

低发射率对二元引射喷管无人机红外特征及探测距离的影响

斯 仁 吉洪湖 黄 伟

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京, 210016)

摘要:为了降低无人机的红外特征及探测距离,采用数值模拟的方法研究了采用二元引射喷管的无人机的红外特征分布,分析了其主要红外辐射贡献源,针对贡献较大的部件采用低发射率材料进行红外抑制,得到了低发射率材料对红外特征和探测距离的影响规律。排气系统和无人机的流场、温度场采用商用软件 Fluent 计算,红外辐射特征及探测距离采用自主开发的红外软件 (NUAA-IRSE) 计算。结果表明:发射率由 0.9 降为 0.2 后,在 3~5 μm 波段内,无人机的辐射强度的降幅为 35%~77%,探测距离的降幅为 27%~51%;在 8~14 μm 波段内,无人机的辐射强度的降幅为 67%~77%,探测距离的降幅为 40%~50%。

关键词:无人机;二元引射喷管;红外辐射;探测距离;低发射率;红外抑制

中图分类号:V218 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2013)05-0665-06

Effect of Low Emissivity on Infrared Signature and Detection Range of UAV with 2-D Ejector Nozzle

Si Ren, Ji Honghu, Huang Wei

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: In order to reduce the UAV's infrared signature and detection range, the infrared signature of UAV with 2-D ejector nozzle is studied by numerical simulation method. The main sources of infrared radiation contribution are analyzed. Moreover, the low emissivity materials are used for large infrared radiation contribution components for infrared suppression. The impact laws of low emissivity material on the infrared signature and the detection range are obtained. The flow field of the exhaust jet and UAV are calculated by the commercial software Fluent. The infrared radiation characteristics and detection range are calculated with an IR analysis software (NUAA-IRSE) developed by our research group. The results show that when the emissivity is reduced from 0.9 to 0.2, In 3—5 μm band, the decreasing amplitude of radiation intensity is 35% to 77%, and the decreasing amplitude of detection range is 27% to 51%. While in 8—14 μm band, the decreasing amplitude of radiation intensity is 67% to 77%, and the decreasing amplitude of detection range is 40% to 50%.

Key words: unmanned aerial vehicle; 2-D ejector nozzle; infrared radiation; detection range; low emissivity; infrared suppress

无人机具有许多独特而优异的战术性能,存在着巨大的作战潜能。目前国际上掀起了新的无人

机研究热潮,许多国家的军事部门都把无人机的发
展置于优先地位^[1]。但随着红外探测跟踪技术在

基金项目:航空科学基金(2011ZB52028)资助项目;南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(2011ZB52028)资助项目。

收稿日期:2013-04-01;**修订日期:**2013-07-21

通信作者:吉洪湖,男,教授,博士生导师,E-mail:jhhpe@nuaa.edu.cn。

军事上的广泛应用和红外制导武器的大量出现,对飞行速度较低的无人机的生存能力形成了极大威胁,红外辐射特性及可被探测的距离已成为评价无人机总体作战性能的一项重要战术指标^[2]。

飞行器的排气系统和蒙皮分别是 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 及 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段内的主要红外辐射源。目前国内对无人机红外特征的研究还比较少,李晋岭等^[2]对无人机红外辐射特性数值模拟方法进行了综述分析;施小娟等^[3]和罗明东等^[4]分别采用离散传递法和实验测量研究了轴对称发动机背负式安装的无人机排气系统在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的红外辐射强度空间分布。

无人机通常采用不可调喷口面积的收敛喷管,将轴对称喷管改型为二元喷管是降低排气系统红外特征的有效手段^[5],如“暗星”无人侦察机等。二元喷管圆转矩形的过渡段和矩形喷口强化了喷流的掺混,降低了核心区的温度,减少了喷管内部高温壁面的投影面积^[6]。黄伟等^[7]对低速排气非对称二元喷管的红外辐射特性进行了实验研究。为了改善二元喷管的推力性能,刘福城等^[8]在二元喷管的基础上,加装短套管引射套筒形成了二元引射喷管,研究了短套管几何参数变化对喷管推力特性和 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的红外辐射特性的影响。

