

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.014

南京长江第四大桥钢箱梁铺装层温度影响系数分析

雷笑¹,王杰¹,章登精²,吉伯海¹,谢发祥¹

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京市公共工程建设中心, 江苏 南京 210046)

摘要: 为了减少现有的钢桥面铺装层车辙深度预估的误差,提出基于长期实测数据的钢桥面铺装车辙评估模型的温度影响系数计算公式。首先对南京长江第四大桥的实测温度概率统计后采用双高斯函数表征其分布;在此基础上修正了现有车辙评估模型中的温度影响系数公式,并利用车辙实测数据对车辙评估模型计算值进行验证。研究表明:钢箱梁复合浇筑式铺装层温度可通过双高斯分布描述其概率分布;计入温度影响系数的车辙深度与实际车辙值之间误差较小,相对误差为15.2%。

关键词: 钢箱梁;铺装层;温度分布;温度影响系数;双高斯分布;车辙深度;南京长江第四大桥

中图分类号: U448 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2018)01-0090-05

Analysis on the temperature influence coefficient of the Fourth Nanjing Yangtze Bridge Pavement

LEI Xiao¹, WANG Jie¹, ZHANG Dengjing², JI Bohai¹, XIE Faxiang¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Nanjing public project construction center, Nanjing 210046, China)

Abstract: A temperature influence coefficient for the rutting evaluation model of steel bridge deck pavement based on the double-Gaussian distribution was developed to reduce the error of the rut depth evaluation of the Forth Nanjing Yangtze Bridge. First, the double-Gaussian distribution was employed to analyze the monitoring temperature of the Forth Nanjing Yangtze Bridge. Then, the formula of the temperature influence coefficient for the rutting evaluation model was modified, and the calculated value of rutting evaluation model was compared with the measured one. The results show that the temperature of the asphalt pavement of a steel box girder can be described by the double-Gaussian distribution. The difference is very small between the rutting prediction value considering the temperature influence coefficient and the monitoring rutting data, while the relative error is 15.2%.

Key words: steel box girder; pavements; temperature distribution; temperature influence coefficient; double-Gaussian distribution; rut depth; the Fourth Nanjing Yangtze bridge

钢桥由于自重轻、强度高、制作施工快速等优点,在我国大跨径桥梁建设中得到日益广泛的应用^[1-2]。然而,钢桥面铺装历来是大跨径悬索桥建设的难点与重点之一,在国内已投入使用的大跨径钢桥中,大部分桥梁的桥面铺装都出现了车辙、波浪推移、拥包等病害。由于钢桥面铺装中沥青材料具有较高的温度敏感性,外部温度变化是铺装层产生这些病害的重要原因,其中车辙病害更直接与高温天气相关。

国内外诸多学者对桥面铺装层的温度分布及车辙病害进行了许多有价值的研究。邓学钧^[3]根据自然环境以及交通状况,对江阴长江大桥的钢桥面铺装高温稳定性进行了分析。逯彦秋等^[4]根据气象学和传热学基本原理,利用钢桥面铺装层瞬态温度场的二维计算模型分析了环境因素对钢桥面铺装层温度场的影响。胡坚锋等^[5]以嘉绍大桥为背景,对钢桥面铺装层温度、钢箱梁断面温度以及大气温度的相关性进行了分析。

基金项目: 国家自然科学基金(51678216);国家自然科学基金青年基金(51108152)

作者简介: 雷笑(1980—),男,讲师,博士,主要从事桥梁设计理论与结构分析研究。E-mail:leix2010@126.com

引用本文: 雷笑,王杰,章登精,等. 南京长江第四大桥钢箱梁铺装层温度影响系数分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1): 90-94. DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.014.

Phelan 等^[6]基于实测的太阳辐射、空气温度以及风速数据,利用数值模型对铺装层温度进行了计算分析。Anastasio 等^[7]、Sohey 等^[8]总结了不同铺装材料的温度特性,并利用热对流模型分析了铺装层结构的动态温度曲线。石立方等^[9]对沥青路面结构进行全厚度车辙试验,根据不同温度、荷载及其组合试验条件下的试验结果,分析车辙的发展规律性。Vaitkus 等^[10]研究了等效标准轴载对 27 种不同铺装结构车辙深度的影响,提出了相应最小车辙深度的铺装结构。Yavyzturk 等^[11]利用二维有限元模型,对温度作用下沥青铺装层的温度波动进行评估,并以此为依据对不同深度处的沥青温度进行预测。Wang^[12-13]基于铺装层实测温度,对沥青铺装层的温度时程曲线进行分析。研究表明,车辙病害与温度作用和铺装层结构所使用的不同材料相关,同时有效温度及不同温度的作用时间对铺装层车辙深度的评估有重要影响。

