

地铁车辆运行条件下 IGBT 器件 过热报警问题分析研究

丁杰¹, 唐玉兔²

(1. 湖南文理学院 国际学院, 湖南 常德 415000; 2. 湖南文理学院 地理科学与旅游学院, 湖南 常德 415000)

摘要:针对宁波地铁2号线车辆压道运行工况下频繁出现 IGBT 器件过热报警问题, 分别开展 MP₂ 车和 M₂ 车在压道运行工况和正线运行工况下的温升测试, 并利用 FLUENT 软件对热管散热器和 IGBT 器件进行仿真分析。研究表明, 受车体底部设备阻挡, 地铁车辆牵引逆变器热管散热器进出风口的风速为车辆速度的 15%~40%; 压道运行工况下, MP₂ 车热管散热器的进口平均风速低于 M₂ 车, 是 MP₂ 车频繁报警 IGBT 器件过热的根本原因; 正线运行工况下, 热管散热器的进口平均风速为 6 m/s, 可以保证 IGBT 器件的可靠应用。温升测试与仿真分析方法可为地铁车辆牵引逆变器的热设计工作提供理论指导。

关键词:线路运行; 地铁车辆; 牵引逆变器; 热管散热器; IGBT 器件; 温升

中图分类号: TM46 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2023)01-0106-08

绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)作为地铁车辆牵引逆变器的核心器件, 直接影响到地铁车辆的安全可靠运行。由 IGBT 器件的失效机理可知, 其封装结构在长期高温热循环作用下会发生芯片失效和焊料层老化等, 因此, 良好散热条件是 IGBT 器件可靠运行的前提。

刘宾礼等^[1]基于热传导理论和 Causer 传热热阻热容网络结构, 建立适用于器件级到系统级的 IGBT 器件传热模型。李阳等^[2]采用 Icepak 软件对散热器的肋片高度、肋片厚度和风机风量等因素进行仿真分析。付和平等^[3]通过散热器的稳态热阻模型和流体动力学模型, 分析不同堵塞程度下的电力电子变流装置散热器的散热性能。热管具有优异的导热性能, 在大功率器件的散热中得到较多应用, 相关的试验测试和仿真分析受到关注。冉娅东等^[4]针对热管分层嵌入式结构的散热器进行仿真分析, 得到热管散热器的散热性能参数。陈柏超等^[5]基于一维稳态传热理论分析微型平板热管对分离热通道散热器性能的影响。丁杰等^[6]针对地铁车辆牵引逆变器热管散热器开展温升实验, 并提出一种快速评估热管散热器瞬态温升的仿真方法。母福生等^[7]利用 Icepak 软件对比平板微热管散热器和传统翅片散热器对 IGBT 器件结温的影响。吴智勇等^[8]采用数值模拟和试验测试方法分析直管热管散热器的性能, 并提出 L 形热管和均温管的改进方案。

基于宁波地铁2号线车辆压道行驶时频繁出现的 IGBT 器件过热报警问题, 开展实际线路运行条件下的温升测试, 通过建立热管散热器和 IGBT 器件的流动与传热仿真模型, 分析 IGBT 器件在压道运行工况和正线运行工况下的温度特性。

1 温升测试的测点布置

宁波地铁2号线一期工程的线路从栎社国际机场站至清水浦站。地铁车辆采用6节车的编组形式,

收稿日期: 2022-10-12 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20220308

基金项目: 湖南省教育厅科学研究重点项目(21A0416); 湖南文理学院科技创新团队(校办通[2020]26号); 常德市企业科技特派员自主项目(常财企[2021]0058)

作者简介: 丁杰(1979—), 男, 正高级工程师, 研究方向为轨道交通振动噪声、电力电子器件可靠性。E-mail: dj8083@126.com

丁杰, 唐玉兔. 地铁车辆运行条件下 IGBT 器件过热报警问题分析研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2023, 36(1): 106-113.

$TC_1 + MP_1 + M_1 = M_2 + MP_2 + TC_2$, 其中, TC 表示带司机室的拖车, MP 表示带受电弓的动车, M 表示动车, 数字 1 和 2 表示编号。为了省去冷却风机和风道结构, 安装在 MP 车和 M 车下方的牵引逆变器采用热管散热器加走行风冷方式。

图 1 为热管散热器的结构。以散热器台面为安装基础, 一侧安装了 8 个 IGBT 器件, 编号为 VT1~VT6 的 6 个 IGBT 器件构成三相逆变桥臂, 编号为 VT7 和 VT8 的 2 个 IGBT 器件构成斩波桥臂。在 IGBT 器件的中间位置布置编号为 J1~J3 的温度继电器, 监测到散热器台面温度超过设定值(如 85 °C) 时, 牵引变流程序报 IGBT 器件过热故障, 自动降低功率以保护 IGBT 器件。散热器台面另一侧斜插 72 根重力热管, 翅片嵌套在热管上, 外罩用于防护热管和翅片。IGBT 器件芯片产生的热量依次通过 IGBT 器件基板、导热硅脂、散热器台面、热管和翅片, 再由走行风对翅片进行散热。

