

# 钢桁架－钢筋混凝土管柱结构风致响应试验研究<sup>\*</sup>

姚泽良<sup>1</sup>，白国良<sup>2</sup>，党发宁<sup>1</sup>，李晓文<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 水利水电学院，陕西 西安 710048; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院，陕西 西安 710055)

**摘 要：**大跨长悬挑钢－混凝土高柔结构的动力性状决定了其风振系数不能采用我国规范中的方法来计算。制作气弹性模型进行了动力性状、脉动风作用下位移响应、加速度响应、扭转响应、气动力稳定性等问题的相关试验，计算得到了风振系数，分析了风速、风向角、风机、周围建筑物等因素对风振系数的影响，给出了风振系数的建议值。将试验结果与其他方法计算的结果进行了对比分析，结果表明，试验结果偏大，符合风洞试验原理。研究结果为工程设计提供了基础资料，可供同类工程参考。

**关键词：**高柔结构；扭转；气弹性模型风洞试验；风振系数

**中图分类号：**TU311 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-811X(2010)S0-0170-06

## 0 引言

我国荷载规范<sup>[1]</sup>规定：对于一般悬臂结构以及高度大于30 m、高宽比大于1.5且可以忽略扭转影响的高层结构，均可只考虑第一振型的影响，结构的风荷载可通过风振系数法来计算。对于基本自振周期大于0.25 s的高柔结构均应考虑风压脉动对结构产生顺风向风振的影响。钢桁架－钢筋混凝土管柱结构是大型火电厂冷却系统的主要支撑结构，结构下部为大直径钢筋混凝土管柱，中部为大跨度空间交叉多面悬挑钢桁架，上部为透气性A型架和挡风墙，设备质量主要集中在上部。结构动力性状决定了风振系数不能采用我国规范中的方法来计算，而应考虑风压脉动对结构产生顺风向风振的影响。我国大型火电厂多处多风的北方地区，挡风墙承担的风荷载对结构下部将产生较大的作用，从安全性和经济性上考虑，对该类结构进行风振试验研究非常必要。本文制作气弹性模型进行了动力性状、脉动风作用下的位移响应、加速度响应、扭转响应、气动力稳定性等问题的相关试验，计算得到了脉动风荷载下的风振系数，分析了相关影响因素。

## 1 试验模型设计

### 1.1 结构原型动力性状分析

结构原型钢桁架高7.4 m，柱网尺寸22.8 m×25.372 m，三边悬挑，最大悬挑14.8 m，管柱直径3.8 m、壁厚0.4 m、柱高40.35 m，A型架高9.4 m，挡风墙高13 m，风机56台。

确定结构动力特性参数是进行风洞试验必不可少的一个重要步骤<sup>[2-3]</sup>。采用ANSYS软件对结构原型进行了模态分析。分析表明，第一阶振型以无悬挑端中点为中心的转动，表现为空间扭转；第二阶振型沿无悬挑端结构的平动；第三阶振型绕与无悬挑端对应的悬挑边中心的转动，表现为空间扭转。从柱顶铰接和刚接的模态分析结果来看，两种形式的振型一致，频率最大相差为4.1%，说明形式改变不会导致结构自振周期发生根本性变化。结构周期在1.6 s左右，其大小远远大于规范规定的0.25 s的范围，属于高柔结构，应对结构在脉动风作用下发生顺风向响应进行试验研究。选取柱顶刚接时的模态计算结果作为气弹模型设计的依据，取前三阶频率为0.64 Hz、0.70 Hz、0.73 Hz。

### 1.2 模型制作

根据风洞试验段的尺寸和实际结构的大小，在Reynold数相等且满足一定的阻塞度的条件下制

<sup>\*</sup> 收稿日期：2010-09-25

基金项目：国家自然科学基金项目资助(50778150)；陕西“13115”科技创新重大项目资助(2007ZDKG39)

