

地铁车辆用电容储能装置的研制

周要培, 王 斌

(西安中车永电捷通电气有限公司技术中心, 陕西 西安, 710016)

摘要: 主要介绍了地铁车辆用电容储能系统的工作原理, 给出了一种基于模块化设计原则的电容储能装置结构设计方案, 通过建立储能装置的三维结构仿真模型, 对其散热结构进行了热场仿真分析, 通过升温试验、风速测试等验证了散热结构的合理性。试验结果表明电容储能装置满足产品的设计要求, 解决了装置内散热效果不好的问题, 且在体积、功率等方面具有较大的优势。

关键词: 地铁车辆; 电容储能装置; 结构设计; 模块化; 热仿真

Design of metro-vehicle capacitor energy storage device

ZHOU Yaopei, WANG Bin

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

Abstract: The working principle of the metro-vehicle regenerative braking energy capacitor storage system is analyzed, and a structural scheme design of capacitor energy storage device(CESD) based on modular design principles is presented. A 3D simulation model of CESD is established, and thermal simulation of internal cooling system is analyzed; Then the rationality of internal cooling system is verified by device temperature rise experiment and wind velocity test, the results shows that the CESD fulfills the product design request, and solves the problem of bad cooling effects in CESD with major superiority in volume and power.

Key words: metro-vehicle; capacitor energy storage device; structural design; modulization; thermal simulation

0 引言

地铁车辆的站间距很短, 车辆在运行过程中需要频繁起动、制动, 会带来电网电压波动的问题^[1-2]。电网电压的波动特别是电网电压的升高对车站设备及车辆的运行很不利, 因此如何减小地铁车辆牵引供电系统中的电网电压波动已成为轨道交通领域讨论的热点问题。目前, 国内外常采用制动能量吸收装置来解决该问题, 其中以电阻耗散装置的应用较为普遍, 但其只解决了电网电压升高问题, 却没有考虑电网电压下降的问题^[3-5]。若采用储能装置将制动能量

进行储存, 并在列车起动取流时将所储存能量释放至牵引电网, 则可避免直流电网电压的下降, 解决电网电压波动问题。

储能装置的储能方式有多种, 如飞轮储能、电容储能等^[6-8], 由于飞轮制造工艺难度大、造价过高等因素, 其在国内外均没有大范围推广^[9]。超级电容是一种先进的高能量储存元件, 具有容量大、体积小、寿命长及组合方便等特点。因此, 提出了一种电容储能装置, 该装置主要由直流控制柜、变流器柜和电抗器柜组成, 本文以电容储能装置内部结构布局为研究对象, 对装置内

部散热结构进行合理的布局，并对其工作原理和控制策略等进行了分析，通过仿真和现场试验，对其实际效果进行了验证。

1 电容储能装置的结构方案

1.1 电容储能系统的工作原理

电容储能系统包括高压开关柜、电容储能装置和超级电容器等，其并网方案如图1所示。

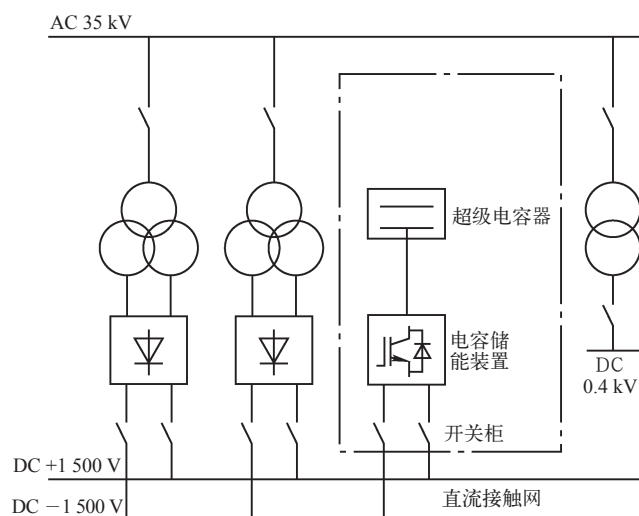


图1 再生制动储能系统并网方案

Fig. 1 Connect-in strategy of the CESD system

地铁列车制动时，再生制动能量会引起直流接触网电网电压升高，储能装置检测到直流接触网电压满足起动条件时，开启充电功能，将再生制动能量存储在超级电容器中；列车牵引时，牵引吸收电网的大量能量会导致直流接触网电压降低，储能装置检测到直流接触网电压满足起动放电条件时，开启放电功能，将超级电容器储存的能量直接释放到直流接触网，稳定直流接触网电压。

