

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.001

# 混合动力汽车用复合结构电机及其关键技术发展

郑萍, 白金刚, 宋志翌, 刘勇

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 150001 哈尔滨)

**摘要:** 为更深入地了解混合动力汽车用复合结构电机的发展趋势和关键技术,对复合结构电机及其关键技术进行综述,简要分析了有刷、无刷两类复合结构电机的组成、工作原理及其拓扑结构,并对不同复合结构电机方案的优势及其存在的关键技术问题进行深入分析和总结.结果表明:基于复合结构电机的纯电气式混合动力方案不仅可以避免基于行星齿轮的机械式混合动力方案中的振动、噪声、磨损和定期维护等问题,而且具有结构简单紧凑、易于控制的优势.无刷复合结构电机去掉了有刷复合结构电机中的电刷滑环机构,提高了系统可靠性,因此复合结构电机无刷化是该研究方向的必然发展趋势.

**关键词:** 混合动力汽车;复合结构永磁同步电机;四象限能量转换器;电气变速器;双机械端口电机;定子永磁式双转子电机;无刷复合结构电机

中图分类号: TH133; TP183

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)03-0001-10

## Development of the compound-structure electrical machine and its key technologies for hybrid electric vehicles

ZHENG Ping, BAI Jingang, SONG Zhiyi, LIU Yong

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

**Abstract:** To gain a deep insight into the development tendency and the key technology of compound-structure electrical machine for hybrid electric vehicles, this paper reviews the compound-structure electrical machine and its key technologies. The composition, operating principle and topologies of different compound-structure electrical machines are analyzed, including the brush and brushless ones. Meanwhile, the advantages and key technology problems of different compound-structure machines are investigated and summarized. The results show that the purely-electrical hybrid schemes based on the compound-structure electrical machine don't have the problems of vibration, noise, wear and regular maintenance, but they also have advantages of simple and compact structure and easy control, compared with the mechanical hybrid schemes based on the planetary gear. Meanwhile, they also show that the investigation of the brushless compound-structure electrical machine must be a development tendency in this field for the brushless compound-structure electrical machines can get rid of brushes and slip rings in the brush ones as well as improve the system stability.

**Keywords:** hybrid electric vehicles; compound-structure permanent-magnet synchronous machine; four quadrant transducer; electrical variable transmission; dual mechanical port machine; stator-permanent-magnet double-rotor machine; brushless compound-structure electrical machine

燃油汽车的发展受到能源危机和环境污染两大难题制约,新能源汽车的开发成了近年来汽车领域的研究热点<sup>[1]</sup>. 新能源汽车可分为纯电动汽车、燃料电池汽车和混合动力汽车<sup>[2-3]</sup>. 混合动力汽车不

需要建立纯电动汽车和燃料电池汽车所需的加电站和加气站,是目前从燃油汽车到燃料电池汽车和纯电动汽车过渡期间最为成熟的电动汽车.

1997年,丰田公司的普锐斯混合动力汽车首次采用了行星齿轮机构作为动力分配装置,显著地降低了车辆的油耗和尾气排放,深受广大消费者的青睐.图1为行星齿轮的结构,图2为丰田普锐斯混合动力系统结构.图中内燃机与行星齿轮的行星架相连、电机1与行星齿轮的太阳轮相连、电机2与行星

收稿日期: 2015-11-15.

基金项目: 国家杰出青年基金(51325701);

国家自然科学基金(51377030).

作者简介: 郑萍(1969—),女,博士生导师,长江学者特聘教授.

通信作者: 郑萍, zhengping@hit.edu.cn.

齿轮的齿圈和减速器相连. 内燃机通常运行在最佳燃油曲线上, 通过调节电机 1 的转速, 使行星齿轮的齿圈输出的转速满足负载的转速需求, 同时将内燃机的转矩按一定的比例传递给负载. 同时根据实际负载的转矩需求, 电机 2 为内燃机和负载之间提供一定的转矩差. 因此, 通过行星齿轮、电机 1 和电机 2 的对内燃机转速转矩的调节, 使整车具有较高的燃油经济性和良好的整车性能<sup>[4-6]</sup>.

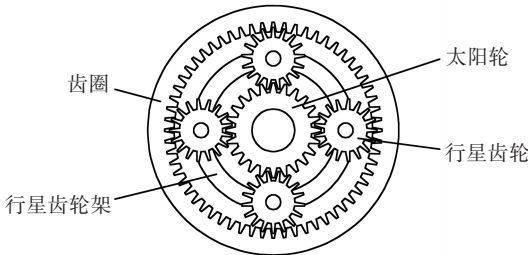


图 1 典型的行星齿轮

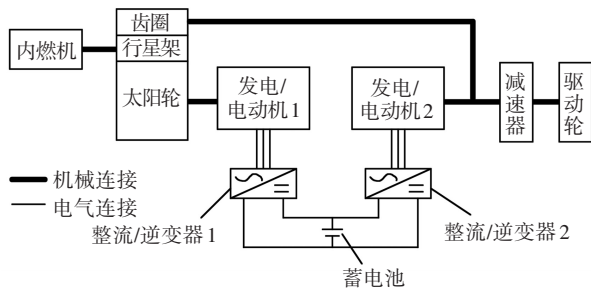


图 2 丰田普锐斯混合动力系统结构

丰田普锐斯凭借图 2 中的混合动力系统结构统领混合动力汽车领域十几年, 世界各国把赶超普锐斯作为目标. 在丰田普锐斯取得商业巨大成功后, 通用、福特等各大汽车厂商相继推出了基于行星齿轮机构的混合动力方案<sup>[7-9]</sup>, 其中通用混合动力系统的结构如图 3 所示. 通过对这些方案的分析表明, 目前这些能回避丰田专利的机械式方案都比普锐斯复杂得多. 不仅如此, 由于行星齿轮是一种精密的机械部件, 因此会存在传动损耗、齿轮振动、噪声等问题, 同时还需要定期润滑<sup>[10]</sup>.

