

# 超大型冷却塔结构风振与地震作用影响比较

柯世堂<sup>1,2</sup>, 赵林<sup>1,2</sup>, 葛耀君<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092, keshitang@163.com; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 超大型冷却塔属于典型风及地震敏感结构, 随着塔高的日益增大这两种作用成为设计的控制因素, 为了研究这两种作用在不同部位的控制程度, 对某超大型冷却塔进行风洞刚体测压和气弹测振试验, 通过加载试验获得的塔筒表面风压分布模式和风振系数进行风载作用下结构响应计算, 和冷却塔在七度地震作用下的响应进行比较. 对比结果表明: 环基和塔筒响应完全受风振控制, 其在风载作用下的内力数值远大于地震作用下的数值, 其中子午向和环向内力从塔底到塔顶逐渐变小, 子午向和环向弯矩最大值均出现在塔筒的中部区域. 两者对于人字柱的内力影响相差较小, 和自重作用共同控制人字柱响应; 采用振型分解法计算结构响应需要考虑前 300 阶的振型影响, 而对于风振作用的频域分析只需考虑前 30 阶模态数即可满足.

**关键词:** 冷却塔; 风洞试验; 地震作用; 参振模态

中图分类号: TP339; U495.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)10-1635-07

## Comparison of super-large cooling towers under earthquake excitation and wind load

KE Shi-tang<sup>1,2</sup>, ZHAO Lin<sup>1,2</sup>, GE Yao-jun<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China, keshitang@163.com; 2. College of Civil Engineerin, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to research the influence of super-large cooling tower under earthquake excitation and wind load, the rigid model and aero-elastic model of a super-large cooling tower in the wind tunnel were employed, the data obtained in the test were loaded to calculate the structural response. By the comparison with the response under earthquake excitation, it is obvious that the responses of annular base and tower shell are completely controlled by wind load, and the value under wind load is much greater than that under earthquake excitation. Vertical and hoop forces of tower shell are diminished from the bottom to the top, and the maximums are found at the middle of the tower shell. Their influence on supporting columns is not obvious. 300 modes should be considered in mode analysis method, while 30 modes are only considered when the structural response is calculated under wind load.

**Key words:** cooling tower; wind tunnel test; earthquake excitation; modes of vibration

大型冷却塔作为一种空间薄壁的高耸结构, 其主体结构由旋转壳体、支柱和环梁三大部分组成, 通常情况下 100 多米高的冷却塔壳体最小厚度仅有十几厘米. 1965 年 11 月英国渡桥电厂的 3

座高 114 m 的冷却塔在一阵强风下先后倒塌, 以及 1973 年 Ardeer 电厂和在 1984 年 FiddlersFerry 电厂的冷却塔再次倒塌, 引起了世界各国学者对冷却塔结构安全性研究的重视, 已经先后召开了 5 次关于自然通风冷却塔的国际会议, 国际上有许多学者从事冷却塔在强风和地震作用下的安全性研究<sup>[1-3]</sup>. 近几年, 国内针对冷却塔抗风问题已展开了较为广泛的研究工作<sup>[4-10]</sup>, 风洞试验为其中有效手段之一, 主要采用刚体模型表面同步测压和基底高频天平测力试验方法, 北京大学的武

收稿日期: 2009-01-13.

基金项目: 国家自然科学基金委重大研究计划重点研究项目 (90715039); 科技部重大科技项目 (2008ZX06004-001).

作者简介: 柯世堂 (1982—), 男, 博士研究生;

葛耀君 (1958—), 男, 教授, 博士生导师.

际可和魏庆鼎教授较早的对于冷却塔的受力性能和风致振动进行了相关研究<sup>[4-5]</sup>,同济大学课题组针对传统气弹模型设计方法的不足提出了基于等效梁格法冷却塔气弹模型设计方法<sup>[6]</sup>,而后对于超大型冷却塔的风荷载特性和风致干扰效应在风洞试验中进行了比较全面的研究<sup>[7-9]</sup>,浙江大学的孙炳楠教授采用 CFD 方法对冷却塔进行了单塔和双塔情况下的风荷载模拟<sup>[10]</sup>.这些研究大多是单独基于风振或地震作用下的分析,对于风荷载和地震作用下响应的对比分析研究相对较少.

