

基于 STL 的卫星可展开天线对太阳翼 遮挡检测方法研究

徐春生 肖应廷 孙治国 刘丽坤
(中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要 卫星上天线尺寸越来越大, 在轨展开后会对太阳翼产生遮挡。文章给出一种检测太阳翼电池片所受遮挡的方法。此方法首先分别提取天线和太阳翼电池片三维模型的 STL(Stereo Lithographic)格式数据信息, STL 数据包括三角形网格的法向矢量和三角形 3 个顶点的位置信息。然后根据需要对电池片的 STL 数据进行插值处理, 并按照太阳翼转动角度和太阳光与太阳翼法向夹角的变化对天线的 STL 数据进行后续处理。之后, 判断电池片的三角形网格与天线三角形网格的几何位置关系, 建立太阳翼遮挡模型。该模型不须提供天线的参数信息, 只需要三维模型即可完成遮挡分析。

关键词 可展开天线; 太阳电池片; STL 数据; 遮挡检测

中图分类号: TP391. 41 **文献标志码:**A **DOI:**10. 3969/j. issn. 1673-8748. 2012. 05. 008

Research on Occlusion Detection of Solar Array from Deployable Antenna for Satellite Based on STL Data

XU Chunsheng XIAO Yingting SUN Zhiguo LIU Likun
(China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: With the size of satellite antenna's being bigger, it is inevitable that the antenna shades the solar array when it deploys in-orbit. This paper gives a method of occlusion detection of solar cells which on solar array. First, STL(Stereo Lithographic) data in antenna and solar cells' three-dimensional model are extracted. The STL data contain normal vector information and position of triangle grids. Then interpolation in the solar cells' STL data is finished on demand, and the antenna's STL data are handled according to solar arrays' rotation angle and the angle between sunlight and normal vector of solar array. Finally, a model of occlusion detection is established by judging position relation between solar cells' triangles and antenna's triangles which are gotten from STL data. This method needs only the solar cells' and the antenna's three-dimensional model, and doesn't need the antenna's parameters.

Key words: deployable antenna; solar cells; STL data; occlusion detection

收稿日期:2012-06-27; 修回日期:2012-08-01

作者简介:徐春生(1981—),男,博士,工程师,从事通信卫星机械总体设计工作。Email:xcstju@yahoo.com.cn。

1 引言

随着卫星有效载荷技术的发展,卫星上可展开天线(以下简称天线)口径越来越大。天线和太阳翼在卫星发射时收拢在卫星舱板上,在轨时展开。随着太阳翼的转动和太阳角的变化,在某些特定时刻,天线将对太阳翼造成遮挡,其实质是对太阳翼电池片的遮挡。遮挡使投射到部分电池表面的太阳光强度减小,导致其整串太阳电池输出电流下降,太阳电池阵输出功率衰减。为了在卫星设计初期综合考虑整星功率、天线布局以及太阳翼的结构形式和电池片布片方式,有必要研究天线对太阳翼电池片的遮挡问题。

针对卫星上的遮挡分析,文献[1]采用计算机图形学原理,来分析遮挡物对敏感器视锥的遮挡情况。文献[2]在计算太阳光压力矩时,考虑了太阳翼与卫星本体的相互遮挡情况,并采用凸多边形求交的算法来计算遮挡面积。文献[3]在给定太阳光线方向和卫星构型的前提下,利用有理 Bezier 曲面的特性,能够分析卫星本体对太阳翼电池阵的遮挡影响。文献[4]从空间曲面中提取出三角网格,然后根据光线方向和三角网格对应的法向矢量判断三角网格的可见性,也是分析卫星本体对太阳翼的遮挡影响。文献[1-4]中,遮挡分析主要是转化为几何分析,但上述文献若应用在太阳翼遮挡分析上,尚存在以下问题:并未考虑太阳翼电池片的实际布片情况;遮挡物基本是形状规则的卫星本体,而对于形状较复杂的天线还存在较难建立遮挡分析所需模型的问题。

本文将天线的三维模型和太阳翼电池片的三维模型分别转化为 STL 数据,然后对 STL 中的三角网格进行处理,将太阳翼的遮挡问题转化为判断三角网格相交和相含的问题。STL 数据可以直接从实际产品(天线和太阳翼电池片)的三维模型得到,包含了分析遮挡所需的全部几何数据,无其它冗余信息。采用 STL 数据后,无须再按照天线的几何参数和电池片布片参数进行复杂的建模。

