

光机结构的轴向一致性可控方法研究

孙向阳^{1,3} 张国玉^{1,2} 段洁¹

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022
² 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022
³ 长春大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 针对轴向预载随结构的热变形改变而导致光机系统特性失效的设计难点, 提出了一种光机结构轴向一致性可控方法。建立光机结构的热效应模型, 分析热变形与轴向预载的关系, 通过与传统轴向压紧结构的热分析比较, 设计了一种轴向预载与温度变形一致可控的挠性构件; 对不同结构参数挠性构件的变形分析表明, 所设计的挠性构件在温度变化时具有很高的轴向变形可控性; 建立了轴向变形量 $\Delta\delta$ 与挠性构件参数的数学模型, 给出具体结构参数的设计方法。将所研究的挠性构件引入星模拟器的结构设计中, 实际测试结果表明光机系统具有很好的常温特性, 验证了所提光机结构轴向一致性可控方法的有效性。

关键词 光学设计; 光机结构; 预载; 热变形; 挠性构件

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0116001

Investigation of Controllable Axial Conformity for Opto-Mechanical Structure

Sun Xiangyang^{1,3} Zhang Guoyu^{1,2} Duan Jie¹

¹ College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² Key Laboratory of Optoelectronic Measuring-Controlling and Optical Information Transmitting, Ministry of Education, Changchun, Jilin 130022, China

³ Electronic and information Engineering, Changchun University, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to solve design difficulties about failure of opto-mechanical system features due to axial pre-loading caused by thermal deformation, a controlled design method with axial conformity for opto-mechanical structure is proposed. The relationship between the thermal deformation and axial pre-loading is got based on the analysis of the thermal effect model. By comparing with the thermal analysis in the conventional axial pressure structure, a flexible element with controllable conformity between the axial pre-load and the thermal deformation is designed. The deformation analysis of the flexible elements with various model parameters showed that there is controllable conformity for the axial thermal deformation when the temperature is changed. A practice design method is given to built a model to calculate the axial thermal deformation and parameters for the flexible element. The controlled design method of axial conformity is used to design the construction of the star simulator. The measured results reveal that the method is feasible and effective.

Key words optical design; opto-mechanical structure; pre-loading; thermal deformation; flexible element

OCIS codes 120.4570; 120.4880; 220.4880; 220.4830; 220.4610

1 引言

光机系统设计中的光学元件与金属零件各参数

都是在常温条件(一般指 22 °C)下给出的, 当其工作条件变化时, 各组件结构尺寸将有一定改变, 从而造

收稿日期: 2011-07-15; **收到修改稿日期**: 2011-09-02

作者简介: 孙向阳(1978—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事航天器地面模拟技术与光电检测技术等方面的研究。

E-mail: xys0321@126.com

导师简介: 张国玉(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光电检测与航天器模拟设备等方面的研究。

E-mail: zh_guoyu@yahoo.com.cn

成包括配合间隙、光机零件接触力等设计参数的变化,最终必将影响到光机系统的特性,例如系统的焦距、准直性等^[1]。以实际设计的某高精度星模拟器为例,其光机系统为大尺寸、长焦距、大视场结构,但为保证地面标定的精度要求,其整体工作时处于特定温度环境下的高仿真模拟空间,所以温度条件所造成的光机性能变化在设计过程中应给予重点考虑。

要保持光学元件自身特性的稳定,为使因结构变形而产生的应力不对光学零件产生影响,就需随时改变各组件的变形量,有效平衡组件间的接触力,即控制光机结构的轴向组件接触力与热变形,实现一致性变化。本文通过分析温度变化对光机结构的径向与轴向影响,以及造成光机系统轴向预载变化的规律,提出一种光机结构的轴向一致性可控方法,并结合有限元分析手段,给出参考数据,并针对所设计的大尺寸星模拟器光机结构进行轴向一致可控设计,以验证所提方法的正确可行。

