

一、项目名称

单机 400MW 级抽水蓄能电站工程关键技术

二、推荐意见

本项目依托国家重点建设工程项目—浙江仙居抽水蓄能电站工程建设，针对单机 400MW 级抽水蓄能电站工程建设中的电站动能条件与机组参数适应性、机组稳定性设计、机组和厂房振动控制、施工检修等关键技术难题开展研究，提出了高水头、大容量抽水蓄能电站多参数关联优选方法，建立了抽水蓄能电站额定水头和水头变幅的分水头段精细化取值通用标准；揭示出 400MW 级蓄能机组抽水和发电相反方向稳定性相互影响与制约的机理，提出了机组抽水和发电双向稳定性裕度控制技术；提出机组过渡过程结构非稳态动力响应全过程分析技术和一种抽水蓄能机组全频段监测方法，创新结构振动评价体系；提出大型抽水蓄能机组施工检修新技术。本项目成功实现了国内单机容量最大的抽水蓄能机组的工程应用。

研究成果在后续多个工程获得应用，使得我国抽水蓄能电站的单机容量从 300MW 级跨越到 400MW 级，取得了显著的社会、环境和经济效益，推动了抽水蓄能行业科技进步。

推荐该项目为浙江省科学技术进步奖一等奖。

三、项目简介

抽水蓄能电站属于大规模的储能装置，是世界公认的运行灵活、经济环保的调峰电源，目前在国内外已经获得了广泛的应用。为了提高抽水蓄能电站的经济性，目前抽水蓄能电站正向着高水头、高转速、大容量化方向发展。

近年来，随着浙江省经济社会的发展，对能源资源的需求日益扩大，核电和新能源的建设使得系统调峰问题更加突出。

我国水电发展“十三五”规划提出：加快抽水蓄能电站建设，全面实现高性能大容量水电机组和高水头大容量抽水蓄能机组成套设备设计和制造的自主化。“中国制造 2025”战略提出：力争用十年时间，迈入制造强国行列。

因此，亟需进一步提升抽水蓄能电站设计、工程建设和运维管理能力，解决浙江省调峰问题，落实水电发展“十三五”规划，助力“中国制造 2025”战略。

在推进高水头、高转速、大容量抽水蓄能电站建设的过程中，遇到了下述难题：电站动能条件与机组适应性难以协调，引起机组参数确定困难；机组双向稳定性裕设计难度大，给电站安全运行带来隐患；国内外部分抽水蓄能电站因厂房振动过大导致板梁柱结构开裂，严重影响设备和厂房结构安全，以及运行人员的身心健康；对于高水头、高转速、大容量抽水蓄能电站而言，机组和厂房振动问题更加突出。因此，项目组设立“单机 400MW 级抽水蓄能电站工程关键技术”研究课题，在工程设计过程中，联合用户、项目建设单位、设备制造龙头企业、科学研究机构，采取“产-学-研-用”的方式，对高水头、高转速、大容量抽水蓄能电站参数设计关键技术、机组和厂房振动控制关键技术等进行研究，

并取得突破，项目研究取得专利 10 项（包括发明专利 6 项），论文 18 篇，论著 1 项，使得我国抽水蓄能电站的单机容量从 300MW 级跨越到 400MW 级，实现了国内单机容量最大的抽水蓄能电站的建成和 400MW 级自主化抽蓄机组的首次工程应用，推动了我国抽水蓄能技术的科技进步。

本项目的研究成果已经运用在浙江长龙山、浙江宁海等多个抽蓄电站中，共 32 台机组，装机容量 1310 万千瓦。社会和经济效益显著。

四、主要科技创新

（一）主要创新点

1、针对高水头、大容量抽水蓄能电站动能条件与机组适应性差的难题，提出了抽水蓄能电站多参数关联优选方法，建立了抽水蓄能电站额定水头和水头变幅的分水头段精细化取值通用标准，攻克了高水头、大容量抽水蓄能电站水库水位变幅和扬程水头变幅引起的与大容量机组水力性能相互适应的难关，为 400MW 机组的自主化研制及其首次工程应用提供了技术支撑。

