

调谐负刚度-惯容质量阻尼器参数优化 与地震响应控制

易 举¹, 徐 凯¹, 何晓晖², 华旭刚¹, 温 青³, 陈政清¹

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518029;

3. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 提出一种调谐负刚度-惯容质量阻尼器(TNIMD), 用于地震作用下的结构减震控制。通过拉格朗日方程得到结构 TNIMD 耦合系统运动方程, 采用定点理论进行 TNIMD 参数优化设计, 讨论最优负刚度系数的取值, 开展参数分析和减震效果验证。参数分析研究表明: TNIMD 对主结构位移响应的控制优于无负刚度元件下的调谐惯容质量阻尼器(VTMDI), 且质量比及惯容比越小, TNIMD 相对优势越大。减震分析结果表明: 在远场、近场脉冲及近场无脉冲地震作用下, TNIMD 对主结构位移及绝对加速度响应的控制效果均优于 VTMDI, 验证了 TNIMD 减震的优越性, 为 TNIMD 研究提供参考。

关键词: 惯容; 调谐质量阻尼器; 负刚度; 参数优化; 地震响应

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)06-1015-08

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.06.012

引 言

近年来, 基于惯容(Inerter)的减振装置受到土木工程界的极大关注。惯容的本质是一种惯性力放大装置^[1], 通过滚珠丝杠、齿轮齿条、行星齿轮等机构将物理质量放大为自身成百上千倍的惯性质量(Inertance)。Tadashi 等^[2]利用滚珠丝杠放大黏滞阻尼力进行了建筑结构抗震研究(惯容与阻尼元件并联, 后称 Viscous Mass Damper, 简称 VMD^[3])。几乎同一时期, Smith 申请专利: 力-控制机械装置(Force-controlling mechanical device)^[4], 并在力学-电学相似性分析中正式将其命名为惯容(Inerter)^[5]。惯容在汽车悬架系统中得到了广泛应用^[6-7]。

为进一步放大 VMD 的阻尼力和惯性力, 受调谐质量阻尼器(TMD)的启发, 以 Ikago 等^[3]、Kida 等^[8]为代表的日本学者将 VMD 与弹簧串联, 提出了调谐黏滞阻尼器(TVMD), 并将其用于建筑结构地震控制, 同时采用固定点法推导了 TVMD 的设计公式, 引起了土木工程界对惯容减隔震装置的关注。目前, 基于惯容的减振装置的物理模型就是惯容、弹簧和阻尼元件的各类串、并联组合^[1]。这类减振装置按是否接地可分为接地类和非接地类。接地类惯容减振装置包括 VMD, TVMD, TID(并联的弹簧-

阻尼再与惯容串联)^[9]、TMDI(调谐质量阻尼器 TMD 通过惯容元件接地)^[10]等。非接地类惯容是将调谐质量阻尼器中的阻尼元件替换为各类接地惯容减振装置^[11-12], 其中比较特殊的是 TMDI, 因其本来就含有调谐质量, 在高层建筑中往往采用跨越多层的安装方式来实现优于 TMD 的减振效果^[13]。李亚峰等^[14]通过改变 TMDI 中阻尼单元的位置, 将阻尼元件与惯容并联, 提出了一种变化型 TMDI(VTMDI)。国内外学者基于上述各类减振装置的高层建筑及桥梁抗风与抗振^[15-18]、拉索多模态减振^[19-21]开展了诸多研究。

此外, 也有学者利用负刚度的位移放大效应, 将负刚度弹簧引入到惯容减振装置中, 陈杰等^[22]提出了两种负刚度惯容减振装置, 用于连续梁体系的简谐受迫振动控制。范舒铜等^[23]提出了一种含有 Maxwell 模型的惯容-接地负刚度减振装置。负刚度弹簧装置通过预压弹簧等措施, 使得装置的出力与位移负相关^[24]。

鉴于此, 在 VTMDI 的构型中引入负刚度弹簧, 组成惯容-阻尼-负刚度的并联形式, 形成了一种调谐负刚度-惯容质量阻尼器(Tuned Negative-stiffness Inerter Mass Damper, TNIMD), 该装置利用负刚度弹簧增大阻尼耗能, 实现对 VTMDI 减震效果的提升。本文建立结构基底激励下的 TNIMD 与单

收稿日期: 2022-06-18; 修订日期: 2022-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52025082, 51708208); 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40208)。

自由度结构耦合系统模型,采用定点理论优化 TNIMD 频率和阻尼比,讨论刚度系数的取值范围和相比 VTMDI 的优越性,通过数值模拟验证地震作用下 TNIMD 对结构的减震效果。

1 调谐负刚度-惯容质量阻尼器

图 1 为 TNIMD 与被控单自由度主结构耦合系统理论分析模型。主结构质量、刚度及阻尼系数分别为 m_s, k_s 及 c_s 。TNIMD 物理质量为 m_1 , 一侧通过正刚度弹簧与主结构相连,另一侧与并联的惯容 b 、阻尼器 c_1 和负刚度弹簧 k_n 系统接地,当去掉负刚度弹簧后, TNIMD 模型退化为 VTMDI^[14]。该耦合系统的动能、势能及阻尼耗能分别为:

$$\begin{cases} T = \frac{1}{2} m_s (\dot{x}_s + \dot{x}_g)^2 + \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1 + \dot{x}_g)^2 + \frac{1}{2} b \dot{x}_1^2 \\ V = \frac{1}{2} k_s x_s^2 + \frac{1}{2} k_1 (x_s - x_1)^2 + \frac{1}{2} k_n x_1^2 \\ D = \frac{1}{2} c_s \dot{x}_s^2 + \frac{1}{2} c_1 \dot{x}_1^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 x_s 及 x_1 分别为主结构及 TNIMD 相对地面的位移; x_g 为基底位移; k_1 为 TNIMD 与主结构相连的弹簧刚度。

