



分布式光纤温度传感系统 (DTS) 和 光纤陀螺 (FOG) 技术

在大坝工程中的应用研究

◎蔡德所 肖衡林 鲍华 等著

Applications of the Distributed Optical Fiber Temperature Sensor System (DTS)
and the Fiber Optic Gyro (FOG) in Dams Engineering

水利部“948”项目(200109)

湖北清江水电开发有限责任公司施工科研项目(SBY2006069) 联合资助


广西水利厅科技配套资金(2003-04)

广西右江水利开发有限责任公司科研项目(BS2003005)

分布式光纤温度传感系统(DTS)和 光纤陀螺(FOG)技术 在大坝工程中的应用研究

Applications of the Distributed Optical Fiber Temperature Sensor System (DTS)
and the Fiber Optic Gyro (FOG) in Dams Engineering

©蔡德所 肖衡林 鲍华 等著

 GUANGXI NORMAL UNIVERSITY PRESS
广西师范大学出版社

· 桂林 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

分布式光纤温度传感系统 (DTS) 和光纤陀螺 (FOG) 技术在大坝工程中的应用研究 / 蔡德所, 肖衡林, 鲍华等著. — 桂林: 广西师范大学出版社, 2013.7

ISBN 978-7-5495-3929-1

I. ①分… II. ①蔡…②肖…③鲍… III. ①光纤传感器—温度监测系统—应用—大坝—水利工程—研究②光学陀螺仪—挠度观测—应用—大坝—水利工程—研究 IV. ①TV649

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 127183 号

广西师范大学出版社出版发行

(广西桂林市中华路 22 号 邮政编码: 541001)
(网址: <http://www.bbtpress.com>)

出版人: 何林夏

全国新华书店经销

广西大华印刷有限公司印刷

(南宁市高新区科园大道 62 号 邮政编码: 530007)

开本: 787 mm × 1 092 mm 1/16

印张: 28.5 字数: 693 千字

2013 年 7 月第 1 版 2013 年 7 月第 1 次印刷

定价: 98.00 元

如发现印装质量问题, 影响阅读, 请与印刷厂联系调换。

本书参编单位及人员

参编单位：三峡大学

湖北省清江水电开发有限责任公司

广西壮族自治区水利厅

广西右江水利开发有限责任公司

中国航天科技集团上海 803 所

参编人员：蔡德所 肖衡林 鲍 华 卫 炎 李 嵘

谭少华 孙 役 蔡元奇 苏 迅 李玮岚

李 烈



第一作者简介

蔡德所，男，1952年11月出生于武汉市。博士后、教授、博士生导师；湖北省有突出贡献中青年专家、原国家电力公司跨世纪学术带头人。曾在武汉水利电力大学、清华大学、成都科技大学、四川大学、哈尔滨工业大学求学、深造。1995年9月后，曾任葛洲坝水电工程学院水工系副主任、武汉水利电力大学宜昌校区土木建筑工程系主任、科学技术处处长；2000年5月后，曾任广西水利厅党组成员、副厅长、巡视员；曾兼任广西水利电力职业技术学院院长。现为武汉大学、广西大学、三峡大学兼职教授、博士生导师；广西水利学会理事长、广西水土保持学会理事长、南宁市人民政府咨询专家，中国科学院亚热带农业生态研究所客座研究员，广西电力工业勘察设计研究院博士后科研工作站站内合作导师。目前的主要研究方向：一是水利水电工程安全监测的光纤传感技术；二是生态修复与生物监测技术。共承担国家和地方主要科研项目26项。近十年来，获省级人民政府科技进步特等奖2项（主研）、一等奖3项（项目主持人，排名第一）、二等奖3项（项目主持人，排名第一）。在《水利学报》、《岩土工程学报》、《生态学报》等刊物上发表科研论文116篇，出版专著7部。获国家发明专利3项、新型实用专利5项。培养博士后4名、博士生12名、硕士生26名。

序 言

大坝工程既代表了巨额投资和巨大效益,同时又蕴含着潜在的成灾风险。如垮坝,洪水不仅破坏水库、水电工程本身,而且对大坝下游人民的生命和财产造成惨重灾难。因此,大坝安全监测显得尤为重要。虽然大坝安全监测的常规技术已有百年历史,但常规观测仪器存在若干根本性缺陷:对测点物性有影响、耐久性较差、易受强电磁场干扰、信息量十分有限,无法实现分布式检测。尤其对大体积混凝土结构温度场监测、高混凝土面板堆石坝面板挠度监测、随机裂缝的捕捉等显得无能为力。