低发射率材料能够有效降低蒙皮的红外辐射贡献。目前针对战斗机上采用低发射率材料进行红外抑制的研究比较多,如冯晓星等^[9]计算了战斗机蒙皮和排气系统壁面发射率变化对 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段内红外抑制效果的影响。

在探测距离计算方面,祁蒙^[10]研究了红外搜索跟踪系统中探测概率、虚警概率和信噪比三者之间的关系。

从以上分析可以看出,无人机的红外特征计算主要集中在轴对称喷管和改型喷管的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段,针对低发射率材料对无人机的红外特征和探测距离影响的研究还比较少。本文以采用二元引射喷管的高空无人机为研究对象,在计算无人机及排气系统的流场、温度场和组分浓度场的基础上,使用本课题组自主开发的飞行器红外特征及隐身效能分析软件(NUAA-IRSE)计算无人机在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 及 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的红外特征分布,分析其主要的红外辐射贡献部件,并针对贡献较大的部件采用低发射率材料进行红外抑制,最后使用典型的点源红外探测器性能参数和大气环境参数计算探测距离,得到无人机采用低发射率材料进行红外抑制的措施后红外特征和探测距离的变化规律。

1 物理模型

本文的研究对象是采用二元引射喷管的无人机。图1是无人机外形结构图。

无人机排气系统的喷管为文献[8]中优选出的短套管二元引射喷管。图2是短套管二元引射喷管及机尾布局模型,主喷管由外涵进口截面、内涵进口截面(末级涡轮)、中心锥、支板、内涵壁面、外涵壁面和引射套管组成。其中,主喷管的出口宽高比为4;引射套管的入口位置 $L_d = 0.09D_p$,出口面积比 $\frac{A_{ej}}{A_p} = 1.27$,间距比 $\frac{L_p}{D_p} = 1.17$ 。

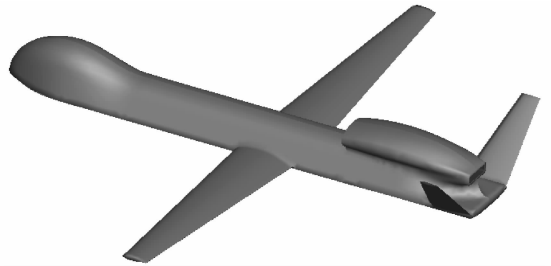


图1 采用二元引射喷管的无人机几何模型

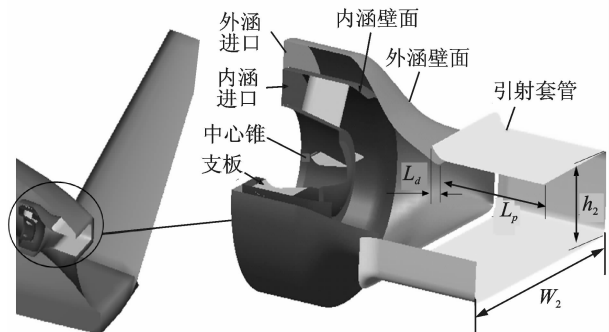


图2 短套管二元引射喷管及机尾布局模型

2 计算方法

2.1 流场、温度场计算方法

2.1.1 计算域及网格划分

无人机和排气系统的流场计算域及网格划分如图3所示,由于该模型在结构上具有对称性,因此只选取1/2模型进行流场计算。机身长度为 L ,计算域的长度为 $4L$,半径为 $2L$ 。网格划分时,在近壁面和喷流区域进行了局部加密,经过网格无关解验证,网格总数为400多万。

2.1.2 边界条件

无人机飞行环境为海拔10 km高空,飞行马赫数为0.75。外流场边界设置为温度217 K、压力18 767 Pa的压力远场边界。喷管的内、外涵进口以及引射进口截面均设为给定总温、总压的压力进

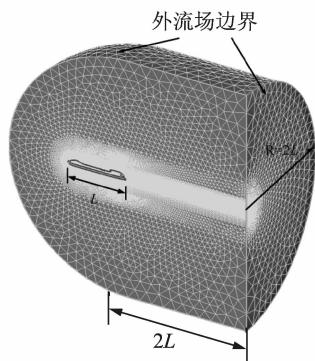


图 3 无人机流场计算域及网格

口边界,其中内涵进口:670 K,48 960 Pa;外涵进口:293 K,53 550 Pa;引射进口:217 K,18 767 Pa。蒙皮、中心锥和支板均设为绝热壁面,其他固体区域与周围的流体域进行耦合传热计算。

