

星载计算机的热效应预测分析及结构设计

王立国, 安天琪, 徐殿国, 王宏佳
(哈尔滨工业大学 电气工程系, 哈尔滨 150001)

摘要: 星上计算机对航天器控制性能与运行寿命有着极其重要作用, 而温度又对计算机的性能有重要影响。利用 SolidEdge 及 FloTHERM 软件对星上计算机进行了热分析与设计, 推导出 SolidEdge 及 FloTHERM 模型简化规则, 用于解决仿真的精度与效率问题。基于 PCB 发热机理分析, 给出空间环境试验条件要求的边界条件; 依据线路板组件功耗及机箱所处的温度环境, 建立各个线路板组件的 FloTHERM 热分析模型; 给出了整机及各个 PCB 板的温度分布以及关键发热元器件的温度等热损耗分析结果。所做工作可为星上计算机布局设计及在轨故障预测提供参考准则。

关键词: 星上计算机; 热变形; 可靠性设计; FloTHERM 仿真; 故障预测

中图分类号: TN702; V416.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2013)04-0365-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2013.04.005

0 引言

统计数据表明: 以电子和电气故障为代表的星上计算机故障占航天器故障总数的 54%, 其中热引发的 PCB 结构热变形问题尤其突出。自从 B. A. Boley 于 1957 年提出了热致变形问题后, 航天器热变形现象引起了国内外学者的广泛关注。空间日照区和阴影区之间的巨大温度变化梯度会对星上计算机产生很大热变形影响, 为此需要进行热变形分析和热设计。通过 PCB 热变形机理分析可以保证元器件的温度不超过功能极限温度, 满足系统可靠性指标的要求, 即元器件热失效概率满足系统可靠性要求^[1-4]。因此, 开展星上计算机热学建模及地面模拟研究极其必要。

对航天器结构的热应力问题, NASA、ESA 等国外航天机构均进行了相关研究。国外许多学者给出了在空间域上采用有限元划分、在时间域上采用傅里叶级数描述空间温度负荷的计算方法。国内从事此方面工作的单位主要有清华大学、浙江大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学、西安电子科技大学等, 已经在星载天线的空间热辐射、热应力、热稳定性以及热变形分析等方面进行了

相关研究^[5-7]。研究内容涵盖各向同性材料温度场的有限元分析、基于三维建模的温度场分布及其模态分析、不考虑内热源的三维各向异性瞬态热传导、利用有限差分方法分析温度的全方位分布和周期变化规律等^[8-10]。但对于由热效应所引发的热变形及热稳定性影响有待深入研究。

为了最大程度地减少在轨热环境及其变化对计算机性能的影响, 本文使用 FloTHERM 热分析软件对其建立整机热模型, 针对实际工作状况, 对计算机各 PCB 的温度场进行了分析。利用分析结果指导电子元器件布局优化, 包括增设元器件传热通道、改进箱体结构设计等措施, 旨在有效降低元器件工作温度。

1 SolidEdge 软件的建模及简化

图 1 为由 9 块电路板组成的整机结构示意图, 电路板的编号从上到下分别为 0-10 板、0-20 板至 0-90 板, 每块电路板通过导轨装入机箱; 电路板通过传导散热; 机箱壳体为硬铝合金板拼合而成。鉴于航天器外界环境温度变化范围可达 -170~200 °C, 本文选择最恶劣温度工况对整机、线路板组件、关键元器件进行建模及热仿真分析, 包括瞬态和静态分析。在极端环境温度工况下, 设备底板的温度可达 50 °C。

收稿日期: 2013-04-05; 修回日期: 2013-07-08

基金项目: 民用航天预先研究项目(编号: C4120062301)

作者简介: 王立国(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力电子动力学设计、无传感器参数辨识技术以及 PPF、APF、HAPF、SVC、TSC 为代表的电网谐波抑制与无功补偿技术研究。E-mail: wlg2001@hit.edu.cn.

