

复兴号 FXD1 动力集中动车组用异步牵引电机设计

何 冲, 何云凤, 唐子谋
(中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 介绍了复兴号 FXD1 动力集中动车组用异步牵引电机的设计情况。主要从整车总体技术要求、电机结构设计、电磁方案设计、电机特性、关键技术、电机试验等方面进行了阐述。根据异步牵引电机的技术特点, 通过对电磁设计、结构设计及冷却设计等关键技术研究, 设计了 1 台异步牵引电机, 并进行了试验。试验结果表明该异步牵引电机满足整车技术指标要求, 验证了设计方案的可行性。

关键词: 异步牵引电机; FXD1 动力集中动车组; 电机设计

中图分类号: TM 343; TM 922.71 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)10-0056-05

doi: 10.12177/emca.2020.120

Development of Asynchronous Traction Motor for FXD1 Power Concentrated EMU

HE Chong, HE Yunfeng, TANG Zimou
(CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: The development of asynchronous traction motor for FXD1 power concentrated electric multiple unit (EMU) is introduced. The overall technical requirements of locomotive, motor structure design, motor electromagnetic design, motor characteristics, key technologies, and motor test are discussed. According to the technical characteristics of asynchronous traction motor, a prototype asynchronous traction motor is developed based on the research of key technical problems such as electromagnetic design, structure design and cooling design. The test results show that the asynchronous traction motor meets the technical requirements of locomotive, and verify the feasibility of the design scheme.

Key words: asynchronous traction motor; FXD1 power concentrated electric multiple unit (EMU); motor design

0 引 言

FXD1 动力集中动车组是“复兴号”动车组成员之一, 该车所用动力车由中车株洲电力机车有限公司研制, 最高运营时速为 160 km/h, 最高设计时速为 200 km/h。牵引系统采用交-直-交电传动方式, 经受电弓从电网吸收的工频 25 kV 单相交流电, 经过牵引变压器降压后, 由牵引变流器的整流模块整流成直流电, 再由牵引变流器的逆变模块逆变成牵引电机所需的电压和频率可调的

三相交流电^[1]。

配套该车的牵引电机为异步牵引电机, 具有体积小、质量轻、功率密度大、可维护性好等特点。

本文所设计牵引电机是在和谐型客运电力机车牵引电机基础上设计。在电机结构方面, 进行轻量化设计, 以提升电机功率密度及转矩密度; 在电磁方案方面, 优化电机电磁方案^[2], 以提高电机与变频器的匹配性及电机本身的谐波抑制能力; 在通风散热方面, 优化电机风道结构, 使电机绕组在轴向及周向的温度分布更加合理均匀。

收稿日期: 2020-05-27; 收到修改稿日期: 2020-08-07

作者简介: 何 冲(1985—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为轨道交通牵引电机研发。

1 整体要求

1.1 机车基本信息

轴式 B0-B0, 齿传动比 4.43, 新轮轮径 1 250 mm、全磨耗轮径 1 150 mm, 持续运行速度 95 km/h、最高设计速度 200 km/h, 起动牵引力 240 kN、持续牵引力 212 kN, 整车额定牵引功率 5 600 kW、短时牵引功率 6 400 kW, 每台动力车由 4 台牵引电机驱动, 恒功运行速度范围 95 ~ 200 km/h。

1.2 环境及线路条件

运行环境温度: -40 ~ 40 ℃; 运行环境湿度: 最大相对湿度 95%; 运行环境海拔: ≤2 500 m。特殊要求: 能满足风、沙、雨、雪、雾霾, 偶有盐雾、酸雨、沙尘暴的要求。

牵引电机在车上采用架悬方式安装, 最大振动量级: 垂向 5.4 m/s²、横向 4.7 m/s²、纵向 2.5 m/s²。最大冲击量级: 垂向 300 m/s²、横向 300 m/s²、纵向 300 m/s²。

1.3 变流器对牵引电机要求

变流器对牵引电机采用轴控方式, 控制策略为额定之前采用恒磁通控制, 额定之后采用恒功率控制。逆变器对牵引电机的输出限制如表 1 所示。

表 1 逆变器对牵引电机输出限制

参数名称	数值	参数名称	数值
中间直流电压/V	3 600	最高工作频率/Hz	350
牵引最大电压/V	2 808	制动最大电压/V	2 808
最大输出电流/A	480	额定输出电流/A	430

