

# 带伸臂桁架减振层高层结构抗风效果分析\*

汪梦甫<sup>†</sup>, 梁晓婷

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**建立某50层钢框架-混凝土核心筒三维空间结构模型,对原结构和装设伸臂桁架减振层的结构进行顺风向脉动风作用下的时程分析,探讨了减振层数量与布置位置对该结构抗风性能的影响.结果表明:合理的减振层数量及其优化设置可有效改善高层结构舒适度以及抗风性能;以层间位移角和结构顶层峰值位移为控制目标,将阻尼器连续布设在结构中部减振效果较好;以结构顶层峰值加速度为控制目标,将阻尼器连续布设在靠近结构顶部减振效果较好;在黏滞阻尼器的阻尼指数和总阻尼系数等参数不变的条件下,设置多道减振层高层结构的综合抗风性能优于设置单道带伸臂桁架减振层的高层结构.

**关键词:**高层结构;伸臂桁架;黏滞阻尼器;舒适度;抗风性能

**中图分类号:**TU352

**文献标志码:**A

## Analysis on Wind Resistance Effect of High-rise Building with Damped Outrigger Storeys

WANG Mengfu<sup>†</sup>, LIANG Xiaoting

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The three-dimensional finite element model of a 50-storey steel frame-concrete core wall structure was established. The along-wind induced vibration analysis of the structure with/without damping outrigger storeys under the simulating wind load was performed, and the influence of the number and location of the damping outrigger storey on wind resistance performance of the 50-storey steel frame-concrete core wall structure was discussed. The analysis results show that the rational number and optimal arrangement of the damping outrigger storey can effectively improve the comfort level and wind resistance performance of the tall steel frame-concrete core wall structure. If the maximum inter-storey displacement angle or the peak roof displacement is taken as control objectives, damping outrigger storeys should be installed near the central structure so as to obtain better vibration reduction effect. If the peak roof acceleration is taken as control objectives, damping outrigger storeys should be installed near the top of the structure so as to obtain better vibration reduction effect. Assuming that the total damping coefficients and other parameters of single viscous damper are unchanged, wind resistance performance of high-rise buildings with different damping layers are compared, and the results indicate that the total performance of the buildings with multiple damping layers is better.

**Key words:** tall buildings; outrigger; viscous damper; comfort; wind resistance performance

\* 收稿日期:2016-10-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278181), National Natural Science Foundation of China(51278181)

作者简介:汪梦甫(1965-),男,湖北通城人,湖南大学教授,博士生导师

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: wangmengfu@126.com

风引起对结构作用的风荷载,是各种工程结构的重要设计荷载.近年来,随着我国建设事业的快速发展,愈来愈多的高层建筑在各地兴建<sup>[1]</sup>.在风荷载作用下,这些高层建筑发生振动,当振动达到一定限值时,会使结构的安全和使用性能受到影响,可见,高层结构风振控制很重要.传统设计方法通过增大构件截面尺寸、设置加强层等方法来提高结构抗风性能,但这种硬减振的方式同时也增大了结构的刚度,减小了结构的自振周期,带来的抗风效果并不明显,而且会导致材料费用和施工费用的增加,不够经济适用.对于风荷载引起结构振动,除了采取调整结构布置和结构形式等方法以更好地发挥结构功能以外,采用振动控制来减小结构振动的方法已经愈来愈受到重视,振动控制研究在工程界正处于迅速发展阶段<sup>[2]</sup>.Yao<sup>[3]</sup>首先提出在建筑结构中应用振动控制的概念,通过在结构某些部位安装控制系统,由其与结构共同抵御地震、强风或其他外部荷载的动力作用,通过主动或被动地对结构施加控制力或通过调整结构的质量、阻尼和刚度等动力特性,来调谐和减小结构动力反应,从而使结构满足相应的使用要求<sup>[4]</sup>.此方法是对传统结构减振方法的重大突破,融合了各学科的先进技术<sup>[5]</sup>.

黏滞阻尼器对温度不敏感,受激励频率影响小,阻尼力与位移异向,且节点的局部受力比其他类型阻尼器有利<sup>[6]</sup>.Smith等<sup>[7]</sup>提出对高层结构加设刚性伸臂,伸臂末端与柱分离,在两者之间加设竖向布置的阻尼器,在风荷载或地震作用时,结构可充分利用外围柱与伸臂之间由于弯曲而产生的竖向位移差.杨晗琦等<sup>[8-9]</sup>通过对高层建筑安装刚性伸臂式布置黏滞阻尼器,得出刚性伸臂减振层起到了放大层间位移的效果,可有效抵抗地震作用的结论.基于以上研究,本文采用谐波叠加法模拟某高层建筑脉动风场,建立有限元模型,研究伸臂桁架减振层的抗风性能.

