

大跨径桥梁的动态监控模型研究

华锡生, 黄红女, 王天祥

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 考虑到大跨径桥梁的安全监控模型应结合其动态特性而建立, 探讨了把风速、温度、车流量等外界影响因素作为大桥变形的状态参数, 采用自适应卡尔曼滤波, 建立大跨径桥梁的动态监控模型, 并对大桥变形速率分量进行分析. 通过对南京长江第二大桥的分析, 表明动态监控模型具有较好的效果和应用价值.

关键词: 动态监控模型; 自适应卡尔曼滤波; 速率分量; 大跨径桥梁

中图分类号: U448.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-198X(2004)01-0067-04

大跨径的新型桥梁, 如斜拉桥、悬索桥等, 通常采用钢箱梁体, 结合柔性的斜拉索或悬索, 构成了比较复杂的结构力学体系. 桥体在温度、风力、行车量等外界因素作用下, 处于动态特性的变形中. 为监控这些大跨径桥梁的安全运行, 常布置有一定内容的监测系统. 如何合理地对待日常观测的大量资料进行处理, 以获得大桥工作的实时性态, 研究产生动态形变的主要因素, 控制桥体不良安全因素组合的出现, 进而有效地实施日常运行的安全监控, 是众所关注的问题.

大跨径桥梁的安全监控模型应结合其动态特性考虑, 但目前通常研究的安全监控模型(如统计模型、混合模型等)主要体现着“静态”的特色, 难以满足大桥安全监控的需要. 此外, 就安全监控的要求而言, 不仅仅限于单独处理大桥的位移、桥型变化等信息, 而必须进行温度、风力、车流量等外部因素作用下的桥体动态监控模型的研究, 以便在一些不利条件发生时, 实施对其他因素的控制, 确保大桥安全.

卡尔曼滤波模型用一组状态方程和观测方程来描述变形系统, 把参数估计和预报有机地结合起来, 是一种较好地处理动态变形的数学模型. 但是, 在大桥安全监控中, 必须准确地定出其状态因子. 此外, 该模型有时会产生发散, 导致状态参数估计有误, 状态参数的初始形式及动态噪声的方差有时难以准确选定, 这些都将对处理结果产生直接影响. 因此, 结合大跨径桥梁安全监控的特点, 研究自适应卡尔曼滤波监控模型, 有较好的应用价值.

本文结合南京长江第二大桥具有的监测资料, 研究了大桥的状态方程形式, 利用自适应滤波处理, 建立大桥的动态监控模型, 并对速率分量进行分析, 在南京长江第二大桥工作性态分析和预报的应用中取得了较好的效果.

1 卡尔曼滤波模型

对于线性离散系统, 其状态方程和观测方程的一般形式为

$$\begin{cases} X_{k+1} = \Phi_{k+1,k} X_k + \Gamma_k \Omega_k \\ L_{k+1} = B_{k+1} X_{k+1} + \Delta_{k+1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: X_{k+1} —— t_{k+1} 时刻的状态向量; $\Phi_{k+1,k}$ —— t_k 到 t_{k+1} 时刻状态转移矩阵; Γ_k ——第 k 期动态噪声系数矩阵; Ω_k ——动态噪声矩阵; L_{k+1} , B_{k+1} ——第 $k+1$ 期的观测向量和观测向量系数矩阵; Δ_{k+1} —— $k+1$ 期观测噪声向量.

设 Ω_k 和 Δ_k 为互不相关的零均值高斯白噪声序列, 可导出离散型的卡尔曼滤波基本方程如下:

状态预报方程为
$$\hat{X}_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1/k-1} \quad (2)$$

预报误差协方差矩阵 $D_{X_{k/k-1}} = \Phi_{k,k-1} D_{X_{k-1/k-1}} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} D_{\Omega_{k-1}} \Gamma_{k-1}^T$ (3)

增益矩阵 $J_k = D_{X_{k/k-1}} B_k^T (B_k D_{X_{k/k-1}} B_k^T + D_{\Delta_k})^{-1}$ (4)

状态滤波方程 $\hat{X}_{k/k} = \hat{X}_{k/k-1} + J_k (L_k - B_k \hat{X}_{k/k-1})$ (5)

