

基础隔震结构附加变化型调谐质量惯容阻尼器的优化设计研究

叶 昆¹, 杨启帆¹, 陈振明^{1,2}

(1. 华中科技大学土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中建钢构股份有限公司, 广东 深圳 518118)

摘要: 在强震作用下基础隔震结构的隔震层将发生非常大的水平变形。已有研究表明采用在基础隔震结构的隔震层附加变化型调谐质量阻尼器(VTMD)的混合控制策略能够有效降低隔震层的水平变形需求,然而该混合控制策略最大的缺陷在于需要很大的调谐质量。考虑到惯容装置具有明显的质量放大效应,本文提出将惯容装置(Inerter)与VTMD中的阻尼器并联,从而形成具有较小调谐质量的变化型调谐质量惯容阻尼器(VTMDI),并将其附加在基础隔震结构的隔震层,基于随机振动的分析框架开展了VTMDI参数的优化设计研究。研究表明直接将基础隔震结构的上部结构层间变形作为优化目标的传统优化策略并不经济有效。为此,本文提出了一种基于两步优化法的优化策略,该优化策略首先确保附加VTMDI的基础隔震结构相对于附加相同阻尼的基础隔震结构具有更优的控制效果;然后确保附加VTMDI的基础隔震结构的上部结构层间变形最小。通过动力时程分析结果表明:两种优化策略都能有效降低隔震层的水平变形和上部结构的层间变形,同时不会导致调谐质量出现过大的运动行程,基于两步优化法的优化策略更为经济有效。

关键词: 基础隔震结构; 惯容; 变化型调谐质量阻尼器; 随机振动; 优化设计; 两步优化法

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)08-1368-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.08.011

引 言

传统的建筑结构采用基础隔震技术后,整个结构的周期得到延长,且水平变形集中在隔震层,上部结构的层间变形和绝对加速度响应大幅度降低,结构的抗震性能得到明显提升^[1]。但是在强震作用下,隔震层产生过大的水平变形,可能超过隔震装置自身的水平变形能力,从而引发隔震装置失效,导致整个基础隔震结构被破坏^[2]。传统的调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)是一种有效的被动控制装置,被广泛地应用于机械、土木和航天航空等行业的振动控制领域^[3]。因此,有学者提出将TMD附加在基础隔震结构中以降低强震作用下隔震层的水平变形^[4]。然而在TMD的实际应用过程中,存在两个制约其性能进一步提升的条件:(1)需要很大的调谐质量以实现TMD更好的振动控制性能^[5];(2)需要有足够的自由空间满足调谐质量大行程的运动^[6]。

近年来,惯容(Inerter)元件因其具有显著的表现质量放大效应,在振动控制领域得到了众多学者

的重点关注^[7-10]。文献[8,11-14]提出将惯容元件与TMD串联,形成调谐质量惯容阻尼器(Tuned Mass Damper Inerter, TMDI)。De Domenico等^[15-16]基于随机振动分析理论对附加在基础隔震结构的TMDI开展了参数优化研究,研究表明附加优化后的TMDI不仅能够减小隔震层的水平变形,同时还能减小上部结构的地震响应,TMDI的调谐质量也不会出现过大的运动行程。

为了有效解决传统TMD中调谐质量运动行程过大的问题,Ren^[17]提出了一种接地式的变化型调谐质量阻尼器(Variant Tuned Mass Damper, VTMD)。VTMD与传统TMD最大的区别在于阻尼元件的位置不同,VTMD中的阻尼元件直接与大地连接,而TMD中的阻尼元件与受控的主结构连接。同时Ren^[17]基于固定点理论推导了VTMD的最优调谐参数的解析表达式,并证明在相同调谐质量大小的情况下,VTMD相较于传统TMD不仅具有更好的减振效果,而且调谐质量的运动行程也更小。Xiang等^[18]将VTMD称为非传统TMD,并将其附加在基础隔震结构中,通过确定最大振动抑制带宽的方式得到了VTMD最优调谐参数的数值解,数值仿

真结果表明:与附加最优 TMD 的基础隔震结构相比,附加最优 VTMD 的基础隔震结构的减震性能更好,且调谐质量的运动行程得到显著降低。基于以上分析可知:惯容元件与 TMD 串联连接后可以降低 TMD 中调谐质量的大小,同时以 VTMD 替代传统 TMD 可以减小调谐质量的运动行程。结合惯容装置和 VTMD 各自的优点,将 VTMD 中的阻尼元件与惯容元件并联连接,形成具有较小调谐质量的变化型调谐质量惯容阻尼器(Variant Tuned Mass Damper Inerter, VTMDI),用于基础隔震结构的性能控制。需要指出的是,李亚峰等^[19]基于固定点理论推导了 VTMDI 最优调谐参数的解析表达式,通过参数研究表明:在相同调谐质量和惯容系数的条件下,VTMDI 具有比 TMDI 更好的减振效果。

目前,对于基于惯容元件的调谐阻尼器用于基础隔震结构性能控制的优化设计,其优化问题基本的是无约束的单参数优化问题。比如隔震层水平变形、上部结构层间位移(或绝对加速度)和调谐阻尼器的能量耗散指数等^[15]。但是对于基础隔震结构而言,上部结构的层间位移(或绝对加速度)和隔震层水平变形都是应该关注的响应量,因此合理的优化设计应该同时考虑上述两个反应量^[20]。此外,为了减小强震作用下基础隔震结构的隔震层水平变形和上部结构层间变形(或绝对加速度),最简单有效的方式是在隔震系统中附加黏滞阻尼。考虑到引入惯容元件会增加额外的成本,因此对于受控的基础隔震结构而言,附加基于惯容装置元件的调谐阻尼器的控制效果应该比直接附加相同阻尼时的控制效果要好,这一要求应该成为优化设计过程中的约束条件,但是在目前的相关研究中没有得到体现。

基于上述分析,本文将基础隔震结构简化为经典的两自由度模型,基于随机振动分析框架提出基础隔震结构附加 VTMDI 的优化设计方法。在优化设计研究的过程中,将隔震系统水平变形以及上部结构的层间变形作为目标函数或约束函数,同时将附加 VTMDI 的控制效果与直接附加相同黏滞阻尼的控制效果之间的比值作为约束条件。

1 附加 VTMDI 的基础隔震结构

1.1 运动方程

VTMDI 的构造如图 1 所示,由质量、弹簧、阻尼和惯容四个基本力学元件构成,其中 m_T, k, c 和 m_z 分别为相应的调谐质量大小、刚度系数、阻尼系数和惯容系数(与质量具有相同量纲)。如图 1 所示,对于惯容这种具有两端点的力学元件,所产生的的力 F

