武装直升机红外隐身系统研究

武振波 武 哲
(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系，北京 100083)

摘 要：根据武装直升机在执行作战任务时所面临的战场环境，明确了红外隐身时重点考虑红外制导导弹的威胁，介绍了红外制导的方式及发展趋势，导出了导弹在点源制导和成像制导两种情况下作用距离的计算公式，论述了获得武装直升机红外辐射特性的理论分析计算和飞行测量两种途径，通过算例研究辐射强度和温差对导弹作用距离的影响，并对红外抑制效果与途径进行分析.

关 键 词：直升机；红外探测器；飞行测量；红外抑制
中图分类号：V 218
文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2003)07-0588-05

Research on infrared stealth system for armed helicopter

Wu Zhenbo Wu Zhe
(Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the battlefield environment for performing operational mission, emphasis should be placed on the threat from infrared guided missile when conducting infrared stealth for armed helicopter. Modes and developing tendency of infrared guidance were introduced, calculation formulas of performance range of point-source and imaging guided missile were derived, and two approaches, theoretical analysis computation and flight measurement, of obtaining infrared radiation characteristic of armed helicopter were described. Effects of radiation intensity and difference in temperature on missile performance range were studied through samples. Infrared suppression effects and approaches were analyzed.

Key words: helicopter; infrared detectors; flight measurement; infrared suppression

武装直升机是名副其实的攻击型武器装备，实质上是一种超低空火力平台，其强大火力与特殊机动能力的有机结合，可以有效地对各种地面、水面、水下和超低空目标进行精确的打击，在现代立体合成作战中具有不可替代的地位和作用. 现代先进武器装备的一个重要发展方向是隐身机，即控制并降低目标特征信号，对武装直升机来说，对其进行红外隐身的研究具有重要的军用价值. 本文分析武装直升机在执行作战任务时所面临的战场环境，重点介绍来自红外制导导弹的威胁及发展概况、作用距离的计算公式，同时论述了获得武装直升机红外辐射特性的理论分析计算及飞行测量两种途径，最后就红外抑制的效果与途径进行分析.

1 战场环境分析

分析武装直升机面临的战场环境，首先应该考虑它的活动区域. 它执行作战任务时一般在低空、超低空或贴地飞行，有时会利用地形、地物隐蔽接近目标. 由于现在防御性武器装备不断发展，对武装直升机的生存有很大的威胁，其威胁主要来自两个方面：地面的防空武器和空中的飞行器. 地面防空武器有高射炮与机枪，有的机炮射程远，

收稿日期：2002-04-22
作者简介：武振波(1976—)，男，辽宁朝阳人，博士生，wzbaizsh@sina.com.

低空追踪性能好，另外还有地对空导弹，特别是肩射导弹.空中威胁来自固定翼战斗飞机和敌方武装直升机.战斗机相对于直升机来说速度快、高度高，但超低空飞行性能不如直升机，如果被追击则可以立即在空中机动飞行，下降高度进入超低空，利用地形地物隐蔽自己，极有可能摆脱跟踪和攻击；如果携带空对空导弹，可以寻找有利时机，占据有利位置，发射导弹将其击落，因此固定翼飞机对武装直升机的威胁不是很大.威胁最大的还是敌方武装直升机，双方空战时，近距使用机炮，远距使用空对空导弹.

据统计表明，在几次局部战争中，地(空)-空导弹对飞机毁伤概率已达94%，高射炮毁伤概率达6%，在地(空)-空导弹中，红外制导的导弹占90%，雷达制导的导弹占4%，现代高炮火控系统又有相当部分配备光电跟踪系统.武装直升机超低空或贴地飞行执行任务时所在的空域常为敌方地面雷达探测的盲区，这时应重点考虑来自红外制导武器的威胁，特别是来自红外制导导弹的威胁，包括地对空和空对空导弹.总之，对武装直升机红外隐身系统进行研究业已成为重要的课题.

2 红外制导

红外制导由于制导精度高、抗干扰能力强、隐蔽性好等特点，已成为精确制导武器的重要技术手段.红外导弹制导主要分为点源制导和成像制导两种方式.点源制导是将目标作为热点处理，利用目标的绝对热红外辐射量，因而分不清目标和背景的细节，故容易受背景和假目标的干扰；而成像制导利用目标和背景的热辐射温差，形成目标和背景的热图图像来实现自动导引，它除了利用目标的绝对热辐射量外，更主要的是利用目标的相对热辐射来探测、识别目标.

