

无人机红外辐射建模与图像仿真

刘连伟,杨淼淼,邹前进,姚梅,王敏,许振领

(洛阳电子装备试验中心,河南 洛阳 471003)

摘要: 无人机红外辐射特性建模及图像仿真计算具有重要意义。利用 CFD 软件计算无人机温度分布,建立了蒙皮稳态温度数据库和满足精度需求的温度插值算法,实现了无人机蒙皮温度的插值计算;提出网格编号投影思想,改进基于深度缓存的正交投影方法,建立了适于红外图像的二维投影算法;基于无人机辐射、大气传输和探测器响应的光谱特性,采用光谱积分方式计算无人机光谱及波段红外特性和图像序列,建立了无人机红外辐射计算模型。对无人机红外辐射特性和模型计算速度进行了分析,并与某型无人机实测数据进行了比对,结果表明:模型计算误差小于 20%,可用于仿真实验测试与分析。

关键词: 无人机; 红外辐射; 图像仿真

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0628002

UAV infrared radiation modeling and image simulation

Liu Lianwei, Yang Miaomiao, Zou Qianjin, Yao Mei, Wang Min, Xu Zhenling

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

Abstract: It's significant to research the infrared radiation model and simulate infrared image of unmanned aerial vehicle (UAV). The interpolation calculation of skin temperature was realized, based on the database of steady-state temperature distribution of the UAV which was calculated in use of CFD. Due to the new method of grid number projection, the orthogonal projection of depth buffer was improved and a two-dimensional projection algorithm for infrared image was implemented. The IR model of UAV was finally built to calculate spectral and band of infrared image, in which atmospheric transmission and detector response were both considered. The UAV infrared characteristics of the whole trajectory and calculation speed of this model were analyzed. The simulation value was compared with the measured flight experiment data, the results show that the relative error is less than 20% and can be used for experiment test and analysis.

Key words: UAV; infrared radiation; image simulation

收稿日期:2016-10-10; 修订日期:2016-11-20

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(11504420)

作者简介:刘连伟(1985-),男,工程师,主要从事红外对抗仿真方面的研究。Email:yyoohh@126.com

0 引言

相比于普通战机,无人机飞行速度慢,或截面积较小,或展弦比大,整体辐射强度偏弱且辐射能量分布于多个探测器像元,导致红外成像设备对无人机侦察预警存在困难。因此,开展无人机红外辐射特性研究,分析无人机红外成像特性,对改进侦察探测算法,提高侦察探测性能具有重要的意义。徐顶国等研究了典型飞翼布局无人机在长波波段的红外辐射强度分布^[1-2],李晋岭、汪卫华等综述了无人机红外辐射计算方法,研究了螺旋桨无人机三维流场分布^[3-4],孙占久等计算分析了不同参数对无人机红外辐射的影响^[5],贾庆莲建立了不同观测角下无人机红外辐射计算公式^[6]。

文中以某典型大展弦比涡桨无人机为研究对象,以地对空方向迎头探测为主要侦察方向,分析了其红外辐射主要来源,采用 CFD 软件和自主开发红外辐射计算软件相结合的方式,建立了无人机红外辐射计算模型。首先利用 Fluent 软件计算无人机蒙皮温度分布,建立典型工况下蒙皮温度数据库,分析建立无人机温度插值关系,实现了无人机蒙皮温度插值计算;其次,在传统投影方法进行改进,提出以目标网格编号为投影值的二维投影方法,建立了符合红外图像投影物理原理的投影算法,尤适于同时要求多个谱线/谱段成像的图像计算,并对目标边缘成像进行了修正,提高了计算速度和计算精度;最后,逐航迹点调用 Modtran 4.0 计算大气辐射和天空背景辐射亮度,计算无人机表观红外辐射特性;建立了无人机红外辐射计算模型,实现了无人机波段和光谱红外辐射特性的计算及全航路红外数字图像序列的计算。

