

中文引用格式:王恒,宋英华,吕伟.附加VIMD的高层基础隔震结构抗震抗风性能研究[J].中国安全科学学报,2026,36(5):199-206.

英文引用格式:Wang Heng, Song Yinghua, Lyu Wei. Study on seismic and wind resistance performance of a high-rise base-isolated structure with supplemental VIMD[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(5):199-206.

附加 VIMD 的高层基础隔震结构抗震 抗风性能研究*

王恒¹助理研究员,宋英华^{**1,2}教授,吕伟¹教授
(1 武汉理工大学 中国应急管理研究中心,湖北 武汉 430070;
2 青海大学 地质工程学院,青海 西宁 810016)

中图分类号:X915.5 文献标志码:A DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.05.1355

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(WUT:104972024KFYzxk0042,104972025RSCbs0150)。

【摘要】 为推动黏滞惯质阻尼器(VIMD)在高层基础隔震结构中的工程应用,以20层隔震钢结构模型为研究对象,首先,探讨VIMD的惯质对结构自振周期的影响;然后,从太平洋地震工程研究中心选取10条实际地震动并进行调幅使其匹配目标设计反应谱,研究VIMD对结构地震响应的控制特征及减震效果;最后,基于达文波特脉动风速谱,采用谱表示法生成10条随机脉动风速时程,研究VIMD对结构风振响应的控制特征及减振效果。结果表明:VIMD可延长该高层基础隔震结构的自振周期,且主要体现在前6阶。在地震激励作用下,VIMD对高层基础隔震结构隔震层相对位移响应的减震效果与黏滞阻尼器(VD)相当,但其对上部结构响应的减震率较VD可提升19.5%~24.5%。在风荷载作用下,VIMD和VD对高层基础隔震结构响应控制能力基本相同。

【关键词】 黏滞惯质阻尼器(VIMD); 高层基础隔震结构; 自振周期; 抗震性能; 抗风性能

Study on seismic and wind resistance performance of a high-rise base-isolated structure with supplemental VIMD

Wang Heng¹, Song Yinghua^{**1,2}, Lyu Wei¹

(1 China Research Center for Emergency Management, Wuhan University of Technology,
Wuhan Hubei 430070, China; 2 School of Geological Engineering, Qinghai
University, Xining Qinghai 810016, China)

Abstract: To promote the engineering application of VIMD in high-rise base-isolated structures, a 20-story base-isolated steel structure model was considered. First, the influence of the VIMD's inertance on the structure's natural periods was investigated. Then, 10 real ground motion records were selected from the Pacific Earthquake Engineering Research Center database and were scaled to match the target design response spectrum. The control characteristics and seismic mitigation effects of VIMD on the structural response were studied. Finally, based on the Davenport fluctuating wind speed spectrum, the spectral

* 文章编号:1003-3033(2026)05-0199-08; 收稿日期:2025-12-14; 修稿日期:2026-02-22

** 通信作者:宋英华(1962—),男,湖北武汉人,博士,教授,主要从事公共安全与应急管理方面的研究。E-mail: song6688c@163.com。

representation method was used to generate 10 stochastic fluctuating wind speed time histories. The control characteristics and wind-induced vibration mitigation effects of VIMD on the structural response were studied. The results indicate that VIMD can further extend the natural periods of the high-rise base-isolated structure, mainly in the first six modes. Under seismic excitations, the control effectiveness of VIMD on the relative displacement response of the isolation layer is comparable to that of Viscous Dampers (VD). However, the vibration mitigation ratios of VIMD for the response of the superstructure is improved by 19.5%–24.5% compared with that of VD. Under wind loads, VIMD and VD have basically the same response control capabilities for the high-rise base-isolated structure.

Keywords: viscous inertial mass damper (VIMD); high-rise base-isolated structure; natural period; seismic performance; wind resistance performance

0 引言

近年来,随着我国城市化进程的高速发展,高层建筑逐渐成为主要大城市发展的必然选择。基础隔震技术因其优越的减震效果而被广泛应用于结构抗震性能提升^[1-3]。当前一些高层建筑已经采用基础隔震技术,如日本大阪的公园住宅中之岛塔(约 193 m)、美国洛杉矶市政厅(约 138 m)。然而,强震下高层基础隔震结构的隔震层位移可达数百毫米,可能导致隔震支座破坏或上部结构倾覆失稳。此外,高层基础隔震结构具有高、柔、低基频和低阻尼的特点,在风荷载下易发生大幅振动,导致风荷载可能成为控制荷载,其风振响应需引起高度重视。因此,发展高性能阻尼器,有效控制高层基础隔震结构隔震层位移并提升上部结构抗震抗风性能,对保障高层建筑安全、推进韧性城市建设具有重要意义。

