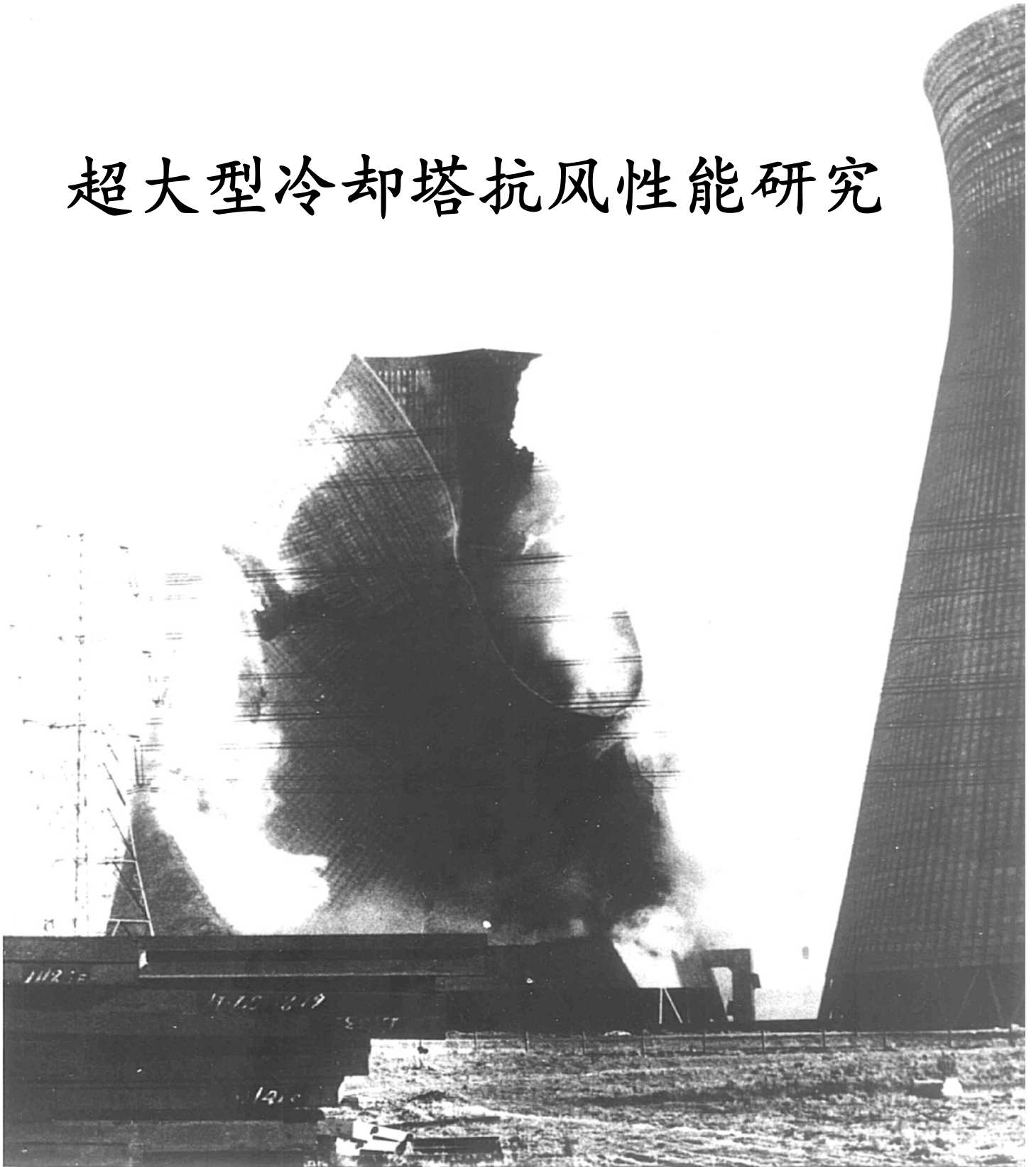


同济大学风工程馆会议室

2013.12.2

超大型冷却塔抗风性能研究



超大型冷却塔抗风性能的研究

1. 台风风场风速特性研究

by 曹曙阳

2. 台风作用下超大型冷却塔物理模型风洞试验研究

by 陈旭

3. 超大型冷却塔龙卷风荷载试验研究

by 操金鑫

4. 典型桥梁断面颤抖振模型试验

by 翁祥颖



台风风场风速特性研究

曹曙阳 教授/博士

同济大学 土木工程防灾国家重点实验室

二〇一三年十二月二日



SLDRCE Tongji University



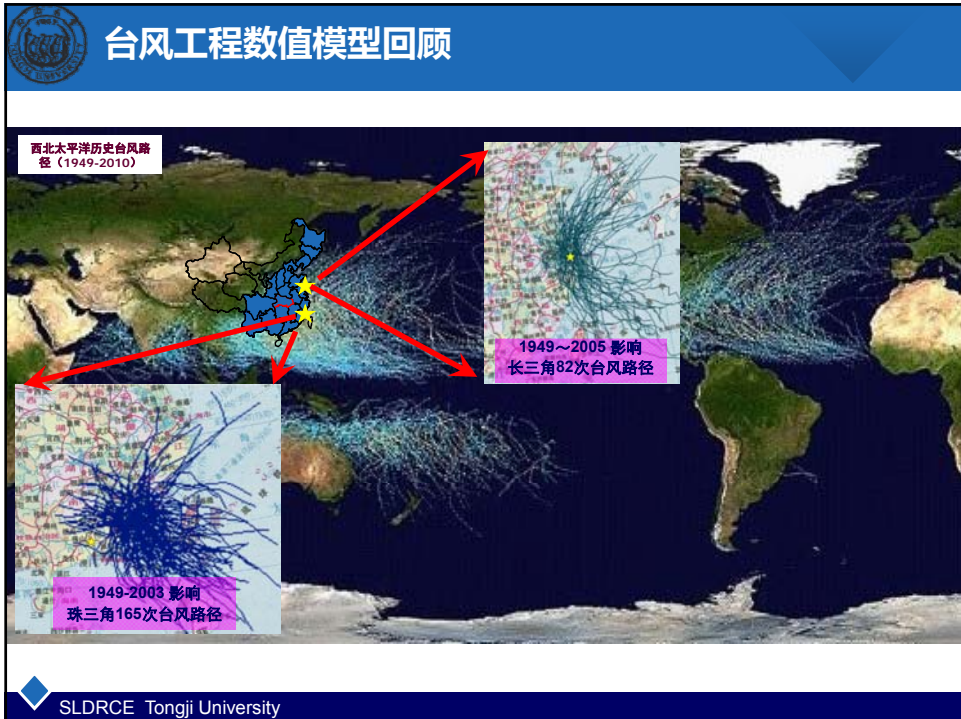
强/台风影响

● 沿海大型冷却塔遭受飓风气候影响日渐频繁



➤ 飓风极值风场的风速剖面变化梯度低于良态模式、紊流度与阵风因子远大于规范规定值

SLDRCE Tongji University



台风工程数值模型回顾

1 $P = P_c + \Delta P \exp\left[-\left(\frac{R_m}{r}\right)^\beta\right]$

中心气压及其压差 最大风速半径

2 $\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v = -\frac{1}{\rho} \nabla p - f \times k \times v + F$

$v = v_g + v'$

3 $\begin{cases} \frac{\partial v_g}{\partial t} + v_g \cdot \nabla v_g = -\frac{1}{\rho} \nabla P - f k \times v_g \\ \frac{\partial v'}{\partial t} + v' \cdot \nabla v' + v' \cdot \nabla v_g + v_g \cdot \nabla v' = -f k \times v' + F \end{cases}$

4 $\begin{cases} v'|_{z' \rightarrow \infty} = 0 \\ \rho k_m \frac{\partial v'}{\partial z} \Big|_{z'=0} = \rho C_d |v_s| v_s \end{cases}$

$C_d = \kappa^2 / \left\{ \ln\left[\frac{(z_{10} + h - d)}{z_0}\right] \right\}^2$

Holland 径向压力剖面系数 β , 优化值 1.05~1.75

Mature typhoon wind field structure

Vertical coordinate system

地表粗糙长度

SLDRCE Tongji University



典型台风风场模拟案例分析

强台风基本参数定义

台风中心压差: $\Delta P=50\text{hPa}$

最大风速半径: $R_m=87.9\text{km}$

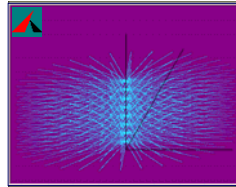
径向风压指数: $\beta=1.75$

整体移动速度: $C=10\text{m/s}$

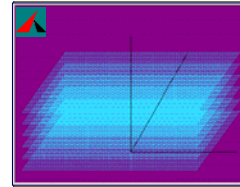
大气边界层中:

半径500km、高50m

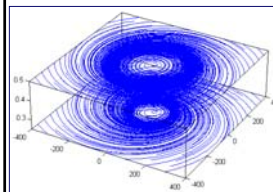
空间单元为: $50 \times 300 \times 16$



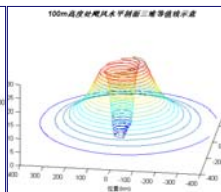
Cylindrical coordinate



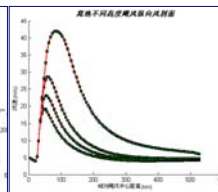
Orthogonal coordinate



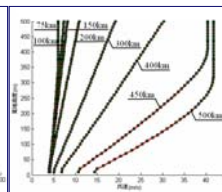
Speed vectors



Pressure isoline



Horizontal speed profile



Vertical speed profile



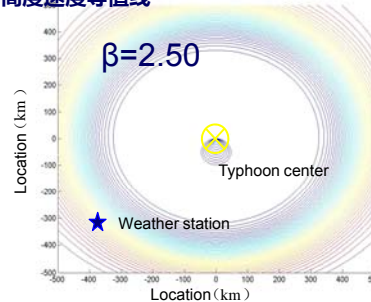
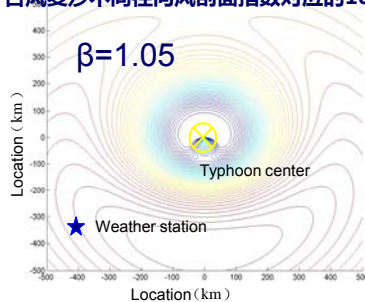
典型台风风场模拟案例分析

径向风压剖面参数 β 的影响

Holland提出的竖向压力和风速的公式(Holland, 1980)

$$P_r = P_c + \Delta P \exp\left[-\left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^\beta\right] \quad V = \sqrt{\frac{\beta}{\rho_A} \cdot \left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^\beta \cdot [100] \cdot (P_r - P_c)}$$

台风麦莎不同径向风剖面指数对应的10m高度速度等值线



- β 表面风压对风速的分布具有强的敏感性



基于 β 参数估计的结果改善

世贸中心432m 高度

❖ 台风罗莎 Krosa (0716)

Zhu, L.D., Zhao, L., et al. (2012). Validation of Numerical Typhoon Model Using Both Near-ground and Aerial Elevation Wind Measurements. *Disaster Advances*, 5(1), 14-23.

SLDRCE Tongji University

基于 β 参数估计的结果改善

❖ 径向风压参数 β 的影响

(a) $B=1.1$

(a) Wind speed at Waglan island

Li, Q., Duan Z.D. (2005) Shapiro typhoon wind-field model and its numerical simulation. *Journal of nature disasters*. 14(1), 45-52.

Huang, W.F., Xu, Y.L. (2012) A refined model for typhoon wind field simulation in boundary layer. *Advances in structural engineering*. 15(1), 77-89.

