

# 桥面沥青铺装温度场的特性及预估模型

纪小平<sup>1</sup>, 郑南翔<sup>1</sup>, 张宜洛<sup>1</sup>, 王 波<sup>2</sup>, 侯江波<sup>3</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 徐州市政工程设计院, 江苏 徐州 221002; 3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

**摘 要:**为了揭示桥面铺装温度场的分布特性并建立预估模型, 测试道路和桥面沥青铺装的温度场并进行对比分析。在夏季高温期和冬季低温期实测温度场, 收集或计算气温、风速、湿度和太阳辐射等气象要素, 对比分析实测温度场, 揭示桥面铺装温度场的分布特性; 采用统计分析方法, 建立桥面铺装夏季日最高温度和冬季日最低温度的预估模型。研究表明: 桥面铺装温度与气温几乎呈同步周期性变化; 与道路铺装相比, 桥面铺装的夏季日最高温度高 1.4 °C (3 cm 处)、日温差大 2.2 °C; 路表、距路表 3 cm 和 7 cm 处的冬季日最低温度分别高 3.3 °C、1.8 °C 和 0.9 °C, 冬季日温差分别小 2.0 °C、2.2 °C 和 2.1 °C; 建立了以气温、太阳辐射、风速与湿度为变量的桥面铺装夏季日最高温度和冬季日最低温度预估模型, 与 LTPP 和 SHRP 模型相比, 该模型在预估桥面铺装温度场时具有更好的精度。

**关键词:**桥梁工程; 桥面铺装; 温度场; 分布特性; 预估模型

**中图分类号:** U443.33 **文献标志码:** A

## Prediction model and characteristics of temperature field on bridge deck asphalt pavement

Ji Xiao-ping<sup>1</sup>, ZHENG Nan-xiang<sup>1</sup>, ZHANG Yi-luo<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>2</sup>, HOU Jiang-bo<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Xuzhou Municipal Engineering Design Institute, Xuzhou 221002, Jiangsu, China; 3. CCCC First Highway Consultants Co Ltd, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

**Abstract:** The temperature fields of road pavement and bridge deck pavement were tested and comparatively analyzed, so as to reveal the characteristics of temperature field on bridge deck pavement and set up a prediction model. The temperature fields were tested in summer and winter, and the meteorological data, including air temperature, wind speed, humidity and solar radiation were collected or calculated out. Comparative analysis for tested temperature fields was carried out to reveal the characteristics of temperature field on bridge deck pavement. The prediction model of temperature field of bridge deck pavement was developed, respectively for the highest temperature in summer and lowest temperature in winter. The results show that there is a synchronous periodic change between the bridge deck pavement temperature and air temperature. Compared with road pavement, the daily highest temperature in summer of bridge deck pavement

is 1.4 °C (3cm away from pavement surface) higher, and the daily temperature difference is 2.2 °C higher. The daily lowest temperature in winter of that at the road surface, 3 cm and 7 cm below pavement surface is 3.3 °C, 1.8 °C and 0.9 °C higher, and the temperature difference is 2.0 °C, 2.2 °C and 2.1 °C lower. The prediction model of temperature field of bridge deck pavement has been developed, respectively for the highest temperature in summer and lowest temperature in winter, including several factors, such as air temperature, wind speed, humidity and solar radiation. And the accuracy of the developed models is higher than the models of SHRP and LTPP for predicting the temperature field of bridge deck pavement. 8 figs, 14 refs.

**Key words:** bridge engineering; bridge deck pavement; temperature field; distribution feature; prediction model

## 0 引言

桥面铺装的早期破坏一直是世界性的技术难题。交通荷载的高振动性、桥梁挠度、铺装基层特性等都是造成桥面铺装层早期破坏的原因;另外,桥面铺装温度场的特性也恶化了其使用条件,进一步加速其发生破坏。桥面铺装由于其特殊的结构及所处的特殊环境,在温度分布上与普通路面存在着一定的差异。目前,桥面铺装设计已经考虑到了力学响应的特殊性,但很少涉及温度场的特殊性。因此,分析桥面铺装温度场的特性及影响因素,是合理设计桥面铺装的基础。

