

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201904016

被动式自适应悬吊质量摆对大跨空间结构振动控制的研究*

霍林生, 张豫皖, 黄辰, 李宏男

(大连理工大学建设工程学部, 辽宁大连 116024)

摘要: 针对悬吊质量摆在地震作用下动力响应过大而导致的大摆角频率失调问题, 提出一种基于弧形支座的被动式自适应悬吊质量摆, 以保证其在振动过程中周期保持恒定并应用于大跨空间结构的振动控制。首先推导出在大摆角振动中能使悬吊摆的周期保持恒定的弧形支座的数学方程, 接着利用拉格朗日方程原理建立了自适应悬摆—大跨空间结构耦合体系的运动方程。针对悬吊质量摆仅能控制结构水平振动的缺点进行改进, 使其可以同时控制大跨空间结构水平和竖向的动力响应。以一单层网壳结构为例, 研究了其在不同的水平和竖向地震作用下的减振效果, 并与传统的悬吊摆进行对比。结果表明, 改进后的自适应摆对大跨结构水平和竖向地震响应的峰值和均值都有较好的减振效果, 减振率最高可达65%, 尤其是大摆角时减振效果明显优于传统的悬吊质量摆。

关键词: 悬吊质量摆; 周期恒定; 大跨空间结构; 振动控制; 减振率

中图分类号: TU351.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-0968-09

Research on Vibration Control of Large-span Spatial Structures with a Passive Adaptive Suspended Mass Pendulum

HUO Linsheng, ZHANG Yuwan, HUANG Chen, LI Hongnan

(Faculty of Infrastructure Engineering Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In this paper, a passive adaptive suspended pendulum (ASMP) based on curved support is proposed to reduce the seismic response of the large-span spatial structures. Firstly, the mathematical equations for the curved support are derived, which can keep the period of the suspended mass pendulum constant at a large angle of swing. Based on the principle of Lagrange equations, the motion equation of the coupling system of ASMP and long-span spatial structures is established. The shortcomings that the suspended mass pendulum can only control the horizontal vibration of the structure are overcome so that the horizontal and vertical dynamic response of the large-span space structure can be simultaneously controlled. Furthermore, to verify the vibration control effectiveness of the ASMP, a reticulated shell structure was investigated under different horizontal and vertical seismic records. The results reveal that the ASMP has a significant mitigation effect on the peak and average values of the horizontal and vertical seismic response of the structure and the vibration reduction rate can reach up to 65%, which is obviously better than normal suspended mass pendulums.

Keywords: passive adaptive suspended pendulum; constant period; large-span spatial structure; vibration control; response reduction ratio

* 收稿日期:2019-04-08;修回日期:2019-05-30

基金项目:国家重点研发项目(2016YFC0701103)、国家自然科学基金面上项目(51578114)资助

作者简介:霍林生(1975—),男,教授,博士。主要从事工程结构抗震及减振控制的研究。E-mail: lshuo@dut.edu.cn

引言

近年来,大跨空间结构在体育场、火车站、机场航站楼等建筑中得到了极为广泛的应用。这些结构具有跨度大、质量轻和频率低的特点,在遭受地震作用时动力响应往往较大,容易导致结构产生疲劳损伤,会影响结构的安全和使用功能。因此,对大跨空间结构进行振动控制十分重要^[1]。大跨空间结构中有一些常见的非结构构件如马道、风管、灯具、音箱、大屏幕、吊顶等屋面悬挂物,可以将这一类的悬挂物改造为悬吊质量摆,用以控制大跨空间结构的振动响应。悬吊质量摆是一种被动控制的减振方法,与其他的被动控制装置相比,它又具有原理简单、减振效果明显、造价低、可靠性高、易于安装等诸多优点,因此在实际工程中有极为重要的应用^[2]。

关于悬吊质量摆在减振控制中的应用,国内外的专家学者进行了广泛的研究。李宏男等^[3-6]研究了悬吊质量摆减振原理,提出利用悬吊质量摆减小结构的动力响应,并分析了摆长等参数对其减振效果的干扰,最后利用实际地震动记录进行数值模拟。王肇民^[7]采用传递函数的方法计算了悬吊质量摆-结构耦合体系的动力响应,并选用一个实际的输电塔进行了模拟计算。张伟等^[8]提出一种半刚性悬挂结构体系,并研究了其避震机理和参数优化。闫维明等^[9]提出一种新型悬吊式TMD并进行了振动台实验。侯洁等^[10-11]在考虑了悬吊质量摆的非线性刚度的情况下,提出了一种新的计算大摆角下结构的动力响应的方法。霍林生等^[12]提出了一种悬吊质量摆的空间振动模型并研究了其空间振动特性。受到大摆角非线性的影响,摆的实际振动周期与线性悬吊质量摆的理论计算结果存在差异,在大幅振动的情况下,随着摆角的增加,振动的周期也会增加。如果设计中忽略大摆角非线性的影响,将会因频率失谐而导致其减振性能降低。因此,发展有效的自适应悬吊质量摆减振系统是非常必要的。A. J. Roffel等^[13]提出了一种自适应悬吊质量摆的构造方式,其主要原理是通过电机来调整外套框架的位置,从而改变摆的长度。类似形式的悬吊质量摆,还应用于澳大利亚悉尼的奇夫利塔。D. T. R. Pasala^[14]和M. T. Contreras^[15]提出了一种主动控制的

