

静力水准系统的最新发展及应用

Latest Developments and Applications of
Hydrostatic Levelling System



何晓业 著

中国科学技术大学出版社

当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书

中国科学技术大学

校友文库

静力水准系统的最新发展及应用

Latest Developments and
Applications of Hydrostatic
Levelling System

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书综合了近几年来国内外对高精度静力水准系统的研究和作者本人的研究成果,综述了最新的静力水准传感器所采用的技术手段,分析了影响静力水准系统测量精度的各种因素,并结合作者本人主持研究的静力水准课题,以静力水准系统的实际应用例子,展现静力水准系统在科学和社会发展中的重要性。本书理论和实践并重,可作为从事精密工程测量、位移仪器制造、工程建设(如桥梁、铁路、高层建筑、大科学工程建设等行业)等有关工程技术人员参考书,也可以作为高等院校与精密工程测量有关的专业教材或选修教材。

图书在版编目(CIP)数据

静力水准系统的最新发展及应用 / 何晓业著. — 合肥:中国科学技术大学出版社, 2010. 1

(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书;中国科学技术大学校友文库)

“十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-312-02631-7

I. 静… II. 何… III. 流体静力水准仪—研究 IV. TH761

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 213186 号

出版发行 中国科学技术大学出版社

地址 安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编 230026

网址 <http://press.ustc.edu.cn>

电话 编辑部 0551-3606196 发行部 0551-3602909

印 刷 合肥晓星印刷有限责任公司

经 销 全国新华书店

开 本 710mm×1000mm 1/16

印 张 9.5

插 页 2

字 数 148 千

版 次 2010 年 1 月第 1 版

印 次 2010 年 1 月第 1 次印刷

印 数 1—2000 册

定 价 29.00 元

总 序

侯建国

(中国科学技术大学校长、中国科学院院士、第三世界科学院院士)

大学最重要的功能是向社会输送人才。大学对于一个国家、民族乃至世界的重要性和贡献度,很大程度上是通过毕业生在社会各领域所取得的成就来体现的。

中国科学技术大学建校只有短短的五十年,之所以迅速成为享有较高国际声誉的著名大学之一,主要就是因为她培养出了一大批德才兼备的优秀毕业生。他们志向高远、基础扎实、综合素质高、创新能力强,在国内外科技、经济、教育等领域做出了杰出的贡献,为中国科大赢得了“科技英才的摇篮”的美誉。

2008年9月,胡锦涛总书记为中国科大建校五十周年发来贺信,信中称赞说:半个世纪以来,中国科学技术大学依托中国科学院,按照全院办校、所系结合的方针,弘扬红专并进、理实交融的校风,努力推进教学和科研工作的改革创新,为党和国家培养了一大批科技人才,取得了一系列具有世界先进水平的原创性科技成果,为推动我国科教事业发展和社会主义现代化建设做出了重要贡献。

据统计,中国科大迄今已毕业的5万人中,已有42人当选中国科学院和中国工程院院士,是同期(自1963年以来)毕业生中当选院士数最多的高校之一。其中,本科毕业生中平均每1000人就产生1名院士和七百多名硕士、博士,比例位居全国高校之首。还有众多的中青年才俊成为我国科技、企业、教育等领域的领军人物和骨干。在历年评选的“中国青年五四奖章”获得者中,作为科技界、科技创新型企业界青年才俊代

表,科大毕业生已连续多年榜上有名,获奖总人数位居全国高校前列。鲜为人知的是,有数千名优秀毕业生踏上国防战线,为科技强军做出了重要贡献,涌现出二十多名科技将军和一大批国防科技中坚。

为反映中国科大五十年来人才培养成果,展示毕业生在科学研究中的最新进展,学校决定在建校五十周年之际,编辑出版《中国科学技术大学校友文库》,于2008年9月起陆续出书,校庆年内集中出版50种。该《文库》选题经过多轮严格的评审和论证,入选书稿学术水平高,已列为“十一五”国家重点图书出版规划。

入选作者中,有北京初创时期的毕业生,也有意气风发的少年班毕业生;有“两院”院士,也有IEEE Fellow;有海内外科研院所、大专院校的教授,也有金融、IT行业的英才;有默默奉献、矢志报国的科技将军,也有在国际前沿奋力拼搏的科研将才;有“文革”后留美学者中第一位担任美国大学系主任的青年教授,也有首批获得新中国博士学位的中年学者……在母校五十周年华诞之际,他们通过著书立说的独特方式,向母校献礼,其深情厚意,令人感佩!

