

在轨航天器空间几何遮挡算法

余庆波¹, 王海福¹, 王辉²

1. 北京理工大学; 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

2. 中国兵器科学院, 北京 100089

摘要 航天器空间几何遮挡算法是空间碎片风险评估的关键环节, 遮挡算法的正确性对评估精度影响显著。针对空间碎片碰撞风险评估中航天器几何遮挡问题, 基于计算机图形学 Roberts 算法和 Z 缓冲器算法, 建立了一种算法简单、精度高、通用性强的几何遮挡处理方法及算法实现。针对航天器结构比较复杂的特点, 提出了先对航天器实现舱段分解, 在消除被遮挡面后, 再进行合并的遮挡处理原则, 并建立了航天器结构空间几何遮挡理论模型及算法流程。采用该算法对 IADC 规定的简单航天器标准工况进行了遮挡处理分析, 得出了遮挡处理后不同方向下航天器的暴露面积。结果表明, 不同方向下的航天器暴露面积是不同的, 遮挡处理后 IADC 规定的简单航天器最小暴露面积仅为原来的 38.91%, 最大也只有原来的 55.27%。可见, 在不同运行姿态下, 航天器暴露面积差别很大, 改变航天器飞行路线及运行姿态可有效减少空间碎片的碰撞风险。

关键词 空间碎片; 航天器; 遮挡算法; 暴露面积

中图分类号 V414

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)16-0036-04

Space Shading Algorithm for On-orbit Spacecraft

YU Qingbo¹, WANG Haifu¹, WANG Hui²

1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology;
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. China Academy of Defense Science and Technology, Beijing
100089, China

Abstract Space shading algorithm for spacecraft is the key link of Meteoroid and Orbital Debris (M/OD) risk assessment. The analysis precision of M/OD risk assessment is mostly dependent on the accuracy of space shading algorithm. The M/OD risk assessment plays a very important role in shielding design and in-orbit safety for spacecraft. For the spacecraft shading problem in orbital debris risk assessment, based on Roberts algorithm and Z-buffer algorithm, a shading algorithm is proposed, which is simple in computation, accurate in results and versatile in applications. Spacecraft structures are often very complex, therefore, in the algorithm, a decomposition of the structure and a related shading are made before a combination operation. The shading of simple spacecraft specified by IADC is analyzed. The exposed areas of spacecraft and each finite element in different yawing directions are obtained. The exposed area of the simple spacecraft is different in different directions. The minimum and maximum exposed areas after shading

are 38.91% and 55.27% of the exposed area of the simple spacecraft before shading, which shows that the exposed area of spacecraft has great different in different flight attitude. And changes in spacecraft mission operations, flight rules, and flight planning can reduce meteoroid and debris risks.

Keywords orbital debris; spacecraft; shading algorithm; exposed area

0 引言

随着空间碎片环境的不断恶化, 空间碎片碰撞风险评估已成为人类航天发射活动和航天器防护设计的重要内容和关键环节^[1-8]。航天器几何遮挡处理直接影响到碰撞风险评估的精度, 不同遮挡处理将导致评估结果产生巨大差异。同时, 航天器结构空间几何遮挡及空间碎片的分布导致了航天器各部件在轨运行风险的不同, 对航天器各部件采取合适的防护结构, 可简化防护结构、减轻航天器总质量, 从而增加航天器的有效载重。因此, 解决航天器结构空间几何遮挡问题是进行航天器防护结构设计和碰撞风险评估的关键技术之一。针对这一问题, 本文提出了一种 M/OD 环境下航天器空间几何遮挡处理方法, 并结合算例进行了应用分析。

1 坐标转换

在处理航天器遮挡问题时, 航天器与空间碎片必须处于同一坐标系下, 选用空间碎片来流坐标系, 即以航天器质心为坐标原点 O , 来流反方向为 OX_0 轴, OZ_0 轴沿地轴指向北极, OY_0 轴由右手法则确定。被遮挡面是指在一定的空间碎片

收稿日期: 2009-07-16

基金项目: 爆炸科学与技术国家重点实验室基金项目(20080231)

作者简介: 余庆波, 博士研究生, 研究方向为新概念弹药技术和航天器防护技术, 电子信箱: bard217@sina.com; 王海福(通信作者), 教授, 研究方向为新概念弹药与高效毁伤技术、常规战斗部技术及航天器失效机理与防护技术等, 电子信箱: wanghf@bit.edu.cn

