

教育部科学研究优秀成果奖（自然科学和工程技术）提名项目公示

一、项目名称

新能源重型特种车辆电驱动系统关键技术及应用

二、提名单位（提名专家）

北京航空航天大学

三、项目简介

重型特种车辆电动化是推动绿色低碳转型，助力“双碳”目标实现的重要途径，电驱动系统是新能源重型特种车辆的核心总成，突破电驱动系统关键技术是实现新能源重型特种车辆核心技术自主可控、产业链升级的关键。

项目以系统解决“多电机多模构型创新难、高性能电机电控设计难、多电机多模协同控制难”等主线，在国家重点研发计划、国家自然科学基金等项目支持下，产学研用十年深度合作，从基础理论创新、工程技术创新两个层面建立了新能源重型特种车辆电驱动系统科技创新成果体系，取得“高可靠、优设计、精控制”三大创新成果：

（1）针对复杂工况下新能源重型特种车辆电驱动系统可靠性难题，发明了多电机多模电驱动系统高效可扩展式构型设计方法，研发了面向不同吨位等级的系列化双电机、四电机多模电驱动系统产品；揭示了弯曲应力-曲率半径精准映射规律，发明了重载齿轮高强度齿形-刀具一体化快速设计方法，齿根抗断裂强度提升15%以上；提出了融合高保真数字孪生模型的健康状态高精度监测方法，通过有限的训练数据和基于迁移学习网络的域判别方法，故障诊断准确率达到99%。电驱动系统健康服役寿命超3万小时。

（2）针对新能源重型特种车辆电驱动系统高效率、高功率密度、高集成度电机电控系统设计难题，发明了扁线绕组端部换位技术、近槽口不等高分块扁线技术和新型波绕组扁线技术，提出了多场约束下的电机多目标近限设计方法，高效区占比提升超15%，峰值效率 $>97.5\%$ ；发明了宽温域下端部淋油及转子甩油的高效直接油冷技术，提升连续功率密度超20%；发明了多电机控制器集成设计技术，攻克了多电机集成控制器热负荷高和近场辐射电磁兼容难题，集成控制器重量减轻超15%，体积下降超23%。全电机（包括电机轴和壳体）额定功率密度 $\geq 2.2\text{kW/kg}$ ，系统效率提升1%。

（3）针对复杂应用场景下多电机多模电驱动系统扭振突出、模式切换控制

难、实际使用电耗高的难题，提出了电驱动系统宽频扭振定向抑制方法，低频冲击和低频扭振分别降低45%和25%；提出了无动力中断的模式切换过程协同控制方法，攻克了恶劣工况下无动力中断模式切换的难题，换模成功率达到100%；发明了基于数据驱动的预测型能量管理方法，实现了在典型运行工况下的系统能量最优利用，模式切换频次降低96.7%。矿山工况系统能耗降低10%。

项目研发出法士特FS4E250、凯博eQMT和精进SD150等130-180吨级系列化电驱动系统产品，额定功率密度 $\geq 1.375\text{kW/kg}$ 、最高效率 $\geq 93.07\%$ 、最大输出扭矩 $\geq 28700\text{Nm}$ 。项目产品已与一汽解放等60余家整车企业配套，累计销售超12万台，市场占有率超过70%，并出口欧洲、美国等30多个国家。近三年项目直接经济效益57.67亿元，经济和社会效益显著。

项目授权发明专利60件、软件著作权26件，出版专著3部，发表论文38篇，制定企业标准24项；培养硕博研究生超120人、省部级优博论文3人，获省部级教学成果奖2项。专家鉴定认为：项目总体技术水平国际先进，其中高效率高功率密度扁线油冷电机设计技术、多电机多模电驱动系统无动力中断模式切换协同控制方法达到国际领先水平。

四、 主要完成人情况

排名		第1完成人	
姓名	徐向阳	技术职称	教授
工作单位	北京航空航天大学	完成单位	北京航空航天大学
对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：作为北航方面的负责人，是本项目的主要技术负责人，提出了新能源重型特种车辆电驱动系统关键技术研发的技术路线，提供了高速重载极端服役工况下的高可靠性设计、高效率高集成度电机系统研发、复杂工况下的瞬态协同控制与稳态能量管理技术的开发思路。在系列化产品应用中，提出了面向工程实际的建设性意见和建议，确保产品开发进度。本人在该项技术研发中投入的工作量占本人工作总量的50%。			