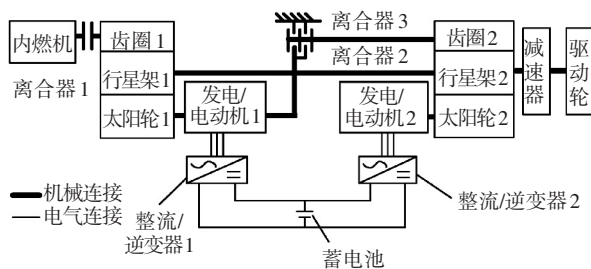


图 3 通用混合动力系统结构

近年, 基于复合结构电机的纯电气式混和动力方案越来越受到重视. 该方案省去了行星齿轮机构, 直接由两台电机复合而成. 该类电机可调节发动机和主减速器之间的转速差和转矩差, 实现动力

分离和分配功能, 达到了与采用行星齿轮的机械式方案相同的效果, 同时复合结构电机具有结构简单紧凑, 易于控制的优势, 是国际上寄予厚望的研究方案. 目前, 复合结构电机主要分两类方案, 即有刷复合结构电机方案和无刷复合结构电机方案. 早期的复合结构电机均为有刷方案, 通过这类方案的研究表明: 有刷复合结构电机系统可实现丰田普锐斯混合动力系统的所有工况需求, 且具有技术先进性和竞争力. 无刷复合结构电机方案是在有刷方案的研究基础上产生的, 它解决了有刷方案中因电刷滑环机构引起的效率下降、可靠性降低等问题, 目前这类无刷方案还处于探索阶段. 本文对这两类复合结构电机及其关键技术分别进行综述.

### 1 有刷复合结构电机

有刷复合结构电机是基于传统电机形成的, 尽管有刷复合结构电机的命名方式不同, 但从功能上看, 这些有刷复合结构电机都能实现混合动力系统的动力分配和无级变速功能, 下面对这类方案进行概述.

#### 1.1 四象限能量转换器

四象限能量转换器是瑞典皇家工学院 Chandur Sadarangani 教授于 2002 年提出的一种由两台永磁电机复合形成的动力分离装置<sup>[11-12]</sup>, 其系统结构如图 4 所示. 四象限能量转换器由双转子电机和定子电机组成, 双转子电机和定子电机共用一个转子——外转子. 图 5 为四象限能量转换器转速与转矩调节的示意图. 双转子电机实现了发动机与车辆负载间的转速解耦, 而定子电机实现了发动机与车辆负载间的转矩解耦. 因此, 发动机的转速转矩完全独立于车辆负载的转速转矩, 从而使发动机始终工作在最佳燃油曲线上, 提高了整车的燃油经济性.

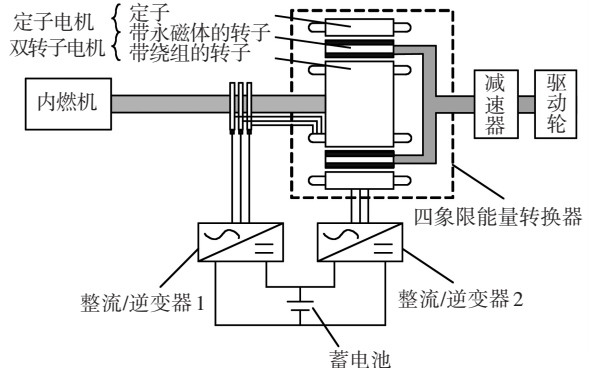


图 4 四象限能量转换器系统结构

Chandur Sadarangani 根据四象限能量转换器的结构特点, 提出了 3 种不同拓扑方案, 即径向-径向磁通方案、轴向-轴向磁通方案和轴径向-径向磁通

方案,如图6所示.通过对不同方案的电磁性能和加工工艺的比较表明,四象限能量转换器的实际应用和选择不但受电机自身性能的影响而且还与车用空间和成本相关.

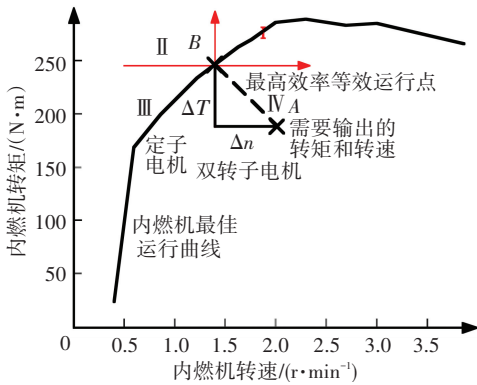
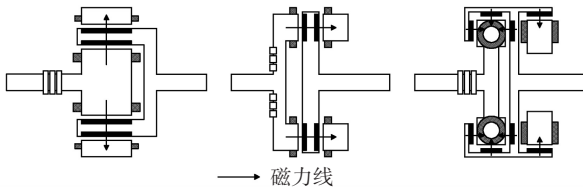


图5 四象限能量转换器系统转速与转矩调节示意图



(a) 径向-径向磁通 (b) 轴向-轴向磁通 (c) 轴径向-径向磁通

图6 四象限能量转换器3种拓扑结构

### 1.2 电气变速器

电气变速器是荷兰代尔夫特理工大学 Martin Hoeijmakers 教授于2004年提出的.该方案相当于由两台感应电机复合形成的动力分离装置<sup>[13-14]</sup>,其系统结构如图7所示.电气变速器由定子、外转子和内转子组成.其中,定子和内转子都放置了电枢绕组,同时外转子上嵌入了双层鼠笼结构.研究表明,这种结构的电气变速器存在严重的磁场干涉现象.

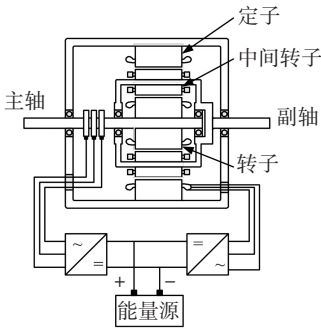


图7 电气变速器系统结构

随后,哈尔滨工业大学的崔淑梅教授对这种电气无级变速器方案进行研究,分析了不同整车控制策略<sup>[15-16]</sup>,并先后研制了分体式方案和一体式方案的样机.研究表明,一体式样机的磁耦合现象严重,并导致负载转矩波动增加;分体式样机的磁场干涉小,同时有功率密度高和安装灵活的优势<sup>[17]</sup>.

### 1.3 四端口机电能量变换器

四端口机电能量变换器是哈尔滨工业大学的崔淑梅教授基于开关磁阻电机原理提出的动力分离装置<sup>[18-19]</sup>,其结构如图8所示.通过对四端口机电能量变换器磁场耦合问题的分析表明,外转子轭部的饱和程度对内外电机的各自性能影响很大.进一步通过对样机的实验测试表明,四端口机电能量变换器在磁场耦合的情况下使得电机出现了更加严重的转矩波动和噪声等问题.

