武装直升机红外辐射计算中多重遮挡处理

陈海涛 卞恩荣

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016) (南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

摘 要: 针对武装直升机红外辐射计算中任意方向上可视净面积求取问题,提出了一种基于随机模拟的遮挡处理方法. 该方法利用曲面造型方法建立直升机的三维模型,并将其离散为四边形面元,采用翼边拓扑结构描述直升机外形的数学模型. 在此基础上,基于可见性测试、深度测试和遮挡测试原理对空间多边形面元进行遮挡判断,求出其遮挡面元集,再利用随机变量的统计方法对该多边形进行遮挡计算,求得净面积. 对某型武装直升机和简单形体的计算表明,通过合理划分面元数和选取随机点数, 简单目标计算误差可以控制在5%以内,复杂目标可以控制在工程精度要求内. 该方法已应用于武装直升机红外辐射特性计算软件中,应用表明该方法稳定、可靠,适于工程分析.

关 键 词: 武装直升机; 红外辐射; 遮挡; 随机变量

中图分类号: V 218

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)04-0391-04

New algorithm of processing multi occultation and its application in infrared radiation calculation of military helicopter

Chen Haitao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Bian Enrong

(School of Aeronautics and Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To solve the problem of calculating visible net area under any direction in infrared radiation calculation for military helicopter, a new algorithm based on stochastic simulation was proposed. By using surface modeling method, the helicopter's three-dimensional model was constructed and discretilized into quad surface elements. The mathematic model for helicopter was represented with the winged-edge structure. Visibility test, depth test and shelter test were applied to find out all the other polygons that have occultation relationship with the researched spatial polygon, then put them into a set. The statistics method of random variable was introduced subsequently to calculate the net area of this polygon. The calculation results of certain military helicopter and simple object show that the percentage error for simple object can be controlled within 5%, and for complex object can meet the engineering requirement by controlling the total polygons and random points reasonably. The algorithm has been used successfully in the calculation software of military helicopter's infrared radiation. Applications show that the algorithm is stable, reliable and suitable for engineering analyses.

Key words: military helicopter; infrared radiation; occultation; random variable

据有关资料[1]表明,在现代战争中,地(空)-空导弹对飞机毁伤概率已达94%,而其中红外制导的导弹就占了90%. 空中目标的红外隐身,已经成为各国投入大量人力物力的研究项目. 武装直升机利用敌方地面雷达探测的盲区,进行超低空或贴地飞行,其主要威胁是来自红外制导武器.

收稿日期: 2005-04-11

基金项目: 国防预研资助项目

作者简介: 陈海涛(1975-),男,江苏扬州人,博士生, chtnuaa@sina.com.

因此,对武装直升机红外隐身技术进行研究就显得更加重要了. 研究中一项重要的工作就是其红外辐射特性的理论计算. 通过理论计算,可以为红外隐身提供技术途径和检验隐身效果.

根据红外辐射理论,目标沿某方向的可视净面积是计算该方向红外辐射特性的重要参数之一. 武装直升机形体复杂,各部件在不同观测方向上存在不同程度的遮挡,从而使得净面积的计算繁琐复杂. 本文在对武装直升机三维建模,并将其离散化为多边形面元的基础上,将统计方法中的随机变量引入到多边形面元净面积的计算体系中,提出了一种利用随机模拟[2,3]求解遮挡多边形面积的方法,并以此方法为基础,建立了一种处理多重遮挡的算法.

1 利用随机模拟求遮挡多边形面积

设 A 为空间面元集中一多边形面元,沿某一方向观察它时,有多个面元对其产生遮挡,这些遮挡面元记为 $B_1, B_2, \cdots, B_n$. 面元 A 被遮挡部分沿观察方向投影后,形成的多边形(称为遮挡多边形)记为 P,则:

$$P = A' \cap (B'_1 \cup B'_2 \cup \cdots \cup B'_n) \quad (1)$$

$$A' = (A' - P) \cup P \quad (2)$$

式中 $A', B'_1, B'_2, \cdots, B'_n$ 是各面元的投影面元. 令:

$$C = B_1 \cup B_2 \cup \cdots \cup B_n \quad (3)$$

则 C 就是面元 A 的遮挡面元集.