为此本文基于某超大型冷却塔(塔高 177 m)群塔组合刚体测压模型与气弹模型试验结果,采用有限元和自行编制的频域计算方法,对该超大型冷却塔进行了试验不对称风压作用下的冷却塔响应计算,并和地震作用下响应进行对比分析,得出了一些有益的结论.

## 1 风洞试验

### 1.1 试验设备及模型

本试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室 TJ-3 大气边界层风洞中进行.该风洞为闭口回流式矩形截面风洞,试验段尺寸宽为 15 m、高为 2 m、长为 14 m.按 1:200 缩尺比制作冷却塔测外压模型和测内压模型(如图 1),冷却塔及周边其他建筑模型阻塞度小于 7%.

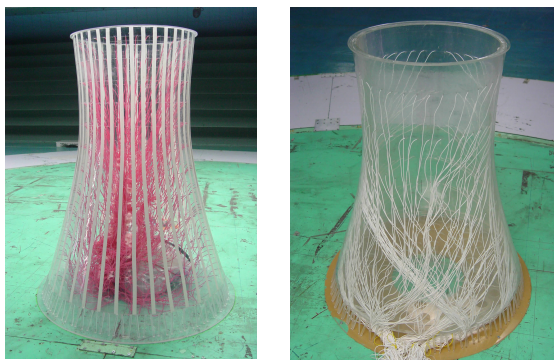


图 1 冷却塔模型

大气边界层模拟风场的调试和测定是用丹麦 DANTEC 公司的 Streamline 热线风速仪,冷却塔内外表面平均压力与脉动压力测量采用美国 Scanivalve 扫描公司的 DSM3000 电子压力扫描阀.信号采样频率为 312.5 Hz,每个测点采样样本总长度为 6 000 个数据.

冷却塔测外压模型沿其环向与子午向布置 36 × 12 个外表面压力测点.测内压模型沿其环向与子午向布置 36 × 6 个内表面压力测点.内外压测点布置见图 2.冷却塔周边存在较为密集的工

业厂房,建筑物之间的干扰效应不容忽视(见图 3).

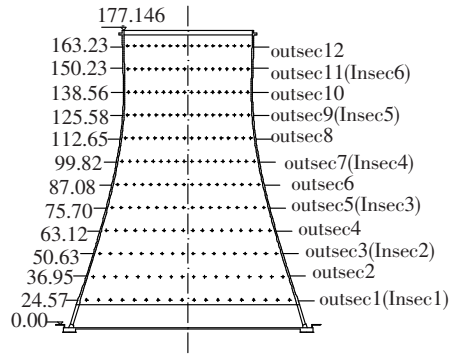
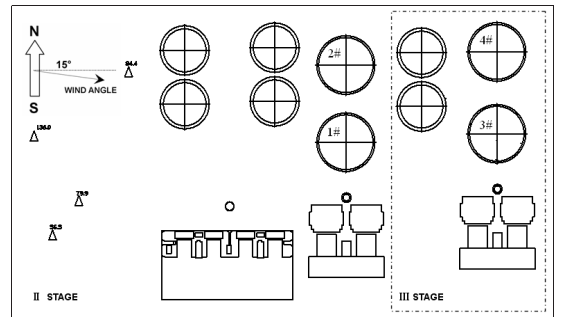
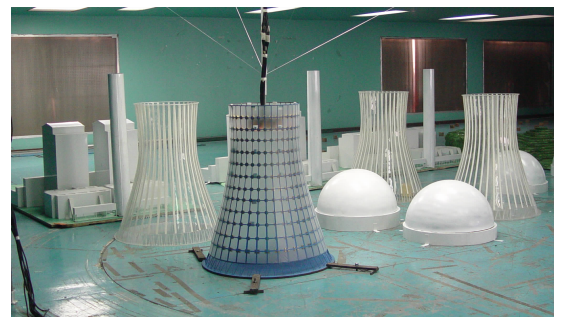


图 2 测压模型测点布置(单位:m)



(a)场地平面图



(b)风洞试验布置图

图 3 某电厂冷却塔工程 I 期、II 期平面布置图

### 1.2 符号定义

冷却塔表面测点  $i$  处的压力系数  $C_{pi}$  为

$$C_{pi} = \frac{P_i - P_\infty}{P_0 - P_\infty} \quad (1)$$

其中:  $P_i$  为作用在测点  $i$  处的压力,  $P_0$  和  $P_\infty$  分别为试验时参考高度处的总压和静压.

