

平行光管主反射镜组件的非线性有限元分析

辛雪军^{1,2}, 陈长征¹, 张星祥¹, 许艳军¹, 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: 为了提高对光学仪器中光机结构分析的精度, 引入了非线性分析方法, 用非线性有限元法研究了某平行光管主镜组件存在的非线性问题。介绍了产生结构非线性的主要来源, 并在接触理论的基础上对主反射镜组件进行了合理的有限元建模。采用接触非线性分析方法对螺钉预紧时反射镜的响应及在自重和温度载荷作用下反射镜的变形进行了分析。将线性和非线性分析结果与实际结果进行了对比, 结果表明, 采用接触非线性分析方法对反射镜组件进行工程分析减小了分析误差。因此, 在工程分析中, 对某些接触部位采用非线性分析方法可以提高分析精度, 得到的结果更加符合实际。

关键词: 平行光管; 主反射镜; 接触; 非线性分析; 有限元分析

中图分类号: TH741.14 **文献标识码:** A

Nonlinear analysis of primary mirror subassembly for collimator based on finite element method

XIN Xue-jun^{1,2}, CHEN Chang-zheng¹, ZHANG Xing-xiang¹, XU Yan-jun¹, REN Jian-yue¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: To improve the analysis accuracy for the optical mechanical structure of a optical system, a nonlinear analysis method is introduced and then a nonlinear Finite Element (FE) analysis is applied to analysis of the mechanical model of a primary mirror subassembly. The main source for structural nonlinearity is summarized, and a FE model for the primary mirror subassembly of a collimator is established on the basis of contact theory. The mirror response based on bolt contact and the mirror deviation based on gravity and temperature loads are analyzed by contact nonlinear analysis method. Using a practical measuring result, the linear and nonlinear methods are compared, and it is included that the contact nonlinear analysis indeed reduces the analysis error. Therefore, nonlinear analysis can improve the analysis accuracy and obtain the results which are close to

that in real system of engineering analysis.

Key words: collimator; primary mirror; contact; nonlinear analysis; finite element analysis

1 引言

工程分析技术在光学仪器的光机结构设计中发挥着不可替代的作用,分析模型简化的合理性直接影响最后结果的可信性,分析精度的高低直接影响整个任务的成败。实践证明,合理有效的工程分析对于缩短设计的研制周期、降低研制成本等起着至关重要的作用。大型平行光管中,较多使用的是反射系统,其中主反射镜是光管的关键部件,主反射镜面形的好坏直接影响光管的成像质量。根据瑞利条件,当镜面的变形量为 $\lambda/8$ 时,人眼即可观察到对光学系统像质的影响,即反射镜表面有微小的变形都会引起成像质量的变化。在反射镜结构系统分析过程中会涉及到一些明显的接触问题,以往的工程分析常常将这些问题近似地看作线性问题来处理,但工程实验发现,有些反射镜的面形精度与工程分析所得到的分析结果差异很大。即使实验使用相同的支撑结构,环境因素也相同,但反射镜在同一方向上的两个不同矢量上面形精度并不相同,有时已经影响到其使用要求。(即重力沿同一坐标轴正、负两个方向分别作用的工况下,面形精度并不相同,而根据光学仪器的安装工艺、加工工艺和使用状态的要求,两个矢量方向上面形精度应相同或只允许存在极小的误差)。就目前的线性工程分析而言,所得到的结论通常为两个矢量方向上面形精度相同,所以工程分析结果与实验结果存在较大的误差^[1~4]。为了提高分析精度,本文引入了非线性分析方法,针对某平行光管主镜组件中存在的非线性问题进行了论述,并进行了非线性分析。

2 非线性问题描述

线性分析的基本原理是如果刚度变化足够小,则可以假定在变形过程中形状或材料属性没

有任何变化。这就意味着在线性分析中,结构的柔度矩阵只需计算一次,其他载荷情形下,结构的线性响应可通过将柔度矩阵与新的载荷向量相乘得到。而非线性结构问题^[5]是指结构刚度随其变形而改变的问题。在非线形工程分析中,由于刚度依赖于位移,所以不能够再用初始的柔度乘以外加载荷的方法来计算任意载荷下的结构变形,结构的刚度阵在整个分析过程中必须进行多次的生成和求逆,这就使得分析求解的成本比线性分析高得多。所以在实际的工程分析中应该采用以线性分析为主,以非线性分析为辅的分析策略。