与两 endpoint 之间的相对加速度成正比:

$$F = m_z(\ddot{u}_2 - \ddot{u}_1)$$

式中 m_z 为惯容元件的惯容系数,其大小取决于惯容元件的具体形式; \ddot{u}_1 和 \ddot{u}_2 为惯容元件两端点的加速度。需要指出的是,当调谐质量 $m_T=0$ 时,VTMDI 将等价于文献[21]所定义的 TVMD。

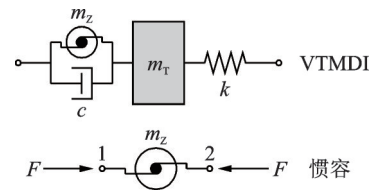


图 1 变化型调谐质量阻尼器(VTMDI)和惯容(Inerter)元件的力学模型

Fig. 1 Mechanical models for VTMDI and Inerter

本文对两自由度(2DOF)的基础隔震结构(Base-Isolated Structure, BIS)体系进行相应的计算分析。附加 VTMDI 后,简化计算分析模型转变为如图 2 所示的三自由度体系,该体系在下文简称 BIS_VTMDI 体系。在 BIS_VTMDI 体系中, x_1, x_s 和 x_T 分别为隔震层水平变形、上部结构层间变形和调谐质量 m_T 相对于地面的位移(即运动行程); m_1 和 m_s 分别为隔震层质量和上部结构的等效质量; k_1 和 k_s 为隔震层的等效水平刚度和上部结构的水平侧移刚度; c_1 和 c_s 分别为隔震层的等效阻尼系数和上部结构的阻尼系数。BIS_VTMDI 体系在水平地震激励 a_g 下的运动方程为:

$$m_s \ddot{x}_s + m_s \ddot{x}_1 + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = -m_s a_g \quad (1)$$

$$m_s \ddot{x}_s + (m_s + m_1) \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 +$$

$$(k_1 + k) x_1 - k x_T = -(m_s + m_1) a_g \quad (2)$$

$$(m_T + m_z) \ddot{x}_T + c \dot{x}_T + k x_T - k x_1 = -m_T a_g \quad (3)$$

定义以下反映基础隔震结构动力特性的相关参数,即上部结构和基础隔震结构的自振圆频率 ω_s 和 ω_1 :

$$\omega_s = \sqrt{k_s/m_s}, \quad \omega_1 = \sqrt{k_1/(m_s + m_1)} \quad (4)$$

上部结构和整个基础隔震结构的阻尼比 λ_s 和 λ_1 为:

$$\lambda_s = \frac{c_s}{2m_s \omega_s}, \quad \lambda_1 = \frac{c_1}{2(m_s + m_1) \omega_1} \quad (5)$$

上部结构质量、调谐质量和惯容系数相对于整个基础隔震结构质量的质量比 r_s, r_T 和 r_z 分别为:

$$r_s = \frac{m_s}{m_s + m_1}, \quad r_T = \frac{m_T}{m_s + m_1}, \quad r_z = \frac{m_z}{m_s + m_1} \quad (6)$$

VTMDI 的附加刚度比 α 和附加阻尼比 λ 分别为:

$$\alpha = \frac{k}{\omega_1}, \quad \lambda = \frac{c}{2(m_s + m_1) \omega_1} \quad (7)$$

将式(4)~(7)所定义参数代入方程(1)~(3),得到 BIS_VTMDI 基于矩阵形式的运动方程为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -Mra_g \quad (8)$$

式中

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} r_s & r_s & 0 \\ r_s & 1 & 0 \\ 0 & 0 & r_z + r_T \end{bmatrix}, \\ C &= \begin{bmatrix} 2r_s\lambda_s\omega_s & 0 & 0 \\ 0 & 2\lambda_1\omega_1 & 0 \\ 0 & 0 & 2\lambda\omega_1 \end{bmatrix}, \\ K &= \begin{bmatrix} r_s\omega_s^2 & 0 & 0 \\ 0 & (1+\alpha)\omega_1^2 & -\alpha\omega_1^2 \\ 0 & -\alpha\omega_1^2 & \alpha\omega_1^2 \end{bmatrix}, \\ r &= \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ r_T/(r_T+r_z) \end{Bmatrix}, \\ x &= \begin{Bmatrix} x_s \\ x_1 \\ x_T \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

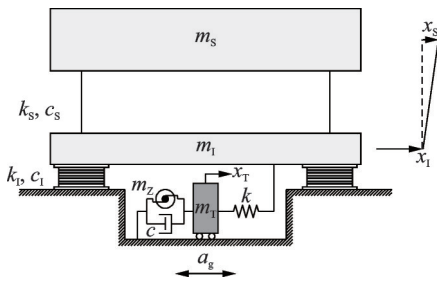


图2 附加VTMDI的基础隔震结构计算分析模型

Fig. 2 Analytical model of base-isolated structure equipped with VTMDI

1.2 地震动模型及随机响应

假设水平地震激励 a_g 为零均值的平稳白噪声随机过程,其功率谱密度为常数 S_0 。基于状态空间方法,方程(8)可以改写成一阶状态向量形式:

$$\dot{v}(t) = Av(t) + Ba_g \quad (10)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ -r \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 $\mathbf{0}_{3 \times 3}$ 和 $\mathbf{I}_{3 \times 3}$ 分别表示 3×3 的零矩阵和单位矩阵。

如果结构体系振动的初始条件为零,则状态向量 $v(t)$ 的稳态协方差矩阵为:

$$G_{vv} = E[v(t) \cdot v^T(t)] \quad (12)$$

式中 $E[\cdot]$ 表示期望值算子。

根据随机振动理论,稳态响应的协方差矩阵 G_{vv}

满足李雅普诺夫方程(Lyapunov Equation),即:

$$AG_{vv} + G_{vv}A^T + 2\pi S_0 BB^T = 0 \quad (13)$$

方程(13)中的稳态响应的协方差 G_{vv} 可以利用 MATLAB 内置的 lyap 函数加以求解。对应定义的一阶状态向量 $v(t)$,协方差矩阵 G_{vv} 的主对角元素的平方根依次为:上部结构层间变形的标准差 $\sigma_{x_s}^{\text{BIS_VTMDI}}$,隔震层水平变形的标准差 $\sigma_{x_1}^{\text{BIS_VTMDI}}$,调谐质量 m_T 相对于地面位移的标准差 $\sigma_{x_T}^{\text{BIS_VTMDI}}$,上部结构层间变形速度的标准差 $\sigma_{\dot{x}_s}^{\text{BIS_VTMDI}}$,隔震层水平变形速度的标准差 $\sigma_{\dot{x}_1}^{\text{BIS_VTMDI}}$,调谐质量 m_T 相对于地面速度的标准差 $\sigma_{\dot{x}_T}^{\text{BIS_VTMDI}}$ 。需要指出的是,在给定 r_T 和 r_z 的情况下,BIS_VTMDI 体系的上述标准差实际上是附加刚度比 α 和附加阻尼比 λ 的函数。

