

# 沙岭子电厂冷却塔群风荷载的风洞研究

顾志福 孙天凤  
(北京大学,北京,100871)

季书弟  
(能源部华北电力设计院,北京,100011)

**摘要** 本文通过风洞实验研究了沙岭子电厂接近直线布置的四个双曲线型冷却塔在主导风向和最大风速风向角下的平均压力和脉动压力分布。研究表明: 在较大风向角时, 主要由于塔群间的邻近作用, 使塔面最小平均风压系数绝对值有所增加, 对塔面的脉动压力分布影响较小; 在较小风向角时, 主要由于上游塔的尾流影响, 使下游塔塔面的平均压力分布变化较大, 特别是脉动压力, 与孤立塔相比可增大几倍。同时, 塔群影响使得下游塔压力谱中能量分布相对集中, 其峰值频率较孤立塔有成倍的提高。

**关键词** 冷却塔群, 脉动压力, 邻近影响, 尾流影响

## 一、引 言

河北宣化附近沙岭子电厂的冷却塔群由四座外形和尺寸相同的双曲线型自然通风冷却塔组成; 塔高 105 米, 底部直径 82.6 米, 淋水面积 4500 平方米。四塔基本上自西北向东南排列 (如图 1 所示), 分别称为 I, II, III 和 IV 塔。I、II 塔的中心连线与 III、IV 塔的中心连线平行并相距 20 米定义自 I、II 塔连线起算的角度为风向角  $\beta$ , 顺时针方向为正。当  $\beta = 15^\circ$  时为当地常年主导风向, 当  $\beta = 37.5^\circ$  时为最大风速风向。

从风荷载的角度来看, 由于冷却塔之间的相互影响, 其中包括邻近影响和尾流影响, 与孤立塔相比不管是平均压力分布还是脉动压力分布都会有很大不同。在实际设计中如估计不足将会导致灾难性的后果。1965 年英国渡桥电站冷却塔

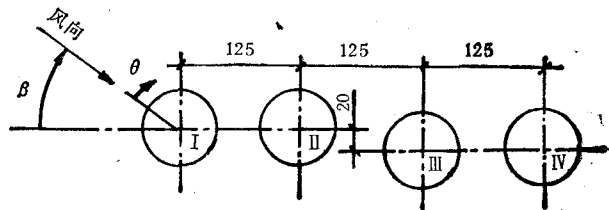
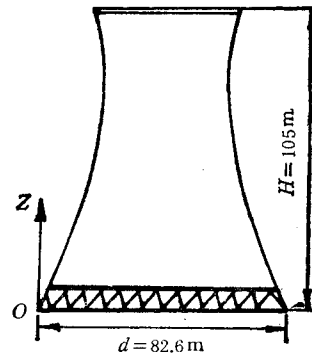


图 1 冷却塔尺寸和沙岭子电厂塔群布置示意图

本文于 1990 年 7 月 27 日收到第一稿, 1990 年 9 月 20 日收到修改稿。

群中处于下风向的三座塔在五年一遇的大风中倒塌事件就是一个典型的例子<sup>[1]</sup>。通过对渡桥事件的调查及随后的许多研究结果,不少学者认为塔群的影响和随之带来的动态荷载变化是导致发生这一灾难性事件的主要因素之一。

为了给工程设计提供科学的风荷载依据,同时也为了对建筑群之间的相互影响机理进行探索,我们对沙岭子电厂四塔的实际布置进行了风洞模拟试验,以了解该塔群布置在常年主导风向和最大风速风向下的风荷载特性,重点在于研究塔群对动态压力分布的影响。鉴于当时具有一定尺寸的大气边界层风洞尚未建成,实验仍在均匀气流中进行。

实际的冷却塔是处在近地面的空气动力“粗糙”层内(又称为大气边界层)。对于风荷载说,大气边界层气流与均匀气流的主要差别可简单地归结为风速梯度(即风速随离地面高度增加而增加)和大湍流度二大特点。根据我们以往的结果,如果在大气边界层气流实验中采用“同高风速”的方法来无量纲化平均风压系数,那么与在均匀气流中所得的实验结果非常相近(指冷却塔而言)。另一方面,来流湍流度对塔面的脉动压力分布还是有很大影响的,特别是在迎风面附近。然而本实验的主要目的在于研究由于群体而产生的影响,因此在均匀流中的实验也有一定的学术意义和实际价值。

