第一篇

公路、桥梁、隧道试验检测技术

第一章　概　　论

第一节　检测的目的和意义

工程试验检测工作是公路工程施工技术管理中的一个重要组成部分，同时也是公路工程施工质量控制和竣工验收评定工作中不可缺少的一个主要环节。通过试验检测能充分地利用当地原材料，迅速推广应用新材料、新技术和新工艺，能用定量的方法科学地评定各种材料和构件的质量，合理地控制并科学地评定工程质量，并为科学养护决策提供客观依据。因此，工程试验检测对于提高工程质量、加快工程进度、降低工程造价、提高养护水平、推动公路工程施工技术进步，将起到极为重要的作用。公路工程试验检测技术是一门正在发展的新兴学科，它融试验检测基本理论和测试操作技能以及公路工程相关学科基础知识于一体，是工程设计参数、施工质量控制竣工验收评定、养护管理决策的主要依据。

为使管理满足使用要求，必须在精心设计的基础上，严格按照设计文件和现行施工技术规范的要求认真组织施工。作为施工技术人员和工程试验检测人员或质量控制管理人员，在整个施工期间，应在吃透并领会设计文件，熟悉现行施工技术规范、规程的前提下，严格作好路用材料质量、施工控制参数、现场施工过程质量和分部分项过程验收这四个关键环节的把关工作。随着公路等级的提高，各级公路管理部门的施工单位以对加强质量检测，施工质量控制和验收水平给予了高度重视，但在评分工程中仍有部分单位不具备原材料质量试验检测和施工质量控制试验检测的基本条件。有些单位虽然已购

置了一些数量的试验检测仪器设备，也建立了试验检测机构，并配备了相应的试验技术人员，但由于多种原因，已建成的试验室不能发挥应有的作用。工程实践经验证明，不重视施工控制和施工现场质量的控制管理工作，而仅靠经验评估是造成工程出现早期破坏的重要原因，因此，要想切实提高公路工程施工质量，缩短施工工期，降低工程投资，在建立健全工程质量控制检测制度的同时，必须配备一定数量的试验检测设备和相应的专职试验检测技术人员。

第二节　我国公路工程试验检测队伍

一、试验检测机构状况

目前，各地从事公路工程试验检测的专业机构大体有以下几种类型。

1. 专门从事公路工程检测的专业公司；
2. 一些大专院校设立的以教师为主体的试验检测中心或实验室；
3. 设计部门成立的试验检测公司；
4. 科研机构成立的试验检测部门或公司；
5. 一些公路养护部门和施工企业组建的实验检测部门或公司。

二、试验检测人员结构状况

(一)专业试验检测机构

国内专业试验检测公司，多为早期由政府部门组建或较大规模建设项目实施期间由政府行为构建的试验检测机构。经过多年演变最后与政府或事业单位脱离而成为早期的专业检测公司，该类检测公司构建早，成长期较长，人员来源面广，包含有来自公路管理部门、设计部门、大专院校等方面的各类专业人员，人员构成多样，综合素质较高。

(二)大专院校设立的试验检测机构

为了适应市场需求和自身发展的需要，一些大专院校纷纷成立检测机构。这些检测机构的成员大多是教职员工，有时还雇用部分外聘人员，有时则组织研究生参与试验检测工作。总体上讲，这一类检测机构人员理论水平较高，但其结构单一，一般比较缺少具有施工经验的业务人员。

（三）公路工程勘察设计部门成立的试验检测机构

为了扩大业务面，抢占公路工程市场，以适应设计单位走向企业化的趋势，设计院所多成立有检测机构，其从业人员自然基本上都是公路工程勘测设计从业人员，从结构上讲也显得有些单一，但从业务素质上讲，设计从业人员有较丰富的勘测、设计经历，而且有较多的接触施工实践的机会。

（四）科研机构成立的试验检测部门

科研机构设立的试验检测部门，由于主要从业人员从事公路公程科研工作，经常接触或者参与施工实践，并且可以研究和解决公路工程设计、施工和养护中的重要技术难题，因而此类检测机构的总体素质是较高的。

（五）公路养护部门和施工企业组建的实验检测机构

此类检测公司的从业者大多为从事公路施工和养护工程施工、养护技术管理的专业技术人员，多具有丰富的施工经验和养护技术管理经验，对施工管理、施工技术、施工工艺有较深刻的了解，而从事养护技术管理的人员除具有一定施工技术经历外，同时对公路构筑物、公路附属设施的使用功能、使用品质有着更直接的体验，对于工程设计和施工质量的优劣有亲身的、直接的、也是最为深刻的感受。此类从业者，对于从事工程投资控制和质量管理，有比较丰富的实践经验。当然，这些从业人员实验检测的业务知识和技术法规知识有一定的局限性，需要进行系统地试验检测业务培训和检测实践锻炼。

三、试验检测工作细则

每项试验检测方法，应根据现行最新技术标准、操作规程和有关行业工作规范，制订详细实施细则。

（一）制订实施细则

由于有些标准规定得不细，而有些质检机构操作人员有可能是新手，他们虽然以通过本单位的考核，但不一定很熟练；更重要的是质检机构的工作就像工厂生产产品一样，每步都应该按工艺要求进行详细的实施，为此必须制订有关实施细则。

（二）实施细则的内容

1. 技术标准、规定要求、检测方法、操作规程等；

2. 抽样方法及样本大小；

3. 检测项目、被测参数大小及容许变化范围；

4. 检测人员组成和检测系统框图；

5. 对检测仪器的检查标定项目和结果；

6. 对检测仪器和样品或试件的基本要求；

7. 对环境条件等检查，即从保证计量检测结果可靠角度出发，运用允许变化范围的规定；

8. 在检测过程中发生异常现象的处理办法；

9. 在检测过程中发生意外事故的处理办法；

10. 检测结果计算整理分析方法。

(三)实施细则的有关方法

1. 抽样方法

确定样本大小后，一般由委托试验检测单位提供编号进行随机抽样。原则上抽样人不得与产品直接见面，样本应在生产单位或使用单位已经检测合格的基础上抽取。特殊情况下，也允许在生产场所已经检测合格的产品中抽取。

抽样前，不得事先通知被检产品单位，抽样结束后，样品应立即封存，连同出厂检测合格证一并送往试验检测地点。

2. 样本大小的确定

凡产品技术标准中已规定样本大小的，按标准规定执行；凡产品技术标准中未明确规定样本大小的，按试验检测规程或相应技术标准中的方法确定；也可按百分比抽样的抽样基数不得小于样本的5倍；在生产场所抽样时，当天产量不得小于均衡生产时的基本日均产量；在使用抽样时，抽样基数不得小于样本的2倍。

3. 样本的保存

样本确定后，抽样人应以适当的方式封存，由样本所在部门以适当的方式运往检测部门。运输方式应以不损坏样本的外观及性能。样品箱、样品桶、样品的包装也应满足上述要求。

4. 样本登记表内容

抽样结束后，由抽样人填写样品登记表，登记表应包括以下内容：产品生产单位；产品名称、型号；样品中单件产品编号及封样的编号；抽样依据、样本大小、抽样基数；抽样地点；运输方式；抽样日期；抽样人姓名、封样人姓名。

(四)注意事项

1. 对于比较重要的检测项目，若采用专用检测设备，应通过试验确定其检测数据的重复性；

2. 对于某些比较简单的实验检测项目，如果标准规定得很细，能满足上述要求时，可不必制订实施细则。

四、试验检测原始记录

原始记录是试验检测结果的如实记载，不允许随意更改，不许删减。

原始记录应印成一定格式的记录表，其格式根据检测的要求不同可以有所不同。原始记录表主要应包括：产品名称、型号、规格；产品编号、生产单位；检测项目、检测编号、检测地点；温度、湿度；主要检测仪器名称、型号、编号；检测原始记录数据、数据处理结果；检测人、复核人；试验日期等。

记录表中应包括所要求记录的信息及其他必要信息，以便在必要时能够判断检测工作在那个环节可能出现差错。同时根据原始记录提过的信息，能在一定准确度内重复所做的检测工作。

工程试验检测原始记录，一般不得用铅笔填写，内容填写应完整，应有试验检测人员和计算校核人员的签名。

原始记录，如果确需更改，作废数据，应划两条水平线，将正确数据填在上方，盖更改人印章。原始记录应集中保管，保管期一般不得少于两年。原始记录保存方式也可用计算机软盘。

原始记录经过计算后的结果，即检测结果必须有人校核，校核者必须在本领域有五年以上工作经验。校核者必须在试验检测记录和报告中签字，以示负责。校核者必须认真核对检测数据，校核量不得小于所检测项目的5%。

五、试验检测结果的处理

(一)试验检测数据整理

试验检测结果的处理是试验检测工作中的一个重要内容。由于试验检测中得到的数值都是近似值，而且在运算过程中，还可能运用无理数构成的常数，因此，为了获得准确的试验检测结果，同时也为了节省运算时间，必须按误差理论的规定和数字修约规则截取所需要的数据。此外，误差表达方式反映了对试验检测结果的认识是否正确，也利于用户对试验检测结果的正确理解。由于目前尚未规定报告上必须注明不确定度，暂时可以不考虑。

1. 数据处理应注意：检测数据有效位数的确定方法；检测数据异常值的判定方法；区分可剔除异常值与不可剔除异常值；整理后的数据应填入原始记录的相应部分；

2. 检测数据的有效位数应与检测系统的准确度相适应，不足部分以“0”补齐，以便测试数据位数相等；

3. 同一参数检测数据个数不少于 3 时，用算术平均值法；测试个数大于 3 时，建议采用数理统计方法，计算代表值；

4. 测试数据异常值的判断，对于每一单元内检测结果中的异常值用格拉布斯法；检测各试验室平均中的异常值用狄克逊(Dixon)法。

这里要强调一下，对比检测应使用三台与原检测仪器准确度相同的仪器对检测项目进行重复性试验。若检测结果与原检测数据相符，则证明此异常值是由产品性能波动造成的；若不相符，则证明此值是因仪器造成的，可以剔除。

(二)试验检测结果判定

在工程质量检验评定中，施工质量的不合格率是大家所关心的问题，由于所抽子样的数据都是随机变量，他们总是存在一定波动。看到数据有一些变化，或某检测数据低于技术规定要求，就认为施工质量或产品有问题，这样的判定方法是不慎重的，也是缺乏科学依据的，因此很容易给施工带来损失。试验检测结果的整理和判断必须按照数据统计的方法即第八章所述的方法进行。

第三节　试验检测管理

质检机构的人员配置应合理，人员的配置包括行政管理人员、试验检测技术人员和其他工作人员三类，其中试验检测技术人员应由不同学科和不同职称的技术人员组成。

一、质检机构技术负责人，质量保证负责人及其他人员配置

质检机构的技术负责人要对整个质检机构的工作全部负责，业务上应该有较高的水平。另一方面，由于技术负责人在一定程度上决定了检测工作的质量，因此，当技术负责人变动时，应检查在技术负责人变动后该机构的工作水平。

质量保证负责人协助技术负责人对整个质检机构的全部检测工作的质量负责，在技术负责人不在时代行使其职权。在小的质检机构，质检负责人可由技术负责人兼任。

质量保证负责人不一定要求精通管辖的每一项具体工作，但必须熟悉本单位的主要业务，并且有一定的质量管理方面的知识。

质量保证负责人必须是该机构的主要负责人之一，这有助于质量工作中的有关决定能够得到贯彻执行。

技术负责人、质量保证负责人及质量检测管理人员，应熟悉国家、部门、地方关于产品质量检测方面的政策、法令、法规、规定；应熟悉工程质量标准；应熟悉抽样理论，能熟练地应用各类抽样标准，确定其样本大小；具备编制审定检测实施细则，审查检测报告的能力，熟练掌握检测质量控制理论，具有对检测工作进行质量诊断的能力；熟悉国内外工程质量的检测方法，检测技术的现状及发展趋势，掌握国内外检测仪器设备的信息；不断学习新知识，不断进行知识更新。

质检机构的技术负责人应有工程师以上的职称，精通所管辖的业务，具有十年以上专业工作的经验。

质检机构的人员应按所进行的业务范围进行配置，各类工程技术人员、工程师以上的人员不得低于20%。

各业务岗位人员的配置应与所从事的检测项目相匹配，重要的检测项目应有两人，每人可兼作几个项目。

二、试验检测人员要求

试验检测人员应按各自的岗位分工，认真履行岗位职责，作好本职工作，确保检测工作质量。

（一）对试验检测人员的要求

1. 检测操作人员应熟悉检测任务，了解被检测对象和所用检测仪器设备的性能。检测人员必须经过考核合格，取得上岗操作证以后，才能上岗操作。凡使用精密、贵重、大型检测仪器设备者，必须熟悉该检测仪器的性能，具备使用该仪器的知识，经过考核合格，取得操作证书才能操作；

2. 检测人员应掌握所从事检测项目的有关技术标准，了解本领域国内外测试技术，检测仪器的现状及发展方向，具备制定检测大纲，采用国内外最新技术进行检测工作的能力；

3. 检测人员应了解误差理论，数理统计方面的知识，能独立进行数据处理工作；

4. 检测人员应对检测、数据处理工作持严肃的态度，以数据说话，不受行政或其它方面影响的干扰。

（二）对检测人员考核的主要内容

1. 工程质量检测专业知识

了解所用仪器设备的结构原理、性能及正确使用和维护等知识；掌握所检测工程项目的质量标准和有关技术指标程度；实际操作和数据处理的能力。

2. 计量的基础知识

计量法常识、国际单位制基本内容和误差理论基本知识。

三、计量检定人员要求

(一)对计量检定人员的要求

1. 凡从事计量检定工作的人员,必须具备从事计量检定工作所必备的知识和技能,且经上级计量行政部门考核合格并取得‘检定员证”,才能从事所考核合格项目的计量检定工作。见习人员或学徒工、待培人员,不得独立从事检定工作,不得在检定证书上签字;

2. 计量检定复核人员应真正起到复核的作用,复核人员必须是从事该项目两年以上具有工程师职称的人员或从事该项目五年以上的助理工程师;

3. 计量检定人员必须具备高中以上文化程度。计量检定人员应不断学习新知识,随时了解国内外本领域计量技术的现状及检测设备的信息。

(二)对计量检定人员考核的主要内容

1. 计量基础知识

计量法常识、国际单位制基本内容和误差理论基本知识。

2. 较丰富的专业知识

了解本专业所用标准器具的结构原理和正确使用维护等知识,对本专业的检定系统和检定规程的理解及掌握的熟悉程度,实际操作和数据处理的能力。

第二章　路基路面现场检测技术

第一节　压实度检测

一、压实的意义与机理

压实，就是把一定体积的路基土基层材料或路面沥青混凝土压缩到更小的体积的过程。在此过程中，使颗粒相互挤压到一起，减少孔隙，由此提高材料密度。高标准压实，是保证路基、路面应有强度和稳定性一项最经济有效的技术措施。

压实可以充分发挥路基土和路面材料的强度，可以减少路基、路面在行车荷载作用下产生的永久形变，还可以增加路基土和路面材料的不透水性和强度稳定性，对于增强道路路基路面的使用性能和延长寿命是非常重要的。如果路基、底基层、基层或面层材料压实不足，在使用过程，路面上就可能产生车辙、裂缝、沉陷和水损坏，也可能使整个路面产生剪切破坏。

对于高等级沥青混凝土路面工程来说，成功的压实应能使面层达到最佳孔隙率和密实度。如果压实不够，孔隙常趋于相互连通，此时空气和水分就容易浸入致使道路易遭到破坏 此外，在冰冻气温下，路面中的水分发生冻胀也将造成道路的早期破坏。但对压实的沥青混合料中需要留有一定量的孔隙，否则由于孔隙量过分减少，在沥青含量稍多时，路面在轴载的作用下，将出现泛油和失稳现象。对于密级配混合料路面理想的孔隙

量为 8%或更低一些，此时孔隙之间一般并不连通；孔隙量过高，沥青路面容易产生剥落、松散、坑洞等水毁现象。

我们通常用压实度来衡量现场压实的质量，对于路基土及路面基层，压实度是指工地实际达到的干密度与室内标准击实试验所得的最大干密度的比值；对沥青路面，压实度是指现场实际达到的密度与标准密度的比值。

二、影响压实的因素

在室内对细粒土或多种路面材料进行压实试验时，影响土或路面材料达到规定密实度的主要因素有：含水量、土或材料的颗粒组成以及击实功等。

在施工现场碾压细粒土的路基时，影响路基达到规定压实度的主要因素有：土的含水量、碾压层的厚度、压实机械的类型和功能、碾压遍数以及地基的强度。

在工地碾压级配集料时，影响集料达到规定密实度的主要因素，除上述因素外，还有集料的特性（包括质量、级配的均匀性和细料的塑性指数）以及下承层的强度。

此外，土和路面材料的类型对所能达到的压实度也有明显的影响。

（一）含水量的影响

在压实过程中，土或材料的含水量对所能达到的密实度起着非常大的作用。

锤击或碾压的功需要克服土颗粒间的内摩阻力和粘结力，才能使得土颗粒产生位移并互相靠近。土的内摩阻力和粘结力是随着密实度而增加的。土含水量小时，土颗粒间的内摩阻力大，压实到一定程度后，某一压实功不再能克服土的抗力，压实所得的干密度小。当土的含水量逐渐增加时，水在土颗粒间起着润滑作用，使土的内摩阻力减少，因此同样的压实功可以得到较大的干密度。在这个过程中，单位土体中空气的体积逐渐减小，而固体体积和水的体积则逐渐增加。当土的含水量继续增加到超过某一限度后，虽然土的内摩阻力还在减小，但单位土体中的空气体积已经减小到最小限度，而水的体积却在不断增加。由于水是不可压缩的，因此在同样的压实功下，土的干密度反而逐渐减小。土的干密度与含水量的这种紧密关系，形成了一种驼峰形击实曲线。

因此，细颗粒土以及天然砂砾土、红土砂砾、级配碎石、级配砾石、石灰稳定土等多种路面材料，都只有在一定含水量条件下才能达到最大干密度。这个与最大干密度相适应的含水量，通常称作最佳含水量。

最佳含水量是通过击实试验求得的。击实试验后，在含水量—干密度关系图上与最大干密度相应的含水量就是最佳含水量。但是，某一种土或某一种路面材料的最佳含水量和最大干密度不是固定不变的，它随着压实功能而变。在室内进行压实试验时，它随

所用的压实功而改变。在工地碾压时，它随所用压路机的质量或功能以及碾压遍数而变。

在施工现场，用某种压路机碾压含水量过小的土或级配集料，要达到高的压实度是困难的。如土的含水量超过最佳值过多，要达到较大的压实度同样是困难的。因此，在特殊干旱和特殊潮湿地区，实际施工中往往不得不降低对压实度的要求。对含水量过大的土、砂砾土、无机结合料稳定土等路面材料进行碾压时，经常会发生“弹簧”现象，而不能压实。

（二）压实功的影响

同一类土，其含水量随压实功能的增加而减少，最大干容重则随压实功能的加大而增大。若土偏干时，增加压实功能对提高干容重影响较大；若土偏湿时，增加压实功对提高干容重收效甚微。若土的含水量过大时，增加压实功能就会出现“弹簧”现象；当压实功能增加到一定程度后，对最佳含水量和最大干密度的提高都不明显了。

（三）压实机械的影响

所用压实机械对于一定含水量下的路基土和路面材料的压实状态有很大的影响。使用轻型压路机只能得到较小的密实度，用重型压路机可以得到较大的密实度。振动压路机比相同质量的普通光面钢轮压路机的压实效果好得多。不但密实度大，而且有效的压实深度也大（含水量大的粘土除外）。

（四）碾压层厚度与碾压遍数的影响

碾压应当有适当的厚度。对于路基土来说，碾压层过厚，非但碾压层的下部压实度达不到要求，而且上部压实度也要受到不利的影响。同时，碾压层的厚度应与所用压路机的质量或功能相适应，它也随着压路机的类型而变。

压路机的碾压遍数对于路基土和路面材料的密实度的影响是众所周知的。用同一压路机对同一种材料进行碾压时，最初的若干遍碾压，对增高材料的干密度影响很大；碾压遍数继续增加，干密度的增长率就逐渐减小；碾压遍数超过一定数值后，干密度实际上就不再增加了。

（五）碾压速度的影响

不管使用哪种型式或质量的压路机进行碾压，其碾压速度对路基土或路面材料层所能达到的密实度有明显的影响，而且碾压速度过快，还容易导致被压层的平整度变差（形成小波浪）。

碾压速度影响振动轮对单位面积内材料的压实时间。碾压速度低时，单位面积内的振动次数比碾压速度高时要多，因而作用在被压材料上的能量，前者多于后者。实际上，传递到被压材料层内的能量与碾压速度成反比。假定使碾压材料层达到规定密实度所

需的压实能量不变，则碾压速度加倍时，碾压次数大致也要加倍。

（六）土和材料的类型的影响

不同类型土的压实性能是不一样的。就填筑路堤而言，最合适的土是砂砾土、砂土和亚砂土。这些土容易压实，有足够的稳定性，遇水不致过分泡软。用这些土填筑的路堤，沉陷可能最小，而且可以作为路面的优良基础。在沼泽地以及受水浸泡的低洼地，用砂砾土填筑路堤最合适。除了颗粒均匀之外，这些土的特点是干密度大，塑性很小。

粉土质土和细亚砂土稍差些，这些低粘性土也比较容易压实。在饱水情况下，这些土容易变成流动状态，并失去承载能力。用这种土填筑的路堤的边坡，在良好的水文地质条件下是足够稳定的。但是，如果不作相应的加固，容易受水冲刷。压实不足时，会由于过分饱水而失去稳定性。在不利的水文地质和气候条件下（冰冻地区），这些土容易发生冻胀。

最难于压实的土是粘土，在潮湿状态，这种土不稳定，并容易发生剪切。粘土的特点是液限大，最佳含水量大而最大干密度小。压实的粘土具有良好的不透水性。

胀缩性粘土和有机质土的干密度最小，对于填筑路堤来说，这些土是最不好的。必须使用这些土填筑路堤时，应该特别仔细地控制填土和压实。用这些土填筑的路堤，如压实度不足，路堤可能产生很大的沉陷，并将延续很长时间。用胀缩性粘土填筑的路堤，经过充分压实后，具有良好的不透水性。但对于已经压实的胀缩性粘土路堤，如果不采取封闭防水措施，一旦雨水侵入，路堤表层约 10cm 厚就会蓬松。

在天然状态的粘土质页岩是比较稳定的，但当用它填筑路堤时，需要采取专门措施。因为用页岩填筑路堤时，在个别页岩块之间形成许多未被填塞的孔隙。在路堤筑成的初期，页岩块会崩解，路堤的稳定性遭到破坏。因此，在用页岩块填筑路堤时，应预先将其粉碎到细粒状，并用合适数量的细粒土填充小块页岩间的孔隙。

从加速施工过程、缩短填土的压实时间、减少碾压机械和燃料的消耗量等观点出发，同时也为了减少填土的压实费用，应该优先选用塑性小、容易压实的土（如轻亚砂土和轻亚粘土）。在消耗压实功能最少的情况下，用这种土可以筑成均匀的路堤。

泥炭、淤泥类土以及含有大量有机质的土，含水量变化时，土的体积和密实度都会发生较大的变化，在一般情况下不适宜用作路堤填土。

（七）地基或下承层的强度的影响

实践证明，在填筑路堤时，如果地基没有足够的强度，路堤的第一层是难于达到较高压实度的。因此，在填筑路堤之前，必须先碾压地基（清场后），使其达到足够的压实度（如 90% 压实度）和强度。如地基本身比较湿软（在水稻田地区常有这种情况），直接在上

填筑路堤，往往会发生困难，路堤的第一层（每层以压实厚度 20cm 考虑），甚至第二层上，重型压路机无法进行碾压；重型压路机进行碾压，土层就发生“弹簧”现行，碾压得越多，“弹簧现象”越严重。在这种情况下，应先采用石灰或固化剂处理地基，或者先将地基土用砂、砂砾、砂砾土或其他类似的材料换填 13 层，进行适当的碾压后，再进行填土。

下承层的强弱对所需压实层的密实度也有明显的影响。试验表明直接铺筑在土基上的同一种级配集料，用相同的压实机械和压实方法碾压时，如果土基强度高，集料的密实度就大；反之，集料的密实度就小。经验证明，在软土地基上的碎石底基层难于压实。

（八）碾压方式的影响

路基、路面基层和沥青面层的施工及规范都要求碾压时必须“先轻后重”，即先用轻型压路机碾压一定遍数后，再用重型压路机碾压。这种合适的碾压方式既有利于提高压实度，又有利于提高平整度。

（九）影响热拌沥青混凝土路面压实的因素

混合料的特性包括不同种类的沥青和集料的特性，以及混合料在不同的温度下，会明显地影响混合料的压实工作性。因此，必须考虑到材料的特性以及混合料的压实温度。

1. 集料

影响混合料工作性的集料特性主要有级配、表面结构和棱角等。增加混合料中集料的最大尺寸或加大混合料中粗集料的比例，会使其工作性能下降。要达到最终密实度就需要加大压实力；同样如果集料表面结构粗糙，可以使混合料具有良好的稳定性，但仍需加大压实力。

砾石常常比碎石圆滑，因而用它生产的混合料工作性就比较好。混合料中经常添加一些天然砂子。但砂量过高，特别是中等粒径的砂子添加过多，会使混合料稳定性降低（工作性高，稳定性低）。稳定性低的混合料往往会由于压路机过重和碾压次数过多而造成压力过度。这种路面在交通和高温作用下，容易出现失稳或变形。

混合料中的石粉或填充料的用量也会影响压实作业。热拌沥青混凝土路面中的粘结力是填充料和沥青结合在一起产生的，因此，混合料应含有足够数量的石粉，以便与沥青结合，在混合料冷却时便能够产生足够的粘聚力。

添加矿物填料可以补偿混合料含砂过量造成的稳定性差和凝固缓慢的缺陷。相反，如果混合料中石粉用量过多，则会变胶粘，也能造成碾压的困难。

2. 沥青

室温条件下沥青为粘稠固体，在高温条件下沥青则成流体。如果要压实混合料，就

必须使混合料中的沥青呈可塑状态，以保证集料颗粒能够产生相对移动。实际上，沥青在压实过程中起到了润滑剂的作用，当混合料冷却后，粘性增加。在温度低于 85℃的条件下，混合料中的石粉与沥青结合，开始牢牢地粘住集料颗粒，使它们固定就位。倘若等到混合料冷却到 85℃以下，再进行压实就十分困难了。

采用的沥青等级和混合料的拌和温度决定了其粘度。在其他因素不变的条件下，如果混合料中使用的是高粘度沥青，则要求稍高的压实温度和较大的压实力。

在混合料中沥青的用量也会影响其工作性。随着沥青含量的增加，集料颗粒上的沥青薄膜厚度也会增加。在压实温度下，由于薄膜较厚，沥青的润滑作用较好，在一定程度上方便了压实工作。

3. 混合料类型

沥青混合料根据压实特性可分为三类：干硬性的、一般的和软的。它们的压实性质，多半与集料和沥青质量，砾石、砂和填料与结合料相对比例，压实层厚度，铺筑温度和环境条件等因素有关。

沥青混合料的有效压实功，必须克服混合料中的阻力，这种阻力可分为：内摩擦力，它主要决定于集料的尺寸、等级和形状；粘结力，主要由结合料薄膜产生；粘滞阻力，它是结合料集料状况的函数。

干硬性混合料的形成，主要是在混合料中使用了较多的粗颗粒材料和大尺寸集料，同时矿粉含量大，沥青粘性高；矿粉含量小的混合料，也易形成干硬性混合料，如聚合物改性沥青混合料就是如此。压实干硬性沥青混合料时，主要问题是克服内摩擦力和颗粒间的锁嵌力，可采用振动压实方法；用中、重型振动压路机压实通常可以达到规定的密实度，而用静力压路机则往往显示出压实力不足，使混合料中粒料难以避免产生搭接问题。

产生软性混合料的原因包括：大部分为天然或圆集料；集料最大尺寸偏小；矿粉含量小；沥青结合料较软；沥青含量高；温度变化时沥青粘度变化率小；混合料中含水量过多。

碾压软性沥青混合料时，由于易出现裂缝和产生较大位移，因而碾压干硬性混合料要比软性混合料容易得多。

4. 混合料温度

沥青混合料的拌和温度决定着压实作业的难易性，同时，也决定着混合料冷却到 85℃所需的时间，这个温度是作业的最低温度界限。在一定的温度范围内，混合料温度越高，沥青流动性越大，混合料的压实阻力越低。温度过高会影响沥青的性能。在拌和与压实极限温度范围内，碾压的最佳温度是混合料能够支撑压路机而不产生明显的水平移动的最高温度。

5. 环境

混合料的冷却速度影响着达到要求密实度的时间，而影响冷却速度的因素有环境（空气）、温度、湿度、风力和混合料下部面层的温度。凡遇气温低、湿度高、风力大以及下部面层温度低等，都会使碾压时间短，并增加碾压的困难。

6. 层厚

一般而言，较厚的沥青混凝土面层比薄的面层更容易达到要求的密实度。这是因为面层越厚，保温时间越长，而允许碾压的时间也越长。对于较难压实的高稳定性混合料，以及处于快速冷却的气候条件时，如采用较厚的面层可以发挥碾压的优点。

三、压实度试验检测方法

现场压实质量用压实度来表示，对于路基土及路面基层和沥青路面，压实度的意义虽然各有不同，但是都同样需要进行有效地控制。此时，要求解决三个问题，即：如何确定土与路面材料的标准干密度，如何确定土基和路面结构层材料各自要求的压实度以及如何在现场正确地评定路基土和路面材料的压实度。

而在现场正确地评定路基土和路面材料的压实度，需要解决三个问题，即准确地测定现场密度、准确地测定含水量以及利用数理统计方法评定现场压实度。

（一）实验室标准干密度和最佳含水量的确定方法

1. 路基土的最大干密度和最佳含水量确定方法

路基受到的荷载应力，随深度而迅速减少，所以路基上部的压实度应高一些；另外，公路等级高，其路面等级也高，对路基强度的要求也相应提高，所以对路基压实度的要求也应高一些。高速、一级公路路基的压实度标准，对于路床 0～80cm 应不小于 95%，路堤 80～150cm 应不小于 93%，150cm 以下应不小于 90%；对于零填及路堑、路槽底面以下 0～30cm 应不小于 95%。

在平均年降雨量少于 150cm 且地下水位低的特殊干旱地区（相当于潮湿系数≤0.25 地区）的压实度标准可降低 2%～3%。因为这些地区雨量稀少，地下水位低，天然土的含水量大大低于最佳含水量，要加水到最佳含水量情况下进行压实确实有很大困难，压实度标准适当降低也不致影响路基强度和稳定性。在平均年降雨量超过 2000mm，潮湿系数＞2 的过湿地区和不能晾晒的多雨地区，天然土的含水量超过最佳含水量 5%时，要达到上述的要求极为困难，应进行稳定处理后再压实。

最通用的确定土和路面材料的标准干密度的方法是击实试验法。用这种方法在室内确定土和材料的最佳含水量和最大干密度，并由此最大干密度作为该土和该材料的标

准干密度。因此,这个方法有时也被称做含水量—密实度关系试验法。击实试验法一般只适用于最大粒径 25mm(圆孔筛)或 20mm(方孔筛)的集料,一些国家也将它用于最大粒径达 38mm(方孔筛)的集料。集料中有少量超尺寸的颗粒(例如不大于 5%)对试验结果无明显的影响。集料中有较多的超尺寸颗粒时,虽然可以进行校正,以确定整个集料的干密度,但现用校正方法并不是很准确的。

现在各国使用的土和路面材料的击实法试验,可分为两类。一类是轻型击实试验法,另一类是重型击实试验法。轻型击实试验分两类,重型击实试验也分两类。各类击实试验的主要参数见表 1－2－1。

表 1－2－1　击实试验方法种类

试验方法	类别	锤底直径 (cm)	锤质量 (kg)	落高 (cm)	试筒尺寸			层数	每层击数	击实功 (kJ/m³)	最大粒径 (mm)
					内径 (cm)	高 (cm)	容积 (cm³)				
轻型	Ⅰ.1	5	2.5	30	10	12.7	997	3	27	598.2	25
Ⅰ法	Ⅰ.2	5	2.5	30	15.2	12	2177	3	59	598.2	38
重型	Ⅱ.1	5	4.5	45	10	12.7	997	5	27	2687.0	25
Ⅱ法	Ⅱ.2	5	4.5	45	15.2	12	2177	3	98	2677.2	38

在击实试验中,根据试验类型不同,分别采用不同的备料方法:

(1)干土法(土重复使用)

将具有代表性的风干或在 50℃温度下烘干的土样放在橡皮板上,用圆木棍碾散,然后过不同孔径的筛(视粒径大小而定)。对于小试筒,按四分法取筛下的土约 3kg;对于大试筒,同样按四分法取样约 6.5kg。估计土样风干或天然含水量,如风干含水量低于开始含水量太多时,可将土样铺于一不吸水盘上,用喷水设备均匀地喷洒适量的水,并充分拌和,闷料一夜备用。

(2)干土法(土不重复使用)

按四分法至少准备 5 个试样,分别加入不同量水分(按 2%～3%含水量递增),拌匀后闷料一夜备用。

(3)湿土法(土不重复使用)

对于高含水量土,可省略过筛步骤,用手捡除大于 38mm 的粗石子即可。保持天然含水量的第一个土样,可立即用于击实试验。其余几个试样,分别风干不同时间,使含水量按 2%～3%递增。

再根据工程要求,按表 1－2－1 的规定选择轻型或重型试验方法。振动台法与表面振动压实仪法均是采用振动方法测定土的最大干密度。前者是整个土样同时受到垂直

方向的振动作用，而后者是振动作用自土体表面垂直向下传递的。研究结果表明，对于无粘聚性自由排水土，这两种方法最大干密度试验的测定结果基本一致，但前者试验设备及操作较复杂，后者相对容易，且更接近于现场振动碾压的实际状况。使用时可根据试验设备拥有情况择其一即可，但推荐优先采用表面振动压实仪法。

已有的国内外研究结果表明，对于砂、卵、漂石及堆石料等无粘聚性自由排水土而言，一致公认采用振动方法，而不是普通击实法。因此，建议采用振动方法测定无粘聚性自由排水土的最大干密度。

2. 路面基层混合料最大干密度及最佳含水量确定方法

常见路面基层材料有半刚性基层及粒料类基层，粒料类基层最大干密度可参照《公路土工试验规程》中的粗粒土和巨粒土最大干密度试验的振动方法或表面振动压实仪法确定。半刚性基层材料按照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》执行，用标准击实法求得，但当粒料含量高时(50%以上)，由于击实筒空间的限制，现行方法就不能得出真正的最大干密度。若以此为准，按施工规范要求的压实度成型，所测的强度和有关参数太小，据此进行设计，势必造成浪费。同样，如以此为准进行施工质量控制，必然要求太低，不能保证施工质量，因此，需要寻求更科学的方法。下面介绍一种确定最大干密度和最佳含水量的方法，即理论计算法。

(1)石灰土、二灰稳定料

根据室内试验测得结合料的最大干密度 ρ_1 和集料的相对密度 γ，把已确定的结合料与集料的质量比换算为体积比 $V_1 : V_2$，则混合料的最大干密度 ρ_0 为：

$$\rho_0 = V_1\rho_1 + V_2\gamma \tag{1-2-1}$$

石灰土、二灰稳定粒料的最佳含水量 ω_0 是结合料的最佳含水量 ω_1 和集料饱水裹覆含水量 ω_2 的加权值，可按下式计算：

$$\omega_0 = \omega_1 A + \omega_2 B \tag{1-2-2}$$

式中　A，B——结合料和集料的质量百分比，以小数计。

饱水裹覆含水量是指把集料浸水饱和后取出，不擦去表面覆裹水时的含水量。除吸水率特大的集料外，此值对于砾石可以取 3%，碎石可取 4%。

(2)水泥稳定粒料

此类材料的最大干密度 ρ_0 与集料的最大干密度 ρ_G 和水泥硬化后的水泥质量有关，即：

$$\rho_0 = \frac{\rho_G}{\left[1 - \frac{(1+k)\,a}{100}\right]} \tag{1-2-3}$$

式中　ρ_G——集料在振动台上的加载振动而得到的最大干密度，g/cm^3；

a——水泥含量，%；

k——水泥水化时水的增量，视水泥品种不同而异，一般为水泥质量的 10% ~ 25%，以小数计。

水泥加水拌均匀后，在 105℃烘箱中烘干，称试验前水泥质量和烘干后硬化的水泥质量，即可求得水泥水化的水增量。

因水泥中含有水化水，故用烘箱法不能正确测出水泥稳定粒料的最佳含水量。根据对比试验，水泥稳定粒料的最佳含水量由水泥的水化水、集料的饱水裹覆含水量和拌和水泥所需水（水灰比为 0.5）三者组成，即：

$$\omega_0 = (0.5 + k)a + \omega_2\left(1 - \frac{a}{100}\right) \qquad (1-2-4)$$

式中符号意义同前。

3. 沥青混合料标准密度确定方法

沥青混合料标准密度，以沥青拌和厂取样试验的马歇尔密度或者试验段密度为准，当采用前者方法时，压实度标准比后者高，无论是用哪种方法，均存在对（马氏试件或芯样试件）测密度的问题，在进行密度试验时应根据混合料本身的特点，可采用下列方法之一：

(1)水中重法

本法仅适用于密实的Ⅰ型沥青混凝土试件，不适用于采用了吸水性大的集料的沥青混合料试件。

(2)表干法

本法适用于表面较粗但较密实的Ⅰ型或Ⅱ型沥青混凝土试件，但不适用于吸水率大于 2%的沥青混合料试件。

(3)蜡封法

本法适用于吸水率大于 2%的Ⅰ型或Ⅱ型沥青混凝土试件以及沥青碎石混合料试件，不能用水中重法或表干法测密度时，应用蜡封法测定。

(4)体积法

本法适用于空隙率较大的沥青碎石混合料及大空隙透水性开级配沥青混合料试件。

具体的试验方法见《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ 052—2000)。

(二)现场压实度评定方法

1. 非破坏性试验法（核子仪测定密度法）

非破坏性试验使用的仪器是各种核子仪，它利用放射性元素（通常是射线和中子射

线)测量路基土或路面结构层材料的密度和含水量。20 世纪 80 年代以前,这类仪器主要在美国和前苏联应用。近年来,使用核子仪的国家逐渐增多,核子仪的应用逐渐普遍。美国生产的核密实度含水量测定仪,既可在现场测定密实度,也可在现场测定含水量。

这种仪器有几种不同的型号:有一种插入式核密实度含水量测定仪,在使用前需要在拟测量的位置打一个洞(洞深等于拟测的深度),然后将探头插入洞中进行测量(如图 1-2-1),此法又称为直接透射法。另一种是表面式核密实度含水量测定仪,可以直接放在表面上进行测量,无需打洞(如图 1-2-2),此法又称为散射法。更先进的一种核密实度含水量测定仪还带有电子计算机。这类仪器的优点是:测量速度快,需要的人员少,可用于测量各种土(包括冻土)和路面材料的密度及它们的含水量,因此受到质量检验人员的欢迎。

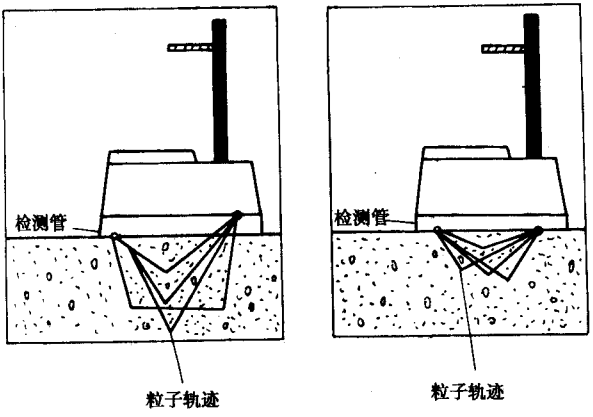


图 1-2-1　透射法

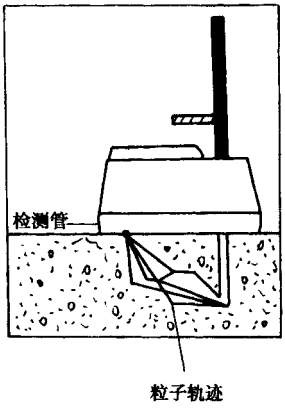


图 1-2-2　散射法

但核子仪的缺点之一是，超标的放射性对人类有害。国内曾不止一次检验发现进口的核密实度 含水量测定仪的放射性超过规定，使用时要注意 ：仪器工作时，所有人员必须退后到距离仪器 2m 以外的地方 ；仪器不使用时，应将手柄放置于安全为止，仪器应装入专用的仪器箱内，放置在符合核辐射的安全规定的地方 ；仪器应当由经过有关部门的审查合格的专人保管，专人使用。

在现场选定的位置上，先用核子仪测量一次，取得读数后，将仪器在原位转 180°测量第二次，记录读数后，再将仪器在原位置转 90°测量第三次，记录数据后，再将仪器在原位置转 180°测量第四次，记录数据。最后，将四次读数的平均值作为该点核子仪湿密度与含水量的测量值，并用灌砂法测定其湿密度。取样品测定含水量后，计算用灌砂法测得的干密度。一般需要在不少于 15 个位置进行这种对比测定，计算两者之间的相关系数，相关系数应大于 0.9。国际上通常以灌砂法作为测定现场密度的标准方法。用核子仪测定现场密度后，需用所得的相关方程将核子仪所测得的值换算成为相当于灌砂法的测定值。

核子仪测得的含水量需与含水量的标准试验方法 ：烘干法进行比较，计算两者的相关方程。用核子仪测定现场土或材料的含水量后，用相关方程将核子仪测得的含水量换算成相当于烘干法的含水量。

实践证明，用核子仪测得的土层或材料层湿密度与灌砂法测得的湿密度比，二者相差不大 ；核子仪测得的含水量与烘干法测得的含水量相比，往往有明显差别。

在标定核子仪时，应注意以下事项：

用插入式核子仪测定土层或材料层的密度和含水量时，由于放射源在插入杆的端部，放射线从层底射向表面，被接收器接收，因此，用它测得的湿密度和含水量是放射源所在深度到表面一定范围内的平均湿密度和平均含水量。

用表面式核子仪测定土层或材料层的湿密度（或沥青混合科层的密度）和含水量时，射线从表面射向某一深度再返回被接收器接收，因此，用它测得的湿密度和含水量是某一深度以上直到表面的平均湿密度和平均含水量。由于射线在不同材料层中的射入深度是不相同的，也由于具体某一台核于仪的射线射入深度是未知的，因此，被测量结构层的厚度（同一材料）不同时，需要分别进行标定 ；被测量层下层的材料不同和厚度不同时，也要分别进行标定。例如，相同沥青混合料、相同厚度的底面层分别修筑在水泥碎石基层上和二灰碎石基层上时，也需要分别进行标定，在同一种基层上的同一种沥青混合料底面层，底面层的厚度不同时，需要分别进行标定 ；在 AC－25Ⅰ型沥青混凝土中面层上标定所得的相关方程，不能用到 SAC－16 表面层上 ；对于后者需要重新进行标定。

用核子仪测定沥青混合料层的密实度，作为钻孔取件测定密实度的辅助方法，也应该如前述那样，先对核子仪进行标定，求出核子仪所得密度与钻件密度之间的相关系数应大于0.9。

2. 破坏性试验测密度法

所谓破坏性试验，是指在测量土层或材料层的密实度和含水量之前，需要对被测量层进行一定程度的破坏，以采取样品。常用的破坏性试验有下述四种。

(1)灌砂法

所谓灌砂法是用均匀颗粒(或单一粒径)的砂，由一定高度下落到一规定容积的筒或洞内，根据其单位质量不变的原理，来测量试洞的容积，用试洞的容积代表洞中取出材料的体积。该方法可用于测试各种土或路面材料的密度。

进行试验之前，首先要标定筒下部圆锥体内的砂的质量以及量砂的单位质量。

标定筒下部圆锥体内的砂的质量的步骤如下：①在灌砂筒筒口高度上，向灌砂筒内装砂至距筒顶15mm左右为止。称取装入筒内砂的质量 m_1，准确至1g。以后每次标定及试验都应该维持装砂高度和质量不变。②将开关打开，让砂自由流出，并使流出砂的体积与工地所挖试坑内的体积相当(可等于标定罐的容积)，然后关上开关，称灌砂筒内剩余砂质量 m_5，准确至1g。③不晃动储砂筒的砂，轻轻地将灌砂筒移至玻璃板上，将开关打开，让砂流出，直到筒内砂不再下流时，将开关关上，并细心地取走灌砂筒。④收集并称量留在板上的砂或称量筒中的砂，准确至1g。玻璃板上的砂就是填满锥体的砂 m_2。⑤重复上述过程测量三次，取平均值。

然后，标定量砂的单位质量，步骤如下：

①用水确定标定罐的容积 V，准确至1mL。

②在储砂筒中装入质量为 m_1 的砂，并将灌砂筒放在标定罐上，将开关打开，让砂流出，在整个过程中，不要触动灌砂筒，直到砂不再下流时，将开关关闭。取下灌砂筒，称取筒内剩余砂的质量 m_3，准确至1g。

③按下式计算填满标定罐所需砂的质量 m_a：

$$m_a = m_1 - m_2 - m_3 \tag{1-2-5}$$

式中　m_a——标定罐中砂的质量，g；

m_1——装入灌砂筒内的砂的总质量，g；

m_2——灌砂筒下部圆锥体内的质量，g；

m_3——灌砂入标定罐后，筒内剩余砂的质量，g。

④重复上述测量三次，取其平均值。

⑤按式(1－2－6)计算砂的单位质量：

$$\gamma_s = \frac{m_a}{V} \tag{1-2-6}$$

式中　γ_s——量砂的单位质量，g/cm³；

V——标定罐的体积，cm³。

先在拟测量密度的地点挖凿一个圆形试洞，洞深通常应等于碾压层的厚度。洞的直径与灌砂筒一致。在挖洞过程中，应使洞壁尽可能垂直，避免洞径上大下小。仔细收集洞中挖出的全部土或材料，勿使丢失，并采取措施保护其含水量不受损失。及时称取(可以分批称)洞中挖出的全部土或材料的质量，并取部分有代表性的样品做含水量试验。剩下的重要一步是量测试洞的容积，或确定所挖出的全部土或材料的体积。

将基板安放在试坑上，将灌砂筒安放在基板中间(储砂筒内放满砂)，使灌砂筒的下口对准基板中孔及试洞，打开灌砂筒的开关，让砂流入试坑内。在此期间，应注意勿碰动灌砂筒。直到储砂筒内的砂不再下流时，关闭开关。小心取走灌砂筒，并称量筒内剩余砂的质量，精确到1g。

用灌砂法测量试筒的容积时，其准确度和精度受下列几个因素的影响：

①标定罐的深度对砂的密度有影响。标定罐的深度减小2.5cm，砂的密度约降低1%，因此，标定罐的深度应与试洞的深度基本一致。

②贮砂筒中砂面的高度对砂的密度有影响。贮砂筒中砂面的高度降低5cm，砂的密度约降低1%，因此，现场测量时贮砂筒中的砂面高度，应与标定砂的密度时贮砂筒中的砂面高度一致。同时，将砂注入贮砂筒的方式要一致，使砂的密度较少变化。

③砂的颗粒组成对试验的重复性有影响。使用的砂应该是清洁干燥的，否则砂的密度会有明显变化。

我国目前所使用的灌砂筒，是根据英国标准BS1377和BS1924设计制作的。新灌砂筒的特点是将过去所用的灌砂法密度测定仪的几个分开的部件(如：漏斗、漏斗架、防风筒、套环和量砂容器)合成一个整体。由于每次使用时贮砂筒内砂的数量不变，砂的下落高度和下落速度不变，完全不受风的影响，因此，它的测量精度高、准确性好。

灌砂法是当前国际上最通用的方法，在很多国家的土工试验法和稳定土材料试验法中，灌砂法列为在现场测定密度的主要方法，可用于测量各种土和路面材料的密度。此法的缺点是：需要携带较多的量砂，称量次数较多，因此它的测量速度较慢。

(2)水袋法

水袋法主要用于美国，我国的公路土工试验规程中虽然也列入了水袋法，但使用较少。

先在拟测量湿密度的位置挖凿一个圆形试洞，对洞深的要求以及对称量洞中挖出土或材料和取样品测量含水量的要求，均与上述灌砂法相同。

测量试洞的容积时，将水袋法中使用的薄橡皮袋放入试洞内，在规定的压力下将水压入橡皮袋中，使橡皮袋扩张到与试洞底和壁相接触，根据所用水量确定试洞的体积。它的优点是：不需几次称量；携带的水量与量砂比相对较少，因此，它较灌砂法方便和快捷。它的缺点是：橡皮袋容易破损，特别在含碎石颗粒的结构层内橡皮袋易破损；冬季摄氏零度以下水要结冻，需要在水中加防冻剂，测量的准确度和重复性较差，对软土不很合适。

(3)环刀法(环刀法适用于细粒土)

所需要采用的仪具和材料有：

人工取土器或电动取土器：人工取土器包括环刀、环盖、定向筒和击实锤系统(导杆、落锤、手柄)。环刀直径为 6～8cm，高 2～3cm，壁厚 1.5～2mm。

室内做密度试验，考虑到与剪切、固结等试验所用环刀相配合，规定室内环刀容积为 60～150cm^3。施工现场检查填土压实密度时，由于每层土压实度上下不均匀，为提高试验结果的精度，可增大环刀容积，一般采用的环刀容积为 200～500cm^3。环刀高度与直径之比，对试验结果是有影响的。根据钻探机具、取土器的筒高和直径的大小，确定室内试验使用的环刀直径为 6～8cm，高 2～3cm；野外采用的环刀规格尚不统一，径高比一般以 1～1.5 为宜。

电动取土器由底座、行走轮、立柱、齿轮箱、升降机构、取芯头等组成。

天平：感量 0.1g(用于取芯头内径小于 70mm 样品的称量)或 1.0g(用于取芯头内径 100mm 样品的称量)。

其他器具：镐、小铁锹、修土刀、毛刷、直尺、钢丝锯、凡士林、木板及测定含水量的设备等。

若用人工取土器测定粘性土及无机结合料稳定细粒土密度，则先擦净环刀，称取环刀质量 m_2，准确至 0.1g。在试验地点，将面积约 30cm×30cm 的地面清扫干净。并将压实层铲去表面浮动即不平整的部分，达到一定深度，使环刀打下后，达到要求的取土深度，但不得扰动下层。将定向筒齿钉固定于铲平的地面上，顺次将环刀、环盖放入定向筒内与地面垂直。将导杆保持垂直状态，用取土器落锤将环刀打入压实层中，至环盖顶面与定向筒上口齐平为止。去掉击实锤和定向筒，用镐将环刀即试样挖出。轻轻取下环盖，用修土刀自边至中削去环刀两端余土，用直尺检测直至修平为止。擦净环刀外壁，用天平称取环刀即试样合计质量 m_1，准确至 0.1g。自环刀中取出试样，取具有代表性的试

样，测定其含水量。

若用人工取土器测定砂性土或砂层密度，如为湿润的砂土，试验时不需要使用击实锤和定向筒。在铲平的地面上，细心挖出一个直径较环刀外径略大的砂土柱，将环刀刃口向下，平置于砂土柱上，用两手平稳地将环刀垂直压下，直至砂土柱突出环刀上端约2cm为止。削掉环刀口上的多余砂土，并用直尺刮平。在环刀上口盖一块平滑的木板，一手按住木板，另一只手用小铁锹将试样从环刀底部切断，然后将装满试样的环刀转过来，削去环刀刃口上部的多余砂土，并用直尺刮平。擦净环刀外壁，称取环刀和试样合计质量 m_1，精确至0.1g。自环刀中取具有代表性的试样测定其含水量。干燥的砂土不能挖成砂土柱时，可直接将环刀压入或打入土中。

用电动取土器测定无机结合料细粒土和硬塑土密度。首先，装上所需规格的取芯头。在施工现场取芯前，选择一块平整的路段，将四只行走轮打起，四根定位销钉采用人工加压的方法，压入路基土层中。松开锁紧手柄，旋动升降手轮，使取芯头刚好与土层接触，锁紧手柄。将电瓶与调速器接通，调速器的输出端接入取芯机电源插口。指示灯亮，显示电路已通；启动开关，电动机工作，带动取芯机构转动。根据土层含水量调节转速，操作升降手柄，上提取芯机构，停机，移开机器。由于取芯头圆筒外表有几条螺旋状突起，切下的土屑排在筒外顺螺纹上旋抛出地表，因此，将取芯套筒套在削好的土芯立柱上，摇动即可取出样品。取出样品，立即按取芯套筒长度用修土刀或钢丝锯修平两端，制成所需规格土芯，如拟进行其他试验项目，装入铝盒，送实验室备用。用天平称量土芯带套筒质量 m_1，从土芯中心部分取试样测定含水量。

