

空间目标褶皱材质 BRDF 建模方法

汪夏^{1*}, 张雅声^{2**}, 徐灿², 李鹏¹, 张峰¹

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学院, 北京 101416

摘要 由于受到外界环境的影响, 卫星表面常常呈不规则的褶皱状, 这会对其光学特性产生一定影响。故空间目标光学特性建模研究需要将表面褶皱考虑在内, 但大量褶皱面元的存在会导致运算量剧增。在此将褶皱看作一种材质, 提出基于宏观光学散射截面测量的双向反射分布函数(BRDF)生成方法, 求得褶皱材质的 BRDF 数据, 进一步利用误差逆传播(BP)神经网络建立了褶皱材质的 BRDF 模型, 代替了复杂的褶皱建模过程, 大大简化了计算, 在保证精度的前提下解决了其实时性差的问题。同时, 通过实验与仿真相结合的方式, 将所设计的 BRDF 模型与传统 BRDF 模型进行对比, 验证了所设计模型的误差远小于传统模型。

关键词 表面光学; 双向反射分布函数模型; 误差逆传播; 褶皱材质; 拟合

中图分类号 O436.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1024001

Bidirectional Reflectance Distribution Function Modeling Approach of Space Objects' Fold Material

Wang Xia^{1*}, Zhang Yasheng^{2**}, Xu Can², Li Peng¹, Zhang Feng¹

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

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

Abstract Due to the influence of the external environment, the satellite's surface is often irregularly folded, and these folds have some influences on the optical properties. So folds need to be taken into account in the modeling of the optical characteristics of space objects. However, a large number of surface cells in fold surface will lead to a dramatic increase in computational complexity. This paper considers pleats as a kind of 'material'. A method based on macroscopic optical scattering cross section measurement is proposed to obtain the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) data of the fold material. Furthermore, the error back propagation neural network is used to establish BRDF model of fold material, which replaces the complex modeling process of folds and greatly simplifies the calculation. The problem of poor real-time performance is solved under the acceptable accuracy. By combining the experiment with the simulation to compare the BRDF model designed in this paper with the traditional BRDF model, it is verified that the error of the model designed in this paper is much smaller than that of the traditional model.

Key words optics at surfaces; bidirectional reflection distribution function model; error back propagation; fold material; fitting

OCIS codes 240.3695; 290.4210; 350.1260; 350.6090

1 引 言

为了在太空中维持内部器件正常运转, 卫星需要克服太空中近 400 °C 的温差^[1-2], 常用的方法就是在卫星表面包覆多层隔热材料^[3-4], 如金色或银色聚酰亚胺等强镜反材质薄膜。但是由于受到制造工艺

以及长期外部环境的影响, 卫星表面常常会形成不规则的褶皱状, 会对卫星自身的光学散射特性产生影响。而大多数空间目标光学特性仿真研究只将其表面视为简单的朗伯面或具有单一材质的平整表面, 没有考虑到实际表面存在褶皱, 使得仿真结果与实测结果存在较大偏差^[5]。

收稿日期: 2019-03-04; 修回日期: 2019-04-22; 录用日期: 2019-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(61304228)

* E-mail: 627176089@qq.com; ** E-mail: lizhizys@263.net

文献[6]基于 Davies 模型对空间目标光学特性进行了仿真计算与分析,但该研究将目标表面视为简单的漫反射面,缺乏精确性;文献[7]基于 Davies 模型所建立的量测模型对空间目标姿态与角速度进行估计,但在光度值计算模型中,仅将目标简单地视为漫反射体与镜面反射体的结合;文献[8]考虑到空间目标表面可能由不同材料包覆而成,采用材料表面双向反射分布函数(BRDF)的多级融合表征模型,但仍忽略了目标表面存在的不规则褶皱对仿真结果的影响。

由于褶皱对卫星光学特性的影响极大,在进行光学特性研究前需要建立合适的褶皱几何模型,而这需要将目标拆分为大量面元。

李艳杰等^[9]基于所建立的等效星等计算模型,采用 STK(Satellite Tool Kit)对空间目标的可见光散射特性进行了分析。在目标星等计算中,该研究初步考虑到目标表面的每一个小面元受射的入射角以及观测角可能不同,先对目标进行几何建模,根据形状和材料对几何模型进行组件和面元划分,计算每个面元在观测方向上的可见光散射强度,将每个面元的散射强度相加,从而得到整体的观测星等。

张峰等^[10]提出一种褶皱表面随机生成的方法,将一个完整平面划分为 160×160 个,共计 25600 个面元,通过体积选择修改器、贴图等技术对每一个面元进行设置与定义,从而模拟出真实的不规则褶皱情况。基于建好的模型对不同褶皱程度的平面进行了研究,采用基于 OpenGL(Open Graphics Library)拾取技术的空间目标光学横截面积计算方法^[11],经两次遮挡判断后提取可见光照面元,通过计算每个可见光照面元的光学散射截面(OCS)值,再累加得到整个表面的 OCS 数据。最后基于仿真数据分析了褶皱起伏数量和起伏高度对目标光学散射特性的影响,为空间目标的反演和仿真研究提供了参考。

