

研
究
开
发流动状态与热源简化方式对 IGBT
水冷板仿真结果的影响

丁 杰, 李江红, 陈燕平, 张陈林

(株洲南车时代电气股份有限公司 技术中心, 湖南 株洲 412001)



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。

摘 要: 利用层流和湍流模型对比研究了直槽道形式水冷板内部的流动状态, 结果表明各槽道的平均流速不一致, 不能简单地将槽道内的流动状态定性为层流或湍流。与均布热源方式相比, 对 IGBT 元件精确建模方式得到的水冷板上 IGBT 元件安装面处的最高温度可高 6~9。精确建模方式可以获得准确的温度分布和 IGBT 元件内部的芯片结温, 计算结果有利于优化水冷板槽道结构, 提高换热效率。

关键词: IGBT; 水冷板; 流动状态; 热源; 水冷散热器; 主变流器; 仿真结果

中图分类号: TM46; TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2011)05-0021-05

Effects of Flow Regime and Heat Source Simplifications
on Simulation Results for Water-Cooling Plate of IGBT

DING Jie, LI Jiang-hong, CHEN Yan-ping, ZHANG Chen-lin

(Technology Center, Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: By comparing laminar and turbulent models, the flow regime of water-cooling plate with straight channels was researched; the results showed that the average velocities were different in channels, and it was improper to set the flow regime of all channels with laminar or turbulent. The highest different temperature of IGBT installing place of water-cooling plate would be 6~9 to IGBT precise model compared with uniform layout heat source. The exact temperature field and junction temperature of IGBT would be got with precise model, which helped optimizing channel structure and improving heat transfer efficiency.

Key words: IGBT; water-cooling plate; flow regime; heat source; water-cooling radiator; power converter; simulation result

0 引言

近年来,交流传动电力机车主变流器正在往大功率水冷 IGBT 技术和主辅一体化集成技术的方向发展^[1]。IGBT 模块是主变流器的核心部件,计算 IGBT 损耗、结温纹波、IGBT 元件温度,分析水冷板冷却性能是很有必要的。IGBT 损耗可以通过元器件厂商提供的仿真工具(如:英飞凌公司的 IPOSIM、三菱公司的 Melcosim 等)进行计算,其主要基于正弦输出电流条件下 IGBT 和续流二极管的导通损耗和开关损耗,计算结温则需要知道环境温度和冷水板的热阻。而目前水冷板的结构设计大部分是经验设计,通过试验来评价冷却性能时,受到时间长、成本高、试验条件有限、试验数据不准确等因素的影响,得到的水冷板热阻值准确度不高。

CFD(计算流体力学)是近年来随着计算机技术和数值方法的发展而得到更加广泛应用的一种分析方法,能更简便、更快速、更直观地得到计算结果。文献[2-3]等利用有限元软件 ANSYS 计算了水冷散热器的温度分布,但是均假设为均匀分布的热源,没有对元件进行详细建模。本文利用 FLUENT 软件对比分析了均布热源方式与 IGBT 元件精确建模方式的结果,并对流动状态进行了探讨,可为 IGBT 水冷板的优化设计提供参考依据。

1 IGBT 模块构造

在一个 IGBT 模块里,数个功率半导体芯片(IGBT 芯片和二极管芯片)被集成在一块共同的底板上。这些芯片的底面被焊接于(或被粘贴于)一块绝缘基片的金属化表面。该绝缘基片的作用是在保证良好导热性能的同时还提供了相对于模块底板的电气绝缘。芯片的

上表面被金属化,它的电气连接可以采用细的铝制键合线用键合的方式来实现。常用的基片有:直接铜熔结DCB(Direct Copper Bonding)主动金属钎焊AMB(Active Metal Brazing)绝缘金属基片IMS(Insulated Metal Substrate)多层绝缘金属基片(Multilayer-IMS)和厚膜铜TFC(Thick Film Copper)等。常用的绝缘材料有:氧化铝(Al_2O_3)氮化铝(AlN)氧化铍(BeO)四氮化三硅(Si_3N_4)环氧树脂、聚酰亚胺等。

