

〈制导与对抗〉

红外搜跟系统对模拟巡航导弹类目标探测试验方法研究

张 乐, 韩佳盈
(63961 部队, 北京 100012)

摘要:对巡航导弹类目标和某型靶机在大气传输中的红外辐射能量进行了理论计算,提出了用使用该型靶机模拟巡航导弹类目标的试验方法,并通过外场动飞试验对该试验方法进行了验证。
关键词: 红外搜跟系统; 红外能量辐射; 模拟巡航导弹类目标; 外场试验
中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2019)01-0018-04

Test Method ofIRST Detecting Cruise Missiles

ZHANG Le, HAN Jiaying
(Unit 63961 of PLA, Beijing100012, China)

Abstract: First, theoretical calculations of the atmospheric transmission of infrared radiation energy of cruise missiles and a type of drone aircraft are presented. Then, a test method that uses drone aircrafts to simulate cruise missiles is discussed. Finally, the test method is proven by an outfield experiment.
Key words: infrared searching and tracking system, infrared radiation energy, cruise missile, outfield experiment

0 引言

从 2018 年 4 月美英法空袭叙利亚事件可以看出,随着空袭兵器远距离精确打击能力的不断提高,现代战争空袭模式已经由临空轰炸转变成远程精确打击,即在防区外由多平台发射巡航导弹、空地导弹、制导炸弹等弹药实施精确打击。巡航导弹是实施远程纵深精确打击的重要力量,具有体积小、雷达散射及红外辐射特性不明显、巡航高度低等显著特点,是现代防空武器的主要作战对象之一。

国内很多学者对巡航导弹的红外辐射特性进行了深入的研究和详细的计算^[1-3],但是一直没有应用在装备研制中。目前防空武器在研制过程中常常受到试验费用、试验周期等诸多因素影响,不可能采用巡航导弹作为试验用靶弹,因此通过研究巡航导弹红外辐射特征,利用靶机等其他低成本、可回收飞行器模拟巡航导弹类目标,对考核防空武器的反导能力具有十分重要的现实意义。

本文从红外搜跟系统能探测到的红外辐射强度出发,以巡航导弹红外辐射强度为依据,以理论分析

与仿真计算等为手段,充分研究了大气对红外辐射的影响,得出了可以使用我国自行研制和生产的某型(以下称 I 型)靶机来模拟巡航导弹类目标的结论,并结合某型防空武器的红外搜跟系统外场动飞试验,进行了飞行验证。

1 巡航导弹红外辐射特性分析

巡航导弹的红外辐射特性非常复杂,包括导弹自身的辐射和对环境辐射的反射两大部分。巡航导弹自身的辐射主要包括蒙皮气动加热的红外辐射、尾焰的红外辐射、发动机喷管的红外辐射、导弹发射部件的红外辐射等;对环境辐射的反射主要包括直射、散射的阳光,地球辐射,天空辐射以及其他星球的辐射。由于环境辐射的反射相对较小,因此本文在理论计算中未考虑环境辐射带来的影响。

巡航导弹的前向辐射主要是 8~12 μm 的蒙皮辐射;后向辐射主要是波段在 4.1~4.2 μm 和 4.3~4.8 μm 由尾焰产生的羽流辐射;而由尾喷管产生的红外辐射主要集中在 3~5 μm 波段,是尾追探测的主要辐射源。在使用中通常要求红外搜跟系统对巡航导弹类

收稿日期: 2018-04-09; 修订日期: 2019-01-03.
作者简介: 张乐 (1977-), 女, 吉林长春人, 工程师, 主要从事光电搜跟系统论证和研究工作。E-mail: 1009973011@qq.com.

目标进行迎头探测和跟踪, 由于该探测系统采用长波红外探测器, 所以后续计算的过程中只考虑巡航导弹的蒙皮辐射。

2 红外辐射的大气衰减

红外辐射在地球大气中传输时, 它与大气成分相互作用而衰减。衰减主要是由以下 3 个方面的原因造成的: 一是大气中某些气体分子 (H₂O、CO₂ 等) 的吸收; 二是大气分子、气溶胶的散射; 三是气象条件 (云、雾、雨、雪) 造成的衰减。设 $\tau_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 τ_{CO_2} 和 τ_{μ_s} 分别为被吸收、散射和因气象衰减制约的大气透过率, 则大气透过率为:

$$\tau = \tau_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \tau_{\text{CO}_2} \cdot \tau_{\mu_s} \tag{1}$$