## 二、实验设备及数据处理

实验是在北京大学低速回流风洞中进行的。该风洞实验段开口,截面为圆形,直径为 2.25 米,长 3.65 米。来流湍流度低于 0.5%,最大风速约为 50 米/秒。

冷却塔模型由全尺寸塔缩尺 1/300 制作而成。模型的顶环和进风口用金属制成,其余为木材。为了减少误差,我们仅用一个塔作为“测量塔”,其他塔则作为“影响塔”。测量塔沿子午线每隔 90° 开一排测压孔,每排有 14 个孔。在实验中利用风洞的  $\beta$  机构旋转模型就可获得冷塔整个面上的压力分布。为了模拟地面的影响,模型被安装在横跨整个实验段的底板上。

按照通常的做法,我们可以将在塔面上测得的压力  $p_b(\theta, z, t)$  分为时间平均量  $\bar{p}_b(\theta, z)$  和脉动量  $p'_b(\theta, z, t)$  二部分,即:

$$p_b(\theta, z, t) = \bar{p}_b(\theta, z) + p'_b(\theta, z, t)$$

其中  $\theta$  为自风向起算的纬向角,顺时针为正,  $z$  为离零米基准面的高度,  $t$  为时间。

我们定义平均压力系数  $C_p(\theta, z)$  和脉动压力系数  $C_{p'}(\theta, z)$  如下:

$$C_p(\theta, z) = \frac{\bar{p}_b(\theta, z) - p_{00}}{1/2 \rho V_{\infty}^2}, \quad C_{p'}(\theta, z) = \frac{\sqrt{\overline{p'_b(\theta, z, t)^2}}}{1/2 \rho V_{\infty}^2}$$

其中  $p_{00}$  为来流参考静压,  $1/2 \rho V_{\infty}^2$  为来流动压。

为了便于工程应用和进行不同状态下塔面压力分布的比较,我们选取从 0.4H 至 0.8 H (H 为塔高)的塔面压力系数沿子午向的平均值作为“代表性”曲线。根据过去多次冷却塔实验经验和本次实验结果,此代表性曲线与  $z = 0.55H$  处的压力分布曲线很接近。所以,本文给出的结果均以这一层为基础。

我们采用增加模型表面粗糙度的方法来获得全尺寸塔在设计风速下的压力分布结果。具体的做法是在塔面沿子午线方向粘贴平均直径为 0.11 毫米的丝线 24 条,沿纬向

均匀分布。这样表面状态下的模型在风洞实际风速为 40.6 米/秒的条件下得到的平均压力分布与广东茂名电厂冷却塔(单塔)在强风时实测所获得的平均压力分布相接近,即平均压力系数最小值  $C_{pmin}$  为 -1.5 左右<sup>[2]</sup>。以冷却塔通风筒平均直径为特征长度,本次实验的雷诺数  $R_e = 5.3 \times 10^5$  塔面相对粗糙度  $k/D = 5.8 \times 10^{-4}$  (其中  $k$  为丝线直径,  $D$  为冷却塔通风筒平均直径)。上述茂名塔实测时的雷诺数  $R_e$  约为  $5 \times 10^7$ 。

脉动压力测量的关键是测压系统的频率响应。为了获得较高的频率响应,压力传感器被安装在塔内测压孔附近,并在测压导管上增加了阻尼器以避免测压管腔内空气柱的共振。压力传感器将瞬时的压力信号转变成电压信号输出后经直流放大器放大再通过模数(A/D)转换器进入计算机进行运算处理。同时也将直流放大器输出的信号连续记录在磁带记录仪上留待后来进一步作动态分析处理。每一测点的记录时间为 1 分钟左右。本文给出的平均压力分布和均方根值脉动压力分布都是通过这样的测量和数据采集系统获得的。仪器布置框图如图 2 所示。

