

# 平流层电动机控制器热特性仿真分析和实验

聂 营<sup>1,2</sup>, 才晶晶<sup>1</sup>, 崔燕香<sup>1</sup>, 王旭巍<sup>1,2</sup>, 王 生<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 光电研究院, 北京 100094;  
2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100094)

**摘 要:** 为得到某电动机控制器在平流层低温低气压环境下工作时的热特性,开展了基于软件 Icepak 的热仿真分析,并通过地面环境模拟实验和平流层飞行实验对仿真模型进行了验证,仿真结果与实验结果基本吻合。结果表明:控制器的热设计可以满足保温和散热要求;在平流层低气压条件下,内部风扇可有效地保持控制器内部温度的均衡;平流层高度的太阳辐射对控制器内部温度分布有较大影响,在进行热设计时应予以考虑。研究结果为平流层电动机控制器的工程应用提供重要的参考依据。

**关 键 词:** 平流层电动机控制器; Icepak 软件; 热仿真分析; 环境模拟实验; 平流层飞行实验; 太阳辐射

中图分类号: V274      文献标志码: A

## Simulation analysis and test on thermal performances of stratospheric motor controller

NIE Ying<sup>1,2</sup>, CAI Jingjing<sup>1</sup>, CUI Yanxiang<sup>1</sup>,  
WANG Xuwei<sup>1,2</sup>, WANG Sheng<sup>1</sup>

(1. Academy of Opto-Electronics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;  
2. College of Materials Science and Opto-electronic Engineering,  
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** To obtain the thermal performances of a motor controller working in stratosphere, numerical simulation based on software Icepak was performed. To confirm the accuracy of the numerical model, a ground environmental simulation test and a stratospheric flight test were carried out. Results showed that the numerical model equation can simulate the thermal performance of the controller well. The influences of the cooling method of forced convection using an inner fan on the thermal performances were researched. The numerical simulation and flight test results showed that the thermal design of the controller was acceptable in view of stable working. Surface solar radiation should be taken into account, as it will influence the internal temperature. The research results provide important references for the engineering application of the stratospheric motor controller.

**收稿日期:**2016-12-27  
**基金项目:**高分辨率对地观测重大专项(Y14202A16N)  
**作者简介:**聂营(1983—),男,高级工程师,博士生,主要从事飞艇动力推进系统研究。

**引用格式:**聂营,才晶晶,崔燕香,等.平流层电动机控制器热特性仿真分析和实验[J].航空动力学报,2018,33(7):1758-1766. NIE Ying, CAI Jingjing, CUI Yanxiang, et al. Simulation analysis and test on thermal performances of stratospheric motor controller[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(7): 1758-1766.

**Key words:** stratospheric motor controller; Icepak software;  
thermal simulation analysis; environmental simulation test;  
stratospheric flight test; solar radiation

当前,综合考虑循环能源等因素,国内外主要研究机构设计的平流层概念艇以及正在研制的平流层实验飞艇,均采用了电动机-螺旋桨推进系统提供动力。根据公开文献资料<sup>[1-7]</sup>,美、日、韩等国的平流层飞艇实验中,仅有美国“HiSentinel 20”飞艇(体积为 2650 m<sup>3</sup>) 在 2005 年 11 月实现了平流层高度的动力飞行,后续“HiSentinel 80”飞艇(体积为 6846 m<sup>3</sup>) 在 2010 年的实验中因电动机控制器发生故障未能实现动力飞行。

鉴于平流层环境特殊的温度适应性,电动机控制器开展工程研制时,一般选用工业级元器件通过系统级的热设计达到使用温度要求。按目前设计的平流层飞艇任务剖面,推进器一般在飞艇进入平流层高度后开启,根据任务进行间歇工作或连续工作。由于平流层高度空气密度低,对流传输热量的能力比较差,导致控制器系统散热条件变差。电动机控制器由于受安装位置、质量和体积等因素的制约,结构集成度高,大功率动力输出时热流密度大,如果控制器产生的热量不能及时发散,而长期积聚于元器件周围,就会引起局部元器件温度升高。文献[8]指出电子设备的失效有 55%是由温度引起的;文献[9]认为半导体器件的温度每升高 10℃,其可靠性就会降低 50%。因此,为避免控制器内元器件性能降低或失效而危及飞艇的动力飞行,需对控制器进行合理的热设计:在上升阶段(大气环境温度逐渐降低)考虑保温措施,防止元器件因温度过低而失效;在平流层动力工作段加强散热措施,防止器件热量的局部聚集。

