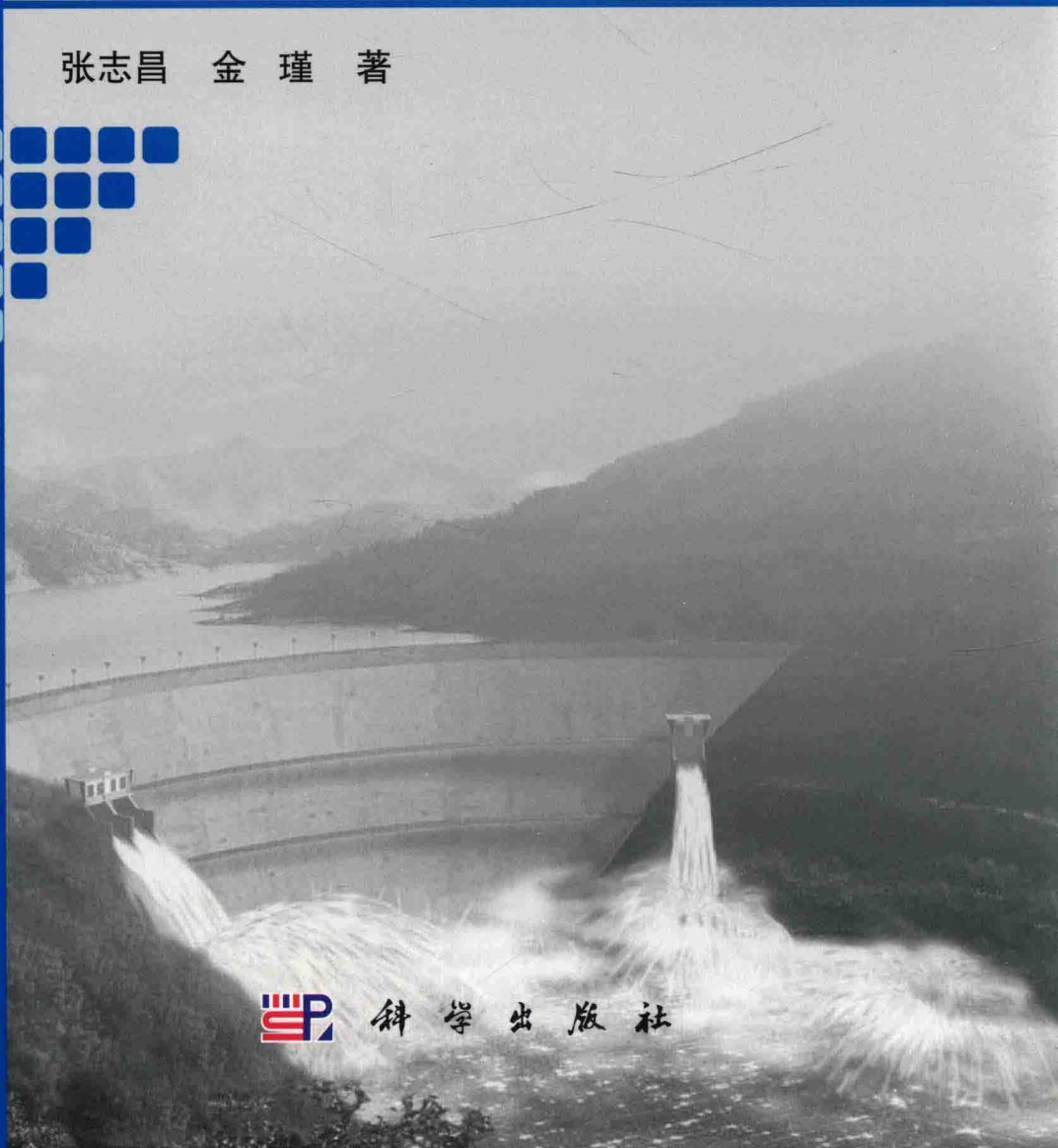


西北旱区生态水利学术著作丛书

台阶式溢洪道水力特性的研究

张志昌 金 瑾 著



科学出版社

西北旱区生态水利学术著作丛书

台阶式溢洪道水力特性的研究

张志昌 金 瑾 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是台阶式溢洪道水力特性的系列研究成果总结。通过模型试验和数值模拟研究单纯台阶式溢洪道的水流流态、掺气发生点的判断方法、台阶上掺气与未掺气水流水面线的计算方法、压强分布规律、掺气浓度分布规律、流速场、紊动能、紊动耗散率和消能效果；研究台阶式溢洪道与掺气挑坎联合应用、台阶式溢洪道与分流齿墩掺气设施联合应用的水力特性，包括掺气挑坎和分流齿墩的体型、设置位置、分流齿墩的收缩比、水舌空腔长度、掺气交汇点的位置，水面线的计算方法、墩头和台阶上的动水压强分布、台阶上的掺气浓度分布、流速分布、水流的紊动特性和消能。通过模型试验研究掺气分流墩设施的收缩比、墩头动水压强特性、设施的掺气特性、水舌扩散特性以及掺气分流墩与消力池联合应用消力池的水流流态、水面线、动水压强分布规律和消能效果。

本书可作为水利水电工程及相关专业科技人员的设计参考书，也可作为高等院校教师和研究生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

台阶式溢洪道水力特性的研究 / 张志昌, 金瑾著. —北京: 科学出版社, 2018.8

(西北旱区生态水利学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-058502-8

I. ①台… II. ①张… ②金… III. ①溢洪道-水力学-研究
IV. ①TV651.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 182411 号

责任编辑: 祝 洁 / 责任校对: 郭瑞芝
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年8月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018年8月第一次印刷 印张: 22 1/2

字数: 440 000

定价: 135.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《西北旱区生态水利学术著作丛书》学术委员会

(以姓氏笔画排序)

主 任：王光谦

委 员：许唯临 杨志峰 沈永明

张建云 钟登华 唐洪武

