

电动飞机电机控制器风冷散热结构的计算与改进^{*}

王书礼^{1,2}, 马少华¹, 张 硕³

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 辽宁通用航空研究院, 辽宁 沈阳 110136;

3. 北京理工大学 电动车辆国家工程实验室, 北京 100081)

摘 要: 根据电动飞机的飞行剖面, 建立了电机控制器的系统损耗及 IGBT 模块的热阻网络模型, 对电机控制器 IGBT 模块的温度进行计算。以轻量小型化为目标, 对电机控制器的散热结构进行了改进。MATLAB/Simulink 系统仿真试验和地面台架样机试验结果表明: 改进的风冷散热器能够满足电动飞机电机控制器的散热需求, 且重量降低 5%。

关键词: 电机控制器; 电动飞机; IGBT 模块; 风冷散热器; 系统仿真

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)06-0084-07

Calculation and Improvement for Air Cooling Structure of Electrical Aircraft Motor Controller^{*}

WANG Shuli^{1,2}, MA Shaohua¹, ZHANG Shuo³

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Liaoning General Aviation Academy, Shenyang 110136, China;

3. National Engineering Laboratory for Electric Vehicles, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: According to the flight profile of the electric aircraft, the system loss of the motor controller was studied, the thermal resistance network model of the IGBT module was established, and the temperature of the IGBT module of the motor controller was calculated. On the premise of meeting the allowable temperature of motor controller, the cooling structure of IGBT module was improved. The results of MATLAB/Simulink simulation and ground bench test showed that the improved air-cooled radiator could meet the cooling requirements of electric aircraft motor controller, and the weight of the air-cooled radiator was reduced by 5%.

Key words: motor controller; electric aircraft; IGBT module; air cooling radiator; system simulation

0 引 言

电动飞机具有可靠性高、零排放、噪声低、操作方便、维护简单、乘坐舒适等诸多优点^[1]。电机控制器是电动飞机的核心部件, 也是电动飞机的主要发热元件之一。电机控制器中的 IGBT 模块集成度高、热流密度大, 在冷却差的条件下极易因

过热而损坏^[2]。电动飞机在起飞阶段对功率需求较高, 是巡航阶段的 3~4 倍。为了保证电动飞机安全可靠的飞行, 电机控制器的额定功率及散热结构按照起飞阶段的功率需求加以确定。由于电动飞机起飞时间较短, 且电机控制器的升温具有一定热惯性, 所以电机控制器的散热结构设计裕度较大, 有一定的优化潜力。

^{*} 基金项目: 辽宁省教育厅科学技术研究项目 (LZGD2017041)

作者简介: 王书礼 (1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为新能源电动飞机动力系统设计研发。

马少华 (1963—), 女, 教授, 研究方向为智能电器、电气设备在线监测与故障诊断技术。

张 硕 (1987—), 男, 副研究员, 研究方向为新能源汽车电机驱动系统控制与设计开发。

电机控制器的散热方式主要有风冷和水冷两种结构。水冷散热结构体积小、散热能力强,但需要配置水泵、水箱、热交换器及管路等辅助设备^[3];风冷散热结构简单、可靠性高,且不需要外加辅助设备,但其散热能力较差,同等功率等级下散热器的体积和重量较大^[4]。小型电动飞机的电机控制器普遍采用风冷散热结构,改进其散热结构,减小散热器的体积和重量对发展小型电动飞机有重要现实意义。

为了发展新能源交通工具,学者们对电机控制器的风冷散热器展开了大量研究。江超等^[5]利用流体仿真软件对新能源纯电动汽车电机控制器的风冷散热器进行了热仿真,证明了风冷散热的合理性。丁杰等^[6]利用 HyperMesh 软件对电动汽车用电机控制器的风冷散热器进行了热仿真分析。胡建辉等^[7]对 IGBT 模块的热损耗进行计算,提出一种控制器散热系统设计的实用方法,并优化了散热结构。Jin 等^[8]针对电驱动矿车控制器的散热器进行了热仿真计算,优化了矿车电机控制器的散热结构。逯振坤^[9]针对电动飞机发动机舱的散热不佳问题展开研究,使用 CFD 软件对飞机发动机舱内流场分布进行了仿真分析,提出了优化方案,解决了电动机及控制器等热源表面散热不均问题。

