应用权重计算方法的光学遥感器材料间匹配性研究

刘 强[1,2],张 峰[1],何 欣[1],李 畅[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. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:提出了用材料间的匹配因子来选择材料的理论,为航空航天结构设计过程中材料的选择提供了理论依据。首先简要阐述了光机材料的选择与材料匹配在光学遥感器结构设计中的重要性,说明了材料匹配性计算的必要性,同时叙述了目前在光机结构设计中选择材料的一般方法,指出了目前选材方式的局限性;提出了匹配计算方法的指导思想与匹配方程的构建原则,即基于对空间遥感器常用的光学反射镜材料及结构材料各项性能参数的分析,根据 Delphi 法与层次法相结合的方法在材料各项性能前分配加权系数,根据不同的侧重点配置不同的权重系数,从而计算出材料间的匹配因子。最后通过与已经研制成功的某型号空间遥感器相比验证,利用匹配因子法计算结果选择的材料与其选择材料完全符合,说明了其选材的正确性,也证明了匹配计算的可行性。

关键词:材料匹配; 权重分析; 匹配因子
中图分类号:TH140.8 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2013)01-0206-06

Research of materials matching in optical remote sensor based on weight coefficient analysis method

Liu Qiang[1,2], Zhang Feng[1], He Xin[1], Li Chang[1,2]

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A new theory for choosing the materials was put forward for the first time based on matching factors, providing a theory for choosing the materials in the process of structure designing in aeronautics and astronautics. The importance of materials choosing and material matching in the structure designing was recommended in brief. The general method of materials selected at present was recited, and the limitation of this method was indicated. The guiding principle of the matching calculating method and the standard establishment of matching formulation were put forward. The performance parameters of optical reflector material in common use of space remote sensing camera and structure material were analyzed. The weight coefficient was assigned according to the Delphi method and the hierarchical method, then the matching factor was computed depend on different weight coefficents. The material selected by the matching factor method is the same with a running space remote sensing camera. The results indicate the

收稿日期:2012-05-13; **修订日期**:2012-06-07
基金项目:中科院三期创新工程(074Z3JN70)
作者简介:刘强(1981-),男,博士生,主要从事空间光学遥感器结构方面的研究。Email:liudequ@126.com
导师简介:张峰(1969-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事光学加工与检测方面的研究。Email:zhangfjy@yahoo.com.cn

correctness of selection and the feasibility of the matching calculation.

Key words: material matching;　weight coefficient analysis;　matching factor

0 引　言

高精密的光学仪器, 无论是在太空中工作的空间光学遥感器, 还是地面上应用于光学加工中小型的光学补偿器, 对光学元件的表面形状以及光学元件之间的相对位置都有很高的要求; 尤其是空间光学遥感器,其工作环境的特殊性,即在太空微重力条件和复杂的热环境下工作, 工作时与地面装调时不同的环境条件对遥感器结构的稳定性提出了很高的要求,结构的稳定性是相机成像质量的关键,需要在结构设计中重点考虑[1-3]。

在结构设计过程中, 需要对各个不同零件的材料进行选择, 由于材料间性能的差异及使用者的不同要求,不可能所有零件都采用同一种材料,所以在设计的过程中还要考虑不同零件材料间的匹配性,因为即使选择的材料具有高的比刚度, 高的热稳定性,但如果相互连接的各零件材料匹配性差,一样得不到理想的设计效果。就笔者所查找的文献中,尚无研究人员明确发表有关材料之间匹配关系的文章,目前结构设计人员选择材料主要是依靠设计者的经验或者单一考虑某一方面的匹配性, 从而带来片面性,尤其是经验不足的年轻设计人员,很容易出现设计的产品达不到预期目的而出现返工的现象。材料的匹配性关乎空间遥感器在结构性能上是否具有高的动静态刚度, 在热性能上是否具有好的温度均匀性,以及对空间热环境及微重力环境是否具有很好的适应能力,国外在遥感器的制作过程中,也极其注意考虑材料匹配性,美国EO-1 AL1optical subsystem 曾把除光学反射镜以外的结构件全部用低膨胀合金(殷钢)来制造,以此来保证极优的材料匹配性能,但目前国内光学遥感器普遍追求长焦距、高分辨率、大视场,导致遥感器体积很大,从而决定了不能全部采用密度是其它结构材料密度 2~3 倍的低膨胀合金,光学遥感器的各种支撑结构应根据需要选择不同材料,而每种材料之间都有不同的属性,设计者需要使所选用材料达到最优的匹配。文中结合目前国内光学遥感器工程项目选材原则, 研究了空间常用的光学材料和结构材料,对各种材料的各项性能进行了系统的分析,并对不同材料零件构成组件的匹配性进行了计算,经过对比已经成功在轨运行的遥感器,其材料的选择与计算结果完全相同。

