

空间光学遥感器大型分束棱镜支撑结构设计

李宗轩^{1,2}, 金光¹, 张雷¹, 闫勇¹, 解鹏¹, 孔林^{1,2}

(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 100049)

摘要: 分束棱镜是大型空间遥感器分离光束的重要部件。为解决空间遥感器中大型分束棱镜的支撑问题, 对尺寸为 200 mm×200 mm×200 mm 的分束棱镜的支撑结构展开研究。提出基于半运动学支撑和被动温度补偿原理的立方分束棱镜支撑结构, 建立棱镜的接触约束, 模拟边界条件的非线性, 利用非线性有限元方法进行工程分析, 最后分析验证。结果显示, 在自重与±15℃稳态温度变化耦合作用下分束棱镜通光面形误差 PV 值优于 73.2 nm, RMS 值优于 12 nm; 棱镜组件的一阶固有频率达到 183 Hz, 表明该分束棱镜支撑结构方案设计合理, 能够满足空间环境下对其结构刚度与热稳定性的要求。

关键词: 大型分束棱镜; 半运动学支撑; 温度补偿; 接触; 非线性分析

中图分类号: TH122; V447.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)08-2096-06

Support structure of large beam splitter in space optical remote sensor

Li Zongxuan^{1,2}, Jin Guang¹, Zhang Lei¹, Yan Yong¹, Xie Peng¹, Kong Lin^{1,2}

(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 100049, China)

Abstract: Beam splitter is a crucial part of a large space optical remote sensor to split the imaging light into two beams. In order to solve the problem of supporting a large beam splitter of a space camera, the research work on the supporting structure of a large beam splitter with a dimension of 200 mm×200 mm×200 mm was performed. The design of the supporting structure of a large cubic beam splitter based on the philosophy of semi-kinematic mounting and passive thermal compensation was presented. The contact pair constraints were built, the nonlinearity of the boundary condition was simulated and the engineering analysis on the prism assembly utilizing nonlinear finite element methods was performed. The analysis results indicated the surface figure precision of the beam splitter's Light Pass Surface, thus the PV value was less than 73.2 nm and the RMS value was less than 12 nm under the coupling of gravity and ±15℃ stationary temperature change; the first natural frequency of the beam splitter assembly reached 183 Hz. The supporting structure design of the beam splitter is valid, and can satisfy the demands on the structural stiffness and thermal stability in the space environment.

Key words: large beam splitter; semikinematic support; thermal compensation; contact; nonlinear analysis

收稿日期: 2011-12-11; 修订日期: 2012-01-15

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(2007AA12J123)

作者简介: 李宗轩(1986-), 男, 博士生, 主要从事空间光学仪器设计与分析方面的研究。Email: lizongx@126.com

导师简介: 金光(1958-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事星载一体化方面的研究。Email: jing@ciomp.ac.cn

0 引言

在空间光学遥感中,可利用分束棱镜的分光作用将其应用于空间多光谱遥感器的分光系统,以实现多光谱成像等目的^[1]。随着空间光学与空间机械电子学技术的不断进步,空间光学遥感器正朝大口径、高分辨率、多成像谱段、宽覆盖的方向发展。大通光口径的光学系统形成了对大尺寸分束棱镜的特殊需求。

分束棱镜作为空间遥感器的核心部件之一,其通光面的面形精度直接影响光学系统的成像质量。当空间遥感器受到外界力学与热学载荷作用时,分束棱镜的支撑系统对保持棱镜通光面的面形精度有重要作用^[2]。大尺寸的立方分束棱镜的通光孔径大、质量好,因此很难加工成机械接口。设计的立方支撑系统必须在对分束棱镜准确定位并卸载自重的同时,减小空间温度变化对通光面面形精度的影响。一般对尺寸不超过 30 mm 的棱镜采用结构简单的非运动学夹钳支撑结构,但在振动和冲击环境下难以实现对光学件的准确定位。当棱镜尺寸增大时,结构的刚度变小;粘接支撑同样适用于尺寸不大的棱镜,但其存在过约束问题,环境温度大范围变化时不能保证面形精度,热应力过大时甚至会造成棱镜的破裂^[3];柔性支撑具有温度适应范围大的优点,因设计过程复杂,增加了对光学件的加工工作量,成本较高。上述支撑方式并不适用于文中空间遥感器的大型立方分束棱镜。