本文根据电动飞机电机控制器的结构原理和电动飞机的飞行剖面,搭建了某双座电动飞机电机控制器功率损耗和热阻网络模型,对 IGBT 模块的结温进行了计算,并对风冷散热器结构进行了改进,改进后的风冷散热结构通过了台架试验。

1 系统损耗及 IGBT 模块结温计算

图 1 所示为某双座电动飞机的电机控制器的结构示意图,主要由控制板、驱动板、IGBT 模块、风冷散热器和壳体等构成^[10]。控制板被安装在控制器的最上部,IGBT 模块上安装驱动板,IGBT 模块的基板固定在风冷散热器的上表面,风冷散热器通常选用传统翅片散热结构^[11]。为了增强散热器的散热效果,IGBT 模块基板的外表面通过导热硅脂与风冷散热器相连^[12]。图 2 所示为 IGBT 模块内部封装结构,在传热过程中,IGBT 模块芯片产生的热量,经 IGBT 模块封装层到达铜基板,最终传递到风冷散热器。风冷散热器与外

界通过对流进行散热。

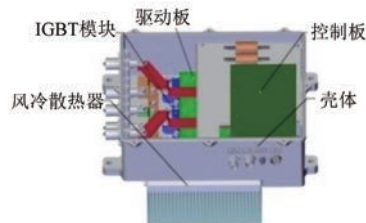


图 1 电机控制器结构示意图

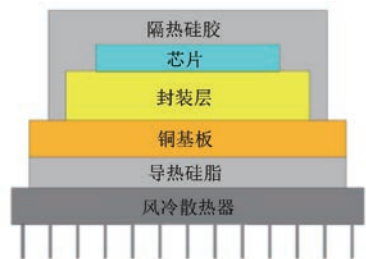


图 2 IGBT 模块内部封装结构示意图

1.1 系统损耗

本文所研究的电动飞机电机控制器为三相两电平逆变系统。该系统具有控制简单、效率高、可靠性高等特点^[13]。系统 3 个桥臂为完全对称结构,每个桥臂由一个 IGBT 模块构成,故对其中一个 IGBT 模块的损耗进行计算,即可获得系统的功率损耗。图 3 所示为三相两电平逆变系统原理图。

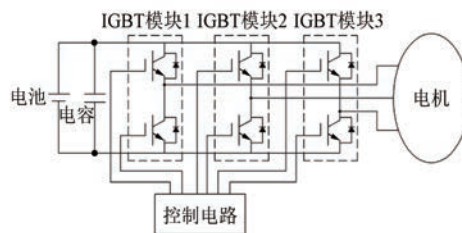


图 3 三相两电平逆变系统

IGBT 模块损耗由两部分构成:IGBT 损耗和反向续流二极管 FWD 损耗。即:

$$P_m = P_{IGBT} + P_{FWD} \quad (1)$$

式中: P_m ——IGBT 模块损耗;

P_{IGBT} ——IGBT 损耗;

P_{FWD} ——二极管 FWD 损耗。

IGBT 损耗包括开通损耗 $P_{IGBT_{on}}$ 、关断损耗 $P_{IGBT_{off}}$ 和通态损耗 $P_{IGBT_{con}}$,可分别表示为

$$\begin{cases} P_{\text{IGBT}} = P_{\text{IGBT_on}} + P_{\text{IGBT_off}} + P_{\text{IGBT_con}} \\ P_{\text{IGBT_on}} = \int_0^{T_0} f_s \cdot P_{\text{on}}(t) dt \\ P_{\text{IGBT_off}} = \int_0^{T_0} f_s \cdot P_{\text{off}}(t) dt \\ P_{\text{IGBT_con}} = \int_0^{T_0} V_{\text{ce}}(t) \cdot i_c(t) \cdot \tau(t) dt \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_0 ——调制波周期;

f_s ——单位调制波周期内的开关次数;

$P_{\text{on}}(t)$ 、 $P_{\text{off}}(t)$ ——单脉冲 IGBT 的开通和关断损耗;

$V_{\text{ce}}(t)$ ——IGBT 的导通压降;

