前　言

随着计算机的迅速发展和普及，计算机在我国水电站设计、施工、运行和管理中的应用已相当广泛。开发和推广计算机辅助设计技术，对于提高在水电工程设计中计算机的应用水平、从根本上改变手工设计的传统方式、加快设计速度和提高设计质量等方面，都有重要的意义。

本书是在我们长期从事水电站计算机辅助设计科研与教学的基础上编写的，全书共分六章，前四章主要介绍计算机辅助设计的基本知识，包括技术资料的计算机处理、数值逼近在计算机辅助设计中的应用、计算机绘图等。第五章重点阐述了水电站动力设备计算机辅助设计的方法与程序设计原理。第六章简明介绍了工程设计方案的计算机辅助评判方法及其在水电站动力设备设计中的应用。在附录中还收入了一系列实用程序，具有一定实用参考价值。

本书第一、二、四、五章由陈德新编写；第三、六章由赵林明编写。全书由陈德新担任主编，由武汉水利电力学院魏先导副教授担任主审。

本书可作为水电站动力工程专业的选修课教材，也可作从事水电工程计算机辅助设计的技术人员的参考书。

由于作者水平有限，书中难免不妥之处，恳请读者指正。

编者

1991年2月

TJ566/01

目　　录

前　言

第一章　绪论……1

第一节　计算机辅助设计系统……1

第二节　计算机辅助设计常用的算法语言……3

第三节　水电站动力设备计算机辅助设计的特点……4

第二章　技术资料的计算机处理……6

第一节　技术资料的计算机处理原则……6

第二节　文字型资料的计算机处理……7

第三节　数表型资料的计算机处理……8

第四节　线图类资料的计算机处理……12

第五节　数据的计算机存取……16

第三章　数值逼近方法在计算机辅助设计中的应用……19

第一节　一元插值方法及程序设计……19

第二节　二元插值方法及程序设计……26

第三节　曲线拟合方法及程序设计……30

第四节　曲面拟合方法及程序设计……40

第五节　曲线的平滑方法……48

第四章　图形的计算机处理……51

第一节　图形输入计算机的方法……51

第二节　计算机绘图的方法与程序设计……55

第三节　普通行式打印机通用图形打印程序的设计……57

第四节　BASIC语言屏幕绘图通用程序的设计……62

第五节　X-Y绘图仪通用绘图程序的设计……69

第六节　工程图形自动绘图程序设计与图形计算机辅助设计……73

第五章　水电站动力设备的计算机辅助设计……78

第一节　水电站动力设备设计软件包的编制……78

第二节　计算机辅助水轮机选型的方法与程序设计……79

第三节　水轮机运转综合特性曲线计算程序的设计……91

第四节　水轮机蜗壳的计算机辅助设计……107

第五节　尾水管的计算机辅助设计……120

第六节　水电站辅助设备计算机辅助设计方法概述……135

第六章　水轮机选型设计方案的计算机辅助评判方法……137

第一节　层次分析法的基本原理及分析过程……137

第二节　层次分析法的程序设计及应用实例……140

参考文献……148

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第一章　绪　　论

在我们学习了计算机的算法语言、计算方法，并掌握了水电站设计的有关专业知识之后，能否用计算机去完成有关水电站的某一项工程设计呢？回答当然是肯定的。但是，我们还会遇到许多困难，这是因为我们还缺乏一个工具，即计算机辅助设计的方法与技能。

计算机辅助设计简称CAD（Computer Aided Design），这是一门新兴的学科，是工程设计的一种现代化手段。简言之，计算机辅助设计就是利用计算机的硬件与软件，辅助设计人员进行工程设计中的资料处理、计算分析、绘制设计图等，由设计人员与计算机组成一种交互式的综合设计系统。

由于CAD技术可以大幅度提高设计的精度与速度，减少设计人员在工程设计过程中的劳动强度与重复性劳动，因此，CAD技术正在世界各国迅速发展。CAD作为一种主要设计手段，广泛应用于造船、航空、航天、机械制造、电子、纺织、建筑乃至服装设计等各行业。CAD技术对工业的发展起了巨大的促进作用，一些经过反复实践的智能性CAD软件，在设计人员几乎不介入或很少介入的情况下，就可以完成一项复杂工程的全部设计环节。

近十几年来，计算机在我国逐渐普及，但是，计算机的作用还没有得到充分发挥。人们往往仅把计算机当作一种计算工具使用，对于计算机的技术资料处理功能、逻辑分析功能、图形处理功能与管理功能等开发不够，因此，工程设计还没有根本摆脱翻手册查资料、人工计算、人工绘图的传统方法。学习、开发和推广CAD技术将把设计者从资料堆、数据堆、绘图板上解放出来，让设计者充分地发挥其创造思维，设计出更优秀的工程或产品。

第一节　计算机辅助设计系统

计算机辅助设计系统是由人与计算机两方面所构成的，它是以设计者为主体、以计算机为辅助工具的综合系统。由于计算机有强大的记忆功能与高速的运算能力，可以完成许多人力所不能及的数据处理与计算工作，而人则具有丰富的经验与创造性。因此，人与计算机结合构成交互式设计系统，可以相辅相成，并具有高度的灵活性。

一、计算机辅助设计系统的必备功能

一个较完整的CAD系统应该满足工程设计各个环节所需要的基本功能，包括资料处理功能、计算分析功能、自动绘图功能等。

（1）资料处理功能　用于处理工程或产品设计所需要的各种技术资料，诸如数表、曲线、图形与其它技术性文件，设计人员的经验或专家系统的经验也常作为重要的技术情报存储在计算机的资料库中，这些资料可供CAD系统随时检索与引用。

（2）计算分析功能　用于解决设计中不可缺少的数值计算与逻辑分析。计算机作为一种高速运算工具，不仅可以进行一般的代数运算，而且，在各种算法语言的支持下，借助于现代计算方法，可以解决人工手算难以解决的数学问题。此外，对一个问题的分析、对某设计方案的评价，可以借助于层次分析法、优化方法等数学手段，结合应用计算机的数值计算与逻辑运算功能，对问题作出合理的分析，对设计方案作出符合实际的评价。

（3）自动绘图功能　用于解决工程设计中的各种绘图问题。设计结果一般要求绘出图表、曲线及工程图（零件图、部件图、系统图、布置图等），当使用者需要时，可用图形打印机或绘图仪自动绘出各种设计图形。

此外，有的CAD系统还可以根据设计结果产生工程施工或零部件加工所需要的工艺流程和数据，以此去控制工程的施工或设备的加工。

二、支持CAD运行的计算机系统硬件

要实现CAD系统的上述基本功能，则要求计算机有一个功能较强的主机系统和必要的外部设备配置。不同规模的CAD系统软件要求在不同容量和性能的系统硬件环境中运行。一般，大规模CAD软件系统需要在大中型计算机系统上运行，而小规模的CAD系统可在小型计算机或微机系统上运行。以微型机为例，其必要基本配置如下。

1.主机系统

微型计算机的主机系统由中央处理机（CPU）和内部存储器ROM（READ ONLY MEMORY）及RAM（RANDOM ACCESS MEMORY）组成，运行CAD系统时要求主机系统有足够的内存容量存储系统软件、运行程序与数据。目前应用较多的IBM-PC微机及其兼容机（如长城0520型），其内存容量一般为512K或614K，这类微机可运行小规模的CAD软件系统。

2.外部存储设备

外部存储设备是微机存储数据、系统软件及用户程序的主要设备。较常用的外部存储器有磁带机、软磁盘驱动器和硬磁盘驱动器，这些外部存储器在计算机操作系统的控制下可与内存之间交换信息。微型计算机所用的磁带机与普通录放机相近，可用质量较好的录音磁带作存储载体，一盒30min的磁带可记录270KB的数据信息，盒式磁带机的存储速度较慢，不能进行随机存取，且可靠性较差。软磁盘存储器以软性磁盘作存储载体，一般微机用$5\frac{1}{4}$英寸磁盘，一片双面双密度软盘可存储360KB至720KB数据信息，存取速度较快，且可以进行随机存取。有的微机还配置有硬盘存储器，硬盘存储器存取速度快、容量大，有10MB、20MB及40MB硬盘，是理想的外部存储器。

在微机上运行CAD程序时，由于存取的数据量大，所以，要经常利用外部存储器存取文件，也常把外部存储器作为CAD系统的资料仓库。所以，运行CAD系统时选择带软盘驱动器或硬盘驱动器的微机系统较为适宜。

3.输入装置

输入装置是把外部信息输入到计算机中去的设备。运行CAD系统时，需要输入计算机的外部信息有数字、字符、中文与图形，因此，输入装置应配置键盘与图形输入装置，

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

常用的图形输入设备有光笔、图形输入板、图形扫描输入仪等。

光笔是一种光电装置，是实现人与显示器、计算机联系的一种图形输入工具。光笔能够感光和发出信号，将光笔笔头对准显示器上某点，同时按下触动开关，当电子束扫描经过荧光屏上此点时，光透过小孔，经透镜聚焦、光导纤维送出，通过光电转换产生一个脉冲输出，经逻辑计算可得到光笔所指点处的坐标。当用光笔在显示器上指点或画图时，在系统软件的控制下可把操作指令或绘制的图形输入到计算机中。

图形输入板是一种平板式图形输入设备，由台板、检测器、电子处理器三部分组成。检测器通常做成笔状或游标状，当检测器在图形输入板上描绘图形或作图时，检测器可直接检测到所处位置的坐标，并把图形显示到屏幕上。所以，往往把已有的设计图或草图贴在图形输入台板上，用触笔或游标沿图形的图素移动，把图形坐标点输入计算机内生成图形信息。

图形扫描输入仪是通过光电扫描直接把图形及其色彩输入到计算机中去的装置。

4.输出装置

运行CAD系统软件需要计算机系统具有显示、打印与绘图三种基本输出功能，因此，一般应配置CRT显示器、行式打印机和绘图仪。

CRT显示器有高分辨率、中分辨率和低分辨率之分，有单色与彩色两种类型。为了显示高精度图形，可为微机系统配置彩色高分辨率显示器（显示640×400以上绘图点数）。

打印机是输出计算结果及程序列表的必需设备，常用的打印机有普通行式打印机、绘图打印机、激光绘图打印机等类型。普通行式打印机只能输出字符，而绘图打印机除了可以打印字符外，还可以输出CRT显示器的硬拷贝。因此，它可作为一种图形输出装置使用，但由于受绘图图幅及精度的限制，只能输出图幅较小、精度要求不高的图形。激光打印机是一种高精度打印机，可以输出字符、中文信息与高精度的图形，但价格昂贵。用户可根据需要选用不同类型的打印机。

绘图仪是一种由计算机控制的自动绘图设备，通常称为X—Y绘图仪，它是一种高精度图形输出装置。绘图仪在计算机的控制下，按照所绘图形的X—Y坐标参数，使绘图笔在X—Y方向移动，绘出各种形状的图形。X—Y绘图仪有平板式和卷筒式、有单笔式和多笔式，多笔式绘图仪可以用不同色彩的绘图笔绘出彩色图形。

具有上述设备配置的微机系统可以为CAD系统的运行造成一个良好的环境，但并不是所有设备都是必备的，在常规配置的微机系统上，只要装有主机、键盘、显示器和一台绘图打印机，就可以运行小规模CAD软件。

第二节　计算机辅助设计常用的算法语言

各类工程的计算机辅助设计最终都要通过运行CAD程序来实现，因此，要用适合的高级语言作为CAD程序设计的语言资源及系统运行环境，CAD系统要求所使用的算法语言具有较强的计算能力、文件管理功能与绘图功能。在微机上广泛应用的算法语言有BASIC语言、FORTRAN语言、PASCAL语言、COBOL语言等，但计算机辅助设计应用较

多的是BASIC语言和FORTRAN语言。

一、BASIC语言的特点

BASIC语言是一种简单易学、具有人机对话功能的交互式语言，分基本BASIC版本与扩展BASIC版本。基本BASIC版本具有常规的计算功能、简单的绘图功能和磁盘文件管理功能，而扩展BASIC除了具有基本BASIC的功能外，在字符串处理、磁盘文件管理和图形处理等方面均有所加强。通常采用的扩展BASIC版本有BASICA（先进BASIC）和GWBASIC（长城计算机BASIC）等。这些扩展BASIC语言具有较强的计算功能、程序链接功能、子程序调用功能，而且，本身就具有绘图指令，因此，扩展BASIC语言是适合CAD程序设计的算法语言。其不足之处是受BASIC系统自身的限制，可供用户支配的内存容量较小，但这个缺点可用BASIC语言的磁盘文件处理功能去弥补，用户可用磁盘文件的存取处理CAD系统运行时的数据，与内存交换信息。CAD工作者应系统掌握BASIC语言的计算功能、文件管理功能与绘图功能。

二、FORTRAN语言的特点

FORTRAN语言是适合于科学计算的算法语言，它是一种编译语言，在数值计算、磁盘文件管理方面都有很强的功能，可供用户支配的内存空间也较大。但FORTRAN语言不是交互式会话型语言，在信息的输入与输出方面也不如BASIC语言灵活。此外，它本身不具有绘图指令，需要通过调用绘图仪系统所配置的绘图指令才能绘图。通常采用的FORTRAN语言有FORTRAN IV和FORTRAN 77等版本，FORTRAN 77的功能较强。由于FORTRAN语言在大型科学计算方面的优势，因而常用它作大型CAD系统软件的语言资源。

设计人员可以根据工程设计的特点与规模选择适合的算法语言来编制CAD程序，也可以分别使用不同的语言编制CAD的各子模块。例如，用FORTRAN语言编制以科学计算为主的程序，把绘图所用的计算结果存入数据文件，再用BASIC语言编制的绘图程序调用数据文件中的绘图数据绘出图形。此外，还可以用数据库软件（DBASE）处理技术数据，用其它高级语言调用数据库中的数据，这样就可以发挥各种语言的特长，为CAD系统软件的程序设计提供方便。

对于初学者来说，由于BASIC语言易掌握，并能满足一般中小规模CAD程序设计的要求，因此，可以先掌握BASIC语言。本书中的程序均用BASIC语言编写。

第三节　水电站动力设备计算机辅助设计的特点

水电站动力设备的设计包括水轮机设备的选型设计、水电站辅助设备与电气设备的选择计算、设备布置设计等内容，尽管各个设计项目的具体内容不同，却有一些共同的特点。以技术供水系统的设计为例，其设计过程为：确定各用户的用水流量与压力，并计算供水系统的总流量与最大压力；进行管路水力计算；确定水泵扬程与流量；从水泵产品系列参数表中选择水泵型号；校核水泵工作点及系统是否满足各用户的压力要求；绘制供水系统图及泵房布置图等。从此例中可以看到，这类设计的基本特点是均包含分析计算、设

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

备选择与图形绘制三个主要环节。

此外，水电站动力设备的选择设计还有两个特点。其一是设计过程中要应用大量的技术资料，例如查阅设备性能规格参数或特性曲线及设计规程、产品目录等；其二是设计过程环节复杂，往往包括计算与分析、设备选择、绘图等各种环节，设计过程是一个综合性过程。以水轮机运转综合特性曲线的计算与绘制为例，就包括查模型综合特性曲线、相似换算、绘辅助曲线、绘运转综合特性曲线等一系列环节，各个环节的实施是设计者通过眼、脑、手并举，并借助于绘图工具所进行的，这种工作是一种智能性综合劳动。在应用计算机辅助设计系统去进行上述设计工作时，辅助设计系统应该具有人在上述设计中所实施的眼、脑、手的功能，并具有绘图工具的功能，这就要求计算机辅助设计系统能够处理好下面三个关键问题。

1）技术资料的计算机处理问题。包括技术资料的计算机存储、检索与引用。

2）智能性程序的设计问题。要把设计方法、设计者的设计思想等经过数学和逻辑的处理并程序化，赋予计算机解决问题的能力。

3）计算机自动绘图问题。在开发通用绘图程序的基础上，编制出各设计项目的专用绘图程序，供CAD系统随时调用。

第二章　技术资料的计算机处理

在工程设计中，技术资料是必不可少的，设计者要通过查阅技术资料，确定设计方案和设计计算的方法，或者引用技术资料中的参数作为工程设计的依据。在社会生产力高速发展、新技术层出不穷的今天，技术资料在工程设计中的地位就更加重要了。设计者往往要在收集资料、查阅资料方面花费大量的劳动。在计算机辅助工程设计中，对技术资料的计算机处理问题同样是一个非常关键的问题。本章着重介绍用计算机处理技术资料的一般原则与方法。

第一节　技术资料的计算机处理原则

计算机处理技术资料的方法与资料的类型及对于资料的引用方式有关，不同类型的资料需要用不同的方法去处理，而且技术资料的应用目的不同时，其处理方法也不相同。

一、技术资料的种类及其在工程设计中的应用

工程设计中常用的技术资料有多种形式，按照其本身的特点可分为四种基本类型，即：文字型、数表型、曲线型与图形型，在工程设计手册或参考资料中，它们或者以某一种形式出现，或者表现为两种以上形式的组合。

1.文字型技术资料

文字型技术资料是以文字叙述方式记述的技术资料，在各种设计手册和技术规程等文献中有大量的文字型资料。另外，国家和主管部门对某工程的政策规定等指令性文件也属于这一类。文字型技术资料常常是确定工程设计方案的重要依据。

2.数表型技术资料

数表型技术资料是以表格化方式表达的数据类资料，一些设备的性能参数表、尺寸参数表、产品目录以及各种统计参数表、各种函数数表均属于这一类。数表是工程设计中选择参数的主要依据。

3.曲线型技术资料

曲线型技术资料是以各种坐标曲线方式表达的数据资料，根据曲线的来源可分为实验曲线、理论计算曲线、统计曲线及各种诺模图。曲线也是工程设计中选择和引用技术参数的重要依据。

4.图形类技术资料

图形类资料是表达工程结构、设备构造及其布置的工程制图或设备的机械制图，这类资料与曲线型资料的差别在于，曲线图主要表达某种函数关系，而图形资料主要表达图形的图素、结构与尺寸参数，这类资料是工程设计中图形设计的重要参考资料或设计依据。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

二. 用计算机处理技术资料的一般原则

工程设计中对于技术资料的应用大体可分为两种方式，即对资料的检索和对技术参数的引用。在计算机辅助设计中处理技术资料也是基于上述两种方式的。计算机处理技术资料的关键是把各类技术资料存储到计算机的内部存储器或外部存储器中，并能方便地对资料进行计算机检索与引用。

以检索为目的处理技术资料时，一般可把资料原文输入计算机，通常以章节序号、页次或关键词为文件名或检索标志，形成磁盘文件。当工程设计中需要查阅有关资料时，只要给出章节序号、页次或关键词，就能用计算机容易地检索到设计人员所需要的资料，并通过屏幕显示或打印输出为使用者提供资料阅读条件。

以数据引用为目的处理技术资料时，需要把其中的数据处理成单变量或数表的表达方式，并按照它们所表示的函数关系输入到计算机中，当设计计算中需要引用资料中的参数时，可通过直接检索或插值计算的方法获得需要的数据。

计算机的软件与硬件技术为资料的处理提供了多种方法与工具，例如，计算机的文件管理功能、数据库管理功能、汉字阅读系统以及图形输入设备等，都可以用于技术资料的处理。在计算机辅助工程设计中，要以便于存储、便于引用、便于数据共享的原则处理技术资料。

第二节　文字型资料的计算机处理

在设计手册及设计技术规程之类的技术文件中，文字型资料占有相当大的比重，这类资料中，有纯文字型的，也有文字与数字混合型的，以后者更常见。例如《水电站机电设计手册》[1]中，关于水轮发电机外型尺寸估算有下面一段文字资料：

“（发电机转子）飞逸线速度U_f的数值受转子机械强度的限制，它与转子磁轭的材料及结构有关，对于由扇形片叠装的普通A$_3$钢板磁轭，U_f为110～120m/s左右；高强度钢磁轭，U_f可达155m/s；对于锻造转子及整环装配的磁轭，U_f可达160～170m/s左右”。

上述一段资料以文字叙述方式表达了水轮发电机转子飞逸线速度与发电机转子材料、结构之间的关系，这类资料的特点是技术参数夹带于文字叙述中，技术参数是资料的本质，而文字说明是为了让人们了解技术参数的性质、特点、函数关系与引用方法。

以文献检索为目的处理上述一段资料时，可应用计算机的文件编辑系统软件(edlin程序）或文字处理程序（word star等）直接把原文输入计算机，以主题词（或关键词）“线速度”为文件名建立磁盘文件。在需要查阅该资料时，可用文件名“线速度”直接检索磁盘文件。

以技术参数引用为目的处理上述一段资料时，在资料输入计算机之前，需要进行适当的数学处理，处理的方法与步骤如下。

1）分析资料中技术参数之间的函数关系，按其函数关系把技术参数转换为由自变量与因变量所构成的数表形式。

在上述关于发电机转子飞逸线速度的一段文字中，明确表达了飞逸线速度与转子材

料、结构形式之间的一元函数关系。若以变量T(I)代表转子材料与结构的特征参数，以变量UF1(I)和UF2(I)分别代表飞逸线速度值，则根据文字叙述的内容可作出下面的数表(表2-1)。

表 2-1　　发电机转子线速度选择（线速度单位：m/s）

转子材料与结构	序　号　I	代表变量T(I)	线速度下限UF1(I)	线速度上限UF2(I)
A₃钢板扇形片叠装	1	1	110	120
高强度钢板叠装	2	2	155	155
整锻或整环装配	3	3	160	170

2）把代表自变量的数组T(I)和代表自变量函数的数组UF1(I)、UF2(I)按其对应关系输入计算机。

当计算程序中需要引用发电机飞逸线速度值时，根据给定的转子材料与结构形式，用特征参数T(I)可检索到所对应的UF1(I)和UF2(I)。当然，也可以用给定的UF1(I)和UF2(I)选择T(I)，由T(I)确定发电机转子的材料与结构形式。

文字型资料的形式多种多样，所表达的参数之间的关系也有多种形式，用计算机处理这类资料时，可根据具体情况采取不同的处理方法，总的原则是搞清楚资料中各参数之间的函数关系，以便于存储的方式把各参数输入计算机，并为参数的引用提供方便。

第三节　数表型资料的计算机处理

数表型资料以表格形式表示各种技术参数之间的关系，按照数表的数学特征可分为一维数表、二维数表和多维数表。从数表所表达的函数关系上看，有的数表规律性强，称之为规则数表；而有的数表规律性不强，称之为不规则数表。用计算机处理数表型资料时，要分析数表的特点，采用合适的处理方法，以便于实现数表的存储与引用。

一、一维数表的计算机处理

一维数表是指一个自变量与一个函数值相对应的数表，其函数表达式为$y_i=f(x_i)$。例如，计算轴流式水轮机轴向水推力的经验公式中，经验系数K值与转轮叶片数之间关系的数表就是一例[3]，如表2-2所示。

表 2-2　　轴流式水轮机轴向水推力系数

叶　片　数	4	5	6	7	8
K	0.85	0.87	0.90	0.93	0.95

表2-2是一个规则的一维数表，它的自变量与函数呈一一对应关系，可把自变量与函数看作两个一维数组，用一维下标变量Z(I)表示叶片数，用另一个一维下标变量K(I)表示水推力系数，则

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$Z(I)=[\ \ 3,\ \ \ 4,\ \ \ 5,\ \ \ 6,\ \ \ 7,\ \ \ 8]$$

$$K(I)=[0.83,\ 0.85,\ 0.87,\ 0.90,\ 0.93,\ 0.95]$$

把数组Z(I)、K(I)对应输入计算机，就实现了对表2-2的计算机存储。当需要引用数表中的参数时，可通过检索数组Z(I)、K(I)求得所需要的参数。

但是，并非所有的一维数表都象表2-2那样规则，有些一维数表的自变量或函数不是一个数，而是一个数值区间。例如，关于导水叶数目与水轮机转轮直径关系的数表就是如此，形式如表2-3所示。

表 2-3　　导水机构导水叶数目

转轮直径D_1(m)	<1.0	1.0～2.25	2.5～8.5	>9.0
导叶数目Z_0(个)	12	16	24	32

表2-3所表达的函数关系为$Z_0=f(D_1)$，属于一维数表，但表示自变量D_1的参数是一个常数区间。用计算机处理这样的数表时，可用两个一维下标变量分别表示自变量常数区间的上、下限，而用另一个一维下标变量表示自变量区间所对应的函数值。例如，对于表2-3中的参数，用D11(I)表示D_1的下限、用D12(I)表示D_1的上限，用Z0(I)表示Z_0值，三个对应的一维数组为

$$D11(I)=[\ 0,\ 1.0,\ \ 2.5,\ \ 9.0]$$

$$D12(I)=[1.0,\ 2.25,\ 8.5,\ 12.0]$$

$$Z0(I)=[12,\ 16,\ 24,\ 32]$$

经上述处理后，不规则的一维数表就成了三个规则的一维数组，把三个数组按对应关系输入计算机就实现了对表2-3的存储。当计算中需要引用表2-3中的参数时，可以用区间检索法，当D_1值给定时，以$D11(I)\leqslant D_1\leqslant D12(I)$为判断条件，检索$D_1$所对应的$Z_0$值。

还有一些数表，形式为一个自变量对应多个因变量，但这类数表仍是一维数表，因为数表所表达的函数关系仍是一元函数。例如，我们熟悉的水轮机型谱参数表就是这种形式，以水轮机型号为自变量（字符串变量）时，水轮机应用水头、单位参数、效率、气蚀系数等均是“型号”的函数。当然也可以把应用水头范围作为自变量，则水轮机型号及其它各参数均为自变量“水头范围”的因变量。对于这一类数表，可仍按一维规则数表的处理方法进行处理，可以用几个一维下标变量分别代表数表中的自变量和因变量，把数表改写为表2-4的形式。

按照表2-4中所规定的变量名，把表中各列参数顺序地输入计算机，就实现了表2-4的计算机存储。当需要引用表中的参数时，可以给出水头范围，用区间检索法选择水轮机型号及其对应的参数，也可以在给定水轮机型号的情况下，用直接检索法查找该型号水轮机的应用水头范围及其它对应参数。

综上所述，尽管一维数表有不同的形式，但总的处理原则是相同的，就是要把表示数表自变量和函数的各参数用一维数组的方式存储到计算机中，用直接检索法、区间检索法或一元插值的方法引用数表中的参数。

表 2-4　　中小型水轮机型谱参数表

序号 I	使用水头范围 $H_{min}(I)$	使用水头范围 $H_{max}(I)$	转轮型号 $TS(I)$	设计单位转速 $N1(I)$	设计单位流量 $Q1(I)$	气蚀系数 $C(I)$
1	2	6	ZD760	170	2000	1.0
2	4	14	ZD560	150	1600	0.65
3	5	20	HL310	95	1470	0.35
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

二、二维数表的计算机处理

二维数表又叫双变量数表，它是由两个自变量查取一个对应函数的数表，二维数表的函数表达式为 $Z=f(x, y)$。工程上应用的二维数表有不同的来源，有通过解析计算所得到的数表，有通过实验方法所得到的数表，还有通过统计方法获得的经验参数表。二维数表中，有些是规则的数表，有些则是不规则的数表。用统计方法获得的一些二元数表，往往以现有的资料为依据，具有局限性，因此，会产生一些不规则的二元数表。

1.规则二维数表的计算机处理

规则二维数表指两个自变量与函数的变化都很有规律的数表，用计算机处理这类数表较容易。我们所熟悉的水轮机效率特性参数表就是这样的数表，它通过水轮机模型试验而获得，表达水轮机效率 η 与水轮机工况参数 Q_1'、n_1' 之间的关系，形式如表2-5所示。

表 2-5　　某水轮机效率（η）特性参数表

水轮机单位转速 n_1'	水轮机单位流量 Q_1' 700	800	900	1000	1100	1200
90	0.740	0.780	0.800	0.810	0.820	0.822
85	0.805	0.820	0.840	0.850	0.865	0.860
80	0.822	0.850	0.870	0.882	0.890	0.870
75	0.845	0.870	0.900	0.905	0.900	0.870
70	0.850	0.882	0.905	0.910	0.900	0.870
65	0.840	0.880	0.904	0.905	0.890	0.860

以表2-5为例，规则二维数表的计算机处理方法如下：

1）用一维下标变量N1(I)表示数表中的n_1'参数，用另一个一维下标变量Q1(J)表示数表中的Q_1'参数，再用二维下标变量E(I, J)表示数表中的η参数。三个数组分别为

$$N1(I)=[90,\ 85,\ 80,\ 75,\ 70,\ 65]$$

$$Q1(J)=[700,\ 800,\ 900,\ 1000,\ 1100,\ 1200]$$

$$E(I,J)=\begin{bmatrix}0.740 & 0.780 & 0.800 & 0.810 & 0.820 & 0.822\\ 0.805 & 0.820 & 0.840 & 0.850 & 0.865 & 0.860\\ 0.822 & 0.850 & 0.870 & 0.882 & 0.890 & 0.870\\ 0.845 & 0.870 & 0.900 & 0.905 & 0.900 & 0.870\\ 0.850 & 0.882 & 0.905 & 0.910 & 0.900 & 0.870\\ 0.840 & 0.880 & 0.904 & 0.905 & 0.890 & 0.860\end{bmatrix}.$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

2 ）根据数组输入计算机的规则，把数组N1(I)、Q1(J)和E(I, J)输入计算机。

当需要引用数表中的参数时，在给定自变量n和Q的情况下，可用二元插值方法计算出对应的η值。

2.不规则双变量数表的计算机处理

不规则双变量数表的特点是两个自变量或函数值的变化缺乏规律性。例如，《水电站设计手册》中关于发电机转子带轴的重量估算公式中，选择计算系数K_r的数表就属于这种情况。K_r是根据我国已生产的部分水轮发电机的参数统计出来的，K_r是发电机转速n与定子铁芯直径D_i的函数，$K_r=f(n, D_i)$，因此属于双变量数表。但表达K_r与n、D_i关系的数表未经任何数学处理，只是一个单纯的统计数表，从形式上和所表达的函数关系上看都是不规则的，数表形式如表2-6示。

表 2-6　　K_r经验参数表：$K_r=f(n, D_i)$

发电机转速n (r/min)	定子铁芯直径D_i (m)	K_r 范 围	备 注
214～750	≤5	4.3～6.8	高速机组的D_i小，K_r取上限
150～214	5～9	3.1～4.0	
100～150	8～12	2.45～3.1	
54.6～100	10～18	1.55～2.16	

表2-6从函数关系上看属于双变量数表，但K_r参数不是用二维数组的形式表示的。用计算机处理这类数表时，不能采用规则二维数表的处理方法，而应当考虑数表的计算机存储与引用的方便，在保持数表函数关系的条件下，对数表作适当的数学处理。以表 2-6 为例，可把数表改写成表2-7的形式。

表 2-7　　由表 2-6 改写的数表

项 目	转速下限	转速上限	D_i 下限	D_i 上限	K_r 下限	K_r 上限
序 号	N1(I)	N2(I)	DI1(I)	DI2(I)	KR1(I)	KR2(I)
1	214	750	0	5	4.3	6.8
2	150	214	5	9	3.1	4.0
3	100	150	8	12	2.45	3.1
4	54.6	100	10	18	1.55	2.16

表 2-7 中各列参数均可用一维下标变量的方式表示，按表中规定的变量名把各列参数输入计算机，就解决了表2-6所示不规则双变量数表的计算机存储问题。当需要引用数表中的K_r参数时，在给定两个自变量n和D_i的情况下，先用双变量区间检索法确定K_r的取值范围，再用插值法求出确定的K_r值，K_r的计算可按下面的步骤进行。

1 ）给定自变量n和D_i。

2 ）以N1(I)≤n≤N2(I) and DI1(I)≤D_i≤DI2(I)为条件检索出K_r的取值区间[KR

1(I)，KR2(I)]；KR1(I)<K_r<KR2(I)。

3）由表2-6中备注（高速机组D_1小K_r取上限）为依据，确定插值公式，备注表明在K_r取值区间确定之后，K_r为n的函数，以线性插值为例，K_r插值计算式为

$$K_r=[KR_2(I)-KR_1(I)]/[N_2(I)-N_1(I)]\times[n-N_1(I)]+KR_1(I)$$

上述方法是针对表2-6的处理而言的，由于不规则数表有各种不同的形式，具体处理方法要根据数表的特点而确定。总的原则是把不规则数表改写成较规则的数表，把数表中的参数以数组的形式输入计算机，根据数表所表达的函数关系确定数表的引用方法。

技术资料中的数表还有三维或三维以上的多维数表，在处理这些数表时，一般也是把数表中的各参数以数组的方式存储到计算机中，并用检索和插值的方法引用数表中的参数。

数表的计算机处理是计算机辅助设计中各类技术资料处理的基础，曲线、图形类资料处理时，一般也要先处理成数表的形式，再用数表的处理方法去解决数据的存储与引用问题。

第四节　线图类资料的计算机处理

线图类资料是以图形方式表示的数据资料，各种形式的数据曲线都属于这一类。按照线图的数学特征，可分为一元曲线、二元曲线和三元空间曲线。按照其表示方式，可分为一般直角坐标系表示的曲线，对数坐标系表示的曲线和极坐标表示的曲线。

用计算机处理线图的方法要根据设计人员使用曲线的目的而确定。设计人员有时需要把各类曲线作为一种直观的图形来使用，通过对线图的观察分析以了解某事物的特性。例如，在水轮机选型设计中，设计者可通过对水轮机模型综合特性曲线的直观分析去比较不同型号水轮机的性能。以这种目的去处理水轮机特性曲线时，要把特性曲线作为一种图形直接输入计算机，并且要通过屏幕显示为设计人员提供阅读曲线的条件。但更多情况下，设计人员要把线图作为数据来看待，通过查曲线获得设计者所需要的数据。以这种目的处理曲线时，需要把曲线所表示的数据及其函数关系输入计算机，并用检索或插值方法求取设计人员所需要的数据。

线图输入计算机的方法有两种。一种方法是把连续曲线离散为一系列坐标点，将离散点的参数输入计算机；另一种方法是通过曲线拟合求出曲线的近似表达式，在计算中可直接引用拟合表达式。本章着重介绍线图的离散处理法。曲线曲面拟合将在第三章中介绍。

一、一元曲线的离散处理法

一元曲线是一种平面曲线，可以绘制在平面直角坐标系中，也可以绘制到平面极坐标系中，工程上常用的一元曲线大部分是用直角坐标系表示的。用计算机处理一元曲线时，可在曲线上取若干个离散点，并且在坐标图中查出各离散点的坐标参数，把各坐标参数以数组的形式存储到计算机中。当计算中需要引用曲线上的参数时，可用一元插值的方法求曲线定义域内任意点的参数。

图2-1所示的是某水电站的尾水位流量关系曲线，是一条光滑连续的一元曲线，函数

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

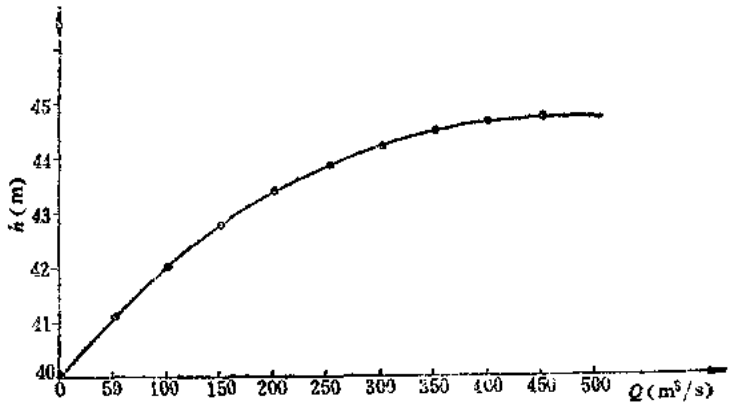


图 2-1 水电站尾水位流量关系曲线

关系为$h=f(Q)$。以这条曲线为例说明一元曲线的离散处理方法。

1)在曲线上取n个离散点，在曲线曲率变化较大处可多取点，以保证曲线的引用精度。

2)查出各离散点的坐标值，写出表达自变量与函数关系的数表，如表2-8所示。

表 2-8 一元曲线离散点参数表

流量 Q_i (m^3/s)	0	50	100	150	200	250	…
尾水位 h_i (m)	40.0	41.1	42.0	42.8	43.4	43.8	…

3)用一维下标变量Q(I)、H(I)分别表示各点流量与尾水位，把数组Q(I)、H(I)输入计算机。

当需要引用$h=f(Q)$曲线时，在给出流量值Q之后，以Q(I)和H(I)为型值点，用一元插值法可计算出所对应的h值。

以上是连续光滑曲线的处理方法，有些曲线在定义域范围内是分段光滑的，用计算机处理这样的曲线时，可把曲线分成几段，保持每一段光滑连续，再把每段光滑曲线离散，把分段区间参数与离散点的参数同时存储到计算机中，用分段插值的方法引用分段光滑的曲线。

二、二元曲线的离散处理法

二元曲线是指函数表达式为$z=f(x, y)$的曲线，在工程上常以二元曲线组的形式表达某事物的特性参数。二元曲线组的实质是空间曲面，但人们为了工程上应用的方便，常以等值线的方式把空间曲线转换成平面上的二元曲线组。例如，地形图上的等高线，它在形式上是平面曲线，实质是表达地球表面的空间几何形状。我们熟知的水轮机模型综合特性曲线，就是把表达水轮机效率、流量、气蚀特性的空间曲面转换为用等效率线、等开度线、等气蚀系数线形式的平面二元曲线组。用计算机处理二元曲线时，可用直接离散法或间接离散法把曲线离散，把离散点的参数输入计算机，也可以用曲面拟合法求出二元曲线

的代数表达式，在计算中直接引用二元曲线的拟合表达式。

1.二元曲线的直接离散

用直接离散法处理二元曲线时，可以直接在曲线上取离散点，在坐标系中查出各离散点的坐标及对应的函数值，用数组形式表达离散点的纵、横坐标参数及其函数值，把各数组输入计算机即可。

以水轮机等效率曲线组的处理为例，离散点的取法如图2-2所示，为了把离散点的参数输入计算机，可用二维下标变量N1(I, J)表示各离散点的n_1'坐标，用二维下标变量Q1(I, J)表示各离散点的Q_1'坐标，再用一维下标变量E(I)表示各等效率线的η值，其中下标I为等效率曲线组中某一曲线的序号，下标J为每条等效率线上离散点的序号。在曲线坐标图中查取各离散点的纵、横坐标参数及对应的效率值，把这些参数按对应关系填入数组N1(I, J)、Q1(I, J)和E(I)。然后，把三个数组输入计算机。

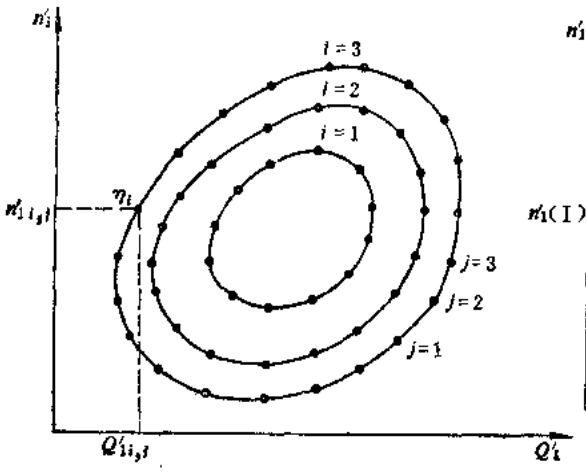


图 2-2 二元曲线直接离散法

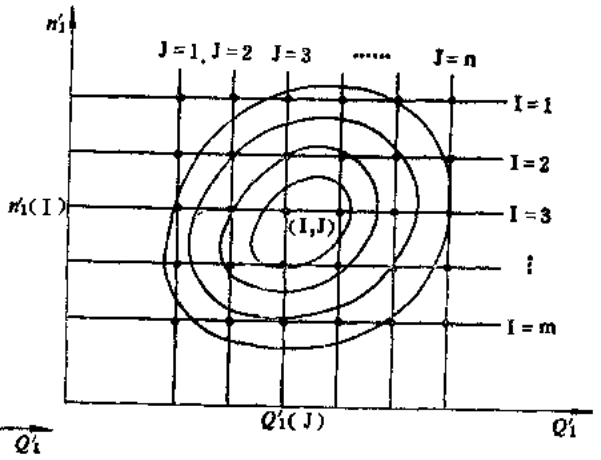


图 2-3 水轮机等效率线的正交网格离散法

二元曲线直接离散法的优点是离散点能够保持曲线的几何形状，便于用计算机重新显示和绘制存储的曲线；缺点是引用曲线上的参数时插值计算不方便。因此，直接离散法主要适用于以绘图为目的时对二元曲线的离散处理。

2.二元曲线的间接离散

为了较方便地使计算机引用二元曲线所表达的数据，可采用间接离散法处理二元曲线组，常用的方法有正交网格离散法和非正交网格离散法。

用正交网格离散二元曲线时，一般用两组分别与曲线的纵、横坐标轴平行的平行线组形成正交网格，用网格节点离散二元曲线组。这里仍以水轮机等效率线的离散为例，正交网格的形成如图2-3所示。

图2-3所示的正交网格是由一组n_1'等于常数的平行线与一组Q_1'等于常数的平行线所构成的。在形成正交网格之后，可用下面的方法把二元曲线离散，并把离散点的参数输入计算机。

1）用一维下标变量N1(I)表示网格节点的纵坐标，用另一个一维下标变量Q1(J)表示节点的横坐标，用二维下标变量E(I, J)表示节点的效率值，在二元曲线坐标图中查

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

取各节点的纵、横坐标及对应的函数值，并把它们顺序填入数组N1(Ⅰ)、Q1(J)和E(I, J)中。

2)用数表输入法把数组N1(Ⅰ)、Q1(J)和E(I, J)输入计算机。

这样，就把二元曲线组所表达的数据以规则二维数表的方式存储到计算机中了。在需要引用二元曲线上的数据时，可以用二元插值计算的方法求出曲线定义域中任意一点的参数。因此，以数据引用为目的处理二元曲线时，多采用这种方法。但这种方法的不足之处是存入计算机的数据失去了原曲线的几何特征。根据存储的数据绘制原曲线时，要通过求等值线的复杂运算，以二元曲线的绘图为目的时，不宜采取这种方法。

在一些特殊情况下，也可以用一组非正交网格的节点离散二元曲线组，例如，用离散点法处理转桨式水轮机模型综合特性曲线时，就可以采用这种方法。考虑到转桨式水轮机在效率换算时不同转角使用不同的效率修正值，可采用一组n'_1等于常数的直线与一组等φ角线形成非正交网格，用网格节点离散等效率线组。离散转桨式水轮机等效率线的非正交网格如图2-4所示。

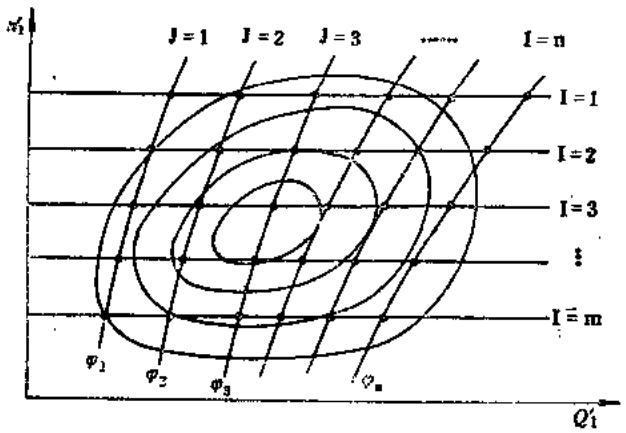


图 2-4 转桨式水轮机等效率线的非正交网格离散法

用图2-4所示的非正交网格离散二元曲线组时，网格节点的纵坐标可用一维下标变量，但节点的横坐标及节点函数值都必须用二维下标变量表示。例如，可用N1(Ⅰ)表示节点n'_1坐标，用Q1(I, J)表示各节点Q'_1坐标，用E(I, J)表示各节点的η值。在曲线坐标图中查出节点的坐标参数及对应的函数值，分别填入N1(Ⅰ)、Q1(I, J)和E(I, J)，再用数组输入法把各数组输入计算机。当需要引用二元曲线上的数据时，可用非正交网格的二元插值法计算曲线定义域内任意点的参数。

二元曲线有各种不同的形式，用计算机处理这些曲线时，要根据曲线的形式与特点，选择适合的离散方法，总的原则是便于计算机存储，便于计算机引用，保证曲线的引用精度。对于那些形状复杂的曲线，直接离散有困难时，可用坐标变换等手段进行预处理，然后再用较规则的网格去离散。

第五节 数据的计算机存取

文字型技术资料（不含技术参数的纯文字资料除外）、曲线型技术资料经过一定的数学处理后，均可变为不同形式的数表。因此，计算机对于各类技术资料的存储最终归结为数据的计算机存储问题。目前，一般的计算机都具有文件管理功能、数据库管理功能，各种高级算法语言也都具有存放数据的指令，因此，我们可以用许多方法解决数据的存取问题。这里重点介绍简单常用的数据存取方法，并以BASIC语言为例，介绍数据存取程序的设计。

一、用DATA语句把数据放在计算程序中

在BASIC语言中，可用READ语句与DATA语句配合存放数据，数据可以是数字，也可以是字符串。下面是一段存放水电站尾水位流量关系数据的程序，标识符Q(I)表示流量，H(I)表示尾水位。

```
10  DIM Q(10), H(10)
20  FOR I=1 TO 10:READ Q(I), H(I):NEXT I
30  DATA 0, 40.0, 50, 41.1, 100, 42.0, 150, 42.8, 200, 43.4
40  DATA 250, 43.8, 300, 44.2, 350, 44.4, 400, 44.6, 450, 44.7
50  '其它计算语句'
```

在计算机辅助设计中，有时要用同一程序调用不同的数据进行计算，有时又要用不同的程序调用同一种数据进行计算，为了实现程序通用性与数据共享，可将数据部分单独形成数据子程序，存入磁盘，供计算中随时调用。下面是用DATA语句编写的HL160水轮机效率特性数据子程序，在BASIC状态下，把行号10～90语句输入计算机，然后键盘输入SAVE "HL160"，A指令，就在磁盘上建立了一个名为HL160的文件。文件用ASCII码形式写入磁盘，可为文件链接提供方便。

```
10  'HL160水轮机效率特性数据'
20  DATA 50, 55, 60, 65, 70, 75:'-----单位转速'
30  DATA 300, 400, 500, 600, 700, 800:'----单位流量'
40  DATA 0.75, 0.81, 0, 84, 0, 84, 0.80, 0.74:'--以下为效率'
50  DATA 0.76, 0.83, 0.87, 0.87, 0.84, 0.75
60  DATA 0.76, 0.84, 0.88, 0.89, 0.86, 0.77
70  DATA 0.76, 0.84, 0.89, 0.90, 0.87, 0.78
80  DATA 0.76, 0.85, 0.89, 0.91, 0.88, 0.78
90  DATA 0.76, 0.83, 0.87, 0.90, 0.87, 0.77
    SAVE "HL160", A
```

当计算中需要引用HL160水轮机效率特性时，只要在计算程序中加上CHAIN MERGE "HL160"指令或直接键入MERGE "HL160"指令，存储在磁盘中的名为"HL160"的数据子程序就自动加到当前的计算程序中。由于数据是以DATA语句存放的，所以，需要

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

与当前程序中的READ语句配合，把数据赋值给表示各参数的下标变量，供计算中引用。这种方式的优点在于，可以方便地为通用计算程序更换数据。以水轮机特性曲线换算程序为例，只要为CHAIN MERGE“数据文件名”指令更换文件名，就可以为特性曲线换算程序更换存储在磁盘中的不同型号水轮机的数据。另外，在水能计算或水电站厂内经济运行计算等各种程序中，凡使用水轮机特性曲线的时候，只要加入CHAIN MERGE“文件名”指令，就可把指定的水轮机特性曲线数据调入到不同的计算程序中，实现数据的共享。

二、用顺序文件方式存取数据

顺序文件是计算机存储数据的一种便利方式，可以用多种方式建立顺序文件，计算机的系统软件行编辑程序EDLIN以及各种高级语言（BASIC、FORTRAN、PASCAL等）都有建立顺序数据文件的功能。而且，用某一种语言建立的顺序数据文件，也可供其它语言调用，为数据共享提供了方便。这里，以BASIC语言为例，说明顺序文件的建立和引用方法。

用BASIC语言建立顺序数据文件的步骤如下：

1）用READ、DATA语句把需要存储的数据读入计算机，并赋给规定的变量名。

2）用OPEN“文件名”FOR OUTPUT AS#文件号指令打开一顺序数据文件。

3）用WRITE#文件号，变量名，变量名，……，变量名指令或者PRINT#文件号，变量名，……，变量名指令把各变量名所代表的数据写入磁盘文件。

以水轮机型谱参数表的存储为例，建立顺序文件的程序如下：

```
10  DIM H$(11), TYPE$(11), BO(11), N1(11), Q1(11), C(11)
20  FOR I=1 TO 10
30  READ H$(I), TYPE$(I), BO(I),N1(I), Q1(I),C(I)
40  NEXT I
50  OPEN'XP'FOR OUTPUT AS#1
60  FOR I=1 TO 10
70  WRITE#1, H$(I), TYPE$(I), BO(I), N1(I), Q1(I), C(I)
80  NEXT I
90  CLOSE#1
100  DATA  10-30,  HL310,  0.394,  88.3,1400,  0.360
110  DATA  25-45,  HL240,  0.365,  72.0,1320,  0.200
120  DATA  35-65,  HL230,  0.315,  71.0,1110,  0.170
130  DATA  50-85,  HL220,  0.250,  70.0,1150,  0.133
140  DATA  70-105,  HL200,  0.200,  68.0,  960,  0.100
150  DATA  90-140,  HL180,  0.200,  67.0,  860,  0.085
160  DATA 110-150,  HL160,  0.224,  67.0,  670,  0.065
170  DATA 140-200,  HL120,  0.118,  62.5,  380,  0.060
180  DATA 180-250,  HL110,  0.120,  61.5,  380,  0.055
190  DATA 230-320,  HL100,  0.100,  61.5,  280,  0.040
```

```
200 END
```

运行上述程序，就把程序中DATA语句所表示的数据按顺序写入名为“XP”的磁盘文件。

当需要引用顺序文件中的数据时，可用下面的方法把文件中数据调入计算机内存。

1）用OPEN“文件名”FOR INPUT AS#文件号指令打开磁盘文件。

2）用INPUT#文件号，变量名，……，变量名指令把数据文件中的数据顺序读入计算机内存，并赋给规定的变量名。

以上面存储的水轮机型谱参数表顺序文件为例，从顺序文件中读取数据并打印那些数据的程序如下，

```
10 '从顺序文件中读取数据程序'
20 DIM H$(11), TYPE$(11), BO(11), N1(11), Q1(11), C(11)
30 OPEN "XP" FOR INPUT AS#1
35 PRINT "水头范围 转轮型号 导叶高度 单位转速 单位流量 气蚀系数"
40 FOR I=1 TO 10
50 INPUT#1, H$(I), TYPE$(I), BO(I), N1(I), Q1(I), C(I)
60 PRINT H$(I); TAB(13); TYPE$(I); TAB(22); BO(I); TAB(32);
   N1(I);
70 PRINT TAB(42); Q1(I); TAB(52); C(I)
80 NEXT I
```

程序输出结果：

水头范围	转轮型号	导叶高度	单位转速	单位流量	气蚀系数
10-30	HL310	0.394	88.3	1400	0.36
25-45	HL240	0.365	72	1320	0.2
35-65	HL230	0.315	71	1110	0.17
50-85	HL220	0.25	70	1150	0.133
70-105	HL200	0.2	68	960	0.1
90-140	HL180	0.2	67	860	0.085
110-150	HL160	0.224	67	670	0.065
140-200	HL120	0.118	62.5	380	0.06
180-250	HL110	0.12	61.5	380	0.055
230-320	HL100	0.1	61.5	280	0.04

