

文章编号 1004-924X(2002)01-0116-06

结合有限元法的空间相机优化设计

单宝忠^{1,3},武克用²,卢 铿²

(1. 深圳大学 光电子学研究所,深圳 518060;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130022;

3. 华南师范大学 量子电子学研究所,广州 510631)

摘要:优化设计是改进设计的有效方法,有限元法是解决分析问题的有力工具。简要阐述了空间光学仪器结合有限元法的优化设计方法,并以某空间相机为例详细介绍了系统的结构优化过程,验证了其优化后的性能。

关键词:空间相机;有限元法;优化设计

中图分类号:V447.3 **文献标识码:**A

1 引言

在空间相机的设计过程中将有限元法和优化设计方法有机地结合起来,是以优化方法的不断完善和有限元法的发展为背景的,两者的结合也是有前提的。

对于空间相机来说,用工程分析和仿真的方法在某些阶段替代传统的设计及实验研究方法是受当前技术条件的限制而采取的手段。实验研究是解决工程问题的常规和有效的方法,但对于空间环境这样的问题在地面上很难实现,其费用极其昂贵,有时甚至无法模拟。计算机仿真和工程分析在合理的建模及工况仿真的前提下能够方便地模拟空间环境,因此成为解决此类问题的重要手段。

随着对空间相机性能的要求越来越高,其功能也逐步地多样化,使得某些空间相机及其运载平台变得体积增大、质量增加、结构复杂化。这不但增加了相机发射及空间运行维护的费用,还使其结构间相互制约,增加设计难度。不当的结构设计将会影响整机的性能。为了在不增加甚至减轻质量的情况下提高整机性能,必须对复杂结构的大型仪器进行可靠的结构设计、合理的参数设

定,采用优化设计技术。

简单的优化设计问题,可以通过手工计算和编程的方法进行。对于空间相机这样复杂的光机系统结构,优化设计计算是非常复杂的,有时是无法进行的。有限元法具有强有力的分析求解功能,若将有限元技术和灵敏度分析技术与优化设计方法结合起来,则可以充分利用各自的优势,解决复杂结构的优化设计问题。

结合有限元法的优化设计方法利用有限元法强有力的求解功能和优化设计思想,寻求最佳设计方案及参数,实现了光机系统在复杂环境下的结构优化设计,达到优化设计的目标。

2 用有限元法求解的优化设计方法

设计灵敏度和优化过程是密切相关的,设计灵敏度为优化过程中有效设计变量的选择及变量搜索方向的确定提供重要的信息。

2.1 设计灵敏度分析

设计灵敏度分析用来计算结构响应随设计变量变化的变化率(偏导数),给优化模块提供重要的梯度信息,同时,对结构修改进行预测,为结构修改提供依据。为了达到同一修改目的,可以有不同的修改部位和方法,需要分析如何修改才是

最为有效合理的,此项技术即为灵敏度分析。比如对于结构的小修改,可以推导出各响应对于各尺寸参数改变的斜率,斜率大者灵敏度高。灵敏度分析给出的通常只是改变的趋势,而不是改变幅值的预测。计算灵敏度系数后,可以用得到的灵敏度信息有针对性地进行设计参数优化的研究。

在空间相机结构轻量化设计中,位移 u 是设计变量 x 的显式方程: $u = u(x)$,其他状态变量可以是这些位移的复合函数,其对变量 x 的函数可写为: $r = r[u(x)]$

设计灵敏度系数定义为某个特定响应品质 r 相对于设计变量 x 的变化率。这些系数是某个响应对一个独立设计变量的偏导数。灵敏度系数:

$$r_{ij} = \frac{\partial r_j}{\partial x_i} \quad (1)$$

式中, x_i 表示第 i 个设计变量, r_j 表示第 j 个响应。所说的响应是指目标函数以及作为约束的状态变量。对灵敏度系数大的设计变量可最大限度地改变响应。

2.2 优化设计求解

基本的优化问题描述如下:

目标函数 Minimize $F(x)$, (2)

