

# Study on Wind-Induced Vibration Control of Mega Super-Tall Building\*

Dayang Wang

School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou  
Email: wadaya2006@yahoo.com.cn

Received: Jan. 24<sup>th</sup>, 2013; revised: Feb. 20<sup>th</sup>, 2013; accepted: Mar. 2<sup>nd</sup>, 2013

Copyright © 2013 Dayang Wang. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** A three-dimensional mega super-tall building model with height of 192 m was built by ANSYS platform. Two kinds of damper equipments (viscous damper and viscoelastic damper) were selected and installed in the building so as to investigate the control effect of the structure in dynamic wind-induced vibration. Totally 27 analysis cases considering different basic wind pressures, wind directions and control equipments were conducted based on the finite element model of the building and control effect of structural displacement, internal force and top acceleration was studied and discussed in detail. The results show that velocity-dependent dampers can dissipate energy imported by wind, attenuate dynamic response, reduce mutation of story-acceleration response and inter-story displacement effectively. The vibration control technology provides a feasible and effective way of controlling wind-induced responses and safety and comfort of mega super-tall building can be improved and ensured.

**Keywords:** Mega Super-Tall Building; Wind-Induced Vibration Control; Viscous Damper; Viscoelastic Damper; Control Effect

## 超高层巨型结构风振控制效果研究\*

汪大洋

广州大学土木工程学院, 广州  
Email: wadaya2006@yahoo.com.cn

收稿日期: 2013年1月24日; 修回日期: 2013年2月20日; 录用日期: 2013年3月2日

**摘要:** 基于大型通用有限元软件 ANSYS 建立了一个 192 m 超高层巨型结构的三维有限元模型, 针对无控和有控(分别设置粘滞阻尼器和粘弹性阻尼器)两种情况, 系统分析了超高层巨型结构在不同风压、风速角和控制装置等 27 种工况下的振动控制效果, 研究了减振控制装置对结构顺风向侧移响应、构件剪力和弯矩响应及顶点峰值加速度响应的影响。研究结果表明, 粘滞阻尼器和粘弹性阻尼器具有大量耗散风振输入能量、有效衰减结构动力响应、降低风振作用下结构层加速度和层间侧移沿高度方向突变的能力, 能够降低风振作用下结构层加速度和层间侧移沿高度方向的突变, 进而保证超高层巨型结构的安全、舒适使用性能。

**关键词:** 超高巨型层结构; 风振控制; 粘滞阻尼器; 粘弹性阻尼器; 减振效果

### 1. 引言

自美籍华裔学者姚治平将控制技术引入到结构

工程界以来, 经过国内外学者三十多年的致力研究, 结构振动控制技术已广泛应用于建筑工程的各个领域, 并取得了卓越的成效, 理论和实践研究表明该技术可有效降低结构在强风荷载下的动力响应, 明显提

\*资助信息: 广东省自然科学基金项目(S2012040007215), 中国博士后科学基金项目(2012M521604), 广东省教育厅科研项目(2012LYM 0104)。

高和改善结构的抗风能力和舒适度<sup>[1,2]</sup>。文献[3]对高耸结构风振控制的研究现状作了综述,指出了在土木工程中应用结构控制方法来设计工程结构的广阔前景;文献[4]通过系统的理论分析和试验研究,指出水箱减振装置对控制高柔结构的风振反应是最有效的重要结论;文献[5]应用现代控制论探讨了结构风振型控制的一般计算理论及方法,并在此基础上对高层建筑的几种控制方法提出了其用于风振控制的设计方法,并将其应用于厦门九州大厦和上海气象塔的抗风设计;文献[6-9]通过试验进一步探讨了U型水箱用于风振控制的特点,改进了计算方法,讨论了水箱有关参数对风振控制效果的影响,取得了良好效果,并对珠海金山大厦、台湾 T&C Tower 大楼、南京电视塔实施新方式的风振控制设计,取得了良好的效果;文献[10,11]亦对设置速度相关型阻尼器的高层建筑进行了减振控制分析研究,验证了减振控制装置对高层结构风致振动控制的有效性。然而,针对巨型高层建筑结构风致振动控制方面的研究文献还较为少见,本文针对某超高层巨型钢结构体系,研究被动控制装置(粘滞阻尼器和粘弹性阻尼器)对巨型结构风致振动控制的减振效果,并探讨控制装置对结构位移、加速度和构件内力的影响规律。