结构整体阻力系数  $C_D$  为

$$C_D = \frac{\sum_{i=1}^n C_{pi} A_i \cos(\theta_i)}{A_T} \quad (2)$$

其中:  $A_i$  为第  $i$  测点压力覆盖面积,  $\theta_i$  为第  $i$  测点压力方向与风轴方向夹角,  $A_T$  为结构向风轴方向投影面积.

定义多塔比例系数  $K_D$  为

$$K_D = C_{Dm} / C_{Ds} \quad (3)$$

其中:  $C_{Dm}$  为给定流场下多塔整体阻力系数极值,

$C_{Ds}$ 为相应流场条下单塔整体阻力系数极值。

### 1.3 实验结果

表 1 给出了不同的冷却塔组合工况在不同的来流风向角下的整体阻力系数均值和最大值以及多塔比例系数的数值,由表 1 可以看出,工况 8 下来流角度  $247.5^\circ$  是四塔组合时最不利来流角度。在 A、B、C、D 4 类不同地形、地貌典型工程场地条件下,进行了冷却塔单塔气弹模型风振试验。冷却塔不同高度位置刚度变化较大,风振响应平均位移值亦有明显差别。表 2 中亦比较了试验与规范风振系数取值,规范值介于试验结果不同位移幅值风振系

数取值之间,冷却塔风振系数与平均风振响应、所处塔筒高度及环向位置有关。对于 I、II 期冷却塔工程(含周边其他建筑)最不利来流角度( $247.5^\circ$ )来流,气弹模型风振系数和刚体测压试验多塔比例系数均明显超出单塔试验结果约 20%~40%。两类试验对比可以说明临近的同等尺寸其他建筑对于冷却塔的干扰效应不容忽视。

将刚体测压和气弹测振试验所得到的表面不对称风压和多塔比例系数以及风振系数用作本文冷却塔风载作用输入参数。

表 1 冷却塔四塔组合最不利来流工况列表

工况编号	被测塔编号	$C_D$	$C_{Dmax}$	$K_D$	来流角度/ $(^\circ)$
1	I 期双塔中的 2#塔	0.422	0.572	1.179	202.5
2	(I 期双塔 + II 期 3#塔) 中的 1#塔	0.448	0.551	1.137	180
3	(I 期双塔 + II 期 3#塔) 中的 2#塔	0.423	0.511	1.053	180
4	(I 期双塔 + II 期 4#塔) 中的 1#塔	0.447	0.558	1.151	180
5	(I 期双塔 + II 期双塔) 中的 1#塔	0.449	0.555	1.145	180
6	(I 期双塔 + II 期双塔) 中的 2#塔	0.431	0.532	1.097	202.5
7	(I 期双塔 + II 期双塔) 中的 3#塔	0.499	0.617	1.271	112.5
8	(I 期双塔 + II 期双塔) 中的 4#塔	0.536	0.647	1.333	247.5

表 2 冷却塔典型场地风振系数试验结果

位移区间	断面编号	测点位置	场地类别			
			A	B	C	D
10~15 cm	6	迎风向	1.71	1.77	1.82	1.94
	5		1.62	1.67	1.73	1.83
	4		1.44	1.50	1.54	1.64
	3		1.68	1.74	1.79	1.91
10~15 cm	6	侧后风向	1.97	1.97	1.97	1.98
	5		1.84	1.85	1.85	1.86
	4		1.62	1.63	1.63	1.64
5~10 cm	6	其他测点	2.34	2.37	2.38	2.52
	5		2.34	2.32	2.52	3.29
	4		2.06	2.19	2.35	2.07
	3		1.90	2.12	2.12	2.51

## 2 地震作用

### 2.1 反应谱

根据江苏省地震工程研究院提供的本场地三期扩建工程地震安全性评价工作报告,50 年超越概率 10% 条件下,拟建厂址基岩水平向地震动峰值加速度值为  $0.087 g$ ;地表水平向地震动峰值加速度值为  $0.121 g$ ,特征周期为  $0.5 s$ ,水平地震影响系数最大值为  $0.3$ 。相应地震基本烈度为 VII 度。拟建场地覆盖层的平均等效剪切波速为