自适应悬吊质量摆,其原理是通过施加电流的方式,适时改变悬吊质量的摆长,从而达到自适应减振的目的。然而,目前的自适应悬吊质量摆减振系统均需传感器和作动器来适时调节摆长,尽管能达到较好的减振效果,但是造价昂贵、维护成本高,可靠性和稳定性难以得到保障,在遭遇恶劣环境条件时某些电子元件的损坏会导致自适应减振系统无法工作。

本文结合悬吊质量摆振动控制的研究成果,提出一种基于弧形支座的被动式自适应悬吊质量摆(Adaptive Suspended Mass Pendulum, ASMP),用以解决大幅振动时悬吊质量摆的频率失调问题,保证大跨空间结构在强震作用下的减振效果。

1 被动式自适应悬吊质量摆的提出

在考虑大摆角振动时,悬吊质量摆的周期为:

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{9}{64} \sin^4 \frac{\theta}{2} + \dots \right)$$

式中, l 和 θ 分别为摆长和摆角。

随着摆角的增加,悬吊摆的周期变长。为了解决频率失调而导致减振效果变差的问题,悬吊质量摆在大摆角振动时,摆长应该逐渐减小,以抵消大摆角导致的周期增加。本文提出了悬吊质量摆的弧型支座设计方案,如图1所示。在小摆角时,摆长基本不变;随着摆角的增加,有效摆长将会减小。因此,如果能合理的设计支座的形状,则可以消除悬吊摆的大摆角非线性对悬吊质量摆周期的影响。如图2所示,将支座的形状定义为一个半径为 a 的圆沿一条直线滚动时圆边界上一定点的轨迹。其中曲线 ACO 、 BDO 是以半径为 a 的圆沿直线 AB 滚动形成的摆线。把摆长为 $4a$ (1/2拱长)的单摆悬挂起来,在两边利用 ACO 、 BDO 形状制成支座来限制单摆的运动。当摆发生振动时,悬挂线不断与圆滚

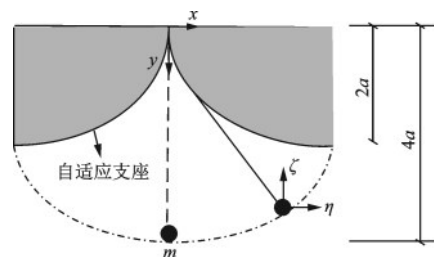


图1 自适应悬吊质量摆

Fig.1 Adaptive suspended mass pendulum

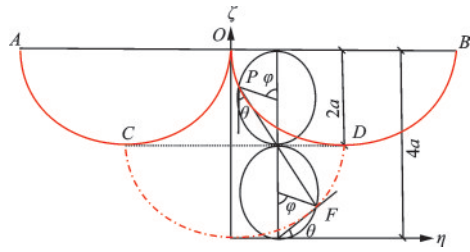


图2 自适应摆原理

Fig.2 Principle of the adaptive suspended mass pendulum

线(ACO、BDO)接触(或脱离),瞬时接触点相当于瞬时悬挂点,且悬挂线与圆滚线在P点相切。当摆到最高点时,与圆滚线的C、D点接触。整个运动过程,可以看作一个悬挂点不断变化的单摆,并且曲线CD相当于以半径为a的圆沿直线CD滚动形成的摆线。

以单摆运动的最低点设立坐标轴 ξ 和 η ,且 φ 是半径为a的圆滚动的角度, θ 是变化的摆线与竖直方向的夹角。

摆球的坐标可以表示为:

$$\eta = a(\varphi + \sin\varphi) \quad (1)$$

$$\zeta = a(1 - \cos\varphi) \quad (2)$$

令 $\varphi=0$,弧长 $s=0$,则曲线中 s 和 φ 的关系为:

$$ds = \sqrt{(d\zeta)^2 + (d\eta)^2} \quad (3)$$

$$s = \int_0^\varphi \sqrt{(d\zeta)^2 + (d\eta)^2} = 4a \sin \frac{\varphi}{2} \quad (4)$$

可知曲线AO和BO长度均为 $8a$ 。

当长为 l 的摆线和质量为 m 的小球在挡板AO、BO上运动时,摆球运动到任意位置 $F(x', y')$,由小球在重力场中沿竖直平面内的受力分析可知,切向的运动方程为:

$$m \frac{d^2 s}{dt^2} = -mg \sin\theta \quad (5)$$

将式(4)代入式(5),可得典型的谐振动方程:

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + \frac{g}{4a} s = 0 \quad (6)$$

式(6)表明质点做谐振动,其周期为:

$$T_s = 4\pi \sqrt{\frac{a}{g}} \quad (7)$$

由式(7)可知,自适应摆的周期与振幅无关,质点在曲线上任意一点由静止释放,到达底端的时间都为 $T_s/4$,此类摆在任意角度时都保持等时性的特点。

图3是自适应摆与传统摆的周期与摆角的关系

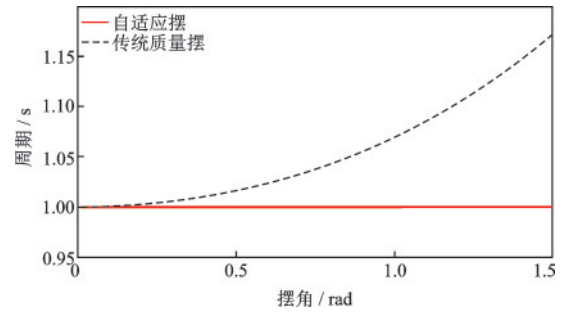


图3 摆的周期与摆角的关系曲线

Fig.3 Relationship between period and angle of swing of the pendulum

曲线。对于自适应摆,其周期保持恒定,而传统摆的周期则随角度的增大而变长。

2 受控系统运动方程

如图4所示,以空间结构为例,建立自适应悬吊质量摆-结构耦合系统的运动方程并与传统的悬吊质量摆进行对比。当结构遭受外部激励作用时,悬吊质量摆可以对结构施加一个与外力方向相反的控制力,从而降低结构动力响应。

