

平板表面温度工程建模研究

卢艺杰, 韩玉阁

(南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为在红外动态战场仿真中实现目标表面温度场的快速计算, 需建立平板表面温度工程计算模型。综合考虑外部环境因素及目标内部因素, 并利用数学推导及取值分析, 获得平板表面温度与外在及内在因素的理论简化表达式。通过控制变量法分析各主要因素对平板表面温度变化速率的影响, 并对其进行数学拟合, 进而建立了平板表面温度的工程模型。通过与实测数据及商用软件模拟数据的对比, 校验了该工程模型的可靠性。结果表明, 该工程模型具有快速计算但不失准确性的特点, 对目标表面温度场的实时计算具有重要工程应用价值。

关键词: 表面温度; 工程模型; 快速计算; 可靠性

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2018)05-0506-06

Project-Modeling of Plate Surface Temperature

LU Yijie, HAN Yuge

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To quickly calculate the surface temperature field of targets in an IR dynamic battlefield simulation, a project calculation model of the plate surface temperature should be established. By considering both external environmental factors and the target's internal factors using mathematical derivation and the analysis of value selection, an simplified relationship is established that takes into account the plate surface temperature in addition to intrinsic and extrinsic factors. The influence of the main factors on the rate of the plate temperature change was analyzed using the control variable method. We then focused on mathematical fitting-working for the rate of plate temperature. Finally, the project model of the plate surface temperature was established, and its reliability was evaluated by comparing the calculation results to the measured- and commercial-software-simulated data. The results show that the project model is fast without sacrificing accuracy, and therefore, has a high value for engineering applications pertaining to real-time calculation of the surface temperature field of targets.

Key words: surface temperature, project model, fast calculating, reliability

0 引言

实时快速获取数据是红外动态战场仿真作战训练平台运行的关键, 为此, 本课题组开发了目标红外数据库系统以高效利用现有实验、仿真及收集成果。平台运行时, 系统中数据提取顺序一般为已有的实验数据和精细模型仿真数据。当上述数据皆无时, 则采用目标表面温度场快速求解方法获取所需数据, 以解决平台运行中实时性和逼真性相互制约的问题。

目前, 国内外对加快目标表面温度场求解思路主

要有: 降维思想^[1]、经验模型^[2]及半经验模型^[3-5]。降维思想计算准确度高但耗时仍相对较长。经验模型对各因素考虑过于简单, 主观性较大。半经验模型能较好地兼顾准确性和快速性, 但已有模型普适性较差, 适用范围局限。

目标表面结构较为复杂, 一般可简化为由平板、圆柱及球面等形状拼接组成。其中, 平板应用最为广泛。因此, 平板表面温度工程建模是目标表面温度工程建模的重要组成部分, 同时, 也能为其它形状的表面温度工程建模提供参考与借鉴。

收稿日期: 2017-08-24; 修订日期: 2018-02-23。

作者简介: 卢艺杰(1991-), 男, 福建龙海, 硕士, 主要从事目标红外辐射特性模拟与仿真。

通信作者: 韩玉阁(1967-), 男, 山东聊城, 博士生导师, 博士, 主要从事目标红外辐射特性模拟与仿真。

基金项目: 装备预先研制项目(41416020404)。

基于上述研究背景, 为了提高模型的普适性、准确性及快速性, 本文依据半经验模型确定法, 对基于已有目标结构及边界条件信息的工程模型开展了研究。通过理论分析与数学推导, 在分析各因素对平板表面温度变化速率影响的基础上, 建立了平板表面瞬时温度场求解的工程模型, 并对装甲车表面温度场进行求解。

1 平板热模型

1.1 平板能量热平衡方程

平板表面温度随时都在变化, 其影响因素可分为内在因素和外在因素。内在因素主要指平板的结构和其材料的热物性等; 外在因素主要是太阳辐射、大气温度、空气湿度和风速等。

如图1, 从能量角度, 以平板为控制体分析, 其与所处环境的能量交换项主要有: 吸收的太阳辐射 Q_{sun} 、吸收的大气辐射 Q_{sky} 、吸收的地面背景辐射 Q_{grd} 、自身向外辐射 Q_{self} 、与大气间的对流换热量 H_{out} 、与目标内部气体间的对流换热量 H_{in} 、目标内部环境与平板内表面辐射和传导总换热量 q 。因此, 其瞬时吸收的热量:

$$Q = Q_{\text{sun}} + Q_{\text{sky}} + Q_{\text{grd}} - H_{\text{out}} - H_{\text{in}} + q \quad (1)$$

