

## 大气层外弹道式目标红外辐射分布研究\*

杨 华<sup>1,2</sup>, 宣益民<sup>1</sup>, 李 强<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学 动力工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

**摘要:** 论述了弹道式目标大气层外飞行过程中红外辐射分布的理论计算方法, 并编制了相应的计算机程序。以某钝锥体外形弹道式目标为例, 对夜间和午间条件下其发射和反射的红外辐射频谱分布和空间分布分别进行了数值计算, 计算结果验证了理论方法和计算程序的正确性。

**关键词:** 弹道式目标; 红外辐射; 热辐射

**中图分类号:** TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)02-0173-04

## IR radiation distribution of ballistic target flying above aerosphere\*

YANG Hua<sup>1,2</sup>, XUAN Yi-min<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>1</sup>

(1. College of Power Engineering Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The theoretical method calculating infrared radiation distribution of ballistic target above aerosphere is discussed, and relevant computer program is designed. The computation results of a ballistic target with obtuse cone shape flying above aerosphere either at night or at midday illustrate the rationality both of the theoretical method and the computer program.

**Key words:** Ballistic target; Infrared radiation; Thermal radiation

### 0 引言

弹道式目标在地球大气层外飞行时, 其红外辐射来自于它表面所发射的热辐射和反射的环境辐射。研究弹道式目标红外辐射的频谱分布和空间分布对于掌握目标的红外辐射特征具有重要意义。本文在前人研究成果的基础上综合考虑弹道式目标的热辐射效应对环境辐射的反射效应, 以大气层外的空间点为探测点(大气层外飞行的卫星和拦截弹就是运用星载和弹载红外探测器从大气层外的某个空间点探测、跟踪和识别目标, 且无需考虑大气对目标红外辐射的衰

减效应), 在探测点距离目标较远的条件下(目标可视 为点目标), 定量计算目标发射的红外辐射和反射的 红外辐射。

### 1 理论分析

为了对目标的红外辐射进行数值计算, 需将目标 表面划分为数量众多、面积很小的单元(简称面元), 每个面元不仅尺寸非常小, 而且可以近似为平面。

#### 1.1 目标发射的热辐射

目标表面第  $m$  面元在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波段的辐射出射度

收稿日期: 2004-05-20; 修订日期: 2004-07-15

\* 基金项目: 中国博士后科学基金资助项目

作者简介: 杨华(1969-), 男, 湖南沅江人, 副教授, 博士, 从事光电对抗与空间电子对抗方面的研究, 在国内正式刊物上发表论文多篇。

为<sup>[1]</sup>:

$$M_{T_m, m} = \varepsilon_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T_m} - 1} d\lambda \quad (1)$$

式中  $\varepsilon_\lambda$  为目标在该波段的平均光谱发射率;  $T_m$  为该面元的温度;  $c_1$ 、 $c_2$  分别为第一、第二辐射常数。该面元在该波段空间任意方向的辐射强度为:

$$I_{T_m, m} = F_m M_{T_m, m} S_m \quad (2)$$

式中  $F_m$  为第  $m$  面元在该方向发射热辐射的角系数;  $S_m$  为该面元的面积。目标的红外辐射在该波段任意方向的辐射强度  $I_T$  为它的所有面元在该波段该方向的辐射强度之和:

$$I_T = \sum_m I_{T_m, m} \quad (3)$$

## 1.2 目标反射的环境辐射

弹道式目标在大气层外的环境辐射包括太阳热辐射、地球热辐射、其他星体的热辐射以及辐射温度约为 3.5 K 的宇宙空间热辐射。弹道式目标表面、太阳热辐射和地球热辐射的辐照度比较大<sup>[2]</sup>, 其他星体和深冷空间热辐射的辐照度非常小, 忽略其他星体和深冷空间的辐射不仅能简化大气层外弹道式目标红外辐射的计算过程, 而且对计算精度的影响也微不足道。因此, 在弹道式目标大气层外红外辐射的计算过程中, 只考虑目标发射的热辐射和反射的太阳辐射与地球辐射。

目标在大气层外飞行时, 可能有一部分太阳辐射直接传输到目标表面, 通常将这一部分太阳辐射简称为太阳直接辐射。目标表面第  $m$  面元反射太阳直接辐射在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波段任意方向的辐射强度  $I_{s, m}$  为:

$$I_{s, m} = E_{\text{sun}} K_{\text{sun}} \rho_{\text{sun}, m} F_{m, s} S_m \quad (4)$$

