

地球外层空间物体真实感成像建模与绘制研究

柳庆武^{1,2}, 郑昌文¹, 张 翼^{1,2}

(1. 中国科学院软件研究所综合信息系统技术国家重点实验室, 北京 100190;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘 要: 针对现有模型在地球外层空间物体真实感成像绘制中的局限性和不足, 建立一种基于几何光学原理和光线追踪技术的 BRDF 微面元模型. 该模型综合了微面元的朝向分布和表面反射率以及微面元之间遮挡关系对地球外层空间物体表面反射特性影响, 以提高对空间物体表面反射光空间分布特征的建模精度, 并把光学反射特性分解为微面元的漫反射特性和镜面反射特性两个分量, 不仅能反映空间物体整体亮度特征, 而且能描述空间物体局部高光特征. 通过与实际测量数据比较, 该模型曲线与测量结果基本一致. 实验结果表明, 采用该模型能够实现对地球外层空间物体真实感成像绘制效果.

关键词: 空间物体; 真实感成像; 微面元; 双向反射分布函数

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 10-2307-04

Research on Modeling and Rendering of Realistic Imaging for Object in Spatial Space

LIU Qing-wu^{1,2}, ZHENG Chang-wen¹, ZHANG Yi^{1,2}

(1. *National Key Laboratory of Integrated Information System Technology, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China*)

Abstract: A new model about BRDF defined by microfacet was developed for spatial object optical reflection modeling based on the principle of optical geometry and the technique of ray tracing. This model briefly contains the contribution to spatial object reflection characteristics by the microfacet normal direction, reflectivity and the shelter relation among microfacets. The diffuse reflection and the mirroring reflection are employed by this model in order to calculate the whole luminance characteristic and the local high luminance characteristic of spatial object. The result of validating work showed that the BRDF microfacet model curve is basically consistent as the actual measurement data curve. The rendering experiment expressly proved that the BRDF microfacet model could be used to simulate the effect exactly and calculate the optical reflection characteristic accurately of spatial object.

Key words: spatial object; realistic imaging; microfacet; bidirectional reflectance distribution function (BRDF)

1 引言

物体呈现的外观取决于物体表面材质和环境光的交互作用. 真实感成像的核心课题之一是研究如何有效而真实地描述物体表面模型、环境光模型及二者的作用过程, 以使得可以在计算机中绘制出物体的真实成像效果^[1,2]. 特别地, 以解决现实中难以观测到各种材质的物体在地球外层空间中成像效果的问题. 作为揭示空间物体表面与背景光学特性属性主要物理量, 物体表面散射与辐射特性在探测跟踪、辐射测量、图像处理、模式识别等领域有着重要的作用^[3,4]. 国内外学者在该领域已

做了很多研究工作, 但大多基于电磁散射理论求出物体散射截面来进行光学特性分析, 或是基于辐射理论将整个物体表面看作 Lambert 面来进行光学特性分析^[5-8]. 由于可见光波长较短, 不能完全满足电磁散射理论条件, 在可见光特性分析方面具有一定的局限性; 而将物体表面看作理想的漫反射体, 忽略其表面的粗糙度、反射率等物理特性, 只能反映出物体的整体亮度, 无法准确地表现物体表面反射光的的空间分布特征. 自双向反射分布函数 (BRDF, Bidirectional Reflectance Distribution Function, Dana, et al, 1999) 在 ACM TOG 上首次发表以来, 国际图形学界大多采用多视点多光照的测量系统. 这种

建模和测量方式数据量大且易用性较差. Gardner(2003)等在 ACM TOG 上发表了易用的基于线性光源的测量系统,但只能采集各向同性的表面变化双向反射分布函数. Richar 等提出了基于微面元模型的偏振 BRDF 模型理论和方法,实现对光线的偏振特性仿真^[9-11]. Dan 等提出了基于微面元理论的地表绘制,但只考虑到太阳直射光的作用^[12,13]. 此外,上述模型、理论、方法针对地表或可实验环境内的物体进行建模与仿真,未对地球外层空间中物体表面受环境辐射的影响进行探讨. 针对上述方法的不足,本文建立了一种基于几何光学原理和光线追踪技术的 BRDF 微面元模型. 该模型综合考虑组成物体表面的微面元的朝向分布和反射率以及微面元之间遮挡关系对反射特性的影响,并把物体表面反射特性分解为微面元的漫反射特性和镜面反射特性两个分量,结合空间环境辐射特性,以提高对空间物体表面反射光空间分布特征的建模精度,从而实现真实感成像绘制效果.

