附件：

2024年度四川省科学技术奖提名项目公示信息

1. 项目名称

抽注水多层同心球中子能谱测量关键技术及应用

1. 提名者

四川省教育厅

1. 提名意见

本项目围绕如何才能研制出具有自主知识产权的高精度多球中子能谱仪？针对如何提高中子能谱测量的准确度和精度？等技术难题，开展了基础性的新技术、新方法和应用研究，构建了一套完整的中子能谱测量技术体系，并成功研制了自主可控的高精度抽注水多层同心球中子能谱仪，本项目集理论创新、方法创新、技术发明、工程应用于一体，极大地提升了中子能谱测量水平。

项目研发过程中获得国际专利2项（其中美国发明专利1项）、国家发明专利41项、实用新型专利2项、软件著作权7项；发表SCI收录论文80余篇；出版专著1本；培养博、硕士研究生近50余名。

项目成果广泛应用于中国核动力研究设计院、重庆建安仪器有限责任公司、四川新先达测控技术有限公司等企事业单位（部分相关专利已成果转化），近年来直接经济效益1.92亿元，经济和社会效益显著。

提名该项目为四川省科学技术进步奖。

1. 项目简介

中子能谱精确测量在中子应用研究和中子辐射防护等领域具有至关重要的作用，是推动当前核科学研究工作发展的基础。然而，由于中子的中性特性及其与物质的复杂相互作用，使得中子能量分布极为广泛，准确测量中子能谱面临重大技术挑战。多球中子谱仪因其各向同性、设备简便、测量能量范围广等优势，成为当前成熟度最高、最有效的中子能谱测量方法之一。目前国外传统多球中子谱仪采用一系列直径变化范围为2-12英寸的高密度聚乙烯慢化球组成，每一个慢化球中放置一个探测器和一套电子学测量系统，这样组成的多套探测系统相互影响，很难解决好一致性问题；多个慢化球同时测量时，每个慢化球都可能接收到其他慢化球散射的中子（即球球干扰），导致测量结果存在较大误差；同时多个慢化球导致设备笨重、携带不便，限制了其在多场景应用中的灵活性和实用性。

本项目围绕如何才能研制出具有自主知识产权的高精度多球中子能谱仪？针对如何提高中子能谱测量的准确度和精度？等技术难题，开展了基础性的新技术、新方法和应用研究，构建了一套完整的中子能谱测量技术体系，并成功研制了自主可控的高精度抽注水多层同心球中子能谱仪，创新成果如下：

**（1）针对谱仪结构，**以水为慢化剂，创新研发了抽注水多层同心球中子能谱仪（通过抽注水方式让5层同心球成为25=32个独立探测球），建立了抽注水多层同心球中子能谱测量理论、方法和技术，解决了传统多球中子能谱仪测量量程低、探测球数量多、携带不便的技术难点，实现了谱仪小型化、便携化和国产化。

**（2）针对能谱测量，**建立了基于遗传算法的时间优化模型，实现了抽注水多层同心球中子能谱仪的最短时间优化组合，提升了测量效率；建立了基于聚类算法和Backus-Gilbert理论的响应矩阵优化方法，以此建立了抽注水多层同心球中子能谱仪测量优化模型；建立了融合中子通量估计、能谱光滑、适应度函数选择等先进技术的自适应差分进化中子能谱展开算法模型，降低了参数调试的复杂性，提高了解谱输出的质量和计算效率，实现了中子能谱的精确测量。

**（3）针对能谱解谱，**突破了传统多球中子能谱仪仅依赖慢化中子信息来解析入射中子能谱的技术限制，充分利用不同能量的中子在入射中子谱仪时发生(n，γ)、(n，n′)、(n，𝛼)、(n, 2n)等核反应释放出的γ射线，融合同一水层组合产生的热中子、快中子和γ射线三者之间的差异，建立了n-γ射线联合反演中子能谱新方法，提高了中子能谱的分辨能力和解谱能力。

本项目集理论创新、方法创新、技术发明、工程应用于一体，极大地提升了中子能谱测量水平。项目研发过程中获得国际专利2项（其中美国发明专利1项）、国家发明专利41项、实用新型专利2项、软件著作权7项；发表SCI收录论文80余篇；出版专著1本；培养博、硕士研究生近50余名；项目成果广泛应用于中国核动力研究设计院、重庆建安仪器有限责任公司、四川新先达测控技术有限公司等企事业单位（部分相关专利已成果转化），近年来直接经济效益1.92亿元，经济和社会效益显著。