针对单机 400MW 级抽水蓄能电站单机容量大、水头高、水库水位变幅大引起的机组水力研发困难和运行性能差的问题，提出抽水蓄能电站多参数关联优选技术，揭示了水头变幅、额定水头、水泵最大入力等多参数与机组性能相互影响、相互适应的规律，建立了抽水蓄能电站额定水头和水头变幅的分水头段精细化取值通用标准，通过合理确定技术参数，解决了高水头、大容量抽水蓄能电站水库水位变幅和扬程水头变幅引起的与大容量机组水力性能相互适应的难题，使得水泵水轮机加权平均效率水轮机工况达到 90.98%，水泵工况达到 93.48%；为电站建设和自主化 400MW 级抽水蓄能机组的研制提供了技术支撑，为 400MW 级机组国产化的顺利实施奠定了基础。电站综合效率达 81.84%，国际领先。

2、揭示了 400MW 级蓄能机组抽水和发电相反方向稳定性相互影响与制约的机理，提出机组抽水和发电双向稳定性裕度控制技术，攻克了高水头、大容量抽水蓄能机组运行稳定性难题，实现了单机 400MW 级抽水蓄能电站的安全、稳定运行。

针对高水头、大容量抽水蓄能电站机组稳定性设计标准缺失、易造成运行不稳定的现状，通过电站输水道系统水力特性与机组水力特性联合仿真研究，揭示了水轮机运行方向和水泵运行方向稳定性相互影响的机理，提出抽水蓄能机组双向稳定性裕度控制技术，为机组水力设计提供支撑，解决了高水头、大容量抽水蓄能电站机组空载并网困难、高扬程水泵工况启动成功率低的问题，无叶区压力脉动幅值水轮机工况降低到 7.1%，水泵工况降低到 3.6%。

3、提出了机组过渡过程结构非稳态动力响应全过程分析技术，实现了非稳态工况机组和厂房振动特性分析；提出一种抽水蓄能机组全频段监测方法，实现了机组运行和结构振动状态的全过程实时监测；创新结构振动评价体系，实现了分部位、分时间、多参数的抽水蓄能机组和厂房振动控制，解决了电站人、机、物和谐共处难题。

（1）**机组过渡过程结构非稳态全过程分析技术：**提出了对机组过渡过程结构非稳态动力响应的

全过程分析技术，实现了非稳态工况机组和厂房振动特性分析，更全面、更准确地掌握非稳态过渡过程中机组对厂房结构的影响。

(2) **抽水蓄能机组和厂房振动全频段监测：**研究出一种抽水蓄能机组全频段运行状态监测方法及监测系统，实现了准确全面地监测抽水蓄能机组的运行状态，同时解决了现有振动监测方法对机组发生故障判断滞缓的问题。

(3) **分部位、分时间、多参数的抽水蓄能机组和厂房振动评价体系：**通过对机组振动源与结构承载能力、设备安全、人体舒适度相互关系的研究，首次提出了分部位、分时间、多标准的振动评价方法和评价标准，以及机组压力脉动评价标准，进一步促进了抽水蓄能电站机组和厂房振动控制技术的系统性构建，解决了人员、设备和建筑物和谐共处难题，“环境友好，和谐发展”。

4、提出大型抽水蓄能机组施工、检修新技术，提高了工程质量，节约了安装检修工期，为单机 400MW 级抽水蓄能电站的安全、稳定运行打下坚实的基础。

提出大型抽水蓄能机组施工方法和中拆检修方法，节约机电安装工期 30 天、机组检修工期 20 天，确保了机组安装质量，为单机 400MW 级抽水蓄能电站的安全、稳定运行打下基础。

五、第三方评价

(一) 科技鉴定意见

由中国水力发电工程学会在杭州组织鉴定（中国水电学会鉴字[2018]第 1242 号）。鉴定委员会专家一致认为，“该项目成果总体达到国际领先水平。”。

(二) 本项目查新结论

1) 本项目查新结论（编号：201833B2114779）：

经比较分析，委托单位采用高水头、大容量抽水蓄能机组多参数关联优选技术和双向稳定性裕度控制方法；采用一种抽水蓄能机组振动全频段监测方法及监测系统。上述技术特点在所检的国内外相关文献中未见具体述及。

六、推广应用情况和社会效益

(一) 推广应用

本项目技术成果首先在仙居抽水蓄能电站得到应用，该工程本电站 2016 年 5 月 31 日首台机组投入商业运行，2016 年 12 月 17 日 4 台机组全部投入商业运行，截至 2018 年 11 月 30 日，仙居电站四台机组发电工况累计运行 10862.61 小时，启动 3855 次，启动成功率 99.79%；抽水工况累计运行 12885.12 小时，启动 2814 次，启动成功率 99.61%。电站综合效率达到 81.84%，主机及辅助控制设备运行稳定，各项性能指标优秀。

