

岩石力学与
工程研究著作丛书

高边坡岩体流变试验与 流变理论及工程应用

张强勇 李术才 杨文东 李文纲 著
向文 王建洪 贺如平 张传健



科学出版社

岩石力学与工程研究著作丛书

高边坡岩体流变试验与 流变理论及工程应用

张强勇 李术才 杨文东 李文纲 著
向 文 王建洪 贺如平 张传健

国家重点基础研究发展计划(“973”项目课题)(2009CB724607)资助
国家自然科学基金面上项目(51279093、41172268)资助
山东省自然科学基金项目(Y2007F52)资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统研究了高坝高边坡软弱岩带和硬脆性岩体的压缩蠕变特征、剪切流变特性和流变破坏机制,提出了岩体大尺寸原位压缩蠕变试验和原位剪切流变试验的加载、测试与分析方法,揭示了软弱岩带和硬脆性岩体的流变力学特性和流变强度的变化规律;建立了软弱岩带的变参数流变损伤模型和硬脆性岩体的非线性黏弹塑性流变模型,构建了高边坡岩体流变参数的解析反演、解析-智能反演和改进二次粒子群反演方法;开发了先进的高边坡监测智能分析网络系统,实现了对大型水电站高边坡监测信息和观测数据的远程实时动态管理和智能化自动分析处理。本书注重理论、方法与工程实践的紧密结合,提出的流变试验方法、建立的流变理论模型、编制的流变计算程序以及开发的监测智能分析网络系统皆成功应用于大型水电站高边坡工程,并有效指导工程实践。

本书可供从事水利、水电、土木、交通、矿山等工程领域的科研和工程技术人员使用,也可作为高等院校土木、水电、交通等相关专业研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高边坡岩体流变试验与流变理论及工程应用/张强勇等著. —北京:科学出版社,2014.7

(岩石力学与工程研究著作丛书)

ISBN 978-7-03-041335-2

I. ①高… II. ①张… III. ①边坡-岩体流变学-研究 IV. ①TU452

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 143115 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:张小霞

责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

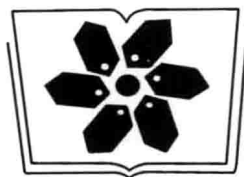
2014 年 7 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014 年 7 月第一次印刷 印张:24 1/2

字数:494 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



中国科学院科学出版基金资助出版

《岩石力学与工程研究著作丛书》编委会

名誉主编:孙 钧 王思敬 钱七虎 谢和平

主 编:冯夏庭

副 主 编:何满潮 黄润秋 周创兵

秘 书 长:黄理兴 刘宝莉

编 委:(按姓氏汉语拼音顺序排列)

蔡美峰	曹 洪	戴会超	范秋雁	冯夏庭
高文学	郭熙林	何昌荣	何满潮	黄宏伟
黄理兴	黄润秋	金丰年	景海河	鞠 杨
康红普	李 宁	李 晓	李海波	李建林
李世海	李术才	李夕兵	李小春	李新平
廖红建	刘宝莉	刘汉东	刘汉龙	刘泉声
吕爱钟	栾茂田	莫海鸿	潘一山	任辉启
余诗刚	盛 谦	施 斌	谭卓英	唐春安
王 驹	王金安	王明洋	王小刚	王学潮
王芝银	邬爱清	徐卫亚	杨 强	杨光华
岳中琦	张金良	赵 文	赵阳升	郑 宏
周创兵	周德培	朱合华		