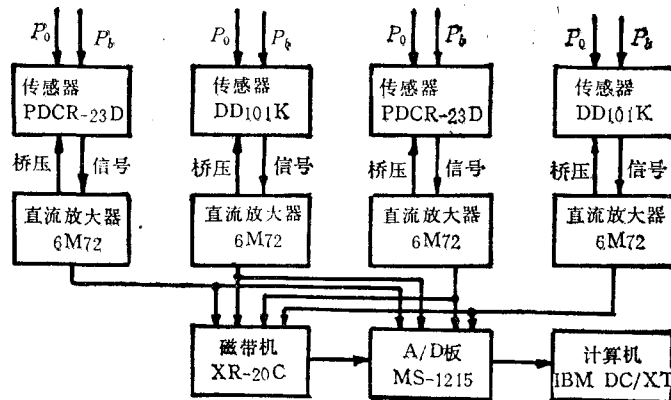


图 2 测量仪器布置框图

根据实验前的标定,该测压系统在 125 Hz(赫兹)以下时幅值相对误差不超过 1%,相位滞后可忽略。

### 三、塔面压力分布实验结果

图 3 为  $\beta = 15^\circ$  (主导风向角)时 I、II、III 和 IV 塔的平均压力系数分布与孤立塔时的比较(其中  $S$  表示孤立塔时的分布)。从 I 塔的压力分布来看与单塔时差别不大,由于后塔的影响使 I 塔的  $|C_{pmin}|$  (绝对值)略有减小。II 塔的压力分布就大为不同:首先其驻点即  $C_p$  最大值点位置向右侧移动了  $15^\circ$  左右,其次靠近 I 塔的左侧负压面积大幅度增加,但其峰值  $|C_{pmin}|$  却有所减小,背压值  $|C_{pw}|$  也略为减小。III 塔的压力分布与 II 塔类似,只是相对来流而言更接近于处在 II 塔的尾流之中,因此 II 塔的尾流对它的影响更大,具体反映在其前驻点值更小,位置进一步向右偏,达  $20^\circ$  左右;左侧的负压更趋平缓,  $|C_{pmin}|$  和  $|C_{pw}|$  更小。由于相对来流来讲,如果不考虑 I、II 塔的影响,IV 塔与 II 塔所处的位置相同,因而它们的压力分布比较接近。

