# 大功率低压逆变器功率部分热仿真分析

王玉博<sup>1,2</sup>,安洋<sup>1,2</sup>,邱书明<sup>1,2</sup>,高卓轩<sup>1,2</sup>,孙福润<sup>1</sup>

(1. 天津电气科学研究院有限公司, 天津 300180;

2. 天津天传电气传动有限公司, 天津 300301)

摘要:逆变器产品一直向更高功率密度、结构更紧凑的方向发展。为提升有限结构空间内逆变器系统的 功率密度,在研发过程中需要经常制作若干样机并开展大量实验。为缩短开发周期,降低样机制作数量和实 验次数,提出一种针对逆变器功率部分的热仿真方法。通过该方法,可在研发设计阶段将各个方案的系统稳 态温升情况以及核心器件的温升情况通过仿真呈现出来,无需制作样机和开展实验也能对比出各个方案的优 劣。最后,实验结果证实热仿真分析方法对热系统散热能力的预估相对准确。通过该方法,可以有效提高工 程师在功率单元设计阶段对系统热特性的把控能力,快速对比不同系统散热方案的优劣,减少样机数量和实 验次数,提高一次设计合格率,降低研发成本。

关键词:大功率;功率部分;热仿真 中图分类号:TM921 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd25374

#### Thermal Simulation Analysis of Power Unit of High Power Inverter

WANG Yubo<sup>1,2</sup>, AN Yang<sup>1,2</sup>, QIU Shuming<sup>1,2</sup>, GAO Zhuoxuan<sup>1,2</sup>, SUN Furun<sup>1</sup>
(1.Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China;
2.Tianjin Tianchuan Electric Drive Co., Ltd., Tianjin 300301, China)

**Abstract:** Inverter products have been developing towards higher power density and more compact structure. To enhance the power density of inverter systems within a limited structural space, several prototypes need to be made and a large number of experiments conducted during the research and development process. To shorten the development cycle and reduce the number of prototypes and experiments, a thermal simulation method was proposed for the power unit of the inverter. Through this method, the system steady-state temperature rise of each scheme and the temperature rise of core components can be simulated during the research and development stage. It is possible to compare the advantages and disadvantages of different schemes without making prototypes or conducting experiments. Experimental results verify that the thermal simulation method has relatively accurate prediction of the cooling capacity of the thermal system. This method can effectively improve engineers' ability to control system thermal characteristics during the power unit design stage, quickly compare the advantages and disadvantages of different cooling solutions. It can also reduce the number of prototypes and experimental times, increase the first-time design yield, and reduce research and development costs.

Key words: high power; power unit; thermal simulation

交流电机和交流传动系统以其能耗较低、效 率高、维护成本低等特点,近年来逐步在冶金领 域,尤其是普碳钢、不锈钢以及有色金属领域广 泛应用。同时,随着国产逆变器产品在技术水平 上逐渐成熟,以及相对进口品牌较低的价格和相 对稳定的产品性能,已经逐步成为越来越多冶金 企业新建产线和产线升级的首选方案。近年来, 高端逆变器的国产化已经成为趋势。更小的体 积、更高的功率输出能有效降低产品成本和成套 成本,这是逆变器产品的一个重要研发方向。在 研发设计中,常规的方式需要将不同的功率设计 方案均做成实物样机,通过一系列实验确定系统 的实际功率输出能力与散热能力,研发周期较 长,企业研发成本较高。而热仿真设计对研发设 计具有极大的辅助作用,没有实物和样机也能进 行热可靠分析和实验。通过建模,减少了打样试

作者简介:王玉博(1984—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为机械工程及自动化,Email:lycra876@163.com

错次数,节约了时间和样机成本,缩短了项目周 期;同时还可以查看产品不同环境和工况条件下 的散热情况,而且几乎没有成本。

本文介绍了一种热仿真设计方法,在逆变器 开发过程中,首先确定逆变器功率部分各个组件 的参数,然后利用仿真软件,得出功率部分在设 计输出下的系统温升和器件温升,对比不同方案 的仿真结果,判定各个方案的优劣,直接选用最 优方案。最后通过实物样机的实验,证明了此方 法的有效性,缩短了产品开发周期,降低了开发 成本。

