

下一代地铁车辆 TQ-250 永磁同步牵引电机研制^{*}

张道禄, 晏才松

(中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 介绍了下一代地铁车辆用 TQ-250 永磁同步牵引电机的研制情况。主要从总体技术要求、设计难点、关键技术、样机试验等方面进行了论述。根据下一代地铁车辆永磁同步牵引电机的技术特点及主要技术参数指标要求, 通过对等效定额设计、电磁设计、轻量化设计及冷却结构设计等关键技术攻关, 研制了 1 台永磁同步牵引电机, 并进行了试验。样机试验结果分析表明, 该电机满足下一代地铁车辆指标要求, 验证了所设计的可行性。

关键词: 永磁同步牵引电机; 地铁; 等效定额; 轻量化

中图分类号: TM 922.71 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)11-0050-06

Development of TQ-250 Permanent Magnet Synchronous Traction Motor for Next Generation Metro Vehicles^{*}

ZHANG Daolu, YAN Caisong

(CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: The developments of TQ-250 permanent magnet synchronous traction motor for next generation metro vehicles were introduced. The overall technical requirements, design difficulties, key technologies, prototype test and other aspects were mainly discussed. According to the technical characteristics and main technical parameters of permanent magnet synchronous traction motor for next generation metro vehicles, the design of the permanent magnet synchronous traction motor was improved by tackling key technical problems such as equivalent quota design, electromagnetic design, lightweight design and cooling structure design. A prototype was developed and the test was carried out on it. The results show that the motor meets the requirements of the next generation metro vehicles, and verify the feasibility of the design.

Key words: permanent magnet synchronous traction motor; metro; equivalent quota; light weight

0 引言

鉴于永磁同步牵引电机的诸多优点, 国内外竞相发展地铁列车用永磁同步牵引电机, 并相继推出了相应的产品。日本铁道技术研究所为下一代郊区列车开发了 235 kW 全封闭永磁电机, 通过性能试验和计算, 235 kW 全封闭永磁同步电机与传统的异步牵引电机相比, 能使列车减少 12% 能耗, 在最高转速时可降低噪声 7 dB(A)^[1]。2006 年东芝为东京地铁 Ginza 线研制了 120 kW 永磁同步牵引电机, 于 2007 年在东京地铁装车运

行, 这是永磁电机在轨道交通上首次商业运行。该电机比异步牵引电机可节能 30%, 噪声可降低 2~6 dB(A)^[2]。中车株洲所研制出了 JD155 地铁永磁同步牵引电机, 安装在沈阳地铁 2 号线列车上并进行运行考核。与沈阳 2 号线地铁列车所用异步牵引电机相比, JD155 永磁同步牵引电机额定效率提高约 3%, 现场运用节电率超过 10%, 电机减重 8%^[3]。

社会经济发展要求下一代地铁车辆具备更高的能源利用效率、更好的环境适应性、更优的服务品质和更高的服役性能。下一代地铁车辆与国际

^{*} 基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAG12B01-04)

作者简介: 张道禄(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为轨道交通牵引电机的研究与开发。

先进的 140 km/h 速度等级市域车辆相比,整车需实现减重 $\geq 13\%$,节能 $\geq 15\%$,降噪 $\geq 3\text{ dB(A)}$ 的技术指标。因此,下一代地铁车辆对其核心动力装备的牵引电机的效率、功率密度、噪声、环境适应性等方面有着更高的指标要求,而传统异步牵引电机性能提升有限,难以满足下一代地铁车辆分配的指标需求,因此提出研制下一代永磁同步牵引电机来适应下一代地铁车辆牵引系统性能指标需求。

本文结合下一代地铁车辆对牵引电机的总体技术要求,就如何设计适用于下一代地铁车辆用永磁同步牵引电机进行了研究,重点介绍等效额定设计、电磁设计、轻量化设计及冷却结构设计等关键技术,相关内容可为同行提供参考。

