温世臣,杨涛.双向地震波作用下巨子型有控结构建筑的隔震设计[J].地震工程学报,2020,42(1):44-51.doi:10.3969/j.issn. 1000-0844.2020.01.044

WEN Shichen, YANG Tao. Seismic Isolation Design of Mega-sub Controlled Structures under Bidirectional Seismic Wave[J]. China Earthquake Engineering Journal, ,2020,42(1):44-51.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.044

双向地震波作用下巨子型有控结构 建筑的隔震设计

温世臣1,杨 涛2

(1. 广西建设职业技术学院土木工程系,广西南宁 530007;2. 广西大学土木建筑工程学院,广西南宁 530004)

摘要:为了增强巨子型有控结构建筑的动力特性,提升其稳定性,设计双向地震波作用下建筑有控 结构。采用3种磁流变阻尼器(MRD)与滑移隔震混合控制结构构成单体建筑有控结构,其包括巨 结构和子结构,并建立该有控结构的动力分析模型。在动力分析模型中输入水平和竖向地震,得到 模型的竖向和水平滑动状态运动微分方程,依据这两个方程采用自适应模糊神经网络优化动力分 析模型,构建优化模型。从优化模型出发,通过实例实验分析得出,优化设计双向地震波作用下建 筑有控结构时,在其上部结构层间和隔离层各安装一个 MRD,可确保优化设计后的有控结构在不 同双向地震工况下的地震反应控制效果最佳,且有控结构在双向地震工况2下,结构第一层、中间 三层以及顶层的加速度和位移的时程曲线走向一致,且差距微小;同时有控结构的巨结构顶层侧移 响应随着子结构刚度增加而提高,动力特性没有明显的变化,子结构随着其自身刚度增加顶层侧移

Seismic Isolation Design of Mega-sub Controlled Structures under Bidirectional Seismic Wave

WEN Shichen¹, YANG Tao²

Department of Civil Engineering, Guangxi Polytechnic of Construction, Nanning 530007, Guangxi, China;
 College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China)

Abstract: To strengthen the dynamic characteristics and stability of mega-sub controlled structure buildings, an individual controlled structure building under the action of bidirectional seismic wave is designed by using three kinds of magneto-rheological dampers (MRDs) and sliding base isolation. A dynamic analysis model of the controlled structure is then established. On the basis of the input of horizontal and vertical earthquakes to the dynamic analysis model, the differential

收稿日期:2018-12-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51568005);广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(KY2016YB679)

第一作者简介:温世臣(1979-),男,内蒙古赤峰人,硕士,高级工程师,主要研究方向:混凝土结构。

equations of motion in the vertical and horizontal sliding states of the model are obtained. In accordance with the two equations, the adaptive fuzzy neural network is used to optimize the dynamic analysis model, and an optimization model is constructed. Experimental analysis of an example indicated that installing one MRD between the layers and one MRD in the isolation layer of the superstructure can ensure the best seismic response control effect for the controlled structure under different bidirectional seismic wave conditions. The time history curves of acceleration and displacement at the first floor, the middle three floors, and the top floor of the controlled structure have the same trend under condition 2, with a small difference. The lateral displacement response of the top floor of the megastructure increases with the increase in the stiffness of the substructure, and the dynamic characteristics do not change obviously. With the increase in its own stiffness, the lateral displacement response of the top floor of the substructure is stable and the dynamic characteristics of the substructure are enhanced.

Keywords: individual building; controlled structure; damper; dynamic analysis; fuzzy neural network

0 引言

地震是一种损伤范围广泛的自然灾害,会给人类 造成巨大的损失,且震后的影响无法在短时间内消 除^[1]。建筑结构的抗震设计可以有效降低地震所带 来的影响。目前单维地震作用方面已形成了一套较 为完善的抗震设计理论及实际应用方法^[2],但理论研 究和震害经验表明,真实地震的地面运动其实是一种 复杂的运动,它包括了水平方向和竖向方向的运动。

目前工程结构的隔震、减振和振动控制等方面的 设计成为社会各层热议话题,其在结构中的应用也在 不断增加,为了控制地震发生时地面上建筑物的水平 方向和竖向方向的相对加速度和相对位移,本文设计 一种双向地震波作用下有控结构隔震建筑,并通过实 验分析获取有控结构的最佳设计方案,增强双向地震 波作用下有控结构的抗震稳定性和动力特性。

