

## 天基空间目标可见光相机探测能力分析

孟庆宇, 张伟, 龙夫年

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 空间目标可见光相机的探测能力与空间目标可见光特性、探测器件性能指标等因素有关。为得到空间光学相机对 200~1 500 km 中低轨道可见光目标的探测能力, 基于基本辐射理论, 综合考虑空间目标几何特性、背景特性与材料特性, 建立空间目标特性的数学模型, 在可见光 0.4~0.7  $\mu\text{m}$  谱段进行仿真计算。得出可见光相机对中低轨道空间目标探测能力的理论计算方法, 并得出相关光学参数计算公式, 为空间光学相机的设计提供理论支持。

**关键词:** 空间光学; 空间目标; 空间相机; 探测能力

中图分类号: V455.8 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)08-2079-06

## Analysis on detection ability of space-based space target visible camera

Meng Qingyu, Zhang Wei, Long Funian

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Space target detection ability of visible light camera is related to the visible characteristics of the space target, detector performance and other factors. To get the detection ability of space optical camera on medium-orbit and low-orbit space target at the distance from 200 to 1 500 km, a mathematical model of space target characteristics was established based on the basic theory of radiation by considering geometry, background, and material characteristics of the space target. Furthermore, a simulation was conducted at the spectral bands of 0.4 to 0.7  $\mu\text{m}$ . The theoretical calculations of detection ability on medium-orbit and low-orbit space target by the visible light camera was got and the formula of related optical parameters was also obtained. These conclusions can provide theoretical support for the design of space optical camera.

**Key words:** space optics; space target; space camera; detection ability

收稿日期: 2011-12-29; 修订日期: 2012-01-23

作者简介: 孟庆宇(1986-), 男, 硕士生, 主要从事空间光学遥感器设计方面的研究。Email: mengqy@ciomp.ac.cn

导师简介: 张伟(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间目标探测与识别方面的研究。Email: wzhang@hit.edu.cn

## 0 引言

随着航天技术的发展与应用, 人类的活动范围已经由地球表面延伸到外层空间, 空间在政治、经济、军事等方面的战略地位日益提高。但目前大量存在的空间废弃卫星与空间碎片已经严重地威胁在轨航天器的安全运行。

通过天基手段获取空间信息是维护航天器安全运行的重要手段。世界各大国都在加快天基空间监视的步伐, 美国早在 1996 年就发射了中段实验卫星 MSX, 搭载可见光探测器 SBV 进行了空间目标监视实验。加拿大、日本、英国也相继在天基空间目标探测方面进行了研究。

空间目标成像是空间信息获取的重要内容, 空间目标的可见光探测属于点目标探测, 主要利用空间目标反射背景辐射进行探测, 因此在开展相机系统设计之前, 需要进行空间目标的可见光特性分析并对相机的探测能力进行预估<sup>[1-2]</sup>。统计分析表明, 大约 75% 的空间目标分布在高度 200~1 500 km 的中低轨道<sup>[3]</sup>, 研究对中低轨道卫星的探测有着更重要的意义。文中以典型空间目标为例, 综合考虑卫星的几何结构特性、背景特性、材料特性, 建立了卫星光学特性模型, 对空间目标的可见光特性进行了理论建模与仿真计算, 得出可见光相机对中低轨道空间目标探测能力的理论计算方法, 并得出相关光学参数的计算公式。

## 1 空间目标光学特性建模

### 1.1 几何结构特性建模

大多数卫星由卫星本体、太阳帆板、卫星天线和连接结构组成, 由于卫星天线与连接结构的面积在卫星整体中所占面积比例很小, 基本可以忽略不计, 在建模时只考虑前两部分, 建立双翼卫星数学模型如图 1 所示。

