

## 真空激光自动监测大坝变形技术\*

王绍民<sup>1</sup> 夏 诚<sup>2</sup> 陈昌林<sup>3</sup> 赵道木<sup>1</sup>

(1 浙江大学物理系 杭州 310028; 2 长春市朝阳监测技术研究所 长春 130061; 3 丰满发电厂 吉林 132108)

**摘 要** 针对大坝变形观测要求精度高和长期稳定可靠的难题,对美国斯坦福大学安装、调整直线加速器的真空中激光三点法作了关键性改进,并移用于大坝,其中用小孔代替透镜组,其作用是定位、限漂、扩束和点化。20年来,该技术已先后运用和推广到太平哨、丰满、龚嘴、桓仁、云峰和太平湾大坝,特别在丰满发挥了重大的社会效益。该技术已正式被确定用于三峡。

**关键词** 大坝变形观测,真空激光准直

## AUTOMATIC MONITORING OF DAM DEFORMATION BY LASER VACUUM COLLIMATION

WANG Shao-Min<sup>1</sup> XIA Cheng<sup>2</sup> CHEN Chang-Lin<sup>3</sup> ZHAO Dao-Mu<sup>1</sup>

(1 Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China)

(2 Institute of Chaoyang Monitoring Technology of Changchun, Changchun 130061, China)

(3 Fengman Power Station, Jilin 132108, China)

**Abstract** Facing the demands of high accuracy and long time stability and credibility for dam deformation monitoring, we have made certain key improvements to a laser three-point method in a vacuum line which has been used on the linear accelerator at Stanford University and then applied it to dam monitoring. The focusing lens system has been replaced by a diaphragm which can effect position location, drift limiting, beam expansion and point conversion. In the past twenty years, this technology has been applied to dams at Taipingshao, Fengman, Gongzui, Huanren, Yunfeng and Taipingwan. Great social benefits have been obtained in particular on the Fengman dam. This technology has also been chosen for the Three Gorges Dam.

**Key words** dam deformation measuring, laser collimation in vacuum line

### 1 大坝变形观测的基本要求

我国水力资源十分丰富,蕴藏总量和可开发量均居世界首位。目前我国已建大坝数量占世界一半以上,为发电、防洪等发挥了巨大作用。但是,一旦大坝失事或控制不妥,就会发生毁灭性灾害,这在国内外屡见不鲜<sup>[1,2]</sup>。再加上对环境和生态的影响,国际上对大坝给人类带来的利弊有不同看法<sup>[3,4]</sup>。因此,建立高精度、高效率、高可靠性的激光监测大坝变形系统非常重要。只要加强监测,控制泄洪,及时加固,就会化弊为利,造福于人民。大坝变形是坝体和基础状况的综合反映,也是衡量大坝是否正常、可靠、安全的重要标志。大坝变形属毫米级,给观测带来一定

难度。若用经纬仪和水准仪,精度不够;若用引张线和静力水准,存在着受外界干扰较大,可靠性、准确性、实时性均较差等问题。

针对大坝变形观测的难题,我们提出其基本要求为:精度高[相对标准误差小于 $\pm(1-2)\times 10^{-7}$ ,或弹性变幅的 $1/20$ ];长期稳定可靠(大于30年不变,或10年连续运转加百年一遇洪水)。

### 2 28年来的探索、发展和推广

其探索、发展和推广可分为以下4个阶段:

\* 原水利电力部科研基金资助项目

2000-11-15收到初稿,2000-11-29修回

(1)第一阶段(1973年至1977年).1973年,原杭州大学(现浙江大学)王绍民通过调研就在富春江电厂开展用激光照准测定大坝位移的试验,精度提高5倍左右.消息传开,原水利电力部通过丰满电厂立即要求到丰满也做试验(因丰满是一个1937年建造的、先天不足的病坝,加上观测手段和国际相同,误差较大,造成1957年水淹哈尔滨的事件).同时,召集全国30多个大坝观测班班长于1975年在原杭州大学参加激光测坝短训班.但是,经过若干年实践,激光照准仍是满足不了大坝变形监测的要求,又回到引张线.再加上1975年8月板桥水库失事事件,加强大坝安全监测迫在眉睫.

这时,王绍民和原东北勘测设计院(现长春市朝阳监测技术研究所)夏诚经过几个月的日夜分析和讨论,提出将美国斯坦福大学安装、调整直线加速器的真空中激光三点法<sup>5</sup>加以改造,移用到大坝监测上来,立刻得到丰满等水电厂的响应,也立刻得到原水利电力部的支持,决定立项.

