

文章编号: 1672-8785(2014)05-0001-06

中波红外和长波红外探测系统 性能的比较与选择

丁利伟¹ 甘宇红² 王宗俐¹ 路学荣¹

(1. 中国空空导弹研究院, 河南洛阳 471009 ;

2. 南宁职业技术学院, 广西南宁 530008)

摘 要: 针对常用的各种中波和长波红外探测系统, 从探测器特性、目标辐射特性、背景辐射特性、大气传输特性和红外系统设计等方面, 分析、计算和比较了中波红外和长波红外探测系统的有关性能, 提供了有实用价值的参数。根据不同的探测目标和使用环境, 为红外探测系统的设计提出了波段选择的建议。

关键词: 红外; 波段选择; 红外辐射; 背景辐射; 大气传输

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.05.001

Performance Comparison and Selection of Mid-wave and Long-wave Infrared Detection Systems

DING Li-wei¹, GAN Yu-hong², WANG Zong-li¹, LU Xue-rong¹

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. Nanning College for Vocational Technology, Nanning 530008, China)

Abstract: The related performance parameters of mid-wave and long-wave infrared detection systems are analyzed, calculated and compared in the respects of detector characteristics, target radiation characteristics, background radiation characteristics, atmospheric transmission and infrared system design. The data which is of value to practical uses is provided. The suggestion on band selection is made for the design of infrared detection systems.

Key words: infrared; band selection; infrared radiation; background radiation; atmospheric transmission

0 引言

目前红外探测系统的种类很多, 用得较多的主要有热成像观察系统、红外制导系统、红外搜索跟踪器 (Infrared Search and Track,IRST) 和导弹来袭报警系统等。这些系统都采用中波或长波红外进行探测。波段选择对系统的性能、复杂性和成本影响很大, 所以波段选择是红外系统

设计首先要解决的重要问题^[1]。红外探测波段会受探测器性能、目标辐射特性、背景辐射特性和大气传输特性等多个因素的影响, 所以需要进行多方面的分析和计算, 才能对其作出最合适的选择。

1 探测器性能分析

探测器本身的性能是选择探测波段时首要

收稿日期: 2014-03-18

作者简介: 丁利伟 (1981-), 男, 河南开封人, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为光电系统设计及应用。

E-mail: lwding2003@126.com

考虑的因素。即使目标在某个波段有着很高的辐射强度和大气透过率,若在该波段没有合适的探测器来探测目标,辐射强度和大气透过率也就没有任何意义。当前能够批量生产并且实际使用最多的探测器有:制冷型中波碲镉汞 (HgCdTe)

探测器和锑化铟 (InSb) 探测器,制冷型长波碲镉汞探测器和量子阱探测器,非制冷型多晶硅探测器和氧化钒探测器。表 1 列出了常用探测器的主要技术参数^[2]。

由表 1 可知,在常用红外探测器中,制冷型

表 1 常用探测器的主要技术参数

参数	InSb	中波碲镉汞	量子阱	长波碲镉汞	多晶硅	氧化钒
使用方式	制冷	制冷	制冷	制冷	非制冷	非制冷
主要工作波段 (μm)	3.6~4.8	3.6~4.8	8.0~9.0	8.0~10.0	8.0~12.0	8.0~12.0
像元尺寸 (μm)	30×30	20×20	25×25	50×50,25×28,30×30	35×35,25×25	38×38, 25×25
阵列格式	320×240 等	384×288 等	288×4, 480 ×4, 128×128, 320×240 等	128×128, 320×240, 640×480 等	384×288, 640×480 等	320×240, 640×480 等
NETD(mK)	10	14	20	29	50	40
重量和体积	大	大	大	大	小	小
功耗和成本	高	高	高	高	低	低

探测器的灵敏度 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 明显优于非制冷探测器,中波制冷探测器的灵敏度优于长波制冷探测器。NETD 直接决定了探测器的探测能力,NETD 愈小,探测能力就愈强。此外,像元愈小,分辨率愈高;阵列愈大,视场就愈大;制冷型探测器的最高帧频可达 200 Hz 以上,而非制冷探测器的最高帧频均在 100 Hz 以下。在设计各种红外系统时,红外探测器的这些性能直接决定了它们的应用范围,目前,长波和中波制冷型探测器主要用于空空制导系统、IRST 系统、红外预警系统和高性能观察系统,而长波非制冷探测器主要用于一般的红外观察系统。

