

桥梁健康监测中多传感器的时空数据配准分析^{*1}

赵玲, 刘云, 黄乔勇

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500)

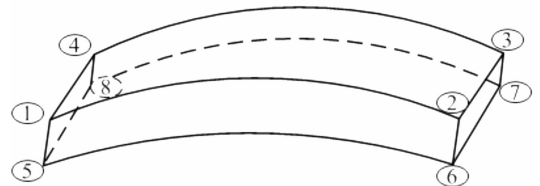
摘要:针对桥梁健康监测中多传感器数据的可信性及准确性问题,提出了一种二维数据处理模型.首先利用最小二乘法对异步测量数据进行时间配准,再通过几何坐标转换算法进行空间配准,将测量数据置于同一个时间和空间的坐标系中,使得数据具有可信性;并在时空数据配准处理后利用卡尔曼滤波的方法减小系统误差,这样数据具有了准确性.仿真结果表明:该模型有效提高了桥梁健康监测中传感器网络所采集数据的可信性与准确性.

关键词:桥梁健康监测;多传感器;时空数据配准;卡尔曼滤波

中图分类号:TP 212 **文献标识码:**A **文章编号:**0258-7971(2012)01-0020-06

现有桥梁健康监测技术中,建立多传感器网络对桥梁健康监测的技术为主流的方法^[1].在多传感器网络中使用不同的传感器对桥梁状况进行监测,然后对多个传感器采集数据进行分析^[2].由于传感器采集频率和空间位置都不一样,各个采集数据之间存在很大的误差^[3],本文针对多传感器数据提出了一种二维数据处理模型,多传感器数据利用最小二乘法对异步测量数据进行时间配准,再通过几何坐标转换算法进行空间配准,将测量数据置于同一个时间和空间的坐标系中,然后利用卡尔曼滤波方法减小系统误差,使得传感器数据具有了可信性及准确性.

根据强度理论,混凝土裂缝的始发部位当出现在由负弯矩诱发的组合桥面板的高拉应力区^[4].我们将相应部位取部分桥段,在相应部位布置了8个加速度传感器,测量水平和垂直2个方向的加速度,从而得到桥梁的振动位移.其中4个水平加速度传感器测量水平方向的加速度,4个垂直加速度传感器测量垂直方向的加速度^[5].如图1所示.



1, 2, 3, 4在同一平面为水平方向加速度
5, 6, 7, 8在同一平面为垂直方向加速度

图1 加速度传感器分布图

Fig. 1 Distribution of acceleration sensor

1 数据配准

由于系统中各传感器是互相独立工作的,并且各传感器的测量都是在各自的局部坐标系下进行的,测量数据之间存在很大的误差,因此必须对传感器的测量数据进行数据配准.传感器的数据配准分为时间配准和空间配准^[6-7].时空配准是数据处理的基础,这样才能保证多个传感器的数据在同一个时间和空间坐标中,进而使系统充分发挥多传感器多源信息的优势.

1.1 时间配准 设定系统中存在传感器A,传感器B,对同一方向的加速度进行测量.A的采样周期为 T_A ,B的采样周期为 T_B , T_A 和 T_B 满足如下比例关系: $T_A : T_B = m : n$, m, n 为互质的正整数.

* 收稿日期:2011-05-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(NNSFC10502050).

作者简介:赵玲(1986-),女,重庆人,硕士生,主要研究方向:数据通信,多媒体通信.

通讯作者:刘云(1973-),男,云南人,副教授,研究方向:无线通信,数据通信,多媒体通信. E-mail:liuyun@kmust.edu.cn.

设加速度状态的最后一次更新时刻为 t ,则下一次加速度状态的更新时刻为 $t+nT_A$,或 $t+mT_B$,即在2次状态更新之间,传感器A进行了 n 次测量,传感器B进行了 m 次测量.