利用模型计算无人机红外辐射特性,通过比对实验数据,初步分析了无人机红外辐射模型精度,结果表明:模型精度优于 20%,可用于仿真实验及测试分析;对无人机运动过程中红外辐射特性进行分析,计算了典型条件下无人机表观红外辐射亮度、强度和无人机与天空背景辐射亮度差,为红外成像设备对无人机的侦察探测提供支持;对影响模型计算速度的因素进行了分析,并进行了计算速度测试,测试结果表明:影响计算速度的因素主要为

模型网格数量、图像规模和 Modtran 调用时间。

1 温度模型

无人机红外辐射的主要来源包括机身蒙皮辐射、尾喷口辐射和尾喷气流辐射。对文中研究对象而言,由于无人机涡桨发动机尾喷口位于机身尾部上方,且发动机尾喷口正对螺旋桨,尾喷气流射出后即被螺旋桨打散^[4],尾焰温度迅速降至环境温度,尾喷气流辐射核心区很短,在地对空探测方向,尾喷气流辐射基本被机身及尾翼遮挡不可见,因此不对尾喷气流建模;对尾喷口和螺旋桨的高温辐射,采用实测数据反演方式建立其温度模型。

以无人机物理原型建立其几何模型,对表面微小结构平滑处理以便于流场计算,将几何模型导入 Gambit 软件进行网格划分,在流场计算时对网格结构调整以适应流场特性,无人机蒙皮网格平均尺度约 5 mm,对微小结构处网格细化以提高网格质量,对机身机翼连接处等尖锐面以虚拟面方法处理提高网格平滑性。无人机几何模型如图 1 所示,蒙皮网格如图 2 所示。

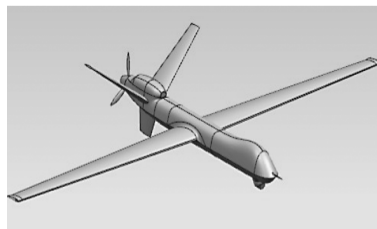


图 1 无人机几何模型

Fig.1 Geometric model of UAV

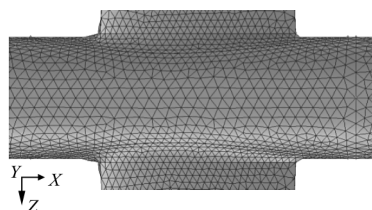


图 2 无人机翼身连接处网格

Fig.2 Wing fuselage connection mesh of UAV

由于无人机飞行速度慢,40 m×40 m×20 m 矩形计算域可满足计算要求。计算域边界条件设定为压力远场条件,即在该边界上流体运动特性与无穷远处流场运动参数一致,无人机壁面边界条件设定为耦合壁面,即在该边界上耦合计算对流、辐射和传导换热。利用 Fluent 计算无人机绕流流场特性及

无人机蒙皮温度分布,湍流模型采用一方程的 S-A 模型,离散方程采用二阶迎风格式。

以无人机速度范围 0.25~0.41 Ma、地面温度范围 220~300 K 为工况条件范围,计算稳态条件下无人机蒙皮温度分布,建立无人机温度数据库。根据稳态条件下蒙皮温度插值计算方法^[7],插值计算无人机蒙皮温度。

采用插值算法计算典型条件下无人机蒙皮温度,并与同条件下 Fluent 计算结果对比,各网格点温度插值误差及误差分布如图 3 和表 1 所示。

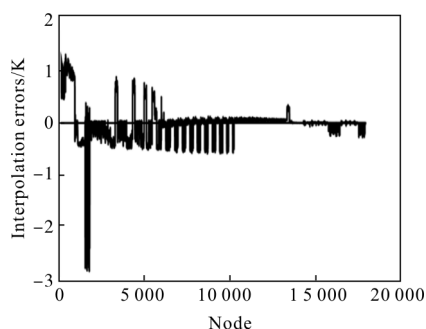


图 3 各网格点温度插值误差

Fig.3 Mesh nodes temperature interpolation error

表 1 温度插值误差区间比例

Tab.1 Interval ratio of temperature interpolation error

Interpolation errors	$ \Delta T \geq 2 \text{ K}$	$0.5 \text{ K} \leq \Delta T < 2 \text{ K}$
Nodes	144	1 819
Ratio	0.80%	10.12%