不等约束 Subject to $g_j(x) \leq 0$

$j = 1, \dots, M$, (3)

等式约束 $h_k(x) = 0$, (4)

边界约束 $x_i \leq x_i \leq x_i''$. (5)

设计变量 $(x) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

MSC/NASTRAN 中的优化算法是基于梯度的算法,用函数梯度来帮助数值寻优。优化过程为:通过计算梯度 $\nabla F(x)$ 和 $\nabla g_j(x)$,确定可行搜索方向向量 S ;沿此方向向量执行一维搜索,确定步长系数 α ;设定新设计点 $(x)^q = (x)^{q-1} + \alpha S$,进行收敛性检验,如果收敛,则结束,否则重复上述优化过程。

设计变量为向量时目标函数的偏导数合成矢量或梯度如式(6)所示:

$$\nabla F(x) = \begin{Bmatrix} \frac{\partial F}{\partial x_1} \\ \dots \\ \frac{\partial F}{\partial x_n} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{F(x + x_1) - F(x)}{x_1} \\ \dots \\ \frac{F(x + x_n) - F(x)}{x_n} \end{Bmatrix}, \quad (6)$$

此梯度向量方向目标函数增长最快。对于最大化问题,搜索方向向量 $S = \nabla F$;对于最小化问题, $S = -\nabla F$ 。对于确定的搜索方向 S 和设计变量向量 x ,设计变量维数由 n 变为 1,优化过程变为一维搜索,变量可表示为:

$$x = x^0 + \alpha S, \quad (7)$$

式中, α 为步长系数。当搜索完成时,得到了此特定方向上的最佳设计。以 f 代表目标函数 F 和约束方程 g_j ,优化后可统一表示为

$$f(\alpha) = f(x^0 + \alpha S), \quad (8)$$

由 $f(\alpha)$ 的麦克劳林级数对 α 的一阶导数可得到 α_{est}

$$\alpha_{est} = \frac{f(x^{q-1}) - f(x^0)}{\left[\frac{df(x^{q-1})}{d\alpha} \right]}, \quad (9)$$

分别计算目标函数和约束方程的 α_{est} ,取最小值作为沿 S 的搜索步长,代入式(7)可得出设计空间的新起点。重复上述过程,直到满足最终优化设计目标为止。

2.3 收敛判断

在数值优化过程中,必须进行收敛条件检验。设计变量为向量的情况,目标函数和约束方程的泰勒展开(x^2 及更高阶项被略去)为:

$$\begin{aligned} F(x^0 + \alpha x) &= F(x^0) + (F)_{x^0} \cdot \alpha x \\ g_j(x^0 + \alpha x) &= g_j(x^0) + (g_j)_{x^0} \cdot \alpha x, \end{aligned} \quad (10)$$

把 Kuhn-Tucker 条件作为收敛判断的标准,其控制方程为拉格朗日函数:

$$L(x, \lambda) = F(x) + \sum_j \lambda_j g_j(x), \quad (11)$$

对无约束的情况, $\lambda_j = 0 \quad j = 1, 2, \dots, M$;对有约束的情况, $\lambda_j \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, M$

Kuhn-Tucker 条件表明:拉格朗日函数 $L(x, \lambda)$ 在最优设计点 x^* 处的梯度必须为 0,即目标函数的梯度及 λ_j 倍起作用约束的梯度的矢量和必须为 0。

3 优化实例

本文以某空间相机的光机系统为例进行了结合有限元法的优化设计实践。

相机总体布局 and 光机结构要适应空间环境的要求,特别是要避免在温度环境、气压变化、失重、发射冲击、振动载荷等因素对相机性能的影响,应

有足够的结构及尺寸稳定性。各种载荷工况的状态见表 1:

表 1 载荷工况状态

Table 1 Status of the loading condition

Load	Type of load	Value
1 Microgravity	Force	1g
2 Low frequency sinusoidal vibration	Dynamical load	3 Hz ~ 8 Hz 4. 89mm 8 Hz ~ 100 Hz 1. 2g
3 Wideband random vibration	PSD	20 Hz ~ 100 Hz 3 db/oct 100 Hz ~ 600 Hz 0. 12 g ² / Hz 600 Hz ~ 2000 Hz - 3 db/oct
4 Stable temperature field	Temperature	-
5 Transit temperature field	Temperature	-

3.1 有限元及优化模型

有限元模型

本文对某空间相机进行了灵敏度分析及优化设计。有限元模型如图 1 所示。模型规模为:节点数 9542、单元数 7355。由于结构多由薄壁板及薄壁筒组成,有限元类型以壳单元为主,壳单元在优化过程中也便于变量选择和控制。

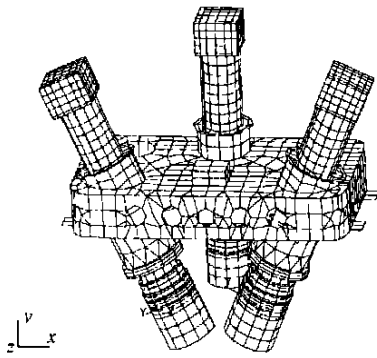


图 1 空间相机的有限元模型
Fig. 1 FEM model of a space camera.

优化设计模型

优化设计模型就是与有限元模型相对应的设计变量以及约束条件、收敛条件的设定。选取壳单元的厚度作为设计变量,根据各部分结构的位置及在结构中的作用,选择了 12 个设计变量,分别为: V_1 CCD 箱壁、 V_2 遮光筒壁、 V_3 支架边框、 V_4 支架筋板、 V_5 支架上板、 V_6 支架支筒、 V_7 正视筒壁、 V_8 前后筒壁、 V_9 支脚、 V_{10} 镜筒筋板、 V_{11} 悬臂支撑、 V_{12} 支筒边缘,其变量定义符号、初始参数值及上下限制值列于表 3 中。

灵敏度分析及优化设计模型以轻量化为目

标,目标函数为质量最小。考虑到光机系统对机械系统静态、动态刚度的要求,以最小一阶固有频率和自重条件下的最大静态变形作为约束条件。

根据有限元的分析结果,选取几个特征节点的位移、相机整体结构的一阶固有频率作为约束,如表 2 所示。

表 2 约束条件列表

Table 2 List of constrain condition

Node number	Restriction fundamental frequency	Lower limit 160 Hz	Upper limit 1. 0e + 30
4	X deformation	- 3. 0e - 3	3. 0e - 3
196	X deformation	- 3. 0e - 3	3. 0e - 3
1515	X deformation	- 3. 0e - 3	3. 0e - 3
2022	X deformation	- 3. 0e - 3	3. 0e - 3
219	X deformation	- 1. 5e - 3	1. 5e - 3
1241	X deformation	- 1. 5e - 3	1. 5e - 3

拉格朗日函数 $L(x,)$ 作为控制方程定义为质量与乘上加权因子的约束条件的和。优化收敛条件为控制方程在最优设计点 x^* 处的梯度为 0。

3.2 设计灵敏度分析及优化设计求解

本文计算了某空间相机的总体质量、一阶固有频率、静态变形对各设计变量的灵敏度系数。限于篇幅,这里绘出一阶固有频率对各设计变量的灵敏度系数曲线,如图 2 所示。

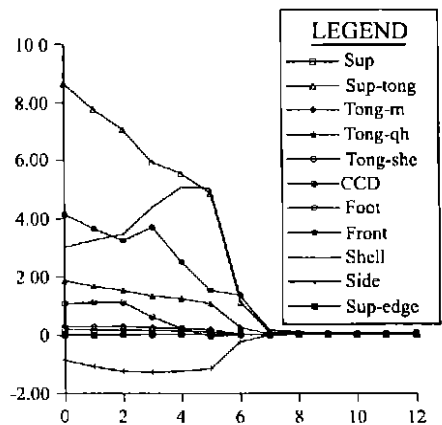


图 2 频率对各设计变量的灵敏度系数

Fig. 2 Sensitivity coefficient of frequency v. s. design variables.