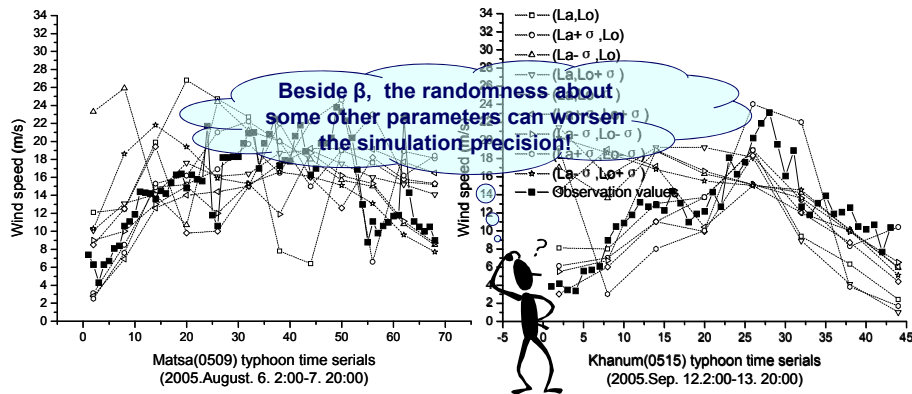
在地表高度处，只有引入一些特定的假设，才能得到更好的拟合效果。

SLDRCE Tongji University



风场参数敏感性分析

❖ 两个强台风（台风麦莎Matsa0509和台风卡努Khanum 0515）的随机性



考虑了更多参数随机性的模拟和观测结果的对比



SLDRCE Tongji University



如何获得合理的风场参数？

“真实的”而非“假定的”！

我们提出了一种间接的方法……

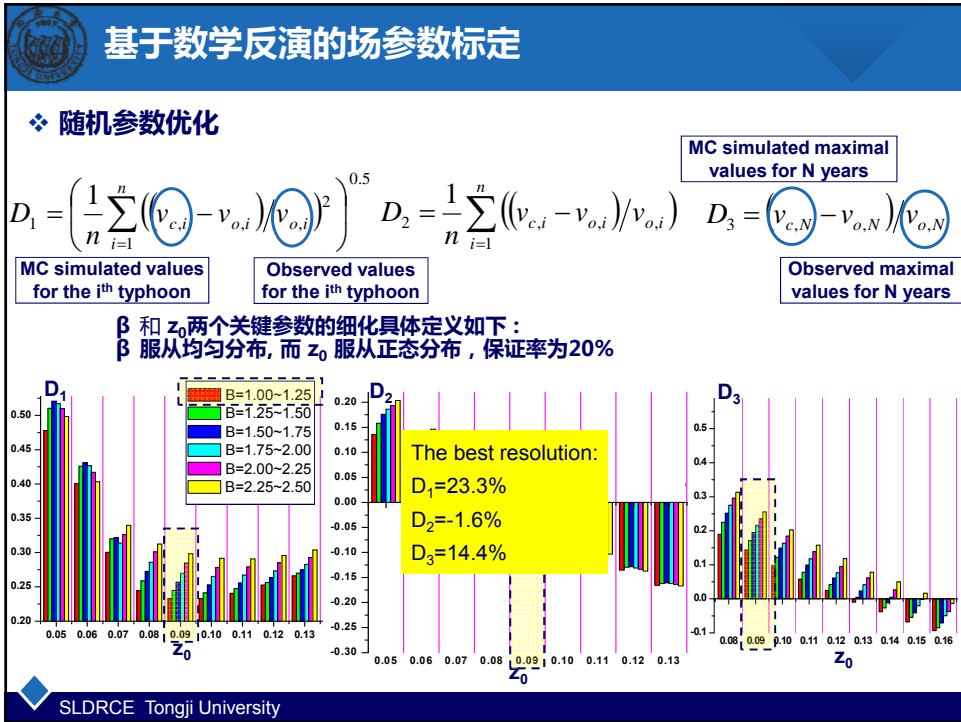
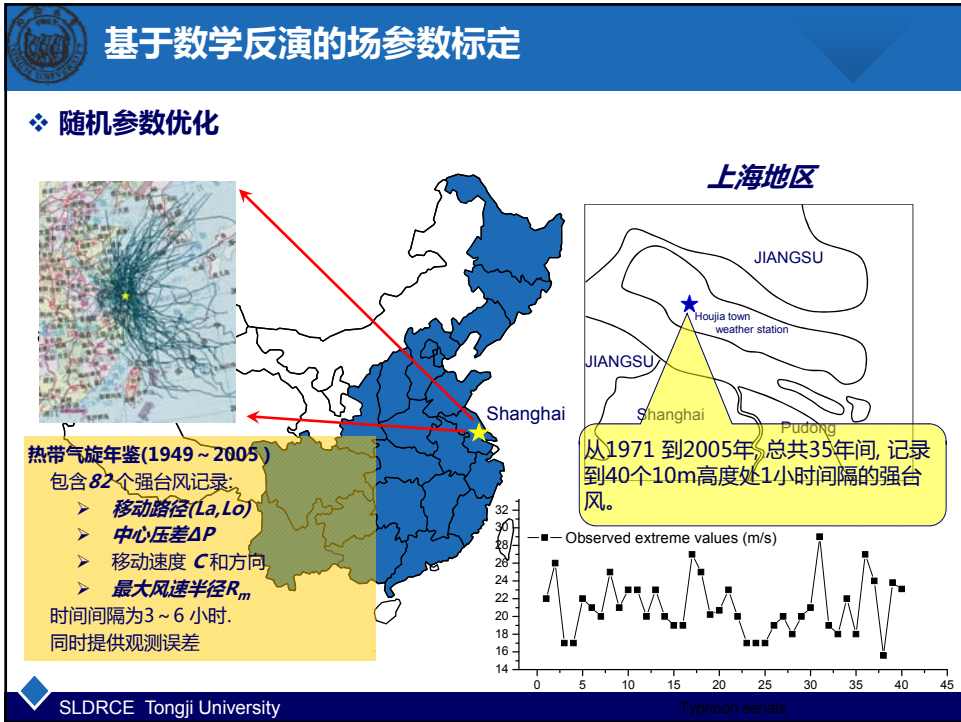
实测风速被用来获得风场参数！

Zhao, L., Zhu L.D., Ge, Y.J. (2009) Monte-Carlo simulation about typhoon extreme value wind characteristics in Shanghai region. *Acta Aerodynamica Sinica*. 27(1), 25-31.

Zhao, L., Lu, A.P., Zhu, L.D., Cao, S.Y., Ge, Y.J. (2013) Radial pressure profile of typhoon field near ground surface observed by distributed meteorologic stations. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 122 105-112.

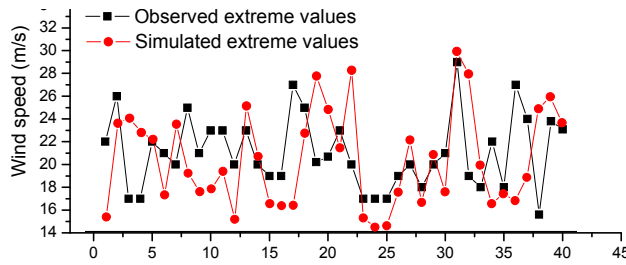


SLDRCE Tongji University





基于数学反演的场参数标定

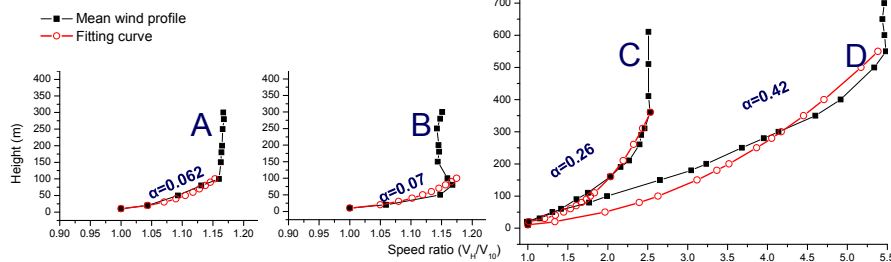


上海地区



模拟极值风速与实测对比

对于 A,B,C,D 四类典型场地



SLDRCE Tongji University



基于数学反演的场参数标定

上海地区台风风环境参数汇总表

Wind environment para.	Climate mode	A terrain	B terrain	C terrain	D terrain	
Gradient height (m)	Normal	300	350	400	450	
	Typhoon	100	100	350	550	
Profile index	Normal	0.12	0.16	0.22	0.30	
	Typhoon	0.062	0.06	0.26	0.42	
10m height	Gust factor	Normal	1.38	1.38	1.70	1.70
		Typhoon	1.83	1.93	2.26	2.33
	Mean speed	Normal	36.4	31.0	24.3	17.5
		Typhoon	32.5	32.0	14.4	7.0
	Fluctuating speed	Normal	50.2	45.3	41.3	29.8
		Typhoon	59.5	61.8	32.5	16.2
100m height	Gust factor	Normal	1.38	1.38	1.70	1.70
		Typhoon	1.59	1.71	1.86	2.00
	Mean speed	Normal	48.0	44.8	40.4	34.9
		Typhoon	37.8	37.1	24.9	13.9
	Fluctuating speed	Normal	66.2	61.8	68.7	59.3
		Typhoon	60.1	61.5	43.8	27.0

SLDRCE Tongji University



基于数学反演的场参数标定

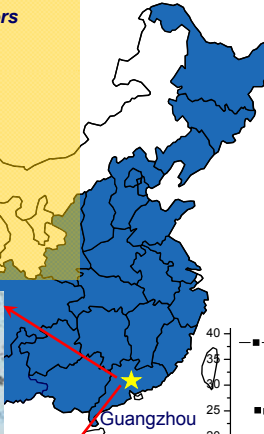
❖ 随机参数优化

Also provided **Observation errors**
热带气旋年鉴(1949~2003)

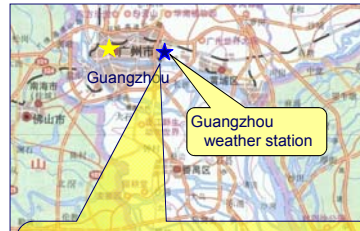
包含165个强台风记录:

- 移动路径(La, Lo)
- 中心压差 ΔP
- 移动速度 C 和方向
- 最大风速半径 R_m

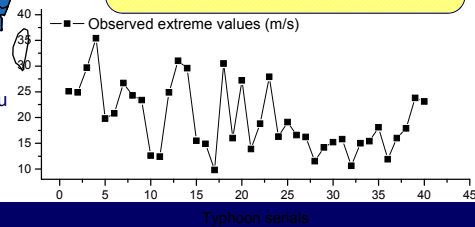
时间间隔为3~6小时
同时提供观测误差



广州地区

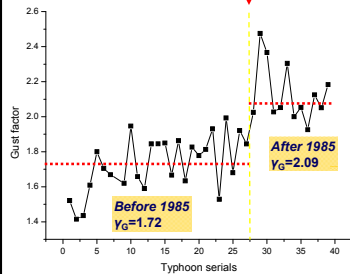


从1962到2003年, 总共42年间, 记录到39个10m高度处1小时间隔的强台风。

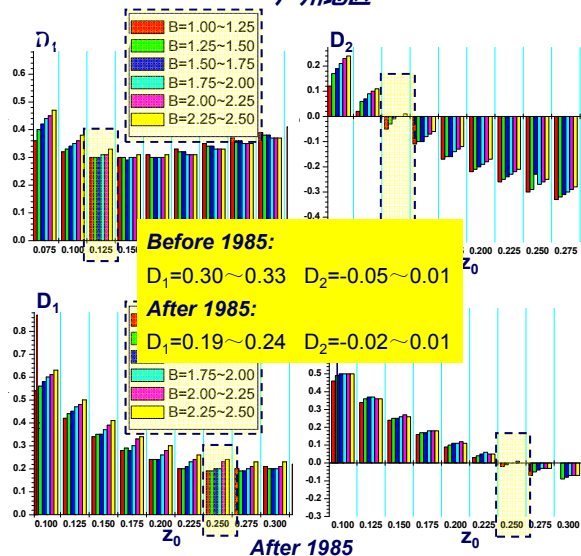


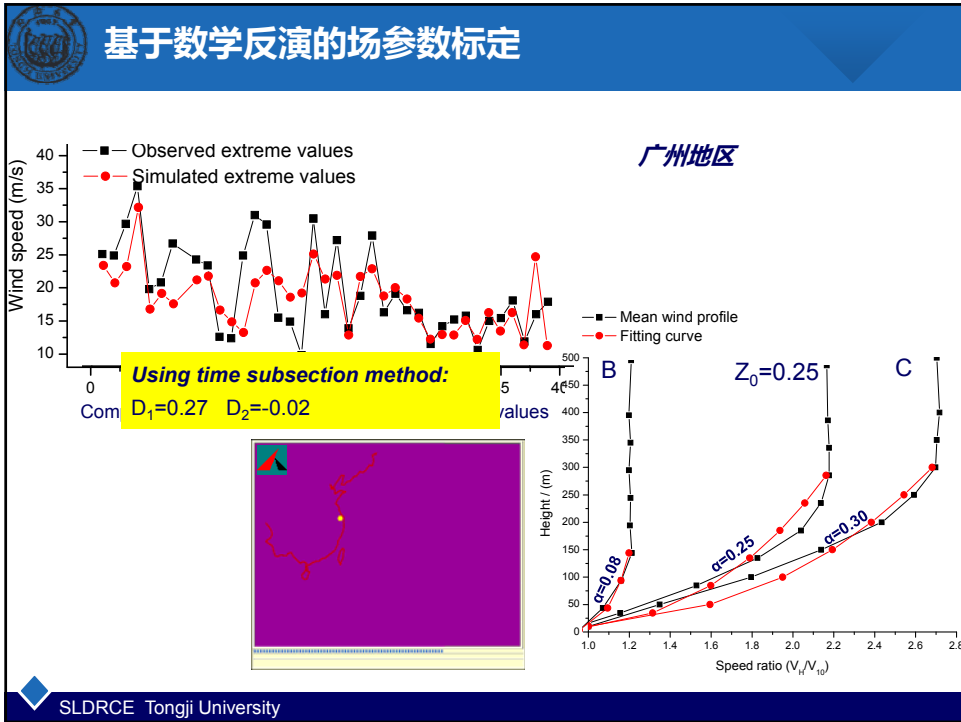
基于数学反演的场参数标定

❖ 随机参数优化



广州地区





基于数学反演的场参数标定

广州地区台风风环境参数汇总表

Wind environment para.		Climate mode	B terrain $Z_0=0.25$	$Z_0=0.25$	C terrain $Z_0=0.30$
Gradient height (m)	Normal	Normal	350	350~400	400
	Typhoon	Typhoon	150	300	300
Profile index	Normal	Normal	0.16	0.16~0.22	0.22
	Typhoon	Typhoon	0.08	0.25	0.29
10m height	Gust factor	Normal	1.38	1.38~1.70	1.70
		Typhoon	1.93	2.09	2.26
	Mean speed	Normal	31.3	31.3~24.6	24.6
		Typhoon	34.9	17.5	15.2
	Fluctuating speed	Normal	43.2	43.2~41.8	41.8
		Typhoon	59.8	39.6	34.4
100m height	Gust factor	Normal	1.38	1.38~1.70	1.70
		Typhoon	1.71	1.71~1.86	1.86
	Mean speed	Normal	45.2	45.2~40.7	40.7
		Typhoon	42.0	29.9	27.3
	Fluctuating speed	Normal	62.3	62.3~69.2	69.2
		Typhoon	71.9	55.5	50.7

