

Imaging Simulation under the Background of Strong Infrared Thermal Radiation

Yingnan Si, Ye Li, Dan Yue*

Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin
Email: *danzik3@126.com

Received: May 8th, 2019; accepted: May 21st, 2019; published: May 28th, 2019

Abstract

Due to the friction of the atmosphere and the convection heat transfer effect of the surrounding flow field, the temperature of the fairing increases, and the aerodynamic thermal radiation effect generated by it is received by the infrared sensor, forming radiation interference, which increases the background brightness and reduces the system's ability to detect and track the target. Generally, it is obtained by MATLAB software modeling and simulation method of infrared imaging sensor based on image processing method, ray tracing method and other common methods. In the presence of this kind of complex modeling and simulation, this paper will propose a new simple and faster system infrared simulation method, namely the software TracePro was used to model and simulate the fairing of temperature and infrared radiation, and the experimental results were compared with previous analysis. Finally, the simulation data with high consistency were obtained, showing that this method is more quick and easy to achieve the simulation of infrared radiation.

Keywords

TracePro Infrared Radiation Simulation

强红外热辐射背景下的成像仿真

司英男, 李野, 岳丹*

长春理工大学, 吉林 长春
Email: *danzik3@126.com

收稿日期: 2019年5月8日; 录用日期: 2019年5月21日; 发布日期: 2019年5月28日

*通讯作者。

摘要

由于大气的摩擦和周围流场的对流换热作用,整流罩的温度升高,其产生的气动热辐射效应被红外传感器所接收,形成辐射干扰,使得背景亮度增加,降低了系统对目标的检测和跟踪能力。一般都是用MATLAB软件基于图像处理方法和光线追迹法等常用的红外成像传感器建模仿真方法得到的。针对这种复杂建模仿真的情况,本文将提出一个更快速、简便的新系统红外仿真方法,即利用TracePro软件对整流罩温度场和红外辐射进行建模仿真,将实验结果与前人进行对比分析,最终得到了与前人一致性非常高的仿真数据,说明此方法可以更快速简便地实现红外辐射仿真。

关键词

TracePro红外辐射仿真

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高速飞行器的整流罩受气动热效应影响对成像系统产生辐射干扰,使得红外图像的背景噪声增加、降低图像信噪比,光学成像探测系统成像质量下降。所以非常有必要去除由整流罩引起的红外热噪声,而除去噪声的首要条件是对整流罩产生的温度场进行正确分析。目前绝大多数温度场建模以及红外成像系统仿真都是基于MATLAB软件来实现的,可以保证实验数据准确性,同时不可避免计算步骤复杂,计算时间长等问题。本文将提出一个新的更快速、简便的实现方式,首先对整流罩气动热辐射效应的温度场分布进行建模,实现整流罩的气动热辐射效应的仿真,然后建立整流罩红外辐射模型。最后进行整流罩热噪声对成像质量影响的建模及仿真。

2. 整流罩温度场建模

飞行器整流罩受气动热效应影响产生红外辐射,导致红外图像噪声增加。当红外噪声从整流罩透射到光学系统,再在光学系统中经过反射,呈现在探测器上,增加图像噪声。假设整个系统无任何辐射吸收情况,建立整流罩气动热辐射仿真流程见图1。

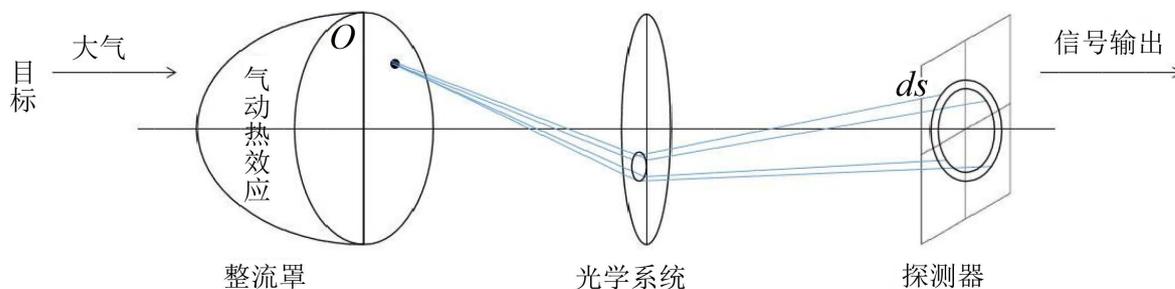


Figure 1. Influence of aerodynamic thermal radiation from fairing on imaging

图1. 整流罩气动热辐射对成像的影响

2.1. 整流罩的温度分布

高速飞行器在大气层内以声速或超声速飞行时，整流罩的气动热效应非常严重，整个整流罩表面气动热分布是不均匀的，整流罩的温度分布也是不均匀的，与整流罩的换热边界条件相关，且随着飞行时间而发生变化。因此，在计算整流罩热辐射效应时，不能将其近似成一个温度分布均匀的漫射灰体。为精确描述头罩温度场的分布情况，可将光学头罩看成具有不同温度的单元组成，采用不规则网格对头罩温度场进行划分[1]。

利用 MATLAB 软件模拟上述飞行器在高速飞行状态下，光学头罩受气动热效应的温度场分布。首先采用有限差分法从空间和角度对整流罩进行划分。然后利用有限差分方法、初始条件和表面的边界条件建立温度场控制方程，并联立求解，见图 2。

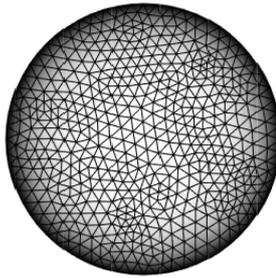


Figure 2. Grid division of fairing model
图 2. 整流罩模型网格划分图

2.1.1. 导热基本定理[2] [3]

1) 导热过程:

导热过程是指热量由温度较高的区域转移到温度较低的区域的过程。

$$Q = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} F$$

Q 为热量，单位为 W； Δt 为平壁两侧面的温度差， $^{\circ}\text{C}$ ； δ 为平壁的厚度，m； F 为平壁的面积， m^2 ； λ 为导热系数。