根据能量守恒定律, 其热平衡方程为:

$$Q = d\rho C_p \frac{\partial T_{\text{ave}}}{\partial t} \quad (2)$$

式中: T_{ave} 为平板整体平均温度, 而本文所研究的是平板外表面温度 T 。我们认为, 当 $\Delta T = |T - T_{\text{ave}}| \leq 2.5 \text{ K}$ 在整日内均能满足时, 即可用 T 代替 T_{ave} 进行求解。 ΔT 的主要影响因素是平板的热阻 R 和吸收的热量 Q , 均为正相关。经本文研究表明: 在 Q 值较高时(夏至日, 平板表面吸收率为 0.9, 发射率为 0.2), 当 $R \leq 0.02 \text{ K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ 时能满足要求。

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{\text{sky}} = \varepsilon \varepsilon_{\text{sky}} \sigma T_a^4 (1 + \cos \beta) / 2 \\ Q_{\text{grd}} = \varepsilon \varepsilon_{\text{grd}} \sigma T_{\text{grd}}^4 (1 - \cos \beta) / 2 \\ Q_{\text{self}} = \varepsilon \sigma T^4 \\ H_{\text{out}} = h_{\text{out}} (T - T_a) \\ H_{\text{in}} = h_{\text{in}} (T_{\text{in}} - T_{\text{ein}}) \\ h_{\text{out}} = bv^m \end{array} \right. \quad (3)$$

式(2)和式(3)中, Q_{sun} 可利用时间地点、气象、目标方位和材料性质等参数计算获得^[6]; q 值与目标运行状态和平板相对位置相关; $d\rho C_p \partial T / \partial t$ 为平板单位面积吸收的总热量, d 、 ρ 、 C_p 、 $\partial T / \partial t$ 、 ε 、 β 分别为平板的厚度、密度、比热容、外表面瞬时温度变化速率、表面发射率、表面倾斜角; T_a 为大气温度, σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, ε_{sky} 为大气等效发射率^[7], $\varepsilon_{\text{sky}} = 0.51 + 0.208(e_a)^{1/2}$, e_a 为近地面层水汽压:

$$e_a = 0.61078 \times \text{RH} \times \exp \left[17.269 \frac{(T_a - 273.15)}{(T_a - 35.19)} \right]$$

式中: RH 为相对湿度; ε_{grd} 为地面发射率; T_{grd} 为地面温度; T_{in} 为平板内表面温度; T_{ein} 为目标内部空气温度; h_{in} 和 h_{out} 分别为平板内外环境对流换热系数; h_{out} 值与风速、风向有关^[8]; v 为风速, b 、 m 均为常数。

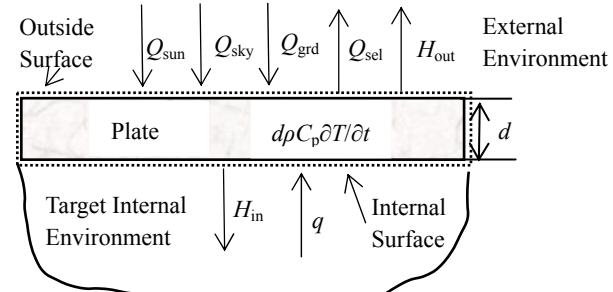


图 1 平板热分析图 Fig.1 Plate thermal analysis

1.2 热平衡方程简化分析

运用数学推导及取值分析方法简化热平衡方程, 其过程如下:

$$\begin{aligned} Q_{\text{sky}} - Q_{\text{self}} &= -\varepsilon \sigma (T^4 - \eta T_a^4) = -\varepsilon \sigma \\ &\quad (T^3 + \eta^{0.25} T^2 T_a + \eta^{0.5} T T_a^2 + \eta^{0.75} T_a^3) \quad (4) \\ &\quad (T - \eta^{0.25} T_a) \end{aligned}$$

式中: $\eta = \varepsilon_{\text{sky}}(1 + \cos \beta)/2$, 因为 T 和 T_a 值为同一数量级, 则式(4)可变为:

$$\frac{-\varepsilon \sigma}{8} (T + T_a)^3 (1 + \eta^{0.5}) (1 + \eta^{0.25}) (T - \eta^{0.25} T_a) = -\gamma (T - \eta^{0.25} T_a) \quad (5)$$

