

# 基于高阶矩法的梁-轨系统温度作用代表值

朱俊樸<sup>1,2</sup>, 戴公连<sup>1</sup>, 苏海霆<sup>1</sup>, 梁金宝<sup>1</sup>

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中国建筑股份有限公司基础设施事业部, 北京 100044)

**摘 要:** 提出了一种基于高阶矩法的结构温度统计方法, 可避免传统方法拟合曲线求分布的不确定性, 计算效率、精度高. 基于我国华东一高铁桥梁长期监测数据, 将箱梁和轨道作为整体, 计算了其竖、横向温度和温差代表值, 分析了温度云图和温差分布规律, 研究了轨道结构对箱梁表面温度的遮盖效应. 研究表明: 结构年温度样本属中变异, 分布规律平稳; 高温标准值分别为 35.4 °C, 38.15 °C, 竖向最大高温梯度分别为 10.33 °C, 12.93 °C; 混凝土竖向有效导热长度约为 60 cm, 轨道遮盖可降低箱梁表面温度 4.4 °C.

**关 键 词:** 高阶矩法; 桥梁工程; 轨道工程; 温度作用代表值; 高速铁路

中图分类号: U 24

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)08-1195-06

## Representative Values of Temperature Action of the Box Girder-Track System Based on the Higher-Order Moment Method

ZHU Jun-pu<sup>1,2</sup>, DAI Gong-lian<sup>1</sup>, SU Hai-ting<sup>1</sup>, LIANG Jin-bao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Civil Infrastructure Operations Dept., China State Construction Engineering Corp. LTD, Beijing 100044, China. Corresponding author: ZHU Jun-pu, E-mail: zhujunpu@gmail.com)

**Abstract:** A structure temperature statistical method was proposed based on the higher-order moment method, which can avoid the uncertainty of the traditional fitting curve method to seeking a distribution as well as can reach a high computational efficiency and accuracy. Based on the long-term monitoring data of a high speed railway bridge in the east China area, by taking box girder and track as an integrated system, the representative values of temperature and its difference in vertical and horizontal direction were calculated. The temperature distribution nephogram and the temperature-difference distribution rules were analyzed. The covering effect of track on the temperature of the box girder surface was studied. Results show that the annual temperature sample of the girder-track system has a middle variability. The distribution is relatively stable with a high temperature standard values of 35.4 °C and 38.15 °C respectively. The largest vertical temperature gradients are 10.33 °C and 12.93 °C respectively. The vertical effective thermal conductivity length of the concrete is approximate 60 cm, and the covering effect of the track on the box-girder surface temperature is 4.4 °C declined.

**Key words:** higher-order moment method; bridge engineering; railway engineering; temperature action representative value; high speed railway

气温和日照对高铁混凝土箱梁-轨道系统温度场影响较大, 温度作用使混凝土结构产生温度应力而开裂, 影响耐久性, 大温差将引起轨道板上拱, 影响列车运行安全. 研究高铁梁-轨系统温度作用代表值, 得到合理的梁-轨系统温度荷载模

式有较大的现实意义.

混凝土结构的温度作用是一个随机过程, Ho等<sup>[1]</sup>按照 50 年的重现期, 把混凝土箱梁的温度作用当作随机变量进行计算; Lucas 等<sup>[2]</sup>认为桥梁温度作用是包含地理信息和季节相关的随机变量

之和,得到了混凝土桥梁温度的标准值和准永久值.随着结构可靠度理论的发展,Zhao 等<sup>[3]</sup>将高阶矩法与可靠度指标结合,进一步完善了结构可靠度理论.国内的一些学者对混凝土桥梁的温度作用做了大量卓有成效的研究<sup>[4-7]</sup>,但往往依据实测数据的拟合曲线求其分布,以得出一定保证率的温度作用代表值,其曲线的拟合方程受不同方法、数据量大小和监测时间的影响较大,从统计学的角度来说该方法也欠妥当.