式中  $E_{\text{sun}}$  为太阳直接辐射在地球大气层外的总辐照度;  $K_{\text{sun}}$  为太阳直接辐射在地球大气层外在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波段的辐照度与  $E_{\text{sun}}$  的比值;  $\rho_{\text{sun}, m}$  为第  $m$  面元该波段对太阳光谱的平均反射率;  $F_{m, s}$  为该面元在该方向反射太阳直接辐射的角系数。

地球反射的太阳辐射在该面元表面也被反射, 通常将这一部分太阳辐射简称为太阳间接辐射。目标表

面第  $m$  面元反射太阳间接辐射在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波段任意方向的辐射强度  $I_{se, m}$  为:

$$I_{se, m} = E_{\text{sun}} K_{\text{sun}} \rho_{se} F_{m, se} \rho_{\text{sun}, m} S_m \quad (5)$$

式中  $\rho_{se}$  为地球及其大气系统对太阳光谱的平均反射率;  $F_{m, se}$  为面元在该方向反射太阳间接辐射的角系数。

目标在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波段任意方向反射太阳辐射的辐射强度  $I_{s, r}$  为它的所有面元在该波段该方向反射太阳辐射的辐射强度之和:

$$I_{s, r} = \sum_m (I_{s, m} + I_{se, m}) \quad (6)$$

地球辐射为地球及其大气系统的热辐射。该面元所反射的地球辐射在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波段任意方向的辐射强度  $I_{e, m}$  为:

$$I_{e, m} = M_{\text{earth}} K_{\text{earth}} \rho_{e, m} F_{e, m} S_m \quad (7)$$

式中  $M_{\text{earth}}$  为地球辐射的辐射出射度;  $K_{\text{earth}}$  为地球辐射在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波段的辐射出射度与  $M_{\text{earth}}$  的比值;  $\rho_{e, m}$  为第  $m$  面元该波段对地球辐射的平均反射率;  $F_{e, m}$  为该面元在该方向反射地球辐射的角系数。

目标在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波段任意方向反射地球辐射的辐射强度  $I_{e, r}$  为它的所有面元在该波段该方向反射地球辐射的辐射强度之和:

$$I_{e, r} = \sum_m I_{e, m} \quad (8)$$

目标在大气层外飞行过程中, 在  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  波段任意方向总的辐射强度  $I$  为:

$$I = I_T + I_{s, r} + I_{e, r} \quad (9)$$

## 2 计算举例

对于任意弹道式目标, 其中心点为  $O$  点, 对称轴为直线  $AB$ , 如图 1 所示。以  $O$  点为原点, 建立如图 1 所示的空间直角坐标系, 地球中心与  $O$  点的连线为  $Z$  轴,  $OX$  垂直于直线  $OZ$  和  $AB$ ,  $OY$  垂直于直线  $OZ$  和  $OX$ 。

太阳辐射方向用射线  $OE$  表示,  $OE$  在  $XOY$  平面的投影线为  $Oe$ ,  $Z$  轴与  $OE$  的夹角  $\angle ZOE$  为  $\phi_0$ ,  $X$

轴与  $Oe$  的夹角  $\angle XOe$  为  $\theta_0$ 。从弹道式目标到探测点的连线用  $OD$  表示,  $OD$  在  $XOY$  平面的投影线为  $Od$ ,  $Z$  轴与  $OD$  的夹角  $\angle ZOD$  为  $\phi$ ,  $X$  轴与  $Od$  的夹角  $\angle XOd$  为  $\theta$ 。  $Y$  轴与  $BA$  的夹角  $\angle YOA$  为  $\alpha$ 。目标飞行姿态与太阳辐射方向之间的空间方位关系由  $\phi_0$ 、 $\theta_0$  和  $\alpha$  描述,  $\phi_0$  的变化范围为  $0\sim\pi$ ,  $\theta_0$  的变化范围为  $0\sim 2\pi$ ,  $\alpha$  的变化范围为  $0\sim 2\pi$ 。目标红外辐射的空间分布可以用  $\phi$ 、 $\theta$  和  $I_T$ 、 $I_{s,r}$ 、 $I_{e,r}$  描述,  $\phi$  的变化范围为  $0\sim\pi$ ,  $\theta$  的变化范围为  $0\sim 2\pi$ 。

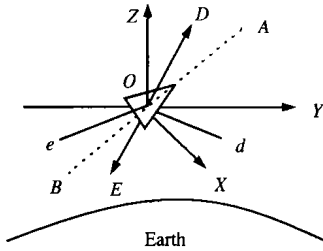


图 1 太阳辐射方向和目标辐射方向的空间方位

Fig.1 Dimensional orientation of sun radiation direction and target radiation direction

