文章编号:1008-1542(2018)01-0017-07　　doi:10.7535/hbkd.2018yx01003

AFPM 型轮毂驱动电机研究综述

戴建国,赵志国,刘台凤,王　程,胡晓明

(淮阴工学院交通工程学院,江苏淮安　223003)

摘　要:新能源汽车产业化是推动汽车产业可持续发展的重要途径,是解决当前能源短缺与环境问题的关键举措。电动汽车作为新能源汽车的重要发展方向,将在未来汽车产业竞争中起到至关重要的作用,其中尤以轮毂驱动方式的电动汽车最为突出。轴向磁通永磁无刷电机以其结构紧凑、功率密度高、工作噪声低以及散热性能好等优点逐渐成为轮毂驱动装置的优选对象。在对 AFPM 电机技术研究现状进行阐述的基础上,着重分析了 AFPM 电机在轮毂驱动方面的工程应用及存在的技术问题,尤其是 AFPM 电机与其他系统的匹配和在高负荷工况下的散热技术问题,并对其在未来汽车行业发展中将起到的关键作用进行了展望。研究结果对 AFPM 电机在新能源汽车领域的技术应用具有一定的参考价值。

关键词:车辆工程;AFPM 电机;轮毂驱动;电动汽车;高功率密度

中图分类号:U469.72　　**文献标志码**:A

Review of research on AFPM hub motor

DAI Jianguo, ZHAO Zhiguo, LIU Taifeng, WANG Cheng, HU Xiaoming

(Faculty of Transportation Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an, Jiangsu 223003, China)

Abstract: The industrialization of new energy vehicles is an important way to promote the sustainable development of automobile industry, and it is also the key measure to solve the problems of energy and environment. As an important type of new energy vehicles, electric vehicles will play an important role in the future competition in the automotive industry, especially in the field of electric vehicle driven by wheel. With the advantages of compact structure, high power density, low working noise and good heat dissipation performance, the AFPM motor has gradually become the preferred object of the hub driving device. Based on the statement of the technical development and research status about AFPM motor, this paper mainly analyzes the engineering application and technical problems of AFPM motor in hub drive, especially the matching of AFPM motor with other systems and the problem of heat dissipation at high load conditions, and looks forward to the key role in the future development of the automotive industry. This paper will play a certain reference and guiding role in the application of AFPM motor in the field of new energy vehicles.

Keywords: vehicle engineering; AFPM motor; hub driven; electric vehicle; high power density

收稿日期:2017-10-30;修回日期:2017-12-10;责任编辑:张　军

基金项目:国家自然科学基金(51605183);江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJB460004);江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2016061-13);淮安市应用研究与科技攻关(工业)计划项目(HAG2015027,HAG201603)

第一作者简介:戴建国(1987—),男,江苏泰兴人,讲师,博士,主要从事车辆动力装置优化方面的研究。

通信作者:赵志国教授。E-mail:hyitjeancool@163.com

戴建国,赵志国,刘台凤,等.AFPM 型轮毂驱动电机研究综述[J].河北科技大学学报,2018,39(1):17-23.

DAI Jianguo, ZHAO Zhiguo, LIU Taifeng, et al.Review of research on AFPM hub motor[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2018,39(1):17-23.

资源短缺与环境污染是当今社会发展面临的主要问题，也是制约传统汽车发展的重要瓶颈因素[1-2]。推进传统汽车节能减排和新能源汽车产业化将成为汽车产业发展亟需解决的重大课题，是推动汽车产业可持续发展的紧迫任务[3]。在全球汽车产业转型升级的关键过渡时期，中国汽车行业应抓住契机，解决关键问题，掌握核心技术，大力发展电动汽车，在全球汽车产业竞争中占得先机，力争行业领先地位。

电动汽车产业发展的关键环节是电池、电机和电控这“三电”技术，在电机及其控制技术方面，中国汽车产业存在明显的劣势，但目前已有越来越多的科研机构及企业将目光转移至电动汽车轮毂驱动电机技术上，对轮毂电机的研究如雨后春笋般涌现[4-6]。