2 BIS_VTMDI 的优化设计

为了反映 BIS_VTMDI 体系中上部结构层间变形以及隔震层水平变形相对于没有附加 VTMDI 的 BIS 体系(即原 BIS 体系)的变化程度,定义以下两个无量纲的反应比 $R_{1,xs}$ 和 $R_{1,x1}$:

$$R_{1,xs} = \frac{\sigma_{x_s}^{\text{BIS_VTMDI}}(\alpha, \lambda)}{\sigma_{x_s}^{\text{BIS}}}, R_{1,x1} = \frac{\sigma_{x_1}^{\text{BIS_VTMDI}}(\alpha, \lambda)}{\sigma_{x_1}^{\text{BIS}}} \quad (14)$$

式中 $\sigma_{x_s}^{\text{BIS}}$ 和 $\sigma_{x_1}^{\text{BIS}}$ 分别表示原 BIS 体系的上部结构层间变形和隔震层水平变形的标准差。

根据式(14),BIS_VTMDI 体系的优化设计问题就是确定最优的附加刚度比 α_{opt} 和附加阻尼比 λ_{opt} ,使得 $R_{1,xs}$ 和 $R_{1,x1}$ 尽可能的小。然而,降低 BIS 体系上部结构层间变形以及隔震层水平变形最为简单的方式就是在隔震层中附加黏滞阻尼(Viscous Damping, VD)。因此,为了比较 BIS_VTMDI 体系和具有相同附加阻尼比的 BIS 体系(以下简称 BIS_VD 体系)中上部结构层间变形以及隔震层水平变形的相对大小,定义如下两个无量纲的反应比 $R_{2,xs}$ 和 $R_{2,x1}$:

$$R_{2,xs} = \frac{\sigma_{x_s}^{\text{BIS_VTMDI}}(\alpha, \lambda)}{\sigma_{x_s}^{\text{BIS_VD}}(\lambda)}, R_{2,x1} = \frac{\sigma_{x_1}^{\text{BIS_VTMDI}}(\alpha, \lambda)}{\sigma_{x_1}^{\text{BIS_VD}}(\lambda)} \quad (15)$$

式中 $\sigma_{x_s}^{\text{BIS_VD}}$ 和 $\sigma_{x_1}^{\text{BIS_VD}}$ 分别表示与 BIS_VTMDI 体系具有相同附加阻尼比的 BIS_VD 体系的上部结构层间变形和隔震层水平变形的标准差。根据式(15),如果 $R_{2,xs}$ 或 $R_{2,x1}$ 接近或大于 1,说明附加 VTMDI 的控制效果不如直接附加黏滞阻尼。因此,综合式(14)和(15)可知,BIS_VTMDI 体系的优化设计不仅应该实现 $R_{1,xs}$ 和 $R_{1,x1}$ 尽可能的小,还应该确保 $R_{2,xs}$ 和 $R_{2,x1}$ 尽可能的小。

2.1 参数研究

在本节的参数研究以及后续的优化策略中,将

BIS_VTMDI体系中的BIS的参数固定为: $\omega_1=0.8\pi$, $\lambda_1=0.10$, $\omega_s=4.0\pi$, $\lambda_s=0.02$ 和 $r_s=5.0/6.0=0.833$ 。同时将VTMDI体系的 r_T 和 r_z 都取值为0.02,附加刚度比 α 和附加阻尼比 λ 的取值范围分别为 $10^{-3}\sim 10^3$ 和 $10^{-4}\sim 10^0$ 。

图3给出了 $r_T=r_z=0.02$ 时, $R_{1,xS}$ 和 $R_{2,xS}$ 随附加刚度比 α 和附加阻尼比 λ 变化的云图,同时在该图中标识出 $R_{1,xS}=1$ 和 $R_{2,xS}=1$ 的界线。从图3(a)可以看出: $R_{1,xS}$ 并没有全局最小值,只是在实线方框区域内存在局部最小值;并且在虚线方框区域所示的洼地区域内,在给定附加刚度比 α 的情况下,存在最优的附加阻尼比 λ 使得 $R_{1,xS}$ 最小。相反地,如图3(b)所示, $R_{2,xS}$ 存在全局最小值。

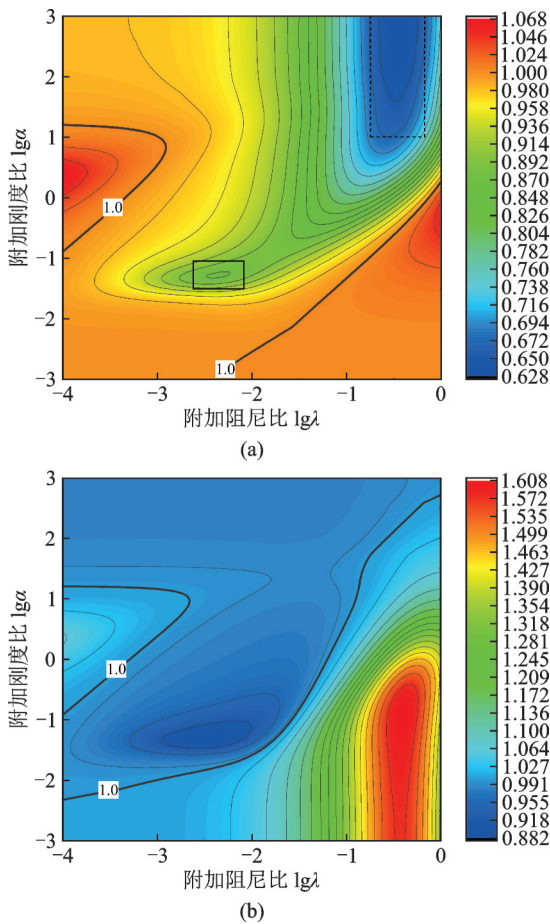


图3 $r_T=r_z=0.02$ 时 $R_{1,xS}$ 和 $R_{2,xS}$ 的云图
Fig. 3 Contours of $R_{1,xS}$ and $R_{2,xS}$ in the case of $r_T=r_z=0.02$

