## 重庆市科学技术奖提名公示内容

（2019年度）

**一、推荐类别：**科技进步奖

**二、项目名称：**

大型贯流式水轮发电机阻尼系统故障抑制关键技术及其应用

**三、推荐单位（专家）及提名意见:**

我单位严格按照《重庆市科学技术奖励办法》及其实施细则的有关规定和重庆市科学技术奖励办公室对提名工作的具体要求，对提名书内容和全部附件材料进行了严格审查，确认该项目符合《重庆市科学技术奖励办法实施细则》规定的提名资格条件，提名材料全部内容属实，且未发现任何违反《中华人民共和国保守国家秘密法》和《科学技术保密规定》等相关法律法规及侵害他人知识产权的情形，如被提名成果发生争议，将积极配合工作，协助调查处理。

我单位承诺将严格按照重庆市科学技术奖励办公室的有关规定和要求，认真履行作为提名单位的义务并承担相呼的责任。

提名该项目为重庆市科技进步奖 二 等奖。

推荐单位：重庆市教育委员会

**四、项目简介**：

我国水电资源及其丰富，水电建设取得了举世瞩目成就，创造了多项世界之最。水轮发电机是开发利用水电资源的关键电力设备，与传统的混流式、轴流式水轮发电机相比，贯流式水轮发电机是一种开发利用低水头、大流量水电资源的优良机型，可节省土建费20-30%、增加年发电量3-5%。然而，由于该种发电机受制于流道和灯泡体水力性能的限制，其气隙和转子直径明显小于常规发电机，从而导致其内部空间狭小细长、设计制造难度陡增，稍有不慎，将因过热而引发阻尼系统严重故障，包括阻尼条融断、磁极表面烧蚀等。近年来日本日立、奥地利伊林、瑞士ABB等国内外大型知名企业制造的多台大型贯流式水轮发电机，由于考虑不周、设计不当，阻尼系统频发故障，造成了巨大的经济损失，严重影响了厂家声誉，其主要原因是在发电机分析、阻尼系统设计、故障监测等方面，均存在难以攻克的技术瓶颈。

本项目在国家自然科学基金、教育部春晖计划、四川省重点研发计划等支持下，产学研用联合攻关，历经十余年，取得了如下创新成果：① 针对大型水轮发电机发热严重、精确计算极难的问题，创建了“机-电-磁-热”多物理现象耦合模型及其有限元算法，攻克了三维多物理场深度耦合求解的难题，计算误差和计算时间分别比国际同类算法降低了48%和15倍；② 发明了一种有效削弱齿谐波的不对称磁极，提出了一套抑制阻尼系统故障的电磁结构与材料参数优化新技术，使转子磁极表面损耗与温升分别降低了56%和58%，对抑制故障起到了根治作用；③ 采用红外和无线传感技术，发明了大型水轮发电机转子磁极过热故障智能监测新方法，攻克了旋转磁极非接触式可靠监测的技术难题，实现了大型水轮发电机通风、发热综合监测的突破。

本项目获发明专利授权3项、发明专利公开2项、实用新型专利授权5项、外观设计专利授权1项、计算机软件著作权1项，发表论文38篇（其中SCI/EI收录8/21篇）。关键技术作为“一带一路”国家重点工程，首次跻身南美市场，成功应用于巴西杰瑞水电站22台75MW世界最大容量贯流式水轮发电机，以及桑河二级水电站8台50MW柬埔寨最大容量贯流式水轮发电机、四川沙坪二级水电站6台58MW国内最大容量贯流式水轮发电机与重庆、四川、云南、西藏、广西、江西、陕西、吉林等25个大型水电项目109台机组，近3年为发供电企业新增收入、利润、税收分别29.5亿元、3.3亿元、7亿元。本项目的核心技术，占领了相关领域的国际制高点，保证了大型贯流式水轮发电机的安全可靠运行，并对其推广应用起到了示范辐射作用。