# 大功率低压逆变器功率部分系统 结构

本文以常规逆变器产品为例进行分析,其系 统结构图如图1所示。图中逆变器由主回路直流 进线、主回路三相出线、逆变模块、控制部分、风 机部分、控制电源、主接触器控制、电源端子、风 机进线、控制电源进线、安全停车控制等几个部 分组成<sup>11</sup>。本文的研究对象为逆变器的主回路功 率部分,如图2所示,功率部分由IGBT、散热器、 风道和风机组成。在逆变器工作过程中,IGBT负 责变换电能,其依据开关频率和电流的大小,散 发出不同的热量。热量通过热传导,传递到散热 器基板,进而传递到散热器齿片。由风机吹出的 风流经齿片将热量通过辐射传导到环境中。最 终整个系统达到一个热平衡,实现系统的稳定 运行<sup>[2]</sup>。



Fig.1 System block diagram



## 2 热设计仿真流程

开展仿真的一般流程为:首先确定系统中各 部分的参数,包括IGBT模块的热功耗、散热器的 导热系数及外形尺寸、导热硅的参数、风机的性 能参数;其次在仿真软件中建立模型,并将上述 参数代入到相应模型中;然后在系统中设置测温 点;最后划分网格,求解计算。仿真完成后,可以 得出各个测温点的最大温升,推导出IGBT模块 温升,结合IGBT模块和各个器件的失效温度,判 定整个系统的设计是否能达到设计的性能要求 和稳定性要求。

#### 2.1 IGBT模块的热功耗

IGBT 是整个系统的核心部件,也是整个系统中的热源。其热功耗主要由 IGBT 损耗和续流二极管损耗组成,与其调制模式和占空比相关,计算方法有很多。文献[3-4]分别提出了两种 IGBT 功耗的计算方法。

如今,IGBT器件的热功耗基本无需手动计 算,各个品牌的供应商都会提供其产品的热功耗 计算工具。本文以富士IGBT作为仿真对象,采 用富士公司提供的FUJIIGBT Simulator 仿真软件 来计算IGBT器件的热功耗。以型号为2MBI6-00XNG120-50的IGBT为例,在软件界面中依次 填入外壳固定温度Te、模块的并联支路数量、输 出频率F0、输出电流I0、载波频率Fsw、功率因数、 调制指数、DC母线电压、T1栅极电阻(ON)、T1栅 极电阻(OFF),即可计算出热功耗为618.1 W,如 图3所示。

