

轨道交通

列车供电系统的热仿真研究

谢海波, 丁 杰, 刘 勇, 李碧钰, 葛会军
(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 随着列车用电设备的不断增多, 列车供电系统的热损耗越来越大。为了检验列车供电系统的冷却设备能否满足性能需求, 利用 Icepak 软件, 采用有限体积法和零方程湍流模型, 通过求解三维 N-S 方程和三维温度场模型计算, 得到了机车变压器、变流模块的温度分布及柜体内部的流场分布。通过试验发现, 仿真与试验结果的温度分布一致, 且单点温度仿真与试验结果的差值也在误差允许范围内。

关键词: 列车供电电路; 热仿真; IGBT; 强迫风冷

中图分类号: U260.4⁺9; TP39

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2017)01-0059-05

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2017.01.012

Thermal Simulation of Power Supply System for Train

XIE Haibo, DING Jie, LIU Yong, LI Biyu, GE Huijun
(Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: With the number of train electrical equipment increasing, the thermal loss power of power supply system is also growing. To test whether the performance of the cooling system of train power supply system can meet the requirements, by using Icepak software, finite volume method and zero-equation turbulence model, solving three-dimensional N-S equation and calculating three-dimensional temperature field model, the temperature distribution of transformer and converter module and the flow field distribution of the cabinet were obtained. Based on experimental verification, the simulation results of temperature distribution are consistent with experimental results, and the single-point temperature differentials between the simulation and the test results are allowable.

Keywords: train power supply system; thermal simulation; IGBT; forced air cooling

0 引言

随着列车供电设备容量的加大, 其内部部件(如: 整流逆变模块、滤波变压器等)的热功率也会随之增大, 为避免温度过高而导致的电力电子器件失效, 需要对供电设备的冷却系统进行良好的热设计。近年来, 基于仿真软件的热分析技术得到了广泛的应用^[1-4], 如帅词俊利用 ANSYS 对挤压模具进行了热仿真并进行了相关优化设计^[5]; 牛永红等对 CPU 芯片水冷散热器进行了数值模拟分析研究^[6]; 葛隼等利用 ANSYS 对晶体管水冷散热器进行了热分析及仿真研究, 并依据结

果提出了散热器的优化意见^[7]; 丁杰等利用 FLUENT 对水冷板、IGBT、热管散热器等进行了大量的热仿真研究^[8]。目前电力机车行业针对变流器 IGBT 模块的热仿真研究较多^[9-12], 但针对变压器、电抗器的热仿真研究较少。

本文基于商业软件 ANSYS 中集成的 Icepak 模块, 对 AC 380 V 列车供电系统的 IGBT 模块及滤波变压器进行了热仿真计算, 并对其内部流场及温度场进行了分析, 通过与试验结果的对比, 验证了该数值计算方法的有效性, 为模型修正及热设计提供参考。

1 模型建立

某型机车三相 380 V 交流供电系统结构布局如图 1 所示。该供电系统由两个柜体组成, 分别为左侧滤波柜

收稿日期: 2016-09-08

作者简介: 谢海波(1989-), 男, 工学硕士, 现从事电机水冷系统开发及变流器热仿真工作。

基金项目: 湖南省自然科学基金省市联合基金重点项目(12JJ8020)

和右侧供电柜。两柜体均采用强迫风冷的冷却方式，且各自风道相互独立，互不干扰，因此后续仿真模型的搭建及计算也分成这两个部分单独进行。滤波柜中主要的发热部件为滤波电容及滤波变压器，滤波电容不在风道内部，其发热功率并不太大，采用的是自然冷却，因此对滤波柜建模时只需考虑滤波变压器，并重点关注滤波变压器的温升情况；供电柜中主要的发热部件有整流 / 逆变模块、充电电阻、放电电阻、低感母排、支撑电容等，其中整流 / 逆变模块和放电电阻发热功率较大，其风道设计如图 2 所示。