目前,国内外学者对路面温度场研究颇多<sup>[1-2]</sup>,但对桥面铺装层温度场的研究则略显不足,且研究多集中于钢桥面铺装<sup>[3-4]</sup>。Au 对香港青马大桥桥面铺装温度场进行了监测,认为太阳辐射和气温是主要的影响因素<sup>[5]</sup>;王乾等对 12 座沥青混凝土桥面铺装的温度场进行了测试,推导出铺装温度与气温、日太阳总辐射量的关系<sup>[6-7]</sup>;刘其伟等对箱梁沥青摊铺层温度场进行了测试<sup>[8]</sup>;兰中秋等建立了钢箱梁桥 SMA 沥青路面温度场分析的数值模型<sup>[9]</sup>;彦彦秋等分析了钢桥桥面铺装层温度场的分布特征<sup>[10-11]</sup>;冯联武等测试了高温季节桥面沥青铺装层内的温度分布状况,建立了基于热传导学的桥面铺装层有限元模型<sup>[12]</sup>。由上述研究可知,鲜有研究分析桥面铺装与道路铺装温度场的差异,并在其基础上揭示桥面铺装温度场特殊性。

为此,本文在同一路段相邻断面的水泥混凝土桥面铺装和道路铺装中埋设温度传感器,测试夏季高温期和冬季低温期的铺装层温度场;并在此基础上,统计分析桥面铺装和道路铺装温度场的分布特性,揭示桥面铺装温度场的特殊性并建立预估模型。

## 1 温度场的测试

在夏季高温期和冬季低温期分别测试道路铺装及桥面铺装的温度场,夏季高温期观测点位于 312 国道 K4801 附近的加尔苏大桥,冬季低温期观测地点位于连(连云港)霍(霍尔果斯)高速 K4666 附近的四台一号大桥,两地均位于新疆果子沟地区。2008 年 8 月至 9 月进行了夏季高温期温度场的测试,共设置 11 个观测点,其中桥面铺装 5 处、道路铺装 6 处,测试深度分别为 0、3、7、10 cm。2009 年 1 月至 3 月进行了冬季低温期温度场测试,共设置 11 个观测点,其中道路铺装 6 处,测试深度分别为 0、3、7、10 cm;桥面铺装层共 5 处,测试深度分别为 0、3、7 cm。

## 2 桥面铺装温度场的特性分析

分析温度实测结果,可知桥面铺装层温度场具有如下特点。

(1)桥面铺装层温度与气温呈周期性变化,但峰值时间较晚。2009 年 3 月 1 日的测试结果如下页图 1 所示,在清晨太阳出来之前,气温与路面温度最低,6:00 气温最低、7:00 路表温度最低;随着太阳的照射,气温与桥面温度逐渐升高,14:00 气温达到最高值、15:00~17:00 路面温度达到最高值。

(2)夏季日最高温度较高。下页图 2 为道路铺装与桥面铺装的路表和距路表 3 cm 处的夏季日最高温度。进一步分析可知,对于路表温度,桥面铺装与道路铺装的夏季日最高平均温度一致;距路表 3 cm 处,桥面铺装的夏季日最高平均温度比道路铺装高 1.4 °C。

(3)冬季日最低温度较高。下页图 3 为道路铺装与桥面铺装的路表、距路表 3 cm 和距路表 7 cm 处的冬季日最低温度。进一步分析可知,桥面铺装的冬季

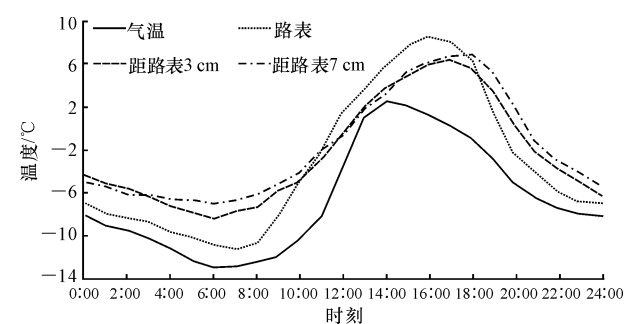


图 1 2009 年 3 月 1 日桥面铺装温度场测试结果

Fig. 1 Testing results of temperature field of bridge deck pavement on March 1 in 2009