作者简介：姚泽良(1976-)，女，汉，湖南益阳人，博士后，主要研究方向为钢筋混凝土结构及防灾减灾工程。E-mail: yaozeliang@sina.com

定了气弹性试验模型相似比<sup>[4-5]</sup>。模型采用 1: 150 的几何缩尺比, 将弹性参数相似融合于刚度分布相似之中。为了使模型试验结果更真实的代表原型结构, 提出了四种模型方案, 并进行了模态分析。经比较, 只有方案四的前三阶频率与结构原型频率的差值在 2% 以内, 可满足试验要求, 因此, 选取方案四作为气弹性试验模型设计方案, 即管柱采用直径为 6 mm 的钢筋, 钢桁架采用 3 mm×3 mm 的钢芯来模拟, 主要模拟管柱的刚度, 其周围用直径 25.3 mm 的泡沫来模拟外衣, 以满足挡风面积的要求; 风机单元采用电脑风扇模拟风机风场, 挡风墙和 A 型架用有机玻璃模拟。图 1 为模型施工图。

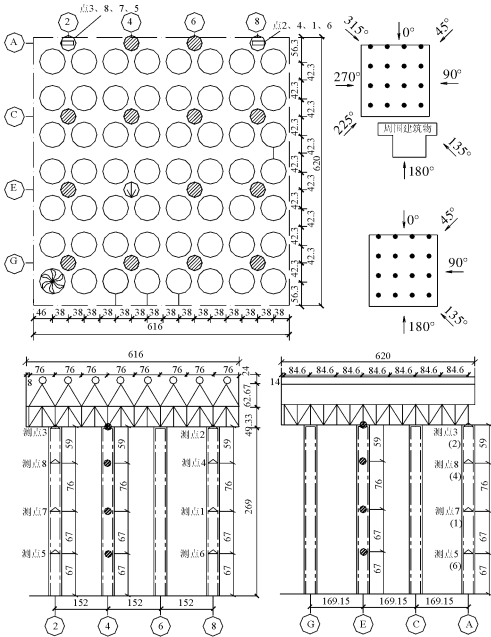


图1 模型施工图

1.3 试验工况与量测设备

试验在 CA-1 大气边界层风洞中进行。试验流场的风速用皮托管和微压计来测量和监控。大气边界层模拟风场的调试和测定采用丹麦 DENTEC 公司的 Streamline 热线/热膜风速仪、A/D 板、PC 机和自编软件组成的系统。压力测量系统为美国 PSI 公司电子压力扫描阀、A/D 板和 PC 机, 以及自编的信号采集及数据处理软件组成。

试验工况主要考虑有无周围建筑、风向角(无周围建筑物时, 由于结构对称, 拟从 0°~180°每隔 45°取一个风向角进行试验; 有周围建筑物时, 0°~360°每隔 45°取一个风向角进行试验)、风机(分风机转动和不转动)等因素的影响。工况共计 26 种。进行每一工况试验时, 风速从 2.4 m/s 起,

步长为 0.4 m/s 递增; 风速达到 6 m/s 后, 步长变为 0.5 m/s, 风速最高达 10 m/s。

2 试验模型动力性状试验分析

采用自由振动的方法对试验模型进行动力性状测试。测试频率的 4 个测点布置在同一根中柱(轴 4 与 2 相交处)的不同高度处, 图 1 平面图中“⊙”表示加速度计的平面位置, 立面图中“●”表示加速度计的立面位置。测试振型的 8 个测点布置在两个角柱(2 轴与 A 轴相交处, 8 轴与 A 轴相交处)上, 每个角柱上沿不同高度布置 4 个激光位移计。图 1 平面图中“□”表示激光位移计的平面位置, 立面图中“△”表示激光位移计的立面位置, “□”长边为位移计照射位置。

表 1 模型频率比较

阶	$f_1/\text{Hz}$	$f_2/\text{Hz}$	$f_3/\text{Hz}$	$(f_1-f_2)/f_1\times 100\%$	$(f_1-f_3)/f_1\times 100\%$
1	16.01	15.82	16.02	+1.2	-0.3
2	17.45	17.19	16.89	-1.5	-3.0
3	18.23	18.42	19.14	+1.0	+5.0