1.4 牵引电机主要性能参数

牵引电机主要性能参数如表 2 所示。

表 2 牵引电机主要性能参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	1 430	额定电压/V	2 550
额定电流/A	387	额定频率/Hz	62.55
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 863	额定转矩/(N·m)	7 330
最高转速/(r·min ⁻¹)	4 094	电机质量/kg	2 130
悬挂方式	架悬	冷却方式	强迫风冷
风量/(m ³ ·s ⁻¹)	1.8	静压/Pa	2 380

2 电机结构

2.1 总体

该电机为单轴承结构, 即电机与齿轮箱合成一体组成整体式驱动单元, 电机与齿轮箱共用传动端端盖, 采用架悬方式在车底安装。电机由定子、转子、非传动端端盖、非传动端端轴承、附件等部件组成, 如图 1 所示。

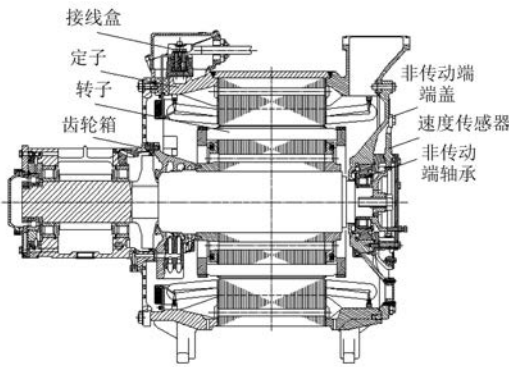


图 1 牵引电机剖面图

2.2 定子

定子主要由定子机座和定子绕组组成, 定子外径 800 mm、定子内径 490 mm、铁心长 340 mm。

定子机座采用无机壳焊接结构, 由定子冲片、定子端板、定子压圈和筋板焊接而成, 具有结构紧凑、体积小、质量轻、散热好等特点。

定子冲片由 0.5 mm 厚的 50W470 硅钢片冲制而成, 该硅钢片具有导磁性能好、铁耗小、绝缘性能强等特点。定子压圈和筋板等主要受力结构部件采用耐低温铸钢材料, 具有强度高、耐冲击性能好、耐低温能力强等特点, 能够满足 -40 ℃ 的低温运行要求。

定子绕组采用低电阻率的无氧铜导线, 匝间绝缘采用耐电晕薄膜, 层级绝缘采用聚酰亚胺薄膜、云母带和玻璃丝带叠包, 嵌线并头后的绕组采用真空压力浸漆(VPI), 具有高电气性能及防潮、耐振、寿命长、可靠性高等特点, 绝缘等级 200 级。

2.3 转子

转子采用鼠笼式结构, 主要由转子铁心、导条、端环及护环组成。

转子铁心主要由转轴、转子冲片、转子端板、转子压圈组成, 转子冲片叠压后采用热套过盈配合方式与转轴装配, 转子压圈在转子冲片两端压

紧以确保转子冲片紧密叠压。转轴采用优质合金钢材料,具有较高的机械性能、抗疲劳性能和耐冲击性能。

转子导条和端环均采用低电阻率的无氧铜材料,导条嵌入转子槽内后冲紧以确保在槽内嵌紧,转子导条与端环采用高频感应钎焊方式连接,为了确保电机运转时端环不变形,在端环外套优质合金钢材料的护环。

2.4 端盖

该电机为单轴承结构,没有传动端端盖,电机与齿轮箱合成一体。

非传动端端盖采用铸铁材料。在非传动端端盖上设计轴承室,为了确保非传动端轴承润滑脂的可靠密封,设计了多槽型迷宫密封结构。非传动端端盖局部采用加强筋,在确保刚度及耐冲击能力的前提下,减轻端盖质量。

2.5 轴承及润滑密封

异步电机运行过程产生的感应电流对轴承将产生电蚀,导致轴承剥离从而影响电机的可靠运行。为了避免电蚀对轴承的伤害,采用高品质绝缘轴承,轴承计算寿命不小于 300 万公里。轴承润滑密封采用无接触式迷宫结构,迷宫间隙小于 1 mm。

非传动端轴承采用 NUB219 圆柱滚子轴承,润滑方式为脂润滑。对储脂室进行优化设计,确保轴承得到充分润滑的同时,轴承温升正常。

2.6 测温及测速装置

为了监测电机的定子绕组温度以确保电机的可靠运行,在电机的机座上装有 PT100 温度传感器,温度传感器探头伸到定子槽底,牵引系统采集温度信号后对电机实施超温保护。