记 $Z^{(A)} = (Z_1^{(A)}, Z_2^{(A)}, \dots, Z_n^{(A)})$ 表示2次状态更新之间传感器A的 n 个测量值; $Z^{(B)} = (Z_1^{(B)}, Z_2^{(B)}, \dots, Z_m^{(B)})$,表示2次状态更新之间传感器B的 m 个测量值,其中上标表示对应的传感器,下标表示该传感器第几次的测量值.由前面的假设可推得, $Z^{(A)}$ 与 $Z^{(B)}$ 在时间上同步.

令 $U^{(A)} = (Z^{(A)} \dot{Z}^{(A)})^T$ 表示 n 个测量值 $Z^{(A)} = (Z_1^{(A)}, Z_2^{(A)}, \dots, Z_n^{(A)})$ 经过时间融合后的测量值及其导数; $U^{(B)} = (Z^{(B)} \dot{Z}^{(B)})^T$ 表示 m 个测量值 $Z^{(B)} = (Z_1^{(B)}, Z_2^{(B)}, \dots, Z_m^{(B)})$ 经过时间融合后的测量值及其导数.

则传感器A和B的测量值可以表示为如下形式:

$$\begin{aligned} Z_i^{(A)} &= Z^{(A)} + (i-n)T_A \dot{Z}^{(A)} + v_i^{(A)}, \quad (i=1, 2, \dots, n), \\ Z_j^{(B)} &= Z^{(B)} + (j-m)T_B \dot{Z}^{(B)} + v_j^{(B)}, \quad (j=1, 2, \dots, m), \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $v_j^{(A)}, v_j^{(B)}$ 为测量噪声.式(1)的向量形式如下:

$$\begin{aligned} Z^A &= W^{(A)} U^{(A)} + V^{(A)}, \\ Z^B &= W^{(B)} U^{(B)} + V^{(B)}, \\ V^{(A)} &= (V_1^A, V_2^A, \dots, V_n^A)^T, \\ V^{(B)} &= (V_1^B, V_2^B, \dots, V_m^B)^T, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $V^{(A)}, V^{(B)}$ 为均值为0的高斯白噪声.

方差:

$$\begin{aligned} E[V^{(A)} V^{(A)T}] &= \text{diag}(\sigma_A^{(2)}, \sigma_A^{(2)}, \dots, \sigma_A^{(2)})_{n \times n}, \\ E[V^{(B)} V^{(B)T}] &= \text{diag}(\sigma_B^{(2)}, \sigma_B^{(2)}, \dots, \sigma_B^{(2)})_{m \times m}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\sigma_A^{(2)}$ 和 $\sigma_B^{(2)}$ 为融合以前测量数据的噪声方差

$$\begin{aligned} W^{(A)} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ (1-n)T_A & (2-n)T_A & \dots & (n-n)T_A \end{bmatrix}^T, \\ W^{(B)} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ (1-m)T_B & (2-m)T_B & \dots & (m-m)T_B \end{bmatrix}^T, \end{aligned} \quad (4)$$

对式(1)进行最小二乘估计:

$$\begin{aligned} \hat{U}^{(A)} &= [\hat{Z}^{(A)}, \hat{\dot{Z}}^{(A)}] = (W^{(A)T} W^{(A)})^{-1} W^{(A)T} Z^{(A)}, \\ \hat{U}^{(B)} &= [\hat{Z}^{(B)}, \hat{\dot{Z}}^{(B)}] = (W^{(B)T} W^{(B)})^{-1} W^{(B)T} Z^{(B)}, \end{aligned} \quad (5)$$

估计方差为:

$$\begin{aligned} R_{\hat{U}^{(A)}} &= \sigma_A^2 (W^{(A)T} W^{(A)})^{-1}, \\ R_{\hat{U}^{(B)}} &= \sigma_B^2 (W^{(B)T} W^{(B)})^{-1}. \end{aligned}$$

