

航天器太阳光压面积影响因素仿真分析

韩 意, 陈 明, 段成林, 李翠兰

(北京航天飞行控制中心, 北京 100094)

摘 要: 太阳光压面积是深空探测航天器精密轨道确定和预报所需的关键参数, 将直接影响定轨和轨道预报精度。采用一种基于目标特性的分析型光压面积计算方法, 以球体、立方体、圆柱体和圆锥体作为目标开展仿真分析, 假设目标表面分别为理想的完全漫反射、完全镜面反射和综合反射的三种材质, 分析了当目标姿态角变化 360° 时, 目标表面材料、尺寸和外形对目标整体光压面积的影响程度, 通过对比仿真结果得到了影响因素的一般特点。可为深空探测航天器太阳光压建模分析与飞行器设计提供参考和借鉴。

关键词: 深空探测航天器; 光压面积; 影响因素; 外形尺寸; 反射率

中图分类号: V412

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)03-0297-07

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20190808010

引用格式: 韩意, 陈明, 段成林, 等. 航天器太阳光压面积影响因素仿真分析[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(3): 297-303.

Reference format: HAN Y, CHEN M, DUAN C L, et al. Simulation of influential factors on spacecraft's solar pressure area [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(3): 297-303.

引 言

航天器在轨过程中会受到太阳光压的影响^[1], 太阳光压力是影响深空探测航天器轨道确定与预报精度的最主要的摄动力, 轨道动力学模型误差主要来源于太阳光压模型。太阳光压受到多种因素的影响, 包括航天器自身特性、姿态变化及控制误差和太阳活动等, 光压面积是表征太阳光压力的重要指标, 是航天器精密轨道确定和预报中所需的关键参数, 直接影响定轨和轨道预报的精度^[2-3]。国内外学者针对太阳光压问题开展了诸多研究, 建立了多种光压模型, 主要包括分析型/物理型模型、经验型模型和半经验型模型3类。

分析型模型主要适用于新发射航天器, 根据航天器的几何形状、大小、表面材料光学特性等物理特性进行建模分析, 具有清晰的物理内涵。但航天器长期在轨运行后光压会发生变化, 继续使用先前模型会带来精度不足的问题。最早提出的分析型模型是球模型, 后来又发展了ROCK系列模型、T30模型和G2A模型等^[4]。经验型模型是根据航天器在轨运行后的精密星历等大量历史数据统计计算建立的, 精度较高, 主要有Colombo模型、ECOM模型、扩展CODE模型等, 但此类方法需要依靠长期大量观测数据做支撑, 并且吸

收了多种摄动力的影响, 物理内涵缺乏, 不利于单独分析光压的变化。半经验模型结合了分析型与经验模型的优点, 在综合考虑航天器发射前的自身基础信息和属性的同时, 兼顾了发射后航天器在轨运行状态的运动信息, 主要有JPL模型、Ad box-wing模型等^[5-7]。

航天器的复杂性, 主要体现在几何结构复杂、目标表面材料种类多样、材料光散射特性不同等方面^[7]。在我国深空探测任务中, 各航天器目前还没有专用的太阳光压模型, 通常做法是简化航天器的形状和结构组成、估算其在光照方向上的投影面积(横截面积)及光压面积。此种方法较为简便, 但未考虑部件之间相互遮挡关系以及表面不同材质对太阳光的反射特性, 与实际情况有较大差距。而要提高光压模型精度, 不仅需要考虑探测器不同部件在光照方向上的相互遮挡关系, 还需要考虑表面不同材质对太阳光的不同反射特性, 遮挡判断和处理计算过程相对比较复杂^[8-9]。

本文针对实际任务特点进行分析型光压模型建模, 了一种基于目标特性的光压面积快速计算方法, 以仿真分析计算方式, 侧重于对航天器太阳光压面积的影响因素(不同表面材料、不同尺寸、不同形状)进行初步分析和探讨, 尝试分析目标表面材料、尺寸和外形对目标整体光压面积的影响程度和一般性规律