对于温度作用代表值或荷载模式的计算方法,我国《高速铁路设计规范》<sup>[8]</sup>采用的是传统的容许应力设计法,通过降低材料强度以保证结构的使用可靠性,难以真实反映结构的可靠程度.我国《公路工程结构可靠度统一设计标准》<sup>[9]</sup>采用以可靠度理论为基础的极限状态设计法,但该方法忽略了基本变量的时间性,以近似方法确定统计量分布,为简化计算将非线性极限状态方程线性化,具有一定局限性.我国《建筑结构可靠度设计统一标准》<sup>[10]</sup>计算可靠度时采用了一次二阶矩法,该方法需要求出极限状态函数的验算点,涉及一系列曲线多次求导,计算量大.

为研究高铁梁-轨系统的温度作用代表值,本文将箱梁和轨道进行一体化分析.采用基于结构可靠度理论的高阶矩法分析桥梁结构温度作用代表值,以一至四阶矩代替温度曲线拟合,突破了传统方法拟合曲线的局限性,也避免了一次二阶矩法的繁琐求导过程.根据某客运专线长达一年的实测数据进行分析统计,提出了适用于我国南方地区的高铁梁-轨系统温度作用代表值.

## 1 高阶矩法基本计算模式

对任何一个随机变量的观测样本序列 $G(x)$ ,通过计算前四阶原点矩和中心矩可得均值 $\mu_G$ ,方差 $\sigma_G$ ,偏度 $\alpha_{3G}$ ,峰态 $\alpha_{4G}$ .无论随机变量样本符合何种分布,均可用其一至四阶矩来描述样本的分布特征.对于工程结构来说,通过一至四阶原点矩刻画随机变量一般可满足精度需求.

由于桥梁温度监测跨越时间长,其温度分布因测点位置不同、监测时间长短而异,很难通过短期监测来准确描述.对此,可假设其温度分布未知,而通过点估计构造立方体正态分布<sup>[11]</sup>以拟合一个假分布 $T(x)$ 来研究其极限温度.

基于 Fleishman 多项式正态转换:

$$\frac{X-\mu_G}{\sigma_G} = S_U(U) = a_1 + a_2U + a_3U^2 + a_4U^3. \quad (1)$$

式中 $\mu_G$ 和 $\sigma_G$ 为样本 $G(x)$ 的均值和标准差,假分布的分布函数 $T(X)$ 及概率密度函数 $t(x)$ 为

$$T(X) = \Phi(U), \quad (2a)$$

$$t(x) = \frac{\varphi(u)}{\sigma_G(a_2 + 2a_3u + 3a_4u^2)}. \quad (2b)$$

式中: $a_1, a_2, a_3, a_4$ 为统计参数; $\Phi(U)$ 为标准正态分布的分布函数; $\varphi(u)$ 为标准正态分布的概率密度.

令 $X_S = (X - \mu_G)/\sigma_G$ ,统计参数可表示为

$$a_1 + a_3 = 0,$$

$$a_2^2 + 2a_3^2 + 6a_2a_4 + 15a_4^2 = 0,$$

$$6a_2^2a_3 + 8a_3^2 + 72a_2a_3a_4 + 270a_3a_4^2 = \alpha_{3G},$$

$$3(a_2^4 + a_3^3a_4 + 210a_2^2a_4^2 + 1\,260a_2a_4^3 + 3\,465a_4^4) + 12a_3^2(5a_2^2 + 5a_3^2 + 78a_2a_4 + 375a_4^2) = \alpha_{4G}. \quad (3)$$

在标准正态分布中,常以均值和均值附近的前三阶标准差对应的点估计作为描述分布的重要指标,即 $u_0, u_{1\pm}, u_{2\pm}, u_{3\pm}$ .通过 Rosenblatt 变换,可由标准正态分布的 7 点估计变换求出立方体正态分布的 7 点估计<sup>[12]</sup>.

