

基于参数识别的双向偏心结构 TMD 优化布置^{*}

何浩祥¹, 吕永伟^{1,2}, 韩恩圳¹

(1. 北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室 北京, 100124)

(2. 国家知识产权局专利局专利审查协作天津中心 天津, 300000)

摘要 针对实际多维结构的偏心距难以直接获得的情况, 提出基于扩展卡尔曼滤波算法实现偏心结构整体质量、水平刚度和偏心距的同步识别方法, 并由此指导调谐质量阻尼器(tuned mass damper, 简称 TMD)的实际最优布置位置。以一非对称钢筋混凝土框架结构为例, 基于自由振动及参数识别算法实现结构整体偏心距等参数的准确识别, 分析了不同位置布置 TMD 对结构减震效果的影响。结果表明: 扩展卡尔曼滤波对结构多参数识别具有较高的精度, 在此基础上选取合理位置布置 TMD 对双向偏心结构具有更好的减震效果, 且具备较强的工程可行性。

关键词 减震控制; 偏心结构; 调谐质量阻尼器; 参数识别; 扩展卡尔曼滤波

中图分类号 TU391; TG405; TH825

引言

地震动是多维复杂的随机运动, 同时具有平动作用和扭转作用, 因此建筑结构可能发生平动和扭转双重破坏^[1]。结构的扭转效应主要有: a. 地震动作用本身具有扭转分量, 使得建筑物结构产生扭转响应; b. 由于偏心结构的质心和刚度中心的不重合, 结构在水平地震作用下也会产生扭转响应^[2]。因此, 在考虑地震动各向平动作用的同时考虑扭转效应并进行减震控制具有重要意义。目前, 关于结构的扭转振动响应控制的研究较为丰富。文献[1, 3-5]系统地研究了多维地震动下不同的结构减震控制理论及结构减震优化设计。文献[6-9]研究了考虑结构偏心扭转 TMD 布置。以上研究均假定结构的质量、偏心距、刚度等参数已知, 或根据有限元分析获得以上相关参数, 进行 TMD 的优化布置^[10]。然而针对实际工程结构, 首先, 建筑结构的刚度及质量等参数与原有设计方案或由有限元分析计算得到的理论刚度本身存在一定的偏差; 其次, 在经过一定的使用年限后, 由于家具、生活用品等产生的附加质量以及由于环境和人为因素引发的结构刚度渐变也将使实际建筑整体的动力参数发生不断变化。对于偏心结构, 其实际质量、刚

度和双向偏心距与理论值之间可能存在明显的偏差, 在不考虑以上偏差情况下直接按照理论值或工程经验确定 TMD 的布置位置并不能充分发挥 TMD 的减震能力, 有时甚至会加剧结构扭转及水平响应, 对结构的安全性不利。因此, 如何通过有效算法获得实际多维偏心结构的质量、刚度和偏心距等物理参数进而指导结构减震控制方案, 实现最优减震效果是亟需解决的问题, 具有重要的工程意义。

结构物理参数识别的研究一直是结构健康监测和损伤识别的热点和难点。目前相关方法主要有基于模态分析的识别方法、基于信号分析的识别方法、基于模型修正的识别方法、基于智能算法和统计模式识别的识别方法、基于系统辨识理论的物理参数识别方法^[11-12]。针对双向偏心结构的物理参数识别, 以上方法的不足主要体现在: 难以根据模态参数或动力信号同时识别多种物理参数, 尤其是双向偏心距。而其中基于系统辨识理论的物理参数识别方法可以直接而精确地识别相关动力方程中的物理参数, 比较适合在偏心结构参数识别中应用^[13-14]。由于三维多自由度结构的状态方程比较复杂, 较难实现各个自由度的参数识别, 此外本研究主要考虑在多维建筑结构平动及扭转响应的基础上进行损伤识别, 因此, 笔者讨论将多维剪切型多自由度建筑整体简化为一单质点多维体系, 建立了整体双向偏心结

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51478024); 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室重点资助项目(USDE201403)
收稿日期: 2015-03-12; 修回日期: 2015-04-18

