

文章编号: 1672-8785(2016)10-0017-06

武装直升机对红外末端防空制导 导弹的威胁及对策分析

杨俊彦^{1,2} 宋敏敏^{1,2} 吕 骏^{1,2}

(1. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109 ;

2. 中国航天科技集团公司红外探测技术研发中心, 上海 201109)

摘 要: 武装直升机具有优异的红外隐身性能和机动能力, 能突破末端红外防空系统, 在现代对地突袭战中发挥着巨大的作用。以阿帕奇武装直升机为例, 基于流体软件建立其红外辐射模型, 分析了该直升机在低空时的红外目标辐射特性。针对红外末端防空导弹的主要工作波段, 分别计算了其在 3~5 μm 中波红外以及 8~12 μm 长波红外区间的红外辐射强度。最后, 以此为基础, 分析了武装直升机对末端红外防空的主要威胁, 并探讨了几种提高武装直升机探测能力和抗干扰能力的方法。

关键词: 直升机; 红外; 末端防空; 对策

中图分类号: TN 215 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.10.004

Analysis of Threat and Countermeasure of Armed Helicopter to Infrared Terminal Air Defense Guided Missile

YANG Jun-yan^{1,2}, SONG Min-min^{1,2}, LV Tao^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China;

2. Infrared Detection Technology Research and Development Center,

China Aerospace Science and Technology Corporation, Shanghai 201109, China)

Abstract: Because of excellent infrared stealth performance and mobility, armed helicopters can break through terminal air defense systems and play a huge role in modern warfare. Taking an Apache armed helicopter as an example, an infrared radiation model is established on the basis of a fluid dynamics software. The infrared radiation characteristics of the helicopter flying at low altitude are analyzed. For the main operation wavebands of terminal infrared air defense missiles, their infrared radiation intensity values in the middle infrared waveband from 3 to 5 μm and in the long infrared waveband from 8 to 12 μm are calculated respectively. Finally, on this basis, the main threat of an armed helicopter to terminal infrared air defense is analyzed and several methods for improving the detection and anti-interference ability of armed helicopters are discussed.

Key words: helicopter; infrared; terminal air defense; countermeasure

收稿日期: 2016-05-13

作者简介: 杨俊彦 (1983-), 男, 山西代县人, 硕士, 主要从事红外探测与仿真技术研究。

E-mail: yjypop2014@163.com

0 引言

21 世纪初的几次局部战争表明, 武装直升机^[1]在独立作战以及配合支援陆军作战中起到了重要的作用。武装直升机具有火力大、机动能力强等特点, 它通过贴地低空飞行的方式, 借助地形地物隐蔽身形, 穿山越林, 悄悄地靠近敌方。同时, 其独到的机动性使其能随时改变飞行方向和飞行高度, 通过俯冲攻击和悬停攻击等方式在对地作战中发挥重要作用, 对装甲类车辆构成重要威胁。

武装直升机能完成^[2]超低空制空权争夺、火力支援、掩护机降与护航和攻击装甲车等地面目标的作战使命, 同时具备参与武装巡逻与侦察、登陆与反登陆作战以及特种作战的能力。武装直升机超低空飞行所具备的高性能攻击方式对现有防空武器系统产生了重要威胁。一是它可以采用地形地物为掩护的超低空飞行方式使预警跟踪系统难以及时发现; 二是采用红外抑制手段的武装直升机的红外辐射特性弱, 防空导弹很难捕获; 三是武装直升机一般在 10 km 外就发动攻击, 超过了现有末端防空导弹的防御范围。另外, 如果武装直升机和无人机等配合作战, 接受无人机发出的预警指令, 也就是说, 当无人机发现空袭目标进入机载导弹的射程内时, 直升机可以通过突然跃升、悬停以及瞄准等方式发射攻击导弹。因此, 如何防御具备超低空入侵能力的武装直升机已成为国内外普遍关注的问题。这些武装直升机主要包括美国的 AH-64、俄罗斯的米-28、卡-50 和意大利的 A-129 等直升机。

1 典型武装直升机目标的特性分析

国外现役的武装直升机以美国的 AH-64D 长弓阿帕奇最为典型, 它饱经战场的考验, 在 20 世纪参与了 1989 年的巴拿马战争、1991 年的海湾战争、1992 年的波黑战争以及 1999 年北约对南联盟的军事入侵; 21 世纪后美国发起的局部战争中基本都有它的身影, 它是当今世界上现在还在服役的最先进的重型武装直升机之一。因此, 本文以阿帕奇武装直升机为计算对象, 通