表1 本项目技术与国内外同类技术的比较

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 关键技术 | 序号 | 本项目技术 | | 国内外  相关技术 | 本项目  水平 |
| 多场耦合  模型及其  有限元  算法 | 1 | “机-电-磁-热”  多场耦合分析 | 深度耦合 | 无耦合  弱耦合 | 国际领先 |
| 2 | 磁极损耗发热  分析平均误差 | ≤3.8% | ≤8% | 国际领先 |
| 3 | 3D耦合场计算时间\* | ≤8小时 | ≤120小时 | 国际领先 |
| 先进设计  制造技术 | 4 | 揭示故障发生机理 | 首创 | 无 | 国际领先 |
| 5 | “结构→材料→制造→性能→行为”设计理念 | 拓展 | 综合性  不够强 | 国际先进 |
| 6 | 电磁结构与  材料参数优化技术 | 拓展 | 综合性  不够强 | 国际先进 |
| 7 | 不对称特殊磁极结构 | 国内首创 | 国外有  但保密 | 国际先进 |
| 通风发热  智能监测与在线  诊断系统 | 8 | 通风冷却测试系统 | 国内首创 | 国内未见 | 国内领先 |
| 9 | 风压采集专用密封接头的加工方法 | 气密好  加工易 | 气密差  加工难 | 国内领先 |
| 10 | 磁极表面无接触式  发热监测 | 国内首创 | 无 | 国内领先 |

\*说明：用于测试运算速度的计算机CPU主频为4GHz、内存为128G。

**五、客观评价：**

**1. 项目典型产品验收评价**

巴西可持续能源开发公司对应用本项目的杰瑞电站第49号发电机评价：东方电机有限公司供货的49号机发电机的性能试验（量热法试验）试验报告，报告唯一编号1150-JI4-RC-C2E/GE-90049，由SINKRO工程技术公司编写，满足IEC60034及合同规定的相关要求。（附件2.7）

**2. 著名机构与专家对本项目的评价**

教育部科技查新工作站L02对本项目的三个创新点（查新点）给出的结论：未见其他机构及个人所发表的论文及专利有相同内容报道，具有新颖性。（附件2.1）

中国人民解放军军事科学院系统工程研究院副院长、全军优秀教师、国家科技进步二等奖以及全军重大科技成果奖和全军科技进步一等奖获得者、国家新世纪百千万工程人才、重庆市首批科技领军人才、中国工程院提名候选人王维俊教授对本项目的评价意见：通过该项目的研究，获得了一批专利成果并发表了一系列的高水平学术论文，其关键技术已成功推广应用于包括南美洲在内的国内外20余个水电站100余台大型贯流式水轮发电机中，获得了良好的经济效益，对推动我国“一带一路”和“中国制造2025”战略具有重要的政治意义和巨大的社会效益。（附件2.3）

**3. 代表性论文评价**

2019年QS世界大学综合排名第42位的悉尼大学电气与信息工程学院院长、全球著名电机专家Jianguo Zhu教授对论文5.2.1-5.2.2的评价意见：这两篇论文均发表在高影响因子的IEEE学术期刊上，就材料特性、结构和尺寸对水轮发电机性能与优化设计开展了全新的系统研究，其研究工作对改进大型贯流式水轮发电机的设计标准、增强其运行稳定性，具有极大帮助；其研究成果为优化空载电压波形、显著降低阻尼条损耗和发热提供了有效指南，并为贯流式水轮发电机的优化设计和制造提供了综合、准确、有效的参考。（附件2.4）

IEEE高级会员、西安市机械学会智能制造分会秘书长、西安交通大学电机教研室主任王曙鸿教授对论文5.2.3的评价意见：论文具有国际先进水平，针对大型水轮发电机空载电压波形优化的问题，并不采用斜极、斜槽、加大气隙等常规的削弱齿谐波方法，而是在国内外率先提出了一种采用不对称磁极冲片的全新方法，并通过运动电磁场场路耦合时步有限元模型计算以及真机实验数据的验证，分析论证了“偏移极靴与阻尼绕组中心线结构”这种不对称磁极结构对改善空载电压波形的明显效果，且该方法具有制造工艺简单、现场安装调整周期短、成本低、适用性强强等突出优点。其研究成果对优化大型水轮发电机空载电压波形与并网电能质量，具有十分重要的指导意义。（附件2.5）