电动机控制器是典型的系统级电子设备。目前,针对电子产品热分析,较为常用的专业化分析软件包括 ANSYS Icepak、FloTHERM 等。方志强等<sup>[10]</sup>介绍了现在流行的电子设备热分析软件,阐述了电子设备热分析软件在应用中面临的一些问题。Icepak 以传热学为基础,通过调用专业的流体动力学求解器和高精度的计算,分析层流、湍流和混合流等多种流体状态,进行元器件级、板级以及系统级的热分析<sup>[11]</sup>;张斌<sup>[12]</sup>结合电路仿真工具和有限元软件进行了大规模集成电路芯片级的稳态热分析;王光宇<sup>[13]</sup>、马岩<sup>[14]</sup>利用 ANSYS 软件开展了 PCB(printed circuit board)的热分析;费朝辉<sup>[15]</sup>、王永豪<sup>[16]</sup>、李卫洲<sup>[17]</sup>、任恒等<sup>[18]</sup>利用

Icepak 进行了电子设备的系统级热分析。上述基于研究在电子设备热设计及工程应用中取得了较好的效果。但上述均在常温常压下开展的,因低温低气压环境会影响电子设备的辐射散热和对流散热效果,在平流层低温低气压环境下使用 Icepak 软件开展电子设备的热分析的有效性需要进行验证。

本文拟使用 Icepak 开展某平流层飞艇动力电动机控制器的系统级热仿真分析,并通过地面环境模拟实验和飞行实验对仿真分析的有效性进行验证。

## 1 仿真分析原理

热分析用于计算一个系统或部件的温度分布及其他热物理参数,如热量的获取或损失、热梯度、热流密度等,其最基本的理论基础是传热学和流体力学。

根据传热学原理<sup>[19]</sup>,电动机控制器与外部环境以及内部元器件之间、元器件与冷却流体之间的热量传递方式由热传导、热对流与热辐射 3 种方式组成,热传导包括芯片、PCB、支柱、机箱壳体、散热器之间的传热,以及机箱壳体内外部温度差引起的热量传递;对流换热包括机箱壳体和散热器在低温低气压环境中的自然对流散热以及机箱的内部风扇驱动的强迫对流换热;辐射换热包括控制器内各部分之间的辐射换热以及机箱壳体和散热器与低温大气环境间的换热。其中,热传导服从傅里叶传热定律,对流换热遵循牛顿冷却方程,两个面之间的辐射传热用斯忒藩-玻耳兹曼方程计算。

固体域的热传导控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho h) = \nabla \cdot [k \nabla T] + S_h \tag{1}$$

控制器的对流换热过程,本质上是一个涉及流体流动、流固热交换以及固体热传导等问题的流体力学问题,可以采用计算流体力学的方法模拟温度场。本文控制器安装于飞艇的艇体两侧,飞艇飞行速度为 7 m/s。由于来流速度较低,可以不考虑流动的压缩性。对三维不可压流动,控制方程由如下连续方程(式(2))、动量方程(式(3))和能量方程(式(4))组成<sup>[20]</sup>

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + (\nabla \cdot \rho \mathbf{v}) \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial T}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{v}) = \nabla \cdot [(\kappa + \kappa_t) \nabla T] + S_h \tag{4}$$

式中  $\mathbf{v}$  为速度矢量(m/s);  $p$  为静压(Pa);  $\rho$  为密度(kg/m<sup>3</sup>);  $\rho \mathbf{g}$  为重力项(N);  $\mathbf{F}$  为其他力源项(N);  $\kappa$  是导热系数(W/m · K),  $\kappa_t = c_p \mu_t / Pr_t$  是由湍流输运引起的导热系数(W/m · K);  $\boldsymbol{\tau}$  为应力张量,  $\boldsymbol{\tau} = \mu[(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{I}]$ ,  $\mu$  为黏度(N · s/m<sup>2</sup>),  $\mathbf{I}$  为单位张量;  $h$  为显焓(J/kg),  $h = \int_{T_{ref}}^T c_p dT$ ,  $T_{ref} = 298.15 \text{ K}$ ,  $c_p$  为比定压热容(J/kg · K);  $\nu$  为流体运动黏度(m<sup>2</sup>/s);  $T$  为温度(K);  $S_h$  为体积热源(W/m<sup>3</sup>)。

对于辐射传热, 本文采用面到面辐射模型, 假设参与辐射的面为灰体, 且为漫反射面, 两个面之间的辐射传热用斯忒藩-玻耳兹曼方程计算

$$q = \epsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \tag{5}$$

式中  $q$  为热流率(W),  $\epsilon$  为辐射率(黑度);  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  为斯忒藩-玻耳兹曼常数,  $A_1$  为辐射面 1 的面积,  $T_1$  为辐射面 1 的温度(K),  $T_2$  为辐射面 2 的温度(K),  $F_{12}$  为由辐射面 1 到辐射面 2 的角系数。

采用有限体积法对上述方程组建立离散方程, 通过调用 Fluent 求解器进行求解, Fluent 求解器提供了多种湍流模型。

利用 Icpak 进行热仿真分析的主要步骤包括建模、定义各种材质的物理特性和边界条件、网格划分、调用 Fluent 求解器求解和后处理等。Icpak 通过基于对象的模型模块对部件级、板级或系统级的问题进行建模, 对象是用来构建模型的实体。网格划分除可以实现自动非结构化网格(四面体, 五面体, 六面体及混合网格)生成外, 还可以生成非连续网格以在不改变计算精度的前提下显著减少网格数量。Icpak 自身的后处理模块可以可视化速度向量、云图、切面和等值面, 可以绘制速度、温度、压力、热流密度、传热系数、热流、湍流参数等云图等<sup>[20]</sup>。