构的动力方程及控制方程,并基于损伤识别理论,采用扩展卡尔曼滤波方法实现对偏心结构刚度识别。此外,利用本方法可以有效识别结构整体质量等效和偏心距,进而为确定 TMD 质量及优化位置提供指导,最终实现结构整体最优调谐减震控制。

1 双向偏心结构调谐减震控制方程

如图 1 所示的双向偏心剪切型建筑结构,可将结构整体等效为具有水平两向及扭转向自由度的多维单质点体系。在结构顶层布置双向 TMD 进行减震时,可将每个方向的 TMD 看作为附加于结构之上的质点。定义建筑结构整体为质点 1,其具有双向平动和绕质心所在竖扭转 3 个自由度;定义 TMD 为质点 2,其具有双向平动和绕建筑物质心所在竖轴转动 3 个自由度。选取合理的坐标系,可建立包括质点 1 和 2 的减震系统动力方程。

如图 1 所示,以结构的质心 C_m 为坐标原点建立直角坐标系,设结构 x 向和 y 向的偏心距分别为 e_x 和 e_y ,即刚心坐标为 (e_x, e_y) 。减震体系的质量矩阵 M 可表示为

$$K = \begin{bmatrix} k_{2x} & -k_{2x} & 0 & 0 & -k_{2x}y_1 & k_{2x}e_y \\ -k_{2x} & k_{1x} + k_{2x} & 0 & 0 & k_{2x}y_1 & -(k_{1x} + k_{2x})e_y \\ 0 & 0 & k_{2y} & -k_{2y} & k_{2y}x_1 & -k_{2y}e_x \\ 0 & 0 & -k_{2y} & k_{1y} + k_{2y} & -k_{2y}x_1 & (k_{1y} + k_{2y})e_x \\ -k_{2x}y_1 & k_{2x}y_1 & k_{2y}x_1 & -k_{2y}x_1 & k_{\theta 2} + k_{2x}y_1^2 + k_{2y}x_1^2 & -k_{\theta 2} - k_{2x}e_y^2 - k_{2y}e_x^2 \\ k_{2x}e_y & -(k_{1x} + k_{2x})e_y & -k_{2y}e_x & (k_{1y} + k_{2y})e_x & -k_{\theta 2} - k_{2x}y_1^2 - k_{2y}x_1^2 & k_{\theta 1} + k_{\theta 2} + (k_{1x} + k_{2x})e_y^2 + (k_{1y} + k_{2y})e_x^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $k_{1x}, k_{1y}, k_{2x}, k_{2y}$ 分别为结构和 TMD 在 x 向及 y 向的水平刚度; (x_1, y_1) 表示 TMD 的坐标;和分别为偏心结构和 TMD 自身的抗扭刚度。

减震体系的阻尼可采用 Rayleigh 阻尼的形式

$$C = \alpha M + \beta K \quad (3)$$

其中:Rayleigh 阻尼系数 α, β 可根据设定的阻尼比及测得的结构频率计算得到。

结构动力方程可表示为

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -M\ddot{U}_g(t) \quad (4)$$

其中: $U = [U_x, U_y, U_\theta]^T = \{u_{x1}, u_{x2}, u_{y1}, u_{y2}, u_{\theta 1}, u_{\theta 2}\}^T$; $\ddot{U}_g(t) = [\ddot{U}_{xg}(t), \ddot{U}_{yg}(t), \ddot{\Phi}_{\theta g}(t)]^T$, 为地震动输入。

定义 $X = \{U \quad \dot{U}\}^T$, $Y = \{U \quad \ddot{U}\}^T$ 为系统的状态向量,则运动方程(4)可表示为状态方程的形式

$$\dot{X} = AX + B\ddot{U}_g(t), Y = CX + D\ddot{U}_g(t) \quad (5)$$

其中: $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$; $C =$

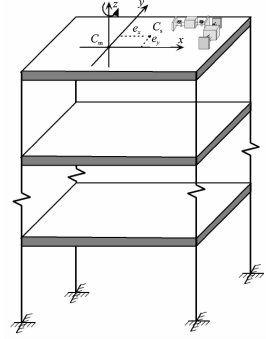


图 1 考虑偏心扭转的三维剪切型结构示意图
Fig. 1 Three-dimensional eccentric shear structure

$$M = \begin{bmatrix} m_x & & \\ & m_y & \\ & & J_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: $m_x = m_y = \begin{bmatrix} m_1 & \\ & m_2 \end{bmatrix}$; $J_t = \begin{bmatrix} J_1 & \\ & J_2 \end{bmatrix}$; m_1 为结构质量; m_2 为 TMD 的质量; J_1 为结构本身绕质心所在竖轴的转动惯量; J_2 为 TMD 绕结构质心所在竖轴的转动惯量。

