

基于统计理论的桥梁应力趋势预测与评估方法

涂雪¹, 熊文², 肖汝诚¹, 沈旭东³, 魏乐永⁴

(1. 同济大学 桥梁工程系, 200092 上海; 2. 东南大学 交通学院 桥梁工程系, 210096 南京;
3. 浙江省交通规划设计研究院, 310006 杭州; 4. 中交公路规划设计院, 100085 北京)

摘要: 针对监测应力的复杂构成及监测数据较低的使用效率, 提出一种基于统计理论的新型桥梁应力趋势预测评估方法. 该方法主要基于统计理论, 将季节性荷载、随机性荷载产生的应力从应力监测值中分离, 然后准确观测并拟合结构退化所引起的应力变化趋势, 最后对结构退化过程给出理论预测, 并以此准确量化评估结构安全性能. 该方法在整个评估过程中可充分利用每一个监测数据, 并可实时根据新的观测数据进行评估修正. 通过在实桥的成功应用, 证明了基于统计理论的新型桥梁应力趋势预测评估方法的优势性.

关键词: 桥梁; 应力趋势; 季节性应力; 预测; 状态评估; 结构退化

中图分类号: U448.27 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)04-0105-06

Prediction of stress development and condition assessment of bridge structures based on statistics theory

TU Xue¹, XIONG Wen², XIAO Ru-cheng¹, SHEN Xu-dong³, WEI Le-yong⁴

(1. Dept. of Bridge Engineering, Tongji University, 200092 Shanghai, China; 2. Dept. of Bridge Engineering, School of Transportation, Southeast University, 210096 Nanjing, China; 3. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research, 310006 Hangzhou, China; 4. CCCC Highway Consultants CO., Ltd., 100085 Beijing, China)

Abstract: To deal with the complex constituent of measured stress and low efficiency of utilizing the vast measured data, this paper developed a new approach for the prediction of stress development and condition assessment of bridge structures based on statistics theory. This method separates the stress with seasonal distribution and stochastic distribution from the whole measured stress using the statistics theory. By doing this, the stress development due to the structure deterioration can be observed and theoretically predicted, which gives a quantifiable structure assessment. Every data measured in the real-time measurement can be used to give the assessment results and each newly-measured data in future can be applied to further update the results. A case study was finally conducted to show and prove the advantages of the proposed method.

Key words: bridge structures; stress development; stress with seasonal distribution; prediction; condition assessment; structure deterioration

混凝土结构应力测量是桥梁结构必不可少的监测手段, 随着科学技术的发展, 对应力测量的要求越来越高, 无线通讯自动实时监测也已成功应用于很多桥梁结构之中. 但是由于监测应力通常是汽车荷载、人群荷载、温度荷载、风荷载、结构自身变

化(退化)、测量系统误差的综合反映, 无法得到各自相应数值, 难以准确独立地观测到其结构退化过程, 从而造成安全性能评估困难^[1-3]. 另外, 在实时监测过程中得到的混凝土应力是一系列随时间变化的海量数据, 但是大多数的应力监测系统仅仅起到一个自动记录器的作用, 或是设置一个阈值, 简单地判断当前的应力状况^[2-4]. 而实际上这些应力-时间变化曲线所包含的信息量却是相当大的, 完全可以通过统计理论以及数据分析的方法来进行深入分析, 以得到更为接近实际情况的结构信息

收稿日期: 2010-09-26.

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2006AA11Z120).

作者简介: 涂雪(1982—), 女, 博士;

肖汝诚(1962—), 男, 教授, 博士生导师.

通讯作者: 熊文, wenwen0317@hotmail.com.

或预测未来结构安全状态^[4-5].