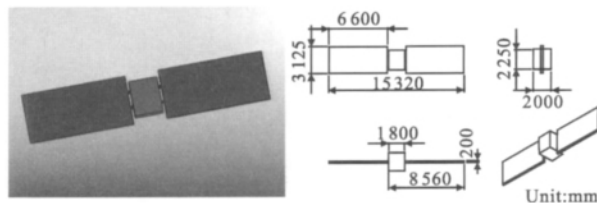


图 1 空间目标数学模型

Fig.1 Mathematical model of space target

卫星尺寸如下。

目标飞行尺寸: 3 125 mm×15 320 mm×2 000 mm;

目标本体尺寸: 2 000 mm×2 250 mm×1 800 mm;

太阳帆板尺寸: 3 125 mm×6 600 mm×2 块。

### 1.2 背景特性建模

通常, 空间目标本身不发光, 而是依靠反射太阳光而发光<sup>[4]</sup>。空间目标的背景辐射主要来自太阳的直射和地球及大气的反射辐射, 在研究卫星辐亮度时应首先考虑太阳辐照度值。太阳距离地球很远, 在目前的计算中, 人们通常将其视为 5 900 K 的黑体, 根据普朗克分布函数得出太阳光谱出射度为:

$$M_{\lambda} = \frac{c_1 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1}}{\lambda^5} \quad (1)$$

太阳光辐射到地球表面(大气层外)的辐照度可以由下式算出:

$$E(\lambda) = \frac{R_s^2 M(\lambda)}{d_{se}^2} \quad (2)$$

式中:  $R_s$  为太阳平均半径,  $R_s = 6.959 9 \times 10^5$  km;  $d_{se}$  为平均日地距离,  $d_{se} = 1.5 \times 10^8$  km。

在可见光探测波段, 0.4~0.7  $\mu\text{m}$  的太阳平均辐照度可由下式求出:

$$E_s(\lambda) = \int_{0.4}^{0.7} E(\lambda) d\lambda \approx 550 \text{ W/m}^2 \quad (3)$$

实际中, 当入射波长不同时, 太阳辐照度的数值是不同的, 而且与理想黑体辐射函数还有一定的偏差。将实际太阳辐照度实验测量值<sup>[5]</sup>拟合为太阳光谱辐照度高次多项式曲线方程  $E_{\text{sun}}(\lambda)$ , 代入数值计算方程。文中将太阳辐照度拟合为 10 次多项式的太阳光谱辐照度曲线  $E_{\text{sun}}(\lambda)$ , 如图 2 所示。

$$E_{\text{sun}}(\lambda) = -1.3 \times 10^{12} \lambda^{10} + 7.7 \times 10^{12} \lambda^9 - 2.0 \times 10^{13} \lambda^8 + 3.0 \times 10^{13} \lambda^7 - 2.9 \times 10^{13} \lambda^6 + 2 \times 10^{13} \lambda^5 - 9.2 \times 10^{12} \lambda^4 + 2.9 \times 10^{12} \lambda^3 - 6.0 \times 10^{11} \lambda^2 + 7.4 \times 10^{10} \lambda - 4 \times 10^9 \quad (4)$$

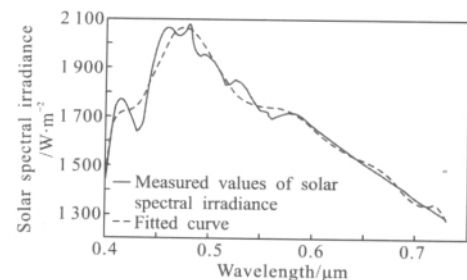


图 2 太阳辐照度测量曲线与拟合曲线

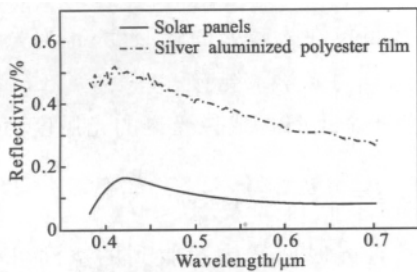
Fig.2 Measured curve and fitted curve of solar irradiance