SLDRCE Tongji University



辽东胶东地区（含渤海湾）风场参数取值

- 辽东胶东地区（含渤海湾）不具备**台风形成基本条件**（宽阔的热带洋面+高低空之间的风向风速差别要小），不会形成台风。
- 文献（鄧鉴章，1987）统计了1949~1985年间影响渤海湾的台风，共计28次。但中心附近最大风力超过32.7 m/s的几乎没有，因此，渤海湾地区虽然有不同路径的台风影响造成少数大风天气过程，但该区域受到强台风影响造成严重危害性的**记录微乎其微**。
- 针对辽东胶东地区（含渤海湾），可按**良态风气候风场参数**作为风洞试验风场参数，A类、B类场平均风剖面指数 α 按《建筑结构荷载规范》选取，分别为0.12、0.15；梯度风高度为300m和350m。



主要研究结论

■ 强/台风风场模拟

1. 台风风场中沿高度和径向的平均风剖面与不同高度的阵风因子具有不同于良态气候模式的分布规律
 - (1) 台风风场中沿高度的**平均风剖面**比良态气候风剖面变化**趋缓**
 - (2) 台风风场**阵风因子**取值远大于良态气候相应值
2. 风洞试验风场参数
 - (1) 辽东胶东地区：按**良态风**气候风场参数
 - (2) 江浙区域：A类、B类场地平均风剖面指数 α 为0.062、0.07，梯度风高度均为100m
 - (3) 广州福建沿海，A类、B类场地平均风剖面指数 α 为0.042、0.08，梯度风高度均为150m。





谢谢大家

同济大学
土木工程防灾国家重点实验室



台风作用下超大型冷却塔物理模型风洞试验研究

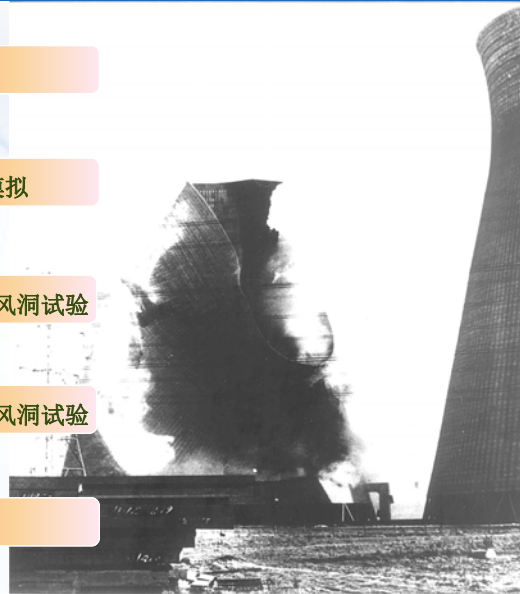
陈旭
同济大学

二〇一三年十二月二日



目录

- 1 概述
- 2 不同场地类别下台风风场试验模拟
- 3 台风作用下冷却塔刚体模型测压风洞试验
- 4 台风作用下冷却塔气弹模型测振风洞试验
- 5 主要研究结论





一、概述

● 沿海大型冷却塔遭受飓风气候影响日渐频繁



➤ 飓风极值风场的风速剖面变化梯度低于良态模式、紊流度与阵风因子远大于规范规定值



一、概述

- 塔高：215m
- 喉部标高：161.250m
- 底部直径：156.420m
- 塔顶直径：103.240m
- 塔筒壁厚：0.27m~1.80m

塔原形不公开



一、概述

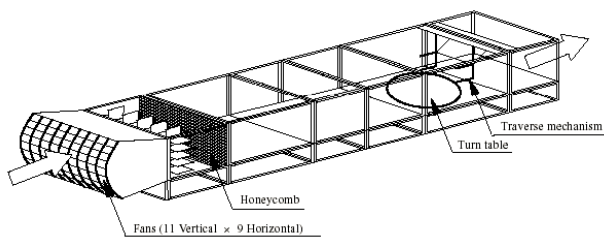
● 主要研究内容

1. 利用日本宫崎大学多风扇**主动控制风洞**对我国沿海区域由北到南两类场地条件（辽东胶东地区、江浙区域和广州福建沿海三种场地A和B类地面粗糙度条件）**台风场极值风环境进行模拟**；
2. 设计加工**1:600同步测内、外压刚性模型**，进行六类台风气候下**冷却塔单塔刚性模型测压试验**；
3. 设计加工**1:600等效梁格气弹模型**，进行六类台风气候下**冷却塔单塔气弹模型测振试验**；



二、台风风场试验模拟

● 风洞设备



- 试验段：2.538m×1.804m
- 风速范围：0-15m/s
- 正弦风速变动上限：9m/s
- 风速变化幅值：±3.5m/s
- 最大波动频率：5Hz





二、台风风场试验模拟

● 试验设备

1. 美国PSI扫描阀公司DTC Initium电子式压力扫描阀系统



控制校准模块及信号采集系统



扫描阀模块

2. 澳大利亚TFI公司Coral Probe眼睛蛇探头



3. 日本松下激光测位计



二、台风风场试验模拟

● 试验参数

- **平均风剖面:** 10min平均风速随高度的变化规律；近地面的台风平均风速可以用指数率进行描述；
- **梯度风高度:** 梯度风高度表征了大气边界层的厚度，在梯度风高度以上大气运动将不再受地面摩擦的影响；

- **湍流强度:** $I_i = \frac{\sigma_i}{U}$ ($i = u, v, w$) 反映风的脉动强度；

- **无量纲风压系数:** $C_{Pi} = \frac{P_i - P_\infty}{P_0 - P_\infty}$

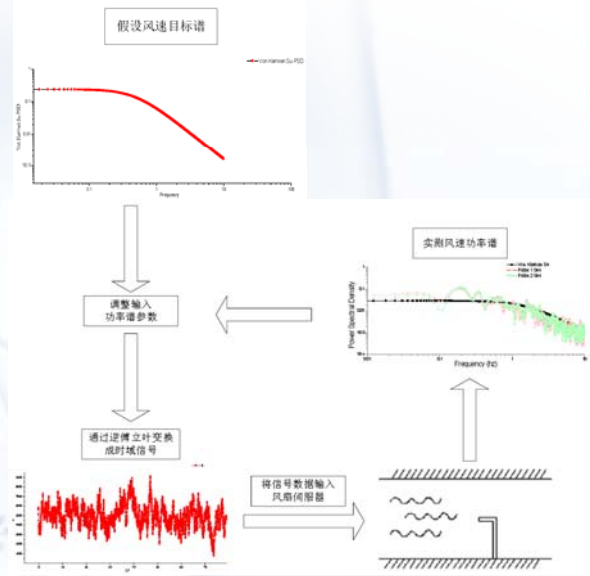
- **阻力系数:** $C_D = \frac{\sum_{i=1}^n C_{Pi} A_i \cos(\theta_i)}{A_T}$

- **风振系数:** $\beta = \frac{R_{\max}}{R_{\text{mean}}}$



二、台风风场试验模拟

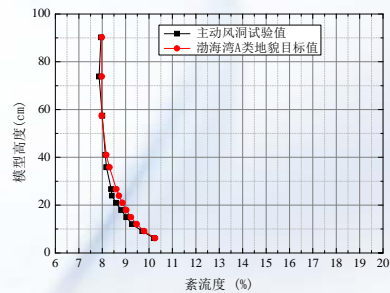
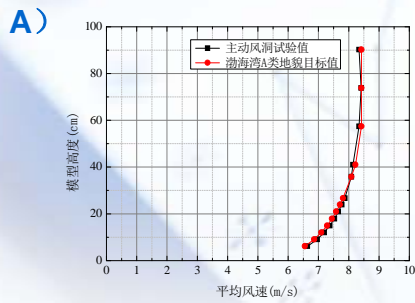
主动风洞模拟原理



二、台风风场试验模拟

环渤海湾A类、B类场地模拟

渤海湾地区虽然有不同路径的台风影响造成少数大风天气过程，但该区域受到强台风影响造成严重危害性的记录微乎其微，该类地区风荷载主要由季风的控制，因此对于渤海湾地区的风环境还是以《建筑结构荷载规范》所规定的A类、B类地貌下的风荷载进行模拟；

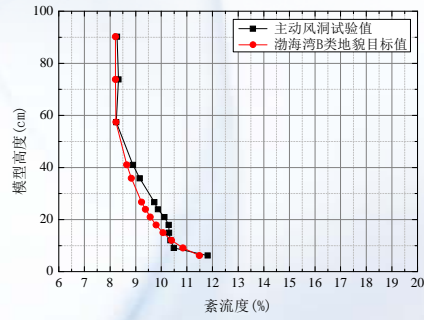
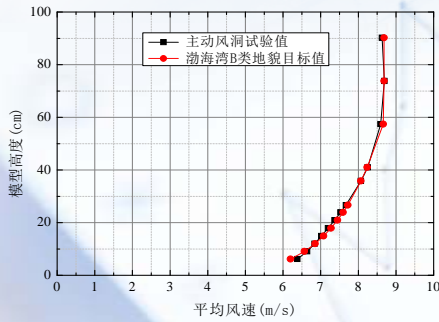




二、台风风场试验模拟

环渤海湾A类、B类场地模拟

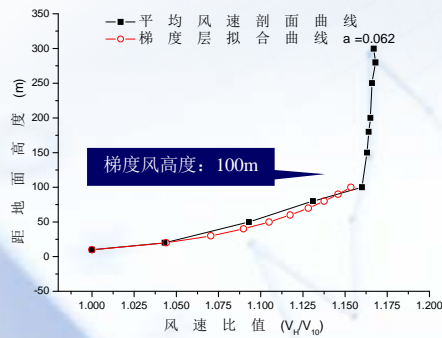
B)



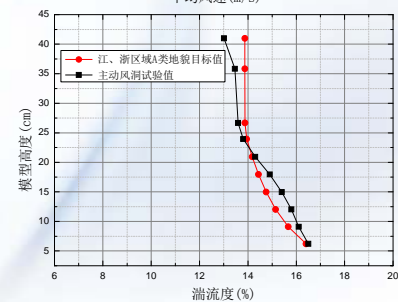
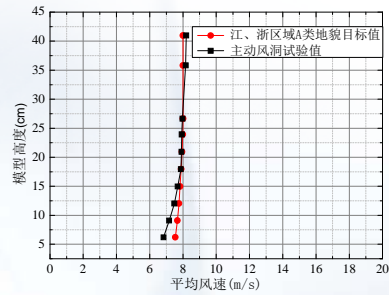
二、台风风场试验模拟

江浙区域A类、B类场地模拟

A)



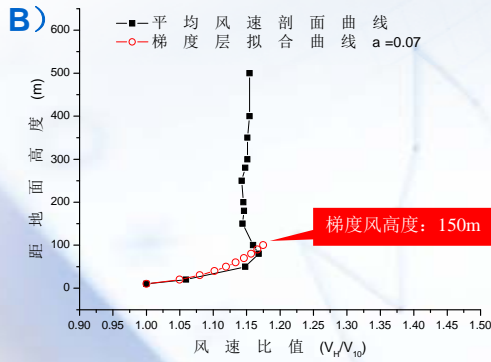
$$I_u(TC) = 1.60 \times I_u(Non-TC)$$



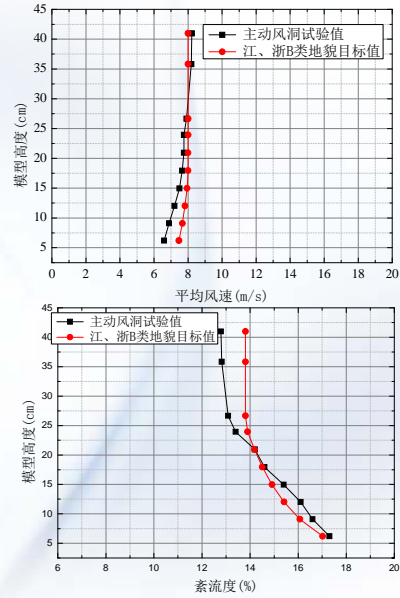


二、台风风场试验模拟

江浙区域A类、B类场地模拟

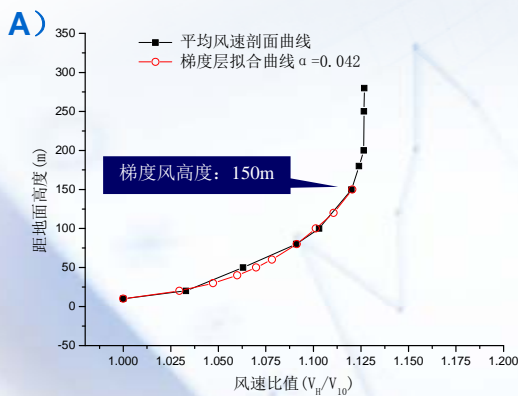


$$I_u(TC) = 1.48 \times I_u(Non-TC)$$

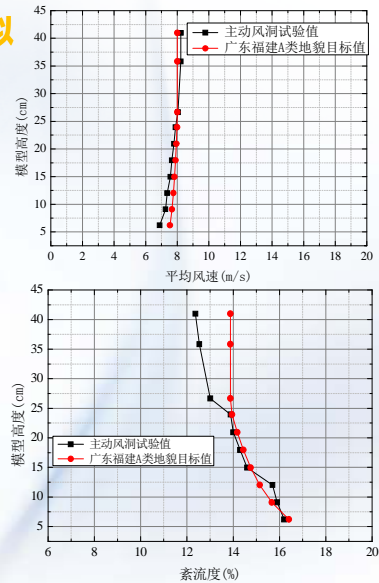


二、台风风场试验模拟

福建广东沿海区域A类、B类场地模拟



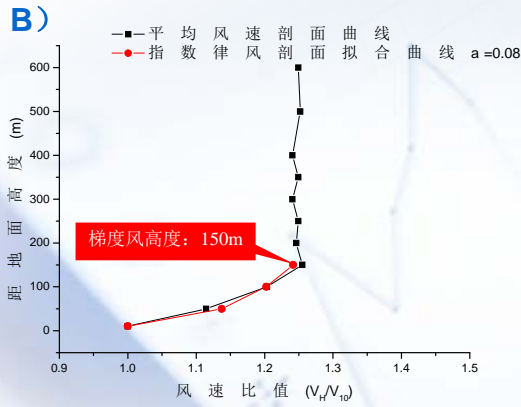
$$I_u(TC) = 1.60 \times I_u(Non-TC)$$



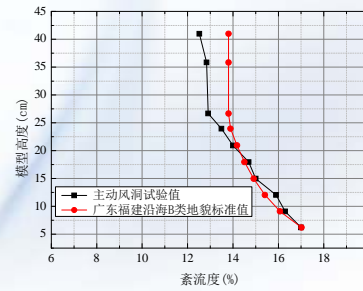
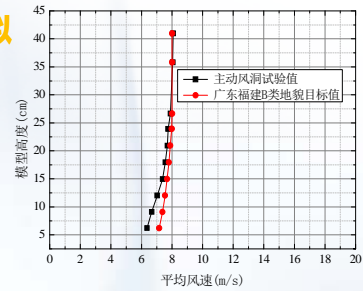


