

文章编号:1005-0523(2012)02-0047-04

非线性模型在钢桥面铺装层温度场计算中的应用

于江¹,周灵²,叶奋³,武金婷³,李林萍¹

(1. 新疆大学建筑工程学院,新疆乌鲁木齐 830047; 2. 重庆房地产职业学院房地产研发与建设系,重庆 401331; 3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

摘要:根据预测量钢桥面铺装结构温度场对预测因子气温的依赖关系,基于工程实例中钢桥面铺装层温度场和气温的实测数据,用统计分析软件PASW进行铺装层表面极端温度非线性回归模型求解,并确定了该项工程钢桥面铺装结构的设计温度,对于钢桥面铺装的设计具有一定的指导意义。

关键词:钢桥面铺装;温度场;非线性模型;回归分析

中图分类号:U216

文献标志码:A

桥面铺装处于道路工程和桥梁工程的交叉地带,常被两个领域的研究设计所忽略。国内外学者对道路结构温度场的研究较为广泛,而对于桥面铺装结构的温度场研究较少。目前钢桥的建设进入了前所未有的高峰期,但是许多已建好的大跨径桥梁钢桥面铺装存在很严重的早期破坏问题,有些桥梁在短期使用后铺装结构就发生了大面积推移、车辙、开裂等病害,这些问题尚未得到很好的解决。

沥青具有粘弹性,它的任何性质都是时间和温度的函数。高温、低温及高低温的循环变化过程等是造成钢桥面沥青混凝土铺装结构破坏的主要原因,而且钢桥面铺装直接铺设在正交异性钢桥面板上,受到行车荷载和温度变化等因素的影响比公路路面或机场道面复杂得多^[1]。目前国内外学者主要采用了以下方法对桥面铺装结构的极端气温进行预估:根据传热学基本定律和导热微分方程相关理论,建立数值预估模型,确定初始条件和边界条件,用有限元方法求解钢桥面铺装层非线性瞬态温度场^[2-3];运用有限差分程序求解^[4];对沥青摊铺温度场进行实测,建立横向平面模型用有限元软件计算并对比分析^[5-6]。

在道路结构温度场研究的发展过程中,统计法在工程实践中获得越来越广泛的应用并成为研究的主流方法^[7]。本文以夏季和冬季钢桥面铺装结构温度场为预测量,气温作为预测因子,考虑温度场变化过程中的非线性关系,提出非线性回归模型,并用统计分析软件工具PASW Statistics(predictive analytics software)进行模型求解,应用于预估钢桥面铺装结构的设计温度中,对于钢桥面铺装的设计具有一定的指导意义。

1 回归分析模型

1.1 探索分析

PASW Statistics统计分析软件工具是传统SPSS统计软件的延续,是世界上最早的统计分析软件,在各领域都有广泛应用。进行数据分析时,最主要的两个步骤是数据探索分析和回归分析。推断统计分析之前的探索性数据分析很必要,考虑到影响桥面铺装温度场的因素可以分为外因和内因两个方面,外部因素的是指桥面铺装在使用期间气候条件的考验,如太阳辐射、气温、风速等;内部因素主要为铺装结构的热力学参数^[8]。重点计算铺装层温度场和气温数据的描述统计量、检验正态性和方差齐性、绘制箱图、Q-Q图、变量间的矩阵散点图等。

收稿日期:2012-01-11

基金项目:国家自然科学基金项目(50968016)

作者简介:于江(1960—),男,教授,研究方向为土木工程。

1.2 非线性模型

许多实际问题都涉及非线性的相互关系,一些非线性可以通过变量转化为线性的模型为本质线性模型。本质非线性模型(式1)不能通过简单地变量转化为非线性模型,需要估计模型中参数的起始值及其取值范围,利用迭代算法寻找使残差平方和达到最小的参数估计值(NLR算法)。

$$y = b_0 + e^{b_1 x_1} + \dots + e^{b_n x_n} + \varepsilon \quad (1)$$

式中: $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)^T$ 需要服从正态性、无偏性、独立性和同共方差性4个假设条件,对 ε 的4个条件进行检验的时候除了相关系数检验、F检验和t检验,还可以有残差的正态性检验、残差的方差齐性检验、残差的独立性检验、多重共线性检验几种检验方法^[9]。估计回归参数 β 的方法是最小二乘法。