由图 3 和表 1 可知,蒙皮温度插值误差的最大值为 -2.85 K,插值误差绝对值的平均值为 0.24 K,插值误差绝对值不小于 0.5 K 的网格点数为 1 963,占网格总数的 10.92%。计算温度插值误差对无人机蒙皮辐射的影响,在长波段对蒙皮自身红外辐射亮度计算引起的误差平均值为 -0.02 W/(m²·sr),相对误差为 2.60%,若考虑大气衰减和大气路径辐射亮度的影响,温度插值误差对蒙皮表面红外辐射的影响更小。因此,蒙皮温度插值计算方法可满足无人机红外模型计算精度要求。

插值计算设定条件下蒙皮温度分布结果如图 4 所示。由于无人机飞行速度慢,气动加热引起的温升小,且内部电子器件温度不高,内热源效应不明

显,因此,蒙皮表面温差小于 4 K,机头前端、机翼前缘由于为迎风驻点部位,气动加热效应相对明显,温度偏高,机身中段、机翼侧面由于气流横掠运动,温度相对略低;螺旋桨和尾喷口部位由于尾喷气流的高温影响,温度明显高于蒙皮,可达 350 K。

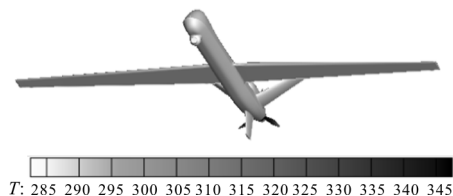


图 4 典型条件无人机蒙皮温度插值

Fig.4 Temperature interpolation of UAV skin in typical condition

2 投影模型

目标红外图像的生成多基于 Vega、OpenGL 等商业软件以目标红外辐射亮度为投影值进行投影计算^[8-9],其优点在于计算速度快^[10],但 OpenGL 等软件的投影算法多基于可见光,生成红外图像需先对目标辐射亮度进行转换且对目标边缘像素计算容易引起误差,同时,生成目标光谱辐射图像时需逐光谱点投影,计算效率低。文中首先对无人机进行网格点编号,以此编号为投影值,在投影基本算法的基础上改进,修正目标边缘成像,编程实现了适用于红外图像的投影算法。该方法可由网格编号追溯网格温度、反射辐射及表面属性等计算参数,物理意义明确,扩展性强,尤其在生成目标光谱辐射图像时,仅需进行一次投影计算,即可根据二维图像中网格编号以查找数据库方式获取目标网格点对应的温度、面元法向、反射光谱辐射、光谱发射率等参数,快速计算生成多光谱点的光谱辐射图像。

图 5 为以网格编号为投影值的投影示意图。以

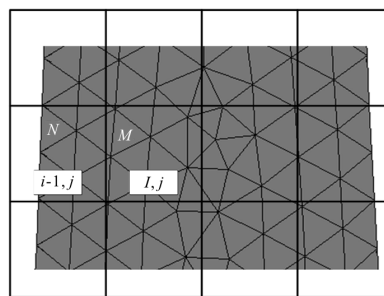


图 5 网格编号投影示意图

Fig.5 Schematic diagram of projection in grid numbering

目标全填充的探测器像元 (i, j) 为例,包括编号为 M 的网格在内的多个网格投影落入该像元,投影图像不记录辐射亮度或灰度,而是记录落入该像元的网格编号及对应的落入面积,计算像元辐射亮度时,由网格编号追溯获取各网格对应温度和发射率计算其本征辐射,追溯获取其面元法向、反射率和探测方向计算其反射辐射,之后计算大气辐射传输特性获得该网格表观辐射,经该像元内多个网格的落入面积加权平均计算像元辐射亮度。以目标半填充的探测器像元 $(i-1, j)$ 为例,包括编号为 N 的网格在内的多个网格投影落入该像元内,同时又有背景辐射落入该像元,投影图像除记录目标网格编号及对应落入面积外,记录背景编