$200 m/s$ ,场地土类型属中软场地土,建筑场地类别为 II 类,为可进行工程建设的一般场地。

建筑抗震设计规范(GB 50011—2001)规定,场地设计地震动加速度反应谱取为

$$\beta(T) = \begin{cases} 5.5\alpha_{\max} T + 0.45\alpha_{\max}, & 0_1 < T \leq 0.1, \\ \alpha_{\max}, & 0.1 < T \leq T_g, \\ \alpha_{\max} \left(\frac{T_g}{T}\right)^{0.9}, & T > T_g. \end{cases} \quad (4)$$

图 4 为本文采用江苏省工程地震研究所提

供的场地地表加速度反应谱. 地震的激励采用水平向+竖向输入方式, 其中竖向反应谱采用相应的水平向反应谱, 竖向地震系数取相应水平地震系数的0.65.

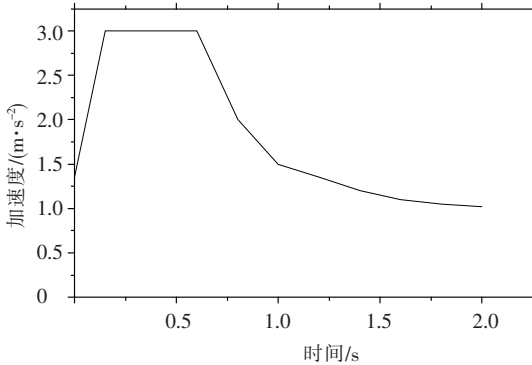


图4 场地水平地震加速度反应谱

## 2.2 线性反应谱分析

线性反应谱分析采用振型分解法, 结构总体阻尼采用0.05, 考虑到本工程规模超出建筑抗震设计规范(GB 50011—2001)的适用范围, 本文计算结果仅给按SRSS组合后的水平向、竖向地震组合输入响应, 即

$$S_{E_{GK}} = \xi \sqrt{\sum_{j=1}^n S_{E_{Hj}}^2 + \sum_{j=1}^n S_{E_{Vj}}^2} \quad (5)$$

其中: 地震效应折减系数  $\xi = 0.35$ .

## 3 风载与地震作用对比分析

### 3.1 结构建模

冷却塔结构建模采用离散结构的有限单元方法, 冷却塔塔壁离散为空间壳单元, 顶部刚性环基与环基连接的52对人字柱采用空间梁单元模拟, 结构312根桩基础采用空间弹簧单元模拟, 弹簧单元一端与环基刚性连接, 另一端固结约束. 有限元计算模型的总体坐标系以沿高度方向为Z轴, 水平向对称结构分别为X轴和Y轴, 其中X轴为顺风向, Y轴为横风向, 符合右手定则. 由此建立如下模型. 通风筒壁建立环向416个单元, 子午向107(含2个刚性环单元)个单元. 冷却塔通风筒特性如表3, 冷却塔采用 $\Phi 1\,300\text{ mm}$  52对人字柱,  $7\,500 \times 2\,500\text{ mm}$  环基离散为104个空间梁单元, 桩基础为 $\Phi 1\,000\text{ mm}$  312根弹簧单元, 前4阶动力特性计算分析结果如表4所示.

### 3.2 环基受力性能对比分析

冷却塔环基设计截面为 $7\,500\text{ mm} \times 2\,500\text{ mm}$ 的矩形连续环形基础, 环基离散为104个空间梁单元. 计算时基本风压取为 $0.35\text{ kPa}$ , 选择风洞试验测量得到的冷却塔筒体外表面实际压力分布加载, 地震作用按七度计算, 采用振型叠加

法求解, 现提供风、地震作用下环基内力对比图(如图5).

从图5(a)中可以看出, 环基在地震作用下的轴力最大值为 $\pm 1\,505\text{ kN}$ , 在风载作用下的轴力最大值 $-1\,171\text{ kN}$ , 且在第20个节点处达到最小值, 对应的偏角 $70^\circ$ 正好是受到群塔干扰后的迎风面正吹风角度. 图5(b)到图5(e)分别给出了环基径向剪力与弯矩、竖向剪力与弯矩的对比图, 可以明显地看出, 这四种内力都是在风载作用下的数值远大于在地震作用下的数值, 并且都是在偏角 $70^\circ$ 时出现最大值. 环基的轴力受地震和风载共同作用控制, 而径向和竖向内力完全由风振控制, 并且与地震作用不同的是在不同的角度数值差别较大, 设计时应特别注意群塔或周边建筑干扰后的迎风面位置的内力数值.

