

# 地铁车辆用 160 kW 永磁直驱同步牵引电机 转子结构优化设计\*

刘 焕, 晏才松, 曹 晴, 张道禄  
(中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001)

**摘 要:** 基于地铁车辆用 160 kW 永磁直驱同步牵引电机的技术要求, 分析了 160 kW 直驱电机的设计难点。针对永磁直驱电机的设计难点, 以电机的 V 型永磁体转子拓扑结构为研究对象, 基于电磁计算软件 Maxwell, 优化转子拓扑结构。通过对不同永磁体 V 型转子拓扑结构的空载磁场和负载磁场进行计算与分析, 得到电机空载和负载性能更好的 V 型转子拓扑结构。基于此结构研制了 1 台永磁同步直驱牵引电机, 并进行了试验, 样机试验结果验证了设计的可行性。

**关键词:** 永磁直驱同步牵引电机; 转子拓扑结构; 空载性能; 负载性能

中图分类号: TM 922.71 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)09-0056-05

doi: 10.12177/emca.2020.093

## Optimal Design of the Rotor Structure of 160 kW Permanent Magnet Direct Drive Synchronous Traction Motor for Metro Vehicle\*

LIU Huan, YAN Caisong, CAO Qing, ZHANG Daolu  
(CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

**Abstract:** Based on the design requirement of 160 kW permanent magnet direct drive synchronous traction motor for metro vehicle, the design difficulties of 160 kW direct drive synchronous traction motor are analyzed. In view of the design difficulties of permanent magnet direct drive motor, the topology structure of the V-shaped permanent magnet rotor of the motor is studied, and is optimized based on Maxwell. Through comparative analysis of motor's no-load performance and load performance of different V-shaped magnet steel rotor topology structures, the suitable rotor topology structure for the design of the motor is obtained. A prototype is developed and the test results verify the feasibility of the design.

**Key words:** permanent magnet direct drive synchronous traction motor; rotor topology structure; no-load performance; load performance

### 0 引 言

20 世纪 90 年代开始永磁电机广泛地应用于生产、生活的各个方面<sup>[1]</sup>。地铁车辆由于频繁起停, 整车效率和动态性能较差, 永磁直驱电机能有效减少传动过程中能量的损失, 提高整机效率, 减小电机运行噪声, 且安装方便、易于

维护。

日本、德国等发达国家在永磁直驱技术方面发展得较早, 技术也相对成熟。1999 年, 东日本铁路公司开发了直驱式永磁同步电机, 2002 年搭载商业运行。西门子公司开发的表贴式永磁直驱牵引系统, 使总体积减少 30%<sup>[2]</sup>。本文项目的地铁直驱永磁电机采用内置式转子磁路结构, 与表

收稿日期: 2020-06-03; 收到修改稿日期: 2020-07-03

\* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1200903-06)

作者简介: 刘 焕(1985—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为永磁电机电磁设计。

贴式转子磁路结构相比,永磁体内置式转子磁路结构由于磁路不对称,会产生磁阻转矩,从而能更为有效地提高电机的过载能力<sup>[3]</sup>,减小电机的体积质量,提高功率密度。

文献[4]通过对比分析表贴式、传统内置式、分段内置式、V型内置式和W型内置式5种转子拓扑结构型式,得出在获得相同的输出转矩时,V型内置式所用的转子材料最少,弱磁扩速性能更好。文献[5]通过对比“一”字型和“V”字型永磁体拓扑结构额定参数、永磁转矩与磁阻转矩占比、弱磁扩速能力,得出V型磁极电机转子冲片面积利用率较高,当电机设计功率密度较大时,通常每极永磁体排布空间会相对紧张,采用V型磁极电机为最优方案。文献[6-7]表明采用转子齿开槽的方式可以改善空载反电动势和气隙磁密波形,减小电机的谐波。上述文献均只是针对电机某方面的性能进行转子拓扑结构的优化,尚未考虑到电机的整体性能。

