

北京市科学技术奖技术发明奖申报项目公示

项目名称	高温超导磁体多物理场设计方法、关键技术及其应用
提名者	清华大学
申报奖种	北京市科学技术奖技术发明奖
完成单位	清华大学、中国电力科学研究院有限公司、中国科学院合肥物质科学研究院、中国科学院近代物理研究所、上海超导科技股份有限公司、清华大学深圳国际研究生院
完成人	瞿体明、郑金星、吴巍、诸嘉慧、刘华军、关明智、朱佳敏、洪智勇、冯峰、宋彭
项目简介（限 500 字）	<p>高温超导磁体技术在先进能源装备、大科学装置和高端医疗设备等领域有着广阔的应用前景，对发展磁约束核聚变技术、极高场核磁共振磁体、质子/重离子癌症治疗装置等技术意义重大，符合国家“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要的战略需求。然而，高温超导磁体的非线性多场设计理论、运行监测方法、低成本高性能的材料制备工艺等瓶颈问题一度制约其发展和应用。为此，清华大学联合多家优势企事业单位针对上述问题开展攻关，取得了一系列创新发明成果，主要包括：</p> <p>(1) 提出了考虑非线性电磁效应的高温超导缆线和磁体多场结构设计新理论和新方法，包括发明了高性能集束</p>

化高温超导复合缆线导体技术，提出并建立了屏蔽电流效应对高温超导磁体应力分布影响的理论模型，建立了高温超导磁体多场结构设计新方法，保障磁体在运行中的结构安全性。

(2) 发明了基于多场行为的高温超导磁体稳定运行检测新技术，包括高温超导长带性能连续测量、高温超导磁体交流损耗分析测试、以及基于埋入与分布式光纤的低温-电磁多场环境下磁体运行性能测试等技术，实现了高温超导磁体的多维度、全过程健康监测。

(3) 发明了高温超导磁体技术所必需的材料制备新方法和新工艺，包括采用低氟化学溶液沉积快速制备低成本高温超导薄膜的新方法，本征缺陷与 BaHfO_3 掺杂相结合的强人工钉扎中心引入新方法，以及基于非接触式强制瞬冷技术连续制备工业级超低阻内封接头和使用 REBCO 脱层带材制备超导接头的新工艺。

本项目成果在加速器磁体、核磁共振磁体、超导电机和限流器磁体等领域实现了示范应用，为国家重大科技基础设施建设和国内外百余台超导磁体的设计制造提供了技术支撑，近三年直接经济效益超 1.15 亿元。基于核心发明点，项目团队共发表学术论文 49 篇，获得国家发明专利授权 29 项。中国电工技术学会对本项目成果开展了科技成果鉴定，认为项目整体处于国际领先水平。

本项目成果不仅能服务于国家战略发展，也同时促进了北京市的经济社会发展。基于本项目设计和测试技术所开发的磁偏置型超导限流器和超导储能磁等超导电力装置有望提升电网质量，增强北京电网抗短路故障的能力，提高首都供电可靠性和安全性；依托项目成果可发展超导质子/重离子治癌装置等高端医疗装备，未来有望带动近千亿元的全产业链经济效益。本项目的顺利实施对北京市科研创新能力的增强、高技术人才储备的充实和国际科技竞争力的提升起到了积极促进作用。

完成人对项目主要贡献

姓名	排名	职称	单位	主要贡献
瞿体明	1	副教授	清华大学	在发明点 1 中，提出了考虑非线性电磁效应的高温超导磁体多场结构设计的新方法，验证了屏蔽电流效应对高场磁体应力分布的影响；在发明点 2 中，发展了交流损耗测量、长带连续性能测量等关键测试技术；在发明点 3 中，参与开发了低氟化学溶液沉积法制备高温超导薄膜的新技术和二代带材的超导连接技术。
郑金星	2	研究员	中国科学院合肥物质科学研究院	在发明点 1 中，发明了基于 REBCO 超导带材的新型集束化高温超导复合缆线导体，并在高温超导储能磁体和其他大型超导磁体中获得了应用；在发明点 2 中，开展了交流损耗和应变测试技术在高温超导磁体中的应用研究。