Metcherlich 的收益递减规律模型适用于投入与产出的关系,Michaelis Menten 模型(式2)广泛应用于生命科学中,地基承载力可以采用吸力强度修正对数模型计算^[10]。在选择非线性模型时,可以从确定参数的初始值入手,通过路表温度与气温之间关系的散点图确定参数的取值范围,再从中选取初始值,或用固定的数替代某些参数,以此确定其它参数的取值范围。

$$y = ax/(x+b) \quad (2)$$

2 工程实例

为获得大跨径钢桥面铺装结构夏季高温和冬季低温时的温度场实测数据,选取上海市嘉定区的桃浦路延伸段蕴藻浜大桥进行铺装层温度场实验。蕴藻浜大桥于2010年5月底建成通车,主桥采用两跨连续下承式刚桁架拱全焊接组合钢结构,跨径组合600 m+135 m,桥面宽33 m,行车道宽16.5 m,双向四车道。桥面沥青混凝土铺装结构为4 cm 沥青玛蹄脂碎石(SMA-13)+4 cm 环氧沥青混合料(EA-10)+环氧沥青防水粘结层。

2.1 传感器的布设和观测的内容

表1列出了蕴藻浜大桥桥面铺装层温度场实测的仪器、传感器的布置与埋设方法及观测时间与频率。

表1 传感器的布设和温度场观测方法

Tab.1 Design of sensors and observing method of temperature field

观测仪器	① 数据采集使用的温度传感器为PT100铂丝热电阻传感器,测量范围为-200~650℃,测量精度为0.01℃,误差为0.5℃。② 温度数据采集仪器选用上海天贺自动化仪表有限公司生产的MDL-1048A高精度温度数据自动记录仪。
传感器的布置	分别在钢板上(铺装层底部)、EA-10层表面、SMA-13层表面(路表)平行布设2个温度传感器,共3组,布设位置在轮迹带处,沿桩号前进方向对应横隔板处和两横隔板中间处,两传感器之间的距离为1700 cm。
传感器的埋设	在铺设铺装层的过程中进行温度传感器的埋设,主要有两个步骤,首先进行钢板上温度传感器的定位和焊接。接下来是环氧沥青混凝土层摊铺完成后,进行传感器的定位、开槽、埋入和回填。由于桥面铺装结构较薄,适当采用交错布置的方法。传感器的导线应放入挖好的线槽并引至中央分隔带处,穿入接线箱。PT100在埋设过程中要与数据采集仪相连接,对其成活率进行监测。温度测试时,把一组2个传感器固定在铺装层表面相对应的位置测试路表温度。为测试空气温度,同时将两个温度传感器系在测试点附近两桥梁吊杆上。
观测时间	夏季 2010年8月5—21日 酷暑持续高温时段 冬季 2011年1月7—19日 冬季持续低温时段
观测方法	实时显示桥面铺装结构内部的温度场和气温,设置温度记录仪8个通道每隔10 min记录1次数据,为确保试验中不出现失误同时由人工进行记录和校核,并每天将数据采集仪记录的温度数据导出。

2.2 观测结果

实测数据显示,气温是影响钢桥面铺装层温度的最主要因素,铺装层内各深度处的温度与气温的日变化曲线的趋势相一致,呈现周期性、波动性和滞后性的特点。夏季晴好气候条件下路表温度的日温差最大,冬季正常天气条件下铺装层底面温度的日波动最大。冬季路表温度与气温之间的温差比夏季小得多,