2 太阳翼遮挡分析

本文提出的遮挡分析方法主要由 3 部分组成:数据提取、数据处理、数据分析。如图 1 所示。其中,数据提取部分是从天线和太阳翼电池片的三维

模型中得到 STL 数据文件;数据处理部分的功能是将天线的 STL 数据进行旋转、太阳翼电池片的 STL 数据进行插值等处理;数据分析部分主要将数据处理部分得到的天线和太阳翼电池片的 STL 数据进行相互之间的几何分析,以确定遮挡情况。

为了便于利用遮挡分析图,假定太阳翼固定不动,使得天线相对太阳翼作“逆向运动”,定义坐标系 +Z 轴与太阳翼电池片正面方向一致,+Y 轴沿太阳翼转动轴指南,X、Y、Z 成右手系,所以需对天线的 STL 数据进行旋转处理。

在确定遮挡情况时,本文所提供的方法是基于如下假设:太阳翼电池片的某一三角形网格 A 和天线的某一三角形网格 B 相交,或 A 包含 B,或 B 包含 A,即判断 A 被 B 完全遮挡,不再通过求取交点计算实际遮挡面积,从而简化计算量。但这样带来一个问题,若某一电池片实际被遮挡仅有 1/4,该电池片的两个三角形网格中的一个被判定遮挡,则整个电池片判定被遮挡 1/2。为解决该问题,本文对从三维模型得到的太阳翼电池片的三角形网格数据进行插值处理,从而使得三角形网格的颗粒度更小、更密,以使判定的遮挡情况更逼近实际。

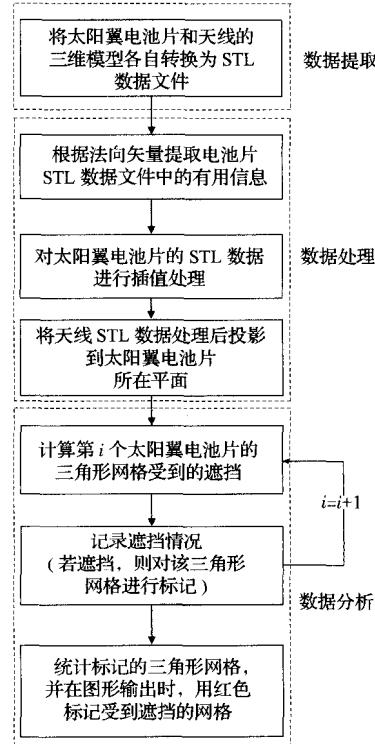


图 1 天线对太阳翼遮挡分析流程图

Fig. 1 Flow chart of occlusion detection on solar array from deployable antenna

2.1 数据提取

2.1.1 STL 简介

STL 是美国 3D System 公司 1988 年开发的用于快速成型制造技术的表面模型数据交换标准^[5]。

目前,Pro/E、CATIA 等软件均能输出以 STL 表示的三维实体模型,该模型是利用空间三角形的拼接来对原有三维模型表面进行逼近的数学模型,每个三角形用 3 个顶点来表示,每个顶点采用 (x, y, z) 来定位。另外,STL 数据中还包含每个三角形的法向矢量数据。STL 文件的 ASCII 格式数据如下:

```

solid STL          文件开始
    facet normal x y z  三角形开始,三角形法向矢量
        outer loop
            vertex x1 y1 z1  三角形第一点坐标
            vertex x2 y2 z2  三角形第二点坐标
            vertex x3 y3 z3  三角形第三点坐标
        endloop
    endfacet          三角形结束
    ...
    endsolid STL      文件结束

```

上述数据格式中, x, y, z 反映了三角形法向矢量与基准坐标系(生成 STL 时选择的坐标系)3 个坐标轴的夹角。 $x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3$ 分别为三角形三个顶点在基准坐标系下的坐标值。

图 2 是 STL 中一个三角形网格的示意图。如图 2 所示, P_1, P_2, P_3 分别为 STL 数据中, 第 i 个三角形的 3 个顶点, 括号中为顶点坐标。 n_p 为三角形的法向矢量。

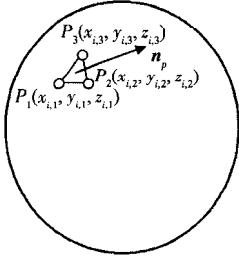


图 2 STL 数据中的三角形网格示意

Fig. 2 Triangle mesh of STL data

2.1.2 天线和太阳翼电池片的 STL 数据提取

为考虑卫星上真实的天线模型和太阳翼电池片的实际布片情况,采取的方法为:分别由天线的 Pro/E 模型和太阳翼电池片的 Pro/E 模型提取 STL 数据。后文的模型均假定天线的 Pro/E 模型和太阳翼电池片布局的 Pro/E 模型与卫星上实际