谈广鸣 康绍忠

《西北旱区生态水利学术著作丛书》编写委员会

(以姓氏笔画排序)

主 任：周孝德

委 员：王全九 李 宁 李占斌

罗兴锜 柴军瑞 黄 强

总 序 一

水资源作为人类社会赖以延续发展的重要要素之一，主要来源于以河流、湖泊为主的淡水生态系统。这个占据着少于1%地球表面的重要系统虽仅容纳了地球上全部水量的0.01%，但却给全球社会经济发展提供了十分重要的生态服务，尤其是在全球气候变化的背景下，健康的河湖及其完善的生态系统过程是适应气候变化的重要基础，也是人类赖以生存和发展的必要条件。人类在开发利用水资源的同时，对河流上下游的物理性质和生态环境特征均会产生较大影响，从而打乱了维持生态循环的水流过程，改变了河湖及其周边区域的生态环境。如何维持水利工程开发与生态环境保护之间的友好互动，构建生态友好的水利工程技术体系，成为传统水利工程发展与突破的关键。

构建生态友好的水利工程技术体系，强调的是水利工程与生态工程之间的交叉融合，由此生态水利工程的概念应运而生，这一概念的提出是新时期社会经济可持续发展对传统水利工程的必然要求，是水利工程发展史上的一次飞跃。作为我国水利科学的国家级科研平台，西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地(西安理工大学)是以生态水利为研究主旨的科研平台。该平台立足我国西北旱区，开展旱区生态水利工程领域内基础问题与应用基础研究，解决若干旱区生态水利领域内的关键科学技术问题，已成为我国西北地区生态水利工程领域高水平研究人才聚集和高层次人才培养的重要基地。

《西北旱区生态水利学术著作丛书》作为重点实验室相关研究人员近年来在生态水利研究领域内代表性成果的凝炼集成，广泛深入地探讨了西北旱区水利工程建设与生态环境保护之间的关系与作用机理，丰富了生态水利工程学科理论体系，具有较强的学术性和实用性，是生态水利工程领域内重要的学术文献。丛书的编纂出版，既是对重点实验室研究成果的总结，又对今后西北旱区生态水利工程建设、科学管理和高效利用具有重要的指导意义，为西北旱区生态环境保护、水资源开发利用及社会经济可持续发展中亟待解决的技术及政策制定提供了重要的科技支撑。

中国科学院院士

王光谦

2016年9月

总 序 二

近50年来全球气候变化及人类活动的加剧,影响了水循环诸要素的时空分布特征,增加了极端水文事件发生的概率,引发了一系列社会-环境-生态问题,如洪涝、干旱灾害频繁,水土流失加剧,生态环境恶化等。这些问题对于我国生态本底本就脆弱的西北地区而言更为严重,干旱缺水(水少)、洪涝灾害(水多)、水环境恶化(水脏)等严重影响着西部地区的区域发展,制约着西部地区作为“一带一路”桥头堡作用的发挥。

