

翅柱式水冷散热器的性能研究

丁 杰, 何多昌, 唐玉兔

(南车电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 为化解强化换热与流动阻力的矛盾、优化某 IGBT 水冷散热器的设计, 对比分析了 5 种不同翅柱结构(带小突起枣核状、光滑枣核状、菱形、圆形和方形)对流速、压降和温度的影响。研究表明: 带小突起枣核状翅柱的换热效果最佳, 圆形翅柱的换热效果最差; 光滑的枣核状翅柱流线型最好、压降最小, 方形翅柱的流线型最差、压降最大; 温度对冷却介质物性参数有较大的影响, 在水冷散热器的设计和使用过程中需要对温度予以关注。

关键词: IGBT; 水冷散热器; 翅柱; 枣核状; 流速; 压降; 温度

中图分类号: TM46; TB657.5

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2013)02-0032-05

Performance Analysis of Water-cooling Radiator with Pin-fins

DING Jie, HE Duo-chang, TANG Yu-tu

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

Abstract: In order to solve the contradiction between enhanced heat transfer and flow resistance, optimize the design of a water-cooling radiator with IGBT module, it presents the comparison and analysis of the effects of 5 different pin-fins structures (with small protrusions of jujube-stone-like, smooth jujube-stone-like, rhombus, circular and square) on the velocity, pressure and temperature. Research results show that jujube-stone-like pin-fin with small protrusions has the best heat transfer effect while heat transfer effect of circular pin-fins is the worst. Smooth jujube-stone-like pin-fin has the minimum pressure drop while square pin-fin has the maximum. As temperature has great influence on cooling medium physical parameters, consideration must be taken to temperature during design and use of water-cooling radiator.

Key words: IGBT; water-cooling radiator; pin-fins; jujube-stone-like; flow velocity; pressure drop; temperature

0 引言

随着大功率电力电子器件的发展, 变频器的容量得以不断提升, 电力电子器件的损耗也随之增加。尽管风冷方式成本低廉且技术水平得到不断提升, 但其散热能力有限, 促使具有更大散热能力的水冷散热器的应用越来越广泛。针对结构紧凑的水冷散热器, 为进一步提高散热性能, 人们做出了许多努力^[1-10], 研究方向主要集中在流道结构、形式及微通道等。翅柱式结构不仅避免了板翅式结构将来流变得均匀的缺点, 强化了

换热, 而且还能增强流体的扰动性, 增大流动过程中的局部分离损失和漩涡损失, 故其流动阻力往往要大于板翅式结构的。强化换热与流动阻力这一矛盾关系给水冷散热器的优化设计带来了很多困难。为了优化 IGBT 水冷散热器设计, 本文利用 FLUENT 软件对比分析了 5 种不同翅柱结构对流速、压降和温度的影响。研究结果可为水冷散热器的设计工作提供指导。

1 水冷散热器的结构

图 1 示出某 IGBT 水冷散热器结构, 其内部槽道采用了并联型和串联型相结合方式。冷却介质由入口流入后均匀流向 3 条支路, 各支路介质依次流经 2 个 IGBT 元件下方的槽道并带走热量, 在出口汇流后流出。汇

收稿日期: 2012-10-09

作者简介: 丁杰(1979-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事变流器结构仿真和热仿真的研究开发工作。

流到出口的槽道设置了一段细小弯曲的泄压槽,其作用是平衡3条支路的压降,保证每条支路的流量相同。为了强化换热,拟采用5种不同翅柱结构又排布置方案。第1种方案结构截面为枣核状的翅柱(长6.95 mm,宽2.8 mm),上面有圆弧半径为0.1 mm的小突起(图2),用于增强紊流作用;第2种方案结构截面为光滑的枣核状翅柱,其上无小突起;第3、4、5种方案结构的截面分别为菱形(6.95×2.8 mm)、圆形(直径2.8 mm)和正方形(边长2.8 mm)的翅柱。5种结构翅柱的高度均为3 mm。翅柱又排布置时,长度方向间距为5.5 mm,宽度方向间距为5.8 mm。