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

随着西部大开发等相关战略的实施,国家重大基础设施建设正以前所未有的速度在全国展开;在建、拟建水电工程达 30 多项,大多以地下硐室(群)为其主要水工建筑物,如龙滩、小湾、三板溪、水布垭、虎跳峡、向家坝等,其中白鹤滩水电站的地下厂房高达 90m、宽达 35m、长 400 多米;锦屏二级水电站 4 条引水隧道,单洞长 16.67km,最大埋深 2525m,是世界上埋深与规模均为最大的水工引水隧洞;规划中的南水北调西线工程的隧洞埋深大多在 400~900m,最大埋深 1150m。矿产资源与石油开采向深部延伸,许多矿山采深已达 1200m 以上。高应力的作用使得地下工程冲击地压显现剧烈,岩爆危险性增加,巷(隧)道变形速度加快、持续时间长。城镇建设与地下空间开发、高速公路与高速铁路建设日新月异。海洋工程(如深海石油与矿产资源的开发等)也出现方兴未艾的发展势头。能源地下储存、高放核废物的深地质处置、天然气水合物的勘探与安全开采、CO₂ 地下隔离等已引起政府的高度重视,有的已列入国家发展规划。这些工程建设提出了许多前所未有的岩石力学前沿课题和亟待解决的工程技术难题。例如,深部高应力下地下工程安全性评价与设计优化问题,高山峡谷地区高陡边坡的稳定性问题,地下油气储库、高放核废物深地质处置库以及地下 CO₂ 隔离层的安全性问题,深部岩体的分区碎裂化的演化机制与规律,等等,这些难题的解决迫切需要岩石力学理论的发展与相关技术的突破。

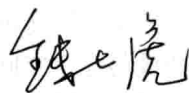
近几年来,国家 863 计划、国家 973 计划、“十一五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金重大研究计划以及人才和面上项目、中国科学院知识创新工程项目、教育部重点(重大)与人才项目等,对攻克上述科学与技术难题陆续给予了有力资助,并针对重大工程在设计和施工过程中遇到的技术难题组织了一些专项科研,吸收国内外的优势力量进行攻关。在各方面的支持下,这些课题已经取得了很多很好的研究成果,并在国家重点工程建设中发挥了重要的作用。目前组织国内同行将上述领域所研究的成果进行了系统的总结,并出版《岩石力学与工程研究著作丛书》,值得钦佩、支持与鼓励。

该研究丛书涉及近几年来我国围绕岩石力学学科的国际前沿、国家重大工程建设中所遇到的工程技术难题的攻克等方面所取得的主要创新性研究成果,包括深部及其复杂条件下的岩体力学的室内、原位实验方法和技术,考虑复杂条件与过程(如高应力、高渗透压、高应变速率、温度-水流-应力-化学耦合)的岩体力学特性、变形破裂过程规律及其数学模型、分析方法与理论,地质超前预报方法与技术,工

程地质灾害预测预报与防治措施,断续节理岩体的加固止裂机理与设计方法,灾害环境下重大工程的安全性,岩石工程实时监测技术与应用,岩石工程施工过程仿真、动态反馈分析与设计优化,典型与特殊岩石工程(海底隧道、深埋长隧洞、高陡边坡、膨胀岩工程等)超规范的设计与实践实例,等等。

岩石力学是一门应用性很强的学科。岩石力学课题来自于工程建设,岩石力学理论以解决复杂的岩石工程技术难题为生命力,在工程实践中检验、完善和发展。该研究丛书较好地体现了这一岩石力学学科的属性与特色。

我深信《岩石力学与工程研究著作丛书》的出版,必将推动我国岩石力学与工程研究工作的深入开展,在人才培养、岩石工程建设难题的攻克以及推动技术进步方面将会发挥显著的作用。



2007年12月8日

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

近二十年来,随着我国许多举世瞩目的岩石工程不断兴建,岩石力学与工程学科各领域的理论研究和工程实践得到较广泛的发展,科研水平与工程技术能力得到大幅度提高。在岩石力学与工程基本特性、理论与建模、智能分析与计算、设计与虚拟仿真、施工控制与信息化、测试与监测、灾害性防治、工程建设与环境协调等诸多学科方向与领域都取得了辉煌成绩。特别是解决岩石工程建设中的关键性复杂技术疑难问题的方法,973、863、国家自然科学基金等重大、重点课题研究成果,为我国岩石力学与工程学科的发展发挥了重大的推动作用。

应科学出版社诚邀,由国际岩石力学学会副主席、岩石力学与工程国家重点实验室主任冯夏庭教授和黄理兴研究员策划,先后在武汉与葫芦岛市召开《岩石力学与工程研究著作丛书》编写研讨会,组织我国岩石力学工程界的精英们参与本丛书的撰写,以反映我国近期在岩石力学与工程领域研究取得的最新成果。本丛书内容涵盖岩石力学与工程的理论研究、试验方法、实验技术、计算仿真、工程实践等各个方面。