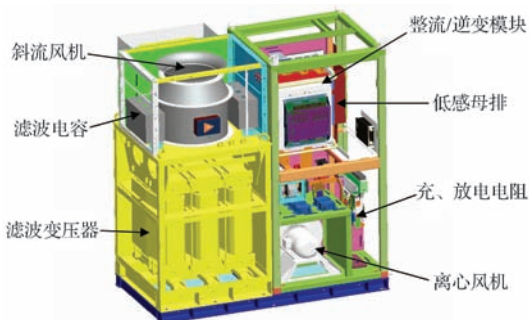


图 1 列车供电系统结构图
Fig. 1 Structure of train power supply system

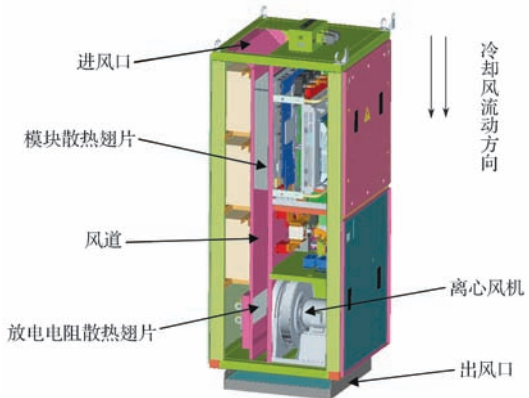


图 2 供电柜风道示意图
Fig. 2 Schematic diagram of air duct of power supply cabinet

1.1 物理模型

由于受计算机资源及计算时间的限制，在进行仿真计算时，通常会对研究对象进行一定的简化工作。简化的基本原则为：在保证计算效率的同时尽量地减少因删减而对计算结果所造成的影响。整个列车供电系统采用强迫风冷进行冷却散热，因此模型搭建也主要是围绕风道、风机和核心散热部件等进行。滤波柜中重点关注的研究对象为滤波变压器，所建立的物理模型如图 3 所示；供电柜中重点关注的研究对象为整流 / 逆变模块，删减对模块温升影响小且对风道流场影响小的其他部件，所建立的供电柜物理模型如图 4 所示。

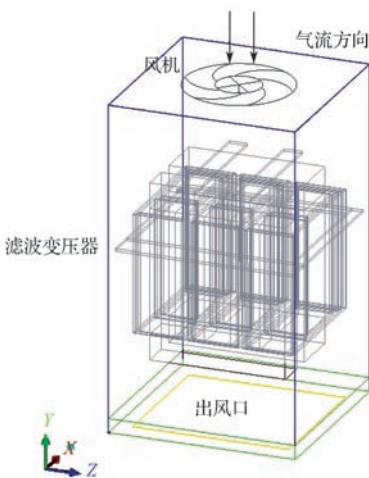


图 3 滤波柜物理模型
Fig. 3 Physical model of the filter cabinet

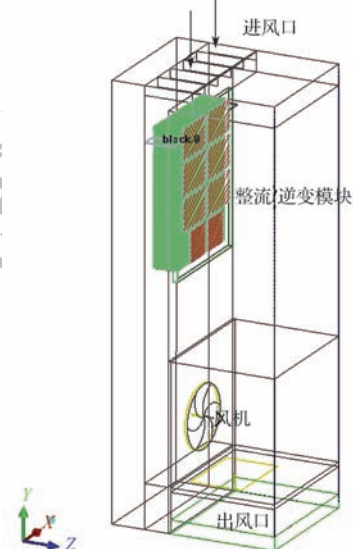


图 4 供电柜物理模型
Fig. 4 Physical model of the power supply cabinet

1.2 网格划分

优质的网格可以保证仿真计算的精度。Icepak 软件不仅提供了非结构网格、结构化网格、Mesher-HD 网格（六面体占优）3 种网格类型，还提供了非连续性网格、Mesher-HD 专属的多级网格处理方式，且 3 种网格类型均可以进行局部加密。由于此仿真模型较少涉及斜面及曲面，因此用系统自带的网格划分工具可以得到满足计算精度要求的网格。

整个列车供电系统划分为结构化网格，滤波柜和供电柜分别对变压器线圈厚度方向和散热器翅片区域进行了网格加密。网格质量信息中，面对齐率及网格偏斜度是衡量网格质量的两个重要参数。这两个参数值越接近 1，表示网格的质量越好。滤波柜的单元数为 239 万，供电柜的单元数为 1 128 万；两个柜体的网格面对齐率为 0.98~1，网格偏斜度为 0.9~1，由此可知供电系统模型的网格质量完全满足计算要求。

