

南京长江五桥施工阶段  
ZSC2000B、STT2200塔吊抗风安全性研究  
工作汇报

同济大学土木工程学院桥梁系  
2018.06.26

# 项目参与者

风荷载计算	简旭东
边塔Midas建模	简旭东
边塔Midas结果输出	简旭东、许煜远
中塔ANSYS建模	张玮、李轶贤
中塔ANSYS结果输出	张玮、李轶贤
报告撰写	简旭东
背景调研、汇报PPT制作	王鹏
CFD分析	风洞郑老师
塔吊现场勘测	张玮

# 报告提纲

- 1 问题概述
- 2 有限元建模
- 3 风荷载数值模拟
- 4 塔吊风载响应分析
- 5 抗风安全性评价
- 6 总结

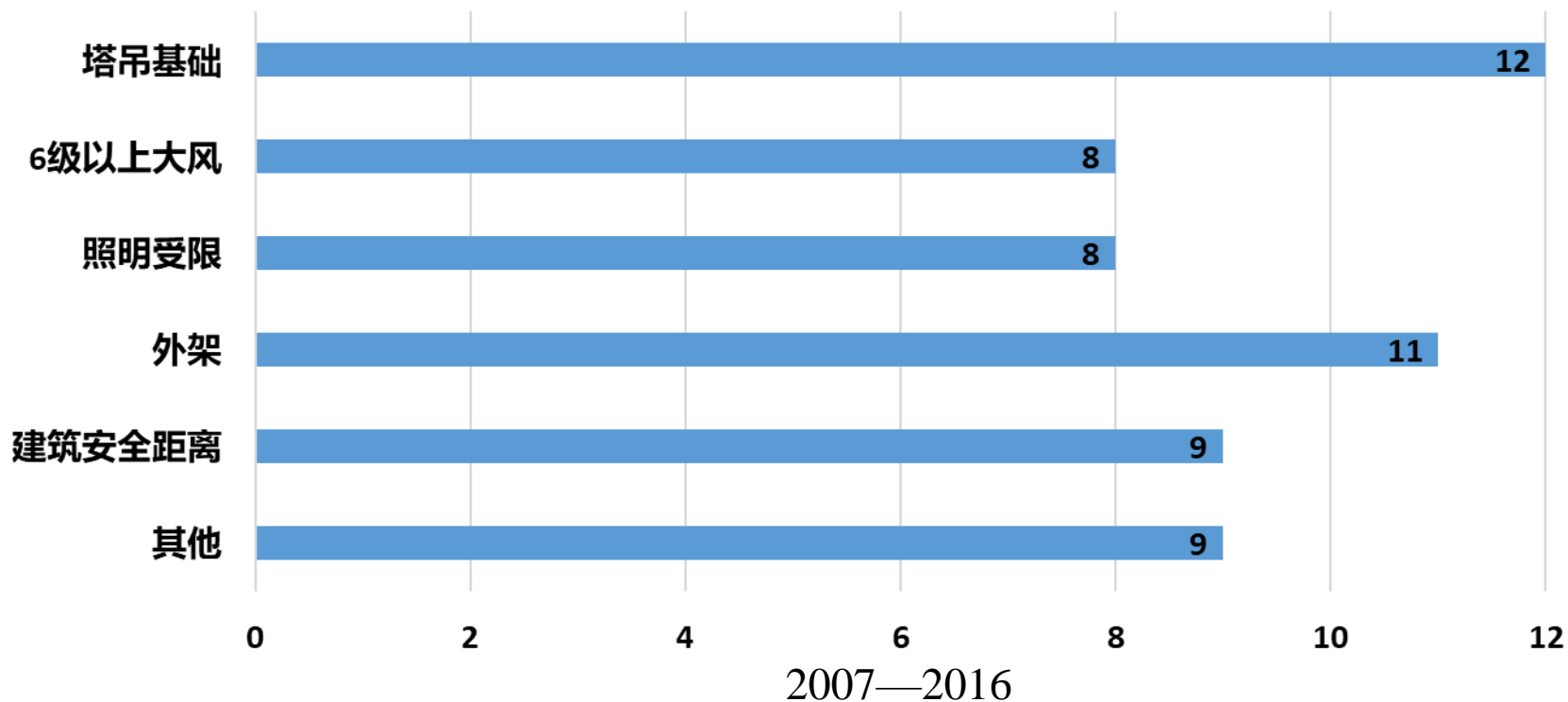
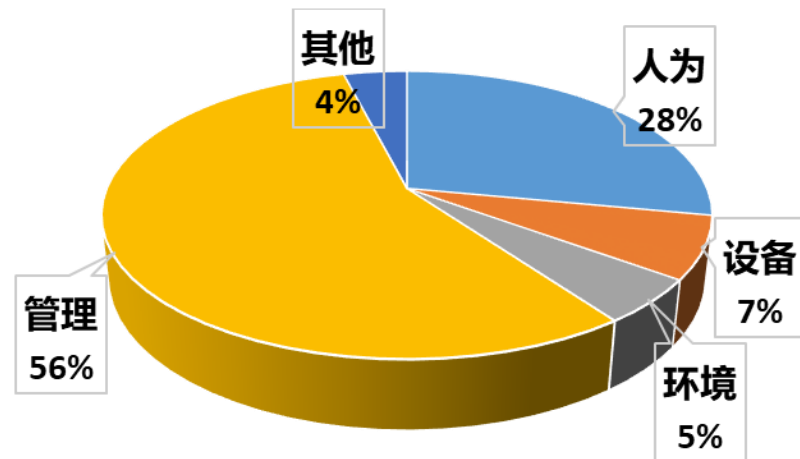
南/北塔-塔吊