号及落入面积。计算像元辐射亮度时,仅需将背景作为特定网格处理,其余与目标全填充像元辐射亮度计算方法相同。

文中无人机红外辐射计算模型设定探测视线始终指向无人机中心,并根据无人机成像大小、无人机与探测器距离实时调整每帧图像分辨率,保证目标基本充满视场范围以提高图像分辨率。投影算法基本思路分为如下 3 步:

(1) 将无人机网格坐标经三次坐标变换转换由机体坐标系转换至探测坐标系:由机体坐标系转换至地面坐标系,由地面坐标系转换至含无人机姿态的运动坐标系,由运动坐标系转换至探测坐标系,转换矩阵基本形式为:

$$Tran = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & -\sin \theta \cos \varphi \cos \gamma + \sin \varphi \cos \gamma & \sin \theta \cos \varphi \sin \gamma + \sin \varphi \cos \gamma \\ \sin \theta & \cos \theta \cos \gamma & -\cos \theta \sin \gamma \\ -\cos \theta \sin \varphi & \sin \varphi \sin \theta \cos \gamma + \cos \varphi \sin \gamma & -\sin \theta \sin \varphi \sin \gamma + \cos \varphi \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: θ 为俯仰角; φ 为偏航角; γ 为滚转角,对应以上三步转换,角度定义分别为机体坐标系与地面坐标系夹角、无人机运动姿态角和探测视线角。无人机网格坐标转换算法为:

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = Tran_3 \cdot Tran_2 \cdot Tran_1 \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: (X, Y, Z) 为探测坐标系下无人机网格坐标; (x, y, z) 为机体坐标系下无人机网格坐标; $Tran_3$ 、 $Tran_2$ 、 $Tran_1$ 分别为 3 个坐标转换矩阵。

(2) 计算图像分辨率,其计算公式为:

$$D_i = (1+C) \frac{\max\{\Delta X, \Delta Y\}}{M} \quad (3)$$

式中: C 为图像留白比例,一般取 0.1~0.2; M 为像素数; $\max\{\Delta X, \Delta Y\}$ 为目标二维投影在 x, y 方向的最大尺度。

(3) 将成像规模扩大 n 倍以提高计算精度,即图像规模由 $M \times M$ 扩大至 $nM \times nM$,按深度缓存算法判断面元遮挡关系,对目标像素赋目标编号,对背景像素赋背景编号,完成二维图像生成。扩大图像将在无人机红外辐射计算完成后缩减至设定规模。

3 辐射模型

无人机本征辐射、路径及背景辐射、大气透过率以及探测器响应都具有光谱特性,文中以光谱积分方法计算无人机波段辐射,提高了计算精度。无人机光谱及波段辐射计算公式为:

$$L = \int_{\lambda} A(\lambda) \cdot (\tau(\lambda) \varepsilon(\lambda) L_b(\lambda, T) + L_p(\lambda)) \quad (4)$$

式中: $A(\lambda)$ 为探测器归一化光谱响应率; $\tau(\lambda)$ 为大气光谱透过率; $\varepsilon(\lambda) L_b(\lambda, T)$ 为无人机本征光谱辐射亮度, $\varepsilon(\lambda)$ 为无人机蒙皮光谱发射率, $L_b(\lambda, T)$ 由普朗克公式计算; $L_p(\lambda)$ 为大气光谱路径辐射亮度。

无人机自身辐射根据普朗克公式计算,大气透过率、大气路径辐射及天空背景辐射通过跨平台调用 Modtran 4.0 计算。模型中逐航迹点生成 Modtran 4.0 的输入文件 tp5 后运行 Modtran 主程序,之后读取输出文件 tp7,完成当前航迹点大气辐射传输计算。