排名		第2完成人	
姓名	蔡蔚	技术职称	教授
工作单位	哈尔滨理工大学	完成单位	哈尔滨理工大学
对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：作为项目的主要骨干之一，对创新点2具有重要的贡献。首创国际领先的“发卡式”扁线绕组发明技术，带来电机低耗高效、散热好体积小、节材降本和易于快节奏自动制造等优势。创新发明了直接油冷技术，取得“电机和油冷却方法”【支撑创新点2】等成果。本人在该项技术研发中投入的工作量占本人工作总量的60%。			

排名		第3完成人	
姓名	王峰	技术职称	教授
工作单位	江苏大学	完成单位	江苏大学
<p>对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：对创新点2.1.2、2.3.2、2.3.3均有重要贡献，对项目中基于数字孪生技术的电驱动系统全生命周期故障预测研究做出了重要贡献，显著提升电驱动系统典型故障诊断准确率；提出多模电驱动系统切换频次-能量消耗实时优化策略；负责完成电驱动系统模式切换过程宽频减振方法研究，提出了融合目标点识别+映射决策+优化控制的电驱动系统多频扭振定向抑制方法，实现了模式切换宽频扭振综合抑制。本人在该项技术研发中投入的工作量占本人工作总量的80%。</p>			

排名		第4完成人	
姓名	王书翰	技术职称	教授
工作单位	北京航空航天大学	完成单位	北京航空航天大学
<p>对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：作为项目的主要骨干之一，对创新点3具有重要的贡献，提出了新能源重型特种车辆电驱动系统瞬态模式切换过程协同控制方法，攻克了模式切换过程中动力中断的难题，实现了新能源重型特种车辆在大坡度极限工况下的换挡成功率达到100%；提出了面向不同极端应用场景的控制参数自学习方法，实现了多电机电驱动系统控制参数在多种矿区道路的自演进、自进化，同时保证了批量下线的快速自学习与生命周期内的稳定自学习。本人在该项技术研发中投入的工作量占本人工作总量的60%。</p>			

排名		第5完成人	
姓名	谢颖	技术职称	教授
工作单位	哈尔滨理工大学	完成单位	哈尔滨理工大学
<p>对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：作为项目的主要骨干之一，对创新点2具有重要的贡献。针对国家战略新兴产业新能源汽车电驱动领域，开展电机研发及关键材料应用技术研究，结合发卡式绕组的优势，实现了电动汽车对电机高效率和高功率密度的要求，研发的驱动电机功率密度大于 6.7kW/kg，远超国家《节能与新能源汽车技术路线图2.0》中2025年的规划目标【支撑创新点2】；同时研发的新能源车用电机的新型油冷系统，改善了喷油流量不均和冷却效果差等问题，实现了全面均衡冷却【支撑创新点2】。本人在该项技术研发中投入的工作量占本人工作总量的60%。</p>			

排名		第6完成人	
姓名	李可	技术职称	副教授
工作单位	江苏大学	完成单位	江苏大学
<p>对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：作为项目骨干之一，对创新点2做出创造性贡献，是扁线电机创新结构及近限设计方法、端部淋油及转子甩油的高效直接油冷技术、电机控制器多维度高集成技术等技术发明点的主要贡献者。本人在该项技术研发中投入的工作量占本人工作总量的50%。</p>			

排名		第7完成人	
姓名	张海涛	技术职称	正高级工程师
工作单位	陕西法士特汽车传动集团有限责任公司	完成单位	陕西法士特汽车传动集团有限责任公司
<p>对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：法士特技术团队带头人，推动传统变速箱、新能源纯电驱动系统及相关技术创新。指导并参与多款新能源纯电驱动系统产品的研发，在新能源车辆传动系统的创新研发上取得多项突破；带领研发团队在重型商用车领域不断提升和优化产品性能与可靠性；推动技术标准的制定和优化，推动智能制造以提升生产效率和产品质量，增强了企业与产品的市场竞争力；积极参与行业技术交流，推动新能源电驱动系统和整个商用车变速箱行业的技术进步。</p>			

