

文章编号:1001-5078(2011)03-0272-06

· 红外技术 ·

一种飞行器蒙皮红外辐射图像生成方法

张可¹, 黎宁¹, 刘福美¹, 单勇²

(1. 南京航空航天大学信息科学与技术学院, 江苏 南京 210016; 2. 南京航空航天大学能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要:提出了一种实用的飞行器蒙皮红外辐射图像生成方法。首先是飞行器的几何建模与网格化并通过建立控制方程求解蒙皮温度场;其次,通过飞行器蒙皮红外辐射各单元面按深度排序后依次投影,实现了数据从三维空间到二维平面的转换,生成了各个角度的飞行器蒙皮温度分布图,进而计算辐射亮度并进行规格化处理。利用图像表达方式,实现飞行器蒙皮红外波段辐射亮度成像。实验证明,该方法简单实用,为研究飞行器蒙皮红外辐射分布提供了有效的表现形式。

关键词:飞行器蒙皮;辐射亮度;红外图像;温度分布图

中图分类号:TN21

文献标识码:A

Method of aircraft skin infrared radiation image generating

ZHANG Ke¹, LI Ning¹, LIU Fu-mei¹, SHAN Yong²

(1. College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The method of an aircraft skin infrared radiation imaging is proposed. First, the geometric model of the aircraft skin is built up with a grid. Temperature distribution of the aircraft skin is obtained by solving the control equations. Second, the aircraft skin infrared radiation data is transferred from three-dimensional to two-dimensional by element projections according to the ordering of their depth. The images of the temperature distribution are generated at various angles so that the radiance of aircraft skin can be calculated and normalized. Finally, the aircraft skin infrared radiance is described as a grey image. The experimental results have shown that the method is simple and practical and it provides an effective representation for the study on infrared distributions of the aircraft skin.

Key words: aircraft skin; radiance; infrared image; temperature distribution image

1 引言

近十多年的战争表明,能否有效打击来犯的空目标,将对战争的胜负起着决定性作用。一切军事目标,如海洋中的舰船、地面部队及各种装备、空中的飞机、导弹等都散发出大量的红外辐射,各种红外技术装备利用目标的红外特征,可以从空中和空间对这些目标进行侦察、监视与跟踪^[1-2]。因此研究飞行器等军事目标的红外辐射特性具有极其重要的意义。

目前国内外开展空中目标红外辐射特性研究主

要有两种方法:一是在真实战术环境条件下的试飞及实际测量;二是理论或工程计算模拟方法^[2]。前者的优势在于可以得到最直接的测量结果,逼近程度较高,但是由于战场目标的多样性及背景的复杂性通常难以实现^[3-6]。后者通过建立积分微分方程,采用逆向蒙特卡罗法、窄谱带模型法、有限体积

基金项目:预研基金项目(No. T0775-041-3)资助。

作者简介:张可(1984-),女,硕士,研究方向为图像处理。

E-mail: zhangkelovesister@126.com

收稿日期:2010-11-27;修订日期:2010-12-13

法等求解,并用计算机进行模拟仿真,不仅能节约大量的试验费用,而且还还可产生恶劣地理自然条件下外场试验无法获取的红外图像^[7-10]。就目前国内外公开发表的文献看,研究较多的是目标红外辐射特性的数值计算及数值分析,而对于如何将其以图像形式直观生动得表现,则研究较少^[11]。虽然 Fluent, Tecplot 等软件根据导入的数据,能显示目标温度图像,但呈现的都是三维空间的,而在实际应用中,如在红外制导中导引头根据辐射图像进行目标探测和识别,所需要的是二维辐射图像。因此,研究如何将三维空间下的温度数据转换成二维温度图像,进而转换成红外辐射图像,具有重要的军事意义和实际应用价值。本文就这个问题展开讨论,在对飞行器进行几何建模与网格划分后,通过建立控制方程计算模拟飞行器蒙皮温度,而后将单元面按深度由小到大排序后依次投影,生成飞行器各个角度的二维蒙皮温度分布图,最后利用温度分布数据计算辐射亮度并进行红外图像仿真。