来流方向下,航天器不会遭到碰撞的表面。

航天器有限元模型上的任意一点 (x, y, z) 可通过3次旋转变换到空间碎片来流坐标系中^[5],即先绕 z 轴旋转 ψ 角,再沿 x 轴旋转 φ 角,最后沿 y 轴旋转 θ 角,转化矩阵表述如下:

$$\begin{bmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi - \sin\phi\sin\theta\sin\psi & \sin\phi\sin\theta\cos\psi + \cos\theta\sin\psi & -\cos\phi\sin\theta \\ -\cos\phi\sin\psi & \cos\phi\cos\psi & \sin\phi \\ \cos\theta\sin\psi + \sin\phi\cos\psi & -\cos\theta\cos\psi\sin\phi + \sin\theta\sin\psi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

2 几何遮挡算法

考虑到航天器结构的复杂性及有限元模型的网格特点,本文基于计算机图形学 Roberts 算法和 Z 缓冲器算法得出了一种原理及实现都较简单的遮挡算法,该算法的主要优点是计算速度快、编制代码容易^[9-10]。算法的基本原则是先对航天器实现舱段分解并建立各舱段有限元模型,消除被遮挡面后再进行合并。其基本流程如下:在来流坐标系中,在航天器内部取一个点,通过点面关系判断,消除各舱段的背面;再将舱段进行合并,将合并的这些面在 yOz 面上进行投影,对有重叠投影区域的表面单元进行深度判断,从而消除复杂航天器的结构遮挡单元。

2.1 单舱段几何遮挡处理

单舱段消除被遮挡面指的是消除单舱段的背面。由于航天器有限元模型各表面网格单元的平面方程已知,因此采用点与平面的关系来实现单舱段遮挡面消除处理。具体方法如下。

1) 取点位置矢量 $p(x, y, z)$,并算出各平面的法矢量 $n(a, b, c)$,若点在平面上,则有 $p \cdot n = 0$,否则,点积符号代表点在平面的那一侧,设点在几何体内时,点积结果为负。

2) 若点在几何壳体的内部,点的位置矢量与几何体各网格单元平面的法矢量点积应该为负,若为非负值,则应该对非负的方程乘以一个系数-1,以修正一些平面的法矢量。

3) 在进行背面剔除时,由于来流方向为 $-x$ 轴方向,因此,只需判断平面的 x 分量符号。若 $x > 0$,网格单元可见;否

则,网格单元被遮挡。

以中心在原点的单位立方体为例,每个表面只划分一个网格(图1)。取体内一点 $(0, 0, 0)$,则点面点积关系表述如下:

$$S \cdot V = \begin{pmatrix} 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 2 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, S 为点矢量, V 为立方体表面法矢量。

点 $(0, 0, 0)$ 对所有的面都是不可见的,对非负方程乘以系数-1以修正平面法矢量,即

$$V = \begin{pmatrix} 2 & -2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & -2 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$$

选择 x 轴正向为观察点,判断 x 值后发现,只有右1可见。去除背面的效果如图2所示。

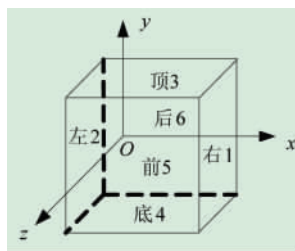


图1 以原点为中心的立方体
Fig. 1 Cube with the coordinate origin as the center

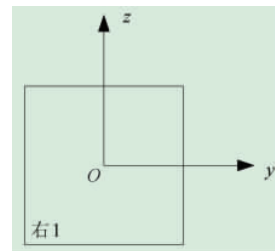


图2 遮挡处理后的暴露面
Fig. 2 Exposure surface after shading

2.2 舱段间遮挡面处理

对于单凸面体结构的航天器,如球形卫星等,在空间遮挡处理时只需按照上述的单舱段几何遮挡处理进行即可;但对于复杂结构航天器,还需要分析各个舱段潜在可见面网格单元在 yOz 面上的投影,得出真实的可见面网格单元。两个网格单元的投影关系可分为4种,如图3所示。