本文以宁波招宝山大桥为工程背景,采用一种基于统计理论的应力趋势预测模型,从随时间变化的海量应力数据中得到结构真实有用的信息. 具体来说,以数据统计为理论方法,将季节性荷载、随机性荷载产生的应力(变)从应力(变)监测值中分离,从而准确独立观测到结构退化所引起的应力变化趋势,以此定量评估结构安全性能,并对未来应力发展进行理论预测. 在整个评估过程中可充分利用每一个监测数据,并可实时根据新的观测数据进行评估修正. 该方法基于实时监测数据,理论结合实际,投资少、可操作性强,能进行实时结构安全评估以及未来状态预测.

1 应力趋势预测与评估方法

1.1 应力时间序列分类与模拟

现阶段观测混凝土应力主要还是利用应变计观测混凝土的应变,然后计算混凝土的应力^[2,6]. 根据应力应变之间简单的线性关系,本文认为监测数据直接以应力形式得到. 实时监测得到的应力是一系列随时间变化的海量数据,从这些数据中依一定方式采集数据并按原先的时间顺序排列的一系列数据称之为应力时间序列,该应力时间序列又可看作是若干子时间序列之和. 本文将采用数据统计中的平稳无趋势时间序列、呈现趋势时间序列以及季节性时间序列来分别模拟这些子应力时间序列并对其和分析.

1.1.1 平稳无趋势时间序列

假设某时间序列 n 个数据: $y_1, y_2, \dots, y_n$, 其真正平稳的数学概念依赖于时刻 $(t_1, t_2, \dots, t_k)$ 的随机变量 $(y_{t_1}, y_{t_2}, \dots, y_{t_k})$ 的分布情况. 假设 y_t 具有二阶矩, 如果 $E(y_t) = \mu$ 为常数, $E(y_t - \mu)(y_s - \mu) = \gamma(|t - s|)$ 仅与 $|t - s|$ 有关, 那么 $\{y_t, t = 1, 2, \dots\}$ 称为宽平稳序列. $\gamma(|t - s|)$ 称为序列的自协方差, 因此宽平稳序列的均值与自协方差随时间的平移而不变. 假如 $t = s$, 那么 $\gamma(0)$ 即为 y_t 的方差, 显然宽平稳序列的方差也随时间平移而不变. 这些平稳序列一般地没有向上或向下的走向或趋势, 也称之为无趋势序列. 于是对一个无趋势的序列用其历史数据去估计它的平均数, 这个估计就成了对未来的预测.

1.1.2 呈现趋势时间序列

时间序列如果受到某些因素的影响, 从而使得序列相应的期望值序列随时间的变化而发生改变. 倘若这样的动态变化比较长期且变化具有方向性(例如上升或下降), 则此类序列为有趋势序

列. 即待分析的时间序列在每一时刻 t 的随机观察值 y_t 构成的期望值数列 $E(y_t)$ 在整体时间范围内显著地呈现上升或下降的趋势. 鉴于上述定义, 有趋势时间序列模型可描述为

$$y_t = T_t + \epsilon_t, \quad t = 1, 2, \dots \quad (1)$$

其中: y_t 为序列在 t 时刻的观察值; T_t 为趋势函数, 也就是序列在 t 时刻的期望值; ϵ_t 为随机误差, 一般可假设为平稳的随机序列.

按照对趋势的假定不同, 又可分为线性趋势模型、二次趋势模型、简单指数模型以及修正指数模型. 以线性趋势模型为例, 其模型表示为

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 t + \epsilon_t. \quad (2)$$

继而通过已观察到的数据 $y_1, y_2, \dots, y_n$, 对参数 β_0, β_1 作出合理有效的估计.

1.1.3 季节性时间序列

一般季节模型分为加法型与乘法型 2 种.

加法型:

$$y_t = T_t + S_t + \epsilon_t, \quad t = 1, 2, \dots, \sum_{i=1}^L S_i = 0. \quad (3)$$

乘法型:

$$y_t = T_t \cdot S_t \cdot \epsilon_t, \quad t = 1, 2, \dots, \sum_{i=1}^L S_i = L. \quad (4)$$

其中: L 为 1 年中季节的长度; S_t 为时刻 t 时的季节影响, $S_t = S_{t+L} = S_{t+2L} = \dots$ (不变季节性); ϵ_t 为随机误差, 假定为随机平稳序列, 视加法或乘法模型其均值分别为 0 或 1.

