

文章编号: 1003-501X(2010)12-0001-05

# 大口径主反射镜支撑结构设计

关英俊<sup>1</sup>, 辛宏伟<sup>2</sup>

(1. 长春工业大学 机电工程学院, 长春 130012;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘要:** 大口径空间反射镜支撑技术是空间相机研制中的关键技术之一。从保证反射镜组件刚度、强度和热尺寸稳定性的角度出发, 对某型卡塞格林系统 $\Phi$  980 mm 口径主反射镜支撑结构进行了设计。提出采用背部六点支撑, 三点为主另外三点为辅的支撑方案, 通过在支撑结构中设置柔性环节, 从而解决了大口径主反射镜在自重作用下面形精度满足要求而在温变载荷作用下面形精度严重超差的问题。利用有限元分析软件进行了主镜组件的静、动态刚度及热尺寸稳定性分析, 并在分析的基础上对支撑结构中的柔性环节结构参数进行修正, 在保证支撑刚度的同时降低了重力、装配应力和热应力对面形精度的影响。分析和试验结果表明, 主镜在重力和 4℃均匀温升载荷下面形精度达到  $PV < \lambda/10$ ,  $RMS < \lambda/50$  ( $\lambda=632.8$  nm), 主镜组件一阶固有频率为 116 Hz, 动力学环境下最大应力 65 MPa, 各项指标完全满足光学系统对主反射镜的设计要求。

**关键词:** 空间相机; 主镜; 支撑结构; 柔性铰链; 有限元分析

中图分类号: TH761

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.12.001

## Design of Support for Large Aperture Primary Mirror

GUAN Ying-jun<sup>1</sup>, XIN Hong-wei<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Support technology of large aperture space mirror is one of the key points for space camera development. The influences of stiffness, strength and thermal dimensional stability of the mirror component were considered in the process of support structure design. A support for  $\Phi$  980 mm primary mirror in Cassegrain space telescope was designed. The support scheme of six points support on back was proposed in which three points were main and the others were assistant. The problem that surface figure accuracy of large aperture primary mirror meets the demand in the gravity load, but out of errors under the load case of uniform temperature change was solved by adding flexible support. By adopting finite element analysis technique, the static and dynamic as well as thermal characters of primary mirror were analyzed. According to the analysis results, structural parameters of the flexible support were adjusted, and then reduce the influences of gravity, assembly stress and thermal stress on the primary mirror. Analysis and test results indicate that surface figure accuracy of the mirror reaches to  $PV < \lambda/10$ ,  $RMS < \lambda/50$  ( $\lambda=632.8$  nm), the first natural frequency is 116 Hz, and the maximum stress is 65 MPa in the vibration test, which can meet the requirements for the primary mirror.

**Key words:** space camera; primary mirror; support structure; flexible hinge; finite element analysis

## 0 引言

随着空间光学的发展, 对空间相机分辨率的要求越来越高。目前空间相机地面分辨率的提高仍有赖于其光学系统口径的增大和焦距的增长。长焦距大口径空间相机一般采用反射式光学系统, 大口径主反射镜

收稿日期: 2010-09-01; 收到修改稿日期: 2010-10-09

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(863-2-5-1-13B)

作者简介: 关英俊(1978-), 男(满族), 吉林永吉人。讲师, 博士, 主要研究工作是空间光学仪器 CAD/CAE。E-mail: gyj5460@sohu.com。

支撑技术一直是空间相机研制的关键技术之一<sup>[1]</sup>。一方面主镜支撑系统必须保证在发射运载过程中不被破坏,这就要求支撑结构具有足够高的动态刚度和强度,另一方面主镜系统必须保证在空间轨道环境中具有足够高的位置精度和面形精度,这就要求主镜系统具有足够高的静态刚度和热尺寸稳定性<sup>[2-3]</sup>。然而,这两方面往往是矛盾的,大口径主镜支撑结构设计之所以是空间相机研制中的难点和关键技术,就是因为其设计要在这个矛盾中寻求良好的折衷,使主镜系统既满足刚度、强度要求,同时又满足热尺寸稳定性要求。

本文以某型卡塞格林空间相机 $\Phi 980$  mm 口径主镜系统为研究对象,从支撑结构材料选取、支撑方案确定、支撑中柔性环节设置等方面对主镜支撑结构进行了详细的设计。利用有限元分析技术对设计方案进行分析验证,并研制了主镜系统的力学样机,对主镜的力学特性进行了试验测试,验证了设计的合理性。