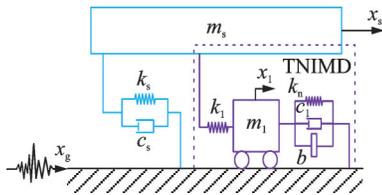


图 1 TNIMD 与被控主结构耦合系统模型

Fig. 1 TNIMD and controlled main structure coupling system model

根据拉格朗日方程得到耦合系统运动方程为:

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + k_s x_s + k_1 (x_s - x_1) + c_s \dot{x}_s = -m_s \ddot{x}_g \\ (b + m_1) \ddot{x}_1 + k_1 (x_1 - x_s) + k_n x_1 + c_1 \dot{x}_1 = -m_1 \ddot{x}_g \end{cases} \quad (2)$$

引入如下无量纲参数:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{m_1}{m_s}, \mu_b = \frac{m_b}{m_s}, \omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}}, \omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \\ \beta &= \frac{\omega_1}{\omega_s}, \alpha = \frac{k_n}{k_1}, c_s = 2\zeta_s m_s \omega_s, c_1 = 2\zeta_1 m_1 \omega_1, \\ \phi &= \frac{\omega}{\omega_s}, \tau = \omega_s t, \ddot{x}_g = a_g e^{i\phi\tau} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 μ 及 μ_b 分别为 TNIMD 物理及惯性质量与主结构质量比; ω_s 及 ω_1 分别为主结构及 TNIMD 振动圆频率, β 为二者频率比; ζ_s 及 ζ_1 分别为主结构及 TNIMD 阻尼比; α 为无量纲负刚度系数; ϕ 为外激励

频率与主结构频率比; τ 为无量纲时间; t 为时间; a_g 为基底激励荷载幅值。

同时引入主结构及 TNIMD 的无量纲位移^[14]:

$$y_s = \frac{x_s}{a_g} \omega_s^2, y_1 = \frac{x_1}{a_g} \omega_s^2 \quad (4)$$

将式(3)~(4)代入式(2),可得无量纲运动方程:

$$\begin{cases} \ddot{y}_s + y_s + \mu\beta^2 (y_s - y_1) + 2\zeta_s \dot{y}_s = -e^{i\phi\tau} \\ \left(\frac{\mu_b}{\mu} + 1 \right) \ddot{y}_1 + \beta^2 (y_1 - y_s) + \alpha\beta^2 y_1 + 2\zeta_1 \beta \dot{y}_1 = -e^{i\phi\tau} \end{cases} \quad (5)$$

在谐波荷载激励下,即 $\ddot{x}_g = e^{i\phi\tau} a_g$, 主结构与 TNIMD 位移响应可分别假设为^[14]:

$$y_s = y_{s0} e^{i\phi\tau}, y_1 = y_{10} e^{i\phi\tau} \quad (6)$$

式中 y_{s0} 及 y_{10} 分别为主结构及 TNIMD 位移响应幅值。

将式(6)代入式(5),可得系统位移响应幅值^[14]:

$$\begin{aligned} y_{s0} &= \frac{A_1 + iB_1 \zeta_1}{C_1 + iD_1} = \sqrt{\frac{A_1^2 + B_1^2 \zeta_1^2}{C_1^2 + D_1^2}}, \\ y_{10} &= \frac{A_2}{C_1 + iD_1} = \sqrt{\frac{A_2^2 + B_2^2}{C_1^2 + D_1^2}} \end{aligned} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} A_1 = \beta^2 \mu - \mu\phi^2 - \mu_b \phi^2 + \beta^2 \mu^2 + \alpha\beta^2 \mu \\ B_1 = 2\mu\beta\phi \\ A_2 = \beta^2 \mu + \beta^2 - \phi^2 + 1 \\ B_2 = 2\phi\zeta_s \\ C_1 = -\phi^4 (\mu + \mu_b) + (\mu + \mu_b + \beta^2 \mu + \beta^2 \mu^2 + \\ \alpha\beta^2 \mu + \beta^2 \mu \mu_b + 4\beta\mu\zeta_1 \zeta_s) \phi^2 - \beta^2 \mu - \\ \alpha\beta^4 \mu^2 - \alpha\beta^2 \mu \\ D_1 = \zeta_1 D_{11} + \zeta_s D_{12} \\ D_{11} = -2\phi (\beta^3 \mu^2 + \beta\mu - \beta\mu\phi^2) \\ D_{12} = -2\phi (\beta^2 \mu - \mu\phi^2 - \mu_b \phi^2 + \alpha\beta^2 \mu) \end{cases} \quad (8)$$