近十几年来,在高科技的渗透和支持下,常规安全监测技术开始在酝酿更新换代,尤其是 Smart 结构的提出和研制。在各国竞相发展的安全监测高新技术中,光纤传感检测技术以其独特的优势而处于中心地位。随着光通信的迅猛发展,光纤及仪表降价,经济性也有竞争力。分布式光纤传感是传感技术发展中的尖端领域和研究开发的热点。

我于 1996 年在武汉水利电力大学宜昌校区(原葛洲坝水电工程学院,现三峡大学)创建了光纤传感监测技术研究室,致力于分布式光纤传感监测技术在大坝工程中的应用研究,着力解决水电工程中的技术难题。2002 年,在总结研究团队六年初期成果的基础上,我出版了《光纤传感技术在大坝工程中的应用》。时隔十年,再将《分布式温度测量系统(DTS)和光纤陀螺(FOG)技术在大坝工程中的应用研究》奉献给广大的读者。本专著共计五篇 35 章,核心内容由两大部分组成:一是分布式光纤温度测量系统(DTS)在大坝工程中的应用研究;二是光纤陀螺(FOG)技术在混凝土面板堆石坝工程中的应用研究。前者解决了大体积混凝土施工和运行中温度场的分布式监测问题,后者解决了高混凝土面板堆石坝面板法向挠度的监测问题。我们开展了不少物理量的光纤传感监测技术研究,这两项成果在大坝工程中的应用取得了突出的成果,也成为目前大型水电工程应用较为成熟的技术。由分布式光纤温度测量系统(DTS)在大坝工程中的应用研究,我们派生了两项二次开发的创新成果,一是大坝温度场的重构,二是大坝渗流分布式监测理论与方法。大坝温度场的重构就是将由分布式光纤温度测量系统(DTS)获得的温度资料和有限元技术相结合,应用等参逆变化理论和热模态分解理论重构大坝温度场。重构的温度场具有光纤监测数据的实时性,又有混凝土坝理想热传导规律性,它既反映混凝土坝温度场的实际温度分布规律,又反映混凝土坝温度场理想状态下的温度分布规律。在此基础上探讨了基于分布式温度测量系统(DTS)的实时有限元仿真技术,它解决了传统有限元仿真分析无法考虑的偶然因素和随机因素影响的弊端。大坝渗流分布式监测理论与方法的内容也比较丰富,基于大比尺模型实验,详细研究了光纤与多孔介质传热过程,建立了渗流监测理论方程式。在试验数据分析的基础上,得出温升和功率及导热系数经验公式、温升和功率及渗流流速的经验公式。其中,基于分布式温度测量系统(DTS),渗漏点位置的确定既方便,又准确。难点是渗流流速的确定,也就是渗漏量是多少?这些在本书中都有一些创新的阐述。另外,在应用光纤陀螺(FOG)技术监测高混凝土面板堆石坝面板法向挠度的同时,我们还很好地解决了分布式监测坝体沉降的问题。

上述内容的研究,得到了水利部“948”计划项目、中国长江三峡建设总公司科技项目、广西水利厅科技配套项目、湖北清江水电开发公司施工项目、广西右江水利开发有限责任公司施工项目等项目的资助和三峡大学、广西水利电力勘测设计研究院的支持,在此表示衷心的感谢!同时,也非常感谢一直关心、帮助和支持我的同事、朋友和领导!请恕我不一一写出他们的名字,但他们的名字将永远记在我的心中!十几年来,我和我的团队共获得省级人民政府科技进步特等奖2项、一等奖2项、二等奖2项,这些研究成果应该说对推动水利水电科技进步起到了积极的作用,是对大坝安全监测理论与技术的贡献。因此,还要感谢我历届的博士、硕士研究生,他们为我的专业方向、为本专著的研究内容吃了不少苦,付出了聪明才智!实际上,本书的成果也搁置了几年,在大家的鼓励下,想想还是挤时间整理一下,供相关专业的学生和工程技术人员参考。由于自身的学术水平有限,时间仓促,书中不足和错误在所难免,敬请专家学者、工程技术人员和同行们批评指正。

写到序言的结尾,脑海中突然浮现出2008年5月26日在三峡大学召开“光纤陀螺技术监测水布垭砼面板堆石坝面板挠度和坝体沉降”项目验收会的情景,会议一开始,业主单位的主要领导说:“今天,我们在这里召开项目验收会,我们感到很自豪,2007年,世界最高的混凝土面板堆石坝水布垭通过了高水位的检验,光纤陀螺技术监测面板挠度和坝体沉降功不可没!”看似一席普通的话,情真意切,使我感到特别温暖。的确,一项高新技术,若能够真正解决工程难题、为重大工程安全起到作用,这比得什么奖都更重要!