本文采用 Kruskal-Wallis 法进行季节性的统计检验, 其基本步骤如下^[7].

假设 H_0 序列是平稳的(或随机的), 它没有季节性; H_1 序列有季节性.

检验统计量

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^L \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1). \quad (5)$$

其中: R_i 为在第 i 个季节里 y_t 的秩和; n_i 为在第 i 个季节里 y_t 的个数; N 为所有 y_t 个数, $N = n_1 + n_2 + \dots + n_L$.

在原假设 H_0 为真的情况下, n_i 适当地大, 那么统计量 H 近似地服从 $\chi^2(L-1)$. 给定显著性水平 α , 如果 $H > \chi^2_{\alpha}(L-1)$, 则拒绝 H_0 , 以 $(1-\alpha) \times 100\%$ 置信度认为序列具有季节性. 相反, 则在一定程度上支持模型不具有季节分量的原假设.

1.2 应力趋势预测建模步骤与评估

桥梁结构混凝土主梁的应力一般主要由随机性荷载、季节性荷载以及趋势荷载引起. 随机性荷

载为汽车荷载、人群荷载以及测量系统误差,这些荷载引起的应力都呈现不规则起伏,本文假定为平稳无趋势时间序列(1.1 节中序列 1);季节性荷载为温度荷载、风荷载,这类荷载引起的应力年复一年地重复同一规律变化,具有很强的季节性,本文假定为季节性时间序列(1.1 节中序列 3);趋势荷载指得是结构退化(包括桥梁结构车流量的增大或减小)的广义荷载,其应力呈趋势变化,这是判断桥梁或预测结构是否退化以及安全的重要观测对象,本文假定为呈现趋势时间序列(1.1 节中序列 2). 本文所提出的桥梁结构应力趋势预测与评价方法的核心思想就是将趋势荷载所引起的应力从整个实测应力中分离出来,并进行趋势模拟,以找到其结构退化的表现,从而对测点处的应力状态作出相关预测、判断. 该应力趋势预测建模方法的 4 个重要步骤.

1.2.1 分离季节性荷载引起的应力

为将季节分量从应力时间序列中滤出,即从 y_t 中分离出 S_t 与 ϵ_t ,一般采用滑动平均方法来实现.

对于加法型季节模型($y_t = T_t + S_t + \epsilon_t$),考虑到季节影响 S_t 在加法模型中满足条件 $S_{t+1} + S_{t+2} + \cdots + S_{t+L} = 0$,采用长度为 L 的滑动平均数: $MA_t = (T_t + \cdots + T_{t-L+1})/L + (\epsilon_t + \cdots + \epsilon_{t-L+1})/L$.

按滑动平均方法原理,该均值可代表呈现趋势时间序列考察长度内中间点数值. 若 L 为奇数, $MA_t \approx T_{t-(L-1)/2}$,可构造序列 $\{y_{t-(L-1)/2} - MA_t\}$,它等于序列 $\{S_{t-(L-1)/2} + \epsilon_{t-(L-1)/2}\}$;若 L 为偶数, $(MA_t + MA_{t+1})/2 \approx T_{t+1-L/2}$,可构造序列 $\{y_{t+1-L/2} - (MA_t + MA_{t+1})/2\}$,它等于序列 $\{S_{t+1-L/2} + \epsilon_{t+1-L/2}\}$.至此将季节分量从应力时间序列中分离.

对于乘法型的季节模型, $y_t = T_t \cdot S_t \cdot \epsilon_t$,利用加法型的讨论,可以构造 $y/MA = S \cdot \epsilon$ 形式的序列将季节分量从应力时间序列中分离.