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第三章　数值逼近方法在计算机辅助设计中的应用

在第二章里，介绍了技术资料的计算机处理方法，并重点阐述了数表型及曲线类技术资料的计算机存储方法。当以数据引用为目的处理这些技术资料时，表示数表或曲线的自变量及函数的参量，通常都是以数组的方式存储到计算机中的。存储技术数据的目的是为了在计算程序中引用它们。而引用数据的主要方法是数值逼近方法，这种方法的本质是采用代数多项式、样条函数或其它有理函数类作为逼近函数，近似地表达以数组方式在计算机中存储的离散数据，当给出某一自变量时，可以近似地求出相应的函数值。

插值计算和数据拟合是数值逼近方法中的基本方法。这两种方法在水电站动力设备的计算机辅助设计中有着广泛的用途，是引用各类数表与曲线的重要工具。例如，对于表达水电站库容水位关系或流量与下游水位关系的一元曲线，可以用一元插值或一元多项式拟合的方法引用曲线上的数据，而对于水轮机特性曲线等的二元曲线或数表，则可用二元插值或二元多项式拟合的方法引用曲线或数表中的数据。

在计算机辅助设计程序编制过程中，正确选择数值逼近的方法是保证计算精度的关键。一般应根据数表、曲线的数学特征及设计计算时的精度要求选择合适的数值逼近方法。当曲线或数表所对应的曲线较平缓且计算精度要求不太高时，可用线性插值、抛物线插值或低次多项式拟合方法逼近原曲线；当曲线曲率变化较大或设计计算的精度要求较高时，则选用三次样条函数插值或较复杂的拟合方法去逼近原曲线。另外对于某些自交的、封闭的曲线，可采用参数插值方法。

限于篇幅，本章只介绍在水电站动力设备计算机辅助设计中应用的一些数值逼近方法。对于各种数值逼近方法的数学导出过程只作简单介绍或不作介绍，而着重介绍各种数值逼近方法的程序设计的基本技巧及其在水电站动力设备计算机辅助设计中的应用。

第一节　一元插值方法及程序设计

在所要逼近的曲线上选取 n 个点，各点对应的自变量为 $x_k(k=1, 2, \cdots, n)$，设 $a=x_1<x_2<\cdots<x_n=b$，x_k 称为插值节点，区间 $[a, b]$ 称为插值节点组成的插值区间，各插值节点相应的函数值为 $y_k(k=1, 2, \cdots, n)$。现给出 $x\in[a, b]$，要求利用部分或全部插值节点及一定的公式计算 x 相应的函数值 y，这就称为插值计算。

一、一元线性插值方法及程序设计

采用公式（3-1）进行插值计算称为线性插值。

$$y=y_{k-1}+\frac{x-x_{k-1}}{x_k-x_{k-1}}(y_k-y_{k-1}) \qquad (3\text{-}1)$$

式中，$x\in[x_{k-1},\ x_k](k=2,\ 3,\ \cdots,\ n)$。

线性插值认为函数值y在区间$[x_{k-1},\ x_k]$随自变量x呈线性规律变化，因此这种插值方法虽然计算简便但计算精度低。

【例 3-1】 这是一个一元数表线性插值例子。在进行混凝土蜗壳的设计时，首先要根据设计水头H_r确定蜗壳进口断面平均流速V_j，H_r与V_j之间的关系由表3-1给出。当给出10～60m间的某设计水头H_r时，用线性插值方法确定其相应的V_j值。

表 3-1　　混凝土蜗壳H_r与V_j之间的关系

设计水头H_r (m)	10	20	30	40	50	60
进口断面流速V_j (m/s)	2.85	3.75	4.55	5.20	5.80	6.45

线性插值的程序为

```
100  '线性插值计算混凝土蜗壳进口断面流速'
110  N=6:DIM X(N), Y(N)
120  FOR I=1 TO N:READ X(I), Y(I):NEXT I
130  DATA 10, 2.85, 20, 3.75, 30, 4.55, 40, 5.2, 50, 5.8, 60, 6.45
140  PRINT "请输入设计水头Hr的值" :INPUT Z
150  FOR I=2 TO N
160  IF Z<=X(I) THEN 180
170  NEXT I
180  Y=Y(I-1)+(Y(I)-Y(I-1))*(Z-X(I-1))/(X(I)-X(I-1))
190  PRINT"设计水头Hr="Z"m"
200  PRINT"进口断面流速V="Y"m/s"
```

程序的主要标识符为

X——一维数组，存放插值节点的自变量值；

Y——一维数组，存放插值节点的函数值；

N——插值节点个数；

Z——插值点自变量值。

程序中第120行、第130行用READ和DATA语句将插值节点的自变量与函数值存储于计算机中，第140行输入插值点自变量值，第150～170行判断插值点相邻的插值节点，第180行用线性插值公式计算插值点的函数值，第190行、第200行输出插值计算结果。

在用线性插值公式进行插值计算时，只用到插值点相邻的两个插值节点的自变量及其函数值，因此在进行插值计算时，必须找出插值点相邻的插值节点，这一过程称为搜索插值区间，程序第150～170行采用逐步比较的方法搜索插值区间，这是常用的一种搜索插值区间的方法。

二、一元抛物线插值方法及程序设计

利用插值点相邻的三个插值节点按式（3-2）进行插值计算称为抛物线插值。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$y=a_0+a_1(x-x_{k-2})+a_2(x-x_{k-2})(x-x_{k-1}) \qquad (3\text{-}2)$$

式中 $a_0=y_{k-2}$,

$$a_1=\frac{y_{k-1}-y_{k-2}}{x_{k-1}-x_{k-2}},$$

$$a_2=\frac{\dfrac{y_k-y_{k-2}}{x_k-x_{k-2}}-\dfrac{y_{k-1}-y_{k-2}}{x_{k-1}-x_{k-2}}}{x_k-x_{k-1}},$$

$x\in[x_{k-1},\ x_k]\ (k=3,\ 4,\ \cdots,\ n)$。

抛物线插值认为函数值y在区间$[x_{k-2},\ x_k]$随x的变化规律为二次抛物线，其计算精度比线性插值高，是工程设计计算中常用的一种插值计算方法，有时也将抛物线插值叫做一元三点插值方法。

【例 3-2】 采用抛物线插值方法调用HL200飞逸特性曲线的程序为

```
100 '抛物线插值计算HL200飞逸转速'
110 N=6:DIM X(N), Y(N)
120 FOR I=1 TO N:READ X(I), Y(I):NEXT I
130 DATA 0, 0, 10, 100, 20, 116, 30, 123, 40, 127.5, 50, 128
140 PRINT"请输入开度a0的值":INPUT Z
150 FOR I=2 TO N
160 IF Z<=X(I) THEN 180
170 NEXT I
180 IF I=2 THEN I=I+1
190 C=(Y(I)-Y(I-2))/(X(I)-X(I-2))
200 C=C-(Y(I-1)-Y(1-2))/(X(I-1)-X(I-2))
210 C=C/(X(I)-X(I-1))
220 B=(Y(I-1)-Y(I-2))/(X(I-1)-X(I-2))
230 A=Y(I-2)
240 Y=A+B*(Z-X(I-2))+C*(Z-X(I-2))*(Z-X(I-1))
250 PRINT"开度a0="Z"mm", "飞逸转速="Y"rpm"
```

程序的结构和标识符基本上与[例3-1]中程序相同，程序中第130行的数据是从HL200飞逸特性曲线上读取的，这些数据构成插值节点。

三、三次样条插值及程序设计

从整个区间$[a,\ b]$来看，线性插值和抛物线插值方法虽然能够保证各个子区间$[x_{k-1},\ x_k]$之间的曲线互相衔接，但不能保证整个曲线在插值节点处的光滑性。样条函数插值不仅能保证整个曲线的光滑性，也能保证曲线的连续性，可以很好地逼近原曲线，具有较高的计算精度。另外，利用样条函数可以在给出节点的情况下构造通过节点的光顺曲线，这对于用计算机绘制曲线是有很大作用的。下面介绍常用的三次样条插值方法。

在区间$[a,\ b]$上构造函数$s(x)$满足下列三个条件：

1) $s(x_k)=y_k$ ($k=1,\ 2,\ \cdots,\ n$)。

2) $s(x)$在$[a,\ b]$上有一阶和二阶连续导数。

3) 在每一个子区间$[x_k,\ x_{k+1}]$上，$s(x)$均为三次多项式，则$s(x)$为$[a,\ b]$上的三次样条插值函数。

令m_k表示$s(x)$在x_k处的一阶导数值，即$s'(x_k)=m_k$ ($k=1,\ 2,\ \cdots,\ n$)，因此对$[a,\ b]$的每一个子区间$[x_k,\ x_{k+1}]$有

$$s(x_k)=y_k,\ s'(x_k)=m_k,\ s(x_{k+1})=y_{k+1},\ s'(x_{k+1})=m_{k+1} \tag{3-3}$$

构造满足条件式 (3-3) 的函数$s(x)$为

$$\begin{aligned} s(x)=&\left[\frac{3}{h_k^2}(x_{k+1}-x)^2-\frac{2}{h_k^3}(x_{k+1}-x)^3\right]y_k\\ &+\left[\frac{3}{h_k^2}(x-x_k)^2-\frac{2}{h_k^3}(x-x_k)^3\right]y_{k+1}\\ &+h_k\left[\frac{1}{h_k^2}(x_{k+1}-x)^2-\frac{1}{h_k^3}(x_{k+1}-x)^3\right]m_k\\ &-h_k\left[\frac{1}{h_k^2}(x-x_k)^2-\frac{1}{h_k^3}(x-x_k)^3\right]m_{k+1} \end{aligned} \tag{3-4}$$

其中 $h_k=x_{k+1}-x_k,\ x\in[x_k,\ x_{k+1}]$。

由式(3-4)求得$s(x)$在子区间$[x_{k-1},\ x_k]$右端点x_k的二阶导数值应为

$$s''(x_k-0)=\frac{6}{h_{k-1}^2}y_{k-1}-\frac{6}{h_{k-1}^2}y_k+\frac{2}{h_{k-1}}m_{k-1}+\frac{4}{h_{k-1}}m_k \tag{3-5}$$

$s(x)$在子区间$[x_k,\ x_{k+1}]$左端点x_k的二阶导数值应为

$$s''(x_k+0)=-\frac{6}{h_k^2}y_k+\frac{6}{h_k^2}y_{k+1}-\frac{4}{h_k}m_k-\frac{2}{h_k}m_{k+1} \tag{3-6}$$

由于要求$s(x)$在插值节点x_k处二阶导数连续，则有

$$s''(x_k-0)=s''(x_k+0) \tag{3-7}$$

将式 (3-5)、式 (3-6) 代入式 (3-7) 并加以整理后得

$$(1-\alpha_k)m_{k-1}+2m_k+\alpha_k m_{k+1}=3\left[\frac{1-\alpha_k}{h_{k-1}}(y_k-y_{k-1})+\frac{\alpha_k}{h_k}(y_{k+1}-y_k)\right] \tag{3-8}$$

其中$\alpha_k=\dfrac{h_{k-1}}{h_{k-1}+h_k}$。

式 (3-8) 对于插值节点$x_2,\ x_3,\ \cdots,\ x_{n-1}$均成立，从而得到$n-2$个含$m_k(k=1,\ 2,\ \cdots,\ n)$的方程。若所给的插值问题在$a$，$b$处满足$s''(x_1)=0$和$s''(x_n)=0$，即在区间$[a,\ b]$之外，插值曲线直线延伸，计算$s(x)$在$x_1$和$x_n$处的二阶导数并整理得

$$2m_1+m_2=\frac{3}{h_1}(y_2-y_1) \tag{3-9}$$

$$m_{n-1}+2m_n=\frac{3}{h_{n-1}}(y_n-y_{n-1}) \tag{3-10}$$

由式(3-8)、式(3-9)和式 (3-10) 可解得$m_1,\ m_2,\cdots,m_n$ (具体解法参阅有关数值分析的教科书)，这样由式 (3-4) 定义的三次样条插值函数$s(x)$就可确定。

【例 3-3】 经计算得到混凝土蜗壳包角φ与相应断面外径R的对应关系如表3-2所列。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 3-2　　混凝土蜗壳包角与相应断面外径的关系

蜗壳包角φ (°)	0	34.3	55.4	91.2	138.0	180.0
断面外径R (m)	2.65	2.90	3.20	3.60	4.00	4.40

用三次样条函数插值计算当蜗壳包角φ为30、60、90、120和150时的相应断面外径R的程序为

```
100 '三次样条插值计算蜗壳外径'
110 'N为插值节点个数，M为插值点数'
120 N=6:M=5
130 DIM X(N), Y(N), A(N), B(N), C(N), D(N), H(N), Z(M), W(M)
140 FOR I=1 TO N:READ X(I), Y(I):NEXT I
150 DATA 0,2.65,34.3,2.9,55.4,3.2,91.2,3.6,138,4,180,4.4
160 FOR I=2 TO N:H(I-1)=X(I)-X(I-1):NEXT I
170 K=N-1
180 FOR I=2 TO K
190 A(I)=H(I-1)/(H(I-1)+H(I))
200 B(I)=3*((1-A(I))*(Y(I)-Y(I-1))/H(I-1)+A(I)*(Y(I+1)
    -Y(I))/H(I))
210 NEXT I
220 A(1)=1:A(N)=0
230 B(1)=3*(Y(2)-Y(1))/H(1)
240 B(N)=3*(Y(N)-Y(N-1))/H(N-1)
250 FOR I=1 TO N:D(I)=2:NEXT I
260 FOR I=1 TO N:C(I)=1-A(I):NEXT I
270 P=N
280 FOR I=2 TO P
290 IF ABS(D(I))<=.000001 THEN END
300 A(I-1)=A(I-1)/D(I-1):B(I-1)=B(I-1)/D(I-1)
310 D(I)=A(I-1)*(-C(I))+D(I):B(I)=-C(I)*B(I-1)+B(I)
320 NEXT I
330 B(P)=B(P)/D(P)
340 FOR I=1 TO P:B(P-1)=B(P-I)-A(P-I)*B(P-I+1):NEXT I
350 PRINT"请输入插值点的蜗壳包角数值（插值点数为"M"个）"
360 FOR I=1 TO M:INPUT Z(I):NEXT I
370 FOR I=1 TO M:FOR J=2 TO N
380 IF Z(I)<=X(J) THEN 400
```

```
390  NEXT J
400  J=J-1
410  E=X(J+1)-Z(I):E1=E*E:F=Z(I)-X(J)
420  F1=F*F:H1=H(J)*H(J)
430  W(I)=(3*E1-2*E1*E/H(J))*Y(J)+(3*F1-2*F1*F/H(J))
       *Y(J+1)
440  W(I)=W(I)+(H(J)*E1-E1*E)*B(J)-(H(J)*F1-F1*F)
       *B(J+1)
450  W(I)=W(I)/H1
460  NEXT I
470  FOR I=1 TO M
480  PRINT "蜗壳包角="Z(I), "蜗壳外径="W(J)"m"
490  NEXT I
500  PRINT"计算结束"
```

程序的主要标识符是

X——一维数组，存放插值节点自变量值；

Y——一维数组，存放插值节点函数值；

Z——一维数组，存放插值点自变量值；

W——一维数组，存放插值点函数值；

B——一维数组，代表插值节点的一阶导数值。

程序运行过程及结果为

```
RUN
请输入插值点的蜗壳包角数值（插值点数为5个）
? 30
? 60
? 90
? 120
? 150
蜗壳包角=30   蜗壳外径=2.851859m
蜗壳包角=60   蜗壳外径=3.262843m
蜗壳包角=90   蜗壳外径=3.588998m
蜗壳包角=120  蜗壳外径=3.84669m
蜗壳包角=150  蜗壳外径=4.10921m
计算结束
```

四、参数插值方法

对于某些封闭和半封闭的曲线，如图3-1，在利用插值方法引用这类曲线时，可能出现两种困难。一是在用插值公式时，若公式中涉及到的插值节点的自变量值相同或相差很

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

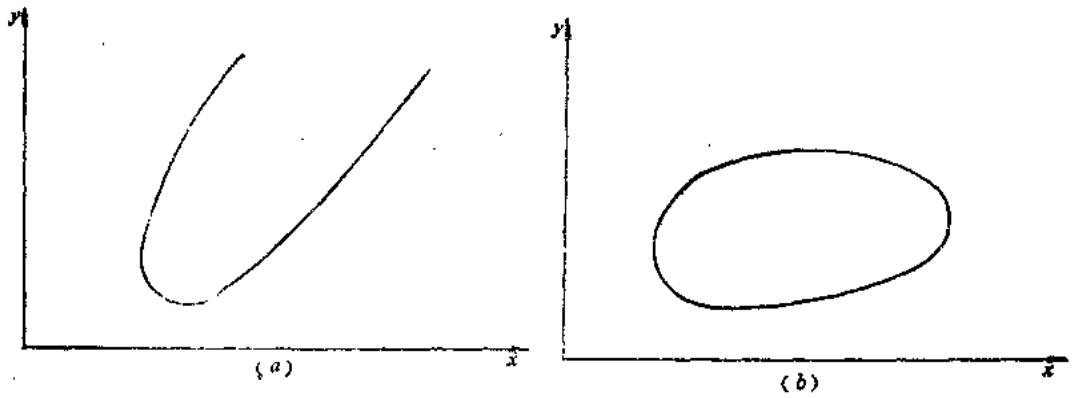


图 3-1 封闭和半封闭曲线

(a)半封闭曲线；(b)封闭曲线

小时，会发生计算溢出的问题，不能保证程序正常运行；二是无法搜索插值区间。

坐标旋转法，分段插值法和反插值法（即给出 y 计算 x，一般用于构造曲线场合）可解决上述问题。应用中常将曲线上的数据参数化后再利用各种插值方法进行插值计算。

1.数据参数化的方法

工程设计计算中常用的参数化方法为累加弦长法，这是一种比较好的方法，具体计算公式为

$$t_k=\begin{cases}\sum_{i=2}^{k} l_i \Big/ \sum_{i=2}^{n} l_i, & k=2,\ 3,\ \cdots,\ n\\ 0 & k=1\end{cases} \tag{3-11}$$

其中

$$l_i=\sqrt{(x_i-x_{i-1})^2+(y_i-y_{i-1})^2} \tag{3-12}$$

参数化的另外一种方法是在曲线上选取等间距的点，即选取

$$t_k=\begin{cases}0 & k=1\\ \dfrac{k-1}{n-1} & k=2,\ 3,\ \cdots,\ n-1\\ 1 & k=n\end{cases} \tag{3-13}$$

2.参数插值方法

对给出数据参数化后，就得到关系式$x=f_1(t)$和$y=f_2(t)$，对给出的某一参变量t，由$(t_k,\ x_k)(k=1,\ 2,\ \cdots,\ n)$作为插值节点用插值公式计算相应于$t$的$x$值，同样以（$t_k$，$y_k$）（$k=1,\ 2,\ \cdots,\ n$）作为插值节点用插值公式计算相应于$t$的$y$值。例如采用线性插值公式，计算对于$t\in[t_{k-1},\ t_k]$相应的$x$、$y$的计算公式为

$$\begin{cases}x=x_{k-1}+\dfrac{t-t_{k-1}}{t_k-t_{k-1}}(x_k-x_{k-1})\\ y=y_{k-1}+\dfrac{t-t_{k-1}}{t_k-t_{k-1}}(y_k-y_{k-1})\end{cases} \tag{3-14}$$

若采用样条插值方法计算 t 所对应的 x、y，则称为参数样条插值计算。

3.参数样条插值计算的程序设计

设计参数样条插值程序时，可采用下面的步骤：

1）由已知数据（x_k，y_k）（$k=1$，2，…，n）采用累加弦长参数化方法得到参变量$t_k(k=1, 2, \cdots, n)$，选择插值参变量t。

2）调用三次样条插值子程序计算t所对应的x。

3）再调用一次三次样条插值子程序计算t所对应的y。

五、提高插值计算精度和速度的一些方法

所谓提高插值计算精度是指尽可能使利用插值计算得到的插值点的函数值与原曲线上相应的函数值之间的误差小一些。一般来讲，采用高精度的插值公式可提高插值精度，但会带来计算速度慢和编制程序困难的问题。

按照所处理曲线的变化形状，在曲线形状变化大的区域多选取一些插值节点，曲线形状比较平坦的区域少取一些插值节点，则采用较为简单的插值公式也可满足工程设计所需计算精度。

在进行插值计算时，首先要判断插值点所在区间，[例3-1]、[例3-2]、及[例3-3]中采用的是逐步比较法搜索插值区间，这种方法比较常用，但在插值节点较多的情况下，这种方法有计算速度慢的缺点。为了提高搜索插值区间的计算速度，可采用以下几种方法。

1.分区搜索法

将插值节点按序分成若干大区间，先搜索插值点在大区间的位置，然后再在大区间所属子区间进一步搜索。

2.辅助函数法

这种方法通过解析计算直接求出插值区间。

当区间$[a, b]$给出的插值节点是等距节点时，即$x_k-x_{k-1}=x_{k+1}-x_k=h$时（这里$k=2, 3, \cdots, n-1$），由算法语言中的取整函数INT构成辅助函数为

$$F(x)=\mathrm{INT}\left(\frac{x}{h}+1\right) \tag{3-15}$$

此处设$x_1=0$。计算得插值点x相应的$F(x)$后，x所在插值区间$[x_{k-1}, x_k]$为$k=F(x)+1$。

若插值节点间距不等时，辅助函数为

$$F(x)=\mathrm{INT}\left(\frac{s+n+1}{2}\right) \tag{3-16}$$

其中 $$s=\sum_{i=1}^{n-1}\frac{|x-x_i|-|x-x_{i+1}|}{x_{i+1}-x_i},\quad x\in[a, b]。$$

由于解析计算在计算机运算中计算速度快，因此辅助函数法具有快速进入插值区间的特点。

第二节　二元插值方法及程序设计

水轮机的某些特性曲线，如等效率特性曲线$\eta=f(Q_1', n_1')$等是二元曲线（或曲面），在引用这些曲线时，先按第二章所述方法将曲线离散化，得到一系列插值节点，然后也用插值计算方法求出自变量相应的函数值，这里介绍一般的二元插值方法

一、二元插值计算的基本方法

已知二元函数$F=f(x, y)$在平面坐标系$x\sim y$中矩形网格上的4个插值节点(x_i, y_j)、

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$(x_{i+1},\ y_j)$、$(x_i,\ y_{j+1})$和$(x_{i+1},\ y_{j+1})$（如图3-2），相应的函数值分别为$F_{i,j}$、$F_{i+1,j}$、$F_{i,j+1}$和$F_{i+1,j+1}$，假若采用线性插值方法计算矩形域$x_i \leqslant x \leqslant x_{i+1}$，$y_j \leqslant y \leqslant y_{j+1}$内某点$(x,\ y)$的函数值$F$，计算方法如下。

首先取$x=x_i$，沿y方向按式

$$F_A=F_{i,j}+\frac{y-y_{i,j}}{y_{i,j+1}-y_{i,j}}(F_{i,j+1}-F_{i,j}) \tag{3-17}$$

计算图3-2中A点的函数值F_A，再取$x=x_{i+1}$，仍沿y方向按式

$$F_B=F_{i+1,j}+\frac{y-y_{i+1,j}}{y_{i+1,j+1}-y_{i+1,j}}(F_{i+1,j+1}-F_{i+1,j}) \tag{3-18}$$

计算图3-2中B点的函数值F_B。这里点A即自变量为(x_i,y)的点，点B即自变量为(x_{i+1},y)的点，求得A、B两点的函数值后，再按式

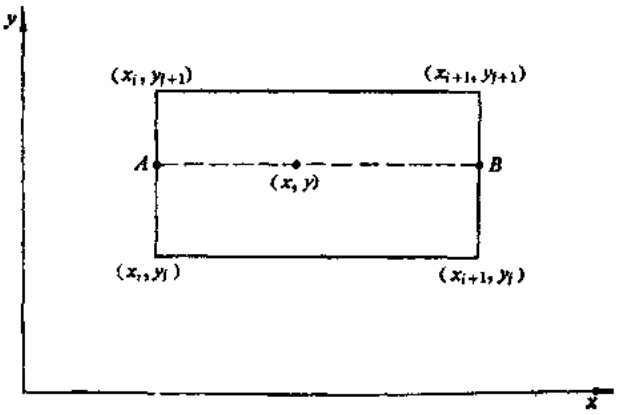


图 3-2　二元线性插值示意图

$$F=F_A+\frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i}(F_B-F_A) \tag{3-19}$$

沿x方向计算出所求的F值。

这种二元插值方法的实质就是将二元插值转化成三次一元插值计算，因此，也可以先沿x方向进行两次插值计算后再沿y方向进行一次插值计算得到插值点的函数值。

上面以线性插值为例介绍了二元插值的基本方法，在具体的工程计算问题中，有时也采用抛物线插值或样条函数插值，在插值计算过程中，可以用同一种插值方法沿两个方向进行插值计算，也可以在某一方向采用某一种插值方法，在另一方向采用另一种插值方法进行计算，这要根据引用曲线的形状和计算精度要求而确定选用什么插值公式。

用二元插值方法引用水轮机的特性曲线，计算速度比较慢，搜索插值区间也耗费不少时间，这是其主要缺点。

二、二元插值方法在引用水轮机特性曲线时的应用

1.正交网格的情况

对于水轮机的等效率特性曲线$\eta=f(Q_1',\ n_1')$，分别取Q_1'和n_1'为常数，在平面坐标系$Q_1'\sim n_1'$中形成正交网格，然后以网格节点上的数据$(Q_1',\ n_1',\ \eta)$作为二元插值计算的插值节点，用式（3-17）、式（3-18）、式（3-19）类似的公式计算出给定$(Q_1',\ n_1')$后相应的η值，这就是在正交网格情况下二元插值计算引用水轮机等效率特性曲线的方法。

在具体的插值计算过程中，也要判断插值点所在的插值区间，可以采用第一节中所述方法进行插值区间的搜索。若正交网格间隔相等时，可借助于辅助函数式（3-15）快速搜索插值区间。

2.非正交网格的情况

有时为了计算需要，也常用非正交网格将所引用的水轮机特性曲线离散化，在非正交网格节点上取插值节点进行二元插值计算。如轴流转桨式水轮机综合特性曲线中的等效率特性曲线，由于在进行原模型能量特性转换时，各叶片转角φ下效率修正值不同，必须采用一组等φ角线与一组等n_1'线相交形成非正交网格。

如用线性插值方法在非正交网格的情况下引用轴流转桨水轮机的等效率特性曲线，可按照下面的步骤进行。

已知某插值点A相邻的四个插值节点的数据为（$Q'_{i,j}$，$n'_{i,j}$，$\eta_{i,j}$）、（$Q'_{i+1,j}$，$n'_{i+1,j}$，$\eta_{i+1,j}$）、（$Q'_{i,j+1}$，$n'_{i,j+1}$，$\eta_{i,j+1}$）和（$Q'_{i+1,j+1}$，$n'_{i+1,j+1}$，$\eta_{i+1,j+1}$），其中下角为i的插值节点在φ_i线上，下角为$i+1$的插值节点在φ_{i+1}线上。设插值点的自变量值为（Q'_1，n'_1），首先分别沿φ_i线和φ_{i+1}线计算n'_1相应的Q'_1和η为Q'_{i1}、η_1（在φ_i线上）与Q'_{i2}、η_2（在φ_{i+1}线上），计算公式为

$$\begin{cases} Q'_{i1}=\dfrac{n'_1-n'_{i,j}}{n'_{i,j+1}-n'_{i,j}}(Q'_{i,j+1}-Q'_{i,j})+Q'_{i,j} \\ \eta_1=\dfrac{n'_1-n'_{i,j}}{n'_{i,j+1}-n'_{i,j}}(\eta_{i,j+1}-\eta_{i,j})+\eta_{i,j} \end{cases} \tag{3-20}$$

$$\begin{cases} Q'_{i2}=\dfrac{n'_1-n'_{i+1,j}}{n'_{i+1,j+1}-n'_{i+1,j}}(Q'_{i+1,j+1}-Q'_{i+1,j})+Q'_{i+1,j} \\ \eta_2=\dfrac{n'_1-n'_{i+1,j}}{n'_{i+1,j+1}-n'_{i+1,j}}(\eta_{i+1,j+1}-\eta_{i+1,j})+\eta_{i+1,j} \end{cases} \tag{3-21}$$

然后由计算所得（Q'_{i1}，η_1）和（Q'_{i2}，η_2）在Q'_1方向上按式（3-22）计算所求插值点的效率值η为

$$\eta=\frac{Q'_1-Q'_{i1}}{Q'_{i2}-Q'_{i1}}(\eta_2-\eta_1)+\eta_1 \tag{3-22}$$

用抛物线插值公式在非正交网格情况下进行插值计算，计算步骤与上述类似，只是用到9个插值节点的数据，相应公式也比式(3-20)、式(3-21)、式(3-22)复杂。至于用样条插值方法进行插值计算，计算过程更为繁琐。

三、二元插值程序的设计方法

二元插值程序的设计方法与一元插值程序设计方法类似，下面给出一个在正交网格下线性插值的例子。

【例 3-4】 调用矩形域（$0.22\leqslant Q'_1\leqslant 0.38, 50\leqslant n'_1\leqslant 70$）上HL120效率特性曲线$\eta=f(Q'_1, n'_1)$的线性插值程序为

```
100 '二元线性插值计算HL120效率值'
110 DIM X(5), Y(5), Z(5, 5)
120 FOR I=1 TO 5:READ X(I):NEXT I
130 FOR I=1 TO 5:READ Y(I):NEXT I
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
140 FOR I=1 TO 5:FOR J=1 TO 5
150 READ Z(I, J)
160 NEXT J:NEXT I
170 '插值节点的数据如下'
180 DATA 0.22, 0.26, 0.30, 0.34, 0.38
190 DATA 50, 55, 60, 65, 70
200 DATA 0.856, 0.868, 0.863, 0.845, 0.812, 0.86, 0.887, 0.891, 0.879,
    0.848, 0.857, 0.88, 0.902
210 DATA 0.899, 0.878, 0.852, 0.886, 0.9, 0.901, 0.885, 0.831, 0.868,
    0.883, 0.88, 0.86
220 PRINT "请输入插值点的Q1'值和n1'值(0.22<=Q1'<=0.38; 50<=n1'
    <=70)"
230 INPUT X, Y
240 PRINT
250 FOR I=2 TO 5
260 IF X<=X(I) THEN 280
270 NEXT I
280 FOR J=2 TO 5
290 IF Y<=Y(J) THEN 310
300 NEXT J
310 Z1=Z(I-1, J-1)+(Y-Y(J-1))*(Z(I-1, J)-Z(I-1, J-1))/
    (Y(J)-Y(J-1))
320 Z2=Z(I, J-1)+(Y-Y(J-1))*(Z(I, J)-Z(I, J-1))/(Y(J)-
    Y(J-1))
330 Z=Z1+(X-X(I-1))*(Z2-Z1)/(X(I)-X(I-1))
340 PRINT "下面输出插值结果"
350 PRINT "单位流量="X"m3/s", "单位转速="Y"rpm", "效率="Z*100"%"
```

程序的主要标识符是

X——一维数组，按序存放矩形网格上插值节点的Q_1'值；

Y——一维数组，按序存放矩形网格上插值节点的n_1'值；

Z——二维数组，按序存放矩形网格上插值节点的效率η值；另外程序中单变量X、Y、Z分别为插值点的Q_1'、n_1'和η值。

程序中第180～210行数据是矩形网格上25个插值节点的有关数据，矩形网格是由间隔相等的5组等Q_1'线和等n_1'线相交形成的，所形成的网格是正交网格，因此在计算机中存储网格节点（即插值节点）对应于Q_1'和n_1'时，只采用一维数组，但是对于节点上的η值必须严格按各节点的排列顺序给出。对于非正交网格，存储节点上的数据应采用二维数组。为了适应在给出插值点的情况下搜索插值区间，插值节点的数据必须严格按顺序存放

在第180～210行DATA语句中，程序中第120～160行将插值节点的有关数据读入计算机内存中。程序中第250～270行判断插值点在Q_1'方向上所在插值区间，这里仍采用逐步比较的方法判断插值区间。同理，第280～300行是搜索插值点在n_1'方向上所在的插值区间。程序的第310～330行是用式（3-17）～（3-19）类似公式线性插值计算插值点的效率值。

调用该程序计算$Q_1'=0.25m^3/s$，$n_1'=64rpm$时的效率值，程序运行过程及结果为

```
RUN
请输入插值点的Q1'值和n1'值（0.22<=Q1'<=0.38:50<=n1'<=70）
? 0.25, 64
下面输出插值结果
单位流量=0.25m3/s      单位转速=64rpm      效率=87.32%
```

在水电站动力设备的计算机辅助设计程序中调用水轮机的二元特性曲线，在采用插值方法时，为了保证计算精度，必须取较密的网格，这样就要有较多的数据存入计算机中，占用计算机大量内存，这也是插值计算方法除运算速度慢之外的另一缺点，下节给出的另外一种数值逼近方法可以克服这些缺点。

第三节　曲线拟合方法及程序设计

插值计算引用曲线，实质上是用分段函数逼近原曲线，本节所要介绍的曲线拟合方法是构造整体逼近原曲线的函数，换句话说，就是将曲线表示成解析式，这无疑为在水电站的计算机辅助设计中引用各类曲线带来方便。事实上，大部分在水电站设计中所涉及到的曲线都可以经曲线拟合方法转化为解析形式，只有个别形状变化较复杂的水轮机特性曲线不易解析表达而采用插值计算方法对其引用。曲线拟合方法所得的与解析式相应的曲线并不完全与原曲线上的给出点（这些点供曲线拟合时用）重合，而是尽可能逼近这些点，这是曲线拟合与插值计算方法的又一区别。

曲线拟合方法较多，较为复杂的曲线拟合方法有自适应曲线拟合法、样条函数曲线拟合法等。本节只介绍在水电站的计算机辅助设计中常用的一些较为简单的曲线拟合方法。

一、最小二乘线性函数曲线拟合的基本原理

如图3-3，在曲线上选取m个点形成数据集$\{x_i, y_i\}(i=1, 2, \cdots, m)$，用下式对这些数据进行拟合。

$$f(x)=c_0\varphi_0(x)+c_1\varphi_1(x)+\cdots+c_n\varphi_n(x) \qquad (3\text{-}23)$$

式中　c_j——待定系数，$j=0,1,\cdots, n$；

$\varphi_j(x)$——拟合基函数，彼此线性无关，$j=0,1,\cdots, n$；

$f(x)$——拟合函数，是线性函数。

曲线拟合就是在给出式(3-23)中$\varphi_j(x)$后，由数据集$\{x_i,y_i\}$确定式(3-23)中待定系数c_j，下面给出一种称为最小二乘法的确定c_j的方法。

设拟合函数式(3-23)对给定x_i的拟合值$f(x_i)$与原函数值y_i的差为

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$\varepsilon_i = f(x_i) - y_i \tag{3-24}$$

ε_i称为拟合绝对误差，简称残差。确定式(3-23)中c_j使

$$I = \sum_{i=1}^{m} \varepsilon_i^2 \tag{3-25}$$

为最小。由式(3-23)～(3-25)可知，I是c_j的函数，根据多元函数极值原理，为使I最小，c_j应满足

$$\frac{\partial I}{\partial c_j} = 0 \quad (j=0,1,\cdots,n) \tag{3-26}$$

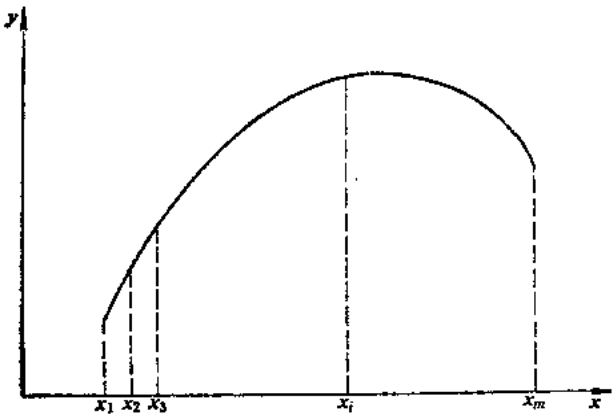


图 3-3 在曲线上读取数据示意图

由$\partial I/\partial c_0 = 0$可得出

$$2\sum_{i=1}^{m}[c_0\varphi_0(x_i)+c_1\varphi_1(x_i)+\cdots+c_n\varphi_n(x_i)-y_i]\varphi_0(x_i)=0 \tag{3-27}$$

类似地可得出$\partial I/\partial c_1=0, \partial I/\partial c_2=0, \cdots, \partial I/\partial c_n=0$的具体式子，将这些式子加以整理得

$$\boldsymbol{AC}=\boldsymbol{B} \tag{3-28}$$

记$\sum_{i=1}^{m}$为Σ，则(3-28)中各矩阵为

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} \Sigma\varphi_0(x_i)\varphi_0(x_i) & \Sigma\varphi_0(x_i)\varphi_1(x_i)\cdots\Sigma\varphi_0(x_i)\varphi_n(x_i) \\ \Sigma\varphi_1(x_i)\varphi_0(x_i) & \Sigma\varphi_1(x_i)\varphi_1(x_i)\cdots\Sigma\varphi_1(x_i)\varphi_n(x_i) \\ \vdots & \vdots \quad \cdots \quad \vdots \\ \Sigma\varphi_n(x_i)\varphi_0(x_i) & \Sigma\varphi_n(x_i)\varphi_1(x_i)\cdots\Sigma\varphi_n(x_i)\varphi_n(x_i) \end{bmatrix} \tag{3-29}$$

$$\boldsymbol{C}=(c_0,c_1,\cdots,c_n)^T \tag{3-30}$$

$$\boldsymbol{B}=(\Sigma\varphi_0(x_i)y_i,\ \Sigma\varphi_1(x_i)y_i,\cdots,\ \Sigma\varphi_n(x_i)y_i)^T \tag{3-31}$$

式(3-28)是$n+1$阶线性代数方程组，一般称其为正规方程，由线性代数中有关定理不难证明其解是唯一的，一般采用主元素高斯消去法求得其解。当由式(3-28)解得c_j($j=0, 1, \cdots, n$)后，则拟合函数式(3-23)得以确定。

以上所述就是最小二乘线性函数曲线拟合的基本原理。

二、一般代数多项式曲线拟合及程序设计

将式(3-23)中基函数取为幂函数x^j($j=0, 1, \cdots, n$)，则拟合函数$f(x)$为一般代数多项式，此时正规方程(3-28)中左边系数矩阵为

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} \Sigma 1 & \Sigma x_i & \cdots & \Sigma x_i^n \\ \Sigma x_i & \Sigma x_i^2 & \cdots & \Sigma x_i^{n+1} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \Sigma x_i^n & \Sigma x_i^{n+1} & \cdots & \Sigma x_i^{n+n} \end{bmatrix} \tag{3-32}$$

这是一个对称正定矩阵。正规方程式(3-28)中右边列向量为

$$\boldsymbol{B}=(\Sigma y,\ \Sigma x_i y_i,\ \cdots,\ \Sigma x_i^n y_i)^T \tag{3-33}$$

根据式（3-32）的特点，在计算A中各元素时，一般只计算其第一行和第$n+1$列元素即可。

在大多数情况下，用一般代数多项式作为拟合函数对水电站设计中涉及的各种曲线进行拟合就可取得满意结果。

【例 3-5】 用二次代数多项式对ZZ560-46最优单位转速下的气蚀特性曲线进行拟合，计算步骤为

1）在曲线上均匀选取一些点，读取这些点的单位流量Q_i'和气蚀系数σ组成数据$\{Q_i', \sigma_i\}$（$i=1, 2, \cdots, 6$）（具体值列于表3-3中），选取函数

$$f(Q_i')=c_0+c_1Q_i'+c_2(Q_i')^2 \qquad (3\text{-}34)$$

对这些数据拟合。

2）计算方程式（3-28）中系数矩阵A和右边列向量B，产生正规方程

$$\begin{bmatrix} 6 & 7.8000 & 10.8400 \\ 7.8000 & 10.8400 & 15.9120 \\ 10.8400 & 15.9120 & 24.3760 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 2.60200 \\ 3.61780 \\ 5.32628 \end{bmatrix} \qquad (3\text{-}35)$$

解该方程得$c_0=0.36070$，$c_1=-0.26525$，$c_2=0.23125$。

3）求得c_0、c_1和c_2后，由式（3-34）计算拟合值及残差（具体值也列于表3-3中）。

表 3-3　　ZZ560-46最优单位转速下气蚀特性曲线拟合结果比较

序　　号	1	2	3	4	5	6
Q_i' (m³/s)	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
σ	0.300	0.321	0.374	0.446	0.531	0.630
$f(Q_i')$	0.297	0.327	0.375	0.443	0.528	0.633
ε	−0.003	0.006	0.001	−0.003	−0.003	0.003

通过本例可以看出，用拟合函数逼近原曲线是可行的，当在程序中引用曲线时，只需把相应的拟合函数存储在计算机中，这样对程序设计来说是很方便的，同时也提高了运算速度。

【例 3-6】 一般代数多项式曲线拟合的通用程序为

```
100  '多项式曲线拟合程序'
110  'm为拟合点数'
120  M=8
130  DIM X(M), Y(M), Y1(M)
140  PRINT'请输入多项式最高项次数':INPUT N
150  DIM A(N+1, N+2)
160  FOR I=1 TO M:READ X(I):NEXT I
170  FOR I=1 TO M:READ Y(I):NEXT I
180  DATA 44.7, 48.1, 53.4, 58.4, 64.5, 68.7, 73, 76.3
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
190 DATA 0.8, 0.84, 0.88, 0.9, 0.9, 0.88, 0.84, 0.8
200 FOR J=1 TO N+1:FOR K=1 TO N+1:FOR I=1 TO M
210 A(J, K)=A(J, K)+X(I)^(J+K-2)
220 NEXT I:NEXT K:NEXT J
230 FOR J=1 TO N+1:FOR I=1 TO M
240 A(J, N+2)=A(J, N+2)+Y(I)*X(I)^(J-1)
250 NEXT :NEXT
260 PRINT'以下输出正规方程'
270 FOR I=1 TO N+1:FOR J=1 TO N+2
280 PRINT A(I, J),
290 NEXT J
300 PRINT
310 NEXT I
320 FOR K=1 TO N+1
330 FOR IO=K TO N+1
340 WC=ABS(A(IO, K))
350 IF WC>0 THEN 380
360 NEXT IO
370 PRINT'正规方程无解':END
380 IF IO=K THEN 440
390 FOR J=K TO N+2
400 T=A(K, J)
410 A(K, J)=A(IO, J)
420 A(IO, J)=T
430 NEXT J
440 T=1/A(K, K)
450 FOR J=K TO N+1
460 A(K, J+1)=T*A(K, J+1)
470 NEXT J
480 IN=N
490 IF K=N+1 THEN 560
500 FOR I=IO TO IN
510 FOR J=K TO N+1
520 A(I+1, J+1)=A(I+1, J+1)-A(I+1, K)*A(K, J+1)
530 NEXT J
540 NEXT I
550 NEXT K
```

```
560 FOR IK=2 TO N+1
570 I=N+2-IK
580 FOR J=I TO IN
590 A(I, N+2)=A(I, N+2)-A(I, J+1)*A(J+1, N+2)
600 NEXT J
610 NEXT IK
620 PRINT'以下为多项式拟合系数'
630 FOR I=1 TO N+1
640 PRINT A(I, N+2),
650 NEXT I
660 PRINT
670 FOR I=1 TO M:FOR J=1 TO N+1
680 Y1(I)=Y1(I)+A(J, N+2)*X(I)^(J-1)
690 NEXT :NEXT
700 PRINT'以下为拟合结果'
710 PRINT'----------'
720 PRINT'序号        原值        拟合值        相对误差'
730 PRINT'----------'
740 FOR I=1 TO M
750 PRINT I, Y(I), Y1(I), (Y(I)-Y1(I))/Y(I)*100'%'
760 NEXT I
770 PRINT'----------'
```

程序中主要标识符是

X——一维数组，存放给出数据中的自变量值；

Y——一维数组，存放给出数据中的函数值；

N——代数多项式最高项次数；

A——（$N+1$）（$N+2$）维数组，首先存放正规方程中左边系数矩阵式（3-32）中元素及右边列向量式（3-33）中元素，程序运行结束后，各行 $N+2$ 位元素存放待定系数的值；

Y1——一维数组，存放拟合值。

程序的主要结构为

160、180：读入给出数据中的自变量值；

170、190：读入给出数据中的函数值；

200～310：形成正规方程并在屏幕上显示；

320～610：用主元素高斯消去法解正规方程；

620～660：输出所求的待定系数值；

670～690：计算拟合值；

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

700～770：输出拟合值及拟合的相对误差。

调用该程序对HL120-38水轮机在开度a_0为21mm时的$\eta=f(n_1')$曲线用二次代数多项式拟合，程序运行过程及结果如下。

```
RUN
请输入多项式最高项次数
? 2
以下输出正规方程
 8          487.1       30604.45        6.840001
 487.1      30604.45    1977840         416.582
 30604.45   1977840     1.309819E+08    26152.04
以下为多项式拟合系数
-.6251313    5.047305E-02  -4.164221E-04
以下为拟合结果
```

序　号	原　值	拟 合 值	相 对 误 差
1	0.8	0.7989651	0.129357%
2	0.84	0.8391839	9.714848E-02%
3	0.88	0.8826768	-0.3041869%
4	0.9	0.902262	-0.251333%
5	0.9	0.8979602	0.2266434%
6	0.88	0.8769838	0.3427538%
7	0.84	0.8402877	-3.425139E-02%
8	0.8	0.8016818	-0.2102181%

在调用该程序时，将曲线上选取的点数8赋给程序120行变量M，将各点的自变量n_1'值键盘输入到180行DATA语句中，各点的函数值η输入到190行DATA语句中。

三、正交多项式曲线拟合方法

1.正交多项式

若n次项系数不为零的多项式$g_n(x)$满足

$$\int_a^b \rho(x)g_j(x)g_k(x)dx=\begin{cases}0 & j\neq k\\ A_k>0 & j=k\end{cases}\quad(j=0,\ 1,\ \cdots,\ n;\ k=0,\ 1,\ \cdots,\ n)\tag{3-36}$$

就称多项式序列$g_0(x)$，$g_1(x)$，…，$g_n(x)$在$[a,\ b]$上带权$\rho(x)$正交，并称$g_n(x)$是$[a,\ b]$上带权$\rho(x)$的n次正交多项式。

如1785年由勒让德引进的多项式$P_n(x)$就是在$[-1,\ 1]$上带恒为1的权$\rho(x)$的正交多项式，其正交性质（3-36）为

$$\int_{-1}^{1} P_n(x)P_m(x)dx=\begin{cases}0 & m\neq n\\ \dfrac{2}{2n+1} & m=n\end{cases}$$

零次勒让德多项式为$P_0(x)=1$，一次勒让德多项式为$P_1(x)=x$，二次以上勒让德

多项式由递推公式

$$(n+1)P_{n+1}(x)=(2n+1)xP_n(x)-nP_{n-1}(x) \quad (n=1,\ 2,\ \cdots) \qquad (3\text{-}37)$$

计算得出。如由式(3-37)计算得

$$P_2(x)=\frac{(3x^2-1)}{2}$$

$$P_3(x)=\frac{(5x^3-3x)}{2}$$

除勒让德正交多项式外，比较重要的正交多项式还有第二类切比雪夫多项式，拉盖尔(Laguerre)多项式等。

2.离散状况下在任意实区间正交的正交多项式的构造

设给出离散数据x_1，x_2，…，x_m及权函数$\omega(x)>0$，构造带权正交的多项式$P_0(x)$，$P_1(x)$，…，$P_n(x)$，注意$n\leqslant m$，用递推公式表示$P_k(x)$，即

$$P_{k+1}(x)=(x-\alpha_{k+1})P_k(x)-\beta_kP_{k-1}(x) \quad (k=1,\ 2,\ \cdots,\ n-1) \qquad (3\text{-}38)$$

这里$P_k(x)$是最高项系数为1的k次多项式，其中$P_0(x)=1$，$P_1(x)=(x-\alpha_1)P_0(x)$。式(3-38)中

$$\begin{cases}\alpha_{k+1}=\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{m}\omega(x_i)x_iP_k^2(x_i)}{\sum\limits_{i=1}^{m}\omega(x_i)P_k^2(x_i)}\\ \beta_k=\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{m}\omega(x_i)P_k^2(x_i)}{\sum\limits_{i=1}^{m}\omega(x_i)P_{k-1}^2(x_i)}\end{cases} \quad (k=0,1,\cdots,n-1) \qquad (3\text{-}39)$$

由归纳法可以证明这样给出的$P_k(x)(k=0,1,\cdots,n)$是关于x_1，x_2，…，x_m正交的，具体证明过程略。

3.正交多项式曲线拟合方法

选用式(3-38)、式(3-39)构造的正交多项式作为拟合函数式(3-23)的基函数，并取$\omega(x)$恒为1，由于正交多项式的正交性，使得式(3-29)简化为

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}\Sigma P_0^2(x_i) & 0 & \cdots & 0\\ 0 & \Sigma P_1^2(x_i) & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots\\ 0 & 0 & \cdots & \Sigma P_n^2(x_i)\end{bmatrix} \qquad (3\text{-}40)$$

同时有

$$\boldsymbol{B}=(\Sigma P_0(x_i)y_i,\ \Sigma P_1(x_i)y_i,\ \cdots,\ \Sigma P_n(x_i)y_i)^T \qquad (3\text{-}41)$$

将式(3-40)、式(3-41)代入式(3-28)中可解得

$$c_k=\frac{\Sigma P_k(x_i)y_i}{\Sigma P_k^2(x_i)} \qquad (3\text{-}42)$$

这样就确定了拟合函数(3-23)。

由上述可以看出，用正交多项式作曲线拟合，具有计算简便的特点。

由于在用正交多项式作曲线拟合的计算过程中不用解方程组，只用递推公式，因此给相应的计算程序编制带来很大的方便。此外，每当增加一次拟合函数式(3-23)的次数，

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

只要把程序中循环次数加1，其余不用改变，利用这一特点，在用正交多项式作曲线拟合时，可以较灵活地选用拟合函数式（3-23）的最高项次数，以获取较为满意的拟合结果。

【例 3-7】 对例3-6中HL120-38水轮机在开度a_0为21mm时的$\eta=f(n_1')$曲线用二次多项式进行拟合，选用的拟合函数为

$$f(n_1')=c_0P_0(n_1')+c_1P_1(n_1')+c_2P_2(n_1') \tag{3-43}$$

其中$P_k(n_1')$（$k=0$，1，2）为由式（3-38）计算的正交多项式。

由[例3-6]程序第180行中数据和式（3-38）、式（3-39）计算得

$$\begin{cases} P_0(n_1')=1 \\ P_1(n_1')=(n_1'-58.1375) \\ P_2(n_1')=(n_1')^2-117.3141n_1'+3359.5872 \end{cases} \tag{3-44}$$