如上试验操作完毕后，按下式分别计算试样的湿密度 ρ_w 及干密度 ρ_d：

$$\rho_w = \frac{4 \times (m_1 - m_2)}{\pi d^2 h} \tag{1-2-7}$$

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 + 0.01\omega} \tag{1-2-8}$$

式中　ρ_w——试样的湿密度，g/cm³；

ρ_d——试样的干密度，g/cm³；

m_1——环刀或取芯套与试样合计质量，g；

m_2——环刀或取芯套筒质量，g；

d——环刀或取芯套筒直径，cm；

h——环刀或取芯套筒高度，cm；

ω——试样的含水量，%。

在破坏性试验中，环刀法是我国最早使用的测定土的湿密度的一种方法，它也是较

简单和较快捷的一种试验方法，但它的破坏性较灌砂法和水袋法大得多。此外，环刀法只能用于测定不含砾石或碎石的纯细粒土的现场湿密度，且不适用于松散性材料。用环刀法测量土层的湿密度，有较多因素影响测量结果的准确度和精确度：

1）环刀壁厚

当环刀被打入土中时，产生的应力使土有些变松。壁较厚时，产生的应力较大，因此干密度会有所降低。

2）环刀内径

通过用相同壁厚，不同内径的环刀进行比较试验，发现环刀内径对所得密度和试验结果的标准差无明显影响。环刀法更适宜于测定粘性土的密度。

对环刀取土的合适位置也不容忽视。用上三种方法测得的密度，都是某一深度范围内的平均密度。用前两种方法测得的密度是试洞深度范围内的平均密度。通常试验的深度等于碾压层的厚度，用环刀法测得的密度是环刀内土样所在深度范围内的平均密度。国内习惯用的环刀所取的土是表面下 5 ~ 10cm 范围内的土，则所得密度仅是 5 ~ 10cm 范围内土的平均密度，它不能代表整个碾压层的平均密度。由于碾压后，土层的密实度是从上到下减小的，而且顶部与底部的密实度相差很大。因此，用环刀法测定土的密度时，若环刀是从顶面往下取土的，则所得密度（或据此计算的压实度）将偏大 若环刀取的是底部的土，则所得的密度或计算的压实度将明显偏小。

就检查路基土和路面结构层的压实度而言，需要的是整个碾压层的平均压实度，而不是层中某一部分的压实度。因此，在用环刀法测定土的密度时，应使所得密度能代表整个碾压层的平均密度。这在实际工作中是比较困难的。只有使环刀中所取的土恰好是碾压层中间的土，环刀法所得结果才能与灌砂法所得结果大致相同，或略安全些。

（4）蜡封法

当天然土、压实土或路面材料能被成块地挖取时，可以用蜡封法测定其密度。块体应大一些，以提高测定的准确性和精度。一般块体体积应大于 $300cm^3$，并要能代表整个碾压层。在进行蜡封时，应先用油灰（腻子）将试块表面的孔隙填满。

在我国高等级公路沥青路面施工中，通常用路面钻机从某一沥青混合料层的表面向下取该结构层的芯样，然后用蜡封法测量芯样的体积。蜡封后，有两种方法可用于测定试块的体积：

1）水中称重法

利用物体浸入水中所减少的质量等于物体本身的体积这个原理，来确定试块的体积。因此，除称取蜡封试块在空气中的质量外，还要称取它在水中的质量。同时要知道

或用通常的方法测定石蜡的相对密度，以减去包覆试块或钻件的石蜡的体积。

2）排水法

将蜡封试块浸入一定体积的水中，称取排出水的质量。排出水的质量就是排出水的体积，也就是蜡封试块的体积。此体积减去试块或钻件表面石蜡的体积，得到试块或钻件的体积。

（5）钻芯法测定沥青面层密度

沥青混合料面层的施工压实度是指按规定方法测得的混合料试样的毛体积密度与标准密度之比，以百分率表示。对沥青混合料，国内外均以取样测定作为标准试验方法。

按照路面钻孔以及切割取样的方法钻取路面芯样，芯样直径不宜小于 ϕ100mm。当一次钻孔取得的芯样包含有不同层位的沥青混合料时，应根据结构组合情况用切割机将芯样沿各层结合面锯开分层进行测定。

将钻取的试件在水中用毛刷轻轻刷净粘附的粉尘。如果试件边角有松散颗粒，应仔细清除。然后将试件晾干或用电风扇吹干，静置不少于 24h，直至恒重。

按现行的试验规程的沥青混合料试件密度试验方法测得试件的视密度或毛体积密度。当试件的吸水率小于 2% 时，采用水中重法或表干法测定；当吸水率大于 2% 时，用蜡封法测定；对空隙率很大的透水性混合料及开级配混合料用体积法测定。

当计算压实的沥青混合料的标准密度采用马歇尔击实试件成型密度或试验路段钻孔取样密度时，沥青面层的压实度按下式计算：

$$K = \frac{\rho_s}{\rho_0} \times 100 \tag{1-2-9}$$

式中　K——沥青面层的压实度，%；

ρ_s——沥青混合料芯样试件的视密度或毛体积密度，g/cm^3；

ρ_0——沥青混合料的标准密度，g/cm^3。

由沥青混合料实测最大密度计算压实度时，应先进行空隙率折算，作为标准密度，再按式（1-2-10）计算压实度：

$$\rho_0 = \rho_t \times \frac{100 - VV}{100}) \tag{1-2-10}$$

式中　ρ_t——沥青混合料实测的最大密度，g/cm^3；具体试验方法参见试验规程；

ρ_0——沥青混合料的标准密度，g/cm^3；

VV——试件的空隙率，%。

在试验检测中，我们必须注意到：压实度的大小取决于实测的压实密度，同样也与标准密度的大小有关。但目前对标准密度的规定并不统一，有些工程在压实度达不到时便

重新进行马歇尔试验，调整标准密度使压实度达到要求，这一做法实际上是弄虚作假。为了防止这种情况，新的检测方法规定了三种标准密度：一种是马歇尔击实试件密度；一种是试验路段钻孔取样密度；第三种是由实测最大密度按空隙率折算的标准密度。在进行检测时，应结合工程实际情况，采用相应的标准密度。

3. 试验路法

试验路法就是通过铺筑试验路来确定路面材料与拥有机械相适应的最佳含水量和最大干密度。

将实际用于路面结构层的材料，如级配集料、水泥稳定土、石灰稳定土等铺筑几段不同含水量的试验路，每段一种含水量，并应尽可能使中间的含水量接近预估的最佳含水量。将材料拌和均匀后，用工地拥有的压实机械进行碾压试验。在碾压过程中，经常测定集料或稳定土的干密度，直到干密度不再增加为止。用最后得到的干密度的平均值作为相应含水量（也取平均值）下的最终干密度。利用不同含水量及其相应的最终干密度绘制“含水量—干密度”关系曲线，并根据此曲线确定适合于所用机械被压材料的最佳含水量和最大干密度。材料变化时，需要另铺试验路，重新确定其最佳含水量和最大干密度。

很明显，用试验路法得到的标准干密度受压实机械的影响。由于至少需要铺筑 4～5 种不同含水量的试验路，工作量相当大。如只在一种预估的合适含水量下铺筑试验路，并以所得的最终干密度作为标准干密度，则对某种集料或稳定土来讲，针对某一机械的材料合适含水量是难于确定的。因此，试验路上得到的标准干密度是否适当，就不能确定。

当然，也可以采用另一种方法铺筑试验路段。在长 200～300m 的路段上，先用含水量较小的路面材料均匀摊铺一层（厚 20～25cm），用工地拥有的或规定的压实机械进行碾压试验，直到材料的干密度不再增加为止。然后将压实的材料层翻松，洒一定数量的水并拌和均匀，铺平整后用同样的压实机械进行湿压试验，直到材料的干密度不再增加为止。如此反复进行 4～5 次，每次都增加一定的含水量。如前所述绘制“含水量—干密度”关系曲线，并根据此关系曲线确定材料的最佳含水量和最大干密度。采用此方法的前提是，每次碾压结束后，材料没有明显破碎现象。

试验路法的主要优点是：它考虑了所用的全部集料颗粒，并且是在工地的实际条件下得到的。当集料的最大粒径大于击实试验法所容许的最大粒径而且这部分颗粒的含量超过 30%时，可以采用试验路法确定集料的标准干密度。

对于沥青混合料试验路法，主要通过试验路选择较理想的压实机械和压实工艺，并

通过钻芯取样法确定其密度作为标准密度。

4. 含水量测定方法

现场测得的密度仅仅是路基土和路面材料的湿密度。为计算土和材料的干密度，还必须准确测定其含水量。

用核子仪可以直接在工地快速测得含水量，若用环刀法、灌沙法等测量密度时，都需要专门取有代表性的样品，送室内进行含水量试验。

含水量试验最准确的方法是烘干法。烘干法中，将已经称过湿质量的土或材料放在温度 105～110℃的烘箱内，烘够规定的时间后，取出称其干质量，然后计算其含水量。通常，粘性土需要烘干的时间较长，重粘土和粘土应烘 24h。在测定中粒土和粗粒土的含水量时，不能仅取其中的细粒土测量含水量，因为它不能代表整个中粒土和粗粒土的含水量，且所得含水量可能较实际含水量为大。因此，所取的试样应能代表整个中粒土和粗粒土的颗粒组成，即在颗粒组成和含水量方面都有代表性。因此，取的样品数量应该较多。

作为一种快速简易的含水量测定法，在国内常用酒精燃烧称重法（简称酒精法），也有用砂浴法和烘干法的。在国外有多种型号的核密实度含水量测定仪，中子（放射性同位素）含水量测定仪，还有含水量快速测定仪。使用含水量快速测定仪时，将湿土和电石一起放入密闭金属容器内，摇晃 3min。电石吸收土中的水分，产生乙炔气体，密闭容器内的压力增大，通过容器另一端的压力表，可以立即读出土的含水量。

实践证明，用酒精燃烧法测量土的含水量的准确度与土类有关。用酒精法测量砂的含水量时，所得结果与烘干法的结果相符。用酒精燃烧法测量粘性土，特别是重亚粘土和粘土的含水量时，所得结果与烘干法的结果相差很大。酒精燃烧法测得的含水量常小于烘干法的结果。其主要原因是，酒精难于将粘性土烧干。此外，潮湿的粘性土难于粉碎，也使酒精法的准确度降低。对于有机质含量高的土，不能采用酒精燃烧法测含水量。

5. 压实度检测结果的评定

路基、路面压实度以 1～3km 长的路段为检验评定单元，按要求的检测频率及方法进行现场压实度抽样检查，求算每一测点的压实度 K_i。

压实度的评定要点是：

(1)控制平均压实度的置信下限，以保证总体水平；

(2)规定单点极值不得超出给定值，放置局部隐患；

(3)规定扣分界限以区分质量优劣。

检验评定段的压实度代表值 K（算术平均值的下置信界限）为：

$$K = \overline{k} - t_a S/\sqrt{n} \geqslant K_0 \tag{1-2-11}$$

式中　$\overline{k}$——检验评定段内各测点压实度的平均值；

t_a——t 分布表中随各测点数和保证率(或置信度)而变的系数；高速、一级公路：基层、底基层为 99%，路基、路面面层为 95%；其他公路：基层、底基层为 95%，路基、路面面层为 90%；

S——检测值的均方差；

N——检测点数；

K_0——压实度标准值。

(1)路基、基层和底基层

$K \geqslant K_0$，且单点压实度 K_i 全部大于等于规定值减 2 个百分点时，评定路段的压实度可得规定满分；当 $K \geqslant K_0$，且单点压实度全部大于等于规定极值时，对于测定值低于规定值减 2 个百分点的测点，按其占总检查点数的百分率计算扣分值；$K < K_0$ 或某一单点压实度 K_i 小于规定极值时，该评定路段压实度为不及格，评为零分。

路堤施工段落短时，分层压实度要点点符合要求，且实际样本数不小于 6 个。

(2)沥青面层

当 $K \geqslant K_0$ 且全部观测点大于等于规定值减 1 个百分点时，评定路段的压实度可得规定的满分；当 $K \geqslant K_0$ 时，对于测定值低于规定值减 1 个百分点的测点，按其占总检查点数的百分率计算扣分值；$K < K_0$ 时，评定路段的压实度为不合格，评为零分。

第二节　回弹弯沉检测方法

路面弯沉是汽车车轮荷载作用下路面表面产生的垂直变形值。它是反映路面整体抗压强度的一个综合指标。目前我国沥青路面设计方法采用的设计指标之一是路表回弹弯沉，并规定了双轮胎轮隙中心处路面表面最大回弹弯沉值应不大于竣工验收弯沉值。在施工控制及施工验收中，用到了竣工验收弯沉值；在旧路的补强设计中，回弹弯沉值也是反映旧路强度的一个很重要的基本参数。在水泥混凝土路面中，弯沉检测用于接缝传荷能力和脱空的分析评定，所以正确的弯沉测试具有重要的意义。

路面在车轮作用下产生沉降，其总变形值等于总弯沉值。当车轮荷载卸除后，路面便向上回弹，其回弹变形值便是回弹弯沉值。总弯沉值与回弹弯沉之差便是残余弯沉。

一般总弯沉比回弹弯沉大，表明路面除了产生弹性变形外还产生塑性变形。若总弯沉等于回弹弯沉，表明路面是完全弹性体。总弯沉小于回弹弯沉，表明路面产生隆起的塑性变形。

一、关子弯沉值的几个基本概念

(一)弯沉

指在规定的标准轴载作用下，路基和路面表面轮隙位置产生的总垂直变形(总弯沉)或垂直回弹变形(回弹弯沉)，以 0.01mm 为单位。

(二)设计弯沉值

根据设计年限内一个车道上预测通过的累计当量轴次(N_e)、公路等级系数(A_c)、面层类型系数(A_s)和基层类型系数(A_b)而确定的路面弯沉设计值(L_d)。

$$L_d = 600Ne^{-0.2}A_cA_bA_s \tag{1-2-12}$$

高等级高速公路路基顶面的回弹弯沉，由设计单位根据设计的土基回弹模量、所建高等级公路相同土质的路基的回弹模量和弯沉的关系综合确定。

(三)竣工验收弯沉值

是检验路面是否达到设计要求的指标之一。当路面厚度计算以设计弯沉为控制指标时，则验收弯沉值≤设计弯沉值 ;当厚度计算以层底拉应力为控制指标时，应根据拉应力计算所得的结构厚度，重新计算路面弯沉值，该弯沉值即为竣工验收弯沉值。

二、主要的弯沉测试方法

(一)贝克曼梁法

传统方法，速度慢，静态测试，比较成熟，目前属于标准方法。

(二)自动弯沉仪法

利用贝克曼梁原理快速测定，属于静态测试范畴，但测定的是总弯沉，因此使用时应用贝克曼梁进行标定换算。

(三)落锤式弯沉仪法

近年来像日本、丹麦等国研制了动力式落锤弯沉仪，并以量测冲击载荷作用下路面表面的弯沉，它可模拟快速行车对路面的弯沉效应。

利用重锤自由落下的瞬间产生的冲击荷载测定弯沉，属于动态弯沉，并能反算路面的回弹模量，快速连续，使用时应用贝克曼梁进行标定换算。

弯沉测量的目的，一是利用弯沉仪量测路面表面在标准轴载作用下的轮隙回弹弯沉

值，用作评定路面强度的指标；二是通过对路面结构分层测定所得的回弹弯沉值，根据弹性体系垂直位移理论解，反算路面各结构层的材料回弹模量值。

三、贝克曼弯沉仪测量法

用弯沉指标来表示路面强度的做法早在 20 世纪 30 年代便已经开始。美国在 50 年代研制出贝克曼弯沉梁，我国也仿照贝克曼弯沉梁研制了现在的弯沉仪。为了提高测量精度和解决弯沉测量时支座位移的问题，前苏联、瑞士、法国研制了光学弯沉仪，它的特点是把测点与读数装置分开，消除了支座位移的影响。我国目前多使用贝克曼弯沉仪测弯沉。

(一)仪具与材料

1. 贝克曼弯沉仪

我国目前多使用的贝克曼弯沉仪，通常由铝合金制成，总长 3.6m，杠杆比(即前臂与后臂之比)一般为 2∶1。要求刚度高，质量小，精度高，灵敏度高和使用方便，仪器构造如图 1－2－3 所示。

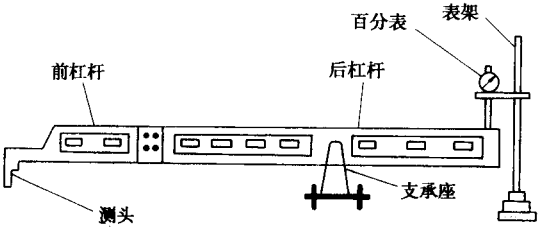


图 1－2－3　弯沉仪构造图

2. 测试车

采用双轴、后轴双侧 4 轮的载重车，测试车可根据需要按公路等级选择，高速公路、一级公路和二级公路采用后轴为 100kN 的 BZZ—100 型汽车。其他等级公路采用后轴为 60kN 的 BZZ－60 型汽车。其标准轴载车的主要参数见表 1－2－2。并要求轮胎花纹清晰，没有明显磨损。车上所装重物应稳固均匀，汽车行驶时载物不得移动。测试前应对轮胎气压进行检验。

表 1－2－2　测定弯沉用的标准轴参数

标准轴载等级	BZZ—100	BZZ—60
后轴标准轴载 P(kN)	100 ± 1	60 ± 1
一侧双轮荷载(kN)	50 ± 0.5	30 ± 0.5

标准轴载等级	BZZ—100	BZZ—60
轮胎充气压力(MPa)	0.7±0.05	0.5±0.05
单轮传压面当量圆直径(cm)	21.30±0.5	19.5±0.5
轮隙宽度	满足能自由插入弯沉仪测头的测试要求	

(二)准备工作

汽车加载,以砂石、砖等材料或铁块等重物加载,注意必须堆放稳妥。再称量汽车后轴重力,此时前轮应驶离地磅,调整汽车加载重物,使汽车后轴总重 P 符合上述规定。然后,印取轮迹,在平整坚实的地表上,将合乎荷载标准的汽车后轴用千斤顶顶起,在车轮下放置有复写纸的厘米纸,开启千斤顶使车轮缓缓下放,即在复写纸上压轮迹。然后再顶起后轮,取出厘米纸,注明左、右轮,用笔均匀画出轮胎印迹周界,计算其面积。

最后,按下列公式,计算后轮的单位面积压力及荷载在当量圆直径:

单位压力为:
$$p = \frac{P}{2F} \tag{1-2-13}$$

单圆荷载当量直径为:
$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} \tag{1-2-14}$$

双圆荷载当量直径为:
$$d = \frac{D}{\sqrt{2}} \tag{1-2-15}$$

(三)测定方法与步骤

首先,选定测点,一般路段可在行车道上每隔 50~100m 选一测点,并记录测点里程、位置。如果情况特殊,可根据具体情况适当加密测点。有条件时,可用两台弯沉仪的左、右两行车带同时进行测定。

接着,用'前进卸载法'测定,将试验车的一侧后轮(一般均使用左、右轮)停于测点上。迅速在此一侧后轮的两轮胎间隙安置弯沉仪测头,并调平弯沉仪。测头应置于轮胎间隙中心稍前 3~5cm 处。调整百分表,使读数为 4~5mm。轻轻扣打弯沉仪,检查百分表是否稳定回零。

然后吹口哨,指挥汽车缓缓前进,使百分表指针随路面变形的增加持续向前转动。当转动到最大值时,迅速读取初读数 d_1,汽车仍在继续前进,百分表指针反向回转。待汽车驶出弯沉影响半径后,百分表指针回转稳定,读取读数 d_2。当弯沉仪的杠杆比为 2:1 时,则回弹弯沉值(mm)如下:

$$l_t = 2(d_1 - d_2) \times \frac{1}{100} \tag{1-2-16}$$

最后记录下回弹弯沉测量的结果。

如果需要测定总弯沉值和残余弯沉值，则应用“后退加荷法”。即先将试验车停驻在弯沉影响半径范围之外。在测点先安置好弯沉仪测头，读记百分表读数 d_3。然后指挥试验车缓缓地由前向后倒退至测点，并使弯沉仪测头刚好对准轮胎间隙中心，待百分表稳定后读记数值 d_4，随即指挥汽车向前缓缓行驶离开测点至影响半径之外，待百分表稳定后读记数值 d_5，则：

总弯沉为：
$$l_z = 2(d_4 - d_3) \times \frac{1}{100} \tag{1-2-17}$$

回弹弯沉为：
$$l_t = 2(d_4 - d_5) \times \frac{1}{100} \tag{1-2-18}$$

残余弯沉：
$$l_e = l_z - l_t \tag{1-2-19}$$

（四）弯沉仪的支点变形修正

①当采用 3.6m 的弯沉仪对半刚性基层沥青路面、水泥混凝土路面等进行弯沉测试时，有可能引起弯沉仪支座处变形，因此应检验支点有无变形。用另一台检验用的弯沉仪安装在检测用的弯沉仪后方，其测点架于测定用的弯沉仪的支点旁。当汽车开动时，同时读取两台弯沉仪的读数，如检验用的弯沉仪百分表有读数，则应记录并进行支点变形修正。

②当采用长 5.4m 的弯沉仪测定时，可不进行支点变形修正。进行弯沉仪支点变形修正时，路面测点的回弹弯沉值按下式计算：

$$L_T = (L_1 - L_2) \times 2 + (L_3 - L_4) \times 6 \tag{1-2-20}$$

式中　L_1——车轮中心临近弯沉仪测头时测定用弯沉仪的最大读数，0.01mm；

L_2——汽车驶出弯沉影响半径后测定用弯沉仪的终读数，0.01mm；

L_3——车轮中心临近弯沉仪测头时检验用弯沉仪的最大读数，0.01mm；

L_4——汽车驶出弯沉影响半径后检验用弯沉仪的终读数，0.01mm。

式(1-2-20)适用于测定用弯沉仪支座处有变形，但百分表架处已无变形的情况。

（五）温度修正

沥青面层厚度大于 5cm 且路面温度超过(20±2)℃范围时，回弹弯沉值应进行温度修正，温度的修正有两种方法。

1. 查图法

测定时的沥青层配筋温度按下式计算：

$$T = (T_{25} + T_m + T_e)/3 \tag{1-2-21}$$

式中　T——测定时沥青层平均温度，℃；

T_{25}——根据 T_0 由图 1－2－4 决定的路表下 25mm 处的温度，℃；

T_m——根据 T_0 由图 1－2－5 决定的沥青层中间深度的温度，℃；

T_e——根据 T_0 由图 1－2－6 决定的沥青层地面处的温度，℃。

图 1－2－4 中 T_0 为测定时路表温度与测定前 5d 日平均气温的平均值之和，日平均气温为日最高气温与最低气温的平均值。

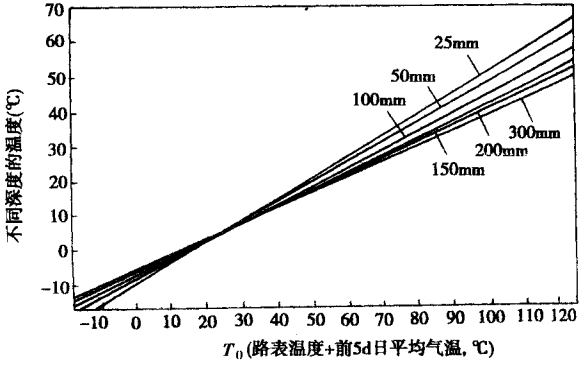


图 1－2－4　沥青面层平均温度的确定

（线上的数字表示路表下的不同深度）

不同基层的沥青路面弯沉值的温度修正系数 K，根据沥青平均温度 T 及沥青层厚度，分别由图 1－2－5 及图 1－2－6 求取。

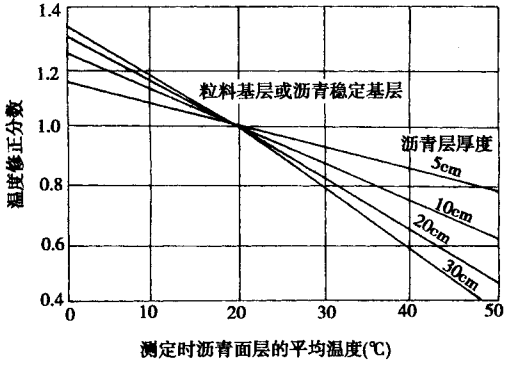


图 1－2－5　路面弯沉温度修正系数曲线

（适用于粒料基层或沥青温度基层）

沥青路面回弹弯沉按下式计算：

$$L_{20} = L_T \times K \tag{1－2－22}$$

式中　K——温度修正系数；

L_{20}——换算为 20℃的沥青路面回弹弯沉值，0.01mm；

L_T——测定时沥青面层内平均温度为 T 时的回弹弯沉值，0.01mm。

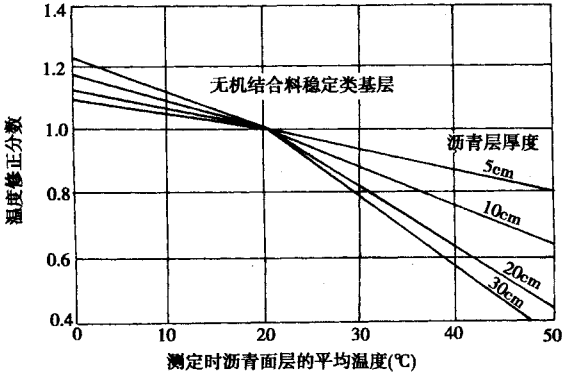


图 1－2－6　路面弯沉温度修正系数曲线

（适用于无机结合料稳定的半刚性基层）

2. 经验计算法

测定时的沥青面层平均温度 T 按下式计算：

$$T = a + bT_0 \tag{1-2-23}$$

式中　T——测定时沥青面层平均温度，℃；

a——系数，$a = -2.65 + 0.52h$（h 为沥青面层厚度）；

b——系数，$b = 0.62 - 0.008h$；

T_0——测定时路表温度与前 5h 平均气温之和，℃。

沥青路面弯沉的温度修正系数 K 按下式计算：

当 $T \geqslant 20$℃时：

$$K = e^{(\frac{1}{T} - \frac{1}{20})h} \tag{1-2-24}$$

当 $T < 20$℃时：

$$K = e^{0.002h(20-T)} \tag{1-2-25}$$

沥青回弹弯沉按(1－2－22)式计算。

(六)结果的评定

1. 按下式计算每一个评定路段的代表弯沉：

$$L_r = \overline{L} + Z_a S \tag{1-2-26}$$

式中　L_r——一个评定路段的代表弯沉，0.01mm；

$\overline{L}$——一个评定路段内经各项修正后的各测点弯沉的平均值，0.01mm；

S——一个评定路段内经各项修正后的全部测点弯沉的标准差，0.01mm；

Z_a——与保证率有关的系数，当设计弯沉值按《公路沥青路面设计规范》确定时，采用表 1－2－3 中的规定值。

表 1－2－3　保证率系数表

层　位	Z_a	
	高速公路、一级公路	二、三级公路
沥青面层	0.645	1.5
路基	2.0	1.645

2. 计算平均值和标准差时，应将超出 $\pm(2\sim3)S$ 的弯沉特异值过大的点，找出局部处理。用两台弯沉仪同时进行左右轮弯沉值测定时，应按两个独立的测点计，不能采用左右两点的平均值。

3. 弯沉代表值不大于设计要求的弯沉值时得满分，大于时得零分。

若在非不利季节测定时，应考虑季节影响系数。

四、国外弯沉测定方法

用贝克曼梁弯沉仪测定弯沉，当路面较弱或轮荷较大时，有时会碰到仪器支座处于弯沉盆内的情况。由于支点的下沉，百分表读数便不能反映路面的实际弯沉值。显然，试验时还要测出贝克曼梁前支座的弯沉值。

为了能在贝克曼梁上得出弯沉记录曲线，美国使用一种赫尔麦记录器，它装在贝克曼梁上，通过测针臂带动的一个杠杆起作用，用笔在旋转纸带上画出汽车加荷前后的弯沉曲线。还有一种电子换能器，装在贝克曼梁上，它与带有笛卡尔坐标记录器的 y 轴相接，x 轴则与卡车车轮移动所带动的旋转电位计相接，记录器可记录测点处路面弯沉的变化曲线。

为了提高量测精度和解决弯沉量测时支座位移的问题，一些国家研制出精密量测路面弯沉的仪器，如瑞士 N－3 型精密水准仪（精度为 0.002mm），前苏联的 HA 型和 HB 型精密水准仪（精度为 0.05mm），这类仪器量测弯沉的特点都是把测点与读数装置分开，消除了支座位移的影响。

为了量测路面表面或路面结构内部的弯沉值及其随车重和车速的变化，有一种固定式的弯沉测定器。美国各州公路工作者协会（AASHO）在道路试验中采用 LVDT 装置，即线性变数微分转换器，将它埋入路面中，以测量轮下的弯沉值，再在路面内埋设金属棒，埋深 2m，一头固定，一头自由，当车辆通过时金属棒随路面的位移在互感器中滑动，

便可量出弯沉大小的变化。

后来各国先后研制成自动弯沉仪，可在路面上连续地进行快速量测。丹麦国家公路试验室研制的 Danish 移动式弯沉记录仪，用卡车牵引，总长 1.5m，移动速度为 1.5km/h。框架的四轮立于路面上，轮荷载 40kN。量测时弯沉仪的测针置于测点上，牵引车不动，挂车上的测量车可借传动机构带动向前滚动至测针位置，磁带自动记录弯沉影响线，并算出弯沉和曲率半径。测点间距 11mm，每天可测约 2000 个点。

国外发展了许多轻便仪器，可以量测冲击荷载作用下路面的弯沉，模拟快速行车对路面的弯沉效应。落锤式弯沉仪(FWD)是目前应用较为广泛的弯沉检测设备，代表了弯沉检测的发展方向。它的基本原理是通过液压系统提升和释放荷载块对路面施加冲击荷载，荷载大小由落锤质量和起落高度控制，荷载时程和动态弯沉盆均由相应的传感器测定。20 世纪 60 年代，法国首先提出冲击式动力弯沉仪的初步设想，70 年代后期丹麦和瑞典首先研制成 FWD。80 年代以后，美国、英国和日本等相继引进和仿制了这种弯沉仪。研究表明，FWD 的冲击荷载与时速 60～80km 的车辆对路面的荷载相似，可以较好地模拟行车荷载作用，并且测速快，精度高，因此自 20 世纪 80 年代初以来，FWD 在国际上得到日益广泛的应用，至今已有 50 多个国家和地区引进了 FWD。

在美国，拥有 FWD 的用户绝大部分都配套使用分析软件，最常用的为 DARWIN、AASHTO、MODULUS、EVERCALC、LLBACK、EVERPAVE 等，主要分析功能是性能评价和罩面设计。这与我国的情况有较大区别，据了解，我国绝大部分 FWD 用户单位没有配套的分析软件，FWD 也仅作为一种高精度的弯沉测量仪器在使用，仅有少数研究性单位在进行深入探讨。

继 FWD 之后，新一代弯沉仪 RWD(Rolling Wheel Delectometer 滚轮式弯沉仪)正处于研究阶段。它是采用高频激光扫描，连续地记录行驶中的测试车在路表产生的弯沉，测试速度约 55mile/h。目前主要有 Dynatest(丹麦)与 Quest Integrated(美国)合作、美国密西西比州的 ARA(Applied Research Associates)公司和瑞典的 RDT 等机构从事 RWD 的研制工作，第一代产品已经问世，精度适合于路网普查。RWD 的最大优点是：所记录的是真实受力状态而不是模拟荷载状态下的弯沉，并且测速远大于 FWD，因此对交通的影响较小，是较为理想的弯沉检测设备，因此是此类设备的重要发展方向。

得克萨斯大学开发的 RDD(Rolling Dynamic Wheel Deflectometer 滚动动力弯沉仪)的加载原理与 RWD 相似，但弯沉的测量采用的是滚动式弯沉传感器。它的测试速度约 2.5km/h，可以同时提供路表破损摄像。RDD 的主要优点是连续测量，信息量大，但由于测试速度慢等原因，用户很少。

第三节　回弹模量试验检测方法

土基的回弹模量是公路设计中一个必不可少的参数，我国现有规范已给出了不同的自然区划和土质的回弹模量值的推荐值，具体参见《公路沥青路面设计规范》中附录 E“土基回弹模量参考值”表。但由于土基回弹模量的改变将会影响路面设计的厚度，所以建议有条件时最好直接测定，而且随着施工质量的提高，回弹模量值的检验将会作为控制施工质量的一个重要指标。测定回弹模量的方法，目前国内常用的主要有：承载板法、贝克曼梁法和其他间接测试方法（如贯入仪测定法和 CBR 测定法）。

一、承载板法

（一）目的和适用范围

1. 本方法适用于在现场土基表面，通过承载板对土基逐级加载、卸载的方法，测出每级荷载下相应的土基回弹变形值，经过计算求得土基回弹模量。

2. 本方法测定的土基回弹模量可作为路面设计参数使用。

（二）仪具与材料

1. 加载设施：载有铁块或集料等重物、后轴重不小于 60kN 的载重汽车一辆。在汽车大梁的后轴之后约 80cm 处，附设加劲小梁一根作反力架。汽车轮胎充气压力为 0.50MPa。

2. 现场测试装置，如图 1－2－7 所示，由千斤顶、测力计（测力环或压力表）及球座组成。

3. 刚性承载板一块，板厚 20mm，直径为 ϕ30cm，直径两端设有立柱和可以调整高度的支座供安放弯沉仪测头，承载板放在土基表面上。

4. 路面弯沉仪两台，由贝克曼梁、百分表及其支架组成。

5. 液压千斤顶一台，80～100kN，装有经过标定的压力表或测力环，其容量不小于土基强度，测定精度不小于测力计量程的 1/100。

6. 秒表。

7. 水平尺。

8. 其他：细砂、毛刷、垂球、镐、铁锹、铲等。

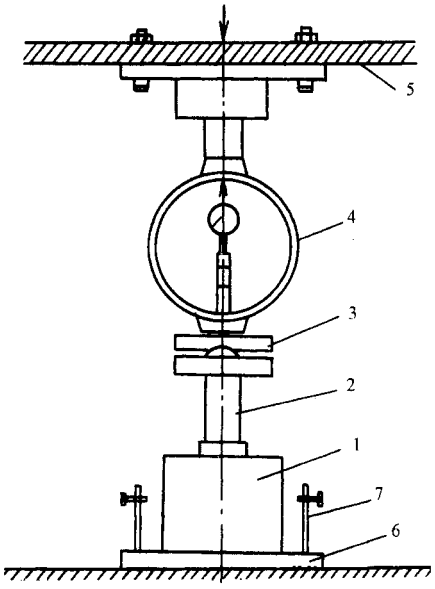


图 1－2－7　承载板测试装置图

1—加载千斤顶；2—钢圆筒；3—钢板及球座；4—测力计；

5—加劲横梁；6—承载板；7—立柱及支座

(三)试验前准备工作

1. 根据需要选择有代表性的测点，测点应位于水平的路基上，土质均匀，不含杂物；

2. 仔细平整土基表面，撒干燥洁净的细砂填平土基凹处，砂子不可覆盖全部土基表面避免形成一层。

3. 安置承载板，并用水平尺进行校正，使承载板置水平状态。

4. 将试验车置于测点上，在加劲小梁中部悬挂垂球测试，使之恰好对准承载板中心，然后收起垂球。

5. 在承载板上安放千斤顶，上面衬垫钢圆筒，并将球座置于顶部与加劲横梁接触。如用测力环时，应将测力环置于千斤顶与横梁中间，千斤顶及衬垫物必须保持垂直，以免加压时千斤顶倾倒发生事故并影响测试数据的准确性。

6. 安放弯沉仪，将两台弯沉仪的测头分别置于承载板立柱的支座上，百分表对零或其他合适的初始位置。

(四)测试步骤

1. 用千斤顶开始加载，注视测力环或压力表，至预压 0.05MPa，稳压 1min，使承载板与土基紧密接触，同时检查百分表的工作情况是否正常，然后放松千斤顶油门卸载，稳压 1min，将指针对零或记录初始读数。

2. 测定土基的压力—变形曲线。用千斤顶加载，采用逐级加载卸载法，用压力表或测力环控制加载量，荷载小于 0.1MPa 时，每级增加 0.02MPa，以后每级增加 0.04MPa 左右。为了使加载和计算方便，加载数值可适当调整为整数。每次加载至预定荷载后，稳定 1min，立即读记两台弯沉仪百分表数值，然后轻轻放开千斤顶油门卸载至 0，待卸载稳定 1min 后，再次读数，每次卸载后百分表不再对零。当两台弯沉仪百分表读数之差小于平均值的 30% 时，取平均值。如超过 30%，则应重测。当回弹变形值超过 1mm 时，即可停止加载。

3. 各级荷载的回弹变形和总变形，按以下方法计算：

回弹变形 L =（加载后读数平均值 - 卸载后读数平均值）× 弯沉仪杠杆比

总变形 L' =（加载后读数平均值 - 加载初始前读数平均值）× 弯沉仪杠杆比

4. 测定汽车总影响量 a。最后一次加载卸载循环结束后，取走千斤顶，重新读取百分表初读数，然后将汽车开出 10m 以外，读取终值数，两只百分表的初、终读数差之平均值乘弯沉仪杠杆比即为总影响量 a。

5. 在试验点下取样，测定材料含水量。取样数量如下：

最大粒径不大于 5mm，试样数量约 120g；

最大粒径不大于 25mm，试样数量约 250g；

最大粒径不大于 40mm，试样数量约 500g。

6. 在紧靠试验点旁边的适当位置，用灌砂法或环刀法或其他方法测定土基的密度。

（五）计算

1. 各级压力的回弹变形加上该级的影响量后，则为计算回弹变形值。表 1-2-4 是以后轴重 60kN 的标准车为测试车的各级荷载影响量的计算值。当使用其它类型测试车时，各级压力下的影响量 a_i 按下式计算：

$$a_i = \frac{(T_1 + T_2)\pi D^2 P_i}{4 T_1 Q} \cdot a \qquad (1-2-27)$$

式中　T_1 ——测试车前后轴距，m；

T_2 ——加劲小梁距后轴距离，m；

D ——承载板直径，m；

Q ——测试车后轴重，N；

P_i ——该级承载板压力，Pa；

a ——总影响量，0.01mm；

a_i ——该级压力的分级影响量，0.01mm。

表 1－2－4　各级荷载影响量(后轴 60kN)

承载板压力(MPa)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50
影响量	0.06a	0.12a	0.18a	0.24a	0.36a	0.48a	0.60a

2. 将各级计算回弹变形值点绘于标准计算纸上,排除显著偏离的异常点并绘出顺滑的 $P-L$ 曲线,如曲线起始部分出现反弯,应按图 1－2－8 所示修正原点 O,O'则是修正后的原点。

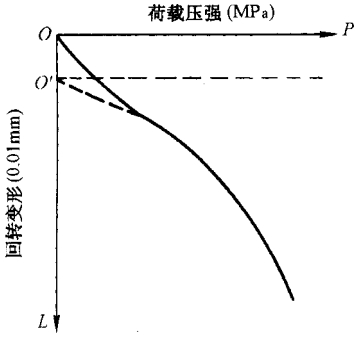


图 1－2－8　修正原点示意图

3. 按下式计算相应于各级荷载下的土基回弹模量值:

$$E_i = \frac{\pi D}{4} \cdot \frac{P_i}{L_i}(1-\mu_0^2) \qquad (1-2-28)$$

式中　E_i——相应于各级荷载下的土基回弹模量,MPa;

μ_0——土的泊松比,根据部颁路面设计规范规定选用;

D——承载板直径 30cm;

P_i——承载板压力,MPa;

L_i——相对于荷载时的回弹变形,cm。

4. 取结束试验前的各回弹变形值按线形回归方法由下式计算土基回弹模量 E_0 值:

$$E_0 = \frac{\pi D}{4} \cdot \frac{\sum P_i}{\sum L_i}(1-\mu_0^2) \qquad (1-2-29)$$

式中　E_0——土基回弹模量,MPa;

μ_0——土的泊松比,根据部颁设计规范规定取用;

L_i——结束试验前的各级计算回弹变形值;

P_i——对应于 L_i 的各级压力值。

(六)报告

1. 本实验采用的记录格式如表 1－2－5。

表 1－2－5　承载板测定记录表

路线和编号：						路面结构：				
测定层位：						测定用汽车型号：				
承载板直径(cm)：						测定日期：　年　月　日				
千斤顶读数	荷载 P(kN)	承载板压力(MPa)	百分表读数(0.01mm)			总变形(0.01mm)	回弹变形(0.01mm)	分级影响量(0.01mm)	计算回弹变形(0.01mm)	Ei(MPa)
			加载前	加载后	卸载后					
总影响量 a										
土基回弹模量 E_0 值(MPa)										

2. 试验报告应记录下列结果：

(1)试验时所采用的汽车；

(2)近期天气情况；

(3)试验时土基的含水量；

(4)土基密度和压实度；

(5)相应于各级荷载下的土基回弹模量值；

(6)土基回弹模量值。

二、贝克曼梁法

(一)目的和适用范围

本方法适用于在土基、厚度不小于 1m 的粒料整层表面，用弯沉仪测试各测点的回弹弯沉值，通过计算求得该材料的回弹模量值的试验；也适用于在旧路表面测定路基路面的综合回弹模量。

(二)试验方法与步骤

1. 准备工作

(1)选择洁净的路基表面、路面表面作为测点，在测点处作好标记并编号。

(2)无结合料粒料基层的整层试验段(试槽)应符合下列要求：

①整层试槽可修筑在行车带范围内或路肩及其他合适处，也可在室内修筑，但均应适于用汽车测定弯沉。

②试槽应选择在干燥或中湿路段处，不得铺筑在软土基上。

③试槽面积不小于 3m × 2m，厚度不宜小于 1m。铺筑时，先挖 3m × 2m × 1m（长 × 宽 × 深）的坑，然后用欲测定的同一种路面材料按有关施工规定的压实层厚度分层铺筑并压实，直至顶面，使其达到要求的压实度标准。同时应严格控制材料组成，配比均匀一致，符合施工质量要求。

④试槽表面的测点间距可按图 1－2－9 布置在中间 2m × 1m 的范围内，可测定 23 点。

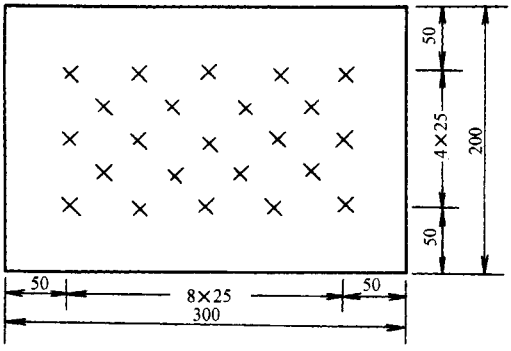


图 1－2－9　试槽表面的测点布置（单位：cm）

2. 测试步骤

按上述方法选择适当的标准车，实测各测点处的路面回弹弯沉值 L_i。如在旧沥青面层上测定时，应读取温度，并按规定的方法进行测定弯沉值的温度修正，得到标准温度 20℃时的弯沉值。

（三）计算

1. 计算全部测定值的算术平均值、单次测量的标准差和自然误差：

$$\overline{L} = \frac{\sum L_i}{n} \tag{1-2-30}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (L_i - \overline{L})^2}{n-1}} \tag{1-2-31}$$

$$r_0 = 0.675 \times S \tag{1-2-32}$$

式中　$\overline{L}$——回弹弯沉的平均值，0.01mm；

S——回弹弯沉测定值的标准差，0.01mm；

r_0——回弹弯沉测定值的自然误差，0.01mm；

L_i——各测点的回弹弯沉值，0.01mm；

n——测点总数。

2. 计算各测点的测定值与算术平均值的偏差值 $d_i = L_i - \overline{L}$，并计算较大的偏差与自然误差之比 d_i/r_0。当某个测点观测值 d_i/r_0 的值大于表 1-2-6 中的 d/r 极限值时则应舍弃该测点，然后重新计算所余各测点的算术平均值($\overline{L}$)及标准差(S)。

表 1-2-6　相应于不同观测次数的 d/r 极限值

n	5	10	15	20	50
d/r	2.5	2.9	3.2	3.3	3.8

3. 按下式计算代表弯沉值：

$$L_r = \overline{L} + S \tag{1-2-33}$$

式中　L_r——计算代表弯沉；

$\overline{L}$——舍弃不符合要求的测点后所余各测点弯沉的算术平均值；

S——舍弃不符合要求的测点后所余各测点弯沉的标准差。

4. 按下式计算土基、整层材料的回弹模量(E_1)或旧路的综合回弹模量：

$$E_1 = \frac{2Pr}{L_r}(1-\mu^2)K \tag{1-2-34}$$

式中　E_1——计算的土基、整层材料的回弹模量或旧路的综合回弹模量，MPa；

P——测定车轮的平均垂直荷载，MPa；

r——测定用标准车双圆荷载单轮传压面当量圆的半径，cm；

μ——测定层材料的泊松比，根据部颁路面设计规范的规定取用；

K——弯沉系数，为 0.712。

(四)报告

报告应包括弯沉测定表、计算的代表弯沉、采用的泊松比及计算得到的材料回弹模量 E_1 等，对沥青路面应报告测试时的路面温度。

三、其它间接测试方法

土基回弹模量也可用长杆贯入综合次数法和 CBR 间接推算法来求算。长杆贯入综合次数法是利用长杆贯入仪，试验时记录测头击入土中每 10cm 所需的锤击次数，直至贯入土中 80cm 为止。综合贯入次数是按布辛公式以距路基表面深度为 5cm、15cm、25cm、35cm、45cm、55cm、65cm 和 75cm 时压应力略加调整作为各层的权数。综合贯入次数 N_{80} 计算式为：

$$N_{80} = (20N_1 + 12N_2 + 7N_3 + 4N_4 + 2.5N_5 + 2N_6 + 1.5N_7 + N_8)/50) \tag{1-2-35}$$

路基回弹模量 E_0 可按下式计算：

$$E_0 = KN_{80} \tag{1-2-36}$$

式中　K——实验确定系数，一般为 12～20；

N_{80}——综合贯入次数。

CBR 值间接推算法是利用 CBR 测试结果按下列关系式求算 E 值：

$$E = n\mathrm{CBR} \tag{1-2-37}$$

式中　n——常数，一般为 80～100，需经试验确定。

第四节　水泥混凝土芯样劈裂强度试验方法

水泥混凝土路面强度的控制指标是弯拉或劈裂强度。由于弯拉强度试件成型及试验过程比较麻烦，现多用劈裂强度来代替。

需要强调的一点是快速无破损方法与传统的钻芯试验方法比较，有其较大的优势，但不能代替钻芯的劈裂强度试验结果，也不能代替试验室标准条件下的弯拉强度，不适宜作为仲裁试验或工程验收的最终依据。

一、目的和适用范围

从硬化混凝土结构物中钻取和检查芯样，测定芯样的劈裂抗拉强度，作为评定结构品质的主要指标。

二、仪具与材料

1. 压力机。

2. 劈裂夹具、木质三合板垫条，如图 1－2－10 所示。

三、试验方法与步骤

(一)检查

1. 外观检查

每个芯样应详细描述有无裂缝、接缝、分层、麻面或离析等情况，必要时应记录以下事项：

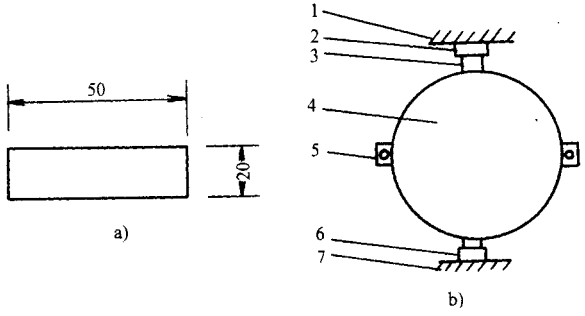


图 1－2－10　芯样劈裂试验装置示意图(单位：mm)

a)夹具钢板条；b)劈裂夹具

1,7—压力机压板车；2,6—夹具钢垫条；3—木质或纤维层；4—试件；5—侧杆

(1)集料情况

估计集料的最大粒径、形状及种类，粗细集料的比例与级配。

(2)密实性

检查并记录存在的气孔及其位置、尺寸与分布情况，必要时应拍下照片。

2. 测量

(1)测平均直径 d_m

在芯样的中间及两面各 1/4 处按两个垂直方向测量三对数值确定芯样的平均直径 d_m，精确到 1.0mm。

(2)测平均长度 L_m

取芯样直径两端侧面测定钻取后芯样的长度及端面加工后的长度，精确至 1.0mm。

3. 表面密度

如有必要，应测定芯样的表观密度。

(二)试验步骤

1. 试件的制作

试件两端平面应与它的轴线相垂直，误差不应大于 ±1°，端面凹凸每 100mm 不超过 0.05mm，承压线凹凸不应大于 0.25mm。

2. 湿度控制

试验前试件应在(20±2)℃的水中浸泡 40h，从水中取出后立即进行试验。

如有专门要求，可用其他养护或湿度控制条件。

3. 劈裂试验

①将试件、劈裂垫条和垫层如图 1－2－10 所示放在压力机上，借助夹具两侧杆，将

试件对中。

②开动压力机，当压力机压板与夹具垫条接近时调整球座使压力均匀接触试件。当压力加到 5kN 时，将夹具的侧杆抽出，以(60 ± 4) N/s 的速度连续、均匀加荷，直至试件劈裂为止，记下破坏荷载，精确至 0.01kN。

四、计算

芯样劈裂抗拉强度 R_a 按下式计算：

$$R_a = \frac{2P}{\pi A} = \frac{2P}{\pi d_m L_m} \tag{1-2-38}$$

式中　R_a——芯样劈裂抗拉强度，MPa，计算结果精确至 0.1MPa；

P——极限荷载，N；

A——芯样劈裂面面积，mm；

d_m——芯样截面的平均直径，mm；

L_m——芯样平均长度，mm。

第五节　平整度试验检测方法

一、基本概念

平整度是路面施工质量与服务水平的重要指标之一。它是指以规定的标准量规，间断地或连续地量测路表面的凹凸情况，即不平整度的指标。路面的平整度与路面各结构层次的平整状况有着一定的联系，即各层次的平整效果将累积反映到路面表面上，路面面层由于直接与车辆及大气接触，不平整的表面将会增大行车阻力，并使车辆产生附加振动作用。这种振动作用会造成行车颠簸，影响行车的速度和安全及驾驶的平稳和乘客的舒适。同时，振动作用还会对路面施加冲击力，从而加剧路面和汽车机件损坏和轮胎的磨损，并增大油耗。而且，不平整的路面会积滞雨水，加速路面的破坏。因此，平整度的检测与评定是公路施工与养护的一个非常重要的环节。

平整度的测试设备分为断面类及反应类两大类。断面类实际上是测定路面表面凹凸情况的，如最常用的 3m 直尺及连续式平整度仪，还可用精确测定高程得到；反应类测

定路面凹凸引起车辆振动的颠簸情况。反应类指标是司机和乘客直接感受到的平整度指标，因此它实际上是舒适性能指标，最常用的测试设备是车载式颠簸累积仪。现已有更新型的自动化测试役备，如纵断面分析仪，路面平整度数据采集系统测定车等。常见几种平整度测试方法的特点及技术指标比较见表 1－2－7。国际上通用国际平整度指数 IRI 衡量路面行驶舒适性或路面行驶质量，可通过标定试验得出 IRI 与标准差 σ 或单向累计值 VBI 之间的关系。

表 1－2－7　平整度测试方法比较

方　法	特　点	技术指标
3m 直尺法	设备简单，结果直观，间断测试，工作效率低，反应凸凹程度	最大间隙 h(mm)
连续式平整度仪法	设备较复杂，连续测试，工作效率高，反应凸凹程度	标准差 σ(mm)
颠簸累计仪	设备复杂，工作效率高，连续测试，反应舒适性	单向累计值 VBI(cm/km)