4 计算分析

4.1 模型精度分析

利用 ImageIR 8300 中波热像仪和 Cedip Jade III

长波热像仪对某大型涡桨无人机红外辐射特性进行了动态测量。无人机以典型航高、航速飞行,测量数据取无人机长时间稳定飞行后的稳态结果。测量前、后利用 SR-800 面源黑体对热像仪进行标定,测量过程中实时监测环境气象数据。

分析测量图像发现:(1)在地对空方向迎头探测时,无人机尾喷口和尾喷气流辐射由于机身遮挡不可探测,螺旋桨由于其面积小在测量图像中被背景淹没,辐射不明显,无人机红外辐射主要来自于蒙皮的红外辐射,验证了模型简化的合理性;(2)无人机蒙皮温度分布与仿真结果分布一致,说明了流场计算结果的合理性。

利用模型计算无人机红外辐射特性,与飞行测量数据比对,计算条件与实验条件一致。经对比:在中波红外波段,计算结果为 $0.13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,计算误差小于 18%;在长波红外波段,计算结果为 $2.98 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,计算误差小于 20%。在中波波段和长波波段,计算结果均大于实测数据,初步分析原因在于模型未考虑热像仪光学系统弥散影响,会导致计算结果偏大。

4.2 无人机红外特性分析

利用模型计算典型条件下无人机迎头逼近运动过程中表观红外辐射亮度、辐射强度和无人机与天空背景辐射亮度差,分析其变化特性。计算条件设定无人机航高 5 km,航速 0.33 Ma ,地面温度 $15 \text{ }^\circ\text{C}$,湿度 40%,能见度 10 km,计算波段选取中波波段 $3\sim 5 \text{ }\mu\text{m}$ 和长波波段 $8\sim 12 \text{ }\mu\text{m}$,典型条件下计算图像如图 6 所示,计算结果如图 7~9 所示。



图 6 无人机长波红外成像图像

Fig.6 UAV LWIR image

图 6 为无人机迎头探测的典型成像图,从中可以看出:由于无人机飞行速度慢,蒙皮气动加热效应并不明显,红外辐射亮度相差不大,螺旋桨由于尾喷气流影响,辐射亮度明显强于蒙皮,由于探测角度关系,高温的尾喷口被机身遮挡。

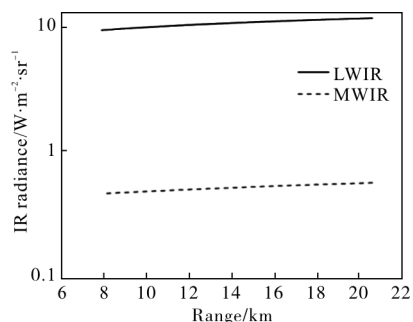


图 7 中长波无人机表观红外辐射亮度

Fig.7 UAV IR apparent radiance of medium-long wave

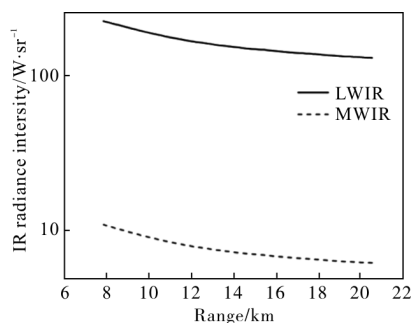


图 8 中长波无人机表观红外辐射强度

Fig.8 UAV apparent IR radiation intensity of medium-long wave

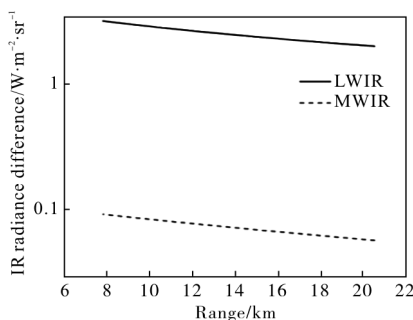


图 9 中长波无人机与天空背景红外辐射亮度差

Fig.9 IR radiance difference between UAV and the sky of medium-long wave

从图 7 中可以看出:无人机表观红外辐射亮度变化范围为长波波段 $11.82\sim 9.47 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,中波波段 $0.57\sim 0.47 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$,随无人机距离逼近了表观辐射亮度越小,分析其原因在于无人机航高高、航速低,自身辐射亮度低,表观辐射中大气路径辐射占很大比例,随距离逼近,大气路径辐射迅速减小,引起无人机表观红外辐射亮度随距离减小而减小。

