

# 机-舰耦合目标的红外辐射特性研究

孙禄<sup>1</sup>, 杨皓琦<sup>1</sup>, 杨青真<sup>1</sup>, 赵帅帅<sup>1</sup>, 王振<sup>2</sup>

(1.西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710129; 2.中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064)

**摘要:**为研究机舰耦合目标的红外辐射特性,利用CFD方法对孤立航母模型、载机待飞模型和载机离舰模型进行了稳态流场的模拟,基于流场结果和逆向蒙特卡洛法计算了3种模型的红外辐射强度,分析了舰载机及其尾喷流对目标红外辐射特征的影响。研究表明:舰载机的尾喷流使得阻焰板及其附近大面积的甲板被加热,载机待飞模型的阻焰板最高壁温在1700K左右;在3~5 $\mu\text{m}$ 红外探测波段,水平探测面上载机待飞模型在舰体前向探测角下的红外特征非常突出,俯仰探测面上载机待飞模型在舰体前向探测角下的红外辐射强度相比于孤立航母模型平均高出约691.6%。

**关键词:**机舰耦合;计算流体力学;逆向蒙特卡洛法;红外辐射强度;舰载机尾喷流

**中图分类号:**U674.70;TK124 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2026)01-0046-12

随着我国国产航母不断下水服役,航空母舰在我国海军装备中的战略地位大幅提升,同时,针对航空母舰的各类武器也层出不穷,迅速发展起来的各种反舰导弹对航母的生存构成了巨大威胁。面积巨大的甲板在太阳的长时照射下大幅升温,喷气式舰载机起飞与降落时的尾喷流对甲板及舰上建筑物的冲击又使得部分区域的甲板壁面温度再次升高,这些作用共同增强了航母的红外辐射特征。

对孤立舰船以及机舰耦合下的流场特性,国内外学者已经进行了相关研究。Polsky等<sup>[1-2]</sup>对两栖攻击舰(LHA)和核动力航母(CVN)模型进行了一系列计算;Cherry等<sup>[3]</sup>定性和定量地模拟了由航空母舰飞行甲板和上层建筑所产生的空气尾流,研究它对飞机在接近和着陆甲板时产生的影响;郭佳豪等<sup>[4]</sup>基于准确捕捉流场中涡的生成和脱落的DES(detached eddy simulation,分离涡模拟)方法,对航母空气流场进行模拟,发现航母舰岛、甲板等钝体边缘产生相互干扰的复杂涡系,导致舰载机进舰轨迹上出现强烈的周期性速度波动;李旭等<sup>[5]</sup>针对航母尾迹对舰载机着舰过程气动特性的影响,采用嵌套网格的方法,对无人机在不同风向下的着舰过程进行数值模拟;Vignesh等<sup>[6]</sup>提出了一种简化的通用航

空母舰模型(GAC),通过风洞实验研究了甲板上方的空气压力分布以及舰岛后方的流动情况;王逸斌等<sup>[7]</sup>从孤立舰船舰面流场主要特征分析出发,分别总结了航空母舰与非航空母舰类舰船的主要流动特征,以及舰载直升机-舰船耦合流场的主要流动特征。

舰船目标的红外辐射特性研究相对较少。李振环<sup>[8]</sup>针对海面舰船进行建模,考虑外界气象参数的实时性变化,求取了舰船目标的非稳态温度场及红外辐射场;陈彬<sup>[9]</sup>以某型号舰船为研究对象,考虑大气传输的衰减作用,分析探测高度及探测角度对海面背景下舰船目标红外特征的影响;石见见等<sup>[10]</sup>分析了舰船红外辐射特性、红外隐身的原理,梳理了舰船红外隐身技术的发展历程。飞机排气系统及整机的气动和红外辐射特性研究已相对成熟。王超哲等<sup>[11]</sup>根据红外辐射的基本原理,提出了基于温度场分布的飞机红外辐射计算方法;李翔等<sup>[12]</sup>认为红外隐身技术对提高未来战机战场生存力具有重要意义,发动机排气系统是飞机后半球的主要红外辐射源;章叶川等<sup>[13]</sup>基于分区控制技术,发展了型面易控的双S弯喷管型面设计方法,用计算流体力学(CFD)数值模拟技术,对双S弯喷管的流动特性进行了数值模拟;高翔<sup>[14]</sup>采用计算流体力学与逆向蒙特卡洛方法,对耦合2种进排气系统布局的飞翼无人机开展了气动及红外辐射特性的数值模拟研究,

收稿日期:2024-09-18

作者简介:孙禄(2000—),硕士研究生

通信作者:杨青真(1964—),教授 e-mail:qzyang@nwpu.edu.cn

对比分析了耦合 2 种进排气布局的飞翼无人机在 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~14  $\mu\text{m}$  波段内红外辐射特征。

综上所述,尽管国内外学者在舰船目标的流场及红外辐射特性方面、飞机排气系统及整机的气动和红外辐射特性方面,开展了较多的研究工作,然而,针对航母与喷气式舰载机耦合状态下的流场与红外辐射特性研究很少。鉴于此,本文建立孤立航母模型和 2 种机舰耦合模型,基于 CFD 的流场计算结果,使用红外计算软件对 3 种模型的红外辐射强度进行仿真计算,分析 3 种模型的流场及红外辐射特性规律。

## 1 几何模型描述

本文根据里根号航母公开图片和尺寸信息对其外形进行全尺寸的三维重构,该航母全长 332.8 m,全宽 76.8 m,建模时截去了舰体水线以下部分,并对甲板边缘建筑和舰岛进行简化,构建“干净构型”的甲板,建立的孤立航母模型如图 1 所示。

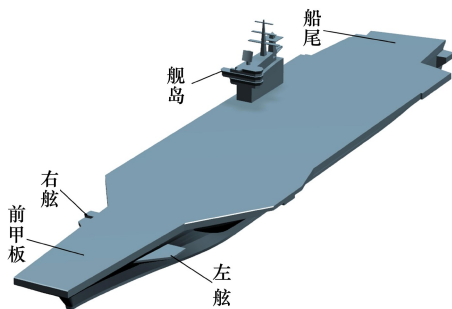


图 1 孤立航母模型

本文基于 F35C 舰载战斗机的公开图片和尺寸信息对其外形进行了三维重构,该机机长 15.5 m,翼展 13.1 m,高 4.54 m,翼展面积 62.1  $\text{m}^2$ 。该型战斗机为单发战机,选取了 1 种有内外涵道的轴对称喷管,添加了锯齿结构,建立了 1 种 Y 型进气道模型。图 2 给出了飞机对称面相关几何参数,带有进排气装置的 F35C 战机模型如图 3 所示。

