

# 巨型框-筒悬挂阻尼控制结构体系随机振动分析\*

## Random Vibration Analysis for Megafame-tube with Suspension Damping Control Systems

邓志恒 秦 荣

Deng Zhiheng Qin Rong

(广西大学土木建筑工程学院 南宁市西乡塘路16号 530004)

(College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University,  
10 Xixiangtanglu, Nanning, 530004, China)

**摘要** 提出一种巨型框-筒悬挂阻尼控制模型,采用结构动力学有限元方法对结构体系进行地震随机振动分析和时程分析,分析结果表明,巨型框-筒悬挂阻尼控制结构体系能有效地减小结构的地震响应,最后讨论影响控制效果的参数。

**关键词** 巨型框-筒 结构控制 随机振动 有限元法

中图法分类号 TU315

**Abstract** The new model of megafame-tube with suspension damping control systems is presented. The structural systems is analysed by the finite element method of structural dynamics. Through the random vibration analysis and time history analysis for the structure, it is effective in decreased the seismic response of the structure is reduced effectively. The influence factors and parameters of control system is discussed.

**Key words** megafame-tube, structural control, random vibration, finite element method

随着高层建筑的不断发展,对结构体系的抗震、抗风、建筑功能适应性提出了更高的要求,研究更加安全、经济、可靠,适应建筑功能要求的结构新体系是高层及超高层建筑结构研究的重要课题。悬挂结构体系是一种抗震性能优良的结构体系,1938年学者 Willams 提出了用悬挂原理建筑高层建筑的想法,50年代后期,悬挂建筑开始进入实用阶段,国外出现了一些悬挂建筑,这些悬挂建筑大都采用竖筒悬挂体系,采用一端吊挂式,其建筑体形为鸡腿式建筑,结构体型不利于抗震,还需重点考虑抗倾覆及稳定性问题,施工也较为困难。巨型框架悬挂体系,是悬挂体系的最新发展,它克服了单点悬挂体系的缺点,然而这种结构体系,用于超高层建筑结构时,抗侧刚度低,楼梯及电梯竖直通难以布置等问题。

作者结合悬挂结构原理、巨型框架、筒体结构及结构控制原理提出巨型框-筒悬挂阻尼控制结构体系。这种结构体系利用核心筒作为竖直运输建筑空间,有更大的抗侧刚度,悬挂楼层与核心筒之间设置阻尼控制器,对结构进行有效的控制。本文采用地震

随机振动分析、时程分析方法对结构体系进行分析,通过结构算例分析,比较巨型框-筒悬挂阻尼控制体系及巨型框-筒座承式结构体系的抗震性能,并讨论影响抗震性能的主要参数。

### 1 结构模型

典型的巨型框-筒悬挂楼层如图 所示,体系剖面图如图 2所示,为有效的控制悬挂楼层地震响应产生的侧移,在巨型框-筒悬挂楼层设置弹簧阻尼控制器,阻尼控制器与核心筒连接,使楼层悬摆力传递至核心筒,由于各悬挂楼层在地震作用下摆动频率不同,部分方向相反,悬摆力部分抵消,对结构起到减振作用,同时阻尼有效耗能减小地震响应。计算模型采用空间有限元计算模型,核心筒体、各层楼板采用壳单元,巨型框架梁、柱采用梁单元,弹簧阻尼控制器独立设置一种弹簧阻尼单元,用弹簧阻尼单元反映控制器参数对结构体系的影响,弹簧阻尼单元两端分别与悬挂楼层及核心筒体铰接,悬挂吊杆采用杆单元,吊杆与巨型框架梁铰接,与各悬挂楼层固接。

### 2 结构振动方程

巨型框-筒悬挂阻尼控制体系受地震时的运动方

2001-12-05收稿, 2002-02-20修回。

\* 广西自然科学基金资助项目 (0135049)

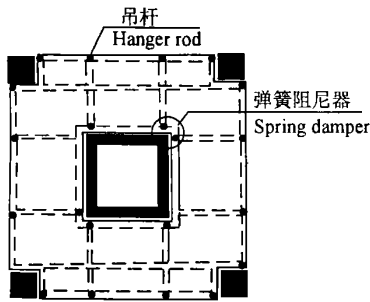


图1 悬挂楼层平面

Fig. 1 Suspension floor plane

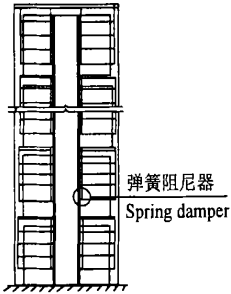


图2 体系剖面

Fig. 2 System section

程为

$$M\{\ddot{x}(t)\} + C\{\dot{x}(t)\} + K\{x(t)\} = -MI\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