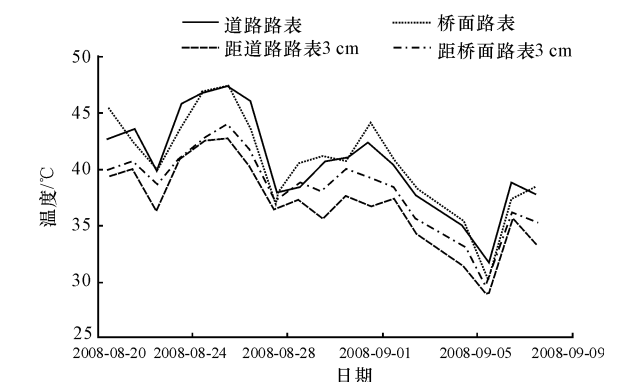


图 2 夏季日最高温度

Fig. 2 Daily highest temperature in summer

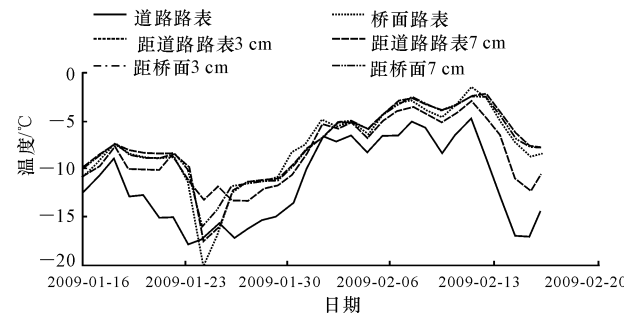


图 3 冬季日最低温度

Fig. 3 Daily lowest temperature in winter

日最低温度较道路铺装高,路表、距路表 3 cm 和距路表 7 cm 处的冬季日最低温度分别高 3.3 °C、1.8 °C 和 0.9 °C。

(4)夏季日温差大。图 4 为路表夏季日温差结果。由图可知,桥面铺装的夏季日温差较道路铺装大,均值大 2.2 °C。

(5)冬季日温差小。图 5 为冬季日温差结果。由图可知,桥面铺装的冬季日温差较道路铺装小,路表、距路表 3 cm 与距路表 7 cm 处分别小 2.0 °C、2.2 °C 和 2.1 °C。