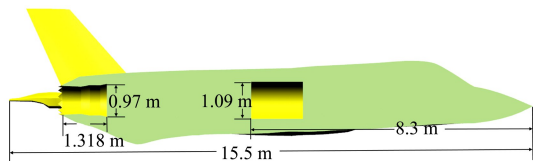


图 2 F35C 对称面几何参数

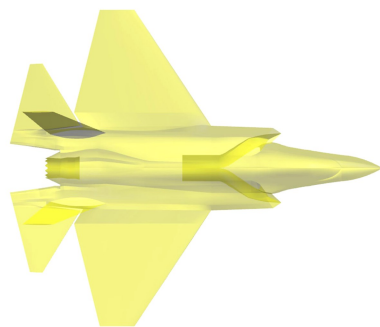


图 3 F35C 模型

如图 4 所示,里根号航母拥有 4 个弹射器,对应 4 条弹射路线,本文选择靠近前甲板中心线位置的第 2 条弹射路线作为舰载机的离舰路线。

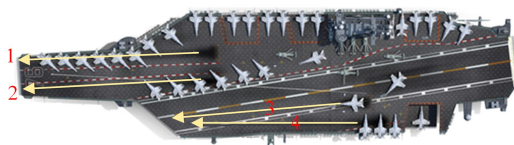


图 4 里根号航母的弹射路线示意图

本文在弹射路线前构建阻焰板模型,阻焰板长 10.97 m,宽 4.267 m,厚 0.2 m,它与甲板面的水平夹角为 50°。将舰载机模型放置在该弹射线路的初始位置和即将离舰位置,分别构建载机待飞模型和载机离舰模型。图 5 展示了 2 种模型舰载机在甲板上的相对位置,弹射路线与前甲板中心线夹角为 2°,载机待飞和载机离舰位置的水平距离为 105 m。

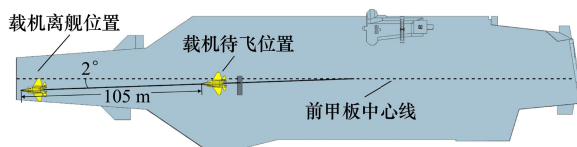


图 5 2 种机舰耦合模型舰载机在甲板上的相对位置

图 6 展示了载机待飞模型舰载机和甲板以及阻焰板的相对位置关系,飞机尾喷管出口的中心点距离甲板的垂直距离为 2 m,距离阻焰板前缘的水平距离为 8 m,建立的载机待飞模型和载机离舰模型

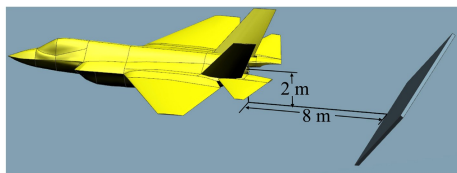


图 6 载机待飞模型舰载机在甲板上的相对位置

如图 7~8 所示。为后续流场及红外计算描述方便,对模型进行部件划分,将孤立航母模型分为舰体、舰

岛和甲板,载机待飞模型和载机离舰模型则在孤立航母模型基础上添加阻焰板和飞机,如图 9 所示。



图 7 载机待飞模型

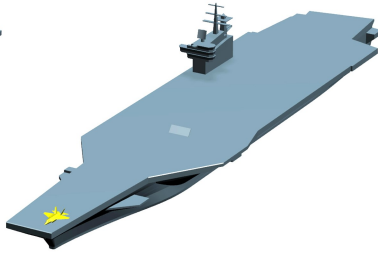


图 8 载机离舰模型

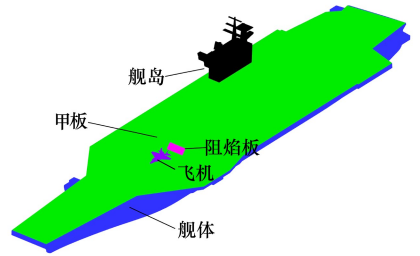


图 9 模型部件划分

## 2 流场计算

### 2.1 流场计算域

由于航母结构具有不对称性,取全模型进行计算,图 10 为孤立航母模型计算域示意图,另外 2 种模型的计算域相同。

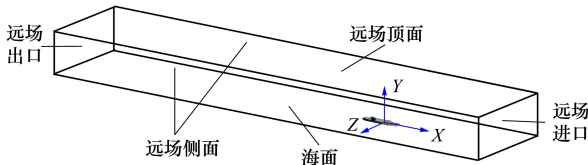


图 10 计算域示意图

笛卡尔坐标系的原点取在船底中心, $X$  轴沿船长方向,以船首方向为正, $Y$  轴为垂直方向, $Z$  轴为船宽方向,以船的右舷为正。远场进口距船首 3 倍船长、远场出口距船尾 8 倍船长,远场侧面距船侧 5 倍船宽,远场顶面距船底 1 倍船长,海面与船的底面平齐。

### 2.2 流场计算网格及网格无关性验证

根据 2.1 节所示计算域,本文利用 Fluent meshing 生成流场计算网格,在计算域内采用非结构多面体网格 (polyhedra) 方法生成流场网格,多面体网格具有计算精度高、网格数量少、收敛性好等优点,已经在流场仿真领域广泛应用。舰体、舰岛、甲板壁面和飞机机身边界层设定为 20 层,第一层网格高度设为 0.003 m,阻焰板和进排气装置的壁面边界层设定为 30 层,第一层网格高度设为 0.000 1 m,并对喷管产生的尾喷流影响较大的部分区域以及阻焰板附近进行多层体网格加密,网格划分示意如图 11 所示。

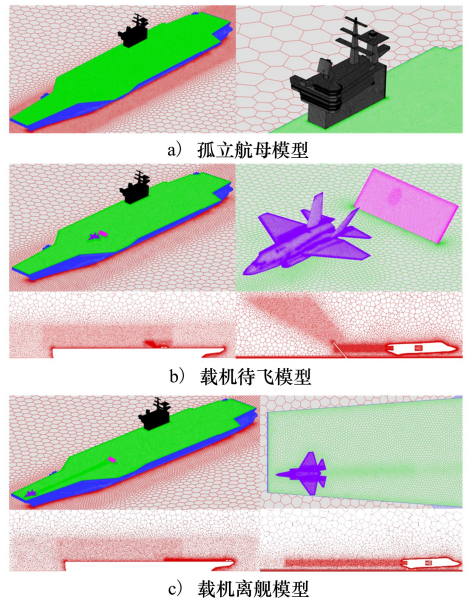


图 11 网格划分示意图

采用 2.4 节设置的流场边界条件,对 3 种模型采用不同数目的网格进行流场试算,以甲板平均壁温和阻焰板前板面平均壁温为网格独立性检验标准,如表 1 所示,最终 3 种模型分别采用 1 352 万、2 056 万和 1 878 万网格进行流场计算。