式中  $M$  为质量矩阵,  $K$  为刚度矩阵,  $x(t)$  为楼层相对地面的位移向量,  $\ddot{x}_g(t)$  为地震地面加速度,  $C$  为阻尼矩阵,  $I$  为单位列向量. 质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵分别由单元刚度矩阵、单元质量矩阵及单元阻尼矩阵集成. 单元刚度矩阵  $K^e$ 、质量矩阵  $M^e$ 、阻尼矩阵  $C^e$  分别为:

$$K^e = \int_V B^T D B dV, \quad (2)$$

$$M^e = \int_V N^T dV dV, \quad (3)$$

$$C^e = \int_V N^T gV dV, \quad (4)$$

式中  $B$  为应变矩阵,  $D$  为弹性矩阵,  $N$  为形状函数矩阵,  $d$  为质量密度,  $g$  为阻尼系数

$$\text{近似采用 Rayleigh 阻尼, } C^e = TM^e + UK^e, \quad (5)$$

$$\text{其中: } T = \frac{2(\gamma_i k_j - \gamma_j k_i) k_i k_j}{k_i^2 - k_j^2}, \quad (6)$$

$$U = \frac{2(\gamma_i k_j - \gamma_j k_i)}{k_i^2 - k_j^2}, \quad (7)$$

式中  $k_i$  和  $k_j$ ; 及  $\gamma_i, \gamma_j$  分别为第  $i, j$  振型的频率及阻尼比,  $i, j$  一般取 1 和 3

动力方程求解采用 Newmark-U 法求解. 计算时参数  $\gamma$  取 0.5  $U$  取 0.25

在进行随机振动分析时由于悬挂结构高振型对地震响应有较大的影响, 因此考虑高振型的影响, 本

文考虑前 20 个振型.

### 3 随机振动分析及算法

由受地震作用下的动力方程

$$\{ \ddot{x}(t) \} + C \{ \dot{x}(t) \} + K \{ x(t) \} = - M I \ddot{x}_g(t) = F(t), \quad (8)$$

式中地震随机激励  $F(t) = - M I \ddot{x}_g(t)$  设为一平稳过程, 它的自相关函数矩阵及谱密度矩阵有维纳-辛钦关系如下:

$$R_{FF}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{FF}(k) \exp(ikf) dk, \quad (9)$$

$$S_{FF}(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{FF}(f) \exp(-ikf) df. \quad (10)$$

对于平稳的地震激励假定  $E[F(t)] = 0$ , 则有  $E[X(t)] = 0$ .

随机响应  $X(t)$  的相关函数矩阵及谱密度矩阵之间也有与式 (9)、(10) 相同的维纳-辛钦关系:

$$R_{XX}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{XX}(k) \exp(ikf) dk, \quad (11)$$

$$S_{XX}(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_{XX}(f) \exp(-ikf) df. \quad (12)$$

体系的频率响应函数矩阵及脉冲响应函数矩阵为

$$H(k) = (-k^2 M + ikC + K)^{-1} = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \exp(-ikt) dt, \quad (13)$$

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(k) \exp(ikt) dk. \quad (14)$$

$$\text{易得: } S_{XX}(k) = H^*(k) S_{FF}(k) H^T(k), \quad (15)$$

式中 \* 表示共扼矩阵

位移均方差

$$\sigma_{x_j}^2 = R_{XX}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{XX}(k) dk, \quad (16)$$

对于线性结构在平稳随机激励下速度谱密度及加速度谱密度与位移谱密度的关系有

$$S_{\dot{x}\dot{x}}(k) = k^2 S_{XX}(k), \quad (17)$$

$$S_{\ddot{x}\ddot{x}}(k) = k^4 S_{XX}(k), \quad (18)$$

$$\text{因此 } \sigma_{\dot{x}_j}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} k^2 S_{XX}(k) dk, \quad (19)$$

$$\sigma_{\ddot{x}_j}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} k^4 S_{XX}(k) dk. \quad (20)$$

本文分析所采用的地震动加速度随机模型为过滤的噪声模型 (Kanai-Tajimi 模型)

$$S_{\ddot{x}_g}(k) = \frac{1 + 4\gamma_g \left(\frac{k}{k_g}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{k}{k_g}\right)^2\right]^2 + 4\gamma_g \left(\frac{k}{k_g}\right)^2} S_0. \quad (21)$$

式中基岩的地运动加速度功率谱密度函数为白噪声  $S_0$ , 复盖土的阻尼比为  $\gamma_g$ , 卓越频率为  $k_g$ .