## 2 控制器热仿真分析

### 2.1 模型建立

本文电动机控制器工作海拔高度为 18 km, 要求控制器内部 PCB 温度不低于 -40 ℃, 不高于

85 ℃。控制器为铝合金长方体壳体, 外形如图 1 所示, 一面设置挤压式散热器, 设备内部为 3 层电路板, 如图 2, 上层和下层为 PCB; 中层板为加热板用于保持驱动器内部温度, 加热板启动后由温控电路控制间断工作, 加热板的温度维持在 55 ~ 75 ℃之间, 为便于分析, 简化为一个温度恒为 65 ℃的热源。

Icpak 采用了一种基于对象的建模方法, 对象是用来构建模型的实体, 本文模型用到的对象及属性如表 1 所示, 表中  $q_v$ ,  $p_s$  分别表示风机的体积流量和静压。仿真模型的网格如图 3 所示(白色框内为控制器), 采用非连续网格, 在控制器局部(包括松弛区域)进行加密, 单元总数约为 86 万。

为便于与控制器在环境模拟实验箱内的自然对流散热实验进行对比, 将环境模拟实验箱的尺寸设置为计算域, 控制器位于环境模拟实验箱中央。为了模拟实验箱内环境温度始终恒定以及控制器与环境模拟实验箱内壁之间的辐射工况, 将计算域在  $x$  轴方向的 2 个面设置成“Opening”, 其余 4 个面设置为恒温壁面, 计算域在各个方向的尺寸均大于 2 倍的控制器特征长度。有来流工况下的对流散热模拟, 通过设置位于  $x$  方向的流动速度实现。

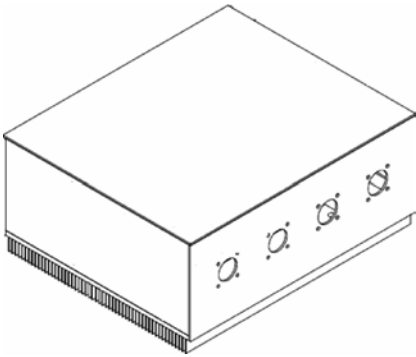


图 1 控制器外形示意图

Fig. 1 Illustration of the controller shape

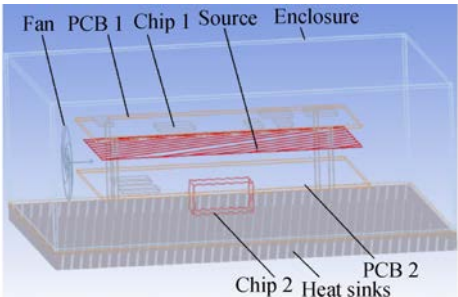


图 2 控制器内部布局示意图

Fig. 2 Illustration of internal layout of the controller

表 1  控制器仿真模型的主要对象及属性

Table 1  Major modules and properites of the controller simulation model

| 元器件   | 尺寸/mm             | 功耗/W     | 模型         | 材质/属性                                                                     |
|-------|-------------------|----------|------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 机箱    | 长 270×宽 255×高 100 |          | Enclosure  | 6063-T5                                                                   |
| 散热翅   | 长 270×宽 10×高 1.5  | 0        | Heat sinks | Al-Extruded                                                               |
| PCB 1 | 长 180×宽 90×厚度 2   | 0        | Plate      | FR-4. 1                                                                   |
| 芯片 1  | 长 20×宽 20×厚度 2    | 1. 2     | Block      | Si-Typical                                                                |
| 加热板   | 长 180×宽 90        |          | Source     | 恒温 65℃                                                                    |
| PCB 2 | 长 180×宽 122×厚度 2  | 0        | Plate      | FR-4. 1                                                                   |
| 芯片 2  | 长 40×宽 20×厚度 2    | 3(28. 8) | Block      | Si-Typical                                                                |
| 风扇    | 内径 50    外径 20    | 0        | 2D-Fan     | $q_v=0. 007\ 456\ \text{m}^3/\text{s}$ , $p_s=4. 46\ \text{N}/\text{m}^2$ |
| 支柱    | 直径 4              | 0        | Block      | Cu_Brass                                                                  |