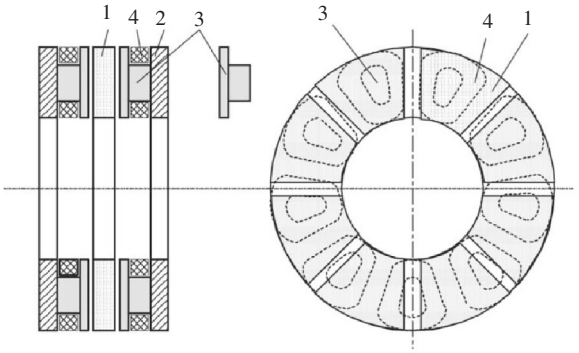
轮毂电机又称为车轮内装电机，能够简化车辆结构、可实现多种复杂驱动方式，具有便于采用多种新能源技术的优点[7]。如今各式各样的轮毂电机及其控制方法层出不穷，尤以美国、日本、德国、法国等发达国家的轮毂电机技术最为突出[8-10]。美国的 Robert 是最早发明轮毂驱动装置的，他将电动机、传动系和制动系全部融入至轮毂装置中，将该技术申请了发明专利。该技术于 1968 年被通用电气公司应用于大型矿用自卸车上。日本的清水浩教授从 1991 年开始进行电动汽车研究，该课题组研制出了多种轮毂驱动电机，并成功应用于多种电动汽车车型，紧接着本田、三菱、东洋等企业均相继推出了轮毂驱动型电动汽车。随后，美国、德国、法国、英国的多家知名车企均相继展出了不同形式的轮毂驱动技术产品。

中国在该领域起步较晚，但随着国家政策的激励与资金的投入，高校及研究机构对轮毂电机技术的研究均有所加强，研究较为前沿且已获得一定成果的有同济大学、北京理工大学、吉林大学等高校，企业方面以广汽集团和奇瑞公司对轮毂驱动技术的研究成果较为突出，并已推出了采用轮毂驱动的纯电动车产品[11-13]。

为了满足轮毂电机高功率密度、低速大扭矩以及宽恒功率范围的需求，通常选用的永磁轮毂电机结构形式有：径向磁通永磁同步电机、横向磁通永磁同步电机以及轴向磁通永磁同步电机。综合分析这 3 种结构形式的电机可以发现，径向磁通永磁同步电机结构尺寸较大，作为轮毂驱动装置的空间利用率较低，不利于电动汽车轮毂装置的布置；横向磁通永磁同步电机具有高转矩密度和低速大扭矩的优点，非常适合于直驱式轮毂系统，但其存在磁漏系数大、功率因数低、定位力矩大、结构复杂和工艺要求高等缺点，使得其在轮毂系统中的应用受限；而轴向磁通永磁同步电机以其独特的扁平结构、较好的散热性能、较小的振动噪声等优点更适合作为轮毂系统的驱动装置[14]。

1 AFPM 型电机的技术发展与研究现状

AFPM 盘式电机相比常规径向磁场电机具有功率密度高、惯性小、体积小、易于装配、散热性能好等优点，近年来开始大量应用于机器人关节、风扇、风力发电、电动汽车驱动以及飞行工具推进器等有一定空间限制的领域[15]，其结构如图 1 所示。



1—永磁体；2—定子支撑铁磁盘；3—定子极；4—定子绕组。

图 1 AFPM 盘式电机基本结构

Fig.1 Basic structure of the AFPM disk motor

美国比德哥煦生命科技大学的 GIERAS 等[15]通过长期对 AFPM 电机技术的研究，撰写了介绍 AFPM 电机的专著，详细叙述了当前常见的各类 AFPM 电机的结构及磁路设计原理，并涵括了对电机驱动与传热的探讨，为 AFPM 电机进一步的研究提供了系统的分析方法与翔实的理论数据。

对 AFPM 电机的研究早在 1978 年就已经有了较为成功的案例，意大利比萨大学的 BRAMANTI[16] 首先提出了制造 AFPM 电机的方法，并通过分析 AFPM 电机的轴向磁场特性，研制出了一台双定子内转子轴向磁通永磁同步电机。至 20 世纪 80 年代，WEH 等[17]详细分析了不同结构的 AFPM 电机优缺点，并研制出一台双外转子内定子结构的高转速、高转矩的轴向磁通永磁同步电机，在当时引起了较大的影响；随后其将研究方向转向大功率低转速的 AFPM 电机，为了减少电机的惯量，在转子圆盘上应用强化纤维塑料，成功地研制了一台 220 kW，3.8 kNm 低速高转矩的轴向磁通永磁同步电机[18]。随后全方位的开展了 AFPM 电