二、台风风场试验模拟

福建广东沿海区域A类、B类场地模拟

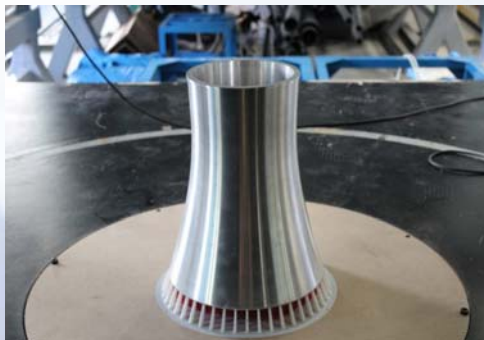


$$I_u(TC) = 1.48 \times I_u(Non-TC)$$



三、刚体模型测压风洞试验

1:600同步测内、外压刚性模型



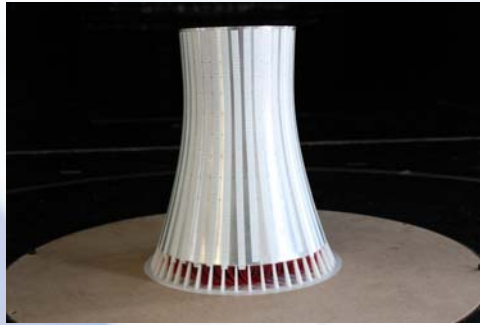
外表面测点: $8 \times 36 = 288$
 内表面测点: $8 \times 36 = 288$
 参考点风速: 8m/s (塔顶)
 采样频率: 300Hz
 单个样本采样时间: 25s



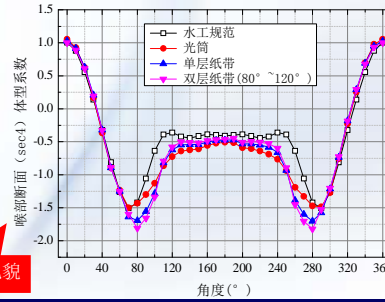
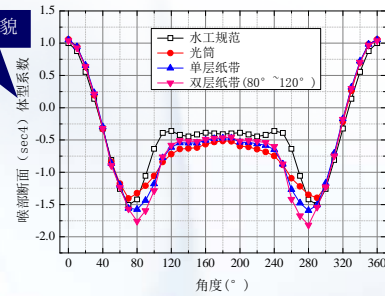
三、刚体模型测压风洞试验

雷诺数效应模拟

GB50009: A类地貌



外表面粘贴单层纸带雷诺数效应模拟结果较好



GB50009: B类地貌



三、刚体模型测压风洞试验

台风风场下单塔整体气动力特性

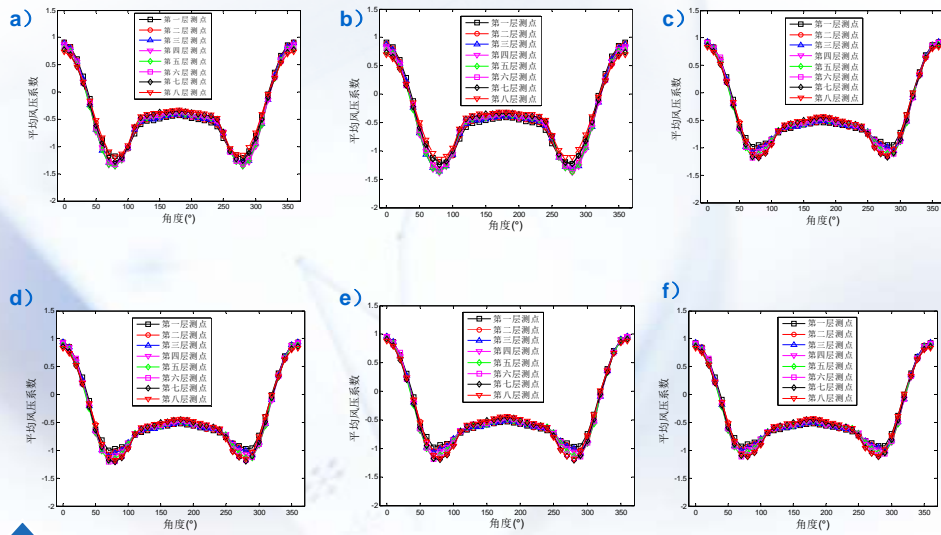
台风风场	整体阻力系数均值	第三层测点整体阻力系数均值	第三层测点整体阻力系数脉动值	第七层测点整体阻力系数均值	第七层测点整体阻力系数脉动值
环渤海湾A类场地	0.530	0.436	0.028	0.532	0.047
环渤海湾B类场地	0.494	0.413	0.036	0.497	0.072
江浙区域A类场地	0.671	0.556	0.043	0.715	0.091
江浙区域B类场地	0.678	0.555	0.046	0.718	0.109
广东、福建沿海区域A类场地	0.702	0.570	0.041	0.723	0.093
广东、福建沿海区域B类场地	0.682	0.552	0.048	0.711	0.105

平均风剖面指数越小，相同高度处平均风荷载越大，因此结构整体受力越大，同时紊流强度越高，整体受力的脉动性越大。



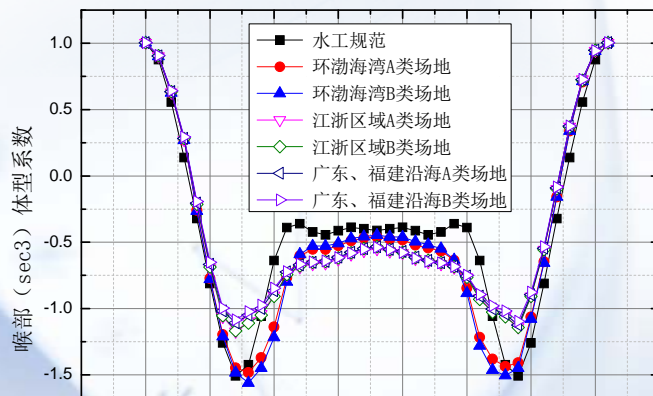
三、刚体模型测压风洞试验

台风风场下单塔外表面平均风压分布



三、刚体模型测压风洞试验

台风风场下单塔外表面平均风压分布

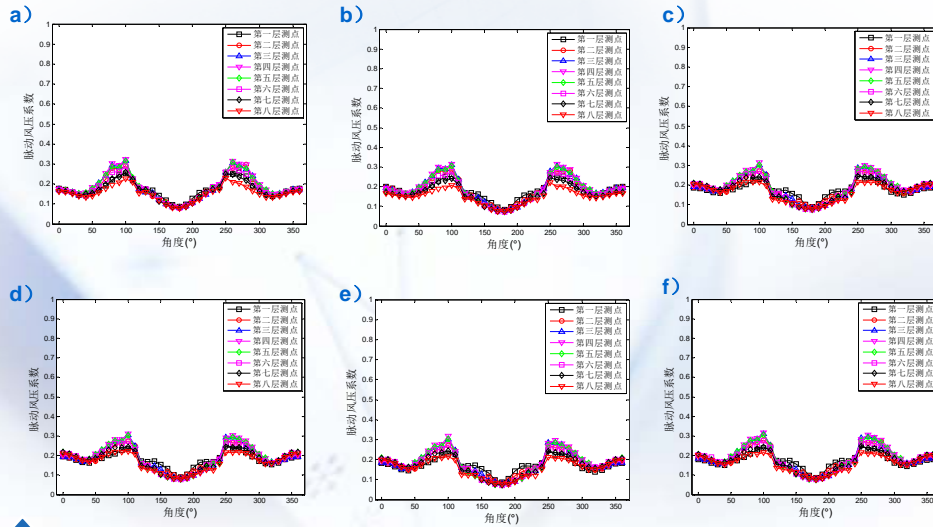


台风风场下冷却塔喉部区域外表面平均风压分布与《水工规范》八项式曲线分布相同，但最小负压值大于《水工规范》的-1.506；



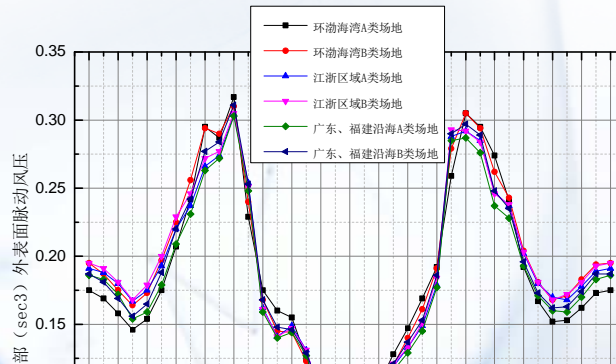
三、刚体模型测压风洞试验

台风风场下单塔外表面脉动风压分布

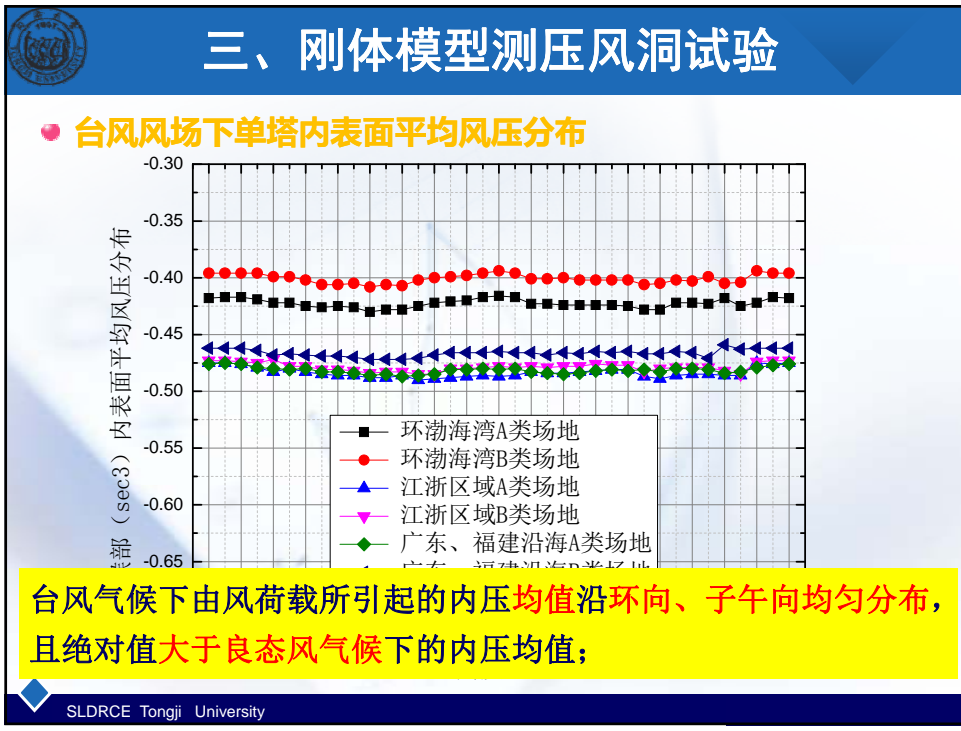
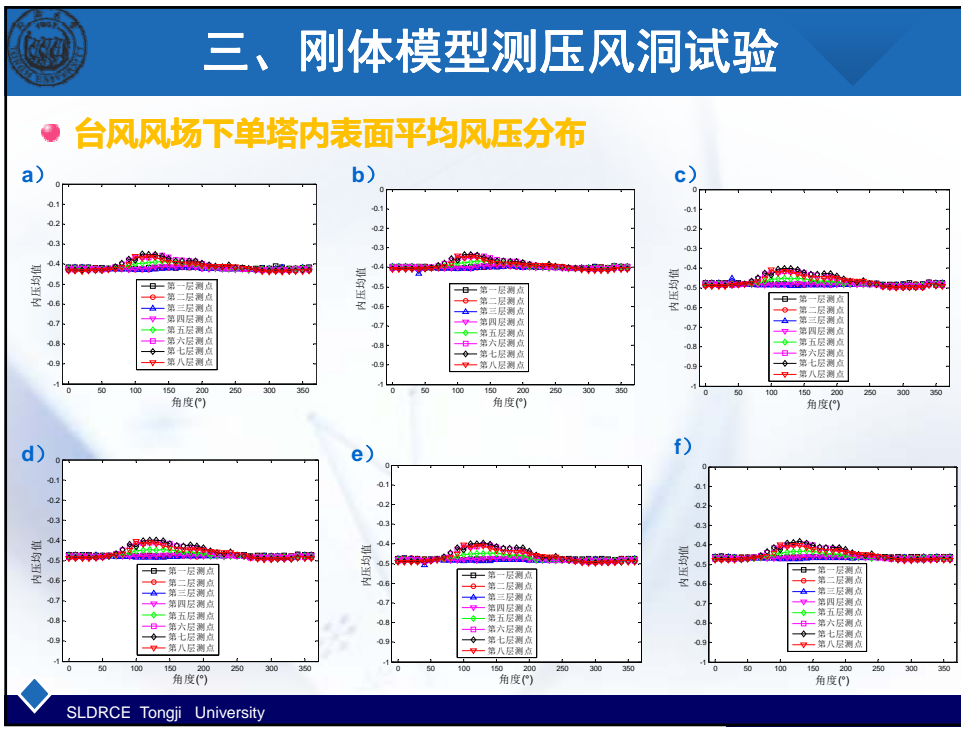


