基于面元网格化的空间目标光学特性计算方法

鲍文卓，丛明煜，张 伟，程 军，曹移明

（哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心，哈尔滨 150001，latermouse@126.com）

摘 要：为实现复杂结构空间目标光学特性的工程化计算，基于计算几何的面元网格化思想，提出了一种空间目标光学特性计算方法.建立了空间目标标准几何结构、面元网格划分、面元遮挡、面元照度计算的数学模型，设计开发了空间目标光学特性计算软件.针对不同的卫星目标，进行了光学特性的计算，并将计算结果分别与解析法计算结果和试验测量结果进行比较分析，结果表明面元网格化的计算精度优于解析方法，且与试验结果相比其计算偏差小于一个视星等，满足工程应用的要求.

关键词：空间目标；光学特性计算；几何体建模；面元网格化

中图分类号：O432.2 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2010)05－0710－06

An optical characteristics calculating method based on surface mesh-creation for space targets

BAO Wen-zhuo, CONG Ming-yu, ZHANG Wei, CHENG Jun, CAO Yi-ming

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, latermouse@126.com)

Abstract: In order to realize the optical characteristics calculation of space targets with complex shape, an optical characteristics calculating method for space targets was presented based on the general idea of surface mesh-creation. The mathematical models of standard geometries for targets, mesh-creation methods, visibility of the target, and the luminance calculation were given. The software calculating optical characteristics of space targets was designed and compiled. For several satellite targets, optical characteristics calculations were conducted with this method, and the results were compared with those of analytic method and experiments. It is showed that the mesh-creation method is better than the analytic method in precision, and the errors are less than one apparent magnitude compared with experimental results, so this method can be applied in practice.

Key words: space target; optical characteristics calculation; target geometry modeling; surface mesh-creation

近距离导航测量、空间目标天基监视等领域中，可见光载荷具有质量轻、体积小、定位测量精度高等特点，已得到广泛应用.在空间目标光学特性计算方面[1－7]，主要采用2种计算方法：标准几何体解析法、蒙特卡罗光线追迹法.标准几何体解析法计算模型简单、精度较低，主要用于光学载荷的总体方案设计阶段；蒙特卡罗光线追迹法考虑了追迹光线在几何体面型之间的多次反射现象，计算模型复杂、计算速度慢，主要用于目标特性典型与边界观测条件下的计算中.

本文应用计算几何面元网格化思想，提出并实现了一种基于面元网格化的空间目标光学特性计算方法，建立了空间目标标准几何结构、面元网格划分、面元遮挡、面元照度计算的数学模型，实现了空间目标光学特性的高效计算.

1 面元网格化计算方法

1.1 计算方法原理

空间目标光学特性可等效为目标离散化的表面面元光学特性的叠加.图1给出了将空间目标表面分解为一系列相互独立的面元集合的示意

收稿日期：2009－04－01.
基金项目：国家高技术发展研究计划资助项目(2006AA704215).
作者简介：鲍文卓(1983—)，男，博士研究生；
丛明煜(1964—)，男，教授，博士生导师；
张 伟(1962—)，男，教授，博士生导师.

图，通过求取各个面元的反射特性，进行整体叠加，可求得空间目标整体的光学特性.

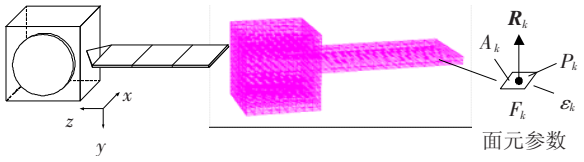


图 1　空间目标面元网格化示意图

空间目标整体特性参数可表示为离散化面元特征量 F_k 的集合，记 $M = \{F_k\}_{k=1}^{m}, k = 1,2,\cdots,m$. 第 k 个面元的特征量为

$$F_k = (P_k, \boldsymbol{R}_k, A_k, \varepsilon_k, S_k, V_k)^{\mathrm{T}}.$$

式中：P_k 为面元中心坐标 (x_k, y_k, z_k)，$\boldsymbol{R}_k$ 为面元法线方向矢量，A_k 为面元面积，ε_k 为面元表面漫反射系数，S_k 为面元光照加权因子，V_k 为面元观测加权因子.