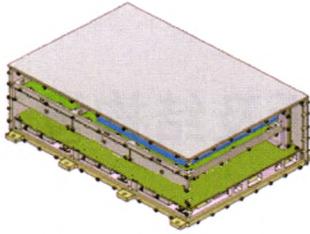


图 1 整机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure

电路板安装在框架上, 以实现传导散热。线路板组件之间依靠框架紧密接触, 构成一个整体。整机通过底板安装在热沉上。机箱外表面都作了发黑处理, 发射率为 0.85; 其内部不作发黑处理, 表面保持抛光的铝合金状态, 发射率为 0.038。左侧和右侧挡板的外表面也作了发黑处理, 发射率为 0.85; 它们的内表面以及机箱内部线路板组件的框架, 均保持抛光的铝合金状态, 发射率为 0.038。为给出整机及各个 PCB 板的温度分布, 需要对关键发热元器件的热损耗进行分析。利用 SolidEdge 软件对图 1 所示的整机结构进行了建模和分析。在不影响热特性的前提下, 又对特定部位和器件信息进行了简化, 简化规则如表 1 所示。简化后所建立的模型如图 2 及图 3 所示。

利用 FloTHERM 软件的 FloMCAD 工具, 将 SolidEdge 所建立的三维整机模型导入; 使用 FloTHERM 软件自带的建模工具, 根据 Protel 绘制的电路图, 又建立了各线路板组件模型, 如图 4 与图 5 所示。

表 1 简化规则

Table 1 The simplifications

分类	内容
特征级简化	删除一些对于零部件静、动态特性影响很小的特征, 如各零件上小的倒圆、倒角, 接插件上的针等
零件级简化	删除所有零件间的螺钉、螺母等紧固件; 删除导热绝缘垫; 删除具有同类结构参数的开槽圆柱阵列

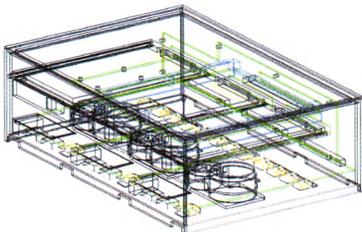


图 2 整机的 SolidEdge 装配模型

Fig. 2 SolidEdge assembly model for the whole structure

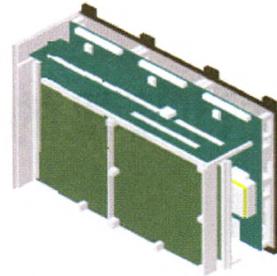


图 3 SolidEdge 装配模型的外形图

Fig. 3 The SolidEdge assembly model

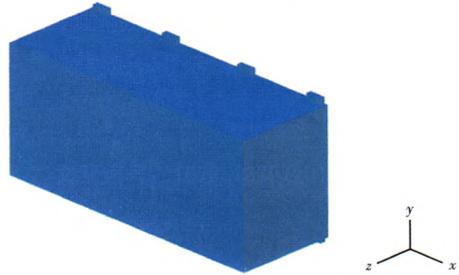


图 4 FloTHERM 模型 (简化前)

Fig. 4 FloTHERM model before simplified

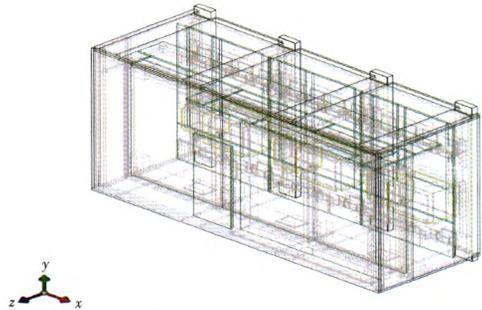


图 5 FloTHERM 模型 (简化后)

Fig. 5 FloTHERM model after simplified

2 温度升高的机理分析

为分析 0-10 号板至 0-90 号板组件的热效应, 又对各类电子元器件的温度特性进行了研究。大量使用的半导体器件如集成运放器、TTL 逻辑芯片、各种电源稳压芯片等, 其基本组成单元都是 PN 结, 对温度变化非常敏感^[11-12]。PN 结的性能与温度的关系为

$$I_{CO} = I_{COR} e^{0.069(T-T_R)}, \quad (1)$$

式中: I_{CO} 为温度为 T 时的反向漏电流; I_{COR} 为温度为 T_R 时的反向漏电流。式(1)表明, 温度每升高 10°C , I_{CO} 将增加 1 倍。