## 1 大口径主镜支撑结构设计

### 1.1 主镜结构设计

该主镜口径为 $\Phi 980$  mm,中心带有 $\Phi 280$  mm 通光孔的圆形反射镜。主镜材料的选择是研制反射镜系统首要考虑的问题,考虑当前各种常用光学材料的力学性能、热物理性能、可加工性能、材料的稳定性和安全性以及材料来源等综合因素,决定选择凝胶注模 RB-SiC<sup>[4]</sup>作为镜体材料。凝胶注模成型工艺易于制造形状复杂的镜体结构,利于镜体结构轻量化。对于主镜镜体结构设计,利用 Roberts<sup>[5]</sup>等人给出的圆形反射镜径厚比 $dr(D/t)$ 与自重变形的经验公式:

$$\delta = \frac{3\rho ga^4}{16Et^2} = \frac{3\rho gdr^2D^2}{256E} \quad (1)$$

式中: $\delta$ 为最大自重变形; $\rho$ 为材料密度; $g$ 为重力加速度; $a$ 为圆盘半径, $a=D/2$ ; $E$ 为弹性模量; $t$ 为圆盘厚度。根据式(1)确定本反射镜在自重最大变形为 $\lambda/8$ 条件下的反射镜厚度为 100 mm,镜体采用三角形轻量化孔与蜂窝形轻量化孔相结合的背部开口形式。其中加强肋的厚度设计为 4 mm,镜面厚度为 6 mm。Hall<sup>[6]</sup>给出了圆盘反射镜最少支撑点数 $N$ 的经验公式:

$$N = \frac{1.5r^2}{t} \sqrt{\frac{\rho g}{E\delta}} \quad (2)$$

式中: $r$ 为圆盘半径; $t$ 为镜体厚度; $\rho$ 为材料密度; $g$ 为重力加速度; $E$ 为弹性模量; $\delta$ 为要求控制的变形量 PV 值。根据式(2),计算镜体厚度为 100 mm 和 130 mm,反射镜最大变形为 63.2 nm( $\lambda/10$ ),计算得到的支撑点数分别为 5 点和 6 点。根据理论计算与工程实践经验,确定主镜采用 6 点支撑方案,其中 3 点为主要支撑,用来承担大部分反射镜的重力和振动载荷,另外 3 点为辅助支撑,用来弥补主支撑的不足。在 6 点支撑方案中,主支撑的刚度较大,而辅助支撑刚度相应较小,以适应装调时应力变化。刚度较小的辅助支撑另一方面的作用是不会与主支撑结构零件热变形干涉。反射镜轻量化结构如图 1 所示。

### 1.2 柔性支撑结构设计

主镜系统在加工、检测、装调、运输、发射及入轨等一系列过程中其受力状态不断变化,特别是在轨状态下,还要承受空间环境温度变化的影响,这些变化影响将降低光学系统的成像质量<sup>[7]</sup>。因此,在反射镜支撑结构设计中要尽量降低力学和热环境变化对反射镜面形精度的影响,也就是要求反射镜系统同时具有足够的刚度、强度和热尺寸稳定性。主镜支撑刚度和强度的保证相对来说较易满足,只要支撑结构刚度足够大,就能保证主镜在重力作用下面形精度和位置精度不超差,且反射镜支撑结构在发射运载阶段不产生塑变和破坏。但过大的支撑结构刚度带来的负面影响是在空间环境温度变化时,由于支撑结构件与反射镜材料热特性的不匹配而造成的胀缩不一致,从而将支撑结构由于热变形而产生的热应力传递给反射镜,造成反射镜面形精度的下降,导致像质下降,严重时甚至不能正确成像。