系统刚度矩阵 K 可表示为

$$\begin{bmatrix} I & 0 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}; B = D = \begin{bmatrix} 0 \\ -I \end{bmatrix}.$$

综上,根据多向地震动加速度激励向量,便可计算得到结构与 TMD 的耦合动力响应。

2 考虑偏心率的 TMD 位置优化布置

由结构的动力方程及已有研究成果可知,TMD 的布置位置主要影响对结构的扭转效应减震。为了全面了解 TMD 的布置位置对结构扭转减震效果的影响,可根据以上建立的结构与 TMD 的耦合动力方程,对一单层框架结构不同位置布置 TMD 并进行数值分析和结果对比。该结构平面图见图 2。

单层框架结构的质量为 $m_1 = 4 \times 10^5$ kg,长度 a 为 45 m,宽度 b 为 24 m;水平抗推刚度和抗扭刚度分别为 $k_x = 3.5 \times 10^9$ N/m, $k_y = 3.2 \times 10^9$ N/m 和 $k_\theta = 3.2 \times 10^{11}$ N/rad;两向偏心距 e_x 和 e_y 分别为 4

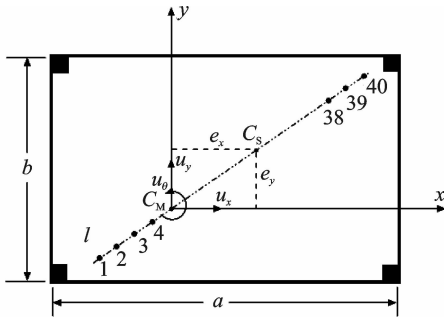


图2 结构平面示意图

Fig.2 Schematic plan of structure

和3 m。连接结构刚心 C_s 和质心 C_M 作直线 l ,如图2所示,在直线 l 上从点1(-4, -3)开始沿 l 正方向每隔0.5 m布置同一个TMD,沿 l 共布置40个点,布置相同TMD对结构减震响应的影响,其中,质心 C_M 位置为点10,刚心 C_s 位置为点30。取TMD质量为结构质量的8%,即 $m_2 = 3.2 \times 10^4$ kg,设定TMD的振动频率与结构的振动频率相同,使其发生谐振,从而确定TMD的刚度。从点1~40,每点依次布置一次TMD并求得扭转加速度响应最大值,结果如图3所示。

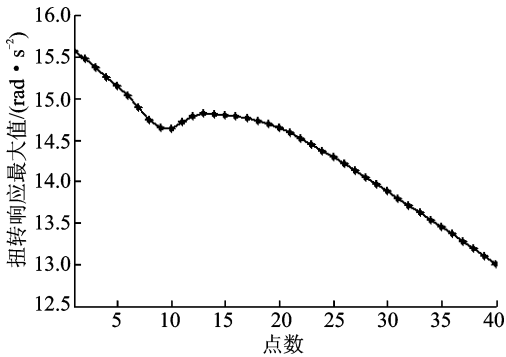


图3 扭转响应最大值随布置点位置变化图

Fig.3 Maximum torsional responses with different locations

由图3可以看出,TMD的布置位置从点1向点40,结构的扭转加速度响应最大值整体上呈减小趋势。当布置位置在小于点10时,即TMD在结构质心地外侧时,建筑结构的扭转响应较大,TMD布置位置距质心越远则建筑物结构响应越大;当布置位置在点20~30间,即TMD在结构质心与刚心之间时,随点数增大结构的扭转响应下降较平缓;当布置位置在大于点30时,即TMD在结构刚心外侧时,建筑结构的扭转响应明显减小,TMD布置位置距刚心越远建筑物结构响应越小。不同布置位置下的结构水平加速度变化基本不大。由此可见,对于建筑物结构进行布置TMD进行减震时,TMD的布置