2 参数优化设计

2.1 最优调谐比

根据定点理论,假设主结构阻尼比 $\zeta_s = 0$, 主结构位移幅频响应函数(Frequency Response Functions, FRFs)存在与阻尼器阻尼比无关的定点,如图 2 中点 P 和 Q。将这两点纵坐标调整至相等。根据式(7),当 $\zeta_s = 0$ 时,主结构位移响应为:

$$y_s = \frac{A_1 + iB_1 \zeta_1}{C_1 + iD_1} = \sqrt{\frac{A_1^2 + B_1^2 \zeta_1^2}{C_1^2 + D_{11}^2 \zeta_1^2}} \quad (9)$$

TNIMD 阻尼比分别取为 0 和 $+\infty$, 并令对应的

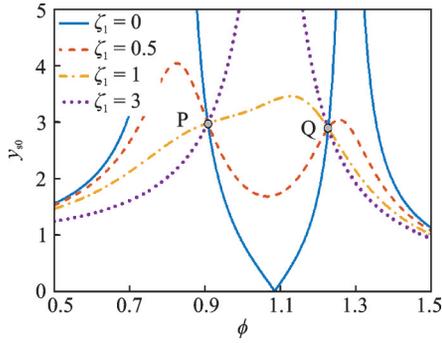


图2 TNIMD 阻尼比对主结构 FRFs 的影响 ($\mu = 0.01, \mu_b = 0.1$)

Fig.2 FRFs of main structure installed TNIMD with different damping ratio ($\mu = 0.01, \mu_b = 0.1$)

主结构位移幅频响应函数相等^[23],即

$$y_s|_{\zeta_1=0} = \left| \frac{A_1}{C_1} \right| = y_s|_{\zeta_1=+\infty} = \left| \frac{B_1}{D_{11}} \right| \quad (10)$$

式(10)可简化为关于激励频率比平方 ϕ^2 的一元二次函数:

$$\phi^4 + \frac{\mu\beta^2(2+3\mu+2\alpha+2\mu_b)+2(\mu_b+\mu)}{-2\mu-2\mu_b}\phi^2 + \beta^2\mu \frac{2+\mu+\beta^2\mu+\beta^2\mu^2+2\alpha+2\alpha\beta^2\mu}{2\mu+2\mu_b} = 0 \quad (11)$$

根据韦达定理,有:

$$\phi_P^2 + \phi_Q^2 = \frac{\mu\beta^2(2+3\mu+2\alpha+2\mu_b)+2(\mu_b+\mu)}{-2\mu-2\mu_b} \quad (12)$$

式中 ϕ_P, ϕ_Q 分别为两定点 P, Q 的横坐标。

取 $\phi = \phi_P, \phi = \phi_Q$, 分别带入式(10) $\zeta_1 = +\infty$ 表达式中,并令主结构位移响应相等^[23]:

$$\left| y_s(\zeta_1 = +\infty, \phi = \phi_P) \right| = \left| y_s(\zeta_1 = +\infty, \phi = \phi_Q) \right| \quad (13)$$

当式(13)方程左右两侧取相反符号时方程有非零解,可得:

$$\zeta_{1,opt} = \sqrt{\frac{\zeta_{1,1}^2 + \zeta_{1,2}^2}{2}} = \sqrt{\frac{(\mu + \mu_b)(12\mu + 12\mu_b + 12\alpha\mu + 12\alpha\mu_b + 10\mu\mu_b - 2\alpha\mu^2 + 8\mu^2 - \mu^3)}{8\mu(4\alpha^2 + 4\alpha\mu + 8\alpha + \mu^2 + 2\mu - 2\mu_b + 4)}} \quad (21)$$

2.3 负刚度系数

在确定负刚度系数之前,需先明确该系统的稳定性判定条件。耦合系统的特征方程可表示为:

$$C_1 + iD_1 = \gamma_4(i\phi)^4 + \gamma_3(i\phi)^3 + \gamma_2(i\phi)^2 + \gamma_1 i\phi + \gamma_0 = 0 \quad (22)$$

其中:

$$\begin{aligned} \gamma_4 &= \mu_b + 1, \gamma_3 = 2\beta\zeta_1, \\ \gamma_2 &= \mu_b + \alpha\beta^2 + \beta^2\mu + \beta^2 + \beta^2\mu\mu_b + 1, \\ \gamma_1 &= 2\beta\zeta_1(\mu\beta^2 + 1), \gamma_0 = \alpha\beta^2 + \beta^2 + \alpha\beta^4\mu \end{aligned} \quad (23)$$

本文采用劳斯-赫尔维茨判据,各系数需满足如

$$\phi_P^2 + \phi_Q^2 = 2\mu\beta^2 + 2 \quad (14)$$

令式(14)与式(12)相等,可得 TNIMD 最优频率比表达式为:

$$\beta_{opt} = \sqrt{\frac{2\mu + 2\mu_b}{\mu(2\alpha - \mu - 2\mu_b + 2)}} \quad (15)$$

为保障最优调谐频率比大于 0,无量纲负刚度系数应满足: $\alpha > 0.5\mu + \mu_b - 1$ 。

将式(15)代入式(11),可得两定点横坐标 ϕ_P, ϕ_Q :

$$\phi_{P,Q} = \frac{2\alpha + \mu + 2 \pm \sqrt{2(\mu_b + \mu)}}{2\alpha - \mu - 2\mu_b + 2} \quad (16)$$

此外,将式(15)代入式(10)中任一方程,可得定点处主结构最优位移响应幅值为:

$$y_{s,opt} = \sqrt{\frac{(2\alpha - \mu - 2\mu_b + 2)^2}{2(\mu + \mu_b)}} \quad (17)$$

