

溪洛渡水电站工程技术丛书

泄洪洞工程实践

樊启祥 等◎编著



中国三峡出版传媒
中国三峡出版社

溪洛渡水电站工程技术丛书

泄洪洞工程实践

樊启祥等 编著

中国三峡出版传媒
中国三峡出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

泄洪洞工程实践 / 樊启祥等编著. —北京: 中国三峡出版社, 2016. 6
(溪洛渡水电站工程技术丛书)

ISBN 978-7-80223-928-9

I. ①泄… II. ①樊… III. ①水力发电站-泄洪隧洞-工程技术 IV. ①TV74
②TV651.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 140125 号

责任编辑: 祝为平 彭新岸

中国三峡出版社出版发行

(北京市西城区西廊下胡同 51 号 100034)

电话: (010) 66112758 66116828

<http://www.zgsxcbs.cn>

E-mail: sanxiaz@sina.com

北京市十月印刷有限公司印刷 新华书店经销

2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 25.75

字数: 550 千字

ISBN 978-7-80223-928-9 定价: 168.00 元

溪洛渡水电站工程技术丛书

《泄洪洞工程实践》

编委会

顾问:	张超然				
主任:	樊启祥				
副主任:	洪文浩	张世保			
委员:	王仁坤	陈正云	廖建新	鲁结根	聂庆华
	李金河	刘晓东	王孝海	李小春	吴涛
	尹晓华				
编写组人员:	樊启祥	聂庆华	陈庄明	李果	许传稳
	刘太平	黄勇	彭帅	伍文峰	席前伟
	董万里	杨敬	吴世斌	于文璟	王丰
	覃壮恩	祝细根	易丹	黄伟洪	罗勇
	黄照元	李国军	张兴全	余沿波	徐勇
	孙玮				

序

溪洛渡水电站位于四川省雷波县和云南省永善县相接壤的金沙江下游峡谷段，电站装机容量 13860MW，其装机规模仅次于三峡工程，是我国第二大水电站，世界第三大水电站。溪洛渡水电站是实施西电东送、优化我国能源布局和改善电力结构的关键电源点。

溪洛渡水电站枢纽主要建筑物由混凝土双曲拱坝、地下引水发电系统和泄洪建筑物组成。混凝土双曲拱坝最大坝高 285.50m，是目前世界上已建成的三座 300m 级特高拱坝之一，系世界第四高坝。引水发电系统采用左、右岸地下式库区厂房布置，各布置 9 台 770MW 水轮发电机组，是世界上最大的地下电站。泄洪建筑物由坝身 7 个泄洪表孔、8 个泄洪深孔和左右岸共 4 条泄洪洞组成。水库正常蓄水位 600.00m，死水位 540.00m，水库总库容 126.7 亿 m^3 ，调节库容 64.6 亿 m^3 ，可进行不完全年调节。

枢纽最大泄洪流量高达 $50900\text{m}^3/\text{s}$ ，泄洪总功率近 1 亿 kW，为世界拱坝枢纽之最。其中，7 个表孔和 8 个深孔的最大泄洪流量达 $32000\text{m}^3/\text{s}$ ，为世界混凝土拱坝坝身泄洪之首；左、右岸 4 条泄洪洞最大泄洪流量超 $16600\text{m}^3/\text{s}$ ，是世界上最大的泄洪洞群，居泄洪洞群泄洪流量之冠。

由于溪洛渡水电站泄洪具有窄河谷、高水头、大泄量的特点，又位于高地震烈度区，因此，泄洪建筑物的设计、施工和安全运行面临一系列困难和挑战。其中，高水头、大流量、泄洪频繁的泄洪洞工程备受世人关注，面临着更为严峻的考验。

四条泄洪洞在两岸对称布置，左、右岸各两条，洞长 1.5 ~ 1.8km。泄洪洞的设计充分考虑了工程地质和地形条件、流道水流特性、闸门结构和流激响应，以及出口消能防冲等综合因素；采用平面转弯、有压流下接无压流和洞内龙落尾的布置，出口采用斜切扭曲式的挑流鼻坎，将水舌沿河道纵向拉开，使水流挑射均匀落入河道，左右岸挑流水舌水下碰撞消能的方式。