### 2.2 散热器导热系数及外形尺寸

散热器是系统热量的主要承载和耗散部件, 需要确定导热系数与其散热方向的横截面积。 一般散热器的产品手册上会标注其产品的导热

and the second se	固定
Fixed C	ase Temp. 115 °C O Calculate Case Temp.
se - Hea T1/C	tsink Thermal Resistance: Rth(c-f)
法器温	度: Tf
) 固定散热	A器温度 50 °C ○ Calculate Heatsink Temp.
户定义	数执禁执用团(
۲	Rth(f-a) 0 *C/W
	散热器热电阻(用户定义)
0	r1 0 tau1 0
	r2 0 tau2 0
	Rth(f-a) 0
mbient Te	emperature: Ta
周围温度	度: Ta 20 *C
2MBI600	XNG170-50
电路	型 温度条件
- TEXHE PWM控	上
E弦波	(詳細語)
计算条	件
真块的并	联支路教量 1 个 Sweep
俞出频率	Fo 50 (Hz)
俞出电流	lo 285 (Arms)
成近频率 力室内割	Psw 2.5 (KHz) 0
周制指数	0.96
Duty	0 0
)C田线电	正 VDC 540 (V) 0
「1 栅极电	LIE (Ω)
2 栅极电	
「2 栅极电	1 (Ω) 0 μ(OFF) 1 (Ω)
2 棚极电	1 (Ω) Ο μβg(OFF) 1 (Ω) Ο
2 棚极电	SER(CFF) 1 (Ω) 0 SER(OFF) 1 (Ω) 0 SER(把准系数
F2 栅极电 非 MBI600XN	App(CPF) 1 (Ω) 0 DPB(OFF) 1 (Ω) 0 系耗标:准系数 IG170-50
T2 栅极电 排 MBI600XM <b>员耗结果(</b>	Appen(Unity) 1 ((2)) 以現(OFF) 1 ((2)) 高純校定准系数 IG170-50 W)
F2 棚极电 排 MBI600XI 段耗结果( lotal per arr lotal per arr	Appen(Unity) 1 (ロ) 以内(OFF) 1 (ロ) 気軽化に進糸数 G0170-50 W 617.9 Total per system 3707.6 の 617.9 Total per system 3707.6 1 (ロ)
12 棚极电 加固600XM 操耗结果( lotal per arr	ΔEBI (OFF)         1 (Ω)           DBB (OFF)         1 (Ω)           Comparing the system         3707.6           W)         617.9           Total per system         3707.6           W1         617.9           Total per system         3707.6           Total per system         3707.6           Total per system         3707.6           Total per system         3707.6
12 栅极电 加固的00XN 极耗结果( fotal per arr fotal 导动场杆	Seg1(vrv)         1         (Ω)           SEG1(OFF)         1         (Ω)           SEG1(OFF)         1         (Ω)           AR4645:42.75.85         1         (Ω)           Seg1(OFF)         1         (Ω)           Approximation         617.9         Total per system
12 棚极电 加Bi600Xh <b>操耗结果(</b> fotal per arr Total 导通损耗 开通 反向收复)	Seg1(vrv)         1         (Ω)           SEG1(OFF)         1         (Ω)           SEG1(OFF)         1         (Ω)           AR4645:42.52.32         3         3           NG170-50         W)         3707.63           Per parallel         617.9         Total per system           9         12.02         T5           1         01         T2         02           1         03.44         1         1           271.2         50.9         108.7         87.4
F2 棚极电 #BI600Xh 瞬耗结果( fotal per arr fotal per arr Fotal 厚通损耗 反向恢复)	Seg1(vrv)         1         (Ω)           SG1(OFF)         1         (Ω)           SG4645:42.52.52.52         1         (Ω)           SG470-50         1         (Ω)           W)         617.9         Total per system         3707.4           sper parallel         617.9         Total per system         3707.4           1         0.1         12         02         To           479.6         138.4         1         05         1067.9           108.7         67.4         1
12 棚极电 12 棚极电 MBI6000XN 操耗结果( fotal per arr fotal per arr Fital 导通损耗 开通 反向恢复) 晶度结果(	Seg1(-YrV)         1         (Ω)           SEG1(OFF)         1         <
12 栅极电 12 栅极电 MBI600XM 换耗结per arr Total per ar	Seg1(-Yry)         1         (Ω)           SEG1(OFF)         1         (Ω)           SEG1(OFF)         1         (Ω)           AR4645:42.74.95         1         (Ω)           MG170-50         W)         3707.45           m         617.9         Total per system         3707.4           per parallel         617.9         Total per system per parallel         3707.4           1         01         12         02         T5         D6           108.7         67.4         98.7         99.7         1         157.6         150.5         157.6
T2 個級电 T2 個級电 前 MBI600XM 換耗结果( Total per arr Total per arr	Segl(-Yrv)         1         (C)           Segl(OFF)         1         (C)           Statistical X-State         (C)         (C)           More parallel         617.9         Total per system         3707.4           m         617.9         Total per system         3707.4           m         617.9         Total per system         3707.4           m         617.9         Total per system         3707.4           1         0.1         T2         02         T5         05           1         108.7         67.4         99.7         1
2 個級电 # MBI600XM <b>與耗结果(</b> Total per arr Total 等通损耗 开通 反同恢复) 关断 Tuj (ave) Tuj (ave) Tuj (ave) Tuj c (ave)	Segl(-Yrv)         1         (C)           SGB(OFF)         1         (C)           SAMEKE:::::::::::::::::::::::::::::::::::
2 個似电 外BIG00Xh MBIG0Xh MBIG00Xh	Sega(VrV)         1         (D)           SGB(OFF)         1         (Q)           SAVEKE: #X:#X