$i_c(t)$ ——IGBT 的集电极电流,即母线电流;

$\tau(t)$ ——占空比。

根据文献[14]采用插值法所得的 IGBT 开关损耗 $P_{\text{on}}(t)$ 和 $P_{\text{off}}(t)$ 分别为

$$\begin{cases} P_{\text{on}}(t) = a_{\text{on}} \cdot i_c^3(t) + b_{\text{on}} \cdot i_c^2(t) + c_{\text{on}} \cdot i_c(t) \\ P_{\text{off}}(t) = a_{\text{off}} \cdot i_c^3(t) + b_{\text{off}} \cdot i_c^2(t) + c_{\text{off}} \cdot i_c(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: a_{on} 、 b_{on} 、 c_{on} ——IGBT 开通拟合系数;

a_{off} 、 b_{off} 、 c_{off} ——IGBT 关断拟合常数。

二极管 FWD 损耗包括通态损耗 $P_{\text{FWD_con}}$ 和反向恢复损耗 $P_{\text{FWD_rec}}$ 两部分,可分别表示为

$$\begin{cases} P_{\text{FWD}} = P_{\text{FWD_con}} + P_{\text{FWD_rec}} \\ P_{\text{FWD_con}} = \int_0^{T_0} V_{\text{FWD}}(t) \cdot i_{\text{FWD}}(t) \cdot [1 - \tau(t)] dt \\ P_{\text{FWD_rec}} = \int_0^{T_0} f_s \cdot P_{\text{re}}(t) dt \end{cases} \quad (4)$$

式中: $V_{\text{FWD}}(t)$ ——二极管 FWD 的通态压降;

$i_{\text{FWD}}(t)$ ——二极管 FWD 的通态电流;

$P_{\text{re}}(t)$ ——单脉冲 FWD 反向恢复损耗。

单脉冲 FWD 反向恢复损耗可表示为

$$P_{\text{re}}(t) = a_{\text{FWD}} \cdot i_{\text{FWD}}^3(t) + b_{\text{FWD}} \cdot i_{\text{FWD}}^2(t) + c_{\text{FWD}} \cdot i_{\text{FWD}}(t) \quad (5)$$

式中: a_{FWD} 、 b_{FWD} 、 c_{FWD} ——FWD 反向恢复拟合系数。

电机控制器的系统损耗为 3 个 IGBT 模块的损耗之和,可表示为

$$P_{\text{sys}} = 3P_{\text{m}} = 3(P_{\text{IGBT}} + P_{\text{FWD}}) \quad (6)$$

1.2 IGBT 模块的结温

为了计算 IGBT 模块的结温,采用热电类比

法将热学问题转换成电学问题。热阻抗是描述 IGBT 模块在稳态和瞬态或者短脉冲电流下的热行为的重要参数^[15]。本文采用典型 Foster 模型表征 IGBT 模块的电热损耗,如图 4 所示,其中, R_i 为热阻; C_i 为热容; $i=1,2,3,4$ 。

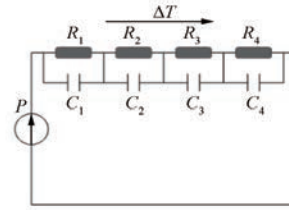


图4 典型四阶 Foster 模型

四阶 Foster 模型的瞬态热阻抗 $Z(t)$ 可以表示为^[16]

$$Z(t) = \sum_{i=1}^4 R_i \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right] \quad (7)$$

式中: R_i ——热阻;

τ_i ——热时间常数。

根据 R_i 和 τ_i , 可以求出热容 C_i :

$$C_i = \tau_i / R_i \quad (8)$$

由英飞凌公司生产的 FF600R06ME3 型 IGBT 模块的 IGBT 和二极管 FWD 的瞬态热阻抗特性 Z_{thJC} 曲线如图 5 所示。根据图 5, 可以分别辨识出 IGBT 和 FWD 四阶 Foster 模型的热阻和热容。

