

光电遥感器反射镜组件过盈接触分析

王永宪^{1,2}, 任建岳¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:针对空间光学遥感器反射镜组件结构中存在的过盈配合接触非线性问题,利用非线性有限元分析软件 ABAQUS 进行结构分析。文中围绕反射镜组件结构中接触问题的非线性特征为重点,分析了过盈量、摩擦系数等参数对反射镜的影响。通过非线性有限元模型的建立、分析、验证最终确定该结构的合理过盈量为 0.08 mm。有限元分析的结果对于改进空间光学遥感器装调工艺具有非常重要的理论参考依据。

关键词:光电遥感器;反射镜组件;接触非线性;有限元分析;过盈配合

中图分类号:V447.3;TP391.72 **文献标识码:**A

Analysis on interference fit reflector subassembly of electro-optical sensor

WANG Yong-xian^{1,2}, REN Jian-yue¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: In the spatial optics remote sensor reflector subassembly has had the full coordinate contact non-linear problem. Used non-linear finite element analysis software ABAQUS in view of this question this article to carry on the structure analysis. This article revolved the reflector subassembly design characteristic to carry on the analysis. Namely: The non-linear contact question characteristic is a key point. Analyzed full parameters and so on quantity, friction coefficient to the reflector subassembly precision influence. Carried on the finite element model the establishment, the analysis, the confirmation. Determined finally this structure the reasonable interference fit is 0.08 mm.

Key words: electro-optical sensor; reflector subassembly; contact nonlinear; finite element analysis; interference fit

1 引言

目前空间光学遥感系统在天文观测、地球资源监测、灾害监测及军事侦察等方面获得了越来越广泛的应用,空间光学遥感器已成为人类认识自然,探索外层空间的重要工具^[1-5]。反射式空间光学遥感器中,反射镜作为其关键部件,其精度直接决定系统的最终成像质量。在反射镜组件结构中由于存在过盈配合接触非线性问题使得反射镜的精度(主要是面形精度)很难控制,而这个问题使用传统的弹性接触理论是无法解决的。为了提高精度、降低设计和制造成本,本文采用国际上先进的非线性有限元分析软件 ABAQUS 进行过盈配合接触非线性分析。

2 过盈配合理论介绍

2.1 接触理论基础

接触理论是研究物体之间通过接触而实现力的传递的一种分析方法^[6-8]。

如图 1 所示为平面应变状态的两物体 Ω_1 和 Ω_2 在单一方向外载荷 P (法向表面载荷)的作用下产生法向接触应力的情况。

基金项目:“863”基金项目(No. 863-2-5-1-13B)资助。

作者简介:王永宪(1975-),男,博士研究生,从事光学仪器 CAD/CAE 方面研究和机械动力学方面研究。E-mail: yongxianwang@sina.com; zmfewyx@163.com

收稿日期:2009-03-10; 修订日期:2009-04-07

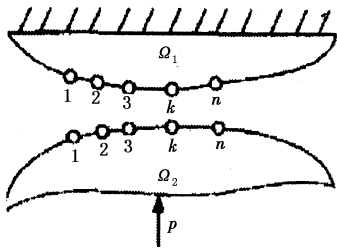


图1 接触示意图

在初始接触区及其周围将 Ω_1 和 Ω_2 离散成接触点对 $1, 2, \dots, n$ 。其间距数学表达式为:

$$\varepsilon_k = \varepsilon_{0k} + u_{1k} + u_{2k} - \alpha \quad (1)$$

式中, ε_{0k} 是 k 点对的初始间距; u_{1k} 和 u_{2k} 分别是两物体在 k 点的弹塑性位移; α 是刚体的位移量; ε_k 是物体刚体位移和弹塑性变形后 k 点对的间距。

将接触点对的间距写成矩阵,即:

$$\{\varepsilon_k\} = \{\varepsilon_0\} + \{u_1\} + \{u_2\} - \alpha \{e\} \quad (2)$$

式中, $\{e\}$ 为单位列矢量。

由矩阵位移法原理可知:

$$\{u_1\} = [F_1] \{R_1\} \quad (3)$$

$$\{u_2\} = [F_2] \{R_2\} \quad (4)$$

其中, $[F_1]$ 和 $[F_2]$ 为物体 Ω_1 和 Ω_2 ; $\{R_1\}$ 和 $\{R_2\}$ 为接触节点力,并有 $\{R_1\} = -\{R_2\}$ 。若以 Ω_1 为基准,记 $\{R_1\} = \{R\}$, $[F_1] + [F_2] = [F]$,则可得到典型的接触问题的位移协调方程,即:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_0\} + [F] \{R\} - \alpha \{\varepsilon\} \quad (5)$$