(6)高温持续时间长。2008 年 8 月 20 日至 9

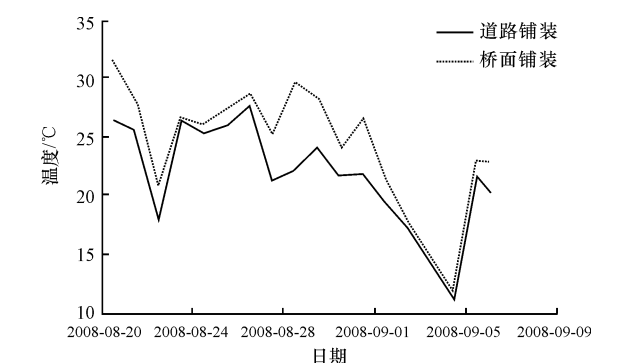


图 4 夏季日温差

Fig. 4 Daily temperature difference in summer

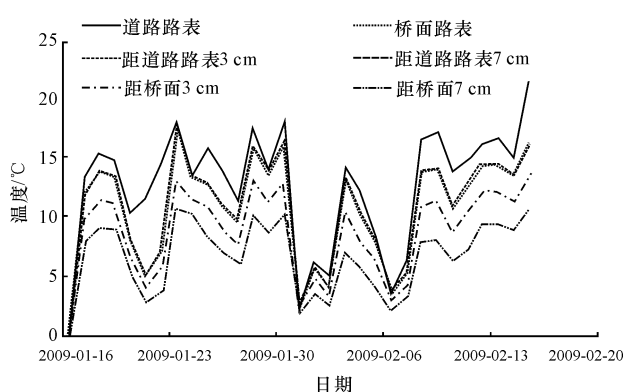


图 5 冬季日温差

Fig. 5 Daily temperature difference in winter

月 5 日高温持续时间如图 6 所示。由结果可知,桥面铺装比道路铺装的高温作用时间长。

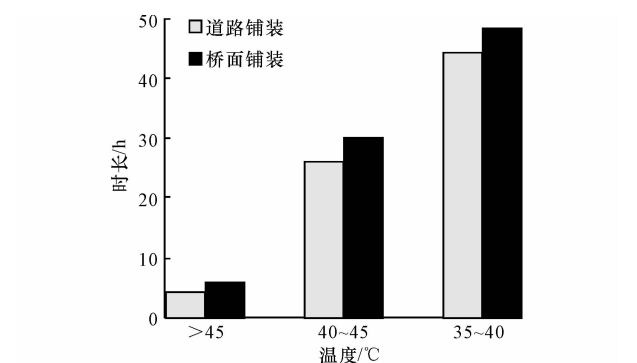


图 6 夏季高温持续时长

Fig. 6 Duration of high-temperature in summer

### 3 桥面沥青铺装温度场的预估模型

#### 3.1 温度场的影响因素

影响路面温度场变化的环境因素主要为气温、太阳辐射、风速、湿度等。

(1)气温  
路面结构暴露在自然环境条件下,与大气直接接触,大气与地表构成对流换热系统,因而气温与路

面结构温度的分布规律密切相关。路面温度随气温呈周期性变化,两者规律相似,但温度峰值气温较滞后。

## (2) 太阳辐射

基于统计分析法建立的沥青路面温度场预估模型往往存在地区差异,使其只能适用于当地路面温度场的预估。产生地区差异的主要原因是不同地区的太阳辐射不一致,特别是随着纬度和海拔发生变化时。本文引入太阳辐射因子用以消除地区差异性,参考相关文献[13-14],确定太阳辐射的计算方法如下。

第 1 步:计算日辐射角度  $\Gamma$

$$\Gamma = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365} \quad (1)$$

式中:  $d_n$  为 1 年中的日期数,范围为 1~365,例如 1 月 1 日  $d_n = 1$ , 5 月 14 日  $d_n = 134$ 。

第 2 步:计算偏心率  $E_0$

$$E_0 = 1.000\ 11 + 0.034\ 221\cos(\Gamma) + 0.001\ 28\sin(\Gamma) + 0.000\ 719\cos(2\Gamma) + 0.000\ 077\sin(2\Gamma) \quad (2)$$

第 3 步:计算太阳赤纬  $\delta$

$$\delta = [0.006\ 918 - 0.399\ 912\cos(\Gamma) + 0.070\ 257\sin(\Gamma) - 0.006\ 758\cos(2\Gamma) + 0.000\ 907\sin(2\Gamma) - 0.002\ 697\cos(3\Gamma) + 0.001\ 48\sin(3\Gamma)] \left( \frac{180}{\pi} \right) \quad (3)$$

第 4 步:计算日升时角。时角为某地区每天太阳最高点与太阳日升或日落时的角度。当日升时,时角为负值;日落时,时角为正值。当地时间正午 12 时时角为  $0^\circ$ , 前后每隔 1 h, 增加  $15^\circ$ 。日升时角  $\omega$  计算式为

$$\omega = \cos^{-1}[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad (4)$$

式中:  $\varphi$  为纬度。

第 5 步:计算日太阳辐射量  $R_0$

$$R_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_0 \sin(\varphi) \sin\left[\delta\left(\frac{\pi\omega}{180} - \tan(\omega)\right)\right] \quad (5)$$

式中:  $I_{sc}$  为日辐射常数,为  $4.871\text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

第 6 步:计算地平面上某一地点一天中某一时段(时角  $\omega_1$  到  $\omega_2$ )的太阳辐射时总量  $I_h$

$$I_h = \frac{12 \times 3\ 600}{\pi} I_{sc} \left[ 1 + 0.033\cos\left(\frac{360d_n}{365}\right) \right] \cdot \left\{ \cos(\varphi)\cos(\delta) [\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1)] + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin(\varphi)\sin(\delta) \right\} \quad (6)$$

## (3) 湿度和风速

大气湿度影响地面有效辐射,进而影响路面温度场。风速是影响大气与路面结构间对流热交换的重要因素,风速增大加剧对流热交换。在预估模型中引入风速和湿度因子,以提高温度场的估测精度。