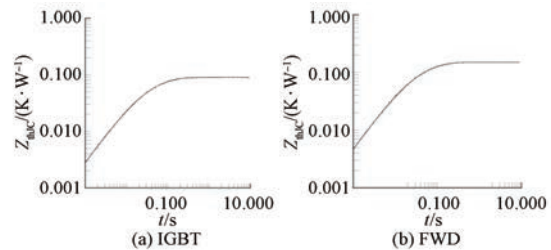


图5 瞬态热阻抗特性 Z_{thJC} 曲线

基于电机控制器三相两电平逆变系统的电气原理和电机控制器散热器结构, 搭建电机控制器热阻网络模型, 如图 6 所示。

电动机控制器风冷散热器通过导热硅脂与 IGBT 模块的基板相连, 虽然导热硅脂可以减小接触电阻和接触面之间的空气间隙, 但是并不能完全消除接触电阻和空气间隙。因此, 从 IGBT 模块基板到散热器的界面热阻 R_{ch} 应包括导热热阻和接触热阻两部分^[17]:

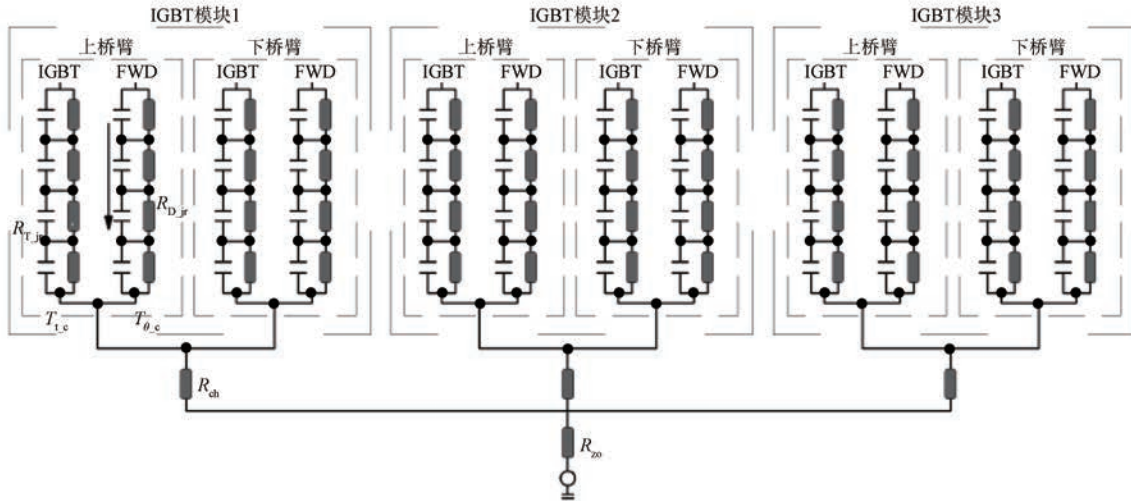


图6 电机控制器热阻网络模型

$$R_{ch} = R_{gr} + R_{int} \quad (9)$$

式中： R_{gr} ——导热热阻；

R_{int} ——接触热阻。

导热热阻 R_{gr} 的大小与涂层的厚度、面积及导热系数等相关，在给定导热硅脂型号的情况下，结合涂层厚度 d 及面积 S ，可以求出导热热阻：

$$R_{gr} = \frac{d}{\lambda \cdot S} \quad (10)$$

式中： λ ——导热硅脂的导热系数。

在接触面积和界面温差已知情况下，接触热阻 R_{int} 通过式(11)计算可得：

$$R_{int} = k_c \frac{\Delta T_c}{S_a} \quad (11)$$

式中： k_c ——换热系数；

ΔT_c ——界面温差；

S_a ——接触面积。

接触热阻 R_{int} 在实验室的条件下通过测量也可得到^[18]。

风冷散热器的散热主要以热传导和热交换两种方式进行，因此风冷散热器的热阻包括内部热传导热阻和空气热交换热阻两部分：

$$R_{zo} = R_{th} + R_{thk} \quad (12)$$

式中： R_{zo} ——散热器热阻；

R_{th} ——内部热传导热阻；

R_{thk} ——空气热交换热阻。

典型风冷散热器结构如图7所示。

散热器内热传导热阻 R_{th} 与散热器材料的导

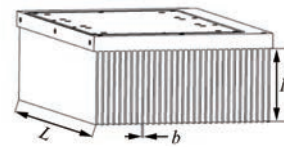


图7 典型风冷散热器结构

热系数和散热器的进风口速度、形状等参数有关。散热器内热传导热阻 R_{th} 可表示为^[19]