注:  $f_1$  为模型实现频率,  $f_2$  为模型计算频率,  $f_3$  模型实测频率。

根据测试结果, 模型第一阶频率为 16.02 Hz, 第二阶频率为 16.89 Hz, 第三阶频率为 19.14 Hz。表 1 为模型实现频率(为 25 倍结构原型计算频率)、模型计算频率和模型实测频率的比较。分析表明, 模型实测频率与、模型计算频率的误差均在 5% 以内。

3 气弹模型试验研究

3.1 试验原理

一般来讲, 在结构的不同部位, 荷载风振系数会有较大的变化, 同时风振系数随风向角变化也比较大, 但采用位移风振系数的差异比较小, 可以对整体或区域采用一个风振系数值<sup>[6-7]</sup>。设平均风压产生的静位移是  $R_s(z)$ , 由脉动风引起的等效风振力所产生的位移响应为  $R_d(z)$ , 则风荷载作用下结构的总响应为:

$$R_a(z) = R_s(z) + R_d(z), \tag{1}$$

式中:  $R_s(z)$  平均风压产生的静位移;  $R_d(z)$  由脉动风压的等效力产生的位移。

工程上常采用将平均风引起的静位移  $R_s(z)$  乘上大于 1.0 的系数, 其结果即等于平均风和脉动风的响应之和, 取该系数为位移风振系数  $\beta_z$ , 指风

荷载位移总响应与平均风的静位移之比：

$$\beta_z = \frac{R_s(z) + R_d(z)}{R_s(z)} = 1 + \frac{R_d(z)}{R_s(z)}, \tag{2}$$

式中： $\beta_z$  风振系数； $R_s(z)$  平均风压产生的静位移； $R_d(z)$  由脉动风压的等效力产生的位移。其中，平均风为静力荷载，它产生的静位移响应可以用静力分析的方法或风洞试验方法方便的求出，而脉动风引起的结构振动响应在本文中可以用风洞时程的方法求出。

若时程分析得到各点的位移响应时程值用  $U_i$  表示，脉动位移平均值  $\sigma$  为：

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2}{n - 1} \tag{3}$$

由此可得风振系数为：

$$\beta = 1 + \frac{\sigma}{\bar{U}}, \tag{4}$$

式中： $\bar{U}$  为平均风引起的静位移，即位移平均值； $\sigma$  为脉动风引起的脉动位移平均值。

3.2 试验内容

3.2.1 风场模拟

根据结构所在地区有关资料，结合周边环境的地形地貌特征，采用 B 类地貌风场。在风洞中通过设置尖塔、立方体和锯齿带作为粗糙元，经过反复调试按 1/150 的几何缩尺比模拟 B 类风场。图 2 为试验风洞中的试验模型及模拟得到的风速剖面、脉动风功率谱与理论值的对比情况。由图 2 可知，风场模拟效果较好。

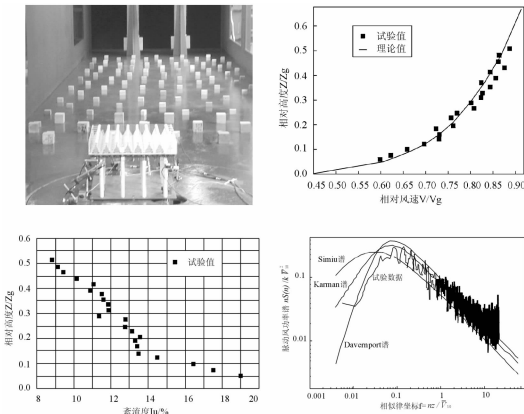
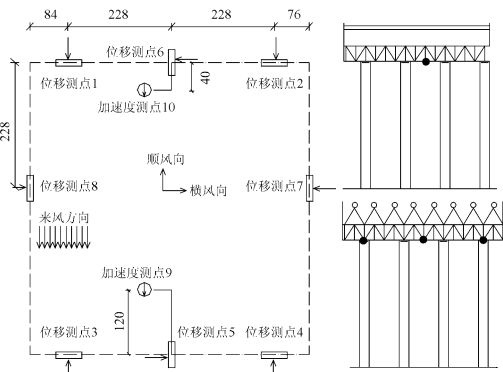