应用产品一致。

在 Pro/E 模型中,选取卫星机械坐标系作为参考坐标系,这样生成的 STL 数据中的矢量和位置信息均相对于卫星机械坐标系。STL 数据和原始模型的逼近程度通过 Pro/E 中的两个偏差控制参数进行控制:“弦高”和“角度控制”。其中“弦高”用来设置三角形逼近的绝对误差,“角度控制”用来设置三角形平面与其逼近的曲面切平面夹角的余弦。

将太阳翼电池片和天线的三维模型各自以卫星机械坐标系为基准,选择合适的“弦高”和“角度控制”2 个参数后,得到两组 STL 数据文件(太阳翼电池片的 STL 文件记为“Solar_STL_Original”,天线的 STL 文件记为“Antenna_STL_Original”)。

2.2 数据处理

数据处理步骤如下:

(1)按照太阳翼电池片的 STL 数据中的法向矢量信息,提取出有效的三角形网格信息。

由于假定太阳翼固定不动,始终指向 +Z 向,所以提取“Solar_STL_Original”中法向矢量为 $n_z = 1$ 的三角形网格,形成“Solar_STL_Valid”的新数据文件。

(2)对“Solar_STL_Valid”数据进行插值处理。

图 3 是采用的简单插值方法, P_1, P_2, P_3 为原有网格的顶点, M_1, M_2, M_3 为原有网格 3 条边的中心点,这样插值后,原有的 1 个网格变为图 3 中所示的 4 个网格,并且 4 个网格为全等三角形,这样分解后的全部网格的形状和分解前的相似,且颗粒度更小。

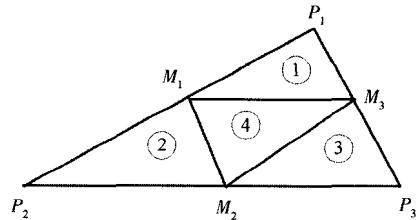


图 3 三角形网格插值示意图

Fig. 3 Sketch map of interpolation method on triangle mesh

处理完毕后的 STL 数据记为“Solar_STL_Final”。

(3)将“Antenna_STL_Original”数据投影到太阳翼电池片所在平面。

为了使得天线相对太阳翼作“逆向运动”。需将天线的 STL 数据进行如下 3 步处理。

第 1 步:按照式(1)进行旋转。

$$(x'_{i,1 \sim 3}, y'_{i,1 \sim 3}, z'_{i,1 \sim 3}) = (x_{i,1 \sim 3}, y_{i,1 \sim 3}, z_{i,1 \sim 3}) \cdot$$

$$\mathbf{R}_y(\theta_y) \mathbf{R}_x(\theta_x) = (x_{i,1 \sim 3}, y_{i,1 \sim 3}, z_{i,1 \sim 3}) \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & -\sin(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & \sin(\theta_x) \\ 0 & -\sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $(x_{i,1\sim 3}, y_{i,1\sim 3}, z_{i,1\sim 3})$ 为旋转前的天线三角形网格 3 个顶点的坐标, 由于太阳翼旋转时, 旋转中心在太阳翼驱动机构旋转轴上, 所以 $(x_{i,1\sim 3}, y_{i,1\sim 3}, z_{i,1\sim 3})$ 中的 $z_{i,1\sim 3}$ 应将原值减去太阳翼驱动机构旋转轴在卫星机械坐标系下的高度; $(x'_{i,1\sim 3}, y'_{i,1\sim 3}, z'_{i,1\sim 3})$ 为旋转后的天线三角形网格 3 个顶点的坐标; θ_x 是太阳光与太阳翼法向夹角 α 的负值, 向北为正, $R_x(\theta_x)$ 为相应的旋转矩阵; θ_y 是天线“逆向运动”时绕卫星太阳翼驱动机构旋转轴的旋转角, $\theta_y = -\beta + 90^\circ$ (β 为太阳翼相对卫星的旋转角度, 绕 $-Y$ 轴逆时针旋转为正), $R_y(\theta_y)$ 为相应的旋转矩阵。

