0254-6124/2022/42(3)-0485-07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LIU Yan, WEN Desheng, YI Hongwei, YIN Qinye. Simulation of Apparent Magnitude Curves of Space Objects (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(3): 485–491. DOI:10.11728/cjss2022.03.210721079

空间目标视星等曲线仿真*

刘 燕[1,2,3] 汶德胜[3] 易红伟[3] 殷勤业[2]

1(西安明德理工学院 西安 710124)

2(西安交通大学电子与信息工程学院 西安 710049)

3(中国科学院西安光学精密机械研究所 西安 710119)

摘 要 人类航天活动日益频繁，空间目标种类和数量不断增多，识别未知空间目标的关键特征具有重要的科学价值。本文通过辅助图形软件建模分割，获取球体、圆锥体和圆柱体带法向量的面元坐标；基于卫星仿真工具包，得到了目标轨道及位置参数，并结合双向反射分布函数各向异性 Phong 模型和四元数姿态更新模型，完成了地基观测条件下 4 种形状空间目标的视星等仿真。仿真结果表明，目标受空间位置、形状和姿态的影响程度不同，其光度曲线具有各自特点。球体由于形状完全中心对称，光度曲线主要受空间位置的影响；圆锥体、正方体、圆柱体光度曲线的波形受形状影响较大，曲线走向受位置影响较大，波动频率受姿态角速率影响较大。通过统计分析相关数据，可为后续空间目标位置、姿态和形状的反演提供先验模型。

关键词 双向反射分布函数，各向异性 Phong 模型，视星等，光度曲线

中图分类号 V19, V556.5

Simulation of Apparent Magnitude Curves of Space Objects

LIU Yan[1,2,3] WEN Desheng[3] YI Hongwei[3] YIN Qinye[2]

1(*Xi'an Mingde Institute of Technology*, *Xi'an* 710124)

2(*School of Electronics and Information*, *Xi'an Jiaotong University*, *Xi'an* 710049)

3(*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Xi'an* 710119)

Abstract With the increasing frequency of human space activities and the increasing variety and number of space targets, it is of great scientific value to identify the key features of unknown space targets. By segmentation using auxiliary graphics software, the surface coordinates of sphere, cone and cylinder with a normal vector are built. Based on the satellite simulation toolkit, the target orbit and position parameters are obtained. Combining with isotropic Phong BRDF model and attitude quaternion update model, the apparent magnitudes of these four shape space targets under ground observation

* 国家自然科学基金项目（61427811）和中国科学院青年创新促进会基金项目（1188000111）共同资助

2021-02-08 收到原稿，2022-04-01 收到修定稿

E-mail：liuyan2015@opt.cn

conditions are simulated. Simulation results show that the target is affected by the spatial position, shape and attitude in different degrees, and each light curve has its own characteristics. Because the sphere is completely centrosymmetric, the light curve is mainly affected by the space position. Light curve waveforms of the cone, cube and cylinder are mainly influenced by shape, the curve trends are mainly influenced by position, and wave frequencies are mainly influenced by attitude angular rate. By statistical analysis of the data, a prior model can be provided for the subsequent inversion of space target position, attitude and shape.

Key words BRDF, isotropic Phong model, Apparent magnitude, Light curve

0 引言

空间目标即人类开展空间活动产生的对象，主要包括人造地球卫星、空间站、空间运载工具以及直径大于 1 cm 的空间碎片等。随着进入空间的目标数量不断增加，以及其载荷复杂化、目标形状多样化、目标体积小型化等特点，对于空间目标特性研究提出了迫切需求。目前，空间目标光学特性分析与模型特征技术的发展受到关注，并在各研究领域得到广泛应用。空间目标是一个复杂的几何体，为了真实描述目标的光学特性，一般用方体、柱体、球体及锥体等典型的几何形状对空间目标进行几何建模[1,2]。本文研究的基本形状光度视星等曲线变化规律，主要适用于地基光电探测系统获取的中高轨远距离点目标的光度信息分析。

目前，关于空间目标视星等曲线反射模型和光度数据反演目标特点的研究不断深入。Shan 等[3] 对自旋棱柱体的光度曲线开展了分析及姿态研究。Liu 等[4] 对圆柱体、立方体目标基于 Phong 模型建立视星等曲线，研究得出立方体底面积是影响其光度的主要决定因素，而圆柱体侧面积是其主要决定因素。Sun 等[5] 对卫星几何模型基于 DAVIS 反射模型建立视星等曲线，认为太阳帆板对卫星整体光度的贡献不可忽略。Zhou 等[6] 介绍了通过雷达光电成像信息处理，实现在轨空间目标状态及姿态估计的几种最新技术。