2 目标红外辐射特性

目标辐射特性研究是获取目标特征、对目标进行识别的重要手段。红外探测的目标种类繁多,可以说地球上所有的物体都可能成为红外探测的目标。从红外探测的角度分析,目标辐射分成两大类:一类类似于黑体的灰体辐射,世界上大部分物体均属于这一类。这种辐射是连续的,符合或基本符合黑体辐射的普朗克公式;另

一类是选择性辐射,典型代表是火焰,一般碳氢化合物燃烧均会产生高温的 CO_2 和 H_2O 分子,这些非对称的高温分子会产生分子辐射,这类辐射只在某一些波段产生辐射,是选择性辐射。一般情况下,实际的目标大都符合灰体辐射特性或同时兼有两种辐射特性。探测飞机时,尾部喷口和飞机蒙皮的辐射属于灰体辐射,而热气流辐射则是选择性辐射^[3]。探测舰船时,舰身和锅炉排气管口的辐射属于灰体辐射,排气管口排出的热气流的辐射属于灰体辐射。桥梁、码头和车辆等目标的辐射一般只有灰体辐射。

为探测目标的红外辐射,首先要明确目标可能的温度范围或它的最低温度,计算不同温度的物体在中波和长波各个波段的辐射通量密度,得出用哪个波段的探测器最适合探测这个温度范围的目标。利用普朗克公式可以计算目标的辐射通量密度及其分布特征,普朗克公式可表示为^[3,4]

$$M_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (1)$$

式中, M_λ 为光谱辐射通量密度,单位是 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; λ 为波长,单位是 μm ; c_1 为第一辐射常数, $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.741832 \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^2$; c_2 为第

二辐射常数, $c_2 = hc/k = 1.438786 \times 10^{-2} m \cdot K$;
 h 为普朗克常数, $h = 6.626176 \times 10^{-34} W \cdot s^2$; k
 为波尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} W \cdot s \cdot K^{-1}$ 。 T
 为绝对温度, 单位为 K; 全光谱的辐射通量密

度可根据斯蒂芬-波尔兹曼定律计算^[5]:

$$M = \int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \quad (2)$$

表 2 不同温度的目标在不同波段的辐射通量密度

目标温度 K(°C)	总辐射通量 密度 W/cm ²	3.6~4.8μm 波段辐 射通量密度 W/cm ²	8.0~9.0μm 波段辐 射通量密度 W/cm ²	8~10μm 波段辐 射通量密度 W/cm ²	8~12μm 波段辐 射通量密度 W/cm ²
220(-53)	1.34×10^{-2}	8.90×10^{-6} (0.0664%)	4.0×10^{-4} (2.99%)	9.1×10^{-4} (6.77%)	1.34×10^{-3} (16.0%)
240(-33)	1.89×10^{-2}	2.8×10^{-5} (0.149%)	7.45×10^{-4} (3.94%)	1.53×10^{-3} (8.49%)	3.65×10^{-3} (19.3%)
260(-13)	2.61×10^{-2}	8.0×10^{-5} (0.31%)	1.28×10^{-3} (4.92%)	2.74×10^{-3} (10.52%)	5.81×10^{-3} (22.32%)
280(+7)	3.50×10^{-2}	1.94×10^{-4} (0.55%)	2.04×10^{-3} (5.84%)	4.24×10^{-3} (12.1%)	8.64×10^{-3} (24.68%)
300(+27)	4.62×10^{-2}	3.97×10^{-4} (0.86%)	3.06×10^{-3} (6.62%)	6.22×10^{-3} (13.46%)	1.23×10^{-2} (26.54%)
320(+47)	5.98×10^{-2}	8.67×10^{-4} (1.45%)	4.31×10^{-3} (7.22%)	8.68×10^{-3} (14.53%)	1.67×10^{-2} (27.9%)
340(+67)	7.62×10^{-2}	1.80×10^{-3} (2.35%)	5.92×10^{-3} (7.77%)	1.164×10^{-2} (15.3%)	2.18×10^{-2} (28.6%)
360(+87)	9.52×10^{-2}	2.80×10^{-3} (2.95%)	7.48×10^{-3} (7.85%)	1.46×10^{-2} (15.3%)	2.69×10^{-2} (28.2%)
380(+107)	0.118	3.77×10^{-3} (3.18%)	7.35×10^{-3} (6.22%)	1.51×10^{-2} (12.78%)	2.66×10^{-2} (22.5%)