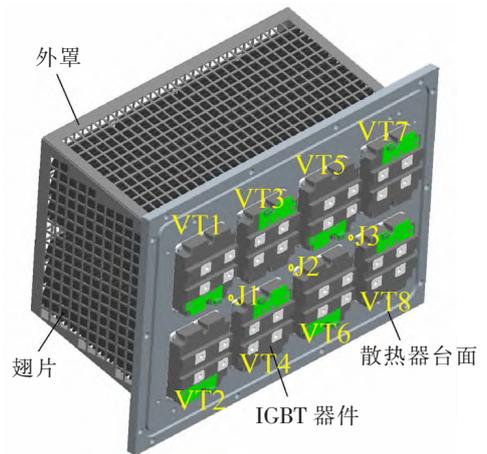


图 1 热管散热器的结构

为确保地铁列车的安全运行, 在每日正式载客运行(正线运行)之前, 地铁车辆会以较低的速度进行压道行驶, 以检验车辆和线路等是否正常。根据现场运营反馈, 在地铁车辆压道行驶时, MP₂ 车的牵引逆变器频繁出现 IGBT 器件过热报警的问题, 而 M₂ 车的过热报警次数较少。受测试设备通道数限制, 分别针对 MP₂ 车和 M₂ 车先后开展实际线路压道运行和正线运行的温升测试。

针对 MP₂ 车进行测试时, 将编号为 V₁~V₃ 和 V₅~V₇ 的热线风速仪分别布置在热管散热器的两端, 编号为 V₄ 的热线风速仪布置在热管散热器的侧面中间位置, 如图 2(a) 所示。热管散热器的温度测量采用热电偶, 编号为 T₁~T₁₁ 的热电偶布置在热管散热器的台面上, 编号为 T₁₂ 和 T₁₃ 的热电偶用于测量空气温度, 如图 2(b) 所示。压道运行时, 从库内出发行车至清水浦站, 行车方向为向右, 测点 V₁~V₃ 处在热管散热器的进风口, 测点 V₅~V₇ 则处在热管散热器的出风口。正线运行时, 从清水浦站出发行至栎社国际机场站, 行车方向为向左, 测点 V₅~V₇ 处在热管散热器的进风口, 测点 V₁~V₃ 则处在热管散热器的出风口。全程记录 MP₂ 车牵引逆变器热管散热器台面温度和散热器进、出风口风速。

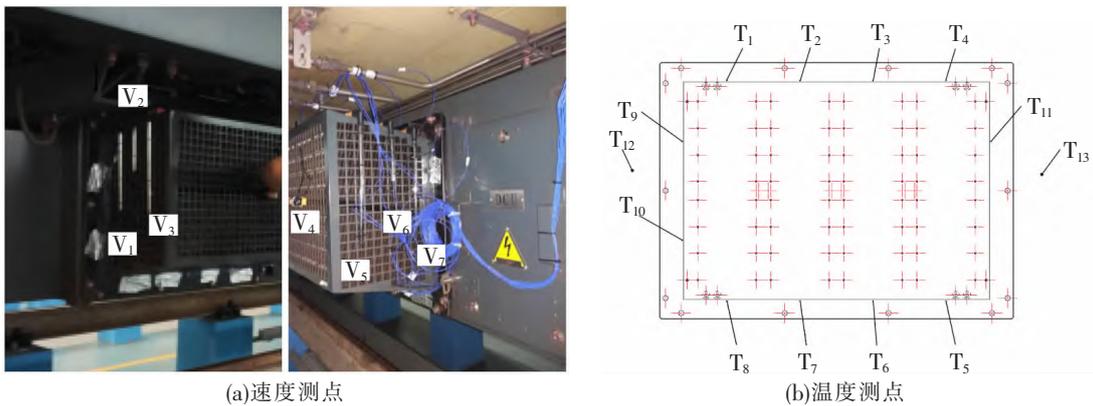


图 2 温升测试的测点布置

针对 M₂ 车, 按照与 MP₂ 车对应的位置布置测点, 以相同的测试方法进行测试。

2 温升测试的数据分析

2.1 压道运行工况

图 3 为压道运行工况下 MP₂ 车的测试结果。图 3(a) 表示地铁车辆的速度曲线, 压道工况的车速主要在 6~8 m/s, 对应时速为 21~29 km/h。图 3(b) 表示测点 V₁~V₃ 和 V₅~V₇ 的平均风速, 可以看出, 热管散热器附近的风速主要在 0.5~2 m/s 范围。当车速为 6 m/s 时, 热管散热器进风口(V₅~V₇) 的平

均风速约为 1 m/s , 出风口($V_1 \sim V_3$)的平均风速约为 0.3 m/s 。图 3(c)表示热管散热器台面(T_1)、进风口(T_{13})和出风口(T_{12})的温度曲线,其他温度测点的数据未列出。压道运行工况下,环境温度为 $26 \text{ }^\circ\text{C}$,压道至 3000 s 时热管散热器温度基本达到平衡,散热器台面温度 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,之后有一段长坡线路,牵引逆变器的输出功率增大,车速有所减缓,散热器台面温度继续上升至 $88 \text{ }^\circ\text{C}$,最大温升达到 62 K 。从温升变化趋势来看,测点 T_1 的温度尚未达到平衡,若继续压道运行,温度还将持续上升,随时有过热风险。

