

阻尼器系数对悬挂建筑结构减震效率影响研究

吴延飞¹, 张晓姗¹, 吴岳²

(1. 杭州建工集团有限责任公司, 杭州 310000; 2. 华北理工大学, 河北 唐山 063000)

摘要: 利用拉格朗日方程建立了核筒悬挂建筑结构体系运动方程, 采用 Longe-Kuta 方法求解体系地震动力响应时程。实例计算结果表明, 阻尼器系数对悬挂结构的减震效果具有明显影响, 楼层位移沿结构高度的分布趋于均匀, 且相对于普通无悬挂结构其层间位移、层位移、层速度以及层加速度大幅度减小, 而且存在一个优化的阻尼器系数使得结构层间位移有最小值。

关键词: 悬挂建筑结构; 阻尼器系数; 拉格朗日方程; 减震效率

中图分类号: TU351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-349X(2018)03-0056-04

DOI: 10.16160/j.cnki.tsxyxb.2018.03.012

A Research on the Damping Effect of Damper Coefficients on Suspension Structures

WU Yan-fei¹, ZHANG Xiao-shan¹, WU Yue²

(1. Hangzhou Construction Group Co. Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. North China University of Science and Technology, Tangshan 063000, China)

Abstract: The motion equation for the core tube suspension building structure is established through Lagrange equation, and the response interval of seismic force of the system obtained with Longe Kuta method. The calculation results show that the damping coefficient of the damper has an obvious influence on the damping effect of the suspension structure, that the floor displacement tends to be uniform along the height of the structure, and the inter-story displacement, floor displacement, displacement velocity and acceleration are greatly reduced compared with the ordinary none-suspension structure, and that there exists an optimal damper coefficient which minimizes structure displacement.

Key Words: suspension structure; damping coefficient; Lagrange's equations; damping effect

0 引言

随着时代的发展以及科技的不断进步, 悬挂结构体系的工程应用之路变得更加明朗与宽阔, 各种各样的悬挂式建筑在世界各地被建立起来, 如加拿大温哥华西海岸办公大楼、南非约翰内斯堡的标准银行大楼、伦敦中区泰晤士河畔的河岸广场加减工程, 以及中国香港汇丰银

行总部大楼等。而且随着悬挂原理在建筑中的不断应用和实践, 悬挂式建筑的结构理论和实际运用也愈加趋向成熟, 应用方向从住宅、办公楼、医院到旅馆、展览馆等均有涉及, 建筑高度最高的甚至能够达到 27 层 130 米。悬挂结构的受力性能与结构高度、悬挂楼层数、吊杆半径、楼层阻尼器系数因素有关, 本文主要讨论分

作者简介: 吴延飞(1991—), 男, 河北邯郸人, 助理工程师, 主要从事土木工程研究。

析楼层阻尼器系数对悬挂结构的减震效果。

1 建立悬挂建筑结构体系运动方程

理论设定一个 14 层核筒悬挂建筑结构, 简化为葫芦串模型, 将 14 层悬挂结构体系分为两个 7 层悬挂系统, 1—7 层悬挂在第一根吊杆上, 8—14 层悬挂在第二根吊杆上, 悬挂体系每一楼层中均加设阻尼器, 以提高悬挂结构的抗震效果。设坐标系 XOY 固定在地平面上, 悬挂系统的第一振型为 $\phi(z)$, 不考虑其余干扰振型影响, 则第一根吊杆、第二根吊杆联接的悬挂系统中楼层位移为 u_1, u_2 , 可得^[1]:

$$\begin{cases} u_1 = q\phi(z_1) \\ u_2 = q\phi(z_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中, q 为结构体系中每个质量块的广义坐标, $\phi(z) = (1 - \cos \frac{z\pi}{2H})$ 为结构体系的近似的第一阶振型函数, z 为距地面的高度。