IEEE高级会员、西安市机械学会智能制造分会秘书长、西安交通大学电机教研室主任王曙鸿教授对论文5.2.4的评价意见：论文具有国际先进水平，阐述了电机温度场的准确分析与计算，需要准确知道其损耗和热源。在现有文献中，绝大多数情况都是直接告诉热源、或者通过某一种“路”或“场”的模型先计算出电机的损耗。该文在国内外率先分析、对比、讨论了不同的电磁场及损耗计算有限元模型对于大型水轮发电机转子温度场计算结果的影响，进而通过真机实验数据进行了验证。其研究成果阐明了精确分析计算发电机损耗的重要性，对提升大型水轮发电机损耗发热分析计算与设计制造水平，具有重要的理论指导意义与模型参考价值。（附件2.6）

**4. 本项目技术的用户评价**

重庆安居水电站：在技术改造中采用了“大型贯流式水轮发电机阻尼系统断条故障抑制机理及设计关键技术”，实施后于2007年4月到2008年8月2台机组全部投运发电，发电机运行工况良好，经现场检测，各项技术指标达到技术合同及国家标准要求。（附件3.2）

四川紫兰坝水电开发有限公司：在设计中采用了“大型贯流式水轮发电机阻尼系统断条故障抑制机理及设计关键技术”，2006年7月31日，第一台机组正式投运发电，到2007年5月13日为止，全部三台机组已投运发电。发电机在运行过程中，工况良好，能够实现额定功率满发及进相运行。经现场检测，发电机各项技术指标达到合同及国家标准要求。（附件3.3）

四川港航嘉陵江金沙航电开发有限公司：在设计中采用了“大型贯流式水轮发电机阻尼系统断条故障抑制机理及设计关键技术”，到2006年7月6日为止，全部3台40MW机组已投运发电，经现场检测，发电机各项技术指标达到合同及国家标准要求，对此我们感到满意。（附件3.4）

四川汶川塘房水电责任有限公司：2012年1月-2017年1月之间，在水轮发电机运维检修工作中，参考、应用了“大型贯流式水轮发电机阻尼系统断条故障抑制机理及设计关键技术”成果，未发生阻尼系统断条故障与磁极铁心表面过热烧蚀故障，有效避免了此类故障带来的故障维修经济损失与发电量减少所致经济损失。（附件3.5）

四川嘉陵江桐子壕航电开发公司：在设计制造与运维检修中，应用了“大型贯流式水轮发电机阻尼系统断条故障抑制机理及设计关键技术”成果，2006年至今，从未发生此类事故，一直安全运行。（附件3.6）

四川电力职业技术学院青峰岭教学电厂：2007年7月至2015年1月之间，基于“大型贯流式水轮发电机阻尼系统断条故障抑制机理及设计关键技术”成果，对我厂水轮发电机组运维检修，提出了一系列合理化建议，并提供了较好的技术支持，有效避免了阻尼系统断条与极靴表面过热烧蚀故障。（附件3.7）

**六、应用情况**

1. 本项目技术在大型贯流式水轮发电机中的推广应用总体情况

| 序号 | 国家  /地区 | 电站名 | 发电机  台数 | 单机容  量/MW | 装机总容  量/MW | 首台发电机  投运年份 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 巴西 | 杰瑞 | 22 | 75 | 1650 | 2013 |
| 2 | 柬埔寨 | 桑河 | 8 | 50 | 400 | 2017 |
| 3 | 越南 | 成山 | 3 | 10 | 30 | 在建 |
| 4 | 四川 | 沙坪二级 | 6 | 58 | 348 | 2017 |
| 5 | 广西 | 桥巩 | 4 | 57 | 228 | 2008 |
| 6 | 四川 | 犍为 | 2 | 55.6 | 111.2 | 在建 |
| 7 | 陕西 | 蜀河 | 4 | 46 | 184 | 2009 |
| 8 | 广西 | 长洲 | 4 | 42 | 168 | 2006 |
| 9 | 江西 | 峡江 | 4 | 40 | 160 | 2013 |
| 10 | 四川 | 金银台 | 3 | 40 | 120 | 2005 |
| 11 | 广西 | 红花 | 3 | 38 | 114 | 2005 |
| 12 | 云南 | 六库 | 5 | 36 | 180 | 待建 |
| 13 | 四川 | 桐子壕 | 3 | 36 | 108 | 2003 |
| 14 | 四川 | 紫兰坝 | 3 | 34 | 102 | 2006 |
| 15 | 西藏 | 多布 | 4 | 30 | 120 | 2015 |
| 16 | 四川 | 沙溪 | 3 | 29 | 87 | 2012 |
| 17 | 广西 | 融安 | 1 | 18 | 18 | 2015 |
| 18 | 江西 | 新干 | 7 | 16 | 112 | 2018 |
| 19 | 四川 | 柳树 | 3 | 16 | 48 | 2017 |
| 20 | 陕西 | 巨亭A | 2 | 16 | 32 | 2016 |
| 21 | 重庆 | 安居 | 2 | 15 | 30 | 2007 |
| 22 | 重庆 | 潼南 | 3 | 14 | 42 | 2017 |
| 23 | 吉林 | 望江楼 | 3 | 10 | 30 | 在建 |
| 24 | 陕西 | 巨亭B | 1 | 10 | 10 | 2017 |
| 25 | 广西 | 邕宁 | 6 | 9.6 | 57.6 | 2018 |
| **合计** | | | **109** |  | **4489.8** |  |