1 总体技术要求

1.1 车辆基本信息

下一代地铁车辆为 4 动 2 拖 6 辆编组型式,最高运营速度为 140 km/h,车辆半磨耗轮径为 805 mm,齿轮传动比为 4.947,齿轮传动效率为 0.975。定员载客 AW2 工况下牵引性能要求为 0~50 km/h 加速度不小于 1.0 m/s^2 ,0~140 km/h 加速度不小于 0.5 m/s^2 ;常用制动性能要求为 140~0 km/h,平均减速度不小于 1.0 m/s^2 。

1.2 逆变器对牵引电机要求

逆变器对永磁牵引电机采用轴控方式,对电机控制策略为满压前按最大转矩最小电流比控制,满压后按弱磁控制。逆变器对永磁牵引电机的要求如表 1 所示。

表 1 逆变器对电机要求

参数名称	参数值
最大电流/A	≤ 360
最高工作频率/Hz	≤ 360
牵引最高电压/V	1 170
制动最高电压/V	1 287
额定中间直流电压/V	1 500
最高线空载反电动势/V	$\leq 2\ 300$

1.3 适应环境及线路

电机需适应风、沙、雨、雪、盐雾环境要求。电机工作环境温度 $-25\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。适应海拔高度 $\leq 2\ 500\text{ m}$ 。

下一代地铁车辆电机需适应 80~140 km/h

不同速度等级的地铁线路,不同速度等级线路站间距不同。

1.4 对永磁牵引电机关键技术要求

车辆总体分配给牵引电机的主要技术指标如表 2 所示。

表 2 电机主要技术指标

参数名称	参数值
额定功率/kW	250
额定转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	2 300
额定效率/%	≥ 97
最大牵引功率/kW	322
最大制动功率/kW	565
最高转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	4 772
绝缘等级/级	200
电机重量/kg	≤ 545
噪声要求/dB(A)	108
冷却方式	自通风

图 1 和图 2 所示为该电机的牵引制动特性曲线。其中最大牵引转矩 $1\ 986\text{ N}\cdot\text{m}$,最大牵引功率 322 kW;最大制动转矩 $1\ 710\text{ N}\cdot\text{m}$,最大制动功率 560 kW。

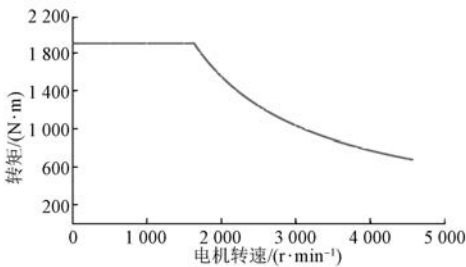


图 1 电机牵引特性曲线

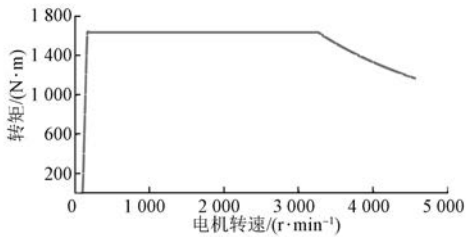


图 2 电机制动特性曲线

2 设计难点

(1) 对电机负载能力要求高。地铁线路站间距短,要求地铁车辆采用“快起快停”运行工

况。地铁车辆频繁起停,牵引电机大部分时间运行在低速大扭矩区间。低速段牵引、制动时电机输出转矩最大,电机电流大、发热量大,然而牵引电机采用自带风扇通风冷却方式,电机的冷却风量与电机转速成正比,低速段时电机转速较低,散热能力差。下一代地铁车辆需适应 80~140 km/h 不同速度等级的地铁线路,不同线路站间距不同,对电机负载能力的要求比现有地铁电机高。

(2) 对电机功率密度要求高。为了实现下一代地铁整车减重指标,车辆总体要求牵引电机比同等功能异步牵引电机减重 20%。同时该电机还需适应 2 500 m 高海拔环境,高海拔环境下空气稀薄影响电机散热,对电机提高功率密度带来了更大的挑战。

