

论精密工程测量及其应用

张正禄¹, 邓 勇¹, 罗长林¹, 刘祖强², 杨 红²

(1. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 长江水利委员会 三峡勘测研究院, 湖北 宜昌 443003)

On Precise Engineering Surveying and Its Application

ZHANG Zheng-lu, DENG Yong, LUO Chang-lin, LIU Zu-qiang, YANG Hong

摘要:给出精密工程测量的定义, 阐述精密工程测量的特点, 论述它的理论、技术和方法、数据处理方法、专用仪器以及软件研制等内容, 用实例说明其用处。

关键词:精密工程测量; 测量机器人; 工程变形监测; 专用仪器; 测量软件; 控制网布设

一、精密工程测量的定义和特点

工程测量分为普通工程测量和精密工程测量。仿照工程测量学的定义, 精密工程测量主要是研究地球空间中具体几何实体的精密测量描绘和抽象几何实体的精密测设实现的理论、方法和技术。精密工程测量代表工程测量学的发展方向。所谓精密, 顾名思义是精确严密。

精密工程测量的最大特点是要要求的测量精度很高。精度这一概念包含的意义很广, 分相对精度和绝对精度。相对精度又有两种, 一种是一个观测量的精度与该观测量的比值, 比值越小, 相对精度越高, 如边长的相对精度。但比值与观测量及其精度这两个量都有关, 同样是 1:1 000 000, 观测量是 10 m 和是 10 km 时, 精度分别为 0.01 mm 和 10 mm, 故有可比性较差的缺点; 另一种是一点相对于另一点, 特别是邻近点的精度, 这种相对精度与基准无关, 便于比较, 但是各种组合太多, 如有 100 个点, 每一个点就有 99 个这样的相对精度。绝对精度也有两种, 一是指一个观测量相对于其真值的精度, 这一精度指标应用最多(下面所提精度, 都指这种精度)。由于真值难求, 通常用其最或是值代替。但这一绝对精度指标也有弊病, 有时, 它也与观测量的大小有关, 如长度观测量。另一种是指一点相对于基准点的精度, 该精度与基准有关, 并且只能在相同基准下比较。

由于精度的含意较多, 而且随测量技术的发展又在不断提高, 有什么精度要求的测量才能称为精

密工程测量就很难给出一个确切的定义。这里我们给出以下定义: 凡是采用一般的、通用的测量仪器和方法不能满足工程对测量或测设精度要求的测量, 统称精密工程测量。

大型工程、特种工程中并非所有的测量都是精密工程测量。因此, 大型工程、特种工程不能与精密工程并列。但是, 大型特种工程中一定包括一些或许多精密工程测量。3 维工业测量、工程变形监测中的许多测量也属于精密工程测量。就精度而言, 在工业测量中, 在设备的安装、检测和质量控制测量中, 精度可能在计量级, 如微米乃至纳米; 在工程变形监测中, 精度可能在亚毫米级; 在工程控制网建立中, 精度可能在毫米级。长、大隧道的横向贯通精度虽然在厘米、分米级, 但对测量精度要求很高, 仍属于精密工程测量。

精密工程测量的另一个特点是对测量的可靠性要求也很高, 包括测量仪器的鉴定检核、测量标志的稳定、测量方法的严密、测量方案的优选、观测量之间的相互检查控制, 以及严密的数据处理和对测量的质量检查控制以及监理等等。

二、精密工程测量研究的主要内容

精密工程测量的研究内容主要包括精密工程测量的理论、技术、方法、专用的仪器设备以及测量软件研发等方面。

精密工程测量的理论、技术和方法是以大地测量学为基础的。因为所有测量工作都要涉及参考面和线, 如地球椭球体、大地水准面、垂线、经纬线、真

收稿日期: 2005-12-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2003CB716705); 欧盟国际合作基金资助项目(EVGF-CT-2002-00061)