根据拉格朗日方程建立核筒悬挂建筑结构体系的运动方程式, 如下。

$$\begin{aligned} & [m_1 \phi^2(z_1) + m_2 \phi^2(z_2) + \bar{m}] \ddot{q} + m_{10} \phi(z_1) r_1 \cos \theta_1 \ddot{\theta}_1 + m_{20} \phi(z_2) r_2 \cos \theta_2 \ddot{\theta}_2 = \\ & \sum_{i=1}^2 m_{i0} \phi(z_i) r_i \sin \theta_i \dot{\theta}_i^2 - \sum_{i=1}^2 [k_{i1}(x_{i0} - x_{i1}) + c_{i1}(\dot{x}_{i0} - \dot{x}_{i1})] \phi(z_i) - \sum_{i=1}^2 \sum_{j=0}^7 D_{ij} [\dot{u}(z_{ij}) - \dot{x}_{ij}] \phi(z_{ij}) - \int_0^H \bar{m} \ddot{x}_g \phi(z) dz - \sum_{i=1}^2 m_{i0} \ddot{x}_g \phi(z_{i0}) - \\ & \bar{k} q m_{10} \phi(z_1) r_1 \cos \theta_1 \ddot{q} + m_{10} r_1^2 \ddot{\theta}_1 = -[k_{11}(x_{10} - x_{11}) + c_{11}(\dot{x}_{10} - \dot{x}_{11})] r_1 \cos \theta_1 - D_{10} [\dot{x}_{10} - \dot{q}\phi(z_{10})] r_1 \cos \theta_1 - m_1 g r_1 \sin \theta_1 - \\ & m_{10} \ddot{x}_g r_1 \cos \theta_1 m_{20} \phi(z_2) r_2 \cos \theta_2 \ddot{q} + m_{20} r_2^2 \ddot{\theta}_2 = -[k_{21}(x_{20} - x_{21}) + c_{21}(\dot{x}_{20} - \dot{x}_{21})] r_2 \cos \theta_2 - D_{20} [\dot{x}_{20} - \dot{q}\phi(z_{20})] r_2 \cos \theta_2 - m_2 g r_2 \sin \theta_2 - \\ & m_{20} \ddot{x}_g r_2 \cos \theta_2. \end{aligned} \quad (2)$$

式中, H : 核筒高度; $\bar{m}$: 核筒质量线密度; EI : 核筒截面抗弯模量; D_{i0} : 第 i 个悬挂体楼段顶层楼盖阻尼器阻尼系数; D_{ij} : 第 i 个悬挂体楼段中第 j 楼层阻尼器阻尼系数; $u(z, t)$: 核筒 z 高度 t 时刻的位移; $q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t)$: 核筒位移振型坐标; m_i : 第 i 个悬挂大梁质量; z_i : 第 i 个悬挂大梁高度; $x_{ij}, \dot{x}_{ij}, \ddot{x}_{ij}$: 第 i 个悬挂体楼段中第 j

楼层的水平位移、速度及加速度; $x_{i0}, \dot{x}_{i0}, \ddot{x}_{i0}$: 第 i 个悬挂体楼段顶层楼盖的水平位移、速度及加速度; $z_{ij}, \dot{z}_{ij}, \ddot{z}_{ij}$: 第 i 个悬挂体楼段中第 j 楼盖(层)的竖向位移、速度及加速度; r_i : 第 i 个悬挂体的连杆长度; $\theta_i, \dot{\theta}_i, \ddot{\theta}_i$: 第 i 个悬挂体摆动的角度、速度及加速度; m_{ij}, k_{ij}, c_{ij} : 第 i 个悬挂体第 j 楼层的质量、刚度系数及阻尼器系数; $\bar{k}$: 刚度系数的平均值; g : 重力加速度; $\ddot{x}_g$: 地震地面加速度。

对于 x_{ij} ($i = 1, 2; j = 1, \dots, 7$) 与多自由度的运动方程相同。采用 Longe-Kuta 数值方法求解以上的方程组。由于 q, θ_1, θ_2 是动力耦合的, 需要先将 $\ddot{q}, \ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2$ 用行列式表示成显式的表达式, 然后与 $\ddot{x}_{ij}$ 一起求解^[2]。

2 计算实例及结果分析

给出每一楼层的质量 $m_{1j} = m_{2j} = 933 \text{ t}$, $k_{1j} = k_{2j} = 9.5 \times 105 \text{ kN/m}$, $r_1 = r_2 = 1 \text{ m}$, 输入地震地面加速度 $\ddot{x}_g = 4.0 \text{ m/s}^2$, 在此基础上考察不同阻尼器系数为 $3\ 000 \text{ kN/(m} \cdot \text{s)}$, $5\ 000 \text{ kN/(m} \cdot \text{s)}$, $7\ 000 \text{ kN/(m} \cdot \text{s)}$ 时悬挂结构与无悬挂结构二者的层间位移、层位移、层速度、层加速度, 来具体分析减震效果^[3]。