目前的沥青路面车辙预估模型建立可分为 3 类方法:理论分析方法、半理论-半经验法、经验法^[14]。在这些方法中,确定实际铺装层面临的温度作用影响大小,对减少铺装层车辙深度评估误差具有积极的意义。而在大量实测温度数据的基础上,借助统计分析方法,获得其统计参数和概率分布是确定温度作用影响大小的有效手段^[15]。特别是南京长江第四大桥在国内首次采用复合浇筑式钢桥面铺装的结构形式^[14],正确建立模型评估桥面铺装设计寿命期间的车辙状况,对相应桥梁的设计及运营养护工作十分重要。

本文在对南京长江第四大桥为期 2 年的温度监测数据进行分析的基础上,得到钢桥面铺装层温度分布的双高斯概率密度函数,进而求得铺装层高温值出现的频率与时长;根据铺装层的高温时长修正了车辙评估模型中的温度影响系数公式。此方法对减少类似环境地区同类结构钢桥面铺装层车辙深度评估的误差具有一定的参考价值。

1 南京长江第四大桥钢箱梁观测断面及测点布置

南京长江第四大桥位于长江南京区段内,是中国首座三跨悬索桥,桥跨布置为 575 m+1418 m+483 m,采用扁平流线型加劲梁,全桥使用浇筑式沥青铺装技术,整体结构为“下面层 40 mm 浇筑式沥青混合料+上面层 35 mm 改性沥青混合料”,具有防水、抗老化、抗疲劳性能良好及钢桥面板随从性好等优点(图 1 为铺装层构造)。全桥桥面共采用 21 个温度传感器对钢箱梁温度进行监测。其中跨中位置共布设 15 个温度传感器对铺装层温度进行记录。钢箱梁铺装层测点位置如图 2 所示。

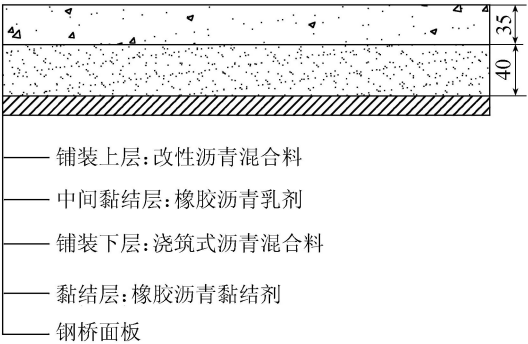


图 1 铺装层构造示意图(单位:mm)

Fig.1 Pavement structure(units:mm)

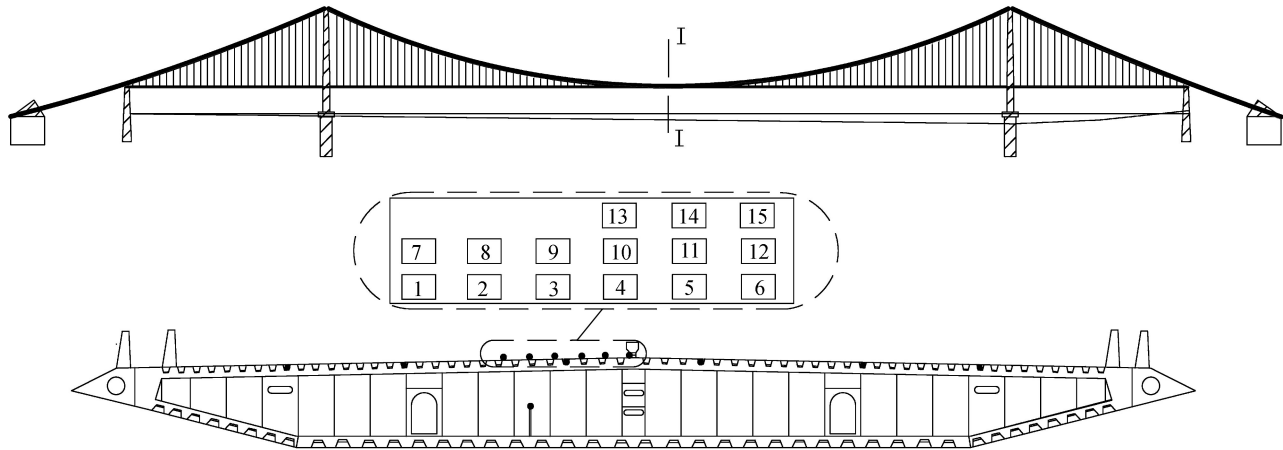


图 2 钢箱梁铺装层测点布置

Fig.2 Layout of the temperature sensors

2 铺装层温度变量的双高斯分布

图3为15号测点2013—2014年的温度变化。从图3可以看出,铺装层温度随年温差的变化有明显的年循环和典型的季节性,其中,夏季温度较高(最高温度为61.8℃),冬季温度较低(最低温度为-8.2℃)。因此,可将温度随时间的变化看作一个随机分布^[13],采用特定分布函数描述箱梁的温度变化,确定温度变化的规律。