西部大开发水利要先行,开展以水为核心的水资源-水环境-水生态演变的多过程研究,揭示水利工程开发对区域生态环境影响的作用机理,提出水利工程开发的生态约束阈值及减缓措施,发展适用于我国西北旱区河流、湖库生态环境保护的理论与技术体系,确保区域生态系统健康及生态安全,既是水资源开发利用与环境规划管理范畴内的核心问题,又是实现我国西部地区社会经济、资源与环境协调发展的现实需求,同时也是对“把生态文明建设放在突出地位”重要指导思路的响应。

在此背景下,作为我国西部地区水利学科的重要科研基地,西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地(西安理工大学)依托其在水利及生态环境保护方面的学科优势,汇集近年来主要研究成果,组织编纂了《西北旱区生态水利学术著作丛书》。该丛书兼顾理论基础研究与工程实际应用,对相关领域专业技术人员的工作起到了启发和引领作用,对丰富生态水利工程学科内涵、推动生态水利工程领域的科技创新具有重要指导意义。

在发展水利事业的同时,保护好生态环境,是历史赋予我们的重任。生态水利工程作为一个新的交叉学科,相关研究尚处于起步阶段,期望以此丛书的出版为契机,促使更多的年轻学者发挥其聪明才智,为生态水利工程学科的完善、提升做出自己应有的贡献。

中国工程院院士

2016年9月

总 序 三

我国西北干旱地区地域辽阔、自然条件复杂、气候条件差异显著、地貌类型多样，是生态环境最为脆弱的区域。20世纪80年代以来，随着经济的快速发展，生态环境承载负荷加大，遭受的破坏亦日趋严重，由此导致各类自然灾害呈现分布渐广、频次显增、危害趋重的发展态势。生态环境问题已成为制约西北旱区社会经济可持续发展的主要因素之一。

水是生态环境存在与发展的基础，以水为核心的生态问题是环境变化的主要原因。西北干旱生态脆弱区由于地理条件特殊，资源性缺水及其时空分布不均的问题同时存在，加之水土流失严重导致水体含沙量高，对种类繁多的污染物具有显著的吸附作用。多重矛盾的叠加，使得西北旱区面临的水问题更为突出，急需在相关理论、方法及技术上有所突破。

长期以来，在解决如上述水问题方面，通常是从传统水利工程的逻辑出发，以人类自身的需求为中心，忽略甚至破坏了原有生态系统的固有服务功能，对环境造成了不可逆的损伤。老子曰“人法地，地法天，天法道，道法自然”，水利工程的发展绝不应仅是工程理论及技术的突破与创新，而应调整以人为中心的思维与态度，遵循顺其自然而成其所以然之规律，实现由传统水利向以生态水利为代表的现代水利、可持续发展水利的转变。

西北旱区生态水利工程省部共建国家重点实验室培育基地(西安理工大学)从其自身建设实践出发，立足于西北旱区，围绕旱区生态水文、旱区水土资源利用、旱区环境水利及旱区生态水工程四个主旨研究方向，历时两年筹备，组织编纂了《西北旱区生态水利学术著作丛书》。

该丛书面向推进生态文明建设和构筑生态安全屏障、保障生态安全的国家需求，瞄准生态水利工程学科前沿，集成了重点实验室相关研究人员近年来在生态水利研究领域内取得的主要成果。这些成果既关注科学问题的辨识、机理的阐述，又不失在工程实践应用中的推广，对推动我国生态水利工程领域的科技创新，服务区域社会经济与生态环境保护协调发展具有重要的意义。

中国工程院院士

2016年9月

前 言

台阶式溢洪道因其显著的消能效果在工程中得到了广泛应用,但对于台阶式溢洪道水力特性,尤其是与掺气设施联合应用水力特性的研究成果甚少。本书是作者多年来对台阶式溢洪道模型试验和数值模拟的系列研究成果的总结。

模型试验部分主要研究台阶式溢洪道、台阶式溢洪道与掺气挑坎联合应用、掺气分流墩设施、台阶式溢洪道与分流齿墩掺气设施联合应用以及掺气分流墩设施与消力池联合应用的水力特性。