用[例3-6]程序第190行中数据和式（3-42）、式（3-44）计算得

$$c_0=0.8550,\quad c_1=-1.8025\times10^{-4},\quad c_2=-5.0407\times10^{-4}$$

将这些值代入式（3-43）中加以整理得到标准二次多项式为

$$f(n_1')=-0.8280+0.0590n_1'-5.0407\times10^{-4}(n_1')^2 \tag{3-45}$$

由式（3-45）计算各n_1'相应的η值及残差值列于表3-4中。

表 3-4　　HL120-38 $a_0=21$mm时$\eta=f(n_1')$曲线拟合结果比较

序　号	1	2	3	4	5	6	7	8
单位转速 n_1'(r/m)	44.7	48.1	53.4	56.0	59.2	62.5	68.7	72.5
效 率 η	0.80	0.84	0.88	0.90	0.90	0.88	0.84	0.80
式(3-45)计算效率值	0.802	0.844	0.885	0.895	0.898	0.890	0.846	0.800
$f(n_1')-\eta$	0.002	0.004	0.005	−0.005	−0.002	0.010	0.006	0.000

四、提高曲线拟合精度的常用方法

应用曲线拟合的方法将水电站设计中所涉及的一些曲线解析表达后，可以在计算机辅助设计中快速方便地引用这些曲线。同时必须注意曲线拟合的精度，以保证所用解析式能尽量真实地反映原曲线。

所谓提高曲线拟合的精度，一是尽量降低残差的最大值，即尽可能使

$$\varepsilon_{max}=\max|\varepsilon_i|\quad(i=1,\ 2,\ \cdots,\ m) \tag{3-46}$$

降低；二是使所拟合函数相应曲线尽可能靠近原曲线，即使

$$s=\left(\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\varepsilon_i^2\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3-47}$$

尽量小一些，这里s称为均方拟合误差。

当拟合函数选定之后，可设计一些算法，如迭代权因子法，扰动算法等对所求拟合函数中的待定系数进行修正，以使ε_{max}降低。另外，选用合适的拟合函数，不仅可降低ε_{max}，也可使s变小。不少算法有助于选择拟合函数，如变量的自动、半自动筛选法，将曲线拟

合变成常微分方程的反演问题等，更为复杂的算法还有变内节点样条函数拟合法等。

限于篇幅，这里只介绍几种常用的方法，这些方法经实践证明在水电站设计中的曲线解析表达过程中是有效的。

1.选用合适次数的多项式作为拟合函数

如前所述，水电站设计中所涉及的大部分曲线都可以用多项式作为拟合函数进行拟合，一般来讲，选用较高次数的多项式比低次多项式有较高的拟合精度。如本节[例3-6]中，用二次多项式对HL120-38水轮机在开度为21mm时的$\eta=f(n_1')$曲线拟合，$\varepsilon_{max}=0.0031$，而用三次多项式拟合时，$\varepsilon_{max}=0.0017$。

但是多项式的次数不要选的太高，选用较高次数的多项式作拟合函数时，正规方程中系数矩阵式（3-32）呈病态，给求解正规方程带来困难（对这一问题可利用正交多项式作曲线拟合函数加以克服）；另外，拟合曲线与原曲线在选定的拟合点几乎重合，而在非拟合点处出现不应有的波动。

2.用一些简单的非线性函数作拟合函数

根据经验，对于大多数水轮机的线性特性曲线，选用式

$$f(x)=c_0+c_1x+c_2x^p \tag{3-48}$$

作拟合函数往往得到较高的拟合精度。这里将式（3-48）称为p次抛物线。由于其中含有非线性参数p，故称式（3-48）为非线性拟合函数。

如果采用一般的非线性曲线拟合法，计算过程比较繁杂，下面给出一种简便方法确定式（3-48）中待定系数c_0、c_1、c_2及参数p。

假设p值为已知，当给出拟合数据后，由于此时式（3-48）为线性函数，根据线性函数最小二乘曲线拟合的基本原理可得到求c_0、c_1和c_2的正规方程为

$$\begin{bmatrix} \Sigma 1 & \Sigma x_i & \Sigma x_i^p \\ \Sigma x_i & \Sigma x_i^2 & \Sigma x_i^{p+1} \\ \Sigma x_i^p & \Sigma x_i^{p+1} & \Sigma x_i^{2p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma y_i \\ \Sigma x_i y_i \\ \Sigma x_i^p y_i \end{bmatrix} \tag{3-49}$$

由式（3-49）解得c_0、c_1和c_2后，就可计算出由式（3-46）、式（3-47）定义的ε_{max}和s。

取不同的p，就可得到一系列c_0、c_1和c_2及相应的ε_{max}和s，取其中ε_{max}或s最小的一组拟合结果作为最终的拟合结果供使用。由此可见，寻求较佳的p次抛物线作拟合函数，实际上是一个一维优化问题，其目标函数是使ε_{max}或s最小，因此可以用一维优化的一些计算方法找到较佳的p值。

【例 3-8】 表3-5给出HL240-LJ-140在设计水头下的出力N与效率η间的关系。

表 3-5　　HL240-LJ-140在设计水头下出力N与效率η间的关系

序　　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
出力N(MW)	2.28	2.44	2.58	2.75	2.81	3.07	3.60	3.66	3.70	3.74
效率η(%)	86.5	87.5	88.5	89.5	90.5	91.5	91.5	90.5	89.5	88.5

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

用二次多项式对表3-5中数据所构成的$\eta=f(N)$关系曲线进行拟合，拟合结果相应的$\varepsilon_{max}=1.13$，$s=0.5943$。三次多项式对$\eta=f(N)$进行拟合，$\varepsilon_{max}=0.68$，$s=0.3336$。选用p次抛物线，经用优化方法计算得$p=17.5$，相应的拟合函数是

$$f(N)=70.70510+6.91520N-7.63759\times10^{-10}N^{17.5}$$

其相应的$\varepsilon_{max}=0.42$，$s=0.1611$。

3.采用迭代权因子最小二乘曲线拟合法

设拟合函数仍为式（3-23），确定其中待定系数c_j（$j=0$，1，…，n），使

$$I=\Sigma\omega_i\varepsilon_i^2$$

为最小，这种曲线拟合法称为权因子曲线拟合法，如式（3-23）为一个一元二次多项式，则相应的正规方程为

$$\begin{bmatrix}\Sigma\omega_i & \Sigma\omega_i x_i & \Sigma\omega_i x_i^2\\ \Sigma\omega_i x_i & \Sigma\omega_i x_i^2 & \Sigma\omega_i x_i^3\\ \Sigma\omega_i x_i^2 & \Sigma\omega_i x_i^3 & \Sigma\omega_i x_i^4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}c_0\\c_1\\c_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\Sigma\omega_i y_i\\ \Sigma\omega_i x_i y_i\\ \Sigma\omega_i x_i^2 y_i\end{bmatrix} \qquad (3\text{-}50)$$

下面给出一种选取权因子ω_i（$i=1$，2，…，m）的方法。

首先取$\omega_i=1$（$i=1$，2，…，m），解式（3-50）求得c_0、c_1和c_2后，计算出残差ε_i（$i=1$，2，…，m），将ε_i取绝对值作为ω_i并代入式（3-50）中重新解得c_0、c_1和c_2及相应的残差，将计算所得的ε_i取绝对值后与原ω_i相乘，所得乘积作为新的ω_i再代入式(3-50）中进行计算。将这一计算过程重复进行，就可以不断得出不同的拟合结果，经数学上严格证明可知，最后的拟合结果可使ε_{max}降低。如果将上述计算过程称为迭代计算，则迭代计算是收敛的。

以上以二次多项式作曲线拟合为例介绍了一种选取权因子的方法，一般将这种方法及重复计算过程叫做迭代权因子最小二乘曲线拟合法，应用这种方法不仅能使ε_{max}降低，还可以得到一系列拟合精度相近的拟合结

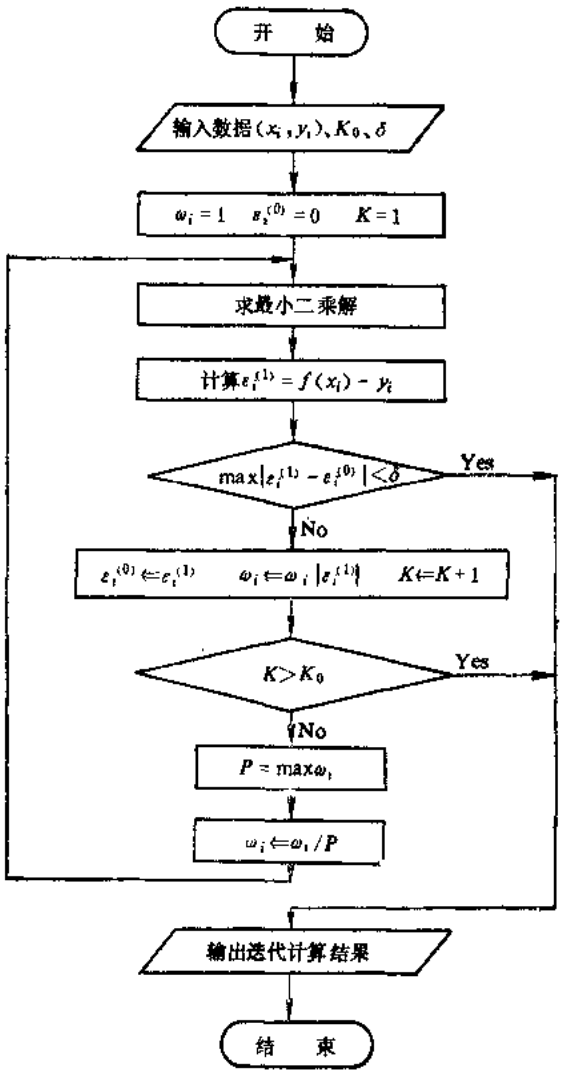


图 3-4　迭代权因子最小二乘曲线拟合程序框图

果．这一特点对于曲面的数值逼近是很有用的，这点在下一节将作介绍。

图3-4给出迭代权因子最小二乘曲线拟合的程序框图。关于程序中的一些说明如下。

1）程序框图中δ为一较小的数，控制迭代精度，K_0是给定的迭代次数，若迭代次数K大于K_0时仍没满足给定的迭代精度，程序自动退出。

2）程序框图中p值为每次迭代过程中权因子ω_i的最大值，将各ω_i除以p以后再作为权因子值，从式（3-50）可明显看出不影响迭代计算过程，但可以避免在具体计算时出现计算溢出。

【例 3-9】 采用二次多项式作拟合函数，对表3-5中数据所构成的$\eta=f(N)$关系曲线进行拟合，拟合时采用迭代权因子最小二乘法，迭代10次的计算结果列于表3-6中。

表 3-6　　迭代权因子最小二乘曲线拟合结果

迭代次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
常数项c_0	26.4940	23.0443	13.5563	11.8625	12.0073	12.3308	12.3833	12.1532	12.3527	12.2707
一次项系数c_1	40.4899	42.3797	49.3540	50.4598	50.3270	50.0366	50.0365	50.1802	50.0406	50.0911
二次项系数c_2	−6.7184	−6.7139	−7.7708	−7.9460	−7.9203	−7.8784	−7.8685	−7.8905	−7.8673	−7.8749
ε_{max}	1.1287	1.0931	1.0071	1.0354	1.0103	0.9888	0.9782	0.9766	0.9682	0.9671

从表中数据可知，迭代10次后，与一般的曲线拟合方法所得结果（即第1次迭代）相比，ε_{max}降低14.32%。

最后需要指出的是，迭代权因子最小二乘曲线拟合法虽然可降低ε_{max}，却使s有所增加，这是这种方法的不足之处。

除上述几种提高曲线拟合精度的方法外，比较简单的提高曲线拟合精度的措施就是对所拟合曲线分段进行拟合，这时采用较为简单的拟合函数也可获得较好的拟合效果。但是要注意在分段拟合时，要尽量保证分段处的连续性和光顺性。严格地讲，分段曲线拟合问题属有约束条件的曲线拟合问题，计算过程比较复杂，一般对于引用曲线的情况下，只要近似地保证分段处的连续性就可以了。

第四节　曲面拟合方法及程序设计

水轮机的等效率特性曲线、等开度线、等气蚀系数线等都可以看作较为平滑的空间曲面，这些曲面可用二元函数表示，比较简单的二元函数为二元多项式。如果用二元函数近似地解析表达水轮机的某些特性曲线，对于在水电站的计算机辅助设计中引用这些曲面是很方便的，与二元插值方法相比，具有计算速度快，程序编制简单的优点。本节介绍曲面解析表达的几种方法。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

一、二元曲线的多项式直接拟合法

根据数值逼近原理，对于某二元曲线，可用一个二元多项式进行拟合。

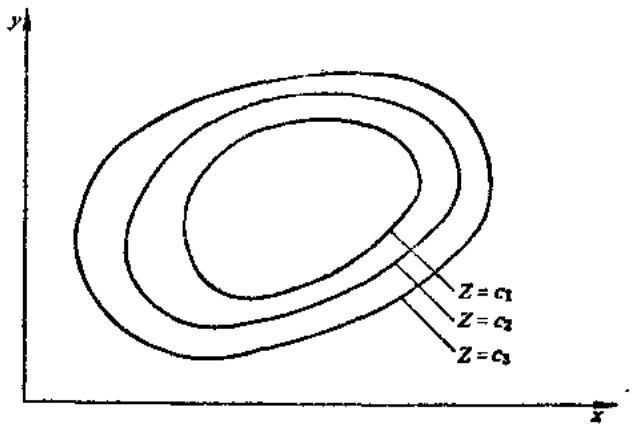


图 3-5　二元曲线（其中c为常数）

如图3-5所示，若已知某二元曲线组$Z=f(x,\ y)$上l个点的数据（$x_k,\ y_k, z_k$）$(k=1,\ 2,\ \cdots,\ l)$，则曲线组可用一个完全二元多项式

$$f(x,\ y)=\sum_{i=0}^{n}\ \sum_{j=0}^{m}c_{ij}x^iy^j \tag{3-51}$$

来拟合，式（3-51）中c_{ij}为待定系数，其个数为$(m+1)(n+1)$。二元多项式的次数m、n可根据曲线的几何形状来确定，比较简单的曲线可取较低的次数，较复杂的曲线可取较高的次数。例如，以双三次多项式作拟合函数时，式(3-51)的形式为

$$\begin{aligned}f(x,y)=&c_{00}+c_{10}x+c_{20}x^2+c_{30}x^3+c_{01}y+c_{11}xy+c_{21}x^2y+c_{31}x^3y\\&+c_{02}y^2+c_{12}xy^2+c_{22}x^2y^2+c_{32}x^3y^2+c_{03}y^3+c_{13}xy^3+c_{23}x^2y^3+c_{33}x^3y^3\end{aligned} \tag{3-52}$$

式中共有16个待定系数$c_{ij}(i,j=0,\ 1,\ 2,\ 3)$。在二元曲线上选取16个已知点，将这些点的数据（$x_i,\ y_i,\ z_i$）代入式（3-52），组成一个16元一次联立方程组，解联立方程组，求出待定系数c_{ij}，即得曲线的解析表达式。

上述确定式（3-51）的方法称为二元曲线的多项式直接拟合法，其特点是计算简便，缺点是在选取的点或附近，式（3-51）计算的函数值与原曲线上的值很接近或一致，但在其它区域，二者可能相差很大，换句话说就是用直接拟合法得到的曲线解析表达式的整体逼近性能差。因此，直接拟合法适用于解析表达形状变化不太复杂的曲线场合。

二、二元曲线的二元多项式最小二乘拟合法

1.两步拟合法

以混流式水轮机等效率特性曲线解析处理为例，将两步拟合法的步骤介绍如下。

取单位转速n_1'为常数，得到该n_1'下的$\eta=f(Q_1')$曲线，用式

$$f(Q_1')=\sum_{i=0}^{n}a_iQ_1'^i \tag{3-53}$$

对其拟合。取n_1'为另一常数，对该n_1'下的$\eta=f(Q_1')$曲线仍用式（3-53）进行拟合。重复

这一过程，最后可得到式（3-53）中系数a_j($j=0$，1，…，n）随n_1'变化的关系曲线，对这（$n+1$）条曲线分别用式

$$a_j=\sum_{i=0}^{m}c_{ij}n_1'^{\,i}\quad(j=0,\ 1,\ \cdots,\ n)\tag{3-54}$$

进行拟合，然后将式（3-54）代入式（3-53)中，得到表示等效率特性曲线$\eta=f(Q_1',\ n_1')$的解析式为

$$f(Q_1',\ n_1')=\sum_{j=0}^{n}\ \sum_{i=0}^{m}c_{ij}n_1'^{\,i}Q_1'^{\,j}$$

式中系数c_{ij}的个数仍为$(m+1)(n+1)$。

上述两步拟合法的实质就是在n_1'方向上得到一系列拟合式，然后对这一系列拟合式中的同名待定系数沿n_1'方向拟合，将两次拟合结果合并得到所求表示水轮机等效率特性曲线的解析式。因此，两步拟合法也可以沿Q_1'方向进行。

关于两步拟合法有几点说明。

1）式（3-53）、式（3-54）中的多项式最高次数n、m可以相同，也可以不同，要根据所拟合的曲线形状而定。

2）式（3-53）、式（3-54）可以用一般多项式拟合方法求出，也可以用正交多项式拟合方法求出。

3）在两步拟合法的第二步中，若式（3-53）中系数a_j随n_1'的变化规律不明显时，可利用迭代权因子最小二乘法曲线拟合可得到多种拟合方案的特点对a_j和n_1'关系数据中的个别数据进行调整，使a_j随n_1'的变化曲线尽可能光顺，以保证最后所得到的拟合函数的计算精度。

4）对某些复杂的曲线，如水轮机全特性曲线，经调整后第一步拟合结果中的系数随拟合方向的变化曲线仍不光顺，这种情况下可将这些数据（如水轮机等效率特性曲线拟合中的数据a_j、n_1'）作为插值计算中的插值节点，利用插值计算方法进行该方向的计算，而在另一方向仍是解析计算。用这种解析插值混合计算的方法引用较复杂曲线可取得满意结果。在插值计算的方向上尽可能选取等距节点，以便利用辅助函数法提高插值计算的速度。

两步拟合法处理曲线的过程较繁杂，如果所处理的曲线比较光顺时，最好采用最小二乘直接拟合法。

2.最小二乘直接拟合法

已知某曲面上的数据（x_k，y_k，z_k)($k=1$，2，…，l)，用二元多项式

$$f(x,y)=\sum_{j=0}^{n}\ \sum_{i=0}^{m}c_{ij}x^iy^j\tag{3-55}$$

对这些数据拟合，这里要求给出的数据组数l大于式（3-55）中待定系数c_{ij}的个数$(m+1)(n+1)$。仍设残差为

$$\varepsilon_k=f(x_k,\ y_k)-z_k\quad(k=1,\ 2,\ \cdots,\ l)\tag{3-56}$$

与一元曲线拟合类似，确定式（3-55）中c_{ij}，使

$$I=\sum_{k=1}^{l}\varepsilon_k^2$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

为最小，相应的正规方程为

$$\boldsymbol{MC}=\boldsymbol{T} \tag{3-57}$$

如$m=2$，$n=2$，记$\sum_{k=1}^{I}$为$\sum$，并略去下标，（3-57）中M、C和T分别为

$$\boldsymbol{M}=\begin{Bmatrix}
\sum 1 & \sum x & \sum x^2 & \sum y & \sum xy & \sum x^2y & \sum y^2 & \sum xy^2 & \sum x^2y^2 \\
\sum x & \sum x^2 & \sum x^3 & \sum xy & \sum x^2y & \sum x^3y & \sum xy^2 & \sum x^2y^2 & \sum x^3y^2 \\
\sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 & \sum x^2y & \sum x^3y & \sum x^4y & \sum x^2y^2 & \sum x^3y^2 & \sum x^4y^2 \\
\sum y & \sum xy & \sum x^2y & \sum y^2 & \sum xy^2 & \sum x^2y^2 & \sum y^3 & \sum xy^3 & \sum x^2y^3 \\
\sum xy & \sum x^2y & \sum x^3y & \sum xy^2 & \sum x^2y^2 & \sum x^3y^2 & \sum xy^3 & \sum x^2y^3 & \sum x^3y^3 \\
\sum x^2y & \sum x^3y & \sum x^4y & \sum x^2y^2 & \sum x^3y^2 & \sum x^4y^2 & \sum x^2y^3 & \sum x^3y^3 & \sum x^4y^3 \\
\sum y^2 & \sum xy^2 & \sum x^2y^2 & \sum y^3 & \sum xy^3 & \sum x^2y^3 & \sum y^4 & \sum xy^4 & \sum x^2y^4 \\
\sum xy^2 & \sum x^2y^2 & \sum x^3y^2 & \sum xy^3 & \sum x^2y^3 & \sum x^3y^3 & \sum xy^4 & \sum x^2y^4 & \sum x^3y^4 \\
\sum x^2y^2 & \sum x^3y^2 & \sum x^4y^2 & \sum x^2y^3 & \sum x^3y^3 & \sum x^4y^3 & \sum x^2y^4 & \sum x^3y^4 & \sum x^4y^4
\end{Bmatrix} \tag{3-58}$$

$$\boldsymbol{C}=(c_{00},\ c_{10},\ c_{20},\ c_{01},\ c_{11},\ c_{21},\ c_{02},\ c_{12},\ c_{22})^T$$

$$\boldsymbol{T}=(\sum z,\ \sum xz,\ \sum x^2z,\ \sum yz,\ \sum xyz,\ \sum x^2yz,\ \sum y^2z,\ \sum xy^2z,\ \sum x^2y^2z)^T \tag{3-59}$$

正规方程左边系数矩阵M是一对称正定矩阵，其中元素的排列次数很有规律，一般用主元素高斯消去法解式（3-57）。解正规方程得出式（3-55）中系数$c_{ij}(i=0,\ 1,\ \cdots,\ m;\ j=0,\ 1,\ \cdots,\ n)$后，也就得到了表达数据$(x_k,\ y_k,\ z_k)$相应曲面的解析式。

采用二元多项式式（3-55）对曲面拟合时，若i，$j\geqslant 3$，才可保证拟合函数相应曲面是光滑连续的。

根据经验得知，应用最小二乘曲面拟合的方法解析表达水轮机的等效率特性曲线等二元曲线时，大部分区域内可得到满意的结果，即有较好的拟合精度；个别区域当曲线变化急剧时，拟合误差比较大，如果是在单纯引用曲线的场合，可把这部分区域“挖”出来单独拟合。

需要指出的是，上节所提到的提高曲线拟合精度的一些方法也可用于提高曲面拟合的精度。

【例 3-10】 用双四次多项式对HL120-LJ-38模型水轮机的等效率特性曲线$\eta=f(Q_1',\ n_1')$进行拟合，拟合时取曲线上的52个数据（在表3-7中列出），所得拟合式中的25个系数$c_{ij}(i=0,\ 1,\ \cdots,\ 4;\ j=0,\ 1,\ \cdots,\ 4)$是

$c_{00}=1.188303$，$c_{10}=-6.65905$，$c_{20}=18.82422$，$c_{30}=-87.68106$，$c_{40}=115.6875$，

$c_{01}=-0.0121038$，$c_{11}=9.279284\times10^{-2}$，$c_{21}=0.3739826$，$c_{31}=0.6675736$，

$c_{41}=-1.5466$，

$c_{02}=1.750247\times10^{-4}$，$c_{12}=4.993349\times10^{-4}$，$c_{22}=-1.242641\times10^{-2}$，

$c_{32}=7.983713\times10^{-3}$，$c_{42}=-1.614959\times10^{-2}$，

$c_{03}=-1.19543\times10^{-6}$，$c_{13}=1.117491\times10^{-6}$，$c_{23}=9.550431\times10^{-6}$，

$c_{33}=7.993961\times10^{-5}$，$c_{43}=2.915412\times10^{-4}$，

$c_{04}=5.335507\times10^{-9}$，$c_{14}=-2.640842\times10^{-7}$，$c_{24}=1.452926\times10^{-6}$，

$c_{34}=-2.609522\times10^{-6}$，$c_{44}=-8.666574\times10^{-7}$

拟合的结果列于表3-7中。

由表中数据可以看出，所得拟合精度完全能够满足工程设计中的需要。

表 3-7　　HL120-LJ-38水轮机等效率特性曲线拟合结果

单位流量 $Q_1'(m^3/s)$	单位转速 $n_1'(r/m)$	效率 η	拟合值 $f(Q_1', n_1')$	残差 $f(Q_1', n_1')-\eta$
0.176	65.5	0.8	0.803	0.003
0.18	62.5	0.82	0.823	0.003
0.188	55.5	0.84	0.843	0.003
0.193	50	0.84	0.835	−0.005
0.197	46.3	0.82	0.819	−0.001
0.199	43.4	0.8	0.8	0
0.208	70.2	0.8	0.794	−0.006
0.212	68	0.82	0.818	−0.002
0.216	65.4	0.84	0.839	−0.001
0.221	61.5	0.86	0.86	0
0.236	49.5	0.86	0.85	−0.01
0.237	47.5	0.84	0.838	−0.002
0.239	45.5	0.82	0.823	0.003
0.241	42.7	0.8	0.798	−0.002
0.233	72.5	0.8	0.798	−0.002
0.24	68.7	0.84	0.84	0
0.251	62.5	0.88	0.88	0
0.256	59.2	0.89	0.887	−0.003
0.26	56	0.89	0.885	−0.005
0.264	53.1	0.88	0.877	−0.003
0.268	47.4	0.84	0.842	0.002
0.27	43.5	0.8	0.805	0.005
0.274	76.3	0.8	0.801	0.001
0.281	73	0.84	0.843	0.003
0.291	68.7	0.88	0.881	0.001
0.299	64.5	0.9	0.901	0.001
0.31	58.4	0.9	0.903	0.003
0.317	53.1	0.88	0.883	0.003
0.32	48.1	0.84	0.842	0.002
0.322	44.7	0.8	0.805	0.005
0.304	78.6	0.8	0.801	0.001
0.311	76	0.84	0.835	−0.005
0.322	71	0.88	0.88	0
0.33	66.7	0.9	0.9	0
0.343	60	0.9	0.901	0.001
0.349	54.3	0.88	0.878	−0.002
0.354	49	0.84	0.836	−0.004
0.356	45	0.8	0.791	−8.999999E-03
0.347	79.5	0.8	0.801	0.001
0.358	75.5	0.84	0.839	−0.001

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

续表

单位流量 $Q_i'(m^3/s)$	单位转速 $n_i'(r/m)$	效率 η	拟合值 $f(Q_i', n_i')$	残差 $f(Q_i', n_i')-\eta$
0.375	66.5	0.88	0.878	−0.002
0.384	60.5	0.88	0.874	−0.006
0.393	53	0.84	0.837	−0.003
0.397	48.3	0.8	0.797	−0.003
0.372	78.1	0.8	0.796	−0.004
0.379	75	0.82	0.823	0.003
0.385	71.5	0.84	0.843	0.003
0.393	66.5	0.86	0.857	−0.003
0.398	63	0.86	0.857	−0.003
0.405	57	0.84	0.842	0.002
0.408	53.5	0.82	0.823	0.003
0.411	51	0.8	0.805	0.005

下面给出二元多项式曲面拟合的通用程序.

```
100  DIM X(100), Y(100), Z(100), Z1(100)
110  PRINT "n1为二元多项式中X的最高次数，请输入N1的值"
120  INPUT N1
130  PRINT "n2为二元多项式中y的最高次数，请输入N2的值"
140  INPUT N2
150  N0=52:N3=(N1+1)*(N2+1):N4=N3
160  FOR I=1 TO N0
170  READ X(I), Y(I), Z(I)
180  Z(I)=Z(I)/100
190  NEXT I
200  DATA 0.176, 65.5, 80, 0.18, 62.5, 82, 0.188, 55.5, 84, 0.193, 50,
     84, 0.197, 46.3, 82, 0.199, 43.4, 80
210  DATA 0.208, 70.2, 80, 0.212, 68, 82, 0.216, 65.4, 84, 0.221, 61.5,
     86, 0.236, 49.5, 86, 0.237, 47.5, 84, 0.239, 45.5, 82, 0.241, 42.7,80
220  DATA 0.233, 72.5, 80, 0.24, 68.7, 84, 0.251, 62.5, 88, 0.256, 59.2,
     89, 0.26, 56, 89, 0.264, 53.1, 88, 0.268, 47.4, 84, 0.27, 43.5, 80
230  DATA 0.274, 76.3, 80, 0.281, 73,84, 0.291, 68.7, 88, 0.299, 64.5,
     90, 0.31, 58.4, 90, 0.317, 53.4, 88, 0.32, 48.1, 84, 0.322, 44.7, 80
240  DATA 0.304, 78.6, 80, 0.311. 73,84, 0.322, 71,88, 0.33, 66.7, 90,
     0.343, 60, 90, 0.349, 54.3, 88, 0.354, 49, 84, 0.356, 45, 80
250  DATA 0.347, 79.5, 80, 0.358, 75.5, 84, 0.375, 66.5, 88, 0.384,
     60.5, 88, 0.393, 53,84, 0.397, 48.3, 80
260  DATA 0.372, 78.4, 80, 0.379, 75, 82, 0.385, 71.5, 84, 0.393, 66.5,
```

```
      86, 0.398, 63, 86, 0.405, 57, 84, 0.408, 53.5, 82, 0.411, 51, 80
270 DIM A(N0, N0+1), A1(N0, N0+1), B(N0+1), B1(N0+1)
280 FOR L=1 TO N0
290 R=1
300 FOR J=1 TO N2+1:FOR I=1 TO N1+1
310 K=I+R-1
320 B(K)=X(L)^(I-1)*Y(L)^(J-1)
330 NEXT I
340 R=K+1
350 NEXT J
360 FOR I=1 TO N3:FOR J=1 TO N4
370 A1(I, J)=B(I)*B(J)
380 NEXT J:NEXT I
390 FOR I=1 TO N3:FOR J=1 TO N4
400 A(I, J)=A(I, J)+A1(I, J)
410 NEXT J:NEXT I
420 FOR I=1 TO N3
430 B1(I)=B(I)*Z(L)
440 A(I, N3+1)=A(I, N3+1)+B1(I)
450 NEXT I
460 NEXT L
470 PRINT "正规方程相应矩阵计算完毕"
480 N=N3-1
490 FOR K=1 TO N+1
500 FOR IO=K TO N+1
510 WC=ABS(A(IO, K))
520 IF WC>0 THEN 550
530 NEXT IO
540 PRINT "正规方程无解":END
550 IF IO=K THEN 610
560 FOR J=K TO N+2
570 T=A(K, J)
580 A(K, J)=A(IO, J)
590 A(IO, J)=T
600 NEXT J
610 T=1/A(K, K)
620 FOR J=K TO N+1
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
630 A(K, J+1)=T*A(K, J+1)
640 NEXT J
650 IN=N
660 IF K=N+1 THEN 730
670 FOR I=IO TO IN
680 FOR J=K TO N+1
690 A(I+1, J+1)=A(I+1, J+1)-A(I+1, K)*A(K, J+1)
700 NEXT J
710 NEXT I
720 NEXT K
730 FOR IK=2 TO N+1
740 I=N+2-IK
750 FOR J=I TO IN
760 A(I, N+2)=A(I, N+2)-A(I, J+1)*A(J+1, N+2)
770 NEXT J
780 NEXT IK
790 PRINT "以下为多项式拟合系数"
800 FOR I=1 TO N+1
810 LPRINT A(I, N+2)
820 NEXT I
830 PRINT
840 FOR L=1 TO N0
850 R=1
860 FOR J=1 TO N2+1:FOR I=1 TO N1+1
870 K=I+R-1
880 Z1(L)=Z1(L)+A(K, N+2)*X(L)∧(I-1)*Y(L)∧(J-1)
890 NEXT I
900 R=K+1
910 NEXT J
920 NEXT L
930 PRINT "以下为拟合结果"
940 FOR I=1 TO N0
950 LPRINT X(I), Y(I), Z(I), INT(Z1(I)*1000)/1000, UNT( (Z1(I)
    -Z(I))*1000)/1000
960 NEXT I
```

程序中的主要标识符为

X、Y、Z——均为一维数组，存放给出数据的自变量及函数值；

Z1——一维数组，存放拟合值；

N0——数据组数；

B——一维数组，是形成正规方程时的辅助数组；

A1——二维数组，形成正规方程系数矩阵M中元素的辅助数组；

B1——一维数组，形成正规方程右边列向量T中元素的辅助数组；

A——二维数组，存放矩阵M及T中元素，程序结束时，最后一列存放待定系数的值。

程序的结构基本上与曲线拟合程序相同，使用程序时，只要在程序中的DATA语句中填入所拟合数据，并给出N_0值，然后按程序要求输入拟合多项式的最高项次数即可。应用该通用程序可将水轮机的各类二元曲线转化成解析表达式。

第五节 曲线的平滑方法

在设计计算中常常会遇到这样的问题，当用经过某些计算得到的数据绘制曲线时，发现这些数据所对应的平面坐标系中的点构不成光顺曲线，如图3-6所示。

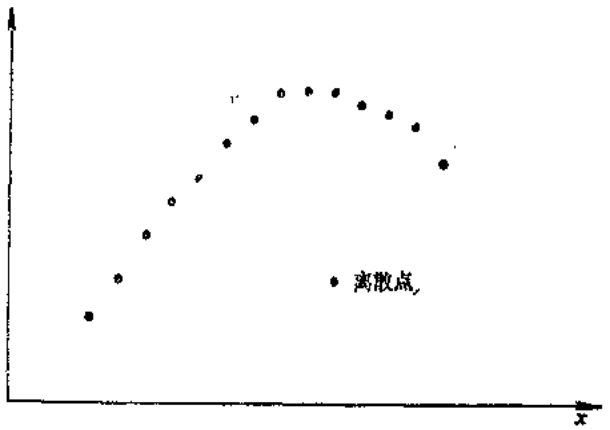


图 3-6 离散点图

在这种情况下，可采用最小二乘曲线拟合法对这些数据进行拟合，利用拟合值形成光顺曲线，这种处理方法的主要缺点是计算量偏大。

一般情况下，可利用式（3-60）的称之为五点三次平滑公式对数据进行修正，使这些数据能够形成光顺曲线。式（3-60）是利用三次多项式对给出的等距五点进行曲线拟合后再加以整理得到的。

设给出五点为(x_{-2}, y_{-2})、(x_{-1}, y_{-1})、(x_0, y_0)、(x_1, y_1)和(x_2, y_2)，且有$x_i-x_{i-1}=h(i=-1, 0, 1, 2)$，用五点三次平滑公式

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$
\begin{cases}
\bar{y}_{-2}=\dfrac{1}{70}(69y_{-2}+4y_{-1}-6y_0+4y_1-y_2)\\
\bar{y}_{-1}=\dfrac{1}{35}(2y_{-2}+27y_{-1}+12y_0-8y_1+2y_2)\\
\bar{y}_0=\dfrac{1}{35}(-3y_{-2}+12y_{-1}+17y_0+12y_1-3y_2)\\
\bar{y}_1=\dfrac{1}{35}(2y_{-2}-8y_{-1}+12y_0+27y_1+2y_2)\\
\bar{y}_2=\dfrac{1}{70}(-y_{-2}+4y_{-1}-6y_0+4y_1+69y_2)
\end{cases}
\qquad (3\text{-}60)
$$

对$y_i(i=-2,\ -1,\ 0,\ 1,\ 2)$进行修正，修正后的值为$\bar{y}_i(i=-2,\ -1,\ 0,\ 1,\ 2)$。

当给出数据较多时，为对称起见，除两端点附近外，都用式（3-60）中第三式进行平滑计算。式（3-60）中不涉及x及h，因而具有计算简便的特点，下面给出用式(3-60)对数据进行平滑的通用程序。

```
100  '数据的五点三次平滑程序'
110  PRINT "N为平滑点数，请输入N的值(N>=5)":INPUT N
120  DIM A(N), B(N)
130  PRINT "请按序输入所平滑的数据"
140  FOR I=1 TO N
150  PRINT "第"I"个数据=":INPUT B(I)
160  NEXT I
170  A(1)=(69*B(1)+4*(B(2)+B(4))-6*B(3)-B(5))/70
180  A(2)=(2*(B(1)+B(5))+27*B(2)+12*B(3)-8*B(4))/35
190  FOR I=3 TO N-2
200  A(I)=(-3*(B(I-2)+B(I+2))+12*(B(I-1)+B(I+1))+17*B(I))/35
210  NEXT I
220  A(N-1)=(2*(B(N-4)+B(N))-8*B(N-3)+12*B(N-2)
     +27*B(N-1))/35
230  A(N)=(-B(N-4)+4*(B(N-3)+B(N-1))-6*B(N-2)
     + 69*B(N))/70
240  PRINT "以下输出平滑结果"
250  FOR I=1 TO N
260  PRINT "原值="B(I), "平滑后的值="A(I)
270  NEXT I
```

程序的主要标识符是

B——一维数组，所要平滑的数据中的函数值；

A——一维数组，平滑后的函数值。

用该程序对表3-8中数据进行平滑，平滑后的数据也列于表3-8中。

表 3-8　　数 据 平 滑 计 算 结 果

序　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x_i	0	1	2	3	4	5	6	7	8
y_i	54	145	227	359	401	342	259	112	65
$\bar{y}_i$	56.8	133.6	244.1	347.9	393.5	352	241.5	123.7	62.1

根据经验得知，当平滑一次后平滑结果不理想的时候，可再用平滑公式式（3-60）对平滑后的数据进行平滑，这样可获得较满意的结果。在水电站的计算机辅助设计中，本节所述平滑方法一般用于绘制曲线的场合。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第四章　图形的计算机处理

图形不仅是工程设计中常用的技术资料，而且是工程设计成果的主要组成部分，因此，计算机图形处理必然是工程CAD的重要环节。计算机图形处理包括的内容很广，这里主要介绍图形输入计算机的方法、通用绘图程序的设计原理、工程图形自动绘制程序的设计方法以及计算机辅助图形设计等基本知识。

第一节　图形输入计算机的方法

在工程计算机辅助设计中，需要把一些图形输入计算机，供设计中引用。图形输入计算机可采用不同的方法，在第一章里，曾简介了图形输入的专用设备，如光笔、图形输入板等，这些设备虽然工作方式不同，但原理是相同的，即把图形数字化，把表示图形的坐标参数输入计算机。另一种方法是首先人为地将图形数字化，然后，再把代表图形的数据输入计算机。本节重点介绍后一种方法。工程上应用的图形有曲线图、工程或设备结构图、工程设备布置图、系统原理图等，各类图形有不同的特点，图形参数的表示方法也不同，应根据图形的特点，采用适正的方法把图形输入计算机。

一、图形的离散点输入法

在第二章中，我们曾用离散点法处理各种数据曲线，通过曲线的离散处理，把曲线所表达的参数及其函数关系输入计算机。这里，我们用离散点法处理各种图形，通过在图形的图素上直接取离散点把连续的图形变成一系列按顺序排列的点，把离散点的坐标参数输入计算机。这种方法可用于各类图形的计算机输入，尤其适用于自由曲线的计算机处理。

图4-1为某水轮机转轮轴面投影，该图形中的上冠线、叶片进出口边及下环曲线均为自由曲线。因此，适合用离散点法把图形输入计算机。以图4-1为例说明离散点法输入图形的步骤。

1）把图形分割为若干部分，每一部分都应是连续的光滑曲线。本例中，可把图形分为上冠线、叶片进口边曲线、出口边曲线和下环曲线四部分，由于图形呈对称形，所以可只输入中心线一侧的参数。

2）把图形放在平面直角坐标系中，在各部分分割曲线上取离散点，取点时注意保证离散点应能保持曲线的几何形状，在曲线曲率变化大处多取些点，直线部分只取两端点即可。

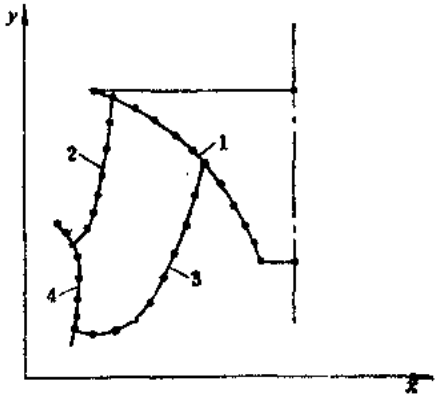


图 4-1　图形离散法示意图

3）为每部分分割的曲线编号，以变量I表示各部分曲线的序号，以变量J表示各曲线上离散点的序号，各点的横坐标与纵坐标参数分别用二维下标变量X(I,J)和Y(I,J)表示，每条曲线上取的点数用一维下标变量M(I)表示。在坐标里中查取各离散点的坐标参数，并赋值给规定的变量，然后，把数组X(I,J)、Y(I,J)和M(I)输入计算机。

按离散点法输入的图形，可用通用绘图程序重新绘制出来。

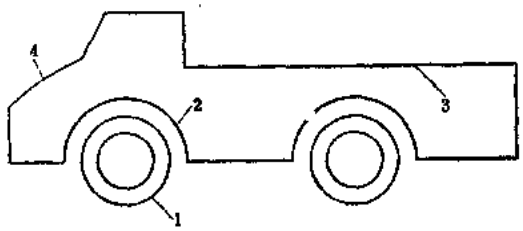


图 4-2 构成汽车外形图的图素

1—圆；2—圆弧；3—直线；4—曲线

二、按图素输入图形的方法

任何图形都是由不同的图素所构成的，构成图形的基本图素有直线、圆、圆弧、函数曲线、自由曲线。例如，图4-2所示的汽车外形示意图，就是由直线、圆、圆弧、自由曲线四种图素所组成的。

用图素输入法输入图形时，各种图素的输入方法如下：

1）直线：输入线段端点的坐标。例如，端点1的坐标用一维下标变量$XL_1(I)$、$YL_1(I)$表示，端点2的坐标用$XL_2(I)$、$YL_2(I)$表示，I为线段的序号，把数组$XL_1(I)$、$YL_1(I)$、$XL_2(I)$、$YL_2(I)$输入计算机。

2）圆：输入圆心坐标与半径值。例如，圆心坐标用XC(I)、YC(I)表示，半径用RC(I)表示，I为图形中圆图素的序号，把各圆的参数以数组XC(I)、YC(I)、RC(I)的形式输入计算机。

3）圆弧：输入圆心坐标、半径及圆弧起点与终点的圆心角。例如，以XA(I)、YA(I)表示圆心坐标，用RA(I)表示半径，用$XT_1(I)$、$XT_2(I)$分别表示圆弧的始终角，下标I为图形中圆弧图素的序号，把表示圆弧参数的数组XA(I)、YA(I)、RA(I)、$XT_1(I)$、$XT_2(I)$顺序输入计算机。

4）函数曲线：输入曲线自变量的定义域及函数的表达式。例如，当曲线为抛物线时，输入曲线始终点的X坐标及抛物线方程。

5）自由曲线：在曲线上取离散点，用二维下标变量X(I,J)、Y(I,J)表示离散点的坐标参数，I为曲线的序号，J为曲线上离散点的序号，用一维变量M(I)表示某曲线I上离散点的数目，把数组X(I,J)、Y(I,J)与M(I)输入计算机。

用图素输入法输入计算机的图形，可利用计算机绘制直线、圆、圆弧的基本功能在显示器屏幕上显示或通过绘图仪绘出。以图4-2所示的图形为例，用图素输入法所编制的图形输入及屏幕显示程序如下：

```
10  '输入圆图素参数:圆心与半径'
20  FOR I=1 TO 4:READ XC(I),YC(I),RC(I):NEXT I
30  DATA 100,200,10,100,200,20,200,200,10,200,200,20
40  '输入圆弧图素参数:圆心，半径与始、终角'
50  FOR I=1 TO 2:READ XA(I),YA(I),RA(I),XT1(I),XT2(I):NEXT
60  DATA 100,200,30,0,3.1416,200,200,30,0,3.1416
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
70 '输入直线图素参数:起点终点坐标'
80 FOR I=1 TO 9:READ X1(I),Y1(I),X2(I),Y2(I):NEXT
90 DATA 80,150,100,120,100,120,140,120,140,120,140,150
100 DATA 140,150,280,150,280,150,280,200,280,200,230,200
110 DATA 170,200,130,200,70,200,40,200,40,200,40,170
180 '输入自由曲线图素参数:离散点坐标'
190 FOR I=1 TO 5:READ X(I),Y(I):NEXT I
200 DATA 40,170,50,162,60,156,70,152,80,150
210 '图形输入完毕'
220 '屏幕显示图形'
230 SCREEN 2,0:COLOR 2,0:LINE(10,80)-(360,300),4,B
240 '画圆'
250 FOR I=1 TO 4:CIRCLE(XC(I),YC(I)),RC(I),,,,1.05:NEXT
260 '画圆弧'
270 FOR I=1 TO 2:CIRCLE(XA(I),YA(I)),RA(I),,XT1(I),XT2(I),1.05
280 NEXT I
290 '画直线'
300 FOR I=1 TO 9:LINE(X1(I),Y1(I))-(X2(I),Y2(I)):NEXT I
310 '画曲线'
320 FOR I=1 TO 4:LINE(X(I),Y(I))-(X(I+1),Y(I+1)):NEXT I
330 LOCATE 15,5:PRINT"1--圆 2--圆弧 3--直线 4--直线
```

程序输出的结果如图4-3所示。

三、用基本图元输入图形的方法

工程上的许多图形是由一些不同的专业性基本图形单元构成的，这种基本图形单元称为图形部件或简称为图元。图元是单个图素的组合，例如电路图上的二极管、三极管、电阻、电容、运算放大器等，机械制图的齿轮、轴承、螺钉等，水电站油、气、水系统图上的阀门、表计、水泵、油泵等，均属于这样的基本图元。图元输入法是以一个符号代表一种基本图元输入计算机，这样就可以大大减少输入计算机的数据量，也为计算机绘制和引用图形提供方便。用图元输入法输入图形的基本方法与步骤如下：

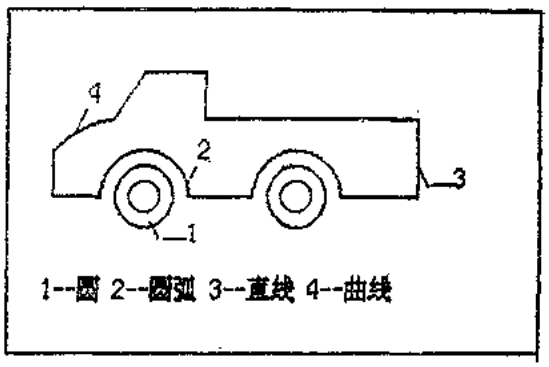


图 4-3 屏幕显示图素输入法输入的图形

（1）确定组成图形的基本图元并为每种图元规定一个变量名或字符串 例如，水电站的蜗壳取水系统简图是由滤水器、水平绘制的阀门、竖向绘制的阀门与管道等基本图元

所组成，我们可以为滤水器图元取代码LS$，为横向阀门取代码V1$、竖向阀门取代码V2$，为几段连接管道取代码LIN1$、LIN2$、LIN3$等。

（2）定义基本图元　给定基本图元的参数，并根据基本绘图指令的格式定义图元的画法。以BASIC语言屏幕绘图为例，按照绘图指令DRAW的格式定义一个代码为SQ$、边长为20绘图单位的正方形图元时，则SQ$＝"u20r20d20l20"，用DRAW SQ$指令可在屏幕上显示出定义的正方形。同样方法，横向阀门图元V1$＝"d8m+10,−8d8m−10,−8"，DRAW V1$可在屏幕上绘出横向阀门图元。当然，也可以利用其它绘图指令定义基本图元，例如用多种绘图指令的组合，定义包括多种图素的更复杂图元。

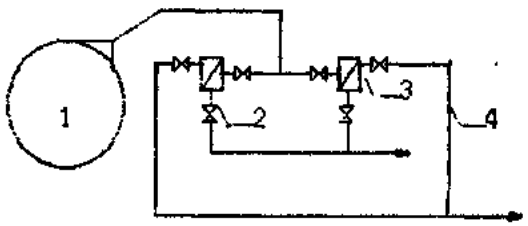
（3）输入基本图元　图元在图形中都是有一定位置的，为了输入图元，要确定图元的位置坐标，把这些位置坐标以数组形式输入计算机。在绘制图形时，先把坐标点移动到图元的应在位置上，再用绘图指令绘出图元。例如，假设横向阀门在图形中位置坐标为(X1,Y1)，应用DRAW "bm＝X1; ,＝Y1"指令可把绘图坐标点移到(X1,Y1)，再用DRAW V1$指令就可以在(X1,Y1)位置上绘出横向阀门图元。根据这样的原理，输入基本图元实际上就是把图元代码及其位置坐标输入计算机。

下面是根据图元输入法编写的输入蜗壳取水系统简图与显示图形的源程序。程序运行结果在屏幕上显示了输入的图形，如图4-4所示。

```
10  '图形输入程序，参数按BASIC绘图指令DRAW要求定义'
20  '输入圆的参数（圆心坐标及半径）'
30  READ XC,YC,RC:DATA 100,180,40
40  '输入滤水器图元LS$及位置坐标'
50  FOR I=1 TO 2:READ XS(I),YS(I):NEXT I:DATA 202,150,292,150
60  LS$="D20L14U20R14M-14,+20"
70  '输入水平阀门图元V1$及位置坐标'
80  FOR I=1 TO 4:READ XV(I),YV(I):NEXT I
90  DATA 170,150,300,150,210,156,260,156
100 V1$="D8M+10,-8D8M-10,-8"
110 '输入竖阀门图元V2$及位置坐标'
120 FOR I=1 TO 2:READ VX(I),VY(I):NEXT I
130 DATA 190,180,280,180
140 V2$="R8M-8,+10R8M-8,-10"
150 '输入表示管道的直线段:LIN1$,LIN2$,LIN3$,LIN4$'
160 LIN1$="BM100,140R30D17U17M+30,-20R80D40R19BR11
        R9BR12BU6R10BR10R40D96"
170 LIN2$="BM240,160L19BL11L9BM-12,-6L10BL10L10D96
        R240M-8,-2BD4M+8,-2"
180 LIN3$="BM195,170D10BD10D20R130M-8,-2BD4M+8,-2"
190 LIN4$="BM285,170D10BD10D20"
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
200 '图形输入完毕'
210 '屏幕显示图形程序'
215 SCREEN 2,0:COLOR 2,0
220 '画蜗壳图(圆)'
225 CIRCLE(XC,YC),RC,,,,1.05
230 '画滤水器图元'
235 DRAW"BM=XS(1);,=YS(1);XLS$;BM=XS(2);,=YS(2);XLS$;"
240 '画水平阀门'
245 FOR I=1 TO 4:DRAW"BM=
    XV(I);,=YV(I);XV1$;":NEXT I
250 '画竖向阀门'
255 FOR I=1 TO 2:DRAW"BM=
    VX(I);,=VY(I);XV2$;":NEXT I
260 '画管道(直线)'
265 DRAW"XLIN1$;XLIN2$;XLIN3$;
    XLIN4$;"
270 END
```



1--蜗壳 2--阀门 3--滤水器 4--管路

图 4-4 用图元输入法输入并显示的图形

第二节 计算机绘图的方法与程序设计

一、计算机绘图的方式

在第一章里，曾介绍过计算机的输出设备。在运行CAD软件的计算机系统中，一般都配置普通行式打印机、绘图打印机或X-Y绘图仪，这些设备在系统软件的支持下都具有不同形式的绘图功能。

普通行式打印机是最简单的输出设备，它可以输出各种字符，利用各种高级语言的格式输出语句，还可以用它打印出由离散符号（字符）所组成的图形。在绘图仪问世之前，普通行式打印机曾作为一种打印图形的设备起过重要作用，在60年代著名的美国宇航局（NASA）所公布的文献中，仍用普通行式打印机打印各种数据曲线和简单图形。这种打印图形的方式在目前仍有一定的用途，在计算机系统只配置一台普通行式打印机而没有其它图形输出设备的情况下，可以用这种方式输出简单的图形。另外，有的高级语言本身没有绘图指令，也可以用行式打印机输出一些简单的图表。

