

精密工程测量技术的应用

华锡生 黄腾

编著

河海大学出版社



TB22
2002
1

精密工程测量技术及应用

华锡生 黄 腾 编著

内 容 提 要

本书介绍精密工程测量的特点、精度要求及实施方案,数据的预处理及异常值检验,应用现代新型仪器实施平面及高程精密测量的方法及其精度分析;论述控制网的优化、高程的精密传递、现代测绘技术GPS的应用;研究大气折光对测量精度的影响;讲述变形监测的资料分析方法及自动监测技术,精密测量技术的工程应用。本书所论述的内容大部分结合了现代工程精密测量技术,研究和分析问题较深入,并有较广的涵盖面。

本书既可作为测量工程专业本科教学用书、研究生教材,又可供有关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

精密工程测量技术及应用/华锡生,黄腾编著. —南京:河海大学出版社, 2002. 8(2008. 1 重印)

ISBN 978—7—5630—1752—2

I. 精... II. ①华... ②黄... III. 精密测量: 工程测量 IV. TB22

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第 050634 号

书 名	精密工程测量技术及应用
书 号	ISBN 978—7—5630—1752—2/TV·219
责任编辑	马文潭
特约编辑	陈吉平
责任校对	江 南
封面设计	书衣坊
出 版	河海大学出版社
地 址	南京市西康路 1 号(邮编:210098)
电 话	(025)83737852(总编室) (025)83722833(发行部)
经 销	江苏省新华书店
印 刷	丹阳市教育印刷厂
开 本	787 毫米×1092 毫米 1/16 17.25 印张 421 千字
版 次	2002 年 8 月第 1 版 2008 年 1 月第 3 次印刷
定 价	40.00 元

前 言

近年来,我国的建设事业有着突飞猛进的发展,许多前所未有的重大工程,如三峡工程、小浪底工程、城市地铁、过江隧道、特大型现代桥梁、高速公路、城市建筑群体等,正在不断地涌现。建设事业的发展对测量工程提出了许多新的急需解决的课题,这些课题的解决也将会有力地推动着测量工程学科的快速前进。

现代高新技术及测绘科技的新进展,是推动测量工程飞速前进的另一主要动力。如微机的应用、高精度全站仪、GPS、一些专用的新型仪器、自动化观测设备,使测绘技术及方法产生了巨大变革。因此,进一步掌握和开发测绘新技术并在实际工程建设中灵活应用,将是测绘工程深入发展的关键。

现代测绘技术的进展,不仅仅体现在一些新型精密仪器设备的应用上,更多地反映在测绘数据处理和资料分析的新技术上。特别是资料分析及处理技术,不仅要求牢固地掌握测绘科学的基本理论及方法,而且必须深刻了解其他相关学科的理论,体现了多学科相交叉相结合的特点。对此,要求测绘工作者应具有更广泛的专业知识面。

本书主要论述了一些基本的精密测量原理和方法,数据处理和资料分析的技术,是编者根据从事过的重大工程项目测量工作的体会编著而成的。其目的是以期读者在从事的测绘实际工作中有所借鉴和裨益。各种工程的测量问题复杂,难点层出不穷,测量工作者应该在深刻掌握一些现代测量技术理论和方法的基础上,进一步发挥智慧和才能,解决工程中的测量课题,促进测量工程学科的发展。这也是作者编写本书的希望。

全书共9章,其中第三章、第五章、第九章由黄腾编写,第四章、第六章由兰孝奇编写,其他部分由华锡生编写。全书由华锡生教授作了统一的校阅修改。

由于编者水平所限,书中不足之处恳请读者批评指正。

编 者

2001年10月

目 录

第一章	概论	(1)
	1. 精密工程测量的特点及其发展	(1)
	2. 精密工程测量的精度	(5)
	3. 精密工程测量实施方案	(8)
第二章	数据可靠性及异常值检验	(12)
	1. 误差概述	(12)
	2. 粗差的检验	(15)
	3. 异常值的探测	(20)
	4. 稳健估计方法	(25)
第三章	精密测量方法与精度分析	(31)
	1. 角度测量及误差	(31)
	2. 精密距离测量	(35)
	3. 精密高程测量	(39)
	4. 精密全站仪 TC2003	(44)
	5. 极坐标测量及精度	(48)
	6. 前方交会精度分析	(51)
	7. 准直测量及精度	(57)
	8. 精密垂准测量	(63)
	9. 土层位移观测	(67)
第四章	控制基准及监测网优化	(73)
	1. 控制基准的建立及稳定性分析	(73)
	2. 监测网的优化理论与设计	(75)
	3. 垂线的精度及其优化	(85)
	4. 引张线观测及误差分析	(94)
第五章	精密高程传递	(96)
	1. 近地面大气折光的特点	(96)
	2. 大气折光系数 K 的讨论	(102)
	3. 三角高程大气折光误差及处理	(110)
	4. 精密跨江高程测量	(115)
	5. GPS 水准精密高程传递	(120)
	6. 液体静力水准	(125)
第六章	GPS 在精密工程测量中的应用	(131)
	1. GPS 卫星定位系统	(131)
	2. GPS 定位中的误差	(133)
	3. GPS 控制网	(135)

