



工程安全监测技术 2007

GONGCHENG ANQUAN
JIANCE JISHU 2007

◎ 刘大文 胡建忠 主编



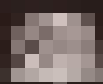
中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

工程安全监测技术 2007



CHINESE ACADEMY OF SCIENCES
JOURNAL OF ENGINEERING SAFETY MONITORING
2007

ISSN 1672-9247



中国科学院
工程安全监测技术
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES
JOURNAL OF ENGINEERING SAFETY MONITORING

工程安全监测技术 2007

GONGCHENG ANQUAN
JIANCE JISHU 2007

© 刘大文 胡建忠 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是全国大坝安全监测技术信息网主办的“2007年技术信息技术交流会”论文集，收集了设计、施工、电厂、工程管理、仪器制造、科研单位和高等院校等单位大坝安全监测工作者提交的会议交流论文。

全书共分四部分内容：监测仪器与系统、监测设计与施工、监测资料分析与反馈、监测测量技术。

本书可供水利、电力、交通、矿山等领域从事工程安全监测设计、施工、管理、仪器制造等专业的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程安全监测技术. 2007/ 刘大文, 胡建忠主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2007
ISBN 978-7-5084-5046-9

I. 工… II. ①刘…②胡… III. 水利工程—安全监察—文集 IV. TV513-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 156881 号

书 名	工程安全监测技术 2007
作 者	刘大文 胡建忠 主编
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	787mm×1092mm 16 开本 24.75 印张 587 千字
版 次	2007 年 10 月第 1 版 2007 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	68.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

根据“全国大坝安全监测技术信息网”六届二次网长会议关于2007年度网内工作会议安排，大坝安全监测信息网决定在2007年下半年召开“2007年技术信息交流会”。为筹备本次会议，丰富会议内容，于2007年3月向全网各网员单位发出征文通知，以便编辑《工程安全监测技术2007》论文集，作为大会的技术交流资料。到8月底共收到论文56篇，包括设计单位、监测仪器设备生产厂家、工程施工单位、发电厂、电力管理部门、安全监察管理部门、高等院校和科研单位等。

工程安全监测是监视工程安全的重要手段。通过监测可获取第一手的资料，可了解建筑物的工作性态，评价建筑物的安全状况、在发现建筑物出现异常迹象时制定响应的工程措施来保障其安全。因此安全监测对保障工程安全、社会安定、人民生命财产和充分发挥工程效益等方面具有极其重要的作用。几十年来，我国已拥有一支认真负责、高水平的大坝安全监测队伍，他们从事监测设计、施工、管理、仪器生产制造、资料的分析反馈和科学研究等工作，长期坚守在自己的岗位上，为我国的水电工程的安全运行作出了不可磨灭的贡献；与此同时在安全监测的技术上也有长足的进步，并取得了丰硕的成果。本论文集中收集的论文有我国大坝安全监测工作者近年来的实践经验，也有理论探讨或独特的见解，都是他们长期辛勤劳动的成果，是十分宝贵的财富。

论文内容主要涉及监测仪器设备和自动化系统、监测设计和监测工程施工经验和方法、监测系统的更新改造、监测资料的计算分析与监测成果的反馈、监测测量技术等。有些内容涉及安全监测新技术的新理论、新方法。如关于监测自动化系统可靠性的考核、高性能振弦式仪器的研制、新的监测信息管理系统的应用、碾压混凝土内监测仪器的埋设方法、有关监测资料的计算和分析方法的讨论、对岩锚梁开裂机理的研究、监测量误差的探讨等。

由全国大坝安全监测技术信息网主办、中国水电顾问集团成都勘测设计研究院协承办的“2007年监测技术信息交流会”即将于2007年10月在成都召开，本次会议是全国工程安全监测界的又一次盛会，必将对总结和交流工程安全监测成果，展望和开拓工程安全监测未来起到重要的作用。

编 者

2007年9月

主编单位

全国大坝安全监测技术信息网

中国水电顾问集团成都勘测设计研究院

编辑委员会

主 编 刘大文 胡建忠

编 委 (以姓氏笔画为序)