2 光机结构的热变形模型与理论分析

设光学材料和镜筒的热膨胀系数关系为 $\alpha_G < \alpha_M$, 安装温度为 T_1 , 工作温度范围为 $T[T_{\min}, T_{\max}]$, 温度差为 ΔT , 透镜和镜筒等零件均为沿光轴旋转对称, 系统安装时处于常温状态下。

2.1 温度变化对光机结构的径向影响

当温度下降时, 镜筒与光学元件差分收缩, 镜筒内壁将产生切向应力; 当温度上升时, 光学元件与镜筒之间的理论径向间隙将会增大, 导致透镜在无轴向约束下发生偏转而产生系统误差。

2.2 温度变化对光机结构轴向预载的影响

当温度升高时, 金属组件因其材料的热膨胀系数比透镜材料的大, 将会产生更大的膨胀, 装配温度 T_1 环境下确定的轴向预载随之变小, 升高一定温度时, 预载消失; 当温度降低时, 镜筒相对光学元件收缩, 机械界面与光学表面接触应力增大, 造成光学元件表面变形或破裂, 使光学性能失效。设光机结构中轴向预载 P 在温度改变时的变化值为 ΔP , 则有

$$\Delta P = K_1 \Delta T, \quad (1)$$

式中 K_1 为温度灵敏度因子, 即设计预载随温度变化的速率。

确定相关设计的 K_1 值后, 就能评估出任何温度下的实际预载, Paul R. Yoder^[2] 曾提出了透镜系统的 K_1 因子式

$$K_1 = \frac{-\sum_1^n (\alpha_G - \alpha_M) t_i}{\sum_1^n C_i}, \quad (2)$$

式中 C_i 称为零件的复杂度, 在光机系统中一块透镜的 $C_i \approx [2t_E / (E_G A_G)]_i$, 镜筒壁的 $C_i \approx [t_E / (E_M A_M)]_i$, 隔圈的 $C_i \approx [t_S / (E_S A_S)]_i$; $(t_E)_i$ 和 $(t_S)_i$ 为透镜元件与隔圈在彼此接触高度上对应的轴向厚度; E_G, E_M 和 E_S 分别为透镜、镜筒和隔圈材料的杨氏模量; A_G, A_M 和 A_S 分别是透镜、镜筒和隔圈受压区域的横截面积。

理想的情况就是通过 K_1 值来确定轴向预载的大小, 使系统组件在其工作温度范围 $[T_{\min}, T_{\max}]$ 内都保持常温下的轴向预载。但是任何一项机械结构的变化都会影响 K_1 值, 要建立轴向预载随温度变化与估算 K_1 值的模型比较困难。此时考虑应用光机设计手段有意地控制 K_1 值, 将对 K_1 值影响因素都转变为次要的问题, 即在结构设计中通过针对性的设计来减弱或消除温度变化对 K_1 值的影响, 使轴向具有合适的特性, 于是引入轴向一致性设计思想。

3 轴向一致性可控方法研究

光机结构的轴向一致性设计就是尽量让设计特性符合线性, 使温度因素造成外形尺寸的变化不过多地改变实际在组件上的轴向预载, 以有效降低透镜组件的 K_1 值, 从而在温度变化过程中有效控制预载变化量。

3.1 传统轴向预载控制方法

当设计的光机结构口径大, 且在温度变化时仍要求具有很高的光学特性, 机械结构的轴向公差、倾斜公差以及偏心公差就需严格限制。采用传统的螺纹压圈时, 其制造和装配精度就很难保证且温度改变时无法精确估算预载, 此时可考虑采用如图 1 所示的弹性压圈结构, 通过弯曲元件提供可控相对运动。