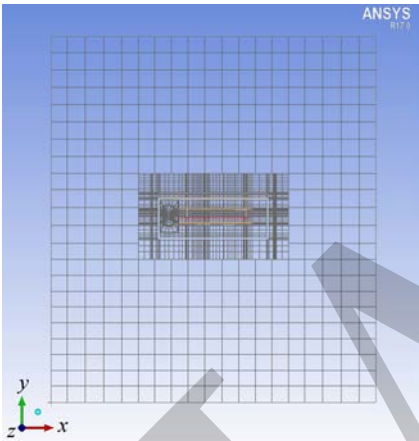


图 3  控制器模型非连续网格

Fig. 3  Non-conformal mesh for the controller model

其他设置还包括:Plates 热力学模型使用导热厚板,设置厚度和材料;风扇类型为二维圆形内部风扇,流动方向沿正向法向,流动类型为线性,设置体积流量和压力;设置重力方向为 $-y$ 方向;环境气压设为 7 490 Pa,环境温度设为 $-56. 5\ ^\circ\text{C}$ ;辐射模型采用面到面模型,辐射角系数采用 Hemicube 方法计算。

因为 18 km 处的大气密度较小,分析控制器自然对流散热时,流动的雷诺数约为 1 500,使用层流模型进行计算,压力项松弛系数为 0. 7,动量项松弛系数为 0. 3;分析有来流情况下的强制对流散热时,流动的雷诺数约为  $4. 6\times 10^4$ ,使用零方程湍流模型计算,压力项松弛系数为 0. 3,动量项松弛系数为 0. 7。

2. 2  仿真结果

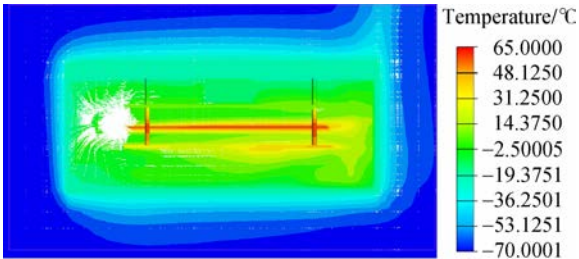
根据工程实际需要,为便于开展实验验证,进

行了空载工况和额定功率工况下的仿真分析,空载工况的模拟包括有无风扇、有无辐射 4 种工况;额定功率工况的模拟,包括不考虑太阳辐射、中等程度辐射和强辐射 3 种工况。

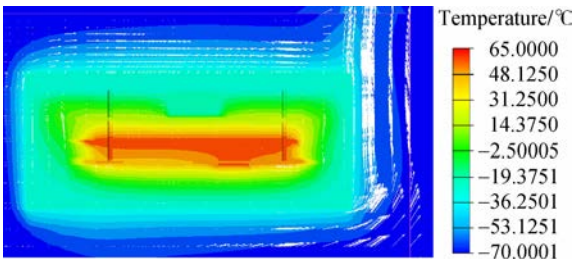
2. 2. 1  空载工况仿真结果

控制器驱动电动机空载(仅电动机转动,不驱动螺旋桨转动)运行时,由根据实际功耗,芯片 1 功率取 1. 2 W,芯片 2 功率取 3 W,加热板简化为恒温热源,其余热源忽略不计。空载工况模拟分析了控制器在低温低气压环境中的内外部温度分布。空载工况模拟可与地面模拟环境实验(限于实验设备尺寸无法进行驱动螺旋桨转动的额定功率负载实验)进行对比。空载运行时,有无风扇情况下控制器内部的温度分布如图 4,内部元器件温度如图 5 所示,内部各主要测点的温度如表 2 所示。

有无加热板的分析结果对比表明,加热板可以保证控制器内电路板和元器件温度在适用范围内;有风扇和无风扇条件下的仿真分析结果对比表明:在平流层大气密度较低的条件,内部风扇亦可有效防止发热芯片局部温度聚集、保持控制器内部温度的均衡;考虑和不考虑辐射散热条件

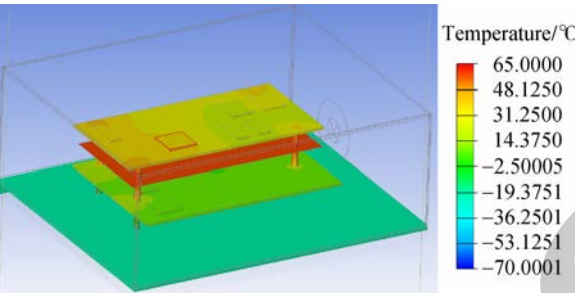


(a) 有风扇

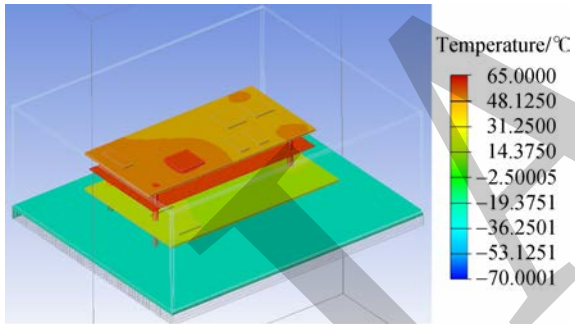


(b) 无风扇

图 4 空载工况下控制器内部温度分布  
Fig. 4 Temperature distribution inside the controller under no-load mode



