

基于 ANSYS 的桥梁长波红外建模仿真

周方方¹, 司斌^{1,2}, 王晖^{1,2}, 张二磊¹

(1.中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009; 2.航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘要: 综合考虑太阳、大气、河流和车辆等环境因素以及桥梁的结构、材质等的影响, 使用 ANSYS 软件和 MODTRAN 软件建立桥梁的三维瞬态温度场模型与红外辐射特征模型, 分析桥梁的长波红外辐射特性。

关键词: 桥梁模型; 红外建模仿真; ANSYS 软件; 红外辐射特性

中图分类号: TN219 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2013)02-0107-06

Infrared Simulation of Bridge by ANSYS

ZHOU Fang-fang¹, SI Bin^{1,2}, WANG Hui^{1,2}, ZHANG Er-lei¹

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang 471009, China)

Abstract: The model for calculation of the 3D transient temperature and infrared flux of a bridge by ANSYS and MODTRAN is proposed with comprehensive consideration of the influence of sun, air, river, vehicle, the structure and the material of the bridge and so on. The long-wave infrared character of the bridge has been analyzed.

Key words: bridge model, infrared simulation, ANSYS, infrared radiation character

0 引言

桥梁的红外辐射特征分析对于复杂背景中典型地面目标的识别具有重要的意义。同时, 桥梁作为重要的交通要道, 其红外辐射特征的研究分析具有重要的军事意义, 可为桥梁目标的探测、识别、定位、精确打击提供基础数据^[1]。

本文借助 ANSYS 和 MODTRAN 等软件, 综合考虑太阳、大气、河流、车辆等因素的影响, 建立桥梁的红外辐射特征模型, 分析桥梁的长波红外辐射特性。

1 桥梁的几何模型

综上所述, 本文建立具有通用性的桥梁三维红外辐射模型, 并针对某地某桥梁进行计算。该桥梁为预应力混凝土梁箱型桥梁, 其横截面如图 1 所示。

基本假设如下:

桥梁结构复杂, 而且影响桥梁红外辐射特性的因素较多, 对其进行完整详细的建模仿真较为困难, 我们可以对桥梁模型做如下简化^[2]:

- 1) 材料的热物理属性视为各向同性, 忽略不同种类材料的传导热阻, 外表面均视为灰体辐射;
- 2) 忽略栏杆、排水系统等对桥梁温度分布的影响;
- 3) 忽略箱体内壁之间的相互辐射。

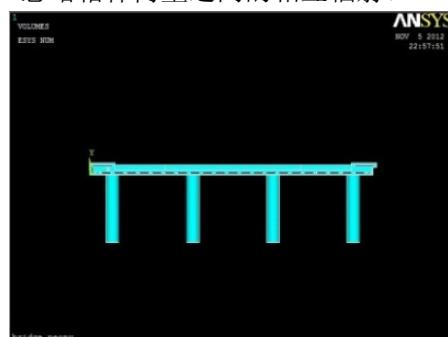


图 1 桥梁横截面

Fig.1 Cross-section of bridge

2 桥梁的温度场模型

根据 ANSYS 的载荷输入, 目标温度场的影响因素主要有环境辐射、热对流和热辐射。对于桥梁模型, 我们还应考虑到车辆的影响作用。

2.1 环境辐射

对于桥梁模型，环境辐射主要指的是太阳、大气、周围背景环境等的热辐射。

太阳是自然环境中的主要辐射源，物体表面所吸收的太阳辐射能量受到地理位置、季节、时间、海拔高度以及大气状况等诸多因素的影响。

对于地面目标来说，太阳辐射主要分为直接辐射 I_d 和散射辐射 $I_{scatter}$ ：

$$I_{sun} = CFF \cdot (\eta I_d + I_{scatter}) \quad (1)$$

式中：CFF 为云遮系数，指的是没被云层占据的天空区域与整个天空区域的面积之比，其取值在 0~1 之间，晴天时取 1，阴雨天时取 0； η 为目标表面单元接收到太阳直射辐射系数，当目标表面单元在桥底面或者被桥面悬出部分遮挡的桥侧面腹板时， $\eta = 0$ ，反之，目标表面单元不被遮挡时则为 1。