泄洪洞单洞最大泄流量为 $4200 \text{ m}^3/\text{s}$ ，最大流速达 50 m/s ，其多项指标均居世界前列，没有类同的工程经验可借鉴，因而在设计和建设过程中必须坚持技术创新和管理创新。

首先在设计上，采用了有压流下接无压流的流道结构，通过有压段实现平面转弯，绕过拱坝坝肩抗力体，不影响拱坝坝肩的稳定性，并实现了布置的灵活性；在隧洞中部设置液压弧形工作闸门，通过无级开度调节控制有压段水流流态，避免有压段的明满流过渡，削减进水口水流的立轴漩涡，调度灵活；采用龙落尾的结构形式，将 70% 左右的总水头集中在仅占全洞长度 25% 的尾部洞段，将高速水流区段集中在远离拱坝坝肩抗力体的部位，万一在该部位产生气蚀破坏也不会危及大坝安全，并提高了泄洪洞整体运行的可靠性和安全性；经国内多家权威科研院所水力学模型试验研究，优选了掺气底坎和侧墙掺气的体型，掺气减蚀效果良好；出口采用斜切扭曲挑坎，水舌分布均匀、挑距稳定，不碰本岸、不冲对岸，实现了挑流水舌入水纵向拉开、水下对冲消能的消能方式。

在溪洛渡泄洪洞施工过程中，坚持科技创新，研制和采用了一大批新技术、新装备、新材料、新工艺和新标准，因而确保了施工工期和作业安全，全面提升了工程质量，并取得了较显著的经济效益。

泄洪洞工程施工中，全面实现了“体型精准、平整光滑、耐磨防裂”的工程质量目标，堪称精品工程。在三峡集团公司金沙江质量检查专家组历年检查中，泄洪洞工程年年都被评为优良工程，这在工程建设中是很难得的。前来溪洛渡工地参观交流的单位和同仁，也对溪洛渡泄洪洞工程质量给予了高度评价，认为泄洪洞工程质量是一次性达标，坚持从头到尾不断创新，全面拉升了我国水工隧洞建造水平。泄洪洞工程建设六年来，共获评省部、行业级科技成果奖 6 项，获批水利部工法 4 项，获得专利 13 项。

泄洪洞工程在建设取得的丰硕创新成果，归功于三个方面的努力：首先是对“求真务实、创新拼搏、追求卓越”的三峡文化的传承和发扬，以“工程有亮点、管理有创新、各方有收获”为起点，努力追求精品工程，形成全员敢挑重担、勇于开拓的氛围；二是规范化的管理与施工，使各项技术创新落到实处，让质量、安全管理执行到位，为生产标准化打下基础；三是方法科学、目标合理，提出了施工质量要做到“亲水和气、体型精准、平顺光滑、耐磨防裂”的要求，建设者们围绕着这一要求探寻规律、开拓创新，促进泄洪洞工程全面达到国内领先、世界一流的水平。

《泄洪洞工程实践》一书分设计篇、施工篇和运行篇三部分，全面回顾了泄洪洞工程真实的建设历程，系统总结了其设计、施工和运行的成功经验和有益的启迪及教训。各部分从回顾历程开始，系统介绍各阶段基本情况，详细描述施工的有利条件和不利因素以及作业环境；认真梳理各阶段遇到的问题，提出处理方案的思路，比选各种解决方案，以及方案执行过程中的管理与控制，并对方案的执行效果进行评价；最后分析提炼经验与教训，并对后续工程提出改进意见与建议。

鉴于国内外很多大型泄洪洞因高速水流动气蚀或大流量泄洪都曾出现过损坏或严重破坏的问题，为此，在建设过程中我曾多次强调：“纵观国内外高水头泄洪洞运行的实例，均不同程度出现损伤和破坏，大家一定要特别认真地对待设计、施工和运行中的每一个细小环节，切实做到全过程、全方位严控，防患于未然。”陆佑楣院士在金沙江质量专家组检查大会上对全体参建者说：“从水力学模型上观察，40m/s 的流速已经是无坚不摧的感觉了，你们搞 50m/s 流速的泄洪洞，如果不出问题那就是奇迹了，期待你们创造奇迹。”

