

高速铁路箱梁-双块式轨道系统温度梯度研究*

戴公连,梁金宝,苏海霆[†]

(中南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410075)

摘要:温度作用对高速铁路箱梁-轨道整体工作性能有重要影响,通过对我国东南地区某32 m简支梁-CRTS I型双块式无砟轨道结构温度的持续监测,重点研究了箱梁-轨道系统日温度变化规律与竖向温度梯度分布规律,基于全年每测点16 560个数据,采用高阶矩法确定具有一定重现期的箱梁-轨道系统竖向温差代表值,提出了适用于我国东南地区箱梁-轨道系统的竖向温度梯度拟合模式.研究表明:可采用一阶傅里叶级数模拟结构晴天温度升降变化特征,拟合程度较高,同一季节拟合参数 a 、 b 、 ω 与 φ 自上而下逐渐减小,温度波动幅值 a 随深度增加趋近于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;不同季节各截面竖向晴天温度日变化特征基本一致,于11:00~21:00前后出现正温度梯度,于01:00~9:00前后出现负温度梯度;轨道-箱梁整体对应超越概率0.01的竖向正负温差代表值分别为 $14.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,箱梁顶板对应超越概率0.01的正负温差代表值分别为 $13.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-3.54\text{ }^{\circ}\text{C}$,底板为 $2.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-1.12\text{ }^{\circ}\text{C}$,可采用指数对箱梁顶板竖向正负温差代表值进行拟合,其分布规律在形式上与中国铁路桥梁规范相接近,可采用线性形式对底板温差代表值进行拟合,两种拟合形式相关系数的平方均在0.99以上,可为规范修正与桥梁设计提供参考.

关键词:铁路桥梁;双块式无砟轨道;轨道结构;竖向温差;高阶矩法

中图分类号:U213.9

文献标志码:A

Study on Temperature Gradient of Box Girder-Twin-Block Track System in High-speed Railway

DAI Gonglian, LIANG Jinbao, SU Haiting[†]

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Temperature effect is one of the main factors that influence the performance of box girder-track in high speed railway. Through the continuous temperature field monitoring of CRTS I twin-block ballastless track with 32 m simple supported beam bridge for the entire year, the time-dependent temperature variation and the regular distribution of temperature gradient were analyzed. The representative values of temperature differences with a certain return period were ascertained by Higher Moment Method. Based on the 16560 data at each measurement point, the vertical temperature load modes of box girder-track in southeastern China were suggested. The analysis results reveal that the goodness-of-fit is increased by using the first Fourier series to simulate the temperature fluctuation characteristics of sunny day, and the

* 收稿日期:2016-10-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378503), National Natural Science Foundation of China(51378503); 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2015G001-K), Project of Science and Technology Research and Development Program of China Railway Corporation (2015G001-K); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2015zzts060), Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University(2015zzts060)

作者简介:戴公连(1964—),男,河南夏邑人,中南大学教授,博士生导师

[†]通讯联系人, E-mail: suhaiting1988@ gmail.com

same season fitting parameters a, b, ω and φ decrease from top to bottom and the temperature fluctuation amplitude of a is close to 0°C as the depth increases. The diurnal variation characteristics of each section on sunny days are basically similar in the different seasons, and the positive and negative temperature gradients approximately appear around 11:00 to 21:00 and 01:00 to 9:00, respectively. The positive and negative representative values of box girder-track vertically are 14.87°C and -6.3°C with the exceedance probability of 0.01, respectively. And the positive and negative representative values of the top plate and bottom plate are $13.74^\circ\text{C}, -3.54^\circ\text{C}$ and $2.38^\circ\text{C}, -1.12^\circ\text{C}$ with the exceedance probability of 0.01, respectively. The values of positive and negative temperature difference of top plate are fitted by the exponential form, which is approached to the temperature load modes of the concrete box girder in Chinese railway bridge code. The values of bottom plate are fitted by linear form. The correlation coefficients of the two fitting forms are more than 0.99, which can be used for the engineering application and reference.

Key words: railroad bridges; twin-block ballastless track; track structure; vertical temperature difference; higher moment method

高速铁路要求线路具有高平顺性、高精度、维修少和小残变等特点^[1],而温度作用是影响高速铁路箱梁-轨道系统高平顺性与稳定性的主要因素之一^[2].由于混凝土的导热性能较差^[3-5],曝露于自然环境下的高速铁路箱梁-轨道系统所受太阳辐射、大气辐射和对流换热等因素的影响程度不尽相同,使箱梁和轨道整体竖向存在非线性温度分布,对箱梁-轨道整体变形和局部受力产生一定的影响^[6-8].

关于箱梁-轨道系统竖向温度梯度分布规律,既有研究中通常将轨道与箱梁单独进行考虑,文献[9]通过对某地区双块式无砟轨道进行温度测试,研究了其温度荷载取值方法;文献[10]通过对某曲线段纵连板式无砟轨道温度场的持续观测,提出了典型地区无砟轨道秋季竖向温度荷载模式;文献[11]通过建立极值概率模型来确定轨道板温度荷载取值,得出不同设计基准期均匀温度日最值与保证概率的关系;文献[12]通过建立误差反向传播的多层人工神经网络,对轨道板竖向温度梯度进行预测并用实测数据进行验证;文献[13]根据极值统计理论提出箱梁的正温度梯度曲线,并与现行公路桥梁规范进行比较;文献[14]对某特大型预应力混凝土连续箱梁桥进行连续温差效应观测,提出了一种适合于中国中部地区的箱梁温度梯度模式;文献[2]总结了国内外桥梁规范对于温度效应的规定,提出了高速铁路箱梁日照温度在考虑轨道板作用下的模式.然而,已有研究对象中对高速铁路箱梁-轨道整体竖向温度分布及其效应的研究甚少.对高速铁路桥梁而言,32 m 跨简支箱梁运用最为广泛,既有针对无砟小型箱梁的温度效应研究不能完全

适用于高速铁路箱梁.因此,有必要对高速铁路箱梁-轨道整体竖向温度分布及效应进行研究.