由图 2 可以看出,一阶固有频率对支架筋板的灵敏度最高,通过对支架筋板的修改,可更有效地改变频率值。同时,注意到,在 8 次迭代之后,各设计变量的灵敏度趋近于 0,由于优化时给出

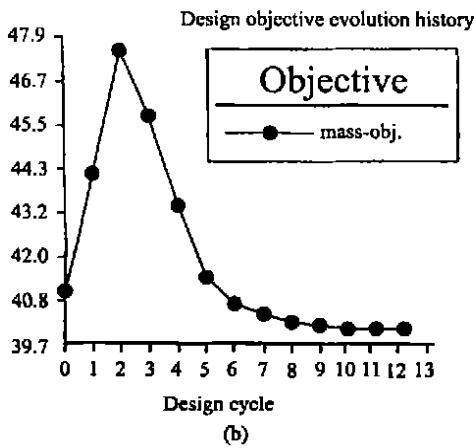
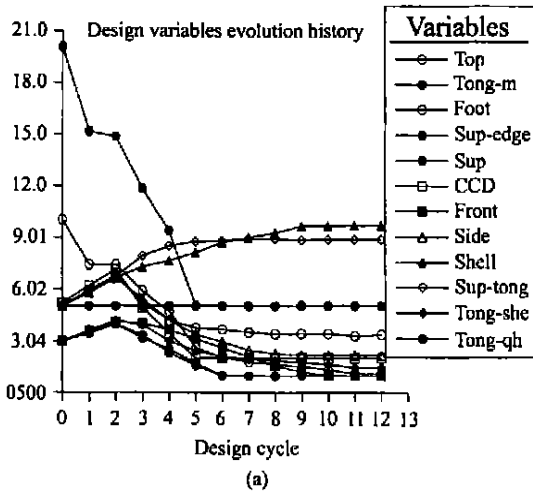


图 3 用迭代数目表示的设计变量和目标的关系
Fig.3 Description of relationship between design variables and objective with iteration number.

表 3 设计变量的优化结果

Table 3 Optimum result of design variables

Design variable	Mark symbol	Initial value	Lower limit	Upper limit	Optimum value
V ₁	CCD	3	2	10	3.349117
V ₂	Sup - tong	3	1	10	5.000131
V ₃	Side	5	1	20	2.000328
V ₄	Shell	5	1	20	1.000036
V ₅	Top	5	1	20	2.177032
V ₆	Tong - she	5	1	20	9.668828
V ₇	Tong - m	3	1	10	8.832468
V ₈	Tong - qh	3	1	10	1.452038
V ₉	Foot	10	5	30	1.000040
V ₁₀	Front	3	1	10	1.000007
V ₁₁	Sup	10	5	25	1.122862
V ₁₂	Sup - edge	10	5	25	5.000065

的误差要求较小,迭代次数到达 12 次。说明此设计点的一阶固有频率对各设计变量的偏导数为 0,是此优化目标的极值点,可作为优化设计的收敛点。

各设计变量在 12 次迭代过程中的变化情况如图 3(a) 所示。目标函数的变化历程曲线如图 3(b) 所示。可以看到,图 3 中各曲线的末端接近水平,说明通过优化,各设计变量和目标函数都已经收敛,达到了优化目标。表 3 列出了设计变量的优化值。

