

安全监测

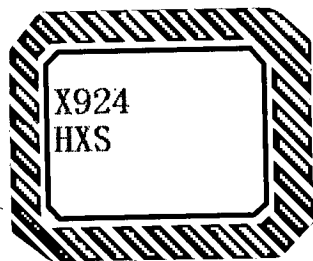
原理与方法

华锡生 田林亚 编著

河海大学出版社

安全监测原理与方法

华锡生 田林亚 编著



河海大学出版社

内 容 提 要

结合安全监测的特点,本书主要论述了安全监测精度指标确定的方法,安全监测基准及倒垂的稳定性,多种位移监测的技术、方法,GPS技术在安全监测中的应用,精密的高程变形监测,自动监测技术和监测系统以及安全监测模型的建立及应用,并且结合实际工程探讨了安全监控的综合分析方法等内容。书中论述的安全监测内容均基于测绘技术的进展并尽可能地反映现时的特色。

本书可作为测绘专业本科及研究生教学之用,又可供有关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

安全监测原理与方法/华锡生,田林亚编著. —南京:
河海大学出版社,2007. 11

ISBN 978-7-5630-2202-1

I. 安... II. ①华... ②田... III. 安全监察—
研究 IV. X924

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 000692 号

- 书 名 安全监测原理与方法
书 号 ISBN 978-7-5630-2202-1/O · 124
责任编辑 马文潭
特约编辑 张林清 陈永安
责任校对 江 南 武 鸣
封面设计 杭永鸿
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)
印 刷 南京捷迅印务有限公司
开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 19 印张 474 千字
版 次 2007 年 11 月第 1 版 2007 年 11 月第 1 次印刷
定 价 50.00 元

前

言

安全监测是测绘科学的重要内容之一,它在更广的意义上及更深入的内容中反映了测量学科的现时特色和先进的理论与技术,同时也极具代表性地体现出测量学科的发展趋势。

在国民经济飞速发展的今天,人们对自然资源的优化利用和对生存环境的保护,都有了更深层次的认识。安全监测科学引起了人们的广泛关注和高度重视,安全监测的理念在各种工程建设中均得到必要的体现。进一步深化自动监测技术的研究,深入开展对形变机理及形变量值准确预报的探讨,对监测物安全性的判别及健康状况的诊断,对工程在运行中风险程度作出切合实际评估等内容的研究,必将进一步发挥安全监测在抗灾防害、为民造福工作中的积极作用。

安全监测是一门涉及较广领域的现代科学,它深刻地体现了多学科相互交叉、相互补充的特色,同时还反映了对各种先进技术广泛的吸纳及应用。

形变信息的采集是安全监测的基础,目前发展极为迅速的自动监测技术,可解决大量监测信息同步实时采集的需要。此外,结合各类传感技术及相应理论而研制开发的无损检测技术,有效地解决了监测工作中的困难。结合“3S”技术实施的滑坡及大范围地表形变监测也正在深入开展。基于现代控制理论和计算机网络技术,对各种大型工程实施安全监控的自动监测系统研究和开发,也取得了一定的成果。安全监测信息的自动采集,经数十年的发展已产生了“质”的飞跃,也是现时最为活跃的测量技术内容之一。

监测信息的处理及分析是安全监控的重要环节,结合现代数学物理方法深入研究监控模型的构建,也取得了显著的进展,这为检验及判别构筑物运行性态是否正常,分析各种作用因素对形变的影响,准确预报形变量值和规避不利因素组合对构筑物可能产生的风险等提供了条件。安全的预测研究,将随着安全监测理论和技术的发展而进一步得到深化。

安全监测,其最主要的目的是切合实际地对构筑物工作状态的安全作出评价。因此,对综合评价理论和方法进行深入的研究有重要意义,特别是对构筑物整体安全的智能化认知和判别系统的开发研究显得尤为迫切。这方面的内容是安全监测工作值得密切关注的技术难点和更深层次发展的努力方向。

安全监测涉及的范围如此广泛,而每一个具体内容又十分细致深化,这对各种新技术的吸纳和研究就显得尤为重要。因此,安全监测工作必须遵循“厚积而薄发”的工作原则,也是进行安全监测工作的科技人员毕生不断努力的方向。作者根据目前安全监测的现况及要求,结合自己的实践和研究,编写了本书,希冀对安全监测工作有一些实际的参考作用。比之于安全监测广泛而深奥的学科领域,本书所述的内容虽如“沧海一粟”,但亦贡献了涓滴之力量。

本书在撰写中,曾参阅了大量的文献和资料,未逐一列出,特向有关作者表示歉意。此外,翁静君及冯小磊等人完成了许多书稿整理工作,给予了较大帮助,在此谨表谢意。

由于水平所限,不足和错误之处难免,敬请谅解。

作 者

2007年6月于南京

目

录

第一章 概述	1
1.1 安全监测的目的与意义	1
1.2 监测工作的内容及发展概况	4
1.3 安全监测的特点和基本要求	10
1.4 监测精度的讨论	16
第二章 安全监测基准	22
2.1 参考基准的选择与建立	22
2.2 监控网的数据处理及稳定性检验	27
2.3 监控网质量评价与优化	34
2.4 倒垂基准稳定性和倒垂组补偿原理	41
第三章 水平位移监测技术	50
3.1 精密全站仪及自动补偿原理	50
3.2 全站仪测控技术与精度分析	56
3.3 短基线精密三维测控	62
3.4 视准线监测及精度	68
3.5 引张线监测与复位误差	71
3.6 精密激光准直在变形监测中的应用	77
3.7 精密垂准测控	82
3.8 倾斜仪监测技术及误差	87
第四章 高程变形监测	94
4.1 精密水准监测技术	94
4.2 竖直大气折光及折光系数	98
4.3 三角高程大气折光误差及处理方法	104
4.4 精密跨江高程	112
4.5 高程精密传递	118
第五章 GPS 安全监测	124
5.1 GPS 定位的误差	124
5.2 GPS 监控网	129
5.3 GPS 水准精密高程传递	134
5.4 小波分析在 GPS 测量中的处理技术	139