位置对建筑的响应有一定的影响,不同位置布置TMD的得到的结构扭转响应差别较大。因此,能够准确得到建筑结构的质心和刚心的位置显得尤为重要,而在建筑结构投入正常使用阶段,由于使用者入住带来的各种附加质量使得结构整体质量不再是设计时的理论质量,此时结构整体的质心位置也与设计时结构质心位置有所差别。如果能够根据结构响应确定结构的真实偏心距,可指导TMD的布置位置将充分发挥TMD的减震能力。

3 基于扩展卡尔曼滤波的偏心结构参数识别

卡尔曼滤波是一种最优状态估计方法^[15],由实时获得的受噪声污染的离散观测数据,对系统状态进行线性、无偏及最小误差方差最优估计。扩展卡尔曼滤波算法用递推状态空间方程的一阶泰勒公式代替非线性方程对非线性系统进行状态估计。已有研究表明,利用卡尔曼滤波技术能够实现剪切框架结构中部分参数的简单识别,且具有较好识别精度,但该方法需要结构的输入和输出信息均较完备^[12-16]。目前尚缺乏基于卡尔曼滤波的双向偏心结构质量、刚度、偏心距等多参数同时识别的方法。非线性系统的离散状态方程和观测方程为

$$\dot{\mathbf{X}}(t_{i+1}) = f[\mathbf{X}(t_i), t_i] + \mathbf{W}(t_i) \quad (6)$$

$$\mathbf{Z}(t_{i+1}) = h[\mathbf{X}(t_{i+1}), t_{i+1}] + \mathbf{V}(t_{i+1}) \quad (7)$$

其中: $\mathbf{X}(t_i)$ 为 t_i 时刻状态向量; $\mathbf{X}(t_{i+1})$ 为 t_{i+1} 时刻状态向量; $\mathbf{Z}(t_{i+1})$ 为 t_{i+1} 时刻观测向量; $\mathbf{W}(t_i)$ 为系统噪声向量; $\mathbf{V}(t_{i+1})$ 为 t_{i+1} 时刻的观测噪声向量。

$\mathbf{W}(t_{i+1})$ 和 $\mathbf{V}(t_{i+1})$ 相互独立均为零均值的高斯白噪声,其协方差矩阵分别为 \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 。卡尔曼滤波方程如下。

状态预测

$$\hat{\mathbf{X}}(t_{i+1}/t_i) = \hat{\mathbf{X}}(t_i/t_i) + f[\hat{\mathbf{X}}(t_i/t_i), t_i] \quad (8)$$

$$\mathbf{P}(t_{i+1}/t_i) = \Phi[\hat{\mathbf{X}}(t_{i+1}/t_i), t_i, t_{i+1}] \mathbf{P}(t_i/t_i) \times \Phi[\hat{\mathbf{X}}(t_i/t_i), t_i, t_{i+1}] + \mathbf{Q}(t_i) \quad (9)$$

计算增益矩阵

$$\mathbf{G}[\hat{\mathbf{X}}(t_{i+1}/t_i), t_{i+1}] = \mathbf{P}(t_{i+1}/t_i) \times \mathbf{H}^T[\hat{\mathbf{X}}(t_{i+1}/t_i), t_{i+1}] \{ \mathbf{H}[\hat{\mathbf{X}}(t_{i+1}/t_i), t_{i+1}] \times \mathbf{P}(t_{i+1}/t_i) \mathbf{H}^T[\hat{\mathbf{X}}(t_{i+1}/t_i), t_{i+1}] + \mathbf{R}(t_{i+1}) \}^{-1} \quad (10)$$

状态滤波

$$\hat{\mathbf{X}}(t_{i+1}/t_{i+1}) = \hat{\mathbf{X}}(t_{i+1}/t_i) + \mathbf{G}[\hat{\mathbf{X}}(t_{i+1}/t_i), t_{i+1}] \times \{ \mathbf{Z}(t_{i+1}) - h[\hat{\mathbf{X}}(t_{i+1}/t_i), t_{i+1}] \} \quad (11)$$

$$\mathbf{P}(t_{i+1}/t_{i+1}) = \{ \mathbf{I} - \mathbf{G}[\hat{\mathbf{X}}(t_{i+1}/t_i), t_{i+1}] \} \times \mathbf{H}[\hat{\mathbf{X}}(t_{i+1}/t_i), t_{i+1}] \mathbf{P}(t_i/t_i) \quad (12)$$