单纯台阶式溢洪道的水力特性主要综述已有的研究成果,提出了单纯台阶式溢洪道水流流态的判别方法、未掺气水流和掺气水流水面线的计算方法,掺气发生点的计算方法、台阶上掺气浓度的分布规律,压强分布规律和消能率的计算方法。台阶式溢洪道与掺气挑坎联合应用的水力特性主要为掺气挑坎的设置位置、掺气挑坎的高度、通气孔后台阶上的水流流态、水面线、压强特性、空腔长度、掺气交汇点的位置以及掺气量和掺气浓度的分布规律。掺气分流墩设施水力特性的研究主要为掺气分流墩设施的体型和特点、设施的收缩比、墩头壁压特性、水舌扩散和掺气特性、掺气分流墩设施的消能量以及分流齿墩的研究成果。台阶式溢洪道与分流齿墩掺气设施联合应用主要为分流齿墩掺气设施的体型、设置位置、收缩比、水流流态和水面线、墩头和台阶上的压强特性、台阶上的掺气现象与掺气浓度以及分流齿墩掺气设施与台阶式溢洪道联合应用的消能效果和设计方法。掺气分流墩设施与消力池联合应用的水力特性主要为水舌射距的计算方法、消力池水流流态的控制、界限水深的计算方法、水面线和水跃长度的计算方法、消力池的压强特性以及最大时均压强和脉动压强系数的计算方法、掺气分流墩设施与消力池联合应用的消能效果。

数值计算部分主要研究了台阶式溢洪道、台阶式溢洪道与掺气挑坎联合应用,以及台阶式溢洪道与分流齿墩掺气设施联合应用的水力特性,包括台阶上的水流流态、自由水面线、台阶和分流齿墩墩头的压强场、流速场、紊动能和紊动耗散率。

从2001年开始,在作者的指导下,先后有7位研究生对台阶式溢洪道的水力特性进行了研究,取得了系列研究成果,他们是郑阿漫、曾东洋、骈迎春、金瑾、尹芳芳、徐啸和李若冰。

参加本书撰写的有张志昌、金瑾、骈迎春、尹芳芳、徐啸、李若冰和闫晋垣。

具体分工如下：第1章由张志昌撰写，第2章由张志昌、徐啸和骈迎春撰写，第3章由金瑾撰写，第4章由骈迎春和张志昌撰写，第5章由尹芳芳和张志昌撰写，第6章由张志昌和闫晋垣撰写，第7章由徐啸和张志昌撰写，第8章由李若冰和张志昌撰写，第9章由张志昌和闫晋垣撰写，全书由张志昌统稿。

书中借鉴了国内外同行的研究成果，以参考文献的形式标出，在此表示感谢。由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2018年1月

目 录

总序一

总序二

总序三

前言

第 1 章	台阶式溢洪道水力特性的研究现状和问题	1
1.1	台阶式溢洪道的研究现状	1
1.2	台阶式溢洪道研究的主要问题	6
	参考文献	7
第 2 章	台阶式溢洪道水力特性的试验研究	9
2.1	台阶式溢洪道的水流流态	9
2.2	台阶式溢洪道的试验模型	12
2.3	台阶式溢洪道水面线和掺气分布规律的研究	14
2.3.1	台阶式溢洪道非掺气水流水面线的研究现状	14
2.3.2	台阶式溢洪道非掺气水流水面线新的计算方法	15
2.3.3	台阶式溢洪道全流程水面线的计算	17
2.3.4	台阶式溢洪道掺气水流水面线和掺气浓度的研究	22
2.4	台阶式溢洪道的压强分布规律	33
2.4.1	台阶式溢洪道压强分布规律的研究现状	33
2.4.2	台阶式溢洪道压强分布规律的试验研究	36
2.5	台阶式溢洪道消能效果的研究	50
2.5.1	滑行水流消能率的计算公式	50
2.5.2	台阶式溢洪道跌落水流和滑行水流消能率的统一公式	54
	参考文献	55
第 3 章	台阶式溢洪道水力特性的数值模拟	58
3.1	数值模拟在台阶式溢洪道上的应用状况和计算模型	58
3.1.1	数值模拟在台阶式溢洪道上的应用状况	58
3.1.2	计算模型	60
3.2	紊流数值模拟理论及数值方法	61
3.2.1	基本控制方程的建立	61

