

③ 441-446

# 车辆热特征分析及红外热像模拟\*

宣益民 刘俊才 韩玉阁

(南京理工大学动力工程学院, 江苏, 南京, 210094)

TN215.41

**摘要** 给出了车辆热特征分析及红外热像模拟的方法,并以坦克为例,根据其自身结构特点及外界条件,建立了坦克车体三维瞬态温度场及整体辐射通量计算模型,运用色度学原理,根据数值计算结果,用计算机模拟出坦克整体温度分布图及其在红外波段范围内的辐射通量图。

**关键词** 车辆热特征, 辐射通量, 红外热像模拟。

## 引言

近年来,红外热成像日益广泛地应用于各种军事技术中.现代武器系统越来越重视通过目标所产生的红外辐射来探测、识别、攻击目标,而发展红外武器系统及目标的隐身性能都要求提供各种典型目标的红外辐射特性。

为了探讨一般车辆热特征分析及红外热成像模拟方法,本文以坦克为例,综合考虑自然气象条件(天气、风速、风向、气温、太阳辐射等)和背景环境(天空、地表)等因素的影响,给出适用于不同地域和季节的坦克红外热成像理论模型,计算并演示坦克在大气窗口波段范围(3~5 $\mu\text{m}$ 、8~12 $\mu\text{m}$ )内的红外热像图。

## 1 坦克车体温度场计算模型

坦克红外热成像理论建模必然要涉及到坦克温度场的理论计算,这是一个求解具有复杂几何形状在辐射、对流边界条件下的三维瞬态导热问题.要准确地描述坦克整体的温度场,不仅需要正确地给出描述温度场的控制方程,更需要合理地处理相应的边界条件和初始条件。

### 1.1 简化条件及控制方程

坦克车体各部分实际形状比较复杂,为了使理论建模成为可能,简化如下:将炮塔看作半球体;炮管看作圆柱体;车体的其它装甲部分看作平板;乘员舱作空腔处理;动力舱考虑发动机和传动装置.各部分材料的热特性在其各自范围内作常数处理;气候、地理条件随时间作缓慢变化;气象条件无突变.辐射采用灰体模型,不考虑空气等吸收介质的影响。

对于炮塔,采用球坐标系;对于炮管,采用圆柱坐标系;对于车体的其它装甲部分,采用直角坐标系.在不同的坐标系下,不含内热源的瞬态热传导方程可写成以下统一形式<sup>[1]</sup>:

$$\rho C_p \frac{dT(r,t)}{dt} = \nabla \cdot [k \nabla T(r,t)], \quad (1)$$

\* 国防预研基金(编号 95J3.2.1. BQ0206)资助项目  
稿件收到日期 1998-04-21, 修改稿收到日期 1998-08-04

式(1)中  $k$  为导热系数,  $\rho$  为密度,  $C_p$  为比热容。

## 1.2 边界条件

坦克车体温度场的边界条件一般由以下几个主要部分组成:

### 1.2.1 对流边界条件

坦克无论处于静止状态,还是以一定的速度运动,其外表面与周围环境之间、内表面与舱内气体之间的对流换热总是存在的,而处理对流换热边界条件的关键在于确定各部分的对流换热系数。根据文献[2],本文在预测车辆温度分布时,对流换热系数的计算公式为

$$h = 0.733|T_s - T_\infty| + 1.9v + 1.8 \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}), \quad (2)$$

式(2)中  $T_s$  为待求的表面温度;  $T_\infty$  为环境气流的温度;  $v$  为坦克行驶速度与风速矢量和。

对于乘员舱和动力舱内的气体温度变化规律,本文采用集总参数法处理,其能量平衡方程为

$$\rho_\infty V_\infty C_\infty \frac{dT_\infty}{dt} = \sum_{i=1}^N A_i \cdot h_i \cdot (T_{s,i} - T_\infty) + \sum_{j=1}^M Q_j + m_{in} \cdot C_{in} \cdot T_{in} - m_{out} \cdot C_{out} \cdot T_{out}, \quad (3)$$

式(3)中  $\rho_\infty$  为舱内气体密度;  $V_\infty$  为舱内气体体积;  $C_\infty$  为舱内气体比热容;  $dT_\infty/dt$  为舱内气体温度随时间变化率;  $A_i$  为舱内表面  $i$  单元的换热面积;  $h_i$  为舱内表面  $i$  单元的对流换热系数;  $T_{s,i}$  为舱内表面  $i$  单元的表面温度;  $Q_j$  为舱内的第  $j$  个热源(空调装置、人体生理散热等);  $N$  为舱内表面单元总数;  $M$  为舱内热源数;  $m_{in}$  为流入气体流率;  $m_{out}$  为流出气体流率;  $C_{in}$  为流入气体比热容;  $C_{out}$  为流出气体比热容;  $T_{in}$  为流入气体温度;  $T_{out}$  为流出气体温度。