其中: $\hat{\mathbf{X}}(t_i/t_i)$ 和 $\mathbf{P}(t_i/t_i)$ 分别为 t_i 时刻状态估计向量和误差协方差矩阵; $\hat{\mathbf{X}}(t_{i+1}/t_i)$ 和 $\mathbf{P}(t_{i+1}/t_i)$ 分别为由 t_i 时刻的状态估计向量和误差协方差矩阵对 t_{i+1} 时刻状态估计向量和误差协方差矩阵的预测值; $\Phi[\hat{\mathbf{X}}(t_{i+1}/t_i), t_i, t_{i+1}]$ 为从 t_i 时刻到 t_{i+1} 时刻的状态转移矩阵; $\mathbf{G}[\hat{\mathbf{X}}(t_{i+1}/t_i), t_{i+1}]$ 为增益矩阵; \mathbf{I} 为单位矩阵; $\mathbf{H}[\hat{\mathbf{X}}(t_{i+1}/t_i), t_{i+1}]$ 为 $\mathbf{h}[X(t_{i+1}), t_{i+1}]$ 的 Jacobi 矩阵。

对于多层双向偏心结构,限于卡尔曼滤波算法能力的限制尚不能建立各层参数均未知的层间模型,但可根据式(4)和式(5)的系统耦合减震方程实现结构整体物理参数的识别。将结构整体的质量、刚度和偏心距等参数转化为扩展卡尔曼滤波状态方程的状态量,建立结构的状态方程和观测方程,代入卡尔曼滤波方程进行状态量的估计^[15]。在扩展卡尔曼滤波的迭代过程中进行参数识别的同时会对输入的响应进行状态预测,通过对状态预测响应和输入响应之间判断扩展卡尔曼滤波的识别是否准确以保证其识别精度。

在实际测试和应用中,首先,可以采用在结构上施加初始位移之后突然卸载的方法获得结构自由振动响应信号,再将结构顶层信号作为系统输出信号带入到卡尔曼滤波方程中,通过迭代计算逐步实现动力参数的精确识别;然后,根据识别出的建筑结构的整体质量结果确定 TMD 的质量,由识别出的双向偏心距结果结合第二部分所论述的 TMD 的布置位置对结构的扭转效应减震影响规律;最后,确定最优的 TMD 布置位置。

上述方法避免了传统减震方法主要依据设计方案和工程经验确定结构动力方程参数的缺陷,能够通过实测信号精确估计工程结构的真实质量、刚度和偏心状态,有的放矢地确定调谐阻尼器的设计和加工参数,然后建立更精确的结构动力方程和减震控制模型,通过动力时程分析可获得结构在预期地震作用下更真实的动力响应和减震性能,为实现基于性能的减震控制提供有效的技术支持。

4 计算实例

为了验证基于卡尔曼滤波的双向偏心结构质量、刚度和偏心距的物理参数识别方法和识别精度,以及基于参数识别结果的 TMD 位置合理优化布置对减震效果的影响,以某 10 层非对称框架结构为例,将结构整体简化为多维单质点体系。利用扩展卡尔曼滤波对结构整体的质量、偏心距、刚度等参数进行识别。以偏心距识别结果为依据,在不同位置布置 TMD 比较减震效果。如图 4 所示,框架结构的长和宽分别为 50 和 24 m。框架结构各楼层的质量和刚度参数以及整体偏心距如表 1 所示。

