

空间目标可见光反射特性的研究

周彦平, 卢春莲, 杨莉莉, 汪黎黎

(哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001, leann.lu@hit.edu.cn)

摘要: 为提高空间对抗能力,提出了空间目标可见光反射特性控制的方法,在空间目标表面设计过程中尽量避免漫反射,采用镜面反射方式,同时目标本体采用多面体结构设计.以地基可见光探测为例,选择高度为250 km圆轨道上的圆锥体目标和高度为900 km圆轨道上的圆柱体目标为对象,分析了地基可见光遥感器对其探测能力与几何位置的关系.由空间目标可见光反射特性的研究得到结论,在多面体结构空间目标的表面设计中采用镜面表面设计,使可见光遥感器对它的探测能力明显降低,且由探测到的目标光谱特征无法判断目标的真实外形,从而达到控制空间目标可见光反射特性的目的.研究对未来空间目标的外形设计控制具有一定指导意义.

关键词: 空间目标;可见光;反射特性;镜面表面;探测概率

中图分类号: O439

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)11-1716-04

Visible light reflection characteristics of space target

ZHOU Yan-ping, LU Chun-lian, YANG Li-li, WANG Li-li

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, leann.lu@hit.edu.cn)

Abstract: For the purpose of improving space countermeasure capabilities, a method to control visible light reflection characteristics was given. Polyhedral structure and mirror surface were used during the surface design. Diffuse reflection surface and spherical structure should be avoided. Then taking the a cone target in 250 km high orbit and a cylinder target in 900 km high orbit as examples, the visible area on the ground was analyzed. It is found that the visible area of space target decreases significantly for the design of mirror surface and the observed shape changes, which results in the stealth of space target. The research can provide some reference for the exterior design of space target.

Key words: space target; visual light; visible light; reflection characteristics; Mirror surface; Detected probability

在现代空间对抗技术领域,掌握空间目标的运行是对目标进行攻击的基础.对空间目标进行探测和跟踪的方法有雷达、光学和无源跟踪定位等3种方式^[1].其中,光学探测与跟踪系统具有精度高、探测距离远的优势.各种目标都有自己独特的光学特征,这是光学系统从背景中发现和识别目标的基础.光学探测方式主要是对空间目标的红外可见光光谱辐射特征进行探测^[2].由维恩位移定律可知,根据空间目标的温度,其自身辐射在可见光波段非常微弱,可忽略不计,因此目标可见

光特征主要是指目标反射的太阳光^[3].

对空间目标反射太阳光的计算是研究空间目标的反射辐射特性、估计地面光学遥感器探测能力以及卫星的精密测轨等过程中不可或缺的环节.虽然已有许多文献介绍过这方面的研究成果,但是这些计算的基础都是以目标具有均匀漫反射系数,且符合朗伯漫反射定律^[4-8].本文主要通过分析多面体结构镜面表面设计的空间目标的可见光反射特性,并通过对其研究提出相应的控制方法.

1 空间目标可见光反射特性控制技术

对于空间目标反射的太阳光,通过目标外形设计,可使目标反射太阳光的方向避开地球,特别

收稿日期: 2009-09-24.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA701101B).

作者简介: 周彦平(1956—),男,教授,博士生导师.

是潜在对手的光学观测站. 若目标是球形的, 则太阳光必有一部分光束反射到地球方向, 因此目标表面应尽量采用多面体结构, 并在轨道上运行时进行姿态调整, 避免反射的太阳光向地球传播. 同时, 在空间目标表面设计过程中避免漫反射, 采用镜面反射方式, 而在空间环境高真空的条件下, 目标周围不存在可以产生散射的大气, 那么能够对目标进行探测的空间范围将明显减小, 且目标被探测到的形状特征与目标实际形状具有很大差别, 从而可以减小目标的被探测概率, 达到控制可见光反射特性的目的. 由于像聚酯薄膜等类似镜面的包裹材料已经大量应用于卫星本体等空间目标上, 采用这类材料作为表面材料, 即很容易实现镜面表面的设计, 而且, 随着镀膜工艺的进步, 制成具有良好反射特性的镜面复合膜也已成为了可能, 因此实现空间目标镜面表面设计具有可行性, 难度不大, 且不增加载荷.