本文仿真给出了球体、圆锥体、长方体和圆柱体 4 种形状在自旋与非自旋状态下的视星等曲线。通过分析不同形状、姿态、相位角条件下视星等曲线各自特点及规律，建立基本形状目标视星等曲线数据库，为后续空间目标位置、姿态和形状反演工作提供了较为完整的数据模型。

1 地球惯性坐标系至卫星载体坐标系的转换

卫星姿态主要是指确定卫星的载体坐标系相对于惯性参考系的旋转角度，因此要实现地球惯性坐标系至卫星载体坐标系的转换首先需要确定卫星姿态[7,8]。通过卫星仿真工具包仿真获得每一时刻卫星的姿态四元数，有

$$\boldsymbol{q}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{q}_{13}\\ q_4\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}n\sin(\theta/2)\\ \cos(\theta/2)\end{bmatrix}. \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{q}_{13}=\begin{bmatrix}q_1 & q_2 & q_3\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$为四元数的矢量部分，代表欧拉轴的方向，有

$$[\boldsymbol{q}_{13}^{\times}]=\begin{bmatrix}0 & -q_3 & q_2\\ q_3 & 0 & -q_1\\ -q_2 & q_1 & 0\end{bmatrix};$$

q_4 为欧拉转角；n和 θ 分别为旋转轴和旋转角。四元数表示的姿态矩阵为

$$\boldsymbol{A}=\left(q_4^2-|\ \boldsymbol{q}_{13}\ |^2\right)\boldsymbol{I}_3-q_4\left[\boldsymbol{q}_{13}^{\times}\right]+2\boldsymbol{q}_{13}\boldsymbol{q}_{13}^{\mathrm{T}}. \tag{2}$$

经过平移姿态矩阵旋转归一化，可以得到太阳与观测站在卫星载体坐标系中的矢量，即

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{sun}}^{\mathrm{B}}=\boldsymbol{A}\cdot\frac{\left(\boldsymbol{u}_{\mathrm{sun}}^{\mathrm{I}}-\boldsymbol{u}_{\mathrm{pt}}^{\mathrm{I}}\right)}{\left\|\boldsymbol{u}_{\mathrm{sun}}^{\mathrm{I}}-\boldsymbol{u}_{\mathrm{pt}}^{\mathrm{I}}\right\|}, \tag{3}$$

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{obs}}^{\mathrm{B}}=\boldsymbol{A}\cdot\frac{\left(\boldsymbol{u}_{\mathrm{obs}}^{\mathrm{I}}-\boldsymbol{u}_{\mathrm{pt}}^{\mathrm{I}}\right)}{\left\|\boldsymbol{u}_{\mathrm{obs}}^{\mathrm{I}}-\boldsymbol{u}_{\mathrm{pt}}^{\mathrm{I}}\right\|}. \tag{4}$$

其中：上标 B 表示向量位于卫星载体坐标系，上标 I 表示向量位于地球惯性坐标系；$\boldsymbol{u}_{\mathrm{sun}}^{\mathrm{I}}$、$\boldsymbol{u}_{\mathrm{pt}}^{\mathrm{I}}$、$\boldsymbol{u}_{\mathrm{obs}}^{\mathrm{I}}$分别为通过卫星仿真工具包仿真获得每一时刻的太阳矢量、卫星矢量及观测站矢量。

2　形状模型

将空间目标形状拆分为圆柱、多面体、球形、锥形等基本形状的组合。目标表面可视为由许多微小面元构成，且每个微小面元都可以利用 BRDF 模型描述其反射特征[9,10]，这里采用面元分割法对基本形状表面进行划分。在目标载体坐标系中，每个面元定义三个基本的坐标向量$\left[\begin{array}{ccc}\boldsymbol{u}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{B}} & \boldsymbol{u}_{\mathrm{u}}^{\mathrm{B}} & \boldsymbol{u}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{B}}\end{array}\right]$，$\boldsymbol{u}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{B}}$为面元的法向量，垂直于面元向外，$\boldsymbol{u}_{\mathrm{u}}^{\mathrm{B}}$和$\boldsymbol{u}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{B}}$在面元内且相互垂直，三者符合笛卡儿坐标系右手定律，卫星为刚体，三者不会随时间变化。在目标载体坐标系内，每个面元定义$\boldsymbol{u}_{\mathrm{sun}}^{\mathrm{B}}$为卫星指向太阳的单位向量，$\boldsymbol{u}_{\mathrm{obs}}^{\mathrm{B}}$为卫星指向地面观测站的单位向量，$\boldsymbol{u}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{B}}$ 为$\boldsymbol{u}_{\mathrm{sun}}^{\mathrm{B}}$和$\boldsymbol{u}_{\mathrm{obs}}^{\mathrm{B}}$的平分向量，如图 1 所示。