排名		第8完成人	
姓名	闫斌	技术职称	高级工程师
工作单位	凯博易控车辆科技（苏州）股份有限公司	完成单位	凯博易控车辆科技（苏州）股份有限公司
<p>对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：作为项目的主要骨干之一，对创新点2具有重要的贡献，发明了重型车辆电驱动系统高压控制系统高度集成技术，攻克了控制器数量多、高压系统复杂、热管理稳定性和内部电磁兼容的问题；集成控制器相比分立控制器重量减轻15%以上，体积下降23%以上，提高了控制器的整体功率密度。本人在该项技术研发中投入的工作量占本人工作总量的60%。</p>			

排名		第9完成人	
姓名	左树淼	技术职称	助理研究员
工作单位	北京航空航天大学	完成单位	北京航空航天大学
<p>对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：作为项目的主要骨干之一，对创新点1具有重要的贡献，建立了展成法齿轮加工过程动态仿真模型，探明了齿根曲率对齿根应力的影响规律，为齿根应力高效计算和优化设计做出了重要贡献。本人在该项技术研发中投入的工作量占本人工作总量的60%。</p>			

排名		第10完成人	
姓名	刘莹	技术职称	中级工程师
工作单位	精进电动科技股份有限公司	完成单位	精进电动科技股份有限公司
<p>对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：作为项目骨干之一，对创新点2做出创造性贡献，是扁线电机创新结构及近限设计方法、多电机控制器集成设计技术等技术发明点的主要贡献者。本人在该项技术研发中投入的工作量占本人工作总量的50%。</p>			

排名		第11完成人	
姓名	刘艳芳	技术职称	教授
工作单位	北京航空航天大学	完成单位	北京航空航天大学
<p>对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：作为项目的主要骨干之一，对创新点1具有重要的贡献，提出了电驱动系统关键零部件健康状态高精度深度迁移监测方法，集成开发了软硬件应用平台，攻克了小样本、多干扰、算力需求高的难题，实现跨工况域故障诊断</p>			

准确率达到90%以上。本人在该项技术研发中投入的工作量占本人工作总量的60%。

排名		第12完成人	
姓名	敬代云	技术职称	高级工程师
工作单位	浙江双环传动机械股份有限公司	完成单位	浙江双环传动机械股份有限公司
对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：作为项目骨干之一，对创新点1做出创造性贡献，是可拓展式多电机多模电驱动系统构型设计、高速重载齿轮高承载设计等技术发明点的主要贡献者。本人在该项技术研发中投入的工作量占本人工作总量的50%。			

排名		第13完成人	
姓名	刘飞	技术职称	副高级
工作单位	哈尔滨理工大学	完成单位	哈尔滨理工大学
对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：作为项目的主要骨干之一，对创新点2具有重要的贡献。面向国家新能源交通的战略需求，致力于新能源汽车电机的理论研究和技术应用，研究方向主要包括车用永磁电机多物理场分析方法创新、拓扑创新和新型复合冷却方法创新。完成人针对新型商用车电驱动高密度和高效冷却进行持续研究，对商用车油冷电机均衡冷却技术进行了较为深入的探索，设计的商用车油冷电机功率密度达6.5 kW/kg(支撑创新点2)。本人在该项技术研发中投入的工作量占本人工作总量的60%。			

排名		第14完成人	
姓名	张震	技术职称	无
工作单位	陕西法士特汽车传动集团有限责任公司	完成单位	陕西法士特汽车传动集团有限责任公司
对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：带领法士特新能源创新团队开发和优化2E280/4E240/FS4E250/FS4E200-2等多个纯电动动力系统和产品，在法士特新能源传动系统的研发中发挥了关键作用；推动新能源商用车技术的创新，参与新能源产品的战略布局和规划；助力推出适用于新能源纯电驱动的系统解决方案，研发的一系列产品满足市场对环保和高效动力的需求；带领团队在新能源传动系统的轻量化、高效能和高可靠性方面取得重要突破；积极推动校企合作，对实现产学研一体、科技成果转化等作出突出贡献；参与新能源行业相关技术指标的制定，推动行业的规范化发展。			

排名		第15完成人	
姓名	潘国平	技术职称	高级工程师
工作单位	凯博易控车辆科技（苏州）股份有限公司	完成单位	凯博易控车辆科技（苏州）股份有限公司
对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：作为项目的主要骨干之一，对创新点3具有重要的贡献，提出了面向不同极端应用场景的控制参数自学习方法，实现了多电机电驱动系统控制参数在多种矿区道路的自演进、自进化。本人在该项技术研发中投入的工作量占本人工作总量的60%。			