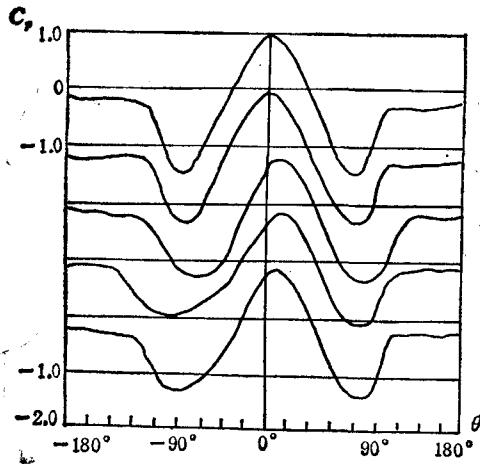


图 3  $\beta = 15^\circ$  (主导风向角)时,四塔的平均压力系数分布

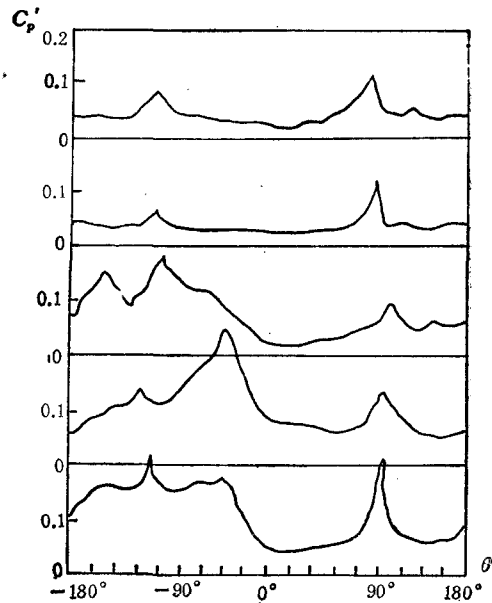


图 4  $\beta = 15^\circ$  (主导风向角)时四塔的脉动压力系数分布

图 4 为  $\beta = 15^\circ$  时四塔的脉动压力系数分布  $C_p'$  和孤立塔的比较。与孤立塔相比, I 塔的  $C_p'$  随  $\theta$  的变化相似,其中正负  $100^\circ$  附近的二个峰值是由于剪切层从塔面分离所引起的。由于受上游塔尾流的影响, II、III 和 IV 塔左侧的脉动压力均成几倍地增加,其中 III 塔峰值最高。II 塔在靠 I 塔的左侧出现二个峰值,分析其原因,第一个峰值是 II 塔本身涡脱落所引起,第二个峰值则可能是某种分离再附现象所致。在 III、IV 塔上  $C_p'$  于  $-40^\circ$  左右出现第一个峰值,这是因为前塔的剪切层分离后作用在后塔塔面所造成的(从该位置附近的压力自功率谱中可以看到明显的峰值)。第二个峰值略向后移至  $120^\circ$  左右,这是 III、IV 塔本身剪切层分离所致。相比较而言, IV 塔的脉动压力分布更为饱满,这是上游塔尾流综合作用的结果。

通过以上对  $\beta = 15^\circ$  时四塔平均压力和脉动压力分布与孤立塔的比较分析可知:当风向角较小时,主要是尾流影响,上游塔对下游塔的平均压力分布影响较大,同时对下游塔的脉动压力影响很大,能增加几倍。这主要是由于上游塔的尾流直接作用所致。

图 5 为最大风速风向  $\beta = 37.5^\circ$  时四塔的平均压力分布。由于风向角的增大,与  $\beta = 15^\circ$  时相比,各塔的平均压力分布形态相差较小,这是因为塔群间的尾流影响大为减弱。但由于塔与塔的邻近作用(其中包括从塔面分离的剪切层的作用和剪切层间的相互作用)使得各塔两侧的  $|C_{p_{min}}|$  各不相同,且有不同程度的增加。如 I、II 塔一侧  $C_{p_{min}}$  可达  $-1.6$ ,而 III、IV 塔一侧则达  $-1.65$  左右。(注:  $|C_{p_{min}}|$  在对冷却塔作静态应力计算时是一个重要的参数)

图 6 为  $\beta = 37.5^\circ$  时四塔的脉动压力系数分布与  $\beta = 15^\circ$  时相比较, II 塔的脉动压力值要小得多,这是因为 I 塔尾流影响大为减弱所致,与上述平均压力分布的影响减小相一致。III 塔的脉动压力值还是比较大,这是因为相对而言它与 II 塔的轴线连线与