吴巍	3	研究员	中国科学院近代物理研究所	在发明点 1 中, 参与构建了采用高杨氏模量材料缠绕加强以改善高场磁体应力状态的方法, 参与提出了屏蔽电流效应对磁体应力影响的理论模型; 在发明点 2 中, 发明了基于埋入与分布式光纤的热应变及多场测量技术, 并将其应用于超导磁体的实际运行测试。
诸嘉慧	4	教授级高工	中国电力科学研究院有限公司	在发明点 2 中, 发明了复合导体高温超导磁体线圈, 开发了高温超导单元的交流损耗测量装置, 最终实现了磁偏置超导限流器 10 kV 并网测试和应用。并将上述技术应用到相关高温超导装置的运行测试中。
刘华军	5	研究员	中国科学院合肥物质科学研究院	在发明点 1 中, 发明了一种基于 REBCO 涂层导体的高温超导导体, 大幅度改善高温超导缆线导体的导热性和力学性能, 使其可以应用于高场、大载流工况下的高温超导磁体。并参与了极高场内插磁体的研制。
关明智	6	研究员	中国科学院近代物理研究所	在发明点 1 中, 1) 参与构建了屏蔽场的高精度计算方法。与其他候选人合作提出了考虑屏蔽效应对磁体应力影响的理论模型, 并提出运用极低温应变测量技术实验表征了屏蔽电流效应对高温超导磁体局部应变的重要影响。2) 发展了基于埋入与分布式光纤的低温-电磁多场环境下运行性能测试技术等, 实现了高温超导磁体多维度健康检测。
朱佳敏	7	高级工程师	上海超导科技股份有限公司	在发明点 1 中, 参与发明了高效冷却的高温超导转子磁体结构; 在发明点 3 中, 发明了高速脉冲激光沉

				积制备带有混合人工钉扎的 EuBCO 超导薄膜技术，大幅度提升了超导带材低温高场下的性能；将点焊、钎焊和内封技术相结合，发明了世界上目前唯一的 REBCO 高温超导带材超低阻内封式接头。
洪智勇	8	研究员	上海超导科技股份有限公司	在发明点 1 中，参与发明了高效冷却的高温超导转子磁体结构；在发明点 3 中，将点焊、钎焊和内封技术相结合，参与发明了世界上目前唯一的 REBCO 高温超导带材超低阻内封式接头。
冯峰	9	副教授	清华大学深圳国际研究生院	在发明点 1 中，参与构建了考虑非线性电磁效应的高温超导磁体多场结构设计方法；在发明点 3 中，发明了低氟化学溶液沉积快速制备二代高温超导薄膜材料的新技术，并提出了利用 REBCO 脱层带材制备超导接头的技术方案。
宋彭	10	助理研究员	清华大学	在发明点 1 中，参与构建了考虑非线性电磁特性的高温超导磁体的多场结构设计方法，并将其应用到高温超导电机磁体中；在发明点 2 中，参与发明了高温超导复合导体线圈，并参与磁偏置高温超导限流器装置的开发。

代表性论文专著

序号	论文专著名称	刊名	年卷页码 (xx年 xx 卷 xx 页)	发表时间	全部作者
1	Screening current effect on the stress and strain distribution in REBCO high-field magnets: experimental verification and numerical analysis	Superconductor Science and Technology	2020, 33, 05LT02	2020-03-18	燕宇帆, 辛灿杰, 关明智, 刘华军, 谭运飞, 瞿体明
2	基于磁路的高温超导带材临界电流连续检测方法	稀有金属材料与工程	2015, 44(2), 429-432	2014-03-05	邹圣楠, 顾晨, 瞿体明, 韩征和