表3 冷却塔通风筒特性

离地高度/m	筒壁壁厚/m	中心半径/m
12.216	1.400	67.347
37.405	0.340	59.380
62.594	0.330	51.656
87.784	0.320	45.685
100.378	0.310	43.123
112.973	0.300	41.103
125.568	0.271	39.731
138.162	0.271	39.132
150.757	0.271	39.229
177.150	0.271	39.543

表4 冷却塔自振频率和振型描述

阶数	频率/Hz	振型特点	振型示意
1	0.785	4个环向谐波 2个竖向谐波	
2	0.830	5个环向谐波 2个竖向谐波	
3	0.838	5个环向谐波 2个竖向谐波	
4	0.940	3个环向谐波 1个竖向谐波	

### 3.3 人字柱受力性能对比分析

52对冷却塔人字柱设计采用 $\Phi 1\,000\text{ mm}$ 钢筋混凝土柱, 采用空间梁单元模拟. 对于人字柱来说, 主要承受轴力、剪力和弯矩3个内力作用. 表5给出不同荷载工况下人字柱受到的最大轴力、

剪力和弯矩的数值大小。

从表 5 中可以看出,不管是风载、地震作用还是自重,对于人字柱的轴力、剪力和弯矩的影响不是很大,基本都在同一数量级,只是在自重的作用下所有人字柱只存在受压的轴力,而对于风和地震作用下同时存在拉力和压力。由于冷却塔是

对称的旋转薄壳结构,人字柱受到的弯矩和剪力都比较小,每延米最大弯矩  $485 \text{ kN} \cdot \text{m}$  出现在风载作用下,从历史上冷却塔的事故中也发现,大多都是塔筒或是环基出现破坏,很少有人字柱发生破坏的,设计时需要注意的是人字柱和环基及壳体连接部位的构造措施。