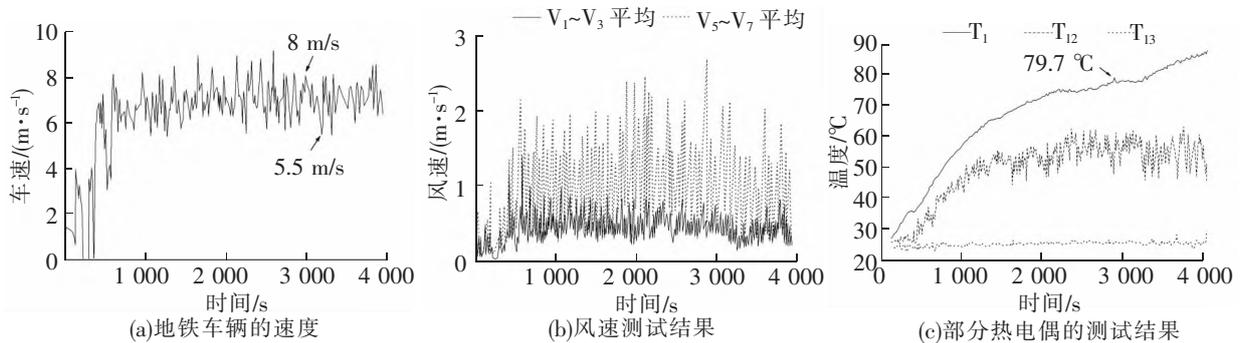


图 3 压道运行工况下 MP_2 车的测试结果

图 4 为压道运行工况下 M_2 车的测试结果。图 4(a)表示压道运行工况的车速主要在 $7 \sim 10 \text{ m/s}$, 对应时速为 $25 \sim 36 \text{ km/h}$,与图 3(a)有差别是由于受测试设备通道数限制, M_2 车与 MP_2 车并非同时测试的,地铁列车每次压道运行时的状况有所区别。图 4(b)表示热管散热器附近的风速主要在 $0.5 \sim 4 \text{ m/s}$ 范围,热管散热器进风口($V_5 \sim V_7$)的平均风速约为 2 m/s ,出风口($V_1 \sim V_3$)的平均风速约为 0.6 m/s 。图 4(c)表示环境温度为 $26 \text{ }^\circ\text{C}$,压道运行至 2800 s 时散热器台面温度约为 $73 \text{ }^\circ\text{C}$,测点 T_1 在长坡线路运行终点的最高温度约为 $83 \text{ }^\circ\text{C}$,最大温升为 57 K 。

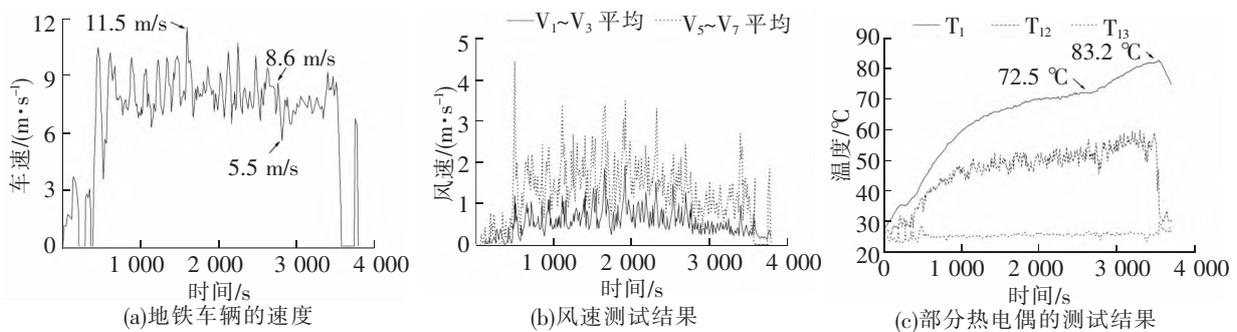


图 4 压道运行工况下 M_2 车的测试结果

从温升数值来看, M_2 车较 MP_2 车低约 5 K ,原因在于 M_2 车底部较为宽敞,对牵引逆变器的遮挡较少,而 MP_2 车底部安装的固有设备较多,对牵引逆变器遮挡明显,导致 MP_2 车热管散热器进出风口的风速要低于 M_2 车, MP_2 车底部的散热条件较 M_2 车恶劣。说明安装在车体底部的牵引逆变器热管散热器依靠走行风进行散热时,受车底部件的布局以及热管散热器本身的遮挡等,进出风口的风速为车辆速度的 $15\% \sim 40\%$ 。