机的研究。

曼彻斯特理工大学的 SPOONER 等[19]和 DOSTAL 等[20]提出了一种新的定子铁芯不开槽 TROUS 型轴向磁通永磁无刷直流电机结构型式，该电机具有双外转子内定子结构，定子绕组环绕在定子铁芯之上，使得定子绕组低端缩短，进而提高了电机的效率和功率密度。马来亚大学的 MAHMOUDI 等[21-23]基于遗传算法优化设计了 1 台三相四极 50 Hz 的 AFPM 电机，优化目标包括最大化功率密度、最小化谐波畸变率、正弦反电势波形最大化以及低齿槽转矩，并通过试验验证了优化效果的有效性。科贾埃利大学的 AYDIN 等[24-25]对 1 台 24 槽 8 极单定子双转子 AFPM 电机展开了研究，总结了减小电机齿槽转矩的方法，通过对多种方法的对比得出，斜槽斜极是削弱齿槽转矩最有效的方法，并细致分析了永磁体斜极以及采用不同斜极方式削弱齿槽转矩的效果，最后以试验验证了此类方法的有效性。

国外对 AFPM 电机的研究已经达到了产品化的阶段。目前为止，已有瑞士 INFRANOR 公司、德国 Robert Bosch 公司和罗马尼亚电力工程研究所等在生产系列的 AFPM 电机产品。

中国关于 AFPM 电机的研究处于初步发展阶段，但已取得了一定的成果。沈阳工业大学的王晓远等[26]对一种基于 Halbach 阵列的 AFPM 盘式电机展开了研究，并从电机优化设计的角度出发，提出了一种新型楔形气隙电机结构，通过改变气隙结构以提升电机的气隙磁密，进而改善电机性能。考虑到 AFPM 电机盘式布置的型式，其内部气隙磁密分布较为复杂，河南理工大学的 SHANGGUAN 等[27-28]通过传统磁路法以及有限元切片法对 AFPM 电机的气隙磁密进行了深入研究和计算分析，明确了电机气隙磁密的分布状态。

为了研究整体磁极斜极与分段磁极斜极对齿槽转矩的不同影响，周俊杰等[29]基于能量法和傅里叶分解法，推导出 AFPM 电机在斜极前后的齿槽转矩解析表达式，并利用有限元法展开仿真与分析，发现采用分段磁极斜极方法对削弱 AFPM 电机的齿槽转矩具有更理想的效果。

2　AFPM 型电机的分类

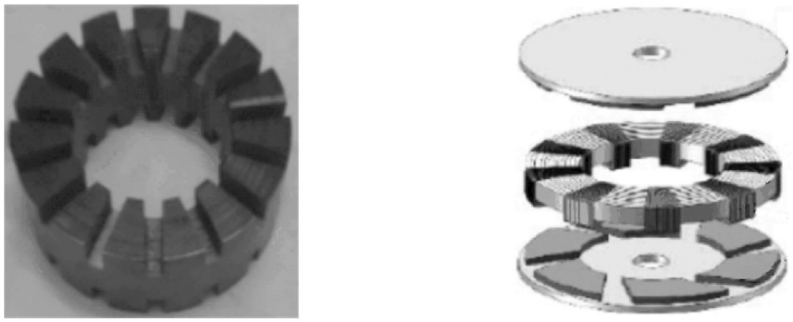
AFPM 电机依据不同的标准有不同的分类情况。若按照定子和转子的个数划分，可分为单定子-单转子结构（简称 SS）、单定子-双转子结构（简称 TORUS）、双定子-单转子（简称 AFIR）和多定子-多转子结构（简称 MS）4 种，如图 2 所示[30-32]。AFPM 型电机多用作牵引及驱动装置，因此主要根据其产生的转矩能力来选择电机结构。在图 2 所示的 4 种结构中，在相同尺寸条件下，MS 结构产生的转矩是 AFIR 结构和 TORUS结构的 2 倍，是 SS 结构的 4 倍[33]，由此可见，定子转子数目的增多有利于提升 AFPM 电机的转矩输出。