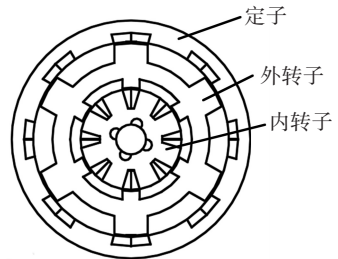


图8 四端口机电能量变换器电机结构

### 1.4 双机械端口电机

双机械端口电机是美国俄亥俄州立大学的徐隆亚教授于2005年提出了一种由两台永磁电机复合构成的动力分离装置<sup>[20-21]</sup>,电机结构如图9所示.双机械端口电机由3个部件构成,其中任意一个部件可作为固定部件,其他两个部件作为旋转部件.在这种情况下,旋转部件作为机械端口,同时电机中存在两个电气端口.徐隆亚教授对3个部件中可能的旋转部件和固定部件的搭配进行了讨论,并选择了与四象限能量转换器相近的结构进行了分析,两种方案的区别在于双机械端口电机的中间转子只采用了一层永磁体.

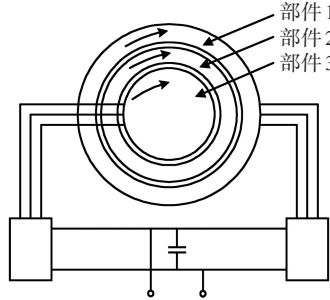


图9 双机械端口电机结构

随后,中国科学院电工所的温旭辉教授通过对单层永磁体双机械端口电机的研究表明,该方案尽管使电机的功率密度得到提升,但方案中定子电机和双转子电机之间的磁场耦合现象比较严重<sup>[22-23]</sup>.

### 1.5 双转轴混合磁路能量变换器

2005年,中国汽车技术研究中心等单位提出了一种采用油冷系统的的双转轴混合磁路能量变换器<sup>[24]</sup>,其结构如图10所示.该方案与与双机械端口

电机结构相似,二者的区别在于双转轴混合磁路能量变换器采用了冷却效果更好的油冷却系统.通过对电机各部件在自然冷却方式和油冷却方式下进行温度分布比较,结果显示,采用油冷却方式可以有效地解决内转子散热困难的问题,确保电机在额定工况下持续可靠运行<sup>[25]</sup>.但是,由于油冷系统对电机的密封性要求较高,因此该方案的加工工艺复杂同时电机可靠性也被降低.

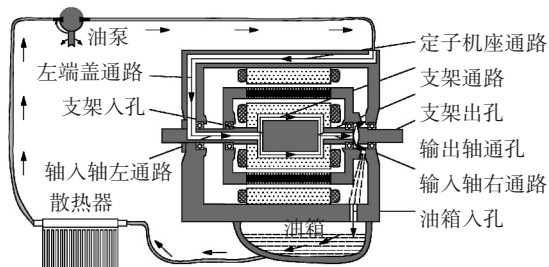


图 10 油冷却的双转轴混合磁路能量变换器结构

### 1.6 复合结构永磁同步电机

基于对四象限能量转换器的深入研究,哈尔滨工业大学郑萍教授提出了该类电机的 6 种拓扑结构,并依据其结构特点命名为复合结构永磁同步电机,如图 11 所示.

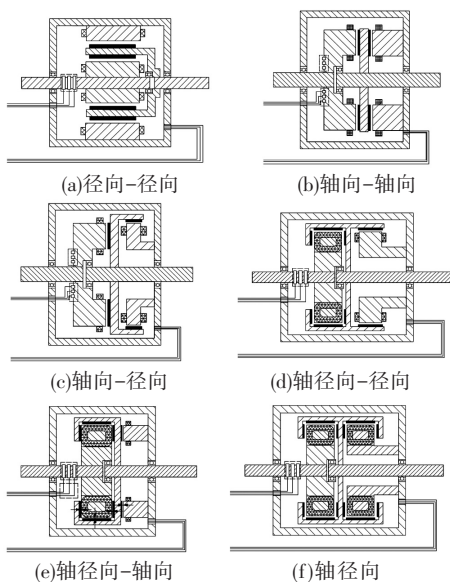


图 11 复合结构永磁同步电机 6 种拓扑结构

郑萍教授通过对各种拓扑结构电机的设计原则和设计方法进行研究,分析各类结构的优缺点及应用场合<sup>[26-27]</sup>.研制了径向-径向磁通结构和轴向-轴向磁通结构的样机并建立了测试平台进行了实验测试,径向-径向磁通结构和轴向-轴向磁通结构的样机部件及其实验平台分别如图 12~15 所示.测试结果表明复合结构永磁同步能够实现动力分离的功能,验证了磁解耦设计的可行性<sup>[28-31]</sup>.

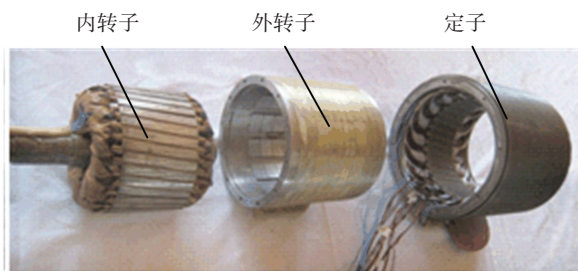


图 12 径向-径向磁通复合结构永磁同步电机样机部件

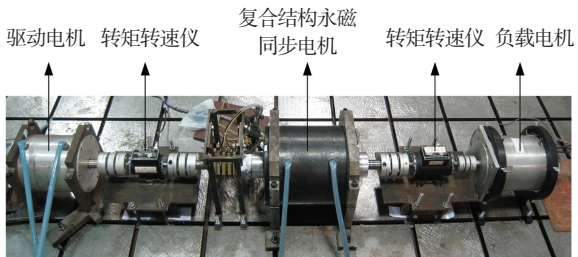


图 13 径向-径向磁通复合结构永磁同步电机实验平台

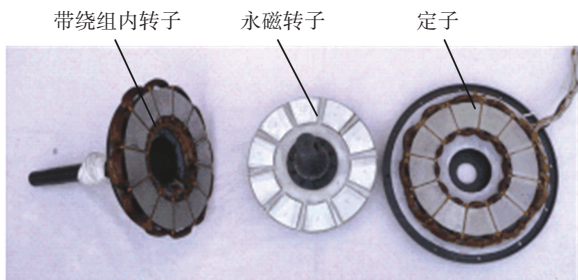


图 14 轴向-轴向磁通复合结构永磁同步电机样机部件

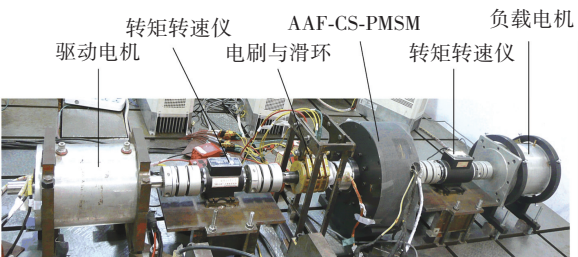


图 15 轴向-轴向磁通复合结构永磁同步电机实验平台

### 1.7 定子永磁式双转子电机

定子永磁式双转子电机是由江苏大学全力教授课题组基于双凸极电机原理提出的动力分配方案<sup>[32-33]</sup>,其结构如图 16 所示.该课题组对电机的电磁性能、混合动力工况下电机的工作模式、控制策略等方面进行了研究.结果表明:定子永磁式双转子电机的功率密度和电磁性能明显好于磁阻式四端口机电能量变换器.此外,由于定子和内转子中的永磁体只会在各自侧气隙中形成磁场闭合回路,因此定子永磁式双转子电机内外的磁场耦合影响非常小.