1.2 总体布局

再生制动储能装置主电路原理图如图2所示，主要包括直流滤波电路、直流电流显示电路、直流过电压抑制电路、直流电气隔离电路、直流电压显示电路和双向半桥电路等。

再生制动储能装置主电路采用四组双向半桥电路，通过载波移相技术减小纹波电流，将直流

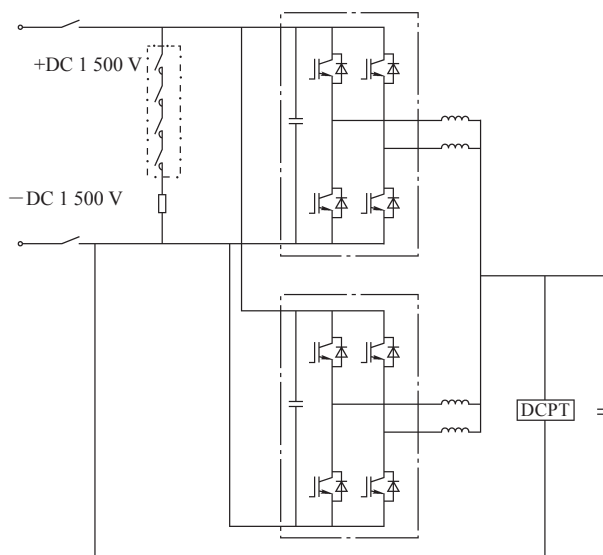


图2 电容储能装置的主电路原理图

Fig. 2 Main circuit principle of the CESD

接触网输入的1 500 V直流电变换成电压、频率均可调的直流电，将再生制动能量储存至超级电容器中。电容储能装置主要由柜体、功率单元、控制单元、风机、隔离开关、放电电阻、门极电源、电抗器以及电源等组成。

电容储能装置结构布局的主要依据是主电路原理图，此外还综合考虑了电器元件的电气间隙、爬电距离、重量分布、通风散热、电磁兼容、拆装频次及检修频率等关键因素。设计的具体过程为：先根据主电路中电器元件的顺序及高、低压电器元件之间的电磁兼容性，将电器元件用层状隔板分隔成不同的安装隔室；再依据不同电器元件的散热要求来确定其安装、散热的结构形式；最后再根据不同电器元件的检修频率来确定电器元件在不同隔室的安装顺序。该装置内部部件均采用模块化设计原则，方便了后续的检修维护，实现了地铁列车所需要的再生制动能量储能功能。电容储能装置的结构配置如图3、图4所示。

1.3 工作原理结构拓扑

电容储能装置的工作状态分为吸收能量充电与释放能量放电两种工作状态。当地铁制动时，机械能转化为电能，牵引逆变器工作于整流

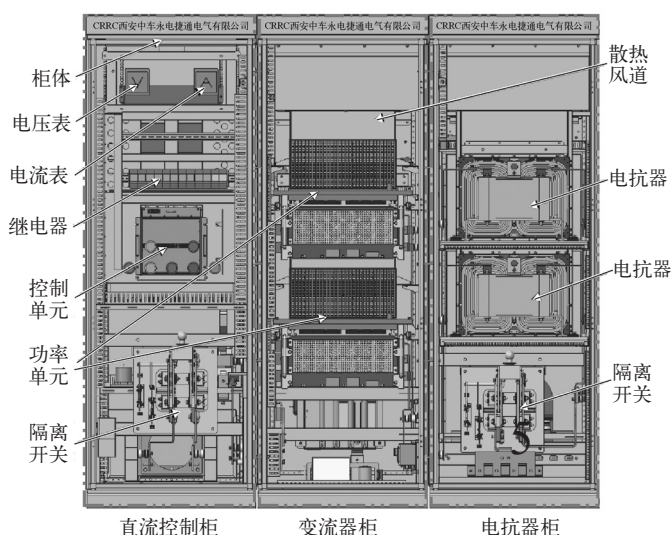


图3 电容储能装置电器部件分布图（正面）

Fig. 3 Distribution of electrical components in the CESD (front view)