文中研究的立方分束棱镜外形尺寸为 200 mm×200 mm×200 mm,要求工作环境温度在 20±15℃范围内变化时,棱镜通光面面形精度 $PV < \lambda/8$, $RMS < \lambda/50$ ($\lambda=632.8$ nm),并要求棱镜组件的一阶固有频率大于 150 Hz。结合半运动学支撑与被动温度补偿原理,为大型立方分束棱镜设计了一种基于空间应用的支撑结构,并基于非线性接触理论对棱镜组件结构进行了工程分析,验证了支撑结构设计的合理性,能够满足使用要求。

1 立方分束棱镜支撑结构

1.1 棱镜支撑结构要求

立方分束棱镜在运输、发射期间要承受振动、冲

击等力学载荷;在轨工作期间要受到重力释放,外热流变化等因素的影响。以上各种因素的作用会导致棱镜通光面面形发生变化,从而影响光学系统的成像质量。对空间遥感器中立方分束棱镜支撑系统的设计按照以下基本要求进行^[4-7]:(1)良好的结构刚度和强度;(2)很好的热稳定性;(3)极高的动态刚度及合理的模态分布;(4)合理的约束;(5)空间定位准确;(6)便于装配、检验。

1.2 材料的选择

根据以上原则,综合考虑各种材料的密度、屈服强度、热胀系数、技术成熟度与经济性等指标,棱镜材料选用加工技术与使用经验成熟,研磨抛光周期较短的 K9 光学玻璃;支撑结构件采用密度低、强度高、加工性能良好、热胀系数较低的钛合金材料(ZTC4);衬垫采用化学稳定性好、热胀系数较大,具有耐高、低温与自润滑特性的聚四氟乙烯塑料(PTFE)。以上 3 种材料的属性参数见表 1。

表 1 棱镜组件中各部件的材料属性

Tab.1 Material properties of the prism assembly

Material	K9	ZTC4	PTFE
Density /kg·m ⁻³	2 470	4 400	2 180
Elastic modulus /GPa	61.7	114	0.5
Poisson ratio	0.2	0.29	0.46
CTE /10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	3.5	8.9	100

1.3 立方棱镜的半运动学支撑方式

棱镜的半运动学支撑方式是指依据运动学原理布置的 6 处小平面接触来完全约束棱镜的 6 个空间自由度,而不产生过约束,从而达到对棱镜运动学定位支撑的目的^[3]。

立方分束棱镜的半运动学支撑形式见图 1。其中,热变形前的棱镜用实线轮廓表示;热变形后的棱镜用虚线轮廓表示;6 处小平面凸台属于棱镜支撑结构,分成 3 组分别置于 3 个相互正交的平面上。同一平面内的一组凸台要求具有高的平面度,不同平面内的两组凸台要求具有高的垂直度。 $X-Z$ 平面内的 3 处凸台约束了棱镜沿 Y 轴的平动以及绕 Z 轴和 X 轴的转动; $Y-Z$ 平面内的 2 处凸台约束了棱镜沿 X 轴的平动以及绕 Y 轴的转动; $X-Y$ 平面内的一处凸台约束了棱镜沿 Z 轴的平动。棱镜在预紧力的作用

