

文章编号: 0253-2239(2010)08-2249-08

# 近程光学导航空间目标特性计算模型校验方法

鲍文卓 丛明煜 张 伟 汪洪源 王付刚 曹移明

(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** 为了提高空间目标光学特性的计算精度, 提出并实现了一种基于缩比模型实验的空间目标光学特性计算模型参数校验方法。首先, 分析影响空间目标光学特性的主要因素, 确定计算模型参数校验的总体方案; 其次, 构建空间目标光学特性实验测量系统, 采集两类实验被测对象(表面材料与目标缩比模型)在不同条件下的光学特性数据; 最后, 建立基于实验测量数据的计算模型参数校验算法, 对空间目标表面材料与几何结构的光学特性计算模型参数进行分步校验。实验结果表明, 校模后的目标特性计算结果与实验结果在统计意义上趋近一致, 该计算模型的校验方法可满足近程光学导航实际工程应用的要求。

**关键词** 空间光学; 空间目标光学特性; 近程光学导航; 模型参数校验; 缩比模型实验

**中图分类号** O432.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103008.2249

## A Verification and Validation Method for Calculation Model of Space Target Characteristics Used for Short-Range Optical Navigation

Bao Wenzhuo Cong Mingyu Zhang Wei Wang Hongyuan Wang Fugang Cao Yiming

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

**Abstract** In order to improve the precision of the space target optical characteristic calculation method, a verification and validation method for parameters of optical characteristic calculation model based on the target scale-model experiments is proposed. Firstly, the main influencing factors of the optical characteristics are analyzed, and the verification and validation scheme of the calculation model is proposed. Secondly, the experimental system is designed and the optical characteristics of two kind of targets are gained. Finally, the verification and validation algorithm is built up and parameters of the target surface materials and the geometrical construction are verified and validated step by step. It is showed that the results gained by the calculation model after verification and validation are close to the experimental results statistically. This verification and validation method can meet the requirement of short-range optical navigation.

**Key words** space optics; space target optical characteristics; short-range optical navigation; model parameters verification and validation; scale-model experiment

## 1 引 言

近程空间光学导航采用天基平台光学载荷获取空间目标(在轨运行的卫星)的光学图像信息, 在轨实现目标捕获、识别与跟踪。该导航方法具有自主性强、精度高等特点, 已成为近程自主空间交会对接的首选方式。在导航过程中, 空间目标光学特性决

定了导航信息获取系统的输入信号属性, 它是导航系统设计、仿真、测试与评估以及应用等工作开展的前提与基础。

目前, 在空间目标光学特性研究与实验方面已开展了大量工作。在空间目标光学特性理论建模与计算方面, 基于材料光学特性的不同假设, 建立了漫

收稿日期: 2009-09-10; 收到修改稿日期: 2009-11-30

基金项目: 国家 863 计划(2006AA704215)资助课题。

作者简介: 鲍文卓(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事目标光学特性与图像仿真分析等方面的研究。

E-mail: latermouse@126.com

导师简介: 丛明煜(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事空间光学工程方面的研究。E-mail: mycong@hit.edu.cn

反射<sup>[1,2]</sup>、双向反射分布函数<sup>[3~5]</sup>、高次余弦散射分布<sup>[6]</sup>等理论模型;在材料特性模型基础上,建立了基于漫反射特性的标准几何体解析法<sup>[1]</sup>、基于光线追迹的离散数值计算方法<sup>[7,8]</sup>;考虑到空间目标表面材料包覆后及在轨飞行时,其几何结构属性(例如表面粗糙度等参数)相对材料标准属性发生了较大变化,使得空间目标光学特性的计算结果存在较大误差。为校正理论建模与计算方法,应开展空间目标光学特性的实验测量。目前,主要有两类实验方式:空间目标全尺寸与缩比实验。在全尺寸空间目标光学特性实验方面,有三种实验方式:第一种为地面环境全尺寸实验,目前难以建立相应实验设施,未见相关报道;第二种为空间环境全尺寸地基观测实验<sup>[9,10]</sup>,采用地基光学测量设备对在轨空间目标进行择机观测,该实验结果易受大气扰动影响,观测时段有限,难以获得不同观测、光照条件下的实验数据;第三种为空间环境全尺寸天基观测实验,采用天基光学测量设备对在轨空间目标进行择机观测,实验数据精度较高,但实验成本代价高,难以完成不同种类空间目标的实验。在缩比空间目标光学特性实验方面,目前已建立了较完善的实验环境,主要开展了材料光学特性实验<sup>[11]</sup>,该实验模式克服了空间环境全尺寸地基、天基观测实验模式的不足,具有精度较高、可重复性和实验样本量大的特点,但还未见有关基于空间目标缩比实验结果对光学特性理论模型校验的相关报道。

