

基于 ICEPAK 软件的一种红外成像系统热设计

朱承希, 施家明

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 随着红外成像技术的不断进步, 人们对于红外成像系统提出更高要求。针对一种红外成像系统, 使用 Icepak 软件对其进行热力学仿真分析, 并将结果与实际情况进行对比验证。在此基础上提出几种散热方案, 并针对每一种方案进行建模与仿真。通过定量化比较, 最终选取最佳方案。该方案既降低系统整体温度, 又使系统内温度分布均匀化。

关键词: 热设计; Icepak; 红外成像系统; 模型仿真

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2013)04-0211-06

Thermal Design of One Kind of Infrared Imaging System Using ICEPEAK Software

ZHU Cheng-xi, SHI Jia-ming

(Shanghai Institute of Technical Physics of CAS, Shanghai 200083, China)

Abstract: With the development of infrared imaging technology, people raise higher demand to infrared imaging system. For one kind of infrared imaging system, the paper uses ICEPAK to analyze its thermal condition and compares the result with actual situation. On the basis of this analysis, we apply many cooling methods and analyze each method in ICEPAK. At last we find a best method which can both reduce temperature and unify temperature distribution of system by quantitative comparison.

Key words: thermal design, ICEPAK, infrared imaging system, prototype simulation

0 引言

随着红外成像技术的不断进步, 越来越多的红外成像设备应用于民用、军事以及航天领域。在应用不断拓展与深入的同时, 人们也对红外成像系统提出更高的要求。为达到户外应用目的, 通常将红外探测器、光学系统以及电子处理系统集成在同一个封闭的箱体中。系统工作时产生的热量将不可避免地升高箱体内温度, 形成非均匀温度场与杂散光, 影响成像质量; 同时在封闭箱体内极易形成高温区, 降低设备的工作性能与可靠性。

20 世纪 80 年代, 国际上开始针对红外光学系统展开热力学分析及无热化技术研究^[1], 我国随后也在此方面展开深入研究并取得实质性进展。目前已成功研制出光学补偿式和机械补偿式的被动无热化光学系统^[2-3]。对于大型成像系统, 近年来国内外研究者也展开细致的热力学分析, 如亚利桑那大学的 Myung Cho 等研究者详细分析了热载荷对于

TMT 望远系统的影响^[4]。对于封闭式红外成像系统, 不同的结构分布将产生不同的温度场分布, 并对系统产生不同的热干扰, 因此对此类系统仍需进行针对性的热分析和热设计。

针对一种红外成像系统, 本文希望通过基于 Icepak 的建模以及仿真分析, 得出其内部温度分布, 在与实测温度比对的基础上定量化的寻找合理有效的散热措施, 以提高其工作性能与可靠性。

1 仿真模型简介

1.1 模型介绍

本次研究的红外成像系统由两台红外组件、一块整机电路板以及机箱外壳等部分组成。机箱外形如图 1 所示。内部并排安装两台红外组件, 整机电路板垂直安装在机箱背部, 箱体内布局如图 2 所示。红外组件包括一套红外镜头、一台制冷型红外探测器、一块组件电路板以及基座等结构件, 其布局如图 3 所示。组件电路板参与系统成像处理, 且电路

收稿日期: 2013-02-27; 修订日期: 2013-03-11.

作者简介: 朱承希 (1983-), 男, 江苏无锡人, 硕士生, 主要从事光机系统方面的研究。

基金项目: 中国科学院上海技术物理研究所四期创新专项项目, 编号: Q-DX-18。

板上发热元件较多,因此对其进行详细建模。该电路板主要由一块 DSP 芯片,两块电源模块以及电容、电感等其它电子元器件组成,建模时将其它电子元器件合并简化为一长方形热源,称为元器件。其布局如图 4 所示。