12 御枳电 非 MBI600X3 瞬時結果( で) で) で) の の で) の の の の の 、 の の 、 の の に の の 、 の 、 の 、 の し の い の 、 、 、 の 、 の 、 、 、 の 、 の 、 の 、 、 、 の 、 の 、 の 、 の 、 、 、 の の の 、 の の の の の の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の 、 の の 、 の の の の の 、 の 、 の の の の の の の の の の の の の	Selet(vrv)         1         (D)           More rearealist         617.9         Total per system per paratile           Total         271.2         50.9         1           176.6         137.6         1         1           176.6         157.6         1         1         1           176.6         157.6         1         1         1           176.0         1         1         1         1         1           176.6         1         1         1         1         1         1           176.0         1         1         1         1         1         1         1           176.0         1         1         1         1         1         1         1           170.0 <td< td=""></td<>
12 響似电 ま MEBROOXN 線純結束の Total 即す Total 即す で た の の 数 で し の な 取 。 こ の の 次 し の 次 で あ し の の 次 で あ し の の 次 で あ し の の 次 で あ し の の 次 で う こ の う し の う 本 う で う こ の う で う こ の う 本 う で う こ の の 次 で う こ の う で う こ の つ な で 、 の つ の な で 、 の つ の な で 、 の つ の な つ 、 の つ 、 つ の つ て う こ の つ な つ 、 つ 、 つ の つ て う で う こ の つ な つ 、 つ の な つ 、 つ い つ つ て う の つ て う の で つ 、 つ つ の つ の つ の つ て う の で つ 、 つ の つ て う の つ の つ て う の つ の つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ つ	SREAL(VPV)         1         (C)           More parallel         617.9         Total per system           More parallel         617.9         Total per system per parallel         3707.6           10         17         D2         TS         D5           1087.6         138.4         20         TS         D5           1087.7         87.4         99.7         50         105.7         105           1107.6         1107.6         1107.6         105         105         105           110.7         5.0         100.5 <td< td=""></td<>
12 物似电 非 MEI600XN 操純結果で Total 即で 加日 です 調査 体現 に のの 、 の に の の 、 の に の の 、 の に の の 、 の の 、 の の 、 の の の の 、 の の の 、 の の 、 の の の 、 の の の の 、 の の の の 、 の の の の の の の の の の の の の	Seg(CPF) 1 (0) SEG(CPF) 1 (0
12 個似电 1 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1	SREE(CVFV)         1         (C)           SREE(E: 47: 45)         1         (C)           SREE(E: 47: 45)         1         (C)           M         617.9         1         (C)           m         617.9         1         (C)           m         617.9         1         (C)           M         617.9         1         707.6           m         617.9         1         707.6           m         617.9         1         707.6           10         1         72         02         75           1087         67.4         99.7         99.7           T         D1         72         D2         75           1167.6         1160.5         157.6         105.7           1167.7         7.6         10         10           1150.0         1         1         1         1           1150.0         1         1         1         1           1150.0         1         1         1         1
2 物似电 計 ME3I600XP 横毛銘東で Artal Explosite 第連の後 にの時度) では のとの時度) では のとの時度) では のとの時度) では のとの時度) では のとの時度) では のとの時度) です のとののの のとのでは のとののので のとのでは のとののので のとのので ので のとのので ので ので ので ので ので ので ので ので ので	SREAL(-Yr-Y)         1         (C)           DBB (OFF)         1         (C)           SREALE: AF-SR         (C)         (C)           M         617.9         Total per system         3707.6           M         617.9         Total per system per paratel         3707.6           10         172         02         TS         05           108.7         67.4         0         0         0           109.7         67.4         0         0         0           105.0         107.6         100.5         0         0           100.0         100.0         0         0         0         0           100.0         100.0         0         0         0         0         0         0           101.0         102.0         100.0         0         0         0         0         0         0         0         0         0         0         0         0         0         0         0
2 物化34	SREAL(-Yrsy)         1         (C)           DBB (OFF)         1         (C)           SREALE: AF-SR           NG 170-50           W)         617.9         Total per system         3707.6           n per parallet         617.9         Total per system         3707.6           470.6         138.4         2         5         5           172         D2         T5         D5           199.7         0.4         99.7         99.7           7         D1         T2         D2         T5           180.5         175.6         105.7         105.0         105.0           150.0         10         7.6         10         10         10           150.0         10         10         10         10         10         10           150.0         10         10         10         10         10         10         10           150.0         10         10         10         10         10         10         10