蔡德所

2012年10月于绿城南宁

目 录

第一篇 分布式光纤传感技术监测百色水利枢纽 5[#]、6A[#]坝段温度场

第 1 章 光纤传感技术研究综述	3
1.1 引言	3
1.2 光纤传感技术在结构损伤评估中的应用	3
1.3 光纤传感技术在裂缝、应力、应变检测方面的应用	4
1.4 光纤传感技术在弯曲和位移检测方面的应用	5
1.5 光纤传感技术在温度检测方面的应用	6
第 2 章 分布式光纤温度传感技术的基本理论	8
2.1 分布式光纤温度传感技术的基本原理	8
2.1.1 光时域反射(OTDR)技术	9
2.1.2 拉曼分布式光纤温度传感器的温度信号解调方法	10
2.2 DTS 系统的组成与结构	13
2.3 DTS 系统的测控流程	14
2.4 DTS 光纤测温系统的性能和率定	15
2.4.1 光纤的传输损耗	15
2.4.2 单端和双端测量方法的比较	16
2.4.3 大量程测温传感光纤的率定	17
第 3 章 分布式光纤温度传感监测技术的基本实践	19
3.1 引言	19
3.2 分布式光纤温度传感的可靠性分析	19

3.3	温度监测的分布式光纤传感网络设计	21
3.4	网络光缆的标定和光纤测头的保护	21
3.5	温度光纤传感网络的埋设工艺研究与出口保护	23
3.6	监测成果分析	25
第4章	分布式光纤传感监测百色 RCC 坝 5[#]、6A[#] 坝段温度场	31
4.1	百色水利枢纽概况	31
4.2	分布式光纤传感网络设计	32
4.3	测温光纤的埋设工艺研究和保护	33
4.4	坝址气象条件分析	36
4.5	温度监测成果分析	37
4.5.1	坝体混凝土水化热过程分析	38
4.5.2	坝体混凝土温度影响因素分析	48
4.5.3	冷却水管降温冷却效应分析	51
4.5.4	与常规温度计监测资料的比较	52
4.6	百色 RCC 坝 5 [#] 、6A [#] 坝段典型高层温度监测结果趋势分析	53
4.6.1	5 [#] 坝段 1 号光路(传感光缆埋设图见附图 3)	53
4.6.2	6 [#] 坝段 2 号光路(传感光缆埋设图见附图 3)	54
4.6.3	6 [#] 坝段 3 号光路(传感光缆埋设图见附图 3)	54
4.6.4	6 [#] 坝段 4 号光路(传感光缆埋设图见附图 3)	55
4.6.5	6 [#] 坝段 5 号光路(传感光缆埋设图见附图 3)	55
4.6.6	6 [#] 坝段 6 号光路(传感光缆埋设图见附图 3)	55
4.7	高温季节浇筑混凝土的温控措施	55
第5章	结论	58

第二篇 基于 DTS 的温度场重构理论及实时仿真分析

第 1 章 概述	63
1.1 引言	63
1.2 温度场分析的研究现状	64
1.3 本篇研究工作的主要内容	69
第 2 章 温度场仿真计算与监测数据的对比分析	71
2.1 引言	71
2.2 百色水利枢纽大坝三维模型的建立	72
2.2.1 百色水利枢纽大坝的结构布置及材料	72
2.2.2 百色水利枢纽大坝的实际浇筑施工进度	75
2.2.3 百色水利枢纽大坝有限元模型的建立	76
2.3 碾压混凝土筑坝的温度场特性分析	78
2.3.1 坝体横断面温度场特性分析	78
2.3.2 坝体水平剖面温度场特性分析	80
2.3.3 坝体特征点温度时间历程特性分析	82
2.4 分布式光纤测温系统实测值与温度场仿真值的比较	84
2.4.1 同时刻温度场仿真与光纤测试值的比较分析	84
2.4.2 同部位温度场时间历程与光纤测试值的比较分析	89
2.5 小结	94
第 3 章 基于分布式光纤测温技术的温度场重构理论研究	96
3.1 碾压混凝土坝温度场的计算原理	96
3.1.1 温度场有限元计算原理	96
3.1.2 碾压混凝土坝温度组成与影响因素的分析	100
3.2 基于分片光滑插值函数重构理论的研究及应用	101
3.2.1 基于分片光滑插值函数重构理论的研究	101