空间目标反射光谱辐照度为

$$E(\lambda) = \sum_{k=1}^{m} E_k(\lambda) \cdot S_k \cdot V_k. \tag{1}$$

式中：$E(\lambda)$ 为空间目标反射光谱辐照度，$E_k(\lambda)$ 为面元 F_k 的反射光谱辐照度，m 为面元数目.

计算方法流程如图 2 所示，主要包括：1）目标标准几何体建模，将目标描述为二次曲面几何体的形式；2）目标网格面元生成，将各二次曲面几何体离散化为面元的集合；3）面元遮蔽性判断，对离散化后的面元进行可见性条件判断；4）面元特性计算；5）目标整体特性计算.

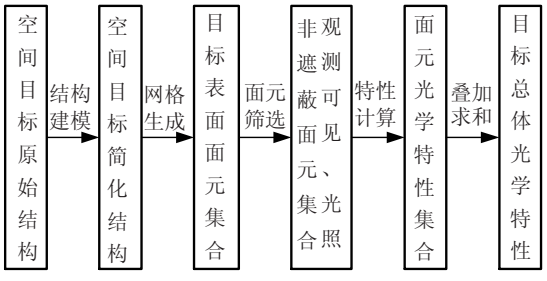


图 2　目标光学特性计算流程

1.2　坐标系变换关系

空间目标光学特性计算需要定义下列坐标系：卫星本体坐标系 $R_{\mathrm{sat}}(OXYZ)$、子结构体参考坐标系 $R_{\mathrm{ref}}(oxyz)$、观测视线坐标系 $R'(Ox'y'z')$、光照方向坐标系 $R''(Ox''y''z'')$，各坐标系之间的坐标变换关系如图 3，图 4 所示（坐标系原点 O、o 分别位于目标与子结构体质心位置，ϑ, σ 分别为观测方向 R_{obs} 与光照方向 R_{sun} 在卫星本体坐标系中的方位角、高低角）[8].

图 4 中，矩阵 $\boldsymbol{BR}$、$\boldsymbol{BL}$、$\boldsymbol{BO}$ 分别为卫星本体坐标系到子结构体参考坐标系、观测视线坐标系、光照方向坐标系的变换矩阵. 各个坐标系之间的空间位置矢量变换满足：

$$R_{\mathrm{sat}} = (\boldsymbol{BR})^{\mathrm{T}} R_{\mathrm{ref}} + \boldsymbol{R}_s = (\boldsymbol{BL})^{\mathrm{T}} R'' = (\boldsymbol{BO})^{\mathrm{T}} R'. \tag{2}$$

式（2）中的变换矩阵为

$$\boldsymbol{BR} = (\boldsymbol{l}, \boldsymbol{m}, \boldsymbol{n})^{\mathrm{T}}, \tag{3}$$

$$\boldsymbol{BO} = \boldsymbol{R}_Y(\sigma_{\mathrm{obs}}) \boldsymbol{R}_Z(\theta_{\mathrm{obs}}), \tag{4}$$

$$\boldsymbol{BL} = \boldsymbol{R}_Y(\sigma_{\mathrm{sun}}) \boldsymbol{R}_Z(\theta_{\mathrm{sun}}). \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{l}, \boldsymbol{m}, \boldsymbol{n}$ 分别为子结构体参考系坐标方向在本体坐标系下的单位矢量，$\boldsymbol{R}_Y(), \boldsymbol{R}_Z()$ 分别为绕 Y、Z 轴的旋转变换矩阵，$\boldsymbol{R}_s$ 为子结构体参考坐标系坐标原点在本体坐标系中的位置矢量.