三、刚体模型测压风洞试验

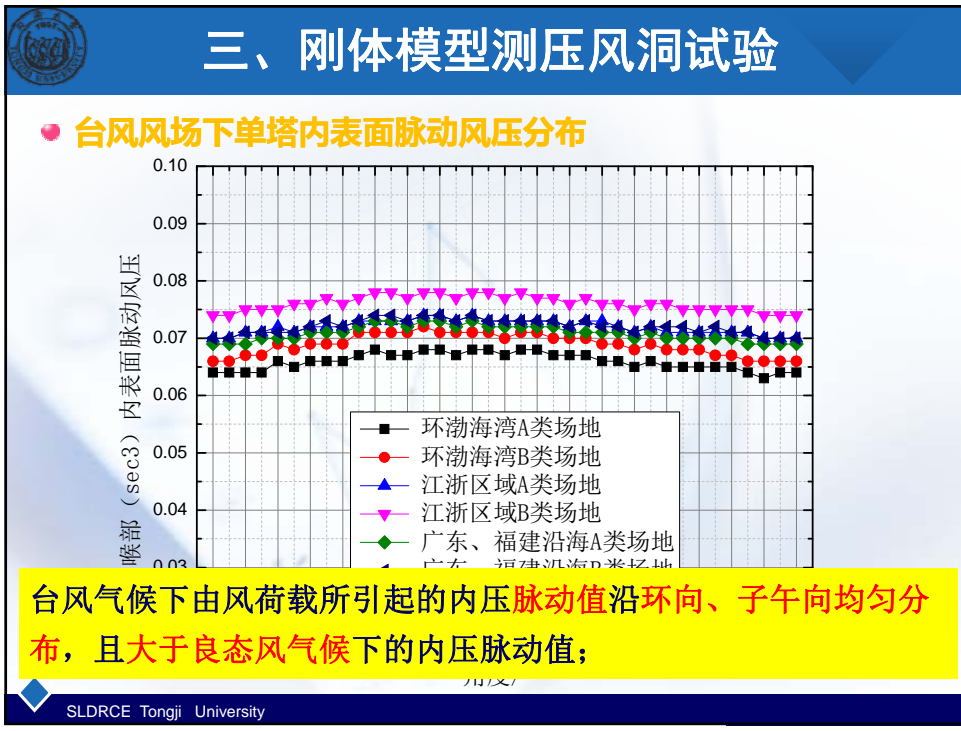
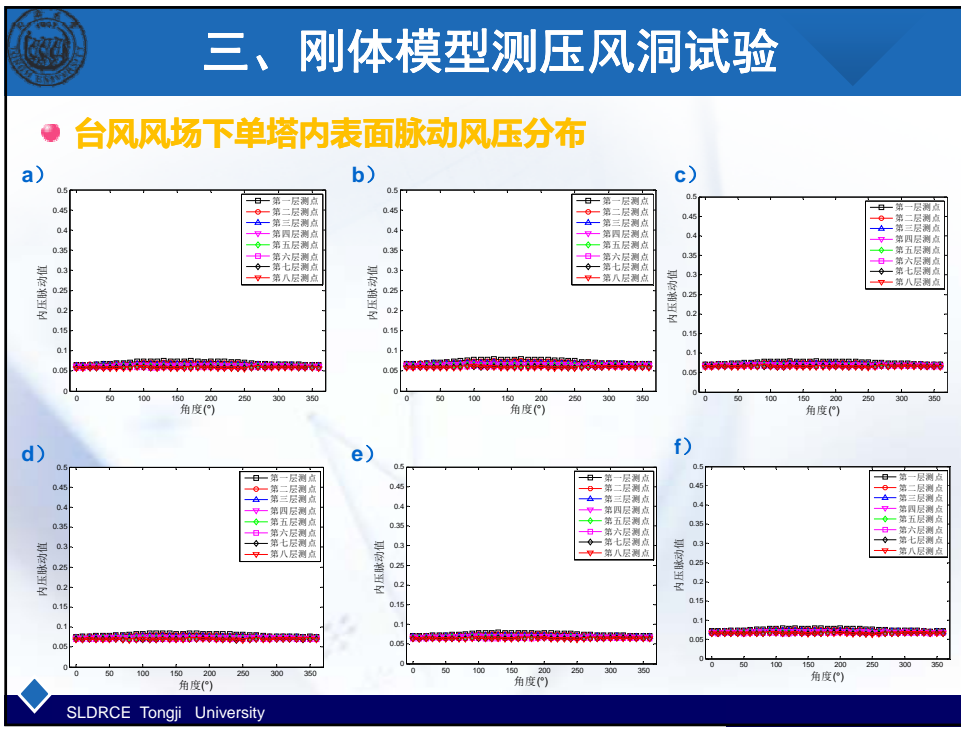
台风风场下单塔外表面脉动风压分布



台风风场下顺风向紊流度较良态风大，湍流强度越大，在冷却塔迎风区的脉动风压越大，但是在100°附近的脉动风压最大处，不同湍流强度的脉动风压几乎相等；



台风气候下由风荷载所引起的内压均值沿环向、子午向均匀分布，且绝对值大于良态风气候下的内压均值；





四、气弹模型测振风洞试验

● 等效梁格气弹模型设计原理

Step 1. 子午向单元数 m ，环向单元数 n ，单元数 $2(2m+1)n$ ；

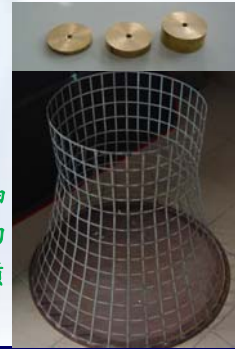
Step 2. 考虑环向对称性，简化子午向和环向厚度和宽度变量为 $D_{ver,i}$, $W_{ver,i}$ ($i=1,m$), $D_{cir,j}$, $W_{cir,j}$ ($j=1,m+1$), 变量数缩减为 $4m+2$ ；

Step 3. 子午向采用通长等厚构件， $D_{ver,i}$ 简化为常量 X_0 ，可得筒体不同高度抗弯和轴向缩尺刚度常量矩阵 $\{C_{bending,i}\}$, $\{C_{axial,i}\}$, $i=1,m$ 。

$$\{D_{ver,i}\} = X_0 \{E\}_{1 \times m}$$

$$\begin{Bmatrix} W_{ver,i} \\ D_{cir,i} \\ W_{cir,i} \end{Bmatrix} = \kappa \times \begin{Bmatrix} C_{bending,i} \\ C_{axial,i} \end{Bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 & X_3 & X_5 \\ X_2 & X_4 & X_6 \end{bmatrix}$$

通过**正交桁梁**单元来实现刚度的模拟，避免了弯扭刚度与轴向刚度不协调的问题，通过**附加铜块**作为配重来进行质量的模拟，通过**钢骨架**外表面张贴具有可张拉性能的弹性、轻质**薄膜**作为外衣来进行气动外形的模拟。



四、气弹模型测振风洞试验

● 1:600等效梁格气弹模型设计加工 (风速比1:25)

构件	高地高度/mm	中心半径/mm	环向尺寸/mm		子午向尺度/mm		配重×36/g 质量
			厚度	宽度	厚度	宽度	
冷却塔通风筒	32.7	130.4	1	3	1	3	
	57.5	122.5	0.5	2	0.5	2	5
	80.5	115.6	0.2	0.5	0.2	0.5	1
	103.4	109	0.2	0.5	0.2	0.5	1
	128.6	102.4	0.2	0.5	0.2	0.5	1
	151.8	96.9	0.2	0.5	0.2	0.5	1
	177.2	91.7	0.2	0.5	0.2	0.5	1
	202.9	87.5	0.2	0.5	0.2	0.5	1
	228.7	84.6	0.2	0.5	0.2	0.5	1
	252.5	83.1	0.2	0.5	0.2	0.5	0.8
	278.5	82.9	0.2	0.5	0.2	0.5	0.5
	302.3	83.6	0.2	0.5	0.2	0.5	0.5
328.3	84.8	0.2	0.5	0.2	0.5	1.5	
358.3	86	0.2	0.5				
刚性环	358.3	86	采用半径为0.5mm的圆截面钢丝				
人字柱顶	32.7	130.4	采用半径为0.5mm扁截面钢丝				



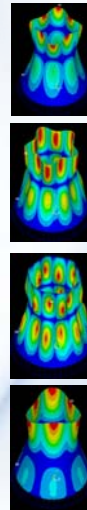


四、气弹模型测振风洞试验

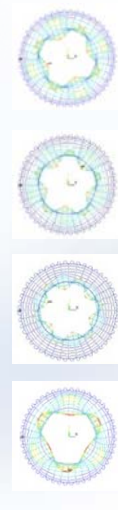
动力特性测试

阶数	壳单元建模		梁格建模	模型实测 实测频率 实测误差
	振型描述	原型频率	设计频率	
1	4个环向谐波 2个竖向谐波	0.842	20.208	19.875
2				-1.64%
3	5个环向谐波 2个竖向谐波	0.881	21.144	21.875
4				3.46%
5	6个环向谐波 2个竖向谐波	0.992	23.808	23.375
6				1.82%
7	3个环向谐波 1个竖向谐波	1.007	24.168	24.250
8				0.34%

壳单元建模

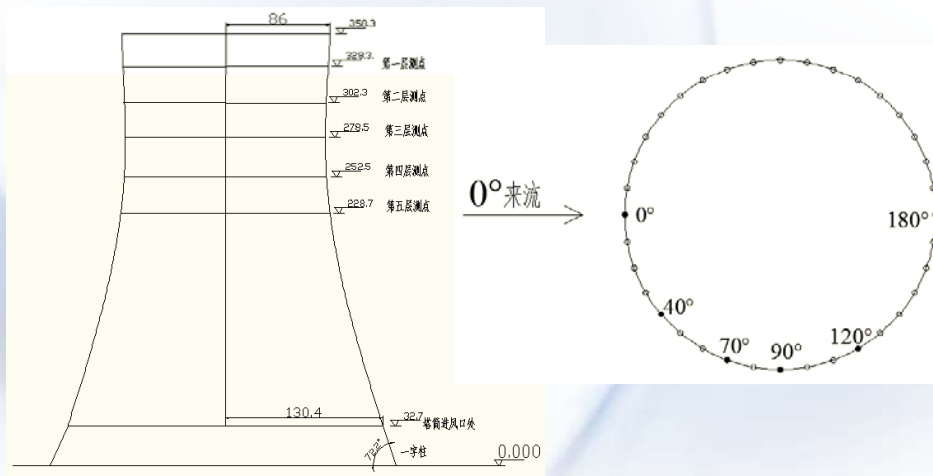


梁格建模



四、气弹模型测振风洞试验

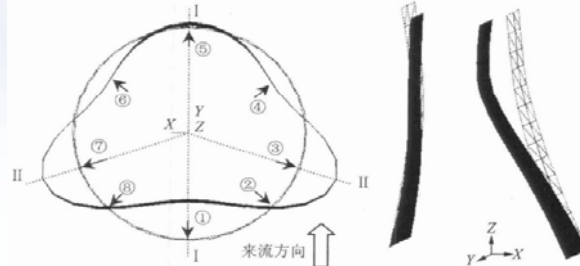
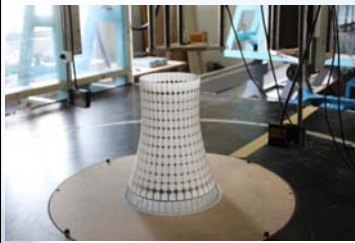
位移测点布置





