

高速动车组大功率永磁牵引电机研制^{*}

贾喜勤¹, 许 勇¹, 李 广¹, 刘永强¹, 徐 萌², 苏晓伟³, 霍向飞¹

- (1. 中车永济电机有限公司, 山西 永济 044502;
2. 中车长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062;
3. 中车唐山机车车辆有限公司, 河北 唐山 063035)

摘 要: 随着动车组(EMU)速度等级的不断提高, 要求牵引电机的功率更大、质量更轻、效率更高。为此, 主要从高速动车组永磁牵引电机参数选取、结构设计等方面展开研究, 并进行仿真分析计算, 在现有安装空间内, 研制出更高转速、更大功率密度的永磁牵引电机, 以满足 EMU 运行要求。

关键词: 永磁牵引电机; 高速动车组; 冷却结构

中图分类号: TM 922.71 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)09-0051-05

doi: 10.12177/emca.2020.096

Development of High-Power Permanent Magnet Traction Motor for High-Speed EMU^{*}

JIA Xiqin¹, XU Yong¹, LI Guang¹, LIU Yongqiang¹, XU Meng², SU Xiaowei³, HUO Xiangfei¹

- (1. CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Yongji 044502, China;
2. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China;
3. CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 063035, China)

Abstract: The increasing speed grade of electric multiple unit (EMU) requires more power, lighter weight and higher efficiency of traction motor. The parameters selection and structure design of permanent magnet traction motor of high-speed EMU are studied, and the simulation analysis and calculation are carried out. In the existing installation space, a permanent magnet traction motor with higher speed and higher power density is designed to meet the operation requirements of high-speed EMU.

Key words: permanent magnet traction motor; high-speed electric multiple unit (EMU); cooling structure

0 引 言

随着动车组(EMU)速度等级的不断提高, 要求牵引电机的功率更大、质量更轻、效率更高。由于永磁电机具有功率密度大、效率高等特点^[1], 成为高速动车组较优的选择。

鉴于永磁同步牵引电机的诸多优点, 目前国内从事轨道交通车辆研发的公司竞相开展 EMU 永磁牵引电机技术研究。国外, 法国阿尔斯

通公司为改进型单层 AGV 高速动车组开发了 720 kW 全封闭永磁同步电机, 电机质量 730 kg^[2]; 西门子公司发布了基于永磁电机牵引系统的 Velaro Novo 列车^[3], 其电机功率 670 kW, 质量 775 kg。国内, 中车四方股份公司在国家 863 计划支持下研制完成时速 350 公里高速永磁动车组, 其配套的永磁牵引电机, 功率 635 kW, 功率密度达到 1.01 kW/kg。

本文以某时速 400 公里 EMU 永磁牵引电机

收稿日期: 2020-04-13; 收到修改稿日期: 2020-07-07

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB1200506-14)

作者简介: 贾喜勤(1979—), 男, 高级工程师, 研究方向为轨道交通电机设计。

为例,从电机参数选取、结构设计等方面开展研究,在现有安装空间内,设计出更高转速、更大功率密度的永磁牵引电机。

1 永磁电机参数及设计目标

永磁电机主要参数如表 1 所示。

表 1 永磁电机主要参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	815
效率/%	97
工作制	S1
冷却方式	全封闭水冷
冷却水量/(L·min ⁻¹)	60
质量/kg	≤750

设计目标:

- (1) 电磁设计方面,合理选择电机参数,优化电机设计,发挥永磁电机高功率密度、高效率的优点,满足额定参数及牵引制动特性要求,使电机额定效率达到 97%,温升控制在 200 K 以内。
- (2) 结构设计方面,重点研究优化永磁电机冷却结构,高速转子结构,做好散热与温升的匹配,以及满足电机高速性能要求。

2 永磁电机设计参数选取

根据 EMU 电机牵引、制动特性参数,兼顾变流器 IGBT 器件参数,选择合理的电压、电流,同时保证最高转速时永磁电机反电动势在变流器可承受范围内。电机最大牵引功率为 815 kW,最大牵引转矩为 3 128 N·m,最高转速 6 287 r/min。

结合电机最大外形尺寸,确定定子冲片外径;根据风路及电磁负荷,确定定子槽数及槽型。定子槽型采用开口槽,槽数为 54 槽;定子绕组采用双层成型绕组。

转子采用 V 型径向磁路结构,永磁体采用耐高温、低温度系数的钕钴永磁材料,为了使电机功率得到充分发挥,在现有空间尺寸约束下,应尽可能的增大永磁体尺寸,同时平衡漏磁、最大去磁工作点及高速离心力的影响^[4-6]。