在此红外成像系统中,所有机械结构件均采用航空铝合金加工,表面进行黑色阳极氧化处理。机箱采用封闭式结构,顶部安装一块防晒板,外表面喷涂防晒油漆,用于减小日照对箱体内部仪器的影响。工作时,红外探测器、组件电路板以及整机电路板持续产生热量,热量在封闭的机箱内进行累积,直到与外界的热交换达到稳定状态。考虑到整机电路板仅用于数据传输,本身可在高温下工作且对系统成像不产生直接影响,因此建模时简化为一块印制电路板。

1.2 模型边界条件

该红外成像系统在工作一定时间后,与外界达到热平衡状态,箱体内部形成稳定的温度场。系统内部存在 3 处热源,分别是:红外探测器,组件电路板以及整机电路板。各个器件的功耗如表 1 所示。

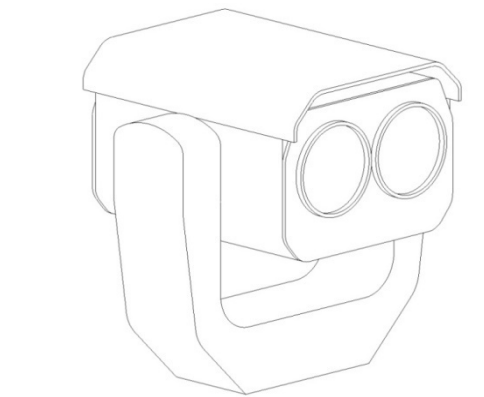


图 1 红外成像系统外形示意图
Fig.1 The shape of infrared imaging system

表 1 系统发热器件功耗

Table 1 Power consumption of components in system			
名称	红外探测器	组件电路板	整机电路板
功率/W	6	4	6

组件电路板进行详细建模,在电路印制板上焊有两块 DC-DC 电源模块,一块 DSP 处理器以及经简化后的元器件。组件电路板上各器件功耗如表 2 所示。

表 2 组件电路板发热器件功耗

Table 2 Power consumption of components on module's PCB			
名称	电源模块(单块)	DSP 处理器	元器件
功率/W	0.6	0.3	2.5

系统内主要材料的特性如下:
铝合金: 密度 2800 kg/m^3 ; 比热 $900\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$; 导热系数 $205\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。
光学材料: 密度 5350 kg/m^3 ; 比热 $309\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$; 导热系数 $59\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。
空气: 密度 1.1614 kg/m^3 ; 比热 $1005\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$; 导热系数: $0.0261\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$; 体膨胀系数 $0.00333/\text{K}$; 扩散率 1.0。