作者简介: 张正禄(1944-), 男, 四川渠县人, 教授, 博士生导师, 现主要从事精密工程测量、变形监测分析与预报、测量数据处理和工程信息系统方面的科研和教学工作。

北方向等。对于工程而言,小范围要求在几何平面上进行设计施工放样,大范围有时要穿过好几个 3 度带,而且高差也较大,就必须作椭球面向平面的归化计算,作局部大地水准面的精化,以及换带和投影计算。归化、投影等改正计算误差必须小于测量误差。因而,工程基准面和局部坐标系的设计是精密工程测量的重要问题。

工程控制网在许多方面有别于国家大地测量控制网。网的优化设计、精度、可靠性、费用和灵敏度设计计算要求更加精细,如要求采用基于观测值内部可靠性的精密测量控制网模拟法优化设计、观测值多维粗差定位与定值和方差分量估计算法等。一般来说工程控制网的长短边相差悬殊,点之间高差也很大, GPS 和地面观测条件都较差(顶空障碍大,受旁折光和垂直折光影响等),这就要求对网作精心布设。同时还涉及 GPS 边、地面边之间的精度匹配、地面边角测量精度匹配的影响。GPS 网、地面边角网以及混合网的布设问题涉及到测距三角高程测量、精密几何水准的选取以及对规范要求的理解等问题。GPS 网在很大程度上逐渐取代地面网,对于边长悬殊极大(从几十米到几十千米)的工程控制网,用精密星历解算基线,精度也可达毫米级,但对于许多精密工程来说,不能采用单纯的 GPS 网、GPS 网与地面网、特别是与高精度测边相结合乃是最新的发展方向。

在精密工程测量特别是工程变形分析中涉及到数据处理理论和方法的研究。如非线性随机模型的参数估计、非参数估计和半参数估计理论。对于海量变形监测数据处理,要研究数据挖掘理论与方法,即要从大量的、模糊的和随机的各种数据源中,提取隐含在其中的有用信息和知识。统计分析、模糊数学、人工神经网络、分形几何以及小波理论等是数据挖掘的基础理论。分类、模糊聚类、关联分析、回归分析、时序分析、偏差分析以及预测分析等是数据挖掘的常用方法。其中,分类用于规则描述,并用这种描述来构造模型;模糊聚类是把数据按相似性分成类,发现数据的分布模式以及数据属性间的关系;关联分析是寻找数据中隐藏的关联网、关联规则和相关性;预测分析是利用大量的已有数据通过建模找出变化规律,由此对未来数据及特征进行预测等等。采用人工神经网络技术可用于大坝变形预报,用模糊数学理论处理观测误差,采用模糊聚类分析可对大坝的安全进行评判。在变形的几何分析和物理解释基础上,要研究变形预报的理论和方法,涉及系统论、控制论、信息论、突变论、协同论、小波、分形、混

沌理论和耗散结构等许多非线性学科变形预报的系统论方法。主要有两种:一种是输入-输出模型法,即把变形体看作是一个具有非线性、耗散性、随机性、外界干扰不确定性等特点的复杂系统,各种外界影响因子为输入,而变形为输出,有回归分析法、时间序列法、卡尔曼滤波法和人工神经网络法等;另一种是动力学方程法,根据系统运动的物理规律建立确定的微分方程来描述系统的运动,在对系统受力和变形认识的基础上,用低阶、简化的,在数学上可求解和可分析的模型来模拟变形过程。