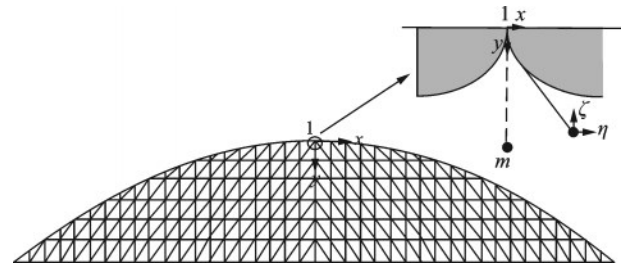


图4 附加自适应悬吊质量摆的空间结构示意图

Fig.4 Schematic of a spatial structure with the adaptive suspended mass pendulum

建立以主结构为基础的坐标系 Oxy 以及以摆球为坐标系的 ξ, η ($\zeta = l - l \cos\theta$, $\eta = l \sin\theta$)。结构的动能 T 可用式(8)确定:

$$T = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{A}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{A}} = \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} m_u & M_{ur} \\ M_{ru} & M_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

式中, \mathbf{M} 为结构的质量矩阵; $\dot{\mathbf{A}}$ 为结构相对于地面运动的速度向量; m_u 为悬吊质量摆所在结点的等效质量; M_{rr} 为其它结点的等效质量矩阵; M_{ur} 和 M_{ru} 分别为结点间的耦联质量矩阵; \dot{x} 为悬吊质量摆所在结点相对于地面的速度; $\dot{\mathbf{A}}$ 为其它结点的相对于地面的速度向量。

自适应悬吊摆的动能 T_m 为:

$$T_m = \frac{1}{2} m ((\dot{x} + \dot{\eta})^2 + \dot{\zeta}^2) \quad (9)$$

式中, m 为悬吊摆的质量。

结构的势能 U 为:

$$U = \frac{1}{2} \Delta^T K \Delta = \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} x \\ \Delta_r \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} k_u & K_{ur} \\ K_{ru} & K_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \Delta_r \end{Bmatrix} \quad (10)$$

式中, K 为结构的刚度矩阵; k_u 为悬吊质量摆所在结点的等效刚度; K_{ur} 为其它结点的等效刚度矩阵; K_{ru} 和 K_{rr} 分别为结点间的耦联刚度矩阵; x 为悬吊质量摆所在结点相对于地面的位移; Δ_r 为其它结点的相对于地面的位移向量。

自适应悬吊摆的势能 U_m 为:

$$U_m = mg\zeta \quad (11)$$

式中, g 为重力加速度。

主结构的耗散能量 D 为:

$$D = \frac{1}{2} \dot{\Delta}^T C \dot{\Delta} = \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\Delta}_r \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} c_u & C_{ur} \\ C_{ru} & C_{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\Delta}_r \end{Bmatrix} \quad (12)$$

式中, C 为结构的阻尼矩阵; c_u 为悬吊质量摆所在结点的等效阻尼系数; C_{ur} 为其它结点的等效阻尼矩阵; C_{ru} 和 C_{rr} 分别为结点间的耦联阻尼矩阵。

将式(8)~(12)代入拉格朗日方程(13)中, 可得到结构体系的运动方程:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q \quad (13)$$

式中, $L = T - U$; 对于广义坐标 q_i 和广义速度 \dot{q}_i , 分别取 $x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}$; 广义力 $Q = [F \ F_r]$, F 为主结构顶层的外部激励, F_r 为其它结点的等效激励矩阵。

根据拉格朗日方程可得附加自适应摆的结构体系的运动方程:

$$\begin{bmatrix} M + \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\Delta}_r \end{Bmatrix} + C \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\Delta}_r \end{Bmatrix} + K \begin{Bmatrix} x \\ \Delta_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F + ma(\dot{\theta}^2 \sin\theta - \ddot{\theta}(1 + \cos\theta)) \\ F_r \end{Bmatrix} \quad (14)$$

式中, F 为悬吊质量摆所在结点处的外部激励荷载; F_r 为其他节点的外荷载向量。

自适应悬吊质量摆的运动方程为:

$$2ma^2(1 + \cos\theta)\ddot{\theta} + ma(1 + \cos\theta)\ddot{x} - ma^2\dot{\theta}^2 \sin\theta + mga \sin\theta = 0 \quad (15)$$

类似的, 当在空间结构附加传统的悬吊质量摆时, 结构体系的运动方程为:

$$\begin{bmatrix} M + \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\Delta}_r \end{Bmatrix} + C \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\Delta}_r \end{Bmatrix} + K \begin{Bmatrix} x \\ \Delta_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F + ml(\dot{\theta}^2 \sin\theta - \ddot{\theta} \cos\theta) \\ F_r \end{Bmatrix} \quad (16)$$