壁面  $Y^+$  值用来判断壁面附面层内第一层网格节点的流体流动状态: $Y^+ < 1$  表示流动处于黏性亚层; $1 < Y^+ < 30$  表示流动处于缓冲层; $Y^+ > 30$  表示流动处于对数层。本文使用 Realizable  $k-\epsilon$  两方程湍流模型,采用非平衡壁面函数法处理壁面附近的流动,该方法要求将壁面第一层网格节点置于对数层,建议壁面  $Y^+$  值大于 30 而小于 500。当采用前述 3 套网格计算时,孤立航母模型的甲板壁面  $Y^+$  平均值为 43.77;载机待飞模型的甲板壁面  $Y^+$  平均值为

60.59,机身壁面为 58.22,进气道壁面为 43.94,喷管壁面为 31.21;载机离舰模型的甲板壁面  $Y^+$  平均值为 70.2,机身壁面为 80.23,进气道壁面为 51.05,喷管壁面为 33.47。因此这 3 套网格下的壁面  $Y^+$  值已达到仿真要求。

表 1 网格独立性验证

模型	网格数	甲板平均壁温/K	阻焰板前板面平均壁温/K
孤立航母	751 万	325.4	
	965 万	323.9	
	1 352 万	323.5	
	1 871 万	323.5	
载机待飞	1 335 万	346.1	839.7
	1 753 万	345.9	838.9
	2 056 万	345.5	838.2
	2 583 万	345.5	838.2
载机离舰	1 278 万	332.5	403.6
	1 512 万	331.5	403.1
	1 878 万	331.2	402.9
	2 345 万	331.2	402.9

### 2.3 流场计算方法及验证

本文采用 ANSYS Fluent 进行流场计算,所有流场算例均采用压力基求解器、三维空间及稳态计算,流动被认为是理想、可压缩、有黏流动,通过隐式方程求解,梯度项使用 Green-Gaussian Cell-based 进行离散,对流项使用二阶迎风格式。由于本文机舰耦合模型的流场存在喷管射流,阻焰板后存在流动的分流和再附着,相较于其他湍流模型,Realizable  $k-\epsilon$  两方程模型可以较好地模拟圆孔射流,当壁面附近存在分离、再附着或者射流流动时常使用非平衡壁面函数法处理壁面附近的流动,因此湍流模型使用 Realizable  $k-\epsilon$  两方程模型,壁面函数采用非平衡壁面函数法。

本文考虑了壁面间辐射和太阳辐射对壁面温度分布的影响。DO 辐射模型是一个精确的辐射模型,可以解决复杂几何形状的辐射问题,且能够考虑气体的吸收和散射,计算精度较高,适合追求精确辐射计算的场合。太阳辐照(solar irradiation)模型计算效率较高,适合宏观太阳辐射效应的模拟。本文在正式计算时均开启了 DO 辐射模型,并加载了太阳辐照模型。太阳辐照的设置参考了文献[9],目标位于东经 122°,北纬 37°,第 8 时区,前甲板朝正北向,日期为夏至日中午 12 点,日照因子为 1(晴朗),3 种模型设置相同。

此外,考虑到壁面层的纵向和横向导热,需要在壁面层划分固体网格,但舰船壁面的厚度与舰船的尺寸相比很薄,这增加了网格划分难度,但如果忽略壁面厚度则会对壁温分布产生影响,本文决定采用壳导热模型解决这一问题。如图 12 所示,壳导热模型可应用在薄壁结构上而不需要对壁厚层进行网格划分,当激活壳导热模型时,选择壁面层数、壁面厚度和每层壁的材料则 Fluent 会自动在壁面生成虚拟的网格层。其中,壳导热模型的第一层壁面与流体域网格相邻,第二层壁面和第三层壁面等壁面依次按顺序相邻并远离流体域网格。本文参考文献[8],选择甲板的壁面层数为 2 层,第一层为甲板钢,第二层为一种隔热材料;选择舰岛和舰体以及飞机机身的壁面层数为 1 层,舰岛和舰体的壁面材料为一种船用常见的舰体材料,飞机机身的壁面材料为 Fluent 材料库中的铝,材料物性参数如表 2 所示。

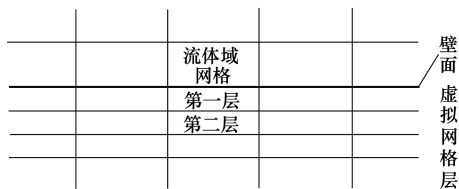


图 12 壳导热模型示意图

表 2 航母材料物性参数表

材料类型	厚度/mm	导热系数/( $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ )	发射率	密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )	比热容/( $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$ )
甲板钢	50	51.8	0.9	7 850	468.16
隔热材料	30	0.083		2 000	816
舰体材料	50	22.154	0.5	7 700	476.52
铝	5	202.4	0.75	2 719	871

为验证上述计算方法对于本文航母流场计算的适用性,本文选择文献[2]中 CVN-73 的舰载机降落轨迹下滑线上空气流场速度分量的实验和流场仿真

结果,与孤立航母模型在相同边界条件下的计算结果进行对比分析。

图 13 展示了该下滑线的相对位置。该下滑线

与航母前甲板中心线的夹角为  $9^\circ$ ，与水平甲板面的夹角为  $3.5^\circ$ ，末端为理想着舰点，该点距离船尾  $60.96\text{ m}$ ，位于斜角甲板中心线上。

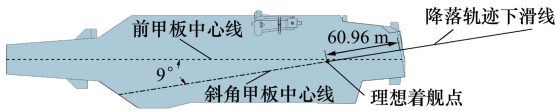


图 13 理想下滑轨迹示意图

在验证计算时，采用图 10 所示的计算域，远场进口为速度进口，远场出口为压力出口，远场侧面和顶面为压力远场，舰船表面和海平面设为壁面，边界条件的具体数值与文献[2]的设置相同，验证计算时没有考虑辐射和壁面导热问题，其余计算方法与前述相同。采用表 1 中 4 套孤立航母模型的流场计算网格进行验证计算，图 14 展示了 4 套网格在下滑轨迹线上空气流场速度的垂直分量分布，图中，横轴  $d$  表示距离理想着舰点的水平距离， $W$  表示空气速度的垂直分量，当采用 1 352 万和 1 871 万网格时曲线基本一致，可认为已达到网格无关性，因此取 1 352 万网格的结果与文献[2]结果对比。