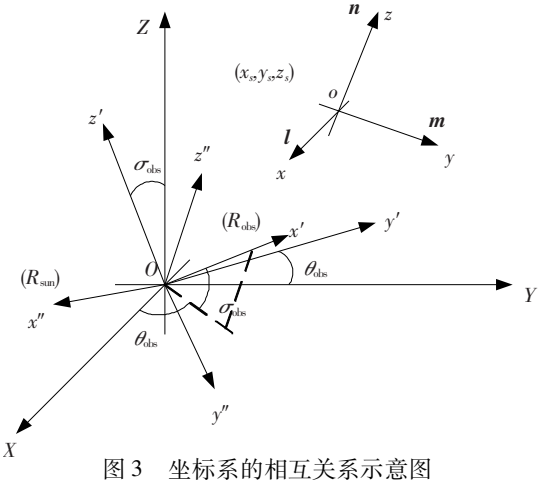


图 3　坐标系的相互关系示意图

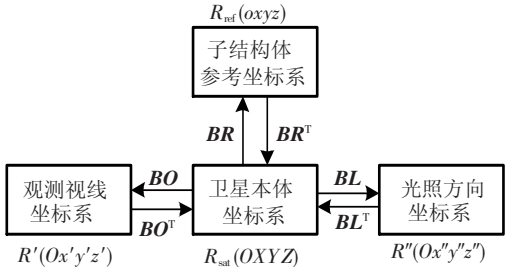


图 4　坐标系的变换关系

1.3　目标标准几何体与面元网格建模

为了提高计算效率，忽略对空间目标光学特性影响较小的结构体，将空间目标等效为长方体、球体、圆柱体与圆锥体的组合. 图 5 给出了目标结构等效示例，可看出，简化后的目标整体结构保持了原有目标的主要形状特征.

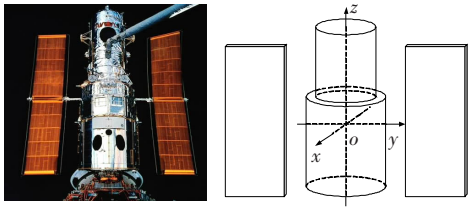


图 5　典型卫星目标结构建模图

复杂的空间目标经过结构简化，可等效为 4 种二次曲面几何体的组合. 这 4 种几何体由矩形面、圆形面、球面、圆柱面以及圆锥面 5 类二次曲

面组成.

采用一种快速矩形、梯形面元划分方法,对各标准二次曲面参考系坐标轴向尺度范围作多等份划分,可达到面元网格划分均匀性的目的.

以矩形平面网格划分为例(如图 6),将其在 x、y 轴方向(子结构体参考坐标系)划分为 $L \times W$ 个面元,面元 $F_{i,j}$ 的特征参数为

$$p_{i,j} = \left(\Delta L \times \left(i + \frac{1}{2}\right), \Delta W \times \left(j + \frac{1}{2}\right), 0\right)^{\mathrm{T}}, \quad (6)$$

$$i = 1, \cdots, L, \quad j = 1, \cdots, W.$$

$$A_{i,j} = \frac{S}{L \times W} \quad . \quad (7)$$

$$r_k = (0, 0, 1)^{\mathrm{T}}. \quad (8)$$

式中:$\Delta L = \dfrac{S}{L}$,$\Delta W = \dfrac{S}{W}$ 分别为面元在 X、Y 方向上的长度,S 为矩形面积.

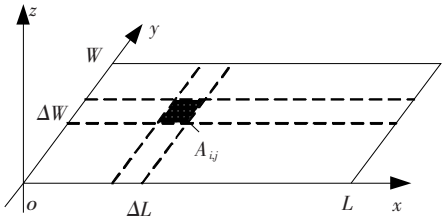


图 6 矩形平面网格划分方法示意图

依据上述原理,可将圆形面、圆柱面、圆锥面在极坐标系下进行划分,球面在球坐标系下进行划分,面元划分数学模型如表 1 所示.