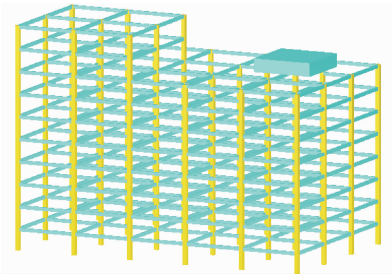


图 4 10 层非对称框架结构有限元模型
Fig. 4 FE model of ten-layer asymmetric frame

表 1 建筑结构的各参数
Tab. 1 The parameters of the structure

| 结构层数 | 楼层质量 m/kg | 楼层刚度 | | | 结构整体的偏心距 | |
|------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|----------------|----------------|
| | | $K_x/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$ | $K_y/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$ | $K_t/(10^{11} \text{N} \cdot \text{m})$ | e_x/m | e_y/m |
| 1 | 6.65×10^5 | 3.41×10^9 | 3.38×10^9 | 9.8 | | |
| 2 | 6.70×10^5 | 3.36×10^9 | 3.33×10^9 | 9.75 | | |
| 3 | 6.55×10^5 | 3.31×10^9 | 3.28×10^9 | 9.70 | | |
| 4 | 6.43×10^5 | 3.26×10^9 | 3.23×10^9 | 9.65 | | |
| 5 | 6.12×10^5 | 3.21×10^9 | 3.18×10^9 | 9.60 | | |
| 6 | 5.97×10^5 | 3.16×10^9 | 3.13×10^9 | 9.55 | 5 | 4 |
| 7 | 5.93×10^5 | 3.11×10^9 | 3.08×10^9 | 9.50 | | |
| 8 | 5.85×10^5 | 3.06×10^9 | 3.03×10^9 | 9.45 | | |
| 9 | 2.10×10^5 | 1.86×10^9 | 1.56×10^9 | 3.75 | | |
| 10 | 2.10×10^5 | 1.86×10^9 | 1.56×10^9 | 3.75 | | |
| 整体等效 | 5.44×10^6 | 3.35×10^8 | 3.20×10^8 | 1.45 | | |

将结构简化为多维单质点体系,建立动力方程,根据式(4)和式(5)将动力方程表示为 6 个状态方程,并将结构的质量 m 、水平刚度 k_x 和 k_y 、偏心距 e_x 和 e_y 作为状态方程中的状态量。限于算法中未知参数的数量限制,考虑到结构扭转刚度在实际使用过程中变量化不大,假定结构的扭转刚度与设计值相同。随机设定代入扩展卡尔曼滤波识别的各参数初始值分别为:质量 $m_0 = 8.160 \times 10^6$ kg,刚度初始值 $k_{x0} = 1.675 \times 10^8$ N/m, $k_{y0} = 1.280 \times 10^9$ N/m,初始偏心距 $e_{x0} = 15$ m, $e_{y0} = 8$ m。比为 15% 的噪声,识别结果如图 5 及图 6 所示。由以上结果可以看出,在仅已知结构的输入输出信号和结构的扭转刚度的前提下,利用扩展卡尔曼滤波对结构质量、水平刚度、偏心距同时进行识别具有较高的精度和抗噪能力,完全可以满足工程实际识别应用,可根据此识别结果作为布置 TMD 的可靠依据。

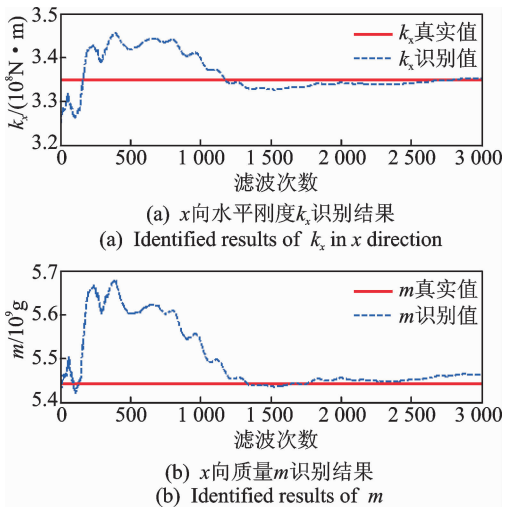


图 5 x 向水平刚度 k_x 与质量 m 识别结果

Fig. 5 Identified results of k_x and m in x direction

根据识别的偏心距 $e_x = 4.92$ m, $e_y = 3.96$ m, 选取结构上 $A(-5$ m, -4 m), $B(5$ m, 4 m) 和 C

