

具有散热结构的地铁列车再生制动 能馈变流器结构设计

周要培 魏 兴 王 斌 吴玲玲
(西安中车永电捷通电气有限公司技术中心,710016,西安//第一作者,工程师)

摘 要 介绍了地铁列车再生制动能馈系统的工作原理,给出了一种基于模块化设计思路的能馈变流器结构设计方案。通过建立变流器柜的三维结构仿真模型,对柜内散热系统进行了热场分析;通过柜内温升试验及风速测试,验证了变流器散热系统结构的合理性。试验及测试结果表明,再生制动能馈变流器体积小、重量轻,不仅满足了产品的设计要求,还解决了变流器柜内散热效果不好的问题。

关键词 地铁列车; 能馈变流器; 结构设计; 模块化; 热场仿真

中图分类号 U260.35+9

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.04.033

Structural Design of Metro Train Regenerative Braking Energy Feedback Converter with Heat-dissipation Structure

ZHOU Yaopei, WEI Xing, WANG Bin, WU Lingling

Abstract The working principles of metro train regenerative braking energy (MRBE) feedback system is introduced, a structural scheme design of MRBE feedback converter based on modular design idea is presented. Through establishing a 3D simulation model of converter cabinet, the thermal filed of internal cooling system is analyzed, and the rationality of internal cooling system is verified through experiment of the converter temperature rise and wind velocity. The results show that the MRBE feedback converter could fulfill the product design requests and solve the problems of poor cooling effects in converter cabinet owing to the small size and light weight.

Key words metro train; energy feedback converter; structural design; modularization; thermal field simulation

Author's address CRRC Xi'an YongeJieTong Electric Co., Ltd., 710016, Xi'an, China

能馈变流器作为地铁车辆再生制动能馈系统的关键组成部分,具有元器件多、柜体结构相对复杂以及发热的功率较大等特点。其主要的发热器

件(如 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)等)具有很高的发热功率密度。一旦这些热量没有得到快速有效的发散,就会引起变流器内部温度上升,进而引起内部电气部件工作温度上升。当柜内温度超过器件的允许温度后,会使能馈变流器发生故障,从而导致再生制动能馈系统停止运行,使其不能满足地铁车辆再生制动能量的吸收利用及稳定列车牵引网压的要求,间接影响了地铁列车的正常运行。因此,研究能馈变流器内部散热结构的合理设计具有重要意义。

目前,针对强迫风冷变流器散热结构的研究大部分都关注功率单元^[1-5],或重点研究散热器(包括风冷及水冷)的性能参数^[6-8],很少有报告或文献提出对能馈变流器内部散热系统结构进行研究。本文以再生制动能馈变流器内部结构布局为研究的对象,对变流器内部散热结构进行合理设计,运用有限元软件进行了热场仿真分析,并通过试验进行了验证,从而保证系统中各功率器件的正常运行。

1 能馈变流器的结构方案

1.1 再生制动能馈系统的工作原理

再生制动能馈系统包括高压开关柜、35 kV/900 V 变压器及能馈变流器等,其并网方案见图 1。

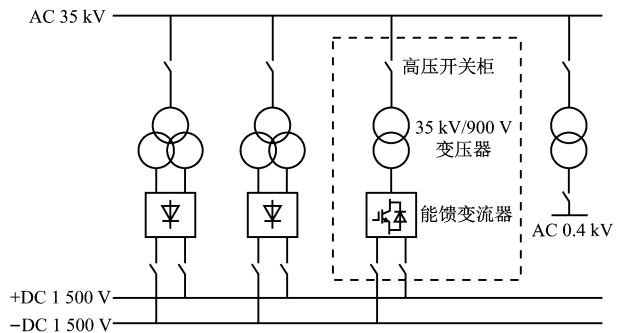
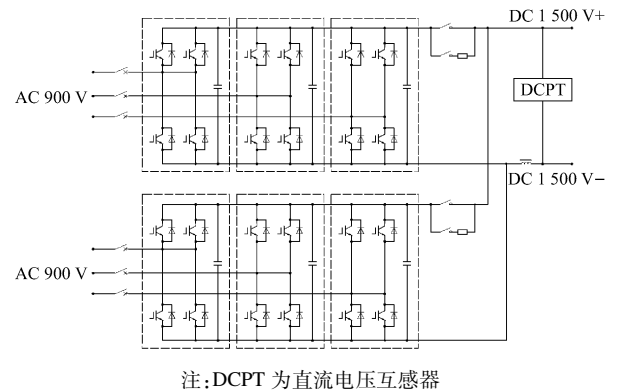


