

文章编号: 1672-8785(2021)10-0024-04

## 空间球形目标大小对其热效应的影响

白心爱

(吕梁学院物理系, 山西 吕梁 033000)

**摘 要:** 针对一种重要对抗措施——核弹头的反模拟气球诱饵, 提出了一些有益于突防的具体措施。通过热网络数学模型及差分法, 分别对不同大小空间球形目标的白天和夜间表面温度场分布进行了计算。结果表明, 为了使诱饵在白天和夜间都能使用, 在设计时采用一组不同大小的诱饵, 使其表面温度分布在含弹头气球表面温度的附近两侧。这样既可破坏美国导弹防御系统(National Missile Defense, NMD)基于大小识别目标的能力, 又可增加对方识别目标的复杂性。

**关键词:** 气球诱饵; 热效应; 表面温度; 球形目标大小

中图分类号: O434 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.10.004

## Influence of the Size of Space Spherical Target on Thermal Effect

BAI Xin-ai

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

**Abstract:** Aiming at “Anti-Simulation Balloon Decoys for Nuclear Warheads”, which is one of the important countermeasures, some specific measures beneficial to penetration are proposed. By means of the thermal network model and difference method, the surface temperature distributions of spherical objects with different sizes in daytime and nighttime are calculated. The results show that in order to make the decoys usable both during the day and at night, a group of different sizes of decoys is designed so that the surface temperature of the decoys is distributed on both sides of the surface temperature of the balloon containing the warhead. This measure can undermine U.S. National Missile Defense (NMD) system's ability to identify targets based on size and increase the complexity of identifying targets as well.

**Key words:** balloon decoy; thermal effect; surface temperature; spherical target size

收稿日期: 2021-07-30

基金项目: 山西省自然科学基金项目(201801D121125); 吕梁市重点研发计划(高新技术领域)项目(GX-ZDYF2019091)

作者简介: 白心爱(1971-), 女, 山西吕梁人, 教授, 主要从事红外辐射与物理教育方面的研究。

E-mail: 807816896@qq.com

## 0 引言

空间目标热效应研究为红外光学制导、隐身与反隐身、突防、目标探测与识别、引信等技术提供了研发依据; 同时也是用于精确打击、战场监视、空战等方面的关键技术之一, 对国防和国民经济的发展具有极其重要的意义。

国内外已对空间目标热效应进行了广泛的研究<sup>[1]</sup>。美国等发达国家通过测量获得了许多可靠的相关数据。但由于测量成本过高, 国内的研究只停留在理论计算分析上, 包括目标背景辐射特性计算、目标自身辐射特性计算、目标自身热效应研究等。目标自身的热效应与其温度有关, 而影响目标温度的因素有很多, 如形状、涂层、高度、间距以及大小等。之前针对一种重要对抗措施——核弹头的反模拟气球诱饵<sup>[2]</sup>, 对形状、涂层、高度及间距的影响进行了一些研究。本文将通过计算不同大小目标的温度场分布来讨论其对目标热效应的影响, 并提出一些有益于突防的具体措施。

## 1 热网络数学模型及温度场的数值解法

根据热网络思想, 将空间目标划分为许多个节点。考虑各种辐射及热传递的影响, 可得节点热平衡方程<sup>[3]</sup>:

$$\sum_l w_{j,l}(T_l - T_j) + \sum_l v_{j,l}(T_l^4 - T_j^4) + Q_{T,j} = (mc)_j \frac{T_j(t + \Delta t) - T_j(t)}{\Delta t} \quad (j=1, 2, \dots, n; l=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中,  $w_{j,l}$  为节点间传导网络系数;  $Q_{T,j}$  为节点总热源, 包括节点的内热源;  $v_{j,l}$  为节点间辐射网络系数;  $\rho$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数;  $m$  与  $c$  分别为节点的质量与比热容。