特点,有助于深空探测航天器太阳光压的建模与分析,并对探测器研制和设计工作提供参考。

1 光压面积计算方法

采用微面元的思想,将受照面划分为各微小平面元,然后以平面受照情况下的力学模型为基础,分析整个航天器的太阳光压^[10]。设某一微小平面的法向单位矢量为 $\mathbf{n}$,太阳光线照在该平面上,入射角为 θ ,太阳光产生的力及方向如图1所示。

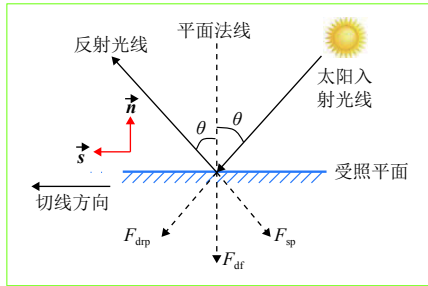


图1 平面受太阳光照压力示意图

Fig. 1 Sketch map of lighting pressure on the tiny flat

在考虑热辐射对受照平面表面力影响的情况下,该微平面受到的入射光产生的压力分解到法线方向,经过合成可以得到法向分力为^[11]

$$\mathbf{F}_n = -\frac{E}{c} \cdot \frac{R_0^2}{R_1^2} \cdot S_c \left((1 + \gamma\beta) \cos\theta + \frac{2}{3} (1 - \gamma\beta) \right) \cdot \mathbf{n} \quad (1)$$

其中: E 为地球表面太阳辐射常数; c 为光速; R_1 为面元到太阳的距离; R_0 为地球到太阳的距离; S_c 为面元在入射方向上的投影面积,其值为 $A \cos\theta$, A 为面元的实际受照面积; γ 为反射系数(无量纲); β 为镜面系数(无量纲),漫反射系数等于 $\gamma(1-\beta)$ ^[12]。

用 S 表示该微平面的太阳光压面积参数(下文简称光压面积),即

$$S = S_c \left((1 + \gamma\beta) \cos\theta + \frac{2}{3} (1 - \gamma\beta) \right) \quad (2)$$

用光压系数因子 k 表示面元的光压面积 S 与投影面积 S_c 的比值,即

$$k = (1 + \gamma\beta) \cos\theta + \frac{2}{3} (1 - \gamma\beta) \quad (3)$$

显然 k 与面元的光学特性以及面元的朝向有关。对于表面材质有多种、三维立体的而非平面的航天器,设第 i 种材质面元的反射系数为 γ_i ,镜面系数为 β_i ,系数因子 k 用 $k(\gamma_i, \beta_i, \theta)$ 表示,根据微积分思想,可得到用积分形式表示的投影面积 S_c 为

$$S_c = \int \cos\theta ds \quad (4)$$

光压面积 S_p 可表示为

$$S_p = \int k(\gamma_i, \beta_i, \theta) \cos\theta ds \quad (5)$$

实际情况中航天器模型的表面难以用解析表达式来描述,且星体与帆板之间存在复杂的遮挡关系。为解决航天器光压面积计算精度及效率与面元遮挡判断之间的矛盾,本文采用了一种基于目标特性的光压面积计算方法,利用开放式图形库OpenGL开发了计算软件,通过简单几何体光压面积理论值与仿真值比对,验证了该方法的准确性。本方法对目标模型的消隐处理速度和帧缓存中像素信息读取速度都很快,进行某一姿态情况下的单次光压面积计算用时小于0.05 s,可用于航天器飞行试验任务中光压面积实时计算的场合。主要计算流程包括:

1) 目标三维建模:利用三维建模软件3DMAX对复杂结构航天器进行几何建模,通过修改和编辑含有材质信息的目标三维模型,输出3ds文件格式;

2) 读取3ds模型:使用基于OpenGL开发的计算软件,读取处理好的3ds格式模型文件,主要读取信息包括目标表面各点的位置、外法线方向、面元面积、面元代表的材质种类等,用以实现对模型的编辑、控制和绘制;