图 1 再生制动能馈系统并网方案

由图1可见,直流侧通过DC 1 500 V开关柜、负极柜同DC 1 500 V 直流接触网相连;交流侧经35 kV/900 V 变压器、高压开关柜同AC 35 kV 电网相连接。再生制动能量直接反馈至AC 35 kV 的电网中。

1.2 总体布局

再生制动能馈系统的能馈变流器主要包括1组四象限PWM(脉宽调制)整流器,并设置了带电显示电路、交流电气隔离电路、交流过压抑制电路、交流过流保护回路、交流充电电路、直流放电电路、直流过流保护回路及直流充电电路等。其主电路原理图如图2所示。



注:DCPT 为直流电压互感器
图2 能馈变流器的主电路原理图

能馈变流器主电路采用三相电压型两电平直交逆变电路,将输入的DC 1 500 V 直流电转换成电压、频率均可调的三相交流电,将再生制动能量直接回馈至AC 35 kV 电网。

能馈变流器主要由柜体、功率单元、风机、隔离开关、断路器、避雷器、熔断器、电磁接触器、充放电电阻、门极驱动电源组件及CT(电流互感器)组件等组成。

本文主要根据主电路原理图,对能馈变流器进行结构总体布局设计。此外,还考虑了电器件的电气间隙、爬电距离、重量的分配、通风散热条件、电磁兼容性、拆装的频率及检修的难易度等关键因素。能馈变流器电气部件的主要布局如图3所示。

能馈变流器布局设计的具体过程为:首先,根据电器件的体积、质量等因素,以及高低压电器件之间的电磁兼容性,将电器件用层状隔板分隔成不同的安装区域;然后,依据不同电器件的散热条件,来确定其散热的结构型式;最后,根据不同器件的可维修程度来确定电器件的拆装顺序。该能馈变流器采用模块化设计,方便了安装维护,实现了城

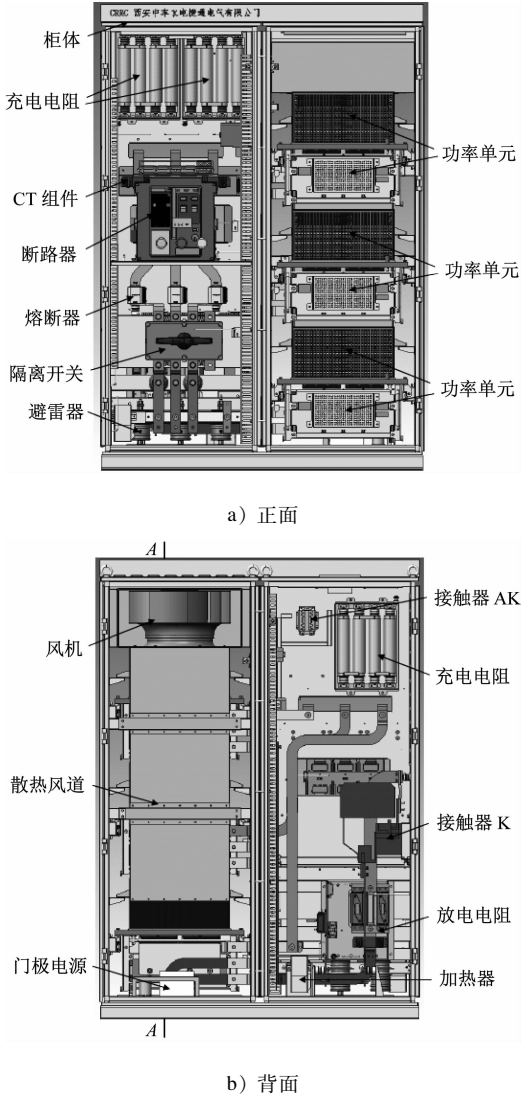


图3 5 能馈变流器电器部件分布图

市轨道交通列车所需要的再生制动能量反馈功能。

1.3 散热风道结构设计

每台能馈变流器均由3个功率单元构成。功率单元采用抽屉式安装方式,设有专门的安装滑轨,以便其安装维护或更换。功率单元采用复合相变+强迫风冷的散热方式,其冷却单元体积小、重量轻、散热效率高。

功率单元作为能馈变流器的核心部件,其散热性能对整个变流器能否正常工作起到至关重要的作用,因此有必要设计一种供功率单元散热用的风道结构^[12],以提高功率单元的散热效率。