式中: $\gamma = \varepsilon \sigma (T + T_a)^3 (1 + \eta^{0.5}) (1 + \eta^{0.25}) / 8$, γ 误差小于 4.5%; T 值可根据目标运动状态在 $(T_a - 5, T_a + 20)$ 范围选取。在 $270 \text{ K} < (T, T_a) < 330 \text{ K}$ 范围内, 式(5)误差小于 2.5%。式(2)可变为:

$$\begin{aligned} T &= \frac{[Q_{\text{sun}} + Q_{\text{grd}} + (\gamma \eta^{0.25} + bv^m) T_a]}{(\gamma + bv^m + h_{\text{in}})} + \\ &\quad \frac{[h_{\text{in}} T_{\text{ein}} + q - d \rho C_p \partial T / \partial t]}{(\gamma + bv^m + h_{\text{in}})} \quad (6) \end{aligned}$$

综合式(1)~(6), 当时间、地点、平板材质与位置、目标运动状态确定时, 只需再确定瞬时的大气温度 T_a 、风速 v 、相对湿度 RH 及平板表面瞬时温度变化速率 $\partial T / \partial t$, 即可获得该时刻平板的表面温度 T 。

有时我们无法获得某地某时刻的 T_a 、RH、 v 值, 但基本均能获得该地该日的平均气温 T_{ave} 与最大温差 ΔT_a 、平均相对湿度 RH_{ave} 与最大相对湿度差 ΔRH 、

最大风速 v_{\max} 与最小风速 v_{\min} 等信息。根据中国气象数据网资料和课题组实测数据, 结合已有模型^[9-10], 对南京地区气温、湿度及风速的日变化表达式拟合结果如下:

$$T_a(t) = 0.491\Delta T \cos\left[\frac{\pi}{12}\left(\frac{t}{60} - 15.32\right)\right] + 0.058\Delta T \cos\left[\frac{\pi}{6}\left(\frac{t}{60} - 1.22\right)\right] + T_{\text{ave}} \quad (7)$$

$$\text{RH}(t) = 0.34\Delta \text{RH} \cos\left[\frac{\pi(t-3006)}{720}\right] + 0.052\Delta \text{RH} \cos\left[\frac{\pi(t-812)}{360}\right] + \text{RH}_{\text{ave}} \quad (8)$$

$$v(t) = v_{\min} + v_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{30} \cdot \frac{t - t_{w1,2}}{\text{SF}_{1,2}}\right) \quad (9)$$

式(7)~(9)中: t 为当日时刻, min。式(9)中: $t_{w1}=T_1$, $t_{w2}=2(T_2-T_1)$, $\text{SF}_1=4(T_2-T_1)$, $\text{SF}_2=4(T_3-T_2)$, T_1 、 T_2 、 T_3 的取值与地理位置和条件相关^[10]。在南京地区, T_1 约为日出后 60 min, T_2 为当日 870 min, T_3 为日落后 60 min。

2 平板表面瞬时温度变化速率拟合

影响平板表面温度变化速率 $\partial T / \partial t$ 的因素繁多。本文采用控制变量法, 根据商业软件仿真数据, 分析了平板厚度 d 、密度 ρ 、比热容 C_p 、导热系数 k 、太阳辐射以及目标内部与平板内表面辐射和传导总换热量 q 对 $\partial T / \partial t$ 值的影响, 计算结果表明: 对水平放置平板, $\partial T / \partial t$ 值的主要影响因素是太阳辐射和材料的 $d\rho C_p$ 值。

本文将太阳辐射以季节形式考虑。设 $\Delta(d\rho C_p) = d\rho C_p / 80698.288$, 为材料相对的 $d\rho C_p$, $80698.288 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 为钢的 $d\rho C_p$ 值。

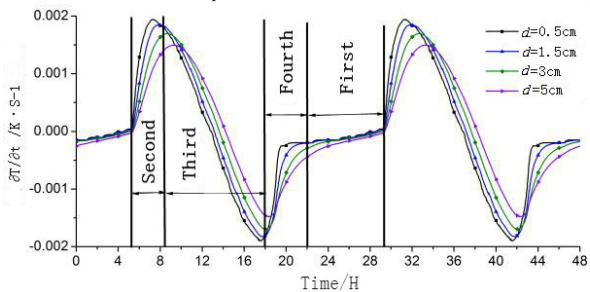


图 2 分段示意图

Fig.2 Sketch of curves subsection

如图 2, 结合理论分析与 $\partial T / \partial t$ 曲线趋势, 将一周期内 (24 小时) 曲线分 4 段拟合。第二段从日出时刻 t_{rise} 至 $\partial T / \partial t$ 最大值时刻 t_{\max} ; 第三段从 t_{\max} 至 $\partial T / \partial t$ 最小值时刻 t_{\min} ; 第四段从 t_{\min} 至 $t_{\text{down}} + \Delta t$ 时刻, 其中,