式中, 斯蒂芬-波尔兹曼常数 $\sigma = 5.6697 \times 10^{-12} W \cdot cm^{-2} \cdot K^{-4}$ 。波段的辐射通量密度也可用同样方法求得, 只是积分限不同^[3]:

$$M(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \int_0^{\lambda_2} M_{\lambda} d\lambda - \int_0^{\lambda_1} M_{\lambda} d\lambda \quad (3)$$

由表 2 可知, 从 220 K 到 380 K, 目标在长波波段内的有效辐射都远大于中波波段内的辐射。随着温度的升高, 目标的总辐射不断增加, 中波波段辐射的比例不上升, 而长波波段内的辐射则先上升而后均持续下降。图 1 显示了不同温度的目标在不同波段的辐射通量密度的百分比变化趋势。目前, 从一些公开的资料看, 美国、法国、加拿大和英国等国的各种红外探测器的工作波段并不完全相同, 但都比较接近, 因此这些探测器所能探测的目标辐射通量密度随目标温度的变化趋势与图 1 也基本一致。

就温度为 260 K 的黑体辐射而言, 中波波段的辐射只占总辐射的 0.31%, 即约千分之三, 而 8~9μm 长波波段中能利用的辐射占总辐射近 5%, 8~10μm 长波波段中能利用的目标辐射占总辐射的比例大于 10%, 8~12μm 长波波段能利用的目标辐射占总辐射的比例大于 20%, 上述

3 种长波波段的辐射分别是中波辐射的 16 倍、34 倍和 72 倍, 显然长波探测优于中波探测。

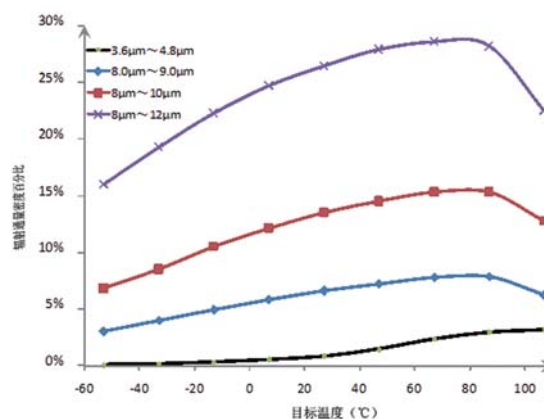


图 1 不同温度的目标在不同波段的辐射通量密度百分比

随着物体温度的升高, 中波的有效辐射比例迅速增加, 绝对辐射量也很快增加。当温度升到 320 K 时, 中波波段的辐射占总辐射比例升至 1.45%, 而 8~9μm 长波波段中能利用的目标辐射占总辐射 7.22%, 8~10μm 长波波段能利用的目标辐射占总辐射 14.53%, 8~12 μm 长波波段能利用的目标辐射占总辐射的比例大于 27.9%, 上述 3 种长波波段的辐射分别是中波辐射的 5 倍、10 倍和 19 倍。考虑到大气吸收和各个波段

探测器的灵敏度,热像仪在中波和长波的实际探测能力比较相近。

3 背景的红外辐射特性

探测被测目标时始终会有背景存在,探测目标的本质就是区别目标和背景,所以要探测到目标,必须考虑背景。目标和背景的辐射亮度必须有足够的差别,热像仪才能探测到目标。目标的背景多种多样,有海洋、蓝天、云层、沙漠、草地、山脉、树林和城市等。下面对主要背景辐射的波段和强弱进行概括分析。