对于某种钝锥体外形的弹道式目标,其端头帽半径为 0.1 m,底盖板直径 0.9 m,高 1.8 m,表面初始温度为 300 K。当  $\alpha$  为  $7\pi/36$ 、 $\theta_0$  和  $\phi_0$  分别取不同值

(太阳的辐射方向变化)时,根据上述理论,可以编程计算该弹道式目标大气层外飞行过程中红外辐射强度的频谱分布与空间分布。

图 2~图 5 为  $\phi_0$  分别取 0 和  $\pi$  时(如果  $\phi_0$  为 0 或  $\pi$ ,  $\theta_0$  可为任意值)弹道式目标大气层外飞行过程中发射和散射的红外辐射强度在  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  和  $6\sim 16\ \mu\text{m}$  的频谱分布与空间分布,其中(a)为目标发射红外辐射的分布、(b)为目标反射太阳红外辐射的分布、(c)为目标反射地球红外辐射的分布。

### 3 结 论

弹道式目标在地球大气层外的飞行过程中,其表面发射和反射的红外辐射都具有一定的频谱分布和空间分布,上述分布受目标外形尺寸、表面材料和温度、飞行高度和姿态以及太阳辐射方向等因素的影响。

从图 2 和图 3 可以看出:

- (1) 在  $\phi_0=0$  的条件下,目标在地球背向太阳辐射的区域上空(夜间)飞行,太阳辐射传输不到目标表面,目标表面不反射太阳的红外辐射;
- (2) 由于太阳辐射传输不到目标表面,目标表面温度较低,它发射的红外辐射较弱;

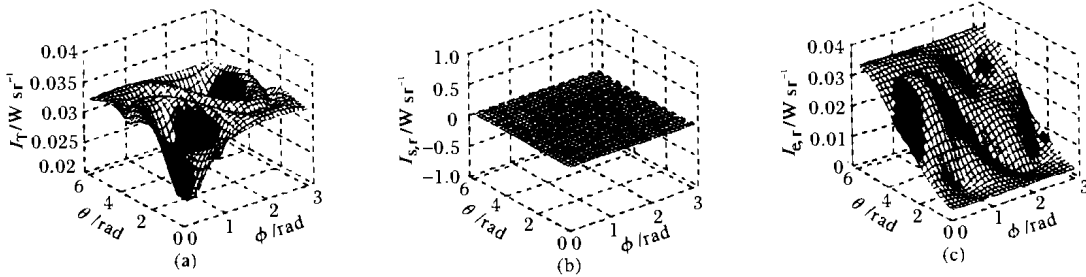


图 2  $\phi_0=0$  时目标在  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  波段红外辐射强度的空间分布

Fig.2 Dimensional distribution of the target's infrared radiation intensity in  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  band while  $\phi_0=0$