第 2 步: 天线 $-Z$ 向的表面不会独立出现, 势必会和其他表面对太阳翼电池片产生重复遮挡, 所以剔除“Antenna_STL_Original”中法向矢量为 $n_z < 0$ 的三角形网格。

第 3 步: 将每个天线三角形网格的 Z 坐标值改为和电池片 $+Z$ 向平面的 Z 坐标值相同的值, 从而使得接下来的三角形遮挡分析从三维空间转换到二维平面。

处理完毕后的 STL 数据记为“Antenna_STL_Final”。

2.3 数据分析

数据分析步骤如下:

(1) 在二维平面上, 针对“Solar_STL_Final”中的每个三角形网格, 判断其和“Antenna_STL_Final”中每个三角形网格的遮挡情况。

对于“Solar_STL_Final”中某一个太阳翼电池片插值后形成的三角形网格中的某一个(记为 A), 按照如下 4 种情况逐一判断其和“Antenna_STL_Final”中某一个三角形网格(记为 B)的几何关系: 相离、相交、A 包含 B、B 包含 A。若为后 3 种情况之一, 则判断该电池片的 $1/(2 \times 4^n)$ (n 为插值次数) 被遮挡, 并将 A 的标志位记为 1, 否则记为 0。

判断 2 个三角形是否相交, 采用文献[6]中的办法, 即判断 2 个线段矢量的混合积是否满足一定条件。

判断 2 个三角形是否包含, 如判断 A 是否包含 B, 采用基于文献[7]中的判断矩阵的行列式的方法, 即若 A 的某条边的两个顶点和 B 的某一个顶点组成的行列式的值大于 0, 则 A 的两个顶点和 B 的这个顶点构成顺时针。

本文对文献[7]所提方法进行拓展: ① 判断 A 的某一条边的 2 个顶点是否和 B 的某一顶点组成的行列式的值大于 0; ② 若大于 0, 则相含标志位加 1(相含标志位初始值为 0); ③ 重复步骤①, 直至判断完 B 的 3 个顶点和 A 的 3 条边的关系; ④ 若相含标志位为 9, 则判断 A 包含 B。

(2) 根据步骤(1)得到的 2 个 STL 中的三角形互相遮挡情况, 计算遮挡面积, 并生成遮挡图。

根据步骤(2), 所有太阳翼电池片三角形网格的遮挡标志位数目为 N , 则总的遮挡面积为

$$S = N \cdot S_{stl} \quad (2)$$

式中: S_{stl} 为电池片插值后产生的每个网格的面积。

3 应用

设定某太阳翼上电池片的布片参数和天线的参数后, 在 Pro/E 软件中生成电池片和天线的三维模型, 然后按照图 1 所示流程分析电池片所受遮挡情况。根据图 1 所示流程, 在分析太阳翼遮挡时需要 3 个输入文件: 太阳翼电池片 STL 数据、天线 STL 数据、STK 软件中得到的不同时刻卫星所在轨道位置处的太阳光与太阳翼的夹角和太阳翼法向与卫星 X 轴的夹角(见表 1)。得到的分析结果如表 1 第 4 列和第 5 列所示。

表 1 遮挡计算所需的 STK 数据输入和遮挡结果的输出

Table 1 Input data from STK and output data after occlusion detection

北京时间	太阳光与 太阳翼法向 夹角/(°)	卫星 X 轴和 太阳翼法向 夹角/(°)	未插值时 被遮挡 比例/%	1 次插值 后被遮挡 比例/%
2026-06-12T07:00:00	22.83	15	21	13
2026-06-12T07:10:00	23.00	17.5	18	12
2026-06-12T07:20:00	23.16	20	13	9

表 1 中前 3 列为输入数据, 定义了太阳光与太阳翼法向的夹角(即表 1 中第 2 列数据)和太阳翼相对卫星的旋转角度(即表 1 中第 3 列数据, 旋转角度的起始位置设定为太阳翼法向与卫星 X 轴同向时所处位置)。

图 4 是未对太阳翼电池片 STL 数据进行插值时, 得到的太阳翼遮挡图, 图 5 是对太阳翼电池片 STL 数据进行 1 次插值后, 得到的太阳翼遮挡图。

图 4 和图 5 中红色的三角形网格代表被遮挡。图 4 和图 5(a)~(c) 分别对应表 1 中各行时刻下的遮挡图, 图中上部为南太阳翼, 下部为北太阳翼。图 4(d) 和图 5(d) 分别是图 4(a) 和图 5(a) 的局部放大图。从

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>