通常情况下不会在雨、雪天气使用红外搜跟系统探测和跟踪目标, 所以本文忽略气象衰减 (即不考虑雨雪对红外辐射的衰减), 仅考虑水汽吸收、CO₂ 吸收和大气散射 3 种衰减。

2.1 大气中气体分子的吸收

2.1.1 大气中的水汽吸收

水造成了大气中最强烈的红外吸收, 红外辐射水汽的吸收与它所通过的路程中分子总数有关。文献[4]利用实验数据计算得到在大气温度为 5℃, 相对湿度为 100%时水蒸汽的光谱吸收系数数据表。根据文献[5]则可以得到温度 T_1 , 相对湿度为 r_1 时的吸收系数 μ_1 与温度 T_2 , 相对湿度为 r_2 时的吸收系数 μ_2 的关系:

$$\mu_2 = \mu_1 \cdot \frac{r_2}{r_1} \cdot \frac{f_2}{f_1} \tag{2}$$

式中: f_1 为温度 T_1 时饱和空气中的水蒸气质量; f_2 为温度 T_2 时饱和空气中的水蒸气质量。

考虑到巡航导弹的巡航高度为 50~150 m, 所以由高度引起的大气衰减这里忽略不计。因此, 可以得到海平面上不同路程 X 大气水汽的吸收透射率 $\tau_{\text{H}_2\text{O}}$:

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}} = e^{-\mu_{\text{H}_2\text{O}} X} \tag{3}$$

2.1.2 大气中的 CO₂ 吸收

CO₂ 是造成红外辐射传输衰减的重要因素, CO₂ 吸收衰减取决于大气中 CO₂ 分子的数目, 试验研究表明 CO₂ 的密度在大气近表层中保持不变, 因此 CO₂ 的光谱透射比只与辐射通过的距离有关。参考文献[4]给出了二氧化碳海平面水平路程上光谱吸收系数数据表, 通过查表可以获得海平面水平路径上 CO₂ 的吸

收系数 μ_{CO_2} 。进而获得海平面水平路程 X 的 CO₂ 的透射比:

$$\tau_{\text{CO}_2} = e^{-\mu_{\text{CO}_2} X} \tag{4}$$

2.2 大气的散射衰减

大气对辐射引起散射衰减的原因是由于大气含有分子和悬浮的微粒的这些散射元。在工程计算时, 散射系数 μ_s 可利用大气能见距离来确定。试验数据表明, 在 0.3~14 μm 间光谱散射衰减系数与 $\lambda^{-1.3}$ 正比, 工程上可用下式计算光谱散射衰减系数:

$$\mu_s(\lambda) = \frac{3.91}{D_v} \left(\frac{0.55}{\lambda} \right)^{1.3} \tag{5}$$

式中: λ 为波长, 单位为 μm; D_v 为大气能见距离, 单位为 km。

通过式(5)可以获得由散射造成的辐射透射比为:

$$\tau_s = e^{-\mu_s X} \tag{6}$$

式中: X 为辐射通过的路程长度, 单位为 km。

3 巡航导弹和靶机的红外辐射能量的计算方法

在 5 km 外的巡航导弹的成像尺寸远小于探测器的像元尺寸, 所以将其看做点目标, 因此红外搜跟系统主要对其飞行过程中产生的红外辐射能量进行探测和跟踪。当导弹在大气中高速飞行时, 气动加热效应引起的蒙皮温度变化可以用如下经验公式进行计算:

$$T_s = T_0(1 + 0.164 Ma^2) \tag{7}$$

式中: T_0 周围大气温度; Ma 为马赫数。

由普朗克定理可知: 黑体辐射的光谱分布可由下式表示:

$$W(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1}$$

式中: c_1 为第一辐射常数; c_2 为第二辐射常数。

若求 $\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ 谱段产生的辐射通量密度, 可由下式求解:

$$W_{\lambda_1 - \lambda_2} = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} W(\lambda, T) d\lambda \tag{8}$$

再由基本关系式:

$$L = \varepsilon W / \pi \tag{9}$$

$$J = L \times S \tag{10}$$

可分别求出目标的辐射亮度 L (W/(sr·m²)) 和辐射强度 J (W/sr), 其中 ε 为蒙皮的发射率, 这里取 $\varepsilon = 0.8$,