在最小二乘时间融合以后测量值的估计值为:

$$\hat{Z}^{(A)} = c_1 \sum_{i=1}^n Z_i^{(A)} + c_2 \sum_{i=1}^n i Z_i^{(A)},$$

$$\text{式中: } c_1 = -\frac{2}{n}, c_2 = -\frac{6}{n(n+1)}.$$

$$\hat{Z}^{(B)} = d_1 \sum_{i=1}^m Z_i^{(B)} + d_2 \sum_{i=1}^m i Z_i^{(B)},$$

$$\text{式中: } d_1 = -\frac{2}{m}, d_2 = \frac{6}{m(m+1)}, \quad (6)$$

估计方差为:

$$\begin{aligned}\text{Var}[\hat{Z}^{(A)}] &= \frac{2\sigma_A^2(2n+1)}{n(n+1)}, \\ \text{Var}[\hat{Z}^{(B)}] &= \frac{2\sigma_B^2(2m+1)}{m(m+1)}.\end{aligned}$$

1.2 空间配准 传感器 A 在时刻 t_{kA} 的极坐标下的有偏测量为^[8]:

$$\begin{bmatrix} r_A^p(t_{kA}) \\ \theta_A^p(t_{kA}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \varepsilon_A^r(t_{kA}) & 0 \\ 0 & 1 + \varepsilon_A^\theta(t_{kA}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_A(t_{kA}) \\ \theta_A(t_{kA}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_A^r(t_{kA}) \\ b_A^\theta(t_{kA}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_A^r(t_{kA}) \\ v_A^\theta(t_{kA}) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中 $r_A^p(t_{kA})$ 和 $\theta_A^p(t_{kA})$ 分别为距离和方位角的有偏测量, $r_A(t_{kA})$ 和 $\theta_A(t_{kA})$ 为真实的距离和方位角, $\varepsilon_A^r(t_{kA})$ 和 $\varepsilon_A^\theta(t_{kA})$ 为距离和方位角的比例偏差, $b_A^r(t_{kA})$ 和 $b_A^\theta(t_{kA})$ 为距离和方位角的偏移量偏差, $v_A^r(t_{kA})$ 和 $v_A^\theta(t_{kA})$ 为 0 均值的白噪声, 协方差分别为 $(\sigma_{rA})^2$ 和 $(\sigma_{\theta A})^2$, 并假设传感器之间的测量噪声相互定理.

通过坐标转换, 将极坐标下的测量值转换为笛卡尔坐标系的测量值^[9], 得到直角坐标系下的测量方程为:

$$Z_A(t_{kA}) = HX(t_{kA}) + B_A(t_{kA})C_A(t_{kA})\beta(t_{kA}) + V_A(t_{kA}), \quad (8)$$

其中, $X(t_{kA}) = \Phi(t_{kA}, t_{kA-1}) + U^{t_{kA}}$, (9)

$$\Phi(t_{kA}, t_{kA-1}) = e^{A(t_{kA}-t_{kA-1})},$$

$$U_{t_{kA-1}}^{t_{kA}} = \int_{t_{kA-1}}^{t_{kA}} \Phi(t_{kA}, \tau) u(\tau) d\tau,$$

$$E[U_{t_{kA-1}}^{t_{kA}} (U_{t_{kA-1}}^{t_{kA}})^T] = Q_{t_{kA-1}}^{t_{kA}}, \quad (10)$$

$$Q_{t_{kA-1}}^{t_{kA}} = \int_{t_{kA-1}}^{t_{kA}} \Phi(t_{kA}, \tau) q(\tau) \Phi(t_{kA}, \tau)^T d\tau,$$

$$H \triangleq \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_A(t_{kA}) = \begin{bmatrix} \cos\theta_A^p(t_{kA}) & -r_A^p(t_{kA})\sin\theta_A^p(t_{kA}) \\ \sin\theta_A^p(t_{kA}) & r_A^p(t_{kA})\cos\theta_A^p(t_{kA}) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$C_A(t_{kA}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & r_A(t_{kA}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \theta_A(t_{kA}) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\beta_A(t_{kA}) = [b_A^r(t_{kA}), b_A^\theta(t_{kA}), \varepsilon_A^r(t_{kA}), \varepsilon_A^\theta(t_{kA})]^T, \quad (13)$$

式中

$$X_A(t_{kA}) = [x(t_{kA}), \dot{x}(t_{kA}), y(t_{kA}), \dot{y}(t_{kA})]^T, \quad (14)$$