表 1 不同面型网格面元特征参数建模

子结构类型	网格面积/m²	网格参考点坐标(相对于子结构体参考坐标系)/m	面元法线方向(相对于子结构体参考坐标系)/m
矩形平面	$\dfrac{S}{(L \times W)}$	$\left(\Delta L \times \left(i + \frac{1}{2}\right), \Delta W \times \left(j + \frac{1}{2}\right), 0\right)^{\mathrm{T}}$	$(0,0,1)^{\mathrm{T}}$
圆形平面	$\dfrac{\pi}{L} \cdot \left[\left(\dfrac{r}{W} \cdot j\right)^2 - \left(\dfrac{r}{W} \cdot (j-1)\right)^2\right]$	$\left(\dfrac{r}{W} \cdot j \cdot \cos\left(\dfrac{2\pi}{L} \cdot i\right), \dfrac{r}{W} \cdot j \cdot \sin\left(\dfrac{2\pi}{L} \cdot i\right), 0\right)^{\mathrm{T}}$	$(0,0,1)^{\mathrm{T}}$
球面	$\dfrac{\pi}{L}\left\{\dfrac{\pi \cdot r^2}{W}\left[\sin\left(\dfrac{\pi}{W} \cdot j\right) + \sin\left(\dfrac{\pi}{W} \cdot (j-1)\right)\right]\right\}$	$\begin{pmatrix} r \cdot \sin\left(\frac{\pi}{W} \cdot j\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{L} \cdot i\right) \\ r \cdot \sin\left(\frac{\pi}{W} \cdot j\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{L} \cdot i\right) \\ r \cdot \cos\left(\frac{\pi}{W} \cdot j\right) \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \sin\left(\frac{\pi}{W} \cdot j\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{L} \cdot i\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{W} \cdot j\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{L} \cdot i\right) \\ \cos\left(\frac{\pi}{W} \cdot j\right) \end{pmatrix}$
圆柱面	$\dfrac{2\pi}{L} r \cdot \dfrac{H}{W}$	$\left(r \cdot \cos\left(\dfrac{2\pi}{L} \cdot i\right), r \cdot \sin\left(\dfrac{2\pi}{L} \cdot i\right), -\dfrac{H}{W} \cdot j\right)^{\mathrm{T}}$	$\left(\cos\left(\dfrac{2\pi}{L} \cdot i\right), \sin\left(\dfrac{2\pi}{L} \cdot i\right), 0\right)^{\mathrm{T}}$
圆锥面	$\dfrac{2\pi \cdot r}{L \cdot W}(2j-1) \dfrac{H}{2W \cdot \sin\left[\tan^{(-1)}\left(\frac{H}{r}\right)\right]}$	$\begin{pmatrix} \frac{j}{W} r \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{L} \cdot i\right) \\ \frac{j}{W} r \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{L} \cdot i\right) \\ H - \frac{H}{W} \cdot j \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \cos\left[\tan^{(-1)}\left(\frac{r}{H}\right)\right] \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{L} \cdot i\right) \\ \cos\left[\tan^{(-1)}\left(\frac{r}{H}\right)\right] \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{L} \cdot i\right) \\ \sin\left[\tan^{(-1)}\left(\frac{r}{H}\right)\right] \end{pmatrix}$

1.4 面元可见与光照遮蔽计算模型

面元观测可见性与光照遮蔽性逻辑特性参数是目标光学特性的加权因子(取 1 或 0),采用光线追踪法求取面元加权因子.

空间目标经标准几何结构建模与网格划分后,其特征量在子结构体参考坐标系下可表达为面元特征量的集合形式:

$$M_{\mathrm{Sub}} = \{f_k\}_{k=1}^{m} = \{p_k, r_k, A_k, \varepsilon_k, S_k, V_k\}_{k=1}^{m}. \quad (9)$$

将式(9)由子结构体参考坐标系变换至卫星本体坐标系,面元特征可表达为

$$M = \{F_k\}_{k=1}^{m} = \{P_k, \boldsymbol{R}_k, A_k, \varepsilon_k, S_k, V_k\}_{k=1}^{m},$$

$$R_k = (\boldsymbol{BR})^{\mathrm{T}} r_k,$$

$$P_k = (\boldsymbol{BR})^{\mathrm{T}} p_k + \boldsymbol{R}_s. \quad (10)$$

式中:M 为空间目标特征量集合,m 为空间目标面元网格划分个数.

