

# 电动汽车集中式驱动用中/高速永磁同步电机电磁性能对比

## Electromagnetic Performances Comparison between Medium and High Speed PM Synchronous Machine in EV Centralized electrical drive System

祝子冲 彭飞 曲俊先 夏雪

东南大学电气工程学院, 江苏省 南京市 210096

**摘要:** 乘用车电驱动系统所需额定功率约为 50-100kW, 目前比较成熟的技术方案是采用集中式电驱动系统。其将传统的内燃机替换为相同功率等级的电机, 同时保留驱动链的其它部分。集中式电驱动系统电机的额定转速在 4000-8000r/min, 输出转矩在 100-300N·m。由于输出转矩在电磁负荷一定时与电机有效部分体积成正比, 因此低转速电机质量较大, 高性能稀土永磁体用量增加。而相同功率等级的高速电机 (>15000r/min), 体积约为现有电机的一半, 永磁体用量大幅降低。本文以 BMW i3 上的主驱动电机电磁性能为基准, 使用 Jmag 有限元软件分析计算 75kW, 18000r/min 高速永磁同步电机性能, 探索将其应用于电动汽车电驱动系统的可行性及优缺点。

**关键词:** 集中式驱动; 电动汽车; 高速永磁电机; 电磁性能

**Abstract:** The power of electrical drive system of passenger EV ranges from 50kW to 100kW, the maturest and widely used powertrain is centralized single motor drive mode. It replaces internal combustion engine (ICE) with an electrical machine while keeps other components of powertrain unchanged. Electrical machines used in this application have rated operation speed at about 4000-8000r/min and output torque 100-300N·m. As the output torque is nearly proportional to machine volume at specific electrical and magnetic load, low speed machine tend to have larger mass and PM usage regarding to higher speed one. For example, a high speed PM synchronous machine with rated speed 15000r/min has volume half of the one commonly used (4000-8000r/min). This paper takes BMW i3 drive machine as a benchmark and use JMAG software to calculate electromagnetic performance of a 75kW, 18000r/min high speed PM synchronous machine, then explores the feasibility, pros and cons of using it in passenger EV electrical drive system.

**Key words:** Central drive system; electrical vehicle; high speed PM machine; electromagnetic performance

### 1 引言

电驱动系统的核心是高性能的驱动电机和功率电力电子变换装置, 其性能直接决定电动汽车的技术水平<sup>[1]</sup>。车辆的电驱动系统依据安装位置不同分为: 集中式驱动和分布式驱动。集中式驱动将普通汽车的内燃机动力源替换为电机, 其他功率传递结构保持不变<sup>[2],[3]</sup>。分布式结构将驱动电机分布于各个驱动轮附近, 可以将功率电力电子器件与电机布置在一起或分开放置, 这种结构省去变速箱、离合器、差速机构及传动轴全部或部分结构<sup>[4]</sup>。集中式驱动是目前主流且较为成熟的技术方案, 所用驱动电机的额定功率约为 50-100kW, 额定转速在 4000-8000r/min, 输出转矩在 100-300N·m。在该转速范围内, 要求驱动电机具有较高的效率及功率密度, 而对尺寸尤其是轴向尺寸要求不高。采用整数槽分布绕组结构的永磁同步电机性能特点符合其要求, 而分数槽集中绕组结构受高转速下的转子损耗制约并不适用于该转速范围, 更适用于轮毂直接驱动领域 (转速范围在 300-800r/min)。

目前商业化的纯电动汽车主驱动电机绝大多数采用整数槽分布绕组永磁电机。其转子采用内嵌式永磁体 (Interior Permanent Magnet-IPM) 结构以增大凸极比及磁阻转矩分量, 在额定转速以上往往需要弱磁以满足一定直流母线电压下的转速要求, 内嵌式结构具有较大的直轴电感弱磁能力突出<sup>[5]</sup>。这种类型的电机的绕组采用磁动势谐波含量较低的整数槽分布绕组, 有效降低了转子损耗和转矩波动。如图 1 所示, 第 4 代 Prius (混合动力) 及 BMW i3 主驱动电机都具有上述特点, 这些电机的额定转速多在 4000-8000r/min, 为中速永磁同步电机 (转速>15000r/min 定义为高速电机, 下同)。