上述方法存在的问题在于几何建模过程过于复杂,由于面元数量巨大,且每一个面元的法向都不一样,因此需要考虑每个面元的光学特性以及面元之间的遮挡关系,这将导致计算量过大,实时性较差。针对这一问题,本文提出了一种有效减小计算量的方法,核心思想就是将表面的褶皱视为一种新材质,由褶皱表面 OCS 值逆向求出该褶皱材质对应的 BRDF 数据,利用误差逆传播(BP)神经网络训练得到褶皱材质的 BRDF 模型,代替传统的几何褶皱模型,在不损失模拟分析精度的条件下,显著简化了计算,提升了目标光学特性分析的实时性。

本文基于对多种材质样片的大量实测数据进行统计分析,总结归纳出改进 Phong 模型^[12](经实验验证,对比传统 Phong 模型,在精度上提高了 $2\% \sim 3\%$);将给定目标的褶皱表面分割为大量的微小面元,并选取银色聚酰亚胺作为面元材质(已通过对聚酰亚胺样片的实测数据进行拟合,得到了该材质对应改进 Phong 模型的参数);通过选定的入射角和观测角以及面元 BRDF 模型,计算各面元的 OCS 值,累加得到整个褶皱表面的 OCS 值,进而逆向计算求得该褶皱材质的 BRDF;通过 BP 神经网络对获得的 BRDF 数据进行处理,得到该褶皱材质的 BRDF 模型。

2 褶皱材质 BRDF 数据的获取

为了对材质自身的光学散射特性进行描述,国内外通常采用 BRDF 这一概念,BRDF 是表面材质的特有属性,定义为单位面元辐射亮度与辐射照度的比值,与光入射角、反射角有关^[13],用于表征材质在某一入射条件下不同观测角度的散射特性。OCS 用于表征目标的可见光散射特性^[14],可由 BRDF 计算得到,能够全面反映目标表面材料及其几何结构、形状等因素对目标光学特性的影响。

通过 3D Studio Max 建立的褶皱表面如图 1(a)所示。本文获取褶皱材质 BRDF 的途径是通过褶皱表面的 OCS 数据逆向计算得到对应的 BRDF。首先需要对整个褶皱表面的 OCS 进行计算,褶皱表面几何模型建立的基本思想是将一个完整平面分割为大量微小的三角形面元,通过控制每个面元的顶点来调整起伏高度,从而形成褶皱。起伏高度的变化导致每个面元的法向方向不相同,即入射角和反射角也不同,如图 1(b)所示。

从单个面元来看,由文献[15]可得面元 OCS 的表达式为

$$d(S_{\text{OCS}}) = f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_i \cos \theta_r dA, \quad (1)$$

式中: $d(S_{\text{OCS}})$ 为面元的 OCS 值; $f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$ 为面元的 BRDF,即镜反材质的 BRDF; θ_i 为入射光线与面元法向 Z 轴的夹角,即入射天顶角,如图 2 所示; φ_i 为入射光线在面元上的投影与 Y 轴的夹角,即入射方位角; θ_r 为光经目标表面反射照向探测器方向的方向向量与 Z 轴的夹角,即观测天顶角; φ_r 为目标指向探测器的方向向量在面元上的投影与 Y 轴负方向的夹角,即观测方位角; dA 表示面元面积,由于褶皱面元之间存在着遮挡关系,故 A 为褶皱表面的可见光照散射面积,如图 2 所示。

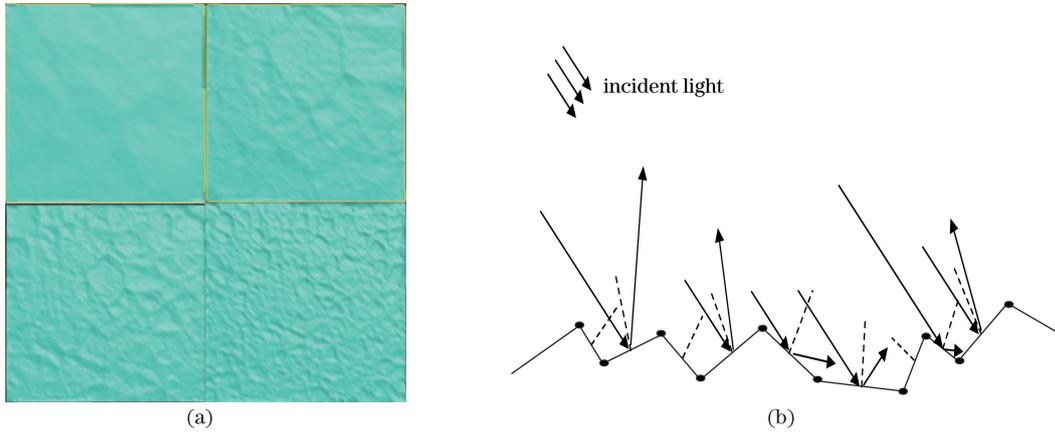


图 1 褶皱表面模型图与示意图。(a)不同起伏高度和起伏数量的褶皱表面;(b)褶皱表面受射示意图

Fig. 1 Model and schematic diagrams of fold surface. (a) Fold surfaces with different heights and amounts of fluctuations; (b) diagram of irradiated fold surface