近年来,学校组织了一系列关于中国科大办学成就、经验、理念和优良传统的总结与讨论。通过总结与讨论,我们更清醒地认识到,中国科大这所新中国亲手创办的新型理工科大学所肩负的历史使命和责任。我想,中国科大的创办与发展,首要的目标就是围绕国家战略需求,培养造就世界一流科学家和科技领军人才。五十年来,我们一直遵循这一目标定位,有效地探索了科教紧密结合、培养创新人才的成功之路,取得了令人瞩目的成就,也受到社会各界的广泛赞誉。

成绩属于过去,辉煌须待开创。在未来的发展中,我们依然要牢牢把握“育人是大学第一要务”的宗旨,在坚守优良传统的基础上,不断改革创新,提高教育教学质量,早日实现胡锦涛总书记对中国科大的期待:瞄准世界科技前沿,服务国家发展战略,创造性地做好教学和科研工作,努力办成世界一流的研究型大学,培养造就更多更好的创新人才,为夺取全面建设小康社会新胜利、开创中国特色社会主义事业新局面贡献更大力量。

是为序。

2008年9月

前 言

随着社会的发展,大型建筑,包括大型桥梁、高层建筑、高速铁路等建设得越来越多,也越来越快。人们对这些建筑安全性的要求也越来越高。为了提高建筑的安全性,在建设过程中和建设完成以后需要不断地对建筑的关键部位的位置变化进行高精度的观测,防患于未然。同时,在不断建设的大科学工程中,对许多关键建筑、部件和位置的位移变化要求相当苛刻,不仅仅需要知道某段时间内这些变化量的大小,往往还要实时监测这些变化,以便实时调整科学装置的工作状态。

在所有的变化中,尤以竖直方向的变化最为明显,因为一个建筑物或装置,在水平方向往往不受到自然力的影响,而重力是无处不在的。因此,静力水准系统在近年来得到了越来越广泛的应用,对静力水准系统的研究也越来越深入。

本书综合了近几年来国内外对高精度静力水准系统的研究和作者本人的研究成果,综述了最新的静力水准传感器所采用的技术手段,分析了影响静力水准系统测量精度的各种因素,并结合作者本人主持的静力水准研究课题,用静力水准系统的实际应用例子,来展现静力水准系统在科学和社会发展中的重要性。

本书理论与实践并重,可作为从事精密工程测量、位移仪器制造、工程建设(如桥梁、铁路、高层建筑等行业)等有关工程技术人员参考书,也可以作为高等院校与精密工程测量有关的专业教材或选修教材。

由于该书涉及的专业领域知识比较广泛,加之作者的理论水平、实际经验和掌握的资料有限,书中难免有不妥之处甚至错误,恳请读者批评指正。

作 者

2009年6月于合肥

目 次

总序	(i)
前言	(iii)

第 1 部分 基础理论和技术

第 1 章 静力水准系统引论	(3)
1.1 静力水准的概念	(3)
1.2 静力水准系统的历史	(5)
1.3 静力水准系统的主要技术	(8)
1.3.1 接触式传感器	(9)
1.3.2 非接触式传感器	(10)
第 2 章 静力水准系统的误差分析	(14)
2.1 传感器内部误差	(14)
2.1.1 安置误差	(14)
2.1.2 传感器倾斜引起的误差	(15)
2.1.3 润湿现象引起的误差	(15)
2.1.4 传感器组合部件温度变化引起的误差	(17)
2.1.5 液体漏损引起的误差	(17)
2.2 外界条件引起的误差	(18)
2.2.1 温度因素干扰分析	(18)