在 A'中随机产生 $m(m \to \infty)$个点,记为 M. 由式(2)可知,对于点 m_i,要么 $m_i \in P$,要么 $m_i \notin P$,如果 m 个点的产生是真正的随机变量,则 m 个点在 A'中的分布是均匀的,m 个点分为两部分,落在 P 中的点和其余的点. 根据随机点过程理论[4],设 $N(P)$表示 m 落在 P 中的点数,则:

$$N(P) = \sum_i I_P(x_i) \quad (4)$$

其中 $x_i \in M$;$I_P(x)$是集合 P 的示性函数,即

$$I_P(x) = \begin{cases} 1 & x \in P \\ 0 & x \notin P \end{cases} \quad (5)$$

设 S_P 表示遮挡多边形的面积,由随机模拟的统计方法可求得:

$$S_P = \frac{N(P)}{m} \times S'_A \quad (6)$$

式中 S'_A 是面元 A 的投影面积.

由式(1)、式(3)和式(5)可知,如果面元 A'内一点 $x \in P$,那么 $x \in C$. 因此,判断 A'内一点是否属于遮挡多边形,只需判断它是否属于遮挡面元集内的某一面元. 对于空间面元 A,只要知道了它的遮挡面元集 C,就可以利用随机过程模拟的方法求出它的遮挡多边形的面积,算法见图 1.

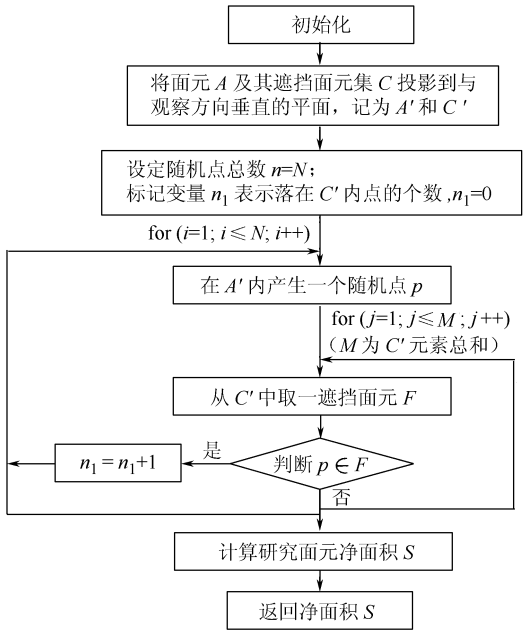

图 1 随机模拟求遮挡多边形面积

对于该算法有几点需要说明:①随机数是影响在面元 A'内落点是否均匀的关键因素,一般软件中都有产生随机数的标准函数,虽然它们产生的是伪随机数,但在本文研究中,已能满足需要. 读者也可以自己编写随机数发生程序,以产生服从均匀分布的随机数;②由于面元都是凸多边形,可以利用向量外积判断法来判断一点是否在多边形内. 如图 2 所示:P_0 为判断点,多边形顶点按顺序排列为 $P_1P_2\cdots P_n$. 令 $V_i = P_i - P_0, i = 1, 2, \cdots, n$, $V_{n+1} = V_1$,那么 P_0 在多边形内的充要条件是外积 $V_i \times V_{i+1}$的符号相同;③可以用 A'的最小外接矩形代替 A',这样随机点在矩形内产生,更容易实现均匀分布.

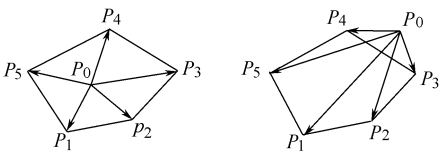

图 2 外积判断法

2 多重遮挡处理算法

直升机离散化为多边形面元后,需采用合理的数据结构来描述它的外形. 有了直升机外形的数学模型,结合随机模拟求遮挡多边形面积的原理,本文提出了一种处理直升机多重遮挡的算法.

2.1 直升机外形的数学描述

本文采用的是目前大型 CAD/CAE 软件中常

用的翼边结构描述方法,即用一个由点表、面表和体表等数据表的数据库记录直升机的三维模型. 其描述方法如下:①将整个直升机外表分解为许多面元,每个面元都是一个平面、面元或者为三角形,或者为四边形;②直升机的几何结构可由所有面元完全确定,面元的位置和方向则由顶点的坐标决定. 直升机几何结构数据库中用点数据表和面数据表,分别记录上述的数据;③面元与面元之间只能是顶点相交. 即顶点只能出现在一个面元的顶点位置,而不允许出现在另一个面元的 2 个顶点的边线上;④为使面元相互间的几何关系更为明确,在数据库中还增加了体表,将属于某一体结构的面元进行分组. 每个体由若干个面元组成,体可以是封闭的,也可以是非封闭的. 体的数据由单独的体数据表记录,它记录了各个体元分别由哪几个面元组成. 根据上面的描述,本文设计的点表、面表和体表结构如下:

点数据表:

字段名	意义
INDEX	点序号(唯一值)
X	x 坐标
Y	y 坐标
Z	z 坐标

面数据表:

字段名	意义
INDEX	面元序号(唯一值)
PART _ NAME	面元所属体元名称
POINTS	顶点数
POINT _ ID1	顶点 1 序号
POINT _ ID2	顶点 2 序号
POINT _ ID3	顶点 3 序号
POINT _ ID4	顶点 4 序号

体表:

字段名	意义
NAME	体元名称(唯一值)
DATA _ ID	体数据表序号
BOX	体包围盒

一个面元中各个顶点在表中按顺时针方向的顺序排列.