2.2 正线运行工况

图 5 为正线运行工况下 M_2 车的测试结果。图 5(a)表示正线运行工况的车速主要在 $13 \sim 20 \text{ m/s}$, 对应时速为 $47 \sim 72 \text{ km/h}$ 。图 5(b)表示热管散热器附近的风速主要在 $4 \sim 8 \text{ m/s}$ 范围,热管散热器进风口($V_1 \sim V_3$)的平均风速约为 6 m/s ,出风口($V_5 \sim V_7$)的平均风速约为 1.5 m/s 。图 5(c)表示热管散热器台面(T_4)、进风口(T_{12})和出风口(T_{13})的温度曲线。由于地铁车辆正线运行工况中的运行方向与压道运行工况相反,2 种工况的进出风口对应的温度测点编号有变化。测点 T_4 的温度变化表现出大体上以指数规律上升,局部先升后降的特点,这是由于地铁车辆从站点出发,经历了若干个加速、匀速、制动和靠站停车的过程,加速时 IGBT 器件的损耗增大^[9],进风口的风速相应增大;制动时 IGBT 器件的损耗减小,进风口

的风速相应减小;匀速时 IGBT 器件的损耗较小,进风口的风速达到最大值;停车时 IGBT 器件的损耗为 0,此时的风速也接近于 0。图 5(c)与图 4(c)相比,测点 T_4 的最高温度达到 $58\text{ }^\circ\text{C}$,最大温升为 32 K ,正线运行工况的温升明显低于压道运行工况,这是由于正线运行工况的车速高于压道运行工况,热管散热器进风口的风速相应增大,使热管散热器具有较高的散热性能。

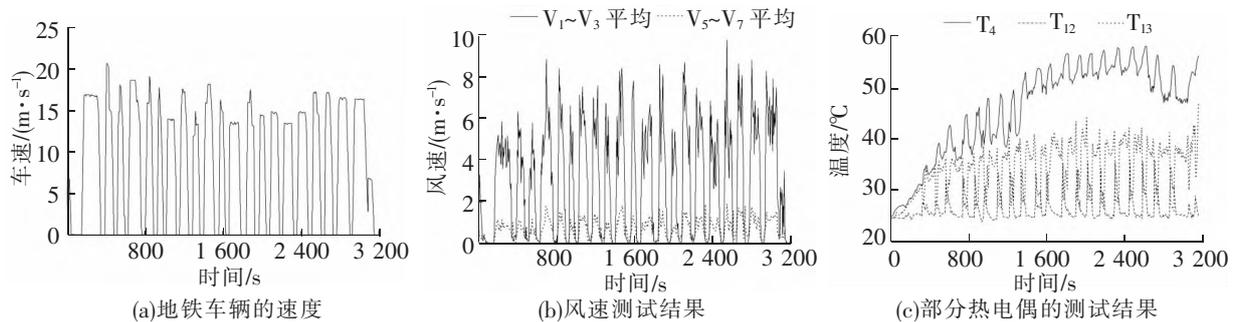


图 5 正线运行工况下 M_2 车的测试结果

针对 MP_2 车开展正线运行工况的温升测试,可以得到与 M_2 车相似的结果,其中测点 T_3 和 T_4 的最大温升为 34.6 K ,较 M_2 车的最大温升高出 2.6 K 。 MP_2 车正线运行工况与压道运行工况相比,散热器台面的最大温升明显降低,这说明压道运行工况的车速低,导致热管散热器进风口的风速低,热管散热器的散热性能恶化导致 IGBT 器件频繁报过热故障,可以说明所测试地铁车辆存在设计缺陷。

3 热管散热器的仿真计算与分析

3.1 IGBT 器件的损耗及结温计算

宁波地铁 2 号线车辆牵引逆变器的主电路采用二电平形式,计算 IGBT 器件的损耗时,通常采用的假设和简化处理方式^[9]:(1)编号为 VT1~VT6 的 6 个 IGBT 器件构成的电路为上下桥臂对称的三相桥式拓扑结构,采用正弦脉宽调制方式,输出电流为正弦波形;(2)将 IGBT 器件内部的 IGBT 芯片和续流二极管(Freewheeling Diode, FWD)芯片输出特性进行线性化近似处理;(3)直流母线电压 V_{DC} 实际值与测试条件相近时,IGBT 芯片的导通损耗、关断损耗与电流峰值、直流母线电压近似为成正比关系;FWD 芯片的导通损耗忽略不计,与直流母线电压为线性关系,与电流峰值为修正关系。

IGBT 芯片的导通损耗为

$$P_{\text{cond,IGBT}} = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{\text{CE0}} I_{\text{CP}}}{\pi} + \frac{r_{\text{CE}} I_{\text{CP}}^2}{4} \right) + m \cos \varphi \left(\frac{v_{\text{CE0}} I_{\text{CP}}}{8} + \frac{r_{\text{CE}} I_{\text{CP}}^2}{3\pi} \right) \quad (1)$$

式中, v_{CE0} 、 r_{CE} 分别为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时 IGBT 芯片的初始饱和压降和导通电阻; I_{CP} 为电流峰值; m 为调制比; φ 为电压电流相位角; $\cos \varphi$ 为功率因数。

IGBT 芯片的开关损耗为

$$P_{\text{sw,IGBT}} = \frac{f_{\text{sw}}}{\pi} (E_{\text{on,IGBT}} + E_{\text{off,IGBT}}) \quad (2)$$