四、气弹模型测振风洞试验

● 台风风场下单塔风振特性



台风风场

位移响应最不利位置

位移响应次不利位置

喉部迎风区域风振系数均值

▶ 冷却塔单塔风振位移响应最大值出现在喉部迎风区域，该区域位移均值、脉动值均为最大；

▶ 台风风场下冷却塔单塔位移响应风振系数大于《火力发电厂水工设计规范》中B类地貌下1.9的取值，其中福建广东沿海地区B类地貌风振系数达2.15；

广东、福建沿海区域B类场地

2.15



五、主要研究结论

(1) 采用宫崎大学多风扇主动控制风洞对我国沿海区域由北到南两类场地的台风风场进行模拟，以顺风向的平均风剖面和紊流度为模拟目标，模拟结果较好；

(2) 台风气候下冷却塔整体受力特性大于良态风气候，其中平均风剖面指数越小，整体受力均值越大，紊流度越大，整体受力脉动性越大；

(3) 台风气候下冷却塔单塔喉部区域外表面平均风压分布与《水工规范》八项式曲线分布相同，但最小负压值大于《水工规范》的-1.506；



五、主要研究结论

(4) 台风风场下顺风向紊流度较良态风大，湍流强度越大，在冷却塔迎风区脉动风压越大，但是在 100° 附近的脉动风压最大处，不同湍流强度的脉动风压几乎相等；

(5) 台风气候下由风荷载所引起的内压均值、脉动值沿环向、子午向均匀分布，且绝对值大于良态风气候；

(6) 台风气候下冷却塔单塔风振位移响应最大值出现在喉部迎风区域，其中位移响应风振系数均大于2.0，大于《水工规范》中B类地貌下风振系数1.9；



谢谢大家

同济大学

土木工程防灾国家重点实验室





超大型冷却塔龙卷风荷载试验研究

操金鑫 博士
同济大学

二〇一三年十二月二日



龙卷风的结构破坏特点

1、强风导致的结构整体破坏



2、伴随龙卷风的负压带来的结构整体或屋顶结构的破坏



3、飞散物造成的破坏





中国龙卷风发生统计表（1949-1990）

编号	时间	地点	灾情
Q06001	1966	江苏省盐城西南约20公里泰南乡刘村附近	据统计，死亡87人，伤1246人，其中重伤275人；毁坏房屋32903间，其中全部倒塌的10413间
Q06002	1967	浙江省嘉兴地区	倒房5276间，不同程度损坏3818间，死亡87人，伤510人（其中重伤283人）。
Q06008	1971	江苏省滨海、阜宁2县	两县有13个乡受灾，损坏房屋3095间，死亡2人，伤38人
Q06012	1974	广西南宁市西北郊	受龙卷风袭击，房倒树折，有6个单位受灾，17人受伤，经济损失45万元
Q06020	1980	安徽省当涂县	全县有18个乡受影响，刮倒房屋1949间、电线杆508根、树木3万余株，死1人，重伤28人
Q06023	1981	上海市宝山县罗南、罗店、同浦、盛桥4个乡	共有7个村受龙卷风袭击，1人死亡，55人受伤，倒房50余间，损坏120间，经济损失达27万元。龙卷风在陆地上停留仅25分钟，而后进入长江江面。据目击者反映，在江面上吸起了200米高的水柱，直径约20米
Q06096	1990	天津市西郊区、静海县、大港区	共有16个乡镇、70余个村庄先后遭受罕见的风雹袭击。大港区赵连庄乡遭龙卷风夹带冰雹危害。受灾农作物面积1.71万公顷，绝收5800公顷，损坏民房5723间、砖坯2637万块，折断树木1.2万棵，伤580余人，直接经济损失8000余万元
Q06097	1990	河南省淮滨、罗山、新县、固始县	以淮滨县受灾较重，最大风速约是30米/秒，倒塌房屋1076间，刮断成材树1.67万株，受灾农作物1800公顷，直接经济损失300万元



同济大学龙卷风灾害调查

2009年6月出现了强烈的
飚线，造成了
人死亡100多



水雹造成了10

2012年4月



龙卷风风灾。

2013年3月
江南、华南地
东、广西、贵



强对流天气在
西、福建、广



各国规范

美国

美国原子能协会于1983年颁发了“Standard for Estimating Tornado and Extreme Wind Characteristics at Nuclear Power Sites - ANSI/ANS-2.3-1983”

美国原子能标准管理委员会于2007年版发“Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants”

国际规范委员会于2008年颁发了“ICC/NSSA Standard on the Design and Construction of Storm Shelters”，2009年颁发的国际建筑规范的最新版中增加了强风避难所抗风设计的相关条文。

日本

可能造成危险物或有害物泄漏或扩散的高危结构

功能必须得到保护的重要设施

众多设施使用人需要保护的利用人数较多的设施

将“龙卷风危险度模型的建立”，“龙卷风风速风向的时间和空间特性的解明”和“龙卷风和下击暴流的抗风设计方法的基础研究”列为制定上述设施的龙卷风抗风设计指南的关键项目。

中国

暂未具体考虑龙卷风结构风荷载

对于重要的建筑结构有必要考虑龙卷风荷载

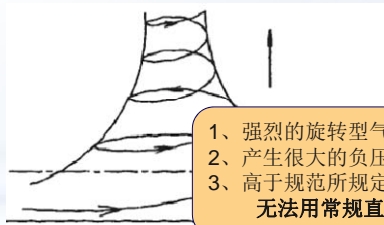


龙卷风风场特性

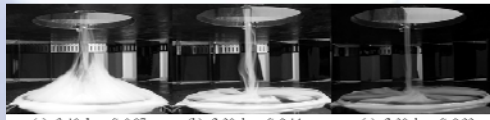
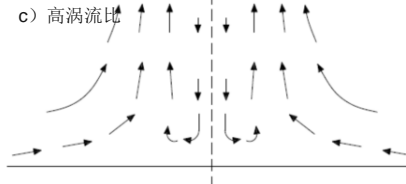
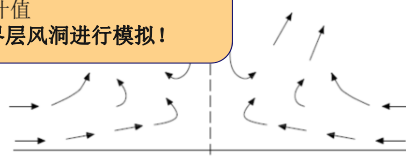
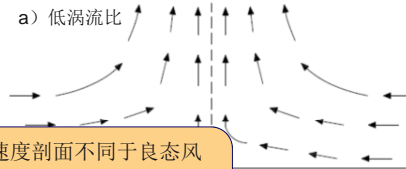




龙卷风风场特性



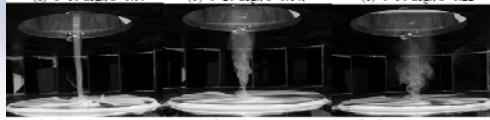
- 1、强烈的旋转型气流，速度剖面不同于良态风
- 2、产生很大的负压
- 3、高于规范所规定的设计值
无法用常规直流边界层风洞进行模拟！



(a) $\theta=10$ deg., $S=0.07$

(b) $\theta=20$ deg., $S=0.14$

(c) $\theta=30$ deg., $S=0.22$



(d) $\theta=40$ deg., $S=0.31$

(e) $\theta=50$ deg., $S=0.45$

(f) $\theta=60$ deg., $S=0.65$



龙卷风风场模拟

国内外龙卷风模拟器

龙卷风模拟器	模拟器设计原理	模拟器图示
德州理工大学	Ward型	
京都大学	Ward型	
东京工艺大学	Ward型	
爱荷华州立大学	新型龙卷风模拟器	
同济大学	新型龙卷风模拟器	



龙卷风风场模拟

同济大学龙卷风模拟器



龙卷风风场模拟

同济大学龙卷风模拟器

1) aspect ratio

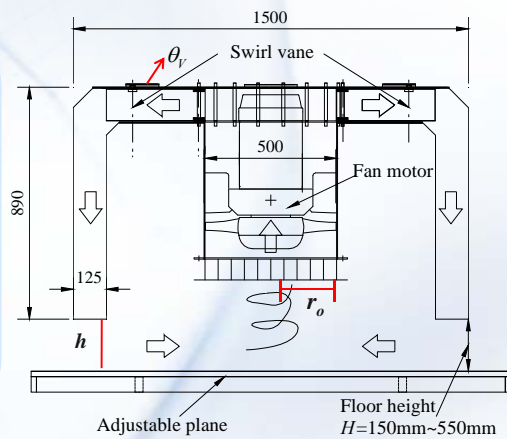
$$a = h/r_o$$

2) 径向雷诺数 Re

$$Re = Q/(hv)$$

3) 涡流比 (Swirl ratio)

$$S = \frac{r_o}{2h} \tan \theta_v = \frac{1}{2a} \tan \theta_v$$





龙卷风风场模拟

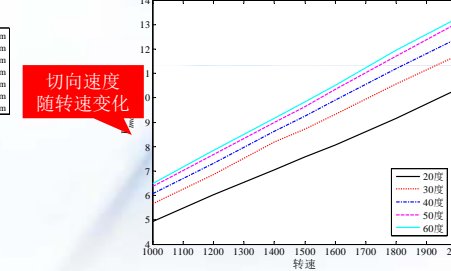
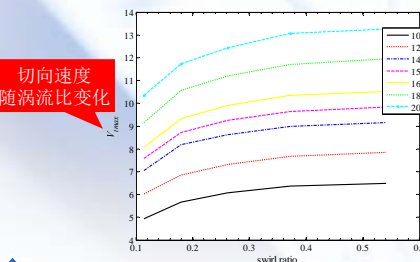
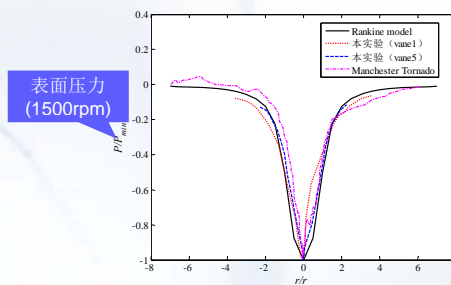
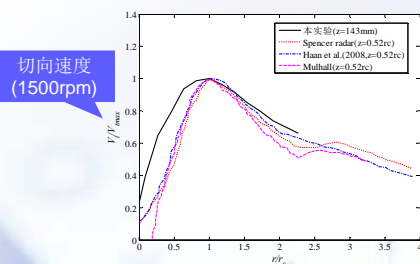
■ 试验工况

测点高度	实验工况	导流板角度	风机转速 (rpm)							涡流比
			1000	1200	1400	1500	1600	1800	2000	
H=400mm z=143mm	vane1	20°	1000	1200	1400	1500	1600	1800	2000	0.114
	vane2	30°	1000	1200	1400	1500	1600	1800	2000	0.180
	vane3	40°	1000	1200	1400	1500	1600	1800	2000	0.262
	vane4	50°	1000	1200	1400	1500	1600	1800	2000	0.372
	vane5	60°	1000	1200	1400	1500	1600	1800	2000	0.541



龙卷风风场模拟

■ 龙卷风风场特性





龙卷风风场模拟

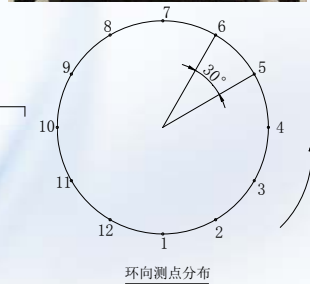
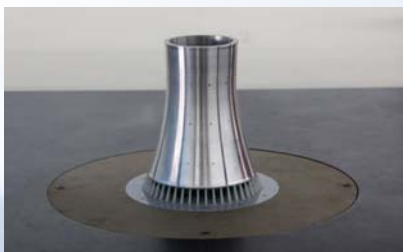
不同工况最大切向速度

涡流比	1000rpm	1200rpm	1400rpm	1500rpm	1600rpm	1800rpm	2000rpm
0.114	4.94	6.02	7.03	7.58	8.05	9.15	10.34
0.180	5.67	6.86	8.18	8.73	9.32	10.57	11.74
0.262	6.08	7.32	8.62	9.26	9.90	11.20	12.45
0.372	6.38	7.68	8.99	9.65	10.36	11.71	13.07
0.541	6.48	7.84	9.16	9.85	10.52	11.95	13.25



龙卷风下刚体模型测压风洞试验

1:1500同步测内、外压刚性模型



在模型的内、外表面均布置测压点，其中，内、外表面均布有36个测点，且内、外测压点布置在相同位置。对于外表面，测压点沿高度方向布置3层，每一层沿模型环向布有12个测点。内表面与外表面测压点布局相同。



龙卷风下刚体模型测压风洞试验

■ 静止状态试验工况

r 为距离龙卷风中心的距离, r_s 为模型底部塔筒起始处的半径

测点位置	模型相对中心位置 (r/r_s)	0	±0.2	±0.6	±1	±1.4	±1.8	±2.6	±3.4	±4.2	±5	
H=400mm z=143mm	涡流比	0.114, 0.18, 0.262, 0.372, 0.541										
	风机转速	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
		1200	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
		1400	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
		1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
		1600	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
		1800	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
		2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000



龙卷风下刚体模型测压风洞试验

■ 水平运动试验工况

测点位置	平台移动速度 (m/min)	转速		
H=400mm z=143mm $\theta_f=20^\circ, 50^\circ$	2.5	1000	1500	2000
	4.8	1000	1500	2000
	7.2	1000	1500	2000
	9.6	1000	1500	2000
	12	1000	1500	2000

θ_f 为导流板角度, z 为模型高度



龙卷风下刚体模型测压风洞试验

压力系数的定义

1、平均压力系数

$$C_{P_{mean}} = \frac{P_{mean} - P_s}{\frac{1}{2}\rho U_{max}^2}$$

2、极值压力系数

$$C_{P_{min}} = \frac{P_{min} - P_s}{\frac{1}{2}\rho U_{max}^2}$$

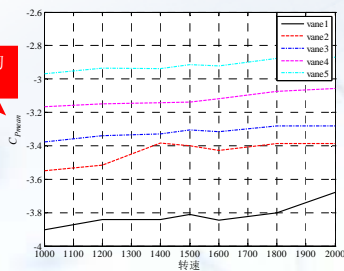
P_{mean} 为所测平均压力; P_{min} 为所测极值压力; U_{max} 为冷却塔模型高度处的最大切向速度