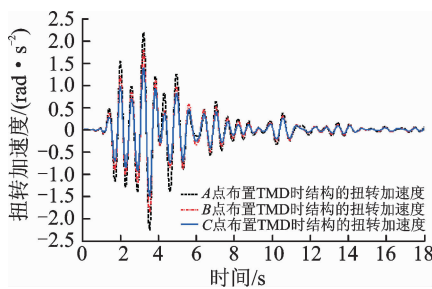


图 7 A, B 和 C 点布置 TMD 时整体结构的扭转响应
Fig. 7 Torsional responses on point A, B and C

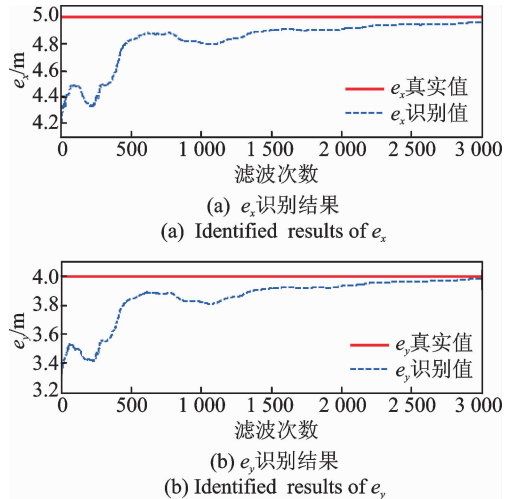


图 6 偏心距 e_x, e_y 识别结果

Fig. 6 Identified results of e_x and e_y

(15 m, 12 m) 3 个具有代表性的位置点。在 A, B 和 C 三点分别布置质量为 4.32×10^5 kg、刚度为 2.6×10^7 N/m 的 TMD。考虑地震动扭转分量,利用弹性波理论中的频域法,由地震动三方向平动分量,合成地震动的扭转分量时程,对结构施加水平两向平动和竖向扭转地震波激励^[17]。 A, B 和 C 点布置 TMD 得到的结构扭转加速度响应如图 7 所示,3 个位置布置 TMD 时结构水平加速度响应变化很小,对每个时刻 C 点的响应与 A 点的响应作比,结构的水平响应和扭转响应如图 8 所示。

由图 7 可以看出, TMD 的布置位置对结构的扭转响应具有明显影响,在 C 点布置 TMD 相对具有更好的减震效果。通过图 8 看出:在 A 点和 C 点分别布置 TMD 的 x 向结构加速度响应的比值在 1 附近小幅变化,表明 TMD 的布置位置对结构的平动减震影响并不明显; A 点布置 TMD 与 C 点布置 TMD 结构的扭转响应比值约为 0.7,说明 TMD 的布置位置对结构的扭转减震影响较明显。

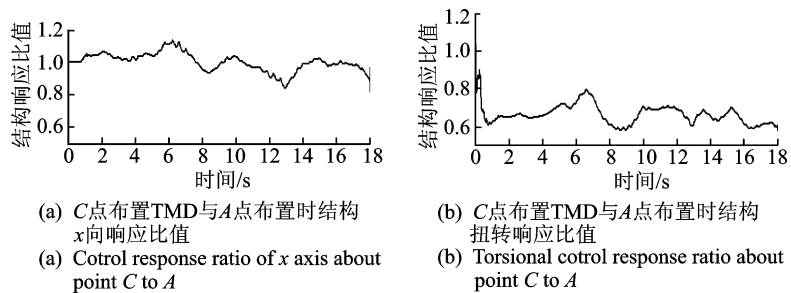


图 8 C 点布置 TMD 与 A 点布置时结构响应比值

Fig. 8 Cotrol response ratio about point C to A

5 结束语

在双向偏心结构上安装 TMD 进行减震控制时,结构的偏心距对减震效果有明显的影响。笔者建立了考虑偏心的三维剪切型建筑结构减震控制方程,探讨了偏心距的影响规律,提出了基于扩展卡尔曼滤波算法同时识别结构的整体质量、水平两向刚度、偏心距的方法。算例分析表明,笔者提出的物理参数识别方法具有实施便捷、抗噪性强及精度较高等优点。基于识别的水平两向偏心距结果表明,TMD 布置于刚心一侧能减小结构与 TMD 整体的偏心作用,更有利于结构的扭转效应的减震。依据物理参数识别结果确定结构减震方案,能够有的放矢、充分发挥阻尼器的耗能能力,实现基于性能的结构减震控制。