本丛书编委会编委由 58 位来自全国水利水电、煤炭石油、能源矿山、铁道交通、资源环境、市镇建设、国防科研、大专院校、工矿企业等单位与部门的岩石力学与工程界精英组成。编委会负责选题的审查,科学出版社负责稿件的审定与出版。

在本套丛书的策划、组织与出版过程中,得到了各专著作者与编委的积极响应;得到了各界领导的关怀与支持,中国岩石力学与工程学会理事长钱七虎院士特为丛书作序;中国科学院武汉岩土力学研究所冯夏庭、黄理兴研究员与科学出版社刘宝莉、沈建等编辑做了许多繁琐而有成效的工作,在此一并表示感谢。

“21 世纪岩土力学与工程研究中心在中国”,这一理念已得到世人的共识。我们生长在这个年代里,感到无限的幸福与骄傲,同时我们也感觉到肩上的责任重大。我们组织编写这套丛书,希望能真实反映我国岩石力学与工程的现状与成果,希望对读者有所帮助,希望能为我国岩石力学学科发展与工程建设贡献一份力量。

《岩石力学与工程研究著作丛书》

编辑委员会

2007 年 11 月 28 日

前 言

我国水电资源总量位居世界第一,其中我国西部地区可开发的水能资源占全国的72%,但开发率仅为8%,因此,大力开发西部水电,实施“西电东送”是我国“西部大开发”战略的重要组成部分,也符合我国开发清洁能源的可持续发展国策。在“西部大开发”过程中,我国西部(特别是西南地区)涌现出一大批坝高超过200m的水电站高拱坝,如雅砻江二滩拱坝,坝高240m;澜沧江小湾拱坝,坝高294.5m;黄河拉西瓦拱坝,坝高250m;大渡河大岗山拱坝,坝高210m;金沙江溪洛渡拱坝,坝高292.5m;金沙江白鹤滩拱坝,坝高289m;雅砻江锦屏一级拱坝,坝高305m。尽管这些高坝被建在地质条件相对比较好的边坡岩体上,但由于岩体是长期地质构造运动的产物,因此,这些高坝的坝肩坝基高边坡岩体内部常常分布有层间挤压带、层间和层内错动带、断层破碎带、蚀变岩带等软弱岩带和强度高、脆性强、节理发育的硬脆性岩体。

岩体作为一种复杂的地质体,流变特性是其重要的力学特性之一。工程实践与研究表明,岩体工程的破坏与失稳,在许多情况下并不是在开挖完成后立即发生,而是岩体的应力、变形将随时间变化而不断发展和调整,往往需要延续较长一段时期。由于岩体的非均质性、不连续性和各向异性,在长期荷载作用下,工程岩体的应力应变状态、变形破坏特征均随时间而不断发生变化,具有显著的流变时效特性。

对高边坡软弱岩带来说,由于其强度低,在较小荷载作用下,极易出现显著的流变变形,并随荷载增大最后产生流变破坏。对高边坡硬脆性岩体来说,由于其强度较高,一般认为其不会产生流变,但许多实际监测结果表明,即使是质地比较坚硬的岩体,因为受到发育节理、裂隙的切割,在开挖卸荷和高地应力的长期作用下也会出现明显的流变变形。可见,有效分析和揭示高坝高边坡软弱岩带和硬脆性岩体的流变特征与强度破坏特性,对于保证高坝工程的设计、施工安全以及长期运行稳定具有十分重大的理论意义、工程意义和工程应用价值。

本专著在第一作者主持承担的国家自然科学基金面上项目(51279093、41172268)、“973”项目课题(2009CB724607)、山东省自然科学基金项目(Y2007F52)以及中国水电顾问集团成都勘测设计研究院科技支撑项目的支持下,深入开展了高坝高边坡软弱岩带和硬脆性岩体的流变试验、流变理论和数值模拟分析研究,建立了高边坡岩体原位流变试验方法和流变理论体系,并在实际工程中得到成功应用。首先,通过直径1000mm的现场大尺寸原位压缩蠕变试验、剪切

