

# 空间遥感相机热控设计中的热分析与热试验技术的探讨

李积慧 韩双丽 卢 铿 王家骥  
(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

**摘要** 通过某空间遥感相机模样热分析与热试验结果的比较,发掘出目前我们在这两方面工作中存在的问题。阐明热分析与热试验有机结合的重要性,并就如何提高热分析与热试验水平提出一些建议。

**关键词** 热控设计 热分析 热试验

## 1 引言

多年来一直困扰国内 CAD/CAE 工作者的一个首要问题就是如何证明其工作的正确性。由于在许多情况下拿出确凿证据来支持其设计思想是很困难的,所以他们正确的意见也会经常受到质疑和忽视。其实 CAD/CAE 本来就是面向实际需要的一种解决复杂工程问题的有力工具,只要努力与实践结合,在实践中不断加以充实、完善,就一定会被广大工程技术人员所接受。空间遥感相机要满足高分辨力的技术指标,相机结构及光学元件在空间环境条件下必须具有足够的尺寸稳定性,而对相机结构尺寸稳定性影响最大的因素就是空间环境温度的波动,因此相机的热控设计是相机的整个设计工作的重点之一。热分析在我所已开展几年,为许多项目的设计、评审作了大量有益的工作。如何把热分析与热环境模拟试验更紧密地结合起来,使其更能反映工程实际情况,更有说服力,是 CAD/CAE 工作者所面临的一项重要课题。本文以某空间遥感相机模样热控设计为例,阐述了加强空间光学仪器的热分析与热试验的合作的重要性及近年来在这两方面工作中积累的经验。

## 2 热控设计技术路线

遥感相机的热控设计是保证相机在恶劣工作环境下能够正常工作的重要设计环节,是一

个贯穿模样、初样、正样, 从设计- 分析- 制造- 试验再回到设计的循环迭代过程。在相机模样总体设计之后, 将设计模型在计算机工作站上转化为有限元模型。通过对相机及窗口结构的温度场及热弹性的分析计算, 并与光学分析给出的对光学系统中各光学元件镜面畸变及拓扑关系的要求相比较, 预估出相机能够达到预期分辨率时其关键部件的温度分布, 即热控指标。然后根据已经掌握的工作环境数据确定相机的初始边界条件, 模拟空间环境热载荷, 求得相机的瞬态及稳态温度场, 将其与热控指标比较, 若不满足热控指标要求即采取热控措施, 重新热分析, 必要时修改工程设计和有限元模型; 若满足则表明热控设计能达到预期目标, 开始模样工程制造。在模样相机制成后进行热环境模拟试验, 测得相机关键部件热控前的温度分布及采取热控措施后的温度分布, 将其与热分析所得温度指标相比较, 分析热试验结果并评价模样热分析的有限元模型、温度指标数值及热控方案的合理性。最后总结模样热控设计经验, 为初样的热控设计作准备。

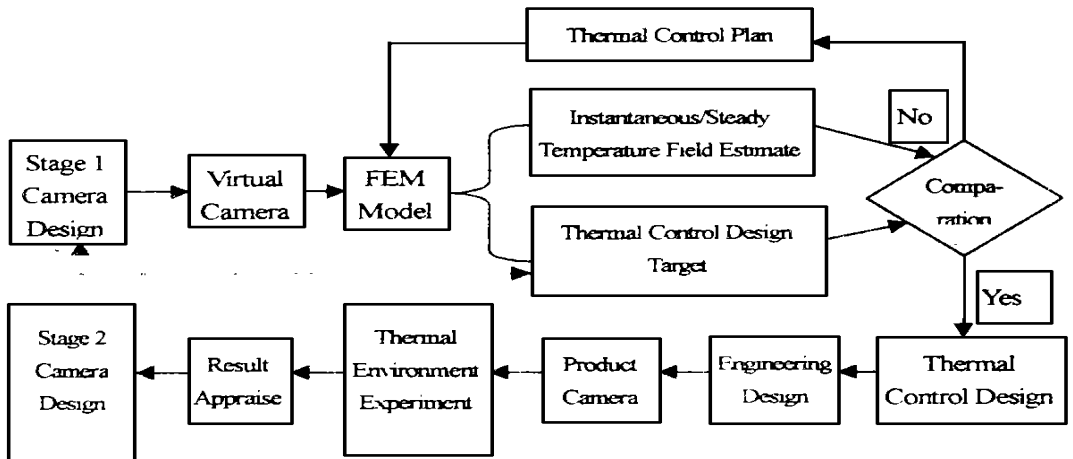


Fig 1 Thermal control design process flow chart

### 3 热试验与热分析结果比较

在遥感相机模样总体设计的基础上, 我们用 UG2、PATRAN 等软件进行了热分析, 获得了相机能够正常工作时所处温度水平、主要光学元件轴向及径向温差的允许范围, 即温控指标。在模样相机制成之后进行了热平衡试验, 获取了试验条件下相机的温度场分布及相机的分辨率随温度场的变化情况。将所得的温度指标与热分析的计算结果比较(如下表), 可以发现径向温差的温度指标结果相近<sup>[1]</sup>; 由于试验环境室温较高, 试验场内缺乏低温制冷系统, 所以试验的温度水平指标要高于分析计算指标; 而二者的轴向温差指标则相差较大。