面元观测可见性计算的判定步骤为:

1)将式(10)的空间目标面元集合由本体坐标系变换到观测视线坐标系,面元特征可表达为

$$M' = \{F'_k\}_{k=1}^{m} = \{P'_k, \boldsymbol{R}'_k, A_k, \varepsilon_k, S_k, V_k\}_{k=1}^{m},$$

$$\boldsymbol{R}'_k = (\boldsymbol{BO})\boldsymbol{R}_k,$$

$$P'_k = (\boldsymbol{BO})\, P_k. \quad (11)$$

2)将 M' 集合分成若干子集,每个子集内的面元具有相同的 y'、z' 坐标值,即有

$$M' = \{N_i\}_{i=1}^{n}, \quad (12)$$

$$N_i = \{F'_k\}_{k=1}^{l} \; y'_k = A_i, z'_k = B_i. \quad (13)$$

式中:N_i 为 M' 分类子集,n 为分类子集的数目

($n < m$)，A_i，B_i 分别为分类子集对应的坐标值，l 为分类子集中的面元数.

3)将各分类子集内的面元按 x' 方向进行深度排序，具有最大 x' 值的面元视为可视面元，集合 N_i 中的面元特征量 F'_k 中的可视加权因子为

$$V_i = \begin{cases} 1, & x'_i = \max(N_i); \\ 0, & \text{otherwise}, \end{cases} \quad i = 1,2,\cdots,l. \tag{14}$$

1.5　面元光学特性计算模型

空间目标在轨时，接收到的辐射主要来自太阳、其他天体以及地球反照. 其中，太阳辐射为目标光学特性的主要辐射源，其他辐射源在目标光学特性计算时可忽略.

面元光学特性计算原理如图 7 所示，任意面元反射的太阳光能量在传感器入瞳处产生的光谱照度为

$$E_k(\lambda) = \frac{E_{\text{sun}}(\lambda)}{R^2} \cdot \varepsilon_k \cdot A_k \cdot \cos\Theta_1 \cdot \cos\Theta_2. \tag{15}$$

式中：R 为面元到光学载荷入瞳处的距离，Θ_1，Θ_2 分别为面元法线方向 $\boldsymbol{n}$ 与太阳方向矢量 $\boldsymbol{R}_{\text{sun}}$、观测方向矢量 $\boldsymbol{R}$ 的夹角，$E_{\text{sun}}(\lambda)$ 为太阳在大气层外的可见光波段光谱辐照度，

$$E_{\text{sun}}(\lambda) = \left(\frac{r_{\text{sun}}}{R_{\text{sun}}}\right)^2 \cdot M(\lambda).$$

式中：r_{sun} 为太阳参考半径，R_{sun} 为太阳到空间目标的距离，$M(\lambda)$ 为太阳的可见光波段光谱辐出度.

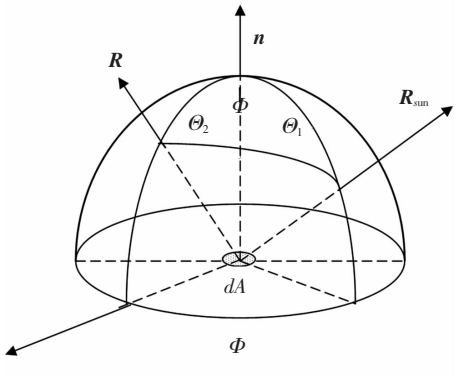


图 7　面元光学特性计算原理示意图

2　计算软件结构与功能设计

基于上述数学模型与计算方法，采用 Visual C + +6.0编译环境，开发出用于空间目标光学特性分析计算的集成软件. 软件功能结构与操作界面如图 8，图 9 所示.

集成软件具有：1)空间目标标准几何体结构建模；2)空间目标标准几何体解析法特性计算；3)空间目标面元网格化方法特性计算；4)计算结果的存储与管理.