对铺装层各测点的温度数据进行统计分析,通过显著性水平0.05的K-S检验以及10~20℃的拟合效果比较,最终选用双高斯分布对铺装层各测点的温度数据进行描述。双高斯分布的拟合公式如下^[16]:

$$f(T) = N_1(\sigma_1, \mu_1) + N_2(\sigma_2, \mu_2) = \alpha_1 \left[\frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} \right] + \alpha_2 \left[\frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} \right]$$

(1)

式中: T ——测点温度; $f(T)$ ——铺装层温度的双高斯概率密度函数; $N_1(\sigma_1, \mu_1)$ 、 $N_2(\sigma_2, \mu_2)$ ——高斯分布; σ_1 、 μ_1 、 σ_2 、 μ_2 ——双高斯分布的拟合参数; α_1 、 α_2 ——权重系数。

拟合后的频率直方图与相应的双高斯分布曲线如图4所示。4号、10号、13号、14号测点的双高斯概率密度函数分别为 $0.81N_1(10.59, 23.61) + 0.19N_2(6.01, 6.12)$ 、 $0.72N_1(9.25, 23.35) + 0.28N_2(8.24, 6.36)$ 、 $0.83N_1(11.69, 23.12) + 0.17N_2(8.04, 5.49)$ 、 $0.76N_1(11.57, 23.78) + 0.24N_2(8.96, 6.08)$ 。从图4可以看出,双高斯分布曲线与频率直方图具有良好的一致性,表明双高斯概率密度函数能够反映测点处不同温度出现的概率。

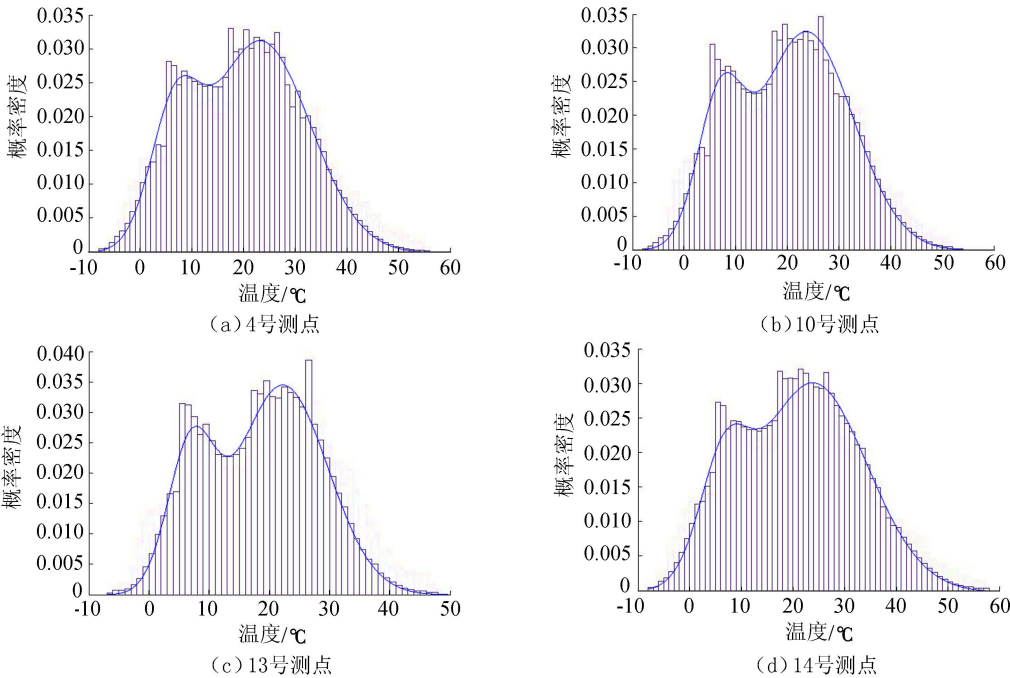


图4 各测点双高斯分布拟合

Fig. 4 Double-Gaussian distribution of each sensor

利用相同的方法,得到铺装层跨中截面所有测点的双高斯概率密度函数,并对各测点概率密度函数的参数值进行统计,求得平均值。利用平均值得到铺装层总体温度分布为

$$f(T_1) = 0.79N_1(10.65, 23.53) + 0.21N_2(7.19, 6.01)$$

(2)