过流体软件建立其红外辐射模型, 仿真计算其在低空状态的红外辐射特性, 同时以此为基础讨论武装直升机对末端红外防空的主要威胁, 探讨提高对武装直升机的探测能力和干扰对抗能力的方法。



图 1 全副武装的 AH-64D 阿帕奇武装直升机

1.1 目标特性及建模参数

阿帕奇武装直升机主要由机身、旋翼、尾桨、发动机、武器系统以及红外隐身装置等组成, 其主要几何参数见表 1。

基于收集的阿帕奇武装直升机的相关图片和主要几何参数, 对阿帕奇武装直升机的外形和结构进行了几何反演, 建立了能够反映机身、旋翼、尾桨、排气喷管、进气道以及红外抑制器方位等特征结构的直升机三维模型, 具体如图 2 所示。

表 1 阿帕奇武装直升机的几何外形参数^[3]

序号	项目	参数 (m)
1	机长	17.76
2	机高	3.52 (至垂尾); 4.30 (至尾桨)
3	旋翼直径	14.63
4	尾桨直径	2.77
5	短翼翼展	5.23
6	红外隐身装置	用低发射率材料作 衬里的黑洞式多分流 排气管 (BHO) 引射器



图 2 阿帕奇直升机的简化模型

1.2 辐射强度估算方法

1.2.1 物理模型

武装直升机整机本体的红外辐射可分为蒙皮表面红外辐射和气体尾焰辐射两部分, 因此需要同时考虑直升机旋翼和红外抑制器对红外辐射的影响。

蒙皮的红外辐射计算方法^[4]是, 首先建立武装直升机三维模型, 然后生成计算网格, 以此为基础, 计算在某一飞行状态下武装直升机的表面温度场, 然后根据表面材料的辐射特性, 求解所画网格生成的各微元表面之间的角系数。尾焰红外辐射的计算方法是, 尾焰红外辐射的传递过程由辐射传输方程控制, 基于红外辐射的容积性、选择性以及方向性, 该控制方程通常是积分方程或微分-积分方程。因此, 本文采用正、反射线迹法对直升机红外辐射特性进行仿真模拟。同时, 考虑了直升机的旋翼对直升机整体红外辐射产生的影响, 即旋翼产生的下洗气流与机身换热会改变机身表面温度场分布、旋翼的下洗气流与发动机抑制器喷流会发生强烈混合, 甚至能改变发动机喷流流动方向。如图 3 所示, 令武装直升机旋翼叶素的安装角是 ϕ , 叶素旋转时的速度 $u = \omega r$, 考虑由旋翼之上与旋翼之下的气流传递产生的诱导速度 v 对叶素的影响, 基于三角形法则, 就可确定直升机悬停状态下旋翼桨叶叶素的速度矢量。

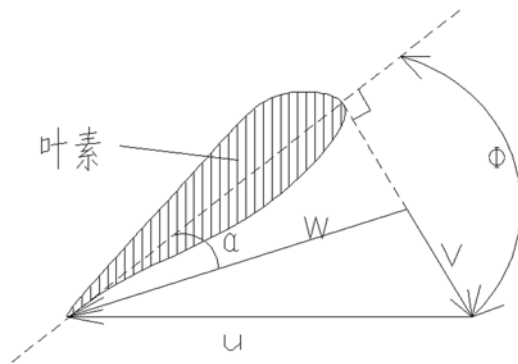


图 3 桨叶叶素的速度多边形

1.2.2 计算方法

通过 Fluent 软件计算得到直升机的蒙皮温度场和尾焰流场数据 (包括温度、压力、浓度), 然后采用光线追迹法^[5,6]处理这些数据, 即通过正向追迹确定尾焰和喷管壁面对测试点的红外辐射, 并通过反向追迹确定到达测试点的这些光线的能量总和。

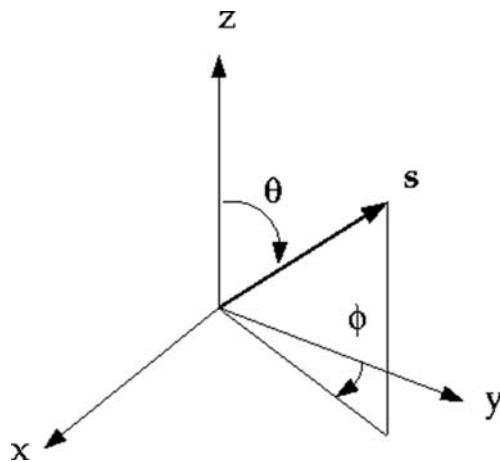


图 4 离散角的参考坐标系

如图 4 所示, 正向追迹的第一步是追踪一定空间立体角内从离散测试点发出的光线。令观测点的坐标为 (x, y, z) , 它发出的光线为 s , 它的天顶角和方向角分别为 θ 和 ϕ 。因为直升机计算区域离观测点的位置较远, 即从观测点向直升机所张的立体角远小于半球空间 2π , 所以在正向过程中, 须在立体空间内尽可能小地对发射光线进行坐标离散。然后, 将观测点与目标中心的连线定为法线方向 s , 直升机的计算边界

