

空间遥感器 CCD 控制箱数据板热可靠性研究

The thermal reliability research of the data processing PCB of CCD control system in the space remote sensor

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所;2.中国科学院研究生院) 王春霞^{1,2} 胡君¹ 杨洪波¹

WANG Chun-xia HU Jun YANG Hong-bo

摘要: 作为卫星的重要有效载荷,空间光学遥感器的可靠性是至关重要的。而光学遥感器电子设备的可靠性严重影响其工作可靠性。由于电子设备不断微型化,特别是航天电子设备,体积小、布局紧凑,致使电子设备热流密度急剧增加,从而大大降低系统的可靠性。为此本文从热传输原理出发,运用 ICEPAK 热分析软件对某空间光学遥感器 CCD 成像子系统数据板在空间工作环境下的温度场进行了分析,并结合热分析结果提出热优化设计方案,提高了系统可靠性。得到工程项目的实际应用。

关键词: 空间光学遥感器;数据板;热分析;可靠性

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

Abstract: The reliability of the space optical remote sensor is very essential and important. The reliability of electronic equipments in the space optical remote sensor affects its reliability greatly. Electronic equipments, specially the avionic equipments become gradually smaller. Because of the small volume and compact arrangement, heat flow density of equipments is sharply increased and the reliability is greatly reduced. In this paper the heat transfer principle is introduced briefly. Temperature field of the data processing PCB of CCD Imaging system in a space remote sensor is analyzed by ICEPAK, and the optimal design is proposed. The reliability of the electronic system is well improved. The analysis and plan is well used in the engineering project.

Key words: space optical remote sensor; data processing PCB; thermal analysis; reliability

1 引言

为适应空间遥测技术的不断发展、大信息量需求及灵活多变的任务要求,CCD 实时传输型空间光学遥感器的研制已成为各国空间技术人员重点科研课题。光学遥感器通常是一次使用不可维修的产品,因此对可靠性有很高的要求。而 CCD 控制箱等电子设备的可靠性严重影响光学遥感器的可靠性。

随着电子技术的迅猛发展,电子组装向着小型化、高密度、高功率方向发展,对于航空航天器上使用的电子设备尤为突出,这就导致了电子设备的热流密度急剧增大,使得电子设备过热问题越来越突出。电子设备的过热是电子产品失效的主要原因之一,对电子设备而言,即使是降低 1℃,也将使设备的失效率降低一个可观的量值。所以,要提高电子设备的可靠性,就必须对其进行热分析和热设计。热分析是利用数学手段在电子设备设计阶段获得温度分布的方法,它使设计人员在设计阶段就可以快速、准确地预知元器件温度,发现产品的热缺陷,从而不断优化设计。

本文运用 ICEPAK 热分析软件对某空间光学遥感器 CCD 成像子系统数据板在空间工作环境下的温度场分布进行了分析,并结合热分析结果提出热优化设计方案,提高了系统可靠性。得到工程项目的实际应用。

2 基本传热原理及 ICEPAK 热分析

2.1 基本传热原理

王春霞:在读博士研究生

基金项目:2006 年国家重大工程项目(编号不公开)

传热的三种基本形式为:导热、对流换热和辐射换热。光学遥感器在空间所处环境与地面环境完全不同,真空、微重力等因素决定了空间光学遥感器的主要传热方式是热传导和热辐射。

2.1.1 热传导

热传导的基本规律是傅立叶定律,其数学表达式为:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dn} \quad (1)$$

式(1)中: λ 为材料的导热系数,单位 W/(mK); q 为热流密度,单位 W/m²。

2.1.2 辐射换热

辐射换热指物体发射电磁能,并被其他物体吸收转变为热量的交换过程。在工程中通常考虑两个或两个以上物体之间的辐射,系统中每个物体同时辐射并吸收热量。它们之间的净辐射换热热量可以用斯蒂芬-玻尔兹曼定律来计算:

$$\phi = \epsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (2)$$

式(2)中: ϵ 为发射率; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,单位 W/(m²K⁴); A_1 为辐射面 1 的面积, F_{12} 为表面 1 对表面 2 的角系数; T_1 、 T_2 分别为表面 1 和表面 2 的绝对温度。

2.2 热分析技术

电子设备热分析,又称为热模拟,是利用数学手段在设计阶段获得设备温度分布的方法,从而确定出模型中温度的最高点。通过对模型进行修改或采取必要的散热措施,使其最高温度在允许的范围内,达到设计要求,从而减少产品研制费用和缩短研制周期。