4. 大气折射对 GPS 测量的影响	(140)
5. 小波分析在 GPS 测量中的处理技术	(143)
6. GPS 在安全监测中的应用	(151)
第七章 变形监测数据处理	(157)
1. 统计模型及处理技术	(157)
2. 统计模型在资料分析中的应用	(163)
3. 确定性模型和混合模型	(168)
4. 安全监控模型的数据诊断	(174)
5. 变形监测的动态模型	(179)
6. 灰关联分析及 GM 模型	(185)
7. 人工神经网络基本原理及应用	(191)
第八章 自动测控技术	(199)
1. 常用传感器的工作原理及应用	(199)
2. 地下工程自动精密导向技术	(205)
3. 垂线自动化观测技术	(209)
4. 精密三维测控系统	(216)
5. 大桥钢箱梁安装的测控	(222)
6. 大型工程自动监测系统	(229)
7. 安全监控信息系统	(234)
第九章 精密测量技术在工程中的应用	(241)
1. 大桥索塔变形监测	(241)
2. 大桥合龙段的状态控制	(247)
3. 顶管工程的精密导向	(252)
4. 灵山大佛精密测控	(258)
5. 自动全站仪在大坝位移监测中的应用	(264)
参考文献	(270)

第一章 概 论

1. 精密工程测量的特点及其发展

近几十年来,随着科学技术的飞速进步和建设事业的迅猛发展,各种前所未有的巨大工程及建筑群体纷纷涌现。这些工程的兴建,对传统的工程测量在内容、精度、技术要求、测控技术等方面提出了众多急待解决的问题。适应现代工程建设需要,加快工程测量学科的进展,对精密工程测量的发展起到了推动作用。

1.1 精密工程测量的特点

所谓精密工程测量,主要是指结合现代测绘科技的新进展,研究和解决大型工程或特种工程对测量的高精度、可靠性、自动测控等各个方面要求的测量科学。

精密工程测量是工程测量学科的一个重要组成部分,代表着工程测量的新进展和先进技术。另一方面,它也有别于传统的工程测量。首先,精密工程测量仍然是在测量学的基本理论和方法指导下的测量技术,以各种测绘仪器及设备,测角、测边、测高程,进而获得各点的三维坐标或进行施工放样和求取位移量值等一系列需要的测量信息。从这个方面来看,它与传统的工程测量没有很大的差别,只是在信息获取的精度方面,精密工程测量有更高的要求。通常而言,精密工程测量要求的精度为 $1\text{ mm}\sim 2\text{ mm}$,甚至达亚毫米级。因此,目前精密测量工作,很大部分仍结合传统工程测量的方法进行着。

但另一方面,结合现代工程的需要,在解决复杂工程的测量问题时,在对精度的更高要求以及解决测值可靠性及安全监控诸方面,传统的工程测量是难以满足和不能实现的。因此,必须研制新仪器和专用设备,提高仪器的自动化程度及精度,深入分析工程测量工作中的各种误差并采取有效措施加以克服,研究新的数据处理方法和理论,研究新的测量技术及实施方案,从而形成一套专门为高精度工程测量所需的理论、方法和技术,这是有别于传统工程测量的一个主要方面。

此外,在工作内容及对象上,传统的工程测量包括在工程建设的勘察、设计、施工和管理阶段所进行的各种测量工作,如控制测量、地形测量、施工放样等,包含了很广的范围,其精度要求将根据各种有关的规范而定,相对而言,其精度较低,以通常的测量方法就容易达到。而精密工程测量是服务于各种工程中精度要求“特高”、“特难”,以及必须实施精密和自动化测量的那部分工作。虽然其服务范围相对较小,但是它的重要性十分显著,起着关键性的作用。

还有,精密工程测量不仅仅是建立在传统的工程测量学科的基础上,而是一个多学科相互结合相互补充的测量领域,非常典型地显示出多学科交叉的特性。以精密工程测量所用的仪器设备而言,必须深入和牢固地掌握测量仪器学、电子学、机械加工、讯号传输与转换、大气科学、计算机技术、光学、电磁波理论、自动测控技术等众多的学科。以安全监控而言,必须掌握自动测控技术、传感器、电子技术、测量仪器学、岩土力学、力学、材料学、结构工程、

计算机、各种数学模型、误差理论、环境工程等学科。在精密工程测量中,各种学科的交叉和相互结合已达到了很难明显区分的程度,这是发展的必然趋势,也是精密工程测量进一步扩大服务范围的需要。

最后的一个明显特点是,精密工程测量所用的仪器设备,必须有很高的性能和适合于从事服务对象的专门要求。没有先进的仪器设备将很难保证精密工程测量成果的精度、可靠性和有效性。在测角测距仪器方面,有徕卡公司的 TC2003 高精度全站仪、TCA2003 自动跟踪型全站仪,其标称精度达 $(0.5, 1 \text{ mm} + 1 \times 10^{-6} D)$ 。这是一类比较完美的高精度仪器,广泛地应用在各种精密工程测量作业中,达到了极高的精度并逐步向使测量作业人员从繁重的劳动中解脱出来的方向去发展。在测距仪方面,有 ME-5000 $(0.2 \text{ mm} + 0.2 \times 10^{-6} D)$,以及徕卡公司新近生产的无棱镜测距仪 TCR1101,它除了以红外光束测距外,还可以发射红色激光束,不用反射棱镜,测距达 80 m,精度为 $(2 \text{ mm} + 2 \times 10^{-6} D)$,极大地方便了精密工程测量中难于设置棱镜的测量环境的使用。在水准测量中,Zeiss 公司生产的 DINI12 电子水准仪,不仅极大地提高了观测速度,方便了作业,而且使水准测量每公里偶然中误差仅为 $\pm 0.3 \text{ mm}$ 的极高精度。

