

动车组大功率强迫风冷充电机的研制

周要培, 魏 兴

(西安中车永电捷通电气有限公司, 陕西 西安 710016)

摘要: 为了满足动车组车辆大功率直流负载、减小设备重量和提高设备可靠性的要求, 研发了基于模块化设计思路的大功率强迫风冷充电机。从主电路、结构等方面介绍了该充电机的研制方案, 通过建立充电机的结构仿真模型, 对其结构强度、散热效果进行了有限元分析, 并通过试验验证。结果表明该充电机满足产品的设计要求, 在功率、重量及功率密度等方面也具有很大的优势。

关键词: 动车组; 充电机; 模块化; 结构设计; 热仿真

Design of high-power forced air cooling charger for EMUs

ZHOU Yaopei, WEI Xing

(Technology Center, CRRC Xi'an YongeJieTong Electric Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: In order to meet the requirements of EMUs vehicle high-power DC loading, reducing weight, improving reliability, a high-power forced air cooling charger based on modular design principles is developed. The development scheme of the charger from the aspects of main circuit and structure is introduced. A structure simulation model of charger is established, and the structural strength and heat transfer are analyzed. Then test validation is achieved, results showe the charger fulfills the product design request, with major superiority in power, weight and power density.

Key words: EMUs; charger; modulization; structural design; thermal simulation

0 引言

随着中国高速铁路的快速发展, 动车组牵引供电技术水平也在不断提高, 动车组的低压直流供电系统是为车辆牵引及制动系统提供保障的设备, 它的好坏直接影响动车组列车能否正常运行。充电机作为低压直流供电系统内的核心设备, 也需要快速响应市场需求, 节约成本、减小重量和提高功率密度等。

为满足以上动车组市场对充电机技术水平提出的更高要求, 需要进一步提高动车组充电机的功率密度指标^[1-2]。本文采用模块化的

设计原则, 功率模块采用复合碳化硅IGBT器件, 使用强迫风冷技术, 箱体采用铝合金材质, 提高了充电机的功率密度, 在整个充电机装置有限的空间内对整体布局及风道结构进行了优化设计, 并采用有限元软件进行了结构强度、热场仿真分析, 最后通过相关试验验证, 表明充电机满足了产品的结构设计要求。

1 充电机的结构方案

1.1 动车组充电机的工作原理

动车组充电机通过三相AC 380 V/50 Hz

列车交流母线供电，主电路由输入预充电电路、三相全桥不可控整流电路（AC/DC）和
高频隔离的移相全桥电路（DC/DC）组成，
充电机主电路原理如图1所示。高频隔离电路
采用ZVS（IGBT零电压关断技术）控制与高
频变压器的隔离，可实现充电机的轻量化、高
效率及电路隔离功能，为动车组车辆提供安全
可靠的直流电源^[3-5]。

充电机主电路由两路并联而成，工作原

理为：三相AC 380 V/50 Hz输入预充电回路
后，三相不可控整流电路实现将输入交流转换
为直流，并通过FC滤波稳定中间电压，然后
通过全波DC/DC变换电路。当中间直流电压
稳定到恒定值后，全波电路开始工作，将中间
直流电压变换成交流电压，通过变压器变换、
输出二极管整流和输出LC滤波后，终成为稳
定的DC 110 V直流，根据不同工况，充电机
可以实现对动车组蓄电池的恒压、恒流充电。