与观测点的连线和法线方向的最大夹角 θ_{max} 是天顶角 θ 的离散上限, 而圆周角 φ 取值 2π 。

将天顶角和圆周角分别离散为 m 和 n 份, 形成 $m \times n$ 个等分立体角。对于每个立体角单元中心发出的光线, 在传递方向只考虑其衰减和发射辐射的作用, 忽略散射, 即只考虑一维多层介质的辐射传输问题, 认为在尾焰与光线相交的方向, 光线会一直向前, 直至离开尾焰或遇阻于壁面。当光线遇阻于喷管壁面时开始反射, 反射光线在 2π 空间内离散, 同时认为反射微元面 i 是漫反射, 求得反射光线与其它喷管各个微元表面的交点。

统计单元面 i 上的漫反射光线与其它单元面的交点数 m , 可求得这 m 个单元表面对表面 i 在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 的辐照度, 具体是

$$H_i = \sum_{j=1}^m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\Omega_i} L_j(T_j) \cos \theta_j d\omega d\lambda \quad (1)$$

式中, L_j 为第 j 个单元表面的辐射亮度, T_j 为第 j 个单元表面的温度, θ_j 是第 j 个单元表面中心与单元面 i 中心的连线和法线方向的夹角, ω 为第 j 个单元表面向单元面 i 所张的立体角, λ 为波长, 单元面 i 的辐射边界条件设定为

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_i^0 d\lambda = \varepsilon_i \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_i(T_i) d\lambda + \frac{1 - \varepsilon_i}{\pi} H_i \quad (2)$$

式中, 右边第一项为单元面 i 在波段内自身辐射的光谱辐射亮度, 第二项为单元面 i 对 m 个单元表面入射辐射的反射, ε_i 是单元面 i 的发射率。

反向过程开始于光线到达目标的最后一个交点。在光线能量反向到达探测点的过程中, 需求解能量辐射输运方程。在波段内, 吸收、发射和散射性介质内的辐射传递方程为

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{dL}{dl} = -k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L d\lambda + k_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_b d\lambda + \frac{k_2}{4\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\Omega=4\pi} L(\theta, \varphi) \phi(\theta, \varphi) d\Omega d\lambda \quad (3)$$

式中, k 、 k_1 和 k_2 分别为光谱衰减、吸收和散射系数, $k = k_1 + k_2$, L 为传输方向 l 上的光谱辐射亮度, Ω 为立体角, ϕ 为散射相函数。

只考虑完全燃烧情况, 即假设传输方程中的散射项为零。在计算一个光线行程内的辐射能量之前, 空间离散能量辐射输运方程, 同时沿光线传递方向分层。代表本层的为每层的中心点, 总共 n 层。然后, 累加光线行程中所有层的能量, 可获得反向光线到达探测点的光谱辐射亮度, 即

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{L^0 \tau_1 \tau_2 \cdots \tau_n + L_b^1 (1 - \tau_{1\sigma}) \tau_2 \cdots \tau_n + \cdots + L_b^{n-1} (1 - \tau_{(n-1)}) \tau_n + L_b^n (1 - \tau_n)\} d\lambda \quad (4)$$

由普朗克公式可知:

$$L = \frac{2\varepsilon_i h c^2 \lambda^{-5}}{\exp(\frac{hc}{k_0 \lambda T_i}) - 1} \quad (5)$$

式中, L 是光谱辐射亮度, ε_i 为单元 i 的发射率; h 为普朗克常数; c 为光速; k_0 为玻尔兹曼常数; λ 为光波波长; $\tau_i = \exp(-\Delta l_i k_i)$ 为第 i 层的光谱透过率, k_i 是第 i 层的光谱吸收系数。

当光线达到壁面时, L^0 为该面元向光束传播反方向发射的光谱辐射亮度, 如果光束直接逸出计算域, 则 $L^0 = 0$ 。

在跟踪完所有光线束后, 根据热辐射发射表面和接收表面几何关系的交互性, 可计算得到在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内的尾焰和直升机到达探测点的辐射照度:

$$H = \sum_{j=1}^N \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\Omega_i} L_j^n(T_j) \cos \theta_j d\Omega d\lambda \quad (6)$$