### 1.3 材料特性建模

空间目标常用的材料有铝板、银色镀铝聚酯薄膜、黄色镀铝聚酯薄膜、太阳能电池板等<sup>[6]</sup>。空间目标本体常采用银色镀铝聚酯薄膜、黄色镀铝聚酯薄膜两种材料。计算中,太阳能电池板的反射率通常取 0.3,卫星本体材料的反射率通常取 0.8,即将反射率  $\rho$  考虑为常量。实验得出,空间目标材料反射率是一个以波长  $\lambda$  为变量的函数,其数值随着波长的改变而改变。计算中,考虑材料的细分光谱特性,得出材料反射函数  $\rho(\lambda)$ 。

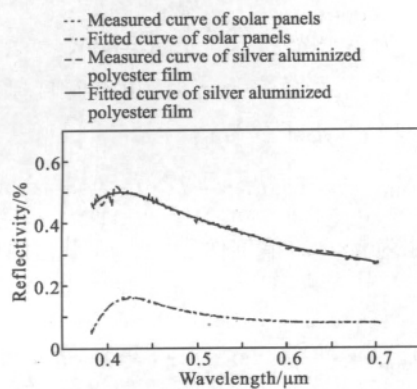
在许多计算中,常将太阳能电池板的贡献忽略不计。该数学模型中,太阳能电池板的正视面积为  $41.2\text{ m}^2$ ,卫星本体的正视面积为  $4.05\text{ m}^2$ ,前者是后者的 10 倍。实验数据表明,太阳能电池板的反射率最小值在 8% 左右,峰值达 16% 左右,可知太阳能电池板在可见光特性计算中是有很意义的。计算中,太阳能电池板的贡献不可忽略不计。

由实验数据,将太阳能电池板与银色镀铝聚酯薄膜的反射率分别拟合为入射波长  $\lambda$  的 6 次多项式函数  $\rho_1(\lambda)$ 、 $\rho_2(\lambda)$ ,如图 3 所示。



(a) 测量曲线

(a) Measured curve



(b) 拟合曲线

(b) Fitted curve

图 3 材料反射率曲线

Fig.3 Curves of materials reflectivity

$$\rho_1(\lambda) = -1.1 \times 10^4 \lambda^6 + 3.6 \times 10^4 \lambda^5 - 5.1 \times 10^4 \lambda^4 + 3.9 \times 10^4 \lambda^3 - 1.6 \times 10^4 \lambda^2 + 3.6 \times 10^3 \lambda - 3.3 \times 10^2 \quad (5)$$

$$\rho_2(\lambda) = -6.7 \times 10^3 \lambda^6 + 2.3 \times 10^4 \lambda^5 - 3.2 \times 10^4 \lambda^4 + 2.4 \times 10^4 \lambda^3 + 1.0 \times 10^4 \lambda^2 + 2.2 \times 10^3 \lambda - 2.0 \times 10^2 \quad (6)$$

### 1.4 目标光学特性建模

空间目标(卫星)外表面覆盖着多层隔热材料,为软体结构,在深空负压的状态下,既非理想的漫反射面(朗伯面),也非理想的镜反射面,而是兼具漫反射与镜反射特性的一种反射面<sup>[7]</sup>。根据卫星表面状况及反射特性可以用高次余弦散射分布表示,分布示意图如图 4 所示。