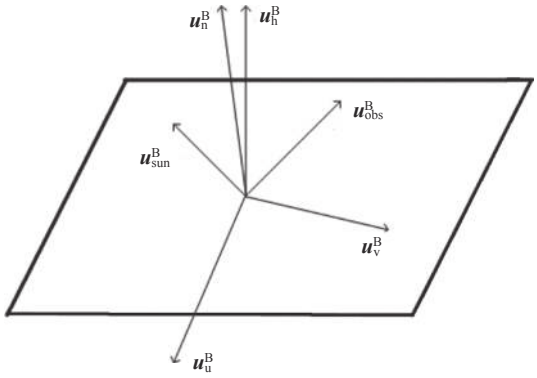


图 1　形状反射模型

Fig. 1　Shape reflection geometry

3　基于各向异性 Phong 模型的视星等值计算

为了表征物体表面光散射的空间分布，1977 年 Nicodemus 给出 BRDF 的严格定义：经过目标表面沿$(\theta_{\mathrm{r}},\ \phi_{\mathrm{r}})$方向反射出射的辐亮度$\mathrm{d}L_{\mathrm{r}}(\theta_{\mathrm{r}},\ \phi_{\mathrm{r}},\ \Delta\phi)$与沿$(\theta_{\mathrm{i}},\ \phi_{\mathrm{i}})$方向入射到目标表面的辐照度$\mathrm{d}E_{\mathrm{i}}(\theta_{\mathrm{i}},\ \phi_{\mathrm{i}})$之比。图 2 给出了定义 BRDF 坐标的几何角度关系，其中 θ 和 ϕ 分别表示天顶角和方位角，下标 i 和 r 分别表示入射和探测方向，λ为光的波长。

$$f(\theta_{\mathrm{i}},\phi_{\mathrm{i}},\theta_{\mathrm{r}},\phi_{\mathrm{r}},\lambda)=\frac{\mathrm{d}L_{\mathrm{r}}(\theta_{\mathrm{r}},\phi_{\mathrm{r}},\lambda)}{\mathrm{d}E_{\mathrm{i}}(\theta_{\mathrm{i}},\phi_{\mathrm{i}},\lambda)}. \tag{5}$$

式(5)表示 BRDF 的一般定义，通过测量入射辐照度及物体表面反射的辐亮度计算 BRDF，在实际应用中并不广泛，通常通过建立物体表面的反射模型，模拟获取物体表面的 BRDF 表达式。各向异性 Phong 模型主要由镜面反射分量$\rho_{\mathrm{spec}}(i)$和漫反射分量$\rho_{\mathrm{diff}}(i)$组成[11]，i表示每个面元，有

$$\rho_{\mathrm{total}}(i)=\rho_{\mathrm{spec}}(i)+\rho_{\mathrm{diff}}(i). \tag{6}$$

镜面反射分量为

$$\begin{aligned}\rho_{\mathrm{spec}}(i)=&\frac{D}{8\pi}\left\{\left[\boldsymbol{u}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{B}i}\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{B}i}(i)\right]^{z}\cdot\left\{\boldsymbol{u}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{B}i}\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{sun}}^{\mathrm{B}i}(i)+\right.\right.\\&\boldsymbol{u}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{B}i}\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{obs}}^{\mathrm{B}i}(i)-\left[\boldsymbol{u}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{B}i}\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{sun}}^{\mathrm{B}i}(i)\right]\cdot\\&\left.\left.\left[\boldsymbol{u}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{B}i}\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{obs}}^{\mathrm{B}i}(i)\right]\right\}^{-1}\right\}F_{\mathrm{reflect}}(i),\end{aligned} \tag{7}$$

$$z=\frac{n_{\mathrm{u}}(i)\left[\boldsymbol{u}_{\mathrm{u}}^{\mathrm{B}i}\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{B}i}(i)\right]^{2}+n_{\mathrm{v}}(i)\left[\boldsymbol{u}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{B}i}\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{B}i}(i)\right]^{2}}{1-\left[\boldsymbol{u}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{B}i}\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{B}i}(i)\right]^{2}}. \tag{8}$$

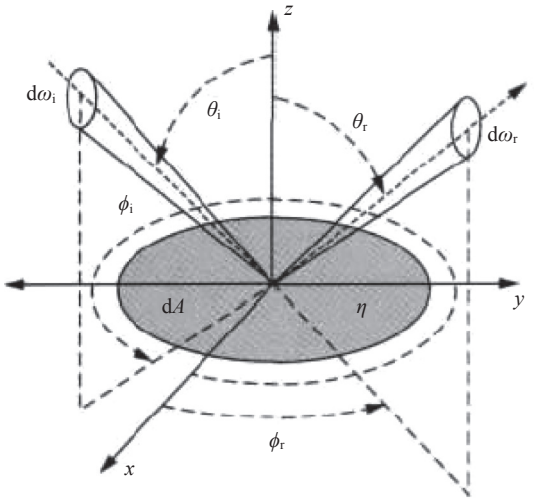


图 2　BRDF 几何关系

Fig. 2　BRDF geometric diagram

式中 D 为材料镜面反射分布特性，有

$$D=\frac{\sqrt{\left[n_{\mathrm{u}}(i)+1\right]\left[n_{\mathrm{v}}(i)+1\right]}}{8\pi}. \tag{9}$$