Table 1 Comparison of thermal analysis/ thermal test results

temperature target	analysis result( )	test result( )
environment temperature	$21 \pm 4$	$25 + 4$
axial temp. differences	3	1.5
radial temp. differences	0.25	0.2

## 4 热分析与热试验经验总结

模样相机的热分析是在总体设计之后与动力学分析一同进行的,分析结果发现了工程设计中的一些问题,提出了解决意见,并最终形成了以被动热控为主、主动热控为辅的热控方案。此次模样相机的热平衡试验是我们首次开展空间光学仪器的热环境模拟试验,由于缺乏经验,在一些工作环节上存在不同程度的不足,导致试验结果不够准确。通过试验结果分析、与热分析结果的比对,得出结论,即本次热试验和热分析结果出现这样大的偏差一方面是由于热环境模拟试验装置比较简陋,不易获得很高精确度;另一方面可以看到在分析计算和试验安排上还有一定的缺陷。同时我们既发现了问题,又积累了经验,主要体现在以下几个方面。

### 4.1 热试验方面的经验总结

#### 4.1.1 试验装置

试验中外热流的模拟采用加热带固定在铝皮上,通过铝皮向相机表面辐射的方法给相机加热。这种方法不易测算究竟有多少热量传递给相机,而且热流密度小,加热效率低,加热时间长。在相机初样热试验时,考虑用红外加热器代替现有的方法。漏热是试验过程中一直困扰我们的大问题,延长了加热和热平衡所需时间,今后应采用密闭的可抽真空容器作为环境模拟室。相机前端由于受平行光管辐射和对流的影响,使其温度分布沿轴线呈前低后高的状态,客观上增加了初始误差,需采取措施进行热隔离。

#### 4.1.2 试验程序规范化

试验前应尽可能考虑到试验中会遇到的各种突发事件,并计划好应急措施。参照航天部《QJ1446-88 卫星整星热平衡与热真空试验》制订详细的试验大纲,试验应按大纲安排,一步一步地进行。试验中尽量不要中断,以免试验状态发生变化,导致试验结果产生偏差。不同时刻采集的温度值应与同时获取的相机分辨力数值相对应,试验结束后认真整理所得数据。

#### 4.1.3 试验结果分析

精确估算试验结果的误差是很困难的,特别是空间光学仪器,其误差限很小,各项误差又经常混在一起,难以分离。但掌握试验所预示的方向,正确提取试验带来的信息是我们的最终目的。因此我们需仔细研究各个误差项,例如确定热室向外漏热的多少、相机与热室间连接电缆漏热的多少、热流模拟方法的局限性、温度传感器的误差等,从中找出一些规律,力争将系统误差逐项分离,在试验结果中对某些系统误差进行补偿,并在试验中尽量减少随机误差的影响。

### 4.2 热分析的经验总结

#### 4.2.1 热分析策略

遥感相机热控设计是集光、机、电、热于一身的综合信息处理过程,所以热分析也不能局限于机械与热之间的关系,我们应运用一体化的设计、分析方法,在分析计算中统筹考虑光、机、电各种因素对相机热特性的影响。当务之急是开发光学 CAD 与机械 CAD/CAE 的接口,达到相机的热分析与光学成像质量评价的有机结合,能够迅速、可靠地进行光、机、电、热等因素综合影响下计算机模拟仿真和工程分析。

遥感相机与航天器的轨道舱及其内部的各分系统组成一个大系统,它们通过传导、对流、

辐射进行热交换, 并且热能交换的多少随航天器所处的运行阶段的不同而变化。因此我们应站在系统的、动态的高度来分析问题, 解决问题。在具体分析时做到在轨、留轨一体化; 相机、窗口、轨道舱一体化。

#### 4.2.2 模型简化

模型简化是工程分析的重要环节, 关系到分析结果的正确性, 因此要做到繁简适度。以前我们热分析的有限元模型过于依赖物理样机, 国外空间相机热分析至多数百个节点, 而我们动辄上千个节点, 造成建模过于繁琐, 计算量也无形中增加了几倍至上百倍。实际建模时在满足分析精度的前提下某些结构的单元网格可以粗一点, 某些与热流传递关系不大的部件可以省略。单元间过渡、接触热阻等问题可以通过单元试验获得规律, 在材料热物性中体现一个系数, 而在建模时将其忽略; 对于结构的间断、材料的非线性问题, 如果工程设计对模型的这些细部信息很关心, 可在整体求解的基础上建立细部结构的细化模型, 通过局部分析判断其设计合理性<sup>[3]</sup>。同时化要掌握一定原则, 不可一切从简, 正确简化的尺度是以不破坏热分析的准确程度为前提。搞好模型简化需要我们在平时的工作中不能僵化, 要多找规律、熟悉软件、深入理解练习题, 积累的经验多了遇到实际问题自然能找到解决的捷径。