2.2 最优阻尼比

在 TNIMD 调谐过程中,已使两定点位置幅频响应曲线的幅值相等。为得到最优阻尼比,还需使两定点作为幅频响应曲线的峰值点^[23],则有:

$$\frac{\partial y_{s0}^2}{\partial \phi^2} = 0 \quad (18)$$

此时,假设:

$$y_{s0}^2 = \frac{p}{q} = \frac{A_1^2 + B_1^2\zeta_1^2}{C_1^2 + D_{11}^2\zeta_1^2} \quad (19)$$

将式(19)代入式(18),可得:

$$\frac{\partial y_s^2}{\partial \phi^2} = 0 \Rightarrow \frac{p}{q} = \frac{p'}{q'} \quad (20)$$

式中 p', q' 分别为 p, q 表达式对 ϕ^2 的导数。

将式(15)及两定点横坐标 ϕ_P, ϕ_Q 代入式(20),可得两最优阻尼比为 $\zeta_{1,1}$ 和 $\zeta_{1,2}$,取二者的均方根值作为最优阻尼比表达式^[23],即

下关系^[22]:

$$\begin{cases} \gamma_i > 0; i = 0, 1, 2, 3, 4 \\ \gamma_2\gamma_3 - \gamma_4\gamma_1 > 0 \\ \gamma_1\gamma_2\gamma_3 - (\gamma_3^2\gamma_0 + \gamma_4\gamma_1^2) > 0 \end{cases} \quad (24)$$

负刚度系数的确定方法一般有两种:一种人为给定满足稳定性条件的负刚度系数;另一种更为常用,令两定点 P, Q 对应幅值与零激励频率时的幅值相等^[22]:

$$y_s|_{\phi=\phi_P, \phi_Q} = y_s|_{\phi=0} \quad (25)$$

根据式(7),有:

$$y_s|_{\phi=0} = \left| \frac{\alpha\beta^2 + \beta^2\mu + \beta^2}{\alpha\beta^2 + \beta^2 + \alpha\beta^4\mu} \right| \quad (26)$$

将式(26)及式(17)代入式(25),可得:

$$\left| \frac{\alpha\beta^2 + \beta^2\mu + \beta^2}{\alpha\beta^2 + \beta^2 + \alpha\beta^4\mu} \right| = \sqrt{\frac{(2\alpha - \mu - 2\mu\mu_b + 2)^2}{2\mu(\mu_b + 1)}} \quad (27)$$

由式(27)可得4个负刚度系数解,分别为:

$$\begin{cases} \alpha_{1,2} = \pm \sqrt{2(\mu_b + \mu)} - 1 \\ \alpha_{3,4} = \pm \frac{\sqrt{2(\mu_b + \mu)}}{2} - \frac{\mu}{2} - 1 \end{cases} \quad (28)$$

将 $\alpha_{2,3}$ 代入式(15),不满足根号内分母大于0的条件,应舍弃。将 α_1 代入式(21),分母为0,也应舍弃。因此,最优负刚度系数 $\alpha_{opt} = \alpha_1$ 。图3为不同负刚度系数的减震结构位移幅频响应曲线。由图3可知,当 $\alpha/\alpha_{opt} < 1$ 时,随着负刚度系数绝对值的增大,主结构位移响应幅值减小, TNIMD对主结构的控制效果越好;当 $\alpha/\alpha_{opt} > 1$ 时,随着负刚度系数绝对值的增大,低频附近位移响应增大,甚至超过共振峰值。因此, α_{opt} 可作为负刚度系数绝对值的上限,防止低激励频率时主结构响应的放大。

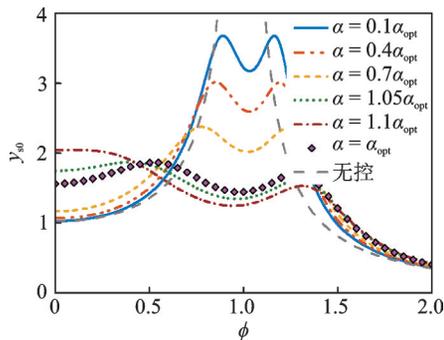


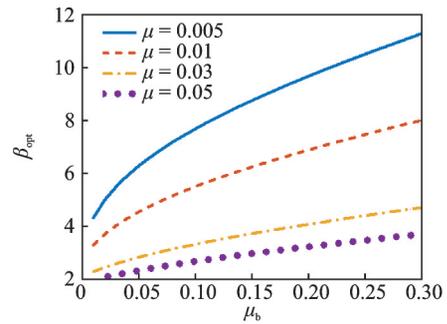
图3 TNIMD负刚度系数对主结构FRFs的影响
($\mu=0.01, \mu_b=0.1$)

Fig. 3 FRFs of main structure installed TNIMD with different negative stiffness coefficients ($\mu=0.01, \mu_b=0.1$)