绘图打印机是能够输出字符、中文与图形的输出设备，它通过拷贝计算机屏幕映象的方式输出图形。绘图打印机能够输出光滑连续的曲线，可以用来绘制精度较高的图形。绘图打印机绘图的关键是首先要把图形显示在计算机屏幕上，目前广泛使用的绘图BASIC语言，具有屏幕绘图功能。这种方式的绘图精度受计算机图形显示设备的分辨率与打印机性能的限制，显示设备的分辨率越高、打印机的针数越多，绘图的精度就越高。另外，这种绘图方式所输出的图幅受限制，只能输出显示器屏幕所能容纳的图形。

X-Y 绘图仪是一种较高精度的绘图设备，各种型号的绘图仪都配备有一套完整的绘图指令，这些指令一般可用各种高级算法语言直接调用。由于X-Y绘图仪在计算机的控制下模仿人的绘图方式用绘图笔画图，因此，它可以绘制任何复杂的图形。绘图仪所绘图形的图幅仅受绘图板尺寸的限制，大型平板式绘图仪或卷筒式绘图仪可以绘制适合工程设计要求的大型设计图。

二、绘图程序的设计方法

在计算机辅助设计系统软件中，必须有一套性能良好的绘图程序包，才能实现工程设计中图形的自动绘制，绘图程序包要由通用绘图程序与各种专用的绘图程序组成，以便随时调用这些绘图程序绘制需要的图形。通用绘图程序主要用于各种曲线类图形的绘制，同时，又可作为许多专用绘制程序的子程序。设计通用绘图程序时，必须使程序具有下述的内容才能使之具有较好的通用性。

1.绘图数据接口

绘图数据接口主要用来为绘图变量赋值，一般可用二维下标变量X(I,J)、Y(I,J)分别表示图形坐标点的x、y坐标，用一维下标变量M(I)表示某图素上坐标点的数目。在调用通用绘图程序时，首先要给绘图变量X(I,J)、Y(I,J)、M(I)赋值。

2.绘图图幅给定

为了人为控制所绘图形的尺寸，绘图程序中应设有图幅给定语句，一般可用会话方式由键盘输入图幅参数（图形图幅的长与宽）。

3.绘图坐标参数的最大值与最小值的选择

从给定的绘图坐标参数X(I,J)、Y(I,J)中自动选择出X_{max}、X_{min}与Y_{max}、Y_{min}，这些值在绘图坐标变换中要用到。

4.坐标变换

图形自身的坐标系称为用户坐标系，而计算机的显示器屏幕以及X-Y绘图仪等图形输出设备均有自己的坐标系，可称之为绘图坐标系。在计算机绘图时，需要经过坐换变换，把原图形的坐标参数换算为相应的绘图坐标参数才能使用绘图指令把图形绘出。另外，在用户坐标系中，原图形的坐标参数可能是正数，也可能是负数，可能是小数，也可能是数值很大的整数，但绘图设备则要求绘图参数为正整数，因此，坐标变换部分在通用绘图程序中是必不可少的。

5.基本图形绘制

按照坐标变换后的绘图坐标参数，用绘图指令把图形绘出。

6.坐标轴自动绘制

曲线类图形必须有坐标轴相配合才能正确表达其数量关系，其它的图形配上坐标轴可以反映各部分之间的尺寸关系。在通用绘图程序中，要求根据图形的数量关系自动绘出坐标轴线、刻度线并标注上相应的刻度值。

计算机辅助设计系统的专用绘图程序是为绘制各种专业性图形用的，不同的专业性图形有不同的绘图方法，因此，要根据工程设计的需要编制一系列的专用绘图程序，供计算中调用。计算机绘制专业性图形的方法可以看作是对人工绘图过程的模拟，设计专用绘图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

程序时，要把人工作图的复杂过程经过逻辑处理、数学处理，实现作图过程的程序化。例如，可用插值计算代替手工绘图中找交点交线的过程，用数值光滑代替曲线板光滑，用坐标变换或图形参数的矩阵变换解决图形的投影等。灵活运用各种数学方法与程序设计技巧，就可以设计出各种专业性绘图程序，实现计算机自动绘图。

第三节　普通行式打印机通用图形打印程序的设计

普通行式打印机是以逐行逐列打印方式输出字符的，用行式打印机打印图形的原理是，按照图形上离散点的坐标参数，经坐标换算，确定各点在打印机坐标系中的位置（点在打印中所处的行与列），在打印纸的相应位置上打印出某种符号，由这些离散符号构成一幅图形的轮廓。一般高级算法语言都具有控制格式打印语句，因此，可用各种高级语言编写图形打印程序。本节以BASIC语言为例，说明通用图形打印程序的设计方法。

1.绘图的数据

要绘制图形的数据以离散点坐标参数的方式输入计算机。为了能在同一图幅上同时打印出多条不同曲线，图形坐标点的参数要用双下标变量的方式表示。例如，以X(I,J)、Y(I,J)分别表示坐标点的x、y坐标，以M(I)表示曲线I上离散点的数目。在绘图之前，首先要给变量X(I,J)、Y(I,J)和M(I)赋值。在BASIC语言中，可用READ、DATA语句为变量赋值，也可以把计算结果中的图形坐标参数直接赋给绘图变量。用READ、DATA方式为绘图变量赋值的程序如下。

```
10  DIM X(10, 50), Y(10, 50), M(10)
20  FOR I=1 TO M:'图形中共M条曲线'
30  FOR J=1 TO N(I):'曲线I上的坐标点数为N(I)个'
40  READ X(I,J), Y(I,J)
50  NEXT J:NEXT I
60  DATA{数据X(I,J), Y(I,J)}
```

2.图幅的设定

打印机输出的图形的图幅（长与宽），是由打印的图形所占的行数与行宽（列数）所决定的，因此，要通过设定打印的总行数与行宽的方法规定输出图幅的大小。例如，要打印一幅相当于16开本的图形，可设定打印行数为30行、行宽为80列。在BASIC语言中，可用INPUT语句由键盘输入图幅参数，若用变量H_0与L_0分别表示行数与行宽，输入H_0与L_0的语句为

```
70  INPUT "打印图形的行数H0=";  H0
80  INPUT "打印图形的列数L0=";  L0
```

3.图形坐标参数的最大值与最小值的选择

图形坐标参数中x、y方向的最大值（X_{max}、Y_{max}）与最小值（X_{min}、Y_{min}）是重要的控制参数，在绘图坐标变换时要用到这些参数，在坐标轴绘制中也要用到这些参数。在通用绘图程序中，最大值与最小值并不是已知的，因此，要有一段最大值与最小值选择程

序，从绘图参数X(I,J)与Y(I,J)中自动选择出X_{max}、Y_{max}、X_{min}与Y_{min}，选择程序如下：

```
100  XMIN=X(1,1):XMAX=X(1,1):YMIN=Y(1,1):YMAX=X(1,1)
110  FOR I=1 TO M:FOR J=2 TO N(I)
120  IF XMIN>X(I,J) THEN XMIN=X(I,J)
130  IF XMAX<X(I,J) THEN XMAX=X(I,J)
140  IF YMIN>Y(I,J) THEN YMIN=Y(I,J)
150  IF YMAX<Y(I,J) THEN YMAX=Y(I,J)
160  NEXT J:NEXT I
```

4.坐标变换与打印符号定义

原图形的坐标点要经过坐标变换，变换为绘图设备的坐标系中的坐标点才能供设备输出图形。行式打印机的坐标系与常规的直角坐标系不同，它的纵、横坐标分别为自上而下的行坐标与自左而右的列坐标，两坐标系之间的关系如图4-5所示，原图形上某点i的坐标参数x_i、y_i变换到打印机的坐标系L(列)—H(行)中时，把x_i变换为列参数L_i，把y_i变换为行参数H_i，变换关系如下（见图4-5）：

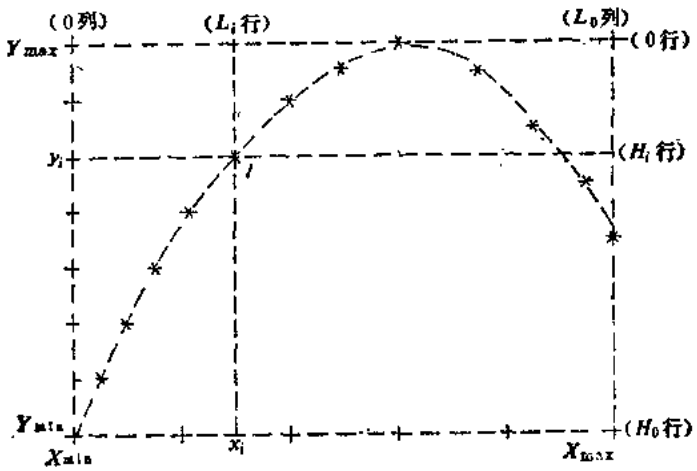


图 4-5　图形坐标系与打印机坐标系

$$L_i=\frac{L_0}{X_{max}-X_{min}}(x_i-x_{min})$$

$$H_i=\frac{H_0}{Y_{max}-Y_{min}}(Y_{max}-y_i)$$

式中　L_0——图幅的行宽；

H_0——图幅的总行数。

如图4-5所示，原图形上的每个坐标点在打印图中均有一个对应的位置，只要按上面的换算式把原图形的坐标参数x_i、y_i换算为打印图形的坐标参数L_i、H_i，则图形坐标点在打印图中的位置就已经确定了。为了从打印机上输出图形，可把打印图中字符位置看作一个由H_0行与L_0列所组成的矩阵，并用字符串变量G$(H_0,L_0)表示这个矩阵，在有图形坐

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

标点之处，把该位置的G$(I, J)定义成某种可见符号，例如*、#、A、B等，在没有图形坐标点之处，把该位置的G$(I, J)定义为空格，这样，就进一步在计算机内存中形成了一幅图形的映象。形象地讲，这种方法就象在一个广场上，用身着不同颜色服装的人群排摆图案一样。图形坐标转换与打印符定义的程序如下：

```
200  DIM G$(40, 100):A$="ABCDEF"
210  FOR H=0 TO H0:FOR L=0 TO L0
220  G$(H, L)=" "
230  NEXT L:NEXT H
240  FOR I=1 TO M:FOR J=1 TO N(I)
250  H=INT((YMAX-Y(I, J))/(YMAX-YMIN)*H0+.5)
260  L=INT((X(I, J)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*L0+.5)
270  G$(H, L)=MID$(A$, I, 1)
280  NEXT J:NEXT I
```

上段程序中，第200句把整个打印图幅用二维字符串变量G$(40, 100)表示，并定义字符串A$，A$中的字符是打印图形要使用的符号；第210～230句先把图幅内所有的位置定义为空格；第240～280句进行坐标变换，并为每条曲线上的点定义一种打印符，I=1时表示第1条曲线，这时G$(H, L)等于A$中的第一个字符“A”；同理，I=2时表示第2条曲线，G$(H, L)等于A$中的第二个字符“B”。依次类推，不同序号的曲线用不同的符号表示，以示区别。

5.图形的打印输出

上述的计算只是在计算机内存中形成了一幅图形的映象，还需要把图形显示到计算机屏幕上并通过打印机打印到纸面上才能得到实在的图形。应用算法语言的字符输出与控制格式打印语句可以实现图形的显示与打印输出，由于图形上各点在打印图中的位置与打印符已在矩阵G$(H, L)中定义好，只要输出G$(H, L)就可获得图形，图形显示与打印的程序为

```
300  FOR H=0 TO H0:FOR L=0 TO L0
310  PRINT TAB(L); G$(H, L);
320  LPRINT TAB(L); G$(H, L);
330  NEXT L:NEXT H
```

上述程序中语句300～330通过二重循环把图幅内的所有字符输出，第310句为屏幕显示图形的语句，第320句为打印输出语句，凡有图形坐标点的地方输出一个规定的可见字符，无图形坐标点的地方输出空格，当把G$(H, L)中定义的字符全部输出时，由离散点所组成的图形就显现出来了。

6.坐标轴的定义与输出

如图4-5所示，坐标轴也是由离散的符号所组成的，横轴由符号“-”与“+”表示，纵轴由符号“1”与“+”表示，用上述定义图形打印符的方法同样可以定义坐标轴。若以“+”表示坐标轴的刻度，在刻度处打印出相应的刻度值，就能表达图形的数量关系。

若横坐标轴某刻度对应的列坐标为L_i、纵坐标轴某刻度所对应的行坐标为H_j，则L_i所对应的刻度值x_i与H_j所对应的刻度值y_j可用下列的公式计算。

$$x_i=\frac{L_i}{L_0}(X_{max}-X_{min})+X_{min}$$

$$y_j=\frac{H_0-H_j}{H_0}(Y_{max}-Y_{min})+Y_{min}$$

以常规直角坐标系为例，假如要在图形图幅的最后一行打印x轴，则x轴的定义与打印可用下面一段程序。

```
400  A$="1+-"
410  FOR L=10 TO L0
420  G$(H0, L)=MID$(A$, 3, 1)
430  NEXT L
440  FOR L=10 TO L0 STEP 10
450  G$(H0, L)=MID$(A$, 2, 1)
460  NEXT L
470  FOR L=10 TO L0
480  PRINT TAB(L); G$(H0, L);
490  NEXT L
500  FOR L=10 TO L0 STEP 10
510  X=INT(((L-10)/L0*(XMAX-XMIN)+XMIN)*100)/100
520  PRINT TAB(L); X;
530  NEXT L
```

上段程序中，第400句定义一个字符串，字符串中的字符是组成坐标轴所用的符号；第410～430句定义x轴为一行由“-”号组成的横线；第440～460句在横线上每间隔10列定义一个“+”表示刻度；第470～490句打印输出x轴线；第500～530句打印x轴刻度值。按照同样的方法，可以定义与打印y坐标轴。

以上分别介绍了通用图形打印程序的结构与各部分的设计方法，将上述各部分有机地联系在一起就构成了图形打印程序。在程序设计中要注意一个问题，由于行式打印机以逐行逐列扫描方式输出字符，因此，图形符号、坐标轴、刻度值必须同时输出，不可能先打印完图形再返回来打印坐标轴与刻度值，这就要求图形与坐标轴的符号同时定义在同一个G$(H, L)字符矩阵中，并同时输出G$(H, L)中的所有字符。下面是通用图形打印的BASIC源程序与用该程序所打印的正弦、余弦曲线。使用该程序时，只要输入图形中曲线的条数M、每条曲线上的坐标点数N(I)，再用赋值语句为图形坐标变量X(I, J)、Y(I, J)赋值，就可以调用该程序绘制任何形状的图形。

```
10  ·图形数据赋值给X(I, J), Y(I, J)·
20  M=2:N(1)=25:N(2)=25
30  DIM X(5, 50), Y(5, 50)
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
40  FOR J=1 TO 25
50  X(1, J)=6.2832/24*(J-1):X(2,J)=X(1, J)
60  Y(1, J)=SIN(X(1, J)):Y(2,J)=COS(X(2, J))
70  NEXT J
80  GOSUB 100
90  END
100 '通用图形打印程序'
110 INPUT"图幅行数H0="; H0
120 INPUT"图幅行宽L0="; L0
130 '选择Xmin, Xmax, Ymin, Ymax'
140 XMIN=X(1, 1):XMAX=X(1, 1):YMIN=Y(1, 1):YMAX=X(1, 1)
150 FOR I=1 TO M:FOR J=2 TO N(I)
160 IF XMIN >X(I, J) THEN XMIN =X(I, J)
170 IF XMAX<X(I, J) THEN XMAX=X(I, J)
180 IF YMIN >Y(I, J) THEN YMIN =Y(I, J)
190 IF YMAX<Y(I, J) THEN YMAX=Y(I, J)
200 NEXT J:NEXT I
210 '坐标变换与打印符定义'
220 DIM G$(40, 100):A$ ="-1+ABCDEF"
230 FOR H=0 TO H0:FOR L=0 TO L0+10
240 G$(H, L)=" "
250 NEXT L:NEXT H
260 FOR H=0 TO H0 STEP 5:FOR L=0 TO L0+10
270 G$(H, L)=MID$(A$, 1, 1)
280 NEXT L:NEXT H
290 FOR H=0 TO H0:FOR L=0 TO L0+10 STEP 10
300 G$(H, L)=MID$(A$, 2, 1)
310 NEXT L:NEXT H
320 FOR H=0 TO H0 STEP 5
330 FOR L=0 TO L0+10 STEP 10
340 G$(H, L)=MID$(A$, 3, 1)
350 NEXT L:NEXT H
360 DEF FNH(Y)=INT((YMAX-Y)/(YMAX-YMIN)*H0+0.5)
370 DEF FNL(X)=INT((X-XMIN)/(XMAX-XMIN)*L0+0.5)+10
380 FOR I=1 TO M:FOR J=1 TO N(I)
390 H=FNH(Y(I, J)):L=FNL(X(I, J)):G$(H, L)=MID$(A$, I+3, 1)
400 NEXT J:NEXT I
```

```
410 FOR I=0 TO H0
420 '图形打印输出'
430 YY=INT(((H0-I)/H0*(YMAX-YMIN)+YMIN)*1000)/1000
440 IF I/5=INT(I/5) THEN PRINT TAB(2); YY;:LPRINT TAB(2); YY;
450 FOR J=10 TO L0+10
460 PRINT TAB(J); G$(I, J); :LPRINT TAB(J); G$(I, J);
470 NEXT J
480 NEXT I
490 FOR J=10 TO L0+10 STEP 10
500 XX=INT(((J-10)/L0*(XMAX-XMIN)+XMIN)*100+.5)/100
510 PRINT TAB(J-2); XX; :LPRINT TAB(J-2); XX;
520 NEXT J
```

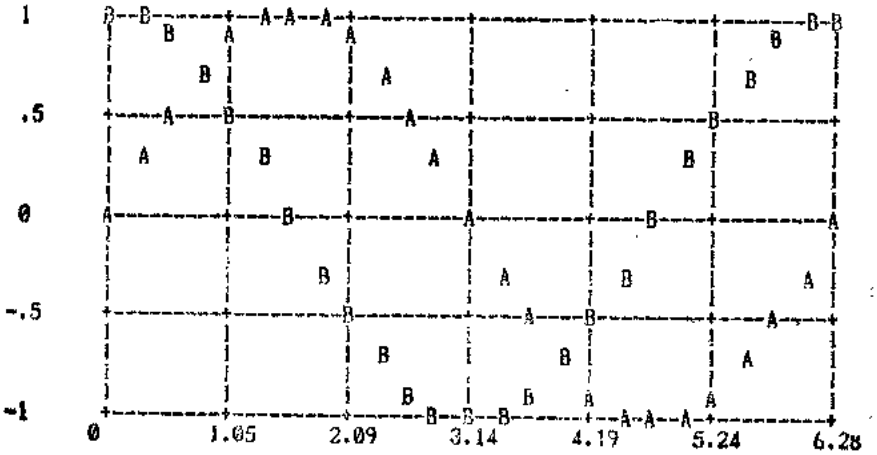


图 4-6 通用打印图形程序输出的曲线图

第四节 BASIC语言屏幕绘图通用程序的设计

目前许多微机具有BASIC语言屏幕绘图功能，常用的APPLE微机、IBM微机及其各种兼容机等，都可以绘图，只是不同微机的绘图指令不尽相同．这里以IBM微机及其兼容机为例，介绍BASIC语言屏幕绘图程序的设计．

一、BASIC语言的绘图方式与基本绘图指令

一般BASIC语言的绘图方式是首先把图形显示在计算机的显示器屏幕上，再利用绘图打印机输出屏幕图形的硬拷贝．不同版本的BASIC语言具有不同的绘图功能，基本BASIC通常只具有绘制直线的功能，而扩展BASIC（如BASICA、GWBASIC等）则具有绘点、直线、矩形、圆弧等功能．以常用的BASICA为例，其基本绘图指令如下：

1.画点指令

语句格式：PSET (X,Y) [,COLOR]

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

其中X、Y为绘图点的屏幕坐标，参量COLOR为画点所用的颜色，在配备彩色显示器的微机上，COLOR取值0～7（或0～16），一般以0表示黑色，其它数值分别代表不同的颜色。执行该指令可在屏幕坐标点（X,Y）位置画出一个点。

2.画直线指令

语句格式：LINE（X_1,Y_1）-（X_2,Y_2）[,COLOR]

其中（X_1,Y_1）和（X_2,Y_2）分别为直线段的起点和终点的坐标，COLOR为直线段的颜色，取值范围同上面指令。执行此语句，可在屏幕坐标点（X_1,Y_1）和（X_2,Y_2）间画一条直线段。

3.画矩形指令

语句格式：LINE（X_1,Y_1）-（X_2, Y_2）, [COLOR][,B]

其中（X_1,Y_1）与（X_2,Y_2）为矩形对角线坐标，COLOR同上面指令，B参数表示画的图形为矩形。

4.画椭圆弧（或圆弧）指令

语句格式：CIRCLE（X,Y）, rL, COLOR[,start,end[,aspect]]]

其中（X,Y）是椭圆圆心坐标，r是半径（主轴），COLOR参数同上面指令；start,end是弧线起始与终止的圆心角，取值-2π～2π；aspect为椭圆横轴半径对纵轴半径的比率，aspect＝Y轴半径/X轴半径，当aspect取不同值时，可画出椭圆弧或圆弧。

以上是BASIC语言几个主要的绘圆指令，除此之外，还有其它一些绘图指令，例如DRAW string指令，其使用方法可参考BASIC手册。

二、显示器屏幕坐标系统与屏幕分辨率

计算机的显示器屏幕一般可在两种方式下工作，即文本方式和图形显示方式，在文本方式下，显示器屏幕可以显示文本文件，包括各种字母、数字与运算符，这种方式主要用于程序列表和显示计算结果。在图形显示方式下，显示器屏幕可以显示图形信息。屏幕显示出的图形是由许多小点构成的，这些小点是最小的图形单位，一般称之为“象元”或“绘图点”。为了确定绘图点在屏幕上的位置，显示器规定了自己的坐标系统，该坐标系统以屏幕左上角为原点，横坐标自原点起由左向右为正方向，纵坐标自原点起由上向下为正方向。因此，屏幕坐标系统与常规的直角坐标系不同，它的横轴与常规坐标系相同，而纵轴与常规坐标系相反。

显示器屏幕显示图形的精度与屏幕的分辨率有关，分辨率越高，显示的图形越精确。屏幕分辨率用屏幕所显示的绘图点的数量表示，一般的CRT显示器在计算机系统的控制下可以在低分辨率、中分辨率、高分辨率三种状态下工作。

（1）低分辨率　整个显示器屏幕显示320×200个绘图点，即水平方向有320个点，垂直方向有200个点，在BASIC状态下SCREEN 1指令可把屏幕置于低分辨率状态。

（2）中分辨率　整个显示器屏幕显示640×200个绘图点，即水平方向有640个点，垂直方向有200个点，在BASIC状态下SCREEN 2指令可把屏幕置于中分辨率状态。

（3）高分辨率　整个显示器屏幕显示640×400个绘图点，即水平方向有640个点，垂直方向有400个点，切换计算机上的显示器控制开关可置显示器工作在高分辨率状态，

只有配置640×400dots显示器及显示卡时才具有这种工作状态。

为适应计算机辅助设计的需要，世界各国已研制出超高分辨率显示器，例如日本某公司研究的20英寸显示器可显示2000×2000个绘图点，美国Tektronix公司的Tek1010存储管图形显示器其分辨率可达4096×4096个绘图点。但这里以普通640×400dots显示器为例，说明屏幕绘图程序的设计。

三、屏幕绘图通用程序的设计

屏幕绘图通用程序仍按本章第二节中叙述的原理设计。

1.图形坐标变量赋值

图形坐标点的参数用二维下标变量X(I,J)、Y(I,J)表示，并以变量N(I)表示各条曲线上的坐标点数，下标I表示图形中某曲线的序号，J表示某曲线上坐标点的序号，用赋值语句为X(I,J)、Y(I,J)、N(I)赋值。

2.图幅给定

屏幕绘图的图幅由屏幕绘图点参数L_0与H_0决定，L_0表示图形的宽（水平方向绘图点数），H_0表示图形的长（垂直方向绘图点数），在中分辨率状态时$L_0 \leqslant 639$，$H_0 \leqslant 199$；在高分辨率状态时，$L_0 \leqslant 639$，$H_0 \leqslant 399$。在BASIC状态下，可用INPUT语句键盘输入L_0与H_0值。

3.图形坐标参数中的最大值与最小值选择

从图形坐标参数X(I,J)、Y(I,J)中自动选择X_{max}、Y_{max}、X_{min}、Y_{min}，方法见本章第三节中所述。

4.坐标变换

把原图形的坐标点换算为显示器屏幕的绘图坐标点才能使用绘图指令绘出图形。

显示器屏幕坐标系与用户坐标系的关系如图4-7所示。若图形上某点在用户坐标系中的坐标参数为X(I,J)、Y(I,J)，根据两坐标系之间的关系可求出该点在屏幕坐标系中的坐标参数L(I,J)、H(I,J)。当给定的绘图图幅为$L_0 \times H_0$(dots)，并且要求用户坐标轴的x轴距屏幕左边框x_0(dots)、y轴最高点距屏幕上边框y_0(dots)时，两坐标系之间的换算式如下：

$$L(I,J)=L_0/(X_{max}-X_{min})\times[X(I,J)-X_{min}]+x_0$$

$$H(I,J)=H_0/(Y_{max}-Y_{min})\times[Y_{max}-Y(I,J)]+y_0$$

按照上述换算关系，可把图形上的所有坐标点换算为屏幕绘图坐标点，具体程序如下：

```
100  DIM X(10,50),Y(10,50)
110  FOR I=1 TO M:"共M条曲线"
120  FOR J=1 TO N(I):"曲线I上有N(I)个点"
130  L(I,J)=L0/(XMAX-XMIN)*(X(I,J)-XMIN)+X0
140  H(I,J)=H0/(YMAX-YMIN)*(YMAX-Y(I,J))+Y0
150  NEXT J:NEXT I
```

5.图形的屏幕显示

经坐标变换后，已把原图形上各点转换为屏幕坐标系的点，用绘直线指令LINE

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

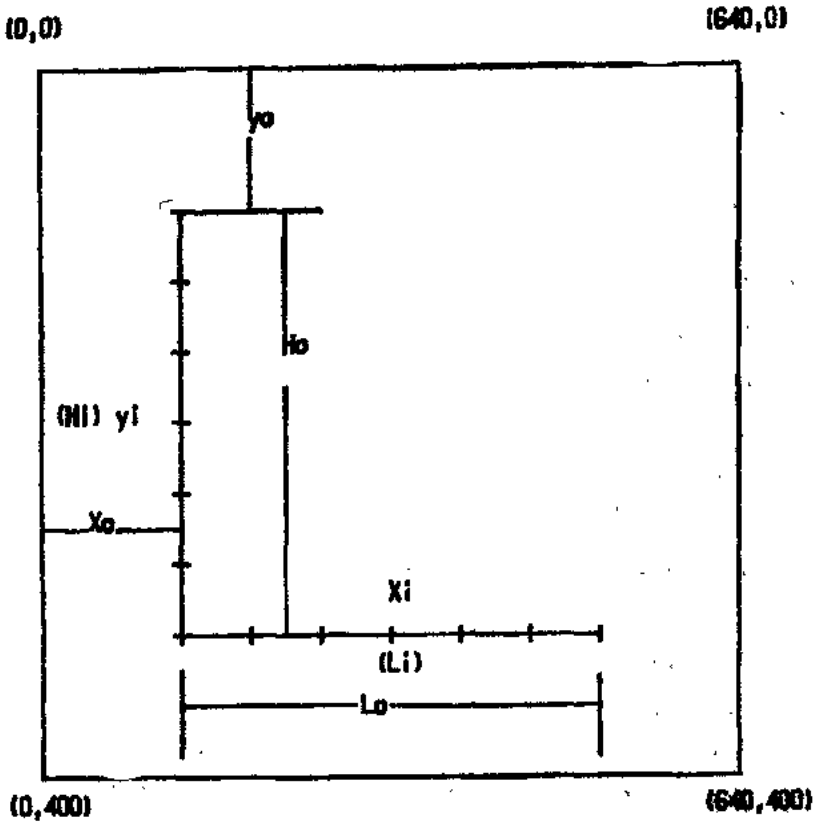


图 4-7 显示器屏幕坐标系与用户坐标系的关系

$(x_i,y_i)-(x_i,y_i)$把同一曲线的点连接起来，就把图形显示到计算机屏幕上了，具体程序语句为

```
200 FOR I=1 TO M
210 FOR J=1 TO N(I)-1
220 LINE(L(I, J), H(I,J))-(L(I, J+1), H(I, J+1))
230 NEXT J:NEXT I
```

6.坐标轴的绘制

坐标轴的绘制包括纵轴线、横轴线、刻度线的绘制与刻度值的标注几部分内容。

（1）纵、横轴的绘制 屏幕上直角坐标系的纵、横轴是两条相互垂直的直线，当屏幕图形的图幅$L_o\times H_o$设定后，可使横轴的长度为L_o，纵轴的长度为H_o，根据用户给定的位置参数x_o与y_o（见图4-7），则横轴的始、终点屏幕坐标分别为(x_o, y_o+H_o)与(x_o+L_o, y_o+H_o)；纵轴的始、终点屏幕坐标分别为(x_o, y_o)与(x_o, y_o+H_o)，用LINE指令把两轴的始点与终点连接即可画出两轴线。

（2）刻度线的绘制 可把刻度线看作是与轴线相垂直的短线，因此，刻度线也可用绘直线的方法绘出。一般坐标轴的刻度线是等间隔的，可用等分坐标轴线的方法计算出各刻度线的位置坐标。若给定x、y轴的刻度数分别为m和n，则x轴上第i个刻度线的屏幕横坐标L_i与y轴上第j个刻度线的屏幕纵坐标H_j分别为

$$L_i = L_0/mi + x_0;\quad i = 1,\ 2,\ 3,\ \cdots,\ m$$

$$H_j = H_0/nj + y_0;\quad j = 1,\ 2,\ 3,\ \cdots,\ n$$

刻度线的长度可根据坐标轴线的长短而定，再根据刻度线的位置参数L_i、H_j，可计算出各刻度线的始、终点屏幕坐标（x_1，y_1）、（x_2，y_2），用LINE指令把各刻度线的始、终点连接起来，就画出了刻度线。下面是绘制纵、横坐标轴刻度线的程序例。

```
350 INPUT "X轴刻度数M, Y轴刻度数N" ; M, N
360 INPUT "刻度线长度( dots)" ; D
370 Y1=H0-D:Y2=H0+D
380 FOR I=1 TO M
390 X1=L0/M*I+X0:X2=X1
400 LINE(X1,Y1)-(X2,Y2)
410 NEXT I
420 X1=L0-D:X2=L0+D
430 FOR J=1 TO N
440 Y1=H0/N*J+Y0:Y2=Y1
450 LINE(X1,Y1)-(X2,Y2)
460 NEXT J
```

（3）**刻度值标注** 在图形显示状态下，要把一个数或一个符号标注到屏幕的某位置上可使用LOCATE row, col指令，这个指令的主要功能是在屏幕上置光标的位置，参数row指明光标所要置的行号，一般取值1到25；参数col指明光标所要置的列号，一般取值1到80。用这条指令把光标置到指定的位置，再用PRINT指令把某数字或符号显示到光标所置处，可实现数字或符号的定位显示。根据这个原理可以把刻度值标注到相应的刻度线位置上。

标注刻度值时，首先要计算刻度线位置所对应的行（row）与列（col），再计算出各刻度线相对应的刻度值。而各刻度线的屏幕位置坐标在画刻度线时已计算出，只要按比例把屏幕坐标参数换算为相应的行与列就行了。

以高分辨率显示状态为例，屏幕水平方向所显示的绘图点数目为640，而显示的列数为80，列数与横向绘图点数的比值为80/640=1/8；而垂直方向绘图点数为400，显示的行数为25，行数与纵向绘图点数的比值为25/400=1/16，使用这两个比例系数就可把横轴上第I个刻度的L(I)换算为列数C(I)，把纵轴上第J个刻度的H(J)换算为行数R(J)。各刻度线所对应的刻度值是根据原图形的坐标参数计算出的，若x轴上第I个刻度所对应的刻度值为X(I)，y轴上第J个刻度所对应的刻度值为Y(J)，则X(I)与Y(J)分别为：

$$X(I) = (x_{max} - x_{min})/mI + x_{min}$$

$$Y(J) = y_{max} - (y_{max} - y_{min})/nJ$$

下面是标注x、y坐标轴刻度值的程序例。

```
500 R=(H0+Y0)/8+1:'X轴刻度值打印在第R行'
510 FOR I=0 TO M
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
520  L(I)=L0/M*I:C(I)=(L(I)+X0)/16
530  X(I)=(XMAX-XMIN)/M*I+XMIN
540  LOCATE R,C(I):PRINT X(I);
550  NEXT I
560  C=(X0-80)/16:'Y轴刻度打印在第C列'
570  FOR J=0 TO N
580  H(J)=H0/N*J:R(J)=(H(J)+Y0)/8
590  Y(J)=YMAX-(YMAX-YMIN)/N*J
600  LOCATE R(J), C:PRINT Y(J)
610  NEXT J
```

7.符号标注

为了使绘制的图形易于读懂，有时需要在图形上标注一些必要的数字或符号。例如，在同一图上绘数条曲线时，可为各曲线标上序号或曲线的名称。标注符号的原理与标注刻度值的原理相同。首先要确定标注位置的屏幕坐标参数，再把这些参数换算为行数与列数，然后，可用LOCATE指令与PRINT指令配合将符号标注到预想位置。

以上分别介绍了屏幕绘图程序各部分的设计方法，将各部分有机联系在一起就可编制出一个完整的通用绘图程序。这里给出一个屏幕绘图通用程序，调用通用绘图程序时，只需要为下列参量赋值。

M——图形中所包含的曲线的条数；

N(I)——图形中第I条曲线上的坐标点数；

X(I,J)——图形上某点的横坐标参数；

Y(I,J)——图形上某点的纵坐标参数。

```
10   '绘图数据赋值'
20   CLS:Y0=34 :X0=16:SCREEN 1
30   DIM X(10,50),Y(10,50),H(10,50),L(10,50)
40   FOR J=1 TO 30
50   X(1,J)=6.2832/29*(J-1):X(2,J)=X(1,J):
         Y(1,J)=SIN(X(1,J)):Y(2,J)=COS(X(1,J))
60   NEXT J
70   M1=2:M2=30 :INPUT'h0,l0:'; H0,L0 :CLS
80   GOSUB 120
90   END
100  '通用绘图程序'
110  '选择Xmin,Xmax,Ymin,Ymax'
120  XMIN=X(1,1):XMAX=X(1,1)
130  YMIN=Y(1,1):YMAX=Y(1,1)
140  FOR I=1 TO M1
```

```
150 FOR J=1 TO M2
160 IF XMIN>X(I,J) THEN XMIN=X(I,J)
170 IF XMAX<X(I,J)THEN XMAX=X(I,J)
180 IF YMIN>Y(I,J) THEN YMIN=Y(I,J)
190 IF YMAX<Y(I,J)THEN YMAX=Y(I,J)
200 NEXT J
210 NEXT I
220 '坐标转换'
230 FOR I=1 TO M1:FOR J=1 TO M2
240 H(I,J)=H0*(YMAX-Y(I,J))/(YMAX-YMIN)+Y0
250 L(I,J)=L0*(X(I,J)-XMIN)/(XMAX-XMIN)+80
260 NEXT :NEXT
270 '绘Y轴'
280 LINE(80,Y0)-(L0+80,H0+Y0),7,B
290 X1=75:X2=85:NN=INT(H0/32)
300 FOR I=0 TO NN
310 Y1=H0/NN*I+Y0:Y2=Y1
320 LINE(X1,Y1)-(X2,Y2):
    FOR K=1 TO L0 STEP 8:PSET(K+80,Y1):NEXT K
330 Y=YMAX-(YMAX-YMIN)*I/NN
340 YY=INT(Y*1000+0.5)/1000
350 IF Y<0 THEN YY=INT(Y*1000-0.5)/1000
360 Y1=INT(H0/17/NN*I+.5)+Y0/17
370 LOCATE Y1,2:PRINT USING "###.##" ; YY;
380 NEXT I
390 '绘X轴'
400 Y1=H0-5+Y0:Y2=H0+3+Y0:YY1=H0/16+1+Y0/16:
    MM=INT(L0/50)
410 FOR I=0 T0 MM
420 X1=L0/MM*I+80:X2=X1
430 LINE(X1,Y1)-(X2,Y2):
    FOR K=Y0 TO H0+Y0 STEP 5:PSET(X1,K):NEXT K
440 X=XMIN+(XMAX-XMIN)/MM*I
450 XX=INT(X*100+0.5)/100
460 X1=INT(L0/8/MM+0.5)*I+10
470 LOCATE YY1-1,X1:PRINT XX;
480 NEXT I
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
490 '绘曲线'
500 FOR I=1 TO M1:FOR J=1 TO M2-1
510 LINE(L(I,J),H(I,J))-(L(I,J+1),H(I,J+1))
520 NEXT J:NEXT I
530 RETURN
```

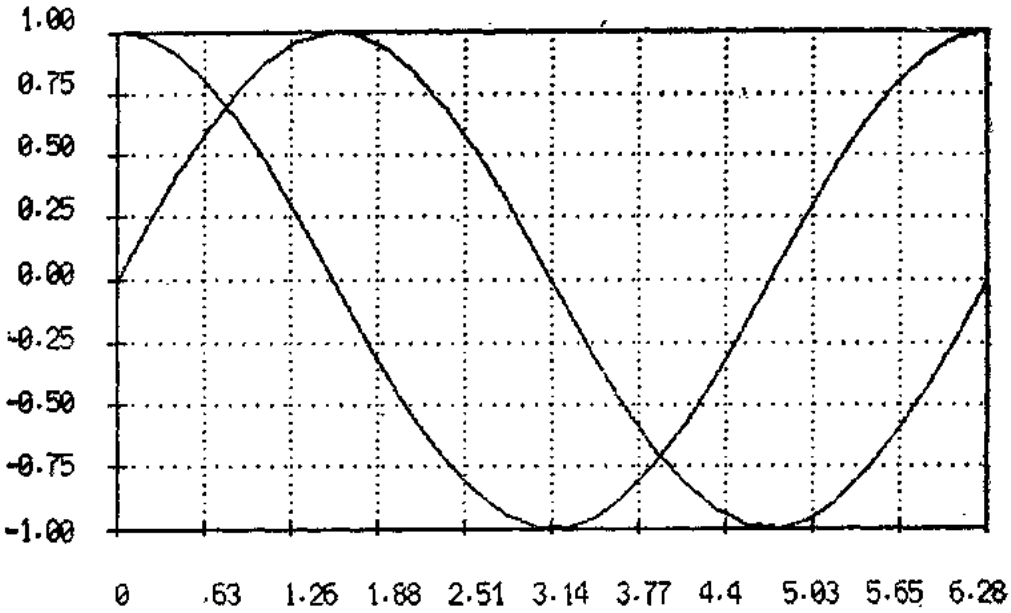


图 4-8 通用屏幕绘图程序绘制的曲线图

第五节 X-Y绘图仪通用绘图程序的设计

X-Y绘图仪本身具有一套完整的绘图指令，可用各种高级语言调用它绘制各种因素。这里以DXY-880绘图仪为例说明绘图程序设计方法。

一、X-Y绘图仪绘图指令

不同型号的绘图仪具有不同的绘图指令系统，一般都具有绘制点、直线、圆弧等基本指令，此外还有绘坐标轴、选择绘图笔等专用指令。

以上是DXY-880的几个常用绘图指令，此外还有一些其它辅助绘图指令，具体格式可参考DXY-880使用手册。调用绘图指令的格式与绘图仪的联接方式有关，以BASIC语言调用D指令为例，格式如下：

```
PRINT #1,'D 1000, 500'      (用串行口联接DXY-880与计算机)
LPRINT 'D 1000, 500'        (用并行口联接DXY-880与计算机)
```

二、绘图仪坐标系与绘图图幅

DXY-880的坐标系与常规的直角坐标系一致，如图4-10所示，绘图板左下角为坐标原点，最大绘图幅为 3800×2700 绘图单位，使用绘图纸的最大规格为 A_3（420×270 mm）。

表 4-1　　DXY-880绘图仪主要指令一览表

DXY指令	格　式	参数意义	范围(初值)	功　能
H (Home)	H			清除错误，返回原点
D (Draw)	$Dx_1, y_1 \cdots x_n, y_n$	x_n:x轴绝对坐标 y_n:y轴绝对坐标	−16383～+16383	绝对坐标系画直线
M (Move)	Mx,y			绝对坐标系抬笔移动
I (Relative Draw)	$I\Delta x_1, \Delta y_1, \cdots \Delta x_n, \Delta y_n$	Δx_n:x坐标增量 Δy_n:y坐标增量	−16383～+16383	相对坐标系绘直线
R (Relative Move)	RΔx, Δy			相对坐标系抬笔移动
L (Line type)	L_p	见图4—9	p=−5～+5 (0)	定义线型
X (Axis)	Xp,q,r	p=0:y轴 p=1:x轴 p: 单位长度 r: 单位个数	p=0,1 q=−16383～16383 r=1～16383	绘制坐标轴系
P (Print)	$P_{c_1,c_2\cdots c_n}$	c_1～c_n: 字符串		绘制ASCII字符
S (Scal)	Sn	n: 字符尺寸	n=0～127(3)	定义字符尺寸
J (Pen change)	Jn	n: 笔号	n=0～8(1)	换取绘图笔
C (Circle)	Cx,y,r,θ_1,θ_2	x,y:圆心绝对坐标 r:半径 θ_1:起始角 θ_2:终止角	x,y,r=−16383～+16383 θ_1,θ_2=−32767°～+32767°	绝对坐标绘圆弧
E (Relative Circle)	Er,θ_1,θ_2			当前位置绘圆弧

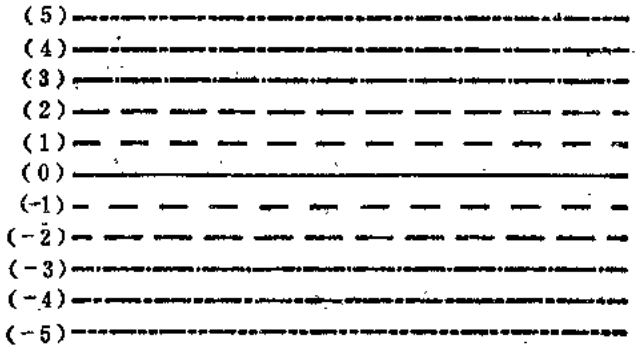


图 4-9　DXY-880的11种线型

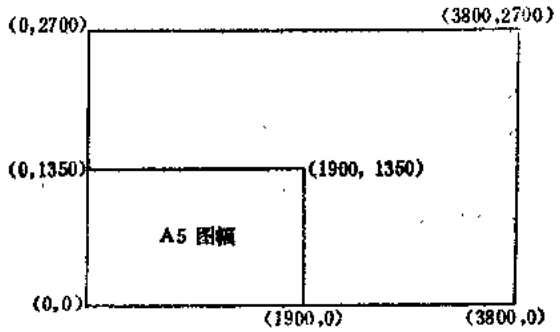


图 4-10　DXY-880绘图仪坐标系与绘图图幅

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

三、绘图仪通用绘图程序的设计

1.图形坐标参数赋值

与其它绘图方式一样，图形坐标点的参数用二维变量X(I,J)、Y(I,J)表示，用赋值语句为变量X(I,J)、Y(I,J)赋值。

2.绘图图幅给定

绘制的图幅大小通过给定绘图单位的方式设置，若以L_0、H_0分别表示x、y方向的绘图单位数，则$L_0 \leqslant 3600$，$H_0 \leqslant 2700$，在BASIC语言中，可用INPUT语句键盘输入L_0与H_0数值。

3.坐标换算

首先要选择出图形坐标参数中的X_{max}、X_{min}、Y_{max}、Y_{min}，然后，把图形的原坐标参数X(I,J)、Y(I,J)换算为绘图仪坐标L(I,J)、H(I,J)：

$$L(I,J)=L_0/(X_{max}-X_{min})\times[X(I,J)-X_{min}]$$

$$H(I,J)=H_0/(Y_{max}-Y_{min})\times[Y(I,J)-Y_{min}]$$

4.图形的绘制

经坐标换算后，用绘直线的D指令将同一曲线上的点连接起来，就绘出了图形，绘图语句如下：

```
10  FOR I=1 TO M
20  PRINT #1, "M", L(I,1), H(I,1)
30  FOR J=1 TO N(I)-1
40  PRINT #1, "D", L(I,J), H(I,J), L(I,J+1), H(I,J+1)
50  NEXT I:NEXT J
```

5.坐标轴绘制

给定x、y坐标轴刻度数目r，根据图幅参数L_0、H_0确定坐标轴长度，并计算各刻度线

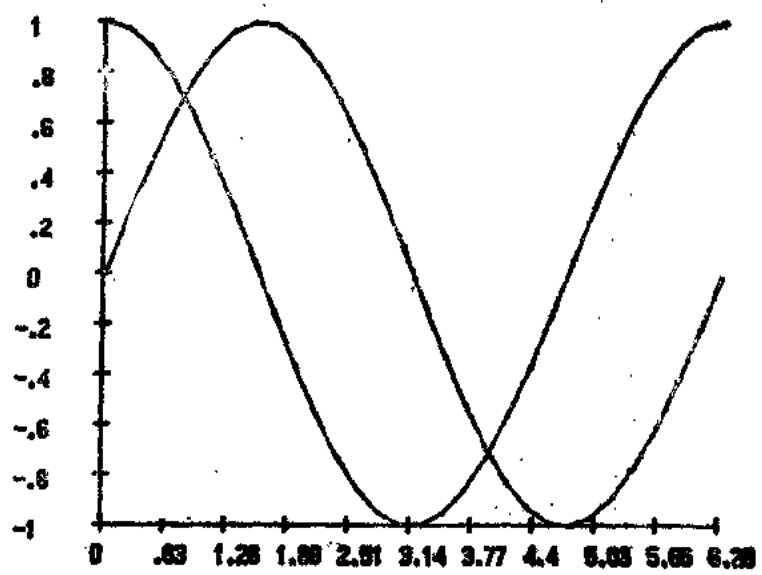


图 4-11　DXY-880通用绘图程序绘制的曲线

的位置与相应刻度值，用X指令绘出坐标轴系。

下面是DXY-880通用绘图程序，前面第10～90句为调用绘图程序实例。

```
10  'DXY-880A绘图仪通用绘图程序'
20  DIM X(10,50), Y(10,50), H(10,50), L(10,50)
30  '给图形变量X(I,J), Y(I,J)赋值'
40  FOR J=1 TO 30
50  X(1,J)=6.283/29*(J-1):Y(1,J)=SIN(X(1,J)):X(2,J)=X(1,J):
    Y(2,J)=COS(X(1,J))
60  NEXT J
70  M1=2:M2=30:CLS
80  GOSUB 100
90  END
100 '选择XMIN, XMAX, YMIN, YMAX'
110 XMIN=X(1, 1):XMAX=X(1,1)
120 YMIN=Y(1, 1):YMAX=Y(1,1)
130 FOR I=1 TO M1
140 FOR J=1 TO M2
150 IF XMIN>X(I,J) THEN XMIN=X(I,J)
160 IF XMAX<X(I,J) THEN XMAX=X(I,J)
170 IF YMIN>Y(I,J) THEN YMIN=Y(I,J)
180 IF YMAX<Y(I,J) THEN YMAX=Y(I,J)
190 NEXT J, I
200 '联上绘图机'
210 OPEN "com1:1200, e, 7, 1, cs65535"AS#1
220 LOCATE 23:PRINT "plotter is oprating"
230 '键入图幅参数'
240 INPUT "Ho, Lo"; HO, LO:INPUT "X0,Y0"; X0, Y0
250 '根据图幅选择字号，用"Sn"指令'
260 PRINT #1, "S3"
270 IF HO<1000 THEN PRINT #1, "S2";
    IF HO<500 THEN PRINT #1, "S1"
280 RH=HO/10:RL=LO/10
290 '取1号笔，用"J"指令'
300 PRINT #1, "J1":PRINT #1, "M"; X0, Y0
310 '绘X轴与Y轴，用"X"指令'
320 PRINT #1, "X"0, RH, 10:PRINT #1, "M"; X0, Y0
330 PRINT #1, "X"1, RL, 10:PRINT #1, "M"; X0, Y0
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
340 '写坐标参数，用"P"指令'
350 FOR I=1 TO 11
360 L=RL*(I-1)+X0:XH=(XMAX-XMIN)/10*(I-1)+XMIN
370 PRINT #1, "M"; L-30, Y0-60:PRINT #1, "P"; INT(XH*100
    +0.5)/100
380 NEXT I
390 PRINT #1, "M"; X0, Y0
400 FOR I=1 TO 11
410 H=RH*(I-1)+Y0:YH=(YMAX-YMIN)/10*(I-1)+YMIN
420 PRINT #1, "M"; X0-140, H-20:PRINT #1, "P"; INT(YH*100
    +0.5)/100
430 NEXT I
440 PRINT #1, "M", X0, Y0
450 '坐标换算'
460 FOR I=1 TO M1:FOR J=1 TO M2
470 H(I,J)=HO*(Y(I,J)-YMIN)/(YMAX-YMIN)+Y0
480 L(I,J)=LO*(X(I,J)-XMIN)/(XMAX-XMIN)+X0
490 NEXT :NEXT
500 '绘曲线，用"M", "D"指令'
510 PRINT #1, "M", L(1,1), H(1,1)
520 FOR I=1 TO M1:FOR J=1 TO M2-1
530 PRINT #1, "D", L(I,J), H(I, J), L(I,J+1), H(I,J+1)
540 NEXT J
550 PRINT #1, "M", L(I+1, 1), H(I+1, 1)
560 NEXT I
570 '放下笔，回原点'
580 PRINT #1, "J0":PRINT #1, "H"
590 CLOSE
600 RETURN
```

第六节　工程图形自动绘图程序设计与图形计算机辅助设计

前几节介绍了计算机绘图的几种不同方式与通用绘图程序的设计，所介绍的通用绘图程序可直接用于绘制各种坐标曲线和简单图形。但是，在水电站动力设备的计算机辅助设计中，需要用计算机绘制更复杂的图形，其中包括下面几种不同类型的图形：

1）复杂曲线类图形。如水轮机模型综合特性曲线、水轮机运转综合特性曲线等。

2）工程结构或设备结构类图形。如水轮机蜗壳、尾水管类设计图。

3）水电站主副厂房设备布置图类。如电气设备布置图、辅助设备布置图等。

4）系统图类图形。如水电站油、气、水系统图等。

上述四类图形各具不同特点，解决这些图形的计算机绘图问题可以采用两种方式，即计算机自动绘图方式与计算机辅助图形设计方式。凡是经设计计算可以确定其整体几何形状与尺寸的图形，可以用自动绘图的方式绘出图形，一般，曲线类图形、工程结构类图形可以采用这种方法。而设备布置图、设备系统图类图形，整个图形不易用简单的数字模型描述，仅靠计算无法确定整个图形的几何形状与尺寸，这类绘图问题可用计算机辅助图形设计的方式解决。

一、工程图形自动绘图程序的设计

1.曲线类图形自动绘图程序的设计

如上所述，简单的曲线类图形可以用通用绘图程序直接绘制，但是，对于复杂的曲线线图，要针对线图的线型构成、参数标注方式等特点，设计专用绘图程序。绘制复杂曲线类图形的程序，其总体结构与前几节所讲的通用绘图程序的结构相同，所不同的是，在绘制图形部分要包括绘制不同线型的程序段。例如，在绘制转桨式水轮机模型综合特性曲线的专用绘图程序中，必须包括绘制实线、虚线、单点划线三种线型的程序段或子程序，因为水轮机的等效率线与等开度线、等气蚀系数线、等叶片转角线习惯上分别用实线、虚线与单点划线的方式表示。

