

2026 年度拟提名陕西省科技进步奖项目公示内容

一、项目名称

复杂工况下永磁电机高任务遂行设计与驱控技术及应用

二、提名者及提名意见

提名者：

陕西省知识产权局

提名意见：

该项目针对航空航天等复杂工况下永磁电机可靠性不足、故障容错能力弱、任务遂行能力低等关键技术难题，历时十余年攻关，提出了“精准建模—冗余设计—鲁棒控制—高效遂行”协同创新方法，形成了可靠性精准建模、多场耦合多余度设计、早期故障精准诊断和全工况自适应容错控制等系列创新成果，突破了四大技术瓶颈：一是提出了复杂工况下多变量函数的电机可靠性建模及寿命预测方法；二是发明了多场耦合冗余电机设计方法；三是提出了复杂扰动环境下早期故障诊断方法；四是提出了全工况自适应容错控制方法。

该项目总体技术达到国际先进水平，关键指标优于国内外同类技术：寿命达 3×10^7 转（提升 50%），工作温度拓展至 $-60^\circ\text{C} \sim +150^\circ\text{C}$ ，故障后热蔓延率 $\leq 10\%$ 。项目获授权国家发明专利 52 项、软件著作权 8 项，发表高水平论文 25 篇。

该项目已成功应用于兰州万里航空机电、西安飞行自动控制研究所、西安航天精密机电研究所等科研院所和相关企业，覆盖航空航天、装备制造、新能源、光电探测等多个领域，支撑多种航空作动系统、无人机伺服系统、航天飞行器伺服驱动系统成功装机与定型，打破了国外技术垄断，实现核心部件自主可控，推动了航空航天等领域核心动力部件技术进步和产业升级，产生了重大的社会和经济效益。

对照陕西省科学技术进步奖授奖条件，提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

三、项目简介

永磁电机是无人机、战斗机、卫星、飞船等航空航天装备的核心动力与伺服控制部件，广泛应用于电推进、机电作动、载荷展开、姿态控制等关键任务。但是航空航天等领域面临空间高真空（ 1.3×10^{-10} 千帕）、大温差交变（ -130°C 至 $+120^\circ\text{C}$ ）、强粒子辐射（ 1.1mSv/天 ）等极端环境，以及大机动过载、强力学载荷、高振动冲击等苛刻条件，对永磁电机的可靠性带来了巨大的挑战。而永磁电机系统作为执行机构，当其发生故障时为单点失效，会严重降低任务遂行能力甚至任务失败，带来灾难性后果。

2012 年以来，西北工业大学在国家级纵向项目、国家自然科学基金、陕西

省重点研发计划、航天基金、重大横向等项目的支持下，提出了“精准建模—冗余设计—鲁棒控制—高效遂行”协同创新研究方法，突破了复杂工况下永磁电机中的可靠性精准建模、多场耦合冗余设计、早期故障精准识别、全工况自适应容错等关键技术瓶颈，解决了航空航天复杂工况下永磁电机系统可靠性不足、故障容错能力弱等核心问题，显著提升了永磁电机在复杂工况下的任务遂行能力，推动了我国航空航天装备核心动力部件的国产化替代与升级，为相关型号任务的成功发射和安全稳定运行提供了重要保障。

该项目紧密围绕航空航天复杂工况下永磁电机的高任务遂行能力需求，聚焦可靠性建模、多余度设计、故障诊断、容错控制四大核心方向，开展系统性研究，具体内容如下：

(1) 复杂工况下的永磁电机可靠性精准建模

针对复杂工况引起的永磁电机可靠性建模误差问题，分析高真空、大温差、强辐射等极端环境引起的电机材料特性和磁化特性的变化过程，揭示大机动过载、强力学载荷、高振动冲击等苛刻条件对电机负载特性和机械特性的影响规律。计算高低温剧烈变换条件下辐射散热为主方式下的电机磁滞、涡流、铜耗、机械等损耗，揭示永磁电机的电磁场、温度场、结构场等物理场分布规律。对永磁电机中的主要组成部分绕组、永磁体、轴承等关键部件在复杂工况下的失效率进行计算，确定永磁电机各部件在复杂工况下可靠性主要失效模式，获取基于电、磁、力、热、失效影响因素等多变量下的永磁电机可靠度函数，建立复杂工况下的永磁电机可靠性精准模型。