t_{down} 为日落时刻, Δt 表示平板外表面消除绝大部分整日太阳辐射对其影响所用时长; 第一段从 $t_{\text{down}} + \Delta t$ 至第二天日出时刻即 $1440 + t_{\text{rise}}$ 。

2.1 第一段曲线拟合

第一段时间内, 平板均无受太阳照射, 只考虑 $d\rho C_p$ 拟合曲线, 将其拟合为直线表达式: $\partial T / \partial t = a_1 t + b_1$ 。分析各工况下数据, $b_1 = -275 a_1$ 。斜率 a_1 的拟合回归方程为:

$$a_1 = -1.66 \times 10^{-7} \times \Delta(d\rho C_p) + 9.748 \times 10^{-7} \quad (10)$$

2.2 第二段曲线拟合

第二段时间内, 在不同季节中, 结合 $d\rho C_p$ 拟合曲线, 将其拟合为四分之一正弦表达式: $\partial T / \partial t = A_2 \sin[\omega_2(t - t_{\text{rise}})] + b_2$ 。其中, $b_2 = a_1(t_{\text{rise}} - 275)$, a_1 可依式(10)获得; $\omega_2 = \pi / (2\Delta t_2)$, $\Delta t_2 = t_{\max} - t_{\text{rise}}$ 为第二段时长; $A_2 = \max(\partial T / \partial t) - b_2$, $\max(\partial T / \partial t)$ 为整周期内 $\partial T / \partial t$ 的最大值。因此, 只需拟合 Δt_2 与 A_2 即可, 设其拟合表达式分别为: $\Delta t_2 = a_{21}\Delta(d\rho C_p) + b_{21}$, $A_2 = a_{22}\Delta(d\rho C_p) + b_{22}$ 。拟合后的 a_{21} 、 b_{21} 、 a_{22} 、 b_{22} 如表 1 所示。

2.3 第三段曲线拟合

第三段时间内, 在不同季节中, 结合 $d\rho C_p$ 拟合曲线, 将其拟合为直线表达式 $\partial T / \partial t = \max(\partial T / \partial t) + a_3(t - t_{\max})$ 。 $\max(\partial T / \partial t) = A_2 + b_2$, $t_{\max} = \Delta t_2 + t_{\text{rise}}$, A_2 , b_2 , Δt_2 , t_{rise} 均已在前文获得。 $a_3 = [\min(\partial T / \partial t) - \max(\partial T / \partial t)] / (t_{\min} - t_{\max})$ 。因此, 只需拟合 $\min(\partial T / \partial t)$ 和 t_{\min} 即可, 设其拟合表达式分别为: $\min(\partial T / \partial t) = a_{31}\Delta(d\rho C_p) + b_{31}$, $t_{\min} = a_{31}[\Delta(d\rho C_p)]^{0.5} + b_{31} + t_{\text{rise}}$ 。拟合后的 a_{31} 、 b_{31} 、 a_{32} 、 b_{32} 如表 1 所示。

2.4 第四段曲线拟合

同第二段曲线类似, 在不同季节中, 将其拟合为四分之一正弦表达式: $\partial T / \partial t = A_4 \sin[\omega_4(t - t_{\min})] + \min(\partial T / \partial t)$ 。其中, $A_4 = \partial T / \partial t|_{t_{\text{down}} + \Delta t} - \min(\partial T / \partial t)$,

$\partial T / \partial t|_{t_{\text{down}} + \Delta t}$ 为 $t_{\text{down}} + \Delta t$ 时刻 $\partial T / \partial t$ 值, 可由第一段曲线拟合公式求得; $\omega_4 = \pi / (2\Delta t_4)$, $\Delta t_4 = t_{\text{down}} + \Delta t - t_{\min}$ 为第四段时长。因此, 只需拟合 Δt 值即可, 设其拟合表达式为: $\Delta t = a_4\Delta(d\rho C_p) + b_4$ 。拟合后的 a_4 、 b_4 如表 1 所示。