2 红外辐射图像生成技术

自然界中一切物体时刻都会辐射红外线,红外辐射图像是利用物体自身各部分辐射的差异以及目标本身与背景之间的辐射差异获得图像的细节,它反映了目标表面温度分布状况,即把人眼不能直接看到目标的表面温度分布图像转变人眼可以看到的代表目标表面温度分布的图像。通常采用 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 两个波段的红外热辐射,这是由目标自身辐射和大气透红外性质所决定的^[12-14]。飞行器的红外辐射主要来自发动机排气,其次是机体蒙皮。发动机排气主要集中在 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 红外波段,而机体蒙皮在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段有较强的红外辐射^[15]。为了获取飞行器蒙皮红外辐射图像,必须首先对其进行几何建模与网格划分。

2.1 飞行器几何建模及网格划分

空中目标飞行器包含有大量不同层次的复杂结构,几何构型极为繁杂,需要根据具体需求经过一定的简化,将目标分为若干个区域,采用 CAD 技术或其他方法,建立目标的三维几何模型,然后利用 Fluent 商业软件对目几何模型进行三维网格划分,即建立三维有限元模型^[16]。此过程中,空间物体被离散成一系列的单元,单元由面形成,面又由棱线构成,

棱线则由点构成,全部的点、线、面和单元就构成了空间网格的总体。在具体划分网格时,根据数值计算的精度和所需要的计算资源,确定不同部位网格的疏密程度。针对飞行器蒙皮红外辐射计算,发动机极其周围部位划分比较细密网格,其他部分则较稀疏。本文采用商用 Fluent 软件,某直升机几何模型三维网格划分如图 1 所示。

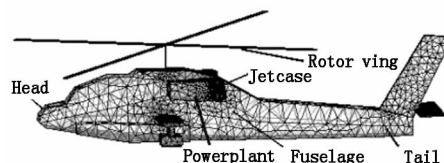


图1 飞行器三维几何模型网格划分

Fig.1 geometric model with grids of the aircraft

2.2 飞行器蒙皮温度场的计算

在计算飞行器等目标的温度场时,需要建立质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、组分输运方程和辐射传输方程五个控制方程,方程形式如下:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot [\vec{v}(\rho E + p)] = \nabla \cdot [k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j] \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_j) = -\nabla \cdot \vec{J}_j \quad (4)$$

$$\nabla \cdot [L(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}] + aL(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (5)$$

式中, ρ 为气体的密度; $\vec{v}$ 是速度矢量; p 是静压; τ 是应力张量; E 代表了总能量, 包括动能与内能; k_{eff} 是有效导热系数; T 表示温度; h_j 和 $\vec{J}_j$ 分别是组分 j 的焓和质量扩散流率; Y_j 是组分 j 的当地质量浓度; s 是路径长度; α 是吸收系数; σ 是 Stefan-Boltzmann 常数; $L(\vec{r}, \vec{s})$ 是辐射亮度。

本文模拟了直升机近地面悬停状态, 边界压力取大气压力, 固体壁面采用无滑移固壁边界条件, 发射率和气体吸收率分别设定为 0.8 和 0.1, 排气系统内部各部件设为流-固耦合面并假设排气管入口气体完全燃烧。速度和压力耦合采用 SIMPLEC 算法, 各参数的离散均采用二阶精度的迎风格式, 采用软件 Fluent 求解上述控制方程组, 得到某直升机的蒙皮温度场分布数据文件。某一区域数据形式如表 1 所示。其中, 如果 $n_3 = 3, n_2 = 5, n_1 = 1$, 则表明三角面元的三个顶点序号为 $(x_3, y_3, z_3), (x_5, y_5, z_5), (x_1, y_1, z_1)$, 其对应的温度值分别为 t_3, t_5, t_1 。

表1 数据形式
Tab.1 date format

	Coordinates and Temperature
X	$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, \dots$
Y	$y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, \dots$
Z	$z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, \dots$
Node Number r	$n_1 \quad n_2 \quad n_3$
	$n_4 \quad n_5 \quad n_6$
	$n_7 \quad n_8 \quad n_9$
	$\dots \quad \dots \quad \dots$
	$\dots \quad \dots \quad \dots$

建立三维有限元模型时,由于物体边界所包含的区域完全是实的,而边界面是非透明的,故在物体内部的单元面或线段是不可见的^[17]。对于外部边界面,相对于人的视点而言,一部分单元面是在物体的背面,这类面被物体自身遮挡,也是不可见的。为了正确呈现飞行器蒙皮温度图像及红外辐射图像,必须去掉不可见的单元面,保留可见单元面。