图2 风场模拟

3.2.2 风振试验

在模型的特殊点布置 8 个激光位移计和 2 个加速度计来测量结构在横风向和顺风向的响应<sup>[6-7]</sup>，测点布置如图 3 所示。图中 1~8 测点布置激光位移计，其中 1~4 测点用于测量结构顺风向的振动，

5~8 测点用于测量结构横风向的振动。9、10 测点用于测量加速度响应。参考风速的仪器高度是 0.75 m，反算到实际大气层高度为 0.75 m × 150 = 112.5 m。对模型在紊流场、风速 2.4~10 m/s 的情况下进行了试验，通过激光位移计记录了不同时段下各个测点的位移响应值。通过加速度计记录了加速度响应值。



注：⊙加速度计位置，□长边为激光位移计照射位置，其上箭头为位移计激光照射方向。

图3 测点布置

4 试验结果分析

运用软件 Matlab 自编程序对原始数据进行预处理，得到位移响应平均值和根方差值。为了验证处理结果的准确性，任意抽取若干组原始数据在数据处理程序 Origin 中做了统计处理，经比较表明，采用 Matlab 处理的结果准确。利用 office 工具整理预处理结果并制表。将整理好的数据用 Origin 数据处理程序绘出位移响应曲线图。

6 m/s 和 6.5 m/s 试验风速下反算实际结构 10 m 高度处的风速为 24.44 m/s 和 25.298 m/s，和规范计算的该地区 10 m 高度处的风速比较接近，因此，下面对 6 m/s 和 6.5 m/s 试验风速下的风振系数进行分析。测点 1~4 在 0° 和 180° 处于顺风向，计算出的风振系数应为真实意义上的顺风向风振系数，而测点 5~8 在 0° 和 180° 方向上处于结构的横风向，所测位移响应是结构在横风向上的位移响应，此时横风向上只存在分离流产生的风脉动和由此在结构横风向产生的脉动位移，因此计算出来的平均位移应该是脉动风响应的平均值，而并非结构在平均风作用下的平均风响应。

4.1 风速对风振系数的影响分析

分析表明，测点在不同风向角作用下风振系数随风速变化趋势不尽相同，风振系数变化范围

也相差较大,迎风面风振系数随风速增大而减小;当风向角和结构存在偏角(不正交)时,风振系数随风速呈不规则变化,变化趋势不明显,出现这种情况的主要原因是分析风振系数时采用的是广义风振系数,即不管结构处于何种风向角,不管测点位移响应是横风向还是顺风向响应,都定义为风振系数,而从风振系数的真实意义上讲,只有测点处于顺风向时的风振系数才能反映结构顺风向上的响应,即顺风向风振系数,因此,从设计时采用的风振系数和顺风向风振系数的定义出发,可以将结构处于顺风向时风振系数随风速的变化趋势作为真实意义上风速对结构的影响规律。例如 $0^{\circ}$ 测点1和 $180^{\circ}$ 测点3的风振系数才有真实意义。下面以风机不转动、无周围建筑物时测点1为例进行分析。

$0^{\circ}$ 时风振系数随风速的增大而减小。这主要是因为此时测点1位于迎风面上,在设计风速较小时,平均风静力响应较小,脉动风响应较大,此时脉动风响应占主导地位,风振系数较大;随着风速的增大,脉动风响应逐渐减小,风振系数随风速呈下降趋势。

$180^{\circ}$ 时风振系数分布较 $0^{\circ}$ 时离散,风振系数随风速增大而增大。这主要是因为此时测点1位于背风面,风绕过建筑物,加大了结构周围风场的紊流度,增强了该测点挡风墙上风荷载的脉动成分,同时也加大了结构背风面脉动风动力响应,风速越大,脉动响应也越强烈,风振系数也会随之增大。

$225^{\circ}$ 时风振系数分布更加离散,从整体数据来看,其值偏大,大部分数据在4.0以上。此时结构在两个方向上同时作用有来流风,矩形外形的挡风墙加强了风的分流,测点1受到多种脉动风影响,致使风振系数很大,且随风速增强风振系数呈现不规则变化。