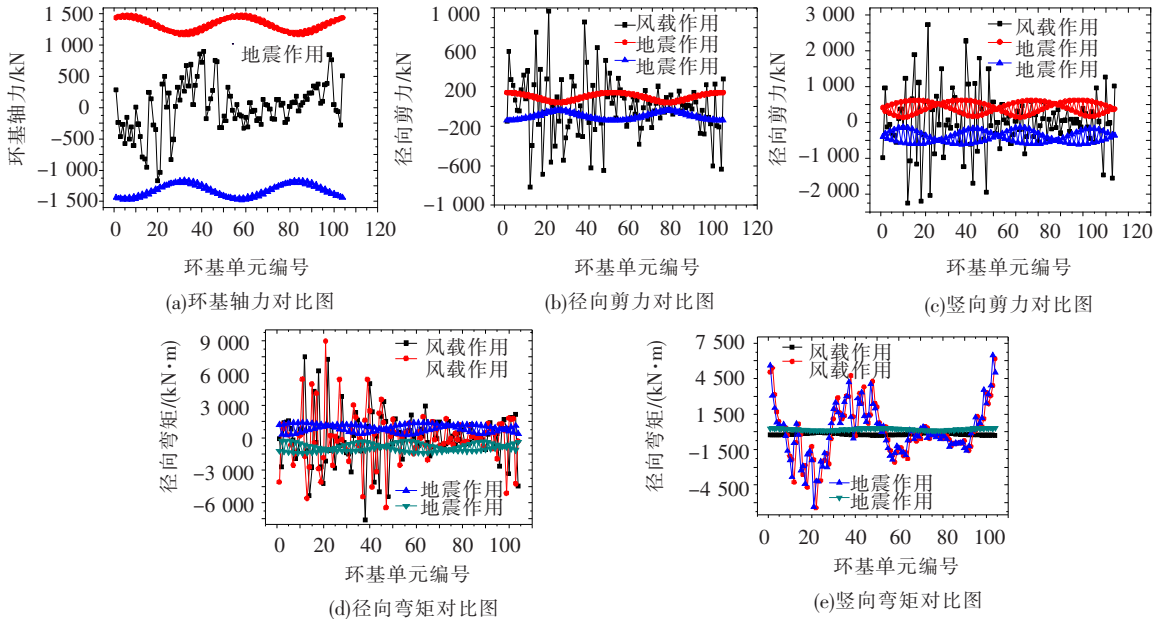


图 5 风和地震作用下环基不同内力对比图

表 5 不同荷载组合人字柱每延米最不利内力及其对应的其他内力数值

编号	组合工况	内力								
		轴向最大压力时			轴向最大拉力时			最大弯矩时		
		轴力/ kN	剪力/ kN	弯矩/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	轴力/ kN	剪力/ kN	弯矩/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	轴力/ kN	剪力/ kN	弯矩/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )
1	自重	-3 846	33	119	-3 611	55	160	-3 611	55	160
2	静风	-2 773	41	291	2 720	57	339	2 141	71	485
3	温度(冬季)	-16	59	197	-16	59	197	-16	59	545
4	温度(夏季)	6	22	96	6	22	96	6	22	178
5	地震	$\pm 2\ 264$	$\pm 72$	$\pm 422$	$\pm 2\ 264$	$\pm 72$	$\pm 422$	$\pm 22\ 464$	$\pm 72$	$\pm 422$

### 3.4 塔筒受力性能对比分析

塔筒上的受力是冷却塔设计中最受关注的部分,其受风荷载的空间分布模式影响极大,由于塔筒是空间薄壁高耸结构,其振型极其复杂,要求地震作用时对于高阶振型的贡献问题需要考虑。塔筒环向和子午向内力均按划分的单元数和模板层数给出,子午向内力按每层模板端部内力总共给出 106 个结果,环向为每层竖向最大内力单元所对应内力值。

图 6 分别给出了子午向、环向的每层最大内力和弯矩的数值对比图,从图中可以看出,对于塔筒这种旋转薄壳结构体系,风载作用下环向和子午向内力都大于地震作用下的内力数值,对于风

载和地震作用下子午向和环向内力,从塔筒底部到塔顶逐渐变小,而风载作用下的子午向和环向弯矩最大值则出现塔筒的中部区域,地震作用下的子午向弯矩基本不随高度的变化而改变,地震作用下的环向弯矩最大值也出现在塔筒中部位置。

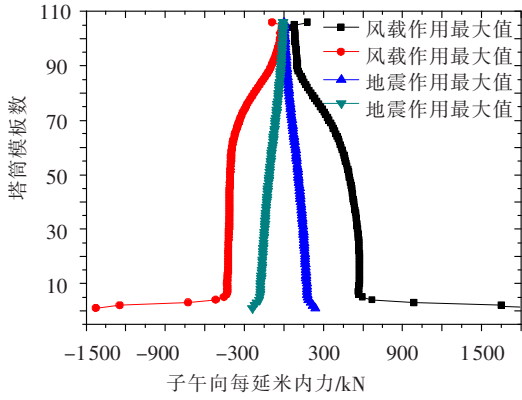
### 3.5 参振模态数目的影响

为了研究参振模态数目对风振作用下响应的影响,利用频域计算方法(自行编制的动力计算程序 RSFM)加载风洞试验得到的风压分布模式进行分析。选取风向角为  $0^\circ$  度,风速为  $141 \text{ m/s}$  (相当于风洞中的  $10 \text{ m/s}$ ) 时的工况进行分析。图 7 给出了选取不同参振模态数目下的冷却塔喉部位移标准

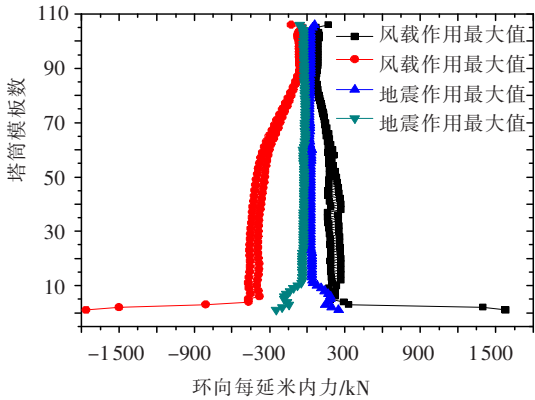
差.可以看出,当参振模态为 10 时,位移标准差较

小,高阶模态对位移的贡献还比较大,当参振模态数目为 30 时,位移标准差区域稳定,当参振模态为 50 时高阶模态对位移的贡献已经非常小,所以计算冷却塔风载作用下位移响应时取 30 个参振模态数即认为可以满足要求.