3 电机基本结构

在保持现有机机械接口不变的情况下,为了适应永磁电机的运行特点,电机内部设计为密封结构。EMU 永磁电机三维外形如图 1 所示。



图 1 EMU 永磁电机三维外形

将设有水道的机座设计为外部水冷却循环系统,对电机本体进行冷却。内部冷却风扇、转子通风道与机座四角通风道构成内部风冷循环系统。EMU 永磁电机冷却结构和电机冷却水道结构示意图如图 2 和图 3 所示。

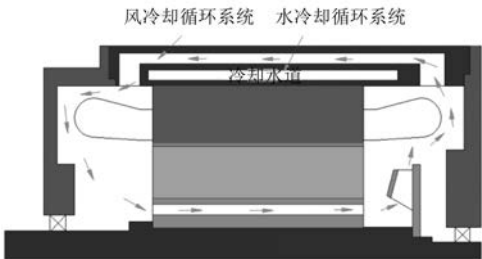


图 2 EMU 永磁电机冷却结构示意图

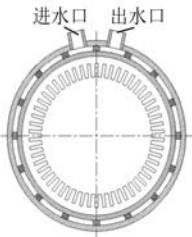


图 3 冷却水道结构示意图

定子铁心为斜槽结构,斜槽齿距为一个齿槽,以削弱齿槽转矩及转矩脉动。

转子磁路结构采用 V 型径向磁路结构,具有更大的转矩密度和更好的弱磁特性。

轴承采用高速绝缘轴承,位置传感器采用整体式旋转变压器。

定子铁心设有温度传感器,对定子温度进行检测,为控制提供保护信号。传动端与非传动端轴承室设有振动和温度的复合传感器,为故障预测与健康管理系统(PHM)提供监控和保护信号。

4 有限元分析

利用有限元电磁场分析软件结合路计算结果对关键电磁参数优化设计,包括对空载反电动势、齿槽转矩等进行优化计算。分析计算负载单相、两相、三相短路的电流及短路转矩,对电机抗去磁能力进行分析,确保电机在最大去磁工作状态下仍能正常工作,同时对电机的温度场、关键部件机械强度进行分析^[7]。

4.1 电磁设计分析

电机选用 6 极 54 槽配合,定子铁心斜槽设计,降低齿谐波,减小齿槽转矩影响。采用电磁分析软件对斜槽情况下的空载反电动势、齿槽转矩等进行分析计算,波形如图 4~图 6 所示。

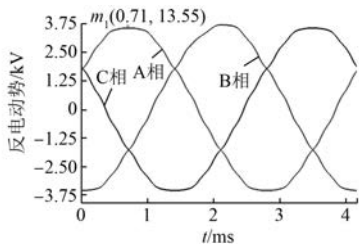


图 4 斜槽反电动势波形

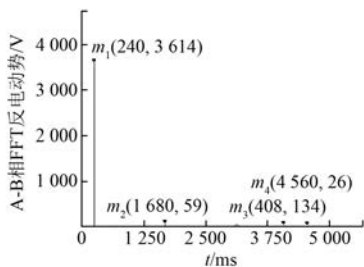


图 5 反电动势(线电压)傅里叶分析

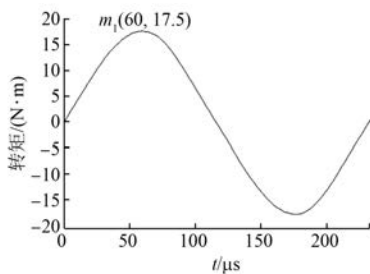


图 6 齿槽转矩波形

从分析结果可以看出:

(1) 空载反电动势谐波小,波形更加光滑。

反电动势谐波含量仅占 2.01%,反电动势有效值仿真为 2 556 V,实测值为 2 579 V,仿真值与试验值基本一致。

(2) 齿槽转矩低,起动及运行更平稳。齿槽转矩仿真最大值为 17.5 N·m,实测最大值为 16 N·m,仿真与试验值接近,同时也表明定子斜槽设计,能够有效抑制永磁电机齿槽转矩影响。