(3) 电机低噪声指标。国际最新的 IEC 60349-4 永磁牵引电机设计标准规定:牵引电机在最高转速 4 772 r/min 时声功率级噪声不大于 115 dB(A)^[4]。下一代地铁车辆为实现更好的服务品质,要求永磁牵引电机实现在最高转速 4 772 r/min 时声功率级噪声不大于 108 dB(A)。由于地铁永磁牵引电机采用自通风冷,噪声主要来源于冷却风扇带来的空气动力噪声。安装吸声材料等被动降噪手段因牵引电机安装空间受限无法实现,为了实现降噪指标需采用减小冷却风量的主动降噪手段,又与电机高功率密度指标、高海拔适应能力相冲突。

3 关键技术

下一代地铁车辆对牵引电机质量、效率、噪声、环境适应性等多方面提出了较高要求。为了实现高性能指标,通过对等效定额设计、电磁设计、轻量化设计、冷却等难题进行相关的研究和技术攻关是下一代地铁车辆永磁牵引电机研制成功的关键。

3.1 等效定额设计

针对下一代地铁车辆适应 80~140 km/h 不同速度等级地铁线路的运行要求,采用牵引计算与线路仿真相结合计算出电机在地铁车辆各种工况下的平均损耗,选取合理的额定参数避免电机温升超标或容量选取过大^[5]。下述内容简要介绍了关键定额参数的选取原则。

3.1.1 额定电流

电机额定电流按 GB 50157 标准规定选取^[6]:

$$I_m \geq I_{rms}/(0.8 \sim 0.9) \quad (1)$$

式中: I_m ——牵引电机额定电流;

I_{rms} ——列车整车运行条件下全线一个往返的模拟运行计算得到的均方根电流或故障运行条件下计算得到的均方根电流,取其高者。

3.1.2 额定转速

地铁车辆牵引电机额定转速理论上对应列车技术速度下的电机转速。

考虑到永磁牵引电机采用全封闭结构,地铁车辆停站时间短热量散发困难,同时鉴于电机采用自通风冷却(冷却风量与电机转速成正比),因此地铁车辆永磁牵引电机额定转速选择列车旅行速度及技术速度之间的对应转速。

3.1.3 额定电压

选取的额定电压在额定转速下产生的铁耗大于定子平均铁耗,同时需低于额定网压下逆变器输出的最大基波电压。额定电压的选取:

$$U_n \leq \frac{\sqrt{6}}{\pi} U_d \quad (2)$$

式中: U_n ——牵引电动机额定电压;

U_d ——额定中间直流回路电压值。

地铁车辆永磁牵引电机受空载反电动势限制在额定点通常未满载,可将 3.1.1 节确定的电流设定为额定电流,将电流相位角设定为最大化扭矩的相位角,将其后运行时的电压作为额定电压。

3.1.4 额定功率

选取的额定功率是由上述 3 个因素结合车辆总体的效率、功率因数指标确定的。

表 3 所示为结合上述电机等效定额设计原则确定的下一代地铁车辆永磁同步牵引电机适应 80 km/h 速度等级、140 km/h 速度等级线路的等效定额。

表 3 线路仿真定额

项目	80 km/h 线路	140 km/h 线路
额定电流/A	221	174
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500	2 300
额定电压/V	520	925
额定功率/kW	190	250

3.2 电磁设计

下一代地铁车辆永磁牵引电机在与牵引系统相匹配的条件下,以电机输出转矩满足车辆牵引制动特性曲线为目标,通过选择合理电磁结构参数、分配电机各部位损耗使电机适应不同速度等级线路运行工况。

3.2.1 主要结构参数选取

(1) 极数。电机极数越高,线圈端部尺寸越短,定子轭部越薄,电机体积和质量越小,因此高极数利于电机轻量化设计。该电机最高工作转速 4 772 r/min,配套逆变器最高输出频率为 360 Hz,综合考虑电机体积质量和逆变器开关频率,电机极数选择 8 极。