在已知铺装层温度的双高斯概率密度函数和给定温度区间 $[a, b]$ 的情况下,可以积分得到该温度区间在全年出现的时间,全年铺装层40℃以上温度值出现的频率与时长如表1所示。由表1可以得到铺装层

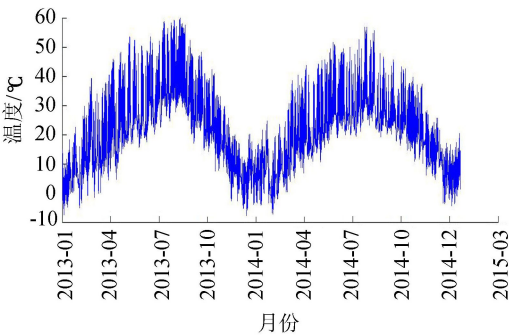


图3 2013年1月至2014年12月15号测点温度变化

Fig. 3 Temperature of the No. 15 sensor from 2013.1 to 2014.12

全年温度在 40℃ 以上的总计时长为 639 h。

3 车辙深度评估

桥面铺装车辙深度直接反映车辆行驶的舒适性及桥面铺装的安全性和使用期限,是桥面铺装设计的重要参数。温度变化对车辙深度的评估具有不可忽视的影响,一般通过温度影响系数加以修正。

基于月平均温度以及动态模量和动稳定度的分析,得到的车辙温度影响系数公式为^[17]

$$C_T = \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_i}{365} \frac{T_i}{24} \frac{D_s}{D'_s} \right)$$

(3)

式中: C_T ——车辙温度影响系数; D_i ——每年第 i 时间段的天数; T_i ——每年第 i 时间段铺装层每天温度高于 40℃ 的时间, h; D_s ——铺装层室内车辙试验的动稳定度; D'_s ——每年第 i 时间段内,铺装层温度大于 40℃ 时间内的铺装层平均温度计算的动稳定度。

利用式(2),可以通过积分得到温度区间 $[a, b]$ 在全年出现的时间,进而得到全年铺装层温度超过 40℃ 的总时长。利用式(3)修正后的温度影响系数对现有车辙评估模型^[12]进行修正,得到修正后的车辙评估模型:

$$D = CC'_T C_v C_w \left(365 \frac{N}{D_s} \right)$$

(4)

式中: D ——车辙深度; C ——基于室内车辙试验条件和现场车辙深度的差异修正系数,根据沥青路面设计规范,取值 1/7; C'_T ——修正后的温度影响系数; C_v ——行驶速度修正系数,取 0.282 3^[17]; C_w ——车道修正系数,根据 JTJ014—2004《公路沥青路面设计规范》^[18],双向六车道系数为 0.3~0.4; N ——全年日均当量轴次。

为比较修正后的车辙评估模型与实际车辙之间的误差,检验基于双高斯分布得到的温度影响系数的可靠性,对南京长江第四大桥铺装层车辙进行了实测,车辙累计深度如表 2 所示。

表 2 实测高温月份车辙深度

Table 2 Measured rut depth in months at high temperature

mm

监测时间	上游车道车辙深度			下游车道车辙深度		
	重车道	行车道	超车道	重车道	行车道	超车道
2013-06	1.2	1.8	1.2	1.2	0.9	1.0
2013-07	1.6	1.9	2.2	1.4	1.7	1.4
2013-08	2.0	2.0	2.3	1.5	1.9	1.8
2013-09	2.2	2.4	2.5	1.5	2.0	1.9
2013-10	2.5	2.4	2.7	1.7	2.2	1.9

在表 2 中,2013 年 10 月测得的南京长江第四大桥 6 个车道车辙深度的平均值为 2.18 mm。由于车辙评估模型中的影响因素众多,为了更好地反映考虑实际温度分布的温度影响系数对车辙评估模型的修正作用,把不计温度影响系数的车辙评估模型计算值(3.27 mm)、考虑实测温度影响系数的车辙评估模型计算值(1.85 mm)分别与车辙实测值进行比较,结果表明,前者相对误差为 50%,后者相对误差为 15.2%。