$$R_{th} = \frac{l}{1.16k_s Lbn} \quad (13)$$

式中： l ——齿高；

k_s ——导热系数；

L ——散热器长度；

b ——齿宽；

n ——齿数。

散热器与空气热交换热阻 R_{thk} 除了与散热器的几何尺寸有关外，还与散热器的出风口速度有关。散热器与空气热交换热阻 R_{thk} 可表示为^[20]

$$R_{thk} = \frac{[1 - 0.152 (v_s L)^{-\frac{1}{10}}] L^{\frac{1}{5}}}{5.12 v_s^{\frac{4}{5}} Lbn} \quad (14)$$

式中： v_s ——出风口速度。

根据飞机飞行剖面，利用 MATLAB/Simulink 软件搭建电机控制器风冷散热器温度求解模型，如图8所示。

将散热器的齿高 l 作为设计变量，计算 IGBT 模块的最高结温。根据 IGBT 模块结温的最高允许温度对风冷散热器结构进行改进。

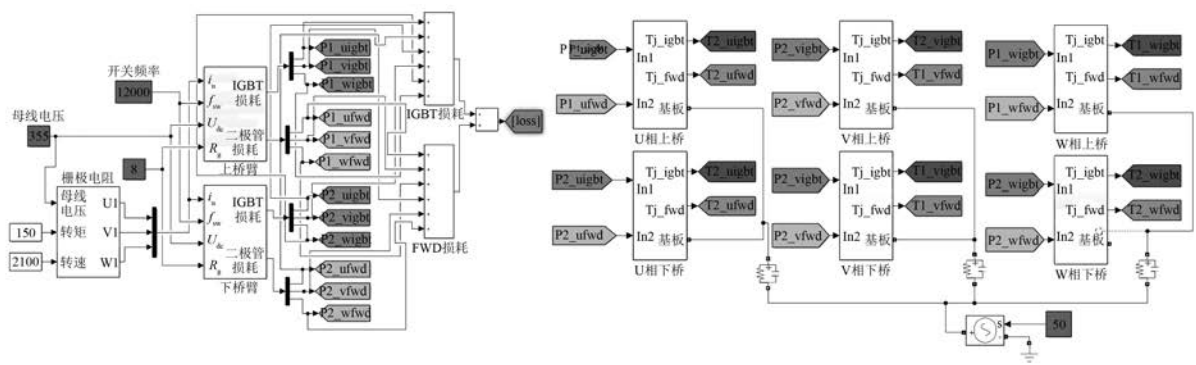


图 8 电机控制器风冷散热器温度求解模型

2 系统仿真及样机试验

2.1 系统仿真试验

为了验证该电动飞机电机控制器风冷散热器优化方法的正确性,以某双座电动飞机电机控制器为例进行系统仿真试验。飞机在起飞及巡航阶段运行工况如表 1 所示。电机控制器设计参数如表 2 所示。根据电机控制器额定功率设计的风冷散热器设计参数如表 3 所示。

表 1 飞机在起飞及巡航阶段运行工况

飞行阶段	功率/kW	时长/min	飞行速度/(km·h ⁻¹)	电机转速/(r·min ⁻¹)	输出扭矩/(N·m)
起飞	47	1.5	100	2 100	150
巡航	14	60	115	1 500	60

表 2 电机控制器设计参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	50
额定电压/V	DC 400
开关频率/kHz	12
调制比	0.9
最高工作温度/℃	85
效率/%	90

表 3 风冷散热器设计参数

参数名称	参数值
长度/mm	230
宽度/mm	240
高度/mm	110
基板厚度/mm	14
齿高/mm	90
齿宽/mm	5
有效换热面积/m ²	1.05
齿数	30
重量/kg	8

假设环境温度为 20℃,IGBT 及二极管 FWD 的最高允许结温为 85℃,分别对飞机在起飞及巡航阶段进行系统仿真,可得飞机在起飞及巡航阶段下散热器齿高与 IGBT 模块结温特性曲线,如图 9、图 10 所示。