## 2. 超高层巨型结构有限元模型

### 2.1. 工程结构概况

某超高层巨型结构总高 48 层、192 m,层高均为 4 m,结构平面呈方形,平面尺寸为 49 m × 49 m,两个方向均为 7 跨(每跨 7 m)的结构平面布置。结构由四根环形封闭巨型梁和四根巨型柱组成,巨型梁分别为位于 12、24、36、和 48 层,巨型梁所占高度为一层楼高;巨型柱分别设置在结构的四个角上。巨型柱、一般柱均采用箱形截面形式,巨型柱截面尺寸(单位均为 mm)依次为 900 × 900 × 50 × 50 (1~12 层)、900 × 900 × 40 × 40 (13~24 层)、800 × 800 × 35 × 35 (25~36 层)和 700 × 700 × 35 × 35 (37~48 层),一般柱截面尺寸为 800 × 800 × 40 × 40 (1~24 层)、700 × 700 × 30 × 30 (25~48 层);巨型梁、一般梁均采用 H 型钢截面形式,巨型梁截面尺寸为 800 × 300 × 19 × 35 (1~48 层),一般梁截面尺寸为 700 × 300 × 16 × 28 (1~48 层);结构中支撑的截面形式同样采用 H 型截面形式,截面尺

寸均为 300 × 300 × 18 × 18。

### 2.2. 三维有限元模型建立

模型建立及单元选取是进行结构三维有限元分析的关键。目前用于结构分析的主要模型是剪切型模型、弯剪型模型、杆系模型和单柱模型,而杆系模型能够较好地分析结构的受力和破坏状态。因此,本文基于大型通用有限元软件 ANSYS 平台,以杆系模型为基础,引入三维梁单元(梁、柱单元采用 BEAM188 和 BEAM4 单元)、壳单元(楼板单元采用 SHELL63 单元)和阻尼单元(被动阻尼器采用 COMBIN14 单元),对超高层巨型结构进行风致动力响应分析,图 1 显示了超高层巨型结构的三维有限元模型。表 1 给出了有限元模型前 16 阶自振周期和频率。

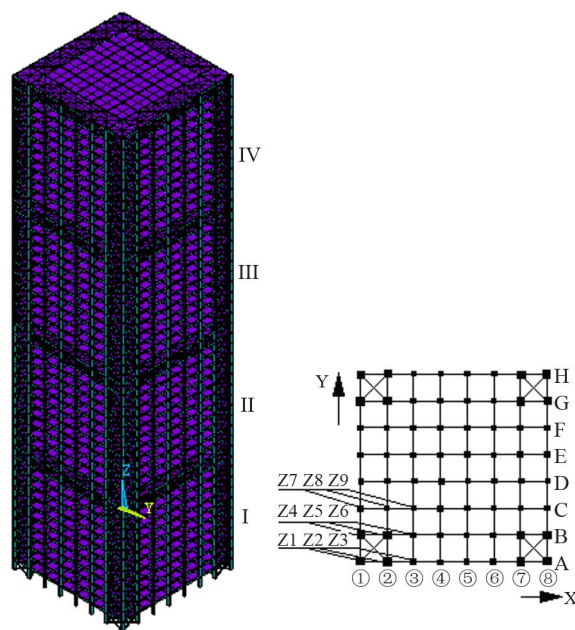


Figure 1. Three-dimensional finite element model  
图 1. 三维有限元模型

Table 1. The former 16 frequencies and periods of model structure  
表 1. 模型前 16 阶频率和周期

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
频率 (Hz)	0.210	0.211	0.290	0.660	0.661	0.882	1.241	1.242
周期(s)	4.761	4.739	3.448	1.515	1.513	1.134	0.805	0.805
阶数	9	10	11	12	13	14	15	16
频率 (Hz)	1.583	1.814	1.815	2.253	2.310	2.709	2.780	2.820
周期(s)	0.632	0.551	0.551	0.444	0.433	0.370	0.360	0.355