S 为目标的截面积。

4 理论计算

4.1 靶机选型

目前国内训练主要使用的靶机有两种型号，从外形尺寸和飞行速度等特性来看，I 型靶机的特征参数较为接近战斧巡航导弹（BGM-109C）。此外，I 型靶机采用喷气式动力，其飞行特性也最接近战斧巡航导弹，通过数据对比和进一步计算分析（见表 1），发现其在长波波段的红外能量虽然小于战斧巡航导弹，但是理论上其红外辐射能量仍能被红外搜跟系统探测，因此决定选择 I 型靶机在外场试验中模拟巡航导弹类目标。

表 1 靶机与战斧巡航导弹数据对比

Table 1 Data comparison between two types of drone aircraft and Tomahawk cruise missiles

	Cruise missiles (BGM-109C)	I drone aircraft	II drone aircraft
Diameter/m	0.517	0.41	0.26
Length/m	6.24	5	3
Cruising speed/(m/s)	238	230	150
S_{front}/m^2	0.21	0.13	0.05
S_{side}/m^2	3.2	2	0.78
Skin radiation at long wave bands/(W/sr) (calculate the value under the same conditions)	8.53	5.56	1.9

4.2 仿真计算

为保证武器系统顺利完成后续作战使用流程，所以红外搜跟系统必须在一定距离上能够跟踪到目标，因此在进行仿真时探测距离应为定值（后续计算中 $R=5\text{ km}$ ）。为了使 I 型靶机能够模拟巡航导弹类目标进行动飞试验，在仿真时以红外搜跟系统探测能力、目标红外辐射能量和探测距离为约束条件，利用上述公式仿真计算得到满足试验条件的环境参数，如温度、能见度、湿度等。

某型装备要求红外搜跟系统在能见度 10 km，常温（20℃），相对湿度 75%，能够探测并稳定跟踪战斧巡航导弹（速度为 240 m/s）。利用公式(1)~(10)可以计算出战斧巡航导弹经过大气衰减后到达红外搜跟系统的能量约为 2.5386 W/sr。在允许误差±10%的情况下，靶机的红外辐射强度经过大气衰减后应在 2.7925~2.2947 W/sr 之间并被探测到，以此为约束条

件，反推出满足该条件的环境参数。

通过大量的仿真计算，选取出能够满足试验需求的环境参数，详细数据见表 2。可以看出，在能见度大于 20 km 的情况下，湿度在 40%左右，温度在-10℃左右环境条件能够满足试验的需求；能见度在 15 km 左右时，湿度小于 40%，气温不高于 25℃是试验进行的最佳时机；当能见度在 10 km 左右时，湿度在 35%~40%之间，温度在 0℃~25℃之间的环境条件，也可以满足试验的需求。

内蒙古西部地区相对比较干燥，湿度为 30%左右，冬季和春季的温度在-10℃~25℃之间变化，全年大部分时间能见度能达到 15 km 以上，基本满足仿真的试验条件，因此确定在内蒙古西部地区进行外场跟飞试验。

4.3 试验情况

该型武器系统先后两次在该地区使用 I 型靶机进行了动飞试验，靶机飞行速度为 200 m/s。

第一次试验时间为 1 月份，能见度 20 km，环境温度-3℃，相对湿度 30%。红外搜跟系统对高度为 200 m 的 I 型靶机进行了对 3 个航次探测和跟踪，稳定跟踪距离分别在 5.1 km、5.3 km 和 6.4 km。

第二次飞行试验时间为 5 月份，能见度 12 km，环境温度 25℃，相对湿度 35%。红外搜跟系统对高度为 150 m 的 I 型靶机进行了 4 个航次的探测和跟踪，稳定跟踪距离分别在 5.24 km、5.09 km、5.13 km 和 5.18 km。

通过两次动飞试验的验证，可以看出试验结果与仿真计算结果相吻合。因此，可以使用该 I 型靶机及其系列型号来模拟巡航导弹类目标的长波红外特性，对红外搜跟系统的探测跟踪性能进行试验考核。