## 1 脉动风数值模拟

### 1.1 基础理论

谐波叠加法是由Shinozuka等<sup>[10]</sup>提出的模拟随机风速时程的一种经典方法,最初用来模拟一维单变量平稳高斯随机过程,后来发展为可模拟多变量、非平稳随机过程.

风场运动是关于时间和空间相关的各向非均匀随机过程,在结构抗风中通常将其假定为三维多变量平稳随机过程.在笛卡尔坐标系中风场运动表示为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} U = \bar{U}(z) + u(y, z, t) \\ v = v(y, z, t) \\ w = w(y, z, t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $U$ 为顺风向风速( $X$ 方向); $\bar{U}(z)$ 为顺风向平均风速( $X$ 方向); $u, v, w$ 分别为顺风向( $X$ 方向)、横风向( $Y$ 方向)和垂向( $Z$ 方向)脉动风速分量; $t$ 为时间.

平均风速 $\bar{U}(z)$ 是描述风场运动沿高度变化规律的重要指标,一般认为它符合对数率<sup>[11]</sup>:

$$\bar{U}(z) = \frac{1}{k} u_* \ln(z/z_0) \quad (2)$$

式中: $k=0.4$ ,称为Kaman常数; $z_0$ 为地面粗糙度; $u_*$ 为摩擦速度.

风场的能量特征是以功率谱密度函数来描述,本文采用Kaimal谱表示为<sup>[12]</sup>:

$$\frac{nS(f)}{u_*^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \quad (3)$$

式中: $S(f)$ 为功率谱密度; $n$ 为频率; $f = \frac{nz}{U(z)}$ 为无量纲Monin坐标.

自然风场对结构的脉动作用的空间相干性是计算节点空间距离的函数,通常用相干系数 $\text{Coh}(\omega)$ 表示,相干系数采用Davenport形式为<sup>[11]</sup>:

$$\text{Coh}(\omega) = \exp\left[-C \frac{\omega r}{2\pi U(z)}\right] \quad (4)$$

式中: $C$ 为衰减系数; $\omega$ 为圆频率; $r$ 为计算点间的距离.

谐波叠加法通过一系列的三角余弦函数的叠加模拟随机过程样本,由随机振幅和随机相位的谐波振动的线性叠加而形成,当模拟点数较多时,通常把快速傅里叶变化(FFT)技术融入模拟过程以提高模拟效率.

### 1.2 利用MATLAB软件模拟脉动风场

#### 1.2.1 研究背景

某钢框架-混凝土核心筒结构共50层,层高3.5m,总高度175m,结构平面为正方形,长和宽均为30m,外框架尺寸为10m×10m,框架边柱尺寸为750mm×750mm×65mm,角柱尺寸为1000mm×1000mm×75mm,主钢梁尺寸为700mm×300mm×13mm×24mm,均采用Q390钢;混凝土核心筒外围墙厚500mm,中间隔墙厚300mm,混凝土强度等级为C40;楼板为压型钢板-混凝土组合板,混凝土强度等级为C30;基本设防烈度为7度,结构满足抗震要求,为住宅类建筑,地面粗糙度类别为B类,10年风荷载重现期下10m高处风压为0.4kN/m<sup>2</sup>,高宽比达到5.83,由风引起结构的振动较明显.结构平面图与立面图如图1所示.利用MIDAS Gen软件建立结构计算模型,如图2所示,模型中梁、柱构件采用梁单元,楼板采用薄板单元,剪

力墙采用板单元,板单元网格划分尺寸为 1 m;主钢梁与外围框架柱刚接,与核心筒剪力墙铰接。

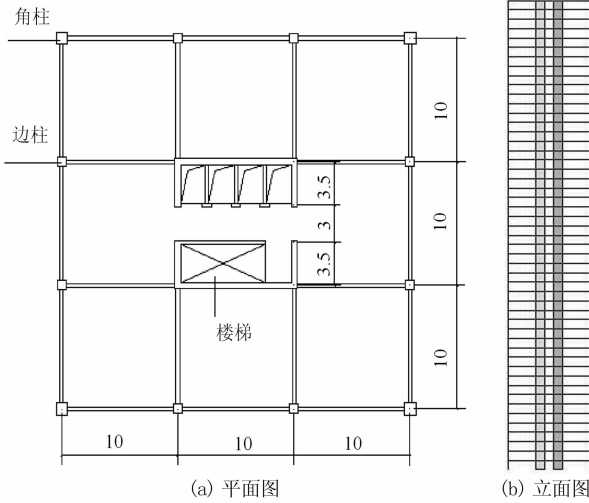


图 1 结构平面图与立面图

Fig. 1 Plane and elevation layout of the structure

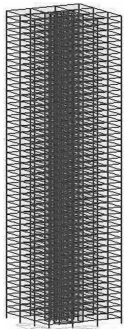
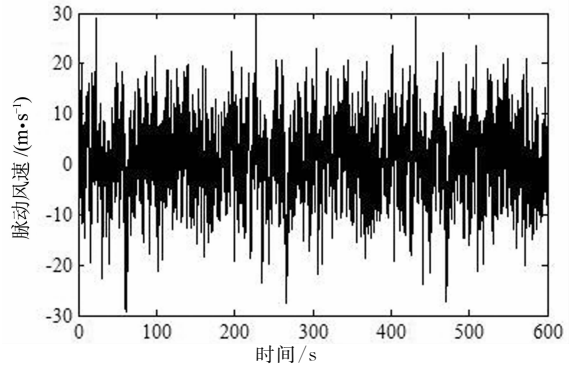