另外，本项目研究成果已经运用或即将应用在吉林敦化、浙江长龙山、河北丰宁、广东深圳等多个抽蓄电站中，共 32 台机组，装机容量 1310 万千瓦，奠定了中国抽水蓄能技术进一步发展的基础。

根据我国抽水蓄能电站建设规划，在“十三五”期间将新增开工规模 6000 万千瓦，到 2025 年，我

国抽水蓄能装机容量将达到 9000 万千瓦，目前已建 2670MW，将新增约 6330MW，其中包括已经核准的广东阳江（4×400MW）、福建厦门（4×350MW）、浙江宁海（4×350MW）、河南洛宁（4×350MW）等电站，电站单机容量将向 350~400MW 级发展，因此本 400MW 级自主化抽水蓄能机组电站工程关键技术有着广阔的市场空间。

（二）社会效益和经济效益

本项目在 400MW 级抽水蓄能机组电站多参数关联优选、机组稳定性裕度设计、机组和厂房振动控制、安装检修新技术等方面实现了突破，掌握了一批具有自主知识产权的抽水蓄能电站工程关键技术，成功实现了国内首台套单机容量最大的 400MW 级自主化抽水蓄能机组的工程应用，确立了我国在抽水蓄能领域的国际先进地位。研究成果在后续多个工程获得应用，使得我国抽水蓄能电站的单机容量从 300MW 级跨越到 400MW 级，推动了科技进步。

项目研究成果能够更好地服务于能源结构调整和智能电网建设大局，有效保障全球最大电网的安全稳定运行，推进“全球能源互联网”建设。提升了抽水蓄能电站设计、设备制造、建设国际竞争力，掌握抽水蓄能核心技术，解决浙江省调峰问题，落实国家“十三五”水电发展规划，助力“中国制造 2025”和“一带一路”战略落地。取得了显著的社会、环境和经济效益。

仙居抽水蓄能电站投产运行后，每年可为浙江电网节约标煤约 15 万吨，减少二氧化碳排放量 30 万吨，相当于 5 万辆轿车全年的尾气排放总量。应用本项目技术的抽水蓄能电站全部建成后，每年将减少二氧化碳排放 260 万吨以上。社会效益显著。

七、主要完成人员情况

序号	姓名	性别	出生年月	技术职称	文化程度	工作单位	对成果创造性贡献
1	侯 靖	男	1972.02	教高	硕士研究生	中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司	对创新点二、三、四做出贡献。
2	胡万飞	男	1963.11	教高	本科	中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司	对创新点一、二做出贡献。
3	陈顺义	男	1964.04	教高	本科	中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司	对创新点一、二做出贡献。
4	姜成海	男	1962.06	教高	本科	浙江仙居抽水蓄能有限公司	对创新点四做出贡献。
5	丁 光	男	1974.10	高工	本科	浙江仙居抽水蓄能有限公司	对创新点三、四做出贡献。
6	李成军	男	1980.10	教高	本科	中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司	对创新点一、二做出贡献。
7	杨经卿	男	1982.06	高工	本科	中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司	对创新点三做出贡献。
8	佟德利	男	1970.01	高工	本科	国网新源控股有限公司	对创新点三做出贡献。
9	潘罗平	男	1969.05	教高	博士研究生	中国水利水电科学研究院	对创新点三做出贡献。
10	倪晋兵	男	1972.12	教高	本科	浙江仙居抽水蓄能有限公司	对创新点三做出贡献。
11	胡清娟	女	1968.03	高工	硕士研究生	国网新源控股有限公司	对创新点三、四做出贡献。
12	郑齐峰	男	1965.09	教高	本科	中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司	对创新点三做出贡献。
13	魏春雷	男	1981.03	高工	本科	国网新源控股有限公司	对创新点四做出贡献。

八、完成人合作关系说明

项目名称	单机 400MW 级抽水蓄能电站工程关键技术
第一完成单位	中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司
合作单位（一）	浙江仙居抽水蓄能有限公司
合作单位（二）	国网新能源控股有限公司
合作单位（三）	中国水利水电科学研究院
合作方式	合作承担项目

