

基于变异系数与趋势因子的斜拉桥索力评估

熊文^{1,2}, 涂雪¹, 肖汝诚¹

(1. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092; 2. 路易斯安那州立大学 土木与环境工程系, 巴吞鲁日 70803, 美国)

摘要: 为充分应用不同时期索力监测数据提出一种基于变异系数与趋势因子的索力评估方法. 该方法以索力基本评估值为初始值, 赋予每一根拉索具有物理意义的权重, 提出并引入两个修正系数: 变异系数与趋势因子. 利用斜率灰色关联度计算的变异系数反映索力监测值与目标值之间的整体变异性. 利用时间序列分析计算的趋势因子, 体现索力(结构)变化的趋势性, 反映其安全性能. 该方法简单实用, 考虑因素合理充分, 理论依据完备, 在整个评估过程中可充分利用每一个不同时期的监测数据, 评估结果不仅针对某一时间点, 更加针对整个运营阶段的索力发展过程. 详细阐述了该评估方法的思路与步骤, 并通过宁波招宝山大桥实例证明该方法的优越性.

关键词: 斜拉桥; 索力评估; 权重; 变异系数; 趋势因子
中图分类号: U 443.38, U 447 **文献标识码:** A

designed stay cable forces. The trend coefficient is obtained by the time series analysis, which reflects the developing trend of stay cable forces and structural safety. The proposed assessment method is simple and practical but with persuasive theoretical study and sufficient consideration. Every data measured in the real-time measurement can be used to give the assessment results which are not only for a stay cable condition at a time point but also for the entire in-service period. The whole idea and procedure of assessing stay cable forces are given in detail. A case study is finally conducted to show and prove the advantages of the proposed method.

Key words: cable-stayed bridges; condition assessment of stay cable forces; weight coefficient; variation coefficient; trend coefficient

Condition Assessment of Stay Cable Forces Based on Variation and Trend Coefficients

XIONG Wen^{1,2}, TU Xue¹, XIAO Rucheng¹

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA)

Abstract: To efficiently utilize the vast measured data, a new approach is proposed for the condition assessment of stay cable forces based on the variation and trend coefficients. This method uses the basic assessment value of stay cable forces as the initial value and gives each stay cable a weight coefficient as well as other two newly-proposed significant coefficients, the variation and trend coefficients. The variation coefficient is determined by the degree of grey slope incidence, which reflects the entire difference between the measured and

拉索是斜拉桥的关键构件之一, 承受及传递斜拉桥的全部荷载. 斜拉桥收缩徐变、运营荷载及结构退化均使其运营状态与成桥状态存在偏差, 故其索力与设计索力相比也会发生显著变化. 一般来说, 斜拉桥的恒载索力决定结构内力分布及大小, 而运营阶段索力变化则对主梁线形、结构应力等产生显著影响, 从而决定斜拉桥整个运营阶段的安全性能. 因此, 对斜拉桥运营状态索力进行准确评估尤为重要.

通常认为索力评估主要是基于设计索力对一组实测索力进行评估的过程^[1-3]. 但这种仅针对当前索力与设计索力相对差值进行评估的方法显然缺乏足够的合理性, 是一种较为粗糙的评估方法^[3]. 现阶段可靠度理论、灰色系统理论以及专家系统在拉索索力评估过程中开始尝试应用, 但基于这些理论的大部分评估方法仅根据当前一组观测数据进行, 无

收稿日期: 2010-09-15

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA11Z120)

第一作者: 熊文(1982—), 男, 工学博士, 主要研究方向为桥梁结构体系、构造及设计理论、桥梁结构健康检测, 新材料工程应用.

E-mail: wenwen0317@hotmail.com

通讯作者: 肖汝诚(1962—)男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为桥梁结构设计理论、计算理论以及桥梁结构体系.

E-mail: xiaorc@tongji.edu.cn

法与前期观测数据对应分析,索力发展趋势也无法考虑其中,且无法考虑每根拉索的特殊性^[4-7].