测量噪声 $V_A(t_{kA})$ 为 0 均值的白噪声, 噪声协方差为

$$E[V_A(t_{kA})V_A(t_{kA})^T] = R_A(t_{kA}) = \begin{bmatrix} R_A(t_{kA}, 11) & R_A(t_{kA}, 12) \\ R_A(t_{kA}, 21) & R_A(t_{kA}, 22) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

其中,

$$\begin{aligned}R_A(t_{kA}, 11) &= [r_A^p(t_{kA})]^2 (\sigma_{\theta A})^2 \{ \sin[\theta_A^p(t_{kA})] \}^2 + (\sigma_{\theta A})^2 \{ \cos[\theta_A^p(t_{kA})] \}^2, \\ R_A(t_{kA}, 12) &= R_A(t_{kA}, 21) = \{ (\sigma_{\theta A})^2 - [r_A^p(t_{kA})]^2 \} \times (\sigma_{\theta A})^2 \sin[\theta_A^p(t_{kA})] \cos[\theta_A^p(t_{kA})], \\ R_A(t_{kA}, 22) &= [r_A^p(t_{kA})]^2 (\sigma_{\theta A})^2 \{ \cos[\theta_A^p(t_{kA})] \}^2 + (\sigma_{\theta A})^2 \{ \sin[\theta_A^p(t_{kA})] \}^2.\end{aligned} \quad (16)$$

2 卡尔曼滤波的系统误差配准

对于桥梁的加速度传感器监测系统, 由于只对加速度测量, 所以选取加速度作为状态变量, 而位移作为被测量. 采用双轴加速度传感器获得桥梁的水平和竖直 2 个方向的振动加速度, 经过数据配准后再进行数值积分 2 次获得位移信息^[10]. 这样便可以建立起离散型卡尔曼滤波基本方程. 首先进行时空配准, 后续

的观测向量使用的均为经过时空配准以后的观测值. 设 t_k 时刻的被估计状态加速度 X_k 受噪声序列 W_{k-1} 驱动, 驱动记录由下述状态方程描述:

$$a_k = \Phi_{k,k-1} a_{k-1} + \Gamma_{k-1} W_{k-1}, \quad (17)$$

$$\text{加速度 } a_k = a_{k-1} + iT, T \text{ 为采用周期振动位移为: } S_k = S_{k-1} + a_{k-1} \frac{T^2}{2}. \quad (18)$$

$X = [a \ S]$, 其中位移 S 和加速度 a 都是二维向量, 分别表示桥梁水平方向和垂直方向的位移与加速度, 则

$$X = [a^1 \ a^2 \ S^1 \ S^2], \quad (19)$$

则滤波器的状态方程为:

$$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k-1} W_{k-1}. \quad (20)$$

对 X_k 的量测满足线性关系, 量测方程为:

$$Z_k = H_k X_k + V_k, \quad (21)$$

式中 $\Phi_{k,k-1}$ 为 t_{k-1} 时刻到 t_k 的一步转移阵.

$$\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{T^2}{2} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{T^2}{2} & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Γ_{k-1} 为系统噪声驱动阵, H_k 为量测阵, V_k 为量测噪声序列, W_k 为系统激励噪声序列. 并假定激励噪声与量测噪声不相关. Q_k 为系统噪声序列的方差阵, R_k 为量测噪声序列方差阵, 则

X_k 的估计

$$\hat{X}_{\frac{k}{k-1}} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{\frac{k-1}{k-1}}, \quad (23)$$

状态估计:

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{\frac{k}{k-1}} K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{\frac{k}{k-1}}), \quad (24)$$

滤波增益为:

$$\begin{aligned} K_k &= P_{k,k-1} H_k^T (H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k)^{-1}, \\ K_k &= P_k H_k^T R_k^{-1}, \end{aligned} \quad (25)$$

一步预测均方差为:

$$P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T, \quad (26)$$

估计均方误差为:

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{\frac{k}{k-1}}. \quad (27)$$

3 系统仿真

在桥梁监测系统中由加速度传感器的分布图可知, 4 个水平加速度传感器和 4 个垂直加速度传感器分别在 2 个二维平面上, 其中 1 号、2 号、5 号、6 号传感器的采用频率为 100 Hz, 3 号、4 号、7 号、8 号传感器的采用频率为 200 Hz^[11]. 采样时间为 60 s.