本文所设计的能馈变流器散热风道结构如图4所示。3个功率单元共用1个风道和风机。在顶部离心风机产生的负压作用下,冷空气分别从能馈变流器柜正面的上部、中部和下部进入柜内,流经3个

功率单元的散热器并分别带走其热量。之后,热空气在竖直风道中汇集并向上穿过离心风机,然后从变流器顶部的背面排出。

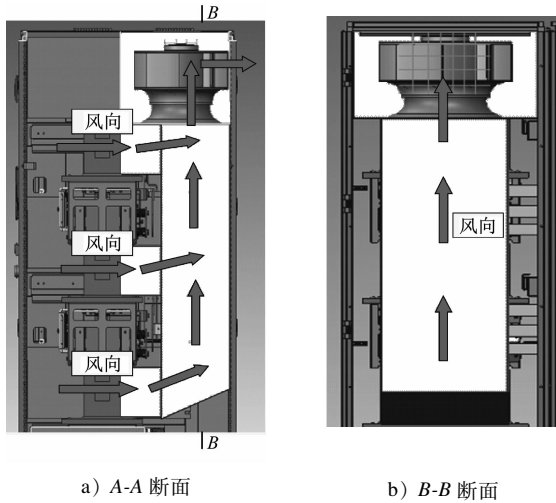


图4 能馈变流器散热风道结构

2 热场仿真分析

依据流体流动所遵循的能量守恒定律、质量守恒以及动量守恒定律,可以建立变流器柜内散热系统结构的数学模型方程,并对仿真模型的边界条件进行限定,对本文中所设计的散热结构进行仿真分析,以得到变流器内散热结构内流场的分布情况。

2.1 数学模型

气体在实际流动中应该遵循质量守恒定律、动量守恒定律及能量守恒定律。由质量守恒方程,流体的连续性方程为^[9-11]:

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

式中:

t ——空气流动时间;

ρ ——空气密度;

u, v, w —— x, y, z 三个方向上的空气速度矢量。

由动量守恒得到的运动方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} P_{i,j} + g_i - f_i \quad (2)$$

其中,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} P_{i,j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \\ &\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中:

u_i —— i 方向上空气速度矢量;

u_j —— j 方向上空气速度矢量;

μ ——空气粘着系数;

$P_{i,j}$ ——单位表面积力;

g_i —— i 方向单位体积的流体力;

f_i —— i 方向单位体积的流体阻力。

由雷诺方程及雷诺数计算可得,气体流动为湍流状态,故而数值的模拟计算采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,即在单方程模型的基础上引入单位质量空气的湍动能 k 及其耗散率 ε 。

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \right) \quad (4)$$

将湍流的粘度系数 μ_t 为:

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

式中:

C_μ ——经验系数,通常取 0.09。

由此可推导出标准 $k-\varepsilon$ 模型的数值方程为:

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

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}; G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i};$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}; Y_M = 2\rho \varepsilon Ma^2, Ma = \sqrt{k/c^2},$$

$$c = \sqrt{KRT}$$

式中:

Ma ——马赫数;

S_k ——用户自定义源项;

T ——空气温度;

c ——声速;

K ——空气绝热指数;

R ——气体常数。

2.2 初始条件及边界条件

依据气体动力学论,如果马赫数 $Ma < 0.3$,可以将空气视为不可压缩气体。经计算, $Ma = 0.11$,故可以将空气等效为不可压缩、饱和的气体,其控制方程为稳态方程,且湍流模型为标准 $k-\varepsilon$ 模型。

根据经验选择的仿真风机特性曲线如图5所示。其额定流量设为 $8000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。热场仿真的初始条件设定如下:风机的初始流量为 $8000 \text{ m}^3/\text{h}$,采用无滑移壁面边界条件。