1 材料匹配性分析

1.1 匹配方程的建立

材料匹配性的计算, 指导思想是综合考虑材料的各种参数, 分别对相匹配材料的同种或相关参数进行对比,其值相同或接近为优;同时根据不同的用途,对材料的不同参数赋以不同的权值,从而实现材料的最优匹配。依据以上思想,得出匹配方程(1),即经过计算求得相匹配材料的匹配关系 $f(x_i, y_i)$,再根据方程(2)得出匹配因子 p_i。

$$f(x_i, y_i)=\sum_{i=1}^{n} w_i\left(\left|\frac{y_i-x_i}{y_i+x_i}\right|\right) \tag{1}$$

$$p_i=1-f(x_i, y_i) \tag{2}$$

式中:w_i 为权重系数。

分析计算出的匹配因子值 $p_i(0\leqslant p_i\leqslant 1)$,依据工程中使用经验,如果 $p_i\geqslant 0.5$,则相匹配材料的匹配度好;如果 $p_i\leqslant 0.5$,则相匹配材料的匹配度差,不宜选用。

1.2 权重系数 w_i 的计算

权重系数的计算基于德尔菲(Delphi)法与层次法结合的方法[4],这种方法的原理是:当很多参数需要评价时,需要准确判断不同参数的重要程度,根据不同的参数对目标影响的程度进行两两对比, 得到初始权数,形成对比矩阵,最终通过一系列计算后得到权重值[5-6]。不同参数两两之间的比较尺度 a_{ij} 的规则含义如表 1 所示。

表 1 比较尺度 a_{ij} 的规则含义

Tab.1 Signification of comparison scale a_{ij}

a_{ij}	Signification
1	x_i and x_j get the same impact on overall goal
3	x_i gets slightly larger impact than x_j
5	x_i gets larger impact than x_j
7	x_i gets significantly larger impact than x_j
9	x_i gets extremely larger impact than x_j
2,4,6,8	The impact is between the adjacent level
1,1/2,…1/9	The impact between x_j and x_i is the reciprocal of a_{ij}

对于材料的 n 个性能品质参数 $x_1, x_2, \cdots x_n$,两两相比较的结果如表 2 所示。

表 2 材料品质参数比较矩阵表

Tab.2 Comparison matrix of materials properties

	x_1	x_2	…	x_n
x_1	a_{11}	a_{12}	…	a_{1n}
x_2	a_{21}	a_{22}	…	a_{2n}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
x_n	a_{n1}	a_{n2}	…	a_{nn}

由表 2 可以得出较矩阵 A。

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

式中:$a_{ii}=1$, $a_{ij}=1/a_{ji}$。

假设在矩阵 A 中做两两比较时,令 w_i 为第 i 个指标的重要程度,w_j 为第 j 个指标的重要程度,a_{ij} 为第 i 个指标相对于第 j 个指标的重要程度比值,即:

$$a_{ij}=w_i/w_j \tag{3}$$

根据该矩阵求权向量的值,求法通常有和法、根法、特征根法和最小平方法等[7],这里采用特征根法。

令各组成元素对目标的特征向量为:

$$W=(w_1, w_2, \cdots, w_n)^T \tag{4}$$

如果有 $\sum_{i=1}^{n} w_i=1$,并且矩阵 A 满足:

$$a_{ij}=\frac{a_{ik}}{a_{jk}} \quad i,j,k=1,2,\cdots,n \tag{5}$$

则 A 为一致性矩阵,对应于特征根 n 并归一的特征向量表示各因素对目标的权重,该向量 W 为权向量,且 W 满足:

$$AW=\lambda_{max}W \tag{6}$$

则 W 的分量$(w_1, w_2, \cdots, w_n)$就是对应于 n 个因素的权重系数。由此矩阵计算出的特征向量经归一化得到的权向量为:

$$W=(w_1, w_2, \cdots, w_n)^T \tag{7}$$

依照算公式(3)~(7)可以得出权重因子向量。

2 材料匹配性实例计算

2.1 材料性能参数

为说明匹配因子方法在工程实践中选择材料的指导性,实例特意选择了对材料性能要求很高的空间光学遥感器,考虑到空间遥感器所具有的环境特点,在光学遥感器的光机结构材料选择中,将材料的力学性能和热性能作为主要研究对象。下面分别从力和热两方面对材料进行分析。