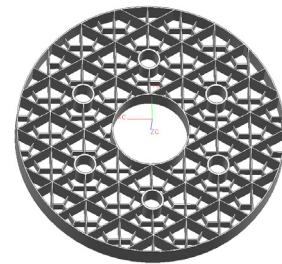


图 1 主镜轻量化结构

Fig.1 Lightweight structure of primary mirror

为了提高主镜系统的空间环境适应能力, 在支撑结构中设置适当的柔性环节是整个主镜支撑设计中的最核心的核心技术。支撑采用两脚架(bipod)结构形式, 如图 3 所示, 具体的连接方式为镶嵌件(4J32)通过胶粘接的方式与反射镜支撑孔相连, 柔性支撑件(TC4)通过螺钉与镶嵌件相连接, 柔性件再与支撑背板(高体分 SiC/Al)通过螺钉相连接。通过工程分析可知, 采用传统的 bipod 结构支撑主镜, 调节支杆直径来调节支撑刚度, 难以同时满足刚度和热尺寸稳定性的要求。所以考虑在支杆中设置柔性铰链来调节主镜的热尺寸稳定性。

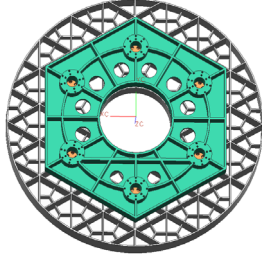


图 2 主镜组件模型

Fig.2 Model of primary mirror component

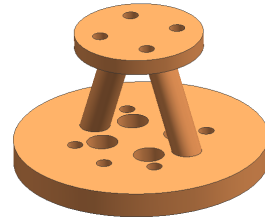


图 3 柔性支撑件

Fig.3 Flexible support part

将单层铰链简化为如图 4 所示的形式, 并且对弯矩作用下的转角刚度和位移刚度进行分析。在极坐标系下转角为(详细推导过程参见文献[8]):

$$\theta = \int \frac{12R \sin \alpha M(x)}{Eb(2R + t - 2R \sin \alpha)^3} d\alpha \quad (3)$$

挠度为

$$y = \iint \frac{12R \sin \alpha M(x)}{Eb(2R + t - 2R \sin \alpha)^3} d\alpha d\alpha \quad (4)$$

式中: 积分限为 $[0, \pi]$ ,  $R$  为铰链的切削半径,  $t$  为铰链厚度的最薄处,  $b$  为铰链宽度,  $M(x)$  为力矩, 此处可以认为力矩为常数  $M$ 。根据力矩作用下柔性铰链的转角与挠度的表达式, 采用 Romberg 数值积分方法对转角和挠度积分表达式进行积分, 可得到不同的  $R$ 、 $t$  值与柔性铰链转角刚度的关系。结果可以发现, 随着  $t$  值的增加, 转角刚度成二次曲线, 随着  $R$  值的增加, 转角刚度变小, 但变化并不明显。所以在实际的设计计算过程中, 先根据工艺要求大致确定  $R$  值, 然后主要调节  $t$  值以及柔性铰链在支撑件中的位置来满足支撑刚度和热尺寸稳定性的要求。具体改进后的支撑结构件如图 5 所示。

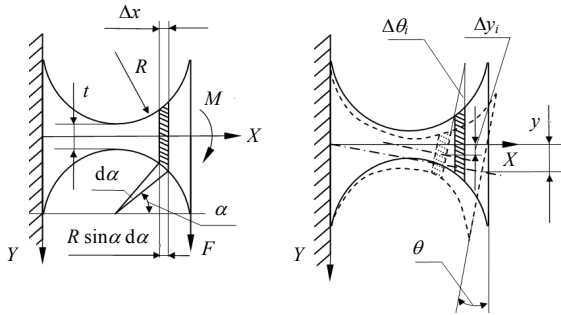


图 4 柔性铰链在力矩作用下的变形示意图

Fig.4 Sketch map of distortion of flexible hinge under moment

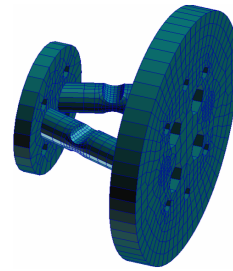


图 5 改进后的柔性支撑件

Fig.5 Improved flexible support part

## 2 有限元分析

根据理论分析和经验得出了主镜组件的大体结构方案, 但具体的结构尺寸参数必须依赖有限元分析技术来调整确定。针对大口径空间反射镜这类超精密的特殊空间光机系统, 运用有限元分析技术对其进行力学和热特性分析有许多需要注意之处和建模分析技巧, 因为最终要考核的指标是光学反射面的面形精度, 通常其均方根值(RMS)要求达到几十分之一波长(可见光波长取 632.8 nm), 所以有限元模型中出现比较微小