2) 对流换热

由于流体微团改变空间位置所引起的流体和固体壁面之间的热量传递过程。

$$Q = \alpha (t_w - t_f)$$

t_w, t_f 为壁面和流体的平均温度，单位为 $^{\circ}\text{C}$ ； α 是平均对流换热系数。

3) 热流密度

如果忽略热扩散，不计算辐射传热，对于等扩散系数混合气体，在整流罩表面能量输运时，热流密度既与温度有关，同时也与浓度有关：

$$(-q_w) = \left(\frac{\mu}{P_r} \frac{\partial h}{\partial y} \right)_w + \left[\frac{\mu}{P_r} (Le-1) \sum_i h_i \frac{\partial C_i}{\partial y} \right]_w$$

P_r 称为普朗特数。

4) 传热过程[4]

物体的传热过程分为三种基本传热模式，即：热传导、热对流和热辐射，热量从高温向低温的传递

就称为传热过程。

$$K = 1 / \left(\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \right)$$

K ——传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; h_1, h_2 ——围护结构两表面热交换系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

2.1.2. 仿真过程

在球坐标系下, 整流罩节点差分方程:

$$\begin{aligned} T_{r,\theta,\varphi}^{k+1} = & \frac{\alpha\Delta\tau}{\Delta r^2} (T_{r-1,\theta,\varphi}^k + T_{r+1,\theta,\varphi}^k) + \frac{2\alpha\Delta\tau}{r \cdot \Delta r} T_{r+1,\theta,\varphi}^k \\ & + \frac{\alpha\Delta\tau}{r^2 \sin^2 \varphi \Delta \theta^2} (T_{r,\theta-1,\varphi}^k + T_{r,\theta+1,\varphi}^k) \\ & + \frac{\alpha\Delta\tau}{r^2 \Delta \varphi^2} (T_{r,\theta,\varphi-1}^k + T_{r,\theta,\varphi+1}^k) + \frac{\alpha \cos \varphi \Delta \tau}{r^2 \sin \varphi \Delta \varphi} T_{r,\theta,\varphi+1}^k \\ & + \left(1 - \frac{2\alpha\Delta\tau}{\Delta r^2} - \frac{2\alpha\Delta\tau}{r \cdot \Delta r} - \frac{2\alpha\Delta\tau}{r^2 \sin^2 \varphi \Delta \theta^2} - \frac{2\alpha\Delta\tau}{r^2 \Delta \varphi^2} - \frac{\alpha \cos \varphi \Delta \tau}{r^2 \sin \varphi \Delta \varphi} \right) T_{r,\theta,\varphi}^k \end{aligned}$$

整流罩边界条件:

$$\begin{aligned} T_{r,\theta,\varphi}^{k+1} = & \frac{h\Delta\tau}{\rho c \Delta r} T_1 - \frac{\lambda\Delta\tau}{\rho c \Delta r^2} T_{r-1,\theta,\varphi}^k \\ & - \frac{\lambda\Delta\tau}{\rho c r^2 \sin \varphi \Delta \theta \Delta \varphi} T_{r,\theta,\varphi+1}^k - \frac{\lambda\Delta\tau}{\rho c r^2 \sin \varphi \Delta \theta \Delta \varphi} T_{r,\theta+1,\varphi}^k \\ & + \left(1 - \frac{h\Delta\tau}{\rho c \Delta r} + \frac{\lambda\Delta\tau}{\rho c \Delta r^2} + \frac{\lambda\Delta\tau}{\rho c r^2 \sin \varphi \Delta \theta \Delta \varphi} + \frac{\lambda\Delta\tau}{\rho c r^2 \sin \varphi \Delta \theta \Delta \varphi} \right) T_{r,\theta,\varphi}^k \end{aligned}$$

2.1.3. 仿真实验结果

当飞行器飞行马赫数为 1、1.5、2、2.5 时, 整流罩温度分别为 228 K、330 K、373 K、473 K。利用 MATLAB 软件对整流罩温度场进行分析。分别得到 4 个不同整流罩温度的温度场分布图, 见图 3。

通过图 3 仿真结果可以看出, 当飞行器飞行速度在 2.5 Ma 时, 整流罩大部分面积的温度在 450 K 以上, 而真实情况下, 飞行器飞行速度会达到 3 Ma 以上, 整流罩温度将会远高于 450 K, 对系统产生很大影响。由此可见, 整流罩的气动加热现象非常明显, 气动热使整流罩温度变得很高。

2.2. 整流罩红外辐射计算[5] [6]

2.2.1. 红外辐射理论基础

整流罩红外辐射可以根据红外辐射的基本定律得到:

- 1) 普朗克定律

$$M_{b\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

- 2) 斯蒂芬 - 玻尔兹曼定律

$$M = \int_0^\infty M_\lambda d\lambda = \sigma T^4$$

- 3) 距离平方反比定律

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{I}{d^2}$$

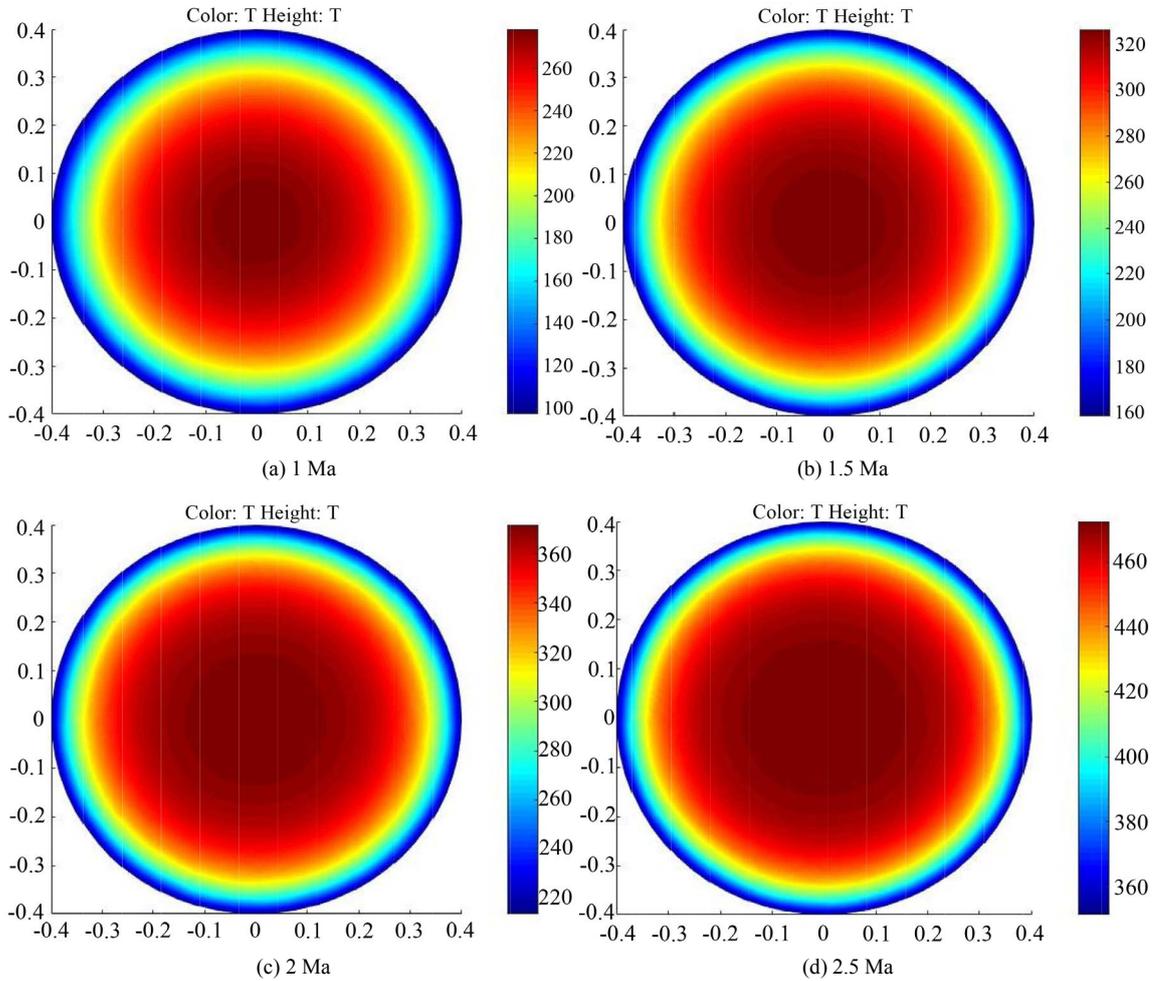


Figure 3. Cloud diagram of fairing temperature at different speeds
图 3. 不同运动速度下整流罩温度云图

4) 扩展源产生的辐射照度

如果探测器视场角达到 π ，辐射源面积又充满整个视场(如在室外工作的红外装置面对的天空背景)，则探测器表面上产生的辐射照度等于辐射源的辐出度，即

$$E = M$$

2.2.2. 仿真过程

根据以上定律计算红外辐射：

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{R \sin \theta}{d_1 + d_2 - (R - R \cos \theta)}\right)$$

$$E = \frac{I \cos \theta_2 \cos \theta_1}{\left(\frac{R \sin \theta}{\sin \theta_1}\right)^2}$$