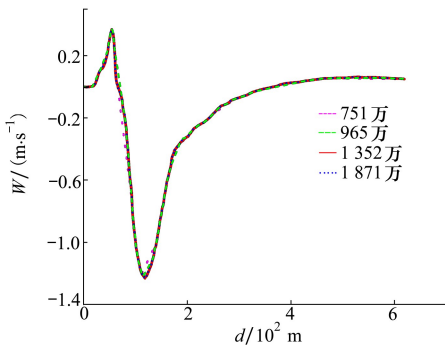


图 14 不同网格数量时降落轨迹线上垂直速度对比

图 15 展示了本文与文献[2]中降落轨迹线上的垂直速度对比，在理想着舰点上本文仿真的垂向速度为 0，因为理想着舰点紧贴壁面，此处的理论值应为 0，但风洞实验结果约为  $-0.077\text{ m/s}$ ，可能是由风洞实验测点布置时距离壁面有一定的距离所致。从理想着舰点至船尾处，本文与文献[2]的仿真结果相似，CFD 均预测了上洗气流，然而实验结果为下洗气流，这可能与实验点的数量较少有关，舰尾后实验和仿真结果均表现为下洗气流。在距离理想着舰点约  $118\text{ m}$  处，本文与实验结果吻合较好，峰值基本一致。距离着舰点  $300\sim 400\text{ m}$  范围内，风洞试验结果出现上洗气流，但 CFD 仿真结果仍为下洗气

流，这与实验点的数量和误差均有关系。总体来看，本文的仿真结果与文献[2]提供的仿真和实验数据在变化趋势上基本一致，局部差异的原因包括 CVN73 和 CVN76 在舰体结构上的细节区别以及无法获得精确的舰尾结构。对于流场计算而言，前述的计算方法应当认为是可靠的。

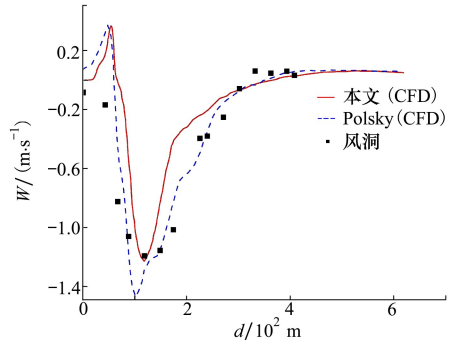


图 15 降落轨迹线上垂直速度对比

### 2.4 流场计算边界条件

本文设置的 3 种模型流场计算边界条件分别如表 3~5 所示。载机待飞模型和载机离舰模型在远场、海面、甲板、舰岛和舰体的边界设置上与孤立航母模型相同，载机待飞模型和载机离舰模型喷管进口条件相同，给定发动机处于全加力时的出口条件。在验证计算的基础上添加了辐射模型和壳导热模型，全舰壁面在开启壳导热模型后，传热边界条件将应用在远离流体域的最底层虚拟网格面上。因此可将舰船内部舱室的空气温度设为  $295.15\text{ K}$ ，自然对流换热系数设为  $10.0\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  [8]，舰船外表面与空气的对流换热程度与外表面当地的空气流动情况、舰船表面材料属性以及粗糙度均有关系，本文给定全舰外表面的粗糙度为  $5\ \mu\text{m}$  [15]，Fluent 将根据给定的粗糙度耦合外表面当地的空气流动情况求解外表面当地与空气的对流换热。此外，考虑到喷管尾焰产生的燃烧气体组分，开启了组分输运模型，在喷管进口设置燃烧气体组分的质量分数为： $\omega_{\text{CO}} = 0.000\ 1$ ， $\omega_{\text{CO}_2} = 0.071\ 8$ ， $\omega_{\text{H}_2\text{O}} = 0.029\ 4$ ，其余边界的组分与空气组分一致。

表 3 孤立航母模型边界条件设置

边界类型	边界设置
远场进口	速度进口, $V = 15.432\text{ m/s}$ , $T = 295.15\text{ K}$
远场侧面和顶面	压力远场, $p = 101\ 325\text{ Pa}$ , $T = 295.15\text{ K}$
远场出口	压力出口, $p = 101\ 325\text{ Pa}$ , $T^* = 297.8\text{ K}$
海面	移动壁面, $V = 15.432\text{ m/s}$ , $T = 295.15\text{ K}$
全舰壁面	壳导热, 对流及辐射混合边界

表 4 载机待飞模型边界条件设置

边界类型	边界设置
飞机机身	对流及辐射耦合边界, 自由流温度 $T=295.15\text{ K}$
阻焰板壁面 进气道和喷管壁面	绝热壁面
进气道出口	压力出口, $p=p_1, T^*=T_1^*$
喷管进口	压力进口, $p^*=p_2^*, T^*=T_2^*$

表 5 载机离舰模型边界条件设置

边界类型	边界设置
飞机机身	移动壁面, $V=60\text{ m/s}$ , 对流及辐射耦合边界, 自由流温度 $T=295.15\text{ K}$
阻焰板壁面 进气道和喷管壁面	绝热壁面
进气道出口	绝热移动壁面, $V=60\text{ m/s}$
进气道出口	压力出口, $p=p_3, T^*=T_3^*$
喷管进口	压力进口, $p^*=p_2^*, T^*=T_2^*$

## 3 红外辐射特性计算

### 3.1 红外计算方法及验证

逆向蒙特卡洛方法 (reverse Monte Carlo method, RMCM) 是基于辐射传输互异性原理从蒙特卡洛方法发展而来的, 其原理是从探测器向目标随机发射特征射线并进行逆向追踪, 在传输过程中判断射线是否被吸收, 直到射线被吸收或从透明边界逸出, 随后以吸收或逸出点为起点, 反向计算红外辐射传输, 最终得到目标的红外辐射特性。相比于离散传递法, 逆向蒙特卡洛方法不需要对空间立体角进行离散, 拥有较高的计算效率, 而与蒙特卡洛法相比, 逆向蒙特卡洛方法更适合计算某个方向探测器接收到的红外辐射能量。本文不对整个空间的红外辐射特征进行求解, 因此采用自主开发的基于逆向蒙特卡洛法的红外辐射特性仿真计算软件, 对 3 种模型进行红外辐射特性计算。

通过与喷管实验模型的测量值进行对比, 检验本文 RMCM 程序的计算精度。图 16 为某喷管缩比实验模型<sup>[16]</sup>, 模型的详细尺寸、流场边界条件和红外计算条件与文献[16]一致, 网格划分方法和数量与文献[17]相同, 将内外涵进口近似为固体壁面,

发射率分别为 0.35 和 0.3。表 6 给出了测量结果与本文 RMCM 程序仿真计算结果的对比, 可以看出, 典型探测角下的仿真计算结果与实验测量结果最大误差在 15% 以内, 平均相对误差为 6.45%, 验证了本文 RMCM 计算程序在实际工程上的可靠性。