由传感器分布图可知传感器的相对坐标, 设 1 号和 5 号传感器的分别为 2 个二维平面的原点, 则 1 号和 5 号的坐标为 (0, 0), 2 号和 6 号的坐标为 (5 000, 0), 3 号和 7 号的坐标为 (5 000, 2 400), 4 号和 8 号的坐标为 (0, 2 400). 单位为 mm.

(1) 由于在系统中垂直方向和水平方向加速度配准协方差相似, 在本文中只展示水平方向加速度数据配准后的协方差, 如图 2 所示;

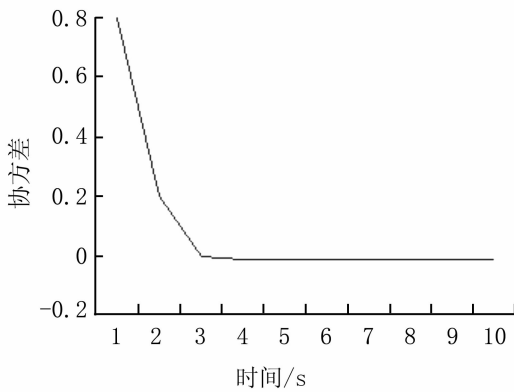


图 2 水平方向加速度配准协方差

Fig. 2 The covariance of horizontal acceleration

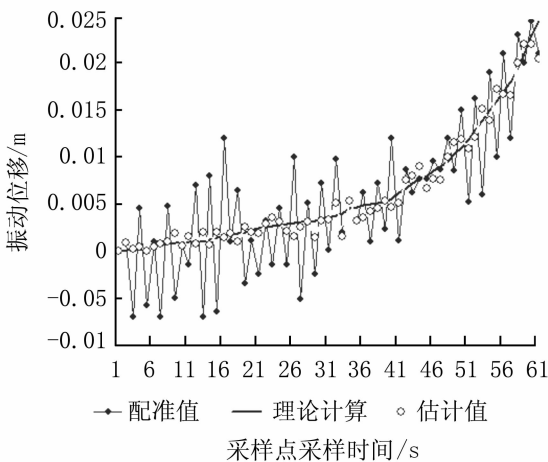


图 3 水平方向振动位移

Fig. 3 The vibration displacement of horizontal

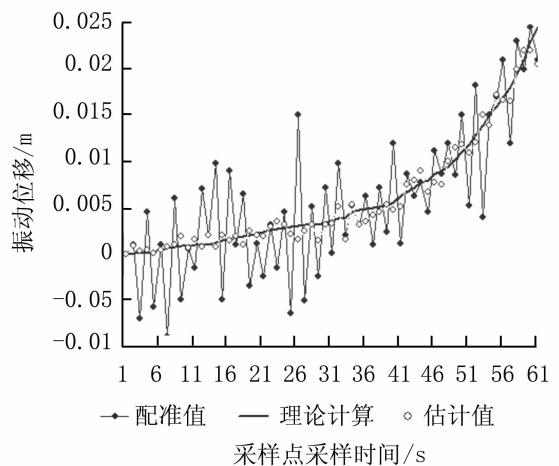


图 4 垂直方向振动位移

Fig. 4 The vibration displacement of vertical

(2) 采样点在 60 s 内的水平方向和垂直方向的振动位移. 由图 2 水平方向加速度配准协方差可以看出, 同一平面内的 4 个水平方向的加速度传感器数据配准后的误差在很短的时间内趋近于 0, 说明配准算法达到收敛的预期目标. 由图 3 水平方向振动位移及图 4 垂直方向振动位移图可知, 水平方向及垂直方向的振动位移经过配准后的配准数据与理论值还存在着系统的误差, 在经过采用卡尔曼滤波后, 从估计值可以看出, 卡尔曼滤波的方法能有效减小系统误差, 得到的估计值与理论值相比精确度较高.