2.2.2 压力因素干扰分析	(23)
2.2.3 液体的蒸发	(24)
2.2.4 液体的成分与质量	(24)
2.3 传感器的标定	(25)
第3章 系统稳定性研究	(28)
3.1 系统中液体的运动	(28)
3.2 液体管道直径的选择和系统的抗干扰能力	(31)
3.3 结论	(32)
第4章 宏观因素对系统的影响	(34)
4.1 地球曲率半径改正数	(34)
4.2 重力异常对 HLS 测量的影响	(36)
4.2.1 附近巨大物体的作用	(36)
4.2.2 月亮和太阳引力的影响	(38)

第2部分 设计和应用实例

第5章 高精度 CCD 静力水准传感器的设计	(45)
5.1 传感器的原理设计	(46)
5.2 传感器设计中所要考虑和解决的问题	(48)
5.2.1 不同钵体之间压力不同的因素	(48)
5.2.2 不同测量点的温度不同的因素	(48)
5.2.3 液体的选择	(49)
5.2.4 气泡的影响	(49)
5.3 钵体的设计	(49)
5.4 CCD 光路及驱动电路的设计	(51)
5.5 电源的设计	(53)
5.6 浮子、弹簧的设计	(54)
5.7 其他因素的考虑	(55)
5.7.1 液体的蒸发和冷凝	(55)
5.7.2 液体的除菌	(55)
5.7.3 液面的半月形、球面形和水面波动的影响	(56)

5.7.4 气管的堵塞	(56)
第 6 章 信号的采集和处理	(57)
6.1 数据采集系统总体框图	(57)
6.2 提高 CCD 数据采集分辨率的几种方法	(58)
6.3 系统的数据采集、储存和传输	(61)
6.4 软件的功能	(63)
第 7 章 传感器的标定和线性拟合	(65)
7.1 传感器中 CCD 的标定和线性拟合	(65)
7.1.1 标定方法	(65)
7.1.2 标定步骤和结果分析	(67)
7.1.3 CCD 标定结论	(71)
7.2 钵体传感器的标定	(72)
7.2.1 标定的目的	(72)
7.2.2 标定方法和系统搭建	(72)
7.2.3 标定数据分析	(75)
7.2.4 结论	(80)
第 8 章 多钵体系统测试及其在 BEPC II 工程的应用	(81)
8.1 多钵体系统测试	(81)
8.1.1 三钵体系统测试	(82)
8.1.2 九钵体系统测试	(88)
8.1.3 九钵体系统的计算公式	(94)
8.2 系统性能综述和在 BEPC II 工程中的使用	(97)
8.2.1 系统性能综述	(97)
8.2.2 系统在 BEPC II 工程中的实际使用及结果分析	(98)
第 9 章 SSRF 中的静力水准系统	(108)
9.1 系统的设计	(108)
9.1.1 上海光源的 HLS 系统设计指标	(108)
9.1.2 传感器设计	(109)
9.1.3 SSRF 的 HLS 布局	(109)
9.2 系统的安装	(112)
9.3 测量数据分析	(114)

第 10 章 静力水准系统在民用建筑上的应用	(121)
10.1 系统在大坝变形监测中的应用	(121)
10.2 系统在桥梁工程中的应用	(125)
10.3 系统在核电站中的应用	(127)
参考文献	(131)
致谢	(137)
后记	(139)

第 1 部分 基础理论和技术

第 1 章 静力水准系统引论

静力水准系统是用来测量观测点高程位置变化的方法之一。目前,它在大型桥梁、高层建筑、高速铁路等的建设和运营过程中承担变形监测的任务。尤其在不断建设的大科学工程中,对许多关键建筑、部件和位置的位移变化要求相当苛刻,不仅仅需要知道某段时间内高程位移量的大小,往往还要实时监测这些变化,以便实时调整科学装置的工作状态,在这些领域,静力水准系统越来越成为不可替代的监测手段。