国外曾对多种地面背景的光谱辐射特性做过大量实验,图2是几种常见地面背景的光谱辐射亮度曲线^[3,6]。结果表明,沙地、土壤和草地等的光谱辐射特性相当类似,在 $3\mu\text{m}$ 以下主要对太阳光反射和散射, $5\mu\text{m}$ 以上类似于环境温度的黑体辐射,相当于背景自身的温度辐射。在 $3\mu\text{m}$ 至 $4.8\mu\text{m}$ 间有一个最小辐射带,在这个辐射带中,太阳辐射的反射和散射很小,地物背景自身的温度辐射也很弱。若按与背景辐射光谱亮度很相似的 35°C 黑体的辐射光谱亮度计算,中波背景辐射亮度只有长波的 $1/10\sim 1/15$;当冬天的环境温度约为 270K 时,中波背景的辐射亮度只有长波的 $1/20\sim 1/30$ 。夜间,因为没有太阳辐射,背景只有地面热辐射,地面背景的辐射也以长波为主。一般认为地球是一个 280K 的灰体,地面热辐射的峰值波长约为 $10\mu\text{m}$ 。

天空背景的光谱辐射亮度依赖于观察的仰角、云层状况和环境温度。天空中的云层大多位于高度为几百至几千米的中低空。受太阳照射的亮云,在 $3\mu\text{m}$ 以下对太阳有强烈的散射和反射,其自身辐射也类似于黑体。天空辐射中的中波部分主要来自太阳光散射,长波部分主要来自大气热辐射^[7]。太阳的位置对太阳散射区辐射有很强影响,而对大气热辐射区的影响很小。大气温度对大气热辐射区有很强影响,但对太阳辐射的影响很小。在地面,接近水平观测时仰角较小,经过的大气路径很长,即经过的大气很厚,其红外辐射接近于大气温度下的黑体

辐射^[8]。一般从背景辐射方面考虑,长波波段更适于高空背景观察,中波波段更适于低空背景观察。

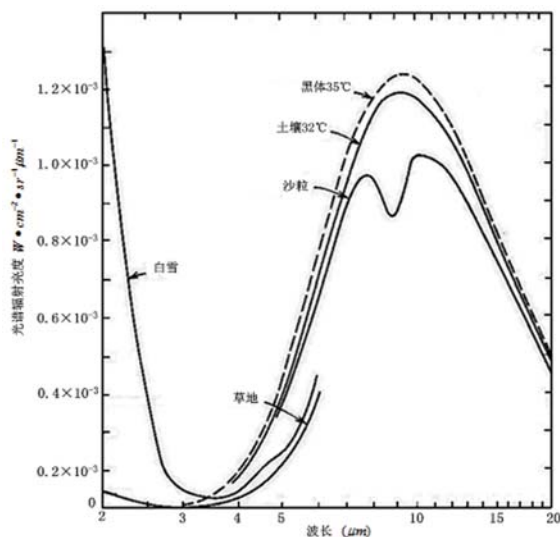


图2 几种常见背景的光谱辐射亮度曲线

由以上对各种背景辐射特性的分析可知,红外系统能探测到的目标辐射是目标辐射和背景辐射的差值。所以,在考虑对目标的探测能力时必须分析目标方向的背景辐射。由于目标所处的背景变化很大,且背景辐射受表面状态影响很大,因此,对目标的背景辐射不宜做统一的分析,但在波段选择时必须考虑这方面的因素。

4 红外辐射的大气传输特性

计算红外辐射的大气透过率需要明确很多条件。首先,不考虑火焰等选择性辐射体,因为它没有长波波段的辐射,本文只比较目标的连续热辐射。另外也不考虑特殊能见度条件下的粒子散射,只考虑大气中的水汽和二氧化碳的吸收。其中水汽的吸收最严重,不同的沉淀水厚度对不同波段的红外辐射吸收不同。二氧化碳只在中波 $4.3\mu\text{m}$ 附近有一个强吸收带。红外辐射大气透过率的计算公式为

$$\tau_a = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda R(\lambda) \tau_{H_2O}(\lambda) \tau_{CO_2}(\lambda) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda R(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

式中, L_λ 为目标的光谱辐射亮度, $R(\lambda)$ 为探测器相对光谱响应, $\tau_{H_2O}(\lambda)$ 为水汽的透过率, $\tau_{CO_2}(\lambda)$ 为 CO_2 的大气透过率, τ_a 为大气总透过率。对于长波, 探测器的光谱响应基本恒定, 目标平均按 300 K 的黑体辐射考虑, 光谱辐射无明显起伏, 可以近似为恒定。因此, 大气透过率计算公式可简化为

$$\tau_a = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{H_2O}(\lambda) \tau_{CO_2}(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