### 3. 结构振动控制分析

为探讨超高层巨型结构在风振作用下的减振控制效果,分别选择粘滞阻尼器和粘弹性阻尼器对其进行减振控制研究。粘滞阻尼器和粘弹性阻尼器属于速度相关型阻尼器,其在结构微小扰动下即能马上进入耗能状态,既能耗散外界输入结构中的能量,又可避免其它耗能器存在的阻尼器初始刚度如何与结构侧移刚度相匹配的问题。同时,为使对比分析结果具有参考性,取粘滞阻尼器和粘弹性阻尼器的阻尼系数相同:  $C_d = 500 \text{ kN}\cdot\text{s}/\text{mm}$ , 阻尼器数量也相同(即提供给结构的总阻尼相同,  $\Sigma C_d$  不变),粘弹性阻尼器的刚度系数为  $K_d = 440 \text{ kN}/\text{mm}$ 。阻尼器分别在普通层 I、II 和 III 沿 Y 轴方向在①、④、⑤、⑧轴线的 B-C、D-E 和 E-F 的跨间设置,阻尼器以斜撑方式在层间布置。表 2 给出了开展结构风致振动控制分析的 27 个工况组合。

### 4. 结构减振控制效果研究

#### 4.1. 结构侧向位移响应

图 2 为结构中设置与未设置速度相关型阻尼器时的层间侧移图,表 3 显示了不同工况下结构顶点侧移和最大层间侧移对比。由图 2、表 3 可知,速度相关型阻尼器可有效降低结构在各种风荷载作用下的层侧移和层间侧移反应,如工况“0.72°~30°”,无控情况下的顶层质心侧移为 442 mm,设置粘滞阻尼器时为 248 mm,粘弹性阻尼器时为 189 mm,顶层侧移分别减小 44%和 57%;在  $\Sigma C_d$  相同的条件下,设置粘弹性阻尼器所减小的层侧移和层间侧移要大于粘滞阻尼器的情况,其原因在于粘弹性阻尼器不仅附加给结构一定的阻尼,还附加刚度,二者均对结构的侧向变形起抑制作用,从而使得结构的侧向变形减小;在三道巨型梁设置处,由于其所在层的层间刚度大大增

Table 2. Analysis cases  
表 2. 工况分析

	工况组合								
	①无控			②粘滞阻尼控制			③粘弹性阻尼控制		
基本风压 (kN/m <sup>2</sup> )	0.5			0.72			1.48		
风速角(°)	0	30	45	0	30	45	0	30	45

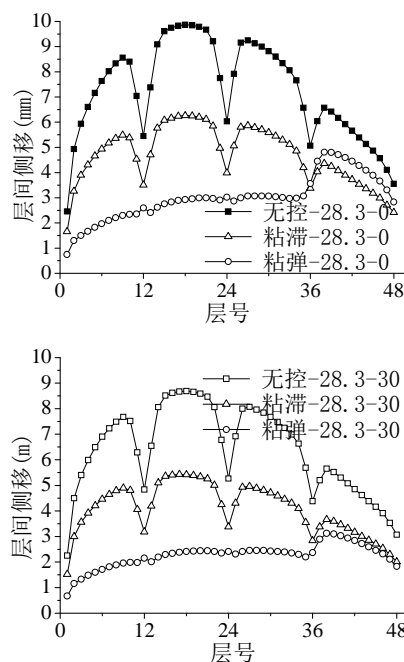


Figure 2. Structure inter-story displacement  
图 2. 结构层间侧移图

Table 3. Roof and maximum inter-story displacement of model in different cases

表 3. 结构在各工况下的顶点侧移和最大层间侧移

基本风压	风速角	顶点峰值侧移(mm)			最大层间侧移(mm)		
		无控	粘滞	粘弹	无控	粘滞	粘弹
0.5	0	350	225	144	9.9	6.2	4.8
	30	308	195	108	8.7	5.4	3.1
	45	178	133	78	4.9	3.6	2.2
0.72	0	520	322	225	14.6	8.8	7.5
	30	442	249	189	12.4	6.8	6.3
	45	235	176	106	6.6	4.9	3.1
1.48	0	840	671	380	23.6	18.5	11
	30	800	510	318	22.4	14.2	10.5
	45	481	312	198	13.5	8.6	6.6