本书详细记载了施工中取得的一系列技术创新成果，包括底板水平和喇叭口双向光爆技术；钢筋拱肋替代钢拱架支护技术；采用布料机入仓，实现隧洞浇筑常态混凝土技术；研发的常态混凝土衬砌台车、斜洞混凝土衬砌台车、悬臂隐轨拖模台车和过流面处理登高台车等新装备；低热水泥与低硅粉掺量和高粉煤灰掺量配制的兼顾高强耐磨与和易性的高性能复合混凝土新材料。在施工过程中，结合新技术、新设备和新材料，还制订了一批新工艺和新标准，包括翻模工艺的改进、锚杆注浆工艺的改进等，并对典型的施工工艺都制订了工艺标准，实现了工程施工的标准化，使我国水工隧洞施工水平提升到一个新高度。

溪洛渡泄洪洞工程于 2007 年 3 月正式开工，在参建各方团结拼搏、不断创新、攻坚克难、科学设计、精心施工下，于 2013 年 4 月顺利完建。2013 年 9 月泄洪洞首次过流，2014 年 6 月 30 日完成泄洪洞单位工程验收，并整体移交溪洛渡电厂管理运行。

截至 2015 年汛末，泄洪洞已经历两个汛期和一个枯水期的运行，共泄洪运行 27 次，累计过流 1047 小时，单洞最大泄量 $2081\text{m}^3/\text{s}$ ，最大流速超过 40m/s。原型监测成果表明，泄洪洞运行性态正常，没有发生空化损坏，运行安全可靠，经受了泄洪的初步考验。但是，泄洪洞尚未经受大洪水和设计运行工况的考验，运行单位务必遵循精心调度、精心运

行、精心维护的刚性原则，确保泄洪洞长期、安全运行。建设者们期待着迎接更大洪水的检验，以见证溪洛渡泄洪洞创造大流量、高水头泄洪洞安全可靠运行的奇迹。

从我国水电施工现状来看，距真正的现代工业化仍有不小差距：首先是机械化程度需继续提升，尤其是辅助作业仍大量采用手工操作，还有很大提升空间；二是施工工法没有形成系列通用标准，不同的工人操作往往会出现不同效果，难以全面确保施工质量；三是建设者人员素质参差不齐，许多农民工还达不到职业工人水准，部分管理人员职业意识也有待提高等。针对上述问题，溪洛渡泄洪洞工程项目部强化机械化、标准化作业意识的教育，大力研发专用设备，鼓励和推广深度机械化、标准化施工作业，不断提升了施工质量，努力缩短差距。

中国长江三峡集团公司是溪洛渡水电站的项目法人，溪洛渡工程建设部代表项目法人负责组织项目建设；设计单位是成都勘测设计研究院有限公司；泄洪洞工程水力学模型和混凝土材料试验研究由中国水利水电科学研究院、清华大学、四川大学和成都院科研所、长江科学院等多家国内权威科研单位承担；主要土建施工、设备安装单位有中国水利水电第七工程局有限公司、中国人民武装警察部队水电部队、中国葛洲坝集团有限公司和中国水利水电第十四工程局有限公司等单位；监理单位是长江三峡技术经济发展有限公司和中南勘测设计研究院有限公司；由长江电力溪洛渡水力发电厂负责运行。在本书出版之际，谨向全体建设者致以崇高的敬意！

本书是对泄洪洞工程建设的纪实，力图让参建者全面再认识泄洪洞工程建设全过程，促使后续工程在技术和管理水平再上一个新台阶。本书可供水利水电工程技术人员、管理人员和高等院校水利水电专业师生参考。希望本书能为推动我国水工隧洞的设计、施工和管理水平的整体提升作出有益贡献。