下始终与 6 处凸台保持接触,从而由运动学原理确定棱镜的空间位置。

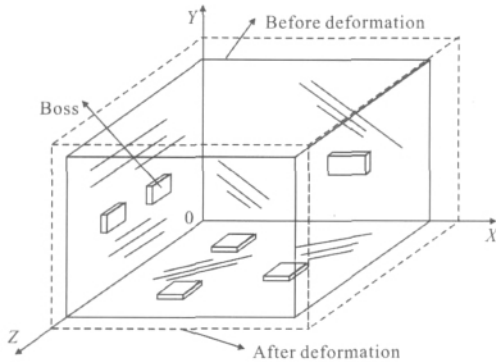


图 1 立方棱镜的半运动学支撑

Fig.1 Semi-kinematic mounting of a cubic prism

棱镜的主体支撑结构设计采用底板加压板的“三明治”形式,如图 2 所示。棱镜置底板与压板之间,在底板与压板间用 4 根支撑杆相连接;在底板上

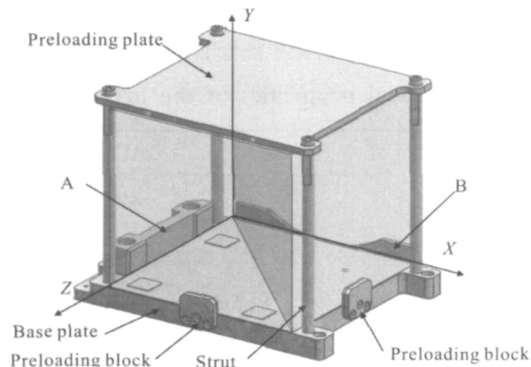


图 2 棱镜组件的结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the prism assembly structure

加工有 3 处共面凸垫与棱镜接触,作为半运动学支撑的第 1 个定位面;棱镜侧面的 2 个正交方向上分别布置挡块 A 和挡块 B,提供半运动学支撑的第 2 与第 3 定位面;在挡块 A 和 B 相对的棱镜侧面设置两个压片,以保证棱镜与半运动学定位面始终保持接触;压片与棱镜之间采用 2mm 厚的 PTFE 衬垫以避免应力集中现象的产生;衬垫与棱镜之间、衬垫与压片之间使用环氧胶固结以增强结构刚度。

为了考察棱镜的支撑结构是否满足空间环境的使用要求,实验分析计算了棱镜组件在 $\pm 15^\circ\text{C}$ 稳态温度变化与 G_x 、 G_y 、 G_z 3 个正交方向自重分别耦合作用情况下的镜面面形精度。得到棱镜通光面面形 PV 值与 RMS 值如表 2 所示。

表 2 在自重与 $\pm 15^\circ\text{C}$ 稳态温度变化耦合作用下的棱镜面形精度分析结果

Tab.2 Surface figure precision by gravity & $\pm 15^\circ\text{C}$ temperature change coupling

Load case/ $^\circ\text{C}$	PV/nm	RMS/nm
$G_x,+15$	485.5	53.36
$G_x,-15$	485.7	53.37
$G_y,+15$	485.7	53.38
$G_y,-15$	485.5	53.36
$G_z,+15$	485.7	53.37
$G_z,-15$	485.6	53.37

由表 2 可知,棱镜通光面的面形精度 RMS 不能达到优于 $12\text{ nm}(\lambda/50)$ 的光学设计指标要求。因为支撑结构的热胀系数大于棱镜的热胀系数,当棱镜组件受热膨胀时,支撑结构的热膨胀变形量大于棱镜的变形量。在棱镜与支撑结构的接触部位使用环氧胶固结后,此处发生了支撑结构牵扯棱镜表面的现象,产生了较大的拉应力,导致棱镜面形精度下降;同样在棱镜受冷收缩时,支撑结构的收缩变形量大于棱镜的收缩变形量,支撑结构采取了夹持棱镜的结构形式,对棱镜产生较大的压力,导致面形精度下降。因此,必须对结构设计进行改进,采取合适的途径保证棱镜在热载荷作用下能够满足光学设计提出的面形精度要求。

1.4 棱镜支撑的被动温度补偿设计改进

立方分束棱镜在半运动学支撑下,要在 3 个正交方向释放自身的热变形以保证通光面的面形精度。如果支撑结构在 3 个正交方向上对棱镜的约束刚度过大,棱镜会产生较大的热应力,导致镜面面形超差;约束刚度过小,则会导致结构的刚度整体下降,动力学性能降低。