2.1 阻尼器系数对层间位移的影响

根据计算得出表 1 和图 1。从中可以看出, 在阻尼器系数由 $3\ 000 \text{ kN/(m} \cdot \text{s)}$ 增加到 $7\ 000 \text{ kN/(m} \cdot \text{s)}$ 的过程中, 每一个相对应楼层的层间位移都随之增加; 但是当阻尼器系数为 $1\ 000 \text{ kN/(m} \cdot \text{s)}$ 时, 对应的层间位移则大于当阻尼系数为 $3\ 000 \text{ kN/(m} \cdot \text{s)}$ 时的层间位移。阻尼器主要是耗损地震震动导致的层间位移, 对其运动产生阻力。当阻尼器系数增大, 对楼层运动的阻力就会增大, 相对于 $3\ 000 \text{ kN/(m} \cdot \text{s)}$ 的阻尼器系数, $7\ 000 \text{ kN/(m} \cdot \text{s)}$ 的阻尼器系数就增大了楼层震动的整体性, 这与普通无悬挂的结构体系近似无差异。因此应该存在一个最优的阻尼器系数使层间位移取最小的值。通过表 1 和图 1 中反映的数据可得出, 当阻尼器系数为 $3\ 000 \text{ kN/(m} \cdot \text{s)}$ 时, 对悬挂结构减震效率最优, 相较于无悬挂结构 1 层的层间位移减小震效率可达到 97%。

表 1 悬挂结构与无悬挂结构层间位移的比较

mm

悬挂系统	阻尼器系数 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	第 1 层间	第 2 层间	第 3 层间	第 4 层间	第 5 层间	第 6 层间	第 7 层间
第一吊杆 (0—1 层~6—7 层)	3 000	1.9	1.7	1.6	1.4	1.2	1.0	0.6
	5 000	1.3	1.7	1.9	1.9	1.7	1.3	0.7
	7 000	2.0	2.4	2.7	2.8	2.5	1.9	1.1
第二吊杆 (7—8 层~13—14 层)	3 000	4.0	4.0	3.8	3.4	2.8	2.1	1.1
	5 000	3.9	4.1	4.1	3.8	3.2	2.4	1.3
	7 000	3.9	4.3	4.4	4.2	3.6	2.7	1.5
无悬挂	(0—1 层~6—7 层)	57.4	52.3	45.9	39.1	31.7	22.8	12.1
	(7—8 层~13—14 层)	57.4	52.3	45.9	39.1	31.7	22.8	12.1

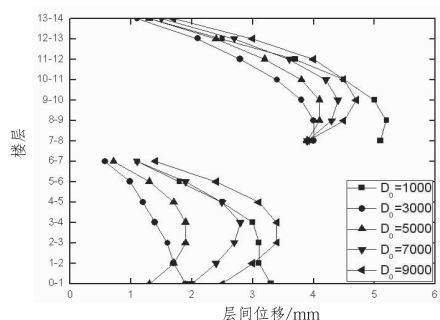


图 1 阻尼器系数与层间位移的关系

2.2 阻尼器系数对层位移的影响

同样根据运动方程计算得出表 2 和图 2, 从

中可看出, 在阻尼器系数由 $3\,000\text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 增加到 $7\,000\text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 的过程中, 每一个悬挂体对应楼层的层位移都随之减小, 但是随着楼层的增高, 层位移则相应增大。普通无悬挂建筑结构 7 层与 1 层相比较层位移提高值达到 77%, 但对于加设阻尼器的悬挂建筑结构而言, 阻尼器系数为 $3\,000\text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 时, 7 层与 1 层相比较提高值仅为 5%, 由此可得出结论: 有阻尼器的悬挂结构, 其震动的整体性趋于平稳, 在阻尼器系数为 $7\,000\text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 时, 相较于无悬挂结构其层位移减小更为明显, 7 层的层位移减小效率达到 72%。

表 2 悬挂结构与无悬挂结构层位移的比较

mm

悬挂系统	阻尼器系数 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层	第 7 层
第一吊杆 (1—7 层)	3 000	97.5	99.0	100.3	101.2	101.7	102.1	102.2
	5 000	80.0	81.0	81.6	82.0	82.3	82.4	82.5
	7 000	67.7	68.3	68.8	69.1	69.4	69.6	69.7
第二吊杆 (8—14 层)	3 000	182.8	185.5	188.0	190.1	191.6	192.6	193.0
	5 000	153.0	154.8	156.4	157.6	158.6	159.2	159.5
	7 000	133.6	133.2	134.5	135.7	136.7	137.5	137.9
无悬挂	(1—7 层)	57.4	109.6	154.7	191.9	220.4	240.1	250.2
	(8—14 层)	57.4	109.6	154.7	191.9	220.4	240.1	250.2