为了提高空间目标光学特性的计算精度,本文采用系统模型参数辨识的思想,将缩比空间目标光学特性实验结果与理论计算模型相结合,综合考虑了空间目标表面材料特性与几何结构关系对空间目标光学特性的整体影响,设计了针对材料、本体结构与整星结构的三类光学特性缩比实验;建立了基于实验测量数据的计算模型参数校验算法;实现了空间目标光学特性计算模型参数的分步校验。实验结果表明该方法可满足近程光学导航实际工程应用的要求。

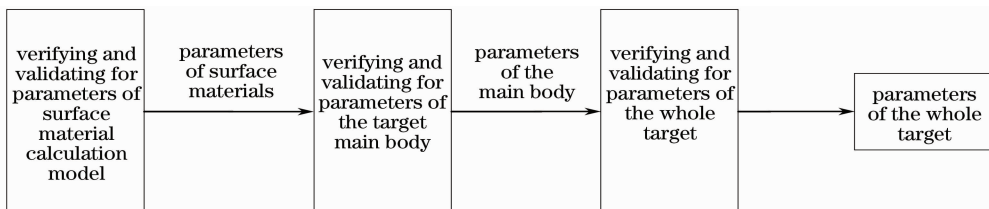


图2 目标光学特性计算模型参数校验方案

Fig. 2 Verification and validation scheme of target optical characteristics model parameters

## 2 空间目标缩比模型实验方案设计

### 2.1 实验方案总体思路

图1给出了空间目标等效结构示意图。该结构模型采用方形形式的本体与双翼长方形太阳帆板结构的组合体;卫星本体结构包覆材料有两种,分别简称为材料一与材料二,太阳帆板材料与本体结构材料不同,简称为材料三。

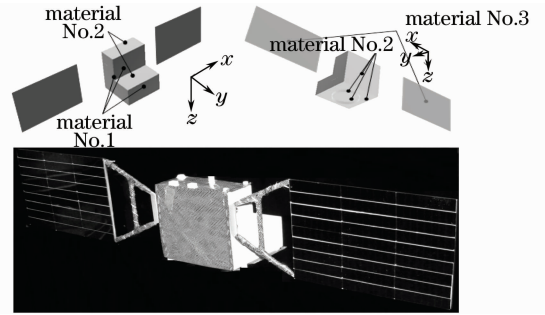


图1 空间目标结构示意图

Fig. 1 Configuration for space target construction

空间目标的光学特性可以等效为表面面元光学特性的叠加,目标表面面元的光学特性与面元之间的相互遮挡关系是目标光学特性的两大主要影响因素<sup>[12~15]</sup>。面元光学特性反映了目标表面材料的光学特性,而面元之间的相互遮挡关系反映了空间目标的复杂几何结构。

针对上述分析,从目标表面材料的光学特性、目标的复杂几何结构两方面入手,对目标光学特性计算模型参数进行了校验。

图2给出了空间目标光学特性计算模型参数校验方案框图。模型参数校验采用以下三个步骤:1)目标表面材料反射特性实验,对空间目标表面材料的光学特性计算模型参数进行校验;2)目标本体结构光学特性模型实验,对目标本体结构的光学特性计算模型参数进行校验;3)目标整星光学特性模型实验,实现目标光学特性计算模型参数的最终校验。目标本体与整星结构参数校验的目的是修正目标复杂几何结构对计算模型的影响,两种模型参数校验实验为递进关系,分别使用本体等效反射率与整星等效反射率参