采用差分法<sup>[3]</sup>求得节点热平衡方程<sup>[3]</sup>的解:

$$T_j(t + \Delta t) = T_j(t) + \frac{M_j}{l_j} \Delta t \quad (2)$$

通过迭代法求得此方程的解。

## 2 目标的热效应计算

### 2.1 计算模型

假设目标为一组位于 120°E、25°N 且高度为 1200 km 的球形气球诱饵与含弹头气球, 其质量为 0.5 mg, 直径为 3 m, 表面温度均匀。测量时间为北京时间 1 月 30 日 12 点, 此时太阳天顶角为 42.78°。

### 2.2 目标的热效应计算

弹头的存在使得含弹头气球与诱饵(空气球)的热效应不同, 辐射换热的存在使得气球间的热效应相互影响。下面对考虑气球间相互影响时两种不同情况下的温度场分布进行计算和讨论。

设弹头与诱饵的初始温度分别为 310 K 和 300 K。弹头与诱饵间的热传导由辐射形成, 目标是质量为 0.5 mg 的球形气球。

#### 2.2.1 白天部署两个及以上球形气球时的热效应计算<sup>[5,7-9]</sup>

(1) 部署一组气球, 在涂层、间距及大小完全相同的情况下, 计算不同的气球直径对其表面温度的影响。

在气球涂层和间距一定的情况下, 部署后的气球表面温度还受其大小的影响。同时部署直径均为 2 m 和 3 m、间距相同的铝箔涂层气球各三个。表 1、表 2 和表 3 分别列出了运用热平衡方程算得的不同间距下部署 10 min 后各球的表面温度。

根据文献<sup>[5]</sup>, 地球的长波辐射通量为 237 W/m<sup>2</sup>, 太阳辐射常数为 1353 W/m<sup>2</sup>, 地球半径为 6.37 × 10<sup>6</sup> m。

表 1 间距为 0 m 时不同大小气球的表面温度

直径/ m	辐射角 系数	空球 1 温度/K	空球 2 温度/K	含弹头气 球温度/K
2	0.072	414.3	414.3	422.9
3	0.072	442.4	442.4	434.2

表 2 间距为 3 m 时不同大小气球的表面温度

直径/ m	辐射角 系数	空球 1 温度/K	空球 2 温度/K	含弹头气 球温度/K
2	0.01	414.0	414.0	422.6
3	0.018	442.0	442.0	433.8

表 3 间距为 6 m 时不同大小气球的表面温度

直径/ m	辐射角 系数	空球 1 温度/K	空球 2 温度/K	含弹头气 球温度/K
2	0.0042	414.0	414.0	422.5
3	0.0075	441.9	441.9	433.7

通过比较表 1、表 2 和表 3 可知,在相同间距下,气球直径越小,部署后各气球的表面温度越低,其热效应也相应越小。这是因为气球直径的减小一方面降低了气球间的辐射角系数,另一方面使对外部热流的接收面积变小。

上述讨论都是假设各个气球的表面涂层、大小及间距均相等。这样设计的一组气球对于攻击方有利的是不给对方以几何参数来识别的机会。在没有确切涂层信息的情况下,对方很难从众多完全一样的气球中找出真正的目标。事实上,这只是一种理想的情况。由于受许多因素影响,众多的气球不可能保持完全一样的大小及间距。因此,进攻方应从实际出发,考虑间距及大小不完全相等的情况。同时,为增加 NMD 系统防御的难度,实际上一般不会部署一组完全相同的气球。为此,进攻方必须对这些情况下气球表面温度受到的影响有所研究。

(2)部署一组涂层及间距相同但大小不全相等的气球,计算并讨论气球大小对其表面温度的影响。

假设同时部署三个大小不一、间距均为 3 m 的铝箔涂层气球。空球 1 的直径为 4 m,另外两个气球的直径为 2 m。表 4 列出了采用热平衡方程算得的各气球在部署 10 min 后的表面温度。