(2) 复杂工况下永磁电机多余度设计方法

在复杂工况下永磁电机可靠性模型的基础上，提出永磁电机多场冗余设计方法。研究复杂工况下不同余度结构对永磁电机可靠性和性能的影响，从绕组组合模式对磁动势与性能参数的影响出发，揭示永磁电机的多余度设计对定子和分段转子错位双凸极磁阻结构、径向和轴向混合励磁源的磁场调制行为，获取电枢绕组、凸极结构、永磁体等主要参数的优化设计规律，考虑磁路饱和对气隙磁场调制作用的影响，建立基于换极效应的磁动势磁导模型，计算电机的励磁气隙磁密和电枢气隙磁密，探寻气隙各次谐波磁场幅值随转子转动的变化规律，最大程度地利用有效磁场谐波分量，抑制无效磁场谐波分量，优化调制气隙磁场分布，提升永磁电机动态性能。

强噪声与小样本条件下的多余度永磁电机故障诊断

针对复杂工况下永磁电机早期故障难以识别、诊断精度低以及多余度电枢绕组进一步影响诊断精度的问题，研究复杂工况下多余度永磁电机故障诊断方法。根据多余度永磁电机的电压平衡方程，建立精确的永磁电机解析模型，分析电机绕组、永磁体、轴承等主要参数的改变对电机运行性能的影响，建立永磁电机的故障机理模型，在分析电机故障电气特征的基础上，研究电机故障的振动特征，以采集的永磁电机振动信号和电流信号为原始信源，分别提取它们的时域特征，针对电机故障特征存在较强的非线性关系，采用具有很强非线性

处理能力的核主元分析进行特征融合，得到信息互补的特征向量，建立基于深度学习的故障诊断模型，实现对多余度永磁电机常见故障的早期准确诊断。

(4) 复杂工况下多余度永磁电机容错控制

针对故障后永磁电机控制精度下降、运行不稳定、无法持续执行任务的问题，构建全工况自适应容错控制体系。一是基于多余度拓扑结构，设计故障状态下的通道快速切换策略，实现故障通道的无感切除与健康通道的无缝衔接，减少故障对系统运行的影响；二是设计多物理场协同容错控制算法，结合电机运行状态与故障类型，自适应调整控制参数，抑制故障后的转矩脉动与转速波动，保障电机在故障工况下仍维持高精度控制与稳定动力输出；三是开展容错控制仿真与试验验证，模拟航空航天复杂工况下的各类故障场景，优化控制策略的动态响应性能与鲁棒性，确保故障工况下系统仍能满足装备任务遂行要求。

该项目主要技术经济指标如表 1 所示：

表 1 项目主要技术指标

性能指标	该项目指标	性能指标	该项目指标
电机余度	双/多余度	工作环境温度	-60℃~+150℃
寿命(转数)	3×10^7	早期故障诊断准确率	≥99%
电机温升	≤65℃/2 小时	故障后热蔓延率	≤15%
控制器通道	双/多通道	故障下 电机动态性能	转速波动≤0.3% 转矩脉动≤3% 控制精度≤0.01mm
可靠性建模精度	偏差≤5%		

该项目共授权发明专利 52 项，专利成果转让 2 项，授权软件著作权 8 项，相关原理性方法/基础理论成果发表国内外高水平学术论文 25 篇。

该项目已成功应用于兰州万里航空机电有限责任公司、西安飞行自动控制研究所、西安航天精密机电研究所、烟台奇创芯源科技有限公司、诸暨和创电机科技有限公司、北京能耀数字科技有限公司等多家单位的电气设备中，有力支撑了武器伺服系统、发动机控制系统、无人机驱动系统、光电吊舱等产品的成功装机，为我国航空航天等领域机电系统的型号研制与工程化应用提供了重要技术支撑，产生了重大的社会和经济效益。