1.3 数学模型及边界条件

为保证仿真计算能顺利进行，需对上述物理模型指定适当的数学求解模型以及合适的边界条件。仿真计算时进行了如下假设：（1）空气为不可压缩流体，且其密度只随温度变化；（2）忽略重力及辐射换热对计算的影响；（3）材料属性参数均为常数；（4）IGBT 损耗的热量全部通过其底板散发出去；（5）所有热源为均匀热源，其大小按体积进行分配；（6）系统工作的环境温度为 40 ℃。根据相关计算^[14-15]得出，变压器铁心损耗为 14 kW、变压器线圈损耗为 1.5 kW、IGBT 芯片损耗为 1 364 W、二极管芯片损耗为 862 W。

由于系统为强迫风冷散热，且通过估算雷诺数可知系统内为湍流流动形态，因此计算模型选择适用于大多数电子散热仿真工况的零方程湍流模型。风机采用 FAN 模型进行简化，可以设置固定流量，也可以设置风机性能曲线。由于在仿真过程中很难精准建立变压器模型，风机属性用性能曲线表示，风机工作点会因流阻差异而与实际情况有较大差别，故滤波柜风机采用固定流量方式，设置为 2 m³/s。供电柜的风机属性根据图 5 所示的离心风机性能曲线进行设置。

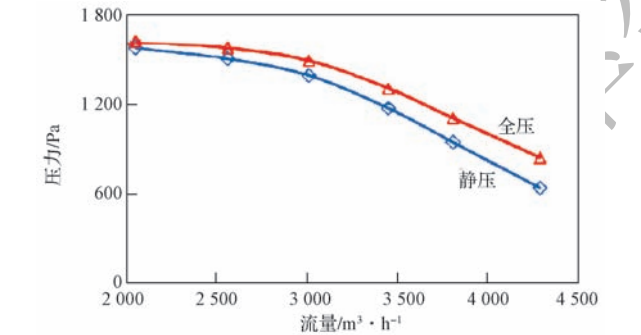


图 5 离心风机性能曲线
Fig. 5 Performance curves of centrifugal fan

为使仿真结果更好地符合实际情况，在变压器建模过程中，在其外层添加了一层热阻，用以模拟铜线表面的绝缘漆及绝缘纸对散热的影响。为简化 IGBT 模块的建模，在整流 / 逆变模块上建立 IGBT 模块基板及硅脂层，用面热源模拟 IGBT 及二极管芯片的发热。模型中各部件材料热导率如表 1 所示。

表 1 材料热导率
Tab. 1 Thermal conductivities of materials

部件名称	材料	热导率 /W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
变压器铁芯	硅钢	45
变压器线圈	铜	385
模块基板	铝	205
散热器基板	铝	205
导热材料	硅脂	0.9

2 仿真结果分析

2.1 滤波柜

图 6 为滤波柜内流场分布图。可以看出风机出风口处流速较大，但最大点并不在出风口处，而在滤波柜的四周。这是由于变压器周边挡板与柜体间形成了细小的夹缝，因此处流道面积骤降所造成的。还可发现，在变压器的上部形成了多个流动漩涡区域，且漩涡中心处流速基本为 0。漩涡主要是因风机出风口的高速气体遇到变压器的阻挡，由气体发生回流所产生。

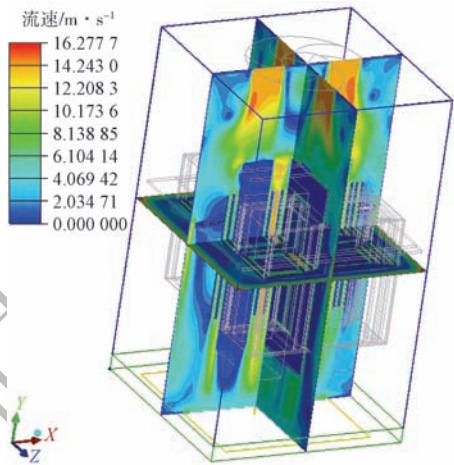


图 6 滤波柜流速分布
Fig. 6 Air velocity distribution of the filter cabinet

图 7 为变压器的温度分布图。由图可知变压器温度分布由上至下逐渐升高，最高温度约为 108.7 ℃，且变压器线圈的温度要比铁心温度高得多。这主要是由于风机安装在柜体顶部，随着冷却气体由上至下流动，气体温度不断升高，其与变压器间的温差不断减小，从而使得气体与变压器间的换热量也不断减小；线圈的温度比铁心温度高则是因为线圈的功率损耗比铁心的功率损耗大得多。