在太阳光透过大气层到达地面的途中，其中一部分被大气中的水蒸气和二氧化碳吸收，使其内部温度升高；同时大气还吸收来自地面的反射，使其本身具有一定的温度，并向周围进行辐射^[3]。计算公式为：

$$I_{sky} = F_\theta \cdot \sigma (0.51 + 0.208 \sqrt{e_a}) \cdot T_a^4 \quad (2)$$

式中： σ 是斯蒂芬-波尔兹曼常数； e_a 是水蒸气压强； T_a 是大气温度。

桥梁表面接受的背景环境辐射主要包括水面辐射 I_w 和水面对环境辐射的反射 I_f 两部分。分别为：

$$I_w = \sigma \varepsilon_w \cdot T_w^4$$

$$I_f = \rho_w \cdot (I_{sun} + I_{sky}) \quad (3)$$

式中： ε_w 为水面的发射率； T_w 为水面表面温度， T_w 仿真方法与桥梁相同，由于水的流动性，计算时可忽略桥梁的影响作用； ρ_w 为水面的反射率。

2.2 热对流

对流主要是指目标表面与周围空气间的对流热交换，主要受大气温度、目标表面温度、风速等因素的影响：

$$I_{cv} = h(T_s - T_a) \quad (4)$$

式中： T_a 、 T_s 分别为大气温度和目标表层温度； h 为换热系数，对于室内情况， h 为常数，而在室外时， h 与风速有关，一般取：

$$h = 3.83 + 4.11v \quad (5)$$

式中： v 为风速。

2.3 热辐射

温度大于绝对零度的物体，都向外发射热辐射。温度为 T 的表面单元向周围环境的总辐射强度可由普朗克公式计算得到：

$$I_{ra} = \sigma \varepsilon T^4 \quad (6)$$

2.4 车辆的影响作用

当汽车在桥面上行驶时，会改变路面的热流和热对流交换，从而引起路面温度分布的变化，其影响主要包括以下三部分：轮胎与桥面摩擦、车身对太阳直接辐射的遮挡和车辆快速行驶引起的强迫对流。

轮胎与桥面之间的摩擦生热可表示为：

$$W = \mu G \cdot \gamma \quad (7)$$

式中： μ 为车辆轮胎与桥面的之间的摩擦系数； G 为平均汽车载荷； γ 为车流量，它随时间变化，车流量在上下班高峰期达到最大，大约为 400 辆/h，凌晨时最小，大约 10 辆/h。

车身对太阳直接辐射的遮挡作用可用太阳直接辐射乘以 η 来处理。此时 η 并不是简单的 0 或 1，而与车速与车流量相关。若车流量为 N ，车速为 V （单位为 m/h），则：

$$\eta = 1 - N/V \quad (8)$$

计算时假定车辆按 50~70 km/h 的速度匀速行驶。车辆快速行驶引起机动车路面的风速增大，使得对流热交换作用增大，其大小与车速有关。

桥面受到车辆的影响作用，其对流热交换可表示为：

$$I_{cv} = \eta \cdot I_{mcv} + (1 - \eta) \cdot I_{ncv} \quad (9)$$

式中： I_{mcv} 为强迫风引起的对流热交换； I_{ncv} 为自然风引起的对流热交换。

2.5 目标本征温度的求解

本算法利用 ANSYS 软件中的瞬态热分析功能，根据桥梁的几何模型，使用 solid70 实体单元和 surf152 表面效应单元，建立有限元计算模型，综合考虑上述影响因素对目标进行热分析。其主要步骤如图 2 所示。