全球定位系统 GPS 在精密工程测量应用中的研究,将为精密工程测量开创一个新局面。测量工作者在工程建设区域范围内,正在深入研究进一步减弱 GPS 的误差、提高 GPS 定位精度的问题。研究内容具体包括对流大气层对信号传输的影响、天线相位中心的漂移、整周模糊度的解算以及在数据处理方面的小波分析技术、神经元网络处理技术等。河海大学利用 GPS 高精度定位技术,在南京长江二桥的首级 GPS 控制中,实现了控制网最弱点位误差不大于 2 mm,1.4 km 过江高程传递中,达国家 II 等水准精度。武汉大学测绘学院在隔河岩大坝安全监测中,坝顶位移测量的精度达 1 mm 左右。这些都是成功利用 GPS 于精密工程测量中的例子。随着研究的深入,GPS 在精密工程测量中将会发挥更大的作用。

在一些特殊要求的精密工程测量工作中,研制和开发了许多专用仪器及设备。例如精密量距仪,Distinvar,Distometer 等,在几米到 50 m 范围的精度可达 0.03 mm 左右,满足了高精度量距工作的要求。激光干涉原理组成的自准直反射系统精密长度测量仪,在 60 m 内的误差小于 0.01 mm。精密偏距测量装置,在 100 m 基准线上偏距测定的误差不大于 0.05 mm。自动跟踪激光准直测量系统,相对精度优于 10^{-6} 。液体静力水准系统,所测两点高差的误差不大于 0.01 mm。精密垂准系统,几十米高度内的垂准误差小于 0.10 mm。此外,还研制和开发了测量地表以下不同高度处的沉降和位移的电磁感应沉降仪、倾斜仪,测量岩体变形的应变仪、大位移计,测量地下水面高度变化的渗压计,测量建筑物内部应力的应力应变仪。这些专用的精密测量设备,在精度要求很高的工程建设中,如电子对撞机、核电站、大坝安全监控、大型土建工程、国防建设、现代大型桥梁工程、地铁工程等,解决了测量的难题,为有效实施所需的测量作业创造了条件,发挥了积极作用。

1.2 我国的精密工程测量情况

精密工程测量,随着我国国民经济和建设事业的飞速发展,最近 20 多年来得到了显著的发展。例如,形成了一支较高素质的精密工程测量技术队伍,逐步构成了一套有特色的精密工程测量方法,积累了大量精密工程测量的经验,开发和研究了许多精密工程测量的理论和技术,独立承担了我国各种工程所需的精密工程测量任务。

近些年来,各种现代工程建设项目的数量涌现,构建了我国现代化国民经济的新格局。

这些工程的建设也为精密工程测量的发展提供了条件。例如:大亚湾等核电站控制网点位误差要求在 $\pm 1.0\text{ mm}$ 内,核反应堆堆心各构件安装的同轴度要求误差不大于 0.2 mm ;北京正负电子对撞机平面控制点位误差不大于 1 mm ,地下控制网相邻点位误差不大于 0.3 mm ,相邻巨型磁铁安装误差 $\Delta X = \Delta Y < 0.2\text{ mm}$,漂移加速管安装误差小于 0.2 mm ;南京长江第二大桥主跨为 628 m 的斜拉桥,采用两岸对称安装方式,钢箱梁的对接误差要求不大于 3 mm ,大桥首级控制网点位中误差不大于 2 mm ;在数百米的高坝安全监测中,要求坝顶位移监测的误差不大于 1.0 mm ,坝基位移监测误差不大于 0.5 mm ,坝体表面接缝或裂缝的监测误差不大于 0.2 mm 。此外,我国近年来已建成的众多大型工程建筑物,例如:北京及上海的地铁工程,小浪底及龙羊峡等巨型高坝,上海等地的过江隧道,众多的高速公路,单跨达 1400 多米的悬索桥——江阴长江大桥,宝钢等现代钢铁基地及石化基地,上海东方明珠塔,数百米高的大厦等大型或特大型建筑群体,上海过黄浦江 800 m 排水顶管工程等建设项目中,均提出制约整个工程的独特精度要求的精密工程测量课题及内容。在解决这些关键技术的同时,丰富了精密工程测量的内容,推动了精密工程测量理论和技术、方法的发展,形成了我国精密工程测量的基本队伍及构架体系。可以说,如果没有实际工程的需要,没有广大测量工作者的不懈努力,我国精密工程测量事业就得不到如此显著的发展。

我国的建设事业正处于方兴未艾的阶段,正在或即将开始建设的大型工程项目比比皆是。例如:长江三峡水电工程,南水北调工程,近 300 m 坝高的龙滩、溪洛渡工程,数百米直径的射电天文望远镜列阵,跨越 6 km 江面的苏通长江大桥及跨越 32 km 的杭州湾交通工程大桥,我国从黑龙江到海南的沿海高速公路,青藏铁路工程,许多城市地铁工程及开发区建设,为2008年北京奥运会准备的建筑群体。众多举世瞩目的特大型工程的建设,将为精密工程测量工作者提供施展才能、发挥特长和作出贡献的广阔天地,同时会进一步推动我国精密工程测量理论和技术的发展。

1.3 发展的几个方向

精密工程测量从它初期开始发展到现阶段,已初具规模并基本形成了一个体系。随着各种工程的兴建和科学技术的不断进步,精密工程测量将会得到更迅速的发展。

从现阶段来看,在精密工程测量技术的发展中,应该进一步加强如下几个方面的研究。

(1) 对经典测量理论和方法的研究

精密工程测量的基础仍然是经典测量,经典测量中所用的理论和各种方法,如极坐标法、交会法、控制网等在精密工程测量中仍得到了广泛应用。不同的是,精密测量中精度要求高。因此,进一步深入分析这些测量作业中的各种误差来源,研究有效地克服误差的措施和方法,将有可能提高测量的精度,满足高精度的要求。