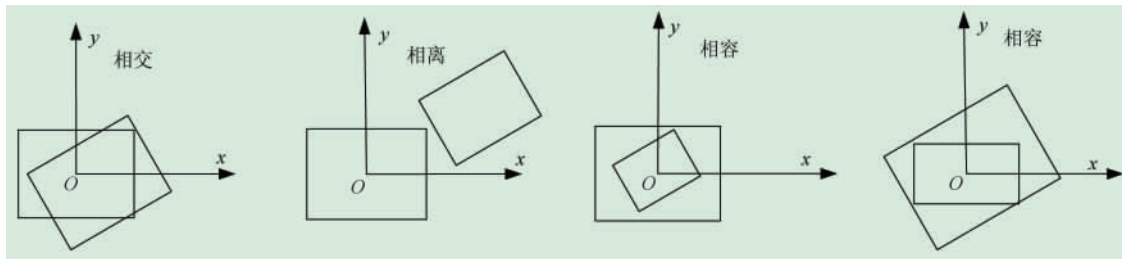


图3 两网格单元在 yOz 面上投影关系

Fig. 3 Projection relation on yOz plane

从图3可以看出,遮挡关系的判断可通过判断网格单元投影线段的交点来实现,即:

1) 若存在交点且交点不是两线段的端点,则两网格单元存在遮挡关系;

2) 若不存在交点或交点为两线段的端点则进行投影区域判断,若一网格单元投影区域包含(被包含于)另一网格单元的投影区域时,则存在遮挡关系,否则两网格单元不存在遮挡关系。

两线段的交点计算方法: 设线段 S_1 的两个端点分别为 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$, S_2 的两个端点分别为 $P_3(x_3, y_3)$ 和 $P_4(x_4, y_4)$ 。则两线段所在直线的参数方程可表述为

$$\begin{cases} S_1(u) = (1-u)P_1 + uP_2 \\ S_2(v) = (1-v)P_3 + vP_4 \end{cases} \quad (3)$$

式中, u 和 v 为参数。

当 $0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1$ 时, 方程 (3) 即为两线段 S_1 和 S_2 的参数方程, 可表述为

$$\begin{aligned} S_1: & \begin{cases} x = x_1 + (x_2 - x_1)u \\ y = y_1 + (y_2 - y_1)u \end{cases} \quad (0 \leq u \leq 1) \\ S_2: & \begin{cases} x = x_3 + (x_4 - x_3)v \\ y = y_3 + (y_4 - y_3)v \end{cases} \quad (0 \leq v \leq 1) \end{aligned} \quad (4)$$

若两线段相交且存在交点, 则应满足关系式

$$\begin{cases} x_1 + (x_2 - x_1)u = x_3 + (x_4 - x_3)v \\ y_1 + (y_2 - y_1)u = y_3 + (y_4 - y_3)v \end{cases} \quad (5)$$

根据方程 (5) 可求出参数 u 和 v

$$u = \frac{\begin{vmatrix} x_3 - x_1 & x_4 - x_3 \\ y_3 - y_1 & y_4 - y_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_3 - x_4 & x_2 - x_1 \\ y_3 - y_4 & y_2 - y_1 \end{vmatrix}} \quad v = \frac{\begin{vmatrix} x_3 - x_1 & x_2 - x_1 \\ y_3 - y_1 & y_2 - y_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_3 - x_4 & x_2 - x_1 \\ y_3 - y_4 & y_2 - y_1 \end{vmatrix}} \quad (6)$$

令 $\begin{vmatrix} x_3 - x_4 & x_2 - x_1 \\ y_3 - y_4 & y_2 - y_1 \end{vmatrix} = \Delta$, 若 $\Delta = 0$, 方程组无解, 说明两线段无交点; 若 $\Delta \neq 0$, 则方程组有唯一解, 说明两直线存在唯一交点。

$\Delta \neq 0$ 时, 可根据方程 (6) 计算出 u, v 值, 若 $0 \leq u \leq 1$, 交点在线段 S_1 上; 否则交点在线段 S_1 延长线上。若 $0 \leq v \leq 1$, 则交点在线段 S_2 上; 否则交点在线段 S_2 的延长线上。因此, 只有当 $0 \leq u \leq 1$ 且 $0 \leq v \leq 1$ 时, 才能确定交点同时在两线段上。

判断出存在遮挡关系的网格单元后, 还需进行深度判断, 即判断两网格单元平面的 x 值大小, x 值小的为被遮挡表面, 如图 4 所示, S_2 所在表面被 S_1 所在表面遮挡。

