

文章编号: 1672-8785(2020)06-12-05

# 高度对球形气球诱饵及导弹辐射特性的影响研究

白心爱

(吕梁学院物理系, 山西 吕梁 033000)

**摘 要:** 为了使导弹拥有方达到突防的目的, 在分析背景辐射的基础上, 利用空间目标表面温度数学模型计算了不同高度下空间目标表面的温度场分布, 并分析讨论了高度对红外辐射特性的影响。结果表明, 无论是白天还是夜间, 高度都不会成为区分诱饵与弹头的参数, 但尽可能在白天部署可以降低击中率, 从而达到突防的效果。

**关键词:** 高度; 球形气球诱饵; 导弹; 辐射特性

**中图分类号:** O434 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.06.003

## Research on the Effect of Height on the Radiation Characteristics of Spherical Balloon Decoy and Missile

BAI Xin-ai

(Department of Physics, Luliang University, Luliang 033000, China)

**Abstract:** In order to make the missile owner achieve the purpose of penetration, the mathematical model of the surface temperature of space targets is applied to calculate the temperature field distribution of targets at different heights on the basis of analyzing the background radiation. And the influence of height on infrared radiation characteristics is analyzed and discussed. The results show that the height is not the parameter which can distinguish the decoy and the warhead by day or by night, but deployment in the day time can reduce the hit rate and achieve the penetration effect.

**Key words:** height; spherical balloon decoy; missile; radiation characteristics

### 0 引言

空间目标红外辐射特性研究为突防、隐身与反隐身、目标探测与识别、引信以及红外光学制导等技术提供了依据<sup>[1]</sup>。而温度是基于红

外辐射特性识别目标的重要依据之一, 且表面温度场的计算是目标红外辐射特性研究中非常重要的一个环节。国外对空间目标红外辐射特性的研究较早, 其中一些发达国家(比如美国)

收稿日期: 2020-05-26

基金项目: 山西省自然科学基金项目(201801D121125)

作者简介: 白心爱(1971-), 女, 山西吕梁人, 副教授, 硕士, 主要从事红外辐射与物理教育方面的研究。  
E-mail: 807816896@qq.com

已经获得了很多关于空间目标红外辐射特性的可靠且准确的数据<sup>[2]</sup>, 同时研发了许多相关的仿真计算软件, 并将其广泛应用于导弹防御及相关领域的建模和仿真中。目前, 国内关于这方面的研究还仅停留在对目标温度场分布的理论研究阶段。本文首先分析背景辐射, 然后搭建目标表面温度场的数学模型, 最后对球形气球诱饵及弹头的温度场分布进行定量计算, 并针对突防技术研究其红外辐射特性。

### 1 空间目标的背景辐射分析

空间目标的外部热流主要是背景辐射热流。对近地目标而言, 白天的背景辐射主要包括月球的红外辐射、地球的长波辐射、太阳辐射及其反射辐射<sup>[2]</sup>。而夜间太阳直接照射和地球反射太阳光的辐射通量为零。

#### 1.1 太阳辐射热流

如图 1 所示, 太阳辐射用太阳常数  $S$  表示, 目标所受的太阳辐射外热流为<sup>[3]</sup>

$$dq_1 = S \cos \beta_s dA = SF_1 dA \quad (1)$$

式中,  $dA$  表示目标外表面的微元面积,  $F_1$  表示太阳直接辐射角系数。

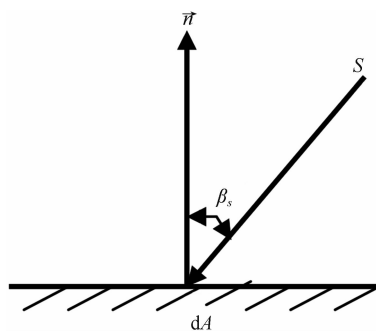


图 1 太阳辐射外热流的示意图

根据式(1)对整个表面进行积分, 即可得到整个表面所获得的太阳辐射热流。

#### 1.2 地球反射热通量

假设地球是均匀反射太阳辐射的漫反射体, 其反射遵守兰贝特定律。则目标外表面上的任一微元所得的反射通量(见图 2)为<sup>[4]</sup>

$$dq_2 = \rho_e S dA \iint_{A_E} \frac{\cos \eta \cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{\pi l^2} dA_E = F_2 \rho_e S dA \quad (2)$$