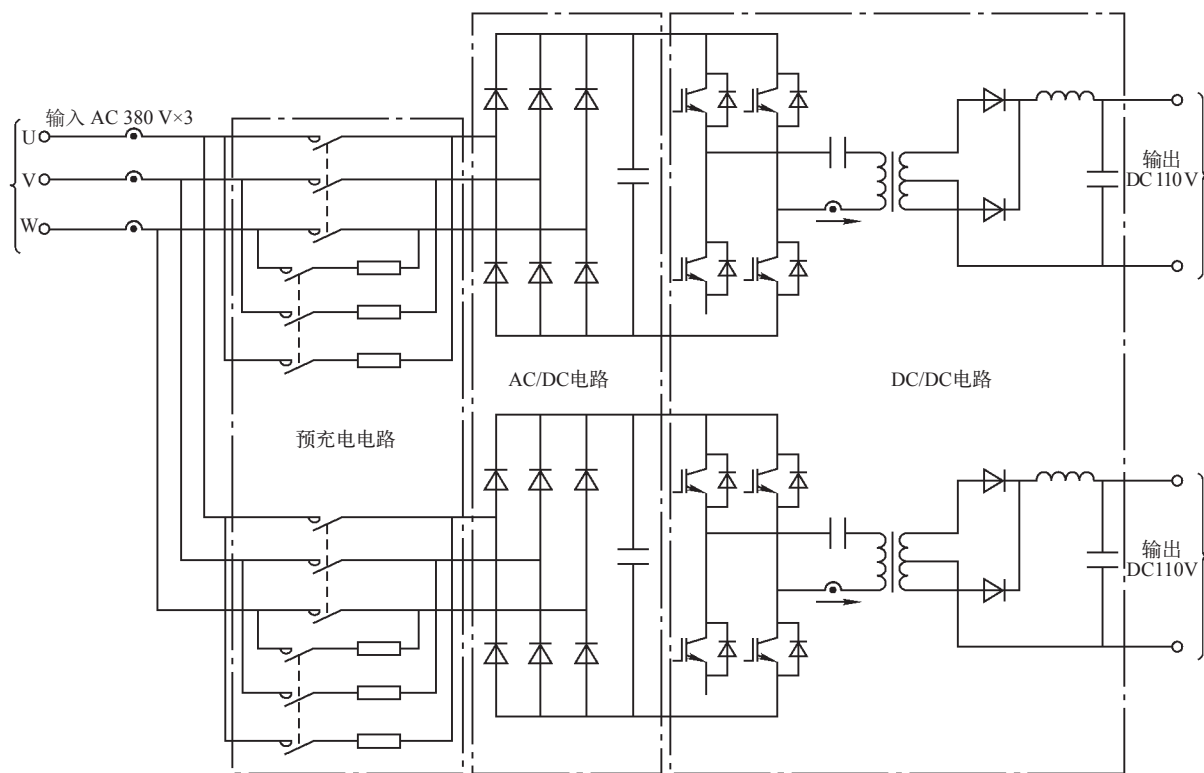


图1 动车组充电机的主电路原理图

Fig. 1 Main circuit schematic diagram of EMU charger

1.2 整体结构布局

充电机整体结构布局的主要依据是主电路原理图，此外还综合考虑了各个电气部件的冷却方式、质量分配、爬电距离、电磁兼容、电气间隙、检修空间和维护难易程度等关键的因素。其容量为60 kW，冷却方式为强迫风冷，使整个系统小型化、轻量化；充电机的安装接口为标准动车组充电机的统一型接口，系统兼容性好；箱体采用铝合金材质，具有轻量化、散热性良好等优点；其功率模块采用了复合碳化

硅IGBT混合器件，有助于降低装置的损耗，工作效率提高至93%，优于其他同类产品。

充电机的整体外形结构如图2所示。设备最大外形尺寸（长×宽×高）为3 066.5 mm×1 524 mm×651.5 mm，本体尺寸（长×宽×高）为2 000 mm×1 298 mm×651.5 mm，设备总重量为570 kg；其内部电气部件主要有滤波器、电流传感器组件、预充电组件、功率模块、二极管盘组件、熔断器、控制单元、冷却风机、控制连接器和过滤网等。充电机的内部