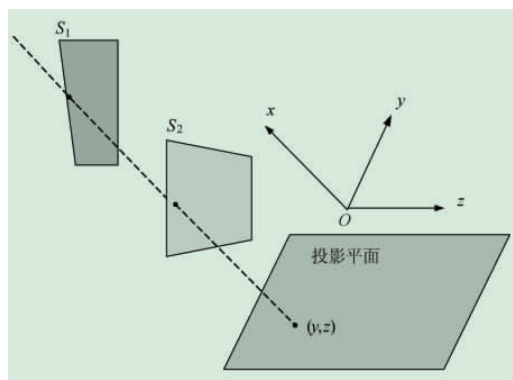


图 4 深度判别法

Fig. 4 Depth identification

3 遮挡处理程序流程和算例分析

3.1 遮挡处理程序流程

根据遮挡算法原理和航天器有限元模型特点, 设计了遮挡

算法流程, 如图 5 所示。以该算法为核心的几何遮挡程序为航天器空间碎片碰撞风险仿真评估系统的顺利实现奠定了基础。

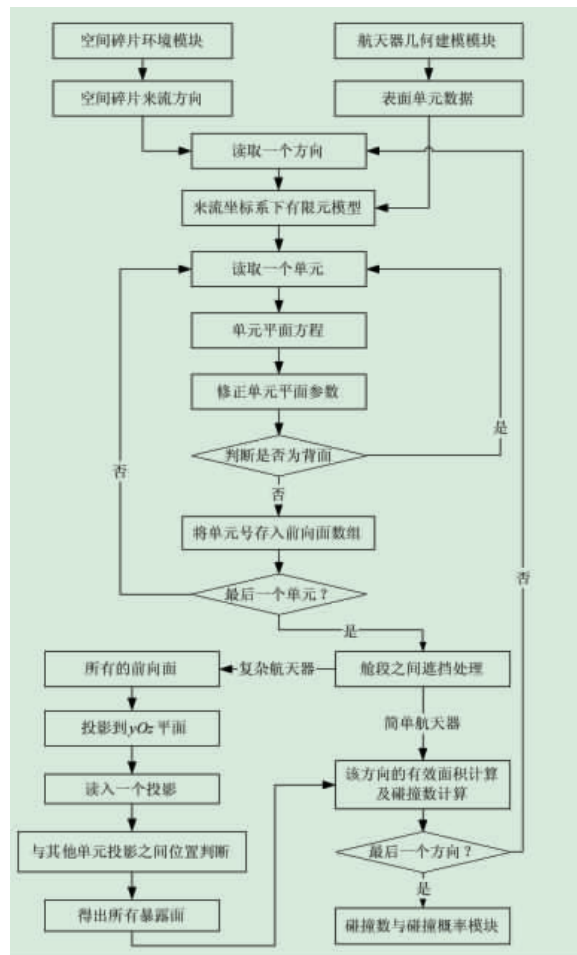


图 5 遮挡面处理流程图

Fig. 5 Flow chart of impact handling module

3.2 遮挡处理结果

根据以上算法和分析实现的程序可正确实现遮挡判断。以简单航天器为例, 其立方体边长和柱段直径均为 1 m , $-x$ 方向柱段长 3 m , $-y$ 与 $-z$ 柱段长均为 1 m , $+y$ 柱段长 2 m 。将航天器表面划分为 296 个四边形网格单元, 有限元模型如图 6 所示。未进行遮挡处理时航天器的总面积为 13.854 m^2 , 采用上述遮挡算法进行遮挡处理后不同方向的暴露面积及各单元面积列于表 1。表 1 中, 以图 6 所示 $-x$ 方向为 0° 方向, 逆时针方向为正。

从表 1 可以看出, 进行遮挡处理后, 航天器表面各有限元单元暴露面积是不同的, 完全被遮挡单元的暴露面积为 0 , 方向为 5° 和 -5° 时暴露面积最小, 从图 6 也可以看出, 该方向上航天器被遮挡面积是最多的。从表 1 还可以看出, 进行遮挡处理后航天器最小暴露面积 (5.3912 m^2) 仅为原来的 38.91% , 最大暴露面积 (7.6569 m^2) 也仅为原来的 55.27% 。航天器暴露面积越多, 在轨工作时遭遇空间碎片的碰撞风险就越大, 通过遮挡分析可以调整航天器的飞行方向, 使其暴露