a）单定子-单转子结构（SS）　b）单定子-双转子结构（TORUS）　c）双定子-单转子结构（AFIR）　d）多定子-多转子结构（MS）

图 2　AFPM 电机的结构形式

Fig.2　Structures of the AFPM motor

若按照磁通闭合路径的不同划分，AFPM 电机可分为定子有铁芯和定子无铁芯结构，如图 3 所示[34]。定子无铁芯结构具有电机效率高、散热性好、定子磁路线性化等优点，但其存在电感较小，恒功率区小，绕组涡流损耗大等缺点[35-36]。定子有铁芯结构还可进一步划分为有槽和无槽 2 种形式。定子有槽可以减小齿槽转矩，但存在绕组涡流损耗大、恒功率范围小的缺点；定子铁芯无槽可以提高电机的恒功率范围，但同时会产生较大的损耗问题[35]。



a) 定子有铁芯结构　　b) 定子无铁芯结构

图3 AFPM电机的定子铁芯结构

Fig.3 Stator structure of the AFPM motor

3 AFPM型电机在轮毂驱动方面的工程应用

轮毂驱动的方式可为电动汽车提供更加灵活多变的驱动选择，将电机整合在车轮内部来直接驱动车轮转动，极大地提高了车辆的传动效率和底盘的可操作性，同时节省了电动汽车的布置空间[37]，有效提升了车辆的空间利用率。

意大利SOLERO等[38]研制的4.5 kW无槽结构AFPM轮毂电机应用于三轮电动车，其剖面图如图4所示，该电机采用双转子-单定子背靠背绕组结构，有效缩短绕组端部。应用此种AFPM型轮毂电机的电动车持续行驶速度为50 km/h，最大行驶速度可达80 km/h。

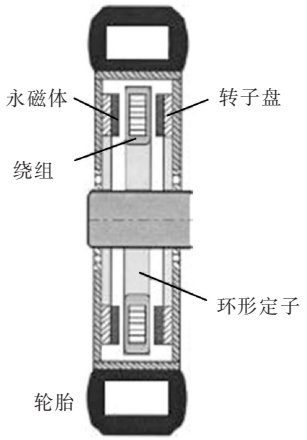


图4 意大利三轮电动车轮毂电机剖面图

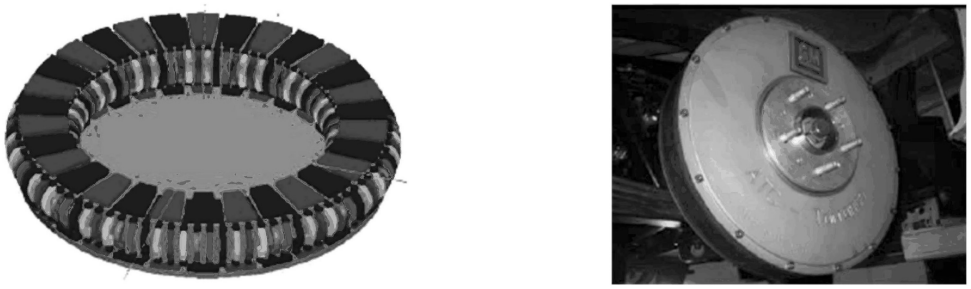
Fig.4 Hub motor profile of Italian three-wheel electric vehicle

通用汽车公司和罗马大学合作研制的轴向磁场永磁驱动轮毂电机，如图5所示，该电机应用于混合电力汽车GM's S10，最大转矩为500 N·m，最大功率为25 kW，最高转速可达1 200 r/min[39]。此轮毂电机采用有铁芯开槽结构，冷却方式为液冷。为了获得较高的转矩密度选取了较多的极对数和较大的电机外径；为降低定位力矩，将转子磁钢不等距分布，并采用磁性槽楔以削弱定子的开槽效应；为了进一步提高电机功率密度，根据转子铁芯的磁力线分布，削减磁密较低的多余铁芯。此外，水冷铝环和高热导率的环氧一起用于定子外侧，能有效降低电机的温升。

中国对AFPM型轮毂驱动电机方面的研究取得不错的成就。邓秋玲等[40]提出了一种应用于混合动力汽车的新型高密度AFPM轮毂驱动电机，此电机的电枢由分段的叠片定子极和简单的绕组所构成，节约了成本，降低了损耗，不仅解决了轴向磁场电机电枢铁芯制造困难的问题，同时还可以获得较好的性能。清华大学卢东斌等[41]提出一种基于霍尔传感器的磁场定向控制应用在电动汽车永磁无刷轮毂电机的方法。永磁无刷轮毂电机一般为外转子结构，采用霍尔传感器作为位置传感器，可以实现较好的转矩控制，保证车辆的平顺性和舒适性，同时具有电机结构紧凑和方案成本低的优点。哈尔滨工业大学的倪荣刚[14]探讨了AFPM轮毂电机的输出特性与电磁参数的关系，并给出其计算方法和影响因素，同时指出所研究轮毂系统的输出能力还受到电机损耗和温升的影响，为后续AFPM轮毂电机的研究明确了一定的方向。