图1是某IGBT模块截面的示意图,图2是190 mm × 140 mm尺寸IGBT模块的内部构造,包含了24个13 mm × 13 mm IGBT芯片和12个13 mm × 13 mm 二极管芯片,底板尺寸为187 mm × 137 mm。

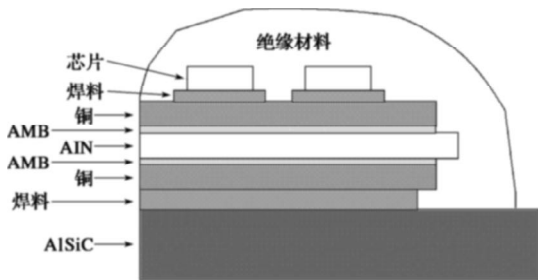


图1 IGBT 模块截面

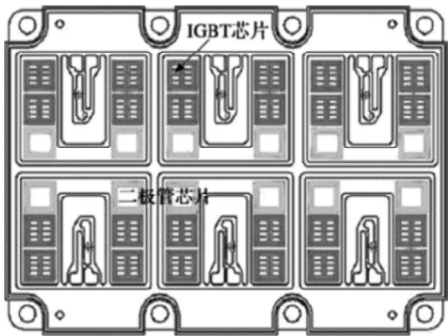


图2 IGBT 模块内部构造图

表1列出了IGBT模块内几种材料的热性能参数。值得注意的是,不同元器件厂商提供的材料参数会略有区别。

表1 材料热性能参数

材料	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	比热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
芯片	2 340	157	729
焊料	7 560	33	226
铜	8 960	395	386
AlN	3 210	175	740
AlSiC	3 010	180	823

2 仿真模型

2.1 仿真对象

变流器模块采用模块化结构、快速管路连接、低感母排技术和轻量化设计,将电容器、低感母排、控制盒、水冷板、IGBT元件等集成在一起,便于安装和维护更换。图3是某变流器模块采用的水冷板示意图,水冷板上安装了6个IGBT模块,由IPOSIM软件可确定每个元件耗散2 kW热量,热量通过IGBT模块的底板和涂抹

的导热硅脂传导到水冷板。水-乙二醇混合物从入口进入,在数个截面为2.5 mm × 14.5 mm的直槽道内流动,带走热量,从出口流出。

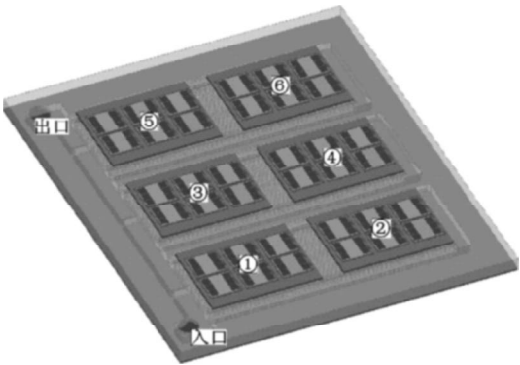


图3 水冷板示意图

在大功率变流器设计中,不能忽略功率端子和芯片之间连线所引起的损耗,它会对IGBT壳温有一定的影响。尽管它的部分损耗能够通过功率端子散发出去,IPOSIM软件认为所有连线的损耗是通过IGBT模块的底板散热的,本文的仿真也采用这样的假设。

方案1取每个IGBT元件2 kW的损耗均布在187 mm × 137 mm的底板上。从图2可看出,芯片和铜层分布在中间区域,两侧的孔用于螺栓与水冷板的紧固,热量将主要从中间区域散发出去,因此,方案2取181 mm × 110 mm均布热源。方案1、2未考虑接触热阻的影响。方案3选择对IGBT进行详细建模,构建了芯片、焊料、铜层、AlN、AlSiC底板,并赋予相应的材料参数,封装用的绝缘材料则没有考虑。IGBT模块底板上均匀涂抹了导热硅脂,与水冷板之间的接触热阻为9 K/kW。2 kW热量作为均匀体积热源分布在芯片上。