随机振动分析过程中, 首先对结构体系进行模态

分析,采用子空间法,考虑悬挂结构体系高振型的影响,本文取前 20个振型.输入地震加速度随机模型(Kanai-Tajimi模型)  $S_{\dot{x}_g}(k)$ ,由式(11)~(15)计算各振型平稳响应  $X(t)$ 的互谱密度函数  $S_{XX}(k)$ 及自相关函数  $R_{XX}(t)$ ,由式(16)~(20)计算位移方差,速度方差及加速度方差值

### 4 算例分析

#### 4.1 随机振动分析

例 1 68层巨型框筒结构,  $x, y$  方向巨型框架跨度为 32.9 m 29.3 m (柱轴间距离),筒体尺寸为 12.9 m  $\times$  9.3 m,采用 2种结构布置方案,方案一采用座承式巨型框筒结构体系,巨型框架为 1层,1~8层设六层框架结构,9~10层设五层框架结构,巨型框架柱尺寸为:2层以下 2.6 m  $\times$  2.6 m,22~42层 2.3 m  $\times$  2.3 m,43~68层 2 m  $\times$  2 m,巨型框架梁尺寸为 0.8 m  $\times$  2.7 m,楼层层高均为 3.6 m,次框架柱尺寸 0.4 m  $\times$  0.4 m,次框架梁采用 0.25 m  $\times$  0.8 m,巨型框架柱采用高强砼,砼弹性模量取  $E_0 = 3.6 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ,巨型框架梁采用预应力砼框架梁,筒体厚度为:2层以下 0.7 m,22~42层 0.5 m,43层~68层 0.3 m.方案二采用巨型框筒悬挂阻尼控制结构体系,巨型框架层数、柱、梁、悬挂楼层梁、筒体均同方案一,巨型框筒 1~8层悬挂 6层,9~10层悬挂 5层,每层悬挂楼层处设弹簧阻尼控制器,弹簧阻尼控制器设置位置见图 1 图 2 控制器弹簧刚度  $k_d$ 取 100 kN/m,阻尼系数  $C_d$ 取为 2000 kN·s/m.悬挂楼层吊杆采用直径  $d = 150 \text{ mm}$ 的圆型钢吊杆,吊杆顶层与巨型梁铰接,与各悬挂楼层固接,钢吊杆弹性模量  $E = 2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ,砼泊桑比取 0.2,钢吊杆泊桑比取 0.3.采用空间模型进行计算,高层建筑楼层荷载近似取 15 kN/m<sup>2</sup> (含活载、恒载,恒载包括墙体重量),结构阻尼采用 Rayleigh 阻尼,控制器参数用弹簧阻尼单元考虑.对上述 2种结构方案分别进行随机振动分析,随机模型采用过滤的噪声模型(Kanai-Tajimi模型)见(21)式中取  $\gamma_g = 0.63$ ,  $k_g = 5\pi$ ,  $S_0 = 8.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^3$ .

图 3为顶层位移、加速度的谱密度函数,图中实线为悬挂阻尼控制结构体系谱密度函数,虚线为座承式巨型框筒结构体系谱密度函数.可以看出悬挂阻尼控制结构体系有效地削减了各谱密度的峰值.对谱密度函数进行积分,相应得到结构各层 2种结构体系情况下的位移、加速度的方差值.图 4为 2种体系的各楼层位移、加速度方差,实线为悬挂阻尼控制结构体系,虚线为座承式框筒结构体系.