学者们将黏滞阻尼器 (Viscous Damper, VD)、调谐质量阻尼器 (Tuned Mass Damper, TMD) 和磁流变阻尼器 (Magnetorheological Damper, MRD) 设置在隔震层以提升基础隔震结构抗震性能,研究表明: VD 阻尼系数过大会激起基础隔震结构高阶模态响应,从而增大上部结构层间位移和楼层加速度^[4]。TMD 存在极短时间内无法启动或充分启动、需要较大的附加质量块和行程空间等问题^[5-6]。MRD 的高制造成本、磁流变液悬浮稳定性问题和极端地震作用下的可靠性仍需研究^[7]。近年来,由惯质单元、阻尼单元和刚度单元组成的惯质类阻尼器得到了广泛的研究,其优越的控制性能已在建筑、桥梁减震中得以验证^[8-11]。其中,黏滞惯质阻尼器 (Viscous Inertial Mass Damper, VIMD) 是由惯质单元和阻尼单元并联组成,相比于其余惯质阻尼器,其构造更为简单、制造成本更低。减震机制方面, VIMD 中的惯质单元通过改变结构的质量矩阵来延长隔震

结构周期,惯质并非真实的物理质量,因此,不会增大结构所受地震作用,这是其显著优势;同时,阻尼单元为结构提供附加阻尼,进一步增强减震效果^[12]。数值模拟与振动台试验研究表明:对于中低层基础隔震结构, VIMD 可显著减小隔震层位移响应、上部结构层间位移及楼层加速度响应,且优于 VD,尤其对于软土地^[13-15]。VIMD 的迅猛发展为提升高层基础隔震结构抗震抗风性能提供了新的途径。

鉴于此,笔者拟开展附加 VIMD 的 20 层隔震钢结构模型抗震性能与抗风性能研究。动力特性方面,探讨 VIMD 惯质系数的增大对结构自振周期的影响;抗震性能方面,选取 10 条实际地震动并进行调幅使其匹配目标设计谱,研究 VIMD 对结构地震响应控制特征及减震效果;抗风性能方面,基于达文波特脉动风速谱模型生成 10 条随机脉动风速时程,研究 VIMD 对结构风振响应控制特征及减振效果;以期对黏滞惯质阻尼高层基础隔震结构的工程应用提供重要参考依据。

1 高层基础隔震结构-VIMD 系统的运动微分方程

图 1 为 20 层高层基础隔震结构-VIMD 系统。图 1 中, m_i 、 c_i 和 k_i 分别为上部结构第 i 层的质量、阻尼和刚度; u_1-u_{20} 分别为上部结构第 1 层到第 20 层相对于隔震层的位移响应; m_b 、 c_b 和 k_b 分别为隔震层的质量、阻尼和刚度; u_b 为隔震层相对于地面的位移响应; m_e 和 c_d 分别为 VIMD 的惯质系数和阻尼系数; $\ddot{u}_g$ 为地面运动加速度。

该高层基础隔震结构-VIMD 系统的运动微分方程为:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \tag{1}$$

其中,

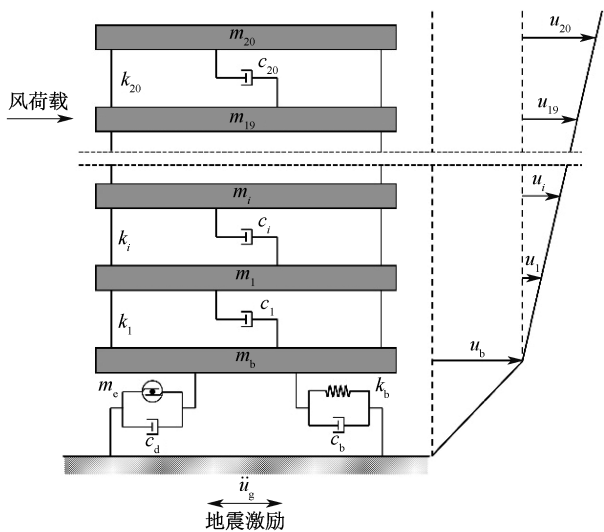


图 1 20 层高层基础隔震结构-VIMD 系统
Fig. 1 20-story high-rise base-isolated structure with supplemental VIMD

$$M = \begin{bmatrix} (m_b + \sum_{i=1}^{20} m_i) + m_e & m_1 & m_2 & \cdots & m_{20} \\ m_1 & m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ m_2 & 0 & m_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{20} & 0 & 0 & \cdots & m_{20} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_b + c_d & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & c_1 + c_2 & -c_2 & \cdots & 0 \\ 0 & -c_2 & c_2 + c_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & c_{20} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_b & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & k_1 + k_2 & -k_2 & \cdots & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 + k_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & k_{20} \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} u_b \\ u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{20} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$F = \begin{cases} -[m_b + \sum_{i=1}^{20} m_i, m_1, m_2, \cdots, m_{20}]^T \ddot{u}_g, \text{地震激励} \\ [f_1 + f_2 + \cdots + f_{20}, f_1, f_2, \cdots, f_{20}]^T, \text{风荷载} \end{cases} \quad (5)$$

式中 $f_1 \sim f_{20}$ 分别为上部结构第 1 层到第 20 层的脉动风荷载作用力。

选用 20 层钢结构模型作为高层基础隔震结构-VIMD 系统的上部结构^[16],其具体参数可见表 1。高层基础隔震结构隔震前的基本周期为 3.51 s,隔震后的基本周期为 4.51 s,上部结构的阻尼采用瑞