3.2.2	紊流模型	62
3.2.3	自由水面的确定	62
3.2.4	计算模型的网格划分	63
3.2.5	边界条件的处理	64
3.3	台阶式溢洪道的水面线及水流流态	65
3.3.1	不同时刻的自由水面线	65
3.3.2	单个台阶上的水流流态	66
3.3.3	不同工况下的自由水面线	67
3.4	计算结果与试验结果的对比	70
3.5	台阶式溢洪道压强场的研究	71
3.5.1	台阶式溢洪道的压强等值线分布	71
3.5.2	台阶内的压强分布规律	75
3.6	台阶式溢洪道的流速场	88
3.7	台阶式溢洪道消能率的研究	91
3.7.1	溢洪道坝面紊动能和紊动耗散率的分布规律	91
3.7.2	台阶式溢洪道台阶内紊动能和紊动耗散率的分布规律	94
3.7.3	台阶式溢洪道的消能率	94
	参考文献	96
第4章	台阶式溢洪道与掺气挑坎联合应用水力特性的试验研究	97
4.1	试验模型	97
4.2	设掺气挑坎后台阶式溢洪道的水流流态	99
4.3	设掺气挑坎后台阶式溢洪道的水面线	101
4.4	设掺气挑坎后台阶式溢洪道的相对时均压强分布	103
4.4.1	台阶水平面的相对时均压强分布	103
4.4.2	台阶竖直面的相对时均压强分布	108
4.4.3	台阶水平面的相对时均压强沿程分布	112
4.4.4	台阶竖直面的相对时均压强沿程分布	117
4.4.5	脉动压强测点布置	121
4.4.6	台阶水平面脉动压强分布	121
4.5	设掺气挑坎后台阶式溢洪道的水流掺气浓度	125
4.5.1	设掺气挑坎后台阶式溢洪道的水流掺气现象	125
4.5.2	空腔长度的确定	125
4.5.3	设掺气挑坎情况下掺气交汇点位置的确定	128
4.5.4	设掺气挑坎情况下通气孔通气量的确定	128

4.5.5 设掺气挑坎情况下台阶式溢洪道掺气浓度分布	130
4.5.6 增加台阶式溢洪道掺气浓度的措施	137
4.6 设掺气挑坎后台阶式溢洪道的消能	138
4.7 掺气挑坎与台阶式溢洪道联合应用的其他研究成果	138
参考文献	141
第5章 台阶式溢洪道与掺气挑坎联合应用水力特性的数值模拟	142
5.1 计算模型	142
5.2 紊流模型及控制方程	143
5.3 带有掺气挑坎的台阶式溢洪道的三维数值模拟	144
5.3.1 划分计算网格	144
5.3.2 选择计算模型及求解器类型	144
5.3.3 设定边界条件	145
5.3.4 流场初始条件	145
5.3.5 求解计算	145
5.4 三维数值模拟计算结果与分析	145
5.4.1 台阶式溢洪道不同时刻的自由水面线	145
5.4.2 台阶式溢洪道的水流流态	146
5.4.3 计算结果与试验结果的对比	148
5.5 台阶式溢洪道的流速场	151
5.5.1 流速矢量分布	151
5.5.2 流速等值线分布	153
5.5.3 断面流速分布	156
5.5.4 台阶式溢洪道的边界层发展	158
5.6 台阶式溢洪道的压强场	159
5.6.1 台阶式溢洪道压强等值线分布	159
5.6.2 单个台阶水平面的压强分布	161
5.6.3 单个台阶竖直面压强测点布置	165
5.6.4 单个台阶竖直面压强分布	165
5.6.5 台阶水平面压强的沿程分布	169
5.6.6 台阶竖直面压强的沿程分布	171
5.7 台阶式溢洪道的消能	173
5.7.1 单个台阶紊动能和紊动耗散率的分布规律	173
5.7.2 紊动能和紊动耗散率的沿程分布规律	176
5.7.3 溢洪道的消能率	177