对于中波, $R(\lambda)$ 也基本恒定, 而 300 K 的黑体辐射在 3.6 ~ 4.8 μm 之间随波长增加而迅速

上升, 光谱辐射不能按恒定计算。因此, 大气透过率的计算公式可简化为

$$\tau_a = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda \tau_{H_2O}(\lambda) \tau_{CO_2}(\lambda) d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda d\lambda \quad (6)$$

一些资料提供了水汽和 CO_2 对中波和长波红外辐射的衰减数据 [8,9]。表 3 是按照上述条件和公式计算的大气透过率数据。表中没有列出长波 8~10 μm 波段的数据, 因为这个波段的数据应在 8~9 μm 和 8~12 μm 两个波段之间。

由表 3 数据可以得出, 当沉淀水厚度大于 40 mm 后, 长波透过率明显低于中波。

表 3 不同波段的红外辐射在不同沉淀水量条件下的透过率

探测波段	沉淀水厚度 (mm)							
	10	20	40	60	100	200	300	400
$\tau_a(3.6 \sim 4.8 \mu m)$	0.651	0.574	0.510	0.470	0.426	0.384	0.360	0.345
$\tau_a(8 \sim 9 \mu m)$	0.797	0.634	0.439	0.281	0.116	0.019	<0.01	接近 0
$\tau_a(8 \sim 12 \mu m)$	0.855	0.730	0.549	0.391	0.218	0.053	<0.02	接近 0

沉淀水厚度与距离、季节、地域和高度的关系很大。一般情况下, 热带的平均温度为 30 $^{\circ}C$, 其饱和沉淀水厚度为 30.04 mm/km [6], 海面的相对湿度取为 90%, 海面的沉淀水厚度为 27 mm/km。干燥地带的相对湿度取为 30%, 其沉淀水厚度为 9 mm/km。温带的夏季温度平均取为 15 $^{\circ}C$, 饱和沉淀水厚度为 12.71 mm/km, 海面的相对湿度也取为 90%, 沙漠地带的湿度取值为 30%, 对应的沉淀水厚度分别为 11.4 mm/km 和 3.8 mm/km。冬季的平均温度取值为 0 $^{\circ}C$, 饱和沉淀水厚度为 4.84 mm/km, 海面的相对湿度也取值为 90%, 沙漠地带的湿度取值为 30%, 对应的沉淀水厚度分别为 4.36 mm/km 和 1.45 mm/km。由这些数据可知, 环境温度达到 30 $^{\circ}C$ 时, 海面上不到 2 km 的距离处沉淀水厚度超过 40 mm。环境温度降到 0 $^{\circ}C$ 时, 在距离海面约 10 km 处沉淀水厚度达到 40 mm。结合表 3 的数据可知, 在湿度较大的环境特别是湿热环境中, 应该优先选用中波探测系统。

5 红外系统设计中的其它因素

在红外系统的设计中, 还有一些因素和波段选择有关, 如整流罩 (或窗口) 材料和成本等。在某些情况下, 这些因素极为重要。

(1) 窗口 (或整流罩) 材料。一般的红外光电系统需要安装窗口玻璃, 而飞机、导弹等使用的红外系统必须安装特殊材料的整流罩。部分红外光学系统需要进行高速运动, 比如导弹的最高速度可达到 5 Ma 以上, 窗口玻璃和整流罩要承受高速气流的压力和气动加热导致的高温。在这种环境下, 窗口材料不仅应具有变形小、自身辐射小和光学性能稳定等特点, 还要能透过相应波段的红外辐射。能全面满足这些要求的材料很少, 中波红外材料有氟化镁、蓝宝石和硅单晶等, 长波能用的材料更少, 只有硫化锌、硒化锌等很少几种 [10]。如果长波红外系统必须配备能承受高温高压的整流罩或窗口, 在材料选用方面要极其慎重, 不合适的材料会直接影响整个系统功能的实现。

