

卫星及其诱饵的表面瞬态温度场*

徐 晖 孙仲康

(国防科技大学电子技术系 长沙 410073)

摘 要 文中给出了计算空间目标和诱饵表面温度场的方法, 比较了目标和诱饵表面温度特性的差异, 指出了这些差异对点目标自动识别的重要意义。

关键词 红外物理, 点目标, 自动目标识别, 温度

分类号 TN21

如何识别有系留诱饵伴飞的空间目标(卫星, 弹头等)是ATR中一个重要课题。美国在1992财政年度设立了名为“有识别能力的拦截弹”的研究项目, 研究如何利用目标和诱饵在辐射波谱方面的差异来实现超级灵巧并有识别能力的第三代拦截弹技术。在获取空间目标的辐射波谱特征方面, 美国采用了置于航天飞机和探空火箭上的多波段传感器族进行实测, 而从我国的技术和经济现状来看, 要实现同样的设想还须相当一段时间的努力。所以研究一种解析方法计算空间目标的辐射波谱具有重要的实际意义。根据物体辐射的基本定律, 物体的表面温度和表面热物理特性决定了物体的辐射能量和波谱, 在物体本身的特性决定以后, 其表面温度特性唯一地决定其辐射特征。本文首先给出了计算空间物体表面温度场的方法, 然后比较分析目标与其系留诱饵在温度特性上的差异, 最后指出这些差异在自动点目标识别上的应用。

1 表面瞬态温度场及其节点热平衡微分方程组

现有对目标红外辐射特性的研究中大都是将目标表面看成一个等温面, 从而将目标看成一个红外辐射波谱不随时间和观测方向变化的物体。但这种等温假设与实际情况有相当大的差距。目标表面的实际情况是, 由于目标表面各部分与太阳及地球的相对位置随着目标运动而变化, 所以目标各部分受热不同且随时间变化, 从而目标表面温度呈不均匀分布, 而且, 这一不均匀分布还随目标运动而变化。所以目标及其诱饵表面是瞬态变化的温度场。目标与诱饵功能作用是完全不同的, 它们也因此而在结构上互不相同。所以目标与诱饵具有不同的热特性, 在表面温度上则表现为不同的分布和变化规律。

计算目标和诱饵的表面温度场, 首先必须分析它们在空间的表面受热情况。对目标表面加热的热源包括内外热源两大部分。内热源是指目标表壳内包围的所有设备, 它们

* 1993年10月5日收稿

在工作的同时也散发出部分热量，从目标内部对目标加热。外热源则包括目标以外存在于空间的所有其它物体。对在地球轨道飞行的目标，主要的外热源包括地球和太阳。它们从目标的外表面对目标进行加热。加热方式主要有以下三种：1) 太阳直接照射目标；2) 地球直接照射目标；3) 地球反射的阳光照射目标。显然，外热源的加热作用与太阳、地球和目标三者之间的相对位置关系有关，并与目标的外形和姿态有关。而外热源对目标表面温度分布的影响除与前述因素有关外，还与目标表面的结构和热物理特性（吸收率、发射率、比热容、导热系数、密度等）有关。

要精确地求解瞬态温度场是困难的。本文参考航天器热设计采用的节点网络法^[1]，采取了先定控制面积，再定节点位置的方法。首先将物体表面划分成数个相对等温且热物理特性基本相同的单元，然后将各节点的几何中心确定为相应节点的位置。以面元中节点处的法向为节点法向；以面元间的热交换为节点间的热交换；以面元接受的外热为节点接受的外热；以节点的温度为面元的温度。据此分析节点间及节点与内外热源之间的热交换，建立各个节点的热平衡微分方程，结合一定的初始条件假设求解这些微分方程组成的方程组，即可得到物体表面上各点温度随时间的变化。本文在节点选取上更多地考虑了计算目标表温这一具体要求，未计算内部节点的温度变化，而是将所有内热源的作用等效为一集总的等温热源。另外，在目标表面上作了更细的划分，选取更多的节点，使计算简单但能反映目标表温变化的实际情况。

设按上述方法将目标表面分成 N 个面元，得到 N 个节点。对每个节点有如下的节点热平衡微分方程：

$$Q_{1j} + Q_{2j} + Q_{3j} + Q_{4j} + Q_{5j} + Q_{6j} - Q_{7j} - (GC)_j \frac{dT_j}{dt} = 0 \quad (1)$$

