

doi:10.3788/gzxb20184701.0129004

# 基于实验测量与 OCS 仿真计算的卫星光学 散射特性对比验证

田琪琛<sup>1</sup>, 李智<sup>2</sup>, 徐灿<sup>3</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 刘程浩<sup>1</sup>, 齐跃<sup>1</sup>

(1 航天工程大学 研究生院, 北京 101416)

(2 航天工程大学 航天指挥系, 北京 101416)

(3 航天工程大学 航天装备系, 北京 101416)

**摘 要:** 卫星的光度数据与卫星的姿态、材质、观测角度等多种因素有关, 仿真计算往往无法获取这些因素, 导致仿真计算结果无法与实测进行对比。针对仿真结果无法通过实测进行验证的问题, 结合卫星工具箱中卫星运动场景, 分别通过实验测量与仿真计算获取卫星光学散射特性的时序数据。实验测量中, 在实验室内模拟太空光学环境, 实现实验过程中卫星模型姿态与卫星工具箱中卫星姿态的并行分析, 保证了测量的准确性。仿真计算中, 采用基于前期空间目标常用材质双向反射分布函数实测数据拟合出的双向反射分布函数模型, 且考虑卫星表面材料褶皱对空间目标光学散射特性的影响, 提高仿真精度。此外, 设计了一个轨道参数为: 半长轴  $a=7\ 716.14$  km, 偏心率  $e=0.001$ , 轨道倾角  $i=58^\circ$ , 近日点幅角  $\omega=36^\circ$ , 升交点赤经  $\Omega=345^\circ$ , 平近点角  $M=231.1^\circ$ , 相位角变化范围为  $38^\circ\sim 98^\circ$  的三轴稳定卫星运动场景, 通过实验测量与仿真计算获取该场景下卫星的光度数据, 发现二者趋势相同, 幅值相近, 相关系数为 0.69。

**关键词:** 空间目标; 光学散射特性; 实验测量; 仿真计算; 运动状态

中图分类号: TP751.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)01-0129004-7

## Comparison and Verification of Satellite Optical Scattering Characteristics Based on Experimental Measurements and OCS Simulation

TIAN Qi-chen<sup>1</sup>, LI Zhi<sup>2</sup>, XU Can<sup>3</sup>, LI Peng<sup>1</sup>, LIU Cheng-hao<sup>1</sup>, QI Yue

(1 Department of Graduate Management, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

(2 Department of Space Command, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

(3 Department of Space Equipment, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

**Abstract:** Photometric data of satellites are related to many factors, such as satellite attitude, material and observation angle. The simulation calculation is often unable to obtain these factors, so that the simulation results cannot be compared with the measured results. Aiming at the problem that simulation results cannot be verified by measurement, the photometric data of the satellite in Satellite Tool Kit motion scene are obtained by experimental measurement and simulation calculation. In laboratory measurement, not only the space optical environment is simulated, but also the parallel analysis of satellite model attitude and satellite attitude in Satellite Tool Kit can be realized, which ensure the measurement accuracy. In simulation calculation, the bidirectional reflectance distribution function model based on the bidirectional reflectance distribution function data of the common space target material is used, and the influence of the wrinkled surface is taken into account, which improves the accuracy of the simulation. In addition, a three-axis stable satellite motion scene with phase angle variation range of  $38^\circ$ -

基金项目: 国家高技术研究发展计划(No.2015AA7046104)

第一作者: 田琪琛(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为航空宇航科学与技术, Email: 15651756195@163.com

导师(通讯作者): 李智(1972-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为航空宇航科学与技术, Email: 954448550@qq.com

收稿日期: 2017-08-07; 录用日期: 2017-09-26

<http://www.photon.ac.cn>

98° is designed, the orbital parameters of the satellite are: semi major axis  $a=7\ 716.14$  km, eccentricity  $e=0.001$ , orbit inclination  $i=58^\circ$ , argument of perihelion  $\omega=36^\circ$ , longitude of ascending node  $\Omega=345^\circ$ , mean anomaly  $M=231.1^\circ$ . When compare the photometric data obtained by experiment and simulation, the results show that two trends are same and the correlation coefficient is 0.69.