式中,  $\rho_e$  表示地球对太阳辐射的平均反射率,  $A_E$  表示太阳直接辐射的地表面面积,  $dA_E$  表示地表面的面积元,  $l$  表示  $dA_E$  与  $dA$  之间的距离,  $F_2$  表示地球反射辐射角系数。

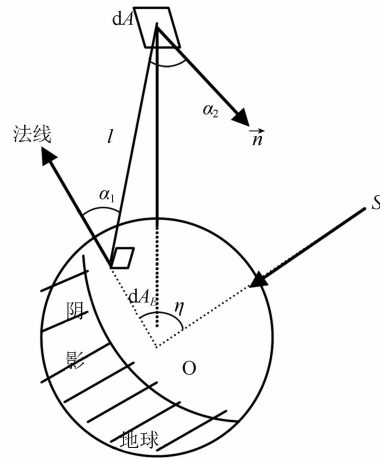


图 2 地球反射辐射外热流图

#### 1.3 地球的红外辐射热通量

假设地球是一个各处红外辐射强度均匀的辐射热平衡体, 则空间目标表面上的任一微元  $dA$  获得的整个地球表面红外辐射热流(见图 3)为<sup>[4]</sup>

$$dq_3 = \frac{1 - \rho_e}{4} S dA \iint_{A_E} \frac{\cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{\pi l^2} dA_E = F_3 \frac{1 - \rho_e}{4} S dA \quad (3)$$

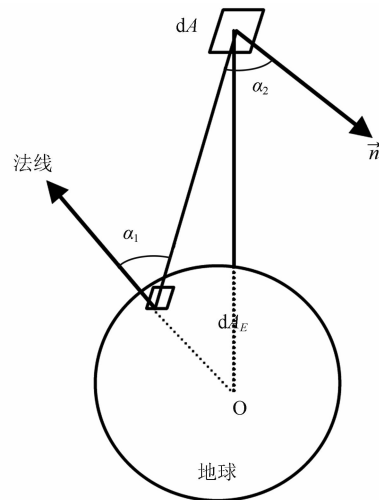


图 3 地球红外辐射外热流图

式中,  $dA_E$  表示地球表面微元面积,  $A_E$  表示地球表面面积,  $F_3$  表示地球红外辐射角系数。

或者基于以上假设可得: 地球吸收太阳的

能量等于其向空间辐射的能量, 即

$$E = \frac{1-\rho_e}{4} \cdot S \quad (4)$$

式中,  $E$  为地球大气长波辐照度。

#### 1.4 月球对太阳辐射的反射热通量和红外辐射热通量

目标表面上任一微元面积  $dA$  接收的月球反射热通量为<sup>[3]</sup>

$$dq_4 = \rho_m S dA \iint_{A_M} \frac{\cos\eta \cos\alpha_1 \cos\alpha_2}{\pi l^2} dA_M = F_4 \rho_m S dA \quad (5)$$

式中,  $dA_M$  表示月球表面的微元面积,  $A_M$  表示受到太阳直接辐射的月球表面面积,  $l$  表示  $dA$  与  $dA_M$  之间的距离,  $F_4$  表示月球反射辐射角系数,  $\rho_m$  表示月球对太阳辐射的平均反射率。