热分析方法主要有两类:分析方法和数值方法。随着现代计算机技术的飞速发展,用数值方法求解传热学问题所占比重

越来越大。数值方法主要有:有限差分法、有限元法及有限体积法等。有限差分法是求解偏微分数值解最古老的方法。其不足的是离散方程的守恒性难以保证,最严重的缺点是对不规则区域的适用性差。有限元法对不规则几何区域的适应性好,但在对流项的离散处理及不可压缩 Navier—stokes 方程的原始变量法求解方面不如有限体积法发展成熟。用有限体积法导出的离散方程可以保证具有守恒性,而且物理意义明确,是目前应用最普遍的一种数值方法,而且随着非结构化网格的研究,其对不规则几何区域的适应性方面存在不足的现状也正在改进,有限体积法应用的范围将更为广泛。ICEPAK 热分析软件求解采用的就是有限体积法。

2.3 ICEPAK 特点

ICEPAK 是一个专业的电子设备热分析软件,能够解决系统级、部件级、封装级的热分析问题。它拥有用户模拟过程所需要的各种物理模型,可以模拟自然对流、强迫对流、混合对流、热传导、热辐射等情况。有多种网格生成方法,能够满足现代电子产品设计中几何形状越来越复杂的要求。求解采用有限体积法,基于 Fluent 求解器,保证工程问题的计算精度。

使用该软件热仿真分为模型建立(前处理)、模型求解和后处理三个过程。对电子设备热分析可分为以下详细步骤:

- (1) 前期准备工作:了解被分析设备的详细情况,包括 PCB 板及板上元件等的几何外形、材料的热物性等情况。
- (2) 设置合理的边界条件:设置求解域、环境温度、流动状态以及各边界的边界条件等。
- (3) 对电子设备及其附属器件进行建模。
- (4) 划分网格并优化网格质量:对必要的元件设置 assembly 的非连续网格,对一些必要部分单独设置网格,检查网格质量,保证求解收敛。
- (5) 设置各器件的辐射参数并对辐射角系数进行求解,设置表面发射率,计算各物体间的角系数,进行辐射计算。
- (6) 求解结果:设置求解次数,收敛判据和松弛因子,设置监测点判断结果是否收敛。计算是否收敛与模型的建立有很大的关系,有时需要经过反复的模型修改以解决计算的收敛问题。
- (7) 通过后处理分析结果优化模型:后处理可以直观地以图形和数据来显示模型的温度场等。通过设计人员的分析来判断设计优劣,从而发现设计中的问题并提出改进方案。

3 遥感器 CCD 成像子系统数据板热分析

3.1 数据板参数特性

数据板为 8 层板,板厚 2mm,基板材料 FR4,铜层参数如表 1 所示:

铜层	铜厚(mil)	覆铜率(%)
顶层	1.9	75
中间层	1.2	70
底层	1.9	75

表 1 数据板铜层参数

依据以上数据,由 ICEPAK 软件求出 PCB 导热系数如下:
 $\lambda(\text{plane})=40.4569\text{w/(mK)}$ $\lambda(\text{normal})=0.406754\text{w/(mK)}$
CCD 成像子系统数据板是放置于 CCD 控制箱中,距离箱体前端 40mm 处。CCD 控制箱已据总体规划,采用表面涂漆的

初步热设计。数据板上主要包含 3 种关键元器件,分别为 Chip1、Chip2、Chip3,电路板分 5 个区,这 5 个区所用元件一样,每个区包含 1 片 Chip1,2 片 Chip2 以及 1 片 Chip3。如图 1 所示。



图 1 CCD 成像子系统数据板

为更好地保证空间光学遥感器的可靠性,对遥感器的电子设备均采用降额设计。

数据板(R=200mm)上关键元器件的热参数如表 2 所示:

	尺寸(mm)	功耗(W)	导热率(W/m·K)	降额后允许最大结温(℃)	热阻(℃/w)
Chip1	27×27×2.25	0.56	10	53	3.8
Chip2	14.17×14.17×2.25	0.3	15	65	2.96
Chip3	49×13.59×10.2	0.33	10	80	3.2