本文根据地铁车辆对永磁直驱牵引电机的总体技术要求,阐述了直驱牵引电机的设计难点,并针对这些难点进行了V型永磁体转子结构的优化,通过有限元仿真计算分析对比不同转子拓扑结构下的电机空载性能和负载性能,得到有效解决相关难点的转子拓扑结构型式,基于分析结果进行了160 kW永磁直驱电机的设计,并通过试验验证了该设计的可行性。

1 设计难点

1.1 电机总体技术要求

地铁车辆系统是直驱电机的工作主机,其工作状况决定了直驱电机的特性。电机技术要求如表1所示。

表1 电机技术要求

| 参数名称                        | 参数值 | 参数名称       | 参数值   |
|-----------------------------|-----|------------|-------|
| 额定功率/kW                     | 160 | 冷却方式       | 水冷    |
| 额定转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 365 | 额定转矩/(N·m) | 4 186 |
| 最高工作频率/Hz                   | 360 | 最大电流/A     | 360   |
| 额定工作效率/%                    | 92  | 声功级/dB     | ≤103  |

1.2 电机轻量化、小型化、效率要求高

地铁车辆直驱化后,要求牵引电机运行在低速区间,因而电机转矩较高,且地铁车辆频繁起

停,牵引电机长时间运行在启动加速和制动减速状态,在这种状态下,电机需要的牵引功率和制动功率大,运行转速低,因而牵引转矩和制动转矩高。

永磁直驱电机的效率比非直驱永磁电机低,通常在90%以下,但所设计的电机要求效率为92%,效率要求也较高。

直驱牵引电机转矩增加,根据电磁转矩正比于电机体积,电机体积应相应增大。同样体积的电机,转矩增加,电机的输入电流增加,损耗会随之增大,效率会下降。但限于电机的安装空间,直驱电机的尺寸质量要求严格,需轻量化、小型化,同时又要确保电机的效率符合要求。

一定大小的电机,性能是一定的,在转矩大、体积小的情况下,电机磁路容易饱和,导致铁耗增加,又因为转矩大,电流大,铜耗增加,使电机的整体损耗增加,效率降低。要使电机小型化、轻量化,同时增大效率,需优化电机定转子结构,也就是优化电机的整体磁路结构,使得电机内部磁密分布较平均,减小局部饱和面积,从而使得电机在同样的电流下能够得到更大的转矩。

1.3 电机电磁与温升的综合考量

永磁直驱牵引电机采用全封闭冷却结构,冷却效果比开启式冷却结构差。

直驱牵引电机转矩大,电流大,发热量大,而体积小,散热面积小,电机整体温度上升速度会变快。电机温度过高,影响永磁体的磁性能,硅钢片和绕组的性能,因而影响电机的整体性能。而且,一般轴承温度限值较小,温升过高,可能会损坏轴承,也可能导致永磁体出现不可逆退磁,从而损毁电机。

因此,在进行电机设计时,需要综合考虑电机电磁性能和电机温升,提高电机电磁性能,减小电机的损耗。一般通过优化电机定转子磁路结构来实现。

1.4 电机的低噪声需求

电机运行中,转矩脉动越低,电机的振动噪声越小,因此要满足电机的低噪声要求,需要电机转矩脉动率低。电机的谐波越少,谐波幅值越小,电机的振动噪声越小,因此减小电机的噪声,主要通过减少电机的谐波,同时谐波减少可以减小电机的谐波损耗。

## 2 转子结构优化

通过分析第1节设计难点可知,永磁直驱电机设计过程中存在电机轻量化、小型化、噪声小与高效率要求矛盾,且散热面积小与温升不能太高之间也存在矛盾,这些矛盾构成了设计的难点,要解决这些矛盾与难点,需要采用合适的转子拓扑结构。

V型永磁体结构,能够灵活的进行磁路结构的调整,且结构简单,易于装配,漏磁相对较少,在获得相同的输出转矩时,V型内置式所用的转子材料最少,弱磁扩速性能好,转子冲片面积利用率高。当电机设计功率密度较大时,通常每极永磁体排布空间会相对紧张,采用V型磁极电机为最优方案<sup>[5]</sup>。