四、客观评价

项目“复杂工况下永磁电机高任务遂行设计与驱控技术及应用”针对空间高真空、大温差交变、强辐射以及大机动过载、强振动冲击等复杂工况下永磁电机可靠性不足、环境适应性差、早期故障难以识别和故障后持续运行能力不足等行业共性问题，围绕可靠性精准建模、多场耦合多余度设计、早期故障诊断和全工况自适应容错控制开展了系统研究，形成了从可靠性分析、结构设计、状态感知到故障容错的一体化技术体系。

项目建立了考虑电、磁、力、热及失效因素耦合作用的复杂工况永磁电机

可靠性模型及全生命周期寿命预测方法，解决了传统模型对多应力耦合考虑不足、小样本条件下预测偏差较大的问题；提出兼顾可靠性、容错性和动态性能的多冗余结构设计及磁场谐波优化方法，实现可靠性与运行性能协同提升；针对复杂扰动环境下早期故障特征微弱、样本数量有限等问题，构建多源信号融合与深度学习相结合的故障诊断方法；进一步建立全工况自适应容错控制体系，实现故障通道快速切换及故障状态下的高精度稳定运行。

根据项目申报材料与国内外同类技术对比，本项目电机寿命达到 3×10^7 转，同类技术约为 2×10^7 转，寿命提高 50%；可靠性建模偏差由同类技术的 $\leq 10\%$ 降低至 $\leq 5\%$ ；工作环境温度范围达到 $-60^\circ\text{C} \sim +150^\circ\text{C}$ ，宽于同类技术的 $-40^\circ\text{C} \sim +120^\circ\text{C}$ ；早期故障诊断准确率达到 $\geq 99\%$ ，高于同类技术的 $\geq 90\%$ ；故障后热蔓延率控制在 $\leq 15\%$ ，优于同类技术的 $\leq 20\%$ ；故障响应与切换时间 $\leq 5 \text{ ms}$ ，优于同类技术的 $\leq 10 \text{ ms}$ 。在故障容错运行状态下，实现转速波动 $\leq 0.3\%$ 、转矩脉动 $\leq 3\%$ 、位置控制精度 $\leq 0.01 \text{ mm}$ 。电机余度、控制器通道及稳态温升等指标与国内外同类先进技术相当。综合比较表明，项目在长寿命可靠性、宽温域环境适应、早期故障诊断、快速容错切换及故障态高精度运行等方面具有明显技术优势。

项目成果已在航空航天、工业制造、高端装备和新能源等领域实现工程化应用。截至 2026 年 5 月，相关技术已应用于兰州万里航空机电有限责任公司、西安飞行自动控制研究所、西安航天精密机电研究所、烟台奇创芯源科技有限公司、诸暨和创电机科技有限公司、北京能耀数字科技有限公司等 6 家行业单位，应用对象涵盖航空飞行控制伺服系统、航空电推进与机电作动系统、航天器在轨驱动机构、光电探测稳定平台、工业驱动设备及新能源核心驱动系统。

其中，成果在航空领域支撑了多种航空作动系统的装机试飞与定型；在无人机及民机高压大功率伺服系统中，实现故障余度热隔离与快速切除，故障工况下系统降额比例控制在 10% 以内；在航天领域应用于卫星、飞船等航天器伺服驱动与控制系统，为高真空、大温差交变、强辐射环境下有效载荷展开、天线指向和姿态控制等任务提供可靠支撑；在工业驱动、光电探测和新能源装备领域，提升了复杂工况下设备连续运行可靠性、动态响应及环境适应能力，促进了相关核心动力部件的国产化应用。

项目成果已形成较好的经济效益。兰州万里航空机电有限责任公司应用证明显示，2023—2025 年应用本项目相关成果累计新增销售额 13035 万元、新增利润 1570 万元，体现了成果较强的工程转化能力和产业化价值。

