

一、项目名称：大型水工建筑物泄洪消能水力安全关键技术研究与应用

二、提名者及提名意见（包含提名等级）：

提名者：中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

提名等级：二等奖

提名意见：由西安理工大学和中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司联合完成的“大型水工建筑物泄洪消能水力安全关键技术与应用”项目，针对大型水工建筑物在高水头大泄量情况下泄洪消能的技术难题，近20年来在国家自然科学基金等纵向科研项目的支持下，紧密结合工程实际，采用数值模拟与物理模型试验相结合的手段，在溢洪道泄流能力提升，高速水流溢流面掺气，大单宽流量、低弗劳德数底流有效消能方面进行了系统的研究。明确了影响琴键堰泄流能力的水力学机制，完善了其堰流理论，并提出了优化的琴键堰体型参数，给出了高精度水力设计公式及琴键堰设计的方法。阐明了高速水流溢流面的掺气机制，开发了局部侧墙掺气和底板下弯式掺气新技术，提出了突扩突跌门座段体型优化有效途径。提出了设置掺气挑坎、掺气分流墩、分流齿墩等多种掺气设施解决方案，阐明了台阶式溢洪道与掺气设施联合应用下的掺气和消能特性。提出了闸室分流、设置侧挑坎和收缩墩等多项整流技术，较成功地解决了大单宽流量、低弗劳德数底下消力池水面波动及消能不充分的问题。

研究提出的关键技术我国黄河上游的许多梯级电站及其他大型点水利水电工程项目中得到了广泛推广与应用，有效的保证的大坝泄洪的水力安全，取得了显著社会效益和经济效益。经严格审查，该项目推荐书中各项材料完整，相关栏目的内容填写符合申报要求，完成人和完成单位资格有效，并经过本单位公示无异议，符合陕西省科学技术奖的推荐要求，特推荐该项目参加2021年度陕西省科学技术二等奖评审。

三、项目简介：

本项目属于水利工程水力学研究领域。近几十年来，随着经济不断发展，对水资源及清洁能源不断提出大量的需求，我国兴建了诸多大型水利水电工程，因此泄洪流量及泄流水头的增大对泄水建筑安全泄洪及消能提出了前所未有的挑战。同时泄水建筑物普遍存在泄洪任务重、泄槽易发生空化空蚀破坏、消力池适应性差、流态不稳定及消能率低等问题直接影响着水工建筑物的安全运行。该项目完成单位结合国家自然科学基金项目、省科技计划项目、自主研究项目以及企业实际工程研究项目，采用理论分析、数值模拟以及模型试验等方法，历经近20年，在溢洪道泄流能力提升，高速水流溢流面掺气，大单宽流量、低弗劳德

数底流有效消能方面进行了系统的研究，并将研究成果多次应用于相关工程领域。本项目取得的主要内容及创新成果如下：

(1) 琴键堰是一种可以极大提高溢洪道泄流能力的新型非线性自由溢流堰，该项目明确了影响琴键堰泄流能力的水力学机制，完善了其堰流理论，并提出了优化的琴键堰体型参数，给出了高精度水力设计公式及琴键堰设计的方法。

(2) 阐明了大型溢洪道/泄洪洞侧墙、小底坡泄槽及泄槽反弧段掺气困难的机理，开发了局部侧墙掺气和底板下弯式掺气新技术，提出了突扩突跌门座段体型优化有效途径，避免了高速水流对溢洪道和泄洪洞的空蚀破坏。

(3) 系统地研究了台阶式溢洪道的水力特性，针对台阶式溢洪道上游端难以掺气的问题，提出了设置掺气挑坎、掺气分流墩、分流齿墩等多种掺气设施解决方案，并研究阐明了台阶式溢洪道与掺气设施联合应用下的掺气和消能特性。

(4) 针对大单宽流量、低弗劳德数底流消能的技术难题，基于跃前水流佛氏数较小、消力池的消能率较低等问题，提出了闸室分流、设置侧挑坎和收缩墩等多项整流技术，成功地解决了消力池水面波动及消能不充分的问题。

该项目研究成果不仅解决了高坝泄水建筑物水力安全关键技术难题，提高了工程经济指标，而且为工程的安全运行和维护提供了系统、可靠的理论基础及科学依据。基于项目研究成果，获得发明专利 1 项、实用新型专利 3 项、著作 1 部，学术论文 50 余篇，其中 SCI/SSCI 收录论文 3 篇（包括领域内国际知名期刊国际水利学会 *Journal of Hydraulic Research* 论文 1 篇和美国土木工程协会 *Journal of Hydraulic Engineering* 论文 1 篇）；国家自然科学基金委管理科学部认定的重要学术期刊论文 10 余篇。相关成果应用于我国积石峡、羊曲、里底、九甸峡、玛尔挡、BAKUN、乌弄龙、白虎滩等多个水电站的规划建设中。