2015年11月

目 录

1 综 述	1
1.1 基本情况	1
1.2 主要成果	3
1.3 体会与愿景	5
2 设计篇	6
2.1 概述	6
2.1.1 工程概况	6
2.1.2 工程等级及洪水标准	6
2.1.3 基本资料及主要数据	7
2.1.4 泄洪消能建筑物布置格局	8
2.2 泄洪洞设计历程	9
2.2.1 布置原则	9
2.2.2 可研阶段推荐布置方案	9
2.2.3 对可研推荐方案的优化	10
2.2.4 水力学模型试验研究	11
2.3 地质条件	12
2.3.1 左岸泄洪洞工程地质条件	12
2.3.2 右岸泄洪洞工程地质条件	14
2.4 泄洪洞总体布置	17
2.4.1 隧洞轴线	18
2.4.2 进水塔	18
2.4.3 有压隧洞段	19
2.4.4 工作闸门室	20
2.4.5 工作闸门室通气洞	21
2.4.6 无压隧洞段	21
2.4.7 龙落尾段	22
2.4.8 补气洞布置	24
2.4.9 掺气设施布置	24

2.4.10	明渠段	24
2.4.11	挑流鼻坎段	25
2.5	泄洪洞水力特性与体型设计	26
2.5.1	泄流能力	26
2.5.2	水流流态	27
2.5.3	压力分布	44
2.5.4	水流速度和水流空化数	47
2.5.5	龙落尾段掺气减蚀措施研究	47
2.5.6	出口挑流水舌归槽情况	86
2.6	泄洪洞结构设计	87
2.6.1	进口结构设计	87
2.6.2	有压隧洞段结构设计	89
2.6.3	闸门室结构设计	90
2.6.4	无压隧洞上平段结构设计	90
2.6.5	龙落尾段结构设计	91
2.6.6	挑流鼻坎结构设计	91
2.7	泄洪洞运行方式研究	92
2.7.1	泄洪洞整体运行方式	92
2.7.2	泄洪洞单洞运行方式	92
2.8	泄洪洞抗冲刷耐磨材料选择	93
2.8.1	泄洪洞对材料的要求分析	93
2.8.2	抗冲刷耐磨材料选择	93
2.9	下游河道防护设计	94
2.9.1	下游河道防护原则	94
2.9.2	下游河道防护范围	94
2.9.3	水力模型试验成果	94
2.9.4	下游河道防护方案	101
2.10	设计小结	102
3	施工篇	103
3.1	施工总体情况	103
3.1.1	工程简况	103
3.1.2	工程地质情况	104
3.1.3	主要参建单位	105
3.1.4	主要设计指标	105
3.1.5	主要工程量	107
3.1.6	工程总布置	108

3.1.7 工程总进度	121
3.2 开挖支护	137
3.2.1 开挖施工布置	137
3.2.2 有压段开挖	138
3.2.3 工作闸门室开挖	148
3.2.4 无压段开挖	154
3.2.5 龙落尾段开挖	164
3.2.6 出口明挖	169
3.2.7 洞室支护	172
3.2.8 特殊部位及不良地质洞段开挖支护处理	177
3.2.9 开挖支护小结	182
3.3 泄洪洞混凝土	183
3.3.1 混凝土施工布置	183
3.3.2 进水塔施工	183
3.3.3 有压段施工	194
3.3.4 工作闸门室施工	205
3.3.5 无压段施工	211
3.3.6 龙落尾施工	221
3.3.7 明渠段施工	243
3.3.8 挑坎施工	250
3.3.9 混凝土温控与防裂	257
3.3.10 混凝土过流面处理	266
3.4 闸门与启闭机安装	275
3.4.1 工程概况	275
3.4.2 工程特点	278
3.4.3 泄洪洞进口事故闸门施工过程及控制	278
3.4.4 固定卷扬式启闭机施工过程及控制	280
3.4.5 中闸室工作闸门施工过程及控制	283
3.4.6 液压启闭机施工过程及控制	288
3.4.7 质量保证措施	296
3.4.8 施工效果	297
3.4.9 经验小结	298
3.5 灌浆与基础处理	298
3.5.1 基本概况	298
3.5.2 施工难点及应对措施	301
3.5.3 施工规划	302