该课题组进一步提出了基于磁通切换电机原理的磁通切换双转子电机<sup>[34-37]</sup>,其结构如图 17 所示.通过对该方案的电磁性能、设计方法、控制策略等方

面的研究表明,磁通切换双转子电机可以获得与四象限能量转换器同样好的功率密度、效率等性能,而且该方案还具有转矩波动低的优势。

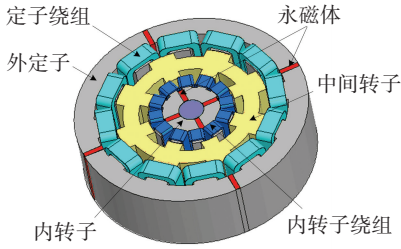


图 16 定子永磁式双转子电机结构

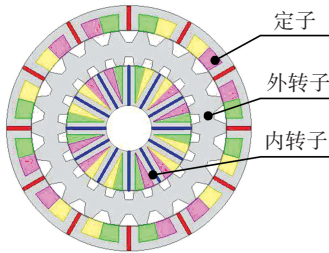


图 17 磁通切换双转子电机结构

### 1.8 电磁耦合无级变速器

电磁耦合无级变速器是由华南理工大学黄向东教授课题组基于混合励磁永磁同步电机原理提出的,其结构如图 18 所示<sup>[38]</sup>。该方案与以往有刷方案的不同之处在于中间的永磁转子采用永磁体磁极和铁心磁极交错布置方式,同时在定子侧放置直流励磁绕组。这样通过改变励磁绕组中的励磁电流可以调节气隙主磁通,从而使该方案获得更大速域的恒功率运行范围。通过进一步对该方案的励磁调节方法、系统控制方法、电磁性能和温升特性进行分析<sup>[39-41]</sup>表明,尽管这种永磁转子结构有利于气隙主磁场的调节,但也使内外两个电机之间存在磁耦合问题。该课题组进一步通过增加外转子轭部厚度的方式来减小电机中的磁耦合问题。此外,该课题组还对电机的无速度传感器矢量控制方法和电机冷却问题进行了研究。但同时也可以看出,电磁耦合无级变速器比以往有刷方案多了一套励磁绕组,使整个系统变得复杂。

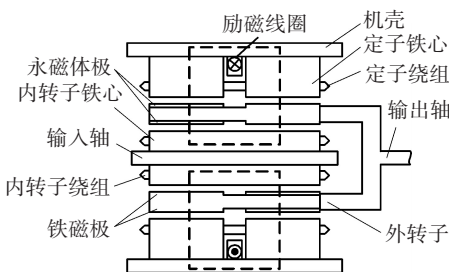


图 18 电磁耦合无级变速器结构

## 2 无刷复合结构电机

前面提到的有刷复合结构电机的研究方法与技术已趋于成熟,但该类电机的内转子存在电枢绕组且需要采用电刷滑环结构,从而引起散热、动平衡、可靠性和需经常维护等一系列问题。因此,一些研究学者们提出了无刷复合结构电机。

### 2.1 无刷电磁耦合无级变速器

无刷电磁耦合无级变速器是由华南理工大学黄向东等于 2005 年提出的基于旋转变压器原理的动力分离装置,其系统结构如图 19 所示。无刷电磁耦合无级变速器通过非接触式集流器实现向内转子绕组馈电,实现了电机结构无刷化。该方案中旋转变压器受供电频率的限制使得电机的实用性受到了限制。当无刷电磁耦合无级变速器两个转子的转速相近时,内转子绕组的电流频率非常低,旋转变压器中电流频率也会非常低,导致整个电机的效率低下。同时,该方案并未解决内转子电枢绕组过热和动态平衡等问题<sup>[42-43]</sup>。

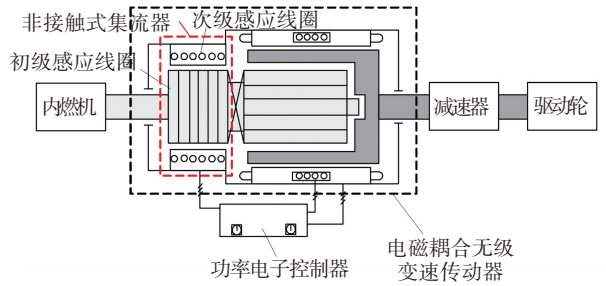


图 19 电磁耦合无级变速传动器系统结构

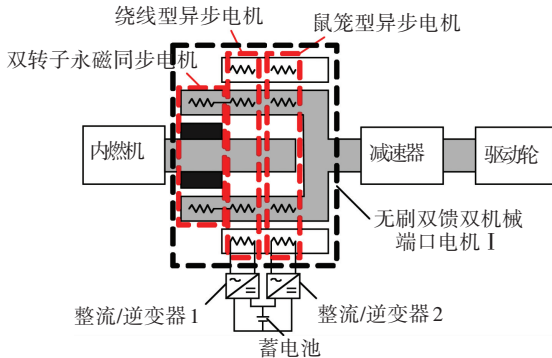
### 2.2 无刷双馈双机械端口电机

无刷双馈双机械端口电机是由华中科技大学黄声华教授于 2008 年提出了基于无刷双馈电机原理的动力分离装置,其 3 种机械结构的系统结构如图 20 所示<sup>[44-46]</sup>。由于无刷双馈双机械端口电机可以看做由 3 个电机级联而成,其结构和磁场关系非常复杂,有效的控制策略难以确定,而且对制作工艺的要求很高。除此之外,引入感应电机式方案会影响电机系统在体积和效率方面的竞争力。