力学性能方面:着重考虑比刚度。其定义为材料的弹性模量与密度的比值,即 E/ρ,弹性模量越高,密度越低,比刚度越高,材料的力学性能越好。

材料热性能方面:主要考虑材料的比热容、热膨胀系数及导热系数这三项对光学成像影响较大的因素,其中最为设计者关心的是热膨胀系数及导热系数,在材料的选择上,最期望的空间材料应具有高导热低热胀系数。定义材料的热稳定性为 λ/α,其比值越大,热稳定越好,材料的热适应性越好[6-10]。

针对空间材料需要考虑的 5 种性能进行分析,即密度、弹性模量、导热率、线胀系数和热扩散率(见表 3 和表 4)。

表 3 光学材料性能参数表

Tab.3 Properties of optical materials

No.	Material	Density /kg·m^{-3}	Elastic modulus /GPa	Heat conduction coefficient /W·m^{-1}K^{-1}	Thermal expansion coefficient 10^{-6}/K	Thermal diffusivity 10^{-7}/m^2·s^{-1}
1	SiC	3 140	420	180	2.4	843.1
2	Fused silica	2 330	64	1.13	3.25	6.7
3	Al	2 710	69	167	22.5	687.7
4	Zerodur	2 530	92.9	1.64	0.05	7.9
5	ULE	2 200	67	1.3	0.03	7.6
6	Be	1 840	303	216	11.5	609.8
7	Si	2 330	131	137	2.6	828.1

表 4 结构材料性能参数表

Tab.4 Properties of structural materials

No.	Material	Density /kg·m^{-3}	Elastic modulus /GPa	Heat conduction coefficient /W·m^{-1}K^{-1}	Thermal expansion coefficient 10^{-6}/K	Thermal diffusivity 10^{-7}/m^2·s^{-1}
1	A1	2 710	69	167	22.5	687.7
2	45	7 810	200	48	11.6	133.6
3	TC4	4 440	114	7.4	9.1	27.3
4	4J32	8 100	141	13.7	2.4	30.2
5	Low volume fraction Al/SiC (LVF)	2 940	100	155	16	572.4
6	High volume fraction Al/SiC (HVF)	3 000	180	225	8	1 048.9

2.2 匹配性计算

需要对空间材料所关注的上述 5 个参数进行权重计算。令 5 个参数分别为 $x_1, x_2, \cdots x_5$,在反射镜和镶嵌件之间主要关心的是线胀系数的匹配和结构的变形,依据材料的实际使用特点,按照层次法规则将上述各参数赋值。文中选择了两组赋值方法,第一组赋值方法参考了空间环境下空间相机的要求, 第二组作为第一组的对比。

第一组:首先确定初始权数,依照航天相机设计时着重考虑结构的刚性和材料受热线膨胀系数匹配的特点,依表 1 所述比较规则将弹性模量 **E** 赋为 $x_2=3$,线胀系数 α 赋为 $x_4=5$,将密度 ρ,导热率 λ,热扩散率 **D** 均赋为 1,即有 $x_1=x_3=x_5=1$,由此按照表 2 规则将 5 个参数间进行重要程度比较,得到比较矩阵 A。

$$A=\begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1 & 1/5 & 1 \\ 3 & 1 & 3 & 3/5 & 3 \\ 1 & 1/3 & 1 & 1/5 & 1 \\ 5 & 5/3 & 5 & 1 & 5 \\ 1 & 1/3 & 1 & 1/5 & 1 \end{bmatrix}$$

依据算公式(3)~(7)进行计算,最后得出权向量结果为:$W_1=(w_1, w_2, \cdots, w_n)^T=(0.091, 0.273, 0.091, 0.454, 0.091)^T$