四、客观评价：

(1) 总体科学技术水平。本项目主要由两项国家自然科学基金面上项目、两项省重点实验项目以及相关生产型科研项目组成。具体组成项目如下：

国家自然科学基金面上项目，琴键堰泄流水力特性与体型参数优化研究(51579206)；

国家自然科学基金面上项目，高水头泄洪洞反弧段流场水气两相运动特性研究(50579085)；

陕西省教育厅科技研究计划，弧形闸门突扩突跌段侧墙空化特性的大涡模拟研究(08JK404)；

陕西省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)自主研究项目，弧形闸门突扩突跌段侧墙水力特性的数值模拟研究

(ZZKT-1);

水能资源利用关键技术湖南省重点实验室开放研究基金项目,水平淹没射流泄洪消能的临底流速特性及数值模拟(PKLHD201301)。

(2) 主要技术指标比较。与国内外已有研究成果相比,本项目的创新性在于:

①明确了影响琴键堰泄流能力的水力学机制,完善了其堰流理论,并提出了优化的琴键堰体型参数,给出了高精度水力设计公式及琴键堰设计的方法;②阐明了大型溢洪道/泄洪洞侧墙、小底坡泄槽及泄槽反弧段掺气困难的机理,开发了局部侧墙掺气和底板下弯式掺气新技术,提出了突扩突跌门座段体型优化有效途径;③系统研究了台阶式溢洪道的水力特性,针对台阶式溢洪道上游端难以掺气的问题,提出了设置掺气挑坎、掺气分流墩、分流齿墩等多种掺气设施解决方案,并研究阐明了台阶式溢洪道与掺气设施联合应用下的掺气和消能特性。④提出了闸室分流、侧挑坎技术、设置侧收缩墩等多项整流技术,成功地解决了大单宽流量,低弗劳德数底流消能的技术难题。

(3) 主要知识产权评价。基于项目研究成果,发明专利 1 项、实用新型专利 3 项、著作 1 部、发表学术论文 50 余篇,其中国际知名期刊 SCI/SSCI 收录论文 3 篇;国内重要学术期刊论文 10 余篇。发表论文被各大学术期刊、博硕士论文引用 400 余次。

(4) 人才培养。基于该项目研究,培养出多名优秀硕士研究生和博士研究生,部分博士学位论文和硕士学位论文题目如下:《琴键堰泄流水力特性与体型参数研究》、《泄水建筑物控制转换段水力特性与体型优化研究》、《高水头泄洪洞掺气减蚀设施优化研究》、《台阶式溢洪道强迫掺气水流水力特性的试验研究》等。

(5) 企业评价:

甘肃省水利水电勘测设计研究院:“在本工程的设计阶段,西安理工大学结合相关常压模型及减压模型试验,采用 VOF 多相流三维数值模型,对九甸峡水利枢纽右岸泄洪洞有压出口弧形闸门突扩突跌水流衔接段的水力特性进行了系统研究。针对弧形闸门突扩突跌段存在的流态不稳定、侧墙和底板掺气不足等问题,提出了相应的技术解决方案,确保了枢纽泄水建筑物的安全运行,取得了良好的社会效益及经济效益。”

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司:“在本工程的可研阶段,西安理工大学结合 1:100 几何比尺整体水工模型试验和 Fluent 三维数值模拟软件,对冷达水电站表孔与底孔泄流与底流消能进行了系统研究。针对表孔消力池消能不足且池后水面二次跌落大、底孔消力池入池水流弗劳德数小而未形成典型底流流态,进而导致消能率不足、下游河道冲刷严重等问题,提出了表孔与底孔底流消力池

消能的相关技术解决方案，确保了枢纽泄水建筑物的安全运行，取得了良好的社会及经济效益。”

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司：“在本工程的设计阶段，西安理工大学结合 1:40 几何比尺水工模型试验，对苏洼龙水电站右岸泄洪洞及底流消力池的水力特性与体型进行了研究。针对消力池入池水流弗劳德数偏低，池内形成不稳定水跃，进而引发流态差、消能率低等问题，提出了消力池前设置直墙式收缩墩+跌坎消力池方案。设置收缩墩可以破坏来流与消力池内水流剪切产生的间歇性震荡漩涡，增大消能率，从根本上改善消力池内震荡流态；设置跌坎有效降低了消力池内临底流速和底板冲击压力。提出的技术解决方案，确保了枢纽泄水建筑物的安全运行，取得了良好的社会及经济效益。”