1 有控结构动力分析模型建立

设定某单体建筑同楼层各种构件的上下移动量 无差别,通过层间剪切型分析模型,在不以基础提离 以及土与结构相互间的作用为前提条件,将墙体质 量集中于各层,整个结构需建立在刚性特征显著的 地基上^[3]。为了设计双向地震波作用下单体建筑的 有控结构,设置一种3种磁流变阻尼器,将该阻尼器 称为 MRD。MRD 与滑移隔震混合控制结构构成 的主体结构即为本文设计的有控结构。设置该有控 结构层数为 n 层^[4],平行板模型可用作 MRD 恢复 力模型,双线性恢复力模型可用作隔震层 U 型带片 限位阻尼器。图 1 为动力分析模型。本文设计的单 体建筑有控结构是巨子型有控结构,其由巨结构以及 子结构构成(图 2)。模型中隔震层质量用 m_b表示;

模型上部结构各层质量用m1~m,表示;模型隔震



层总的竖向和水平方向的刚度分别用 $K_{z,b}$ 和 $K_{x,b}$ 表示;上部结构各层竖向和水平刚度分别用 $K_{z,1} \sim K_{z,n}$ 和 $K_{x,1} \sim K_{x,n}$ 表示;隔震层竖向和水平方向总 阻尼分别用 $C_{z,b}$ 和 $C_{x,b}$ 表示;上部结构各层竖向和 水平方向阻尼分别用 $C_{z,1} \sim C_{z,n}$ 和 $C_{x,1} \sim C_{x,n}$ 表 示;隔震层 MRD 提供的总库仑阻尼和黏滞阻尼分 别用 $C_{mc,b}$ 和 $C_{mv,n}$ 表示;上部结构各层 MRD 提供的 库仑阻尼和黏滞阻尼分别用 $C_{mc,1} \sim C_{mc,n}$ 和 $C_{mv,1}$ $\sim C_{mv,n}$ 表示;隔离层摩擦系数用 μ 表示;水平和竖 向加速时程分别用 $X_{g}(t)$ 和 $Z_{g}(t)$ 表示。

1.1 质量矩阵 M

 $M = diag[M_{p}, M_{1}, \dots, M_{i}, \dots, M_{n-1}]$ (1) 式中:第 *i* 组相对独立子结构的质量和对角矩阵用 M_{p} 和 M_{i} (*i* = 1, 2, ..., *n* - 1)表示。

1.2 刚度矩阵 K

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_{\mathrm{P}} + \boldsymbol{K}_{\mathrm{s,diag}} & \boldsymbol{K}_{\mathrm{c}} \\ \boldsymbol{K}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{K}_{\mathrm{s}} \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

$$\mathbf{K}_{\mathrm{s}} = \mathrm{diag}[K_{\mathrm{s},1}, \cdots, K_{\mathrm{s},n-1}]$$

式中:巨结构 $n \times n$ 阶刚度矩阵用 K_p 表示;第i组相 对独立子结构的 $n_1 \times n_1$ 阶刚度矩阵用 $K_{s,i}$ (i=1,2,…,n-1)表示; K_c^T 与 K_s 为子结构刚度矩阵,巨结 构和子结构之间的耦合刚度矩阵可以用 K_c 和 $K_{s,diag}$ 表示,公式为:

$$\mathbf{K}_{c}(i,j) = \begin{cases} -k_{i,1}, & j = (i-1)n_{1} + 1 \\ -k_{a}, & j = (i-1)n_{1} \\ (i = 1, 2, \cdots, n-1) \end{cases}$$
(3)

 $\mathbf{K}_{\text{s,diag}} = \text{diag}[k_{1,1} + 0, k_{2,1} + k_{a}, \cdots, k_{n-2} + k_{a}, 0 + k_{a}]$