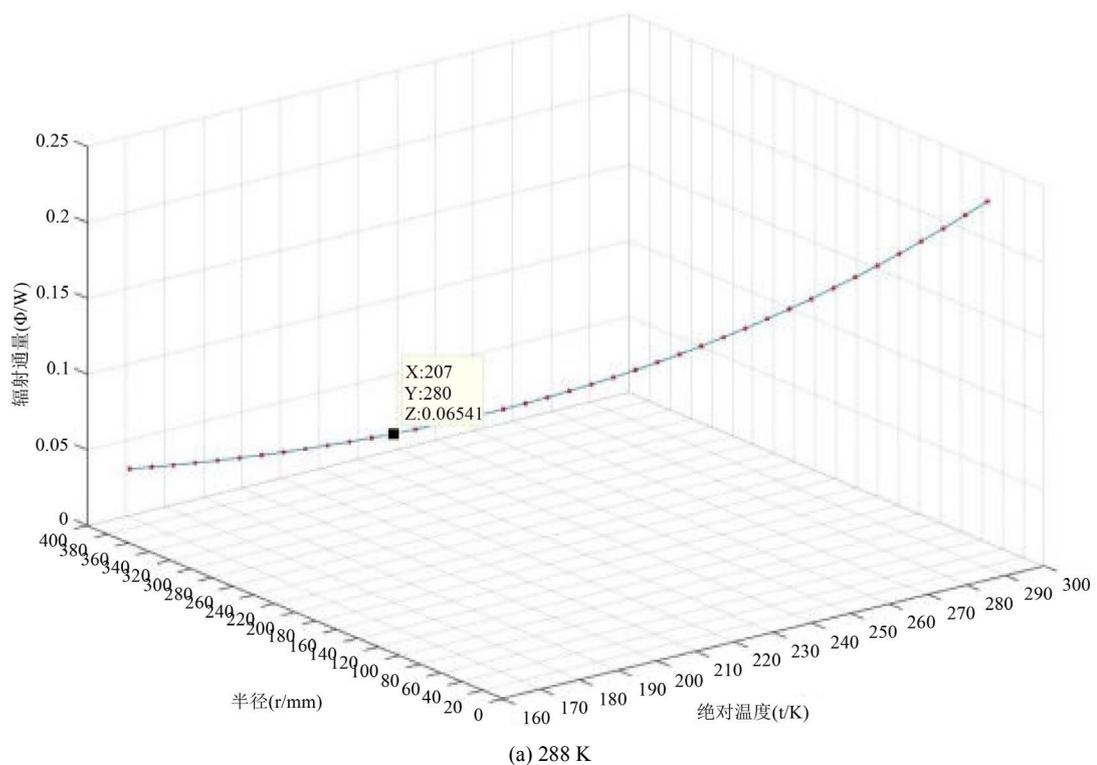
2.2.3. 仿真实验结果

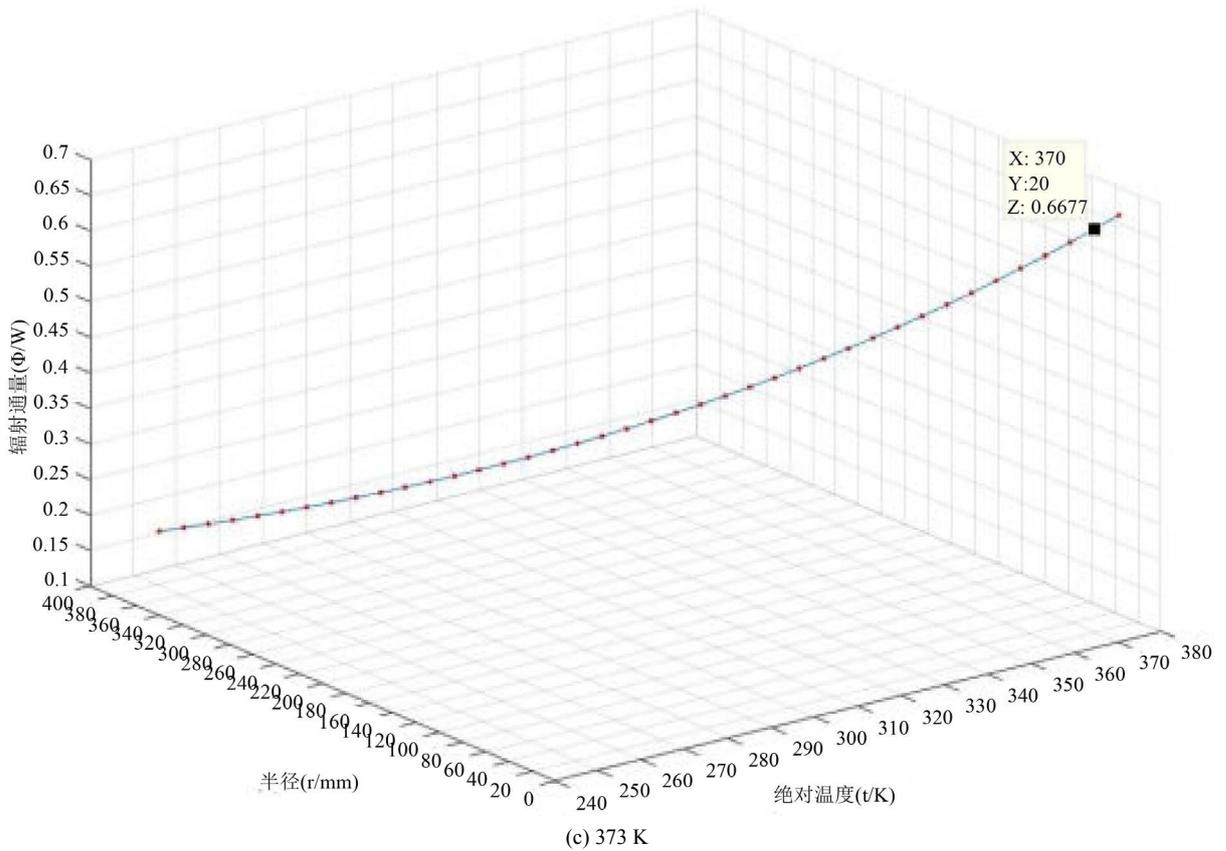
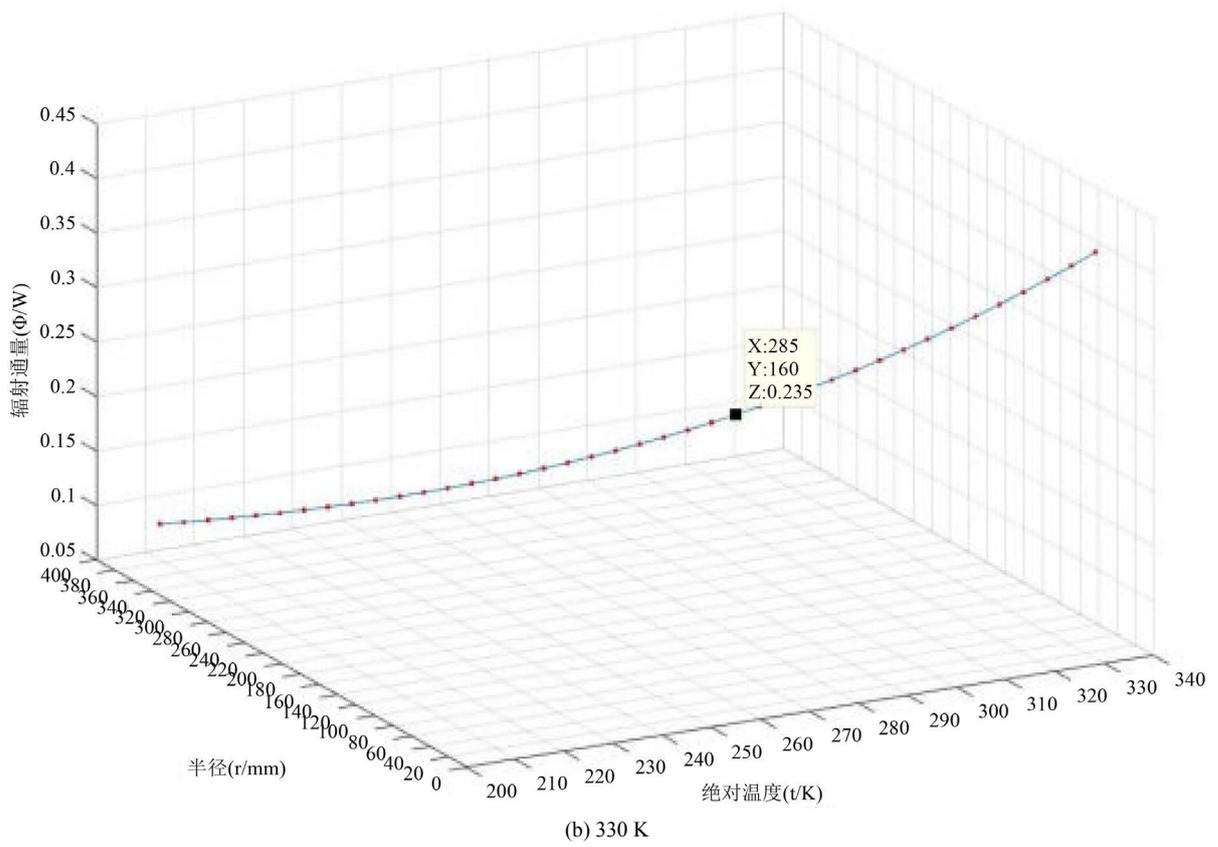
预设目标及其辐射通量见图 4。