在精密工程测量仪器方面,多传感器集成测绘系统、激光跟踪仪、激光扫描仪、测量机器人、各种高精度 GPS 接收机、电子全站仪、水准仪以及各种专用测量仪器,为精密测绘提供了技术保障。其中,激光扫描仪可对被测对象在不同位置扫描、建模并转换到 CAD 成图,在土木工程、建筑监测、路桥设计、3 维建模、工业设计制造以及 GIS 数据采集等方面有广阔的应用前景。车载、机载激光扫描测量将成为地面数据采集的主要手段。一种由测量小车、测量机器人、激光测距断面仪、激光扫描仪和轨距、轨道高差、轨道里程传感器组成的高速铁路轨道测量系统是一种典型的多传感器集成测量系统,可实现铁道轨道的自动化测量,轨道限界 2 维断面测量和隧道 3 维断面测量其轨距和轨道高差精度可达到 0.5 mm(图 1)。由 GPS 接收机、激光测距仪组成的远程位移测量系统可实现无人值守的远距离遥控遥测遥传实时变形监测,可用于活动性滑坡临滑前的持续监测预报(图 2)。由各种专用监测仪器、现代大地测量仪器以及空对地观测仪器组成的立体监测系统,可实现对滑坡和各种工程建筑进行持续的自动监测和变形预报。

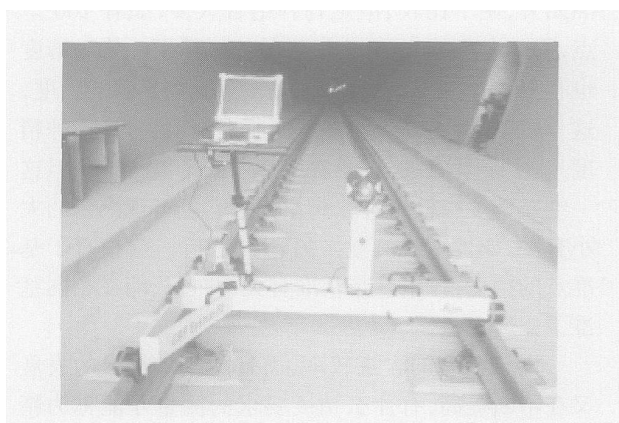


图 1 高速铁路轨道多传感器集成测量系统

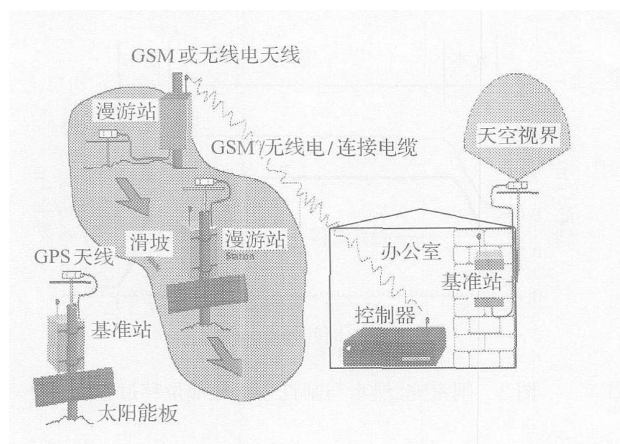


图2 远程位移多传感器集成监测系统

在现代测量中,软件的研发与测量仪器设备的研制具有同等重要的意义。精密工程测量的软件包括三大方面:与测量仪器或多传感器集成的测量系统相配套的随机软件;用于科研的科研型软件;面向广大用户的商品化通用软件。随机软件由厂商开发,如GPS接收机的基线向量解算和网平差软件,电子全站仪的机载软件等,目前多已实现汉化,具有最常用的功能;科研型软件的专用性强,具有特殊的和高难的功能。一般来说使用较复杂,不易掌握。如用精密星历解算长基线的Gamt, Berness软件。用于精密工程控制网数据处理和平差计算的科研型软件除了具有一般的常用功能外,还具备以下功能:可作自由网平差或拟稳自由网平差;可对不同类型、不同精度观测值按不等权进行整体平差;可作距离改化、方向改化计算;能自动组成全部三角形并作计算闭合差和限差检验;自动组成测角、测边全部极条件,并计算其自由项及限值;自动计算坐标方位角、基线或测距边条件的自由项及其限值;还可以作观测值的可靠性因子(多余观测分量)计算、边角权匹配计算、粗差检验及灵敏度分析等。