1.1 特定角度观测镜面空间目标的外形特征

当设计好的可见光传感器在自身轨道运行或安置于地面基地时, 能否探测到空间目标, 即对空间目标是否有监视能力, 这与太阳、空间目标和可见光传感器三者的几何位置有很大关系^[9-10]. 假设太阳 - 目标连线与目标表面 dS 面元法线的夹

角为 δ , 则当且仅当传感器与目标的连线与目标表面 dS 面元法线的夹角等于 δ 时, 传感器所在观测点可探测到目标. 在可探测到目标的特定角度, 探测到的多面体结构镜面表面空间目标的外形特征如表 1 所示.

表 1 特定角度观测目标外形特征

目标实际形状	观测目标外形特征
圆柱体	侧面为亮线, 底面为亮面
圆锥体	侧面为亮线, 底面为亮面
长方体/立方体	亮面

由表 1 可见, 当探测器探测到亮线或者亮面特征时, 并不能由此推断目标实际外形特征和对其进行定义, 因此降低了探测器对空间目标进行探测的正确概率.

1.2 镜面表面目标的可见光反射特性

表 2 通过对比漫反射表面和镜面表面空间目标可见光反射特性以及地基可见光传感器对两种不同目标的探测能力, 对镜面表面目标的可见光反射特性进行分析.

表 2 地基探测空间目标的可见光反射特性分析

目标表面特性	观测外形特征	地面探测能力与几何位置关系	亮度
漫反射表面	与目标实际外形相同	在地球阴影区之外, 目标在空间轨道任一位置上时, 在其对地球表面张角范围内, 目标均可被地面可见光传感器探测到.	较弱
镜面表面	与目标实际外形具有很大差别	当且仅当传感器 - 目标连线与目标表面面元法线的夹角等于太阳 - 目标连线与目标表面面元法线的夹角时, 在观测点上可探测到目标. 因此当目标在地球阴影区之外的空间轨道某一位置时, 地球上能探测到目标的位置是某个特定的点, 甚至太阳反射光不能到达地面, 地面传感器无法探测到目标.	较强

相对于漫反射表面的空间目标, 地基可见光传感器对表面为镜面的空间目标的探测能力已大大降低, 且不存在目标正下方的观测点, 可对目标进行探测的特定角度观测点只能以较大倾斜角度对目标进行观测, 从而增大了大气层对探测的影响, 降低了探测精度.

2 地面探测能力与几何位置关系分析

以地基对目标反射太阳光的探测为例, 选择具有代表性的轨道和目标形状进行地面探测能力与几何位置关系分析, 计算特定轨道上的目标在

地面上的可探测范围.

2.1 圆锥体目标分析

以高度为 250 km 圆轨道上的圆锥体目标为例展开讨论, 太阳光视为平行光入射, 目标飞行姿势为中心轴线始终平行于地面. 涉及的变量定义和参数设置如下: $H_t = 250$ km 为轨道高度; $R_e = 6378$ km 为地球半径; 圆锥体目标的半张角 $\theta = 10^\circ$; α 为太阳光入射方向和地心 - 空间目标连线方向的夹角, 范围为 $[0, 360^\circ]$, 表示空间目标在轨道上运行一周; φ_0 为地心 - 空间目标连线与空间目标到地球表面切线的夹角, 各参数关系如图

1 所示.

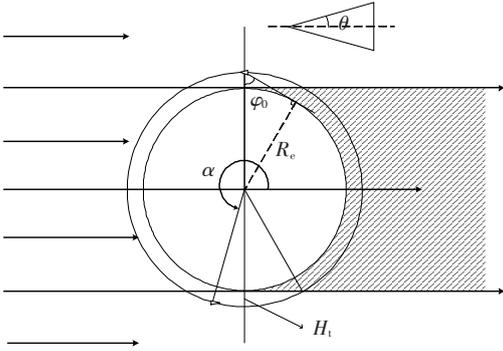


图1 圆锥体目标参数关系示意图

其中:

$$\varphi_0 = \arcsin\left(\frac{R_e}{R_e + H_t}\right) = \arcsin\left(\frac{6378}{6378 + 250}\right) = 74^\circ.$$

在地球阴影区内,没有太阳光入射到目标表面,因此不存在反射光,地面遥感器不能对目标进行探测,阴影区域范围为

$$0 \leq \alpha \leq 74^\circ, 286^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ.$$