2.1.3 数值求解方法

无人机及排气系统的流场、温度场及燃气组分浓度场采用商业软件 Fluent 进行数值分析。计算过程中选用二阶迎风差分格式和耦合显示求解器对连续方程、动量方程和能量方程进行求解。湍流模型采用 SST $k-\omega$ 两方程模型,燃气组分浓度场的计算采用组分输运模型,流-固耦合传热中辐射传热的计算采用 DO 辐射传热计算模型。

2.2 红外辐射计算方法

本文采用 NUAA-IRSE 软件计算无人机的红外辐射特征分布,运用离散传递法对红外辐射传输方程进行离散^[11],计算中考虑了无人机蒙皮自身的发射以及对排气系统辐射的遮挡,排气系统固体壁面自身的发射与反射,燃气中 CO_2 , H_2O 和 CO 等组分对辐射的吸收与发射等过程。红外辐射特征的计算所需要的蒙皮和排气系统壁面温度分布,以及燃气喷流的压力、温度场和 CO_2 , H_2O 和 CO 组分浓度场等数据均从前流场计算的结果中插值提取。基准算例中的蒙皮及排气系统的固体壁面设定为发射率 0.9 的灰体壁面。为得到目标本身的红外辐射特征分布,计算结果不考虑大气的吸收散射作用。红外辐射特征计算方法的验证参考文献^[8, 11]。

红外辐射特征计算的探测点分布如图 4 所示。由于无人机在高空飞行,本文只研究水平和下方两个探测面上的红外特征分布。水平探测面是指机身侧向,下方探测面是指机腹下方。每个探测面上每隔 5° 设置一个探测点,其中 0° 是指机尾方向, 180° 是指机头方向。

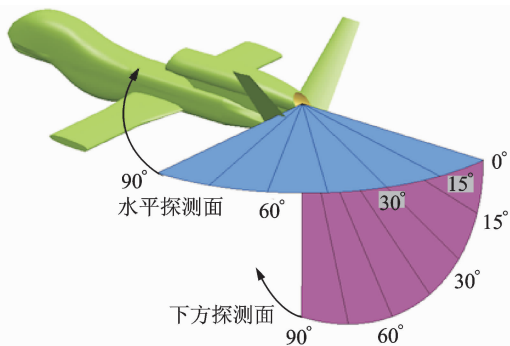


图 4 计算平面及方位角示意图

2.3 探测距离计算方法

红外探测系统对飞行器的探测距离大小是评价飞行器红外辐射水平以及红外辐射抑制效果的一个重要指标。由于空中目标的探测距离较远,通常将目标作为点源处理。一般使用如下方程计算此类点源探测系统的探测距离^[12]

$$R = \left[\frac{\eta \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (I_{\alpha} - I_{\beta}) \cdot \tau_{\alpha}(\lambda) d\lambda}{\text{NEI} \cdot \text{SNR}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: I_{α} 为目标的光谱红外辐射强度; I_{β} 为背景的光谱红外辐射强度; $\tau_{\alpha}(\lambda)$ 为目标与探测系统之间的大气光谱透射率;SNR 为红外探测系统的信噪比;NEI 为等效噪声照度; η 为目标辐射有效系数,其定义如下

$$\eta = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\alpha} \cdot \tau_{\alpha}(\lambda) \cdot \frac{D_{\lambda}^*}{D_{\lambda_p}^*} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\alpha} \cdot \tau_{\alpha}(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

式中: D_{λ}^* 为光谱比探测度; $D_{\lambda_p}^*$ 为峰值比探测度。

本文采用 NUAA-IRSE 软件中提供的某典型红外搜索跟踪系统的性能参数计算无人机的探测距离。探测距离计算参数如下: I_{α} 为前文计算的无人机红外辐射强度;由于高空背景辐射相对目标辐射较弱, I_{β} 在此忽略; $\tau_{\alpha}(\lambda)$ 由 NUAA-IRSE 软件根据飞行环境及当前距离自动调用 Modtran 软件进行迭代计算,其中考虑了地球曲率遮挡的影响;探测器工作波段分别为 $3.6 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 10.3 \mu\text{m}$;NEI 分别为 $5.06 \times 10^{-14} \text{ W/cm}^2$ 和 $1.32 \times 10^{-13} \text{ W/cm}^2$;SNR 取为 6; η 取为 0.8。