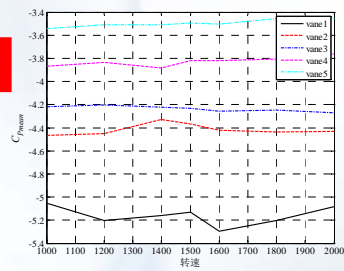
龙卷风下刚体模型测压风洞试验

龙卷风模拟器风机转速的影响(龙卷风中心 $r/r_s=0$)

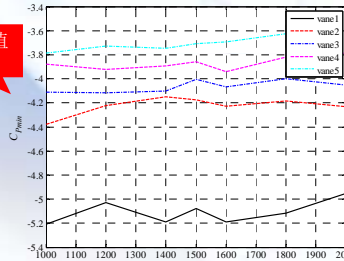
内表面平均压力系数



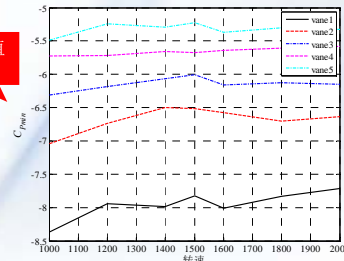
外表面平均压力系数



内表面极值压力系数



外表面极值压力系数

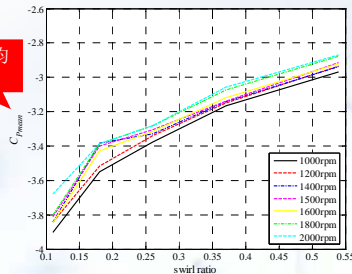




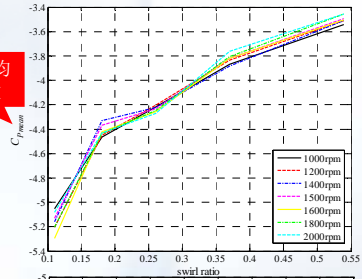
龙卷风下刚体模型测压风洞试验

■ 涡流比的影响(龙卷风中心 $r/r_s=0$)

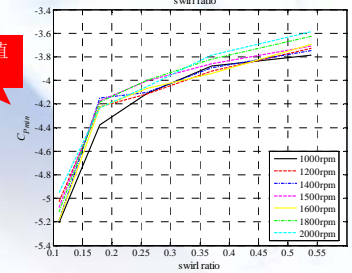
内表面平均
压力系数



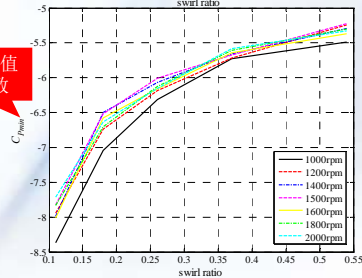
外表面平均
压力系数



内表面极值
压力系数



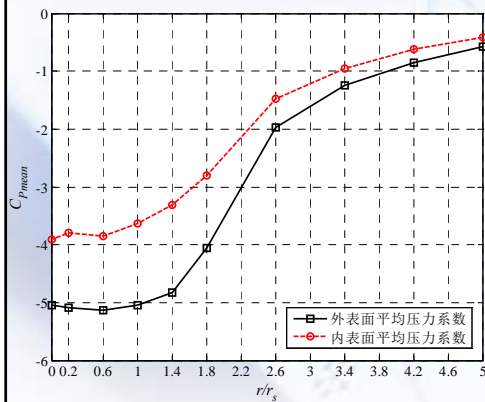
外表面极值
压力系数



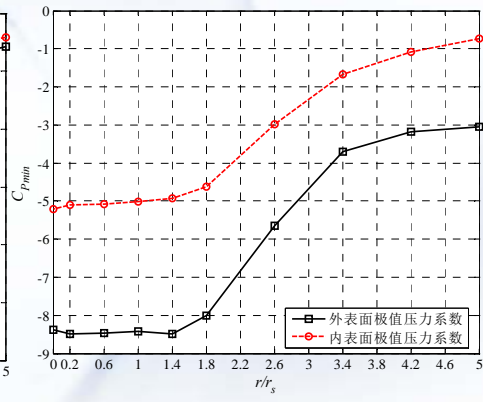
龙卷风下刚体模型测压风洞试验

■ 相对龙卷风中心位置的影响 ($n=1000\text{rpm}$, vane1)

平均压力系数



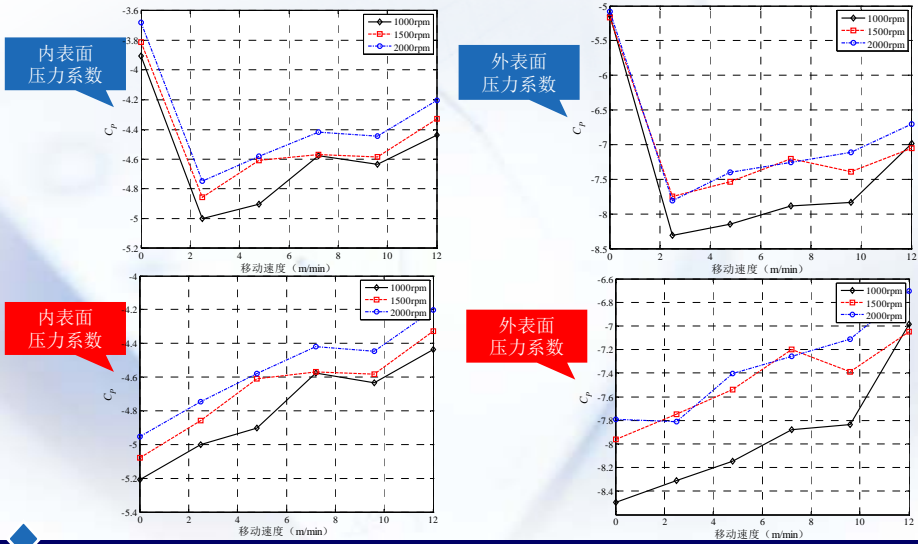
极值压力系数





龙卷风下刚体模型测压风洞试验

水平运动速度的影响 (vane1)



龙卷风下抗风设计建议

设计中, 根据不同设计目标, 得到不同设计参考风压系数

设计目标		最不利位置 (r/r_s)	C_{Pmean}	g	σ_{C_p}	C_{Pmin}
外压系数	平均压力系数	0.6	-5.13			
	极值压力系数	1.4	-4.91	2.95	1.28	-8.68
内压系数	平均压力系数	0	-3.90			
	极值压力系数	0	-3.83	2.83	0.49	-5.21
净风压系数	平均压力系数	1.4	-1.83			
	极值压力系数	1.4	-1.85	3.38	1.00	-5.25

建议在考虑龙卷风作用下的冷却塔抗风设计时, 最不利平均风力系数 (净风压系数) 取-2.0, 其对应的峰值因子为3.5左右。



主要研究结论

■ 龙卷风特性及风场模拟

1. 重要建筑结构的抗龙卷风设计已渐渐发展成一个必须考虑的内容，必须通过模型试验研究大型冷却塔受龙卷风气流作用时的风荷载和风致响应。
2. 同济大学龙卷风模拟器可以实现龙卷风风场特性的模拟，通过改变该模拟器的控制参数，可以满足本研究要求：
 - (1) 旋转气流不同**移动速度**
 - (2) 旋转气流不同**转动速度**
 - (3) 旋转气流**相对冷却塔不同距离**



主要研究结论

■ 龙卷风下刚体模型测内外压风洞试验

1. 影响因素
 - (1) 随着**涡流比**的增加，压力系数绝对值减小
 - (2) 不同的**转速**对压力系数影响较小
 - (3) **平台移动速度**对压力系数的影响较大，且压力系数与移动速度成反比
 - (4) 龙卷风静止时的极值风压系数比**移动状态**下的风压系数大，而龙卷风静止时的平均风压系数比移动状态下的风压系数小
 - (5) **相对龙卷风中心的距离**对压力系数影响较大，外压的最不利位置偏离龙卷风中心，内压的最不利位置则位于龙卷风中心
2. 龙卷风下设计建议
设计平均风力系数（净风压系数）取-2.0，其对应**极值因子**取3.5



谢谢大家

同济大学
土木工程防灾国家重点实验室

典型桥梁断面颤抖振模型试验

研究内容汇报

翁祥颖

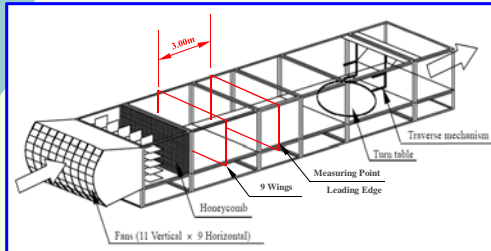
二〇一三年十二月二日

内容介绍

- 一、主动来流模拟
- 二、主动来流桥梁断面颤振试验
- 三、主动来流桥梁断面抖振力试验研究

一. 主动来流模拟

1.1 试验设备



Multiple-Fan Wind Tunnel Setup

试验段尺寸: 2.540m × 1.800m

风速可调范围: 0~15 m/s

频带宽度: 0~10Hz



Active Wings

翼型断面: NACA0010

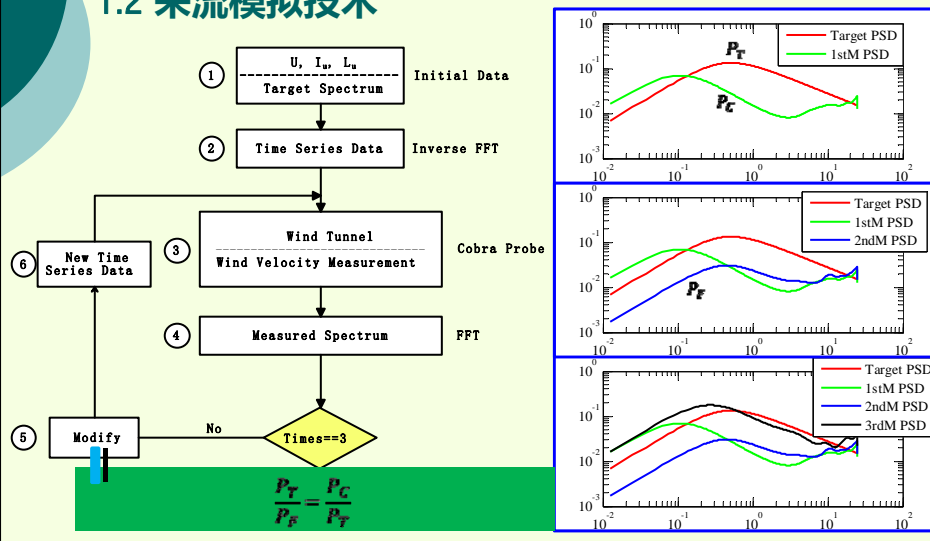
机翼阵列: 竖向9个

频带宽度: 0~3.8Hz



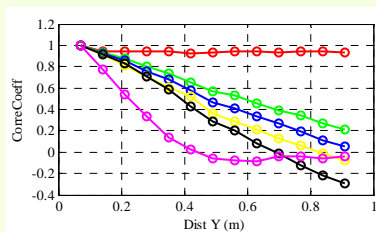
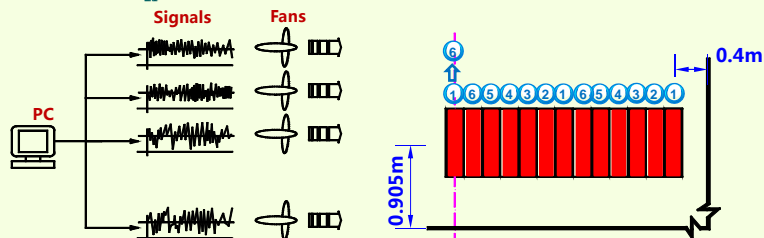
一. 主动来流模拟(续)

1.2 来流模拟技术



一. 主动来流模拟(续)

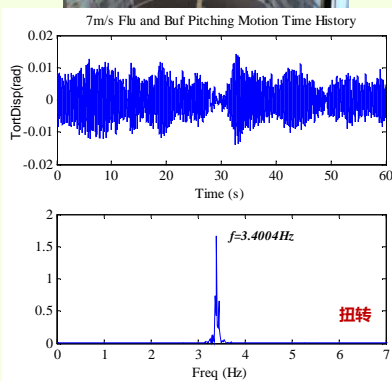
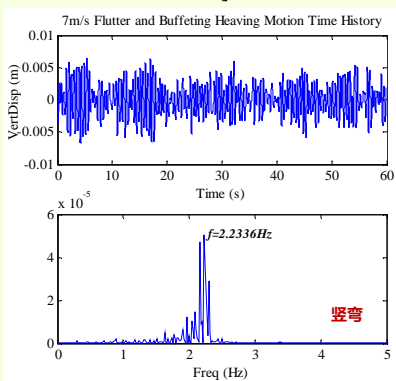
1.3 不同 L_x^y 来流模拟技术



二. 主动来流桥梁断面颤振试验

2.1 试验模型

- 几何缩尺比 $\lambda_L = 1:76$;
- 风速缩尺比 $\lambda_V = 1:4.5$;
- 缩尺竖弯频率 $f_h = 2.11 \text{ Hz}$;
- 缩尺扭转频率 $f_t = 3.58 \text{ Hz}$;