3.5.4	施工布置	305
3.5.5	灌浆施工	305
3.5.6	灌浆成果分析	310
3.5.7	经验小结	314
3.6	技术创新	316
3.6.1	概述	316
3.6.2	开挖施工技术创新	318
3.6.3	混凝土施工技术创新	329
3.6.4	新材料应用	354
3.6.5	技术创新小结	362
3.7	施工小结	366
4	运行篇	368
4.1	泄洪洞初期运行情况	368
4.2	安全监测	373
4.2.1	泄洪洞及出口边坡安全监测	373
4.2.2	水力学原型观测	375
4.2.3	中闸室环境量观测	381
4.3	运行中关注问题的探讨	381
4.3.1	进口立轴漩涡	381
4.3.2	闸门和启闭机	385
4.3.3	通气补气的情况	385
4.3.4	掺气坎掺气减蚀效果	385
4.3.5	出口挑坎挑流效果	386
4.3.6	出口挑流消能效果及下游防护	392
4.3.7	雾化范围及强度	393
4.4	运行小结与建议	395
5	结 语	396
	致 谢	398
	参考文献	399

1 综 述

1.1 基本情况

溪洛渡水电站位于四川省雷波县和云南省永善县相接壤的金沙江下游峡谷段,电站总装机容量 13860MW,年发电量 573.5 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。水库正常蓄水位 600.00m,死水位 540.00m,水库总库容 126.7 亿 m^3 ,调节库容 64.6 亿 m^3 ,可进行不完全年调节。枢纽主要建筑物由混凝土双曲拱坝、地下引水发电系统和泄洪建筑物组成。混凝土双曲拱坝坝高 285.50m,引水发电系统采用地下式库区厂房布置,在左、右岸各布置有 9 台 770MW 的发电机组,单机引用流量 $423.8 \text{m}^3/\text{s}$ 。溪洛渡水电站于 2003 年开工,2013 年首台机组发电,2014 年全部机组投产。

溪洛渡水电站泄洪具有窄河谷、高水头、大泄量的特点。工程按千年一遇洪水设计,万年一遇洪水校核,相应洪水流量分别为 $43700 \text{m}^3/\text{s}$ 和 $50900 \text{m}^3/\text{s}$,泄洪总功率近 1 亿 kW ,堪称世界拱坝枢纽之最。电站枢纽位于深山峡谷区,岸坡陡峻、河谷狭窄,枯水期河面宽度仅 100 余 m,泄洪消能难度大。因此枢纽泄洪采取分散泄洪、分区消能,在坝身布置 7 个表孔、8 个深孔,泄洪能力约 $21644 \sim 32278 \text{m}^3/\text{s}$ (设计至校核),还需要左、右岸泄洪洞承担泄洪流量 $15430 \sim 16648 \text{m}^3/\text{s}$ (设计至校核),泄洪洞泄量约占枢纽总泄量的 $1/3$ 。

(1) 泄洪洞总体布置与结构形式

溪洛渡水电站共布置有四条泄洪洞,左、右岸基本对称布置各两条,洞长 $1.5 \sim 1.8 \text{km}$ 。泄洪洞的布置综合考虑了地形地质条件、泄量要求、闸门结构设计、出口消能防冲等要求,采用有压接无压、洞内龙落尾的形式,由上游至下游依次布置有进水塔、有压段、工作闸门室、无压段、龙落尾、明渠段和挑流鼻坎。利用大坝和厂房进水口之间的中等缓坡台地布置泄洪洞进水塔,在平面上利用有压段进行转弯,绕过拱坝坝肩,经工作闸门室后接顺直的无压段;然后结合出口地形条件,采用洞内龙落尾的形式,将 70% 左右的总水头差集中在占全洞长度 25% 的尾部,便于集中处理高速水流问题;最后通过明渠段连接斜切扭曲式的挑流鼻坎,将水舌纵向