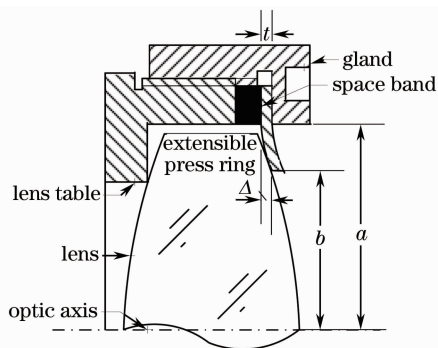


图 1 弹性压圈压紧结构

Fig. 1 Flange plates pressing structure

轴向偏转 Δ 与总预载 P 之间的线性关系^[3]可表示为

$$\Delta = (K_A - K_B)(P/t^3), \tag{3}$$

式中

$$K_A = 3(m^2 - 1)[a^4 - b^4 - 4a^2b^2 \ln(a/b)] / (4\pi m^2 E_M a^2),$$

$$K_B = \frac{3(m^2 - 1)(m + 1)[2 \ln(a/b) + (b^2/a^2) - 1][b^4 + 2a^2b^2 \ln(a/b)] - a^2b^2}{4\pi m^2 E_M [b^2(m + 1) + a^2(m - 1)]},$$

P 为安装预载, t, a 和 b 分别为弹性压圈偏转部分的厚度、外侧半径和内侧半径, m 为材料泊松比的倒数 $1/\nu_M$, E_M 为弹性压圈的杨氏模量。

合理选取参数 t, a 和 b , 在装配过程中通过隔圈研磨调整厚度, 便可在透镜与压件间产生预期的法兰盘偏转。

3.2 轴向预载可控方法

采用以上的弹性压圈结构可以达到控制安装预载的目的, 但缺点是温度变化时不能实时调整变形量以控制预载变化, 理想的压紧结构应满足随温度变化可实时调整其轴向变形量, 实现真正的轴向一致性可控。通过改进传统的弹性压圈结构, 针对光机结构中凸透镜和凹透镜给出两种挠曲结构, 如图 2 所示。

此挠曲压圈将隔圈与弹性压圈两种结构合并, 选择可研磨材料, 预载量仍可采用(3)式进行估算, 主要参数如图 3 所示, a, b 分别为挠性构件的最小内径和最大内径, t 为挠性处厚度, c 为壁厚差, 以控制变形方向。

3.2.1 挠性构件的热分析

在变温条件下, 单独分析两种挠性结构的轴向

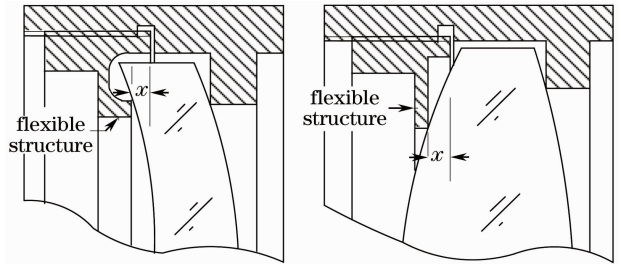


图 2 接触透镜表面的挠曲结构

Fig. 2 Flexible structure for lens

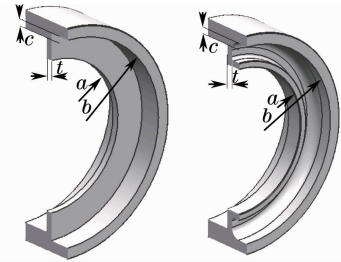


图 3 挠曲构件结构参数

Fig. 3 Structure parameters of flexible element

变形, 由于挠性结构两侧存在壁厚差, 温度的升高与降低使得挠性结构部分发生不同方向偏转^[4,5]。图 4(a) 为温度在 $22\text{ }^\circ\text{C} \sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 的变形; 图 4(b) 为温度在 $-30\text{ }^\circ\text{C} \sim 22\text{ }^\circ\text{C}$ 的变形。