2.2 参数设置

水的冰点为零度,为保证水冷系统在-25 的低温条件下能正常工作,选择了水和乙二醇的混合物(各含50%)作为冷却液。图4是水-乙二醇混合物在-37~70 的特性曲线图。

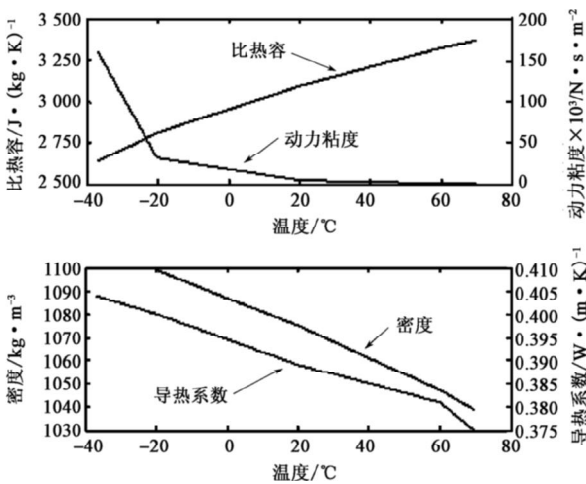


图4 水-乙二醇混合物的物性曲线

冷却液入口温度55 ,流量为30 L/min。可初步估

算出各个槽道内的平均流速为 1.061 m/s。槽道当量直径计算公式为

$$d_e = \frac{2ab}{a+b} \quad (1)$$

式中: a 、 b 分别为槽道的宽度和高度。

Re 数的计算公式为

$$Re = \frac{\rho u d_e}{\eta} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; u 为流场中的特征速度, m/s ; η 为流体的动力粘度, $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$ 。

由计算可知 $d_e = 4.26 \text{ mm}$ $Re = 2\,780$ 。

就管槽内的流动状态而言, 有层流和湍流之分, 其分界点的临界雷诺数 $Re_c = 2\,300$ 。雷诺数大于 10 000 后为旺盛湍流区, 而一般认为 $2\,300 < Re < 10\,000$ 的范围为过渡区^[4]。由于各槽道的阻力不同, 流速不一, 层流和湍流状态不能一概而定。因此, 需要对比研究层流和湍流情况下的计算结果。本文选择了以下几种常用湍流模型:

Spalart-Allmaras 单方程模型是从经验和量纲分析出发, 由针对简单流动再逐渐补充发展而适用于带有层流流动的固壁湍流流动的单方程模型。

标准 $k-\varepsilon$ 模型需要求解湍流脉动动能 k 及其耗散率 ε 方程。湍流脉动动能输运方程是通过精确的方程推导得到, 但耗散率方程是通过物理推导, 数学上模拟得到的。该模型假设流动为完全湍流, 分子粘性的影响可以忽略。因此, 标准 $k-\varepsilon$ 只适合完全湍流的流动过程模拟。

重整化群(renormalization group, RNG) $k-\varepsilon$ 模型是将非稳态 Navier-Stokes 方程作 Gauss 统计展开, 并用对脉动频谱的波段数作滤波的方法推导出来的模型。与标准 $k-\varepsilon$ 模型有相似的形式, 但模型常数不同, 而且方程中出现了新的函数。

可实现 $k-\varepsilon$ 模型是为了避免标准 $k-\varepsilon$ 模型处理时均应变率特别大时, 出现负的正应力的不正确情况。可实现 $k-\varepsilon$ 模型的 k 方程与标准 $k-\varepsilon$ 模型和 RNG $k-\varepsilon$ 模型有相同的形式, 只是模型参数不同, ε 方程则有较大不同。