式中, f_{sw} 为开关频率; $E_{\text{on,IGBT}}$ 、 $E_{\text{off,IGBT}}$ 分别为 IGBT 芯片的导通损耗和关断损耗。

FWD 芯片的导通损耗为

$$P_{\text{cond,FWD}} = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{\text{F0}} I_{\text{CP}}}{\pi} + \frac{r_{\text{F}} I_{\text{CP}}^2}{4} \right) + m \cos \varphi \left(\frac{v_{\text{F0}} I_{\text{CP}}}{8} + \frac{r_{\text{F}} I_{\text{CP}}^2}{3\pi} \right) \quad (3)$$

式中, v_{F0} 、 r_{F} 分别为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时 FWD 芯片的死区电压和导通电阻。

FWD 芯片的开关损耗分别为

$$P_{\text{sw,FWD}} = \frac{f_{\text{sw}} E_{\text{rec,FWD}}}{\pi} \quad (4)$$

式中, $E_{\text{rec,FWD}}$ 为 FWD 芯片的关断损耗。

IGBT 芯片和 FWD 芯片的结温分别为

$$T_{J,IGBT} = T_A + (P_{cond,IGBT} + P_{sw,IGBT})(R_{thJC,IGBT} + R_{thCH,IGBT}) + (P_{cond,IGBT} + P_{sw,IGBT} + P_{cond,FWD} + P_{sw,FWD})R_{thHA} \quad (5)$$

$$T_{J,FWD} = T_A + (P_{cond,FWD} + P_{sw,FWD})(R_{thJC,FWD} + R_{thCH,FWD}) + (P_{cond,IGBT} + P_{sw,IGBT} + P_{cond,FWD} + P_{sw,FWD})R_{thHA} \quad (6)$$

式中, T_A 为环境温度; $R_{thJC,IGBT}$ 为 IGBT 结壳热阻; $R_{thCH,IGBT}$ 为 IGBT 壳与散热器间热阻; $R_{thJC,FWD}$ 为 FWD 结壳热阻; $R_{thCH,FWD}$ 为 FWD 壳与散热器间热阻; R_{thHA} 为散热器热阻。

地铁车辆牵引逆变器使用的 IGBT 器件型号为 FZ1500R33HE, 最高允许工作结温为 150 °C。该型号 IGBT 器件的数据手册中提供了特征值(如 $R_{thJC,IGBT} = 7.35$ K/kW, $R_{thCH,IGBT} = 10$ K/kW, $R_{thJC,FWD} = 13$ K/kW, $R_{thCH,FWD} = 11$ K/kW), 还提供了 25、125、150 °C 结温下的特性曲线, 式(1)~式(4)中的相关参数可按照结温的线性插值方式处理。IGBT 器件的损耗和温升相互耦合, 经过迭代计算可以得到不同结温对应的 IGBT 器件损耗^[10]。

M_2 车正线运行工况下, $V_{DC} = 1\ 670$ V, 输出电流有效值 $I_{rms} = 546$ A, 输出频率 $f_o = 50$ Hz, $f_{sw} = 490$ Hz, $m = 0.9$, $\cos \varphi = 0.85$ 。 T_A 取 26 °C, 假设 $R_{thHA} = 28$ K/kW, 通过迭代计算可得 $P_{cond,IGBT} = 425$ W, $P_{sw,IGBT} = 346$ W, $P_{cond,FWD} = 99$ W, $P_{sw,FWD} = 187$ W, $T_{J,IGBT} = 69.0$ °C, $T_{J,FWD} = 62.5$ °C。

M_2 车压道运行工况下, $V_{DC} = 1\ 670$ V, $I_{rms} = 317$ A, $f_o = 50$ Hz, $f_{sw} = 490$ Hz, $m = 0.9$, $\cos \varphi = 0.85$ 。 T_A 取 26 °C, 假设 $R_{thHA} = 107$ K/kW, 通过迭代计算可得 $P_{cond,IGBT} = 218$ W, $P_{sw,IGBT} = 201$ W, $P_{cond,FWD} = 52$ W, $P_{sw,FWD} = 163$ W, $T_{J,IGBT} = 101.1$ °C, $T_{J,FWD} = 99.0$ °C。

MP_2 车压道运行工况的进风口速度低, 假设 $R_{thHA} = 180$ K/kW, $T_{J,IGBT} = 149.8$ °C, $T_{J,FWD} = 128.4$ °C, IGBT 芯片的温度将达到 150 °C。

通过上述计算可知, 压道运行工况和正线运行工况的 IGBT 器件损耗和结温计算依赖于散热器热阻 R_{thHA} 和环境温度 T_A 的选取。

编号为 VT7 和 VT8 的 2 个 IGBT 器件构成斩波桥臂, 在地铁车辆制动回馈能量导致网压升高时开始工作, 其中一个 IGBT 器件的 IGBT 芯片产生导通损耗和开关损耗, 另一个 IGBT 器件的 FWD 芯片正向导通, 起续流作用, 产生的损耗较小。