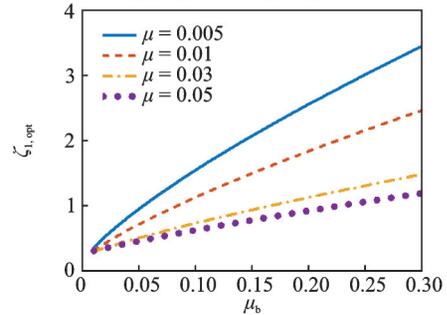
3 参数分析

3.1 惯容比对最优参数的影响

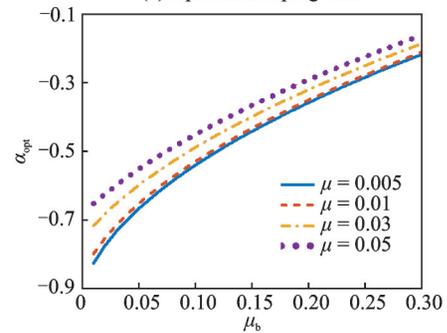
TNIMD最优频率比、最优阻尼比、最优负刚度系数及对应的主结构位移幅频响应最大值随惯容比的变化规律如图4所示。由图4可知:TNIMD最优频率比和阻尼比都随惯容比增大而增大,但质量比越大,其值越小。值得注意的是,这同无负刚度的VTMDI最优参数与质量比的关系相反。此外, TNIMD最优负刚度系数与惯容比及质量比均呈正相关。质量比对主结构位移幅频响应最大值影响极小,但惯容比对其影响较大。



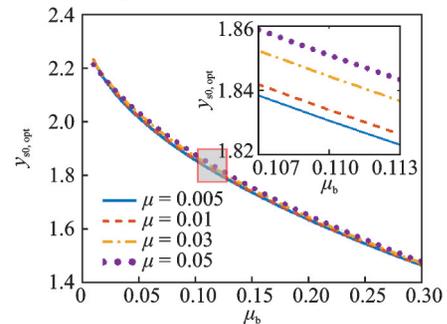
(a) 最优频率比
(a) Optimal frequency ratio



(b) 最优阻尼比
(b) Optimal damping ratio



(c) 最优负刚度系数
(c) Optimal negative stiffness coefficient



(d) 主结构位移幅频响应最大值
(d) Maximum of displacement amplitude-frequency response of main structure

图4 TNIMD最优调谐参数随惯容比的变化规律

Fig. 4 The relationship between optimal tuned parameters of TNIMD and the inerter ratio

3.2 负刚度对减振效果的影响

若适当增大负刚度系数值,如令 α 为0.3,0.5及0.7倍 α_{opt} ,此时主结构位移幅频响应最大值在不同质量比下的变化如图5所示。由图5可知,当惯容比较小时,主结构位移幅频响应最大值随着质量比的增大而明显减小,但随着惯容比的增大,该趋势逐渐

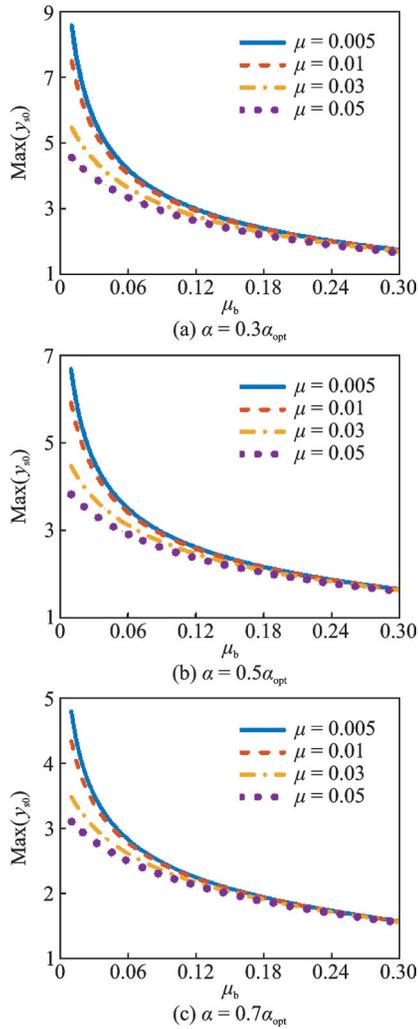


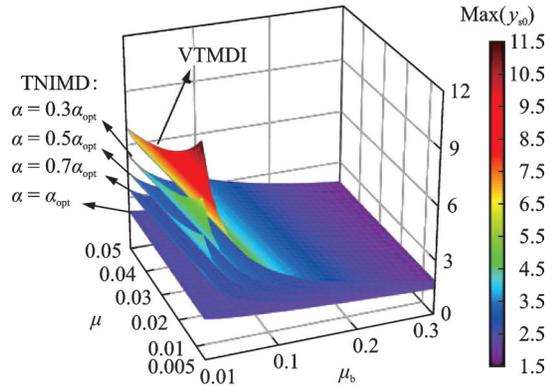
图 5 TNIMD 负刚度系数对主结构位移幅频响应最大值的影响

Fig. 5 Effect of negative stiffness coefficients of TNIMD on the maximum of displacement amplitude-frequency response of the main structure

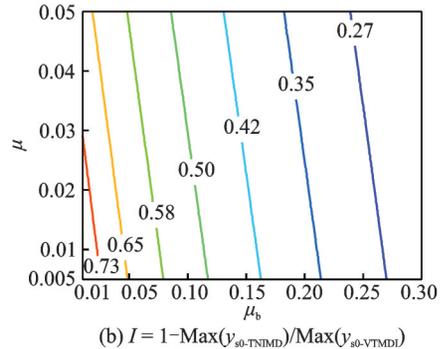
减小;当惯容取较大值,如 $\mu_b=0.3$ 时,质量比对减振效果的影响可忽略不计。