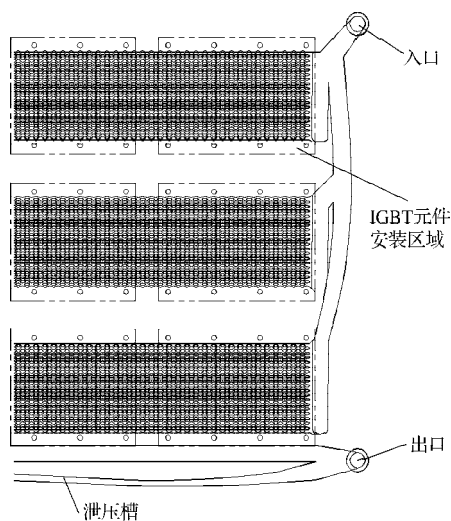


图1 水冷散热器局部结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of partial structure for water-cooled radiator

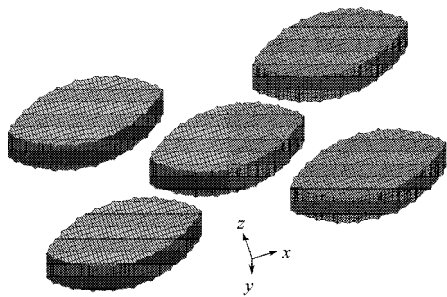


图2 带小突起的枣核状翅柱

Fig. 2 Jujube-stone-like pin-fins with small protrusions

2 计算模型与参数设置

由于翅柱的细节特征尺寸很小,为模拟小突起的作用,要求网格的尺寸不能过大。如果对整个水冷散热器进行仿真,所需容量会超出计算资源的限制。考虑到3个支路的流量相同,元件的发热量也相同,且几何和边界条件具有一定的对称性,可以充分利用对称的特点来建立FLUENT计算模型(图3)。水冷散热器的入口总流量为30 L/min,按该计算模型折算后的入口平均流

速为1.054 m/s,出口设置为压力出口边界条件,计算得出单个IGBT元件耗散的热量为2 997 W。翅柱平面方向(x 、 z 方向)网格尺寸取0.2 mm,厚度方向(y 方向)网格尺寸取0.5 mm,其余区域的网格尺寸逐渐过渡至1 mm,划分高质量的六面体网格和极少量的棱柱体网格,计算模型的网格数量在1 500万左右。选择层流和标准 k - ε 模型这2种最具代表性的仿真模型来分析水冷散热器内部的流动状态^[11]。

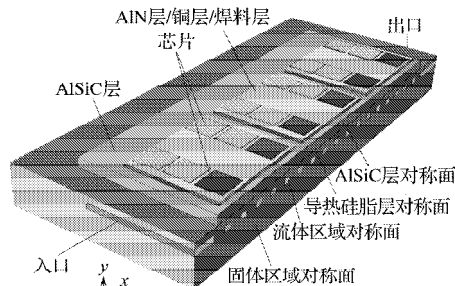


图3 计算模型

Fig. 3 Computational model

图4~图7分别示出水、40%乙二醇+60%水、50%乙二醇+50%水的热物性变化曲线。可以看出,3种冷却介质的参数在同一温度下有着较大的不同,而同一种冷却介质在不同温度下亦有较大的不同。可以利用图4~图7了解不同温度下各种冷却介质的密度、比热容、导热系数和动力粘度。