2.1 结构非线性的来源

在结构力学模拟中有3种非线性的来源。

(1)材料非线性:主要是指应用的材料特性随温度、变形等的变化而变化,造成求解的复杂性;

(2)边界条件非线性:指边界条件在分析过程发生变化,产生边界条件非线性问题。如反射镜组件结构中螺钉预紧及由于重力或温度载荷作用下而造成接触条件发生变化的问题就属于边界条件非线性问题;

(3)几何非线性:主要发生在位移的大小影响到结构响应的情形。

平行光管中主反射镜是一种精密的光学仪器,光学元件要求变形很小且结构中各元(部)件相对位移较小,不会引起材料非线性和几何非线性的问题,存在的主要问题是由于接触所带来的边界条件的非线性问题。

2.2 接触理论基础

接触理论^[6,7]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。接触模拟的一般目的是在已知初始接触状态条件下,对接触体系施加一定外载荷,确定接触面积及计算所产生的接触压力。在有限元中,接触条件是一类特殊的不连续约束。因此,分析方法必须能够判断什么时候两个表面是接触的,并且能应用相应的接触约

束。与此类似,分析方法还必须能判断什么时候两个表面是分开的,并能解除其约束。

图1所示为平面应变状态的两个物体 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。首先做如下假设:

- (1) 两物体材料均为各向同性;
- (2) 接触表面光滑,忽略切向摩擦;
- (3) 小变形,且在变形过程中接触点对始终一一对应;
- (4) 单调加载,即加载过程中无卸载情况。

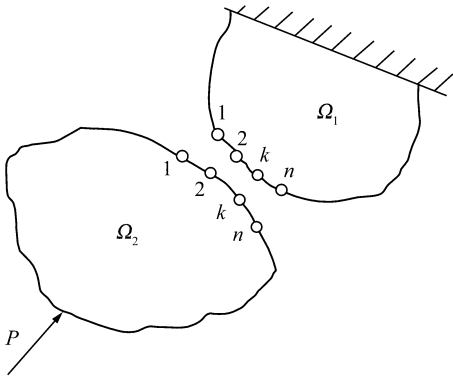


图1 接触示意图

Fig.1 Sketch of contact

在初始接触区及其周围将 Ω_1 和 Ω_2 离散成接触点对,如图1中的 $1, 2, \dots, n$ 。这样处理可以用离散的接触节点接触力来代替外载荷作用下的分布压力。接触区的任一点 k 在变形后必须满足弹性变形与初始距离之和大于或等于刚体位移量。其数学表达式为:

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

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。

将可能接触的点对加载后的间距写成矩阵形式,即:

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \{\boldsymbol{\varepsilon}_0\} + \{\boldsymbol{u}_1\} + \{\boldsymbol{u}_2\} - \alpha\{\boldsymbol{e}\}, \quad (2)$$

式中 $\{\boldsymbol{e}\}$ 为单位列向量。

由矩阵位移法原理可知, $\{\boldsymbol{u}_1\} = [\boldsymbol{F}_1]\{\boldsymbol{R}_1\}$, $\{\boldsymbol{u}_2\} = [\boldsymbol{F}_2]\{\boldsymbol{R}_2\}$ 。其中 $[\boldsymbol{F}_1]$ 和 $[\boldsymbol{F}_2]$ 分别为物体 Ω_1 和 Ω_2 对应于可能接触的点的柔度矩阵,它们是由材料的性质决定的,可以从表征材料应力

水平的相当总刚度求逆得出; $\{\boldsymbol{R}_1\}$ 和 $\{\boldsymbol{R}_2\}$ 为接触点应力,并有 $\{\boldsymbol{R}_1\} = -\{\boldsymbol{R}_2\}$ 。若以 Ω_1 为基准,记 $\{\boldsymbol{R}_1\} = \{\boldsymbol{R}\}$, $[\boldsymbol{F}_1] + [\boldsymbol{F}_2] = [\boldsymbol{F}]$,则可得到典型的接触问题的位移协调方程,即 $\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = \{\boldsymbol{\varepsilon}_0\} + [\boldsymbol{F}]\{\boldsymbol{R}\} - \alpha\{\boldsymbol{e}\}$ 。