Figure 4. Target radiation flux
图 4. 目标辐射通量

通过仿真结果(见图 5)可以看出,当飞行器飞行速度不断增加的时候,整流罩辐射强度增长变化率也在不断地迅速增大。整流罩温度达到 450 K 以上的时候,由温度变化引起的整流罩辐射强度将大于目标辐射强度,即其产生的气动热噪声完全将目标信息淹没。





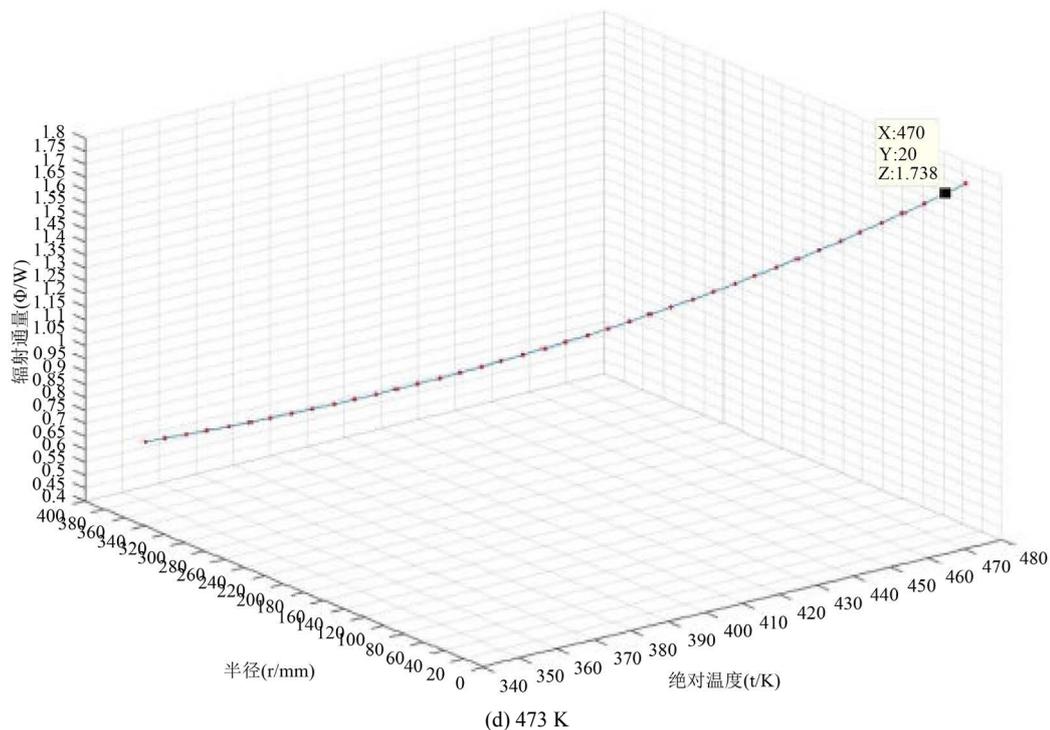


Figure 5. Coordinates of radiation intensity of the fairing at different temperatures
图 5. 不同温度下的整流罩辐射强度坐标图

3. 整流罩红外辐射的建立与仿真

TracePro 是一款基于蒙特卡罗法的非序列光线追迹软件, 普遍用于照明系统、光学分析、辐射分析及光度分析。TracePro 可采用“普适光线追迹”技术来追击辐射, 可以引入一个辐射源辐射到一个设定好的模型上, 在模型内部和界面处没有额外的损耗, 在每个界面上, 辐射遵从吸收、反射等定律。相对于传统的 MATLAB 软件建模仿真方式, TracePro 软件可以仿真辐射在模型中不同的传播路径时, 还可追踪其辐射通量以及辐射吸收量情况, 特别是它能够对真实场景计算和显示。可以利用 TracePro 建立实体模型, 设置辐射源、光学系统、探测器以及相关光学参数和辐射参数, 对整个系统进行模拟仿真。辐射源是一切辐射系统的根本, 所以首先就是建立辐射源, 其次建立卡塞格林光学系统[7], 最后设置一个接收面。本文将飞行器整流罩作为辐射源进行设计。

3.1. 整流罩红外辐射建立模型

3.1.1. 辐射源建立

本文辐射源拟用外形为半球形的整流罩。先对整流罩模型进行设定: 半径设为 400 mm, 厚度为 8 mm, 表面材料设定为氟化镁材料, 发射形式拟定为光照度, 表面温度根据飞行速度而设定, 分别为 288 K、330 K、373 K、473 K (图 6)。

对整流罩进行有限元法进行划分, 本文划分微元不同于传统模式的不规则四边形有限元划分方式, 采用以圆环的新微元划分方式, 简化步骤快速实现对整流罩进行辐射模拟。分别对每一个微元圆环面计算设定。