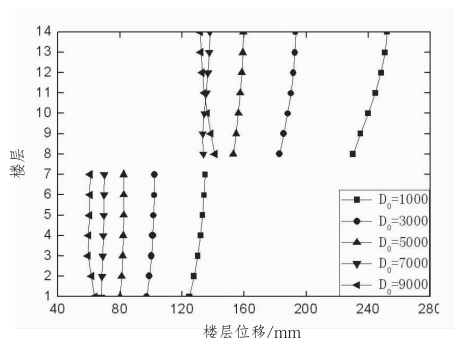


图 2 阻尼器系数与层位移的关系

2.3 阻尼器系数对层速度的影响

根据运动方程计算得出表 3 和图 3, 从中可看出, 在阻尼器系数由 $3\,000\text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 增加到 $7\,000\text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 的过程中, 每一个悬挂体对应楼层的层速度都随之减小, 而随着楼层的增高, 层速度则相应增大。无悬挂建筑结构 7 层与 1 层相比较层速度提高值达到 75%, 但对于加设阻尼器的悬挂建筑结构而言, 阻尼器系数为 $3\,000\text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 时, 7 层与 1 层相比较层速度提高值仅为 2%, 从而不难得出, 有阻尼

器的悬挂结构,其震动的整体性趋于平稳,在阻尼器系数为7 000 kN/(m·s)时,相较于无悬挂结构其层速度减小更为明显,7 层的层速度减小效率达到 83%。

表 3 悬挂结构与无悬挂结构层速度的比较 m·s⁻¹

悬挂系统	阻尼器系数/(kN·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层	第 7 层
第一吊杆 (1—7 层)	3 000	0.399 7	0.406 7	0.410 5	0.411 7	0.410 5	0.408 2	0.406 8
	5 000	0.348 4	0.351 7	0.352 4	0.351 1	0.348 6	0.345 9	0.344 8
	7 000	0.327 0	0.323 7	0.315 2	0.307 2	0.303 8	0.300 8	0.300 0
第二吊杆 (8—14 层)	3 000	0.577 4	0.574 3	0.575 5	0.576 6	0.576 6	0.576 1	0.575 6
	5 000	0.572 8	0.571 1	0.569 9	0.569 6	0.569 8	0.569 8	0.569 8
	7 000	0.560 8	0.557 4	0.554 8	0.553 8	0.553 5	0.553 4	0.553 5
无悬挂	(1—7 层)	0.451 9	0.834 0	1.154 3	1.433 5	1.610 4	1.710 9	1.768 5
	(8—14 层)	0.451 9	0.834 0	1.154 3	1.433 5	1.610 4	1.710 9	1.768 5

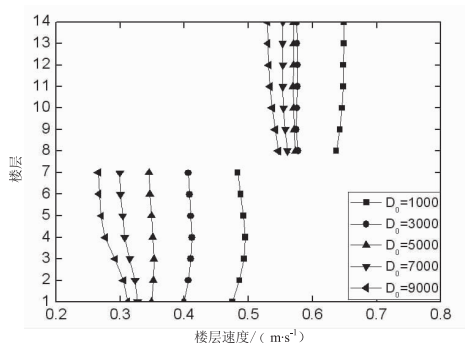


图 3 阻尼器系数与层速度的关系

2.4 阻尼器系数对层加速度的影响

从表 4 和图 4 中可看出,在阻尼器系数由

3 000 kN/(m·s)增加到 7 000 kN/(m·s)的过程中,各悬挂体对应楼层的层加速度都随之增大,伴随楼层的增高,层加速度也对应增大。无悬挂建筑结构 7 层与 1 层相比较,层加速度提高值达到 67%,但对于加设阻尼器的悬挂建筑结构而言,随着楼层增加层加速度反而降低。悬挂建筑结构由于地震的震动影响,建筑物会跟着吊杆摆滑,摆动越小,抗震性能越佳。通过表 4、图 4 中数据不难分析出,有阻尼器的悬挂结构,其震动的整体性趋于平稳,在阻尼器系数为 3 000 kN/(m·s)时,相较于无悬挂结构其层加速度减小更为明显,1 层的层加速度减小效率达到 78%。