由于作用在各分散点上的力 F_k 的和必须等于法向外载荷 P ,所以平衡条件可写作 $\sum_{k=1}^n F_k = P$ 。同时,对可能接触区的各节点来说,只有接触时才存在接触力,即:

$$\begin{cases} F_k \geq 0 & (\text{当 } \varepsilon_k = 0 \text{ 时}) \\ F_k = 0 & (\text{当 } \varepsilon_k > 0 \text{ 时}) \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots, n), \quad (3)$$

式(3)称为接触准则。这样,接触问题就是求一组解,使它满足上述条件。

在分析螺钉联接的结构时(如在重力的作用下变形问题),线性与非线性分析方式的处理方法是不同的,在通常线性模拟中一般可以用MPC(多点约束)模拟螺钉联接方法来处理,这就忽略了各个接触面之间可能存在的相对滑移和分离的可能,同时也忽略了螺钉联接所存在的预紧力载荷。这种算法除相互联接的节点以外,其他的节点并没有参与两体之间的直接关系,因而也无法考虑接触应力问题。对于热弹性问题,采用线性分析时,接触面不能分离,而在实际状态是可能存在的,这就造成不真实的模拟,从而产生分析误差。在复杂结构受热载荷作用下,线性简化的分析精度就更低。因此,对于精度要求较高的反射镜组件,应采用非线性方法来提高分析精度。

3 系统分析

本文以平行光管主反射镜组件为研究对象,对其在重力载荷和温度载荷作用下进行非线性有限元分析,并将分析结果与采用线性分析方法得到的结果进行对比。根据以往工程实践经验,采用非线性分析方法得到的结果误差较小。

3.1 模型的建立

图2是主反射镜组件的装配图。反射镜支撑方式采用圆周支撑,反射镜安装在镜框中,并用压板将反射镜上端边缘固定,用螺钉将镜框与平行光管主体连在一起。反射镜材料采用的是SiC并

经过轻量化设计,轻量化率在65%以上,主镜框采用了高体份 Al/SiC,压板和螺钉材料采用了 TC4,

其特性参数如表1所示。

表1 主反射镜组件材料属性表

Tab.1 Material properties of primary mirror subassembly

| | 密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$ | 泊松比 ν | 弹性模量 E/GPa | 热胀系数 $\alpha/(10^{-6}/\text{K})$ |
|--------|----------------------------------|-----------|---------------------|----------------------------------|
| SiC | 3 200 | 0.3 | 400 | 2.4 |
| TC4 | 4 400 | 0.34 | 114 | 9.1 |
| Al/SiC | 3 000 | 0.3 | 180 | 8.0 |

在图2的基础上建立主反射镜组件的有限元模型如图3所示,对其中固定压板的6处螺钉联接部位采用接触非线性算法进行分析。模型主要采用一阶减缩积分单元,只在重点受力部位采用二次减缩积分单元,同时对一阶减缩积分单元引

入一个小量的人工“沙漏刚度”以限制沙漏模式的扩展。对主反射镜进行分析时,尽可能地采用六面体单元,模型复杂部位适当地采用了楔形单元,以增加过渡的连续性和协调性。螺钉网格细致划分,进行接触分析时采用非协调单元,并细化网格,使其扭曲减至最小。

3.2 非线性有限元分析

非线性分析的边界条件如下:

- 1) 镜框与外界的接口处采用固定连接。
- 2) 接触面属性定义。支撑方案考虑了在外力作用下零件会产生弯曲和相互滑移或倾斜的倾向,因此采用罚函数的形式。

3) 确定分析步骤时,可以分4步进行,以便增加收敛速度,分别对每一步进行最大变形分析和反射镜的面形精度分析,再将各步耦合分析,确定所有载荷作用下的最大变形和反射镜的面形精度。