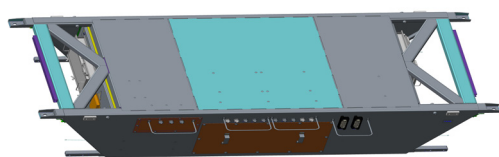


图2 充电机的外形

Fig. 2 Outline drawing of charger

结构布局如图3所示。

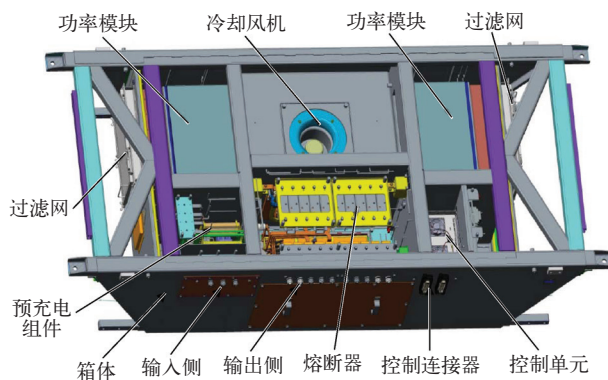


图3 充电机结构布局

Fig. 3 Charger structure layout

1.3 散热风道结构设计

该充电机采用模块化的设计原则，并采用两路并联设计及独立控制的方式，确保了系统冗余性。单台充电机内部有两组功率模块，功率模块采用抽屉式的安装方式，打开箱体门盖后便可以方便进行安装维护或更换；其功率模块IGBT采用混合碳化硅器件，从而提高开关频率，降低感性器件的体积重量以及损耗。功率模块采用强迫风冷的散热方式，使得充电机功率模块的体积小、重量轻及散热效率高。

功率模块作为动车组充电机内部的核心部件，其散热效果决定了整个充电机能否正常工作，因此有必要对功率模块的散热风道结构进行优化设计，进而确保充电机内功率模块等器件散热效率的最大化。经结构设计优化，开发充电机散热风道结构如图4所示。两组功率模块左右对称布置，冷却风机布置在功率模块的中间部位，外部冷空气分别由左右两侧的过滤网处进入风道，分别对两组功率模块的散热器进行冷却散热，然后在中间部位汇合，最后在离心风机的作用下从箱体底部出风口将热空气排至充电机箱体外部。

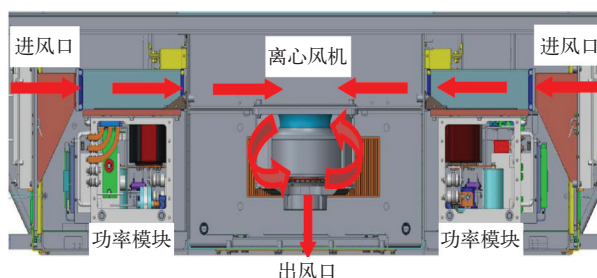


图4 充电机散热风道结构

Fig. 4 Cooling air duct structure of charger

2 热仿真有限元分析

风道结构设计对充电机的散热效果有很大的影响，因此有必要对优化后的风道结构的散热效果进行热仿真分析，根据流体流动所遵循的相关守恒定律，可以从理论上建立充电机散热结构的模型方程，并对其初始、边界条件进行设定，利用ANSYS有限元软件进行计算分析，从理论分析上得到充电机风道结构的散热效果。

2.1 建立数学模型方程

由质量守恒方程，可以将流体的连续方程表示为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中， t 为时间； ρ 为密度； u 、 v 和 w 为 x 、 y 和 z 三个方向上的速度矢量。

由动量守恒定律得到的运动方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} &= \frac{\partial P_{ij}}{\partial x_j} + g_i - f_i \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中， μ 为空气粘着系数； P_{ij} 为单位表面积力； g_i 为 i 方向单位体积的流体力； f_i 为 i 方向单位体积的流体阻力。

由雷诺方程、雷诺数计算得到标准 $k-\varepsilon$ 模型，其中耗散率 ε 可以定义为

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right) \quad (4)$$

$$\mu_i = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型的方程^[6-9]为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_b + G_k - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $G_k = \rho \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$; $G_b = \beta g_i \frac{\rho}{Pr_i} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i}$;