2.3 二维温度图实现

在得到包含温度信息的飞行器三维数据后,必须通过某种变换,将三维空间转换为二维平面才能实现蒙皮温度成像。几何物体的任意三维空间坐标点,可根据具体应用投影到任意平面上得到二维坐标,最简单的是投影到三个特殊坐标平面。以几何物体的任意三维空间坐标点 $A(x, y, z)$ 为例,将其投影到 XOY 、 YOZ 或 XOZ 二维平面上得到该点的二维坐标,即 $A'(x', y')$ 、 $A'(y', z')$ 或 $A'(x', z')$,生成前视、左视及俯视图。

对于几何物体而言,在生成二维视图的过程中还需要考虑的一个重要问题是前后遮挡问题。当几何物体向某平面投影时,如果某两点二维坐标值相同,必然其中一点被另一点遮挡。此时,可根据去除的第三维的坐标值的大小来判断它们之间的前后,从而选留可视的点。对于有限元而言,主要判断单元面的可视性。一个简单的判断标准为,被任一个单元面遮挡的部分最终也不可见,即只有不被任何单元面遮挡的部分才是可见的。

以几何建模与网格化后的飞行器投影到平面 XOY 生成前视图为例,实现三维空间到二维平面转换的步骤如下:

(1)单元面按深度排序。单元面的深度定义为组成有限元网格的多边形各顶点 z 坐标中最大的 z 的值, z 值越大,此单元面离视点越近。将所有的单

元面按其深度值由小到大排序。

(2)计算所有节点 x 坐标的最小值 $x_{\min}$,最大值 $x_{\max}$, y 坐标的最小值 $y_{\min}$,最大值 $y_{\max}$ 。

(3)定义初试温度矩阵 T 。设需要生成的飞行器的温度图像大小为 $M \times N$ 像素,初始温度矩阵 T 可定义为一个 $M \times N$ 大小矩阵,矩阵值为环境温度值 $T_{\text{Background}}$,即温度图像的背景温度值。

(4)划分投影网格。将三维飞行器图像在 XOY 平面上投影所在的矩形区划分成 $M \times N$ 的大小网格,则二维图像横坐标 x 与纵坐标 y 每个网格的间隔为:

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{M} \quad (6)$$

$$\Delta y = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{M} \quad (7)$$

此网格与温度矩阵一一对应。

(5)单元面节点坐标尺度变换。将当前深度最小的单元面投影到 XOY 平面,多边形单元面各顶点坐标进行尺度变换。设该单元面任一顶点为 $A(x, y, z)$,该节点的温度值为 t_1 ,其在 XOY 平面上的投影点为 $A(x, y)$,尺度变换公式为:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{\Delta x} \quad (8)$$

$$y' = \frac{y - y_{\min}}{\Delta y} \quad (9)$$

$A'(x', y')$ 即为变换后的图像坐标。根据公式(8)和式(9)得到该单元面所有节点尺度变换后的坐标。

(6)更新温度矩阵 T 的值。将 A 点尺度变换后的坐标 x', y' ,向上去整后得到 m, n ,则 m, n 为点 $A(x, y, z)$ 所对应的投影网格的横坐标与纵坐标,即对应温度矩阵 T 中元素的行号与列号,于是 $T(m, n) = t_1$,替代原来的元素值。单元面的所有顶点对应的 T 的元素值更新后,将所有包含单元面内部及边界的网格所对应的 T 的元素值更新为所有顶点温度的平均值。

(7)依次对深度排序后的三角面重复步骤(5)及(6),不断更新温度矩阵 T ,直到所有的单元面操作完成。

采用以上算法最终得到的温度矩阵 T 即为当前视角飞行器可见表面的温度值,对其进行规格化处理,建立温度值和灰度等级的关系式,使得图像的灰度值与温度值之间形成对应关系,生成飞行器

蒙皮温度分布图。

2.4 辐射亮度图实现^[18]

设物体的温度为 T , 则其全波段辐射力 E_{all} 计算公式为:

$$E_{\text{all}} = \alpha \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (10)$$