5.5 GPS 在安全监测中的应用	147
第六章 自动测控技术	154
6.1 常用传感器的工作原理及应用	155
6.2 垂线自动监测技术	163
6.3 液体静力水准系统	169
6.4 地下工程精密导向测控	177
6.5 光纤传感技术及应用	182
6.6 大型工程自动监测系统	186
第七章 安全监控模型	195
7.1 监控模型的质量评价	195
7.2 监控模型的数据诊断	200
7.3 统计模型及处理技术	209
7.4 确定性模型和混合模型	214
7.5 灰色模型及灰关联分析	220
7.6 时间序列分析模型	229
7.7 卡尔曼滤波在监控分析中的应用	236
第八章 安全监测综合分析及其在工程中的应用	247
8.1 模糊聚类分析与模糊评判	247
8.2 BP 神经网络综合分析的应用	253
8.3 大桥钢箱梁安装测控分析系统	260
8.4 索塔变形监测综合分析	266
8.5 大桥合龙段的状态控制	272
8.6 地下工程施工安全监控及形变预测	277
8.7 区域性地面沉降安全监控分析系统	283
8.8 安全监控信息系统	291
参考文献	297

第一章 概 述

1.1 安全监测的目的与意义

20 世纪 50 年代以来,我国国民经济得到了快速的发展,特别是近 20 年,在改革开放方针的指导下,更呈现出突飞猛进的势态,众多前所未有的大型工程纷纷涌现,构建了我国现代化国民经济的坚实基础。

在水电工程方面,我国建成了举世瞩目的长江三峡工程、小浪底工程。此外,随着流域的滚动开发,金沙江、澜沧江流域有一大批巨型电站和高坝正在或即将建设,其中有坝高 292 m 的小湾拱坝、坝高 277 m 的白鹤滩双曲拱坝、坝高 278 m 的溪洛渡电站以及坝高 214 m 的龙滩电站等许多装机容量在 420~1 260 万 kW 的巨型水电站。这些电站的建设,为满足国民经济飞速发展而日益增长的电力需求提供了可靠保证。在交通运输方面,我国建成了遍布全国的高速公路网 4 万多千米,正在建设或已经建成的许多特大型现代桥梁有主跨径 1 088 m 的双塔双索面斜拉桥(苏通长江大桥),主跨径 1 490 m 的悬索桥(润扬长江大桥),跨越杭州湾水面的 36 km 特大桥以及跨越 32 km 海面的东海大桥等。这些大型工程的完成,将为构建我国现代交通网络的新格局发挥重要作用。此外,为解决京、津、塘和广大华北地区水资源问题而正在建设的南水北调工程(包括东线、中线、西线三个部分);在世界屋脊和永久性冻土带上修建的青藏铁路工程;从新疆轮南到上海长达 4 000 多千米的西气东输工程;为优化城市交通环境而修建的北京、上海、南京、深圳等许多城市的地铁工程、磁悬浮轨道;我国自行设计建设的大型核电站工程以及众多的城市建筑群体和大型工业体系的建设等,无不标志着我国经济建设已步入现代高速发展新阶段。对这些特大型工程施工阶段及运行期的安全监测和实施科学管理,确保安全运行而造福于民,为国民经济的发展作出应有的贡献,是一件十分重要的大事。

我国现代化建设的进程,也深刻体现在人口、资源、环境保护和减灾防灾等各个方面的可持续发展重大问题的解决中。改善和优化人民的生存环境,对各种自然灾害的预测和防治等为主要内容的监控研究工作,已提到十分重要的议事日程及项目实施工作中。例如,研究地壳结构及板块的活动并建立广布全国的地震监测网,以便实施对地震预测和早期预报;研究滑坡的机理,分析泥石流的生成及其动力特性,开发相应的动态监测技术,以有效地进行滑坡和泥石流灾害的防治;利用自动水情预报系统和防洪 GIS 技术等,实现对洪涝灾害的预报及提供有效的应急措施;研究地下水资源的保护和合理开采,建立地下水情监测系统,实现对地下水资源科学调配以防止大面积地表沉陷灾害的发生。在大型工程建设中,实施以周围环境及生态平衡良好发展为目标的可性论证和监控系统的构建等,无不体现在我国社会现代化进程中,在自然资源开发和利用的同时,加强对生态环境和自然灾害监控及