雷阻尼。

表 1 20 层钢结构模型参数
Table 1 Parameters of the 20-story steel structure model

楼层	高度/ m	质量/ kg	弹性剪切刚 度/(kN/m)	阻尼系数/ (kN·s/m)
20	3.96	1.170×10 ⁶	171.70×10 ³	上部结 构阻尼 比:3%
18—19	3.96	1.100×10 ⁶	256.46×10 ³	
15—17	3.96	1.100×10 ⁶	291.23×10 ³	
12—14	3.96	1.100×10 ⁶	453.51×10 ³	
6—11	3.96	1.100×10 ⁶	554.17×10 ³	
2—5	3.96	1.100×10 ⁶	862.07×10 ³	
1	5.49	1.126×10 ⁶	862.07×10 ³	3.85×10 ³
隔震层	—	5.524×10 ⁶	103.80×10 ³	

2 惯质对高层基础隔震结构-VIMD 系统自振周期的影响

定义 VIMD 的惯质比 μ 和阻尼比 ξ 分别为:

$$\mu = \frac{m_e}{m_b + \sum_{i=1}^{20} m_i} \quad (6)$$

$$\xi = \frac{c_d}{2(m_b + \sum_{i=1}^{20} m_i)\omega_b} \quad (7)$$

式中 ω_b 为高层基础隔震结构的一阶频率。

考虑工程实际,VIMD 惯质比 μ 的取值范围为 $[0, 1]$,阻尼比 ξ 的取值范围为 $[0, 0.5]$ 。图 2 为高层基础隔震结构-VIMD 系统自振周期随惯质比增大的变化特征。从图 2 可以看出,VIMD 可进一步延长高层基础隔震结构-VIMD 系统的自振周期,且主要在于前 6 阶,对 6 阶以后的周期基本无影响。表 2 对比了高层固支结构、高层基础隔震结构、高层基础隔震结构-VIMD 系统的前 6 阶自振周期。当 $\mu = 1$ 时,高层基础隔震结构-VIMD 系统的一阶周期是高层固支结构的 1.47 倍。

表 2 4 种体系前 6 阶周期的对比
Table 2 Comparison of the first six natural periods of four structural systems

阶次	1	2	3	4	5	6
固支结构	3.51	1.35	0.81	0.60	0.48	0.39
基础隔震结构	4.51	1.81	1.10	0.74	0.57	0.46
基础隔震结构-VIMD 系统 ($\mu=0.5$)	4.81	2.30	1.26	0.79	0.59	0.47
基础隔震结构-VIMD 系统 ($\mu=1$)	5.15	2.64	1.30	0.80	0.60	0.48

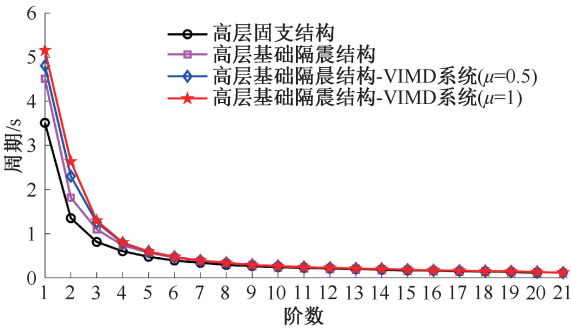


图2 高层基础隔震结构-VIMD 系统自振周期随
惯质比增大的变化特征
Fig.2 Variation characteristics of natural period of the
high-rise base-isolated structure with supplemental
VIMD with increasing inertance ratio

3 高层基础隔震结构-VIMD 系统抗震性能分析

3.1 实际地震动的选取

考虑该高层基础隔震结构抗震设防烈度为 8 度 (0.3 g, g 为重力加速度), 场地类别为 II 类场地, 设计地震分组为第 3 组。根据《建筑抗震设计规范》^[17], 该高层基础隔震结构在罕遇地震作用下的地震影响系数曲线的相关参数为: 水平地震影响系数最大值 $\alpha_{\max} = 1.20$, 特征周期值 $T_g = 0.5\text{ s}$, 曲线下降段的衰减系数 $\gamma = 0.942$, 直线下降段的下降斜率调整系数 $\eta_1 = 0.024$, 阻尼调整系数 $\eta_2 = 1.156$ 。

表3 实际地震动信息

Table 3 Information of the actual ground motions					
序列号	地震动名称	年份	震级	分量	调幅后的峰值 加速度/(cm/s ²)
RSN-161	Imperial Valley-06	1979	6.53	H-BRA225	3.12
RSN-173	Imperial Valley-06	1979	6.53	H-E10050	3.12
RSN-181	Imperial Valley-06	1979	6.53	H-E06230	3.37
RSN-1158	Kocaeli, Turkey	1999	7.51	DZC180	4.97
RSN-1529	Chi-Chi, Taiwan	1999	7.62	TCU102-E	3.21
RSN-2457	Chi-Chi, Taiwan-03	1999	6.2	CHY024E	4.86
RSN-3744	Cape Mendocino	1992	7.01	BNH270	2.66
RSN-6942	Darfield, New Zealand	2010	7.0	NNBSS13E	3.41
RSN-6966	Darfield, New Zealand	2010	7.0	SHLCS40W	3.65
RSN-8130	Christchurch, New Zealand	2011	6.2	SHLCS40W	5.10

