《含明满流交替的复杂水力过渡过程模拟及瞬变流法泄漏检测定位技术》项目公示信息

**项目名称**

含明满流交替的复杂水力过渡过程模拟及瞬变流法泄漏检测定位技术

# 提名者与提名意见

提名单位：陕西省水利厅

由西安理工大学、陕西省水利电力勘测设计研究院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“含明满流交替的复杂水力过渡过程模拟及瞬变流法泄漏检测定位技术”项目，针对输配水系统复杂水力过渡过程，在国家自然科学基金、陕西省水利科技计划项目等纵向科研项目及实际工程项目的支持下，对水力瞬变波传播机理、明满流交替水力过渡过程、水锤计算的高精度算法、管道泄漏检测与定位等方面进行了系统的研究。项目揭示了管径非一致均匀及方向变化和非恒定摩阻对水击压力波传播衰减的影响规律，提出了可以统一求解明满流交替水力过渡过程的全窄缝数学模型，给出了高效、高精度求解水力过渡过程的数值算法，开发了基于瞬变流模型及神经网络方法相结合的管道泄漏检测定位技术。研究提出的关键技术在陕西省及国内诸多水电站、大型输配水工程项目中得到了推广与应用，有效保证了输水系统的安全稳定运行，取得了显著社会效益和经济效益。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术进步奖提名条件，同意推荐。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步二等奖。

# 项目简介

该项目属于水利工程-水利工程基础学科-水力学学科。该项目以国家自然科学基金、陕西省水利科技计划、西北旱区生态水利国家重点实验室基金等纵向项目以及一大批大中型输水调水工程为依托，历经二十余载的产学研合作，采用理论分析、数值模拟以及模型试验相结合的方法，在水力瞬变波传播机理、明满流交替水力过渡过程、水锤高精度计算格式、爆管泄漏故障诊断等方面进行了系统研究，取得了创新成果如下：

1、首次提出了基于多尺度法的水击波解析解，揭示了非均匀管径变化和非恒定摩阻对水击压力波传播衰减的多尺度影响机理。2、提出了融入新的物理机制至明满流交替水力过渡过程的数值模拟方法，提出了可以统一求解明满流交替水力过渡过程的全窄缝数学模型。3、建立了一套高效、高精度求解复杂水力过渡过程中瞬变流水锤波的数值模型，提出了水锤计算的高精度算法。4、建立了基于径向基函数人工神经网络的泄漏定位预测模型，自主开发了一套基于瞬变模拟法的泄漏定位软件。

基于项目研究成果，授权实用新型专利6项，获批软件著作权8项，公开发表学术论文30余篇，其中SCI/SSCI收录论文10篇，培养硕士、博士研究生10余名。相关成果应用于我国引汉济渭、东庄水利枢纽、延安黄河、榆林马镇、包头山北地区在生水供水工程、新疆阜康抽水蓄能电站，霍尔古吐水电站等一批引调输配水工程、及水电站引水系统的水力瞬变流分析，为输配水系统合理设计与安全运行提供了重要的技术支撑，取得了显著的社会及经济效益。

该项目研究成果丰富和完善了复杂水力过渡过程的基础理论，为中大型输配水工程管线复杂瞬变流数值模拟及泄漏检测提供了有力的技术手段，对于提高长距离输配水系统的设计水平，保障长输管线运营经济性和安全性具有重要的意义。

# 客观评价

1. 支撑本项目研究的科研项目顺利结题并通过验收，并获得持续的研究资助。
2. 国家自然科学基金准予“基于两相声速的摩擦壅塞流模型构建与泄漏率预测研究（51706180）”项目结题。
3. 陕西省水利厅对项目陕西水利科技项目“输水管道泄漏检测与定位研究（2016slkj-14）”组织验收，专家组认为项目成果对于支持管道泄漏检测方法、管道泄漏的精确定位提供了有意义的理论探索。
4. 西安市碑林区科技计划项目“长距离输水管道瞬变定位方法优化（GX2043）”同意结题。
5. 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地自主研究课题“输水管道泄漏检测的瞬变流数学模型（2017ZZKT-1）”项目结题。

基于本项目成果积累的研究基础，针对本项目的科技的局限性，我们持续获得一项国家自然科学面上项目及一项陕西省自然科学基金联合基金的资助，目前进行近一步的深化相关研究与应用，表明本项目成果获得了高度的认可。