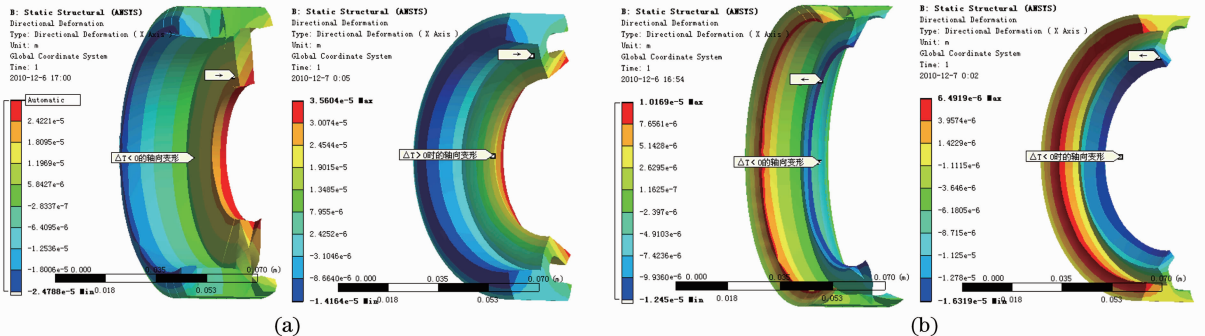


图 4 挠曲结构的温度变形。(a) $\Delta T > 0$ 时的挠曲结构轴向变形; (b) $\Delta T < 0$ 时的轴向变形

Fig. 4 Thermal deformation of flexible structure. (a) Axial deformation of $\Delta T > 0$; (b) axial deformation of $\Delta T < 0$

当 $\Delta T > 0$ 时, 挠性结构部分向压圈壁薄的一侧偏转, 轴向变形会消除由镜筒与透镜膨胀系数差异而造成的间隙增大, 防止由升温造成的接触面脱离; 当 $\Delta T < 0$ 时, 挠性结构部分向压圈壁厚的一侧偏转, 其变形会降低由收缩差值所造成的接触面应力

过大的风险。可见此挠曲构件具有随温度可控变形的特性, 参考(3)式合理设计出其结构参数, 就可实现理想的轴向一致变形可控。

表 1 为一组挠曲压圈的结构参数, 图 5 为采用 8 种结构尺寸 35# 钢的挠性构件在不同温度下的轴

向变形量曲线。

表 1 挠曲构件的结构参数

Table 1 Structure parameters of flexible element

Parameter	1	2	3	4	5	6	7	8
a / mm	110	100	90	80	70	60	50	40
b / mm	120	110	100	90	80	70	58	46
t / mm	3	3	3	3	2.5	2.5	2	1.5
c / mm	3	3	3	3	2	2	2	2

由图 5 可以看出,给出的 8 种不同参数的挠性构件轴向变形量与温度均具有良好的线性关系,说明所设计的挠性构件对轴向一致性具有很高的可控性。

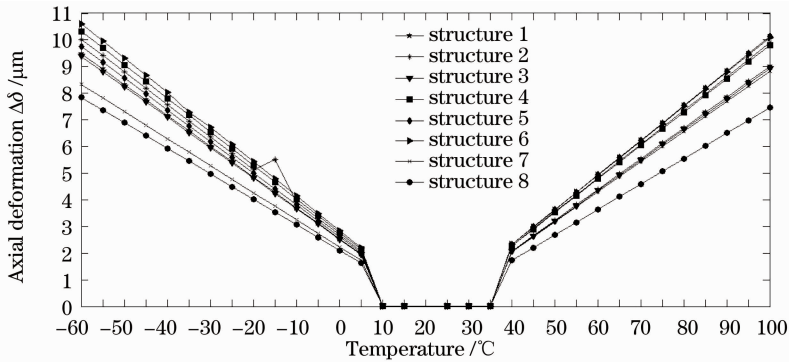


图 5 各温度下不同参数的轴向变形量 $\Delta\delta$

Fig. 5 Axial deformation $\Delta\delta$ in changing temperature

3.2.2 挠性构件的参数设计

运用分析软件估算工作温度范围内轴向最大变形量 $\Delta\delta_{\max}$,利用分析所得到的 $\Delta\delta$ 与参数 a, b, c, t 的数据组,应用 Matlab 软件拟合出与 $\Delta\delta$ 之间的函数关系(a, b, c, t 参数对变形量 $\Delta\delta$ 的影响相互独立),可表示为

$$\begin{cases} \Delta\delta_T = K_a a + B_a \\ \Delta\delta_T = K_b b + B_b \\ \Delta\delta_T = K_c c + B_c \\ \Delta\delta_T = K_t t + B_t \end{cases}, \quad (4)$$