防治的特色。

运动是物质的属性,自然界中一切都处于动态的变化过程中。以混凝土大坝为例,会因坝体温度变化、库水作用、基础变异、坝基渗流场改变、混凝土徐变、材料老化、风力和地震等各种因素的作用而产生变形。在这些作用因素中,可以粗略地分为两大类:一类是内部因素,如混凝土材料在发生化学反应时产生的水化热以及材料的徐变和老化、坝体结构的变异和强度的降低等,使大坝由于自身材料和结构变化而产生变形。另一类是外部作用因素,如坝体温度、库水及地下水的作用、基础的恶化和地震等,由于外力作用对大坝的影响而使坝体产生变形。建筑体的变形是不可避免的,通常它们均处于一个动态平衡的过程中。就建筑物的变形而言,一般可以分成两种:一种是符合建筑物正常规律的变化,也就是在内、外部作用因素影响下所发生的符合建筑物正常规律性的变化。在这种变化中,物体内部的结构及工作性态没有出现异常,不会危及建筑体的安全。另一种变形是由于建筑物本身的结构和材料出现变异使工作性态异常,或者由于超乎寻常的外界条件作用下使产生的变化明显地超过了正常工作允许的变形量值,超出了建筑物具有的一定规律的变化特性。这种有异于正常情况的变形有可能危及建筑物的安全,是安全监测工作重点研究的对象。因此,建筑物的安全监测工作,应该在总结正常运行规律的基础上,加强对异常值的判别,对异常程度定性定量的研究是极为重要的工作内容。

由此可见,安全监测是一门在工程建设或自然资源保护及灾害的防治中,分析及预测研究对象的变形规律、对异常情况进行判断及成因的分析,从而提出相应的有效补救措施,以防止危及安全事故发生的理论及应用技术科学。

进行安全监测的目的,主要有如下一些方面。

1) 为工程施工期和运行期的安全监控提供依据

例如,在三峡工程混凝土浇筑时,为保证大体积混凝土的浇筑质量,需要监测混凝土的温度和接缝的开合度变化,以控制混凝土的浇筑速度和程序,评价混凝土的施工质量及分析所采取的温控措施是否有效。在三峡工程大体积混凝土浇筑中,不仅要严格控制混凝土的入仓温度,而且在结构体内不同高层面上也布设了众多网络状水管,用温度较低的江水在水管内流通,带走混凝土凝固时所产生的水化热。通过施工中的温度、接缝开合度等方面的监测及分析,表明了大坝在混凝土浇筑中,温度被有效地控制在允许范围内,混凝土的质量优良。此外,也表明了混凝土的施工工艺和流程合理,所采取的温控措施有效。

在葛洲坝大江坝段施工时,采用上游围堰和防渗墙阻挡江水,下游基坑开挖到设计高程后浇筑坝体的方案。在施工中,当下游基坑抽水到 33.0 m 高程时,由上游围堰防渗墙监测资料表明,墙体上游面拉应变很大而下游面压应变也产生异常。对此进行了专门分析和计算,得出的结论是由于防渗墙结构单薄,抗应变能力有限,若继续抽水,墙体可能会断裂而危及大江围堰和基坑施工。根据监测及分析的结果,施工中立即采取应急措施,在大江围堰和基坑之间,增建一个平压围堰,在平压围堰体内加设第二道防渗墙,保证了大江围堰的安全和基坑施工的顺利进行。

又如,某连拱坝经数十年运行和长期监测资料的分析,建立了由温度、库水位和时效等因素构成的监控模型,进而分析了在各种不利组合因素作用下的监控指标。20 世纪 90 年代的某年冬季,电厂管理人员为多发电和考虑春季农业用水有足够的水源支持,采取了高蓄库水的方案。然而,当年冬季出现极少遇到的异常寒冷,使大坝工作在极低温度且高水位的

最不利条件下运行,坝体监测的位移值出现大量异常值并显著地超过监控指标的情况,同时发现在坝体上出现许多裂缝,有危及大坝安全的可能。根据资料分析结果和大坝变形预报模型监控指标,管理人员首先采取紧急放水、快速降低水位等措施,使大坝的变形未进一步恶化,同时对坝体采取补强及修复,确保了大坝的安全。

2) 对变形情况的预测预警,实现对灾害的规避

1977年开始,对距离三峡大坝上游 26 km 的新滩老滑坡体进行了系统的监测,到 1984 年底已累积了多年资料。由多期的资料分析,建立了新滩滑坡体的监控模型。按此监控模型的分析,表明在新滩镇附近的姜家坡堆积物处于“复活”状态并具有整体滑移的迹象,滑移的方向为南偏西,直指新滩老镇。进一步的预测分析表明,可能发生大滑坡的时段为 1985 年的雨季。对此,当地行政人员根据提供的监测报告和预测分析,在 1985 年 6 月 11 日下大雨时果断地采取撤离全体居民的应急预案。6 月 12 日凌晨,新滩发生了体积达 $2\,000\text{万 m}^3$ 的巨型滑坡,不仅新滩古镇全部被毁,而且滑坡堆积物滑入长江产生的涌浪高达 49 m,毁沉船只多艘。在新滩滑坡灾害中,由于进行了较长时期的监测,建立了良好的监控模型,及时提供了准确的预报和预警,政府部门采取了有力的防险预警方案,使灾区居民无一伤亡,在安全监测史上展示了成功的范例。