2. 东方电气集团东方电机有限公司的应用证明

大型贯流式水轮发电机阻尼系统断条故障抑制机理及设计关键技术应用于世界最大的贯流式水电站巴西杰瑞贯流水电站，是“一带一路”重点工程，其左岸22台机组全部由东方电机提供，于2016年11月完成投产发电。合同总价4.8亿美元，是目前中国水电成套设备出口合同金额最大的项目，也是我国大型水电成套设备首次大批量跻身南美市场，政治意义及经济、社会效益明显。另外，该技术还成功应用于柬埔寨最大水电站桑河二级8×50MW、越南成山3×10MW、犍为9×55MW、西藏多布4×30MW、沙坪二级6×58MW、潼南3×14MW等多个贯流式水电项目，近3个自然年新增销售额超过5亿元。（附件3.1）。

**七、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 | 授权号 | 权利人 | 发明专利  有效状态 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 发明专利  （授权） | 一种发电机  的磁极结构 | ZL 2011 1 0297001.3 | 东方电气集团东方电机有限公司 | 有效 |
| 2 | 发明专利  （授权） | 一种磁极冲片及采用该磁极冲片的永磁发电机转子铁心 | ZL 2013 1  0467230.4 | 东方电气集团东方电机有限公司 | 有效 |
| 3 | 发明专利  （授权） | 一种测试电机风压采集专用密封接头的加工方法 | ZL 2012 1  0086774.1 | 东方电气集团东方电机有限公司 | 有效 |
| 4 | 实用新型专利  （授权） | 灯泡贯流式水轮发电机阻尼绕组断条故障在线监测装置 | ZL 2017 2 1293296.6 | 西华大学，成都市格林菲勒科技有限公司 | 有效 |
| 5 | 实用新型专利  （授权） | 一种发电机转子  温度监测装置 | ZL 2017 2 1292255.5 | 成都市格林菲勒科技有限公司，西华大学 | 有效 |
| 6 | 实用新型专利  （授权） | 电力设备发热诊断用广角红外透镜 | ZL 2011 2 0173991.5 | 四川电力职业技术学院 | 有效 |
| 7 | 实用新型专利  （授权） | 电力设备发热诊断用广角红外透镜的单面安装结构 | ZL 2011 2 0173970.3 | 四川电力职业技术学院 | 有效 |
| 8 | 实用新型专利  （授权） | 一种测试电机风压采集专用密封接头 | ZL 2012  2 0123551.3 | 东方电气集团东方电机有限公司 | 有效 |
| 9 | 发明专利  （公开） | 一种灯泡贯流式水轮发电机阻尼绕组断条故障在线监测方法 | CN107764404A | 西华大学，成都市格林菲勒科技有限公司 | 有效 |
| 10 | 发明专利  （公开） | 一种发电机转子  温度监测方法 | CN107764403A | 成都市格林菲勒科技有限公司，西华大学 | 有效 |