项目形成授权发明专利 52 项、软件著作权 8 项，相关基础理论和方法发表高水平学术论文 25 篇，建立了较为完整的自主知识产权体系。成果面向航空航天装备高可靠、长寿命、强容错和自主可控需求，提升了复杂工况永磁电机可靠性设计、故障诊断和容错控制技术水平，并向工业制造、光电装备和新能源领域拓展应用，对推动高性能永磁电机及驱控系统技术进步、促进核心机电部件国产化替代和提升高端装备自主保障能力具有重要意义。

综上，项目技术创新具有较强的系统性和工程针对性，多项关键性能指标优于申报材料所列国内外同类技术，成果经过多领域、多单位长期工程应用验证，取得了较好的经济效益，并具有显著的工程应用价值。

五、应用情况

本成果聚焦复杂工况下永磁电机可靠性不足、故障容错能力弱、任务遂行能力低等关键难题，突破了可靠性精准建模、多场耦合冗余设计、早期故障精准识别、全工况自适应容错等关键技术瓶颈，形成了一套兼具实用性与创新性的技术体系。该成果已应用于航空航天、装备制造、新能源等多个领域，涉及多家重点企业及科研院所，实现了技术成果的规模化工程化应用，应用产品涵盖航空作动系统、航天飞行器伺服驱动系统、工业驱动设备、光电探测产品、新能源装备等，为各行业相关产品升级、核心部件国产化替代提供了有力支撑，具体应用情况如表 3 所示。

表 3 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	西安飞行自动控制研究所	多余度拓扑设计、热安全隔离与容错控制技术	应用于无人机及民机高压大功率伺服系统。通过该技术实现了故障余度的热隔离与切除，将故障工况下的系统降额比例控制在 10%以内，保障了飞控系统在全飞行剖面内的高可靠运行。	2020.06-至今	赵小鹏
2	兰州万里航空机电有限责任公司	高可靠性设计、宽速域鲁棒控制、多余度协同管理技术	应用于航空电推进及机电作动系统。解决了宽速域变负载与强振动冲击下系统稳定性不足的难题，支撑了多种航空作动系统的成功装机试飞与定型，实现了机载机电系统的自主可控。	2020.03-至今	关文卿
3	西安航天精密机电研究所	多余度设计、可靠性建模、故障诊断与容错控制技术	应用于卫星、飞船等航天飞行器的伺服驱动与控制系统。在高真空、大温差交变及强辐射的空间极端环境下，保障了有效载荷展开、天线指向及姿态控制等关键任务的高可靠执行。	2020.09-至今	曹宽
4	烟台奇创芯源科技有限公司	低脉动电机结构设计、高精度扰动抑制及高可靠集成技术	应用于光电探测、光电吊舱及目标跟踪类产品。显著提升了系统在复杂扰动工况下的视轴稳定可靠性与跟踪精度，支撑了多款装备的研制定型与批量交付。	2022.12-至今	牟道禄
5	诸暨和创电机科技有限公司	抗扰控制及恶劣环境适应性优化技术	应用于水泵、风机、矿山及冶金钢厂等工业驱动产品。解决了重载交变、高温高湿及强振动环境下电机效率偏低、运行不稳的瓶颈，大幅提升了工业装备的连续工作可靠性。	2020.02-至今	李嘉晖
6	北京能耀数字科技有限公司	电磁-热-力-流多物理场协同	应用于多种规格新能源产品。在保证高功率密度的同时，攻克了宽调速、大过载工况下多物	2021.05-至今	张慧

		优化理论、自适应容错控制	理场耦合设计困难的难题，实现了新能源核心动力部件的国产化替代。		
--	--	--------------	---------------------------------	--	--