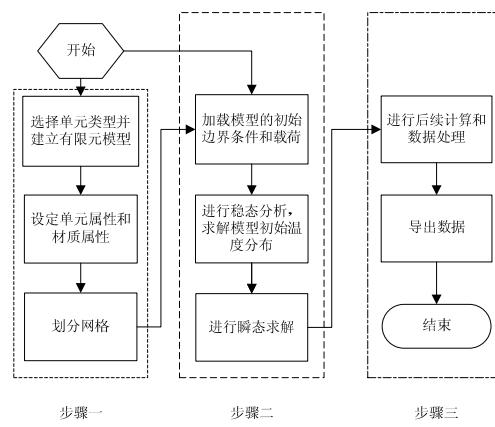


图 2 ANSYS 有限元分析过程

Fig.2 Process of ANSYS analysis

1) 建立模型并划分网格。由于桥梁模型的长度远远大于厚度、宽度, 且在长度方向上具有对称性, 同时由于桥梁在长度方向上温差较小, 所以在建立模型时值取桥梁的一部分进行计算, 也可减小后续计算过程占用的时间和内存, 模型如图 3 所示; 然后定义材料性能参数、导热系数、密度和比热, 图中各个部分材质及物性参数如表 1^[4]所示。

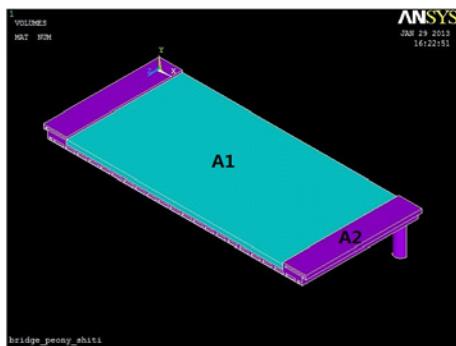


图 3 桥梁实体模型
Fig.3 Entity model of bridge

表 1 桥梁各部分材质及物性参数

Table 1 Physical parameters of the various parts of bridge

区域	A1 (蓝色部分)	A2 (紫色部分)
材 质	沥青	混凝土
比热/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	650	1000
密度/(kg·m ⁻³)	1800	2500
导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	0.8	1.2
发射率	0.90	0.88
太阳吸收率	0.73	0.65

接着在创建的几何模型上划分网格, 主梁截面有限元模型如图 4 所示。

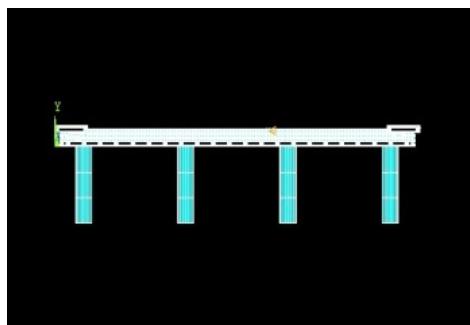


图 4 桥梁有限元模型
Fig.4 The finite element model of bridge

2) 进入求解器进行加载求解。在进行瞬态分析之前先进行稳态分析以确定初始温度, 方法是先将时间积分设置为 OFF, 设定只有一个子步的, 时间很小的载荷步(例如 0.01), 然后施加对流边界条件

进行求解。获得瞬态热分析的初始条件后, 再打开时间积分, 设定荷载步和荷载子步, 打开自动时间步长, 以优化时间。

3) 进入后处理器, 获取桥梁梁箱的温度分布以及进行后续的数据处理。

2.6 模型分析

图 5 所示分别为本算法仿真得到的某日桥面本征温度分布图。晚上时桥面沿行路方向上温度几乎不变, 白天时桥底柱子上方桥面温度略低于其他区域, 主要时由于白天时桥面受到太阳辐射的影响, 温度增高, 但是桥柱由于位置关系, 其温度受太阳辐射的影响较小, 增长较慢, 产生温差, 使得桥梁上表面热量向桥柱传导, 温度增长速度低于其他区域。

图 5 中桥面纵向为行路方向, 横向几个温度明显不同区域自左至右分别为人行道、非机动车道、机动车道、非机动车道和人行道。图 6 为机动车道、非机动车道和人行道三部分的 24 h 温度变化图。从图中曲线看, 日出前各温度曲线坡度较小, 温度变化不大。日出后, 各部分温度逐渐升高, 在午后达到峰值, 此时各部分之间的温差最明显; 随着太阳下山, 各部分温度逐渐降低。各温度曲线均在日出后和日落前变化最快。