图 6(a)为 TNIMD 与 VTMDI 的质量比和惯容比均相等时,主结构位移幅频响应的最大值 ($y_{s0-TNIMD}$, $y_{s0-VTMDI}$)。由图 6(a)可知,即使增大负刚度系数, TNIMD 对主结构位移响应的减振效果仍然优于 VTMDI。与 VTMDI 相比, TNIMD 的减振效果提高定义为: $I=1-\text{Max}(y_{s0-TNIMD})/\text{Max}(y_{s0-VTMDI})$, 当 $\alpha = \alpha_{opt}$ 时,减振效果提升如图 6(b)所示,图中数字表示 I 值。由图 6(b)可知,质量比及惯容比越小, TNIMD 相对 VTMDI 对主结构减振效果越好, I 值可超过 73%,而在较大的质量比及惯容比下, TNIMD 相对 VTMDI 的减振效果仍有约 27% 的提升,充分说明了负刚度对减振效果提升的影响。

根据文献 [14],可写出附加 VTMDI 的主结构最优位移响应幅值:



(a) 主结构位移幅频响应最大值
(a) Maximum displacement amplitude-frequency response of main structure



(b) $I=1-\text{Max}(y_{s0-TNIMD})/\text{Max}(y_{s0-VTMDI})$

图 6 简谐荷载下 TNIMD 与 VTMDI 对主结构最大值位移响应的减振效果比较

Fig. 6 Comparison of damping effect of TNIMD and VTMDI on the maximum displacement response of main structure under harmonic loads

$$\text{Max}(y_{s0-VTMDI}) = \frac{2 - \mu - 2\mu_b}{\sqrt{2(\mu + \mu_b)}} \quad (29)$$

令 $|\text{Max}(y_{s0-TNIMD})| < |\text{Max}(y_{s0-VTMDI})|$, 并联合式 (29) 与 (17), 可得:

$$|2\alpha - \mu - 2\mu_b + 2| < |2 - \mu - 2\mu_b| \quad (30)$$

式 (30) 求得 TNIMD 减振效果优于 VTMDI 时的负刚度系数取值范围:

$$\mu + 2\mu_b - 1 < \alpha < 0 \quad (31)$$

图 7 所示蓝色曲面以上至 0 平面内为 TNIMD 优于 VTMDI 的负刚度系数取值,黄色曲面为根据

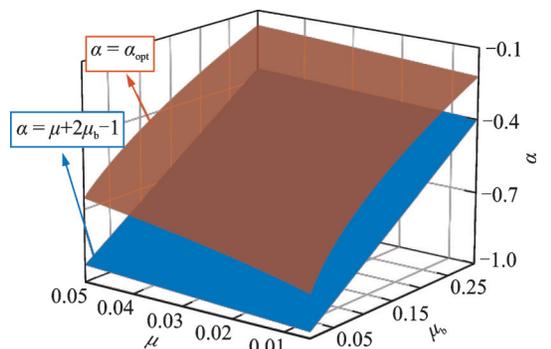


图 7 最优负刚度系数与负刚度系数取值限值对比
Fig. 7 Comparison of optimal negative stiffness coefficient and limit value of negative stiffness coefficient

定点理论得到的最优负刚度系数。可见:最优负刚度系数被包含在内,因此,按最优负刚度系数取值,且当 $\alpha/\alpha_{opt} < 1$ 时, TNIMD 对主结构位移的控制效果一直优于 VTMDI。

4 地震作用下 TNIMD 减震分析

根据 FEMA P695^[25] 推荐的地震动, 选取 44 条远场、28 条近场无脉冲、28 条近场脉冲地震波作为主结构基底激励, 分别计算主结构在无控、附加 TNIMD 及 VTMDI 时的相对位移 x_s 及绝对加速度 \ddot{x}_1 ($\ddot{x}_1 = \ddot{x}_s + \ddot{x}_g$) 的统计平均值, 分析 TNIMD 的减震有效性, 对比分析 TNIMD 与 VTMDI 的减震效果。

分析中, 不考虑地震对结构的破坏, 结构处于线弹性阶段。假设主结构质量取为 2200 kg, 阻尼比取为 1.0%, 主结构周期 T 根据仿真需要设置, 取为 0.01~3 s。各地震波加速度幅值统一取为 0.3g, 不考虑地震波加速度幅值对减震的影响。

图 8 给出了主结构在不同地震波下的位移和绝对加速度响应统计平均值。由图 8 可知: VTMDI 及 TNIMD 都表现出对主结构地震响应良好的控制效果, 且 TNIMD 优于 VTMDI。表 1 给出了主结构周期 T 分别为 0.5 和 2 s 时, TNIMD 相对 VTMDI 的减震率提升百分比。结果表明: 相比于 VTMDI,