4 AFPM型轮毂驱动电机存在的关键技术问题

AFPM电机的技术得到了飞速发展，但其作为电动汽车轮毂驱动装置仍存在以下技术问题。



a）盘式电机定转子结构　　b）盘式电机实物图

图 5　轴向磁场永磁驱动轮毂电机

Fig.5　Axial magnetic field permanent magnets hub driven motor

1）制动器、位置传感器和控制系统需要与 AFPM 型轮毂电机进行配套

AFPM 型轮毂驱动电机需要分辨率高、外型扁平、与电机结构配套的传感器和控制器，控制系统宜采用高速微处理器和数字信号处理器（DSP），运用矢量控制方法和无位置传感器控制，以提高系统的可靠性和对环境的适应性[42]。

2）车轮内部空间有限，需要合理布置

由于车轮内部空间限制，给驱动电机、制动系统、减速机构、控制系统的合理布置增加了难度，尤其是轮毂电机已占据了车轮内部的大部分空间，这就使制动器的安装更为困难，即使采用结构优化安装了制动系统，紧凑的布置形式也容易导致制动器及轮毂电机的散热、机械制动和再生制动的协调等方面问题，同时影响车轮的定位参数，造成电动汽车的操纵稳定性下降。因此，AFPM 轮毂电机的空间布置及驱动制动控制也将是今后研究的关键技术[43]。

3）AFPM 轮毂电机应具有良好的散热性和密封性

轮毂电机处于过载运行时，电机温度会升高，为了防止这一现象产生，轮毂电机应具有良好的散热性，然而，为了防止车轮涉水、尘土污染等使轮毂电机受到损坏，轮毂电机还应具有较好的密封性。因此，需要考虑如何兼顾散热和密封这两大关键问题。

4）AFPM 轮毂电机应具有较好的转矩波动抑制能力

电动汽车采用轮毂驱动形式，具有简化车辆结构、可实现多种复杂驱动方式以及便于采用多种新能源技术等优点，然而轮毂驱动的方式增大了车轮的簧下质量和轮毂转动惯量，并会产生一定的垂向激励，将会对车辆的操纵稳定性、行驶平顺性以及安全性带来影响，因此 AFPM 电机作为轮毂驱动装置应具有较好的转矩波动抑制能力，以尽可能地降低轮毂驱动所带来的垂向激励。

5　结　论

AFPM 型电机在功率密度和工作效率等方面具有优异的表现，现已成为轮毂电机领域的研究热点。本文阐述了 AFPM 电机的国内外研究现状及其结构分类，并对 AFPM 电机在轮毂驱动方面的研究及工程应用情况进行了描述，在此基础之上，结合 AFPM 电机自身特性及其在轮毂驱动技术方面的匹配问题，指出了当前 AFPM 电机作为轮毂驱动装置存在的关键技术问题，尤其是 AFPM 电机与其他系统的匹配和在高负荷工况下的散热技术问题。

在后续的研究过程中，只有解决了所提出的几个关键技术难点，方可推动 AFPM 电机在轮毂驱动方面的技术应用，进而实现其产业化发展。

参考文献/References：

[1]　YUAN X，MU R，ZUO J，et al. Economic development，energy consumption，and air pollution：A critical assessment in China[J]. Human and Ecological Risk Assessment：An International Journal，2015，21(3)：781-798.

[2] BROWN S, PYKE D, STEENHOF P. Electric vehicles: The role and importance of standards in an emerging market[J]. Engergy Policy, 2010, 38(7): 3797-3806.

[3] 中国科学院能源领域战略研究组. 中国至 2050 年能源科技发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[4] WANG R, CHEN Y, FENG D, et al. Development and performance characterization of an electric ground vehicle with independently actuated in-wheel motors[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3962-3971.

[5] CHEN B C, KUO C C. Electronic stability control for electric vehicle with four in-wheel motors[J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(4): 573-580.

[6] YOO C H, LIM D K, WOO D K, et al. A new multimodal optimization algorithm for the design of in-wheel motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(3):1-4.