图4分别给了 $r_T=r_z=0.02$ 时, $R_{1,xI}$ 和 $R_{2,xI}$ 随附加刚度比 α 和附加阻尼比 λ 变化的云图,同时在该图中标识出 $R_{1,xI}=1$ 和 $R_{2,xI}=1$ 的界线。从图4(a)可以看出: $R_{1,xI}$ 同样没有全局最小值,也是在实线方框区域内存在局部最小值;并且 $R_{1,xI}$ 总体上随着附加刚度比和附加阻尼比的增加而减小。相反地,如图4(b)所示, $R_{2,xI}$ 存在全局最小值。进一步比较图3和4可以发现:存在一个由附加刚度比 α 和附加

阻尼比 λ 组成的设计参数空间,在该设计参数空间内不仅 $R_{1,xS}$, $R_{2,xS}$, $R_{1,xI}$ 和 $R_{2,xI}$ 均小于1,而且存在最优的附加刚度比和附加阻尼比使得 $R_{1,xS}$, $R_{2,xS}$, $R_{1,xI}$ 和 $R_{2,xI}$ 中的任何一个性能指标取得最小值。

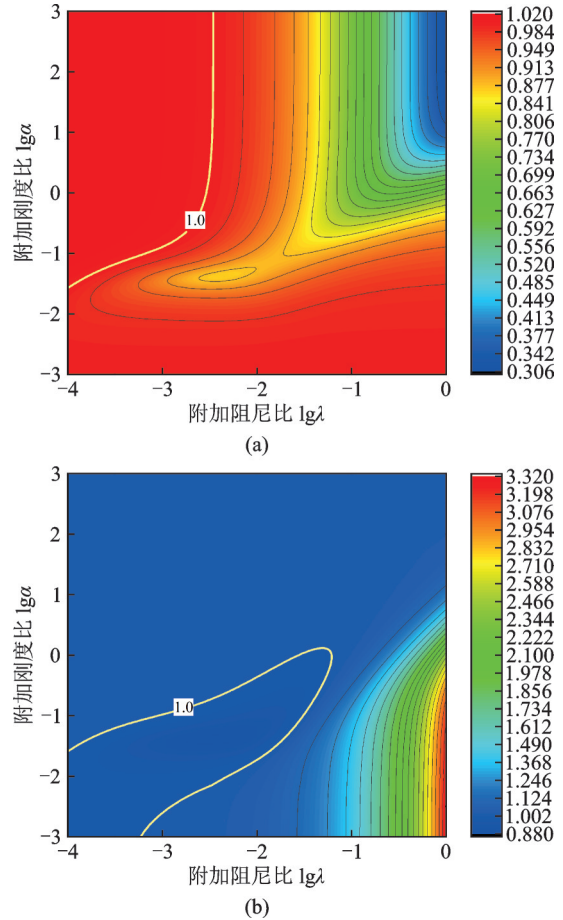


图4 $r_T=r_z=0.02$ 时 $R_{1,xI}$ 和 $R_{2,xI}$ 的云图
Fig. 4 Contours of $R_{1,xI}$ and $R_{2,xI}$ in the case of $r_T=r_z=0.02$

2.2 优化策略

考虑到基础隔震技术的最终目的是降低上部结构的地震响应,因此最为直接的优化目标就是使得BIS_VTMDI体系中上部结构的层间位移最小(即优化目标为 $R_{1,xS}$);相应的约束条件是确保BIS_VTMDI体系的性能应该优于相应的BIS_VD体系(即约束参数为 $R_{2,xS}$ 和 $R_{2,xI}$)。根据2.1节的参数研究,在给定的BIS体系以及已知 r_T 和 r_z 的情况下,BIS_VTMDI体系的优化设计参数为附加刚度比 α 和附加阻尼比 λ ,相应的优化设计问题可以表示为下式:

$$\begin{aligned} & \text{Find } \alpha_{\text{opt}} \text{ and } \lambda_{\text{opt}}, \\ & \text{Minimize } R_{1,xS}, \\ & \text{subjected to } R_{2,xS} \leq 1 \text{ and } R_{2,xI} \leq 1 \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)所代表的有约束多变量优化问题,可以利用MATLAB内置的非线性优化函数fmincon求解最优的设计参数(即 α_{opt} 和 λ_{opt})。基于式(16)可以

得到在给定 r_T 的情况下,不同 r_z 所对应的 α_{opt} 和 λ_{opt} 以及相应的 $R_{1,XS}, R_{1,XI}, R_{2,XS}$ 和 $R_{2,XI}$ 。

图 5 给出了在 $r_T=0.02$ 时,不同 r_z 所对应的 α_{opt} 和 λ_{opt} 曲线以及相应的 $R_{1,XS}, R_{1,XI}, R_{2,XS}$ 和 $R_{2,XI}$ 曲线。特别是根据图 5(c) 可知 r_z 的最大允许取值为 0.354, 是因为一旦 r_z 超过该值, $R_{1,XS}$ 将大于 1, 导致不存在满足公式(16)的设计最优解。此外,从图 5(a) 和 (b) 中可以看出,随着 r_z 的增加,最优附加刚度比 α_{opt} 和最优附加阻尼比 λ_{opt} 先增加后减小;而 $R_{1,XS}$ 和 $R_{1,XI}$ 则是先减小后增加,因此存在最优的 $r_{z,opt}$ 使得 $R_{1,XS}$ 取得最小值。公式(16)所对应的 BIS_VTMDI 体系的设计优化问题可以进一步拓展为:在给定 BIS 体系以及已知 r_T 的情况下, BIS_VTMDI 体系的设计优化参数为质量比 r_z 、附加刚度比 α 和附加阻尼比 λ , 相应的优化设计问题可以表示为下式:

$$\begin{aligned} & \text{Find } r_{z,opt}, \alpha_{opt} \text{ and } \lambda_{opt}, \\ & \text{Minimize } R_{1,XS}, \\ & \text{subjected to } R_{2,XS} \leq 1 \text{ and } R_{2,XI} \leq 1 \end{aligned} \quad (17)$$