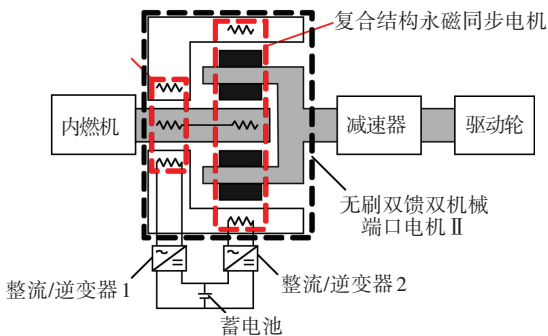
### 2.3 爪极无刷双机械端口电机

爪极无刷双机械端口电机是由中国科学院电工所温旭辉教授于 2008 年提出了基于爪极电机原理的动力分离装置<sup>[47]</sup>,其系统结构如图 21 所示。爪极无刷双机械端口电机由定子 1、转子 1、定子 2、转子 2 组成,其中:定子 1 是一个 U 型铁心且被等分成了 3 个单元,每个单元对应一相;转子 1 为爪极转子,由一系列的齿状铁心构成;转子 2 和定子 2 的结构与轴向磁通永磁同步电机的结构相同,转子 2 的

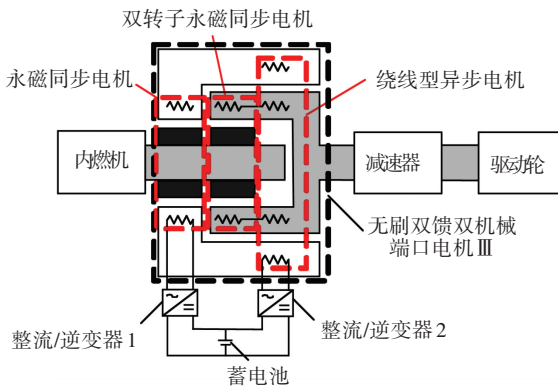
铁心两侧均贴有永磁体,定子 2 的绕组形式为集中绕组. 定子 1、转子 1 和转子 2 构成转速调节电机; 转子 2 和定子 2 构成转矩调节电机. 由于爪极无刷双机械端口电机磁动势中谐波含量较大,导致电机转矩波动非常大<sup>[48]</sup>.



(a) 机械结构 I



(b) 机械结构 II



(c) 机械结构 III

图 20 无刷双馈双机械端口电机系统结构

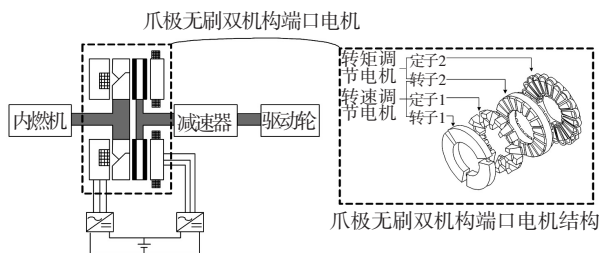


图 21 爪极无刷双机械端口电机系统结构

### 2.4 无刷爪极复合结构电机

无刷爪极复合电机是由哈尔滨工业大学郑萍教授于 2009 年提出的基于爪极电机原理的动力分离

装置<sup>[49]</sup>,其系统结构如图 22 所示.

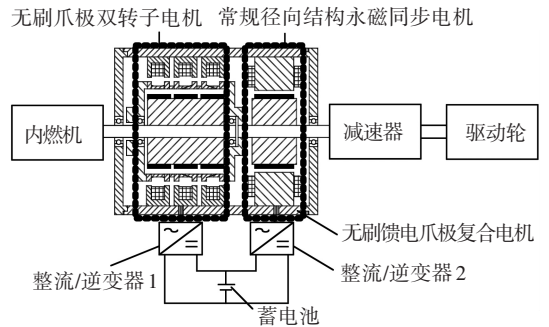
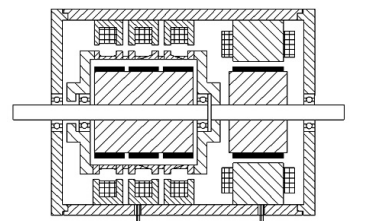
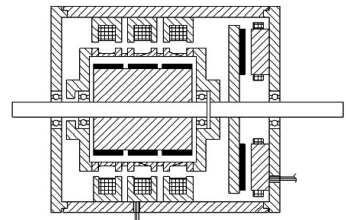


图 22 无刷爪极复合结构电机系统结构

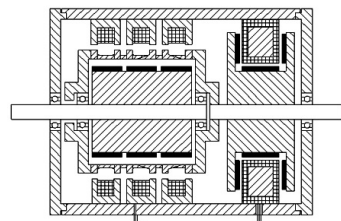
无刷爪极复合结构电机由无刷爪极双转子电机和常规永磁同步电机组成. 其中,无刷爪极双转子电机作为无刷爪极复合电机的核心部件,是将传统爪极电机的爪极部分切割下来作为旋转部件形成一个转子,传统爪极电机的永磁转子作为另一个转子,从而实现双转子电机的无刷化. 无刷爪极双转子电机的作用是内燃机和驱动轮之间提供转速差. 常规永磁同步电机的结构可以采用径向结构、轴向结构或轴径向结构,其作用是内燃机和驱动轮之间提供转矩差<sup>[50]</sup>,无刷爪极复合结构电机的 3 种拓扑结构如图 23 所示.



(a) 爪极-径向磁通



(b) 爪极-轴向磁通



(c) 爪极-轴径向磁通

图 23 无刷爪极复合结构电机 3 种拓扑结构

通过研制无刷爪极双转子电机样机并建立系统测试平台进行实验测试,样机部件及实验平台分别如图 24、25 所示. 通过理论分析和实验验证了电机

的反电动势、功率因数、齿槽转矩等电磁性能,同时验证了验证了无刷爪极双转子电机的转速调节功能. 但由于样机中爪极支架上存在着较大的涡流损耗导致样机的损耗实验测试结果与仿真值之间的偏差较大<sup>[51-52]</sup>.

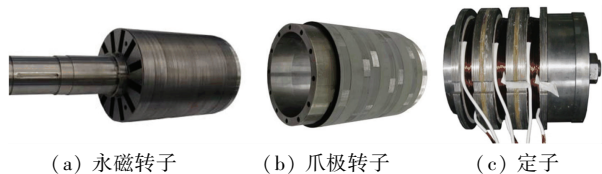


图 24 无刷爪极双转子电机样机部件

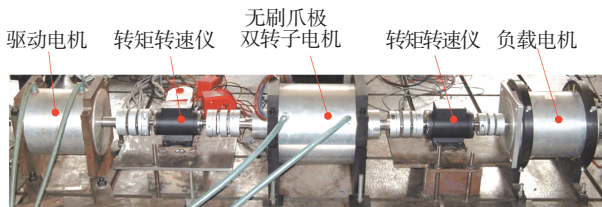


图 25 无刷爪极双转子电机实验平台

### 2.5 无刷横向磁通复合结构电机

无刷横向磁通复合结构电机是郑萍教授于2011年提出了基于横向磁通电机原理的动力分离装置<sup>[53]</sup>,其系统结构如图26所示. 无刷横向磁通永磁复合电机由无刷横向磁通双转子电机和常规永磁同步电机组成. 其中,无刷横向磁通双转子电机是将横向磁通电机齿部连接一起形成一个转子,通过改变定子绕组的电频率,调节横向磁通转子与永磁转子之间的转差. 永磁同步电机的结构可以采用径向结构、轴向结构或轴径向结构,其作用是内燃机和驱动轮之间提供转矩差. 无刷横向磁通复合结构电机的3种拓扑结构如图27所示.