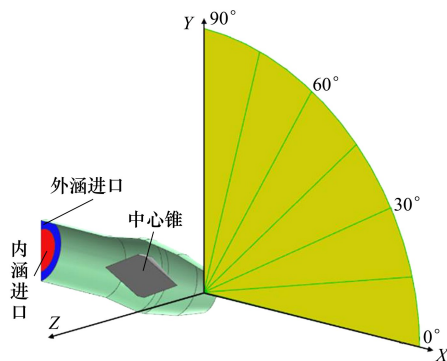


图 16 喷管缩比模型及计算角示意图

表 6 缩比模型实验结果<sup>[16]</sup>与 RMCM 计算结果对比

探测角度/ (°)	测量值/ ( $\text{W} \cdot \text{Sr}^{-1}$ )	计算值/ ( $\text{W} \cdot \text{Sr}^{-1}$ )	相对误差/ %
0	7.26	7.11	2.07
15	2.88	2.73	5.21
30	1.35	1.52	12.59
60	0.76	0.79	3.94
75	0.44	0.46	4.54
90	0.29	0.32	10.34

### 3.2 红外计算探测角定义及边界条件设置

由于航母并非完全对称结构, 其红外辐射特征分布具有不对称性, 在俯仰和水平探测面内辐射强度值相差很大, 因此设置俯仰探测面和水平探测面, 如图 17 所示, 其中, 俯仰探测面和水平探测面均以船首 X 正向为  $0^\circ$  方向, 船尾 X 负向为  $180^\circ$  方向, 水平探测面与船底水线位置平齐, 俯仰探测面与水平探测面垂直, 每隔  $5^\circ$  设置 1 个探测角, 共 107 个探测角。红外辐射计算的边界网格直接利用流场计算域的边界网格, 计算方式为不考虑背景的纯目标计算, 目标原点海拔均为  $0\text{ km}$ , 探测距离均为  $5\text{ km}$ , 大气参数设置为夏季, 无云无降雨。考虑大气在辐射传输路径上的吸收衰减作用, 红外计算波段为  $3 \sim 5\ \mu\text{m}$  和  $8 \sim 14\ \mu\text{m}$ , 气体辐射采用窄谱带模型计算。流场计算中的远场边界在红外计算中仍为气体边



### 4.2 各模型红外辐射特性计算结果的对比分析

本文在分析各个模型红外辐射强度角向分布情况时,只选取对红外贡献较大的部件和模型的总红外辐射强度值进行描述。

图 19 为孤立航母模型俯仰探测面和水平探测面 3~5 μm 波段以及 8~14 μm 波段的无量纲红外辐射强度角向分布曲线。在 3~5 μm 波段水平探测面内(见图 19a),舰体和舰岛是主要的辐射源,总红外辐射强度曲线在舰体前后基本呈对称分布,90°探测角下的总红外辐射强度最大,为 1 557.3 W/Sr,该探测面内各个探测角下的总红外辐射强度均值为 1 072 W/Sr,舰体的辐射贡献平均占比达到了 81.89%,舰岛达到 12.24%;在 3~5 μm 波段俯仰探测面内(见图 19b),总红外辐射强度曲线在舰体前

后也基本呈对称分布,90°探测角下红外辐射强度最大,为 19 690.4 W/Sr,该探测面内各个探测角下的总红外辐射强度均值为 12 854 W/Sr,此时甲板是最主要的辐射贡献源,甲板的辐射贡献平均占比达到了 91.75%;8~14 μm 波段内红外辐射强度曲线的变化规律与 3~5 μm 波段基本相同,水平探测面上(见图 19c),90°探测角下的总红外辐射强度最大,为 46 721.4 W/Sr,该探测面内各个探测角下的总红外辐射强度均值为 31 566 W/Sr,舰体的辐射贡献平均占比达到了 84.3%,舰岛达到了 12.18%,俯仰探测面上(见图 19d),90°探测角下的红外辐射强度最大,为 63 617.7 W/Sr,该探测面内各个探测角下的总红外辐射强度均值为 359 152 W/Sr,甲板的辐射贡献平均占比达到了 89.47%。

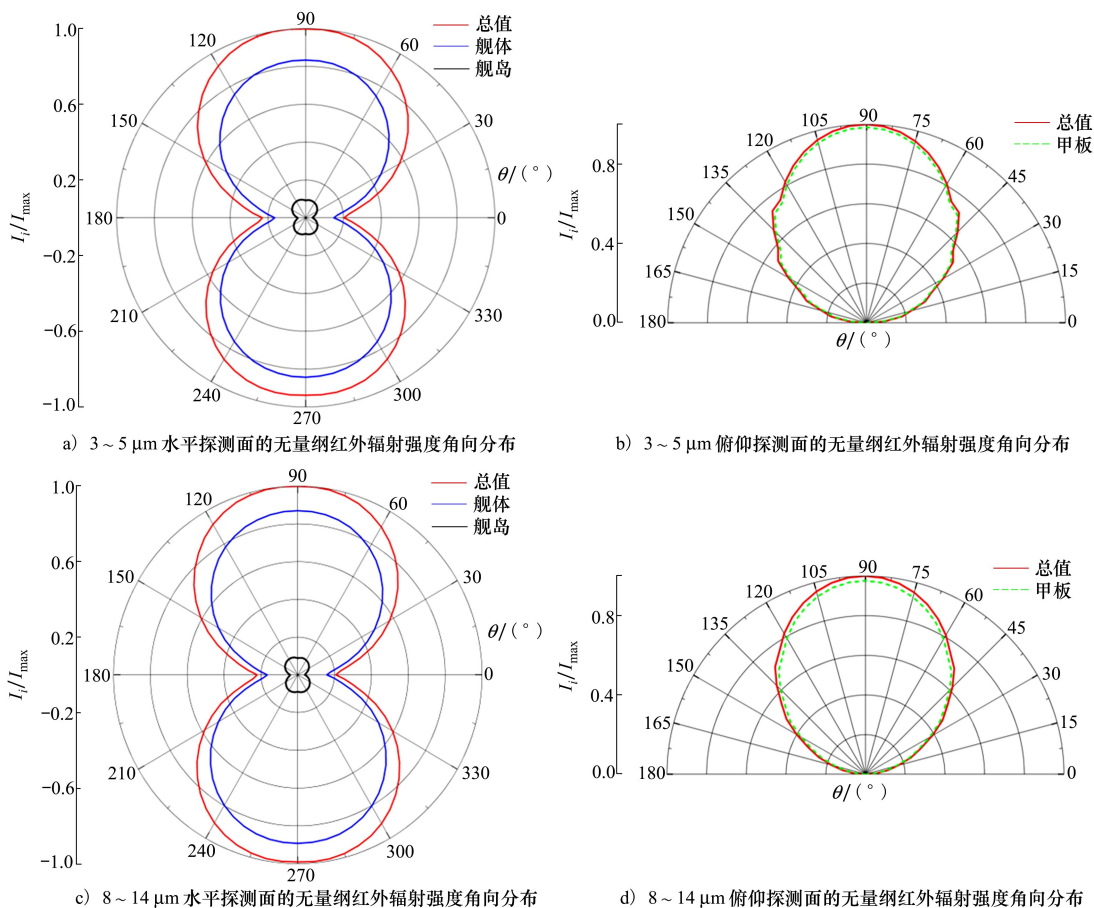


图 19 孤立航母模型的无量纲红外辐射强度角向分布曲线

图 20 为载机待飞模型俯仰探测面和水平探测面 3~5 μm 波段及 8~14 μm 波段的无量纲红外辐射强度角向分布曲线。在 3~5 μm 波段水平探测面内(见图 20a),总红外辐射强度曲线在舰体前后差