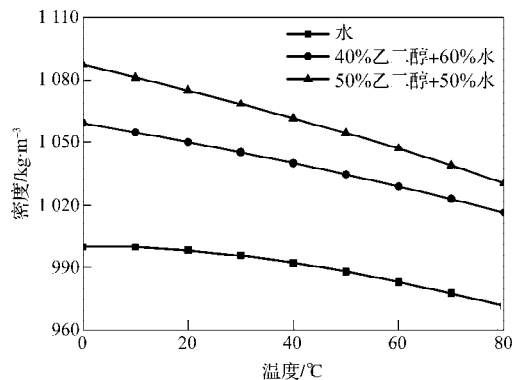


图4 密度随温度变化的曲线

Fig. 4 Curves of density with respect to temperature

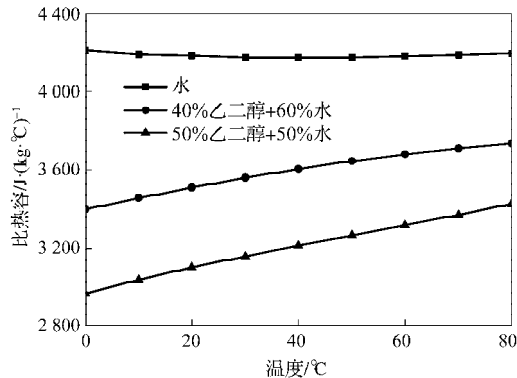


图5 比热容随温度变化的曲线

Fig. 5 Curves of specific heat with respect to temperature

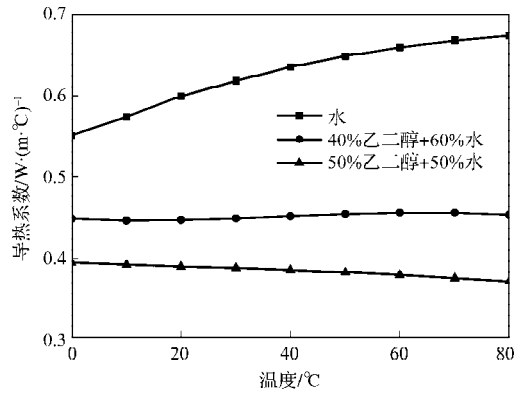


图6 导热系数随温度变化的曲线

Fig. 6 Curves of thermal conductivity with respect to temperature

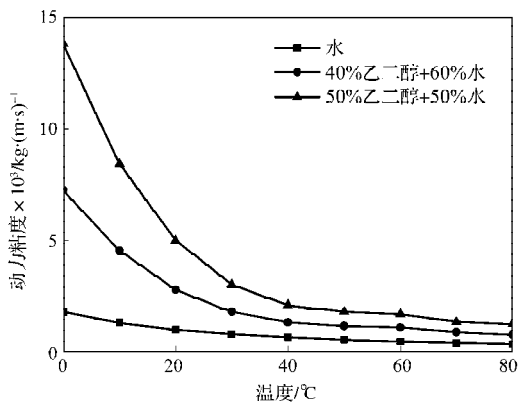


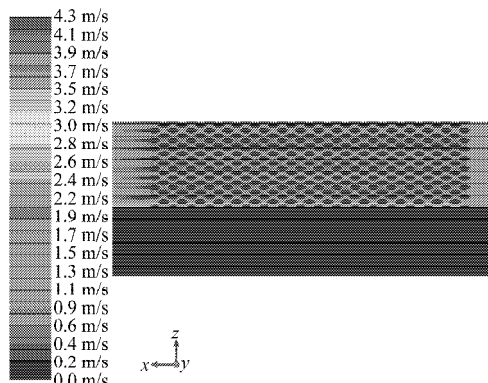
图7 动力粘度随温度变化的曲线

Fig. 7 Curves of dynamic viscosity with respect to temperature

3 计算结果及分析

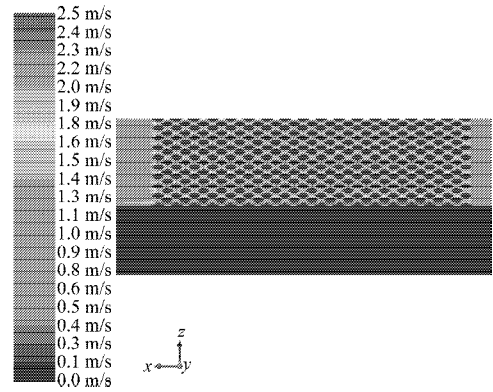
3.1 流场分布

图8示出冷却水入口温度为25℃、采用标准 $k-\varepsilon$ 模型的流速分布计算结果。5种翅柱结构的流速分布都比较均匀,冷却水可以对叉排的翅柱进行较好的冲刷。由于方形翅柱的截面积突变最显著,局部区域的最高流速可达5.6 m/s,是5种翅柱结构中最高;光滑的枣核状翅柱的流线型最好,局部区域的最高流速仅为2.5 m/s,是5种翅柱结构中最低的;菱形、圆形和带小突起枣核状翅柱的最高流速分别为2.8 m/s、3.2 m/s和4.3 m/s。