3 计算结果与分析

3.1 红外计算结果

3.1.1 壁面温度分布

蒙皮及排气系统喷管壁面的温度分布如图 5 所示,从图中可以看出:(1)由于无人机在高空亚音速条件下飞行,其蒙皮受到的气动加热较小,蒙皮

的温度分布较均匀,且与环境温度相当;(2)涡轮、中心锥和支板是温度比较高的部件;(3)引射套筒的温度呈现出窄边低、宽边高的分布趋势,并且其量值明显低于外涵壁面的温度,这是由于二元主管宽边的燃气流温度更高,以及引射套筒内窄边区域引射的冷气流量比宽边更多引起的。

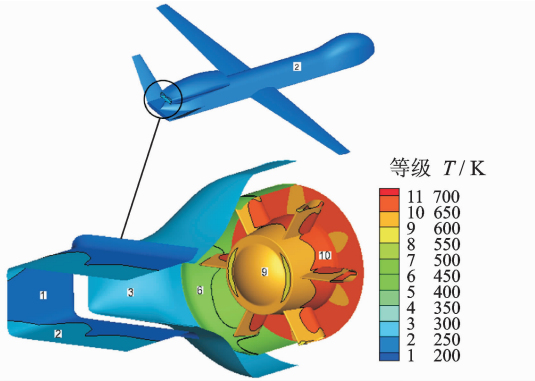


图5 蒙皮及喷管壁面温度分布

3.1.2 主要部件的红外贡献

下方探测面上蒙皮、喷管壁面和喷流的红外辐射强度分布如图6所示,其中 I 为积分红外辐射强度, $I_{\max, \text{NozzleWall}, 3\sim 5}$ 为喷管壁面在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的辐射强度最大值。从图中可以看出:(1)喷管壁面的 I 在 30° 之前较大,并且 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的量值相当;(2)由于蒙皮的温度很低,其在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的 I 很小;(3)相比于喷管壁面,蒙皮在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的 I 很大,并在 90° 达到最大值;(4)由于无人机使用无加力的小流量发动机,相比于喷管壁面来说,燃气喷流在各探测角度上的 I 都比较小。

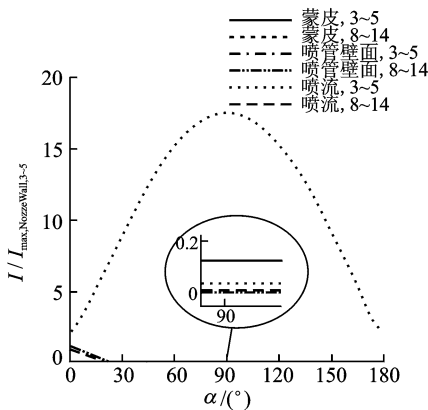


图6 蒙皮、喷管壁面和喷流的红外辐射强度对比(下方探测面)

下方探测面上喷管壁面的各主要部件在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的红外辐射强度分布如图7所示。从图中可以看出:(1)喷管壁面的 I 在 30° 范围内较大,在 30° 以后很小;(2)由于中心锥、涡轮和支板在小角度范

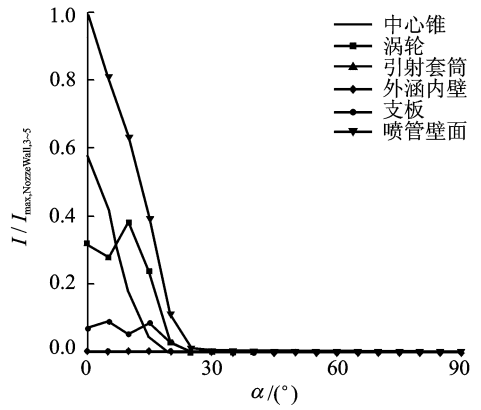


图7 喷管固体壁面的红外辐射贡献分布(下方探测面)