在计算中需注意的:乘员舱和静止状态下动力舱内的气体可看作基本上不流动,在运用式(3)时,其中的气体流入流出流率取零即可。

### 1.2.2 辐射边界条件

坦克的外表面辐射换热体系由坦克外表面、天空背景、地面以及太阳所构成。内表面辐射换热体系分为乘员舱和动力舱两部分,其中乘员舱由装甲、炮塔和隔板构成,动力舱由装甲、发动机机壳、传动装置箱外表面等部分构成。

本文采用蒙特卡洛(Monte Carlo)法计算各单元表面间的辐射传递系数。辐射传递系数  $F_{ij}$  的含义为:面元  $i$  的本身辐射经一次投射,及经系统中其它各面一次或多次反射后,最终被面元  $j$  吸收的份额。

在处理太阳辐射边界条件时,一般将其分为直射、散射和环境反射三部分<sup>[3]</sup>。对于某一单元表面  $i$ ,其吸收的太阳辐射能可表示为:

$$Q_i = A'_i \cdot q_{sd} \cdot \alpha_i + A_i \cdot (q_{sr} + q_{sf}) \cdot \alpha_i, \quad (4)$$

式(4)中  $q_{sd}$ 、 $q_{sr}$ 、 $q_{sf}$  分别为太阳直射、散射、环境反射辐射功率密度;  $\alpha_i$  为  $i$  单元表面的太阳吸收率;  $A'_i$  为考虑遮挡后,  $i$  单元表面被太阳照射到的部分在垂直于太阳入射光线的平面上的投影面积;简称“太阳入射投影面积”;  $A_i$  为  $i$  单元表面的实际换热面积。

在考虑太阳直射部分时,关于太阳入射投影面积的求解,本文采用蒙特卡洛法(Monte Carlo)处理:对于某单元表面  $i$ ,假设无任何其它表面遮挡时,其在垂直于太阳入射光线的平

面上的投影面积为  $A$ 。对该表面模拟向外发射能束, 能束总数为  $N$ , 由于太阳光是平行入射光, 所以在模拟发射时其发射方向是固定的, 为太阳光入射方向的反方向, 跟踪每一条能束, 判断该能束与其它表面是否有交点, 如有交点, 则说明该发射点被遮挡, 太阳光无法照射到。统计被太阳光照射到的发射点的总数, 假设为  $N_c$ , 则考虑遮挡后该单元表面的太阳入射投影面积  $A'$  为:

$$A' = A \cdot \frac{N_c}{N}. \quad (5)$$

### 1.2.3 局部边界条件

对于坦克车体的某些特殊区域, 如动力舱风扇排风口、动力舱散热器的进气口等, 均根据实测值给定相应的边界条件。

### 1.3 坦克车体温度场求解

在对坦克车体进行网格划分以后, 本文采用内节点法对坦克车体温度场控制方程进行离散化, 对于近边界节点, 用附加源项法处理。由此可以得到, 对于内节点和近边界点, 离散后的方程具有以下统一的形式<sup>[4]</sup>:

$$a_p t_p = a_e T_e + a_w T_w + a_n T_n + a T_s + a_b T_b + a_l T_l + b, \quad (6)$$

式(6)中, 车体温度场的离散方程满足对角占优的条件, 可用 Gauss-Seidel 迭代法<sup>[4]</sup>求解。

坦克整体除了车体以外, 还包括车轮和履带以及炮管。文献[5]详细描述了车轮和履带温度场的求解方法。文献[6]介绍了炮管温度场的求解方法。

## 2 坦克整体辐射通量计算模型

坦克红外热图像理论建模最终需要的是坦克整体在红外波段( $3 \sim 5 \mu\text{m}$  或  $8 \sim 12 \mu\text{m}$ )范围内的辐射通量。对于坦克上任一单元表面, 该辐射通量包括以下两部分:

### 2.1 本身辐射

在求得坦克整体温度分布以后, 该部分辐射通量可以从普朗特公式出发, 通过对红外波段范围积分得到。根据文献[1]有:

$$E_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} d\lambda, \quad (7)$$

式(7)中  $\lambda_1, \lambda_2$  为红外波段范围的下限和上限;  $T$  为单元表面温度;  $\varepsilon(\lambda, T)$  为表面发射率, 与波长  $\lambda$  和温度  $T$  有关;  $C_1, C_2$  为第一和第二辐射常数。