当 $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 时,只有锥体侧面存在太阳光入射,此时在太阳光反射方向上探测到的是一条亮线.在该范围内空间目标到地球表面切线与太阳光入射方向的夹角为

$$\varphi_1 = \varphi_0 + 90^\circ + (\alpha - 90^\circ) = \varphi_0 + \alpha = 74^\circ + \alpha,$$

入射光与反射光的夹角为

$$\begin{aligned} \phi_1 &= [90^\circ - \theta + (\alpha - 90^\circ)] \times 2 = \\ &(\alpha - \theta) \times 2 = 2\alpha - 20^\circ. \end{aligned}$$

若要在地面上接收到空间目标反射的太阳光,必须满足

$$\varphi_1 \geq \phi_1,$$

则有

$$\alpha \leq 94^\circ.$$

当 $180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ 时,只有锥体底面存在太阳光入射,此时太阳光反射方向上探测到的是一个亮的圆面.在该范围内空间目标到地球表面切线与太阳光入射方向的夹角为

$$\varphi_2 = 180^\circ - \varphi_0 - (\alpha - 180^\circ) = 286^\circ - \alpha,$$

入射光与反射光的夹角为

$$\phi_2 = [90^\circ - (\alpha - 180^\circ)] \times 2 = 540^\circ - 2\alpha.$$

若要在地面上接收到空间目标反射的太阳光,必须满足

$$\varphi_2 \leq \phi_2,$$

则有

$$\alpha \leq 254^\circ.$$

那么,目标可在地面上特定角度进行探测的轨道范围是 $74^\circ \leq \alpha \leq 94^\circ$,目标特征为一条亮线; $180^\circ \leq \alpha \leq 254^\circ$,目标特征为一个亮面.

2.2 圆柱体目标分析

以高度为 900 km 圆轨道上的圆柱体目标为例展开讨论,太阳光视为平行光入射,目标飞行姿势为轴线始终垂直于地面.变量定义和参数设置同前,其中轨道高度变成 $H_t = 900$ km,参数关系如图 2 所示.

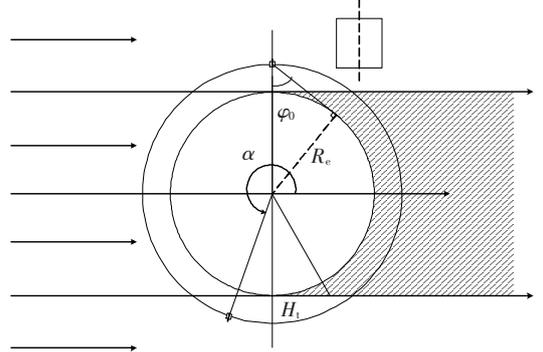


图2 圆柱体目标参数关系示意图

$$\begin{aligned} \varphi_0 &= \arcsin\left(\frac{R_e}{R_e + H_t}\right) = \\ &\arcsin\left(\frac{6378}{6378 + 900}\right) = 61^\circ. \end{aligned}$$

地球阴影区域范围为

$$0 \leq \alpha \leq 61^\circ, 299^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ.$$

当 $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 时,只有圆柱体底面存在太阳光入射,此时在太阳光反射方向上探测到的是一个亮面.在该范围内空间目标到地球表面切线与太阳光入射方向的夹角为

$$\varphi_1 = \varphi_0 + \alpha = 61^\circ + \alpha,$$

入射光与反射光的夹角为

$$\phi_1 = 2\alpha. \tag{14}$$

若要在地面上接收到空间目标反射的太阳光,必须满足

$$\varphi_1 \geq \phi_1,$$

则有

$$\alpha \leq 61^\circ.$$

该区域位于地球阴影区内,目标表面不存在反射光.