1.1 静力水准的概念

静力水准系统,英文叫做 Hydrostatic Levelling System,简称 HLS,是利用相连的容器中,液体总是寻求具有相同势能的水平原理,来测量和监测参考点彼此之间的垂直高度的差异和变化量。它具有很高的测量精度,在测量领域获得了广泛应用。尤其是在大型精密工程测量中,如对水电站、核电站、大型科学科研工程中的地基和关键部件垂直位置的变化监测等发挥着重要作用,HLS 具有精度高、自动化性能好,具有实时测量功能等特点。

HLS 系统传感器的基本原理并不复杂,用管道连接的容器中注入一定的液体,所有容器中的液体将在管道中自由流动,其结果是当平衡或者静止

时各容器中的液体表面将保持相同的高度,但是各个容器中的液体深度可能并不相同,这也就反映了各个容器所在的各参考点的高度的不同(图 1.1 为其原理图)。

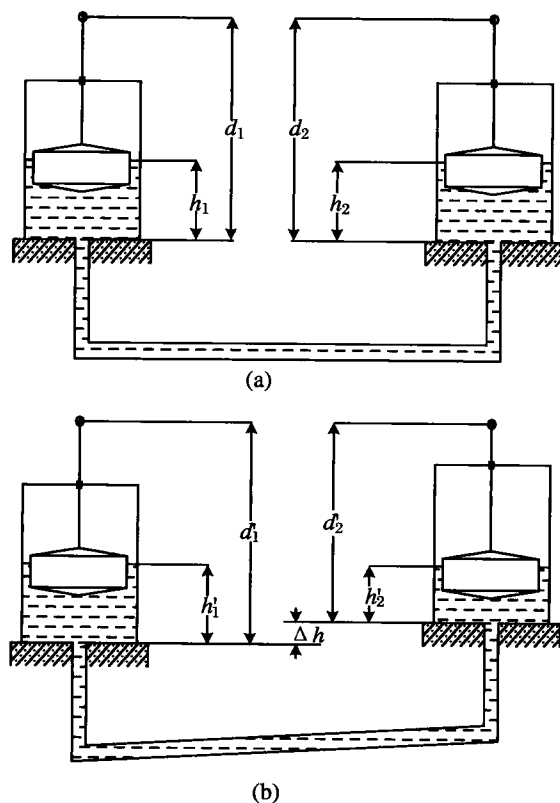


图 1.1 HLS 原理示意图

如果容器和连通管道中使用的液体密度均匀一致,环境压力等因素也相同,上图中的第一种情况显示的是两个容器对称分布,处于相同的高度,此时

$$d_1 = d_2, \quad h_1 = h_2$$

其中, d 表示标志物到容器底面的距离, h 为容器中液体的高度。所以两个容器所在位置之间的高度差为零, $\Delta H = 0$ 。

对于第二种情况,由于两个容器所处位置的高度发生了变化,有

$$h'_1 = h_1 + \frac{\Delta h}{2}, \quad h'_2 = h_2 - \frac{\Delta h}{2}$$

所以

$$d'_1 = d_1 + \frac{\Delta h}{2}, \quad d'_2 = d_2 - \frac{\Delta h}{2}$$

可以得到

$$\Delta h = d'_1 - d'_2 \quad (1.1)$$

如果两个容器的距离比较远,假如液体的密度也不同,则当处于平衡(静止)状态时,有下面的关系式

$$p_1 + \rho_1 g_1 H_1 = p_2 + \rho_2 g_2 H_2 = C \quad (1.2)$$

式中, p_1, p_2 分别为两个容器中液面上方的大气压强; ρ_1, ρ_2 分别为两个容器中液体的密度; g_1, g_2 分别为两个容器所在位置的重力加速度; H_1, H_2 分别是两个容器中从基准水平面起算的液面的高度,例如容器内液体液面到系统(包括连通管)中液体最低点的高度。在一个复杂的、测量范围比较大的静力水准系统中,温度、压力等因素必须要加以考虑,在以后的章节中将给予进一步讨论。