### 2.2 单元表面的反射辐射

反射辐射部分包括单元表面对太阳、天地背景以及来自其它单元表面入射辐射的反射。计算表达式如下:

$$E_{i, r}^{nl, ra} = \rho_{sun}^{nl, ra} \cdot q_{sun}^{nl, ra} + \rho^{nl, ra} \cdot (q_{sky}^{nl, ra} + q_{gd}^{nl, ra} + \sum_{j=1}^N q_j^{nl, ra}), \quad (8)$$

式(8)中  $\rho^{nl, ra}$  为单元表面红外波段范围的反射率;  $\rho_{sun}^{nl, ra}$  为单元表面红外波段范围的太阳反射率;  $q_{sun}^{nl, ra}, q_{sky}^{nl, ra}, q_{gd}^{nl, ra}$  分别为单元表面接收的红外波段范围内太阳、天空背景、地面背景辐射能量;  $N$  为单元表面总数。

### 3 结果分析与讨论

根据实测参数,本文选择以下算例:时间是7月1日上午10点~12点;环境温度为 $25.0\sim 32.8^{\circ}\text{C}$ ;最大风速为 $5.0\text{m/s}$ ;风向正南风;天空晴朗少云;坦克位于北纬 $30^{\circ}$ ,炮管指向正南方向,当坦克处于运动状态时,行始速度为 $40\text{km/h}$ .其中,坦克在一段时间内处于发射状态,开始射击时间为11点整,射击间隔为 $240\text{s}$ ,共射击10发.

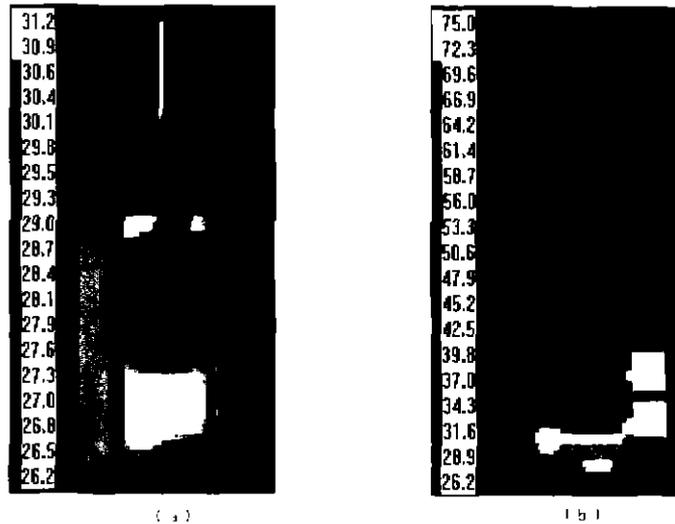


图1 坦克整体温度场灰度图

(a) 静止状态(时间11点,色标范围 $26.2^{\circ}\text{C}\sim 31.2^{\circ}\text{C}$ )

(b) 运动状态(时间11点,色标范围 $26.2^{\circ}\text{C}\sim 75^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 1 The gray picture of the temperature distribution of a tank

(a) the stationary state (time: 11 o'clock, the range of color:

$26.2^{\circ}\text{C}\sim 31.2^{\circ}\text{C}$ ), (b) the moving state (time: 11 o'clock,

the range of color:  $26.2^{\circ}\text{C}\sim 75^{\circ}\text{C}$ )

在相同的外界条件下,对静止、运动两种状态的坦克分别进行计算,并根据色度学原理,用计算机模拟了坦克整体温度分布图及其辐射通量图.

图1给出了相同外界条件下,时间为11点时,坦克分别处于静止、运动两种状态的整体温度场灰度图.比较图1(a)和图1(b),可以看出两种状态下坦克整体温度分布的不同.其中,从图1(a)中,可以明显地看出太阳辐射对炮塔和炮管温度分布的影响、炮管在上装甲前部及前装甲上部投下的阴影对该部分温度分布的影响和侧装甲在翼子上投下的阴影对翼子板温度分布的影响,这与预期情况是一致的.

图2给出静止、运动两种状态下,坦克乘员舱内气体温度随时间变化曲线.从图(1)中可见,运动状态下乘员舱内气体温度要明显高于静止状态下的,另外,也可看出坦克发射炮弹对乘员舱内气体温度的影响,从而说明本文求解舱内气体温度所用的集总参数法是比较合理的.