3.2 地震响应分析

高层基础隔震结构的性能控制目标为: ①上部结构峰值层间位移响应 J_1 ; ②上部结构峰值绝对加

$$J_1 = 1 - \frac{\max(\max(|u_1|), \max(|u_2 - u_1|), \max(|u_3 - u_2|), \cdots, \max(|u_{20} - u_{19}|))}{u_{s0}} \tag{8}$$

$$J_2 = 1 - \frac{\max(\max(|\ddot{u}_b + \ddot{u}_1 + \ddot{u}_g|), \max(|\ddot{u}_b + \ddot{u}_2 + \ddot{u}_g|), \cdots, \max(|\ddot{u}_b + \ddot{u}_{20} + \ddot{u}_g|))}{\ddot{u}_{s0}} \tag{9}$$

从太平洋地震工程研究中心选取 10 条实际地震动作为时程分析的输入, 根据文献[17]中地震加速度时程曲线的最大值规定, 调幅所选地震动最大值, 使其更接近于目标设计反应谱。图 3 为标准的文献[17]中设计反应谱、实际地震动加速度反应谱及其平均加速度反应谱。可以看到, 所选地震动的平均加速度反应谱与设计反应谱接近, 且在基本周期处重合。调幅后的实际地震动详细信息见表 3。

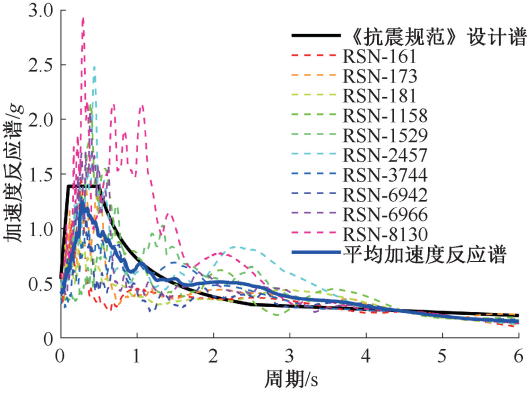


图3 《建筑抗震设计规范》设计反应谱与
实际地震动加速度反应谱及其平均加速度
反应谱的对比
Fig.3 Comparison of design response spectrum in
Code for Seismic Design of Buildings with the
acceleration response spectra of actual ground
motions and their mean acceleration response
spectrum

速度响应 J_2 ; ③隔震层峰值相对位移响应 J_3 。各个控制目标相应的减震率定义如下:

$$J_3 = 1 - \frac{\max(|u_b|)}{u_{b0}} \tag{10}$$

式中 u_{s0} 、 $\ddot{u}_{s0}$ 和 u_{b0} 分别为无阻尼器时高层基础隔震结构的上部结构峰值层间位移响应、上部结构峰值绝对加速度响应和隔震层峰值相对位移响应。

图 4 为实际地震动下,VIMD 参数变化对高层基础隔震结构地震响应控制效果的影响特征。从图 4a 可以看出,对于上部结构峰值层间位移响应,惯质比的影响较阻尼比更为显著,且存在一组最优 VIMD 参数可使该响应最小化。当 $\mu = 0.74,\xi = 0.16$ 时,上部结构峰值层间位移响应的减震率达到

最大,其值为 43.9%。从图 4b 可以看出,随着 VIMD 的惯质比和阻尼比增大,上部结构峰值绝对加速度响应的变化趋势与峰值层间位移响应较为相似。当 $\mu = 0.31,\xi = 0.18$ 时,VIMD 达到最优的控制效果,其减震率为 35.0%。从图 4c 可以看出,隔震层峰值相对位移响应的减震率受阻尼比控制,其最大减震率可达 41.3%。表 4 为实际地震动下 VIMD 和 VD 对高层基础隔震结构响应的减震率。两者对隔震层位移响应的控制效果相当,但当以上部结构地震响应为控制目标时,VIMD 比 VD 在减震率上可提升 19.5%~24.5%。