菲涅尔反射量为

$$F_{\mathrm{reflect}}(i)=R_{\mathrm{spec}}+(1-R_{\mathrm{spec}})\left[1-\boldsymbol{u}_{\mathrm{h}}^{\mathrm{B}i}(i)\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{sun}}^{\mathrm{B}i}(i)\right]^{5}. \tag{10}$$

式中，R_{spec}为材料镜面反射系数。定义R_{diff}为材料漫反射系数，则漫反射分量为

$$\begin{aligned}&\rho_{\mathrm{diff}}(i)=\\&\left(\frac{28R_{\mathrm{diff}}}{23\pi}\right)(1-R_{\mathrm{spec}})\left\{1-\left[1-\frac{\boldsymbol{u}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{B}i}\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{sun}}^{\mathrm{B}i}(i)}{2}\right]^{5}\right\}\cdot\\&\left\{1-\left[1-\frac{\boldsymbol{u}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{B}i}\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{obs}}^{\mathrm{B}i}(i)}{2}\right]^{5}\right\}.\end{aligned} \tag{11}$$

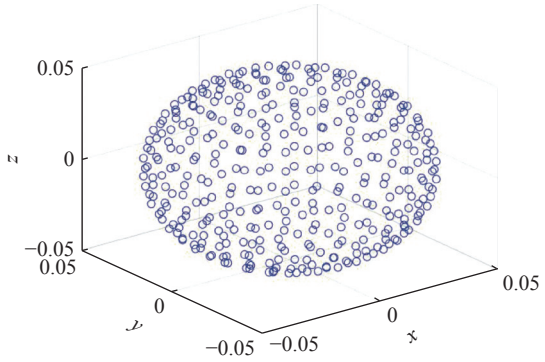


图 3 球形面元分割

Fig. 3 Spherical element segmentation

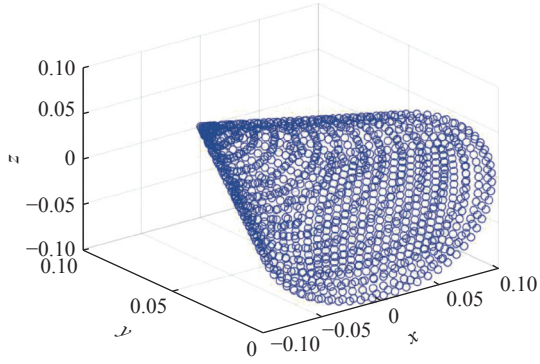


图 4 圆锥形面元分割

Fig. 4 Conical element segmentation

太阳可见光波段辐射至目标的辐照度为

$$E_{\mathrm{sun}}(i)=E_{\mathrm{sun.vis}}\rho_{\mathrm{total}}(i)\left[\boldsymbol{u}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{B}i}\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{sun}}^{\mathrm{B}i}(i)\right]. \tag{12}$$

式中 $E_{\mathrm{sun.vis}}=673.1\mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-2}$为太阳在目标处的照度[12], 当面元法线矢量$\boldsymbol{u}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{B}i}$与太阳方向矢量$\boldsymbol{u}_{\mathrm{sun}}^{\mathrm{B}i}(i)$之间的夹角$>\dfrac{\pi}{2}$时, $E_{\mathrm{sun}}(i)=0$。

太阳光线经过卫星反射至观测站的辐射量为

$$E_{\mathrm{obs}}(i)=\frac{E_{\mathrm{sun}}(i)A(i)\left[\boldsymbol{u}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{B}i}\cdot\boldsymbol{u}_{\mathrm{obs}}^{\mathrm{B}i}(i)\right]}{\left\|d^{\mathrm{B}}\right\|^{2}}. \tag{13}$$

式中, $A(i)$为每个单位小面元的面积, d^{B}为观测站至卫星的距离, 当观测站矢量方向与面元法向量夹角$>\dfrac{\pi}{2}$时, $E_{\mathrm{obs}}(i)=0$。 卫星的视星等值为

$$m=-26.7-2.5\lg\left|\frac{\sum_{i=1}^{N}E_{\mathrm{obs}}(i)}{E_{\mathrm{sun.vis}}}\right|. \tag{14}$$