目标外表面上任一微元面积  $dA$  受到整个月球表面的红外辐射热流为

$$dq_5 = F_5 E_m dA \quad (6)$$

式中,  $F_5$  表示月球红外辐射角系数,  $E_m$  表示月球平均红外辐射热流密度。

## 2 空间目标的表面温度数学模型

考虑以上背景辐射及各种方式的热传递对目标表面温度的影响<sup>[5]</sup>, 根据网络思想可推导出热平衡方程<sup>[6]</sup>:

$$\begin{aligned} & \alpha_{1i} E_{sun} F_{1i} A_i + \alpha_{2i} \rho_e E_{sun} F_{2i} A_i + \alpha_{3i} E_e F_{3i} A_i + \alpha_{4i} \rho_m E_{sun} F_{4i} A_i \\ & + \alpha_{5i} E_m F_{5i} A_i + \sum_{j=1}^N \beta_{j,i} A_j \epsilon_j \sigma T_j^4 + \sum_{j=1}^N K_{i,j} (T_j - T_i) + P_i \\ & - A_i (\epsilon_{ii} + \epsilon_{ei}) \sigma T_i^4 - m_i c_i \frac{dT_i}{dt} = 0 \quad (7) \end{aligned}$$

式(7)为节点  $i$  的热平衡方程, 其中各项的意义详见参考文献<sup>[6]</sup>: 前五项是其空间外热源; 第六项是吸收其它节点的热辐射; 第七项是接收其它节点流的传导热量; 第八项是内热源功率; 第九项是其外辐射能量; 第十项是内能变化率。  $\alpha_{ki}$  ( $k=1,2,3,4,5$ ) 分别为空间目标外表面太阳辐射、地球反照辐射、地球长波辐射、月球反照辐射和月球辐射的吸收率。  $F_{ki}$  ( $k=1,2,3,4,5$ ) 分别为太阳的直接辐射、地球的反照辐射、地球的长波辐射、月球的反射辐射以及

月球红外辐射角系数。  $E_m$  是月球辐射的辐照度;  $E_{sun}$  是太阳辐射常数;  $E_e$  是地球大气长波辐射的辐照度, 其值等于  $\frac{1-\rho_e}{4} E_{sun}$ ;  $\rho_m$  和  $\rho_e$  分别是月球和地球的平均反射率;  $T_j$  和  $T_i$  分别是节点  $j$  和  $i$  的热力学温度;  $A_j$  和  $A_i$  分别是节点  $j$  和  $i$  的表面积;  $\beta_{j,i}$  是节点  $i$  对  $j$  的吸收因子<sup>[6]</sup>;  $\sigma$  是斯蒂芬-玻尔兹曼常数<sup>[6]</sup>;  $\epsilon_j$  是节点  $j$  的发射率<sup>[6]</sup>;  $K_{i,j}$  是节点  $j$  对  $i$  的传导因子<sup>[7]</sup>;  $\epsilon_{ii}$  和  $\epsilon_{ei}$  分别是内、外表面发射率;  $c_i$  是比热容;  $m_i$  是质量<sup>[6]</sup>。

利用差分法<sup>[8]</sup>求解该热平衡方程<sup>[9]</sup>, 得

$$T_i(t+\Delta t) = T_i(t) + \frac{M_i}{L_i} \Delta t \quad (8)$$

利用迭代法求解该方程, 即可得到白天及夜间目标的表面温度。

## 3 目标表面温度计算结果分析

### 3.1 计算模型

计算模型为球形。根据参考文献<sup>[9]</sup>, 地球半径为  $6.37 \times 10^6$  m, 太阳辐射常数为  $1353 \text{ W/m}^2$ , 地球长波辐射通量为  $237 \text{ W/m}^2$ 。根据参考文献<sup>[6]</sup>, 假设目标是位于  $120^\circ \text{E}$ 、 $25^\circ \text{N}$  的直径和质量分别为 3 m 和 0.5 mg 的球形气球, 测量时间为北京时间 1 月 30 日 12 时 (此时太阳天顶角为  $42.78^\circ$ ); 同时假设气球表面温度均匀。

### 3.2 目标高度对空间球形目标温度分布的影响

#### 3.2.1 高度对球形气球诱饵表面温度的影响

根据热平衡方程式及辐射角系数公式<sup>[10]</sup>, 部署后气球的温度是其高度的函数。图 4(a)和图 4(b)分别为白天和夜间铝箔、铝基、灰色  $\text{TiO}_2$  和白色  $\text{TiO}_2$  四种不同涂层的平衡温度随高度的变化曲线。