数实现目标光学特性的全局参数修正。

### 2.2 实验测量系统方案

#### 2.2.1 实验测量系统组成

实验方案总体思路给出了三类实验测试对象光

学特性实验测量模式,计算模型参数校验实验流程如图 3 所示。

图 4 分别给出了目标本体材料平板、空间目标本体结构、空间目标整星的实物缩比模型。

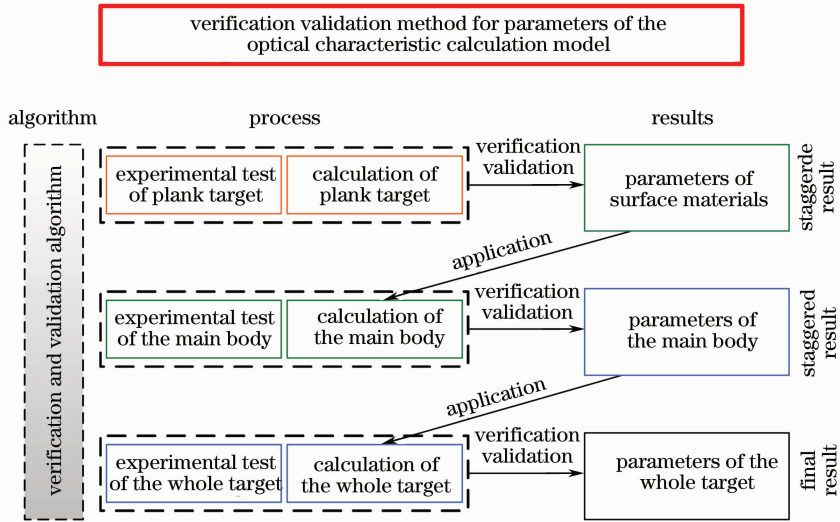


图 3 计算模型参数校验流程

Fig. 3 Verification and validation flow chart of calculation model parameters

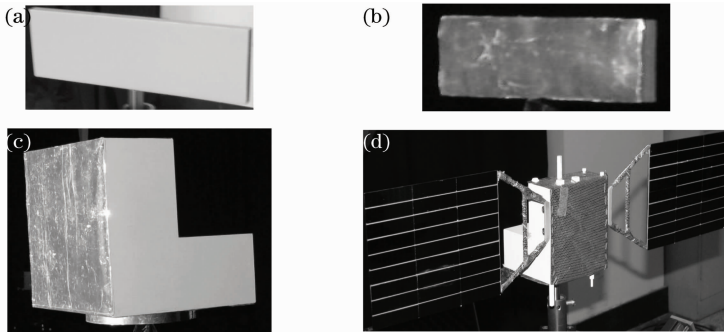


图 4 空间目标缩比模型。(a)材料一平板模型;(b)材料二平板模型;(c)本体缩比模型;(d)整星缩比模型

Fig. 4 Scaled models of space target. (a) plank model with material No. 1; (b) plank model with material No. 2; (c) scaled model for main body; (d) scaled model for space target

目标光学特性计算模型参数校验实验测量系统组成如图 5 所示。系统由以下几个部分组成:太阳模拟器、待测对象、目标转台、测量相机以及数据处理计

算机。测量相机可放置在以转台为原点的圆周(半径为 3 m)上任意一点,太阳模拟器置于固定位置。为了防止实验过程中 CCD 探测器出现饱和,在测量系统输出信号较强时,在测量相机镜头上放置衰减片。

#### 2.2.2 实验数据处理方法

实验数据处理方法如图 6 所示。实验数据处理

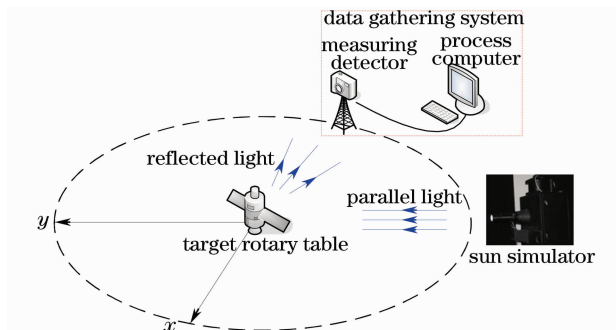


图 5 实验测量系统组成

Fig. 5 Components of test and measurement system

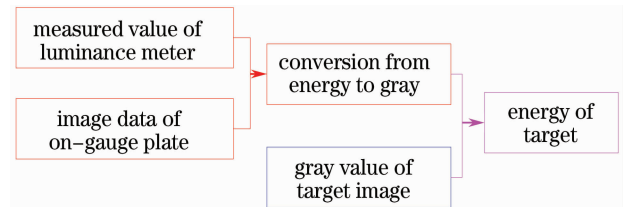


图 6 实验数据处理原理图

Fig. 6 Diagram of test data processing

可分为标准板的标定数据处理与测量对象的实验数据处理两部分。

为提高实验测量系统的精度,克服太阳模拟器、测量相机光学系统能量衰减所带来的系统误差,采用标准漫反射板对测量系统进行标定实验。对反射率为 0.9 的标准漫反射板进行标定测量实验,获取测量系统的输入与输出光学信号,基于标准板的标称值,建立信号灰度值与亮度之间的对应关系。

在标定实验的基础上,开展测量对象目标特性实验。首先,通过读取实验图像数据,求取加装衰减片后的测量对象图像总的灰度值;其次,由标定数据表查取总灰度值对应的能量值;最后,根据衰减片衰减倍数确定测量对象能量值。