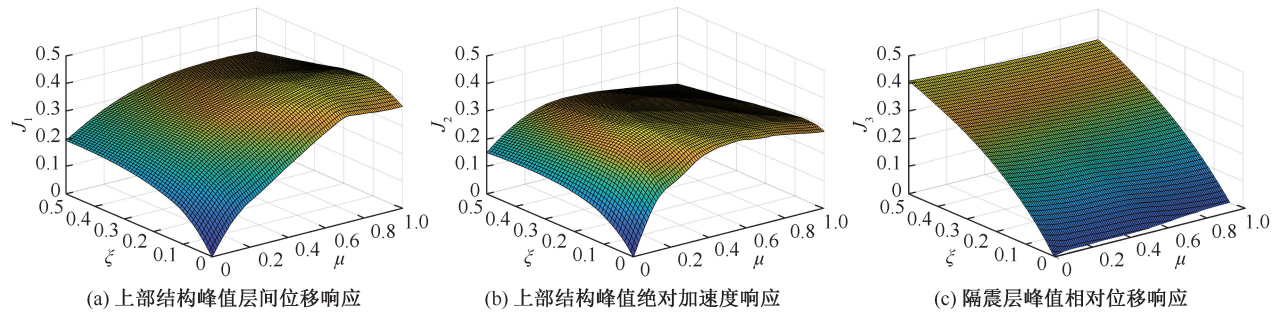


图 4 实际地震动下 VIMD 对高层基础隔震结构地震响应控制的变化特征
Fig. 4 Variation characteristics of the seismic response control of VIMD on the high-rise base-isolated structure under actual ground motions

表 4 实际地震动下 VIMD 和 VD 对高层基础隔震结构地震响应减震率对比

性能指标	VD		VIMD	
	最优参数	减震率/%	最优参数	减震率/%
J_1	$\xi = 0.48$	19.4	$\mu = 0.74,\xi = 0.16$	43.9
J_2	$\xi = 0.36$	15.5	$\mu = 0.31,\xi = 0.18$	35.0
J_3	$\xi = 0.5$	41.3	$\mu = 0,\xi = 0.5$	41.3

4 高层基础隔震结构-VIMD 系统抗风性能分析

4.1 脉动风速时程的生成

脉动风速谱采用达文波特谱^[18],其表达式为:

$$S_{v_d}(\omega) = 4K\bar{v}_{10}^2 \frac{f_1^2}{\omega(1+f_1^2)^{4/3}},$$
$$f_1 = \frac{c_1\omega}{\pi\bar{v}_{10}} \tag{11}$$

式中: $\bar{v}_{10}$ 为 10 m 处的平均风速,取 $\bar{v}_{10}=30$ m/s; ω 为脉动风速频率; K 为与地面状况相关的参数,取 $K=0.03$,对应于市镇地面状况; c_1 为常数,取 600 m。

采用谱表示法生成模拟脉动风速时程^[19]。定义空间直角坐标系 $O-xyz$, x 轴为顺风向, y 轴为横风向, z 轴为竖向。选取的脉动风速谱与高度无关,对于风场中空间坐标分别为 (x_i,y_i,z_i) 和 (x_j,y_j,z_j) 的 2 个点 i 和 j ,其脉动风速的互功率谱密度为:

$$S_{v_{pj}}(\omega) = \sqrt{S_{v_{pi}}(\omega,z_i)S_{v_{pj}}(\omega,z_j)}\gamma_{ij}(\omega) \tag{12}$$

式中: $S_{v_{pi}}(\omega,z_i)$ 和 $S_{v_{pj}}(\omega,z_j)$ 分别为 i 点和 j 点处脉动风速的自功率谱; $\gamma_{ij}(\omega)$ 为经验相干函数。其表达式为^[20]:

$$\gamma_{ij}(\omega) = \exp\left\{-\frac{\omega}{2\pi} \frac{[C_x^2(x_i-x_j)^2 + C_z^2(z_i-z_j)^2]^{1/2}}{\bar{v}_{10}}\right\} \tag{13}$$

式中: (x_i,z_i) 和 (x_j,z_j) 分别为迎风面上的 2 点坐标; C_x 和 C_z 为衰减系数,由经验确定,通常取 $C_x=16$, $C_z=10$ 。采用柯列斯基分解脉动风场的互功率谱密度矩阵,脉动风速时程可通过快速傅里叶变换生成。脉动风速时程的持时为 327.66 s,时间间隔为 0.02 s。

图 5 为高层基础隔震结构第 7 层处的脉动风速时程曲线及其功率谱密度和达文波特谱的对比,从图 5 可以看出,模拟风速的功率谱密度与达文波特目标谱在走势上一致,这验证了所生成脉动风速时程的正确性。

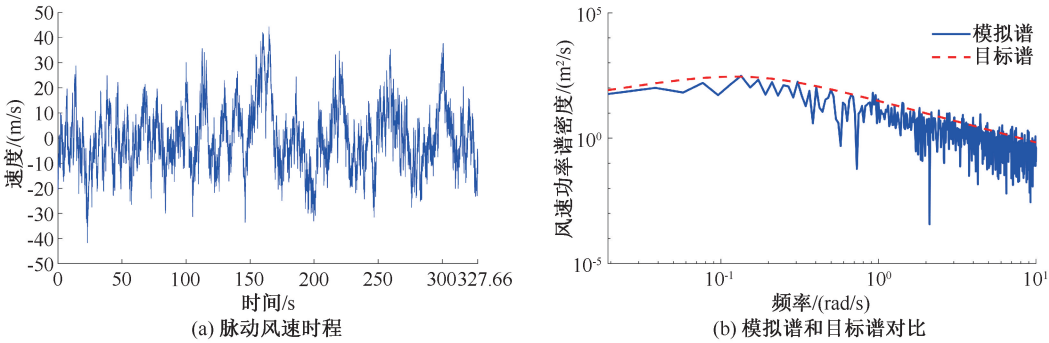


图 5 第 7 层的脉动风速时程曲线及其功率谱密度和达文波特谱对比

Fig. 5 Time history curve of fluctuating wind speed of the 7th floor and comparison of its power spectral density versus Davenport spectrum