本文以 32 m 简支梁-CRTS I 型双块式无砟轨道为研究对象,通过长期数据采集,分析了不同截面的温度日变化特征及温度梯度,基于高阶矩数学统计方法^[15],以一至四阶矩构造样本的立方体正态分布,建立了箱梁-轨道系统各测点温差的极限状态函数,得出不同超越概率所对应的温差代表值,突破了传统方法寻找分布的局限性,并进一步提出适用于高速铁路箱梁-轨道整体竖向温度梯度拟合模式.

1 箱梁-轨道系统温度场测试方案

以合福高速铁路客运专线某 32 m 简支梁-CRTS I 型双块式无砟轨道系统为工程背景,该桥位于东经 118° ,北纬 28° ,为消除箱梁端部边界的影响,测试截面选取了距离桥端 15 m 处位置,考虑到轨道轴向走向为 9.5° ,为南北走向,测点采取单侧布置,如图 1 所示.

为准确分析箱梁-轨道系统整体竖向温度效应,研究轨道结构遮盖对箱梁竖向温度模式产生的影响,选取截面 I 与截面 II 测点进行分析,测点编号为 A~M.

箱梁-轨道系统温度测试元件采用北京基康 BGK-3700 型温度计,仪器测量精度为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$,现场测试中将温度元件全部接入 BGK-Mirco40 数据采集仪中实现自动采集存储,采样周期为 30 min,采用无线传输进行远程控制下载,使用太阳能供电

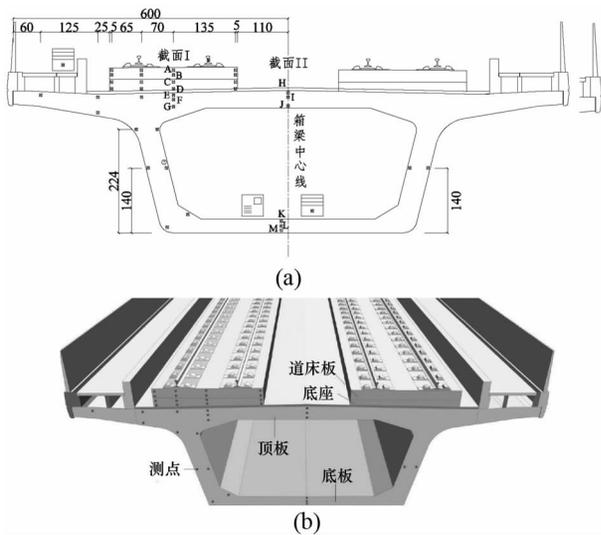


图1 箱梁-轨道系统温度测点布置示意图
Fig.1 The arrangement of box girder-track system temperature sensors

系统供电.为研究高速铁路箱梁-轨道整体竖向的温度分布特征,选取具有代表性的试验数据(2014年6月8日0时—2015年6月9日24时)进行分析,共采集16560组数据,能够满足概率统计模型的精度需求.

2 箱梁-轨道日温度变化规律

箱梁-轨道结构每天的温度波动可看作是一种周期性过程,故可用傅里叶级数来表示^[16],即表示为三角级数之和:

$$T(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} (a_n \sin \frac{n\pi}{l}t + \beta_n \cos \frac{n\pi}{l}t). \quad (1)$$

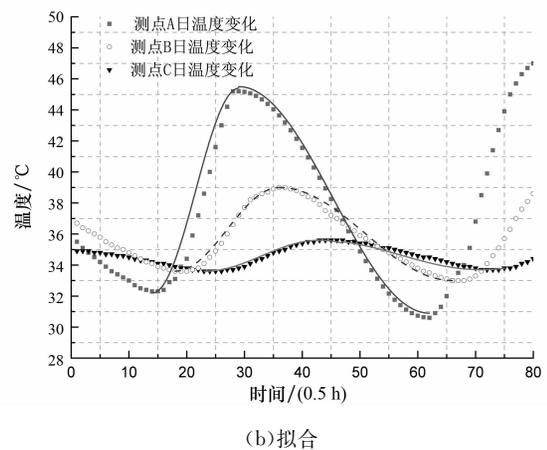
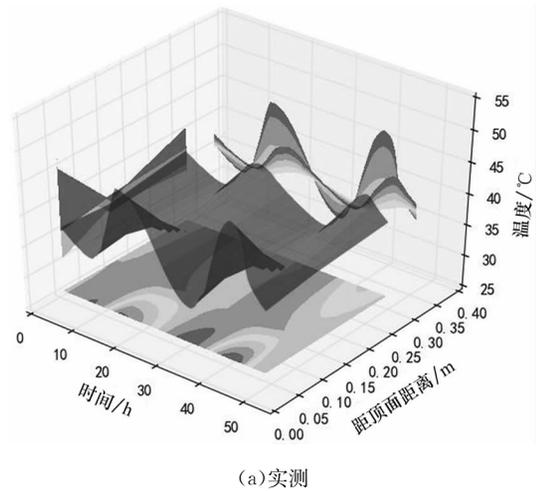
通过对结构温度日变化进行傅里叶拟合,发现结构日温度变化可分为升温过程与降温过程,采用一阶傅里叶级数模拟结构晴天日温度变化特征,拟合相关系数的平方均在0.95以上,取7月20—21日截面I的A、B、C测点实测数据,其拟合结果如图2所示.