环境温度变化除直接导致运放器的工作点发生漂移外, 还会导致晶体管的特性曲线发生变化。温度与允许功耗的关系为

$$P_{CM} = (T_{JM} - T_f) / R_T, \quad (2)$$

式中： P_{CM} 为最大允许功耗； T_{JM} 为最高允许结温； T_f 为环境温度； R_T 为热阻。外界温升将直接引起结温升高，从而引起最高工作电压下降，导致 PN 结击穿损坏。因此，必须将组件的结温控制在允许范围内。

对 0-10 号板至 0-90 号板组件热分析而言，属于具有内热源的平面稳态温度场计算问题。引入参数 q_v 用来表示由电加热造成的体积热源强度，其模型的泛函数表达式为

$$J = \iint_D \left[\frac{k}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{k}{2} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 - q_v T \right] dx dy + \int \alpha (0.5 T^2 - T_f T) ds \quad (3)$$

取极值时，可得到极值曲面 $T(x, y)$ ，并将其代入欧拉方程后可得出：

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_v = 0; \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = \alpha (T - T_f) \Big|_r \quad (5)$$

式(4)和(5)中： k 与 α 为等效系数； x, y 为 PCB 几何长度与宽度； T_f 为环境温度，取 50°C ； Γ 为 PCB 等效面积。式(4)与式(5)可为组件的热变形仿真边界条件的设定提供参考。

3 温升模拟

整机功耗为 48.5 W，0-30 号板（DC/DC 变换模块板）的功耗为 4.5 W。鉴于 0-30 号板的功耗在整机功耗中所占比例之大，需对其进行重点分析。

图 6 为整机的总体网格划分情况。综合考虑计算精度与效率，本次计算中精度选为“Medium”，“Cell”数量取 1 090 959。

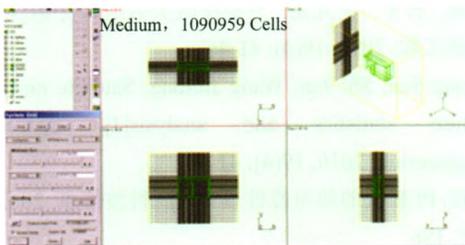


图 6 仿真模型网格的划分
Fig. 6 Mesh of simulation model

为分析各电路板的温升数据，假设各电路板的温度数据应涵盖电路板上需要分析的所有元器

件的壳温和结温。给出各处热阻以及辐射传热的设置，并根据实际模型要求进行网格设置描述。在 0-30 号电路板上布置了监测点 V1、V2、R1（见图 7），以监测关键器件的温度。

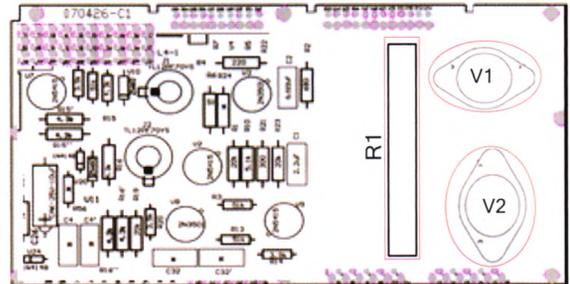


图 7 0-30 号板元件布局图
Fig. 7 Components layout of the 0-30# PCB

对整机工作情况进行仿真，部分元器件热耗分配和仿真温度数据如表 2 所示。计算后 V1、V2 及 R1 监测点的温度曲线如图 8 所示。可见在当前布局情况下，各监测点温度未超出各自的降额温度值。

表 2 0-30 号板上监测点处关键器件的功耗及温度
Table 2 Power consumption and temperature of key components at monitoring points of 0-30# PCB

监测点	最大功耗/W	一级降额温度/ $^\circ\text{C}$
V1	0.12	90
V2	0.25	85
R1	0.80	160

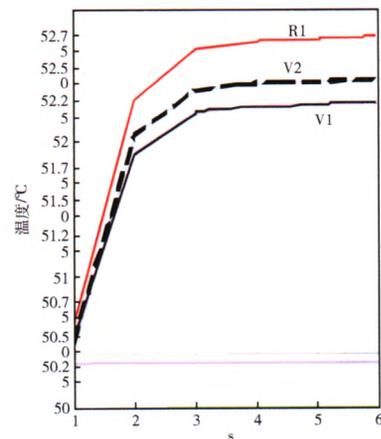


图 8 监测点温度曲线
Fig. 8 Temperature curve of the monitoring points

在环境温度 50°C 下，整机温度分布云图如图 9 所示，可见其最高温度未超过 65.1°C 。0-30 号板及框架的顶层和底层温度分布云图如图 10 所示，可见无论是 A 工作模式还是 B 工作模式，0-30 号板最高工作温度均未超过 65.1°C ，符合表 2 与图 8 中数据要求。