异很大,330°探测角下的总红外辐射强度最大,为 51 242.8 W/Sr,该探测面内各个探测角下的总红外辐射强度均值为 18 217 W/Sr,阻焰板在舰体前向探测角下的辐射贡献较为突出,它在舰体前向(水平

探测面  $0^\circ \sim 90^\circ$  和  $270^\circ \sim 360^\circ$  探测角) 的辐射贡献平均占比为 82.92%; 在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段俯仰探测面内 (见图 20b)), 总红外辐射强度曲线在舰体前向较为突出,  $70^\circ$  探测角下的总红外辐射强度最大, 为  $114\ 610 \text{ W/Sr}$ , 该探测面内各个探测角下的总红外辐射强度均值为  $84\ 797 \text{ W/Sr}$ , 阻焰板和甲板是主要的辐射贡献源, 阻焰板的平均辐射贡献占比为 45.67%, 甲板的平均辐射贡献占比约为 43.01%; 在  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  波段水平探测面内 (见图 20c)), 总红外辐射强度曲线在舰体左右基本呈对称分布,  $70^\circ$  探测角下的红外辐射强度最大, 为  $49\ 852.4 \text{ W/Sr}$ , 该探

测面内各个探测角下的总红外辐射强度均值为  $30\ 226 \text{ W/Sr}$ , 舰体的平均辐射贡献占比达到了 71.42%, 阻焰板在舰体前向探测角下的平均辐射贡献占比为 19.2%; 在  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  波段俯仰探测面内 (见图 20d)),  $90^\circ$  探测角下的总红外辐射强度最大, 为  $880\ 330 \text{ W/Sr}$ , 该探测面内各个探测角下的总红外辐射强度均值为  $497\ 497 \text{ W/Sr}$ , 甲板的辐射贡献平均占比达到了 86.49%;  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  波段内阻焰板的辐射贡献没有  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段突出, 因为阻焰板的核心高温区接近  $1\ 700 \text{ K}$ , 它的红外辐射贡献主要体现在中红外波段。

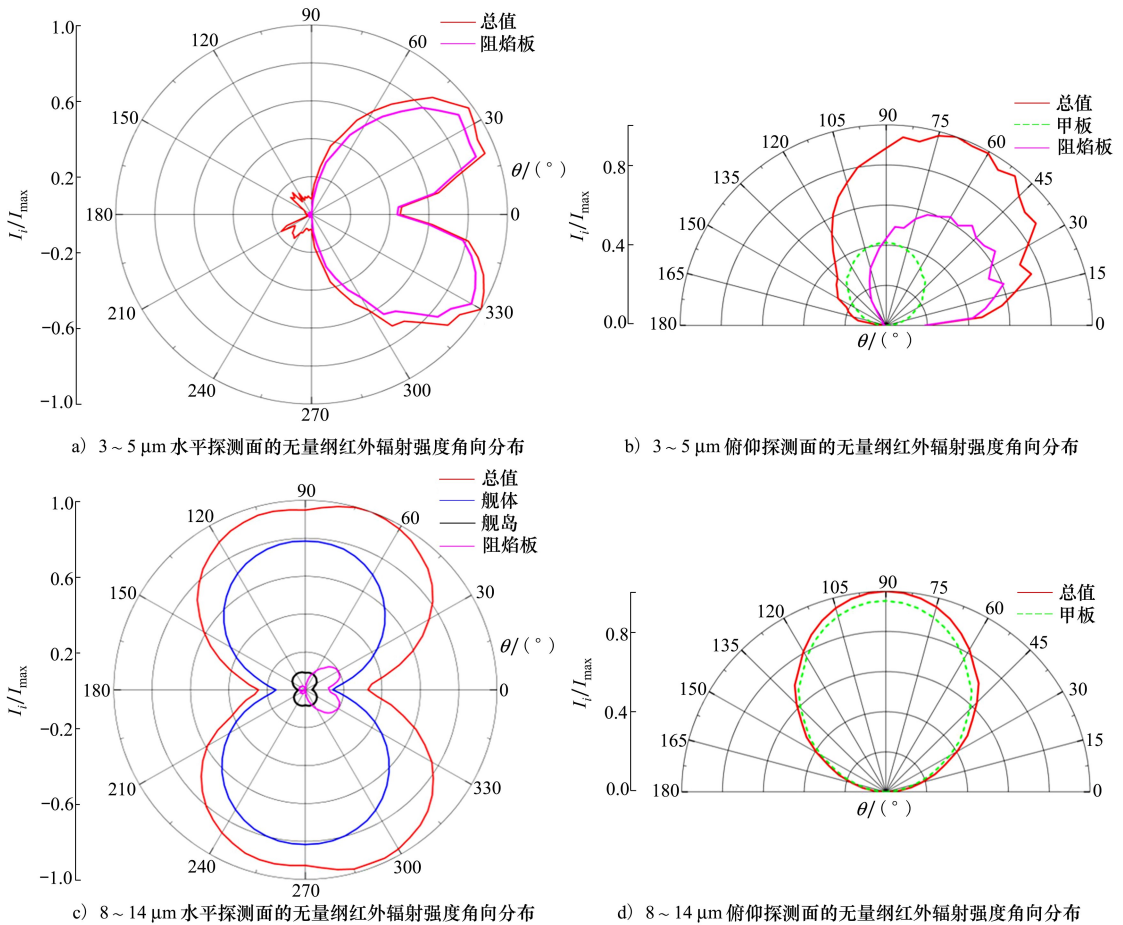


图 20 载机待飞模型的无量纲红外辐射强度角向分布曲线

图 21 为载机离舰模型俯仰探测面和水平探测面  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段以及  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  波段的无量纲红外辐射强度角向分布曲线。在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段水平探测面内 (见图 21a)), 舰体后向 (水平探测面  $90^\circ \sim 270^\circ$ ) 探测角下的红外辐射特征很突出,  $160^\circ$  探测角下的总红外辐射值最大, 为  $11\ 493.4 \text{ W/Sr}$ , 该探测面内各探测角下的总红外辐射强度均值为