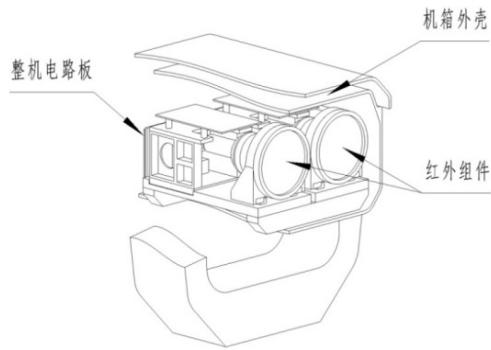


图 2 红外成像系统内部布局图
Fig.2 The inside distribution of infrared imaging system

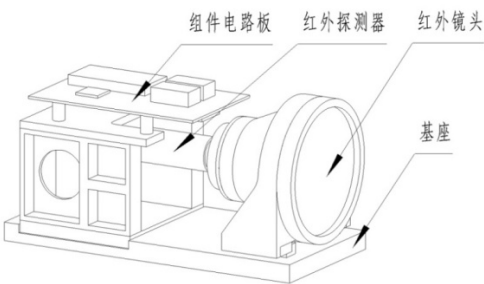


图 3 红外组件布局图
Fig.3 The distribution of infrared module

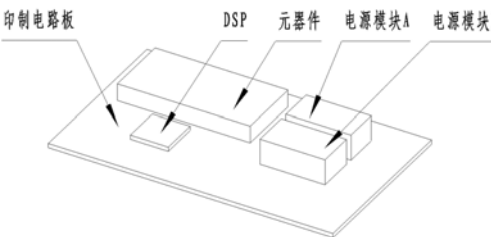


图 4 组件电路板布局图
Fig.4 The distribution of module's PCB

2 模型仿真、验证及分析

2.1 常用热分析软件简介

目前常用的热力学分析软件有 ANSYS ICEPAK 和 MSC. SINDA/G。ICEPAK 采用 FLUNT 求解器,在流体热力学分析中具有巨大优越性,能够分析从芯片级到部件级以至系统级散热问题,与 ANSYS 合并后,可通过 WORKBENCH 平台进行多物理场耦合分析,大大拓展其分析范围。SINDA/G 为美国工业标准的热分析软件,最早应用于航天领域,该软件包括大量计算求解器和库函数,分析可靠性高,在求解非线性问题时显示出强大能力,其计算结果通常作为评价其它有限元软件精度的参照标准。

本文采用 ICEPAK 作为分析软件,并同时实测该红外成像系统长时间工作后的关键区域温度,以此作为 ICEPAK 仿真结果的评价标准。

2.2 理论基础

该红外成像系统中同时存在 3 种热交换形式,分别是:传导换热、对流换热以及辐射换热。其中机箱外壳与大气之间主要为对流换热。机箱内部同时存在上述三种换热方式,占主导作用的是传导换热与对流换热,辐射换热对系统热交换的贡献较小。为简化计算,系统模型中不考虑辐射换热。

ICEPAK 在处理层流传热问题时,其通过同时计算质量、动量以及能量传递方程这三组控制方程来求解 Navier-Stokes 方程。处理湍流传热问题时,其在三组控制方程上增加对应的附加方程进行求解。Icepak 中共有 8 种对应不同模型的附加方程,通常情况下,零式方程即能取得较好的结果^[5]。以下是三组控制方程以及零式方程:

1) 质量守恒方程(针对不可压缩流体):

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \tag{1}$$

2) 动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla \cdot P + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \cdot \vec{g} + \vec{F} \tag{2}$$

3) 能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho h \vec{v}) = \nabla \cdot [(K + K_t)\Delta T] + S_h \tag{3}$$

4) 零式方程:

$$\mu_t = \rho l^2 S \tag{4}$$

式中: \vec{v} 为速度, m/s; ρ 为密度, kg/m³; P 为静压,

Pa; $\vec{\tau}$ 为应力张量, Pa; \vec{g} 为重力加速度, m/s²; K

为分子导电系数, Ω·m; K_t 为取决于湍流传输状态的导电系数, Ω·m; T 为温度, K; S_h 为定积热源, W; μ_t 为湍流黏度, Pa·s; l 为混合长度, m; S 为平均应变率张量, 1/s。

2.3 模型仿真及验证

为量化评价系统内部温度,在系统内设立 4 个测温范围,分别包括监测红外探测器、红外镜头、组件电路板以及机箱后盖。其中前三个测温范围反应核心器件的温度,最后一个测温范围反应机箱外壳的散热情况。Icepak 会自动监测这些测温范围内的最高温度、最低温度以及平均温度。

在环境温度 27.5℃ 时,开启该红外成像设备,连续工作 4 h,此时视为内部温度场达到稳定状态。运用红外成像仪、电路板测温芯片以及点式温度计对上述测温范围进行多组温度数据测量,将平均值记录于表 3 中。在 Icepak 中设置环境温度为 27.5℃,启动 Fluent 进行系统仿真,迭代收敛后该系统达到温度稳定状态,此时将上述四个温度范围内的温度值记录于表 4 中。

表 3 环境温度 27.5℃ 时实测温度
Table 3 Actual temperature tested at ambient temperature of 27.5℃