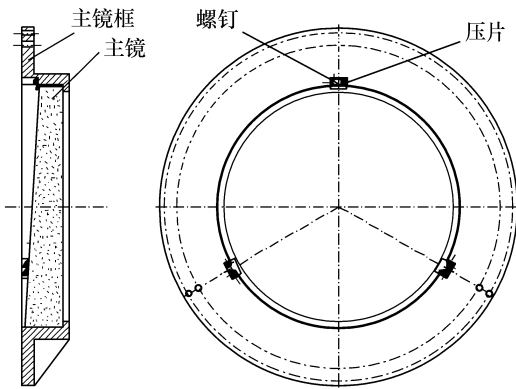


图2 主反射镜组件的装配图

Fig.2 Sketch of primary mirror subassembly

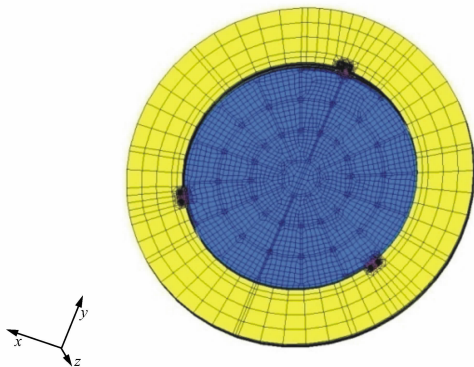


图3 主反射镜组件的有限元模型

Fig.3 Finite element model of primary mirror subassembly

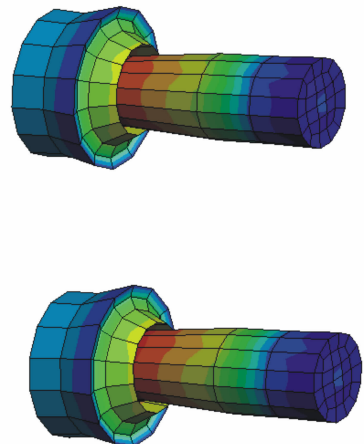


图4 螺钉变形图

Fig.4 Displacement contour of bolts

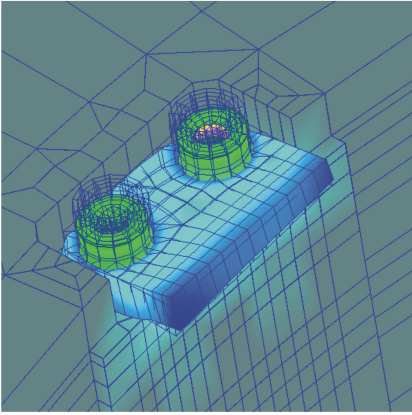


图5 螺钉联接部位变形图

Fig.5 Displacement contour of bolt contact

分析结果:

1) 如图4、图5所示,对6个螺钉全部施加3 000 N的预紧力后可以看到,螺钉伸长,压板和镜框在局部集中载荷作用下产生微小的局部变形,同时反射镜局部受到挤压,产生变形,导致反射镜局部面形精度下降。