实际设计中,参数 a 作为有效光学口径首先被确定下来,(4)式转化后可得到参数 b, c, t 的值

$$\begin{cases} b = [K_a a + (B_a - B_b)] / K_b \\ c = [K_a a + (B_a - B_c)] / K_c \\ t = [K_a a + (B_a - B_t)] / K_t \end{cases}, \quad (5)$$

(4)式和(5)式中的 $K_i (i=a, b, c, t)$ 为参数的线性比例系数。

光机系统工作温度 $T \in [T_{\min}, T_{\max}]$ 与有效光学口径 a 确定后,挠性构件可应用此方法进行设计。

4 大尺寸星模拟器的轴向一致性设计

将挠性构件引入到所研究的大尺寸星模拟器设计当中,结合星模拟器的工作环境条件,建立挠性结构的分析模型,比较普通压圈安装结构和挠性压圈安装结构的分析结果,从而验证所提方法的正确性^[6~9]。

4.1 星模拟器的轴向压紧装置初始设计

镜筒材料选择铝合金,透镜材料为 K9,螺纹压圈与镜筒材料相同,调整隔圈为 35# 钢材,其具体参数如表 2 所示,其中 E_M 为杨氏模量,SY 为屈服应力。

表 2 零件材料的机械特性

Table 2 Mechanical properties of partmaterials

Materials	$\alpha / (10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C})$	$E_M / (10 \text{ GPa})$	SY / 10^3	ν_M	$\rho / (\text{g}/\text{mm}^3)$	$k / [\text{W}/(\text{m}\cdot\text{k})]$
2A12	23.4	7.17	10.3~50.3	0.33	2.79	142~179
K9	7.1~8.3	8.00	10.3~50.3	0.275	2.51	1.11
35#	11.9	20.7	28.3~31.0	0.287	7.75	46.4

星模拟器的光学系统由 4 片透镜组成,运用 Ansys 软件对采用传统矩形截面压圈组装的星模拟器光机结构进行温度效应分析。图 6(a),(b)分别

为温度由 22 °C 到 -60 °C 降温和到 100 °C 升温时的镜面接触应力。

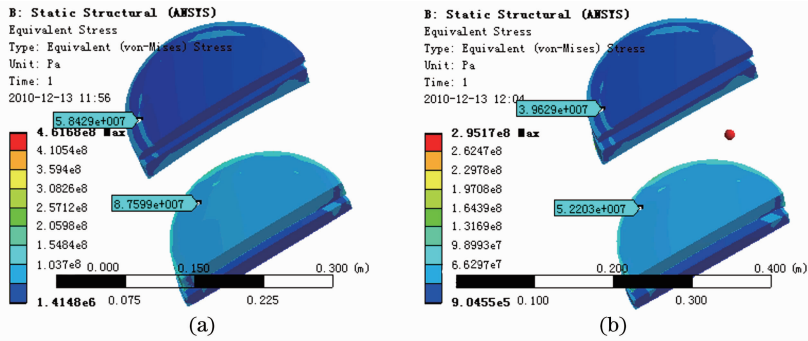


图6 采用普通压圈的透镜组接触应力。(a) $\Delta T < 0$ 的透镜接触应力；(b) $\Delta T > 0$ 的透镜接触应力

Fig. 6 Contact stress of lens with common pressing ring. (a) Contact stress of $\Delta T < 0$; (b) contact stress of $\Delta T > 0$