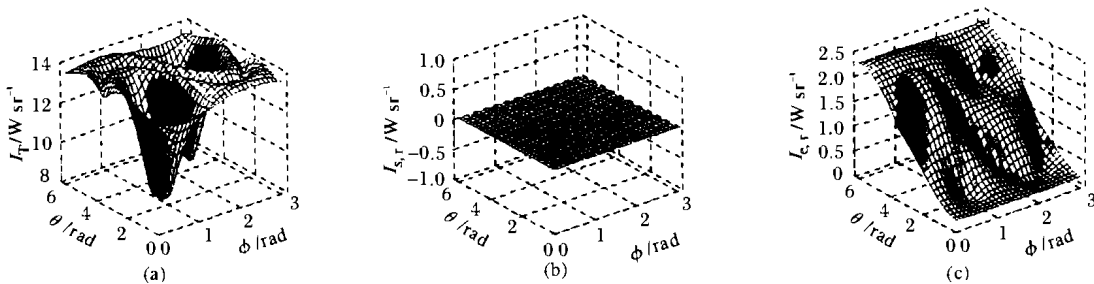
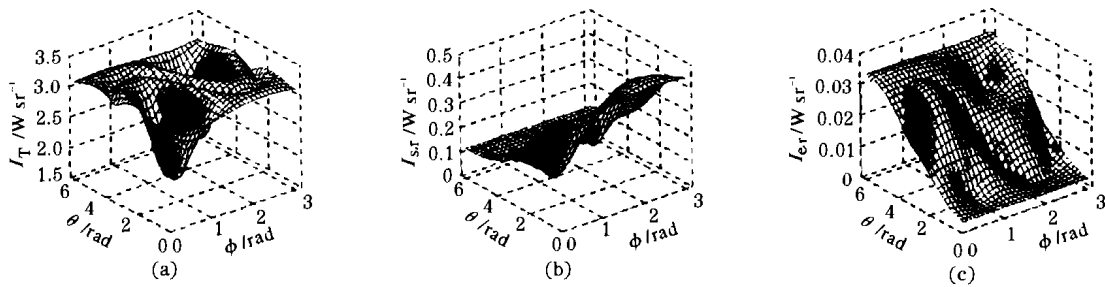
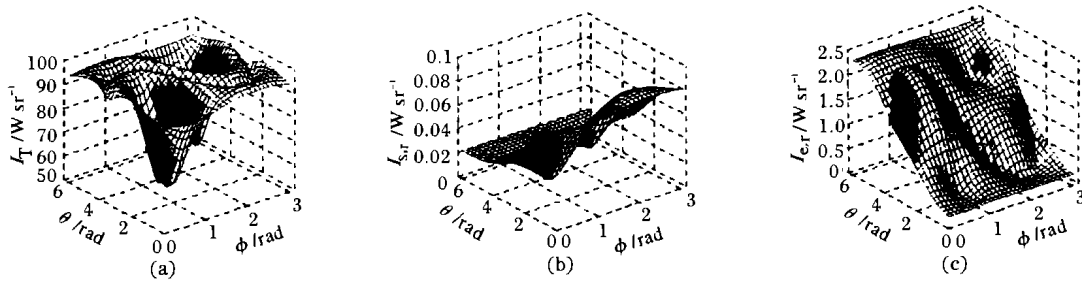


图 3  $\phi_0=0$  时目标在  $6\sim 16\ \mu\text{m}$  波段红外辐射强度的空间分布

Fig.3 Dimensional distribution of the target's infrared radiation intensity in  $6\sim 16\ \mu\text{m}$  band while  $\phi_0=0$

图 4  $\phi_0=\pi$  时目标在 3~5  $\mu\text{m}$  波段红外辐射强度的空间分布Fig.4 Dimensional distribution of the target's infrared radiation intensity in 3~5  $\mu\text{m}$  band while  $\phi_0=\pi$ 图 5  $\phi_0=\pi$  时目标在 6~16  $\mu\text{m}$  波段红外辐射强度的空间分布Fig.5 Dimensional distribution of the target's infrared radiation intensity in 6~16  $\mu\text{m}$  band while  $\phi_0=\pi$ 

(3) 由于地球表面温度为常温,使得 6~16  $\mu\text{m}$  波段的辐射强度大于 3~5  $\mu\text{m}$  波段的辐射强度,导致目标所反射的红外辐射在 6~16  $\mu\text{m}$  波段的辐射强度大于 3~5  $\mu\text{m}$  波段的辐射强度。

从图 4 和图 5 可以看出:

(1) 在  $\phi_0=\pi$  的条件下,目标在地球朝向太阳辐射的区域上空(午间)飞行,目标表面温度较高,发射的红外辐射较强;

(2) 由于太阳表面温度较高,使得 3~5  $\mu\text{m}$  波段的辐射强度大于 6~16  $\mu\text{m}$  波段的辐射强度,导致目标所反射的红外辐射在 3~5  $\mu\text{m}$  波段的辐射强度大

于 6~16  $\mu\text{m}$  波段的辐射强度。

(3) 3~5  $\mu\text{m}$  波段,目标所反射的太阳辐射强于所反射的地球辐射;而 6~16  $\mu\text{m}$  波段,目标所反射的太阳辐射弱于所反射的地球辐射。图中的数值计算结果与定性的理论分析结果一致,表明了计算结果的合理性。

#### 参考文献:

- [1] 刘景生.红外物理[M].北京:兵器工业出版社,1992.55-61.
- [2] 徐根兴.目标和环境的光学特征[M].北京:宇航出版社,1995.44-102.

## 《红外与光电系统手册》简介

《红外与光电系统手册》(内部资料)共八卷。主要内容:第一卷《红外辐射》、第二卷《辐射的大气传输》、第三卷《光电元器件》、第四卷《光电系统设计、分析和测试》、第五卷《被动光电系统》、第六卷《主动光电系统》、第七卷《光电对抗系统》、第八卷《新系统和技术》。有需求者请与本编辑部联系,联系电话:022-23666400 或 022-23009840。