3) 建筑物运行安全的评价及不安全因素的排除

我国某大型水坝,左岸山体内布置有高大的发电厂房、大断面的输水隧道群体及泄洪排水系统,但左岸山体风化严重,地质破碎且有一定数量的断层构造带,要确保电厂的安全运行,左岸山体的稳定是个关键。20 世纪末,在大坝库区逐步蓄高水位的过程中,监测到地下厂房廊道内两个排水孔渗流量严重异常,而山体内渗流的恶化对左岸山体的稳定性影响十分有害。为评价山体及发电厂房等构筑物的安全,利用地下洞室内布置的各种观测点及观测仪器,其中包括渗流测点、渗压计、倾斜仪、应力应变计、岩体多测点位移计以及在山体表面布置的沉降测点、平面位移测点等多期的大量监测资料,建立反向传播模糊神经网络模型实施安全评价。得到的结论是虽然此两个排水孔渗流量严重异常,但这种异常是局部范围性质的,山体其他各部位仍属正常状态,这种局部异常对山体及构筑物的安全运行没有显著影响。为进一步查找排水孔异常的原因,结合施工记录资料及地下爆破作业的情况,根据山体勘察阶段提供的工程及水文地质成果综合分析,初步认为:可能是由于厂房附近一条延伸很远的较大破碎断层带因施工而被震动,使地下渗水因库水位的提高渗流不畅,经由渗流测孔加速流出而导致两个测孔异常的初步结论。为进一步验证此结论的可靠性,分别在左岸山体附近的水库内和沿构造带进行渗流通道的同位素示踪测试,表明渗流测孔异常与库水位提高无关,而是由构造带渗水加剧所致。对此,工程技术人员采取了在一定范围的构造带处理措施,以保证地下构筑物的安全。

4) 为验证设计、反演设计参数提供有用的信息

某现代大型桥梁,塔柱主墩基础采用 100 多根直径为 2.5 m、长度为 100 余米的混凝土灌注桩,桩间距 6 m 左右。按模型试验及土力学分析计算,桩群产生的摩擦力可以安全地承担大桥的荷载而确保基础的稳定。为验证设计的准确性和监测基础的实际沉降情况,工程技术人员布置了对主墩高程的变形监测以及在一些桩底及桩体不同高程面的应力应变监测,以此获得基础实际沉降量值以验证设计的准确性。此外,还可以由这些监测资料反演各桩的实际摩擦系数、群桩效应的折减系数,验证所设计桩的尺寸、长度和桩群的布置,采用的

摩擦系数是否合理等,为今后设计提供有益的参考。通常,为验证设计及参数反演目的而进行的变形监测应该专门设计,首先,它必须考虑监测内容和项目的完整性,即为验证某设计内容时监测项目的设置,应十分全面而不可疏漏。其次,为验证或反演参数时确定监测精度。如果监测精度较低,使反演参数的误差很大,则结果不足以凭信和取用。此外,还必须考虑到各监测量值与所反演参数的相关性,一个参数的反演通常与各种因素有关,如何排除次要因素的影响,突出主要因素的独立作用也是十分关键的。

大型工程施工及运行的安全是极为重要的,它不仅直接与确保工程的正常运行有关,而且对社会的安定、对人民生命财产的保护、对国民经济发展与生态环境的优化作用巨大。工程不安全事故的一些惨痛历史教训至今还使人们记忆犹新、难以忘怀。以水电工程建设为例,由美国大坝委员会发表的调查资料表明,到1972年底,美国已建大坝共4 974座,其中土石坝3 896座,发生重大事故案例349宗,溃坝52宗。我国水利部统计资料表明,截至20世纪80年代底,全国大、中、小型水库溃坝占大坝总数的3.4%,其中最多的年份为1973年。在交通及土建工程中,重庆市綦江县的彩虹桥,1996年2月16日竣工后,历时仅3年,这座120 m跨径的人行大桥就塌垮而没入江水之中,造成多人伤亡。该桥在塌垮的两年以前就有人发现存在拱架钢管焊接及材料问题和桥梁结构发生严重破损的现象。再如,台湾省接连高雄与屏东的高屏大桥,2000年8月发生桥体断裂,16辆汽车坠河,几十人受伤。上海黄浦江过江2号线中,由于防渗体系产生问题而江水涌入,致使附近大楼塌垮。许多工程中典型安全事故的频发,难以一一列举。对这些案例的事后分析表明,有一些是由于工程施工质量造成的,也有部分是环境条件恶化及局部气候异常(连降暴雨)引起的,但是更多的是由于管理不善、缺乏必要的安全监测以及对隐患未及时处理而产生的。因此,安全监测工作必须引起人们足够的重视,严格实施工程运行中对异常状况的及时报警,查明不安全的因素,采取有效的补强措施等,对防止事故的发生具有重要作用。此外,还应顾及的是到目前为止,许多工程已运行了好多年,经历了各种风风雨雨,结构强度的降低、材料的老化和构件的破损,使建筑物步入“老年”和“亚健康”状态而长期以来得不到有效的补救和修复。加强对这些构筑物的安全监控和深入地开展对长期运行工程的健康诊断及定期检查,就显得特别重要。因此,进一步研究健康诊断理论、开发各种诊断所用的方法和先进的技术手段是安全监测工作的一个重要发展方向。

1.2 监测工作的内容及发展概况

我国的安全监测主要在20世纪50年代开始起步。以水电工程为例,在50年代初修建的荆江分洪闸和杜家台分洪闸就布置有水平和垂直位移监测项目。1958年兴建的丹江口水利枢纽已布置了包括变形、应力、温度、渗压和接缝等项目的较完整监测系统。水利水电工程通常工程量浩大,蓄水面积宽广,起着拦水作用的大坝修建在深山峡谷,坝基的工程及水文地质极为复杂。此外,地下水的渗流,地震、温度和库水位的变化等各种因素的作用,使大坝常期处于恶劣的工作条件之下。大型的水坝高达100 m以上,所蓄的库水达数十亿 m^3 ,一旦失事,巨量库水的下泄将造成难以估计的损失,不堪设想。国内、外均有大量的资料统计了大坝失事及造成巨大损失的记载。国际“大坝破坏和损坏委员会”主持统计了1900—1965年间全球约有500宗坝工事故,其中溃坝案例有90宗(不包括我国在内)。我