以极坐标测量方法为例,影响极坐标测量精度的主要误差有对中误差、观测误差、目标偏心误差、测角测距误差、测点标定误差、外界大气折光影响等。通常,极坐标法如果采用全站仪 TC1500($2.''0, 2\text{ mm} + 2 \times 10^{-6}D$),以光学对中,不计大气折光,距离为 300 m 时,可以估算得测定点的点位误差 m_p 大约为 $\pm 4.3\text{ mm}$,如果考虑大气折光,则影响就更大。在精密工程测量中,若控制点和待定点上均有强制对中设备,则对中误差、目标偏心、标定误差均大约为 $\pm 0.1\text{ mm}$ 。观测中,采用 TC2003 全站仪($0.''5, 1\text{ mm} + 1 \times 10^{-6}D$)且选择阴天有微风的良好天气观测, 300 m 距离极坐标法的点位中误差 m_p 大约仅 $\pm 1.5\text{ mm}$ 。分析和研究经典测量方法的误差来源,采取措施减弱这些误差,将会十分有效地提高测值精度。精密工程测量中,

所达到的精度要求高,因此通常测量中不被顾及的一些“小”误差也必须考虑,这些“小”误差在高精度观测中也会突出地显现而成为进一步提高精度的障碍。

(2) 减弱环境因素作用的影响

通常的测量工作均在大气中进行,所用的光学仪器、光电测距仪、电磁波信号的传输等都受到大气折光的影响,使通常测量中绝大多数测量方法均不同程度地蒙受折光误差。研究局地小范围的大气变化规律及其特性,预估这些影响对测量作业中的误差,选择较佳的观测时段或制订合宜的观测方法,使测值精度得到提高。例如,角度观测中,采用提高视线距地面的高度,分不同时段观测取平均值以及在上午 9:00~11:30 和下午 2:30~5:00 的较佳时段观测,以减弱大气折光对测角的影响。在测距中,测定仪器站和镜站的大气温度和气压对测距值进行改正,以及采用边对比测量法有效减弱大气折光产生的比例误差等。

温度变化产生的影响也是测量误差的主要来源。在距离丈量中采用线胀系数较小材料制成的尺子和应用相应的温度改正公式,减弱温度的影响。也有些采用补偿方法来提高测量精度,例如以因瓦丝和钢丝构成双丝高程基准点等。在地震站台的仪器设置时,把高灵敏度的仪器安置在很深的山洞内,以多道密封门实施隔离,采用自动监测和记录,以避免温度变化对高灵敏度仪器测值的影响。上述方法均十分有效并取得了理想结果。

(3) 研究合理的数据处理方法

在通常的分析中,观测误差被假定服从于正态分布,根据正态分布的特性,建立了一套有效的数据处理方法。但是,测量工作者在长期大量观测资料分析的基础上发现,观测误差的分布并非完全正态,相对于正态分布而言,有一部分误差在 5%~10% 左右出现异常(或粗差)。这部分粗差数据在参与假定的平差模型(正态分布模型)中处理时,平差结果将会失真或被歪曲。在精密工程测量中,粗差的影响将更为显著和“致命”。因此,如何准确地判定粗差并把它们剔除出观测数据,是必须解决的问题。

在安全监控中对异常值的准确判定是十分重要的。根据监控模型和观测值可以预报建筑物变形的情况并藉此评定建筑物运行的情况是否正常。如果把正常变形值判定为异常,将会引起不必要的虚惊,如果把异常值误判为正常,则危险和隐患得不到发现及处理。如何建立建筑物安全监控中对“异常”值的准确判据,也是精密工程测量必须解决的问题。

此外,在安全监控模型的研究中,统计模型是广泛使用的。长期以来使用的结果表明,该模型行之有效且使用方便、简单。但是,这种模型没有深刻描述变形与作用因素之间的内涵和机理,并且需要大量长期观测资料建立统计模型,才能较好地进行预报。而对于一些特殊情况,由于模型建立中没有遭遇过,使预报结果缺乏应有的准确性。研究其它模型,如确定性模型、混合模型等,或应用现代数据处理方法,如灰关联方法、模糊评判、神经元网络、遗传分析等来处理安全监控问题,也是目前深入研究的课题。

(4) 专用测量仪器的进一步研究

用于常规方法的测量仪器,如精密全站仪、电子水准仪、测距仪等,由专门的厂家生产。目前,这些仪器主要是向进一步提高精度及智能化、自动化方向发展,从而更适合于精密工程测量的需要。例如,徕卡公司生产的自动跟踪全站仪 TCA2003,可自动瞄准目标测量,采集的信息输入计算机处理,根据预设指令,自动完成整个测量作业,且精度很高,被称作“测量机器人”。

对于特种要求的测量工作,通常的仪器难于发挥作用,故必须研制专用的设备。很多特种精密测量工作,通常的精度要求为 0.1 mm。因此,各类性能优良且工作稳定的传感器得

到广泛采用,以它们为测量元件而构成高精度的自动测控系统,在特种精密工程测量中,在安全监控中发挥了积极作用。精密测量的自动化、智能化是目前最为活跃的部分,也是现代测控技术的发展方向,在这个方面,还有大量的工作要做。

进一步提高测量精度,满足各种工程的需要;努力发展精密测量的智能化、自动化,极大地减轻观测人员的劳动强度;提高测值的可靠性和测量系统的稳定性;研究合宜的数据处理方法,提高对异常值的鉴别能力;进一步深化多学科相结合处理精密工程测量的问题等,这些将是精密工程测量目前发展的方向。