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T}; Y_M = 2\rho \varepsilon M_i^2; M_i = \sqrt{\frac{k}{a^2}}; a = \sqrt{\gamma RT}。$$

2.2 设定初始和边界条件

由气体动力学理论知识可知, 当马赫数 $M_a < 0.3$ 时, 空气即可视为不可压缩气体。

经计算本文中 M_a 为 0.11, 冷却空气为不可压缩, 所选冷却风机为离心风机, 风机特性曲线(流量-静压曲线)如图 5 所示。初始流量为 2 500 m³/h, 边界条件为光滑固体平面。

2.3 热仿真结果分析

由功率模块散热器和风道结构确定整个系统的阻力, 风机实际工作点为流量静压特性曲线与系统匹配后的交点, 结合系统的散热要求进行热场仿真分析计算。

图 6 为充电机散热风道的速度云图。左右两侧功率模块进风口滤网处的风量均设定为 1 250 m³/h 条件下, 进风口处的风速约为 2.6 m/s。此时, 进风口滤网处的风阻约为 110 Pa, 功率模块散热器风阻为 116 Pa, 二极管盘处及出风口滤网处风阻约为 150 Pa, 考虑其余风道阻力 100 Pa, 则系统总阻力约为 476 Pa。由图 6 可知, 该种散热风道结构内的速度场比较流畅, 且没有出现散热风路的阻塞、涡旋现象等。

图 7 为充电机散热风道内的温度云图, 环境温度设定为 45 ℃, 功率模块散热器基板的最大温度为 82.5 ℃, 温升为 37.5 ℃, 满足散热器基板最大温升 45 ℃ 的要求; 二极管散

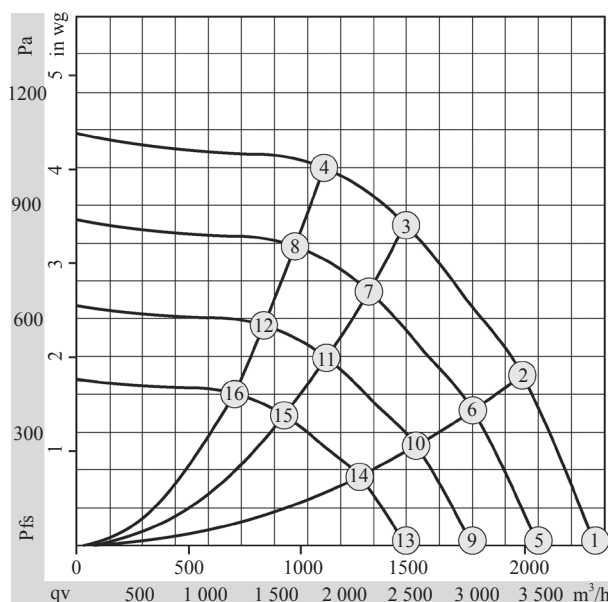


图5 风机特性曲线(流量-静压曲线)

Fig. 5 Fan performance curve

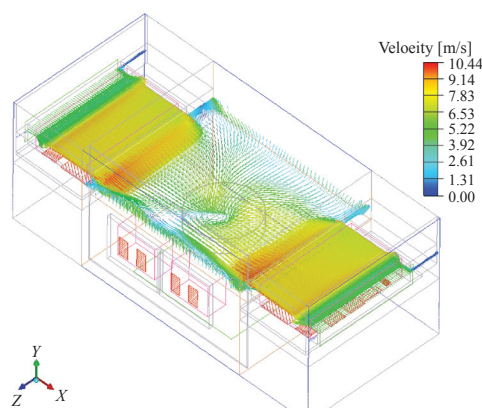


图6 充电机散热风道速度云图

Fig. 6 Velocity nephogram of cooling air duct of charger

热器基板的最大温度为 77.2 ℃, 最大温升为 32.2 ℃, 满足散热器基板最大温升 35 ℃ 的要求。因此, 功率模块散热器和二极管散热器均能满足设计要求, 风道结构设计及风机选型均满足设计要求。