测温点位置	实测温度/℃
红外探测器	39.90
红外镜头	35.90
组件电路板	50.60
机箱后盖	34.70

表 4 环境温度 27.5℃ 时仿真数据
Table 4 Simulation data at ambient temperature of 27.5℃

测温点位置	最高 温度/℃	最低 温度/℃	平均 温度/℃
红外探测器	42.45	40.84	41.78
红外镜头	36.35	36.29	36.32
组件电路板	69.84	39.63	53.58
机箱后盖	36.59	35.34	35.85

为验证仿真数据的有效性,在仿真数据中选取上述 4 组测温范围的平均温度与实测温度进行对比,将结果记录于表 5 中。

由表 5 可知,仿真数据与实测数据误差最大为 6.2%,绝对温度误差最大为 2.15℃。造成误差的原因可能是部分接触面导热系数设置存在偏差、实际热源设置存在偏差或网格划分不够精细等。如果进

一步针对模型进行修改,能得出更为精确的结果。总体来说,该结果具有一定代表性。

表5 环境温度 27.5℃时实测与仿真数据对照表

Table 5 Comparison of actual and simulation data at ambient temperature of 27.5℃

测温点位置	实测数据/℃	仿真数据/℃	误差/%
红外探测器	39.90	41.78	4.71
红外镜头	35.90	36.32	1.17
组件电路板	50.60	53.58	5.90
机箱后盖	34.70	36.85	6.20

2.4 仿真分析

环境温度 27.5℃时红外成像系统内部温度分布图如图 5~图 7 所示,其中图 5 是 X 向剖视图,图 6 是通过组件中心的 Z 向剖视图,图 7 是 Z 向剖视图中各器件所在位置示意图:

由图 5~图 7 可知:工作数小时后,该系统内将呈现一个稳定的温度场。在 X 向成左右对称分布;在 Z 向从左上至右下依次呈现温度从高到底的阶梯分布。其中:

1) 系统与环境之间仅存在对流换热,系统内部同时存在 3 种换热方式。由于系统内部热源集中在左侧与顶层,造成系统箱体内温度由左上至右下从高到底,形成明显温度梯度。

2) 组件电路板与红外组件之间依靠四颗螺柱定位,其余部位与机械结构件再无接触。产生的热量主要依靠对流换热方式与箱体内空气进行热交换,换热效率较低。箱体顶层出现明显高温区,最高温度接近 70℃,易加速电路板老化,降低工作可靠性。

3) 红外探测器处于机箱内中部,该制冷型探测器集成有斯特林制冷机,工作时持续产生热量,这些热量通过金属结构件传导至红外组件的基座上,具有较高的换热效率。即便探测器具有较高功耗,其温度也仅为 41℃左右。

4) 红外镜头处于箱体内的低温区,其温度为 36℃左右。此时光学系统已经明显高于设计温度,该温度变化将改变红外光学材料的折射率、变镜片表面曲率和中心厚度;红外光学材料与铝制镜头之间热膨胀系数的不匹配将使镜片承受额外应力,加剧镜片面形改变;镜筒的膨胀将改变镜片之间的间隔。这些因素都将导致光学系统像质的下降^[6]。

5) 红外探测器与红外镜头采用分体式安装,两者分别处于箱体中的不同温度梯度区。此类温度梯度的存在将使各零件产生不一样的热膨胀变形,引起红外探测器与光学镜头的光轴偏移,最终将影响系统成像的质量^[7]。

组件电路板处于系统内高温区,且对温度变化较为敏感,因此将其印制电路板的温度分布图单独列出,如图 8 所示。

由图 8 及表 4 可知,组件电路板的不同区域之间温度差近 40℃。其中位于电路板中间的电源模块温升最高,其余器件温度均在 59℃以上。电路板上各器件与环境温差均达到 30℃以上。