石建舟 邵乃辰 李文力 李文慧

陈绪高 舒 涌 覃友中 蔡德文

目 录

前言

监测仪器与系统

大坝安全监测自动化设计的省思与建议	李旦江 王为胜 毛良明	(3)
关于差动电阻式钢筋计的使用和测值计算	储海宁 秦淑芳	(16)
大坝安全监测自动化系统可靠性考核指标平均无故障 工作时间计算探讨	赵花城	(23)
NJG 真空激光准直监测系统测控原理及其应用	罗孝兵 卢欣春	(30)
大坝监测自动化系统中几种常用多通信方式介绍	廖占勇	(36)
高性能振弦式仪器的研制与应用	郭宝玉 杨振宇	(43)
FWC2000 大坝安全监测信息管理系统的设计和应用	秦淑芳 陈健祥	(47)
FWC2000 型安全监测自动化系统在新疆吉林台一级水电站安全 监测中的应用	王为胜 郝佳圣 毛良明 郭一竹	(52)
光电步进式垂线坐标仪在周公宅水库大坝变形监测 工程中的应用	毛良明 郭 跃 李旦江 施海莹	(62)
磁致伸缩液位计在红石大坝渗漏量监测中的应用	陈文斌	(69)
数字强震仪在大坝安全监测中的应用研究	高 峰 魏继武 宋丽红	(73)
基于触发器技术的监测信息管理系统 数据一致性保障	施玉群 王 龙 何金平 吴云芳	(77)
三座店水库大坝观测系统设计与实施	张 新 张 峰	(83)
基于 GPRS 网络的白溪引水工程安全监测系统	赵 斌 杨立新 俞晓红	(87)
长湖水电站大坝安全监测自动化系统更新改造及实施运行	刘秀玉 李芳志	(95)
地声监测在水电工程监测中应用的探讨	李大宏	(102)

监测设计与施工

惠州抽水蓄能电站安全监测系统设计	高 平	(109)
石泉大坝 24~27 号坝段扬压力超标成因分析及更新改造设计	但其宝	(116)
石泉大坝坝顶垂直位移观测系统改造设计	但其宝	(127)

沙牌水电站大坝蓄水期外部变形观测的设计与应用	吴常栋 (136)
RCC 高坝安全监测设计与评估	王蓉川 (145)
深溪沟水电站外部变形监测网设计思路	孙 璇 (152)
碾压混凝土内应变计组安装埋设方法	李大宏 (157)
龙羊峡大坝自动化安全监测系统的实施及运行情况	鄢宁平 (164)
五强溪水电站大坝安全监测系统	杨国祥 (169)
监测施工特殊部位三向测缝计 (WY 型) 的安装	陈 军 (177)
分布式光纤传感测温系统在丹江口大坝右岸加高工程 温度监测中的应用	岳 鹏 李 磊 (182)

监测资料分析与管理

混凝土面板堆石坝的渗流量调查情况	王志远 (195)
混凝土应力应变的量测和计算	邵乃辰 (200)
用统计模型估计实际观测精度	王志远 (205)
变形法计算混凝土应力时的几个问题	冯 波 (213)
地下厂房岩锚梁开裂机理探讨	李文慧 李文力 王佛凯 彭 琦 (218)
活动式测斜仪精度分析及利用平面数据对其成果的修正	刘满江 (225)
锚索测力计的计算问题	李大宏 (231)
监测管理信息系统中三维模型若干问题研究	吴云芳 齐文强 何金平 (235)
大坝安全综合评价物元可拓模型研究	廖文来 何金平 (240)
混凝土坝时效变形合理因子表达式研究	周莉莉 龚 静 何金平 (246)
混凝土坝时效变形特性研究	李东升 龚 静 何金平 (251)
吉林台一级水电站面板堆石坝变形监测成果分析	郝佳圣 秦淑芳 (257)
石泉扩机工程高边坡外部变形监测精度分析与评价	但其宝 (263)
石泉扩机工程引水隧洞放空检查及监测资料分析	但其宝 (275)
丹江口大坝加高混凝土温控及监测成果分析	彭成军 (288)
二滩水电站大坝监测平面基准网两期观测成果分析	吴常栋 郭火元 (294)
紫坪铺工程面板堆石坝变形监测分析	蔡德文 牟 林 阮文兰 (301)
沙湾水电站原厂房后边坡变形体监测及变形特点分析	石建舟 张飞跃 (312)
基于实测浸润线的土石坝渗透系数反演分析	龙 盎 李 民 曹怀志 (322)
三板溪水电站地下洞室施工期安全监测分析	杨振宇 (328)
五强溪水电站边坡变形及稳定性分析	杨国祥 (334)
浅谈街面水电站厂房岩锚梁荷载试验的监测分析报告	林建春 黄晓君 (341)