1. 与国内外已有研究成果相比，本项目的创新性在于：
2. 水击波的传播过程受到管道非均匀性的影响（如管径大小变化，方向变化），非恒定摩阻的影响，以往的研究只考虑管径突变导致的影响，但是对于由于管径生锈，有淤积导致的全程性影响缺乏研究，本项目首次基于多尺度法给出了水击波的解析解，揭示了非均匀管径变化和非恒定摩阻对水击压力波传播衰减的影响机理，提出相应的处理模型，为提高有压管道水击压力波数值模拟精度奠定了物理基础。
3. 传统上模拟明满流的Preissmann窄缝法不能模拟负压流，近年来发展的二分压力法较为复杂，且存在难以判别明流及满管负压流的困难，本项目突破了这些局限性，提出了全窄缝法，实现了不考虑气液两相相互作用下明满流交替瞬变流的准确模拟。改进了管道瞬变流的有限体积数值算法，引入了高阶格数值式，突破传统格式对于Courant数的限制，实现了对管道压力波的快速准确捕捉。
4. 管道泄漏检测与定位是近年来研究的热点，也是工程中高度关注的课题，本项目充分揭示了发生泄漏时管道流场变化特性及其对瞬变压力波响应机制，与机器学习的神经网络法相结合，发展了管道泄漏位置检测与定位的新方法。
5. 国内外同行学术性检索、引用和评价意见

依托本项目研究成果，发表各类学术期刊论文30余篇，SCI检索期刊论文10篇，累计他引近200次。发表期刊包括《水力发电学报》、《中国给水排水》、《农业工程学报》、《水动力学研究与进展》，《Physics of Fluid Engineering》《J. Num. Meth. Fluids》《Int. J. Comp. Fluid Dy.》等及本学科领域国内外高水平期刊发表，累计他引近200次。高精度高效算法方面论文评审专家认为“基于Godunov格式的两阶有限体积格式在低库朗特数时能得到最佳的计算结果，与特征线法等差分法相比，计算效率分别…研究成果具有重要的价值”。“近年来实践中遇到不少计算规模很大的案例，对计算速度提出了要求。采用有限体积法等来求解水锤基本方程，即保证了稳定性、守恒性，又提高计算速度”。“This paper employs a high-precision fifth-order WENO scheme，…. to solve an urgent problem related to the phenomenon of water hammer，…. uses GPU parallel acceleration technology to increase the computational efficiency of the program. In my opinion, this study is the key to this article”。 国内知名学者如张建，郭新蕾，许翔昭，Bhavneet Kaur、Kamyar Mansour 等在 《Physics of Fluid Engineering》、《应用基础及工程科学学报》，《CHINESE JOURNAL OF PHYSICS》等行业重要学术刊物对本项目的成果给与正面评价。如学者Kamyar Mansour评价到“This new scheme maintains its designed convergence rate at first- and second-order critical points and has a better numerical resolution in comparison to the third-order WENO-JS and WENO-Z schemes.郭新蕾评价到“瞬变流泄漏检测法的准确性和可靠性较高．在管道中激励瞬变流，现阶段主要有两种方法:第一种是快速开启、关闭或周期性调节管道首端、中间或末端的阀门，制造流量脉冲（张巧玲等）”。

1. 应用企业评价

陕西省水利水电勘测设计研究院“工程设计期间采用本项目开发的可以模拟含明满流交替的复杂水力过渡过程模拟的数值模型，成功模拟了长距离输配水工程在管线充、放水、运行调控过程发生的复杂水力过渡现象，有力支撑了引汉济渭工程管线的设计布置及安全防护，保障了工程设计的合理性及安全性，并为工程建成后的运行管理提供了技术支撑”。中国电建集团西北勘测设计研究院“本工程的在可研阶段采用本项目研发的基于有限体法及考虑非恒定摩阻的高精度模型进行水力过渡过程计算，计算精度高、速度快，对于电站管线的布置，水锤防护措施的设计提供了有力的支撑，保证了工程设计的合理性及可行性”。

1. 相关科技奖励

2015获全国优秀水利水电勘测设计奖银质奖（开都河柳树沟水电站工程设计）；2017获陕西省第十八次优秀工程设计一等奖（开都河察汗乌苏水电站工程设计）；2020获年度电力行业优秀工程咨询成果二等奖（哈密抽水蓄能电站可行性研究报告）。