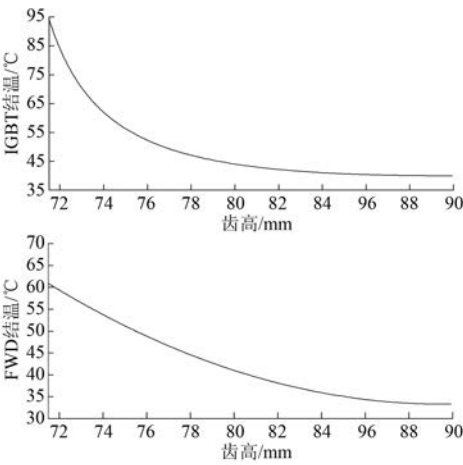


图 9 起飞阶段 IGBT 模块结温特性曲线

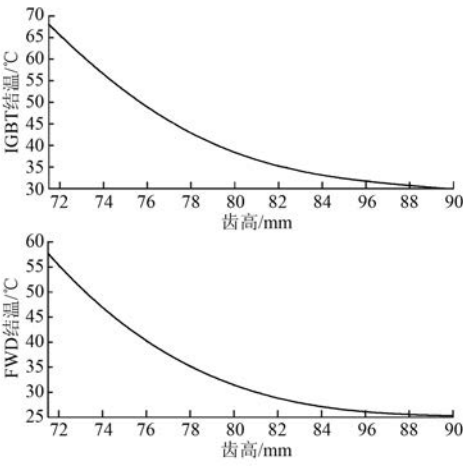


图 10 巡航阶段 IGBT 模块结温特性曲线

由图 9 和图 10 可以看出:

(1) 飞机在起飞阶段的 IGBT 结温远高于巡航阶段, 而二极管的结温起飞阶段和巡航阶段相差不多;

(2) 飞机在起飞阶段风冷控制器的齿高达到 72.3 mm 时, IGBT 的结温为 85 °C, 达到 IGBT 允许最高结温。根据仿真结果, 确定满足飞机电机控制器散热需求的最优散热器齿高为 72 mm。

2.2 样机试验

为了验证仿真结果的正确性, 进行地面模拟飞机飞行台架试验。用 3 个可调变速散热器风扇模拟电机控制器散热器在飞机飞行过程中的散热风速, 分别以齿高为 90 mm (按额定功率散热需求设计) 和 72 mm (按计算最优散热需求设计) 两种风冷散热器进行试验。使用螺旋桨地面试验台模拟飞机在飞机过程中的起飞及巡航阶段的工况, 如图 11 所示。试验方法结合飞机实际运行工况, 首先按起飞功率运行 1.5 min, 然后进入巡航功率, 当 IGBT 模块温度达到稳态后停止试验, 观察并记录 IGBT 模块温度变化。当运行到约 200 s 时, IGBT 模块温度逐渐进入稳态。



图 11 地面模拟飞机飞行台架试验台

图 12 所示为散热器齿高 90 mm 时 IGBT 模块温度特性曲线, 整个试验过程中 IGBT 模块在模拟飞行阶段时的温度最高为 32 °C。图 13 所示为散热器齿高 72 mm 时 IGBT 模块温度特性曲线, 在整个试验过程中 IGBT 模块在飞行阶段的温度最高为 75 °C。

样机试验结果相比仿真结果温度偏低, 造成此误差的原因是由于 IGBT 模块中热敏电阻被安置在 IGBT 芯片附近的硅胶中, 硅胶的隔热作用造成实测温度偏低。通过样机试验验证了该优化方法的正确性, 齿高 72 mm 的风冷散热器能够满足电动飞机电机控制器的散热需求, 重量相比齿高 90 mm 的风冷散热器减轻了 5%, 优化了电动

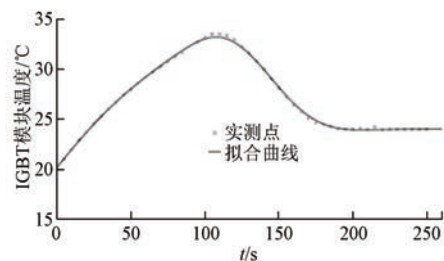


图 12 IGBT 模块温度特性曲线 (90 mm 齿高)

