**项目名称：**适用于电动汽车的电机驱动系统设计与振动控制策略

**提名者：**河南省教育厅

**提名意见：**

该项目针对电动汽车驱动系统及振动控制性能瓶颈和国产化需求：

（1）基于“源电机理论”，综合永磁同步电机与电励磁电机的优点，从电磁相似性原理出发，设计了一种具有高转矩密度的新型“聚磁式”宽调速磁场调制电机，该电机具有低速大转矩和宽调速特性，适用于电动汽车驱动。

（2）创新性的提出了一种基于速度分区的控制方法，该方法低速区结合电机铜耗最小原理，高速区保持反电势q轴分量恒定，对不同运行区域分别采用不同的控制策略，使电机在整个运行区间都能表现出良好的性能。

（3）创新性的提出了一种将模糊控制与粒子群优化算法相结合弱磁控制方法。该控制方法根据电机在高速区的运行状态变化实施不同的控制策略：当电机处于升、降速阶段，仅采用模糊控制方法进行电流调节，达到稳态后应用粒子群优化算法对电流进行优化，使电机效率得到进一步提高。

（4）创新性的提出了一种基于滤波-X自适应滤波振动主动控制策略。其中振动控制算法实现从车身结构中提取振动响应残差信号，将其应用到控制器结构和算法迭代过程中，从而构造出参考信号，构建了新的振动控制器，克服了振动反馈可能带来的整个控制系统不稳定问题。

本项目来源于1项国家自然科学基金项目和4项省部级项目，发表论文24篇，其中SCI/EI收录21篇；授权发明专利10项，学术著作3本。根据本项目的科技创新方法，应用于在湘潭顺达新材新能源汽车技术有限公司、郴州顺达新能源汽车技术有限公司、怀化顺达新能源汽车技术有限公司等5家公司进行投产应用的电动汽车相关产品中，近三年累计新增产值16278万元。

提名该项目为河南省科学技术进步奖 贰 等奖。

**项目简介：**

电动汽车驾驶的舒适度和操纵的稳定性是评价汽车性能最重要的两项性能指标，它们主要取决于电机驱动系统与悬挂系统的性能好坏。本项目从高效率、高功率密度、低速大转矩及宽调速特性的驱动系统设计与高性能悬挂系统的振动控制策略两方面展开研究。主要研究内容与创新点如下：

（1）针对目前电动汽车驱动用永磁电机气隙磁场不可调、调速范围有限等不足，提出了一类具有高转矩密度的新型“聚磁式”电动汽车用宽调速磁场调制电机。主要特点是基于“源电机理论”，从电磁相似性原理出发，设计并计算了该类电机的空载磁场分布、气隙磁密、空载永磁磁链、空载感应电动势、绕组电感、齿槽转矩以及电磁转矩等电磁特性。搭建了实验平台，分别进行了空载和负载实验，实验结果验证了理论推导、计算和分析的正确性。

（2）针对混合励磁同步电机的结构特点，结合空间电压矢量控制，提出了混合励磁电机的一种宽调速控制新方法。该控制方法在速度分区控制的基础上，低速区结合电机铜耗最小原理，高速区保持反电势*q*轴分量恒定，对不同运行区域分别采用不同的控制策略，使电机在整个运行区间都能表现出良好的性能。由于在高速区采用了励磁电流和*d*轴电流弱磁相结合的方式，使用该类调速系统比之前文献单纯采用励磁电流弱磁调速具有更宽的调速范围。

（3）针对混合励磁同步电机内部各电磁参数强耦合、随电机运行状态改变而变化的特点，提出了一种新颖的速度分区控制策略。所述控制策略给出了混合励磁同步电机在低速区运行时的铜耗最小化控制模型；然后重点针对高速区的弱磁调速，提出了一种基于粒子群优化算法的模糊弱磁控制方法。该控制方法根据电机在高速区的运行状态变化实施不同的控制策略：当电机处于升、降速阶段，仅采用模糊控制方法进行电流调节，达到稳态后应用粒子群优化算法对电流进行优化，使电机效率得到进一步提高。