的模型等效误差, 比如说对称模型在有限元模型中出现了不对称性, 连接刚度不正确等, 最终反映到镜面变形结果上都是不可接受的误差, 甚至是完全错误的结果。所以笔者认为, 在单镜设计分析阶段, 可以采用一般有限元软件中自带的自动网格划分功能, 划分 10 结点的四面体单元, 此阶段主要是寻求设计规律, 通过自动网格划分可大大地提高设计分析效率。待确定了反射镜结构方案, 特别是在组件级的分析过程中, 建议采用手动六面体或板壳单元进行网格划分, 一方面是由于六面体单元相对于四面体单元计算精度较高, 另一方面是由于采用规则的六面体单元或板壳单元在零件连接上易于控制, 且在有限元模型的基础上易于修改模型, 从而为探寻设计规律, 优化设计参数提供了十分便利的先决条件, 所以此种建模分析的策略对提高分析效率和精度是十分重要的。

2.1 有限元模型描述

本文所研究的主反射镜前期单镜的分析研究在此不再赘述。在组件分析过程中, 主镜采用板壳单元划分网格, 支撑结构采用 8 结点六面体单元进行网格划分, 共划分 38 702 个结点, 38 803 个单元。有限元模型见图 6。主镜组件材料属性见表 1。

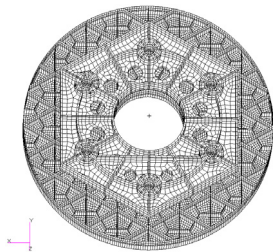


图 6 主镜组件有限元模型

Fig.6 Finite element model of primary mirror component

表 1 主镜组件材料属性

Table 1 Material properties of primary mirror component

Materials	Density $\rho$ / $10^{-6}$ kg·mm <sup>3</sup>	Young's modulus $E$ /GPa	CET $\alpha$ /(10 <sup>-6</sup> /°C)	Poisson's ratio $\mu$
RB-SiC	3.06	340	2.5	0.2
4J32	8.1	141	2.5	0.25
TC4	4.4	109	9.1	0.34
SiC/Al	2.94	180	8.1	0.2

约束定义为主镜背板与相机主框架连接孔的 6 自由度全约束。工况为三个方向重力作用和 4℃均匀温升载荷作用, 然后再去除重力和温升载荷计算主镜组件在约束状态下的模态。

2.2 分析结果

根据对主镜组件提出的设计指标要求, 对主镜组件进行了静态载荷作用下的刚度和热尺寸稳定性分析, 并通过模态分析考查组件的动态刚度。在三个方向分别施加重力载荷以及 4℃均匀温升载荷作用下主镜的面形计算结果见表 2。从表 2 的分析结果可见, 在静态载荷下主镜的面形精度能达到  $PV \leq \lambda/10$ ,  $RMS \leq \lambda/50$ , 满足设计指标要求。

表 2 静态载荷下主镜的面形误差

Table 2 Surface errors of primary mirror under static loads

Load cases	$PV$ /nm	$RMS$ /nm
1 g	x axis	53.2
	y axis	52.6
	z axis	62.6
4℃ temperature rise	58.8	10.6

主镜组件在约束状态下的前 4 阶模态分析结果如图 7 所示, 从分析结果可以看出, 主镜组件 1 阶固有频率为 116 Hz, 对应的振型为主镜绕光轴转动。

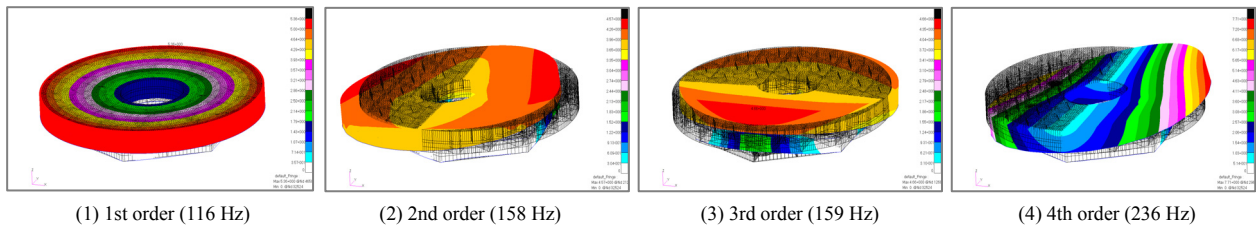


图 7 主镜组件前 4 阶模态

Fig.7 The first 4-order modes of primary mirror component

3 动力学试验

动力学试验是空间相机研制过程中的一个重要环节, 它主要针对发射阶段相机所承受的动力学环境进



行模拟。虽然试验载荷作用时间相对较短,但它对保证空间相机工作的可靠性起着不可忽视的作用。相机整机及零部件的试验在振动试验台上进行,主要模拟火箭飞行过程中所经受的各种振动干扰环节,描述振动特性的环境规范一般以频域和振动量级载荷表示。