(2) 定子。下一代地铁车辆逆变器中间直流环节最大网压 1 800 V,电机需采用成型绕组,定

子槽型采用开口槽,槽数为 72 槽。为了降低电机齿槽转矩及转矩脉动,定子采用斜槽结构,斜槽距离为 1 个齿距。

(3) 转子。地铁车辆要求电机在低速启动区输出大转矩,为了充分利用永磁电机磁阻转矩来降低电机启动区域工作电流,转子采用内置式磁路结构设计。

(4) 永磁体采用高磁能积和耐高温性能好的稀土材料。

3.2.2 仿真计算

采用场路结合的方法进行电磁计算,电机牵引制动性能用路的方法进行计算,其他用 Ansoft 软件进行有限元的分析和校核。

图 3 所示为电机牵引制动性能计算结果。图 4 所示为电磁场有限元仿真分析结果。

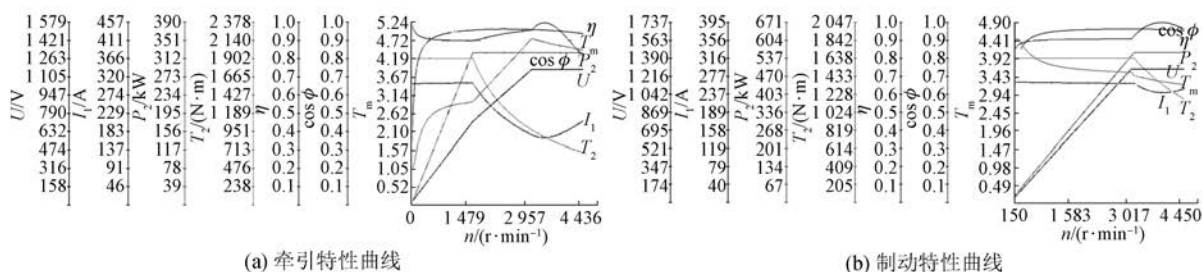


图 3 电机牵引制动性能计算结果

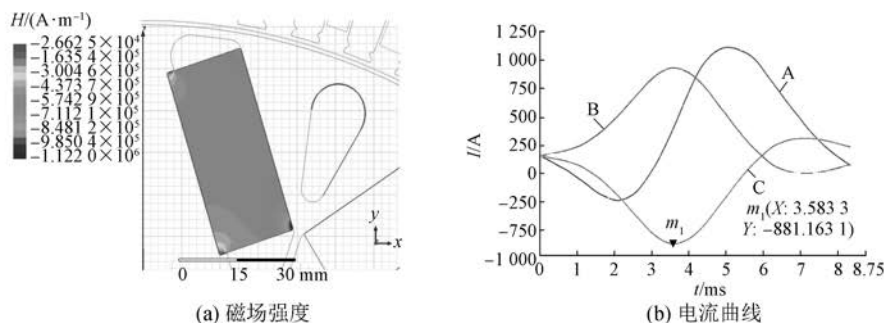


图 4 电磁场仿真分析结果

3.3 轻量化设计

电机质量由电磁部件和结构部件的质量组成。

在不影响电机牵引制动性能的情况下,采用多极化设计可减少定子冲片轭部深度、定子绕组端部伸出长度,从而可以减少电磁部件质量。

结构部件轻量化设计采取的主要措施有:

(1) 对电机各组成部件的重要性进行分类,

重要等级较低的部件采用轻质材料;

(2) 电机定子采用全叠片无机壳结构,优化冷却风道、增加定转子冷却风孔数量进行减重;

