

# 城轨列车再生制动能量回馈变流器的研制

周要培, 魏 兴, 王 斌, 吴玲玲

(西安中车永电捷通电气有限公司, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 分析了城轨列车再生制动能量回馈系统的工作原理, 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仿真模型, 对柜内散热系统进行了热场分析。然后通过变流器温升试验验证了柜内散热系统的可用性和可靠性, 结果表明再生制动能量回馈变流器满足产品设计要求, 解决了变流器柜散热效果不好的难题, 在体积和重量上也有很大的优势。

**关键词:** 城轨列车; 能馈变流器; 结构设计; 模块化; 热仿真

## Design of metro-train regenerative braking energy feedback converter

ZHOU Yaopei, WEI Xing, WANG Bin, WU Lingling

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

**Abstract:** The working principles of the metro-train regenerative braking energy(MRBE) feedback system is analyzed, and a structural scheme design of MRBE feedback converter based on modular design idea is presented. A 3D simulation model of converter cabinet is established, and thermal simulation of internal cooling system is analyzed. Then the availability and reliability of internal cooling system are verified by converter temperature rise experiment, the results show that the MRBE feedback converter meets the product design demand, solving problem of bad cooling effects in converter with significant advantages in volume and weight.

**Key words:** metro-train; energy-feedback converter; structural design; modulization; thermal simulation

## 0 引言

能馈变流器作为地铁车辆再生制动能量回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, 其中主要的发热器件如IGBT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地发散, 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, 会造成能馈变流器发生故障, 从而导致再生制动能量回馈系统停止运行, 致使其不能满足地铁车辆再生制动能量的吸收利用及稳

定列车牵引网电压的要求, 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系统的合理设计具有重要意义。

当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<sup>[1-5]</sup>, 或重点研究散热器(包括风冷及水冷)的性能参数<sup>[6-8]</sup>, 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。

本文以再生制动能量回馈变流器内部结构布局为研究对象, 对变流器内部散热结构进行合理设计, 并运用Ansys Fluent有限元软件进行了热

场仿真分析,并通过风速测试以及变流器柜内的温升试验进行了验证,从而保证系统中各个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变压器和能馈变流器等,其并网方案如图1所示。直流侧通过DC 1 500 V开关柜、负极柜与DC 1 500 V直流接触网相连;交流侧经35 kV/900 V变压器、高压开关柜与AC 35 kV电网相连接,将再生制动的能量直接反馈至AC 35 kV电网中<sup>[9-13]</sup>。

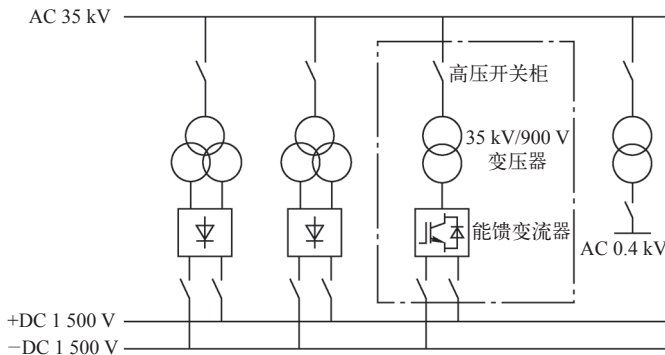


图1 再生制动能馈系统并网方案

Fig. 1 Connect-in strategy of MRBE feedback system

### 1.2 总体布局

再生制动能馈变流器主电路原理图如图2所示。主要包括一组四象限PWM整流器,并设置带电显示电路、交流电气隔离电路、交流过电压抑制电路、交流过电流保护回路、交流充电电路、直流放电电路、直流过电流保护回路和直流充电电路。