滤波误差协方差矩阵 $D_{X_{k/k}} = (I - J_k B_k) D_{X_{k/k-1}}$ (6)

2 自适应卡尔曼滤波的方差补偿法

通常卡尔曼滤波需要对观测数据及动态模型的特性有较为准确的掌握,才能得到理想的结果.但在有些情况下滤波的先验值往往难以得到或者是随时间变化的,自适应滤波即是在滤波过程中利用滤波本身的信息来判断系统是否处在正常状态,如果出现偏离,则利用自身信息去修正模型误差.一般的自适应卡尔曼滤波都是利用前面一定时段的滤波信息来估计协方差阵,计算量相对较大.本文采用一种通过对滤波预报值的协方差阵附加一个衰减因子 s 来克服滤波发散的算法.

将式(3)改写为下列形式:

$D_{X_{k/k-1}} = s (\Phi_{k,k-1} D_{X_{k-1/k-1}} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k,k-1} D_{\Omega_{k-1}} \Gamma_{k,k-1}^T)$ (7)

通过附加衰减因子 s 使过去的结果对滤波值的影响越来越小,更多地利用新的观测值,由于在整个滤波过程中 s 取固定值会降低滤波的精度,可采用预报残差来计算一个检验量,判断滤波状态是否正常,如果正常则按一般滤波递推,否则根据计算得到的随滤波状态变化的 s 进行递推.其中 s 可按下面方法确定.

首先根据式(1)和式(5)计算预报残差:

$C_{k/k-1} = L_k - B_k \hat{X}_{k/k-1}$ (8)

若假定初始值 X_0 和 L_0 所对应的方差分量 $\sigma_{X_0}^2 = I, \sigma_{L_0}^2 = K$ (其中 I 为单位矩阵),对于线性系统可推得

$E(C_{k/k-1} C_{k/k-1}^T) = B_k D_{X_{k/k-1}} B_k^T + Q_{L_k}$ (9)

由式(8),有

$C_{k/k-1}^T C_{k/k-1} \leq s T (B_k D_{X_{k/k-1}} B_k^T + D_{L_k})$ (10)

当模型出现误差时,可以根据前 N 个时刻的 $C_{k/k-1}(i)$ 计算 $\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} (C_{k/k-1} C_{k/k-1}^T)$ 作为 $E(C_{k/k-1} C_{k/k-1}^T)$ 的估值.当滤波处于稳态时:

$E(C_{k/k-1} C_{k/k-1}^T) \approx \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} (C_{k/k-1} C_{k/k-1}^T) \approx B_k D_{X_{k/k-1}} B_k^T + D_{L_k}$ (11)

因此

$s \geq \frac{C_{k/k-1}^T C_{k/k-1}}{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^N (C_{k-N+j/k-N+j-1}^T C_{k-N+j/k-N+j-1})}$ (12)

据此可以判断滤波是否正常.当 $s \leq 1$ 时,滤波处于稳定状态,计算时取 $s = 1$;当 $s > 1$ 时,则滤波出现偏离,可能发散.如果出现发散现象,可以作为一个衰减因子减少陈旧数据的影响.实际计算时,为了防止出现虚报,可以为 s 设立一个警报值 s_0 ,如取 $s_0 = 2$ 或 3 .当 $s > s_0$ 时,表明滤波出现发散,这时取 s 值为衰减因子,代入式(7),以后逐步减小,直至 $s = 1$ 为止.

3 大跨径桥梁的自适应卡尔曼滤波模型

以大跨径桥梁的水平位移为例,风速(S)、温度(T)、车流量(Z)等外界因素对水平位移影响较大,本文以此3种外界因素的影响为例,监控点的水平位移可表示为

$X_1(t_{k+1}) - X_1(t_k) = \Delta Z_k X_2(t_k) + \Delta S_k X_3(t_k) + \Delta T_k X_4(t_k) + \Delta t_{k+1} X_5(t_k) + W(t_k)$ (13)

式中: $X_1(t)$ —— t 时刻测点位置; $X_2(t), X_3(t), X_4(t), X_5(t)$ ——车流量、风速、温度、变形速率影响的状态参数,它们是时刻变化的; $\Delta Z_k, \Delta S_k, \Delta T_k, \Delta t_{k+1}$ ——车流量、风速、温度、变形速率在时刻 t_{k+1} 与 t_k 之间的量值.