式中, N 为对探测点有贡献的光线总数; θ_j 为第 j 个单元立体角中心方向与其所在测点表面法线的夹角。将探测目标作为点源处理, 其辐射强度 I 表示为辐射照度乘以探测距离的平方:

$$I = H \cdot R^2 \quad (7)$$

式中, R 为探测距离。

1.3 目标辐射强度分析

假设直升机处在悬停状态, 悬停高度为 30 m, 分别计算 3~5 μm 中波波段和 8~12 μm 长波波段的红外辐射强度, 计算结果如图 5 所示。

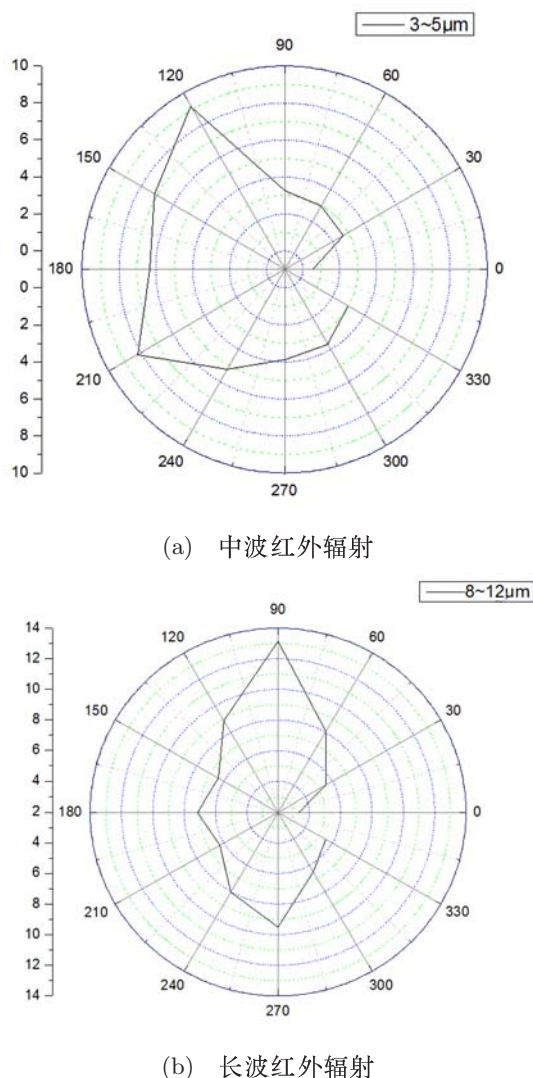


图 5 阿帕奇武装直升机红外辐射强度的空间分布

如图 5 所示, 该武装直升机在中波波段和长波波段沿迎头方向即 0° 时红外辐射强度的空间分布不一致, 不过能量都最弱。总体而言, 长波红外辐射的强度大于中波。而在以直升机为末端防空对象的红外导弹的实际工作波段中, 选用长波波段是一个发展趋势。

2 武装直升机作战威胁分析

2.1 红外隐身对目标探测的影响

从图 5 可以明显看出, 采用红外隐身措施的阿帕奇武装直升机在迎头方向的辐射强度小于 4 W/Sr , 是典型的弱目标。根据现有作战模式, 需要保证红外制导导弹的 10 km 有效射程,

以对抗武装直升机。考虑到武器系统的反应时间, 对制导系统的探测能力至少要达到 12 km 以上。对辐射能量如此小的直升机, 这无疑是很困难的, 也是现有末端防御系统难以达到的。据报道, 美国正在着力开发的 RAH-66 武装直升机将红外抑制系统综合设计到了机体中, 并将红外抑制器安置在尾梁中。该直升机采用独特的长条形排气口设计, 留有使发动机的排气和冷却空气全部混合的足够长度, 故被称为“最冷的直升机”。这些措施对末端防空无疑是更大的威胁 [7]。

2.2 红外干扰对精确制导的影响

随着光电对抗技术的快速进步, 以激光定向干扰为代表的红外干扰系统 (Directional Infrared Countermeasures, DIRCM) 已经成为末端防御制导导弹面临的主要威胁。激光定向红外干扰是在导弹视场的小立体角内将激光干扰源的能量集中, 瞄准导弹的红外制导系统进行定向发射, 把干扰能量聚焦到红外制导探测系统上, 使制导系统上的探测器及电路输出饱和, 从而“致盲”导弹, 使其丢失目标。