5.7.4 掺气挑坎的空腔长度和通气量	178
参考文献	179
第 6 章 掺气分流墩设施水力特性的试验研究	180
6.1 掺气分流墩设施的体型和特点	180
6.1.1 掺气分流墩设施的体型	180
6.1.2 掺气分流墩设施的特点	181
6.2 掺气分流墩设施的原型观测和应用	182
6.3 掺气分流墩设施收缩比的研究	184
6.3.1 试验模型	184
6.3.2 收缩比对水舌挑距的影响	185
6.3.3 收缩比对消力池压强特性的影响	189
6.3.4 收缩比对消能效果的影响	190
6.4 掺气分流墩墩头壁压特性的研究	191
6.4.1 墩头时均压强特性	191
6.4.2 墩头脉动压强特性	197
6.4.3 墩头频谱特性和振动特性	199
6.4.4 墩头的空化特性	199
6.5 掺气分流墩水舌的掺气特性	200
6.5.1 试验模型	200
6.5.2 量纲分析	201
6.5.3 水舌断面含水浓度分布的特点	202
6.5.4 断面最大含水浓度的沿程变化	203
6.5.5 断面平均含水浓度的沿程变化	204
6.5.6 不掺气核心区的长度	205
6.5.7 水舌沿横向掺气浓度的变化	206
6.5.8 掺气分流墩水舌与普通二元水舌沿程断面掺气浓度的比较	207
6.6 掺气分流墩设施的消能量	208
6.7 分流齿墩设施简介	210
6.7.1 试验条件和试验模型	210
6.7.2 影响分流齿墩设施消能效果因素分析	211
参考文献	215
第 7 章 台阶式溢洪道与分流齿墩掺气设施联合应用水力特性的试验研究	216
7.1 试验模型	216
7.2 分流齿墩掺气设施体型的确定	217

7.2.1	分流齿墩掺气设施的组成及作用	217
7.2.2	分流齿墩掺气设施的位置	218
7.2.3	水平掺气坎的高度	218
7.2.4	侧墙掺气坎的高度	220
7.2.5	分流齿墩形状、宽度、收缩比和高度的确定	220
7.3	水流流态和水面线	223
7.3.1	分流齿墩掺气设施的出射水流流态	223
7.3.2	台阶式溢洪道上的水流流态	224
7.3.3	分流齿墩掺气设施与台阶式溢洪道联合应用的水面线	225
7.3.4	台阶式溢洪道边墙水面线	227
7.4	压强分布	228
7.4.1	齿墩墩头动水压强测点布置	228
7.4.2	齿墩墩头时均压强沿墩高分布	229
7.4.3	台阶式溢洪道水舌冲击区压强分布规律	234
7.4.4	台阶式溢洪道的压强分布	237
7.5	台阶上的掺气浓度分布	251
7.5.1	掺气现象	251
7.5.2	台阶式溢洪道上的掺气浓度	252
7.6	分流齿墩掺气设施与台阶式溢洪道联合应用的消能效果	266
7.6.1	消能机理	266
7.6.2	收缩断面水深和流速系数	266
7.6.3	消能率	267
7.7	分流齿墩掺气设施与台阶式溢洪道联合应用的设计方法	268
	参考文献	278
第 8 章	台阶式溢洪道与分流齿墩掺气设施联合应用水力特性的数值模拟	279
8.1	计算模型的建立	279
8.1.1	计算模型	279
8.1.2	计算模型的网格划分	280
8.1.3	边界条件的处理	281
8.1.4	求解器的设置	281
8.2	分流齿墩掺气设施与台阶式溢洪道联合应用的水流流态	282
8.2.1	台阶式溢洪道的水流流态	282
8.2.2	水舌最大和最小挑距	284
8.2.3	台阶式溢洪道的水面线	285