若把加速率 Ω 看成动态噪声,可得状态向量在 t 时刻单测点离散化后的状态方程为

$$X_{k+1} = \Phi_{k+1,k} X_k + \Gamma_k \Omega_k \tag{14}$$
$$X_{(t)}^T = \{X_1(t) \ X_2(t) \ X_3(t) \ X_4(t) \ X_5(t)\}$$
$$\Phi_{k+1,k} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta Z_{k+1,k} & \Delta S_{k+1,k} & \Delta T_{k+1,k} & \Delta t_{k+1,k} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \Gamma_k = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \Delta t_{k+1,k}^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \Delta t_{k+1,k} \end{bmatrix}$$

观测方程为 $L_{k+1} = B_{k+1} X_{k+1} + \Delta_{k+1}$ 其中 $B_{k+1} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ 。

按式(4)到(6)(7)(12)进行自适应滤波计算,滤波拟合度 $MEC = 1 - \sqrt{\sum [\hat{L}_t - L_t]^2} / (\sqrt{\sum L_t^2} + \sqrt{\sum \hat{L}_t^2})$,预报拟合度 $EC = 1 - \sqrt{\sum [\hat{L}_t - L_t]^2} / (\sqrt{\sum L_t^2} + \sqrt{\sum \hat{L}_t^2})$ 。

4 应用实例

4.1 分析模型

由于篇幅所限,本文仅以南京长江第二大桥 6# 监测点横向位移监测分析为例,进行统计模型和自适应滤波处理。根据南京长江第二大桥安装的多种传感器及高精度自动全站仪等构成的安全监控系统采集的大量数据进行处理,逐步回归分析,最终确定的模型如下:

$$x = -0.6084 + 0.1075T + 0.2931Z - 0.0156Z^2 - 0.0012S^2 + 0.0143\lambda$$

式中 T, Z, S, λ 分别为温度、车流量、风速及变形速率。回归中误差 $m = 4.33 \text{ mm}$,复相关系数 $R = 0.909$ 。由复相关系数知,最终所选的因子能很好地描述测点横向位移的状态。

由上述模型,可选定自适应滤波的状态参数方程进行滤波分析。为考察初始值选择对自适应滤波的影响,计算分析 4 种条件。(a)初始状态参数取回归方程系数,且 $D_{X_0} = I, D_{\Delta} = 1, D_{\Omega} = 1$,作为基准条件,随后的 3 种计算是在此基础上对初始参数进行部分调整。(b)把初始状态参数改取为 0.001。(c)把 D_{Δ}, D_{Ω} 改取为 50。(d)把 D_{Δ}, D_{Ω} 改为 0.001。

实际计算表明,滤波中误差可以达到不大于 $\pm 0.2 \text{ mm}$ 的精度,相比于回归中误差 $m = \pm 4.33 \text{ mm}$,精度有显著提高。这主要是滤波的增益矩阵,根据前期处理的结果及时地对本次滤波值不断修正所致(见表 1)。图 1 为回归及滤波两种不同模型处理的过程线。

表 1 不同模型处理的结果

Table 1 Results of different models

模型	回归或滤波中误差/mm	MEC	预报中误差/mm	EC
统计模型	4.33	0.909	7.81	
滤波(1)	0.10	0.983	2.28	0.861
滤波(2)	0.17	0.971	3.30	0.756
滤波(3)	0.20	0.964	3.55	0.732
滤波(4)	0.18	0.970	3.38	0.745

在初始值及初始参数选定基本合理的条件下,自适应滤波自动通过方差补偿及控制,使滤波结果稳定可靠,即使观测噪声和动态噪声方差难以精确获得,但通过滤波过程自动不断地修正,仍可以很快获得准确结果。