围内的投影面积较大,并且温度较高,是主要的红外辐射贡献部件;(3)尽管外涵内壁和引射套筒的投影面积较大,但是由于其温度较低,所以红外贡献较小。

3.1.3 低发射率材料对红外特征的影响

针对蒙皮、中心锥、涡轮和支板等红外辐射贡献较大的部件,使其壁面发射率由0.9降为0.2进行红外抑制。发射率降低后,辐射强度的变化趋势与降低前基本相同,其量值在各探测方向上均有明显降低。无人机在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的红外辐射强度分布如图8所示,其中 I 的量纲一常数 $I_{\max, 3\sim 5, 0.9}$ 是无人机固体表面发射率为0.9时,在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的辐射强度最大值。从图中可以看出:(1)在 30° 范围内,由于以排气系统的辐射贡献为主, I 的量值较大,并随角度增大而迅速减小。在 30° 以后,由于以蒙皮的辐射贡献为主, I 的量值较小,其变化趋势与蒙皮在各角度的投影面积变化规律相似;(2)由于无人机采用二元引射喷管,在下方探测面上,低温的引射套筒对内部高温部件的遮挡效果更明显,在小角度范围内,下方探测面的 I 小于水平探测面。由于蒙皮在下方探测面上的投影面积更大,在大角度范围内,下方探测面的 I 大于水平探测面。

无人机在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的红外辐射强度分布如图9所示,其中,为了与 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的红外辐射强度

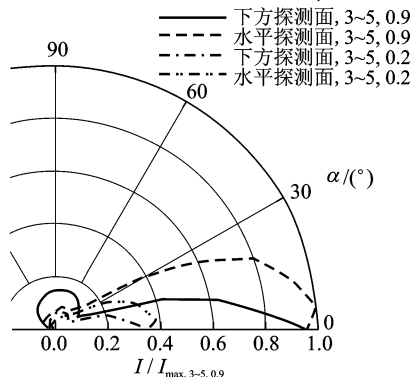


图8 无人机的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外辐射强度分布

相比较, I 的量纲一常数仍为 $I_{\max, 3\sim 5, 0.9}$ 。从图中可以看出:(1)由于以蒙皮的辐射贡献为主, I 的变化趋势与蒙皮在各角度的投影面积变化规律相似;(2)由于蒙皮在下方探测面上的投影面积更大, 下方探测面的 I 大于水平探测面;(3)与 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 相比, $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的 I 更大。

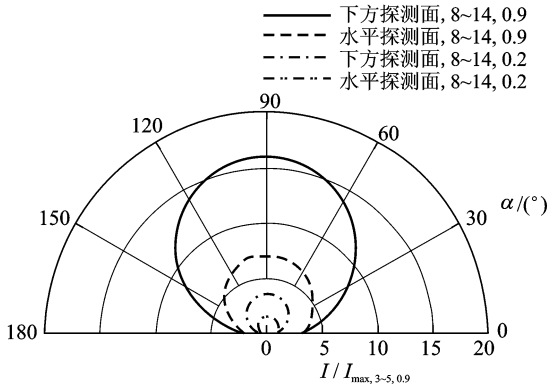


图9 无人机的 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 红外辐射强度分布

3.2 探测距离计算结果

3.2.1 低发射率材料对探测距离的影响

除下方探测面上某些角度存在地球曲率遮挡的影响以外, 其他探测方向上探测距离与无人机红外特性的分布规律基本相似。发射率降低后, 探测距离的变化趋势与降低前基本相同, 其量值在各探测方向上均有明显降低。无人机在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的探测距离分布如图 10 所示, 其中 $R_{\max, 3\sim 5, 0.9}$ 是无人机固体表面发射率为 0.9 时, 在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的探测距离最大值。从图中可以看出:(1)下方探测面的 R 会受到地球曲率的限制。当发射率为 0.9 时, 由于 I 足够大, 使得在 $60\sim 120^\circ$ 范围内的 R 大于无人机与地球表面之间的距离;(2)发射率降低后, 使下方探测面的 R 小于飞行高度, 不存在地球曲率遮挡的影响;(3)由于探测平面和探测方向不同, 导致大气透过率不同, 使得相同量级的 I 对应不同的 R 。如图 8 中下方和水平探测面上 30° 的 I 基本相同, 但是图 10 中下方探测面上对应角度的 R 更小, 这是由于在下方探测面上相同厚度的大气中含有的吸收介质浓度更大, 透过率更小。