3.2.2	基于分片光滑插值函数重构理论的应用	104
3.3	基于基本解空间映射的温度场重构理论的研究及应用	106
3.3.1	基于基本解空间映射的温度场重构理论的研究	106
3.3.2	基于基本解空间映射的温度场重构理论的应用	109
3.4	小结	113
第4章	基于分布式光纤传感技术的实时仿真研究	115
4.1	温度场实时仿真实论	115
4.2	百色 RCC 重力坝温度场实时仿真分析	117
4.3	重力坝温度场实时仿真误差分析	126
4.4	小结	130
第5章	基于空间信息的温度光纤三维可视化系统(DamAna3D)	131
5.1	引言	131
5.2	系统构成原理	131
5.3	数据库结构与系统结构	132
5.3.1	数据库结构	132
5.3.2	系统结构	132
5.4	系统功能介绍及操作说明	133
5.4.1	系统的主要功能	133
5.4.2	界面操作说明	134
第6章	结论	142

第三篇 基于 DTS 的渗流监测技术研究及其工程应用

第1章	概述	147
1.1	大坝渗流监测现状综述	147

1.1.1	渗流检测方法概述	147
1.1.2	渗流量的监测	154
1.2	各种方法的比较	155
1.3	课题研究工作的意义、目的和主要方法	156
1.3.1	课题研究的意义和目的	156
1.3.2	研究工作的主要方法	157
第2章	分布式光纤温度传感系统机理及渗流监测原理	159
2.1	分布式光纤温度传感系统	159
2.1.1	DTS测温原理	159
2.1.2	分布式光纤温度传感系统的组成与结构	160
2.1.3	渗流监测系统的组成	161
2.2	渗流监测原理	161
2.2.1	传热微分方程	162
2.2.2	线热源法理论	164
2.2.3	岩土材料导热系数计算讨论	166
2.3	小结	174
第3章	模型试验与数据分析	176
3.1	引言	176
3.1.1	问题的提出	176
3.1.2	分析的目的	176
3.1.3	分析的思路	177
3.2	试验模型设计	177
3.2.1	模型槽	177
3.2.2	渗流系统	179
3.2.3	监测及加温系统	180
3.2.4	辅助测量设备和仪器	180

3.2.5	光纤的布设	180
3.2.6	填充介质	181
3.2.7	监测系统工作流程	182
3.3	试验过程	183
3.3.1	试验工况	183
3.3.2	试验模式	185
3.4	试验数据整理	185
3.4.1	有效数据的选择	186
3.4.2	有效数据的处理	186
3.5	试验结果与分析	186
3.5.1	不同加热功率下光纤温升的变化规律	187
3.5.2	不同介质、不同含水量下光纤温升的变化规律	198
3.5.3	不同导热系数下光纤温升的变化规律	203
3.5.4	加热光纤长短对光纤温升的影响	206
3.5.5	不同渗流流速下光纤温升的变化规律	208
3.5.6	渗流情况下,不同功率下温升的变化规律	210
3.5.7	不同介质对光纤温升的影响	212
3.5.8	补充对照试验及讨论	214
3.5.9	误差分析	215
3.6	小结	216
第4章	分布式光纤温度传感系统监测渗流的理论研究	218
4.1	引言	218
4.2	多孔介质传热过程	218
4.3	光纤与多孔介质间的传热过程分析	219
4.3.1	非渗流情况下,光纤与多孔介质间传热过程	219
4.3.2	渗流情况下,光纤与多孔介质间传热过程	220
4.4	渗流监测理论方程式推导	222

4.4.1	基本假定	222
4.4.2	非渗流情况监测理论方程式	223
4.4.3	渗流情况监测理论方程式	224
4.5	小结	224
第5章	渗流监测经验公式的建立	226
5.1	引言	226
5.2	温升和功率及导热系数经验公式的建立	226
5.2.1	Excel 软件线性回归简介	226
5.2.2	SPSS 软件非线性回归分析简介	228
5.2.3	温升和功率的关系	228
5.2.4	温升和导热系数的关系	231
5.2.5	温升和功率及导热系数的经验公式	233
5.3	温升和功率及渗流流速的经验公式建立	234
5.3.1	温升和渗流流速的关系	234
5.3.2	温升和功率的关系	237
5.3.3	温升和功率及渗流流速的经验公式	238
5.4	渗流经验公式的讨论	240
5.4.1	渗流前经验公式讨论	240
5.4.2	渗流后经验公式讨论	246
5.5	小结	250
第6章	采用 DTS 对思安江面板坝渗流监测研究	251
6.1	思安江水库枢纽工程概述	251
6.2	传感光纤的埋设与工艺	252
6.2.1	传感光纤的布置设计	252
6.2.2	思安江大坝渗流监测的传感光纤网络布置	253
6.2.3	传感光纤的施工工艺	254