2.3 计算结果及分析

根据能馈变流器散热系统结构,建立其内部散

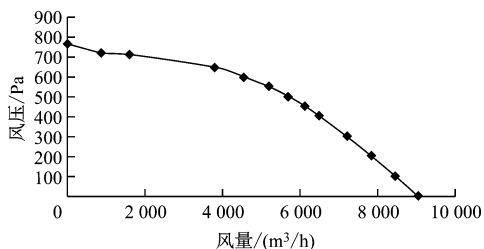


图5 仿真风机特性曲线

热三维仿真模型(如图6所示),并进行仿真计算。流体域采用四面体网格对仿真模型划分网格,并对柜内局部流道完成细化,保证了仿真分析计算的准确性、收敛性。

图7为能馈变流器内空气流经3个功率单元散热器时的速度云图($X=310\text{ mm}$ 平面)。从图7可知,散热风道结构下的速度场在变流器内的流动比较流畅,并没有出现风路的阻塞或涡旋等。上、中、下3层功率单元散热器入口截面处的速度分布不一样:上层散热器的空气主流区域靠近翅片上部,中层散热器的空气主流区域在散热器高度方向分布比较均匀,下层散热器的空气主流区域靠近翅片的中下部。

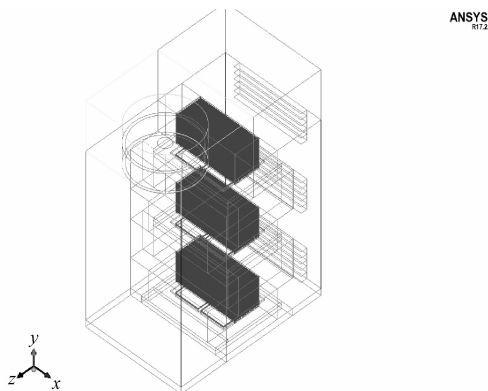


图6 变流器三维仿真模型

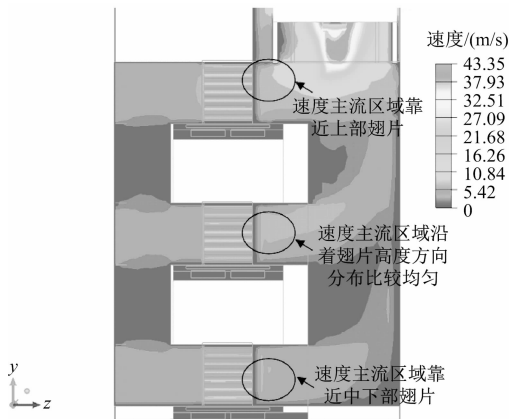


图7 变流器内空气速度云图

根据仿真计算结果,通过中层散热器的流量比上层的流量少了2.6%,通过下层散热器的流量比上层的流量少了4.9%。对功率单元的冷却效果是由散热器冷却空气流量和速度场分布共同作用的效果。3层的空气流动速度方差一致减小,说明气流速度的不均匀分布程度一致减小。

图8为变流器内3个功率单元所对应的基板温度云图。从图8可知,上、中、下3个功率单元对应基板的最大温升分别为 $29.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $29.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30.58\text{ }^{\circ}\text{C}$,对应IGBT的最大温升分别为 $38.746\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $39.031\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $39.202\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。虽然通过3层的空气流量有差别,但是由于上层散热器的冷却空气绝大部分分布在翅片上部,故3个功率单元的散热效果差距很小,最大温差仅为 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可见3个功率单元的均温性比较好,有利于3个功率单元保持相近的寿命。

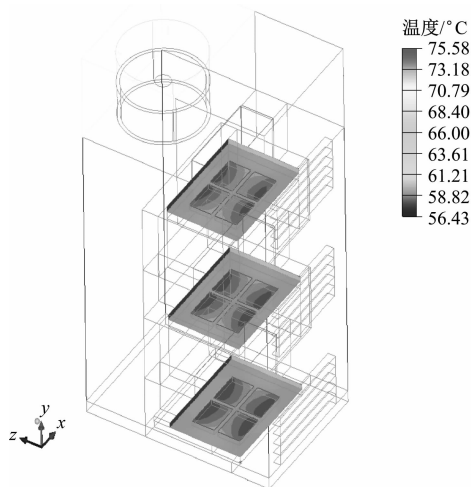


图8 功率单元对应的基板温度云图

3 试验验证

仿真计算及数据分析从理论上验证了本文所设计的变流器散热系统风道结构的合理性。为了进一步验证设计的合理性及产品的可靠性,在完成能馈变流器样机的研制后,进行了散热系统内部风速测试及变流器的温升试验。

3.1 风速测试

在3个功率单元的进风口处各取3个点对风速进行测量,并取测量平均值进行分析。试验数据与仿真结果的对比结果如表1所示。

由表1可知,试验风速略小于仿真风速,这是由于在建立三维仿真模型时,对散热系统内部结构进

行了简化处理,系统的流阻比实际流阻偏小;测量风速与仿真风速的相对误差都不超过 7%。实际测量结果显示,各处风速均在 3 m/s 左右,满足系统散热要求。

表 1 功率单元进风口处风速测量数据与仿真数据比较			
位置	测量风速/ (m/s)	仿真风速/ (m/s)	相对误差/%
上层	3.22	3.43	6.5
中层	3.16	3.34	5.6
下层	3.05	3.26	6.9