式中, α 为发射率; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 为常数。

波长从 $0 \sim \lambda$ 之间的辐射力 $E_{0 \sim \lambda}$ 为:

$$E_{0 \sim \lambda} = F(\lambda \cdot T) \cdot E_{\text{all}} \quad (11)$$

式中, $F(\lambda \cdot T)$ 的值可由相应的黑体辐射函数表查得。

波长从 λ_1 到 λ_2 之间的辐射力为:

$$E_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = E_{0 \sim \lambda_2} - E_{0 \sim \lambda_1} \quad (12)$$

假设所有物面皆符合朗伯余弦定律, 即所有表面皆为漫灰表面, 则 λ_1 到 λ_2 波段的辐射亮度为:

$$L_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = \frac{E_{\lambda_1 \sim \lambda_2}}{\pi} \quad (13)$$

为了直观显示飞行器红外波段辐射亮度分布, 将飞行器蒙皮温度图像转换为辐射亮度图, 需对辐射亮度进行规格化处理, 将辐射亮度值变换到灰度等级 $[0, 255]$ 区间内, 规格化公式为:

$$L' = \left\lceil \frac{L - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}} \times 255 \right\rceil \quad (14)$$

式中, $L_{\max}$ 和 $L_{\min}$ 分别为亮度最大值和最小值; L 和 L' 分别表示原始亮度和规格化的亮度; $\lceil \rceil$ 代表向上去整。

在对辐射亮度规格化处理后即建立辐射亮度与灰度等级关系, 使得图像的灰度值代表辐射亮度。

3 结果及分析

某悬停状态下的直升机初始状态在地心, 机头朝的是经度 0° , 纬度 0° 的方向。根据实际需要, 背景温度取为 200 K , 温度图像大小为 200×200 像素, 采用本文提出的算法, 生成该直升机各个角度的蒙皮温度分布图, 经纬度间隔为 5° 。几个典型角度温度分布图如图 2 ~ 图 5 所示。由于在二维投影之前已对所有的单元面按深度值由小到大排序, 因此先投影的单元面必然是离视点较远的, 后投影的离视点较近, 因此最终呈现的单元面为当前视角可见面。由生成的灰度图像可见, 飞行器蒙皮高温与低温部分对比较明显, 遮挡面处理效果较好, 温度较高部分主要集中在发动机喷管。