对可能接触区的各节点来说,只有接触时才存在接触力,即:

$$\begin{cases} F_k \geq 0 & (\text{当 } \varepsilon_k = 0 \text{ 时}) \\ F_k = 0 & (\text{当 } \varepsilon_k > 0 \text{ 时}) \end{cases} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式(6)称为接触准则。接触问题就是求一组解,使它满足上述条件。

2.2 过盈配合理论

过盈问题是接触问题的一种,属于边界条件高度非线性的复杂问题。其特点是在接触问题中某些边界条件不是在计算开始就可以给出,而是计算的结果,两接触体间的接触面积和压力分布随外载荷的变化而变化^[9-10]。近年来提出的点面接触模型是把两接触体分为主动体和被动体,在分析时研究主动体的节点与被动体接触表面上相接触的自由度关系及变形的一致关系,从而确定接触边界条件,然后从边界变形协调的变分原理出发,建立整个接触系统的控制方程。

3 反射镜组件的分析过程

3.1 反射镜组件结构特征

本文以在研某型空间光学传感器反射镜组件为

研究对象,如图2所示。反射镜支撑方式采用圆周支撑,反射镜安装在镜框中,镜框圆周均匀布置三个柔性连接结构,并用压板将反射镜上端面固定,镜框与整机主体支撑结构相连。

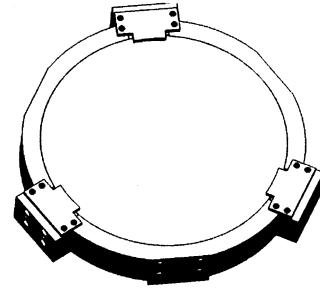


图2 反射镜结构示意图

反射镜组件中存在的接触关系有:

- (1) 反射镜与压板之间的接触;
- (2) 反射镜与镜座之间的接触;
- (3) 反射镜与柔性压块之间的接触。

3.2 有限元模型的建立

3.2.1 网格划分

利用MSC/Patran软件建立有限元模型,如图3所示。

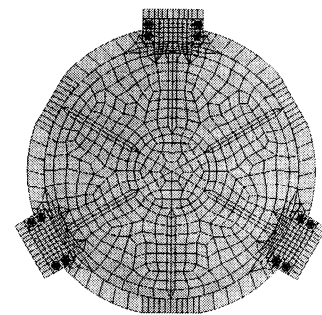


图3 反射镜组件有限元模型

网格划分所遵循的原则:

- (1) 有限元模型主要采用一阶减缩积分单元,在局部重点要考查的部位采用二阶减缩积分单元;
- (2) 对减缩积分单元引入少量的人工沙漏刚度以限制沙漏模式的扩展;
- (3) 在模拟承受弯曲结构时,厚度方向至少划分4层单元;
- (4) 在进行接触分析时采用非协调单元,并将网格作细化处理,使网格扭曲减至最小;
- (5) 尽可能采用六面体单元,在模型复杂部位适当采用楔形单元,以增加过渡的连续性和协调性。

3.2.2 过盈配合条件

ABAQUS导入Patran输出的inp文件,Interaction模块中建立接触对(7对),并且在反射镜与柔

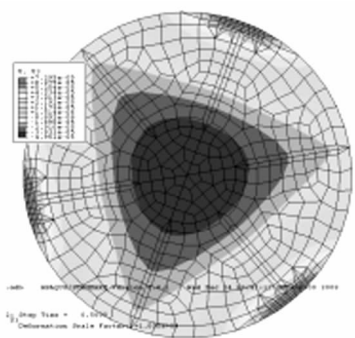
性压块的接触对分析步中施加过盈配合。

3.2.3 计算结果

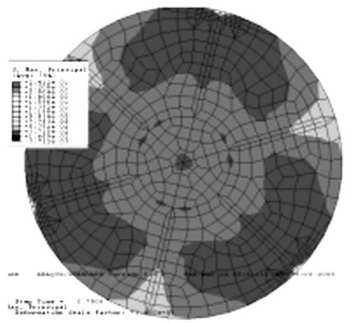
表1所示为不同过盈量的最大反射镜应力。图4所示为过盈量0.08 mm时的反射镜 Mises 应力云图和变形云图。表2所示为过盈量为0.08 mm时不同摩擦系数对反射镜面形精度。图5所示为结构的总动能和总内能。

表1 不同过盈量下的反射镜应力

过盈量/mm	0.03	0.05	0.08	0.10
反射镜组件最大应力/MPa	1.106	13.81	24.12	98.33
面形精度 PV/nm	26.55	17.25	12.03	40.36