物体的热力性质参数中, 热惯量是一种综合指标, 它是物质对温度变化的热反应的一种量度, 即量度物质热惰性(阻止物体温度变化)大小的物理量。其中, 热惯量 $P = (C \cdot \rho \cdot \lambda)^{1/2}$ 。高热惯量的物质, 对温度的变化阻力较大。相同情况下, 目标温度的变化与热惯量成反比。热惯量 P 大, 昼夜温差小。

沥青与混凝土的热惯量分别为 967.47、1732.05。由图 6 所示, 沥青的温度变化更大。机动车道与非机动车道材质, 结构相同, 却由于车辆的行驶作用, 呈现出不同的红外特性。同时两者温差在白天时大, 晚上较小。首先由于白天车辆行驶会造成对太阳直射辐射的遮挡, 引起温差, 其次, 白天的车流量远大于晚上, 摩擦生热和强迫对流对机动车道表面的影响也会很大。

图 7(a)为人行道表面温度与侧面温度随时间的变化关系。从图中可看出, 各部分在同一时刻温度的差别较大。图 7(b)为各部分接收到的太阳辐射随时间的变化关系。从图中可明显发现相同时刻, 各部分由于倾角和朝向受到的太阳辐射差别很大。

这是因为各表面上的太阳光入射角不同, 桥梁各部分受到的太阳辐射不同。倾角为 90°, 面朝南

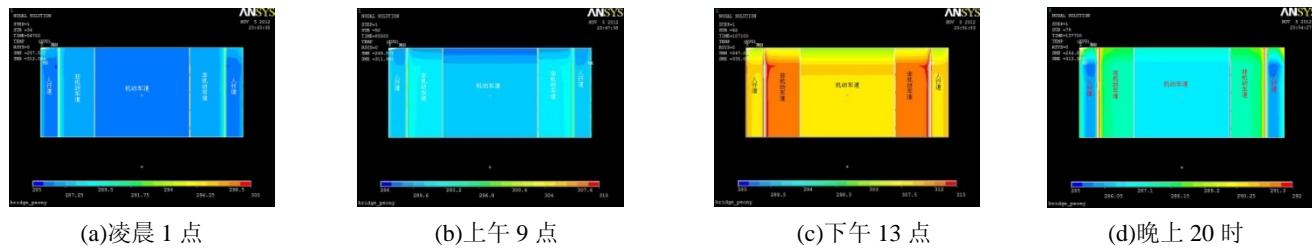


图5 桥面本征温度分布

Fig.5 Temperature distribution of bridge

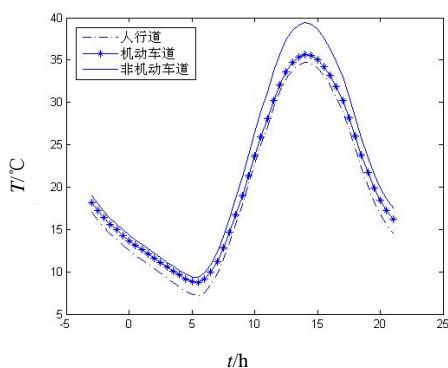


图6 各部分24h温度变化图
Fig.6 The change in temperature of 24 h

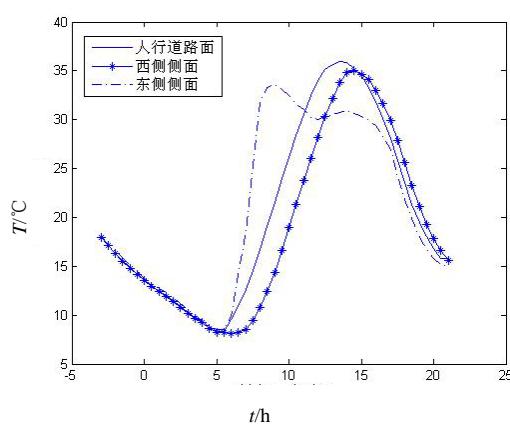
偏西30°的西侧侧面在日出到11点这段时间几乎接收不到太阳辐射；而同样倾角但面朝南偏东120°的东侧侧面从日出开始被太阳照射，但下午13点以后几乎就不再接收太阳辐射。由于在相同的时刻受到的太阳辐射不同，因而各部分表面温度也不同，达到全天最高温度的时间也不同。由图7可知，白天地表温度变化和其受到的太阳辐射强度变化趋势一致，太阳辐射是白天影响目标温度变化的最主要原因。对于西侧侧面，在上午9时温度达到当日最高后，在14:30时左右又出现峰值，这主要是因为14