3) OpenGL消隐处理和计算:采用正交投影模式、根据目标姿态进行旋转变换,启用深度缓存进行深度测试实现目标消隐,读取渲染处理后帧缓存中的像素面元信息,计算得到各个面元法向矢量、面元与入射光夹角以及面元材质种类,进而计算各面元光压面积,最后计算出整个目标的光压面积。通过改变目标姿态和光源位置即光照方向,可计算复杂目标在不同条件下的光压面积。

根据该计算方法,只需更换3ds格式航天器三维模型和相应材质的光学特性参数,即可快速分析不同航天器的光压面积随各种影响因素的变化情况,便于开展相关仿真实验。

2 目标光压面积影响因素分析

由于航天器通常由星体、一对或单个的较大的太阳能电池帆板构成,星体通常为立方体或圆柱体,另外少量的卫星是棱锥体,还有通讯天线和雷达等。因此,为分析光压面积影响因素的一般规律,本文建立

了立方体、圆柱体、圆锥体、球体四个凸面体目标进行光压建模,分别计算各目标在光照方向上的光压面积 S_p 以及投影面积 S_c 的变化情况。

2.1 初始仿真条件

4个目标体积都为 1.0 m^3 ,尺寸参数如表1所示。

定义计算坐标系 $o-xyz$ 及3个目标的初始姿态如图2所示,太阳光照方向与 oz 轴负向相同,设目标绕 x 轴顺时针旋转的角度 a 为目标姿态角。

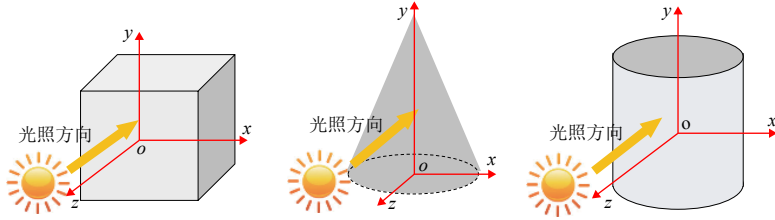


图2 目标坐标系及太阳光入射方向示意图

Fig. 2 Targets' body coordinate systems and the lighting direction

分析中不考虑卫星表面材料反射率的影响因素,如波长、表面粗糙度等,而是直接分析材质反射率对目标整体光压面积的影响。假设目标表面均为同一种材质,反射系数用 γ 表示,镜面系数用 β 表示,选取理想的、具有典型意义的完全漫反射、完全镜面反射和综合反射情况的3种材质,如表2所示。

表2 表面材质光学特性参数

Table 2 Optical characteristic parameters of surface materials

材质	反射系数 γ	镜面系数 β
完全漫反射	1	0
完全镜面反射	1	1
综合情况	0.5	0.5

假设材料的光学特性为完全吸收时, $\gamma = \beta = 0$,根据式(2)和式(3)可知,光压面积与材料特性为完全漫反射时的值相同,因此本文不再单独分析材料为完全吸收的情况。

设球体半径为 R ,由于球中心对称,故建立以球心为原点的坐标系,如图3所示。以球心到太阳的单位向量 d 的方向为 z 轴正方向,取积分面元为 dA ,面元法向为 n ,设 n 与 d 的夹角为 θ , n 与 xoz 平面的夹角为 φ , n 在 xoz 平面的投影 n' 与 d 的夹角为 ϕ ,定义 n 与 $+y$ 轴同向时 φ 为 90° , n' 与 $+x$ 轴同向时 ϕ 为 90° , φ 、 ϕ 取值范围均为 $-90^\circ \sim 90^\circ$,则 $dA = R^2 \cos \varphi d\varphi d\phi$,根据面元几何关系为

$$\begin{cases} n = (\cos \varphi \sin \phi, \sin \varphi, \cos \varphi \cos \phi) \\ \cos \theta = d \cdot n = \cos \phi \cos \varphi \end{cases} \quad (6)$$