4 结 论

本文对于桥梁健康监测中多传感器系统数据存在的可信性及准确性问题提出了多传感器数据利用最小二乘法对异步测量数据进行时间配准, 再通过几何坐标转换算法进行空间配准, 使得测量数据在同一个时间和空间的坐标系中, 使得数据具有可信性; 并在时空数据配准处理后利用卡尔曼滤波的状态估计和误差估计减小了系统误差, 这样配准后的数据具有了准确性. 通过实际数据的仿真验证了该方法能有效抑制时空数据差异带来的影响, 桥梁健康监测中传感器网络数据分析能够明显提高数据的准确性, 并具有实际应用的推广意义.

参考文献:

- [1] FRANK X LI, Anwarul Islam, GRACIELA C, et al. Real-time urban bridge health monitoring using a fixed wireless mesh network [C]//Radio and Wireless Symposium IEEE, 2010:384-387.
- [2] 袁浩. 桥梁结构健康无线传感网络监测系统设计与优化[D]. 广州: 广东工业大学, 2009.
- [3] COUE C, FRAICHARD T H, BESSIERE P, et al. Using bayesian programming for multi-sensor multi-target trackin in automotive applications [C]//Robotics and Autornation IEEE Iuterational Conference on IEEE, 2003, 27:2 104-2 109.
- [4] 孙曼, 植涌, 叶丰, 等. 钢-混凝土组合桥面板模型混凝土顶裂缝损伤全过程检测[J]. 世界桥梁, 2006(4):60-63.

- [5] 杨继红. CCD 桥梁振动检测系统的设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2007.
- [6] 朱蕊莘,宋建光. 网络化作战系统中的多雷达时空数据配准[J]. 现代防御技术,2008,36(2):20-29
- [7] 祁永庆. 多平台多传感器配准算法研究[D]. 上海:上海交通大学,2008.
- [8] 贺席兵. 信息融合中多平台多传感器的时空对准研究[D]. 西安:西北工业大学,2001.
- [9] 高海波. 多源传感器最优配准技术和算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.
- [10] 田利梅,叶卫东. 卡尔曼滤波在桥梁健康监测系统中的应用研究[J]. 计算机测量与控制,2005,13(6):524-526.
- [11] SUKUN KIN,PAKZAD S,CULLER D,et al. Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks[C]// Information Processing in Sensot Networks IEEE,2007(6):254-263.

Multi – sensor data alignment for bridge health monitoring

ZHAO Ling, LIU Yun, HUAN Qiao-yong

(College of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Aimed at the problem of credibility and accuracy exiting in multi – sensor data for bridge health monitoring, this paper presents a model based on two – dimensional data processing. To make reliability of the measurements, first asynchronous data are equalized by the least square algorithm, and through the geometric coordinate transformation algorithm, measurements will be placed in the same space and time coordinate system. To improve accuracy of the measurements, Kalman filter is applied to reduces the system error after the data alignment. The simulation results show that the methods significantly increase the credibility and accuracy of data in multi – sensor networks for bridge health monitoring.

Key words: bridge health monitoring; multi – sensor; data alignment; Kalman filter

(上接第14页)

Estimate of bounds on eigenvalues of the Hadamard product and the Fan product of matrices and nonnegative matrices

ZHOU Ping, LI Yao-tang

(School of Mathematics and Statistics, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: A new lower bound of the minimum eigenvalues of Hadamard product for inverse A^{-1} of nonsingular M – matrix A and nonsingular M – matrix B , a new lower bound of the smallest eigenvalues of Fan product for nonsingular M – matrices A and B , and a new supper bound of the spectral radius of Hadamard product for nonnegative matrices A and B , are given respectively. These three estimating formulas of the bounds are easier to calculate since they only depend on the entries of matrices A and B . The given examples show that the estimating formulas of the bounds are better than several known estimating formulas.

Key words: M – matrix; nonnegative matrix; Hadamard product; Fan product; spectral radius; smallest eigenvalue