(a) 第 4 代 Prius 主驱动电机转子冲片与定子结构

(b) BMW i3 主驱动电机转子冲片与定子结构

图 1 采用内嵌式转子结构与分布绕组的驱动电机

## 2 采用中速永磁同步驱动电机的电驱动系统性能特点

得益于永磁同步电机优良的低速特性，采用中速永磁同步电机（以 BMW i3 主电机为例，下同）的电驱动系统可以采用单级变速箱（减速齿轮），大大简化了驱动链的结构，提高了动力传递过程中的总效率。如图 2 所示，中速永磁同步电机经单级减速齿轮将动力传递到分动箱，分动箱进一步降低转速并将动力传递到车轮。总的减速比达到 13.68，车轮上的扭矩可以达到 3556N·m，百公里加速时间为 7.3s。整个驱动系统省去了多级变速箱，大幅降低了车辆成本和系统的复杂程度，提高了可靠性。

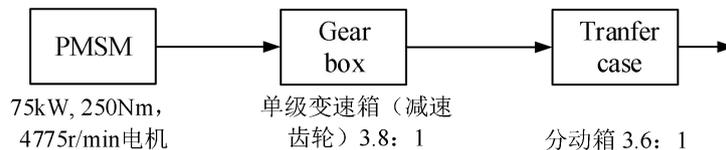


图 2 采用中速驱动电机的纯电动汽车驱动系统结构

在驱动系统中省略多级变速器，电机的转速与车速的关系固定，不能通过调节速比将电机工作点调整到高效工作区。这种系统结构对驱动电机提出了更高的要求，要求高效工作区更宽，同时效率对转速和转矩的变化不敏感。永磁同步电机由于转子磁场不可调节，很难兼顾低速大转矩和高转速工况下的性能，该中速电机在 NEDC 工况下的总效率为 92.6%，没有充分发挥高性能永磁同步电机的性能优势。另外，该系统采用的永磁同步电机额定转速为 4775r/min，为达到给定的功率要求，输出转矩较大。在电负荷  $A$  和磁负荷  $B_{\delta 1}$  一定时，转矩与有效部分的体积  $L_{stk} * D^2$  近似成正比，如式 (1) 所示。导致电机的体积及高性能稀土永磁体用量增加，不利于电动汽车的推广与普及。

$$T = \frac{\sqrt{2}\pi}{4} B_{\delta 1} L_{stk} D^2 k_{w1} A \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (1)}$$

随着新型散热技术<sup>[6]</sup>、高转速合金、陶瓷<sup>[7]</sup>及空气轴承<sup>[8]</sup>技术的发展，采用高速永磁同步电机+一级减速器替换传统的中速电机逐渐具备可行性，如图 3 所示。经过合理设计，高速永磁同步电机具有更宽的高效工作区，体积及永磁体用量大幅降低，电机及整个驱动系统的动态特性进一步提升。

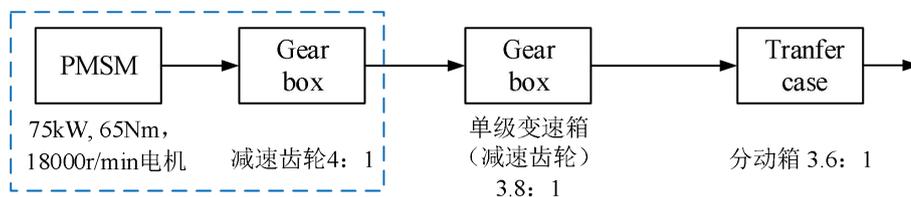


图 3 将中速电机替换为高速电机+减速齿轮组合后的驱动链结构

## 3 中/高速永磁同步电机设计思路及基本参数

中速驱动电机转子部分采用常规的内嵌式永磁体结构，为增大电机的磁阻转矩分量同时减小转子漏磁，转子冲片上设置有较多的隔磁槽。但由于转速较大（最大转速达到 11400r/min），转子磁桥宽度仍然较大，漏磁较多。因此，其转子采用双层永磁体结构，与“V”形磁体类似，提高了气隙磁密幅值，优化了气隙磁密波形。定子绕组采用单层同心式结构，消除了各相线圈在绕组端部的交叠，相与相间的端部