度;定子环形绕组结构简单,简化了定子工艺流程. 但是由于电机是基于横向磁通电机原理工作的,电机的三维磁路复杂,漏磁严重,导致了电机的功率因数较低<sup>[54]</sup>.

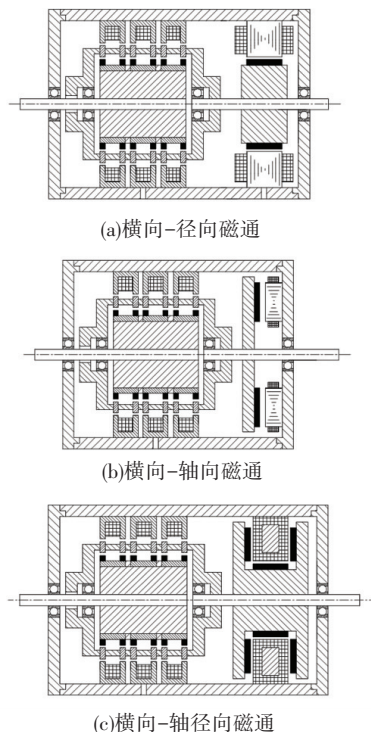


图 27 无刷横向磁通复合结构电机3种拓扑结构



图 28 无刷横向磁通双转子电机样机部件

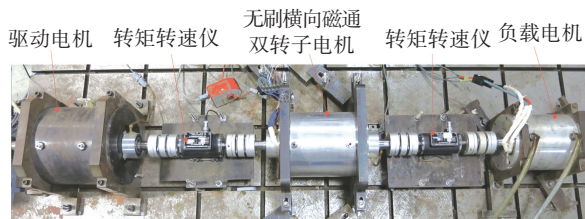


图 29 无刷横向磁通双转子电机样机部件图及实验平台

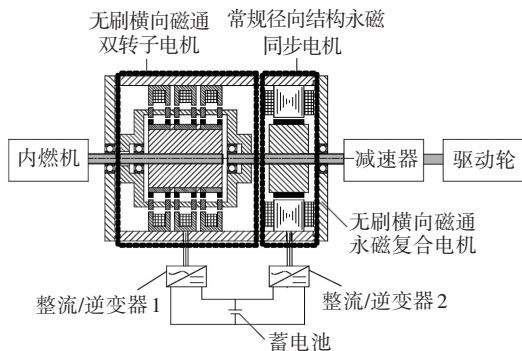


图 26 无刷横向磁通复合结构电机系统结构

郑萍教授研制了无刷横向磁通双转子电机样机并建立了系统测试平台进行了实验测试,样机部件及实验平台分别如图28、29所示. 实验验证了无刷横向磁通双转子电机的转速调节功能. 由于横向磁通转子支架采用酚醛树脂玻璃纤维材料,支架的涡流损耗较小,但支架的机械强度明显降低. 由于无刷横向磁通双转子电机具有高转矩密度的特点,定子各相之间不存在耦合,大大降低了电机的控制难

### 2.6 磁场调制型无刷复合结构电机

磁场调制型无刷复合结构电机是郑萍教授于2010年提出的动力分离装置<sup>[55]</sup>,其系统结构如图30所示. 该方案由磁场调制型无刷双转子电机和传统永磁电机构成. 其中,磁场调制型无刷双转子电机是该方案的核心部件,其结构如图31所示,图中1表示永磁转子,2表示调制环转子,3表示定子. 磁场调制型无刷复合结构电机是由定子、调制环转子和永磁转子构成,它的作用是为内燃机和驱动轮之间提供转速差,并将发动机的转矩传递给车辆负

载<sup>[56]</sup>. 常规永磁同步电机的结构可以采用径向结构、轴向结构或轴径向结构,它的作用是为内燃机和驱动轮之间提供转矩差.

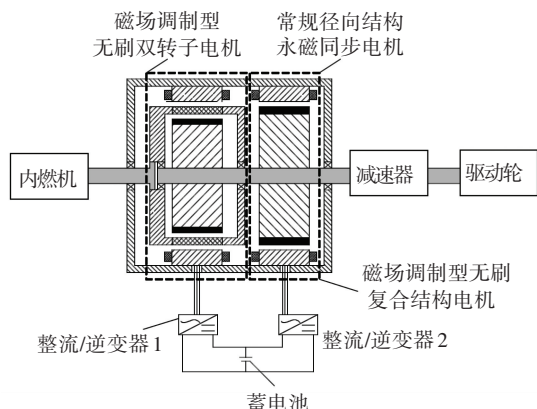


图 30 磁场调制型无刷复合结构电机系统结构

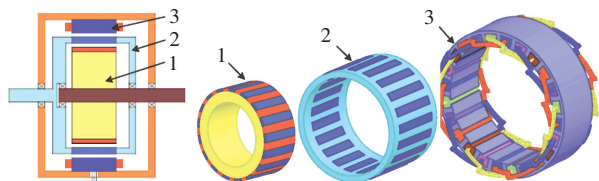
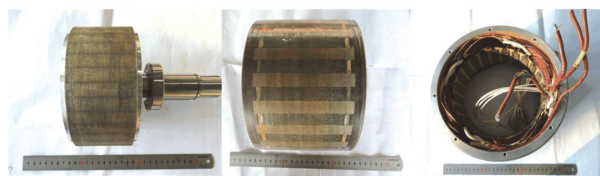


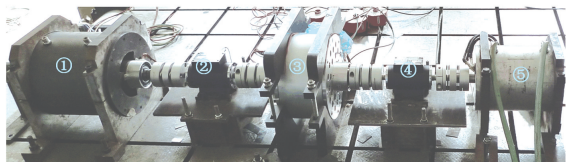
图 31 磁场调制型无刷双转子电机结构

通过采用解析法和有限元法对磁场调制型无刷双转子电机的工作原理进行深入分析并论证了该电机的原理可行性和方案的先进性,结果表明磁场调制型无刷双转子电机在功能上可等效为一个行星齿轮和一个电机. 在此基础上,对电机的电磁性能、功率因数、损耗分布及计算等方面进行深入研究<sup>[57]</sup>,结果表明该电机具有功率密度高和转矩波动小的优势. 研制径向磁场调制型无刷双转子电机样机并建立系统测试平台进行实验测试,样机部件及实验平台分别如图 32、33 所示. 通过实验验证了磁场调制型无刷双转子电机的转速调节功能<sup>[58]</sup>.