面积 $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ 的现场大尺寸原位剪切流变试验和不同加卸载应力路径的室内三轴蠕变试验,深入研究了高边坡软弱岩带和硬脆性岩体的压缩蠕变特征、剪切流变特性及其流变破坏规律;然后,通过流变理论研究,建立了高边坡软弱岩带的变参数流变损伤模型和硬脆性岩体的非线性黏弹塑性流变模型,开发了相应的流变计算程序,提出了高边坡岩体流变参数的解析反演、解析-智能反演和改进二次粒子群反演方法;最后,应用 Microsoft Visual C++ 与 Microsoft Visual Studio .Net 网络编程技术和 SQL Server 网络数据库技术,开发出智能化、信息化和远程异地可视化的高边坡监测智能分析网络系统。本书提出的流变试验方法、建立的流变理论模型、编制的流变计算程序以及开发的监测智能分析网络系统皆成功应用于大型水电站高边坡工程,并有效指导工程的设计和施工。

本书共分 8 章。第 1 章介绍目前国内外岩体流变试验和流变理论的研究现状;第 2 章介绍高边坡软弱岩带的大尺寸原位压缩蠕变试验和原位剪切流变试验的研究成果;第 3 章介绍软弱岩带的变参数流变损伤模型和相应流变计算程序的研究成果;第 4 章介绍高边坡硬脆性岩体的大尺寸原位压缩蠕变试验和原位剪切流变试验以及室内三轴蠕变试验的研究成果;第 5 章介绍硬脆性岩体的非线性黏弹塑性流变模型和相应流变计算程序的研究成果;第 6 章介绍高边坡岩体流变参数的解析反演、解析-智能反演和改进二次粒子群反演方法的研究成果;第 7 章介绍大岗山水电站高边坡开挖稳定的三维非线性流变数值计算分析研究成果;第 8 章介绍高边坡监测智能分析网络系统的开发技术和相应工程应用的研究成果。

本书出版得到了“973”项目课题(2009CB724607)、国家自然科学基金面上项目(51279093、41172268)、山东省自然科学基金项目(Y2007F52)、中国科学院科学出版基金以及中国水电顾问集团成都勘测设计研究院科技支撑项目的大力资助,作者在此深表谢意!同时,对参与本专著相关内容研究的研究生陈芳、陈旭光、张宁、陈晓鹏、张建国、于秀勇以及中国水电顾问集团成都勘测设计研究院的黄彦昆教高、邵敬东教高、曾纪全高工、刘大文高工、胡建中高工、蔡德文高工的大力指导和帮助,在此也表示衷心感谢!

本书的完成也得到山东大学朱维申教授、陈卫忠教授、李树忱教授、张庆松教授、张乐文教授、贾超教授、刘健教授以及中科院武汉岩土力学研究所杨春和研究员、焦玉勇研究员、李银平研究员的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢!

在本书的撰写过程中,参阅了国内外相关专业领域的大量文献资料,在此向所有论著的作者表示由衷的感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和欠妥之处,敬请各位同仁批评指正!

主要符号说明

c_{creep} ——剪切流变黏聚力	$J(t)$ ——蠕变柔量
c_{∞} ——长期黏聚力	$K(t-\tau)$ ——蠕变核函数
c^t ——瞬时黏聚力	S_{ij} ——偏应力张量
D ——损伤变量	S_{ij}^N, S_{ij}^O ——一个时间增量步内的新、老应力偏量
e_{ij} ——偏应变张量	$\bar{S}_{ij}$ ——一个时间增量步内的平均偏应力
e_{ij}^N, e_{ij}^O ——一个时间增量步内的新、老应变偏量	t_D ——损伤发生时间
$\bar{e}_{ij}$ ——一个时间增量步内的平均偏应变	t_s ——进入加速蠕变段的时间
E_0 ——瞬时变形模量	t_{un} ——单位时间
E_1, E_2 ——黏弹性变形模量	$W(t)$ ——时效变量
E_{t_D} ——时刻 t_D 时的弹性模量	α ——损伤系数
E_{∞} ——长期变形模量	$\dot{\gamma}$ ——剪应变速率
f_{creep} ——剪切流变内摩擦系数	δ ——边坡变形量
f_{∞} ——长期内摩擦系数	ϵ_{ij} ——应变张量
f^t ——瞬时效摩擦系数	δ_{ij} ——Kronecker 函数
F ——屈服函数	δ_P ——降雨变形分量
$F(X)$ ——目标函数	δ_T ——温度变形分量
g_{∞}^* ——剪切势函数	δ_{θ} ——时效变形分量
g_{∞}^t ——拉伸势函数	$\epsilon_{\text{equivalent}}$ ——等效应变
G_1, G_2 ——瞬时与黏弹性剪切模量	$\epsilon_{\text{threshold}}$ ——应变损伤阈值
HCBM 模型——非线性黏弹塑性流变模型	η_1, η_2, η_3 ——黏滞系数
HKKP 模型——变参数流变损伤模型	θ_{σ} ——洛德角
$H(t)$ ——单位阶跃函数	σ_{∞} ——三轴蠕变长期强度
I_1, I_2, I_3 ——应力张量第一、第二、第三不变量	σ_{∞}^c ——压缩蠕变长期承载力
J_1, J_2, J_3 ——偏应力张量第一、第二、第三不变量	σ_0^c ——压缩瞬时承载力
	σ_f ——三轴蠕变破坏强度
	σ_{ij} ——应力
	σ_s ——流变屈服强度