# 应用情况

该项目以输配水系统水力过渡过程关键技术为突破点，提出多项解决水锤计算精度、明满流交替水力特性、泄漏检测与定位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。与陕西省水利水电勘测设计研究院及中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司等单位合作，项目研究成果已经广泛应用于陕西省及国内多个输配水工程规划建设中，如引汉济渭调水工程、东庄水利枢纽供水工程、延安黄河引水工程、榆林马镇引水工程、包头山北地区在生水供水工程、新疆阜康抽水蓄能电站，霍尔古吐水电站等一批引调输配水工程及水电站引水系统的水力瞬变流分析，为输配水系统的安全运行提供了重要的技术支撑，对推进我国水利水电，市政环境工程的建设发展，保障输配水系统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作用。

主要应用单位及应用对象见下表，部分其它工程的应用情况参见技术合同及研究报告等相关附件。

**主要应用单位情况表**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 单位名称 | 应用的技术 | 应用对象及规模 | 应用起止时间 | 单位联系人/电话 |
| 1 | 陕西省水利水电勘测设计研究院 | 基于高精度有限体积法、考虑非恒定摩阻的模拟技术 | 东庄水利枢纽工程/供水量可达4.35亿立方米，满足泾惠渠灌区145.3万亩灌溉供水及铜川新区、西咸新区（泾河、秦汉、空港三城）、富平县城、庄里工业园区、深陕工业区、三原县城的城镇及工业用水水量 | 2021-2022年 | 许建建13087592256 |
| 基于高精度有限体积法、考虑非恒定摩阻的模拟技 | 榆林黄河东线马镇引水工程/年引水量2.9亿立方米，设计引水流量27立方米每秒 | 2020-2022年 | 许建建13087592256 |
| 含明满流交替的复杂水力过渡过程模拟的数值模型 | 引汉济渭引水及输配水工程/98.3公里秦岭隧洞、343.6公里输配水工程 | 2021-2022年 | 党云刚13991273060 |
| 含明满流交替复杂水力过渡过程模拟的数值模型 | 延安黄河引水工程/取水规模8977万m3；泵站扬程黄延线582m，子长线681m，高清线20m；线路总长146km | 2016-2017年 | 党云刚13991273060 |
| 2 | 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 | 基于高精度有限体积法、考虑非恒定摩阻的高精度模型 | 新疆阜康抽水蓄能/电站装机容量1200MW，最大水头524m，最小水头449m | 2016-2022年 | 李学强18192003635 |
| 基于高精度有限体积法、考虑非恒定摩阻的高精度模型 | 霍尔古吐水电站/18km引水隧洞，直径27m抗阻调压井 | 2020-2022年 | 李学强18192003635 |
| 基于高精度有限体积法、考虑非恒定摩阻的高精度模型 | 包头市山北地区再生水供水工程/总扬程670m两级泵站，178.8km压力供水 | 2021-2022年 | 庄鹏宇029-88750163 |
| 3 | 净化控股集团股份有限公司 | 管道泄漏检查技术及分区计量模型 | 无为市城乡供水工程/每日20万吨供水、37.65公里管网 | 2022.1-至今 | 刘志明15291846919 |
| 水力模型及泄漏检测方法 | 张卜水源地至阎良城区输水管线/日供水量10万吨，管线长29km | 2020-2021年 | 刘志明15291846919 |