由图 4 可知, 白天和夜间球形目标的表面平衡温度都是随高度的增加而逐渐减小的。这是因为球状物体的地球长波辐射角系数随高度的增加而减小, 导致夜间目标的表面平衡温度随高度增加而降低的幅度比白天要大。

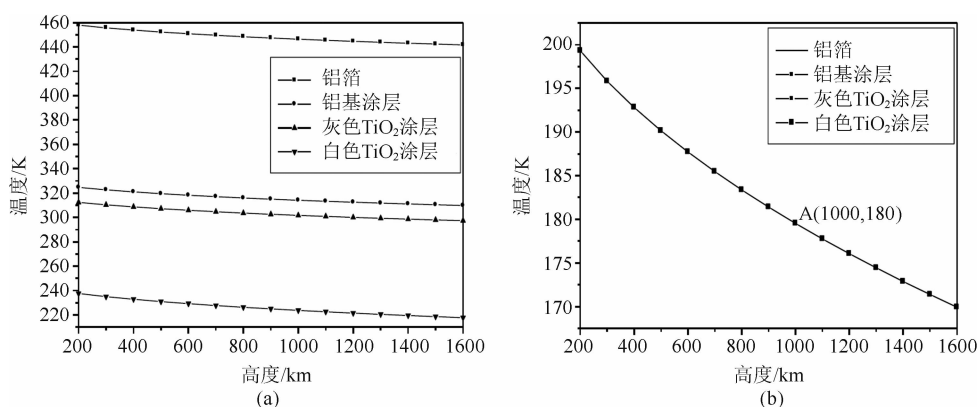


图 4 气球温度随高度的变化曲线：(a)白天；(b)夜间

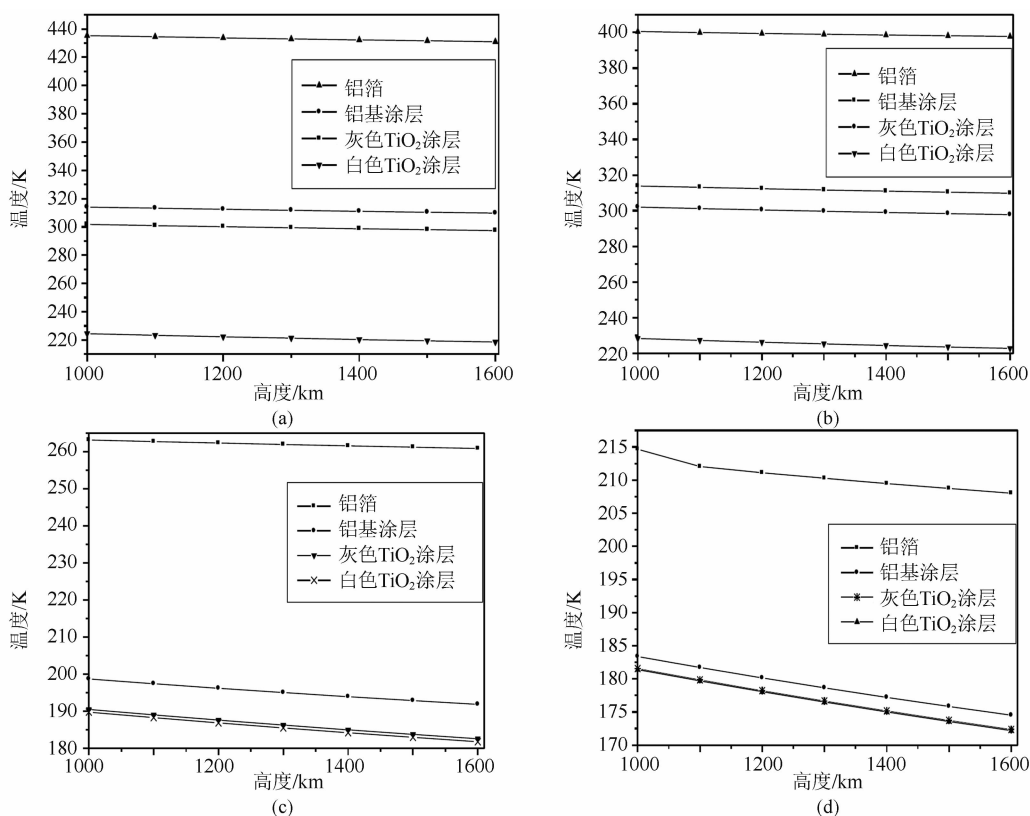


图 5 不同涂层弹头温度随高度的曲线变化：(a)热传递等于辐射值(白天)；(b)热传递等于 5 倍辐射值(白天)；(c)热传递等于辐射值(夜间)；(d)热传递等于 5 倍辐射值(夜间)