σ_{un} ——单位应力

σ_{ve} ——流变门槛值

τ_{∞} ——剪切流变长期强度

τ_{f} ——剪切流变破坏强度

τ_{s} ——剪切流变屈服强度

ϕ_{∞} ——长期内摩擦角

ψ_{∞} ——长期剪胀角

Δe_{ij}^k ($k=1,2,3,4$)——偏应变增量

$\langle \rangle$ ——开关函数

目 录

《岩石力学与工程研究著作丛书》序

《岩石力学与工程研究著作丛书》编者的话

前言

主要符号说明

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本书主要研究成果	12
第 2 章 高边坡软弱岩带的原位流变试验与分析研究	14
2.1 引言	14
2.2 软弱岩带原位压缩蠕变试验及分析	14
2.2.1 试验对象和试验点地质条件	14
2.2.2 原位压缩蠕变试验的加载与测试方法	16
2.2.3 原位压缩蠕变试验结果分析	19
2.3 软弱岩带压缩蠕变长期承载能力分析	24
2.3.1 等时应力-应变曲线	24
2.3.2 压缩荷载-变形等时簇曲线	25
2.3.3 压缩蠕变长期承载力	25
2.4 软弱岩带原位剪切流变试验及分析	27
2.4.1 试验对象与试验点地质条件	27
2.4.2 试验设备安装与试验程序	28
2.4.3 原位剪切流变试验结果分析	29
2.5 软弱岩带的长期抗剪强度	35
2.5.1 剪切流变长期强度	35
2.5.2 剪切流变试验抗剪强度	40
2.5.3 长期抗剪强度	42
2.6 小结	44
第 3 章 软弱岩带的变参数流变损伤模型与计算程序开发	45
3.1 引言	45

3.2 软弱岩带的蠕变变形特征	45
3.2.1 黏弹性性质	45
3.2.2 黏塑性性质	50
3.2.3 流变损伤性质	50
3.3 软弱岩带的流变损伤演化方程	51
3.3.1 流变损伤演化方程	51
3.3.2 流变损伤判别条件	52
3.4 软弱岩带的变参数流变损伤模型	53
3.4.1 流变损伤模型的本构方程	53
3.4.2 流变损伤模型的蠕变方程	55
3.4.3 流变损伤模型的松弛方程	56
3.4.4 流变损伤模型的三维表达式	58
3.5 软弱岩带的变参数流变损伤计算程序	60
3.5.1 流变损伤模型的差分形式	61
3.5.2 流变损伤计算程序的开发	62
3.5.3 流变损伤计算程序的验证	62
3.6 小结	66
第4章 高边坡硬脆性岩体的原位流变试验与分析研究	67
4.1 引言	67
4.2 硬脆性岩体原位压缩蠕变试验及分析	67
4.2.1 试验对象与试验点地质条件	67
4.2.2 试验加载分级与设备安装	68
4.2.3 原位压缩蠕变试验结果分析	69
4.2.4 压缩蠕变长期承载能力分析	75
4.3 硬脆性岩体原位剪切流变试验及分析	77
4.3.1 试验对象与试验点地质条件	77
4.3.2 试验设备安装与试验流程	78
4.3.3 原位剪切流变试验结果分析	79
4.3.4 硬脆性岩体的长期抗剪强度	88
4.3.5 硬脆性岩体的剪切流变经验方程	98
4.3.6 硬脆性岩体的剪切流变模型	125
4.4 硬脆性岩体的三轴蠕变试验及分析	134
4.4.1 常规三轴试验	135