$5\ 105 \text{ W/Sr}$ , 后向探测角下的红外辐射值大幅升高, 是因为载机离舰时飞机处于即将离舰位置, 仅有正后向被阻焰板遮挡, 飞机的高温喷管被左后向和右后向的红外探测器探测到, 飞机在舰体后向探测角下的平均辐射贡献占比达到了 37.09%。另外值得注意的是, 载机离舰模型在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  探测波段的气体辐射贡献较为突出, 因为飞机在该位置下喷管羽

流向后充分发展,其燃烧气体组分也随羽流在甲板上方广泛分布,3~5  $\mu\text{m}$  波段水平探测面内气体的平均辐射贡献占比达到了 37.09%;在 3~5  $\mu\text{m}$  波段俯仰探测面内(见图 21b),舰体后向(俯仰探测面  $90^\circ \sim 180^\circ$ )探测角下的红外辐射强度也比舰体前向探测角下(俯仰探测面  $0^\circ \sim 90^\circ$ )高,  $100^\circ$  探测角下的总红外辐射值最大,为 41 812.3 W/Sr,该探测面内各探测角下的总红外辐射强度均值为 26 456 W/Sr,探测方向越靠近飞机正后向,飞机喷管壁面辐射特征越明显,超过 1 500 K 的喷管高温壁面使得 3~

5  $\mu\text{m}$  波段飞机正后向附近探测角下的红外强度值大幅提升;8~14  $\mu\text{m}$  波段内载机离舰模型与孤立航母模型的红外辐射强度分布曲线的变化规律基本一致,水平探测面上(见图 21c),  $90^\circ$  探测角下的总红外辐射强度最大为 46 721.4 W/Sr,总红外辐射强度均值为 31 566 W/Sr,俯仰探测面上(见图 21d),  $90^\circ$  探测角下的红外辐射强度最大为 636 177 W/Sr,总红外辐射强度均值为 359 152 W/Sr;飞机后向探测角下的红外辐射强度并没有增加,这也是因为高温部件的红外辐射贡献主要体现在中红外波段。

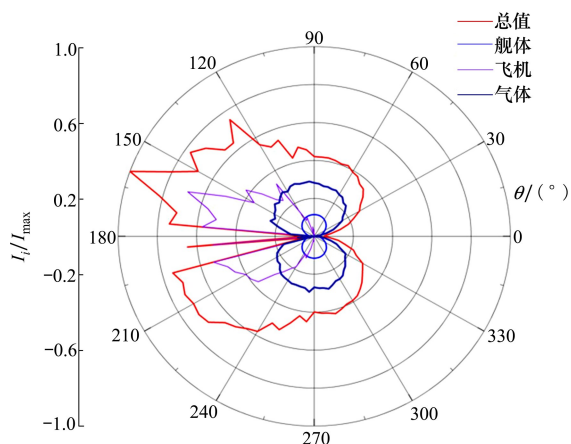
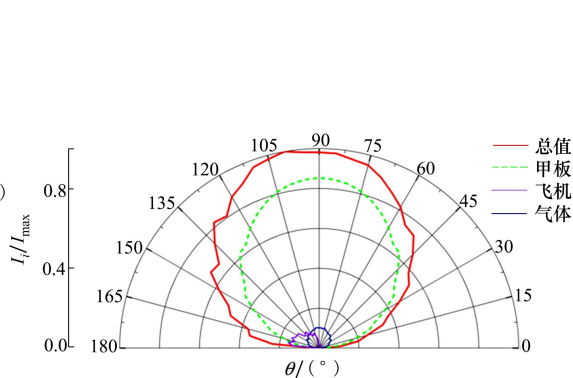
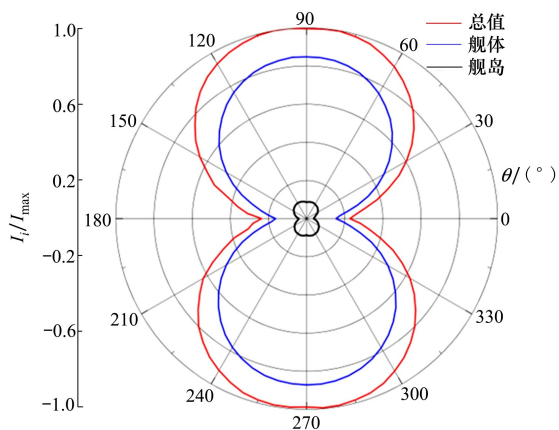
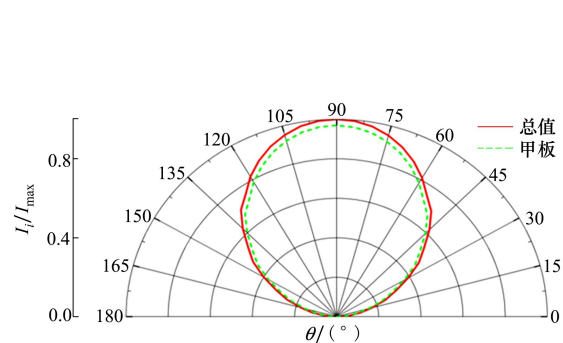
a) 3~5  $\mu\text{m}$  水平探测面的无量纲红外辐射强度角向分布b) 3~5  $\mu\text{m}$  俯仰探测面的无量纲红外辐射强度角向分布c) 8~14  $\mu\text{m}$  水平探测面的无量纲红外辐射强度角向分布d) 8~14  $\mu\text{m}$  俯仰探测面的无量纲红外辐射强度角向分布

图 21 载机离舰模型的无量纲红外辐射强度角向分布曲线

## 5 结 论

本文对孤立航母模型、载机待飞模型和载机离舰模型进行了流场和红外辐射特性的数值计算,通过分析 3 种模型的流场及红外辐射特性,得到以下

结论:

1) 阻焰板使飞机尾喷流的方向发生明显的偏转,在高温尾喷流的直接冲击下阻焰板核心区的最高温度超过 1 700 K,阻焰板前缘的甲板最高壁温接近 650 K。受尾喷流影响的载机待飞模型和载机离舰模型的甲板平均壁温(不包含阻焰板)相比于孤立航母模型分别高出 22 K 和 7.7 K。

2) 3~5  $\mu\text{m}$  红外探测波段:在水平探测面内, 载机待飞模型在舰体前向探测角下的红外特征非常突出, 红外辐射强度均值远高于另外2个模型, 载机离舰模型在舰体后向探测角的红外特征较为突出, 孤立航母模型在各个探测角下的辐射强度均比2个机舰耦合模型小得多; 在俯仰探测面内, 相比于孤立航母模型, 载机离舰模型的红外辐射强度均值高出约106%, 载机待飞模型在舰体前向探测角下的红外辐射强度均值高出约为691.6%。8~14  $\mu\text{m}$  波段:水平探测面上载机待飞模型的红外辐射特征在

左前向和右前向探测角下较为突出; 俯仰探测面上, 孤立航母模型、载机离舰模型、载机待飞模型的红外辐射强度依次升高, 载机待飞模型相比于孤立航母模型, 红外辐射强度均值高出约38.5%。