二、平整度测试方法

(一)3m 直尺法

3m 直尺测定法有单尺测定最大间隙及等距离(1.5m)连续测定两种。两种方法测定的路面平整度有较好的相关关系。前者常用于施工质量控制与检查验收，单尺测定时要计算出测定段的合格率 等距离连续测试也可用于施工质量检查验收，要算出标准差，用标准差来表示平整程度。

1. 试验目的和适用范围

用于测定压实成型的路基、路面各层表面的平整度，以评定路面的施工质量及使用质量。

2. 测试要点

(1)在测试路段路面上选择测试地点

①当为施工过程中质量检测需要时，测试地点根据需要确定，可以单杆检测；

②当为路基、路面工程质量检查验收或进行路况评定需要时，应首尾相接连续测量 10 尺。除特殊需要外，应以行车道一侧车轮轮迹(距车道线 80～100cm)带作为连续测定的标准位置。

③对旧路面已形成车辙的路面，应取车辙中间位置为测定位置，用粉笔在路面上作好标记。

(2)测试要点

①在施工过程中检测时，按根据需要确定的方向，将 3m 直尺摆在测试地点的路面上。

②目测 3m 直尺底面与路面之间的间隙情况，确定间隙为最大的位置。

③用有高度标线的塞尺塞进间隙处，量记最大间隙的高度，精确至 0.2mm。

④施工结束后检测时，按现行《公路工程质量检验评定标准》(JTJ 071—98)的规定，每 1 处连续检测 10 尺，按上述步骤测记 10 个最大间隙。

3. 计算

单杆检测路面的平整度计算，以 3m 直尺与路面的最大间隙为测定结果。连续测定 10 尺时，判断每个测定值是否合格，根据要求计算合格百分率，并计算 10 个最大间隙的平均值。

$$\text{合格率} = (\text{合格尺数}/\text{总测尺数}) \times 100\%$$

4. 报告

单杆检测的结果应随时记录测试位置及检测结果。连续测定 10 尺时，应报告平均值、不合格尺数、合格率。

(二)连续式平整度仪法

1. 试验目的与适用范围

用于测定路表面的平整度，评定路面的施工质量和使用质量，但不适用于在已有较多坑槽、破损严重的路面上测定。

2. 仪器设备

(1)连续式平整度仪 构造如示意图 1－2－11。

除特殊情况外，连续式平整度仪的标准长度为 3m，其质量应符合仪器标准的要求。中间为一个 3m 长的机架，机架可缩短或折叠，前后各有 4 个行走轮，前后两组轮的轴间距离为 3m。机架中间有一个能起落的测定轮。机架上装有蓄电源及可拆卸的检测箱，检测箱可采用显示、记录、打印或绘图等方式输出测试结果。测定轮上装有位移传感器，自动采集位移数据时，测定间距为 10cm，每一计算区间的长度为 100m，100m 输出一次结果。当为人工检测，无自动采集数据及计算功能时，应能记录测试曲线。机架头装有一牵引钩及手拉柄，可用人力或汽车牵引。

(2)牵引车 小面包车或其他小型牵引汽车。

(3)皮尺或测绳。

3. 试验要点

(1)选择测试路段路面测试地点，同 3m 直尺法。

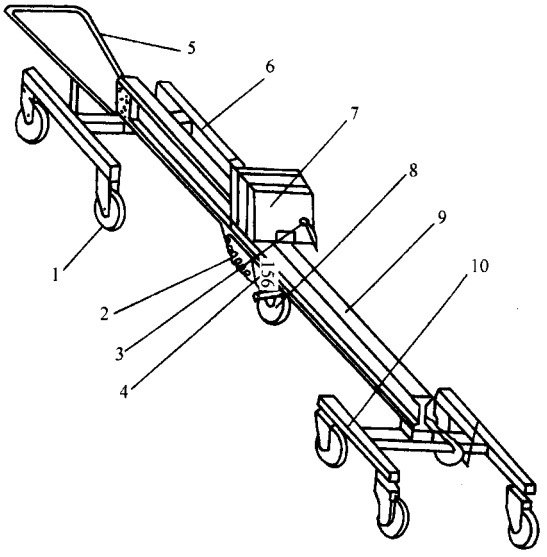


图 1－2－11　连续式平整度仪构造图

1—脚轮；2—拉簧；3—离合器；4—测架；5—牵引架；6—前架；

7—纵断面绘图仪；8—测定轮；9—纵梁；10—后架；

(2)将连续式平整度测定仪置于测试路段路面起点上。

(3)在牵引汽车的后部，将平整度的挂钩挂上后，放下测定轮，启动检测器及记录仪，随即启动汽车，沿道路纵向行驶，横向位置保持稳定，并检查平整度检测仪表上测定数字显示、打印、记录的情况。如检测设备中某项仪表发生故障，即停车检测。牵引平整度仪的速度应均匀，速度宜为 5km/h，最大不得超过 12km/h。

在测试路段较短时，亦可用人力拖拉平整度仪测定路面的平整度，但拖拉时应保持匀速前进。

4. 计算

(1)连续式平整度测定仪测定后，可按每 10cm 间距采集的位移值自动计算 100m 计算区间的平整度标准差，还可记录测试长度、曲线振幅大于某一定值(3mm、5mm、8mm、10mm 等)的次数、曲线振幅的单向(凸起或凹下)累计值及以 3m 机架为基准的中点路面偏差曲线图，并打印输出。当为人工计算时，在记录曲线上任意设一基准线，每隔一定距离(宜为 1.5m)读取曲线偏离基准线的偏离位移值 d_i。

(2)每一计算区间的路面平整度以该区间测定结果的标准差表示，按式(1－2－39)计算：

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum(\overline{d} - d_i)^2}{n-1}} \tag{1-2-39}$$

式中　σ_i——各计算区间的平整度计算值，mm；

d_i——以 100m 为一个计算区间，每隔一定距离（自动采集间距为 10cm，人工采集间距为 1.5m）采集的路面凹凸偏差位移值，mm；

n——计算区间用于计算标准差的测试数据个数。

（3）计算一个评定路段内各区间平整度标准差的平均值、标准差、变异系数。

5. 报告

试验应列表报告每一个评定路段内各测定区间的平整度标准差、各评定路段平整度的平均值、标准差、变异系数以及不合格区间数。

（三）车载式颠簸累积仪法

1. 目的和适用范围

（1）本方法规定用车载式颠簸累积仪测量车辆在路面上通行时后轴与车厢之间的单向位移累积值 VBI 表示路面的平整度，以 cm/km 计。

（2）本方法适于测定路面表面的平整度，以评定路面的施工质量和使用期的舒适性。但不适用于已有较多坑槽、破损严重的路面上测定。

2. 主要设备

本试验需要下列仪具：

（1）车载式颠簸累积仪

由机械传感器、数据处理器及微型打印机组成，传感器固定安装在测试车的底板上，如图 1-2-12 所示。仪器的主要技术性能指标如下：

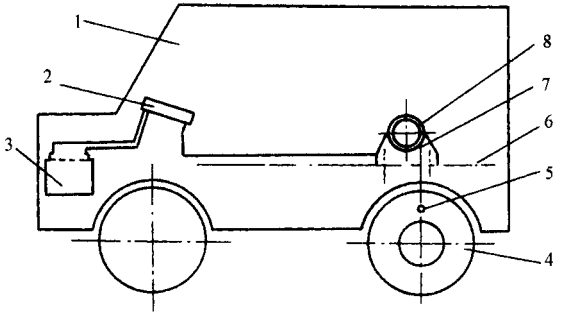


图 1-2-12　车载式颠簸累积仪安装示意图

1—测试车；2—数据处理器；3—电瓶；4—后桥；5—挂钩；6—底板；7—钢丝绳；8—颠簸累积仪传感器

①测试速度：可在 30～50km/h 范围内选定；

②最小读数：1cm；

③最大测试幅值：±30cm；

④最大显示值：9999cm；

⑤系统最高反应频率：5kHz；

(2)测试车

旅行车、越野车或小轿车。

3. 工作原理

测试车以一定的速度在路面上行驶，由于路面上的凹凸不平状况，引起汽车的激振，通过机械传感器可测量后轴同车厢之间的单向位移累积值 VBI，以 cm/km 计。VBI 越大，说明路面平整性越差，人体乘坐汽车时越不舒适。

4. 使用技术要点

(1)仪器安装应准确、牢固、便于操作。

(2)测试速度以 32km/h 为宜，一般不宜超过 40km/h。

5. 注意事项

(1)检测结果与测试车机械系统的振动特性和车辆行驶速度有关。减振性能好，则 VBI 测值小；车速越高，VBI 测值越大。因此必须通过对机械系统的良好保养和检测时严格控制车速来保持测定结果的稳定性。

(2)用车载式颠簸累积仪测出的颠簸累积值 VBI，与用连续式平整仪测出的标准差 σ 概念不同，可通过对比试验，建立两者的相关关系，将 VBI 值换算为 σ，用于路面平整度评定。

(3)通过大量研究观察得出：$\sigma = 0.6IRI$

(4)国际平整度指数 IRI 是国际上公认的衡量路面行驶舒适性或路面行驶质量的指数。也可通过标定试验，建立 VBI 与 IRI 的相关关系，将颠簸累积仪测出的颠簸累积值 VBI 换算为国际平整度指数 IRI。

关于车载式颠簸累积仪测定平整度试验方法可详见《公路路基路面现场测试规程》

6. 报告

(1)应列表报告每一个评定路段内各测定区间的颠簸累积值，各评定路段颠簸累积值的平均值、标准差、变异系数。

(2)测试速度

(3)试验结果与国际平整度指数等其他平整度指标建立的相关关系式、参数值、相关系数。

三、平整度指标间相互关系的建立

(一)国际平整度指数

平整度测定的方法和仪器很多,相应采用的指标也各不相同。为了使采用不同的方法和仪器测定的结果可以相互比较,需要寻找一个标准的(或通用的)平整度指标,它同其他平整度指标有良好的相关关系。同时,采用反应类平整度仪测定时,为使测定结果具有时间稳定性,必须经常进行标定;而标定曲线的精度取决于标定路段采用的平整度指标同反应类测定系统的相关性。

为了解决上述问题,世界银行于 1982 年组织了有巴西、英、美、法等国专家参加的国际研究小组,在巴西进行了大规模的路面平整度试验。在此基础上提出采用国际平整度指数(IRI)作为评价标准的建议。

国际平整度指数(IRI)是一项标准化的平整度指标。它同反应类平整度测定系统类似,但是采用的是数学模型模拟 1/4 车轮(即单轮,类似于拖车)以规定速度行驶在路面断面上,分析行驶距离内动态反应悬挂系的累积竖向位移量。标准的测定速度规定为 80km/h,其测定结果的单位为 m/km。因而,这一指标与反应类仪器的平均调整坡 ARS 相似,称作参照平均调整坡($RARS_{80}$)。

求得每一个位置的变量值后,即可计算该位置的调整坡(RS)。

IRI 为路段长度内 RS 变量的平均值。因此,当每个断面点的调整坡求得后,便可按下式计算 IRI:

$$IRI = \frac{1}{n-1}\sum_{i=2}^{n} RS_i \qquad (1-2-40)$$

上述计算过程已编制电算程序,在量测得到纵断面的高程资料后,便可按抽样点间距利用此程序计算该段路面平整度的国际平整度指数 IRI 值。

国际平整度指数 IRI 作为通用指标的效果,可以通过考察不同平整度测定方法的测定结果转换成以 IRI 表征后的一致性得到证实。

图 1-2-13 所示为各类路面国际平整度指数 IRI 的大致变化范围。

(二)VBI 与其他平整度指标相关关系的建立

用车载式颠簸累积仪测定的 VBI 值需要与其他平整度指标[如连续式平整度仪测出的标准差、国际平整度指数(IRI)等]进行换算时,应将车载式颠簸累积义的测试结果进行标定,即与相关的平整度仪测量结果建立相关关系,相关系数均不得小于 0.90。

为与其他平整度指标建立相关关系,选择的标定路段应符合下列要求:

(1)有 5~6 段不同平整度的现有道路,从好到坏不同程度的都应各有一段。

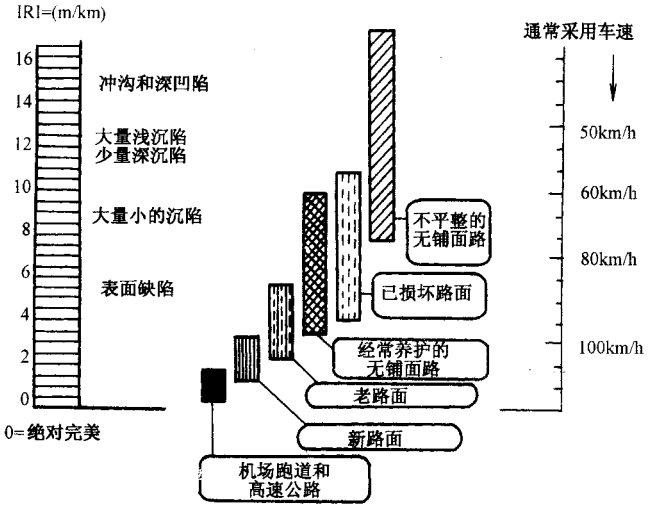


图 1－2－13　国际平整度指数 IRI 变化范围

(2)每段路长宜为 250～300m。

(3)每一段中的平整度应均匀,段内应无太大差别。

(4)标定路段应选纵坡变化较小的平坦、直线地段。

(5)选择交通量小或可以疏导的路段,减少标定时车辆的干扰。

标定路段起迄点用油漆作好标记,并每隔一定距离作中间标记,标定宜选择在行车道的正常轮迹上进行。

1. 用连续式平整度仪进行标定

(1)用于标定的仪器应使用按规定进行校准后能准确测定路面平整度的连续式平整度仪。

(2)按现行操作规程用连续式平整度仪沿选择的每个路段全程连续测量平整度 3～5 次,取其平均值作为该路段的测试结果(以标准差表示)。

(3)用车载式颠簸累积仪沿各个路段进行测量,重复 3～5 次后,取其各次颠簸累积值的平均值作为该路段的测试结果,与平整度仪的各段测试结果相对应。标定时的测试车速应在 30～50km/h 范围内选用一种或两种稳定的车速分别进行,记录车速及搭载量,以后测试时的情况应与标定时的相同。

(4)整理相关关系

将连续式平整度仪测出的标准差 σ 及车载式颠簸累积仪测出的颠簸累积值 VBIv 绘制出曲线并进行回归分析,建立相关关系:

$$\sigma = a + b \cdot \mathrm{VBIv} \tag{1-2-41}$$

式中　σ——用连续式平整度仪测定的以标准差表示的平整度，mm；

VBIv——测试速度为 v 时用颠簸累积仪测得的累积值 VBI，cm/km；

a、b——回归系数。

2. 将车载式颠簸累积仪测定结果换算成国际平整度指数的标定方法

(1)将所选择的标定路段在标记上每隔 0.25m 作出补充标记。

(2)在每个路段上用经过校准的精密水平仪分别测出每隔 0.25m 标点上的标高，计算国际平整度指数 IRI。

(3)用车载式颠簸累积仪测试得到各个路段的测试结果。

(4)将各个路段的国际平整度指数 IRI 与颠簸累积值 VBIv 绘制出曲线并进行回归分析，建立相关关系：

$$IRI = a + b \cdot VBI_v \tag{1-2-42}$$

式中　IRI——国际平整度指数，m/km；

VBIv——测试速度为 v 时颠簸累积仪测得的颠簸累积值，cm/km；

a、b——回归系数。

第六节　路面抗滑性能试验方法

一、摩擦系数测定车测定路面横向力系数(SFC)

(一)目的与适用范围

本方法适用于以标准的摩擦系数测定车测定沥青路面或水泥混凝土路面的横向力系数(SFC)，测试结果可作为竣工验收或使用期评定路面抗滑能力的依据。

(二)仪具设备

本试验需要下列仪具设备：

1. 摩擦系数测定车

SCRIM 型，主要组成如图 1-2-14 所示，由车辆底盘、测量机构、供水系统、荷载传感器、仪表及操作记录系统、标定装置等组成。测定车应符合下列要求：

(1)测量机构

可为单侧或双侧各安装一套，测试轮与车辆行驶方向成 20°角，作用于测试轮上的静

态标准载荷为 2kN。测试轮胎应为 3.00 - 20 的光面轮胎，其标准气压为 0.35 ± 0.01MPa。当轮胎直径减少达 6mm 时(每个测试轮约测 350km ~ 400km 需更换)，需更换新轮胎。

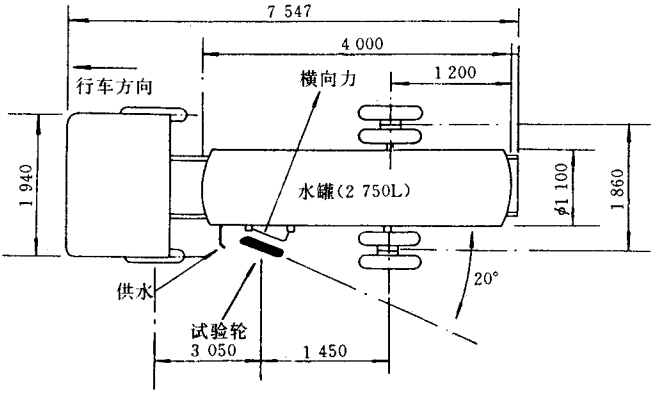


图 1 - 2 - 14　横向力摩擦系数测定车机构示意图(单位：mm)

(2)测定车辆轮胎气压应符合所使用汽车规定的标准气压范围。

(3)能控制洒水量，使路面水膜厚度不小于 1mm。通常测量速度为 50km/h 时，水阀开启量宜为 50%，测量速度为 70km/h 时，宜为 70%，余类推。

2. 备用轮胎等备件。

(三)测定方法与步骤

1. 准备工作

(1)按照仪器设备技术手册或使用说明书对测定系统进行标定。仪器设备进行标定、检查时，必须在关闭发动机的情况下进行。标定按 SFC 值 10、20、30、……、100 的不同档次进行，满量程为 100 时的示数误差不得超过 ± 2。

(2)检查横向摩擦系数测定车系统的各项参数是否符合要求，检查外部警告标志是否正常。

(3)储水罐灌水。

(4)将测试轮安装紧固且保持在升起的位置上。

(5)将记录装置处于正常使用状态，安装足够的打印纸。打开记录系统预热不少于 10min。

(6)根据需要确定采用连续测定或断续测定，以及每公里测定的长度。选择并设定“计算区间”，即输出一个测定数据的长度。标准的计算区间为 20m，根据要求也可选择为 5m 或 10m。

(7)根据要求设定为单轮测试或双轮测试。

(8)输入所需的说明性预设数据,如测试日期、路段编号、里程桩号等。

(9)发动车辆驶向测试地段。

2. 测定步骤

(1)在测试路段起点前约 500m 处停住,开机预热不少于 10min。

(2)降下测试轮,打开水阀检查水流情况是否正常及水流是否符合需要,检查仪表各项指数是否正常,然后升起测试轮。

(3)将车辆驶向测试路段,提前 100m ~ 200m 处降下测试轮。测定车的车速可根据公路等级的需要选择。除特殊情况外,标准车速为 50km/h,测试过程中必须保持匀速。

(4)进入测试段后,按开始键,开始测试。在显示器上监视测试运行变化情况,检查速度、距离有无反常波动,当需要标明特征(如桥位、路面变化等)时,操作功能键插入到数据流中,整公里里程桩上也应做相应的记录。

(四)测试数据处理

测定的摩擦系数数据存储在磁盘或磁带中,摩擦系数测定车 SCRIM 系统配有专门数据处理程序软件,可计算和打印出每一个计算区间的摩擦系数值、行程距离、行驶速度、统计个数、平均值及标准差,同时速可打印出摩擦系数的变化图。根据要求将摩擦系数在 0 ~ 100 范围内分成若干区间,作出各区间的路段长度占总测试里程百分比的统计表。

(五)报告

1. 测试路段名称及桩号、公路等级、测试日期、天气情况,路面在潮湿状态下的路表温度,描述路面结构类型及外观等。

2. 测试过程中交叉口、转弯等特殊路段及里程桩号的记录。

3. 数据处理打印结果,包括各测点路面摩擦系数值、行程距离、行驶速度,每一个评定路段路面摩擦系数值统计个数、平均值、标准差、变异系数。

4. 公路沿线摩擦系数的变化图,不同摩擦系数区间的路段长度占总测试里程百分比的统计表。

二、摆式仪测定路面抗滑值(F_{pc})

(一)目的和适用范围

本方法适用于以摆式摩擦系数测定仪(摆式仪)测定沥青路面及水泥混凝土路面的抗滑值,用以评定路面在潮湿状态下的抗滑能力。

(二)仪具与设备

本试验需要下列仪具与设备：

1. 摆式仪

形状及结构如图 1－2－15 所示，摆及摆的连接部分总质量为 1500 ± 30g，摆动中心至摆的重心距离为 410 ± 5mm，测定时摆在路面上滑动长度为 126 ± 1mm，摆上橡胶片端部距摆动中心的距离为 508mm，橡胶片对路面的正向静压力为 22.2 ± 0.5N。

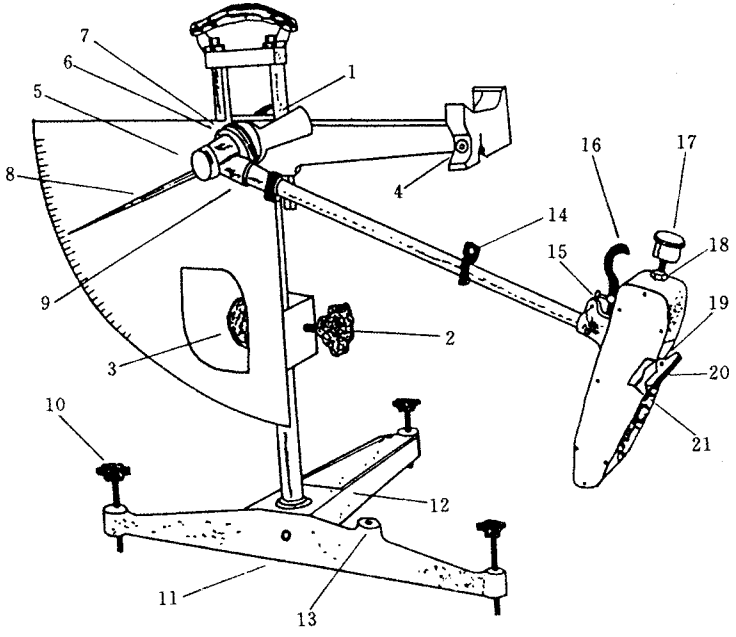


图 1－2－15　摆式仪结构图

1、2—紧固把手；3—升降把手；4—释放开关；5—转向节螺盖；6—调节螺母；7—针簧片或毡垫；8—指针；9—连接螺母；10—调平螺栓；11—底座；12—垫块；13—水准泡；14—卡环；15—定位螺丝；16—举升柄；17—平衡锤；18—并紧螺母；19—滑溜块；20—橡胶片；21—止滑螺丝

2. 橡胶片

用于测定路面抗滑值时的尺寸为 6.35mm × 25.4mm × 76.2mm，橡胶质量应符合表 1－2－8 的要求。当橡胶片使用后，端部在长度方向上磨耗超过 1.6mm 或边缘在宽度方向上磨耗超过 3.2mm，或有油类污染时，即应更换断橡胶片。新橡胶片应先在干燥路面上测试 10 次后再用于测试。橡胶片的有效使用期为 1 年。

3. 标准量尺：长 126mm。

4. 洒水壶。

5. 橡胶刮板。

表 1－2－8　橡胶物理性质技术要求

性质指标	温　度（℃）				
	0	10	20	30	40
弹性(%)	43～49	58～65	66～73	71～77	74～79
硬度	55±5				

6. 路面温度计：分度不大于 1℃。

7. 其他：皮尺或钢卷尺、扫帚、粉笔等。

(三)方法与步骤

1. 准备工作

(1)检查摆式仪的调零灵敏情况，并定期进行仪器的标定。当用于路面工程检查验收时，仪器必须重新标定。

(2)对测试路段按随机取样选点的方法，决定测点所在横断面位置。测点应选在行车道的轮迹带上，距路面边缘不应小于 1m，并用粉笔作出标记。测点位置宜紧靠铺砂法测定构造深度的测点位置，一一对应。

2. 试验步骤

(1)仪器调平

①将仪器置于路面测点上，并使摆的摆动方向与行车方向一致。

②转动底座上的调平螺栓，使水准泡居中。

(2)调零

①放松上、下两个紧固把手，转动升降把手，使摆升高并能自由摆动，然后旋紧紧固把手。

②将摆向右运动，按下安装于悬臂上的释放开关，使摆上的卡环进入开关槽，放开释放开关，摆即处于水平释放位置，并把指针抬至与摆杆平行处。

③按下释放开关，使摆向左带动指针摆动，当摆达到最高位置后下落时，用左手将摆杆接住，此时指针应指零。若不指零时，可稍旋紧或放松摆的调节螺母，重复本项操作，直至指针指零。调零允许误差为 ±1BPN。

(3)校核滑动长度

①用扫帚扫净路面表面，并用橡胶刮板清除摆动范围内路面上的松散粒料。

②让摆自由悬挂，提起摆头上的举升柄，将底座上垫块置于定位螺丝下面，使摆头上的滑溜块升高。放松紧固把手，转动立柱上升降把手，使摆缓缓下降。当滑溜块上的橡胶片刚刚接触路面时，即将紧固把手旋紧，使摆头固定。

③提起举升柄，取下垫块，使摆向右运动。然后，手提举升柄使摆慢慢向左运动，直至橡胶片的边缘刚刚接触路面。在橡胶片的外边摆动方向设置标准量尺，尺的一端对准该点。再用手提起举升柄，使滑溜块向上抬起，并使摆继续运动至左边，使橡胶片返回落下再一次接触路面，橡胶片两次同路面接触点的距离应在126mm（即滑动长度）左右。若滑动长度不符标准时，则升高或降低仪器底正面的调平螺栓来校正，但需调平水准泡，重复此项校核直至使滑动长度符合要求。而后，将摆和指针置于水平释放位置。

注 校核滑动长度时，应以橡胶片长边刚刚接触路面为准，不可借摆力量向前滑动，以免标定的滑动长度过长。

(4)用喷壶的水浇洒测试路面，并用橡胶刮板刮除表面泥浆。

(5)再次洒水，并按下释放开关，使摆在路面滑过，指针即可指示出路面的摆值。但第一次测定，不作记录。当摆杆回落时，用左手接住摆，右手提起举升柄使滑溜块升高，将摆向右运动，并使摆杆和指针重新置于水平释放位置。

(6)重复(5)的操作测定5次，并读记每次测定的摆值，即BPN，5次数值中最大值与最小值的差值不得大于3BPN。如差数大于3BPN时，应检查产生的原因，并再次重复上述各项操作，至符合规定为止。取5次测定的平均值作为每个测点路面的抗滑值（即摆值 F_B），取整数，以BPN表示。

(7)在测点位置上用路表温度计测记潮湿路面的温度，准确至1℃。

(8)按以上方法，同一处平行测定不少于3次，3个测点均位于轮迹带上，测点间距3m～5m。该处的测定位置以中间测点的位置表示。每一处均取3次测定结果的平均值作为试验结果，准确至1BPN。

(四)抗滑值的温度修正

当路面温度为 T(℃)时测的摆值为 F_{BT}，必须按式(1－2－43)换算成标准温度20℃的摆值 F_{B20}：

$$F_{B20} = F_{BT} + \Delta F \tag{1-2-43}$$

式中　F_{B20}——换算成标准温度20℃时的摆值，BPN。

F_{BT}——路面温度T时测得的摆值，BPN；

T——测定的路表潮湿状态下的温度，℃；

ΔF——温度修正值，按表1－2－9采用。

表1－2－9　温度修正值

温度 T(℃)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
温度修正值 ΔF	－6	－4	－3	－1	0	＋2	＋3	＋5	＋7

(五)报告

1. 测试日期、测点位置、天气情况、洒水后潮湿路面的温度,并描述路面类型、外观、结构类型等。

2. 列表逐点报告路面抗滑值的测定值 F_{BT}、经温度修正后的 F_{B20} 及 3 次测定的平均值,格式如表 1 - 2 - 10。

项目名称：　　表 1 - 2 - 10　摆值检测表

里程桩号	实测摆值	测点平均值	段平均值	备注

检测：　　复核：　　检测日期：

3. 每一个评定路段路面抗滑值的平均值、标准差、变异系数。

(六)精密度与允许差

同一个测点,重复 5 次测定的差值应不大于 3BPN。

三、砂补法测定路面构造深度(TD)

(一)目的与适用范围

本方法适用于测定沥青路面及水泥混凝土路面表面构造深度,用以评定路面表面的宏观粗糙度、路面表面的排水性能及抗滑性能。

(二)仪具设备

本试验需用下列仪具与设备：

1. 人工铺砂仪：由量砂筒、推平板和刮平尺组成。

(1)量砂筒

形状尺寸如图 1 - 2 - 16 所示,一端是封闭的,容积为 25000mm^3,可通过称量砂筒中水的质量以确定其容积 V,并调整其高度,使其容积符合规定要求。一般带一专门的刮

尺将筒口量砂刮平。

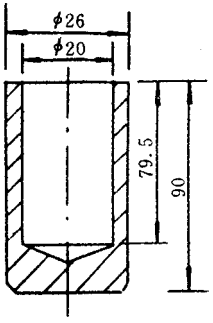


图 1－2－16　量砂筒(单位：mm)

(2)推平板

形状尺寸如图 1－2－17 所示，推平板应为木制或铝制，直径 50mm，底面粘一层厚 1.5mm 的橡胶片，上面有一圆柱把手。

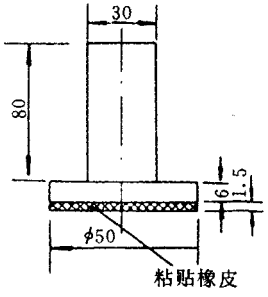


图 1－2－17　推平板(单位：mm)

(3)刮平尺

可用 30cm 钢板尺代替。

2. 量砂

足够数量的干燥洁净的匀质砂，粒径 0.15mm～3mm。

3. 量尺

钢板尺、钢卷尺，或采用将直径换算成构造深度作为刻度单位专用的构造深度尺。

4. 其他

装砂容器(小铲)、扫帚或毛刷、挡风板等。

(三)方法与步骤

1. 准备工作

(1)量砂准备

取洁净的细砂晾干、过筛,取 0.15mm ~ 0.3mm 的砂置适当的容器中备用。量砂只能在路面上使用一次,不宜重复使用。回收砂必须经干燥、过筛处理后方可使用。

(2)测试路段应选择在干燥、表面均匀的路面上,测点应选在行车道的轮迹带上距路面边缘不应小于 1m。

2. 试验步骤

(1)用扫帚或毛刷子将测点附近的路面清扫干净,面积不小于 30cm × 30cm。

(2)用小铲向圆筒中注满量砂,手提圆筒上方,在硬质路表面上轻轻地叩打 3 次,使砂密实,补足砂面用钢尺一次刮平。

注 不可直接用量砂筒装砂,以免影响量砂密度的均匀性。

(3)将砂倒在欲测的路面上,用底面粘有橡胶片的推平板,由里向外重复做摊铺运动,稍稍用力将砂细心地尽可能地向外摊开,使砂填入凹凸不平的路表面的空隙中,应尽可能将砂摊成圆形,并不得在表面上留有浮动余砂。注意摊铺时不可用力过大或向外推挤。

(4)用钢板尺测量被砂所覆盖的圆面积的直径,测量时,沿着砂补圆的直径均等分布测量 4 次,取其平均值准确至 5mm。

(四)计算与记录表格

1. 圆筒体积

计算圆筒样品的内径体积用下列公式:

$$V = \frac{1}{4}\pi d^2 h \tag{1-2-44}$$

式中　V——圆筒的内径体积,25cm^3;

d——圆筒的内径,mm;

h——圆筒的高度,mm。

2. 面层构造深度

计算表面构造深度 TD 用下列关系式:

$$\mathrm{TD} = 4V/\pi D^2 \tag{1-2-45}$$

式中　TD——表面构造深度,mm;

V——砂的体积,25000mm^3;

D——推砂的平均直径,mm。

3. 试验记录表格(见表 1－2－11)

表 1－2－11　路面构造深度测定记录

项目名称：　　(砂补法)

路段桩号	推砂直径(cm)					构造深度(mm)	备　注
	1	2	3	4	平均值		
							构造深度： $TD=\frac{4V}{\pi D^2}$　cm V 推砂体积($25cm^3$) D 铺砂的平均直径(cm)

试验：　　计算：　　试验日期：

第七节　水泥混凝土路面板厚度检测方法

一、目的和适用范围

1. 本方法规定水泥混凝土路面板的厚度可以在支立侧向模板时,靠检测模板的高度来控制浇筑的混凝土路面板的厚度,以 cm 计,测量准确到 0.1cm。

2. 本方法规定模板高度允许误差 －5mm。

3. 本方法规定水泥混凝土路面板的厚度亦可在混凝土路面浇筑完成后用钻机取芯样的方法来检测。

二、仪具设备

本检测方法需要的仪具设备有：

1. 钢板尺或电子深度测尺。

2. 铝合金直尺,其长应大于浇筑混凝土板的宽度。

3. 取芯样的钻机及相应的配套设备。

三、检测方法

1. 在混凝土浇筑前、侧向模板支立完成后进行模板检查验收时，按照规定的检查频率，在每一个横断面上用尺检测三点模板的高度，并以 3 点的平均值作为该横断面混凝土板的浇筑厚度。检查记录如表 1－2－12 所示。

表 1－2－12　水泥混凝土模板安装检查记录表

项目名称：　　施工段起讫桩号：

路线名称：　　施工日期：

承包单位：

检测横断面桩　　号	检查断面宽度(m)	模板高度(板厚度)(m)			备　　注
		左	中	右	
					左 指距左侧模板 80cm～100cm 处为测点。 右 指距右侧模板 80cm～100cm 处为测点。 中 指两侧模板的中线为测点

检测：　　检测日期：　　年　　月　　日

2. 若检测结果模板的支立高度超过规定的允许负误差时，不得浇筑混凝土，并应责令承包商修整基层(挖掉后整平)，直到满足要求为止。

3. 亦可在混凝土板浇筑完成后用钻机钻取芯样的方法来检查水泥混凝土板的厚度。

第八节　沥青混合料渗水试验检测方法

由于存在降水、交通量和交通组成以及行车速度等外界因素造成沥青路面的水破坏现象，以及沥青路面本身的沥青与碎石粘结力不足、空隙率较大、压实度偏小的内部因素，使水破坏现象变得普遍而又严重。水破坏的产生会引起表面层产生坑洞、唧浆、网裂以及其他的路面破坏。沥青路面水破坏归根结底由于存在渗水现象，因此研究沥青路面的渗水性对于防止水破坏有十分重要的意义。

据相关研究表明，沥青路面的空隙率小于 4%时，基本上是不透水的；当空隙率大于 15%时(即接近于常见的渗水性沥青路面)，其渗水性非常好，但对沥青路面不会造成太

大的危害;而当空隙率处于其间时,存在着透水现象,且易造成水破坏,特别是空隙率为8%时,这种破坏更为严重。国外的研究资料也表明:热拌沥青混凝土的空隙率小于8%时,混合料的渗水性很小;空隙率大于8%时,混合料的渗水性增加很快。本文实验研究了沥青路面的渗水性及其影响因素。

沥青混合料的空隙率低于8%时,路面雨水是通过连通的空隙由表面层渗流入中面层或底面层,甚至透过基层,若要得到及时消除,则整个路面层必须构成连通状态。当空隙率高于8%时,沥青混合料内部的空隙呈连通状态,从而在有坡降、遇雨水时,水可沿接近的空隙流动,最后排走。特别是大空隙的渗水性路面(空隙率为20%左右),水在其中的渗流速度特别快,属于紊流,其渗水能力可用达西定律计算:

$$V = KI \tag{1-2-46}$$

式中　V——为雨水渗透速度,cm/s;

K——为渗透系数,cm/s;

I——为水力坡降。

对于渗水性沥青路面,水力坡降 I 为1,故 $V = K$。当孔隙率为20%左右时,其渗透系数通常在$(4 \sim 10) \times 10^{-2}$cm/s的范围。

渗水性沥青路面雨水排水是横向排水。另有资料表明,日本对不同渗水分析渗透系数的比较结果认为:水平方向的渗透系数比垂直方向约大2~3倍,这说明由垂直方向渗透下落的水在水平方向是能很快排走的,故关键在于垂直方向的渗透能力。

沥青路面的渗水性常用渗透系数表示,故检测其渗水性实际上就是其渗透系数的测定,但迄今为止,对沥青混合料尚没有一如土壤试验那样的标准试验方法,故各国试验均有不同。日本借用了土壤渗透的试验方法。美国采用了将待测沥青混合料置于密实的混合料上,设置一定的水头,以单位时间内水平降低某一高度所渗透的水量(mL)计。比利时则采用一种流量计,以渗透一定数量所需的时间表示。而我国则是采用公路行业标准规定的路面渗水仪(类似于比利时的测定方法)。这里介绍到的是日本道路工团的试验方法、国内常规的室内试验方法、简化的试验方法和路面现场检测方法。

一、日本道路工团的实验方法

在此试验中,将直径为1.5cm,长为40cm的玻璃管置于沥青混合料马歇尔试件上,管的周围用胶封闭,把玻璃管中的水注满,当水面落到高度为35cm时开始读秒表,当水面落到5cm时,读表结束。

二、简化试验方法

将沥青混合料的标准击实试件制成后不脱模，去掉试件两面的滤纸。待试件冷却后，连同试模浸入水中 1h，使试件吸水饱和。试验时，将试模支放在容器中，试模底部脱空。另取 100mL 水，倒入试模中，同时起动秒表计，水从试件的孔隙中渗出，当试件表面水全部渗入试件内，停止秒表，记录时间，计算试件透水系数 k：

$$k = Q\mathrm{h}/6.35At \tag{1-2-47}$$

式中　Q——注入的水量，100mL；

A——试件面积，81cm^2；

t——渗透时间，s；

h——试件高度，cm。

三、国内的渗水性试验方法

本渗水试验方法适用于路面渗水仪测定碾压成型的沥青混合料试件和路面的渗水系数，以检验沥青混合料的配合比设计和沥青路面的压实情况。

试验中使用到的路面渗水仪，其形状及尺寸如图 1-2-18。上部盛水量筒由透明有机玻璃制成，容积 600mL，上有刻度，在 100mL 及 500mL 处有粗标线，下方通过 ϕ10mm 的细管与底座相接，中间开一开关。量筒通过支架联结，底座下方开口内径 ϕ150mm，外径 ϕ165mm，仪器附铁圈压重两个，每个质量约 5kg，内径 ϕ160mm。

另外还需要的仪器有 水筒及大漏斗、秒表、密封材料、黄油、玻璃腻子、油灰或橡皮泥等，也可采用其他任何能起到密封作用的材料，接水容器以及其他一些必要物品，如水、红墨水、粉笔、扫帚等。

对于沥青混合料试件的室内试验，详细的步骤如下：

准备工作 先在洁净的水桶内滴入几滴红墨水，使水成淡红色。然后组合装妥路面渗水仪。再按照沥青混合料试件成型方法（轮碾法）制作沥青混合料试件，试件尺寸为 30cm × 30cm × 5cm，脱模，揭去成型试件时垫上表面的纸。

试验前，将试件放置于坚实的平面上，在试件表面上沿渗水仪底座圆圈位置抹一薄层密封材料，边涂边用手压紧，使密封材料嵌满试件表面混合料的缝隙，且牢固地粘结在试件上，密封料圈的内径与底座内径相同，约 150mm。将渗水试验仪底座用力压在试件密封材料圈上，再加上铁圈压重压住仪器底座，以防压力水从底座与试件表面间流出。

用适当的垫块如混凝土试件或木块在左右两侧架起试件，试件下方放置一个接水容

器。关闭渗水仪细管下方的开关，向仪器的上方量筒中注入淡红色的水至满，总量为600mL。

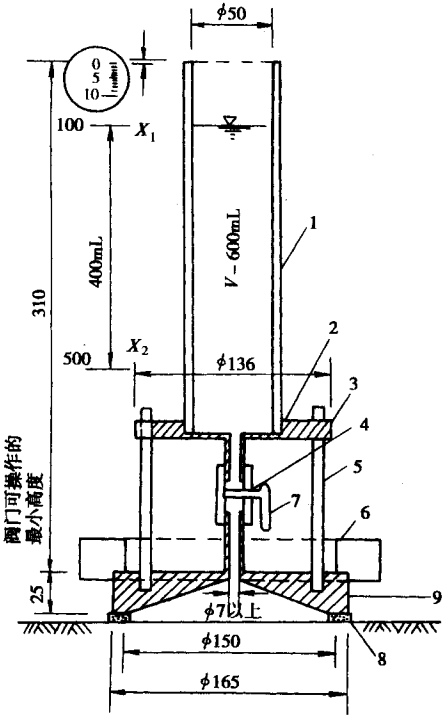


图 1－2－18　渗水仪(尺寸单位：mm)

1—透明有机玻璃箱；2—螺纹链接；3—顶板；4—阀；5—立柱支架；

6—压重钢圈；7—把手；8—密封材料；9—底座

迅速将开关全部打开，水开始从细管下部流出，待水面下降 100mL 时，立即开动秒表，每间隔 60s，读记仪器管的刻度一次，至水面下降 500mL 时为止。测试过程中，应观察渗水的情况，正常情况下水应该通过混合料内部空隙从试件的反面及四周渗出，如水是从底座与密封材料间渗出，说明底座与试件密封不好，应另采用干燥试件重新操作。如水面下降速度很慢，从水面下降至 100mL 开始，测得 3min 的渗水量即可停止。若试验时水面下降至一定程度后基本保持不动，说明试件基本不透水或根本不透水，则在试验报告中注明。

按以上步骤对同一种材料制作 3 块试件测定渗水系数，取其平均值，作为检测结果。

沥青混合料主件的渗水系数按式(1－2－47)计算，计算时以水面从 100mL 下降至 500mL 所需的时间为标准，若渗水时间过长，亦可采用 3min 通过的水量计算。

$$C_w = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} \times 6 \qquad (1-2-48)$$

式中　C_w——沥青混合料试件的渗水系数，mL/min；

V_1——第一次读数时的水量（通常为 100mL），mL；

V_2——第二次读数时的水量（通常为 500mL），mL；

t_1——第一次读数时的时间，s；

t_2——第二次读数时的时间，s。

在试验报告中，必须逐点报告每个试件的渗水系数及 3 个试件的平均值。若路面不透水，应在报告中注明。

另外必须说明的是，本试验方法成败的关键是试验仪与试件表面的密封性，除规程中提到的黄油、玻璃腻子、油灰或橡皮泥等可作为密封材料外，各单位也可采用其他能起到密封作用的材料。

若是现场进行检测试验，则在测试路段的行车道路面上，采用随机选择测试位置，每一个检测路段应测定 5 个测点，清扫表面后并做好测试标记，其他步骤与沥青混合料试件的渗水性试验步骤相同。

第九节　沥青路面离析及其评价探讨

在沥青路面面层的的设计、生产和铺筑施工中能产生许多潜在的引起路面破坏的因素。在这些因素中，最严重的问题是沥青混凝土的离析。研究发现：沥青路面上发生的一些早期破坏现象，如一个一个孤立的水破坏造成的网裂、形变和坑洞、局部严重车辙、局部泛油、横向裂缝多、新铺沥青路面的表面构造深度忽粗忽细，以及路面初始平整度水平不高和不平整度发展得快等，都与沥青混合料的离析有关。

沥青路面是否离析，在检查者和承包商之间往往难以取得一致意见。在有争论的地方测试，某些结果表明除级配改变以外，其他与不离析的地方一样。这些结果表明，不均匀的表面构造是由于粗或细集料集中以及局部压实不良所造成的。美国学者借助道路表面分析仪（ROSAN）对离析做了定量的分类研究，提出了用道路表面分析仪控制和评价离析的初步控制指标。

测量处的表面构造深度与平均表面构造深度的比值定义为构造比，这些比值是以大

量统计不同的混合料劲度、空隙率、级配和沥青含量为基础而得出的结果。尽管构造深度的改变常常是级配分离的结果，但表面构造的改变也表明是由于温度离析而引起密度不同所致。可以用破坏性试验确认哪一种类型的离析是导致表面构造深度异常的主要原因。

构造比在 0.75～1.16 间定义为无离析，假如压实合理，这种区域面层空隙率符合设计要求，90%以上的混合料劲度模量符合设计要求，粗集料最大粒径的通过率绝对没有比规定的大 5%以上的，沥青含量都在设计用量的 0.3%范围内。

构造比在 1.17～1.56 间定义为轻微离析，混合料的劲度模量为无离析区域的 70%～90%，空隙率将增加 0～4%，将有 1 个或 2 个筛孔通过率将比无离析区的混合料大 5%以上，同时导致沥青含量比设计的减少 0.3%～0.75%。

构造比在 1.57～2.09 间定义为中等离析，混合料的劲度模量将降到无离析区的 50%～70%，空隙率增加 2%～6%，将有 2 个或 2 个以上筛孔通过率将比规定的大 10%以上，沥青含量将减少 0.75%～1.3%。

构造比大于 2.09 定义为严重离析，混合料劲度模量将降到无离析区的 30%以下，空隙率增加 4%以上，有 3 个或 3 个以上筛孔通过率将比规定的大 15%以上，沥青用量可能减少 1.3%以上。在这种区域钻取芯样或切割试件有可能崩塌。

通过定量指标，对沥青混合料的离析有了比较一致的看法，对提高沥青混合料路面使用质量，减小甚至基本消除沥青路面的多种早期破坏现象以及保证路面的使用寿命具有十分重要意义。

第三章　路基路面检测新技术

第一节　弯沉检测新技术

一、自动弯沉仪

利用贝克曼梁测定路面回弹弯沉值操作简便，应用广泛，我国路面设计及检测的标准方法和基本参数都是建立在这种试验方法基础之上的。但是，这种试验方法整个测试过程全是人工操作，测试结果受人为因素的影响较大，而且测速慢。自动弯沉仪是测定路面弯沉值的高效自动化设备，可对路面进行高密集点的强度测量，适用于路面施工质量控制、验收及路面养护管理。

(一)主要设备

自动弯沉仪测定车 洛克鲁瓦型，由测试汽车、测量机构、数据采集处理系统三部分组成。测量机构如图 1－3－1 所示，它安装在测试车底盘下面。

自动弯沉仪测定车的主要技术参数如下：

测试车轴距：　6.75m

测臂长度：　1.75～2.40m

后轴荷载：　100kN

测定轮对路面的压强：　0.7MPa

最小测试步距：　4～10m

测试精度：　　0.01mm

测试速度：　　1.5～4.0km/h

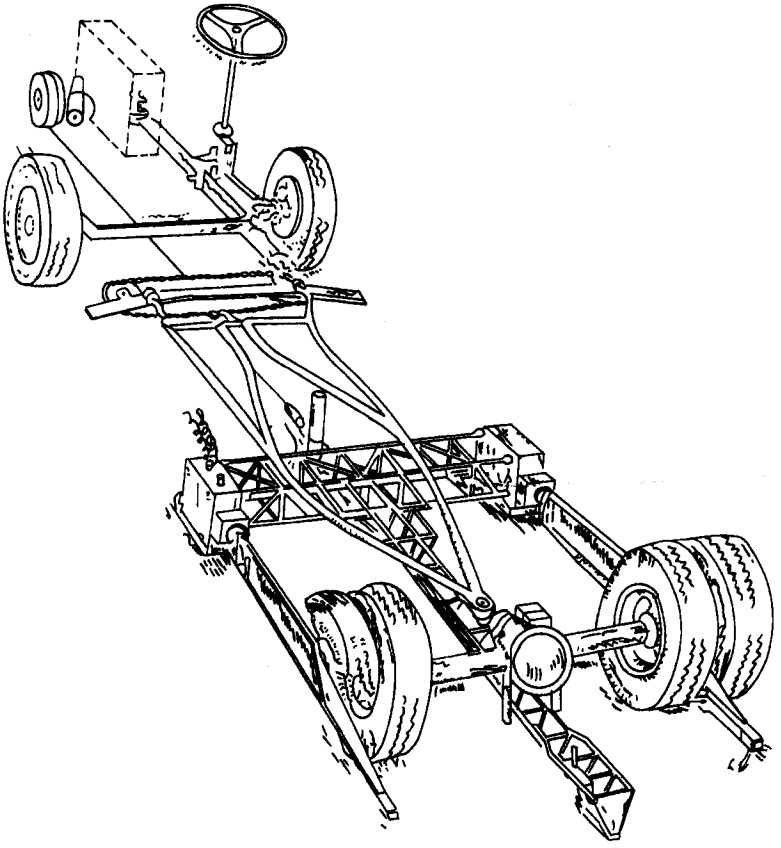


图 1－3－1　自动弯沉仪测量设备

(二)工作原理

自动弯沉仪的基本工作原理与贝克曼梁的原理是相同的，都是采用简单的杠杆原理。

自动弯沉仪测定车在检测路段以一定速度行驶，将安装在测试车前后轴之间底盘下面的弯沉测定梁放到车辆底盘的前端并支于地面保持不动，当后轴双轮隙通过测头时，弯沉通过位移传感器等装置被自动记录下来，这时，测定梁被拖动，以二倍的汽车速度拖到下一测点，周而复始地向前连续测定。通过计算机可输出路段弯沉检测统计计算结果。

(三)使用技术要点

1. 自动弯沉仪做长距离移动时，应根据路况把一些对通过能力影响大的组件、部件

拆下来，待移动到测量工地时，再进行安装调试。

2. 操作计算机，根据要求输入有关信息及命令。

3. 为了保证系统 A/D 转换板与位移传感器的测量精度，应进行自动弯沉仪的标定。

4. 自动弯沉仪所采集数据以文本方式存储于计算机中，其记录格式分节点数据、弯沉值数据及弯沉盆数据三种。输入有关信息和参数后，可显示出左右双侧的弯沉峰值柱状图及峰值、距离和温度等；计算出平均值、标准差和代表弯沉值；显示弯沉盆图形并计算出曲率半径。

应当注意，自动弯沉仪测定的是总弯沉，因而与贝克曼梁测定的回弹弯沉有所不同。可通过自动弯沉仪总弯沉与贝克曼梁回弹弯沉对比试验，得到两者相关关系式，换算为回弹弯沉，用于路基、路面强度评定。

关于自动弯沉仪测定路面弯沉试验方法可详见《公路路基路面现场测试规程》。

二、落锤式弯沉仪

利用贝克曼梁方法测出的回弹弯沉是静态弯沉。自动弯沉仪检测弯沉时，因为汽车行进速度很慢，所测得的弯沉也接近静态弯沉。为了模拟汽车快速行驶的实际情况，不少国家开发了动态弯沉的测试设备。落锤式弯沉仪（Falling Weight Delectometer，简称 FWD）模拟行车作用的冲击荷载下的弯沉量测，计算机自动采集数据，速度快，精度高。近年来，采用落锤式弯沉仪，（FWD）测定路面的动态弯沉，并用来反算路面的回弹模量，已成为世界各国道路界的热门课题。这种设备特别适用于高等级公路路面和机场的弯沉量测和承载能力评定。落锤式弯沉仪是目前国际上最先进的路面强度无损检测设备之一。

（一）主要设备

落锤式弯沉仪分为拖车式和内置式。拖车式便于维修与存放，而内置式则较小巧、灵便。

落锤式弯沉仪的测量系统示意图如图 1－3－2 所示。

1. 荷载发生装置：包括落锤和直径 300mm 的 4 分式扇形承载板。

2. 弯沉检测装置：由 5～7 个高精度传感器组成。

3. 运算及控制装置。

4. 牵引装置：牵引 FWD 并安装运算及控制装置等的车辆。

（二）工作原理

将测定车开到测定地点，通过计算机控制下的液压系统，启动落锤装置，使一定质量

的落锤从一定高度自由落下，冲击力作用于承载板上并传递到路面，导致路面产生弯沉，分布于距测点不同距离的传感器检测结构层表面的变形，记录系统将信号输入计算机，得到路面测点弯沉及弯沉盆。