3.1.2. 光学系统建立

本文拟用卡塞格林系统作为光学系统。设置其表面材质为 lens 材质。

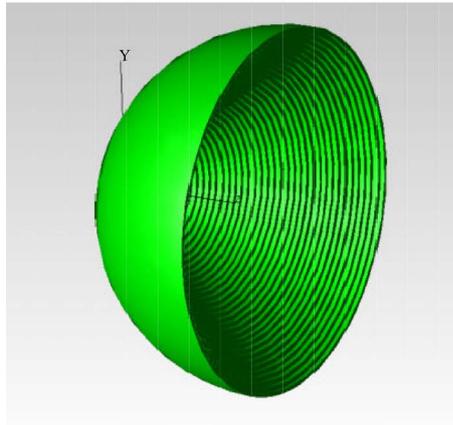


Figure 6. Division of fairing radiation intensity
图 6. 整流罩辐射强度划分

本文仍使用最简单的由主镜为抛物面和次镜为双曲面组成的卡塞格林系统，结构见图 7。

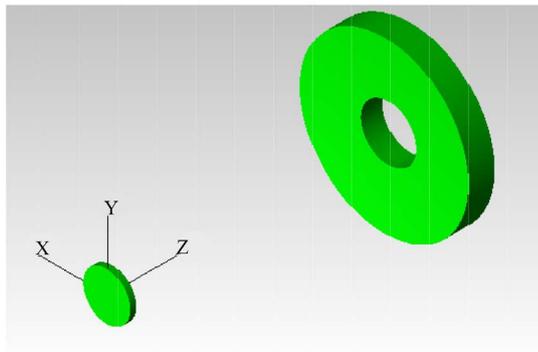


Figure 7. Cassegrain optical system model
图 7. 卡塞格林光学系统模型

在双反射系统中，由于次镜的存在，都要发生遮拦现象。遮拦比 σ 用来描述遮拦程度的量。即

$$\sigma = \frac{D_2}{D_1}$$

由反射镜焦距公式和组合系统焦距公式可知

$$f_1' = \frac{r_{o1}}{2} = f_1$$

$$f_2' = \frac{r_{o2}}{2} = f_2$$

$$f' = -\frac{f_1 f_2'}{\Delta} = \frac{f_1 f_2'}{f_1' - f_2' - d} = f$$

3.2. 整流罩红外辐射仿真过程

整流罩安装在红外探测系统的最前面，整流罩截面与成像面平行，并且整流罩中心、光学系统中心和接收面中心在同一条直线上。利用 Monte Carlo 法[8]对所有进入卡塞格林光学系统的光线进行追迹。在计算中，跟踪记录每一部分辐射的行踪直到它被系统接收。然后再跟踪下一部分辐射，通过跟踪大量

的辐射, 就可以计算出接收面入射光线的数量、总光通量的数值以及整流罩的辐射通量在接收面的分布情况。

3.3. 仿真结果

通过对飞行器整流罩的建模和仿真, 分析了高速运动下整流罩的气动热效应对红外成像的影响。对不同飞行速度下的飞行器整流罩进行建模和气动热辐射仿真, 将整流罩气动热看作是红外背景热噪声, 研究导引头整流罩气动热对红外成像结果的影响。根据距离平方反比定律计算接收面上的辐射照度, 并进行灰度量化。结果见图 8。