再生制动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、门极驱动电源组件以及CT组件等组成。

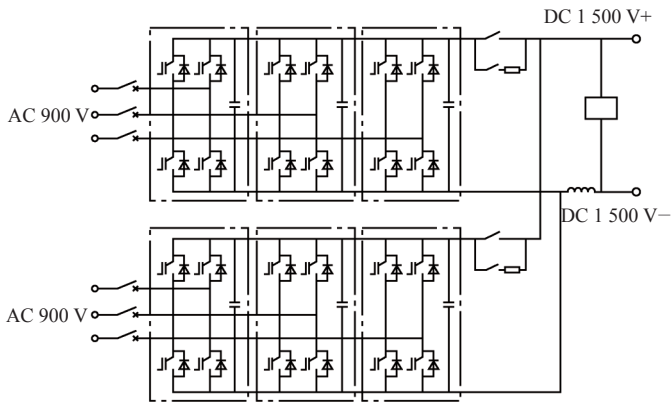


图2 能馈变流器的主电路原理图

Fig. 2 Main circuit principle of energy-feedback converter

能馈变流器的结构总体布局的主要根据是主电路原理图,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、拆装的频率以及检修的难易度等关键因素。设计的具体过程为: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;再依据不同电器件的散热条件,来确定其散热的结构型式;最后再根据不同器件的可维修程度来确定电器件的拆装顺序。该变流器内部结构均为模块化设计,方便了安装维护,实现了城轨列车所需要的再生制动能量反馈功能。能馈变流器的结构配置如图3、图4所示。

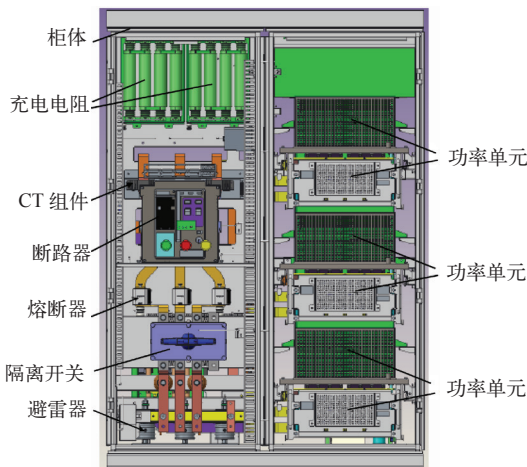


图3 能馈变流器电器部件分布图(正面)

Fig. 3 Distribution of electrical components in energy-feedback converter(front view)

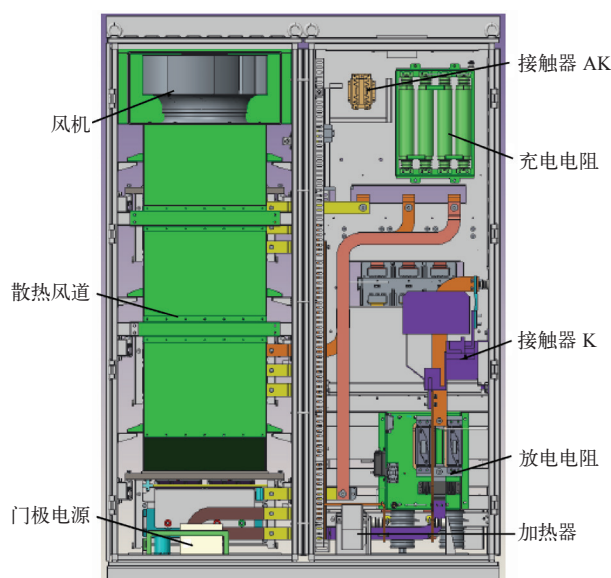


图4 能馈变流器电器部件分布图(背面)

Fig. 4 Distribution of electrical components in energy-feedback converter(back view)

### 1.3 散热风道结构设计

该能馈变流器采用模块化设计, 每台变流器均由3个功率单元构成, 功率单元采用抽屉式安装方式, 并设计有专门的安装滑轨, 便于功率单元的安装维护或更换; 功率单元采用复合相变+强迫风冷的散热方式, 冷却单元体积小、重量轻和散热效率高。

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<sup>[17]</sup>, 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5所示。本方案中3个功率单元共用一个风道和风机, 图5中箭头方向为空气流动方向, 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, 并流经3个功率单元的散热器, 分别带走3个功率单元的热量后, 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。