上式中 T_j 为节点 j 的温度， t 为时间，其中各项的意义如下： Q_{1j} 为太阳对面元 j 的直接辐射加热； Q_{2j} 为地球反射的太阳辐射对面元 j 的加热； Q_{3j} 为地球自身辐射对面元 j 的加热； Q_{4j} 为内热源对面元 j 加热； Q_{5j} 为其它节点流入节点 j 的热流； Q_{6j} 为表面元 j 的内部发热，一般的目标表壳自身不产热，所以 $Q_{6j} = 0$ ； $Q_{7j} = F_j \epsilon_j \sigma T_j^4$ 为面元 j 的辐射散热； $-(GC)_j \frac{dT_j}{dt}$ 表面元温度改变引起的热量变化，当温度升高，此项为负；温度下降，此项为正。

对 N 个节点，可以得出 N 个如 (1) 的方程。由于节点间相互影响，这 N 个方程必须联立求解。

以上列出了节点的热平衡微分方程，并明确了各项热量的意义，方程组中各项的具体计算方法从略。

求解节点热平衡微分方程组需要给出初始条件，但初始条件的确定是困难的。对于可认为周期稳定的卫星表面温度场可用如下方法求得。首先，设目标表面处处温度相等，以此作为初始温度条件计算目标运行一周内各时间点的表面温度场；然后，以这一周期结束时刻的温度场作初始条件，计算下一周期内各时间点的温度场；比较上述两周期内各时间点的温度场，如差别大于要求的标准，重复前述过程；若前后两周期内各时间点的温度场均足够接近，满足要求的标准，则最后一周期的结果即为所求周期稳定的温度

场。

2 有限差分法解节点热平衡微分方程组

为求解前述节点热平衡微分方程组,这里采用有限差分法将其转化为线性方程组,从计算结果稳定性考虑^{[2][3][4]},本文选用了后向差分方式。(1)式中令

$$a_j = Q_{1j} + Q_{2j} + Q_{3j} + Q_{4j} + Q_{6j} \quad (2)$$

$$b_j = -F_j \varepsilon_j \sigma \quad (3)$$

则(1)变为

$$a_j + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N K_{ij}(T_i - T_j) + b_j T_j^4 - (GC)_j \frac{dT_j}{dt} = 0 \quad (4)$$

取后向差分方式并设:

$$T_j^4(t + \Delta t) = 4T_j^3(t)T_j(t + \Delta t) - 3T_j^4(t) \quad (5)$$

代入(4)并整理得节点的线性方程为:

$$\begin{aligned} \left[-\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N K_{ij} + 4b_j T_j^3(t) - \frac{(GC)_j}{\Delta t} \right] T_j(t + \Delta t) + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N K_{ij} T_i(t + \Delta t) \\ = 3b_j T_j^4(t) - \frac{(GC)_j}{\Delta t} T_j(t) - a_j \end{aligned} \quad (6)$$

令

$$m_{jj} = \left[-\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N K_{ij} + 4b_j T_j^3(t) - \frac{(GC)_j}{\Delta t} \right] \quad (7)$$

$$m_{ji} = K_{ji} \quad (8)$$

$$d_j = 3b_j T_j^4(t) - \frac{(GC)_j}{\Delta t} T_j(t) - a_j \quad (9)$$

(6)式变为:

$$\sum_{i=1}^N m_{ij} T_i(t + \Delta t) = d_j \quad (10)$$

对 N 个节点有 N 个如(10)的等价方程组成的方程组,写成矩阵形式得:

$$MT = D \quad (11)$$

其中 M 由(7)和(8)决定。

$$D = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_N]^T \quad (12)$$

$$T = [T_1 \ T_2 \ \dots \ T_N]^T \quad (13)$$

求解(10)式可由 t 时刻的温度场得到 $t + \Delta t$ 时刻的温度场。

3 目标表面等效温度的计算

由§1和§2求得了目标在各时刻的表面温度场,据此给出计算点目标在各时刻 t 的表面等效温度的方法如下:首先计算出各时刻目标和诱饵的在观测方向的红外辐射波谱,发现各波谱均呈单峰分布,其峰值波长(有效单色辐射最大的波长)为 λ_{\max} ,波谱形状类似于黑体辐射的普朗克分布;然后假定这些分布符合普朗克定律,并假定表面温度为均匀分布。设这一温度为该观测方向的等效温度,则波谱的峰值波长和表面等效温度满足