3 模型校验与分析

3.1 实测结果校验

实测对象为冷静态装甲车的发动机外表面装甲。该装甲为钢材, 其外表面发射率 ϵ 约为 0.82。实验地点为蚌埠某地, 时间为 2014 年 8 月 18 日。实测过程中风速 v 较为稳定, 约为 3.5 m/s, 其它实测参数如图

3 所示。

表1 各段曲线拟合参数表

Table 1 Fitting parameters of each curve

	Spring	Summer	Autumn	Winter
a_{21}	38.75	40.05	31.6	34.3
b_{21}	114.55	131.3	117.4	107.5
a_{22}	-0.000174	0.00016	0.000189	-0.000163
b_{22}	0.00201	0.00196	0.0019	0.00159
a_{31}	29.1	40.1	39.1	40
b_{31}	674.7	719.1	576.2	512.7
a_{32}	0.000235	0.0002	0.00026	0.000249
b_{32}	-0.0021	-0.002	-0.00196	-0.0017
a_4	47.4	50.3	48.6	45.7
b_4	22.2	28.3	23.1	18.2

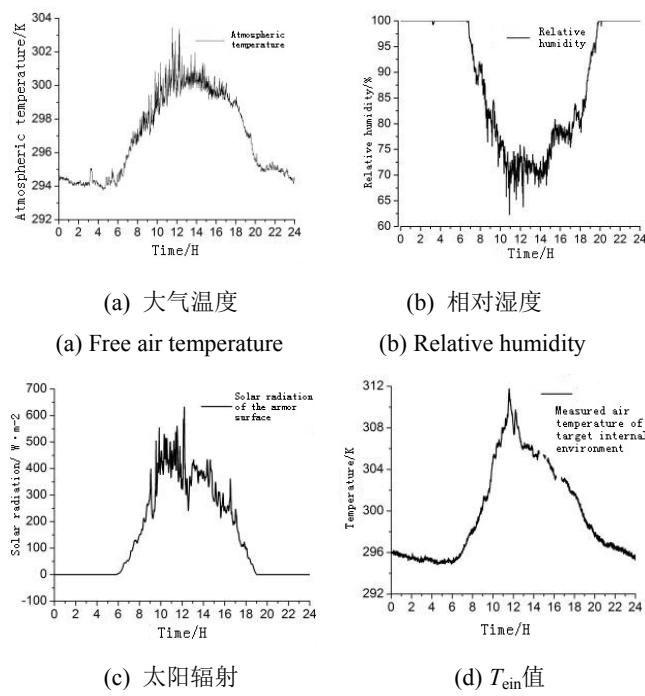


图3 实测参数 Fig.3 Measured parameters

根据式(6), 利用已拟合公式分别计算考虑 $\partial T / \partial t$ 和忽略 $\partial T / \partial t$ 两种情况下该装甲外表面温度 T , 并与实测温度进行对比。

表2 计算工况参数设置表

Table 2 Calculating cases' parameters setting

	Spring	Summer	Autumn	Winter
Plate:length×width×thickness /cm	100×100×5	120×100×6	50×50×0.8	200×150×8
Plate materials	Steel	Commercial Bronze	Aluminium alloy	Beton
Location	Beijing	Xiamen	Xi'an	Chengdu
Time	2016-4-8	2016-7-20	2016-10-18	2016-1-4
T_{ein}/K	288.15	301.15	291.15	289.15
$H_{\text{in}}/(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$	3.5	4	4	2
$q/(\text{W}/\text{m}^2)$	100	50	0	150

如图4所示, 工程模型计算结果与实测结果大体一致, 设其间的绝对温差值为 $|\Delta T_{\text{out}}|$, 单位为 K。若忽略 $\partial T / \partial t$ 影响, 则 $|\Delta T_{\text{out}}| \leq 3$ 比例为 73.4%, $3 < |\Delta T_{\text{out}}| \leq 5$ 比例为 18%, $5 < |\Delta T_{\text{out}}| \leq 11.4$ 比例为 8.6%; 考虑 $\partial T / \partial t$ 影响, 则 $|\Delta T_{\text{out}}| \leq 3$ 比例为 90.01%, $3 < |\Delta T_{\text{out}}| \leq 5.9$ 比例为 10%。