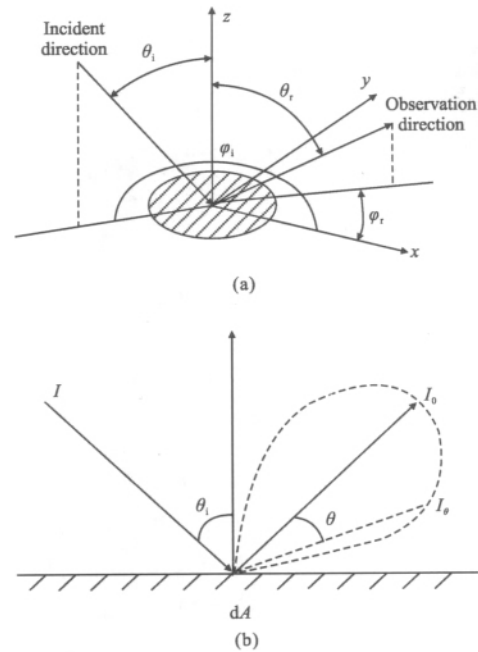


图 4 高次余弦散射分布示意图

Fig.4 Nth cosine scattering distribution diagram

若太阳在目标处的光谱辐照度为  $E_{\text{sun}}(\lambda)$ ,目标表面材料的光谱反射率为  $\rho(\lambda)$ ,太阳光的入射角为  $(\theta_i, \varphi_i)$ ,探测器的观测角为  $(\theta, \varphi)$ ,其中,  $\theta_i \in [0, \frac{\pi}{2}]$ ,  $\theta \in [0, \frac{\pi}{2} - \theta_i]$ ,  $\varphi_i, \varphi \in [0, 2\pi]$ ,在光学系统入瞳处产生的辐照度为:

$$E_{\text{sunlight}} = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{(n+1) \cdot E_{\text{sun}}(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot A \cdot \cos\theta_i \cdot \cos^n\theta}{2\pi(2 - \sin^{n+1}\theta_i - \cos^{n+1}\theta_i)R^2} d\lambda \quad (7)$$

$$\theta_i \in [0, \frac{\pi}{2}], \theta \in [0, \frac{\pi}{2} - \theta_i]$$

当考虑卫星表面为漫反射(朗伯辐射体)时,空间目标在光学系统入瞳处产生发辐照度为:

$$E_{\text{sunlight}} = \frac{A}{\pi} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{E_{\text{sun}}(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \cos\theta_i \cdot \cos\theta}{R^2} d\lambda \quad (8)$$

根据卫星表面状况, 卫星目标表面的散射近似服从三次余弦散射分布, 即  $n=3$ 。在此情况下, 空间目标在光学系统入瞳处产生的辐照度为:

$$E_{\text{sunlight}} = \frac{2A}{\pi R^2} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{E_{\text{sun}}(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \cos\theta_i \cdot \cos^3\theta}{2 - \sin^4\theta_i - \cos^4\theta_i} d\lambda$$

$$\theta_i \in \left[ 0, \frac{\pi}{2} \right], \theta \in \left[ 0, \frac{\pi}{2} - \theta_i \right] \quad (9)$$

建立表面散射特性为三次余弦散射分布的空间目标模型。经仿真计算, 空间目标在探测系统入瞳处辐照度随入射角、观测角的变化关系如图 5 所示。

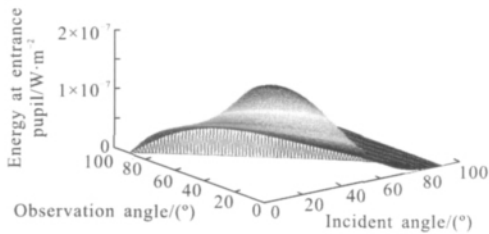


图 5 空间目标在探测系统入瞳处辐照度随入射角、观测角的变化关系

Fig.5 Relationship of the illuminance of space target on the entrance pupil dependence for incident and observing angle

通过对太阳光谱辐照度实验测量值、材料表面反射率实际测量值进行拟合得出函数  $E_{\text{sun}}(\lambda)$ 、 $\rho(\lambda)$ , 进而得到公式(9), 有利于进行入瞳处光谱照度值的快速便捷计算。将公式(9)利用 Matlab 编程形成软件, 在每次计算时, 只需输入积分上下限  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  便可得出不同谱段范围内入瞳处的辐照度值。