图 8 显示无人机表观红外辐射强度变化范围为长波波段 $129.45\sim 222.74 \text{ W}/\text{sr}$,中波波段 $6.24\sim 10.98 \text{ W}/\text{sr}$,随无人机距离逼近,表观红外辐射强度

越大,原因在于尽管随距离减小,无人机表观红外辐射亮度减小,但投影面积逐渐增大,造成表观红外辐射强度随距离减小而增大。

图 9 显示无人机与天空背景辐射亮度差变化范围为长波波段 1.94~3.06 W/(m²·sr), 中波波段 0.06~0.09 W/(m²·sr), 变化趋势为随无人机距离逼近亮度差越大,原因在于尽管随距离减小,无人机表观红外辐射亮度减小,但距离越近,无人机相对探测器仰角越大,天空背景辐射亮度越小,使得无人机与天空背景辐射亮度差随距离减小而增大。

4.3 模型计算速度分析

仿真实验准备周期长,计算量大,提高计算速度,缩短准备时间是迫切的需要,同时,研究分析图像仿真的实时性,也具有重要的意义。文中在无人机红外辐射计算模型的基础上,对影响计算速度的因素(模型网格数量、成像图像规模)进行初步的测试分析,为红外仿真实验实时仿真设计提供了参考。

测试用机为普通计算机,CPU 为 Corei7, 主频 3.6GHz, 内存 8G,操作系统为 64 位 Windows7,编程语言及运行平台为 Matlab2013b。计算速度测试结果如表 2 所示

表 2 模型各模块计算耗时

Tab.2 Computing time of each module for model

Nodes	Elements	Image size	Temperature interpolation time/s	Projection time/s	Radiance compute time/s	Other time/s	Total time/s
17 981	35 958	500×500	5.6	114.3	6.9	0.3	127.1
1 351	2 698	500×500	0.4	9.9	6.9	0.3	17.5
1 351	2 698	200×200	0.4	1.7	6.7	0.3	9.1

由以上数据分析可知:(1)模型计算速度与模型网格数量(网格点数和网格面元数)及成像图像规模有关,当网格数量与图像规模较大时,计算耗时主要为图像投影计算模块,当蒙皮网格数和图像规模较小时,计算耗时主要为辐射计算模块,辐射计算模块耗时主要为 Modtran 4.0 调用,调用耗时为 6.6 s;(2) 温度插值计算速度主要与网格点数有关,图像投影计算速度与网格面元数和图像规模相关,网格点数、网格面元数和图像规模缩减比率与引起对应计算速度的提升比率的比例约为 1:1,可见该部分计算速度与对应程序计算的循环次数有关。

为提高流场及温度场计算精度,往往把模型网格尽量划分细密,但网格数量过大影响成像速度。为提高计算速度,一方面可采用网格插值的方法:即在计算流场和温度场时采用细密网格模型,计算完成后进行网格疏化,从细密网格插值至粗化网格,可在保证温度计算精度的同时提高成像速度;另一方面,Modtran 调用耗时较长,可采用预先计算数据库实时插值的方法提高辐射计算速度,此外,图像投影算法没有进行优化,有较大速度提升空间;同时,采用多线程方式也可有效提高目标稳态辐射的计算速度,满足一定的图像实时性仿真要求。