因此，如果进攻方在夜间部署目标，那么防守方就可根据所测得的温度信息得出目标的高度位置；而如果在白天部署，则必须有确切的涂层信息才能得出目标的高度位置(事实上防守方也不会有确切的涂层信息)。假设通过低轨道 SBIRS 估算出某一空间目标的表面温度为 310 K，这就可能是位于 300 km 高度处的使用灰色  $TiO_2$  涂层的目标，也可能是位于

1500 km 高度处的使用铝基涂层的目标。因此，没有确切的涂层信息就无法判断目标的实际高度。

### 3.2.2 高度对弹头表面温度的影响

通过利用热网络方程<sup>[11]</sup>和差分法求解弹头和气球的热平衡问题，即可求得弹头的表面温度。若气球与弹头的温度不同，则它们会以以下几种方式互相传热<sup>[11]</sup>：通过垫片(用于调

整气球内的弹头位置)的热传导、辐射、由运动导致的气体对流以及气球内气体的热传导。结合这些传热方式,通过求解热平衡方程即可得到温度场分布。

根据热平衡方程式及辐射角系数公式,部署后弹头的温度是其空间高度的函数。图 5 所示为部署 10 min 后气球温度随高度的变化曲线。其中,图 5(a)和图 5(c)所示分别为白天和夜间热传递等于辐射值的情况;图 5(b)和图 5(d)所示分别为白天和夜间热传递等于 5 倍辐射值的情况。

由图 5 可以看出,白天和夜间各气球在部署后的温度都是随高度的增加而降低,但白天变化特别小(仅呈微弱减小趋势),而夜间降幅比较明显。

#### 4 结论

通过以上分析可知,部署气球诱饵与弹头之后,其温度不管是白天还是夜间都随高度的增加而降低,所以高度不会成为区分诱饵与弹头的参数。此外,白天温度变化特别小(仅呈微弱减小趋势),而夜间温度降幅比较明显,因此尽可能在白天部署气球。这样可以防止对方依据温度来判断目标高度,以降低击中率,从而达到突防的效果。我们接下来将会在红外光谱检测和红外辐照度监测方面作进一步的研究。

#### 参考文献

- [1] 沈培志,王培源. 反舰导弹突防的技术手段与战术措施 [J]. 飞航导弹, 2018, 50(1): 25-29.
- [2] 李亨,李劲东,孙鹤,等. 空间目标温度与红外特性影响因素研究 [J]. 激光与红外, 2019, 49(12): 1436-1441.
- [3] 刘关心,阳再清. 直升机目标红外辐射特性分析 [J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40(3): 36-40.
- [4] 李文杰,闫世强,王成良,等. 红外预警卫星探测波段地球背景辐射仿真研究 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(12): 63-69.
- [5] 陶文铨,杨世铭. 传热学(第五版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [6] 白心爱,吴振森. 间距对空间球形目标表面温度的影响 [J]. 山西大学学报(自然科学版), 2004, 27(4): 39-41.
- [7] Rohsenow W M, Hartnett J P, Ganic E N. Handbook of Heat Transfer Fundamentals [M]. New York: McGraw-Hill, 1985.
- [8] 苗恩铭. 温度场计算中差分法的应用 [J]. 工具技术, 2005, 39(8): 19-22.
- [9] 白心爱. 空间目标的热效应研究 [J]. 山西大学学报, 2006, 29(1): 48-50.
- [10] 杨贤荣,马庆芳,原庚新,等. 辐射换热角系数手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [11] 刘安安. 目标与环境光散射辐射特性与应用研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2002.