**八、主要完成人情况**

韩力：第一完成人，教授，工作单位：重庆大学，完成单位：重庆大学。作为项目主持人和技术负责人，组织实施大型贯流式水轮发电机阻尼系统故障抑制关键技术的各项研究任务，在项目研发和推广应用中投入工作量占本人工作总量的65%左右。本人在本项目“机-电-磁-热”多物理场耦合分析及其电磁结构参数优化设计等研究内容上，做出了突出贡献，同时也是本项目第二完成人、第三完成人在重庆大学就读硕士研究生和博士研究生的指导教师，师生合作共同署名发表了20余篇与本项目密切相关的SCI/EI论文。

周光厚：第二完成人，教授级高级工程师，工作单位：东方电气集团东方电机有限公司，完成单位：东方电气集团东方电机有限公司。作为本项目关键主研人员及第一完成人指导的硕士、博士研究生，完成贯流式水轮发电机阻尼系统断条故障数据收据、整理、分析和规律总结，参与多物理场的分析与计算，构建了电磁场-电路-机械耦合等高精度、交叉校验的物理和数学模型，揭示了多物理场合理匹配的关系，提出了贯流式水轮发电机阻尼系统的优化设计方法，并成功应用于电磁方案设计及性能优化，负责优化设计方案的具体实施，并完成大量科研试验等工作，实现了数学计算与实验测试的交叉校验，制订了贯流式水轮发电机电磁优化分析技术规范。对创新点1、2、3做出了重要贡献，投入工作量占本人工作总量的65%左右。

范镇南：第三完成人，副教授，工作单位：西华大学，完成单位：西华大学。作为第一完成人指导的硕士生、博士研究生，全程担任项目关键主研。攻克了三维多物理场深度耦合求解难题，提出了发电机“机-电-磁-热”多场耦合模型及其有限元算法，优化了关键设计参数取值，提出了磁极过热智能红外诊断新方法，拓展了“结构-材料-制造-性能-行为”设计理念。对创新点1、2、3做出了重要贡献，以第一及通讯作者合作发表28篇相关SCI/EI论文，获权及公开专利6项，投入工作量占本人工作总量80%左右。2015年由四川电力职业技术学院（国网四川省电力公司技能培训中心）调入西华大学。

李建富：第四完成人，高级工程师，工作单位：东方电气集团东方电机有限公司，完成单位：东方电气集团东方电机有限公司。作为本项目的主研人员，完成了贯流式水轮发电机特殊磁极对谐波抑制作用的理论分析，构建了多场耦合分析模型，进行了多个典型机组的电磁场和温度场分析计算，发现并揭示了阻尼绕组及转子表面异常过热的机理，研究并提出了贯流式水轮发电机转子磁极的电磁优化设计措施，成功应用于世界最大容量的巴西杰瑞贯流式机组的电磁方案设计及优化，负责首台转子温度及谐波含量的科研试验，参与制订贯流式水轮发电机的电磁分析技术规范，推广应用至柬埔寨桑河二级、西藏多布等重点工程。对创新点1、2做出了重要贡献，投入工作量占本人工作总量的50%左右。

董秀成：第五完成人，教授，工作单位：西华大学，完成单位：西华大学。作为本项目的主研人员，在国内率先开发、研制出了“大型发电机组风速、温度智能测试及数据处理系统”，为本项目相关发电机内部通风、散热及温度状态的监测，以及物理场分析模型的验证和完善，提供了切实有力的技术支持。对创新点1、3做出较为重要贡献，投入工作量占本人工作总量的50%左右。

刘晓宇：第六完成人，讲师，工作单位：重庆大学，完成单位：重庆大学。作为本项目的主研人员，从贯流式水轮发电机的研究现状出发，针对阻尼系统断条故障的研究分析，对电磁场进行建模改进和仿真计算，推导了考虑非线性材料的发电机运动电磁场控制方程，讨论了有限元法对发电机电磁场问题的网格处理方法，建立了计算阻尼系统损耗分布的发电机运动电磁场问题的数学模型及有限元仿真模型，投入工作量占本人工作总量的25%左右。