^𝐾,♥ 「 𝐾」

式中:第*i*组子结构底层柱的剪切刚度用*k_i*(*i*=1, 2, ..., *n*-1)表示;附加柱刚度用*k*_a表示。

1.3 阻尼矩阵 C

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} C_{p} + C_{s,diag} & C_{c} \\ C_{c}^{T} & C_{s} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{C}_{s} = \operatorname{diag} \begin{bmatrix} C_{s,1}, \cdots, C_{s,n-1} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{C}_{s} = c \qquad i = (i-1)m + 1$$

$$\boldsymbol{C}_{s} = c \qquad (4)$$

$$C_{c}(i,j) = \begin{cases} c_{1,1}, & j \in (i-1)n_{1} \\ -c_{a}, & j = (i-1)n_{1} \\ (i=1,2,\cdots,n-1) \end{cases}$$
(5)
$$C_{c} = diag[c_{1,1}, +0, c_{2,1}, +c_{2,2}, \cdots, c_{n-1}, +c_{n-1}] \end{cases}$$

$$C_{s,diag} = diag[c_{1,1} + 0, c_{2,1} + c_{a}, \cdots, c_{n-2,1} + c_{a}, 0 + c_{a}]$$

式中:巨结构阻尼矩阵可用 C_{P} 表示;n-1组相对独 立子结构的阻尼组合矩阵可用 C_{s} 表示;第i组相对 独立子结构阻尼矩阵可用 $C_{s,i}$ ($i=1,2,\cdots,n-1$)表 示;巨结构和子结构之间的阻尼耦合项可用 C_{s} 、 $C_{s,diag}$ 表示;第*i*组子结构底层柱的阻尼值可用 $c_{i,1}(i)$ =1,2,…,n-1)表示;流体阻尼器供给的附加阻尼值可用 c_a 表示。

2 有控结构运动方程构成

2.1 构建竖向运动微分方程

同一时刻录入水平和竖向地震时,结构竖向运动是独立的^[5],将具有代表性的质量层从有控结构 中取出,分析作用于质量层的有控结构竖向受力情 况时,应将静力平衡位置当成位移标准,动力体系 中,静力平衡位置的运动方程可以不考虑重力因素。 有控结构各层竖向力平衡方程可表示为^[6]:

第一层

 $m_{1}(\ddot{z}_{1}+\ddot{z}_{g})+c_{z,1}\dot{z}_{1}-c_{z,2}(\dot{z}_{2}-\dot{z}_{1})+k_{z,1}z_{1}-k_{z,2}(z_{2}-z_{1})=0$ (6)

式中: $m_1(\ddot{z}_1 + \ddot{z}_g)$ 、 $c_{z,1}\dot{z}_1$ 、 $k_{z,1}z_1$ 分别为第一层的竖 向受力; $c_{z,2}(\dot{z}_2 - \dot{z}_1)$ 、 $k_{z,2}(z_2 - z_1)$ 为竖向阻力。 基准层

$$m_{1}(\ddot{z}_{1}+\ddot{z}_{g})+c_{z,1}(\dot{z}_{1}-\dot{z}_{i-1})-c_{z,i+1}(\dot{z}_{i+1}-\dot{z}_{1})+k_{z,j}(z_{1}-z_{i-1})-k_{z,i+1}(z_{i+1}-z_{i})=0$$
(7)

式中: $m_1(\ddot{z}_1 + \ddot{z}_g)$ 、 $c_{z,1}(\dot{z}_1 - \dot{z}_{i-1})$ 、 $k_{z,j}(z_1 - z_{i-1})$ 为基准层的竖向受力; $c_{z,i+1}(\dot{z}_{i+1} - \dot{z}_1)$ 、 $k_{z,i+1}(z_{i+1} - z_i)$)为基准层的竖向阻力。

顶层

 $m_{n}(\ddot{z}_{n}+\ddot{z}_{g})+c_{z,n}(\dot{z}_{n}-\dot{z}_{n-1})+k_{z,n}(z_{n}-z_{n-1})=0$ $m_{n}(z_{n}+z_{g})+c_{z,n}(z_{n}-z_{n-1})+k_{z,n}(z_{n}-z_{n-1})=0$ (8)

式中: $m_n(z_n + z_g)$ 、 $c_{z,n}(z_n - z_{n-1})$ 与 $k_{z,n}(z_n - z_{n-1})$ 均为顶层竖向受力。

将各层额平衡方程按矩阵形式整理,且有控结构竖向运动微分方程可用公式表示为:

 $M\{\ddot{z}\} + C_z\{\dot{z}\} + K_z\{z\} = F\{\ddot{z}_g\}$ (9) 式中:有控结构各层竖向相对位移、速度和加速度列 向量分别用 $\{z\},\{\dot{z}\},\{\ddot{z}\}$ 表示;有控结构质量、竖向 刚度和阻尼矩阵分别可用 M,K_z,C_z 表示;竖向地 震加速的录入可用 $\{\ddot{z}_g\}$ 表示;地面地震加速度转换 矩阵可用F表示,则地面地震加速度转换矩阵公式 可表示为^[7]:

 $\mathbf{F} = (-m_1, -m_2, \dots, -m_{n-1}, -m_n)^T$ (10) 式中:*T*为时间;*m*为有控结构对应受力;1~*n*对应 有控结构层数。

2.2 构建水平滑动状态运动方程

最大静摩擦力和有控结构所受惯性力相比,当

47

最大静摩擦力小于有控结构所受惯性力时,隔震层 与基础间有滑动现象产生^[8-9],此时隔震层受到的摩 擦力最大。该摩擦力的大小会根据摩擦方向的变化 而变化,原本体系由n个自由度组成,现在变为n+ 1个自由度。分析本文有控结构的滑动状态水平向 受力情况时,因为当最大静摩擦力大于有控结构所 受惯性力时体系处于啮合状态,所以分析过程中可 分析有控结构下隔震层、第一层水平受力情况,其他 层的状态与啮合状态表现一致。隔震层在摩擦中受 到的库仑摩擦力可用 F_b 表示;该库仑摩擦力的方向 与实际运动方向正好相反^[10],以竖向振动为前提, 有控结构的水平力平衡方程可表示为:

$$\mathbf{F}_{b} = -\operatorname{sign}(\dot{X}_{b})\mu[g(m_{b} + \sum_{i=1}^{n} m_{i}) + c_{z,i}\dot{z}_{1} + k_{z,1}z_{1}]$$
(11)

式中: \dot{X}_{b} 为隔震层水平加速度; μ 为隔震层摩擦系数;g为重力加速度; m_{b} 为隔震层受力; m_{i} 为第i层 柱受力; $c_{z,1}\dot{z}_{1}$ 、 $k_{z,1}z_{1}$ 为标准层水平受力。以平衡 条件为依据,有控结构下隔震层、第一层的平衡方程 可相应表示为:

隔震层

$$m_{b}\ddot{X}_{b} + (c_{x,b} + c_{x,1})\dot{X}_{b} - c_{x,1}\dot{X}_{1} + (k_{x,b} + k_{x,1})X_{b} - k_{x,1}x_{1} + \frac{P_{1}}{h_{1}}X_{b} - \frac{P_{1}}{h_{1}}X_{1} + F_{b} + \bar{P}_{b} = c_{m,1} - c_{m,b} - m_{b}\ddot{X}_{g}$$
(12)

第一层

$$m_{1}\ddot{X}_{1} - c_{x,b}X_{b} + (c_{x,1} + c_{x,2})X_{1} - c_{x,2}\dot{X}_{2} - k_{x,1}x_{b} + (k_{x,1} + k_{x,2})X_{1} - k_{b,2}x_{2} - \frac{P_{1}}{h_{1}}X_{b} + \left(\frac{P_{1}}{h_{1}} + \frac{P_{2}}{h_{2}}\right)X_{1} - \frac{P_{2}}{h_{2}}X_{2} = c_{m,2} - c_{m,1} - m_{1}\ddot{X}_{g}$$

$$(13)$$

由此可将有控结构矩阵形式的水平运动微分方 程表示为:

 $M\{\ddot{X}\} + (C_X + c_X E E^T)\{\dot{X}\} + (K_X + K_P)\{X\} = EU + F\{\dot{X}_g\}$ (14)

式中:{X}、{ \dot{X} }、{ \dot{X} }分别为有控结构各层水平相 对位移、速度和加速度列向量,且都由原本的n维变 为n+1维; C_x 、 K_x 分别为有控结构的质量、水平阻 尼和水平刚度矩阵; K_P 为考虑竖向地震力影响的几 何刚度矩阵; \ddot{X}_g 为地震水平加速度输入; c_m 为总阻 尼向量。此外,包括M在内,都由原来的 $n \times n$ 变为 $(n+1) \times (n+1)$ 维。