拉开,使水流挑射均匀落入河道,水下碰撞消能。

泄洪洞进水塔为深水岸塔式结构,检修闸门口尺寸 $12\text{m} \times 15\text{m}$ (宽 $\times$ 高);有压洞段为衬砌后直径 15m 的圆形断面,末端与地下工作闸门室相接;地下工作闸门室分为上、下两室,上室为控制室,下室设有 $14\text{m} \times 12\text{m}$ (宽 $\times$ 高)的潜孔弧形工作闸门;无压段紧接弧形工作闸门之后,为衬砌后断面尺寸 $14\text{m} \times 19\text{m}$ (宽 $\times$ 高)的城门洞形,底板纵坡 2.3% ;龙落尾段体型复杂,断面尺寸与无压段相同,由奥奇曲线段、斜坡段、反弧段和下直坡段组成(为减免空蚀对衬砌结构的破坏,在奥奇段的起始处设置了与地面相通的补气洞,并根据龙落尾高流速区的长度分别设置了 $3 \sim 4$ 道掺气坎);出口明渠与龙落尾下直坡段顺接,底板纵坡 8% ;末端挑坎高程高于下游水位,采用扭曲斜切挑流鼻坎。

(2) 参建单位

溪洛渡水电站的建设单位为中国长江三峡集团溪洛渡工程建设部,泄洪洞单项工程初期由建设部下设的地下厂房项目部管理,至 2008 年 6 月转为泄洪洞项目部管理。

溪洛渡水电站的设计单位为成都勘测设计研究院有限公司。在可研及设计阶段,还有中国水利水电科学研究院、清华大学、四川大学等多家单位对溪洛渡泄洪洞工程进行了水力学模型试验,为泄洪洞的设计与运行提供了理论技术支持。

泄洪洞工程土建项目的主承建单位:左岸 1#、2#泄洪洞为中国水利水电第七工程局有限公司,右岸 3#、4#泄洪洞为中国人民武装警察部队水电部队;金结安装的主承建单位:左岸 1#、2#泄洪洞为中国葛洲坝集团有限公司,右岸 3#、4#泄洪洞为中国水利水电第十四工程局有限公司。在施工阶段还有湖南中铁五新钢模有限责任公司、广汉金达隧道机械有限公司、湖北高曼重工股份有限公司等专业公司参与了装备研发工作,长江科学院参与了混凝土材料研究。

泄洪洞工程的监理单位:左岸 1#、2#泄洪洞为长江三峡技术经济发展有限公司,右岸 3#、4#泄洪洞为中南勘测设计研究院有限公司。

溪洛渡水电站的运行管理单位为长江电力溪洛渡水力发电厂。

(3) 进度节点与工程量

泄洪洞开挖于 2007 年 3 月开始,2010 年 12 月开挖完成。进口混凝土于 2009 年 7 月开始,2012 年 4 月完成;隧洞混凝土衬砌于 2009 年 10 月开始,2013 年 4 月完成全部混凝土及灌浆施工。闸门及启闭机安装于 2013 年 5 月完成。2013 年 9 月泄洪洞首次过流;2014 年 6 月 30 日完成泄洪洞单位工程验收,并整体移交溪洛渡电厂管理。

左右岸泄洪洞共计完成石方洞(井)挖 197.31万 m^3 ,混凝土衬砌 119.3万 m^3 ,钢筋制安 5.39万 t ,锚杆锚筋 18.98万根 ,喷混凝土 4.17万 m^3 ,橡胶止水 4.69万 m ,铜片止水 1.07万 m ,回填灌浆 11.59万 m^2 ,固结灌浆 8.09万 m ,帷幕灌浆 1.19万 m 。

1.2 主要成果

泄洪洞最大设计流速达 50m/s ，单洞设计流量约 $4000\text{m}^3/\text{s}$ ，总泄量超过 $16000\text{m}^3/\text{s}$ ，最大坡度达 22.46° ，多项指标均居世界前列。其技术要求及建造难度极具挑战性，没有相同的工程经验可供学习照搬，需要技术与管理的创新。通过全体参建单位的努力，泄洪洞工程在建设过程中取得了丰硕的成果。