不同线型的绘制方法要根据绘图设备及其指令系统而确定，例如：在X-Y绘图仪的指令系统中，已含有绘制实线、虚线、点划线的指令，可以直接调用。而BASIC语言屏幕绘图方式则没有绘制多种线型的专用指令，需要应用绘制点、直线的指令设计出绘制不同线型的程序，假如一条曲线上M个离散点的坐标为XT(I)、YT(I)，I=1，2，…M，那么，根据这些离散点分别绘制实线、虚线和单点划线的程序例为

```
10  DIM XT(60), YT(60)
20  FOR I=1 TO 40:XT(I)=I*10:YT(I)=160-I^2/10:NEXT I
30  M=40 :SCREEN 1:LINE(0,0)-(400,200), 2, B
40  '绘制实线'
50  FOR I=1 TO M-1
60  LINE(XT(I), YT(I))-(XT(I+1), YT(I+1))
70  NEXT I
80  '绘制虚线'
90  FOR I=1 TO M:YT(I)=YT(I)+15: NEXT I
100  FOR I=1 TO M-1 STEP 2
110  LINE(XT(I), YT(I))-(XT(I+1), YT(I+1))
120  NEXT I
130  '绘单点划线'
140  FOR I=1 TO M:YT(I)=YT(J)+15: NEXT I
150  FOR I=1 TO M-2 STEP 4
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
160  LINE(XT(I), YT(I))-(XT(I+1), YT(I+1))
170  LINE(XT(I+1), YT(I+1))-(XT(I+2), YT(I+2))
180  NEXT I
190  FOR I=4 TO M STEP 4
200  PSET(XT(I), YT(I))
210  NEXT I
```

根据上述方法所设计的绘制轴流转桨式水轮机模型综合特性曲线的自动绘图程序，其输出的图形如图4-12所示。

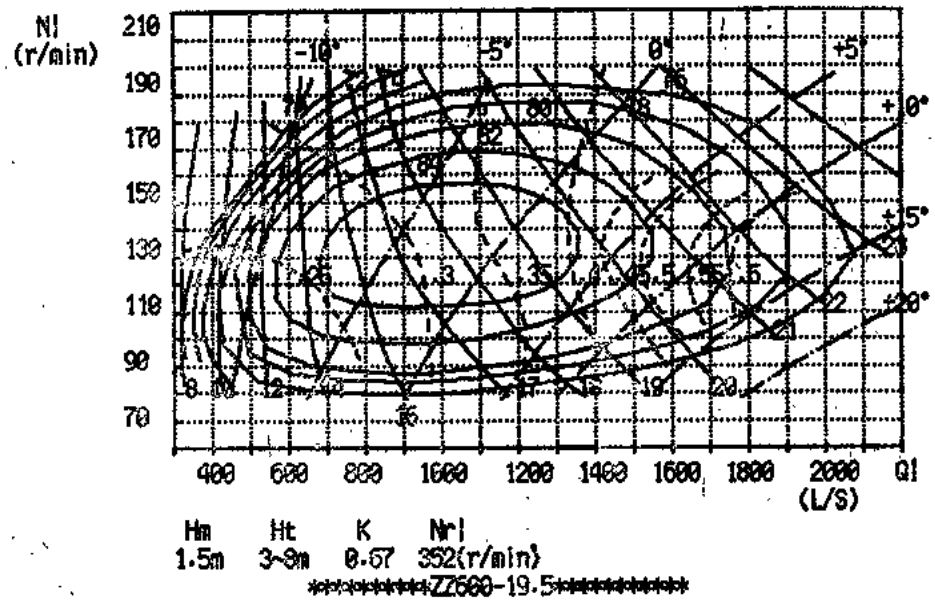


图 4-12　自动绘图程序输出的水轮机模型综合特性曲线图

2.工程结构图类自动绘图程序的设计

工程结构图或设备结构图是表示工程或设备结构、几何形状与尺寸的图形，用计算机处理这类图形时，可以用离散点的方法表达图形的绘图参数，也可以用基本图素的方法表达图形的绘图参数，两种方法相比较，基本图素法更适合于结构图类自动绘图程序的设计。因为工程结构图类可以用直线、圆、圆弧、自由曲线这四种基本图素表示，而大部分计算机的绘图指令系统又提供了绘制这些基本图素的绘图命令，所以，用图素表示法设计绘图程序，不仅可以简化绘图参数的计算，还可以提高绘图的精度。

根据工程结构图类的绘图要求，自动绘图程序的结构应包括三个主要部分，即绘图参数计算部分、图形绘制部分、几何尺寸与技术符号标注部分。

（1）图形绘图参数的计算　工程设计一般是确定工程设施或设备的立体结构，根据设计确定的立体结构基本参数，人们可以用画法几何与工程制图的原理靠作图法绘出需要的各种视图，但是，用计算机绘图时，仅靠工程设计所确定的工程结构参数，很难直接绘出所需要的工程图形。以水轮机尾水管的设计为例，在设计计算过程中，只是确定了尾水

管的空间尺寸，进口直锥段只给出了进口直径、出口直径及直锥段高度，肘管段只给出了几个截面图形控制点的坐标、圆弧的圆心与半径，出口段只给出了有关的长、宽、高参数等。尾水管设计结果要求根据上述结构参数绘制出轴侧投影图、水平投影图及一系列水平截面图。在尾水管自动绘图程序设计时，可采用下面方法计算各投影图与截面图的绘图参数。

1）建立图形自身的坐标系，根据设计结果所确定的尾水管的空间结构参数确定各投影图、截面图的图形参数，这些参数按图形自身的坐标系进行计算与定义。

2）根据上一步所确定的图形结构情况，将图形分解为一系列基本图素，并逐一计算出构成该图形的各图素的绘图参数。例如，尾水管的轴侧投影图可分解为直线、圆弧与自由曲线三种图素，这些基本图素的绘图参数的计算方法在本章第一节中已作了介绍。为了绘图程序设计方便，凡同一类图素的绘图参数，可用同一下标变量表示。

（2）图形绘制　由于构成所有图形的基本图素都可以归纳为直线、圆、圆弧、自由曲线四种基本类型，因此，可以设计一个包括绘制这四种基本图素的通用绘图子程序，绘图子程序可用循环形式依次绘出构成图形的所有直线、圆、圆弧、自由曲线图素。具体程序设计可参照本章第一节用基本图素法处理图形的程序例子。

（3）几何尺寸与符号标注　工程结构图是工程施工的技术依据，图形要反映出工程结构与施工要求，因此，需要在图形上标注几何尺寸，有时还要求标注一些供施工用的技术符号。关于数字与符号的标注原理在通用绘图程序设计中已作了介绍，具体方法与技巧将在第五章的水轮机蜗壳、尾水管计算机辅助设计两节中详细阐述。

二、图形的计算机辅助设计

在水电站动力设备的计算机辅助设计中，需要用计算机辅助图形设计的方法处理一些图形。例如水电站厂房设备布置图及油、气、水系统图等，这些图形仅靠计算无法确定其几何形状与尺寸，要靠设计人员进行图面的布置设计。在手工设计中，设计人员用图板、直尺、圆规等绘图工具进行图形设计，随着CAD技术的发展，计算机辅助图形设计已成为工程图形设计的重要手段。计算机辅助图形设计有多种不同方法与方式，较有代表性的有Auto CAD系统软件。1982年，美国Auto desk公司首先推出了一套Auto CAD系统软件。后来，经不断改进、扩充，形成各种不同版本，被广泛应用于各种工程设计领域。Auto CAD系统作为一套高效绘图工具，可用于各种工程结构图、厂房设计和设备布置图，以及电子、化学、土木、机械工程图的计算机图形设计中，并具有三维图形处理功能。

Auto CAD系统是一种交互式图形处理系统，运行Auto CAD系统时，在显示器屏幕上提供出图形处理项目的主菜单，供使用者选择菜单中的项目，进行绘图、图形编辑、图形输出等一系列绘图操作。某版本的Auto CAD系统提供的主菜单显示如下：

0.Exit Auto CAD（退出Auto CAD）

1.Begin NEW drawing（开始新的绘图工作）

2.Edit an EXISTING drawing（编辑现存图形）

3.PLOT a drawing（绘图）

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

4.Printer Plot a drawing（打印机绘图）

……

在选择菜单项目时，只要键入相应的数字，再按回车或空格键即可进入所选择的图形处理状态。

在进行新图形绘制和图形编辑时，Auto CAD系统提供一组图素用来构成图形，基本图素包括点、直线、圆、圆弧等，并提供了直线与圆弧连接、图素插入、图素消去、图形层与块定义等一系列图形编辑命令，使用者只要按各命令的提示进行键盘输入就可以在显示器屏幕上进行图形设计。以绘制直线图素为例，绘图操作过程为

Command: LINE From Point: 1, 1

To Point: 5, 2

To Point: （Space or Return）

执行上述操作后，在显示器屏幕上的坐标点（1,1）至（5,2）间会给出一条直线段，其它指令的使用过程也如此。使用者熟练掌握各指令的操作后，Auto CAD软件可帮助人们进行各种复杂图形的设计。由于篇幅所限，Auto CAD系统的详细应用可参考有关Auto CAD使用手册。

第五章　水电站动力设备的计算机辅助设计

第一节　水电站动力设备设计软件包的编制

水电站动力设备的设计包括水电站的水轮机、发电机及辅助设备系统的一系列设计项目。尽管各部分设计的具体方法不同，但基本上都属于以设备选型、系统方案构成设计为目的的设计类型。设计的各个项目是独立的，但参数之间是有联系的。为了便于设计项目的管理及各项目之间的数据交换，在编制程序软件包时可采用模块式程序结构，把整个程序系统分为主控模块、数据模块、工具程序模块，各分项设计模块等几部分。各模块的设计可采取如下的原则。

1.主控模块的设计

主控模块的功能是显示软件包的程序主菜单，供程序使用者选择主菜单中的设计、计算项目，当菜单中某一项被选择时，应用文件管理功能或程序链接功能可把被选项目的计算程序调入计算机内存，执行程序、输出计算结果，并把后续程序使用的数据写入数据文件，然后返回主控模块，再提供主菜单，供使用者继续选择其它项目。设计主控模块时，应先把调试好的各项程序以规定的代码为文件名存入磁盘。在BASIC状态下，用D$=INPUT$(1)指令可为串变量D$键入所选程序的代码，再用CHAIN D$指令就可以把所选程序调入内存并执行。为使各项程序执行完后能自动返回主模块，在各项程序的END语句之前可加上RUN“主控模块文件名”语句。应用上述方法可以实现主控模块对各分项程序的管理。

2.数据模块的设计

水电站设计中应用的数据主要是《水电站设计手册》中的技术资料，包括各种数表和曲线。此外，各类产品目录、价格表也是重要的参考资料，为了用计算机引用这些资料，可把有关公用性强、数据量大的数据资料收入数据模块。收入数据模块的数据在存储时应遵循下面的原则：

1）使数据结构标准化，便于引用。例如水轮机特性曲线数据，所有同类型不同型号水轮机的特性曲线数据均要按同样格式存储。

2）使用ASCII码方式存储数据文件，便于数据与计算程序的链接与数据共享，这种方式存储的数据，可被不同算法语言调用。

3）使数据文件命名规格化，便于数据识别与引用。

3.工具程序模块的设计

为了尽量简化计算机辅助设计软件系统，可把一些公用的工具程序集中到工具程序模块中，这些程序可随时被链接到某个程序中或作为通用子程序使用。水电站计算机辅助

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

设计系统常用的工具程序有三类，一类是插值计算程序，主要用于曲线与数表的引用，常用的有一元插值、二元插值。另外，参数样条插值常用于图形坐标点的加密。第二类是矩阵运算程序，这类程序常用于网络计算、图形坐标变换，同时，又是曲线拟合、曲面拟合的工具程序。第三类是通用绘图程序，它是绘制各种曲线图的工具，同时又可作为各种专用绘图程序的主体子程序。在工具程序设计中，应注意三个问题。一是变量名应标准化，防止与调用它的主程序发生混乱；二是程序语句行号可置大一些，防止调入时冲掉原程序中的语句；三是工具程序应以ASCII码形式存放在磁盘中，便于链接与调用。

4.各分项计算程序的设计

各分项计算程序是软件包的主体程序，要求这些程序通用性强，使用方便，具有规格化的数据接口，变量标识符规范化，符合工程上的一般规定和设计人员的习惯用法。为了简化程序设计，程序中的常用算法，例如插值、光顺、求等值线、解线性方程组等，可直接使用工具模块中的通用程序。

分项计算程序虽然具体应用于某一项目的设计，但它是以同类工程的通用设计为目标的。因此，要求程序中充分考虑同类工程中各具体工程的差别，使程序具有处理这些差别的功能。以水轮机选型程序为例，不仅应适用于混流式水轮机选型，也应能适用于其它类型水轮机的选型，这样，一旦程序调试完毕，就可一劳永逸。

只要充分考虑上述问题，就能设计出功能良好的计算程序。下面是一绘水轮机模型综合特性曲线的主程序实例，程序调用数据模块中的数据，插值、绘图均用工具模块中的程序。

```
1  REM 水轮机特性曲线绘制主程序
2  REM read.bas---读数据程序
3  REM DATA.160---HL160特性曲线数据
4  REM SPLIN.BAS--参数样条插值程序
5  REM DRAW.BAS---绘图程序
6  CHAIN MERGE'READ.BAS', ALL, DELETE 6
7  CHAIN MERGE'DATA. 160', ALL, DELETE 7
8  CHAIN MERGE'SPLIN.BAS', ALL, DELETE 8
9  CHAIN MERGE'DRAW.BAS',ALL, DELETE 9
10 END
```

第二节 计算机辅助水轮机选型的方法与程序设计

目前，在我国的水电站设计中，常用的水轮机选型设计方法有套型法、经验公式法以及从水轮机系列型谱中选择水轮机的方法，用计算机辅助设计方法进行水轮机选型时，也常采用上述三种方法。套型法是根据国内外已建水电站的水轮机参数选择水轮机，这种方法在计算机上更容易实施，利用计算处理技术资料的强有力功能，把收集到的已建水电站的资料存储到计算机中，建立有关水轮机的型号和参数的数据库，设计水电站时，应

用技术资料检索法，从存储的技术资料中，把与设计电站的参数相等或者相近的水轮机型号及其参数选择出来，再用统计学方法对这些参数进行适当的数学处理，就可以确定设计电站的水轮机型号与参数。经验公式法是以已建水电站的水轮机参数为基础，经数理统计，得到一套计算水轮机比转速及其它参数的经验公式，用经验公式计算水轮机的比转速，确定水轮机类型，并以比转速为基础，进一步计算出水轮机的转轮直径、转速、吸出高度等基本参数。这种方法很简单，在计算机辅助水轮机选型设计中，可作为一种辅助的方法。从水轮机系列型谱中选择水轮机是我国广泛采用的水轮机选型设计方法，因此，本节以这种方法为例，说明水轮机选型程序的设计方法与技巧。

一、水轮机选型程序的设计思想

计算机辅助水轮机选型设计的过程与人工手算的过程大体相同。计算程序要完成水轮机型号选择、水轮机主要参数计算、工作范围图绘制及打印输出水轮机参数表等一系列设计计算环节。人工手算设计过程中的资料查阅、水轮机设计工况点的选择与调整、转轮直径与转速的圆整、绘制水轮机工作范围图等都要由计算机去完成。

二、水轮机选型程序的结构与设计方法

水轮机选型设计程序要由数据部分、型号选择部分、计算工况点选择与调整部分、转轮直径与转速的计算与圆整部分、工作范围图绘制部分组成。

1.数据部分

水轮机选型设计所用的基本数据资料为水轮机型谱参数表、与选型设计有关的水轮机模型特性曲线数据、转轮标准直径系列与发电机同步转速系列参数表，这些数据可用DATA语句方式放在程序中，用READ语句读入，并赋给相应的变量。

水轮机型谱参数表中的主要参数为水轮机应用水头范围H_{min}、H_{max}、导叶相对高度$b_0/D1$、水轮机最优单位转速n'_{10}、推荐使用单位流量Q'^*_1、最优效率η_{M0}、限制工况效率η^*_M、气蚀系数σ_M、转轮轴向水推力系数K、模型转轮直径D_{1M}等。型谱参数表可按照第二章中所介绍的数表处理方法存储到计算机中。例如，以T$(I)、H1(I)、H2(I)、B0(I)、N0(I)、Q0(I)、E0(I)、EL(I)、C(I)、K(I)、D1M(I)分别表示型谱参数表中的各参数。按照型谱参数表的排列顺序把各数组输入到计算机中。这些参数将用于水轮机型号与参数的选择计算。

与选型设计有关的模型特性曲线数据有两部分，一部分是综合特性曲线上通过最优单位转速n'_{10}的直线上所取的数个工况点的Q'_1、η_M、σ_M值，这些数据主要用于水轮机设计工况点的选择、校核与调整。

如图5-1所示，在通过n'_{10}的直线上取n个工况点（$n=5\sim10$），工况点的参数Q'_1、η_M、σ_M分别用二维下标变量Q1(I, J)、E1(I, J)、C1(I, J)表示。下标I表示某水轮机在型谱中的序号，J表示所取的工况点的序号。这些参数输入计算机后，可根据其中的一个参数插值求出另两个参数，这样，就可以用计算程序在n'_{10}的直线上选择和调整设计工况点，选择和调整设计工况点的方法将在下面介绍。

选型设计所用的另一部分模型综合特性数据是等效率曲线组中最里面一圈或两圈上的工况点的坐标参数n'_1、Q'_1及出力限制线上工况点的坐标参数n'_1，Q'_1。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

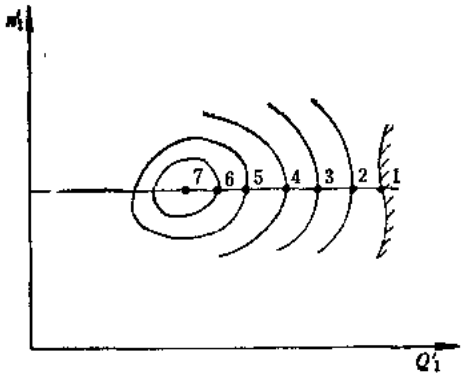


图 5-1 选择设计工况点所用的数据

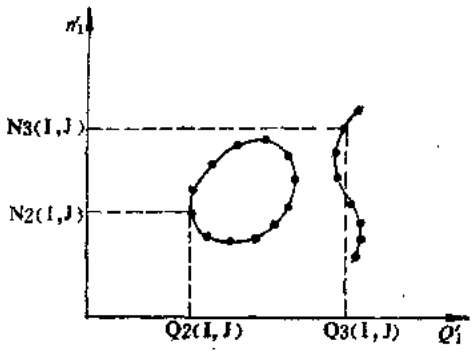


图 5-2 绘制工作范围图所用的数据

如图5-2所示，在最里面的等效率线及出力限制线上顺序地取若干个工况点，以二维数组N2(I, J)、Q2(I, J)分别表示等效率线上各点的坐标参数n_1'和Q_1'，以另一对二维下标变量N3(I, J)、Q3(I, J)表示出力限制线上工况点的坐标参数n_1'和Q_1'，同样，下标I表示某水轮机在型谱中序号，J表示曲线上工况点的序号。这些参数输入计算机后，将在绘制水轮机工作范围图时使用。

2.水轮机型号选择部分

这部分程序基本是对设计者从型谱参数表中选择水轮机方法的模拟。在水轮机通用选型程序中，可用人机对话方式输入水电站的基本设计参数，例如特征水头（H_{min}、H_r、H_{av}、H_{max}）、电站装机容量N_y、水轮机设计尾水高程ABS、吸出高度限制值H_s，等，在BASIC状态下，可用INPUT语句提示输入变量的名称与单位并键盘输入数据，输入语句的格式如下：

```
340 INPUT "特征水头：Hmin, Hmax, Hr, Hav=(m)"；HMIN, HMAX,
    HR, HAV
350 INPUT "总装机容量Nr(MKW)，机组海拔高程ASL(m)，吸出高限定值Hso
    (m)="；NY, ASL, HS0
```

输入基本设计参数后，可用H_{min}、H_{max}与型谱参数表中的各水头段参数H1(I)、H2(I)相比较，以$H_{min}\geqslant$H1(I) and $H_{max}\leqslant$H2(I)为条件，选择出符合设计电站水头范围的所有机型，以这些机型作为各选机型参加选型方案比较。一旦某机型被选择，其序号I被记录下来，在下一步的计算中，可用序号I引用被选择的水轮机的诸参数，诸如N0(I)、Q0(I)、C(I)等。

3.水轮机设计工况点的选择与调整

在确定了水轮机的型号之后，下一步是用模型综合特性曲线计算水轮机的实际工作参数。其中最关键的是确定水轮机的设计工况点，设计工况点的参数n_1'、Q_1'、η_M、σ是计算水轮机转轮直径、水轮机转速以及水轮机允许吸出高度的依据。确定设计工况点的原则是保证水轮机的最大允许吸出高度不小于给定的限制值H_s。在此条件下尽可能取较大的单位流量值，以减小水轮机直径，缩小机组尺寸。在人们手工设计的过程中，是通过人为

调整设计工况点的方法来满足上述条件的。对于混流式水轮机，首先取最优单位转速与出力限制线的交点作为设计工况点；对于转桨式水轮机，首先取最优单位转速与水轮机制造厂家推荐的单位流量作为设计工况点的参数，当选择的设计工况点的允许吸出高度不满足要求时，通过调整设计工况点的参数，减小单位流量，使气蚀系数减小，直到设计工况点的吸出高度满足要求为止。在计算机辅助水轮机选型程序中确定设计工况点的方法基本上是对上述手算过程的模拟。

如图5-1中所示，为了达到自动调整计算工况点的目的，在程序中，已存入了水轮机特性曲线上若干个工况点的Q'_1、η_M、σ值，在开始计算时，可取工况点1的单位流量$Q_1(I, 1)$作为设计工况点的单位流量，同时，用该点的气蚀系数值$C_1(I, 1)$计算水轮机的允许吸出高度H_{s1}，若$H_{s1}\geqslant H_{ss}$，说明该工况点已满足要求，可把该点确定为设计工况点，进入下一步的计算。若$H_{s1}<H_{ss}$，说明初选的工况点1不满足要求。这时，可用给定的H_{ss}值反算出一个气蚀系数值σ_j，再用σ_j作插值变量，以图5-1中所示的工况点为型值点插值计算，求出σ_j所对应的单位流量值与模型效率值。其计算过程如下：

$$\sigma_j=(10-ASL/900-H_{ss})/(k\times H_r)\qquad (k\text{为}\sigma\text{修正系数})$$

用σ_j作插值变量时，在图5-1所示的工况点中，可以用判断语句找出与σ_j所对应的工况点相邻的两个工况点的序号J和J+1，以一元线性插值为例，求σ_j所对应的工况点的单位流量Q'_{1r}和模型效率η_{Mr}的计算式如下：

$$Q'_{1r}=[Q_1(I, J+1)-Q_1(I, J)]/[C_1(I, J+1)-C_1(I, J)]\times[\sigma_j-C_1(I, J)]+Q_1(I, J)$$

$$\eta_{Mr}=[E_1(I, J+1)-E_1(I, J)]/[Q_1(I, J+1)-Q_1(I, J)]\times[Q'_{1r}-Q_1(I, J)]+E_1(I, J)$$

上述计算出的Q'_{1r}即设计工况的单位流量，η_{Mr}为设计工况的模型效率。

4.水轮机转轮直径D_1和转速n的计算与圆整

在确定了设计工况点的Q'_{1r}、η_{Mr}之后，就可以计算水轮机的转轮直径与转速了，这些计算都有现成的公式，编程很容易，不再赘述。假如转轮直径的计算值记作D_{1j}，转速的计算值记作n_j，还需要进一步把D_{1j}圆整为标准系列中的D_1值，把n_j圆整为同步转速n。按照一般圆整的原则，尽可能取与计算值最接近的标准系列值或略大于计算值的标准系列值。以转轮直径的圆整为例，若计算值D_{1j}介于系列值D1(I)与D1(I+1)之间，且$D_1(I+1)>D_1(I)$，则可按下面的原则进行圆整：

IF(D1J−D1(I))/D1J<=0.03　　THEN　D1=D1(I)

IF(D1J−D1(I))/D1J>0.03　　THEN　D1=D1(I+1)

这里以相对差值3%作为取上限系列值与下限系列值的界限，实际计算中可根据工程具体情况给定不同的界限。转速n的圆整也可采用同样的方法。

在确定了转速直径D_1与转速n之后，可根据型谱参数表中的数据计算出轴向水推力、飞逸转速等其它参数。将这些参数以表格形式输出，供设计人员评定水轮机选型方案时使用。

5.水轮机工作范围图的绘制

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

绘制水轮机工作范围图的目的是为了检查水轮机的实际工作范围是否在高效区。为了绘制水轮机的工作范围，在程序的数据部分已存入了水轮机模型特性曲线最里面一圈或两圈的坐标参数以及出力限制线上若干个工况点的坐标参数，除了这些参数之外，还需要计算出水轮机的工作范围：

$$n'_{1min}=nD_1/\sqrt{H_{max}}$$

$$n'_{1r}=nD_1/\sqrt{H_r}$$

$$n'_{1max}=nD_1/\sqrt{H_{min}}$$

根据上述计算出的水轮机工作范围及存放在$DATA$语句中的等效率线、出力限制线数据，调用通用绘图程序，就可以绘出图5-3所示的水轮机的工作范围图。

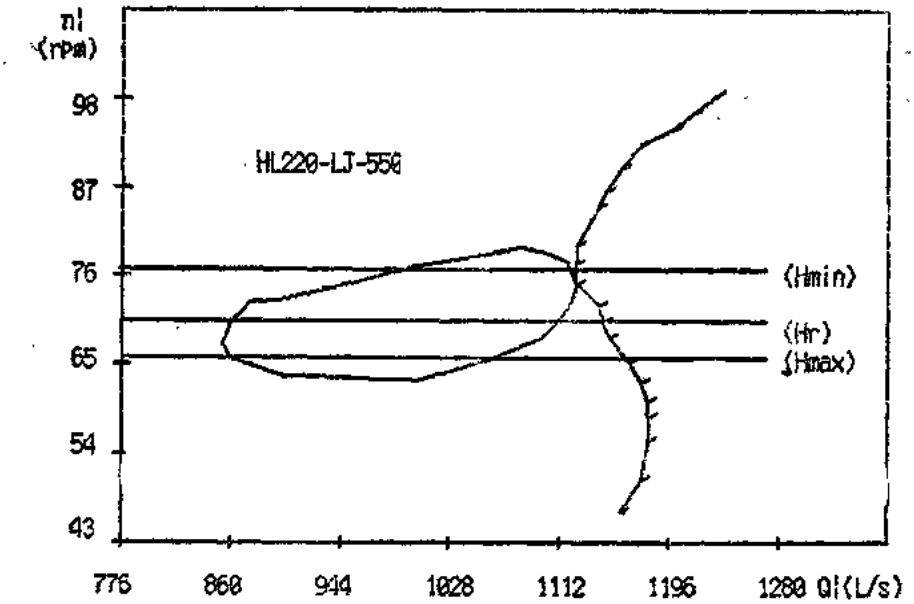


图 5-3 水轮机工作范围图

6.水轮机参数表的打印输出

按照工程设计的要求，可用习惯的表格方式打印输入模型水轮机参数表与原型水轮机参数表，打印表格要用到一些表格图形符号，把计算机的输入设置为图形符号状态后，可以输入表格。

表 5-1 **打印输出的水轮机参数表**

选型方案……I机组台数7

模型水轮机参数表

Hmin	Hmax	型 号	单位转效	单位流量	σ	ηmo
70	115	HL200	68	960	0.1	0.92

原型水轮机参数表

型　号	Hmin	Hmax	Hr	Nr(KKW)	n(rPm)	D1(m)	Pt(T)	η	Hs
HL200	40	55	48	102	79	6	435	0.932	3

三、水轮机选型设计程序流程框图

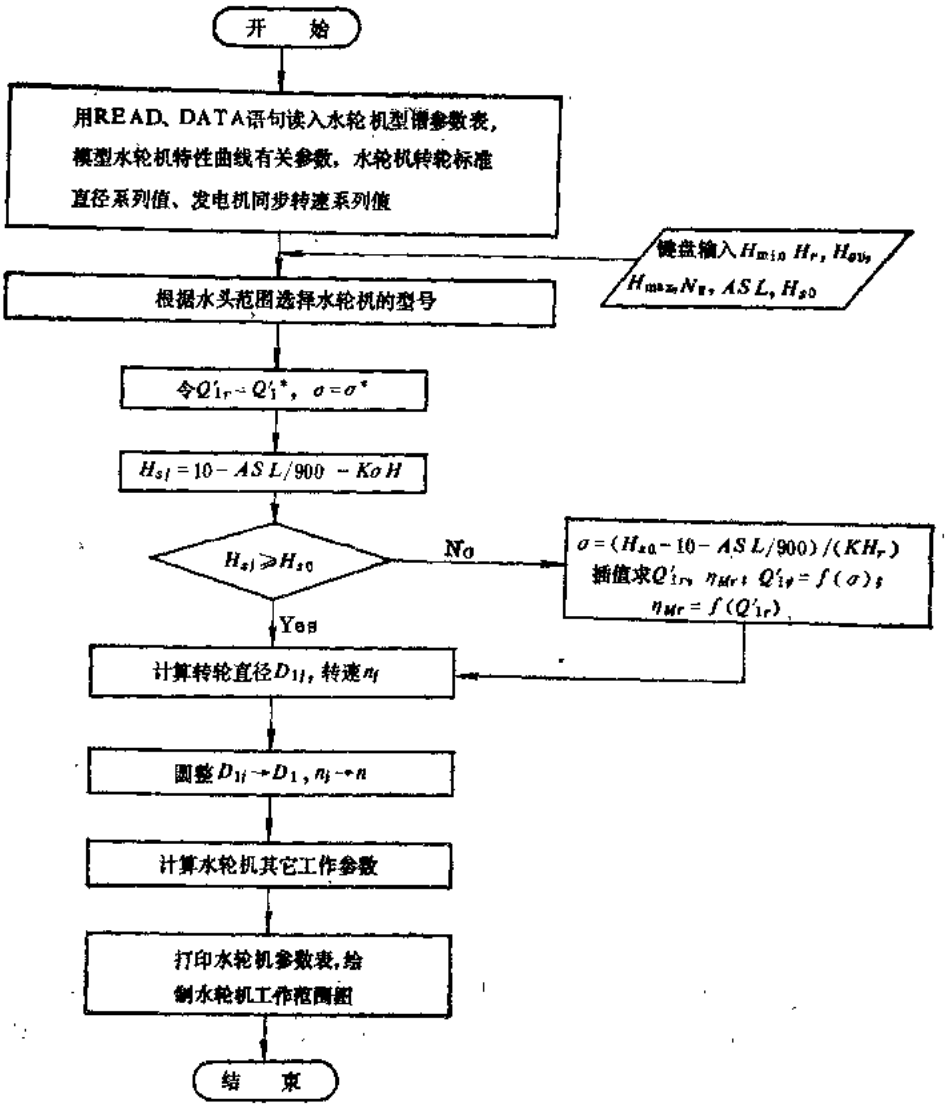


图 5-4　水轮机选型设计程序框图

四、水轮机选型设计源程序

下面所附的程序为反击式水轮机选型设计程序。由于篇幅限制，程序的数据部分只列入了部分混流式水轮机的参数，用户需要时，可增补另外的混流式水轮机参数及轴流式、斜流式等其它型式水轮机参数。运行程序时，以人机会话方式输入基本设计参数，运行结

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

果输出所选水轮机的模型及原型参数表，并绘出水轮机实际工作范围图。

```
10  '水轮机选型设计程序'
20  'Hmax--最大水头  Hmin--最小水头  Hav--平均水头  Hr--额定水头'
30  'Nr--单机出力  Hso--允许Hs限定值  ABS--海拔高程  Hs--计算吸出高'
40  'D1----转轮直径  n--水轮机额定转速  pt--轴向水推力  nr-飞逸转速'
50  'N0(I)--各型号水轮机最优单位转速'
60  'Q0(I)--各型号水轮机推荐单位流量'
70  'C(I)---各型号水轮机限制工况气蚀系数'
80  'E0(I)--各型号水轮机最高效率'
90  DIM H1(20), H2(20), T$(20), N0(20), Q0(20), C(20), E0(20),
    NF(20)
100  DIM KS(20), D(30), N(30), Q2(10, 20), N2(10, 20), E2(10, 20),
    C2(10, 20)
110  DIM Q1(10, 20), E1(10, 20), C1(10, 20), Q3(10, 20), N3(10, 20),
    D1M(10)
120  DIM X(10, 20), Y(10, 20), H(10, 20), L(10, 20)
130  '读入水轮机型谱参数表'
140  NN=5:REM Nn--水轮机型号数
150  FOR I=1 TO NN
160  READ T$(I), H1(I), H2(I), N0(I), Q0(I), C(I), E0(I), EL(I),
    D1M(I), KS(I), NF(I)
170  NEXT I
180  REM 读入各机型nio下单位流量，效率，气蚀系数
190  FOR I=1 TO NN:FOR J=1 TO 5
200  READ Q1(I, J), E1(I, J), C1(I, J)
210  NEXT :NEXT
220  REM 读入最高效率线与出力限制线参数
230  FOR I=1 TO NN: FOR J=1 TO 20
240  READ Q2(I, J), N2(I, J)
250  NEXT J
260  FOR J=1 TO 20
270  READ Q3(I, J), N3(I, J)
280  NEXT J:  NEXT I
290  REM 读入转轮标准D1系列与同步转数系列
300  FOR I=1 TO 30: READ D(I):NEXT
310  FOR I=1 TO 28 :READ N(I):NEXT
320  REM 水轮机型号选择
```

```
330 SCREEN 0 :PRINT"          请输入基本设计参数"
340 INPUT "特征水头:Hmin, Hmax, Hr, Hav=(m)";HMIN, HMAX, HR,
    HAV
350 INPUT "总装机容量Nr(KKW), 机组海拔高程ASL(m), 吸出高限定值Hso
    (m)="; NY, ASL, HS0
360 KK=0
370 INPUT "装机台数Z="; Z:IF Z=0 THEN END
380 EF=0.98:NR=INT(NY/Z/EF)
390 SCREEN 0:REM'水轮机型号选择'
400 FOR I=1 TO NN
410 IF HMAX>H2(I) THEN 540
420 IF HMIN<H1(I) THEN 540
430 KK=KK+1 :LOCATE 10
440 PRINT TAB(15);"选型方案----"; KK;"机组台数";Z
450 PRINT TAB(10);"==========="
460 PRINT TAB(12);"****模型水轮机参数表****"
470 PRINT "-----------------------------------------"
480 PRINT "| Hmin | Hmax | Type | nio | Qio | σ | η |"
490 PRINT "|------+------+------+----+---+--+--|"
500 PRINT "|";TAB(3);H1(I);TAB(9);"|";TAB(11);H2(I);TAB(17);"|";
    TAB(19);T$(I);TAB(25);"|";TAB(27);N0(I);TAB(33);"|";TAB(35);
    Q0(I);TAB(41);"|";TAB(43);C(I);TAB(49);"|";TAB(51);E0(I);
    TAB(57);"|"
510 PRINT "└------┴------┴------┴----┴---┴--┴--┘"
520 K=I:GOSUB 560
530 LOCATE 22:STOP
540 NEXT I
550 GOTO 370
560 '确定计算工况, 以Hsj大于HS0为条件'
570 C1=C(K):Q1=Q0(K)
580 HSJ=10-ASL/900-1.2*C1*HR
590 IF HSJ>=HS0 THEN HS=INT(HSJ-0.5):GOTO 680
600 C1=(10-ASL/900-HS0)/(1.2*HR)
610 HS=HS0
620 FOR L=1 TO 5
630 IF C1<C(L) THEN 650
640 L0=L:GOTO 660
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
650 NEXT L
660 Q1=(Q1(K, L0)-Q1(K, L0-1))/(C1(K, L0)-C1(K, L0-1))*
    (C1-C1(K, L0-1))+Q1(K, L0-1)
670 EM=(E1(K, L0)-E1(K, L0-1))/(C1(K, L0)-C1(K, L0-1))*
    (C1-C1(K, L0-1))+E1(K, L0-1)
680 EM=E0(K):Q1=Q0(K)
690 ET=INT((EM+0.03)*1000+0.5)/1000:Q2=Q1/1000
700 '计算转轮直径D1及转速n'
710 D1=SQR(NR*1000/(9.810001*HR^1.5*Q2*ET)):D1=INT(D1*100+
    0.5)/100
720 N=N0(K)*SQR(HAV)/D1:N=INT(N*10+0.5)/10
730 REM D1与n的圆整
740 FOR I=1 TO 30
750 IF D1>D(I) THEN 770
760 I0=I:GOTO 780
770 NEXT I
780 IF (D1-D(I0))/D1<=0.03 THEN D1=D(I0) ELSE D1=D(I0+1)
790 N=N0(K)*SQR(HAV)/D1
800 FOR I=1 TO 25
810 IF N>N(I) THEN 830
820 I0=I:GOTO 840
830 NEXT I
840 IF (N-N(I0))/N(I0)<=0.03 THEN N=N(I0) ELSE N=N(I0+1)
850 ET=1-(1-E0(K))*(D1M(K)/D1)^0.2-0.02 :ET=INT (ET*1000)/
    1000
860 PT=INT(KS(K)*HMAX*D1^2):NF=INT(NF(K)*HMAX^0.5/
    D1*10+0.5)/10
870 PRINT "    ****原型水轮机参数****"
880 PRINT "-----------------------------------------------------------"
890 PRINT "| 型号 | Hmin | Hmax | Hr | Nr | n(rpm) | D1 | pt | η | Hs |"
900 PRINT "+------+------+------+----+----+--------+----+----+---+----+"
910 PRINT "|";TAB(3);T$(K);TAB(9);"|";TAB(11);HMIN;
    TAB(17);"|";TAB(19);HMAX;TAB(25);"|";TAB(27);HR;TAB(33);
    "|";TAB(35);NR;TAB(41);"|";TAB(43);N;TAB(49);"|";TAB(51);
    D1;TAB(57);"|";TAB(59);PT;
920 PRINT TAB(65);"|";TAB(67);ET;TAB(73);"|";TAB(75);HS;TAB
    (79);"|"
```

```
930 PRINT "└---┴-----┴-----┴--┴--┴-------┴---┴---┴---┴--┘"
940 REM 计算工作范围，绘工作范围图
950 N1=N*D1/SQR(HMAX):N2=N*D1/SQR(HAV):N3=N*D1/
    SQR(HMIN)
960 FOR J=1 TO 20
970 Q3(K, J)=Q3(K, J)*Q1/Q0(K)
980 NEXT J
990 '绘制水轮机工作范围图'
1000 PRINT "  ****绘制水轮机工作范围图****"
1010 XMAX=Q3(K, 1):YMAX=N3(K, 1)
1020 FOR J=1 TO 20
1030 IF XMAX<Q3(K, J) THEN XMAX=Q3(K, J)
1040 IF YMAX<N3(K, J) THEN YMAX=N3(K, J)
1050 NEXT J
1060 XMIN=Q2(K, 1):YMIN=N3(K, 1)
1070 FOR J=1 TO 20
1080 IF XMIN>Q2(K, J) THEN XMIN=Q2(K, J)
1090 IF YMIN>N3(K, J) THEN YMIN=N3(K, J)
1100 NEXT J
1110 XMIN=XMIN/1.1:YMIN=YMIN/1.1:XMAX=XMAX*1.1:YMAX=
     YMAX*1.1
1120 H0=340:L0=500
1130 FOR J=1 TO 20
1140 H(1, J)=INT((YMAX-N2(K, J))/(YMAX-YMIN)*H0+0.5)
1150 L(1, J)=INT((Q2(K, J)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*L0+0.5)+80
1160 H(2, J)=INT((YMAX-N3(K, J))/(YMAX-YMIN)*H0+0.5)
1170 L(2, J)=INT((Q3(K, J)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*L0+0.5)+80
1180 NEXT J
1190 Y4=INT ((YMAX-N1)/(YMAX-YMIN)*H0+0.5)
1200 Y5=INT ((YMAX-N2)/(YMAX-YMIN)*H0+0.5)
1210 Y6=INT ((YMAX-N3)/(YMAX-YMIN)*H0+0.5)
1220 SCREEN 0:LINE(80, 0)-(L0+80, H0), 7, B
1230 X1=75:X2=85 :PRINT TAB( 6 );"ni"
1240 FOR I=2 TO 9
1250 Y1=H0/8*(I-1):Y2=Y1
1260 Y=YMAX-(YMAX-YMIN)/8*(I-1)
1270 YY=(YMAX-Y)/(YMAX-YMIN)*25/460*H0+1
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
1280  YY=INT(YY+0.5)
1290  LINE(X1, Y1)-(X2, Y2)
1300  LOCATE YY, 2:PRINT INT(Y*10+0.5)/10
1310  NEXT I
1320  Y1=H0-3:Y2=H0+3
1330  FOP I=1 TO 7
1340  X1=L0/7*(I-1)+80:X2=X1
1350  X=XMIN+(XMAX-XMIN)/7*(I-1)
1360  XX=(X-XMIN)/(XMAX-XMIN)*80/640*L0+8
1370  LINE(X1,Y1)-(X2,Y2)
1380  LOCATE H0/18+1, XX:PRINT INT(X+0.5);
1390  NEXT I
1400  PRINT TAB(XX+6); "Qi"
1410  FOR I=1 TO 2:FOR J=1 TO 19
1420  LINE(L(I,J), H(I,J))-(L(I,J+1), H(I,J+1))
1430  NEXT :NEXT
1440  FOR J=1 TO 19
1450  LINE(L(2,J), H(2,J))-(L(2,J)+5,H(2,J)-2)
1460  NEXT J
1470  YY4=Y4/17:YY5=Y5/17:YY6=Y6/17
1480  LINE(80,Y4)-(L0,Y4):LOCATE YY4,65:PRINT"(Hmax)"
1490  LINE(80,Y5)-(L0,Y5):LOCATE YY5,65:PRINT"(HR)"
1500  LINE(80,Y6)-(L0,Y6):LOCATE YY6,65:PRINT"(Hmin)"
1510  RETURN
1520  '型谱参数(混流式水轮机)'
1530  DATA HL240,25,45,72,1320,0.20, 0.92, 0.90, 0.46, 0.32, 159
1540  DATA HL220,40,85,70,1150,0.133,0.92, 0.9, 0.46, 0.32,133
1550  DATA HL200,70,115,68, 960, 0.1, 0.92, 0.89, 0.46, 0.22, 131
1560  DATA HL180,90, 125, 67, 860,0.085,0.92, 0.9, 0.46,0.22, 134
1570  DATA HL160,90, 150, 67, 670,0.065,0.91, 0.89,0.46, 0.16,127
1580  REM 特性曲线nio时η=f(Qi), σ=f(Qi)参数
1590  DATA 1250, 0.89, 0.20, 1200, 0.908, 0.198, 1160, 0.916, 0.196,
            1120, 0.92, 0.196, 1080, 0.916, 0.198
1600  DATA 1160, 0.884, 0.137, 1100, 0.902, 0.127, 1050, 0.914, 0.121,
            1000, 0.92, 0.115, 950, 0.916, 0.11
1610  DATA 1190, 0.87, 0.14, 1100, 0.90, 0.127, 1050, 0.903, 0.122,
            1000, 0.907, 0.115, 950, 0.904, 0.11
```

```
1620 DATA 850, 0.895, 0.085, 825, 0.905, 0.082, 800, 0.91, 0.08,
         775, 0.915, 0.078, 750, 0.92, 0.075
1630 DATA 690, 0.886, 0.045, 655, 0.090, 0.04, 630, 0.903, 0.037,
         600, 0.912, 0.036, 550, 0.91, 0.033
1640 REM 最高效率线与出力限制线的Qi与ni参数
1650 DATA 1060, 64.8, 1100, 65, 1150, 67.5, 1175, 70, 1200, 72.5,
         1210, 75, 1220, 78, 1210, 80, 1180, 81, 1150, 80.8,
         1100, 78.5, 1050, 76.5, 1025, 75, 1000, 73.5, 980, 72,
         972, 70, 975, 68,983,66,1000,65,1060,64.8
1660 DATA 1257, 50, 1250, 55, 1240, 60, 1238, 65, 1237.6, 67.5,
         1237.5, 70, 1237.4, 72.5, 1237.4, 75, 1237.4, 76.5,
         1238, 78, 1238.4, 80, 1244, 82, 1250, 84, 1251, 85,
         1252, 87, 1256, 90, 1258, 92, 1260, 93.5, 1263, 95,
         1265, 97
1670 DATA 1000, 62.5, 1050, 64.9, 1100, 68, 1110, 70, 1120, 72,
         1125, 75, 1118, 77.5, 1100, 79, 1080, 79.6, 1050, 78.5,
         1000, 77.2, 950, 75, 900, 73, 875, 72.4, 860, 70, 854,
         67.5, 858, 66, 862, 65, 900, 63, 1000, 62.5
1680 DATA 1160, 46, 1175, 50, 1180, 55, 1181, 58, 1180, 60,
         1175, 62.5, 1165, 65, 1150, 68, 1145, 70, 1142, 72,
         1125, 75, 1124, 77.5, 1125, 80, 1142, 85, 1148, 87,
         1160, 90, 1175, 93, 1200, 95, 1215, 97, 1240, 100
1690 DATA 800, 60, 850, 62, 880, 65, 900, 66.6, 910, 70, 908, 73,
         900, 74, 875, 76, 850, 75.7, 825, 75, 775, 72.5, 725,
         70, 700, 68, 680, 66, 677, 65, 675, 63, 685, 61, 700,
         60, 748, 59, 800, 59.9
1700 DATA 940, 45, 944, 50, 948, 55, 947, 60, 949, 65, 949.5, 67.5,
         950, 70, 950.3, 72.5, 950.5, 75, 950.5, 77.5, 950.6, 80,
         950.7, 82.5, 950.8, 85, 960, 87.5, 965, 90, 970, 92.5,
         980, 95, 990, 97, 1000, 99, 1010, 100
1710 DATA 760, 75, 780, 74, 805, 72.5, 815, 70, 810, 67.5, 800, 65,
         775, 62.0, 750, 58, 710, 57.5, 660, 58.0, 625, 60, 620, 62,
         615, 62.5, 620, 63.5, 625, 65, 640, 67.5, 660, 69, 670, 70,
         700, 72.5, 760, 75
1720 DATA 820, 52, 830, 55, 835, 57.5, 840, 60, 848, 62.5, 850, 65,
         855, 67.5, 860, 70, 862, 72.5, 868, 75, 870, 77.5, 872, 80,
         874, 82.5, 874, 85, 875, 87, 877, 88, 890, 90, 900, 91, 910,
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
        92, 920, 93
1730 DATA 600, 62, 625, 63.5, 640, 65, 658, 67.5, 660, 70, 658, 72,
        650, 73, 630, 74.7, 600, 74.7, 565, 73, 550, 72.5, 537, 72,
        520, 70, 510, 67.5, 509, 66, 510, 64, 525, 62.5, 530, 62,
        550, 61.8, 599, 62
1740 DATA 665, 50, 665, 52.5, 665.8, 55, 665.8, 57.5, 666, 60,
        666, 62.5, 666.5, 65, 666.5, 67.5, 667, 70, 667, 72.5,
        667, 75, 667.5, 77.5, 667.5, 80, 669, 82.5, 670, 85,
        673, 86, 680, 88, 690, 90, 701, 92, 720, 95
1750 REM 转轮标准直径系列与发电机同步转速系列'
1760 DATA 0.42, 0.45, 0.5, 0.6, 0.71, 0.8, 0.84, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6,
        1.8, 2.0, 2.1, 2.25, 2.5, 2.75, 3.0, 3.3, 3.8, 4.1, 4.5,
        5.0, 5.2, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0
1770 DATA 57.7, 60, 62.5, 65.2, 68.2, 71.4, 75, 79, 83.8, 88.2,
        93.8, 100, 107.1, 115.4, 125, 136.4, 150, 166.7, 187.5,
        214.3, 250, 300, 333.3, 375, 428, 500, 600, 750
```

第三节　水轮机运转综合特性曲线计算程序的设计

手工计算水轮机运转综合特性曲线时，计算繁锁、工作量大，尤其有许多选型设计方案参加比较时，绘制各方案运转综合特性曲线要花费大量重复性劳动。这个问题可以用计算机辅助设计的方法解决，设计一种通用程序，去完成运转综合特性曲线的计算与绘图问题。

一、程序设计思想

用计算机处理水轮机运转综合特性曲线的计算与绘制，基本上是模拟人们手工计算与绘图的过程，解决计算中几个主要问题的方法如下：

1）手算中要查阅手册中的水轮机特性曲线，计算程序中采用把模型综合特性曲线存储到计算机中去的方法。

2）手算中用人们眼睛查找工况点参数，程序中采用插值计算方法求工况点参数。

3）手算中使用作图工具按几何作图原理绘制运转综合特性曲线图，程序中用求等值线算法计算等效率线与等吸出高度线，用绘图程序绘制图形。

总之，程序设计是将人们手工计算与绘图过程逻辑化与程序化。

二、各类型水轮机模型综合特性曲线的计算机存储方法

水轮机模型综合特性曲线常因为水轮机的类型不同或表达方式不同而具有不同的形式。要针对各种不同形式采用不同的存储方法，以便于计算时引用。

1.混流式水轮机模型综合特性曲线的存储方式

通用的混流式水轮机模型综合特性曲线由类椭圆形等效率线、等气蚀系数线、等开度线及出力限制线所构成，以特性曲线换算为目的存储综合特性曲线时，可采用直接离散法或正交网格离散法进行处理。

（1） 直接离散法 直接离散法就是在需要离散的曲线上直接取离散点。离散等效率曲线时，如图5-5(a)所示，可用一组n_1'等于常数的直线与等效率线形成交点，这些交点均在等效率线上，用这些点直接把等效率线离散。在坐标图中，查取各离散点的坐标参数Q_1'、n_1'及各点相对应的函数值η_M，用相应的下标变量分别表示这些参数，按照第二章所介绍的数组存储方法，把各参数存储到计算机中。

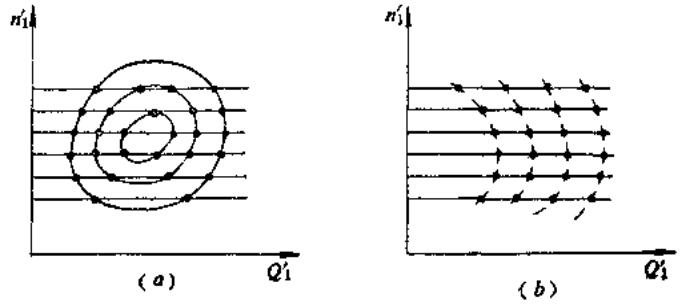


图 5-5 水轮机模型综合特性曲线的直接离散
(a)等效率曲线的离散；(b)等气蚀系数线的离散

进行特性曲线换算时，应用水轮机相似公式可直接把模型水轮机等效率线的参数换算为原型水轮机等效率线的参数，换算式如下：

$$H=(nD_1)^2/n_1'^2$$

$$\eta_T=\eta_M+\Delta\eta$$

$$N=9.81Q_1'D_1^2H^{1.5}\eta_T$$

按照上述换算关系，可把模型等效率线上各点的n_1'坐标换算为H（水头）坐标，把各点的模型效率η_M换算为原型效率η_T，把Q_1'坐标换算为N（出力）坐标。这样，模型等效率线上的点仍对应原型等效率线上的点，将同一条等效率线上的点连接起来就可绘制运转综合特性曲线的等效率线，计算与编程序都很简单。