变形法计算混凝土应力时的几个问题 冯 波 (349)

监测测量技术

双金属标工作原理及线膨胀系数比的反演 刘满江 (357)

测量精度及误差传播定律 刘满江 (361)

水准测量的主要误差来源及其消除与减弱方法 冯 立 (364)

全站仪在水下地形测量中的应用 金先炜 (369)

利用大地测量法实现施工期边坡稳定性实时准动态监测 吴常栋 (372)

石泉大坝坝顶视准线观测系统分析与评价 但其宝 (377)

监测仪器与系统

大坝安全监测自动化设计 的省思与建议

李旦江 王为胜 毛良明

(南京电力自动化设备总厂水电仪器公司 江苏省南京市 210003)

摘 要 从提高大坝安全监测自动化系统实用性、可靠性、实时性、稳定性的角度出发,讨论了监测自动化设计中有关系统规模和总体方案、监测仪器选型、系统防雷、软件功能等有争议的问题,并提出了相关建议。

关键词 大坝安全监测 自动化 设计

1 引言

我国是世界上建坝最多的国家,据 2004 年统计,已建在建各类水库大坝约 85289 座,其中,大型水库大坝(库容 1 亿 m^3 以上) 445 座,中型水库大坝(库容 1000 万~1 亿 m^3) 2782 座,小型水库大坝(库容 10 万~1000 万 m^3) 82062 座^[1]。尤应指出的是,其中戴上病险水库大坝帽子的有 3 万多座,约占总数的 36%。因此,我国大坝安全管理和安全监测的任务十分艰巨。

在我国,大坝安全监测作为大坝安全管理的耳目,最早起步于 20 世纪 50 年代,而后和世界各国大坝安全监测技术的发展相一致,至 20 世纪末已经取得了长足的进步。通过几十年的努力,我国在监测技术和监控理论、监测仪器和自动化技术、监测管理和信息化技术等方面都有了迅猛发展。就大坝安全监测自动化技术而言,真正进入广泛应用阶段是从 90 年代开始至 21 世纪初,期间随着传感器技术、计算机技术和微电子技术、通信技术日新月异的发展,我国大坝安全监测自动化水平有了量变到质变的飞跃,监测自动化技术也渐趋成熟,而且,2005 年我国该领域第一部行业技术标准《大坝安全监测自动化技术规范》^[2](DL/T 5211—2005)正式颁发,可以说有了上述基础,21 世纪我国大坝安全监测自动化才进入了推广应用的新阶段。但是,大坝安全监测自动化的现状不容乐观,它的系统的实用性、可靠性、实时性、稳定性尚待提高,这个领域的一些重要问题,例如:自动化数据采集系统的规模和总体方案、自动化系统监测仪器的选型、监测系统的防雷、自动化系统的软件功能等认识并不一致,长期存在争议。因此,监测自动化设计作为这个领域的龙头,必须妥善解决这些问题,以利健康发展。

2 自动化数据采集系统的规模和总体方案问题

我国大坝安全监测自动化的数据采集方式经历了从单台仪器遥测、专用测量装置、集中式数据采集系统到分布式数据采集系统的发展过程，自动化规范明确规定今后自动化数据采集方式宜采用分布式采集系统（DL/T 5211—2005 第 5.3.1 条），这是时代的进步。但是，自动化系统的规模和总体方案问题仅有原则性的指导意见，歧见较多，较难执行。