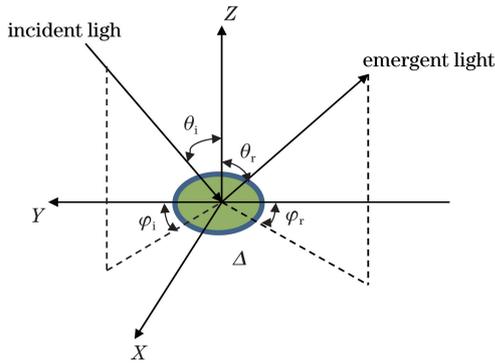


图 2 面元受射示意图

Fig. 2 Diagram of surface cell being irradiated

将(1)式累加得到整个褶皱表面的 OCS 公式为

$$S_{\text{OCS}} = \int_A f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_i \cos \theta_r dA, \quad (2)$$

式中: S_{OCS} 为褶皱表面的 OCS 值。

表 1 银色聚酰亚胺的改进 Phong 模型参数

Table 1 Improved Phong model parameters of silvery kapton

Material	ρ_d	ρ_s	α	β / rad	a	b
Silvery kapton	0.0122	287.7403	4119.5696	$\min\{\pi/2, \beta\}$	1.3272	0.0933

基于改进的 Phong 模型可以计算出单个面元在任意入射角及观测角下的 BRDF 值,进而求出面元 OCS 值,累加即得整个褶皱表面的 OCS 值。为了得到褶皱材质的 BRDF,还需作如下假设:以聚酰亚胺为例,将这些面元视为一个整体,该表面可等效为一种带有褶皱材质的平整平面 D ,该平面的光学散射特性与聚酰亚胺褶皱表面表现出的宏观光学散射特性相同,总体呈现一种漫反射、弱镜反现象,则面元 dA 可等效为平面面元 dD (褶皱处理后外轮廓面积)。对该平面整体进行照射时,可视为光线在同

为了求得整个褶皱表面的 OCS 数据,需要先对面元的光学特性进行描述,本文选用改进的 Phong 模型作为面元的 BRDF 模型,其表达式为

$$f_r = \rho_d \cos \theta_i + \rho_s \frac{\cos^a \beta}{\cos^a \theta_i} \exp[-b(1 - \cos \beta)^{1/\pi}], \quad (3)$$

式中: ρ_d 和 ρ_s 分别为表面材质的漫反射率和镜面反射率; α 为镜向指数; β 为观测方向与镜面反射方向的夹角(单位: rad); 系数 $a > 0$, 用以调节菲涅耳反射的强度; 系数 $b > 0$, 用以调节镜面反射分量的增减速度。本文选取银色聚酰亚胺作为面元材质,其对应的改进 Phong 模型参数见表 1^[10,12](聚酰亚胺的改进 Phong 模型参数为本课题组前期对大量聚酰亚胺样片的 BRDF 测量数据进行拟合得到的,精度可达到 3%)。

一入射角下入射,经反射后能量分布范围较镜反材料大的多。

基于上述假设,由于单次测量时入射条件、观测条件一定,故 $\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r$ 在各平面面元 dD 处均相等,由于该褶皱表面被视为平面,各可见光照面元累加起来的面积可以等效为该平面面积,则(2)式可转化为

$$S_{\text{OCS}} = f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_i \cos \theta_r \int_D dD, \quad (4)$$

式中: dD 为等效平面面元; D 为褶皱等效平面的面

积。进一步可推出褶皱材质的 BRDF 计算公式为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{S_{OCS}}{D \cos \theta_i \cos \theta_r} \quad (5)$$

利用上述结论,可由褶皱表面的 OCS 值逆向求出褶皱材质的 BRDF 值。

基于以上分析,总结出获取褶皱材质 BRDF 数据集的步骤为:

1) 基于改进 Phong 模型求出面元各个角度下的 BRDF 值;

2) 基于 OpenGL 双重拾取技术,通过给定的入射天顶角、入射方位角、观测天顶角、观测方位角、面元面积和面元 BRDF 计算各个可见光照面元的 OCS 值,再通过累加的方法得到整个表面的 OCS 值;

3) 保持入射条件和观测条件不变(这里指光源位置和探测器位置不变),将所有面元视为一个整体,通过(5)式求得褶皱表面在该入射和观测条件下的 BRDF 值,即褶皱材质的 BRDF 值;

4) 改变角度求得褶皱材质在不同入射角和观测角下的 BRDF 值。

概括来说,本文采用基于 OpenGL 拾取技术的空间目标光学横截面积计算方法对褶皱表面几何模型的光学特性进行计算,得到该表面的 OCS 曲线^[11],基于(5)式的转化可进一步得到其 BRDF 曲线。下面给出以聚酰亚胺为面元材质的某褶皱表面在入射方位角和观测方位角均为 0° 时,不同入射天顶角[不同线形代表不同入射天顶角]下的 f 关于观测天顶角 θ_r 的曲线,如图 3 所示。