无人机在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的探测距离分布如图 11 所示。从图中可以看出:(1)下方探测面的 R 受地球曲率限制的角度范围更大;(2)发射率降低后, 使下方探测面的 R 受地球曲率限制的角度范围变小;(3)尽管 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的探测器性能没有 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的探测器性能好, 但是由于 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的 I 的量值大以及相应波段内大气吸收相对较弱, 使得 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的 R 比 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 更大。

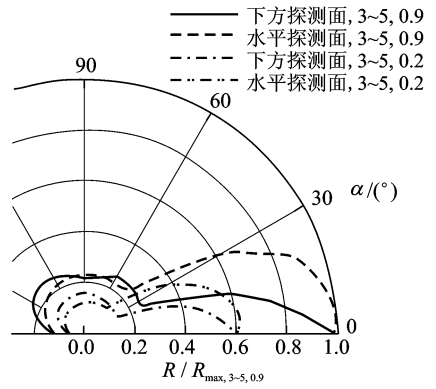


图10 无人机 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的探测距离分布

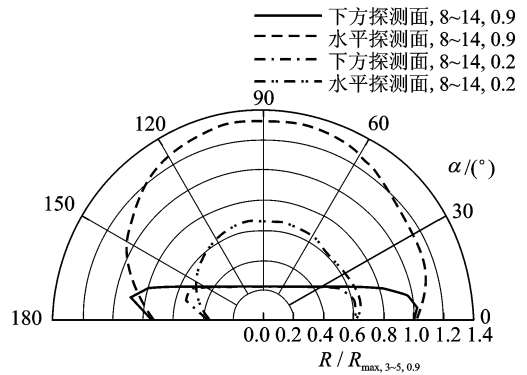


图11 无人机 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的探测距离分布

3.2.2 红外特征和探测距离降幅对比

发射率降低后无人机在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的红外辐射强度和探测距离降幅如图 12 所示。 I 的降幅在 $35\%\sim 77\%$ 之间, 其中降幅在机头方向最大, 在 30° 以后, 下方探测面上 I 的降幅比水平探测面上 I 的降幅更大; R 的降幅在 $27\%\sim 51\%$ 之间, 其中降幅在机头方向最大, 在 50° 以后, 水平探测面上 R 的降幅比下方探测面上 R 的降幅更大。

发射率降低后无人机在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的红外辐射强度和探测距离降幅如图 13 所示。 I 的降幅在 $67\%\sim 77\%$ 之间, 在 40° 以后, 下方和水平探测面上的降幅都较大; 水平探测面上 R 的降幅在 $40\%\sim 50\%$ 之间, 受地球曲率影响, 下方探测面上 R 的变化不大。

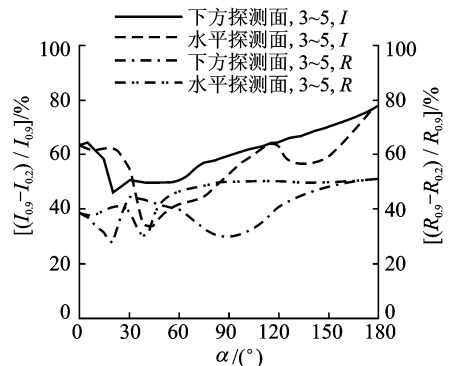


图12 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外辐射强度和探测距离降幅对比

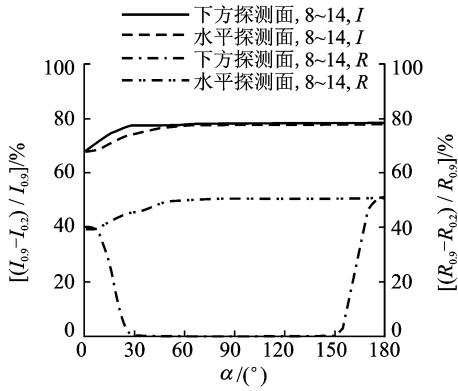


图 13 8~14 μm 红外辐射强度和探测距离降幅对比

4 结 论

本文以采用二元引射喷管的高空无人机为研究对象,用数值模拟的方法计算了低发射率材料对无人机红外特征和探测距离的影响,主要结论如下:

(1)发射率降低后,无人机的红外辐射强度以及探测距离的变化趋势与发射率降低前基本相同,并且其量值有明显降低。

(2)发射率由 0.9 降为 0.2 后,在 3~5 μm 波段内,无人机的红外辐射强度的降幅为 35%~77%,探测距离的降幅为 27%~51%。

(3)发射率由 0.9 降为 0.2 后,在 8~14 μm 波段内,无人机的红外辐射强度的降幅为 67%~77%,探测距离的降幅为 40%~50%。

参考文献:

- [1] 王淑芬. 无人机发展的情报研究[J]. 飞航导弹, 1998(10):1-5.
Wang Shufen. Intelligence research of UAV development [J]. Winged Missiles Journal, 1998(10):1-5.
- [2] 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.
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.
- [3] 施小娟,吉洪湖,罗明东. 发动机背负式安装无人机的排气系统红外特征的计算研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(4):651-656.
Shi Xiaojuan, Ji Honghu, Luo Mingdong. Numerical simulation of infrared radiation characteristics for exhaust system of an UAV with engine installed on the back of the fuselage [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(4):651-656.
- [4] 罗明东,吉洪湖,黄伟,等. 轴对称喷管与后机身组合结构的红外特性实验[J]. 南京航空航天大学学报, 2007,39(3):293-297.
Luo Mingdong, Ji Honghu, Huang Wei, et al. Experiments on infrared radiation characteristics of combination axisymmetric nozzle and aft fuselage[J].

Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007, 39(3):293-297.

- [5] 李娜,吉洪湖,黄伟,等. 混合排气二元收敛喷管气动与红外隐身综合设计方法[J]. 航空动力学报, 2011, 26(11):2563-2570.
Li Na, Ji Honghu, Huang Wei, et al. Comprehensive design of aerodynamic and infrared stealth of 2-D convergent nozzle with mixed flow [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(11):2563-2570.
- [6] 张勃,吉洪湖. 大宽高比矩形喷管的射流与外流掺混特性的数值研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(1):104-110.
Zhang Bo, Ji Honghu. Numerical study of internal and external flow mixing for rectangular nozzles with large aspect ratio [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(1):104-110.
- [7] 黄伟,吉洪湖,罗明东,等. 低速排气非对称二元喷管红外辐射特性实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2008,40(1):16-20.
Huang Wei, Ji Honghu, Luo Mingdong, et al. Experimental investigation on IR characteristics of un-symmetrically two-dimensional nozzle at low exhaust velocity[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 40(1):16-20.
- [8] 刘福城,吉洪湖,斯仁,等. 短套管二元引射喷管设计及气动与红外特性数值研究[J]. 红外技术, 2013, 35(10):607-610.
Liu Fucheng, Ji Honghu, Si Ren, et al. Numerical simulation of two-dimensional ejector nozzle with short shroud [J]. Infrared Technology, 2013, 35(10):607-610.
- [9] 冯晓星,吉洪湖,斯仁,等. 战斗机 3~5 μm 波段红外特征空间分布及低发射率材料隐身效果分析[J]. 红外技术, 2011,33(7): 389-394,405.
Feng Xiaoxing, Ji Honghu, Si Ren, et al. Numerical study on spatial distribution 3—5 μm infrared signature and stealth effect of low emissivity material for fighter aircraft [J]. Infrared Technology, 2011, 33(7): 389-394,405.
- [10] 祁蒙. 红外搜索跟踪系统的探测概率研究[J]. 激光与红外, 2004,34(4):269-271.
Qi Meng. Detection probability of IR search and track system [J]. Laser & Infrared, 2004, 34(4): 269-271.
- [11] 罗明东,吉洪湖,黄伟. 非加力涡轮发动机排气系统红外辐射强度的数值计算研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(10):1609-1616.
Luo Mingdong, Ji Honghu, Huang Wei. Numerical evaluation on infrared radiant intensity of exhaust system of turbine engine without afterburning [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(10):1609-1616.
- [12] 吴晗平,易新建,杨坤涛. 红外搜索系统的作用距离及其等效检验[J]. 红外技术, 2004, 26(4): 1-5.
Wu Hanping, Yi Xinjian, Yang Kuntao. Distance of infrared search and track system and its equivalent examination [J]. Infrared Technology, 2004, 26(4): 1-5.