其中, N为单位面元个数, 由目标表面分割后的网格个数确定。

由太阳光压 SRP 引起的加速度被建模为物体面向太阳的面积、表面属性和姿态的函数。本文给出的视星等值计算没有考虑太阳光压的影响。因为与引力加速度相比, 太阳光压加速度非常小[13]。

4 不同形状的光度特征信息仿真

基于卫星仿真工具包建立场景, 仿真时间为 2019 年 5 月 22 日 04:00:00－06:00:00 UT, 地面观测站坐标为(108°E, 34°N)高度 0 km, 卫星为地球同步轨道卫星, 经度 120°处轨道倾角为 30°; 初始姿态 $\boldsymbol{q}$=[0.746057 −0.106878 −0.100389 0.649537], 根据式(1)可以解算出目标的自转轴 $\boldsymbol{n}$=[0.981228 −0.140568 −0.132033]。

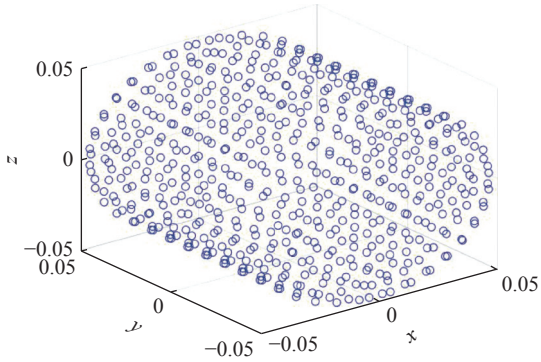


图 5 圆柱形面元分割

Fig. 5 Cylindricall element segmentation

首先利用 SolidWorks Explorer 2014 软件建模, 然后用 HyperMesh14.0 分割面元, 再用 Matlab 处理所有节点与面元文件, 获得每一个面元中心点在空间目标本体坐标系下的法向量坐标和位置坐标。图 3～5 分别表示面元分割后的球形、锥形和圆柱形。球形表面积 100 m^2, 分割为 374 个面元, 每个面元面积为 0.2674 m^2; 锥形表面积 100 m^2, 分割为 1266 个面元, 每个面元 0.0790 m^2; 圆柱形表面积 100 m^2, 分割为 576 个面元, 每个面元 0.1736 m^2; 正方形表面积 100 m^2, 分割为 6 个面元, 每个面元 16.7 m^2。除正方形外, 其他三种目标形状均为曲面, 面元划分越小则获得的面元法向量越精确。以下通过三种情况分别研究形状、姿态、相位角对目标光度曲线的影响。

情况 1 球体、圆锥体、正方体、圆柱体的表面积均为 100 m^3, 不同形状会随着相位角变化造成视面积不同, 4 种形状物体均不自旋转动。太阳–目标–观测站之间的夹角即为相位角。图 6(a)为观测时间内