维恩位移定律 $\lambda_{\max} T = 2.898 \times 10^3 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, 所以, 由波谱峰值波长可得各波谱在相应观测方向的等效温度。具体算法如下:

step1 计算 t 时刻各面元在观测方向的有效辐射面积;

设观测点矢量与面元 j 的法向矢量之夹角为 α_j , 则面元 j 的有效辐射面积 F_{jr} 为:

$$F_{jr} = F_j \frac{|\cos\alpha_j| + \cos\alpha_j}{2}$$

显然, 当 $\alpha_j > 90^\circ$ 时, $F_{jr} = 0$

当 $\alpha_j \leq 90^\circ$ 时, $F_{jr} = F_j \cos\alpha_j$

step2 按普朗克定律计算各面元 (等温的) 的有效单色辐射 E_j ;

E_j 定义为面元 j 单位时间内在 λ 附近的单位波长上辐射出的能量到达距该面元 r 处垂直于面元与观测点联线的单位面积的部分。

在单位距离处面元 j 的有效单色辐射为

$$E_j = \frac{F_{jr} \epsilon_j}{\pi} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T_j} - 1}$$

其中: $c_1 = 3.743 \times 10^8 \text{W} \cdot \mu\text{m}^4 / \text{m}^2$; $c_2 = 1.4387 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$; λ 为波长, 单位为 μm ; E_j 为面元 j 的有效单色辐射, 单位为 $\text{W} / (\mu\text{m} \cdot \text{m}^2)$; ϵ_j 为表面材料在观测方向的发射率。

step3 叠加各面元的有效单色辐射得总的有效单色辐射 E

$$E = \sum_{j=1}^N E_j$$

step4 找出波谱中的峰值波长;

step5 按位移定律计算在该观测方向的表面等效温度。

4 计算结果及分析

4.1 计算实例

本文对某侦察卫星和诱饵进行了计算。该卫星轨道倾角 i 为 97° , 形状为 $240\text{km} \times 530\text{km}$ 。取地球半径为 6367km , 由此可求得轨道半长轴 a 和偏心率 e 。其它三个轨道根数分别设为: 升交点角 Ω 为 45° , 近地点角为 45° , 近地点时刻 $\tau_p = 0$ 。

该卫星卫星形状为圆柱体, 其直径 D 为 3m , 长 12m , 重约 12700kg 。文献未给出卫星的表壳结构和材料, 假定为铝合金 (LY9, LY12), 厚度均匀为 0.01m 。据此查表^[1]得卫星表面热物理特性及有关参数如下: 比热 $C = 837\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$, 密度 $\rho = 2780\text{kg}/\text{m}^3$, 导热系数 $k = 120.9\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ 。又假定目标表面吸收率为 $\alpha_s = 0.20$, 且为有机涂层。最后, 设内热源 Q_i 为 200W 。

设诱饵是一系留在目标上的表面镀膜汽球。为迷惑敌方雷达和可见光探测, 诱饵具有和目标相同的形状和表面材料。所以诱饵和目标具有以下共同点: a) 轨道, b) 姿态, c) 外形, d) 吸收率, 辐射率, 比热, 密度, 导热系数。另一方面, 诱饵和目标具有以下不同点: a) 表层厚度, 因诱饵仅是表面镀膜, 其厚度很小, 假定为 $1\mu\text{m}$; 而卫星为保证一定的强度, 其表壳需具有一定厚度, 前面已假定为 10mm 。b) 内热源, 诱饵内一般无内热源。如加入内热源, 制造诱饵的难度和成本都将大大增加。所以假定诱饵无内热源。

计算中取太阳赤经 α 为 45° ，赤纬 δ 为 50° 。

假定观察者在轨道面内迎着目标及其系留诱饵运动方向观察。这样可以观察到目标的前半柱面和下底面。本文计算了目标在其轨道面内与其运动方向夹角为 5° 、 30° 、 45° 、 60° 、 85° 的五个方向的辐射情况。