2.5 系统散热优化

2.5.1 优化方案

由 2.3 分析可知,该红外成像系统内的温度分布不均以及部分区域温度过高等情况主要由热源分布集中,部分器件散热效率低下等原因造成。为了改善系统内部热环境,从以下几方面寻找有效散热措施:提高机箱自然对流效率、提高组件电路板散热效率、加快箱体内部空气流动。

依据上述思路,选取以下几种散热措施:增大机箱散热面积、为组件电路板与机箱之间增加热通路以及在箱体内增加风扇进行强迫对流等。针对每一种措施,均在 Icepak 内进行建模及仿真,并根据仿真结果进行比对。以下将几种具有代表性的方法及每种方法改进后的系统温度列于表 6 中。

方案一:在机箱背部增加散热片,提高机箱表面积;

方案二:在组件电路板上各器件与组件基板之间用 1mm 厚铜箔形成热通路;

方案三:在两个组件背后各增加一个风扇,加快箱体内气体流动;

方案四:同时采用方案二与方案三措施。

将各方案对应的测温点平均温度与未散热时各点平均温度进行比对,绘制温度对照图,如图 9 所示。

2.5.2 优化分析及结论

1) 方案一未明显改善系统内部温度分布;

2) 方案二明显降低组件电路板的温度,使平均温度下降至 43.48℃,并改善温度不均情况,使组件电路板上温差将至 5℃,其温度分布如图 10 所示。同时方案二在一定程度上减小箱体内温差,箱体内部温度 Z 向剖视图如图 11 所示。

3) 方案三加快箱体内气体流动,明显改善箱体内部温度分布不均情况,使红外镜头所处区域温差减小,箱体内气流轨迹图如图 12 所示;该方案对组件电路板温度没有明显改善;

4) 方案四既降低组件电路板温度,同时进一步减少箱体内温差,箱体内部温度 Z 向剖视图如图 13 所示。

5) 考虑到在封闭箱体内存装风扇可能对电子设备引入干扰,是否采用方案四作为散热措施还需进一步在实践中决定。如无法采用方案四,方案二的散热措施已可在一定程度上改善该系统箱体内部