(a) 永磁转子 (b) 调制环转子 (c) 定子

图 32 径向磁场调制型无刷双转子电机样机部件



1—驱动电机; 2,4—转矩转速仪; 3—磁场调制型无刷双转子电机; 5—负载电机

图 33 径向磁场调制型无刷双转子电机实验平台

### 2.7 基于磁性齿轮的无刷复合结构电机

香港大学 K.T. Chau 教授于 2010 年提出了基于磁性齿轮的无刷复合结构电机,其结构如图 34 所示<sup>[59]</sup>. 该方案与 Prius 系统相类似,只是将 Prius 系统中的行星齿轮用磁性齿轮代替. 为了追求集成化和高功率密度,该课题组将系统中的两台永磁电机和磁性齿轮进行了集成化处理. 为了解决由于集成化引起的磁耦合问题,课题组还采用了永磁体 halbach 排列方式以及在耦合转子铁心中加入不导磁屏蔽壳来消除磁场耦合的影响. 通过解析分析的方法定性分析该方案的转矩特性,并提出了考虑磁性齿轮变速比和电机性能的设计方法. 通过上述的分析可知,该方案将磁性齿轮和两台永磁同步电机集成一起,具有结构紧凑、质量轻和功率密度高的优点;但是该方案中 4 层气隙和 3 个转子的结构将极大的增加了电机加工难度,这使得该方案的实用性大打折扣.

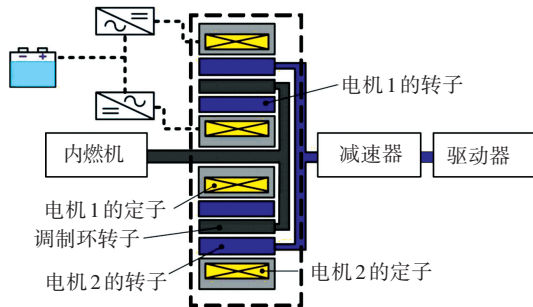


图 34 基于磁性齿轮原理的无刷复合结构电机结构

## 3 结 论

1) 基于复合结构电机的纯电气式方案与基于行星齿轮的机械式方案相比,不仅可以避免机械式方案中的振动、噪声、磨损和定期维护等问题,而且具有结构简单紧凑、易于控制的优势.

2) 有刷复合结构电机的研究已趋于成熟,其研究成果证明了复合结构电机在混合动力汽车应用中的可行性和先进性. 同时也表明有刷复合结构电机具有工作原理简单、结构紧凑、功率密度高等优点,但也存在绕组严重发热、需要电刷滑环机构馈电、旋转绕组动平衡难以保证等瓶颈难题.

3) 无刷复合结构电机去掉了有刷方案的电刷滑环机构,提高了电机可靠性,是目前该领域的研究前沿. 但无刷复合结构电机也存在着结构与工作原理复杂、样机加工困难、功率因数低等问题,尚需进一步深入研究.

## 参 考 文 献

[1] 许光清,邹骥,杨宝路. 控制中国汽车交通燃油消耗和温

- 室气体排放的技术选择与政策体系[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(3): 167-173.
- [2] 陈清泉,孙立清. 电动汽车的现状和发展趋势[J]. 科技导报, 2005, 23(4): 24-28.
- [3] CHAN C C. The state of the art of electric, hybrid and fuel cell vehicles [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(4): 704-718.
- [4] MILLER J M. Hybrid electric vehicle propulsion system architectures of the e-CVT type[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(3): 756-767.
- [5] MILLER J M, EVERETT M. An assessment of ultra-capacitors as the power cache in Toyota THS-II, GM-Allision AHS-2 and Ford FHS hybrid propulsion systems [C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition 2005. Austin: IEEE Press, 2005: 481-490.
- [6] 涂超群,马丽琼. 透视丰田第二代普锐斯混合动力汽车技术[J]. 装备制造技术, 2010(2): 141-142.
- [7] ZHANG H, ZHU Y, TIAN G, et al. Optimal energy management strategy for hybrid electric vehicles [R]. Warrendale: SAE, 2004.
- [8] HOLMES A G, SCHMIDT M R. Hybrid electric powertrain including a two-mode electrically variable transmission: 6478705[P]. 2002-11-12.
- [9] GREWE T M, CONLON B M, HOLMES A G. Defining the general motors 2-mode hybrid transmission [R]. Detroit: SAE, 2007.
- [10] CHAU K T, CHAN C C. Emerging energy-efficient technologies for hybrid electric vehicles[J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(4): 821-835.
- [11] NORDLUND E, SADARANGANI C. The four-quadrant energy transducer [C]//Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference. Pittsburgh: IEEE Press, 2002: 390-397.
- [12] ERIKSSON S, SADARANGANI C. A four-quadrant HEV drive system [C]//Vehicular Technology Conference 2002. Vancouver: IEEE Press, 2002: 1510-1514.
- [13] HOEIJMAKERS M J, RONDEL M. The electrical variable transmission in a city bus [C]//Power Electronics Specialists Conference 2004. Aachen: IEEE Press, 2004: 2773-2778.
- [14] HOEIJMAKERS M J, FERREIRA J A. The electric variable transmission [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(4): 1092-1100.
- [15] XU Q, SONG L, TIAN D, et al. Research on intelligence torque control for the electrical variable transmission used in hybrid electrical vehicle [C]//Electrical Machines and Systems 2011. Beijing: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [16] CUI S M, XU Q, CHENG Y. Research on direct torque control for the electrical variable transmission [C]//Vehicle Power and Propulsion Conference 2010. Lille: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [17] CUI S M, HUANG W X, CHENG Y, et al. Design and experimental research on induction machine based electrical variable transmission [C]//Vehicle Power and Propulsion Conference 2007. Lille: IEEE Press, 2007: 231-235.
- [18] 崔淑梅,宋立伟,韩守亮,等. 磁阻式四端口机电能量变换器: 101106308[P]. 2008-01-16.
- [19] CUI S M, YUAN Y, WANG T. Research on switched reluctance double-rotor motor used for hybrid electric vehicle [C]//Electrical Machines and Systems 2008. Wuhan: IEEE Press, 2008: 3393-3396.
- [20] XU L Y. A new breed of electric machines-basic analysis and applications of dual mechanical port electric machines [C]//Electrical Machines and Systems 2005. Nanjing: IEEE Press, 2005: 24-31.
- [21] XU L Y, ZHANG Y, WEN X H. Multioperational modes and control strategies of dual-mechanical-port machine for hybrid electrical vehicles [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(2): 747-755.
- [22] 温旭辉,徐隆亚,赵峰,等. 双机械端口电机及其驱动控制系统: 1945939[P]. 2007-04-11.
- [23] GUO X Z, FAN T, WEN X H, et al. Electromagnetic coupling analysis of uniform magnetic-filed permanent magnet dual mechanical port machine [C]//Electrical Machines and Systems 2008. Wuhan: IEEE Press, 2008: 3181-3184.
- [24] 赵航,史广奎,黄苏融,等. 双转子混合动力复合永磁电机: 1738163[P]. 2006-02-22.
- [25] 黄苏融,刘行,张琪,等. 双转轴混合磁路能量变换器及其冷却结构研究[J]. 微特电机, 2006, 34(9): 1-2.
- [26] LIU Y, CHENG D S, BAI J G, et al. Topology comparison of compound-structure permanent-magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6): 2217-2222.
- [27] ZHENG P, ZHAO J, LIU R R, et al. Comparison and evaluation of different compound-structure permanent-magnet synchronous machine used for HEVs [C]//Energy Conversion Congress and Exposition 2010. Atlanta: IEEE Press, 2010: 1707-1714.
- [28] 刘冉冉. 混合动力车用径向-径向磁通复合结构永磁同步电机的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
- [29] 赵静. 混合动力车用轴向-轴向磁通复合结构永磁同步电机的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [30] ZHENG P, LIU R R, WU Q, et al. Magnetic coupling analysis of four-quadrant transducer used for hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6): 2597-2599.
- [31] ZHENG P, ZHAO J, WU Q, et al. Evaluation of the magnetic coupling degree and performance of an axial-axial flux compound-structure permanent-magnet synchronous machine used for hybrid electric vehicles [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(7): 07F113.