## 2 热场仿真分析

依据流体流动所遵循的能量守恒定律、质

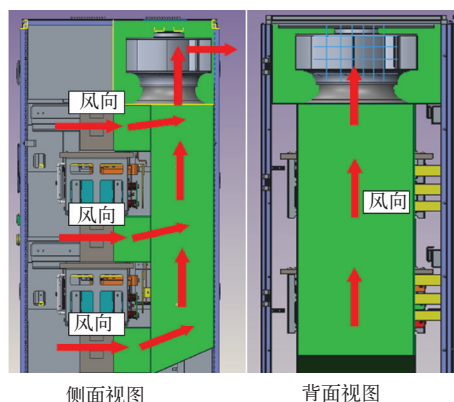


图5 能馈变流器散热风道结构

Fig. 5 Structure of radiating air duct in the energy-feedback converter

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、动量守恒定律以及能量守恒定律。由质量守恒方程, 将流体的连续性方程用式(1)表示<sup>[14-16]</sup>

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

式中,  $t$ 为时间;  $\rho$ 为密度;  $u$ 、 $v$ 和 $w$ 为 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 3个方向上速度矢量。

由动量守恒得到的运动方程为

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

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

式中,  $\mu$ 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。

由雷诺方程及雷诺数计算可得, 本文所研究的气体流动为湍流状态, 故而数值的模拟计算采用标准模型; 实际上标准模型是双方程模型中的一种, 即在单方程模型的基础上引入湍

动能及其耗散率方程。此模型方程由Launder以及Spalding于1972年首次提出<sup>[14-16]</sup>。该模型中的耗散率 $\varepsilon$ 可以定义为

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

将湍流的粘度系数 $\mu_t$ 可表示为 $t$ 、 $\varepsilon$ 的方程，计算公式为

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

由此可推导出标准 $t$ - $\varepsilon$ 模型的数值方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \\ G_k &= \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}; G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}; \\ \beta &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}; Y_M = 2\rho \varepsilon M_t^2, M_t = \sqrt{k/a^2}, a = \sqrt{\gamma RT} \end{aligned} \quad (6)$$

## 2.2 初始条件及边界条件

依据气体动力学理论，如果马赫数 $M_a < 0.3$ ，可以将空气视为不可压缩气体。本文中经计算， $M_a = 0.11$ ，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，且湍流模型为标准模型。

根据既有产品的设计经验，本文所选的风机特性曲线如图6所示，其额定流量设定为8 000 m<sup>3</sup>/h。热场仿真的初始条件设定如下：风机的初始流量为8 000 m<sup>3</sup>/h，采用无滑移壁面边界条件。

## 2.3 计算结果及分析

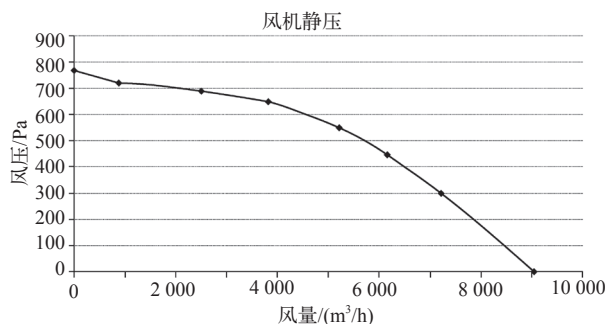


图6 风机的特性曲线

Fig. 6 The performance curves of fan

根据能馈变流器散热系统结构，建立其内部散热三维仿真模型如图7所示。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，网格划分后利用本文2.1节中数学模型方程，并选取2.2节中的初始条件、边界条件后进行仿真计算。

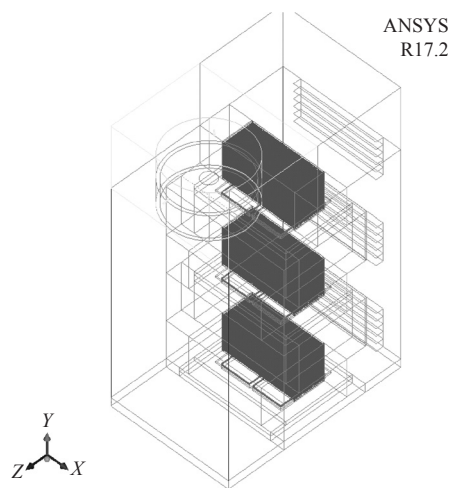


图7 变流器三维仿真模型

Fig. 7 The 3D simulation model of converter

图8为能馈变流器内流经3个功率单元散热器的速度云图（ $X=310$  mm平面）。由图8可知，本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、中和下三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。