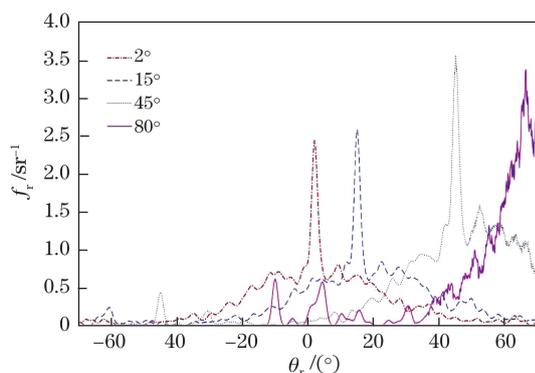


图 3 不同入射天顶角下某褶皱材质的 BRDF

Fig. 3 BRDF of fold material under different incident zenith angles

由图 3 中的曲线可以看出,每条褶皱 BRDF 曲线均存在很多个极值点,除了幅值最高的主要镜反点外,还有许多局部的镜反点。出现该现象的主要原因为褶皱杂乱无章地分布,组成褶皱表面的各面

元的高度和法向均存在差异,由于每个面元都存在一个镜反点,故整体来看不同的反射角会产生程度不等的镜反现象。

3 基于 BP 神经网络的模型构建

3.1 BRDF 模型分类

根据以往的研究,BRDF 模型可以分为三类:物理模型、经验(半经验)模型以及数据驱动模型。物理模型是指建立在一定几何光学原理基础上的模型,主要模型有 Cook-Torrance 模型、Torrance-Sparrow 模型等;经验模型是由设计者根据个人经验判断得出的简单等式,其背后缺乏物理意义;半经验模型则是结合物理原理以及经验判断而建立的模型,主要有 Phong 模型、五参数模型、改进 Phong 模型等;数据驱动模型是一种基于测量仿真数据的、为各向异性 BRDF 提供的一种通用模型。与以上两类数据模型不同,数据驱动模型是基于大量的数据而建立的模型,具有较高的准确性,主要以机器学习为主,大多没有明确的表达式^[16]。

对比以上 3 种模型可知,物理模型由于使用具体的物理参数来描述表面材质的光学特性,故具有较高的精确性,但对于结构及光学特性较为复杂的表面,物理参数往往难以描述;经验(半经验)模型虽然较为简洁,计算快速,但由于是根据个人的经验判断所得,缺乏理论依据,不同的模型使用范围存在差异,泛化能力较弱;数据驱动模型直接建立在大量数据之上,能够全面反映数据的规律,因此具有较高的准确性及泛化能力,但由于数据量过大,往往计算速度较慢。

由第 1 节的分析可知,本文需要研究的褶皱表面的模型结构较复杂,因此需要大量的数据来表述其光学特性,同时褶皱 BRDF 曲线复杂,不易用公式来表述,用具体的物理参数来概括其特征较为困难。经验(半经验)模型泛化能力较弱,适应性较差,以往的研究并未给出针对褶皱表面的 BRDF 模型,因此也不宜使用。数据驱动模型通过机器学习的方法对数据进行学习训练,能够较为全面地提取数据特征,完整地概括出褶皱表面的光学特性。因此,本文基于 BP 神经网络建立了一种数据驱动模型,用该模型来描述褶皱表面的光学特性。

3.2 BP 神经网络

BP 神经网络的优势在于可通过 BP 将结果训练到最优,无需将待测目标的已知物理特性作为先验信息,并且可以实现输入与输出间的任意非线性

映射。对于褶皱材质的 BRDF 模型,其描述的是各个入射角度及观测角度下的光学特性,具有很强的非线性及复杂性。相比于传统的 BRDF 模型,由于神经网络节点众多,描述能力强,基于 BP 神经网络来构建 BRDF 模型更能精确地表达多褶皱表面光度曲线存在多个极值点的特性。因此,本文选择基于 BP 神经网络来进行褶皱材质的 BRDF 建模。

依据 BP 神经网络的原理,建模步骤应为:1) 给定输入与期望输出值,在本文中,期望输出值即为由褶皱表面 OCS 值逆向运算得到的 BRDF 数据;2) 选择训练函数、学习函数以及损失函数;3) 设置隐含层层数;4) 确定各层传递函数以及节点的个数;5) 进行学习训练,将实际输出值同期望输出值进行对比,计算两者的误差,并根据误差来逐层调整更新连接权值,重新训练;6) 进行有效性检验,即每一次训练之后,利用样本数据对当前网络进行一次检验,以所得误差作为判定依据,当下一次检验误差相比前一次不再下降时,即认为通过一次有效性检验,当连续通过一定次数的检验后,即认为误差达到收敛,训练停止。

3.3 建模过程

1) 针对本文所需解决的问题,规定输入层为入射天顶角 θ_i 、观测天顶角 θ_r 、观测方位角 φ ,输出层为期望 BRDF 值 f_0 。(为了简化计算,本文入射方位角取 0°)。