3 基于自适应模糊神经网络的有控结构优 化模型构建

3.1 自适应模糊神经网络

自适应神经网络 ANFIS 可以通过正向前馈网 络或是反馈网络实现,径向基函数和单项线性响应 函数都可作为自适应模糊神经网络激发函数的神经 元^[11]。以线性叠加原理为基础确立 ANFIS 模糊规 则,假设将 2 输入 1 中的输出系统公式可表示为,

$$Q = Ax_1 + Bx_2 + C \tag{15}$$

式中:系统的输入分别用 x_1 和 x_2 表示;系统的输出 用Q表示;A、B、C均为常数。

ANFIS 通常分为输入层、规则层、模糊推理层、 反模糊化层、输出层 5 个层次。输入层会将输入的 数值传递给规则层;规则层中所有结点的输出表示 所有规则的激励强度;模糊推理层与模糊推理的前 提和结论紧密相连,且模糊推理层是根据问题的不 同而确定的;为了使系统顺利执行反模糊化任 务^[12],需要反模糊化层提供明确的输出值;输出层 是输出反模糊化后的数值。这 5 个层次间连接权系 数的自适应调节可通过输入层提供的原始输入数据 实现,经过每个层次的作用^[13],最后在输出层所得 到的结构可以有效地反馈实际的系统模型,该过程 称为自适应模糊神经网络原理。

3.2 构建优化模型

有控结构参数的设置,直接影响本文有控结构 的最佳隔震效果^[14],其摩擦系数与隔震层刚度等隔 震参数的变化对该结构隔震效果的影响最大。控制 装置数量和位置的设定是本文有控结构中需要重点 考虑的问题,理论上控制装置越多越有助于整体结 构的控制,但是实际中发现,控制装置数量太多会引 发很多问题。优化设计有控结构时^[15],为了避免动 力分析耗时长、调用频率高等问题,取相同的结构造 价,使目标函数上部结构水平加速度峰值最小,可表 示为:

$$\min(\max|\ddot{x}(t)|) \tag{16}$$

优化计算变量可得:

$$k_{x,b} \in \{k_{xb,1}, k_{xb,2}, \cdots, k_{xb,m-1}, k_{xb,m}\}$$
 (17)

$$p \in \{p_1, p_2, \cdots, p_{\mu-1}, p_{\mu}\}$$
 (18)

$$E = \begin{bmatrix} e_1, e_2, \cdots, e_{n-1}, e_n \end{bmatrix}$$
(19)

约束条件为:

$$e_i \leqslant [e_s]_i \in [1, 2, \cdots, n-1, n]$$
(20)

$$\sum_{i=1}^{n} e_i \leqslant [e_i] \tag{21}$$

(22)

 $\max |S_i(t)| \leq [S]$ (23) 其中,离散值个数用 p 表示;本文有控结构中 MRD的空间位置向量可用 E 表示; e_i 为本文有控结 构第 i 层的 MRD 数量; $[e_s]$ 表示本文有控结构单层 允许安装的 MRD 的最大总数量; $[e_i]$ 表示本文有 控结构允许安装 MRD 的最大总数量; $[\Delta_1]$ 表示上 部结构水平位移容许值; $S_i(t)$ 表示结构各层的层 间剪力;[S] 表示结构层间剪力容许值。

 $\max |x_i(t)| \leq \lceil \Delta_1 \rceil$

4 工程实例分析

设置上文研究的有控结构层数为5层,每层的

层高均为 3.5 m,表 1 为该结构的结构参数。选择 聚四氟乙烯滑移板作为隔震层的摩擦材料,该摩擦材 料的摩擦系数 $\mu = 0.17$,屈服刚度 $k_{b2} = 0.10$,屈服位 移 $x_y = 0.35$ cm。计算可得本文有控结构隔震前水平 及竖向自振周期 $T_x = 0.257$, $T_y = 0.077$,隔震后水平 自振周期 $T_x = 1.315$ 。将 20 t 足尺 MRD 安装到本文 有控结构中,表 2 为 20 t 足尺 MRD 性能表。

表 1 混合控制结构参数

|--|

层数	楼层质量/t	层间水平刚度/(×10 ⁵ kN・m ⁻¹)
5 层	249	2.12
1~4 层	385	3.12
隔离层	187	0.45

表 2	为 20 t 足尺 MRD 主要性能参数	
-----	----------------------	--

			Tuble 2 11	um periorn	iunce pur unic		scale MINB		
冲程 /cm	最大 阻尼力/kN	最大最小 力比	最大耗电 功率/W	线圈	缸体直径 /cm	磁流变液 动黏系数/Pas	流体最大 屈服应力/kPa	两极间隙 /mm	有效流体 体积/cm ³
+8.3	199	10.09	21.6	3×1036	21.04	0.54	49.82	1.96	89.7