4.2 短路电流及去磁分析

用分析软件对电机一相、两相、三相短路分别进行分析,对比结果如表 2 所示。

表 2 短路工况电流和转矩

负载短路工况 (永磁体 150 ℃)	电流		转矩	
	电流/A	额定电 流倍数	转矩/ (N·m)	额定转 矩倍数
一相短路	390.65	1.60	2 024.0	1.25
两相短路	697.86	2.85	2 898.1	1.79
三相短路	759.81	3.10	3 235.5	2.00

从分析结果看出,电机负载三相短路时短路电流、最大转矩达到最大,超过一相、两相短路情况。三相短路时,定子绕组有较大的短路电流流过,在永磁体上产生很大的去磁磁势,对永磁体产生去磁作用,严重情况下,导致永磁体失磁,这是必须避免的。

因此,对三相负载短路时永磁体最大去磁工作点进行校核,永磁体 150 ℃的额定和短路工况工作点如图 7 所示。

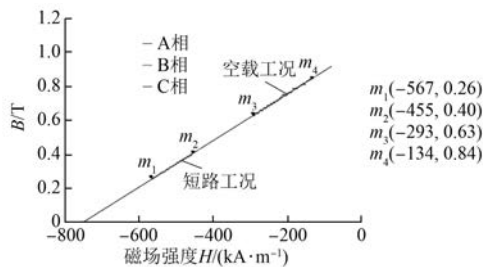


图 7 额定工况和短路工况永磁体的工作点

由图 7 可以看出,在额定和短路工况下,永磁体工作点均在回复线直线上,不会产生不可逆去磁。

电机的永磁体选用耐高温、低温度系数的钕钴永磁材料,可使永磁体工作点范围合适,具有较高磁热稳定性。在发生短路故障时,能很好保证永磁体的特性,在恢复故障后,又能使永磁体可以

很快正常工作,电机的抗去磁能力强。

4.3 损耗分析

电机额定效率要求达到 97%。通过仿真分析研究电机损耗,以充分发挥永磁电机性能,降低电机损耗,满足电机效率要求。由于永磁电机无转子铜耗;且永磁电机的磁场是由永磁体产生,电机功率因数高,定子电流小,相应的定子铜耗较小。经分析,永磁电机额定效率达到 97.37%,如表 3 所示。

表 3 电机额定工况损耗分析					
参数	定子 铜耗/kW	铁心 损耗/kW	其他 损耗/kW	总损耗 /kW	效率/%
额定点	5.26	7.06	9.66	21.98	97.37

全速范围内,效率大于 94% 的区域约占整个工况的 80% 以上,如图 8 所示。

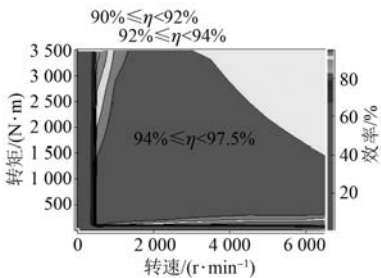


图 8 电机全速度范围效率曲线

4.4 电机流场、温度场分析

4.4.1 电机流场分析

合理设计水路结构,在给定水量情况下,电机水阻满足水路的压力要求。电机冷却水量 60 L/min 时,要求水压不大于 210 kPa。流场分析结果如图 9、图 10 所示。

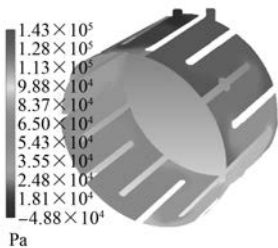


图 9 电机压力分布图

经仿真分析,冷却水量 60 L/min 时,水路进出口压差为 142 kPa,样机实测水压为 160 kPa,满



图 10 电机流场分布图

足压降不大于 210 kPa 的要求。

4.4.2 电机温度场分析

将损耗作为热源建立温度场模型,冷却水量 60 L/min、进水温度 65 ℃ 时,经分析计算,温升满足热绝缘 200 级要求,分析结果如表 4、图 11、图 12、图 13 所示。