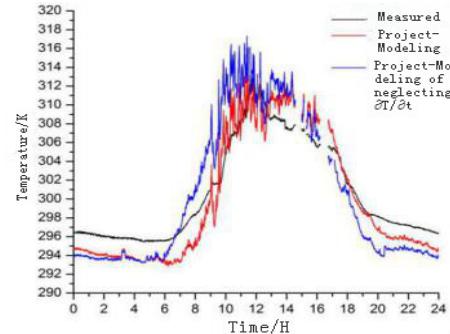


图4 工程模型计算温度与实测温度对比图

Fig.4 Comparison of temperature results

在 0:00~06:51 与 20:00~24:00 期间, 工程模型计算结果较实测结果整体低 1.04~2.4 K, 其误差可能为该时间段内的实测相对湿度为 100%, 装甲表面有结露现象, 结露放热使装甲温度升高。在 06:51~12:30 期间, 吻合性较好, 平均温差为 2.16 K, 最高温差为 4.59 K。在 12:30~16:30 期间, 吻合性一般, 平均温差为 2.42 K, 最高温差为 5.89 K, 这是由天气突然转阴引起较大误差, 如图 3(c)所示, 太阳辐射值在 12:30~13:30 期间下降幅度大。在 16:30~20:00 期间, 吻合性很好, 平均温差为 0.65 K, 最高温差为 1.96 K。

此次校验验证了该工程模型的可靠性较强。同时, 考虑 $\partial T / \partial t$ 影响, 能有效地提高准确性。

3.2 商用软件仿真结果校验

由于实测工况较少, 为验证所建立工程模型的普适性和可靠性, 本文运用商用软件 FLUENT 获取不同工况(季节、地点、气象参数、材料、尺寸、内部环境)下的计算结果, 并与工程模型计算结果对比。气象参数均根据实际气象资料取值, 地表发射率均为 0.88, 工况设置如表 2 所示。

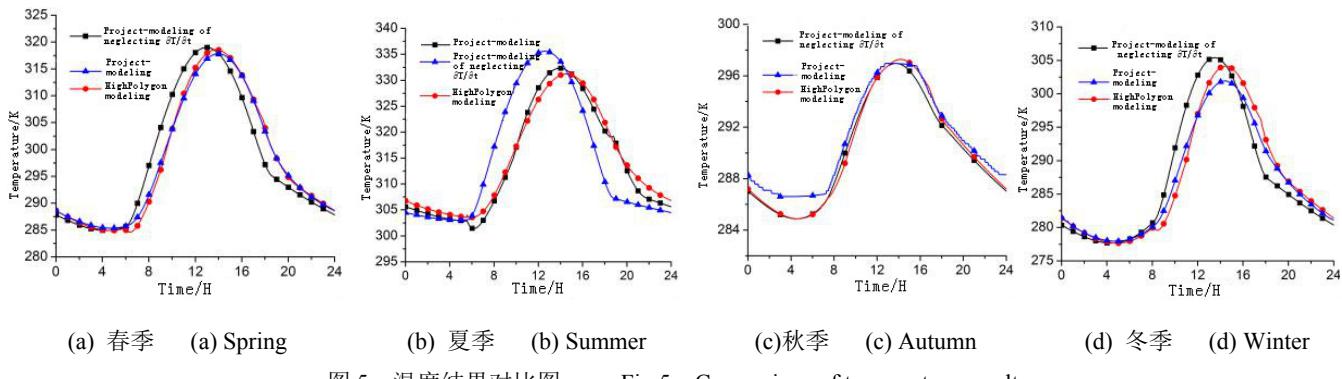


图 5 温度结果对比图

Fig.5 Comparison of temperature results

如图 5, 通过结果对比, 所建立的工程模型均具有较高的可靠性、正确性及普适性。对于 $\Delta(d\rho C_p)$ 较大的材料, 计算时必须考虑 $\partial T/\partial t$ 影响。从计算时间上, 获取平板表面 24H 温度值, FLUENT 在普通配置的计算机需运行 30 min 以上, 而工程模型运行不超过 2 s, 具有良好的实时性。