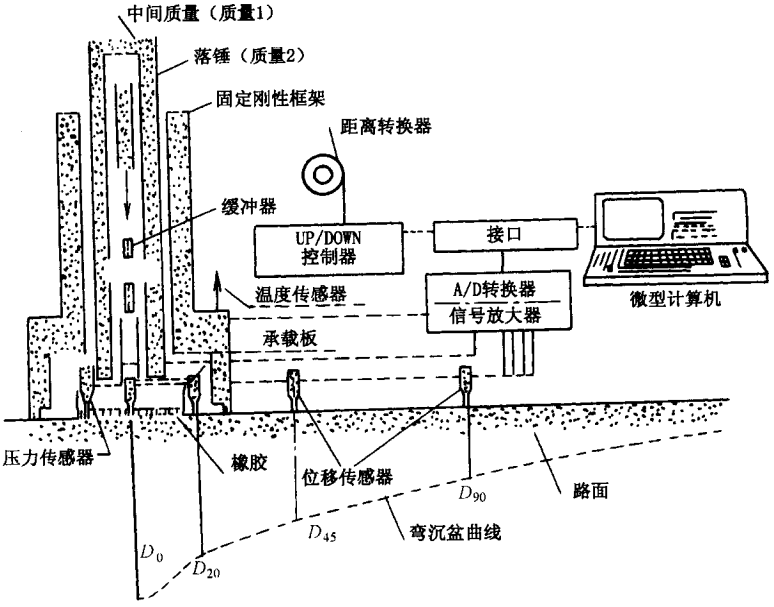


图 1－3－2　落锤式弯沉仪测量系统示意图

（三）使用技术要点

1. 通过调节锤重和落高可调整冲击荷载大小。例如，我国路面设计标准轴载为 BZZ－100，落锤质量应选为 5t，因为承载板直径为 30cm，对路面的压强恰为 0.7MPa。

2. 检测时，拖车式落锤弯沉仪牵引速度最大可达 80km/h，根据我国的实际情况，牵引速度以 50km/h 左右为宜。内置式落锤弯沉仪最高时速大于 100km/h，每小时可测 65 点。

3. 传感器分布位置为：1 个位于承载板中心，其余布置在传感器支架上。路面结构不同，弯沉影响半径亦不同。路基或柔性基层沥青路面传感器分布在距荷载中心 2.5m 范围内即可。目前，我国高等级公路大多采用半刚性基层沥青路面结构，弯沉影响半径已达 3～5m，传感器分布范围应布置在距荷载中心 3～4m 范围内，以量测路面弯沉盆形状。

4. 每一测点重复测定不少于 3 次，舍去第一个测定值，取以后几次测定值的平均值作为计算依据，因为第一次测定的结果往往不稳定。

弯沉检测装置操作方式为计算机控制下的自动量测，所有测试数据均可显示在屏幕

上或打印出来或存储在软盘上；可输出作用荷载、弯沉(盆)、路表温度及测点间距等；可打印弯沉平均值、标准差、变异系数及代表弯沉值等数据。

应当注意，落锤式弯沉仪所测弯沉为动态总弯沉，与贝克曼梁所测的静态回弹弯沉不同。可通过对比试验，得到两者之间的相关关系，并据此将落锤式弯沉仪所测弯沉值换算为贝克曼梁的静态回弹弯沉值。

可利用计算机按弹性层状体系理论的计算模式和程序，根据落锤式弯沉仪所测弯沉盆数据反算路面各层材料的弹性模量。

关于落锤式弯沉仪测定路面弯沉试验方法详见《公路路基路面现场测试规程》。

第二节　平整度检测新技术

用三米直尺检测路面平整度，尽管设备简单、直观，但测试速度太慢，劳动强度大。连续式平整度仪的测速最高只有 15km/h，工作效率也较低。

平整度的测试设备可分为两大类，一类是测试路表不平整程度(反应类设备)，另一类是测定路表凹凸情况(断面测试仪)。目前，颠簸累积仪是应用最广泛的反应类设备，激光平整度仪则是最先进的断面类设备。它们提高了路面平整度的测速与精度。

一、车载式颠簸累积仪

车载式颠簸累积仪测定路面平整度速度快，价格低廉，操作简便。可用其检测结果评定路面的施工质量和使用期的舒适性。

(一)主要设备

1. 颠簸累积仪：由机械传感器、数据处理器及微型打印机组成。

2. 测试车：旅行车、越野车或小轿车。

(二)工作原理

测试车以一定的速度在路面上行驶，路面上的凹凸不平引起汽车的激振，通过机械传感器可测量后轴同车厢之间的单向位移累积值 VBI，以 cm/km 计。VBI 越大，说明路面平整度越差，人体乘坐汽车时越不舒适。

(三)使用技术要点

1. 仪器安装应准确、牢固、便于操作。

2. 因为颠簸累积值的大小与测试车的底盘悬挂性能有关，所以仪器安装后，在投入正式使用前，必须进行标定。

用车载式颠簸累积仪测出的颠簸累积值 VBI 与用连续式平整度仪测出的标准偏差 σ 概念不同，可通过标定试验，建立两者的相关关系，将 VBI 值换算为 σ，用于路面平整度评定。

国际平整度指数 IRI 是国际上公认的衡量路面行驶舒适性或路面行驶质量的指数。也可通过标定试验，建立 VBI 与 IRI 的相关关系，将颠簸累积仪测出的颠簸累积值 VBI 换算为国际平整度指数 IRI。

3. 测试时，向计算机输入有关信息及命令，就可自动采集数据。

4. 检测结果与测试车机械系统的振动特性和车辆行驶速度有关。减振性能好，则 VBI 测值小；车速越高，VBI 测值越大。因此必须通过对机械系统的良好保养和检测时严格控制车速来保持测定结果的稳定性。测试速度一般在 30 ~ 80km/h（视被测对象及标定条件确定）。

5. 可存储、显示、打印颠簸累积值 VBI，标准偏差 σ，国际平整度指数 IRI，测试速度及距离。

关于车载式颠簸累积仪测定平整度试验方法可详见《公路路基路面现场测试规程》

二、激光路面平整度测定仪

激光路面平整度测定仪是一种与路面无接触的测量仪器，测试速度快，精度高。这种仪器还可同时进行路面纵断面、横坡、车辙等测量，因此，也被称为激光路面断面测试仪。

（一）主要仪器

激光路面平整度仪是一台装备有激光传感器，加速度计和陀螺仪的测试车，它同时备有先进的数据采集和处理系统，如图 1 - 3 - 3 所示。

（二）工作原理

测试车以一定速度在路面上行驶，固定在汽车底盘上的一排激光传感器通过测试激光束反射回读数器的角度来测试路面，这个距离信号同测试车上装的加速度计信号进行互差，消除测试车自身的颠簸，输出一路面真实断面信号。信号处理系统将来自激光传感器的模拟信号转换成数值信号并记录下来。随着汽车的行进，每隔一定间距，采集一次数据。通过数据分析系统，可显示打印国际平整度指数 IRI 等平整度检测结果。

（三）使用技术要点

1. 数据采集完全在计算机控制下进行，根据具体情况输入有关信息和命令。

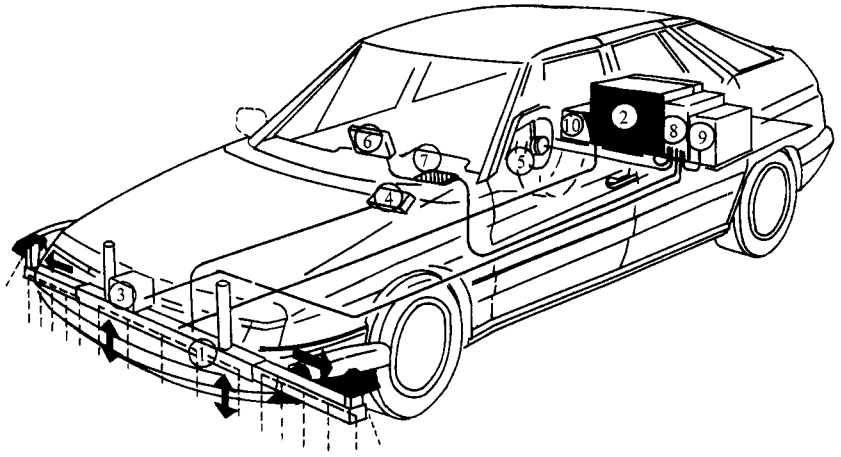


图 1-3-3　激光平整度仪示意图

1—激光传感器；2—激光盒；3—陀螺盒；4—测量束控制台；5—距离测量；6—微机屏幕；7—微机键盘；8—微机；9—计算机存贮器；10—电源

2. 为了保证测量精度，应进行系统检查，如做静态振动试验、直尺试验、轮胎气压检查、传感器标定检查。

3. 测试速度一般在 20～120km/h 范围内。

4. 测试宽度大于 2.5m。如在测试梁上安装两个扩展臂，测试宽度可增加至 3.5m 或更大。

5. 采样间隔一般为 0.1m，最小为 5mm。

6. 可显示测试状态及有关数据，输出分析结果，如国际平整度指数 IRI、车辙、横坡等。

应当注意，不能直视激光孔或观察通过抛光物面或镜面反射回来的激光束，防止损伤眼睛。只能通过一张红外线显示卡或光谱变换眼镜才可以观察光束的存在与否。

目前，激光路面平整度仪或激光路面断面测试仪尚未纳入我国公路检测规范，其试验方法可参照仪器使用说明书。

第三节　抗滑性能检测新技术

《公路沥青路面设计规范》对高速公路、一级公路沥青路面竣工后第一个夏季的抗滑

性能要求如下 横向力系数 SFC≥54，摆值 F_B（BPN）≥45，构造深度 TC≥0.55mm。横向力系数 SFC 为新增加抗滑指标，用摩擦系数测定车进行测定。

由于摆式仪测定摆值受人为因素影响大，检测速度慢，只适用于一般公路不具备摩擦系数测定车时的抗滑性能检测。

路面宏观构造深度可用铺砂法或激光构造深度仪测定。铺砂法测定误差较大，效率低。激光构造深度仪测定的构造深度与铺砂法有良好的相关关系，且检测速度快，精度高。

一、摩擦系数测定车测定路面横向力系数

摩擦系数测定车测定的路面横向力系数既表示车辆在路面上制动时的路面抗力，还表征车辆在路面上发生侧滑时的路面抗力，因此它是路面纵横向摩擦系数的综合指标，反映较高速度下的路面抗滑能力。测试车自备水箱，能直接喷洒在轮前约 30cm 宽的路面上，可控制路面水膜厚度，测速较高，不妨碍交通，特别适宜于在高速公路、一级公路上进行测试。

（一）主要仪器

摩擦系数测定车通常为 SCRIM 型，主要由车辆底盘、测量机构、供水系统、荷载传感器、仪表及操作记录系统、标定装置等组成。

（二）检测原理

测定车上装有与车辆行驶方向成 20°角的测试轮。测定时，供水系统洒水，降下测试轮，并对其施加一定荷载，荷载传感器测量与测试轮轮胎面成垂直的横向力（如图 1－3－4），此力与轮荷载之比即为横向力系数。横向力系数越大，说明路面抗滑能力越强。

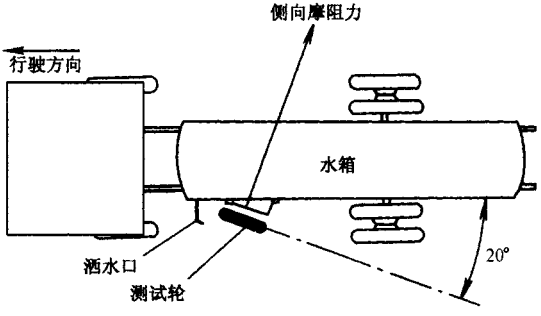


图 1－3－4　横向力系数检测原理示意图

（三）检测技术要点

1. 测试前对仪器设备进行标定、检查，保持测试车的规范性。

2. 测试轮重垂直荷载为 2kN。

3. 测速为 50km/h。

4. 可连续或断续测定设定计算区间的横向力系数。设定计算区间可在 5 ~ 1000m 范围内任意选定。

5. 用计算机控制测试操作。

6. 可计算打印每一个评定段的横向力系数值、统计个数、平均值、标准差、变异系数。

关于摩擦系数测定车测定路面横向力系数试验方法可详见《公路路基路面现场测试规程》。

二、激光构造深度仪

激光构造深度仪是小型手推式路面构造深度测试仪，也称激光纹理测试仪，具有运输方便，操作快捷，费用低廉，可靠性好等优点。

(一)主要结构

激光构造深度仪主要由装在两轮手推车上的光电测试设备、打印机、仪器操作装置及可拆卸手柄组成。

(二)工作原理

高速脉冲半导体激光器产生红外线投射到道路表面，从投影面上散射光线由接收透镜聚焦到以线性布置的光敏二级管上，接收光线最多的二极管位置给出了这一瞬间到道路表面的距离，通过一系列计算可得出构造深度。

(三)使用技术要点

1. 检查仪器，安装手柄。

2. 根据被测路面状况，选择测量程序。

3. 适宜的检测速度为 3 ~ 5km/h，即人步行的正常速度。

4. 仪器按每一个计算区间打印出该段构造深度的平均值。标准的计算区间长度为 100m，根据需要也可为 10m 或 50m。

应当注意，我国公路路面构造深度以铺砂法为标准测试方法。利用激光构造深度仪测出的构造深度与铺砂法测试结果不同，但两者具有良好的相关关系。因此，激光构造深度仪所测出的构造深度不能直接用以评定路面的抗滑性能，必须换算为铺砂法的构造深度后才能判断路面抗滑性能是否满足要求。

关于激光构造深度仪测定沥青路面构造深度试验方法可详见《公路路基路面现场测试规程》

第四节　路面雷达测试系统

一、路面雷达测试系统的优点

路面雷达测试系统，能在高速公路时速下，实时收集公路的雷达信息，然后将信息输入电脑程序内，在很短的时间里，电脑程序便会自动分析出公路或桥面内务层厚度、湿度、空隙位置、破损位置及程度。

目前，我国公路路面厚度测试常采用钻孔测量芯样厚度的方法，给路面造成损坏或留下后患。而路面雷达测试系统是一种非接触、非破损的路面厚度测试技术，检测速度高，精度也较高，检测费用低廉。因此，它不仅适用于沥青路面或水泥混凝土路面各层厚度及总厚度测试；路面下空洞探测；路面下相对高湿度区域检测；路面下的破损状况检测。还可以用于检测桥面混凝土剥落状况；检测桥内混凝土与钢筋脱离状况；测试桥面沥青覆盖层的厚度。

二、主要设备

1. 路面探测雷达：包括 1～4 套雷达。
2. 数据采集与处理系统：包括计算机、显示器、打印机、数据采集系统和距离量测仪。
3. Windows 电脑操作软件：具有数据的采集、处理、回放及备份等功能。
4. 交流电源转换器。
5. 雷达检测车。

三、工作原理

雷达检测车以一定速度在路面上行驶，路面探测雷达发射电磁脉冲，并在短时间内穿过路面，脉冲反射波被无线接收机接收，数据采集系统记录返回时间和路面结构中的不连续电介质常数的突变情况。路面各结构层材料的电介质常数明显不同，因此电介质常数突变处，也就是两结构层的界面。根据测知的各种路面材料的电介质常数及波速，则可计算路面各结构层的厚度或给出含水量、损坏位置等资料。路面雷达原理见图 1－3－5。

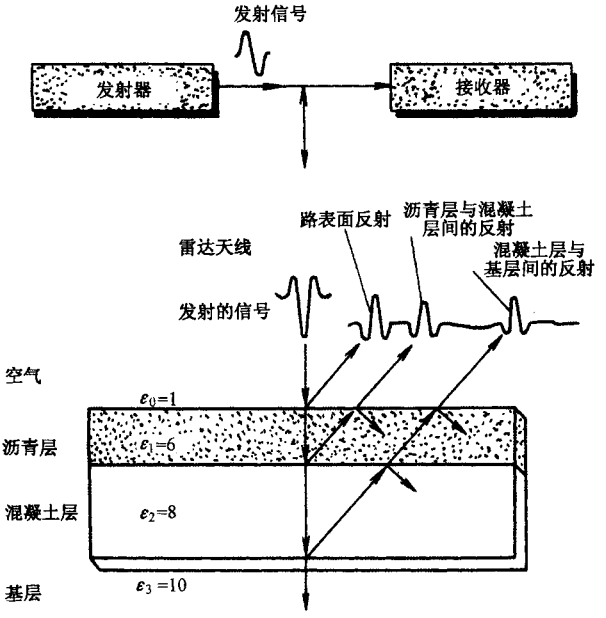


图 1－3－5　路面雷达原理图

四、使用技术要点

1. **检测速度可达** 80km/h **以上。**
2. **检测距离 :以** 80km/h **的速度对路面及桥面进行连续检测不少于** 4h(320km)。
3. **最大探测深度大于** 60cm。
4. **厚度数据精度一般为深度的** 2% ~ 5%。

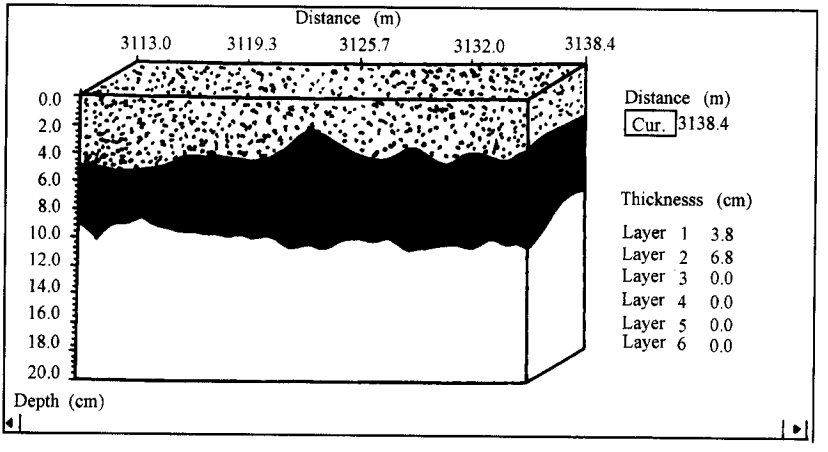


图 1－3－6　三维路面剖面图

5. 检测在计算机控制下进行，可实时地同时进行数据采集、存储及雷达波形显示。

6. 数据经处理后，可显示路面彩色剖面图、三维路面厚度剖面图、雷达波形图、原始雷达波形瀑布图、桥面剥落或破损状况图，打印路面各层厚度表。三维路面剖面见图 1－3－6。

路面雷达测试系统检测路面厚度的试验方法尚未列入我国路面检测规程，其测试方法可参照路面雷达测试系统使用说明书。

第五节　CBR 值试验技术

CBR 又称加州承载比，是 California Bearing Ration 的缩写，由美国加利福尼亚州公路局首先提出来，用于评定路基土和路面材料的强度指标。在国外多采用 CBR 作为路面材料和路基土的设计参数。

我国现行沥青和水泥混凝土路面设计规范，对路面、路基的设计参数系采用回弹模量指标，而在境外修建的公路工程多采用 CBR 指标。为了进一步积累经验用于实际，以促进国际，学术交流，参考了国内外的情况，将 CBR 指标列入《公路路基设计规范》和《公路路基施工技术规范》，作为路基填料选择的依据。

路基填料最小强度要求见表 1－3－1。

表 1－3－1　路基填料最小强度和最大粒径要求

项目分类		路面底面下深度（mm）	填料最小强度　CBR(%)		填料最大粒径（mm）
			高速公路、一级公路	其它等级公路	
填方路基	上路床	0～30	8	6	10
	下路床	30～80	5	4	10
	上路堤	80～150	4	3	15
	下路堤	150 以下	3	2	15
零填及路堑路床		0～30	8	6	10

注：①当路床填料 CBR 值达不到表列要求时，可采取掺石灰或其它稳定材料等措施进行处理。
②其他公路铺筑高级路面时，应采用高速公路、一级公路的规定值。

一、CBR 值室内试验技术

（一）主要仪器设备

1. 圆孔筛：孔径 38mm、25mm、20mm、及 5mm 筛各 1 个。

2. 重型标准击实仪器设备：试筒(如图 1－3－7 所示)、夯锤等。

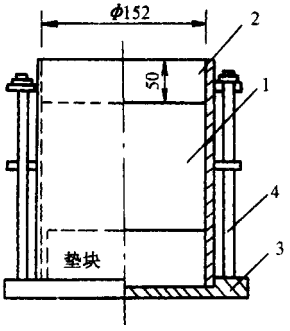


图 1－3－7　CBR 试筒(单位：mm)

1—试筒；2—套环；3—夯击底板；4—拉杆

3. 贯入杆：端面直径 50mm、长 100mm 的金属柱。

4. 路面材料强度或其它载荷装置(如图 1－3－8 所示)：能量不小于 50kN。

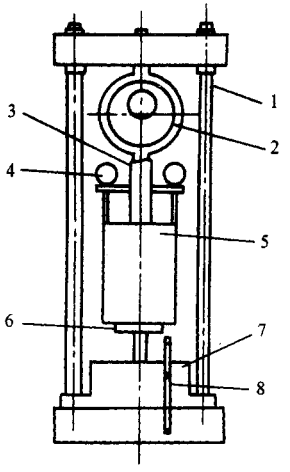


图 1－3－8　手摇测力计式载荷装置示意图

1—框架；2—量力环；3—贯入杆；4—百分表；5—试件；6—升降台；7—蜗轮蜗杆箱；8—摇把

5. 百分表、测力环、荷载板等。

(二)试验原理

试验时，按路基施工时的最佳含水量及压实度要求在试筒内制备试件；为了模拟材料在使用过程中的最不利状态，加载前饱水 4 昼夜；在浸水过程中及贯入试验前，在试件顶面施加荷载板以模拟路面结构对土基的附加应力；贯入试验中，材料的承载能力越高，对其压入一定贯入深度所需施加的荷载越大。所谓 CBR 值，就是试料贯入量达到

2.5mm 或 5mm 时的单位压力与标准碎石压入相同贯入量时标准荷载强度(7MPa 或 10.5MPa)的比值,用百分数表示。

(三)试验技术要求

1. 试验采用风干试料,按四分法备料。

2. 做击实试验,求试料的最大干密度和最佳含水量。

3. 按最佳含水量制备试件。

4. 试件泡水 4 昼夜。

5. 做贯入试验:加荷使贯入杆以 1 ~ 1.25mm/min 的速度压入试件,记录不同贯入量及相应荷载。总贯入量应超过 7mm。

6. 绘制单位压力 P 与贯入量 l 关系曲线,必要时进行原点修正。

7. 从 $P-l$ 关系曲线上读取贯入量发别为 2.5mm 和 5.0mm 所对应的单位压力 $P_{2.5}$(MPa)和 P_5(MPa),则:

$$CBR_{2.5} = \frac{P_{2.5}}{7} \times 100\% \qquad (1-3-1)$$

$$CBR_5 = \frac{P_5}{10.5} \times 100\% \qquad (1-3-2)$$

一般采用 $CBR_{2.5}$,如 $CBR_5 > CBR_{2.5}$,则试验要重做。如果结果仍然如此,则采用 CBR_5。

关于 CBR 值室内试验的详细步骤及具体要求可参见《公路土工试验规程》中的"承载比(CBR)试验"。

二、土基现场 CBR 值测试方法

(一)主要仪器

(1)荷载装置:设有加劲横梁的载重汽车,后轴重不小于 60kN。

(2)现场测试装置:由千斤顶、测力计、球座、贯入杆、荷载板及百分表等组成,如图 1-3-9 所示。

(二)测试原理

在公路路基施工现场,用载重汽车作为反力架,通过千斤顶连续加载,使贯入杆匀速压入土基。为了模拟路面结构对土基的附加应力,在贯入杆位置安放荷载板。路基强度越高,贯入量为 2.5mm 或 5.0mm 时的荷载越大,即 CBR 值越大。

(三)测试技术要点

1. 将测点约直径 30cm 范围的表面找平。

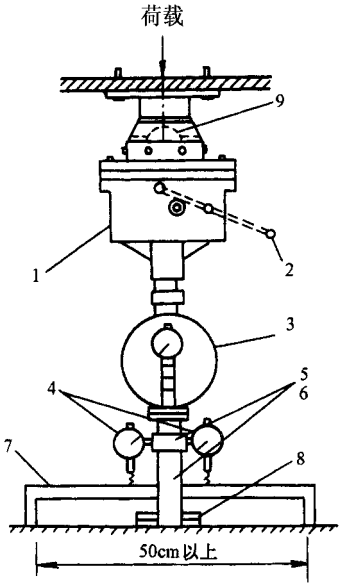


图 1－3－9　现场 CBR 测试装置示意图

1—加载千斤顶；2—手柄；3—测力计；4—百分表；5—百分表夹持具；6—贯入杆；

7—平台；8—承载板；9—球座

2. 安装现场测试装置，使贯入杆与土基表面紧密接触。

3. 起动千斤顶，使贯入杆以 1mm/min 的速度压入土基，记录不同贯入量及相应荷载。贯入量达 7.5mm 或 12.5mm 时结束试验。

4. 卸载后在测点取样，测定材料含水量。

5. 在测点旁用灌砂法或环刀法等测定土基的密度。

6. 绘制荷载压强－贯入量曲线，必要时进行原点修正。

应当注意，公路现场条件下测定的 CBR 值，因土基的含水量和压实度与室内试验条件不同，也未经泡水，故与室内试验 CBR 值不一样。应通过试验，寻找两者之间的关系，换算为室内试验 CBR 值后，再用于路基施工强度检验或评定。

关于土基现场 CBR 值测试方法哥详见《公路路基路面现场测试规程》。

三、落球仪快速测定土基现场 CBR 值试验方法

本方法适用细粒土路基施工现场 CBR 值的测定，试验精度较高，方法可靠，快速简便，能满足路基施工现场检验的要求。

(一)主要仪器

1. 落球仪 结构与形状如图 1－3－10 所示，它包括底座、落球支架、导杆及落球、导

杆卡口开关、刻度标尺、仪器平整水泡、100mm 内径的底座套板。

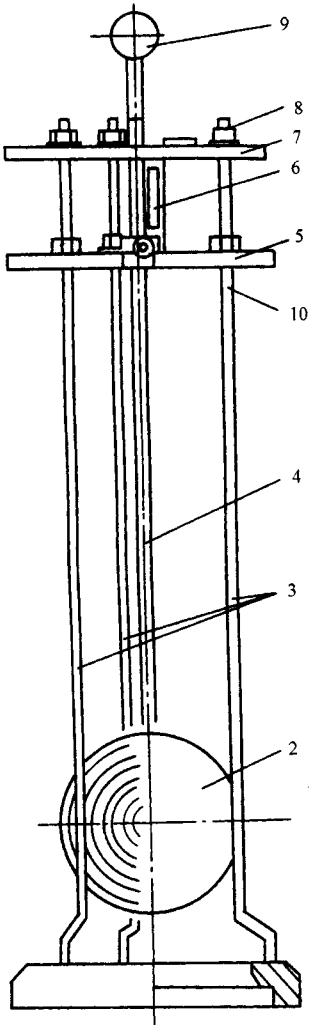


图 1－3－10　落球仪的结构与形状

1—底座；2—球体；3—立柱；4—导杆；5—下顶板；6—刻度标尺；7—上顶板；8—调平气泡；9—提手；10—卡口开关

2. 卡尺或钢板尺、刮刀、水平尺等。

(二)试验原理

一定质量的球从一定高度自由下落到土基表面，陷入深度越小，表明路基强度越高。根据落球在一定高度自由下落陷入土面所做的功与室内标准试验贯入深度所做的功相等的原理，推导得出由落球陷痕直径 D 值计算现场 CBR 值的公式。

(三)试验技术要点

1. 将测点土基表面刮平。

2. 将落球仪置于测点,使球体自由落下,用卡尺量落球陷痕直径 D 值。

3. 计算现场 CBR 值:

$$\text{现场}\quad \mathrm{CBR} = C\alpha \tag{1-3-3}$$

式中　C——有效系数,与土质有关,可通过试验,建立现场 CBR 值与用落球仪测定的陷痕直径 D 的相关关系予以确定;当无此条件时,粘性土类可取 0.35,砂性土类可取 0.45;

α——仪器系数;

$$\alpha = \frac{\left(H + R - \sqrt{R^2 - D^2/4}\right) m}{1.01 D^{1.39} \left(R - \sqrt{R^2 - D^2/4}\right)^{1.62}} \tag{1-3-4}$$

式中　D——落球陷痕直径,cm;

m——导杆与落球重量,$m = 4.5\mathrm{kg}$;

H——球体落高,$H = 60\mathrm{cm}$;

R——球体半径,$R = 4.7\mathrm{cm}$。

应当指出,落球仪测定的现场 CBR 值,因土基的含水量和压实度与室内 CBR 试验标准条件不同,也未经泡水,所测结果与前述'土基现场 CBR 值测试方法'所得现场 CBR 值相近。同样,应通过对比试验,建立落球仪 CBR 值与室内 CBR 值相关关系,换算为室内 CBR 值后,再用于评定路基强度。

关于落球仪快速测定土基现场 CBR 值试验方法详见《公路路基路面现场测试规程》

第四章　桥梁试验检测技术

第一节　桥梁试验的意义与分类

在科学技术的发展过程中，科学试验起着非常重要的作用。从土木工程设计计算理论的演变历史来看，每一种理论体系的建立和发展，一般都和大量的科学试验、生产实践密切联系。试验研究对于推动和发展结构设计计算理论、解决生产实践中出现的疑难问题往往起到了重要的作用。

在桥梁工程的发展中，桥梁试验也起到了同样重要的作用。大量的试验研究，成为促进桥梁结构设计计算理论、设计方法不断发展的重要因素之一。桥梁试验是对桥梁原型结构或桥梁模型结构直接进行的科学试验工作，包括试验准备、理论计算、现场试验、分析整理等内容的一系列工作。桥梁原型试验也称之为桥梁检测，其目的是通过试验，掌握桥梁结构在试验荷载作用下的实际工作状态，判定桥梁结构的承载能力和使用条件，检验设计与施工质量 桥梁模型试验的目的是研究结构的受力行为，探索结构应力、应变的内在规律，为设计施工服务。随着交通事业的蓬勃发展，新结构、新材料、新工艺的不断涌现，桥梁工程的试验技术日益受到人们的重视，并不断得到发展和提高。桥梁试验的任务主要包括以下几个方面。

1. 确定新建桥梁结构的承载能力和使用条件。对于重要的桥梁结构在建成竣工后，通过桥梁试验考察该桥的施工质量与结构性能，判定桥梁结构的实际承载能力，为竣工

验收、投入运营提供科学的依据。对于新型或复杂的桥梁结构，通过系统的桥梁试验，可以掌握结构在荷载作用下的实际受力状态，探索结构受力行为的一般规律，为充实和发展桥梁结构的设计计算理论积累科学的资料。

2. 评估既有桥梁的使用性能与承载能力。对于既有桥梁结构在运营期间，因受水害、地震等自然灾害而损伤，或因设计施工不当而产生严重缺陷，或因使用荷载大幅度增长而严重超过设计荷载等级，通常通过桥梁试验来评估既有桥梁的使用性能与承载能力，为既有桥梁养护、加固、改建或限载对策提供科学的依据。这对于缺乏完整技术资料的既有桥梁更为必要。

3. 研究结构(构件)的受力行为，总结结构受力行为的一般规律。随着桥梁工程的不断发展，新结构、新材料、新工艺的推广应用，原有的规范、规程往往不能适应工程实践的要求。为了修改、完善既有的规范、规程，指导设计与施工工作，就需要进行大量的研究性试验。

在实际工作中，桥梁试验的种类很多，按照试验的目的与要求分类，可分为科学研究性试验和生产鉴定性试验。研究性试验的目的是为了建立或验证结构设计计算理论和经验公式，或验证某一结构理论体系中的科学假设判断的可靠性。研究性试验一般把对结构或构件的主要影响因素作为试验参数，试验结构的设计与数量均应按照具体研究目的的需要确定。根据实际情况，试验可在原型结构上进行，也可在模型结构上进行。研究性试验一般多采用模型结构，在专门的试验室内进行，利用特定的加载装置，以消除或减少外界因素的干扰影响，同时突出所要研究的主要因素。通过系统的模型试验，对测试资料数据加以分析论证，从而揭示出具有普遍意义的规律。生产鉴定性试验具有直接服务于生产实践的意义，一般以原型结构作为试验对象，在现场进行试验，根据一定的规范、标准的要求，按照有关设计文件，遗过试验来确定结构的实际承载能力、使用性能和使用条件，检验设计施工质量，提出桥梁养护、加固、改建、限载对策，有效地保证桥梁结构的安全使用。生产鉴定性试验也称之为桥梁检测，包括静载试验、动载试验、无损检测与长期监控测试四个方面。在桥梁试验中，原型试验存在费用高、期限长、测试环境多变等不利的影响因素，如对一些大型桥梁进行多因素的研究性试验，有时是难以实现的。因此，结合原型桥梁进行模型试验往往成为科技工作者的一种有效手段，可以更为方便全面地研究主要影响因素之间的关系，探索结构行为的普遍规律，推动新结构、新材料、新工艺的发展与应用。

根据试验荷载作用的性质，桥梁试验可分为静荷载试验和动荷载试验。桥梁静载试验是将静止的荷载作用在桥梁上的指定位置而测试结构的静力位移、静力应变、裂缝等参量的试验项目，从而推断桥梁结构在荷载作用下的工作性能及使用能力。动载试验是

利用某种激振方法激起桥梁结构的振动，测定桥梁结构的固有频率、阻尼比、振型、动力冲击系数、行车响应等参量的试验项目，从而判断桥梁结构的整体刚度、行车性能。静载试验与动载试验虽然在试验目的、测试内容等方面不同，是两种性质的试验，但对于全面分析掌握桥梁结构的工作性能是同等重要的。

就试验对结构产生的后果来说，桥梁试验可分为破坏性试验和非破坏性试验。一般情况下，鉴定性试验多为非破坏性试验。但在某些情况下为了达到预定的试验目的，往往需要进行破坏性试验，以掌握试验结构由弹性阶段进入塑性阶段甚至破坏阶段时的结构行为、破坏形态等试验资料。实际上，原型结构的破坏试验，不论在费用上还是在方法上都存在一些具体的问题，特别是在结构进入破坏阶段后试验是比较困难的。因此，破坏试验一般均以模型结构为对象，在实验室内进行，以便能够较为方便可行地进行加载、控制、量测、分析，从而总结出具有普遍意义的规律，推广应用于原型结构。

按试验持续时间的长短，可分为长期试验和短期试验。鉴定性试验与一般性的研究试验多采用短期试验方法，只有那些必须进行长期观测的现象，如混凝土结构的收缩和徐变性能、桥梁基础的沉降等，才采用长期试验方法。此外，对于大型桥梁结构或新型桥梁结构常常采用长期观测或组织定期的检测，以积累这些结构长期使用性能的资料。

总之，结合具体的试验目的及要求，可选用一种或几种试验方法。在选择时应讲求经济成本，一般能用模型代替的，就不搞大规模的原型试验，通过非破坏性试验可以达到试验目的的，就不做破坏性试验。

第二节　桥梁检测的工作内容

桥梁检测的工作内容比较多，涉及到很多方面。从方法上来讲，分为静载试验、动载试验和无损检测；从时间上来看，分为短期试验和长期试验；从进行时期来看，分为成桥试验和施工阶段监测控制。一般情况下，桥梁现场检测可分为三个阶段，即准备规划阶段、加载与观测阶段和分析总结阶段。

准备规划阶段是桥梁检测顺利进行的必要条件。该阶段工作包括桥梁设计文件、施工记录、监理记录、原试验资料、桥梁养护与维修记录等桥梁技术资料的收集；桥梁现状如桥面系、承重结构构件、支座、基础等部位的表观检查；设计内力计算、加载方案制定、量测方案制定、仪器仪表选用等方面；也包括搭设工作脚手架、设置测量仪表支架、测点

放样及表面处理、测试元件布置、测量仪器仪表安装调试等现场准备工作。可以说，检测工作的顺利与否很大程度上取决于检测前的准备工作。

加载与观测阶段是整个检测工作的中心环节。这一阶段的工作是在各项准备工作就绪的基础上，按照预定的试验方案与试验程序，利用适宜的加载设备进行加载，运用各种测试仪器，观测试验结构受力后的各项性能指标如挠度、应变、裂缝宽度、加速度等，并采用人工记录或仪器自动记录手段记录各种观测数据和资料。有时，为了使某一加载、观测方案更为完善，可先进行试探性试验，以便更完满地达到原定的试验目的。需要强调的是，对于静载试验，应根据当前所测得的各种技术数据与理论计算结果进行现场分析比较，以判断受力后结构行为是否正常，是否可以进行下一级加载，以确保试验结构、仪器设备及试验人员的安全，这对于存在病害的既有桥梁结构进行试验时尤为重要。

分析总结阶段是对原始测试资料进行综合分析的过程。原始测试资料包括大量的观测数据、文字记载和图片等材料，受各种因素的影响，一般显得缺乏条理性与规律性，未必能深刻揭示试验结构的内在行为规律。因此，应对它们进行科学的分析处理，去伪存真、去粗取精，综合分析比较，从中提取有价值的资料。对于一些数据或信号，有时还需按照数理统计的方法进行分析，或依靠专门的分析仪器和分析软件进行分析处理，或按照有关规程的方法进行计算。这一阶段的工作，直接反映整个检测工作的质量。测试数据经分析处理后，按照相关规范、规程以及检测的目的要求，对检测对象做出科学的判断与评价。全部检测工作体现在最后提交的试验研究报告中。

混凝土无损检测技术是桥梁检测技术中一项重要的内容。所谓混凝土无损检测技术，是在不破坏混凝土内部结构和使用性能的情况下，利用声、光、热、电、磁和射线等方法，测定有关混凝土性能的物理量，推定混凝土的强度、缺陷等的测试技术。混凝土无损检测技术与破坏试验方法相比，具有不破坏结构的构件、不影响其使用性能、可以探测结构内部的缺陷、可以连续测试和重复测试等特点。应用混凝土无损检测技术，可以检测混凝土的强度、弹性模量、裂缝的深度和宽度，可以检查钢筋的直径、位置和保护层厚度，并可以探知混凝土的碳化程度、钢筋的锈蚀程度和混凝土构件的尺寸等参数。混凝土无损检测技术，对于进行施工质量检查与管理，进行既有结构的养护维修管理，评定既有混凝土结构的强度、耐久性及损伤程度是非常重要的。

对于大跨度桥梁，由于施工周期长，外界因素变化较大，为了确保施工能够较准确地实现设计意图，避免一些随机因素如温度、湿度、材料参数、施工误差对桥梁施工过程和成桥后状态造成过大的影响，就需要在施工过程中对每一施工阶段桥梁的线形、应力、内力等参数进行实时在线监测控制，逐阶段与设计目标值进行比较，并预测下一施工阶段

这些参量的变化态势，以便必要时修正设计计算参数，采取控制调整措施，以逼近设计目标值，这就是施工控制。施工控制对于大跨度桥梁的建造具有非常重要的意义。

混凝土桥梁的一些时效因素如收缩、徐变、基础沉降、温度变化，往往使桥梁结构产生附加内力，可能造成桥面线形不平顺，严重时会危及桥梁结构的安全运营。为了能够及时准确地掌握这些时效因素对结构的影响程度，了解这些时效因素对结构影响的变化趋势，就需要在一个相对较长的时期内定期测量桥梁结构的线形、应变、内力、裂缝等参量，并对这些参量进行综合分析，以判断桥梁结构的实际状态，这类测试我们称之为长期监控测试。除此之外，对于一些重要桥梁或新型桥梁结构也常常采用定期检测的方法来积累这些结构长期使用性能的资料，以使规范更臻完善。

综上所述，桥梁检测是一门直接服务于工程实践的技术学科，涉及到桥梁的设计计算理论、试验测试技术、仪器仪表性能、数理统计分析、现场试验组织等方面，具有较强的综合性、应用性和复杂性。近 20 年来，随着桥梁工程的飞速发展，新结构、新材料、新工艺的不断涌现，桥梁荷载的不断趋于增大，以及大批既有桥梁结构进入老化期，因此桥梁检测工作就愈显重要，并对其提出了更高、更全面的要求；同时，随着自动化技术的不断发展及计算机的普及应用，使得测试技术、分析手段也取得了长足的进步。完全可以相信，桥梁检测将进一步地推动桥梁建设事业的发展，为确保桥梁安全运营、进行科学养护起到更加重要的作用。

第三节　静载试验

静载试验应在现场指挥统一指挥下按计划有秩序进行。首先检查不同分工的测试人员是否各行其职；交通管理、加载（或司机）和联络人员是否到位；加载设备、通讯设备和电源（包括备用电源）是否准备妥当；加载位置测点放样和测试仪器安装是否正确。然后调试仪器（自动记录时对测试仪表数据采集和记录设备进行联接），利用过往车辆（或初试荷载）检查各测点的观测值的规律性，使整个测试系统进入正常工作状态。然后记录气候天气情况和试验开始时间，进行正式试验。

一、试验观测与记录

（一）温度稳定观测

仪表安装完毕后，一般在加载试验之前应对各测点进行一段时间的温度稳定观测，

中间可每隔 10min 读数一次。观测时间应尽量选择在加载试验时外界气候条件对观测造成误差的影响范围，用于测点的温度影响修正。

（二）仪表的测读与记录

人工读表时，仪表的测读应准确、迅速，并记录在专门的表格上（表 1－4－1，表 1－4－2），以便于资料的整理和计算。记录者应对所有测点量测值变化情况进行检查，看其变化是否符合规律，尤其应着重检查第一次加载时量测值变化情况。对工作反常的测点应检查仪表安装是否正确，并分析其他可能影响其正常工作的原因，及时排除故障。对于控制测点应在故障排除后重复一次加载测试项目。

表 1－4－1　电阻应变仪应变观测记录表

仪器型号：_____仪器采用灵敏系数：_____应变单位：$\mu\varepsilon$

电阻片标距：_____ mm　电阻片灵敏系数：

应变计算修正系数：_____

观点号 / 观测时间 / 加载程序													
		读数	应变	修正应变	总应变	读数	应变	修正应变	总应变	读数	应变	修正应变	总应变

表 1－4－2　百分表挠度（位移）观测记录表

仪器型号：_____挠度（位移）　单位 0.01mm

观点号 / 观测时间 / 加载程序													
		读数	位移	总位移	读数	位移	总位移	读数	位移	总位移	读数	位移	总位移

当采用仪器自动采集数据记录时，应对控制点的应变和位移进行监控，测试结果规律异常时，应查明原因采取补救措施。将记录结果整理成表 1－4－1 和表 1－4－2 的格式，以便进行结果分析，并与原始记录一同保存备查。

（三）裂缝观测

加载试验中裂缝观测的重点是结构承受拉力较大部位及旧桥原有裂缝较长、较宽的部位。在这些部位应测量裂缝长度、宽度，并在混凝土表面沿裂缝走向进行描绘。加载过程中观测裂缝长度及宽度的变化情况，可直接在混凝土表面进行描绘记录，也可采用专门表格记录。加载至最不利荷载及卸载后应对结构裂缝进行全面检查，尤其应仔细检查是否产生新的裂缝，并将最后检查情况填入裂缝观测记录表，必要时可将裂缝发展情况绘制在裂缝展开图上。

二、加载实施与控制

（一）加载程序

加载应在指挥人员指挥下严格按计划程序进行。采用重物加载时按荷载分级逐级施加，每级荷载堆放位置准确、整齐稳定。荷载施加完毕后，逐级卸载。采用车辆加载时，先由零载加至第一级荷载，卸载至零载；再由零载加至第二级荷载，卸至零载……，直至所有荷载施加完毕（有时为了确保试验结果准无误，每一级荷载重复施加 1～2 次）每一级荷载施加次序为纵向先施加重车，后施加两侧标准车；横向先施加桥中心的车辆，后施加外测的车辆。

（二）加载稳定时间控制

为控制加卸载稳定时间，应选择一个控制观测点（如简支梁的跨中挠度或应变测点），在每级加载（或卸载）后立即测读一次，计算其与加载前（或卸载前）测读值之差值 S_g，然后每隔 2min 测读一次，计算 2min 前后读数的差值 ΔS，并按下式计算相对读数差值 m：

$$m = \frac{\Delta S}{S_g}$$

当 m 值小于 1%或小于量测仪器的最小分辨值时即认为结构基本稳定，可进行各观测点读数。但当进行主要控制截面最大内力荷载工况加载程序时荷载在桥上稳定时间应不少于 5min，对尚未投入营运的新桥应适当延长加载稳定时间。

某些桥梁，如拱桥，有时当拱上建筑或桥面系参与主要承重构件的受力，因连接较弱或变形缓慢，造成测点观测值稳定时间较长，如结构的实测变位（或应变）值远小于计算值，可将加载稳定时间定为 20～30min。

(三)加载过程的观察

加载试验过程应对结构控制点位移(或应变)、结构整体行为和薄弱部位破损实行监控,并将结果随时汇报给指挥人员作为控制加载的依据。随时将控制点位移与计算结果比较,如实测值超过计算值较多,则应暂停加载,待查明原因再决定是否继续加载。试验人员如发现其他测点的测值有较大的反常变化也应查找原因,并及时向试验指挥人员报告。加载过程中应指定人员随时观察结构各部位可能产生的新裂缝,注意观察 构件薄弱部位是否有开裂、破损,组合构件的结合面是否有开裂错位,支座附近混凝土是否开裂,横隔板的接头是否拉裂,结构是否产生不正常的响声,加载时墩台是否发生摇晃现象等等。如发生这些情况应报告试验指挥人员,以便采取相应的措施。

(四)终止加载控制条件

发生下列情况应中途终止加载:

(1)控制测点应力值已达到或超过用弹性理论按规范安全条件反算的控制应力值时;

(2)控制测点变位(或挠度)超过规范允许值时;

(3)由于加载,使结构裂缝的长度、缝宽急剧增加,新裂缝大量出现,缝宽超过允许值的裂缝大量增多,对结构使用寿命造成较大的影响时;

(4)拱桥加载时沿跨长方向的实测挠度曲线分布规律与计算值相差过大或实测挠度超过计算值过多时;

(5)发生其他损坏,影响桥梁承载能力或正常使用时。

第四节　试验数据分析及桥梁承载力评定

通过静载试验得到的原始数据、文字和图像描述材料是荷载试验最重要的资料。虽然它们是可靠的。但这些原始资料数量庞大,不直观,不能直接用于评定承载能力,故进行承载力评定之前必须对它进行处理分析,得出直接进行承载能力评定的指标,以满足承载力评定的需要。

一、试验数据分析

(一)试验资料的修正

1. 测值修正

根据各类仪表的标定结果进行测试数据的修正，如考虑机械式仪表较正系数、电测仪表率定系数、灵敏系数、电阻应变观测的导线电阻影响等等。当这类因素对测值的影响小于1%时可不予修正。

2. 温度影响修正

温度对测试的影响比较复杂。结构构件的各部位不同的温度变化、结构的受力特性、测试仪表或元件的温度变化、电测元件的温度敏感性、自补性等等均对测试精度造成一定的影响。逐项分析这些影响是困难的。一般可采用综合分析的方法来进行温度影响修正，即利用加载试验前进行的温度稳定观测数据，建立温度变化（测点处构件表面温度或空气温度）和测点测值（应变和挠度）变化的线性关系，然后按下式进行温度修正计算：

$$S = S' - \Delta t \cdot K_t$$

式中　S——温度修正后的测点加载测值变化；

S'——温度修正前的测点加载测值变化；

Δt——相应于 S' 观测时间段内的温度变化（℃）；

K_t——空载时温度上升1℃时测点测值变化量。

$$K_t = \frac{\Delta S}{\Delta t_1}$$

式中　ΔS——空载时某一时间区段内测点测值变化量；

Δt_1——相应于 ΔS 同一时间区段内温度变化量。

温度变化量的观测对应变宜采用构件表面温度，对挠度宜采用气温。温度修正系数 K_t 应采用多次观测的平均值，如测值变化与温度变化关系不明显时则不能采用。

由于温度影响修正比较困难，一般不进行这项工作，而采取缩短加载时间、选择温度稳定性较好的时间进行试验等办法尽量减小温度对测试精度的影响。

3. 支点沉降影响的修正

当支点沉降量较大时，应修正其对挠度值的影响，修正量 C 可按下式计算：

$$C = \frac{l - x}{l}a + \frac{x}{l}b$$

式中　C——测点的支点沉降影响修正量；

l——A 支点到 B 支点的距离；

x——挠度测点到 A 支点的距离；

a——A 支点沉降量；

b——B 支点沉降量。

(二)各测点变位(挠度、位移、沉降)与应变的计算

根据量测数据作下列计算

总变位(或总应变)　$S_t = S_1 - S_i$

弹性变位(或弹性应变)　$S_e = S_1 - S_u$

残余变位(或残余应变)　$S_p = S_t - S_e = S_u - S_i$

式中　S_i——加载前测值；

S_1——加载达到稳定时测值；

S_u——卸载后达到稳定时测值。

引入相对残余变位(或应变)的概念描述结构整体或局部进入塑性工作状态的程度。

相对残余变位(或应变)按下式计算：

$$S'_p = \frac{S_p}{S_t} \times 100\% \tag{1-4-1}$$

式中　S'_p——相对残余变位(或应变)，S_p、S_t 意义同前。

(三)应力计算

根据测量到的测点应变，当结构处于线弹性工作状态时可以利用应力应变关系计算测点的应力。

(1)单向应力状态

$$\sigma = E\varepsilon \tag{1-4-2}$$

(2)平面应力状态

①当主应力方向已知时：

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) \tag{1-4-3}$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_2) \tag{1-4-4}$$

式中　E——构件材料弹性模量；

ν——构件材料泊松比；

ε_1、ε_2——方向相互垂直的主应变；

σ_1、σ_2——方向相互垂直的主应力。

②主应力方向未知时需用应变花测量其应变计算主应力。应变花的常见形式为直角形或等边形(图 1-4-1a)、b)，由三个应变片组成；也可以增加校核片布置为扇形和伞形(图 1-4-1d)，e)。采用图 1-4-1 中的五种应变花时测点主应力可以表示为

$$\sigma_1 = \left(\frac{E}{1-\nu}\right) A + \left(\frac{E}{1+\nu}\right)\sqrt{B^2 + C^2} \tag{1-4-5}$$

$$\sigma_2 = \left(\frac{E}{1-\nu}\right) A + \left(\frac{E}{1+\nu}\right)\sqrt{B^2 + C^2} \tag{1-4-6}$$

$$\tau_{max} = \left(\frac{E}{1+\nu}\right)\sqrt{B^2 + C^2} \tag{1-4-7}$$

$$\psi_0 = \frac{1}{2}\mathrm{tg}^{-1}\frac{C}{B} \tag{1-4-8}$$

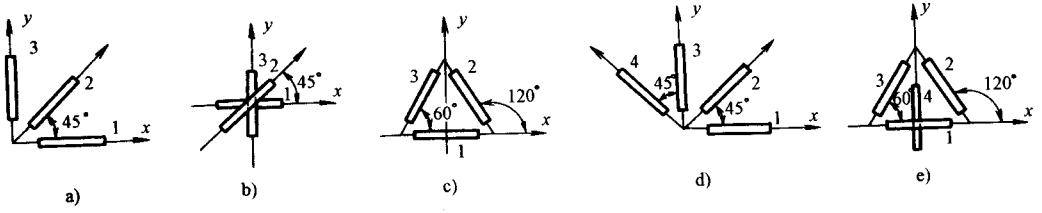


图 1-4-1　常用应变花的形式

a)直角形；b)直角交叉形；c)等边形；d)扇形；e)伞形；

其中 参数 A、B、C 由应变花的形式而定，上面五种形式应变花的参数见表 1-4-3。

表 1-4-3　应变花参数

测量平面上一点主应变时应变计的布置		A	B	C
应变花名称	应变花形式			
45°直角应变花	图 1-4-1a)	$\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2}$	$\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2}$	$\frac{2\varepsilon_{45} - \varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2}$
60°等边三角形应变花	图 1-4-1c)	$\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3}$	$\varepsilon_0 - \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{60} + \varepsilon_{120}}{3}$	$\frac{\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120}}{\sqrt{3}}$
伞型应变花	图 1-4-1e)	$\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2}$	$\frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}{2}$	$\frac{\varepsilon_{60} - \varepsilon_{120}}{\sqrt{3}}$
扇型应变花	圈 1-4-1d)	$\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{45} + \varepsilon_{90} + \varepsilon_{135}}{4}$	$\frac{1}{2}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{90})$	$\frac{1}{2}(\varepsilon_{135} - \varepsilon_{45})$