**Key words:** Space target; Optical scattering characteristics; Experimental measurement; Simulation calculation; Motion state

**OCIS Codes:** 290.4210; 350.6090; 350.1260; 120.4820; 120.4640

## 0 引言

空间目标的光学观测是空间态势感知的主要手段之一,而光度序列是光学观测最容易获取的探测数据,基于光度数据反演目标外形、归属、运动状态成为研究热点<sup>[1]</sup>.由于实际目标的光学散射特性与卫星的姿态、材质、观测角度等多种因素有关,使得单纯基于实际天文观测开展目标特性分析具有很大的难度.与通过天文观测获取目标的光变数据方法相比,仿真计算与实验测量的方式不仅速度快、效率高,还可以快速判断数值模型及分析结果的准确性,是实际观测的有力补充手段.国内外学者开发的仿真算法大都将空间目标模型简化为单一几何体或者简单几何体的叠加,将目标表面材料设置为朗伯体材质或者单一材质,且没有考虑实际目标表面褶皱的情况<sup>[2]</sup>.国内外学者搭建的空间目标光学散射特性实验平台大多存在自动化程度低、模拟实际场景能力差等问题,造成实验过程中卫星姿态不准确、无法开展全面分析等问题.如参考文献[3]中搭建的实验平台,虽能实现卫星任意姿态下光学散射特性的测量,但是需要手动调整卫星的姿态,实验效率低、精度不足;参考文献[4]中搭建的实验平台,虽然自动化程度较高,但是该系统观测俯仰角模拟范围只有 $-15^\circ\sim 15^\circ$ ,观测方位角模拟范围只有 $-25^\circ\sim 25^\circ$ ,因此模拟空间目标运动状态的能力有限.

本文利用空间目标的光学特性实验室在光学洁净暗室的基础上,构建包括太阳模拟器、平面反光镜、光谱仪、多轴转台等设备的实验测量环境,具备3个自由度姿态调整以及1个自由度探测器调整能力,能够模拟任意角度下的空间光学观测<sup>[5]</sup>.数值仿真中,采用空间目标光散射截面(Optical Cross Section, OCS)方法,利用前期测量的常见空间目标材质双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)数据拟合出的面元材料BRDF模型,并对卫星模型表面进行褶皱化处理,提高计算精度.为检验实验测量与数值计算的一致性,本文在卫星工具箱(Satellite Tool Kit, STK)中设计了一个卫星运动场景,分别实验测量与仿真计算获取卫星在该场景下的光度数据.

## 1 空间目标光学散射特性实验研究

### 1.1 空间目标光学特性实验室介绍

实验室整体布局如图1.主要的实验仪器有太阳模拟器(标准氙灯光源)、平面反光镜、底座滑轨、目标模型、三轴转台、光谱仪等.

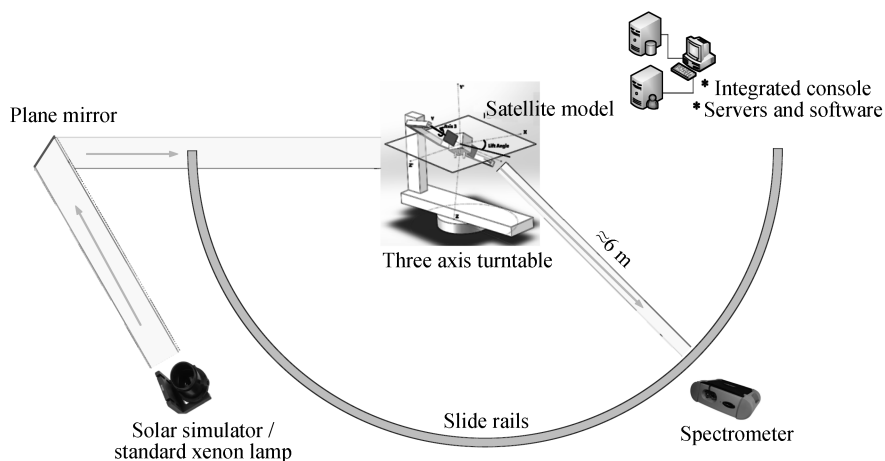


图1 实验室整体布局图  
Fig.1 Overall layout of the laboratory

实验室拥有一颗某卫星的缩比模型(模型长 1 m,宽 0.6 m,高 0.8 m),该模型所用材质和真实卫星一致.实验平台采用了良好的轴系设计,在避免移动大型设备的基础上,能够平行模拟实际光源、目标、探测器的相对位置.实验室拥有的转台(如图 2 所示)可以实现卫星模型俯仰轴(图 2 中 Axis 2)、滚转轴(图 2 中 Axis 3)、偏航轴(图 2 中 Axis 1)的转动.将光源、目标器、探测器之间的夹角记为相位角(Phase Angle),光谱仪能够进行绕心运动,模拟真实场景下的相位角,实时测量卫星模型的灰度值(Digital Number, DN)值.