# 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 | 授权日期 | 证书编号 | 权利人 | 发明人 |
| 1 | 论文 | An improved third-order finite difference weighted essentially nonoscillatory scheme for hyperbolic conservation laws | 中国 | DOI:10.1 002/fld.48 47 | 2020年4月24日 | International Journal for Numerical method in Fluids | 西安理工大学 | Guodong Li;Xiaogang Li;Pengfen Li;Dandan Cai |
| 2 | 论文 | 输配水系统明满瞬变流全窄缝数值模型  | 中国 | 2022,41(9):21-30 | 2022年3月 | 水力发电学报 | 西安理工大学 | 莫铁祥，李国栋 |
| 3 | 计算机软件著作 | 管道泄漏检测计算软件V2.0 | 中国 | 2022SRO134954 | 2022年01月20日 | 国家版权局 | 西安理工大学 | 张巧玲、杨振东、黄铋匀、严悦 |
| 4 | 论文 | Improvement of third-order finite difference WENO scheme at critical points | 中国 | DOI：10.1080/10618562.2019.1687888 | 2019年11月11日 | International Journal of Computational Fluid Dynamics | 西安理工大学 | Xiaogang Li, Guodong Li, Yongbin Ge |
| 5 | 论文 | 含泄漏供水管道瞬变流动特征及泄漏定位 | 中国 | 2021,37(15):35-40 | 2021年8月 | 中国给水排水 | 西安理工大学 | 杨振东，曹亚龙，张巧玲，赵思茂，曹佳豪，吴峰，李国栋 |
| 6 | 论文 | 基于TVD框架的Godunov格式水锤求解模型 | 中国 | 2022,37(03):326-334 | 2022年5月 | 水动力学研究与进展 | 西安理工大学 | 莫铁祥；李国栋；杨振东；张巧玲 |
| 7 | 论文 | 基于特征线法的含气输水管道水锤特性分析 | 中国 | 2022,38(05):79-86. | 2022年3月 | 农业工程学报 | 西安理工大学 | 张巧玲；黄铋匀；杨振东；严悦；李国栋；郭利豪 |
| 8 | 计算机软件著作 | 基于有限体积法三阶PPM格式的水击计算软件V1.0 | 中国 | 2021SR1046398 | 2021年07月15日 | 国家版权局 | 西安理工大学 | 莫铁祥，李国栋 |
| 9 | 计算机软件著作 | 长距离输水系统明满流过渡数值模拟软件V1.0 | 中国 | 2022SR0010813 | 2022年01月04日 | 国家版权局 | 西安理工大学 | 李海潮、李国栋、李珊珊 |
| 10 | 计算机软件著作 | 有压管道充水过程数值模拟软件V1.0 | 中国 | 2022SRO603475 | 2022年05月19日 | 国家版权局 | 西安理工大学 | 李珊珊、李国栋、李海潮 |

# 主要完成人情况

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 排名 | 姓名 | 技术职称 | 行政职务 | 工作单位 | 完成单位 | 对本项目的贡献 |
| 1 | 李国栋 | 教授 | 原副所长 | 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，主要贡献在明满流交替水力过渡过程、水锤计算高精度算法方面。 |
| 2 | 张巧玲 | 副教授 | 副所长、党支部书记 | 西安理工大学 | 西安理工大学 | 主要贡献在输水管道泄漏检测与定位方面 |
| 3 | 党云刚 | 高级工程师 | 副院长 | 陕西省水利电力勘测设计研究院 | 陕西省水利电力勘测设计研究院 | 主要贡献在调水工程中进行技术推广应用及反馈改进，创新多种调流减压装置系统  |
| 4 | 杨振东 | 副教授 | 无 | 西安理工大学 | 西安理工大学 | 主要贡献在输配水有压管道水击的传播衰减多尺度基础理论研究  |
| 5 | 李学强 | 正高级工程师 | 副总工程师 | 中国电建集团西北勘测设计研究院 | 中国电建集团西北勘测设计研究院 | 主要贡献在相关电站系统设计的水力过渡过程应推广应用及反馈改进 |
| 6 | 莫铁祥 | 博士研究生 | 无 | 西安理工大学 | 西安理工大学 | 主要进行相关模型算法软件的开发 |
| 7 | 周晓平 | 正高级工程师 | 分院院长 | 中国电建集团西北勘测设计研究院 | 中国电建集团西北勘测设计研究院 | 主要贡献在供水系统瞬变流中推广应用相关技术 |
| 8 | 李珊珊 | 讲师 | 无 | 西安理工大学 | 西安理工大学 | 主要贡献模型算法软件的开发  |
| 9 | 许建建 | 高级工程师 | 分院副院长 | 陕西省水利电力勘测设计研究院 | 陕西省水利电力勘测设计研究院 | 主要贡献在输配水工程中进行技术推广应用 |
| 10 | 李奇龙 | 讲师 | 无 | 西安理工大学 | 西安理工大学 | 主要贡献在输配水工程中进行技术推广应用 |