红外热像理论建模工作的最终是要给出坦克整体在大气窗口( $3\sim 5\mu\text{m}$ 或 $8\sim 12\mu\text{m}$ )波段范围内的辐射通量图.图3给出了运动状态下,时间为11点时, $8\sim 12\mu\text{m}$ 波段范围内的计算机模

拟的坦克整体辐射通量灰度图。显然,发动机排气管附近区域和散热器区域的红外辐射特征比车体其它区域要明显得多。坦克在行驶过程中,由于履带与车轮之间的摩擦生热,使得这一区域的红外辐射特征比较明显。计算表明,处于射击状态的坦克炮管也是一个红外辐射亮度较高的区域。所有这些区域都是坦克车辆的红外辐射特征明显区域,是红外制导武器的红外导引头的探测敏感区域,也是坦克红外隐身设计和红外抑制技术予以重点关注的区域。

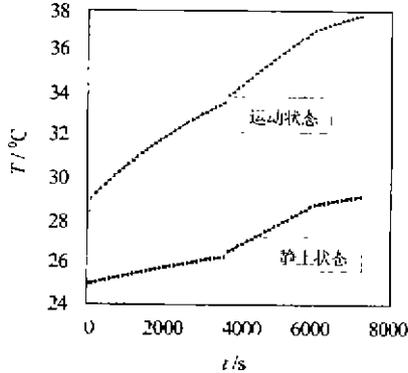


图2 在静止和运动状态下坦克乘员舱内气体温度随时间的变化

Fig. 2 The air temperature in the control cabin of a tank in stationary and moving states vs the time

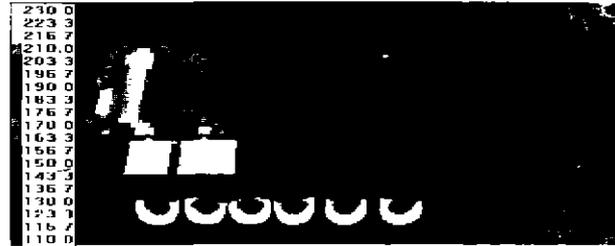


图3 运动状态下8~12 $\mu\text{m}$ 波段范围内坦克整体辐射通量灰度图(时间11点)

Fig. 3 The gray picture of radiative flux of a tank (in motion) in the spectral region of 8~12 $\mu\text{m}$  at 11 o'clock

#### 4 结语

本文以坦克为例,综合考虑自然气象条件和背景环境及坦克自身结构等的影响,运用传热学原理,建立了坦克车体三维瞬态温度场计算模型,用有限差分法进行了数值求解,并给出了坦克整体在(3~5 $\mu\text{m}$ 、8~12 $\mu\text{m}$ )红外波段范围内的辐射通量计算模型。结果分析表明,在坦克红外热像理论建模中,所采用的理论方法是合理的,计算结果反映了坦克温度场分布规律和随时间的变化规律。本文所讨论的模型和方法具有一定的通用性,适用于一般车辆的热特征分析及红外热像模拟,例如,应用于交通管制中的车辆识别和交通管理模拟系统。

#### REFERENCES

- 1 Whitaker S. *Fundamental Principles of Heat*, New York: Pergamon Press Inc., 1977, 143~157
- 2 Gonda T, Gerhart G R. *SPIE*, 1998, **1089**: 23~27
- 3 Rohsenow W M. *et al. Handbook of Heat Transfer Applications*, New York: Mc Graw-Hill, 1985: 484~512
- 4 TAO Wen-Quan. *Numerical Heat transfer*, Xi'an, Xi'an Jiaotong Univ. Press (陶文铨, 数值传热学, 西安: 西安交通大学出版社), 1988: 62~98
- 5 XUAN Yi-Ming, WU Xuan, HAN Yu-Ge. *Journal of Ballistics* (宣益民, 吴 轩, 韩玉阁, 弹道学报), 1997, **9**(1): 17~21
- 6 HAN YU-Ge, XUAN Yi-Ming. *Applied Optics* (韩玉阁, 宣益民, 应用光学), 1998, **19**(2): 8~14

## ANALYSIS OF THE THERMAL FEATURES AND SIMULATION OF THE INFRARED SIGNATURES OF VEHICLES\*

XUAN Yi-Ming LIU Jun-Cai HAN Yu-Ge

(School of Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** The methods for analysis of the thermal features and simulation of the infrared signatures of vehicles were given. Taking a tank as an example, according to its structural features and the external conditions, the models for calculating the 3-D transient temperature field and radiative flux of the body of a tank were established. The temperature field of a tank and its radiative flux picture in the infrared spectra were simulated by computer.

**Key words** thermal features, vehicles, radiative flux, simulation, infrared signatures.

---

\* The project supported by the National Defense Preliminary Research Foundation of China  
Received 1998-04-21, revised 1998-08-04