刘传坤：第七完成人，高级工程师，工作单位：东方电气集团东方电机有限公司，完成单位：东方电气集团东方电机有限公司。作为本项目的主研人员，完成了贯流式水轮发电机转子过热故障的非接触式红外监测与诊断以及通风冷却试验，获得了发电机风量及风路中各部位的风压，确定了发电机正常运行时各部件正常温度范围，构建了完整的红外图像拍摄和图像处理系统，精确测量显示出目标测点及其热像上任意位置，通过计算机分析发电机参数与红外检测数据，以函数曲线精确确定过热点位置，在多个贯流式水轮发电机电站进行了现场试验及数据分析，并协助完成了对仿真计算的交叉检验。对该项目创新点3做出了突出贡献，投入工作量占本人工作总量的30%左右。

李景灿：第八完成人，讲师，工作单位：重庆大学，完成单位：重庆大学。作为本项目的主研人员，参与了部分大型贯流式水轮发电机电磁场与温度场的分析计算工作，投入工作量占本人工作总量的25%左右。

王军：第九完成人，教授，工作单位：西华大学，完成单位：西华大学。作为本项目的主研人员，参与了部分水轮发电机物理场建模、分析工作，以及部分模型验证和完善工作，投入工作量占本人工作总量的25%左右。

姚兵：第十完成人，讲师，工作单位：西华大学，完成单位：西华大学。作为本项目的主研人员，参与了部分水轮发电机物理场建模、分析工作，以及部分电气试验工作，投入工作量占本人工作总量的25%左右。

**九、主要完成单位及创新推广贡献:**

重庆大学为本项目的第一完成单位，负责其管理和执行。本单位组织项目团队各成员单位，汇集了电气工程学科领域的专家、学者和技术骨干，实施校企产学研用联合攻关，针对大型贯流式水轮发电机阻尼系统故障抑制关键技术，从“机-电-磁-热”多物理场耦合分析、电磁结构参数优化设计、发电设备在线监测等方面，分析并解决了阻尼绕组与极靴铁心过热、空载电压波形优化等技术难题，形成了具有自主知识产权的大型贯流式水轮发电机转子磁极设计、制造关键技术。该技术已成功推广应用于国内外20多个水电站100余台大型贯流式水轮发电机，保证了机组的安全可靠运行，为水力发电企业带来了明显的经济效益和社会效益，起到了推广示范作用。

东方电气集团东方电机有限公司为本项目的第二完成单位，负责本项目典型电站贯流式水轮发电机阻尼系统故障数据的收据、整理、分析和归纳，参与电磁场、温度场的建模和分析计算，负责产品的对比试验验证等工作，对优化设计方案进行具体实施，并负责本项目研究成果的推广运用。通过本项目的研究，掌握了抑制阻尼绕组与极靴铁心过热、优化空载电压波形等关键核心技术，培养了一批专业技术人才，提高了我国机电装备工业水平，提升了中国水轮发电机组的国际竞争力。

西华大学为本项目的第三完成单位，负责项目相关极靴构件损耗发热与空载电压波形质量物理场分析、机组通风散热测试系统、故障监测诊断及预警等研究工作。在揭示极靴构件损耗发热及发电机空载电压波形随结构参数变化规律、提出偏移极靴与阻尼绕组中心线结构适用范围，以及制定故障监测预警方案等方面，做出了关键贡献，为本成果的最终形成与推广应用，提供了重要的技术支持。

**十、完成人合作关系说明：**

| 序号 | 合作方式 | 合作者  (本项目排名) | 合作时间 | 合作成果 | 证明材料 | 备注 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 多场耦合  模型及其  有限元算法 | 韩 力(1)  周光厚(2)  范镇南(3)  李建富(4)  董秀成(5)  刘晓宇(6)  李景灿(8)  王 军(9)  姚 兵(10) | 2006-今 | 软件著作权  项目合同  学术论文 | 附件1.12、5.1.1、5.1.5-5.1.7、5.2.1-5.2.13 |  |
| 2 | 先进设计  制造技术 | 韩 力(1)  周光厚(2)  范镇南(3)  李建富(4) | 2014-2016 | 专利技术  项目合同  学术论文 | 附件1.1-1.2、5.1.1-5.1.5、5.2.1-5.2.13 |  |
| 3 | 通风发热  智能监测与  在线诊断系统 | 周光厚(2)  范镇南(3)  李建富(4)  董秀成(5)  刘传坤(7) | 2011-2018 | 专利技术  实验报告  项目合同 | 附件1.3-1.11、2.8、5.1.6-5.1.7 |  |