对于模型水轮机等气蚀系数线的离散，可按图5-5(b)所示，在等σ线上直接取离散点，把各点的n_1'、Q_1'、η_M、σ值以数组形式按对应关系存储到计算机中。计算原型水轮

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

机的等H_1'线时，可把同一水平线上各点的出力N、吸出高度H_s计算出，形成各水头下的$H_s-f(N)$曲线，再用求等值线的方法求出运转特性曲线的等H_1'线。

（2）正交网格离散法　正交网格离散法是用一组正交网格节点间接离散曲线。第二章中，曾介绍了二元曲线的正交网格离散法，这种方法适用于处理混流式水轮机模型综合特性曲线，正交网格的形成方法如图5-6所示。

为了减少存储的数据量，可用图5-6所示的网格节点同时离散等效率线与等气蚀系数线，用两个一维下标变量分别表示节点的纵坐标与横坐标，而用两个二维下标变量分别表示节点的模型效率与气蚀系数值。例如，用N1(I)表示n_1'，用Q1(J)表示Q_1'，用E1(I,J)表示η_M，用C1(I,J)表示σ。把各节点的参数以数组的形式输入计算机，各数组分别对应于上述的变量名，这样，就可以用二元插值的方法求水轮机任意工况点的效率与气蚀系数。

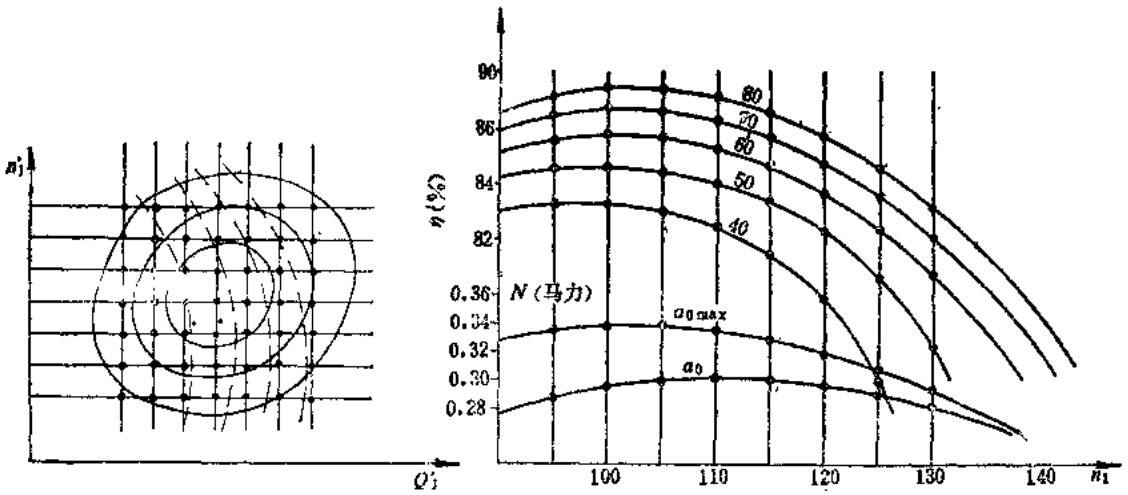


图 5-6　混流水轮机模型综合特性曲线的正交网格离散

图 5-7　水轮机线性特性曲线的离散

2.转桨式水轮机模型综合特性曲线的存储方式

转桨式水轮机模型综合特性曲线的离散宜采用非正交网格法，这在第二章第五节中已作过介绍。网格由一组φ等于常数线与一组n_1'等于常数线构成，用网格节点同时离散水轮机的等效率曲线与等气蚀系数线。这样，节点的n_1'坐标可用一维下标变量表示，而节点的Q_1'、η_M、σ值均要用二维下标变量表示。以规定的变量名把表示离散点参数的数组输入计算机，用非正交网格的二元插值法引用模型特性曲线的效率与气蚀系数。

3.水轮机线性模型特性曲线的存储方式

许多欧美国家用线性特性曲线方式表示水轮机模型特性曲线，如我国引进的HL310、HL230水轮机就采用这种表达形式。

线性模型特性曲线的离散宜采用直接离散法，如图5-7所示。作一组n_1'等于常数的直线，与水轮机各开度下的效率曲线及出力曲线形成交点，用这些交点离散效率曲线与模型出力曲线。在曲线坐标图上查取交点的单位转速、开度、效率或出力值，用不同的下标变

显表示各参数，以数组的形式把各交点的参数输入计算机。在水轮机特性曲线换算时，只要给出水头与导水叶相对开度，求出相应的单位转速，就可以用单位转速和导叶开度作插值变量，计算对应工况点的效率与模型出力。

除了上述方法之外，还可以用曲线拟合或曲面拟合法求出水轮机模型综合特性曲线的解析表达式，把这些表达式写入计算程序中就可以直接引用特性曲线的参数了，具体方法可参考第三章。

三、水轮机运转综合特性曲线计算程序的结构与设计方法

根据运转综合特性曲线的计算与绘制过程，可把程序分为模型曲线数据部分、水轮机基本参数输入部分、辅助曲线$\eta=f(H)$、$H_s=f(H)$计算部分、运转特性曲线的等效率线计算部分、出力限制线计算部分、等吸出高度线计算部分和运转综合特性曲线绘图部分。

1.模型综合特性曲线数据

模型综合特性曲线经离散处理后，可用下面三种方式之一存储到计算机中。

1）以DATA语句方式直接放在计算程序中，用READ语句读入。

2）以DATA语句方式把数据输入计算机并形成ASCII码数据文件。使用时，用CHAIN MERGE“文件名”指令链接到计算程序中，这种方式便于为计算程序更换数据。

3）以顺序文件方式把数据写入磁盘。使用时，把顺序文件调入内存，赋值给规定的变量名，这种方式便于为计算程序更换数据。

以上三种方式的具体编程可参考第二章。本节后面所附的源程序采用了第一种方式，各数据的变量标识符及输入顺序见SUB-1。

2.水轮机基本工作参数的输入

运转综合特性曲线计算所必须的参数可用键盘输入方式给定，在BASIC状态下，采用INPUT语句进行会话方式输入，运行程序时，在屏幕上提示出输入参量的名称及单位，然后键入具体参数，具体程序语句可参见所附源程序中的SUB-2。

3.辅助曲线$\eta=f(N)$的计算与等效率线的计算

这部分计算是运转综合特性曲线计算的核心部分，计算过程由下面几个步骤组成。

（1）插值计算各水头下的$\eta=f(N)$曲线　在$H_{min}\sim H_{max}$之间取m个计算用的水头（一般取$m=10\sim20$），用H1(I)表示，I为各水头序号，再计算出各H1(I)所对应的水轮机单位转速，用N11(I)表示。

$$H1(I)=(H_{max}-H_{min})(I-1)/(m-1)+H_{min}$$

$$N11(I)=n\times D_1/\sqrt{H1(I)}$$

$$I=1,\ 2,\ 3,\ \cdots,\ m$$

以各水头下的单位转速N11(I)作插值变量对离散的模型综合特性曲线网格节点数据进行插值计算，求出各插值点的效率，并计算出各插点的出力，插值点的取法如图5-8所示。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

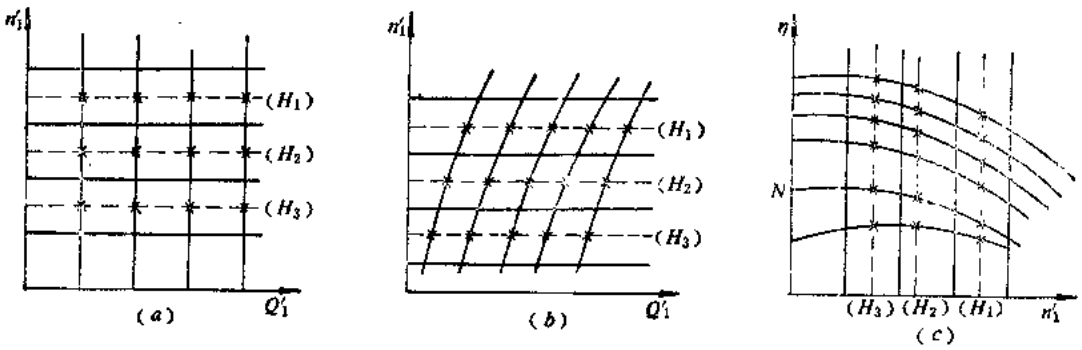


图 5-8 插值点的取法示意图

对于用正交网格离散的混流式水轮机模型综合特性曲线，插点可取在Q_1'等于常数的网格线上，这样，可以用N11(I)为插值变量用一元插值的办法求出插点的η_M值，再由η_M计算出η_T与出力N，即可得到各水头下的$\eta_T=f(N)$曲线。

对于用非正交网格离散的转桨式水轮机模型综合特性曲线，插点可取在网格的φ等于常数线上，这样，可以用N11(I)为插值变量，沿等φ线单方向用一元插值计算插点的η_M与Q_1'，再由这些参数计算出η_T与出力N，得到各水头下的$\eta_T=f(N)$曲线。这样取插值点的好处不仅是插值计算简单，而且可解决效率换算时，不同φ角下用不同的效率修正值的问题。

对于线性模型特性曲线，插点取在各开度下的效率线上，插值点的效率值可由插点左右的型值点的效率求出，为了提高插值精度，可用抛物线插值或三次样条插值。在给定水头下，各开度时的出力可由最大开度时的出力乘以相对开度值近似求出，并用相似换算公式计算出原型水轮机的出力，由此得到各水头下的$\eta_T=f(N)$曲线。

（2）等效率线的计算　等效率线是利用辅助曲线$\eta_T=f(N)$来求取的，通过(1)中的计算求出了各水头下的$\eta_T=f(N)$曲线，在此基础上可用求等值线的算法计算运转综合特性曲线的等效率线，程序设计方法如下：

1）用比较判断语句找出各水头下$\eta_T=f(N)$曲线的最高点，记作P(K)，K为计算水头序号。以P(K)点为界把曲线分为前半坡和后半坡，为下一步等效率线的插值提供方便。如图5-9所示。

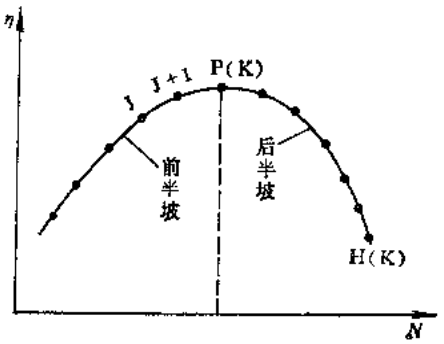


图 5-9 $\eta_T=f(N)$曲线的前半坡与后半坡

判断各水头下$\eta_T=f(N)$曲线最高点的方法很简单，用一段寻找最大值的程序即可，把曲线上各点的η_T值按点的顺序作比较，第J+1点的效率大于第J点时，说明曲线是上升的；当第J+1点的效率开始小于第J点时，则第J点就是$\eta_T=f(N)$曲线的最高点，若该曲

线是第K个计算水头下的$\eta_T=f(N)$曲线，则最高点就记作P(K)。

2）根据原型水轮机的最高效率$\eta_{T\max}$，选择几个递减的效率值作为等效率线计算时的插值变量，记作η_i，$\eta_i=\eta_{T\max}-0.01i$，例如$i=1,2,3,\cdots,10$。

3）用选定的η_i值作插值变量，对各水头下的$\eta_T=f(N)$曲线插值，则同一η_i值插值所求出的各点（坐标为出力N和水头H）即等效率线上的点，插值求等效率线的原理如图5-9示。

在等效率线插值中，首先要判断插值变量η_i为常数的水平线与某水头下的$\eta_T=f(N)$曲线有无交点，判断方法是用η_i与$\eta_T=f(N)$曲线最高点的效率值作比较，若η_i大于最高点P(K)的效率值，说明以插值变量η_i所作的水平线与第K个水头下的$\eta_T=f(N)$曲线无交点；反之，则说明以η_i所作的水平线与第K个水头下的$\eta_T=f(N)$曲线有交点。

为了绘图方便，可用η_i值对$\eta_T=f(N)$曲线的前半坡与后半坡分别插值，如图5-10所示，对前半坡插值得到1、2、3三点，构成运转综合特性曲线的等效率线的左边部分；对后半坡插值得1′、2′、3′三点，构成等效率线的右边部分。

在插值计算中，要统计出用某效率值作插值变量时所得到的插点的数目，这是由于以某效率值所作的水平线与有些水头下的$\eta_T=f(N)$曲线有交点，与有的水头下的$\eta_T=f(N)$曲线无交点。为了统计等效率线插值所得到的点数，可设一计数变量M(I)，每得一个交点，使M(I)加1，这里I表示等效率线的序号。这样，当与各水头下的$\eta_T=f(N)$曲线循环插值完毕时，M(I)就累计了某等效率线I（效率为η_i）上的总点数，为后面的自动绘图作了准备。

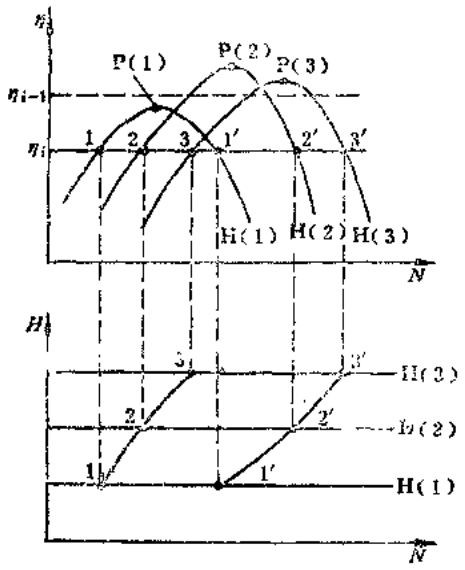


图 5-10　等效率线插值原理

4.原型水轮机出力限制线的计算

模型综合特性曲线的出力限制线上离散点的参数（Q_M'、n_M'、η_M）已存储在计算机中，可根据这些参数换算出原型水轮机的出力限制线，在大于额定水头的工作范围中，由发电机额定功率确定出力限制线。

5.等H_s线的计算

等H_s线的计算原理与等效率线的计算基本相同，由于网格节点的气蚀系数已存储在数据部分，因此，在插值计算各水头下$\eta_T=f(N)$曲线的同时，可计算各插点的σ值，进而计算$H_s=f(N)$曲线，在此基础上，用求等值线的插值计算求出等H_s线。

6.运转综合特性曲线图的绘制

运转综合特性曲线是平面坐标曲线。用第四章中介绍的通用绘图程序可把图形的主要部分绘出。图形中的特殊之处，例如出力限制线的阴影线、等H_s的虚线表示等，根据基本绘图原理都可以绘出，具体方法可参考本节所附源程序。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

四、程序编制流程

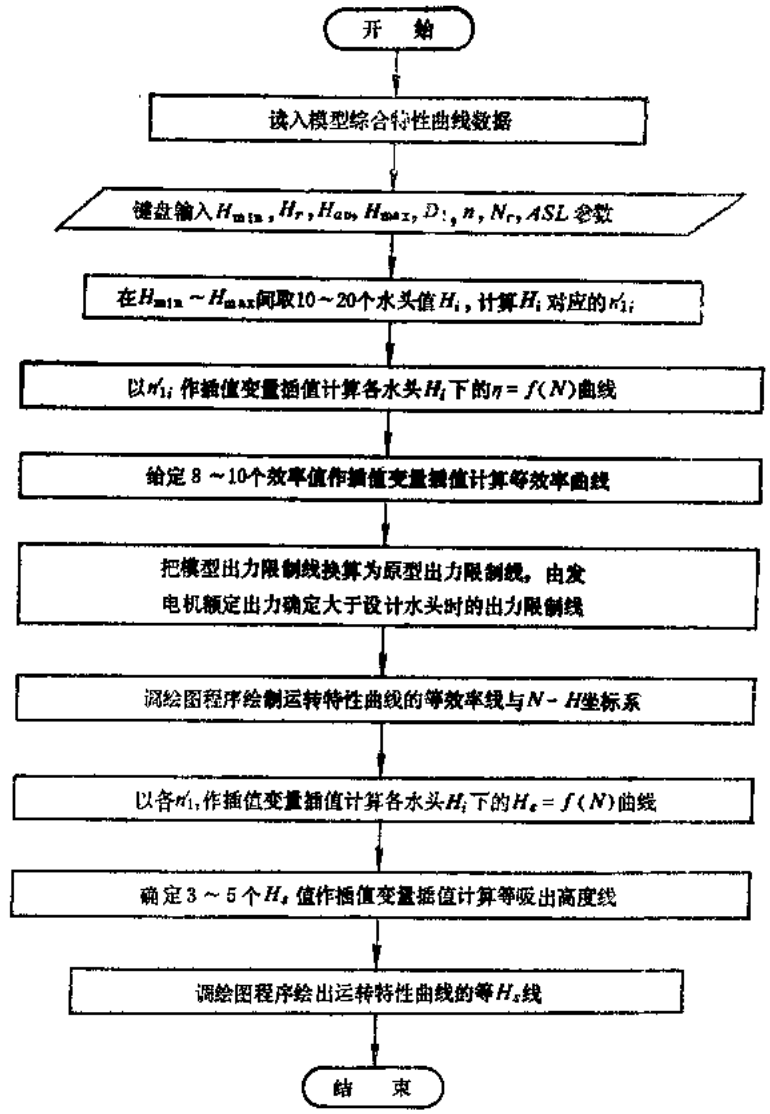


图 5-11 水轮机运转综合特性曲线计算程序框图

五、运转综合特性曲线计算源程序

下面所附程序为混流式水轮机运转综合特性曲线计算通用程序，对此程序稍加修改，补充插值求单位流量的语句即可用于转桨式水轮机。

```
10 '混流式水轮机运转综合特性曲线计算绘制程序'
11 GOSUB 17:'读入模型特性曲线数据'
12 GOSUB 36:'输入设计参数'
13 GOSUB 57:'插值计算辅助曲线，等效率线与出力限制线'
14 GOSUB 131:'绘运转综合特性曲线等效率线与出力限制线'
15 GOSUB 211:'计算等Hs线，绘制等Hs线'
```

```
16 END
17 'SUB-1:模型曲线参数读入部分子程序'
18 'M1,M2--输入模型效率时的纵横节点数'
19 'M3,M4--输入气蚀系数时的纵向始终节点序号'
20 'M5,M6--输入气蚀系数时的横向始终节点序号'
21 'N12((I)--网格节点单位转速;Q2(J)--网格节点单位流量'
22 'E2(I,J)--网格节点效率;XGM2(I,J)--网格节点气蚀系数'
23 'N13(I),Q3(I),E3(I)--出力限制线单位转速单位流量与效率'
24 DIM N12(20),Q2(22),E2(20,22),Q3(20),E3(20),N13(20),XGM2(20,30)
25 READ M1,M2,M3,M4,M5,M6
26 FOR I=1 TO M1:READ N12(I):NEXT
27 FOR J=1 TO M2:READ Q2(J):NEXT
28 FOR J=1 TO M1:FOR J=1 TO M2:READ E2(I,J):NEXT:NEXT
29 READ D1M,EMMAX,C0
30 FOR I=1 TO M1:READ N13(I):NEXT
31 FOR I=1 TO M1:READ Q3(I):NEXT
32 FOR I=1 TO M1:READ E3(I):NEXT
33 FOR I=M3 TO M4:FOR J=M5 TO M6
34 READ XGM2(I,J):NEXT:NEXT
35 RETURN
36 'SUB--2:输入设计参数部分子程序'
37 CLS:LOCATE 5
38 INPUT '请输入最大水头';HMAX
39 INPUT '请输入平均水头(m)';HPJ
40 INPUT '请输入设计水头(m)';HR
41 INPUT '请输入最小水头(m)';HMIN
42 INPUT '请输入标称直径(m)';D1
43 INPUT '请输入额定出力(kkw)';NR
44 INPUT '请输入同步转速(rpm)';N1
45 INPUT '请输入海拔高程ASL(m)';ASL
46 CLS:LOCATE 10,24:PRINT'正在计算中'
47 'SUB--3:插值计算效率--出力辅助曲线子程序'
48 'N11--插值水头对应的单位转速;E(I,J)--插值点效率'
49 'W1(I,J)--各水头下出力值;W2(I,J)--等效率线上出力(左边)'
50 'W3(I,J)--等效率线上出力(右边);等吸出高线上出力'
51 'P(I)--各水头下η=f(N)曲线最高点序号'
52 'E13(I),Q13(I),W13(I)--出力限制线上效率，单位流量，出力值'
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
53 DIM N11(20),E1(20,22),W1(20,22),W2(20,20),W3(20,20)
54 DIM M(30),X1(20,20),X2(20,20),Y(10,20),E(10)
55 DIM H(20,22),L1(20,22),L2(20,22),P(20),H1(20)
56 DIM E13(20),W13(20),Q13(20),A(20),B(20)
57 FOR I=1 TO 10
58 H1(I)=(HMAX-HMIN)/9*(I-1)+HMIN
59 N11(I)=N1*D1/SQR(H1(I))
60 NEXT I
61 ETMAX=1-(1-EMMAX)*(D1M/D1)^0.2
62 BE=ETMAX-EMMAX
63 FOR K=1 TO 10
64 FOR I=1 TO M1
65 IF N11(K)(N12(I)) THEN 67
66 IO=1:GOTO 68
67 NEXT I
68 FOR J=1 TO M2
69 N=IO-1:DD=(N11(K)-N12(N))/(N12(IO)-N12(N))
70 E1(K,J)=(E2(IO,J)-E2(N,J))*DD+E2(N,J)+BE
71 W1(K,J)=9.810001*Q2(J)*H1(K)^1.5*E1(K,J)*D1^2/10^6
72 NEXT J:NEXT K
73 '找出效率曲线最高点，插值求等效率曲线'
74 FOR K=1 TO 10
75 FOR J=1 TO M2
76 IF E1(K, J+1)>E1(K, J) THEN 78
77 P(K)=J:GOTO 79
78 NEXT J
79 NEXT K
80 FOR I=1 TO 10
81 M(I)=0
82 E(I)=ETMAX-0.1*I
83 FOR K=1 TO 10
84 IF E(I)>E1(K, P(K)) THEN 101
85 M(I)=M(I)+1
86 Y(I, M(I))=H1(K)
87 FOR J=1 TO P(K)
88 IF E(I)<E1(K, 1) THEN JO=2:GOTO 92
89 IF E(I)>E1(K, J) THEN 91
```

```
90  JO=J:GOTO 92
91  NEXT J
92  N=JO-1:DD=(E(I)-E1(K, N))/(E1(K, JO)-E1(K, N))
93  W2(I, M(I))=(W1(K, JO)-W1(K, N))*DD+W1(K, N)
94  FOR J=P(K) TO M2
95  IF E(I)<E1(K, M2) THEN JO=M2:GOTO 99
96  IF E(I)<E1(K, J) THEN 98
97  JO=J:GOTO 99
98  NEXT J
99  N=JO-1:DD=(E(I)-E1(K, N))/(E1(K, JO)-E1(K, N))
100 W3(I, M(I))=(W1(K, JO)-W1(K, N))*DD+W1(K, N)
101 NEXT K
102 NEXT I
103 FOR I=1 TO 10
104 FOR J=1 TO M(I)
105 X1(I, J)=W2(I, J) :X2(I, J)=W3(I, J)
106 NEXT J:NEXT I
107 '计算出力限制线'
108 Q11=NR*1000/(9.8*D1↑2*(E3(10)+BE)*HR↑1.5)*10↑3
109 FOR I=1 TO 10
110 FOR K=1 TO 19
111 IF N11(I)<N13(K) THEN 113
112 KO=K:GOTO 114
113 NEXT K
114 N=KO-1:DD=(N11(I)-N13(N))/(N13(K)-N13(N))
115 E13(I)=(E3(K)-E3(N))*DD+E3(N)+BE
116 Q13(I)=(Q3(K)-Q3(N))*DD+Q3(N)
117 W13(I)=9.810001*Q13(I)*H1(I)↑1.5*E13(I)*D1↑2/10↑6
118 NEXT I
119 FOR I=1 TO 10
120 IF H1(I)>HR THEN W13(I)=NR
121 NEXT I
122 FOR I=1 TO 10
123 IF H1(I)<HR THEN 125
124 IO=I:GOTO 126
125 NEXT I
126 W13(1)=W13(1)*Q11/Q13(IO)
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
127 FOR I=1 TO IO
128 W13(I)=(NR-W13(1))/(IO-1)*(I-1)+W13(1)
129 NEXT I
130 RETURN
131 'SUB--4 : 绘图子程序'
132 'X1(I, J), X2(I, J), Y(I, J)--绘图变量'
133 'L1(I, J), L2(I, J), H(I, J)--屏幕绘图变量'
134 XMIN=X1(1, 1):XMAX=X1(1, 1)
135 YMIN=Y(1, 1):YMAX=Y(1, 1)
136 FOR I=1 TO 8
137 FOR J=1 TO M(I)
138 IF XMIN>X1(I, J) THEN XMIN=X1(I, J)
139 IF XMIN>X2(I, J) THEN XMIN=X2(I, J)
140 IF XMAX<X1(I, J) THEN XMAX=X1(I, J)
141 IF XMAX<X2(I, J) THEN XMAX=X2(I, J)
142 IF YMIN>Y(I, J) THEN YMIN=Y(I, J)
143 IF YMAX<Y(I, J) THEN YMAX=Y(I, J)
144 NEXT J:NEXT I
145 YMAX=YMAX*1.05
146 YMIN=YMIN/1.05
147 HO=340:LO=520:SCREEN 0, 2
148 FOR I=1 TO 10
149 FOR J=1 TO M(I)
150 H(I, J)=(YMAX-Y(I, J))/(YMAX-YMIN)*HO+1
151 L1(I, J)=(X1(I, J)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO+80
152 L2(I, J)=(X2(I, J)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO+80
153 NEXT J:NEXT I
154 FOR I=1 TO 8
155 FOR J=1 TO (M(I)-1)
156 LINE(L1(I, J), H(I, J))-(L1(I, J+1), H(I, J+1)), 2
157 LINE(L2(I, J), H(I, J))-(L2(I, J+1), H(I, J+1)), 2
158 NEXT J
159 NEXT I
160 LINE(80, 0)-(600, 340), 2, B
161 C=(YMAX-HMAX)/(YMAX-YMIN)*HO
162 F=(YMAX-HMIN)/(YMAX-YMIN)*HO
163 LINE(80, C)-(600, C)
```

```
164 LINE(80, F)-(600, F)
165 X1=75:X2=85
166 FOR I=1 TO 7
167 Y1=HO/6*(I-1):Y2=Y1
168 FOR X1=80 TO 600 STEP 5:PSET(X1, Y1):NEXT X1
169 LINE(75, Y1)-(85, Y2), 3
170 NEXT I
171 Y1=335:Y2=345
172 FOR I=1 TO 10
173 X1=LO/10*I+80:X2=X1
174 FOR Y1=0 TO 335 STEP 4:PSET(X1, Y1):NEXT Y1
175 LINE(X1, Y1)-(X2, Y2)
176 NEXT I
177 FOR I=2 TO 7
178 Y1=HO/6*(I-1)
179 YY=INT (YMAX-(YMAX-YMIN)/6*(I-1)+0.5)
180 H=INT((YMAX-YY)/(YMAX-YMIN)*25/440*HO+0.5)
181 LOCATE H, 3:PRINT YY
182 NEXT I
183 FOR I=0 TO 10
184 X1=LO/10*I
185 XX=INT((XMAX-XMIN)/10*I+XMIN+0.5)
186 L=INT((XX-XMIN)/(XMAX-XMIN)*80/640*LO+0.5)+8
187 LOCATE 21, L:PRINT XX
188 NEXT I
189 C=INT((YMAX-HMAX)/(YMAX-YMIN)*25/440*HO+0.5)
190 LOCATE C-1, 64:PRINT '最大水头';HMAX;'(m)'
191 F=INT((YMAX-HMIN)/(YMAX-YMIN)*25/440*HO+1)
192 LOCATE F, 64:PRINT '最小水头';HMIN;'(m)'
193 LOCATE 1, 12:PRINT 'H(M)'
194 LOCATE 20, 70:PRINT 'N(KKW)':C=INT(C+0.5)
195 FOR I=1 TO 8 STEP 2
196 D=INT((X1(I, M(I))-XMIN)/(XMAX-XMIN)*80/640*LO+0.5)+9
197 E(I)=INT(E(I)*1000+0.5)/10
198 LOCATE C-1, D:PRINT INT(E(I)+0.5);'%'
199 NEXT I
200 FOR I=1 TO 10
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
201  A(I)=(YMAX-H1(I))/(YMAX-YMIN)*HO+1
202  B(I)=(W13(I)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO+80
203  NEXT I
204  FOR I=1 TO 9
205  LINE(B(I), A(I))-(B(I+1), A(I+1))
206  IF H1(I)<HR THEN 208
207  LINE(B(I), A(I))-(B(I)+5, A(I)-5):GOTO 209
208  LINE(B(I), A(I))-(B(I)+5, A(I))
209  NEXT I
210  RETURN
211  'SUB--5 :计算等Hs曲线，绘制等Hs曲线子程序'
212  'Hs1(I, J)-各水头下吸出高值; Hs(I)--等吸出高度值'
213  'M(I)--等Hs线插值所得点数计数变量'
214  DIM XGM1(20, 22), Hs1(20, 22), Hs(3)
215  FOR K=1 TO 10
216  FOR I=M3 TO M4
217  IF N11(K)>N12(M3)THEN IO=M3+1:GOTO 222
218  IF N11(K)<N12(M4)THEN IO=M4   :GOTO 222
219  IF N11(K)<N12(I)THEN 221
220  IO=I:GOTO 222
221  NEXT I
222  FOR J=M5 TO M6
223  N=IO-1:DD=(N11(K)-N12(N))/(N12(IO)-N12(N))
224  XGM1(K, J)=(XGM2(IO, J)-XGM2(N, J))*DD+XGM2(N, J)
225  HS1(K, J)=10-HB/900-1.2*XGM1(K, J)*H1(K)
226  NEXT J
227  NEXT K
228  FOR K=1 TO 10
229  FOR J=M5 TO M6
230  IF HS1(K, (J+1))>HS1(K, J) THEN 232
231  P(K)=J:GOTO 233
232  NEXT J
233  NEXT K
234  L=INT(10-ASL/900-1.1*C0*HR)
235  FOR I=1 TO 3
236  M(I)=0
237  HS(I)=L-I+3
```

```
238 FOR K=1 TO 10
239 IF HS(I)>HS1(K, P(K)) THEN 249
240 M(I)=M(I)+1
241 Z(I, M(I))=H1(K)
242 FOR J=P(K) TO M6
243 IF HS(I)<HS1(K, M6) THEN JO=M6:GOTO 247
244 IF HS(I)<HS1(K, J) THEN 246
245 JO=J:GOTO 247
246 NEXT J
247 N=JO-1:DD=(HS(I)-HS1(K, N))/(HS1(K, JO)-HS1(K, N))
248 W3(I, M(I))=(W1(K, JO)-W1(K, N))*DD+W1(K, N)
249 NEXT K
250 NEXT I
251 FOR I=1 TO 3
252 FOR J=1 TO M(I)
253 H(I, J)=(YMAX-Z(I, J))/(YMAX-YMIN)*HO+1
254 L2(I, J)=(W3(I, J)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO+80
255 NEXT J:NEXT I
256 GOSUB 267
257 FOR I=1 TO 3
258 FOR J=1 TO 29 STEP 2
259 LINE(LL(I, J), HH(I, J))-(LL(I, J+1), HH(I, J+1)), 3
260 NEXT J:NEXT I
261 FOR I=1 TO 3
262 D=INT((W3(I, M(I)-1)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*80/640*
    LO+0.5)+10
263 C=INT((YMAX-Z(I, M(I)-1))/(YMAX-YMIN)*HO/450*25+0.5)
264 LOCATE C, D:PRINT HS(I)
265 NEXT I
266 RETURN
267 DIM LL(5, 30), HH(5, 30)
268 FOR I=1 TO 3:FOR L=1 TO 30
269 HH(I, L)=(H(I, M(I))-H(I, 1))/29*(L-1)+H(I, 1)
270 FOR J=1 TO M(I)
271 IF HH(I, L)=H(I, 1) THEN LL(I, L)=L2(I, 1):GOTO 278
272 IF HH(I, L)=H(I, M(I)) THEN LL(I, L)=L2(I, 1):GOTO 278
273 IF HH(I, L)<H(I, J) THEN 275
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
274 JO=J:GOTO 276
275 NEXT J
276 J1=JO-1 :DD=(HH(I, L)-H(I, J1))/(H(I, JO)-H(I, J1))
277 LL(I, L)=(L2(I, JO)-L2(I, J1))*DD+L2(I, J1)
278 NEXT L:NEXT I
279 RETURN
280 '水轮机模型特性曲线数据--HL220--46'
281 DATA 15, 16, 2, 15, 3, 14, 90, 87.5, 85, 82.5, 80, 77.5
282 DATA 75, 72.5, 70, 67.5, 65, 62.5, 60, 57.5, 55
283 DATA 650, 700, 725, 750, 800, 850, 900, 950, 1000
284 DATA 1050, 1100, 1150, 1200, 1225, 1250, 1300
285 DATA 0.680, 0.734, 0.754, 0.769, 0.782, 0.790, 0.800, 0.803
286 DATA 0.810, 0.818, 0.823, 0.827, 0.828, 0.819, 0.809, 0.761
287 DATA 0.718, 0.762, 0.780, 0.790, 0.807, 0.811, 0.820, 0.826
288 DATA 0.832, 0.839, 0.843, 0.850, 0.848, 0.838, 0.821, 0.780
289 DATA 0.749, 0.784, 0.800, 0.809, 0.821, 0.830, 0.838, 0.843
290 DATA 0.851, 0.860, 0.865, 0.866, 0.860, 0.845, 0.830, 0.784
291 DATA 0.780, 0.807, 0.818, 0.823, 0.836, 0.845, 0.852, 0.860
292 DATA 0.870, 0.880, 0.881, 0.880, 0.867, 0.852, 0.835, 0.781
293 DATA 0.798, 0.823, 0.830, 0.837, 0.849, 0.860, 0.867, 0.874
294 DATA 0.884, 0.891, 0.894, 0.886, 0.869, 0.856, 0.840, 0.799
295 DATA 0.817, 0.837, 0.843, 0.849, 0.861, 0.870, 0.879, 0.888
296 DATA 0.897, 0.900, 0.900, 0.889, 0.867, 0.856, 0.840, 0.805
297 DATA 0.827, 0.845, 0.851, 0.859, 0.870, 0.881, 0.890, 0.900
298 DATA 0.900, 0.900, 0.900, 0.889, 0.866, 0.853, 0.842, 0.811
299 DATA 0.832, 0.849, 0.857, 0.864, 0.878, 0.891, 0.900, 0.900
300 DATA 0.900, 0.900, 0.900, 0.889, 0.866, 0.854, 0.843, 0.817
301 DATA 0.832, 0.851, 0.858, 0.866, 0.883, 0.898, 0.900, 0.900
302 DATA 0.900, 0.900, 0.900, 0.889, 0.867, 0.855, 0.843, 0.822
303 DATA 0.822, 0.848, 0.858, 0.867, 0.884, 0.899, 0.900, 0.900
304 DATA 0.900, 0.900, 0.897, 0.884, 0.865, 0.856, 0.846, 0.822
305 DATA 0.811, 0.841, 0.852, 0.862, 0.882, 0.897, 0.900, 0.900
306 DATA 0.900, 0.900, 0.891, 0.881, 0.862, 0.855, 0.845, 0.821
307 DATA 0.801, 0.828, 0.841, 0.852, 0.878, 0.890, 0.899, 0.900
308 DATA 0.900, 0.892, 0.885, 0.872, 0.854, 0.848, 0.840, 0.818
309 DATA 0.790, 0.816, 0.828, 0.839, 0.860, 0.875, 0.884, 0.888
310 DATA 0.886, 0.883, 0.878, 0.862, 0.850, 0.843, 0.833, 0.811
```

```
311 DATA 0.779, 0.799, 0.810, 0.821, 0.840, 0.859, 0.868, 0.873
312 DATA 0.873, 0.872, 0.860, 0.852, 0.842, 0.835, 0.826, 0.802
313 DATA 0.767, 0.785, 0.797, 0.800, 0.821, 0.840, 0.850, 0.853
314 DATA 0.855, 0.852, 0.848, 0.840, 0.831, 0.823, 0.817, 0.793
315 DATA 0.46, 0.90, 0.16, 90, 87.5, 85, 82.5, 80, 77.5
316 DATA 75, 72.5, 70, 67.5, 65, 62.5, 60, 57.5, 55
317 DATA 1166, 1151, 1138, 1127, 1121, 1120, 1124, 1130, 1140, 1160,
        1170, 1176, 1182, 1185, 1185
318 DATA 0.830, 0.851, 0.867, 0.880, 0.891, 0.899, 0.900, 0.896
319 DATA 0.890, 0.881, 0.872, 0.865, 0.866, 0.846, 0.834
320 DATA 0.104, 0.109, 0.120, 0.128, 0.131, 0.138, 0.142, 0.148,
        0.152, 0.157, 0.162, 0.166
321 DATA 0.098, 0.102, 0.108, 0.115, 0.119, 0.125, 0.128, 0.134,
        0.142, 0.149, 0.156, 0.161
322 DATA 0.093, 0.098, 0.105, 0.109, 0.115, 0.118, 0.124, 0.128,
        0.135, 0.142, 0.150, 0.156
323 DATA 0.092, 0.096, 0.102, 0.107, 0.111, 0.116, 0.120, 0.125,
        0.130, 0.137, 0.146, 0.151
324 DATA 0.090, 0.094, 0.101, 0.105, 0.108, 0.113, 0.118, 0.123,
        0.128, 0.135, 0.143, 0.148
325 DATA 0.091, 0.093, 0.099, 0.104, 0.107, 0.111, 0.117, 0.122,
        0.127, 0.134, 0.142, 0.146
326 DATA 0.089, 0.092, 0.097, 0.102, 0.106, 0.111, 0.116, 0.121,
        0.127, 0.133, 0.144, 0.147
327 DATA 0.089, 0.092, 0.097, 0.101, 0.105, 0.109, 0.115, 0.121,
        0.127, 0.134, 0.144, 0.148
328 DATA 0.089, 0.090, 0.091, 0.093, 0.104, 0.109, 0.115, 0.122,
        0.128, 0.136, 0.146, 0.151
329 DATA 0.089, 0.093, 0.096, 0.099, 0.104, 0.109, 0.115,0.122, 0.130,
        0.139, 0.149, 0.157
330 DATA 0.089, 0.092, 0.096, 0.099, 0.104, 0.108, 0.116,0.123, 0.132,
        0.142, 0.155, 0.163
331 DATA 0.089, 0.092, 0.096, 0.099, 0.104, 0.109, 0.117,0.125, 0.136,
        0.147, 0.164, 0.171
332 DATA 0.089, 0.092, 0.097, 0.099, 0.105, 0.109, 0.118,0.128, 0.140,
        0.155, 0.173, 0.182
333 DATA 0.090, 0.090, 0.091, 0.100, 0.105, 0.110, 0.119,0.121, 0.146,
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

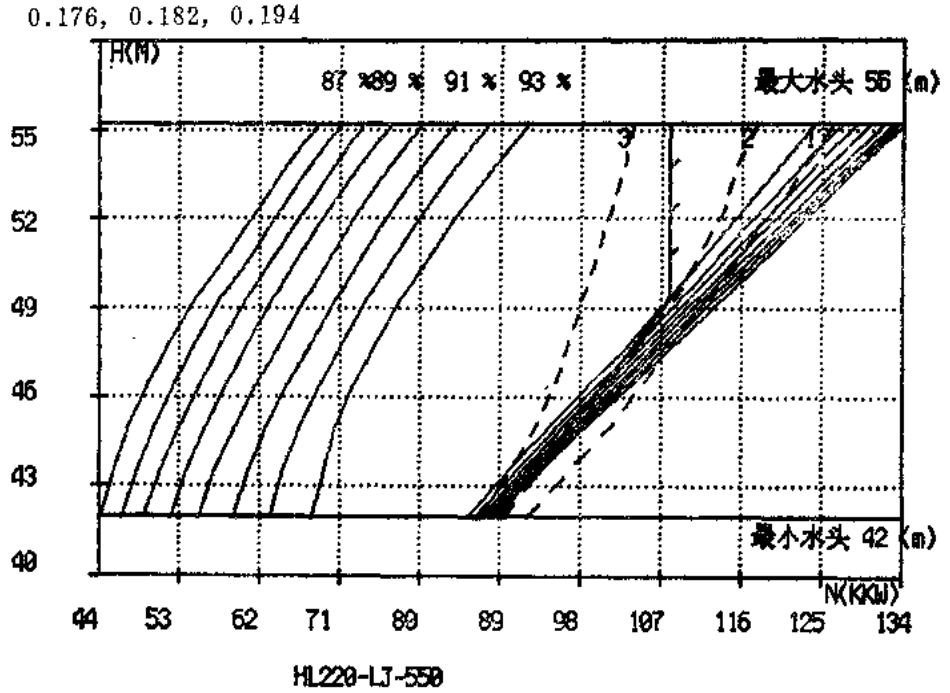


图 5-12 程序输出的运转综合特性曲线图

第四节 水轮机蜗壳的计算机辅助设计

蜗壳是水轮机的重要过流部件，也是决定电站主厂房尺寸的关键部件。大中型水电站主要使用金属蜗壳与混凝土蜗壳。尽管两种蜗壳的计算方法不同，但计算过程都可归结为蜗壳参数选择、断面水力计算与图形绘制三个部分。本节以金属蜗壳为主说明程序设计的方法。

一. 金属蜗壳计算程序的设计

1.蜗壳基本参数选择

设计金属蜗壳时要选择座环及碟形边的几何参数、蜗壳进口断面流速系数，此问题可按照第二章中介绍的技术资料处理方法去解决。

1）《水轮机设计手册》中的座环及碟形边数表为不规则二元数表，应按不规则二元数表的处理方法把此数表存储到计算机中，选择表中参数时，给定转轮直径D_1和水轮机水头H，以D_1和H作自变量，检索座环及碟形边数表选择与D_1和H相对应的各参数。

2）把《水轮机设计手册》中关于蜗壳进口断面平均流速系数与水头关系的曲线离散化并存入计算机，计算中根据水轮机的工作水头用一元插值方法可确定流速系数。

2.蜗壳各断面的水力计算

蜗壳断面水力计算包括进口断面计算、圆形断面计算及椭圆断面计算三部分。由于各部分计算均有现成的公式，所以，程序设计比较简单。在确定了蜗壳包角φ，之后，可每间隔5°～10°取一计算断面，逐个断面进行计算，并以$\rho>S$和$\rho<S$为条件，判断计算断面是圆形断面还是椭圆断面，使程序进行不同的计算段落。计算所得断面参数，以数组形式存放，为下一步的绘图准备好数据。

3.蜗壳图形的绘制

蜗壳水力设计的结果一般要求绘出蜗壳单线图，图形包括圆断面图、椭圆断面图与蜗壳平面图，这类图属于工程结构图，可采用基本图素表示法计算图形的绘图参数与绘制图形。

（1）圆断面图的绘制　蜗壳圆断面图形如图5-13示，由直线与圆弧两种图素构成。直线部分为表示座环的L_1、L_2、L_3、L_4，圆弧部分包括表示蜗壳断面的大圆弧O_1及表示碟形边的小圆弧O_2和O_3。在绘图程序设计时，直线部分用LINE指令绘制，圆弧部分用CIRCLE指令绘制。取图示的坐标系，分别计算各部分图素的绘图参数。

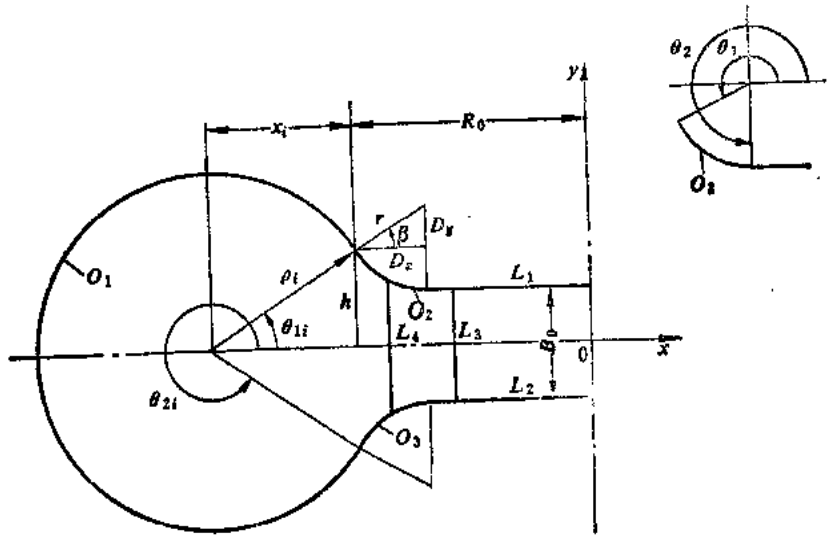


图 5-13　蜗壳圆断面绘图参数示意图

1）圆弧O_1绘图参数计算：在图形坐标系xoy中，圆弧O_1的圆心坐标为$(-a_i,\ 0)$，半径为ρ_i，i为计算断面序号，这些参数在断面水力计算中已求出并存放在数组中。圆弧的起始角为θ_{1i}，终止角为θ_{2i}，根据图5-13所示的几何关系，θ_{1i}与θ_{2i}分别为

$$\theta_{1i}=\mathrm{arctg}(h/x_i)$$

$$\theta_{2i}=2\pi-\theta_{1i}$$

2）圆弧O_2及O_3绘图参数的计算：圆弧O_2为表示碟形边的圆弧，其半径在选择碟形边参数时已经确定，根据图5-13所示的几何关系可进一步求出圆心坐标$(x_2,\ y_2)$、圆弧起始角θ_1与终止角θ_2，在图形xoy坐标系中，这些参数分别为

$$D_x=\sqrt{r^2-(r+B_0/2-h)^2}$$

$$D_y=(r+B_0/2-h)$$

$$x_2=-(R_0-D_x)$$

$$y_2=B_0/2+r$$

$$\beta=\mathrm{arctg}(D_y/D_x)$$

$$\theta_1=\pi+\beta$$

$$\theta=1.5\pi$$

圆弧O_3与圆弧O_2对称，可用O_2的参数相应求出。有了上述参数之后，就可直接用绘

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

圆弧指令绘出O_2和O_3。

3）直线部分绘图参数计算，直线部分只需确定线段的起点与终点的坐标，表示座环的直线$L_1 \sim L_4$的绘图参数可由选定的座环参数直接求出，再把这些参数变换为xoy坐标系中的参数，用LINE指令可绘出各线段。

（2）椭圆断面的绘制　椭圆断面的几何关系如图5-14示，按照蜗壳椭圆断面的作图方法，断面轮廓线由大圆弧O_1与小圆弧O_2、O_3连接而成。

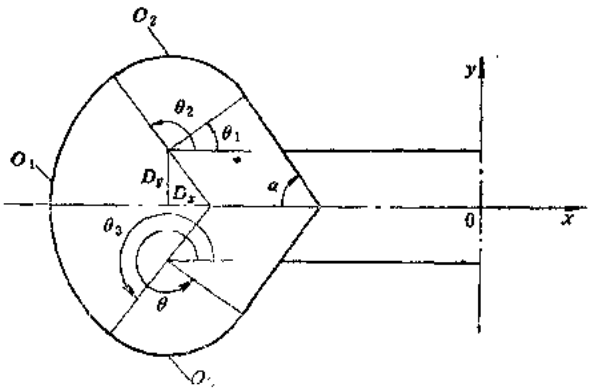


图 5-14　蜗壳椭圆断面绘图参数示意图

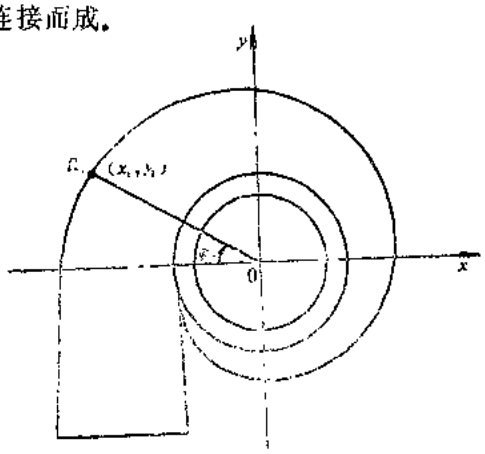


图 5-15　蜗壳平面图绘图参数示意图

1）大圆弧O_1绘图参数的计算：在蜗壳断面图的xoy坐标系中，圆弧O_1的圆心(x_{1i}, y_{1i})的参数为$(-a_i, O)$，半径为ρ_{1i}，这些参数在椭圆断面的水力计算中已经求出。圆弧O_1的起始角θ_2与终止角θ_3为

$$\theta_2 = \pi - \alpha;$$

$$\theta_3 = \pi + \alpha \quad (\alpha\text{一般取}55^\circ)$$

2）小圆弧O_2与O_3绘图参数的计算：小圆弧O_2与O_3的半径ρ_{2i}在断面水力计算中已求出。圆弧O_2的起始角θ_1与终止角θ_2是已知数，其中，$\theta_1 = \pi/2 - \alpha$；$\theta_2 = \pi - \alpha$。根据断面几何关系可求出各断面$i$的圆弧$O_2$的圆心坐标$(x_{2i}, y_{2i})$，计算式为

$$D_x = (\rho_{1i} - \rho_{2i})\cos\alpha$$

$$D_y = (\rho_{1i} - \rho_{2i})\sin\alpha$$

$$x_{2i} = x_{1i} - D_x$$

$$y_{2i} = y_{1i} + D_y$$

圆弧O_3与圆弧O_2关于x轴对称，参数可相应求出。

根据上面计算得到的各圆弧的绘图参数，可用绘制圆弧的CIRCLE指令绘出各圆弧，构成椭圆断面。

（3）蜗壳平面图的绘制　蜗壳平面图主要表示蜗壳的平面轮廓尺寸。蜗壳平面图如图5-15所示，由表示座环的两个同心圆与蜗壳平面外轮廓线所构成，两个同心圆表示座环支柱所在圆环的内、外径，是已知数。因此，只要求出外轮廓线上各点在xoy坐标系中的坐标参数(x_i, y_i)，就可画出蜗壳平面图。

在蜗壳各断面水力计算时，外轮廓最大半径与平面角度之间的关系$R_i = f(\varphi_i)$已经求

出。为了绘图方便，需要把这种极坐标参数换算为平面直角坐标参数。在xoy坐标系中，外轮廓线上某点i的直角坐标参数x_i、y_i为

$$x_i=-R_i\cos\varphi_i;\quad y_i=R_i\sin\varphi_i$$

依次计算出外轮廓线上各点的x_i、y_i，用绘直线指令 LINE(x_i,y_i)—$(x_{i+1},\ y_{i+1})$把各点联接，就可绘出蜗壳平面外轮廓线。另外，再把表示座环的两个同心圆及蜗壳进口钢管段画出，就构成蜗壳的平面图。

（4）蜗壳主要尺寸的标注　为了表示蜗壳的几何尺寸，需要在蜗壳各图形的一些关键部位上标注线性尺寸或角度等参数，标注方法在第四章中已作介绍，具体程序设计方法参见本节所附源程序。

4.金属蜗壳设计程序编制流程图

上面已较详细地介绍了金属蜗壳计算程序中各部分的设计方法，按照金属蜗壳的实际设计过程可制定出下面的程序编制流程图。

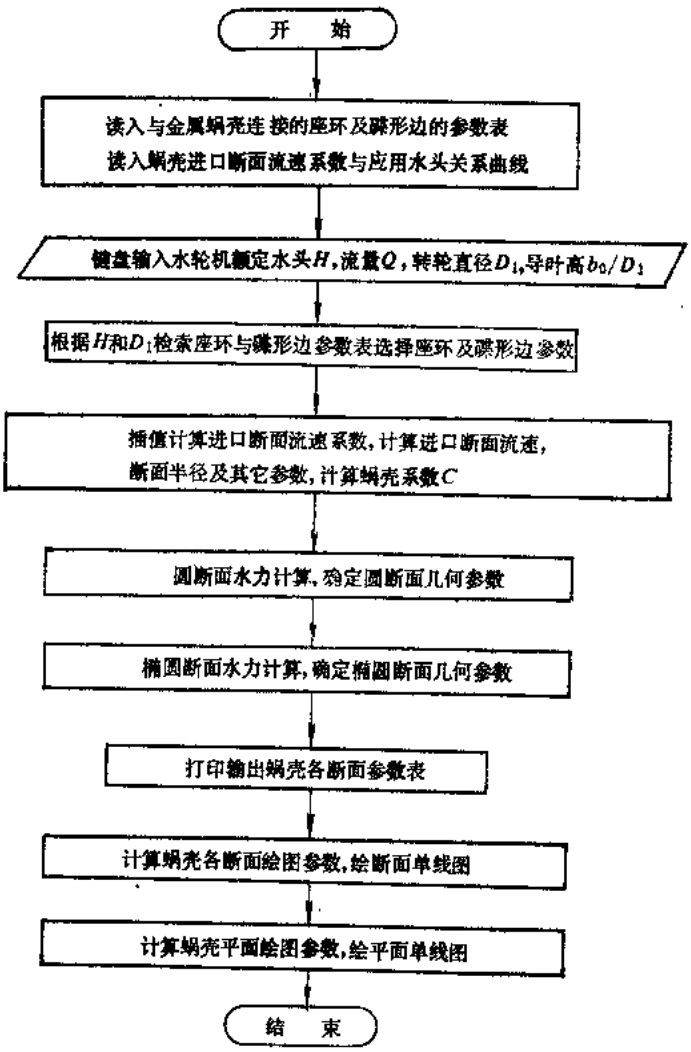


图 5-16　金属蜗壳设计程序框图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

二、混凝土蜗壳计算程序的设计方法

混凝土蜗壳计算程序的设计思路与金属蜗壳计算程序的设计思路基本相同，按照其设计过程，整个程序也由参数选择、断面水力计算与蜗壳图形绘制三大部分组成。但是，两种蜗壳的具体计算方法是不同的，其主要差别在于下面两个方面。

第一，金属蜗壳无例外是由圆形断面与椭圆形断面构成的，而混凝土蜗壳是由“T”型断面构成的，设计混凝土蜗壳时，要根据水电站的具体情况选择不同参数的“T”型断面，因此，程序中要有断面参数选择部分。

第二，金属蜗壳断面水力计算方法与混凝土蜗壳不同，金属蜗壳用现成的公式计算各断面参数，而混凝土蜗壳断面计算没有统一的解析表达式，在程序设计中要解决断面积分值S的求解问题。

1.混凝土蜗壳断面形状的选择

混凝土蜗壳一般采用“T”形断面，根据电站的具体情况又可选择对称“T”形、上伸“T”形、下伸“T”形与“Γ”形四种不同形式，各类型断面几何参数的取值范围在《水轮机设计手册》中作了规定[2]。在程序设计中，可用一变量T作为断面形状的特征参量，T=1，2，3，4分别代表四种断面类型，运行程序时，通过用键盘输入不同的T值可选择不同的蜗壳断面形状。

2.断面积分$S=\int_{r_b}^{r_i}\frac{b}{r}dr$的计算

求解蜗壳断面积分S是混凝土蜗壳水力计算的关键。在手工计算中一般用图解积分法求S值，在程序设计中可考虑用下面两种方法求解S值。

（1）用数值积分法求S值　这种方法是对图解积分的模拟，对于某计算断面，根据断面几何参数可求出不同半径处的b/r值，形成断面的$b/r=f(r)$曲线，曲线下所包括的图形的面积即S值，该面积的计算可用梯形法或其它数值积分方法。

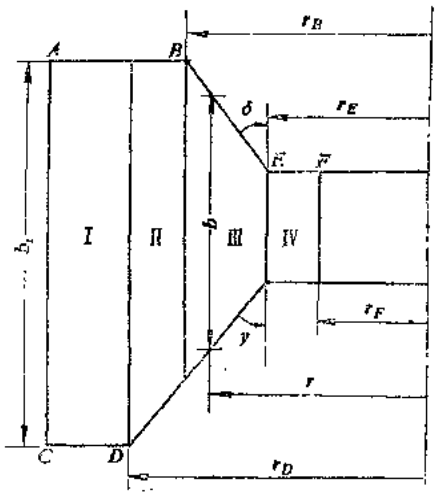


图 5-17　混凝土蜗壳断面

（2）用解析积分法求S值　如图5-17示，首先根据断面几何关系求出控制点A、B、C、D处的半径，并把断面分割为图示的四个部分，各部分中参数b与r的函数关系如下：

I部分：b为常数；$b=b_i$

II部分：$b=f(r,\ \gamma)$；$b=b_i-(r_D-r)\mathrm{ctg}\gamma$

III部分：$b=f(r,\ \gamma,\ \delta)$；$b=b_i-(r_D-r)\mathrm{ctg}\gamma-(r_B-r)\mathrm{ctg}\delta$

IV部分：b为常数；$b=B_e$

对于某计算断面来说，参数r_D、r_B、γ、δ、b_i均为常数，因此，上面各式中的b或为常数，或为r的解析函数，这样，就可以用解析积分法求出各部分的积分。

I 部分： $S_{\mathrm{I}}=\int_{r_D}^{r_C}\frac{b}{r}dr=b_i\ln(r_C/r_D)$

II部分： $S_{\mathrm{II}}=\int_{r_B}^{r_D}\frac{b}{r}dr=(b_i-r_D\mathrm{ctg}\gamma)\ln(r_D/r_B)+(r_D-r_B)\mathrm{ctg}\gamma$

III 部分： $S_{\mathrm{III}}=\int_{r_E}^{r_B}\frac{b}{r}dr=(b_i-r_D\mathrm{ctg}\gamma-r_E\mathrm{ctg}\delta)\ln(r_B/r_E)+(r_B-r_E)(\mathrm{ctg}\gamma+\mathrm{ctg}\delta)$

IV 部分： $S_{\mathrm{IV}}=\int_{r_F}^{r_E}\frac{b}{r}dr=B_0\ln(r_E/r_F)$

整个断面的积分值S为四部分积分值之和，$S=S_{\mathrm{I}}+S_{\mathrm{II}}+S_{\mathrm{III}}+S_{\mathrm{IV}}$。求出$S$之后，其它计算均有现成公式，编程很容易。利用断面计算结果可绘出蜗壳断面图与平面图，绘图程序设计可参考金属蜗壳部分。

三、蜗壳水力设计与绘图源程序

由于金属蜗壳与混凝土蜗壳计算程序的设计原理基本相同，为节省篇幅，这里只附上金属蜗壳计算程序。程序各部分均作了提示说明，主要变量符号与水轮机教材[3]中基本一致，便于阅读与使用。运行程序时，只需按屏幕提示用人机对话方式键盘输入水轮机工作水头、转轮直径等几个基本参数，运行结果输出断面参数表与蜗壳单线图。