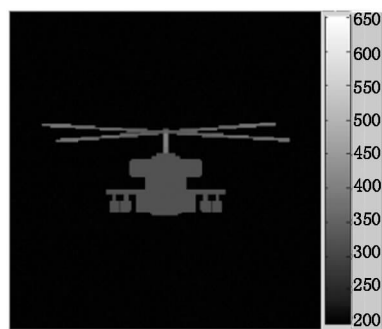


图2 经度 0° 纬度 0° 温度图

Fig. 2 temperature distribution at $0^\circ\text{E}, 0^\circ\text{N}$

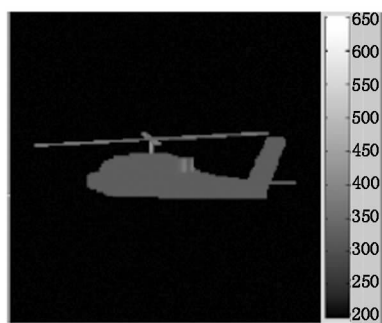


图3 东经 45° 纬度 0° 温度图

Fig. 3 temperature distribution at $45^\circ\text{E}, 0^\circ\text{N}$

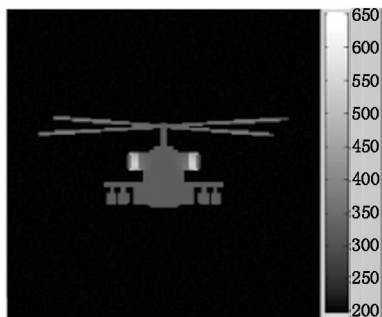


图4 东经 180° 纬度 0° 温度图

Fig. 4 temperature distribution at $180^\circ\text{E}, 0^\circ\text{N}$

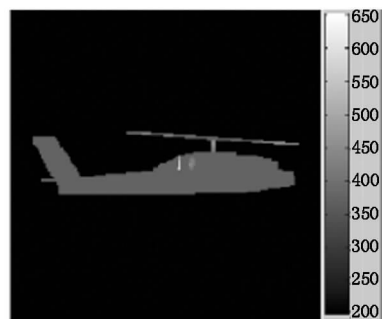


图5 西经 90° 纬度 0° 温度图

Fig. 5 temperature distribution at $90^\circ\text{W}, 0^\circ\text{N}$

由式(10) ~ 式(13) 计算 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段飞行器蒙皮辐射亮度并进行成像, 图 2 ~ 图 5 温度图对应的红外辐射图像如图 6 ~ 图 9 所示。由飞行器几个典型方向的蒙皮红外辐射图像, 可以清楚的观察到飞行器红外辐射高能量主要集中在机身中段, 发动机舱辐射能量最高, 这些特征与对应的温度图像分

布特征相一致。

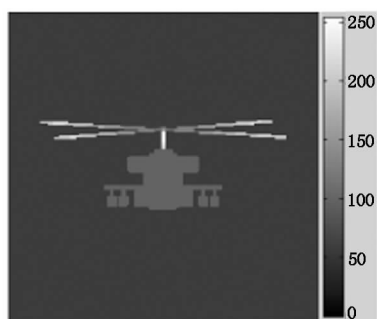


图6 经度 0° 纬度 0° $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 红外辐射图

Fig. 6 infrared image at $0^{\circ}\text{E}, 0^{\circ}\text{N}$ ($8 \sim 14 \mu\text{m}$)

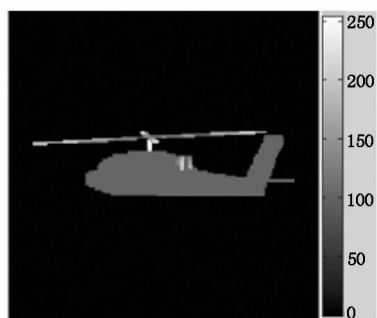


图7 东经 45° 纬度 0° $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 红外辐射图

Fig. 7 infrared image at $45^{\circ}\text{E}, 0^{\circ}\text{N}$ ($8 \sim 14 \mu\text{m}$)



图8 东经 180° 纬度 0° $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 红外辐射图

Fig. 8 infrared image at $180^{\circ}\text{E}, 0^{\circ}\text{N}$ ($8 \sim 14 \mu\text{m}$)

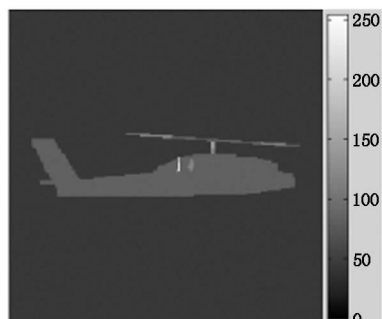


图9 西经 90° 纬度 0° $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 红外辐射图

Fig. 9 infrared image at $90^{\circ}\text{W}, 0^{\circ}\text{N}$ ($8 \sim 14 \mu\text{m}$)

4 结论

飞行器红外特性研究对许多工程问题具有重要意义。本文针对三维有限元飞行器模型提出的实现飞行器蒙皮红外辐射图像生成算法,适用于任意有

限元网格模型,如坦克、导弹等军事目标表面红外热成像。有限元网格划分越密,红外图像素越高,计算精确度就越高,误差也越小。该算法具有效率高和对内存要求少,适用性广等特点,有效且易于实现,为研究飞行器蒙皮红外辐射分布提供了一种有效的手段。

参考文献:

- [1] Wang Jiangan, Xiao Weian. Analysis of infrared radiation feature of targets based on double bands [J]. Laser & Infrared, 2001, 31(6): 351 - 353. (in Chinese)
王江安,肖伟岸. 基于双波段的目标红外辐射特征分析[J]. 激光与红外, 2001, 31(6): 351 - 353.
- [2] He Li. Infraed thermal imaging technology towards the new century [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2002, 39(12): 48 - 51. (in Chinese)
何丽. 走向新世纪的红外热成像技术[J]. 激光与光电子学进展, 2002, 39(12): 48 - 51.
- [3] Mahulikar S P, Sane S K, Gaitonde U N, et al. Numerical studies of infrared signature levels of complete aircraft [J]. Aeronautical Journal (S0001 - 9240), 2001, 105(1046): 185 - 192.
- [4] Pan Leyi, Zheng Lian, Wang Keyong. Infrared image generating of the target in the sky [J]. Infrared Technology, 2000, 22(4): 4 - 9. (in Chinese)
潘乐义,郑链,王克勇. 空中目标的红外图像生成[J]. 红外技术, 2000, 22(4): 4 - 9.
- [5] Zheng Kunpeng, Bi Xiaoping, Huang Xiaohui, et al. Infrared radiation calculation and thermal image simulation of fume released from the tank [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(6): 613 - 616. (in Chinese)
郑坤鹏,毕小平,黄小辉,等. 坦克排烟的红外辐射计算及热图像仿真[J]. 激光与红外, 2010, 40(6): 613 - 616.
- [6] Xia Xinlin, Ai Qing, Ren Depeng. Analysis on the transient temperature-fields for infrared radlation of aircraft skin [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2007, 26(3): 174 - 177. (in Chinese)
夏新林,艾青,任德鹏. 飞机蒙皮红外辐射的瞬态温度场分析[J]. 红外与毫米波学报, 2007, 26(3): 174 - 177.
- [7] Zeng Zhaoyang, Chen Hongye, Chen Kuifeng. The characteristic of electric heating film and its application in military [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(9): 893 - 896. (in Chinese)
曾朝阳,陈宏烨,陈奎峰. 电热膜红外图像生成技术研究[J]. 激光与红外, 2008, 38(9): 893 - 896.

- [8] ShanYong, Zhang Jingzhou, LI Ligu. Numerical calculation and experimental verification for the infrared radiation characteristics of helicopter infrared radiation suppressor [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(2):96-100. (in Chinese)
单勇, 张靖周, 李立国. 直升机红外抑制器红外辐射特性的数值研究和实验验证[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(2):95-100.
- [9] Pan Chengxiong, Zhang Jingzhou. Modeling and analysis of helicopter skin temperature distributions [J]. Acta Aeronautica et Astronautica, 2010, 27(7):72-78. (in Chinese)
潘丞雄, 张靖周, 单勇. 直升机机身表面温度场建模与数值分析[J]. 航空学报, 2010, 27(7):72-78.
- [10] Soenksen K P. Measurement of projectile surface temperature by means of its infrared radiation; a preliminary study [R]. AD-A264053, 1993.
- [11] Yang Wei, Zhang Jianqi, Liu Jinsong. Theoretical calculations of infrared radiation of the projectile in flight [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(1):42-45. (in Chinese)
杨威, 张建奇, 刘劲松. 飞行弹丸红外辐射特性的理论计算[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(1):42-45.
- [12] Mmhlukar S P, Sonawane H R, Rao. Infrared signature of aerospace vehicles [J]. Progress in Aerospace Sciendes, 2007, 43(7-8):218-245.
- [13] Du Shenghua, Gong Jiaming, Xia Xinlin. Infraed characteristics of a spacecraft [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(7):432-436. (in Chinese)
杜胜华, 龚加明, 夏新林. 某飞行器红外辐射特性研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(7):432-436.
- [14] Michael F. Modest backward monte carlo simulations in radiative heat transfer [J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125(57).
- [15] Lü Jianwei, Wang Qiang. Effect of temperature and emissivity of aircraft skin on infrated radiation characteristics [J]. Opto-Electionic Engineering, 2009, 36(2):49-54. (in Chinese)
吕建伟, 王强. 飞行器表面温度和发射率分布对红外辐射特征的影响[J]. 光电工程, 2009, 36(2):49-54.
- [16] An Xiaowei, Cui Liju. A fast computer graphics to FE model and A hidden line algorithm [J]. Jouranal of Shenyang Institute of Technology, 2000, 19(1):12-16. (in Chinese)
安晓卫, 崔丽菊. 有限元图形的快速显示和消隐处理[J]. 沈阳工业学院学报, 2000, 19(1):12-16.
- [17] Xia Xiaoling. Hidden surface removal for 3-D object [J]. Journal of Dong Hua University, 2002, 28(2):137-142. (in Chinese)
夏小玲. 三维消隐算法研究[J]. 东华大学学报:自然科学版, 2002, 28(2):137-142.
- [18] Zhang Jianqi, Fang Xiaoping. Infrared physics [M]. Xidian University Press, 2004:50-200.
张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004:50-200.