2 空间辐照度分析

为了计算空间物体表面的反射特性,首先需计算空间背景辐射在物体表面产生的辐照度. 空间背景辐射包括太阳直接辐射、地球及大气反射辐射、月球及其它星体反射辐射等. 其中,太阳直接辐射、地球及大气反射辐射是主要背景辐射源,月球及其它星体反射辐射对空间物体表面的影响可忽略不计.

(1) 太阳直射辐照度

根据普朗克黑体辐射公式,太阳的辐射出射度 M_s 为:

$$M_s = c_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_s}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda \quad (1)$$

式(1)中, λ 为波长,单位为 μm ; $c_1 = 3.741844 \times 10^8 (\text{W} \cdot \mu\text{m}^2)$ 为第一黑体辐射常数; $c_2 = 14388 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$ 为第二黑体辐射常数; $T_s = 5900 (\text{K})$ 为太阳平均温度. 在波长范围 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内太阳的总辐通量 $\phi_s = 4\pi R_s^2 M_s$, 其中 $R_s = 6.9599 \times 10^8 (\text{m})$ 为太阳半径. 假设太阳发出的总辐射在空间方向上均匀分布,则太阳的发光强度 I_s 为:

$$I_s = \frac{\phi_s}{4\pi} = R_s^2 M_s \quad (2)$$

因此,太阳到空间物体表面处的辐照度 $E_s = \frac{R_s^2}{D_u^2} M_s$, 其中 D_u 为太阳与空间物体的距离. 由于空间物体到太阳的距离远大于物体到地球的距离,因此 D_u 可视为日地平均距离 $\bar{D}_u = 1.49597892 \times 10^{11} (\text{m})$.

(2) 地球及大气反射辐照度

地球及大气本身不发光,主要辐射来自于太阳,因

此其反射光谱与太阳光谱近似. 假设地球及大气为一漫反射体,则其反射辐照度 E_e 为:

$$E_e = \rho E_s \quad (3)$$

式中, $\rho = 0.35$ 为地球平均反射率.

3 BRDF 微面元模型

3.1 BRDF 模型

BRDF 模型表示了不同入射角条件下物体表面在任意观测角的反射特征,是光辐射的反射辐亮度和入射辐照度的比值 f_r :

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (4)$$

式中: θ_i 和 φ_i 为入射光的入射角和方位角; θ_r 和 φ_r 为反射光的出射角和方位角; L_r 为空间物体表面经照射后在 (θ_r, φ_r) 方向上的辐亮度,单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$; E_i 为 (θ_i, φ_i) 方向上入射光产生的表面辐照度,单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$. f_r 的单位为 sr^{-1} , 其物理意义为沿方向 (θ_r, φ_r) 出射的辐亮度与方向 (θ_i, φ_i) 入射在空间物体表面的辐照度之比. 若施照体为平行光,则入射辐照度是为一固定值,有:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{L_r(\theta_r, \varphi_r)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (5)$$

由式(5)可知:根据 BRDF 和入射光强可以推导出任意观测角下的反射光强,从而得到空间物体表面整体的反射光空间分布特征. BRDF 几何光学关系如图 1 所示.

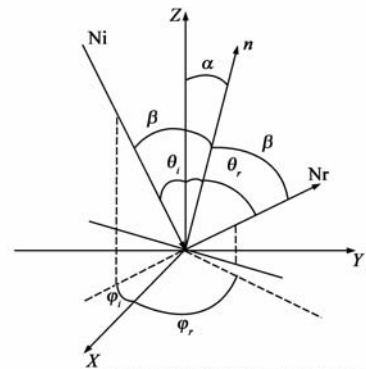


图1 BRDF几何光学关系及微面元坐标光路图

3.2 基于 BRDF 模型的微面元建模

假设空间物体表面由随机朝向的面元组成,根据几何光学原理,基于微面元理论和光线追踪技术,当入射光照射到空间物体表面时,每个微面元都产生漫反射和镜面反射. 空间物体表面整体的反射特性由微面元的朝向分布、表面反射率以及微面元之间的遮挡关系确定.