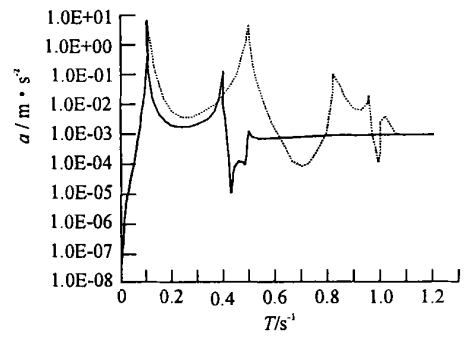
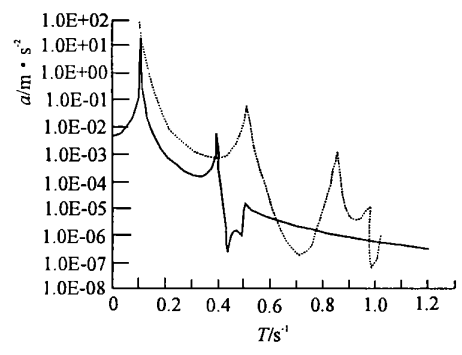


图 3 结构顶层谱密度

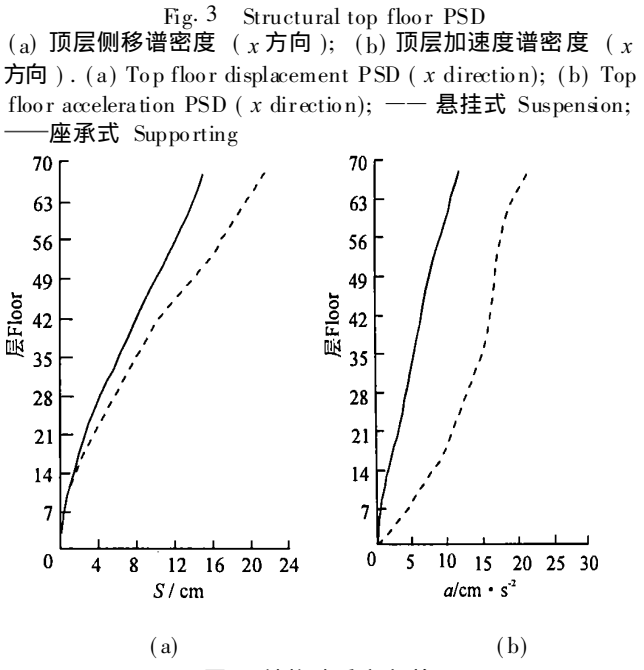


图 4 结构动反应方差

Fig. 4 Standard deviation of structural seismic response (a)楼层侧移方差(x方向);(b)楼层加速度方差(x方向). (a) Standard deviation of floor acceleration (x direction); (b) Standard deviation of floor displacement (x direction)——悬挂式 Suspension; ——座承式 Supporting

#### 4.2 时程分析

例 2 4层巨型框筒结构,平面尺寸及 2种结构布置方案同例 1,巨型框架柱尺寸为:2层以下 2.2 m  $\times$  2.2 m,21~42层 2 m  $\times$  2 m,筒体厚度为:2层以下 0.6 m,21~42层 0.3 m.输入 EL centro地震波进