本文以宁波招宝山大桥为工程背景,介绍一种基于变异系数与趋势因子的斜拉桥索力评估方法.该方法在索力基本评估值的基础上,以索力长期(历年)监测值为研究对象,对索力发展趋势进行时间序列分析以计算趋势因子,对运营期间索力监测值与设计值之间关联度(索力变化的不均匀性)进行分析以计算变异系数,同时按变权修正的方法(计算权重)考虑每根拉索的特殊性.该方法在整个评估过程中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,基于趋势并考虑关联度以及权重的评估结果不仅针对某一时间点,更加针对整个运营阶段的索力发展过程,并以此合理反映斜拉桥的整体安全性能.

1 评估思路与方法

1.1 索力基本评估值

根据斜拉桥索力的工程意义,拉索索力属于适度指标模型,取设计索力为索力标准值.有理由认为在设计索力下,结构状态最优,因此假定索力为标准索力时评分为 100.当索力变化影响结构达某种程度时,可假定当前索力评分为 0,这个“程度”可根据不同需求,不同标准而制定.通过对某一斜拉桥的计算可得,当某拉索索力卸载 47%时,其拉索所在位置相邻的三根拉索索力变化均在 7%范围以内,主梁跨中截面上缘压应力增加 2.1 MPa,下缘压应力减少 4.8 MPa^[1].另外许多学者均以固定的索力变化百分比来定义索力评分 0^[4,6,8].故本文按拉索自身强度及相关文献建议,定义索力变化 40%及以上时评分为 0,并以适度指标模型按曲线插值,见式(1).

$$x_i = f(t_i) = \begin{cases} A \left(\frac{t_i - t_m}{t_{i0} - t_m} \right) e^{B \left(\frac{t_i - t_m}{t_{i0} - t_m} - 1 \right)}, & t_m < t_i \leq t_{i0} \\ A \left(\frac{t_m - t_i}{t_m - t_{i0}} \right) e^{B \left(\frac{t_m - t_i}{t_m - t_{i0}} - 1 \right)}, & t_{i0} < t_i < t_m \\ 0, & t_i \leq t_m \text{ 或 } t_i \geq t_m \end{cases} \quad (1)$$

式中: x_i 为拉索*i*的评估值; t_i 为拉索*i*的实测索力值; t_{i0} 为拉索*i*的标准索力值,取设计索力; $t_m = 0.6t_{i0}$; $t_{im} = 1.4t_{i0}$ (当索力变化 40%及以上评分为 0 时); A 为评估值范围,这里取值为 100; B 为形状参数,这里取值为 -0.5.各参数几何含义见图 1.

得到单个测点的评估值 x_i 之后,与其评估值相对应的指标评语见表 1.

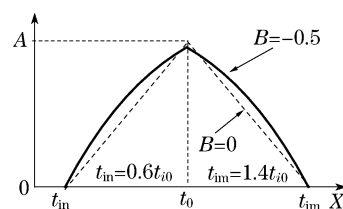


图 1 索力评估量纲一化模型

Fig.1 Nondimensional assessment mode of stay cables

表 1 拉索索力指标评分标准

Tab.1 Assessment criterion of stay cable forces

评定标度	构件技术状况	描述	索力评估量纲一化值
1	良好	索力变化不大	80~100
2	较好	索力有一定的变化,但处于一个合理的范围	60~80
3	较差	索力变化很大,需要引起重视	40~60
4	差	索力变化相当大,可能是某些结构破坏的先兆	20~40
5	危险	索力变化非常大,必须立刻查明原因,作出相应处理	0~20

1.2 权重系数计算

斜拉桥索力评估中,一般认为索力具有相同的重要性^[3-4,6],即各索力测点的初始权重 $w_j^{(0)} = 1$.但实际上各拉索索力变化对结构的影响程度并不相同(主要考虑对主梁的影响),也就是说各拉索的初始权重存在差异.该权重计算方法各异,本文以主梁弯曲应变能为准进行计算.

结构的弯曲应变能表达式为

$$U = \int_s \frac{M^2(s)}{2EI} ds \quad (2)$$

式中: E, I 分别表示材料弹性模量和截面惯矩; M 表示弯矩; s 表示沿长度积分.

对于离散的杆系结构该表达式可写为

$$U = \sum_{i=1}^m \frac{L_i}{4E_i I_i} ({}^L M_i^2 + {}^R M_i^2) \quad (3)$$

式中: m 为结构单元总数; L_i, E_i, I_i 分别表示*i*号单元的杆件长度、材料弹性模量和截面惯矩; ${}^L M_i, {}^R M_i$ 分别表示*i*号单元左、右端弯矩.