以空间物体平均表面为 XOY 面,以平均表面法线为 OZ 建立坐标系(图 1). k_i 为入射光方向向量, k_r 为反

射光方向向量; θ_i 为入射角, θ_r 为反射角; α 为微面元法线方向与 Z 轴的夹角, β 为入射光在微面元上的入射角. BRDF 微面元模型 f_r 为:

$$f_r = f_r^D + f_r^M \quad (6)$$

式(6)中, f_r^D 为漫反射分量, f_r^M 为镜面反射分量. f_r^D 和 f_r^M 定义为:

$$\begin{cases} f_r^D = \frac{k^D}{\pi} \\ f_r^M = \frac{k^M C_r V_r F_r}{\cos\theta_i \cos\theta_r} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, k^D 为漫反射系数, k^M 为镜面反射系数; θ_i 和 θ_r 分别是光线入射角和反射角; C_r 为空间物体表面微面元斜率分布函数(表面粗糙度); V_r 为遮蔽函数; F_r 为描述空间物体表面反射率的 Fresnel 函数. C_r 、 V_r 、 F_r 定义为:

$$\begin{cases} C_r = \exp(-\delta^{-2} \cdot \tan^2 \alpha) \cdot \delta^{-2} \cdot \cos^{-4} \alpha \\ V_r = \min[1, \min(2\cos\alpha \cdot \cos\theta_r \cdot \cos^{-1}\beta, 2\cos\alpha \\ \quad \cdot \cos\theta_i \cdot \cos^{-1}\beta)] \\ F_r = \frac{1}{2} [\sin^2(\theta_i - \theta_t) \cdot \sin^{-2}(\theta_i + \theta_t) + \tan^2(\theta_i - \theta_t) \\ \quad \cdot \tan^{-2}(\theta_i + \theta_t)] \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, α 为微面元与平均表面法线夹角; δ 为空间物体表面微面元斜率均方差; θ_t 为经 Snell 定律(Snell, 1621)计算所得的折射角.

4 基于 BRDF 微面元模型的光学反射特性建模

(1) 对太阳直射光的反射

由于空间物体与太阳相距遥远, 太阳光可以看作是平行光. 根据 BRDF 微面元模型定义, 设空间物体表面由若干微面元组成, 则微面元 dA 被太阳光照射产生的光谱辐射强度 E_{dA}^s 为:

$$E_{dA}^s = f_r E_s \cos\theta_i dA \quad (9)$$

式(9)中: E_s 为太阳光辐照度, θ_i 为微面元 dA 的法线与太阳光方向的夹角, f_r 为微面元 dA 的 BRDF. 则在微面元 dA 法线方向为 θ_r 角的观测方向的光谱辐射强度 $E_{dA}^s(\theta_r)$ 为:

$$E_{dA}^s(\theta_r) = f_r E_s \cos\theta_i \cos\theta_r dA \quad (10)$$

(2) 对地球及大气反射光的反射

根据式(10), 微面元 dA 反射地球及大气反射光在法线方向为 θ_r 角的观测方向的光谱辐射强度为:

$$E_{dA}^c(\theta_r) = f_r \rho E_s \cos\theta'_i \cos\theta'_r dA \quad (11)$$

式(11)中: θ'_i 、 θ'_r 为微面元 dA 的法线与地球及大气反射光方向、观测方向的夹角.