### 3.2 桥面铺装温度场预估模型的建立

本文温度场预估模型建立思路如下:先建立路表的温度场预估模型,再建立路表温度与路面内部温度的关系模型,将 2 个模型耦合得到桥面铺装温度场预估模型。

#### 3.2.1 夏季日最高温度预估模型

##### (1) 路表夏季日最高温度场预估模型

采用日最高气温  $T_{\text{amax}}$  代表气温、日太阳辐射量  $R_0$  表征太阳辐射,同时考虑湿度  $H$  和风速  $W$  的影响。路表夏季日最高温度的预估模型为

$$T_{\text{smax}} = a_1 + a_2 T_{\text{amax}} + a_3 R_0 + a_4 H_{\text{ave}} + a_5 W_{\text{ave}} \quad (7)$$

式中:  $H_{\text{ave}}$  为日平均相对湿度(%);  $W_{\text{ave}}$  为日平均风速(km/h);  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  为回归系数。

通过中国气象科学数据共享服务网获取气象资料,并计算日平均辐射,通过回归分析得到夏季路表日最高温度预估模型(4 个夏季温度测试点的数据参与回归分析,剩下 1 个测试点用于模型验证),如式(8)。预估值与实测值的相关系数  $R^2 = 0.838$ 。

$$T_{\text{smax}} = -24.509 + 0.742 T_{\text{amax}} + 1.334 R_0 - 0.054\ 2 H_{\text{ave}} - 0.069\ 3 W_{\text{ave}} \quad (8)$$

##### (2) 路面内部温度与路表温度的关系模型

采用幂函数形式建立路面内部日最高温度  $T_{\text{pmax}}$  与路表日最高温度  $T_{\text{smax}}$  和路面深度的关系模型,如式(9)所示。

$$T_{\text{pmax}} = -0.860(D^{1.375}) + T_{\text{smax}} \quad (9)$$

式中:  $T_{\text{pmax}}$  为距路表  $D$  处的夏季日最高温度( $^\circ\text{C}$ );  $D$  为路面深度(cm)。

##### (3) 夏季日最高温度场预估模型

联合式(8)、式(9),得到夏季日最高温度场预估模型,如式(10)。实测值与预估值的相关系数  $R^2 = 0.945$ 。

$$T_{\text{pmax}} = -0.860(D^{1.375}) - 24.509 + 0.742 T_{\text{amax}} + 1.334 R_0 - 0.054\ 2 H_{\text{ave}} - 0.069\ 3 W_{\text{ave}} \quad (10)$$

#### 3.2.2 冬季日最低温度场预估模型

按上述步骤,建立桥面铺装冬季日最低温度场预估模型(5 个冬季温度测试点的数据参与回归分

析,剩下 1 个测试点用于模型验证),如式(11)。实测值与预估值的相关系数  $R^2=0.965$ 。

$$T_{pmin}=1.011(D^{0.100})+1.103+0.958T_{amin}+0.011\ 0R_0-0.023\ 5H_{ave}-0.031\ 6W_{ave}\quad (11)$$

式中: $T_{pmin}$ 为距路表  $D$  处的冬季日最低温度( $^{\circ}\text{C}$ ); $T_{amin}$ 为冬季日最低气温( $^{\circ}\text{C}$ )。

### 4 桥面铺装温度场预估模型的验证

采用所建立的预估模型计算测试期内的高温温度场和低温温度场,并与 SHRP、LTPP 温度场预估模型的计算结果进行对比,以验证所建立的桥面铺装温度场预估模型的可靠性。