# 主要完成单位及创新推广贡献

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 排 名 | 完成单位 | 创新推广贡献 |
| 1 | 西安理工大学 | 西安理工大学项目组依托多项国家自然科学基金、陕西省科技计划项目，陕西水利科技研究、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，完成了相关软件的开发，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，特别是在合作单位陕西省水利电力勘测设计研究院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。 |
| 2 | 陕西省水利电力勘测设计研究院 | 陕西省水利电力勘测设计研究院结合实际的工程项目，鼓励合作开展应用研究，极力推广相关软件及技术的应用，并反馈相关应用情况，促进相关技术的持续改进。 |
| 3 | 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结合实际的工程项目，鼓励合作开展应用研究，极力推广相关软件及技术的应用，并反馈相关应用情况，促进相关技术的持续改进。 |

# 完成人合作关系说明

西安理工大学李国栋，张巧玲，杨振东，李珊珊，李奇龙，莫铁祥通过科研团队、及项目合作等方式的长期紧密合作，共同科研立项、通过培养研究生、共同发表论文及共同知识产权，

陕西省水利电力勘测设计研究院党云刚、许建建与西安理工大学及内部通过项目及产业合作，把本项目的相关科研成果应用到单位承担的工程建设项目中。

中国电建集团西北勘测设计研究院李学强，周晓平与西安理工大学及内部通过项目及产业合作，把本项目的相关科研成果应用到单位承担的工程建设项目中。

完成人合作关系情况汇总表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 合作方式 | 合作者/项目排名 | 合作起始时间 | 合作完成时间 | 合作成果名称 |
| 1 | 论文合著 | 李国栋1、张巧玲2，杨振东4 | 2018.07 | 2021.08 | 含泄漏供水管道瞬变流动特征及泄漏定位 |
| 2 | 论文合著 | 李国栋1、张巧玲2，杨振东4 | 2019.07 | 2022.03 | 基于特征线法的含气输水管道水锤特性分析 |
| 3 | 论文合著 | 李国栋1、张巧玲2，杨振东4，莫铁祥7 | 2020.09 | 2022.05 | 基于TVD框架的Godunov格式水锤求解模型 |
| 4 | 共同知识产权 | 张巧玲2，杨振东4 | 2019.09 | 2022.01 | 管道泄漏检测计算软件V2.0 |
| 5 | 共同知识产权 | 李珊珊10，李国栋1  | 2020.01 | 2021.12 | 长距离输水系统明满流过渡数值模拟软件V1.0 |
| 6 | 共同立项 | 李国栋1，杨振东4，李珊珊10 | 2019.01 | 2022.12 | 长距离输水管涵明满流交替的水动力学特性及数值模型构建； |
| 7 | 共同立项 | 张巧玲2，杨振东4，李国栋1、李珊珊10 | 2016.12 | 2018.12 | 输水管道泄漏检测与定位研究 |
| 8 | 共同立项 | 张巧玲2，李国栋1，杨振东4 | 2017.06 | 2018.12 | 输水管道泄漏检测的瞬变流数学模型 |
| 10 | 联合培养研究生 | 李国栋1、张巧玲2 | 2015.09 | 2018.06 | 基于非恒定摩阻的输水管道泄漏检测数值模拟及试验研究 |
| 11 | 联合培养研究生 | 李国栋1、张巧玲2 | 2017.09 | 2020.06 | 含分叉结构长输水管线泄漏定位数值模拟研究， |
| 12 | 联合培养研究生 | 李国栋2、张巧玲2 | 2018.09 | 2021.06 | 输水管道中含气水流瞬变特性试验研究及数值模拟 |
| 13 | 联合培养研究生 | 李国栋1、杨振东4 | 2018.09 | 2021.06 | 管道有压流有限体积格式构造及明满流全窄缝模型建立 |
| 14 | 产业合作 | 党云刚3，李国栋1  | 2015 | 2016 | 延安引黄供水，，  |
| 15 | 产业合作 | 党云刚3，李国栋1  | 2019 | 2021 | 榆神工业园马镇引水工程，  |
| 17 | 产业合作 | 周晓平6，李国栋1 | 2020 | 2022 | 内蒙山北地区供水项目 |
| 18 | 共同立项 | 李国栋1，，李学强5，李奇龙10，  | 2017 | 2019 | 新疆阜康抽水蓄能电站水力过渡仿真分析与计算 |
| 19 | 产业合作 | 李学强5，李国栋1 | 2010 | 2013 | 西藏多布水电站厂房输水系统水力机械过渡过程仿真分析 |