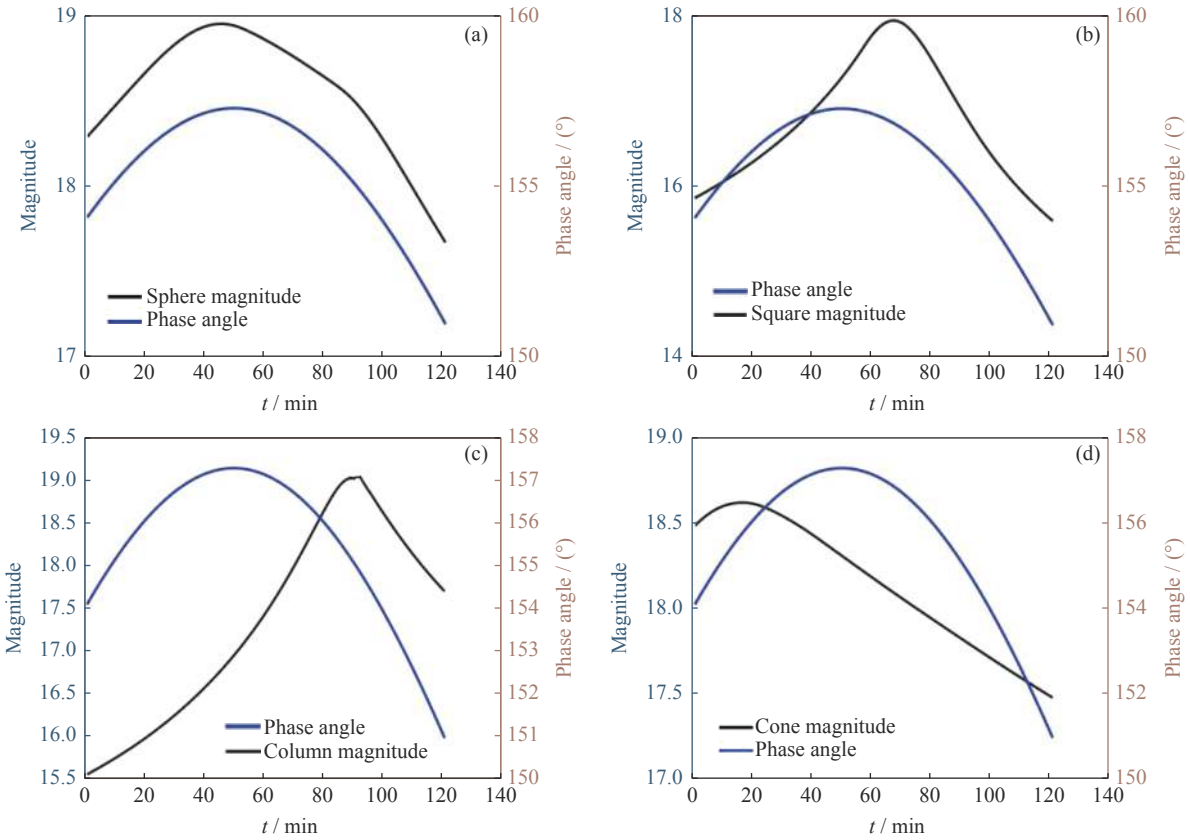


图 6　相位角与视星等的关系曲线

Fig. 6　Relation curve between phase angle and apparent magnitude

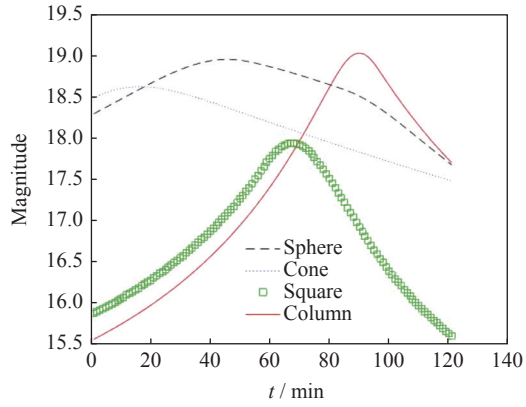


图 7　视星等曲线

Fig. 7　Apparent magnitude curve

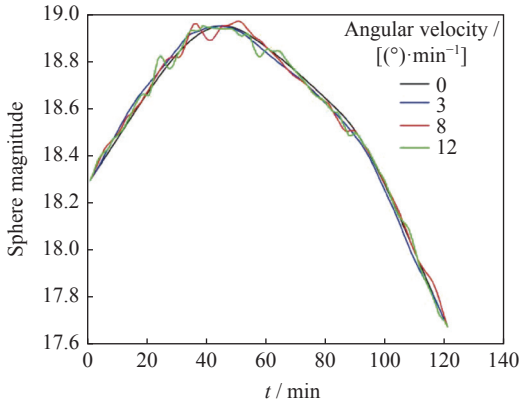


图 8　球体不同角速度下的视星等

Fig. 8　Apparent magnitude of the sphere at different angular velocities

球体视星等曲线与相位角变化曲线的关系, 可以看出球体视星等值变化规律与相位角变化规律完全一致; 图 6(b)为观测时间内正方体视星等值曲线与相位角变化曲线的关系, 可以看出两条曲线变化规律大致相同; 而图 6(c)(d)的曲线变化规律相似度逐次减弱。图 7 为 4 种形状目标随时间变化的视星等值对比, 总体上看球体视星等值变化缓慢且平均值最大, 其次是圆锥体。正方体、圆柱体和圆锥体目标侧面和底面对视星等的影响不同[4], 造成视星等极大值与相位角极大值在时间上出现偏离。

情况 2　图 8～11 分别为球体、圆锥体、正方

体、圆柱体在姿态角速度分别为 0(°)·min^{-1}、3(°)·min^{-1}、8(°)·min^{-1}、12(°)·min^{-1} 时自旋的视星等曲线。随着自旋角速度的增加，目标波动频率增加，但自旋对球体视星等曲线的影响不大，只有在自旋角速度较大时视星等值才会出现不稳定的微小波动，而对于其他三个形状自旋引起的波动非常明显。