表1 目标尺寸参数

Table 1 Targets' size parameters

序号	目标	尺寸/m
1	立方体	边长1.0
2	圆柱体	底面半径0.564 高1.0
3	圆锥体	底面半径0.691 高2.0
4	球体	半径0.620 3

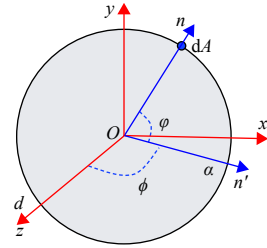


图3 球体光压面积计算示意图

Fig. 3 Sketch map of calculating the sphere's SRP area

根据式(5)进行积分,可得球体光压面积 S 的与投影面积 $S_c = \pi R^2$ 的关系式为

$$S = \frac{4}{3} \pi R^2 = \frac{4}{3} S_c \quad (7)$$

从式(7)可知,理论上球体的光压面积与表面材质的反射率无关,比例系数 k 的值约为1.33。

使用工具软件可计算出当表面材质不同时,半径为 $0.620 3 \text{ m}$ 体积为 1 m^3 的球体的光压面积均为、投影面积和比值 k 如表3所示。从表3可知,使用工具软件计算得到的球体光压面积结果与理论分析结论相同。

表3 球体光压面积计算结果

Table 3 Calculation results of sphere SRP area

材质	光压面积	投影面积	比值 k
完全漫反射	1.612	1.209	1.33
完全镜面反射	1.612	1.209	1.33
综合情况	1.612	1.209	1.33

下文分别分析计算各目标在不同表面材料、不同尺寸和不同形状条件下的光压面积变化情况。

2.2 表面材料对光压面积的影响

在图2中当目标绕 ox 轴旋转一周即目标姿态角 α 从 $0\sim 360^\circ$ 时,立方体、圆柱、圆锥和球体4个目标在垂直于太阳入射方向的平面上的投影面积(单位为: m^2)变化曲线如图4所示,从图4中可以看出,圆锥体投影面积整体上最大,立方体的投影面积最小,圆柱体的居中。

设立方体、圆锥和圆柱体的光压面积分别为 S_{cube} 、 S_{cone} 、 S_{cder} ,设表面材质分别为表2所示的完全漫反射、完全镜面反射和综合反射时目标的光压面积分别为 S_{diff} 、 S_{spec} 、 S_{mix} 。

当姿态角 α 从 $0\sim 360^\circ$ 时,3个目标的光压面积变化情况如图5所示。从图5可以得到以下结论:①对于立方体和圆柱体,在表面材质分别为漫反射、镜面反射和综合情况时,整体上目标光压面积 S 的大小关系为

$S_{\text{spec}} > S_{\text{mix}} > S_{\text{diff}}$,即镜面反射材质时目标光压面积最大,漫反射材质时光压面积较小;②圆锥体表面材质为镜面反射时,光压面积的变化幅度大于漫反射和综合情况时的变化幅度。

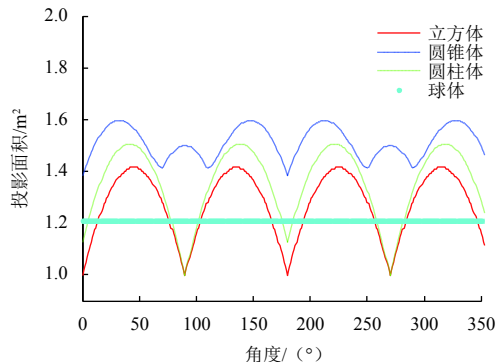


图4 四种目标的投影面积随姿态角变化曲线
Fig. 4 Four targets' projection areas changing with attitude angle α