2. 精密工程测量的精度

2.1 各种工程对精度的要求

精密工程测量,就其精度而言,通常要求达到毫米级或亚毫米级的量值。各种工程建设对精度的要求,因工程而异是各不相同的。同时也由于各部位的重要性不同,实现的目的不同,构成的材料不同,允许的误差不同等诸因素的综合要求,而对精密工程测量提出不同的精度要求。

在变形监测中,土石坝由土体及堆石等材料组成,设计中考虑了这些材料的固结及塑性特性,通常安全系数较大,坝体有足够的在较大变形条件下不失其稳定性和安全性的能力。因此,在土石坝安全监测中,精度可以放宽到 $4\text{ mm}\sim 5\text{ mm}$ 。与此相反,混凝土大坝,由呈现弹性变形特征的混凝土构成,它有一定的抗拉、抗压极限强度,而且由于弹性模量较大,允许的变形值相对较小,否则就易出现裂缝等,使坝体受损。根据材料的特性和结合坝体结构、设计取用的允许变形量,并顾及坝体不同部位及其重要性,而确定了安全监测通常的精度指标为 $1\text{ mm}\sim 2\text{ mm}$ 。

在谢尔普霍夫 760 亿 eV 的质子加速器安装中,为保证粒子束的集束运行轨道分解出的第 10 阶傅里叶谐波分量的振幅不超过 $25\text{ }\mu\text{m}$,经计算推得,对电子束起集束作用的巨型磁铁组(共 120 块,重 250 t)必须严格地安置在同一圆周上,安装误差在径向不大于 0.2 mm ,高程误差小于 0.2 mm 。

以主跨 628 m 的南京长江第二大桥而言,主梁采用斜拉索双塔钢箱梁,施工中以塔柱为中心的对称逐段悬臂拼接。为确保桥型曲线和斜拉缆索的设计应力,经大桥结构整体有限元计算,要求桥轴线的拼接误差不大于 1 mm ,两合龙端面的对接误差不大于 3 mm 。

以南京某交易中心大楼为例,该楼为全高 150 m 的塔型大楼,考虑电梯安装及玻璃幕墙安装所需,对大楼修建的垂直度进行控制。要求各层间的垂直度误差不大于 2 mm ,全楼垂直度误差不大于 8 mm 。

以核电站建设为例,为确保核电站各构筑物之间的精密联系和核反应堆运行中的安全,要求厂区首级控制网的点位中误差小于 1 mm ,核反应堆所建微型控制网点位误差小于 1 mm ,反应堆心各构件的同轴度误差不大于 0.2 mm 。

上海过黄浦江底 30 m 深的排水顶管工程,全长近 800 m,以掘进机头开挖,四台油压千斤顶单向逐段(每段长 3 m)顶进。由于在另一端预留洞口的直径很小,要求顶管全程的中误差在 $\pm 10\text{ mm}$ 以内,否则价值昂贵的机头就难以顺利取出。

上述仅列举了一部分工程对精密工程测量的精度要求。在这些精度要求中,有的是考

虑工程安全运行和监控所需,有的是由构筑物正常工作和发挥效能所需,有些是它的重要性及确保安全性所决定,也有些是已有的环境条件、工作状况所限制。因此,精密工程测量的精度,将因各种工程的特点、重要性、环境条件、拟实现的目标等诸因素不同而异,其最终目的是保证建筑物正常、安全可靠地运行。此外,在提出各工程精密测量的精度要求时,通常应结合各种分析,根据材料的特性,确定误差的允许值。测量人员应根据此要求,拟定测量方案,选择仪器,实现所要求的精度。

由于很多工程没有“有章可循”的精度规定,在精密工程测量中,精度要求的合理性是极为重要的,过高的精度不仅在实施中会遇到困难,而且常常要花费成倍的人力物力。对于设计人员而言,应经常兼顾“需要”与“实现可能性”的相互统一和协调,使各种工程的精度定得更合理。

2.2 一些工程中的精度要求情况

许多工程建筑物的某些专门项目中,对测量的精度要求尚未取得统一认识及“规范化”,因此在理论上很难进行有效的推证。事实上,许多具体工作中精度的限定,主要是结合结构计算、长期以来工作的经验以及借鉴已成功的实例,并根据“规范”的有关条款,经过反复论证、分析,才初步确定的。上述所指的是各种“规范”中找不到明确规定的一些专项及特殊要求的工程构筑物对精度的要求。大量的工程构筑物,如果已有“规范”规定的精度要求,则必须严格按“规范”要求执行。

一些工程中所要求及已实现的精度情况,对精密工程测量有着极好的参考价值。表1-1中列出了所达到的精度及实现这些精度所采用的有效方法。当然,可行的方法并非仅限于这些,在解决这些测量问题中,可以根据具体情况而广泛地采用各种有效的方法,这才是推动精密工程测量发展的源泉。

表 1-1 精密工程测量实现的精度及方法 (单位:mm)