加,从而造成结构的侧向变形发生突变,而设置粘弹性阻尼器时发生突变的程度小于粘滞阻尼器的情况,其原因在于粘弹性阻尼器的附加刚度减小了一般层的层间抗侧刚度与巨型梁所在层抗侧刚度之间的差距,从而缩减巨型梁处侧向变形的突变程度。此外,由于结构在第 36~48 层之间没有设置粘弹性阻尼器,因而造成该区段结构侧移的增大和突变。

## 4.2. 结构内力响应

图 3 为三种风压强度水准作用下，一般柱 z1 和巨型柱 z3 在各工况下的最大剪力和最大弯矩图。

由图可见：与未设置速度相关型阻尼器的工况相比，设置阻尼器后柱的最大剪力和弯矩明显减小，而

且随着风速角的增大，柱内力也呈现逐渐下降的变化规律，说明结构中设置的阻尼器能有效耗散风振能量，减小结构构件变形；虽然结构中所设置阻尼器的  $\Sigma C_d$  相同，但是由于粘弹性阻尼器在附加阻尼的同时也附加刚度，因而使得设置粘弹性阻尼器时的柱剪力

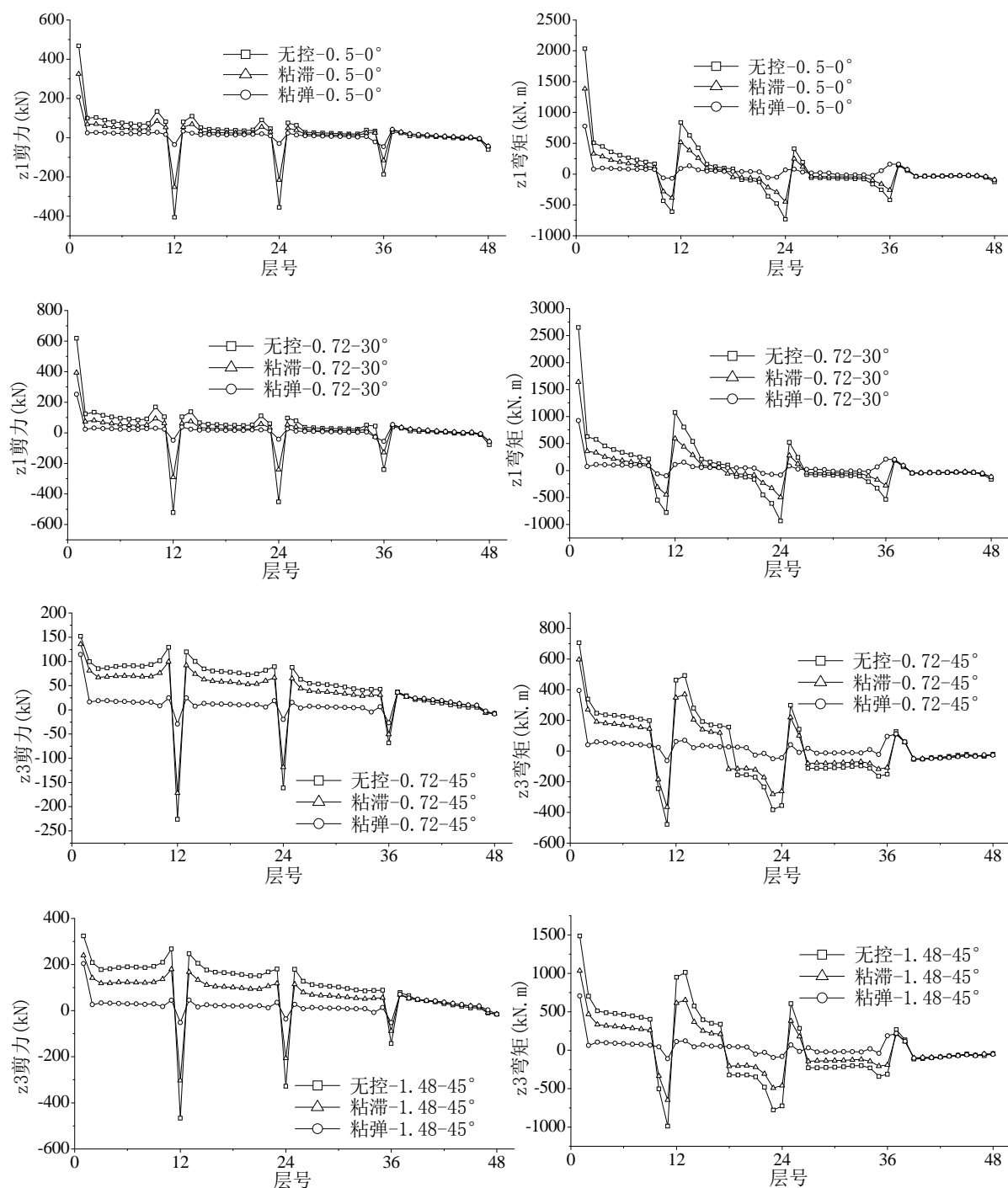


Figure 3. Maximum shear force and moments of column z1/z3  
图 3. 柱 z1/z3 最大剪力和弯矩图

和弯矩要明显小于设置粘滞阻尼器的情况，且在巨型梁设置处的柱弯矩和剪力突变减小；一般柱(z1)和巨型柱(z3)的剪力和弯矩虽具有相似的变化规律，但速度相关型阻尼器对其内力变化的影响程度有明显差别，对前者的影响要小于后者：如工况“1.48°~45°”，z1 在无控、粘滞和粘弹三种情况下的剪力分别为 775.34 kN、547.17 kN、380.05 kN，剪力相对于无控情况分别下降 29.4%和 51%，弯矩分别为 3137.03 kN·m、2169.72 kN·m、1304.83 kN·m，分别下降 30.8%和 58.4%；而 z3 的剪力分别为 323.77 kN、239.22 kN、204.58 kN，分别下降 26.1%和 36.8%，弯矩分别为 1487.85 kN·m、1033.26 kN·m、706.08 kN·m，分别下降 30.6%和 52.5%。