考虑到槽道的宽度为 2.5 mm, 为了能准确地捕捉流场信息, 需要在该尺度上划分足够数量的网格。结合 IGBT 模块各层材料的厚度和整个模型的复杂程度, 流体区域的网格尺寸取 0.5 mm。为了控制网格数量, 减少计算机资源, 水冷板的固体区域网格尺寸逐步扩大至 1 mm。整个模型的网格划分由高质量的六面体单元和极少量的五面体单元组成, 网格数量为 1 256 万。图 5 和图 6 分别是 IGBT 模块和流体区域的网格。

3 计算分析

3.1 流场分布

图 7 和图 8 分别是层流模型和标准 $k-\varepsilon$ 模型的中间

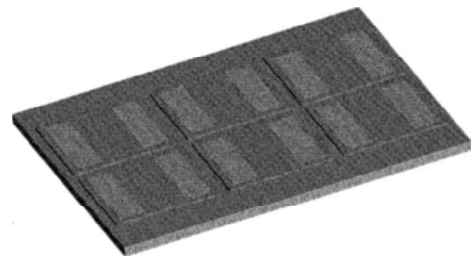


图 5 IGBT 模块网格

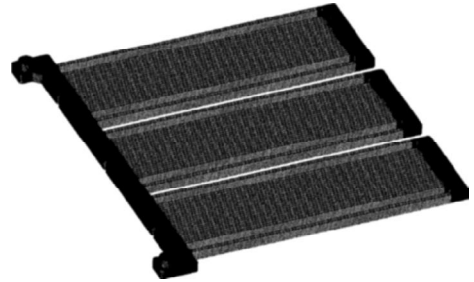


图 6 流体区域网格

面流速分布, 可以看出水-乙二醇混合物在槽道内和转折区域的流动情况。层流模型情况下, 转折区域圆角处的流速很小, 存在一些旋涡。标准 $k-\varepsilon$ 模型情况下, 转折区域圆角处的流速则大一些, 且各槽道的流速要均匀一些, 但具体的流速值难以在云图中清楚体现出来。

水冷板共有 78 个直槽道, 第 1 号槽道在入口侧的最外道, 第 78 号槽道在出口侧的最外道。为了清楚描述各槽道内的流速, 图 9 和图 10 分别是层流模型和标准 $k-\varepsilon$ 模型的槽道平均流速分布。层流模型情况下, 第 19 号和第 58 号槽道的平均流速最高, 可达 1.485 m/s, $Re = 3\,890$, 而第 47 号槽道的平均流速最低, 为 0.28 m/s, $Re = 733$ 。标准 $k-\varepsilon$ 模型情况下, 第 58 号槽道的平均流速最高, 为 1.36 m/s, $Re = 3\,560$, 第 47 号槽道的平均流速最低, 为 0.594 m/s, $Re = 1\,556$ 。

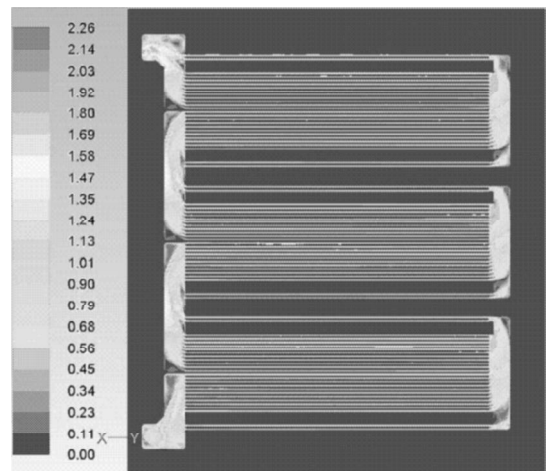


图 7 层流模型的中间面流速分布

图 11 是层流和 4 种湍流模型的压降对比曲线, 层流模型的压降最小, 为 22.1 kPa, 标准 $k-\varepsilon$ 模型是基于完全湍流的假设, 压降要高于其他几种湍流模型。