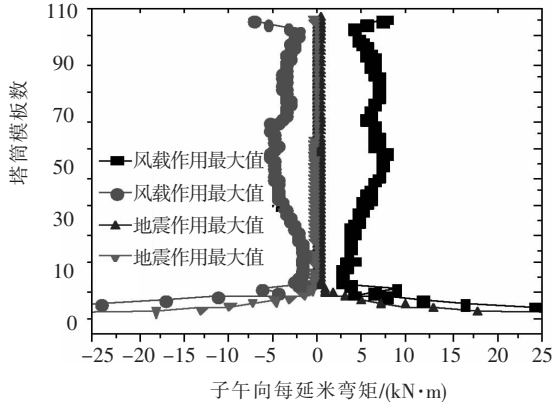
对于地震作用下的响应采用振型分解法,计算发现水平向和竖向质量参与系数最大的振型分别为第 33 阶和第 186 阶,因此线性反应谱分析应充分计入高阶振型的效应,本次计算中取前 300 阶时, X、Y 和 Z 方向的质量参与系数均达到 99.9% 以上.可以得出,地震作用下的响应计算需要考虑高阶的振型影响,而对于风载作用下的响应计算只需考虑 30 阶模态数即可满足.



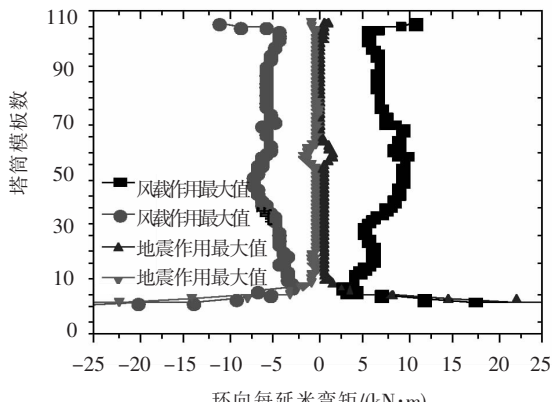
(a)子午向内力对比图



(b)环向内力对比图



(c)子午向弯矩对比图



(d)环向弯矩对比图

图 6 风和地震作用下塔筒不同内力对比图

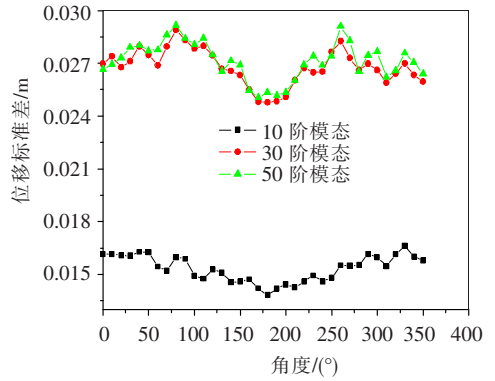


图 7 参振模态数对位移标准差的影响

### 4 结 论

1) 基于超大型冷却塔 0.35 kPa 基本风压下风振和七度区地震作用的有限元分析可知,环基主要受风振控制,其在风载作用下的内力数值远大于地震作用下的数值,并且在不同的角度内力差别较大,应注意群塔或周边建筑干扰后的迎风面位置的内力数值.

2) 不管是风载、地震作用还是自重,对于人字柱的轴力、剪力和弯矩的影响不是很大,基本都是在同一数量级,设计时需要注意人字柱与环基及壳体连接处的构造措施.

3) 塔筒完全受风振控制,风载作用下环向和子午向内力及弯矩都大于地震作用下的数值,对于风载和地震作用下子午向和环向内力,均从塔筒底部到塔顶逐渐变小,而风载作用下的子午向和环向弯矩最大值则出现塔筒的中部区域,地震作用下的子午向弯矩基本不随高度的变化而改变,环向弯矩最大值也出现在塔筒中部位置.

4) 采用频域计算结构响应时,地震作用下的响应计算需要考虑 300 阶的振型影响,而对于风载作用下的响应计算只需考虑 30 阶模态数即可满足.