$270^{\circ}$ 时,测点1完全处于横风向,所测位移响应与来流风向成 $90^{\circ}$ ,在风速较小时,来流中的分离流在测点1上产生的脉动风响应相对较大,随着风速增大,来流中的分离流在测点1区域产生的漩涡脱落距离增大,使其所生脉动风响应减小,风振系数也随之减小,从整体上来看,此时的脉动风影响较大,风振系数在3.0以上。

$315^{\circ}$ 时,当风速小于 $25\text{ m/s}$ 时,风振系数随风速的增加而增大,风速大于 $25\text{ m/s}$ 时,风振系数随风速而减小,风振系数变化范围不是太大。 $225^{\circ}$ 和 $315^{\circ}$ 都处在结构的对角线上,在结构上产

生两个方向的响应,但两者对测点风振系数的影响却不相同,其中, $315^{\circ}$ 时的风振系数远小于 $225^{\circ}$ 时的风振系数,这一现象在所有的数据处理中都有存在,具体将风向角对风振系数的影响(4.2节)中进一步解释。

## 4.2 风向角对风振系数的影响分析

分析表明,测点位移因其所处位置而改变,风振系数随风向角的变化十分敏感。单个测点风振系数随风向角的变化很大,而且每个测点风振系数随风向角的变化也不尽相同。每种风速下单测点风振系数随风向角的变化规律相似。单测点风振系数在背风面、侧风面和 $45^{\circ}$ 上的风振系数比测点迎风面上的风振系数大。下面以风机不转动、无周围建筑物、 $30.8\text{ m/s}$ (该风速与根据规范推导的当地测点高度处风速非常接近)时测点1为例进行分析。

$0^{\circ}$ 和 $180^{\circ}$ 时,结构处在顺风向上,表面所受风压大致均匀,平均风响应大于其脉动风响应,脉动成分较小,测点1风振系数小于2。

$225^{\circ}$ 时,测点1不仅受到来流风中平均风的作用,而且受到其脉动风的影响,经过大量的数据分析表明,靠近风向角标好的测点受脉动风影响小,风振系数也小;远离风向角标号的测点受风脉动影响大,风振系数也大。以测点1、3为例, $315^{\circ}$ 时测点3(此时该点远离风向角标号)风振系数为18, $225^{\circ}$ 时测点1(此时该点远离风向角标号)风振系数为4.7。下面从结构振型和风特性来分析其原因。结构前三阶中存在扭转振型,在风荷载作用下,结构将会发生扭转振动。 $0^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $135^{\circ}$ 、 $225^{\circ}$ 、 $315^{\circ}$ 时,结构处于复杂的紊流场中,会加剧结构的扭转,表现为受迫振动。以 $225^{\circ}$ 测点1为例,风速矢量如图4。 $225^{\circ}$ 时测点1风响应包括:1区平均风产生的平均风荷载响应和在该区风脉动响应;另一部分是风在行进过程中受到建筑物的阻碍,绕过建筑物,在建筑物的背面(即2区)产生的脉动风,因此, $225^{\circ}$ 时测点1的脉动风响应为1区脉动响应和2区脉动响应之和,正是由于2区风脉动的影响导致了测点1风振系数增大。

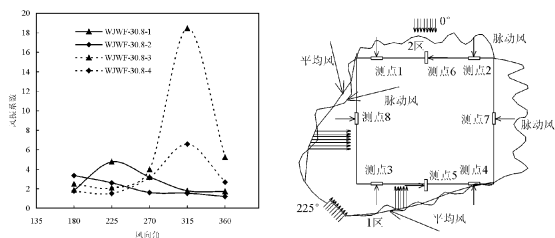


图4 风振系数随风向角的变化情况

### 4.3 周围建筑物对风振系数的影响分析

当风机不转动时,从整体上而言,180°~270°测点1、2风振系数因建筑物影响而风振系数减小;315°~360°测点3、4风振系数因建筑物影响而减小,但个别测点除外,例如:0°时测点3、4的风振系数增大,而测点5的风振系数减小,图5为0°时来流分布情况。由图可知,风在行进过程中受到建筑物的阻挡,在主厂房和建筑物之间形成回旋气流,从而增强了这部分空间顺风向上的气流脉动,导致测点3、4的风振系数增大,但从其位移响应上来看,结构的响应不大,因此风振系数的计算不但要看其值大小,还要考虑结构的真实响应。0°时,测点5的风振系数由于建筑物的存在而有所减小,这说明此种工况下测点5脉动响应是减小的,但减小幅度不大。从整体上来看,测点风振系数因建筑物的存在而减小。