V型永磁体转子拓扑结构如图1所示。

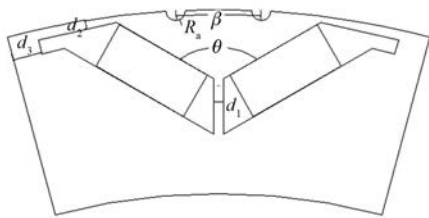


图1 V型永磁体转子拓扑结构图

从图1可见,转子拓扑结构优化,可调整部分较多,本文仅对永磁体夹角 $\theta$ 以及转子表面槽间夹角 $\beta$ 进行仿真分析。永磁体长宽,隔磁桥 $d_1$ 、 $d_2$ ,极间距离 $d_3$ ,表面槽半径 $R_a$ 保持不变。对不同夹角 $\theta$ 进行仿真计算,在夹角 $\theta$ 确定的前提下,对转子表面槽间夹角 $\beta$ 进行仿真计算,通过比较电机的空载和负载性能,得出永磁体V型的最优夹角 $\theta$ ,以及最优的转子表面槽间夹角 $\beta$ 。

### 2.1 转子永磁体不同夹角对电机性能的影响

V型永磁体夹角不同时,空载情况下电机反电动势及谐波分析如图2所示。负载情况下,给电机同样的电流,根据最小电流最大转矩得到电机的性能曲线如图3所示。

根据图2,空载情况下,V型永磁体夹角 $\theta$ 在 $100^\circ \sim 160^\circ$ 区间时,电机的反电动势基波幅值逐渐减小,3次谐波幅值呈U形曲线,夹角为 $130^\circ$ 时,电机的3次谐波幅值最小,由图2可见,其他次谐波占比较小,可忽略不计。由图3可知,负载

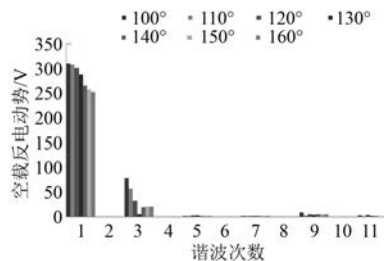


图2 永磁体不同夹角空载反电动势谐波分析图

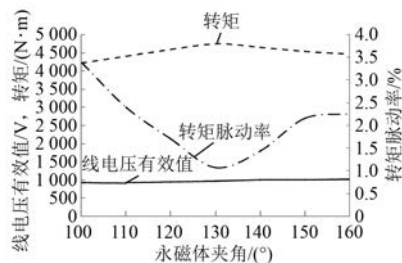


图3 永磁体不同夹角负载特性曲线

情况下,夹角为 $130^\circ$ 时,电机转矩得到最大值,同时转矩脉动率为最小值,随着夹角的增大,电机的端电压呈上升趋势,但总体变化较小。

结合图2、图3,综合考虑电机的空载性能和负载性能。对于牵引电机来说,电机的空载反电动势是一定的,若空载反电动势已到限值,但负载转矩还不够,则需要增加电流,从而导致损耗增大,效率降低,温升也可能无法满足要求,因此需要增大体积,若空载反电动势较低,负载转矩不够,则可以通过增加永磁体的体积来增加反电动势,同时提高负载转矩。

根据文中设计难点的分析,该电机设计存在轻量化、小型化、噪声小与高效率要求的矛盾,同时存在散热面积小与温升不能太高的矛盾,因此转子拓扑结构应选择可以减小电机的体积质量,同时能够减小电流,减小损耗且谐波含量少噪声小的设计。空载反电动势较小且负载转矩较大,有利于电机的小型化轻型化,同时增大效率,空载反电动势谐波含量小且负载转矩脉动小有利于减小噪声。

综合考虑上述性能,V型永磁体夹角 $\theta$ 在 $130^\circ$ 时,空载反电动势相对较小,负载转矩最大,空载反电动势谐波含量少,谐波幅值小,且负载转矩脉动率最低,可见选择V型永磁体夹