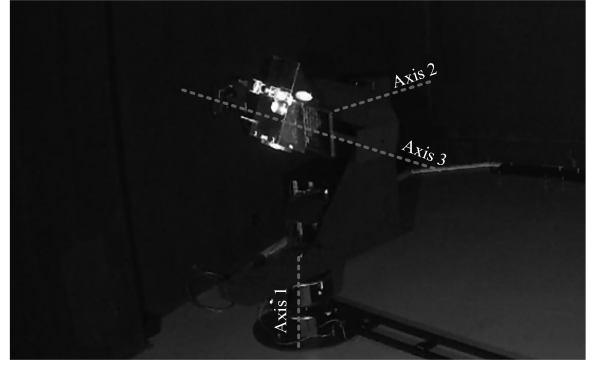


图 2 转台示意图

Fig.2 Turntable diagram

课题组前期对实验室几何模拟原理进行了说明<sup>[6]</sup>,通过 4 个自由度的实时调整,使得实验过程中卫星模型的姿态与实际场景中卫星姿态保持相同.实验操作流程如图 3.

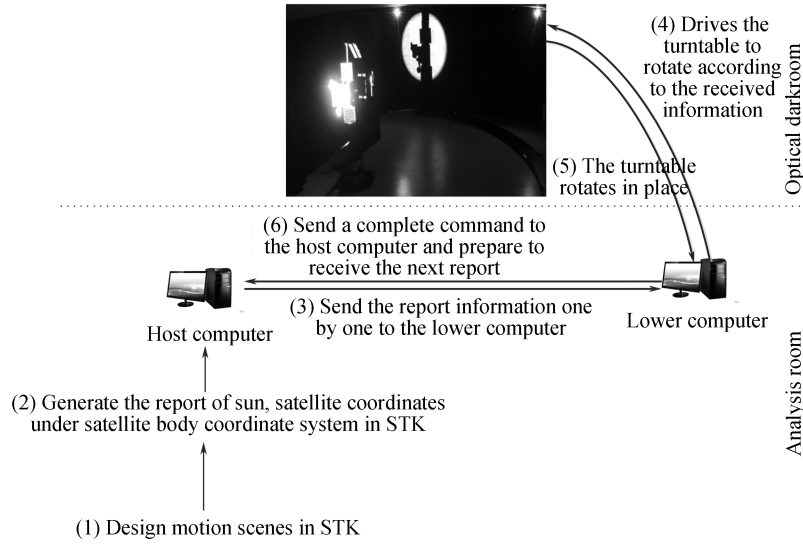


图 3 实验操作流程

Fig.3 Experimental operation flow

## 1.2 实验测量 DN 值与星等的转换关系

设待测卫星模型的星等为  $m_r$ ,标准白板的星等为  $m_b$ ,两者具有关系<sup>[7]</sup>

$$m_b - m_r = 2.5 \lg \left( \frac{\Phi_r}{\Phi_b} \right) \quad (1)$$

式中,  $\Phi_r$  表示探测器接收到的空间目标的辐射通量,  $\Phi_b$  表示探测器接收到的白板的辐射通量.根据反射率的定义,  $\Phi_r$  与  $\Phi_b$  的比值表示它们的相对反射率  $\rho$ ,即

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_b} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),得

$$m_r = m_b - 2.5 \lg \rho \quad (3)$$

本文采用等效相对反射率测量方法<sup>[8]</sup>,原理为

$$\rho(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \rho'(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \cdot \frac{\cos 30^\circ}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \quad (4)$$

式中,  $\rho'(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$  是光谱仪测得的待测目标在入射角  $(\theta_i, \varphi_i)$  和观测角  $(\theta_r, \varphi_r)$  处相对于朗伯白板在入射角为  $(0^\circ, \varphi_i)$ ,观测角为  $(30^\circ, \varphi_r)$  时的相对反射率,称其为相对反射率系数.