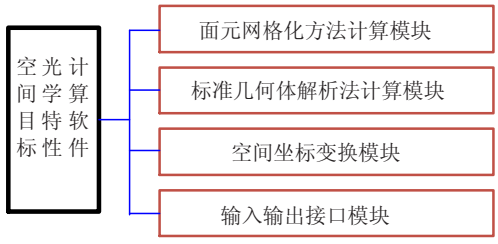
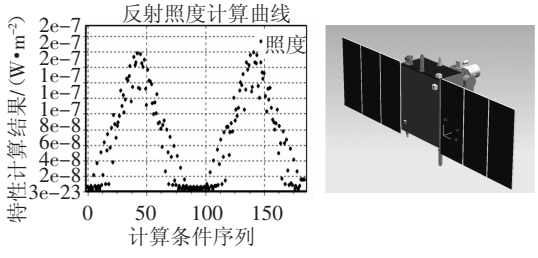


图 8　集成软件功能结构



(a)软件界面



(b)计算结果

图 9　集成软件界面及计算结果示意图

3　计算结果与分析

为考核与验证基于面元网格化光学特性计算的精度，采用下述方法进行分析与验证：

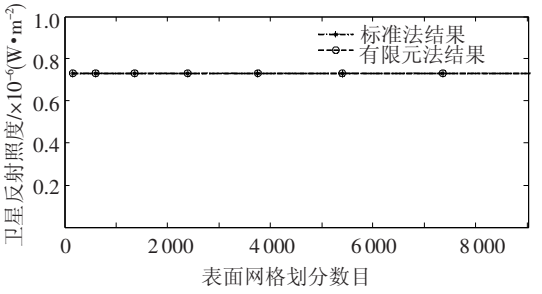
1)面元网格化方法与标准几何体解析法计算结果进行比较. 通过二次曲面标准几何体计算结果，确定满足网格化方法计算收敛条件的网格划分尺度参数；通过整星计算结果，验证网格化方法的计算精度；

2)面元网格化方法与缩比模型(卫星本体、整星模型)试验结果进行比较，进一步验证网格化方法的计算精度和实际应用的可行性.

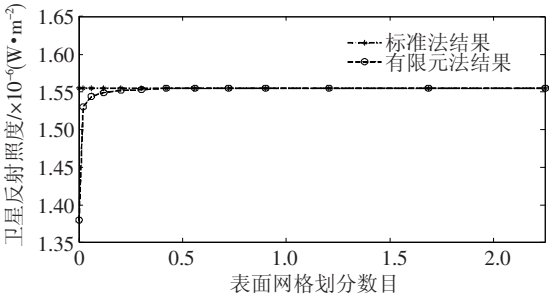
3.1　网格尺度参数确定

计算条件采用观测方向与光照方向均选定为几何体本体的 $-x$ 方向，观测距离设定为 15 km. 计算结果如图 10 所示，从图 10 中可看出由于面元网格化会带来结构体表面面形的畸变(曲面面元等效为平面面元)，使得面元网格化方法与解析

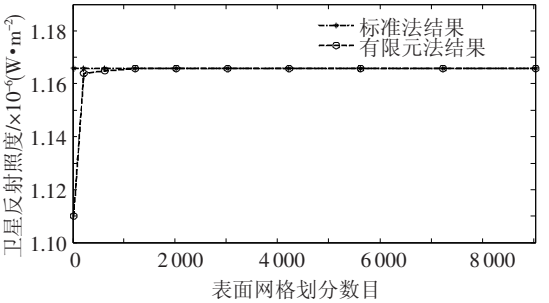
法(真值)的计算结果有一定的误差,但是随着面元网格划分密度的提高,误差趋近于0. 表2给出了满足计算收敛条件(计算精度)下的标准几何体网格划分尺度参数.