Main performance parameters of 20 t full-scale MRD

将本文有控结构优化方案分为 3 种:一为在上 部结构层间安装一个 MRD;二为只在隔离层安装 一个 MRD;三为在上部结构层间和隔离层各安装 一个 MRD。3 种方案的地震波选用双向地震波,见 图 3。将三种方案输入到地震波中,可得到三种工 况:一为水平加速度峰值为 208 cm/s²,但无竖向地 面加速度输入;二为水平加速度峰值为 208 cm/s², 竖向加速度峰值为水平方向的 1/3;三为水平加速 度峰值为 208 cm/s²,竖向加速度峰值为水平方向 的 2/3。采用与本文有控结构相同的结构造价,采 用自适应模糊神经网络对该相同造价的结构进行优 化设计。隔震层水平刚度 $k_{x,b} \in \{2.9, 3.1, 3.3, 3.5, 5\}$ 3.7} × 10⁴ kN/m; 摩擦系数取值为 $\mu \in \{0.195, 0.205, 0.215, 0.225, 0.235\};$ 约束条件: $[e_s] = 2.5$ 、 $[e_t] = 5.5$ 、[S] = 1 985 kN、 $[\Delta_1] = 9.54$ cm、屈服刚度 $k_{b2} = 0.10k_{b1}$ 、屈服位移 $x_y = 0.35$ cm、隔震层摩擦系数 $\mu = 0.125$ 、空间位置布置E = [2.5, 1.5, 0.5, 0.0]。

对采用3种不同优化方案的有控结构进行双向 地震波地震反应分析,得到采用3种不同优化方案 的有控结构,在3种双向地震波工况荷载影响下的 相对加速度峰值、相对位移峰值与3种工况下的滑 移隔震混合控制结果分析结果列于表3。



表3中,采用方案1的有控结构在各种工况下

Fig.3 Bidirectional seismic wave

Table 5 Comparison of seismic responses of structures							
结构方案	工况	相对加速度 峰值/(cm•s ⁻²)	比滑移隔震 结构减小/%	相对位移 峰值/cm	比滑移隔震 结构减小/%		
	工况 1	310.56	-	4.38	-		
滑移隔震结构	工况 2	328.00	-	4.67	-		
	工况 3	357.29	-	5.18	-		
准人校相体持	工况 1	268.70	9.11	3.86	8.36		
混合控制结构 方案 1	工况 2	283.03	9.52	4.10	8.75		
	工况 3	318.05	9.84	4.54	9.06		
混合控制结构 方案 2	工况 1	267.63	12.66	3.60	13.10		
	工况 2	279.88	13.51	3.79	14.11		
	工况 3	303.78	13.82	4.19	14.63		
混合控制结构 方案 3	工况 1	243.59	20.38	3.20	20.38		
	工况 2	255.87	20.80	3.38	21.20		
	工况 3	277.22	21.23	3.72	22.20		

Table 3 Comparison of seismic responses of structures

表 3

结构地震反应比较

的各项地震反应与滑移隔震结构相比减小的最小值 和最大值分别为 8.36%和 9.11%;方案 2 在各种工 况下的各项地震反应与滑移隔震结构相比减小的最 小值和最大值分别为 13.10%和 14.63%;方案 3 在 各种工况下的各项地震反应与滑移隔震结构相比减 小的最小值和最大值分别为 20.38%和 22.20%。由 此可知,3 种混合方案在各种工况下的各种地震反 应均得到了很好的控制,但方案 3 的控制效果更 突出。

为了验证双向地震波作用下本文有控结构在各

种工况荷载下的各项地震反应得到有效的控制,分 析采用最佳混合结构方案3优化设计的有控结构, 在工况2下相对加速度和位移时程,结果见图4。

从图 4 可以看出,采用混合结构方案 3 优化设计的有控结构,在双向地震波作用下结构的第一层、中间三层以及顶层的加速度和位移的时程曲线走向一致,且差距微小,说明采用混合结构方案 3,也就是在原有有控结构上部结构层间和隔离层各安装一个 MRD 的设计方案,可确保该有控结构在双向地震波作用下的相对加速度和位移均得到显著控制。