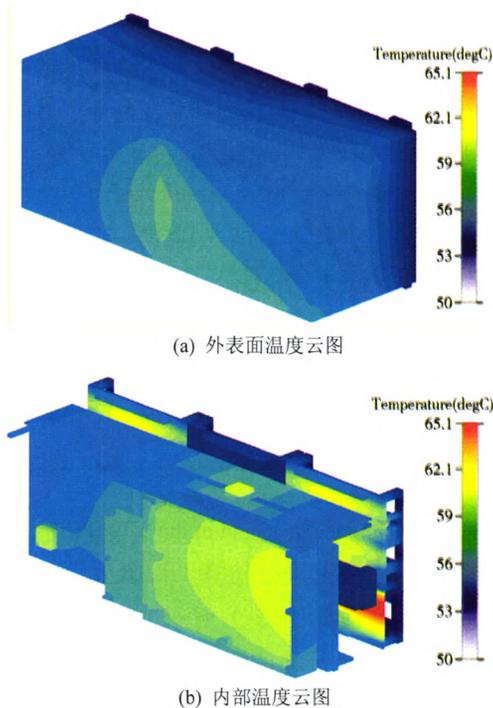


图9 整机温度分布云图

Fig. 9 Temperature contours of the whole structure

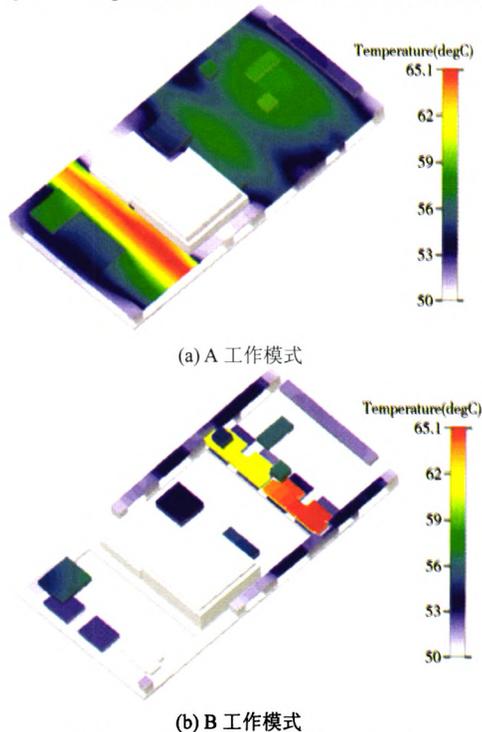


图10 0-30号板的温度分布云图

Fig. 10 Temperature contours of the 0-30[#] PCB

经过仿真热分析,可以掌握整机的温度场分布:在热沉温度为 50°C 的情况下,9块电路板组件工作时表面最高温度为 65.1°C ,位于0-30号板的R1与V2监测点处。

经过计算校核,9块电路板组件工作时,主要元器件满足降额要求。根据仿真得到的电路板

和元器件最高温度,可得出如下分析结果:

1) 建议将V1、V2及R1监测点处的大功率器件分开摆放,如把R1处的热耗高的元器件放在冷却气流的上游,保证板面热容量均匀分布。

2) 元器件布局应考虑其周围其他器件热辐射的影响,如V1及V2等处的功率器件应进行隔离;对热敏感的部件如控制芯片等应远离热源布置。

3) 热量较大或电流较高的元器件应安装于散热器上,避免放置在电路板的角落和四周边缘,在增强安装强度的同时保证散热通道的通畅。

4) 功率大的器件尽量离机箱壁近些,可以借用机箱壁作为散热面,但要考虑PCB强度分配,可选择田字梁或日字梁增加PCB的强度。

5) 仿真分析结果可用来指导高低温试验,采用仿真定量分析与试验定量分析相结合的方式,可为星上计算机的热设计提供准则。

6) 利用FloTHERM建模仿真过程可模拟不同工况条件下的星载计算机受热状态,与地面试验相结合,可以反演星载计算机在轨热故障状态。

4 结束语

本文应用SolidEdge软件建立了星上计算机电气模型图,再利用FloTHERM软件对整机模型中的电路板组件进行了建模以及热效应分析,给出了整机温度分布云图;尤其对电路板上的关键器件进行了重点分析,分析了0-30号板的温度分布,得到了相关监测点处的温度;针对这些分析结果,对电路板的优化设计提出了建议。本文所做的工作可为星上计算机热设计提供参考准则,同时为星上计算机在轨热故障诊断及故障预测提供依据。