采用不同的预估模型计算路表和距路表 3 cm 处的桥面铺装的夏季日最高温度,结果如图 7 所示。

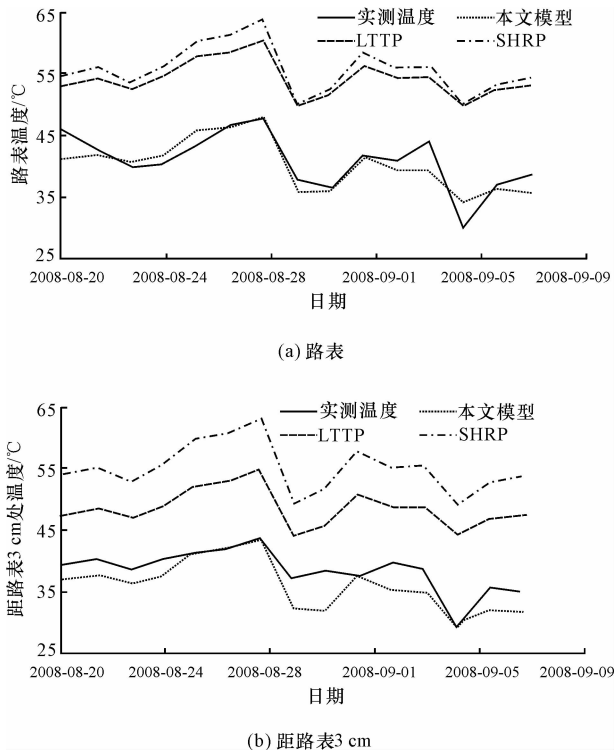


图 7 夏季日最高温度对比

Fig. 7 Comparison of daily highest temperatures in summer

由图 7 可知,SHRP 公式计算值最高且略大于 LTPP 公式计算值,两者均远远高于实测值;本文模型计算值与实测值最接近。

采用不同的预估模型计算路表和距路表 7 cm 处的桥面铺装的冬季日最低温度,结果如图 8 所示。由图 8 可知,对于路表温度,SHRP 计算值与实测值最接近;对于距路表 7 cm 处温度,本文模型计算值与实测值最接近。

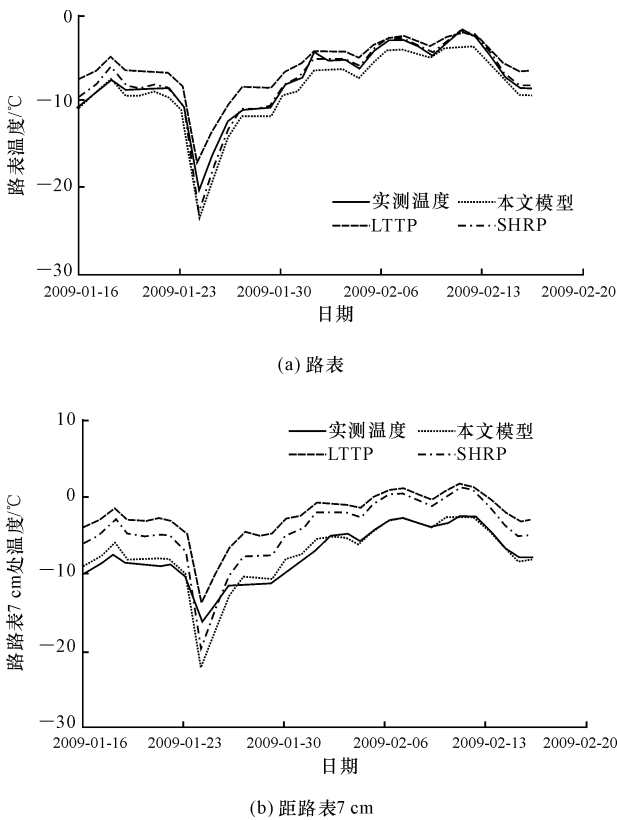


图 8 冬季日最低温度对比

Fig. 8 Comparison of daily lowest temperatures in winter

### 4 结 语

(1)桥面铺装温度与气温几乎呈同步周期性变化,6:00 气温最低、7:00 路表温度最低、14:00 气温达到最高值、15:00~17:00 路面温度达到最高值。

(2)与道路铺装相比,桥面铺装的夏季日最高温度高 1.4  $^{\circ}\text{C}$  (3 cm 处)、日温差大 2.2  $^{\circ}\text{C}$ ;路表、距路表 3 cm 和距路表 7 cm 处的冬季日最低温度分别高 3.3  $^{\circ}\text{C}$ 、1.8  $^{\circ}\text{C}$  和 0.9  $^{\circ}\text{C}$ ,冬季日温差小 2.0  $^{\circ}\text{C}$ 、2.2  $^{\circ}\text{C}$  和 2.1  $^{\circ}\text{C}$ ;高温持续时间长。

(3)建立了以气温、太阳辐射、风速与湿度为变量的桥面铺装夏季日最高温度和冬季日最低温度预估模型;与 LTPP 和 SHRP 模型相比,本文模型在预估桥面铺装温度场时具有更高的精度。

(4)需要通过更广泛的温度测试验证预估模型的适用性。

### 参考文献:

### References:

[1] Maggiore C, Airey G, Marsac P. A dissipated energy comparison to evaluate fatigue resistance using 2-point bending[J]. Journal of Traffic and Transporta-