如空间物体某一表面对太阳光、地球及大气反射光可见, 则在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内对式(10)和式(11)积分, 得到空间物体表面反射太阳直射光、地球及大气反射光的辐照度 E 为:

$$E = \int E_{dA}^s(\theta_r) d\lambda + \int E_{dA}^c(\theta_r) d\lambda = \iiint \frac{f_r E_s \cos\theta_i \cos\theta_r}{R^2} dA d\lambda + \iiint \frac{f_r \rho E_s \cos\theta'_i \cos\theta'_r}{R^2} dA d\lambda \quad (12)$$

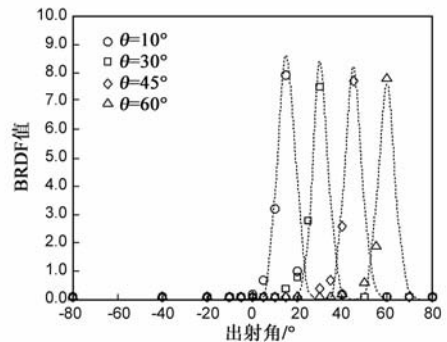
5 模型验证与实验分析

5.1 模型验证

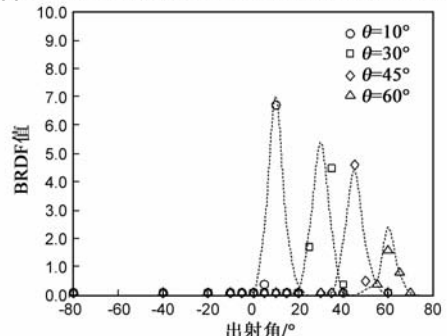
采用王安祥(光学技术, 2008)通过中国科学院安徽光机所设计的 BRDF 测量系统对卫星本体包覆材料和卫星天线表面白漆材料进行测量所获得的两组 BRDF 实验数据进行 BRDF 微面元模型的有效性验证.

(1) 卫星本体包覆材料测量值与 BRDF 微面元模型曲线比较

在式(6)~(8)中, 取 $k^D = 0.1$, $k^M = 0.5$, $C_r = 0.01$, 折射率 = $0.18 + 3.60i$, 入射角分别为 10° 、 30° 、 45° 、 60° , 计算卫星本体包覆材料对背景辐射的 BRDF 值, 并与实际测量结果进行比较. 图 2-a 中离散点为实验测量数据, 曲线为 BRDF 微面元模型曲线. 从图中可以看出, 在理想镜面反射方向附近的 BRDF 测量值较大, 其它方向上较小, 说明材料表面较光滑, 反射光线主要集中在镜面反射方向. BRDF 微面元模型曲线函数值与实际测量结果基本一致.



(a) 卫星本体包覆材料测量值与BRDF微面元模型曲线比较



(b) 卫星天线白漆料测量值与BRDF微面元模型曲线比较

图2 BRDF微面元模型验证

(2) 卫星天线表面白漆测量值与 BRDF 微面元模型曲线比较

同理,取 $k^D = 0.1$, $k^M = 0.2$, $C_r = 0.007$, 折射率 = $0.20 + 2.50i$, 入射角分别为 10° 、 30° 、 45° 、 60° , 计算卫星天线表面白漆材料对背景辐射的 BRDF 值, 并与实际测量结果进行比较. 图 2-b 中离散点为实验测量数据, 曲线为 BRDF 微面元模型曲线. 从图中可以看出, BRDF 微面元模型曲线函数值与实际测量结果基本一致.

5.2 实验与分析

基于 BRDF 微面元模型, 通过对空间物体表面的光学反射特性进行计算, 并利用以序列光线追踪方法建立的相机镜头模型模拟生成空间中物体的仿真图像^[14]. 对空间物体表面反射特性分别使用 Lambert 模型和微面元模型进行了成像实验.



图3 Lambert模型和微面元模型绘制效果对比

根据空间物体表面反射特性计算与实验结果, 对比 Lambert 模型和微面元模型仿真图像(图 3)可以看出, 作为理想漫反射模型的 Lambert 模型只能反映空间物体表面的整体亮度, 不能准确描述空间物体表面在不同角度下的反射特性, 而微面元模型不仅能反映空间物体表面整体亮度特征, 而且能描述空间物体表面的高光特征. 为了验证仿真结果, 对光线入射角为 30° 、方位角为 0° 的 BRDF 微面元模型计算结果进行分析(图 4): (1) 空间物体主体表面函数曲线具有较大峰值且峰值区间较窄, 说明空间物体主体表面较光滑; (2) 空间物体主体表面部分存在较强高光效果, 且高光区域较小, 符合理论曲线特征; (3) 太阳帆板的函数曲线较平缓, 说明帆板表面粗糙; 同时帆板函数曲线绝大部分位于空间物体主体表面函数曲线下方, 说明帆板表面反