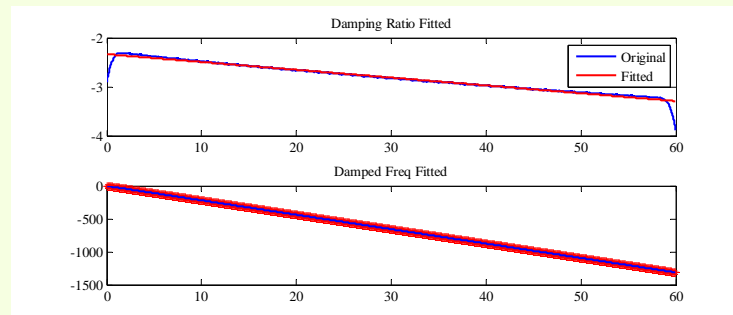


二. 主动来流桥梁断面颤振试验(续)

2.2 颤振导数识别方法

CWT法

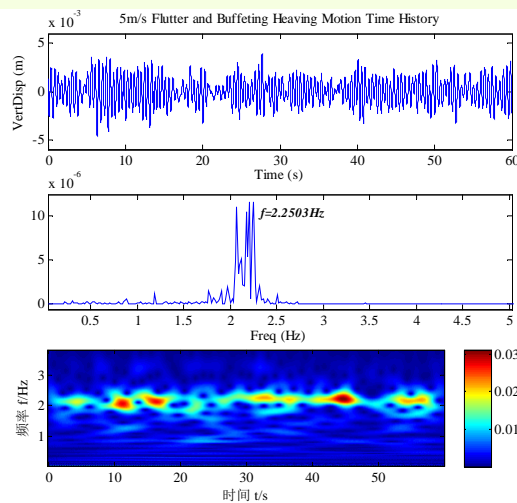
- ① 时域识别算法，适用于环境随机激励数据与自由振动数据；
- ② 高效，线性最小二乘拟合，不存在拟合失效状况；
- ③ 鲁棒性强；



二. 主动来流桥梁断面颤振试验(续)

CWT法(续)

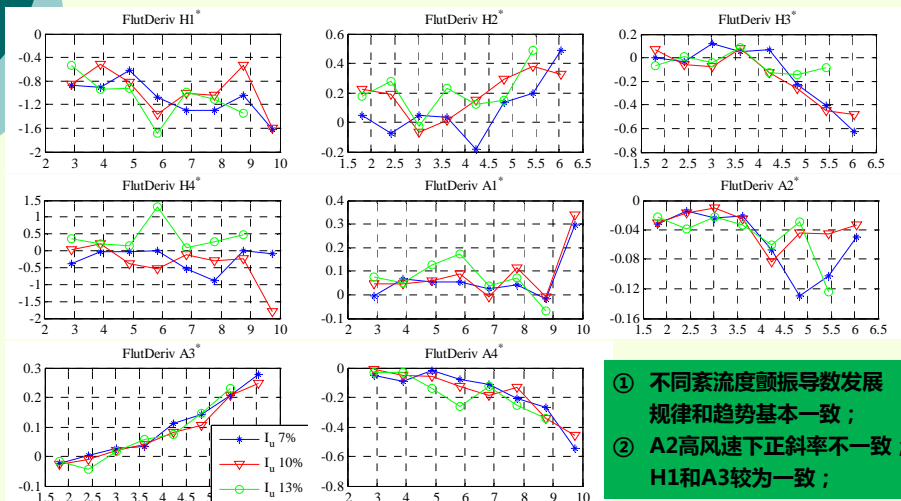
CWT与SSI比较



- ① 紊流作用下，模型振动的卓越频率为一窄带分布，卓越频率振动非连续出现；
- ② SSI阶数无法准确给定，不同阶数识别结果差别显著；矩阵分解效率低下，计算资源要求高；
- ③ SSI在非连续卓越振动时，分析对象中绝大部分为随机噪声；

二. 主动来流桥梁断面颤振试验(续)

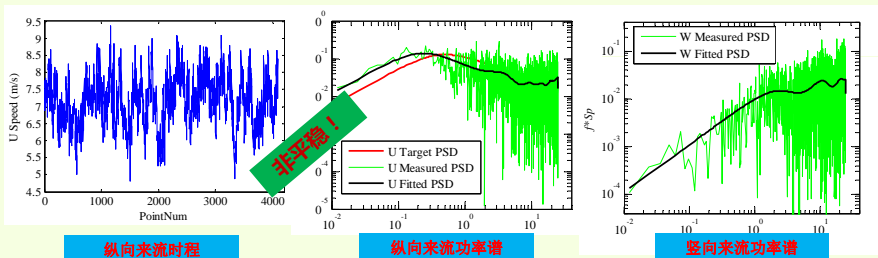
2.3 紊流度对颤振导数的影响



三. 主动来流桥梁断面抖振力试验研究

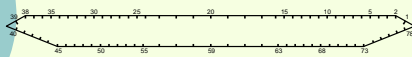
3.1 主动来流条件

流场编号	U(m/s)	I _u	I _w	L _w ⁺ (m)	L _u ⁺ (m)
1	7	10%	1.8%	> 1.40	1.66
2			9.0%	0.67	1.64
3			10%	0.53	1.78
4			10%	0.45	1.67
5			8.0%	0.34	1.73
6			4.0%	0.20	1.27

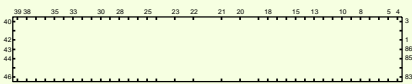
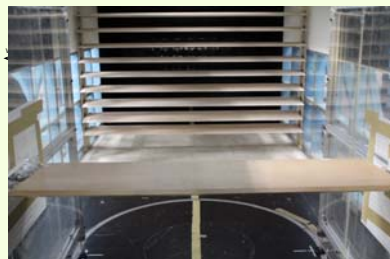


三. 主动来流桥梁断面抖振力试验研究(续)

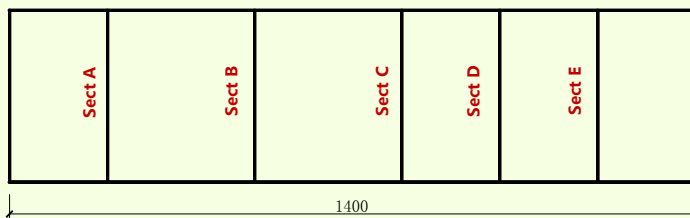
3.2 试验模型



流线型断面

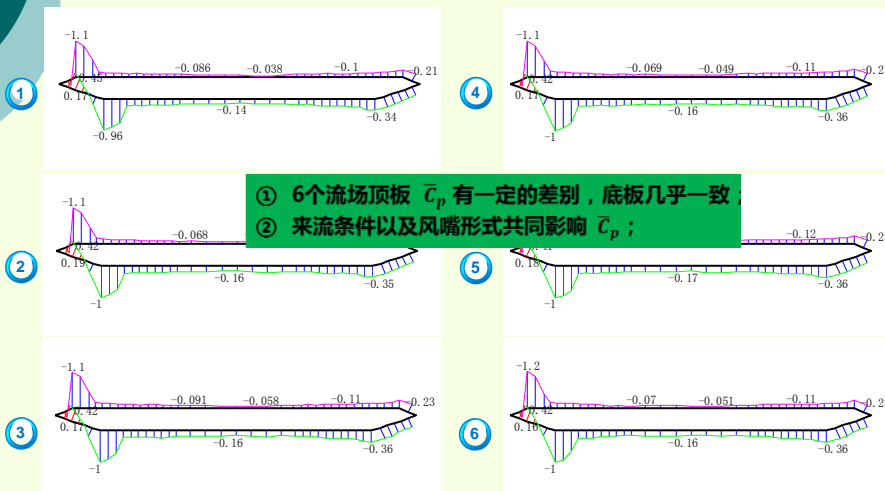


1:5矩形断面



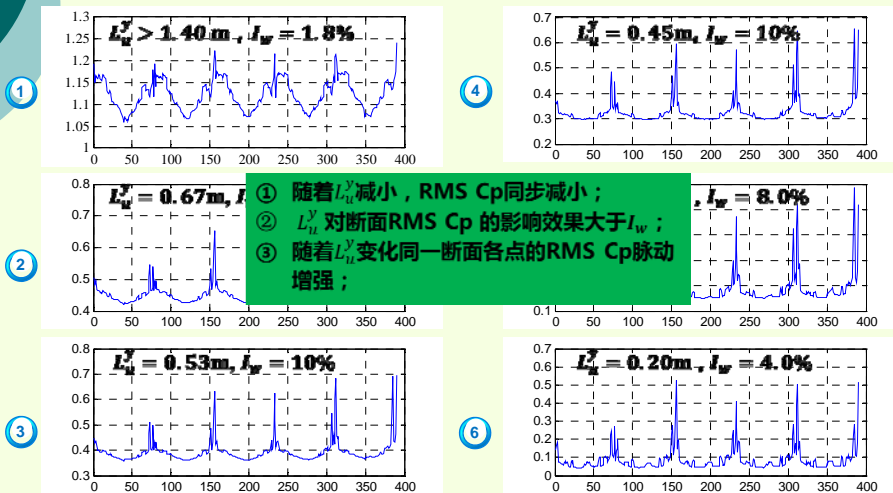
三. 主动来流桥梁断面抖振力试验研究(续)

3.3 流线型断面压力特性 —— Mean C_p



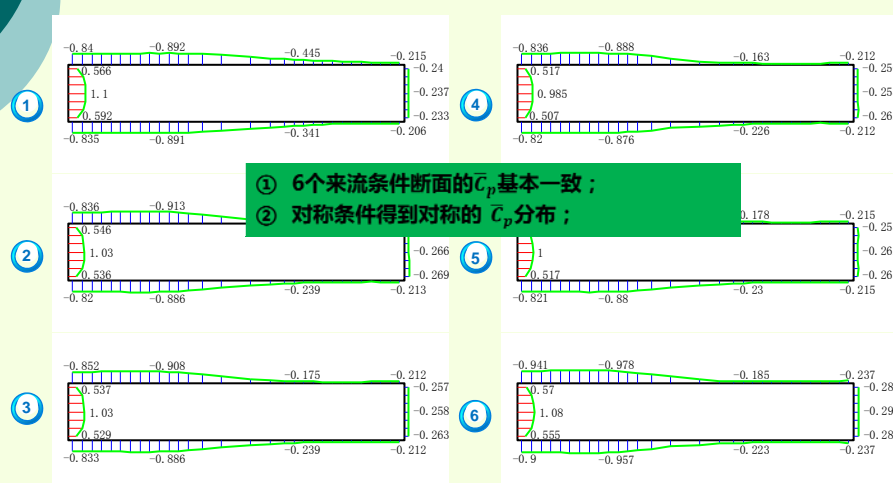
三. 主动来流桥梁断面抖振力试验研究(续)

3.3 流线型断面压力特性 —— RMS Cp



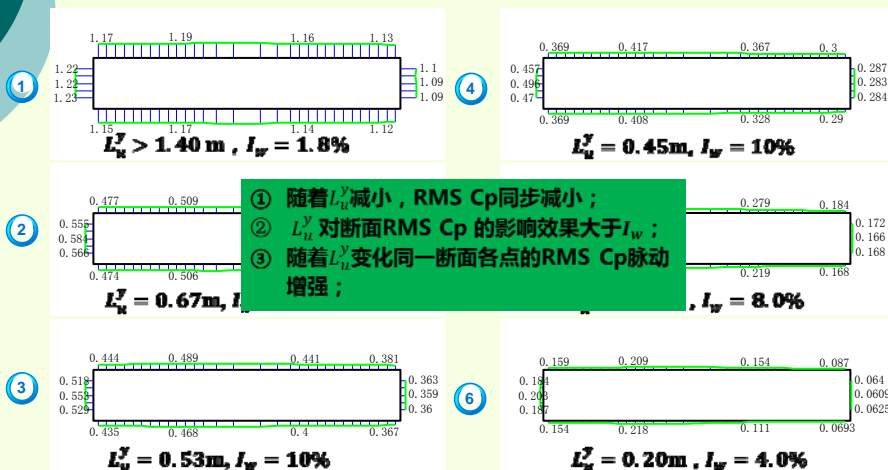
三. 主动来流桥梁断面抖振力试验研究(续)

3.4 1:5矩形断面压力特性 —— Mean Cp



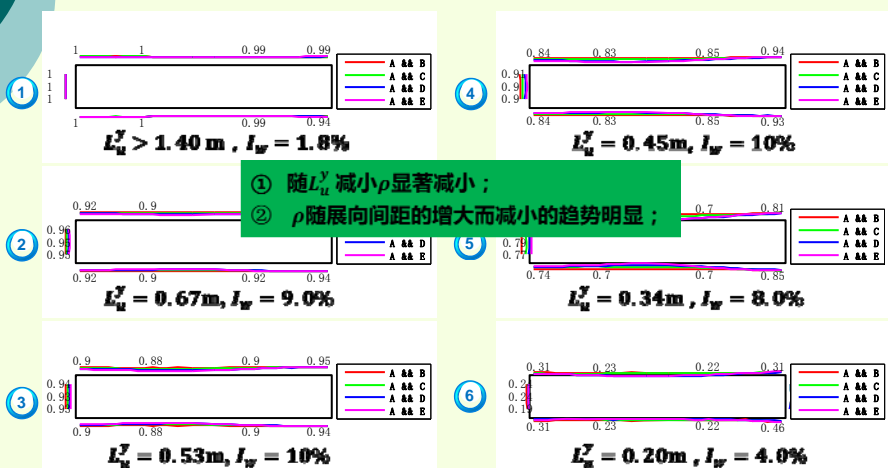
三.主动来流桥梁断面抖振力试验研究(续)

3.4 1:5矩形断面压力特性 —— RMS Cp



三.主动来流桥梁断面抖振力试验研究(续)

3.4 1:5矩形断面压力特性 —— ρ



谢谢大家

同济大学

土木工程防灾国家重点实验室