2.1 规模问题

尽管 DL/T 5211—2005 第 5.1.5 条和第 5.1.7 条分别对新建工程和更新改造工程安全监测自动化系统的规模给出原则性要求，但事实上，近年来我国除了某些大型、特大型工程设计了庞大的安全监测自动化系统外，很多一般工程，同样存在不管工程规模、不管安全管理的实际需要、不管经济性能的比较，一味将大坝安全监测的全部项目和测点转为自动化监测的项目和测点，因而造成自动化监测系统规模过大，说它为普遍现象应不为过。这里首先要讨论的是原来人工测量或遥测的项目和测点全部（或基本上）转入自动化系统是否合理？拥护者的主要理由当然是现代化管理的需要，实现“无人值班、少人值守”的需要，是现代化技术的发展方向。但是，还应注意以下几个方面。

(1) 大坝安全监测有其特殊性，必须遵循仪器监测和巡视检查相结合的原则，仪器监测仅能提供部分安全信息。据统计，大坝 70% 的老化和异常现象是由有经验的技术人员在现场巡视检查中发现的，我国梅山、柘溪、陈村、白山等大坝的重大异常信息的发现和过程就是最好的例证，这些大坝的异常部位都不是仪器监测部位^[3]。实践证明，即使在实施大坝监测自动化以后，仪器监测项目和测点再多，自动化监测系统再齐全，也不能减少技术人员的现场巡视检查力度。因此，在大坝安全监测范围内，有了自动化监测就认为能实现“无人值班、少人值守”的说法并不确切。

(2) 根据监测目的不同，安全监测项目和测点有永久性监测和临时性（短期性）监测的区别，有提供大坝安全信息和提供施工信息（包括验证设计需要的信息）的区别，对于临时性监测和提供施工信息的项目和测点与大坝的长期安全运行关系不大，不必列入自动化系统。例如：很多的表面变形测点，指导坝体施工的测缝、测温和应力测点，运行多年后大坝自动化更新改造时确认与大坝安全运行关系不大的测点等。

(3) 纳入自动化系统的项目采用的是仪器设备，特别是埋入坝内或基础的仪器设备必须确保可靠、稳定的原则，那些不太成熟、没有使用经验的仪器设备不宜纳入（下节将专门讨论）。

(4) 一些人工监测比较困难，但是必须加强巡视检查的项目，例如大坝边坡的变形、绕坝渗流、坝基扬压力、渗流量等，也不宜以节省劳动强度为理由全部纳入自动化系统，可以采用部分纳入自动化系统，部分保留人工监测的方案，或者强调纳入自动化系统测点的长期人工比测，以利于加强巡视检查。

总之，近年来普遍存在的那种将原先人工测量的大坝安全监测项目和测点全部（或基本上）转入自动化系统，造成规模过大的现象应该纠正。观测界的有识之士已经在深入研

究自动化监测系统的合理规模问题，如长江水利委员会设计院在“南水北调中线干线工程安全监测系统设计研究”一文^[4]中指出：“首先，安全监测项目和测点数量应按各建筑物的类型、结构特点、地质条件等实际需要来设定，不可盲目设置，也不是多多益善；其次，所需自动化监测的测点数量及 MCU 的数量不可过多，一般来说自动化测点数量占总数的 30%~60% 比较合理；再者，监测系统的功能不是越多越好，而应选择实用性强、稳定可靠、技术先进的功能，这样系统的故障率会相应降低。”

2.2 总体方案问题

大坝监测自动化系统的总体方案是指自动化系统的总体结构问题。DL/T 5211—2005 中规定：“大坝安全监测自动化系统宜采用分布式系统，其基本的数据采集方式参见图 1，称为基本采集系统。” DL/T 5211—2005 第 5.3.3 条进一步规定：“根据工程的规模和特点，整个自动化系统的总体结构可由一个或多个基本采集系统组成。基本采集系统内部可采用 EIA—RS—232C、EIA—RS—485/422—A、CANbus 以及其他国际标准构建现场通信网络；基本系统之间及基本系统与监测管理中心站之间可采用局域网连接；监测自动化系统应具备与系统外局域网或广域网连接的接口。”