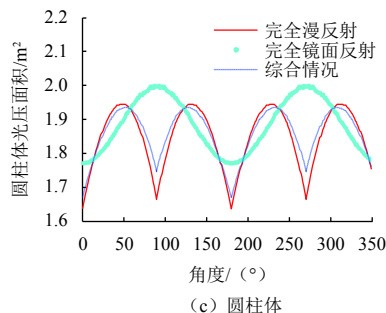
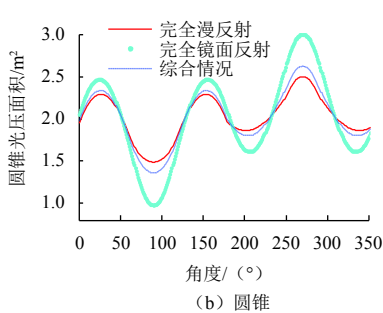
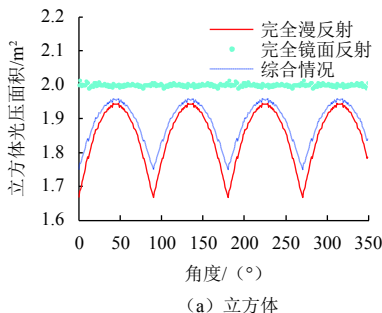


图5 目标光压面积随姿态角 α 变化情况
Fig. 5 Targets' SRP areas changing with attitude angle α

3个目标的光压系数 k 随姿态角 α 从 $0\sim 360^\circ$ 时的变化情况如图6所示。3个目标的光压系数 k 的均值如表4所示。

从图6和表4可知,镜面反射材质时,各目标的光压系数均值大于漫反射和综合情况;整体上立方体的光压系数最大,圆锥体的最小。

2.3 尺寸对光压面积的影响

为分析目标形状相同但尺寸不同时,光压面积变化情况,本文按照等比例关系新构建了3个大尺寸目标:立方体边长2 m;圆柱体底面半径1.128 4 m、高2 m;圆锥体底面半径1.382 m、高4 m。这3个大目标的尺寸是原来小目标的2倍,体积是小目标的8倍,都为 8 m^3 。目

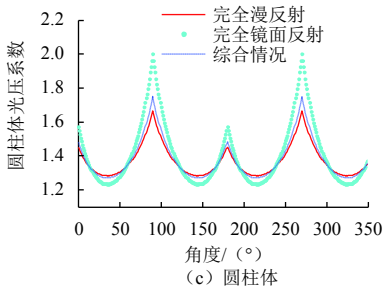
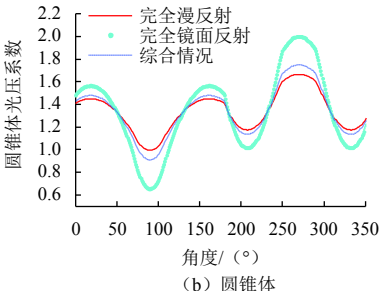
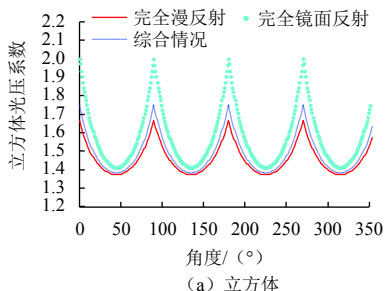


图6 目标光压系数 k 随姿态角 α 变化情况
Fig. 6 Targets' SRP coefficient k changing with attitude angle α

表 4 不同目标光压系数计算结果

材质	立方体	圆锥体	圆柱体
完全漫反射	1.460	1.336	1.372
完全镜面反射	1.587	1.339	1.411
综合情况	1.492	1.337	1.382
均 值	1.513	1.337	1.388