国水利电力部刊印的“水库失事资料汇编”表明,我国从 1954—1961 年共 8 年间有 532 座土石坝失事,其中库容在 1 亿 m^3 以上的有 8 座。

大坝的安全监控工作,在 20 世纪 50 年代初就得到广大水电工作者的极大重视,开展了利用各种有效方法对大坝的变形监测,进行了监测资料的系统分析,使安全监控技术在我国进入了实际应用的新阶段。

在随后的发展过程中,大坝的安全监测工作在组织机构、理论技术和方法手段等各个方面均取得了显著进步。早在 1982 年成立的全国大坝安全监测信息网就开始不定期地召开全国大坝安全管理及学术讨论会,迄今已达 50 多次,进行大坝的科学管理和安全监控技术等方面的学术交流。1985 年,电力工业部设置了大坝安全监察中心,负责安全监测技术规范的制定、组织对大坝的定期检查和运行状况的评价以及对各种事故的分析、处理,实施全国大坝的科学及规范化管理。1988 年,水利部设立了针对土石坝为主的大坝安全监测中心。1990 年,中国水电学会成立了大坝安全监测专委会等机构和组织。

从 20 世纪 80 年代开始,大坝安全监测与管理方面的规范和制度得到进一步地加强。1980 年制定了“土石坝观测资料整编办法规范”,1981 年制定了“水利水电工程测量规范”,1983 年发布了“水利水电工程管理条例”,1989 年制定了“混凝土大坝安全监测技术规范”,1994 年制定了“土石坝安全监测技术规范”,1995 年发布了“水库大坝安全鉴定办法”等。在水利水电工程的安全监控工作中,构建了一整套有效和可行的规章制度,对大坝的安全和日常的科学管理起到有“规范”可依的作用。

安全监测主要是为确保工程的安全、防止事故发生而造成严重危害,验证规划、设计、施工的正确性与工程质量,对老化及病变结构的补强加固、维修养护的效果提出评价等。凡此,对安全监测科学可理解为:它是一门结合现代科技,对工程建设及自然环境保护过程中所研究对象的安全评价、预测与控制而进行的信息采集、处理分析、反演推理及综合评判等的理论研究和应用技术科学。现代安全监测的主要内容可包括如下一些方面。

1) 安全监测的信息采集技术

早在 20 世纪 50 年代,我国兴建的一些大坝,如佛子岭大坝(高 76 m)、梅山大坝(高 88.2 m)、丹江口大坝(高 97 m)、官厅水库大坝等已采用精密水准测量、经纬仪、垂线及视准线等多种技术和方法,开始了大坝位移监测工作。到 60 年代,从国外引入了卡尔松式仪器(差动电阻式传感器)并使之国产化,用于大坝混凝土的应力应变、钢筋应力、坝体伸缩缝与裂缝开合变形和坝体内部温度等许多项目的监测工作。70 年代,在大坝变形的监测中,广泛采用变形监控网、正垂倒垂系统、视准线及引张线等技术,监测坝区、坝体及坝基的位移,同时采用应变计、无应力计、测缝计、钢筋计、测压管和渗压计等监测大坝及基础的应力应变、渗流和扬压力等物理变形量。布置加速度计、拾震器和地震仪,监测大坝振动及其动态特性。在这个时期,大坝的安全监测工作已较全面地构建了变形监测信息采集的基本框架体系和确立了监测的必要内容。信息采集的方式大量是基于人工观测,即使是内部监测仪器,如应力应变、钢筋计和测缝计等,也都是利用电桥或可移动的测量仪表,逐支地进行人工测读、记录。

建筑物是一个有机的整体,随着环境因素(如温度、水位)的变化而时刻都处于动态形变中。为安全监测而布置的各个测点或监测项目之间是紧密相关的,各作用因素的变化均会引起整个建筑物的相应变化而使各测点输出对应的信息量值。因此,在研究完整的变形过

程中,最希望获得整体的同步实时形变监测量。采用人工观测,工作量极大,速度慢,采集到的信息不可能满足同步实时的要求,从而对安全分析及评价的可靠性和准确性带来十分不利的因素。此外,建筑物在运行中,有时会遇到一些突发性事件,如狂风暴雨、洪水和地震等,在这些极端恶劣条件下,管理人员特别希望能十分迅捷地获得实时的监测信息。对此,在 20 世纪 90 年代初期,我国便开始了安全监测自动化系统的研究及开发。到现在为止,已有许多系列和谱型的自动化设备投入了正式使用,在安全监测中发挥了积极作用。

安全监测的自动化系统主要由各类高性能的传感器及现场数据采集测控单元(MCU)构成的监控信息采集装置组成,用屏蔽电缆或光纤将采集到的变形量的数字信号传输到计算机,进行分析处理。自动监测信息采集系统可根据工程的大小、监测项目的多少及测点的分布情况而布设成集中式、分布式或集散式结构形式,可完成上万甚至更多测点的同步实时监测。1992 年,水利部大坝安全监测中心在东武仕水库实现了第一座水库大坝的安全监测自动化。1994 年,在葛洲坝二江泄水闸安装了由南京水文自动化研究所研制的 D—94 型分布式数据采集系统,实现对 2 台垂线仪、18 台遥测引张线仪和 135 台差动式仪器的自动测控及数据采集。同一时期,南京电力自动化研究院研制成 DAMS—I 到 IV 型的分布式数据采集系统,在青铜峡、隔河岩和漫湾等许多电站的大坝安全监测中安装运行,发挥了重要作用。