（4）针对电机振动和路面激励引起的整车振动问题，提出了一种基于滤波-X自适应滤波振动主动控制策略。其中振动控制算法实现从车身结构中提取振动响应残差信号，将其应用到控制器结构和算法迭代过程中，从而构造出参考信号，构建了新的振动控制器，克服了振动反馈可能带来的整个控制系统不稳定问题。

（5）针对电动汽车悬挂系统自适应滤波振动控制策略的实用性问题，提出一种在线辨识控制通道的振动主动控制算法。其基本思想是在控制输出端引入一个随机噪声信号，采用FIR滤波器作为受控通道模型进行实时在线辨识，同时控制环节采用滤波-X控制算法。

本项目在多项国家自然科学基金和省、部级项目的支持下，取得了一系列创新性研究理论成果，得到了国内外知名学者的引用和好评，同时本项目研究成果在湘潭顺达新材新能源汽车技术有限公司、郴州顺达新能源汽车技术有限公司、怀化顺达新能源汽车技术有限公司、长沙顺达新材动力技术有限公司等5家公司进行投产应用。相关研究项目组共发表主要论文SCI/EI收录论文24篇，包括中科院分区二区以上论文5篇，获得国家发明专利授权10项。项目负责人黄全振博士先后获得河南省高校科技创新人才、河南省高校青年骨干教师等人才称号。

**客观评价：**

（1）项目评审意见

2014年8月30日，受河南省科技厅委托，河南省教育厅组织相关专家对河南工程学院完成的教育厅科技重点项目“混合励磁同步电机宽调速系统研究（13B470936）”进行成果鉴定，鉴定委员会听取了汇报、审阅了有关材料、经质询和讨论，形成鉴定意见为：“该项目研究思路新颖、技术先进，在混合励磁同步电机基于弱磁基速系数自适应调节综合性能优化算法研究方面达到国内领先水平”。

2015年9月2日，受河南省科技厅委托，河南省教育厅组织相关专家对河南工程学院完成的河南省科技攻关项目“适用于电动汽车的新型宽调速驱动系统研究（142102210403）”进行成果鉴定，鉴定委员会听取项目汇报，审查相关资料，形成鉴定意见为：“该项目研究思路清晰，技术先进，在电动汽车的混合励磁同步电机弱磁控制技术研究方面有创新，达到国内领先水平”。

（2）论文主要创新点及其引用评价（由于篇幅限制，仅列2篇代表作）

**1）重要科技创新3：基于粒子群优化的混合励磁同步电机模糊弱磁控制**

（1） IEEE Fellow、英国皇家工程院院士、英国谢菲尔德大学终身教授Z. Q. Zhu在顶级期刊IET Electric Power上引用本论文“In hybrid-excited PM machines, the torque-speed characteristics are obtained by calculating the appropriate set of field current, d-axis and q-axis currents [13, 14].”，“In addition, a fuzzy control method is applied with particle swarm optimization [14].”文献[14]正是项目论文4，见附件2-4。

（2） 教育部青年长江特聘教授、国家优秀青年基金获得者东南大学花为教授在其发表文章《Design and Analysis of Two Six-Phase Hybrid-Excitation Flux-Switching Machines for Electric Vehicles》引用了本论文“Thus several control methods for flux weakening have been proposed to obtain minimum cooper loss[20],”文献[20]正是项目论文4，见附件2-5。

**2）重要科技创新4：基于参考信号自提取的悬挂系统振动控制策略**

（1）上海交通大学杨斌堂教授在《Mechanical Systems and Signal Processing》上引用了本论文“in the real applications, the adaptive filter-based feedforward control methods [21] have been widely exploited, e.g., filtered-x least-mean-square (FxLMS) [22,23] control and filtered-u least-mean-square (FuLMS) [24] control.”文献[24]正是项目论文1，见附件2-6。

（2）土耳其科奇大学Prof. Utku Boz在《Smart Materials and Structures》上引用了本论文“the controller output should not affect the reference signal (Huang et al 2013b).”文献[Huang et al 2013b]正是项目论文1，见附件2-7。

（3）华南理工大学邱志成教授在《International Journal of Acoustics and Vibration》上引用了本论文“The comparison of the FXLMS algorithm with FULMS is theoretically analysed and experimentally validated using a cantilever beam by Huang et al.38” 文献[38]正是项目论文1，见附件2-8。