4 结 论

- a. 南京长江第四大桥钢箱梁复合浇筑式铺装层温度分布可采用双高斯分布概率密度函数进行估计。
- b. 基于南京长江第四大桥铺装层温度的双高斯概率密度统计,提出了实测温度影响系数的计算公式。
- c. 计入双高斯概率密度分布下温度影响系数的车辙评估模型计算车辙深度为 1.85 mm,与实测车辙值相比误差较小(相对误差为 15.2%)。需要指出的是,由于车辙评估模型中的影响因素众多,同时温度变化受环境影响大,本文提出的温度分布及温度影响系数仅适用于类似气候环境地区的铺装结构车辙深度评估。

参考文献:

- [1] 吉伯海. 我国缆索支承桥梁钢箱梁疲劳损伤研究现状[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(5):410-415. (JI Bohai. Current status of research on fatigue damage in steel box girder of cable supported bridge in China[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014, 42(5):410-415. (in Chinese))
- [2] 吉伯海, 程苗, 傅中秋, 等. 基于实测应变的钢桥面板疲劳寿命分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(5):422-426. (JI Bohai, CHENG Miao, FU Zhongqiu, et al. Fatigue life analysis of steel bridge deck based on measured strain[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014, 42(5):422-426. (in Chinese))
- [3] 邓学钧. 中国江阴长江大桥桥面沥青铺装层高温稳定性[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(2):1-7. (DENG Xuejun. Asphalt pavement stability at high-temperature for the Jiangyin bridge in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(2):1-7. (in Chinese))
- [4] 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 Yanqiu, ZHANG Xiaoning, TANG Weixia. 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))
- [5] 胡坚锋, 刘增永, 徐文城, 等. ERS 钢桥面铺装及钢箱梁断面温度监测与分析[J]. 公路, 2016, 5(5):101-108. (HU Jianfeng, LIU Zengyong, XU Wencheng, et al. Temperature monitoring and analysis of ERS steel deck pavement and steel box girder section[J]. Highway, 2016, 5(5):101-108. (in Chinese))
- [6] PHELAN P E, KALOUSH K E, GOLDEN J S. Impact of pavement thermophysical properties on surface temperatures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(8):683-690.
- [7] ANSTASIO S, VILSSCHER J D, WAVMAN M, et al. Standardization of the environmental information for asphalt technologies [J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14(6), 3542-3551.
- [8] SOHEY N, OHSHIMA K I. Influence of the thermophysical properties of pavement materials on the evolution of temperature depth profiles in different climatic regions[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(1):32-47.
- [9] 石立万, 王端宜, 吴瑞麟. 温度荷载联合作用下沥青路面全厚度车辙研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(11):37-40. (SHI Liwan, WANG Duanyi, WU Ruilin. Common effects of temperature and load on total thickness rutting of asphalt pavement, Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2013, 41(11):37-40. (in Chinese))
- [10] VAITKUS A, PALIUKAITI M. Evaluation of time loading influence on asphalt pavement rutting[J]. Procedia Engineering, 2013, 57(1):1205-1212.
- [11] YAVYZTURK C, KSAIBATI K, CHIASSON A D. Assessment of temperature fluctuations in asphalt pavements due to thermal environmental conditions using a two-dimensional transient finite-difference approach [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 17(4):465-475.
- [12] WANG D. Simplified analytical approach to predicting asphalt pavement temperature [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(12):04015043.
- [13] WANG D. Prediction of time-dependent temperature distribution within the pavement surface layer during FWD testing[J]. Journal of Transportation Engineering, 2016, 142(7):06016002.
- [14] 章登精. 复合浇筑式钢桥面铺装车辙评估模型研究[J]. 中国工程科学, 2013, 15(8):63-69. (ZHANG Dengjing. Study on steel deck pavement rutting model of composite guss asphalt concrete[J]. Engineering Sciences, 2013, 15(8):63-69. (in Chinese))
- [15] 雷笑, 叶见曙, 王毅. 日照作用下混凝土箱梁的温差代表值[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2008, 38(6):1105-1109. (LEI Xiao, YE Jianshu, WANG Yi. Representative value of solar thermal difference effect on PC box-girder[J]. Journal of South East University(Natural Science Edition), 2008, 38(6):1105-1109. (in Chinese))
- [16] 王高新, 丁幼亮, 王晓晶, 等. 苏通大桥扁平钢箱梁温度场长期监测与统计分析[J]. 公路交通科技, 2014, 31(2):69-73. (WANG Gaoxin, DING Youliang, WANG Xiaojing, et al. Long-term monitoring and statistical analysis of temperature field of flat steel-box girder of Sutong Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(2):69-73. (in Chinese))
- [17] 南京重大路桥建设指挥部. 南京长江第四大桥复合浇筑式钢桥面铺装试验报告[R]. 南京: 江苏省交通科学研究院, 2010.
- [18] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面设计规范:JTJ 014—2004[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.