名 称	精度要求	实现精度	采用方法
1. 大坝变形观测			
坝基水平位移	0.3	0.3	倒垂,真空激光准直
坝顶水平位移	1.0	1.0	引张线、正垂、激光准直、GPS技术
坝体位移	1.0		引张线、正垂、激光准直、GPS技术
坝体垂直位移	1.0	1.0	精密水准、静力水准
坝体裂缝	0.2	0.2	裂缝计、应变仪
坝基倾斜	1"、0	1"、0	精密水准、静力水准、电子倾斜仪
近坝区岩体	2.0	2.0	监控网
闸门、闸墙	3.0	1~2	近景摄影
2. 高精度控制网	2.0	1.0~2.0	TC2003 全站仪、GPS 测量、ME-3000 配合 T ₃
3. 大桥精密测量			
高塔柱变形	3.0	3.0	TC2003、GPS 技术
钢箱梁安装	1.0	1.0	TC2003
桥型曲线控制	5.0	3.0	现场测控系统
高塔柱垂直度	$\frac{1}{20\,000}$	$\frac{1}{50\,000}$	TC2003、自动整平水准仪
合龙段拼接	3.0	3.0	精密测距、测温及模型拟合

续表 1-1(单位:mm)

名 称	精度要求	实现精度	采用方法
4. 88 m 灵山大佛造型 微型控制网	1.0	0.3	ME—3000, T2000
数字化成像	10.0	5.0	近景摄影、数字化处理技术 BC ₂ 解析测图仪
安装定位	8.0	5.0	分层投影导线、距离交会
5. 800 m 顶管工程 方位传递	7."0	3."5	联系三角形结合 GAK ₁ 陀螺经纬仪
贯通误差(平面)	12.5	8.0	TC1800 智能测控系统、精密水准
(竖直)	4.0	1.8	
6. 垂准测量 高楼垂直度	8.0	2.0	自动置平($\pm 1''$)垂准仪
电视塔变形	2.0	1.6	激光铅垂仪加竖直面温度梯度改正
7. 大型机械安装 汽轮发电机轴线	0.1	0.03	波带极激光准直系统
汽轮发电机高程	0.05	0.02	液体静力水准仪
8. 核电站 微型控制网	1.0	0.8	边角网、ME—3000 测距
堆心各构件同轴	0.2	0.2	专用对中器
边孔同轴度	0.6	0.4	水银池自准直仪
9. 精密跨江高程	1.2	1.0	$L=1.5$ km, 采用经纬仪倾角法及强反光标志
10. 电子对撞机 地面控制网	1.0	0.3	边角网、ME—3000 测距
地下控制网	1.0	0.3	
地下高程控制网	1.0	0.5	几何水准与液体静力水准
漂移管	0.2	0.06	激光准直仪及调节装置
磁铁体	0.2	0.12	多种专用测量设备

2.3 精密工程测量中精度的确定

精度的确定是一项很重要的内容。根据精度要求并结合工程的具体情况,才能考虑测量的方案,选用合适的仪器设备,确定操作的必要步骤,提出克服环境条件影响的措施,使测量成果符合要求。但是,各种工程建设各有特点,而且有不少工程在我国刚开始出现,或者建设的数量尚不多。对它们的精度要求,在现行“规范”上尚无明确的规定。设计人员、施工人员、测量工作者必须紧密配合、共同商讨并进而协调对精度的认同。仅靠单方面的人员来确定精度,有时会产生精度要求过严的问题。这种过严的精度要求,一方面会造成不必要的浪费,使测量工作必须花费大量人力物力和时间,另一方面可能造成难于实施的困境。

对于“规范”中没有明确界定的极重要构筑物的精度要求,在精度的初步选定时,可按如下几个方面进行考虑:

(1) 根据确保工程最主要的目标及不利情况,进行多种模拟计算分析,并结合目前的先进技术能实现的精度而初步确定

例如,回旋加速器环形厅中的磁铁,必须保证粒子束运行轨道的第 10 阶傅立叶谐波振幅不大于 $25\ \mu\text{m}$ 。以此对各磁铁的平面位置误差进行了多种情况的计算,最终分析表明,误

差最大不允许超过 10 mm。考虑到最终的误差由安装误差、磁件的变形、地基沉降、热膨胀、振动、固体潮影响等综合反映出来,而研制的专用仪器精度可以达到 0.1 mm~0.2 mm,因此,界定磁体的定位误差为 ± 0.2 mm。又如,大跨距斜拉桥南京长江二桥工程中,施工后索力的误差不能大于设计索力的 4%。采用斜拉桥力学计算模型,考虑多种条件后模拟计算,初步确定出大桥主轴线误差不能大于 1.0 mm,各钢箱梁的高程误差不能大于 5.0 mm。在大桥施工中,应用现代精密全站仪 TC2003 并结合优选的测量方法,可以实现这种精度。

(2) 根据类似工程安全运行资料并结合专门分析的结果而认定

根据大坝安全监控规范要求,混凝土坝的坝顶水平位移观测中误差应不大于 1 mm。这是我国研究工作者在众多大坝长期安全监测中获得的共识,是对大坝工作性态分析的结果,还考虑了对大坝设计特征参数反馈的需要。通常而言,一座百米高坝,在多种因素影响下,年变幅量可能达到 20 mm 以上。以变幅的 1/20 作为安全监测精度,可以满足安全监测和参数反馈的需要,并实现对设计的验证。

(3) 借助于同类工程执行的并已被验证能确保工程质量的精度指标

例如,薄钢板连续轧制的导轨,当轨距误差较大时,会使产品出现整卷薄板边沿参差不齐,不符合要求。当轨距平行度误差小于 0.01 mm 时,这种现象可以克服。因此,可采用 ± 0.01 mm 作为轨距平行度的精度要求。又如,大型汽轮发电机组安装中,多个汽缸轴系的同心度要求不大于 0.03 mm。如果误差过大,不仅影响汽轮机组的出力,机组运行时会产生明显振动,而且严重时会使轴瓦发热,烧毁轴瓦。当满足此精度要求时,汽轮机将能正常运行。