（4）上海大学蒲华燕教授在《Smart Materials and Structures》上引用了本论文“Secondary path modeling (SPM) is often indispensable to the convergence of an adaptive active control algorithm. One of the most popular adaptive algorithms is the filtered-x least mean square (FXLMS) algorithm[4,5]” 文献[4]正是项目论文1，见附件2-9。

（3）科技查新报告

针对本项目的研究内容，委托教育部科技查新工作站G12进行国内文献对比查新，查新报告分别对关于电动汽车用宽调速磁场调制电机、混合励磁电机的一种宽调速控制方法、电动汽车速度分区控制策略、将自适应滤波振动控制策略应用到车辆振动控制、电动汽车悬挂系统自适应滤波振动控制策略进行了详细检索分析，最终结论为：国内公开中文文献中，未见与该委托项目“适用于电动汽车的电机驱动系统设计与振动控制策略”相同的中文文献报道。

（4）项目水平查新评价

为确定本申报项目所涉及的技术和产品在国内外同领域的水平，本项目组委托国家一级查新机构上海科学技术情报研究所进行了项目水平查新，经检索出具了项目“水平检索报告”，该报告编号为20190620SH（见附件）。报告详细地分析了关于“聚磁式”电动汽车用宽调速磁场调制电机、混合励磁电机的一种宽调速控制新方法、一种新颖的混合励磁电机速度分区控制策略、基于振动响应残差信号提取的新型控制器结构和算法、一种在线辨识控制通道的振动主动控制算法的创新性；同时，以“高转矩密度的聚磁式电动汽车用宽调速磁场调制电机/磁齿轮”为例，进行了国内外同类系统对比分析，在电机的转矩及转矩密度方面，相关指标领先于香港大学、日本大阪大学、美国北卡罗莱纳州立大学等国内外同类产品；“该委托项目涉及的电机驱动系统与振动控制策略，经怀化顺达新能源汽车技术有限公司、郴州顺达新能源汽车有限公司、湘潭顺达新能源汽车技术有限公司等相关公司出具的证明显示，推广应用情况和市场销售状况良好；报告最终结论为：经文献对比分析，该委托项目整体达到国际先进水平。”

（5）产品检测报告测评

本项目组研发的适用于电动汽车的聚磁式宽调速磁场调制电机驱动系统，委托上海市质量监督检验技术研究院进行了质量检测，质量检测依据为“GB／T18488.1-2015电动汽车用驱动电机系统” （见附件）。经检测，新型电机驱动系统在电机额定功率时的效率、最大输出转矩和最大转速等三项关键性能指标方面，均达到或超过国家标准。

**推广应用情况、经济效益和社会效益：**

本项目在多项国家自然科学基金和省、部级项目的支持下，取得了一系列创新性研究理论成果，得到了国内外知名学者的引用和好评，同时本项目研究成果在湘潭顺达新材新能源汽车技术有限公司、郴州顺达新能源汽车技术有限公司、怀化顺达新能源汽车技术有限公司、长沙顺达新材动力技术有限公司、国网郑州公司等公司进行投产应用。相关研究项目组共发表主要论文SCI/EI收录论文24篇，包括中科院分区二区以上论文5篇，获得国家发明专利授权10项。

通过上述公司，本项目的主要技术成果与技术创新得到应用与推广。应用本项目创新点1设计的新型电动汽车驱动电机，和原来传统的永磁同步电机相比，在效率与功率密度基本不变的情况下，由于引入了电励磁使得其调速范围进一步增大，最高转速提升30%；低速转矩输出能力则提升20%。该新型电机于2016年投产后，当年新增产值近1600万元，2017年和2018年分别新增产值2600万和3800万左右。

针对应用于电动汽车的新型驱动电机，本项目利用创新点2和创新点3设计了新型电机控制器，实验表明该控制器可有效控制电机运行，性能安全可靠。自2016年投产后，最近三年其总的销售额增加了约3600万元。

本项目的创新点4和创新点5对解决电动汽车悬架系统的振动控制问题起了很大作用。面向主动悬架系统的智能控制算法与执行机构的完美结合，可有效增加或衰减电动汽车行驶过程中的系统能量，协助悬架系统控制车身姿态，改善汽车的操作性和安全性，增加了电动汽车驾驶的平顺性和舒适性。融入新的智能控制算法的主动悬架系统于2016年投产后，取得了良好的市场与社会效应，2016-2018年间，平均每年新增产值超过1500万元。