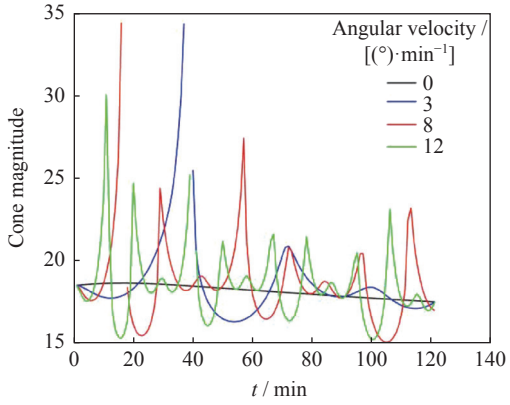


图 9 圆锥体不同角速度下的视星等

Fig. 9 Apparent magnitude of the cone at different angular velocities

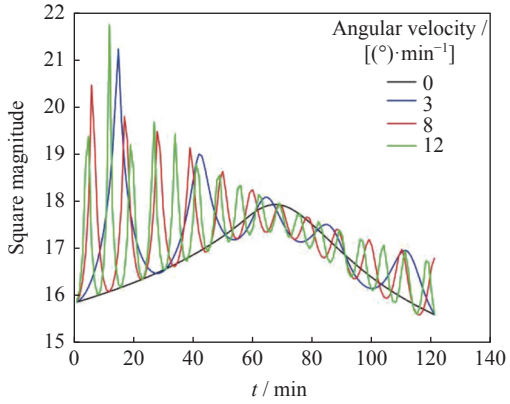


图 10 正方体不同角速度下的视星等

Fig. 10 Apparent magnitude of the cube at different angular velocities

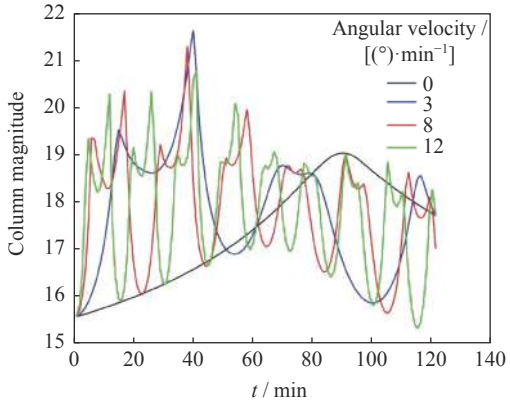


图 11 圆柱体不同角速度下的视星等

Fig. 11 Apparent magnitude of the cylinder at different angular velocities

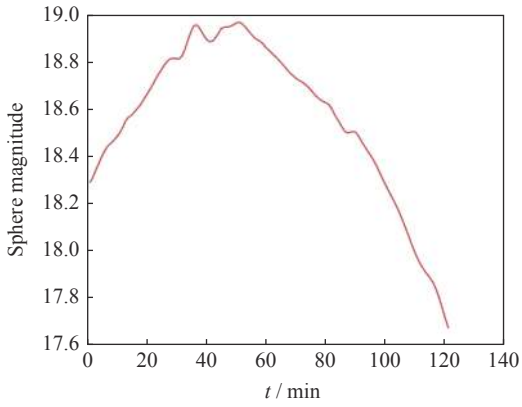


图 12 球体视星等波形曲线

Fig. 12 Apparent magnitude curve of the sphere

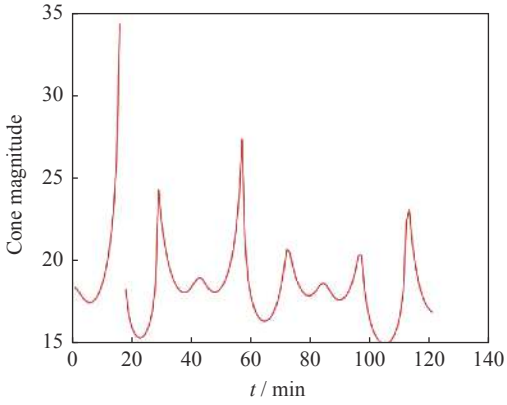


图 13 圆锥体视星等波形曲线

Fig. 13 Apparent magnitude curve of the cone

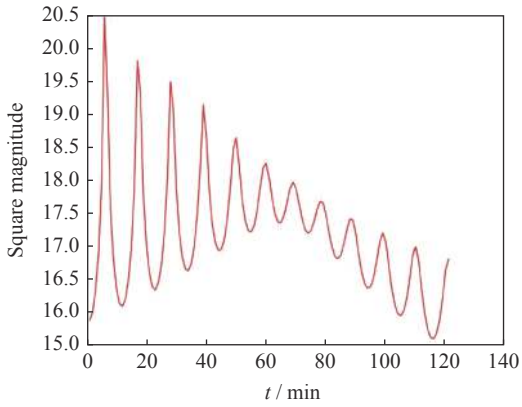


图 14 正方体视星等波形曲线

Fig. 14 Apparent magnitude curve of the cube

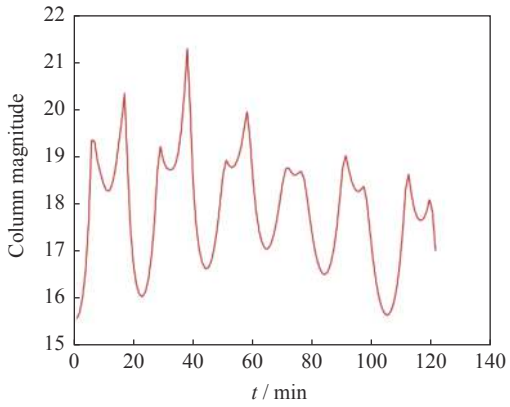


图 15　圆柱体视星等波形曲线

Fig. 15　Apparent magnitude curve of the cylinder

情况 3　由图 12～15 可发现不同形状目标的波动波形也不同，并且其波形有各自的规律和特点：正方体的波动曲线类似正弦曲线且整体变化趋势与不自旋时的曲线相同，圆柱与圆锥的波动曲线形状也有各自特点，球体的波动波形不明显。因此，波的形状可以体现目标的形状特点。

5　结论

仿真结果表明不同形状的目标视星等曲线有其各自特点。空间目标在不发生自旋时，球体等中心对称目标的视星等变化规律与相位角变化规律相似度极高，可以根据曲线的相似度推断目标是否为中心对称体；正方体、圆柱体和圆锥体等有正面和侧面的目标，视星等变化曲线会出现比较明显的极值，这些特点可以作为划分空间目标形状的依据。空间目标发生自旋时，视星等曲线会发生波动，角速度越大波动频率越快。由于目标自转过程中，不同形状各个面反射的光线及遮挡情况不同，因此球体的曲线波动不是很明显；锥体、正方体、圆柱体波动曲线的波形明显不同，有其各自规律及特点。今后研究重点是基于 UKF 的卫星位置、姿态、材料以及形状的反演，加入偏振度弥补光度反演的不足。

参考文献

[1] GENG Wendong, DU Xiaoping, LI Zhi, *et al*. Introduction to Space Situational Awareness[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015

[2] LIU D, WANG X D, LI Y H, *et al*. Space target detection in optical image sequences for wide-field surveillance[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, **41**(20): 7846-7867

[3] SHAN Bin, LIANG Yongqi, LI Hengnian. 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)

[4] LIU Hao, DU Xiaoping, GOU Ruixin. Apparent magnitude measurement of geosynchronous orbit space object based on Phong model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, **53**(4): 041502 (刘浩, 杜小平, 苟瑞新. 基于Phong模型的地球同步轨道目标视星等仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, **53**(4): 041502)

