

地铁车辆牵引变流器的热管散热器的数值模拟

丁 杰, 唐玉兔

(南车电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 变流器采用“热管散热器+走行风冷”方式可简化柜体结构。为分析热管散热器的散热性能, 利用Fluent软件分析了其流速和温度的分布特点, 结果表明热管散热器在较低的车辆运行速度下仍具有较好的散热效果。实际的现场应用情况验证了仿真结果的准确性。

关键词: 地铁车辆; 变流器; 热管; 数值模拟

中图分类号: U264.3+7; TK172.4

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2012)05-0031-03

Numerical Simulation of Heat-pipe Radiator for Metro Vehicle Converter

DING Jie, TANG Yu-tu

(CSR Research of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: With heat-pipe radiator and air-cooling in driving state, structure of converter cabinet can be simplified. In order to analyze the thermal performance of heat-pipe radiator, velocity and temperature distribution are analyzed by Fluent software. Results show that heat-pipe radiator still has predominated performance at slowly driving velocity. The veracity of simulation results are verified by practical applications.

Key words: metro vehicle; converter; heat-pipe; numerical simulation

0 引言

地铁作为城市公共交通系统的一个重要组成部分, 其安全稳定运行具有重要的社会意义, 因此, 对地铁车辆的核心部件——牵引变流器的可靠性提出了非常严格的要求。在产品设计时, 牵引变流器的关键器件IGBT模块需要进行良好的散热设计, 以便及时将热量散发出去。

大功率电力电子器件的散热方式有多种选择, 如强迫风冷、水冷、油冷、走行风冷等。强迫风冷需要配备合适的风道和风机, 而风机的使用存在一定的安全隐患, 且运行时会产生较大的噪音。水冷及油冷系统较为复杂, 且存在泄漏的风险。采用“热管散热器+走行风冷”方式, 可以省去风道和风机, 简化柜体结构, 若能保证散热效果, 它将具有非常明显的优势。为了分析热管散热器的性能, 本文采用Fluent软件对地铁车辆牵引变流器的热管散热器进行了模拟, 分析了其流速和温度的分布特点及热管性能对散

热效果的影响, 现场应用结果验证了仿真的可行性。

1 热管散热器的结构

某地铁的动车装有1台二电平VVVF(变压变频)牵引变流器柜, 柜内装有2个变流器模块, 每个模块分别驱动1个转向架上的2台电机。变流器模块的热管散热器结构外形如图1所示, 散热器台面上安装了8个IGBT

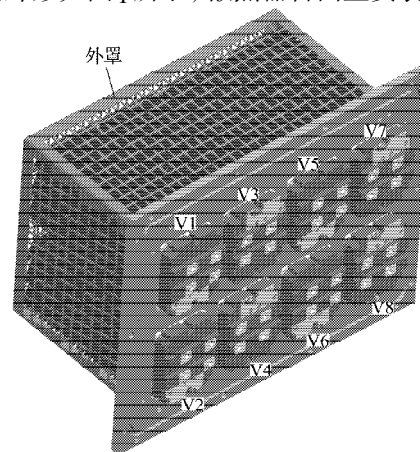


图1 热管散热器的结构外形

Fig.1 Configuration of heat-pipe radiator

收稿日期: 2012-03-20

作者简介: 丁杰(1979-), 男, 硕士, 工程师, 现主要从事变流器结构仿真和热仿真的科研工作。

模块(V1~V8),其中6个用于逆变的三相桥臂、2个用于电阻制动或过压保护的斩波相。热管的一端嵌入散热器台面,另一端有大量的散热片。为降低散热片被砂石或异物撞击风险,且尽量不影响空气流经散热片,为热管散热器安装了一个开有多个方孔的金属外罩。

2 计算模型

变流器模块的电路参数如下:供电电压DC 1 500 V、输出电压为三相AC 0~1 400 V、输出频率0~150 Hz、额定输出电流262 A、开关频率500 Hz、功率因数0.98、调制比0.8。该变流器模块使用的IGBT模块型号为5SNA0800N330100。

电力电子元件工作时将产生大量的热量,因斩波的时间很短,故本文只考虑逆变相的元件损耗。在计算二电平三相逆变桥臂的平均损耗时,根据电压、电流、开关频率、功率因数和调制比大小先计算出单个IGBT模块的损耗 P_{av} ,继而计算出逆变桥臂上6个元件的总损耗($6P_{av}$)。较为方便的计算工具有IPOSIM^[1]、Melcosim及Semisel^[2]等。在使用IPOSIM工具时,可自动选择Infineon的元件及其对应参数,不能选择其他品牌元件。可从ABB数据手册的图表中获得计算所需的5SNA0800N330100输入参数,再利用IPOSIM工具算出损耗。在额定工况下,单个IGBT模块中IGBT芯片损耗为429 W,二极管芯片损耗为171 W,故 $P_{av}=600$ W。IGBT模块材料包括AlSiC基板、焊料、铜层、基片、芯片和绝缘材料等。为得到芯片的结温,按照文献[3]的方法建立详细的IGBT仿真模块。考虑IGBT模块与热管散热器的接触热阻,选择100 μm 的导热硅脂(导热系数1 W/m $\cdot$ °C)。