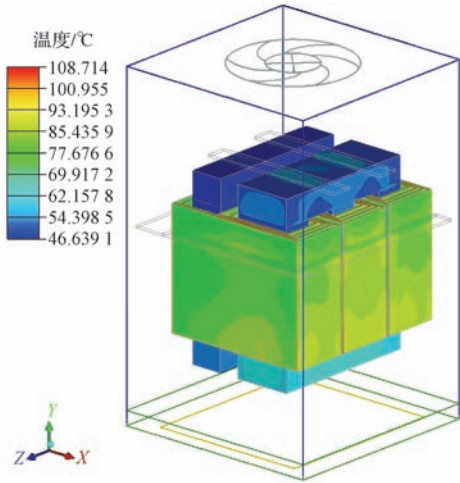


图 7 变压器温度分布
Fig. 7 Temperature distribution of the transformer

单独对温度较高的线圈进行研究，其温度分布如图 8 所示，可知变压器的最高温度点在 V 相线圈靠近柜体底部的面上。由于该线圈处于 3 个线圈的中间位置，其外侧的两个流道都需与旁侧的两个线圈共用，从而使得其部分热量不能及时传递出去。此外，由于铁心的存在，线圈底部与铁心间的那部分气体的流速相对较慢，这也

片根处温度低。散热器最高温度点不在散热器底部，而是在中间偏下的位置，这是由于最下面两个二极管的发热功率比 IGBT 发热功率要小得多。还可以看出，散热器基板表面温度基本呈左右对称分布，IGBT 模块底板最高温度为 98.6 ℃。

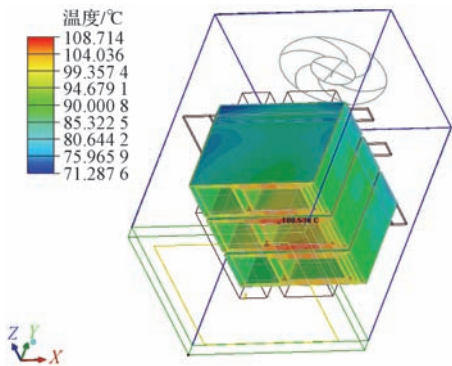
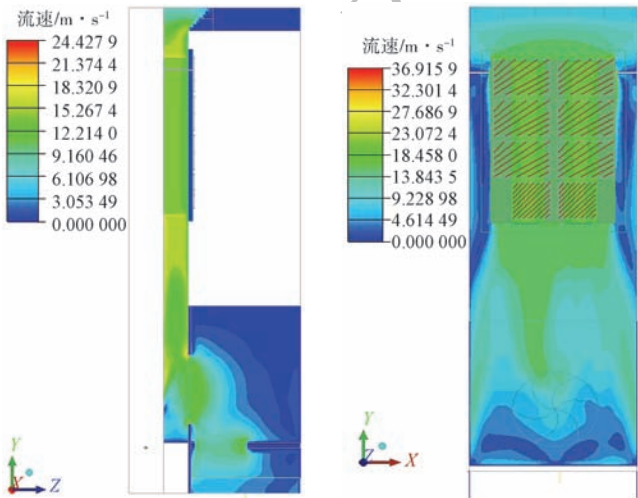


图 8 变压器线圈温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of transformer coil

2.2 供电柜

图 9 为供电柜内部流场分布图，其中图 9 (a) 为 X 方向截面（平行于散热器基板的方向），图 9 (b) 为 Z 方向截面（垂直于散热器基板的方向）。由图可以看到整个供电柜流道的流场分布，其中散热器翅片区域因流道截面积减小而有较大流速，边界层的存在使得翅片区域流速梯度非常大。换热器两侧挡板使得绝大部分气体都是通过翅片区域流道流过，挡板下方气体流速趋近于 0，有利于气体与散热器之间充分地传热。