动力学试验的主要目的为:

- 1) 验证结构方案设计的合理性和正确性,考核相机是否具备承受可能遇到的动力学环境的能力;
- 2) 暴露结构设计过程中工艺不合理的环节,在材料、元器件选择和制造装配中可能存在或隐藏的缺陷,提高其结构系统的工作可靠性;
- 3) 研究动力学环境对新材料和新结构的影响。

针对本主镜组件主要进行了 0.2 g 正弦扫频试验、正弦振动和随机振动试验。通过 0.2 g 正弦扫频试验可以测试 0~2 000 Hz 频段范围内的所有结构频率特性,通过正弦和随机振动试验可以测试主镜组件的最大加速度响应和柔性结构的应力水平。图 8(a)是反射镜组件力学样机在振动台上进行振动试验的加速度与应力测试。根据图 8(b)反射镜的横向加速度响应曲线,主镜在 112 Hz 时发生共振响应,说明反射镜的一阶谐振频率为 112 Hz。图 8(c)中,  $\varepsilon = 588$  为应变仪所采集到的最大微应变数值,  $\sigma$  为真实应力 65 MPa,远小于钛合金的屈服应力 877 MPa,说明结构安全可靠,经过傅里叶变换后,此时的频率为 116 Hz。

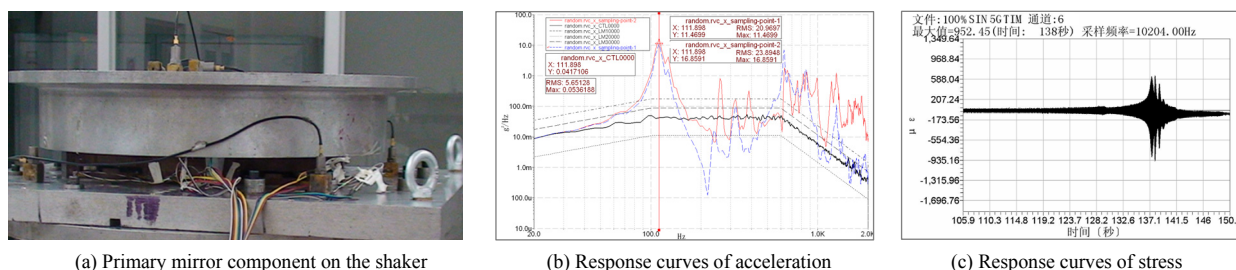


图 8 主镜组件动力学试验测试

Fig.8 Dynamic tests of primary mirror component

## 4 结 论

本文针对某大口径主反射镜进行了详细的镜体及其支撑结构设计。为满足大口径空间反射镜严格的动静刚度及热尺寸稳定性要求,在支撑结构中合理地设置了柔性环节。通过有限元分析和动力学环境试验可以得出如下结论:主镜在三个方向重力及 4℃ 均匀温升载荷下的最大面形误差为  $PV \leq \lambda/10$ ,  $RMS \leq \lambda/50$ , 满足静态刚度和热尺寸稳定性要求;试验测试反射镜组件一阶固有频率为 112 Hz,有限元分析误差为 3.5%,说明反射镜组件动态刚度足够高,且分析误差满足分析精度要求;试验测试柔性支撑结构在动力学环境中的最大应力响应为 65 MPa,远小于材料屈服应力,结构强度足够大。本大口径主反射镜及其支撑结构的设计也为同类空间反射镜的设计提供了一定大借鉴和参考。

### 参考文献:

- [1] 闫勇,王栋,金光. 大口径 SiC 反射镜组件研制技术[J]. 光电工程, 2010, 37(6): 108-112.  
YAN Yong, WANG Dong, JIN Guang. Design and Fabrication Technology Large Aperture SiC Mirror Assembly [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2010, 37(6): 108-112.
- [2] 李志来,薛栋林,张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(12): 2485-2490.  
LI Zhi-lai, XUE Dong-lin, ZHANG Xue-jun. Optical and mechanical design for long focal length and wide-field optical system [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2008, 16(12): 2485-2490.
- [3] 孙宝玉. 光学反射镜柔性支撑结构尺寸稳定性分析[J]. 光电工程, 2009, 36(9): 142-145.  
SUN Bao-yu. Stability Analysis on the Dimension of Flexible Supporting Structure of the Optical Reflector[J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2009, 36(9): 142-145.