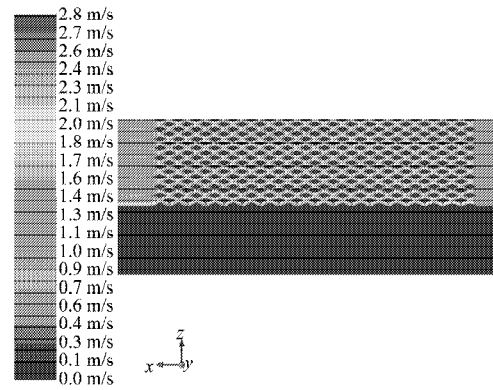
(a) 带小突起的枣核状翅柱

(a) Jujube-stone-like pin-fins with small protrusions



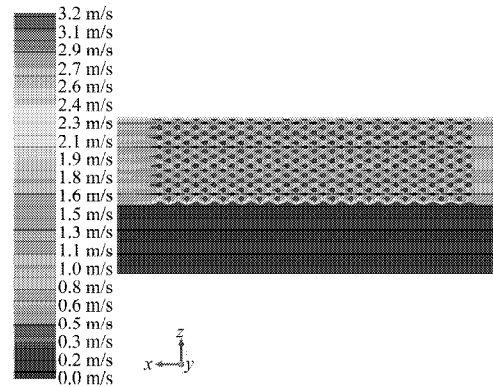
(b) 光滑的枣核状翅柱

(b) Smooth jujube-stone-like pin-fins



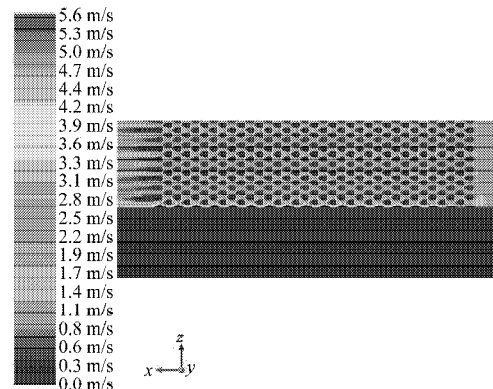
(c) 菱形翅柱

(c) Rhombus pin-fins



(d) 圆形翅柱

(d) Circular pin-fins



(e) 方形翅柱

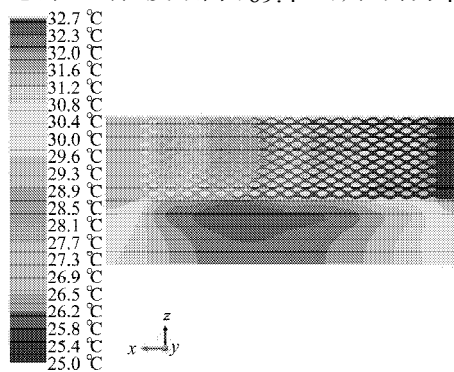
(e) Square pin-fins

图8 中间截面流速分布

Fig. 8 Velocity distribution in middle section

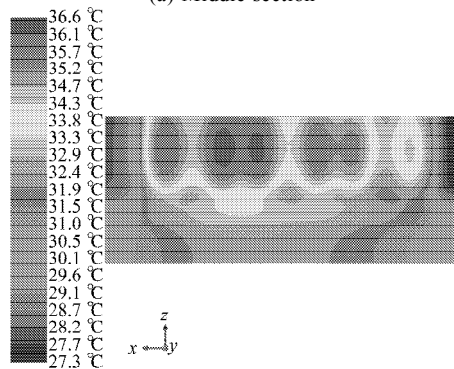
3.2 温度场分布

图9示出冷却水入口温度为25℃、采用标准 $k-\varepsilon$ 模型时带小突起枣核状翅柱结构水冷散热器的温度场分布计算结果。图9(a)示出中间截面的温度分布,可以看出,芯片正下方翅柱的温度高于其他位置的。流体区域基本对应了芯片尺寸的范围,大部分热量沿着芯片正下方的各层材料传递并被冲刷翅柱的冷却水带走;还有一部分热量沿着芯片两侧的AlSiC基板层传递,传导至散热器的固体区域,因该区域远离冷却水的作用,从而出现了局部区域温度较高的情况。图9(b)示出散热器上IGBT元件安装面的温度分布,对应芯片正下方的温度最高(36.6℃)。图9(c)示出元件及散热器整体的温度分布,芯片上的温度最高(69.4℃),温升为44.4℃。