分离出季节分量之后还需对其进行季节性的统计检验.

1.2.2 拟合应力时间序列中的趋势函数,并得到预测方程

对现有观测数据已滤出季节分量 $S_t + \epsilon_t$ (加法型) 或 $S_t \cdot \epsilon_t$ (乘法型),为尽可能再次排除 ϵ_t 的影响,对在同季节里(第 i 个季节)的季节分量求平均.

加法型:

$$\hat{S}_i = \sum_{\text{第} i \text{ 个季节}} (S_t + \epsilon_t/n_i). \tag{6}$$

乘法型:

$$\hat{S}_i = \sum_{\text{第} i \text{ 个季节}} (S_t \cdot \epsilon_t/n_i). \tag{7}$$

根据式(7),式(8)中 S_t 的特性,一年中所有 S_t 的平均值可以写为

加法型:

$$\bar{S} = \sum_{t=1}^L (S_t + \epsilon_t)/L = \sum_{t=1}^L \epsilon_t/L. \tag{8}$$

乘法型:

$$\bar{S} = \sum_{t=1}^L (S_t \cdot \epsilon_t)/L \approx \sum_{t=1}^L \epsilon_t/L. \tag{9}$$

然后进行基本转换消除 ϵ_t 的影响,得到如下形式.

加法型:

$$\hat{S}_i^* = \hat{S}_i - \bar{S}. \tag{10}$$

乘法型:

$$\hat{S}_i^* = \hat{S}_i/\bar{S}. \tag{11}$$

以 $\hat{S}_i^*$ 对原序列进行非季节化处理,在各自季节内构造 $(y_t - \hat{S}_i^*)$ 或 $(y_t/\hat{S}_i^*)$,其可以看作是桥梁结构中趋势荷载所引起的应力时间序列,以此拟合其趋势函数 $f(t;\beta_0,\beta_1,\cdots)$,并得到如下预测方程.

加法型:

$$y_t = f(t;\beta_0,\beta_1,\cdots) + \hat{S}_i^*. \tag{12}$$

乘法型:

$$y_t = f(t;\beta_0,\beta_1,\cdots) \cdot \hat{S}_i^*. \tag{13}$$

若取用加法型线性趋势模型以及加法型季节模型,基于当前时刻之前所监测数据,可得到应力预测公式为

$$y_t = T_t + S_t = (\beta_0 + \beta_1 t) + S_t. \tag{14}$$

其中: S_t 为时刻 t 时相对应的 $\hat{S}_i^*$,按步骤 2 预测公式已理论上排除 ϵ_t 的影响.

另外,一旦新的数据与信息又被采集,而准备再对以后的未来作预测时,很自然要求不断对模型进行“修正”,以尽量使模型与数据进一步拟合且避免预测误差的增长. 这种修正对简单的线性加法型趋势函数特别有必要,可以实现用最简单的函数形式进行较为准确的数据拟合. 以式(14)为例,本文采用指数平滑方法以 Holt-Winters 模型对 t 时刻的 T_t,β_1 以及 S_t 按照 $t-1$ 时刻的相应数值进行不断修正^[8],得

$$T_t(t_1) = T_t(t_1 - 1) + \alpha \cdot e_t, \tag{15}$$

$$\beta_1(t_1) = \beta_1(t_1 - 1) + \alpha \cdot \gamma \cdot e_t, \tag{16}$$

$$S_i(t_1) = \begin{cases} S_i(t_1 - 1) + \delta \cdot (1 - \alpha) \cdot e_i, & t_1 \text{ 在第 } i \text{ 个季节;} \\ S_i(t_1 - 1), & t_1 \text{ 不在第 } i \text{ 个季节.} \end{cases} \quad (17)$$