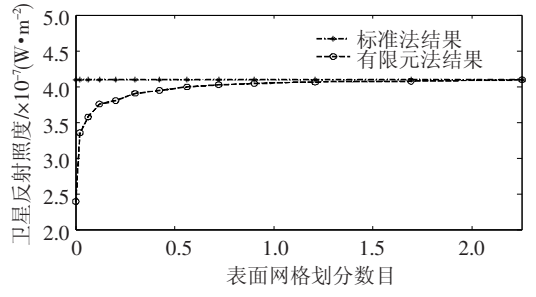
(a)边长1 m正方体



(b)半径1 m球体



(c)底面半径1 m、高1 m圆柱体



(d)底面半径1 m、高1 m圆锥体

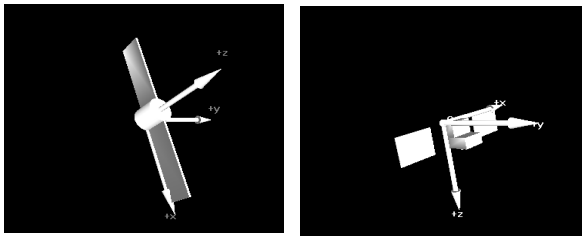
图10　标准几何体目标光学特性对比结果

表2　满足收敛条件下的结构体网格划分尺度

几何体类型	尺寸参数/m	满足收敛条件的网格数
正方体	1×1×1	≥1
圆柱体	1×1	1 600
圆锥体	1×1	20 000
球体	1	6 400

3.2　计算精度验证

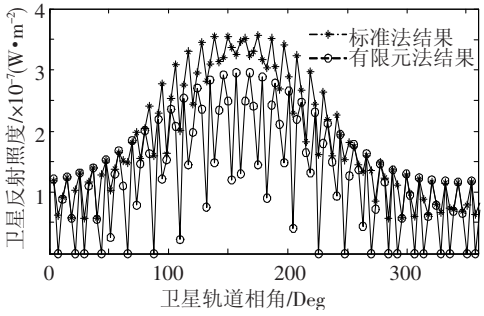
对图11(a)所示卫星构型,分别采用解析法与面元网格化法对卫星在一个轨道周期内光学特性变化情况进行对比计算. 计算条件:卫星为柱体本体+长方体双翼帆板结构(卫星柱体本体:底面半径0.5 m,高1 m,反射率设为0.8;双翼帆板尺寸参数如下:3 m×0.1 m×1 m,反射率均设为0.8);卫星运行轨道设定为600 km太阳同步轨道(降交点地方时06:30 am);计算起始时刻设为2009年1月1日0时;目标星姿态绕轨道系y轴的角速度为1 (°)/s;观测星与目标星处于同一轨道,且位于目标星后方15 km.



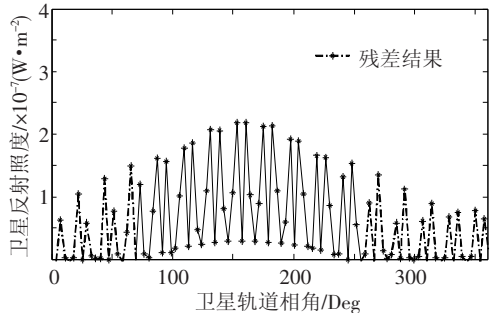
(a)模型1　　(b)模型2

图11　卫星结构示意图

计算结果如图12所示,由图12可看出,由于面元网格化方法考虑了卫星各子结构体之间的相互遮挡关系,其特性计算结果优于解析法.



(a)特性结果



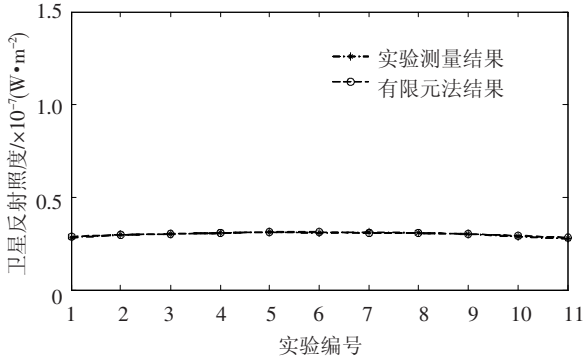
(b)残差结果

图12　卫星光学特性计算结果对比

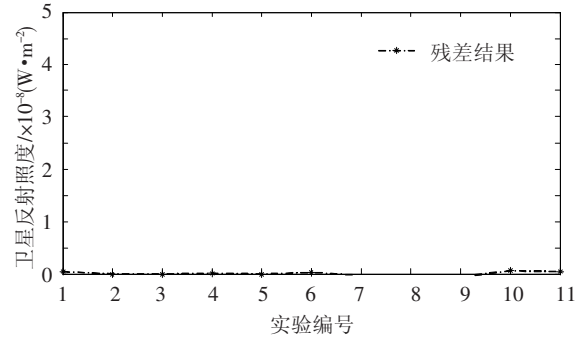
3.3　试验结果比较

对图11(b)所示卫星构型中的卫星本体及整星缩比模型进行了地面光学特性试验测量,将试验结果与面元网格化计算结果进行比较(如图13),结果表明面元网格化方法计算结果与试验测量结果的偏差小于一个视星等,可满足光学载荷系统地面数字仿真、半实物仿真对目标特