图 2 结构计算模型

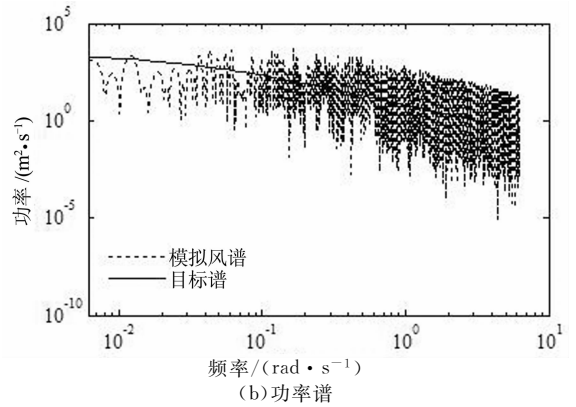
Fig. 2 Structural calculation model

### 1.2.2 脉动风场数值模拟

本文中的建筑结构高 175 m,地面粗糙度  $z_0 = 0.02$ ,10 年风荷载重现期下 10 m 高处平均风速为 25.3 m/s,风场模拟点为 50 个,模拟点间距 3.5 m,频率采样点数  $N=2^{10}$ ,上限频率为  $2\pi$ ,时程曲线取前 10 min,采样时距为 0.1 s.采用谐波叠加法,利用 MATLAB 有限元软件进行结构脉动风场模拟,得到结构的脉动风速曲线.为了验证模拟的精度,将模拟出来的脉动风速的功率谱与目标谱——Kaimal 谱进行对比,通过二者的拟合程度来判断其相关性的好坏,进而验证用谐波叠加法模拟风荷载时程的效果.图 3~图 4 分别为建筑第 10 层和 50 层高度处脉动风速时程曲线图和模拟风谱与目标谱对比图.由对比图可以看出,采用谐波叠加法模拟出来的脉动风速功率谱与目标谱拟合良好,仅在低频区有一定误差,表明该模拟方法具有较高的精度.可知,本文所采用的谐波叠加法模拟的脉动风场适用于结构风致效应的分析。

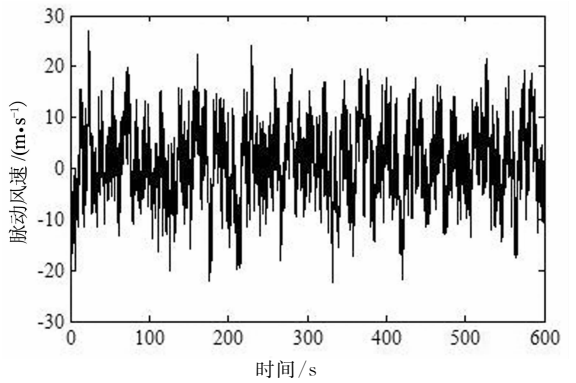


(a) 脉动风速时程

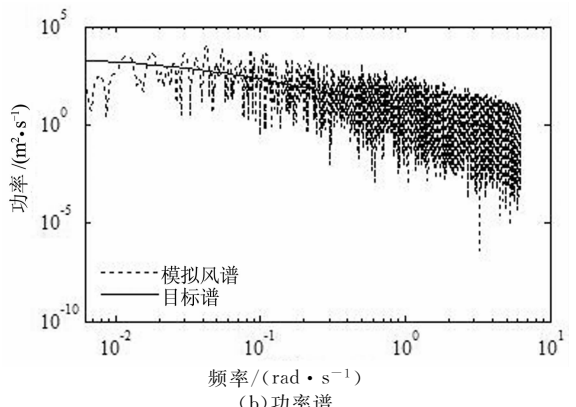


(b) 功率谱

图 3 第 10 层高处脉动风速时程与目标自功率谱对比  
Fig. 3 The fluctuating wind speed curve and comparing of auto power spectrum at 10<sup>th</sup> storey