(四)试验结果与理论分析的比较

为了评定结构整体受力性能，需对桥梁荷载试验结果与理论分析值比较，以检验新建桥是否达到设计要求的荷载标准，或判断旧桥的承载能力。比较时可以将结构位移、应变等试验值与理论计算值列表进行比较，对结构在最不利荷载工况作用下主要控制测点的位移、应力的实测值与理论分析值，要分别绘出荷载位移（$P-\Delta$）曲线，荷载应力

($P-\sigma$)曲线,并绘出最不利荷载工况作用下位移沿结构(纵、横向)分布曲线和控截面应变(沿高度)分布图,绘制结构裂缝分布图(对裂缝编号注明长度、宽度、初裂荷载以及裂缝发展情况)。为了量化,以及描述试验值与理论分析值比较的结果,此处引入结构校验系数:

$$\eta = \frac{S_e}{S_s} \tag{1-4-9}$$

式中　S_e——试验荷载作用下量测的弹性变位(或应变)值;

S_s——试验荷载作用下的理论计算变位(或应变)值。

S_e 与 S_s 的比较可用实测的横截面平均值与计算值比较,也可考虑荷载横向不均匀分布而选用实测最大值与考虑横向增大系数的计算值进行比较。横向增大系数最好采用实测值,如无实测值也可采用理论计算值。

二、荷载试验成果分析与承载能力评定

经过荷载试验的桥梁,应根据整理的试验资料分析结构的工作状况,进一步评定桥梁承载能力,为新建桥验收做出鉴定结论,或作为旧桥承载力鉴定检算的依据,并纳入桥梁承载能力鉴定报告和桥梁载能力鉴定表。一般进行下列分析评定工作。

(一)结构工作状况

1. 校验系数 η

校验系数 η 是评定结构工作状况、确定桥梁承载能力的一个重要指标。不同结构形式的桥梁其 η 值常不相同,η 值常见的范围可参考表 1-4-4。一般要求 η 值不大于 1。η 值越小结构的安全储备越大。η 值过大或过小都应该从多方面分析原因。如 η 值过大可能说明组成结构的材料强度较低,结构各部分联结性较差,刚度较低等等。η 值过小可能说明材料的实际强度及弹性模量较高,梁桥的混凝土桥面铺装及人行道等与主梁共同受力,拱桥拱上建筑与拱圈共同作用,支座摩阻力对结构受力的有利影响,计算理论或简化的计算式偏于安全等等。试验加载物的称量误差、仪表的观测误差等也对 η 值有一定影响。

表 1-4-4　桥梁校验数常值表

桥梁类型	应变(或应力)校验系数	挠度校验系数	桥梁类型	应变(或应力)校验系数	挠度校验系数
钢筋混凝土板桥	0.20~0.40	0.20~0.50	预应力混凝土桥	0.60~0.90	0.70~1.00
钢筋混凝土梁桥	0.40~0.80	0.50~0.90	圬工拱桥	0.70~1.00	0.80~1.00

2. 实测值与理论值的关系曲线

由于理论的变位(或应变)一般系按线性关系计算,所以如测点实测弹性变位(或应变)与理论计算值成正比,其关系曲线接近于直线,说明结构处于良好的弹性工作状况。

3. 相对残余变位(或应变)

测点在控制荷载工况作用下的相对残余变位(或应变) S_p/S_t 越小说明结构越接近弹性工作状况。一般要求 S_p/S_t 值不大于 20%,当 S_p/S_t 大于 20%时,应查明原因。如确系桥梁强度不足,应在评定时,酌情降低桥梁的承载能力。

4. 动载性能

当动载试验效率 η_d 接近 1 时,不同车速下实测的冲击系数最大值可用于结构的强度及稳定性检算。

结构的自振频率、活载强迫振动频率及阻尼系数等对桥梁承载能力的影响可参考其他有关资料进行分析。

(二)结构的强度及稳定性

当荷载试验项目比较全面时,可采用荷载试验主要挠度测点的校验系数 η 来评定结构的强度和稳定性。检算时用荷载试验后的梁桥检算系数 Z_2 代替《公路旧桥承载能力鉴定方法》中旧桥检算系数 Z_1,对桥梁结构抗力效应予以提高或折减。

砖石和混凝土桥

$$S_d(\gamma_{s0}\Psi\sum\gamma_{sl}Q)\leqslant R_d\left(\frac{R^j}{\eta_m},a_k\right)\times Z_2 \qquad (1-4-10)$$

钢筋混凝土及预应力混凝土桥

$$S_d(\gamma_g G;\gamma_q\sum Q)\leqslant\gamma_b R_d\left(\frac{R_c}{\gamma_c};\frac{R_s}{\gamma_s}\right)\times Z_2 \qquad (1-4-11)$$

根据 η 值由表 1-4-5 查取 Z_2 的取值范围,再根据下列条件确定 Z_2 值。符合下列条件时,Z_2 值可取高限,否则应酌减,直至取低限。

表 1-4-5　经过荷载试验的桥梁检算系数 Z_2 值表

η	Z_2	η	Z_2
0.4 及以下	1.20~1.30	0.8	1.00~1.10
0.5	1.15~1.25	0.9	0.97~1.07
0.6	1.10~1.20		
0.7	1.05~1.15	1.0	0.95~1.05

注:1. η 值应经校核确保计算及实测无误;

2. η 值在表列之间时可内插;

3. 当 η 值大于 1 时应查明原因,如确系结构本身强度不够,应适当降低检算承载能力。

(1)加载内力与总内力(加载内力 + 恒载内力)的比值较大,荷载试验效果较好。

(2)实测值与理论值线性关系较好,相对残余变位(或应变)较小。

(3)桥梁结构各部份无损伤,风化、锈蚀、裂缝等较轻微。

η 值应取控制截面内力最不利荷载工况时最大挠度测点进行计算。对梁桥可采用跨中最大正弯矩荷载工况的跨中挠度 对拱桥检算拱顶截面时可采用拱顶最大正弯矩荷载工况时跨中挠度 检算拱脚截面时可采用拱脚最大负弯矩荷载工况时 $l/4$ 截面处挠度 检算 $l/4$ 截面时则可用上者平均值 如已安排 $l/4$ 截面最大正、负弯矩荷载工况,则可采用该程序时 $l/4$ 截面挠度。但拱桥在采用 η 值根据表 1 - 4 - 5 进行检算时,应不再另行考虑拱上建筑联合作用。

对于旧桥采用 Z_1 值根据《公路旧桥承载能力鉴定方法》检算不符合要求,但采用 Z_2 值根据 1 - 4 - 10 求 1 - 4 - 11 检算符合要求时,可评定桥梁承载能力满足检算荷载要求。

(三)地基与基础

当试验荷载作用下墩台沉降、水平位移及倾角较小,符合上部结构检算要求,卸载后变位基本回复时,认为地基与基础在检算荷载作用下能正常工作。

当试验荷载作用下墩台沉降、水平位移、倾角较大或不稳定,卸载后变位不能回复时,应进一步对地基、基础进行探查、检算,必要时应对地基基础进行加固处理。

(四)结构的刚度要求

试验荷载作用下,主要测点挠度校验系数 η 应不大于 1。各点的挠度不超过规定的允许值。即

圬土拱桥 一个桥范围内正负挠度的最大绝对值之和不小于 $L/1000$,履带车和挂车要验算时提高 20%。

钢筋混凝土桥 梁桥主梁跨中　　$L/600$

梁桥主要悬臂端　　$L/300$

桁架、拱桥　　$L/300$

(五)裂缝

对于新建桥试验荷载作用下预应力结构不应出现裂缝,钢筋混凝土结构裂缝不超“桥规”容许值:

$$\delta_{\max} \leqslant [\delta] \qquad (1-4-12)$$

对于旧桥试验荷载作用下绝大部分裂缝宽度应不大于表 1 - 4 - 6 规定的允许值,荷载试验后所有裂缝应不大于 1 - 4 - 6 规定的允许值。

表 1－4－6　裂缝限值表

结构类别	裂缝部位			允许最大缝宽（mm）	其他要求
钢筋混凝土梁	主筋附近竖向裂缝			0.25	
	腹板斜向裂缝			0.30	
	组合梁结合面			0.50	不允许贯通结合面
	横隔板与梁体端部			0.30	
	支座垫石			0.50	
预应力混凝土梁	梁体竖向裂缝			不允许	
	梁体纵向裂缝			0.20	
砖、石、混凝土拱	拱圈横向			0.30	裂缝高小于截面高一半
	拱圈纵向			0.50	裂缝长小于跨$\frac{1}{8}$
	拱波与拱肋结合处			0.20	
墩台	墩台帽			0.30	不允许贯通墩台身截面一半
	墩台身	经常受浸蚀性环境水影响	有筋	0.20	
			无筋	0.30	
		常年有水，但无侵蚀性影响	有筋	0.25	
			无筋	0.35	
		干沟或季节性有水河流		0.40	
	有冻结作用部份			0.20	

注：表中所列除特指外适用于一般条件，对于潮湿和空气中含有较多腐蚀性气体等条件下的缝宽限制应要求严格一些。

通过对桥梁结构工作状况、强度稳定性、刚度和抗裂性各项指标进行综合评定，并结合结构下部评定和动力性能评定，综合给出桥梁承载能力评定结论，将评定结论写入桥梁承载能力鉴定报告。

第五节　结构动载试验

桥梁结构承受车辆、人群、风力和地震等动力荷载作用下产生振动，桥梁在动力荷载作用下的受力分析是桥梁结构分析的又一重要任务。桥梁的振动问题影响因素复杂，仅靠理论分析还不能满足工程应用的需要，需用理论分析与实验测试相结合的方法解决，桥梁动载试验就成为解决该问题必不可的手段。桥梁的动力特性（频率、振型和阻尼比）

是评定桥梁承载力状态的重要参数，随着我国公路桥梁检验评定制度推行，桥梁动载试验会将越来越受到重视。

结构振动问题涉及振源（输入）、结构（系统）和响应（输出），它们的关系为：

振源（输入）⟶结构（系统）⟶响应（输出）

在结构振动问题中输入、系统和输出中知其中两者，可以求第三者，所以桥梁的动载试验可以划分为三类基本问题：

1. 测定桥梁荷载的动力特性（数值、方向、频率等）。

2. 测定桥梁结构的动力特性（自振频率、阻尼、振型等）。

3. 测定桥梁在动荷载作用下的响应（动位移、动应力等）。

桥梁的振动试验涉及很宽的范畴，如模拟地震试验、抗风试验、疲劳试验等。本章着重介绍常规桥梁结构动力特性和动载响应的试验与分析。

一、桥梁动载试验的测试仪器

结构振动的测试仪器包括：测振传感器、信号放大器、光线示波器、磁带记录仪和数字信号处理机。近年振动信号分析处理技术发展很快，已开发出多种以 A/D 转换和微机结合的数据采集和分析一体化的智能仪器，可以进行实时数据采集分析，并能实现数据储存，有取代磁带记录仪和专用信号处理机的趋势，但还有待普及。

（一）测振传感器

1. 基本原理

振动参数有位移、速度和加速度。测量这些振动参数的传感器有许多种类。但由于振动测量的特殊性，如测量时难以在振动体附近找到一个静止点作为测量的基准点，所以就需要使用惯性式测振传感器。通常所指的测振传感器即为惯性式测振传感器（以下简称为测振传感器）。测振传感器的基本原理为：由惯性质量、阻尼和弹簧组成一个动力系统，这个动力系统固定在振动体上（即传感器的外壳固定在振动体上），与振动体一起振动。通过测量惯性质量相对于传感器外壳的运动，就可以得到振动体的振动（图 1－4－2）。由于这是一种非直接的测量方法，所以，这个传感器动力系统的动力特性对测量结构具有很重要的影响。

设被测振动体的振动规律如下：

$$x = X_0 \sin\omega t \tag{1-4-13}$$

式中　x——振动体相对固定参考坐标的位移；

X_0——振动体振动的振幅；

ω——振动体振动的圆频率。

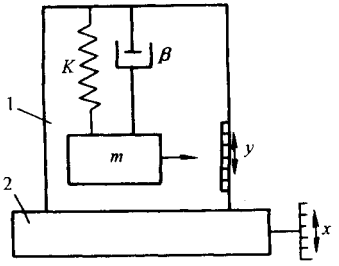


图 1－4－2　测振传感器力学原理

1—传感器；2—振动体

传感器外壳随振动体一起运动。以 y 表示质量块 m 相对于传感器外壳的位移，由图 1－4－2 可知，质量块 m 的总位移为 $x+y$，它的运动方程为

$$m\frac{\mathrm{d}^2(x+y)}{\mathrm{d}t^2}+c\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}+ky=0 \tag{1-4-14}$$

或

$$m\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2}+c\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}+ky=mX_0\omega^2\cdot\sin\omega t \tag{1-4-15}$$

上式为一单自由度有阻尼的强迫振动的方程，它的通解为

$$y=Be^{-nt}\cos(\sqrt{\omega^2-n^2}\,t+a)+Y_0\sin(\omega t-\varphi) \tag{1-4-16}$$

其中，$n=\dfrac{c}{2m}$。

上式中第一项为自由振动解，由于阻尼作用而很快衰减；第二项为强迫振动解，其中

$$Y_0=\frac{X_0\left(\dfrac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left(1-\dfrac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2+4\xi^2\dfrac{\omega^2}{\omega_n^2}}} \tag{1-4-17}$$

$$\varphi=\operatorname{arctg}\frac{2\xi\dfrac{\omega}{\omega_n}}{1-\left(\dfrac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \tag{1-4-18}$$

式中　ξ——阻尼比，$\xi=\dfrac{n}{\omega_n}$；

ω_n——质量弹簧系统的固有频率，$\omega_n=\sqrt{\dfrac{k}{m}}$。

由式(1－4－16)可知，传感器动力系统的稳态振动如下：

$$y=Y_0\sin(\omega_t-\varphi) \tag{1-4-19}$$

2. 传感器的频率特性

将式(1－4－19)与式(1－4－13)相比较，可以看出传感器中的质量块相对外壳的运动规律与振动体的运动规律一致，但两者相差一个相位角 φ。质量块的振幅 Y_0 与振动体的振幅 X_0 之比为

$$\frac{Y_0}{X_0}=\frac{(\frac{\omega}{\omega_n})^2}{\sqrt{(1-\frac{\omega^2}{\omega_n^2})^2+4\xi^2\frac{\omega^2}{\omega_n^2}}} \tag{1-4-20}$$

式(1－4－20)和式(1－4－18)分别为测振传感器的幅频特性和相频特性，相应的曲线称为幅频特性曲线和相频特性曲线(图 1－4－3、图 1－4－4)。由图 1－4－3、图 1－4－4 可知，当$\frac{\omega}{\omega_n}$较大时，即振动体振动频率较之传感器的固有频率大很多时，不管阻尼比 ξ 的大小如何，$\frac{Y_0}{X_0}$趋近于 1，φ 趋近于 180°，表示质量块的振幅和振动体的振幅趋近于相等，而它们的相位趋于相反，这是测振传感器的理想状态。当$\frac{\omega}{\omega_n}$接近于 1 时，$\frac{Y_0}{X_0}$值随阻尼值的变化而作很大的变化，这一段的相位差 φ 随着$\frac{\omega}{\omega_n}$的变化而变化，表示仪器测出的波形有畸变。当$\frac{\omega}{\omega_n}$较小趋于零时，$\frac{Y_0}{X_0}$值也趋于零，表示传感器难以反映所要测的振动。所以，在设计和选择测振传感器时，应使传感器的固有频率 ω_n 与所测振动的频率 ω 相比尽可能小，即使$\frac{\omega}{\omega_n}$尽可能大。但是，降低传感器的固有频率有时会有困难，这时可以适当选择阻尼器的阻尼值来延伸传感器的频率下限。

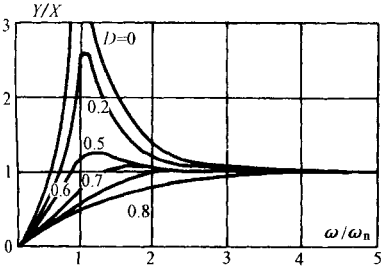


图 1－4－3　幅频特性曲线

以上讨论是关于测量位移的传感器，如果使传感器的固有频率远远大于所测振动的

频率，可以得到关于惯性式加速度传感器的频率特性。当 $\omega_n \geqslant \omega$ 时，由式(1－4－17)、式(1－4－18)可得：

$$Y_0 \approx X_0 \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \tag{1-4-21}$$

$$\varphi \approx 0 \tag{1-4-22}$$

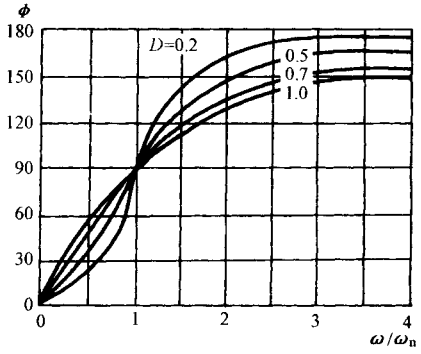


图 1－4－4　相频特性曲线

所测振动的加速度为：

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -X_0\omega^2 \sin\omega t \tag{1-4-23}$$

令 $a_m = X_0\omega^2$，由式(1－4－21)可知：

$$Y_0 \approx \frac{1}{\omega_n^2} \cdot a_m \tag{1-4-24}$$

上式表示传感器的位移幅值与被测振动的加速度幅值成正比，这就是惯性式加速度传感器的工作原理。以 $\frac{\omega}{\omega_n}$ 为横坐标，以 $Y_0 \frac{\omega_0^2}{a_m}$ 为纵坐标，可得加速度传感器的幅频特性曲线(图 1－4－5)。

以上介绍的质量、弹簧和阻尼系统是测振传感器的感受部分。感受到振动信号要通过各种转换方式转换成电信号，转换方式有磁电式、压电式、电阻应变式等。传感器所测的振动量通常是以位移、速度和加速度等，按它们的转换方式和所测振动量可以分成很多种类。以下简要介绍磁电式速度传感器和压电式加速度传感器。

3．磁电式速度传感器

磁电式速度传感器是根据电磁感应的原理制成的，其特点是灵敏度高，性能稳定，输出阻抗低，频率响应范围有一定宽度。调整质量、弹簧和阻尼系统的动力参数，可以使传感器既能测量非常微弱的振动。也能测比较强的振动。

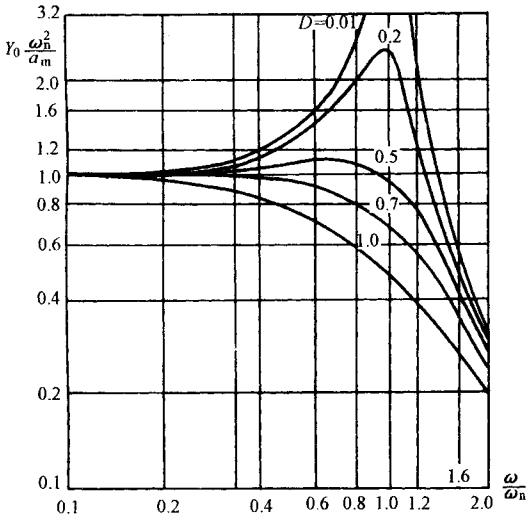


图 1－4－5　加速度传感器的幅频特性曲线

图 1－4－6 为一磁电式速度传感器，其中磁钢和壳体相固连，并通过壳体安装在振动体上，与振动体一起振动；芯轴和线圈组成传感器的系统质量，通过弹簧片（系统弹簧）与壳体连动。振动体振动时，系统质量与传感器壳体之间发生相对位移，因此线圈与磁钢这间也发生相对运动。根据电磁感应定律，感应电动势 E 的大小为

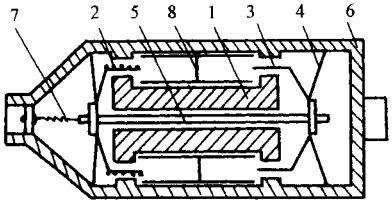


图 1－4－6　磁电式速度传感器

1—磁钢；2—线圈；3—阻尼环；4—弹簧片；5—芯轴；6—外壳；7—输出线；8—铝架

$$E = Blnv \tag{1-4-25}$$

式中　B——线圈所在磁钢间隙的磁应强度；

l——每匝线圈的平均长度；

n——线圈匝数；

v——线圈相对于磁钢的运动速度，即系统质量相对于传感器壳体的运动速度。

从上式可以看出，对于传感器来说 Bln 是常量，所以传感器的电压输出（即感应电动

势 E)与相对运动速度 v 成正比。

图 1－4－7 为一摆式测振传感器,它的质量弹簧系统设计成转动的形式,因而可以获得更低的仪器固有频率。摆式传感器可以测垂直方向和水平方向的振动;它也是磁电式传感器,输出电压与相对运动速度成正比。

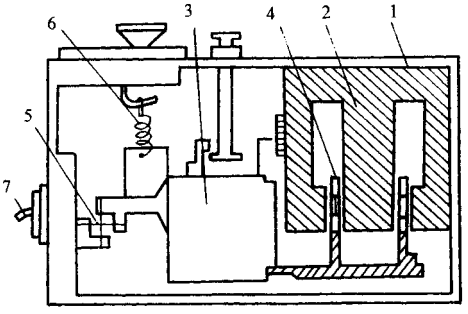


图 1－4－7　摆式传感器

1—外壳;2—磁钢;3—重锤;4—线圈;5—十字簧片;6—弹簧;7—输出线

磁电式测振传感器的主要技术指标如下。

①传感器质量弹簧系统的固有频率　它直接影响传感器的频率响应。固有频率取决于质量的大小和弹簧的刚度。

②灵敏度　即传感器在测振方向受到一个单位振动速度时的输出电压;

③频率响应　当所测振动的频率变化时,传感器的灵敏度、输出的相位差等也随之变化,这个变化的规律称为传感器的频率响应。对于一个阻尼值,只有一条频率响应曲线。

④阻尼　传感器的阻尼与频率响应有很大关系,磁电式测振传感器的阻尼比通常设计成 0.5～0.7。

磁电式传感器输出的电压信号一般比较微弱,需要用电压放大器进行放大。

4. 压电式加速度传感器

从物理学知道,一些晶体材料当受到压力并产生机械变形时,在其相应的两个表面上出现异号电荷,当外力去掉后,晶体又重新回到不带电的状态,这种现象称为压电效应。压电式加速度传感器是利用晶体的压电效应而制成的,其特点是稳定性高、机械强度高及能在很宽的温度范围内使用,但灵敏度较低。

图 1－4－8 为压电式加速度传感器的结构原理,压电晶体片上是质量块,用硬弹簧将它们夹紧在基座上。质量弹簧系统的弹簧刚度由硬弹簧的刚度和晶体片的刚度组成,刚度很大,质量块的质量较小,因而质量弹簧系统的固有频率很高,可达数千赫兹,高的

甚至可达 100 ~ 200kHz。

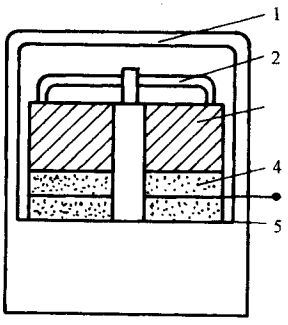


图 1-4-8　加速度传感器的结构原理

1—外壳；2—硬弹簧；3—质量块；4—压电晶体；5—输出端

由前面的分析可知，当传感器的固有频率远远大于所测振动的频率时，质量块相对于外壳的位移就反映所测振动的加速度。质量块相对于外壳的位移乘上晶体的刚度就是作用在晶体上的动压力。这个动压力与压电晶体两个表面所产生的电荷量（或电压）成正比，因此我们可以通过测量压电晶体的电荷量来得到所测振动的加速度。

压电式加速度传感器的主要技术指标如下。

(1)灵敏度

压电式加速度传感器有两种形式的灵敏度，电荷灵敏度 S_q（S_q 的单位是 pC/g，pC 是微微库仑，g 是重力加速度）和电压灵敏度 S_v（S_v 的单位通常是 mV/g）。传感器灵敏度的大小取决于压电晶体材料的特性和质量块的质量大小。传感器几何尺寸愈大亦即质量块愈大，灵敏度愈大，但使用频率愈窄；传感器体积减小亦即质量块减小，灵敏度也减小，但使用频率范围加宽。选择压电式加速度传感器，要根据测试要求综合考虑。

(2)安装谐振频率 $f_{安}$

$f_{安}$ 是指传感器牢固地（用钢螺栓）装在一个有限质量 m（目前国际上公认的标准是取体积为 1 立方英寸，质量为 180g）的物体上的谐振频率。压电式加速度传感器本身有一个固有谐振频率，但是传感器总是要通过一定的方式安装在振动体上，这样谐振频率就要受安装条件的影响。传感器的安装谐振频率与传感器的频率响应有密切关系，不好的安装方法会大大影响测试的质量。

(3)频率响应

根据对测试精度的要求，通常取传感器安装谐振频率的 $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{10}$ 为测量频率的上限，测量频率的下限可以很低，所以压电式加速度传感器的工作频率很宽。

(4)横向灵敏度比

即传感器受到垂直于主轴方向振动时的灵敏度与沿主轴方向振动的灵敏度之比。在理想的情况下,传感器的横向灵敏度比应等于零,即当与主轴垂直方向振动时不应有信号输出。

(5)幅值范围

即传感器灵敏度保持在一定误差大小(通常在 5% ~ 10%)时的输入加速度幅值的范围,也就是传感器保持线性的最大可测范围。

压电式加速度传感器用的放大器有电压放大器和电荷放大器两种。

(二)光线示波器

光线示波器也是一种常用的模拟式记录器,主要用于振动测量的数据记录,它将电信号转换为光信号并记录在感光纸或胶片上,得到的是试验变量与时间的关系曲线。

图 1 - 4 - 9 为光线示波器的工作原理,当振动的信号电流输入振动子线圈 2 时,在固定磁场 3 内的振动子线圈就发生偏转,与线圈连着的小镜片及其反射的光线也随之偏转,偏转的角度大小和方向与输入的信号电流相对应,光线射在前进着的感光记录纸上即留下所测信号的波形,与此同时在感光记录纸上用频闪灯 8 打上时间标记。光线示波器可以同时记录若干条波形曲线,它还可以用于静力试验的数据记录。

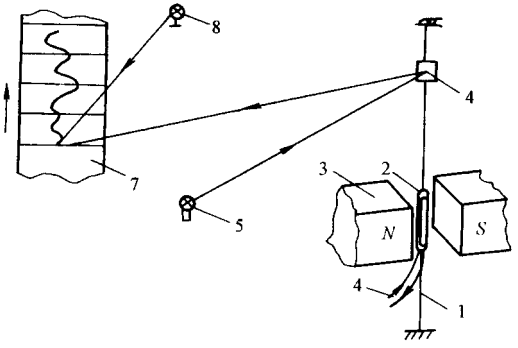


图 1 - 4 - 9　光线示波器的工作原理

1—张丝;2—线圈;3—磁场;4—镜片;5—光源;6—输入线;7—记录纸;8—频闪灯

对光线示波器记录的试验结果进行数据处理,与 $X-Y$ 记录仪相同,要用尺直接在曲线上量取大小,根据标定值按比例换算得到代表试验结果的数值;关于时间的数值,可用记录纸上的时间标记按同样方法进行换算。

(三)磁带记录仪

磁带记录仪是一种常用的较理想的记录器,可以用于振动测量和静力试验的数据记

录，它将电信号转换成磁信号并记录在磁带上，得到的是试验变量与时间的变化关系。

磁带记录仪由磁带、磁头、磁带传动机构、放大器和调制器等组成，它的原理见图 1－4－10。记录时，从传感器来的信号输入到磁带记录仪，经过放大器和调制器的处理，通过记录磁头把电信号转换成磁信号，记录在以规定速度作匀速运动的磁带上。重放时，使记录有信号的磁带按原来记录时的速度（也可以改变速度）作匀速运动，通过重放磁头从磁带‘读出’磁信号，并转换成电信号，经过放大器和调制器的处理，输出给其他仪器。

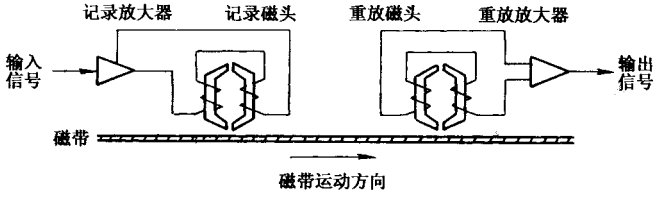


图 1－4－10　直接记录式磁带记录仪原理图

磁带记录仪的记录方式有模拟式和数字式两种，对记录数据进行处理应采用不同的方法。用模拟式记录的数据，可通过重放，把信号输送给 $X-Y$ 记录仪或光线示波器等，用前面所提到的方法，得到相应的数值。或者，可把信号输送给其他分析仪器，用 A/D 转换，得到相应的数值。用数字式记录仪记录的数据，可直接输送给打印机打印输出，或输送到计算机等。

磁带记录仪的特点是：①工作频带宽，可以记录从直流到 2MHz（DC—2MHz）的信号；②可以同时进行多道记录，并能保持多通道信号之间正确的时间和相位关系；③可以快速记录慢速重放，或慢速记录快速重放，使数据记录和分析更加方便；④通过重放，可以很方便地将磁信号还原成电信号，输送给各种分析仪器。

（四）信号处理机

动态信号数据处理，一般在专用信号处理机或利用数据处理软件在通用计算机上进行。目前数字信号处理技术发展很快，它以 FFT 硬件和专用软件为基础，可以在幅值域、时域、频域对各种类型的信号进行处理。图 1－4－11 给出一般信号处理机的组成图。输入信号首先通过低通抗混淆滤波器和前置放大器，然后经过模数转换器，将模拟电量信号转换成数字信号输入给计算机，在数据处理硬件和软件支持下进行各种数据处理，最后将分机结果显示在屏幕上或通过打印机（绘图仪）打印出来。功能较全的数据处理机还应配备磁盘驱动器、输入和输入接口，及不同算法语言编制的专用程序。信号分析处理已是一门独立的学科专业，广泛用于振动分析、通讯、气象、医疗等行业。信号处理机的规格型号也很多，如 HP3562A、BK2034、7T18S、CF—500，一般数据处理机由专人操

作使用，进行桥梁动态信号分析时，可以根据条件和需要选用，这里就不一一介绍。

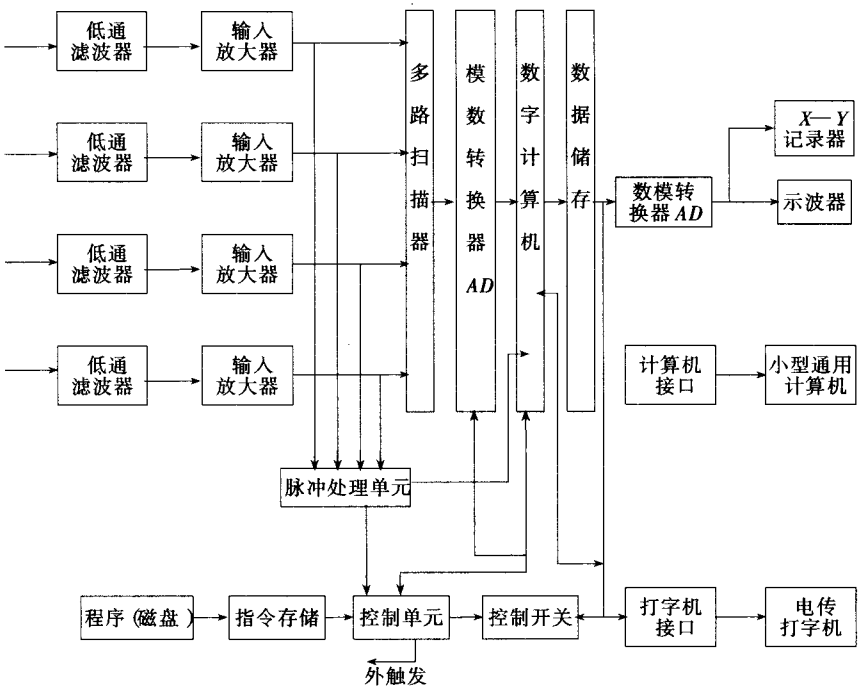


图 1－4－11　数字信号处理机的组成

（五）测试系统的选配

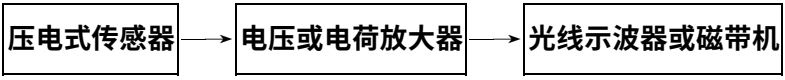
根据常用的一些测振仪器的性能，一般可构成电磁式测试系统、压电式测试系统和电阻应变式测试系统等三种测试系统。

电磁式测试系统在桥梁的动力测试中应用较为普遍，这类系统通过仪器的组合变换可测位移、速度和加速度。电磁式测试系统的特点是输出信号强、灵敏度高、稳定性好、传感器输出阻抗低、长导线的影响较小，因此抗干扰性能好。系统的组成为：

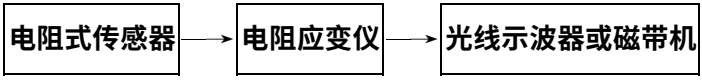
电磁式传感器 → 信号放大器 → 记录装置

压电式测试系统一般用于测量加速度。由于压电式传感器具有高输出阻抗的特性，要求与输入阻抗很高的放大器相连。因此，放大器输入阻抗的大小将对测试系统的特性产生重大影响。由于压电式传感器自振频率较高，因此可测频响较宽。但系统抗干扰性差。长导线对阻抗影响较大，易受电磁场干扰。配套的前置放大器有两种基本形式：一种是电压放大器，它的输出电压正比于输入电压；另一种是电荷放大器，它的输出电压正比于压电传感器输出电荷。这两种前置放大器各具特点，电压放大器的输出电压受输出

电缆长度的影响，低频特性也受其它输出电阻的影响，由这种放大器组配的系统适用于一般频率范围的动力测试。而电荷放大器不受传输电缆分布电容的影响，低频特性也很少受输入电阻的影响，使用频率可达到零，它适用低频或超低频长距离的动力测试。系统的组成为：



电阻应变式测试系统中传感器的种类较多，例如应变计、位移计、加速度计等，需配套使用的放大器是各类动态电阻应变仪，记录装置为常用的光线振子示波器或磁带机等。这类测试系统的低频响应好，可从零赫兹开始。动态电阻应变仪可作为各类电阻应变式传感器的放大器，但这类测试系统易受温度的影响，抗干扰性能较差，长导线对灵敏度也有影响。电阻应变式测试系统中各部分仪器具有通用性强、应用方便等特点，在桥梁动力试验中的应用是很普遍的。系统的组成为：



在选配上述三类测试系统时，要注意选择测振仪器的技术指标，使传感器、放大器和记录仪器的灵敏度、动态范围、频率响应和幅值范围等技术指标合理配套，以保证测试结果的准确性和可靠性。

二、桥梁动载试验的激振方法

在进行桥梁动载试验时，首先要设法使桥梁产生一定的振动，然后应用测振仪器加以测试和记录，通过对记录的振动信号分析得到桥梁的动力特性和响应。可用于桥梁动载试验的激振方法很多，应根据被测桥梁的结构型式和刚度大小选择激振效果好、易于实施的方法。

（一）自振法（瞬态激振法）

自振法的特点是使桥梁产生有阻尼的自由衰减振动，记录到的振动图形是桥梁的衰减振动曲线。为使桥梁产生自由振动，一般常用突加载荷和突卸荷载两种方法。

1. 突加荷载法（冲击法）

在被测结构上急速地施加一个冲击作用力，由于施加冲击作用的时间短促，因此，施加于结构的作用实际上是一个冲击脉冲作用。由振动理论可知，冲击脉中的动能传递到结构振动系统的时间，要小于振动系统的自振周期，并且冲击脉中一般都包含了从零到无限大的所有频率的能量，它的频谱是连续谱，只有被测结构的固有频率与之相同或很

接近时，冲击脉冲的频率分量才对结构起作用，从而激起结构以其固有频率作自由振动。

对于中、小型桥梁结构，可用落锤激振器（或枕木）垂直地冲击桥梁，激起桥梁竖直方向的自由振动。如果水平方向冲击桥面缘石，则可激起横向振动。图 1－4－12 为公路界常用的落锤激振器的构造图。

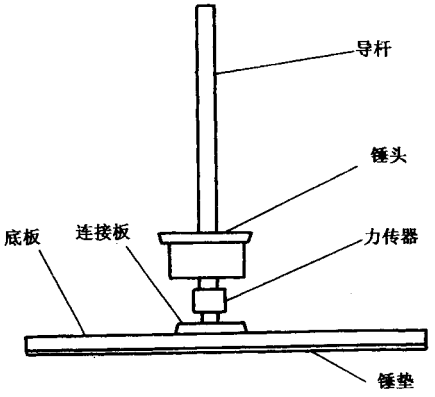


图 1－4－12　落锤激振器构造图

工程界常利用试验车辆在桥面上驶越三角垫木，利用车轮的突然下落对桥梁产生冲击作用，激起桥梁的竖向振动。但此时所测得的结构固有频率包括了试验车辆这一附加质量的影响。图 1－4－13 为试验用解放载重汽车后轮在跨度为 25m 预应力混凝土简支梁桥的跨中位置越过 15cm 高三角垫木后，激起桥跨结构的振动波形记录。

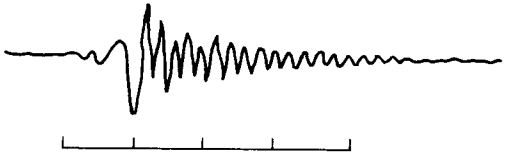


图 1－4－13　跳车引起的结构振动图形

近年来，在桥梁的动载试验中，还采用了爆炸和发射小型火箭产生脉冲荷载等办法来进行激振，但还不普及。采用突加荷载法时，应注意冲击荷载的大小及其作用位置。如果要激起结构的整体振动，则必须在桥梁的主要受力构件上施加足够的冲击力，冲击荷载的位置可按所测结构的振型来确定，如为了获得简支梁桥的第一振型，则冲击荷载作用于跨中部位，测第二振型时冲击荷载应加于跨度的四分之一处。

冲击法引起的自由振动，一般可记录到第一固有频率的振动图形。如用磁带记录仪录取结构某处之响应，通过频谱分析，则可获得多阶固有频率的参数。

2. 突然卸载法(位移激振法)

采用突然卸载法时,在结构上预先施加一个荷载作用,使结构产生一个初位移,然后突然卸去荷载,利用结构的弹性性质使其产生自由振动。图 1－4－14 示出卸载法的激振装置。

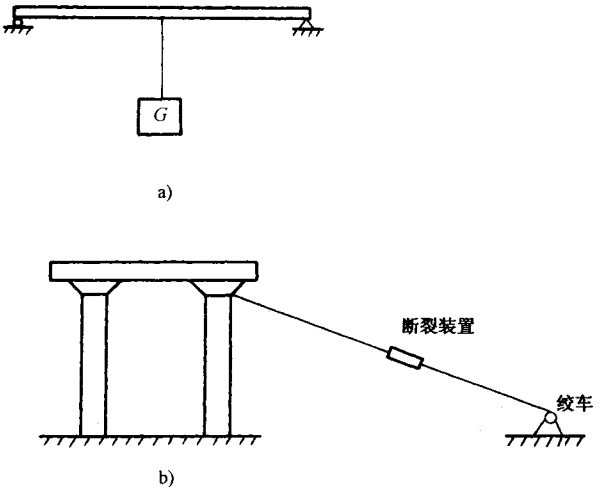


图 1－4－14　卸载法试验装置

为卸落荷载,可通过自动脱钩装置或剪绳索等方法,有时也专门设计一种断裂装置,当预施加力达到一定的数值时,在绳索中间的断裂装置便突然断离,从而激发结构的振动。突卸荷载的大小要根据所需最大振幅计算求出。

(二)共振法(强迫振动法)

激振设备有机械式激振器、电磁式激振器和电气液压式振动台。

共振法是利用激振器,对结构施加激振力,使结构产生强迫振动,改变激振力的频率而使结构产生共振现象并借助共振现象来确定结构的动力特性。

激振器在结构上安装位置和激振方向要根据试验的要求和目的而定。使用时,激振器应牢固地固定于结构上,由底座将激振器产生的交变激振力传给结构。如果将两台激振器安放于结构的适当位置上,反向激振,则可进行扭转振动试验。

连续改变激振器的频率,当激振力的频率与结构的固有频率相等时,结构出现共振现象,此时,所记录到的频率即为结构的固有频率。

对于较复杂的结构,有时需要知道基频以后的几个频率。此时可以连续改变激振力的频率,进行‘ 频率扫描 ”,使结构连续出现第一次共振,第二次共振,……等等,同时记录结构的振动图形。由此可得到结构的第一频率(基频)、第二频率、……等,在此基础上,

再在共振频率附近进行稳定的激振试验，则可准确地测定结构的固有频率与振型。图 1－4－15 为进行频率扫描时的记录曲线。

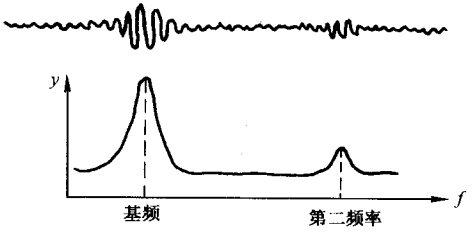


图 1－4－15　频率扫描时结构的振动图

在上述频率扫描试验时，同时记录结构的振幅变化情况，则可作出共振曲线，即频率—振幅关系曲线，从而确定结构的阻尼特性。

对于自振频率较低的大跨度柔性桥梁结构，也可利用人群在桥面上作有规律的运动，使结构发生共振现象。

在桥梁的动载试验中，常用载重车队由低到高的不同速度驶过桥梁，使结构产生不同程度的强迫振动。在若干次运行车辆荷载试验中，当某一行驶速度产生的激振力的频率的频率与结构的固有频率相接近时，结构便产生共振现象，此时结构各部位的振动响应达最大值。在车辆驶离桥跨以后，结构作自由衰减振动，这时可由记录到的波形曲线分析得出结构的动力特性。图 1－4－16 为车速 21km/h，驶过 25m 预应力混凝土简支梁桥时，跨中挠度的时历曲线。振动波形曲线中 A、B 一段，是车辆离桥后，结构作自由衰减振动的波形记录，从中可分析计算出结构的固有频率和阻尼特性。

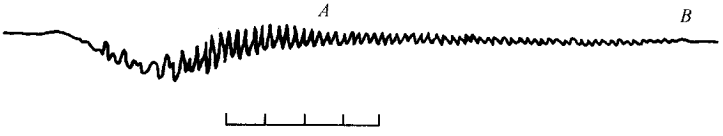


图 1－4－16　车速为 21km/h 时跨中挠度时历曲线

（三）脉动法

对于大跨度悬吊结构，如悬索桥、斜拉索桥跨结构、塔墩以及具有分离式拱肋的大跨度下承式或中承式拱桥，可利用结构由于外界各种因素所引起的微小而不规则的振动来确定结构的动力特性。这种微振动通常称为“脉动”，它是由附近的车辆、机器等振动或附近地壳的微小破裂和远处的地震传来的脉动所产生。

结构的脉动有一重要特性，就是它能明显地反映出结构的固有频率。因为结构的脉

动是因外界不规则的干扰所引起的，因此它具有各种频率成分，而结构的固有频率的谐量是脉动的主要成分，在脉动图上可直接量出。如图 1－4－17 所示结构脉动记录曲线，振幅呈现有规律的增减现象，凡振幅大波形光滑之处的频率都相同，而且多次重复出现。此频率即为结构的基频。如果在结构不同部位同时进行检测，记录在同一记录纸上，读出同一瞬时各测点的振幅值，并注意它们之间的相位关系，则可分析得到某一固有频率的振型。



图 1－4－17　结构脉动曲线

在桥梁结构的正常运营条件下，经常地作用于结构上的动力荷载是各类车辆荷载，在进行桥梁的动载试验中，首先应考虑采用车辆荷载作为试验荷载，以便确定桥梁在使用荷载作有下动力特性及响应。对需要考虑风动荷载或地震荷载的桥梁，应结合桥梁的结构型式作进一步的研究。

三、桥梁动载试验数据分析

桥梁结构的动力特性（例如结构的固有频率、阻尼系数和振型等），它们只与结构本身的固有性质有关（如结构的组成形式、刚度、质量分布和材料的性质等），而与荷载等其它条件无关。结构的动力特性是结构振动系统的基本特性，是进行结构动力分析所必须的参数。

对于比较简单的结构，一般只需结构的一阶频率，对于较复杂的结构动力分析，还应考虑第二、第三甚至更高阶的固有频率及相应的振型。至于系统的阻尼特性只能通过试验的方法确定。

桥梁在实际的动荷载作用下，结构各控制部位的动力响应，如振幅、频率、速度和加速度以及反映结构整体动力作用的冲击系数等，除了可用来分析结构在动荷载作用下的受力状态外，还可验证或修改理论计算值，并作为结构设计的依据。

（一）结构固有频率的测定

按照前面叙述的激振方法，使桥梁产生自由振动，通过测试系统实测记录结构的衰减振动波形，如图 1－4－18 所示。在记录的振动波形曲线上，可根据时标符号直接计算出结构的固有频率 f_0：

$$f_0 = \frac{Ln}{t_1 S} \tag{1-4-26}$$

式中　L——两个时标符号间的距离，mm；

n——波数；

S——n 个波长的距离，mm；

t_1——时标的间隔（常用 1s、0.1s、0.01s 三种标定值）。

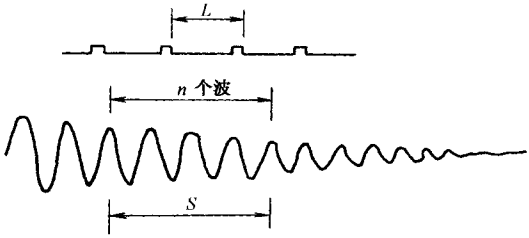


图 1－4－18　由衰减振动曲线求固有频率

在计算频率时，为消除冲击荷载的影响，开始的一、二个波形应舍弃，从第三个波形开始计算分析。

应的频当使用激振器时，结构产生连续的周期性强迫振动，在激振器振动频率与结构的固有频率一致时，结构出现共振现象，振幅达到最大值，共振波峰处的频率即为结构的固有频率，如图 1－4－19 所示。

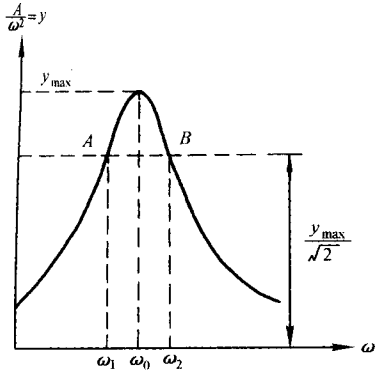


图 1－4－19　共振曲线

采用偏心式激振器时，由于激振力的大小与激振器转速的平方成正比，激振器转数不同，激振力大小不一样。为便于比较，应将振幅折算成单位激振力作用下的振幅，即振幅除以相应的激振力，或者将振幅换算为在相同激振力作用下的振幅，即 A/ω^2，其中 A 为振幅，ω 为激振器的频率。以 A/ω^2 为纵坐标，ω 为横坐标出共振曲线，如图 1－4－19，曲线之峰值所对率即为结构的固有频率。

(二)结构阻尼的测定

桥梁结构的阻尼特性,一般用对数衰减率 δ 或阻尼比 D 来表示。实测的由振动衰减曲线如图 1－4－20,由振动理论知,对数衰减率为

$$\delta = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}} \tag{1-4-27}$$

式中　A_i,A_{i+1}——相邻两个波的振幅值,可直接从衰减曲线上量取。

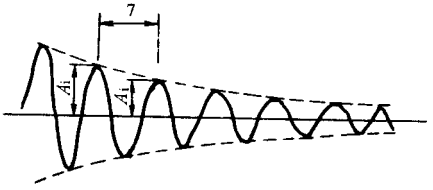


图 1－4－20　由衰减振动曲线求阻尼特性

实践中,常在衰减曲线上量取 m 个波形,求得平均的衰减率:

$$\delta_a = \frac{1}{m} \ln \frac{A_i}{A_{i+m}} \tag{1-4-28}$$

由振动理论知,对数衰减率 δ 与阻尼比 D 的关系为

$$\delta = \frac{2\pi D}{\sqrt{1 - D^2}} \tag{1-4-29}$$

对于一般材料的阻尼比都很小,因此

$$D \approx \frac{\delta}{2\pi} \tag{1-4-30}$$

图 1－4－21 为净跨 25m 预应力混凝土 T 型简支梁桥在动载试验时的自由振动和强迫振动波形曲线。

试验时,采用激振方法是用解放牌载重汽车驶越垫木后给桥梁一个冲击作用,使结构产生自由振动。图 1－4－21a)、b)表示结构作自由衰减振动的波形记录。图 1－4－21a)的波形是在跨中利用 WCD—5 型位移传感器,通过 Y6D—2 型动态电阻应变仪放大及 SC—16 型光线示波器记录的主梁挠度时历曲线。图 1－4－21b)的波形是利用电阻应变片作为传感器测得的跨中断面预应力钢丝的应力时历曲线。由于挠度和纲丝应力的测点都位于同一控制断面,所以二者的波形相位是一致的。

按照前述的方法,可求出结构的动力特性:

固有频率　$f_0 = 4.56$(次/秒)

对数衰减率　$b = 0.0876$

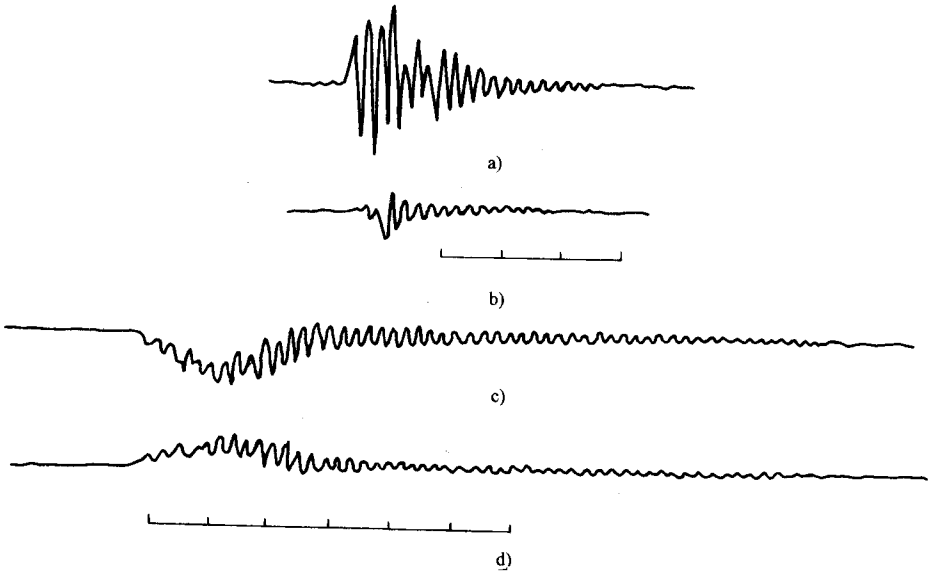


图 1－4－21　桥梁动载试验实测记录曲线

阻尼比　$D = 0.0139$

应当指出，上述分析中，包含有载重汽车这一附加质量的影响。

图 1－4－21c)、d)为载重汽车以 28km/h 的速度通过桥梁时引起结构产生强迫振动的记录曲线图 1－4－21c)挠度曲线，图 1－4－21d)为钢丝应力曲线。由图可见，当汽车驶离桥跨后，桥跨结构恢复到静力平衡位置时仍在振动，只有在这个时候结构才作衰减自由振动。

在结构作自由衰减振动这一段记录上，仍可按上述方法求出结构的动力特性，但此时没有载重汽车的附加质量的影响。

仍用上述方法求出结构的动力特性：

固有频率　$f_0 = 4.63\text{Hz}$

对数衰减率　$\delta = 0.062$

阻尼比　$D = 0.096$

在实测的共振曲线上也可推算阻尼比，如图 1－4－19，具体作法是取 $Y_{\max}/\sqrt{2}$ 值作一水平线，同曲线相交于 A、B 两点，其对应的横坐标为 ω_1 和 ω_2，即

阻尼系数　$$n = \frac{1}{2}(\omega_2 - \omega_1) \tag{1-4-31}$$

阻尼比　$$D = \frac{n}{\omega_0} = \frac{1}{2\omega_0(\omega_2 - \omega_1)} \tag{1-4-32}$$