漏磁互感减小，绕组端部长度较小。为了保证电机在较宽电压范围下的可用性（250-400V），绕组并联支路数较多。但较多的并联支路数可能导致实际运行中由于磁路或电路参数不对称造成的各支路间的环流，在一定程度上增加了端部连接线的长度。对比方案中的高速永磁同步电机采用表贴式永磁体结构（Surface-mounted Permanent Magnet-SPM），具体的设计参数见表 1。基本结构如图 4 所示，仿真过程中永磁体材料为钕铁硼 N40SH，中速电机使用的定转子铁心材料为 0.35mm 厚硅钢片 M330-35，高速永磁电机定子铁心材料为 0.2mm 硅钢片 WTG200，转子铁心为 45#钢。

表 1 中速驱动电机与高速电机设计参数对比

参数	中速电机	高速电机	参数	中速电机	高速电机
极数	12	4	槽数	72	36
绕组层数	1	2	绕组形式	同心式	叠绕组
并绕根数(线径 mm)	12 (0.724)	40 (0.5)	节距	内 5/外 7	8
并联支路数	6	4	匝数	9	5
定子叠片外径 (mm)	242.1	190	定子叠片内径 (mm)	180	102
转子叠片外径 (mm)	178.6	98	转子叠片内径 (mm)	60.8	40
气隙长度 (mm)	0.7	2	铁心长度 (mm)	132.3	125

高速永磁同步电机由于转速较高，设计方案选用较少的极数保证中/高速永磁电机具有相近的基波频率（477.5Hz/600Hz）及铁损密度。高速永磁电机采用更大的每极每相槽数和等效气隙长度，同时采用磁动势谐波含量更低的双层叠绕组，有效减少了转子护套上的涡流损耗。为降低高频集肤效应和临近效应导致的交流损耗，绕组采用多根细导线并绕。高速电机由于定子外径较小，从提高净槽满率的角度出发槽数不宜过多。

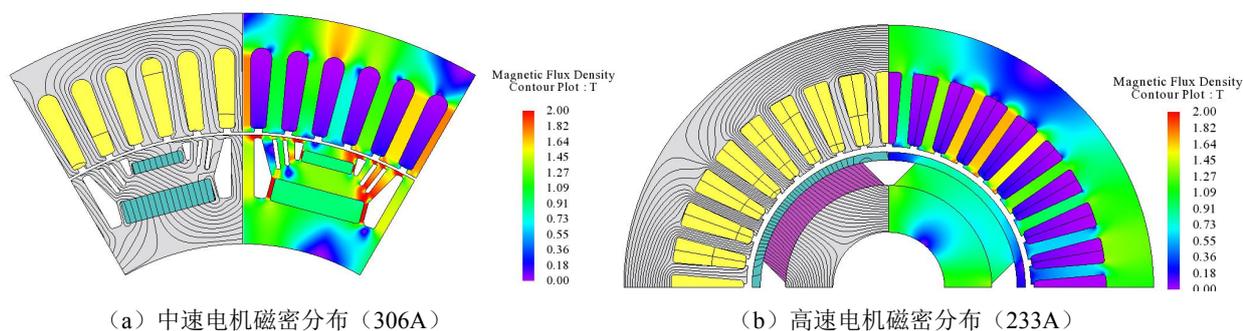


图 4 两型电机在过载工作点下的磁密分布

可以看出，为满足最大转矩要求，中速电机采用更多的极数，有利于减小定转子轭部厚度，配合较大的定转子裂比可以达到较高的输出转矩密度。气隙长度较小，气隙磁密受槽开口的影响较大，为减小齿槽转矩、转矩波动和改善反电势波形，转子轴向分为 6 段斜极。但转子分段斜极导致转矩输出能力有一定程度的下降。中速电机在低速过载工作点磁密值较大，磁路的饱和程度深。转子上的多个磁桥导致转子尤其是内层永磁体漏磁严重，永磁体利用率不高。