其中: α 为趋势平滑常数; γ 为斜率平滑常数; δ 为季节平滑常数; $T_i(t_1)$ 、 $\beta_i(t_1)$ 、 $S_i(t_1)$ 为基于 $y_1, y_2, \dots, y_{t_1}$ 关于序列最近无季节化趋势对 T_i 、 β_i 、 S_i 的修正估计; $T_i(t_1 - 1)$ 、 $\beta_i(t_1 - 1)$ 、 $S_i(t_1 - 1)$ 为基于 $y_1, y_2, \dots, y_{t_1-1}$ 关于序列最近无季节化趋势对 T_i 、 β_i 、 S_i 的原来估计; e_i 为一步预测误差. 各个参数具体数值可参考相关文献,在此不再赘述^[7].

至此,按应力时间序列趋势函数便可推断出桥梁混凝土结构应力发展历史,可以对结构历史退化过程以及当前安全性能进行评估.

1.2.3 预测结构退化临界时刻

当前时刻 t_1 观测应力应该满足

$$\sigma_{t_1} \in [\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]. \quad (18)$$

$\sigma_{\min}$ 为观测允许最小值; $\sigma_{\max}$ 为观测允许最大值. 两者均需要扣除混凝土安装应变计之前的已存应力.

在当前时刻 t_1 对 $t_1 + p$ 时刻的应力预测值仍要满足式(18),即

$$\sigma_{t_1+p} \in [\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]. \quad (19)$$

按加法型趋势函数,根据式(19), $t_1 + p$ 时刻的应力预测值可以由 t_1 时刻的应力观测值表示为

$$T_{t_1+p} + S_{t_1+p} = [\beta_0 + \beta_1(t_1 + p)] + S_{t_1+p} = T_{t_1} + p\beta_1 + S_{t_1+p}. \quad (20)$$

其中: β_0 、 β_1 以及 S_{t_1+p} 均由当前时刻 t_1 之前应力观测值拟合而得.

即式(19)可以写为

$$T_{t_1} + p\beta_1 + S_{t_1+p} \in [\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]. \quad (21)$$

当预测应力达到允许应力时,由式(21),考虑 β_1 不同正负号容易算出此极限时刻所对应的 $p_{\max}$ (即结构退化临界时刻)为

$$p_{\max} = \max\left(\frac{\sigma_{\min} - T_{t_1} - S_{t_1+p}}{\beta_1}, \frac{\sigma_{\max} - T_{t_1} - S_{t_1+p}}{\beta_1}\right). \quad (22)$$

其中: S_{t_1+p} 可视为 $t_1 + p$ 在第 i 个季节所对应的值,若各季节相对应的季节分量记作 S_i ,令

$$S_{\max} = \max(S_1, S_2, \dots, S_L), \quad (23)$$

$$S_{\min} = \min(S_1, S_2, \dots, S_L). \quad (24)$$

如果 $p \geq L$ (应力评估是个长期的过程,一般符合这个假设条件),则式(22)可近似保守改写为

$$p_{\max} = \max\left(\frac{\sigma_{\min} - T_{t_1} - S_{\min}}{\beta_1}, \frac{\sigma_{\max} - T_{t_1} - S_{\max}}{\beta_1}\right). \quad (25)$$

同加法模型求解,乘法模型的结构退化临界时刻为

$$p_{\max} = \max\left(\frac{\min\left(\frac{\sigma_{\min}}{S_{\min}}, \frac{\sigma_{\max}}{S_{\max}}\right) - T_{t_1}}{\beta_1}, \frac{\max\left(\frac{\sigma_{\min}}{S_{\min}}, \frac{\sigma_{\max}}{S_{\max}}\right) - T_{t_1}}{\beta_1}\right). \quad (26)$$

至此,按当前观测数据依据式(25)或式(26)从理论上可预测出未来结构应力(变)发展过程,找到结构退化临界时刻(超出允许应力),以此评估结构未来安全性能,以便采取提前措施.