从分析结果看出,在降温或升温时,透镜中的第二、三片透镜横截面表现出了较大的应力分布,最大接触应力可达 8.7599×10^7 Pa,图 6(a)表明光机结构对温度变化较敏感,易造成光学特性失效,即光机结构的轴向一致性控制较差,因此考虑采用所提出的挠性构件。

4.2 星模拟器光机结构的轴向一致性设计

4.2.1 光学透镜组的受力分析

用挠性构件代替传统压圈,同等工况下对星模拟器整体结构进行热效应分析,分析结果如图 7 所示。可看出第二片透镜边缘处存在接触应力,最大

约为 5.2926×10^7 Pa,图 7(a)所示为可能存在径向接触,应进一步优化参数,但与传统压圈结构相比,透镜组的有效通光表面无明显接触应力,表明光机结构的特性对温度变化不敏感。

4.2.2 采用轴向一致性设计的星模拟器性能测试

在仿真实验舱内,分别对采用传统矩形截面压圈和采用轴向一致性理论设计的大尺寸星模拟器样机进行实际温差测试 ($-30^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$),重点是对影响光学系统核心参数——出射精度的满口径准直度和焦距变化量进行实测,测试结果如图 8,9 所示。

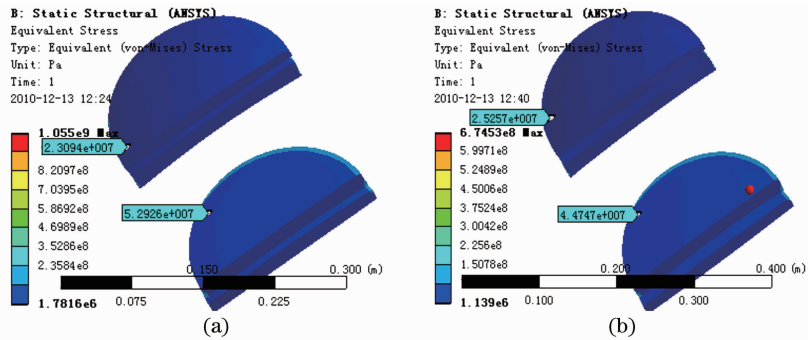


图7 采用挠性构件的透镜组接触应力。(a) $\Delta T < 0$ 的透镜接触应力；(b) $\Delta T > 0$ 的透镜接触应力

Fig. 7 Contact stress of lens with flexible element. (a) Contact stress of $\Delta T < 0$; (b) contact stress of $\Delta T > 0$