可以看出测点A、B、C由上至下峰值出现滞后,变化幅值逐渐减小,采用正弦函数对测点升降温阶段拟合程度高,规律明显.

一阶傅里叶级数函数规律见式(2).

$$T(t) = a \sin(\omega t + \varphi) + b. \quad (2)$$

式中: $a = (T_{\max} - T_{\min})/2$, T_{\max} 、 T_{\min} 为当天测点温度最大、最小值,℃; $\omega = \pi/(q - p)$, q 、 p 为当天测点温度最大、最小值对应的时间标识;升温阶段 $\varphi = \pi(1.5q - 2.5p)/(q - p)$, 降温阶段 $\varphi =$



(a)实测
(b)拟合
图2 测点A、B、C温度实测值与拟合结果图
Fig.2 Measured and fitted temperature of the points A,B,C

$$\pi(0.5q - 1.5p)/(q - p); b = (T_{\max} + T_{\min})/2.$$

对全年天气情况进行统计,其中晴天109d,利用程序对晴天天气下截面I测点A~E日升温与降温过程数据分别进行参数拟合,可得出晴天天气情况下的 a 、 b 、 ω 与 φ ,由于参数数据量较大,将截面I各测点参数按日期进行季节划分,并按季节平均处理,计算结果见表1和表2.

由表1可知,升温阶段同一季节测点参数 a 、 b 、 ω 与 φ 自上而下逐渐减小,其中温度波动幅值 a 变化范围较大并随深度增加趋近于0℃,均匀温度 b 变化幅值趋近于3℃;同一测点在不同季节的波动幅值 a 变化小于1℃,均匀温度 b 随季节变化规律明显,夏季最大,冬季最小,而 ω 随季节变化不大.

由表2可知,降温阶段同一季节测点参数 a 、 b 变化规律与升温阶段相似,逐渐减小,而 ω 与 φ 的绝对值自上而下逐渐增大;同一测点在不同季节 a 、 b 与 ω 变化规律与升温阶段相似.升温阶段和降温阶段的 a 、 b 差别不大,而 ω 、 φ 有一定差别,说明 a 、

b 是反映基本温度的参数, ω 、 φ 是反映温度变化的参数.

表 1 箱梁-轨道结构升温阶段参数季节变化均值表

Tab.1 Average values of parameters with the seasonal variation of box girder-track during heating stage

| 测点 | 春季 | | | | 夏季 | | | | 秋季 | | | | 冬季 | | | |
|----|------|-------|----------|-----------|------|-------|----------|-----------|------|-------|----------|-----------|------|------|----------|-----------|
| | a | b | ω | φ | a | b | ω | φ | a | b | ω | φ | a | b | ω | φ |
| A | 6.05 | 19.28 | 0.18 | 2.21 | 6.78 | 35.56 | 0.18 | 2.15 | 6.34 | 29.27 | 0.20 | 1.78 | 6.05 | 9.99 | 0.21 | 1.17 |
| B | 2.95 | 18.08 | 0.16 | 1.73 | 3.02 | 33.75 | 0.17 | 1.66 | 2.75 | 27.41 | 0.19 | 1.18 | 2.19 | 8.65 | 0.20 | 0.68 |
| C | 1.29 | 17.41 | 0.14 | 1.48 | 1.10 | 32.55 | 0.15 | 1.22 | 0.98 | 26.38 | 0.16 | 1.02 | 0.85 | 8.15 | 0.16 | 0.68 |
| D | 0.69 | 17.27 | 0.14 | 0.71 | 0.52 | 32.05 | 0.13 | 1.20 | 0.46 | 25.88 | 0.15 | 0.85 | 0.38 | 7.37 | 0.15 | 0.54 |
| E | 0.58 | 16.18 | 0.10 | 0.76 | 0.38 | 31.93 | 0.11 | 1.17 | 0.33 | 25.58 | 0.12 | 0.67 | 0.29 | 7.41 | 0.12 | 0.41 |

表 2 箱梁-轨道结构降温阶段参数季节变化均值表

Tab.2 Average values of parameters with the seasonal variation of box girder-track during cooling stage

| 测点 | 春季 | | | | 夏季 | | | | 秋季 | | | | 冬季 | | | |
|----|------|-------|----------|-----------|------|-------|----------|-----------|------|-------|----------|-----------|------|------|----------|-----------|
| | a | b | ω | φ | a | b | ω | φ | a | b | ω | φ | a | b | ω | φ |
| A | 6.37 | 19.37 | 0.10 | -1.51 | 6.58 | 35.67 | 0.09 | -1.36 | 6.12 | 30.82 | 0.10 | -1.51 | 6.03 | 9.13 | 0.10 | -1.49 |
| B | 2.27 | 18.20 | 0.10 | -2.28 | 2.73 | 34.05 | 0.10 | -2.04 | 2.48 | 28.78 | 0.10 | -2.16 | 1.99 | 7.76 | 0.10 | -1.88 |
| C | 0.75 | 17.72 | 0.11 | -3.30 | 0.80 | 32.73 | 0.11 | -3.22 | 0.72 | 27.58 | 0.11 | -3.00 | 0.61 | 7.33 | 0.11 | -3.09 |
| D | 0.33 | 17.67 | 0.12 | -4.44 | 0.24 | 32.23 | 0.13 | -5.28 | 0.22 | 27.25 | 0.13 | -4.86 | 0.23 | 7.38 | 0.11 | -3.93 |
| E | 0.20 | 16.50 | 0.13 | -4.96 | 0.11 | 31.86 | 0.18 | -6.12 | 0.00 | 27.30 | 0.24 | -5.96 | 0.14 | 7.26 | 0.15 | -4.24 |