4 优化结果验证

根据设计变量的优化值重新设定相应的结构尺寸,修改有限元模型得到优化后模型。

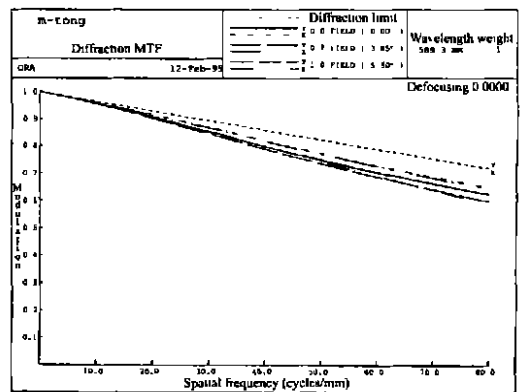
4.1 响应的改善

用优化后的模型进行工程分析,验算相机的总质量、一阶固有频率、静态变形等响应。由于优化过程中采用忽略高阶的简化算法,优化过程中分析的结果与直接分析的结果略有差异。

优化模型的计算结果与原始模型计算结果的比较显示,整机质量由初始的 41.36kg 降低到 40.03kg,下降幅度 3.2%;一阶频率由 154Hz 增为 162.77 Hz,满足最低 160Hz 的要求,增幅 5.7%;静态变形最大值由 6.15μm 减小为 4.99μm,下降幅度 18.8%。

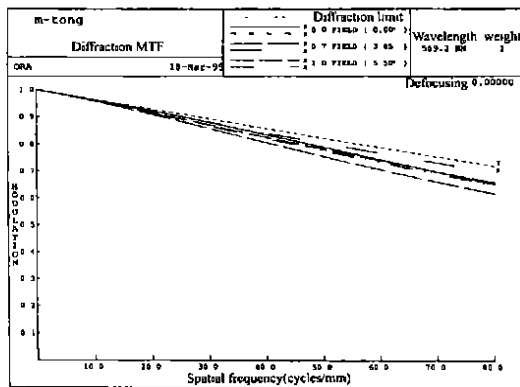
优化后的结构在减轻质量的前提下,改善了响应,达到了预期的优化设计目标。

4.2 光学性能的改善



(a)

改善光学特性是最终目标。在结构优化后,有必要验证光学系统性能的变化。根据优化后结



(b)

图 4 光学系统初始设计和优化设计的光学传递函数

Fig. 4 OTF of original and optimum design of an optical system.

构模型,应用集成分析方法^[2],分别得到光学系

统优化前后的光学传递函数,如图 4(a)、(b)所示。

对比图 4 中(a)、(b)所示的优化前和优化后温度载荷作用下的光学传递函数曲线,可以发现优化后光学系统性能也有了较大的提高,通过优化设计有效地提高了光学系统的性能,优化后的设计更合理。

5 结 论

将结合有限元法的优化设计方法应用在某空间光学仪器的设计上,结果显示,整机质量降低了 3.2%;一阶频率增幅 5.7%;静态变形下降幅度为 18.8%,并使其光学性能得到很大改善。实践证明,结合有限元法的优化设计方法是分析问题和改进设计的有效方法和强有力的工具,尤其适用于空间相机这样复杂的多学科综合系统。

参考文献:

- [1] Moore Gregory J Ph D. Msc/ Nastran Design Sensitivity and Optimization. Msc/ Nastran User 's Guide[Z]. Version 68.
- [2] 单宝忠. 空间相机光机系统光机热集成分析及优化设计航天器热控制[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,1999.
- [3] 卢铿. 空间遥感相机结构的计算机辅助设计[J]. 光学机械, 1989, (4): 16 - 23.
- [4] 颜昌翔,王家骐. 航相机像移补偿计算的坐标变换方法[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(3): 203 - 207.
- [5] 吴亚平,张天序,桑农,等. 大视场主动光学成像系统的成像研究[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(2): 106 - 109.

Optimum design of space cameras based on finite element method

SHAN Bao-zhong, WU Ke-yong, LU E

(1. Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)

Abstract: Optimum design is an effective method for improving design, and the finite element method is a powerful tool for solving and analysing problems met in the course of design. Optimum design combined with finite element method is introduced, which has been applied to the design of a certain space camera.

Key words: space cameras; finite element methods; optimum design

作者简介:单宝忠(1970 -),男,辽宁省人,1993年在吉林工业大学攻读硕士学位,1996年起在中科院长春光学精密机械研究所攻读博士学位,主要从事空间光学仪器 CAD/ CAE 等方向的研究工作,现为华南师范大学流动站、深圳市企业工作站博士后,从事光电子学应用领域研究工作。