3 强度仿真

动车组充电机的安装方式为车下吊装, 其结构特性对充电机内部电气部件及列车的运行安全至关重要, 因此需要对充电机箱体进行结构强度及振动模态分析, 以验证箱体强度是否满足设计要求。本节通过对充电机

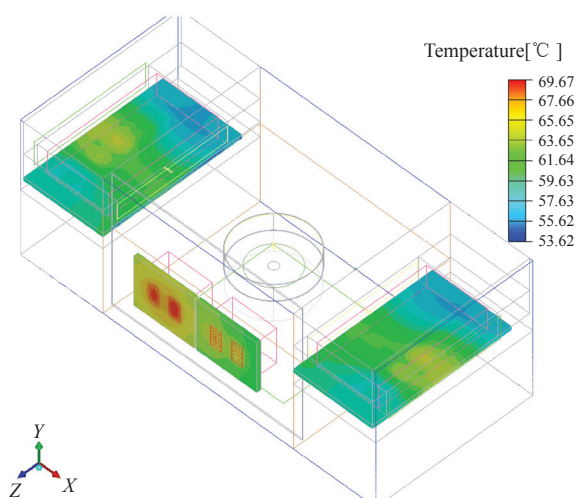


图7 充电机散热风道温度云图

Fig. 7 Temperature nephogram of cooling air duct of charger

箱体建立结构仿真模型并进行仿真计算，分析其力学性能。

3.1 仿真计算条件

首先对箱体的三维模型进行简化，生成几何模型，箱体各部位所用的材质有：铝合金5083-O、6005A-T6，其材料参数、屈服强度等取自国标GB/T 3880.2；箱体结构件为钣金件，使用壳单元进行离散，壳网格尺寸为10 mm，门板和质量较大的电气部件均简化为质量点。边界条件为：箱体通过吊耳安装孔与车体连接，安装孔处施加完全固定约束。依据标准EN 12663-1要求，施加静强度分析所用的工况，仿真分析软件为ANSYS Mechanical 18.2。

3.2 仿真计算结果

模态分析的主要目的是计算箱体结构的固有频率并确定箱体结构的振动形式^[10]，进而判定箱体结构的整体及局部刚度是否满足要求，通过计算机软件的模态仿真计算，本充电机的模态仿真分析计算结果如图8所示。其第一阶到第六阶振型对应的固有频率分别为40.2 Hz、43.5 Hz、57.5 Hz、60.3 Hz、62.4 Hz和64.5 Hz。