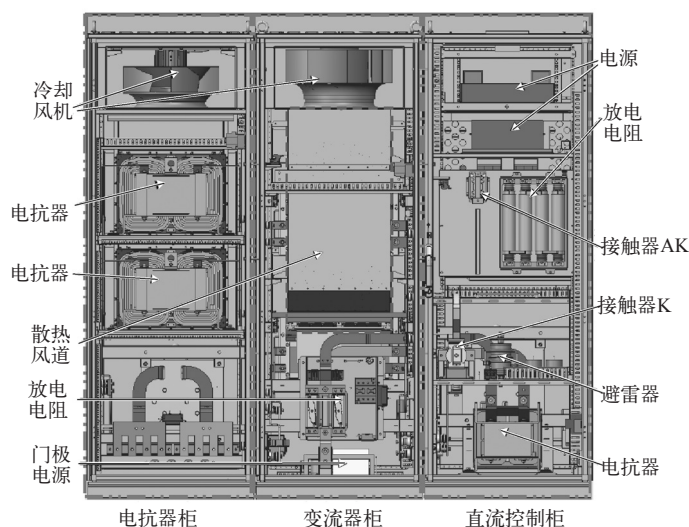


图4 电容储能装置电器部件分布图（背面）

Fig. 4 Distribution of electrical components in the CESD (back view)

发电模式，电流从逆变器流向母线侧，同时引起DC 1 500 V母线电压升高，储能单元会检测到电流从牵引逆变器流向母线，然后开启吸收充电工作，将高压能量吸收存储至锂离子电容器。当地铁牵引时，DC 1 500 V负载加重，逆变器工作于逆变模式，电流从母线流向牵引逆变器，同时电压被拉低。此时储能系统检测到电流从母线流向牵引逆变器，储能系统开启放电工作，将锂离子电容器的能量释放至DC 1 500 V电网。放电时，放电电流走向如图5所示。

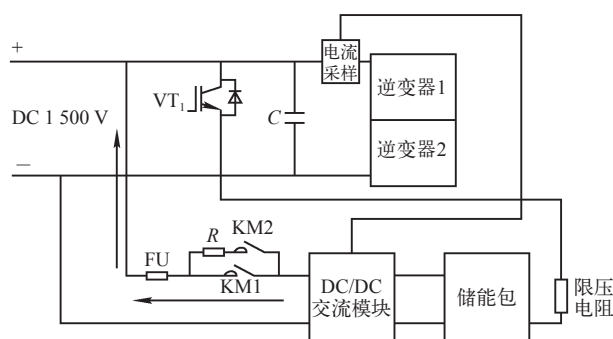


图5 放电电流流向

Fig. 5 Direction of discharge current

1.4 控制策略

当地铁制动时，机械能转化为电能，会引起DC 1 500 V母线电压升高。主逆变控制单元会导通IGBT。IGBT导通后，储能单元会检测到输入电压升高，然后开启吸收充电工作，将高压能量吸收存储至锂离子电容。当地铁牵引时，DC 1 500 V负载加重，电压被拉低。此时储能系统检测到DC 1 500 V电压下降（暂定低于DC 1 400 V，具体数值各线路均不同，根据实际情况调整），储能系统开启放电工作，将锂离子电容器的能量释放至DC 1 500 V电网。功率模块功能就是通过控制IGBT的导通和关断控制电容的充放电，进而使电网电压稳定。控制的主要目的是减小电压波动，同时还要限制充放电电流，避免电流过大损坏器件。另一方面要将储存能量控制在一个合理状态，既能提供一定功率输出，也要留有一定的吸收能量空间。如果再生能量过多而无法完全吸收，还要投入耗能电阻辅助消耗电能。

如图6所示，直流母线侧电流 I 的变化能引起直流母线侧电压 V 的变化，通过测量直流侧电容电压可以间接获得负载功率的变化，因此将直流电压作为充放电控制策略的判断依据。设定当直流电压小于 V_1 时，牵引功率为正，列车正在起动或加速，需要能量支持，电容释放能量，以保证直流母线电压稳定。当直流电压大于 V_4 时，牵引功率为负，有制动能量产生，此时储能系统从直流侧吸收能量，以保证直流母线电压稳定。