假设第*i*根拉索索力变化一个单位力,结构弯曲应变能变化值为 U_i ,那么第*i*根拉索初始权重为

$$w_i^{(0)} = \frac{U_i}{\sum_{i=1}^m U_i} \quad (4)$$

经过变权修正,得到新的权重如下:

$$w_i(x_1, \dots, x_m) = \frac{w_i^{(0)} x_i^{\alpha-1}}{\sum_{j=1}^m w_j^{(0)} x_j^{\alpha-1}} \quad (5)$$

其中: α 为反映对均衡性要求的系数, $\alpha = 0.5$.

变权修正之后的评估值比常权评估值对拉索状态有较高的敏感性. α 取值可反映对均衡性的不同要求, 取值越小, 则对桥梁局部缺陷容忍程度越小.

得到各单索评估值以及权重后, 即可计算拉索索力均匀性评估值如下:

$$V_s = \sum_{i=1}^m w_i x_i \quad (6)$$

1.3 变异系数计算

数据均匀变化时, 曲线出现平移现象, 而不均匀变化则表现为曲线之间的关联程度. 灰色关联分析方法本用于对系统动态发展过程量化分析以考察系统诸因素之间的相关程度. 本文借用灰色关联度分析方法的基本思想——曲线相似程度来计算索力非均匀性变化系数, 即灰色关联度 $r(X_0, X_i)$, 并将其作为索力评估值计算中的变异系数, 以反映运营期间索力监测值与设计值之间的关联度. 当该变异系数越大, 则认为运营期间索力监测值曲线(将每根拉索索力用曲线相连)与设计索力曲线几何形状越相似, 发展变化态势越接近, 关联程度越大, 索力变化稳定均匀. 反之则认为两者索力变化不均匀, 关联程度小.

本文采用斜率关联度计算该变异系数如下:

$$r_i = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{k=1}^{m-1} \frac{1}{1 + \left| \frac{\alpha^{(1)}(x_0(k+1))}{x_0(k+1)} - \frac{\alpha^{(1)}(x_i(k+1))}{x_i(k+1)} \right|} \quad (7)$$

其中: m 为拉索总根数; $X_0 = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(m)\}$ 为参考序列, 此处可为设计索力; $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(m)\}$ 为比较序列, 此处可为运营阶段监测索力; $\alpha^{(1)}(x_0(k+1)) = x_0(k+1) - x_0(k)$; $\alpha^{(1)}(x_i(k+1)) = x_i(k+1) - x_i(k)$.

采用斜率关联度计算该变异系数能够满足量纲一化处理后的保序效应, 均值化、初值化均不会改变灰色关联度序集^[9].

考虑变异系数之后, 即可计算拉索索力非均匀性之后的索力评估值 V_r :

$$V_r = r_i V_s \quad (8)$$

式中: r_i 为变异系数; V_s 为均匀性索力评估值.

1.4 趋势因子计算

结构的状态是随时间而不断变化的. 对于评价

指标而言, 其评估值也是随时间而变化的. 假定成桥时刻 t_0 测得的评估值为 V_{r0} , 当前时刻 t_n 测得评估值为 V_{rn} , 该评估值亦可写作时间函数 $V_r(t)$. 假设评估值经曲线 A、B、C、D 由 V_{r0} 发展为 V_{rn} (图 2), 显然曲线 B、C 随时间发展变化趋于平缓, 故认为曲线 B、C 的退化趋势要小于曲线 A、D 的退化趋势, 以此本文认为曲线 B、C 比曲线 A、D 更为安全.

