

飞行器红外隐身技术

Infrared Stealth Technology of Air Vehicles

桑建华 张勇 / 中航工业成都所

导读：飞行器隐身技术包括雷达隐身、红外隐身和射频隐身等。随着红外传感器技术和计算机技术的发展，红外探测系统探测各种不同目标的能力有很大提高，因此，红外隐身技术也受到广泛重视和迅速发展。本文介绍了红外隐身技术的基本概念、目前研究发展状况及关键技术。

关键词：飞行器；红外线；隐身技术

Keywords: air vehicle; infra-red; stealth technology

1 红外隐身技术

1.1 红外隐身技术的内涵

隐身是目标相对探测系统而言的。目标未被探测系统发现或者识别，认为目标实现了隐身；目标已被探测系统发现或识别，则认为目标未能隐身。隐身技术包括雷达隐身、红外隐身、声隐身、可见光(或视频)隐身技术等。

因为雷达的作用距离远、功能强、精度高，对飞行器的威胁最为严重，所以飞行器以雷达隐身为重点。但近年来，红外探测和制导技术受到各军事强国的重视，相关技术得到了快速发展，如机载红外搜索跟踪系统(IRST)对战斗机的前向探测距离已达185千米左右，与机载雷达的作用距离相近，也对飞行器构成了日益严重的威胁。因此对飞行器红外隐身的需求越来越迫切，红外隐身的作用越来越重要。

红外隐身技术是武器平台针对敌方的红外探测系统(无源的)隐身技术，它属于武器平台有源或主动信号特征控制范畴。飞行器的射频隐身技术、潜艇的减振降噪技术也属于有源或主动特征信号控制范畴。

典型飞行器的红外辐射特征源包

括三大部分：发动机尾喷口/腔体热部件、尾喷流和机体外表面(图1)。

1.2 红外辐射的基本概念和红外隐身技术的特点

自然界中一切温度高于绝对零度的物体(物质)每时每刻都在向外界发射着红外辐射。红外辐射在本质上是电磁辐射。物体辐射出的红外能量的大小与物体的温度有关，并随着红外辐射的波长而变化。由普朗克定律也可以推导出黑体在全波长范围内的辐射出射度 M 与温度的关系式，即斯蒂芬-波尔兹曼定律。而实际物体的辐射出射度可在斯蒂芬-波尔兹曼定律的基础上引入材料的发射率 ε 来计算，即

$$M = \varepsilon \sigma T^4$$

其中， $0 < \varepsilon < 1$ 。一般来说， ε 是温度、辐射方向和波长的函数。因此，一般的辐射源的总辐射能力与其温度的四次方和材料发射率成正比。

此外，红外辐射在大气传输中存在四个大气窗口(表1)，在窗口内，红外辐射衰减减小，传播距离远；而在窗口外，红外辐射基本被大气吸收，传播距离短。第一窗口是早期红外探测装置的工作频段，其背景噪声大，现已不用于红外

探测；第四窗口的透过率较低，为半透明窗口，且飞行器在该窗口的辐射能量很弱。因此，红外探测装置的主要工作频段位于第二和第三大气窗口，红外隐身也是针对这两个大气窗口而言。

温度的不同导致红外辐射波长也不同。发动机喷管和尾喷流的红外辐射能量主要集中于 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波长范围内(也称为中波波段)，机体外表面的能量主要集中于 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波长范围内(也称为长波波段)。这三部分能量的总和，使飞行器的红外辐射能量达到一个非常大的量级(1000 W/sr)。由于高空背景干净、环境温度较飞行器机体温度低很多，飞

表1 红外辐射大气窗口及其波长范围

大气窗口	波长范围(μm)
第一大气窗口	2~2.5
第二大气窗口	3~5
第三大气窗口	8~14
第四大气窗口	16~24

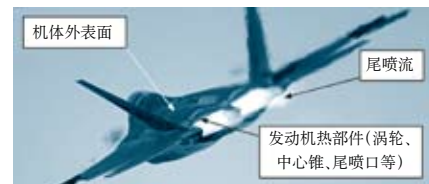


图1 飞行器的红外辐射源

飞行器红外辐射特征在天空背景中显得异常明显。因此,能量大、特征明显是飞行器红外辐射的一个非常重要的特点。

对于红外探测器(包括点源和成像探测器)而言,由于探测器与飞行器之间的距离远大于目标尺寸,因此,飞行器均可当作点源处理。在均匀背景下的点源红外探测器作用距离 R 可以表述为: $R \propto \sqrt{I}$ 。