$$x_i = \mu_i + \sigma_i(a_1 + a_2u_{i\pm} + a_3u_{i\pm}^2 + a_4u_{i\pm}^3). \quad (4)$$

设考虑极限温度后的分布函数为 $T'(x)$ ,设极限温度为 $\Delta$ ,则可构造考虑极限温度后的功能函数如下:

$$T'(x) = \Delta - T(x). \quad (5)$$

对任一随机变量函数样本 $G(x)$ ,若其联合密度函数为 $f(x)$ ,则其均值和 $k$ 阶中心矩分别为

$$\mu_G = \int G(x)f(x)dx, \quad (6a)$$

$$M_{k,G} = \int [G(x) - \mu_G]^k f(x)dx, k \geq 2. \quad (6b)$$

通过正反 Rosenblatt 变换,功能函数 $T'(x)$ 的 $k$ 阶中心矩可由以下公式求得:

$$\mu_Y = \sum_{j=1}^m P_j y[T^{-1}(u_j)], \quad (7a)$$

$$M_{k,Y} = \sum_{j=1}^m P_j \{y[T^{-1}(u_j)] - \mu_Y\}^k. \quad (7b)$$

其中, $y[T^{-1}(u_j)] = x_i - \Delta$ .变换后可得 $T'(x)$ 的 $k$ 阶原点矩为

$$\mu_Y = \sum_{j=1}^m P_j y[T^{-1}(u_j)], \quad (8a)$$

$$\sigma_Y^2 = \sum_{j=1}^m P_j \{y[T^{-1}(u_j)] - \mu_Y\}^2, \quad (8b)$$

$$\sigma_Y^k \alpha_{kY} = \sum_{j=1}^m P_j \{y[T^{-1}(u_j)] - \mu_Y\}^k, k \geq 3. \quad (8c)$$

由式(8a)~(8c)可求得 $T'(x)$ 的 $\mu_Y, \sigma_Y, \alpha_{3Y}, \alpha_{4Y}$ .

由结构可靠度理论,极限温度的超越概率可由高阶矩可靠指标公式求解.其可靠指标 $\beta_{FM}$ 和

超越概率  $P_{\text{fFM}}$  分别为

$$\beta_{\text{FM}} = \frac{3(\alpha_{4Y} - 1)\beta_{\text{SM}} + \alpha_{3Y}(\beta_{\text{SM}}^2 - 1)}{\sqrt{(9\alpha_{4Y} - 5\alpha_{3Y}^2 - 9)(\alpha_{4Y} - 1)}}, \quad (9a)$$

$$P_{\text{fFM}} = \Phi(-\beta_{\text{FM}}). \quad (9b)$$

其中  $\beta_{\text{FM}} = \mu_G / \sigma_G$ .

根据上述方法,可计算给定极限温度  $\Delta$  的超越概率  $P_{\text{fFM}}$ ,其计算流程可见图 1.