2) 先进的监测技术开发和研究

监测信息的采集需要依靠各类仪器、传感器和现代监测技术来完成。安全监测信息的来源是各方面的,有人工巡视、人工检测的信息,有采用仪器及各种设备观测的信息,也有自动化监测及利用多种现代新技术获得的信息。安全监测技术的发展及提高,是监测成果及质量所达到水平的一个重要标志。

在位移监测方面,早期应用的视准线、交会法等监测方法精度较低,不易满足现代安全监测的需要。此外,作业中观测工作量大,受外界条件影响显著,存在不能获得同步实时观测成果等缺陷。因此,进一步研究和开发高精度的自动化位移监测技术就显得十分迫切。

20 世纪 80 年代以来,我国一大批自动化位移监测仪器相继问世。在垂线及引张线观测中,有差动电容式、电磁感应式、步进马达型及光电 CCD 等垂线自动观测仪投入使用,从根本上改变了人工观测的落后局面。这些自动化仪器的分辨率通常能达到 0.01 mm 左右,可长期工作,性能稳定,测值可靠。

在垂直位移方面,研制及开发了遥测静力水准仪,按探测液面高程装置的不同可分为差动电阻式、电容感应式和光电 CCD 式。遥测静力水准仪在建筑物、特别是大坝垂直位移及倾斜监测中,发挥了积极作用,观测的分辨率可达 0.01 mm。由静力水准仪配合自动化引张线组成的系统,在一些大坝的二维位移自动化监测中得到了应用并获得了很高精度的观测成果。

20 世纪 70 年代,我国研制和开发了波带板激光准直及真空管道激光准直系统,位移监测的精度可达到 $1\sim 2\times 10^{-6}D$,特别是真空管激光准直,精度可达 $2\sim 3\times 10^{-7}D$ 。这些系统在刘家峡大坝、丰满大坝、太平湾大坝以及三峡工程等许多大坝监测中得到了广泛应用。此外,波带板激光准直技术在大型汽轮发电机组的调试安装及我国首台电子对撞机的安装与监控中发挥了积极作用。

近期,高精度自动全站仪的投入使用,使极坐标法和交会法监测技术在中小型大坝和土

石坝的安全监测中进一步得到重视。利用自动全站仪 TCA2003 监测,通常在数百米的距离内可以获得较高的三维位移监测量,设备的费用并不昂贵,使用及维护也方便。此外,将自动全站仪通过光缆与控制室的计算机相连,构成三维位移自动监测系统后,非常适合土石坝及中小型大坝的自动监测工作。

在地下工程及高边坡等位移监测中,我国开发了岩体应变计、多点位移计和倾斜仪等设备,方便地用于地下洞室岩体的变形、洞室在开挖过程中岩体掏空后应力释放产生的变形、岩层在外力作用下产生的错动和高边坡的稳定性等内容的监测工作。

在渗流渗压的自动监测中,我国研究和开发的振弦式渗压计、电容感应式渗流量仪等一些自动监测仪器,不仅精度高,测值可靠,而且改变了以往常用的测响锤、压力表和量水堰等人工操作监测方法的不利局面。

上述众多的自动化监测仪器,在我国已形成了系列产品,实施了定型化生产和管理,制定有仪器系列型谱规范,使自动监测仪器的生产、应用、管理和质量保障等各个方面都进入了现代化的轨道。

除了上述自动监测仪器外,现阶段安全监测技术还结合和吸纳了大量的科技新成果及新方法。例如,GPS 技术的应用,在隔河岩大坝的安全监测中,由安装在坝顶及附近稳固基岩上的 7 个 GPS 点构成坝顶位移自动监测系统。大坝遭遇特大暴雨时,该系统仍能正常工作,同时能迅捷及时地对大坝在恶劣环境下的工况监测提供宝贵的信息,发挥了重要作用。在小湾高边坡的自动监测中,应用了河海大学开发的 GPS 多天线监测系统,在高达 600 m、倾角 40° 以上的高边坡稳定性监测中取得了很好的效果。此外,以监测三峡库区生态环境的状况、蓄水可能诱发地震等为目的布置的大区域内的 GPS 监控网,研究开发了采用以高分辨率遥感图像处理技术为手段的近坝区滑坡与高边坡监测系统。在大坝坝基及岩体的安全监测中,应用 20 世纪 80 年代发展起来的光纤传感技术,开展对岩体、混凝土表面裂缝的监测,利用分布式光纤网络温度测量技术探测大坝渗流情况等,都取得了良好的结果。

在建筑物安全隐患及健康检测方面,应用探地雷达(GPR)向地下发射高频电磁波,由电磁反射波定位并显示缺陷所在。此外,工程上还应用了便携式变频电磁剖面仪、高密度电法检测仪、混凝土声波层析技术、表面波混凝土裂缝检测技术、地震多波检测等许多新技术。这些新技术在大坝及土坝内部的缺陷探测、定位,混凝土的老化及结构的完好性检测,大坝及基础工作状况的检测等许多方面都发挥了重要作用,解决了长期以来未能解决的建筑物内部结构和状况无损检测的技术难题。进一步研究和开发新仪器,加强自动化集成并最大程度地应用各种先进技术于安全监测中,是现代监测技术发展的主要方向。

3) 安全监控的数据处理与分析

建筑物安全监控数据处理中很重要的内容之一是变形模型的研究。变形模型的建立有利于分析建筑物的变形规律和特性,可以提供模型监控指标对变形的异常作出准确判断而实施运行中的安全监控。