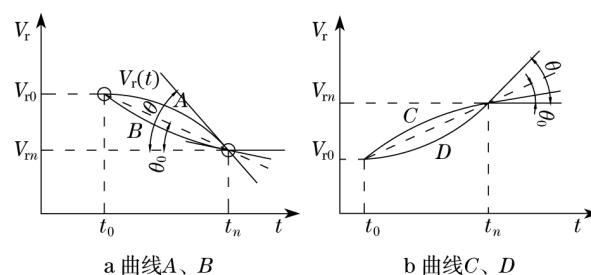


图 2 评估值发展趋势曲线比较图

Fig. 2 Comparison of developing trend of assessment value

假定评估值发展曲线 $V_r(t)$ 在 $[t_0, t_n]$ 上连续、光滑、单调, 如图 2 所示. $V_r(t)$ 在 t_n 处切线与时间轴 t 的夹角为 θ :

$$\theta = \arctan(V_r'(t)|_{t=t_n}) \quad (9)$$

而若假定评价值 V_{r0} 到 V_{rn} 线性变化, 则 $V_r(t)$ 与时间轴 t 的夹角为 θ_0 :

$$\theta_0 = \arctan\left(\frac{V_r(t_n) - V_r(t_0)}{t_n - t_0}\right) \quad (10)$$

利用式(9), (10), 定义趋势因子来反映曲线 $V_r(t)$ 在 t_n 处的平缓程度, 该趋势因子表达式如下:

$$\mu = \frac{\theta_0}{\theta} \quad (11)$$

显然该趋势因子越大, 则表明曲线越平缓, 状态越安全.

对各期测得索力按 1.1~1.3 节所介绍的方法计算索力评估值 $V_{r1}, V_{r2}, \dots, V_{rn}$, 对应时间为 t_1, t_2, \dots, t_n , 对 $V_r - t$ 拟合曲线, 该曲线应该满足单调、连续、光滑.

当采用双曲线模型拟合时:

$$V_r(t) = \frac{1}{c_0 + c_1 t} \quad (12)$$

式中: c_1 和 c_0 表示拟合方程参数.

故趋势因子为

$$\mu = \frac{\theta_0}{\theta} = \frac{\arctan\left(\frac{V_{rn} - V_{r0}}{t_n - t_0}\right)}{\arctan(V_r'(t)|_{t=t_n})} =$$

$$\frac{\arctan\left(\frac{V_{rn} - V_{r0}}{t_n - t_0}\right)}{\arctan(-c_1 \times (V_r(t)|_{t=t_n})^2)} \quad (13)$$

所以,考虑变异系数 r_i 与趋势因子 μ 之后,索力评估值的最终得分为

$$V = \mu r_i V_s \quad (14)$$

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,斜拉桥主要采用双箱单室主梁截面,全长 567 m,跨径布置为 74.5 m + 258 m +

102 m + 83 m + 49.5 m. 斜拉桥上下游两侧,每侧 51 根拉索共计 102 根,最边侧 6 根索装设减振器,即上下游共计 24 根拉索装有减振器,具体结构布置见图 3. 以上游数据为例,拉索实测索力与设计索力(设计索力采用三维空间模型计算得出)结果如图 4 所示(C1~C25, C'1~C'25 分别代表不同斜拉索编号).

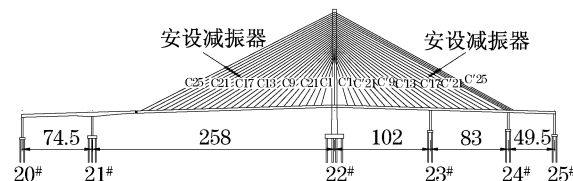
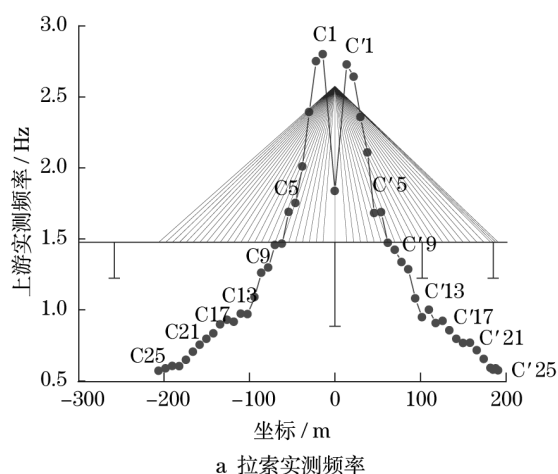
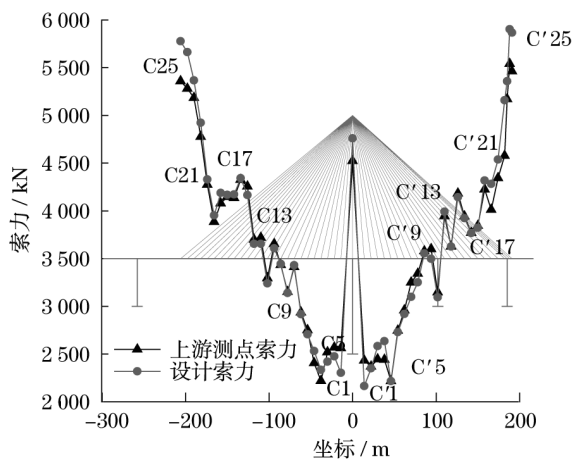