2) 针对本文遇到的非线性较强的函数逼近问题,选用 `trainscg` 作为训练函数,其好处是当训练不收敛时,会自动停止训练,而且耗时较其他算法(如 `trainlm`, `traingd` 等)少,收敛速度较快。该训练方法的迭代次数较多,但每次迭代的计算量要小很多,适用于本文数据量较大、对精度要求较高的情况。

3) 学习函数直接关系到权值和阈值的调整,普通的梯度下降法每次都会遍历整个数据集,耗费大量计算时间,小批量梯度下降法虽然解决了这一问题,但在下降过程中会产生左右振荡的现象,而动量梯度下降法通过对一些梯度进行指数加权平均减小了振荡^[17]。

损失函数作为衡量模型准确度的唯一标准,是逆传输调整参数的依据,决定了训练结果的好坏。针对本文的函数逼近问题,选用均方误差作为损失函数较好,其表达式为

$$\eta = \frac{\sum (f_i - f'_i)^2}{\sum f_i^2}, \quad (6)$$

式中: f_i 为模型预测值,即训练中模型的实际输出值; f'_i 为期望输出值; η 为损失函数。

4) 隐含层的个数过少将导致提取的 BRDF 数据特征不够,而隐含层的个数过多会造成梯度下降等问题,导致隐含层特征提取能力下降。根据输入层及输出层数据量的大小,本文将隐含层个数定为 4 层^[18]。

5) 为了实现对褶皱材质 BRDF 函数曲线的逼近,模型必须要有较强的非线性逼近能力,因此应选用抑制性较强的 `tansig` 函数作为本模型的传递函数,其表达式为

$$f(x) = 2 / [\exp(-2x) + 1] - 1. \quad (7)$$

由于褶皱 BRDF 曲线的非线性较强,故而本文设定每个隐含层神经元节点数为 50 个。

6) 计算误差。针对拟合问题,本文选用均方误差作为误差计算依据,见(6)式,继而再根据求得的误差判定训练效果,并以此为依据逐层调整连接更新权值。

7) 为了得到与目标曲线拟合度尽可能高的结果,有效性检验次数设置为 30 次。

4 模型验证

不同起伏数量以及不同起伏高度的褶皱材质拥有不同的光学特性,本文对多个不同褶皱的表面进行了 BRDF 建模,在不同的入射、观测条件下获取实验数据。其中:入射天顶角选择为 2° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 80° ;观测天顶角选择为 $-90^\circ \sim 90^\circ$,由于镜反可观测角度较小,故每隔 0.1° 扫描一次;观测方位角选取 $0^\circ \sim 90^\circ$,每隔 1° 扫描一次^[18]。获取大量 OCS 数据,根据(5)式求出 BRDF 数据。

选取其中 70% 的数据作为训练样本(training), 15% 的数据作为校验样本(validation),剩下 15% 的数据作为测试样本(test)。下面对两种具有代表性的褶皱材质的训练结果进行回归分析(材质 I 为起伏不明显的褶皱材质,材质 II 为起伏幅度较大的褶皱材质),如图 4 所示。

图 4 中坐标轴的横坐标 T 为目标值,纵坐标 O 为输出值; `data` 为样本数据; $Y = T$ 表示拟合度为 1 的理想曲线; `fitting` 为拟合曲线; R 为拟合度,其值越接近 1,说明拟合度越高。由图可知,拟合取得了较好的效果。对比改进 Phong 模型和五参数模型^[12,19],基于以上两种褶皱材质,给出入射天顶角为 2° 和 45° 、入射方位角和观测方位角均为 0° 下的 f 关于观测天顶角 θ 的拟合曲线,如图 5、6 所示。