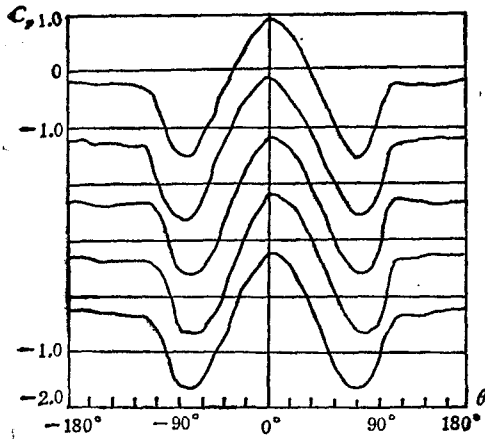


图 5  $\beta = 37.5^\circ$  (最大风速风向角)时四塔的平均压力系数分布

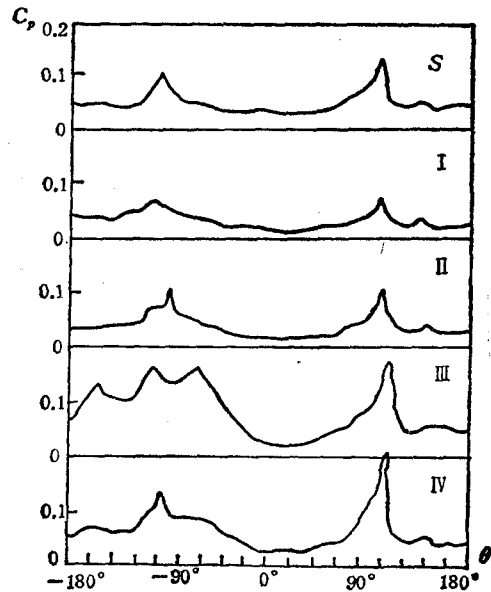


图 6  $\beta = 37.5^\circ$  (最大风速风向角)时四塔的脉动压力系数分布

来流的夹角要小  $10^\circ$  左右,所以受 II 塔的尾流影响要大些。IV 塔分布与 II 塔相似,但数值有增加。

通过以上分析我们可以看出:随着风向角的增加,尾流的影响将逐渐减弱,而邻近作用的影响将增加;反映在平均压力分布上将使各塔最小负压系数绝对值有所增加。

为了进一步了解这二种不同的群体影响产生的机理,我们对各塔面不同纬向角  $\theta$  时的脉动压力进行了谱分析。

首先,我们发现单个冷却塔  $\theta = 120^\circ$  时的压力自功率谱中出现有峰值(见图 7,图中纵座标单位为  $\log \times (S_{P_i}(f)/\text{Max}\{S_{P_i}(f)\})$ ,其中  $S_{P_i}(f)$  为单塔(S)或 I、II、III、IV 塔的压力自功率谱密度,  $f$  为频率),对应的频率约为 26 Hz。据此算得的反映涡脱落频率的无量纲参数斯托哈尔数  $St = 0.12$ ,其值与 Simiv 等<sup>[3]</sup>对孤立岛屿假定的  $St$  数一致。塔群时,在上述二种风向角下的 I 塔压力自功率谱中却找不出明显的峰值。这是由于下游塔的存在抑制了上游塔有规则的剪切层分离或涡脱落的缘故。

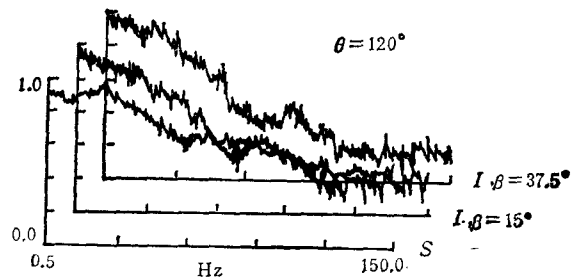


图 7 单个塔(S)和 I 塔分别在  $\beta = 15^\circ$  和  $\beta = 37.5^\circ$  时  $\theta = 120^\circ$  压力的自功率谱

图 8 分别为四塔在二种风向角下,  $\theta = 0^\circ$  时的压力自功率谱。当  $\beta = 15^\circ$  时, II、III 和 IV 塔均处于前塔尾流中,所以在  $\theta = 0^\circ$  时即出现峰值,但峰值频带很宽,主峰