尤其是在日高温阶段,且铺装结构内的滞后性也不是很明显,是由于冬季太阳辐射的强度很弱,大跨径桥面铺装表面的风速远远高于一般路面,大风伴随剧烈的降温对铺装层的影响较大。

极端气温都出现在路表,40℃以上的高温 and 0℃以下的低温在路表的作用时间最长。钢桥面铺装结构一层一般仅为几厘米,外界环境更为苛刻并且受环境的影响更大,钢桥面铺装的极端高温比相同地取的沥青路面大,更容易产生推移、脱空等病害,而极端低温更低,导致铺装层本身的收缩量超过其极限拉应变而导致开裂。采用铺装层表面极端温度作为设计温度,因此建立路表极端温度预估模型。

3 非线性模型的参数确定和铺装层设计温度

3.1 高温温度场预估公式

蕴藻浜大桥铺装层表面高温和低温实测温度数据经探索性分析整体具有非正态性和非方差齐性。绘制夏季气温和路表温度的散点图,见图1,当气温增加时,铺装层表面温度增加得较缓慢,但是随着气温的继续增加铺装层表面温度的增速略有增加。选用对数修改模型 $T = (a + cT_A)^b$ 。

模型迭代了40次后得到了最优解,得到的回归模型为

$$T = (-20.284 + 1.423T_A)^{1.089} \quad (3)$$

式中: T 表示铺装层表面的极端高温; T_A 表示最高气温。 a 的标准误为55.046, b 和 c 的标准误较小,分别为0.510和2.914,所以 a 值的可建议性不强。相关系数 $R^2=89.3% > 85%$,拟合模型能够解释因变量大于85%的变异,说明模型的拟合效果不错。 b 的值略比1大,求得线性回归模型 $R^2=89%$,低于对数修改模型。通过与实测结果比较发现,此式对路表温度极端高温预测的相对误差在16%以内,预测精度较高。

3.2 低温温度场预估公式

绘制冬季气温和路表温度的散点图,见图2,用Michaelis Menten模型(2)进行温度预估,在迭代了12次后得到了最优解,得到的非线性模型为

$$T = \frac{29.192T_A}{T_A + 35.663} \quad (4)$$

式中: T 表示铺装层表面的极端低温; T_A 表示最低气温。 a 和 b 的标准误分别4.412和4.066,估计值较为可信。 $R^2=97.8% > 85%$,拟合模型能够解释因变量大于85%的变异,模型的拟合效果较好。求得线性回归模型 $R^2=97%$,低于Michaelis Menten模型。与实测结果进行对比,此式对路表极端低温预测的相对误差在10%以内。