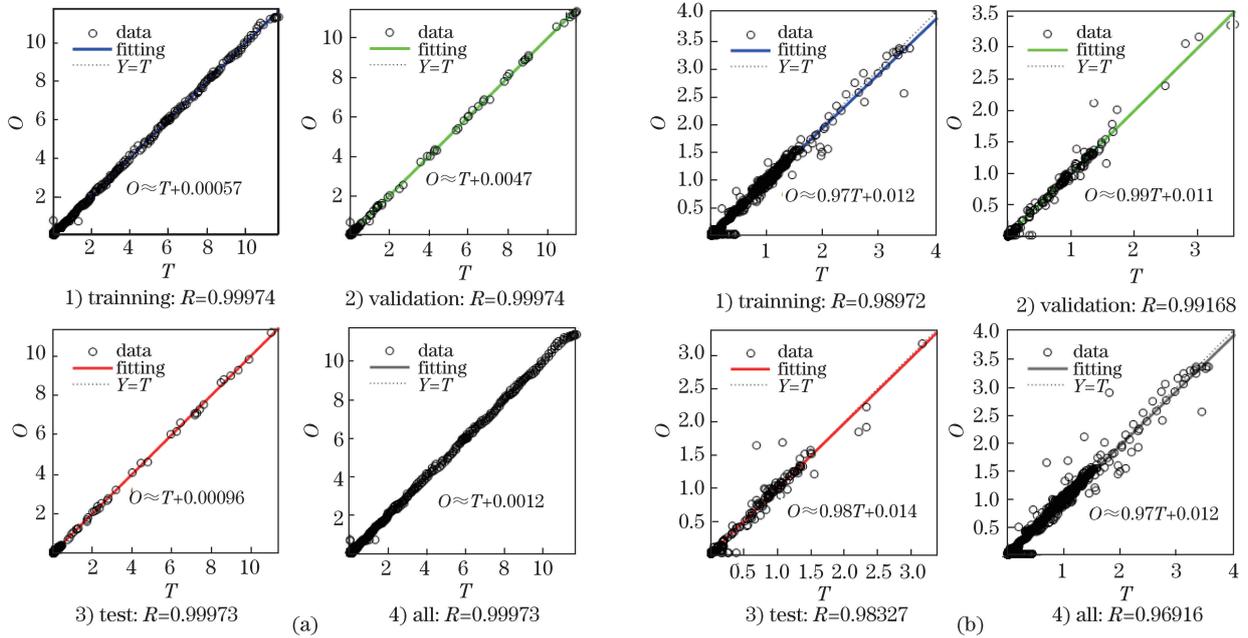


图 4 入射角 45° 下两类褶皱材质的 BRDF 模型训练结果。(a) 褶皱材质 I ;(b) 褶皱材质 II

Fig. 4 Two fold surfaces' training results of BRDF model with incident angle of 45° . (a) Fold material I; (b) fold material II

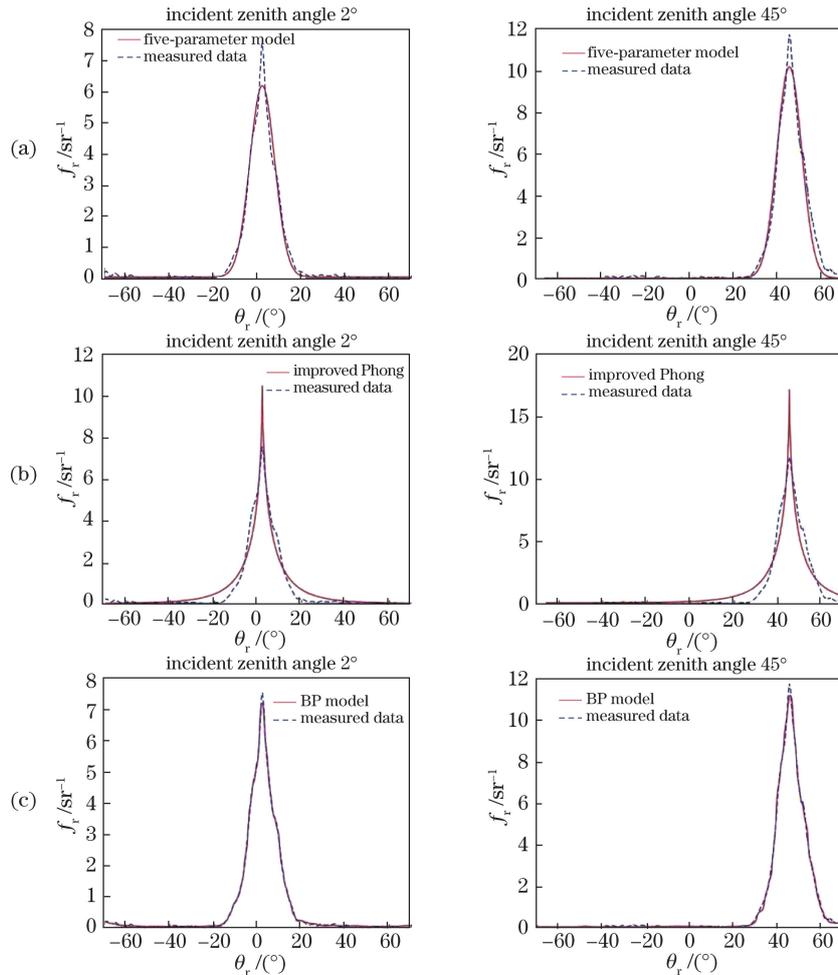


图 5 褶皱材质 I 的 3 种模型效果对比。(a) 五参数模型; (b) 改进 Phong 模型; (c) BP 模型

Fig. 5 Comparison of three models of fold material I. (a) Five-parameter model; (b) improved Phong model; (c) BP model