2.2　遮挡处理算法

根据直升机外形的数学模型,对于它的某一可见面元,只要找出与它相互遮挡的面元,应用前文介绍的随机模拟法求遮挡多边形面积的原理,就可以算出它净面积,进而算该面元的红外辐射特性. 处理算法如图 3 所示.

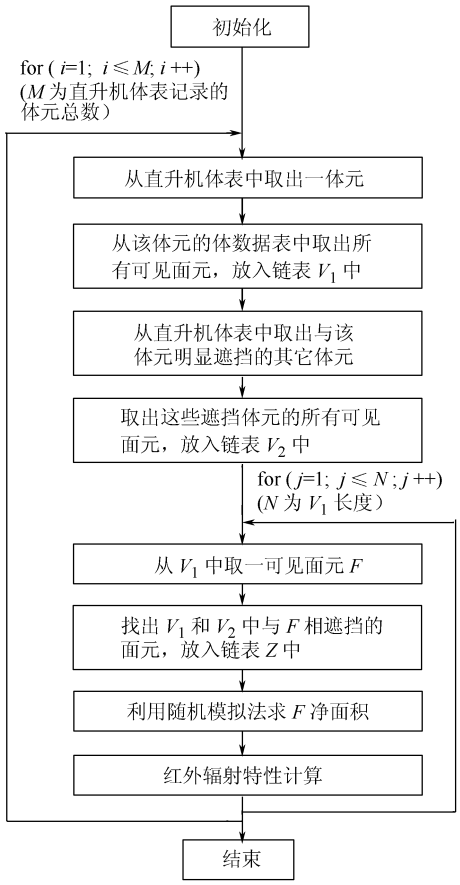

图 3　多重遮挡处理算法

面元的可见性可根据观察方向向量 $\boldsymbol{f}$ 和面元法向量 $\boldsymbol{n}$ 的夹角来判断. 式(7)中,sign<0, 面元可见,反之则不可见.

$$\text{sign} = \frac{\boldsymbol{f} \cdot \boldsymbol{n}}{|\boldsymbol{f}||\boldsymbol{n}|} \tag{7}$$

两体结构是否遮挡,可以根据它们的包围盒在投影面上是否相交来判断[5,6].

找出 V_1 和 V_2 中与 F 相遮挡的面元,可以分两步:①在 F 和 V_1, V_2 中的面元之间进行深度测试,去除位于 F 之后的面元,设平面 Π: $Ax+By+Cz+D=0$ 为观察平面,空间面元为 N 边形,则其中点 (X_c, Y_c, Z_c) 到观察平面的距离 $d = \dfrac{|AX_c + BY_c + CZ_c + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$, 其中 $X_c = \dfrac{\sum_{i=1}^{N} X_i}{N}$, $Y_c = \dfrac{\sum_{i=1}^{N} Y_i}{N}$, $Z_c = \dfrac{\sum_{i=1}^{N} Z_i}{N}$. 根据求得 d 的大小,判断哪些面元位于 F 之后;②将 V_1, V_2 中剩下的面元透射投影变换到 F 所在的平面上,在该平面上利用包围盒测试法[6]判断 F 和变换面元是否有遮挡,去除未遮挡面元.

3 应用算例

算例 1 如图 4 所示,3 个半径均为 20 mm 球叠放在一起,球的表面由四边形面片组成,z 坐标垂直于纸面向外,球心的 z 坐标值都为 0. 3 个球均为黑体,球 1 的温度为 300 K,球 2 的温度为 400 K,球 3 的温度为 500 K.