### 4.3. 结构顶点峰值加速度响应

图 4 为结构在不同风压下，顶层质心加速度时程图，表 4 为各工况下顶层质心峰值绝对加速度值。由图、表可知：速度相关型阻尼器对结构顶层质心加速度时程具有显著的抑制作用，有效控制结构的风振加速度响应。如工况“0.72°~30°”，在无控、粘滞和粘弹三种情况下的峰值绝对加速度分别为 0.633 m/s<sup>2</sup>、

0.229 m/s<sup>2</sup>和 0.236 m/s<sup>2</sup>，峰值加速度分别下降 63.8%和 62.7%；不论结构种设置或未设置速度相关型阻尼器，在基本风压相同的情况下结构顶层质心加速度时程随着风速角的增大而减小，在风速角相同的情况下结构顶层质心加速度时程随着基本风压的增大而增大。

Table 4. Roof absolute maximum acceleration of model in different cases

表 4. 结构在各工况下的顶层质心峰值加速度

基本风压	风速角	峰值加速度(m/s <sup>2</sup> )		
		无控	粘滞	粘弹
0.5	0	0.523	0.237	0.249
	30	0.391	0.203	0.218
	45	0.254	0.151	0.158
0.72	0	0.730	0.240	0.248
	30	0.633	0.229	0.236
	45	0.349	0.220	0.232
1.48	0	1.05	0.289	0.291
	30	1.09	0.286	0.289
	45	0.619	0.266	0.281