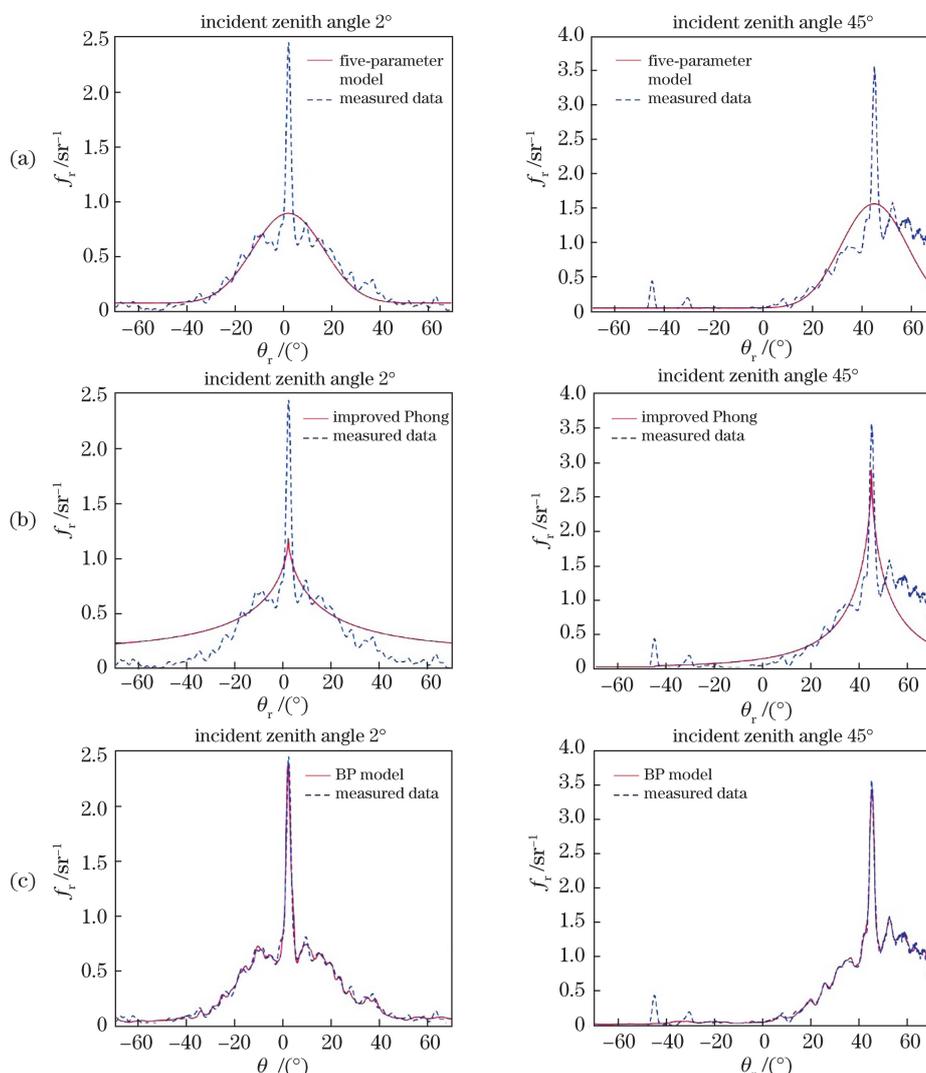


图 6 褶皱材质 II 的 3 种模型效果对比。(a)五参数模型;(b)改进 Phong 模型;(c)BP 模型

Fig. 6 Comparison of three models of fold material II . (a) Five-parameter model; (b) improved Phong model; (c) BP model

从图像角度进行分析,对于褶皱起伏不明显的材质 I,3 种模型均能准确预测出其镜反点的观测角度,但从镜反点幅值以及镜反点以外的漫反射部分的拟合情况来看,BP 模型要好于其他两种模型;对于褶皱起伏明显的材质 II 呈现出的“多极值点”的现象(即漫反射区也存在局部镜反现象),改进 Phong 模型仅能大致描述出镜反点的观测角度,其他部分拟合效果较差,五参数模型则无法描述此褶皱,而 BP 模型仍然具有较好的描述效果。

从误差角度进行分析,结果如表 2、3 所示。对于褶皱材质 I,五参数模型和改进 Phong 模型的拟合误差为 15%~30%,BP 模型的拟合误差为 5%左右。对于褶皱材质 II,五参数模型和改进 Phong 模型的拟合误差为 20%~40%,BP 模型的拟合误差仍在 10%以内。

表 2 褶皱材质 I 的误差对比

Table 2 Error comparison of fold material I

Incident zenith angle / (°)	Error / %		
	Five-parameter model	Improved Phong model	BP model
2	16.23	29.93	4.61
45	18.15	27.21	5.13

表 3 褶皱材质 II 的误差对比

Table 3 Error comparison of fold material II

Incident zenith angle / (°)	Error / %		
	Five-parameter model	Improved Phong model	BP model
2	24.20	38.84	6.03
45	32.34	33.46	7.38

由于传统的 BRDF 模型的局限性在于其只可描述简单的单镜反点平面,故传统模型多用于无褶皱或少褶皱的表面;而基于 BP 神经网络的 BRDF 模型由于描述能力更强,适用性更强,对于褶皱材质的局部镜反现象能够有较好的描述效果,因此,基于 BP 神经网络的 BRDF 模型更适用于实际中存在的褶皱表面。

5 结 论

卫星表面常常因制造工艺等影响而产生褶皱,对目标的光学特性产生了极大影响,因此在对卫星光学特性进行建模分析时必须将褶皱的影响考虑进去。针对褶皱表面 3D 模型建立过程复杂以及由此造成的后续计算量大的问题,提出一种新的褶皱建模方法,将褶皱视为一种材质,将数万个面元简化为一个面元,基于 BP 神经网络进行 BRDF 建模,以描述褶皱材质,进而用材质 BRDF 模型代替褶皱表面 3D 模型进行仿真计算,大大减小了计算量。通过与传统 BRDF 模型进行对比,得出了本文模型适用性更强、准确率更高的结论。