综上所述，近3年上述应用公司累计新增销售额16278万元，至今已取得良好的经济与社会效益。

**主要知识产权和标准规范目录：**

[1] 黄明明，徐其兴，王刚等．适用于电动汽车驱动用的新型调速系统及电流分配方法：中国，授权号：ZL201210012732.3．

[2] 阳辉，林鹤云，颜建虎，黄允凯，房淑华，金平，张洋. 一种磁通切换型永磁记忆电机: 中国，授权号：ZL201210560231.9．

[3] 朱晓锦，黄全振，高守玮，高志远，姜恩宇，赵苗，孙伟. 控制通道在线实时辨识的压电智能结构振动主动控制方法：中国，授权号：ZL201110033217.9．

[4] 黄明明，郭新军，徐其兴等．混合励磁同步电动机宽调速系统及电流分配方法： 中国， 授权号：ZL201110276762.0[P]．

[5] 阳辉，林鹤云，颜建虎，黄允凯，房淑华，壮而行，张洋. 一种磁通切换型内置式永磁记忆电机: 中国，授权号：ZL201310149285.0.

[6] 林鹤云，张洋，董夏林，颜建虎，房淑华，黄允凯，阳辉. 一种轴向永磁异步风力发电机: 中国，授权号：ZL201310377425.X.

[7] 林鹤云，阳辉，董剑宁，壮而行，房淑华，黄允凯. 一种轴向磁场定子分割式磁通切换型记忆电机: 中国，授权专利号：ZL 201310463648.8.

[8] 林鹤云，阳辉，房淑华，黄允凯.一种高功率密度的磁通切换型混合永磁记忆电机: 中国，授权专利号：ZL 201410241364.9.

[9] 林鹤云，张洋，房淑华. 一种双定子永磁游标风力发电机: 中国，授权专利号：ZL20140321107.6.

[10] 林鹤云，阳辉，壮而行，董剑宁，黄允凯，房淑华. 一种容错型定子分割式磁通切换型记忆电机: 中国，授权专利号：ZL201310431045.X.

**论文专著目录：**

[1] Huang Quanzhen, Luo Jun\*, Li Hengyu, et al. Analysis and implementation of a structural vibration control algorithm based on an IIR adaptive filter[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22: 085008. (JCR二区，IF=2.963，被引9次)

[2] Hui Yang, Heyun Lin, Z. Q. Zhu, et. al. *A variable-flux hybrid-PM switched-flux memory machine for EV/HEV applications*, IEEE Transactions on Industry Applications[J]. 2016, 52(3): 2203-2214. (JCR一区，IF=2.937，被引23次)

[3] Huang Mingming, Lin Heyun, Huang Yunkai, et al. Fuzzy control for flux weakening of hybrid exciting synchronous motor based on particle swarm optimization algorithm[J]. IEEE Transactions on magnetic, 2012, 48(11): 2989-2992. (JCR四区，IF=1.467，被引14次)

[4] Hui Yang, Z. Q. Zhu, Heyun Lin, et. Al. *Comparative study of hybrid PM memory machines having single- and dual-stator configurations*[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(11): 9168-9178. (JCR一区，IF=7.168)

[5] Liu Kai, Xiaowu. Mu et al. Consensusability of multi-agent systems via observer with limited communication data rate[J]. International Journal of Systems Science, 2016, 47(15): 3591-3597. (JCR二区，IF=2.185)

[6] Zhang Yang, Lin Heyun, Fang Shuhua, et al. Air-gap flux density characteristics comparison and analysis of permanent magnet vernier machines with different rotor topologies[J] IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4): 0605105. (JCR四区，IF=1.288，被引1次)

[7] Hui Yang, Z. Q. Zhu, Heyun Lin, et. al. *Design synthesis of switched flux hybrid-permanent magnet memory machines*, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 65-79. (JCR一区，IF=3.808，被引8次)

[8] Zhang Yang, Lin Heyun, Fang Shuhua, et al. Comparison and analysis of dual stator permanent magnet vernier machines with different pole/slot combinations for low speed direct drive applications[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016, 50(4): 617-626. (JCR四区，IF=0.723，被引1次)