(1) 设计成果

①采用有压接无压的结构形式，通过有压段实现平面转弯，绕过拱坝坝肩，实现了布置的灵活性。

②在隧洞中部设置液压弧形工作闸门，通过无级开度调节来控制有压段水流流态，避免有压段的明满流过渡，消减轴流漩涡，调度灵活。

③采用龙落尾的结构形式，将高速水流区集中在泄洪洞尾部，以便于集中处理高速水流问题，万一发生气蚀破坏也不至于危及大坝及其他建筑物安全。

④多家科研单位对泄洪洞进行大比例尺的水力学模型试验及深入细致的研究，比选出最优掺气底坎和侧墙掺气体型，掺气减蚀效果良好。

⑤出口采用斜切扭曲挑坎，水舌分布均匀、挑距稳定，不砸本岸、不冲对岸，实现了入水纵向拉开、水下对冲消能。

(2) 施工成果

① 新技术拓展

a. 底板水平光爆：设计了水平光爆造孔设备固定支架，保证水平架钻造孔精度，提高底板开挖平整度，减少超欠挖。泄洪洞底板平均超挖值小于 10cm ，不平整度控制在 8cm 内，半孔率达 94.5% ，大幅减少超挖和混凝土回填，提高施工效率，节约施工成本。

b. 喇叭口双向光爆：开挖体呈倒楔形，且位于高处，需要一次爆破成型，避免多次临时支护和反复搭设排架。通过“水平、倾斜混合造孔，大孔、小孔穿插，双向三面光爆，加设爆破减震空孔”的双向控制爆破技术，实现了一次爆破成型，爆破总体半孔率达 92.5% 以上，开挖面平顺整齐，三面交角部位控制轮廓分明，施工质量优良，大大提高施工效率，同时降低了安全风险。

c. 钢筋拱肋支护：利用钢筋拱肋能贴紧岩面或喷混凝土面的特性，通过拐子筋使之与锚杆焊接，使钢筋拱肋、锚杆、钢筋网及喷混凝土形成整体，与围岩体共同变形承载，提高了支护强度，保证应力复杂及不良地质段的围岩稳定。该方案应用于泄洪洞进出口、51个洞井交叉口及不良地质洞段均未发生塌方或掉块，应用效果良好。

d. 采用布料机入仓，实现全部底板浇筑常态混凝土。

② 装备研发

a. 常态混凝土衬砌台车：设计了“垂直提升、横向输送、多点下料”的混

凝土供料系统,有效解决了常态混凝土的上料、布料问题,成功实现了大断面高边墙隧洞的常态混凝土浇筑,减少使用胶凝材料,有利于温控防裂、提高质量。

b. 斜洞混凝土衬砌台车:在斜洞采用钢模台车衬砌,主要存在两大技术难点,首先是 300t 级的台车在斜坡上的爬升移动问题,其次是 20m 高的钢结构在倾斜面上的安全问题。泄洪洞工程左右岸两个施工团队各自设计了不同的解决方案。左岸采用液压自行式钢模台车,利用两组液压油缸顶推台车行走,同时两组液压油缸互为保险,在一组油缸驱动行走时另一组锁定卡死,保证台车运行安全;右岸采用摩擦式卷扬机双倍率牵引钢模台车,利用卷扬机牵引台车行走,设计了液压夹轨器和防坠器两套保险措施来确保台车运行安全。

c. 悬臂隐轨拖模台车:通过悬臂式设计在传统拖模台车的基础上增设隐轨和抹面平台,解决了有限空间内的拖模轨道问题和已浇面不能承载的问题,取得了良好的施工效果。

d. 过流面处理登高台车:引进用于高空清洁作业的蜘蛛台车,并针对泄洪洞龙落尾段特点进行改进,让台车能在 30°斜坡上自行爬升、自我找平、自助过坎,极大地提高了施工效率。

③ 新材料应用

将硅粉、粉煤灰与低热水泥配合,试验确定了“两低一高”(即低热水泥、低硅粉掺量和高粉煤灰掺量)的配比方案,成功配制出兼顾高强耐磨与和易性的高性能复合混凝土材料,其中 30% 的高粉煤灰掺量已超过规范限值。