标初始姿态以及表面材质类型都与前述情况相同。

当姿态角 a 从 $0\sim360^\circ$ 、材质为完全漫反射时，3种形状的大尺寸目标与相应小尺寸目标的光压面积的比值变化曲线如图7所示。

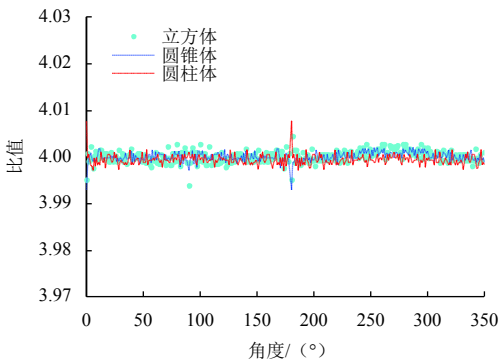


图 7 不同尺寸目标的光压面积比值的变化情况

Fig. 7 The ratio of different size targets' SRP area changing with a

从图7中可以看出，尽管形状不同，但是大尺寸目标的光压面积与相应小尺寸目标的比值都是一致的，约为4。通过计算可知，材质分别为综合反射和镜面反射时，大尺寸目标与相应小尺寸目标的光压面积比值也是4。

2.4 形状对光压面积的影响

当目标姿态角 a 从 $0\sim360^\circ$ 时，对于同一种材质，不同目标的光压面积变化曲线如图8所示。

图9显示了当姿态角 a 从 $0\sim360^\circ$ 时，3种材质条件下不同形状目标的光压面积之差的变化情况，分别是①立方体与圆柱的光压面积之差（ $S_{\text{cube}} - S_{\text{cder}}$ ）；②圆锥与圆柱的光压面积之差（ $S_{\text{cone}} - S_{\text{cder}}$ ）；③圆锥与立方体的光压面积之差（ $S_{\text{cone}} - S_{\text{cube}}$ ）。

从图8和图9可以看出：①整体上在体积相同的情况下，对于同一种材质，立方体和圆柱体相比，立方体的光压面积最大，圆柱体的光压面积较小；②圆锥体顶部锥尖朝向太阳附近时（对应于姿态角 $60^\circ\sim120^\circ$ ）光压面积较小，其他情况下光压面积相比立方体和圆柱体都要大。