五、应用情况：

该项目以大型水工建筑物工程中存在水力安全关键技术问题为突破点，提出多项解决泄水建筑物泄流能力、掺气减蚀、消能防冲等问题的新技术和有效措施，丰富并完善了相关基础理论与技术方法。项目研究成果已经广泛应用于我国多个水电站的规划建设中，如积石峡、羊曲、里底、玛尔挡、BAKUN、乌龙、白虎滩水库均采用了本研究提出的相关技术，为高坝安全泄洪中存在的问题提供重要的技术支撑，对推进我国水电建设发展，保障泄水建筑物及其他水利枢纽结构安全，促进水利工程整体效益的发挥具有重要的实践价值和指导意义。

六、主要知识产权和标准规范等目录：

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家(地区)	授权号(标准编号)	授权(标准发布日期)日期	证书编号(标准批准发布部门)	权利人(标准起草单位)	发明人(标准起草人)
1	学术论文	The effect of the inlet/outlet width ratio on the discharge of piano key weirs	中国	ISSN:0022-1686	2020年6月6号	Journal of Hydraulic Research	西安理工大学	Guodong Li; Shanshan Li; Yuan Hu
2	发明专利	底板下弯式掺气设施	中国	ZL201210530820.2	2016年5月4号	国家知识产权局	中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司	刘少斌; 卫勇
3	著作	台阶式溢洪道的水力特性	中国	ISBN978-7-03-058	2018年8月	科学出版社	西安理工大学	张志昌; 金瑾

				502-8				
4	学术论文	Physical and Numerical Modeling of the Hydraulic Characteristics of Type-A Piano Key Weirs	中国	ISSN:0733-9429	2020年5月1号	Journal of Hydraulic Engineering	西安理工大学	Shanshan Li; Guodong Li; Duo Jiang
5	学术论文	琴键堰不同溢流前缘泄流特性的数值模拟研究	中国	2015, 34(8): 77-84	2015年5月	水力发电学报	西安理工大学	李国栋, 苗洲, 高蓓, 陈刚
6	学术论文	泄洪洞弧形闸门突扩突跌出口段三维流动的数值模拟	中国	2007, 40(5): 34-38	2007年10月	武汉大学学报(工学版)	西安理工大学	李国栋; 许文海; 邵建斌; 陈刚
7	实用新型专利	一种局部侧扩式掺气设施	中国	ZL201620242449.3	2016年9月14号	国家知识产权局	中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司	刘少斌
8	实用新型专利	一种减小消力池水面波动的闸室分流结构	中国	ZL201520548492.8	2015年12月16号	国家知识产权局	中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司	卫勇; 刘少斌; 陈念水; 李玉杰; 刘菁; 赵莹; 朱展博; 张晓莉; 巨江
9	实用新型专利	一种减小消力池水面波动的侧掺气挑坎	中国	ZL201220205006.9	2012年11月28日	国家知识产权局	中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司	卫勇; 刘少斌; 王康柱; 徐春燕; 刘菁; 益波; 焦娟; 诸亮; 巨江; 张晓莉; 王晓萌
10	学术论文	增设收缩墩后的跌坎消力池三维流场研究	中国	2020, 37(1): 67-72	2020年1月	长江科学院院报	西安理工大学	龙建, 牛争鸣, 李奇龙

七、主要完成人情况：

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
李国栋	1	原副所长	正高	西安理工大学	西安理工大学	对本项四个方面的成果均有不同程度的贡献，主要贡献在大坝泄流能力提升，溢流坝面掺气设施方面。完成国家自然科学基金等纵向项目 4 项。
刘少斌	2	分院副总工	正高	中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司	中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司	主要贡献在溢流坝面掺气设施方面及底流消能方面，完成了多项相关工程的试验研究。专利 4 项
李珊珊	3	无	其他	西安理工大学	西安理工大学	主要贡献在大坝泄流能力提升及，底流消能方面。完成国家自然科学基金 1 项。发表论文 8 篇
张枫	4	副总经理	正高	中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司	中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司	将大型水工建筑物泄洪消能水力安全关键技术的多项技术应用于黄河中上游及其他大江大河的多项水利水电工程
陈刚	5	校长	正高	西安文理学院	西安理工大学	主要贡献在掺气机理方面，完成国家自然科学基金 1 项。
张志昌	6	无	正高	西安理工大学	西安理工大学	主要贡献在台阶式溢洪道水力特性的研究及掺气设施。出版专著一部
卫勇	7	无	正高	中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司	中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司	主要贡献在溢流坝面掺气设施及底流消能方面。完成了多项相关工程的试验研究。专利 4 项
陈暘	8	水电院副院长	正高	中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司	中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司	将大型水工建筑物泄洪消能水力安全关键技术的技术应用于国际水利水电工程
李奇龙	9	无	中级	西安理工大学	西安理工大学	主要贡献在大坝底流消能方面。发表论文 4 篇