1.2.4 结构安全评价确定

完成步骤1至步骤3之后,也可以按以下方法将结构安全性能量化,并同时考虑多测点情况.

某一测点 t 时刻的应力预测值为 $\sigma(t)$,当前时刻为 t_1 ,在时刻 $t_1 + p_{\max}$ 应力预测值达到允许限值. 假定一个时间界限 T_0 ,当 $p_{\max} \geq T_0$ 时, $x_i = 100$,当 $p_{\max} = 0$ 时, $x_i = 0$,则该测点应力评价值为

$$x_i = \begin{cases} 100 \cdot p_{\max}/T_0, & p_{\max} < T_0, \\ 100, & p_{\max} \geq T_0. \end{cases} \quad (27)$$

其中: x_i 为应力 i 测点处的应力评价值.

假定,桥梁结构设置了 m 个应力测点,各点初始权重相同为 $1/m$,监测之后对其权重进行变权修正,得到各测点新的权重为

$$w_i(x_1, \dots, x_m) = \frac{x_i^{\alpha-1}}{\sum_{k=1}^m x_k^{\alpha-1}}. \quad (28)$$

其中: $\alpha = 0.5$.

所以桥梁整个混凝土结构的应力综合评价值为

$$V_s = \sum_{i=1}^m w_i x_i. \quad (29)$$

按照文中介绍的4个步骤以现有大量观测数据便可以对当前以及未来混凝土结构应力发展进行研究预测,并以此得到或预测整个结构退化过程,推测其退化临界时刻,进行全寿命安全性能定性以及定量评估.

2 工程实例

2.1 工程概况

招宝山大桥为带协作体系的独塔双索面不对称预应力混凝土斜拉桥,斜拉桥部分横截面形式采用双箱单室,连续梁部分横截面形式采用双箱双室,跨径布置为75 m + 258 m + 102 m + 83 m + 50 m,全长568 m. 具体结构布置见图1.

招宝山大桥混凝土主梁6个截面A ~ F,共设置了44个应力测点,分布如图1所示. 应力测

试可进行实时监测. 通过对监测数据分析,可看出
以下几点:1)各点的实测应力值是随时间而上下
波动的曲线,具有一定季节性质;2)月平均应力

曲线无论从线型和大小上都和原应力曲线有较好的
吻合程度;3)为方便起见,以月平均应力为研
究对像进行研究.

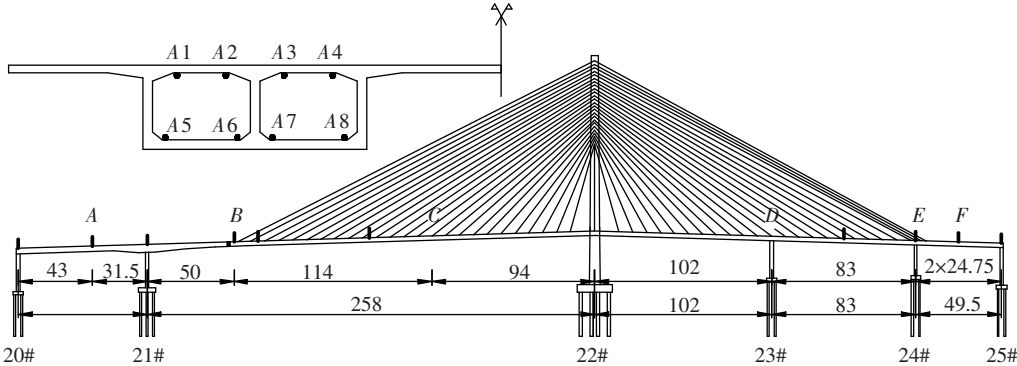


图1 结构以及测点布置图

2.2 测点布置及应力限值

招宝山大桥应变计安装是在大桥成桥 3 a 后,应变计安装后,增加的混凝土收缩徐变效应均
可以忽略不计;但需考虑安置应变计时混凝土结
构的初始应力 σ_{c0} , 其可由设计、施工资料,建立
有限元模型计算得到,最终得到各测点应力允许
值(由于篇幅限制未列出计算结果).