4.2 风振响应分析

高层基础隔震结构第 i 层处顺风向脉动风荷载作用力的表达式为：

$$F_i = \frac{1}{2} \rho v^2 \mu_d B \Delta h \tag{14}$$

式中： ρ 为空气密度，取 $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ ； v 为脉动风速； μ_d 为阻力系数，取 $\mu_d = 1.4$ ； B 和 Δh 分别为高层基础隔震结构模型的宽度和层高，取 $B = 30.48 \text{ m}$ 。

图 6 为风荷载下，VIMD 参数变化对高层基础隔震结构风振响应控制效果的影响特征。从图 6a

和图 6b 可以看出，对于上部结构峰值层间位移响应和绝对加速度响应，阻尼比的影响显著大于惯质比。存在一组最优 VIMD 参数能使上述响应最小化，其减振率分别为 20.2% 和 23.9%。由图 6c 可知：隔震层峰值相对位移响应的减振效果由阻尼比控制，其最大减振率为 30.3%。表 5 为风荷载下 VIMD 和 VD 对高层基础隔震结构响应的减振率。VIMD 在风振响应控制中并未展现出显著优于 VD 的性能，仅在上部结构峰值绝对加速度响应的控制效果上较 VD 可提升 1.5%。

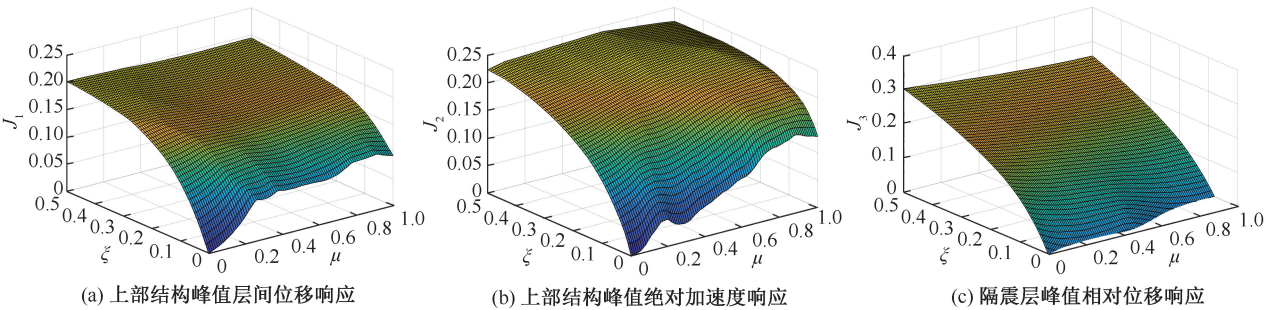


图 6 风荷载下 VIMD 对高层基础隔震结构风振响应控制的变化特征

Fig. 6 Variation characteristics of wind-induced response control of VIMD on the high-rise base-isolated structure under wind loading

表 5 风荷载下 VIMD 和 VD 对高层基础隔震结构风振响应减振率对比

Table 5 Comparison of wind-induced response mitigation ratios of VIMD and VD for the high-rise base-isolated structure under wind loading

性能指标	VD		VIMD	
	最优参数	减震率/%	最优参数	减震率/%
J_1	$\xi = 0.5$	20.2	$\mu = 0.01, \xi = 0.5$	20.2
J_2	$\xi = 0.5$	22.4	$\mu = 0.61, \xi = 0.5$	23.9
J_3	$\xi = 0.5$	30.3	$\mu = 0, \xi = 0.5$	30.3

5 结 论

1) VIMD 可进一步延长高层基础隔震结构模型的自振周期，且主要在前 6 阶，对 6 阶以后的周期基本无影响。

2) 在地震激励下，VIMD 的惯质比对高层基础隔震结构上部结构响应的影响显著大于阻尼比，存在一组最优阻尼器参数可使该响应最小化，而隔震层峰值相对位移响应的减震率受阻尼比控制。最优 VIMD 对隔震层峰值相对位移响应、上部结构峰值层间位移响应和绝对加速度响应的减震率分别可达 41.3%、

43.9%和35.0%。VIMD和VD对隔震层位移响应的控制效果相当,但当以上部结构地震响应为控制目标时,VIMD比VD在减震率上可提升19.5%~24.5%。

3) 在风荷载下,VIMD的阻尼比对高层基础隔震结构峰值响应的的影响显著大于惯质比,尤其对于隔震层峰值相对位移响应。最优VIMD对隔震层峰值相对位移响应、上部结构峰值层间位移响应和绝对加速度响应的减振率分别可达30.3%、20.2%和23.9%。但VIMD在风振响应控制中并未展现出相