由于 DN 值和辐射通量成正比,所以有

$$\rho'(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{\Phi_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{\Phi_b(0^\circ, \varphi_i; 30^\circ, \varphi_r)} = \frac{\sum_{\lambda} \text{DN}_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r, \lambda) - k}{\sum_{\lambda} \text{DN}_b(0^\circ, \varphi_i; 30^\circ, \varphi_r, \lambda) - k} \quad (5)$$

式中,  $\sum_{\lambda} \text{DN}_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r, \lambda)$  是待测目标在入射角为  $(\theta_i, \varphi_i)$ , 观测角为  $(\theta_r, \varphi_r)$  时探测器接收到的光谱 DN 值,  $\sum_{\lambda} \text{DN}_b(0^\circ, \varphi_i; 30^\circ, \varphi_r, \lambda)$  是朗伯白板在入射角为  $(0^\circ, \varphi_i)$ , 观测角为  $(30^\circ, \varphi_r)$  时探测器接收到的光谱 DN 值,  $k$  表示暗电流的 DN 值.

由于标准白板的反射率已知且经过标定, 可推算朗伯白板的星等值为<sup>[9]</sup>

$$m_b = -26.74 - 2.5 \lg \left( \frac{\rho'_{2\pi} S_0 \cos \theta_i \cos \theta_r}{\pi R_1^2} \right) \quad (6)$$

因此待测目标的星等值为

$$m_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = -26.74 - 2.5 \lg \frac{\rho'_{2\pi} S_0 \cos 30^\circ [\sum_{\lambda} \text{DN}_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r, \lambda) - k]}{\pi R_1^2 (\sum_{\lambda} \text{DN}_b(0^\circ, \varphi_i; 30^\circ, \varphi_r, \lambda) - k)} \quad (7)$$

式中,  $S_0$  为朗伯白板的面积,  $\rho'_{2\pi}$  为朗伯白板的半球反射率, 在可见光波段范围内, 白板的半球反射率  $\rho'_{2\pi} = 0.978$ ,  $R_1$  为探测器与目标之间的距离.

利用上述等效相对反射率测量方法, 只需要对朗伯白板进行一次定标, 数据经过后续处理计算, 即可得到待测目标在任意入射角和出射角下的相对反射率, 极大提高了数据处理的效率.

## 2 基于光散射截面的空间目标光学散射特性仿真

### 2.1 空间目标光学散射截面

空间目标光学散射特性的理论研究主要分为两方面, 一方面是分析目标表面材料的光学散射特性, 如材料 BRDF 的测量、拟合与建模; 另一方面是分析空间目标整体的光学散射特性, 如测量、计算目标的光学散射截面, 分析其随各影响因素变化的情况. 其中, 目标的 OCS 与目标表面材料种类、外形结构尺寸以及太阳光入射方向和观测接收方向有关, 而与观测距离无关, 因此较星等更能反映目标本身对光的散射特性, 其定义式为

$$\text{OCS} = \int_A f_r(\theta_i, \theta_r, \phi) \cos \theta_i \cos \theta_r dA \quad (8)$$

式中,  $f_r(\theta_i, \theta_r, \phi)$  是点目标的 BRDF,  $\theta_i$  为入射天顶角,  $\theta_r$  为观测天顶角.

OCS 与星等  $m$  的转化关系为<sup>[10]</sup>

$$m = -26.74 - 2.5 \lg \left( \frac{\text{OCS}}{R_1^2} \right) \quad (9)$$

式中,  $R_1$  表示该目标与探测器之间的距离.

目前有关 BRDF 描述的模型较多, 其中使用比较广泛的是 Phong 模型, 但是在实际使用中, 发现 Phong 模型存在对具有较明显菲涅尔现象的材质 BRDF 数据拟合效果差的问题. 因此本文采用一种改进的 Phong 模型<sup>[11]</sup>, 为

$$f_r = \rho_d \cos \theta_i + \rho_s \frac{\cos^a \beta}{\cos^a \theta_i} \exp[-b(1 - \cos \beta)^{1/\pi}] \quad (10)$$

式中,  $\rho_d$ 、 $\rho_s$  分别为材质的漫反射率和镜面反射率,  $a$  为镜向指数, 用以调节镜面反射强度,  $\beta$  为观测方向与镜面反射方向的夹角,  $a > 0$ , 调节菲涅尔反射的强度;  $b > 0$ , 调节镜面反射分量的增降速度. 该模型可以有效地模拟材质在大角度入射下的菲涅尔反射强度, 同时对漫反射项做出修正, 降低拟合误差.