### 1.6 目标等效星等

以 SBV 相机为例, 选择中间工作谱段 400~700 nm, 分别从 100、200、500、1 000 km 的距离对空间目标进行探测, 分析空间目标可见光特性。

为了便于描述空间目标可见光特性, 通常采用天文学中的星等来描述目标的亮度。星等是指地球大气层外所接收到的星光照度, 零等星的辐照度规定为:  $E_0=2.068 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$ 。星等的数字越小, 星等越高, 目标的照度也就越大。根据星等计算公式, 可以计算出不同探测距离处的目标等效星等。

$$\lg \frac{E_0}{E} = \frac{2}{5} m \quad (10)$$

式中:  $E$  为空间目标在入瞳处的照度;  $m$  为星等值。

表 1 为不同探测距离下, 文中目标模型的等效星等。

表 1 目标等效星等

Tab.1 Equivalent magnitude of the space target

Detection range/km	Maximum energy at entrance pupil /W·m <sup>-2</sup>	Minimum energy at entrance pupil /W·m <sup>-2</sup>	Equivalent visual magnitude of space target
100	1.940 5×10 <sup>-7</sup>	1.031 5×10 <sup>-12</sup>	10.755 2
200	4.851 1×10 <sup>-8</sup>	2.578 7×10 <sup>-13</sup>	12.260 4
500	7.761 8×10 <sup>-9</sup>	4.126 0×10 <sup>-14</sup>	14.25
1 000	1.940 5×10 <sup>-9</sup>	1.031 5×10 <sup>-14</sup>	15.755 2
1 500	8.624 2×10 <sup>-10</sup>	4.584 4×10 <sup>-15</sup>	16.635 7

## 2 空间目标探测能力分析

### 2.1 目标信号响应分析

相机 CCD 焦平面接收到的空间目标可见光通量为<sup>[8]</sup>:

$$\Phi = E_{\text{pupil}} \cdot \tau_0 \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \quad (11)$$

式中:  $E_{\text{pupil}}$  为目标在入瞳处的辐照度;  $\tau_0$  为光学系统光谱透过率;  $D$  为光学系统有效口径。

CCD 焦平面上目标成像光斑的光照度为:

$$E = \frac{\Phi}{\pi d^2/4} = E_{\text{pupil}} \cdot \tau_0 \cdot \left( \frac{D}{d} \right)^2 \quad (12)$$

CCD 在曝光时间  $T$  内接收到的空间可见光目标响应光子个数为:

$$N_{\text{photon}} = \Phi \cdot T \cdot \frac{1}{E_{\text{photon}}} \quad (13)$$

式中:  $E_{\text{photon}}$  为单个光子能量,  $E_{\text{photon}}=hc/\lambda$ 。

当 CCD 的量子效率为  $\eta$  时, 由空间目标可见光引起的 CCD 信号电子数为:

$$N_{\text{CCD}} = N_{\text{photon}} \cdot \eta = E_{\text{pupil}} \cdot \tau_0 \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \cdot T \cdot \frac{1}{E_{\text{photon}}} \cdot \eta \quad (14)$$

在尺寸为  $a \times a$  的单位像元上, 所引起的信号电子数为:

$$N_{\text{element}} = N_{\text{photon}} \cdot \eta \cdot \left( \frac{a}{d} \right)^2 = E_{\text{pupil}} \cdot \tau_0 \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \cdot T \cdot \frac{1}{E_{\text{photon}}} \cdot \eta \cdot \left( \frac{a}{d} \right)^2 \quad (15)$$

### 2.2 信噪比分析

在空间目标可见光探测中, 信噪比的选取应满

足一定的探测概率与虚警概率。信噪比、探测概率、虚警概率之间有着密切的联系。信噪比有多种定义方式,通常定义为:

$$SNR = \frac{\hat{i}}{\hat{\sigma}} = \frac{x - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \quad (16)$$