传统悬吊质量摆的运动方程为:

$$ml^2\ddot{\theta} + ml \cos\theta \ddot{x} + mgl \sin\theta = 0 \quad (17)$$

状态空间是一种能有效解决系统动力响应的方法, 对于受控系统的位移, 加速度等结果, 可由 MATLAB/Simulink 解出。

3 大跨空间结构的振动控制

为评估自适应悬吊质量摆的减振效果, 选择一层网壳结构作为受控结构进行计算。所选的结构为 K8 型单层网壳结构, 跨度为 40 m, 高度为 8 m, 跨高比为 5, 共计 169 个节点, 如图 5 所示。在节点编号 127、140、151、163 处设置固定支座, 阻尼矩阵可由瑞利阻尼公式计算, 阻尼比通常取 0.02。

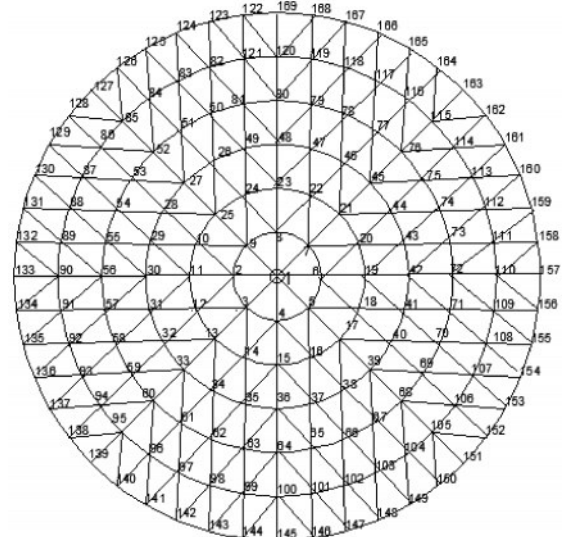


图5 网壳结构模型

Fig.5 Model of a reticulated shell structure

为了分析自适应悬吊质量摆的减振效果, 根据实际情况, 各相关的参数的含义如下:

(1) 周期比 β : 自适应悬吊质量摆的周期与结构周期的比值。自适应摆的摆长为:

$$l_1 = g/(\omega/\beta)^2$$

式中, ω 为主结构的一阶频率。

(2) 质量比: 自适应摆的质量与主结构总质量

M 的比值。

(3)减振率 λ : $\lambda=(x_0-x_1)/x_0$,其中 x_0 和 x_1 分别是结构在无控和有控情况下位移的峰值或均方根值。

自适应悬吊质量摆是一种被动控制装置,在本文所选的网壳结构算例中,将自适应摆悬挂在节点1处。自适应摆的设计可以参照传统的悬吊质量摆,并与其减振效果进行对比。当摆的周期与主结构的周期相同时,自适应摆的减振效果最佳,据此可以获得自适应摆的最优摆长。根据参考文献[10,12],自适应摆的减振率随质量比的增大而增大,但是当质量比大于0.03时,其减振效果不再明显增加。因此在本节的计算中取自适应摆的质量比为0.03。算例中用于对比的传统质量摆的参数均与自适应摆一致。

大跨空间结构由于具有跨度较大、质量轻和频率低的特点,竖向地震作用的影响不能忽视。但是传统的悬吊质量摆只能降低结构水平方向的振动,因此对前文提出的自适应悬吊质量摆进行了改进,使其不仅能够减小结构水平方向的振动,还可以有效的降低结构竖向的动力响应。如图6所示,利用弹簧和阻尼器将自适应摆悬挂在结构上,其对结构竖向振动控制的基本原理与TMD相同。当大跨空间结构在竖向地震作用下产生振动时,会带动自适应摆的竖向振动,其相对运动产生的惯性力反作用到结构上,对结构的竖向振动产生了控制作用,从而可以减小大跨空间结构的竖向地震反应。

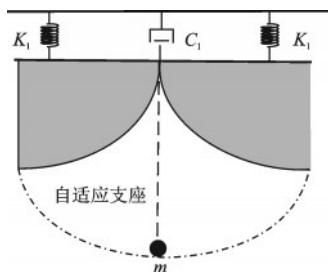


图6 双向自适应悬吊质量摆

Fig.6 Bidirectional adaptive suspended mass pendulum

根据《建筑抗震设计规范》^[16]中对场地类型的划分,分别选取迁安波、El-Centro波、Taft波和天津波代表坚硬、中硬、中软和软土等4类场地类型。每条地震波的峰值加速度在计算时分别按照0.05g、0.1g和0.15g进行调整,对应不同的地震强度。

为了比较两种质量摆对网壳结构的控制效果,在水平和竖直方向上同时输入已选择的地震波对结构的动力响应进行时程分析。因篇幅限制,仅以节点1为例,列出峰值加速度为0.15g时的位移时程曲线,其中图7展示了节点1在水平方向的位移,图8展示了其竖向的位移。其余各种工况下节点1水