3 温度梯度分布规律

为研究高速铁路箱梁-轨道系统中温度梯度的日变化特征,针对截面 I 与截面 II,分别选取各季节天气晴好的典型代表,春季以 4 月 22 日为例,气温 15~27 °C;夏季以 7 月 21 日为例,气温 27~37 °C;秋季以 10 月 17 日为例,气温 13~28 °C;冬季以 1 月 16 日为例,气温 4~1 °C.

3.1 轨道-箱梁整体温度梯度分布规律

由图 3 可知,晴天太阳直射下箱梁-轨道结构升温迅速,各季节截面 I 竖向温度日变化特征基本一致,于 11:00—21:00 前后出现正温度梯度,午后达到最大,春至冬四季 A~G 竖向温差分别为 10.6 °C、13.5 °C、9.5 °C 与 7.2 °C,夜间降温,正温度梯度开始减小;于 01:00—9:00 前后出现负温度梯度,日出前后达到最大,A~G 竖向温差分别为 -3.9 °C、-3.4 °C、-3.2 °C 与 -1.8 °C;其余时刻为正负温度梯度过渡时刻,变化较小.

距离表面 150 mm 范围内温度变化较明显,随着距道床板顶缘距离的增加,热量传递逐渐减弱,各位置温度变化幅度逐渐减小,趋于稳定.

3.2 箱梁温度梯度分布规律

由图 4 可知,各季节箱梁顶板测点竖向温度日变化与截面 I 相似,于 11:00—21:00 前后出现正温

度梯度,四季 H~J 竖向温差分别为 5.3 °C、14.1 °C、3.4 °C 与 2.4 °C,其中箱梁顶板夏季正温度梯度变化明显;于 01:00—9:00 前后出现负温度梯度,H~J 竖向温差分别为 -2.4 °C、-3.4 °C、-2.2 °C 与 -2 °C.由于箱梁底板受翼缘遮盖,温度梯度变化主要受地表辐射与大气散射影响,底板测点 M 温度变化范围较 K 点大,正负温度梯度随时间变化与顶板较为相似,幅值变化较顶板小.

箱梁顶板测点 J 与底板测点 K 距箱梁内表面均为 5 cm,在春季、秋季、冬季两测点温度变化幅值较为接近,约为 3 °C,而夏季由于太阳辐射强,测点 J 变化幅值为 4.5 °C,测点 K 变化幅值为 2 °C.

对比图 3 与图 4 可看出,A 点在四季最大日温差分别为 14.7 °C、15.6 °C、12.1 °C 与 8.7 °C,而 H 点则为 8.3 °C、17.2 °C、6 °C 与 4.6 °C,测点 A 与 H 温差不同,主要原因是由于桥面设置了防水层而道床板顶面未设置,且箱梁内部空气具有保温作用;夏季日照作用强烈,防水层覆盖使桥面热对流效应减小,桥面热量不能及时被外界吸收,从而导致夏季 H 点温差较 A 点大,而其他季节由于日照作用较弱,防水层遮盖效应不明显,使得 H 点温差较 A 点小.

F/G 测点单日温度浮动较小,而 I/J 测点浮动较大,主要原因是由于 F/G 测点受轨道结构遮盖,幅值变化较小,I/J 测点未受遮盖.