**主要完成人员情况：**

姓名：黄全振；排名第1；职称：副教授；工作单位：河南工程学院；主要贡献：针对电机振动和路面激励引起的整车振动问题，提出了一种基于滤波-X自适应滤波振动主动控制策略。针对自适应滤波前馈振动控制策略的实用性问题，提出一种在线辨识控制通道的振动主动控制算法；科技奖励情况：获2017年河南省教育厅科技成果贰等奖，获2019年河南省教育厅科技成果壹等奖。

姓名：黄明明；排名第2；职称：副教授；工作单位：河南工程学院；主要贡献：针对混合励磁同步电机的结构特点，结合空间电压矢量控制，提出了两种基于速度分区控制的控制策略。对不同运行区域分别采用不同的控制策略，使电机在整个运行区间都能表现出良好的性能，当电机处于升、降速过渡阶段，仅采用模糊控制方法进行电流调节，达到稳态后应用粒子群优化算法对电流进行微调与优化，使电机效率得到进一步提高。

姓名：张洋；排名第3；职称：工程师；工作单位：国网河南省电力公司电力科学研究院；主要贡献：提出了一类具有高转矩密度的新型“聚磁式”电动汽车用宽调速磁场调制电机，研究了该类电机的一般设计方法与原则。该类电机“继承”了永磁电机低速大转矩和高转矩密度的优点，同时气隙磁通可调，适用于电动汽车频繁起停和宽调速运行场合。基于“源电机理论”，从电磁相似性原理出发，设计并计算了该类电机的电磁特性。

姓名：阳辉；排名第4；职称：讲师；工作单位：东南大学；主要贡献：针对混合励磁记忆电机的结构特点，提出了新型磁通切换型记忆电机，该电机既继承了记忆电机高效调磁和调速范围宽的特点，同时又能够实现感应电动势正弦，可以采用经典的矢量控制。对其拓扑结构、电磁特性、调磁机理、设计方法、数学模型、控制策略和实验测试等进行了全面深入的研究。分析混合励磁运行对电机电磁性能的影响，探寻最优的直流励磁控制策略；探讨调磁绕组“直流-交流切换”的可行性，研究其对电机弱磁能力的影响。

姓名：方建印；排名第5；职称：教授；工作单位：河南工程学院；主要贡献：在该项目团队中主要从事基础科研及应用建模工作，在智能控制方面进行了深入的研究，在网络通讯下多智能体的一致性方面做了大量基础性的工作。对一阶及二阶多智能体系统切换控制、事件触发控制等条件下的一致性问题，给出了多智能体系统存在一致性协议的充分条件，也给出了在相应条件下给出了系统在分布式协议下达到一致性的设计算法。

姓名：王柳；排名第6；职称：教授级高级工程师；工作单位：国家电网郑州供电公司；主要贡献：对在线辨识控制通道的振动主动控制技术在电力系统应用，尤其是大型电力充油设备（变压器、电抗器）振动削弱效果检验有较大贡献。

姓名：王超；排名第7；职称：工程师；工作单位：国家电网郑州供电公司；主要贡献：对在线辨识控制通道的振动主动控制技术在电力系统应用，尤其是大型电力充油设备（变压器、电抗器）振动削弱效果检验有较大贡献。

姓名：王斌；排名第8；职称：副教授；工作单位：长沙顺达新材动力技术有限公司；主要贡献：提出了一类具有高转矩密度的新型宽调速磁场调制电机，研究了该类电机的一般设计方法与原则。该类电机具有永磁电机低速大转矩和高转矩密度的优点，同时气隙磁通可调，适用于电动汽车频繁起停和宽调速运行场合。

姓名：刘凯；排名第9；职称：副教授；工作单位：河南工程学院；主要贡献：在该项目团队中主要从事基础科研及应用建模工作，在智能控制方面进行了深入的研究，在网络通讯下多智能体的一致性方面做了大量基础性的工作。对一阶及二阶多智能体系统切换控制、事件触发控制等条件下的一致性问题，给出了多智能体系统存在一致性协议的充分条件，也给出了在相应条件下给出了系统在分布式协议下达到一致性的设计算法。