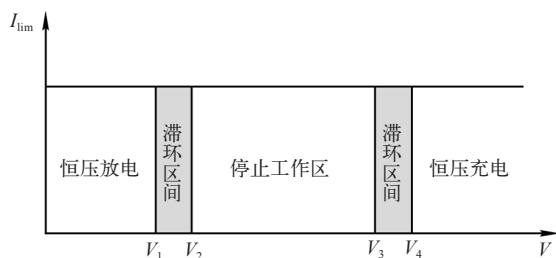


图6 控制策略图（能量）

Fig. 6 Control strategy chart of the CESD(Energy)

1.5 散热风道结构设计

电容储能装置由直流控制柜、变流器柜和电抗器柜组成，均采用标准化、模块化设计原则。直流控制柜主要实现电容储能装置的控制、保护和通信等功能，并通过柜门上的按钮、指示灯及触摸屏实现人机交互功能。变流器柜采用四组双向半桥电路实现DC/DC的功率变换，变流器柜主要由两个功率单元构成，功率单元采用抽屉式的安装方式，并设计有专门的安装滑轨，极大方便了安装维护及更换；功率单元散热器采用复合相变+强迫风冷的散热方式，具有体积小、重量轻且散热效率高的特点。

功率单元作为整个储能装置功率变换的核心部件，发热功率最高，其散热性能对整个装置能否正常工作起到决定性作用，因此有必要设计一种专门供功率单元散热用的风道结构，来解决功率单元的散热问题。本文所设计的储能装置柜内散热风道结构如图7所示，在本方案中两个功率单元共用同一个风道和风机。图7中，箭头方向为空气流动方向，在装置顶部离心风机所产生的气体负压作用下，柜体外部冷空气分别从本装置柜体的正前方进入柜体前门板的进风口滤网，在流经两个功率单元上部的散热器后，流动空气会分别带走两个功率单元所产生的热量，然后变成热空气在竖直风道中向上流动并汇集至离心风机，最后通过柜体后门板顶部的出风口滤网排出。

2 热场仿真分析

依据空气流动所遵循的质量守恒、能量守恒

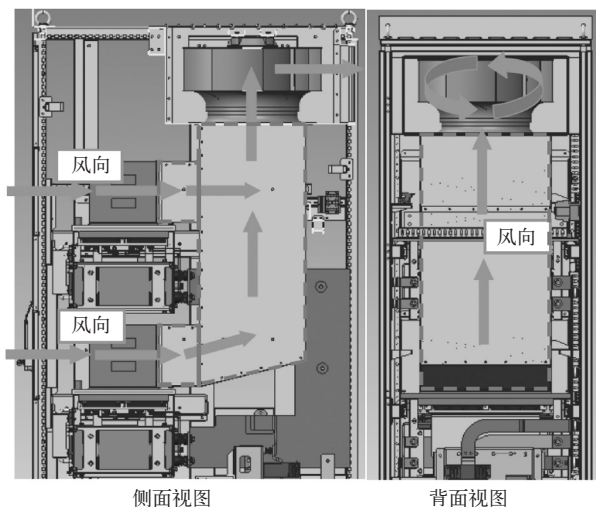


图7 电容储能装置散热风道结构

Fig. 7 Structure of radiating air duct in the CESD

和动量守恒定律，可以建立本装置内散热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热场仿真分析，可以从理论上得到装置散热结构内热流场的分布情况。

2.1 数学模型

空气在实际流动中遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒定律。由质量守恒方程，将流体的连续性方程表示为^[10-13]

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

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

由动量守恒方程得到的运动方程，即

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

其中

$$\frac{\partial}{\partial x_j} P_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2\partial}{3\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

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。

由雷诺方程以及雷诺数计算可得，本文所研究的气体流动为湍流状态，因而数值模拟计算采

用标准 $k-\varepsilon$ 模型；实际上标准 $k-\varepsilon$ 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 ε 。该模型方程是由Launder以及Spalding在1972年首次提出。模型中的耗散率 ε 可以定义为