行时程分析 (最大加速度为  $341.7 \text{ cm/s}^2$ ), 图 5 为种

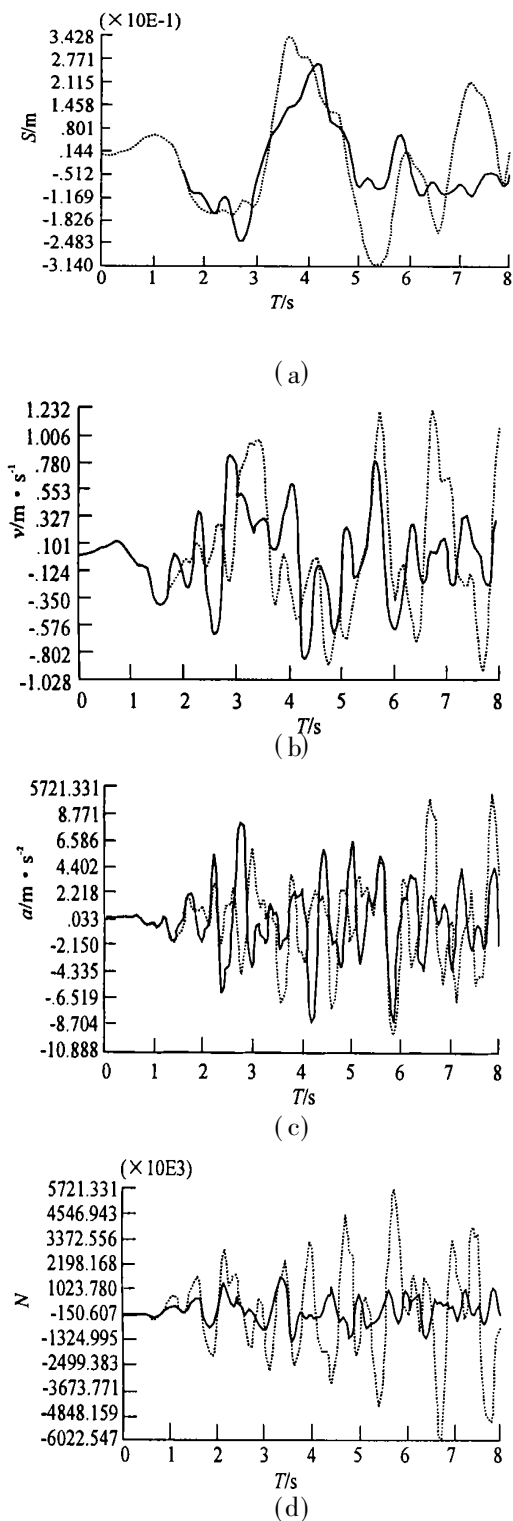


图 5 地震时程响应

Fig. 5 The seismic response time histories

(a) 顶层侧移时程 ( $x$  方向); (b) 顶层速度时程 ( $x$  方向); (c) 顶层加速度时程 ( $x$  方向); (d) 柱基础剪力时程 ( $x$  方向). (a) Top floor displacement ( $x$  direction); (b) time histories Top floor velocity time histories ( $x$  direction); (c) Top floor acceleration time histories ( $x$  direction); (d) Column base shear force time histories ( $x$  direction) — 悬挂式 Suspension; 一座承式 Supporting

结构体系方案的顶层侧移时程、速度时程、加速度时程和巨型柱基反力时程, 图中实线为巨型框-筒悬挂阻尼控制体系地震响应, 虚线为座承式巨型框-筒结构体系地震响应

## 5 影响参数及结论

通过各种参数下算例分析, 影响巨型框-筒悬挂阻尼控制效果的因素, 主要包括弹簧阻尼控制器的参数、悬挂楼层质量、吊杆的刚度及连接方式。悬挂结构质量越大减震效果越好, 因此, 悬挂楼层数量是重要影响参数之一, 吊杆刚度及联接方式对结构动力反应有重要影响, 当吊杆刚度较大时如采用与巨型框架固端联接, 其动力响应反而比非悬挂结构大, 当采用与巨型框架梁铰接与各悬挂楼层固接时, 吊杆刚度越小减震效果越好。阻尼控制器刚度在较小范围内随刚度增加其减震效果降低, 但阻尼控制器刚度越小, 悬挂楼层侧移越大, 合理设计阻尼控制器参数对悬挂楼层侧移及结构控制效果有重要影响。阻尼控制系统的减震效果有随控制器阻尼的增大而增强的趋势, 阻尼的影响还与控制器刚度密切相关, 因刚度增大抑制了悬挂楼层与筒体的相对位移, 影响了阻尼的发挥。

本文所采用的阻尼控制方法具有设计简单, 安装方便, 易于理论分析, 与座承式巨型框-筒结构相比, 有很好的减震特性, 与巨型框-筒悬挂结构相比, 减震效果进一步改善, 且大大减少了悬挂楼层的侧移和加速度, 有效克服悬挂楼层侧移太大的问题, 悬挂楼层位移及加速度可由弹簧阻尼控制参数及设置位置有效控制。巨型框-筒悬挂阻尼控制结构体系还有效解决了巨型框架悬挂结构抗侧移刚度低, 楼梯、电梯等设施不易布置等问题, 是一种易于实现的高层建筑结构体系, 因此, 巨型框-筒悬挂阻尼控制体系是一种具有发展前景的高层建筑结构体系。

## 参考文献

- 1 秦荣. 计算结构动力学. 桂林: 广西师范大学出版社, 1997.
- 2 秦荣. 计算结构力学. 北京: 科学出版社, 2001.
- 3 俞载道. 结构动力学基础. 上海: 同济大学出版社, 1987.
- 4 沈金, 唐锦春, 孙柄楠. 联体多结构振动控制体系的地震随机振动分析. 建筑结构, 2001, 31 (1): 11~15.
- 5 Xu X L, He Q, Ko J M. Dynamic response of damper-connected adjacent buildings under earthquake excitation. Engineering Structure, 1999, 21: 135~148.
- 6 张耀华, 梁启智, 付赣清. 巨型框架悬挂体系抗震原理及初步设计方法. 工程力学, 2000, 17 (2): 10~17.

(责任编辑: 黎贞崇)