第二组:确定初始权数,着重考虑结构的刚性和材料热性能匹配, 同样依表 1 所述比较规则将弹性模量 **E** 赋为 $x_2=3$,密度 ρ 赋为 $x_1=1$,将线胀系数 α,导热率 λ,热扩散率 **D** 均赋为 4,即有 $x_3=x_4=x_5=4$,由此按照表 2 规则将 5 个参数间进行重要程度比较,得到比较矩阵 B。

$$B=\begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 1/4 & 1/4 & 1/3 \\ 4 & 1 & 1 & 1 & 4/3 \\ 4 & 1 & 1 & 1 & 4/3 \\ 4 & 1 & 1 & 1 & 4/3 \\ 3 & 3/4 & 3/4 & 3/4 & 1 \end{bmatrix}$$

计算得出 $W_2=(w_1, w_2, \cdots, w_n)^T=(0.062, 0.250, 0.250, 0.188)^T$。

计算求解出权向量后, 将权向量作为权重系数带入公式(1)及公式(2),求解出光学材料与结构材料之间匹配因子,第一组赋值计算结果如表 5 所示,第二组赋值计算结果如表 6所示。

表 5 按第一组赋值光学和结构材料匹配性因子表

Tab.5 Matching factors of optical and structural materials according to the first team

	Al	45	TC4	4J32	LVF	HVF
SiC	0.418	0.447	0.394	0.661	0.469	0.624
Fused silica	0.464	0.386	0.557	0.644	0.451	0.487
Al	1.000	0.566	0.551	0.334	0.858	0.625
Zerodur	0.326	0.238	0.390	0.336	0.354	0.277
ULE	0.355	0.194	0.332	0.278	0.303	0.231
Be	0.647	0.769	0.618	0.383	0.749	0.801
Si	0.531	0.497	0.534	0.762	0.604	0.681

表 6 按第二组赋值光学和结构材料匹配性因子表

Tab.6 Matching factors of optical and structural materials according to the second team

	Al	45	TC4	4J32	LVF	HVF
SiC	0.586	0.440	0.294	0.459	0.605	0.715
Fused silica	0.368	0.289	0.494	0.503	0.342	0.335
Al	1.000	0.503	0.415	0.297	0.883	0.691
Zerodur	0.283	0.229	0.447	0.369	0.310	0.236
ULE	0.311	0.187	0.384	0.313	0.264	0.196
Be	0.707	0.630	0.427	0.316	0.772	0.822
Si	0.678	0.500	0.424	0.567	0.729	0.743

计算结果分析:

重点考虑材料的刚性和材料受热线膨胀系数匹配时, 即第一组赋值计算结果:SiC 与 4J32,Al 与低体份 Al/SiC(LVF),Be 与高体分 Al/SiC(HVF)以及 Si 与 4J32 均有 $p_i>0.5$, 说明这几种配对材料的匹配度比较好,在设计时优先选用;而 Zerodur 及 ULE 对表中所列的结构材料匹配因子均有 $p_i<0.5$, 匹配度很低,不太适宜与这些结构材料匹配。

当重点考虑材料的刚性和材料热性能匹配时,即第二组赋值计算结果:SiC 与高体分 Al/SiC,Al 与低体份 Al/SiC,Be 与高体分 Al/SiC 以及 Si 与高体分 Al/SiC 均有 $p_i>0.5$, 匹配度比较好;Zerodur 及 ULE 对表中所列的结构材料匹配因子均有 $p_i<0.5$, 匹配度很低,不适宜与这些常用的空间结构材料相匹配。

由上述分析可知,依据材料匹配性计算结果,在反射镜材料选择时, SiC、Al、Be 和 Si 这几种材料都可以做为首选,当进一步选择时,需要进一步综合考虑这几种材料的自身品质性能的优势对比来进行反射镜镜体材料的选择(见表 7)。

表 7 反射镜相关材料的性能系数表[11]

Tab.7 Performance parameters of mirror materials

Correlation	Frequency	Deformation		Quality	Thermal deformation	
Scale factor	$(\mathbf{E}/\rho)^{1/2}$	$\rho/\mathbf{E}$	$\rho^3/\mathbf{E}$	$(\rho^3/\mathbf{E})^{1/2}$	α/λ	$\alpha/\mathbf{D}$
SiC	11.6	0.74	0.73	2.71	0.13	2.85
Fused silica	5.24	3.61	1.97	4.44	28.7	485
Al	5.05	3.92	2.88	5.37	1.35	32.7
Zerodur	6.06	2.72	1.74	4.17	0.31	6.33
ULE	5.52	3.28	1.59	3.98	0.23	3.95
Be	12.8	0.61	0.21	1.43	0.53	18.9
Si	7.50	1.77	0.96	3.11	0.19	3.14
Expectation	High	Low	Low	Low	Low	Low