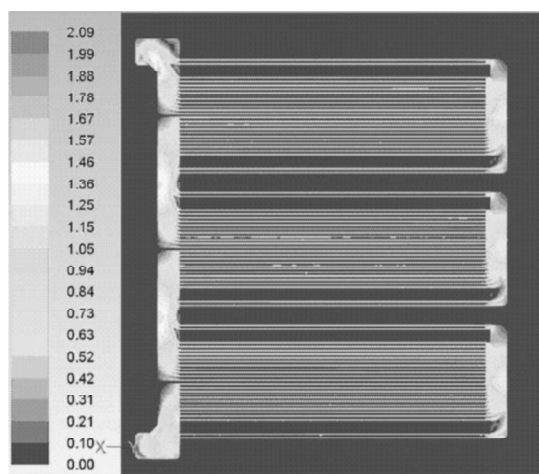
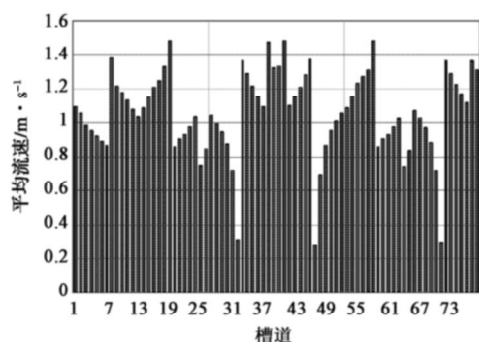
图 8 标准 $k-\varepsilon$ 模型的中间面流速

图 9 层流模型的各槽道平均流速

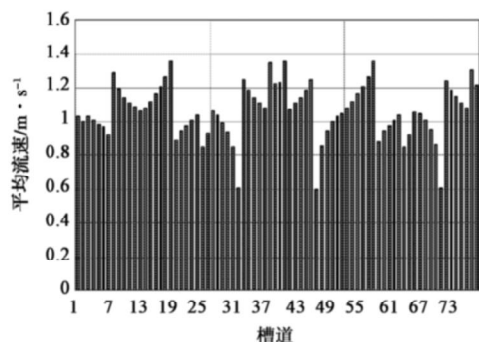
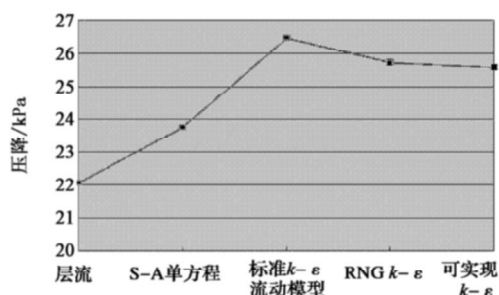
图 10 标准 $k-\varepsilon$ 模型的各槽道平均流速

图 11 压降对比

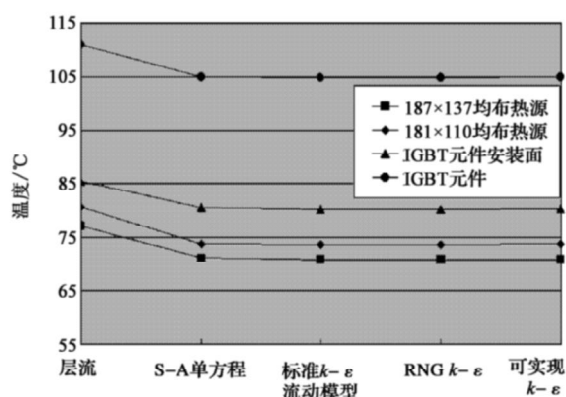


图 12 层流和 4 种湍流模型的温度对比

由于层流时流体微团沿着主流方向作有规则的分层流动,而湍流时流体各部分之间发生剧烈的混合,在热源方案相同时湍流换热的强度比层流强烈。55~70 之间冷却液的物性参数变化不大,所以流场对温度场有很大的影响,而温度场对流场的反作用要小得多。由于每个槽道的平均流速不一,雷诺数不同,不能简单地将槽道内的流动状态定性为层流或湍流。层流模型和标准 $k-\varepsilon$ 模型是分析流动状态的 2 种典型模型,因此,综合考虑层流模型和标准 $k-\varepsilon$ 模型的温度分布,直槽道形式水冷板的冷却性能取两者之间的值更为合理。