高速电机的极数较少，每极磁通大幅增加，虽然每极每相串联总匝数从 36 匝减小到 15 匝，但由于转速增大了 4 倍，所需的直流母线电压仍需要进一步提高到 540V。转速提高后，基频略有增加，为了降低高速永磁电机的电磁损耗密度，高速永磁电机过载工作点磁密设计在 1.6T，低于中速驱动电机的对应值 1.77T。采用平行充磁的“瓦片”形永磁体以改善气隙磁密波形，后期可以通过采用不等厚永磁体进一步减小转矩波动、改善反电势波形<sup>[9]</sup>。永磁体与合金护套通过过盈配合抵消离心力的作用，避免高速运行时永磁体破坏。该高速电机转子半径相较于中速电机大幅减小，同时转子铁心叠压长度减小 6.5mm。转子的转动惯量减小，电机及驱动系统的动态特性大幅提高。高速永磁同步电机绕组的槽满率设计值更小，槽开口处放置较大的不导磁槽楔，有效减少了因漏磁导磁的交流铜损耗。

### 4 中/高速永磁同步电机电磁性能对比

两对比方案基本电磁性能对比如表 2 所示，在保证相同的额定/最大功率时，高速电机转速增加了 4 倍，输出转矩降为原来的约 1/4。电机有效部分从 35kg 减少到 25.78kg，额定功率密度从 2.14kW/kg 增加到 2.91kW/kg。峰值功率密度由 3.57kW/kg 增加到 4.85kW/kg，这一功率密度值对于该转速等级的高速永磁同步电机容易达到<sup>[10]</sup>。增加的一级减速器重量 4.95kg，附属部件（一个高速轴承，两个低速轴承）重量 0.85kg，总重量估算为 5.8kg。高速电机有效部分重量为 31.58kg，仍低于原有的中速电机，如果考虑将高速永磁电机两级减速器一体化，总重量还将有进一步下降。电机总重的降低主要来源于转子重量的降低，其有利于减小转动惯量，改善电驱动系统动态特性及整个车辆的操纵性。永磁体用量由 2.49kg 减少到 1.82kg，减少了 26.9%。

表 2 中/高速永磁同步电机电磁性能对比

参数	中速电机	高速电机	参数	中速电机	高速电机
额定/峰值功率 (kW)	75/125	75/125	额定/最高转速 (r/min)	4775/11400	18000/36000
输出转矩 (N·m)	250	65.5	直流母线电压 (V)	250-400	540
有效部分 <sup>1</sup> 重量 (kg)	35	25.78	额定/峰值功率密度 (kW/kg)	2.14/3.57	2.91/4.85
峰值电流 (A)	306	233	峰值电流密度 (A/mm <sup>2</sup> )	12.64	7.34
永磁体用量 (kg)	2.49	1.82	气隙转矩密度 (kNm/m <sup>3</sup> )	75.43	70.91
转子部分 <sup>2</sup> 重量 (kg)	14.2	6.46	定子部分 <sup>3</sup> 重量 (kg)	20.8	19.32

- 1 有效部分重量包括:定子铁心、转子铁心、永磁体、绕组及转轴;
- 2 转子部分重量包括: 转轴、转子铁心、永磁体, 对于高速永磁同步电机还包括合金护套;
- 3 定子部分重量包括: 定子铁心及绕组。