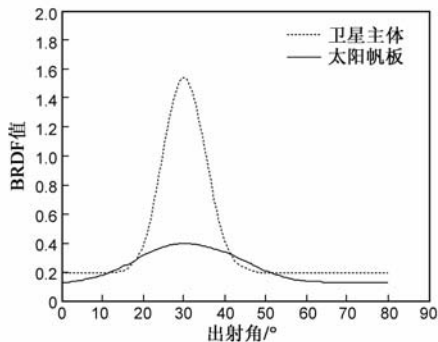


图4 BRDF微面元模型计算结果

射率较低; (4) 帆板表面无明显高光效果且整体亮度低于空间物体主体表面, 符合理论曲线特征.

6 结论

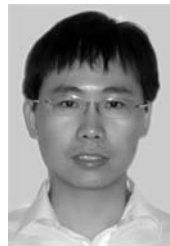
本文基于几何光学原理和光线追踪技术建立了一种 BRDF 微面元模型, 用于空间物体表面反射特性建模与分析. 该模型综合微面元的朝向分布和表面反射率以及微面元之间的遮挡关系对空间物体表面反射特性的影响, 并把对空间物体表面反射特性的描述分解为微面元漫反射特性和镜面反射特性两个分量, 不仅能反映空间物体表面整体亮度特征, 而且能描述空间物体表面高光特征. 通过 BRDF 微面元模型曲线与已公布实际测量数据对比验证, 二者基本一致. 利用 BRDF 微面元模型进行空间物体表面反射特性计算与实验结果表明, BRDF 微面元模型不仅能够较准确地描述空间物体表面粗糙程度, 并且能够较真实地反映空间物体表面不同部件反射特性, 即提高了对空间物体表面反射光空间分布特征的描述精度, 从而达到真实感成像的绘制效果.

参考文献

- [1] 侯文广, 陈大为, 丁明跃. 一种基于多重影像实现真实感人脸三维重建的方法[J]. 电子学报, 2008, 36(4): 661 - 666.
- [2] 袁友伟. 采用 GPU 加速的三维实体模型绘制[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 144 - 146.
- [3] YUAN You-wei. 3D solid models rendering based on GPU acceleration[J]. Acta Electronica Sinica, 36(12): 144 - 146. (in Chinese)
- [4] HOU Wen-guang, CHAN Tai-wai, DING Ming-yue. A novel way achieving 3D reconstruction of actual human face using multi images[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(4): 661 - 666. (in Chinese)

(下转第 2316 页)

作者简介



柳庆武 男, 1979 年 3 月生于湖北监利, 中科院软件所博士研究生, 研究方向为空间计算与仿真、真实感图像建模与绘制.

E-mail: qingwu@iscas.ac.cn

郑昌文 男, 1969 年 9 月生于湖北黄石, 博士, 中科院软件所研究员, 博士生导师, 研究方向为空间飞行导航与控制, 计算机仿真.

E-mail: Changwen@iscas.ac.cn

张翼 男, 1984 年 10 月生于黑龙江省哈尔滨, 中科院软件所硕士研究生, 研究方向为计算机图形学、计算机仿真.