1. 主要知识产权和标准规范等目录

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 知识产权（标准）类别 | 知识产权（标准）具体名称 | 国家  （地区） | 授权号（标准编号） | 授权（标准发布）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） | 发明专利（标准）有效状态 |
| 发明专利 | Water pumping and injecting multi-layered concentric sphere neutron spectrometer | 美国 | US10656292B2 | 2020.05.19 | 美国专利商标局 | 四川新先达测控技术有限公司 | Jianbo Yang；Xianguo Tuo；Yi Cheng；Honghui Wang；Lei Wang；Mingzhe Liu | 有权 |
| 发明专利 | 抽注水多层同心球装置及中子能谱探测系统 | 中国 | ZL201710201494.3 | 2019.05.14 | 第3374228号 | 四川新先达测控技术有限公司 | 杨剑波;庹先国;王洪辉;成毅;王磊;刘明哲;张江 | 有权 |
| 发明专利 | 一种注水排水全自动多球中子谱仪及测量方法 | 中国 | ZL201610264803.7 | 2018.08.03 | 第3021429号 | 四川新先达测控技术有限公司 | 杨剑波;庹先国;黄红;王洪辉;成毅;刘志;李锐 | 有权 |
| 发明专利 | 小型套筒中子能谱探测装置及探测方法 | 中国 | ZL202010026155.8 | 2022.09.30 | 第5486190号 | 四川轻化工大学、成都理工大学 | 杨剑波;李锐;庹先国;成毅;王洪辉;王磊;刘明哲;周建斌 | 有权 |
| 发明专利 | 小型液体慢化中子能谱探测装置及探测方法 | 中国 | ZL202010026106.4 | 2023.05.02 | 第5936386号 | 四川轻化工大学、成都理工大学 | 杨剑波;李锐;庹先国;成毅;王洪辉;王磊;刘明哲;周建斌 | 有权 |
| 发明专利 | 一种温控流体中子谱仪及其测量方法、分析处理系统 | 中国 | ZL202010363883.8 | 2022.03.01 | 第4967559号 | 四川轻化工大学、成都理工大学 | 杨剑波;王昌铭;庹先国;成毅;王洪辉;李锐:彭颖 | 有权 |
| 发明专利 | 一种套轴同心多球中子谱仪及其测量方法、分析处理系统 | 中国 | ZL202010363869.8 | 2022.03.01 | 第4970560号 | 四川轻化工大学、成都理工大学 | 杨剑波;王昌铭;庹先国;成毅;王洪辉;李锐;彭颖 | 有权 |
| 发明专利 | 中子能谱测量系统 | 中国 | ZL201910288957.3 | 2024年06月25日 | 第7141237号 | 成都理工大学 | 杨剑波;庹先国;李锐;成毅;王洪辉;王磊;刘明哲 | 有权 |
| 发明专利 | 网格化区域多模式中子剂量监测方法 | 中国 | ZL 20191 1306804.3 | 2022年10月21日 | 第5528625号 | 四川轻化工大学;成都理工大学 | 杨剑波;李锐;庹先国;成毅;王洪辉;王磊;刘明哲;周建斌 | 有权 |
| 发明专利 | 一种多通路单泵抽注水装置及其系统和方法 | 中国 | ZL201810497605.4 | 2020.01.03 | 第3653291号 | 四川新先达测控技术有限公司 | 杨剑波;庹先国;李锐;成毅;王洪辉;王磊;刘明哲 | 有权 |

1. 论文专著目录

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 论文（专著）  名称/刊名  /作者 | 年卷页码  （xx年xx卷  xx页） | 发表时间（年月 日） | 通讯作者（含共同） | 第一作者（含共同） | 国内作者 | 他引总次数 | 检索数据库 | 论文署名单位是否包含国外单位 |
| 1 | 《智能中子-伽马甄别技术研究》/吉林大学出版社 |  | 2020.11.01 |  | 刘明哲 | 刘明哲、柳炳琦、庹先国 |  |  | 否 |
| 2 | Study of the multi-parameter performance impact of the n–γ response function of a water-pumping-injection single-sphere neutron spectrometer | 2024, 139: 430 | 2024.05.21 | 许洁 | 杨剑波 | 杨剑波、许洁、李锐、石睿、王琦标、张松柏、郑洪龙、刘琦 | 0 | Web of Science | 否 |
| 3 | Unfolding neutron spectra from water-pumping-injection multilayered concentric sphere neutron spectrometer using self-adaptive differential evolution algorithm | 2021, 32: 26 | 2021.03.16 | 杨剑波 | 李锐 | 李锐、杨剑波、庹先国、许洁、石睿 | 8 | Web of Science | 否 |
| 4 | Research on Fitness Function of Two Evolution Algorithms Used for Neutron Spectrum Unfolding | 2021, 78: 109-115 | 2021.01.07 | 杨剑波 | 李锐 | 李锐、杨剑波、庹先国、石睿 | 3 | Web of Science | 否 |
| 5 | 单泵抽注水装置在新型抽注水中子能谱仪中的应用 | 2021,42(S1) | 2021.06.30 | 杨剑波 | 穆克亮 | 穆克亮、杨剑波、阳林锋、李锐、许洁、踪训成 | 2 | 中国知网 | 否 |
| 合 计 | | | | | | | 13 |  |  |

1. 主要完成人

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 姓名 | 排名 | 技术职称 | 完成单位 | 工作单位 |
| 杨剑波 | 1 | 教授 | 四川轻化工大学 | 四川轻化工大学 |
| 庹先国 | 2 | 教授 | 四川轻化工大学 | 四川轻化工大学 |
| 李锐 | 3 | 讲师 | 四川轻化工大学 | 四川轻化工大学 |
| 刘明哲 | 4 | 教授 | 温州理工学院 | 温州理工学院 |
| 王磊 | 5 | 教授 | 成都理工大学 | 成都理工大学 |
| 穆克亮 | 6 | 研究员 | 中国核动力设计研究院 | 中国核动力设计研究院 |
| 石睿 | 7 | 教授 | 四川轻化工大学 | 四川轻化工大学 |
| 许洁 | 8 | 其他 | 四川新先达测控技术有限公司 | 四川新先达测控技术有限公司 |

1. 完成单位

|  |  |
| --- | --- |
| 排名 | 单位名称 |
| 1 | 四川轻化工大学 |
| 2 | 成都理工大学 |
| 3 | 温州理工学院 |
| 4 | 中国核动力设计研究院 |
| 5 | 四川新先达测控技术有限公司 |