4 整车表面温度工程模型计算

如图 6, 忽略炮管、负重轮、履带及其它精小部件, 对装甲车整体表面进行划分, 并对各分块装甲进行工程建模计算。

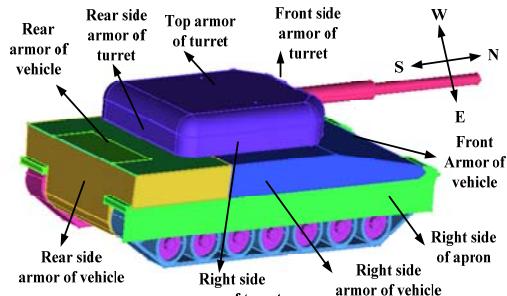


图 6 整车表面划分示意图

Fig.6 Sketch of armoured vehicle surface division

计算条件为: 南京地区, 2016 年 4 月 14 日, 气象参数均根据实际气象资料取值; 坦克处于冷静态, 方位为炮管朝向正北, 装甲材料均为钢。设 d 为装甲厚度 (mm), 假设车体前部 $d_{front\ of\ vehicle}=40$ 、车体后部 $d_{rear\ of\ vehicle}=50$ 、炮塔顶部 $d_{top\ of\ turret}=60$ 、车体侧部 $d_{side\ of\ vehicle}=30$ 、炮塔侧部 $d_{side\ of\ turret}=60$ 、裙板 $d_{apron}=10$ 。

对于北面装甲和南面装甲, 以其瞬时吸收的太阳辐射值与水平装甲吸收的太阳辐射值之比为所拟合平板表面瞬时温度变化速率的修正系数; 对于东面装甲和西面装甲, 将该装甲整日所受太阳照射时间与水平装甲整日所受太阳照射时间之比为 $\partial T/\partial t$ 第二段、第三段、第四段曲线时长的修正系数, 并考虑日照时长

与日照时段的影响修正 $\max(\partial T/\partial t)$ 与 $\min(\partial T/\partial t)$ 值。工程模型计算结果如图 7 所示, 并将计算获得温度场赋于整车, 如图 8 所示。

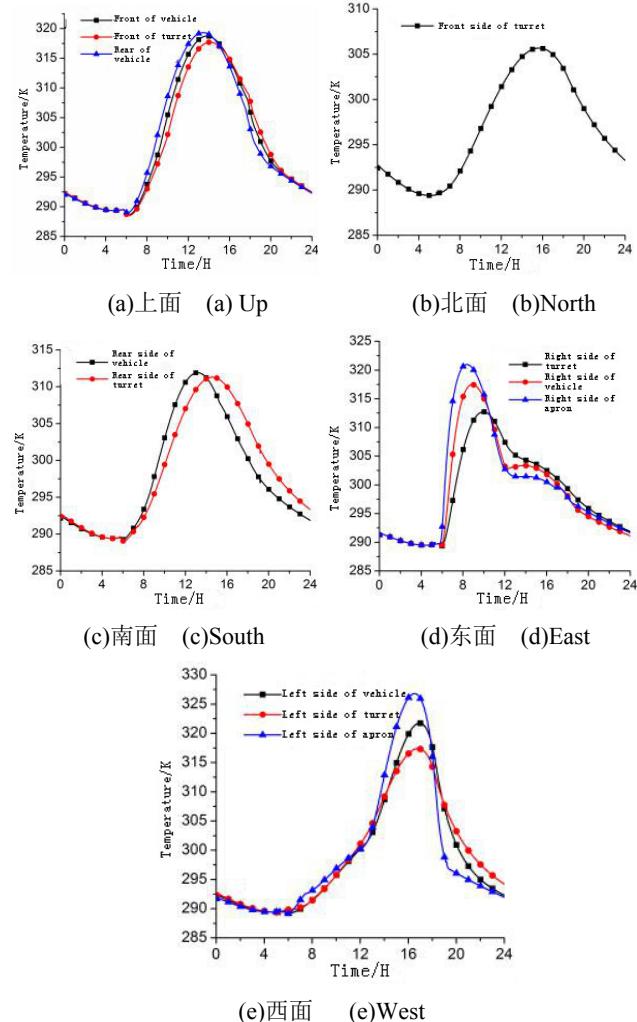


图 7 各面装甲工程模型计算结果图

Fig.7 Calculating results of each surfaces

课题组以往通过商用软件或精细建模方法对装甲车温度场求解时, 在配置较好的服务器中均需运算 6 H 以上。而本文所建立的工程模型, 依托已有目标信息仅需运行数秒钟, 并能较快较准确地反应装甲车