(a) 有风扇



(b) 无风扇

图 5 空载工况下控制器内部器件温度  
Fig. 5 Temperature distribution of modules inside the controller under no-load mode

表 2 空载运行时控制器内各主要测点处温度仿真值  
Table 2 Simulation value of temperature of major module inside the controller under no-load mode

| 工况          | 温度/℃   |        |        |        |        |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|             | 芯片 1   | 芯片 2   | 外壳     | PCB 1  | PCB 2  |
| 有风扇         | 39.26  | -11.97 | -27.95 | 28.69  | 13.44  |
| 无风扇         | 58.95  | -19.08 | -25.28 | 50.22  | 23.29  |
| 不考虑<br>辐射散热 | 47.57  | -4.60  | -9.47  | 34.81  | 16.66  |
| 无加热板        | -37.94 | -50.32 | -54.53 | -46.22 | -52.09 |

下的仿真分析结果对比表明:在平流层大气环境温度较低条件下,控制器的辐射散热能力大大增强,有利于控制器的散热。

2.2.2 额定功率工况仿真结果

本文所述电动机控制器在平流层高度以额定功率工作时,由根据实际功耗,芯片 1 功率取 1.2 W,芯片 2 功率取 28.8 W,加热板简化为恒温热源,其余热源忽略不计。由于平流层高度太阳辐射作用较强,本文分析了控制器单面接受辐射时对内部温度分布的影响,太阳辐照度  $E_e$  分别取 0、600、1280 W/m<sup>2</sup>,来流速度取 7 m/s。各工况仿真分析结果如表 3 和图 6 所示。

表 3 额定功率时控制器内部元器件温度  
Table 3 Temperature of modules inside the controller at specified power

| 元器件   | 温度/℃                 |          |                        |             |                         |
|-------|----------------------|----------|------------------------|-------------|-------------------------|
|       | $E_e=0\text{ W/m}^2$ |          | $E_e=600\text{ W/m}^2$ |             | $E_e=1280\text{ W/m}^2$ |
|       | 无<br>加热板             | 有<br>加热板 | 改变<br>风扇位置             | 不改变<br>风扇位置 |                         |
| 芯片 1  | -42.25               | 35.77    | 31.16                  | 41.98       | 49.22                   |
| 芯片 2  | -18.18               | -5.05    | 6.10                   | 5.93        | 18.36                   |
| 外壳    | -55.22               | -42.49   | -32.99                 | -34.55      | -22.08                  |
| PCB 1 | -53.67               | 14.90*   | 30.75                  | 21.88       | 31.08                   |
| PCB 2 | -55.39               | -6.62    | 7.15                   | 0.70        | 9.90                    |

注:表中加 \* 数值所处工况与后文飞行实验工况相同。

有无加热板的分析结果对比表明,加热板可以保证控制器内电路板和元器件温度在适用范围内。

对比考虑和不考虑太阳辐射仿真分析的结果可得,平流层太阳辐射对连接于壳体的芯片 2 以及位于辐射面壳体下方的芯片 1 的温度均有较大的影响,因此,在进行控制器的热设计时应该考虑平流层高度太阳辐射的影响。

从额定功率工况下控制器内部流场分布可看出,原有风扇放置于发热芯片相对端,风扇将加热板的热量吹向发热芯片端,但由于风扇风压较低不能在控制器内部形成很好的环流效果,容易造成热量在芯片处堆积,不利于芯片的散热。将风扇改变位置,安装在发热芯片同侧后,从仿真分析结果看,位置更改后更有利于芯片的散热和整个控制器内温度的均衡,风扇位