八、主要完成单位及创新推广贡献：

完成单位	排名	对本项目科技创新和应用推广情况的贡献
西安理工大学	1	西安理工大学项目组依托多项国家自然科学基金、陕西省教育厅科技研究计划等项目，主要以开展理论研究为主，并结合工程项目进行应用研究，西安理工大学在试验场地，人力物力给与了大力支持，特别是在合作单位中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司设立研究生培养基地及国家重点实验室研究基地，极大的促进了双方的合作交流。
中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司	2	中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司项目组主要结合实际的项目主要进行应用研究，中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司在技术的推广应用方面发挥了主渠道作用

九、完成人合作关系说明：

本项目是西安理工大学水力学研究所从事水工水力学泄洪消能的相关教师、研究生及中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司从事水工建筑物泄洪消能研究及设计管理的相关工程技术人员共同完成的。

中国电建集团西北勘测设计有限公司是西安理工大学水利工程专业学位硕士生联合培养基地，本项目的完成人通过项目合作，联合培养研究生等形式紧密合作，联合完成项目科技攻关。

项目完成人合作关系说明如下：

完成人李国栋教授是西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室工程水力学研究团队负责人，是本项目的第一完成人。与项目完成人刘少斌，李珊珊，陈刚，卫勇，李奇龙，张志昌，陈阳等都有密切的合作，具体见各完成人情况。

完成人刘少斌正高工是中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司工程实验监测院水力学研究所所长，是联合培养基地的企业合作导师。刘少斌长期主要从事泄水建筑泄洪消能体型优化及掺气设施布设的相关研究，是本项目多项专利的主要完成人。刘少斌从在职攻读硕士学位起就在李国栋教授指导下，结合实际工程开展小底坡掺气体型的研究工作，近年来作为企业合作导师，结合项目联合培养专业学位研究生 5 名。

完成人李珊珊是李国栋教授指导的硕士和博士生研究生，是联合培养基地培养的研究生。自攻读硕士学位起就一直从事琴键堰泄流水力特性与体型参数优化

研究及泄水建筑体型优化及低弗劳德数底流消能研究，是国家自然基金的《琴键堰泄流水力特性与体型参数优化研究》的主要完成人。

完成人张枫正高工为中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司项目副总经理。项目期间积极推动将大型水工建筑物泄洪消能水力安全关键技术应用于澜沧江及黄河中上游多项水利水电工程，如积石峡水电站、玛尔挡水电站、乌弄龙水电站、里底水电站等工程的泄洪消能和掺气减蚀研究。

完成人陈刚教授在西安理工大学任职期间，曾担任水力学研究所所长，也是李国栋教授的硕士研究生指导教师，合作完成相关国家自然科学基金等多个项目，合作指导研究生9名。本项目主要进行掺气机理及侧墙掺气设施的研究。

完成人张志昌教授是西安理工大学水力学实验负责人，与李国栋教授又长期合作关系，包括项目合作，研究生相互指导，本项目中主要完成台阶式溢洪道水力特性及其掺气设施的研究。

完成人卫勇正高工为中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司工程检测研究分院水力学研究所主要技术负责人之一，主要从事大型水工建筑物掺气消能关键技术研究，是本项目多项专利的主要完成人。卫勇也是西安理工大学水力学所企业合作导师，相关研究联合培养研究生2名。

完成人陈暘高工为中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司水电院副院长，将大型水工建筑物泄洪消能水力安全关键技术应用于BAKUN水电站等工程的掺气减蚀研究，参与项目研发的方案策划，对项目研究提出建设性思路，对本项目所取得的研究成果的技术创新及推广应用出了重要贡献。

完成人李奇龙是西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室工程水力学研究团队核心研究成员，西安理工大学水力学及河流动力学专业毕业的硕士和博士生，主要从事低弗劳德数底流消能研究，与李国栋、李珊珊等在冷达水电站、苏洼龙水电站等项目中进行合作。