3	The sensitivity of distributed temperature sensor system based on Raman scattering under cooling down, loading and magnetic field	Cryogenics	2019 100 36-40	2019-04 -03	辛灿杰, 关明智
4	Experimental Measurements of the Sensitivity of Fiber-optic Bragg Grating Sensors with a Soft Polymeric Coating under Mechanical Loading, Thermal and Magnetic under Cryogenic	Chinese Physics Letters	2015, 32(1), 017401	2021-03 -30	关明智, 王省哲, 辛灿杰, 周又和, 马力楨

	Conditio ns					
5	Fabricat ion and Characte ristic Tests of a Novel Low-Resi stance Joint Structur e for YBCO Coated-C onductor s	IEEE Transact ion on Applied Supercon ductivit y	2015, 25(3), 660705	2014-10 -29	缪玘奂, 朱佳 敏, 成敏, 张中伟, 李柱永, 王亚 伟, 盛杰, 金之俭, 洪智勇	

核心知识产权列表

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	权利人	发明人	专利有效状态
1	发明专利	高温超导线圈和 高温超导线圈的 制作方法	中国	ZL201610 878171.3	2018- 06-22	清华 大学	瞿体明, 吴其红, 吴明硕, 顾晨, 冯 峰	授权
2	发明专利	适用于超导电机 转子线圈冷却的 旋转热筒结构及	中国	ZL201510 198733.5	2017- 11-14	上海 超导 科技	孙仁君, 瞿体明, 宋彭, 吴	授权

		使用方法				股份 有限 公 司， 清华 大学	其红，朱 佳敏，洪 智勇	
3	发明专 利权	用于高均匀度磁 体匀场线圈设计 的自动化实现方 法	中国	ZL201210 396948.4	2015- 04-08	中国 科学 院近 代物 理研 究所	杜俊杰， 吴巍，袁 平，马力 祯	授 权
4	发明专 利权	一种适用于提高 高温超导复合化 导体力学性能的 热成型方法	中国	ZL201911 113517.0	2020- 12-08	中国 科学 院合 肥物 质科 学研 究院	郑金星， 程远，陆 坤，刘旭 峰，张正 硕，黄卫	授 权
5	发明专 利权	一种基于 REBCO 超导带材的准圆 截面高温超导磁 体	中国	ZL201810 465627.2	2020- 04-24	中国 科学 院合 肥物 质科 学研 究院	施毅，张 新涛，刘 华军，刘 方，马红 军，雷 雷，于 敏，陈超	授 权
6	发明专 利权	低温背场磁体及 高温超导单元交 流损耗测量装置	中国	ZL201910 114900.1	2021- 07-27	中国 电力 科学	诸嘉慧， 王海洋， 张宏杰，	授 权

						研究 院有 限公 司	陈盼盼, 张会明, 赵勇青, 丘明, 杨 艳芳	
7	发明专 利权	一种复合超导体 线圈	中国	ZL201810 126350.0	2022- 10-25	中国 电力 科学 研究 院有 限公 司	诸嘉慧, 宋彭, 瞿 体明, 陈 盼盼	授 权
8	发明专 利权	一种控制前驱物 氟钡比制备高温 超导膜的方法	中国	ZL201310 354477.5	2014- 12-24	清华 大 学, 清华 大学 深圳 国际 研究 生院	吴蔚, 冯 峰, 黄荣 厦, 史 锴, 瞿体 明, 张燕 怡, 肖绍 铸, 韩征 和	授 权
9	发明专 利权	适用于大规模生 产的钉扎中心引 入结构、方法及 超导带材	中国	ZL202010 507795.0	2021- 08-20	上海 超导 科技 股份 有限 公司	姜广宇, 赵跃, 朱 佳敏, 高 中赫	授 权
10	发明专 利权	一种用于稀土钡 铜氧高温超导体	中国	ZL201510 896584.X	2019- 03-01	清华 大学	冯峰, 瞿 体明, 朱	授 权

		线的超导接头制 作方法				深圳 国际 研究 生院	宇平, 卢 弘愿, 张 向松, 符 其树, 韩 征和	
--	--	----------------	--	--	--	----------------------	--	--