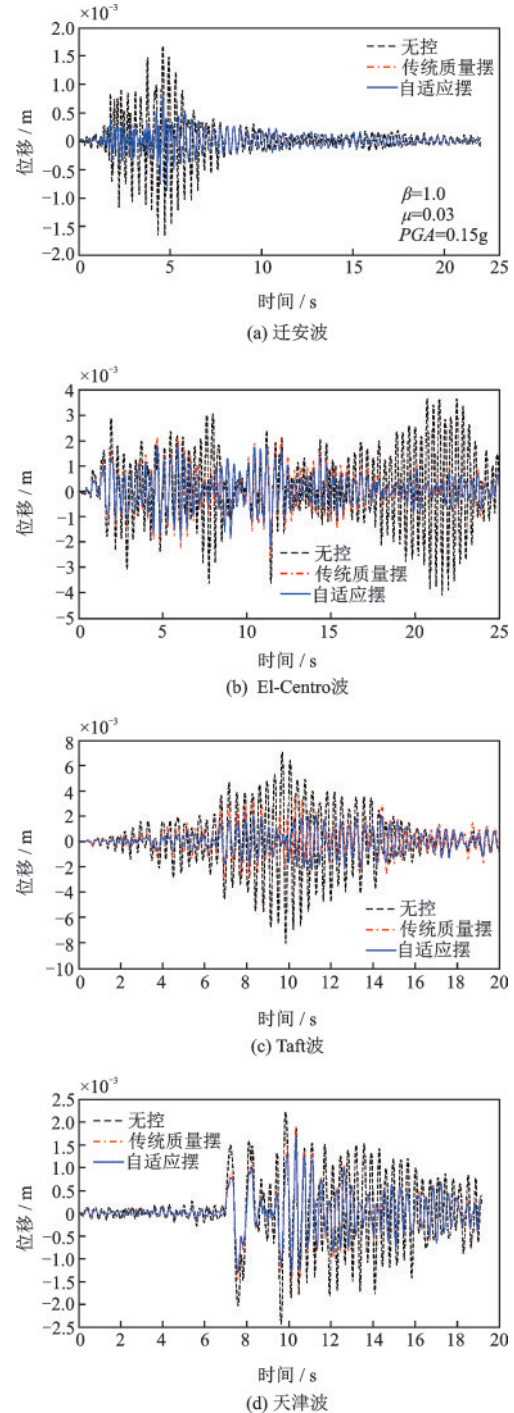
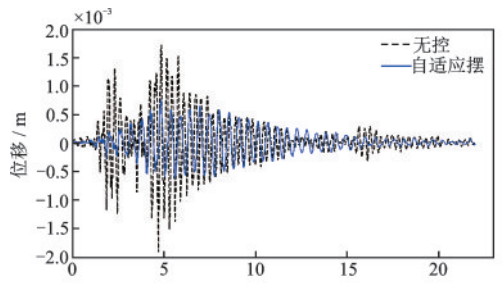
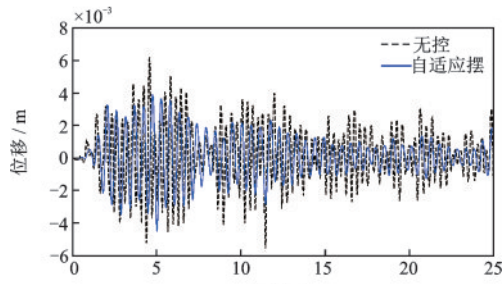


图7 不同地震作用下节点1水平位移时程曲线

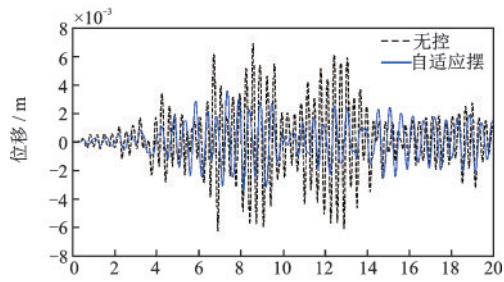
Fig.7 Time history curves of horizontal displacement of Node 1 under different earthquake actions



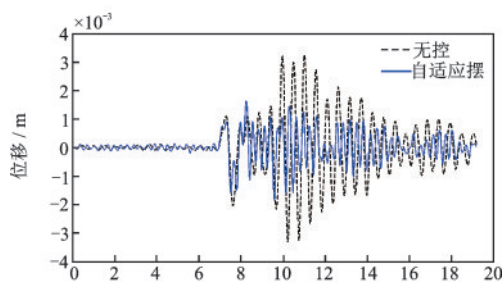
(a) 迁安波



(b) El-Centro波



(c) Taft波



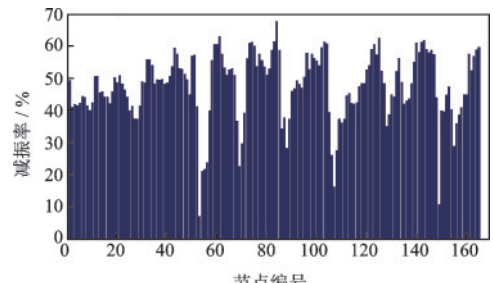
(d) 天津波

图8 不同地震作用下节点1竖向位移时程曲线

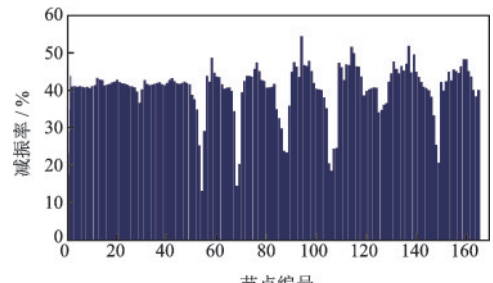
Fig.8 Time history curves of vertical displacement of Node 1 under different earthquake actions