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

湍流的粘度系数 μ_t 表示为 k 、 ε 的方程，即

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

可推导出标准 $k-\varepsilon$ 模型的数值方程为

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

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

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

2.2 初始条件及边界条件

由气体动力学理论可知，当马赫数 $M_a < 0.3$ 时，空气便可以视为不可压缩气体。经计算本文中 $M_a = 0.11$ ，空气便可等效为不可压缩、饱和气体，其控制方程为稳态方程，湍流模型为标准 $k-\varepsilon$ 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8所示。根据散热风道结构、散热器及滤网的阻力，估算风机工作点的静压为400 Pa，流量为6 500 m³/h。热场仿真的初始条件设定如下：风机的初始流量为6 500 m³/h，边界条件为无滑移壁面。

2.3 计算结果及分析

根据储能装置内部功率单元的散热结构，建立其内部三维结构的热仿真模型。采用四面体网格对仿真模型划分网格，并对装置内部局部流道进行细化，确保仿真计算的准确性、收敛性，网格划分后根据本文2.1节中数学模型计算并选取2.2节中的初始条件、边界条件后进行仿真计算。

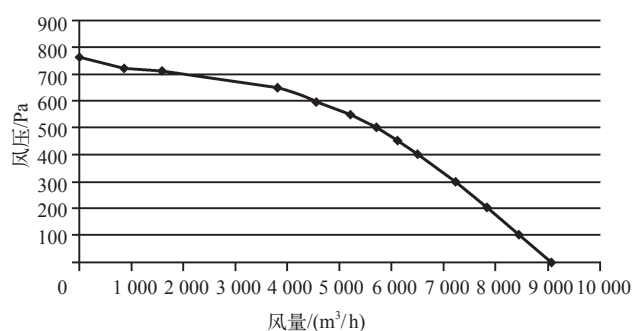


图8 风机特性曲线

Fig. 8 The performance curves of fan

图9为装置内流经两个功率单元散热器的速度云图（沿X方向）。从图9中可以看出，空气流动的速度场在散热风道内的流动比较顺畅，且没有出现风路的阻塞、涡旋等。每层功率单元散热器入口截面处的速度分布有差异，随着Y方向高度的增加，速度变大，流量也变大，这主要是因为上层的风道靠近风机，出现了所谓的“最短效应”的缘故造成的。

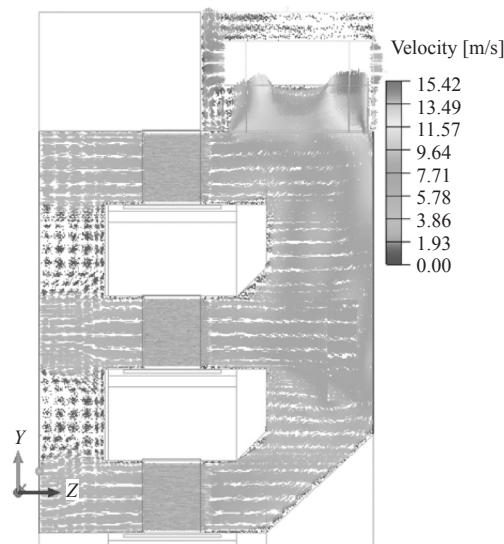


图9 空气速度云图

Fig. 9 Air velocity cloud picture in the CESD

由于散热器内的翅片排布比较紧密，冷却空气流经散热器时截面积突然减小，根据伯努利方程可知，在进入散热器时速度会明显变大。空气流动在并联风道、串联风道中均未出现气流短路、涡旋等现象。统计进入上部、下部的冷却风机流量依次为3 277.8 m³/h、

3 230.6 m³/h, 风机的工作点流量为6 508.4 m³/h, 每层通道的冷却风机流量之间的绝对误差不超过2%。

图10为储能装置内功率单元所对应的IGBT温升云图。由仿真结果统计可得, 每层功率单元所对应IGBT的温度差异性较小, 上、下层最高温度依次为43.6 ℃、44.3 ℃, 最高温升为26.2 ℃。同一层的IGBT沿着Z方向表现出入风口侧IGBT温度比出风口侧IGBT温度略低, 是因为冷却空气在向前流动过程中被加热的缘故所致。