分析采用方案 3 优化设计的有控结构动力特征 时,该有控结构的上部结构层间和隔离层各安装一 个 MRD,应需要讨论结构刚度的作用,将该有控结 构分为巨结构和子结构,有控结构刚度公式可表 述为:

$$RD = K_{\rm sub}^{*} / K_{\rm mega}^{*} \tag{24}$$

式中:K^{*}_{sub}代表子结构刚度;K^{*}_{mega}代表巨结构刚度。 图 5 为有控结构中不同流体阻尼器供给的附加阻尼 值时,巨、子结构顶层侧移响应均方根随结构刚度 RD 变化曲线。

图 5(a)中附加阻尼为 0,此时巨结构随着子结构刚度的增加,其顶层侧移响应均方根曲线呈现上





Fig.5 RMS curve change of top story displacement response of the superstructure and substructure with RD

升趋势,但是上升幅度不明显,因此随着子结构刚 度的不断提升,巨结构的动力特性受到的影响较 小;随着子结构刚度的增加,子结构自身的顶层侧 移响应均方根曲线受到很大的影响,呈现明显的下 降趋势,尤其是在 0.075~0.225 之间下降趋势最 为陡峭,因此当子结构刚度为 0.225 时,子结构顶 层侧移响应约为 0.045 m,当子结构刚度为 0.075 时,子结构顶层侧移响应约为 0.068 m,增加量超 过 50%。由于实际的建筑物无法实现刚度与设计 值无差异,因此无附加阻尼时,对巨、子型有控结构 减震是不利的。

图 5(b)和(c)中附加阻尼均不为 0,相较于(a) 图,(b)和(c)中的巨、子结构的顶层侧移响应有相对 程度的减小,且当子结构刚度较小时,附加阻尼对 巨、子结构的顶层侧移响应的影响较为显著,巨结构 的顶层侧移响应随着子结构的刚度增加而提高,动 力特性没有明显的变化。子结构随着自身刚度的增 加,其顶层侧移响应相对稳定没有明显的变化,说明 子结构的顶层侧移响应对刚度的变化不再敏感。由 此可知,附加阻尼的设置可有效地提高子结构的动 力特性,同时降低巨、子结构的顶层侧移响应。且图 5中可以明确地看出,采用方案3优化设计的有控 结构动力特性稳定。

5 结论

发生多维地震(双向地震)时,设计单体有控结 构可通过降低地面上建筑物的水平方向和竖向的相 对加速度和相对位移,控制建筑物在地震发生时的 各项反应,实现减振效果的改善。通过实验分析得 出,采用方案 3 优化方案,即在有控结构的上部结构 层间和隔离层各安装一个 MRD,该种方案设计的 有控结构在不同地震波工况下的不同地震反应均得 到了最佳的控制,同时有控结构的巨结构的顶层侧 移响应随着子结构的刚度增加而提高,动力特性没 有明显的变化,子结构随着其自身刚度的增加,其顶 层侧移响应没有明显的变化。由此在以后的双向地 震波作用下建筑有控结构设计方面,应采用方案 3 实现有控结构的优化设计。

参考文献(References)

- [1] 张伟光,杨长德,王鹏,基于地震波法的底板破坏区域探测技术 及应用[J].中国安全生产科学技术,2016,12(6):77-81.
 ZHANGWeiguang, YANG Changde, WANG Peng. Detection Technology of Floor Damage Area Based on Seismic Wave Method and Its Application[J].Journal of Safety Science and Technology,2016,12(6):77-81.
- [2] 赵祥,刘忠华,王社良,等.多维地震作用下大跨空间结构的减 震控制分析[J].地震工程学报,2018,40(3);398-405.
 ZHAO Xiang,LIU Zhonghua,WANG Sheliang, et al.Seismic Control Analysis of Large-span Space Structures under Multidimensional Earthquakes [J]. China Earthquake Engineering Journal,2018,40(3);398-405.
- [3] 章丛俊.刚度在结构设计中的运用和控制[J].建筑结构,2015, 45(10):94-102.

ZHANG Congjun. Application and Control of Stiffness in Structural Design[J].Building Structure, 2015, 45(10):94-102.