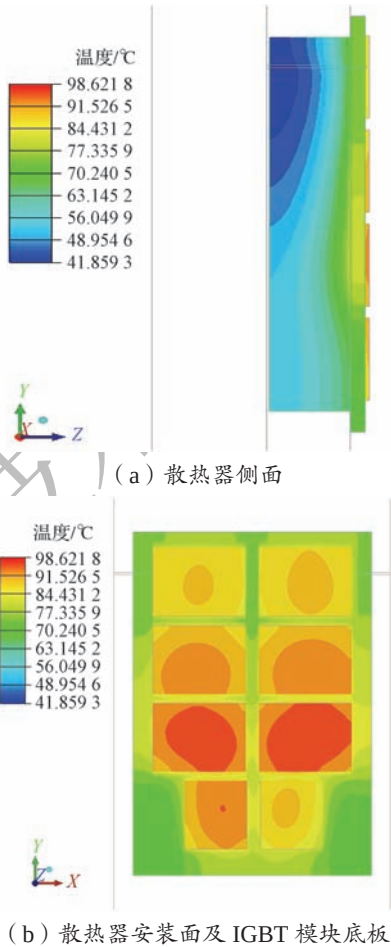


(a) X 截面 (b) Z 截面

图 9 供电柜流速分布

Fig. 9 Air velocity distribution in the power supply cabinet

图 10 为整流 / 逆变模块的温度分布。由图可知，散热器由上至下温度逐渐升高，且翅片外端温度要比翅



(b) 散热器安装面及 IGBT 模块底板

图 10 整流 / 逆变模块温度分布

Fig. 10 Temperature distribution of the rectifier-inverter module

3 试验验证及误差分析

为验证仿真结果的准确性并精准分析误差形成的原因，我们对列车供电系统进行了温升测试，并将试验结果与仿真结果进行对比分析。图 11 示出列车供电系统温升试验现场，试验环境温度为 32 ℃。为了监测变压器及变流模块的温升情况，在变压器 U、V、W 三相各线圈内均布置了热电偶，且在整流 / 逆变模块散热器基板上布置了 9 个温度监测点（图 12）。

图 13 为变压器各相线圈的温升试验曲线。由图可知，随着试验的进行，线圈温度不断升高，50 min 后的线圈温度基本达到稳定，其中 V 相线圈最高温度达到 104 ℃。与仿真结果对比发现，最高温度点分布位置基本一致，试验结果的最大温升为 72 K，而仿真结果的最大温升为 68 K，仿真结果误差在允许范围内。



图 11 列车供电系统温升试验现场

Fig. 11 Temperature rise test field of the train power supply system

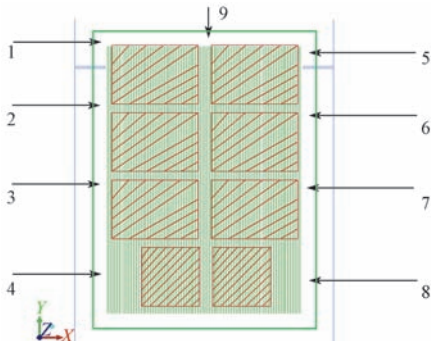


图 12 温度测点示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the temperature test points

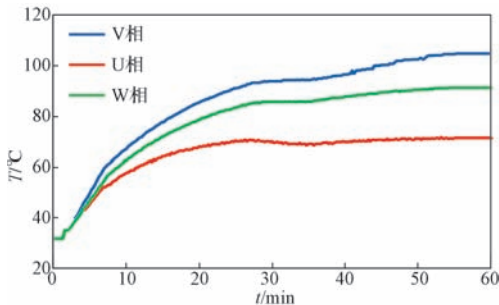


图 13 变压器温升试验曲线

Fig. 13 Temperature rise curves of the transformer

图 14 为整流 / 逆变模块散热器基板上各监测点的仿真与试验温升情况对比。由图可知，大部分测点的温升仿真结果稍大于试验结果，但温度的整体分布趋势基本一致。

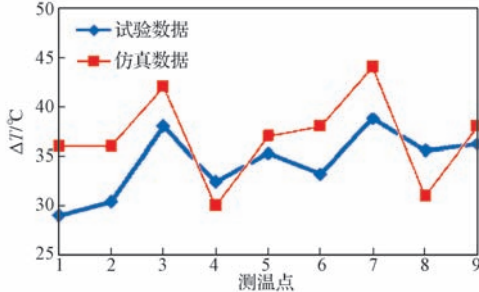


图 14 各测点温升的仿真与试验结果对比

Fig. 14 Comparison of temperature rise of all test points between simulation results and experimental results