置改变前后的温度分布如图 7 所示,内部元器件的温度如图 8 所示。

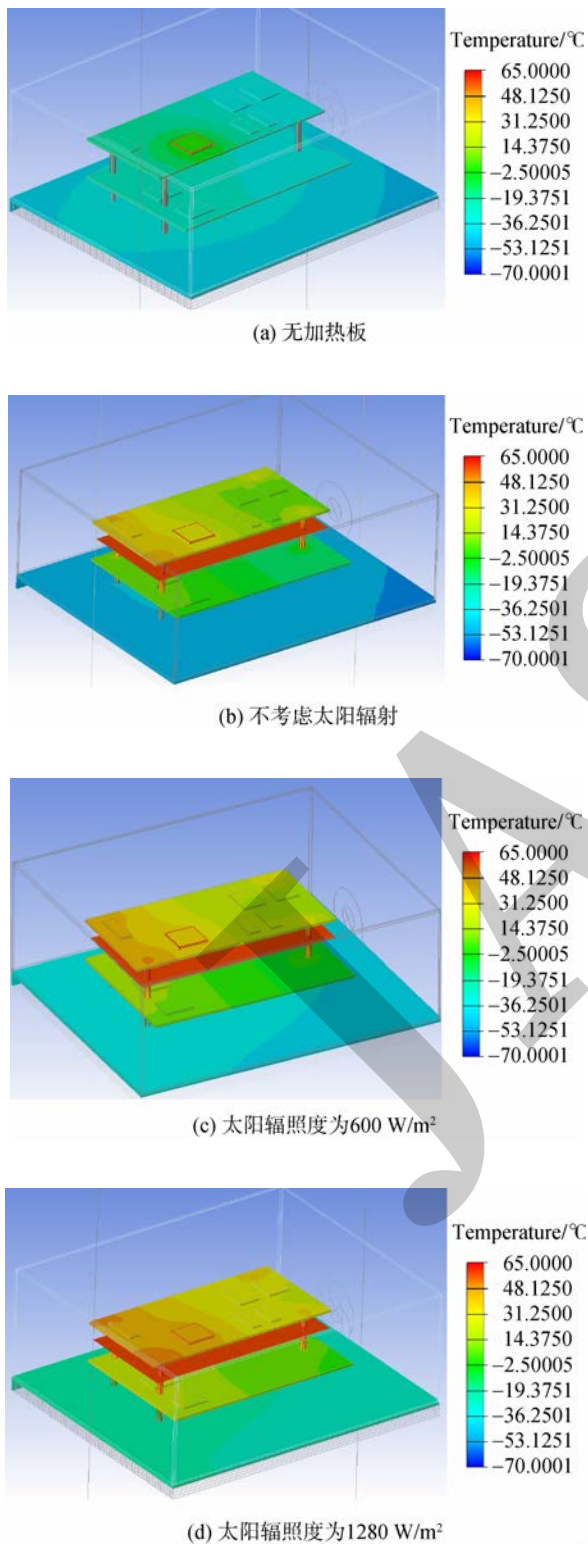


图 6  太阳辐照对控制器内部元器件温度的影响  
Fig. 6  Influences of solar radiation on module temperature inside the controller

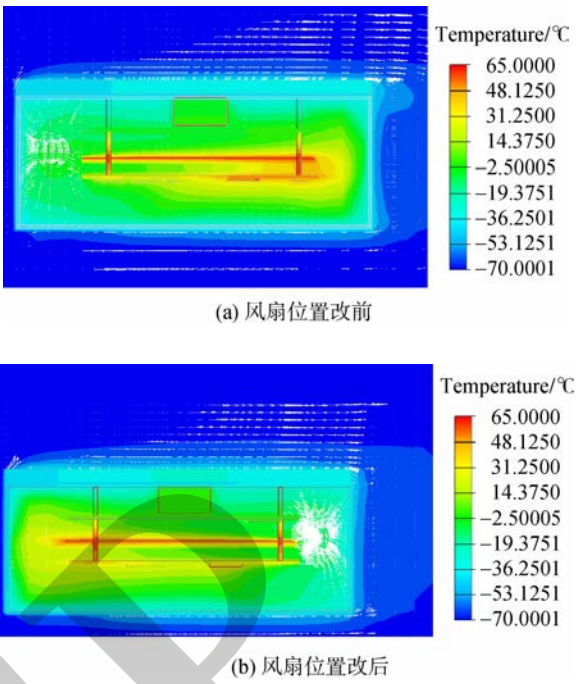


图 7  风扇位置对控制器内部温度分布的影响  
Fig. 7  Influences of fan location on the temperature inside the controller

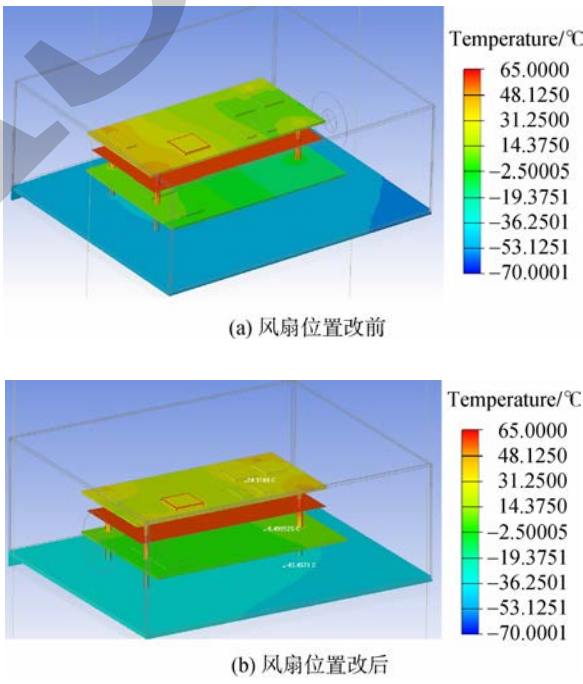


图 8  风扇位置对控制器内部元器件温度的影响  
Fig. 8  Influences of fan location on module temperature inside the controller

