

·光电系统·

## 光电隐身效果的评估方法

杜翠兰, 周建忠

(91404部队, 河北 秦皇岛 066001)

**摘要:**从光电隐身技术内涵入手,介绍了红外隐身和激光隐身的表征方法,对隐身材料性能进行了深入分析。基于光电隐身的表征方法和具体应用,对光电隐身效果的测量与评估做了初步探讨,提出了激光与红外隐身的外场测量与效果评估方法。

**关键词:**隐身效果;性能表征;测量评估

**中图分类号:** TN97; TN2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2011)02-0001-04

## Method of Electro-optic Stealth Effect Evaluation

DU Cui-lan, ZHOU Jian-zhong

(91404 Army Unit, Qinhuangdao 066001, China)

**Abstract:** Based on the meaning of electro-optic stealth technology, the characterization methods of IR stealth and laser stealth are introduced, and the characteristics of stealth materials are analyzed. The measurement and evaluation of electro-optic stealth effect are discussed, based on the property characterization method and application of electro-optic stealth. The methods for field measurement and effect evaluation of laser stealth and IR stealth are proposed.

**Key words:** stealth effect; property characterization; measurement and evaluation

光电隐身是指消除、减小、改变或模拟目标和背景之间在紫外、可见光、红外波段的反射特性差别,以降低目标在紫外、可见光和红外波段的可探测性所实施的隐身技术。光电隐身主要包括紫外隐身(0.30~0.40  $\mu\text{m}$ )、可见光隐身(0.40~0.76  $\mu\text{m}$ )、近红外隐身(0.76~1.2  $\mu\text{m}$ )、中远红外隐身(3~5  $\mu\text{m}$ 、8~14  $\mu\text{m}$ )、激光隐身(1.06、1.54、10.6  $\mu\text{m}$ )等。光电隐身通常要经过目标的光电隐身设计、光电隐身材料的制备和光电隐身效果评估试验3个步骤。评估试验主要是对光电隐身设计的合理性和光电隐身材料的性能以及整体隐身效果进行评估。

### 1 光电隐身性能的表征

光电隐身性能的表征主要内容有两个:一是材料性能的表征,即选择什么参数在实验室测试材料

的隐身性能,希望所选参数能够用来在实验室进行隐身材料的比较和筛选;二是隐身效果的表征,即选择什么参数和方法对目标的隐身效果进行评价,希望所选参数能够和宏观的探测概率和探测距离等联系起来。评价光学隐身材料的性能需要根据具体的波段来考虑。一般情况下,除了要求目标与背景的光谱反射率曲线尽可能一致以外,还要求光学隐身材料具有适合的亮度和光泽度<sup>[1]</sup>。

#### 1.1 红外隐身性能的表征

红外隐身是指消除、减弱、改变或模拟目标和背景之间的中远红外波段2个大气窗口(3~5  $\mu\text{m}$ 、8~14  $\mu\text{m}$ )辐射特性的差别,以对抗红外探测所实施的隐身。红外隐身的方法是根据热成像系统的工作原理采用红外遮蔽、红外融合、红外变形等手

收稿日期:2011-02-15

作者简介:杜翠兰(1977-),女,河北深州人,学士,主要研究方向为光电工程技术领域。

段对目标实施红外隐身。

### 1.1.1 材料性能表征

描述红外隐身材料辐射特性的主要参数是红外发射率,它是指材料与相同温度的黑体在相同条件下的辐射出射度之比,这里的相同条件是指几何条件和光谱条件。一般情况下,可以把红外隐身材料当作朗伯体看待,多采用某一波段全发射率或光谱发射率来评价红外隐身材料的性能。

另外,材料的热惯量也是一个很重要的参数。为了追求材料的红外辐射特性能够全天候与背景一致,材料的热惯量必须与背景的热惯量一致,这样才可以使目标与背景随着环境温度的变化不会引起太大的温度差。

### 1.1.2 隐身效果的表征

对于红外隐身效果评估方法研究主要有2个方面:指标测试与综合评价。

在指标测试方面,根据红外成像系统探测能力的2个参数可知,要使目标不被红外成像系统探测到的2个基本条件是:(1)目标等效空间宽度对红外成像系统的张角应小于红外成像系统的空间分辨率;(2)目标与背景的黑体等效温差应小于红外成像系统的温度分辨率。如满足以上2个条件,则认为实现了目标隐身,反之就没有实现红外隐身。