对于VD的性能优势,前者仅在上部结构峰值绝对加速度响应的控制效果上较后者可提升1.5%。

4) VIMD能有效抑制高层基础隔震结构的地震和风振响应。需指出的是,虽然地震和强风同时发生的概率相对较低,但一旦同时发生,2种灾害的耦合效应对结构造成的破坏可能会远大于2种灾害结果的简单叠加。因此,未来有必要开展地震和强风耦合作用下,VIMD对高层基础隔震结构动力响应的控制机理和性能研究。

参 考 文 献

- [1] Makris N. Seismic isolation: early history[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2019, 48(2): 269–283.
- [2] 李宇, 陈明, 赵国辉. 脉冲型近场地震下 HDR 隔震简支梁桥参数研究[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(10): 141–148.
Li Yu, Chen Ming, Zhao Guohui. Study on parameters of seismic isolated simple-supported beam bridges with HDR under pulse-type near-field earthquake[J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(10): 141–148.
- [3] 杨亚芳. 铁路连续梁桥减隔震设计方案研究[J]. *中国安全科学学报*, 2011, 21(3): 120–123.
Yang Yafang. Study on seismic isolation design schemes of railway continuous beam bridge[J]. *China Safety Science Journal*, 2011, 21(3): 120–123.
- [4] Kelly J M. The role of damping in seismic isolation[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1999, 28(1): 3–20.
- [5] Sladek J R, Klingner R E. Effect of tuned-mass dampers on seismic response[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1983, 109(8): 2 004–2 009.
- [6] 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): 3 478–3 488.
- [7] 朱宏平, 樊剑, 袁涌, 等. 基础隔震系统性能评估与提升研究进展[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(8): 40–49.
Zhu Hongping, Fan Jian, Yuan Yong, et al. Performance evaluation and promotion of base isolation systems: state of the art[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2022, 50(8): 40–49.
- [8] Nakamura Y, Fukukita A, Tamura K, et al. Seismic response control using electromagnetic inertial mass dampers[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2014, 43(4): 507–527.
- [9] Song Jian, Bi Kaiming, Ma Ruisheng, et al. Optimum design and performance evaluation of inerter-based dampers for seismic protection of adjacent bridges[J]. *Structures*, 2023, 55: 1 277–1 291.
- [10] Pietrosanti D, De Angelis M, Basili M. Optimal design and performance evaluation of systems with tuned mass damper inerter (TMDI)[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2017, 46(8): 1 367–1 388.
- [11] Shen Wenai, Niyitangamahoro A, Feng Zhouquan, et al. Tuned inerter dampers for civil structures subjected to earthquake ground motions: optimum design and seismic performance[J]. *Engineering Structures*, 2019, 198: DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109470.
- [12] Wang Heng, Shen Wenai, Li Yamin, et al. Dynamic behavior and seismic performance of base-isolated structures with electromagnetic inertial mass dampers: analytical solutions and simulations[J]. *Engineering Structures*, 2021, 246: DOI:10.1016/j.engstruct.2021.113072.
- [13] Wang Heng, Shen Wenai, Zhu Hongping, et al. Stochastic optimization of a nonlinear base isolation system with LRB and EIMD for building structures[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2023: DOI:10.1155/2023/8392421.
- [14] Wang Heng, Shen Wenai, Zhu Hongping, et al. Performance enhancement of FPS-isolated buildings using an inerter-

- [15] 王恒. 电磁惯质阻尼组合隔震体系的理论与试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
Wang Heng. Theoretical and experimental study on hybrid base isolation systems with electromagnetic inertial mass dampers[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2024.
- [16] Lynch J P, Law K H. Market-based control of linear structural systems[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(10): 1 855-1 877.
- [17] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S].
- [18] Davenport A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1961, 87(372): 194-211.
- [19] Hu Liang, Li Li, Gu Ming. Error assessment for spectral representation method in wind velocity field simulation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(9): 1 090-1 104.
- [20] 黄本才, 汪丛军. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001: 53.


CN

CN

刊号: GST-187 2015 250K

中国学术期刊影响因子年报 (自然科学与工程技术 · 2015版)