式中　ω_0——结构的固有频率。

(三)振型的测定

结构的振型是结构相应于各阶固有频率的振动形式,一个振动系统振型的数目与其自由度数目相等。桥梁结构是一个具有连续分布质量的体系。也就是说,桥梁是一无限多自由度体系,因此,其固有频率及相应的振型也有无限多个。但是,如前所述,对于一般的桥梁结构,第一固有频率即基频,对结构的动力分析才是重要的。对于较复杂的动力分析问题,也仅需前面几个固有频率。也就是说即在一般情况下,一此低阶振型才是重要的。图 1－4－22 表示具有分布质量的各种梁的振型。

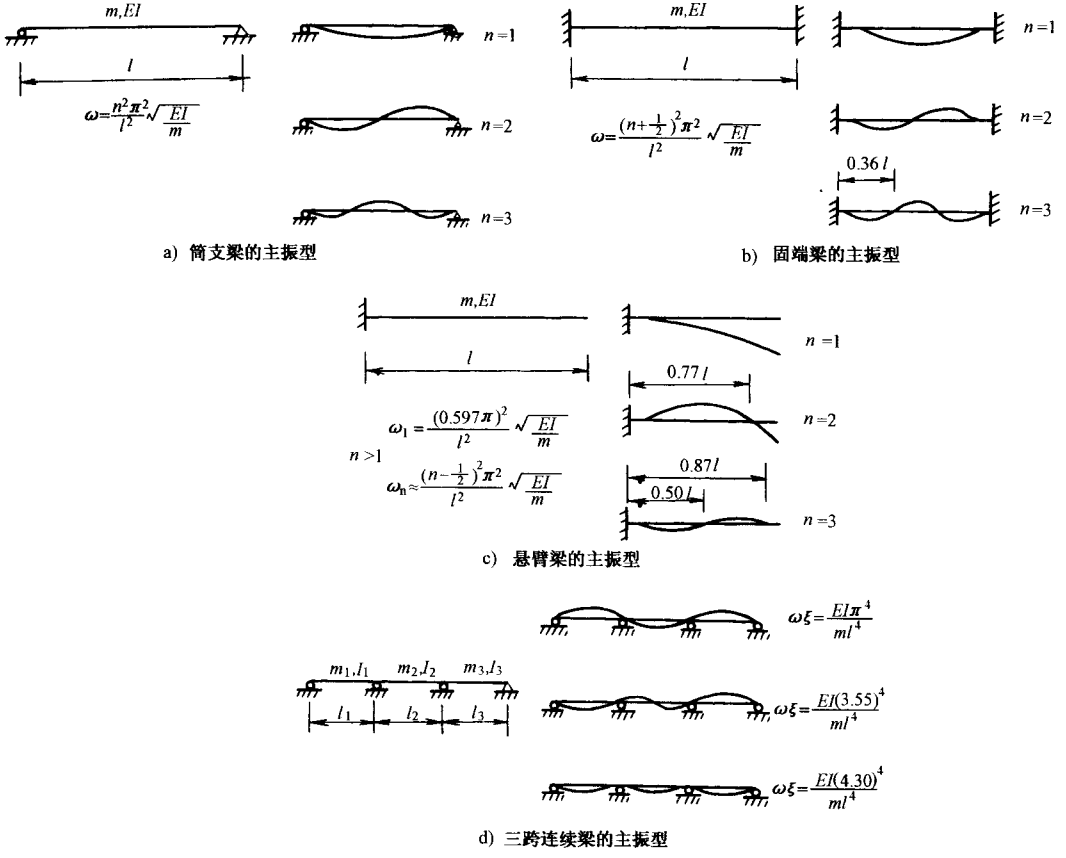


图 1－4－22　具有分布质量的各种梁的振型

采用共振法测定振型时,将若干传感器安装在结构各有关部位,当激振装置激发结构共振的,同时记录结构各部位的振幅和相位,比较各测点的振幅及相位便可绘出振型曲线。

传感器的测点布置视结构形成而定，一般要根据理论分析，估计振型的大致形状，然后在变位较大的部位布点，以便能较好地连接出振型曲线。

振型的测定一般采用两种方法。一是在结构上同时安装许多传感器，这时必须保证预先要精确标定所有传感器的灵敏度，在用多路放大器时，还要求放大器的特性相同。另一种方法只用一个传感器，测试时要不断改变它的位置，以便测出各点的振幅。这种方法需要对传感器多次拆卸和安装，并且还需要有一个作用参考点不能移动的传感器，各次测定值均应同参考点对应比较。

(四)结构动力响应的测定

在动力荷载作用下，桥梁结构某些部位的振动参数如振幅、频率、位移、应力等的测定，可根据试验的具体要求和结构的型式布置测点，采用适当的仪表进行测试。动力荷载作用于结构上产生的动挠度，一般较同样的静荷载所产生的相应静挠度要大。动挠度与静挠度的比值称为活荷载的冲击系数。由于挠度反映了桥跨结构的整体变形，是衡量结构刚度的主要指标，因此活载冲击系数综合反映了荷载对桥梁的动力作用。它与结构的型式、车辆运行速度和桥面的平整度等有关。

为了测定冲击系数，应使车辆荷载以不同的速度驶过桥梁，并逐次记录跨中挠度的时历曲线，如图 1－4－23 所示。按冲击系数的定义有：

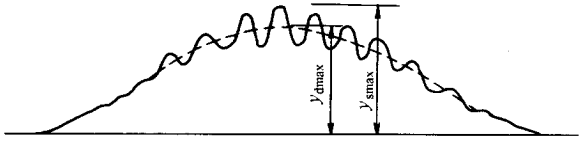


图 1－4－23　移动荷载作用下结构变形曲线

$$1+\mu=\frac{Y_{dmax}}{Y_{smax}} \tag{1-4-33}$$

式中　Y_{dmax}——最大动挠度值；

Y_{smax}——最大静挠度值。

图 1－4－24 为 25m 预应力混凝土梁桥的强迫振动记录。图 1－4－24a)为跨中挠度的时间历程曲线，图 1－4－24b)为跨中断面预应力钢丝的应力时间历程曲线。试验采用的动荷载为解放牌载重汽车，速度为 22km/h，桥面为平整度很差的泥结碎石。

由图 1－4－24 可根据光线示波器记录图上直接量取 Y_d 值和 Y_s 值，则活荷载的冲击系数$(1+\mu)$值为：

$$1+\mu=\frac{Y_{dmax}}{Y_{smax}}=\frac{241.67}{166.64}=1.45$$

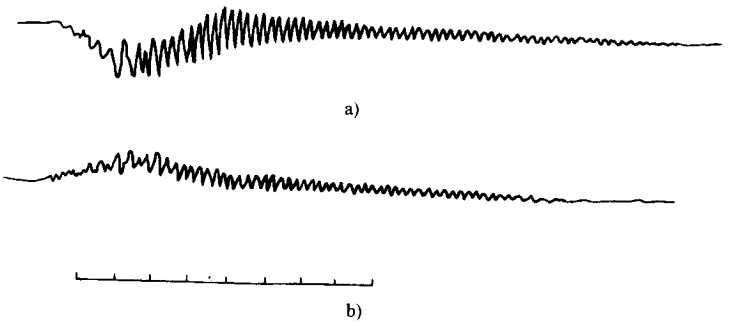


图 1－4－24　汽车过桥时结构振动图形

第六节　混凝土无损检测技术

一、混凝土无损检测技术的形成和发展

混凝土的无损检测技术，是指在不影响结构构件受力性能或其它使用功能的前提下，直接在构件上通过测定某些适当的物理量，推定混凝土的强度、均匀性、连续性、耐久性等一系列性能的检测方法。

早在 20 世纪 30 年代，人们就开始探索混凝土无损检测技术。1930 年首先出现了表面压痕法。1948 年瑞士人施密特(E.Schmid)研制成功回弹仪。1949 年加拿大的莱斯利等运用超声脉冲进行混凝土检测获得成功。60 年代罗马尼亚的费格瓦洛提出超声回弹综合法。随后，许多国家也相继开展了这方面的研究工作，制订了有关的技术标准。我国在 20 世纪 50 年代开始引进瑞士、英国、波兰等国的回弹仪和超声仪，并结合工程应用开展了许多研究工作。经过几十年的研究和工程应用，我国研制了一系列的无损检测仪器设备，结合工程实践进行了大量的应用研究，逐步形成了《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》、《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》、《后装拔出法检测混凝土强度技术规程》、《超声法检测混凝土缺陷技术规程》等技术规程，并由此解决了工程实践中的问题，产生了巨大的社会经济效益。

无损检测技术与常规的混凝土结构破坏试验相比，具有如下一些特点。

(1)不破坏被检测构件，不影响其使用性能，且简便快速；

(2)可以在构件上直接进行表层或内部的全面检测，对新建工程和既有结构物都适用；

(3)能获得破坏试验不能获得的信息,如能检测混凝土内部空洞、疏松、开裂、不均匀性、表层烧伤、冻害及化学腐蚀等;

(4)可在同一构件上进行连续测试和重复测试,使检测结果有良好的可比性;

(5)测试快速方便,费用低廉;

(6)由于是间接检测,检测结果要受到许多因素的影响,检测精度要差一些。

目前,混凝土无损检测技术主要用于既有构件的强度推定、施工质量检验、结构内部缺陷检测等方面。随着对混凝土制作全过程质量控制要求的不断提高,对既有结构物维修养护的日益重视,无损检测技术在工程建设中会发挥越来越重要的作用。

二、常用无损检测方法的分类和特点

由于混凝土无损检测技术不仅能推定混凝土的强度,而且能够反映混凝土的均匀性、连续性等各项质量指标,因此在新建工程质量评价、已建工程的安全性评价等方面具有无可替代的作用,越来越受到人们的重视。为了便于了解全貌,按检测目的、基本原理分类如下。

(一)混凝土强度的无损检测方法

在工程实践中,需要运用无损检测方法推定混凝土的实际强度,主要有如下几种情况:①在施工过程中,由于管理、工艺或意外事故等原因影响了混凝土质量,或预留试块的取样、制作、养护、抗压试验等不符合有关技术规程或标准的规定,以致预留试件的强度不能代表结构混凝土的实际强度时,可以采用无损检测方法推定混凝土强度,作为混凝土合格性评定及验收依据。②当需要了解混凝土在施工期间的强度增长情况,以便进行拆模、吊装、预应力筋张拉或放张等后续工序时,可运用无损检测方法连续监测结构混凝土强度的发展,以便及时调整施工进程。同时,无损检测方法也可作为施工过程中质量控制的重要手段。③对于既有桥梁结构,在使用过程中,有些桥梁已不能满足当前通行荷载的要求,有些桥梁由于各种自然原因而产生不同程度的损伤与破坏,有些桥梁由于设计或施工不当而产生各种缺陷。对于这些桥梁的维修、加固、改建,可通过无损检测方法推定混凝土强度,以便提供加固、改建设计时的基本强度参数和其它设计依据。

混凝土强度的无损检测方法根据原理可分为三种。

1. 半破损法

半破损法是以不影响构件的承载能力为前提,在构件上直接进行局部破坏性试验,或直接钻取芯样进行破坏性试验。属于这类方法的有钻芯法、拔出法、射击法等。这类方法的特点是以局部破坏性试验获得混凝土强度,因而较为直观可靠。其缺点是造成结

构物的局部破坏,需进行修补,因而不宜用于大面积的全面检测。

钻芯法是利用专用钻机,从结构混凝土中钻取芯样以检测混凝土强度或观察混凝土内部质量的方法。钻芯法检测混凝土强度具有直观准确的优点,但其缺点是对构件的损伤较大,检测成本较高。因此,一般宜将钻芯法与其它非破损方法结合使用。

拔出法是使用拔出仪器拉拔埋在混凝土表层内的锚固件,将混凝土拔出一锥形体,根据混凝土抗拔力推算其抗压强度的方法。该法分为预埋法和后装法两种,前者是浇筑混凝土时预先将锚杆埋入,后者是在硬化后的混凝土上钻孔,装入(粘结或胀嵌)锚杆。

射击法也称穿透探针法或贯入阻力法,是采用一种称为温泽探针的射击装置,将硬质合金钉打入混凝土中,根据钉的外露长度作为混凝土贯入阻力的度量并以此推算混凝土强度。钉的外露长度愈多,表明其混凝土强度愈高。这种方法适宜于混凝土早期强度发展情况的测定,也适用于同一结构不同部位混凝土强度的相对比较。该法的优点是测量迅速简便,由于有一定的射入深度(20 ~ 70mm),受混凝土表面状况及碳化层影响较小,但受混凝土粗骨料的影响十分明显。

2. 非破损法

非破损法以混凝土强度与某些物理量之间的相关性为基础,检测时在不影响混凝土任何性能的前提下,测试这些物理量,然后根据相关关系推算被测混凝土的强度。属于这类方法的有回弹法、超声脉冲法、射线吸收与散射法、成熟度法等等。这类方法的特点是测试方便、费用低廉,但其测试结果的可靠性主要取决于混凝土的强度与所测试物理量之间的相关性。

回弹法是采用回弹仪进行混凝土强度测定,属于表面硬度法的一种。其原理是回弹仪中运动的重锤以一定冲击动能撞击顶在混凝土表面的冲击杆后,测出重锤被反弹回来的距离,以回弹值作为与强度相关的指标,来推定混凝土强度的一种方法。

超声波法检测混凝土强度的基本依据是超声波传播速度与混凝土弹性性质的密切关系。在实际检测中,超声声速又通过混凝土弹性模量与其力学强度的内在联系,与混凝土抗压强度建立相关关系并籍以推定混凝土的强度。

成熟度法主要以‘度时积”$M(t)=\sum(T_s-T_0)\Delta t$ 作为推定强度的依据(式中 $M(t)$ 为成熟度,T_0 为基准温度,T_s 为时间 Δt 区间内混凝土的平均温度)。主要用于现场测量控制混凝土早期强度发展状况,一般多作为施工质量控制手段。

射线法主要根据 γ 射线在混凝土中的穿透衰减或散射强度推算混凝土的密实度,并据此推定混凝土的强度。这种方法由于涉及射线防护问题,目前在国内外应用较少。

3. 综合法

所谓综合法就是采用两种或两种以上的无损检测方法，获取多种物理参量，并建立强度与多项物理参量的综合相关关系，以便从不同角度综合评价混凝土的强度。由于综合法采用多项物理参数，能较全面地反映构成混凝土强度的各种因素，并且还能抵消部分影响强度与物理量相关关系的因素，因而它比单一物理量的无损检测方法具有更高的准确性和可靠性。目前已被采用的综合法有超声回弹综合法、超声钻芯综合法、超声衰减综合法等等，其中超声回弹综合法已在国内外获得广泛应用。

(二)混凝土缺陷无损检测方法

所谓混凝土的缺陷，是指那些在宏观材质不连续、性能参数有明显变异，而且对结构的承载能力和使用性能产生影响的区域。即使整个结构的混凝土的普遍强度已达到设计要求，这些缺陷的存在也会使结构整体承载力严重下降，或影响结构的耐久性。因此，必须探明缺陷的部位、大小和性质，以便采取切实的处理措施，排除工程隐患。混凝土缺陷的成因十分复杂，检测要求也各不相同。混凝土缺陷现象大致有：内部空洞、蜂窝麻面、疏松、断层(桩)、结合面不密实、裂缝、碳化、冻融、化学腐蚀等。

混凝土缺陷的无损检测方法主要有超声脉冲法、脉冲回波法、雷达扫描法、红外热谱法、声发射法等等。

超声脉冲法检测内部缺陷分为穿透法和反射法。穿透法是根据超声脉冲穿过混凝土时，在缺陷区的声时、波幅、波形、接收信号的频率等参数所发生的变化来判断缺陷的，因此它只能在结构物的两个相对面上或在同一面上进行测试。目前超声脉冲穿透法已较为成熟，并已普遍用于工程实践，许多国家都已编制了相应的技术规程。反射法则根据超声脉冲在缺陷表面产生反射波的现象进行缺陷判断。由于它不必像穿透法那样在两个测试面上进行，因此对某些只能在一个测试面上检测的结构物(如桩基础、路面等)具有特殊意义，也取得了广泛的工程应用。

脉冲回波法是采用落球、锤击等方法在被测物件中产生应力波，用传感器接收回波，然后采用时域或频域方法分析回波的反射位置，以判断混凝土中缺陷位置的方法。其特点是激励力足以产生较强的回波，因而可检测尺寸较大的构件，如深度达数十米的基桩或厚度较大的混凝土板等。

雷达扫描法是利用混凝土反射电磁波的原理，先向被检测的结构物发射电磁波，在电特性(电容率及导电率)不同的物质界面产生反射波，再根据反射波的性质，分析反射波的影像，便可检测出结构的内部缺陷。其特点是可迅速对被测结构进行扫描，适用于道路、机场等结构物的大面积快速扫测。

红外热谱法是测量或记录混凝土热发射的方法。当混凝土中存在缺陷时，这些有缺

陷的部位与正常部位相比，温度上升与下降的状况是不同的，其外表面会产生温度差。所以，从红外线照相机所测得的温度分布图像中，便能推断出缺陷的位置和大小。

声发射法是利用混凝土受力时因内部微小区域破坏而发声的现象，根据声发射信号分析混凝土损伤程度的一种方法，这种方法常用于混凝土受力破坏过程的监视，用以确定混凝土的受力历史和损伤程度。

（三）混凝土其它性能的无损检测方法

除了强度和缺陷检测以外，混凝土还有许多其它性能可用无损检测方法予以测定。其它性能主要是指与结构物使用功能有关的各种性能。主要有碳化深度、保护层厚度、受冻层深度、含水率、钢筋位置与钢筋锈蚀状况、水泥含量等。现代工程结构物所处的环境越来越复杂，对其它性能的要求越来越高，人们也越来越清楚地认识到其它性能与强度相关性的局限性很大，强度高未必其它性能就好，因此，其它性能的无损检测技术正引起重视。常用的检测方法有共振法、敲击法、磁测法、电测法、微波吸收法、中子散射法、中子活化法、渗透法等。

三、无损检测实例

（一）超声－回弹综合法检测混凝土强度

1. 工程概况

某人行天桥的梯道跨度为 13.0 + 13.0 + 8.0m，桥宽 3.0m，设计荷载为 3.5kN/m^2，采用 25 号混凝土。该桥投入使用几年后，有关部门发现梯道梁底出现了宽度 0.2 ~ 3.0mm 的裂缝。为探明裂缝成因，检验混凝土质量，根据《超声回弹综合法、检测混凝土强度技术规程》，采用了超声－回弹综合法测试梯道梁体混凝土强度，以便采取必要的处理措施，现简介如下。

2. 检测过程

本次检测在梯道每跨梁体侧面均匀布置 10 个超声－回弹测区，每个测区尺寸为 200mm × 200mm。每一测区的两个相对测试面上均匀布置 8 个回弹测点、3 个超声测点，先进行回弹测试，后进行超声测试。测试时将测试面用砂轮片磨机清除杂物和磨平不平整处，并擦净残留粉尘，以保持清洁、平整、干燥。

3. 检测结果

计算测区回弹值时，应从该测区两个相对测试面的 16 个回弹值中，剔除 3 个最大值和 3 个最小值，然后将余下的 10 个回弹值求平均值，得到测区平均回弹值 R_m。测区超声声速值 v 是将超声波传播距离除以 3 个超声测点的平均声时值得到的。由于本次测

试回弹仪均处于水平状态，且测试面是在混凝土浇灌的侧面，因而所求得的测区平均回弹值和超声声速值均无需修正。部分测试结果见表 1－4－7，由于没有专用或地区测强曲线，因此测区混凝土强度换算值可由附表 2 查得，该梯道梁体馄凝土强度推定值即为各测区中最小的混凝土强度换算值。经过统计整理，可得该天桥梯道梁体混凝土强度推定值为 24.2MPa，基本上达到设计要求。

表 1－4－7　综合法测强原始记录表

项目 \ 测区		1	2	3	4	6	7	8	9	10
回弹值	1	33	37	38	42	52	40	36	29	36
	2	30	30	34	38	42	25	32	28	35
	3	38	32	32	28	35	35	32	29	35
	4	29	35	28	43	31	29	32	36	38
	5	36	26	40	35	38	31	33	40	40
	6	40	27	35	34	32	30	38	41	40
	7	41	36	38	33	37	32	37	29	35
	8	29	29	40	36	30	35	43	32	38
	9	32	33	29	29	29	26	49	31	40
	10	31	38	35	45	40	37	32	36	29
	11	36	37	31	30	35	36	38	40	35
	12	40	43	38	37	38	29	34	43	31
	13	43	49	32	32	40	33	32	37	38
	14	36	32	35	33	29	38	37	30	30
	15	37	38	31	36	35	40	30	29	32
	16	34	34	38	31	32	28	29	36	35
	R_m	35.3	34.4	34.8	34.5	35.2	32.7	34.3	33.6	35.7
超声声时值（μs）	1	224.4	228.1	237.2	221.3	227.4	224.1	228.5	231.3	233.1
	2	224.8	231.5	234.6	240.6	236.2	227.3	233.3	223.5	227.4
	3	225.9	227.3	232.1	243.2	232.2	233.1	232.4	225.3	231.6
	平均值	225.0	229.0	234.6	235.0	231.9	228.2	231.4	226.7	230.7
测距（mm）		1000								
声速（km/s）		4.44	4.37	4.26	4.26	4.31	4.38	4.32	4.41	4.33
换算强度（MPs）		28.0	26.1	25.5	25.1	26.5	24.2	25.5	25.6	27.3

(二)钢管混凝土拱肋密实性检测

1. 工程概况

某钢管混凝土系杆拱桥,计算跨径为 64.0m,矢跨比为 1/5,矢高为 12.8m。钢管拱肋截面呈圆端形,高 1.60m,宽 1.20m,拱肋内灌注 C50 微膨胀混凝土。在灌注拱肋混凝土时,由于钢管内加劲肋、焊缝、灌注工艺等原因的影响,使钢管与内填混凝土出现脱粘、空隙等缺陷,导致拱肋实际受力与原设计意图不相符。为确保施工质量,探明混凝土与钢管之间的间隙所处位置及其严重程度,针对该桥钢管混凝土拱肋的实际情况,进行了超声波检测,简介如下。

2. 测试原理

钢管混凝土超声检测不同于普通混凝土试件或钢筋混凝土构件,由于钢板的存在,使超声波在钢管混凝土中的传播途径比较复杂。当钢管与混凝土之间无空隙存在时,其传播路径是:发射⇒直线穿过钢管壁⇒直线穿过混凝土⇒直线穿过钢管壁⇒接收。由于钢管壁厚度与管径相比很小,可略去管壁厚度不计。这样,当钢管与混凝土之间无空隙存在时,超声波通过给定距离的时间,可以通过波的现场实测速度来预测。当混凝土与钢管壁之间存在间隙时,超声波不能直接穿过间隙,而必须绕过间隙传播,这样,便导致传播时间的增长、波幅衰减幅度的增大、波的相位发生变化。比较无间隙和有间隙两种情况下,超声波通过给定距离的时间差别、相位变化及衰减幅度,便可推断出间隙的存在与否、所处位置及其大小程度。上述判别方法的前提条件是:超声波通过混凝土传播的声时值必须小于直接通过钢管壁绕射的声时值,否则,超声波首波将不穿过混凝土而直接沿钢管壁到达接收探头,就无法判断其内部缺陷。图 1-4-25 是钢管混凝土无缺陷典型超声波形,波形无畸变,脉冲包络线是圆弧状,首波频率比沿钢管壁传过来的超声脉冲低;图 1-4-26 是钢管中混凝土与钢管壁脱离或有空洞时典型超声脉冲波型,由混凝土传过来的脉冲波很难测读首波,或虽能测读,但波形畸变大,首波频率极小。

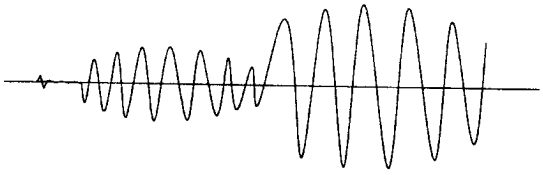


图 1-4-25　无缺陷钢管混凝土正常波形

3. 测试方法

(1)全桥拱肋超声测区布置

考虑到该桥拱肋的实际情况,超声检测测区具体布置为:两根吊杆之间和每根吊杆

与拱肋相交的端部各设 1 个测区，拱脚处适当加密增设 2 个测区。这样，每片拱肋共有 25 个测区，全桥共布置 50 个测区。测区具体布置见图 1－4－27。

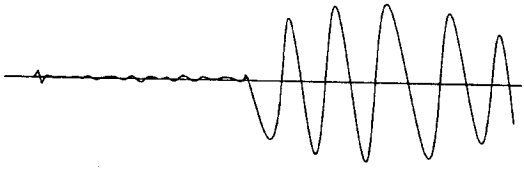


图 1－4－26　有缺陷钢管混凝土畸变波形

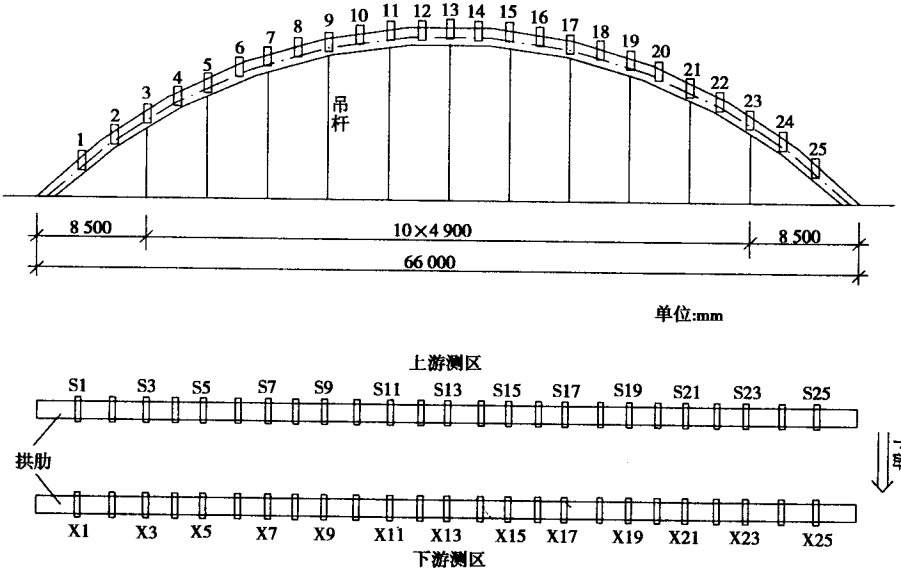


图 1－4－27　测区平面布置示意图(单位：mm)

(2)各测区内测点布置

本次测试截面的测点分别布置在钢管顶、底、两侧，一侧发射、一侧接收，如图 1－4－28 所示。每个测试截面布五对测点：1 号点位于钢管两侧面的正中，3 号点位于钢管上下正中，2 号、4 号点分别位于 3 号点两侧的 1/8 弧长处，除 1、2、3、4 点对测外，另将 2 号、4 号点对测，如图 1－4－28 所示。

(3)检测方法步骤

①现场测试钢板与混凝土的声速。对于混凝土，在现场选取了与拱肋混凝土同期浇注的标准试块 3 个，进行了 12 对点的声速测试，测得混凝土平均声速为 4630m/s；对于钢管，在现场专门布设了 12 个声速测点，测得钢的平均声速为 5350m/s。

②根据各测点路径波距及实测声速，计算各测点路径的理论声时，见表 1－4－8。

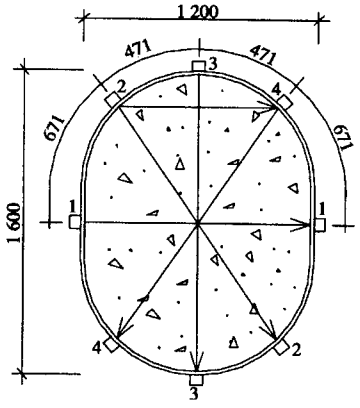


图 1－4－28　测点布置示意图(单位：mm)

表 1－4－8　各测点波距及理论声时计算值

测点路径	直线传播波距(mm)	理论声时计算值(μs)
1－1	1200.0	259.1
2－2,4－4	1509.7	326.1
3－3	1600.0	345.6
2－4	848.6	183.3

③采用对测法，逐测区、测点进行测试，通过比较超声波实测声时与理论声时的差异、波形的畸变程度与衰减幅度来判定间隙的存在与否及大小。

④综合声时、波形、相位三方面参数，评价该测区内填混凝土的密实性，在此基础上，通过对 94 个测区的测试结果综合分析，评价该桥拱肋内填混凝土的密实性。

4. 测试结果及综合评价

根据超声波检测结果，比较实测声时与计算声时、波形畸变程度、相位变化及波幅衰减幅度，便可推断出间隙的存在与否、间隙在该截面的位置及钢管是否与混凝土脱离等问题。将部分检测结果汇总如表 1－4－9 所示。

表 1－4－9　钢管混凝土拱肋密实性超声检测结果(部分测区)

测区编号	测点编号	超声波检测结果		
		声时(μs)	波形畸变分级	超声综合评判结果
X2 测区	1－1	262.0	Ⓡ	基本正常，钢管与混凝土基本密实
	2－2	322.6	Ⓡ	
	3－3	358.8	ⓒ	
	4－4	332.4	Ⓡ	
	2－4	178.0	Ⓡ	

测区编号	测点编号	超声波检测结果		
		声时(μs)	波形畸变分级	超声综合评判结果
X6测区	1－1	263.6	Ⓡ	钢管上部约1/3～1/2弧长范围内与混凝土存在间隙
	2－2	334.8	Ⓡ	
	3－3	380.4	⊗	
	4－4	378.0	⊗	
	2－4	197.2	Ⓡ	
S10测区	1－1	266.8	Ⓡ	钢管上部约1/5弧长范围内与混凝土存在间隙
	2－2	333.2	ⓒ	
	3－3	361.2	⊗	
	4－4	335.6	ⓒ	
	2－4	210.8	⊗	
S11测区	1－1	275.6	ⓒ	钢管与混凝土基本脱开，拱顶局部间隙严重
	2－2	328.4	ⓒ	
	3－3	427.6	⊗⊗	
	4－4	338.0	⊗	
	2－4	210.8	⊗	

注：Ⓡ——波形正常；ⓒ——有小畸变；⊗——畸变较大；⊗⊗——畸变严重。

5. 部分实测波形

部分测点实测波形如图1－4－29、图1－4－30所示。

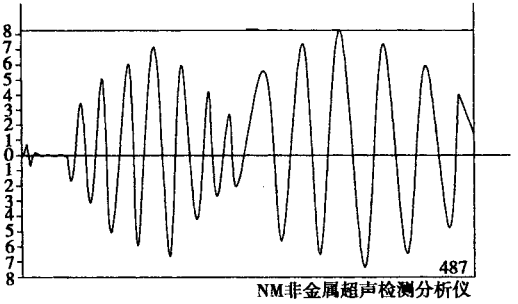


图1－4－29　X2测区4－4测点实测波形

6. 测试结果分析

根据上述测试结果，可以得出如下结论：除拱脚6m左右范围外，该桥拱肋截面上侧约1/5弧长范围内几乎普遍存在钢管与混凝土脱空的现象，其中有部分截面空隙发展到占钢管上部1/3～1/2弧长的范围；此外，在吊杆周围向跨中一侧的拱背，普遍存在间隙较大、但面积不大的空隙；由于焊缝与钢管内纵横肋的存在，空隙的形状比较复杂、多变，

缺乏规律性，且连通性较差。

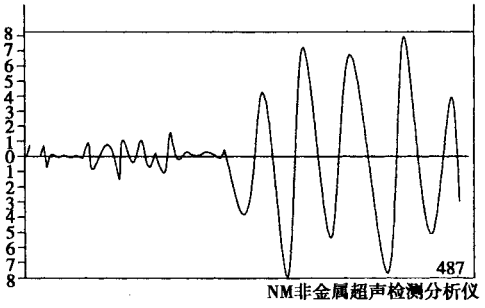


图 1－4－30　S11 测区 3－3 测点实测波形

（三）混凝土钻孔灌注桩完整性检测

1. 资料介绍

反射波法检测混凝土钻孔灌注桩的基本原理是：应力波以波速 V 在桩身传播，无论是桩底反射信号或者是阻抗变化处的波反射信号均是通过相应的两倍长度的时间而为桩头的检波器所接收，故而有

$$V = 2L/t \tag{1-4-34}$$

或

$$\Delta L = V \cdot \Delta t/2 \tag{1-4-35}$$

式中　V——应力波在桩身混凝土中传播的波速；

L——整桩长；

ΔL——缺陷位置距桩头的长度；

t、Δt——整桩中及缺陷处反射的应力波在桩身中传播时间。

为了更好地掌握反射波法测桩的规律性，进行了一组模型桩试验。模型桩共 5 根，桩长均为 5.0m。其中一根为完整桩，另 4 根在距桩头 3.5m 处人为设置了一些常见缺陷：离析、缩颈、扩颈、断桩等。模型桩结构如图 1－4－31 所示。

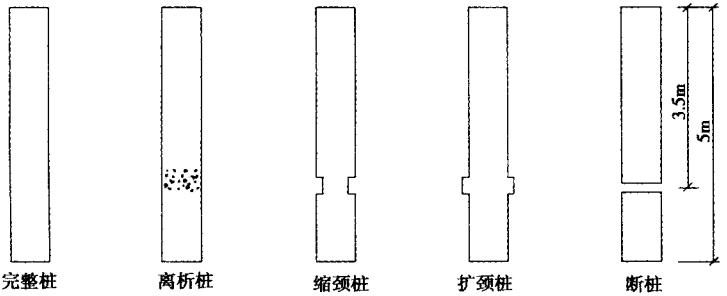


图 1－4－31　模型桩结构示意图

2. 反射波法测试结果

(1)完整桩

完整桩测试结果见图 1-4-32。已知桩长 $L=5.0\text{m}$，由图中可得桩底反射时间 $t=2.50\text{ms}$，所以

$$V=\frac{2L}{t}=\frac{2\times5.0}{2.5\times10^{-3}}=4000(\text{m/s})$$

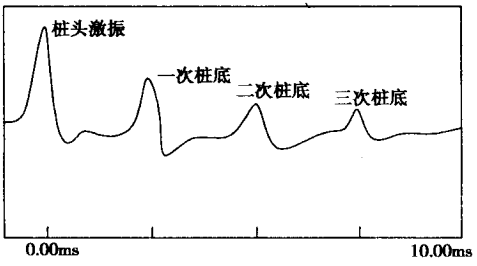


图 1-4-32　完整桩测试结果

即应力波在整桩中平均波速为 4000m/s。桩头激振信号与桩底反射间无异常信号。

(2)离析松散桩

实测图如图 1-4-33 所示。由图知整桩反射时间 $t=2.50\text{ms}$，缺陷反射时间 $\Delta t=1.70\text{ms}$。计算整桩波速为

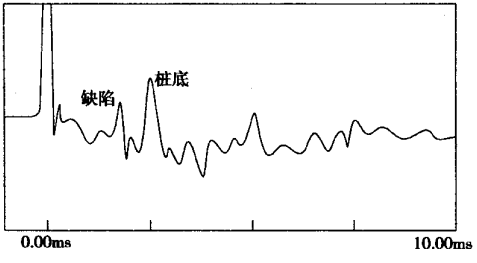


图 1-4-33　离析松散桩测试结果

$$V=\frac{2L}{t}=\frac{2\times5.0}{2.5\times10^{-3}}=4000(\text{m/s})$$

计算缺陷位置

$$\Delta L=\frac{V\cdot\Delta t}{2}=\frac{4000\times1.7\times10^{-3}}{2}=3.4\text{m}$$

计算结果与预设的缺陷位置基本吻合，且缺陷反射信号与激振信号同相。

(3)缩颈桩

实测图如图 1－4－34 所示。由图知整桩桩底反射时间 $t = 2.50\text{ms}$，缺陷反射时间 $\Delta t = 1.60\text{ms}$。计算整桩波速为

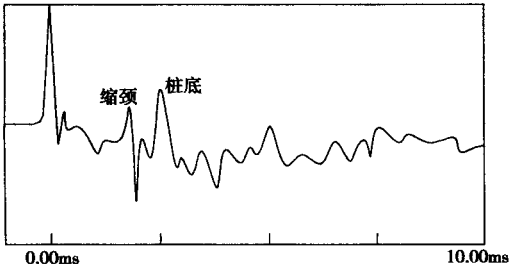


图 1－4－34　缩颈桩测试结果

$$V = \frac{2L}{t} = \frac{2 \times 5.0}{2.5 \times 10^{-3}} = 4000(\text{m/s})$$

计算缺陷位置

$$\Delta L = 1.60 \times 10^{-3} \times 4000/2 = 3.2\text{m}$$

从图中标明位置处可见缩颈桩缺陷反射信号与桩底反射信号同相。

(4)扩颈桩

实测图如图 1－4－35 所示。由图知整桩桩底反射时间 $t = 2.50\text{ms}$，缺陷反射时间 $\Delta t = 1.65\text{ms}$。计算整桩波速为：

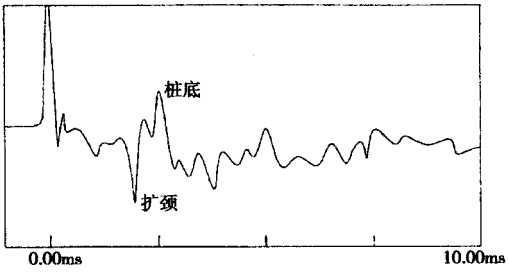


图 1－4－35　扩颈桩测试结果

$$V = \frac{2L}{t} = \frac{2 \times 5.0}{2.5 \times 10^{-3}} = 4000(\text{m/s})$$

计算缺陷位置：

$$\Delta L = 1.65 \times 10^{-3} \times 4000/2 = 3.3\text{m}$$

从图中可见扩颈桩缺陷反射信号与激振信号反向。

(5)断桩

实测波形如图 1－4－36 所示。预设的缺陷位置在距桩头 3.5m 处，图中有一个反射时间为 $\Delta t = 1.70\text{ms}$ 的反射信号，而未见 $t = 2.50\text{ms}$ 的桩底反射信号。由完整桩没得的波速为 4000m/s，计算可得桩长为

$$\Delta L = V \cdot \Delta t/2 = 4000 \times 1.70 \times 10^{-3}/2 = 3.4\text{m}$$

该桩波形与完整桩的测试波形类似，不同的是根据所测得的波形中桩底反射时间算出的桩长较已知桩长短得较多，这表明该桩为断桩。

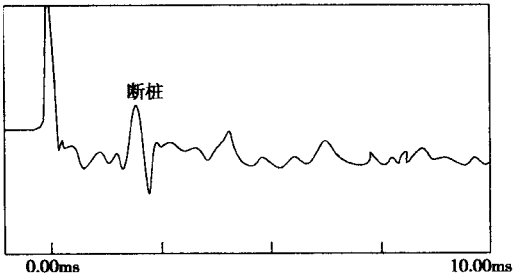


图 1－4－36　断桩测试结果

通过上述的模型桩测试结果表明，反射波法在桩基完整性方面的检测技术较为完善，技术上实用性很强，其良好效果已为许多工程实例所证明。

第五章　隧道检测技术

第一节　概　　述

一、综合分类

公路隧道的建造是百年大计，保证工程质量是业主的基本要求。检测技术作为质量管理的重要手段越来越为人们所重视。公路隧道检测技术涉及面广，分类方法很多。除了运营环境的检测方法对各类隧道都通用外，由于施工方法的不同，山岭隧道、水下沉埋隧道和软土盾构隧道在检测内容与方法上差别很大。考虑到目前我国修建的公路隧道绝大多数为山岭隧道（包括暗挖法施工的黄土隧道），本书着重介绍山岭隧道的检测技术。分类体系如图 1－5－1 所示。

二、材料检测

只有用合格的原材料才能修建出合格的公路隧道。在隧道工程的常用原材料中，衬砌材料属土建工程的通用材料，其检测方法可参阅有关文献；支护材料和防排水材料较具隧道和地下工程特色。支护材料包括锚杆、喷射混凝土和钢构件等。锚杆杆体材质、锚固方式、杆体结构和托板形式等种类繁多，特性各异，分别适用于不同的工程条件；喷射混凝土有干喷、湿喷之分，为了获取较好的力学特性和工程特性，往往在喷射混凝土混合料之外，还添加各种外加剂。所以锚喷材料的检测内容繁多，限于篇幅，本书只介绍锚

喷的施工质量，材料的品质最终由锚喷的强度等指标反映。防排水材料对隧道工程特别重要，有些甚至是隧道与地下工程专用的材料。隧道防水材料包括：注浆材料、高分子合成卷材、防水涂料、石油沥青油毡、排水管和防水混凝土等。值得指出的是，合成高分子防水卷材在我国发展很快。目前修建的公路隧道、地铁和部分铁路隧道都采用不同性能、不同规格的合成高分子卷材作防水夹层，取得了良好的效果。为了适应这种发展需要，将较详细地介绍其检测试验方法。

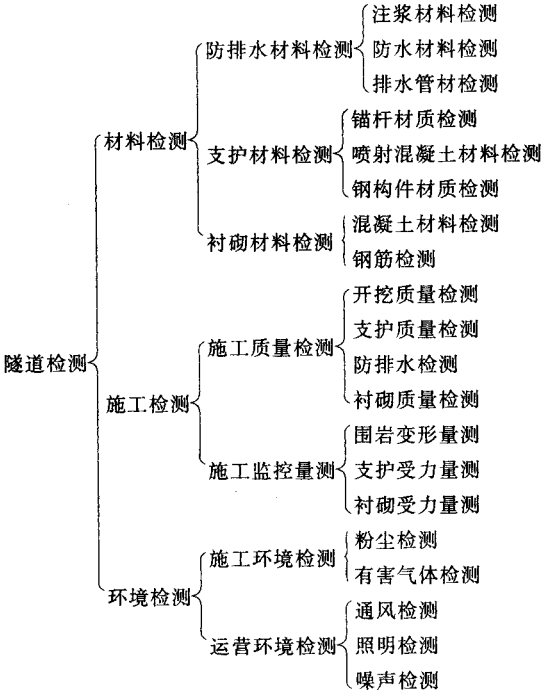


图 1－5－1　检测技术分类

三、施工检测

施工检测的内容十分丰富，可概括为两个方面，即施工质量检测和施工监控量测。

(一)施工质量检测

公路隧道工程上出现的种种质量问题绝大部分都是在施工过程中埋下了质量隐患，如渗漏水、衬砌开裂和限界受侵等，因此必须对施工过程进行质量检测。其主要内容包括：开挖、支护(包括锚喷)、防排水和衬砌混凝土质量检测。

爆破成形好坏对后续工序的质量影响极大，目前在检测爆破成形质量技术方面发展很快。发达国家已广泛使用隧道断面仪来及时检测爆破成形质量，我国在一些长大铁路

隧道施工中也已开始使用断面仪。该仪器可以迅速测取爆破后隧道断面轮廓，并将其与设计开挖断面比较，从而得知隧道的超欠挖情况。应用隧道断面仪还可监测锚喷隧道围岩的变形情况。

支护质量主要指锚杆安装质量、喷射混凝土质量和钢构件质量。对于锚杆，施工质量检测的内容有锚杆的间排距、锚杆的长度、锚杆的方向、注浆式锚杆的注满度、锚杆的抗拔力等。对于喷射混凝土，施工中应主要检测其强度、厚度和平整度。对于钢构件，则要检测构件的规格与节间连接、架间距、构件与围岩的接触情况以及与锚杆的连接。

防排水系统的施工方法目前尚在研究与发展之中，对施工质量的检测也处于探索阶段，教材中将对工程上常用的一些检测或检查方法作简单介绍。

衬砌混凝土质量检测包括衬砌的几何尺寸、衬砌混凝土强度、混凝土的完整性、混凝土裂缝等的检测。其中外观尺寸容易用直尺量测，混凝土强度及其完整性则需用无损探测技术完成，混凝土裂缝可用塞尺等简单方法检测。

（二）施工监控量测

施工监控量测是新奥法施工的一项重要内容，它既是施工安全的保障措施，又是优化结构受力、降低材料消耗的重要手段。量测的基本内容有隧道围岩变形、支护受力和衬砌受力。前面提到的隧道断面仪是目前最先进的隧道围岩变形量测仪器，利用它可迅速测定隧道周边的变形。围岩内部的位移，目前常用机械式多点位移计量测。锚杆受力可用钢筋计量测，喷射混凝土、钢构件和衬砌受力可用各种压力盒量测。将量测结果人工或自动输入计算机，计算机便可根据反算力学模型，推求围岩中的应力场和位移场，据此推断围岩的稳定状态，调整支护或衬砌设计参数。如此反复，使支护与衬砌设计参数与围岩条件相协调，使施工方案不断优化。

四、环境检测

环境检测可分为施工环境检测和运营环境检测。施工环境检测的主要任务是检测施工过程中隧道内的粉尘和有害气体。这里的有害气体主要指 CH_4，我国西南地区修建隧道时经常遇到。若 CH_4 达到适宜浓度，施工中防治措施不当，则可能引发 CH_4 爆炸，造成人身伤亡或经济损失。

运营环境检测包括通风、照明和噪声等。其中通风检测相对比较复杂，检测内容较多，主要有 CO 浓度、烟尘浓度和风速等，受来往车辆的影响不易获得准确的数据。照明检测技术较为先进，现有专供照明检测的车载照度仪、亮度仪，只要随车从隧道通过一趟，隧道内各区段的照明情况便可一清二楚。噪声的检测也比较简单，用噪声计可直接

数显隧道内噪声。

在下文我们着重介绍一下隧道施工监控量测。

第二节　隧道监控量测的必要性及量测任务

隧道施工监控量测是保证工程质量的重要措施，也是判断围岩和衬砌是否稳定，保证施工安全，指导施工顺序，进行施工管理，提供设计信息的主要手段。

一、隧道监控量测的必要性

隧道与地下工程是一种特殊的工程结构体系。从岩体力学的角度看，它是处于与围岩相互作用的体系之中的结构物；从地质力学的角度看，它是处于千变万化的地质体之中的工程单元体。在这样的岩体和地质体中，隧道一经开挖，其中所包容的原状力学体系便被打破，四周原有的受力状态已经改变。随着开挖断面增大或者深度的增长，这种改变也将不断地延续。在支护敷设后的一段时间内，虽然受力状态已发生改变，但是支护与围岩体之间的力的作用还没有达到最终平衡。随着时间的推移，根据得到的信息对支护再作若干变动，这种受力状态的改变才逐渐停止，支护与围岩体间力的作用体系逐渐达到最终平衡。

从隧道与地下工程的这种复杂的力学发展过程，我们可以认识到以下两点：

第一，隧道与地下工程如果作为一种工程结构物看待，它的受力特点和地面工程有很大的差别。由于隧道与地下工程是处于千变万化的岩体之中，其所受外力是不明确的。迄今为止，国内外学术界和工程界对外荷体系的分布和量值还处于研究阶段，这就决定了隧道与地下工程设计是建立在若干假定条件下进行的。

第二，隧道与地下工程的成形过程，自始至终都存在着受力状态变化这一特性。换言之，隧道从开挖起，一直到受力平衡和体系稳定，或者到结构受损，围岩内部结构一直是在变动，支护和衬砌的内力和外形也在变动之中。

从上面两点可以看出，试验性研究，特别是隧道现场监控量测，是从个体到群体解决隧道与地下工程力学、设计、施工问题的一种重要手段和主要途径。可以断言，如果没有这种手段和途径，要最终解决复杂围岩中的隧道与地下工程问题是不可想象的。正因为如此，国内外的许多隧道与地下工程都应用了并正在不断应用着现场监控量测方法来对付工程中出现的复杂受力问题。

二、施工监控量测的任务

1. 确保安全。为此需要掌握围岩和支护状态,进行动态管理,根据量测信息,科学施工。

2. 指导施工。量测数据经过分析处理,预测和确认隧道围岩最终稳定时间,指导施工顺序和施作二次衬砌的时间。

3. 修正设计。根据隧道开挖后所获得的量测信息,进行综合分析,检验和修正施工预设计。

4. 积累资料。已有工程的量测结果可以间接地应用到其它类似工程中,作为设计和施工的参考资料。

三、量测要求

1. 能快速埋设测点。隧道在开挖过程中,开挖工作面四周两倍洞径范围内受开挖影响最大。测点一般是开挖后埋设的,为尽早获得围岩开挖初始阶段的变形动态,测点应紧靠工作面快速埋设,尽早量测。一般设置在开挖工作面 2m 范围内,开挖后 24h 内、下次爆破前测取初读数。

2. 每一次量测数据所需时间应尽可能短。

3. 测试元件应具有良好的防震、防冲击波能力。

4. 测试数据应准确可靠。

5. 测试数据直观,不必复杂计算即可直接应用。

6. 测试元件在埋设后能长期有效工作。

7. 测试元件应有足够的精度。

四、量测项目与方法

施工监控量测的项目应根据隧道工程地质条件、围岩类别、围岩应力分布情况、隧道跨度、埋深、工程性质、开挖方法、支护类型等因素确定。表 1－5－1 中的 1～4 项为必测项目;5～11 项为选测项目。

表 1－5－1　隧道现场监控量测项目及量测方法

序号	项目名称	方法及工具	布　置	量测间隔时间			
				1～15d	16d～1 个月	1～3 个月	大于 3 个月
1	地质和支护状况观察	岩性、结构面产状及支护裂缝观察或描述,地质罗盘等	开挖后及初期支护后进行	每次爆破后进行			

序号	项目名称	方法及工具	布　置	量测间隔时间			
				1 ~ 15d	16d ~ 1 个月	1 ~ 3 个月	大于 3 个月
2	周边位移	各种类型收敛计	每 10 ~ 50m 一个断面，每断面 2 ~ 3 对测点	1 ~ 2 次/天	1 次/2 天	1 ~ 2 次/周	1 ~ 3 次/月
3	拱顶下沉	水平仪、水准尺、钢尺或测杆	每 10 ~ 50m 一个断面	1 ~ 2 次/天	1 次/2 天	1 ~ 2 次/周	1 ~ 3 次/月
4	锚杆或锚索内力及抗拔力	各类电测锚杆、锚杆测力计及拉拔器	每 10m 一个断面，每个断面至少做 3 根锚杆	—	—	—	—
5	地表下沉	水平仪、水准尺	每 5 ~ 50m 一个断面，每断面至少 7 个测点；每隧道至少两个断面；中线每 5 ~ 20m 一个测点	开挖面距量测断面前后 < 2B 时，1 ~ 2 次/天；开挖面距量测断面前后 < 5B 时，1 次/2 天；开挖面距量测断面前后 > 5B 时，1 次/周			
6	围岩体内位移(洞内设点)	洞内钻孔中安设单点、多点杆式或钢丝式位移计	每 5 ~ 100m 一个断面，每断面 2 ~ 11 个测点	1 ~ 2 次/天	1 次/2 天	1 ~ 2 次/周	1 ~ 3 次朋
7	围岩体内位移(地表设点)	地面钻孔中安设各类位移计	每代表性地段一个断面，每断面 3 ~ 5 个钻孔	同地表下沉要求			
8	围岩压力及两层支护间压力	各种类型压力盒	每代表性地段一个断面，每断面宜为 15 ~ 20 个测点	1 ~ 2 次/天	1 次/2 天	1 ~ 2 次/周	1 ~ 3 次/月
9	钢支撑内力及外力	支柱压力计或其他测力计	每 10 榀钢拱支撑一对测力计	1 ~ 2 次/天	1 次/2 天	1 ~ 2 次/周	1 ~ 3 次/月
10	支护、衬砌内应力、表面应力及裂缝量测	各类混凝土内应变计、应力计、测缝计及表面应力解除法	每代表性地段一个断面，每断面宜为 11 个测点	1 ~ 2 次/天	1 次/2 天	1 ~ 2 次/周	1 ~ 3 次/月
11	围岩弹性波测试	各种声波仪及配套探头	在有代表性地段设置	—	—	—	—

注：B 为隧道开挖宽度。

五、施工监控量测计划的制定

施工监控量测计划应综合施工、地质、测试等方面的要求，由设计人员完成。量测计划应根据隧道地质地形条件、支护类型和参数、施工方法和其它有关条件制定。

施工监控量测计划一般应包括下列内容：

1. 监控量测项目、方法及监控量测断面选定，断面内测点数量和位置、量测频率，量测仪器和元件的选定及其精度和率定方法，测点埋设时间等。

2. 量测数据记录表格式，表达量测结果的格式，量测数据精度确认的方法。

3. 量测数据处理方法，并进行试算。

4. 量测数据大致范围，作为判断异常依据。

5. 从初期量测值预测最终位移值的方法，综合判断隧道最终稳定的标准。

6. 施工管理方法。

7. 异常情况对策。

8. 利用反馈信息修正设计的方法。

9. 传感器埋设设计，包括埋设方法、步骤、各部分尺寸及回填浆液配比、工艺选定及与工程进度衔接等。

10. 固定测试元件的结构设计和测试元件的附件设计。一般应保证测点的空间或平面位置正确，使测到的力和变形方向明确，防震、安全可靠；包括钻孔内、钻孔口部和引出线的布线方法，测试仪器对环境的要求。