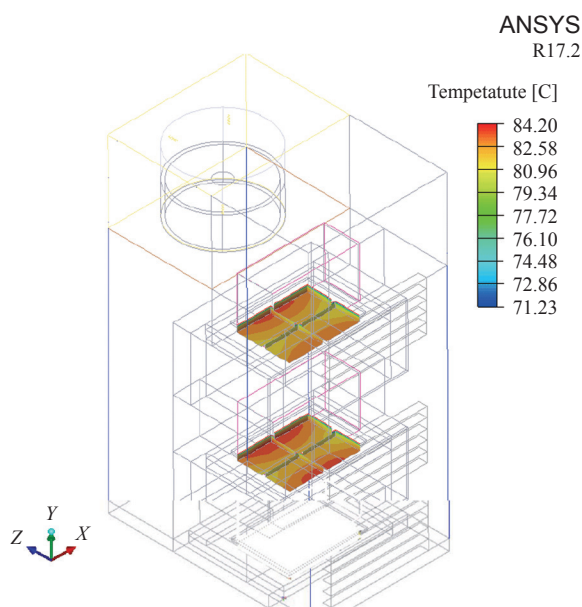
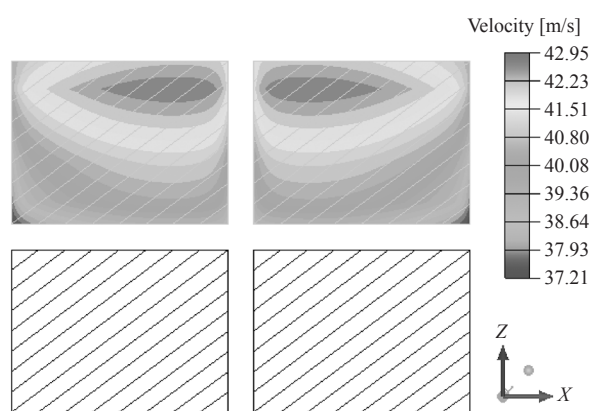


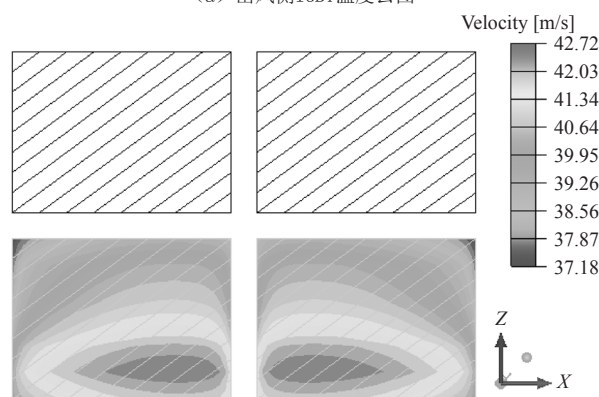
图 10 功率单元对应的 IGBT 温升云图

Fig. 10 Temperature rise cloud picture of the IGBT

研究表明, IGBT的失效主要有过热应力失效、过机械应力失效和过电应力失效等, 但由于过热导致的失效高达50%以上^[14-15], 循环热应力冲击使得焊接及键合出现疲劳, 进而出现失效现象。本文中散热结构下不仅能使每层中的4个IGBT的前排和后排最大温差仅为5.8 K, 还能使每层模块之间所对应位置的IGBT温差小于2 K, 如图11所示。由于复合相变散热器基板内的冷媒冲注腔芯体在Z方向的尺寸并有完全覆盖IGBT的宽度, IGBT部分正下方有小部分是没有相变换热而导致冷却效果相对较差, 温度较高的地方也出现在该区域。



(a) 出风侧IGBT温度云图



(b) 入风侧IGBT温度云图

图 11 单层功率单元对应的 IGBT 温升云图

Fig. 11 Temperature rise cloud picture of the IGBT

由仿真数据可知, 在环境温度为18 ℃时, IGBT最大温升为26.2 ℃; 当环境温度升至45 ℃时, IGBT的最大温度为71.3 ℃, 小于IGBT所允许的极限温度90 ℃。

3 试验验证

经过上述理论仿真分析计算, 从理论上验证了本文所设计的电容储能装置内散热风道结构的合理性。为了进一步验证本装置结构的合理性、可靠性, 在完成本产品样机的研制后进行了散热结构风速测试试验及功率单元的温升试验, 本产品样机照片如图12所示。