在综合评价方面,主要是利用红外成像系统在不同距离上对实施不同红外隐身程度的目标进行空间搜索、识别,统计目标的发现、识别概率,从而做出对隐身效果的评价。

## 1.2 激光隐身性能的表征

激光隐身的目的是尽可能降低目标在激光工作波长的反射特性。目标实施激光隐身以后可使目标指示器照射到目标上的激光产生弱的激光回波,不被激光寻的器所接收,从而躲避对目标的攻击。

### 1.2.1 材料性能表征

评价激光隐身材料的主要性能参数是光谱反射比,它是材料反射与入射的辐射通量或光通量的光谱密集度之比,它包括镜反射比和漫反射比两部分,由于激光隐身材料通常接近于漫反射体,镜反射比一般很小,可以用漫反射比近似评价激光隐身材料的性能。反射率是指当材料的厚度达到其反射比不受厚度的增加而变化时的反射比,一般情况下,激光隐身材料都有一定厚度,其厚度变化不影

响反射比,因此,评价激光隐身材料性能的参数可称为光谱漫反射率或光谱反射率。目标在激光工作波长的反射率越小,目标的激光隐身效果越好。

### 1.2.2 隐身效果的表征

为了方便,通常用激光测距机的主要性能参数准确率和最大测程来共同表征激光隐身的效果。准确率是指在一定条件下利用激光测距机准确测出激光隐身目标的次数与测量总次数之比,准确率越小,说明隐身效果越好。

在某一准确率条件下,激光测距机对激光隐身目标的最大测程可以称为隐身距离。目标在隐身距离之外就认为目标对测距机是隐身的,隐身距离越小,说明隐身效果越好。

## 2 光电隐身效果的评估方法

根据以上对光电隐身性能的表征论述分析,对光电隐身效果的评估应从隐身材料性能参数考察和隐身效果评估两方面来设计评估方法。

### 2.1 红外隐身效果的评估

大部分红外隐身并不是采用发射率尽量低的材料涂覆被保护目标表面,减弱目标红外辐射强度以达到对目标的隐身,而是研究制备各种红外发射率的材料,然后对目标进行红外迷彩设计,使目标的红外辐射特性分布与背景一致而实现红外隐身<sup>[2]</sup>。

#### 2.1.1 材料隐身性能评估

红外材料隐身性能的评估主要是对材料的发射率进行测定。在实验室内,使用红外辐射计测量在不同温度时,不同隐身材料的辐射出射度,将其测量数据与相同温度的黑体相比较,测定材料的发射率。对不同发射率材料的性能建立特性数据库,作为目标隐身设计的理论基础。

#### 2.1.2 隐身效果评估

红外隐身效果的评价主要是对运用隐身材料按照特定目标的红外辐射特性进行隐身设计的效果进行鉴定。与红外隐身效果的表征相应,其评价也有定性和定量2种手段。

在指标测试方面,主要是从红外成像系统的探测能力出发,根据目标的特性和红外辐射在大气中传输的特点,找出实现目标红外隐身的条件。假设目标与背景的黑体等效温差为 $\Delta T_{os}$ ,目标斑块间的黑体等效温差为 $\Delta T_o$ ,当 $\Delta T_{os}$ 增大时,目标与背景间

的对比度增大,当 $\Delta T_0$ 增大时,目标各部分间的对比度增大。试验中测定在不同距离时, $\Delta T_{os}$ 、 $\Delta T_0$ 的变化阈值, $\Delta T_{os}$ 、 $\Delta T_0$ 在多大范围内变化时,目标不被红外成像系统所探测到。试验方法如图1所示。

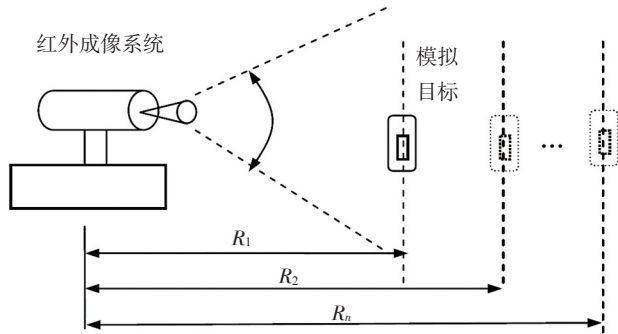


图1 红外隐身效果的定量评估测试示意图

首先将红外成像跟踪系统布设于实施隐身的模拟目标前方,记录试验距离和初始时刻的目标与背景及目标各斑块的温度,使红外成像跟踪系统对选定空间范围内进行扫描搜索。若发现目标,调整试验距离,等待做下一次试验。若未发现目标,则对目标加热升温,直至红外成像跟踪系统发现并锁定目标,记录目标当前温度。待目标冷却后,对目标的不同斑块各自升温,直至红外热像仪识别并锁定目标,记录目标各斑块的温度。反复进行以上试验,对不同隐身的隐身效果进行评价。