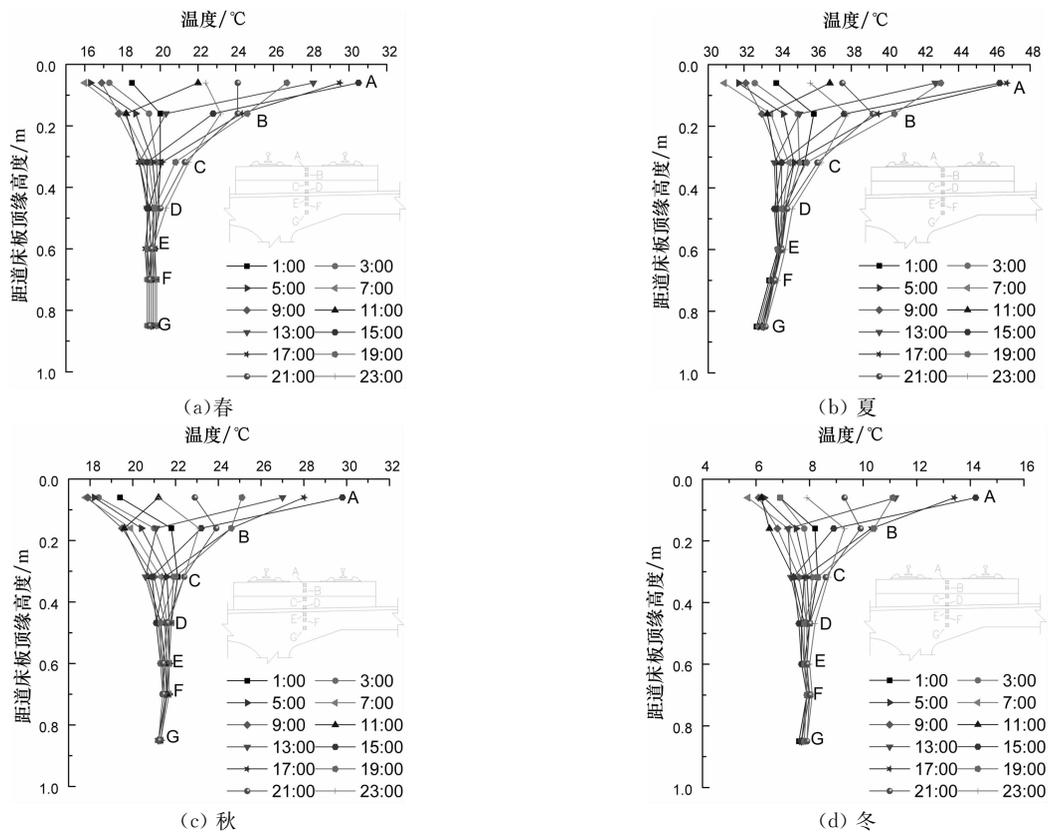


图3 不同季节截面I竖向温度梯度分布

Fig.3 The vertical temperature gradient distributions of section I in different seasons

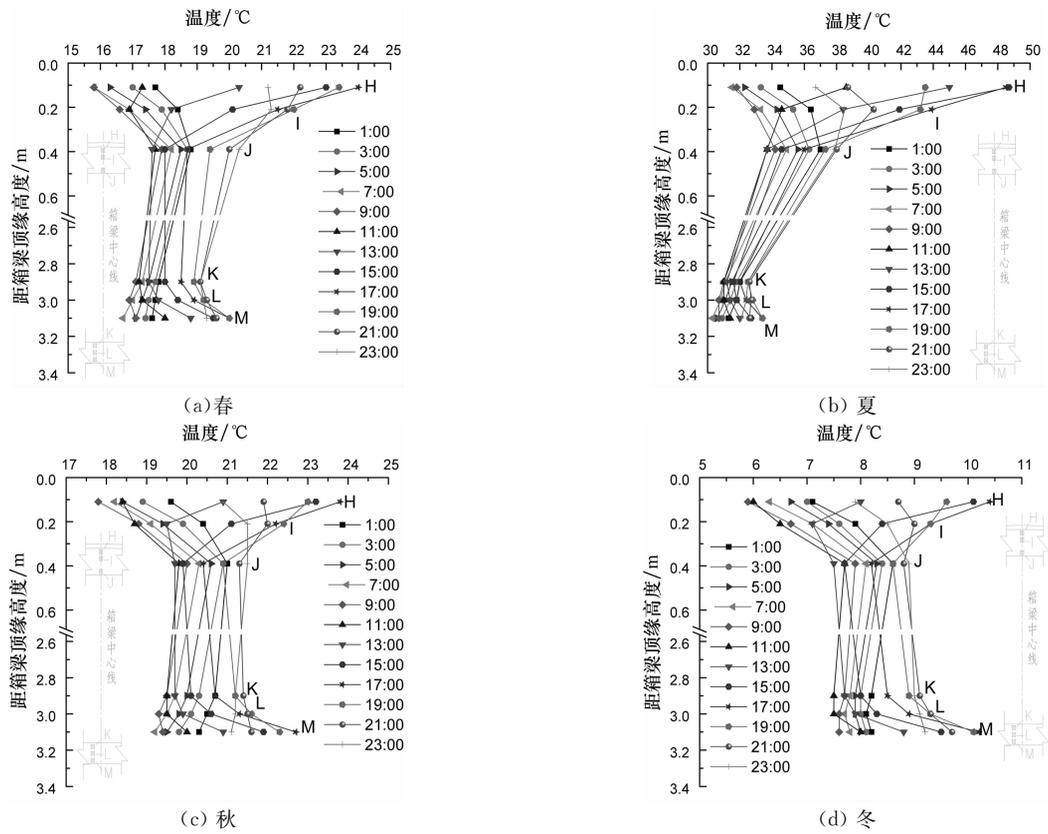


图4 不同季节截面II竖向温度梯度分布

Fig.4 The vertical temperature gradient distributions of section II in different seasons

4 温度梯度拟合模式

根据测点位置进行截面分组,截面 I 各测点位于轨道结构中下部正下方,测点 E、F、G 可作为被轨道结构遮盖的典型测点代表,因此对截面 I 各测点分析,可得到轨道-箱梁整体竖向温度梯度模式;截面 II 各测点位于箱梁顶板与底板中心线位置,为箱

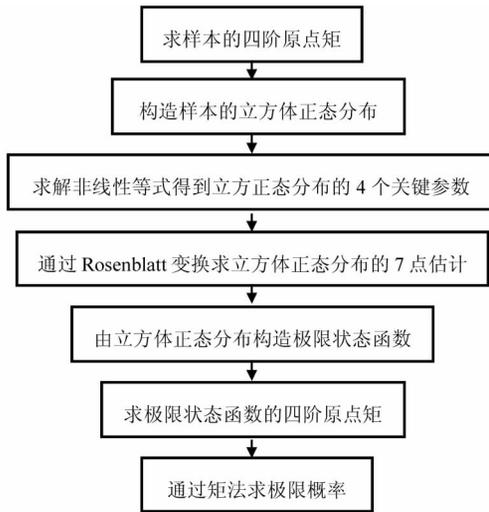


图 5 高阶矩法模型建立过程示意图
Fig.5 The process of establishing the model by Higher Moment Method