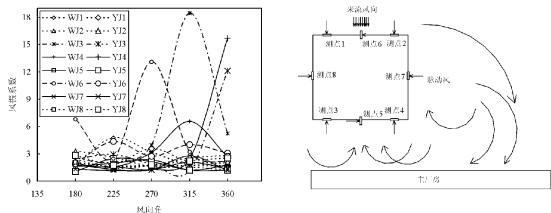


图5 周围建筑物对风振系数影响情况

风机工作的情况下,结构周围的风场因风机工作和周围建筑物的存在而发生了很大变化。通过对风机工作时30.8 m/s和33.4 m/s周围建筑物对风振系数的影响分析,这两种风速下周围建筑物对风振系数的影响规律是一致的,周围建筑物存在风机工作时都使测点风振系数减小,而且减小幅度较大。说明在这种工况下周围建筑物存在对结构抗风有利。

### 4.4 风机转动对风振系数的影响分析

风机工作不仅使结构的振动形式发生了一定变化,更使结构周围风场发生了改变。结构处于风机振动、周围风场改变、风向角、风速等多种因素的综合影响,使问题的归纳总结带来了很大的困难。首先,风机工作对风振系数的影响必须分离两个参数的影响,一个是风速的影响,另一个是风向角的影响。

#### 4.4.1 特殊风向角下风机运转的影响分析

分析表明,无周围建筑物风机转动和风机不转动时测点风振系数随风速变化趋势一致(除个别测点外)。下面以0°测点1为例进行说明(图6)。由图可知,两种工况下测点风振系数大致沿直线