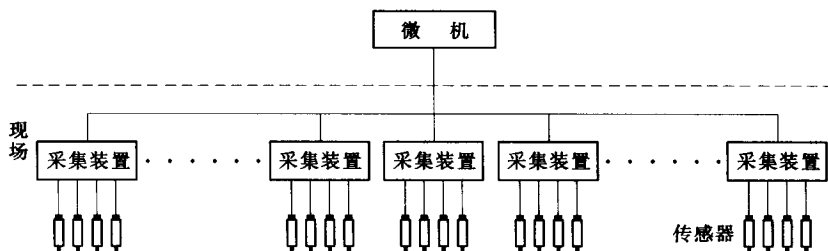


图 1 分布式数据采集方式

上述条文中引起争议的主要是基本采集系统内部现场采集层的现场通信网络问题。目前，国内大坝自动化监测系统绝大多数都采用 RS—485 半双工、全双工异步通信总线构建现场通信网络，而 DL/T 5211—2005 提出也可以采用 CANbus 以及其他现场通信网络，到底采用何者为好？在大坝监测自动化领域内，采用 CANbus 以及其他现场通信网络是未来方向，但近期内仍应采用和完善 RS—485 现场通信网络，理由如下：

(1) RS—485 是国际电子工业协会 EIA 于 1983 年制定并发布的技术标准，但并非网络标准，它仅是串行数据接口标准，只对接口的电气特性作出规定，而不涉及接插件、电缆或协议，系统厂家需在此基础上建立自己的高层通信协议。相对 RS—232 而言，RS—485 弥补了 RS—232 通信距离短、速率低的缺点，是一种相对经济、有较高传输速率、较远传输距离和较宽共模范围、较高噪声抑制功能的通信平台。从目前解决微机、单片机之间（主从结构）中长距离通信的诸多方案分析来看，RS—485 总线通信模式由于具有结构简单、价格低廉、通信距离和数据传输速率适当等特点而被广泛应用于大坝安全监测、工业自动化、仪器仪表、智能化传感器集散控制、楼宇控制、监控报警等领域，已取得长期可靠运行的成熟经验。

(2) 以 CANbus 为代表的现场总线（Fieldbus）是 20 世纪 80 年代末、90 年代初国际

上发展形成的，用于过程自动化、制造自动化、楼宇自动化等领域的现场智能设备互连通信网络。它不仅是一个基层网络，而且还是一种开放式、新型全分布控制系统。以 CAN-bus 为代表的现场总线技术在网络特性、通信可靠性、通信速率、通信距离、网络节点数目等方面明显优于 RS—485 总线，已经受到世界范围的关注，成为自动化通信技术发展的热点，并将导致自动化系统结构与设备的深刻变革，所以应该是大坝监测自动化通信网络的发展方向。

(3) 尽管现场总线技术先进，但是由于各个国家各个公司的利益之争，虽然早在 1984 年国际电工技术委员会/国际标准协会 (IEC/ISA) 就着手开始制定现场总线的标准，至今统一的标准仍未完成。很多公司推出其各自的现场总线技术，但彼此的开放性和互操作性还难以统一。因此，网络开发难度和开发成本较高，开发依赖性较大，限制了现场总线技术在国内的发展。尤其对网络特性为主从结构为特点的大坝监测自动化领域，改成以 CANbus 为代表的现场总线，以便具备多主节点功能的紧迫性不大。

(4) 近年来 RS—485 总线技术在通信可靠性、通信速率、通信距离、网络节点数目方面有了长足进步，能够满足大坝监测自动化系统的各种功能需求。例如 21 世纪初推出的 RS485HUB 多总线服务器的应用，就使 RS—485 总线的结构方式、通信距离、网络节点数目等发生了根本变化。原来 RS—485 总线一定要用手牵手式的总线结构，避免星型连接和分叉连接，应用 RS485HUB 后可以任意采用总线型、星型、树型以及各种分叉连接；原来 RS—485 总线的理论通信距离为 1200m，有了 RS485HUB 的中继作用，RS—485 总线的通信距离已经基本不受限制；原来 RS—485 总线只能带 32 台测控装置进行通信，采用 RS485HUB 后可以扩容为 128 台、256 台，甚至更多设备进行通信，通信可靠性显著改善。

3 仪器设备的选型问题

本节大坝安全监测自动化系统仪器设备主要指监测仪器（传感器），它的选型直接关系到系统功能的实现以及系统能否正常工作的问题。近年来多种新型监测仪器的出现，使大坝监测自动化的可选项目和可选仪器增加，但在某种程度上也增加了仪器设备的选型难度。就仪器设备的选型标准以及测量机器人、光纤传感系统等新型仪器在大坝监测自动化中的应用发表如下看法。