梁未被遮盖的典型测点代表,对其分析可得到箱梁竖向温度梯度模式。

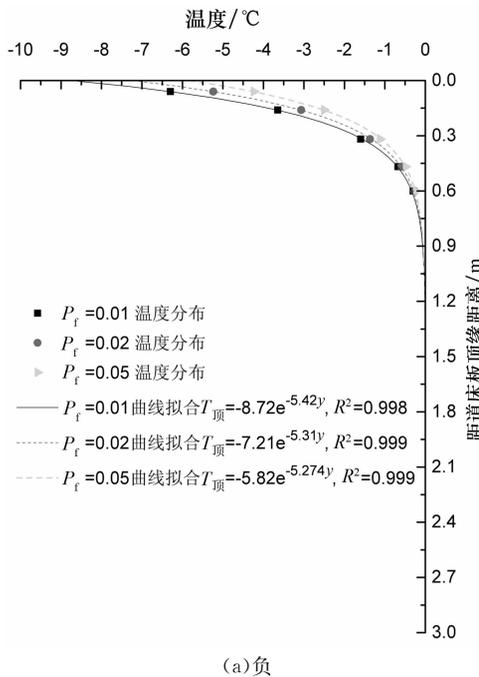
4.1 轨道-箱梁整体温度梯度拟合模式

轨道结构施工结束后,箱梁与轨道形成一个整体,选取全年的有效数据对截面 I 进行竖向梯度模式分析,截面 I 测点 A、B、C、D、E、F 分别与 G 点做差作为统计样本,并将正、负温差单独进行统计,采用高阶矩法建立概率统计模型^[15],取超越概率 0.01、0.02 与 0.05 进行计算,确定了对应重现期 100 年、50 年与 20 年的竖向结构温差代表值,高阶矩模型建立如图 5 所示,计算结果见表 3,拟合曲线如图 6 所示。

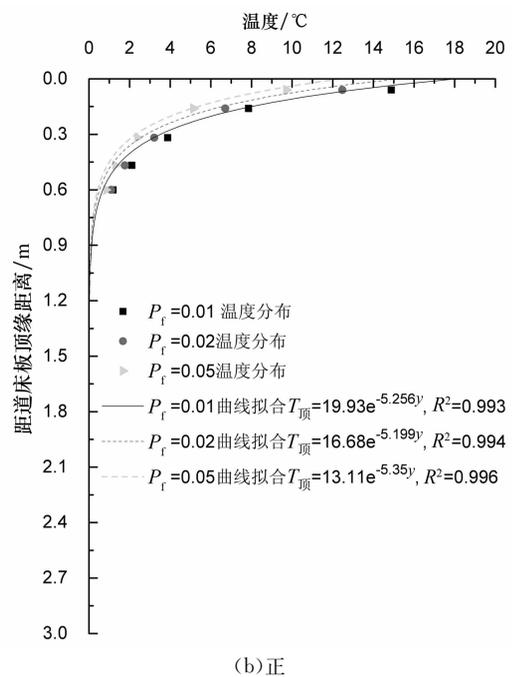
表 3 截面 I 竖向各测点温差代表值

Tab.3 Representative values of the vertical temperature difference of section I

| 距结构顶缘距离/m | 测点号 | 超越概率对应的代表值/°C | | |
|-----------|-----|---------------|-------------|------------|
| | | 0.01 | 0.02 | 0.05 |
| 0.06 | A~G | 14.87/-6.30 | 12.47/-5.24 | 9.71/-4.24 |
| 0.16 | B~G | 7.85/-3.65 | 6.70/-3.07 | 5.14/-2.50 |
| 0.318 | C~G | 3.87/-1.60 | 3.21/-1.37 | 2.38/-1.12 |
| 0.468 | D~G | 2.10/-0.68 | 1.76/-0.60 | 1.30/-0.49 |
| 0.6 | E~G | 1.18/-0.30 | 1.09/-0.27 | 0.84/-0.23 |
| 0.7 | F~G | 0.79/-0.17 | 0.70/-0.12 | 0.58/-0.09 |



(a) 负



(b) 正

图 6 截面 I 竖向温差代表值拟合曲线

Fig.6 Fitting curves of the vertical representative values of temperature difference of section I

由图 6 可知轨道与箱梁结构竖向正、负温度梯度模式拟合结果中相关系数的平方均在 0.99 以上,拟合程度高,具有一定的代表性.

4.2 箱梁温度梯度拟合模式

将截面 II 各测点 H、I、J、L、M 分别与 K 点做差作为箱梁竖向温差统计样本,并将正、负温差单独进行统计,采用高阶矩法建立概率统计模型,取超越概率 0.01、0.02 与 0.05 进行计算,计算结果见表 4,箱梁底

板竖向采用线性形式拟合,拟合曲线如图 7 所示.

由图 7 可知箱梁结构竖向正、负温度梯度模式拟合结果中相关系数的平方均在 0.99 以上,满足精度要求,我国现行铁路桥梁设计规范规定桥梁设计的基准期为 100 年,取超越概率为 0.01,因此对比我国铁路规范^[17]升温模式 $T_y = 16 \times e^{-7y}$,现场测试正温度梯度模式为 $T_y = 18.05 \times e^{-5.46y}$,现行铁路规范温度梯度偏小.