(a) 脉动风速时程



(b) 功率谱

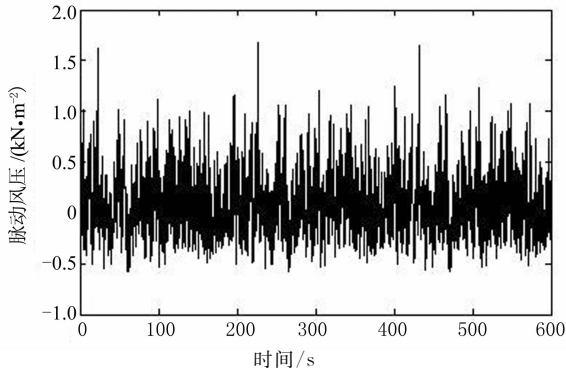
图 4 第 50 层高处脉动风速时程与目标自功率谱对比  
Fig. 4 The fluctuating wind speed curve and comparing of auto power spectrum at 50<sup>th</sup> storey

利用脉动风速推导脉动风压计算公式如下<sup>[13]</sup>:

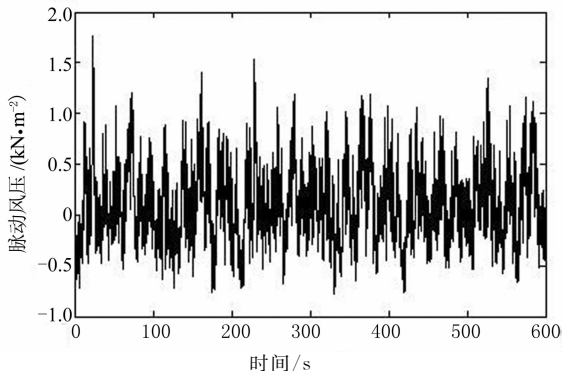
$$w(z,t) = \rho \bar{v}(z)v(z,t) + \frac{1}{2}\rho \bar{v}(z,t)^2 \quad (5)$$

式中:  $\rho = 1.25$ , 为空气密度;  $\bar{v}(z)$  为高度  $z$  处的平均风速;  $v(z,t)$  为高度  $z$  处的脉动风速.

图 5(a)和图 5(b)分别为建筑第 10 层和 50 层高度处顺风向脉动风压时程曲线.



(a) 第 10 层高处脉动风压曲线



(b) 第 50 层高处脉动风压曲线

图 5 脉动风压时程曲线

Fig. 5 The fluctuating wind pressure time-history curves

## 2 结构的动力特性

### 2.1 结构振型

利用谐波叠加法模拟 3 次脉动风时程,对结构进行 3 次顺风向脉动风作用下的时程分析,每层均设加载层,每层风荷载面积取该层结构上下各一半,结构的阻尼比为 0.02,运行分析得到该结构的风振响应,计算前 20 阶振型,其前 3 阶振型示意图如图 6 所示.框-筒结构 1 阶振型表现为沿 X 轴方向的平动,2 阶振型表现为沿 Y 轴方向的平动,3 阶振型表现为沿 Z 轴方向的扭转(风荷载沿 X 方向作用时).

### 2.2 计算结构顶点加速度

在脉动风荷载沿 X 轴作用(X 轴顺风向)和沿 Y 轴作用(Y 轴顺风向)下,通过软件计算分析得到结构前 10 min X 轴、Y 轴顺风向顶点加速度时程曲线如图 7 所示(第 1 次脉动风作用时).3 次脉动风

作用下结构 X 轴、Y 轴顺风向顶点最大加速度均值分别为  $0.1688 \text{ m/s}^2$  和  $0.1393 \text{ m/s}^2$ .

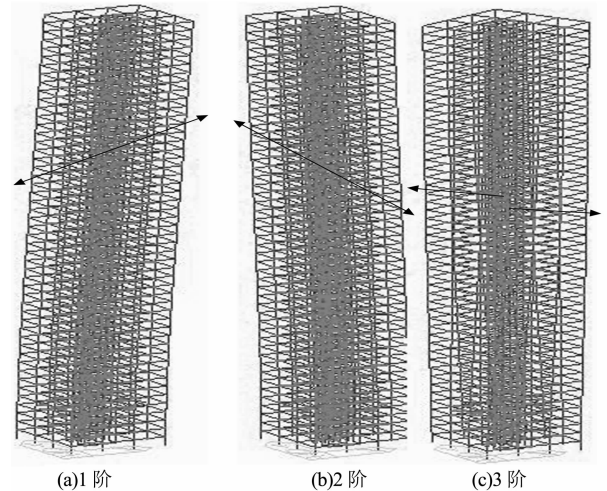
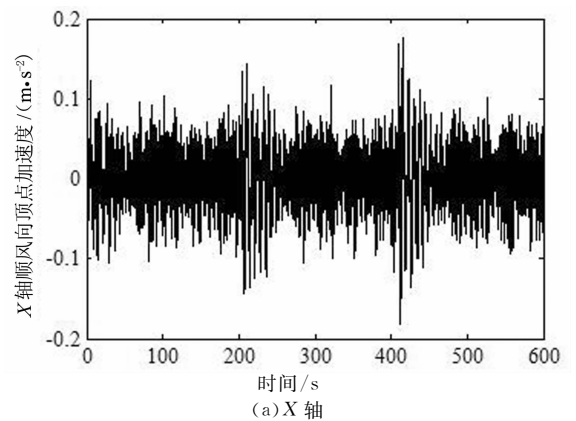
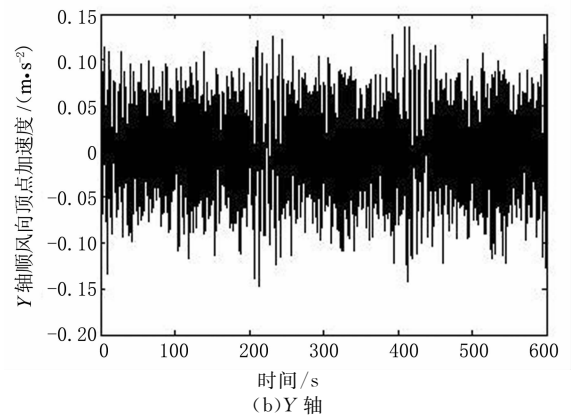