经过计算分析可以得出，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%。但是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，上、中和下三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9为变流器内3个功率单元所对应的基板温度云图。由图9可知，上、中和下3个功率单元对应基板的最大温升分别为29 K、29.96 K和

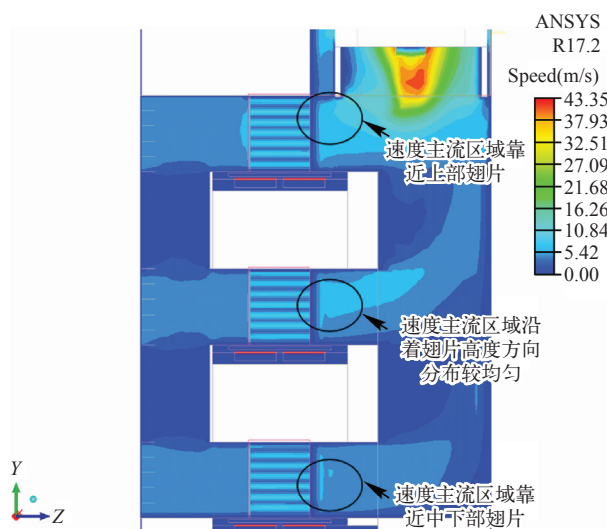


图8 变流器内空气速度云图

Fig. 8 Air velocity cloud picture in the converter

30.58 K, 对应IGBT的最大温升分别为38.746 K、39.031 K和39.2024 K。虽然通过三层的流量有差别,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的原因,导致本散热系统结构中3个功率单元的散热效果差距很小,3个功率单元的最大温差为0.456 8 K,因此该种结构下3个功率单元的均温性比较好,这有利于3个功率单元保持相近的寿命。

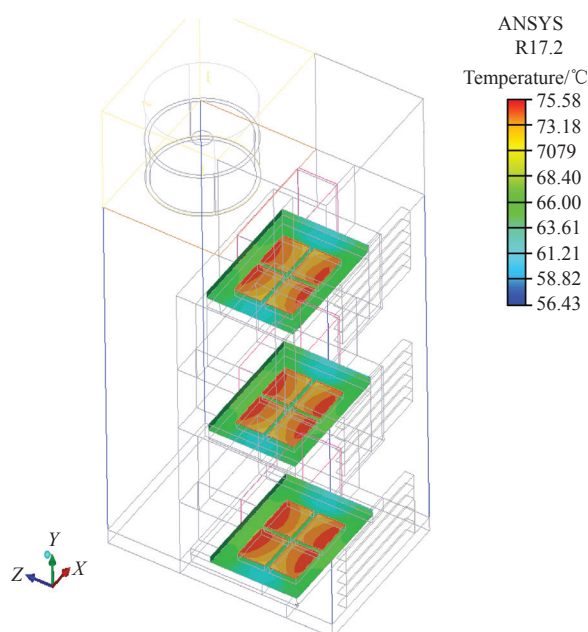


Fig. 9 Temperature rise cloud picture of the base plate

### 3 试验验证

通过上述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,本产品样机照片如图10所示。



图10 能馈变流器样机照片

Fig. 10 The prototype picture of energy-feedback converter

#### 3.1 风速测试

为了验证变流器散热系统内部风速是否满足设计要求,需要进行风速测量试验。测试3个功率单元进风口的风速大小,在上、中和下3个功率单元的进风口处各取3个点进行测量,最后取测量的平均值进行分析。将试验数据与仿真结果进行对比,结果如下表所示。

表 功率单元进风口处风速测量数据与仿真数据对比

Tab. Comparison of air velocities at the air inlet of power unit between measured data and simulated data

| 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     |

由上表可以看出，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。

3.2 温升试验

在能馈变流器主电路上电后，按并网逆变方式运行，在额定功率1 MW连续工作模式下进行温升试验。变流器内部布置了多个热电偶温度探测点，分别涉及3个功率单元基板及IGBT的不同位置，热电偶的具体布置如图11所示。起动能馈变流器后，在额定工况下连续运行2 h，温度记录仪以0.5 Hz的频率记录温度数据。