1.2 静力水准系统的历史

静力水准的基本原理在很早以前就被人们所熟悉。在中国,最早提出水平定义的是墨子。他说:“平,同高也。”言简意赅。至于在工程建设中取平,公元前的文献中有多处提及。庄子指出:“水静则明烛须眉。平中准,大匠取法焉。”王先谦(1842~1917)对“平中准”注解:“其平与准相中,故匠人取法焉,谓之水平。”这是关于工匠利用水平原理进行水准测量的早期文献。所谓“大匠取法”,显然指的是有经验的工程师以水准测量作为营造水平面的依据。可见最迟在公元前4世纪已在工程实践中应用水准测量技术。公元前3世纪,秦博士伏生更进一步说到水准测量的实际应用:“非水无以准万里之平。”其实水准定平技术的记载可能更早一些。墨子曰:“天下从事者,不可以无法仪。无法仪,其事能成者无有也。……百工为方以矩,为圆以规,直以绳,正以县(悬),无巧工不巧,工皆以此五者为法。”在文字

记载之前,水准测量早已在城市建筑中实际应用。考古发现商代城市建筑中已应用水准定平技术。在河北藁城西台的商代中期建筑遗址中,在基槽壁上有用云母粉画出的水平线,可能是用作基础整平的标志线。在河南安阳小屯村殷墟商代晚期的遗址中,不少基坑底部基本在同一水平面上。在发掘时还发现相交的两条水沟,其中填有结实的夯土。主持现场发掘的考古学家认为,这相交的水沟是在遗址修建时用作水准定平的,并举出“现在豫西乡间的泥水匠仍用着与此相仿的办法。在建筑房子的一块地上,先挖成一个X形的交叉水沟……”,以为佐证。这种十字水平北魏时曾应用于天文仪器的定平,办法是“圭上为沟,置水以取平正”。元代天文仪器的定平是在基座板四周“为水渠,……凡欲正四方,置案平地,注水于渠,眠平”,是同样的道理。

在国外,有科学家称古埃及在建造金字塔时,为了保证塔身不倾斜就用到了联通水管,这是静力水准系统的雏形。静力水准系统的测量方法在几百年前就被人们用在各种仪器中。比如,1629年罗马人布兰克研制了一种仪器,在两个玻璃管之间用铅或者皮革支撑的软管连接起来,里面充上液体,用来比较两点间的高度;1879年在法国就有人着手进行静力水准测量的试验,当时采用了2 m高的罐体,之间用长达300 m的软管连接,但是当时的水准测量精度很低;1890年,俄国也开始了类似的实验,其软管的长度达20 m,在测站上确定的高差的中误差达到3 mm。另外,1936年,有人还利用静力水准系统实现跨越“大别利特”海峡长距离——18 km的高程传递,当时传递高程的中误差是0.09 m。1938年,在德国完成了跨越2 km海峡的水准测量工作,误差是0.1 m。1952年,在比利时的“什力多河”跨越4 km的高程传递,中误差是0.14 m。

静力水准系统在今天,更是以惊人的速度得以发展和应用。对于静力水准系统而言,决定其测量精度和性能的因素主要来自两个方面:一方面是安装在测点上的传感器的性能和精度。它受到当时社会科学技术发展程度的影响。随着现代传感器技术的快速发展,出现了基于不同原理的传感器,其测量精度也在不断提高,目前国际上有的传感器产品标称精度达到 $0.01\ \mu\text{m}$ 。另一方面是系统中连通管的布设,以及受到外界影响程度的大小。随着研究的深入,尤其是对高精度静力水准测量的要求越来越高,对可能影响静力水准系统测量精度和性能的因素的研究越来越细致和透彻,以