(3) 采用有限元仿真软件对零部件的强度和刚度进行分析。

图 5 所示为电机关键零部件有限元仿真应力分布云图。仿真结果表明所设计的下一代地铁车辆永磁牵引电机的机座、转子、端盖等部件机械性

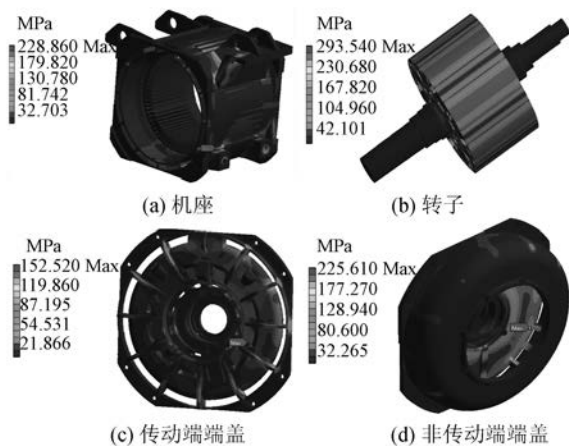


图5 关键零部件有限元仿真应力分布云图

能符合技术要求。

3.4 冷却结构设计

地铁车辆永磁牵引电机全封闭冷却结构分外扇风冷结构、自冷结构 2 种。考虑车辆总体分配给下一代地铁车辆永磁牵引电机的安装空间、功率密度和噪声指标要求,电机采用全封闭外扇风冷结构。图 6 所示为电机冷却结构示意图。冷却风从非传动端滤网进入,带走电机定子铁心的热量,从传动端端盖上的出风口吹出。

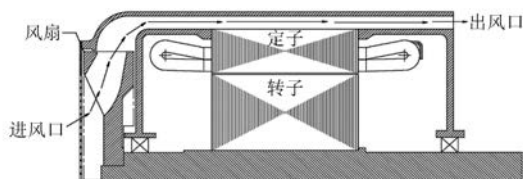


图6 电机冷却结构示意图

3.4.1 风量需求

在获取电机等效定额点损耗后,可根据牵引电机设计手册估算出电机所需风量。估算结果如下:

$$q_v = \frac{\sum p_h}{c_a \Delta \tau_a} \quad (3)$$

式中: q_v ——电机冷却所需风量;

$\sum p_h$ ——电机须由冷却介质带走的损耗;

c_a ——冷却介质的比热容,对于空气,一般取 $1\,100\text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$;

$\Delta \tau_a$ ——冷却介质通过电机后的温升。

3.4.2 冷却风路

根据经验,电机定子铁心平均冷却风速取

$20 \sim 30\text{ m/s}$,才能满足电机散热所需的对流换热量^[7]。在电机所需风量确定时,根据电机定子铁心内经验风速确定轴向通风孔的横截面积。同时为了提高冷却效果和降低噪声,通过尽可能的减少风路中的障碍物和风路改变方向时采取平滑过渡结构等措施来优化冷却风路。

3.4.3 风扇设计

根据下一代地铁车辆永磁牵引电机安装空间及使用环境,电机冷却风扇采用离心式风扇。该电机风扇结构参数设计需同时满足电机冷却风量及噪声要求。风扇叶片采用不均匀排布方法^[8]。

图 7 所示为采用有限元仿真得出的电机内部流体场分布效果图。

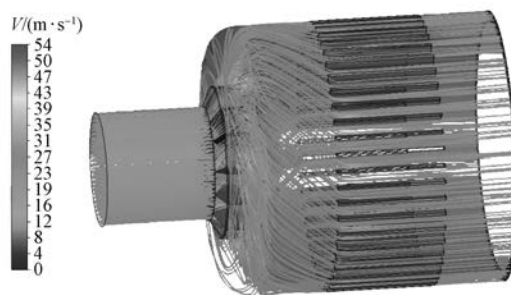


图7 电机内部流体场分布

仿真结果表明下一代地铁永磁牵引电机的冷却结构满足总体要求。

4 样机试验

4.1 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,对其进行了例行试验、型式试验、研究性试验、系统地面联调试验。电机牵引制动特性试验结果如图 8、图 9 所示。