- tion Engineering; English Edition, 2014, 1(5): 49-54.
- [2] Wang H N, Huang Z H, Li L, You Z P, et al. Three-dimensional modeling and simulation of asphalt concrete mixtures based on X-ray CT [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering; English Edition, 2014, 1(1): 55-61.
- [3] 姚莉莉, 王选仓. 无网格法在沥青路面瞬态温度场分析中的应用[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(4): 7-11.
- YAO Li-li, WANG Xuan-can. Application of meshless method for asphalt pavement transient temperature field[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2011, 31(4): 7-11. (in Chinese)
- [4] 徐慧宁, 张锐, 谭忆秋, 等. 季节性冰冻地区冬季路面温度分布规律[J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 7-14.
- XU Hui-ning, ZHANG Rui, TAN Yi-qiu, et al. Temperature distribution of pavement in seasonally frozen region in Winter[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2): 7-14. (in Chinese)
- [5] Au F T K. Health monitoring and management of civil infrastructure systems[J]. Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 2001, 47(6): 282-291.
- [6] 王乾, 童申家, 王选仓, 等. 桥面铺装温度场与温度应力分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(2): 219-224.
- WANG Qian, TONG Shen-jia, WANG Xuan-cang, et al. Analysis on the temperature field and temperature stress of bridge deck pavement[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology; Natural Science Edition, 2009, 41(2): 219-224. (in Chinese)
- [7] 王乾, 王选仓, 詹珽. 基于 ANSYS 的桥面铺装温度场与温度应力模拟分析[J]. 微计算机信息: 测控自动化, 2009, 25(9): 30-32.
- WANG Qian, WANG Xuan-cang, ZHAN Ting. Stimulation analysis for temperature field and temperature stress of bridge deck pavement based on ANSYS[J]. Micro-computer Information; Monitoring and Control Automation, 2009, 25(9): 30-32. (in Chinese)
- [8] 刘其伟, 丁峰, 朱俊, 等. 钢-混凝土组合箱梁沥青摊铺温度场试验[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2006, 36(4): 572-575.
- LIU Qi-wei, DING Feng, ZHU Jun, et al. Temperature field caused by bituminous deck pavement of steel-concrete composed box girder bridge[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2006, 36(4): 572-575. (in Chinese)
- [9] 兰中秋, 何川, 丹宇, 等. 钢箱梁桥 SMA 沥青路面温度场的数值模型[J]. 重庆大学学报, 2003, 26(6): 66-69.
- LAN Zhong-qiu, HE Chuan, DAN Yu, et al. Numerical model of temperature field in SMA asphalt road surface of steel box girder bridge [J]. Journal of Chongqing University; Natural Science Edition, 2003, 26(6): 66-69. (in Chinese)
- [10] 逯彦秋, 陈宜言, 孙占琦, 等. 钢桥桥面铺装层的温度场分布特征[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2009, 37(8): 116-121.
- LU Yan-qiu, CHEN Yi-yan, SUN Zhan-qi, et al. Characteristics of temperature field distribution of steel bridge deck pavement[J]. Journal of South China University of Technology; Natural Science Edition, 2009, 37(8): 116-121. (in Chinese)
- [11] 逯彦秋, 张肖宁, 唐伟霞. 桥面铺装层温度场的 ANSYS 模拟[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 59-63.
- LU Yan-qiu, ZHANG Xiao-ning, TANG Wei-xia. Simulation of temperature field of bridge deck pavement with ANSYS software[J]. Journal of South China University of Technology; Natural Science Edition, 2007, 35(2): 59-63. (in Chinese)
- [12] 冯联武, 魏军. 高温季节桥面沥青铺装层温度场预估[J]. 公路, 2012(4): 141-143.
- FENG Lian-wu, WEI Jun. Prediction of temperature field of deck asphalt pavement at hot season [J]. Highway, 2012(4): 141-143. (in Chinese)
- [13] AL-Salihi A M, Kadum M M, Mohammed A J. Estimation of global solar radiation on horizontal surface using routine meteorological measurements for different cities in Iraq[J]. Asian Journal of Scientific Research, 2010, 3(4): 240-248.
- [14] 王波. 甘肃地区沥青路面温度场研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- WANG Bo. Research on temperature distribution of large temperature difference areas in Gansu province [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)