参 考 文 献

- [1] Jiang J S. Multilayer insulation materials and their application to spacecrafts[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2000, 30(4): 17-25.
江经善. 多层隔热材料及其在航天器上的应用[J]. *宇航材料工艺*, 2000, 30(4): 17-25.
- [2] Wu X D. Influence of multilayer heat insulation material on infrared feature of a satellite[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1721-1725.
吴晓迪. 多层隔热材料对卫星红外特性的影响[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(6): 1721-1725.
- [3] Fan H L. Spacecraft thermal control materials[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2007, 37(6): 7-10.
范含林. 航天器热控材料的应用和发展[J]. *宇航材料工艺*, 2007, 37(6): 7-10.
- [4] Yang M, Wu X D, Lü X Y, *et al.* Numerical analysis on the infrared radiation of multilayer insulation outside the satellite[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(12): 1288-1291.
杨明, 吴晓迪, 吕相银, 等. 卫星表面隔热材料红外辐射的数值分析[J]. *激光与红外*, 2009, 39(12): 1288-1291.
- [5] Li P, Li Z, Xu C. Influence of covering material wrinkles on space object's optical scattering characteristics[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, 38(6): 934-943.
李鹏, 李智, 徐灿. 空间目标表面覆盖材料褶皱对光散射特性的影响[J]. *空间科学学报*, 2018, 38(6): 934-943.
- [6] Wu Y, Yang L, Fan J Y, *et al.* A method of modeling spatial object's visible-light scattering characteristic[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2009, 14(2): 82-85.
吴英, 杨玲, 范剑英, 等. 空间目标的可见光散射特性建模与仿真研究[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2009, 14(2): 82-85.
- [7] Shan B, Liang Y Q, Li H N. Attitude and angular speed estimation of spacial objects based on photometric observation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0512002.
单斌, 梁勇奇, 李恒年. 基于光度观测的空间目标姿态与角速度估计[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0512002.
- [8] Hou Q Y, Gong J N, Fan Z P, *et al.* Inversion and reconstruction of the macroscopic photometric characterization model for on-orbit space object[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(15): 154201.
侯晴宇, 巩晋南, 樊志鹏, 等. 在轨空间目标光学特性宏观表征模型的反演重构[J]. *物理学报*, 2017, 66(15): 154201.
- [9] Li Y J, Jin G, Zhong X. Modeling and simulation of visible light scattering properties of spatial object using STK [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, 33(2): 188-193.
李艳杰, 金光, 钟兴. 基于 STK 的空间目标可见光散射特性建模与仿真[J]. *空间科学学报*, 2013, 33(2): 188-193.
- [10] Zhang F, Zhang Y S, Xu C. Optical scattering characteristics of satellite with fold surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 052401.
张峰, 张雅声, 徐灿. 卫星褶皱表面的光学散射特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 052401.
- [11] Xu C, Zhang Y S, Li P, *et al.* Calculation of optical cross section areas of spatial objects based on OpenGL picking technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0720001.
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): 0720001.
- [12] Liu C H, Li Z, Xu C. A modified Phong model for Fresnel reflection phenomenon of commonly used materials for space targets[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 102901.
刘程浩, 李智, 徐灿. 针对空间目标常用材质菲涅耳反射现象的改进 Phong 模型[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 102901.

- [13] Han Y, Sun H Y, Li Y C, *et al.* Simulation of space object laser radar cross section[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 819-823.
韩意, 孙华燕, 李迎春, 等. 空间目标激光雷达散射截面仿真分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(5): 819-823.
- [14] Han Y, Sun H Y. Advances in space target optical scattering character research[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 758-766.
韩意, 孙华燕. 空间目标光学散射特性研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 758-766.
- [15] Ackermann M R, McGraw J T, Martion J B, *et al.* Blind search for micro satellites in LEO: optical signatures and search strategies[C] // 2003 Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, September 7-13, 2013, Maui Air Force Station, HI. United States: [s. n.], 2003: 1-24.
- [16] Zhou J R, Wei W, Wang C L. Overview of BRDF model research[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2016(18): 109-110.
周璟然, 韦巍, 王成龙. BRDF 模型研究综述[J]. *电子技术与软件工程*, 2016(18): 109-110.
- [17] Li Z, Zhao Z X, Zheng J. Momentum gradient descent method to train the BP network[J]. *Inner Mongolia Science Technology and Economy*, 2006(12): 86-88.
李智, 赵子先, 郑君. 动量梯度下降法训练 BP 网络[J]. *内蒙古科技与经济*, 2006(12): 86-88.
- [18] Liu C H, Li Z, Xu C, *et al.* BRDF model for commonly used materials of space targets based on deep neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1129001.
刘程浩, 李智, 徐灿, 等. 基于深度神经网络的空间目标常用材质 BRDF 模型[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1129001.
- [19] Wu Z S, Xie D H, Xie P H, *et al.* Modeling reflectance function from rough surface and algorithms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(8): 897-901.
吴振森, 谢东辉, 谢品华, 等. 粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法[J]. *光学学报*, 2002, 22(8): 897-901.