3.2 温升试验

能馈变流器主电路上电后,以并网逆变方式运行,并在额定功率为 1 MW、连续工作模式下进行温升试验。在变流器内部的 3 个功率单元基板及 IGBT 等处设置了多个热电偶温度探测点,具体布置见图 9。能馈变流器启动后,在额定工况下连续运行 2 h,由温度记录仪以 0.5 Hz 的频率记录温度数据,并可绘制能馈变流器试验温升曲线。

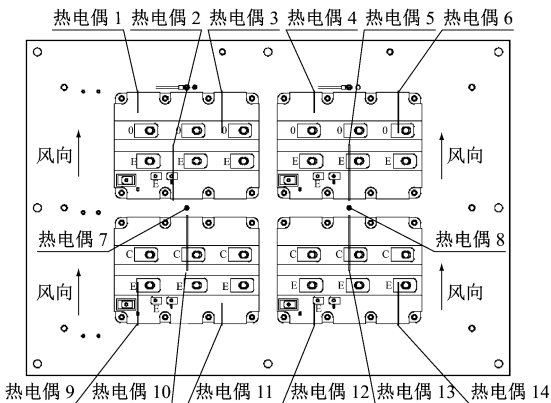


图 9 功率单元基板热电偶布置位置

由绘制的温升曲线可知,随着时间的变化,除了环境温度保持稳定之外,其余各点的温度都在逐步上升,由于各监测点的发热功率不一样,稳定后的温度也不一样。单个功率单元散热器基板上布置有 4 个 IGBT,每个 IGBT 的发热功率都随时间在变化。从温升曲线的上升趋势看,变流器启动后,各模块温度开始快速上升;经过大约 10 min 后,变流器的散热系统功率和各功率器件的损耗达到平衡,温度变化又趋于平缓,最终达到稳定状态。环境温度一直稳定在 17℃ 左右,散热系统温度稳定

后,热电偶 1~6 的监测温度要高于对应热电偶 9~14 的监测温度。这是因为热电偶 1~6 布置在散热器的出风口处,而热电偶 9~14 布置在散热器的进风口处。最高监测温度为 47.6℃,最高温升为 30.6℃,与仿真结果基本吻合,且低于基板所允许的最大温升 40℃。这说明能馈变流器能正常工作,验证了变流器内部散热系统结构设计的合理性。

4 结语

本文通过对再生制动能馈变流器的结构布局进行研究分析,提出了一种具有全新散热系统的能馈变流器结构方案,通过热场仿真分析和温升试验均验证了散热系统结构的可用性及可靠性。该设计方案不仅解决了变流器柜内散热效果不好的难题,而且在体积上以及重量上也具有很大的优势,主要的功能模块拆卸容易,且方便维护,具有较高的实用价值。

参考文献

[1] 丁杰,唐玉兔. 地铁车辆牵引变流器的热管散热器的数值模拟[J]. 大功率变流技术,2012(5):31.

[2] 肖晋,朱新华,贾艳玲,等. 某功率单元强迫风冷散热分析和优化[J]. 电子器件,2015(4):283.

[3] 余小玲,张荣婷,冯全科. 大功率模块用新型冷板的传热性能研究[J]. 电力电子技术,2009(12):79.

[4] 葛隼,何闻. 晶体管水冷散热器的热分析及仿真研究[J]. 机床与液压,2008,36(5):161.

[5] 张晓,周文勇,刘长清. HX_D1C 电力机车辅助变流器风道数值模拟及试验研究[J]. 机车电传动,2011(2):18.

[6] 丁杰,张平. IGBT 水冷散热器试验与仿真[J]. 华北电力大学学报,2015(1):97.

[7] 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.

[8] 孙世梅,张红. 热管换热器流动与传热 CFD 模拟及试验[J]. 南京工业大学学报,2004,26(2):62.

[9] 王福军. 计算流体力学分析 CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:1.

[10] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:6.

[11] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.

[12] 周要培,崔元虎,魏兴等. 变流器柜:201720998423.6[P]. 2018-2-27.

(收稿日期:2018-07-17)