图 6 结构前 3 阶振型图

Fig. 6 Mode shapes of the structure



(a) X 轴



(b) Y 轴

图 7 结构顶点加速度时程曲线

Fig. 7 Roof acceleration time-history curves

### 2.3 结构舒适度评价

人体舒适度评价标准主要有 3 种<sup>[14]</sup>:一是最大加速度标准,二是限值超越标准,三是暴风重现标准.我国和加拿大等国家都采用第 1 种标准,据我国《高层建筑钢-混凝土混合结构设计规程》<sup>[15]</sup>中规定,在重现期为 10 年的风荷载作用下,高度超过 150 m 高层建筑混

合结构,住宅、公寓类结构的顶点最大加速度不得超过  $0.15 \text{ m/s}^2$ ,办公楼、旅馆不得超过  $0.25 \text{ m/s}^2$ 。本文中所研究的高层建筑为住宅类建筑,3次脉动风作用下 X 轴顺风向顶点最大加速度均值  $0.1688 \text{ m/s}^2 > 0.15 \text{ m/s}^2$ ,不满足规范要求。

### 3 单道减振层结构抗风性能

#### 3.1 伸臂桁架式黏滞阻尼器布置

带伸臂桁架减振层高层结构采取在原结构中布置伸臂桁架式黏滞阻尼器来实现,伸臂桁架采用方钢管,尺寸为  $700 \text{ mm} \times 700 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。每层布置 16 个黏滞阻尼器,其理论模型采用 Maxwell 模型,布置方式为在伸臂桁架末端与外围框架柱间近似竖向布置。带阻尼器伸臂桁架减振层布置图如图 8 所示。

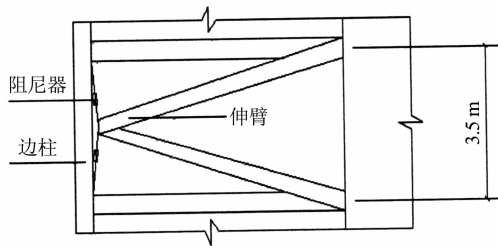


图 8 带阻尼器减振层布置图

Fig. 8 The layout of damping outrigger story

#### 3.2 减振层布置位置对结构抗风性能的影响

为了研究伸臂桁架减振层的最优布置位置,在结构的第 5~50 层布置减振层,减振层位置变化幅度为 5 层,黏滞阻尼器的阻尼系数取  $12\,000 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ ,最大设计出力为  $1\,500 \text{ kN}$ ,阻尼指数取 0.5,参考速度取  $1 \text{ m/s}^2$ ,连接弹簧刚度取阻尼系数的 200 倍。

由于 X 轴顺风向风致响应大于 Y 轴顺风向风致响应,因此在本节和后文中仅给出风荷载沿 X 向作用时,结构的风致响应。对各模型进行 3 次脉动风作用下的时程分析,得到各减振层布置方案下,结构 X 轴顺风向顶点位移均值  $S_D$ 、最大层间位移均值  $S_0$ 、X 向底部剪力均值  $V_X$ 、底部弯矩均值  $M_X$  和顶点最大加速度均值  $A$  如表 1 所示。

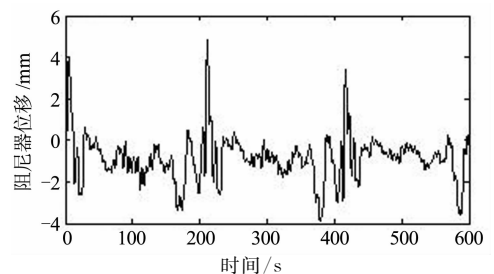
由表 1 可知,当单道减振层布置在结构的第 5 层及以下时,对结构顶点位移以及最大层间位移的减小程度不够明显,这是由于结构底部的剪切变形和位移很小,不能使伸臂桁架减振层的黏滞阻尼器的减振性能得到充分发挥。同时,并非减振层位置越靠近顶层,结构顶点位移和层间最大位移就越小。当减振层位于 20~35 层时,对结构的顶点位移和最大层间位移的减