平方向的动力响应见表1~2。图9为由自适应摆控制的主结构各节点水平位移峰值的减振率柱状图。图10为主结构各节点竖向位移峰值的减振率柱状图。

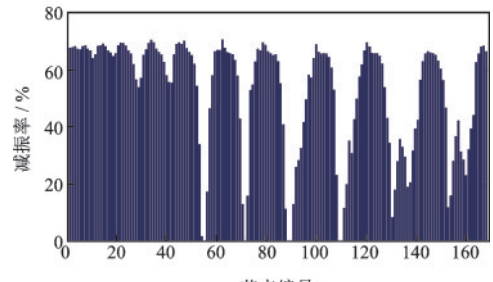
由图7可以看出,在迁安波、El-Centro波、天津波和Taft波的作用下,传统的质量摆与自适应摆对



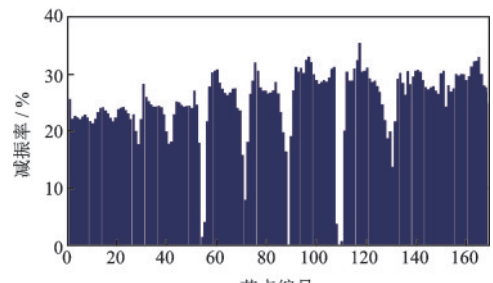
(a) 迁安波



(b) El-Centro波



(c) Taft波



(d) 天津波

图9 不用地震作用下各节点水平位移的减振率

Fig.9 Horizontal displacement reduction rate of each node under different earthquake actions

结构水平位移响应均有较好的减振效果。其中,迁安波作用下节点1的水平位移较小,由表1知此时质量摆的摆角也仅有 10° 左右,因此两种质量摆的减振效果无明显区别。而随着结构响应逐渐增大,如图7(c)所示,Taft波作用下自适应摆对结构水平位移的控制效果明显优于传统的质量摆。由表1可知,自适应摆和传统摆的摆角分别达到了 55.1° 和 46.3° ,而传统的质量摆因大摆角失调问题导致其减

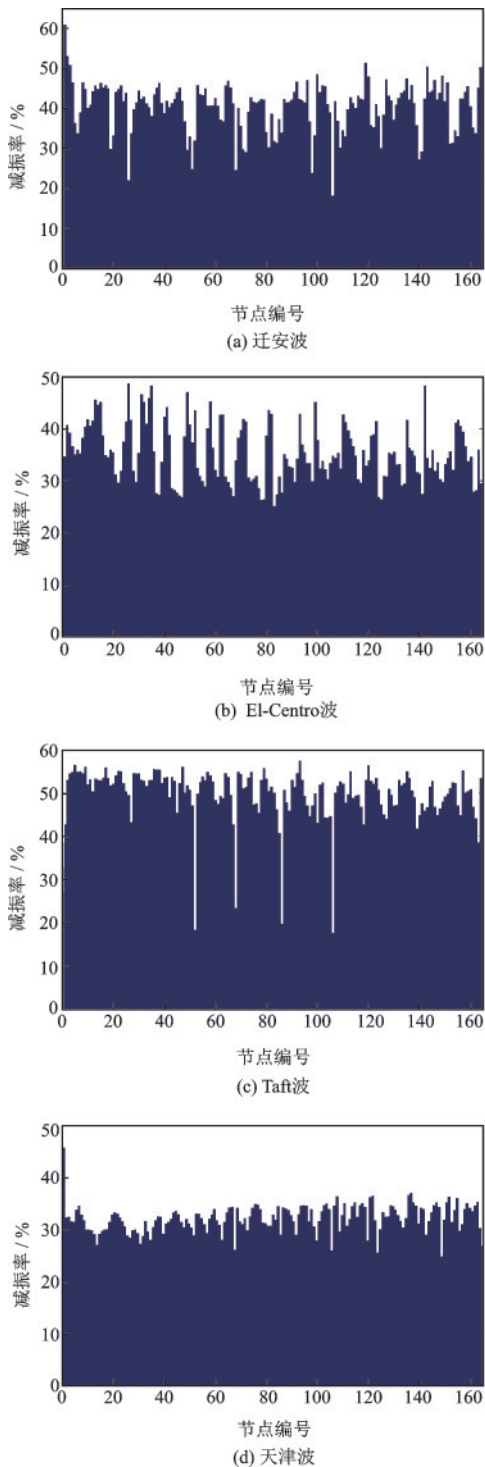


图10 不用地震作用下各节点竖向位移的减振率

Fig.10 Vertical displacement reduction rate of each node under different earthquake actions

振率降低。

如图9(a)所示,迁安波作用下网壳结构各节点水平位移峰值的控制效果较好。选取的网壳结构具有169个节点,其中共有142个节点的减振率超过30%。与迁安波类似,图9(b)中El-Centro波作

用下自适应摆的减振效果也较为理想。由图9(c)可知,在Taft波作用下,共有126个节点的减振率能够达到40%。图9(d)所示的天津波与迁安波类似,共有149个节点减振率可以超过20%。因此,利用自适应悬吊质量摆对网壳结构的地震响应进行控制是可行的,控制效果也较为明显。

由图8可以看出,在竖向的地震作用下,改进后的自适应摆有效的降低了节点1的竖向位移。如图10所示,改进后的自适应摆对网壳结构各节点竖向位移峰值的控制效果均较为理想,其中Taft波作用下结构竖向振动的控制效果最好,共有159个节点减振率可以超过40%,最大减振率可以达到56.9%。在迁安波作用下,共有139个节点的减振率能够达到30%;在El-Centro波作用下,共有131个节点的减振率能够达到30%;在天津波作用下,所有的节点减振率均超过25%。