精密工程测量精度的确定通常是一项很复杂的工作,同时其难度也较大。仅凭经验和参照同类构筑物的成功例子是不够的,需以必要的模拟计算和分析为基础,结合同类工程的成功经验,广泛了解目前的先进技术及方法,经多方面人员的反复论证比较,才能获得有实用价值的初步结果。

3. 精密工程测量实施方案

每一项精密工程测量都会受到各自特点及精度要求、固有的外部环境条件、不同施工方法和技术力量等诸因素的限制。为顺利实现所要求的精度,必须进行精密工程测量方案的周详设计及论证。

3.1 方案设计的要求

通常来讲,一项精密工程测量方案的设计应包括如下一些内容:

(1) 收集各种有关的资料及深刻理解对精度要求的涵义

收集的资料主要有:各种现有的测绘成果,勘测阶段的资料,建筑区工程地质及水文地质的成果,气象资料,各种设计资料和图纸,工程对精度要求的规定及指标等。要深入了解及掌握这些基本资料,特别是对精度的内涵要理解。

通常,每个工程的精度要求在设计时已由设计人员提出。测量人员对于这些众多的精度要求可适当地进行归类,确定出实现这些精度的关键所在。在整个测量方案的设计中,在条件可能的情况下且不涉及费用和时间的显著增加时,应采用较高精度的方案。一个可靠的有较高精度的测量系统的建立,在工程建设中,将为施工测量、安装定位以及其他各项工

作的开展,创造良好的条件。

对于关键部位的一些“特高”精度,必须理解它的涵义。这些精度与哪些部位有关?是相对于什么基准而言的?如果对这种精度不加区分,与整个建筑物的精度混为一谈,或以这种“特高”精度作为整个建筑物的所有精度,将使测量工作无法开展。例如,在现代特大桥工程中,大跨径的斜拉桥或悬索桥,其钢箱主梁安装中,要求相对于桥轴线的误差不大于 1.0 mm 。如果桥轴线的位置控制点在两端索塔处已经固定,则这种精度要求是不难实现的,需要解决的问题也仅限于在两个已知固定点之间的准直测量并保证误差不大于 1.0 mm 。如果对此 $\pm 1.0\text{ mm}$ 的精度要求不加分析,进而用于对大桥施工控制网的精度要求,则施工控制网的点位中误差为 $\pm 0.3\text{ mm}$,甚至更高。根据现有条件,在近 20 km^2 范围内,跨越宽阔的江面而建立点位中误差 $\pm 0.3\text{ mm}$ 的控制网几乎是不可能的。再如,混凝土大坝因进水、泄洪等需要,设有若干个闸门。为确保闸门的安全启闭,要求闸门与门槽间的误差不大于 1.0 mm 。如果误认为这种精度为大坝施工中对坝轴线放样的要求,则测量人员将毫无必要地致力于提高坝轴线及其放样精度的工作中,使施工十分困难、测放工作繁琐、工作量巨大且不易实施。其实这种精度应该是相对于闸室中心线而言的,一旦闸室中心线确定后,保证闸门与门槽的误差不大于 1.0 mm ,是容易实现的。当然闸室中心线的位置误差必须满足与坝轴线的相对精度要求。

因此,在精密工程测量时,测量人员应深入理解精度的涵义,掌握工程的基本知识,与设计人员积极沟通,协调一致,在对精度的解释及要求上达成共识。这样,才能在精密工程测量方案的拟定中,提供切实可行的方案。

(2) 找出关键问题及拟定处理方案

一个工程,众多的精度要求是相互有关的,有一些精度是属于整体性要求的,也有一些精度是关键部位所要求的。通常,整体性要求的精度相对较低,测量技术处理不很困难,比较容易实施,不构成精密工程测量的难点。但是,关键部位要求的测量精度,往往是该工程中精度要求的最高指标,利用通常精密工程测量技术不易满足精度要求且难于实施作业。因此,这些关键精度的解决是该工程精密测量工作的成败所在。

关键部位的精密测量方案,必须详细地进行论证。不仅对拟采用的技术和方法进行论证,而且应在精度分析的基础上,分析采用该方法时主要的误差来源,这些误差来源可能达到的量值,主要误差来源克服的措施。例如,在电视塔体滑模施工中,拟采用激光垂准仪进行定位。此时应考虑到筒体因太阳日照而产生的周日变化,风振对筒体的影响,筒体内各高程面的横向温度梯度对光线传输的偏折等。根据大量观测和实际工作,为有效减弱这些误差的影响,采取的措施是在凌晨日出前完成各施工阶段的定位作业,以极大减弱激光垂准测量所产生的误差。

(3) 成功经验的吸收

有些工程建筑物的精密测量项目,通常并不多见,也有些是首次接触,因此,国内外类似工程成功经验的借鉴极具重要价值。它可以启迪测量工作者在专项要求的测量作业中,有较多的测量方法可供选择,并结合众家之长,设计更为合理可行的技术和方法。这不仅可少走弯路,克服闭门造车的弊端,而且可达到取长补短的目的,使技术上得到进一步的提高。

对于成功的经验决不要单纯地生搬硬套。虽然某种方法在某个专项测量工作中行之有效,但并不证明那种方法是十分完美的。在引用这种方法前,应根据本工程的特点,详细分析和研究该方法的优点及不足之处。针对不足之处研究其改进办法,对完成本工程精密测

量项目就更有可靠的保证。

(4) 能考虑以不同方法进行验证

一些精密测量项目,需要高度的可靠性。以一种方法实施时,由于该方法的局限性,只能以一些多余观测条件来验证。其实,这种验证不太可靠,严格而言,它是采用自己验证自己的方法。例如,测距仪的乘常数变动没有被发现,在测边独立网中,虽然观测成果较好而且也有一定数量的多余观测,但是整个网的比例误差将难于体现。