为了解多个 IGBT 器件安装在同一个散热器台面上的相互影响, 有必要针对热管散热器开展仿真分析。

3.2 热管散热器的流体动力学仿真分析

参考文献[6]的方法, 将热管散热器简化为轴向导热系数很高(20 000 W/m·K 左右)、径向导热系数为热管材料导热系数的实体棒杆。IGBT 器件按照芯片、基片、铜层、焊料和基板等材料建模, 不考虑塑封外壳、硅凝胶、主端子和键合线等。网格尺寸设置为 2 mm, 利用 HyperMesh 软件将热管散热器以及空气区域划分以六面体为主、极少数为五面体的网格。仿真模型的网格数量在 1 900 万左右。

由线路运行条件下的温升测试可知, 正线运行工况下 M_2 车的热管散热器进风口平均风速约为 6 m/s, 然而压道运行工况下, MP_2 车的热管散热器进风口平均风速仅 1 m/s, M_2 车的热管散热器进风口平均风速约为 2 m/s。利用 FLUENT 软件导入网格文件, 设置风速进口边界条件和压力出口边界条件, IGBT 器件的损耗以体积热源形式施加在芯片上, 选择标准 $k-\epsilon$ 湍流模型, 不考虑热辐射的影响。由于网压过高或地铁车辆制动时斩波桥臂的工作时间短, 所以仿真分析时仅考虑三相逆变桥臂产生的损耗进行稳态仿真计算。

图 6 为 M_2 车正线运行工况的仿真结果, 包含空气速度分布、温度分布和对流换热系数分布。由图 6 可以看出: (1) 进口风速为 6 m/s, 受热管散热器翅片、热管和外罩等阻挡, 局部区域的空气速度提高, 最大值为 17.4 m/s; (2) 8 个 IGBT 器件中, 编号为 VT5 和 VT6 的 IGBT 器件温度最高, IGBT 芯片温度最大值为 69.7 °C, 编号为 VT7 和 VT8 的 IGBT 器件温度最低; (3) 进口段的对流换热系数值高于出口段, 说明进口段的散热效果强于出口段。通常, 地铁车辆的运行环境温度取 40 °C, 由仿真分析可知 IGBT 器件的芯片温度最大值约为 86 °C, 远低于最大允许工作结温 150 °C, 因此, 正线运行工况下 IGBT 器件的结温裕量大, 热管散热器加走行风的冷却方式可以保证 IGBT 器件的可靠应用。

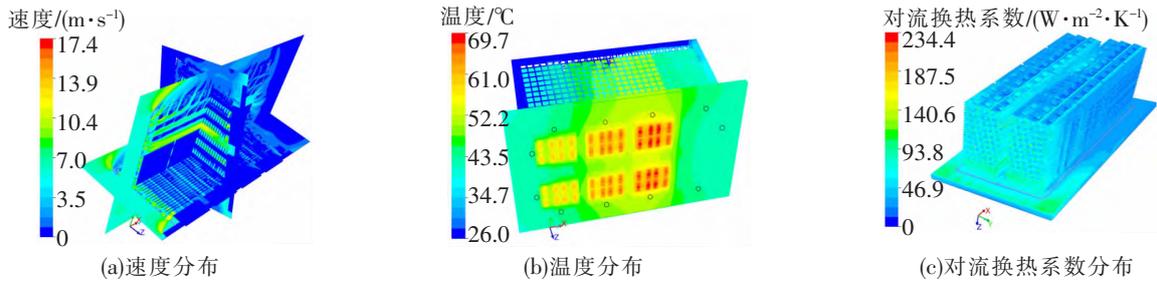


图 6 M₂ 车正线运行工况的仿真结果

图 7 为 M₂ 车压道运行工况的温度分布。可以看出 8 个 IGBT 器件中,编号为 VT1 和 VT2 的 IGBT 器件温度最高,IGBT 芯片温度最大值为 105.3 °C,编号为 VT7 和 VT8 的 IGBT 器件温度最低。通过仿真分析可知 MP₂ 车压道运行工况的温度分布与图 7 相似,故未列出。编号为 VT1 和 VT2 的 IGBT 器件温度最高,IGBT 芯片温度最大值为 150.7 °C,超出最大允许工作结温 150 °C,由此说明压道运行工况下的车辆速度低,尤其是有障碍物阻挡热管散热器时,IGBT 器件面临过热风险。

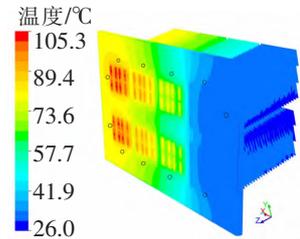


图 7 M₂ 车压道运行工况的温度分布

图 6(b)和图 7 中的圆圈标记表示温升测试中测点 T₁~T₁₁ 的对应位置。表 1 为不同运行工况下各测点的温度测试与仿真结果对比。其中的 MP₂ 车压道运行工况、M₂ 车压道运行工况和 M₂ 车正线运行工况的测试数据分别取自 3 910、3 508、3 170 s 时刻。从表 1 中 3 种运行工况以及各测点的温度对比可知:

表 1 不同运行工况下各测点的温度测试与仿真结果对比

测点	MP ₂ 车压道运行工况			M ₂ 车压道运行工况			M ₂ 车正线运行工况		
	测试/°C	仿真/°C	误差/%	测试/°C	仿真/°C	误差/%	测试/°C	仿真/°C	误差/%
T ₁	88.4	90.2	2.0	82.4	84.4	2.4	42.8	44.3	3.5
T ₂	86.4	87.5	1.3	80.4	77.3	-3.9	49.4	50.6	2.4
T ₃	77.9	79.1	1.5	63.1	59.7	-5.4	54.6	54.5	-0.2
T ₄	56.3	54.3	-3.6	45.4	36.8	-18.9	54.5	42.8	-21.5
T ₅	55.0	54.2	-1.5	44.5	36.7	-17.5	51.2	42.6	-16.8
T ₆	79.1	78.9	-0.3	60.5	58.4	-3.5	54.4	54.3	-0.2
T ₇	83.3	86.8	4.0	75.8	72.7	-4.1	49.5	50.4	1.8
T ₈	90.2	89.9	-0.3	84.2	80.9	-3.9	42.5	43.7	2.8
T ₉	85.5	86.5	1.2	83.9	82.6	-1.6	42.3	43.6	3.1
T ₁₀	84.0	85.7	2.0	82.1	79.4	-3.2	42.4	43.5	2.6
T ₁₁	50.1	38.4	-23.4	42.4	32.7	-22.9	51.0	41.6	-18.4
T ₁₂	52.7	53.2	1.0	56.8	40.6	-28.5	26.8	26.0	-3.0
T ₁₃	26.4	26.0	-1.5	26.0	26.0	0.0	36.5	34.3	-6.0

(1)大部分测点的仿真结果与测试数据时间的温度较为接近,温度高低的变化趋势吻合。

(2)M₂ 车压道运行工况和正线运行工况下,测点 T₄、T₅ 和 T₁₁ 的温度仿真结果与测试数据相差在 10 °C 左右,误差达到 -16.8%~ -22.9%,这与仿真分析时未考虑斩波桥臂的损耗有关,尽管斩波桥臂的工作时间短,由于测点 T₄ 和 T₁₁ 靠近编号为 VT7 的 IGBT 器件,而测点 T₅ 靠近编号为 VT8 的 IGBT 器件,所以 IGBT 器件的热量能较快传递至其周围的热电偶。

(3)MP₂ 车和 M₂ 车压道运行工况的部分温度仿真结果较测试数据偏高,这是由于压道运行工况的

测试数据尚未达到稳定状态。

(4) 出风口的温度仿真结果与测试数据差异较大,例如 M_2 车压道运行工况的测点 T_{12} 误差达到 -28.5% ,主要是图 4(c)中的 T_{12} 温度曲线波动较大,尤其是在 $3\ 495\sim 3\ 625\text{ s}$ 有明显下降,也反映出斩波桥臂变化的损耗对温度的影响。此外,由于热管散热器的阻挡导致出风口的温度分布不均,评价出风口的温度仿真结果时,也不能直接利用空气温升公式($Q=c_p\rho V\Delta T$,其中, Q 为热量; c_p 为空气比热容; ρ 为空气密度; V 为空气体积流量; ΔT 为空气温升)来核算。

(5) 总体而言,通过仿真结果与测试数据的对比,可以说明仿真方法是可行的,仿真结果具有较高的准确性,可以指导地铁车辆牵引逆变器的热设计。

3.3 热管散热器仿真计算的改进

部分测点(如 T_4 、 T_5 、 T_{11} 和 T_{12} 等)的温度误差较大,主要与车辆处于运行状态实时变化、损耗难以准确获取、仿真分析设置的输入条件较理想化等有关。针对该问题,后续可从瞬态温度和稳态温度 2 个方面予以考虑。

考虑瞬态温度时,仿真分析的类型需要设置为瞬态,且三相逆变桥臂和斩波桥臂的损耗需要结合 IGBT 器件的电压、电流等电气参数进行计算,有必要针对每个 IGBT 器件实时测量其电气参数,为仿真分析提供准确的随时间变化的损耗数据^[11]。由于流体动力学仿真模型的网格数量庞大,所以稳态温度计算消耗的时间很大,瞬态计算消耗的计算资源更为巨大。为减小计算资源,缩短计算时间,文献[12]在流体动力学模型中采用精细网格,获得对流换热系数分布,再通过插值方法将对流换热条件映射到粗糙网格的有限元模型中,可以确保热管散热器翅片上的散热条件设置符合流场分布特征。在此基础上,文献[6]从粗糙网格的有限元模型中提取热容矩阵和热传导矩阵,采用模型降阶方法降低矩阵的维度,为快速准确计算热管散热器瞬态温度提供了一种新的途径。

考虑稳态温度时,可以建立地铁列车的空气动力学仿真模型,获得地铁车辆底部,尤其是牵引逆变器附近的空气流速分布,利用 DEFINE_PROFILE 宏为热管散热器的稳态仿真分析提供更为准确的入口边界条件。实际线路运行情况下受弯道、坡度等影响,车速和 IGBT 器件的损耗等数据难以稳定在某一具体的数值,有必要在实验室条件下针对热管散热器搭建风道结构并开展测试。