对比方案的最大电流密度由中速永磁同步电机的 12.94A/mm<sup>2</sup> 降低到 7.34A/mm<sup>2</sup>，以保证总损耗密度与原电机相当，采用相同的定子液冷散热方式时电机定转子温升基本不变。在该电流密度及相近的气隙磁密下，高速永磁同步电机达到与原电机相近的气隙转矩密度 (75.43kN·m/m<sup>3</sup>, 70.91kN·m/m<sup>3</sup>)。原有电机凸极比较大，磁阻转矩占比较高，最大转矩角在 40-50° 间，如图 5 所示。高速永磁电机采用表贴式转子结构，不存在凸极性，电磁转矩贡献全部转矩输出。在低速阶段采用  $i_d=0$  控制，简化控制算法复杂程度，在进一步提高直流母线电压的前提下可以缩小弱磁区域，扩大高效工作区范围。

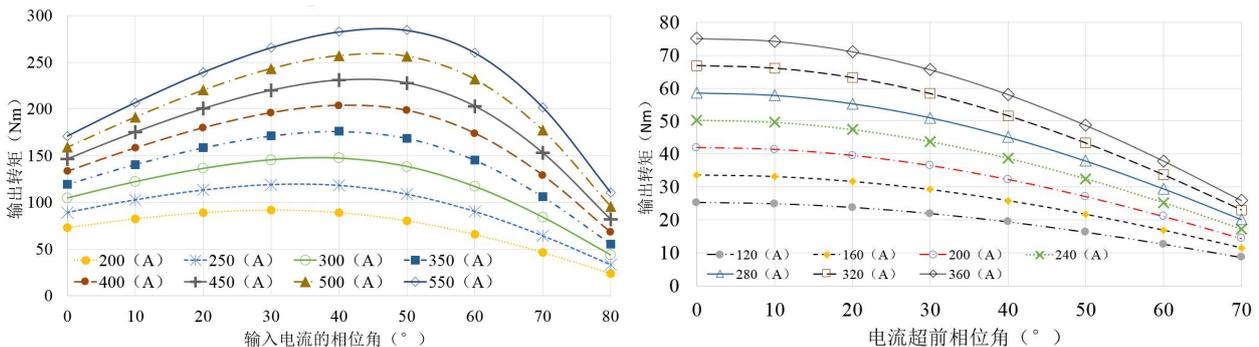


图 5 两型电机输出转矩与电流幅值及电流超前角关系 (采用 Jmag 参数化有限元计算得到的数据)

高速永磁电机的有效部分体积仅为中速电机的 58.19%，电机总电磁损耗密度<sup>1</sup>较原有电机下降 9.16%。各项损耗组成及分布见表 3。

表 3 中/高速永磁同步电机各部分损耗及总损耗对比

	绕组铜耗 (W)	定子铁耗 (W)	转子铁心损耗 (W)	永磁体涡流损耗 (W)	护套涡流损耗 (W)	总损耗 (W)
中速电机	2590.5	1708.89	137.27	外 57.13/内 18.08	无护套	4511.87
高速电机	1610.5	611.39	0.08	4.82	158.20	2384.99

<sup>1</sup> 电磁损耗密度等于总的电磁损耗与定转子体积之比。

中速电机由于转子具有较多的隔磁槽，气隙磁密波形畸变严重，在转子铁心中产生较大的铁损，如图 6 所示。同时内外层永磁体中的涡流损耗较多，如图 7 所示，这部分损耗的散热条件比高速电机更为恶劣。由于合金护套的电磁屏蔽作用，护套中的损耗达到了 158.20W，但永磁体及转子铁心涡流损耗很小，总的转子损耗由 212.48W 减小到 163.1W。需要注意的是，虽然转子总损耗下降较多，但转子损耗密度增加了一倍多，在后期的优化设计过程中，强化转子散热非常重要。