表1和表2给出各种工况下节点1水平方向的动力响应、两种质量摆的减振率以及摆角。由表1可知,地震激励有较强的随机性,这导致结构的响应与自适应摆的控制效果并不相同。总体而言,在所选的地震波作用下,自适应摆对结构水平位移均有较好的减振效果,减振率最低也可以达到20%,最高超过60%。相同地震波作用在节点1上,当地震波的峰值加速度为0.05g时,传统的质量摆对节点水平位移的控制效果较好。而随着地震强度的增加,传统的质量摆因摆角增大而出现频率失调的问题,进而导致其减振率降低。而本文所提出的基于弧形支座的被动式自适应悬吊质量摆可以保证其在振动过程中周期保持恒定,大摆角对其减振效果的影响很小。因此,当地震波峰值加速度较小时,两种质量摆的减振效果区别不大。而随着地震强度的增大,两种质量摆的摆角也逐渐增大,自适应摆对节点位移峰值和均方根值的控制效果也逐渐优于传统的质量摆。

由表2可知,自适应摆对节点1的加速度有较好的控制效果。在相同的工况下,自适应摆对加速度均值的控制效果依然优于传统的质量摆。自适应摆对加速度峰值亦有较为明显的减振效果,减振率最高可以达到60%。比较表1和表2中的减振率数据可知,自适应摆对节点1位移的控制效果优于对加速度的控制。

表1 节点1位移响应和减振率对比

Table 1 Comparison between the displacements of Node 1 and the vibration reduction ratios

地震记录	PGA/g	位移峰值/cm			减振率/%		位移均方根值/cm			减振率/%		摆角/(°)	
		无控	自适应摆	传统摆	自适应摆	传统摆	无控	自适应摆	传统摆	自适应摆	传统摆	自适应摆	传统摆
迁安	0.05	0.06	0.027	0.027	52.5	52.5	0.011	0.005	0.005	58.2	58.2	3.2	3.2
	0.10	0.12	0.058	0.058	51.7	51.7	0.021	0.009	0.009	57.1	57.1	6.5	6.5
	0.15	0.17	0.086	0.087	49.4	49.2	0.032	0.014	0.014	56.3	56.2	9.2	9.2
El-Centro	0.05	0.14	0.070	0.070	50.4	50.4	0.049	0.021	0.021	57.1	57.1	10.1	10.0
	0.10	0.28	0.140	0.160	49.3	42.9	0.100	0.044	0.049	56.0	51.0	20.3	20.1
	0.15	0.39	0.220	0.250	43.6	35.8	0.141	0.063	0.075	55.3	46.8	31.9	31.3
Taft	0.05	0.26	0.084	0.085	67.7	67.3	0.067	0.025	0.025	62.7	62.7	17.8	14.7
	0.10	0.53	0.170	0.220	67.9	58.5	0.140	0.052	0.058	62.9	58.6	36.0	32.7
	0.15	0.8	0.260	0.370	67.5	53.8	0.21	0.08	0.11	61.9	47.6	55.1	46.3
天津	0.05	0.08	0.050	0.050	37.6	37.5	0.024	0.014	0.014	41.7	41.6	7.2	7.2
	0.10	0.17	0.120	0.120	30.3	29.4	0.048	0.027	0.029	43.7	39.6	14.5	14.3
	0.15	0.25	0.190	0.200	25.6	24.0	0.073	0.041	0.045	43.8	38.4	21.9	21.7

表2 节点1加速度响应和减振率对比

Table 2 Comparison between the accelerations of Node 1 and the vibration reduction ratios

地震记录	PGA/g	加速度峰值/(m·s ⁻²)			减振率/%		加速度均方根值/(m·s ⁻²)			减振率/%	
		无控	自适应摆	传统摆	自适应摆	传统摆	无控	自适应摆	传统摆	自适应摆	传统摆
迁安	0.05	0.76	0.48	0.48	36.8	36.8	0.12	0.04	0.04	66.7	66.7
	0.10	1.51	0.97	0.97	35.8	35.8	0.26	0.12	0.12	53.8	53.8
	0.15	2.29	1.49	1.49	34.9	34.9	0.39	0.19	0.19	51.3	51.1
El-Centro	0.05	0.62	0.37	0.38	40.3	38.7	0.19	0.08	0.08	57.9	57.9
	0.10	1.22	0.74	0.77	39.3	36.9	0.39	0.17	0.19	56.4	51.3
	0.15	1.88	1.13	1.24	39.9	34.0	0.59	0.25	0.29	57.6	50.8
Taft	0.05	1.02	0.39	0.54	61.8	47.1	0.25	0.11	0.14	56.0	44.0
	0.10	2.07	0.79	1.20	61.8	42.0	0.51	0.21	0.27	58.8	47.1
	0.15	3.29	1.19	2.01	60.4	38.9	0.77	0.32	0.49	58.4	36.3
天津	0.05	0.39	0.28	0.28	28.2	28.2	0.09	0.04	0.04	55.6	55.5
	0.10	0.77	0.52	0.55	32.5	28.6	0.17	0.09	0.09	47.3	47.1
	0.15	1.17	0.82	0.92	29.9	21.7	0.26	0.13	0.14	49.6	46.2