采用温度补偿方法是解决以上矛盾的一种途径。选择热胀系数较大的材料作为补偿片,置于热胀系数相差较大的光学元件与结构件之间,用补偿片的大变形量来补偿光学元件变形量的不足^[8]。文中在结构设计及材料选择方面采用温度补偿原理,利用初始结构设计时布置的 3 块 PTFE 衬垫作为补偿片,进行热补偿设计。图 3(a)为支撑结构示意图,图 3(b)为

补偿片厚度计算示意图。

根据图 3(b)得出棱镜在 3 个正交方向上热补偿片厚度的表达式为:

$$L_1 = \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{\alpha_1 - \alpha_3} L_2 \quad (1)$$

式中: L_1 为补偿片的厚度; α_1 为补偿片的热胀系数; L_2 为棱镜的单边长度; α_2 为棱镜材料的热胀系数; α_3 为在支撑结构在该热变形方向的线性尺寸。

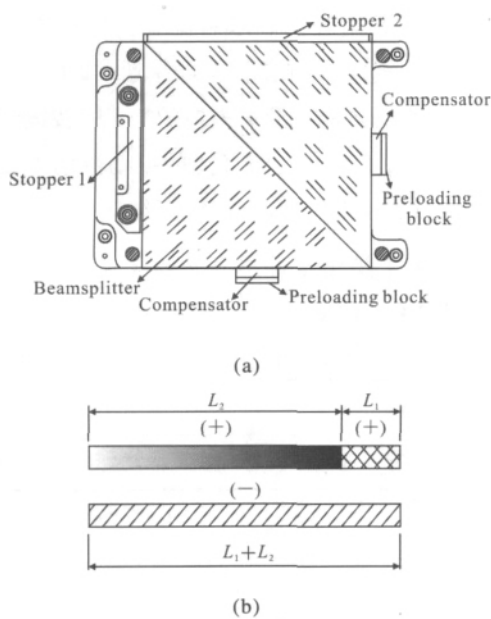


图 3 棱镜支撑结构被动热补偿示意图

Fig.3 Schematic diagram of the passive thermal compensation

由公式(1)可知, α_1 越大, 支撑结构材料的热胀系数 α_3 就越小, 随之 L_1 变小, 因而结构尺寸越小, 刚度越大。根据支撑结构设计材料与选择, 重新设计了在压片、压板与棱镜之间的 3 处 PTFE 衬垫的厚度, 得到 $L_2=9.5\text{mm}$ 。

在采取热补偿措施的同时, 考虑到棱镜与支撑结构因为热胀系数的差异而产生热变形量的不同, 取消在棱镜接触部位的环氧胶固结, 允许棱镜在 3 个正交方向沿接触面与支撑结构产生微小的相对滑移, 从而减小支撑结构对棱镜表面的牵扯。改进后支撑结构的特点如下:

- (1) 支撑结构不会遮挡光学表面的圆形通光孔径;
- (2) 棱镜为半运动学支撑, 不使用胶粘剂固结光

学件, 在外力与热载荷作用下通光面变形较小;

(3) 在棱镜受到振动与冲击时, 各凸垫能为棱镜保持正确的位置提供定位面;

(4) 在环境温度变化时, 补偿片可以补偿棱镜与支撑结构之间热变形的差异。

2 分析验证

2.1 棱镜组件的边界条件非线性

在工程有限元分析中, 对零件间的连接即边界条件的处理往往采用线性简化处理, 即认为热载荷与系统的响应之间为线性关系。而在真实的物理模型中, 结构的刚度会随形变而改变, 存在所谓的非线性问题^[9]。非线性问题可以分为以下 3 种类型: 材料非线性; 几何非线性; 边界条件的非线性。

真实物理模型中, 棱镜组件在外载荷作用下各部件均发生小位移弹性形变, 不考虑材料非线性与几何非线性, 主要考虑边界条件的非线性, 即接触问题。在设计立方分束棱镜半运动学支撑结构中, 支撑结构与棱镜间共有 11 处接触面, 由于支撑结构的热变形量与棱镜的热变形量的微小差异, 棱镜表面与相接触的小平面凸垫之间会发生相对滑移。模拟棱镜与支撑结构在接触部位的非线性边界条件是文中实验分析的一项关键技术, 也直接影响支撑结构设计、分析、验证结果的合理性。