由于将螺钉定义为变形体,其不同预紧力作用下会对反射镜面形精度产生一定的影响,但线性工程分析方法却不能分析出预紧力对反射镜面形精度的影响。

2) 沿光轴正负两个矢量方向分别施加1 g 的重力载荷,同时计算反射镜面形精度。结果发现,第一步施加预紧力时反射镜面形精度虽然降低

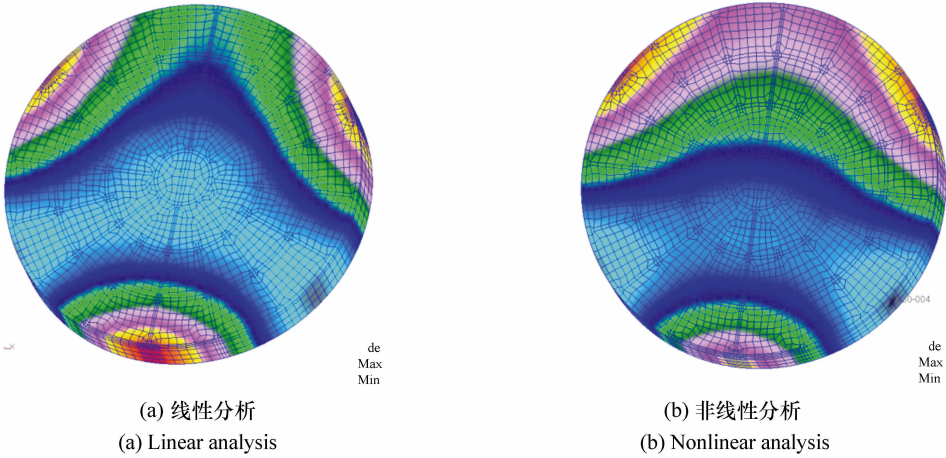


图6 沿光轴正向施加重力载荷时主镜的变形云图

Fig.6 Displacement contour of primary mirror based on gravity load along positive optical axis

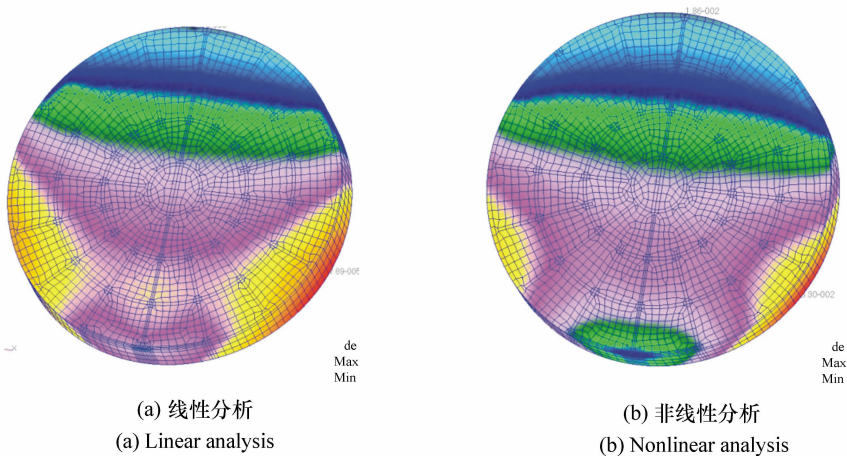


图7 自重与温度耦合时主镜的变形云图

Fig.7 Displacement contour of primary mirror based on loads of gravity and temperature

了,但变化并不明显,在施加重力载荷作用后,反射镜面形精度在局部发生剧烈变化。图6是在重力沿光轴正向单独作用下采用线性与非线性分析所得的变形云图。

3)沿光轴正负两个矢量方向分别施加1g的重力载荷的同时,再整体施加4℃均匀温升载荷,

计算重力与温度耦合时的镜面变形,发现反射镜面形精度也随之发生变化。图7是在重力沿光轴正向与4℃温升耦合作用下采用线性与非线性分析所得的变形云图。

以上各载荷工况下的非线性分析和线性分析结果如表2所示。

表2 线性分析与非线性分析结果对比

Tab.2 Contrast of results of linear and nonlinear analysis

| 分析项 | | 线性分析 | | | 非线性分析 | | |
|-----|----|---------------------------|--------|-------|---------------------------|--------|-------|
| | | δ_{\max}/mm | RMS/nm | PV/nm | δ_{\max}/mm | RMS/nm | PV/nm |
| 自重 | 正向 | 2.10×10^{-5} | 4.01 | 25.80 | 5.40×10^{-5} | 12.46 | 60.52 |
| | 负向 | 2.10×10^{-5} | 4.01 | 25.80 | 3.63×10^{-5} | 8.34 | 41.23 |
| 耦合 | 正向 | 7.89×10^{-4} | 5.80 | 40.28 | 1.08×10^{-3} | 15.15 | 65.80 |
| | 负向 | 7.89×10^{-4} | 5.80 | 40.28 | 9.67×10^{-4} | 11.44 | 52.18 |