由于执行式(17)只需要一个优化步骤,因此在论文后续部分将基于式(17)的优化策略简称为一步优化法。图 6 和 7 分别给出了不同 r_T (取值区间为 0~0.25) 的情况下基于一设计法得到的最优设计参数 $r_{z,opt}, \alpha_{opt}$ 和 λ_{opt} 以及相应的性能指标 $R_{1,XS}, R_{1,XI}, R_{2,XS}$ 和 $R_{2,XI}$ 。从图 7 可以看出:在隔震层附加按照一步优化法设计的 VTMDI 装置后可以有效降低基础隔震结构中上部结构的层间变形和隔震层的水平变形;实际应用中,调谐质量比 r_T 一般不会超过 0.10, 而在这个区间内 $R_{2,XS}$ 或 $R_{2,XI}$ 将等于 1 或略微小于 1 ($R_{2,XS}$ 和 $R_{2,XI}$ 都大于 0.95), 这说明 BIS_VTMDI 体系的性能并没有明显好于相应的 BIS_VD 体系,因此基于式(17)的优化策略并不适用。

为了保证优化结果的经济性,应该在保证 $R_{2,XS}$ 或 $R_{2,XI}$ 尽可能小的情况下使得 $R_{1,XS}$ 最小。为此本文提出了一种优化策略。该优化策略包括以下两步:首先对任一给定的 r_z , 确定最优附加刚度比 α_{opt} 和附加阻尼比 λ_{opt} 使得性能指标 $R_{2,XS}$ 最小,并且同时满足 $R_{2,XS} \leq 1$ 和 $R_{2,XI} \leq 1$ 这两个约束条件,即:

$$\begin{aligned} & \text{Find } \alpha_{opt} \text{ and } \lambda_{opt}, \\ & \text{Minimize } R_{2,XS}, \\ & \text{subjected to } R_{2,XS} \leq 1 \text{ and } R_{2,XI} \leq 1 \end{aligned} \quad (18)$$

因此对于不同的 r_z , 可以得到不同的 α_{opt} 和 λ_{opt} 以及相应的 $R_{1,XS}, R_{1,XI}, R_{2,XS}$ 和 $R_{2,XI}$; 然后基于遍历搜寻的方式(本文建议 r_z 值从零开始, 间隔为 0.0001, 逐渐增加到预定的 r_z 目标值), 从得到的 $R_{1,XS}$ 当中确定最小值, 这样与之相对应的 r_z 即为最优的 $r_{z,opt}$, 同时也可以确定对应的 α_{opt} 和 λ_{opt} 以及相应的 $R_{1,XS}, R_{1,XI}, R_{2,XS}$ 和 $R_{2,XI}$ 。从上述介绍中可以看出, 该优化

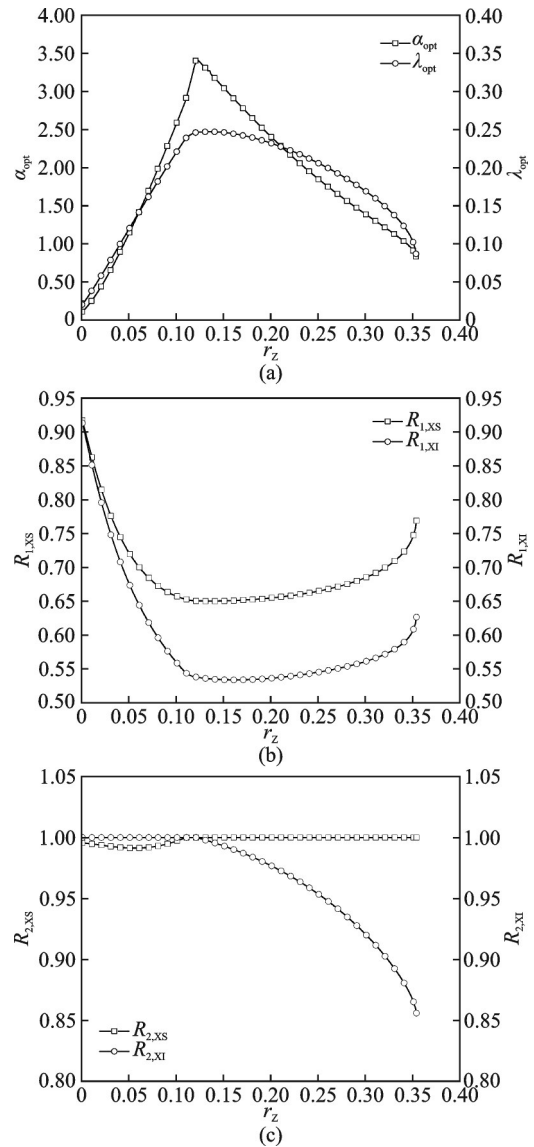


图 5 不同 r_z 情况下最优设计参数以及相应的性能指标 ($r_T=0.02$)

Fig. 5 Optimal design parameters and corresponding performance indices in terms of r_z ($r_T=0.02$)

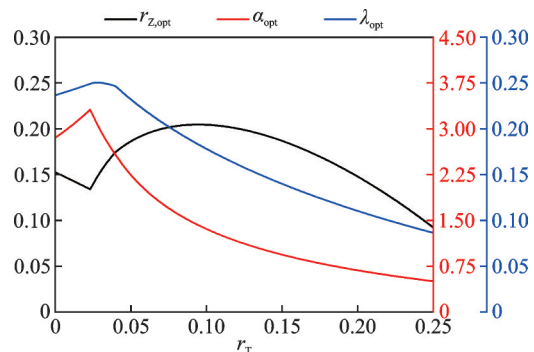


图 6 基于一设计法确定的最优设计参数

Fig. 6 Optimal design parameters obtained by one-step optimization strategy

策略包括两个优化步骤, 因此在本论文后续部分将该优化策略简称为两步优化法。

图 8 和 9 分别给出了不同 r_T (取值区间同样为

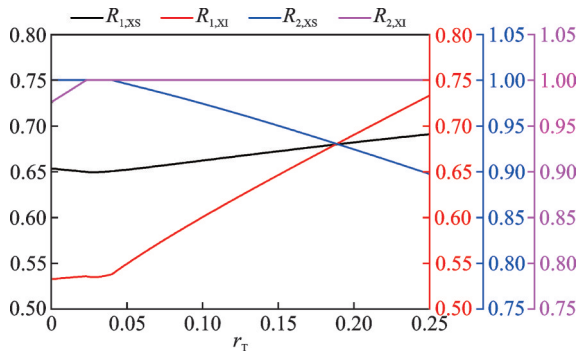


图 7 基于一步优化法确定的性能指标

Fig.7 Performance indices obtained by one-step optimization strategy

0~0.25)的情况下基于两步优化法得到的最优设计参数 $r_{z,opt}$, α_{opt} 和 λ_{opt} 以及相应的 $R_{1,XS}$, $R_{1,XI}$, $R_{2,XS}$ 和 $R_{2,XI}$ 。从图 9 可以看出:在隔震层附加基于两步优化法设计的 VTMDI 装置后同样可以有效降低基础隔震结构中上部结构的层间变形和隔震层的水平变形;而且在调谐质量比 $r_T \leq 0.10$ 的情况下,优化设计后的 BIS_VTMDI 体系的性能也明显好于相应的 BIS_VD 体系 ($R_{2,XS}$ 和 $R_{2,XI}$ 都小于 0.95),这说明两步优化法与一步优化法相比更为有效。