[7] SANTIAGO J D, BERNHOFF H, EKERGRRD B, et al. Electrical motor drivelines in commercial all-electric vehicles: A review[J]. IEEE Transactions on Vehicle Technology, 2012, 61(2):475-484.

[8] BENER A, MAADID M G A A, ZKAN T, et al. The impact of four-wheel drive on risky driver behaviours and road traffic accidents[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2008, 11(5): 324-333.

[9] RAMBALDI L, BOCCI E, ORECCHINI F. Preliminary experimental evaluation of a four wheel motors, batteries plus ultracapacitors and series hybrid powertrain[J]. Applied Energy, 2011, 88(2): 442-448.

[10] LACHHAB I, KRICHEN L. An improved energy management strategy for FC/UC hybrid electric vehicles propelled by motor-wheels [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(1): 571-581.

[11] 李刚, 宗长富, 陈国迎, 等. 线控四轮独立驱动轮毂电机电动车集成控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(4): 796-802.
LI Gang, ZONG Changfu, CHEN Guoying, et al. Integrated control for X-by-wire electric vehicle with 4 independently driven in-wheel motors[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Techonlogy Edition), 2012, 42(4): 796-802.

[12] 王晓远, 高鹏. 基于进化策略的轮毂电机永磁体结构优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 979-984.
WANG Xiaoyuan, GAO Peng. Optimal design of permanent magnets of in-wheel motor based on evolution strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 979-984.

[13] WU F K, YEH T J, HUANG C F. Motor control and torque coordination of an electric vehicle actuated by two in-wheel motors[J]. Mechatronics, 2013, 23(1): 46-60.

[14] 倪荣刚. 轴向磁场永磁同步轮毂电机研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
NI Ronggang. Research on Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Wheel Motor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[15] GIERAS J F, WANG R J, KAMPER M J. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines[M]. London: Kluwer Acadenic, 2004.

[16] BRAMANTI A. Analysis on a synchronous machine with axial air gap[C]// ICEM .[S.l.]:[s.n.],1978: 2-10.

[17] WEH H, MAYER R. Synchronous machine with permanent magent excitation as a flexible propulsion motor with high efficiency[J]. Proceedings of International Conference on Electrical Machines,1984,20(6): 607-612.

[18] WEH H, MOSEBACH H, MAY H. Design concepts and force generation in inverted-fed synchronous machines with permanent magnet excitation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003,20(5):1756-1761.

[19] SPOONER E, CHALMERS B J. "TORUS": A slotless,toroidal-stator, permanent-magnet generator[J]. IEEE Proceedings B-Electric Power Applications, 1992,139(6):497-506.

[20] DOSTAL Z, LIPO T A, CHALMERS B J. Influence of current waveshape on motoring performance of the slotless permanentmagnet machine Torus[C]//International Conference on Electrical and Machines and Drives.[S.l.]:[s.n.], 1993: 376-380.

[21] MAHMOUDI A, KAHOURZADE S, RAHIM A N, et al. Design and prototyping of an optimizedaxial-flux permanent-magnet synchronous machine[J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7(5): 338-349.

[22] MAHMOUDI A, KAHOURZADE S, RAHIM N A, et al. Design, analysis and prototyping of an axial-flux permanent magnet motor based on genetic algorithm and finite element analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(4): 1479-1492.

[23] MAHMOUDI A, KAHOURZADE S, RAHIM N A, et al. Design, analysis and prototyping of a novel structured solid rotor ringed line start axial flux permanent magnet motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronic, 2014, 61(4): 1722-1734.

[24] AYDIN M, ZHU Z Q, LIPO T A, et al. Minimization of cogging torque in axial-flux permanent magnet machines: Design concepts[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(9): 3614-3622.

[25] AYDIN M, GULEC M. Reduction of cogging torque in double-rotor axial-flux permanent-magnet disk motors: A review of cost-effective magnet-skewing techniques with experimental verification[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 5025-5034.

[26] 王晓远, 唐任远, 杜静娟, 等. 基于 Halbach 阵列盘式无铁心永磁同步电机优化设计——楔形气隙结构电机[J]. 电工技术学报, 2007, 22(3): 2-5.
WANG Xiaoyuan, TANG Renyuan, DU Jingjuan, et al. Optimization of disk coreless permanent magnet synchronous motor based on Halbach——the wedgy airgap motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(3): 2-5.