排名		第16完成人	
姓名	赵宏超	技术职称	中级工程师
工作单位	精进电动科技股份有限公司	完成单位	精进电动科技股份有限公司
对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：作为项目骨干之一，对创新点2做出创造性贡献，是端部淋油及转子甩油的高效直接油冷技术、多电机控制器集成设计技术等技术发明点的主要贡献者。本人在该项技术研发中投入的工作量占本人工作总量的50%。			

排名		第17完成人	
姓名	张瀚凝	技术职称	无
工作单位	北京航空航天大学	完成单位	北京航空航天大学
对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：作为项目的主要骨干之一，对创新点3做出创造性贡献，是数据驱动的预测型能量管理策略、宽频扭振定向抑制方法等技术发明点的主要贡献者。本人在该项技术研发中投入的工作量占本人工作总量的60%。			

排名		第18完成人	
姓名	姚坤	技术职称	无
工作单位	北京航空航天大学	完成单位	北京航空航天大学
对本项目主要技术发明/主要科技创新的贡献：作为项目的主要骨干之一，对创新点3具有重要的贡献，提出了新能源重型特种车辆电驱动系统控制参数自学习方法，探明了影响电驱动系统控制质量批量生产中横向覆盖性和寿命里程下纵向稳定性的主要因素，制定了面向批量下线的短周期自学习规则与面向寿命里程的长周期自学习规则，实现了批量下线的快速自学习与生命周期内的稳定自学习。本人在该项技术研发中投入的工作量占本人工作总量的60%。			

五、 主要完成单位

北京航空航天大学，哈尔滨理工大学，江苏大学，陕西法士特汽车传动集团有限责任公司，凯博易控车辆科技（苏州）股份有限公司，精进电动科技股份有限公司，浙江双环传动机械股份有限公司

六、 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
专著	自动变速器电控系统及其应用软件开发技术	中国	机械工业出版社	2018/10	ISBN: 978-7-111-60520-1	北京航空航天大学	徐向阳	出版
发明专利	一种齿轮有限元网格快速适配方法	中国	ZL 202110899036.8	2021/11/19	4801318	北京航空航天大学	董鹏，左树淼，徐	有效

						大学	向阳, 刘艳芳, 王书翰, 郭伟, 赖俊斌, 王卓, 张弛	
发明专利	六轮驱动力分配方法、装置、设备及介质	中国	ZL 201910201383.1	2020/12/11	4148362	北京航空航天大学	徐向阳, 李想, 武妙琦, 吕一功, 董鹏	有效
发明专利	一种犬牙式离合器进齿控制方法	中国	ZL 202010138806.2	2021/8/13	4614718	凯博易控车辆科技(苏州)股份有限公司	郝庆军, 陆中华, 闫斌, 陈鹏飞	有效
发明专利	一种双电机驱动系统及其换挡扭矩控制方法、车辆	中国	ZL 202010075093.X	2021/5/14	4422904	凯博易控车辆科技(苏州)股份有限公司	郝庆军, 陆中华, 崔佳佳, 闫斌	有效
发明专利	一种整车换挡控制系统及其控制方法	中国	ZL 202010138808.1	2021/8/13	4612939	凯博易控车辆科技(苏州)股份有限公司	郝庆军, 陆中华, 程一峰, 耿建涛, 夏天, 马朋涛, 顾家鹏	有效
发明专利	一种纯电动汽车用轴向磁通混合励磁开关磁阻电机	中国	ZL 201810376202.4	2020/3/31	3737361	江苏大学	孙晓东, 刁凯凯, 陈龙, 周卫琪, 杨泽斌, 韩守义, 李可	有效

发明专利	一种多电机混合动力系统及其控制方法	中国	ZL 201811477646.3	2021/6/22	4502889	江苏大学	王峰, 张健, 曹秀娟, 徐兴, 陈龙, 蔡英凤, 周之光	有效
发明专利	一种集成化电驱系统油冷电机	中国	ZL201910339018.7	2020/10/16	4676395	陕西法士特齿轮有限责任公司	严鉴铂, 魏复超, 侯圣文, 刘义, 张海涛	有效
论文	3D Temperature Field Analysis of the Induction Motors with Broken Bar Fault	英国	Applied Thermal Engineering	2014/5	66 (1-2): 25-34	哈尔滨理工大学	Ying Xie, Wang Yunyang	发表