在综合评价方面,是观察红外成像系统对实施不同隐身的目标的发现、识别概率,从而对隐身效果做出评价。

一种方法是将红外成像跟踪系统架设于海边,隐身模拟目标于海上同一距离移动,红外成像跟踪系统对选定海域进行搜索,在锁定目标后,人为地使跟踪系统偏离目标,将系统状态改为搜索状态,如此多次对模拟目标进行搜索探测,统计对目标的探测概率。然后使目标改变距离,在不同的距离上反复进行上述试验,进而评价目标隐身的效果。

另一种方法是采用红外热像仪,在野外采集大量包含背景的有关隐身目标的红外图像,然后,组织有经验的人员对红外图像进行判读,或使用计算机数字图像处理技术对红外图像进行特征提取,找出合适的图像特征统计参数,目标与背景的数字统计特征参数相差越大,目标隐身效果越差,据此对隐身效果做出评价<sup>[3-4]</sup>。

## 2.2 激光隐身效果的评估

红外隐身注重目标材料的辐射特性,而激光隐身则注重目标的反射特性。由脉冲激光测距机的测距方程可知,对于漫反射大目标,其最大测程与目标反射率的平方根成正比;对漫反射小目标,其最大测程与目标反射率的四次方根成正比。对激光隐身效果的评价必须从激光测距机的最大测程和目标反射率入手<sup>[5]</sup>。

### 2.2.1 材料隐身性能评估

材料的隐身性能评估就是对目标的反射率的测量。激光测距、激光跟踪和激光测速等测量系统在测量距离的要求及其分析方法是一致的。在试验场测量中,通常以保证一定回波率的最大作用距离——保证回波作用距离来衡量测量设备的测量能力<sup>[6]</sup>。激光测量系统的测量方程为

$$P_r = \frac{P_s K_s K_r A_s A_r \rho T^2}{\pi^2 R^4 \theta_i^2 \sin^2\left(\frac{\theta_s}{4}\right)} F_s F_r \quad (1)$$

式中, $P_r$ 为激光接收系统接收功率; $K_r$ 为接收系统透过率; $A_r$ 为接收口径面积; $P_s$ 为激光器发射功率; $\theta_i$ 为激光发射发散角; $K_s$ 为发射系统透过率; $A_s$ 为目标有效反射面积; $T$ 为单程大气透过率; $\rho$ 为目标反射系数; $\theta_s$ 为反射光发散角; $F_s$ 为发射激光束强度分布函数; $F_r$ 为接收光强度分布函数; $R$ 为目标距离。

若将发射激光束近似为高斯光束,目标反射光束近似为均匀分布的锥形光束,以 $\theta$ 表示目标偏离发射激光束中心的角度,以 $\beta$ 表示接收口径偏离目标反射光束中心的角度,则发射激光束和目标反射光束的强度分布函数分别为

$$F_s(\theta) = 2 \exp\left(-\frac{8\theta^2}{\theta_i^2}\right) \quad (2)$$

$$F_r(\beta) = \begin{cases} 1 & \beta \leq \theta_s/2 \\ 0 & \beta > \theta_s/2 \end{cases} \quad (3)$$

在远距离目标测试时,多采用大目标作为被试对象,若激光照射器瞄准照射,光斑全部落在目标上,目标偏离照射光斑能量中心的角度 $\theta$ 为0,则 $F_s(\theta)=2$ 。根据实际测试情况可知,一般 $\beta \leq \theta_s/2$ ,则 $F_r(\beta)=1$ 。此时测量方程为

$$P_r = \frac{2P_s K_s K_r A_s A_r \rho T^2}{\pi^2 R^4 \theta_i^2 \sin^2\left(\frac{\theta_s}{4}\right)} \quad (4)$$