本文前期对常见空间材料 BRDF 数据进行了测量, 在此基础上对改进 Phong 模型参数进行反演. 考虑到篇幅有限, 本文给出部分实测材料的改进 Phong 模型参数以及误差, 具体如表 1.

改进过后的 Phong 模型显著提高了对菲涅尔现象的描述能力, 拟合精度提高 90% 以上. 本文后续正是在该模型的基础上, 对空间目标的光学散射特性进行仿真研究.

表 1 部分实测材料的改进 Phong 模型参数拟合结果与误差

Table 1 Partial measured materials improved Phong model parameter fitting results and errors

Material name	$\rho_d$	$\rho_s$	$\alpha$	$a$	$b$	Error
Silver film	0.287 3	291.835 1	4 053.5	1.311 8	0.743 5	0.024 2
LP6 white paint	0.251 2	2.835 8	897.964 7	2.726 4	2.469 3	0.031 4
Gold film	0.371 7	283.882	3 865.7	0.966 5	1.396 5	0.057 2
GaAs	0.042 8	23.006 7	2 122.5	2.112 4	4.856 9	0.071 3
TPT	0.049 1	27.590 7	2 980.6	2.274 3	7.053 5	0.084 3

## 2.2 运动空间目标 OCS 计算方法

本文以实验室某卫星为例,介绍运动空间目标 OCS 的计算方法.使用的卫星三维模型由实验室卫星模型的生产厂家提供,与实验室卫星模型尺寸相同.按照厂家所给卫星表面材料信息对模型表面进行面元拆分(面元的材料 BRDF 特性在表 1 中已经列出),并且考虑到卫星表面通常凹凸不平,因此对模型表面进行了褶皱化处理.最终效果如图 4.

经过上述面元划分、表面褶皱处理等步骤后,按照参考文献[12]中的方法,对运动空间目标的时序 OCS 数据进行计算.

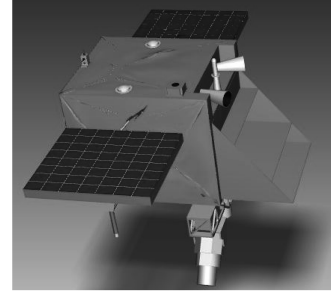


图 4 卫星模型示意图  
Fig.4 Satellite model diagram

## 3 给定场景下运动空间目标光学散射特性实验与仿真结果对比

### 3.1 仿真与实验场景设计

根据卫星的真实运动情况,在 STK 中设计卫星轨道参数为:半长轴  $a=7\ 716.14$  km, 偏心率  $e=0.001$ , 轨道倾角  $i=58^\circ$ , 近日点幅角  $\omega=36^\circ$ , 升交点赤经  $\Omega=345^\circ$ , 平近点角  $M=231.1^\circ$ . 在 STK 中设定的观测时间为 UTCG 时 2017 年 1 月 1 日 21:18:00—21:23:00, 观测站为中国广州站, 测量步长为 3 s(即每 3 秒计算一次 OCS 数据), 该段时间内相位角的变化范围为  $38^\circ\sim 98^\circ$ .

在 STK 中设置该卫星为三轴稳定姿态,  $x$  轴指向惯性速度方向,  $z$  轴由太阳方向约束,  $y$  轴与  $x$  轴、 $z$  轴相互正交, 且满足右手定律(该姿态在 STK 中为 ECI velocity alignment with Sun constraint)<sup>[13]</sup>.

### 3.2 仿真与实验结果对比分析

按照上述方法对该场景下卫星可见光波段内的时序 OCS 数据进行计算, 所得结果如图 5.

对该场景下卫星的时序 DN 值数据进行实验测量, 得到卫星模型在可见光波段的 DN 值时序数据, 如图 6.