分析表中数据,可以很明显的对比出,在空间遥感相机常用的反射镜备选材料中,SiC 材料和 Be 材料的各项性能都要好于其他材料,其中 Be 材料的变形相关性能和质量相关性能高于 SiC, 但是热性能远差于 SiC, 因此设计者在选材时可以依据需求选择镜体材料,但考虑到 Be 材料的毒性,在航空航天应用上,反射镜选用 SiC 材料的占绝大多数。

计算完反射镜和其镶嵌件的匹配因子后, 继续计算结构材料之间的匹配因子(见表 8、表 9),并以此来选择连接件、背板、框架等结构的材料。

表 8 按第一组赋值得出结构材料之间匹配因子表

Tab.8 Matching factors of structural materials according to the first team

	Al	45	TC4	4J32	LVF	HVF
Al	1.000	0.566	0.551	0.334	0.858	0.625
45	0.566	1.000	0.719	0.545	0.691	0.732
TC4	0.551	0.719	1.000	0.648	0.673	0.721
4J32	0.334	0.545	0.648	1.000	0.417	0.514
LVF	0.858	0.691	0.673	0.417	1.000	0.726
HVF	0.625	0.732	0.721	0.514	0.726	1.000

表 9 按第二组赋值得出结构材料之间匹配因子表

Tab.9 Matching factors of structural materials according to the second team

	Al	45	TC4	4J32	LVF	HVF
Al	1.000	0.503	0.415	0.297	0.883	0.690
45	0.503	1.000	0.577	0.534	0.600	0.606
TC4	0.415	0.577	1.000	0.726	0.504	0.503
4J32	0.297	0.534	0.726	1.000	0.365	0.408
LVF	0.883	0.600	0.504	0.365	1.000	0.743
HVF	0.690	0.606	0.503	0.408	0.743	1.000

结果分析:

(1) 重点考虑材料的刚性和材料受热线膨胀系数匹配时,结构材料之间匹配计算结果如表 7 所示: Al 与低体份 Al/SiC,45 钢与高体分 Al/SiC、TC4 与高体分 Al/SiC 以及 TC4 与 4J32 均有 $\mathbf{p}_i>0.5$,说明这几种配对材料的匹配度比较好,在设计时优先考虑;

(2) 按照第二组赋值原则,即着重考虑材料的热性能,包括导热率、线胀系数和热扩散率的条件下结构材料里可以得出几个比较理想的配对材料, 如 Al 和低体分 Al/SiC 材料的匹配度 $\mathbf{p}_i=0.883$, 高体分 Al/SiC 材料和低体分 Al/SiC 材料的匹配度 $\mathbf{p}_i=0.743$,4J32 材料和 TC4 材料的匹配度 $\mathbf{p}_i=0.726$, 很适宜作为相匹配的结构材料。

2.3 匹配性计算在工程中的应用

由于空间光学遥感器重点考虑材料的刚性和材料受热线膨胀系数匹配, 因此取第一组赋值规则来举例说明匹配性计算在工程中的应用。如果选择 SiC 作为反射镜的材料,根据计算结果,选择了 4J32 材料与反射镜镶嵌,$\mathbf{p}_{SiC-4J32}=0.661>0.5$; 与殷钢 4J32 连接零件可以选择自身或除自身外与其匹配最好的 TC4 材料($\mathbf{p}_{4J32-TC4}=0.648>0.5$),与 TC4 材料连接零件选择自身或除自身外与其匹配最好的高体份 Al/SiC 材料($\mathbf{p}_{TC4-Al/SiC}=0.721>0.5$),匹配度较好。

根据材料匹配计算结果, 某型号已成功运行的空间遥感器选材时,反射镜材料选用 SiC,反射镜组件中与反射镜匹配的镶嵌件选择了殷钢 4J32 材料,考虑到性能与质量最优要求,与殷钢 4J32 匹配的连接件选择了 TC4 材料, 承力三角板选择了高体份 Al/SiC 材料,主框架体选择了低体份 Al/SiC 材料(由于无法制备大尺寸的高体份材料, 所以选择低体份材料做为框架), 结合匹配性计算结果可以看出:此空间项目选择的材料在重点考虑材料的刚性和材料线膨胀系数匹配的条件下,为最优选择。其能成功在太空中运行,说明了其选材的正确性,也证明了匹配计算的可行性。