6.3	现场试验及分析	255
6.3.1	分布式光纤检测周边缝渗漏的曲线分析	255
6.3.2	分布式光纤检测 19# 面板渗漏的曲线分析	258
6.3.3	分布式光纤检测 15# 面板渗漏的曲线分析	261
6.4	监测结论	263
6.5	小结	265
第 7 章	结论	266

第四篇 高砦面板堆石坝面板挠度和坝体沉降监测的光纤陀螺技术研究

第 1 章	概述	273
1.1	问题的提出	273
1.2	光纤陀螺(FOG)技术研究综述	276
第 2 章	光纤陀螺(FOG)的基本原理	280
2.1	萨格奈克(Sagnac)效应	280
2.2	光纤陀螺的光学结构	280
2.3	数字闭环光纤陀螺信号处理方法	281
2.4	FOG 用于高砦面板堆石坝面板挠度测量的基本原理	283
第 3 章	光纤陀螺(FOG)检测系统运行管道设计与研究	286
3.1	FOG 系统运行管道的设计思想	286
3.2	FOG 系统运行管道的优化设计	286
3.3	不锈钢波纹管的设计与生产	287
3.4	不锈钢波纹管的硫化	288
3.5	不锈钢波纹管的力学性能测试与小车试通行室内实验	289

第 4 章 光纤陀螺(FOG)检测系统小车设计与研究	290
4.1 测量装置	290
4.2 测试小车设计	291
4.3 FOG 检测系统运行管道底部钢管设计	294
4.4 水布垭高强度 FOG 检测系统小车优化设计	295
4.4.1 水布垭高强度 FOG 检测系统小车及万向滚轮	295
4.4.2 万向牵引环设计	296
4.4.3 测量小车使用方法	297
第 5 章 光纤陀螺(FOG)检测系统研制	299
5.1 主要研制内容	299
5.2 小型化、光电一体化与小动态测量	300
5.2.1 小型化、光电一体化	300
5.2.2 小动态测量	301
5.3 光纤陀螺测试	302
5.4 FOG 可靠性设计	303
5.5 FOG 数字信号处理	304
第 6 章 0+212 面板 FOG 运行管道的埋设与安装及施工期监测	307
6.1 水布垭面板堆石坝简介	307
6.2 FOG 检测系统运行管道的布置方案	307
6.2.1 FOG 运行管道槽放线	308
6.2.2 FOG 运行管道槽开挖	308
6.2.3 FOG 运行管道槽内预铺 II AA 料	308
6.3 FOG 检测系统运行管道的埋设与安装	309
6.4 FOG 系统施工期监测 0+212 面板挠度	314
6.4.1 初始数据的多项式拟合	317
6.4.2 面板浇筑 4 个月后测试曲线分析	318

6.4.3	面板浇筑 8 个月后测试曲线分析	319
6.4.4	面板挠度测试曲线的修正	321
6.4.5	水布垭挠度测试结果与常规方法测试挠度换算结果对比	323
第 7 章	FOG 检测系统现场全程测量 0+212 砗面板挠度	325
7.1	2007 年主汛期前(3、4 月)FOG 检测系统现场全程测量 0+212 砗面板挠度	325
7.1.1	测试曲线	325
7.1.2	测试曲线汇总	336
7.1.3	面板全程检测与一、二期面板测试数据的初步比较分析	336
7.1.4	测试数据	337
7.1.5	讨论与分析	338
7.2	2007 年主汛期(5、6、7、8 月)FOG 检测系统现场全程测量 0+212 砗面板挠度	338
7.2.1	2007 年 5 月监测月报	338
7.2.2	2007 年 6 月监测月报	341
7.2.3	2007 年 7 月监测月报	344
7.2.4	2007 年 8 月监测月报	347
7.3	2007 年主汛期后(9、10、12 月)FOG 检测系统现场全程测量 0+212 砗面板挠度	350
7.3.1	2007 年 9 月监测月报	350
7.3.2	2007 年 10 月监测月报	352
7.3.3	2007 年 12 月监测月报	353
7.4	考虑坝顶 FOG 运行管道管口沉降的 0+212 面板挠度 FOG 技术测量	355
7.4.1	0+212 面板 FOG 运行管道管口沉降	355
7.4.2	0+212 面板挠度测量数据(相对测量)	357
7.4.3	0+212 面板绝对挠度测量数据(考虑管口沉降)	359