## 参考文献:

- [1] ORLANDO M. Wind-induced interference effects on two adjacent cooling towers[J]. *Engineering Structure*, 2001, 23: 979-992.
- [2] NIEMANN H J, KOPPER H D. Influence of adjacent buildings on wind effects on cooling towers[J]. *Engineering Structure*, 1998, 20(10): 874-80.
- [3] BUSCH D, HARTE R, KRATZIG W B, *et al.* New natural draught cooling tower of height[J]. *Engineering Structures*, 2002, 24(12): 1509-21.
- [4] 武际可. 大型冷却塔结构分析的回顾与展望[J]. *力学与实践*, 1996, 18(6): 1-5.
- [5] 陈凯, 魏庆鼎. 冷却塔风致振动实验研究[C]//第十一届全国结构风工程学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 2003. 177-182.

- [6] 赵林, 葛耀君. 双曲薄壳冷却塔气弹模型的等效梁格设计方法和实验研究[J]. *振动工程学报*, 2008, 21(1), 31-37.
- [7] 赵林, 李鹏飞, 葛耀君. 等效静风荷载下超大型冷却塔受力性能分析[J]. *工程力学*, 2008, 25(7), 79-86.
- [8] 赵林, 葛耀君, 许林汕, 等. 超大型冷却塔风致干扰效应试验研究[J]. *工程力学*, 2009, 6(1), 149-154.
- [9] 许林汕, 赵林, 葛耀君. 超大型冷却塔随机风振响应分析[J]. *振动与冲击*, 2009, 28(4), 180-184.
- [10] 刘若斐, 沈国辉, 孙炳楠. 大型冷却塔风荷载的数值模拟研究[J]. *工程力学*, 2006, 23(1), 177-184.
- [11] 中华人民共和国建设部. GB/T 50102—2003 工业循环水冷却设计规范[S]. 长春: 东北电力设计院, 2003.

(编辑 魏希柱)

(上接第 1599 页)

合,在实际中对给水管网长距离输配、管网运行调度管理、调度人员培训等其他相关工程领域的研究具有指导意义。

## 参考文献:

- [1] 赵洪宾. 给水管网系统理论与分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [2] 高金良, 常魁, 方海恩, 等. 城市配水管网改造工程配水分析及其应用[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(2): 32-35.
- [3] 樊敏敏, 王磊. 供水管网地理信息系统在巴黎水务的应用[J]. *中国资源综合利用*, 2008, 26(10): 39-40.
- [4] 吴家铸, 党岗, 刘华峰, 等. 视景仿真技术及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [5] 李国成, 王靖涛. 虚拟现实技术用于复杂结构施工研究[J]. *土木工程学报*, 2003, 36(2): 95-101.
- [6] 许云, 任爱珠, 潘国帅. 基于 GIS 和 VR 的消防指挥系统研究[J]. *土木工程学报*, 2003, 36(5): 92-97.
- [7] 信昆仑, 刘遂庆, 耿为民. 城市给水管网三维水压面的绘制[J]. *给水排水*, 2002, 28(6): 83-87.

- [8] 金侠杰, 林财兴. 虚拟现实及其在网络中的实现[J]. *计算机仿真*, 2003, 20(10): 8-14.
- [9] 苏建明, 张续红, 胡庆夕. 展望虚拟现实技术[J]. *计算机仿真*, 2004, 21(1): 18-24.
- [10] 夏平均, 姚英学. 虚拟装配的研究综述与分析(I)[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, 40(5): 740-744.
- [11] 夏平均, 姚英学. 虚拟装配的研究综述与分析(II)[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2008, 40(6): 942-947.
- [12] 杜国明, 龚健雅, 熊汉江, 等. 城市三维管网的可视化及其系统功能实现的关键技术[J]. *武汉大学学报*, 2002, 27(5): 534-537.
- [13] ROSSMAN L A. The EPANET Programmer's Toolkit for analysis of water distribution systems[C]//Proceedings of the Annual Water Resources Planning and Management Conference. Reston: ASCE, 1999.
- [14] 王延红, 杨平利, 仇小鹏, 等. 仿真建模软件 Creator 的应用技术[J]. *计算机仿真*, 2005, 22(7): 179-181.
- [15] 王乘, 李利军, 周均清, 等. Vega 实时三维视景仿真技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.

(编辑 魏希柱)