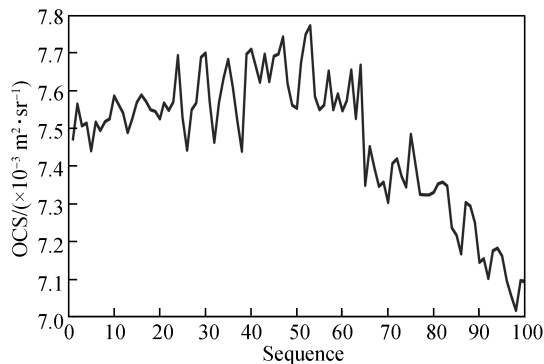


图 5 卫星时序 OCS 数据与星等数据

Fig.5 Satellite timing OCS data and magnitude data

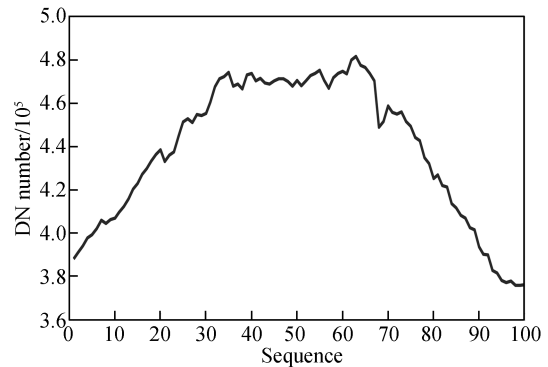


图 6 卫星模型时序 DN 值

Fig.6 Satellite model timing DN value

实验测得白板在可见光波段内的 DN 值为 876 309.6, 暗电流 DN 值为 14 926.96.

按式(7)将实验测量 DN 值转化为星等值, 按式(9)将仿真计算 OCS 转化为星等, 结果如图 7(图 7 中实线为同一场景下, 卫星表面光滑无褶皱时, 通过仿真计算所得的星等序列).

从图7可以看出:当不考虑模型褶皱时,仿真计算与实验测量所得结果幅值差距较大,趋势略有不同.在考虑褶皱后,两者趋势相同,幅值略有不同(最大误差为0.24星等),Pearson相关系数为0.69,对该相关系数进行 $t$ 检验,得 $t=9.437$ ,查表可知, $t_{0.05(98)}=1.984$ ,根据假设检验的相关原理<sup>[14]</sup>,认为实验与仿真所得结果具有相关性,其置信度为0.95的置信区间为 $[0.526, 1]$ .

由于卫星本体表面大范围的覆有银膜等强镜反材料,因此在不考虑褶皱时,照射到卫星本体表面的光被反射到某一固定方向,很难被探测器捕捉到,从而造成星等值偏大;对卫星表面进行褶皱处理后,照射到卫星本体表面的光被反射到各个方向,易被探测器捕捉,使得星等值变小.由于实际模型褶皱复杂,很难做到仿真模型与实际模型褶皱一致,因此实验结果与仿真结果的幅值有差异.

## 4 结论

采用实验测量与仿真计算相结合的方式研究空间目标的光学散射特性.实验平台模拟空间光学环境,实现了对实际场景中卫星姿态的平行模拟,极大地提高了测量精度;仿真算法不仅采用了基于前期实测数据拟合出的BRDF模型,还考虑到了卫星表面褶皱对其光学散射特性的影响,使得计算结果更加准确.本文实现了指定三轴稳定场景下卫星光学散射特性的实验测量与仿真计算的对比验证,为今后运动空间目标光学散射特性的研究提供了新的思路:

1) 研究运动空间目标光学散射特性时,如果没有实验模型,可以采用仿真计算,获取该运动状态下目标光学散射特性的变化趋势和大致幅值,并在此基础上进行运动状态的分析与反演.待有实验模型后,通过实验测量获取更为精确的光学散射特性测量数据,并验证仿真分析所得结果的准确性.

2) 在完成多种卫星模型的仿真计算与实验测量工作的基础上,建立相关的模型库,这样在紧急情况时,可以直接通过仿真计算的方式快速获取空间目标的光学散射特性数据,且能保证数据的准确性.