### 3 计算模型参数校正方法

目标光学特性计算模型参数校验原理如图 7 所示。模型参数校验过程由模型校正与模型验证两部分组成。

模型参数校正思路:建立目标特性理论计算模型;基于测量对象的实验数据样本与理论计算结果,建立参数校正目标函数;采用迭代算法,求取使目标函数最小意义下的参数值。

模型验证思路:利用校正后的计算模型,计算非模型校正实验样本实验条件下的目标特性,并与该实验样本进行统计比较,完成模型验证工作。

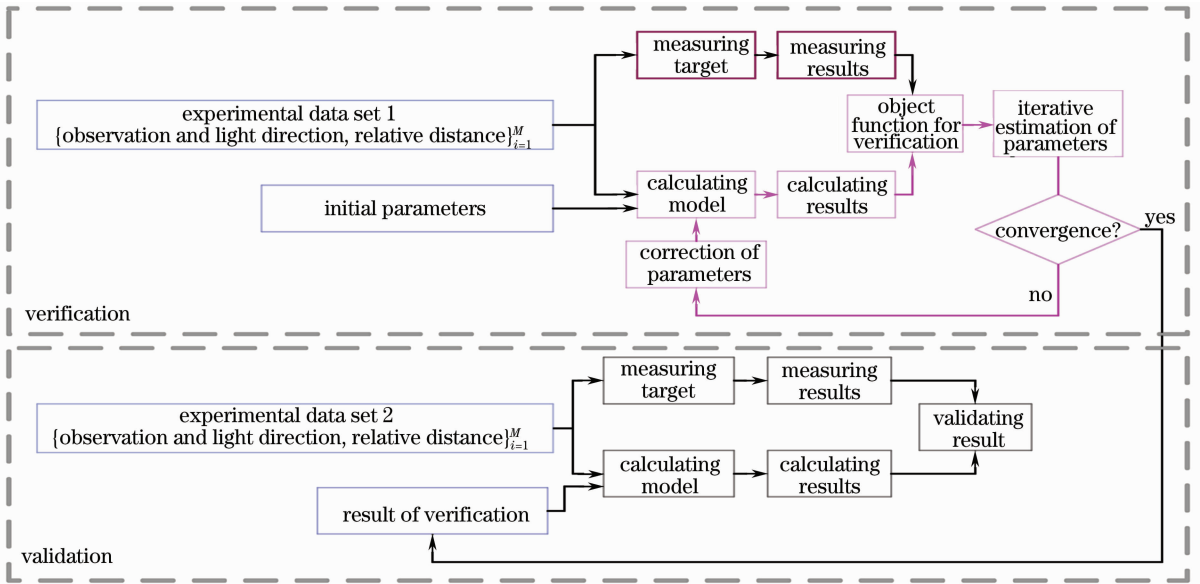


图 7 计算模型参数校验算法原理框图

Fig. 7 Diagram of verification and validation algorithm of calculation model parameters

采用系统辨识理论中的牛顿-拉夫森迭代算法<sup>[16,17]</sup>进行计算模型参数校正。

#### 1) 目标函数构造

设实验样本数  $N$ , 实验样本  $E_e^i$  集合  $S_e = \{E_e^i, i=1, \dots, N\}$ , 计算模型中有  $Q$  个模型参数, 模型参数  $k_i$  的集合  $K = \{k_i, i=1, \dots, Q\}$ , 计算模型样本  $E_t^i(k_1, \dots, k_Q)$  的集合  $S_t = \{E_t^i(k_1, \dots, k_Q), i=1, \dots, N\}$ 。参数优化的目标函数(残差平方和, SSR)为

$$R_{SS} = \sum_{i=1}^N (E_e^i - E_t^i)^2, \quad (1)$$

#### 2) 迭代算法

设第  $j$  次迭代时, 参数初值为  $K^j = \{k_i^j, i=1, \dots, Q\}$ , 由(1)式可得, 对  $k_p \in K^j$  的偏导数近似为

$$\frac{\partial R_{SS}}{\partial k_p} = -2 \sum_{i=1}^N \left[ \left( E_e^i - E_t^{i(0)} - \sum_{q=1}^Q \frac{\partial E_t^i}{\partial k_q} \cdot \Delta k_q \right) \frac{\partial E_t^i}{\partial k_p} \right]. \quad (2)$$

式中  $E_t^{i(0)}$  为迭代初值,  $\Delta k_q^i = k_q^{j+1} - k_q^j$ 。令

$$\frac{\partial R_{SS}}{\partial k_p} = 0. \quad (3)$$

可得如下方程组:

$$\sum_{i=1}^N \left\{ \left[ \sum_{q=1}^Q \frac{\partial E_t^i}{\partial k_q} \Delta k_q \right] \cdot \frac{\partial E_t^i}{\partial k_p} \right\} = \sum_{i=1}^N \left[ (E_e^i - E_t^{i(0)}) \frac{\partial E_t^i}{\partial k_p} \right], \quad p = 1, 2, \dots, Q \quad (4)$$

(4)式可表示为

$$\mathbf{A}_{Q \times Q} \Delta \mathbf{K} = \mathbf{B}_{Q \times 1} \quad (5)$$