2.2 棱镜组件的接触非线性静力学分析验证

为真实模拟棱镜与支撑结构边界条件的非线性问题, 使用 ABAQUS/Standard 隐式非线性有限元解算器进行非线性稳态静力学求解。ABAQUS/Standard 依据 Newton-Raphson 算法求解非线性问题, 它将计算过程分为多个载荷增量步, 在每个增量步结束时确定近似的平衡构形, 得到可接受的解后再求解下一增量步, 所有增量步响应的总和就是非线性分析的近似解^[10]。

通过 Hypermesh 建立棱镜组件的接触非线性分析模型, 将棱镜划分为较粗的网格, 把表面作为主面 (master surface); 将支撑结构划分为较细的网格, 把接触面作为从面 (slave surface)。在棱镜与相邻零件接触部位建立接触对 (contact pair), 并设置小滑移模式, 面对面离散处理, 产生接触对共计 11 处, 如图 4 所示。将模型提交 ABAQUS/Standard 隐式非线性有限元解算器进行非线性稳态静力学求解。计算了

棱镜组件在 $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 稳态温度变化与 X 、 Z 、 Y 3 个正交方向自重耦合作用情况下的镜面面形精度值。图 5 所示为位移变形云纹图。计算得到的镜面面形 PV 值与 RMS 值数据见表 3。

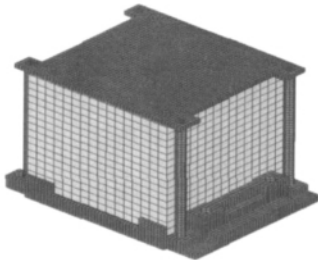


图 4 棱镜组件的非线性分析有限元模型

Fig.4 Nonlinear FEA model of the prism assembly

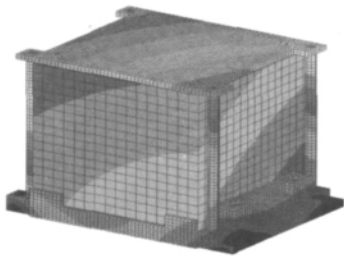


图 5 棱镜组件的非线性分析位移云纹图

Fig.5 Deformation fringe of nonlinear FEA results

表 3 通光面在自重与 $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 稳态温度变化作用下的面形精度(非线性分析)

Tab.3 Surface figure precision caused by gravity & $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature change

Load case/ $^{\circ}\text{C}$	PV/nm	RMS/nm
$G_x,+15$	64.3	8.21
$G_x,-15$	60.6	8.20
$G_y,+15$	73.2	8.10
$G_y,-15$	66.2	9.95
$G_z,+15$	57.9	7.68
$G_z,-15$	66.5	8.60

在图 5 中,可以明显看出在棱镜与支撑结构中的挡块 A、挡块 B 接触的部位,变形云纹图并非为连续谱,这与所建立的非线性接触约束相符合,即棱镜与支撑结构在接触部位允许相对滑移。而由表 3 可知,与没有采取热补偿设计并在棱镜支撑接触处使用环氧胶粘接的原有结构设计相比,现有改进方案在 $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 稳态温度变化与自重耦合作用

下,棱镜通光面面形有明显改善,面形精度 RMS 值优于 $12\text{ nm}(\lambda/50)$,满足了光学设计对棱镜支撑结构的要求。

2.3 基于接触理论的模态分析验证

设计的分束棱镜组件不仅需要具有良好的静态稳定性与热适应性,还需要具有良好的动态特性。为了验证结构的动态刚度,建立了棱镜组件的接触非线性约束模态分析模型,进行基于接触理论的动力学求解。将模型文件提交 Abaqus/Standard 解算器求解棱镜组件的前 3 阶约束模态,求解的前 3 阶模态结果见表 4。可知棱镜组件的 1 阶固有频率达 183 Hz ,其振型为上压板与 4 根连接杆沿 Y 方向的振动。棱镜组件具有足够的刚度,不会在运载环境的振动激励下发生共振,具有较高的动态结构刚度,满足结构设计的要求。