E-mail: Zhangyi@iscas.ac.cn

- [6] Tsihrintzis G A, Tureli U, Nikias C L. Fractional lower-order statistics-based ambiguity functions for differential delay Doppler estimation [J]. IEE Proceedings, Radar, Sonar and Navigator, 1996, 143(6): 358 - 365.
- [7] Ma X Y, Nikias C L. Joint estimation of time delay and frequency delay in impulsive noise using fractional lower order statistics[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(11): 2669 - 2687.
- [8] Gardner W A, Napolitano A, Paura L. Cyclostationarity: Half a century of research[J]. Signal Processing, 2006, 86(4): 639 - 697.
- [9] Huang Z T, Zhou Y Y, Jiang W L. Joint estimation of Doppler and time-difference-of-arrival exploiting cyclostationary property[J]. IEE Proceedings, Part F: Radar and Signal Processing, 2002, 149(4): 161 - 165.
- [10] 黄知涛, 姜文利, 周一宇. 多循环频率时延估计方法及性能分析[J]. 电子学报, 2004, 32(1): 102 - 108.
Huang Z T, Jiang W L, Zhou Y Y. Multi-cycle time-delay estimator and its performance analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(1): 102 - 108. (in Chinese)
- [11] Huang Z T, Zhou Y Y, Jiang W L. TDOA and Doppler estimation for cyclostationary signals based on multi-cycle frequencies[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(4): 1251 - 1264.
- [12] 何劲, 刘中. 脉冲噪声环境中鲁棒的自适应波束形成方法[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 464 - 468.
He J, Liu Z. Robust adaptive beamforming method in impul-

sive noise[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(3): 464 - 468. (in Chinese)

- [13] 郭莹, 邱天爽, 张艳丽. 脉冲噪声环境下一种韧性的时延与多普勒频移联合估计法[J]. 电子学报, 2007, 35(9): 1680 - 1684.
Guo Y, Qiu T Z, Zhang Y L. A robust joint estimation of time delay and Doppler shift in stable distributed noise environment [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(9): 1680 - 1684. (in Chinese)

作者简介



刘洋 1981年2月出生于内蒙古通辽。讲师, 现为大连理工大学在读博士研究生。研究方向为通信信号处理、非平稳非高斯信号处理。
E-mail: yangliuimu@gmail.com



邱天爽 男, 1954年生于江苏海门。IEEE会员, 信号处理学会委员, 现为大连理工大学教授、博士生导师。主要研究方向为非平稳非高斯信号处理、生物医学信号处理。曾获教育部中国高校科学技术二等奖等多项科技奖励。
E-mail: qitush@dlut.edu.cn

(上接第 2310 页)

- [3] 刘剑锋. 目标与地物光散射特性的 BRDF 模化技术[R]. 西安: 西安电子科技大学硕士学位论文, 2005.
- [4] 曹运华, 吴振森, 张涵璐, 等. 基于粗糙样片光谱 BRDF 的空间目标可见光散射研究[J]. 光子学报, 2008, 37(11): 2264 - 2268.
- [5] 陈荣利, 韩乐, 车驰骋, 等. 非自发光空间目标的可见光探测技术研究[J]. 光子学报, 2005, 34(9): 1438 - 1440.
- [6] Shen Y. J, Zhang Z. M, Tsai B. K, et al. Bidirectional reflectance distribution function of rough silicon wafers [J]. International Journal Thermophysics, 2001, 22(4): 1311 - 1326.
- [7] Nicodemus F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity[J]. Applied Optics, 1970, 9(6): 1474 - 1475.
- [8] 王安祥, 张涵璐, 吴振森, 等. 目标表面可见光谱 BRDF 的实验测量及优化建模[J]. 光学技术, 2008, 34(5): 1002 - 1582.
- [9] Richard G P, Thomas A G. Polarimetric BRDF in the micro-

facet model: theory and measurements [A]. Proceedings of the 2000 Meeting of the Military Sensing Symposia Specialty Group on Passive Sensors[C], 2000, 1: 169 - 181.

- [10] 冯巍巍, 魏庆农, 汪世美, 等. 涂层表面偏振双向反射分布函数的模型研究[J]. 光学学报, 2008, 28(2): 290 - 294.
- [11] David S. F, Cliff A. Polarized surface scattering expressed in terms of a bidirectional reflectance distribution function matrix [J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1995, 34(6): 1646 - 1650.
- [12] Dan D. V, B, Thomas B. Modeling earth albedo for satellite in earth orbit[R]. AIAA 2005 - 6465, 2005.
- [13] Cunningham F. G. Power input to a small flat plate from a diffusely radiation sphere with application to earth satellites [R], TN D - 710, NASA, 1970.
- [14] 吴佳泽, 郑昌文, 胡晓惠, 等. 散景效果的真实感绘制[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(5): 746 - 752.