5 结论

利用上述方法，在温度、湿度、能见度等简单大气数据已知的条件下，可以概略地计算出目标经过任意路程衰减后的红外辐射能量，并根据仿真结果制定具体的试验实施方法。例如，试验场地、试验环境、探测距离和飞行航路的确定。其缺点是估算的精度不是太高，但是根据其制定外场试验方法和计划是足够的；其优点是可以提高外场试验效率，可以有效避免“试验等待天气”、“加挂的曳光管辐射太强与实际不符”等多种问题的发生，对考核红外搜跟系统对巡航导弹类目标的探测与跟踪能力具有显著的现实意义。

表 2 符合要求的仿真计算结果

Table 2 Simulation results according to requirements

Visibility/km	Humidity/%	Temperature/℃	Initial energy/(W/sr)	τ_{H_2O}	τ_s	τ_{CO_2}	Detected energy/(W/sr)
20	30	-10	3.02	0.94	0.9121	0.9692	2.5082
		-10	3.02	0.94	0.9121	0.9692	2.5085
	35	25	5.56	0.532	0.9121	0.9692	2.6168
		-10	3.02	0.931	0.9121	0.9692	2.4863
	40	0	3.65	0.853	0.9121	0.9692	2.7523
		20	5.14	0.578	0.9121	0.9692	2.6281
		25	5.56	0.489	0.9121	0.9692	2.4015
	30	-10	3.02	0.94	0.8846	0.9692	2.4326
		0	3.65	0.887	0.8846	0.9692	2.7764
		25	5.56	0.581	0.8846	0.9692	2.7677
15	35	-10	3.02	0.94	0.8846	0.9692	2.4328
		0	3.65	0.87	0.8846	0.9692	2.7222
		25	5.56	0.532	0.8846	0.9692	2.5379
	40	-10	3.02	0.931	0.8846	0.9692	2.4113
		0	3.65	0.853	0.8846	0.9692	2.6693
		10	4.35	0.739	0.8846	0.9692	2.7557
		20	5.14	0.578	0.8846	0.9692	2.5489
		25	5.56	0.489	0.8846	0.9692	2.3291
		0	3.65	0.887	0.832	0.9692	2.6113
10	30	20	5.14	0.661	0.832	0.9692	2.7376
		25	5.56	0.581	0.832	0.9692	2.6031
	35	0	3.65	0.87	0.832	0.9692	2.5603
		10	4.35	0.767	0.832	0.9692	2.6897
		20	5.14	0.6179	0.832	0.9692	2.561
		25	5.56	0.532	0.832	0.9692	2.387
	40	0	3.65	0.853	0.832	0.9692	2.5106
		10	4.35	0.739	0.832	0.9692	2.5919
		20	5.14	0.578	0.832	0.9692	2.3973

参考文献:

[1] 白渭雄, 吴法文. 巡航导弹的红外辐射特性研究[J]. 空军工程大学学报, 2003, 4(6): 26-29.

BAI Weixiong, WU Fawen. The Study of the Infrared Radiation Characteristics of the Cruise Missile[J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2003, 4(6): 26-29.

[2] 张发强, 樊祥, 曹翠娇, 等. 巡航导弹的红外辐射特性研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(11): 1229-1233.

ZHANG Faqiang, FAN Xiang, CAO Cuijiao, et al. Research of the infrared radiation characteristic of cruise missile[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(11): 1229-1233.

[3] 白廷柱, 金伟其. 光电成像技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 101-103.

BAI Tingzhu, JIN Weiqi. *The Principle and Technology of Photoelectric Imaging*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology press, 2006: 101-103.

[4] 路远, 凌永顺. 红外辐射大气透射比的简易计算[J]. 红外技术, 2003, 25(5): 45-49.

LU Yuan, LING Yongshun. The Simple Method to Calculate the Atmosphere Transmittance of Infrared Radiation[J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(5): 45-49.

[5] 周国辉, 刘湘伟, 徐记伟. 一种计算红外辐射大气透过率的数学模型[J]. 红外技术, 2008, 30(6): 331-334.

ZHOU Guohui, LIU Xiangwei, XU Jiwei. A Math Model of Calculate the Atmospheric Transmittance Of Infrared Radiation[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(6): 331-334.

[6] 刘景生. 红外物理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992: 131-133.

LIU Jingsheng. *Infrared Physics*[M]. Beijing: Enginery Industry Press, 1992: 131-133.