温度。
针对该红外成像系统,优先采用方案四作为散热措施。经仿真,该方案使系统内最高温度下降约 17℃,并改善系统内部温度分布不均的情况,同时

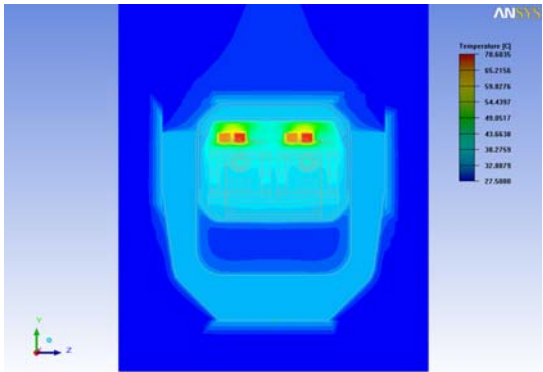


图 5 X 向温度分布图

Fig.5 Temperature distribution of X axial

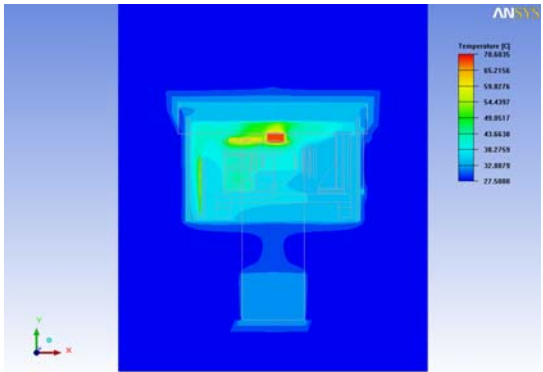


图 6 Z 向温度分布图

Fig.6 Temperature distribution of Z axial

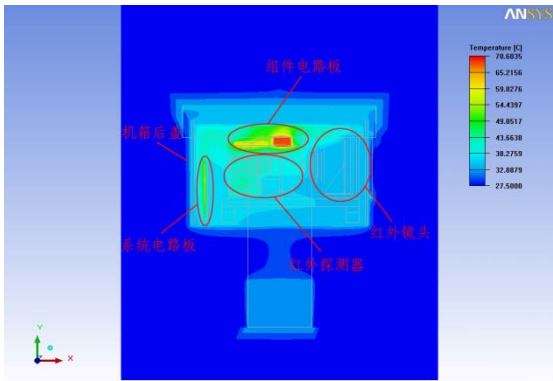


图 7 器件位置示意图

Fig.7 Distribution of inside module

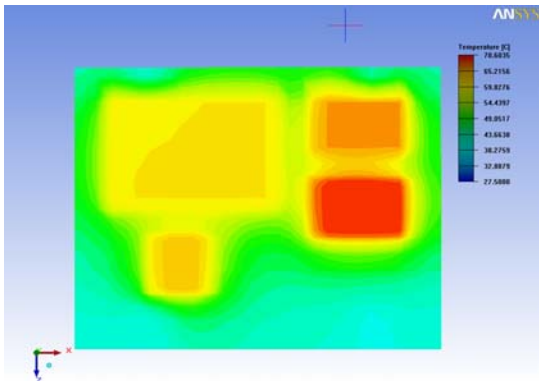


图 8 组件电路板温度分布图

Fig.8 Temperature distribution of module's PCB

表 6 各散热措施下系统内部温度		Table 6 Inside temperature of system for each cooling method			
		方案一	方案二	方案三	方案四
红外探测器 温度/℃	最高温度	42.14	42.82	42.2	42.33
	最低温度	40.54	41.17	40.63	40.72
	平均温度	41.48	42.14	41.54	41.65
红外镜头 温度/℃	最高温度	36.06	36.71	36.32	36.47
	最低温度	36.00	36.69	36.30	36.46
	平均温低	36.03	36.70	36.31	36.47
组件电路板 温度/℃	最高温度	71.43	45.67	69.00	44.64
	最低温度	39.33	40.36	39.36	38.02
	平均温度	53.63	43.48	49.94	41.44
机箱后盖 温度/℃	最高温度	36.05	36.95	36.87	36.92
	最低温度	35.07	35.39	35.58	35.41
	平均温度	35.44	36.02	36.12	36.06

对组件电路板起到良好散热效果，使其平均温度下降约 12℃，温差由 32.1℃下降至 6.6℃。

3 结 论

结合红外成像系统实际温度测量结果，应用 Icepak 热力学仿真软件，可以对该系统进行量化热设计，并使得设计周期大大缩短，提高设计效率。

本文中讨论的几种散热方案，仍需进一步在实际应用中进行验证。在系统设计初始，运用 Icepak 的可视化技术，能直观地显示出该系统内温度分布情况，使各方设计人员能对最终产品的热力学情况有充分了解，从而在最初设计时就能兼顾考虑系统的热设计。

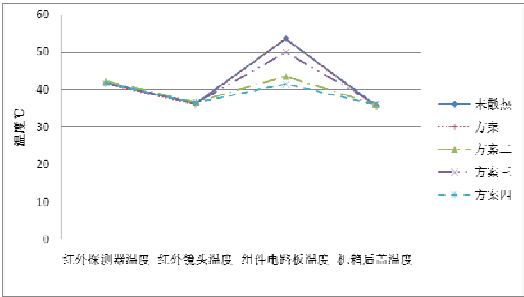


图 9 各方案对应系统测温点平均温度图

Fig.9 System's temperature of each method

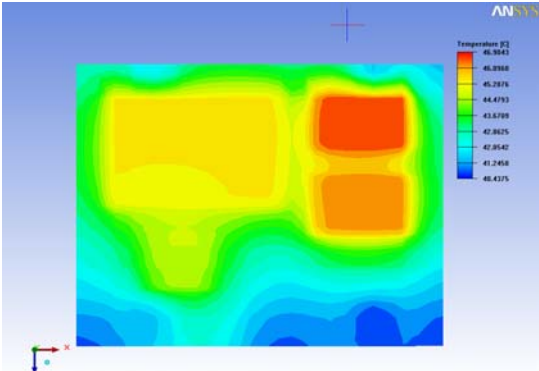


图 10 组件电路板温度分布图（方案二）

Fig.10 Temperature distribution of module's PCB (method two)