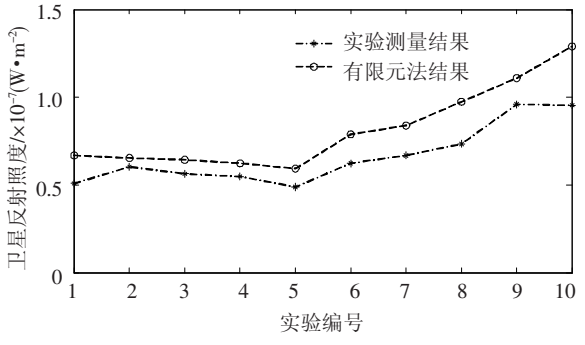
性计算精度的要求.



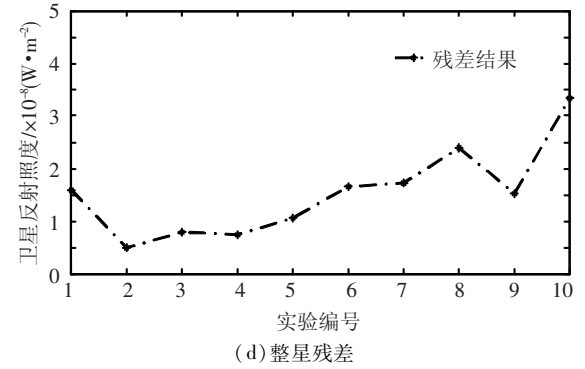
(a)本体结构结果



(b)本体结构残差



(c)整星结果



(d)整星残差

图 13　面元网格化方法计算结果与实测数据比较

4　结　论

1）建立了用于空间目标光学特性计算的面元网格化方法,给出了相关的数学模型与计算方法,并实现了用于空间目标光学特性分析计算的集成软件,实现了空间目标光学特性的高效计算.

2)面元网格化方法具有较好的收敛性,方法特性计算精度优于解析法;

3)面元网格化方法与试验测量结果的偏差小于一个视星等,可满足光学载荷系统地面数字仿真、半实物仿真对目标特性计算精度的要求.

参考文献:

[1] RORK E W, LIN S S, YAKUTIS A J. Ground-based Electro Optical Detection of Artificial Satellites in Daylight from Reflected Sunlight [D]. Massachusetts Avenue, Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1982: 3 – 35.

[2] RASK J D. Modeling of Diffuse Photometric Signatures of Satellites for Space Objects Identification [D]. Ohio State, USA: Air Force Institute of Technology, 1983: 20 – 119.

[3] ZISSIS G J. The Infrared & Electro-optical Systems Handbook vol. 1-Sources of Radiation [M]. Bellingham, Wash: SPIE Optical Engineering Press, 1993: 151 – 157.

[4] HROVAT D. Hyperspectral Analysis of Space Objects: Signal to Noise Evaluation[D]. Ohio State, USA: Air Force Institute of Technologies, 1993: 88 – 91.

[5] MCCUE G A, WILLIAMS J G, MORFORD J M. Optical characteristics of artificial satellites[J]. Planetary and Space Science, 1971, 19(8): 851 – 868.

[6] 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.

[7] KOENDERINK J J, van DOORN A J. Shading in the case of translucent objects[C]//Proc of SPIE. San Jose, CA: Human Vision and Electronic Imaging VI, 2001, 4299: 312 – 320.

[8] 许世文, 龙夫年, 付苓. 实时星场模拟器中的坐标变换[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, 30 (5): 118 – 120.

(编辑　张　红)