仿真结果与试验结果误差产生的原因主要有：（1）模型的简化，如变压器表面添加的热阻与实际变压器表面的热阻有差异；（2）热损耗功率通过估算得到，与

实际损耗功率有一定误差；（3）测温设备的误差。

4 结语

本文利用 Icepak 软件对 AC 380 V 列车供电系统进行了热仿真研究，得到了其滤波柜与供电柜内的流速分布与核心发热部件的温度分布。从仿真与试验的结果对比分析可知，二者温度的分布基本一致，且单点温度仿真与试验结果的差值也在误差允许范围内，这也证明了仿真结果的有效性。

参考文献：

[1] 熊辉, 邵云, 颜骥, 等. 基于 Fluent 的 6 英寸晶闸管水冷散热器设计及优化 [J]. 大功率变流技术, 2013 (4): 22-27.
XIONG H, SHAO Y, YAN J, et al. Design and Optimization of Water-cooled Radiator for 6-inch Thyristor Based on Fluent[J]. High Power Converter Technology, 2013 (4): 22-27.

[2] 贺荣, 龚曙光, 李纯, 等. 基于 Fluent 的水冷板式散热器数值模拟与试验研究 [J]. 流体机械, 2010, 38(2): 57-60.
HE R, GONG S G, LI C, et al. Experimental Study and Numerical Simulation of the Water-cooled Plate Radiator Based on Fluent[J]. Fluid Machinery, 2010, 38(2): 57-60.

[3] 刘衍平, 高新霞. 大功率电子器件散热系统的数值模拟 [J]. 电子器件, 2007, 30(2): 608-611.
LIU Y P, GAO X X. Numerical Simulation on the Heat Sink for High-Power Semiconductor[J]. Chinese Journal Of Electron Devices, 2007, 30(2): 608-611.

[4] 韩冬, 何闻. 基于 ANSYS 的大功率晶体管散热器的研究 [J]. 机电工程, 2007, 24(1): 10-12.
HAN D, HE W. The radiator research of power amplifier tube based on ANSYS[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2007, 24(1): 10-12.

[5] 帅词俊, 倪正顺. 基于 ANSYS 的三维建模方法与热挤压模具的优化设计 [J]. 机械强度, 2004, 26(3): 345-348.
SHUAI C J, NI Z S. Method of Three Dimensional Model and Optimum Design of Hot Extrusion Mould Based on Ansys[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(3): 345-348.

[6] 牛永红, 刘宗攀, 庞赞估. CPU 芯片水冷散热器的数值模拟与分析 [J]. 化工进展, 2010 (S1): 653-655.

[7] 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): 162-164.
GE J, HE W. Thermal Analysis and Simulation for Hydro-cooling-radiator of Transistors[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(5): 162-164.

[8] 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.
DING J, LI J H, CHEN Y P, et al. Effects of Flow Regime and Heat Source Simplifications on Simulation Results for Water-Cooling Plate of IGBT[J]. Electric Drive for Locomotives, 2011 (5): 21-25.

[9] 丁杰, 唐玉兔. 地铁车辆牵引变流器的热管散热器的数值模拟 [J]. 大功率变流技术, 2012(5): 31-33.
DING J, TANG Y T. Numerical Simulation of Heat-pipe Radiator for Metro Vehicle Converter[J]. High Power Converter Technology, 2012(5): 31-33.

[10] 丁杰, 何昌多, 唐玉兔. 翅柱式水冷散热器的性能研究 [J]. 大功率变流技术, 2013(2): 32-36.
DING J, HE D C, TANG Y T. Performance Analysis of Water-cooling Radiator with Pin-fins[J]. High Power Converter Technology, 2013(2): 32-36.