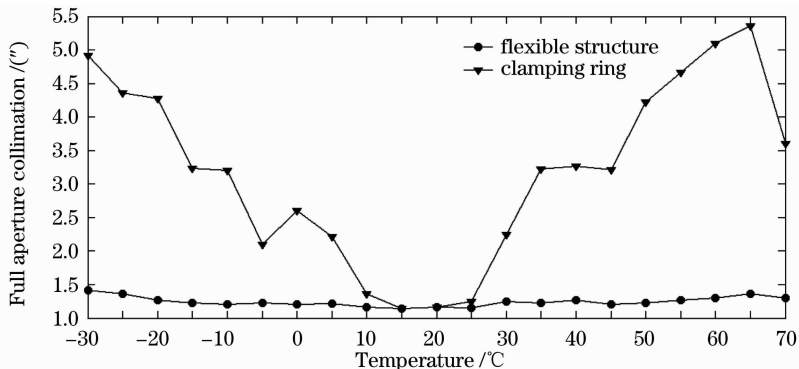


图8 不同温度下的满口径准直性测试结果

Fig. 8 Full aperture collimation at different temperatures

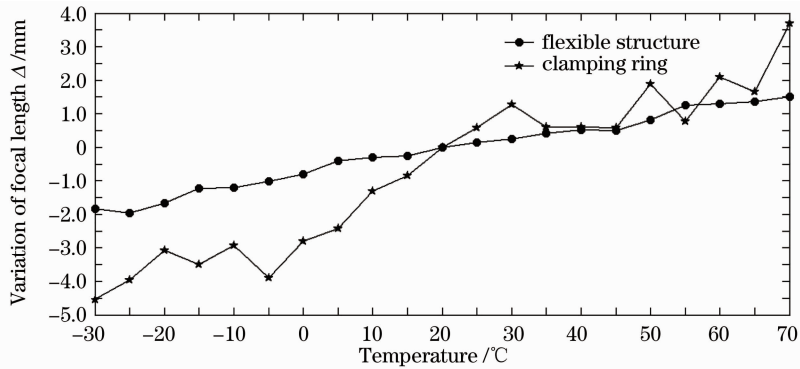


图 9 不同温度下的实际焦距测试结果

Fig. 9 Focal length at different temperatures

从实际测试结果看出,对于采用挠性构件所设计的光机系统来说,温度变化较大时满口径准直性和焦距变化量与采用传统矩形截面压圈时相比优势明显,表明具有相对稳定的光机特性,达到了光机结构设计的最终目的。

5 结 论

根据温度与光机结构径向应力、轴向预载的变化关系,设计出一种用于保护光机系统光学特性且可实现温度变化与轴向变形一致控制的挠性结构。给出 8 种结构尺寸的挠性构件温度变形曲线,并推算出挠性构件的结构参数 a 、 b 、 c 、 t 的具体方法。采用此方法设计的星模拟器结构热分析表明,其能较好地消除温度变化造成的光学透镜表面接触应力。

参 考 文 献

- 1 Zhang Hongpo, Huang Li. Research of a point target simulator [J]. *Optical Instruments*, 2008, **30**(6): 74~76
张红坡,黄莉.点源目标模拟器研制[J].*光学仪器*,2008,**30**(6):74~76
- 2 Jr, Paul R. Yode. Poto-Mechanical System Design[M]. 3rd ed. Boca Raton (US): SPIE, 2006: 179-180, 726-728
- 3 R. J. Roark. Formulas for Stress and Strain[M]. 3rd ed., Mc Graw-Hill, New York, 1958

- 4 Fan Shuwei, Zhou Qinghua, Li Hong. Research of optimization design of groove diffraction grating profile parameters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3133~3139
樊叔维,周庆华,李红.槽型衍射光栅结构参数优化设计研究[J].*光学学报*,2010,**30**(11):3133~3139
- 5 Hu Zhigang, Xu Cheng, Guo Kai. A new method of dynamics optimization design for small-arms system design[J]. *Journal of China Ordnance*, 2005, **26**(2): 150~153
胡志刚,徐诚,郭凯.一种枪械总体动态优化设计的新方法[J].*兵工学报*,2005,**26**(2):150~153
- 6 Cao Weinan, Xie Guilian, Gong Shuguang *et al.*. Application research of homogenization theory in the structural optimization of perforated revolving drum[J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, **7**(9): 937~940
曹尉南,谢桂兰,龚曙光等.均匀化理论在开孔转鼓结构优化中的应用研究[J].*中国机械工程*,2006,**7**(9):937~940
- 7 Zhang Qunyan, Zhou Zhen, Feng Lishuang *et al.*. Research on optical structure of the novel micron-grating accelerometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1796~1799
张群雁,周震,冯丽爽等.新型微米光栅加速度计光学结构研究[J].*光学学报*,2010,**30**(6):1796~1799
- 8 Zhang Rui, Chen Zhiyuan, Yang Shimo *et al.*. Optimize and redesign the primary mirror supporting system of space solar telescope[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(1): 23~26
张锐,陈志远,杨世模等.空间太阳望远镜主镜支撑结构的优化设计[J].*光学技术*,2007,**33**(1):23~26
- 9 Wang Yang, Zhang Jinxu. Study on real-time distance detection based on monocular vision technique [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(1): 107~113
王洋,张景旭.大口径望远镜支撑优化分析[J].*光电工程*,2009,**36**(1):107~113

栏目编辑:胡冰