(2)第二阶段(1977年至1978年).对美国斯坦福大学安装、调整直线加速器的真空中激光三点法作了关键性改进,并移用于大坝.其中用小孔代替透镜组(见图1),小孔的作用是:定位(更换激光管时

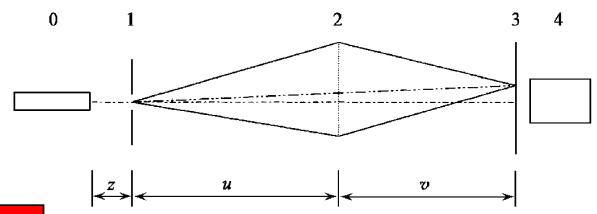


图1 改进了的真空中激光三点法

0为He-Ne激光;1为小孔(第一点);2为波带板(第二点);3为观测屏(第三点);4为四象限硅光电池或CCD

基点不变)限漂(将激光束 $10^{-6}$ 漂移降低一两个量级)扩束(用远场衍射艾里斑充满波带板)和点化(改变高斯光束的变换),并作了详细的原理分析和验证.1978年,在原杭州大学地道内做了20m长的原理性试验,精度达到 $\pm(3-5)\times 10^{-8}$ ,可测两维固体潮,并将这一试验上升为理论,给出了失调系统 $4\times 4$ 阶矩阵和光束在非均匀媒质中传输的 $3\times 3$ 阶矩阵和相应的流图拓扑结构<sup>6</sup>(见图2),从而确定在不同条件下或温度梯度下真空管道应抽的和应保持的真真空度.同时,在丰满坝顶做了200m长的现场性能试验,探索了更加全面和实际的问题,解决了大坝各坝段因六维动态而设计的波纹管软连接结构,以及一系列的技术、工艺难题,为正式使用奠定了稳固的基础.

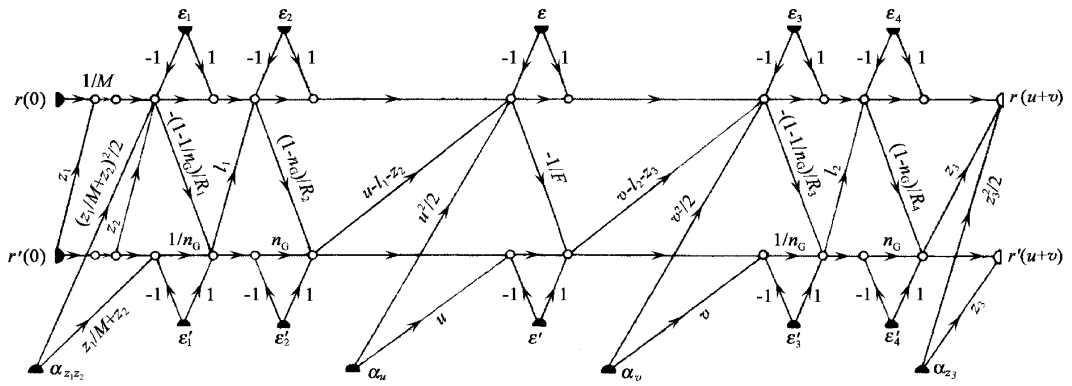


图2 真空中激光三点法的流图拓扑结构

[图中自左向右依次表达了:激光束及其漂移;激光管到小孔之间大气的影响;小孔的限漂作用;小孔到前端面之间大气的影响;前平晶变形的影响;真空管道前部残余气体的影响;测点上波带板位移(即待测量);真空管道后部残余气体的影响;后平晶变形的影响;光束输出管道后到观测屏大气的影响]

(3)第三阶段(1981年至1989年).当原理、理论、技术和工程问题基本解决后,在原水利电力部的支持和各有关单位的协作下,于1981年在太平哨电厂和1984年在丰满电厂建立了两套真空激光半自动(用四象限硅光电池自动找中)测坝变形系统,并分别于1981年和1988年验收和鉴定.由于克服了一系列技术难题,建立以来一直运转正常,水平位

移、垂直位移同时测,可全天候使用,精度比常规方法提高10倍左右,效率提高20倍以上.特别是丰满大坝因历史原因,存在着严重的先天不足,自1986年溢流面混凝土大面积被冲后,发现没有太大影响,边加固边监测,年位移变幅减小,趋于规律弹性变化(见图3),测量值十分可靠,在1998年第一次大坝定检中被评为正常坝.1988年丰满大坝经系统鉴定