**主要完成单位情况。**

**单位名称：河南工程学院**

**排名：第1**

对本项目的支撑作用情况：河南工程学院作为项目申报依托单位，为本项目的开展提供了大力支持，确保各项研究任务的顺利进行，主要科技创新为：

（1）基于“源电机理论”，从电磁相似性原理出发，提出了一类具有高转矩密度的新型“聚磁式”电动汽车用宽调速磁场调制电机，该电机具有低速大转矩和宽调速特性。

（2）针对混合励磁电机提出了一种基于速度分区的控制方法，该方法低速区结合电机铜耗最小原理，高速区保持反电势q轴分量恒定，对不同运行区域分别采用不同的控制策略，使电机在整个运行区间都能表现出良好的性能。

（3）提出了一种基于粒子群优化算法的模糊弱磁控制方法。该控制方法根据电机在高速区的运行状态变化实施不同的控制策略：当电机处于升、降速阶段，仅采用模糊控制方法进行电流调节，达到稳态后应用粒子群优化算法对电流进行优化，使电机效率得到进一步提高。

（4）提出了一种基于滤波-X自适应滤波振动主动控制策略。其中振动控制算法实现从车身结构中提取振动响应残差信号，将其应用到控制器结构和算法迭代过程中，从而构造出参考信号，构建了新的振动控制器，克服了振动反馈可能带来的整个控制系统不稳定问题。

**单位名称：东南大学**

**排名：第2**

对本项目的支撑作用情况：东南大学作为项目申报依托单位，为本项目的开展提供了大力支持，确保各项研究任务的顺利进行，主要科技创新为：

（1）针对电动汽车用混合励磁记忆电机的结构特点，提出了新型磁通切换型记忆电机，该电机既继承了记忆电机高效调磁和调速范围宽的特点，同时又能够实现感应电动势正弦，可以采用经典的矢量控制。

（2）对其拓扑结构、电磁特性、调磁机理、设计方法、数学模型、控制策略和实验测试等进行了全面深入的研究。

（3）分析混合励磁运行对电机电磁性能的影响，探寻最优的直流励磁控制策略；探讨调磁绕组“直流-交流切换”的可行性,研究其对电机弱磁能力的影响。

**单位名称：国网河南省电力公司电力科学研究院**

**排名：第3**

对本项目的支撑作用情况：国网河南省电力公司电力科学研究院作为项目主要完成单位，为本项目的顺利开展提供了大力支持，主要科技创新为提出了一类具有高转矩密度的新型“聚磁式”电动汽车用宽调速磁场调制电机，研究了该类电机的一般设计方法与原则。该类电机“继承”了永磁电机低速大转矩和高转矩密度的优点，同时气隙磁通可调，适用于电动汽车频繁起停和宽调速运行场合。

**单位名称：长沙顺达新材动力技术有限公司**

**排名：第4**

对本项目的支撑作用情况：长沙顺达新材动力技术有限公司作为项目主要完成单位，为本项目的顺利开展提供了大力支持，主要科技创新包括：（1）根据电动汽车复杂工况特点，系统分析、设定各性能指标的权重，然后把过程与结构优化算法和控制系统仿真算法进行集成，构建电机驱动系统综合性能最优的设计与仿真平台；（2）对混合励磁电机驱动系统进行故障诊断与容错控制研究，提高了系统的稳定性和安全性。

在推广应用方面，自2016年起，本企业采用新型电机驱动系统与减振装置后，电动汽车产销量得到大幅提高，为我国近年提出的节能减排、绿色环保等目标做出了非常积极的贡献。

**单位名称：国家电网郑州供电公司**

**排名：第5**

对本项目的支撑作用情况：国网郑州公司作为项目主要完成单位，为本项目的顺利开展提供了大力支持，主要科技创新包括：对在线辨识控制通道的振动主动控制技术在电力系统应用，尤其是大型电力充油设备（变压器、电抗器）振动削弱效果检验有较大贡献。

在推广应用方面，自2016年起，随着本项目技术在电力系统中的推广使用，为本单位更合理的制定停电检修周期，提高了状态检修工作的效率和质量，有效降低了停电检修次数及停电检修时间，节约了电力企业的运营成本。