图 3 结构布置图 (单位:m)
Fig. 3 Layout of bridge structure (Unit: m)



a 拉索实测频率



b 拉索实测索力与设计索力

图 4 索力监测数值

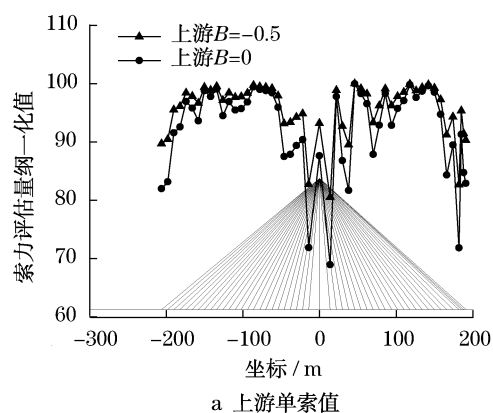
Fig. 4 The measured stay cable forces

2.2 单索评估值确定

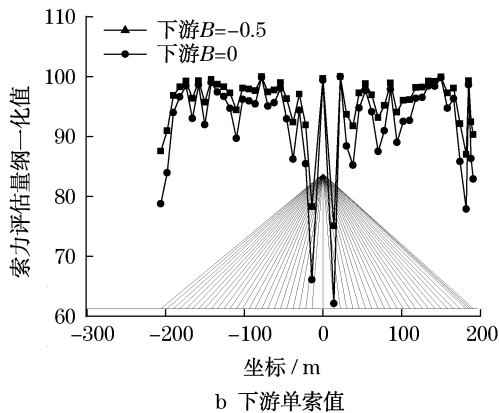
假定斜拉桥设计索力为标准索力,当实测索力为设计索力数值时,单索评价值为 100,索力变化 40%及以上时单索评价值为 0,以适度指标模型按曲

线插值. 本文做了 $B = 0$ 和 $B = -0.5$ 两种计算模型,其中 $B = -0.5$ 较符合实际工程意义. 上、下游索力评估值如图 5 所示.

由图 5 可知,在 0 号索以及边索附近,索力评估



a 上游单索值



b 下游单索值

图 5 单索评估值

Fig. 5 Assessment value of single stay cable

值比较小,根据设计与施工资料对比,发现这些索的成桥索力与设计索力本身就有一定差别.

2.3 拉索权重确定

以设计资料和施工资料为基础,建立该斜拉桥

有限元模型,按照式(4)确定各拉索初始权重.再按照式(5),确定拉索变权后的权重,实际应用中取 $\alpha = 0.5$ (α 取值越小,则对桥梁局部缺陷容忍程度越小).如图6所示.