3) 综合而言, 舰载机的尾喷流使航母阻焰板和甲板的壁温在部分区域大幅提升, 模型的红外辐射特征大幅增强, 在3~5  $\mu\text{m}$  中红外探测波段这种影响非常突出, 因此, 应当对喷气式舰载机起飞离舰时采取红外抑制措施。

## 参考文献:

- [1] Polsky Susan. CFD prediction of airwake flow fields for ships experiencing beam winds[C]//21st AIAA Applied Aerodynamics Conference, Orlando, 2003: 23-26.
- [2] Polsky Susan, Naylor Stephen. CVN airwake modeling and integration: initial steps in the creation and implementation of a virtual burble for F-18 carrier landing simulations[C]//Proceedings of AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, 2005: 1-9.
- [3] Cherry B E, Constantino M M. The burble effect: superstructure and flight deck effects on carrier air wake[R]. DTIC ADA527798, 2010.
- [4] 郭佳豪, 祝小平, 周洲, 等. 舰船空气流场数值模拟及特性分析[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(6): 1037-1044. Guo Jiahao, Zhu Xiaoping, Zhou Zhou, et al. Numerical simulation and characteristic analysis of ship's air flow field[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(6): 1037-1044. (in Chinese)
- [5] 李旭, 祝小平, 周洲, 等. 无人机着舰流场的数值模拟研究[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(1): 186-194. Li Xu, Zhu Xiaoping, Zhou Zhou, et al. The numerical simulation of UAV's landing in ship airwake[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(1): 186-194. (in Chinese)
- [6] Vignesh Kumar K, Nasiruddin S, Shukla S, et al. Pressure and velocity measurements of air flow past a proposed generic aircraft carrier geometry[J]. Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2021, 232: 1-20.
- [7] 王逸斌, 马晨阳, 李通, 等. 舰载直升机-舰船耦合流场数值计算研究综述[J]. 空气动力学学报, 2023, 41(3): 45-66. Wang Yibin, Ma Chenyang, Li Tong, et al. Review of numerical studies on ship-helicopter coupled flowfield[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2023, 41(3): 45-66. (in Chinese)
- [8] 李振环. 海面大型舰船目标红外成像研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014. Li Zhenhuan. The infrared imaging research for large ship target on sea[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [9] 陈彬. 海面背景下舰船目标红外辐射特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015. Chen Bin. Research on infrared radiation characteristics of naval vessel target in the sea background[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [10] 石见见, 王振, 黄泽浩, 等. 舰船红外隐身技术研究发展概述[J]. 船海工程, 2022, 51(增刊2): 77-81. Shi Jianjian, Wang Zhen, Huang Zehao, et al. Overview of research and development of infrared stealth technology for ships[J]. Ship and Ocean Engineering, 2022, 51(S2): 77-81. (in Chinese)
- [11] 王超哲, 童中翔, 芦艳龙, 等. 飞机红外辐射特性及其探测技术研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(9): 996-1001. Wang Chaozhe, Tong Zhongxiang, Lu Yanlong, et al. Research on aircraft infrared radiation characteristics and detection technology[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(9): 996-1001. (in Chinese)
- [12] 李翔, 杨青真, 陈立海, 等. 航空发动机排气喷管红外辐射特征数值研究[J]. 航空工程进展, 2013, 4(1): 126-133. Li Xiang, Yang Qingzhen, Chen Lihai, et al. Numerical study on infrared radiation characteristics of aircraft engine exhaust nozzles[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2013, 4(1): 126-133. (in Chinese)

- [13] 章叶川, 王占学, 史经纬, 等. 双S弯喷管流动特性及红外辐射特性分析[J]. 航空动力学报, 2013, 28(11): 2468-2474.  
Zhang Yechuan, Wang Zhanxue, Shi Jingwei, et al. Analysis of flow characteristics and infrared radiation characteristics of dual S-shaped nozzles[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(11): 2468-2474. (in Chinese)
- [14] 高翔. 飞行器/排气系统红外辐射及电磁散射特性数值研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.  
Gao Xiang. Investigation on the infrared radiation and radar scattering characteristics of aircraft and engine[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016. (in Chinese)
- [15] 王志歆, 杨振, 上官剑锋, 等. 激光除锈工艺对EH36船用钢耐腐蚀性能的影响研究[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(5): 213-220.  
Wang Zhixin, Yang Zhen, Shangguan Jianfeng, et al. Study on the influence of laser rust removal process on the corrosion resistance of EH36 marine steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(5): 213-220. (in Chinese)
- [16] 罗明东. 无人机排气系统红外隐身技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.  
Luo Mingdong. Research on infrared stealth technology of UAV exhaust system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [17] 陈立海. 航空发动机排气系统目标红外/RCS特性计算研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2013.  
Chen Lihai. Research on the calculation of infrared/RCS characteristics of targets in aircraft engine exhaust system[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2013. (in Chinese)

## Research on infrared radiation characteristics of aircraft-ship coupling targets

Sun Lu<sup>1</sup>, Yang Haoqi<sup>1</sup>, Yang Qingzhen<sup>1</sup>, Zhao Shuaishuai<sup>1</sup>, Wang Zhen<sup>2</sup>

(1.School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;  
2.China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** In order to study the infrared radiation characteristics of the coupled aircraft-ship target, the steady-state flow field of the isolated aircraft carrier model, the on-board aircraft waiting-to-fly model and the on-board aircraft leaving-ship model was simulated by CFD method. The infrared radiation intensity of three models was calculated based on the flow field results and the inverse Monte Carlo method, and the influence of the carrier-based aircraft and its tail jet on the infrared radiation characteristics of the target was analyzed. The results show that the tail jet heats the flame shield and its adjacent deck, and the maximum wall temperature of the flame shield of the on-board aircraft waiting-to-fly model is around 1 700 K. In the infrared detection band of 3 to 5  $\mu\text{m}$ , the infrared characteristics of the on-board aircraft waiting-to-fly model on the horizontal detection plane are very prominent at the forward detection Angle of the ship body, and the infrared radiation intensity of the on-board aircraft waiting-to-fly model on the pitch detection plane is about 691.6% higher than that of the isolated aircraft carrier model.

**Keywords:** aircraft-ship coupling; CFD; reverse Monte Carlo method; infrared radiation characteristics; carrier aircraft tail jet

**引用格式:** 孙禄, 杨皓琦, 杨青真, 等. 机-舰耦合目标的红外辐射特性研究[J]. 西北工业大学学报, 2026, 44(1): 46-57.

Sun Lu, Yang Haoqi, Yang Qingzhen, et al. Research on infrared radiation characteristics of aircraft-ship coupling targets [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2026, 44(1): 46-57. (in Chinese)