11. 量测断面布置图和文字说明。

12. 监控量测设计说明书。

六、施工监控量测计划的实施

计划的实施关键需解决下述三个问题：

1. 获得满足精度要求和可信赖的量测信息。

2. 正确进行预测和反馈。

3. 建立管理体制和相应管理基准，进行日常施工管理、量测管理等。

由于开挖工作面是不断推进的，所得到的量测信息也是不断变化的，使得量测信息的管理是动态的，大量的信息需不断地计算和判断。因此，为了及时利用量测信息，应使用微型计算机和绘图仪进行数据处理和施工管理。

七、监控量测管理

1. 隧道现场监控量测应成立专门量测小组，由施工单位或委托其它单位承担量测任务。

2. 量测小组负责测点埋设、日常量测、数据处理和仪器保养维修工作，并及时将量测信息反馈于施工和设计。

3. 现场监控量测应按量测计划认真组织实施，并与其它施工环节紧密配合。

4. 各预埋测点应牢固可靠，易于识别并妥善保护，不得任意撤换和遭到破坏。

第三节　围岩周边位移量测

隧道内壁面两点连线方向的位移之和称为“收敛”，此项量测称“收敛量测”。收敛值为两次量测的距离之差。

收敛量测是隧道施工监控量测的重要项目，收敛值是最基本的量测数据，必须量测准确，计算无误。

一、量测设计

收敛量测的设计包括仪器选择、断面间距、量测频率、测线布置、量测点埋设时间等内容。设计的依据为地质条件、地压分布、隧道埋深、开挖方法、施工进度，断面收敛速度等因素。

(一)量测断面间距

应保证沿隧道轴线每类围岩至少有一个量测断面。一般情况下，洞口段和埋深小于两倍隧道宽度地段，间隔 5 ~ 10m 一个量测断面；其余地段可根据地质条件，每隔 5 ~ 100m 设一个断面。

对于地质条件好且收敛值稳定的隧道，可加大量测断面的间距；对于围岩较差，收敛值长期不稳定，开挖进度快或采用分部开挖法施工的隧道，可缩小量测断面的间距。

(二)量测频率

量测频率按表 1 - 5 - 2 取值。由于从不同测线得到的位移速度不同，量测频率应按速度高的取值；若根据位移速度和距工作面距离两项指标分别选取的频率不同，则从中取高值。

表 1－5－2　收敛和拱顶位移量测频率

位移速度	距工作面距离	频　率
＞10	(0～1)D	1～2次/日
5～10	(1～2)D	1次/日
1～5	(2～5)D	1次/2日
＜1	＞5D	1次/周

注：①位移速度的单位为毫米/日；

②D为隧道宽度。

当隧道接近超前导坑时，或地质条件变差，或量测值出现异常情况，量测频率应加大，必要时1h或更短时间量测一次，反之频率可减少；后期量测时，间隔时间可加大到几个月或半年量测一次。

(三)量测点埋设时间

初期监控测点埋设时间是一个重要因素。一般情况下，测点距开挖工作面应小于1～2m。测点埋设后，第一次量测时间应在上次爆破后24h内，并在下次爆破前进行。第一次量测的初读数是关键性数据，应反复测读；当连续量测3次的误差$R\leqslant 0.18$mm时，才能继续爆破掘进(R根据收敛计而异)。

(四)收敛测线布置

测线布置和数量与地质条件、开挖方法、位移速度等因素有关，主要布置形式见图1－5－2。

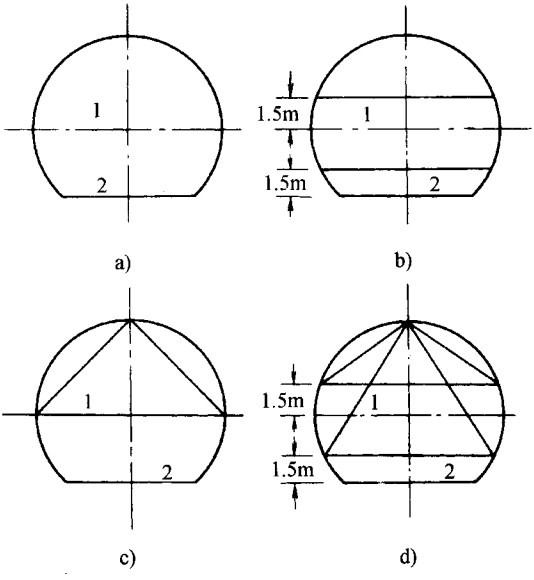


图 1－5－2　隧道周边位移测线布置

全断面开挖时，埋深小于两倍洞径地段或浅埋隧道，采用 3～6 条测线；一般地段应采用 2～3 条测线，但拱脚处必须有一条水平测线。若位移值较大或偏压显著，可同时进行绝对位移量测。

二、量测仪器

目前我国公路隧道施工中常用的收敛计为机械式的收敛计，其性能与特点见表 1－5－3。

表 1－5－3　现场位移监控常用收敛计性能与特点

编号	名　　称	主要技术性能	主要特点
1	QJ－85 型坑道周边收敛计	球铰弹簧式，最小读数 0.01m，量测精度 ± 0.06mm	可靠、方便、精度高
2	GY－85 型收敛计	柱销弹簧式，最小读数 0.01m，量测精度 ± 0.05mm	可靠、方便、精度高
3	SWJ 型隧道周边收敛计	重锤式，最小读数 0.01mm，量测精度 ±（0.30～0.47）mm	可靠、简易、经济

三、测试原理

不同的收敛计有不同的使用方法，下面以球铰式收敛计（图 1－5－3）为例，说明收敛测试原理。仪器安装后，利用弹簧秤、钢丝绳、滑管给钢尺施加固定的水平张力（弹簧秤拉力 90N），同时，钢丝绳带动内滑管沿固定方向移动，内滑管上的触头压缩百分表读得初始数值 X_0；间隔时间 t 后，用同样的方法可读得 t 时刻的值 X_t，则 t 时刻的周边收敛值 U_t 即为百分表的两次读数差。即：

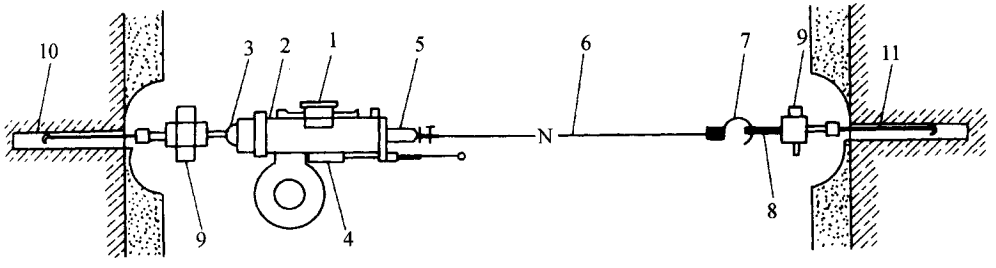


图 1－5－3　球铰式收敛计结构及安装示意图

1—百分表；2—百分表支架；3—球铰；4—弹簧秤；5—滑管；6—钢尺；7—挂钩；8—连接环；9—连接销；10—砂浆；11—预埋件

$$U_t = L_0 - L_t + X_{t1} - X_{t0}$$

式中　L_0——初读数时所用尺孔刻度值；

L_t——t 时刻时所用尺孔刻度值；

X_{t1}——t 时刻时经温度修正后的百分表读数值，

$$X_{t1} = X_t + \varepsilon_t$$

X_{t0}——初读数时经温度修正后的百分表读数值，

$$X_{t0} = X_0 + \varepsilon_{t0}$$

X_t——t 时刻量测时百分表读数值；

X_0——初始时刻百分表读数值；

ε_t——温度修正值，

$$\varepsilon_t = \alpha(T_0 - T)L$$

α——钢尺线膨胀系数；

T_0——鉴定钢尺的标准温度，$T_0 = 20℃$；

T——每次量测时的平均气温；

L——钢尺长度。

四、原始记录和量测资料整理

(一)量测原始记录

量测原始记录应呈表格形式，注明断面编号、测点设置时间，列出量测内容并填写具体量测值，表中应留备注栏，以便记录施工情况，最后应有量测和记录人员的签名。

(二)量测资料整理

每次量测后，需将原始记录及时整理成正式记录。对每一量测断面内的每一条测线，整理后的量测资料应包括：

①原始记录表及实际测点布置图；

②位移随时间以及开挖面距离的变化图；

③位移速度、位移加速度随时间以及开挖面距离的变化图。

在上述图表中应同时记入开挖、喷射混凝土、锚杆施工工序和时间，并将位移警戒线和极限值算出来。

当收敛值在 3～6 个月后还在发展时，一个月后的位移图可用单对数坐标表示。

每日的记录汇入日报表，整理的图表应及时进行数据处理并指导施工，最后汇入工程竣工档案中。

五、数据处理

隧道工程所遇到的许多变量都有相关关系，一个量变化，另一个也随之变化，但却无法从一个变量去精确地计算另一个变量。如围岩变形与地层压力的关系；隧道表面位移值与时间的关系等。所以，应及时对现场量测数据绘制时态曲线（或散点图）和空间关系曲线。当位移－时间曲线趋于平缓时，应进行量测数据处理或回归分析，以推求最终位移和掌握位移变化规律。

六、收敛量测结果的应用

收敛量测结果的主要用途在于评定隧道的稳定性。隧道的稳定性判断有两个方面：一是初期支护的稳定性判断，据此确定二次支护的时间；二是洞周边总收敛值判断，在规定允许值之内，且不大于预留变形量，据此保证结构不侵入限界。

《公路隧道施工技术规范》第 9.3.4 条规定，隧道周壁任意点的实测相对位移值或用回归分析推算的总相对位移值均应小于表 1－5－4 所列数值。当位移速率无明显下降，而此时实测位移值已接近该表所列数值，或者喷层表面出现明显裂缝时，应立即采取补强措施，并调整原设计参数或开挖方法。

表 1－5－4　隧道周边相对位移值（%）

围岩类别 \ 覆盖层厚度（m）	< 50	50 ~ 300	> 300
Ⅳ	0.10 ~ 0.30	0.20 ~ 0.50	0.40 ~ 1.20
Ⅲ	0.15 ~ 0.50	0.40 ~ 1.20	0.80 ~ 2.00
Ⅱ	0.20 ~ 0.80	0.60 ~ 1.60	1.00 ~ 3.00

注：①相对位移值是指实测位移值与两测点间距离之比，或拱顶位移实测值与隧道宽度之比；
②脆性围岩取表中较小值，塑性围岩取表中较大值；
③Ⅰ、Ⅴ、Ⅵ类围岩可按工程类比初步选定允许值范围；
④本表所列位移值可在施工过程中通过实测和资料积累作适当修正。

《公路隧道施工技术规范》第 9.3.5 条规定了二次衬砌的施工应在满足下列要求时进行：

1. 各测试项目的位移速率明显收敛，围岩基本稳定；

2. 已产生的各项位移已达预计总位移量的 80% ~ 90%；

3. 周边位移速率小于 0.1 ~ 0.2mm/d，或拱顶下沉速率小于 0.07 ~ 0.15mm/d。

对于某一个量测断面而言，取拱脚附近的水平测线和另一条最大测线的两条回归方程，作为判断用的方程。前者从收敛速度进行判断，后者从总的收敛量进行判断（不含弹

性变形量)。一方面预报变形情况和判断施作二次支护的时间,另一方面需注意最终位移时,结构是否侵入限界。

第四节　拱顶下沉量测

隧道拱顶内壁的绝对下沉量称为拱顶下沉值,单位时间内拱顶下沉值称为拱顶下沉速度。拱顶下沉量测也属位移量测,对于埋深较浅、固结程度低的地层,水平成层的场合,这项量测比收敛量测更为重要,其量测数据是判断支护效果,指导施工工序,保证施工质量和安全的最基本的资料。

一、量测方法

对于浅埋隧道,可由地面钻孔,使用挠度计或其它仪表测定拱顶相对地面不动点的位移值。对于深埋隧道,可用拱顶变位计,将钢尺或收敛计挂在拱顶点作为标尺,后视点可设在稳定衬砌上,用水平仪进行观测,将前后两次后视点读数相减(后读数减前读数)得差值 A,两次前视点读数相减(后读数减前读数)得差值 B,计算 $C = B - A$ 如 C 值为正,则表示拱顶向上位移 若 C 值为负,表示拱顶下沉。图 1－5－4 示出了 A、B、C 三量间的几何关系。图中实线为前次观测时的情形,虚线为后次观测时的情形;P 为前次观测时标尺上的前视点,P' 为后次观测时 P 点在垂直方向上移到的位置。

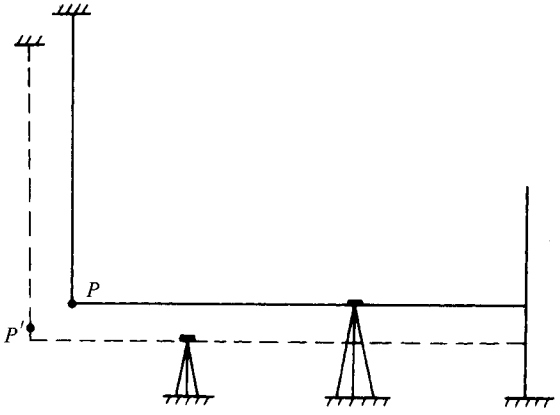


图 1－5－4　水平仪观测拱顶下沉

二、量测要求

1. 拱顶下沉量测断面间距、量测频率、初读数的测取等同收敛量测。

2. 每个断面布置 1～3 个测点，测点设在拱顶中心或其附近。

3. 量测精度为 ±1mm。

4. 量测时间应延续到拱顶下沉稳定后。一般来说，拱顶下沉量的历时变化在开挖后大致呈直线增加，一直到距开挖面约 1～3 倍隧道直径处之后下沉发展变慢、坡率变缓、渐近稳定。如果有底臌时，可按拱顶下沉法量测。

三、量测仪器

拱顶下沉量测主要用隧道拱部变位观测计。

新奥法量测中，要求观察拱部下沉量。由于隧道净空高，使用机械式测试方法很不方便，使用电测方法造价又很高，铁道科研部门设计了隧道拱部变位观测计。其主要特点是，当锚头用砂浆固定在拱顶时，钢丝一头固定在挂尺轴上，另一头通过滑轮可引到隧道下部，测量人员可在隧道底板上测量，见图 1－5－5 测量时用尼龙绳将钢尺拉上去，不测时收在边上，不致影响施工，测点位置又相对固定。

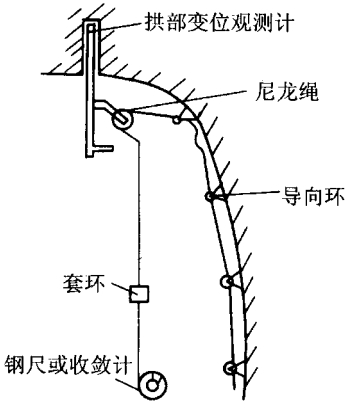


图 1－5－5　拱部变形观测图

四、原始记录和量测资料积累

量测的原始记录与收敛量测相同，用下沉量、下沉速度的时间关系图来表示。

拱顶下沉值主要用于确认围岩的稳定性，尤其是事先预报拱顶崩塌；其方法与收敛

量测相同，拱顶下沉值大约为起拱线附近的水平测线收敛值的 1/2。一般而言，两者随时间变化规律是一样的（崩塌或浅埋除外）。

第五节　地表下沉量测

一、量测目的

浅埋隧道开挖时可能会引起地层沉陷，量测目的在于了解以下内容：

1. 地表下沉范围、量值；
2. 地表及地中下沉随工作面推进的规律；
3. 地表及地中下沉稳定的时间。

二、量测方法

一般用水平仪量测，量测精度 ± 1mm。

量测用的测点沿纵向（隧道中线方向）布置，其间距：当埋深 $h > 2D$ 时，为 20 ~ 50m；当埋深 $D < h < 2D$ 时，为 10 ~ 20m；当埋深 $h < D$ 时，为 5 ~ 10m。（D 为隧道直径）每个隧道至少两个断面；横向布置间距范围为 2 ~ 5m；至少布置 11 个测点，隧道中线附近密些，远离隧道中线处疏些。其实测例见图 1 - 5 - 6。测点构造见图 1 - 5 - 7。

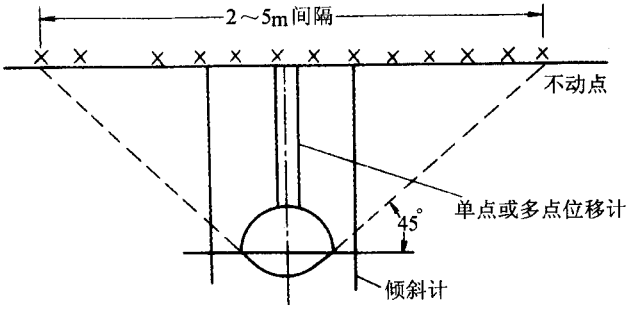


图 1 - 5 - 6　地表下沉测点布置

为了准确掌握地表下沉规律，应从工作面前方 $2D$ 处开始量测地表下沉。

量测频率：开挖面距量测断面前后距离 $d < 2D$ 时，每天 1 ~ 2 次；$2D < d < 5D$ 时，每两日一次；$d > 5D$ 时，每周 1 次。

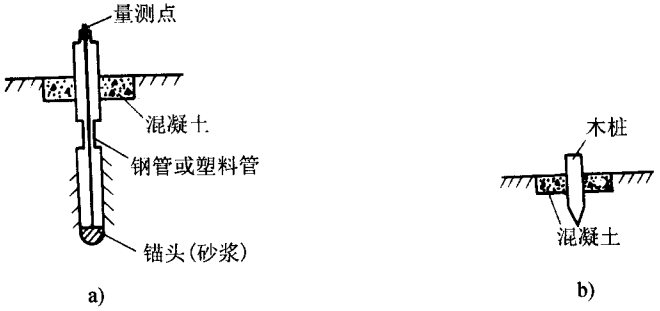


图 1－5－7　下沉测点构造

a)地中下沉测定点；b)地表下沉测定点

三、原始记录和量测资料积累

原始记录表可参考收敛或拱顶下沉记录表，但注意在整理资料时，应将纵向下沉－时间曲线和横向下沉－时间曲线分别作出。

最大下沉量的控制标准根据地面结构的类型和质量要求而定，大约 1～2cm；在弯变点的地表倾斜应小于结构的要求，一般应小于 1/300。

根据回归分析，如果地表下沉量超过上述标准，应采取措施。

第六节　围岩内部位移量测

一、量测目的

隧道围岩内部位移量测的主要目的是了解隧道围岩的径向位移分布和松弛范围，优化锚杆参数，指导施工。

二、量测原理

埋设在钻孔内的各测点与钻孔壁紧密连接，岩层移动时能带动测点一起移动(图 1－5－8)。变形前各测点钢带在孔口的读数为 S_{i0}，变形后第 n 次测量时各点钢带在孔口的读数为 S_{in}。测量钻孔不同深度岩层的位移，也就是测量各点相对于钻孔最深点的相对位移。第 n 次测量时，测点 1 相对于孔口的总位移量为 $S_{1n}-S_{10}=D_1$，测点 2 相对于孔口

的总位移量为 $S_{2n} - S_{20} = D_2$，测点 i 相对于孔口的总位移量为 $S_{in} - S_{i0} = D_i$。于是，测点 2 相对于测点 1 的位移量是 $\Delta S_{2n} = D_2 - D_1$，测点 i 相对于测点 1 的位移量是 $\Delta S_{in} = D_i - D_1$。

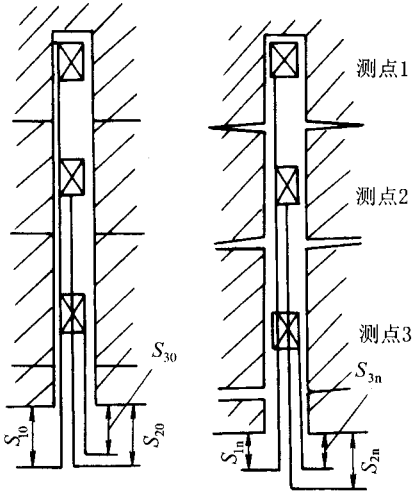


图 1－5－8　围岩内位移量测

当在钻孔内布置多个测点时，就能分别测出沿钻孔不同深度岩层的位移值。测点 1 的深度愈大，本身受开挖的影响愈小，所测出的位移值愈接近绝对值。

三、量测方法

(一)量测断面选择

量测断面应设在有代表性的地质地段，在一般围岩条件下，每隔 200～500m 设一个量测断面比较适宜。在这同一量测断面上，围岩内部位移、锚杆轴力、衬砌内切向和径向应力、表面应力等项量测，均可同时进行。

(二)量测断面上的测点布置

每一量测断面应布设 3～11 个测点，其测点布置应按各个隧道的实际情况选择合适的位置，要尽量靠近锚杆或周边位移量测的测点处，以便计算分析。

每一测点，需选择几种不同深度的钻孔，连续测几种不同深度的围岩内的位移，以确定围岩内部的松弛范围。

(三)量测频率

围岩内位移的量测频率与同一断面其它项目量测频率相同。

四、量测仪器

多点位移计种类很多，根据埋设情况，多点位移计可分为埋设式和移动式两种；根据位移测试仪表的不同又可分为机械式和电测式。

埋设式多点位移计安装在钻孔内以后就不再取出，这里又有弦式和杆式两种。由于埋设式耗资大，测量的点数有限，因此又出现了移动式。这种方法克服了上面的一些缺点，得到了越来越广泛的应用。电测式多点位移计测量部分可采用滑线电阻式、电阻应变式、电感式等。这种方法测量精度高，容易实现遥测，但价格较贵，容易受干扰。机械式测试方法价格便宜、读数稳定，不足之处是精度较低、不易遥测等。目前这两种测试方法都得到了普遍的应用。

机械式八点钻孔伸长计是一种常用的钻孔位移计，用以长期观察钻孔轴向的相对变形。如果钻孔有相当深度，则可认为其变形为绝对变形，它既可监视施工过程中围岩的稳定情况，又能长期观测锚喷加固围岩的效果。

(一)钻孔伸长计的构造

钻孔伸长计由锚固器和位移测定器组成。锚固器安装在钻孔内，一个测点安装一个锚固器，它只起锚固点的作用。位移测定器安装在钻孔口部，可与数个(如 8 个)锚固器配合，测出各测点相对于口部的位移值，然后换算出各测点相对于最深一点的位移值。锚固器与位移测定器之间用钢丝联结。

锚固器在钻孔内锚固时，使用专门设计的安装杆。旋转紧螺栓，压紧钻孔孔壁，形成锚固，并卸下安装杆。此种锚固器结构简单，加工方便，但锚固力较小，约 100N，适用孔径为 90 ~ 125mm。

位移测定器簧座固定外壳的底部，滑杆可在其中自由滑动，钢丝从滑杆中穿过，被压紧螺钉和夹线块夹住，压簧顶着滑杆可将整个钢丝撑紧。当有变形时，滑杆在钢丝与压簧的制约下产生滑动。用深度游标卡尺测读，测量板是测读的基准，测出滑杆的滑动距离，便可知道变形的量值。

(二)钻孔伸长计的安装

1. 钻孔要求

钻孔伸长计是用来测定钻孔轴向各点变形量的，故要求钻孔基本顺直；实际上一般钻孔稍有弯曲不影响使用。

孔径受锚固器尺寸所限，一般不能相差太大。采用 YQ100A 型潜孔凿岩机钻孔，其直径在 100 ~ 120mm 范围内。

2. 锚固器的安装

锚固器安装位置要根据钻孔地质构造情况及对围岩变形情况的预测来确定。一般原则是深处布点稀，浅处布点密，由深到浅依次安装。

安装时，先排除钻孔内可能有的碎石，将锚固器接上钢丝，装在安装杆上，以最小外径向钻孔内递送。递送到一定位置后，可旋转安装杆撑开锚固器，到用力旋转不动为止，然后卸下安装杆。

3. 位移测定器的安装

在钻孔附近埋设底脚螺栓，将钢丝依次穿过位移测定器各孔，装上外壳，用螺母垫片固定在底脚螺栓上。位移测定器中轴线与钻孔轴线相重合，将钢丝穿过压簧及滑杆，放好夹线块并压紧螺钉，把滑杆插进位移测定器底座孔内，用力拉紧钢丝，推送滑杆使弹簧压缩，旋紧压紧螺钉，使夹线块夹紧钢丝，并剪去多余钢丝，最后将测量板装上，盖上盖子。

(三)钻孔伸长计的应用

一般在拱部或顶部导洞开挖后，立即钻孔安装伸长计，然后进行扩挖，隔一定时间测读各点位移值 进行校正，求出相对于最深一点的位移值，作出时间 – 位移曲线，分析各点的变形速率及稳定性。

测读方法，用 0 ~ 300mm 的深度游标卡尺(精度为 ± 0.2mm)测读。以测量板为基准面，通过测量板上的各孔，测量滑杆尾部(即压紧螺钉端面)与基准面的距离变化。在安装好位移测定器后，即可进行初始读数测量，每点需进行 5 次测读，取其 3 次相近的读数平均值作为此处测读结果 测读间隔时间须视工程进展及围岩变形情况而定，由数小时到数天，一般间隔 1d 测读一次。

五、量测资料的应用

围岩内位移的量测多在软弱、破碎或具有较大地质结构面的围岩内进行。这类围岩本身力学性态复杂，受力变形规律不易预测，支护比较困难。进行围岩内位移量测，可以比周边位移量测获取更多的地层信息，特别是有关围岩内的信息，对分析围岩内部的位移规律，并据此调整支护参数，或设计新的支护结构大有助益。

实用中，一般根据量测结果，先绘出位移 – 深度关系曲线(图 1 – 5 – 9)和位移 – 时间关系曲线(图 1 – 5 – 10)。如果在两相邻测点间位移突然变化，则表明在此两点间很可能有不连续位移发生，即松弛围岩的界面在此两点之间 调整支护参数时，如有可能则应使锚杆长度超出此两点。如果相邻测点间位移变化比较均匀，且最深测点仍有较大位移，

则表明围岩受扰动范围较大，仅靠调整锚杆长度一般难以解决支护问题；这时应采取综合治理措施，采用特殊的钢支撑加锚喷（挂网）等方案进行初期支护，并在必要时加大二次衬砌的强度与刚度。通过位移－时间曲线，如果掌握了围岩内部随时间变形的规律，则可更好地用于指导施工，如确定复喷的时间和二次衬砌的施工时间。

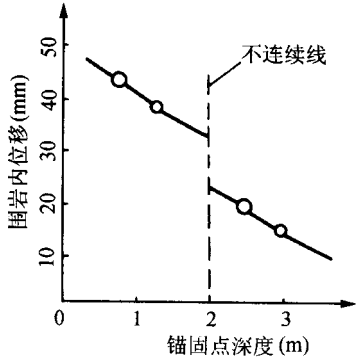


图 1－5－9　位移－深度关系曲线

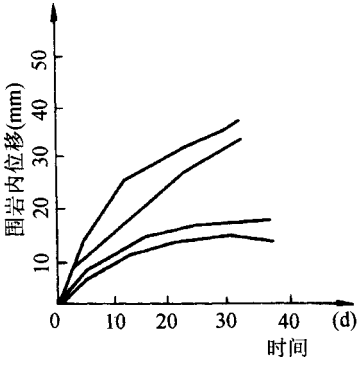


图 1－5－10　位移－时间关系曲线

值得指出的是，以上对量测成果的分析仅仅是初步的，据其结论采取工程措施有时会“药不对症”。为了分析在特定条件下产生的量测结果的深层次原因，综合分析地质因素和施工因素对围岩稳定性的影响，近年来在一些重大工程上开始应用“反分析法”。其基本原理是：以现场量测的位移作为基础信息，根据工程实际建立力学模型，反求实际岩（土）体的力学参数、地层初始地应力以及支护结构的边界荷载等。广义的反分析法还包括在此之后，利用有限元、边界元等数值方法，进行正分析，据之进行工程预测和评价，并进行工程决策和决定采取措施，最后进行监测并检验预测结果。如此反复，达到优化设计、科学施工之目的。图 1－5－11 示出了一种监测预报系统的组成框图，位移反分析法为其核心。

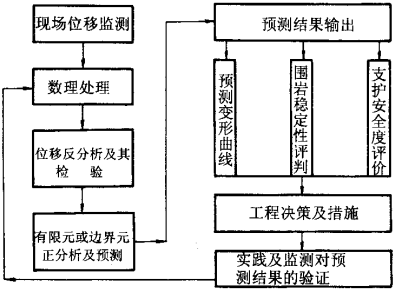


图 1－5－11　监测－预报系统组成框图

第七节　锚杆轴力量测

一、量测目的

锚杆轴力量测的目的在于了解锚杆实际工作状态，结合位移量测，修正锚杆的设计参数。

二、量测方法及仪器

主要使用的是量测锚杆。量测锚杆的杆体是用中空的钢材制成，其材质同锚杆一样。量测锚杆主要有机械式和电阻应变片式两类。

机械式量测锚杆是在中空的杆体内放入四根细长杆，将其头部固定在锚杆内预计的位置上(图 1－5－12)。量测锚杆一般长度在 6m 以内，测点最多为 4 个，用千分表直接读数。量出各点间的长度变化，而后被测点间距除得出应变值，再乘以钢材的弹性模量，即得各测点间的应力。了解锚杆轴力及其应力分布状态，再配合以岩体内位移的量测结果就可以设计锚杆长度及锚杆根数，还可以掌握岩体内应力重分布的过程。图 1－5－13 示出了一个实测例。

电阻应变片式量测锚杆是在中空锚杆内壁或在实际使用的锚杆上轴对称贴四块应变片，以四个应变的平均值为量测应变值，这样可消除弯曲应力的影响，测得的应变值乘以钢材的弹性模量得该点的应力。

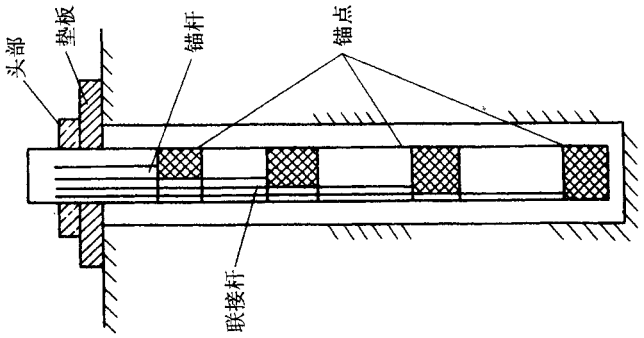


图 1－5－12　量测锚杆构造与安装

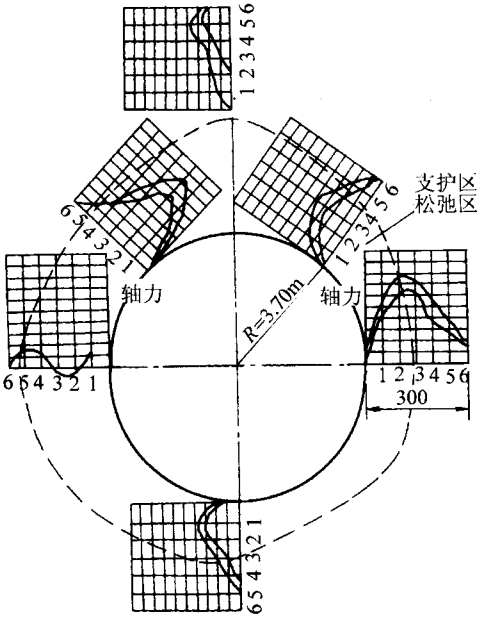


图 1－5－13　锚杆轴力量测实例

三、成果整理

1. 绘制不同时间(t_1，t_2……)锚杆轴力(应力 σ)与深度 l 关系曲线(图 1－5－14)。

2. 绘制各测点(1，2……)轴力(应力 σ)与时间关系曲线(图 1－5－15)。

锚杆轴向力是检验锚杆效果与锚杆强度的依据，根据锚杆极限抗拉强度与锚杆应力的比值 K(锚杆安全系数)即能作出判断。锚杆轴力越大，则 K 值越小。当锚杆中某段最小的 K 值稍大于 1 时应认为合理，因即使出现局部段 K 值稍大于 1，一般亦不会拉

断，因为钢材有较大的延性。

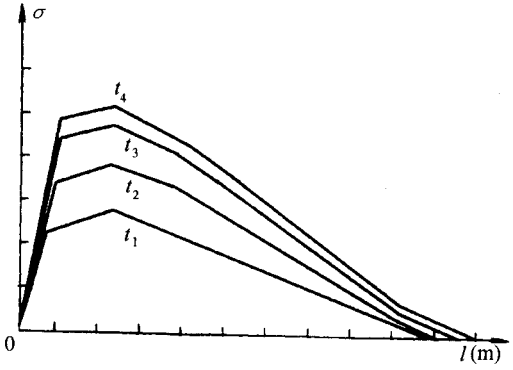


图 1－5－14　不同时间锚杆轴力与深度关系

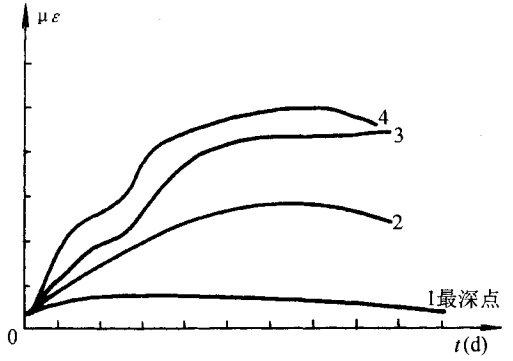


图 1－5－15　测点轴力与时间关系

第八节　钢支撑压力量测

如果隧道围岩类别低于Ⅳ类，隧道开挖后常需要采用各种钢支撑进行支护。量测围岩作用在钢支撑上的压力，对维护支架承载能力、检验隧道偏压、保证施工安全、优化支护参数等具有重要意义。例如，通过压力量测，可知钢支撑的实际工作状态，从钢支撑的性能曲线上可以确定在此压力作用下钢支撑所具有的安全系数，视具体情况确定是否需要采取加固措施。再如，施工中采用上下部分次开挖时，下部跳挖马口容易扰动架脚，造成上部拱架松动下落，轻则支护作用受到影响，重则可能导致局部坍塌。特别是当倾斜

状岩层出现时，极易出现顺层滑坍，影响钢支撑作用的发挥。这时，如果上部拱架上设有压力计，便能从其读数变化情况判断下部开挖对上部支护结构的影响，根据量测结果调整马口开挖宽度，保障下部开挖的安全。

一、测力计分类

围岩作用于钢支撑上的压力可用多种测力计量测。根据测试原理和测力计结构的不同，测力计可分类如下：

- 测力计
  - 液压式
    - 液压盒
    - 油压枕
  - 电测式
    - 应变式
    - 钢弦式
    - 差动变压式
    - 差动电阻式

液压式测力计的优点是结构简单、可靠，现场直接读数，使用比较方便。电测式测力计的优点是测量精度高，可远距离和长期观测。本节仅以液压式测力计为例，介绍压力计的结构原理和压力测试方法。

二、液压测力计结构原理

液压测力计结构如图 1－5－16 所示，主要由油缸、活塞、调心盖、接管式高压软管、减震器和压力表组成。除此之外，为了在组装时排净系统中空气，在油缸壁上设有球形排气阀。在使用中突然卸载时，为了不使压力表损坏，还设有螺钉减震装置。

测力计与压力表的连接有硬管式（直管和弯管）和软管式（高压胶管）两种。油液采用机油或透平油。压力表精度为 1～1.5 级，测量范围为 0～600MPa。为使测力计能在恶劣条件下正常工作，表盖为有机玻璃并装配防水胶套及铠装套。表 1－5－5 为常用的 HC45 型液压测力计技术规格。

三、量测方法

1. 根据量测目的选择量测断面。

2. 在量测断面内布置测点，测点一般为 3 个（1－5－17），也可视需要灵活设置。

3. 根据液压测力计的使用要求，安装测力计于钢支撑上面。注意测力计必须同时与钢支撑和围岩壁面或喷射混凝土面接触，安装应牢固可靠（图 1－5－18）。

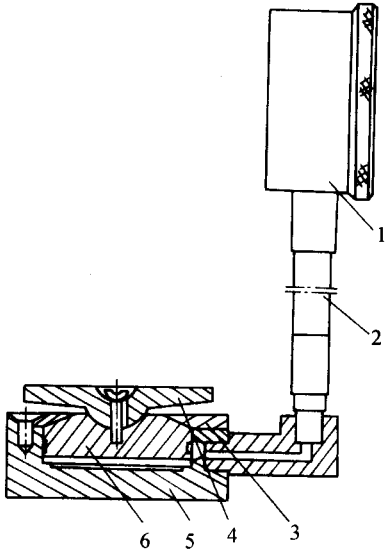


图 1－5－16　液压测力计结构

1—压力表；2—高压胶管；3—压盖；4—调心盖；5—油缸底座；6—活塞

表 1－5－5　HC45 型液压测力计技术规格

额定载荷（t）	承载面积（m^2）	额定油压（MPa）	配用压力表规格（MPa）	油缸内径（mm）	压力表外径（mm）	精度（%）	允许偏心角（°）	质量（kg）	液压油型号
45	0.0135	57.3	0～60	100	100	5	5	12.5	≥30 号机油

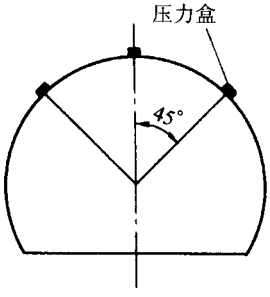


图 1－5－17　测力计的布置

4．通过高压软管将压力表接到读数方便位置，固定管束和压力表于钢支撑或隧道壁面上。由于液压测力计通常就在钢支撑的旁边测取读取，测力计和压力表等有时会受爆破施工影响，所以安装时应注意使量测仪器避开爆破飞石方向。

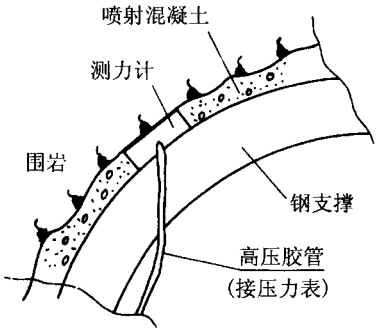


图 1－5－18　测力计安装示意图

5. 读取初读数，并定期记录各点压力值。

四、成果整理

液压测力计测取的是围岩因变形而作用在钢支撑上的径向压力，此压力随时间发展而不断变化。量测成果整理工作主要是绘制各测点的压力－时间变化曲线。图 1－5－19 示出了某地下工程钢支撑压力的实测结果。

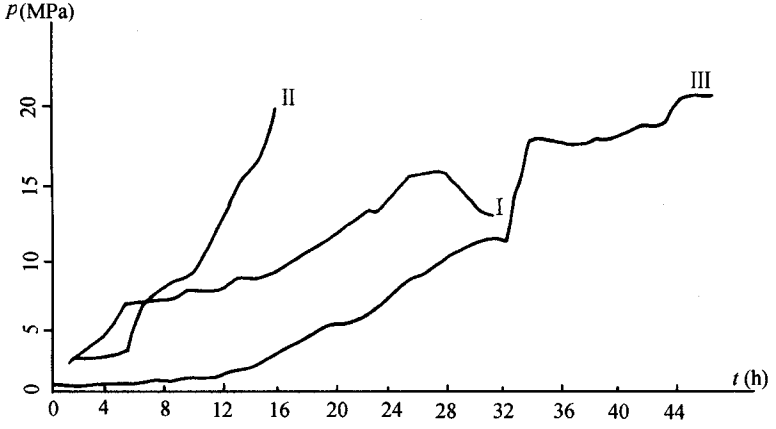


图 1－5－19　某地下工程钢支撑压力－时间曲线

第九节　衬砌应力量测

衬砌应力量测的目的在于研究复杂工程条件下的地压问题、检验设计、积累资料和

指导施工，衬砌应力量测通常是压力量测。上节对压力量测仪器进行了分类，并以液压测力计为例介绍了钢支撑的压力量测方法。本节以钢弦式应力计为例介绍混凝土衬砌应力的量测。

一、弦测法的基本原理

钢弦式测试技术属‘非电量电测法’的范畴，测试工作系统一般由钢弦式传感器（或调频弦式传感器）和钢弦频率测定仪组成，如图 1－5－20 所示。其实质是传感器中有一根张紧的钢弦，当传感器受外力作用时，弦的内应力发生变化，随着弦的内应力改变，自振频率也相应地发生变化，弦的张力越大，自振频率越高，反之，自振频率就越低。因此，钢弦自振频率的变化反映了加于钢弦传感器上外力的变化。如果能测出钢弦频率的变化，就可以利用它测定施加于传感器上的外力。钢弦式测试的基本原理就是利用钢弦的这种性质，将力转换成钢弦的固有频率的变化而进行测量的。

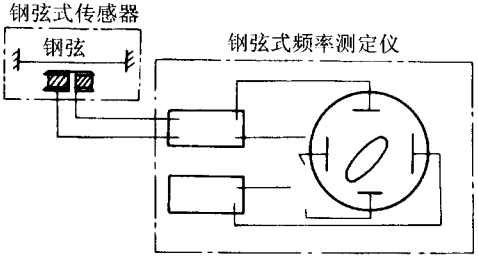


图 1－5－20　钢弦式测试系统

一般测量钢弦频率的方法是使钢弦在电磁力的作用下激振，起振后将振动频率转换成电量，再进行频率测量。钢弦的激振方式通常有两种：间歇式激振和连续等幅激振。

二、压力盒的类型

钢弦式传感器根据它的用途、结构形式和材料不同，一般有多种类型。国产常用压力盒类型、使用条件及优缺点归纳于表 1－5－6。

表 1－5－6　压力盒类型及使用特点

工作原理	结构及材料	使用条件	优　缺　点
单线圈激振型	钢丝卧式 钢丝立式	测土、岩土压力，测土压力	1. 构造简单； 2. 输出间歇非等幅衰减波，故不适用动态测量和连续测量，难于自动化

工作原理	结构及材料	使用条件	优　缺　点
双线圈激振型	钢丝卧式	测水、土、岩压力	1. 输出等幅波，稳定，电势大； 2. 抗干扰能力强，便于自动化； 3. 精度高，便于长期使用
钨　丝压力盒	钢丝立式	测水、土压　力	1. 刚度大，精度高，线性好； 2. 温度补偿好，耐高温； 3. 便于自动化记录
钢弦摩擦压力盒	钢丝卧式	测井壁与土层间摩擦力	只能测与钢筋同方向的摩擦力
钢筋应力计	钢　弦	测钢筋中应力	比较可靠
钢筋应变计	钢　弦	测混凝土变形	比较可靠

三、传压囊的设置

在现场进行实测工作时，为了增大钢弦压力盒接触面，避免由于埋设接触不良而使压力盒失效或测值很小，有时采用传压囊增大其接触面。囊内传压介质一般使用机油，因其传压系数可接近 1，而且油可使负荷以静水压力方式传到压力盒，也不会引起囊内锈蚀，便于密封。压力盒与传压囊装配情况如图 1－5－21 所示。

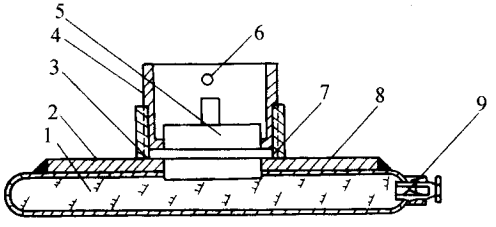


图 1－5－21　钢弦压力盒与传压囊装配图

1—机油；2—底板；3—连接套管；4—压紧套管；5—钢弦压力盒；

6—拧紧插孔；7—“○”型密封圈；8—油囊；9—注油嘴

装配传压囊时，必须将油尽量注满，且囊内无空气；钢弦压力盒与传压囊接触处，用○型密封圈密封，压紧套管要压紧压力盒。达到施以设计负荷不漏油、不浸油时方可使用。

四、钢弦压力盒的性能试验

压力盒的性能好坏，直接影响压力测量值的可靠性和精确度。对于具有一定灵敏度

的钢弦压力盒，应保证其工作频率，特别是初始频率的稳定；压力与频率关系的重复性好，故应用前应对其进行各项性能试验。

（一）钢弦抗滑性能试验

钢弦通常用销钉夹紧装置安装并经过热处理。抗滑性试验时，将压力盒放在频率为 50 周/秒的电振动台上持续振动 10～15s，然后检查其结构的初频变化情况。此外，还应作锤击试验。用小木锤以每分钟 15 次的速度垂直敲打压力盒承压膜，持续 2min 再测量其初频变化；若初频变化在 ±10Hz 以内，则可认为性能良好，否则必须卸下钢弦重新安装。

（二）密封防潮试验

试验时，将压力盒放在专设的压力罐中，先让其在水中浸泡 7d，然后加 0.4MPa 的压力，恒压 6h 取出压力盒并启开，检查其密封质量；若无渗漏现象，则可以认为密封防潮良好，可以使用，否则应更换密封圈。压力盒密封试验装置如图 1－5－22 所示。

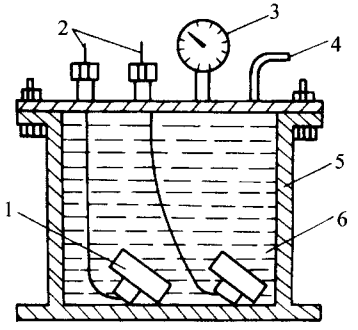


图 1－5－22　压力盒密封试验装置

1—压力盒；2—引线；3—压力表；4—压力泵接口；5—压力缸；6—水

（三）稳定性试验

稳定性试验是为了检查钢弦压力盒的初始频率在一段较长的时间内是否保持不变。其方法是把已经作过抗滑和密封防潮试验的压力盒在完全不受载荷的情况下静置 1 年，再测量其初始频率值；若仍在 ±10Hz 的频差范围内，可认为是稳定可靠的。

（四）重复性试验

压力盒的压力与频率重复性，系指在同一试验条件下，压力与频率对应关系的重复性能。压力盒重复性能良好，其工作频率也一定稳定可靠。其试验方法与压力盒的标定方法相同。

五、钢弦压力盒的标定

压力盒标定，是指在室内测定每个压力盒频率与压力之间的对应关系，并绘出它们

的关系特性曲线，以便现场测试使用。

标定是在压力缸或材料试验机上进行的，如图 1－5－23 所示。

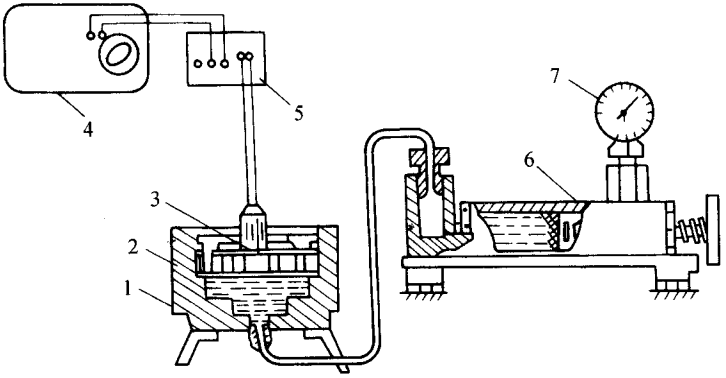


图 1－5－23　压力盒标定装置

1—油压罐；2—密封圈；3—压力盒；4—钢弦频率仪；5—激发放大器；6—压力泵；7—压力表

标定前，应先将压力盒预压 3 次（反复由零加至设计最大负荷），然后开始标定读数。每次读数压力间隔一般为最大压力的 1/8～1/10。标定读数重复进行 3 次，取其平均值，并绘制其压力与频率平方差的关系曲线，即 $P-(f^2-f_0^2)$ 曲线，如图 1－5－24 所示。

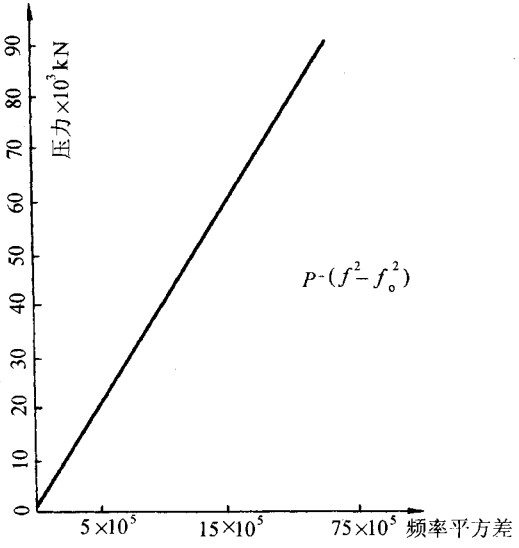


图 1－5－24　$P-(f^2-f_0^2)$ 标定曲线

六、压力盒的布置与埋设

由于测试目的及对象不同，测试前必须根据具体情况作出观测设计，再根据观测设

计来布置与埋设压力盒。压力盒的埋设，虽较简单，但由于体积较大、较重，给埋设工作带来一定的困难。埋设压力盒总的要求是 接触紧密和平稳，防止滑移，不损伤压力盒及引线，并且需在上面盖一块厚 6～8mm、直径与压力盒直径大小相等的铁板。常见压力盒的布置方式如图 1－5－25 所示。

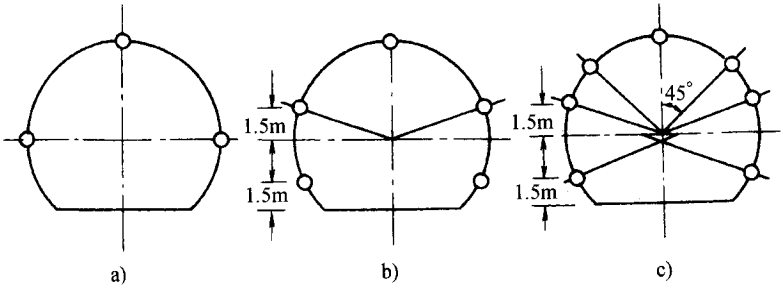


图 1－5－25　压力盒的布置

七、压力盒的观测方法

压力盒按观测设计要求布置埋设好以后，应根据实际情况设立观测室，将每个压力盒的电缆引线集中于室内，并按顺序编排好号码，以防弄混。电缆线铺设一定要得当，切不可被压断、拉断。

观测时，根据具体情况及要求，定期进行测量；每次每个压力盒的测量应不少于 3 次，力求测量数值可靠、稳定，并作好原始记录。这样，通过一段时间现场观测，就可以根据所获得的资料进行整理分析。

第六章　交通工程设施检测技术

第一节　概　　述

交通工程学是由道路工程学派生出来的一门较年轻的应用学科。交通工程是把人、车、路综合在道路交通的统一环境中进行综合研究，以寻求道路通行能力最大、交通事故率最小、运行速度最快的科学措施，从而达到安全、迅速、经济等目的。它能综合应用自然科学和社会科学的理论和方法，协调道路设施、车辆和驾乘人员的关系，使得道路设施得到最有效的利用。

交通工程学科和其他工程学科一样，是随着世界经济和科学技术的发展而产生并发展起来的。道路的建设、汽车的发展、交通量的增长等都为交通工程学提供了物质基础。从历史的角度分析，交通工程学是汽车工业和道路工程兴起和发展的产物。

享利·福特于 1910 年进行 T 型汽车的开发，揭开了美国社会汽车化的序幕，以此为契机，汽车交通量迅速增长，于是人们开展了交通调查及交通管理工作。1921 年出现了专管交通工程的工程师，以此为背景交通工程诞生。1926 年美国哈佛大学率先创立了道路交通专业，1930 年美国成立了交通工程学会，标志着交通工程学成为了一门完整的学科。

1933 年德国修建了世界上第一条高速公路，随后意大利、法国、美国也相继修建了高速公路，从而加速了交通工程学的发展。自 20 世纪 50 年代之后，交通工程学不仅研究