热管内部运行涉及沸腾和冷凝的相变过程,机理极为复杂,目前还很难对热管本身进行数值模拟。较为常用的方法是将热管假设为轴向导热系数很高(20 000 W/m $\cdot$ °C左右)、径向导热系数为热管材料导热系数的实体棒杆。在CFD(计算流体动力学)模型中设置热管材料的导热系数时,需要选择各向异性。在利用水-铜热管设计变流器模块时,为了方便热管内部的水蒸汽冷凝后在重力作用下较为顺利地回到蒸发段,热管与水平面设置15°的倾角。为此,将CFD模型绕直角坐标系旋转15°,使热管与坐标轴平齐。

结合IGBT模块各层材料的厚度和整个模型的复杂程度,同时为了较准确地捕捉散热片之间的流场信息,将网格的基本尺寸设为2 mm,流体和固体区域划分成高质量的六面体单元和极少量的五面体单元,网格数量定在1 900万左右。

地铁车辆行驶时,具有一定的速度,周围的空气则处于静止状态。采用动网格方法可以真实地反映这一情

况,然而动网格的计算复杂,消耗的计算机资源非常大,因此可将地铁车辆视为静止,空气具有相对流速。由于瞬态计算需要设置较小的时间步长,消耗的计算机资源非常大,本文将只针对地铁车辆在几个速度等级下持续运行的工况进行稳态计算。计算时,环境温度设为25°C,采用标准 k - ε 湍流模型,且不考虑辐射的影响。

3 计算结果及分析

3.1 流场分析

该地铁车辆的最高速度为80 km/h,平均运行速度可达66 km/h。随着运行速度的增加,流向散热片的走行风速将提高。为分析恶劣工况下的散热性能,本文主要对20 km/h速度下的仿真结果进行分析。

图2示出20 km/h(即5.56 m/s)速度下的 x 、 y 和 z 轴截面流速分布。可以看出,空气被外罩和散热片所阻挡,流进与流出外罩方孔的速度不一致,局部区域的流速可达16.1 m/s。

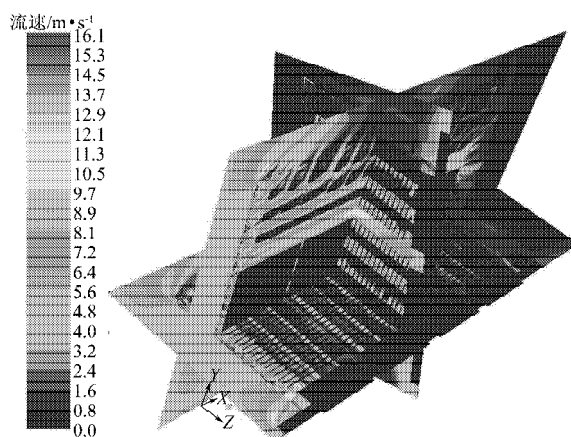


图2 有外罩热管散热器截面的流速分布

Fig.2 Velocity distribution of heat-pipe radiator with shroud in section

图3示出热管散热器无外罩时截面的流速分布。可以看出,空气能够较为顺利地流经散热片,局部区域最高流速为13.7 m/s,低于有外罩热管散热器的空气流速。

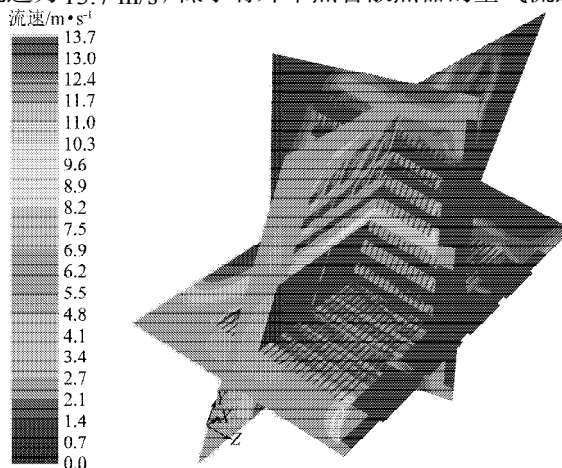


图3 无外罩热管散热器截面的流速分布

Fig.3 Velocity distribution of heat-pipe radiator without shroud in section

3.2 温度场分析

由于地铁车辆可以双向行驶,为了在同一个CFD模型中进行多种工况分析,假设正向行驶时逆变相的元件为V1~V6,反向行驶时逆变相的元件为V3~V8。图4和图5分别示出20 km/h速度时正向和反向行驶的热管散热器温度分布。正向行驶时,V5和V6元件的芯片温度最高,为69.6℃;反向行驶时,V7和V8元件的芯片温度最高,为79.7℃,高出正向行驶工况下最高芯片温度约10℃。文献[4]中用风机吹风方式模拟走行风工况:风速5 m/s、元件总损耗3 600 W、工作时间120 min时,热管散热器台面温升为35℃。现场实测结果显示,变流器长期输出额定电流时,散热器台面最大温升为38℃,表明仿真结果具有较高的准确性。