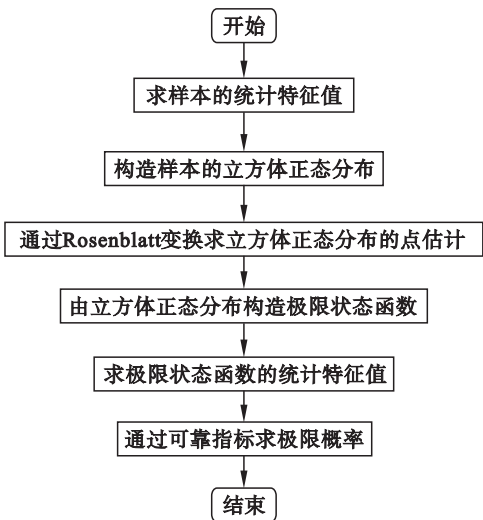


图 1 高阶矩法计算流程图

Fig. 1 Computational flow chart of the higher-order moment method

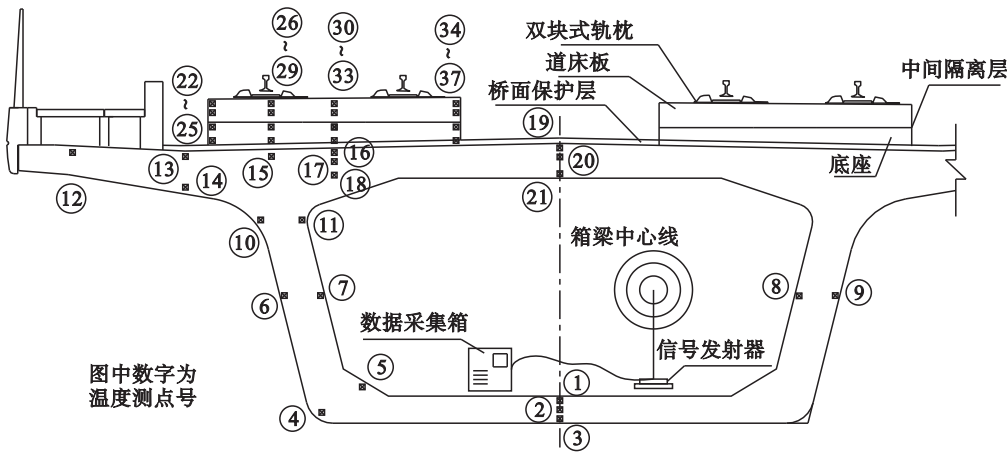


图 2 断面及测点布置图

Fig. 2 Section and the arrangement of monitoring points

$\mu_G = 18.422\,53, \sigma_G = 9.244\,106,$   
 $\alpha_{3G} = -0.243\,64, \alpha_{4G} = 1.704\,973.$   
构造  $G(x)$  的假分布函数,由式(3)计算参数,通过非线性等式求解器 Mathematica 计算得:  
 $a_1 = 0.069\,04, a_2 = 1.221\,3, a_3 = -0.069\,04,$   
 $a_4 = -0.084\,15.$  则假分布函数和概率密度函数为

$$T(X) = \int_0^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (10a)$$

## 2 观测断面及测点布置

以我国东南地区客运专线某桥 32 m 简支梁为工程背景,该桥位于东经  $118^\circ 2' 27''$ ,北纬  $28^\circ 14' 3''$ ,桥梁轴向走向为  $9.5^\circ$ ,支架现浇施工.通过在浇筑前预埋温度计的方法布置测点.数据采集箱置于箱梁内,以无线传输的方式向计算机传输数据.断面及测点布置见图 2.

箱梁－轨道系统共布置 37 个温度测点.箱梁浇筑于 2013 年 12 月,轨道系统施工时间晚 3 个月,监测时长 1 年,从 2014 年 1 月 1 日 0 时起至 2014 年 12 月 31 日 24 时止,采样频率 0.5 h.除个别时段由于仪器故障等原因导致数据缺失,各测点均获得了大量有效数据.以箱梁底板顶缘测点 1 为例,共采集有效数据 14 290 个,其时程曲线见图 3.

## 3 箱梁－轨道系统温度代表值的确定

### 3.1 计算算例

以箱梁底板上表面测点 1 为算例,计算保证率 95% 即超越概率 0.05 所对应的温度代表值.样本  $G(x)$  的统计特征值为

$$t(x) = \frac{(1/\sqrt{2\pi})e^{-\frac{x^2}{2}}}{\sigma(1.24 - 0.12x - 0.27x^2)}. \quad (10b)$$

标准正态分布的 7 点估计为  $u_1 \sim u_7$ ,通过 Rosenblatt 变换,即  $\Phi(u_i) = T(x_i)$ ,求出立方体正态分布的 7 阶点估计  $x_1 \sim x_7$ :

$$\begin{aligned} x_0 &= 18.977\,18, \\ x_{1+} &= 30.190\,7, x_{1-} = 6.285\,352, \\ x_{2+} &= 31.969\,88, x_{2-} = -0.229\,28, \\ x_{3+} &= 10.276\,94, x_{3-} = 12.074\,33. \end{aligned}$$