表 4 棱镜组件前 3 阶约束模态

Tab.4 First three restricting modality of prism assembly

Primary modal direction	Y	X	RZ
Frequency/Hz	183	189	299

3 结 论

根据光学设计要求,针对立方分束棱镜大体积、大质量的特殊结构形式,提出利用半运动学支撑原理与被动温度补偿原理进行大型立方分束棱镜的支撑结构设计,选取合适的支撑形式与结构材料,在满足结构静态刚度与动态力学特性要求的前提下,减小外界环境温度变化对棱镜通光面面形精度的影响。通过对设计的棱镜组件进行接触非线性静力学与动力学实验分析,验证了设计的合理性,在自重与 $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 稳态温度变化耦合作用下,棱镜通光面面形精度 PV 优于 73.2 nm ,RMS 优于 12 nm ,1 阶固有频率达到 183 Hz ,满足光学设计与结构刚度的要求。

目前,该棱镜组件中的立方分束棱镜正在光学车间磨制加工,支撑结构的机械零件已经设计完毕,正在加工制造中。加工完成后可以对棱镜组件进行检测,检验棱镜支撑结构的热稳定性以及非线性有限元分析的准确性。

参考文献:

- [1] Lin Deluo. Development of the CCD camera for CBERS-1 Satellite [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2001, 22(3): 4-8. (in Chinese)
林德萃. CBERS-1 卫星 CCD 相机的研制[J]. 航天返回与遥感, 2001, 22(3): 4-8.
- [2] Wang Zhongsu, Zhai Yan, Mei Gui, et al. Design of flexible support structure of reflector in space remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1833-1841. (in Chinese)
王忠素, 翟岩, 梅贵, 等. 空间光学传感器反射镜柔性支撑的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1833-1841.
- [3] Yoder Jr P R. *Opto-Mechanical Systems Design* [M]. 3rd ed. US: SPIE Press, 2006: 373-378.
- [4] Zhang Xuejun, Li Zhilai, Zhang Zhongyu. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 577-582. (in Chinese)
张学军, 李志来, 张忠玉. 基于 SiC 材料的空间相机非球面反射镜结构设计 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 577-582.
- [5] Xin Hongwei, Yang Jinsong, Gao Minghui. Support design for secondary mirror of high resolution space telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (9): 1724-1729. (in Chinese)
辛宏伟, 杨近松, 高明辉, 等. 高分辨力空间传感器次镜支撑设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1724-1729.
- [6] Fan Lili, Zhang Jinxu, Yang Fei, et al. Impact of the supports of primary mirror in equatorial telescope on its surface deformation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1):173-177. (in Chinese)
范李立, 张景旭, 杨飞, 等. 极轴式望远镜主镜支撑结构对镜面变形的影响 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 173-177.
- [7] Liu Hua, Liu Weiqi, Feng Rui, et al. Novel design and analysis of a flexible mechanism of moving mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (1): 184-189. (in Chinese)
柳华, 刘伟奇, 冯睿, 等. 新型全柔性动镜机构的设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 184-189.
- [8] Shao Jun. Investigation on supporting structure of spacial reflector [J]. *Infrared*, 2006, 27(4): 36-41. (in Chinese)
邵君. 空间反射镜支撑结构研究概述 [J]. 红外, 2006, 27 (4): 36-41.
- [9] Chen Changzheng, Xin Hongwei, Lv Qingtao, et al. Reflector subassembly engineering analysis based on combined nonlinear and linear method [J]. *Computer Simulation*, 2008, 25(3): 323-326. (in Chinese)
陈长征, 辛宏伟, 吕清涛, 等. 某反射镜组件的线性与非线性工程分析[J]. 计算机仿真, 2008, 25(3): 323-326.
- [10] Shi Yiping, Zhou Yurong. *Comprehensive Examples for ABAQUS Finite Element Analysis* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese)
石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.