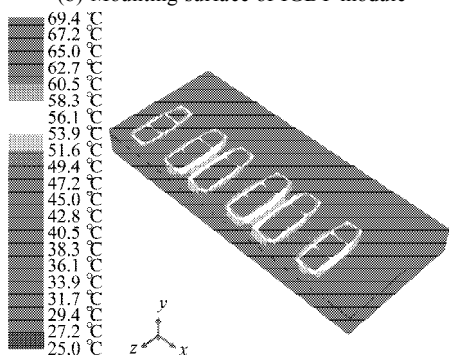
(a) 中间截面

(a) Middle section



(b) IGBT 元件安装面

(b) Mounting surface of IGBT module



(c) 整体

(c) Total

图9 温度分布

Fig. 9 Temperature distribution

3.3 对比分析

表1和表2分别示出冷却介质入口温度为25℃时的芯片最高温度和压降对比,是考虑了5种翅柱结构方案在不同冷却介质(水、40%乙二醇+60%水、50%乙二醇+50%水)和流动状态(层流模型、标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型)下的计算结果。由表1可知,采用相同翅柱结构和冷却介质时,层流模型得到的温度均高于湍流模型,温度可相差6~10℃。针对同一种翅柱结构,采用50%乙二醇+50%水作为冷却介质时芯片的最高温度值最大,而采用水作为冷却介质时芯片的最高温度值最小;均采用层流模型计算时因冷却介质不同导致的芯片最高温度值差可达6~9℃,均采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型计算时因冷却介质不同导致的芯片最高温度值差为7~10℃。

表1 入口温度25℃时的芯片最高温度对比

Tab. 1 Contrast of chip temperatures while the entrance temperature is 25℃

	芯片最高温度/℃					
	水		40% 乙二醇+60% 水		50% 乙二醇+50% 水	
	层流	湍流	层流	湍流	层流	湍流
方案1	75.39	69.41	79.09	73.17	81.28	76.11
方案2	77.81	69.69	82.25	74.11	84.93	77.45
方案3	77.21	70.82	81.18	75.23	83.59	78.32
方案4	83.22	71.92	88.95	76.72	92.31	81.74
方案5	80.69	70.61	85.76	74.97	88.77	78.01

表2 入口温度25℃时的压降对比

Tab. 2 Contrast of pressure drops while the entrance temperature is 25℃

	压降/kPa					
	水		40% 乙二醇+60% 水		50% 乙二醇+50% 水	
	层流	湍流	层流	湍流	层流	湍流
方案1	47.63	51.72	54.84	58.61	62.23	65.77
方案2	13.74	14.71	18.59	19.78	22.74	24.14
方案3	16.95	17.91	20.51	21.49	24.53	25.74
方案4	19.80	21.29	23.58	26.53	27.58	30.36
方案5	84.85	92.73	89.33	97.68	93.46	101.02

针对同一种冷却介质,采用湍流模型计算时,芯片最高温度由低到高的翅柱结构方案排序是“方案1—方案2—方案3—方案5—方案4”,最低温度与最高温度相差8~11℃;采用标准 $k-\varepsilon$ 层流模型计算时,芯片最高温度由低到高的翅柱结构方案排序是“方案1—方案3—方案2—方案5—方案4”,最低温度与最高温度相差2.5~5.5℃。这说明带小突起枣核状翅柱的换热效果最佳,圆形翅柱的换热效果最差。

由表2可知,同一种翅柱结构下,层流模型的压降小于湍流模型。采用层流模型和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型计算时,压降由低到高的翅柱结构方案排序均为“方案2—

方案3—方案4—方案1—方案5”。方案2、3、4的压降差别较小；至于方案5，由于方形翅柱明显改变了流动的截面积，流线型最差，导致压降远远高出其余方案。方案1的压降约为方案2的2.7~3.5倍，二者主要区别在于前者增了许多圆弧半径为0.1 mm的小突起，尽管小突起的尺寸非常小，但对压降产生了非常明显的影响。

表3和表4分别示出入口温度为50℃时的芯片最高温度和压降对比，同样是考虑了5种翅柱结构方案在不同冷却介质（水、40%乙二醇+60%水、50%乙二醇+50%水）和流动状态（层流模型、标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型）下的计算结果。其变化趋势与表1和表2所示的基本一致，但具体数值发生了变化。