包含：合作时间，合作内容，完成方式

1、中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司是项目的牵头单位，与合作单位联合开展科技攻关，合作完成了课题的主要研究工作，针对单机 400MW 级抽水蓄能电站工程建设中的电站动能条件与机组参数适应性、机组稳定性设计、机组和厂房振动控制等关键技术难题开展研究，形成了相应的研究成果，并应用在相应工程中。实现了国内单机容量最大的抽水蓄能电站的建成和 400MW 级自主化抽蓄机组的首次工程应用。项目总负责人为胡万飞，侯靖、陈顺义为总体技术负责，李成军、杨经卿、郑齐峰为各研究领域专业主要负责人，主要负责单机 400MW 级抽水蓄能电站工程设计关键技术研发和浙江仙居抽水蓄能电站的设计工作。合作进行创新点一、二、三、四的研发。

2、浙江仙居抽水蓄能有限公司是本项目中浙江仙居抽水蓄能电站（中国单机容量最大的抽水蓄能电站和首个单机 400MW 抽蓄电站）的建设单位，项目负责人为姜成海，专业负责人为丁光、倪晋兵。合作进行创新点三、四的研发。

3、国网新能源控股有限公司是本项目建设管理单位，项目负责人为佟德利，专业负责人为胡清娟、魏春雷。合作进行创新点三、四的研发。

4、中国水利水电科学研究院为本项目机组和厂房振动控制研究的主要参与单位，项目负责人为潘罗平。合作进行创新点三的研发。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者	合作时间	合作成果	备注
1	共同知识产权	姜成海、佟德利、胡清娟、丁光、潘罗平、杨经卿	2015-2016	一种抽水蓄能机组振动监测系统	
2	论文合著	陈顺义、胡万飞、丁光、李成军	2015-2016	浙江仙居抽蓄电站水泵水轮机特征参数优化	
3	论文合著	陈顺义、李成军	2010-2011	水泵水轮机稳定性预判和对策	
4	论文合著	郑齐峰、李成军、杨经卿	2015-2016	仙居抽水蓄能电站重大设计变更及设计优化	
5	论文合著	郑齐峰、杨经卿	2015-2016	仙居抽水蓄能电站厂房动力特性分析	
6	论文合著	丁光、潘罗平	2015-2016	抽水蓄能机组过渡过程振动特性研究	
7	专著合著	胡万飞	2016-2017	国网新源控股有限公司抽水蓄能电站工程通用设计丛书 工艺设计分册	

九、主要完成单位情况

单位名称	中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司
排 名	1
对本项目科技创新和推广应用支撑作用情况（限 300 字）	
<p>本项目牵头单位，全面主持了“单机 400MW 级抽水蓄能电站工程关键技术”课题研究，对创新点一、二、三、四做出重要贡献和支撑；为项目成果专利、论文等的主要完成人所在单位，浙江仙居抽水蓄能电站设计承担单位。主要负责本项目的总体统筹，各分项研究内容的具体实施，成果总结及工程推广应用。</p>	

单位名称	浙江仙居抽水蓄能有限公司
排 名	2
对本项目科技创新和推广应用支撑作用情况（限 300 字）	
<p>项目建设单位，对创新点三、四做出重要贡献，对创新点一、二提供重要支撑；将本课题成果技术推广应用到浙江仙居抽水蓄能电站项目，建成有中国单机容量最大的抽水蓄能电站和首个400MW级单机抽水蓄能电站。</p>	

单位名称	国网新源控股有限公司
排 名	3
对本项目科技创新和推广应用支撑作用情况（限 300 字）	
<p>项目建设管理单位，对创新点三、四做出重要贡献，对创新点一、二提供重要支撑；将本课题成果技术推广应用到福建厦门（4×350MW）、浙江宁海（4×350MW）等项目，推动了中国抽水蓄能行业的发展。</p>	

单位名称	中国水利水电科学研究院
排 名	4
对本项目科技创新和推广应用支撑作用情况（限 300 字）	
<p>项目建设单位,对创新点三做出重要贡献;为本项目机组和厂房振动控制研究的主要参与单位,主要进行了抽水蓄能电站的振动测试和分析。</p>	