红外制导技术的发展趋势为：工作波段从3～5 μm向8～14 μm及双波段发展；探测器由单元和多元向焦平面发展；探测类型由点源向扫描成像和凝视成像发展；战术使用上从初始自主攻击向自主攻击、高智能化发展.

3 导弹作用距离计算

作用距离是红外制导导弹的一个重要的综合性能指标，它主要取决于红外导引头的性能，是系统探测的信噪比为某一定值时的最大探测距离.红外导引头的制导方式分点源制导和成像制导两种情况，下面分别给出其作用距离的计算公式.

3.1 点源制导

选择扫描探测系统，当武装直升机距离导弹比较远时，其在导弹导引头探测器的视场内，红外系统所接收到的目标红外辐射量与目标和系统之间的距离有关.由于推导过程比较繁杂，参考文献[1]推导出计算公式：

$$R=[(I-A_pL_b+A_pL_p)\bar{\tau}_a]^{1/2}[D^*]^{1/2}\cdot\left[\frac{\pi}{2}D_0N_a\tau_0\right]^{1/2}\left[\frac{K}{(\omega\Delta f)^{1/2}R_{sn}}\right]^{1/2}\tag{1}$$

式中，I 为武装直升机红外辐射强度；A_p 为武装直升机在其与探测器的连线方向的投影面积；L_b 为未被武装直升机遮挡的背景辐射亮度；L_p 为武装直升机到探测器之间的大气的红外辐射(路径辐射)亮度；$\bar{\tau}_a$ 为大气传输平均透过率；D_0 为光学系统的有效孔径；N_a 为光学系统的数值孔径；τ_0 为光学系统平均透过率；D^* 为探测器的平均光谱探测率；ω 为瞬时视场；Δf 为等效噪声带宽；K 为修正因子；R_{sn} 为信噪比(由系统的探测概率和虚警概率确定).

3.2 成像制导

武装直升机充满红外成像系统热像仪的整个瞬时视场时，应作为扩展源进行探测，在计算其作用距离时需要从热像仪的特性参数最小可分辨温差 T_r 的定义导出来[2]，具体应用时需要进行修正：

$$T_r(f)=\frac{\pi^2}{4\sqrt{14}}R_{sn}\frac{T_ef}{F_t(f)}\left(\frac{\alpha}{\tau_d}\beta\right)^{1/2}\cdot(TF_r\Delta f_r)^{1/2}\frac{1}{K}\sqrt{\frac{7}{m}}\tag{2}$$

式中，R_{sn} 为识别目标所需的信噪比；α,β 为探测器的水平，垂直瞬时视场；$F_t(f)$ 为包括人眼在内的系统的总调制传递函数；f 为目标空间频率；F_r 为帧速；Δf_r 为等效噪声带宽；τ_d 为探测器滞留时间；T 为人眼积分时间；T_e 为噪声等效温差；m 为目标的长宽比；K 为具体要求下的概率所对应的信噪比与90%概率所对应的信噪比的比值.对于机载热成像系统，由于飞行环境的影响，T_r 值会上升约一个数量级.

若目标与背景的温差是 ΔT_0，在大气中传输时受到衰减，则降为

$$\Delta T_c=\tau(D)\Delta T_0\tag{3}$$

式中，D 表示目标与探测器系统之间的距离；$\tau(D)$ 为探测器通带内的大气透过率.

设直升机的临界尺寸为 H，距离为 D，则由 ΔT_c 所对应的极限空间频率 f_t 与作用距离 D 的关系可表述为

$$D=\frac{H}{n}f_t\tag{4}$$

热像系统对目标进行扫描形成热图,观察者要对热图进行判断,图 1 给出了不同探测、识别、认清概率情况下所对应的可分辨周数 n.

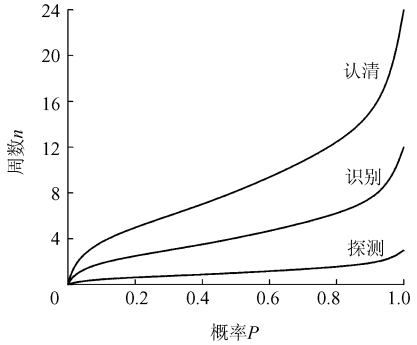

图 1　可分辨周数与概率的关系

武装直升机距离红外成像系统较远时,目标在探测器上是一像点,这时成像系统对点目标的作用距离需要由最小可探测温差 T_d 导出:

$$D = H\frac{1}{(\alpha\beta)^{1/2}}\left(\frac{\sqrt{2}\Delta T_0\tau(D)}{R_{sn}T_e}\right)^{1/3}\cdot [(\tau_d T F_r \Delta f_r)^{1/2}]^{1/3} \quad (5)$$

其中信噪比由探测概率 P[3] 确定,如图 2 所示.