表3 入口温度为50℃时的芯片最高温度对比

Tab. 3 Contrast of chip temperatures while the entrance temperature is 50℃

	芯片最高温度/℃					
	水		40% 乙二醇+60% 水		50% 乙二醇+50% 水	
	层流	湍流	层流	湍流	层流	湍流
方案1	99.67	92.98	103.88	96.16	106.56	98.70
方案2	101.88	93.12	106.99	96.69	110.22	99.58
方案3	101.34	94.05	105.92	97.89	108.83	100.86
方案4	107.02	94.76	113.58	98.57	117.71	101.81
方案5	104.64	93.86	110.45	97.21	114.11	100.15

表4 入口温度为50℃时的压降对比

Tab. 4 Contrast of pressure drops while the entrance temperature is 50℃

	压降/kPa					
	水		40% 乙二醇+60% 水		50% 乙二醇+50% 水	
	层流	湍流	层流	湍流	层流	湍流
方案1	45.46	49.83	49.92	55.85	53.25	57.18
方案2	12.15	14.85	14.81	18.66	17.41	18.86
方案3	15.99	17.54	18.11	19.53	19.60	20.72
方案4	18.71	22.19	20.86	25.63	23.46	27.50
方案5	83.08	91.26	88.30	96.36	90.38	98.18

4 结语

本文通过对带小突起枣核状、光滑枣核状、菱形、圆形和方形5种翅柱结构的对比分析，发现温度对冷却

介质物性参数有较大的影响，在水冷散热器的设计和使用过程中应予以关注。带小突起枣核状翅柱的换热效果最佳，而圆形翅柱的换热效果最差。光滑的枣核状翅柱流线型最好，压降最小；菱形和圆形翅柱的压降稍大；带小突起的枣核状翅柱压降较大；方形翅柱明显改变了流动的截面积，流线型最差，压降最大。在同一种翅柱结构下，采用50%乙二醇+50%水作为冷却介质时芯片的最高温度值最大，采用水作为冷却介质时芯片的最高温度值最小；采用层流模型时芯片的最高温度值大于采用湍流模型时的。由于水冷散热器内部的雷诺数一般在几百至几千范围内，流动状态处于层流向湍流转变的过渡区，非常复杂，且现有的湍流模型还处于发展阶段，因此，对水冷散热器内部的具体流动情况分析还需要大量的实验研究。

参考文献：

- [1] 揭贵生, 孙驰, 汪光森, 等. 大容量电力电子装置中板式水冷散热器的优化设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 99-105.
- [2] 张建刚. 航空电子设备新型结构功能模块的设计开发与研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2009.
- [3] 程劲嘉. 综合模块化航空电子的液冷设计[J]. 电讯技术, 2011, 51(6): 151-155.
- [4] 唐亚男. 填充式液冷散热器的传热强化及流阻性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [5] 张平, 唐良宝. 矩形微通道冷板的实验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(15): 91-94.
- [6] HAN Minsub, LEE Su Dong, HONG Chanook, et al. Development of Water-Cooled Heat Sink for High-Power IGBT Inverter[C]// The 7th International Conference on Power Electronics. Daegu, 2008: 295-299.
- [7] Salem T E, Bayne S B, Porsehet D, et al. Thermal Performance of Water-Cooled Heat Sinks[C]//20th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Texas, 2005: 129-133.
- [8] 余小玲. 电力电子集成模块及新型翅柱复合型散热器的传热性能研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
- [9] 葛浩. 新型微通道热沉的设计和数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [10] 李文顶. 中压矿用变频器主电路损耗分析及散热设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [11] 丁杰, 李江红, 陈燕平, 等. 流动状态与热源简化方式对IGBT水冷板仿真结果的影响[J]. 机车电传动, 2011(5): 21-25.

广告索引：

河北中瓷电子科技有限公司(封二); 上海中电罗莱数码技术有限公司(后插1); 湖南南车时代电动汽车股份有限公司(后插2、3); 株洲时代电气绝缘有限责任公司(后插4); 三菱电机机电(上海)有限公司(后插5); 株洲时代新材料科技股份有限公司(后插6); 株洲南车时代电气股份有限公司电力电子事业部(后插7); 株洲时代装备技术有限责任公司(后插8、9); 瑞士CT-Concept Technologie Ltd.(后插10); 株洲南车时代电气股份有限公司印制电路事业部(后插11); 宁波南车时代传感技术有限公司(后插12); 株洲变流技术国家工程研究中心有限公司(封三); 南车株洲电力机车研究所有限公司风电事业部(封四)。