式中

$$\mathbf{A}_{Q \times Q} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial E_t^i}{\partial k_1} \right)^2 & \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial E_t^i}{\partial k_1} \cdot \frac{\partial E_t^i}{\partial k_2} \right) & \cdots & \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial E_t^i}{\partial k_1} \cdot \frac{\partial E_t^i}{\partial k_Q} \right) \\ \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial E_t^i}{\partial k_2} \cdot \frac{\partial E_t^i}{\partial k_1} \right) & \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial E_t^i}{\partial k_2} \right)^2 & \cdots & \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial E_t^i}{\partial k_2} \cdot \frac{\partial E_t^i}{\partial k_Q} \right) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial E_t^i}{\partial k_Q} \cdot \frac{\partial E_t^i}{\partial k_1} \right) & \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial E_t^i}{\partial k_Q} \cdot \frac{\partial E_t^i}{\partial k_2} \right) & \cdots & \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial E_t^i}{\partial k_Q} \right)^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{Q \times 1} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \left\{ (E_e^i - E_t^{i(0)}) \frac{\partial E_t^i}{\partial k_1} \right\} \\ \sum_{i=1}^N \left\{ (E_e^i - E_t^{i(0)}) \frac{\partial E_t^i}{\partial k_2} \right\} \\ \cdots \\ \sum_{i=1}^N \left\{ (E_e^i - E_t^{i(0)}) \frac{\partial E_t^i}{\partial k_Q} \right\} \end{bmatrix},$$

由(5)式得到第  $j$  次迭代参数增量值为

$$\Delta \mathbf{K}^j = (\Delta k_1^j, \Delta k_2^j, \dots, \Delta k_Q^j)^T \quad (6)$$

可得第  $j+1$  次迭代参数初值为

$$k_p^{j+1} = k_p^j + \Delta k_p^j, \quad p = 1, \dots, Q \quad (7)$$

迭代收敛条件为

$$R_{SS} < \varepsilon, \quad (8)$$

式中  $\varepsilon$  为迭代收敛阈值。

由(9)式可得

$$\frac{\partial E_t^i}{\partial k_1} = \frac{\partial E_t^i}{\partial \rho_1} = \frac{E_{\text{sun}}}{\pi R^2} \cdot \text{Scos} \Theta_1 \cos \Theta_2. \quad (10)$$

将(9)式、(10)式代入(5)式,可求取平板测量对象的反射率参数校正值。设  $N=9, Q=1$ ,模型参数校正结果见表 1。

表 1 材料一模型参数校正结果

Table 1 Verification results for the parameter of material No. 1

Initial value	Convergence result of the parameter	$R_{SS}/10^{-19}$
0.05	0.423966	1.096103
0.2	0.423966	1.096103
0.3	0.423966	1.096103
0.4	0.423966	1.096103
0.5	0.423966	1.096103
1.0	0.423966	1.096103

由表 1 可看出,材料一平板模型反射率校正结果与初值无关,校正结果为  $\rho_1 = 0.424$ 。利用校正后的反射率进行模型参数验证,结果如表 2 所示。由表中的数据可计算出,复算值与实验值离差的均值为  $3.5 \times 10^{-11} \text{ W/m}^2$ ,离差的标准差为  $1.23 \times 10^{-20} \text{ W/m}^2$ 。

表 2 材料一模型参数验证结果

Table 2 Validation results for the parameter of material No. 1

A	B	C	D	Test irradiance /( $10^{-11} \text{ W/m}^2$ )	Test magnitude	Calculation irradiance /( $10^{-9} \text{ W/m}^2$ )	Calculation magnitude
0	0	0	90	0.32	9.0	0.00	9.0
0	10	0	90	61.90	3.3	0.80	3.0
0	20	0	90	14.50	2.4	1.57	2.3
0	30	0	90	21.60	2.0	2.29	1.9
0	40	0	90	28.60	1.6	2.95	1.6
0	50	0	90	34.90	1.4	3.52	1.4
0	60	0	90	39.90	1.3	3.98	1.3
0	70	0	90	44.10	1.2	4.32	1.2
0	80	0	90	46.80	1.1	4.53	1.1

Note: A, B means observation azimuth and altitude angle ( $^\circ$ ); C, D means light azimuth and altitude angle ( $^\circ$ )

#### 4.1.2 材料二平板测量对象

由材料二平板测量对象反射实验结果可看出,

在  $0 \sim 90^\circ$  的观测角变化范围内,材料二平板测量对象光学特性与漫反射存在很大差异,其反射照度变

化规律近似为指数函数形式。因此,可将反射率模型结构选为指数函数形式,构造基于漫反射特性计算模型的等效反射率参数。

设等效反射率为  $\rho_2$ ,反射率模型结构为

$$\rho_2 = \rho_0 + \rho \exp(n\alpha), \tag{11}$$

式中  $\rho_0, \rho, n$  为三个待定参数,  $\alpha$  为观测方向与目标表面镜面反射方向的夹角。

将(11)式代入(9)式可得

$$\frac{\partial E_t^i}{\partial k_1} = \frac{\partial E^i}{\partial \rho_0} = \frac{E_{\text{sun}}}{\pi R^2} \cdot S \cos \Theta_1^i \cos \Theta_2^i, \tag{12}$$

$$\frac{\partial E_t^i}{\partial k_2} = \frac{\partial E^i}{\partial \rho} = \frac{E_{\text{sun}}}{\pi R^2} \cdot S \cos \Theta_1^i \cos \Theta_2^i \exp(n\alpha), \tag{13}$$

$$\frac{\partial E_t^i}{\partial k_3} = \frac{\partial E^i}{\partial n} = \frac{E_{\text{sun}}}{\pi R^2} \cdot S \cos \Theta_1^i \cos \Theta_2^i \cdot \rho \alpha \exp(n\alpha), \tag{14}$$