(a) 应力云图



(b) 变形云图

图4 过盈量0.08 mm时应力云图和变形云图

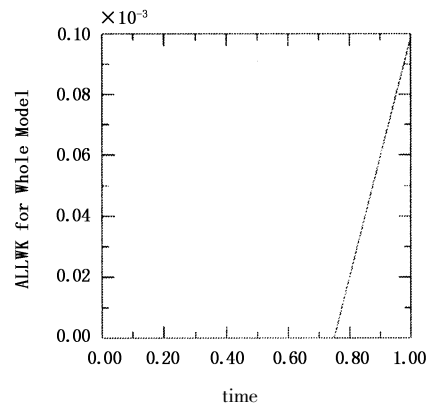
表2 不同摩擦系数下的反射镜面形精度

摩擦系数	0.1	0.2	0.3
面形精度 PV/nm	12.14	12.03	11.98

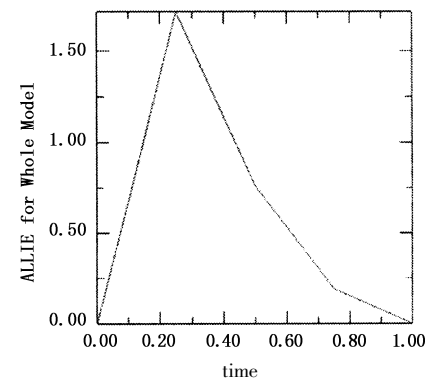
3.2.4 结果分析

从表1可见,反射镜和柔性压块间的过盈量是影响反射镜组件应力的主要因素。随着过盈量的增大,其装配应力增加,当过盈量从0.03 mm增至0.05 mm和从0.05 mm增至0.08 mm,总体应力水平都增加约12 MPa,因此在反射镜装调时应严格控制过盈量。而在从0.08 mm增至0.10 mm,应力增加了74.21 MPa,不再是线性增加;另外面形精度也变化非常大。这些说明了合理的过盈量应该为

$\delta = 0.08 \text{ mm}$ 。



(a) 总动能



(b) 总内能

图5 结构的总动能和总内能

表2所示为过盈量 $\delta = 0.08 \text{ mm}$ 时分别取摩擦系数 $\mu = 0.1, 0.2, 0.3$,按库仑摩擦模型考虑配合面间摩擦行为的配合面接触应力计算结果,可见,摩擦系数对面形精度的影响很小。

能量输出经常是 ABAQUS 分析的一个重要部分,可以应用在评估分析是否得到合理的响应。内能和动能都显示了震荡,反映出了结构的振动行为。在整个模拟过程中,动能被转换成内能,内能再转换回动能,总能量是守恒的。ETOTAL 的值在整个分析过程中几乎保持为零。通过能量曲线说明有限元模型是合理和准确的。

4 结论

(1) 基于非线性有限元软件 ABAQUS, 针对过盈配合提出的分析方法计算反射镜组件应力能全面反映装调终点应力分布状态;

(2) 对反射镜装调的分析计算表明过盈量是影响装配应力的主要因素,过盈量0.08 mm是较合理的选择;摩擦系数对装配应力的影响很小;

(3) 反射镜组件装调过程中出现的应力峰值应在设计时予以考虑;

(4) 有限元计算结果对于确定过盈配合的合理

过盈量和改进加工工艺具有参考意义。本文的研究不仅为相机结构的设计提供了依据,还大大缩短整个结构的设计周期、研制费用,进而为结构设计和试验提供理论依据。

参考文献:

- [1] 王延风,卢镔,宋文荣. 空间相机的结构动力学分析[J]. 光学·精密工程,2003,11(4):50-55.
- [2] 杨力. 先进光学制造技术[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [3] 杨近松. 空间相机桁架结构模态相关性分析[J]. 计算机仿真,2006,23(1):274-276.
- [4] Kammer D C. Development of test-analysis models for large space structures using substructure representations [J]. Journal of Spacecraft and Rockets,1991,28(2):244-250.
- [5] 陈长征,赵玲玲,刘磊,等. 空间遥感器支撑桁架的模态计算与试验[J]. 光学·精密工程,2007,15(8):1164-1169.
- [6] 丁亚林,田海英,王家骥. 空间遥感相机调焦机构设计[J]. 光学·精密工程,2001,9(1):35-38.
- [7] Vaughan R E, Gilbert J A. Analysis of graphite reinforced cementitious composites [C]//Proceedings of the 2001 SEM Annual Conference and Exposition, Portland, OR, June 4-6,2001:532-535.
- [8] 关英俊,辛宏伟,刘巨,等. 基于接触非线性分析方法的反射镜组件工程分析[J]. 光学技术,2007,32(6):859-862.
- [9] 关英俊,辛宏伟,刘巨,等. 空间相机主支撑结构拓扑优化设计[J]. 光学·精密工程,2007,15(8):1157-1163.
- [10] 王永宪,任建岳. 基于有限元法的空间遥感器主镜支撑位置优化[J]. 计算机辅助工程,2008,17(4):14-17.