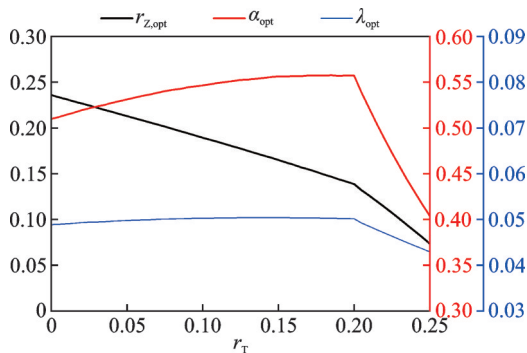


图 8 基于两步优化法确定的最优设计参数

Fig.8 Optimal design parameters obtained by two-step optimization strategy

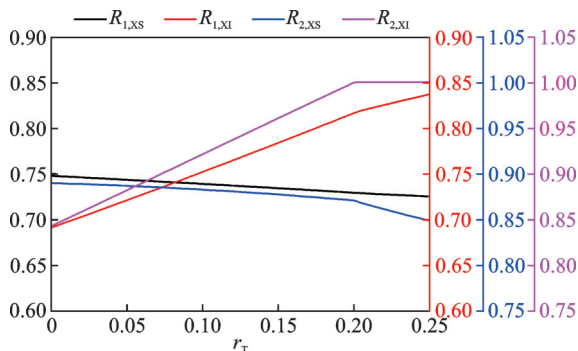


图 9 基于两步优化法确定的性能指标

Fig.9 Performance indices obtained by two-step optimization strategy

需要指出的是,虽然本研究将基础隔震结构上部结构的层间变形作为优化目标,但是上部结构的绝对加速度也可以作为优化目标。考虑到基础隔震结构上部结构的层间变形和绝对加速度这两个性能指标变化规律一致并且紧密关联,此外本论文的研究重点在于提出基础隔震结构附加变化型调谐质量惯容阻尼器的优化设计方法,因此本论文只将上部结构的层间变形作为优化目标。

3 数值算例分析

本小节采用的数值算例为如图 2 所示的 3 自由度 BIS_VTMDI 体系,对优化后的 BIS_VTMDI 体系进行时程分析,通过比较上部结构的最大层间变形(简称 Max.XS)、上部结构层间变形的均方值(简称 RMS.XS)、隔震层的最大水平变形(简称 Max.XI)、隔震层水平变形的均方值(简称 RMS.XI),评估两步优化法的有效性。定义响应量 Max.XS, RMS.XS, Max.XI 和 RMS.XI 在一组地震动作用下的平均值为 $\mu_{Max.XS}$, $\mu_{RMS.XS}$, $\mu_{Max.XI}$ 和 $\mu_{RMS.XI}$ 。时程分析的地震动为满足美国 Los Angeles 地区 50 年回归周期超越概率 10% 的 20 条地震动(简称 LA_10_in_50),由 Somerville 等^[22]建立并用于 TMD 的相关研究。将每条地震动的峰值加速度调整至 0.3g,图 10 给出了调幅后的地震动加速度反应谱。表 1 给出了不同 r_T 的情况下,一步优化法和两步优化法得到的优化设计参数。

根据时程分析的数值结果,可以得到 BIS 体系中上部结构平均最大层间变形 $\mu_{Max.XS}$ 、隔震层平均最大水平变形 $\mu_{Max.XI}$ 、上部结构平均层间变形均方值 $\mu_{RMS.XS}$ 和隔震层平均水平变形均方值 $\mu_{RMS.XI}$ 分别为: 9.422, 224.651, 2.291 和 44.508 mm。表 2 分别给出了不同 r_T 的情况下基于两步优化法优和基于一歩优化法化的 BIS_VTMDI 体系以及相对应 BIS_VD 体系的 $\mu_{Max.XS}$, $\mu_{Max.XI}$, $\mu_{RMS.XS}$ 和 $\mu_{RMS.XI}$ 。

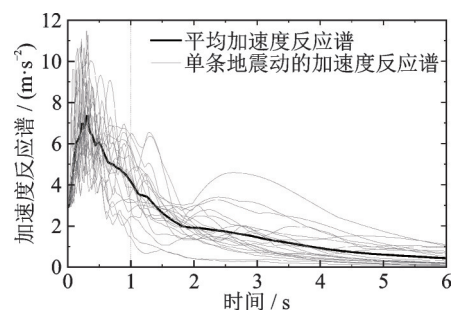


图 10 LA_10_in_50 的加速度反应谱

Fig.10 Acceleration response spectra of LA_10_in_50

表 1 最优的设计参数

Tab. 1 Optimal design parameters

优化方法	r_T	$r_{z,opt}$	α_{opt}	λ_{opt}
	0.02	0.1362	3.2404	0.2471
一步优化法	0.05	0.1860	2.2407	0.2319
	0.10	0.2041	1.3543	0.1778
两步优化法	0.02	0.2265	0.5190	0.0492
	0.05	0.2126	0.5308	0.0497
	0.10	0.1890	0.5461	0.0502

从表 2 可知,基于两步优化法的 BIS_VTMDI 体系随着调谐质量比的增加,上部结构平均层间变形的最大值和均方值不断减小,但减小幅度不大;但隔震层平均水平变形的最大值和均方值则不断增加,说明对于 BIS_VTMDI 体系可以使用较小的调谐质量。从表 2 可以进一步发现:与基于两步优化法优化的 BIS_VTMDI 体系和相对应的 BIS_VD 体系的地震响应相比较,基于一步优化法优化的 BIS_VTMDI 体系和相对应的 BIS_VD 体系的地震响应明显要小。因此从地震响应值绝对大小的角度出发,一步优化法的效果要好于两步优化法,这一点也与 2.2 节优化策略所得到的结论一致。为了进一步比较两种优化方法的控制效果,定义类似于公式(14)和(15)的地震响应折减率,如下式所示:

$$\text{折减率}R1=1-\frac{\text{最优BIS_VTMDI体系的地震响应}}{\text{BIS体系的地震响应}} \quad (19)$$

$$\text{折减率}R2=1-\frac{\text{最优BIS_VTMDI体系的地震响应}}{\text{相对应BIS_VD体系的地震响应}} \quad (20)$$