当 $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 时,只有圆柱体侧面存在太阳光入射,此时在太阳光反射方向上探测到的是亮线.在该范围内空间目标到地球表面切线与太阳光入射方向的夹角为

$$\varphi_2 = \alpha - \varphi_0 = \alpha - 61^\circ,$$

入射光与反射光的夹角为

$$\phi_2 = 2\alpha - 180^\circ.$$

若要在地面上接收到空间目标反射的太阳光,则必须满足

$$\varphi_2 \geq \phi_2,$$

则有

$$\alpha \geq 119^\circ.$$

在 $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 范围内, 只有在满足 $119^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 条件下在地面上的特定角度可以探测到目标, 目标特征为一条亮线. 由于目标形状及轨道的对称性, 可知在 $180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ 范围内, 只有在满足 $180^\circ \leq \alpha \leq 241^\circ$ 条件下在地面上的特定角度可以探测到目标, 目标特征为一条亮线. 那么, 目标可在地面上特定角度进行探测的轨道范围是 $119^\circ \leq \alpha \leq 241^\circ$, 目标特征为一条亮线.

通过对圆锥体目标分析可知, 目标的空间轨道在地球阴影之外的区域为 212° , 其中只有 94° 的范围, 目标表面存在能够到达地面的反射光, 该范围占非阴影区轨道的 44%; 对圆柱体目标分析可知, 轨道在地球阴影之外的区域为 238° , 其中只有 122° 的范围, 目标表面存在能够到达地面的反射光, 该范围占非阴影区轨道的 51%.

当目标表面存在能够到达地面的反射光时, 并非在地面上任意位置都能探测到目标, 目标只能被地面某个特定角度位置上的遥感器探测到, 即当遥感器与目标的连线与目标表面 dS 面元法线的夹角等于太阳 - 目标连线与目标表面 dS 面元法线的夹角时, 而且通过探测到的目标外形特征无法准确判断目标实际外形特征. 因此, 地基遥感器对多面体结构镜面表面空间目标的探测概率被降低的程度将远大于 44% 和 51%.

同理, 以天基遥感器对空间目标反射太阳光的探测进行分析, 可得天基可见光遥感器对多面体结构镜面表面空间目标的探测能力明显降低.

3 结 论

在空间目标的表面设计中采用镜面表面设计, 且目标本体设计成多面体结构, 地基可见光遥感器对它的探测概率明显降低, 并且由探测到的目标光谱特征无法准确判断目标真实的外形特征, 从而实现了有效控制目标可见光反射特性的目的.

但是考虑到应用环境的差异, 并非将目标所有表面设计成镜面即为最优设计, 在实际应用中

需综合考虑探测背景及探测器分布等因素, 选择合理的应用方案. 例如, 当考虑地基可见光探测存在大气层散射反照的影响时, 空间目标面对地球的一面设计成黑体表面将更有利于降低地面遥感器的探测概率, 而背对地球一面仍采用镜面表面设计, 这样便实现了空间目标可见光光谱辐射特性的有效控制.

参考文献:

- [1] ANDREW M S, JOHN M C, DIETZ B. Countermeasures—A technical evaluation of the operational effectiveness of the planned US National Missile Defense System [EB/OL]. 2000-04-01. <http://www.fas.org>.
- [2] WU Zhensen, LI Daoyong, ZHANG Yanqun. Light scattering and visibility condition of spatial objects [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2004, 25(8): 1201-1209.
- [3] WU Zhensen, LIU Anan. Scattering of solar and atmospheric background radiation from a target [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2002, 23(6): 907-917.
- [4] 吴振森, 窦红. 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.
- [5] RORK E W, LIN S S, YAKUTIS A J. Ground-based electro-optical detection of artificial satellites in daylight from reflected sunlight [R]. USA: Air Force Research Laboratory, 1982.
- [6] JAMES E H, CYNTHIA L V. Transfer function characterization of scattering surfaces revisited [C]//Proc SPIE. San Jose: [s. n.], 1997, 3141: 113-128.
- [7] RICKLIN J C, DAVIDSON F M. Atmospheric optical communication with a Gaussian Schell beam [J]. Journal of the Optical Society of America, 2003, 20(5): 856-866.
- [8] 张光明, 郭海军. 空间目标反射太阳辐射的研究 [J]. 飞行器测控技术, 1994, 2: 26-31.
- [9] 李道勇, 王增玉, 张艳群. 空间目标可见光散射特性与可视条件研究 [J]. 光学与光电技术, 2005, 10(3): 5-8.
- [10] 张科科, 阮宁娟. 天基对静止轨道空间目标可见光探测的几何位置分析 [J]. 红外与激光工程, 2007, 9(36): 606-609.

(编辑 张 宏)