(下转第 24 页)

- ZHANG Guang-jun. **Machine Vision** [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [2] 郝雪涛, 江洁, 张广军. CMOS 星敏感器图像驱动及实时星点定位算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2005, **31**(4): 381-384.  
HAO Xue-tao, JIANG Jie, ZHANG Guang-jun. CMOS star sensor image acquisition and real-time star centroiding algorithm [J]. **Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics**, 2005, **31**(4): 381-384.
- [3] Baker K L, Moallem M M. Iteratively weighted centroiding for Shack-Hartmann wave-front sensors [J]. **Optics Express** (S1094-4087), 2007, **15**(8): 5147-5159.
- [4] 胡诗杰. Hartmann-Shack 波前传感器在光束质量诊断中的应用研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2003.  
HU Shi-jie. Research on the application of Hartmann-Shack wavefront sensors in diagnosis of beam quality [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2003.
- [5] 魏新国. 星敏感器中的星图识别方法及相关技术研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.  
WEI Xin-guo. Research on Star Map Identification and Its Relevant Techniques in Star Sensors [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [6] 陈兴美, 严壮志. 基于 FPGA 的红外光斑中心实时检测 [J]. 红外与激光工程, 2005, **34**(3): 401-405.  
CHEN Xing-mei, YAN Zhuang-zhi. Real-time detection of infrared spot based on FPGA [J]. **Infrared and Laser Engineering**, 2005, **34**(3): 401-405.
- [7] 叶敏, 周文晖, 顾伟康. 基于 FPGA 的实时图像滤波及边缘检测方法 [J]. 传感技术学报, 2007, **20**(3): 623-627.  
YE Min, ZHOU Wen-hui, GU Wei-kang. FPGA Based Real-Time Image Filtering and Edge Detection [J]. **Chinese Journal of Sensors and Actuators**, 2007, **20**(3): 623-627.
- [8] 唐端午. 基于脉动阵列的波前处理技术研究 [D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2008.  
TANG Duan-wu. Research on Systolic Array-based wavefront processing technology [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [9] Budrikis Z L, Hatamian M. Moment calculations by digital filters [J]. **AT & T Bell Laboratories Technical Journal** (S0005-8580), 1984, **63**: 217-229.
- [10] Hatamian M. A Real time Two-dimensional Moment Generating Algorithm and its Single Chip implementation [J]. **IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing**(S0096-3518), 1986, **34**(3): 546-553.

~~~~~  
( 上接第 5 页 )

- [4] 张舸, 赵汝成, 赵文兴. 大尺寸轻型碳化硅质反射镜素坯的凝胶注模成型 [J]. 稀有金属材料与成型, 2008, **37**(1): 678-681.  
ZHANG Ge, ZHAO Ru-cheng, ZHAO Wen-xing. Gel-Casting of Large-Scale Lightweight SiC Mirror Blank [J]. **Rear Metal Materials and Engineering**, 2008, **37**(1): 678-681.
- [5] FRIEDMAN E. **Photonics Rules of Thumb** [M]. New York: McGraw Hill, 2003.
- [6] YODER P. **Opto-Mechanical System Design** [M]. Cooperate Marcel Dekker Inc, 1993.
- [7] 郭疆, 何欣. 大口径空间遥感相机主反射镜支撑设计 [J]. 光学 精密工程, 2008, **16**(9): 1642-1647.  
GUO Jiang, HE Xin. Design of support for primary mirror of space remote sensing camera [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2008, **16**(9): 1642-1647.
- [8] 孙宝玉. 空间光学遥感器反射镜柔性调节结构设计 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, **41**(9): 201-203.  
SUN Bao-yu. Flexible Regulating Structure of Optical Reflector of Space Remote Sensor [J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2009, **41**(9): 201-203.