在航空航天领域，成果主要应用于卫星、飞船、无人机、战斗机等航空航天装备的核心动力与伺服控制部件，适配空间高真空、大温差交变、强粒子辐射、强振动冲击等极端复杂工况，有效解决了航空航天装备中永磁电机单点失效、可靠性不足、容错能力弱、控制精度有限等关键问题，填补了我国复杂工况下航空航天永磁电机核心技术的部分空白。该成果广泛应用于兰州万里航空机电有限责任公司、西安飞行自动控制研究所、西安航天精密机电研究所等重点单位，其中在兰州万里航空机电有限责任公司支撑了多种航空作动系统的研制与量产，助力相关产品成功装机试飞；在西安飞行自动控制研究所应用于无人机伺服电机系统，可进一步推广应用于民机高压大功率伺服系统；在西安航天精密机电研究所适配多种型号航天飞行器的伺服驱动与控制系统，有力保障了多项重大航空航天型号任务的成功实施。应用规模全面覆盖多款航空航天装备型号，实现了核心技术的自主可控，打破了国外相关技术垄断与封锁，提升了我国航空航天装备的核心竞争力，为我国航空航天事业高质量发展提供了坚实的技术支撑。

在工业制造领域，成果应用于水泵、风机、矿山机械、冶金钢厂等工业装备的核心动力部件，针对重载交变、粉尘油污、高温高湿等复杂工况，解决了传统永磁电机效率偏低、运行不稳、过载能力不足等瓶颈问题。主要应用于诸暨和创电机科技有限公司，覆盖多款工业驱动产品，广泛应用于矿山、冶金、水利等行业的生产装备，助力工业企业节能增效、提升生产可靠性，应用范围辐射华东地区工业领域，形成了规模化批量应用，累计创造显著经济效益。在光电装备领域，成果应用于光电探测、光电吊舱、目标跟踪等装备的核心执行部件，解决了复杂工况下视轴稳定可靠性不足、跟踪精度受限等问题，显著提升了装备的定位精度、动态响应速度与运行平稳性。应用于烟台奇创芯源科技有限公司，适配该公司多款光电探测类产品，支撑相关型号装备的研制、定型与批量交付，应用规模随产品量产持续扩大，提升了产品市场竞争力，推动了光电探测领域技术升级。

在新能源领域，成果应用于新能源装备的核心驱动部件，针对宽调速、大过载、强振动等复杂工况，精准解决了永磁电机系统运行稳定性不足、效率波动大、多物理场耦合设计困难等技术难题。成果重点应用于北京能耀数字科技有限公司，深度融入该公司研制的多种规格新能源产品研发与生产全过程，实现了技术与产品的深度融合，不仅助力新能源核心动力部件的国产化替代与工程化落地，打破了国外同类核心技术的依赖，还为新能源装备高效、安全、可靠运行提供了坚实的技术支撑，有效降低了装备能耗，提升了产品续航能力与使用寿命。目前，应用规模随新能源产业的快速发展逐步扩大，覆盖新能源装备多个细分领域，后续将进一步拓展应用场景，为我国新能源产业高质量发展注入新动能。

综上所述,本成果已实现多领域、多单位的规模化应用,截至 2026 年 5 月,该项目已在兰州万里航空机电有限责任公司、西安飞行自动控制研究所、西安航天精密机电研究所、烟台奇创芯源科技有限公司、诸暨和创电机科技有限公司、北京能耀数字科技有限公司等 6 家行业重点单位,应用产品涵盖航空航天、工业制造、高端装备、新能源四大领域,包括航空飞行控制伺服系统、航天器在轨驱动机构、工业重载变负载动力单元、光电探测稳定平台及新能源核心驱动系统等关键产品,为产品的高任务遂行提供了重要保障,产生了重大的社会效益。