箱体结构设计要求最低阶的固有频率为30 Hz，本模态分析最低阶固有频率约为40 Hz，

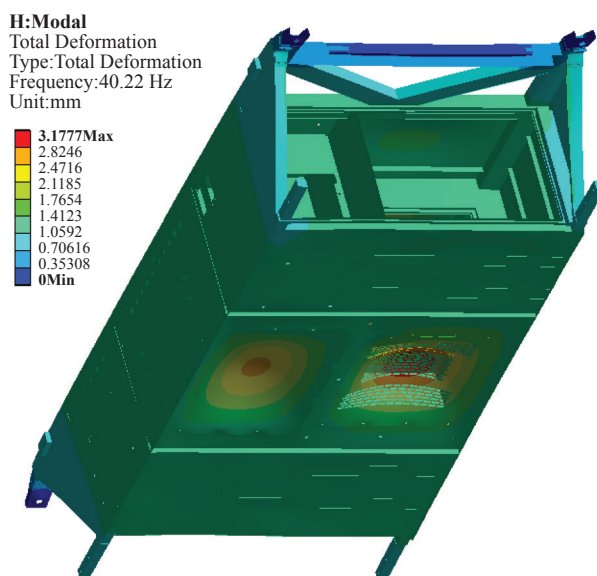


图8 模态仿真分析计算结果

Fig. 8 Results of modal simulation analysis

满足设计要求。

箱体结构静力学仿真计算结果如图9所示。结果表明，忽略安装孔处奇异应力后，箱体最大应力出现在垂直向下3 g工况下，箱体吊耳侧边的焊接处最大应力约为56 MPa，铝合金材质的屈服强度为125 MPa，安全系数为2.23，结构静强度安全系数高于1.15，满足充电机结构静强度设计要求。

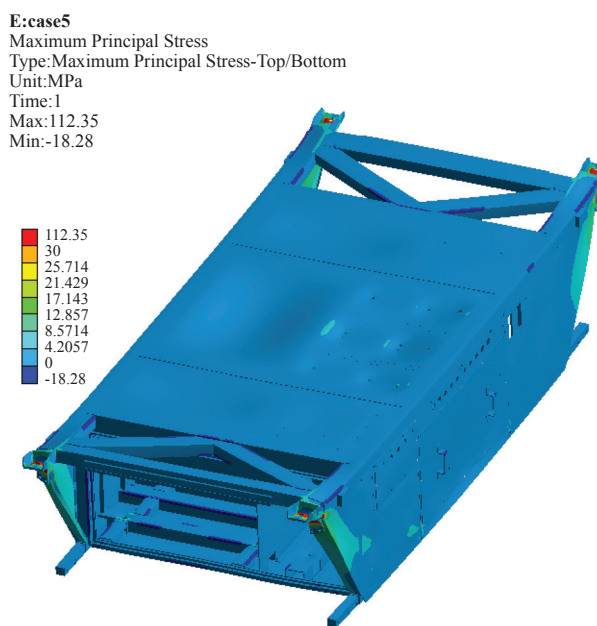


图9 应力分析计算结果

Fig. 9 Stress analysis calculation results

4 试验验证

通过上述仿真计算和分析结果，均从理论上验证了本文所研制的动车组充电机结构方案的合理性。为了进一步验证充电机结构设计的合理性、仿真结果的准确性以及产品的可靠性，在完成动车组充电机产品样机的研制后，进行了充电机的温升试验和冲击振动试验，本文所研制的充电机样机照片如图10所示。



图10 动车组充电机产品样机照片
Fig. 10 Photo of prototype of EMU charger

4.1 温升试验

在输入电压为三相AC 380 V，通电时间以各部件的温度达到饱和（1 h温度变化不超过1 K）为准，在额定负载为60 kW时连续工作模式下进行温升试验。充电机内部布置了多个热电偶温度探测点，连续运行4 h，热电偶以0.5 Hz的频率记录温升数据。

图11为充电机的温升试验曲线。横坐标为时间，纵坐标为温度值，从图11可以看出，随着时间 t 的变化，除了外界环境温度保持相对稳定外，其余各监测点的温度均在缓慢上升，但是因为每个监测点的发热功率不一样，散热效率也不同，每条温升曲线上升的趋势也不同。当充电机散热系统的功率与各个功率器件的损耗达到平衡后，温度上升又逐渐趋于平缓，并最终达到稳态，稳定后的各监测点的温度值也不同。各功率部件温度如下表所示。外界空气温度为26.4℃，功率模块散热器的最终稳定温度为66.1℃，温升为39.7℃，满足