Fig.3 FUJI IGBT simulator interface

系数与截面积。有些定制散热器需要由设计人员与厂家共同确定。本仿真方法中用到的散热器,厂家提供的导热系数为209 W/(m·K),其截面积如图4所示。

#### 2.3 导热硅脂参数

当把IGBT模块安装在散热器平坦的金属表面上时,由于这两个接触面并不是绝对的平滑,



Fig.4 Radiator cross-section view

因此会在模块和散热器之间产生一个间隙。因 为空气的热传导率*l*<sub>air</sub>≈ 0.03 W/(m·K),是属于不 良热传导介质<sup>[5]</sup>,所以这个间隙必须用更好的导 热材料来填充,文献[6]也通过实验进行了验证。 工业上一般选用导热硅脂作为IGBT和散热器之 间填充的导热介质,对系统导热能力有较为明显 的改善,同时兼顾了经济性。导热硅脂的导热率 *l*<sub>paste</sub>应在 0.5~6 W/(m·K)的范围内(约是空气的 20倍到 200倍)。模块-散热器连接热传输示意 图如图5所示。

本次仿真使用的是在工业产品应用中性价 比较高的导热硅脂。其参数为:密度2350 kg/m<sup>3</sup>, 导热系数1.2 W/(m·K)。



2.4 风机参数

风机作为强迫风冷的风源,其性能对于整个 系统效率和冷却效果影响较大。一般而言,对于 无狭窄风道、空间较大工况,风压较低,需要的风 量较大,尽量采用轴流式风机;如遇风道较为狭 长且风阻较大的工况,则推荐选用离心式风机。 逆变器产品风道内一般都有散热器,部分产品还 有电容组,风道风阻较大,要求风机具备较强的 风压,以便克服风道内风阻<sup>17</sup>。

风机在选型时需要考虑如下3个因素:1)风 机是否自带外壳,外壳形状决定风机在其曲线上 的工作点位置,同时决定风机出口处的风速和风 压。如选用的风机无外壳,则需要先确定外壳尺 寸和形状,通过仿真或实验确定风机带壳后的工 作特性后再进行仿真;2)风机尺寸。风机作为整 个系统的一部分,其外形尺寸如果过大,将影响 整个系统的体积,导致装置经济性下降;3)风机 参数及曲线,包括功率、最大静压、最大流速等。 一般来说,初始流速越大,从风道口逸出的风速越 大,至少满足出风口风速大于7m/s的最低要求。 仿真时选用的风机最大外形尺寸为120mm,厚度 38 mm,最大静压710 Pa,最大流速为2 300 m<sup>3</sup>/h。 仿真中用到的离心式风机的结构外形图见图 2。 图6、图7分别为风机外形尺寸和流速曲线图。



#### 图6 风机外形图





2.5 模型建立

系统模型建立的有效性对仿真的效率和结 果有一定影响。在模型建立时以模型简化为根 本原则,不影响散热的部件或者特征均可忽略或 者简化。按上述原则建立仿真模型,IGBT基板以 cuboid方式建模,材料为纯铜;散热器以cuboid方 式建模,材料为铝;导热硅脂也采用cuboid建模, 厚度为0.2 mm(实际厚度小于0.2 mm);风机以外 壳和风机组合搭建,离心风机输入风机曲线,风 机外壳进/出风口按选用风机实际进/出风口尺寸 设置。

整体模型按装置结构形式组合,如图 8a所示,构造分为4部分,自上而下分别是:最上部分为IGBT部分,由散热器+IGBT+风道组成;中间部分为电容部分,由电容+风道组成;最下部分为风机风道部分,由风机+风机壳+风道组成;最后加