3.1 风速测试

为了验证本装置内散热结构的空气流量、风速是否满足设计要求, 需要通过风速测量试验来进行验证。测试功率单元进风口的风速大小,

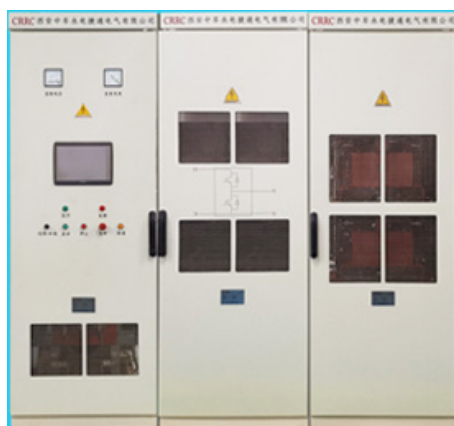


图 12 电容储能装置样机照片

Fig. 12 The prototype picture of the CESD

在每一层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汇总分析。将试验数据与仿真数据进行对比分析，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

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	4.62	4.84	4.8
下层	4.49	4.71	5.3

由上表可以看出，试验风速略低于热仿真风速，这是因为在建立热场仿真模型时，对装置内散热结构进行了模型简化处理，仿真时系统的流阻会比实际的流阻偏小；试验测量的风速与仿真的风速相对误差均为5%左右。实际测量结果显示，各处风速均在4.5 m/s左右，满足功率单元的散热要求。

3.2 温升试验

利用电容储能装置样机，在1 MW额定功率的工作模式下进行温升试验。装置内部功率单元上布置热电偶，其分布在功率单元散热器基板、IGBT的不同位置，热电偶的具体布置点如图13所示。储能装置正常工作后，在额定工况下持续运行2.5 h左右，温度记录仪以0.5 Hz的频率记录监测点的实时温度值。

待试验数据稳定后选取每层模块中的部分

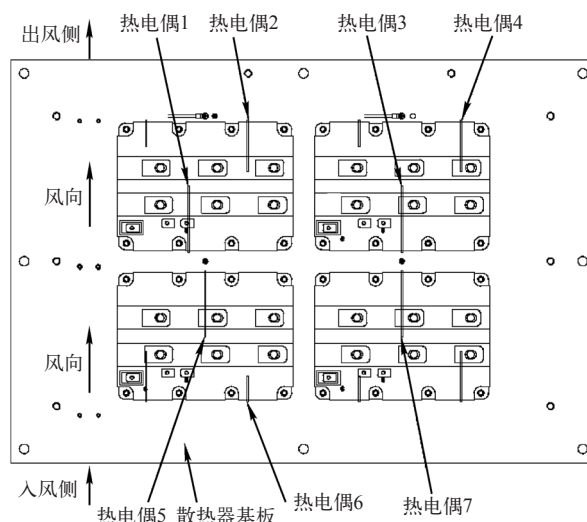


图 13 功率单元热电偶布置位置

Fig. 13 The thermocouple arrangement position on base plate of the power unit

测试点，在仿真结果中截取相同位置的部分测试点进行对比分析，如图14所示。数据表明每层模块对应位置点的温升均比较接近，最大误差不超过2 K，试验温度和仿真温度最大温升误差不超过1.5 K，试验数据温升和仿真数据温升吻合良好。这说明该种散热结构布局下，不仅能满足单个IGBT模块的散热需求，还能保障每层模块所有相应位置下的IGBT在工作时温度的一致性，这样最大限度地保障了每层模块热因素寿命的一致性。因此该结构能实现预期的热设计要求。从图14中可以看出，随着时间的变化，除了环境温度基本保持稳定外，其余监测点的温度都在逐步上升，单层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。由于每个监测点附近的发热功率不同，其温度上升趋势、稳定后的温度也不尽相同。装置启动后，功率单元各监测点的温度开始迅速上升，经过大约6 min后，各功率器件的功率损耗与系统的散热功率逐渐达到平衡，温度上升趋势逐渐平缓，并最终达到稳态。外界的环境温度一直稳定在19℃左右，在整个散热系统温度达到稳态后，热电偶1~4监测点的温度要高于热电偶5~7监测点的温度，这是因为热电偶1~4布置在散热器的出风口处，而热电偶5~7布置在散热器的入