表 2 数据板关键元器件热参数

电子系统可靠性的关键是保证电路芯片的结点温度低于允许工作温度,对于电子器件,

$$T_j - T_c = QR \quad (3)$$

式(3)中 T_j 为器件结温, T_c 为器件壳温, Q 为器件热功耗, R 为器件壳间热阻。

要满足热可靠性要求,必须满足 $T_c \leq T_j - QR$, 所以对于 chip1 $T_c \leq 50.872^\circ\text{C}$, chip2 $T_c \leq 64.112^\circ\text{C}$, chip3 $T_c \leq 78.944^\circ\text{C}$ 。

3.2 热分析结果

该空间光学遥感器 CCD 控制箱位于航天器的附加段,而附加段温度为 $0^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$ 。当附加段温度分别为 20°C 、 30°C 、 45°C 时,数据板上关键元件温度分布分别如图 2、图 3、图 4 所示。

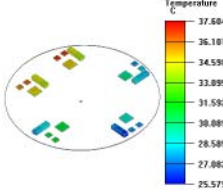


图 2 环境温度 20℃ 时数据板温度分布

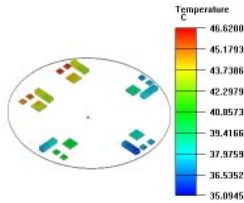


图 3 环境温度 30℃ 时数据板温度分布

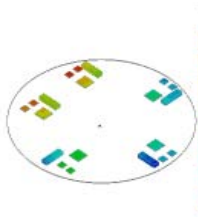


图 4 环境温度 45℃ 时数据板温度分布

对于图 4, 即当航天器附加段温度为 45°C 时, 板上各个元器件壳温如表 3 所示。

器件	Chip1.1	Chip1.2	Chip1.3	Chip1.4	Chip1.5	Chip3.1	Chip3.2
温度值(℃)	58.67089	58.28393	54.89715	53.86624	53.29952	58.22021	57.62667
器件	Chip3.3	Chip3.4	Chip3.5	Chip2.1.1	Chip2.1.2	Chip2.2.1	Chip2.2.2
温度值(℃)	52.92596	52.56567	51.47997	60.47628	60.42501	59.71847	59.29815
器件	Chip2.3.1	Chip2.3.2	Chip2.4.1	Chip2.4.2	Chip2.5.1	Chip2.5.2	
温度值(℃)	55.0472	55.33535	52.06997	52.46511	52.17895	52.24563	

表 3 环境温度 45℃ 时数据板各元件表面温度值

由表 3 可见对于 5 片 chip1 均有 $T_j > 50.872^\circ\text{C}$, 不符合热可靠性要求。若将 CCD 箱体末端通过热管连接到一个 $-15^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ 的冷源, 数据板温度分布如图 5 所示:

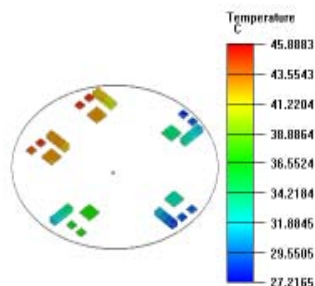


图5 CCD箱体末端连冷源时数据板温度分布

由图5可见,在这样的热设计情况下完全满足降额热可靠性要求。

4 结束语

应用 ICEPAK 热分析软件,对某在研空间光学遥感器 CCD 成像子系统数据板在轨工作环境下的热可靠性进行了具体分析。考虑到可能出现的极端情况,即当 CCD 控制箱所在附加段的温度达 45℃ 时,由分析结果知,数据板上某些关键元器件的温度值不满足热控要求,从而提出热设计优化方案,改进后满足热可靠性要求。热仿真分析可以缩短产品的研制周期,为进一步实施良好的热设计和热控提供了科学依据。该分析结果已经应用到实际工程项目中。

本文创新点:

应用 ICEPAK 这一专业的电子设备热分析软件,对某空间光学遥感器 CCD 成像子系统数据板进行热分析,与一直采用的 Ideas 软件相比,对电子系统的电路板和元器件等建模更加详细、精确。并且当由分析结果得到,在可能出现的极端情况下不满足热可靠性要求时,利用现有条件,提出相应较可行、方便的热设计方案,并已应用到实际工程项目中。

参考文献

- [1]吴清文,卢泽生,卢铿,王建设,王家骥.空间光学遥感器热分析[J].光学精密工程,2002,10-2: 205-208.
- [2]黄艳飞,张荣标,凌万水,章云峰.基于有限元的 PCB 板上关键元件热可靠性分析[J].微计算机信息,2005,21-11: 164-165.
- [3]陶文铨,杨世铭.传热学[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [4]吕永超,杨双根.电子设备热分析、热设计及热测试技术综述及最新进展[J].电子机械工程,2007,23-1: 5-10.
- [5]李琴,朱敏波,刘海东,张现亮.电子设备热分析技术及软件应用[J].计算机辅助工程,2005,14-2: 50-52.
- [6]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,2006.