- [4] 李萌,巨能攀,邓天鑫,等.强震作用下中倾外层状岩质边坡动 力失稳机理研究[J].水利水电技术,2018,49(5):117-122.
 IMeng,JU Nengpan,DENG Tianxin, et al. Study on Dynamic Instability Mechanism of Moderate Outward Dipping Stratified Rock Slope under Strong Earthquake[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2018,49(5):117-122.
- [5] 刘巍,张龑华,芮建辉,等.金港文化中心结构设计[J].建筑结构,2017,47(S1):315-318.
 LIU Wei, ZHANG Yanhua, RUI Jianhui, et al. Structural de-

sign of Jingang cultural center[J].Building Structure, 2017, 47 (S1):315-318.

- [6] 庄鹏,何骁,韩淼,等,设有新型耗能支撑的双层球面网壳减震 分析[J].广西大学学报(自然科学版),2018,43(1):149-159. ZHUANG Peng, HE Xiao, HAN Miao, et al. Seismic Control Analysis of Double-layer Spherical Lattice Shell Structure with Innovative Energy Dissipation Braces[J].Journal of Guangxi University(Natural Science Edition),2018,43(1):149-159.
- [7] 邓天鑫,巨能攀,李龙起,等,陡倾顺层岩质斜坡动力倾倒变形 机理研究[J].水利水电技术,2017,48(12):146-152.
 DENGTianxin,JU Nengpan,LI Longqi,et al.Study on Dynamic Toppling Deformation Mechanism of Inclined Steep-dip Bedding Slope[J].Water Resources and Hydropower Engineering, 2017,48(12):146-152.
- [8] 张清文,李松岩,支旭东,等.跨度 800 m 凯威特型巨型网格结构在 8 度多遇地震作用下受力性能分析[J].建筑结构学报, 2017,38(4):1-9.

ZHANG Qingwen,LI Songyan ,ZHI Xudong,et al.Mechanical Performance Analysis of 800 m Span Kiewitt Type Mega-latticed Structures under 8 Degree Frequent Earthquake[J].Journal of Building Structures,2017,38(4):1-9.

- [9] 张钦礼,王雅.基于建筑信息模型的铁路工程安全管理体系研究[J].中国安全生产科学技术,2017,13(12):174-178.
 ZHANGQinli, WANG Ya. Research on Safety Management System of Railway Engineering Based on Building Information Modeling[J].Journal of Safety Science and Technology,2017, 13(12):174-178.
- [10] 高承勇,安东亚.耗能型屈曲约束支撑在结构设计中的合理应 用与参数控制[J].建筑结构学报,2016,37(6):69-77.
 GAO Chengyong, AN Dongya. Application and parameter controlling for dissipative BRB in structural design[J].Journal of Building Structures,2016,37(6):69-77.
- [11] 贾莉,陈志华,刘红波,等.某张拉整体塔结构动力特性及地震反应分析[J].建筑结构,2017,47(15):16-20,30.
 JIA Li,CHEN Zhihua,LIU Hongbo, et al.Structural Dynamic Characteristics and Seismic Responses for a Tensegrity Tower
 [J].Building Structure,2017,47(15):16-20,30.
- [12] 丛苏莉.多维地震作用下钢筋混凝土建筑结构的抗连续倒塌 仿真分析[J].地震工程学报,2018,40(1):41-47. CONGSuli.Simulation and Analysis of the Progressive Collapse of Reinforced Concrete Structures under Multidimensional Earthquakes[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(1):41-47.
- [13] 叶昌杰,赵鹏飞.利用多点多维地震反应谱法对大跨支承结构 响应的研究[J].建筑科学,2018,34(5):1-9.
 YE Changjie,ZHAO Pengfei.Research on Response of Substructure of Large-span Structure with Response Spectrum Method under Multi-support and Multi-component Seismic Excitations[J].Building Science,2018,34(5):1-9.
- [14] 曲艺,梅宁.童寯工业建筑园区规划及单体设计分析[J].工业 建筑,2017,47(3):37-42.
 QU Yi, MEI Ning. Study of Industrial Architectural Parks Planning of Tong Jun and the Analysis of the Design Methods
 [J].Industrial Construction,2017,47(3):37-42.
- [15] 包联进,周建龙,黄永强,等.国家会展中心 E1 单体结构设计综述[J].建筑钢结构进展,2017,19(5):47-54,76.
 BAOLianjin, ZHOU Jianlong, HUANG Yongqiang, et al. Structural Design Summary on the E1 Part of National Exhibition and Convention Center[J].Progress in Steel Building Structures,2017,19(5):47-54,76.