六、主要知识产权和标准规范等目录（限 10 条）

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	发明专利	一种双余度无刷直流电机控制系统可靠度计算方法	中国	ZL202110725183.3	2023-03-31	5829535	西北工业大学	付朝阳；刘兴邦；刘铮；孙平
2	发明专利	一种牵引电机故障诊断装置及方法	中国	ZL202211075447.6	2022-11-08	5568774	西北工业大学	牛小童；付朝阳
3	发明专利	一种五相永磁同步电机开路故障诊断方法	中国	ZL202010665534.1	2023-03-24	5814647	西北工业大学	马瑞卿；李添幸；赵晓晓
4	发明专利	一种永磁同步电机无差拍转矩磁链控制方法	中国	ZL202211619055.1	2025-09-26	8306285	西北工业大学	付朝阳；刘兴邦；刘铮；平双瑞；胡锦涛
5	发明专利	一种永磁电机可靠性计算方法	中国	ZL201611240081.8	2019-02-26	3268383	西北工业大学	付朝阳；张晓康
6	发明专利	一种电机性能、故障快速检测装置	中国	ZL202311255347.6	2024-01-26	6644295	西北工业大学	付朝阳；范宇航；刘景林；王京锋
7	发明专利	一种卫星天线的驱动传动装置	中国	ZL202310705486.8	2023-09-05	6294244	西北工业大学	付朝阳；宋受俊；葛乐飞；刘景林
8	发明专利	一种电机设备性能测试装置	中国	ZL202210791187.6	2022-09-09	5441407	西北工业大学	付朝阳；牛小童；平双瑞
9	发明专利	一种基于电压比值的模型预测故障检测方法	中国	ZL202410813798.5	2025-10-31	8421092	西北工业大学；西北工业大学深圳研究院	付朝阳；胡锦涛；徐榕蔚；羊彦；薛威
10	发明专利	一种用于电机的传动保护装置	中国	ZL202211276162.9	2023-02-03	5728634	西北工业大学	付朝阳；胡锦涛；郑美云；张守旭；刘景

								林
--	--	--	--	--	--	--	--	---

主要完成人情况

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
付朝阳	1	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	项目总体设计，提出了“精准建模—冗余设计—鲁棒控制—高效遂行”协同创新研究思路，确立总体技术路线和研究方案。提出复杂工况下永磁电机可靠性精准建模、全工况自适应容错控制两大核心方向研究，发明多变量函数可靠性建模方法和多余度通道快速切换策略，牵头制定项目整体技术方案并组织实施，对项目四大创新点均作出核心贡献。
马瑞卿	2	无	二级教授	西北工业大学	西北工业大学	提出复杂工况下多场耦合冗余电机设计方法。提出兼顾可靠性与性能协同提升的多余度结构设计方法，揭示余度拓扑构型与电机容错运行能力、动态性能的耦合关联规律；建立基

						于换极效应的磁动势磁导模型，提出谐波优化控制策略，有效提升了电机的可靠性和动态性能。
牛小童	3	无	博士生	西北工业大学	西北工业大学	提出了复杂扰动环境下永磁电机早期故障诊断方法研究。构建高精度永磁电机解析模型，建立“振动信号+电流信号”双信源采集体系，提出基于核主元分析的多源特征融合方法，构建深度学习故障诊断模型，提高了早期故障诊断准确率。
宋受俊	4	无	二级教授	西北工业大学	西北工业大学	提出了多余度永磁电机设计与容错控制方法。负责电机驱动系统整体方案设计和宽速域鲁棒控制算法研发，提出多余度稀土永磁无刷直流电机关键技术方案，支撑多种航空作动系统的成功装机试飞。
施振中	5	总经理	高工	浙江康格电气有限公司	浙江康格电气有限公司	多场耦合冗余电机设计和实验验证

						证。负责电机结构优化设计和样机研制，完成多余度永磁电机电磁设计、结构强度校核和热分析，参与搭建航空航天复杂工况仿真与实验验证平台。
彭雪昆	6	研发总监	高工	默颶电气有限公司	默颶电气有限公司	进行了高精度容错控制算法的研究，建立了基于多物理场耦合计算模型，对电驱动系统的参数进行了优化设计。
侯红胜	7	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	提出了全工况自适应容错控制方法。负责多物理场协同容错控制算法设计，融合电磁、温度、机械多物理场监测数据实现控制参数自适应调整。
郑如如	8	无	工程师	乐清市雁荡山电气研究院	乐清市雁荡山电气研究院	提出了复杂工况下电机损耗计算和多物理场分布规律分析方法，参与构建辐射散热主导模式下的损耗计算模型，完成可靠性模型的数值验证和容错控制算法的仿真实现。作为共同