角  $\theta$  为  $130^\circ$  的设计最利于解决该电机的相关设计难点。

## 2.2 转子表面开槽对电机性能的影响

转子表面开槽可以减小电机谐波, 优化电机的空载反电动势波形, 使其趋近于正弦, 同时减小电机负载时的转矩脉动率, 从而减小噪声。

开口槽位置不同, 电机的空载和负载性能不同。永磁体夹角  $\theta$  为  $130^\circ$ , 槽深为 2 mm 时, 转子表面槽间夹角  $\beta$  最大可以到  $16^\circ$ , 因此选择转子槽间夹角为  $2^\circ \sim 16^\circ$  区间进行仿真分析, 找到最佳的转子表面开槽位置。

转子表面槽间夹角不同时, 空载情况下电机反电动势及谐波分析如图 4 所示。负载情况下, 给电机同样的电流, 根据最小电流最大转矩得到电机的性能曲线如图 5 所示。

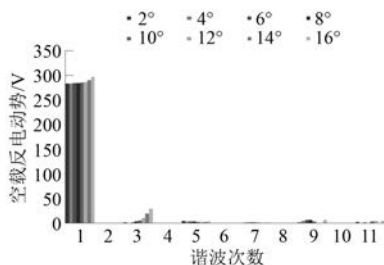


图4 不同夹角开口槽空载反电动势谐波分析图

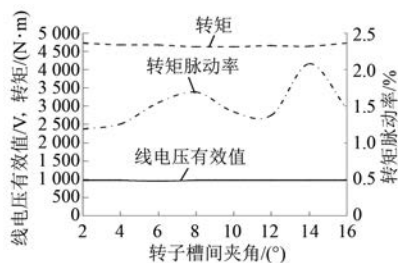


图5 不同夹角开口槽负载特性曲线

根据图 4, 空载情况下, 转子表面开口槽之间的夹角为  $2^\circ \sim 16^\circ$  区间时, 电机的反电动势基波幅值与 3 次谐波幅值均逐渐增大。根据图 5, 负载情况下,  $\beta$  在  $2^\circ \sim 16^\circ$  区间时, 电机转矩曲线呈 U 型分布, 即槽间夹角在  $2^\circ$  和  $16^\circ$  时, 得到的负载转矩相对较大, 且在槽间夹角为  $2^\circ$  时, 负载转矩得到最大值。槽间夹角为  $2^\circ$  时, 电机的负载转矩脉动率为最小值。不同的槽间夹角, 线电压的有效值曲线近乎一条水平线, 可见在区间内, 电机的线

电压有效值变化较小。

根据第 2.1 节的分析可知解决该电机设计过程中的相关难点, 应选择空载反电动势小, 负载转矩大, 空载反电动势谐波含量少, 谐波幅值小, 且负载转矩脉动率低的设计方案。结合图 4 和图 5, 综合考虑电机的性能, 转子表面槽间夹角  $\beta$  为  $2^\circ$  时, 电机的空载反电动势最小, 空载反电动势谐波含量小, 且谐波幅值较小, 负载转矩虽不是最小, 但不同夹角之间的差别并不大, 因此选择转子表面槽间夹角  $\beta$  为  $2^\circ$  进行方案设计, 有利于解决电机的设计难点。

## 3 160 kW 永磁直驱电机设计

### 3.1 电机设计

根据上文的分析, 160 kW 直驱电机最终采用的是 V 型永磁体夹角  $\theta$  为  $130^\circ$ , 转子表面槽间夹角  $\beta$  为  $2^\circ$  的设计。所设计的电机转子拓扑结构如图 6 所示。