设  $N=10, Q=3$ ,模型参数校正结果如表 3 所示。

表 3 材料二模型参数校正结果

Table 3 Verification results for the parameter of material No. 2

Initial value			Convergence result of the parameter			
$\rho_0$	$\rho / 10^{-7}$	$n$	$\rho_0$	$\rho / 10^{-8}$	$n$	$R_{\text{ss}} / 10^{-18}$
0.08	0.209	0.25	0.08	2.09	0.25	3.5
0.1	0.209	0.25	0.08	2.09	0.25	3.5
0.1	0.209	0.3	0.08	2.09	0.25	3.5
0.1	2.090	0.3	0.08	2.09	0.25	3.5
0.1	20.900	0.3	0.08	2.09	0.25	3.5

从表 3 可得,校正参数为: $\rho_0 = 0.0788, \rho = 2.085 \times 10^{-8}, n = 0.2483$ 。利用校正后的反射率进行模型参数验证,结果如表 4 所示。由表中的数据可以

计算出,复算值与实验值之间离差的均值为  $2.57 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$ ,离差的标准差为  $8.06 \times 10^{-18} \text{ W/m}^2$ 。

表 4 材料二模型参数验证结果

Table 4 Validation results for the parameter of material No. 2

A	B	C	D	Test irradiance /( $10^{-10} \text{ W/m}^2$ )	Test magnitude	Calculation irradiance /( $10^{-9} \text{ W/m}^2$ )	Calculation magnitude
0	0	0	90	0.037	8.9	0.000	9.0
0	10	0	90	0.069	8.2	0.149	4.9
0	20	0	90	0.137	7.4	0.293	4.1
0	30	0	90	0.320	6.5	0.428	3.7
0	40	0	90	0.885	5.4	0.553	3.4
0	50	0	90	2.700	4.2	0.698	3.2
0	60	0	90	25.300	1.8	1.320	2.5
0	70	0	90	171.000	-0.3	8.340	0.5
0	80	0	90	965.000	-2.2	95.500	-2.2

Note: A, B means observation azimuth and altitude angle ( $^\circ$ ); C, D means light azimuth and altitude angle ( $^\circ$ )

### 4.2 目标本体结构缩比模型

由于理论计算模型难以刻画空间目标表面材料粗糙度与目标小尺寸非标准几何结构对光学特性的影响,需要在表面材料光学特性模型参数校验的基础上,对本体结构模型光学特性进行进一步的校验。本体结构模型光学特性参数校验的初始参数为材料一、材料二的反射率参数  $\rho_1, \rho_2$ ,设校验后的反射率参数为  $\rho'_1, \rho'_2$ ,记为本体等效反射率。

材料一的反射率初值为  $\rho_1 = 0.424$ ;考虑到实际应用中观测方向与目标面元法线夹角小于  $60^\circ$ ,由材料二反射特性指数校验模型,将其简化为仅含常数项的模型,取材料二初值为  $\rho_2 = 0.005$ 。本体

等效反射率与材料反射率初值的数学关系为

$$\rho'_1 = k_0 \rho_1, \quad \rho'_2 = k_1 \rho_2, \tag{15}$$

式中  $k_0, k_1$  为本体结构校正系数。

由于  $k_1$  参数的灵敏度远小于  $k_0$  的灵敏度,因此在校验的过程中,将  $k_1$  设定为  $k_1 = 1$ ,仅对  $k_0$  参数进行校验。参数校正结果如表 5 所示。

由表 5 可得,本体结构校正参数为  $k_0 = 1.26$ ,则本体等效反射率校正结果为  $\rho'_1 = 0.534, \rho'_2 = 0.005$ 。在三种实验条件下,利用校正后的本体等效反射率进行模型参数验证,比对结果如图 8 与图 9 所示。三组结果中,复算反射照度值与实验值离差的均值分别为  $5.76 \times 10^{-9}, 4.25 \times 10^{-11}, 2.04 \times$



$10^{-9} \text{ W/m}^2$ , 离差的标准差分别为  $7.27 \times 10^{-20}$ ,  $1.03 \times 10^{-19}$ ,  $2.94 \times 10^{-19} \text{ W/m}^2$ ; 复算视星等与实验视星等的最大偏差小于 0.6 星等。

表 5 本体结构校正系数计算结果

Table 5 Calculation results for the verifying parameter of main body

Initial value	Convergence result of the parameter	$R_{ss}/10^{-16}$
0.1	1.259796	4.155548
0.5	1.259796	4.155548
1.0	1.259796	4.155548
2.0	1.259796	4.155548
4.0	1.259796	4.155548
10.0	1.259796	4.155548