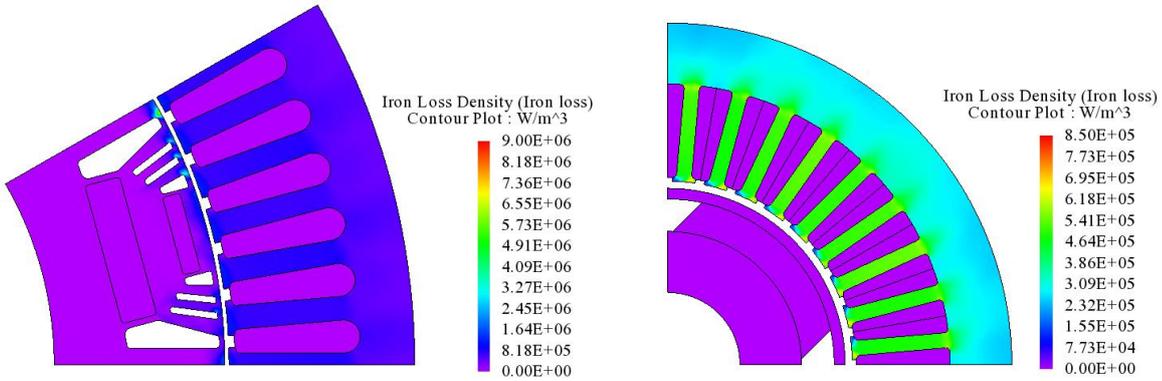


图 6 中/高速永磁同步电机定子铁心损耗密度分布

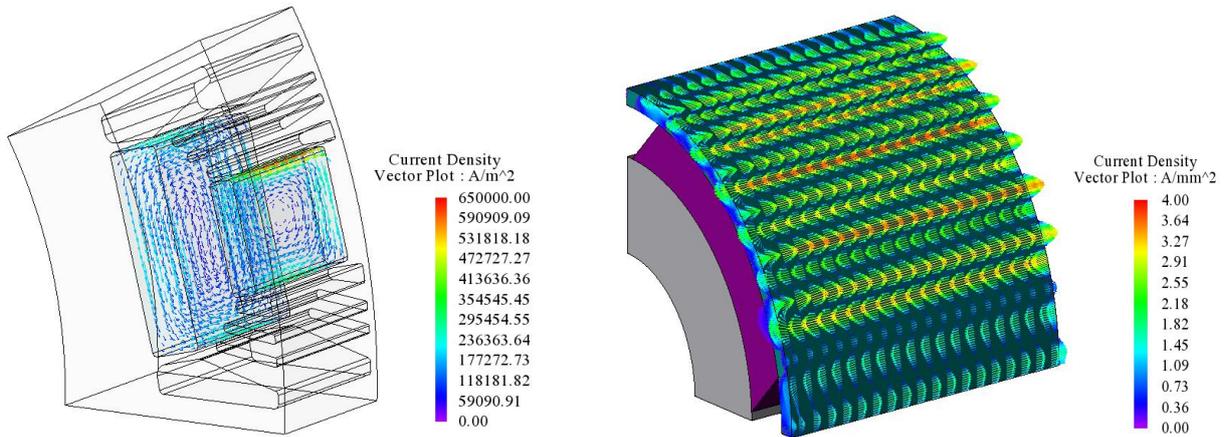


图 7 内嵌式电机永磁体中的涡流损耗（左）和表贴式电机护套中的涡流损耗（右）

图 8 为使用 Jmag RT 计算得到的计及绕组铜耗和定子铁耗时效率分布图。高速电机总损耗相较原电机下降明显，高效工作区更宽，在循环工况下的总效率更好。如图 8 所示，高速电机运行转速较低时效率随转矩的增加变化不大，可以在较大的转矩范围内保持较高的效率，而中速永磁同步电机随着转矩的升高，效率有明显的下降。低转矩工况下，高速永磁同步电机效率等高线与转矩等值线近似平行。即可以在更高的转速下获得较高的效率，而中速电机的效率等高线与转矩等值线垂直，对于转速的变化敏感。