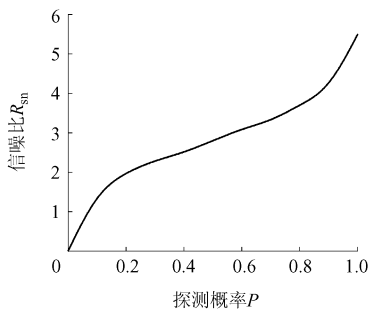

图 2　信噪比与探测概率的关系

4　红外辐射特性

武装直升机红外辐射特性的研究可以从飞行试验测量和理论分析计算两个方面进行,两者相辅相成,互为补充. 实际飞行测量可以得到直升机在真实飞行状态下的红外辐射特性,但是飞行实验测量耗资巨大,工作繁琐,尤其在型号研制初期,通过飞行实验获得红外辐射特性不太可能. 这时就需要进行理论分析计算,和飞行试验相比,所需经费少,可以在一定程度上模拟直升机的红外辐射特性,同时可方便对直升机的红外抑制效果进行分析.

4.1　理论分析计算

在点源制导中,武装直升机的红外辐射强度指总体红外辐射特性,它主要包括 3 个部分:机身蒙皮、发动机热部件及喷流. 在成像制导中,热图温差是辐射能之差,并不是直升机上真正的温差,红外辐射能量除了与本身温度有关外,还与表面发射率有关;要先计算武装直升机的蒙皮温度场,进而求得红外辐射强度,利用计算机模拟生成武装直升机在不同背景和不同方位角的红外图像. 其中蒙皮辐射可分为蒙皮自身辐射、蒙皮对太阳辐射的反射、蒙皮对背景(天空、地面等)辐射的反射.

机身蒙皮辐射的计算首先应该对武装直升机进行三维几何建模,明确各部位的材料特性(传导率、红外发射率、表面太阳吸收率),对目标进行三维网格划分,一般采用面元划分. 蒙皮辐射分为特殊表面和一般蒙皮两种情况进行处理,特殊表面包括发动机影响区、喷流加热区和内部器件散热加热蒙皮及内有燃油的蒙皮等. 要分别建立并求解平衡状态下的热传导方程,得到蒙皮表面的温度,利用红外物理学的基本公式分别计算每个面元的辐射强度,最后累加得到蒙皮的总体辐射.

蒙皮对太阳辐射的反射计算中,可以把太阳辐射看作平行入射,将每一面元视为小平面,通过理想的漫反射和接近理想的镜面反射的线性组合来计算反射强度. 背景为天空时,假定武装直升机上空的上半球的平均天空辐射是与天顶成 45°的天空辐射;背景为地面时,对地面辐射进行工程简化,将地面视为大面积的漫射灰体表面,即只与地面温度和发射率有关. 经过这样处理后就可以通过面元的定向反射率计算蒙皮对背景辐射的反射.

武装直升机上使用的涡轮轴发动机与一般的喷气发动机有很大的区别,通常喷口面积较小又较浅,有时喷口上翘,一般很难探测到自由涡轮后的高温物体的辐射. 发动机的热壁与喷口辐射可根据发动机的数据及其性能算出. 发动机喷流的辐射能取决于排气尾流的温度、化学成分和尾流形状,一般排气尾流红外辐射主要来自 CO_2、H_2O 和 C 粒子. 当直升机在飞行时,发动机喷流将会受到旋翼洗流的干扰,文献[4]采用自由尾流计算技术来分析旋翼洗流,确定喷流中心线的轨迹和速度分布,计算出不同位置喷流截面的形状及温度分布,这样就可以计算喷流的辐射强度,同时也能预测喷流加热区的蒙皮温度分布.

武装直升机在中波段 3～5 μm 的红外辐射主要来自温度最高的发动机热部件及排气尾流,而长波段 8～14 μm 主要来自蒙皮辐射,因为蒙皮辐射的峰值波长为 10 μm,加上蒙皮面积比发动机热部件面积大很多倍. 现在红外制导的工作

波段已扩展到远红外，所以蒙皮辐射在 8～14 μm 波段内具有极重要的地位[1].