因此,在均匀背景下,红外探测器对点源目标的探测距离 R 与目标辐射强度 I 的平方根值成正比关系。如果目标的红外辐射强度下降10dB(90%),则探测器作用距离下降68%。

红外隐身技术研究的核心和内涵是通过冷却、降温、遮挡和降低发射率等技术来控制或减缩武器平台可能被敌方红外探测器探测的红外特征信号,降低武器平台被发现、跟踪、识别、攻击的距离和概率。

2. 发展红外隐身技术的重要性

2.1 迅速发展的无源探测系统对飞行器构成了严重威胁

近年来随着传感器的元器件水平和计算机软硬件水平的不断提高,红外探测器及探测系统发展突飞猛进,已基本克服了传统红外探测器作用距离短、只能定向而无法测距定位的弱点,对武器平台的探测能力和威胁不断提高。

军用飞行器在红外频段所面临的威胁环境主要由机载红外搜索跟踪系统(IRST)、机载前视红外系统(FLIR)以及红外寻的导弹等组成。特别是红外探测器的定位研究也已经取得突破性进展,使得红外探测器具备了定位的能力。

目前,IRST已开始采用 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 双波段探测器件,而最新一代的IRST已采用分布式全向红外搜索/

跟踪/告警系统,如F-35飞机所装备的DIRS系统采用了分布式(共6个)红外探测装置,置于机体的不同位置,为飞机提供全向 360° 的视场,将IRST系统推向了一个新的水平。由此可见,红外探测是先进战斗机战场态势感知的重要手段之一,与协同作战体系的火控雷达系统、电子战系统交联配合,能大大提高战斗机的信息感知能力,使作战体系迅速处于有利态势击毁目标。因此,红外探测器(系统)的发展已经对飞行器构成严重的威胁。

当然,红外探测器的原理也决定了它所存在一些难以克服的弱点,其一是容易受到大气气溶胶的影响,如云、雨、尘埃、烟等对红外探测器均有很大的影响;其二是易受干扰和欺骗,普通的曳光弹、主动式干扰设备均可使红外探测器暂时失效。技术的进步可以部分解决一些问题,但不可能解决全部问题。

2.2 隐身设计、可探测性平衡设计原则

在对武器平台进行隐身设计时,应遵循平衡设计原则,即平衡可探测性原则:对敌方的各种重要探测系统,武器平台应呈现大致相近的被探测距离。目前雷达、红外搜索跟踪系统及无源探测系统是对飞行器作用距离最远的三种探测系统,武器平台的隐身设计应对这三种主要威胁进行平衡设计。雷达隐身性能提高后,降低了敌方的雷达探测距离,但敌方可用红外或无源探测系统来检测目标,因此目标可能会先暴露给对方的红外探测系统。所以隐身设计应遵循雷达隐身、红外隐身、射频隐身性能平衡设计的原则。如果飞行器首先被红外探测系统发现,表明红外辐射特征成为飞行器隐身平衡设计的短板。

3 国外红外隐身技术发展状况

以美国为代表的国外红外隐身技

术发展早已进入工程应用阶段,在红外隐身技术的具体应用实例中,比较典型的包括F-117、B-2、F-22、F-35及多型无人机(见图2~图5)等,所采用的红外隐身技术措施主要包括以下4项。

- 1) 异形喷口技术(各种不同宽高比的二元喷管及背负式排气系统);
- 2) 机体和排气口热壁面的冷却技术;
- 3) 排气系统与机身一体化设计技术,用低温部件对高温部件进行遮挡;
- 4) 各种温度条件下可靠工作的红外隐身涂料技术等。

4 红外隐身技术研究重点

红外隐身技术研究包括三大难点:一是发动机推进效率与红外隐身之间的矛盾,二是高速飞行时气动加热与红外隐身之间的矛盾,三是缺乏一些相关的基础理论、数学模型和数据。为解决这些技术难点,需要重点开展如下几方面的研究。