从大量数据中提取的非线性模型优点是应用方便,缺点是对原始数据的信噪比(SNR)敏感,严重时甚至会导致模型失效^[11]。

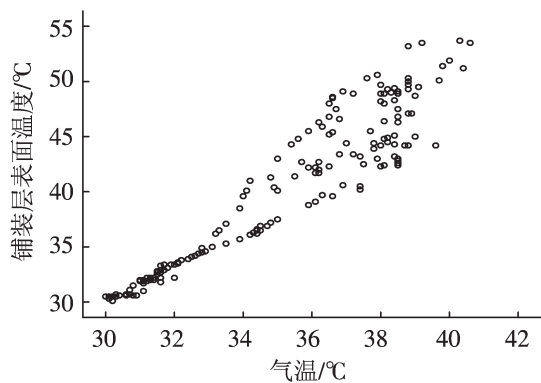


图1 夏季路表温度与气温散点图

Fig.1 Scattering diagram of pavement temperature and air temperature in summer

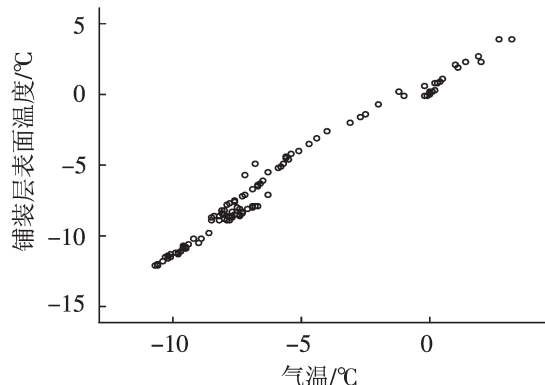


图2 冬季路表温度与气温散点图

Fig.2 Scattering diagram of pavement temperature and air temperature in winter

在我国的现行规范中,复合铺装结构实验研究都是在几个特定温度下进行的,没有考虑与沥青路面路用性能直接相关的铺装层温度,路面设计温度也多依据美国的SHRP指标确定,无法满足我国不同地区路面温度场差异显著的情况^[12]。根据本文的计算方法,上海历史上极端最高气温曾达40.2℃,极端最低气温曾出现过-12.1℃,得到此钢桥面铺装结构最高温度设计值为50.90℃,最低温度设计值为-14.99℃。

4 结语

1) 将非线性模型应用于钢桥面铺装结构温度场的计算,根据工程实测的数据,分别建立了该项工程钢桥面铺装层表面极端高温的对数修改模型和极端低温的Michaelis Menten模型,预估公式在一定的温度范围内具有较高预测精度。

2) 根据本文的模型,计算得该项工程钢桥面铺装结构最高温度设计值为50.90℃,最低温度设计值为-14.99℃。建立的非线性模型对钢桥面铺装设计和材料选择具有一定的指导意义,是一种值得研究的实用方法。

参考文献:

- [1] 黄卫. 润扬长江公路大桥建设——钢桥面铺装[M]. 北京:人民交通出版社,2005:7.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 胡晓,曹德洪,贾璐,孙立军. 夏季桥面沥青铺装层温度预估及其力学影响[J]. 公路工程,2008,33(1):70-73.
- [5] 陈晓强,刘其伟. 钢-混凝土组合箱梁桥沥青摊铺温度场的试验与理论对比分析[J]. 铁道科学与工程学报,2009,6(5):5-10.
- [6] CHEN XIAOQIANG, LIU QIWEI, ZHU JUN. Measurement and theoretical analysis of solar temperature field in steel-concrete composite girder[J]. Journal of Southeast University, 2009, 25(4):513-517.
- [7] 秦健,孙立军. 国外沥青路面温度预估方法综述[J]. 中外公路,2005,25(6):19-23.
- [8] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京:人民交通出版社,2001:30-32.
- [9] 贾丽艳,杜强. SPSS统计分析标准教程[M]. 北京:人民邮电出版社,2010:154-155.
- [10] 马少坤,黄茂松,扈萍,秦会来. 吸力强度修正对数模型在地基承载力中的应用[J]. 岩土力学,2010,31(6):1853-1857.
- [11] 姚莉,王勤,张世强. Michaelis-Menten模型近似回归方法的改进[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2002,27(1):26-29.
- [12] 宋存牛. 沙漠地区路基路面温度场暨路面工作环境温度指标研究[D]. 西安:长安大学,2006.

An Application of Non-linear Regression Model in Temperature Field Calculation of Steel Deck Pavement

Yu Jiang¹, Zhou Ling², Ye Fen³, Wu Jinting³, Li Linping¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. School of Research and Building of Real Estate, Chongqing Real Estate College, Chongqing 401331, China; 3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: According to the relationship between auto-regression factor temperature field of steel deck pavement and regression factor meteorological temperature, based on the measured temperature data of the factors in both summer and winter, the non-linear regression models of daily high and low temperatures with PASW is discussed. The design value of steel deck pavement is decided. It will become some guidance for the structure design of steel bridge deck pavement.

Key words: steel deck pavement; temperature field; non-linear model; regression analysis