### 3  实验结果与分析

#### 3.1  地面环境模拟实验

为验证 Icepak 分析电子设备在低温低气压

环境下热特性的有效性,在地面进行了平流层低温低气压环境模拟实验,环境模拟实验箱内的气压和温度分别设为 7 490 Pa 和  $-56.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,实验过程中一直保持该温度和气压直至实验结束,控制器在环境模拟实验箱内的安置情形如图 9 中红色方框位置所示。实验时,在控制器内部的 6 处关键位置设置测试点,包括芯片 1、芯片 2、PCB1、加热板、PCB 2 以及散热翅侧壳体内部板,部分温度传感器位置如图 10 中红色圆圈位置所示。控制器在低温低气压环境下工作正常,温度平衡后测点温度曲线如图 11 所示,由实验曲线,控制器内部各测点在 6 000~7 800 s 内处于稳定状态。

各测点测试结果与仿真结果对比情况如表 4 所示,除底板测点外,其余各测点温度受加热板影响,温度波动与加热板的加热周期同步,测点温度



图 9 控制器在环境模拟实验箱内的安置情形  
Fig. 9 Installation location of controller in the environmental simulation test chamber



图 10 温度传感器布置位置

Fig. 10 Temperature sensors installation location

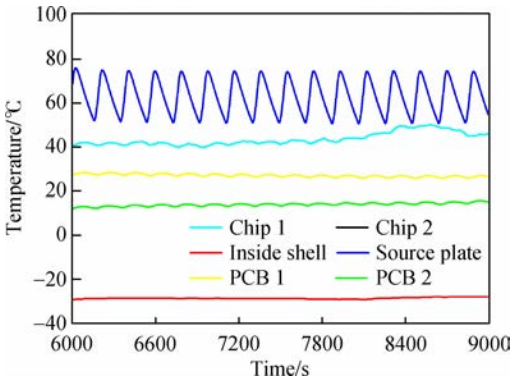


图 11 环境模拟实验温度曲线

Fig. 11 Temperature curves of the environmental simulation test

相对误差在 8% 以内。底板测点因离加热板较远,受加热板的影响不明显,温度保持稳定,相对误差也最小,为  $-3.59\%$ 。

表 4 控制器内测试点处温度实验值与仿真值对比表  
Table 4 Comparison between test result and simulation result of temperature at the measuring point inside the controller

| 测点   | 温度/ $^{\circ}\text{C}$ |           | 相对误差/ $\%$ |
|------|------------------------|-----------|------------|
|      | 实验结果                   | 仿真结果      |            |
| 芯片 1 | 41. 11                 | 39. 26    | $-4. 50$   |
| 芯片 2 | $-12. 64$              | $-11. 97$ | $-5. 30$   |
| 壳体   | $-28. 99$              | $-27. 95$ | $-3. 59$   |
| PCB1 | 26. 78                 | 28. 69    | 7. 13      |
| PCB2 | 14. 25                 | 13. 44    | $-5. 68$   |

对比结果表明,仿真分析结果可以较为真实地反应控制器的实际工作情况,所建立的基于 Icepak 的仿真分析模型是有效的。

3. 2 飞行实验

为进一步验证有来流情况下仿真模型的有效性,利用整个飞艇系统开展飞行实验的机会,测试了控制器在平流层高度飞行时的温度曲线。控制器在飞艇上的安装位置如图 12 中方框所示。限于整个飞艇系统数据量和链路能力,仅在控制器内部的 PCB1 上安装了一个温度测点。

上升过程及平飞实验过程中控制器工作正常,证明控制器的热设计可以满足保温和散热要求。在平流层高度动力开启工作后,控制器内测点温度由  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  逐步上升并稳定于  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温度曲线如图 13 所示(图中横坐标为全球定位系统(GPS)时间,项目原因隐去了时刻)。在本文所截

取的控制器工作时段,因飞艇航向原因该控制器处于艇体背阴侧的无太阳辐射状态(参照图 14 中远处白色的月亮),测点的实测温度(14.0℃)与无辐射情况下该测点的仿真结果(14.90℃,见文中第 2.2.2 节表 3 第 2 行)相对误差为 6.04%,证明有来流情况下的仿真模型也是有效的。



图 12 安装在飞艇上的控制器

Fig. 12 Controller installed on the airship

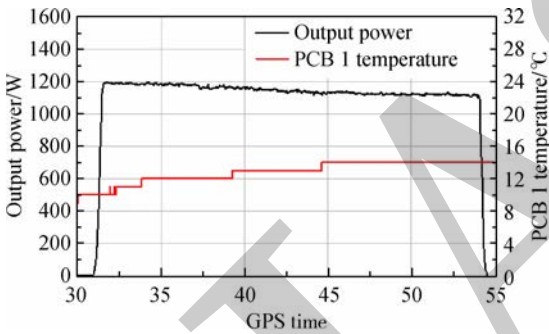


图 13 平流层飞行实验得到的控制器温度曲线

Fig. 13 Temperature curves of controller in stratospheric flight test



图 14 推进器在 18km 高空工作情形

Fig. 14 Thruster working condition at 18km altitude

4 结 论

通过基于 Icepak 的仿真分析、地面环境模拟实验和平流层飞行实验,得到了某平流层电动机

控制器在平流层环境下工作时的热特性。由分析结果可得到如下结论:

1) 平流层环境额定功率工况下仿真和飞行实验结果表明,该控制器的热设计可以满足保温和散热要求。

2) 在平流层低气压条件下,内部风扇对保持控制器内部温度的均衡具有一定的作用。

3) 在平流层低温条件下,控制器的辐射散热能力大大增强,有利于控制器的散热。

4) 平流层高度的太阳辐射对控制器内部温度分布有较大影响,在进行热设计时应该予以考虑。

本文建立的基于 Icepak 的仿真模型分析结果与实验结果基本一致,表明仿真分析是可信的。Icepak 软件可应用于电子设备在平流层低温低气压环境下的热分析,可为工程应用提供重要的参考依据。

参考文献:

[ 1 ] ONDA M. Stratospheric LTA platform and its thrust efficiency with a stern propeller[R]. AIAA-2002-3424,2002.

[ 2 ] KIM D M, LEE Y G, KANG J W, et al. Korea stratospheric airship program and current results[R]. AIAA-2003-6782,2003.

[ 3 ] HENDRICK P, HALLET L, VERSTRAETE D. Comparison of propulsion technologies for a HALE airship[R]. AIAA-2007-7747,2007.

[ 4 ] LEE M. The high altitude lighter than air airship efforts at the us army space and missile defense command/army forces strategic command[R]. AIAA-2009-2852,2009.

[ 5 ] SMITH S, MICHAEL F, MICHAEL L, et al. HiSenti-nel80: flight of a high altitude airship[R]. AIAA-2011-6973,2011.

[ 6 ] ANDROULAKAKIS S P, JUDY R A. Status and plans of high altitude airship (HAATM) program[R]. AIAA-2013-1362,2013.

[ 7 ] AEROSPACE J P. America's OTHER space program: PongSat mission away 22[EB/OL]. [2015-09-15]. <http://www.jpaaerospace.com/pongsat/away22.html>.

[ 8 ] NELSON L A, SEKHON K S, FRITZ J E. Direct heat pipe cooling of semiconductor devices[R]. Palo Alto, California; the 3th International Heat Pipe Conference, 1978.

[ 9 ] 谢德仁. 电子设备热设计工作点评[J]. 电子机械工程, 1999, 71(1): 27-28.

XIE Deren. The review of thermal design for electronic equipment[J]. Electro-Mechanical Engineering, 1999, 71(1): 27-28. ( in Chinese )

[ 10 ] 方志强, 付桂翠, 高泽溪. 电子设备热分析软件应用研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(8): 737-740.

FANG Zhiqiang, FU Guicui, GAO Zexi. Application re-

search on thermal analysis software of electronic systems [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(8): 737-740. (in Chinese)

[11] 阮健. ANSYS 仿真技术在电子产品热设计中的应用[J]. 舰船电子对抗. 2011, 34(3): 114-116.

RUAN Jian. Application of ANSYS simulation techniqueto the thermal design of electronic product[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2011, 34(3): 114-116. (in Chinese)

[12] 张斌. 集成电路芯片级热分析方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.

ZHANG Bin. Thermal analysis method to layout level of integrated circuit[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010. (in Chinese)

[13] 王光宇. 基于 ANSYS 的电子元件热分析应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.

WANG Guangyu. Research of the thermal characters of electronics using ANSYS[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005. (in Chinese)

[14] 马岩. 印制电路板详细模型的热仿真分析[J]. 机械设计与制造工程, 2016, 45(1): 52-55.

MA Yan. Thermal simulation analysis of PCB detailed model[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2016, 45(1): 52-55. (in Chinese)

[15] 费朝辉. 通讯设备的热设计和热分析研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.

FEI Zhaohui. Research on thermal design and thermal analysis of communication equipment [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)

[16] 王永豪. 典型散热器热分析及优化设计平台开发[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.

WANG Yonghao. Development of thermal analysis and optimum design platform for typical heat sink [D]. Xi'an: Xidain University. 2012. (in Chinese)

[17] 李卫洲. 基于 Icepak 软件的电子方舱热设计[J]. 无线电工程, 2011, 41(8): 55-58.

LI Weizhou. Thermal design of electronic shelter using Icepak software[J]. Radio Engineering, 2011, 41(8): 55-58. (in Chinese)

[18] 任恒, 刘万钧, 黄靖, 等. 基于 Icepak 的密闭机箱热设计研究[J]. 电子科学技术, 2015, 2(6): 639-644.

REN Heng, LIU Wanjun, HUANG Jing, et al. Thermal analysis of an airtight cabinet based on icepak[J]. Electronic Science and Technology, 2015, 2(6): 639-644. (in Chinese)

[19] 王经. 传热学与流体力学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.

[20] ANSYS Incorporation. ANSYS Icepak user's guide[R]. Pittsburgh: ANSYS Incorporation, 2015.

(编辑: 王碧珺)