现役武装直升机机载红外对抗武器除了 DIRCM 外, 主要是红外诱饵弹。随着末端红外制导导弹技术的发展, 红外诱饵弹也在不断更新换代。譬如, 新型运动红外诱饵弹 MJU-47B 采用改进后的镁与特氟龙的混合物 MAGTEF 颗粒作为烟火材料, 这种材料既能模拟武装直升机的红外辐射特征, 又能产生足够的推力使诱饵弹跟随直升机飞行, 延长了红外诱饵与直升机分离的时间。以前通过预推保持识别目标对抗红外诱饵的方法已经失效。另外, 正在发展的多频谱诱饵弹如 AD-7 红外诱饵弹, 采用特殊的复合材料完全模拟装载对象的光谱特征, 通过有针对性地在装载对象的频谱区燃烧来对抗特定的末端防御导弹。这已经成为制导导弹对抗干扰的一个新难题 [8]。

3 末端防空制导对策分析

3.1 提高探测隐身直升机的能力

武装直升机红外抑制技术的发展对红外制导导弹的探测能力无疑是一个极大的挑战。虽然采用多模 / 多波段等复合探测手段可以通过增加多维度信息来识别目标, 提高探测能力, 但这种方法的缺点是占有弹上空间及资源, 会增加系统集成的复杂度和成本。此外, 还可以采用预警雷达航迹信息与弹上制导导引系统惯性空间目标轨迹匹配方法, 通过雷达航迹信息来增加来袭目标的空间维度信息总量, 从而降低制导导引系统的虚警率; 也可以添增地面武器系统的高速信号处理系统, 在末端防御导弹发射前就使其与制导导引系统进行有效信息通信和融合, 从而克服因弹上资源受限而无法进行的高复杂度强鲁棒性信息处理算法运算的缺点, 提高目标的识别能力。还可以采用微型捷联惯性导航技术, 在不大幅增加弹上资源、成本和满足惯导精度要求的基础上, 使导弹具备射后截获能力, 提高导弹的有效射程。

3.2 提高对抗复杂新型干扰的能力

红外制导导弹的抗干扰性能水平已成为制导系统设计中一个永恒的热点。及时了解和掌握各型干扰的多维形态特征和辐射特性, 基于红外制导导弹探测器、速率传感器等采集到的丰富信息进行系统级的信息决策融合, 是对抗复杂新型干扰的必要条件和手段。

对于激光定向红外干扰, 可利用激光被动探测干扰源的方位信息与强度信息, 与红外通道进行目标的信息融合, 形成复合制导来对抗。当制导系统未受激光干扰影响时, 可采用红外通道进行制导跟踪。如果激光干扰强度足以对红外通道造成致盲干扰, 则红外探测转为激光探测, 通过反演干扰源的方位与强度信息, 保持对

目标的锁定跟踪; 或利用激光干扰的周期性控制红外通道的采样条件, 实现激光与红外的复合制导。利用激光 / 红外复合成像探测也是对抗新型干扰的一种有效途径。没有干扰时, 主动发射激光, 利用回波探测目标的位置并获得距离信息。遭遇激光干扰时, 利用激光成像, 以更高的空间分辨率获取激光的干扰位置和强度信息, 同时准确探知弹目距离信息, 从而大大提升抗干扰能力。

4 结束语

随着武装直升机的不断研制和开发, 其机动水平和隐身能力在不断增强。同时, 武装直升机的红外对抗手段也在不断发展, 红外末端防空制导需要通过配装红外抑制器和红外诱饵来应对武装直升机的威胁。对武装直升机红外辐射特性的分析结果表明, 红外导弹可以采用轨迹匹配、微型惯组和被动激光 / 红外探测等多种手段, 提高末端防空制导系统对武装直升机的探测能力和干扰对抗能力。

参考文献

- [1] 周家波, 杨凯. 武装直升机现状和发展趋势探析 [J]. 国防科技, 2007, 21(5): 40-44.
- [2] 肖计划. 论联合作战中武装直升机攻防与地形 [J]. 航空科学技术, 2001, 20(5): 33-36.
- [3] 张洪成. PELE 对低空目标毁伤性能研究 [D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [4] 宋敏敏. 基于 CFD 流体仿真软件的反舰导弹红外辐射特性分析 [J]. 红外, 2014, 35(1): 24-32.
- [5] 王同辉. 直升机用引射式红外抑制器气动和红外辐射特性计算 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [6] 潘丞雄. 直升机红外辐射特征分析及抑制技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [7] 孙轶. 国外武装直升机隐身技术的发展 [J]. 舰船电子工程, 2012, 32(6): 11-12.
- [8] 刘波. 国外武装直升机红外对抗技术的发展 [J]. 舰船电子工程, 2012, 32(7): 8-10.