各部位的实时温度及其变化趋势,具有较大的工程意义和使用价值。

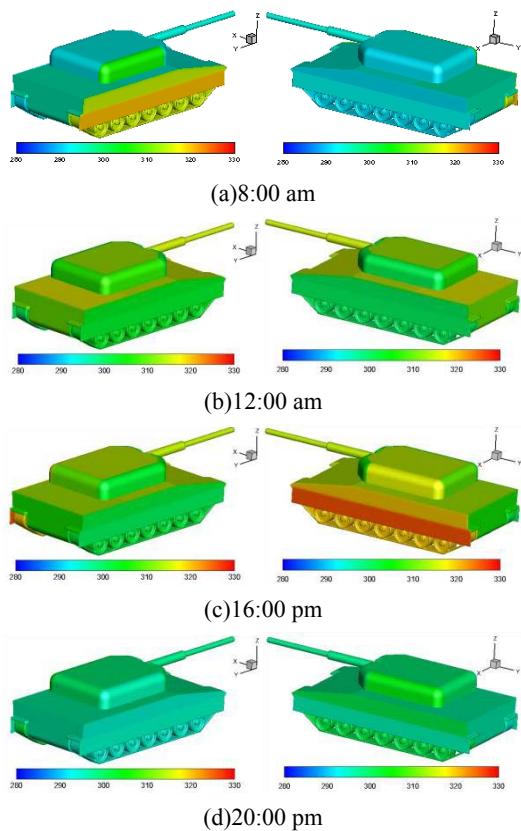


图8 不同时刻下各装甲表面温度分布图(K)

Fig.8 Each surfaces' temperature distribution at different times

5 结论

为在红外动态战场仿真中实现目标表面温度场的快速计算,本文依据半经验模型确定法,依托已有目标结构及边界条件信息建立了平板表面温度工程计算模型。当时间、地点、平板材质与位置、目标运动状态、大气温度、风速、相对湿度确定时,该工程模型可快速获得该时刻平板的表面温度。

通过与实测数据及商用软件模拟数据的对比,该工程模型具有较高的准确性、普适性。对于 $\Delta(d\rho C_p)$ 较大的材料,考虑 $\partial T/\partial t$ 影响,能有效地提高工程模型的准确性。同时,在目标表面温度场求解中,工程模型仅需数秒钟,能较快较准确地反应目标各部位的实时温度及其变化趋势,满足实时性要求。

本文的平板表面温度工程建模方法可为其它形

状的表面温度工程建模提供参考与借鉴,对目标表面温度场的实时计算具有重要的工程应用价值。

参考文献:

- [1] CHENG Zhiduo, REN Dengfeng, HAN Yuge. Research on fast algorithm for infrared radiation characteristics based on dimension reduction method[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(11): 666-669.
成志铎, 任登凤, 韩玉阁. 基于降维思想的红外辐射特性快速算法研究[J]. 红外技术, 2011, **33**(11): 666-669.
- [2] Jacobs P A. *Thermal infrared characterization of ground targets and backgrounds*[M]. SPIE Press, 2006.
- [3] Rivera J S. Analysis of Thermal Imagery Collected at Yuma I, Yuma, Arizona[J]. *Analysis of Thermal Imagery Collected at Yuma I Yuma Arizona*, 1994.
- [4] Ballard, Jerrell R, Jr. Yuma I Information Base for Generation of Synthetic Thermal Scenes[J]. *Radiology*, 1994, **91**(5): 63-64.
- [5] Strojnik M. Semi-empirical model-based approach for IR scene simulation[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1997: 3061.
- [6] 陈珊, 孙继银, 罗晓春. 目标表面太阳辐射特性研究[J]. 红外技术, 2011, **33**(3): 147-150.
CHEN Shan, SUN Jiyin, LUO Xiaochun. Research of target surface solar radiation characteristic[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(3): 147-150.
- [7] 秦娜. 装甲车辆在红外隐身措施下的仿真评估[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
QIN Na. Simulation and evaluation on the armored vehicle with infrared stealth technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [8] Jacobs P A M. Convective Heat Exchange of A Three-Dimensional Target Placed in the Open Field[J]. *Arch. Met. Geoph. Biocl., Ser. B*, 1987(33): 349-358
- [9] 王章野. 地面目标的红外成像仿真及多光谱成像真实感融合研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
WANG Zhangye. Study of the Realistic infrared image synthesis for ground objects and the realistic fusion of multi-spectral images[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [10] Ephrath J E, Goudriaan J, Marani A. Modelling diurnal patterns of air temperature, radiation wind speed and relative humidity by equations from daily characteristics[J]. *Agricultural systems*, 1996, **51**(4): 377-393.