3 结 论

开展航天器太阳光压建模研究，对于提高深空探测任务的定轨与预报精度具有重要价值。本文采用一

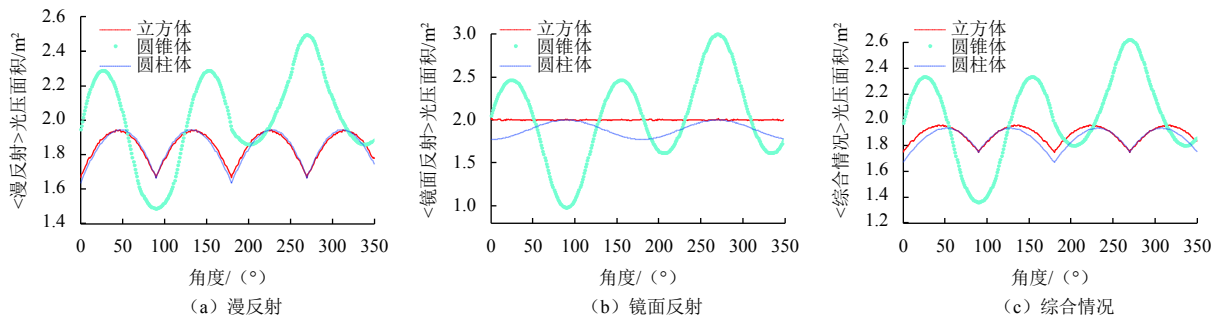


图 8 目标光压面积随姿态角 a 变化情况

Fig. 8 Targets' SRP areas changing with attitude angle a

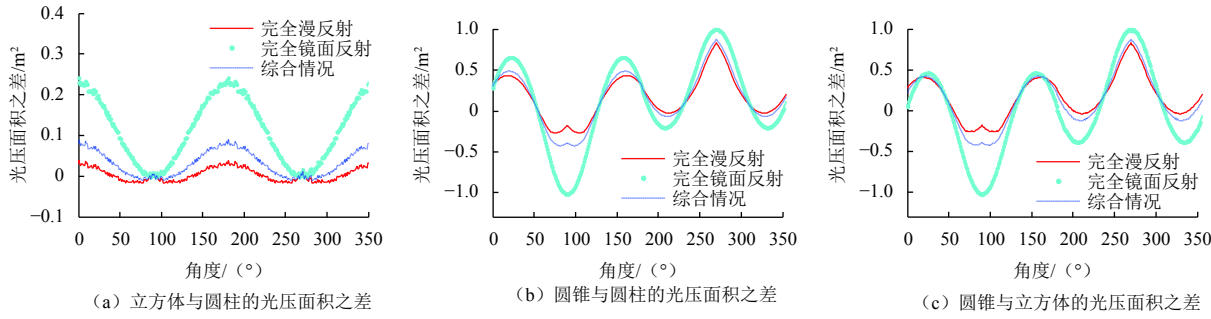


图 9 不同形状光压面积之差随姿态角 a 变化情况

Fig. 9 The difference of different shape targets' SRP areas changing with a

种基于分析型太阳光压面积的计算方法,对表面材料光学特性、尺寸和形状等影响因素进行了仿真计算和分析,通过归纳概括,可以得到以下一般性结论:①对于同一个目标,当其表面材质镜面反射特性较强时,目标光压面积较大,而漫反射特性较强时光压面积较小;②在目标体积相同但形状不同的情况下,立方体的光压面积较大、投影面积较小、光压系数较大,圆柱体的光压面积较小,而圆锥体的投影面积较大;③平面的光压系数整 $S_{\text{cube}} - S_{\text{cder}}$ 体上高于曲面的光压系数;④在形状相同的情况下,若大目标的尺寸是小目标尺寸的 k 倍,则相应地大目标的光压面积值是小目标的 k^2 倍,这一比值与材质的反射特性无关。此外,经分析可知目标的光压面积与其投影面积的比值 k 并非是一个定值,之前研究人员在工程应用中计算目标光压面积时所用的简便方法是用投影面积乘以一个系数,这种方法与实际情况有着一定的差距,结果不太准确。

总体来说,目标表面材料种类、目标形状和尺寸等是光压面积的重要影响因素。在实际应用中,如果要降低目标的整体光压面积、减小光压摄动影响,根据本文的分析结果可知,一方面可以选择漫反射特性较强、反射率较低的表面材料;另一方面可以缩小尺寸,将目标设计为圆柱体。本文只得到了各种影响因素对目标整体光压面积的影响的一般性的、定性的分析结论,后续将进一步开展各种影响因素的量化分析研究,以期获得对工程应用更具有指导意义的有益结论和启示。