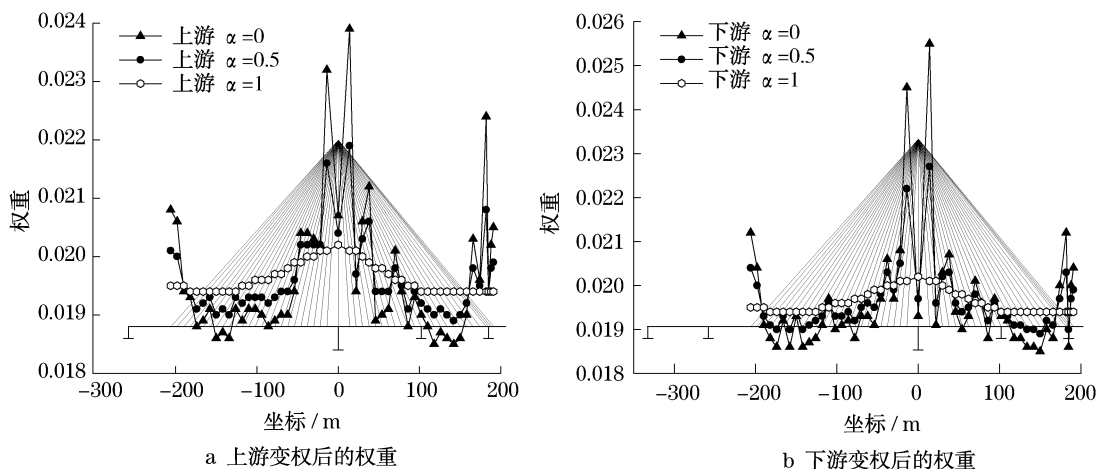


图 6 拉索变权后的权重

Fig.6 Changed weight coefficients of stay cables

故此时,按式(6)可计算出均匀性索力评估值 $V_s(\alpha = 0.5)$:

$$V_s = \sum_{i=1}^m w_i x_i = \begin{cases} 95.52 & \text{上游} \\ 95.39 & \text{下游} \end{cases}$$

2.4 计算变异系数

按式(7)可计算当前监测索力与设计索力相比下的斜率关联度,即变异系数:上游: $r_i = 0.971$,下游: $r_i = 0.968$.此时,按式(8)可计算出考虑非均匀性索力评价($\alpha = 0.5$):上游: $V_r = r_i V_s = 92.77$,下游: $V_r = r_i V_s = 92.31$.

2.5 计算趋势因子

招宝山大桥索力评估趋势因子计算图见图7.

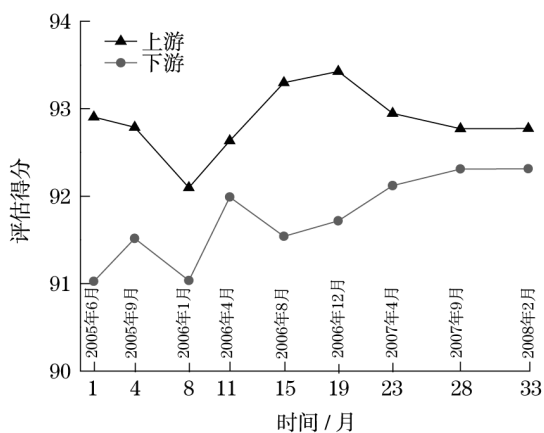


图 7 趋势因子计算图

Fig.7 Calculation of trend coefficients

按 1.4 节方法,以时间 t 为自变量 x ,评估值为因变量 y ,进行双曲线拟合,拟合曲线如下: $y = 1/(c_0 + c_1 x)$,即: $1/y = c_0 + c_1 x$.

考虑不带权的情形,极小化:

$$\sum_{i=0}^8 \left[\frac{1}{y_i} - (c_0 + c_1 x_i) \right]^2,$$

可得:

$$\text{上游: } c_0 = 0.0108, c_1 = -8.2736 \times 10^{-7}$$

$$\text{下游: } c_0 = 0.0110, c_1 = -4.6486 \times 10^{-6}$$

因此,拟合方程如下:

$$\text{上游: } 1/y = 0.0108 - (8.2736 \times 10^{-7})x$$

$$\text{下游: } 1/y = 0.0110 - (4.6486 \times 10^{-6})x$$

拟合方程以及数据点如图8所示.

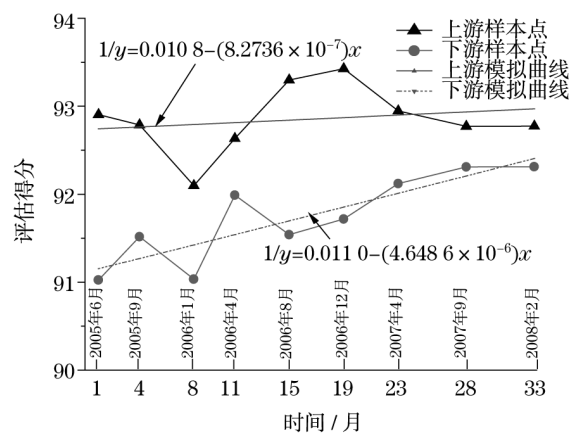


图 8 拟合方程以及数据点图

Fig.8 Fitting equations and data points

按式(13),趋势系数计算见表 2.