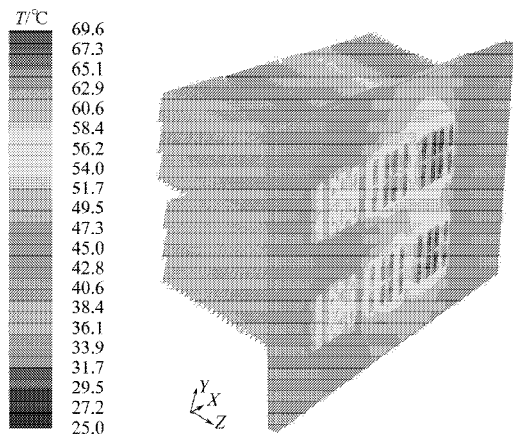


图4 有外罩热管散热器的温度分布(正向行驶)

Fig.4 Temperature distribution of heat-pipe radiator with shroud (forward movement)

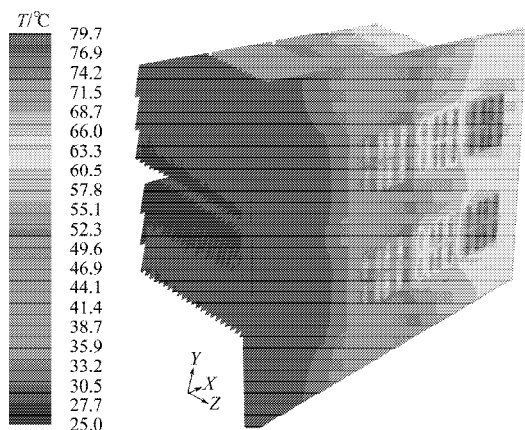


图5 有外罩热管散热器的温度分布(反向行驶)

Fig.5 Temperature distribution of heat-pipe radiator with shroud (backward movement)

图6示出20 km/h速度、正向行驶时无外罩热管散热器的温度分布。图6与图4稍有区别,可以看出,无外罩热管散热器的最高温度比有外罩热管散热器的只低0.9℃,说明外罩方孔的开口率较大,对散热器散热效果的影响较小。

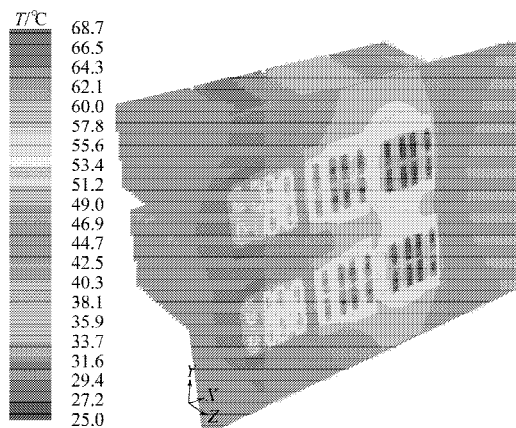


图6 无外罩热管散热器的温度分布(正向行驶)

Fig.6 Temperature distribution of heat-pipe radiator without shroud (forward movement)

3.3 对比分析

图7示出不同行驶速度下热管散热器最高温度的变化情况,随着地铁车辆行驶速度的增加,最高温度下降的趋势减缓,反向行驶时的最高温度比正向行驶时的高4.5~10℃。

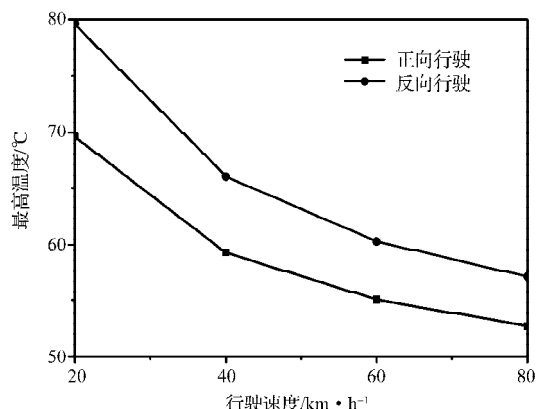


图7 行驶速度对IGBT芯片温度的影响

Fig.7 Effects of driving velocity on the temperature of IGBT chip

热管具有很高的导热性和优良的等温性,可以快速而有效地将散热器底板上的热量传导到散热片。热量传递过程中,热管性能的好坏和接触热阻(包括IGBT模块与散热器间热阻、热管与散热器底板间热阻及散热片与热管间热阻)的大小对散热效果的影响很大。可按照技术要求在接触面均匀涂抹一层薄的导热硅脂并使用合适的紧固力矩以保证IGBT模块与散热器之间的接触热阻在规定范围内。热管的蒸发段嵌入散热器底板的深度较大,二者间的接触较为良好,热管与散热器底板之间接触热阻较小。1 mm厚度的散热片折边与热管的接触容易出现问題,其良好接触需要通过合适的加工工艺予以实现,本文仅分析热管性能对散热效果的影响,对接触问题不进行探讨。

(下转第59页)