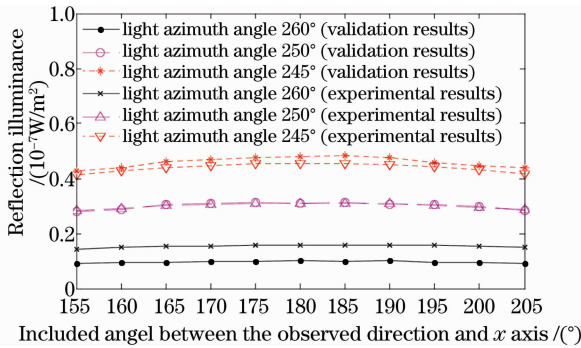


图 8 本体模型光学特性模型校验结果(照度)

Fig. 8 Validation results(illuminance) for the main body of target

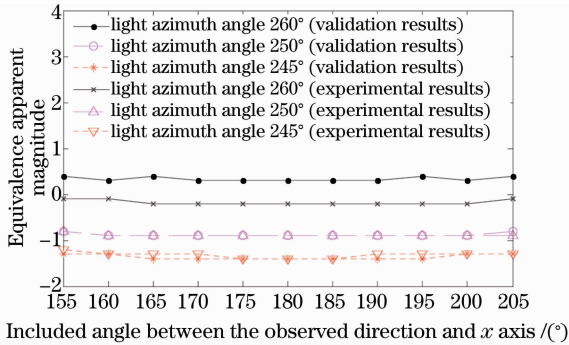


图 9 本体模型可见光反射特性校验结果(视星等)

Fig. 9 Validation results(magnitude) of visible light reflection characteristic for main body model of target

### 4.3 目标整星结构缩比模型

在本体缩比模型等效参数校验的基础上,考虑到太阳帆板与目标本体结构之间的连接关系与相互遮挡关系对目标整星光学特性的影响,将该影响因素等效到太阳帆板反射率参数中,记为整星等效反射率  $\rho'_3$ 。

太阳帆板反射率参数初值  $\rho_3 = 0.17$ , 采用如下反射率校正模型:

$$\rho'_3 = k_2 \rho_3, \quad (16)$$

式中  $k_2$  为整星结构校正系数。校验结果如表 6 所示。

表 6 整星结构校正系数计算结果

Table 6 Calculation results for the verifying parameter of the whole target

Initial value	Convergence result of the parameter	$R_{ss}/(10^{-13})$
0.1	0.4165	6.1114568
0.5	0.4165	6.1114568
1.0	0.4165	6.1114568
5.0	0.4165	6.1114568
10.0	0.4165	6.1114568

从表 6 中可得,整星结构校正系数  $k_2 = 0.4165$ 。在三种实验条件下,利用校正后的整星等效反射率进行模型参数验证,比对结果如图 10 与图 11 所示。三组结果中,复算反射照度值与实验值离差的均值分别为  $1.49 \times 10^{-8}$ ,  $9.77 \times 10^{-9}$ ,  $2.09 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$ , 离差的标准差分别为  $6.71 \times 10^{-17}$ ,  $6.57 \times 10^{-16}$ ,  $1.90 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2$ ; 复算视星等与实验视星等的最大偏差小于 0.5 星等。

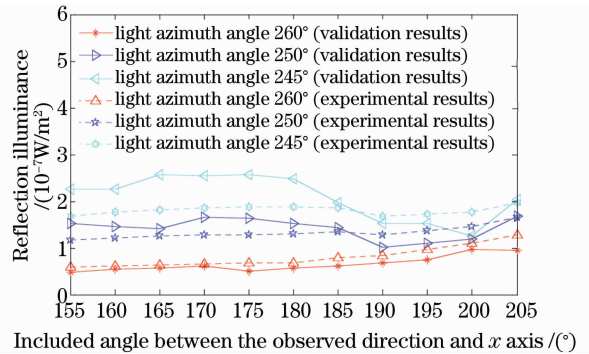


图 10 整星模型可见光反射特性校验结果(照度)

Fig. 10 Validation results(illuminance) of visible light reflection characteristic for space target model

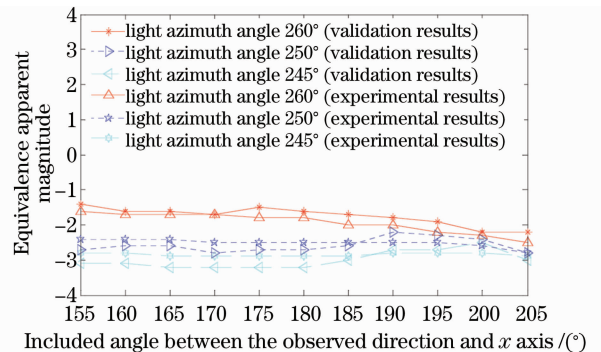


图 11 整星模型可见光反射特性校验结果(视星等)