表 2 趋势因子计算结果
Tab.2 Trend coefficients

项目	θ_0	θ	趋势因子 $\mu = \theta_0/\theta$
上游	0.007 13	0.007 15	0.997 54
下游	0.039 14	0.039 67	0.986 45

由该趋势因子数值可以看出:

(1) 以设计索力为标准索力,结构的索力状态处于渐好的良好趋势;

(2) 上游的索力状态比下游索力状态好.

考虑趋势效应后,利用式(14)计算最终评估值:

上游: $V = \mu r_i V_s = 92.55$; 下游: $V = \mu r_i V_s = 91.06$.

评估值显示,对招宝山大桥整体状态而言,拉索索力变化不大,状态良好.在实测中,招宝山大桥几年来拉索索力稳定,工作良好,这也从侧面验证了该评估方法的正确性.

3 结论

为充分应用不同时期索力观测数据,准确评估斜拉桥索力状态,本文提出一种基于变异系数与趋势因子的评估方法.该方法以索力基本评估值为初始值,首先赋予每一根拉索具有物理意义的权重,提出并引入两个修正系数:变异系数与趋势因子.变异系数利用斜率灰色关联度计算而得,其反映了索力监测值与目标值之间的整体变异性.趋势因子利用时间序列分析计算而得,其体现了索力(结构)变化的趋势性,反映了其安全性能.该方法简单实用,考虑因素合理充分,理论依据完备,可充分利用长期监测中每一个不同时期的索力数据,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.

参考文献:

[1] 陈德伟,李欣然,杨文军.大佛寺长江大桥(斜拉桥)运营阶段

斜拉索安全评估方法[C]//第十六届全国桥梁学术会议.长沙:[s.n.],2004:1019-1022.

- CHEN Dewei, LI Xinran, YANG Wenjun. Assessment of stay cables in the service condition of Dafosi Bridge [C]// Proceedings of the 16th Bridge Engineering Conference. Changsha:[s.n.],2004:1019-1022.
- [2] 赵玲,李爱群,缪长青,等.大跨斜拉桥的拉索损伤识别[J].桥梁建设,2004(5):19.
- ZHAO Ling, LI Aiqun, MIAO Changqing, et al. Identification of damages in stay cables of long-span cable-stayed bridges[J]. Bridge Construction, 2004(5):19.
- [3] 朱劲松,肖汝诚.大跨度斜拉桥拉索安全性分析方法研究[J].土木工程学报,2006,39(9):74.
- ZHU Jinsong, XIAO Rucheng. A study on the safety assessment method for stay cables of long-span cable-stayed bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9):74.
- [4] 兰海,史家钧.灰色关联分析与变权综合法在桥梁评估中的应用[J].同济大学学报:自然科学版,2001,29(1):50.
- LAN Hai, SHI Jiayun. Degree of grey incidence and variable weight synthesizing applied in bridge assessment[J]. Journal of Tongji University: Nature Science, 2001, 29(1):50.
- [5] Matteo J, Deodatis G, Billington D F. Safety analysis of suspension-bridge cable; Williamsburg Bridge[J]. ASCE, Journal of Structural Engineering, 1995, 120(11):3197.
- [6] 尚鑫,徐岳.基于灰色理论的斜拉桥拉索安全性评价[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):22.
- SHANG Xin, XU Yue. Safety-based cables' condition evaluation of cable stayed bridge with grey theory[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science, 2004, 24(1):22.
- [7] Faber M H, Enelund S, Rackwitz R. Aspects of parallel wire cable reliability[J]. Structural Safety, 2003, 25:201.
- [8] 伍华成,项贻强,杨万里.基于神经网络的模糊理论在桥梁状态评估中的应用[J].后勤工程学院学报,2007,23(1):15.
- WU Huacheng, XIANG Yiqiang, YANG Wanli. Application of fuzzy theory on condition assessment of bridge based on neural network [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2007, 23(1):15.
- [9] 吕锋,刘翔,刘泉.七种灰色系统关联度的比较研究[J].武汉理工大学学报,2000,22(2):41.
- LV Feng, LIU Xiang, LIU Quan. The theory of gray relative analysis and its new research[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2000, 22(2):41.