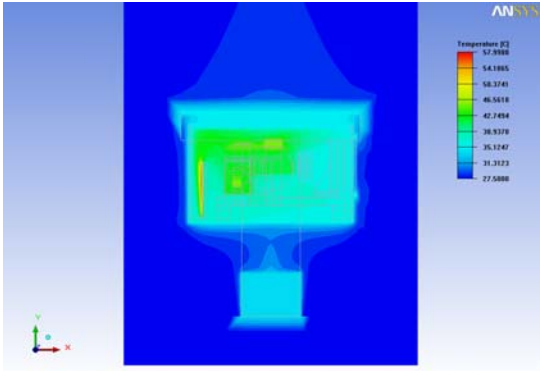


图 11 Z 向温度分布图（方案二）

Fig.11 Temperature distribution of Z axial (method two)

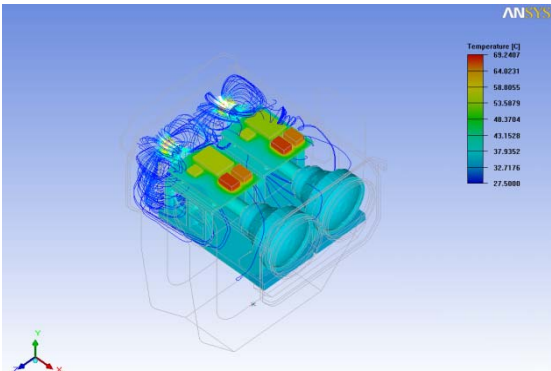


图 12 系统气流轨迹图（方案三）

Fig.12 Air trace of system

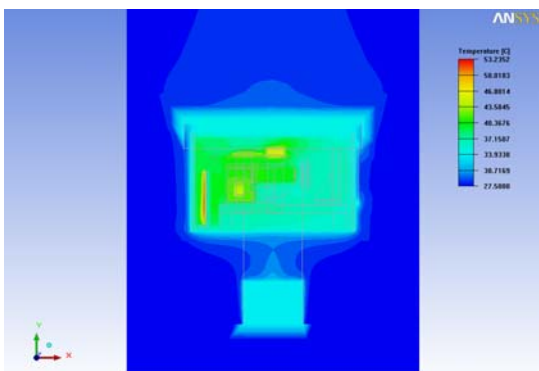


图 13 Z 向温度分布图（方案四）

Fig.13 Temperature distribution of Z axial(method four)

参考文献:

[1] Povey V. Athermalisation Techniques in Infra Red Systems[C]//Proc. of SPIE, 1986, 655: 142-153.

[2] 于洋, 金亚平, 潘兆鑫, 等. 长波红外制冷型光学系统超宽温消热差设计[J]. 红外技术, 2011, 33(10): 585-617

[3] 吴晓靖, 孟军和. 使用简单机械结构实现红外光学系统无热化[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 391-405.

[4] Myung Cho, Andrew Corredor, Konstantinos Vogiatzis, et al. Thermal performance prediction of the TMT telescope structure[C]//Proc. of SIPE, 2009, 7427: 7427-13.

[5] ANSYS Inc. Icepak User's Guide[CP]. SAS IP Inc., 2011

[6] 王学新, 焦明印. 红外光学系统无热化设计方法的研究[J]. 应用光学, 2009, 30(1): 129-133.

[7] Paul R. Yoder. 光机系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.