时左右，环境温度和水面温度达到当天最高值，水面辐射和大气辐射也是访日最高，引起西侧侧面的温度小范围升高，大气和环境辐射也是影响目标温度的主要原因。

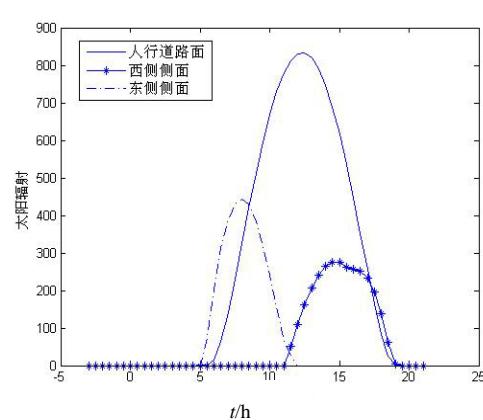
靠近桥梁表面处，温度变化较大，对表面的温度场分布的影响也较大，故而网格划分的粗细也将影响模拟温度的变化。图8为不同网格划分情况下非机动车道表面温度随时间的变化，从中可看出网格较粗（网格大小为0.2 m, 0.5 m）时，夜间温度偏高，昼夜温差变化范围较小；当网格划分较细时，夜间温度较网格划分粗时较低；对比网格大小为0.1 m, 0.08 m, 0.05 m时地表各时刻温度变化可发现，网格划分足够细时温度接近不变，此时网格划分已不再成为模型温度分布的影响因素。

3 目标的红外辐射

当利用红外热像仪对目标物进行拍摄时，红外热像仪接收到的辐射包括目标自身的辐射和目标对周围环境的反射辐射，这些辐射经过大气衰减，最后到达探测器，另外，大气本身也有辐射^[5]，如图9所示。



(a)各采样点温度



(b)各采样点接受的太阳辐射

图7 人行道表面与侧面的温度和太阳辐射

Fig.7 Temperature and solar radiation of sidewalk surface and the side

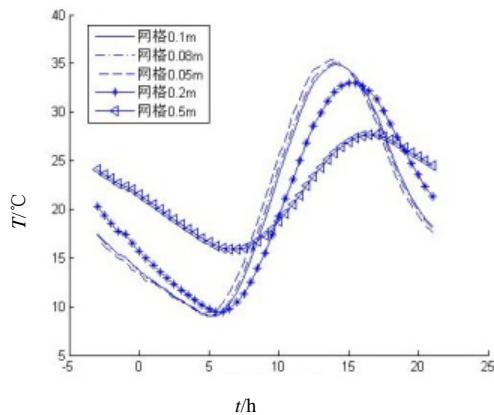


图8 不同网格划分条件下的某点温度

Fig.8 Temperature under the conditions of different meshing

桥梁的自身辐射主要与自身的温度相关, 可由普朗克单色辐射公式, 在给定波段($\lambda_1-\lambda_2$)范围内积分得到:

$$W_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]} d\lambda \quad (9)$$

式中: $\varepsilon(\lambda, T)$ 为桥梁表面材质在给定波段, 给定温度下的发射率; c_1 、 c_2 为辐射常数。

反射辐射包括波长范围内桥梁单元体表面太阳、天空背景、水面入射辐射的反射, 它可表示为:

$$W_{\text{surf}} = (1 - \varepsilon(\lambda, T)) \cdot (Q_{\text{sun}} + Q_{\text{sky}} + Q_{\text{water}}) \quad (10)$$

入射到探测器的环境辐射主要有太阳辐射, 天空背景辐射和大气路径辐射。

桥梁的有效红外辐射可表示为:

$$W_{\lambda_1-\lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{ \tau [\varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]} + (1 - \varepsilon(\lambda, T)) \cdot (W_{\text{sun}} + W_{\text{sky}} + W_{\text{water}})] + (1 - \tau) W_{\text{stm}} \} d\lambda \quad (11)$$