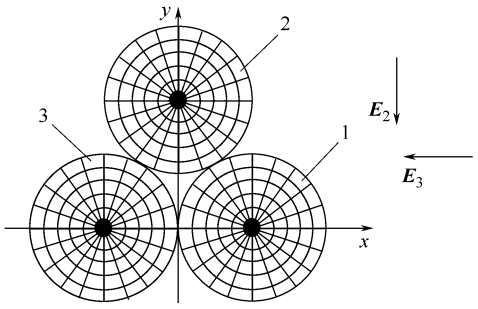

图 4 算例 1

假设观察方向 $\boldsymbol{E}_1$ 为从(0,0,1)到原点的矢量方向(垂直于纸面向内);$\boldsymbol{E}_2$ 为从(0,1,0)到原点的矢量方向;$\boldsymbol{E}_3$ 为从(1,0,0)到原点的矢量方向. 在 3 个方向上,分别计算 3 ~ 5 μm波段范围内的红外辐射强度,结果见表 1.

表 1 计算结果

观察方向	辐射强度/(W · sr^{-1})		相对误差/%
	理论值	计算值	
$\boldsymbol{E}_1$	0.250 4	0.246 7	1.5
$\boldsymbol{E}_2$	0.167 1	0.161 8	3.2
$\boldsymbol{E}_3$	0.038 8	0.037 9	2.3

误差主要来源于离散化模型和随机点的数量,由表 1 可知,这两项误差可以控制在 5% 以内. 实际应用中,可根据需要,通过合理划分面元数和选取随机点数来控制误差,满足工程需求.

算例 2 图 5 所示为某型武装直升机,表面由四边形网格组成. 基于本文的方法,应用编制的武装直升机红外辐射特性计算软件计算了该型直升机在俯仰角 θ=120°时的辐射强度分布,文中以与喷口截面垂直方向的辐射强度为基准,对计算结果作了归一化和无量纲化处理,曲线如图 6 所示. 计算波段为 3 ~ 5 μm,晴天巡航状态. 如图 6 所示,分布曲线出现振荡变化,是因为沿某一观察方向时,直升机各部件间的遮挡比较严重,使得其辐射强度突然降低,如图 6 中,在方向角大概 35° 时,由于机翼和机身对发动机喷口的遮挡,使得该方向的辐射强度突然剧烈下降. 该曲线的变化规律与实际情况相一致,计算结果满足红外辐射特性计算的误差要求,说明该算法的有效性和实用性.

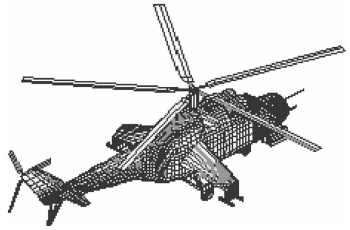

图 5 某型武装直升机

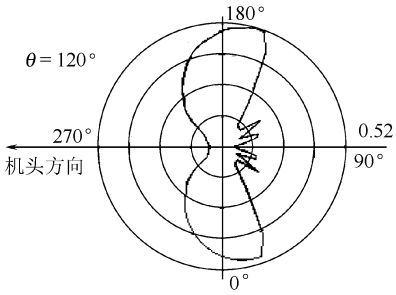

图 6 红外辐射强度分布曲线

4 结 束 语

本文首次将随机变量的统计方法引入到直升机红外辐射理论计算的多重遮挡处理算法中. 根据该遮挡处理算法编制的程序模块,已经应用到了武装直升机红外辐射特性计算软件中. 该软件已经交给用户使用,使用情况证明该算法稳定可靠,结果满足工程精度要求.

参考文献(References)

[1] 武振波,武 哲. 武装直升机红外隐身系统研究[J]. 北京航空航天大学学报,2003,29(7): 588 ~ 592
Wu Zhenbo, Wu Zhe. Research on infrared stealth system for armed helicopter[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(7): 588 ~ 592(in Chinese)

[2] Surzhikov S T. The use of Monte Carlo simulation methods to calculate the radiation of jets of combustion products in view of rotational spectral structure[J]. Heat and Mass Transfer and Physical Gasdynamics, 2003, 41(5): 695 ~ 697

[3] Nelson H F. Backward Monte Carlo modeling for rocket plume base heating [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1992, 6(3): 556 ~ 558

[4] 邓永录, 梁之舜. 随机点过程及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1992. 12 ~ 16
Deng Yonglu, Liang Zhishun. Random point process and its applications[M]. Beijing: Science Press, 1992. 12 ~ 16 (in Chinese)

[5] Pantazopoulos I, Tzafestas S. Occlusion culling algorithms: a comprehensive survey [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2002, 35: 130 ~ 133

[6] 周建江,舒永泽. 简单形体目标电磁遮挡算法研究[J]. 南京航空航天大学学报,1995,27(1): 97 ~ 101
Zhou Jianjiang, Shu Yongze. Research on electromagnetic shadowing algorithm of simple targets[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1995, 27(1): 97 ~ 101(in Chinese)