- [32] 陈云云, 全力, 朱孝勇, 等. 新型定子永磁式双转子电机运行模式分析与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33): 5895-5901.
- [33] 陈云云, 全力, 朱孝勇, 等. 定子永磁式双转子电机多工况运行模式及控制策略研究[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(7): 27-33.
- [34] MO L H, QUAN L, ZHU X Y, et al. Comparison and analysis of flux-switching permanent-magnet double-rotor machine with 4QT used for HEV[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(11): 8205804.
- [35] 刘修福, 全力, 朱孝勇, 等. 混合动力汽车用新型磁通切换双转子电机性能分析[J]. 微特电机, 2013, 41(1): 20-24.
- [36] 邱海兵, 全力, 朱孝勇, 等. 基于双转子磁通切换电机的混合动力系统分析[J]. 微特电机, 2013, 41(11): 57-60.
- [37] 莫丽红, 全力, 朱孝勇, 等. 定子永磁式双转子电机电磁性能分析[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(9): 30-35.
- [38] 黄向东, 罗玉涛, 赵克刚, 等. 电磁耦合无级变速传动系统: 1694339[P]. 2005-11-09.
- [39] 罗玉涛, 孟凡珍, 符兴锋. 电磁耦合无级变速系统磁路等效方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 1-6.
- [40] 罗玉涛, 张桂连, 旷鹏, 等. 基于电磁耦合无级变速器的混合动力车传动控制[J]. 机械工程学报, 2010(8): 88-97.
- [41] 吴健瑜, 罗玉涛, 黄向东. 电磁耦合无级变速器温度场分析与冷却方法研究[J]. 中国机械工程, 2011, 22(8): 887-891.
- [42] 罗玉涛, 喻皓. 电磁耦合无级变速器的调磁及效率分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(9): 1103-1107.
- [43] 罗玉涛, 谈新志. 电磁耦合无级变速器混合励磁特性研究[J]. 微特电机, 2008, 36(7): 4-8.
- [44] 万山明, 黄声华, 陈骁, 等. 一种径向磁场的无刷双馈双机械端口电机: 201323515[P]. 2009-10-07.
- [45] 陈骁, 黄声华, 万山明, 等. 一种轴向磁场的无刷双馈双机械端口电机: 201323512[P]. 2009-10-07.
- [46] CHEN X, HUANG S, WAN S, et al. Principle and mathematic model of the brushless doubly-fed electrical variable transmission[J]. Micromotors, 2009, 12: 3.
- [47] 范涛, 温旭辉. 一种无刷化的双机械端口电机: 101282067[P]. 2008-10-08.
- [48] FAN T, WEN X H, XUE S, et al. A brushless permanent magnet dual mechanical port machine for hybrid electric vehicle application[C]//Electrical Machines and Systems 2008. Wuhan: IEEE Press, 2008: 3604-3607.
- [49] 郑萍, 吴芊, 佟诚德, 等. 无刷馈电爪极复合电机: 101667768[P]. 2010-03-10.
- [50] ZHENG P, WU Q, ZHAO J, et al. Performance analysis and simulation of a novel brushless double rotor machine for power-split HEV applications[J]. Energies, 2012, 5(1): 119-137.
- [51] ZHENG P, WU Q, BAI J G, et al. Analysis and experiment of a novel brushless double rotor machine for power-split hybrid electrical vehicle applications [J]. Energies, 2013, 6(7): 3209-3223.
- [52] TONG C D, ZHENG P, WU Q, et al. A brushless claw-pole double-rotor machine for power-split hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 4295-4305.
- [53] 刘勇, 赵全斌, 佟诚德, 等. 横向-径向磁通结构无刷复合式永磁电机: 102361380[P]. 2012-02-22.
- [54] ZHENG P, ZHAO Q B, BAI J G, et al. Analysis and design of a transverse-flux dual rotor machine for power-split hybrid electric vehicle applications [J]. Energies, 2013, 6(12): 6548-6568.
- [55] 郑萍, 白金刚, 佟诚德, 等. 径向-径向磁场调制型无刷复合结构电机: 101938199[P]. 2011-01-05.
- [56] ZHENG P, SONG Z Y, BAI J G, et al. Research on an axial magnetic-field-modulated brushless double rotor machine[J]. Energies, 2013, 6(9): 4799-4829.
- [57] ZHENG P, BAI J G, TONG C D, et al. Investigation of a novel radial magnetic-field-modulated brushless double-rotor machine used for HEVs[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(3): 1231-1241.
- [58] BAI J G, ZHENG P, TONG C D, et al. Characteristic analysis and verification of the magnetic-field modulated brushless double-rotor machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4023-4033.
- [59] JIAN L N, CHAU K T. Design and analysis of a magnetic-gear electronic-continuously variable transmission system using finite element method [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2010, 107: 47-61.

(编辑 魏希柱)