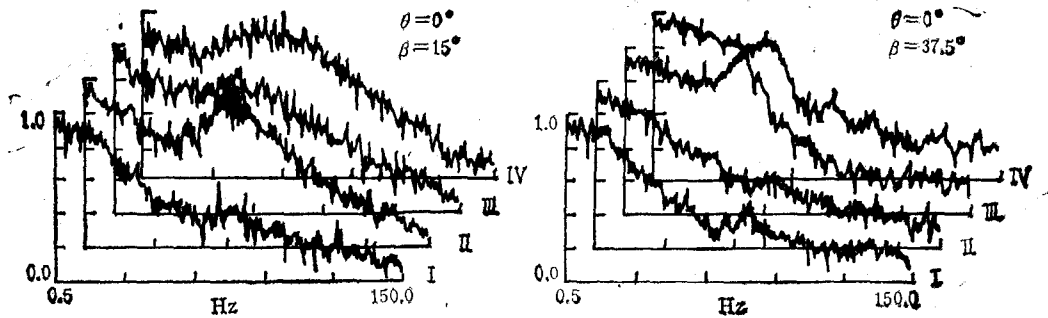


图 8 二种风向角下,四塔  $\theta = 0^\circ$  时压力的自功率谱

值在 66 Hz 附近约为单塔峰值频率的 2 倍半,特别是 II 塔的峰值很明显。

当  $\beta = 37.5^\circ$  时, II 塔  $\theta = 0^\circ$  的压力谱没有明显峰值,而 III、IV 塔在两倍于单塔峰值频率的 52 Hz 附近出现明显峰值。与  $\beta = 15^\circ$  时相比,峰值的带宽变窄,峰值更明显。II 塔在  $\theta = -20^\circ$  时的谱也出现了频率为 52 Hz 的峰值。我们估计,如果风向角再增大,出现频率峰值的角度还会后移,到一定风向角时 II 塔迎风面将不出现峰值。III 塔在  $\theta = 0^\circ$  时出现峰值是因为相对 II 塔来讲它的风向角要小,当然还有 I 塔对它的影响。

另外,我们还发现 II、III 和 IV 塔在  $\theta = \pm 120^\circ$  附近(不同风向角下,各塔  $\theta$  角稍有差别)分别出现了与各自  $\theta = 0^\circ$  时频率相同的峰值,这可能是各塔各自剪切层有规则的分层所致。

以上说明,群体的影响使表征有规则的旋涡自物体表面脱落的斯托哈尔数  $St$  变化很大。所以,在实际中群体影响常会导致一些无法预估的风振问题出现。

#### 四、结 论

从以上给出的沙岭子电厂四塔具体布置在二种特定风向角下的平均压力、脉动压力分布和压力谱分析结果,我们可以得到以下更具普遍意义的冷却塔群对风荷载的影响:

1. 与孤立塔相比,由于塔群影响作用,在塔面的平均压力分布会有不同。当风向角较小时主要是由于上游塔的尾流影响,使处在下风向的塔塔面压力分布变化很大;当风向角较大时主要是邻近作用,各塔的塔面压力分布形状基本相似,但是其最小负压系数绝对值有所增加。

2. 塔群对作用在各塔面的脉动压力分布影响很大。特别是较小角度下的尾流影响对下游塔面脉动压力的幅值影响极大,有时有几倍的增加。相对而言,角度较大时的邻近作用对脉动压力分布的幅值影响要小些。

3. 塔群影响引起下风向塔压力谱的能量集中,同时峰值频率与单塔相比有成倍的提高。

综上所述,塔群引起的邻近作用影响和尾流影响各有其不同的机理和特点。从动态风荷载的角度来讲,群体的影响是极为重要的。在作冷却塔群设计时,除了必须考虑塔群引起的平均风压变化外,更应考虑下风向塔塔面脉动压力幅值的大幅度增加及压力谱中

能量的相对集中和峰值频率的成倍提高,后者可能会导致风振问题的出现。

致谢 参加本实验工作的还有张尚谦、刘可器、孟宪忠等同志。沙岭子电厂和华北电力设计院对于本研究项目给予了资助和支持。作者在此一并表示深切的谢意。

### 参 考 文 献

- [1] Report of the Committee of Inquiry into the Collapse of Cooling Towers at Ferrybridge on Monday November 1965, C. E. G. B., London, 1966, England
- [2] Sun T F and Zhou L M. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1988 14: 181—192
- [3] Simiv E and Scanlan R H. *Wind Effects on Structures*, New York. John Wiley & Sons. 1978:128

## A WIND-TUNNEL STUDY OF WIND LOADING ON COOLING TOWERS OF SHA-LIN-ZI POWER STATION

Gu Zhifu Sun Tianfeng

(Peking University Beijing, 100871, China)

Ji Sude

(N. C. E. D. I.\*)

**Abstract** In this paper the results of wind tunnel testing of fluctuating as well as mean pressures on models of four neighboring cooling towers of Sha-Lin-Zi Power Station, arranged nearly in line under directions of prevailing wind and of peak speed are presented and discussed. It shows that, the peak suction (mean pressure) of certain towers, due to proximity interference, will be moderately greater, and the fluctuating pressure (rms value) of downstream towers, due to wake interference, may be several times larger than that of isolated tower respectively. Meanwhile the frequency of the peak value of pressure spectra will be two times higher.

**Key words** cooling towers group, fluctuating pressure, proximity interference, wake interference

---

\* Northern-China Electricity Design Institute, Department of Energy.