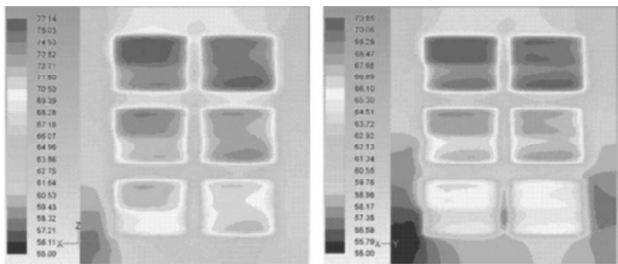
图 13 是层流模型(左侧)和标准 $k-\varepsilon$ 模型(右侧)的温度对比。相同热源方案的层流模型和标准 $k-\varepsilon$ 模型的温度分布有较大差异,层流模型的最高温度比标准 $k-\varepsilon$ 模型高 5~7 $^{\circ}\text{C}$ 。方案 1 将热量均匀分布的面积是方案 2 的 1.287 倍,最高温度比方案 2 低 3 $^{\circ}\text{C}$ 左右。方案 3 的 IGBT 元件安装面的最高温度比方案 1 高出 9 $^{\circ}\text{C}$ 左右。因此,用 3 种方案的分析结果评估水冷板的传热性能时,方案 1 的热阻值最小,方案 3 的热阻值最大。

图 14 是标准 $k-\varepsilon$ 模型时,各 IGBT 元件底部的温度分布。可以看出各 IGBT 元件底部的温度很不均匀,温度高的区域主要集中在 187 mm × 110 mm 区域,芯片正下方的元件底部的温度最高,远离芯片的底板两侧温度最低,芯片上的热量主要从 IGBT 内部向芯片正下方的底板传导,向底板两侧传导的热量较少,这说明 IGBT 模块的热阻测量基准点选在芯片的正下方能更准确地反映 IGBT 实际工况,将测量基准点选在 IGBT 模块的底板侧面,会有较大的误差。第 5、6 个 IGBT 元件的温度高于其余 4 个,热疲劳寿命要低一些。图 14 和图 13(c) 相比,IGBT 元件底板温度分布与水冷板上元件安装位置处的温度分布有较大的区别,这是由于 IGBT 元件与水冷板之间存在接触热阻的缘故。为了尽可能降低接触热阻,需要在 IGBT 元件底板上均匀涂抹一层薄的导热硅脂,安装时使用规定的力矩值拧紧。

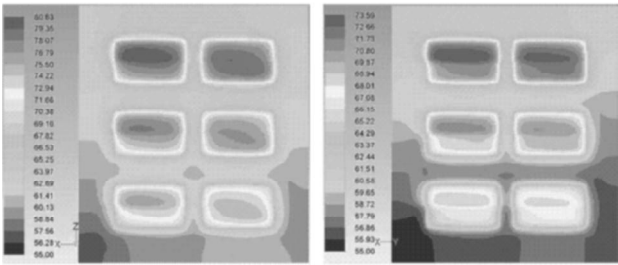
IGBT 元件技术规格书中,一般要求芯片结温低于 125 $^{\circ}\text{C}$,实际应用时应进行功率降额,留出一定的安全裕量。该水冷板在实际使用中出现过几例 IGBT 元件热疲劳现象,表明方案 3 的仿真结果具有较高的可信度。

3.2 温度场分布

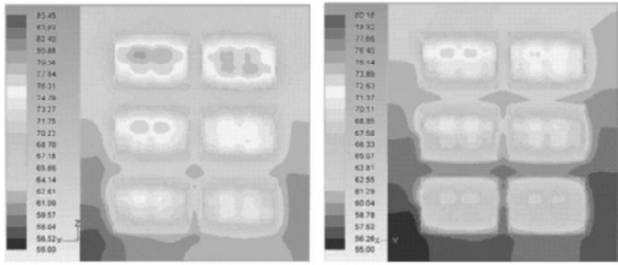
图 12 是层流和 4 种湍流模型的温度对比结果。可以看出 4 种湍流模型的温度基本一致,均小于相应层流模型的温度。IGBT 元件的温度高于水冷板的 IGBT 元件安装面上的温度,181 mm × 110 mm 均布热源方案的温度高于 187 mm × 137 mm 均布热源方案。