4.2 结果分析

按 § 1 和 § 2 给出的方法，本文分别计算得出了目标和诱饵在绕地球运行一周的时间内各时间点的表面温度场，并分别记录了其中 41 个时间点的数据。这些数据是计算分析目标表面等效温度和诱饵辐射特性的基础。下面将从不同侧面分析比较目标和诱饵的表面温度特性的差异：

(一) 表面温度场

结果表明，目标表面各点间的温度差小于同一时刻诱饵表面各点间的温度差。这一差别可以从两方面得到解释：(1) 因为目标具有比诱饵更厚的表壳，使得目标表壳各点间的热传导更大；(2) 因为目标与诱饵在质量上的差异，前者质量大于后者，使得目标具有较诱饵更大的热容量。这样目标表面的温度均匀性比诱饵更好。这一差别的大小决定于质量差别的大小，质量差别越大则均匀性差别越大。目标与诱饵温度均匀性的差异提示人们从不同角度同时观测目标和诱饵，后者表现出较大的差异性，而前者则表现出较小的差异性。

(二) 点目标等效温度变化规律

图 1 至图 4 分别列出了本例中目标及诱饵在不同角度的等效温度曲线。从图中可以看出，从不同方向观测目标具有不同的等效温度。这是因为目标和诱饵表面温度的不均匀分布。从图中还可看出，从同一方向观测，表面等效温度是随时间变化的，这是因为目标及其诱饵的表面温度均随时间变化。

(三) 目标与诱饵在表面等效温度随时间的变化规律上的不同

从图 1 至图 4 可看出，目标等效温度随时间的变化很慢，目标运行一周期间等效温度仅变化数度；而诱饵等效温度则急剧变化，外热变大时温度急剧升高，外热变小时温度又急剧下降，迅速在较低的温度上达到平衡。目标与诱饵在等效温度时间变化速度上的差别是很大的，这一差别的大小决定于表壳质量差别的大小。本例中目标与诱饵质量差别很大，所以它们的温度变化速度差别也很大。随着质量差别的变小，温度变化速度差别也将变小。但由于目标与诱饵功能上的差别，必然存在大的质量差别，从而存在温度变化速度的较大差别。这样从同一方向观测，目标运动中等效温度相对稳定，诱饵极为不稳。

(四) 目标与诱饵在表面等效温度随观测角的变化规律上的不同

从图 1 至图 4 中可以看出从不同角度观测得到的等效温度间的差异。在观测角（图中以 $ob, angle$ 标出）为 45° 两边较大的范围内，随角度变化目标的等效温度变化较小，在观测角超过这一范围后，随角度的变化等效温度变化更快。这是因为本例的目标及诱饵表面材料为有机涂料，其发射率的方向性决定了这一变化规律。从图中还可看出，对于同样的角度差，目标比诱饵具有更小的等效温度差。这一差别表明，从不同观测角的几个站进行探测，目标比诱饵表现出更小的辐射特性差异。