3 结 论

文中创新的提出了用匹配因子衡量光机结构材料匹配性的方法, 综合考虑空间光学遥感器常用材料的各项性能, 设计者根据环境因素等对光机结构

提出的要求,对材料关心的性能增加了权重因子,得到了光学材料和结构材料间的匹配因子及结构材料和结构材料间的匹配因子, 对各种材料匹配性能进行了分析,不同用途赋予不同的权重系数,提出了匹配度的概念,利用匹配度来选择材料;由于结构设计者可以在设计过程中根据遥感器的用途和关心的性能改变权重因子, 因此匹配因子选择材料的方法比较明确、直观,且能将材料的各种性能包含进来统筹考虑, 对空间光学遥感器的结构设计及热设计具有一定的指导意义, 在航空航天结构设计的研究领域具有比较广泛的应用前景。

参考文献:

[1] Ren Jianyue, Chen Changzheng, He Bin, et al. Application of SiC and SiC/Al to TMA optical remote sensor [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2537-2542. (in Chinese)
任建岳, 陈长征, 何斌, 等. SiC 和 SiC/Al 在 TMA 空间遥感器中的应用[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(12): 2537-2542.

[2] Wang Yiqun, Liu Wei, Yan Changxiang, et al. Development of high-precision scanning mirror assembly of imaging spectrometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(11): 2703-2708. (in Chinese)
汪逸群, 刘伟, 颜昌翔, 等. 成像光谱仪运动补偿扫描镜的研制[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(11): 2703-2708.

[3] Fan Lili, Zhang Jingxu, 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.

[4] Cai Hui, Zhang Ying, Ni Zongzan. Filtration of appraiser for Delphi [J]. Chinese Health Service Management, 1995(1): 49-55. (in Chinese)
蔡辉, 张颖, 倪宗瓒. Delphi 法中评价专家的筛选[J]. 中国卫生事业管理, 1995(1): 49-55.

[5] Xu Qian. A method to ensure fuzzy evaluation of integrated weighing [J]. College Mathematics, 2005, 21(1): 26-30. (in Chinese)
许谦. 确定模糊评价综合因素权重的一个方法[J]. 大学数学, 2005, 21(1): 26-30.

[6] Prachee P, Sailu Y, Akash R, et al. Computational prediction and experimental verification of novel IdeR binding sites in the upstream sequences of mycobacterium tuberculosis open reading frames[J]. Bioinformatics, 2005, 21(10): 2161-2166.

[7] Cheng Zhifeng, Zhang Bao, Cui Yan, et al. Application of high volume fraction SiC/Al composites to unmanned airborne photoelectric platforms [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(11): 2820-2827. (in Chinese)
程志峰, 张葆, 崔岩, 等. 高体份 SiC_Al 复合材料在无人机载光电稳定平台中的应用[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(11): 2820-2827.

[8] Li Zhilai, Xu Hong. Design of rectangular space mirror and its support structure [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(5): 1039-1047. (in Chinese)
李志来, 徐宏. 长条形空间反射镜及其支撑结构研究[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(5): 1039-1047.

[9] Xin Hongwei, Guan Yingjun, Li Jinglin, et al. Design of support for large aperture rectangular mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1560-1568. (in Chinese)
辛宏伟, 关英俊, 李景林, 等. 大孔径长条反射镜支撑结构的设计[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(7): 1560-1568.

[10] Wang Zhi, Li Zhaohui. Design of optical-mechanical structure for lunar-based extreme ultraviolet camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(10): 2627-2633. (in Chinese)
王智, 李朝辉. 月基极紫外相机光机结构[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(10): 2627-2633.

[11] Paul R Yoder Jr. Opto-mechanical System Design [M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2008, 1: 108-109. (in Chinese)
Paul R Yoder Jr. 光机系统设计[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2008, 1: 108-109.

[12] Wang Yongxian, Li Jinglin, Xu Yanjun, et al. Application of high volume fraction SiC/Al composite material in satellite remote sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1299-1304.
王永宪, 李景林, 许艳军, 等. 高体份 SiC/Al 复合材料在星载遥感器中应用 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1299-1304.