长期以来,安全监控模型采用基于构建统计分析模型为主的方法,这种建立监控模型的方法直至现在仍然被广泛地应用着。统计模型比较易于建立,计算工作量也不太大,容易为监测人员掌握。此外,在一定程度上表达了建筑物变形与各种主要因素作用的关系,所以较长时期以来,在变形监测数据处理中一直作为最主要的分析模型。然而,此模型也有不足之处,首先通常要求有较长历史的观测资料,才能体现较好的“遍态历经性”,使模型对各种情

况的预报更为准确。其次由于模型中各因子的相关性,使研究及分析各因素对变形量值作用的大小不太准确而存在一定的局限性。20世纪70年代末,在安全监测的数据处理中,研究结合有限元理论而建立的确定性模型及混合模型,使分析建筑物变形的情况与物体的材料、结构和工作条件等紧密地联系起来,对揭示建筑物的变形机理和内部结构变异情况有积极作用。此外,这种模型较好地反映了建筑物变形的整体性,同时也反映了建筑物各个部位变化的共同作用和相关性,因此是一类较好的模型。但是,这类模型在很多情况下不易精确地建立,计算复杂,在实际工作中的应用很不方便。尤其是物体内部实际的温度场分布情况及现实物体的各种力学参数、基础的工程地质条件等难以精确获得时,使模型在计算上存在一定的近似性。尽管如此,这类模型仍不失为极有价值的模型,特别是在由于分析需要而模拟计算各种作用条件下建筑物的变形情况、设计允许变形量的初步确定、结构的稳定性分析以及对关键问题的研究中,确定性模型计算的结果,可作为一种十分重要的依据。

近期以来,应用数学的理论得到很快发展,使安全监控数学模型的研究出现了许多新的内容。例如,以时间序列分析为基础的ARMA模型在建筑物沉陷、位移观测数据处理中的应用;以灰关联分析为基础的多因子灰色模型,在分析多种因素及其相关作用下,建筑物变形规律及预报的研究;以模糊理论为基础的模糊聚类分析在安全性评价中的应用;以BP神经网络为基础的神经网络监控模型及其在安全综合评判分析中的应用;以遗传算法结合神经网络的监控模型;以不确定性理论为基础的综合分析评判模型;以卡尔曼滤波理论为基础的自适应滤波模型和以小波分析理论为基础的小波处理模型在动态分析中的应用。此外,还有进一步深入研究的把多种理论结合在一起的新型混合模型等。

在安全监控数据处理中,另一个重要问题是多测点和整体模型的研究。建筑物是一个“有机”整体,各个部位都是相互关连着的,监测中布置的各种类型的许多监测点将因建筑物的变形而产生各自相应的变化量值。这些监测点变化的集合,反映了建筑物变化的全貌和整体安全状况。此外,在安全监控中,通常要准确了解一些部位的变化对其他部位产生的影响,某些部位变化异常对整体安全性的作用等,因此对整体变形模型的研究及其建立具有重要意义。从目前来看,通常的监控模型都以单测点模型为基础,它监控的范围主要是建筑物的局部情况而不是全貌。因此,如何有机地把各种监测量及各监测点获得的信息“揉合”在一起而建立多因素多测点的整体监控模型是一个值得进一步深入研究的问题。

安全监控的模型应力求:①模型误差小,即所建的模型应具有较高精度地符合建筑物形变的规律性。②能用于长期准确的预报,以使在安全运行及对异常值的检验中发挥积极作用。③能较好地体现变形的动态特性及尽可能地反映变形的数学—物理的统一,为安全监控中变形因素和原因的查找、变形机理的解释和综合推理分析等工作提供方便。④方法简便可靠,以利在实际工作中方便使用。

纯数学的模型在安全监控分析中有一定的局限性,特别是在分析变形的原因、查找变形的主要因素、研究变形的机理以及拟定对变形实施有效控制的措施等各个方面,均是难以满足监控要求的。实施安全监控工作的另一个主要难点是对变形异常值的确定。物体的正常变形不影响其工作性态,但变形异常就表明存在不安全因素,应该进一步查明原因,排除隐患,采取措施,使其恢复到正常工作状态。要准确判断变形的异常值是比较困难和复杂的,异常值的产生可能由观测的粗差产生,也可能由于建筑物结构强度的恶化或者突发性的极端恶劣的环境条件作用影响所致。因此,在判断异常值时,首先必须对监测系统的工作状况

和测值的可靠性进行评判,只有在确认观测到的异常值并不是由观测过程本身及监测系统的不稳定所致后,才有必要再进一步分析是否因建筑体结构的损坏或外部环境条件恶化所造成的。对异常值的准确判定是一项很重要的工作,异常值的漏判将会使存在的不安全因素得不到及时发现,使监测工作失察,而异常值的误判,将会造成不必要的虚惊。在安全监控中,对异常值的判别通常可采用已拟订的安全监控指标体系来进行。安全监控指标可以有多种,例如,由规范规定的指标;由监控模型预报值确定的监控指标;由力学及结构分析订出的监控指标;有根据较长时期运行状况拟订的一些指标以及众多经验丰富的专家知识汇集而成的监控指标。对于这些指标,应该根据建筑物的具体情况而正确地选定并定位出它们之间的相互关系和恰当的评判权重,构成完整的切实可行的异常值评判体系,用于对异常值的评判中。