风口处。空气流经IGBT等发热器件后，会带走其工作产生的热量，从而导致空气温度升高。稳态后所有监测点的最高温度为46.8℃，最高温升为46.8℃-19℃=27.8℃，试验温度和仿真温度的最大温升误差不超过2℃，数据比较吻合，储能装置在额定功率下能持续稳定工作，满足了预期的设计要求。

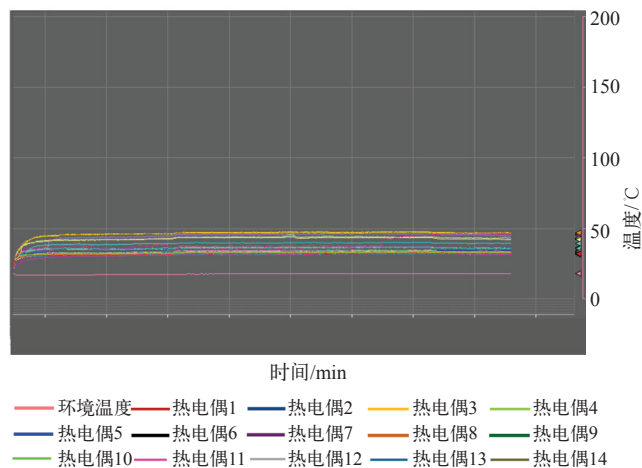


图14 温升试验曲线

Fig. 14 The curves of temperature rise experiment in the CESD

4 结束语

本文通过对电容储能装置的结构进行合理布局，提出了一种具有全新散热结构的储能装置设计方案，通过热仿真、温升等试验共同验证了本装置散热结构的合理性、可靠性。本文解决了储能装置内功率器件散热效果不好的问题，具有大功率（额定功率可达1 MW）、低谐波（直流纹波电压小于0.83%）和电容容量大（静态储电量达9 kW·h）等优点，采用标准化、模块化的设计原则，可稳定直流电网电压、节约电能，也可取消车载制动电阻，检修维护方便，与电网连接简单，且施工方便。

参考文献

- [1] 刘宝林. 地铁列车能耗分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2007(4): 65-70.
- [2] 李培曙. 关于国产地铁制动几个问题的探讨[J]. 铁道车辆, 2000(38): 69-71.
- [3] 白青林. 北京地铁14号线中压能馈装置现场试验

方案[J]. 科技与创新, 2016(11): 123-125.

- [4] 高阳. 浅析城轨交通列车再生制动能量回馈利用装置[J]. 工程建设与设计, 2016(9): 129-131.
- [5] 肖莹. 再生制动能量消耗装置[J]. 轨道交通, 2006(1): 46-49.
- [6] 周剑斌, 苏浚, 等. 地铁列车运行再生能利用的研究[J]. 现代城市轨道交通, 2006(4): 33-35.
- [7] 林清华, 张琴, 等. 基于双能量存储模式的电梯节能装置研究[J]. 电气应用, 2018(2): 70-80.
- [8] 张慧妍, 齐智平, 等. 超级电容器储能直流变换器的设计[J]. 电气应用, 2006(12): 72-78.
- [9] MAHE Bobby, BOLLINGER Terry. Ultracapacitors provide cost and energy savings for Public transportation applications[J]. Battery Power products & Technology, 2005, 10(6): 65-68.
- [10] 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.
- [11] 周维维, 吴军科, 等. 功率变流器的可靠性研究现状及展望[J]. 电源学报, 2013(1): 1-15.
- [12] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [13] 刘博阳, 刘伟志, 等. 地铁辅助变流器功率损耗与热仿真分析[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(4): 72-77.
- [14] 徐盛友. 功率模块IGBT状态监测及可靠性方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [15] 周维维, 吴军科, 杜雄, 等. 功率变流器的可靠性研究现状及展望[J]. 电源学报, 2013(1): 1-15.

作者简介



周要培

周要培(1989-), 男, 硕士, 工程师主要研究方向为轨道交通变流技术。

(收稿日期: 2020-6-14)EA