小幅度优于其他方案,而结构底部剪力随减振层位置变化波动较大,底部弯矩随减振层位置不同而变化的幅度较底部剪力要小一些,当减振层靠近框-筒结构中上部时,底部弯矩减小程度最大。

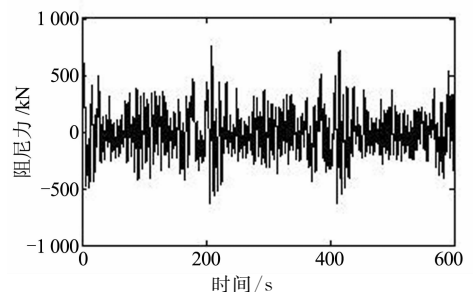
表 1 单道减振层结构风致响应  
Tab. 1 Wind-induced response of single damping layer structure

位置 / 层	$S_D$ / cm	$S_0$ / mm	$V_X$ / kN	$M_X$ / (kN · m)	$A$ / (m · s <sup>-2</sup> )
框筒	12.097	3.036	4 119	420 367	0.168 8
5	9.254	2.390	2 972	267 067	0.109 2
10	7.058	1.846	2 246	213 200	0.088 5
15	5.901	1.580	2 878	192 000	0.110 9
20	5.040	1.366	2 754	174 067	0.103 7
25	4.924	1.420	2 594	174 700	0.123 7
30	4.881	1.254	2 195	174 900	0.101 7
35	5.253	1.381	2 599	195 300	0.104 6
40	5.924	1.622	2 759	220 033	0.083 6
45	7.470	2.054	2 877	267 100	0.081 4
50	7.710	2.109	3 015	273 233	0.083 7

同时,对结构安装带伸臂桁架减振层后,结构 X 轴顺风向峰值加速度均值均小于规范所规定的最大加速度限值  $0.15 \text{ m/s}^2$ ,满足舒适度要求。并且,结构顶点最大加速度随减振层位置变化波动较大,总的来说,减振层越靠近顶层,对顶点加速度控制越有利。单道伸臂桁架最佳布置位置为第 45 层,3 次脉动风作用下结构顶点峰值加速度减振程度均达到 48% 以上,此时第 1 次脉动风作用下耗能效果最佳的阻尼器位移和阻尼力时程曲线如图 9 所示。



(a) 阻尼器位移



(b) 阻尼力

图 9 阻尼器位移和阻尼力时程曲线  
Fig. 9 Displacement and damping force time-history curves of the viscous damper

从上述分析可知,如果要使结构的安全性能更好,以层间位移角和结构顶层峰值位移为控制目标,将阻尼器连续布设在结构中部减振效果较好;如果要使结构舒适性能更好,以结构顶点峰值加速度为控制目标,将阻尼器连续布设在靠近结构顶部减振效果较好。

## 4 多道减振层结构抗风性能

### 4.1 两道减振层结构

当布置两道减振层时,由第3节发现,布置单道减振层其位置在5层以下时是较为不利的,故第1道自第10层起开始布置,考虑到相邻两道减振层之间需要间隔一定的楼层高度,因此第2道减振层与首道减振层设定为需相距10层及以上,各减振层位置变化幅度取为5层,每道减振层的阻尼器数量和安装方式与第3.1节相同,阻尼器总阻尼系数和阻尼指数等参数不变,单个阻尼器阻尼系数取 $6\,000\text{ kN}\cdot\text{s}/\text{m}$ ,最大设计出力为 $750\text{ kN}$ 。对各减振层布置方案下的结构进行快速时程反应分析,得到3次脉动风作用下结构X轴顺风向顶点位移均值 $S_D$ 、最大层间位移均值 $S_0$ 、X向底部剪力均值 $V_X$ 、底部弯矩均值 $M_X$ 和顶点最大加速度均值 $A$ 如表2所示。