表 1 遮挡处理结果 (单位 :m ²)								
Table 1 Shading results (unit: m ²)								
方向/(°)	单元序号							总计
	1	...	150	...	196	...	296	
-175								
-165								
-155	0	...	0.026 8	...	0.044 8	...	0	7.195 1
...	...	...	...	...	...	...	...	...
-85	0.021 8	...	0.063 1	...	0.105 7	...	0	6.095 6
-75	0.064 7	...	0.061 2	...	0.102 5	...	0	6.034 0
-65	0.105 7	...	0.057 4	...	0.096 1	...	0	6.547 9
...	...	...	...	...	...	...	...	...
-5	0.249 0	...	0.005 5	...	0.009 2	...	0	5.391 2
5	0.249 0	...	0	...	0	...	0	5.391 2
...	...	...	...	...	...	...	...	...
85	0.021 8	...	0	...	0	...	0	6.034 0
95	0	...	0	...	0	...	0	6.095 6
...	...	...	...	...	...	...	...	...
135	0	...	0	...	0	...	0	7.656 9
145	0	...	0	...	0	...	0	7.540 5
155	0	...	0	...	0	...	0	7.195 1
165	0	...	0	...	0	...	0	6.730 9
175	0	...	0	...	0	...	0	6.095 6

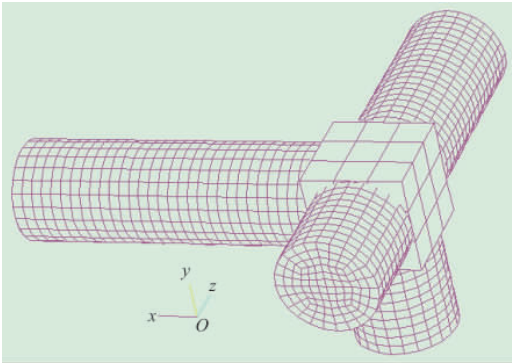


图 6 简单航天器有限元模型
Fig. 6 Simple space station

面积最小,从而减少碰撞风险。

4 结论

航天器结构空间几何遮挡是空间碎片碰撞风险评估仿真系统要解决的关键技术之一,本文针对该问题给出了一种建模方便、算法简单、通用性强的遮挡算法实现方法,并建立了航天器结构空间几何遮挡理论模型及算法流程,最后对IADC规定的标准工况——简单航天器,进行了空间几何遮挡分析,给出了航天器在不同方向的有限元单元暴露面积及航天器总的暴露面积,经过遮挡处理后的简单航天器在不同方向的暴露面积不同,遮挡处理后的最小暴露面积为原来的38.91%,最大为55.27%,调整航天器运行姿态可有效减少空间碎片威胁。

参考文献 (References)

[1] 王海福, 余庆波, 刘有英. 空间碎片风险评估系统[J]. 北京理工大学学报, 2008(12): 1039–1042.

Wang H F, Yu Q B, Liu Y Y. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2008(12): 1039–1042.

[2] Wang Haifu, Yu Qingbo, Liu Youying. Meteoroid and orbital debris risk assessment and shielding system [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2009(1): 6–10.

[3] 刘有英, 王海福, 朵英贤. 航天器防护结构弹道极限数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(4): 915–918.

Liu Youying, Wang Haifu, Duo Yingxian. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(4): 915–918.

[4] Wang H F, Liu Y Y. Performance analysis of shield systems for spacecraft [C]//Proceedings of 2004 International Symposium on Safety Science and Technology. Shanghai, China, 2004: 3006–3009.

[5] Hyde J, Bernhard R, Christiansen E. STS–114 micro–meteoroid/orbital debris (MMOD) post–flight assessment[J]. *Orbital Debris Quarterly News*, 2006, 10(3): 2–3.

[6] Liou J C, Christiansen E, Corsaro R, *et al*. ST9 solar sail: A potential meteoroid and orbital debris sensor [J]. *Orbital Debris Quarterly News*, 2005, 9(1): 6–7.

[7] Christiansen E L, Kerr J H. *Ballistic limit equations for spacecraft shielding*[J]. *Int J Impact Eng*, 2001, 26: 93–104.

[8] 刘有英, 王海福. 高速碰撞下航天器防护结构效能评价 [J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(4): 359–361.

Liu Youying, Wang Haifu. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(4): 359–361.

[9] Rogers D F. 计算机图形学的算法基础 [M]. 石教英, 彭群生, 译. 北京: 机械工业出版社, 2002.

Rogers D F. *Procedural elements for computer graphics*[M]. Shi Jiaoying, Peng Qunsheng trans. Beijing: China Machine Press, 2002.

[10] 陆润民. 计算机图形学教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

Lu Runmin. *Computer graphics directory* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

(责任编辑 代丽)