上材质为铁的2 mm 外壳。整体模型的外形如图 8b 所示。



#### 2.6 参数设置与求解

在软件中,对系统参数做如下设置:求解区 域为360(W)×1350(H)×630(S),单位mm;湿度 为干燥空气;环境温度17℃;大气压强1标准大气 压;散热方式为强迫散热;重力系数9.81 m/s<sup>2</sup>。对 热源参数做如下设置:IGBT为618 W/个;其他项 暂不考虑。对材料做如下设置:外壳采用钢材 料;IGBT基板材料为纯铜。

#### 2.7 网格划分与求解

完成参数设定后,在系统中划定求解域,并 进行系统网格划分:垂直方向网格宽度1mm,横 向网格宽度10mm,网格最大长宽比约为10,总 网格数为1840516个<sup>[8]</sup>。

### 2.8 求解与分析

将外界环境温度定为17℃。在每个IGBT与 散热器接触面的几何中心处,设置共计6个监控 点,然后开始求解,系统运行30min后,监控点温 度在计算迭代到405步后不再变化,残差曲线趋 近1,求解结束<sup>19</sup>。求解结果如图9所示,各个测 温点的温度情况如表1所示。



Fig.9 Simulation result

通过仿真得出:在环境温度为17℃时,各个 监控点温度最大值在A<sub>2</sub>监控点处,最大温度为 66.4814℃。

表1 计算迭代405步各个测温点的
-------------------

Tab.1 Calculation of the temperature at each temperature measurement point in iteration 405

进住止粉	测温点温度/℃						
达代步数	A <sub>1</sub>	$A_2$	$B_1$	$B_2$	$C_1$	$C_2$	
405	66.3	66.4	65.6	65.6	65.1	62.8	
404	66.3	66.4	65.6	65.6	65.1	62.8	
403	66.3	66.4	65.6	65.6	65.1	62.8	
402	66.3	66.4	65.6	65.6	65.1	62.8	
401	66.2	66.4	65.6	65.6	65.1	62.8	
400	66.2	66.4	65.6	65.6	65.1	62.8	

# 3 实验与数据

仿真完成后,将各个部件通过结构件连接, 做成实物部件,通过实验验证系统在设计功率 输出情况下的温升。具体实验方法如下:将被 测逆变器输出侧U,V,W三相输出,通过电抗器 分别与陪测逆变器输出侧U,V,W三相输出相 连接。分别控制陪测逆变器和被测逆变器输出 的交流电压,调节加在电抗器两端的电压值,从 而控制流过陪测逆变器的电流大小,通过调节 开关频率来实现对逆变器不同运行工况的模拟。在被测逆变器每一个 IGBT 的铜基板下方 开槽并埋一个热电偶,热电偶另一端连接至测 温记录仪,测温记录仪将电讯号转变为温度值。 IGBT 出力到 590 A,运行 2 h 后,系统达到稳态 温度,不再变化,而后记录各个测温点数据,得 到数据如表 2 所示。

表2 仿真温度数据与实验温度数据对比表

Tab.2 Comparison of simulation temperature data and experimental temperature data

	测温点温度/℃							
	$\mathbf{A}_1$	$A_2$	$B_1$	$B_2$	$C_1$	$C_2$		
试验温度	71.6	66.3	70.1	69.4	67.1	69.6		
仿真温度	66.3	66.4	65.6	65.6	65.1	62.8		
差值	5.3	-0.1	4.5	3.8	2.0	6.8		

根据IGBT器件手册的要求,管芯临界温度 小于150℃才符合器件使用条件。数据表中温升 最大值为59℃,按实际工况最高环境温度45℃ 推算,器件结温为129℃,符合器件应用条件,该 结构基本满足要求。

根据差值一栏看出仿真数据和实验数据存 在差别,温度差值在-1~7℃之间。因IGBT采用 cuboid模型创建,与实际IGBT构造有差距,且受 环境温度、实际风阻等方面的影响,仿真结果与 实际测试结果会存在一定偏差,通过大量测试数 据统计,得出仿真温度与实际温度误差在±15% (据文献[10]介绍,此误差一般在20%以内),可以 接受。所以认为仿真方法合理,结果有效。