表2 两道减振层结构风致响应  
Tab.2 Wind-induced response of two damping layers structure

位置/层	$S_D$ /cm	$S_0$ /mm	$V_X$ /kN	$M_X$ /(kN·m)	$A$ /(m·s <sup>-2</sup> )
10,20	5.538	1.462	1 831	171 690	0.085 2
10,25	5.221	1.356	1 853	166 163	0.087 1
10,30	5.172	1.314	1 803	164 233	0.082 7
10,35	5.270	1.337	1 900	171 767	0.075 5
10,40	5.485	1.429	1 983	181 333	0.080 8
10,45	5.828	1.541	1 851	190 400	0.069 6
10,50	6.018	1.594	1 908	195 567	0.069 2
15,25	4.869	1.283	2 217	165 833	0.086 1
15,30	4.802	1.227	2 216	163 760	0.082 5
15,35	4.818	1.230	2 526	166 393	0.099 8
15,40	4.946	1.286	2 368	169 933	0.083 5
15,45	5.205	1.385	2 256	175 733	0.069 2
15,50	5.355	1.434	2 218	180 067	0.071 4
20,30	4.683	1.201	2 205	165 900	0.090 8
20,35	4.664	1.165	2 326	165 333	0.084 9
20,40	4.705	1.201	2 296	167 500	0.077 4
20,45	4.931	1.318	2 317	173 333	0.068 5
20,50	5.104	1.382	2 387	176 867	0.069 1
25,35	4.654	1.145	2 059	168 867	0.079 6
25,40	4.653	1.166	2 166	168 767	0.081 9
25,45	4.901	1.267	2 125	172 500	0.068 4
25,50	5.068	1.333	2 183	175 133	0.069 7
30,40	4.881	1.238	2 105	175 033	0.078 4
30,45	5.032	1.283	2 091	176 800	0.067 5
30,50	5.140	1.312	2 154	179 367	0.067 4
35,45	5.543	1.475	2 222	200 300	0.070 8
35,50	5.619	1.490	2 220	200 900	0.068 5
40,50	6.642	1.812	2 525	237 833	0.068 8

由表2可知,布置2道伸臂桁架减振层时,结构顶点位移和层间最大位移减小程度并非都优于单道减振层,但可以看出结构顶点位移和层间最大位移的变化趋势变得很平缓,不会像单道减振层时沿结构竖向位置不同而发生剧烈变化。当2道减振层都位于20~35层时,其对结构顶点位移和层间最大位移的减小作用要优于其他布置方案,3次脉动风作用下减小幅度均达45%以上。

同时,当布置2道减振层时,结构底部剪力、底部弯矩和顶点最大加速度的变化趋势也明显变缓,结构顶点峰值加速度均值虽然并非都小于布置单道减振层时的数值,但是从表中可以看出,任何一种布置方案下结构顶点加速度峰值均值均小于规范所规定的限值,满足舒适度要求,当第2道减振层位于45~50层时,对结构顶点加速度控制要优于其他布置方案,最优布置方案为首道减振层位于第40层,第2道减振层位于第50层,3次脉动风作用下降低幅度均达到51%以上,减振效果可观。

总的来说,当布置2道减振层时,结构的抗风性能综合指标要优于单道减振层结构。

### 4.2 3道减振层结构

通过3.2节和4.1节中对减振层布置位置的探讨可知,减振层位于结构中上部时,结构的抗风性能较好,因此布置3道减振层时,第1道从第20层开始布置,布置规律与4.1节相同。单个阻尼器的阻尼系数取 $4\,000\text{ kN}\cdot\text{s}/\text{m}$ ,最大设计出力为 $500\text{ kN}$ ,其他参数取值不变。减振层的竖向布置方案及其相应结构在3次脉动风荷载沿X向作用时,结构的顶点位移均值 $S_D$ 、最大层间位移均值 $S_0$ 、X向底部剪力均值 $V_X$ 、底部弯矩均值 $M_X$ 和顶点最大加速度均值 $A$ 如表3所示。

表3 3道减振层结构风致响应  
Tab.3 Wind-induced response of three damping layers structure

方案	布置位置/层	$S_D$ /cm	$S_0$ /mm	$V_X$ /kN	$M_X$ /(kN·m)	$A$ /(m·s <sup>-2</sup> )
1	20,30,40	4.647	1.150	2 122	165 367	0.072 9
2	20,30,45	4.703	1.184	2 050	165 967	0.066 6
3	20,30,50	4.755	1.208	2 024	166 833	0.064 8
4	20,35,45	4.784	1.225	2 176	168 967	0.065 7
5	20,35,50	4.841	1.241	2 136	169 567	0.064 9
6	20,40,50	5.093	1.340	2 205	177 767	0.064 8
7	25,35,45	4.777	1.208	2 047	169 600	0.064 9
8	25,35,50	4.833	1.220	2 012	170 167	0.065 4
9	25,40,50	5.100	1.324	2 122	178 733	0.065 6
10	30,40,50	5.275	1.369	2 076	192 133	0.066 2

由表3可知,当布置3道减振层时,其单个指标值虽然不一定都小于布置单道减振层时的最优值,

但是都已非常接近或小于仅布置一道减振层时的最优值,说明其综合抗风性能是最好的。同时,相较于阻尼器均设置于20层以上的2道减振层结构,其各个参数的变化幅度不大,因此在工程应用中可根据结构的高度和实际情况自行选择是否需要布置3道或3道以上减振层。

## 5 结 论

通过采用谐波叠加法对某175 m高钢框架-混凝土核心筒结构进行脉动风场模拟,利用有限元软件MIDAS Gen建立结构的三维模型,对原结构和加设带伸臂桁架减振层结构进行3次顺风向脉动风荷载作用下的时程分析,得到各结构的风致响应,结论如下:

1)利用谐波叠加法模拟出结构的脉动风场,结构各层模拟出的脉动风谱与目标谱拟合良好,基本覆盖了本工程自振频率所处的范围,说明该模拟方法精度较高。

2)对原框-筒结构进行3次顺风向脉动风荷载作用下时程分析,得到结构前3振型和顶点加速度时程,发现结构在X轴顺风向作用下顶点最大加速度均值超过我国规范规定的10年风荷载重现期下结构顶点最大加速度限值,不符合舒适度要求。

3)对设置单道减振层结构进行3次脉动风荷载顺风向作用下的时程分析,并对减振层布置位置进行探讨。结果表明:合理布置伸臂桁架减振层可有效抵抗风作用下结构的振动;以层间位移角和结构顶点最大位移为控制目标,将阻尼器连续布设在结构中部减振效果较好;以结构顶点峰值加速度为控制目标,将阻尼器连续布设在靠近结构顶部减振效果较好。

4)对设置多道减振层结构进行3次脉动风荷载顺风向作用下的时程分析可知,布置多道减振层时,虽然单个指标的减小程度并非都优于单道减振层结构,但总的来说,结构的综合抗风性能更好。

## 参考文献

- [1] 李正农,郝艳峰,刘申会.不同风场下风效应的风洞试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(7):9-15.  
LI Z N,HAO Y F,LIU S H. Wind tunnel test of tall building wind effect in different geomorphologic terrain categories[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2013,40(7):9-15. (In Chinese)
- [2] 张相庭.结构风工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2006:174-181.
- [3] ZHANG X T. Structural wind engineering[M]. Beijing: Architecture & Building Press,2006:174-181. (In Chinese)
- [4] YAO J T P. Concept of structural control[J]. Journal of Structure Division,ASCE,1972,98(7):1567-1574.
- [5] 李宏男.结构振动与控制[M].北京:中国建筑工业出版社,2005:1-15.  
LI H N. Structural vibration and control[M]. Beijing: Architecture & Building Press,2005:1-15. (In Chinese)
- [6] 沈祖炎,王烨华,李元齐.论结构创新[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(1):1-11.  
SHEN Z Y,WANG Y H,LI Y Q. Structure innovation[J]. Journal of Tongji University(Natural Sciences),2010,38(1):1-11. (In Chinese)
- [7] 钟栋青,王曙光,刘伟庆.在振动台模型试验中黏滞阻尼器的设计方法[J].地震工程与工程振动,2011,31(6):191-195.  
ZHONG D Q,WANG S G,LIU W Q. Design method of viscous dampers in shaking table model test[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2011,31(6):191-195. (In Chinese)
- [8] SMITH R J,WILLFORD M R. The damped outrigger concept for tall buildings[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings,2007,16(11):501-507.
- [9] 杨哈琦,汪梦甫,沈蒲生.带刚性伸臂减振层高层结构抗震效果分析[J].地震工程与工程振动,2015,35(2):114-123.  
YANG H Q,WANG M F,SHEN P S. Seismic effect analysis of high-rise building with damped rigid outrigger storeys[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2015,35(2):114-123. (In Chinese)
- [10] 汪梦甫,杨哈琦.带刚性伸臂减振层高层结构抗震性能对比与分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(3):66-74.  
WANG M F,YANG H Q. Comparative analysis of seismic performance on high-rise building with damped rigid outrigger storeys[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2016,43(3):66-74. (In Chinese)
- [11] SHINOZUKA M,DEODATIS G. Simulation of stochastic process by spectral representation[J]. Applied Mechanics Review,1991,44(4):191-203.
- [12] 徐赵东.土木工程常用软件分析与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2010:125-132.  
XU Z D. Application and analysis of common software in civil engineering[M]. Beijing: Architecture & Building Press,2010:125-132. (In Chinese)
- [13] SIMIU E. Wind spectra and danamic along wind response[J]. Journal of Structure Division, ASCE, 1974, 100(9):1897-1910.
- [14] ASCE 7-02 Minimum design loads for buildings and other structures[S]. Reston:Published by the American Society of Civil Engineers,2002:23-76.
- [15] 舒兴平,贺清荣,卢倍嵘.远大小天城高层钢结构顺风向舒适度分析[J].工业建筑,2015,45(10):31-35.  
SHU X P,HE Q R,LU B R. Analysis of along-wind comfort for Xiao Tiancheng fabricated tall steel structure[J]. Industrial Construction,2015,45(10):31-35. (In Chinese)
- [16] CECS 230:2008 高层建筑钢-混凝土混合结构设计规程[S].北京:中国计划出版社,2008:13-16.  
CECS 230:2008 Specification for design of steel-concrete structure of tall buildings[S]. Beijing:China Planning Press,2008:13-16. (In Chinese)