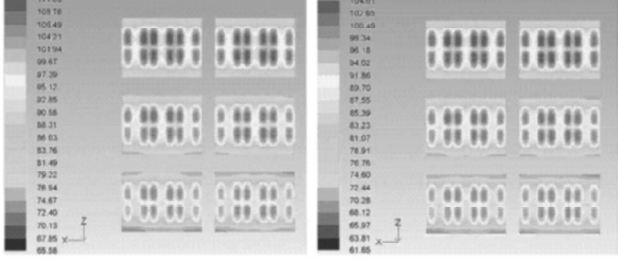
(a)方案 1 : 187 mm × 137 mm 均布热源



(b)方案 2 : 181mm × 110mm 均布热源



(c)方案 3 : IGBT 元件安装面



(d)方案 3 : IGBT 元件

图 13 温度对比

为了改善第5、6个IGBT元件的散热条件,可以结合图9和图10一起分析。第53、54、77、78号槽道的平均流速都很高,而这些槽道对应热量很少的远离芯片的底板两侧。第69~71号槽道对应芯片的正下方,平均流速比较低,因此,适当改进槽道的尺寸和布局,让尽量多的冷却液流经IGBT芯片正下方的流道,可以有效降低第5、6个IGBT元件的芯片温度,提高各IGBT元件的温度均匀性。

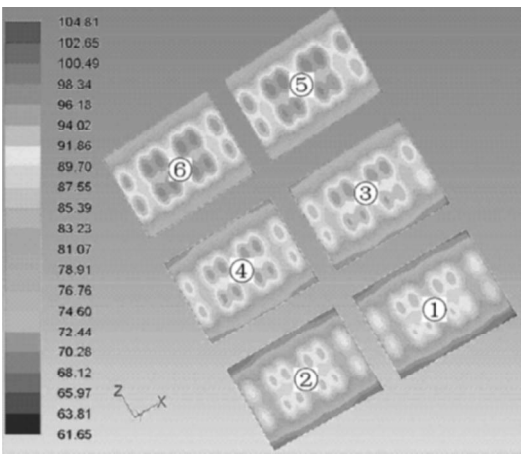


图 14 IGBT 元件底部温度分布

4 结语

对IGBT元件精确建模,可以获得准确的温度分布和IGBT元件内部的芯片结温,为热设计提供直观、准确的计算结果。

每个槽道的平均流速不一致,雷诺数不同,不能简单地将槽道内的流动状态定性为层流或湍流。为了合理评价直槽道形式水冷板的冷却性能,应综合考虑层流模型和标准 $k-\epsilon$ 模型的温度分布。

IGBT元件与水冷板之间存在接触热阻,IGBT元件底板温度分布与水冷板上元件安装位置处的温度分布有较大的区别,因此,IGBT模块的热阻测量基准点选在芯片的正下方能更准确地反映IGBT实际工况,将测量基准点选在IGBT模块的底板侧面,会有较大的误差。

尽管各槽道的截面尺寸相同,但各槽道的平均流速不同,适当改进槽道的尺寸和布局,让尽量多的冷却液流经IGBT芯片正下方的流道,可有效降低IGBT芯片的结温。

参考文献:

[1] 荣智林,忻力,陈燕平,等. TGA6型主辅一体化IGBT变流器[J]. 机车电传动, 2010(5): 25-28.
[2] 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.
[3] 石书华,李守法,张海燕,等. 三电平变频器水冷散热器温度场的计算与分析[J]. 动力工程学报, 2010, 30(1): 68-72.
[4] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.