参 考 文 献

- [1] 李宏男, 霍林生. 结构多维减震控制[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 148-159.
- [2] 刘大海, 杨翠如, 钟锡根. 高层建筑抗震设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993: 328-342.
- [3] 霍林生, 李宏男, 孙丽. 多维地震作用下非对称结构利用 TLCD 减震控制研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(4): 147-153.
- Huo Linsheng, Li Hongnan, Sun Li. Parameter study of TLCD control system excited by multi-dimensional ground motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(4): 147-153. (in Chinese).
- [4] Pouria B, John W, Thang N D. Displacement-based design of buildings with torsion: theory and verification[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(6): 1-13.
- [5] 张俊发, 杨迪雄, 刘云贺, 等. 空间非对称框架结构偏心扭转地震反应的控制[J]. 西安建筑科技大学学报, 2002, 34(4): 349-353.
- Zhang Jinfa, Yang Dixiong, Liu Yunhe, et al. Study on controlling eccentric torsional seismic response of the 3D asymmetric frame structure [J]. Xi'an University of Architectural and Technology, 2002, 34(4): 349-353. (in Chinese).
- [6] Ueng J M, Lin Chichang, Wang J F. Practical design issues of tuned mass dampers for torsionally coupled buildings under earthquake loadings[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2008, 17(1): 133-165.
- [7] 戴育, 霍凯成. 偏心隔震结构扭转效应的影响因素分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(14): 137-141.
- Dang Yu, Huo Kaicheng. Research on the effect of torsional response of base-isolated buildings[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(14): 137-141. (in Chinese)
- [8] Wang J F, Lin Chichang. Seismic performance of multiple tuned mass dampers for soil - irregular building interaction systems[J]. International Journal of Solids and Structures, 2005, 42: 5536-5554.
- [9] 李志军, 刘园园, 王社良, 等. 偏心结构基于 LMI 的鲁棒 H_{∞} 控制[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(5): 857-863.
- Li Zhijun, Liu Yuanyuan, Wang Sheliang, et al. The H_{∞} control of eccentric structure based on LMI [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2014, 34(5): 857-863. (in Chinese)
- [10] 国巍, 李宏男. 考虑扭转耦联效应的附属结构最优位置分析[J]. 计算力学学报, 2009, 26(6): 797-803.
- Guo Wei, Li Hongnan. Secondary system's optimal position analysis concerning the lateral-torsion coupling effect[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2009, 26(6): 797-803. (in Chinese)
- [11] Almazán J L, Espinoza G, Aguirre J J. Torsional balance of asymmetric structures by means of tuned mass dampers[J]. Engineering Structures, 2012, 42(9): 308-328.
- [12] Yang J N, Pan Silian, Huang Hongwei. An adaptive extended Kalman filter for structural damage identifications II: unknown inputs [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2007, 14(3): 497-521.
- [13] He Haoxiang, Lv Yongwei. Damage detection for continuous bridge based on static-dynamic condensation and extended kalman filtering[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 15(8): 1-14.
- [14] Chui C K, Chen Guanrong. Kalman filtering with real-time applications[M]. 3rd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 1998: 35-70.
- [15] Lei Yi, Jiang Ying, Xu Zhiqin. Structural damage detection with limited input and output measurement signals[J]. Journal of Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 28(2): 229-243.
- [16] 任宜春, 易伟建. 结构物理参数识别的多尺度参数卡尔曼滤波方法[J]. 工程力学, 2008, 25(5): 1-5.
- Ren Yinchun, Yi Weijian. Identification of physical parameters by multi-scale parameter Kalman filter [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2008, 25(5): 1-5. (in Chinese).
- [17] 孙士军, 陈国兴. 地面运动转动分量的合成方法[J]. 地震学刊, 1998, 10(1): 19-24.
- Sun Shijun, Chen Guoxing. Synthesis method for estimation of rotation components of ground motion [J]. Journal of Seismology, 1998, 10(1): 19-24. (in Chinese)



第一作者简介: 何浩祥, 男, 1978年5月生, 博士、教授。主要研究方向为结构健康监测和减震控制。曾发表《考虑涡旋效应的圆柱形 TLD 多维减震效果研究》(《振动与冲击》2012年第31卷第6期)等论文。

E-mail: hhx7856@163.com