(1) 开展飞行器红外隐身数学模型与计算方法研究

包括建立红外隐身飞行器的机体表面和发动机排气系统(含尾喷管腔体和热喷流)的红外辐射计算数学模型及相应的计算方法,建立飞行器红外特征分析计算平台,并具有以下功能:一是飞行器热分析计算功能,包括建立高精度的气动加热及发动机排气系统温度场、浓度场和压力场等计算模型;二是飞行器红外辐射计算功能,包括求解机体表面和发动机排气系统的红外辐射及其在高温燃气及大气中传输问题;三是建立红外辐射计算所必需的高精度基础数据库,如材料发射率数据库、高温燃气谱带参数数据库等。

(2) 开展喷管腔体及喷流的红外特征控制方法研究



图2 采取红外隐身措施的F-117战斗机



图3 采取红外隐身措施的B-2轰炸机



图4 采取红外隐身措施的F-22战斗机



图5 采取红外隐身措施的无人机

包括红外隐身与发动机推进性能的相互影响关系研究,主要是发动机喷管腔体及热喷流的红外辐射特征控制方法和技术、排气系统红外隐身与飞行器后体综合设计方法等。主要技术包括:耐高温红外隐身材料的研制、发动机可接受的冷却降温、遮挡、隔热、异形喷口等技术及其在发动机上的综合应用研究等。

(3) 开展飞行器表面的红外隐身方法研究

包括飞行器表面的气动加热、传热

和红外辐射特性、飞行器表面的红外隐身机理和方法等,主要技术包括:气动加热的抑制机理和方法、红外隐身材料的低发射率研制、飞行器表面主动冷却技术、设计方法和应用技术等。

AST

参考文献

[1] 胡传炘. 隐身涂层技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[2] 李世祥. 光电对抗技术[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000.

[3] 张考, 马东立. 军用飞机生存力与隐身设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

[4] 汪亚卫, 李广义, 李业惠等. 展望航空新世纪—50位专家院士访谈录[M]. 北京: 航空工业出版社, 2008.

[5] Ludwig C B, Malkmus W, Reardon J E, et al. Handbook of infrared radiation from combustion gases[R]. NASA—SP—3080, 1973.

[6] 徐南荣, 朱谷君. 热空腔—喷气流的组合辐射[J]. 航空动力学报, 1995, 10(3): 295—298.

[7] 航空发动机设计手册编委会. 航空发动机设计手册第7分册——进排气装置[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002.

[8] 罗明东, 吉洪湖, 黄伟. 非加力涡轮发动机排气系统红外辐射特性的数值计算研究[J]. 航空动力学报, 2007(9): 1609—1616.

[9] Jim C, Denny B, Karen K, Kevin Y. F/A—22 IR signature flight test model validation[J]. Aircraft Survivability, 2003, (Fall) 9—12.

[10] Rynes P, Curran A, Johnson K, Levanen D, Marttila E. New and improved signature model of ground vehicles with muses[M]. ThermoAnalytics, Inc.

[11] Johnson K, Curran A, Less

D, Levanen D, Marttila E. MuSes: A new heat and signature management design tool for virtual prototyping[C]. Presented at Ninth Annual Ground Target Modeling & Validation Conference, Houghton, MI, 1998.8.

[12] Turbine engine infrared signature program[R]. Pratt & Whitney Aircraft Division. AFAPL—77—100.

[13] Varney G E. Infrared signature measurement techniques and simulation methods for aircraft survivability[R]. AIAA—79—1186.

[14] Noah M, Kristl J, Schroeder J, Sandford B P. NIRATAM—NATO Infrared air target model[J]. SPIE, 1479: 275—282.

[15] Nelson E L, Mahan J R, Turk J A, Robert R H, Larry D B, Paul A G. Infrared characterization of jet engine exhaust plumes[J]. SPIE, 1967: 411—418.

[16] 张赛金, 张常国. 北约空中目标红外辐射模型[J]. 现代防御技术, 1994(5): 40—51.

[17] Bakker E J, Fair M L, Schleijsen H M A. Modeling multi-spectral imagery data with NIRATAM v3.1 and NPLUME v1.6[J]. SPIE 3699: 80—91.

[18] Jim C, Denny B, Karen K, Kevin Y. F/A—22 IR signature flight test model validation[J]. Aircraft Survivability, 2003(Fall): 9—12.

作者简介

桑建华, 博士, 自然科学研究员, 长期从事航空工程技术研究, 是我国飞机总体设计及飞行器隐身技术领域的技术专家。

张勇, 硕士, 自然科学研究员, 主要研究领域包括飞行器总体设计、雷达隐身设计和红外隐身设计。