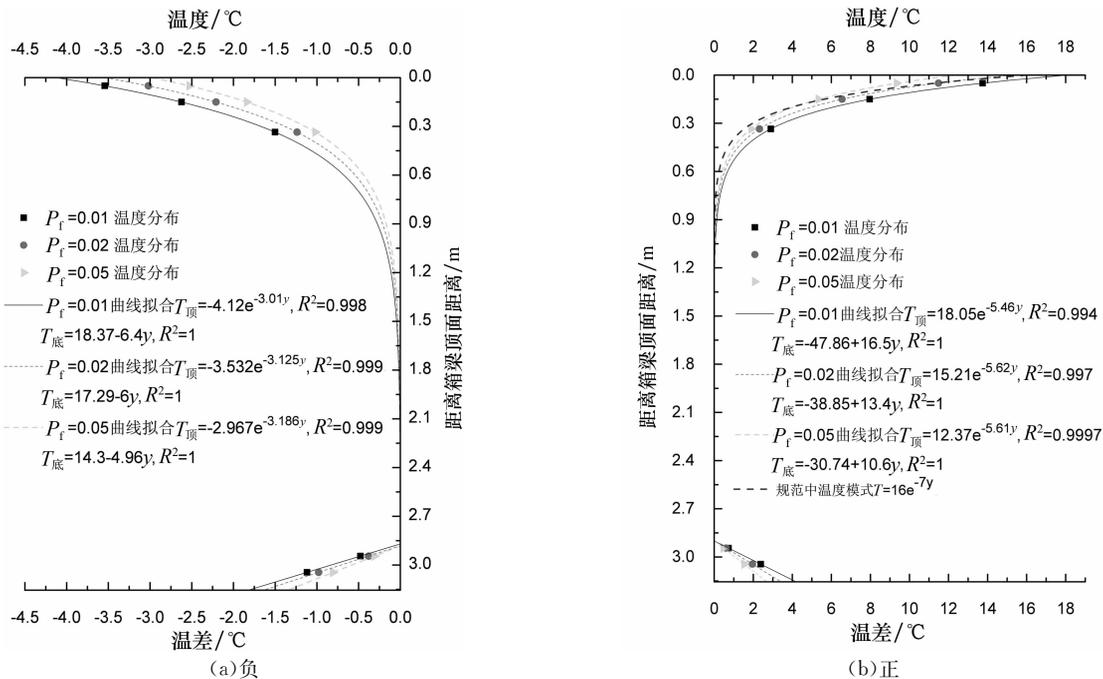


图 7 截面 II 竖向温差代表值拟合曲线

Fig.7 Fitting curves of the vertical representative values of temperature difference of section II

表 4 截面 II 竖向各测点温差代表值

Tab.4 Representative values of the vertical temperature difference of section II

| 距结构顶缘距离/m | 测点号 | 超越概率对应的代表值/°C | | |
|-----------|-----|---------------|-------------|------------|
| | | 0.01 | 0.02 | 0.05 |
| 0.050 | H~K | 13.74/-3.54 | 11.48/-3.02 | 9.34/-2.53 |
| 0.150 | I~K | 7.95/-2.62 | 6.55/-2.21 | 5.33/-1.84 |
| 0.335 | J~K | 2.9/-1.5 | 2.31/-1.24 | 1.89/-1.02 |
| 2.945 | L~K | 0.73/-0.48 | 0.61/-0.38 | 0.48/-0.31 |
| 3.045 | M~K | 2.38/-1.12 | 1.95/-0.98 | 1.54/-0.81 |

5 结论

1)采用一阶傅里叶级数模拟结构晴天温度升降变化特征,拟合程度较高,升温阶段同一季节参数 a 、 b 、 ω 与 φ 自上而下逐渐减小,温度波动幅值 a 随深度增加趋近于 0°C ,均匀温度 b 变化幅值趋近于 3°C ;降温阶段同一季节测点参数 a 、 b 变化规律与升温阶

段相似, ω 与 φ 的绝对值自上而下逐渐增大.

2)各季节截面 I 竖向温度日变化特征基本一致,于 11:00—21:00 前后出现正温度梯度,于 01:00—9:00 前后出现负温度梯度,距离表面 150 mm 范围内温度变化较明显;截面 II 箱梁顶板与底板温度梯度变化与截面 I 类似,但底板温度变化幅值较顶板小.由于桥面设置了防水层且箱梁内部空气具有保温作用,从而导致夏季 H 点差值较 A 点大,而其他季节由于日照作用较弱,防水层遮盖效应不明显,使得 H 点差值较 A 点小.

3)对截面 I 各测点温差样本进行高阶矩统计模型计算,轨道与箱梁整体竖向对应超越概率 0.01 的正负温差代表值分别为 14.87°C 与 -6.3°C ,采用指数形式对竖向正负温差代表值进行拟合,得出轨道与箱梁整体竖向温度梯度模式,如图 6 所示.

4)对截面 II 各测点温差样本进行高阶矩统计模型计算,箱梁顶板对应超越概率 0.01 的正负温差

代表值分别为 $13.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-3.54\text{ }^{\circ}\text{C}$, 底板为 $2.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-1.12\text{ }^{\circ}\text{C}$. 采用指数形式对箱梁顶板竖向正负温差代表值进行拟合, 其分布规律在形式上与中国铁路桥梁规范相接近. 采用线性形式对底板温差代表值进行拟合. 两种拟合形式相关系数的平方均在 0.99 以上, 可为规范修正与桥梁设计提供参考.