表 4 直径不同的三个气球的表面温度

空球 1 温度/K	空球 2 温度/K	含弹头气球 温度/K
464.9	414.0	422.6

由文献[10]可知,空球 1 对其它两个气球的辐射角系数为 0.0072;空球 2 对含弹头气球

的辐射角系数为 0.01。

通过比较表 2 与表 4 可知,在保持间距为 3 m 的前提下,气球直径从 2 m 到 3 m、4 m 变化时,其表面温度从 414.0 K 变化到 442.0 K、464.9 K;直径不变的气球的表面温度也基本不变。由此得出,在气球间距一定的情况下改变其中某一个球的大小,其它气球的表面温度基本不变,而该球的表面温度变化比较明显;而且随着直径的增大,其表面温度升高,热效应也相应地增大。

### 2.2.2 夜间部署两个及以上球形气球时的热效应计算<sup>[7-9]</sup>

(1)假设夜间同时部署两个直径均为 3 m、间距为 3 m 且表面涂有同种涂层(厚度相同)的气球。其中一个内含弹头,弹头的相关参数与前面一样,气球质量为 0.5 kg;另一个是质量为 3 kg 的气球诱饵。计算部署 10 min 后各气球的表面温度(结果见表 5 与表 6 中的部署(B))。

(2)假设夜间同时部署三个直径均为 3 m、间距为 3 m 且表面涂有同种涂层(厚度相同)的气球。其中一个内含弹头,弹头的相关参数与前面一样,气球质量为 0.5 kg;另两个是作为诱饵的空气球,其质量均为 3 kg。计算部署 10 min 后各气球的表面温度(结果见表 5 与表 6 中的部署(C))。

(3)假设夜间同时部署三个气球,在其他参数不变的条件下,进行以下两种变动。情况 1:所有气球直径从 3 m 变为 6 m。情况 2:只把其中一个空气球的直径从 3 m 变为 6 m。部署 10 min 后各气球的表面温度见表 5 与表 6。

通过比较表 5 和表 6 可知,夜间部署三个气球时含弹头气球以及空气球的表面温度比部署两个气球时略高(两种情况下气球完全一样),但含弹头气球与空气球之间始终保持恒定的温度差。另外还可得出,部署后气球的表

表 5 夜间不同情况下, 部署 10 min 后各铝箔涂层气球的表面温度

部署情况	空球 1 温度/K	空球 2 温度/K	含弹头气球 温度/K
部署(A)	187	—	213.0
双球部署(B)	244.87	—	213.1
三球部署(C)	244.9	244.9	213.2
情况 1	197.5	197.5	187.9
情况 2	197.6	244.9	213.1

\*说明: 部署(A)是不考虑气球间相互影响时各气球的表面温度。铝箔涂层空气球的平衡温度为 176 K, 表中的 187 K 是部署 10 min 时的温度(质量大的铝箔涂层气球达到平衡需 10 多分钟)

表 6 夜间不同情况下, 部署 10 min 后各铝基涂层气球的表面温度

部署情况	空球 1 温度/K	空球 2 温度/K	含弹头气球 温度/K
部署(A)	176	—	180
双球部署(B)	178.1	—	180.5
三球部署(C)	178.45	178.45	180.85
情况 1	177.3	177.3	178.3
情况 2	177.8	178.3	180.7

面温度受气球大小的影响。气球直径对其影响较大: 随着直径的增大, 气球表面温度降低。该结论与白天所得结论正好相反, 这是因为白天和夜间目标接收的主要外部热流不同。如果只改变其中一个气球的直径, 那么它所受的影响会比较大, 其表面温度也随直径的增大而降低; 其它两个气球所受的影响非常小。

### 3 结果讨论与分析<sup>[11-13]</sup>

综合上述计算结果可分析得到以下一些有效的突防措施。对于白天来说, 从减小目标及诱饵热辐射的角度考虑, 进攻方在设计时要尽可能避免用较大的气球; 但气球直径的增大可使拦截器的杀伤概率变小, 从这个角度考虑进攻方又需选择较大的气球。为解决这个矛盾, 进攻方可采用另一种方法, 即不部署单个气球, 而将许多小气球集中在一起(间距的减小对目标热效应的影响不大), 且其中一个气球