建筑体上布置的多种观测内容的测点,构成了完整的监测体系,各类观测点的测值应该是相关的,对各种工况条件下建筑体变形的反映应该是协调一致的。因此,最大限度地利用各类观测值及采集到的各种信息集于一体,有效地评价建筑物的工作性态是监控工作进一步研究的内容。在安全监控的综合评判及分析中,目前采用的主要有层次分析法,有基于知识的综合分析推理(人工智能的一个领域),它包括了把知识表达成规则树的产生式专家系统和基于深知识的定性综合分析推理的因果关系网络模型,有将结构对象的各种功能关系用一系列算子表示的物理过程综合分析模型,有采用模糊聚类分析、模糊评判与层次分析相结合的模型,有基于多级灰关联、突变理论的模型,有遗传算法与神经网络相结合的模型,有利用数据仓库技术对数据深层次的知识挖掘和决策支持的方法以及应用盲数理论与可靠度理论的“不确定性”评判方法等。上述的综合分析评判方法基本上都能较好地结合众多监测信息于一体,成功地用于建筑物的安全评价中,但同时也存在进一步完善和提高以及对一些关键处理技术的研究问题。

4) 安全监控信息系统的研究及开发

近十多年来,应用现代计算机技术及网络通讯技术,实施对监测信息的自动采集、处理和分析、变形异常值的评判、综合推理分析与安全性的评价以及对不安全因素的查找和提出相应的应急措施等为工作内容的建筑物安全监控信息系统研究得到了极大的重视,目前已相继开发了一些可供应用的系统。安全监控信息系统的开发和研制是十分有意义的,它有助于迅速和正确地对监测信息的处理,实现可视化和网络传输,为工程管理人员正确评价建筑物运行性态,及时发现隐患以及采取有效措施,为确保运行安全提供有力的手段。安全监控信息系统深入的研究和开发是现时安全监测工作步入信息化时代的一个发展方向。

以大坝的监控而言,安全监控信息系统应包括有巨量的数据库、完备的方法及模型库、合理有效的监控指标与知识库、能适应管理分析需要的图形图表库和功能强大的综合推理分析机制。

数据库和数据库管理系统是解决安全监测中对各种信息的采集、存储、调用、查询、更新和维护等,必须具备对监测信息的自动采集及人工输入等功能。模型及方法库包括为实现安全监控所需的各种计算方法及建立的监控模型,对于大型的安全监控信息系统,要考虑模型的自动生成及信息的批处理。知识库与监控指标库主要是存储、调用和查询等各类专家知识和监控指标,方便对异常值的判别和综合分析评价所用。综合推理分析模块是安全监控信息系统的核心所在,它包括对异常值的判别及成因分析、对安全程度的综合评价、确定

报警级别和辅助决策等。

安全监控信息系统开发的平台和结构同样是十分重要的,必须考虑巨量数据的迅捷传输及调用、高效地管理与处理等,因此系统的结构及数据流程的优化、功能强大的计算机及网络系统和开发优良的应用软件来支撑监控信息系统都是必须顾及的。为达到分级管理和众多用户使用及数据共享的目的,应利用 INTERNET 等成熟的网络技术,建立以 B/S 或 C/S 方式的多级结构的网络系统以适应大型工程安全监控管理的需要。

安全监控系统发展到现在,服务于多种需要的一些监控信息系统的开发和研制也得到了飞速的进展。例如,为防洪及水情预测、抗灾决策分析、疏导受淹人群、预估受淹面积和财产损失、提出应对方案等而研制开发的以地理信息系统为基础平台的防洪抗灾决策支持系统;各流域开发的旨在优化水资源的合理调配、水污染的防治、环境保护以及对洪水高程的预测、洪峰强度及历时预估等内容的水情测报系统;以岩土和地质力学理论为基础的监控危岩及高边坡稳定,库区滑坡在受库水、降雨、地震等作用下产生的变形及预报为内容的岩体与滑坡安全监控系统;以分析和预测地下水开采对地表的变形有效实施地下水的优化采用以及预控地表沉降为内容的地表沉陷安全监控系统;以特大桥的安全运行、优化调度,对大桥各构件的工况进行评判和健康诊断及预估大桥寿命等为内容的特大桥健康诊断信息系统等。

在安全监控的研究方面,一些研究人员正在深入开发“数据仓库”技术和“联机分析处理”技术,以进一步发掘各种隐含和深层次信息的作用,实施对已有数据的二次开发及知识的挖掘,提供决策支持。其内容是将大量用于安全监控事务处理的传统数据库信息,以决策主题的需要进行重组、存储和管理,由专门开发的联机分析处理软件对重组的数据进行分析并转换为辅助决策信息。结合由人工智能与机器学习中发展起来的数据挖掘技术,从“数据仓库”中挖掘有用的知识,构成产生式规则、决策树和数据集等,通过对知识的推理形成智能模型,构成一种更高级的辅助决策系统。

现阶段,科技的飞速发展使社会进入了信息化时代,各种工程安全监控系统的研制和开发正在进一步深入展开,结合现代先进的自动化监测技术和计算机网络技术,应用监控分析与评判的先进理论和模型,依靠长期以来取得的经验和知识,安全监控信息系统的研究一定会得到“质”的飞跃,为各种工程的科学管理提供现代化的方法和手段。

1.3 安全监测的特点和基本要求

1.3.1 安全监测的特点

与通常的测量工作相比,安全监测在内容及采用的技术方面都有其显著的特点,主要体现在如下一些方面。

1) 监测工作的时空及动态特性强

建筑物的变形监测通常要在很长的时空期内实施监测点的多期观测。以水电工程为例,在工程的施工阶段就应开始安全监测,以监控施工质量和确保施工中的安全。在初期蓄水阶段,由于库水的逐步增高,使大坝及坝区两岸的岩体由原来无水的状态变化到不断承受增高的库水作用的过程,坝区渗流场及应力场发生较大的变化,大坝的工作环境会发生显著