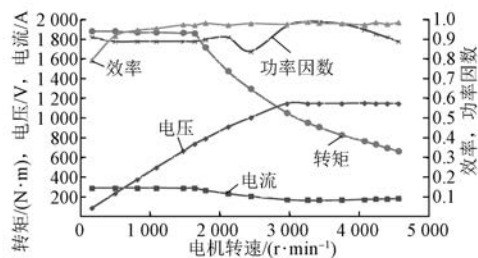


图8 电机牵引特性试验结果

电机试验结果与项目指标对比如表 4

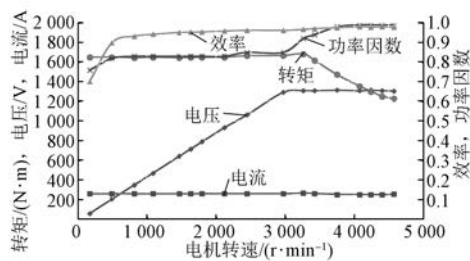


图9 电机制动特性试验结果

所示。

表4 电机试验结果与项目指标对比

项目	项目指标	实测值
额定功率/kW	250	250
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 300	2 300
额定效率/%	≥97	98.5
最大牵引功率/kW	322	337.9
最大制动功率/kW	565	587.4
最大电流/A	≤360	315
最高线空载反电动势/V	≤2 300	2 235
质量/kg	≤545	515
声功级噪声/dB(A)	≤108	107.8
定子绕组温升/K	178.5	97.3
传动端轴承温升/K	-	30.6
非传动端轴承温升/K	-	46.3

试验结果表明:电机质量、效率、噪声、牵引制动性能等指标完全符合车辆总体分配指标要求,电机各部位温升控制在合理范围内,说明该电机的设计开发是成功可行的。

4.2 国内外对比

所设计电机与国内外地铁典型永磁牵引电机技术参数的比较情况如表5所示。

表5 与国内外电机技术参数对比

电机厂家	国外 A	国内 B	所设计电机
额定功率/kW	190	230	250
额定转矩(N·m)	907	1 155	1 038
额定转速(r·min ⁻¹)	2 000	1 900	2 300
质量/kg	635	590	515
功率密度/(kW·kg ⁻¹)	0.299	0.411	0.485
转矩密度/(N·m·kg ⁻¹)	1.428	1.959	2.016

效率越高,则电机越节能;单位转矩质量越小,则电机对材料和空间的利用充分,设计水平越高;单位质量发挥功率越大,则电机越经济,设计难度越大。通过表5对比可知,下一代地铁车辆电机转矩密度、功率密度等部分指标达到国际领先水平。

5 结 语

通过对等效定额设计、电磁设计、轻量化设计、冷却结构设计等难题技术攻关,实现了下一代地铁车辆永磁同步牵引电机的设计与制造,研制出来的样机具有高效率、高功率密度、低噪声、高海拔适应能力等优点。通过该电机的研发和推广应用,可大大提高我国地铁车辆牵引电机的设计和制造水平,也为我国铁路装备提供强大的技术支撑,具有深远的社会意义和重大的经济意义。

【参考文献】

[1] MINORU K.全封闭永磁同步电机的开发[J].何春,译.国外机车车辆工艺,2009(5): 42.

[2] 白石茂智.铁道车辆牵引电动机的技术动向[J].张芳,译.国外机车车辆工艺,2011(5): 1.

[3] 符敏利,何思源,李益丰,等.地铁车辆用JD155 永磁同步牵引电动机的设计[J].大功率变流技术,2012(3): 12.

[4] IEC. Electric traction-rotating electric machines for rail and road vehicles-part4: permanent magnet synchronous electrical machines connected to an electronic converter;IEC 60349.4-2012[S]. Geneva: IEC,2012.

[5] 何云凤,吴顺海,陈文光.地铁车辆异步牵引电动机发热校验方法及应用[J].电力机车与城轨车辆,2010,33(2): 52.

[6] 北京城建设计研究总院有限责任公司.地铁设计规范:GB 50157-2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.

[7] 何思源.全封闭永磁同步牵引电动机冷却系统设计[J].大功率变流技术,2012(3): 48.

[8] 野田伸一.低噪声密封式铁道车辆用电机的开发[J].蔡千华,译.电气牵引,2007(2): 52.

收稿日期: 2019-08-26