式中:  $\hat{i}$  为目标强度估计值;  $x$  为图像中目标位置处的强度值;  $\hat{\mu}$  为背景高斯噪声的均值;  $\hat{\sigma}$  为背景高斯噪声的均方差估计值。

在图像处理过程中,对图像中任一个像素都可以利用二元假设判断法判断目标是否存在。通过计算得到信噪比、探测概率、虚警概率的关系为<sup>[9]</sup>:

$$P_D = 1 - \Phi\left(\frac{Th - u}{\sigma} - SNR\right) \quad (17)$$

$$P_F = 1 - \Phi\left(\frac{Th - u}{\sigma}\right) \quad (18)$$

式中:  $P_D$  为探测概率;  $P_F$  为虚警概率;  $Th$  为灰度直

方图中谷峰对应的灰度级。在空间目标可见光探测中,信噪比阈值通常选取 4~6 进行计算。经推导,选取 6 作为该计算参数。

### 2.3 相机有效口径计算

相机口径尺寸决定系统入射能量的多少,也决定着系统探测能力的大小,它是空间相机的重要指标。经数学推导,可以得到光学系统有效口径的数学评估模型为<sup>[10]</sup>:

$$D \geq \left[ \frac{SNR_{th}^2 + \sqrt{SNR_{th}^4 + 4SNR_{th}^2(B + N_C)}}{2 \cdot E_{pupil} \cdot \tau_0 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{E_{photon}} \cdot \eta} \right]^{1/2} \quad (19)$$

式中:  $SNR_{th}$  为信噪比阈值;  $B$  为非抑制杂光辐射在单个像元上产生的电子数;  $N_C$  为噪声电子数。

将公式(9)代入公式(19)可得空间相机有效口径计算公式为:

$$D \geq \left[ \frac{SNR_{th}^2 + \sqrt{SNR_{th}^4 + 4SNR_{th}^2(B + N_C)}}{2 \cdot \left\{ E_{sunlight} = \frac{2A}{\pi R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{E_{sun}(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \cos\theta_i \cdot \cos^3\theta}{2 - \sin^4\theta_i - \cos^4\theta_i} d\lambda \right\}_{min} \cdot \tau_0 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot T \cdot \frac{\lambda}{hc} \cdot \eta} \right]^{1/2} \quad (20)$$

在计算中,以某型号 CMOS 光电探测器作为示例探测器参数见表 2。计算光学系统有效口径,代入公式进行计算。

表 2 计算参数表

Tab.2 Parameters for calculation

Content	Value
Background radiation electron	$B = 10 e^-$
Noise electron	$35 e^-$
Optical system transmittance	0.85
Integration time/s	1/50
Per-photon energy/J	$E_{photon} = 3.6 \times 10^{-19} (\lambda = 550 \text{ nm})$
Quantum efficiency	30% ( $\lambda = 550 \text{ nm}$ )

计算得出不同探测距离下空间相机所需有效口径数值如表 3 所示。通过计算分析可以看出,光学相

表 3 相机有效口径

Tab.3 Camera effective diameter

Detection range /km	Minimum energy at entrance pupil/ $W \cdot m^{-2}$	Camera aperture/m
100	$1.0315 \times 10^{-12}$	0.14
200	$2.5787 \times 10^{-13}$	0.28
500	$4.1260 \times 10^{-14}$	0.71
1 000	$1.0315 \times 10^{-14}$	1.41
1 500	$4.5844 \times 10^{-15}$	2.12

机的有效口径与空间目标可见光特性、探测器性能(如信噪比、积分时间)等因素密切相关,这些综合因素最终决定着空间可见光相机的探测能力。

## 3 结 论

建立了空间目标光学特性模型,对位于中低轨道 200~1 500 km 处空间目标的可见光特性、探测器响应性能等方面进行了分析,运用软件进行了仿真计算,得出了空间相机有效口径的理论计算公式。结果表明,空间可见光相机探测能力由空间目标可见光特性、探测系统性能等因素综合决定。对相机探测能力推导的公式为中低轨道目标的探测提供了支持,有助于空间相机的设计。

参考文献:

[1] Zhang Keke, Fu Danying. The study on detect ability calculation method of space object visible camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 27(4): 22-16. (in Chinese)  
张科科,傅丹鹰.空间目标可见光相机探测能力理论计算方法研究[J]. *航天返回与遥感*, 2006, 27(4): 22-16.