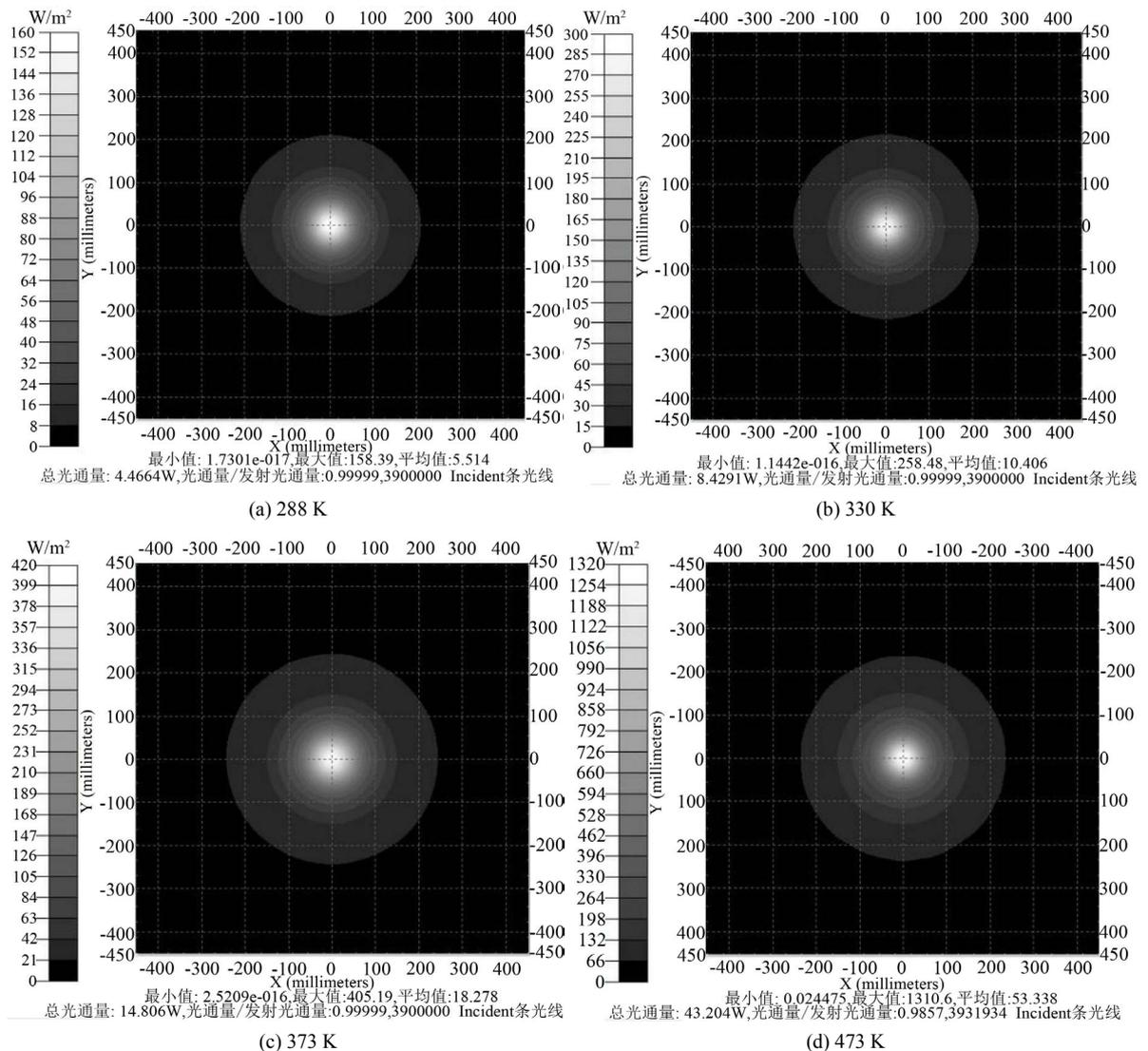


Figure 8. Analysis diagram of fairing radiation intensity at different temperatures

图 8. 不同温度下的整流罩辐射强度分析图

由图 8~9 可知, 在 TracePro 软件中得到的整流罩辐射强度结果与在 MATLAB 软件中得到的整流罩辐射强度数值完全一致。说明 TracePro 软件也可以用来进行红外辐射仿真, 而且 TracePro 软件相比较于 MATLAB 软件有建模更简单、计算更快速、仿真更快捷等优点。同时, 对在 TracePro 仿真的结果进行分

析,可以看出整流罩的红外辐射产生的热背景,使探测器所成的像的亮度增加,造成图像模糊,甚至,整流罩的温度升高到一定温度时,将使探测器产生饱和,即产生所谓的热障问题。因此,红外成像系统要正常工作,就必须采取必要的措施。

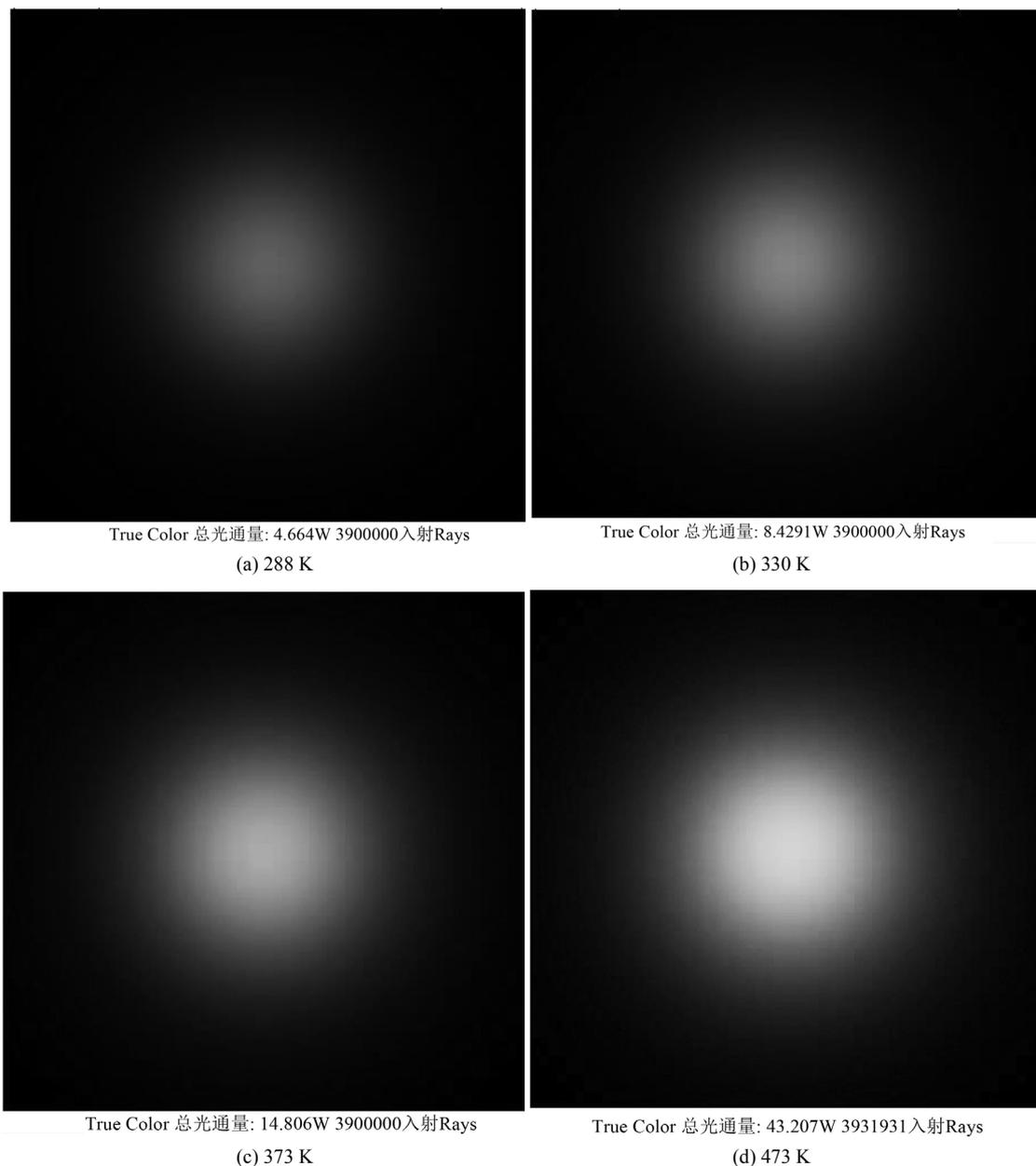


Figure 9. Radiation intensity of the fairing at different temperatures
图 9. 不同温度下的整流罩辐射强度图