3.1 选型标准

大坝监测自动化系统与其他工业测控系统在运行时空环境方面有显著差异，前者特点是长期运行于水工恶劣环境（高湿度、高温变、强干扰、大地域），因此，对仪器设备的要求很高。事实证明，不少大坝监测自动化系统不能正常发挥作用，故障频发，形同摆设，多为仪器选型环节上出的毛病。DL/T 5211—2005 将这些仪器设备的选型标准归纳成第 6.4.3 条，即监测仪器能够连续、准确、可靠地工作，在使用寿命期能适应工作环境，主要性能满足技术规范要求。概括起来有两个方面：一是监测仪器使用的长期性、稳定性要求；二是性能指标（量程、灵敏度、精度等）的先进性、适用性要求。两者都很重

要，如何权衡，笔者看法如下。

(1) 对监测仪器的长期性、稳定性要求应该是仪器选型的重要前提，原则上只有长期性、稳定性好的传感器才有资格纳入大坝监测自动化系统。尤其对埋设在混凝土和土体中的监测仪器（传感器），由于其不可更换和没有校验条件，长期稳定性更应是仪器选型的首要指标。因为，在影响仪器选型的多项指标中，量程、灵敏度、精度等固然重要，但它们只影响测值的量级和误差的程度，只有长期稳定性一项直接影响仪器使用的寿命和可靠性，长期稳定性不好，埋设的仪器等于报废。笔者已经在另文^[5]中比较了钢弦式仪器和差阻式仪器在长期稳定性方面的表现，并指出国内、外钢弦式仪器的不足，其实在近年来开发的其他新型仪器中，长期稳定性问题可能更加突出。例如，仍然作为埋设仪器被广泛应用的压阻式仪器（如渗压计）、电气泡式仪器（如面板挠度计）、电容式仪器（如多点变位计）等，在长期稳定性方面都还没有拿出令人信服的论据，这些类型的传感器充其量只能安装在大坝外部，或者在具有更换和校验条件的场合，用户必须谨慎。

(2) 对传感器的技术性能指标应避免盲目追求高标准或者任意降低标准的倾向。追求某种指标的高标准意味着增加投资，或者降低其他指标的标准。例如渗压计，应该选择合理的量程范围和足够的精度，如果加大量程又要保证原精度要求，则必须多花钱购置大量程同精度渗压计，否则，加大量程的同时必然降低测量精度。同样，降低技术标准意味着降低监测质量，因而不能提供有价值的信息资料。例如曾经在多个大坝监测自动化工程中采用的大气激光准直系统，由于旁折光的影响，测量精度达不到规范要求，测量中误差和测值变幅基本处于同一量级，因而无法判断变形规律。又如测斜仪，该仪器本来是国内、外广泛应用在边坡、大坝上，作为人工监测时的便携式设备，它通过探头在测斜管内自下而上、每隔 50~100cm 的逐段测量，最终给出边坡、大坝内部不同高程的变形和滑移面位置，效果不错。近年来，一些设计单位硬把测斜仪搬入大坝监测自动化系统，在测点布置上，为了满足自动化的需要又不至费用太高，一般相隔 5~10m 设一固定测点探头。姑且对这些固定探头在恶劣环境下工作的长期可靠性不予评论，仅就测点布置较少难以保证监测精度一项来说，自动化监测中此类仪器的应用很难达到在人工逐段监测中的良好效果，甚至由于测点的代表性不够和误差太大给出错误判断。

3.2 测量机器人

近年来，一种能够连续或定时对多个变形监测目标进行自动照准、识别、跟踪、测角、测距和三维坐标测定的测量机器人（自动跟踪全站仪）在大坝监测自动化领域出现，由于它彻底改变了人工光学测量的眼看、嘴念、手记、心算的测量模式，而且依托各项高科技成果将变形测量精度最终能提高到亚毫米级，因此，在大坝、边坡、船闸和各种变形控制网的自动化监测中崭露头角。测量机器人的应用填补了大坝变形自动化监测的空白，应该积极推广，但是在实际应用中必须克服下述误区，否则仍然达不到监测目的。