4 结论

提出了利用被动式自适应悬吊质量摆对大跨空间结构的地震响应进行控制。推导了这种自适应悬吊摆中弧形支座的数学表达式,建立了自适应摆一大跨空间结构的运动方程,并以一个单层网壳结构为算例,研究了不同的地震作用下自适应悬吊质量摆的减振效果,并与传统的悬吊质量摆进行对比。通过数值计算和分析,得出以下结论:

(1)与传统的悬吊质量摆相比,自适应悬吊质量摆能保证其在振动过程中周期保持恒定,可以解决因频率失调而导致减振效果变差的问题。

(2)对于所选的地震激励,自适应悬吊质量摆均降低了结构的位移与加速度响应的最大值和均方根值,其中90%的节点减振率超过20%、65%的节点减振率可以达到40%,减振率最高可达65%以上。

(3)在大幅值的地震激励下,相对于传统的悬吊质量摆,自适应悬吊质量摆的减振效果更加明

显,最大减振率超过50%。相对于传统的悬吊质量摆,自适应摆的减振率可以提高5%~15%。

(4)改进后的双向自适应悬吊质量摆不仅能够控制结构水平方向的振动,还可以有效的降低结构竖向的动力响应。在竖向地震作用下,80%的节点竖向位移的减振率超过30%。

参考文献:

- [1] 李爱群,陈鑫,张志强.大跨楼盖结构减振设计与分析[J].建筑结构学报,2010,31(6):160-170.
Li A Q, Chen X, Zhang Zh Q. Design and analysis on vibration control of long-span floor structures [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 160-170. (in Chinese)
- [2] 谢绍松,张敬昌,钟俊宏.台北101大楼的耐震及抗风设计[J].建筑施工,2005,27(10):7-9.
Xie Zh S, Zhang J Ch, Zhong J H. Aseismatic and Wind-Resisting Design for Taipei 101 [J]. Building Construction, 2005, 27(10): 7-9. (in Chinese)
- [3] 李宏男, Singh M P. 结构动力吸振摆的优化参数[J].世界地震工程,1994,11(4):14-17.
Li H N, Singh M P. Optimum parameters of vibration energy-dissipating pendulum for structures [J]. World Earthquake Engineering, 1994, 11(4): 14-17. (in Chinese)
- [4] 李宏男.摆—结构体系减震性能研究[J].工程力学,1996,13(3):123-129.
Li H N. Study on vibration damping properties of pendulum-structure system [J]. Engineering Mechanics, 1996, 13(3): 123-129. (in Chinese)
- [5] 李宏男,宋本有.高层建筑利用悬吊质量摆的减震研究[J].地震工程与工程振动,1995,15(4):55-60.
Li H N, Song B Y. Seismic response reduction for tall buildings by suspended mass pendulums [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(4): 55-60. (in Chinese)
- [6] 李庆伟,李宏男.输电塔结构的动力稳定性研究[J].防灾减灾工程学报,2008,28(2):202-207.
Li Q W, Li H N. Study on dynamic instability of transmission tower [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(2): 202-207. (in Chinese)
- [7] 王肇民.电视塔结构TMD风振控制研究与设计[J].建筑结构学报,1994,10(5):2-13.
Wang Zh M. Study and design of TMD wind vibration control of TV tower structures [J]. Journal of Building Structures, 1994, 10(5): 2-13. (in Chinese)
- [8] 张伟,张继文,涂永明,等.半刚性悬挂结构体系减振避震机理及参数优化[J].建筑结构学报,2010,31(12):40-47.
Zhang W, Zhang J W, Tu Y M, et al. Earthquake avoidance mechanism and parameter optimization for semi-rigid suspended structures [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(12): 40-47. (in Chinese)
- [9] 闫维明,纪金豹,蒋华戈,等.新型悬吊式TM及其在某标志塔风振控制中的应用[J].建筑结构学报,2010,31(2):55-60.
Yan W M, Ji J B, Jiang H G, et al. new type pendulous TMD and its application on a tower for wind-induced vibration control [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2): 55-60. (in Chinese)
- [10] 侯洁,霍林生,李宏男.非线性悬吊质量摆对输电塔减振控制的研究[J].振动与冲击,2014,33(3):177-181.
Hou J, Huo L Sh, Li H N. Seismic control of transmission towers with nonlinear suspended mass pendulum [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(3): 177-181. (in Chinese)
- [11] 霍林生,侯洁,李宏男.非线性悬吊质量摆减震控制的等效线性化方法研究[J].防灾减灾工程学报,2015,35(3):283-289.
Huo L Sh, Hou J, Li H N. Research on equivalent linearization of seismic control with nonlinear suspending mass pendulum [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(3): 283-289. (in Chinese)
- [12] Huang Ch, Huo L Sh, Gao H G. Control performance of suspended mass pendulum with the consideration of out-of-plane vibrations [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(9): e2217.1-e2217.21.
- [13] Roffel A J, Lourenco R, Narasimhan S, et al. Adaptive compensation for detuning in pendulum tuned mass dampers [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(2): 242-251.
- [14] Pasala D T R, Nagarajaiah S. Adaptive-length pendulum smart tuned mass damper using shape-memory-alloy wire for tuning period in real time [J]. Smart Structures and Systems, 2014, 13(2): 203-217.
- [15] Contreras M T, Pasala D T R, Nagarajaiah S. Adaptive length SMA pendulum smart tuned mass damper performance in the presence of real time primary system stiffness change [J]. Smart Structures and Systems, 2014, 13(2): 219-233.
- [16] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

(本文责编:赵霞)