2.3 应力趋势模拟及预测模型

2.3.1 计算应力季节分量

一个季节的长度 L 可以按月,季度以及半年
来定,即 L 可取 12、4 以及 2. 由于本文按月平均
应力为研究对象,所以 $L = 12$ (偶数). 根据 1.2 节
步骤 1,应力时间序列季节分量可按下式计算.

加法型季节模型:

$$y'_{t+1-L/2} = y_{t+1-L/2} - \frac{1}{2}(MA_t + MA_{t+1}). \quad (30)$$

乘法型季节模型:

$$y''_{t+1-L/2} = y_{t+1-L/2} / \frac{1}{2}(MA_t + MA_{t+1}). \quad (31)$$

以 A 截面 A1 测点为例,式(30)、(31) 参数计
算数值具体见表 1.

表1 季节模型表达式参数数值

编号	时间序列	$(MA_t + MA_{t+1})/2$	$y'_{t+1-L/2}$	$y''_{t+1-L/2}$
1	Feb-06	-0.013 8	-0.091 2	7.590 4
2	Mar-06	0.021 0	0.160 0	8.636 2
3	Apr-06	0.061 6	0.006 4	1.104 2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
17	Jun-07	0.085 1	0.180 9	3.126 4
18	Jun-07	0.076 1	0.265 9	4.495 1
19	Aug-07	0.054 3	0.258 8	5.769 6

2.3.2 季节性统计检验

接着对季节分量按照 Kruskal-Wallis 方法进行
季节性统计检验. 依然以 A1 测点为例,检验的 p 值
0.161 2 小于预定的水平显著性水平 $\alpha = 0.30$,则
季节之间存在显著差异(等效于给定显著性水平
 α ,如果 $H > \chi^2_{\alpha}(L-1)$,以 $(1-\alpha) \times 100\%$ 置信度
认为序列具有季节性). 对其他所有测点均作上述
分析,大部分测点应力均存在季节显著差异.

2.3.3 拟合趋势并建立预测模型

继而,按照式(15)~(17),采用不断修正拟
合参数的方法,对趋势函数进行线性加法拟合,同
时考虑季节分量,最终得到应力预测模型(曲
线),以 A1 测点为例,见图 2.

2.4 计算评价值进行退化评估

仍然以 A1 测点为例,实测得到该测点的监测
允许应力值为 $\sigma_{\min} = -12.69$ MPa、 $\sigma_{\max} =$
14.52 MPa. 由本文可知 $T_{t_1} = 0.071\ 9$ 、 $\beta_1 =$
 $-0.004\ 7$ 、 $S_{\max} = 0.258\ 1$ 以及 $S_{\min} = -0.228\ 4$,
代入式(25)可得 $P_{\max} = 2\ 666.70$ 月. 同样方法可
得到其他测点的退化临界时刻.

假定时间界限 $T_0 = 50\ a = 600$ 月,将每个测
点所计算出的退化临界时刻与 T_0 相比,按照式
(27),可得到各自应力评价值. 得到各应力测点
评价值后,即可对结构的整体应力状态进行评估.
假定各测点权重相同,桥梁结构共设置了 44 个应
力测点,各点初始权重均为 $1/44$,则按照通常常
权综合模式进行评估. 若按式(28)对每一测点的
权重进行变权修正,可得到新的权重. 继而得到最
终全桥评价值为

$$V_s = \sum_{i=1}^m w_i(x_1, \cdots, x_m, w_1^{(0)}, \cdots, w_m^{(0)})x_i = 71.19.$$