(1) 错误认为采用高档测量机器人就能保证变形监测的高精度。笔者实地考察过某工程用高档测量机器人 TCA2003 全站仪全自动监测混凝土重力坝坝体变形的实例。该工程采用极坐标原理测量的测点变形中误差大约在 2~3mm，和以往光学人工测量方法（如视

准线法、边角交会法等)的精度相近,和坝体变形幅度处于同一量级,因此,根本不能作为安全监控的依据,问题出在对测量机器人功能的错误认识上。目前最高精度的测量机器人 TCA2003 全站仪的标称测角、测距和自动照准精度分别为 $\pm 0.5''$ 、 $\pm 1\text{mm} + 1\text{ppm}$ 、 $\pm 2 \sim 3\text{mm}/500\text{m}$ 。事实上,由于大气折光和自动照准误差的存在,方向测定中误差可达 $\pm 2''$ 左右;测距误差最大可达 4ppm ,按通常的使用方法,采用极坐标原理测定监测点的三维坐标的点位测定误差达 $\pm 7 \sim 10\text{mm}/\text{km}$,它与我国大坝变形监测所需要的亚毫米级精度相距甚远。如果要在自动监测中达到亚毫米级精度,则还要付出代价更加昂贵的配套措施:第一,自动监测必须采用三边交会法来确定监测点的三维坐标,即必须建立三个工作基点,安装三套自动跟踪全站仪;第二,必须同时配置计算机控制的高精度测距仪频率校准仪、高精度温度计、气压计、湿度计等设备以及相应的实时校测软件,用来减小测距误差和大气折光误差。显然,只有少数工程能够付出这样高昂的代价。

(2) 片面追求测量机器人工作的全自动化。目前,国内大坝应用测量机器人的工作方式大致有两种:一种是半自动化方式,即先用自动跟踪全站仪进行半自动化数据采集,再将采集数据输入计算机进行数据处理。另一种是全自动化方式,即全站仪数据采集和计算机数据处理一并在线完成。如果采用全自动化方式,要求全站仪、计算机以及各种采集、通信、数据处理的硬软件设备全部在线工作。自动化程度是提高了,但比半自动化方式既大幅增加了设备又大大提升了实施的技术难度,特别是全站仪、测点棱镜等设备的现场保护和可靠性检测工作难度更大。笔者不反对有条件的工程采用全自动化方式,但反对片面追求全自动化。上述工程就是一例,为了实现全自动化,该工程放弃了能够保证监测精度的交会法测量(即采用一台全站仪,分别安置在左、右岸两个工作基点的半自动化方式),反而花大钱在一个 6m 高的混凝土墩上建造了作为工作基点的全站仪保护房,不仅工作基点的稳定性不能保证,还换来了不能满足监测精度的极坐标法测量,这种得不偿失的教训应该避免。

3.3 光纤传感技术

长期以来,我国大坝安全监测自动化领域传统采用的监测仪器(传感器)尽管种类很多,但都有一个共同点,即最终都转化为电信号测量并通过电缆传输到数据采集装置。这种模式具有自身很难克服的某些致命弱点,如抗电磁干扰能力较差,在雷击和强电磁干扰环境中很难正常工作,严重时会导致传感器失效和系统瘫痪,这点应该是目前大坝安全监测自动化系统发生故障的重要原因。从克服传统模式的缺陷看,在大坝安全监测自动化领域采用光纤传感技术是非常理想的选择。因为它是以光波为载体、光纤为传媒,感知和传输外部被测物理量的新型传感技术,在电磁绝缘性能方面具有传统系统不可比拟的优势,除此以外,光纤传感器在高灵敏度、高速测量、高信息量、宜于分布式组网等方面均有明显优势,因此,光纤传感技术正在各行各业掀起新的技术革命。但是,为什么 20 世纪 90 年代初就开始应用于国内、外医学、电力、化工、军事和结构工程的光纤传感技术,直至 21 世纪初才在我国的大坝工程上开始应用研究呢?将光纤传感技术成功应用于大坝监测的关键因素又是什么?

(1) 当前,光纤传感领域仍处于研究阶段。它的发展可分为两大方向:原理性研究与