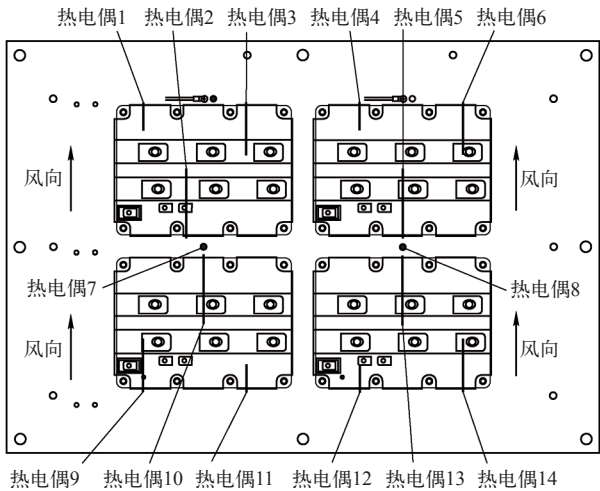


图11 功率单元基板热电偶布置位置  
Fig. 11 The thermocouple arrangement position on base plate of the power unit

图12为能馈变流器试验温升曲线。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，由于各个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，变流器起动后，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，温度上升又趋于平缓，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监测点的温度要高于对应热电偶9~14监测点的温度，如热电偶3监测点的温度为47.6℃，热电偶11监测点的温度为39.9℃，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。温度监测点的最高温度为47.6℃，最高温升为47.6℃-17℃=30.6℃，与仿真计算的数据基本吻合，且小于基板所允许的最大温升40 K，说明了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。

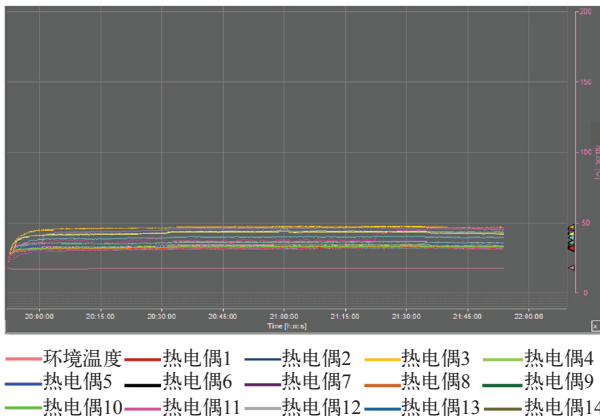


图12 变流器内温升试验曲线  
Fig. 12 The curves of temperature rise experiment in converter

4 结束语

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)：31-33．  
[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): 283-286.
- [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): 79-81.
- [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): 161-164.
- [5] 张晓, 周文勇, 刘长清. HXD1C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): 18-21.
- [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): 97-100.
- [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): 26-28.
- [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): 62-65.
- [9] 王宇, 杨浩, 谢晔源, 等. 一种兼有融冰功能的城轨再生电能回馈系统[J]. 电气应用, 2017, 36(9): 30-32.
- [10] 陈世锋. 储能变流器主电路参数优化设计[J]. 电气应用, 2017, 36(11): 16-17.
- [11] 何治新. 城市轨道交通UPS应用探讨 采用集中式UPS供电系统应确保可靠性[J]. 电气应用, 2017, 36(2): 13-14.
- [12] 刘强兴, 田家运, 韩德斌, 等. 35 kV变电站装配式建设方案研究[J]. 电气应用, 2017, 36(1): 89-93.
- [13] 张哲. 改善电能质量 提高用电效率[J]. 电气应用, 2018, 37(8): 10-12.
- [14] 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.
- [15] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [16] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [17] 周要培, 崔元虎, 魏兴等. 变流器柜: ZL 2017 2 0998423.6[P]. 2018-02-27.

#### 作者简介



周要培

周要培(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市轨道交通方向变流器研发。

(收稿日期: 2018-07-26) **EA**