4.4.2 不同加卸载应力路径的三轴蠕变试验	143
4.4.3 硬脆性岩体的三轴蠕变长期强度	191
4.4.4 三轴蠕变试验结论	204
4.5 硬脆性岩体的三轴蠕变破坏机制	205
4.5.1 常规三轴试验破坏形式	205
4.5.2 三轴蠕变破坏形式	206
4.5.3 三轴蠕变破坏机制	209
4.5.4 研究结论	218
4.6 小结	218
第5章 硬脆性岩体的非线性流变模型与计算程序开发	219
5.1 引言	219
5.2 考虑加载历史的蠕变曲线处理方法	219
5.3 硬脆性岩体的非线性黏弹塑性流变模型	222
5.3.1 非线性流变模型的建立	222
5.3.2 非线性流变模型的本构方程	224
5.3.3 非线性流变模型的蠕变方程	225
5.3.4 非线性流变模型的松弛特性	227
5.3.5 非线性流变模型的三维表达形式	230
5.3.6 蠕变分段函数判别准则	232
5.4 硬脆性岩体的非线性黏弹塑性流变计算程序	234
5.4.1 流变模型的差分形式	235
5.4.2 流变模型计算程序的开发	239
5.4.3 非线性流变计算程序的验证	240
5.5 小结	245
第6章 高边坡岩体流变参数的反演分析研究	247
6.1 引言	247
6.2 岩体黏弹性变形的解析分析	250
6.2.1 刚性承压板下岩体的黏弹性变形计算	250
6.2.2 柔性承压板下岩体的黏弹性变形计算	258
6.3 岩体流变参数的解析反演方法	261
6.3.1 设计变量与目标函数	261
6.3.2 解析反演的基本方法	262
6.3.3 解析反演的技术路线	262

6.4 岩体流变参数的解析-智能反演方法	263
6.4.1 解析-智能反演的基本方法	264
6.4.2 解析-智能反演的技术路线	264
6.4.3 解析-智能反演方法的具体应用	264
6.5 岩体流变参数的改进二次粒子群反演方法	275
6.5.1 粒子群算法原理	275
6.5.2 流变参数改进二次粒子群反演	279
6.5.3 改进二次粒子群反演方法的验证	281
6.5.4 大岗山软弱岩带流变参数的改进二次粒子群反演	283
6.6 小结	286
第7章 大岗山高边坡开挖稳定三维非线性流变数值计算分析	287
7.1 引言	287
7.2 计算条件	288
7.3 坝区初始地应力场的反演	293
7.4 边坡开挖流变数值计算结果分析	295
7.4.1 边坡开挖位移场变化规律	295
7.4.2 边坡开挖应力场变化规律	302
7.4.3 边坡开挖塑性区分布规律	310
7.4.4 边坡开挖损伤区分布规律	312
7.5 小结	314
第8章 高边坡监测智能分析网络系统开发及应用	316
8.1 引言	316
8.2 系统开发目标与总体设计要求	316
8.2.1 系统研发目标	316
8.2.2 系统总体设计要求	317
8.3 系统开发流程	319
8.4 系统运行模式与架构	320
8.4.1 C/S结构	320
8.4.2 SQL Server 2000 数据库系统	322
8.4.3 ADO 数据库访问技术	322
8.5 系统构成及主要功能	323
8.5.1 系统构成	324
8.5.2 系统主要功能	324

8.6 边坡变形预测分析模型及在系统中的实现	331
8.6.1 边坡变形预测分析模型	332
8.6.2 边坡变形预测的逐步回归分析及系统实现	333
8.7 边坡监测智能分析网络系统的工程应用	336
8.7.1 系统在龙滩水电站高边坡工程中的应用	336
8.7.2 系统在锦屏一级水电站高边坡工程中的应用	351
8.8 小结	359
参考文献	360