初始状态参数的准确选定对滤波结果有一些影响,在滤波过程中,参数的调整需要一个过程。若初始状态参数的选择正确,这个调整过程可以迅速完成,使滤波精度更高。

4.2 变形速率分量

由滤波方程可获得各时刻瞬时变形速率分量 λ 。该分量实质上反映了由外界变化的作用力对桥身作用的情况。例如,载重车辆的车流量密度、车速、较大的风速及脉动作用等,都直接影响着桥体的变形速率。为保

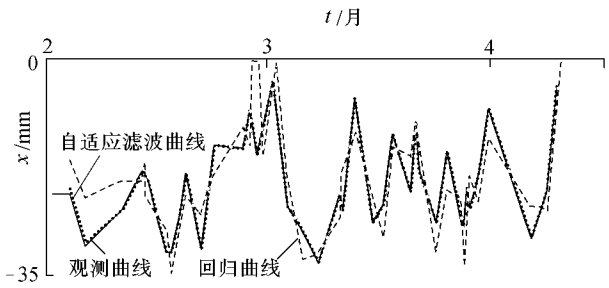


图 1 6# 监测点横向位移变化滤波及预报结果

Fig.1 Filtering and forecast results of transverse displacement at 6# monitoring point

证大桥的安全运营,除了监控桥体变形量值的大小外,还应该监控桥体变形的速率分量,避免巨大的外力冲击使桥体经常处于较大变形速率的波动之中.

南京长江第二大桥 6# 监测点分离得的横向变形速率如图 2 所示.由图 2 可知,桥体在该点处的速率在量值上及变化上均不大,最大约 0.019 mm/min,整个监测期间的速率变幅仅 0.03 mm/min.可见大桥在该点处于较好的运行状态中.对大桥其他测点的分析,最终结果与 6# 监测点的情况基本一致,表明大桥的结构和整体情况良好.目前控制的车速及车辆的载重量等是科学合理的,对保障桥面铺装层的寿命、达到桥梁长期安全运营均有重要意义.

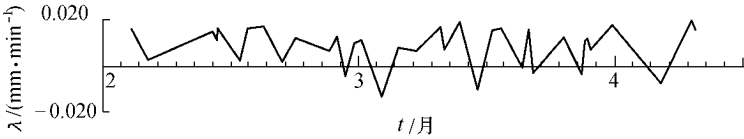


图 2 6# 监测点处的横向变形速率曲线

Fig.2 Velocity component of transverse deformation at 6# monitoring point

5 结 论

a. 与统计模型相比,自适应卡尔曼滤波模型应用于大跨径桥梁的动态监控中,滤波和预报的精度更高.结合状态因子的合理选择,使监控模型准确地反映了大桥工作的动态特性以及桥体变形与各状态因子的关系,具备了在不利条件出现时对一些关键因素实施控制的依据.

b. 大桥监控的自适应卡尔曼滤波,在较短期资料的情况下就能容易地取得良好的监控模型.此外,滤波状态参数以及其他未知初始参数在不能获得精确值而由经验大概赋值时,同样能达到较好的效果.本文方法在大桥动态安全监控的实际工作中有应用价值.

c. 变形的速率分量主要反映了大桥受外荷载变化的瞬时变形特性,它的稳定性及波动情况直接体现着大桥运营状态和结构的稳定性,应该作为大桥安全监控的重要指标.

参考文献:

[1] 胡丛玮.带约束条件的自适应滤波及其在 GPS 定位中的应用[J].测绘学报,2002,31(增刊):39—44.
[2] 潘国荣,王穗晖.建筑物动态变形的模型识别及预测[J].测绘学报,1999,28(4):28—32.

Dynamic monitoring model for long-span bridges

HUA Xi-sheng, HUANG Hong-nu, WANG Tian-xiang

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: In consideration of the dynamic characteristics of long-span bridges, a dynamic monitoring model is developed for long-span bridges by use of the self-adaptive Kalman filtering, with some affecting factors, such as the wind velocity, temperature, and vehicle flow, taken as the state parameters of bridge deformation, and the velocity component of bridge deformation is analyzed. The application of the model to the analysis of the Second Nanjing Yangtze River Bridge shows that the dynamic monitoring model is of good effectiveness and high value of application.

Key words: dynamic monitoring model; self-adaptive Kalman filtering; velocity component; long-span bridge