④ 工艺改进与工艺标准制定

a. 翻模工艺的改进:设计了双向可调节螺栓代替拉条和混凝土垫块固定模板,既方便又不留孔洞;采用分段围檩,很好地适应了翻模时间,减少翻模时对临近模板的扰动;设置轻型工作平台,方便工人在弧面上进行抹面和搬运。

b. 锚杆注浆工艺的改进:设计了注浆塞来控制注浆管拔管速度,避免人为干扰;采用止浆片避免插杆过程中孔内砂浆大量外溢问题;根据锚杆设计外露长度制作相应长度的套管,插杆快结束时,用套管推入锚杆,保证外露长度符合要求。

c. 对所有的典型施工工艺都制定了工艺标准,实现了从工程产品的标准化到工程生产的标准化。

⑤ 工程质量

泄洪洞工程全面实现了体型精准、平整光滑、耐磨防裂的工程质量目标:泄洪洞龙落尾和明渠挑坎段体型偏差平均值小于 10mm;不平整度以 3m 靠尺检测,有压段和无压段小于 5mm 的点达 96.4%,龙落尾段小于 3mm 的点达 97.8%。从 2007 年至 2013 年溪洛渡水电站样板工程评选活动中,泄洪洞工程共获评样板工程 29 个,推广工程 154 个,精品工程 5 项,约占全工地总数的 1/3。

在三峡集团公司金沙江质量专家组历年的检查评比中,泄洪洞工程年年被评为

优良，这在工程建设过程中是少有的。三峡集团公司质量安全部在参加三峡三期混凝土精品仓质量活动后，到溪洛渡巡查时认为泄洪洞混凝土仓都是精品。

来溪洛渡泄洪洞参观交流的单位和同仁，也都对泄洪洞工程的质量给予了高度评价，认为泄洪洞工程的质量是一次性做好的，是从头到尾的创新，全面拉升了隧洞工程建造水平，“有从第三世界国家到了第一世界国家的感觉”。

三峡集团公司原主要领导视察泄洪洞时也表达过这样的看法：“泄洪洞挖得真好”，“混凝土仓与仓之间看不出接缝”，并总结道：“你们搞了这么多创新，不简单！”这些都从侧面说明了泄洪洞工程卓越的工程质量。

1.3 体会与愿景

泄洪洞工程建设六年来，累计获评省部、行业级科技成果奖6项，获批水利部工法4项，获得发明专利13项。

能够取得这些成果，首先来源于对三峡文化的传承和发扬。求真务实：在认识规律和把握规律的基础上遵循规律、运用规律，务实事、求实效，取得实实在在的业绩；规范有序：规范化地管理与施工，让各项技术创新落到实处，让质量、安全管理执行到位，为生产标准化打下基础；追求卓越：工作中的每一步都高标准严要求，同时对取得的成绩没有故步自封，而是不断总结改进、不断超越自我。

其次来源于共同努力。综合各方意见达成共识，以“工程有亮点、管理有创新、各方有收获”为起点，让建设者们对各自的工作有着强烈的认同感和责任感，形成敢挑重担、勇于开拓的氛围。

第三来源于科学方法。“亲水和气、体型精准、平顺光滑、高强防裂”是高速水流下泄洪洞的核心要求，建设者们围绕着这些核心要求探寻规律、开拓创新，让泄洪洞工程全面达到国内领先、世界一流的水平。

本书将泄洪洞工程分为设计、施工、运行三个部分进行总结。从回顾历程开始，介绍各阶段的基本情况，对工作的主客观条件、有利和不利条件、工作的环境与基础等进行分析；然后梳理各阶段遇到的问题，提出解决方案的思路，比选各种解决方案，并对方案的执行效果进行评价；最后分析提炼各种经验与教训，对后续工程提出一些改进的方向与建议。

本书是对泄洪洞工程的纪实，力图让参建者全面地再认识泄洪洞工程建设的全过程，更好地提升管理水平。同时也为没有类似工程管理经验的青年干部提供参考，使其从中汲取成功的经验和挫折的教训，为未来的工程建设奠定技术基础，并取得更好的业绩。另外，也期望本书能给有类似工程经验的同仁提供一些借鉴，共同推动水工隧洞施工技术水平的整体提升。