参 考 文 献

- [1] 陈秋丽,杨慧,陈忠贵,等.北斗卫星太阳光压解析模型建立及应用[J]. *测绘学报*, 2019, 48(2): 169-175.
CHEN Q L, YANG H, CHEN Z G, et al. Solar radiation pressure modeling and application of BDS satellite[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(2): 169-175.
- [2] 崔文,王家松,宝音贺西.光压摄动对卫星姿态轨道耦合的影响分析[J]. *空间科学学报*, 2012, 32(3): 424-429.
CUI W, WANG J S, BAOYIN H X. Analysis of solar pressure perturbation impacting on satellite attitude-orbit coupling[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2012, 32(3): 424-429.
- [3] 李冉,胡小工,唐成盼,等.北斗卫星导航系统混合星座的光压摄动建模和精度分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2018, 43(7): 1063-1070.
LI R, HU X G, TANG C P, et al. Modeling and precision analysis of solar radiation pressure for BDS hybrid constellation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(7): 1063-1070.
- [4] 柳丽,董绪荣,郑坤,等.星载GPS GEO卫星定轨的太阳光压宏观模型[J]. *测绘科学技术学报*, 2011, 28(5): 324-328.
LIU L, DONG X R, ZHENG K, et al. Solar pressure macro-model for geostationary orbit satellite space-based orbit determination using space-borne GPS[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2011, 28(5): 324-328.
- [5] FLIEGEL H F, GALLINI T E, SWIFT E R. Global positioning system radiation force model for geodetic applications[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992(97): 559-568.
- [6] SPRINGER T A, BEUTLER G, ROTHACHER M. A new solar radiation pressure model for GPS[J]. *Advance Space Research*, 1999, 23(4): 673-676.
- [7] 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.
HAN Y, SUN H Y. Advances in space target optical scattering character research[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 758-766.
- [8] LAURENT F. A study of Solar radiation pressure acting on GPS satellites[D]. Austin: The University of Texas, 2009.
- [9] RODRIGUEZ-SOLANO C, HUGENTOBLE J U. Adjustable box-wing model for radiation pressure impacting GPS satellites[J]. *Advances in Space Research*, 2012(49): 1113-1128.
- [10] MAREK ZIEBART, DARE P. Analytical solar radiation pressure modeling for GLONASS using a pixel array[J]. *Journal of Geodesy*, 2011(75): 587-599.
- [11] 刘瞰,赵志萍.卫星太阳光压力矩计算中有效作用面积的计算[J]. *南京理工大学学报*, 2007, 31(6): 684-688.
LIU T, ZHAO Z P. Method to calculate effective area used in computation of solar radiation torque of satellite[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2007, 31(6): 684-688.
- [12] 李铁映,杨慧,王海红.导航卫星光压建模及表面光学特性参数影响分析[J]. *宇航学报*, 2015, 36(6): 731-738.
LI T Y, YANG H, WANG H H. Navigation satellite solar radiation pressure modeling and analysis of effect of surface optical parameters[J]. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(6): 731-738.

作者简介:

韩意(1986—),男,博士,工程师,主要研究方向:轨道计算与目标特性分析。

通讯地址:北京市海淀区51030信箱105分箱(100094)

电话:(010)66363136

E-mail: hanyuxuan.han@163.com

Simulation of Influential Factors on Spacecraft's Solar Pressure Area

HAN Yi, CHEN Ming, DUAN Chenglin, LI Cuilan

(Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

Abstract: Solar radiation pressure (SRP) area is one of the key parameters of orbit determination and prediction in deep space detection, and directly affecting the prediction precision. The calculating method of SRP area based on target characteristics is used, and the sphere, cube, cylinder and cone are chosen to be analytical targets, assuming the materials are purely diffuse, purely specular and mixed surface separately. While the attitude angle changing from 0° to 360° , the influences of the surface materials, size and the shape of the target on the total SRP area of the target are analyzed, the general laws governing influential factors are described by comparing simulated results. These conclusions can provide reference for further research on SRP modeling solution and spacecraft design.

Keywords: deep space detection space craft; solar radiation pressure area; influential factors; shape and size; reflectance

Highlights:

- The influence of surface materials optical characteristics, target size and shape on SRP area is analyzed.
- Taking sphere, cube, cylinder and cone as objects, it is assumed that the surface is purely diffuse, purely specular and comprehensive reflection.
- When specular reflection of surface material is stronger, its SRP area is larger; the SRP coefficient of plane is higher than that of curve surface.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]

中文学术期刊《深空探测学报》文种变更为《深空探测学报》(中英文)

经国家新闻出版署审批, 中文学术期刊《深空探测学报》文种变更为《深空探测学报》(中英文)。杂志的国内统一连续出版物号由CN10-1155/V变更为CN10-1707/V, 《期刊出版许可证》期刊名称登记为《深空探测学报》(中英文)。其他登记事项不变。《深空探测学报》(中英文)将于2020年6月底正式出版。特此通告!

感谢多年来各级领导、专家学者、各位作者、读者及相关单位给予《深空探测学报》(中英文)编辑部的大力支持和厚爱! 欢迎大家登录<http://jdse.bit.edu.cn>, 踊跃投送中英文稿件。

《深空探测学报》(中英文)编辑部

2020-6-15