[2] Mu Da, Li Quanyong, Dong Jianing. Analysis on ground-

- based infrared detection system detecting the infrared magnitude of space targets[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1609–1613. (in Chinese)
- 牟达, 李金勇, 董家宁. 地基红外系统探测空间目标红外星等分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1609–1613.
- [3] Wang Weiguo. Research of space object detecting under bright background [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2005: 1–4. (in Chinese)
- 王伟国. 空间目标白天光电探测技术研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2005: 1–4.
- [4] Tan Bitao, Jing Chunyuan, Wang Baoguo, et al. Measuring the star magnitude of manmade satellites with visual TV[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 397–400. (in Chinese)
- 谭碧涛, 景春元, 王宝国, 等. 卫星星等的可见光电视测量方法[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 397–400.
- [5] Infrared and Photovoltaic Systems Manual [M]. The 8358 Research Institute of The Third Research Institute of CASIC, 2001.
- 红外与光电系统手册 [M]. 航天科工集团三院 8358 研究所, 2001. (in Chinese)
- [6] Li Yanan, Sun Xiaobing, Qiao Yanli. Waveband selection method for space target detection and identification [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 67–71. (in Chinese)
- 李雅男, 孙晓兵, 乔延利. 空间目标探测与识别的波段选择[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 67–71.
- [7] Wang Hongyuan, Zhang Wei, Wang Zhile. Visible characteristics of space satellite based on Nth cosine scattering distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 593–598. (in Chinese)
- 汪洪源, 张伟, 王治乐. 基于高次余弦散射分布的空间卫星可见光特性[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 593–598.
- [8] An Liansheng, Applied Optics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2008: 116–119. (in Chinese)
- 安连生. 应用光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008: 116–119.
- [9] Accetta Joseph S, Shumaker David L. The Infrared and Elector-Optical Systems Handbook [M]. US: SPIE Press, 1993(3): 16–20, 84–88, 95–111.
- [10] Jin Yuzhu. Research on optical detection and recognition method of spcae debris [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 15–18. (in Chinese)
- 金玉竹. 空间碎片光学探测与识别方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 15–18.

## 下期预览

# 单 bar 大功率半导体激光器寿命评价技术

路国光, 黄云, 雷志锋

(工业和信息化部电子第五研究所 电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室, 广东 广州 510610)

**摘要:** 大功率半导体激光器工程应用要求其寿命大于  $10^9$  脉冲次数, 如何在短时间内快速获得大功率半导体激光器的长寿命指标是目前业界普遍关注的问题。针对 808 nm 大功率半导体激光器单 bar 器件进行了温度 25 °C、电流 100 A 和温度 50 °C、电流 100 A 及温度 50 °C、电流 115 A 3 组寿命评价试验, 综合利用线性回归分析、最小二乘法、拟合优度检验等统计学相关知识, 确定单 bar 大功率半导体激光器恒温 25 °C 外推寿命为  $2.86 \times 10^9$  次脉冲次数 (7 950 h), 激光器激活能为 0.21 eV, 加速因子为 1.88。并通过数据分析, 确定恒温 25 °C 寿命试验的最佳寿命试验时间为 4 000 h, 此时, 既能保证外推结果的准确性, 又能降低试验时间和成本, 实现短期寿命试验数据对大功率半导体激光器长寿命的快速评价。