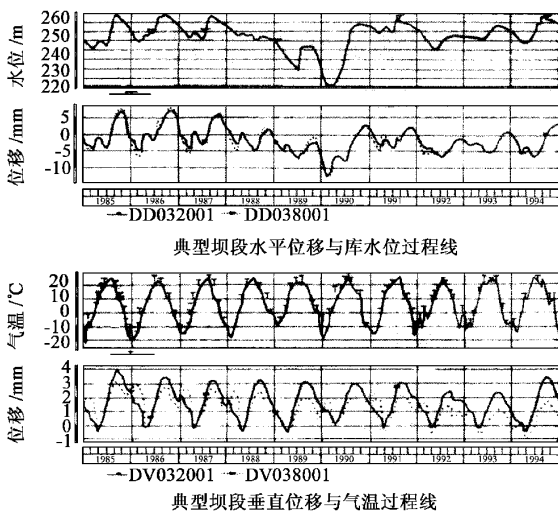


图3 丰满大坝真空激光监测10年变形过程线图

后,1989年“真空激光测坝变形”被列入能源部、水利部《混凝土大坝安全监测技术规范》<sup>[7]</sup>。

(4)第四阶段(1994年至1999年)。真空激光监测大坝变形技术首先在东北推广。在总结前面提到的两套真空激光半自动测坝变形系统的经验和不足的基础上,改进了技术和工艺,使龚嘴、桓仁、云峰、太平湾的系统在一次成型、光机电一体化和自动化遥测上有大幅度提高,四象限硅光电池改为CCD和电脑遥控。在1995年丰满系统发挥重大社会效益后,三峡工程开发总公司经多次考察后认为:真空激光技术先进,测值精度高,稳定可靠,维护简单,决定采用。1999年在葛洲坝试点立项<sup>[8]</sup>。目前,设计得更好的“第三代”方案已确定,准备施工。所谓第三代包括试用新型位相型波带板<sup>[9]</sup>,测点光强度提高4倍以及三点法的二次改造等,使监测系统更加先进可靠。

目前已建和正建的真空激光监测大坝变形系统如表1所示。其中桓仁、云峰和太平湾属当前国内最先进、国际尚无的大坝变形监测自动化系统。

表1 目前已建和正建的真空激光监测大坝变形系统

坝名	系统长度/m	测点数/个	建成年份
太平哨	557	13	1981
丰满	999	52	1984
龚嘴	372	22	1994
桓仁	624	34	1997
云峰	893	53	1997
太平湾	984	55	1998
葛洲坝	1632	71	计划2002
三峡	2050	~100	计划2009

### 3 和当前国内外同类技术综合比较

分三类比较:

(1)由于本项目可以同时监测水平位移和垂直位移,和传统的视准线测水平位移加精密水准测垂直位移比较,本项目精度高10倍左右,准确可靠,效率提高20倍以上,迅速及时,不受气象环境干扰,改善了观测条件,可全天候使用,可用微机遥控自动监测,在汛期和紧急情况下效益特别显著。

(2)同样地,和较先进的引张线自动测水平位移加静力水准测垂直位移比较,本项目抵御外部恶劣环境(湿度大、温度变幅大)功能强,适用范围广(准直长度可达3000m),坚固耐用,使用寿命长(30年以上),而且稳定可靠,维护简单,能够更好地保证监测数据的连续性;测值受相关因素干扰少,真实准确,有效性高;价格两者大致相当,如考虑后期维护投入,则明显占优。凡安装真空激光系统的大坝均和此法平行运行进行比较,不到五年,此法全部被淘汰或改为辅助系统。

(3)和近年出现的亚毫米GPS(全球卫星定位系统)自动监测大坝变形技术相比,本项目具有精度高(本项目精度为 $\pm 0.1-0.2$  mm,GPS精度为 $\pm 0.6-0.8$  mm),速度快(每测一点仅需12 s;GPS则需4小时以上)的优势,在大汛和地震等紧急情况下,优越性更加突出;本项目全部仪器设备(除个别元器件外)均国产化,而GPS的主要仪器有赖于进口,并受制于美国,性能价格比相差5倍以上,而且GPS不能在两岸坝肩处设测点,在保证测点的空间连续性等方面不及本项目。