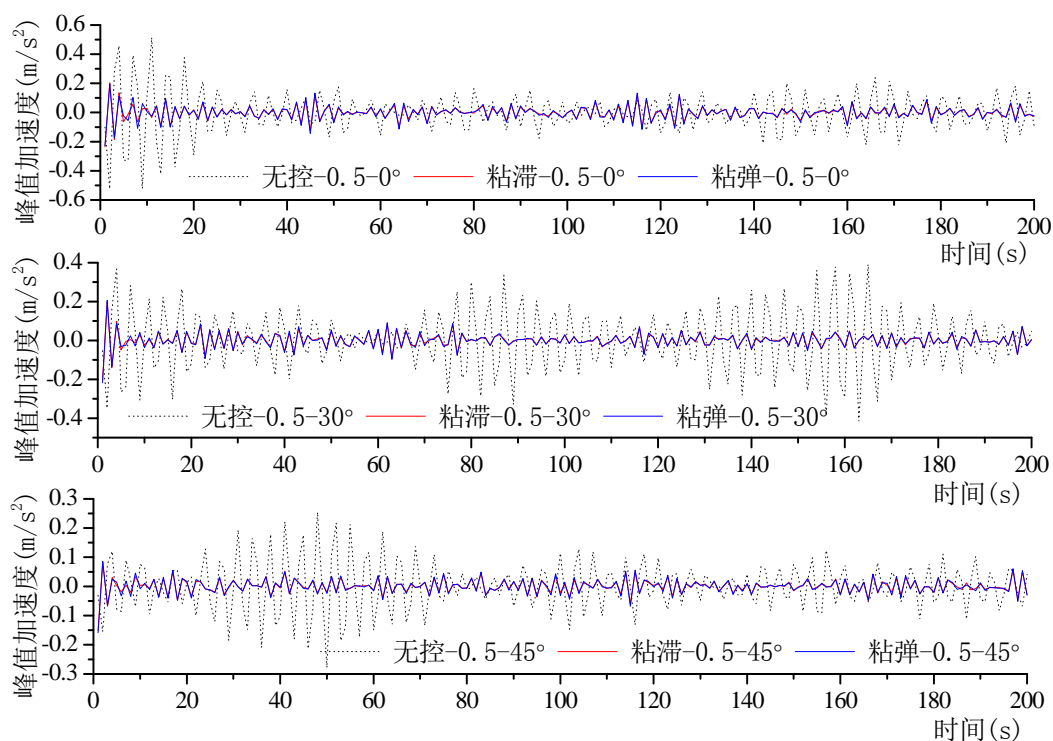


Figure 4. Roof acceleration time series of model in different cases  
图 4. 结构在各工况下的顶层质心加速度时程

## 5. 结论

本文针对一超高层巨型结构, 采用 ANSYS 对不同参数条件下的 27 组工况进行了风振控制动力响应分析与研究。速度相关型阻尼器对于抑制超高层巨型结构的风致振动响应是行之有效的, 不仅具有大量耗散风振输入结构的能量、有效衰减结构动力响应、降低风振作用下结构层加速度和层间侧移沿高度方向突变的能力, 进而提高结构的安全、舒适使用性能; 而且在一定程度上可减少巨型梁所在位置结构层间变形的突变程度, 使结构动力响应沿高度方向的变化趋于一致。

## 参考文献 (References)

- [1] N. Yeung. Viscous-damping walls for controlling wind-induced vibrations in buildings. Hong Kong: The University of Hong Kong, 2000.
- [2] K. C. Chang, W. L. Qu. Unified dynamic absorber design formulas for wind-induced vibration control of tall buildings. *The Structural Design of Tall Buildings*, 1988, 7(2): 147-166.
- [3] 王光远. 高耸结构风振的控制[J]. *石油建筑设计*, 1981, 2: 5-11.
- [4] 张敏证, 王君杰. 建筑结构的振动控制研究——水箱减振装置的数值分析[A]. 第三届全国地震工程会议论文集[C]. 大连: 大连理工大学出版社, 1990: 112-117.
- [5] 瞿伟廉. 高层建筑和高耸结构的风振控制设计[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1991.
- [6] 瞿伟廉, 李肇胤, 李桂青. U 水箱对高层建筑和高耸结构风振控制的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 1993, 14(5): 37-43.
- [7] 瞿伟廉. TLD 对珠海金山大厦主楼风振控制的设计[J]. *建筑结构学报*, 1995, 16(3): 21-28.
- [8] 瞿伟廉. V 型 AMD 对台湾 T&C Tower 大楼风振控制的设计[J]. *土木工程学报*, 1995, 28(5): 3-11.
- [9] 李爱群, 瞿伟廉等. 南京电视塔风振的混合振动控制研究[J]. *建筑结构学报*, 1996, 17(3): 9-17.
- [10] 汪大洋, 周云, 王绍合. 耗能减振层对某超高层结构的减振控制研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(2): 85-92.
- [11] 周云, 汪大洋, 邓雪松, 陈麟. 某超高层结构三种风振控制方法的对比研究[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(2): 16-21.
- [12] 周云, 汪大洋, 李庆祥. 基于性能的某高层结构风振控制研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(11): 214-219.