十、主要专利和论文

(一) 专利

序号	授权（申请）项目名称	作者	知识产权类别	国别	授权号
1	围岩松弛深度测试方法	房敦敏、陈晓江、侯靖 吴旭敏	发明	中国	ZL 2010 1 0586030.7
2	一种避免钢衬开孔的灌浆方法	房敏敏、吴旭敏、侯靖	发明	中国	ZL 2010 1 0584571.6
3	一种地下厂房各洞室的连接结构及其施工方法	鲍利发、戚海峰、吴喜艳、王慧锋	发明	中国	ZL 2008 1 0059698.9
4	大型抽水蓄能机组中拆检修方法	丁光、戴然、张芳	发明	中国	ZL 2016 1 0058582.8
5	抽水蓄能电站机组施工方法及临时支撑结构	罗成宗、孙领、何铮、赵志文、赵宏图、郭晓静、张飞、龙长波	发明	中国	ZL 2015 1 0272500.5
6	一种抽水蓄能机组振动监测系统	丁光、黄悦照、王洪玉、姜成海、罗成宗、佟德利、胡清娟、潘罗平、安学利、郭曦龙、郑云峰、杨经卿、刘建峰	实用新型	中国	ZL 2017 2 0507579.X
7	埋藏式 780MPa 级压力钢管凑合节安装方法	刘启明、杜天棕、何少云、曹玺、丁光、王海涛、谷守新	发明	中国	ZL 2015 1 10155041
8	一种全圆导叶止推压板	丁光、戴然、焦钢毅	实用新型	中国	ZL 2016 2 0083821.0
9	一种推力瓦和托瓦拆卸装置	曹军、郑小康、靳永卫、黄智欣、刘小松、何伟	实用新型	中国	ZL 2014 2 0457028.3
10	机组渗漏水水质在线监测及处理系统	方杰、周杰、李胜兵、丁丽香、李成军、邱绍平、方晓红、袁静、郑应霞	实用新型	中国	ZL 2015 2 0165000.7

(二) 论文

序号	论文题目	作者	发表期刊	发表时间
1	水泵水轮机稳定性预判和对策	陈顺义、李成军 周杰、沈剑初、邱绍平、郑应霞	水力发电	2011

2	400MW 级大型抽水蓄能机组控制流程与控制策略研究	郑波、何铮、李成军、丁光	水力发电	2017
3	浙江仙居抽蓄电站水泵水轮机特征参数优化	李成军、周杰、陈顺义、胡万飞、罗成宗、丁光、赵志文	抽水蓄能电站工程建设文集 2016	2016
4	仙居抽水蓄能电站枢纽总布置介绍	郑齐峰、李成军、吴森华、王东锋、杨经卿	抽水蓄能电站工程建设文集 2016	2016
5	仙居抽水蓄能电站重大设计变更及设计优化	郑齐峰、李成军、王东锋、杨经卿、吴森华、汪静文	抽水蓄能电站工程建设文集 2016	2016
6	仙居抽水蓄能电站压水排气系统 CFD 分析	舒峻峰、周杰、李成军、赵志文	抽水蓄能电站工程建设文集 2016	2016
7	仙居抽水蓄能电站厂房动力特性分析	刘建峰、郑齐峰、杨经卿	抽水蓄能电站工程建设文集 2016	2016
8	抽水蓄能机组过渡过程振动特性研究	罗成宗、丁光、潘罗平、郭曦龙、刘永强、安学利	大电机技术	2017
9	抽水蓄能机组水轮机工况启动时机组及厂房振动时频分析	丁光、安学利、王开、潘罗平、郭曦龙、刘永强	中国水利水电科学研究院学报	2017
10	抽蓄电站国产 800MPa 级钢岔管模型试验研究	陈丽芬、孟江波、王东锋	水电站压力管道第八届压力管道学术会议论文集	2014
11	仙居抽水蓄能电站引水隧洞钢衬设计	王东锋、陈丽芬	水电站压力管道第八届压力管道学术会议论文集	2014
12	抽水蓄能电站地下厂房内部布置标准化研究及应用	胡万飞、姜忠见	抽水蓄能电站工程建设文集 2010	2010
13	抽水蓄能电站发电电动机的主力机型	赵政	抽水蓄能电站工程建设文集 2015	2015

14	抽水蓄能电站发电电动机的过渡过程	赵政	中国水力发电工程学会电气专业委员会电气学术交流会议文集 2013 年	2013
15	水轮机模型开发技术条件编制要点	陈顺义、邱绍平、方杰	第十九次中国水电设备学术研讨会论文集	2016
16	抽水蓄能电站推力轴承安装调试中几项关键技术的应用	葛军强、佟德利、熊涛	水电与抽水蓄能	2018
17	混流式可逆式水泵水轮机“S”形特性研究	李金伟、陈柳、于纪幸、胡清娟	水电站机电技术	2015
18	抽水蓄能电站下库进/出水口水力特性	姜成海、曹玺、何少云	水利水运工程学报	2013

(三) 论著

序号	题目	出版社	出版时间
1	《国网新能源控股有限公司抽水蓄能电站工程通用设计丛书 工艺设计分册》	中国水利水电出版社	2017