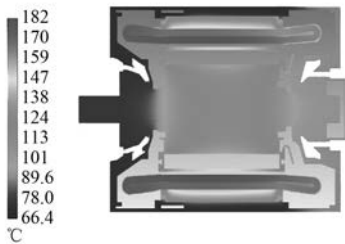


图 11 电机温度场分布图

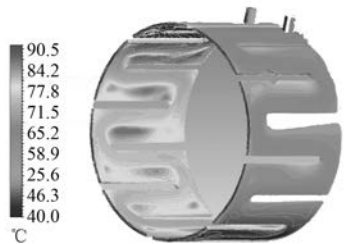


图 12 电机水道壁面温度场分布图



图 13 电机定子轴向温度场分布图

表 4 电机温升分析

参数	温度/℃			温升/K		
	最高	最低	平均	最高	最低	平均
定子线圈	181.84	160.79	171.50	116.84	95.79	106.50
定子铁心	178.96	89.39	147.80	113.96	24.39	82.83

电机整体最高温度发生在绕组上,而整体的温度分布呈轴向上两侧温度较低,中间温度较高的趋势。通过加大水道截面积,可加大散热面积,带走更多的热量;通过增加内部风冷循环结构,加快内部热量与机壳及冷却水冷交换散热,使电机温升降低。绕组仿真温升 106.5 K,满足 200 级绝缘要求。

4.5 转子强度分析

电机转速较高,需对超速下的转子离心力进行分析,确保电机运行安全,同时对转子临界转速进行分析,避免共振出现。

转子冲片强度:隔磁桥结构满足 1.2 倍最高转速工况下强度和刚度要求。强度方面,最大应力小于材料屈服强度。刚度方面,最大位移的气隙占比满足设计要求。

转子临界转速:转子在每一种转速下的固有频率计算了 6 阶,如表 5 所示。

表 5 主要试验结构与指标对比

模型	旋转方向	模型稳定性	临界转速	0 r/min	5 000 r/min	8 000 r/min
1	反涡	稳定	无	138.36 Hz	138.36 Hz	138.35 Hz
2	正涡	稳定	无	138.46 Hz	138.46 Hz	138.46 Hz
3	反涡	稳定	无	246.29 Hz	217.97 Hz	202.68 Hz
4	反涡	稳定	无	246.43 Hz	257.66 Hz	257.66 Hz
5	正涡	稳定	无	257.66 Hz	278.43 Hz	299.40 Hz
6	反涡	稳定	无	1 452.80 Hz	1 452.90 Hz	1 453.10 Hz

在转子动力学分析中,用涡动角速度随自转速度变化的坎贝尔图来得到转子系统的临界转速,如图 14 所示。RATIO=1 为等速线,表示转子在该转速下的固有频率。临界转速点位于涡动频率曲线和等速线的交点处。在 8 000 r/min 转速范围内,各涡动频率曲线与等速线未产生交点,即不存在共振转速点,电机运转安全。

5 永磁牵引电机试验

样机试制完成后,基于 GB 25123.4—2015 标

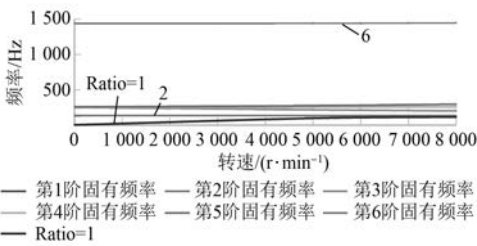


图 14 坎贝尔图

准制定试验大纲,主要试验结果与指标对比如表 6 所示。

表 6 主要试验结果与指标对比

参数	技术要求	试验结果
功率/kW	815	815
温升/K	≤200	长时温升 146
超速	转速 7 544 r/min, 电机无异常响声和机械损坏	合格
效率/%	97	97.2
质量/kg	≤750	735

从试验结果可看出,永磁电机功率 815 kW,长时温升 146 K,满足温升要求,说明冷却结构可行,达到预期效果。

电机超速转速 7 544 r/min,为目前动车电机最高转速,说明电机旋转结构可行。

电机效率 97.2%,达到预期目标,充分发挥永磁电机高效节能的性能。

电机质量 735 kg,比要求减轻 15 kg,功率密度达到 1.108 kW/kg。EMU 牵引电机参数对比如表 7 所示。从表 7 可知,该电机功率密度比现有国内外动车牵引电机高。

表 7 EMU 牵引电机参数对比

动车组	功率/kW	质量/kg	功率密度/(kW·kg ⁻¹)
阿尔斯通 AGV	720	730	0.986
西门子 Velaro Novo	670	775	0.864
时速 350 公里永磁高铁	635	-	1.010
时速 400 公里永磁高铁	815	735	1.108

6 结 语

本文针对 EMU 永磁牵引电机进行了合理的电磁计算、优化的结构设计,尤其是对全封闭通风

(下转第 96 页)