在电机非传动端端盖装有双通道霍尔式速度传感器,可以监测电机的运行转向及转速,测速齿盘齿数为 110。

3 电机特性

3.1 牵引特性

电机牵引特性参数如表 3 所示。牵引特性曲线如图 2 所示。

电机在 0~98 r/min 转速范围内恒转矩运行,转矩为 8 283 N·m;电机在 1 863~4 094 r/min 转速范围内恒功率运行,功率为 1 430 kW。

表 3 电机牵引特性参数

特性点	电机转速/ (r·min ⁻¹)	电机转矩/ (N·m)	电机功率/ kW
起动点	0	8 283	0
恒转矩结束点	98	8 283	85
恒功起始点	1 863	7 330	1 430
恒功结束点	4 094	3 331	1 430

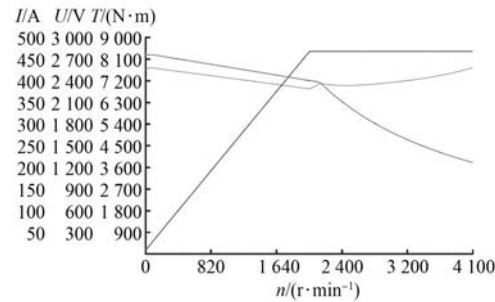


图 2 电机牵引特性曲线

3.2 制动特性

电机制动特性参数如表 4 所示。制动特性曲线如图 3 所示。

表 4 电机制动特性参数

特性点	电机转速/ (r·min ⁻¹)	电机转矩/ (N·m)	电机功率/ kW
恒转矩结束点	0	5 055	0
恒功结束点	2 589	5 055	1 370
恒功起始点	4 094	3 197	1 370
最高速度点	4 094	3 197	1 370

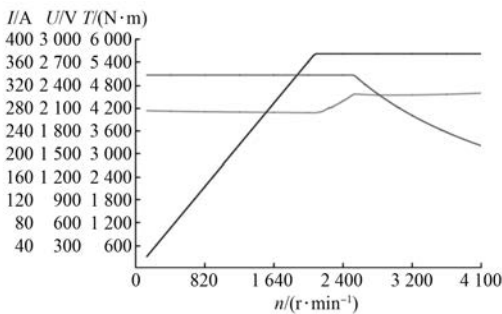


图 3 电机制动特性曲线

电机在 0~2 589 r/min 转速范围内恒转矩运行,转矩为 5 055 N·m;电机在 2 589~4 094 r/min 转速范围内恒功率运行,功率为 1 370 kW。

4 关键技术

4.1 电磁设计

4.1.1 极数

机车用异步牵引电机极数一般选择4极或者6极。该电机的特点为转速高、功率大。电机高速点的功率 P 与过载倍数 T_{ms} 成正比,而过载倍数 T_{ms} 与定子频率 f 成反比^[2]。选择6极,将导致最高速度点的过载倍数降低,从而影响功率发挥。4极电机的效率和功率因数更高。综合对比,该电机的极数选择4极更合适。

4.1.2 绕组匝数

绕组匝数少,电压低、电流大、电机发热因数高、过载倍数大、漏抗小、电压调制比低、谐波抑制能力差;绕组匝数多,电压高、电流小、电机发热因数低、过载倍数低、漏抗大、电压调制比高、谐波抑制能力好。选取绕组匝数时,应该在满足最高速度点过载倍数(一般不低于1.1)需求的前提下,尽可能地选择更多的匝数。该电机绕组匝数选择12较为合适。

4.1.3 定子槽型

为了增大定子漏抗,改善轴向通风冷却效果,定子槽型设计得深而窄,同时在定子槽口部分设计槽沟进一步增加漏抗及冷却效果^[3]。为了减少定子铁耗,应将定子齿部磁密和定子轭部磁密控制在合理范围内,合理控制定子槽型的高宽比^[4]。该电机定子槽数选用60槽、定子槽型采用矩形开口槽,槽型高宽比为4.43,定子槽型如图4所示。

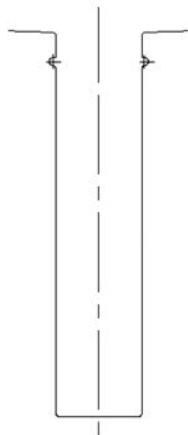


图4 定子槽型

4.1.4 转子槽型

为了提高转子漏抗以提高最大转矩,转子槽型应采用半开口槽,同时在转子槽口部分设计槽沟进一步增加漏抗及冷却效果。转子槽数选用48槽,转子槽型采用半开口槽,槽型高宽比为3.98,不采用斜槽以避免斜槽磁通产生的谐波损耗^[5],转子槽型如图5所示。