3.4 热管散热器散热效果的改进

从图 6(b)和图 7 的温度分布还可以看出,由于散热器台面的温度均匀性不佳,导致处于冷却空气末端的 IGBT 器件温度升高,在现有地铁车辆底部固有设备布局不改变的情况下,可以通过提高散热器台面的温度均匀性角度进行热管散热器性能的优化改进。例如:将热管的形式由直管改为 L 形,增大热管蒸发段与散热器台面的接触面积;还可以在 L 形热管基础上,在散热器台面中嵌入均温用的热管,进一步提高散热器台面的温度均匀性。通过仿真分析可知,采用均温技术的热管散热器结构后,压道运行工况的 IGBT 芯片温升降低了 11.4 K ,降温效果较为明显,有利于提高 IGBT 器件在压道运行工况下的可靠性。

4 结论

(1) 地铁车辆牵引逆变器采用热管散热器加走行风的冷却方式时,受车体底部设备阻挡等影响,热管散热器的迎面风速并不等于车辆速度。

(2) 压道运行工况下,车辆速度低,且受障碍物遮挡等影响, MP_2 车热管散热器的进口平均风速为 1 m/s ,低于 M_2 车,是 MP_2 车频繁报 IGBT 器件过热的根本原因。

(3) 正线运行工况下,热管散热器的进口平均风速为 6 m/s ,结温裕量大,热管散热器加走行风的冷却方式可以保证 IGBT 器件的可靠应用。

(4) 仿真分析方法可以从空气速度分布、温度分布和对流换热系数分布等方面评估热管散热器的散热性能,为地铁车辆牵引逆变器的热设计工作提供理论指导。

参 考 文 献

[1]刘宾礼,罗毅飞,肖飞,等. 适用于器件级到系统级热仿真的 IGBT 传热模型[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 1-13.

- [2]李阳, 郑庆红. 大功率 IGBT 散热设计的模拟及实验研究[J]. 电源学报, 2018, 16(1): 107-111.
- [3]付和平, 陈杰, 邱瑞昌, 等. 电力电子变流装置散热器状态智能预测方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(20): 4350-4358.
- [4]冉娅东, 郑庆祥, 金积德. 牵引变流器中 IGBT 模块的高效热管冷却系统设计[J]. 电子器件, 2021, 44(5): 1122-1127.
- [5]陈柏超, 李田月, 田翠华. 中压 IGBT 模块用热电制冷集成微型平板热管散热器的研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(6): 524-532.
- [6]丁杰, 张平. 地铁车辆牵引逆变器热管散热器的温升试验及热仿真[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(3): 95-102.
- [7]母福生, 王海军, 江乐新, 等. 用于地铁变流器的平板微热管散热器数值模拟与实验研究[J]. 制冷学报, 2019, 40(5): 102-108.
- [8]吴智勇, 王雄, 黄南, 等. 基于均温技术的走行风冷热管散热器性能优化研究[J]. 机车电传动, 2021(1): 126-132.
- [9]丁杰, 忻力, 何海兴, 等. 二电平 IGBT 变频器载荷工况下的损耗和温升计算程序开发[J]. 大功率变流技术, 2014(1): 1-4, 37.
- [10]丁杰, 唐玉兔, 忻力. 一种改进的二电平 IGBT 变频器损耗计算方法[J]. 大功率变流技术, 2013(4): 18-21.
- [11]丁杰, 张平. 地铁车辆牵引逆变器 IGBT 模块的结温与疲劳寿命计算[J]. 电气工程学报, 2017, 12(10): 9-18.
- [12]丁杰, 唐玉兔, 忻力, 等. 网格尺寸对 IGBT 水冷散热器仿真结果的影响[J]. 大功率变流技术, 2012(6): 26-30.

Analysis on the Overheating Alarm of IGBT Devices Under the Operating Condition of Metro Vehicles

Ding Jie¹, Tang Yutu²

(1. International College, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China;

2. School of Geography and Tourism, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China)

Abstract: In view of the frequent overheating of IGBT devices under the ballast operation condition of vehicles of Ningbo Metro Line 2, the temperature rise test under the ballast operation condition and the main line operation condition was carried out for MP₂ and M₂ vehicles respectively, and the heat pipe radiator and IGBT devices were simulated using FLUENT software. The results show that the wind speed at the inlet and outlet of the heat pipe radiator of the traction inverter of metro vehicles is about 15%~40% of the vehicle speed due to the obstruction of the equipment at the bottom of the vehicle body. Under the working condition of ballast operation, the average inlet wind speed of heat pipe radiator of MP₂ vehicle is lower than that of M₂ vehicle, which is the fundamental reason why MP₂ car frequently reports that IGBT devices are overheated. Under the operating condition of the main line, the average inlet wind speed of the heat pipe radiator is 6 m/s, which can ensure the reliable application of IGBT devices. The method of temperature rise test and simulation analysis can provide theoretical guidance for the thermal design of metro vehicle traction inverter.

Key words: line operation; metro vehicles; traction inverter; heat pipe radiator; IGBT devices; temperature rise