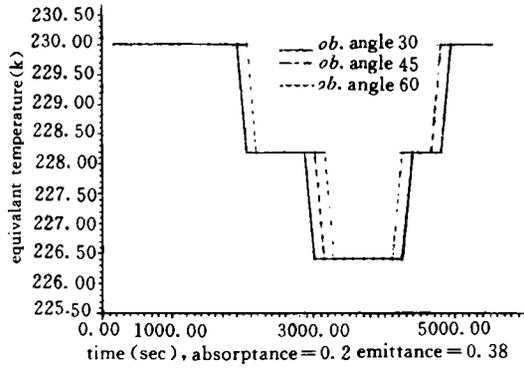


图1 目标等效温度

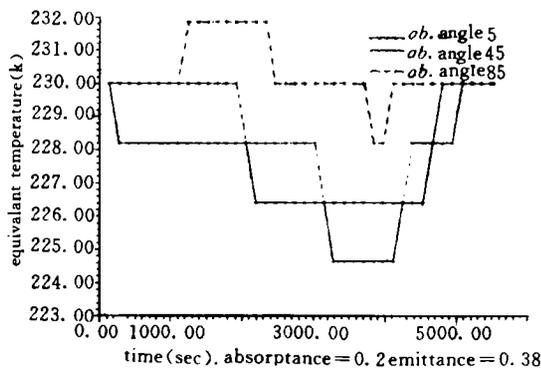


图2 目标等效温度

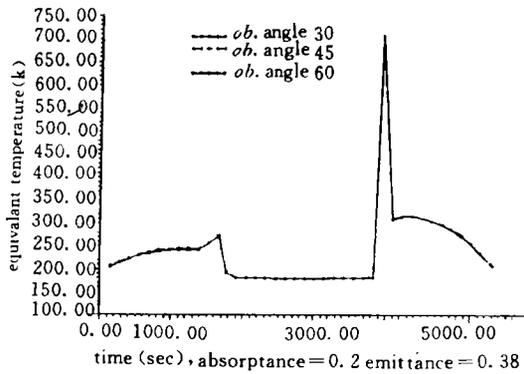


图3 诱饵等效温度

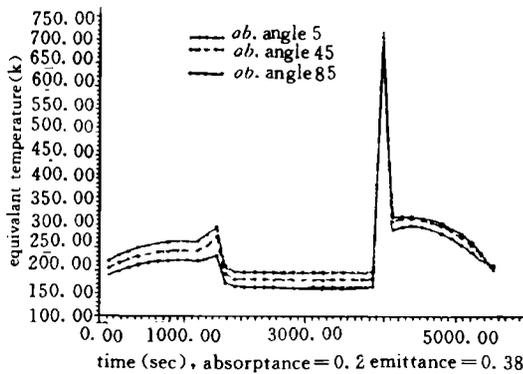


图4 诱饵等效温度

5 结束语

上节从各个侧面分析了目标与其系留诱饵表面温度特性的差别。这些分析表明，目标和诱饵的在表面温度特性上的差别主要表现在以下两方面：

(一) 表面温度的均匀性

目标表面各点间的温度差别相对较小，而诱饵的情况则恰恰相反。所以从不同观测角度探测目标和诱饵，目标表现出较小的等效温度差异，诱饵则表现出较大的等效温度差异；

(二) 表面等效温度的时间稳定性

在同一观测方向探测目标，目标表面等效温度在不同时刻变化不大，而诱饵的等效温度则随时间变化很快。

而以上两方面的温度特性差别又提示目标和诱饵在以下各方面存在差别：

(一) 有效单色辐射的时间稳定性

在外热源变化较快的时间内, 目标有效单色辐射变化不快, 而诱饵有效单色辐射则变化很快。在外热源趋于稳定时, 诱饵表面温度很快达到稳定, 而目标达到稳定的速度则慢得多。

(二) 辐射波谱的时间稳定性

这里主要是指波谱峰值波长及其两侧的波谱形状的稳定性。实际上在整个周期内, 目标和诱饵极少具有相同的波谱形状。目标辐射波谱峰值波长变化区间较小, 诱饵辐射波谱峰值波长则在较大区间内变化。可考虑用两个或多个波长区间内的辐射本领来区分目标和诱饵的不同波谱。

(三) 辐射波谱的方向一致性

从不同方向观测, 目标波谱峰值波长差别不大, 而诱饵波谱峰值波长则在较大范围内变化。

以上运用本文的计算方法计算和分析了卫星目标与其雷达和可见光诱饵在表面温度特性方面的主要差别。应该指出, 运用本文的计算方法, 还可计算目标与其它种类的诱饵的差别, 而只需了解诱饵的结构和表面特性。

本文的方法还可用于计算其它种类的目标, 如地地弹头目标及其诱饵在大气层外自由飞行段的表面温度特性, 并从中提取有用的红外特征。为此需要进一步了解弹头结构、轨道和其它有关特性。关于弹头与其诱饵的表面温度特性将另文讨论。

参 考 文 献

- 1 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制. 北京: 科学出版社, 1985
- 2 W. M. 罗森诺. 传热学手册. 北京科学出版社, 1985
- 3 施天谟, 计算传热学. 北京科学出版社, 1987
- 4 陶文铨. 数值传热学. 西安交通大学出版社, 1988

Temperature Fields of the Surfaces of Satellite and Its Decoy

Xu Hui Sun Zhongkang

(Department of Electronic Technology)

Abstract

A method is presented for the computation of the temperature fields of the surfaces of satellite and its decoy. The temperature differences between satellite and its decoy are discussed. The significant use of the differences for ATR of point target is mentioned too.

Key words infrared, point target, ATR, temperature