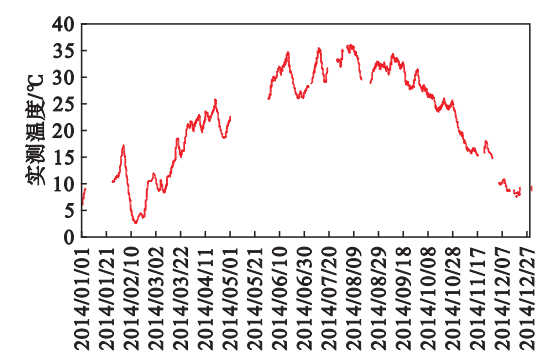


图3 测点1监测数据时程曲线图  
Fig. 3 Measured data of monitoring point 1

构造极限状态函数  $T'(x) = \Delta - T(x)$ , 由式 (7) ~ (8) 可得  $T'(x)$  的  $\mu_Y = 14.177\,47$ ;  $\sigma_Y = 9.228\,842$ ;  $\alpha_{3Y} = 0.2053\,87$ ;  $\alpha_{4Y} = 2.009\,604$ .

超越概率取  $P_{\text{FM}} = \Phi(-\beta_{\text{FM}}) = 0.05$ , 由式 (10) 可求得可靠指标及其对应温度代表值:  $\beta_{\text{FM}} = 1.647\,668\,854$ ;  $\Delta = 32.45\,^{\circ}\text{C}$ .

在结构可靠度研究中,常以标准值、准永久值和频遇值来衡量结构的可靠程度,我国《公路工程结构可靠度统一设计标准》<sup>[9]</sup>和《建筑结构可靠度设计统一标准》<sup>[10]</sup>都对此进行了规定.我国铁路规范未规定温度作用标准值取法,本文根据《欧洲结构设计标准 I:结构作用和基本设计》<sup>[13]</sup>中第 2.5 节的规定取值,取重现期 50 年.若按我国《公路桥涵设计通用规范》<sup>[14]</sup>设计基准期 100 年计算,基准期内最大温度作用超过特征值次数的数学期望为 2 次,即超越概率可取  $2/100 = 2\%$ .

可变作用的准永久值根据作用在足够长的观测期内达到或超过该值的总持续时间与观测期的某一比值确定,取为 0.5,即超越概率为 50%.

可变作用的频遇值可根据作用在足够长观测期内达到或超过该值的总持续时间与观测期的较小比值确定,可取 0.05. 据此可得测点 1 的温度作用代表值见表 1.

表 1 测点 1 的温度作用代表值 Table 1 Representative values of the temperature action at measuring point 1			
代表值名称	标准值	频遇值	准永久值
上位值/ $^{\circ}\text{C}$	35.4	32.45	19.58
下位值/ $^{\circ}\text{C}$	0.37	4.58	19.58

3.2 Monte Carlo 精确度验证

Monte Carlo 模拟统计方法的基本思想是当数据量极大时,超过某数值对应样本个数所占全样本数的比例即约等于其概率.设极限概率

为  $P_f$ :

$$P_f = \frac{n[G(x_k) \leq 0]}{N} \tag{11}$$

该法在样本数量巨大时,精确度较高,根据 Monte Carlo 统计思想,大于标准值的温度值所占样本个数的比例应接近 2%,且样本数量越多时,大于标准值的温度值数量比例就越接近 2%,当样本量达上百万数量级时,比例基本稳定在 2% 左右.取代表测点进行计算,可得各点与 Monte Carlo 2% 分位值的比较,见表 2.