[5] SUN Chengming, ZHANG Wei, WANG Zhile. Application of BRDF for modeling on the visible reflection characteristics of spatial targets[J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(5): 750-753,757 (孙成明, 张伟, 王治乐. 双向反射分布函数在空间目标可见光反射特性建模中的应用[J]. 光学技术, 2008, **34**(5): 750-753,757)

[6] ZHOU Yejian, MA Yan, ZHANG Lei, *et al*. Review of on-orbit state estimation of space targets with radar imagery[J]. *Journal of Radars*, 2021, **10**(4): 607-621 (周叶剑, 马岩, 张磊, 等. 空间目标在轨状态雷达成像估计技术综述[J]. 雷达学报, 2021, **10**(4): 607-621)

[7] MOU Zhongkai. Research on Nonlinear Filtering of Satellite Attitude Determination[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2010: 8-18 (牟忠凯. 卫星姿态确定的非线性滤波方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010: 8-18)

[8] ZHANNG Renwei. Satellite Orbital Attitude Dynamics and Control[M]. Beijing: Beihang University Press, 1998: 185-207 (章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998: 185-207)

[9] TAN Bin, YAO Dongsheng, XIANG Chunsheng, *et al*. Star magnitude computing model of space targets like prism[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(7): 33-37 (谈斌, 姚东升, 向春生, 等. 类柱体空间目标的星等计算模型研究[J]. 光电工程, 2008, **35**(7): 33-37)

[10] HU Miao, XU Guorui, ZHANG Hui, *et al*. Star magnitude measurement of geosynchronous orbit cube target[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, **40**(6): 6-10 (胡淼, 徐国蕊, 张慧, 等. 地球同步轨道立方体目标的视星等测算[J]. 光电工程, 2013, **40**(6): 6-10)

[11] ASHIKHMIN M, SHIRLEY P. An anisotropic Phong BRDF model[J]. *Journal of Graphics Tools*, 2000, **5**(2): 25

[12] CAI Xingfu, ZHANG Xiongmei, GAO Jing. Analysis and Recognition of Space Target Characteristics[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2015: 13-14

[13] LINARES R, CRASSIDIS J L, JAH M K, *et al*. Astrometric and photometric data fusion for resident space object orbit, attitude, and shape determination via multiple-model adaptive estimation[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Toronto, Canada: AIAA, 2010

(责任编辑：宋雅娜)