表 4 悬挂结构与无悬挂结构层加速度的比较 m·s⁻²

悬挂系统	阻尼器系数/(kN·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层	第 7 层
第一吊杆 (1—7 层)	3 000	4.028 8	3.911 0	3.990 2	4.057 2	4.081 9	4.089 8	4.156 3
	5 000	4.075 4	4.016 1	4.028 4	4.013 0	3.975 3	3.945 0	3.867 3
	7 000	4.130 7	4.103 5	4.059 0	3.982 3	3.896 2	3.835 1	3.646 8
第二吊杆 (8—14 层)	3 000	4.174 8	4.016 1	3.878 6	3.821 9	3.752 2	3.700 0	3.693 6
	5 000	4.148 1	4.034 0	3.927 4	3.804 2	3.685 1	3.601 0	3.580 0
	7 000	4.234 9	4.122 6	3.969 9	3.800 9	3.644 6	3.535 6	3.766 4
无悬挂	(1—7 层)	5.376 2	9.853 5	13.051 9	13.569 0	12.858 8	12.858 8	16.489 7
	(8—14 层)	5.376 2	9.853 5	13.051 9	13.569 0	12.858 8	12.858 8	16.489 7

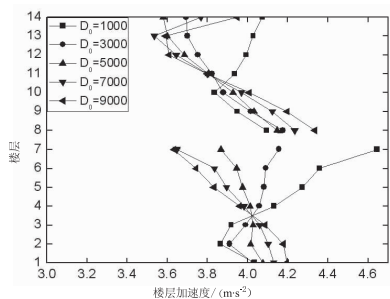


图 4 阻尼器系数与层加速度的关系

3 结论

(1)阻尼器系数的不同对悬挂建筑结构的减震效果具有明显影响,楼层的层间位移、层位移、层速度以及层加速度沿结构高度的分布趋于均匀,且相对于普通无悬挂建筑结构相对应值都大幅度减小。

(2)悬挂建筑结构加设阻尼器后,存在一个最优的阻尼器系数可使层间位移取最小的值。经过数据计算分析,阻尼器系数为 3 000 kN/(m·s)时可达到最优效果。(下转第 65 页)

必然使传统的基于线性假设的回归预测模型产生很大的误差。

4 小结

城市建成区面积是人口、经济、社会、环境等多因素综合影响的结果,从本研究中发现,2015年所选25个省会城市的建成区面积受第三产业和国民生产总值的影响最大,第二产业和工业的影响次之。说明要想对城市进行合理建设使之健康发展,应该以大力调控第三产业、国民生产总值为出发点。

本文利用建成区面积作为研究变量,运用Matlab软件建立多元线性回归模型,利用最小二乘原理求解数学模型中的最优解,不仅简化和优化了繁琐的计算过程,而且通过检验证明所建立的模型计算结果精度较高,对城市建成区面积变化的预测有一定的参考价值。然而,由于在实际情况中城市建成区面积受复杂的多种因素影响,在建模过程中对因素考虑或选择不同,则会造成计算结果的多样性,因此,在研究中应力求完善。

参考文献:

- [1] 李爱民. 基于遥感影像的城市建成区扩张与用地规模研究[D]. 郑州:解放军信息工

程大学,2009.

- [2] 刘柯. 基于主成分分析的BP神经网络在城市建成区面积预测中的应用——以北京市为例[J]. 地理科学进展,2007(6):129-137.
- [3] 雷波. BP神经网络和多元回归模型在城市建成区面积预测中的应用比较——以福州市为例[J]. 城市发展研究,2008(1):153-155.
- [4] 周永生,肖玉欢,黄润生. 基于多元线性回归的广西粮食产量预测[J]. 南方农业学报,2011,42(9):1165-1167.
- [5] 付倩尧. 基于多元线性回归的雾霾预测方法研究[J]. 计算机科学,2016,43(S1):526-528.
- [6] 叶锋. 多元线性回归在经济技术产量预测中的应用[J]. 中外能源,2015,20(2):45-48.
- [7] 韦浩. 多元回归分析法在滑坡空间预测中的应用[D]. 西安:长安大学,2011.
- [8] 张智星. MATLAB程序设计与应用[M]. 北京:清华大学出版社,1993:56-65.
- [9] 邱卫宁,陶本藻. 测量数据处理理论与方法[M]. 武汉:武汉大学出版社,2008:109-113.
- [10] 刘大杰,陶本藻. 实用测量数据处理方法[M]. 北京:测绘出版社,2000:7-14.
- [11] 王乐洋,朱建军. 回归分析、测量平差与大地测量反演[J]. 测绘通报,2007(2):27-30.

(责任编辑:李秀荣)

(上接第59页)

参考文献:

- [1] 刘晶波,杜修力. 结构动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2006:152-178.
- [2] 葛楠,苏幼坡,王兴国,等. 竖向刚度对FPS

滑移摩擦摆系统隔震性能影响研究[J]. 工程抗震与加固改造,2010,32(4):20-25.

- [3] 周锡元,阎维明,杨润林. 建筑结构的震动、减振和振动控制[J]. 建筑结构学报,2002,23(2):2-11.

(责任编辑:李秀荣)