表 2 温差标准值与 Monte Carlo 2% 分位值比较  
Table 2 Comparison between the standard values of the temperature difference and the 2% Monte Carlo tantile values

测点位置	测点号	标准值/ $^{\circ}\text{C}$	大于标准值的样本比例
底板上缘	1	35.4	401/14 290 = 0.028
腹板中部	6	35.17	415/14 111 = 0.029
箱梁梁腋	18	39.93	186/11 363 = 0.016
顶板上缘	19	45.01	448/11 403 = 0.039
底座下侧	33	38.15	455/11 840 = 0.038
轨道板顶	30	41.76	426/13 279 = 0.032

在数据采集样本量 1.5 万左右时,可以看出各测点温差值比例与 2% 较为接近,且没有过大的差距,可认为本文计算的温差统计值有一定准确度.

4 箱梁-轨道系统温度代表值分布特征

为研究高铁箱梁-轨道整体系统温度统计分布状况,可得到结构各部位典型测点的温度代表值见表 3,运用绘图软件可得到箱梁-轨道整体系统在高温和低温下的温度标准值分布云图,见图 4.

表 3 各典型测点的温度代表值表  
Table 3 Representative values of the temperature action on each typical monitoring points  $^{\circ}\text{C}$

测点位置	测点号	标准值	频遇值	准永久值
底板上缘	1	35.4/0.37	32.45/4.58	19.58
腹板中部	6	35.17/0.66	32.3/4.87	19.7
箱梁梁腋	18	39.93/-1.06	35.88/3.05	19.5
顶板上缘	19	45.01/1.38	39.31/4.86	20.27
底座下侧	33	38.15/0.23	34.82/4.57	20.52
轨道板顶	30	41.73/1.02	37.54/4.93	20.93

注:“/”前后数值分别为上位值和下位值.



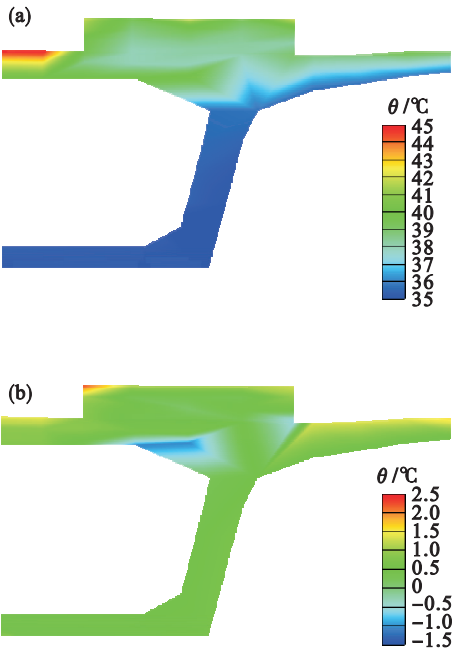


图 4 标准值分布云图  
Fig. 4 Cloud chart of the standard value  
(a)—高温；(b)—低温.

通过计算可知,箱梁和轨道结构年温度样本变异系数分别为 43.1% 和 61.7%,属中变异,分布规律平稳,高温标准值分别为 35.4 ℃ 和 38.15 ℃.在年气温变化中,高温对梁－轨系统影响大,由于混凝土导热的非线性特点,轨道与箱梁表面温度较高,靠近箱梁下部区域温度较低,腹板以下区域温度已较为稳定,说明太阳直接辐射对于混凝土表面温度有较大影响.对于低温标准值云图而言,低温对混凝土结构内外温度影响较小,整个箱梁－轨道结构温度相近,温度最高点出现在轨道板表面,温度最低点出现在箱梁梁腋范围内.此外,从云图可看出混凝土竖向的有效导热长度约为 60 cm.

### 5 箱梁－轨道系统温差代表值分布特征

温差作用是导致混凝土开裂的重要原因,而结构不同部位的温差是相对值,其随时间的变化也是具有时间序列特点的随机游走过程.本节分别计算箱梁、轨道结构竖、横向最大正、负温差代表值,并考虑轨道结构对箱梁表面遮盖导致的梁体上缘最大正、负温差改变情况.