5 结 论

文中利用 CFD 软件,建立了无人机几何模型,划分了流场网格,计算了稳态条件下无人机蒙皮温度数据库,建立了插值算法实现无人机蒙皮温度分布计算;以目标网格编号为投影值改进投影算法,编程实现了适宜于红外图像的投影算法,实现了无人机红外辐射的二维投影计算;调用 Modtran 4.0 计算大气辐射传输特性,以光谱积分方式计算无人机红外辐射,建立了无人机红外辐射计算模型。分析了无人机红外辐射特性及模型计算速度,结果表明:

(1) 经与外场飞行实验数据对比,在中波波段,模型计算误差小于 18%,在长波波段,模型计算误差小于 20%;

(2) 典型条件下无人机迎头逼近探测设备时,由于无人机自身辐射较弱,大气路径辐射占较大比例,在中、长波波段其表观辐射亮度均随距离减小而减小,但由于投影面积和探测仰角的逐渐增大,无人机表观辐射强度以及无人机与天空背景辐射亮度差随距离减小而增大,利于探测器发现提取目标;

(3) 模型计算速度分析结果表明计算耗时:主

要为温度插值、投影计算和辐射计算模块,当目标网格数量及图像规模较大时,投影计算为主要耗时模块,当减少网格数及图像规模时,调用 Modtran 变为主要耗时模块,典型应用时模型单帧图像计算时间小于 10 s。

参考文献:

- [1] Xu Dingguo, Sang Jianhua, Luo Mingdong. Study on the infrared radiation characteristics of UAVS' skin [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 880–884. (in Chinese)
徐顶国, 桑建华, 罗明东. 无人机蒙皮红外辐射特征研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 880–884.
- [2] Xu Dingguo, Sang Jianhua, Luo Mingdong. Research on application of UAVS' infrared stealth technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (12): 3155–3159. (in Chinese)
徐顶国, 桑建华, 罗明东. 红外隐身技术在无人机上的应用研究 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3155–3159.
- [3] Li Jinling, Wang Weihua. Review of infrared radiation characteristics numerical simulation study on Unmanned Aerial Vehicle [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2010, 30 (8): 21–24. (in Chinese)
李晋岭, 汪卫华. 无人机红外辐射特性数值模拟研究综述 [J]. 舰船电子工程, 2010, 30(8): 21–24.
- [4] Wang Weihua, Li Jinling, Wang Chong, et al. Three dimension flow field numerical simulation for airscrew unmanned aircraft vehicle [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34 (5): 292–296. (in Chinese)
汪卫华, 李晋岭, 王充, 等. 螺旋桨无人机三维流场数值模拟 [J]. 红外技术, 2012, 34(5): 292–296.
- [5] Sun Zhanjiu, Nie Hong, Huang Wei. Calculation and analysis on infrared radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1037–1046. (in Chinese)
孙占久, 聂宏, 黄伟. 无人机红外辐射特性计算与分析 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1037–1046.
- [6] Jia Qinglian. Numerical calculation of IR radiation for Unmanned Aerial Vehicle [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51: 071201. (in Chinese)
贾庆莲. 无人机红外辐射的数值计算 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51: 071201.
- [7] Liu Lianwei, Yang Miaomiao, Fan Hongjie, et al. Numerical computation and analysis on the temperature field of antitank missile skin [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(7): 430–435. (in Chinese)
刘连伟, 杨淼淼, 樊宏杰, 等. 导弹蒙皮温度场的数值计算与分析 [J]. 红外技术, 2013, 35(7): 430–435.
- [8] Wang Lu. Study on infrared simulation based on OpenFlight model [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014. (in Chinese)
王露. 基于 OpenFlight 模型的红外仿真技术研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- [9] Kang Changqing, Guo Lihong, Chen Lingjuan, et al. Simulation of infrared image using vega sensors [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 32(2): 242–244. (in Chinese)
康长青, 郭立红, 陈灵娟, 等. 使用 Vega 传感器模块进行红外图像仿真 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2009, 32(2): 242–244.
- [10] Wang Bo. Research on IR imaging real-time simulation method based on OGER [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
王波. 基于 OGER 的红外成像实时仿真方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.