#### 4.3 热分析与热试验的统筹安排

热分析与热试验之间的联系是非常紧密的, 只有它们所探讨的是同样的问题, 其结果之间的比对才有意义。所以热分析与热试验中的相机应处于相同的工况, 即热试验时相机及试验装置的初始条件(IC)、边界条件(BC)、每个工况的试验进程都应与热分析的相应条件一致, 既使稍有不同也应当采取一定措施给予补偿。试验中测温元件的布点位置应与热分析数学模型的节点位置相对应。我们在进行热分析与热试验时要有良好的全局观念, 进行周密的安排。一般情况下, 热环境模拟试验由于在热分析之后进行, 自身设备和方法有较大局限性, 其试验工况可能会与预想方案有一些差别, 此时应在试验结束后修改热网络模型和热分析参数, 依试验工况重新进行热分析, 然后再将分析结果与试验结果比对。

### 5 加强热分析与热试验的合作的重要性

将热分析与热试验的结果比较, 其目的就是为了找出它们各自的问题所在, 进而找出热控设计的不足, 改善热控效果。热分析先于热试验, 因此它可以提供许多有价值的信息, 便于确定热试验温度测点的布置、加热功率的大小、试验结果的预测等。热试验获取的结果是相机真实工作情况的反映, 是验证热分析时所作的种种假设恰当与否的有效手段。通过比对能够找出热分析时数学模型建立、材料属性、热工作载荷及其它初始条件和边界条件的确定等方面的不足, 在初样热设计中对热分析加以完善, 并为今后热分析积累丰富的经验。

在美国和其它一些空间技术非常发达的国家, 工程分析已在航空航天领域的工程设计方面起主导作用, 采用一些专用软件如 PATRAN、NASTRAN 等进行分析并通过的设计方案已不需专家审批而可以直接加工, 试验退而成为专门的鉴定验收手段。出现这种局面主要是由于他们的工程分析水平已非常之高, 能够比较准确地模拟实际情况; 同时也说明他们已渡过了试验与分析的紧密合作期, 已掌握了足够的经验并将之融合进工程分析中。国外的发展状况为我们提供了先进的经验, 也使我们明确了今后发展的目标。热试验与热分析是相互促进、互为补

充的,加强二者的合作是提高热控设计水平的必由之路。它能够逐步提高热分析的准确性,减少热试验的次数,节约大量试验费用,提高航天仪器的可靠性<sup>[4]</sup>。

## 6 总 结

热控设计是空间遥感相机研制的重要组成部分,是保证其正常工作的必要手段。热试验与热分析作为热控设计的关键环节,其水平高低是至关重要的。我所空间光学仪器的热分析只从事了几年,热环境模拟试验才刚刚开展。现在的关键是提高热分析水平,使其不断向工程实际靠拢;提高试验水平,使其更准确可靠,提供更多有价值的信息。我们应对热分析与热试验的结合给予足够重视,加强从事 CAD/CAE 与从事热试验的科研工作者间的联系,在实际工作中遵循一体化的原则,站在系统工程的角度上统筹规划。只要大家协同努力,就能够在短时期内提高我国航天领域工程设计,特别是热控设计的水平。

### 参 考 文 献

- 1 卢锷等. 详查相机(模样)热环境模拟试验报告. 长春光机所, 1998
- 2 柯受全主编. 卫星环境工程和模拟试验. 北京: 宇航出版社, 1993
- 3 赵 鹏. 空间详查相机热响应工程分析方法研究[博士学位论文]. 长春: 中科院长春光机所博士论文, 1998
- 4 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制. 北京: 科学出版社, 1998

## Thermal Analysis and Thermal Test in Space Remote-sense Camera Thermal Control Design

LI Ji-Hui, HAN Shuang-Li, Lu E, WANG Jia-Qi  
(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

### Abstract

Comparing thermal analysis results with those of thermal test's of a space remote-sense camera, we find out our deficiency in these two fields. Importance of cooperation of thermal analysis with thermal test is described. Some advice are given on how to improve the degree of thermal analysis and thermal test.

**Key words:** Thermal experiment, Thermal analysis, Thermal control design

李积慧 男, 1971 年生, 1995 年考入长春光学精密机械研究所研究生部, 1997 年直接攻读博士, 主要从事 CAD/CAE、空间光学机械的热控的研究。