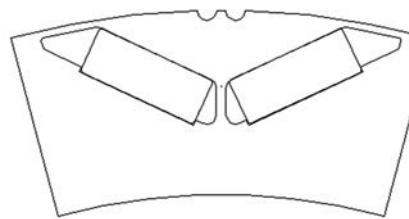


图6 转子拓扑结构图

图 7、图 8、图 9 所示分别为电机的空载反电动势波形图、空载反电动势谐波分析图、负载转矩波形图。

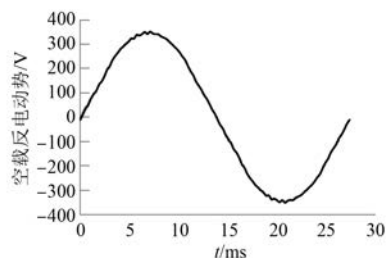


图7 空载反电动势波形图

在图 9 的负载波形中, 转矩脉动率为 1.347%。

在图 6 的转子拓扑结构下, 电机在较小的电流值时就能满足项目要求的功率, 减小了电机的损耗, 电机的总质量为 887 kg, 远小于国外电机的

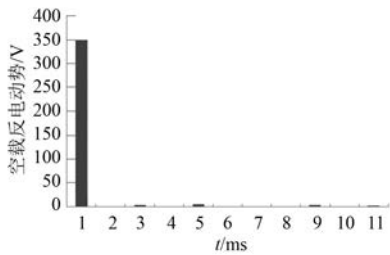


图8 空载反电动势谐波分析图

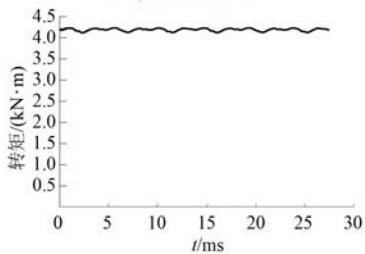


图9 负载转矩波形图

设计质量,满足小型化、轻型化要求。  
由图7、图8、图9可见,电机的空载反电动势波形趋近于正弦波形,且谐波次数较少,不同次数下谐波幅值也较小,负载情况下转矩脉动率较低,电机的噪声也满足了设计要求。

3.2 电机试验结果

样机试制完成后,根据基于 IEC 60349-4 标准制定的电机试验大纲<sup>[8]</sup>,对其进行了型式试验。电机试验结果如表2所示。

表2 160 kW 直驱永磁电机试验结果表

| 项目                          | 项目指标 | 实测值  |
|-----------------------------|------|------|
| 额定功率/kW                     | 160  | 164  |
| 额定转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 365  | 365  |
| 额定效率/%                      | 92   | 94.5 |
| 声功级噪声/dB(A)                 | ≤103 | 89   |
| 定子绕组温升/K                    | 200  | 158  |

通过表2试验结果和项目指标的对比分析可得:电机质量、效率、噪声、温升等指标完全符合车辆总体指标要求,其中额定效率高出了指标2.5%,测量噪声比指标低了14 dB(A),定子绕组

温升值比指标低了45 K,说明通过上述分析方式设计的电机有效地减小了损耗,提高了电机的效率,减小了电机的噪声。

4 结 语

文章首先对直驱牵引电机设计难点进行了分析阐述,并针对这些难点进行了V型永磁体转子结构的优化,通过有限元仿真软件对V型永磁体不同夹角以及转子表面不同开槽方式下的电机空载性能和负载性能进行对比分析,得到永磁体间夹角为130°且转子表面槽间夹角为2°的转子拓扑结构能有效减小电机的体积质量、电流、损耗、谐波含量、谐波幅值,同时降低噪声。基于上述分析结果进行了160 kW 永磁直驱牵引电机的样机设计,通过试验验证了该设计的可靠性。本文所提转子拓扑结构优化方式可以提高电机的整体性能,解决直驱电机的设计矛盾。

【参 考 文 献】

[1] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,2015.  
[2] 柯以诺. 永磁同步电机传动系统在电动车辆上的应用[J]. 大功率变流技术,2009(5): 31.  
[3] 王秀和. 永磁电机[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,2007.  
[4] 王艾萌,卢伟甫. 五种拓扑结构的永磁同步电动机性能分析与比较[J]. 微特电机,2010,38(4): 20.  
[5] 李威扬,黄鹏程,孟曙光,等. 永磁同步电机转子磁钢拓扑结构与运行工况匹配性分析[J]. 防爆电机,2018,53(2): 19.  
[6] 诸德宏,简耀,李明达. 永磁同步电机转子结构优化设计[J]. 微特电机,2019,47(8): 19.  
[7] 王晨,曹光华,陈栋. 一种削弱内置式永磁电动机齿槽转矩的新方法[J]. 微特电机,2015,43(1): 9.  
[8] International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 60349-4: Electric traction-rotating electrical machines for rail and road vehicles. Part 4: Permanent magnet synchronous electrical machines connected to an electronic converter[S]. 2012.