						发明人获授权发明专利 2 项，对创新点一和创新点四作出贡献
梁培鑫	9	无	副教授	西北工业大学	西北工业大学	进行了硬件在环实验平台搭建和测试验证，完成故障注入试验、动态加载试验和极端环境试验，验证容错控制策略在各类复杂故障场景下的稳定性和鲁棒性。
徐振源	10	无	无	乐清市雁荡山电气研究院	乐清市雁荡山电气研究院	搭建了实验平台，完成了相关驱动系统性能测试。

七、主要完成单位情况及创新推广贡献

完成单位	排名	对本项目科技创新和应用推广情况的贡献
西北工业大学	1	全面负责项目总体策划、技术路线制定和核心技术攻关。提出了复杂工况下多变量函数的电机可靠性建模及寿命计算方法，解决了在航空航天等领域空间高真空、大温差交变、强粒子辐射、大机动过载、强力学载荷、高振动冲击等复杂工况下，导致的永磁电机特性演化不明、多场耦合规律不清、可靠性建模精度不足、寿命评估预测不准等问题。发明了复杂扰动环境下永磁电机早期故障诊断方法。针对永磁电机早期故障隐蔽性强、难以识别、诊断精度低，易导致故障扩大化、影响设备安全运行的技术难题，在永磁电机多余度设计结构的基础上，围绕其故障下参数变化特性，构建了一套精准、高效、抗干扰的永磁电机早期故障诊断体系，有效解决了复杂扰动环境下电机故障诊断的核心痛点。发明了永磁电机全工况自适应容错控制方法。解决了现有永磁电机发生故障后，控制精度显著下降、运行稳定性不足、无法持续执行航空航天等高端装备任务的技术痛点，通过构建全工况自适应容错控制体系，实现故障工况下多余度永磁电机的高精度、稳定运行，保障装备任务遂行能力。
浙江康格电气有限公司	2	建立了航空航天复杂工况下永磁电机仿真与实验验证平台针对航空航天复杂工况下故障场景多样、环境恶劣，传统验证方式难以全面覆盖实际应用需求的问题，构建专属仿真与试验验证体系，模拟航空航天领域常见的各类故障场景（如高空低温环境下的绕组故障、强电磁干扰下的功率器件故障、变负载工况下的永磁体退磁故障等），全面测试容错控制策略的性能。通过搭建硬件在环实验平台，如图 4 所示，结合有限元与电路磁等效模型，量化故障电流、磁密畸变及振动噪声随转速、温度、载荷变化的敏感度；开展动态加载试验与极端环境试验，优化控制策略的动态响应性能与鲁棒性，确保容错控制策略在各类复杂故障场景下均能稳定生效。
乐清市雁荡山电气研究院	3	发明了复杂工况下多场耦合冗余电机设计方法，针对永磁电机在复杂工况下易出现可靠性下降、动态性能衰减、磁场畸变等技术问题，立足多余度设计理念，突破传统永磁电机单一结构设计局限，构建了一套兼顾可靠性与动态性能的复杂工况永磁电机多余度设计体系，有效解决了复杂工况下永磁电机高可靠设计难题。

八、完成人合作关系说明

第一完成人和第二完成人共同项目立项；
第一完成人和第五完成人共同项目立项；
第一完成人和第六完成人共同项目立项；
第一完成人和第七完成人共同项目立项；
第一完成人和第八完成人共同项目立项；
第一完成人和第九完成人共同项目立项；
第一完成人和第十完成人共同项目立项；
第一完成人和第三完成人共同发明专利授权；
第一完成人和第四完成人共同发明专利授权。