Fig. 11 Validation results(magnitude) of visible light reflection characteristic for space target model

## 5 结 论

本文提出并实现了一种基于缩比模型实验的空间目标光学特性计算模型参数分步校验方法;构建了用于表面材料与缩比模型的目标光学特性实验测量系统,开展了表面材料平板对象、本体缩比模型、整星缩比模型的光学特性测量实验;在实验测量数据的基础上,完成了三种测量对象的光学特性计算模型参数校验。模型校验结果表明,校模后的目标特性计算结果与实验结果在统计意义上趋近一致,最大偏差小于0.5视星等,该计算模型满足近程光学导航实际工程应用的要求。

## 参 考 文 献

- 1 J. D. Rask, Modeling of diffuse photometric signatures of satellites for space object identification [D]. Wright-Patterson AFB: Air Force Institute of Technology, 1983. 20~119
- 2 G. J. Zissis, J. S. Accetta, D. L. Shumaker. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook vol. 1-Sources of Radiation [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993. 151~157
- 3 Wu Zhensen, Dou Yuhong. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1250~1254  
吴振森, 窦玉红. 空间目标的可见光散射与红外辐射 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1250~1254
- 4 Cao Yunhua, Wu Zhensen, Zhang Hanlu. Experimental measurement and statistical modeling of spectral bidirectional reflectance distribution function of rough target samples [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 792~798  
曹运华, 吴振森, 张涵璐. 粗糙目标样片光谱双向反射分布函数的实验测量及其建模 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 792~798
- 5 Yao Lianxing, Qiu Weili, Wang Fuheng. Optical characteristic of the object and environment [M]. Beijing: Astronavigation Press, 1995. 93~127  
姚连兴, 仇维礼, 王福恒. 目标和环境的光学特性 [M]. 北京: 宇航出版社, 1995. 93~127
- 6 Wang Hongyuan, Zhang Wei, Wang Zhile. Visible characteristics of space satellite based on nth cosine scattering distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 594~598  
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): 594~598
- 7 Huang Zhanhua, Cheng Hongfei, Cai Huaiyu. A study on universal ray tracing algorithm in the medium of variable refractive index [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 589~592  
黄战华, 程红飞, 蔡怀宇. 变折射率介质中光线追迹通用算法的研究 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 589~592
- 8 Zheng Xiaodong, Wang Yangchun, Qin Wenhong. Random error analysis of illumination distribution calculated by non-sequential ray tracing programs [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10): 1970~1973  
郑晓东, 汪扬春, 秦文红. 非序列光线追迹程序照度分布计算的随机误差分析 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(10): 1970~1973
- 9 E. W. Rork, S. S. Lin, A. J. Yakutis. Ground-based electro-optical detection of artificial satellites in daylight from reflected sunlight [D]. Cambridge Massachusetts Institute of Technology, 1982: 3~35
- 10 G. A. Mccue, J. C. Williams, J. M. Morford. Optical characteristics of artificial satellites [J]. *Planet. Space. Sci.*, 1971, **19**(1): 851~868
- 11 Wei Zhang, Hongyuan Wang, Zhile Wang. Measurement of bidirectional reflection distribution function on material surface [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 88~91
- 12 Li Shujun, Gao Xiaodong, Zhu Qixiang. Analysis for luminosity features of a satellite with solar battery panels [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(4): 1~4  
李淑军, 高晓东, 朱耒祥. 带太阳能帆板的卫星光度特性分析 [J]. *光电工程*, 2004, **31**(4): 1~4
- 13 Chen Hui, Wu Zhensen, Bai Lu. Research on the coherent scattering of Gaussian beam from arbitrarily shaped convex object with rough surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 115~120  
陈辉, 吴振森, 白璐. 任意形状凸粗糙物体高斯光束相干散射研究 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 115~120
- 14 Li Wei, Yang Kecheng, Xia Min. Distribution characteristics of scattered light intensity on coated air bubble in water [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 799~803  
李微, 杨克成, 夏珉. 光在水中吸附膜层气泡上的散射特性 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 799~803
- 15 J. J. Koenderink, A. J. van Doorn. Shading in the case of translucent objects [C]. *SPIE*, 2001, **4299**: 312~320
- 16 Fang Chongzhi, Xiao Deyun. Process Identification [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995. 71~126  
方崇智, 萧德云. 过程辨识 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988. 71~126
- 17 Zhu Yiyong, Yao Fuqiang, Wang Housheng. Novel variable step-size adaptive TLS algorithm [J]. *Journal of System Simulation*, 2008, **20**(18): 4843~4846  
朱义勇, 姚富强, 王厚生. 一种优化的自适应总体最小二乘系统辨识算法 [J]. *系统仿真学报*, 2008, **20**(18): 4843~4846