3.3 结果分析

从表2中结果可以看出,在线性分析中,螺钉联接部位采用的是MPC刚性联接,不能模拟接触作用。由于沿同一坐标轴的不同矢量方向施加的足1g的重力载荷,结构刚度不变,所以反射镜最大变形相同。但在非线性分析中,当沿光轴的正负两个方向分别施加1g的重力载荷时,得到的光学元件的面形精度和均方根值不相同,表现为沿光轴负方向的PV值和RMS值较小,而沿光轴正方向的PV值和RMS值较大,分析其原因是由于接触的非线性导致的。当螺钉在预紧力的作用下产生伸长时,两个连接板的接触面相互挤压,当系统达到稳定状态时可以将这种情形视为力学平衡环境。当重力分别沿光轴的正负两个方向作用时,两个连接板接触面相互挤压的程度将有所增加或减弱,这时的两种力学平衡环境不同,连接板的变形量也不同。当这种力的变化传到主反射镜时,导致沿两个矢量方向所计算的主反射镜的面形精度和均方根值有所不同。这种变化通常是局部的,但由于反射镜的支撑方式不同,这种局部性变化会影响到全局。与此同时,反射镜的刚体位移具有全局性。当光学系统对局部PV值的变化、RMS值的变化和刚体位移的变化具有严格限制时,这些变化将使成像质量沿正负两个矢量方向发生变化,特别是在热载荷作用下这种变化将

更明显。此外,由非线性分析所得到的反射镜的最大变形值和面形值均大于由线性分析所得到的结果,这主要是由于考虑了螺钉预紧作用的缘故。

4 结论

本文采用接触非线性分析方法对螺钉预紧时反射镜的响应及在自重和温度载荷作用下反射镜的变形进行了分析,对线性和非线性分析结果进行了对比。结果显示,采用线性分析主镜沿光轴正向自重状态下PV值为25.80nm,RMS值为4.01nm,采用非线性分析时PV值为60.52nm,RMS值为12.46nm;而实际要求主反射镜面形精度PV值为62.38nm,均方根RMS值为12.66nm。上述结果表明,采用接触非线性分析方法对反射镜组件进行工程分析确实减小了分析误差。

在对光机结构系统进行工程分析时,为使分析结果更符合实际,进而为结构的设计优化提供更全面可靠的分析数据,可在系统中选择精度要求较高的元(部)件,采用非线性分析方法进行分析。本文的分析结果证明,将非线性分析方法引入工程分析中,可最大限度地模拟结构的真实状态,对于提高工程分析精度,缩短整个光机结构的研制周期、降低研制成本都具有重要意义。

参考文献:

- [1] 辛宏伟. 空间遥感器结构稳定性分析[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003.
XIN H W. Structural stability analysis of space remote sensor[D]. *Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences*, 2003. (in Chinese)
- [2] 叶露, 王肇勋. 大口径长焦距平行光管主反射镜支撑与调整机构的研究[J]. 光学精密工程, 2000, 8(5): 462-465.
YE L, WANG ZH X. Supporting and adjusting for collimator primary mirror with large-aperture and long-focal length[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(5): 462-465. (in Chinese)
- [3] 陈永聪. 基于有限元法的大口径平行光管主反射镜支撑技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2007.
CHEN Y C. Mounting technology of large mirror in collimator based on FEM[D]. *Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences*, 2007. (in Chinese)
- [4] 吴清文, 卢锴, 王家骥, 等. 自重作用下中心支撑主反射镜面形变化研究[J]. 光学精密工程, 1996, 4(4): 23-28.
WU Q W, LU E, WANG J Q, et al. Study on the surface figure changes of primary mirror centrally supported under gravity load[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996, 4(4): 23-28. (in Chinese)
- [5] 庄茁, 等. ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
ZHUANG ZH, et al. *ABAQUS Nonlinear Finite Element Analysis and Examples*[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [6] 姜晋庆. 弹塑性接触问题的分析方法[J]. 光学机械, 1984, (3): 55-63.
JIANG J Q. An analysis method for elastic-plastic contact problems[J]. *Opt. Machinery*, 1984, (3): 55-63. (in Chinese)
- [7] 丁延卫, 吴清文, 姜晋庆. 基于接触理论的空间光学遥感器的动力学求解[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(5): 652-655.
DING Y W, WU Q W, JIANG J Q. Dynamic solving of a space optical sensor based on contact theory[J]. *J. Harbin Institute Technol.*, 2002, 34(5): 652-655. (in Chinese)

作者简介: 辛雪军(1984—), 男, 吉林人, 硕士研究生, 主要从事空间光学仪器 CAD/CAE 方面的研究。

E-mail: cat1921@tom.com