对箱梁而言,在日照作用下全梁升温,其温度最低点为底板顶缘的测点 1,以此作为竖向温差计算基准点,则最大温差可用顶板顶缘测点 19 减测点 1 的差值作为样本.横向布置的四组测点分

别计算横向温差,取最大值作为横向最大温差.轨道结构竖向最大温差可取测点 30~33 的温差值为样本,横向最大温差取底座测点 24~32,36~32,25~33,37~33 的最大值为样本.轨道遮盖前后对箱梁顶缘温差有一定影响,取测点 16~1 在轨道结构安装前后的监测数据分别计算.可得箱结构最大温差分类见图 5,各组最大温差代表值见表 4.

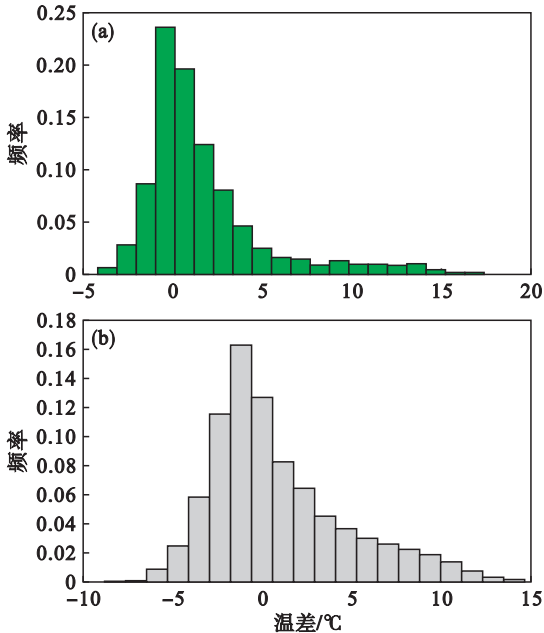


图 5 箱梁和轨道结构最大温差柱状统计图  
Fig. 5 Histogram of the maximum temperature difference of the box girder and the track  
(a)—箱梁；(b)—轨道.

表 4 各位置最大温差代表值  
Table 4 Representative values of the maximum temperature difference at different locations ℃

位置	标准值	频遇值	准永久值
箱梁竖向	10.33/ -2.67	8.39/ -2.17	2.61/ -0.84
箱梁横向	2.24/ -1.37	1.81/ -1.07	0.65/ -0.45
轨道竖向	12.93/ -5.25	9.72/ -4.26	3.38/ -1.81
轨道横向	3.59/ -3.31	3.05/ -2.66	1.23/ -1.05
轨道遮盖前箱梁	8.49/ -3.56	6.73/ -2.84	2.2/ -1.15
轨道遮盖后箱梁	4.09/ -2.6	3.53/ -2.03	1.44/ -0.77

注：“/”前后数值分别为上位值和下位值.

由表 4 可知,箱梁年竖向最大温差标准值可达 10.33 ℃;由于横向受日照作用影响较小,故其横向温差亦较小.轨道结构尺寸较小,竖向高度仅 50 cm,太阳直射下竖向降温迅速,其最大温差标准值为 12.93 ℃;轨道结构横向尺寸 280 cm,底座板核心处混凝土温度较低,取为横向温差计算基点,可得横向最大温差为 3.59 ℃.轨道遮盖效应

对箱梁表面温度影响较大,轨道结构施工后,箱梁表面测点 16 ~1 最大温差标准值降低 4. 4 ℃.

## 6 结 论

1) 提出了一种高速铁路箱梁 – 轨道系统温度作用代表值的统计方法. 该方法绕开了传统方法拟合温度曲线的步骤,避免了由曲线拟合求分布的不确定性,直接通过一至四阶矩计算超越概率及其对应温度值,且计算效率高,有一定的优越性.