在距离为 $R$ 处目标有效反射面积等于光斑大小为

$$A_s = \pi \left( \frac{R\theta_t}{2} \right)^2 \quad (5)$$

测量方程可简化为

$$P_r = \frac{2P_s K_s K_r A_r \rho T^2}{\pi R^2 \sin^2 \left( \frac{\theta_s}{4} \right)} \quad (6)$$

当目标为角反射器时,  $\theta_s$  很小, 这时测量方程可近似为

$$P_r = \frac{8P_s K_s K_r A_r \rho T^2}{\pi R^2 \theta_s^2} \quad (7)$$

当目标为漫反射目标时,  $\theta_s = \pi$ , 这时测量方程由式(6)可简化为

$$P_r = \frac{P_s K_s K_r A_r \rho T^2}{\pi R^2} \quad (8)$$

而对于激光接收系统来说, 漫反射目标在接收光学系统前, 激光所形成的辐照度(功率密度)为

$$E_r = \frac{P_r}{A_r K_r} = \frac{P_s K_s \rho T^2}{\pi R^2} \quad (9)$$

适当选择大气透过, 可计算出目标在实施不同隐身材料时的近似反射率, 从而对目标的隐身效果做出评价。

### 2.2.2 隐身效果评估

激光隐身效果的评估有2种方法, 一种方法是利用激光测距机对隐身目标进行测量, 另一种是利用激光半主动导引头模拟器对隐身目标进行实时探测。

#### 2.2.2.1 激光测距评估法

激光隐身效果可通过激光测距机测距做出评价。将实施激光隐身的目标布设于试验地点, 用GPS对试验点进行定位, 用激光测距机对目标多次测距, 以GPS给出的距离为真值, 比较激光测距机测试距离, 将准确测试次数与总测距次数相比, 测定测率。

将激光测距机和隐身目标分开一定距离架设, 并使目标做远距离测距机的移动。同时激光测距机对目标连续测距, 直至无法测量时, 记录最大测试距离, 在确定测率下对测试最大距离进行计算, 得出最大测程。

#### 2.2.2.2 激光探测评估法

激光隐身效果可通过对激光半主动寻的器对目标的探测概率做出评价。其试验方法与红外隐

身效果定量评估的方法类似, 如图2所示。

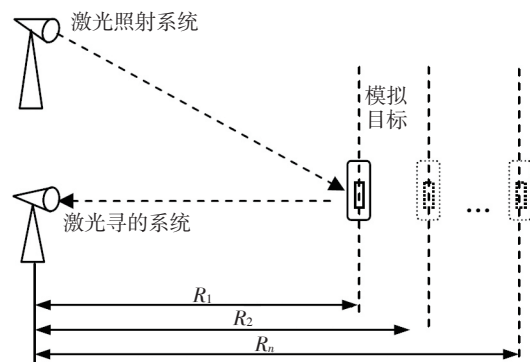


图2 激光隐身效果的探测评估测试示意图

将激光半主动寻的器与激光目标照射器分开一定角度架设, 使实施激光隐身的目标在不同距离上运动, 激光目标照射器对目标进行照射, 记录、统计激光寻的器对目标的探测概率, 与目标不实施隐身时的探测概率相比较, 从而评价目标的隐身效果。

## 3 结束语

光电隐身效果评估对提高目标的光电隐身能力及促进光电隐身技术的发展具有重要意义。应用上述测试方法还可实现对光学频段的其他波段隐身性能的测量。随着隐身材料技术的不断进步, 红外与激光隐身技术正在快速发展, 目标隐身效果评估技术也将不断创新, 以适应不断增长的应用需求。

## 参考文献

- [1] 王顺奎. 热红外隐身涂料的研究与应用简况[J]. 激光与红外技术, 1993.
- [2] 方有培, 钱建平. 对红外成像制导导弹的干扰技术研究[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(3): 2-9.
- [3] 薛晶晶, 白廷柱, 李国琛. 红外隐身材料隐身效果评价方法研究[J]. 光学技术, 2005(3): 36-40.
- [4] 韩玉阁, 宣益民, 马忠俊. 成像目标的红外隐身效果评估[J]. 红外技术, 2010, 32(4): 239-241.
- [5] 王自荣, 孙晓泉. 光电隐身性能表征概述[J]. 激光与红外. 2005(1): 3-7.
- [6] 何照才, 胡保安. 光学测量系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [7] 杨照金. 光电隐身效果评估技术系列讲座(第二讲): 红外隐身效果评估[J]. 应用光学, 2011(2): 41-45.