# 4 结论

本文结合逆变器的功率单元结构,提出一种 热仿真方法,通过简化模型,给出各组成部分的 功能特点以及仿真参数的取值方式。对逆变器 功率单元进行了研发阶段的热设计仿真,得出当 前方案下,实现设计功率、主要部件和系统的温 度数值。在逆变器产品开展样机生产前,对整个 系统的发热情况进行了预估和判定。仿真结果 作为此类产品开发阶段的设计参考,通过对多个 系统方案发热仿真情况的对比,可以大致判定各 个方案组合系统的热性能的优劣。选择最优方 案开展样机制造和实验,可有效减少样机制造次 数和实验次数,提高一次设计合格率,降低研发 成本。

#### 参考文献

- 天津电气科学研究院有限公司.电气传动自动化技术手册 [M]. 第三版.北京:机械工业出版社,2011.
   Tianjin Research Institute of Electric Science Co.,Ltd.. Electrical transmission automation technical manual[M]. 3rd Edition. Beijing:China Machine Press,2011.
   Tit 其, 中国地位可靠地址地址其正规的10, 所, 地方, 中
- [2] 丁连芬.电子设备可靠性热设计手册[M].第一版.北京:电子工业出版社,1989.
   DING Lianfen. Reliability/design thermal applications[M]. First Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1989.
- [3] 张明元,沈建清,李卫超,等.一种快速IGBT损算方法[J].船 电技术,2009,29(1):33-36.
   ZHANG Mingyuan,SHEN Jianqing,LI Weichao, et al. Calculation method of a fast power loss for IGBT modules[J]. Marine

Electric Electronic Engineering, 2009, 29(1): 33–36.

- [4] 李强,林明耀,胡敏强,等.基于 PSPICE 仿真的 IGBT 功耗 计算[J].电力自动化设备,2005,25(1):31-33.
  LI Qiang, LIN Mingyao, HU Minqiang, et al. IGBT power loss estmation based on PSPICE simulation[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(1):31-33.
- [5] 文特里希 阿伦特,尼古莱 乌里希,图斯基 文纳,等.功率半 导体应用手册[Z].第二版.德国:ISLE 出版社,2015.
  WINTRICH Arendt, NICOLAI Ulrich, TURSKY Werner, et al. Application manual power semiconductors[Z]. 2nd Edition.Germany:ISLE Verlag,2015.
- [6] 赵宏林,黄玉美,徐洁兰,等.常用结合面接触热阻特性的试 验研究[J].西安理工大学学报,1999,15(3):26-29.

ZHAO Honglin, HUANG Yumei, XU Jielan, et al. Experiment research on thermal contact resistance of normal used joints[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1999, 15(3):26–29.

[7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.电工电子设备机械结构热设计规范:GB/T 31845—2015[S].北京:中国标准出版社,2015:5-20.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Mechanical structures for electrotechnical and electronic equipment-Thermal design specification: GB/T 31845—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015:5–20.

- [8] 唐兵.某户外便携密闭机箱的结构与热设计[J].舰船电子对抗,2022,45(6):115-120.
   TANG Bing. Structure and thermal design of an outdoor portable closed case[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2022,45(6):115-120.
- [9] 史亮,赵静,王瑞豪,等.高热密度板卡模块高效散热设计研究[J].环境技术,2023,41(8):68-73.

SHI Liang, ZHAO Jing, WANG Ruihao, et al. Research on efficient heat dissipation design of high heat density board card module[J]. Environmental Technology, 2023, 41(8):68–73.

[10] 张红根,郑欣燕.高热量机箱的热设计——Flotherm 建模[J].
 国内外机电一体化技术,2007,10(8):55-56.
 ZHANG Honggen,ZHENG Xinyan. Thermal design of high-cal-

orie chassis——Flotherm modeling[J]. International Mechatronics Technology, 2007, 10(8):55–56.

> 收稿日期:2023-09-12 修改稿日期:2023-11-12