为提高精密测量的可靠性,重大工程某些关键性项目,应采用不同的相应精度的方法检核,或以相应精度不同仪器不同人员采用同一方法检核,这是很重要的。南京长江第二大桥跨江高程传递时,两岸高程的一致性确保大桥高质量建成的关键。而大江南北,因工农业发展的不平衡,地表沉降的差异很大,20世纪70年代所建的水准系统难以应用。为此,拟定了以经纬仪倾角法过江高程闭合环和精密GPS水准两种方法进行高程传递,相互验证。两种不同的方法均达到国家Ⅱ等水准精度,结果十分一致,确保了大桥高程基准的可靠性。

(5) 方案设计的基本步骤

精密工程测量方案设计基本步骤如下:

① 对工程区的环境条件、工程及水文地质、气候的特点等进行详细的分析及描述,并分析总结这些条件对测量作业的影响。要全面完整地掌握该地区已有的测量资料,分析和评价这些资料的精度及利用价值。

② 工程区基准的选择及确定,在详细进行精度分析和遵循有关“规范”条款的基础上,兼顾整个工程区建设的需要,提出控制方案和施测方法,以及对精度进行预估等。

③ 确定出测量中的关键精度所在,并结合自己的经验以及广泛吸收同类工程成功的实例,提出数个实施方案。实施方案应包括采用的仪器、测量的方法、关键技术的解决内容、预期精度的估计,以及不同方案的比较。

④ 数据处理的方法。

⑤ 对方案可行性的论证,工作量及经费的概算等。

3.2 坝顶位移监测系统选择分析

(1) 大坝坝顶水平位移监测方案

混凝土重力坝,坝高80 m,坝顶长480 m,按混凝土重力坝安全监测要求,坝顶位移监测的中误差为 ± 1.0 mm。此外,因电缆传送及维修等工作需要,距坝顶面下3.0 m有一条纵贯全坝的直线型廊道,廊道截面积为 $1.2\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 。大坝位于我国南部,常年平均最高气温为 38°C ,最低气温 0°C 以上。

为监测坝顶水平位移,根据我国许多大坝安全监测的成功实例,可选的方案有如下几种:①分段视准线法;②波带极激光准直;③引张线;④真空激光准直。此外,上述几种监测系统的工作基准,可选择在大坝两岸的坝肩部位,设置两个倒垂基点。倒垂的埋深宜不小于 $2/3$ 坝高,约54 m,以确保倒垂锚块相对稳定。

(2) 各种系统的分析比较

对于方案①,因坝顶长480 m,一次视准线不能保证 ± 1 mm的精度。为提高视准线的精度,宜在大坝中间部位加设另一个正倒垂基准,从而把视准线分成各长240 m的两段,以高精度经纬仪或视准仪观测各测点,才有可能使位移监测的误差达 ± 1 mm的精度。本方法的优点是设备简单、常规、操作简便、设备容易维护。其不足之处是,由于大坝一边紧靠库

水面,另一边是坝后的临空面,形成特定的横向温度梯度场,受显著的大气折光影响。此外,观测工作量大、时间长、不易达到同步观测和自动监测的目的。需加设一个正倒垂系统,当然此正倒垂系统可不仅仅作为分段视准线的中间工作基点,也可作为坝基及中央坝段挠度观测系统之用。为实施坝顶视准线观测,在各坝段顶部还需设置离坝面 1.2 m 以上高度的观测墩及强制对中设备,对坝顶部的美观有一些影响。

方案②,其优点是:操作简便,按现有波带板大气准直的精度,可达 10^{-6} 左右,所以不必分段,不必在大坝中央部位加设正、倒垂系统;有利于实现自动测控;由于激光衍射像斑接收时,采用积分取平均技术,能较好地减弱大气短周期影响产生的误差;整个系统布置的造价也不会太高。其不足之处是:需购置专用设备;受大气折光的长周期分量的影响;对操作人员需进行必要的专门培训;不易实现同步观测。本观测系统可设在坝顶廊道内,并采用波带板自动起落功能,便于实施自动测控。

方案③,优点是测量精度高、设备简单、可避免大气折光的影响,坝顶水平位移测定的精度可以达到 10^{-7} 左右。其不足之处是,若按通常的测量方法,则观测时间长,工作量大。本系统宜设置在坝顶廊道内,从而不影响坝面的布局和观感,同时对整个系统有保护作用。本系统如果采用引张线自动观测仪观测,则易实现自动化测量,对测值的同步性有较好的改善,但是所花的经费较多。

方案④,优点是:测量精度高,可以达到 10^{-7} 左右,极大地减弱了大气折光的影响;可以实现自动测控,观测时间短,工作量小。其不足之处是造价昂贵、所需经费多、设备的维护工作量大。如果仅仅为了实施坝顶水平位移这个单一目的,则本方案的采用宜作进一步的论证和比较。

综上分析及比较,坝顶位移各监测方案均各有优点和不足之处。最终方案,应结合监测工作需达到的目标,大坝及坝顶环境条件的情况,监测队伍的技术水平以及所能承担的经费条件等诸多因素综合考虑和论证后选定。

精密工程测量中,通常均有多个方案可供选择。测量工作人员在方案设计中应尽可能地收集多个方案然后进行比较和分析,并客观地对它们作出评价,同时发挥自己的智慧和创新精神,设计出符合工程所需的方案来。