分布,随着风速的增加,风振系数相应减小;当风速小于40 m/s,风机运转时测点的风振系数比风机不运转时的小,但两者的风振系数相差不大,最大差值为0.3。

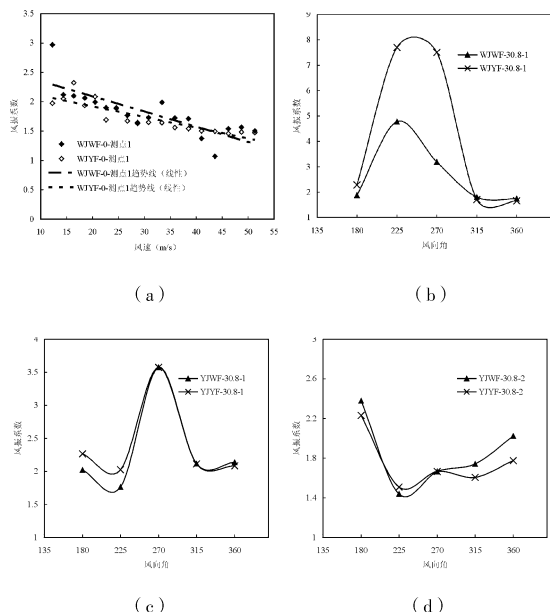


图6 风机转动对风振系数的影响

#### 4.4.2 特殊风速下风机运转的影响分析

分析表明,测点1在225°和270°(图6)、测点2在180°、测点3在360°时,风机运转使这些测点风振系数明显增大;测点1、2、3在其他风向角下风机运转对风振系数影响不大;测点4在任何风向角下风机运转对风振系数都没有较大影响,这说明风振系数的大小不仅与风机的振动有关,在很大程度上还受风向的影响,当来流风向与结构表面不垂直时,结构处于明显的扭转振动状态,使某些测点的风振系数在风机运转时发生很大的变化,但从所有风向角的影响上来看,只存在部分风向角使得风机运转对风振系数有扩大影响,从真正意义的风振系数定义角度出发,并不影响对风振系数的计算,只是结构处于不均匀风荷载作用下的扭转导致测点位移符号发生变化,导致测点的脉动位移响应加大,从而按照公式计算的风振系数明显增大。因此,风振系数的应用不但要看其值的大小,而且还要考虑结构的实际响应,有可能风振系数很大而实际响应很小。另外,从结构顺风向风振系数的计算上来看,当测点处于迎风面时,风机运转对测点风振系数影响不大;当测点处于背风面时,由于背风面脉动风影响导致部分测点风振系数增大。

有周围建筑物时,主要的现象是当风从主厂

房方向吹来时，重点分析风速为 30.8 m/s 的情况。分析表明，当风从主厂房方向吹(180°)来时，风机运转对测点 1、2、3、4 的风振系数影响不大(图 6)。360°(0°)风向角时，风机运转对测点 1、2 风振系数影响较小，但使测点 3、4 风振系数明显减小，其主要原因是风以该角度吹来时，由于周围建筑阻挡使一部分来风转向(180°)，抵消一部分最初来风，致使风脉动响应大大减弱，即在该情况下风机运转使这些测点风振系数减小。

5 小结

根据气动弹性模型风洞试验研究结果，并结合其他方法研究结果进行对比分析，得出如下主要结论。

(1)结构属大跨空间高柔结构，风振系数可按风洞试验结果顺风向取值。试验结果建立在准定常假设基础上，并考虑了高阶振型影响。

(2)顺风向时风振系数基本在 2 以下。横风向时，结构虽有振动，但因该方向上风压较小，可不考虑。当风向与结构斜交时，刚心、质心和几

何中心不重合，顺风向、横风向和扭转风振响应耦合，振动响应加大。

(3)就整体而言，周围建筑物的存在使风振系数减小，设计时可不考虑周围建筑物和风机转动影响。

参考文献：

[1] 中华人民共和国国家标准. GB50009－2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2001.

[2] 黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海：上海同济大学出版社，2002.

[3] 谢壮宁，倪振华，石碧清. 大跨屋盖风荷载特性的风洞试验研究[J]. 建筑结构学报，2001，31(2)：16－22.

[4] Bartz J H. Dry cooling of power plants－a mature technology [J]. Power Engineering, 1998；10.

[5] 白国良，赵春莲，李晓文，等. 大型电厂结构风致响应研究报告[R]. 西安：西安建筑科技大学，2006.

[6] 李忠涌. 上海东方艺术中心风荷载试验[J]. 同济大学学报，2003，31(4)：22－28.

[7] Jozwiak R J, Zuranski J A. Wind tunnel tests of a cable supported roof of a stadium [J]. Wind Engineering into the 21st Century, Larsen, Larose & Livesey ( eds ), Balkema, Rotterdam, 1999；1511－1517.

Experimental Study on Wind-Induced Vibration Response of aSteel Truss -Reinforced Concrete Column Structure

Yao Zeliang<sup>1</sup>, Bai Guoliang<sup>2</sup>, Dang Faning<sup>1</sup> and Li Xiaowen<sup>2</sup>

- (1. Faculty of Water Resources and Hydraulic Power, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;  
2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Large-space and cantilevered structural dynamic behaviors show that its wind vibration factor can't be calculated by the code formula in China. An aeroelastic model was designed. The structural dynamic behaviors and its relevant wind vibration response problems under the action of fluctuating wind loads, such as the displacement, acceleration, torsion and aerodynamic stability, were tested. The structural wind vibration factors were obtained. The effects of wind speed, wind direction angle, fans, surrounding structure on the wind vibration factors were analyzed. The recommended value of wind vibration factors was given. The wind tunnel test data were compared with the results of other methods. Results show that the test data are bigger than the others, which agrees with the wind tunnel experimental principle. The results provide a new basis for the structural design, which may be of referential value to similar projects.

**Key words:** high flexible structure; torsion; aero-elasticity model wind tunnel test; wind vibration factor