综合比较,本项目可满足大坝变形监测及时、迅速、准确、遥控自动化、坚固耐用、长期稳定、维护简单、性能价格比经济合理等全部要求,而其他同类研究和则存在这方面或那方面或全面地明显的缺点和不足。

### 4 社会效益举例<sup>[10]</sup>

丰满大坝是1937年建造的严重先天不足的病坝,1986年汛期溢流中,混凝土冲毁约2000 m<sup>3</sup>。现在采取边加固边监测,大坝逐年趋于稳定,呈弹性变化,在1998年第一次大坝定检中被评为“正常坝”。

1995年东北洪水百年一遇,三大水系、五大水库、十座大坝只有太平哨和丰满能及时报出数据,给

各级领导的迅速决策提供了可靠依据. 关键时刻, 决定丰满不按泄洪标准执行( 5500 m<sup>3</sup>/s ), 控制在4000—4500 m<sup>3</sup>/s. 这样, 就防止了下游防护堤溃决, 9 个市县被淹的严重后果, 避免了数百万人民生命和财产损失. 据统计, 减少损失 176.8 亿元, 还多发 6.04 亿度. 对比 1957 年水淹哈尔滨事件, 显示出其重大的社会效益.

## 5 进一步推广的计划和前景

(1) 和兄弟单位合作, 在葛洲坝和三峡高质量地完成第三代真空激光自动监测大坝变形系统. 在技术上和人员上, 做妥善安排.

(2) 本项目可直接推广应用到所有的直线坝, 和兄弟单位更广泛地合作, 放心地充分发挥我国得天独厚的水利资源.

(3) 进一步加强应用基础研究, 设计和本项目精度相配套的转向元器件, 将本技术推上拱坝, 推向国际.

(4) 继续推动其他学科和技术跨越的迅猛发展.

### 参 考 文 献

[ 1 ] Hoseph S H. United states dam safety learning from the past :

vision for the future. In :Proc. of '99 International Conference on Dam Safety and Monitoring. Beijing :China Book Press , 1999. 19

[ 2 ] Berga L. New trends on dam safety. In :Proc. of '99 International Conference on Dam Safety and Monitoring. Beijing :China Book Press ,1999. 38

[ 3 ] Milliman J D. Nature ,1997 ,386 :325

[ 4 ] Malakoff D A. Science ,1997 ,277 :762

[ 5 ] Hermannsfeldt W B ,Lee M J ,Spranza J J *et al.* Appl. Opt. , 1968 ,7 :995

[ 6 ] Wang S. Scientia Sinica A ,1982 ,25 :72

[ 7 ] 中华人民共和国能源部、水利部. 混凝土大坝安全监测技术规范. 1989[ Ministry of Energy and Ministry of Water Conservancy of People's Republic of China. Technology Criterion of Safety Monitoring for Concrete Dam ,1989( in Chinese )]

[ 8 ] 葛洲坝水力发电厂等编. 三峡大坝位移监测试点葛洲坝枢纽真空激光准直自动测坝位移系统关键技术问题研究成果资料汇编. 湖北宜昌. 1999[ Project ,Water Power Station of Gezhouba Dam *et al.* In :Proc. of Key Technology Problems of Automatically Monitoring Dam Deformation by Laser in Vacuum Line Experimental System on Gezhouba Dam for Three Gorges Water Control Project. Yichang ,Hubei. 1999( in Chinese )]

[ 9 ] 王绍民,江晓清,赵道木. 浙江大学学报(自然科学版), 2000 ,27 :100[ WANG Shao-Min ,JIANG Xiao-Qing ,ZHAO Dao-Mu. J. Zhejiang University 2000 ,27 :100( in Chinese )]

[ 10 ] 宋恩来. 大坝安全监测,1999 ,1 :179[ SONG En-Lai. Dam and Safety Monitoring ,1999 ,1 :179( in Chinese )]

### · 信息服务 ·

## 英国物理学会北京代表处征稿通知( 六 )

### Nanotechnology 微结构科学和技术

是英国物理学会出版的英文科学期刊. 全球公开发行, 每年出版 4 期. 本刊致力于报道原始实验和理论研究, 原始合成, 微结构各学科分析.

研究论文: 原始的研究工作报告, 一般不超过 8500 字( 10 页 ).

综述: 由编辑部编写的专题综述.

本刊免收版面费.

来稿请寄: 北京 603 信箱 18 号分箱 邮编 100080

电子邮件: IOPCHINA@APHY. IPHY. AC. CN