8.3	台阶式溢洪道的速度场	287
8.3.1	台阶式溢洪道上的流速等值线分布	287
8.3.2	台阶断面流速分布	289
8.4	台阶式溢洪道的压强场	291
8.4.1	分流齿墩墩头的压强测点布置	291
8.4.2	分流齿墩墩头迎水面相对时均压强沿墩高分布	292
8.4.3	墩头侧面相对时均压强沿墩高分布	293
8.4.4	墩头时均压强系数沿横断面分布	294
8.4.5	墩头顶部压强分布	296
8.4.6	台阶式溢洪道上相对时均压强分布	298
8.5	消能效果	306
8.5.1	紊动能和紊动耗散率	306
8.5.2	消能率	311
	参考文献	312
第9章	掺气分流墩设施与消力池联合应用水力特性的研究	313
9.1	试验模型和试验条件	313
9.2	水舌扩散的试验研究	314
9.2.1	水舌最大射距的理论分析	314
9.2.2	掺气分流墩水舌射距计算	315
9.2.3	最大射距计算方法在其他挑流消能工中的应用	318
9.3	消力池的压强特性	319
9.3.1	消力池压强系数分析	319
9.3.2	消力池时均压强分布	320
9.3.3	消力池底板脉动压强特性	323
9.3.4	脉动压强的功率谱	324
9.3.5	消力池下游水深的控制	325
9.4	消力池的水流流态以及水跃特性	325
9.4.1	消力池水流流态	325
9.4.2	消力池水面线	326
9.4.3	临界水跃跃后水深和水跃长度	327
9.4.4	淹没水跃条件下跃后水深与水跃长度	327
9.5	消力池水力特性研究	328
9.5.1	消力池体型的确定	328
9.5.2	消力池相对时均压强特性	331

9.5.3 消力池脉动压强分布	333
9.5.4 消力池水面线的比较	334
9.5.5 消力池水跃长度的比较	336
9.6 掺气分流墩设施的消能效果	337
9.6.1 不设掺气分流墩设施时消力池水深和水跃长度的计算	337
9.6.2 掺气分流墩设施与普通二元跌落水流消能效果的比较	337
参考文献	340

第 1 章 台阶式溢洪道水力特性的研究现状和问题

1.1 台阶式溢洪道的研究现状

台阶式溢洪道是将传统的光滑溢洪道改成具有台阶形状的溢流面。水流通过台阶时,台阶就相当于溢流面的粗糙度,使水流在每级台阶上都产生强烈的旋滚,促使水流表面波破碎,加强了水体之间的紊动交换。与光滑溢流面比较,台阶溢流面能消耗更多的能量。试验表明,台阶式溢洪道的消能率比光滑溢洪道高出 40%~80%^[1]。正是由于台阶式溢洪道有更高的消能率,近年来在我国的高坝建设中,采用或拟采用台阶式溢洪道消能的工程越来越多。

建于公元 100 年的突尼斯赖因坝就应用了台阶消能技术^[2]。但真正把台阶式溢洪道作为消能工的研究并大量用于泄水建筑物起始于 20 世纪初。1906 年美国的新科罗托因、卡鲁梅特水道,1939 年英国的拉第波尔等大坝工程就采用台阶消能^[3]。英国在 1968 年建成的克里韦多格支墩坝上用预制混凝土梁做成了台阶形的溢洪道^[3]。70 年代,苏联在第聂伯、索斯诺夫斯基以及鲁克霍维茨基等土坝溢流面上建成了台阶式块体溢洪道^[3]。80 年代,南非在德米斯特克拉尔、扎埃霍克,美国在蒙克斯维尔、上静水等碾压混凝土坝上均采用台阶式溢洪道消能,其中以上静水坝的坝高最大(61m)^[3]。80 年代以后,许多水利工程采用台阶式溢洪道作为主要消能设施。

我国在台阶式溢洪道的研究和应用方面也做了许多工作。1994 年,福建省的水东水电站率先建成了台阶式溢洪道^[4]。以后,湖南省江垭的碾压混凝土坝、六都寨的寨志水库^[5]、广东的稿树下水库^[6]、惠州抽水蓄能电站下库溢流坝和丰顺县虎局水库溢洪道^[7]、吉林的河龙碾压混凝土坝和六顶山水库岸边溢洪道^[8]、四川省凉山州的布西水电站泄洪洞^[9]均拟采用或采用台阶式溢洪道作为消能设施。云南省大朝山水电站采用台阶式溢洪道和宽尾墩联合应用来解决高坝大单宽流量的消能问题^[10]。

目前,世界上已经有数十座中小型水库采用了台阶式溢洪道消能,如表 1.1 所示^[3]。

表 1.1 台阶式溢洪道典型实例

大坝名称	坡度 $\alpha/(^{\circ})$	最大坝高 $H_{\max}/\text{m}$	最大单宽流量 $/[m^3/(s \cdot m)]$	台阶高度 a/m	台阶级数 /级	台阶类型	备注
混凝土坝							
克里韦多格 (英国, 1968)	60	72	2.8	0.76	—	预制混凝土梁	支墩坝溢洪道 用土梁做成 $W=182.9\text{m}$