4.2 飞行试验测量

理论分析计算可以在一定程度上对武装直升机红外辐射特性进行模拟与仿真，但只能作为一种辅助手段. 在国外，军用飞机、直升机必须进行红外辐射特性的飞行试验，而且明确规定在军用飞行条件下对飞机、直升机进行总辐射测量. 只有获得动态红外辐射特性数据，才能有效地研究武装直升机的红外辐射特性，这可以提高武器的研制水平，对红外隐身技术的发展将会有重要的意义.

主要选择地对空、空对空两种类型对直升机全方位的红外辐射特性进行飞行试验测量，建立红外辐射特性数据库，以便在具体作战环境下保证直升机在敌方导弹或探测设备方向上红外辐射尽可能小. 另外，红外辐射特性数据库有助于对直升机红外隐身性能进行鉴定与评估.

红外辐射特性测量的内容应该包括：武装直升机在不同飞行高度下的悬停、巡航飞行、侧飞状态(姿态、运动速度、发动机工作状态、尾喷流温度及气体成份)下所对应的红外辐射强度、红外光谱辐射强度分布、红外热像图、温度特性等. 实际飞行测量可以检验理论分析计算的有效性，同时为在役直升机的隐身改装提供依据.

5 抑制效果与途径分析

5.1 点源制导情况

选择武装直升机总体红外辐射强度作为红外抑制的特性参数，在得到对方导弹导引头参数后，通过公式(1)计算得到辐射强度与作用距离的定量关系. 下面算例的红外参数取为：工作波段 3～5 μm；瞬时视场 $\omega=0.25°\times0.25°$；数值孔径 $N_a=0.25$；有效孔径 $D_0=2$ cm；光谱透过率 $\tau_0=0.9$；探测器透过率 $D^*=5\times10^{10}$ cm·Hz$^{1/2}$·W^{-1}；噪声等效带宽 $\Delta f=1\ 000$ Hz；修正因子 $K=0.1$；信噪比 $R_{sn}=6$(与虚警概率和探测概率有关). 另外，取用于计算大气光学特性的大气模型为中纬度夏季模型. 3～5 μm 波段范围内的大气透过率 $\bar{\tau}_a$ 与距离 D 的关系如表 1 所示.

选取某型直升机在一定方位上进行计算，由于大气透过率与探测距离有一定的依赖关系，故在计算作用距离时运用迭代算法，得到曲线关系如图 3.

表 1 大气透过率与距离的关系

距离/km	1	2	3	4	5
透过率	0.59	0.46	0.41	0.39	0.36
距离/km	6	7	8	9	10
透过率	0.35	0.33	0.32	0.31	0.30

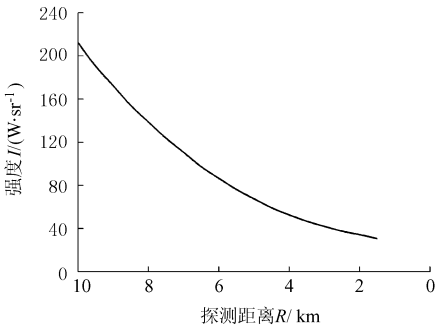

图 3 辐射强度与探测距离的关系

从(1)式可以看出，红外点源隐身的两个主要途径是减少辐射强度和改变辐射光谱. 图 4 中辐射强度为 200 W/sr 时的作用距离为 9.7 km，如果强度抑制 80%，即距离为 3 km，下降了 6.7 km，此时导弹攻击区大大缩小，红外抑制效果明显. 如果在此基础上继续降低辐射强度，使作用距离降到导弹最小发射距离(300～500 m)以下，则导弹失去效能[5].

5.2 成像制导情况

选择武装直升机与环境的温差作为研究目标来分析与作用距离的关系. 算例的参数：噪声等效温差 $T_e=0.3$℃；等效噪声带宽 $\Delta f_r=100$ kHz；瞬时视场 $\omega=0.3$ mrad×0.3 mrad；帧速 $F_r=30$ Hz；人眼积分时间 $T=0.2$ s；滞留时间 $\tau_d=3$ μs；另外取探测、识别、认清概率都为 50%，利用(2)～(5)式计算得到探测距离、识别及认清距离与温差的关系曲线，扩展源和点源情况分别见图 4、图 5.