参考文献

- [1] TB 10621—2014 高速铁路设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2014: 10—27.
TB 10621—2014 Code for design of high speed railway[S].Beijing:China Railway Press,2014: 10—27.(In Chinese)
- [2] 周志敏.高速铁路箱梁日照温度场分布规律及计算模式研究[D].长沙:中南大学土木工程学院,2011:14—31.
ZHOU Z M.Studies on distribution and computing model of sunshine temperature field for high-speed railway box girder bridge[D].Changsha: School of Civil Engineering, Central South University,2011:14—31.(In Chinese)
- [3] ELBADRY M M,GHALI A.Temperature variations in concrete bridges[J].Journal of Structural Engineering,1983,109(10): 2355—2374.
- [4] BARR P J,STANTON J F,EBERHARD M O.Effects of temperature variations on precast, prestressed concrete bridge girders [J].Journal of Bridge Engineering,2005,10(2): 186—194.
- [5] 汪剑,方志.混凝土箱梁桥的温度分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2008,35(4): 23—28.
WANG J,FANG Z.Temperature variation of concrete box girder bridge[J].Journal of Hunan University(Natural Sciences),2008,35(4):23—28.(In Chinese)
- [6] 刘钰,赵国堂.CRTSII 型板式无砟轨道结构层间早期离缝研究[J].中国铁道科学,2013,34(4):1—7.
LIU Y,ZHAO G T.Analysis of early gap between layers of CRTS II slab ballastless track structure[J].China Railway Science,2013,34(4): 1—7.(In Chinese)
- [7] 邵丕彦,李海燕,吴韶亮,等.CRTS I 型轨道板温度变形及与砂浆垫层间离缝的测试研究[J].中国铁道科学,2013,34(2):18—22.
SHAO P Y,LI H Y,WU S L,*et al.*Measurement and research on temperature warping of CRTS I track slab and crack between track slab and cement asphalt mortar cushion[J].China Railway Science,2013,34(2):18—22.(In Chinese)
- [8] 王成晓.CRTS III 型板式无砟轨道力学特性研究[D].北京:北京交通大学土木建筑工程学院,2011: 19—25.
WANG C X.Study on mechanical characteristics of CRTS III type slab ballastless track [D].Beijing: School of Civil Engineering,Beijing Jiaotong University,2011: 19—25.(In Chinese)
- [9] 赵坪锐,刘学毅,杨荣山,等.双块式无砟轨道温度荷载取值方法的试验研究[J].铁道学报,2016,38(1): 92—97.
ZHAO P R,LIU X Y,YANG R S,*et al.*Experimental study of temperature load determination method of bi-block ballastless track [J].Journal of the China Railway Society,2016,38(1): 92—97.(In Chinese)
- [10] 戴公连,苏海霆,闫斌.秋季桥上纵连板式无砟轨道竖向温差试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(3):94—99.
DAI G L,SU H T,YAN B.Experimental study on the vertical temperature gradient of longitudinally connected slab ballastless track on bridge in autumn[J].Journal of Hunan University(Natural Sciences),2015,42(3):94—99.(In Chinese)
- [11] 欧祖敏,孙璐,周杰,等.基于概率需求的高速铁路无砟轨道板温度荷载取值研究 I:轴向均匀温度作用[J].铁道学报,2016,36(2):96—104.
OU Z M,SUN L,ZHOU J,*et al.*Probability value of temperature loads for ballastless track slab of high speed railway: axial uniform thermal actions[J].Journal of the China Railway Society,2016,36(2):96—104.(In Chinese)
- [12] 闫斌,戴公连,苏海霆.基于气象参数的轨道板竖向温度梯度预测模型[J].华南理工大学学报(自然科学版),2014,42(12): 9—13.
YAN B,DAI G L,SU H T.A meteorological parameters-based prediction model of vertical temperature gradient of track plate [J].Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),2014,42(12): 9—13.(In Chinese)
- [13] 陶翀,谢旭,申永刚,等.基于概率分析的混凝土箱梁温度梯度模式[J].浙江大学学报(工学版),2014,48(8):1353—1361.
TAO C,XIE X,SHEN Y G,*et al.*Study on temperature gradient of concrete box girder based on probability analysis[J].Journal of Zhejiang University(Engineering Science),2014,48(8):1353—1361.(In Chinese)
- [14] 方志,汪剑.大跨预应力混凝土连续箱梁桥日照温差效应[J].中国公路学报,2007,20(1):62—67.
FANG Z,WANG J.Sun light thermal difference effect on long span PC continuous box girder bridge [J].China Journal of Highway and Transport,2007,20(1):62—67.(In Chinese)
- [15] ZHAO Y G.Moment methods for structural reliability[J].Structural Safety,2001,23(1):47—75.
- [16] 潘文杰.傅里叶分析及其应用[M].北京:北京大学出版社,2000:27—77.
PAN W J.Fourier analysis and its applications[M].Beijing:Pe-king University Press,2000:27—77.(In Chinese)
- [17] TB 10002.1—2005 铁路桥涵设计基本规范[S].北京:中国铁道出版社,2005:1—25.
TB 10002.1—2005 Fundamental code for design on railway bridge and culvert[S].Beijing:China Railway Press,2005:1—25.(In Chinese)