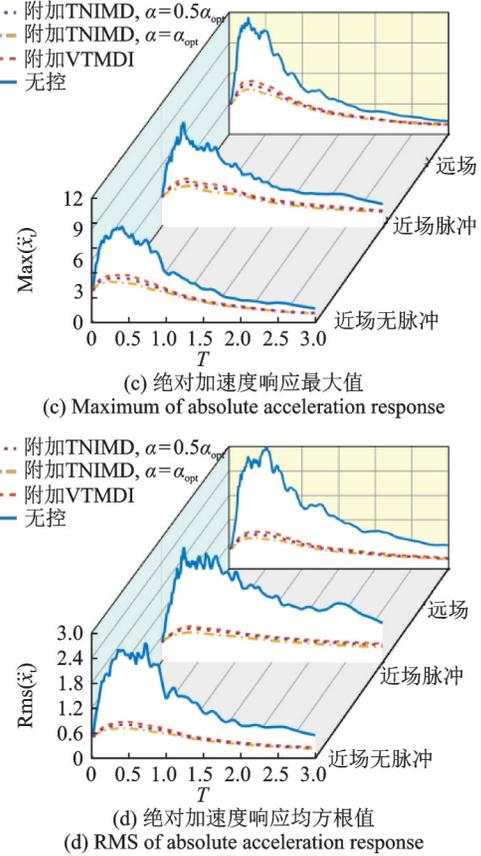
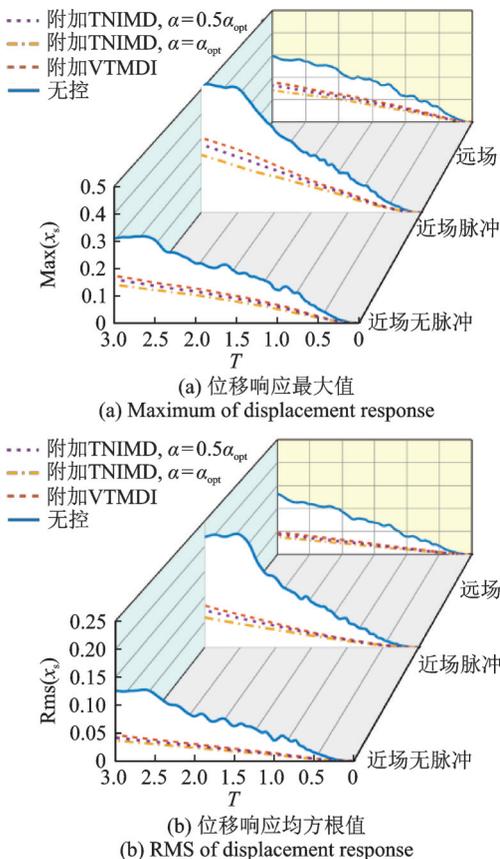


图 8 地震作用下安装 TNIMD 和 VTMDI 的被控结构响应指标平均值随主结构周期变化的规律

Fig. 8 The variation of α of the average value of TNIMD and VTMDI with the period of the main structure under earthquake

表 1 与 VTMDI 相比 TNIMD 提升的减震率(单位: %)

Tab. 1 Improved vibration reduction rate of TNIMD compared with VTMDI (Unit: %)

主结构周期	主结构响应	远场		近场脉冲		近场无脉冲	
		最大值	均方根	最大值	均方根	最大值	均方根
0.5 s	x_s	30.46	28.95	16.67	17.07	28.06	26.32
	\ddot{x}_1	20.29	22.63	16.44	18.19	20.79	21.09
2 s	x_s	21.73	29.75	32.45	34.67	23.44	27.54
	\ddot{x}_1	6.15	12.69	14.28	18.57	8.35	11.00

TNIMD 明显提升了主结构位移和绝对加速度的减震率, 当 $T=0.5$ s 时, TNIMD 对远场及近场无脉冲地震作用的减震效果优于近场脉冲地震作用; 当 $T=2$ s 时, TNIMD 对近场脉冲地震作用的减震效果优于远场及近场无脉冲地震作用。

综上所述, 在各类地震作用下, TNIMD 均具有良好的减震控制效果。

5 结论

本文提出了一种调谐负刚度-惯容质量阻尼器

(TNIMD),开展了参数优化与地震响应控制研究,结果表明:

(1)假设主结构阻尼比 $\zeta_s=0$,主结构位移幅频响应曲线存在与阻尼器阻尼比无关的两个定点,采用定点理论,得到了阻尼器的最优调谐比、最优阻尼比理论公式。

(2)在最优负刚度系数下,TNIMD减振效果相比VTMDI随质量比及惯容比的减小而增大,最大可超过70%。TNIMD减振效果更好。

(3)TNIMD在远场、近场脉冲及近场无脉冲地震作用下对主结构地震响应均有良好的控制效果,且对位移及绝对加速度响应减震效果均优于VTMID,说明了负刚度元件对阻尼器耗能减振的提升作用。

参考文献:

- [1] Ma R S, Bi K M, Hao H. Inerter-based structural vibration control: a state-of-the-art review [J]. *Engineering Structures*, 2021, 243:112655.
- [2] Tadashi A, Hidetsugu K, Fumiaki A, et al. Development of seismic devices applied to ball screw: Part I Basic performance test of RD-series [J]. *AIJ Journal of Technology and Design*, 1999, 5(8):239-244.
- [3] Ikago K, Saito K, Inoue N. Seismic control of single-degree-of-freedom structure using tuned viscous mass damper [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2012, 41(3):453-474.
- [4] Smith M C. Force-controlling mechanical device: US7316303 B2[P]. 2001-7-4.
- [5] Smith M C. Synthesis of mechanical networks: the inerter [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(10): 1648-1662.
- [6] 徐龙,毛明,陈轶杰,等.车辆惯容器-弹簧-阻尼器悬挂构型设计方法综述[J].*兵工学报*, 2020, 41(4): 822-832.
Xu Long, Mao Ming, Chen Yijie, et al. A systematic review of vehicle ISD suspension configuration design [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(4):822-832.
- [7] Wang F C, Su W J. Impact of inerter nonlinearities on vehicle suspension control [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2008, 46(7):575-595.
- [8] Kida H, Nakaminami S, Saito K, et al. A seismic control system with multi-tuning viscous mass damper and its design method [J]. *Journal of Structural & Construction Engineering*, 2009, 74(643):1575-1583.
- [9] Lazar I F, Neild S A, Wagg D J. Using an inerter-based device for structural vibration suppression [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2014, 43(8):1129-1147.
- [10] 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.
- [11] Garrido H, Curadelli O, Ambrosini D. Improvement of tuned mass damper by using rotational inertia through tuned viscous mass damper [J]. *Engineering Structures*, 2013, 56:2149-2153.
- [12] Hu Y L, Chen M Z Q. Performance evaluation for inerter-based dynamic vibration absorbers [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 99:297-307.
- [13] Dai J, Xu Z D, Gai P P. Tuned mass-damper-inerter control of wind-induced vibration of flexible structures based on inerter location [J]. *Engineering Structures*, 2019, 199:109585.
- [14] 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.
- [15] Agathoklis Giaralis M, Petrini F, et al. Wind-induced vibration mitigation in tall buildings using the tuned mass-damper-inerter [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(9): 04017127
- [16] Xu K, Bi K M, Han Q, et al. Using tuned mass damper inerter to mitigate vortex-induced vibration of long-span bridges: Analytical study [J]. *Engineering Structures*, 2019, 182:101-111.
- [17] 文永奎,陈政清,韩冰,等. TVMD的减振机理及其提升连续梁减震性能的研究 [J].*振动工程学报*, 2018, 31(4):599-610.
Wen Yongkui, Chen Zhengqing, Han Bing, et al. Control mechanism of TVMD and its performance improvement for seismic mitigation of continuous bridge [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2018, 31(4): 599-610.
- [18] 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.
- [19] Gao H, Wang H, Li J, et al. Optimum design of viscous inerter damper targeting multi-mode vibration mitigation of stay cables [J]. *Engineering Structures*, 2021, 226: 111375.
- [20] Lazar I F, Neild S A, Wagg D J. Vibration suppression of cables using tuned inerter dampers [J]. *Engineering Structures*, 2016, 122:62-71.

- [21] 刘菁, 梁栋. 垂度拉索-惯质阻尼器体系的减振分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(16): 29-38.
Liu Jing, Liang Dong. Vibration reduction analysis of a cable-inertial damper system with sag[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(16): 29-38.
- [22] 陈杰, 孙维光, 吴杨俊, 等. 基于惯容负刚度动力吸振器的梁响应最小化[J]. 振动与冲击, 2020, 39(8): 15-22.
Chen Jie, Sun Weiguang, Wu Yangjun, et al. Minimization of beam response using inerter-based dynamic vibration absorber with negative stiffness[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(8): 15-22.
- [23] 范舒铜, 申永军. 含惯容和接地刚度的黏弹性动力吸振器的参数优化[J]. 振动工程学报, 2022, 35(4): 814-825.
Fan Shutong, Shen Yongjun. Parameter optimization of viscoelastic dynamic vibration absorber with inerter and grounded stiffness[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(4): 814-825.
- [24] 刘文光, 余欣欣, 许浩, 等. 设置阻尼负刚度系统的高层隔震结构地震响应分析[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 36-44.
Liu Wenguang, Yu Xinxin, Xu Hao, et al. Seismic response of high-rise isolated building based on negative stiffness device with damping[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(7): 36-44.
- [25] Applied Technology Council. Quantification of building seismic performance factors: FEMA P695 [S]. Washington D. C.: Federal Emergency Management Agency, 2009.

Tuned negative stiffness-inertia mass damper parameters optimization and seismic response control

YI Ju¹, XU Kai¹, HE Xiao-hui², HUA Xu-gang¹, WEN Qing³, CHEN Zheng-qing¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518029, China;

3. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: This paper proposes a Tuned Negative-stiffness Inerter Mass Damper (TNIMD) to mitigate seismic vibrations in primary structures during earthquake excitation. The equations of motion for the coupled system of the primary structure and TNIMD are obtained using the Lagrange function, and fixed-point theory is applied for optimal design. The impact of negative-stiffness coefficient on control performance is also discussed. Subsequently, a parametric analysis and evaluation of seismic vibration control are conducted. The results indicate that the displacement response of a primary structure equipped with the TNIMD is significantly less than those with a Vibration Tuned Mass Damper with Inerter (VTMDI) without a negative-stiffness spring. Furthermore, the smaller the mass and inertance ratios, the greater the advantages of TNIMD in vibration control, outperforming VTMDI. This confirms the requirement of installation limitations and the selection of a small mass ratio engineering. Additionally, seismic analysis shows the displacement and absolute acceleration of a primary structure equipped with TNIMD are superior to VTMDI under far-field, near field with pulse, and near-field without pulse earthquakes. The theoretical analysis and optimal design presented in this paper are suggested for engineering applications for seismic vibration control using TNIMD.

Key words: inerter; tuned mass damper; negative stiffness; parameter optimization; seismic response

作者简介: 易 举(1995—),男,硕士研究生。E-mail:3302599576@qq.com。

通讯作者: 温 青(1985—),男,博士,副教授。E-mail:cwengq@hnust.edu.cn。