主办单位: 中国医学科学院
 承办单位: 中国医学科学院图书馆
 主编: 王长林
 地址: 北京·280505 1528 100-2032

研究性质: 技术研究所

计量学指标统计

1. 期刊分类统计 (2)		2. 期刊来源统计		3. 来源统计		4. 来源统计		5. 来源统计		6. 来源统计	
类别	数量	类别	数量	类别	数量	类别	数量	类别	数量	类别	数量
1.1 基础医学	10	1.1.1 基础医学	10	1.1.1.1 基础医学	10	1.1.1.2 基础医学	10	1.1.1.3 基础医学	10	1.1.1.4 基础医学	10
1.2 临床医学	10	1.2.1 临床医学	10	1.2.1.1 临床医学	10	1.2.1.2 临床医学	10	1.2.1.3 临床医学	10	1.2.1.4 临床医学	10
1.3 预防医学	10	1.3.1 预防医学	10	1.3.1.1 预防医学	10	1.3.1.2 预防医学	10	1.3.1.3 预防医学	10	1.3.1.4 预防医学	10
1.4 药学	10	1.4.1 药学	10	1.4.1.1 药学	10	1.4.1.2 药学	10	1.4.1.3 药学	10	1.4.1.4 药学	10
1.5 医学技术	10	1.5.1 医学技术	10	1.5.1.1 医学技术	10	1.5.1.2 医学技术	10	1.5.1.3 医学技术	10	1.5.1.4 医学技术	10
1.6 其他	10	1.6.1 其他	10	1.6.1.1 其他	10	1.6.1.2 其他	10	1.6.1.3 其他	10	1.6.1.4 其他	10
1.7 合计	50	1.7.1 合计	50	1.7.1.1 合计	50	1.7.1.2 合计	50	1.7.1.3 合计	50	1.7.1.4 合计	50
2.1 基础医学	10	2.1.1 基础医学	10	2.1.1.1 基础医学	10	2.1.1.2 基础医学	10	2.1.1.3 基础医学	10	2.1.1.4 基础医学	10
2.2 临床医学	10	2.2.1 临床医学	10	2.2.1.1 临床医学	10	2.2.1.2 临床医学	10	2.2.1.3 临床医学	10	2.2.1.4 临床医学	10
2.3 预防医学	10	2.3.1 预防医学	10	2.3.1.1 预防医学	10	2.3.1.2 预防医学	10	2.3.1.3 预防医学	10	2.3.1.4 预防医学	10
2.4 药学	10	2.4.1 药学	10	2.4.1.1 药学	10	2.4.1.2 药学	10	2.4.1.3 药学	10	2.4.1.4 药学	10
2.5 医学技术	10	2.5.1 医学技术	10	2.5.1.1 医学技术	10	2.5.1.2 医学技术	10	2.5.1.3 医学技术	10	2.5.1.4 医学技术	10
2.6 其他	10	2.6.1 其他	10	2.6.1.1 其他	10	2.6.1.2 其他	10	2.6.1.3 其他	10	2.6.1.4 其他	10
2.7 合计	50	2.7.1 合计	50	2.7.1.1 合计	50	2.7.1.2 合计	50	2.7.1.3 合计	50	2.7.1.4 合计	50
3.1 基础医学	10	3.1.1 基础医学	10	3.1.1.1 基础医学	10	3.1.1.2 基础医学	10	3.1.1.3 基础医学	10	3.1.1.4 基础医学	10
3.2 临床医学	10	3.2.1 临床医学	10	3.2.1.1 临床医学	10	3.2.1.2 临床医学	10	3.2.1.3 临床医学	10	3.2.1.4 临床医学	10
3.3 预防医学	10	3.3.1 预防医学	10	3.3.1.1 预防医学	10	3.3.1.2 预防医学	10	3.3.1.3 预防医学	10	3.3.1.4 预防医学	10
3.4 药学	10	3.4.1 药学	10	3.4.1.1 药学	10	3.4.1.2 药学	10	3.4.1.3 药学	10	3.4.1.4 药学	10
3.5 医学技术	10	3.5.1 医学技术	10	3.5.1.1 医学技术	10	3.5.1.2 医学技术	10	3.5.1.3 医学技术	10	3.5.1.4 医学技术	10
3.6 其他	10	3.6.1 其他	10	3.6.1.1 其他	10	3.6.1.2 其他	10	3.6.1.3 其他	10	3.6.1.4 其他	10
3.7 合计	50	3.7.1 合计	50	3.7.1.1 合计	50	3.7.1.2 合计	50	3.7.1.3 合计	50	3.7.1.4 合计	50
4.1 基础医学	10	4.1.1 基础医学	10	4.1.1.1 基础医学	10	4.1.1.2 基础医学	10	4.1.1.3 基础医学	10	4.1.1.4 基础医学	10
4.2 临床医学	10	4.2.1 临床医学	10	4.2.1.1 临床医学	10	4.2.1.2 临床医学	10	4.2.1.3 临床医学	10	4.2.1.4 临床医学	10
4.3 预防医学	10	4.3.1 预防医学	10	4.3.1.1 预防医学	10	4.3.1.2 预防医学	10	4.3.1.3 预防医学	10	4.3.1.4 预防医学	10
4.4 药学	10	4.4.1 药学	10	4.4.1.1 药学	10	4.4.1.2 药学	10	4.4.1.3 药学	10	4.4.1.4 药学	10
4.5 医学技术	10	4.5.1 医学技术	10	4.5.1.1 医学技术	10	4.5.1.2 医学技术	10	4.5.1.3 医学技术	10	4.5.1.4 医学技术	10
4.6 其他	10	4.6.1 其他	10	4.6.1.1 其他	10	4.6.1.2 其他	10	4.6			

2024 年载文量为 441,可被引文献量为 350,可被引文献比为 0.79。复合总被引频次为 14 026,即年指标为 0.229,复合影响因子为 3 085,复合他引影响因子为 2.539,5 年影响因子为 3.408,他引 5 年影响因子为 3.035。