式中: τ 为大气衰减率; W_{stm} 为大气路径辐射。这两项可由 MODTRAN 软件计算。

4 模型验证

我们使用长波热像仪测量目标的红外辐射特性, 并使用试验数据进行模型验证。

4.1 仿真与实验条件

目标: 桥梁位于北纬中纬度地区, 南北走向;

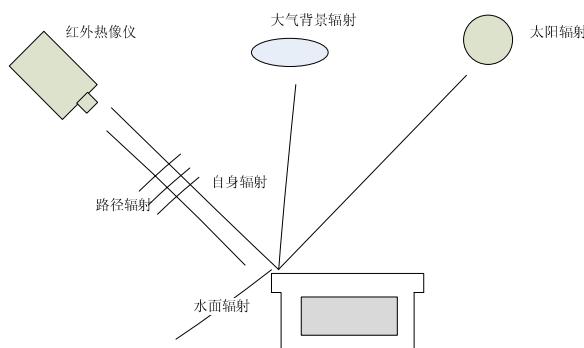


图9 目标的红外辐射特性

Fig.9 Infrared radiation characteristics of the target

桥梁人行道为混凝土材质, 机动车与非机动车路面为沥青材质。

时间: 2012年9月13日21点至次日21点。

试验方法: 由于长波热像仪的视场范围限制和测试目标的完整性, 我们在距目标 1.5 km 远, 100 m 高的楼顶进行测试, 采集时间周期为半小时一次。如图 10 所示为实测目标场景红外图像。

环境因素: 在距目标 1.5 km 远, 3 m 高处测量温度、湿度、能见度、风速等环境因素, 其分度如图 11 所示。

参数选取: 大气透明率取经验值 0.64^[6]; 大气透过率和大气路径辐射由 MODTRAN 计算得出, 分别为 0.74 和 3.5 W/(m²·sr)。

物性参数如表 1 所示。

4.2 误差分析

如图所示, 图 12(a)、(b)、(c) 分别为人行道、非机动车道、机动车道采样点仿真与实测的红外辐射亮度值。从曲线可看出, 仿真值与实测值的变化趋势基本相同; 晚上时仿真值与实测值基本吻合, 但白天时仿真值略高于实测值, 尤其是 14 时至 16 时, 实测值急剧下降且有小范围波动, 分析误差主要有以下原因:

- 1) 实测时有测量误差; 同时由于正午太阳的照射以及长时间的工作, 导致热像仪自身温度升高, 引起误差;
- 2) 建模仿真时, 大气透明率等环境参数由经验值的来, 与实际条件之间存在一定误差, 这对模拟的温度会有影响。
- 3) 实际桥面有一定的斜度, 不是绝对的平面,