## 参考文献

- [1] CHEN Bing-er, XIONG Jian-ning. The platform design of space-based optical observations of space debris[J]. *Chinese Astronomy & Astrophysics*, 2017, **41**(1): 109-124.
- [2] ZHOU Hai-jun, LI Zhi. Study of infrared radiation characteristics of midcourse ballistic targets based on STK/EOIR[J]. *Infrared*, 2017, **38**(2): 21-25.  
周海俊,李智,李学军.基于STK/EOIR的弹道中段目标红外辐射特性研究[J]. *红外*, 2017, **38**(2): 21-25.
- [3] BEDARD D, LEVEAUE M, WALLACE B. Measurement of the photometric and spectral BRDF of small Canadian satellites in a controlled environment[C]. AMOS Technical Conference, 2011, **3**(9): 1-1.
- [4] WEI Xiang-quan, HUANG Jian-ming, YAN Gen-ting *et al.* A set of measurement and verification system for the dynamic visible scatter characteristics of space target[J]. *Journal of Command and Control*, 2015, **1**(1): 81-85.  
魏祥泉,黄建明,颜根廷,等.空间目标可见光散射动态特性测试校验系统[J]. *指挥与控制学报*, 2015, **1**(1): 81-85.
- [5] XU Rong, ZHAO Fei, LI Huai-feng. Parallel measurement of spectral bidirectional reflectance distribution function of non-resolved space objects in laboratory[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(2): 0212002.  
徐融,赵飞,李怀峰.非分辨空间目标光谱双向反射分布函数的实验室平行测量[J]. *光子学报*, 2016, **45**(2): 0212002.
- [6] LI Peng, LI Zhi, XU Can. Research on mapping relationship for experimental measurement of optical characteristic of space target[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2016, **35**(3): 75-79.  
李鹏,李智,徐灿.空间目标光学特性实验测量映射关系研究[J]. *国外电子测量技术*, 2016, **35**(3): 75-79.
- [7] MU Da, LI Quan-yong, DONG Jia-ning. Analysis on ground-based infrared detection system detecting the infrared magnitude of space target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(9): 1609-1613.  
牟达,李全勇,董家宁.地基红外系统探测空间目标红外星等的分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(9): 1609-1613.
- [8] LI PENG. Modeling and experimental measurement of optical scattering characteristics of space targets[D]. Beijing: Equipment Academy, 2016: 60-63.  
李鹏.空间目标光学散射特性建模与实验测量研究[D]. 装备学院,北京:装备学院,2016:60-63.

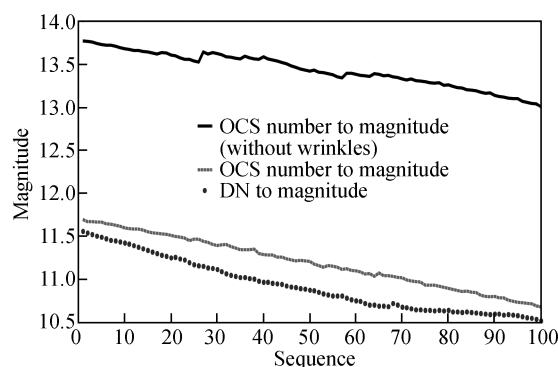


图7 实验测量DN值与仿真计算OCS值转换为星等的对比  
Fig.7 Comparison between the magnitude converted by OCS and DN

- [9] HAN Yi. Research on space target space-based laser imaging detection system simulation[D]. Beijing: Equipment Academy, 2013: 40-41.  
韩意. 空间目标天基激光成像探测系统仿真研究[D]. 北京:装备学院,2013:40-41.
- [10] HAN Y, SUN H, Li Y. Fast calculation method of complex space targets' optical cross section.[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(6): 4013.
- [11] LIU Cheng-hao, LI Zhi, XU Can. A refined phong model for fresnel reflection of the commonly using materials on space targets[J/DB]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017[2017-7-30]. [http://sf.nj95.net/kns/brief/default\\_result.aspx? t=9811](http://sf.nj95.net/kns/brief/default_result.aspx? t=9811).  
刘程浩,李智,徐灿. 针对空间目标常用材质菲涅尔反射现象的改进 Phong 模型[J/DB]. 激光与光电子学进展,2017 [2017-7-30]. [http://sf.nj95.net/kns/brief/default\\_result.aspx? t=9811](http://sf.nj95.net/kns/brief/default_result.aspx? t=9811).
- [12] XU Can, LI Peng, LI Ji-lian. Space-object OCS calculation method based on opengl picking technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(7): 072000.  
徐灿,张雅声,李鹏,等. 基于 OpenGL 拾取技术的空间目标光学横截面积计算[J]. 光学学报,2017,**37**(7):072000.
- [13] QIN Jin-biao. The research and simulation on satellite attitude control system based on STK[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011: 52-53.  
秦金彪. 基于 STK 的卫星姿态控制仿真技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011:52-53.
- [14] Zhang Jin-sheng. Experimental study on structural damage identification by detecting lamb waves[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 2-50.  
张金胜. 基于 Lamb 波的结构损伤识别试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008:2-50.