基于表 2 的地震响应结果以及 BIS 体系的地震响应结果,可以计算不同地震响应的折减率并在表 3 列出。该表第 2 列给出的比较参数中,Max 和

RMS 分别表示响应量的最大值和均方值;XS 和 XI 分别表示上部结构的层间变形和隔震层的水平变形。以 Max_R1_XS 为例,该缩写表示最优 BIS_VTMDI 体系的上部结构平均最大层间变形相对于 BIS 体系的上部结构平均最大层间变形的折减率。从表 3 可以看出,虽然基于两步优化法优化的 BIS_VTMDI 体系相对于 BIS 体系地震响应的折减效果没有基于一部优化法的情况理想,但是与相对应的 BIS_VD 体系比较,两步优化法优化的 BIS_VTMDI 体系地震响应的折减效果明显好于基于一部优化法的情况。特别是采用一步优化法优化的 BIS_VTMDI 体系,其地震响应大部分情况下会大于相对应的 BIS_VD 体系(如表中加粗数字所示)。因此,对于 BIS_VTMDI 体系的优化设计,两步优化法与一步优化法相比更为有效。

以调谐质量比 $r_T=0.02$ 为例,通过时程分析可以得到两种优化策略下 BIS_VTMDI 体系调谐质量平均最大运动行程 $\mu_{\text{Max,XT}}$ 和平均运动行程均方值 $\mu_{\text{RMS,XT}}$ 分别为:263.325 和 57.608 mm(两步优化法);131.685 和 27.196 mm(一步优化法)。相对于 BIS 体系中隔震层平均最大水平变形值 $\mu_{\text{Max,XI}}=224.651$ mm 和平均水平变形均方值 $\mu_{\text{RMS,XI}}=44.508$ mm,基于一部法优化法的调谐质量运动平均最大运动行程和平均运动行程均方值分别减小 41.3% 和 38.9%;而基于两步优化法的调谐质量运动平均最大运动行程和平均运动行程均方值分别增大 17.2% 和 29.4%。根据文献[4]的研究成果:基础隔震结构附加最优 TMD 后其调谐质量运动行程最大值和均方值相对于与原基础隔震结构的隔震层的水平变形最大值和均方值将至少放大 1 倍,因此基于两步优化法优化的 BIS_VTMDI 体系并不会导致过大的调谐质量运动行程。

表 2 基于一部优化法与两步优化法的结构体系反应

Tab. 2 Responses of BIS_VTMDI and BIS_VD based on two-step optimization strategy and one-step optimization strategy

结构体系	响应量	$r_T=0.02$		$r_T=0.05$		$r_T=0.10$	
		一步优化法	两步优化法	一步优化法	两步优化法	一步优化法	两步优化法
BIS_VTMDI	$\mu_{\text{Max,XS}}/\text{mm}$	7.705	8.344	8.025	8.176	8.082	7.932
	$\mu_{\text{Max,XI}}/\text{mm}$	125.968	165.747	127.141	167.557	137.907	171.245
	$\mu_{\text{RMS,XS}}/\text{mm}$	1.377	1.681	1.401	1.660	1.436	1.627
	$\mu_{\text{RMS,XI}}/\text{mm}$	26.095	36.639	26.582	37.314	29.200	38.540
BIS_VD	$\mu_{\text{Max,XS}}/\text{mm}$	7.378	8.489	7.388	8.495	7.506	8.485
	$\mu_{\text{Max,XI}}/\text{mm}$	129.238	194.349	132.474	194.105	145.781	193.860
	$\mu_{\text{RMS,XS}}/\text{mm}$	1.375	1.882	1.388	1.879	1.457	1.875
	$\mu_{\text{RMS,XI}}/\text{mm}$	26.528	44.508	27.311	44.423	30.608	44.339

表 3 一步优化法和两步优化法折减率比较

Tab.3 Comparison of response reduction between one-step and two-step optimization strategies

方法	比较参数	$r_{T=}$	$r_{T=}$	$r_{T=}$
		0.02	0.05	0.10
两步优化法	Max_R1_XS	11.5%	13.2%	15.8%
	Max_R1_XI	26.2%	25.4%	23.8%
	Max_R2_XS	1.9%	3.8%	6.5%
	Max_R2_XI	14.7%	13.7%	11.7%
	RMS_R1_XS	26.6%	27.5%	29.0%
	RMS_R1_XI	34.2%	33.0%	30.8%
	RMS_R2_XS	10.7%	11.6%	13.3%
	RMS_R2_XI	17.7%	16.0%	13.1%
一步优化法	Max_R1_XS	18.2%	14.8%	14.2%
	Max_R1_XI	43.9%	43.4%	38.6%
	Max_R2_XS	-4.4%	-8.6%	-7.7%
	Max_R2_XI	2.5%	4.0%	5.4%
	RMS_R1_XS	39.9%	38.9%	37.3%
	RMS_R1_XI	53.1%	52.3%	47.6%
	RMS_R2_XS	-0.2%	-0.9%	1.5%
	RMS_R2_XI	1.6%	2.7%	4.6%

4 结 论

本文提出将 VTMD 中的阻尼元件与惯容元件并联,形成具有较小调谐质量的变化型调谐质量惯容阻尼器(VTMDI),并用于基础隔震结构的性能控制,开展了 BIS_VTMDI 体系的优化设计研究,结论如下:

(1) 基于 Lyapunov 方程计算 BIS_VTMDI 体系在白噪声作用下的随机响应,通过参数研究提出了两种针对 BIS_VTMDI 体系的优化策略。

(2) 与直接将基础隔震结构的上部结构层间变形作为优化目标的传统优化策略相比,所提出的两步优化法在同时减小隔震位移和降低上部结构加速度响应方面更为有效。

(3) 通过一组地震的动力时程结果证实了采用两步优化法对 BIS_VTMDI 体系进行优化更为经济实用,而且调谐质量并不会出现过大的运动行程。

参考文献:

[1] Kelly J M. Base isolation: linear theory and design[J]. Earthquake Spectra, 1990, 6(2):223-244.

[2] 朱宏平,谭平,叶昆.极罕遇地震作用下铅芯橡胶隔震支座基础隔震结构抗震性能研究[J].建筑结构学报,2019,40(10):122-131.