作者简介:王春霞(1979—),女(汉),山西原平人,在读博士研究生,主要研究方向为空间相机仿真测试技术;胡君(1952—),男(汉族),吉林长春人,高级工程师,硕士生导师,主要研究方向:智能控制与信息处理和仿真测试技术;杨洪波(1963—),男(汉族),吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向:光机热集成分析技术。

Biography: WANG Chun-xia(1979—), Female (Han nationality), Born in Yuanping of Shanxi Province, doctor. Research Area: Simulation measure technology of the space camera.

(130033 吉林长春 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 王春霞 胡君 杨洪波

(100039 北京 中国科学院研究生院) 王春霞

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences Changchun, Jilin 130033, Chi-

na)WANG Chun-xia HU Jun YANG Hong-bo

(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)WANG Chun-xia

通讯地址:(130033 吉林长春市经开区营口路 20 号研究生公寓 A 座 616 寝室) 王春霞

(收稿日期:2008.11.15)(修稿日期:2008.12.13)

(上接第 178 页)

5 结论

本文作者创新点:网格架构发展迅速,所支持的程序的种类日益多样化,可使用的工具也日趋完善和复杂。网格服务的发展方向已从原先的基本的面向计算的服务转到高级信息管理和知识发现服务上来。知识网格系统为分布式数据挖掘和基于网格服务的知识发现定义了一个集成的体系结构。该体系结构推动了地理位置分布的大规模数据集的数据挖掘。利用 VEGA 图形化辅助工具,可以方便地实现分布在网络各结点中的数据挖掘和知识抽取,为科学和工商业提供潜在而非常有价值的信息,促进经济和科技的迅猛发展。

参考文献

- [1]聂永红.计算机等级考试信息的数据挖掘分析.微计算机信息,2008,2-3:178-179.
- [2]Foster I, Kesselman C.网格计算:The Grid 2 Blueprint for a New Computing Infrastructure.金海,等译.北京:电子工业出版社,2004:5.
- [3]诸葛海.知识网格.[2006-12-20].<http://www.ict.ac.cn/jcst/downloads/xsqy/qy1301.pdf>.
- [4]方菲,王立福,杨芙清,等.面向对象软件回归测试技术研究[J].软件学报,2001,12(3):372-375.
- [6]陈平,王柏,徐六通,等.数据挖掘网格的关键技术与挑战研究[J].电信科学,2006(22):52-56.

作者简介:杨灵鑫(1986.03-),男,上海市世范软件技术有限公司,工程师,研究方向:数据库与管理信息系统;罗轶衍(1986.12-),男,上海市世范软件技术有限公司,工程师,研究方向:数据库系统。

Biography: YANG Ling-xin (1986.03-), male, ShiFan limited company of the software technique in ShangHai, engineer, research direction:Database and management information system.

(210089 南京大学)杨灵鑫 罗轶衍

通讯地址:(210089 南京大学浦口校区 16 栋 317)杨灵鑫

(收稿日期:2008.11.15)(修稿日期:2008.12.13)

(上接第 180 页)

- [4]林晓帆,杜斌.利用 UML 映射工具实现系统可靠性建模.微计算机信息,2007,23:3-3.

作者简介:王满敬(1982—)女(汉),河北省饶阳人,硕士研究生,主要研究方向:制造业信息化;杨学增(1983—)男(汉),山东省临沂人,硕士研究生,主要研究方向:电子商务

Biography: WANG Man-jing(1982—), female (Han), Raoyang, Hebei, master, main research in informationization of manufacturing industry.

(610031 西南交通大学 CAD 工程中心)王满敬

(CAD Engineering Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 610031)WANG Man-jing

通讯地址:(610031 四川省成都市二环路北一段 111 号西南交通大学 92# 信箱)王满敬

(收稿日期:2008.11.15)(修稿日期:2008.12.13)