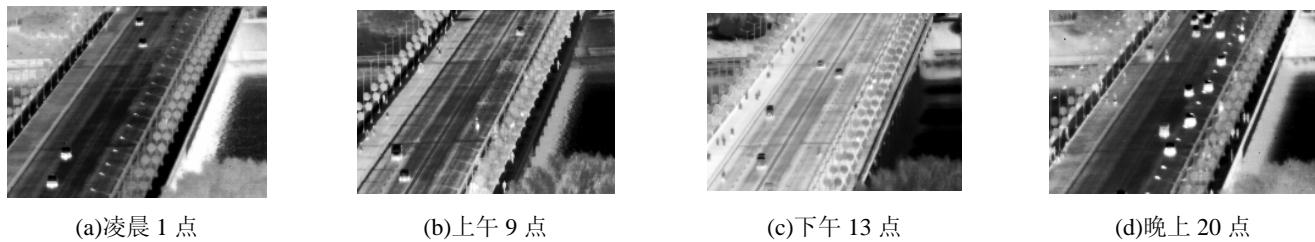


图 10 实测目标场景红外特性图像

Fig.10 The image of the measured Infrared characteristics of target

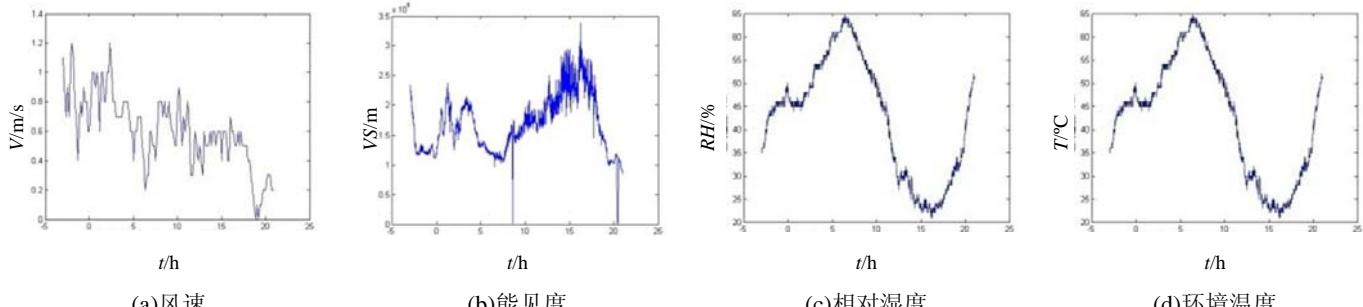


图 11 环境影响因素

Fig.11 Environmental impact factors

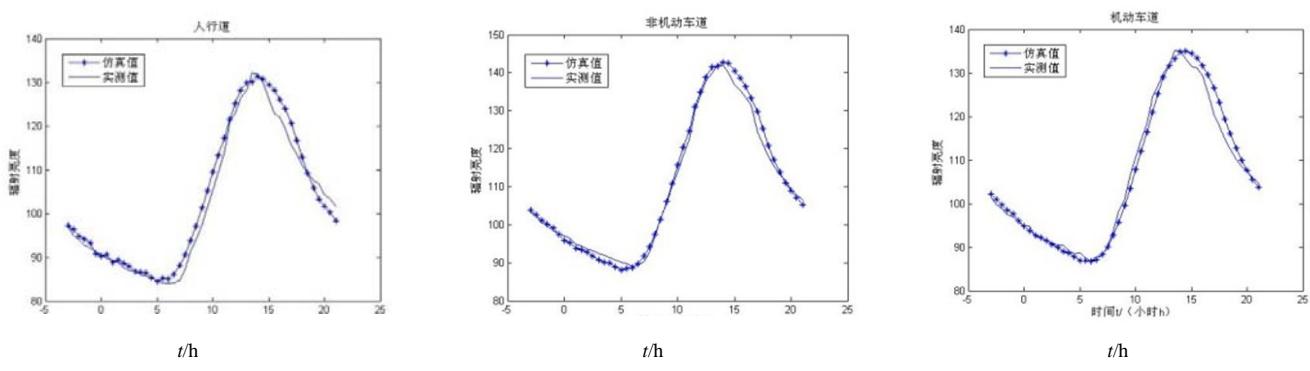


图 12 各采样点仿真值与实测值的对比

Fig.12 Comparison of the simulation and measured values of each sampling point

其倾角及朝向也将影响它接收的太阳辐射大小，进而影响其温度变化。

5 结论

本文综合考虑桥梁的结构、材质以及环境等因素的影响，使用 ANSYS 软件与 MODTRAN 软件来计算桥梁的表征温度分布及其红外辐射特性。从计算结果看，建立的模型是可行的。可为桥梁目标的探测、识别、定位、精确打击提供基础数据，有一定应用价值。

参考文献：

[1] Elbadry M M, Ghali A. Temperature variations in concrete bridges[J]. Proc. ASCE Journal of Structure Engineering, 1983, 109(10):

2355-2374.

[2] 宣益民, 洪宇平, 韩玉阁. 桥梁红外热特征分析[J]. 红外技术, 2000, 22(4): 10-14.

[3] 王章野, 陆艳青, 彭群生, 等. 基于气象学和传热学的城市建筑物红外成像模型[J]. 系统仿真学报, 2000, 12(5): 517-523.

[4] 梁欢. 地面背景的红外辐射特性计算及红外景象生成[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.

[5] 张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.

[6] 太阳能利用协作小组. 我国各地大气透明系数资料[J]. 气象科技, 1980(6): 32-33.