```
10  '带碟形边金属蜗壳计算与绘图程序'
11  KEY OFF:'座环及碟形边尺寸选择'
12  DIM D1(14), DB(14, 2), DA(14, 4), K(14), HA(4), RW(14), H1(14)
13  FOR I=1 TO 4:READ HA(I):NEXT I
14  FOR I=1 TO 14:READ D1(I):FOR J=1 TO 2
15  READ DB(I, J):NEXT J
16  FOR J=1 TO 4:READ DA(I, J):NEXT J
17  READ K(I), RW(1),H1(I)
18  NEXT I
19  DATA 70,115,170,230
20  DATA 1.8,2.6,2.6,3.1,3.1,3.15,3.2,0.1,0.2,0.21
21  DATA 2,2.85,2.85,3.4,3.45,3.45,3.5,0.1,0.2,0.23
22  DATA 2.25,3.25,3.25,3.85,3.9,3.95,4,0.1,0.2,0.23
23  DATA 2.5,3.4,3.45,4.05,4.1,4.2,4.35,0.125,0.25,0.25
24  DATA 2.75,3.65,3.7,4.45,4.55,4.65,4.75,0.125,0.25,0.25
25  DATA 3,4,4,05,4.7,4.75,4.8,4.9,0.125,0.3,0.32
26  DATA 3.3,4.4,4.45,5.15,5.2,5.3,5.4,0.125,0.3,0.32
27  DATA 3.8,5,5.05,5.8,5.85,6,6.1,0.15,0.35,0.35
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
28 DATA 4.1,5.45,5.5,6.3,6.35,6.45,6.6,0.15,0.35,0.35
29 DATA 4.5,6,6.15,7.1,7.15,7.2,7.45,0.15,0.4,0.41
30 DATA 5,6.6,6.85,7.75,7.8,7.85,8.2,0.15,0.4,0.41
31 DATA 5.5,7.3,7.55,8.55,8.6,8.7,9.05,0.175,0.5,0.46
32 DATA 6,8,8.2,9.35,9.45,9.55,9.85,0.175,0.5,0.46
33 DATA 6.5,8.55,8.9,10.6,10.1,10.2,10.7,0.175,0.6,0.46
34 PRINT 'D1=?','Hr=?','Q=?','b0/D1=?';
   D1=4.5:HR=130:Q=150:B0=.225:GOTO 36
35 INPUT '转轮直径D1, 设计水头Hr, 流量Q, 导叶相对高bo/D1'; D1,HR,Q,
   B0
36 CLS:LOCATE 5,10:PRINT'蜗壳断面参数表'
37 PRINT'********设计参数及座环碟形边参数********'
38 PRINT TAB(3);'D1';TAB(13);'Hr';TAB(23);'Q';TAB(33);'b0/D1';
39 PRINT TAB(43);'Da';TAB(53);'Db';TAB(63);'H'
40 FOR I=1 TO 14:I1=I:
41 IF D1=D1(I) THEN 43
42 NEXT I
43 RW=RW(I1):H1=H1(I1)
44 IF HR>170 THEN JB=2 ELSE JB=1
45 FOR J=1 TO 4:JA=J:
46 IF HR<=HA(J) THEN 48
47 NEXT J
48 DA=DA(I1,JA):DB=DB(I1,JB):BCM=B0*D1+0.15:BO=BCM
49 PRINT TAB(1);D1;TAB(11);HR;TAB(21);Q;TAB(31);B0;
50 PRINT TAB(41);DA;TAB(51);DB;TAB(61);BCM
51 PI=3.1415926#:FI0=345:ARFA=INT(PI*55/180*100)/100
52 H=INT((BCM/2+H1(I1))*100)/100:R0=INT((DA/2+K(I1))*100)/100
53 RA=INT((R0-H/TAN(ARFA))*100)/100:L=INT(H/SIN(ARFA)*100)
   /100
54 S=INT(H/SIN(PI/2-ARFA)*100)/100
55 PRINT '********蜗壳进口断面参数********'
56 PRINT TAB(3);'φ0';TAB(13);'a';TAB(23);'h';TAB(33);'Ro';
57 PRINT TAB(43);'Ra';TAB(53);'S';TAB(63);'L'
58 PRINT FI0;TAB(12);ARFA/PI*180;TAB(22);H;TAB(32);R0;TAB(42);
   RA;TAB(52);S;TAB(62);L
59 '蜗壳进口断面平均流速系数选择'
60 FOR I=1 TO 7:READ H(I),KK(I):NEXT I
```

```
61 DATA 20,1,60,0.92,100,0.8,140,0.74,180,0.68,220,0.64,280,0.61
62 FOR I=1 TO 7
63 IF HR>H(I) THEN 65
64 I0=I-1:GOTO 66
65 NEXT I
66 K=(KK(I0+1)-KK(I0))/(H(I0+1)-H(I0))*(HR-H(I0))+KK(I0)
67 '蜗壳进口断面参数计算'
68 QJ=FI0/360*Q:VJ=K*SQR(HR):FJ=QJ/VJ
69 PJ=SQR(FJ/PI):AJ=R0+(PJ↑2-H↑2)↑0.5:RJ=AJ+PJ
70 C=FI0/(AJ-SQR(AJ*AJ-PJ*PJ))
71 K=Q*C/(PI*720)
72 PRINT 'Q', 'QJ', 'C', 'K', 'VJ'
73 PRINT Q, QJ, C, K, VJ
74 PRINT 'FJ', 'PJ', 'AJ', 'RJ'
75 PRINT INT (FJ*100+0.5)/100, INT(PJ*100+0.5)/100, INT(AJ*100
   +0.5)/100,
76 PRINT INT(RJ*100+0.5)/100
77 DIM A(F10/5+2), R(F10/5+2), P(F10/5+2), F(F10/5+2), X(F10/5+
   2)
78 PRINT '----------圆断面参数----------'
79 PRINT 'FI', 'P', 'A', 'R'
80 FOR I=0 TO FI0/5
81 FI=FI0-5*I
82 X=FI/C+SQR(2*R0*FI/C-H*H):X(I)=X
83 P(I)=SQR(X*X+H*H):P(I)=INT(P(I)*100+0.5)/100
84 A(I)=R0+X:A(I)=INT(A(I)*100+0.5)/100
85 R(I)=A(I)+P(I):R(I)=INT(R(I)*100+0.5)/100
86 I0=I
87 S=H/SIN(PI/2-ARFA):IF P(I)<S THEN 90
88 IF I/3<>INT(I/3) THEN 89 ELSE PRINT FI, P(I), A(I), R(I)
89 NEXT I
90 DIM P2(FI0/5+2), P1(FI0/5+2)
91 PRINT'----------椭圆断面参数----------'
92 PRINT'FI', 'P2', 'P1', 'A', 'R'
93 FOR I=I0 TO FI0/5
94 FI=FI0-5*I
95 IF FI=0 THEN FI=0.001
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
96  D=DA/2-RA
97  P=FI/C*(SQR(1/(TAN(ARFA)*TAN(ARFA))+2*RA*C/FI)+1/SIN
    (ARFA))
98  A=PI*P*P+D*D*TAN(ARFA)*0.8
99  F(I)=A
100  P2(I)=SQR(A*1.045+0.81*L*L)-1.348*L
101  P1(I)=L+P2(I)-P2(I)/TAN(ARFA)
102  A(I)=1.22*P2(I)+RA
103  R(I)=A(I)+P1(I)
104  IF P2(I)<0 THEN P2(I)=0
105  IF FI=0.001 THEN FI=0:R(I)=DA/2
106  IF I/3<>INT(I/3) THEN 109
107  PRINT FI, INT(P2(I)*100+0.5)/100, INT(P1(I)*100+0.5)/100,
108  PRINT INT(A(I)*100+0.5)/100, INT(R(I)*100+0.5)/100
109  NEXT I
110  DIM DY(26)
111  '进口钢管直径标准化'
112  FOR I=1 TO 26:READ DY(I):NEXT I
113  DATA 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3,1.4, 1.5,
    1.6
114  DATA 1.8, 2, 2.25, 2.5, 2.8, 3.0, 3.2, 3.5, 4, 4.5, 5, 6
115  FOR I=1 TO 26
116  IF PJ*2<DY(1) THEN 121
117  IF PJ*2>DY(26) THEN 121
118  IF PJ*2>DY(I) THEN 120
119  I2=I:GOTO 123
120  NEXT I
121  DY=INT(SQR(Q/QJ)*PJ*2*100+0.5)/100
122  GOTO 124
123  DG=DY(12)
124  DIM SN(FI0/5+1), HI(FI0/5+1), LI(FI0/5+1), RR(5)
125  PRINT'进口钢管直径='; DG
126  '绘制蜗壳图'
127  DIM X1(20), Y1(20), X2(20), Y2(20), CX(20), CY(20), RC(20),
    XT1(20), XT2(20)
128  DX=SQR(RW↑2-(RW-H1)↑2):DY=RW-H1:RC(0)=RW
129  CX(0)=-(R0-DX):CY(0)=-(0.5*H+RW)
```

```
130 BATA=ATN(DY/DX):XT1(0)=PI+BATA:XT2(0)=PI*1.5
131 CX(1)=CX(0):CY(1)=-CY(0):XT1(1)=PI/2:XT2(1)=PI-BATA:RC
    (1)=RC(0)
132 X1(0)=CX(0):Y1(0)=-0.5*H:X2(0)=0I:Y2(0)=Y1(0)
133 X1(1)=X1(0):Y1(1)=-Y1(0):X2(1)=0:Y2(1)=Y1(1)
134 X1(2)=-0.5*DA:Y1(2)=CY(0)+SQR(RW↑2-(DA/2+CX(0))↑2)
135 X2(2)=X1(2):Y2(2)=-Y1(2)
136 X1(3)=-0.5*DB:Y1(3)=0.5*H:X2(3)=X1(3):Y2(3)=-0.5*H
137 '圆断面绘图参数计算'
138 J0=1
139 FOR J=0 TO I0 STEP 9:J0=J0+1
140 RC (J0)=P(J):CX(J0)=-A(J):CY(J0)=0
141 BETA=ATN(H/X(J)):XT1(J0)=BETA:XT2(J0)=PI*2-BETA
142 NEXT J
143 '椭圆断面绘图参数计算'
144 FOR J=I0+9 TO (FI0-5)/5STEP 9:J0=J0+1
145 RC(J0)=P1(J):CX(J0)=-A(J):CY(J0)=01
146 XT1(J0)=PI-55*PI/180:XT2(J0)=PI+55*PI/180
147 NEXT J
148 JJ=J0-1
149 XT1(J0)=XT1(J0)*1.05:XT2(J0)=XT2(J0)/1.05
150 FOR J=I0+9 TO (FI0-5)/5 STEP 9:J0=J0+1
151 RC (J0)=P2(J)
152 CX(J0)=-(P1(J)-P2(J))*COS(55*PI/180)-A(J)
153 XT1(J0)=PI-(55+90)*PI/180:XT2(J0)=PI-55*PI/180
154 CY(J0)=-(P1(J)-P2(J))*SIN(55*PI/180)
155 NEXT J
156 FOR J=I0+9 TO (FI0-5)/5 STEP 9
157 J0=J0+1:RC(J0)=P2(J)
158 CX(J0)=-(P1(J)-P2(J))*COS(55*PI/180)-A(J)
159 CY(J0)=(P1(J)-P2(J))*SIN(55*PI/180)
160 XT1(J0)=PI+55*PI/180:XT2(J0)=PI+(55+90)*PI/180
161 NEXT J
162 DIM HY1(30), LX1(30), HY2(30), LX2(30)
163 XMAX=0:XMIN=-R(0)*1.2:YMAX=R(0)*1.2/2:YMIN=-YMAX
164 LO=500:HO=500:SCREEN 0, 2
165 M1=0:M2=3:GOSUB 244
```

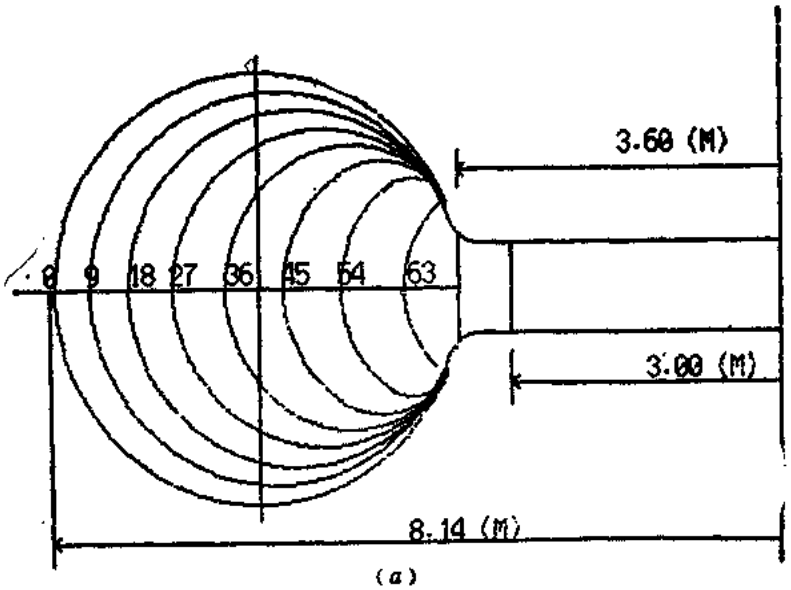

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
166 FOR I=0 TO J0
167 X0=(CX(I)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO
168 Y0=(CY(I)-YMIN)/(YMAX-YMIN)*HO
169 RC=RC(I)/(XMAX-XMIN)*LO*1.02
170 CIRCLE(X0, Y0), RC, 2, XT1(I), XT2(I), 1.04
171 NEXT I
172 '尺寸标注'
173 T=0.07
174 X1(4)=0:Y1(4)=-P(0)*1.3:X2(4)=0:Y2(4)=-Y1(4)
175 X1(5)=0:Y1(5)=P(0)*1.2:X2(5)=-R(0):Y2(5)=Y1(5)
176 X1(6)=X2(5):Y1(6)=Y2(5):X2(6)=X1(6)+T:Y2(6)=Y1(6)-T
177 X1(7)=X1(6):Y1(7)=Y1(6):X2(7)=X1(7)+T:Y2(7)=Y1(7)+T
178 X1(8)=-DB/2:Y1(8)=0.6*BO:X2(8)=X1(8):Y2(8)=BO*1.1
179 X1(9)=0:Y1(9)=BO*0.9:X2(9)=-DB/2:Y2(9)=Y1(9)
180 X1(10)=X2(9):Y1(10)=Y2(9):X2(10)=X1(10)+T:Y2(10)=Y1(10)-T
181 X1(11)=X1(10):Y1(11)=Y1(10):X2(11)=X1(10)+T:Y2(11)=Y1(11)
    +T
182 X1(12)=-DA/2:Y1(12)=-1.1*H:X2(12)=X1(12):Y2(12)=-1.5*H
183 X1(13)=0:Y1(13)=-1.3*H:X2(13)=-DA/2:Y2(13)=Y1(13)
184 X1(14)=X2(13):Y1(14)=Y2(13):X2(14)=X1(14)+T:Y2(14)=Y1(14)
    -T
185 X1(15)=X1(14):Y1(15)=Y1(14):X2(15)=X1(15)+T:Y2(15)=Y1(15)
    +T
186 X1(16)=-R(0):Y1(16)=0:X2(16)=X1(16):Y2(16)=P(0)*1.3
187 X1(17)=-R(0)*1.05:Y1(17)=0:X2(17)=-DA/2:Y2(17)=0
188 X1(18)=-A(0):Y1(18)=-P(0)*1.1:X2(18)=X1(18):Y2(18)=-Y1
    (18)
189 M1=4:M2=18:GOSUB 244
190 L(1)=(LX1(5)+LX2(5))/2/640*80:H(1)=HY1(5)/450*25
191 L(2)=(LX1(9)+LX2(9))/2/640*80:H(2)=HY1(9)/450*25
192 L(3)=(LX1(13)+LX2(13))/2/640*80:H(3)=HY1(13)/450*25
193 DD(1)=INT(R(0)*100)/100:DD(2)=DB/2:DD(3)=DA/2
194 FOR I=1 TO 3
195 LOCATE H(I), L(I):PRINT USING'##, ##'; DD(I)
196 LOCATE H(I), L(I)+6:PRINT'(M)'
197 NEXT I
198 FOR J=1 TO JJ:JO=(J-1)*9
```

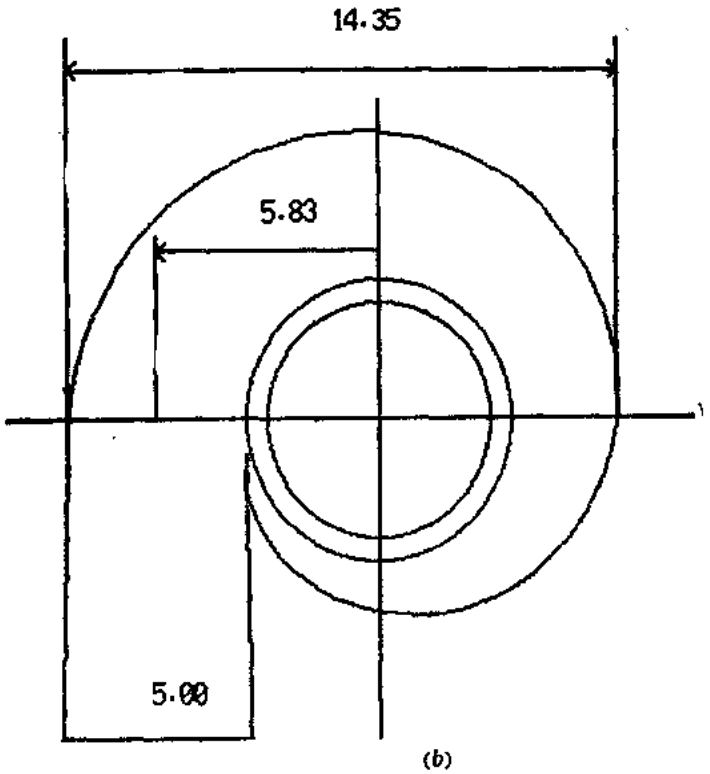
```
199 L(J)=(-R(JO)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO:L(J)=L(J)/640*80
200 H(J)=(0-YMIN)/(YMAX-YMIN)*HO:H(J)=H(J)/450*25
201 LOCATE H(J), L(J):PRINT JO
202 NEXT J
203 T=0.21:REM'蜗壳平面图绘制':
204 DIM XX(70), YY(70), LX(70), HY(70):SCREEN 0
205 FOR I=0 TO FI0/5+1
206 FI=I*5*PI/180
207 XX(I)=-R(I)*COS(FI):YY(I)=R(I)*SIN(FI)
208 NEXT I
209 XMIN=-R(0)*1.4:XMAX=R(0)*1.4:YMAX=XMAX:YMIN=XMIN
210 FOR I=0 TO FI0/5
211 LX(I)=(XX(I)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO
212 HY(I)=(YMAX-YY(I))/(YMAX-YMIN)*HO
213 NEXT I
214 FOR I=0 TO FI0/5-1
215 LINE(LX(I), HY(I))-(LX(I+1), HY(I+1)), 2
216 NEXT I
217 RC1=DA/2/(XMAX-XMIN)*LO:RC2=DB/2/(XMAX-XMIN)*LO
218 CX1=(0-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO:CY1=(0-YMIN)/(YMAX-
    YMIN)*HO
219 CX2=CX1:CY2=CY1
220 CIRCLE(CX1, CY1), RC1, 2,,,1.04:CIRCLE(CX2, CY2), RC2, 2,,,
    1.03
221 X1(1)=-R(0):Y1(1)=0:X2(1)=-A(0)-DG/2:Y2(1)=R(0)
222 X1(2)=X2(1):Y1(2)=Y2(1):X2(2)=X1(2)+DG:Y2(2)=Y1(2)
223 X1(3)=X2(2):Y1(3)=Y2(2):X2(3)=-DA/2*COS(15*PI/180):Y2(3)
    =DA/2*SIN(15*PI/180)
224 '平面图尺寸标注'
225 X1(4)=-R(0)*1.2:Y1(4)=0:X2(4)=R(0):Y2(4)=0
226 X1(5)=0:Y1(5)=-R(0):X2(5)=0:Y2(5)=R(0)
227 X1(6)=-A(0):Y1(6)=0:X2(6)=X1(6):Y2(6)=-DA*0.65
228 X1(7)=-R(0):Y1(7)=0:X2(7)=X1(7):Y2(7)=-R(0)*1.2
229 X1(8)=R(36):Y1(8)=0:X2(8)=X1(8):Y2(8)=-R(0)*1.2
230 X1(9)=-A(0):Y1(9)=-DA*0.6:X2(9)=0:Y2(9)=-DA*0.6
231 X1(10)=X1(9):Y1(10)=Y1(9):X2(10)=X1(10)+T:Y2(10)=Y1(10)-T
232 X1(11)=X1(9):Y1(11)=Y1(9):X2(11)=X1(10)+T:Y2(11)=Y1(10)+T
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
233 X1(12)=-R(0):Y1(12)=-R(0)*1.1:X2(12)=R(36):Y2(12)=Y1(12)
234 X1(13)=X1(12):Y1(13)=Y1(12):X2(13)=X1(13)+T:Y2(13)=Y1(13)
    -T
```



(a)



(b)

图 5-18 蜗壳设计程序输出的图形
(a)蜗壳断面图; (b)蜗壳平面图

```
235 X1(14)=X2(12):Y1(14)=Y2(12):X2(14)=X1(14)-T:Y2(14)=Y1(14)
    -T
236 X1(15)=X1(12):Y1(15)=Y1(12):X2(15)=X1(15)+T:Y2(15)=Y1(15)
    +T
237 X1(16)=X2(12):Y1(16)=Y2(12):X2(16)=X1(16)-T:Y2(16)=Y1(16)
    +T
238 M1=1:M2=16:GOSUB 244
239 L(1)=(LX1(9)+LX2(9))/2/640*80:H(1)=HY1(9)/450*25:DD(1)=
    A(0)
240 L(2)=(LX1(12)+LX2(12))/2/640*80:H(2)=HY1(12)/450*25:DD(2)
    =R(0)+R(36)
241 L(3)=(LX1(2)+LX2(2))/2/640*80:H(3)=HY1(3)/450*25:DD(3)=DG
242 FOR I=1 TO 3:LOCATE H(I), L(I):PRINT USING'##.##';
    DD(I):NEXT I
243 LOCATE 23:END
244 FOR I=M1 TO M2
245 LX1(I)=(X1(I)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO
246 HY1(I)=(Y1(I)-YMIN)/(YMAX-XMIN)*HO
247 LX2(I)=(X2(I)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO
248 HY2(I)=(Y2(I)-YMIN)/(YMAX-YMIN)*HO
249 LINE(LX1(I), HY1(I))-(LX2(I), HY2(I)), 3
250 NEXT I
251 RETURN
```

第五节　尾水管的计算机辅助设计

尾水管是水轮机的重要过流部件，也是决定水电站厂房水下部分尺寸的关键部件。在尾水管的设计中，要根据水轮机的型式、参数及水电站的特点正确选择尾水管的型式与参数。对于常用的弯肘式尾水管、主要是选择尾水管的深度、肘管的断面形状及变化规律、出口扩散段的尺寸。尾水管的结构设计可采用不同的计算方法，其中方法之一是用解析几何的方法进行设计计算，由于近代水轮机所用的尾水管一般是由几种规则的几何体构成的，因此，可以建立构成尾水管空间形体的各曲面与平面的方程式，通过解析计算确定各部分几何体的参数，再根据这些参数绘出尾水管的图形。尾水管设计的另一种常用方法是根据水电站的要求及水轮机的特征参数选择已经标准化的尾水管，将这种标准化的尾水管相似换算为原型水轮机的尾水管。为了水电站工程设计的方便，目前，我国已对尾水管的关键部分肘管进行了标准化，《水轮机设计手册》中推荐使用标准化肘管。本节以选择标准化尾水管的方法为例，介绍尾水管计算机辅助设计的方法与程序设计。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

用计算机设计尾水管的方法基本上是对人工设计尾水管过程的模拟。按照设计过程，可把尾水管设计的程序分为三部分，即尾水管主要参数及肘管选择部分、原型尾水管参数计算部分与尾水管图形绘制部分。

一、尾水管主要参数及肘管的选择

尾水管的主要参数包括尾水管的总深度h、直锥段的扩散角β、尾水管的水平长度L及出口扩散段的宽度B，《水轮机设计手册》中给出了这些参数选择的一般原则及选择范围。这些原则如下：

对于尾水管的深度一般可作如下选择：对于转轮直径$D_1<D_s$的混流式水轮机，取$h\geqslant 2.6D_1$；对于转桨式水轮机，取$h\geqslant 2.3D_1$；而对于$D_1>D_s$的高水头混流式水轮机，可取$h\geqslant 2.2D_1$。

选择进口锥管的单边锥角β时，对于混流式水轮机可取$\beta\leqslant 7°\sim 9°$；对于转桨式，取$\beta\leqslant 8°\sim 10°$。

选择出口扩散段的参数时，对于混流式，断面宽度B可取$(2.7\sim 3.3)D_1$；对于转桨式，可取B为$(2.3\sim 2.7)D_1$；尾水管长度L通常取为$4.5D_1$。对于尾水管的肘管，一般推荐使用标准混凝土肘管。当水头高于200m，肘管部分需装设钢板里衬时，肘管进口的圆形断面至出口的矩形断面之间，采用椭圆渐变断面过渡。

上述关于尾水管参数选择与肘管选择的论述是一段文字型技术资料，根据第二章中关于各类型技术资料的计算机处理方法，可把上述的文字型资料归纳为两个数表。一种数表是供尾水管参数选择用的尾水管总体尺寸及尾水管适用范围数表，形式如表5-2所示。另一种数表是标准混凝土肘管与带钢板里衬的肘管的参数表。以标准混凝土肘管为例，数表形式如表5-3所示，表中给出了肘管一系列水平截面图形控制点的坐标参数、圆弧的圆心及半径。在尾水管计算机辅助设计程序中，尾水管总体尺寸参数表及标准肘管参数表作为基本数据可以用DATA语句方式直接放在程序中，或以顺序文件方式存储到磁盘上，供计算中随时调用。

表 5-2　　尾 水 管 参 数 及 应 用 范 围

D_1	h/D_1	h	L	B	D_s	h_1	h_2	L_1	h_3	应用范围
1000	2.2	2200	4500	1810	1000	1000	574	940	1299	混流式($D_1>D_s$)
1000	2.3	2300	4500	2420	1200	1200	600	1620	1265	转桨式
1000	2.6	2600	4500	2720	1350	1350	675	1823	1220	混流式($D_1<D_s$)

注：D_1—转轮直径；h—尾水管总深度；L—尾水管长度；B—出口扩散段宽度；
D_s—肘管进口直径；h_1—肘管高度；h_2—肘管出口高度；L_1—肘管长度；h_3—出口段出口高度。

有了上述参数表之后，尾水管总体参数及肘管参数的选择就很简单了，总体参数选择的条件是水轮机的型式与转轮D_1/D_s值，肘管选择的条件是水轮机的工作水头。在计算程序中，可用键盘输入方式给定水轮机型式、D_1/D_s、水轮机工作水头，然后，以这些参数为条件，通过对尾水管总体参数表与肘管参数表的检索，选择出适合于给定水轮机及工

表 5-3　　标　准　肘　管　尺　寸

z	y_1	x_1	y_2	x_2	y_3	x_3	R_1	R_2	F
50	−71.90	605.20							
100	41.70	559.45							
150	124.56	542.45						579.61	79.61
200	190.69	512.72						579.61	79.61
250	245.60	479.77						579.61	79.61
300	292.12	444.70						579.61	79.61
350	331.94	408.13						579.61	79.61
400	366.17	370.44						579.61	79.61
450	395.57	331.91						579.61	79.61
500	420.65	292.72	−732.67	813.12	94.33	552.89	1094.52	579.61	79.61
550	441.86	251.18	−496.96	713.07	99.93	545.79	854.01	571.65	71.65
600	459.48	209.85	−360.21	671.28	105.50	537.70	761.82	563.63	63.69
650	473.74	168.80	−276.14	639.26	111.07	530.10	696.36	555.73	55.73
700	484.81	128.09	−205.27	612.27	116.65	522.51	645.77	547.77	47.77
750	492.81	87.764	−142.56	588.39	122.22	514.92	605.41	539.80	39.80
800	497.84	47.859	−85.20	566.55	127.79	507.32	572.92	531.84	31.84
850	499.94	7.996	−31.21	545.98	133.30	499.73	546.87	523.88	23.88
900	500.0	0	21.35	525.97	138.93	492.13	526.40	515.92	15.92
950	500.0	0	75.71	505.26	144.50	484.54	510.90	507.96	7.96
1000	500.0	0	150.07	476.94	150.07	476.95	500.0	504.0	0

作水头的尾水管总体参数及肘管参数。

二、原型水轮机尾水管参数的计算

上述在数表中所选出的尾水管总体参数及肘管参数还不是原型尾水管的实际尺寸。表5-2中的尾水管总体参数是以水轮机转轮直径$D_1=1$米作基准的，因此，计算原型尾水管参数时，要先给定原型水轮机的转轮直径D_{1T}，以D_{1T}为比例系数，把表5-2中尾水管的各线性尺寸均放大（或缩小）D_{1T}倍，就成为原型尾水管的实际尺寸了。

表5-3中所示的肘管参数，是以进口直径$D_4=1$m为基准，因此，计算原型尾水管的肘管参数时，首先要确定原型肘管的进口直径D_{4T}，然后，把标准肘管参数表中的各线性尺寸均放大（或缩小）D_{4T}倍即可。

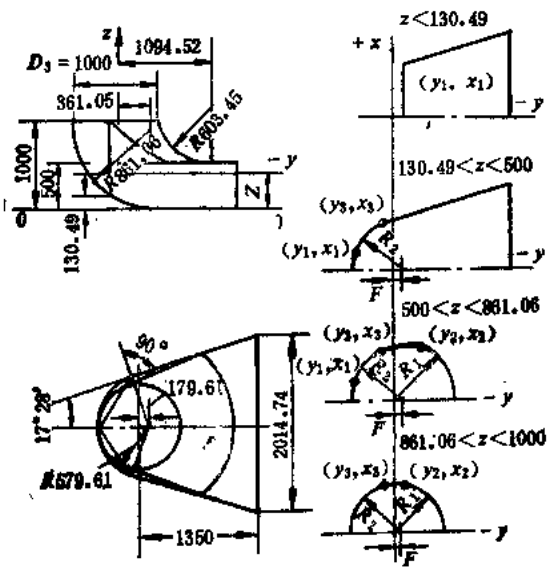


图 5-19　标准混凝土肘管

三、尾水管图形的绘制

尾水管的设计结果中一般要求绘出尾水管的轴侧图、平面投影图及一组水平截面图（这里不考虑尾水管的施工或加工图）。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

1.轴侧图的绘制

以尾水管的竖轴线和底板基准线为纵、横坐标轴建立一直角坐标系，在该坐标系中计算轴侧图各图素的绘图参数。尾水管轴侧图由直线、圆弧和自由曲线三种图素构成。为了方便绘图，可把轴侧图分为三部分：直锥段、肘管段、出口扩散段。

（1）直锥段绘图参数的计算　直锥段的轴侧图如图5-20中的（Ⅰ）部分所示，轴侧投影由直线图素构成，根据直锥段的高度h_z、进口直径D_0及出口直径D_1可确定图形控制点A、B、C、D在x-y坐标系中的坐标参数。在绘图程序中，使用绘直线命令将A、B、C、D四点顺序连接，可绘出直锥段轴侧图。

（2）弯肘段绘图参数的计算　弯肘段轴侧图如图5-20中的（Ⅱ）部分所示，图形由直线、圆弧与自由曲线三种图素构成。对于其中的直线图素，可根据表5-3中的肘管断面参数确定图形控制点I、J、E、H、K在x-y坐标系中的坐标参数，将这些点分别作为各直线段的起点与终点，使用绘直线命令可把各线段绘出。肘管图中的两条圆弧1和4，其圆心、半径与始终点坐标是已知的，可以用绘圆弧指令绘制，但两圆弧上一系列离散点的坐标已在肘管参数表中给出，为了简化程序设计，可把圆弧1、圆弧4与自由曲线2、3一起均作为自由曲线处理，根据表5-3确定各离散点在x-y坐标系中的坐标参数，用绘自由曲线的方法可绘出圆弧1、4与自由曲线2、3。绘图方法可参考第四章关于自由曲线的绘制。

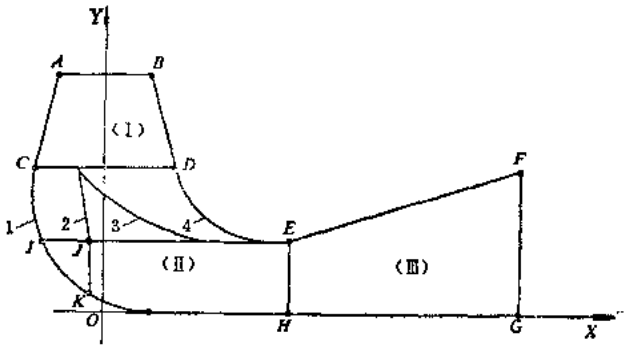


图 5-20　尾水管轴侧图

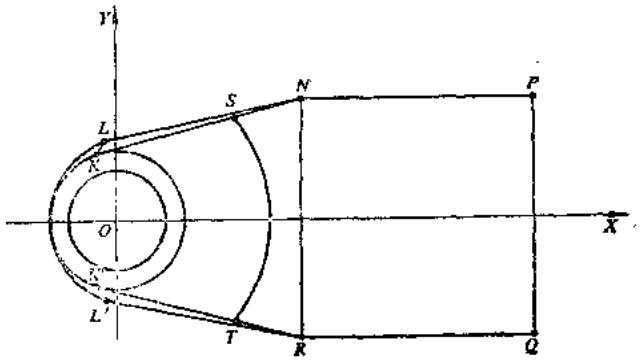


图 5-21　尾水管平面单线图

水平扩散段的轴侧图如图5-20中的（Ⅲ）部分所示，图形是由直线图素构成的。根据表5-2可求出控制点E、F、G、H在x-y坐标系中的坐标，用绘直线命令把各点按顺序连接即可。

2.水平投影图的绘制

尾水管平面投影图由直线、圆、圆弧三种图素构成。

如图5-21所示，过尾水管的中心线作x-y直角坐标系，在该坐标系中计算各图素的绘图参数。平面图中的两个同心圆分别为直锥段进、出口的水平投影，圆心都是尾水管竖轴线的水平投影，半径分别为$D_0/2$和$D_1/2$，可用绘圆指令绘出两圆。两圆弧$\overset{\frown}{LL'}$和$\overset{\frown}{TS}$的绘图参数可由表5-3中断面10的参数确定，弧$\overset{\frown}{LL'}$的圆心由表中F值确定，其半径为R_2，

圆弧的始、终点L和L'，其坐标由表中的(y_2，x_2)确定。弧$\overset{\frown}{TS}$的圆心为尾水管的中心，半径为R_1，圆弧的始、终点T和S，其坐标由表5-3中的(y_2，x_2)确定，用绘圆弧指令可绘出两圆弧。平面图中的直线图素需求出各线段的控制点，其中控制点L和L'在计算圆弧$\overset{\frown}{LL'}$时计算出，控制点N、P、Q、R的坐标可由表5-2的尾水管总体参数确定。控制点K和K'是直线NK、RK'与肘管进口圆水平投影的两切点，可根据其几何关系求出切点坐标。将各控制点分别作为各直线段的端点，即可用绘直线命令绘出各线段。

3.水平截面图的绘制

同尾水管的平面投影图一样，尾水管的各水平截面图也都可以分解为直线、圆、圆弧三种基本图素，各直线段的控制点坐标、各圆的圆心、半径以及各圆弧的圆心、半径、起始角与终止角在肘管断面参数表（表5-2）中都已给出。因此，绘制各水平截面图时，应先建立各截面图的图形坐标系，再根据表5-3中给定的参数计算出在图形坐标系中各图素的绘图参数，用绘制图素的相应绘图指令可绘出各水平截面图。

三、尾水管CAD程序流程图

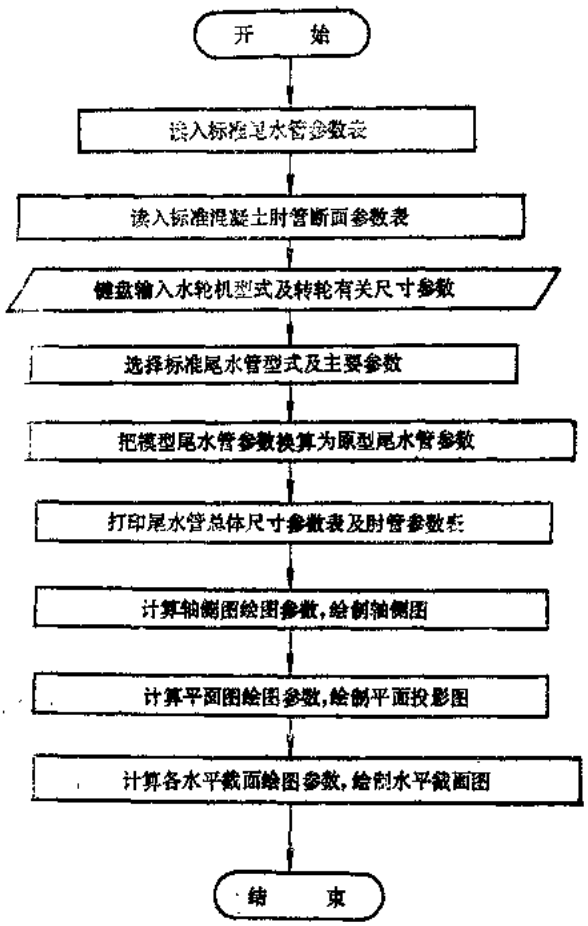


图 5-22　尾水管计算程序流程图

四、尾水管计算源程序

下面的尾水管计算程序，在数据部分只放入了标准肘管的参数，所以，仅适用于配置

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

混凝土肘管的尾水管的设计，假如再增补上带钢板里衬的肘管参数与绘图语句，便可成为弯肘式尾水管通用计算程序。程序中的主要标识符与《水轮机》教材一致❶，以便程序阅读。运行程序时，由键盘输入转轮型式代码T(T=0,1分别表示混流式与转桨式)，以及转轮参数h_1、h_2、D_1、D_2，运行结果输出尾水管轴侧图、平面投影图及指定的水平截面图，并打印出尾水管的主要几何参数。

```
10 SCREEN 0:'尾水管计算程序'
11 '读入标准混凝土肘管参数，程序中主要变量符号与设计手册同'
12 DIM Z(20), Y1(20), X1(20), Y2(20), X2(20), Y3(20)
13 DIM X3(20), R1(20), R2(20), F(20)
14 FOR I=1 TO 20
15 READ Z(I),Y1(I),X1(I),Y2(I),X2(I),Y3(I),X3(I),R1(I),R2(I),F(I)
16 NEXT I
17 DATA 0.05,0.0719,0.6052,1,1,1.1,1,1,1
18 DATA 0.1,-0.0417,0.56945,1,1,1,1,1,1,1
19 DATA 0.15,-0.12456,0.54245,1,1,-0.09436,0.55289,1,0.57961,0.07961
20 DATA 0.2, -0.19069, 0.51272, 1, 1, -0.09436, 0.55289, 1, 0.57961,
   0.07961
21 DATA 0.25, -0.2456, 0.47977, 1, 1, -0.09436, 0.55289, 1, 0.57961,
   0.07961
22 DATA 0.3, -0.29212, 0.4447, 1, 1, -0.09436, 0.55289, 1, 0.57961,
   0.07961
23 DATA 0.35, -0.33194, 0.40813, 1, 1, -0.09436, 0.55289, 1, 0.57961,
   0.07961
24 DATA 0.4, -0.36617, 0.37044, 1, 1, -0.09436, 0.55289, 1, 0.57961,
   0.07961
25 DATA 0.45, -0.39557, 0.33191, 1, 1, -0.09436, 0.55289, 1, 0.57961,
   0.07961
26 DATA 0.5, -0.42065, 0.29272, 0.73266, 0.81312, -0.09436, 0.55289,
   1.09452, 0.57961, 0.07961
27 DATA0.55, -0.44186, 0.25118, 0.45796, 0.72084, -0.09993, 0.54579,
   0.85401, 0.57165, 0.07165
28 DATA 0.6, -0.45948, 0.20985, 0.34472, 0.67936, -0.1055, 0.5377,
   0.76182, 0.56369, 0.06369
29 DATA 0.65, -0.47374, 0.1688, 0.2578, 0.64648, -0.11107, 0.5301,
   0.69636, 0.55573, 0.05573
```