车辆和道路之间的关系，而且进入了人、车、路三者关系的研究阶段，并将人、车、路有机地联系在一起，作为整体综合研究，汽车化道路交通系统已发展到一定的规模。近二十年来，交通工程学及其应用取得了较大的发展，在道路几何线形设计方面，交通心理及人体工程方面，道路网规划与交通规划方面都进行了大量研究。特别是在交通控制与管理方面，许多发达国家在主要干线公路和城市主要街道上，设置了点、线、面的自动控制中心，在高速公路上设置了疏通交通、提供信息、监视行车的管理交通设施，从而实现了现代化的管理。自 20 世纪 80 年代以来，许多发达国家相继进行了智能运输系统的研究，把先进的检测、通信和计算机技术综合应用于汽车和公路，形成新的道路交通运输系统，这将是公路运输系统的发展趋势。

我国在 20 世纪初期(1901 年)从国外进口了第一辆汽车，1913 年修建了第一条汽车公路——长沙至湘潭段公路，至 1933 年由于汽车数量的增加使道路运输呈现出了一定的汽车化程度，为了管理新兴的汽车化道路交通体系，成立了公路交通安全委员会，开始对公路交通安全进行管理，接着在部分省份制定了《公路交通标志、号志设置保护规则》及事故处理办法等。由于当时国内经济比较落后，交通运输体系不甚发达，未将上述问题作为交通工程学科进行研究应用。新中国成立后，由于 70 年代汽车数量的增长大于公路和城市道路的增长，出现了交通公害问题，促使人们开始重视交通的科学管理。到 70 年代末，由道路工程专家张佐周先生建议，开始全面兴起当时在发达国家已成体系的交通工程学，美籍华人张秋先生多次专程回国讲学，为我国交通工程学科的发展起了很大的推动作用。1981 年 12 月 20 日中国公路学会交通工程学会在广东佛山成立，交通部和公安部在有关部门配合下，运用交通工程学原理，制定了一些交通工程法规，颁布了《道路交通标志和标线》等国家标准，在交通管理和交通工程理论方面进行了深入的研究。交通工程学的逐步推广应用，使我国现代化的交通控制及交通管理系统逐步得以实施。特别是高速公路的建设，使现代化的交通管理设施得到了广泛应用，已成为公路的一个重要组成部分，同时也对交通工程管理方式提出了更高的要求。

从国际科学发展的趋势看，随着微电子技术日新月异的发展变化，以及计算机应用技术和光纤传输技术的广泛应用，公路网将成为信息系统中的一个重要组成部分，道路交通的发展使得交通工程地位日趋上升。到 2020 年，我国公路网上的主骨架将改建完成，高速公路及高等级公路也将形成网络，交通工程在监控、通信传输、交通安全设施、服务设施及交通管理方面将任重道远，需要交通工程设施发挥对现代化公路交通的保障服务功能，为此需建立一套完善的交通设施管理体系及测试手段，确保道路设施达到最佳的利用。

第二节　交通工程设施

1988 年 10 月 31 日，全长 18.5km 的沪嘉高速公路的通车，我国大陆高速公路实现了零的突破，随后沈大、广佛、京津塘、西临等一批高速公路相继建成通车，我国高速公路进入了起步与发展阶段。至 1998 年底，我国大陆高速公路通车里程已达到 8733km，截止到 1999 年 10 月 31 日，我国高速公路总里程已突破 1 万公里。虽然我国高速公路建成时间短、里程少，但所建成的高速公路已显示出其巨大的优越性，对我国政治、经济、文化的发展起到了极大的推动作用。目前，国内各省、市已制定了高速公路发展规划，不少省、市的高速公路正在逐步形成网络，高速公路的建设规模随着国民经济的发展逐步扩大，建设地域已从沿海、平原等经济发达地区向内陆腹地、山区发展。“九五”期间高速公路的建设目标是使全国高速公路达到 8380km（至 1998 年底已突破规划数），至 2010 年，汽车专用公路突破 4 万公里。随着国道主干线系统的规划建设，我国高速公路将进入快速发展阶段，高速公路的发展有着广阔的前景。

现代化的公路必须具有完善的管理机构和与之配套的交通设施，才能确保车辆有效地使用公路，达到车辆安全、快速、舒适、经济的目的。为确保行车安全、减少车辆发生事故的破坏程度，高速公路必需配置安全设施、通信、监控设施，其配置的目的是诱导交通，规范行车，提高道路服务水平，实现安全、舒适、经济的功能。

交通工程设施主要由道路交通标志、标线、防撞栏、视线诱导设施、防眩设施、隔离设施及监控、通信、收费系统组成，其综合作用是向道路使用者提供有关路况的各种信息，传送交通管理者对驾乘人员提出的各种警告、指令、指导及采取的安全措施，诱导车辆安全、高效行驶。同时通过监控、通信系统的设置，交通管理者能及时了解道路使用状况，快速处理交通问题。

一、安全设施的构成

（一）防撞护栏

设于高速公路两侧及中央分隔带，用以防止车辆驶出公路或闯入对向车道的设施，其作用是一旦车辆失控发生事故，可使其对乘客的伤害及对车辆的破坏减少到最低限度，使车辆恢复正常行驶，同时防撞护栏对驾驶员具有诱导视线的作用。中央分隔带上

的防撞护栏是连续的，而道路两侧的护栏仅在路外有深沟、陡坡或有设施的地方设置。护栏必须坚固，能经受碰撞，以最大限度地减少车辆损失和恢复行车，而且要经济、美观，以及有良好的视线诱导性。防撞护栏有三种基本类型：一是刚性护栏，多用混凝土或石料制成墙式，其特点是防止车辆驶出路外的效果比较好，但对乘客安全性和视觉的舒适性较差，有较强的行驶压迫感，该类型护栏抗腐蚀性好，沿海及炎热潮湿地区较适用；另一种是柔性护栏，如钢导轨、钢缆等，具有一定的弹性，既能拦挡车辆，又能对车辆冲撞起缓冲作用；第三种是半刚性护栏，具有一定的刚性和柔性，目前应用最广泛的波形梁钢护栏就是其中一种。

（二）交通标志、标线

道路交通标志，是显示交通法规及道路信息的图形符号，它可使交通法规得到形象、具体、简明的表达，同时还表达了难以用文字描述的内容。其具体作用是提供交通信息，起到道路语言作用；指挥控制交通，保障交通安全；指路导向，提高行车效率，是交通管理部门执法的依据。所以交通标志和标线是车辆行驶的指南，是保证车辆安全行驶及道路畅通的必要交通设施。

交通标志根据其作用不同分为警告标志、禁令标志、指示标志、指路标志四种。为了区别各种标志表达的内容，实现交通标志的清晰易见及良好的认读性，其形状有正三角形、长方形、正方形、圆形等，并且配以不同的颜色强调其不同的作用。为了给夜间行车提供方便，要求标志板上应用反光材料。标志牌的尺寸大小应保证司机在一定视距内能清晰识别其图案、文字和符号，文字、符号大小应满足视认距离。视认距离与行车速度及标志大小有关，不同等级道路所要求视认距离不同，其标志牌尺寸及文字、符号的大小也不同。

道路交通标线是由不同颜色的线条、符号、箭头、文字、立面、标记、突起路标和路边轮廓标线等所组成，常敷设或漆划于路面及构造物上。它作为一种交通管理设施，起引导交通与保障交通安全的作用，具有强制性、服务性和诱导性。交通标线主要采用黄色和白色两种颜色，要求涂在地面上能形成醒目的地面标线，并且要求有一定耐磨性、耐溶剂性。为适应夜间行车，路面标线宜用反光涂料，对于特别需强调的路段，可增设反光突起路标，以警示驾乘人员，保证夜间行车安全。

（三）隔离栅

用于封闭高速公路的设施，以防止行人、牲畜或野生动物进入高速公路，一般在道路用地边缘设置成金属网或刺钢丝网等。

（四）视线诱导设施

为防止在雾、雨天气及夜间行驶时驾驶员因看不清道路标线，致使汽车失去方向，一

般在高速公路中央分隔带两侧及道路的两侧每隔一定距离设置视线诱导设施。视线诱导设施能将车头灯光反射出十分醒目的桔黄色的光，使驾驶员容易看清道路的行进方向。目前广泛使用的诱导设施有轮廓标、路钮、线形诱导标。

（五）防眩设施

设于中央分隔带，夜间行车时，可防止对向来车灯光对驾驶员造成眩目的人工构造物，通常采用植树防眩和百叶板式或金属网式防眩栅等方法，设置高度一般为 1.4～1.7m。

二、通信系统

公路通信系统在方兴未艾的高速公路建设中应运而生，运行可靠、操作灵活、维护方便的通信系统为高速公路管理提供有效、完整的服务。通信系统的设置主要是为了确保高速公路系统内部话音、数据、图像信息准确、及时地传输，以满足运营管理的通信需求。高速公路通信系统由综合业务交换、通信传输、移动通信、紧急电话四个部分组成。

（一）综合业务交换

综合业务交换网络主要用于支持调度电话、业务电话和其他非话业务。

调度电话是综合业务交换网中的一个子系统，它与市话公用网无任何联系。调度电话的所有终端用户都直接受控于调度总台，用户间不进行自动交换，也无需拨号即可与总台通信。其主要作用是迅速传达或发布重要指令、信息，及时反馈重大事件或信息。

业务交换网络的核心设备是专用程控用户交换机及外围设备、用户线路、用户终端设备。其中心任务是完成网内用户之间的话务交换，网内用户与市话用户之间自动接续；同时也为市话网承担大量的内部用户间的交换业务，起到话务集中的作用。

（二）通信传输

通信传输系统是为保证“信息流”在特定的传媒中准确畅通而设置的。目前可供选择的通信方式有微波通信、光纤通信和卫星通信三种。

数字微波中继传输是利用无线电波在空中视距传输的一种通信手段。其通信设备由收发天线、极化分离装置、高频筒馈线、中低频机架等组成，同时迩配有相应的辅助电路。

数字光纤传输是用数字式的电信号来调制光源、以光波为信息载体、以光纤维作为传输媒介的通信。其最大特点是传输容量大、传输距离远、抗干扰能力强，广泛应用于中长距离数字通信及图像传输。光纤传输系统主要由光发射机、光接收机、光中继器、远供电源、光纤及其他光器件组成。

卫星通信是为地球站之间传送信号，信号在地球站到卫星间是视距大气层传输。卫星通信实际上采用的是微波接力通信技术，其中继器被搬到离地面约 3600km 高空的卫星上，使卫星通信具备几乎可以向地球上任何地方发送信息的功能。

（三）移动通信

移动通信涵盖范围非常广泛，其显著的特点是通信双方或一方在通信服务区内地址的可移动性。它特别适宜于道路养护、交通安全管理或救援等具有流动性特征的通信。

（四）紧急电话

紧急电话是为行驶在高等级公路上的司机提供紧急呼救的公路专用呼救系统。当发生交通事故或车辆出现故障时，使用者通过应急电话的送受话器，即可向道路管理部门通报事故情况并得以援助。

紧急电话系统由应急电话控制主机、传输线路和应急电话分机三部分组成。按传输线路不同可分为有线应急电话系统和无线应急电话系统。

三、监控系统

监控系统是利用电子技术和电子计算机系统，从事高速公路管理，对道路安全、交通状况等进行实时的监视和控制，从而达到‘安全、高速、舒适、方便’的目的。监控系统一般由信息采集系统、信息处理系统和信息提供系统组成。

（一）信息采集系统

信息采集系统能实时采集路段、匝道口和收费口的交通参数及其他参数，通过视频传输方式传送有关区段的图像信号，定时汇总报送控制中心。该系统主要由车辆检测器、气象检测器、轴重计及超重录像系统、电视监视系统及辅助设施组成。

（二）信息处理系统

信息处理系统根据采集和监测的各种数据、信息，通过处理、分析、判断，提出交通控制方案，并通过相应的设备对交通情况作出相应的管理。该系统主要由前置机、中心处理计算机和主控制台等组成。

（三）信息提供系统

信息提供系统是向道路使用者提供交通、气象、事故和道路情报以及速度限制情报，作为道路使用者的行车指南，辅助调节主干线上交通流，参与交通管理。该系统主要由道路模拟屏、可变道路信息板、可变限速标志和路侧广播组成。

对于隧道监控系统，由于着重于运营安全角度考虑，该系统主要由变配电系统、通风系统、照明和控制系统、消防报警系统、紧急电话系统及信号系统组成。

四、收费系统

收费系统涉及机械工程、电子工程、通信工程、自动控制工程、计算机应用工程、交通工程等学科，是一个较为复杂的综合系统。按收费形式分类有均一式、开放式、封闭式、混合式。按人工参与程度分有人工式、半自动式、全自动式。按通行卡方式分类有穿孔卡式、磁卡式、IC 卡式、电子标签式。目前半自动收费系统应用比较广泛。

半自动收费系统主要由中心计算机系统、分中心计算机系统、收费站控制机、收费车道设备、计算和连接网络组成。全自动收费系统一般采用射频识别系统辅以自动车型识别技术组成。

随着高速公路网的形成、交通量的增长，为了提高收费服务水平和有效地进行道路管理，不停车电子收费系统是将来收费系统的发展趋势。

第三节　检测技术的作用和地位

交通工程设施是确保高速公路实现其高速、经济、安全、舒适功能的必要条件，交通工程设施的各项功能能否充分发挥作用，取决于交通安全设施、监控系统、通信系统的质量及性能，其质量及性能的优劣直接关系到高速公路的效能。若其设置不当或质量不佳，都会存在交通安全事故隐患，将会给国家和人民生命财产造成损失，因此，交通工程设施、设备的质量是至关重要的。

交通工程检测的目的是确保交通工程设施、设备质量合格，以实现交通管理的效果。虽然现代化的交通管理设施的应用在我国起步较晚，各项技术标准与规范、检测与验收、设备与仪器等有待于逐步完善和提高，但我国高速公路建设事业方兴未艾，交通需求日益增加，特别是高速公路建设初期交通事故率普遍较高，合理的管理方法和高质量的交通工程设施就显得更为重要。只有通过严格把握设施、设备产品的质量关，才能达到交通管理的目的，使高速公路充分发挥快速、便捷及安全的作用。所以，交通工程设施、设备的质量检测是非常必要的，应能适应我国交通事业发展的需要。

在人类的各项生产活动和科学实验中，为了了解和掌握整个过程的进展及其最后结果，经常需要对各种基本参数或物理量进行检查和测量，从而获得必要的信息，作为分析、判断和决策的依据，可以认为检测技术就是人们为了对被测对象所包含的信息进行

定性的了解和定量的掌握所采取的一系列技术措施。随着人类社会进入信息时代，以信息的获取、转换、显示和处理为主要内容的检测技术已经发展成为一门完整的技术科学，在促进生产发展和科技进步的广阔领域内发挥着重要作用。

一、检测技术是产品检验和质量控制的重要手段

借助于检测工具对产品进行质量评价是人们十分熟悉的，这是检测技术重要的应用领域。但传统的检测方法只能将产品区分为合格品或废品，起到产品验收和废品剔除的作用。这种被动检测方法，对废品的出现并没有预先防止的能力。在传统检测技术基础上发展起来的主动检测技术（或称之为在线检测技术）使检测和生产加工同时进行，及时地用检测结果对生产过程进行主动地控制，使之适应生产条件的变化或自动地调整到最佳状态。这样检测的作用已经不只是单纯的检查产品的最终结果，而是要过问和干预造成这些结果的原因，从而进入质量控制的领域。

二、检测技术和装置是自动化系统中不可缺少的组成部分

任何生产过程都可以看作是由“物流”和“信息流”组合而成，反映物流的数量、状态和趋向的信息流则是人们管理和控制物流的依据。人们为了有目地进行控制，首先必须通过检测获取有关信息，然后才能进行分析判断以便实现自动控制。所谓自动化，就是用各种技术工具与方法代替人工来完成检测、分析、判断和控制工作。一个自动化系统通常由多个环节组成，分别完成信息获取、信息转换、信息处理、信息传送及信息执行等功能。在实现自动化的过程中，信息的获取与转换是极其重要的组成环节，只有精确及时地将被控对象的各项参数检测出来并转换成易于传送和处理的信号，整个系统才能正常地工作。因此，自动检测与转换是自动化技术中不可缺少的组成部分。

三、检测技术的完善和发展推动着现代科学技术的进步

人们在自然科学各个领域内从事的研究工作，一般是利用已知的规律对观测、试验的结果进行概括、推理，从而对所研究的对象取得定量的概念并发现它的规律性，然后上升到理论研究。因此，现代化检测手段达到的水平在很大程度上决定了科学研究的深度和广度。检测技术达到的水平愈高，提供的信息愈丰富、愈可靠，科学研究取得突破性进展的可能性就愈大。此外，理论研究的一些成果，也必须通过试验或观测来加以验证，这同样离不开必要的检测手段。

从另一方面看，现代化生产科学技术的发展也不断地对检测技术提出新的要求，成

为促进检测技术向前发展的动力。科学技术的新发现和新成果不断应用于检测技术中，这也有力地促进了检测技术自身的现代化。

检测技术与现代化生产和科学技术的密切关系几乎渗透到人类的一切活动领域，它将会成为一门十分活跃的技术学科，发挥着愈来愈大的作用。

第四节　检测依据及内容

交通工程检测主要是测试施工过程中所使用的产品质量是否合格，以及产品安装后是否满足设计文件及规范要求。由于其检测内容涉及的行业及部门较多，检测试验中必须以国家技术标准、行业技术标准、设计文件等为依据。

交通工程检测内容涵盖了形成交通工程设施的产品、设备及施工安装，这些产品、设备的生产涉及到各个行业，其质量既要满足行业规范标准的要求，同时又必须适应公路使用效果的需要。交通工程设施必须进行物理的、化学的试验及其工艺、产品性能、使用效果及施工质量的测定，其各项设施的主要检测内容如图 1－6－1 所示。

第五节　样品抽样

随机抽样是对产品进行检测的基本方法。为了节省时间和费用，我们不必检查每一件产品，而是随机地抽出 n 件产品进行检查，从而对整批产品的质量进行判断。通常将这批产品称为总体，抽出的 n 件产品为子样，n 为子样容量，抽取的过程称为随机抽样。在实际取样中，完全随机抽样客观上有一定困难，要根据实际情况设计抽样方案。目前常采用的抽样方法有简单随机抽样、系统抽样、分层抽样等形式。

简单随机抽样是从包含 N 个个体的总体中抽取 n 个个体，使包含有 n 个个体的所有可能的组合被抽取的可能性都相等。随机抽样数是通过选定骰子个数确定的，随机数骰子是均匀材料制成的正 20 面体，各面上刻有 0～9 的数字各 2 个，便以 6 种不同的颜色组成。根据产品批量 N 需选取骰子个数用 m 表示，通过摇随机数骰子的方法所获得的随机数用 R_0 表示，按规定读取方法确定的随机数用 R 表示。

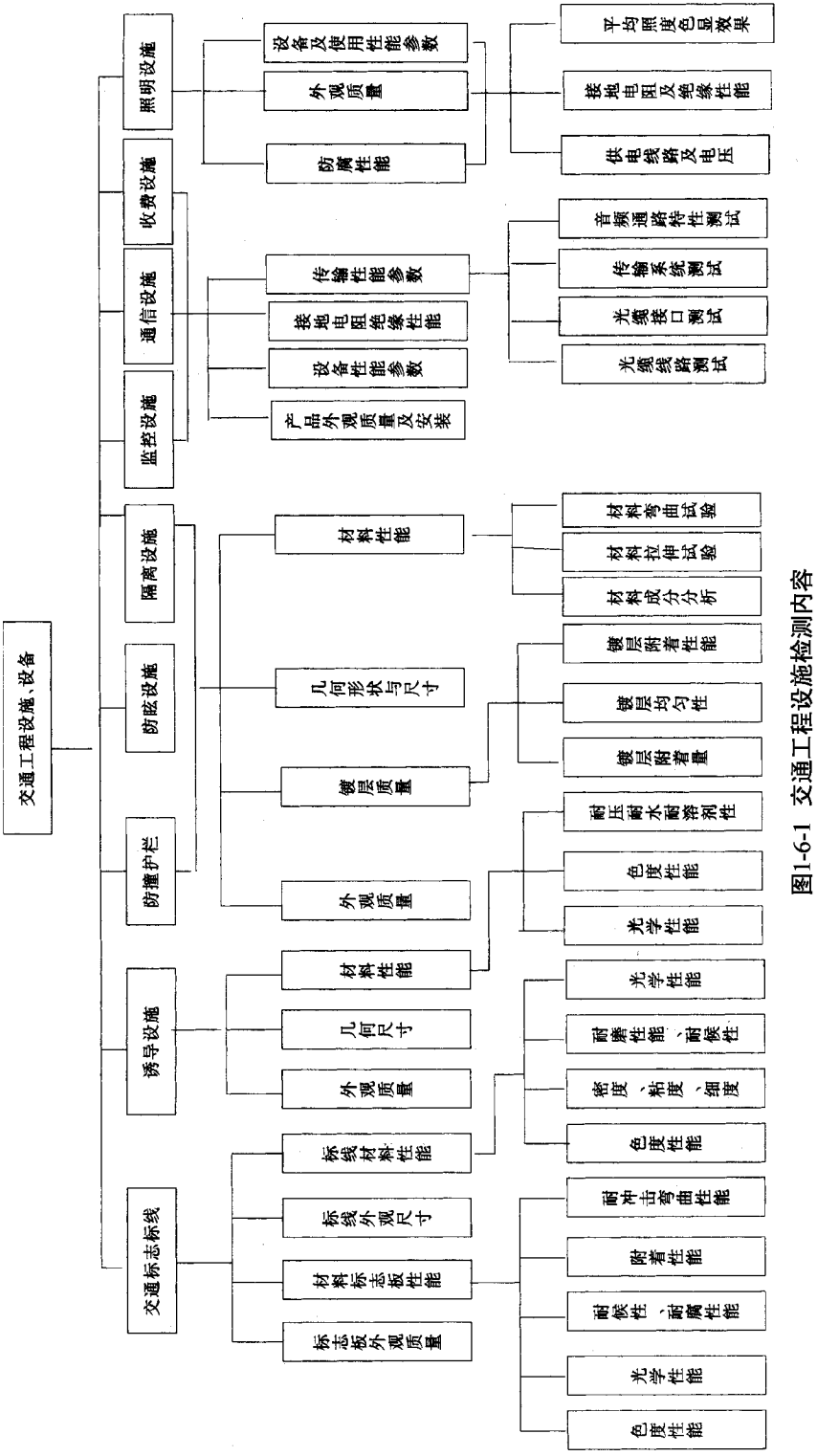


图1-6-1　交通工程设施检测内容

在随机抽样过程中，把抽样单元或单位产品按自然数从“1”开始顺序编号，然后用获得的随机数对号抽取。如抽样单元或单位产品不便编号时，例如批量很大的小元件，也可以获得随机数，然后逐个点数元件，按随机数抽取。

一、确定骰子个数

根据总体大小或批量 N 选定 m 个骰子，如下表示：

N 的范围	骰子个数 m
$1 < N < 10$	1
$11 < N < 100$	2
$101 < N < 1000$	3
$1001 < N < 10000$	4
$10001 < N < 100000$	5
$100001 < N < 1000000$	6

当 $m < 6$ 或骰子丢失、损坏等原因时，可采用重复使用骰子的方法，例如可用 1 个骰子摇 m 次来代替 m 个骰子摇 1 次。规定第 1 次摇骰子所得数字为随机数的最高位，摇第 2 次骰子所得数字为随机数的第 2 位，依此类推。

二、随机数的读取

方法一 如骰子表示的随机数 $R_0 \leqslant N$，则随机数 R 就取 R_0；若 $R_0 > N$，则舍弃不用，另行重摇。重复上述过程，直到取得 n 个不同的随机数为止。

例：$N = 753$，$m = 3$

a）若 $R_0 = 725$，则取 $R = R_0$

b）若 $R_0 = 234$，则取 $R = R_0$

c）若 $R_0 = 839$，则舍弃重摇

方法二 如骰子表示的随机数 $R_0 \leqslant N$，则随机数 R 就取 R_0；若 $R_0 > N$，则设 $R_0 = K_1 N + R_1$，K_1 为 $\frac{R_0}{N}$ 的整数部分。当 $(K_1 + 1) N < 10^m$ 时，舍弃重摇，当 $(K_1 + 1) N \leqslant 10^m$ 时，取 $R = R_1$（若 $0 < R_1 < N$）或取 $R = N$（若 $R_1 = 0$）。重复上述过程，直到获得 n 个不同的随机数为止。

例：$N = 350$，$m = 3$

a)若 $R_0 = 211$,则取 $R = R_0$

b)若 $R_0 = 452$,$K_1 = \left[\frac{452}{350}\right] = 1$,则($K_1 + 1$)$N = 2 \times 350 = 700 \leqslant 10^3$

$R_0 = K_1 N + R_1 = 1 \times 350 + 102$,$R_1 = 102$　取 $R = R_1 = 102$

c)若 $R_0 = 810$,$K_1 = \left[\frac{810}{350}\right] = 2$

由于($K_1 + 1$)$N = 3 \times 350 = 1050 > 10^3$　故舍弃重摇

方法三 如骰子表示的随机数 $R_0 \leqslant N$,则随机数 R 就取 R_0;若 $R_0 > N$,则取一个大于 N 的适当整数为 M。一般取 $M = 2 \times 10^{m-1}$,$2.5 \times 10^{m-1}$,$3 \times 10^{m-1}$ 或 $5 \times 10^{m-1}$,设 $R_0 = K_2 M + R_2$,K_2 为$\frac{R_0}{M}$的整数部分,M 为大于 N 的适当整数。则当($K_2 + 1$)$M > 10^m$ 时,舍弃重摇;当($K_2 + 1$)$M < 10^m$ 时,$R = R_2 < N$ 或 $R = N$(若 $R_2 = 0$)或舍弃重摇(若 $R_2 > N$)。重复上述过程,直到获得 n 个不同的随机数为止。

例:$N = 2677$,$m = 4$,取 $M = 3000$

a)若 $R_0 = 9012$,$K_2 = \left[\frac{9012}{3000}\right] = 3$

由于($K_2 + 1$)$M = 4 \times 3000 = 12000 > 10^4$　故舍弃重摇

b)若 $R_0 = 7820$,$K_2 = \left[\frac{7820}{3000}\right] = 2$

$R_0 = 7820 = 2 \times 3000 + 1820$,$R_2 = 1820$

由于($K_2 + 1$)$M = 3 \times 3000 = 12000 < 10^4$　且 $0 < R_2 < N$

故取 $R = R_2 = 1820$

c)若 $R_0 = 5891$,$K_2 = \left[\frac{5891}{3000}\right] = 1$

$R_0 = 5891 = K_2 M + R_2 = 3000 + 2891$,$R_2 = 2891$

($K_2 + 1$)$M = 2 \times 3000 = 6000 < 10^4$　但 $R_2 = 2891 > N$　故舍弃重摇

简单随机抽样适用于抽样单元间的差异不太大的情况。如果总体中包含了几个具有不同特征的部分,样本容量较小时,总体的代表性有时很差。

系统抽样是把总体中各抽样单元按一定秩序排列起来,并按一定间隔(空间和时间)抽取一个单元构成一个样本。系统抽样操作容易,因为被抽样单元在总体中的分布比较均匀,因而所得样本的代表性常优于简单随机抽样。

分层抽样是将总体可按一定特征分成几个层次,再从各层次中按简单随机抽样或系统抽样的方法抽取适当数目的单元,组成一个样本。

这些抽样方法都希望减少结果中可能出现的量测误差及选择的样本无代表性。每种方法选择的样本数量应与总体估算精度相一致，即按所含抽样样品的数目和标准差来确定。样本数量的选定涉及以下两步骤：

1. 由于抽样的目的是获得关于在某特定总体中要素的性质和分布的数据，选择样本数量时，须对这些要素的分布形式作出假设。通常假设总体是正态分布，正态分布的一个重要特性是不管一个特定正态分布的平均值 μ 和标准差 σ 如何，观察值的相同比率将总是落在平均值和特定的标准差之间。

2. 样本容量误差的范围通常规定为：一个数据项的样本均值对某一个样本百分比而言，应当在平均真值的某一值 d 以内，落在要求的误差范围以内的样本百分比称为置信度。

当对样本总体作出了分布假设之后，根据样本抽样的精度要求，可确定样本数量，即：

$$n = \left(t_\alpha \cdot \frac{\sigma}{d} \right)^2 \tag{1-6-1}$$

式中　n——样本数量；

d——平均值的容许误差范围；

σ——总体分布的标准差；

t_α——相应于置信度的标准正态统计量。

由于上式中 σ 往往是未知数，可通过样本标准差 S 来估算 σ_1，从而确定样本容量。在 GB/T 15482 和 GB/T 14162 中分别确定了连续批、孤立批抽样的方法和抽样样本容量。对样本数量进行检测时，其不合格数反映了总体质量水平。若假设单元总体中有 M 个单元不合格，现从中任意取 n 个单元，则这 n 个单元中所含的不合格数 X 是一个离散性随机变量，X 的概率分布为超几何分布，恰有 M 个不合格单元的概率为：

$$P\{X = m\} = \frac{C_M^m \cdot C_{N-M}^{n-m}}{C_N^n} (m = 0,1,2,\cdots,l)$$

$$l = \min(M, n)$$

若不合格数 m 是一个随机变量，它服从泊松分布，则：

$$P\{X = m\} = \frac{(np)^m}{m} e^{-np}$$

式中　P——不合格品率。

基于假定的不合格概率 α，就可确定样本中的不合格数。

第六节　检测步骤及结果判定

一、检测步骤

①检查产品包装、标志、运输、贮存、质量证明书；

②查阅产品原材料质量证书、所用原材料质量保证书；

③统计产品种类与数量；

④根据规定进行随机抽样；

⑤现场检测；

⑥现场检测完毕，抽取产品试样；

⑦根据标准规定做各种理化试验；

⑧结果判定。

二、结果判定

①当检测步骤中①、②条的有关规定合格后，方可进行产品质量的判定。

②护栏、隔离栅、防眩设施的质量的合格判定，按表 1－6－1 进行，交通标志、视线诱导设施质量的合格判定按表 1－6－2 进行，只有当不合格的样品数不大于表中要求的数据时，该项目才合格。

表 1－6－1　合格判定数的确定

样本数	20	32	80
合格判定数	1	2	3

表 1－6－2　合格判定数的确定

样本数	＜20	32	50
合格判定数	0	1	3

③对交通标志、视线诱导设施，当原材料性能和镀层质量的所有指标同时合格后方判该两项性能合格。

④对护栏、隔离栅、防眩设施，当产品的外观质量、镀层质量、外形尺寸和原材料性能共四项性能完全合格时判该批产品合格。

⑤检测不合格，当供货方提出申诉时：若该项目是非现场检测项目，则从同一批产品中再取双倍数量的试样进行复检，复检结果要求所有试样的所有指标完全合格；若复验项目是现场检测项目，则按规定抽取比初检样品数大的下一级样品数，复检结果要求该项目的所有指标完全合格，否则该批产品质量维持原判。

第七节　数据统计分析与处理

定量分析离不开测量，在测量过程中，被测对象、检测系统、检测方法和检测人员都会受到各种变动因素的影响，这就造成了检测结果和被测量的客观值之间存在一定的差别，这个差值称为测量误差。误差自始至终存在于一切科学实验和测量之中，被测量的真值是永远难以得到的。尽管如此，人们仍然可以设法改进检测工具和实验手段，并通过对检测数据的误差分析和处理，使测量误差处在允许的范围之内；或者说达到一定的测量精度，使测量结果是合理可信的。

在分析测量时，人们采用的被测量真值是指在确定的时间、地点和状态下，所测量出来的实际值。该实际值主要以平均值来反映，常用的有算术平均值、均方根平均值、加权平均值。

为了便于对误差进行分析和处理，人们通常把测量误差从不同角度进行分类。按照误差的表示方法可以分为绝对误差和相对误差；按照误差出现的规律，可以分为系统误差、随机误差和粗大误差；按照被测量与时间的关系，可以分为静态误差和动态误差等。

一、绝对误差与相对误差

(一)绝对误差

绝对误差是仪表的指示值 x 与被测量的真值 x_0 之间的差值，记做 δ：

$$\delta = x - x_0$$

绝对误差有符号和单位，它的单位与被测量真值相同。引入绝对误差后，被测量真值可以表示为：

$$x_0 = x - \delta = x + c$$

式中 $c = -\delta$，称为修正值或校正量，它与绝对误差的数值相等，但符号相反。

绝对误差愈小，说明指示值愈接近真值，测量精度愈高。但这一结论只适用于被测量值相同的情况，而不能说明不同值的测量精度。例如，某测量长度的仪器，测量 10mm 的长度，绝对误差为 0.001mm；另一仪器测量 200mm 长度，误差为 0.01mm，这就很难按绝对误差的大小来判断测量精度高低了。这是因为后者的绝对误差虽然比前者大，但它相对于被测量的值却显得较小。为此，人们引入了相对误差的概念。

(二)相对误差

相对误差是仪表指示值的绝对误差 δ 与被测量真值 x_0 的比值，常用百分数表示，即：

$$r = \frac{\delta}{x_0} \times 100\% = \frac{x - x_0}{x_0} \times 100\%$$

相对误差比绝对误差能更好的说明测量的精确程度。在上面的例子中：

$$r_1 = \frac{0.001}{10} \times 100\% = 0.01\%$$

$$r_2 = \frac{0.01}{200} \times 100\% = 0.005\%$$

显然，后一种长度测量仪表更精确。

在实际测量中，由于被测量的真值是未知的，而指示值又很接近真值。因此，可以用指示值 x 代替真值 x_0 来计算相对误差。

使用相对误差来评定测量精度也有局限性。它只能说明不同测量结果的准确程度，但不适用于衡量测量仪表本身的质量。因为同一台仪表在整个测量范围内的相对误差不是定值，随着被测量数值的减小，相对误差变大。为了更合理地评价仪表质量，可采用引用误差的概念。

引用误差是绝对误差 δ 与仪表量程 L 的比值，通常以百分数表示。引用误差可表示为：

$$r_0 = \frac{\delta}{L} \times 100\%$$

如果以测量仪表整个量程中，可能出现的绝对误差最大值 δ_m 代替 δ，则可得到最大引用误差 r_{0m}：

$$r_{0m} = \frac{\delta_m}{L} \times 100\%$$

对一台确定的仪表或一个检测系统，最大引用误差就是一个定值。测量仪表一般采用最大引用误差不能超过的允许值为划分精度等级的尺度。

在具体测量某个量值时，相对误差可以根据精度等级所确定的最大绝对误差和仪表指示值进行计算。

显然，精度等级已知的测量仪表只有在被测量值接近满量程时，才能发挥它的测量精度。因此，使用测量仪表时，应当根据被测量值的大小和测量精度要求，合理地选择仪表量程和精度等级，只有这样才能提高测量精度。

二、系统误差与随机误差

（一）系统误差

在相同的条件下，多次重复测量同一量时，误差的大小和符号保持不变或按照一定的规律变化，这种误差称为系统误差。其误差的数值和符号不变的称为恒值系统误差，反之称为变值系统误差。变值系统误差又可分为累进性的、周期性的和按复杂规律变化的几种类型。

检测装置本身性能不完善、测量方法不完善、测量者对仪器使用不当、环境条件的变化等原因都可能产生系统误差。例如，某仪表刻度盘分度不准确，就会造成读数偏大或偏小，从而产生恒值系统误差。温度、气压等环境条件的变化和仪表电池电压随使用时间的增长而逐渐下降，则可能产生变值系统误差。

系统误差的特点是可以通过实验或分析的方法，查明其变化规律和产生原因，通过对测量值的修正，或者采取别的预防措施，就能够消除或减少它对测量结果的影响。

系统误差的大小表明测量结果的正确度。它说明测量结果相对真值有一恒定误差，或者存在着按确定规律变化的误差。系统误差愈小，则测量结果的正确度愈高。

（二）随机误差

在相同条件下，多次测量同一量时，其误差的大小和符号以不可预见的方式变化，这种误差称为随机误差。随机误差是测量过程中，许多独立的、微小的、偶然的因素引起的综合结果。

在任何一次测量中，只要灵敏度足够高，随机误差总是不可避免的。而且在同一条件下，重复进行的多次测量中，它或大或小、或正或负，既不能用实验方法消除，也不能修正。但是，利用概率论的一些理论和统计学的一些方法，可以掌握看似毫无规律的随机误差的分布特性，确定随机误差对测量结果的影响。

随机误差的大小表明测量结果重复一致的程度，即测量结果的分散性。通常，用精密度表示随机误差的大小：随机误差大，测量结果分散，精密度低；反之，测量结果的重复性好，精密度高。

精确度是测量的正确度和精密度的综合反映，精确度高意味着系统误差和随机误差都很小。精确度有时简称为精度。

三、随机误差的处理方法

(一)随机误差的分布特性

自然界中，某一事件或现象出现的客观可能性大小，通常可用概率来表示。

客观的必然现象称为必然事件，例如，平面三角形内角和为 180°，就是一个必然事件，必然事件的概率为 1。

违反客观实际的不可能出现的现象称为不可能事件，不可能事件的概率为零。

客观上可能出现，也可能不出现，而且不能预测的现象称为随机事件或随机现象。它具有一定的概率，且概率在 0 和 1 之间。例如，抛掷硬币，出现正面朝上或反面朝上的现象，即为一随机事件。当抛掷次数无限加多时，大量的实验证明，它们的概率接近 0.5。

在研究随机事件的统计规律时，概率是一个重要的概念。它是随机事件统计规律性的表现，是随机事件的固有特性；同时应当注意到概率是个统计概念，只有在大量重复实验中，对整体而言才有意义。

在相同的条件下，对某个量重复进行多次测量，在排除系统误差和测量坏值(粗大误差)之后，测量结果的随机误差在某个范围内取值的可能性，就是一个随机事件的统计概率问题。

下面是一组无系统误差和粗大误差的独立的等精度长度测量结果。用长 300mm 的钢板尺，测量已知长度为 836mm 的导线，共测量了 150 次，即 $n = 150$。现将测量结果，对应的误差 δ_i，各误差出现的次数 n_i 等列于表 1－6－3 中。

表 1－6－3　等精度长度测量结果

区间号	测量值 x_i (mm)	误差值 δ_i (mm)	出现次数 n_i	频率 n_i/n (%)
1	831	－5	1	0.66
2	832	－4	3	2.00
3	833	－3	8	5.33
4	834	－2	18	12.00
5	835	－1	28	18.66
6	836	0	34	22.66
7	837	＋1	29	19.33

区　间　号	测　量　值 x_i (mm)	误　差　值 δ_i (mm)	出现次数 n_i	频　　率 n_i/n (%)
8	838	+2	17	11.33
9	839	+3	9	6.00
10	840	+4	2	1.32
11	841	+5	1	0.66

为了便于统计，在这里我们将测量结果分成了 11 个区间，区间长度 $\Delta x_i = 1\text{mm}$。因此，测量误差也相应地分成 11 个区间，误差区间长度 $\Delta\delta_i = 1\text{mm}$。

表 1－6－3 中还列出根据统计结果计算得到的频率（n_i/n）的数值。它表示测量值或随机误差落在某个区间的相对次数。

在直角坐标图上，以频率（n_i/n）为纵坐标，以随机误差 δ_i 为横坐标，画出它们的关系曲线，得到频率直方图，或称统计直方图，如图 1－6－2 所示。

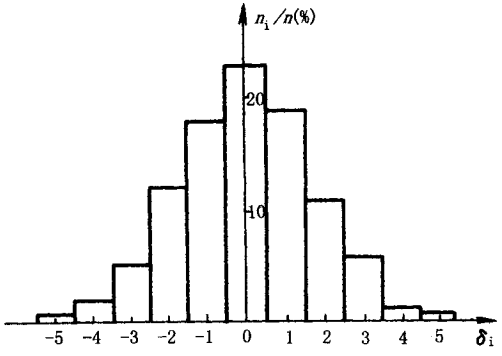


图 1－6－2　随机误差的统计直方图

如果改变区间长度 $\Delta\delta_i$ 的取值，相应的频率值（n_i/n）也会发生变化，对同一组测量数据，频率直方图将不相同。如果以 $n_i/(n\Delta\delta)$ 这个量做为纵坐标，就可以避免这个问题。

当测量次数 $n\to\infty$ 时，令 $\Delta\delta\to\mathrm{d}\delta$，$n_i\to\mathrm{d}n$，无限多个直方图中，顶点的连线应形成一条光滑的连续曲线，这条曲线称为随机误差正态分布曲线。此时，$n_i/(n\Delta\delta)$ 的极限 $f(\delta)$ 称为概率密度，即：

$$f(\delta)=\lim_{n\to\infty}\frac{n_i}{n\Delta\delta}=\frac{1}{n}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}\delta}$$

$f(\delta)-\delta$ 的图形如图 1－6－3 所示。显然，曲线下阴影部分的面积等于 $f(\delta)\mathrm{d}\delta=$

$\frac{dn}{n}$，它表示随机误差值落在图中所示 $d\delta$ 的微小区间内的概率。

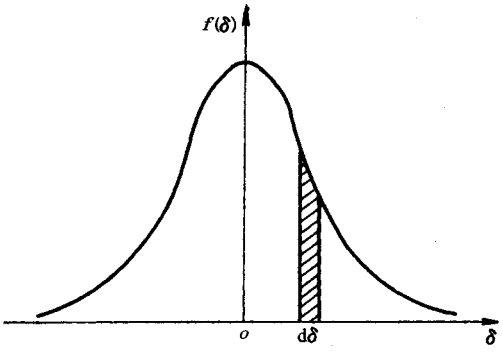


图 1－6－3　随机误差的正态分布曲线

(二)算术平均值和标准偏差

用解析的方法推导出随机误差正态分布曲线的数字表达式，即正态概率密度分布函数。

$$f(\delta)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) \tag{1-6-2}$$

式(1－6－2)称为高斯误差方程。式中，σ 是均方根误差，或称标准误差，标准误差 σ 可由下式求得：

$$\begin{aligned}\sigma &= \lim_{n\to\infty}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-x_0)^2}\\ &= \lim_{n\to\infty}\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_i^2}\end{aligned} \tag{1-6-3}$$

计算 σ 时，必需已知真值 x_0，并且需要进行无限多次等精度重复测量。这显然是很难做到的。

根据长期的实践经验，人们公认，一组等精度的重复测量值的算术平均值最接近被测量的真值，可以利用算术平均值 $\overline{x}$ 代替真值 x_0。来计算式(1－6－3)中的 δ_{io}，即：

$$\overline{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i=\frac{x_1+x_2+\cdots+x_n}{n} \tag{1-6-4}$$

此时，式(1－6－3)中的 $\delta_i=x_i-x_0$，就可以改换成 $v_i=x_i-\overline{x}_0$。v_i 称为剩余误差，剩余误差的特点是不论 n 为何值，总有：

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{n}v_i &= \sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})=\sum_{i=1}^{n}x_i-\sum_{i=1}^{n}\overline{x}\\ &= n\overline{x}-n\overline{x}=0\end{aligned} \tag{1-6-5}$$

由此，我们可以看到，采用由 n 个测量值计算出的算术平均值和这 n 个测量值，计算出($n-1$)个剩余误差后，余下的第 n 个剩余误差就不再是独立的了，它可由式(1－6－5)确定。也就是说，虽然我们可以求得 n 个剩余误差，但实际上它们之中只有($n-1$)个是独立的。考虑到这一点，测量次数 n 为有限值时，标准误差的估计值 $\hat{\sigma}$ 可由下式计算：

$$\hat{\sigma}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}v_i^2} \tag{1-6-6}$$

式(1－6－6)称为贝塞尔公式。

在一般情况下，我们对 σ 和 $\hat{\sigma}$ 并不加以严格区分，统称为标准误差。标准误差 σ 在评价正态分布的随机误差时具有特殊的意义。理论计算表明：

(1)介于($-\sigma$，$+\sigma$)之间的随机误差出现的概率为：

$$\int_{-\sigma}^{+\sigma}f(\delta)\,\mathrm{d}\delta=0.6827$$

(2)介于(-2σ，$+2\sigma$)之间的随机误差出现的概率为：

$$\int_{-2\sigma}^{+2\sigma}f(\delta)\,\mathrm{d}\delta=0.9545$$

随机误差出现在此区间之外的概率为 $1-0.9545=0.0455=4.55\%$。

(3)介于(-3σ，$+3\sigma$)之间的随机误差出现的概率为：

$$\int_{-3\sigma}^{+3\sigma}f(\delta)\,\mathrm{d}\delta=0.9973$$

而出现在此区间之外的概率仅为 $1-0.9973=0.0027<0.3\%$。

因此，在 1000 次等精度测量中，只可能有 3 次随机误差超过(-3σ，$+3\sigma$)区间，实际上可以认为这种情况很难发生。

上述结论说明，标准误差 σ 的大小可以表示测量结果的分散程度。图 1－6－4 给出不同 σ 值的三条正态分布曲线。由此可见，σ 值愈小，则分布曲线愈尖锐；也就是说，测量结果的分散性较小，因此 σ 小可说明测量的精度密度高。对 σ 值大的分布曲线可以得到相反的结论。

但是，标准误差 σ 并不是某次测量的具体误差。各次测量的具体误差可大可小、可正可负，完全是随机的，具体误差恰好等于 σ 的可能性极小。然而，可以通过在一定测量条件下，进行一系列等精度测量，确定出标准误差 σ 的值，以此说明随机误差概率密度的分布情况，并作为评价测量结果的精密度的指标。

同一条件下的多次测量是用算术平均值 $\overline{x}$ 作为测量结果的，即取 $\overline{x}$ 作为被测量的真值。我们可以在相同的条件下，对被测量值进行 n'组测量，每组测量 n 次，对各组测量值都可以求出相应的算术平均值，由于存在随机误差，这些算术平均值也不会完全相同，

它们围绕被测量真值也有一定的分散性。为此，引入了算术平均值的标准误差 $\sigma_{\bar{x}}$ 作为评价 $\overline{x}$ 分散性的指标，理论计算证明：

$$S = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \delta_i^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{1-6-7}$$

此式说明，n 次等精度测量中，算术平均值的标准误差是测量值的标准误差的 $\frac{1}{\sqrt{n}}$ 倍，一般测量时取 $n = 5 \sim 10$ 次即可。

（三）测量结果的正确表示

在消除系统误差的前提下，通过一系列等精度测量，用测得的数据求得标准误差的估计值 σ 后，即可根据式（1-6-1）给出的概率密度分布函数，通过积分运算，求出随机误差落在指定区间 $[-a, +a]$ 内的概率值，从而预计测量值出现在 $[x_0 - a, x_0 + a]$ 区间内的概率。当随机误差出现在某一指定区间内概率足够大时，该测量误差的估计值就具有较大的可信度。此时，测量值落在 $[x_0 - a, x_0 + a]$ 区间内的可信度也较大。上述 $[-a, +a]$ 区间就叫置信区间，相应的概率值叫做置信概率，置信区间和置信概率结合起来表明测量的置信度。

为正确表示测量结果，通常使置信区间取标准误差的整数倍，此倍数称为置信系数。适当确定置信系数，测量结果就可以有较高的置信概率。

对 n 次等精度测量，在无系统误差和粗大误差的情况下，它的测量结果，即被测量的真值，可以用算术平均值 $\overline{x}$ 表示如下：

$$x_0 = \overline{x} \pm Ks = \overline{x} \pm K\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) \tag{1-6-8}$$

如果取置信系数 $K = 2$，则测量结果可表示为：

$$x_0 = \overline{x} \pm 2s = \overline{x} \pm 2\left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right)$$

上式表明，算术平均值与真值的误差落在置信区间 $\pm 2s$ 内的置信概率为 95%。

当取 $K = 3$ 时，置信区间为 $\pm 3s$，置信概率为 99.7%。

在上述 n 次等精度测量中，测量结果的极限范围 x_m 可用下式表示：

$$x_m = \overline{x} \pm K\sigma \tag{1-6-9}$$

当 $K = 2$ 时，测量结果出现在式（1-6-9）所确定的极限范围内的概率为 95.4%；当 $K = 3$ 时，其概率为 99.7%。

如果以单次测量值来表示测量结果，则有：

$$x_0 = x_i \pm K\sigma \tag{1-6-10}$$

取置信系数 K 为 2 或 3 时，置信区间分别为 $\pm 2\sigma$ 和 $\pm 3\sigma$，置信概率则分别为 99.4%和 99.7%。

对一台已知精度等级的测量仪器，在没有系统误差和粗大误差的条件下，用此仪器进行单次测量时，式(1-6-10)就是测量结果的正确表示方法。此时由仪表精度等级和仪表量程可确定出绝对误差最大值，它相当于随机误差极限值 2σ 或 3σ。但是，也应当防止无根据的随意丢掉一些误差大的测量值。对怀疑为坏值的数据，应当加以分析，尽可能找出产生坏值的明确原因，然后再决定取舍。实在找不到产生坏值的原因，或不能确定哪个测量值是坏值时，可以按照统计学的异常数据处理法则，判别坏值并加以舍弃。其基本思路是给定一个置信概率，然后确定相应的置信区间，凡超出此区间的误差被认为是粗大误差，相应的测量就是坏值，应予以剔除。统计判别法的准则很多，在这里我们介绍拉依达准则(3σ 准则)。

设对被测量进行等精度测量，独立得到 $x_1, x_2, \cdots, x_n$，算出其算术平均值 $\overline{x}$ 及剩余误差 $v_i = x_i - \overline{x}$ $(i = 1, 2, \cdots, n)$，并按贝塞尔公式算出标准误差 σ，若某个测量值 x_b 的剩余误差 v_b $(1 \leqslant b \leqslant n)$ 满足下式：

$$|v_b| = |x_b - \overline{x}| > 3\sigma \tag{1-6-11}$$

则认为 x_b 是含有粗大误差的坏值，应予剔除。

使用此准则时应当注意，在计算 $\overline{x}$、v_i 和 σ 时，应当使用包含坏值在内的所有测量值。按照式(1-6-11)剔除坏值后，应重新计算 $\overline{x}$ 和 σ，再用拉依达准则检验现有的测量值，看有无新的坏值出现。重复进行，直到检查不出新的坏值时为止，此时，所有测量值的剩余误差均在 $\pm 3\sigma$ 范围之内。

拉依达准则简便且易于使用，因此得到广泛应用。但它是在重复测量次数 $n \to \infty$ 的前提下建立的，当 n 有限，特别是当 n 较小时，该准则并不可靠，此时可采用其他统计判别准则。

四、系统误差的消除方法

为了尽量减小或消除系统误差对测量结果的影响，可以从两方面入手。首先，在测量之前，必须尽可能预见一切可能产生系统误差的来源，并设法消除它们或尽量减弱其影响。例如，测量前对仪器本身性能进行检查，必要时送计量部门检定，取得修正曲线或表格；使仪器的环境条件和安装位置符合技术要求的规定；对仪器在使用前进行正确的调整；严格检查和分析测量方法是否正确等。其次，在实际测量中，采用一些有效的测量

方法，来消除或减小系统误差。目前主要采用交换法、抵消法、代替法、对称测量法和补偿法。

（一）交换法

在测量中，将引起系统误差的某些条件（如被测量的位置等）相互交换，而保持其他条件不变，使产生系统误差的因素对测量结果起相反的作用，从而抵消系统误差。

例如，以等臂天平称量时，由于天平左右两臂长的微小差别，会引起称量的恒值系统误差。如果被称物与砝码在天平左右称盘上交换，称量两次，取两次测量平均值作为被称物的质量，这时测量结果中就不含有因天平不等臂引起的系统误差。

（二）抵消法

改变测量中的某些条件（如测量方向），使前后两次测量结果的误差符号相反，取其平均值以消除系统误差。

例如，千分卡尺有空行程，即螺旋旋转时，刻度变化，量杆不动，在检定部位产生系统误差。为此，可从正反两个旋转方向对线，顺时针对准标志线读数为 d，不含系统误差时值为 a，空行程引起系统误差 ε，则有 $d = a + \varepsilon$；第二次逆时针旋转对准标志线、读数 d'，则有 $d' = a - \varepsilon_0$，于是正确值 $a = (d + d')/2$，正确值 a 中不再含有系统误差。

（三）代替法

这种方法是在测量条件不变的情况下，用已知用量替换被测量，达到消除系统误差的目的。

仍以天平为例，先使平衡物 T 与被测物 X 相平衡，则 $X = \dfrac{L_2}{L_1} T$；然后取下被测物 X，用砝码 P 与 T 达到平衡，得到 $P = \dfrac{L_2}{L_1} T$，取砝码数值作为测量结果。由此得到的测量结果中，同样不存在因 L_1、L_2 不等而带来的系统误差。