ZHU Hongping, TAN Ping, YE Kun. Investigation of seismic performance of LRB base-isolated structures

subjected to extremely rare earthquakes[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(10):122-131.

[3] Den Hartog J P. Mechanical Vibrations[M]. Dover Publications, 1985.

[4] Taniguchi T, Der Kiureghian A, Melkumyan M. Effect of tuned mass damper on displacement demand of base-isolated structures[J]. Engineering Structures, 2008, 30(12):3478-3488.

[5] De Angelis M, Perno S, Reggio A. Dynamic response and optimal design of structures with large mass ratio TMD[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(1):41-60.

[6] Xiang P, Nishitani A. Optimum design and application of non-traditional tuned mass damper toward seismic response control with experimental test verification[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44(13):2199-2220.

[7] 刘良坤,谭平,闫维明.一种新型惯容减震器的设计及减震效果研究[J].振动与冲击,2018,37(15):156-163.

LIU Liangkun, TAN Ping, YAN Weiming. Design of a novel inerter damper and its aseismic effect under earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(15):156-163.

[8] Pietrosanti D, De Angelis M, Basili M. Optimal design and performance evaluation of systems with Tuned Mass Damper Inerter (TMDI)[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2017, 46(8):1367-1388.

[9] 赵祥昇,李春祥,曹黎媛.结构-NFVD-TTMDI的控制性能[J].振动工程学报,2022,35(1):55-63.

ZHAO Xiangsheng, LI Chunxiang, CAO Liyuan. Control performance of structure-NFVD-TTMDI[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(1):55-63.

[10] 张瑞甫,曹嫣如,潘超.惯容减震(振)系统及其研究进展[J].工程力学,2019,36(10):8-27.

ZHANG Ruifu, CAO Yanru, PAN Chao. Inerter system and its state-of-the-art[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(10):8-27.

[11] Marian L, Giaralis A. Optimal design of inerter devices combined with TMDs for vibration control of buildings exposed to stochastic seismic excitation [C]//Safety, Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures-Proceedings of the 11th International Conference on Structural Safety and Reliability, ICOSSAR 2013. CRC Press, 2013:1025-1032.

[12] Marian L, Giaralis A. Optimal design of a novel tuned mass-damper-inerter (TMDI) passive vibration control configuration for stochastically support-excited structural systems[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2014, 38:156-164.

[13] Giaralis A, Marian L. Use of inerter devices for weight reduction of tuned mass-dampers for seismic protection

- of multi-story building: the Tuned Mass-Damper-Inerter (TMDI) [C]//Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2016. SPIE, 2016, 9799: 415-424.
- [14] Marian L, Giaralis A. The tuned mass-damper-inerter for harmonic vibrations suppression, attached mass reduction, and energy harvesting[J]. Smart Structures and Systems, 2017, 19(6): 665-678.
- [15] De Domenico D, Ricciardi R. An enhanced base isolation system equipped with optimal tuned mass damper inerter (TMDI) [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2018, 47(5): 1169-1192.
- [16] De Domenico D, Impollonia N, Ricciardi R. Soil-dependent optimum design of a new passive vibration control system combining seismic base isolation with tuned inerter damper[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 105: 37-53.
- [17] Ren M Z. A variant design of the dynamic vibration absorber[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 245(4): 762-770.
- [18] Xiang P, Nishitani A. Optimum design for more effective tuned mass damper system and its application to base-isolated buildings[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2014, 21(1): 98-114.
- [19] 李亚峰, 李寿英, 陈政清. 变化型惯质调谐质量阻尼器的优化与性能评价[J]. 振动工程学报, 2020, 33(5): 877-884.
- LI Yafeng, LI Shouying, CHEN Zhengqing. Optimization and performance evaluation of variant tuned mass damper inerter[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(5): 877-884.
- [20] 叶昆, 舒率. 基于性能需求的基础隔震结构附加调谐惯容阻尼器的优化设计研究[J]. 动力学与控制学报, 2020, 18(5): 57-62.
- YE Kun, SHU Shuai. Optimal design of base-isolated structure with supplemental tuned inerter damper based on performance requirement[J]. Journal of Dynamics and Control, 2020, 18(5): 57-62.
- [21] Ikago K, Saito K, Inoue N. Seismic control of single-degree-of-freedom structure using tuned viscous mass damper[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, 41(3): 453-474.
- [22] Somerville P G, Smith N, Punyamurthula S. Development of ground motion time histories for phase 2 of the FEMA/SAC steel project[R]. Richmond, CA: SAC Joint Venture, 1997.

Optimum design of base-isolated structure equipped with variant tuned mass damper inerter

YE Kun¹, YANG Qi-fan¹, CHEN Zhen-ming^{1,2}

(1.School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2.China Construction Steel Structure Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)

Abstract: Base-isolation system would undergo considerable great displacement subjected to strong earthquake. According to recent research progress, the hybrid control strategy combining variant tuned mass damper (VTMD) with base-isolation system has been proved to be effective in reducing such great displacement demand. However, large tuned mass is required to achieve better control performance, which may be difficult to realize in practical application. Employing the mass-amplification effect of the inerter device, a variant tuned mass damper inerter (VTMDI) is proposed in this study by inserting the inerter device in parallel with the dashpot in the VTMD and is attached to the isolation level in the base-isolated structure. Due to the stochastic nature of seismic ground motions, investigation into the optimum design of the VTMDI are conducted based on the framework of random vibration. It is demonstrated that the traditional optimization strategy, taking the inter-story drift of isolated superstructure as the optimization objective, is not cost-effective. Thereby, a novel optimization strategy consisting of two step optimization procedure is proposed. In this two-step optimization strategy, the optimization objective in the first step is taken as the control effect of the base-isolated structure equipped with the VTMDI compared with that of the corresponding base-isolated structure with the same dashpot, and then the optimization objective in the second step is to minimize the inter-story drift of isolated superstructure. And the dynamic time-history analyses show that both optimization strategies can effectively reduce the horizontal deformation in the isolation level and inter-story drift in the superstructure, and the excessive strokes of the tuned mass are also avoided. However, the two-step optimization strategy is more cost-effective than the traditional optimization strategy.

Key words: base-isolated structure; inerter; variant tuned mass damper; random vibration; optimum design; two-step optimization method

作者简介: 叶 昆(1977—),男,博士,教授。E-mail:kun.ye@hust.edu.cn。

通讯作者: 陈振明(1975—),男,教授级高级工程师。E-mail:63409396@qq.com。