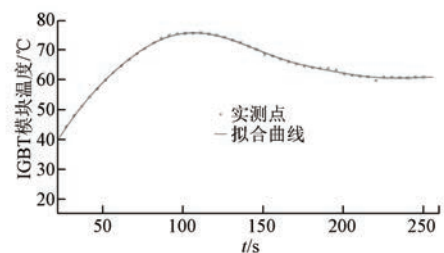


图 13 IGBT 模块温度特性曲线 (72 mm 齿高)

飞机风冷控制器散热结构。

3 结 语

(1) 建立了电动飞机电机控制器 IGBT 功率损耗模型和风冷散热器的热阻网络模型。

(2) 采用 MATLAB/Simulink 仿真软件对电机控制器风冷散热结构的温度进行了仿真。以风冷冷散器的齿高作为设计变量, 对风冷冷散器的结构进行了改进。

(3) 系统仿真和样机试验结果表明: 改进后的散热结构既可满足电机控制器的温度需求, 又减轻了散热器的重量。

【参考文献】

- [1] 黄俊, 杨凤田. 新能源电动飞机发展与挑战[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 57.
- [2] 丁杰, 唐玉兔, 忻力, 等. IGBT 模块封装的热性能分析[J]. 机车电传动, 2013(2): 9.
- [3] 丁杰, 张平. 电机控制器用 IGBT 水冷散热器温升实验与热仿真[J]. 大功率变流技术, 2015(3): 23.
- [4] 陈宏, 冷丽英, 尹梅, 等. 功率模块风冷散热器性能计算方法研究[J]. 机车电传动, 2014(1): 26.
- [5] 江超, 唐志国, 李荟卿, 等. 电机控制器 IGBT 用风冷冷散热器设计[J]. 汽车工程学报, 2015, 5(3): 179.
- [6] 丁杰, 张平. 电机控制器用 IGBT 风冷冷散热器的热

- 仿真与实验[J].电源学报,2015,13(2): 38.
- [7] 胡建辉,李锦庚,邹继斌,等.变频器中的 IGBT 模块损耗计算及散热系统设计[J].电工技术学报,2009,24(3): 159.
- [8] JIN C, WU D, SHEN Y H. Heat dissipation design and analysis of large power inverters for electric drive off-road mine truck [J]. Advanced Materials Research,2013,681: 142.
- [9] 逯振坤.电动飞机发动机舱的热仿真与风冷方案设计[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2018.
- [10] 李玉峰,宁昭义.电动飞机电推进系统可靠性建模与仿真[J].计算机仿真,2019,36(1): 51.
- [11] 杨弘熙,张杰,赵威.风冷散热器仿真中对流换热系数的计算方法[J].湖北工业大学学报,2018,33(1): 18.
- [12] XIN X, ZHANG C, ZHAO J. Electro-thermal based junction temperature estimation model and thermal performance analysis for IGBT module [C] // 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS),2017.
- [13] 叶银忠,耿攀,吴卫民,等.两电平三相逆变器效率对比分析[J].上海应用技术学院学报(自然科学版),2010,10(3): 169.
- [14] XIN X, ZHANG C N. Junction temperature estimation model of insulated gate bipolar transistor power module in three-phase inverter [C] // IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society,2017: 1267.
- [15] 陈明,曾书俐.IGBT 热网络传热模型研究[J].船电技术,2018,38(9): 1.
- [16] 陶文铨.数值传热学[M].2版.西安:西安交通大学出版社,2001.
- [17] 刘巍,王娟.风冷散热器的减重设计方法对比研究[J].电子机械工程,2015,31(5): 15.
- [18] 陈明,汪波,唐勇.IGBT 动态热阻抗曲线提取实验研究[J].电力电子技术,2010,44(9): 101.
- [19] 程鹏,兰海,罗耀华.整流器件热分析及其风冷散热器的仿真研究[J].计算机仿真,2011,28(11): 275.
- [20] 邵强,黄南,熊辉,等.功率组件中强迫风冷散热器风道的风阻估算与风机选型[J].大功率变流技术,2017(2): 38.

收稿日期: 2019-04-10

【期刊简介】

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于1959年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月10日出版,国内外公开发行人,邮发

代号4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。