❶ 《水轮机》(第二版)，水利电力出版社。

```
30 DATA 0.7, -0.48481, 0.12809, 0.18707, 0.61807, -0.11665, 0.52251,
   0.64577, 0.54777, 0.04777
31 DATA 0.75, -0.49281, 0.087764, 0.12436, 0.5925, -0.12222, 0.51492,
   0.60541, 0.5398, 0.0398
32 DATA 0.8, -0.49784, 0.047859, 0.06785, 0.5688, -0.12779, 0.50732,
   0.57292, 0.53184, 0.03184
33 DATA 0.85, -0.49994, 0.007996, 0.01575, 0.54665, -0.13336, 0.49973,
   0.54687, 0.52388, 0.02388
34 DATA 0.9, -0.5, 0, -0.0334, 0.52533, -0.13893, 0.49213, 0.5264,
   0.51592, 0.01592
35 DATA 0.95, -0.5, 0, -0.0815, 0.50436, -0.1445, 0.48454, 0.5109,
   0.50796, 0.00796
36 DATA 1, -0.5, 0, -0.1507, 0.47695, -0.1507, 0.47695, 0.5, 0.5, 0
37 READ X2, X1, Y1, Y2, R1, R2, Z0, Y0, X0
38 DATA 1.09452, 0.36105, 0.13049, 0.5, 0.60345, 0.86106, 0, -0.361,
   0.651
39 '读入三种标准尾水管参数'
40 FOR I=1 TO 3
41 READ H(I), L(I), B5(I), D4(I), H4(I), H6(I), L1(I), H5(I)
42 NEXT I
43 DATA 2.2, 4.5, 1.088, 1, 1.1, 0.574, 0.94, 1.3
44 DATA 2.3, 4.5, 2.42, 1.2, 1.2, 0.6, 1.62, 1.27
45 DATA 2.6, 4.5, 2.72, 1.35, 1.35, 0.675, 1.82, 1.22
46 '输入转轮型式T及h1, h2, D1, D2参数, 选择尾管'
47 T=0:H1=1.2:H2=0.12:D1=4.5:D2=4.8:GOTO 49
48 INPUT "T=?(ZZ or HL), h1=?, h2=?, D1=?, D2=?(m)"; T, H1,
   H2, D1, D2
49 IF T=1 THEN 53
50 I0=1
51 IF D2>D1 THEN I0=3
52 GOTO 55
53 I0=2
54 '把模型尾水管换算为原型尾水管'
55 H=H(I0)*D1:L=L(I0)*D1
56 B5=B5(I0)*D1:D4=D4(I0)*D1
57 H4=H4(I0)*D1:H6=H6(I0)*D1
58 L1=L1(I0)*D1:H5=H5(I0)*D1
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
59 K=D4
60 LOCATE 1, 12:PRINT"尾水管参数表"
61 PRINT "..."
62 PRINT TAB(2); "h"; TAB(10); "L"; TAB(18); "B5"; TAB(26);
   "h4"; TAB(34); "D4";
   TAB(42); "h6"; TAB(50); "L1"; TAB(58); "h5"
63 PRINT "---------------------------------------------"
64 PRINT H*1000; TAB(8); L*1000; TAB(16); B5*1000; TAB(24);
   H4*1000; TAB(32);
   D4*1000; TAB(40); H6*1000; TAB(48); INT(L1*1000); TAB(56);
   H5*1000
65 PRINT "---------------------------------------------"
66 FOR I=1 TO 20
67 Z(I)=Z(I)*K    :F(I)=F(I)*K
68 Y1(I)=Y1(I)*K : X1(I)=X1(I)*K
69 Y2(I)=Y2(I)*K : X2(I)=X2(I)*K
70 Y3(I)=Y3(I)*K : X3(I)=X3(I)*K
71 R1(I)=R1(I)*K : R2(I)=R2(I)*K
72 NEXT I
73 X1=X1*K:X2=X2*K:Y1=Y1*K:Y2=Y2*K:R1=R1*K:
   R2=R2*K
74 Z0=Z0*K:Y0=Y0*K:X0=X0*K
75 IF B5<12 THEN 77
76 B=0.13*B5:RD=5*B:RX=0.25*B:
77 D3=D2*1.02:H3=H-H1-H2-H4
78 PRINT "..."
79 PRINT "D1"; "D2"; "H1"; "H2"; "H3"
80 PRINT "-----------------------------------"
81 PRINT D1*1000, D2*1000, H1*1000, H2*1000, H3*1000
82 PRINT "..."
83 PRINT
84 PRINT "Z"; TAB(7); "Y1"; TAB(14); "X1"; TAB(21); "Y2";
   TAB(28); "X2";
85 PRINT TAB(35); "Y3"; TAB(42); "X3"; TAB(49); "R1"; TAB(56);
   "R2"; TAB(63); "F"
86 PRINT"-----------------------------------"
87 FOR I=1 TO 2
```

```
88 PRINT INT(Z(I)*1000+0.5);
89 PRINT TAB(7); -INT(Y1(I)*1000+0.5); TAB(14); INT(X1(I)*1000
   +0.5)
90 NEXT I
91 FOR I=3 TO 9
92 PRINT INT(Z(I)*1000+0.5); TAB(7); -INT(Y1(I)*1000+0.5);
93 PRINT TAB(14); INT(X1(I)*1000+0.5); TAB(35); -INT(Y3(I)*1000
   +0.5);
94 PRINT TAB(42); INT(X3(I)*1000+0.5); TAB(56); INT(R2(I)
   *1000+0.5);
95 PRINT TAB(63); INT(F(I)*1000+0.5)
96 NEXT I
97 FOR I=10 TO 20
98 PRINT INT(Z(I)*1000+0.5); TAB(7); -INT(Y1(I)*1000+0.5);
99 PRINT TAB(14); INT(X1(I)*1000+0.5); TAB(21); -INT(Y2(I)
   *1000+0.5);
100 PRINT TAB(28); INT(X2(I)*1000+0.5); TAB(35); -INT(Y3(I)
    *1000+0.5);
101 PRINT TAB(42); INT(X3(I)*1000+0.5); TAB(49); INT(R1(I)
    *1000+0.5);
102 PRINT TAB(56); INT(R2(I)*1000+0.5); TAB(63); INT(F(I)
    *1000+0.5)
103 NEXT I
104 '尾水管轴侧图绘制'
105 DIM X(20,20), Y(20,20), HH(20,20), LL(20,20):PI=3.141593
106 KEY OFF: SCREEN 3,2
107 I=1:N(I)=5
108 X(I,1)=D3/2:Y(I,1)=H3+H4:X(1,2)=D4/2:Y(I,2)=H4:X(I,3)
    =-D4/2:Y(I,3)=H4
109 X(I,4)=-D3/2:Y(I,4)=H3+H4:X(I,5)=X(I,1):Y(I,5)=Y(I,1)
110 FOR I=2 TO 6:N(I)=11:NEXT I
111 FOR J=1 TO 11
112 X(2,J)=Y1(J+9):Y(2,J)=Z(J+9):X(3,J)=Y3(J+9):Y(3,J)
    =Y(2,J)
113 X(4,J)=Y2(J+9):Y(4,J)=Y(2,J):X(5,J)=R1(J+9):Y(5,J)=Y(2,J)
114 X(6,J+1)=Y1(J):Y(6,J+1)=Z(J)
115 X(6,1)=-Y0:Y(6,1)=0:N(6)=12
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
116 NEXT J
117 I=7:N(J)=4
118 X(I,1)=Y1(10):Y(I,1)=Z(10):X(I,2)=L1:Y(I,2)=Z(10)
119 X(I,3)=L1:Y(I,3)=0:X(I,4)=-Y0:Y(I,4)=Z0
120 I=8:N(I)=4
121 X(I,1)=L1:Y(I,1)=0:X(I,2)=L:Y(I,2)=0:X(I,3)=L:Y(I,3)=H5:
    X(I,4)=L1:Y(I,4)=Z(10)
122 M=8:XMIN=-D4:XMAX=L*1.2:YMIN=XMIN:YMAX=XMAX
123 L0=80:H0=170:GOSUB 217
124 X1=0:Y1=-D3/2:X2=0:Y2=(H3+H4)*1.2:GOSUB 233
125 X1=-D4/2:Y1=H3+H4:X2=X1:Y2=0:XD=-50:YD=0:BB
    =H3+H4:GOSUB 244
126 X1=L:Y1=H5:X2=L:Y2=0:XD=70:YD=0:BB=H5:GOSUB 244
127 '尾水管平面投影图绘制'
128 DIM XC(10), YC(10), RC(10), XT1(10), XT2(10)
129 XC(1)=0:YC(1)=0:RC(1)=D4/2:XT1(1)=0:XT2(1)=PI*2
130 XC(2)=F(10):YC(2)=0:RC(2)=R2(10):XT1(2)=PI/2+17.47*PI/180:
    XT2(2)=PI*1.5-17.47*PI/180
131 XC(3)=0:YC(3)=0:RC(3)=R1(10)
132 XT2(3)=ATN(X2(10)/Y2(10))/1.02 : XT1(3)=PI*2-XT2(3)
133 MC=3:XMIN=-D4:XMAX=L*1.2:YMIN=XMIN:YMAX=XMAX:
    L0=80:H0=50:GOSUB 226
134 I=1:N(I)=4
135 X(I,1)=R2(10)*COS(XT1(2))+F(10):Y(I,1)=R2(10)*SIN(XT1(2))
136 X(I,2)=L1:Y(I,2)=B5/2:X(I,3)=L1:Y(I,3)=-B5/2:X(I,4)=X(I,1):
    Y(I,4)=-Y(I,1)
137 I=2:N(I)=6
138 X(I,1)=D4/2*COS(PI/2+17.47*PI/180):Y(I,1)=D4/2*SIN(PI/2+
    17.47*PI/180)
139 X(I,2)=L1:Y(I,2)=B5/2:X(I,3)=L:Y(I,3)=B5/2:X(I,4)=L:Y(I,4)=
    -B5/2
140 X(I,5)=L1:Y(I,5)=-B5/2:X(I,6)=X(I,1):Y(I,6)=-Y(I,1)
141 I=3:N(I)=2
142 X(I,1)=X(1,4):Y(I,1)=Y(1,1):X(I,2)=X(2,1):Y(I,2)=Y(2,1)
143 I=4:N(I)=2
144 X(I,1)=X(1,4):Y(I,1)=Y(1,4):X(I,2)=X(2,6):Y(I,2)=Y(2,6)
145 M=4:GOSUB 217
```

```
146 X1=XMIN:X2=L*1.02:Y1=0:Y2=0:GOSUB 233
147 X1=0:X2=0:Y1=-B5/2:Y2=B5/2:GOSUB 233
148 X1=0:Y1=-B5/2:X2=L:Y2=Y1:XD=0:YD=70:BB=L:GOSUB 244
149 X1=L:Y1=B5/2:X2=X1:Y2=-B5/2:XD=70:YD=0:BB=B5:GOSUB
    244
150 LOCATF 1,1:L0=80:H0=150
151 '水平截面图绘制'
152 '断面1--2'
153 LOCATE 1:INPUT"断面号II=";II:IF II<3 THEN 156
154 IF II<11 THEN 168
155 IF II>10 THEN 185
156 I=1:N(I)=7
157 X(I,1)=Y1(II):Y(I,1)=X1(II):X(I,2)=L1:Y(I,2)=B5/2
158 X(I,3)=L:Y(I,3)=B5/2:X(I,4)=L:Y(1,4)=-B5/2:
159 X(I,5)=L1:Y(I,5)=-B5/2:X(I,6)=X(I,1):Y(I,6)=-Y(I,1)
160 X(I,7)=X(I,1):Y(I,7)=Y(I,1):I=2:N(I)=2
161 X(I,1)=L1:Y(I,1)=B5/2:X(I,2)=X(I,1):Y(I,2)=-B5/2
162 M=1:SCREEN 0:COSUB 217
163 X1=XMIN:X2=L*1.03:Y1=0:Y2=0:GOSUB 233
164 X1=0:X2=0:Y1=-B5/2:Y2=B5/2:GOSUB 233
165 X1=0:Y1=-B5/2:X2=L:Y2=Y1:XD=0:YD=70:BB=L:GOSUB 244
166 X1=L:Y1=B5/2:X2=X1:Y2=-B5/2:XD=70:YD=0:BB=B5:GOSUB
    244
167 GOTO 153
168 '断面3--10'
169 XC(1)=F(10):YC(1)=0:RC(1)=R2(10)
170 XT1(1)=ATN((F(10)-Y3(10))/X3(10))+PI/2:
    XT2(1)=PI-ATN(X1(II)/(F(10)-Y1(II)))
171 XC(2)=XC(1):YC(2)=YC(1):RC(2)=RC(1)
172 XT1(2)=PI*2-XT2(1):XT2(2)=PI*2-XT1(1)
173 MC=2:SCREEN 0:GOSUB 226
174 I=1:N(I)=2
175 X(I,1)=Y1(II):Y(I,1)=X1(II):X(I,2)=X(I,1):Y(I,2)=-Y(I,1)
176 I=2:N(I)=6
177 X(I,1)=Y3(10):Y(I,1)=X3(10):X(I,2)=L1:Y(I,2)=B5/2:X(I,3)=L:
    Y(I,3)=B5/2
178 X(I,4)=L:Y(I,4)=-B5/2:X(I,5)=L1:Y(I,5)=-B5/2:X(I,6)=Y3(10)
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
:Y(I,6)=-Y(I,1)
179 M=2:GOSUB 217
180 X1=XMIN:X2=L*1.03:Y1=0:Y2=0:GOSUB 233
181 X1=0:X2=0:Y1=-B5/2:Y2=B5/2:GOSUB 233
182 X1=0:Y1=-B5/2:X2=L:Y2=Y1:XD=0:YD=70:BB=L:GOSUB 244
183 X1=L:Y1=B5/2:X2=X1:Y2=-B5/2:XD=70:YD=0:BB=B5:GOSUB
    244
184 GOTO 153
185 '断面11--20截面图'
186 XC(1)=F(II):YC(1)=0:RC(1)=R2(II)
187 XT1(1)=ATN((F(II)-Y3(II))/X3(II))+PI/2
188 XT2(1)=PI-ATN(X1(II)/(F(II)-Y1(II)))
189 XC(2)=XC(1):YC(2)=YC(1):RC(2)=RC(1)
190 XT1(2)=PI*2-XT2(1):XT2(2)=PI*2-XT1(1)
191 XC(3)=0:YC(3)=0:RC(3)=R1(II)
192 XT2(3)=ATN(X2(II)/Y2(II)):XT1(3)=PI*2-XT2(3)
193 IF XT2(3)<0 THEN XT2(3)=XT2(3)+PI:XT1(3)=PI*2-XT2(3)
194 MC=3:SCREEN 0:GOSUB 226
195 X(1,1)=Y1(II):Y(1,1)=X1(II):X(1,2)=Y1(II):Y(1,2)=-X1(II)
196 X(2,1)=Y3(II):Y(2,1)=X3(II):X(2,2)=Y2(II):Y(2,2)=X2(II)
197 X(3,1)=Y3(II):Y(3,1)=-X3(II):X(3,2)=Y2(II):Y(3,2)=-X2(II)
198 X(4,1)=F(II):Y(4,1)=0.5:X(4,2)=F(II):Y(4,2)=-0.5
199 X(5,1)=F(II):Y(5,1)=0:X(5,2)=R2(II)*COS(0.75*PI)+F(II)
200 Y(5,2)=R2(11)*SIN(0.75*PI)
201 X(6,1)=0:Y(6,1)=0:X(6,2)=R1(II)*COS(PI/4):Y(6,2)=R1(II)*SIN
    (PI/4)
202 X(7,1)=X(5,2)+0.2:Y(7,1)=Y(5,2)-0.4:X(7,2)=X(5,2):Y(7,2)=Y
    (5,2)
203 X(7,3)=X(5,2)+0.4:Y(7,3)=Y(5,2)-0.2
204 X(8,1)=X(6,2)-0.2:Y(8,1)=Y(6,2)-0.4:X(8,2)=X(6,2):Y(8,2)=Y
    (6,2)
205 X(8,3)=X(6,2)-0.4:Y(8,3)=Y(6,2)-0.2
206 M=8:N(1)=2:N(2)=2:N(3)=2:N(4)=2:N(5)=2:N(6)=2:N(7)=3:
    N(8)=3:GOSUB 217
207 X1=XMIN:X2=D4:Y1=0:Y2=0:GOSUB 233
208 X1=0:X2=0:Y1=-B5/2:Y2=B5/2:GOSUB 233
209 LL=((X(5,1)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO+L0)/640*80:
```

```
    HH=((YMAX-Y(5,1))/(YMAX-YMIN)*HO-H0)/450*25
210 LOCATE HH+2,LL+1:PRINT"F=";  INT(F(II)*10+0.5)/10
211 LL=((X(5,2)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO+L0)/640*80:
    HH=((YMAX-Y(5,2))/(YMAX-YMIN)*HO-H0)/450*25
212 LOCATE HH,LL-8:PRINT"R2=";  INT(R2(II)*10+0.5)/10
213 LL=((X(6,2)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO+L0)/640*80:
    HH=((YMAX-Y(6,2))/(YMAX-YMIN)*HO-H0)/450*25
214 LOCATE HH,LL+1:PRINT"R1=";  INT(R1(II)*10+0.5)/10
215 LOCATE 1:GOTO 153
216 '通用绘图子程序'
217 LO=450:HO=450
218 FOR I=1 TO M:FOR J=1 TO N(I)
219 LL(I,J)=INT((X(I,J)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO+0.5)+L0
220 HH(I,J)=INT((YMAX-Y(I,J))/(YMAX-YMIN)*HO+0.5)-H0
221 NEXT J:NEXT I
222 FOR I=1 TO M:FOR J=1 TO N(I)-1
223 LINE(LL(I,J),HH(I,J))-(LL(I,J+1),HH(I,J+1))
224 NEXT J:NEXT I
225 RETURN
226 FOR I=1 TO MC
227 X0=INT((XC(I)-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO+0.5)+L0
228 Y0=INT((YMAX-YC(I))/(YMAX-YMIN)*HO+0.5)-H0
229 R=INT(RC(I)/(XMAX-XMIN)*LO+0.5)
230 CIRCLE(X0,Y0),R,7,XT1(I),XT2(I),1.03
231 NEXT I
232 RETURN
233 '绘中心线子程序'
234 X1=(X1-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO+L0:Y1=(YMAX-Y1)/
    (YMAX-YMIN)*HO-H0
235 X2=(X2-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO+L0:Y2=(YMAX-Y2)/
    (YMAX-YMIN)*HO-H0
236 FOR I=1 TO 10
237 DX=(X2-X1)/10*0.8:DY=(Y2-Y1)/10*0.8
238 XX1=(X2-X1)/10*(I-1)+X1:YY1=(Y2-Y1)/10*(I-1)+Y1
239 XX2=XX1+DX:YY2=YY1+DY
240 XX3=XX1+DX*0.9/0.8:YY3=YY1+DY*0.9/0.8
241 LINE(XX1,YY1)-(XX2,YY2):PSET(XX3,YY3)
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
242 NEXT I
243 RETURN
244 '尺寸标注子程序'
245 X1=(X1-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO+L0:Y1=(YMAX-Y1)/
    (YMAX-YMIN)*HO-H0
246 X2=(X2-XMIN)/(XMAX-XMIN)*LO+L0:Y2=(YMAX-Y2)/
    (YMAX-YMIN)*HO-H0
247 LINE(X1,Y1)-(X1+XD,Y1+YD):LINE(X2,Y2)-(X2+XD,Y2+YD)
248 XX1=X1+XD/2:YY1=Y1+YD/2:XX2=X2+XD/2:YY2=Y2+YD/2
249 XX3=(XX2-XX1)*0.4+XX1:YY3=(YY2-YY1)*0.4+YY1:
    XX4=XX2-(XX2-XX1)*0.4:YY4=YY2-(YY2-YY1)*0.4
250 LINE(XX1,YY1)-(XX3,YY3):LINE(XX4,YY4)-(XX2,YY2)
251 XX0=(XX2-XX1)/2+XX1:YY0=(YY2-YY1)/2+YY1
252 IF XD=0 THEN LINE(XX1,YY1)-(XX1+3,YY1-3):LINE(XX1,YY
    1)-(XX1+3,YY1+3):LINE(XX2,YY2)-(XX2-3,YY2-3):LINE
    (XX2,YY2)-(XX2-3, YY2+3)
253 IF YD=0 THEN LINE(XX1,YY1)-(XX1+3,YY1+3):LINE(XX1,YY1)
    -(XX1-3,YY1+3):LINE(XX2,YY2)-(XX2-3,YY2-3): LINE(XX2,
    YY2)- (XX2+3,YY2-3)
254 HH=INT(YY0/450*25+0.5)+1:LL=INT(XX0/640*80+0.5)-3:LOC-
    ATE HH,LL:PRINT BB
255 RETURN
```

尾水管计算程序输出的结果：

尾 水 管 参 数 表

h	L	B5	h4	D4	h6	L1	h5
11700	20250	12240	6075	6075	3037.5	8190	5490

D1	D2	H1	H2	H3
4500	4800	1200	120	4305

Z	Y1	X1	Y2	X2	Y3	X3	R1	R2	F
304	-437	3677							
608	253	3459							
911	757	3295			573	3359		3521	484

续表

Z	Y1	X1	Y2	X2	Y3	X3	R1	R2	F
1215	1158	3115			573	3359		3521	484
1519	1492	2915			573	3359		3521	484
1823	1775	2702			573	3359		3521	484
2126	2017	2479			573	3359		3521	484
2430	2224	2250			573	3359		3521	484
2734	2403	2016			573	3359		3521	484
3038	2555	1778	−4451	4940	573	3359	6649	3521	484
3341	2684	1526	−2782	4379	607	3316	5188	3473	435
3645	2791	1275	−2094	4127	641	3267	4628	3424	387
3949	2878	1025	−1566	3927	675	3220	4230	3376	339
4253	2945	778	−1136	3755	709	3174	3923	3328	290
4556	2994	533	−755	3599	742	3128	3678	3279	242
4860	3024	291	−412	3455	776	3082	3480	3231	193
5164	3037	49	−96	3321	810	3036	3322	3183	145
5468	3037	0	203	3191	844	2990	3198	3134	97
5771	3037	0	495	3064	878	2944	3104	3086	48
6075	3037	0	916	2897	916	2897	3038	3038	0

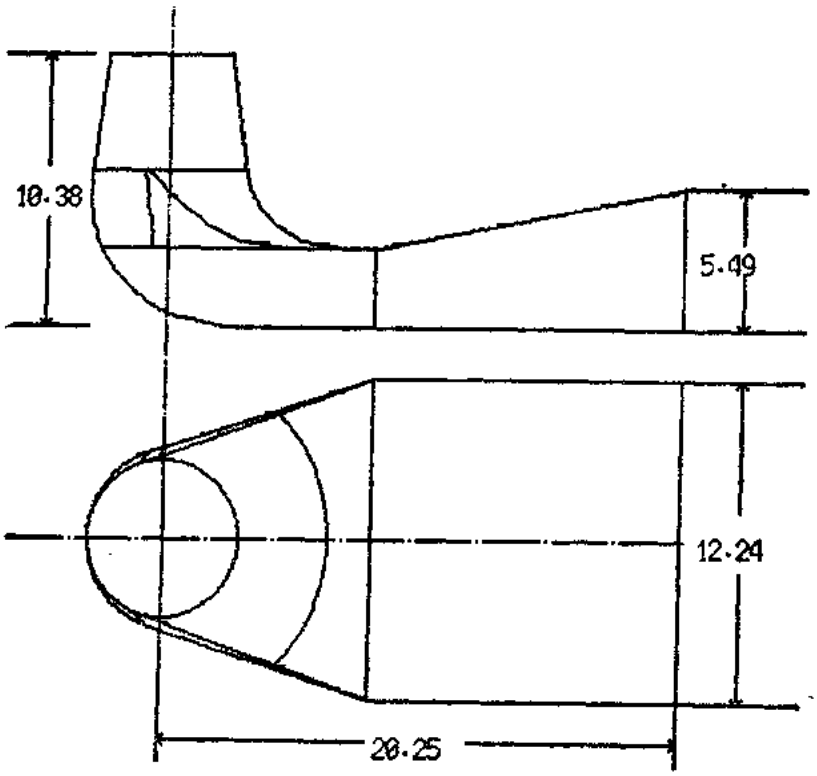


图 5-23 程序输出的尾水管轴侧图与平面图

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

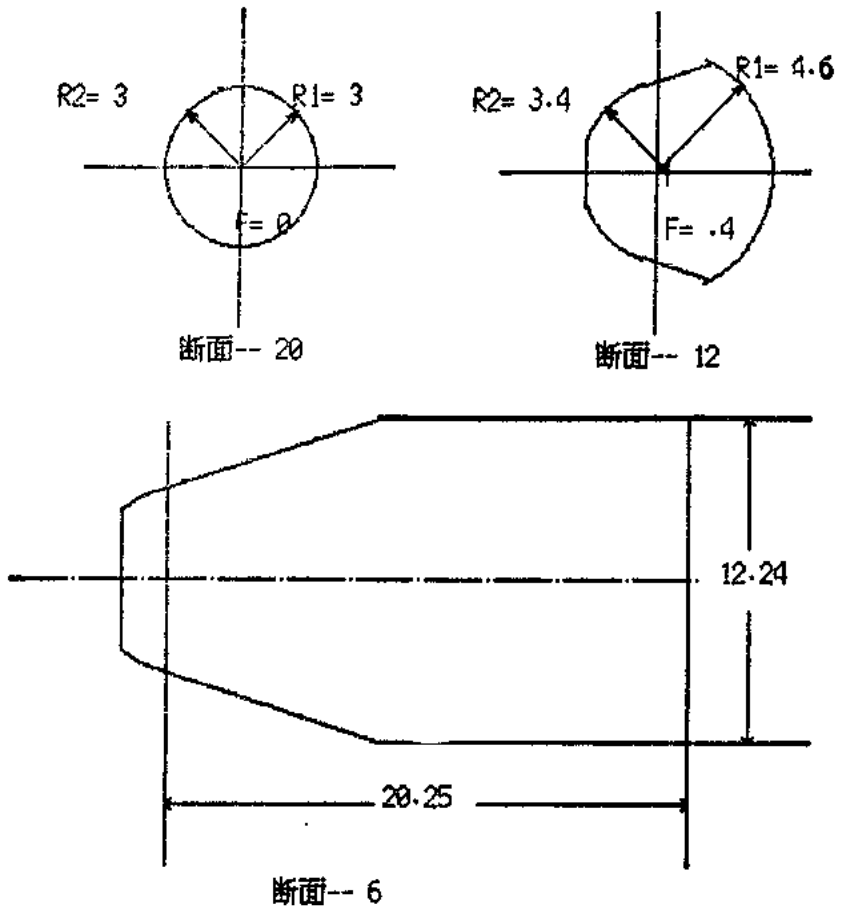


图 5-24 程序输出的尾水管水平截面图

第六节 水电站辅助设备计算机辅助设计方法概述

在本章的前几节中，已经详细地介绍了水轮机选型、特性曲线换算以及过流部件的计算机辅助设计，其中已包含了技术资料处理、基本算法应用、计算机绘图几方面的技巧与程序设计方法，这些基本知识，同样可以应用到其它方面的计算机辅助设计中。因此，本节仅概括介绍水电站辅助设备计算机辅助设计的特点及程序设计的一般原则。

一、水电站辅助设备设计的内容及特点

水电站辅助设备的设计，主要是油、气、水三大系统的设计。包括技术供排水系统、高低压压缩空气系统、透平油及绝缘油系统的设计项目。尽管各系统的具体内容不同，但这些系统的设计有共同的特点与模式，都包括系统构成方案设计、系统设备工作参数计算、设备型号规格选择、系统图绘制四个基本设计环节。

二、辅助设备设计计算程序的设计方法

1.系统构成方案设计

在国内外众多的水电站设计中，辅助设备系统已有了许多比较固定的模式，在设计一

个新的电站时，可以选择一种与新电站参数最接近的系统模式作为基础方案，再根据设计电站的具体参数与特点对选择的基础方案进行适当修改，构成新电站的设计方案。在计算辅助设计中应用这种方法时，需要先搜集一套包括各种水电站基本类型的辅助设备系统设计资料，并按照水电站的型式、容量、水头等基本特征参数将资料归类，把水电站辅助设备系统的构成、主要设备的型号与参数、系统结构简图存储到计算机中，按归类情况形成模块式磁盘文件。在系统模式选择时，可以用人机会话方式键盘输入设计电站的型式、容量和水头等基本参数，用文件检索方法从存储的资料中选择出参数相近的方案，在显示器屏幕上显示出系统构成简图，经用户分析比较确定一种最接近设计电站的方案作为初步方案。然后，根据设计电站的参数与要求对初步方案进行局部修改，当修改方案完全满足设计电站要求时，可把修改后的方案作为设计的最终方案。

2.设备参数的计算

系统构成方案确定后，要进一步计算出系统中各种设备的工作参数。以水电站的排水系统为例，要根据系统构成与设计电站的参数确定各项生产用水的排水量、机组和厂房水下部分的渗漏排水量、检修排水量等，确定集水井的容积，计算检修排泵的生产率、所需扬程及渗漏排水泵的生产率、所需扬程，还要计算各管路系统的尺寸参数及水力损失，确定系统中各阀门的标称直径及工作压力，为下一步各种设备的选择准备好数据。

3.设备选择

设备选择的关键是要有一个参数完备的设备数据库，数据库应包括产品型号、规格、性能参数、尺寸参数及应用范围，乃至设备生产厂家、价格、配套设备等。以水泵为例，必要数据应包括泵型号、流量、扬程、气蚀余量、转速、配套电动机功率、泵的效率等。数据库中的数据以设备类别形成数据模块，为设备选择提供方便。建数据库过程中各种技术资料的处理方法可参考第二章。

4.辅助设备系统图的绘制

应用第四章中所介绍的图形的计算机处理方法，可以实现系统图类的计算机绘制。但是这类图形在设计计算中还无法确定整个图形的绘图参数，要设计一个能够自动生成某辅助设备系统图的程序并非易事，要涉及到数据结构、关系代数、网络技术及图形数据库管理系统等复杂的数学方法与图形处理技术。对于初学者来说，为了避开那些难度较大的问题，可以采用计算机辅助图形设计的方式解决这类绘图问题。例如，应用Auto CAD计算机绘图系统软件绘制系统图时，可采用如下的构想进行程序设计。

1）用Auto CAD绘图方法建立一个由各类型水电站辅助设备系统标准模式图形所构成的图库，供选择系统构成方案时引用。

2）建立一个由水电站辅助设备系统常用设备的图形部件所构成的图形部件图库，供绘制新的系统方案构成图或修改已有的标准模式图时调用。

3）应用与Auto CAD绘图软件相配合的编程语言设计一个管理系统标准模式图库与图形部件图库的程序，作为系统图设计的工具程序，以此为工具，通过对标准模式系统图的选择、修改，使之成为符合设计需要的系统图。

系统图的绘制还可以用其它方法，应用BASIC绘图语言同样可以实现上述功能。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

第六章　水轮机选型设计方案的计算机辅助评判方法

在水轮机选型设计中，借助于计算机辅助设计方法可以形成较多的设计方案。在这些设计方案中必须确定一最优方案以供水电站设计采用。在对各种设计方案的评价中，会涉及较多的因素，这些因素有时是互相制约互相矛盾的，有些因素可定量表示，如年平均发电量、投资经济回收年限、贷款偿还年限等，有些因素则只能定性表示，如机组的抗汽蚀性与耐磨性能、交通运输条件等，这就给确定最优方案带来很大困难。另外，在评价设计方案时，还要考虑分析决策者的心理因素、知识经验及决策水平等。

本章介绍由美国运筹学家T.L.Saaty在《The Analytic Hierarchy Process》一书中提出的一种多元决策方法，即层次分析法，这种方法目前在我国的许多工程设计领域得到应用，它通过建立判断矩阵的过程，逐步分层地将众多的复杂因素和决策者的个人因素综合起来，进行逻辑思维，用定量形式对工程设计的各方案进行比较，最终确定最优方案。此外，这种方法在分析过程中所涉及到的判断矩阵的建立及一些数学计算都可以编制计算程序在计算机上进行，这就给应用计算机对各设计方案进行辅助分析比较带来很大方便。

第一节　层次分析法的基本原理及分析过程

一、层次分析时层次结构的建立

利用层次分析法对工程设计方案进行分析比较时，首先要建立层次结构。层次分析法确定水轮机选型设计最优方案的层次结构为图6-1。

层次结构中的目标层即水轮机选型设计的最优方案。准则层中的各元素就是各设计方案均涉及的诸如运行经济性、可靠性、投资与经济效益、设备制造运输的难易程度等因素，这些因素在评价水轮机选型设计方案时起程度不同的作用。方案层中各元素即各设计方案。

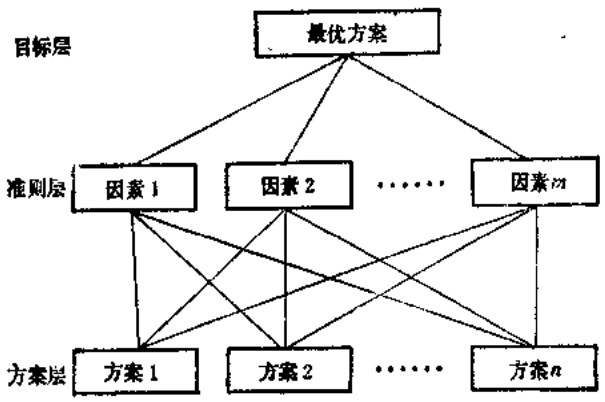


图 6-1　层次结构

层次结构的建立，也就是建立了层次结构中上、下层元素的

隶属关系，下一步就是利用判断矩阵进行层次结构中同一层中各元素间的比较。

二、判断矩阵的形成

判断矩阵是层次分析法的出发点，其作用为显示针对上层中某元素而言、本层元素相互之间的相对重要性。判断矩阵是决策者通过两两比较的方法建立的。

设有n个水轮机选型设计方案，各方案相应某同一因素用b_i（$i=1, 2, \cdots, n$）表示，构造各方案关于因素b的判断矩阵$\mathbf{A}$为

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} b_1/b_1 & b_1/b_2 & \cdots & b_1/b_n \\ b_2/b_1 & b_2/b_2 & \cdots & b_2/b_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_n/b_1 & b_n/b_2 & \cdots & b_n/b_n \end{bmatrix} \tag{6-1}$$

判断矩阵$\mathbf{A}$中元素a_{ij}即方案i与方案j的同一因素的比值。判断矩阵$\mathbf{A}$有以下性质：

1.矩阵$\mathbf{A}$中的元素$a_{ij}>0$，即$\mathbf{A}$为正矩阵；

2.矩阵$\mathbf{A}$中元素满足$a_{ij}=1/a_{ji}$，即$\mathbf{A}$为互反矩阵；

3.矩阵$\mathbf{A}$的对角线元素a_{ii}恒为1。

由于以上性质，在形成判断矩阵时只要给出$\mathbf{A}$的上（或下）三角元素即可，矩阵$\mathbf{A}$为n阶矩阵，上（下）三角元素的个数为$n(n-1)/2$。

矩阵$\mathbf{A}$中元素a_{ij}是b_i和b_j相比较得出的，一般按照Saaty教授所推荐的比较标度将b_i和b_j的比较结果予以量化，从而形成矩阵$\mathbf{A}$中以数值形式表现的元素。这个比较过程是由决策者汇同有关专家共同进行的，由于加入人为判断因素，故称矩阵$\mathbf{A}$为判断矩阵。表6-1给出了Saaty推荐的标度方法。

表 6-1　　Saaty 标 度 说 明

b_i与b_j比较的定性结果	a_{ij}的Saaty标度	意　义
b_i与b_j同样重要	1	$b_i=b_j$
b_i比b_j稍微重要	3	$b_i=3b_j$
b_i比b_j相当重要	5	$b_i=5b_j$
b_i比b_j强烈重要	7	$b_i=7b_j$
b_i比b_j极端重要	9	$b_i=9b_j$
b_i比b_j重要性在上述描述之间	2，或4，或6，或8	
b_i比b_j不重要的上述描述	相应上述数的倒数	

以上以方案层中各方案针对准则层中某因素的判断矩阵的形成为例介绍了判断矩阵的形成方法。

三、判断矩阵的一致性检验

对于判断矩阵中的元素，如果存在

$$a_{ij}=\frac{a_{ik}}{a_{jk}} \quad (i, j, k=1, 2, \cdots, n) \tag{6-2}$$

称$\mathbf{A}$具有一致性，这种情况下，矩阵$\mathbf{A}$的最大特征值为$\lambda_{max}=n$。事实上，采用Saaty的比

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

较标度形成的$\mathbf{A}$往往会导致$\lambda_{max}>n$的情形发生，即$\mathbf{A}$具有不一致性。这种不一致性是否能够容忍，就是判断矩阵$\mathbf{A}$的一致性检验的问题.

为了检验判断矩阵的一致性，需计算它的一致性指标CI，这里

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \tag{6-3}$$

显然，判断矩阵$\mathbf{A}$具有完全一致性时，$\lambda_{max}=n$，$CI=0$，当CI愈大，矩阵的一致性愈差。

一般认为，当相对一致性指标

$$CR=\frac{CI}{RI} \tag{6-4}$$

满足

$$CR\leqslant 0.1 \tag{6-5}$$

的条件时，判断矩阵$\mathbf{A}$基本符合一致性条件，而当$CR>0.1$时，判断矩阵$\mathbf{A}$不能令人满意，需对$\mathbf{A}$进行调整修正，直到满足条件式（6-5）为止，调整$\mathbf{A}$一般根据经验和技巧。

式（6-4）、式（6-5）中的RI称为平均随机一致性指标，与判断矩阵$\mathbf{A}$的阶数有关，具体数值由表6-2给出。

表 6-2　　平均随机一致性指标

判断矩阵$\mathbf{A}$的阶数	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

表6-2中数据是由Saaty教授给出的。

四、由判断矩阵计算比较元素的组合权重

为了检验判断矩阵$\mathbf{A}$的一致性，需要计算矩阵$\mathbf{A}$的最大特征值。由于$\mathbf{A}$具有近似性，采用幂法等精确方法计算λ_{max}的意义不大，一般用近似方法计算λ_{max}。

设矩阵$\mathbf{A}$的最大特征值λ_{max}对应的特征向量为$\boldsymbol{W}$，$\boldsymbol{W}=(w_1, w_2, \cdots, w_n)^T$，采用下面近似方法计算$\boldsymbol{W}$。

1.列标准化后的平均值法（列和法）

$$w_i=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^{n}a_{kj}} \tag{6-6}$$

2.行标准化后的平均值法（行和法）

$$w_i=\frac{\sum_{j=1}^{n}a_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}} \tag{6-7}$$

3.几何平均法

$$w_i=\frac{\left(\prod_{j=1}^{n}a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^{n}\left(\prod_{j=1}^{n}a_{kj}\right)^{\frac{1}{n}}} \tag{6-8}$$

三种方法中，几何平均法计算精度最高，其次是列和法。计算得$\boldsymbol{W}$后，由

$$\lambda_{max}=\sum_{i=1}^{n}\frac{(\mathbf{AW})_i}{nw_i} \tag{6-9}$$

计算λ_{max}，式（6-9）中（$\mathbf{AW}$）为$\mathbf{A}$与$\mathbf{W}$的乘积，$(\mathbf{AW})_i$为其第i个分量。

计算λ_{max}时所用的$\mathbf{W}=(w_1, w_2, \cdots, w_n)^T$，就是判断矩阵$\mathbf{A}$相应的比较元素的组合权重，它反映了层次结构中某一层元素间相对于上一层某一元素的重要程度。

例如，对6个选型设计方案的能量特性建立判断矩阵$\mathbf{A}$进行比较，计算$\mathbf{A}$的λ_{max}相应的特征向量$\mathbf{W}=(0.1269, 0.0495, 0.3386, 0.0495, 0.1479, 0.2927)^T$，这表明，方案3的能量特性最好，方案2和4最差。

五、最优设计方案的确定

按照上述方法对层次结构中准则层中各因素建立判断矩阵进行分析比较，得出准则层中各因素对于目标层的权重为$\mathbf{C}=(c_1, c_2, \cdots, c_m)^T$（$m$为准则层中因素个数），同样得出方案层中各方案（方案个数为n）对于准则层中各因素的权重$\mathbf{D}_j=(d_{1j}, d_{2j}, \cdots, d_{nj})^T$（$j=1, 2, \cdots, m$），然后用式

$$w_i=\sum_{j=1}^{m} c_j d_{ij} \quad (i=1, 2, \cdots, n) \qquad (6\text{-}10)$$

计算方案层中各方案对于目标层的组合权重$w_i(i=1, 2, \cdots, n)$。

由w_i的数值大小比较出各方案的优劣及方案之间的差异，w_i中数值最大者相应方案为最优方案，数值最小者相应方案为最次方案。

以上所述就是用层次分析法对工程设计方案进行评判的基本原理及分析过程。

第二节　层次分析法的程序设计及应用实例

一、层次分析法的程序设计

在用层次分析法对工程设计方案进行评判时，当判断矩阵建立后，分析过程就转化成数学计算过程，因此，可编制计算机程序利用计算机对工程设计方案进行评判。

下面给出一源程序，程序采用人机对话的形式使决策者借助于计算机建立对同一层中各因素针对上一层中某因素进行因素间比较的判断矩阵，然后由计算机完成判断矩阵的组合权重计算和一致性检验，程序中计算判断矩阵的最大特征值λ_{max}时用最简单的行和法。

```
100  PRINT'请输入方案个数n(n<11)'
110  INPUT N
120  PRINT'请输入P的值（当所比较因素可定量给出时P=1，否则P=2）'
130  INPUT P
140  IF P=1 THEN 240
150  FOR I=1 TO N-1:FOR J=I+1 TO N
160  PRINT'请按Saaty标度填入因素'I'与因素'J'的比较结果'
170  INPUT B(I, J)
180  NEXT J:NEXT I
190  FOR I=1 TO N:B(I, I)=1:NEXT I
200  FOR I=2 TO N:FOR J=1 TO I-1
```


标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

```
210 B(I, J)=1/B(J, I)
220 NEXT J:NEXT I
230 GOTO 530
240 FOR I=1 TO N
250 PRINT'请输入方案'I'的所比较因素的数值'
260 INPUT A(I)
270 NEXT I
280 PRINT'请输入f的值(数值大者为优f=2, 数值小者为优f=1)'
290 INPUT F
300 AMAX=A(1):AMIN=A(1)
310 FOR I=2 TO N
320 IF A(I)>AMAX THEN AMAX=A(I)
330 NEXT I
340 FOR I=2 TO N
350 IF A(I)<AMIN THEN AMIN=A(I)
360 NEXT I
370 IF F=2 THEN 430
380 PRINT'请按Saaty标度给出'AMIN'/'AMAX'的值
390 PRINT'(注)数值小者为好'
400 INPUT P:P=P-1
410 FOR I=1 TO N:A(I)=-A(I):NEXT I
420 GOTO 460
430 PRINT'请按Saaty标度给出'AMAX'/'AMIN'的值'
440 PRINT'(注)数值大者为好'
450 INPUT P:P=P-1
460 DRT=(AMAX-AMIN)/P
470 FOR I=1 TO N:FOR J=1 TO N
480 IF A(I)<A(J) THEN 510
490 B(I, J)=INT((A(I)-A(J))/DRT)+1
500 GOTO 520
510 B(I, J)=1/(INT((A(J)-A(I))/DRT)+1)
520 NEXT :NEXT
530 PRINT
540 PRINT'下面输出判断矩阵'
550 PRINT'------------------------------------------------'
560 FOR I=1 TO N:FOR J=1 TO N
570 PRINT USING'***.***'; B(I, J);
```

```
580 NEXT J
590 PRINT
600 NEXT I
610 PRINT'----------'
620 FOR I=1 TO N:FOR J=1 TO N
630 W(I)=W(I)+B(I, J)
640 NEXT J
650 W(I)=W(I)/N
660 NEXT I
670 FOR I=1 TO N:CGW=CGW+W(I):NEXT I
680 FOR I=1 TO N:W(I)=W(I)/CGW:NEXT I
690 PRINT
700 PRINT'下面输出各方案相应的权重系数'
710 PRINT'----------'
720 FOR I=1 TO N
730 PRINT'方案'I'的权重为'W(I)
740 NEXT I
750 PRINT
760 PRINT'----------'
770 FOR I=1 TO N:FOR J=1 TO N
780 AW(I)=AW(I)+B(I, J)*W(J)
790 NEXT J
800 AW(I)=AW(I)/W(I)
810 NEXT I
820 FOR I=1 TO N:LMD=LMD+AW(I):NEXT I
830 LMD=LMD/N
840 PRINT
850 FOR I=1 TO N:READ RI(I):NEXT I
860 DATA 0, 0, 0.58, 0.9, 1.12, 1.24, 1.32, 1.41, 1.45, 1.49
870 CI=(LMD-N)/(N-1):CR=CI/RI(N)
880 IF CR<=0.1 THEN 900
890 PRINT "判断矩阵的一致性不可接受，计算结果无效":END
900 PRINT "判断矩阵的一致性可接受，计算结果有效"
```

程序中的主要标识符为

B——二维数组，判断矩阵中各元素；

A——一维数组，所比较因素的数值；

W——各因素的权重（也是一维数组）；

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

LMD——判断矩阵的最大特征值；

P——控制变量（作用见程序中提示）；

f——控制变量（作用见程序中提示）。

程序的主要结构为：

150～220行：要求决策者按Saaty标度方法填入所比较因素相应判断矩阵的上三角元素，然后由程序自动产生判断矩阵的其余元素，在填入有关数据时，按程序提示填入；

240～520行：当所比较因素以定量形式给出时，该段程序要求决策者输入所比较因素的具体数值，然后要求决策者按Saaty标度方法填入比较因素中最优值和最次值的比，最后由程序自动形成判断矩阵中各元素；

540～610行：在屏幕上输出判断矩阵；

620～760行：按行和法计算各因素的权重并输出计算结果；

770～900行：对判断矩阵进行一致性检验，并输出检验结果。

设有三个水轮机选型设计方案，各方案相应的水轮机最高效率值分别为0.935、0.887和0.903，利用给出的程序进行关于最高效率的方案间比较，程序运行的过程及结果是

RUN

请输入方案个数n(n<11)

? 3

请输入P的值（当所比较因素可定量给出时P=1，否则P=2）

? 1

请输入方案 1 的所比较因素的数值

? 0.935

请输入方案 2 的所比较因素的数值

? 0.887

请输入方案 3 的所比较因素的数值

? 0.903

请输入f的值（数值大者为优f=2，数值小者为优f=1）

? 2

请按Saaty标度给出0.935/0.887的值

（注）数值大者为好

? 5

下面输出判断矩阵

1.000　5.000　3.000

0.200　1.000　0.500

0.333　2.000　1.000

下面输出各方案相应的权重系数

方案1的权重为0.6413302
方案2的权重为0.1211402
方案3的权重为0.2375297

判断矩阵的一致性可接受，计算结果有效

最后需要对程序作一点说明，程序是针对图6-1层次结构中方案层中各因素与准则层中某因素进行相互比较而编制的，当将程序用于其它层次分析中的某层因素间比较时，只要将程序中的汉字注释针对分析对象作相应修改即可。此外，给出的程序只是层次分析程序的一个主要子程序，限于篇幅，主程序不再列出。

下面给出一计算实例。

二、用层次分析法进行方案比较的例子

【例 6-1】 对于某小型电站，有四个水轮机选型设计方案，各方案所考虑的一些因素列于表6-3中，用层次分析法对各方案进行比较以确定最优方案。

表 6-3　　水轮机选型设计各方案因素集

因　素		方案1 2×13000kW	方案2 3×8000kW	方案3 2×15000kW	方案4 3×10000kW
因素 1	年利用小时数(h)	7420	7659	7507	7060
因素 2	单位千瓦投资(元/kW)	2431.4	2070.7	2563.9	2466.5
因素 3	投资纯收回收年限(a)	13.19	11.61	11.28	11.70
因素 4	资金偿还年限(a)	5.01	5.14	5.05	5.90
因素 5	机组运行可靠性及安全性	四个方案中的机组质量、空气间性能等都差不多，方案1、2发电机层在洪水位下			
因素 6	交货期及违约条件	各方案条件相同			
因素 7	资金筹集情况	方案4资金总额超限难于解决			

分析计算过程如下，

1.构造准则层判断矩阵A

根据准则层中各因素如年利用小时数等在决定最优方案时的重要程度进行因素间的比较，按照Saaty标度方法构成判断矩阵A为

$$A=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 3 & 2 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 3 & 3 & 2 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1/2 & 2 & 2 & 1 & 2 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \qquad (6\text{-}11)$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

A的阶数为7，其中各元素相应因素的顺序同表6-3中所列因素的顺序，如**A**中$a_{13}=3$表明决定最优方案时认为年利用小时数较投资经济回收年限重要一些。

2.计算**A**中各因素的权重

按照行和法计算得准则层中各因素的权重为

$$C=(0.2462,\ 0.2462,\ 0.0949,\ 0.0949,\ 0.1692,\ 0.0949,\ 0.0537)^T \quad (6\text{-}12)$$

然后由(6-9)计算**A**的$\lambda_{max}=7.113$[这里用c_i代替(6-9)中的w_i]。

3.对**A**进行一致性检验

将$\lambda_{max}=7.113$，$n=7$代入式(6-3)中计算得

$$CI=\frac{7.113-7}{7-1}=0.0188$$

查表6-2得$n=7$时，$RI=1.32$，则由(6-4)计算得

$$CR=\frac{0.0188}{1.32}=0.0143$$

满足条件式(6-5)，即判断矩阵**A**满足一致性条件，计算结果式(6-12)有效。

4.形成方案层中各方案针对准则层中各因素的判断矩阵$\mathbf{A}_j$

按照形成**A**的同样方法，利用本节给出程序，形成方案层中各方案针对准则层中各因素的判断矩阵$\mathbf{A}_j(j=1,\ 2,\ \cdots,\ 7)$为

$$\mathbf{A}_1=\begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1 & 3 \\ 2 & 1 & 2 & 5 \\ 1 & 1/2 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (6\text{-}13)$$

$$\mathbf{A}_2=\begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & 1/4 \\ 2 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ 3 & 2 & 1 & 1/2 \\ 4 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (6\text{-}14)$$

$$\mathbf{A}_3=\begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 3 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6\text{-}15)$$

$$\mathbf{A}_4=\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 4 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 2 \\ 1 & 2 & 1 & 4 \\ 1/4 & 1/2 & 1/4 & 1 \end{bmatrix} \quad (6\text{-}16)$$

$$\mathbf{A}_5=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 1 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 2 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6\text{-}17)$$

$$\mathbf{A}_6=\begin{bmatrix}1&1&1&1\\1&1&1&1\\1&1&1&1\\1&1&1&1\end{bmatrix} \tag{6-18}$$

$$\mathbf{A}_7=\begin{bmatrix}1&2&2&9\\1/2&1&1&7\\1/2&1&1&7\\1/9&1/7&1/7&1\end{bmatrix} \tag{6-19}$$

5.计算$\mathbf{A}_1$到$\mathbf{A}_7$中各方案的权重，并进行一致性检验

用行和法计算各判断矩阵$\mathbf{A}_j(j=1,2,\cdots,7)$相应的各方案的权重$d_{ij}(i=1,2,\cdots,4;\ j=1,2,\cdots,7)$，计算结果列于表6-4中，各判断矩阵$\mathbf{A}_j(j=1,2,\cdots,7)$的一致性检验结果列于表6-5中。从表6-5中数据可看出，各判断矩阵的一致性指标CR均满足条件式(6-5)，其判断结果有效。

表 6-4　　各方案权重计算结果

因素 j	方案 i			
	1	2	3	4
1	0.2405	0.4373	0.2405	0.0817
2	0.0929	0.1710	0.2900	0.4461
3	0.1000	0.3000	0.3000	0.3000
4	0.3636	0.1818	0.3636	0.0910
5	0.1667	0.1667	0.3333	0.3333
6	0.2500	0.2500	0.2500	0.2500
7	0.4070	0.2762	0.2762	0.0406

表 6-5　　各判断矩阵$\mathbf{A}_j$的一致性检验结果

	$\mathbf{A}_1$	$\mathbf{A}_2$	$\mathbf{A}_3$	$\mathbf{A}_4$	$\mathbf{A}_5$	$\mathbf{A}_6$	$\mathbf{A}_7$
λ_{max}	4.0059	4.0395	4.0000	4.0001	4.0000	4.0000	4.0503
CI	0.0020	0.0132	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0168
RI	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
CR	0.0022	0.0146	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0186

6.各方案排序

计算得$\boldsymbol{C}$及$d_{ij}(i=1,2,3,4;\ j=1,2,\cdots,7)$后，由式(6-10)可计算得各方案对于目标层的组合权重，如方案1的组合权重为

$$w_1=\sum_{j=1}^{7}c_jd_{1j}=0.2462\times0.2405+0.2462\times0.0929+0.0949\times0.1000+0.0949\times0.3636+0.1692\times0.1667+0.0949\times0.2500+0.0537$$

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

$$\times 0.4070 = 0.1999$$

类似计算得出$w_2 = 0.2622$，$w_3 = 0.2886$，$w_4 = 0.2493$。由各方案的组合权重的大小可确定方案 3 为最优方案，方案 2 次之，方案 1 最差。

以上以一较为简单的例子叙述了用层次分析法对水轮机选型设计方案进行综合比较的分析计算过程。

还有一些数学方法可进行方案间的针对准则层中某因素的相互比较，如模糊综合评判法、距离平方和最小法等，限于篇幅，本章不予介绍。

参 考 文 献

[1] 水电站机电设计手册编写组，水电站机电设计手册，水利电力出版社，1982。

[2] 哈尔滨大电机研究所，水轮机设计手册，机械工业出版社，1976。

[3] 李盛林、刘国柱主编，水轮机（第二版），水利电力出版社，1986。

[4] 研野和人，自動設計法，日本CORONA PUBLISING CO., LTD, 1969。

[5] 杨学平，计算机绘图，电力工业出版社，1981。

[6] 黄友谦等，曲线曲面的数值表示和逼近，上海科学技术出版社，1984。

[7] 李庆扬、王能超、易大义，数值分析，华中工学院出版社，1982。

[8] 陈德新，微型计算机在水轮机选型设计中的应用，华北水利水电学院学报，1983。

[9] 赵林明，水轮机全特性的一种计算机存储方法，水力机械技术，1987年第五期。

[10] 陈德新，水轮机特性曲线二元多项式最佳拟合方法，华北水利水电学院学报，1986第1期。

[11] 赵林明，抛物线光顺拟合法及其应用，水利水电微机应用，1988第2期。

[12] 陈德新，水轮机特性曲线处理软件包的设计，水电设备，1987年第2期。

[13] 赵焕臣等，层次分析法——一种简易的新决策方法，科学出版社，1986。

[14] 黄瑞清，微型计算机在机械设计中的应用，四川科学技术出版社，1987。

[15] 孟明辰等，计算机辅助图形设计，机械工业出版社，1989。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载