(2) 成本问题。成本虽然不是红外系统设计中的决定性因素,但也是必须考虑的重要问题。目前,在探测器方面,中波探测器的价格一般是长波的 1/2 到 1/3;光学材料方面,长波透射系统一般使用锗单晶材料,很少使用硫化锌和硒化锌,因为这些材料比中波的硅单晶、氟化镁、氟化钙、锗酸盐、铝酸盐等材料要贵很多。

6 结论

红外探测波段的选择需要综合考虑探测器、目标辐射、背景辐射、大气衰减、材料和成本等多种因素。某些情况下,各个因素对波段选择的影响并不一致。这就更要求对各个因素进行综合分析,以做出最合适的选择。探测某些目标时选用两个波段各有利弊,可能都是合理的。对目标的某些方位,中波探测比长波探测距离更远一些,而在另一些方位,长波探测比中波探测距离更远一些。这时就要再考虑其他方面的因素,如探测器的订货来源、系统的成本、光学材料的选择和系统的复杂性要求等因素,以做出合理决策。对一些常见的被测目标,可以参照以下方式选择合适的探测波段:

(1) 对于要求探测距离较近的红外系统,如普通红外安防监控系统、手持红外望远镜和头盔式热像仪等,探测距离多在几十米到 2 km 之间,应优先采用非制冷长波探测。这种情况下,由于目标距离较近,无论目标辐射光谱分布如何,通过配置不同的光学系统,红外系统均可有效探测到目标。此外,非制冷探测系统具有体积小、重量轻、功耗低和成本低等优势。对主要用于观察森林火灾等大面积高温目标的红外系统,由于目标会产生大面积的强烈红外辐射,且完全覆盖中波和长波辐射带,这种情况下,如果使用非制冷的长波探测系统,探测距离也可达十几千米以上。

(2) 对主要用于湿度较高环境中的红外系统,如舰载光电系统,探测目标的温度大多在 300 K 以上,具有一定的中波辐射,且这种环境下中波辐射的大气透过率比长波的高很多,中波探测器的灵敏度也较高,因此,应优先使用中波探测系统。

(3) 对主要用于空对地、空对空和地对空远距离观察的红外系统,如果探测温度在 300 K 以下的低温目标,由于此时目标的长波辐射比较明显,且传输路径中水汽较少,透过率较高,应优先采用长波探测系统。如果探测高温目标,如飞机热喷管、排气管、尾焰等,此时目标的中波辐射明显,应优先采用中波探测系统。如果红外系统自身在高速运动,如导弹探测系统、机载光电侦察系统等,由于其窗口玻璃要承受很大的风压和气动加热,目前没有合适的长波光学材料,因此也应该采用中波探测系统。

(4) 对于地对地远距离观察红外系统,背景辐射大多比较复杂,大气传输路径较长。如果环境湿度较高,一般应考虑采用中波探测。如果环境湿度较低,可以考虑采用长波探测,但需要综合分析目标辐射、背景辐射等因素。

(5) 对于某些红外系统,可以同时选用两个波段进行探测,通过融合分析中波与长波红外图像,更有利于识别目标,也会使系统具有更好的抗干扰能力。

参考文献

- [1] 徐振亚,白晓东,李丽娟.基于作用距离的红外探测系统工作波段选择方法[J].**红外**,2011,**32**(3):23-28.
- [2] 梅遂生. **光电子技术**[M]. 北京:国防工业出版社,2008:123-130.
- [3] 吴宗凡,柳美琳,张绍举,等. **红外与激光技术**[M]. 北京:国防工业出版社,1998:10-50.
- [4] 石晓光,王蓟,叶文. **红外物理**[M]. 北京:兵器工业出版社,2006:36-38.
- [5] 赵永,姚连钰,李松维.直升机红外辐射理论计算[J].**飞机设计**,2010,**30**(5):36-38.
- [6] Richard D H. Infrared System Engineering[M]. New York: John Wiley and Sons, INC, 1969: 119-157.
- [7] 李刘苗. 海天背景目标红外辐射特性研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
- [8] 吴晗平. **光电系统设计基础**[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [9] B·T·科洛勃罗多夫, N·舒斯特. **红外热成像**[M]. 航天工业总公司第三研究院三部,八三五八所联合翻译出版,1994:46-47.
- [10] 余怀之. **红外光学材料**[M]. 北京:国防工业出版社,2007:48-85.