商用化通用软件的特点是功能强大,使用方便。下面介绍几个典型的商品化软件。

1. 现代精密工程测量控制网数据处理通用软件包Cosa. Win。可作任意网形(从导线、导线网到边角网、混合网、特殊网等)、任意规模(未知点数从1~10⁴)、任意等级平面网、水准网或三角高程网的各种严密数据处理:观测值改化、概算、近似坐标、闭合差自动计算、粗差探测、方差分量估计、隧道贯通误差影响值计算、地面网和GPS网优化设计、坐标转换、网图显绘、报表输出以及变形监测网的拟稳平差和变形分析等。

2. 精密GPS控制网通用平差软件包(Cosa.

GPS)。可与各种GPS接收机的基线向量软件接口,读入基线向量及其方差协方差,在WGS-84坐标系下进行3维网的无约束平差,在高斯平面坐标系下进行2维无约束平差、约束平差,与地面测边网联合平差,进行GPS高程拟合。

3. 测量机器人变形监测软件包。具有工程管理、系统初始化、学习测量、自动测量、数据处理、数据查询、成果输出、工具、帮助等功能。该软件包安装在便携机上,便携机和测量机器人连接,用软件包控制测量机器人工作。以基点(测量机器人的位置)为基准,一已知点定向,另一已知点检查,根据极坐标原理,可获得各个测点的坐标。该法外业观测简单省时,效率高。如对某滑坡监测,常规方法外业观测需3天,而采用该方法却不到2小时。数据处理也实现了自动化。

4. 测量机器人控制网自动观测软件包。可实现工程管理、参数设置、测站设置、学习测量、自动观测和成果输出等功能。该软件包是直接植入测量机器人,实现测量机器人自动观测,进行设置和初始观测后,测量机器人就可按照设定的精度、测回数等进行全自动观测。这样可大大节省外业观测的时间和人力,如某滑坡监测网有15个点,采用人工观测至少要15天,而用测量机器人仅需5天。还可与后续的软件相接,进行网平差。

三、精密工程测量的若干发展与应用

精密工程测量的发展也可概括为“四化”和“十六字”,所谓“四化”是:工程测量内外业作业的一体化,数据获取及其处理的自动化,测量过程控制和系统行为的智能化,测量成果和产品的数字化。“十六字”是:连续、动态、遥测、实时、精确、可靠、快速、简便。

包含精密工程测量的典型工程非常多,如我国举世瞩目的长江三峡工程和其他的大型水利枢纽工程,长达30 km多的杭州湾大桥、上海东海大桥以及其他特大桥梁工程,长18.5 km的秦岭隧道、长达85.3 km的大伙房引水隧道以及其他特长隧道工程,上海磁浮铁路、东方明珠塔和国家大剧院等特种工程,香港大佛工程,北京正负电子对撞机工程,大型大坝变形监测工程,高边坡和滑坡岩崩变形监测工程,大型设备的安装、检测和质量控制等都属于精密工程测量的范畴。

国外的典型大型工程、特种工程更是数不胜数,单就大型粒子加速器而言,欧洲原子核研究中心的环形正负电子对撞机LEP,整个工程位于直径

8.6 km、周长 27 km 且深度达百米的地下环形隧道,布设有 5 000 多块四极聚焦磁铁和两极弯转磁铁。瑞士的阿尔卑斯山隧道长 57 km,据报道其造价与我国的长江三峡工程相当。而建筑工程师梦寐以求的建造 2 000 m 乃至更高的摩天大厦,都是对精密工程测量的挑战。

下面以长江三峡工程永久船闸闸墙变形精密测量为例说明精密工程测量的应用。

永久船闸的变形关系到永久船闸能否正常运行。变形除受开挖边坡的时间效应、岩体年周期变化的影响外,主要与船闸运行过程中充、泄水有关。如果变形太大,会影响人字门的启闭和船闸的正常运行。对闸墙变形监测的精度要求极高(± 0.02 mm),观测周期可任意调整(最小周期为 1 min)。