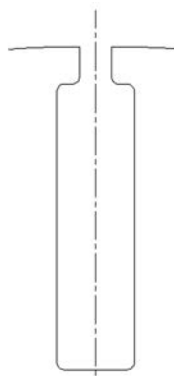


图5 转子槽型

4.2 温升控制

对于电机的温升控制主要有2个措施:减少发热和增强散热。

4.2.1 减少发热

(1) 在保证过载能力的同时,尽可能提高绕组匝数,以提高电机额定电压,降低逆变器供电时的电压谐波畸变率,从而降低谐波损耗。

(2) 电机的电磁线、导条、端环选用低电阻率的无氧铜材料,优化定、转子槽型和导条规格,从而降低电机的发热。

4.2.2 增强散热

(1) 电机的发热损耗主要来源于铜耗,增加定、转子槽口深度,提高冷却风流经定、转子绕组时的散热面积。

(2) 对定子通风孔的结构进行优化设计,引导冷却风吹向定子绕组的端部,加强冷却风对定子绕组端部的冷却,提高冷却风的利用率^[6]。

4.3 绝缘结构

电机的寿命由绝缘寿命决定。该电机中间直流电压为3 600 V,结合线路运行环境的要求,主绝缘结构选用某公司已有成熟应用业绩的3 600 V电压等级绝缘结构,并在定子绕组出槽口位置填充绝缘材料以提高电机整体绝缘性能^[4]。根据电机绝缘试验要求,对定子绕组进行

AC 8 200 V 的对地耐压及峰值为 19 400 V 的对地耐冲击电压试验,耐电压试验值计算方法如下:

对地耐电压 = 2×中间直流电压 + 1 000 V = 8 200 V;

对地耐冲击电压 = 4 × 中间直流电压 + 5 000 V = 19 400 V。

5 电机试验

按照 GB/T 25123.2—2010^[7] 和 TB/T 3315—2013^[8] 标准要求对电机进行型式试验,试验结果如表 5 所示。

表 5 电机试验结果

参数名称	计算值	试验值	符合性
额定功率/kW	1 430	1 432	符合
额定电压/V	2 550	2 556	符合
额定电流/A	387	389	符合
额定频率/Hz	62.55	62.6	符合
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 863	1 864	符合
额定转矩/(N·m)	7 330	7 337	符合
电机温升/K	140	136	符合
风量/(m ³ ·s ⁻¹)	1.8	1.81	符合
静压/Pa	2 300	2 380	符合
质量/kg	2 180	2 130	符合

试验结果表明,电机功率、电压、电流、转速、转矩、温升、质量、风量及静压等指标均满足技术指标和标准要求,电机性能符合设计要求。

6 对比现有产品

该电机与原有 HXD1 系列机车牵引电机主要参数对比,如表 6 所示。

对比结果表明,该电机的转矩密度和功率密度比原有的 HXD1 系列机车牵引电机均有明显提高。

表 6 对比原有产品主要参数

参数名称	HXD1	HXD1B	HXD1D	样机
功率/kW	1 224	1 633	1 224	1 430
转矩/(N·m)	6 802	6 850	7 059	7 330
质量/kg	2 580	2 600	2 595	2 130
功率密度/(kW·kg ⁻¹)	0.474	0.628	0.472	0.671
转矩密度/(N·m·kg ⁻¹)	2.636	2.635	2.720	3.441

7 结 语

本文电机设计过程中,通过对机车整体技术要求分析,结合变流器对电机的输出限制及安装空间的尺寸要求,优化电机机械结构及电磁方案,电机性能完全满足整车技术要求和相关标准要求。

【参 考 文 献】

[1] 沈本荫. 牵引电机 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.

[2] 陈世坤. 电机设计 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[3] 邓日江. 和谐 HXD1 型机车用变频异步牵引电机 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2007, 30(1): 18

[4] 丁禄振. 双流制窄轨电力机车用异步牵引电机设计 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(12): 75.

[5] 戴文进, 张景明. 电机设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.

[6] 丰帆, 郑国丽, 黄鹏程, 等. 异步牵引电机冷却设计的分析与验证 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44(6): 63.

[7] 中华人民共和国铁道部. GB/T 25123.2—2010: 电力牵引 轨道机车车辆和公路车辆用旋转电机 第 2 部分: 电子变流器供电的交流电动机 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

[8] 中华人民共和国铁道部. TB/T 3315—2013: 交流传动机车异步牵引电动机 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

扫码关注
《电机与控制应用》
微信公众号