装有弹头。该措施既可降低气球的热效应, 又可减小杀伤飞行器摧毁弹头的几率。

另一个措施是进攻方部署大小不同的各种气球。一方面, 可以调整各气球间的温度差。另一方面, 由于某些未知因素的影响, 部署后气球的大小可能会变化。部署相同大小的目标很容易被对方识别。而如果各气球大小不同, 即使部署后某个气球的大小发生改变, 防御系统也无法从大小不一的各种气球中察觉出此变化, 因此无法辨别出该目标。这给防御系统的目标识别又增加了难度。

对于夜间来说, 进攻方可以通过调整气球直径来改变其表面温度, 从而达到目标不被对方识别的目的。

## 4 结论

由于白天和夜间表面温度随直径变化的规律不同, 选择诱饵的大小时要特别注意。为了使诱饵白天和夜间都能使用, 在设计时可以采用一组大小不同的诱饵, 使其表面温度分布在含弹头气球表面温度的附近两侧。如果白天某一涂层气球的表面温度比目标高, 那么夜间可能就相反。这样一方面可以破坏 NMD 系统基于弹头热效应识别目标的能力, 另一方面因气球大小不同而增加对方识别目标的复杂性。

除了气球大小之外, 目标热效应还受目标涂层、高度、形状等因素的影响, 而且这些影响又是相互关联的。所以下一步的任务是对它们进行综合分析, 以加强突防实用性。

## 参考文献

- [1] 李享, 李劲东, 孙鹤枝, 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.
- [2] 鲜勇, 李少朋, 雷刚, 等. 弹道导弹中段机动突防技术研究综述 [J]. 飞航导弹, 2015, 45(9): 43-46.

(下转第 44 页)

- tracking search algorithm [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, **42**(13): 5087–5104.
- [15] Chi Z F. Research on satellite remote sensing image fusion algorithm based on compression perception theory [J]. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 2021, **21**(2): 341–356.
- [16] 尹雪, 刘思念, 袁春梅, 等. 基于 DSP 的双线性插值算法在图像旋转中的应用 [J]. *舰船电子工程*, 2020, **40**(3): 97–100.
- [17] 李承轩, 舒忠. 基于双线性插值的印刷图像旋转算法实现 [J]. *现代计算机(专业版)*, 2019, **26**(11): 85–89.
- 
- (上接第 27 页)
- [3] 白心爱. 空间目标轨道高度及大小对其表面温度的影响 [J]. *汕头大学学报(自然科学版)*, 2011, **26**(1): 75–80.
- [4] 申文涛, 朱定强, 蔡国飙. 中段弹道目标的温度场与红外辐射特性计算 [J]. *宇航学报*, 2010, **31**(9): 2210–2217.
- [5] 戴聪明, 陈秀红, 魏合理. 高层大气环境对长波红外背景辐射特性的影响分析 [J]. *红外*, 2012, **33**(9): 23–29.
- [6] 张永棠, 洗敏仪. 中红外  $2\ \mu\text{m}$  Tm:YLF 激光热效应分析 [J]. *激光与红外*, 2017, **47**(7): 813–816.
- [7] 祝念, 高思莉, 岳娟. 高速飞行目标尾焰红外辐射特性的建模仿真计算 [J]. *红外*, 2018, **39**(5): 8–12.
- [8] 戴桦宇, 张雅声, 周海俊, 等. 大气层外弹道目标红外辐射特性研究 [J]. *激光与红外*, 2018, **48**(8): 993–998.
- [9] 姚晓蕾. 突防措施下中段弹头的红外辐射特性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [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] 梁蕾. 洲际弹道导弹突防技术发展趋势 [J]. *飞航导弹*, 2018, **48**(8): 55–57.
- [12] 赵国柱, 金健. 俄罗斯战略导弹突防技术发展研究 [J]. *飞航导弹*, 2020, **50**(7): 62–66.
- [13] 李刚, 王蜀杰, 李兴格. 地空导弹突防技术综述 [J]. *飞航导弹*, 2019, **49**(8): 35–38.