4. 整流罩热噪声对成像的影响

整流罩经过气动加热后温度升高,辐射到红外探测器阵列上成为一种背景噪声,使红外成像的质量下降。设定整流罩与接收面相距为 580 mm,不考虑光学系统的折射效应,整流罩表面温度均匀,对不同温度整流罩影响下的红外图像进行仿真,仿真结果见图 10。

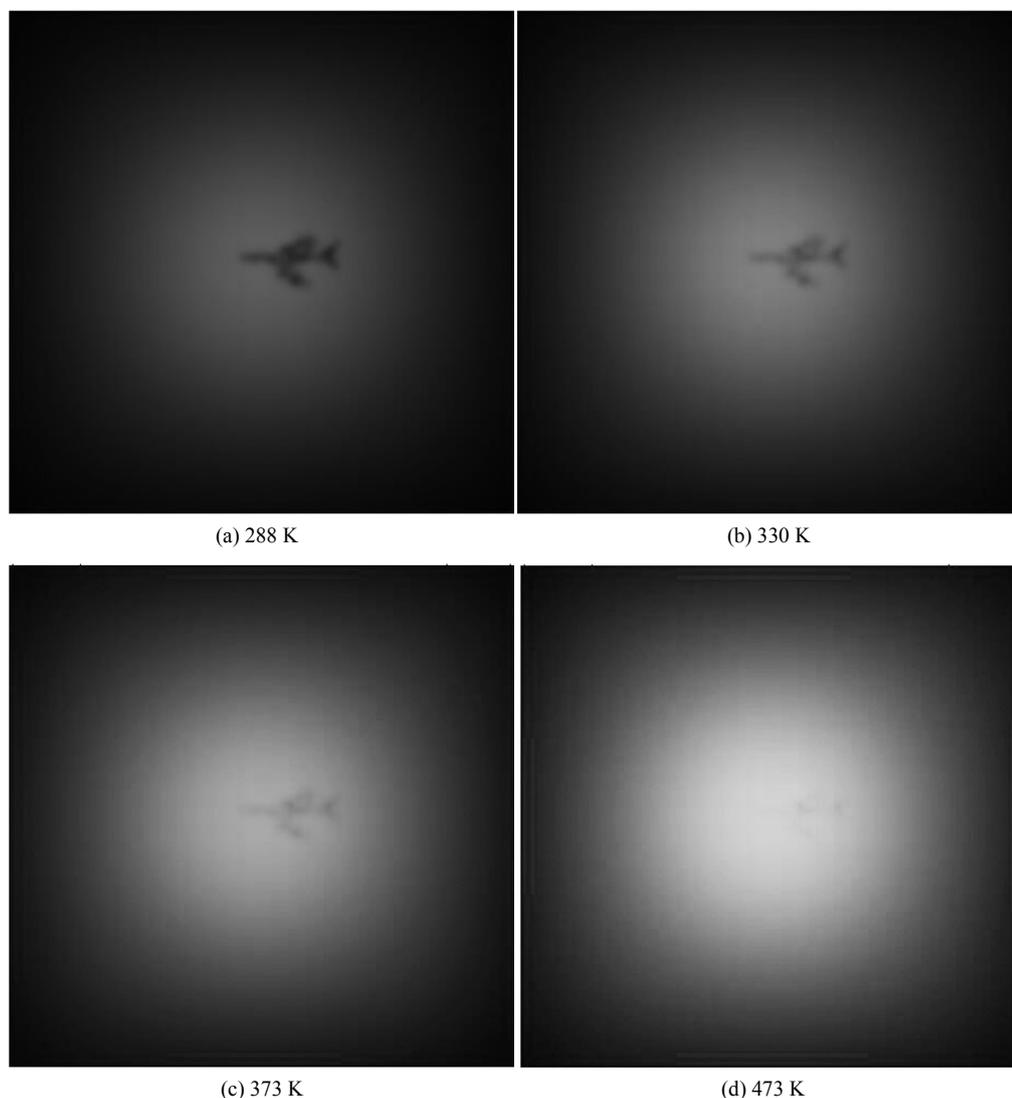


Figure 10. Target infrared simulation images at different fairing temperatures
图 10. 不同整流罩温度下, 目标红外仿真图像

通过图 10 仿真结果看出, 当整流罩温度在 330 K 以下时可以清晰地分辨出红外图像中的预警机目标, 随着红外成像探测系统载机飞行速度加快, 整流罩温度升高, 达到 400 K 以上时, 红外仿真图像中背景变亮, 目标变得很模糊。当整流罩的温度高到一定程度时, 目标信号会被背景噪声完全湮没, 从图像上无法对目标进行识别, 需要将整流罩温度控制在一定范围内, 才可保证红外成像的有效性。

5. 总结

本文的红外辐射及热噪声对成像影响的仿真结果与前人[1] [9]的仿真结果一致性很高。而且目前一般都使用 MATLAB 根据相关公式对温度场和红外辐射进行模拟计算, 所以从本文的仿真结果来看, 证明了利用 TracePro 软件进行红外辐射建模仿真这一新思路是可行的, 为红外成像系统仿真提供了一个实现方式新思路。相对于传统方式, 本文新方式无需编程等复杂步骤, 极大地缩短了建模仿真时间, 简化了实现过程, 同时还可以得到准确的实验数据。利用新建模方式的优点, 可以为后续图像降噪以及目标识别节约更多的时间。

参考文献

- [1] 高希磊. 整流罩气动加热对成像影响建模与仿真[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [2] 罗大雷. 高超、超声速飞行器头部激波层红外辐射特性数值研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2012.
- [3] 葛永博. 空中目标红外辐射建模及成像仿真[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [4] 田杰. 目标红外辐射特征与建模仿真技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [5] 薛文慧. 气动热环境下共形整流罩热辐射特性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [6] 王霄. 空间目标红外成像建模与仿真[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [7] 许求真. 经典卡塞格林系统热差分析[J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 436-441.
- [8] 孙海锋. 高速飞机红外成像过程的数值模拟与特性分析[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [9] 李振. 预警机蒙皮红外特征与成像仿真技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2016.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2324-8696, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: mos@hanspub.org