降低机体和环境间的温差、改变机体的发射率及红外辐射光谱是红外成像隐身的主要途径. 图 4 中可以看出，温差在 600 K 与 100 K 之间作用距离变化不明显，而在 100 K 以下变化显著，故首先解决的就是 600 K 到 100 K 这一阶段，完成这一阶段后成像隐身才能取得明显效果.

这里需要说明，计算作用距离时是以人眼为依据，所以只能对红外抑制效果进行定性分析. 红外制导系统探测和识别目标是由所携带的计算机系统自动完成，这时所要求的是最小可分辨像元数. 可以通过改变武装直升机的热外形、减弱热辐射或进行干扰，使红外成像系统接收到的目标红外辐射信息特征淹没于干扰背景的红外辐射信息

之中,使常规的图像分割方法难以将武装直升机图像从背景中分离出来,因而无法检测和识别.

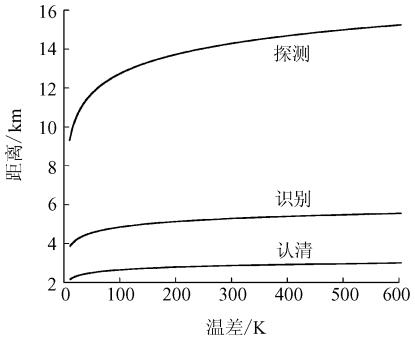

图 4　探测、识别及认清距离与温差的关系

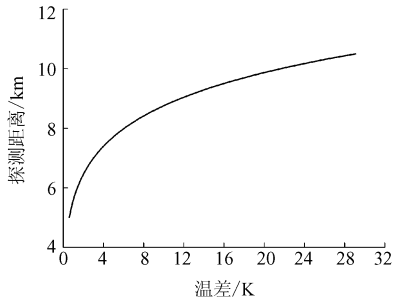

图 5　探测距离与温差的关系

现阶段红外探测与跟踪的主要波长为 3～5 μm,这是目前国外军用直升机广泛采用的红外抑制器的对抗波段.红外抑制器除了减少热部件的红外辐射外,还要降低排气尾焰的温度.新一代红外抑制技术要求在 3～5 μm 波长范围内红外辐射强度值控制在很低的范围内;同时在 8～14 μm 波长范围内不仅要求蒙皮表面冷却接近环境温度,又要求排气尾焰也降至某一要求范围.这时就要求排气系统与机身一体化设计,典型的是美国的 RAH-66,它减少红外信号的主要措施是采用“带状”排气系统,排气口沿尾梁间隔排列,尾喷流与悬翼下洗流掺混,从而红外辐射强度和尾喷流温度大大降低,显著地提高了生存能力.

6　结 束 语

武装直升机作为空中力量的一个重要组成部分,在恶劣的战场环境中必须有很高的生存能力,红外辐射特性已成为评价武装直升机总体性能的一项重要战术指标.本文对武装直升机的红外隐身系统进行了研究,通过算例给出辐射强度、温差与作用距离的定量关系,对红外抑制效果与途径进行分析,当然在一些具体的问题上研究得不是很透彻,需要继续讨论分析.

参考文献(**References**)

[1] 徐南荣,卞南华. 红外辐射与制导[M]. 北京:国防工业出版社,1997

Xu Nanrong, Bian Nanhua. Infrared radiation and guidance [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997(in Chinese)

[2] 骆清铭,刘贤德. 热成像系统作用距离的研究[J]. 激光与红外,1989,21(3):36～39

Luo Qingming, Liu Xiande. Research on function range of thermmal imaging systems [J]. Laser and Infrared, 1989, 21(3):36～39(in Chinese)

[3] Ratches I A. Static performance model for thermal imaging system[J]. Optics Engineering, 1976, 15(6):525～530

[4] 苏　媛, 王吉飞, 曹义华, 等. 旋翼洗流对发动机喷流影响的计算分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(3):297～300

Su Yuan, Wang Jifei, Cao Yihua, *et al*. Effects of rotor downwash on engine jet [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(3):297～300(in Chinese)

[5] 王永生,费洪柱. 红外隐身系统分析[J]. 隐身技术,1991(1):1～13

Wang Yongsheng, Fei Hongzhu. Analysis of infrared stealth system[J]. Stealth Technology, 1991(1):1～13(in Chinese)