为快速及时地监视永久船闸有水系统联合调试和运行初期的建筑物的变形工况,建立了正、倒垂线和引张线组成的半自动化监测系统。用正、倒垂线装置监测闸首边墙变形对人字门门枢垂直度的影响;用引张线法监测闸室边墙顶的水平位移;用几何水准测量法监测闸首基础和闸顶的垂直位移。其中正、倒垂线测点均采用遥测垂线坐标仪(精度 ± 0.01 mm)。

南五闸室充、泄水过程墙与中南边墙顶部位移过程线见图 3。

1. 闸室充满水后,闸顶背向闸室位移,泄水后,闸顶向闸室位移,变化在 0.5 mm 以内。泄水后不可回复的最大位移为 0.06 mm。

2. 充水用时 10 min,墙顶在第 11 min 时到达最大位移 - 0.36 mm。中隔墩变形较南边墙反应快,在闸室水位滞留的 50 min 时间里,闸墙位移一直稳定在满水时刻的位移值;泄水从第 61 min 开始,第

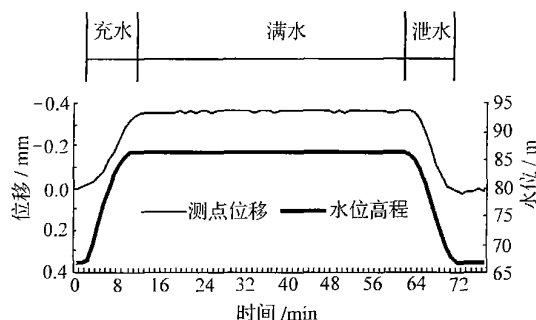


图 3 闸室充、泄水与闸首边墙顶部位移过程线

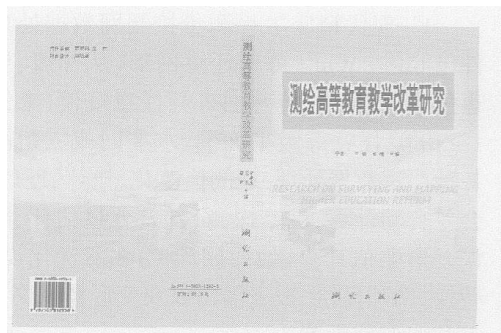
74 min 结束。墙顶在第 62 min 开始位移,第 68 min 时回复到 - 0.01 mm 位置。在闸室泄水到 86 %时,边墙的回复变形就已经完成,说明永久船闸运行初期建筑物变形工况良好。

参考文献:

- [1] 张正禄,吴栋材,杨 仁.精密工程测量[M].北京:测绘出版社,1992.
- [2] 张正禄.工程测量学[M].武汉:武汉大学出版社,2005.
- [3] 张松林,张正禄,罗年学.GPS平面控制网的模拟设计计算方法及其应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2004,29(8):711-714.
- [4] 张正禄,邓 勇,罗长林,等.精密三角高程代替一等水准测量的研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2006,(1):5-8.
- [5] 张正禄,张松林,张 军,等.特高精度水电站施工控制网分析与研究[J].大坝与安全,2002(5):17-20.
- [6] 刘祖强,杨 红,廖永龙.三峡永久船闸建筑物变形特性分析[J].水电站自动化与坝观测,2005,9(2):59-63.

《测绘高等教育教学改革研究》出版

[本刊讯]《测绘高等教育教学改革研究》近日已由测绘出版社出版。该书由宁津生院士,王依、翟翊教授主编,共收录了2005年7月在南京东南大学举行的“全国高等院校测量学教材改革研讨会”和2005年8月在昆明理工大学举行的“测绘工程专业办学模式研讨会”的96篇论文,内容包括:测绘工程专业办学模式,测量学教材内容改革,测量学教学及实习、教学方法改革等内容。可供从事测绘工程教学、研究及管理的教师和领导参考使用。该书为16开本,定价68.00元。



(本刊编辑部)