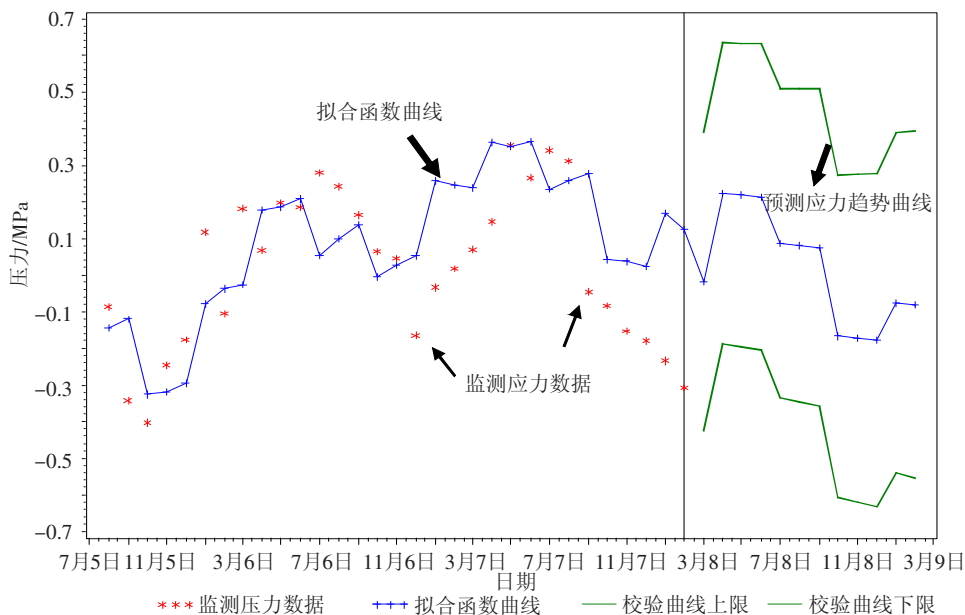


图 2 季节分量拟合曲线

至此,对该桥梁混凝土主梁的应力进行了理论预测,并对其安全性(结构退化程度)给出了定量评估.

3 结 语

为充分应用海量观测应力数据,准确观测或预测结构退化过程,提出一种基于统计理论的新型桥梁应力趋势预测评估方法.该方法采用时间序列分析,从采集到的带有季节效应的海量应力数据中,分离季节分量,拟合趋势函数,并以此得到应力趋势预测方程,建立结构退化模型,最终对结构应力当前及未来安全性能给出定量评估.该方法简单合理,理论依据充分,可充分利用每一个监测数据,还可以实时根据新的观测数据进行评估修正,已成功应用于宁波招宝山大桥,评估结论与实际观测结果吻合.更多的工程应用以及实验室验证将在今后的研究中展开.

参考文献:

[1] 徐丹. 光纤传感器应变监测的应用研究[D]. 大连:大

连理工大学,2008.

[2] 陈留凤. 应变监测反分析及其工程应用[D]. 武汉:武汉大学,2004.

[3] SU M B, CHEN B P, LI W P. Design of the re-mote data acquisition system of health monitoring for railway bridges [C]//Proceedings of the First European Workshop on Structural Health Monitoring. Paris: DEStech, 2002: 665 – 671.

[4] 解增银. 重庆石板坡长江大桥复线桥健康监测数据处理及安全评估应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.

[5] 张红星. 复杂应力状态下应变测量和数据处理方法探析[J]. 中国测试技术,2006,32(2):52 – 55.

[6] 邱法维,杜文博,钱稼茹,等. 虎门大桥应变监测数据处理系统设计[J]. 桥梁建设,2003(2):66 – 69.

[7] WESTFALL P H, TOBIAS R D, ROM D, et al. Multiple comparisons and multiple tests using the SAS system [M]. Cary, NC: SAS Institute Inc,1999.

[8] 赵巍飞,王红勇,张亮. 用霍尔特 – 温特斯模型预测航空运输总周转量[J]. 中国民航大学学报,2007,25(2):1 – 3.

(编辑 魏希柱)