参考文献 (References)

- [1] 张森, 石军, 王九龙. 卫星在轨失效统计分析[J]. 航天器工程, 2010, 19(4): 41-46
Zhang Sen, Shi Jun, Wang Jiulong. Satellite on-board failure statistics and analysis[J]. Spacecraft Engineering, 2010, 19(4): 41-46
- [2] 赵颖. PCB板的热可靠性设计[J]. 科技信息, 2012(9): 142, 156
Zhao Ying. Thermal reliability design of PCB board[J]. Science & Technology Information, 2012(9): 142, 156
- [3] 杜丽华, 蔡云枝. PCB热设计[J]. 现代电子技术, 2002, 139(8): 85-87

- Du Lihua, Cai Yunzhi. Thermal reliability design for PCB[J]. *Modern Electronic Technique*, 2002, 139(8): 85-87
- [4] 耿照新, 胡毅, 孙建海, 等. PCB 的温度与变形的三维有限元分析[J]. *电子器件*, 2005, 28(3): 657-658
Geng Zhaoxin, Hu Yi, Sun Jianhai, et al. Three dimension finite element analysis in temperature and deformation of PCB[J]. *Journal of Electron Devices*, 2005, 28(3): 657-658
- [5] 赵健. PCB 组件热-力分析的有限元模型机仿真[D]. 天津大学硕士学位论文, 2006
- [6] 黄云生. 电子电路 PCB 的散热分析与设计[D]. 西安电子科技大学硕士学位论文, 2010
- [7] 孙简, 丁耀根, 陈仲林, 等. 电子线路板热可靠性分析方法的研究[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(4): 1013-1016
Sun Jian, Ding Yaogen, Chen Zhonglin, et al. Research on the thermal analysis of PCB circuit[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 1013-1016
- [8] 牛利刚, 杨道国, 李功科. 晶圆尺寸级封装器件的热应力及翘曲变形[J]. *电子元件与材料*, 2009, 28(11): 48-51
Niu Ligang, Yang Daoguo, Li Gongke. Research on the thermal stress and warpage of WLCSP device[J]. *Electronic Components and Materials*, 2009, 28(11): 48-51
- [9] 吕倩, 胡家渝. 星载电子产品 PCB 板热过孔数值模拟方法研究[C]//机械电子学学术会议, 2011
- [10] 张世欣, 高进, 石晓郁. 印制电路板的热设计和热分析[J]. *现代电子技术*, 2007, 257(18): 189-192
Zhang Shixin, Gao Jin, Shi Xiaoyu. Thermal design and analysis for PCB[J]. *Modern Electronic Technique*, 2007, 257(18): 189-192
- [11] 唐雅婧. 电子设备 PCB 热分析的多热阻模型研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2006
- [12] 杨艳妮. 星载天线在轨热稳定性影响因素分析[D]. 西安电子科技大学硕士学位论文, 2007

Analysis and prediction of the thermal effect of space computer and its structural design

Wang Ligu, An Tianqi, Xu Dianguo, Wang Hongjia

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In view of the important influence of the thermal behavior of the space computer on the control and lifetime of the spacecraft, the software SolidEdge is used, combined with FloTHERM to make thermodynamic analyses of the space computer. The simplifications of the model of the space computer are made by SolidEdge and FloTHERM to guarantee the accuracy and the efficiency of the calculation. Based on an analysis of the heat source of the PCB, the boundary parameters are determined and the thermodynamic equation is solved. According to the power consumption of the PCBs and the PC box, the thermodynamic model of every parts is built. The temperature distributions of every part and its key elements are obtained. The results provide some guidance for selecting design parameters and predicting failure of the space computer.

Key words: spaceborne computer; thermal deformation; reliability design; FloTHERM simulation; failure prediction

(编辑: 肖福根)