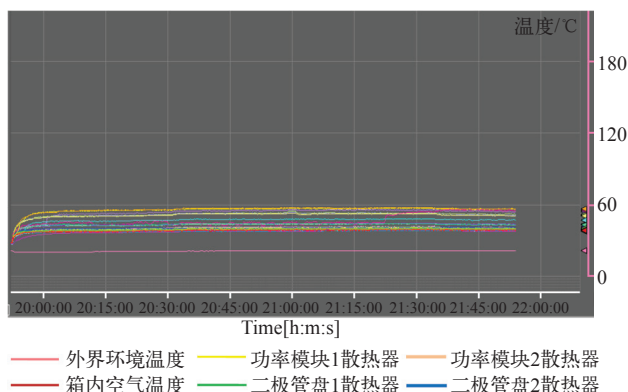


图11 充电机温升试验曲线

Fig. 11 Temperature rise test curve of charger

散热器最大温升45℃的要求，与仿真结果吻合；二极管散热器的最终稳定温度为59.7℃，温升为32.9℃，满足散热器最大温升值35℃的要求，与仿真结果吻合。该充电机在其最高的环境温度（45℃）下长时间工作时，散热结构能很好地满足系统的散热要求，充电机能够长时间稳定运行。

表 各个功率器件稳定后的温度

Tab. Temperature of each power device after stabilization

(单位:℃)

测量点	实测温度	实测温升	仿真温升
功率模块1散热器	64.6	38.2	36.3
功率模块2散热器	66.1	39.7	37.5
二极管盘1散热器	58.8	32.4	30.8
二极管盘2散热器	59.7	32.9	32.2
外界空气温度	26.4	/	/

4.2 冲击和振动试验

为了验证充电机产品的结构强度、仿真分析结果的准确性及结构设计的可靠性，对其进行冲击和振动试验，依据标准为IEC 61373—2010；试验量级为一类A级；充电机设备重量为570 kg；试验频率为 $f_1=4.25$ Hz， $f_2=127.55$ Hz；将充电机按实际吊装状态进行安装，与试验台体刚性连接，采用平均控制模式进行试验，试验结果表明柜体结构完全满足设计要求。

5 结束语

本文所研制的动车组充电机解决了大功率

充电机的散热难题，在重量、体积的功率密度（重量功率密度为 $0.105\ 2\ \text{kW/kg}$ ，体积功率密度为 $35.477\ 7\ \text{kW/m}^3$ ）上也有很大的优势，模块化的设计原则有利于各功能模块的更换、检修或维护。在充电机设计阶段，通过仿真分析手段可以有效指导充电机的设计及方案优化，节约研发成本，降低研发风险，最终通过相关试验的实际验证。结果表明采用本文所研制的动车组大功率充电机，满足产品的结构设计要求，具有较高的产品应用价值。

参考文献

- [1] 周帅, 张小勇, 黄芳军, 等. 一种动车组充电机的设计[J]. 大功率变流器技术, 2014(1): 13-17.
- [2] 陈颖, 张铁军, 贺正芸. 大功率蓄电池组充电器主电路设计[J]. 大功率变流技术, 2009(2): 35-37.
- [3] 张小勇, 周帅, 孙立辉, 等. 铁路客车DC/DC电源主电路的设计与分析[J]. 大功率变流技术, 2013(1): 47-52.
- [4] 曾明高, 严志勇, 张晓, 等. 地铁集成式辅助电源研制[J]. 机车电传动, 2014(1): 69-73.
- [5] 赵清良. 城轨地铁车辆辅助电源系统研究与发展[J]. 机车电传动, 2012(1): 52-57.
- [6] 陈宏, 冷丽英, 尹梅, 等. 功率模块风冷散热器性能计算方法研究[J]. 机车电传动, 2014(1): 26-28.
- [7] 刘大, 陈锦, 宋文举, 等. 牵引变流器内循环系统流场优化设计[J]. 大功率变流技术, 2017(3): 17-22.
- [8] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [9] 王福军. 计算流体动力学分析CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [10] 李碧钰, 丁杰, 谭渺, 等. 集成式辅助电源柜的设计及仿真分析[J]. 机车电传动, 2013(1): 48-54.

作者简介



周要培

周要培（1989—），男，工程师，从事轨道交通变流器、充电机等相关产品的结构研发工作。

（收稿日期：2019—11—04）**EA**