2) 基于长期监测数据,以华东地区一高速铁路简支梁桥为例,箱梁和轨道结构年高温标准值分别为 35. 4 ℃ 和 38. 15 ℃ ,得出了箱梁 – 轨道系统温度分布云图,太阳直接辐射对于混凝土表面温度有较大影响,而低温对结构各处温度影响较小,混凝土轨道竖向有效导热长度约为 60 cm.

3) 箱梁和轨道结构竖向最大高温梯度分别为 10. 33 ℃ 和 12. 93 ℃ ,横向梯度均较小,轨道遮盖效应对箱梁表面温度影响较大,可降低表面温度 4. 4 ℃ .

### 参考文献:

[ 1 ] Ho D, Liu C H. Extreme thermal loadings in highway bridges [ J ]. *Journal of Structural Engineering*, 1989, 115 ( 7 ): 1681 – 1696.

[ 2 ] Lucas J M, Berred A, Louis C. Thermal actions on a steel box girder bridges [ J ]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers; Structures and Buildings*, 2003, 156 ( 2 ): 175 – 182.

[ 3 ] Zhao Y G, Ono T. Moment methods for structural reliability [ J ]. *Structural Safety*, 2001, 23 ( 1 ): 47 – 75.

[ 4 ] 肖建庄, 宋志文, 赵勇. 基于气象参数的混凝土结构日照温度作用分析 [ J ]. *土木工程学报*, 2010, 43 ( 4 ): 30 – 37. ( Xiao Jian-zhuang, Song Zhi-wen, Zhao Yong. Analysis of solar temperature action for concrete structure based on meteorological parameters [ J ]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43 ( 4 ): 30 – 37. )

[ 5 ] 丁幼亮, 王高新, 周广东. 基于长期监测数据的润扬大桥扁平钢箱梁温度分布特性 [ J ]. *中国公路学报*, 2013, 26 ( 4 ): 94 – 104. ( Ding You-liang, Wang Gao-xin, Zhou Guang-dong.

Temperature distribution on flat steel box girders of Runyang bridges based on long-term measurement data [ J ]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26 ( 4 ): 94 – 104. )

[ 6 ] 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 – 1110. ( Lei Xiao, Ye Jian-shu, Wang Yi. Representative value of solar thermal difference effect on PC box-girder [ J ]. *Journal of Southeast University ( Natural Science Edition )*, 2008, 38 ( 6 ): 1105 – 1110. )

[ 7 ] 陶翀. 混凝土箱梁温度场实测研究及概率统计分析 [ D ]. 杭州: 浙江大学, 2014. ( Tao Chong. Observation research and probability statistical analysis on temperature field of concrete box girder [ D ]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. )

[ 8 ] 高速铁路设计规范 ( 试行 ): TB10621—2009 [ S ]. 北京: 中国铁道出版社, 2009. ( Code for design of high speed railway: TB10621—2009 [ S ]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009. )

[ 9 ] 公路工程结构可靠度统一设计标准: GB/T 50283—1999 [ S ]. 北京: 中国计划出版社, 1999. ( Unified standard for reliability design of highway engineering structures: GB/T 50283—1999 [ S ]. Beijing: China Planning Press, 1999. )

[ 10 ] 建筑结构可靠度设计统一标准: GB 50068—2001 [ S ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. ( Unified standard for reliability design of building structures: GB 50068—2001 [ S ]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. )

[ 11 ] Zhao Y G, Lu Z H. Cubic normal distribution and its significance in structural reliability [ J ]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2008, 28 ( 3 ): 263 – 280.

[ 12 ] Zhao Y G, Ono T. New point estimates for probability moments [ J ]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126 ( 4 ): 433 – 436.

[ 13 ] European Committee for Standardization. Eurocode 1: actions on structure on bridges [ S/OL ]. [ 2016 – 01 – 12 ]. <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.pnp?id=332#EN/991>.

[ 14 ] 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2004 [ S ]. 北京: 人民交通出版社, 2004. ( General code for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2004 [ S ]. Beijing: China Communications Press, 2004. )