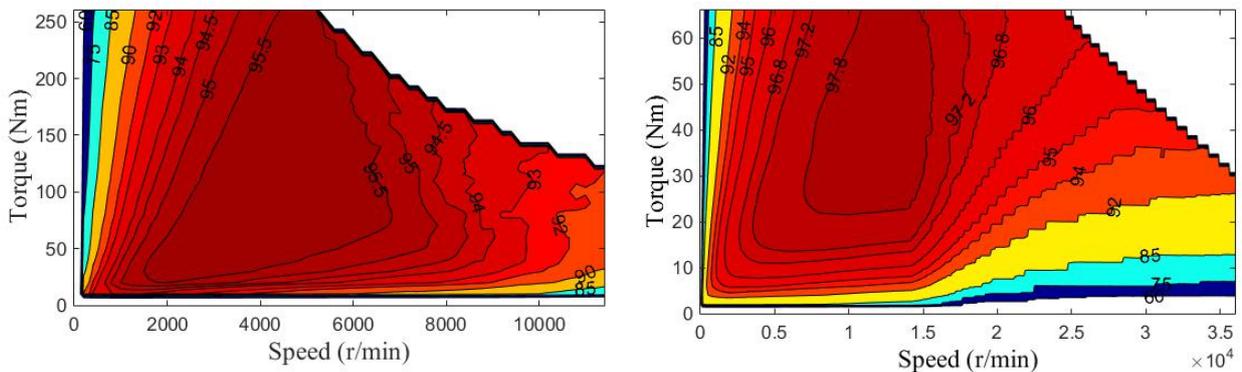


图 8 计及绕组铜耗和定子铁耗时中/高速永磁同步电机效率分布对比

## 5 结论

本文以中速永磁同步电机的基本电磁性能为基准, 设计了用于对比研究的高速永磁同步电机, 探索以高速电机+一级减速器替换中速电机应用于电动汽车电驱动系统的可行性及优缺点。可以看出驱动系统高速化可以大幅降低电机的重量, 高性能稀土永磁体用量减少, 是电动汽车普及需要解决的重要问题。由于高速电机具有更高的峰值效率和更宽的高效工作区, 驱动系统循环工况下的效率得以提高。电机及驱动系统的动态特性因转动惯量的减小得到明显的提升。

## 参考文献

- [1] 祝子冲. 轮毂驱动永磁同步电机的设计与分析[D]. 东南大学, 2017.
- [2] ZHU Z Q, CHAN C C. Electrical machine topologies and technologies for electric, hybrid, and fuel cell vehicles[C]//2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2008: 1–6.
- [3] NANDA G, KAR N C. A Survey and Comparison of Characteristics of Motor Drives Used in Electric Vehicles[C]//Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2006. CCECE '06. 2006: 811–814.
- [4] 刘锋. 轮毂驱动电动汽车整体设计与研究[D]. 武汉理工大学, 2011.
- [5] ZHITKOVA S, FELDEN M, FRANCK D et al. Design of an electrical motor with wide speed range for the in-wheel drive in a heavy duty off-road vehicle[C]//2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM). 2014: 1076–1082.
- [6] POPESCU M, STATON D, BOGLIETTI A et al. Modern heat extraction systems for electrical machines - A review[C]//2015 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD). 2015: 289–296.
- [7] LI X, WANG L, GU L. Performance of high-speed grease lubricated hybrid ceramic ball bearing [J]. Tsinghua Science and Technology, 2004, 9(3): 322–326.
- [8] PAULIDES J J H, ENCICA L, BEERNAERT T F. Ultra-light-weight high torque density brushless PM machine design: Considering driving-cycle of a four-wheel drive race car[C]//2015 Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). 2015: 1–7.
- [9] LEE J-H, KIM D-H, PARK I-H. Minimization of higher back-EMF harmonics in permanent magnet motor using shape design sensitivity with B-spline parameterization [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(3): 1269–1272.
- [10] VAN DER GEEST M, POLINDER H, FERREIRA J A et al. Power density limits and design trends of high-speed permanent magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(3): 266–276.