[27] SHANGGUAN Xuanfeng, ZHANG Kai. Static airgap magnetic field of axial flux permanent magnet disk motor[J]. International Journal of Digital Content Technology and Its Applications, 2013, 7(7): 1175-1182.

[28] SHANGGUAN Xuanfeng, ZHANG Kai. Calculation of 3D airgap magnetic field distribution of an axial flux permanent magnet motor[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013, 273: 338-342.

[29] 周俊杰，范承志，叶云岳，等. 基于斜磁极的盘式永磁电机齿槽转矩削弱方法[J]. 浙江大学学报(工学版)，2010，44(8)：1548-1552.
ZHOU Junjie，FAN Chengzhi，YE Yunyue，et al.Method for reducing cogging torque based on magnet skewing in disc-type permanent magnet motors[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science)，2010，44(8)：1548-1552.

[30] GIERAS F J，WANG Rongjie，KAMPER M J.Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines[M].Berlin：Springer Netherlands，2008.

[31] CAPPONI F G，DONATO G D，CARICCHI F. Recent advances in axial-flux permanent-magnet machine technology[J]. IEEE Transactions on Industry Application，2012，48(6)：2190-2205.

[32] 王晓光.电动汽车轮毂用盘式无铁心永磁同步电机的控制策略研究[D]. 天津：天津大学，2014.
WANG Xiaoguang. Research on Control Strategy of In-Wheel Disc Coreless Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles [D]. Tianjing：Tianjing University，2014.

[33] CHAKER N，SALAH B I，TOUNSI S，et al. Design of axial-flux motor for traction application [J]. Journal of Electromagnetic Analysis & Applications，2009，1(2)：73-84.

[34] 黄允凯，周涛，董剑宁，等. 轴向永磁电机及其研究发展综述[J]. 中国电机工程学报，2015，35(1)：192-205.
HUANG Yunkai，ZHOU Tao，DONG Jianning，et al. An overview on developments and researches of axial flux permanent magnet machines[J]. Proceedings of the CSEE，2015，35(1)：192-205.

[35] RAHMAN K M，PATEL N R，WARD T G，et al. Application of direct-drive wheel motor for fuel cell electric and hybrid electric vehicle propulsion system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications，2006，42(5)：1185-1192.

[36] JAVADI S，MIRSALIM M. A coreless axial-flux permanent-magnet generator for automotive applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics，2008，44(12)：4591-4598.

[37] 郑淑琴，龙江启. 电动汽车永磁无刷轮毂电机控制策略建模[J].中国机械工程，2017，28(6)：744-755.
ZHENG Shuqin，LONG Jiangqi. Control tactics modeling of electric vehicle permanent magnet brushless wheel motors[J]. China Mechanical Engineering，2017，28(6)：744-755.

[38] SOLERO L，HONORATI O，CARICCHI F，et al. Nonconventional threee-wheel electric vehicle for urban mobility[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology，2001，50(4)：1085-1091.

[39] 宫海龙. 高转矩永磁轮毂电机磁系统的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2011.
GONG Hailong. Research on Magnetic System of High Torque Permanent In-Wheel Motor [D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2011.

[40] 邓秋玲，肖锋. 盘式永磁同步电机在混合动力汽车中的应用[J]. 微特电机，2010(10)：66-76.
DENG Qiuling，XIAO Feng. Application of disc type permanent magnet synchronous machines to hybrid electric vehicles[J]. Small & Special Electrical Machines，2010(10)：66-76.

[41] 卢东斌，欧阳明高，谷靖，等. 电动汽车永磁无刷轮毂电机磁场定向控制[J]. 电机与控制学报，2012，16(11)：76-83.
LU Dongbin，OUYANG Minggao，GU Jing，et al. Field oriented control of permanent magnet brushless hub motor in electric vehicle[J]. Electric Machines and Control，2012，16(11)：76-83.

[42] 赵鹏. 盘式永磁无刷直流电机的设计研究[D]. 杭州：浙江大学，2010.
ZHAO Peng. Research on Design of Disk Permanent Magnet Brushless DC Motor[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2010.

[43] 何仁，张瑞军. 轮毂电机驱动技术的研究与进展[J]. 重庆理工大学学报(自然科学)，2015，29(17)：10-18.
HE Ren，ZHANG Ruijun. Research and development of in-wheel motor drive technology[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)，2015，29(17)：10-18.