中塔-塔吊

# 问题概述

## 研究背景

- 塔式吊机的广泛使用
- 塔吊安全事故频发



# 问题概述

## 问题提出

- 高耸塔式吊机在复杂风环境下的抗风安全性
- 结构静风响应计算
- 结构风致振动响应分析（仅抖振）

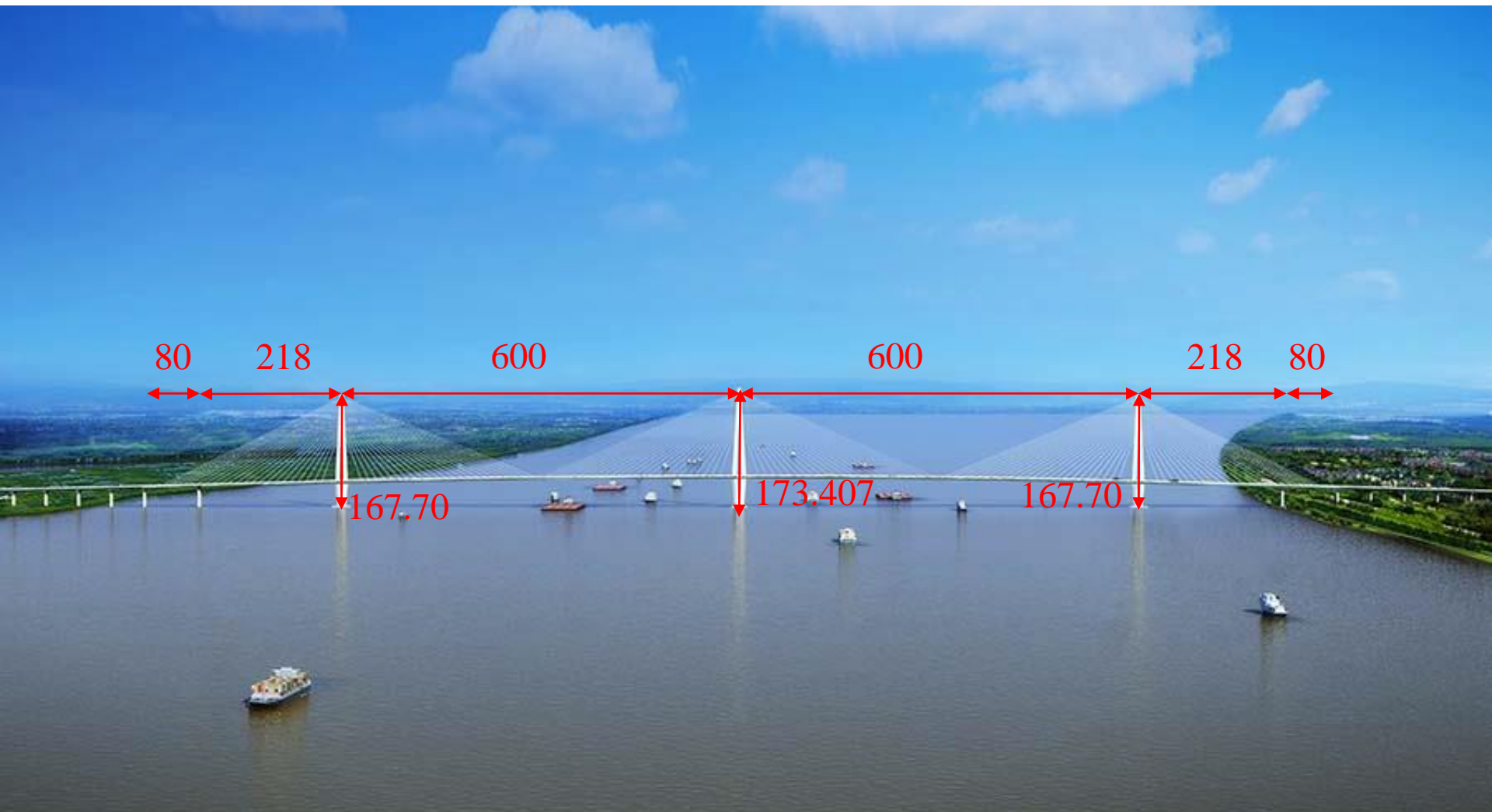
1. 陈宝春, 陈建国, 黄素萍. 2007—2016年我国在役塔吊安全事故统计分析[J]. 浙江建筑, 2018(2):32-36.
2. 郑丽娟.塔吊结构在风力及吊重耦合作用下的响应分析[D].武汉理工大学,2012.
3. 吕明.基于特殊风载的非工作状态塔式起重机安全性分析[D].重庆大学,2008.
4. 刘徽.起重机风荷载的数字仿真研究[D].武汉大学,2007.
5. Shapira A, Simcha M. AHP-Based Weighting of Factors Affecting Safety on Construction Sites with Tower Cranes[J]. Journal of Construction Engineering & Management, 2009, 135(4):307-318.
6. E. S. KIM, S. K. CHOI. Failure analysis of connecting bolts in collapsed tower crane[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2013, 36(3):228-241.
7. Mara T G. Effects of a construction tower crane on the wind loading of a high-rise building[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(11):1453-1460.
8. Hu B. Investigation of the effects of hurricane wind loads on constructions[C]// Antennas and Propagation, 1989. ICAP 89. Sixth International Conference on (Conf. Publ. No.301). IET, 2010:449-453 vol.1.
9. 建筑结构荷载规范(GB50009-2001)
10. 公路桥梁抗风设计规范 (JTG/T D60-01-2004)



# 问题概述

## 工程背景

南京长江五桥——纵向钻石型索塔 中央双索面 三塔组合梁 斜拉桥

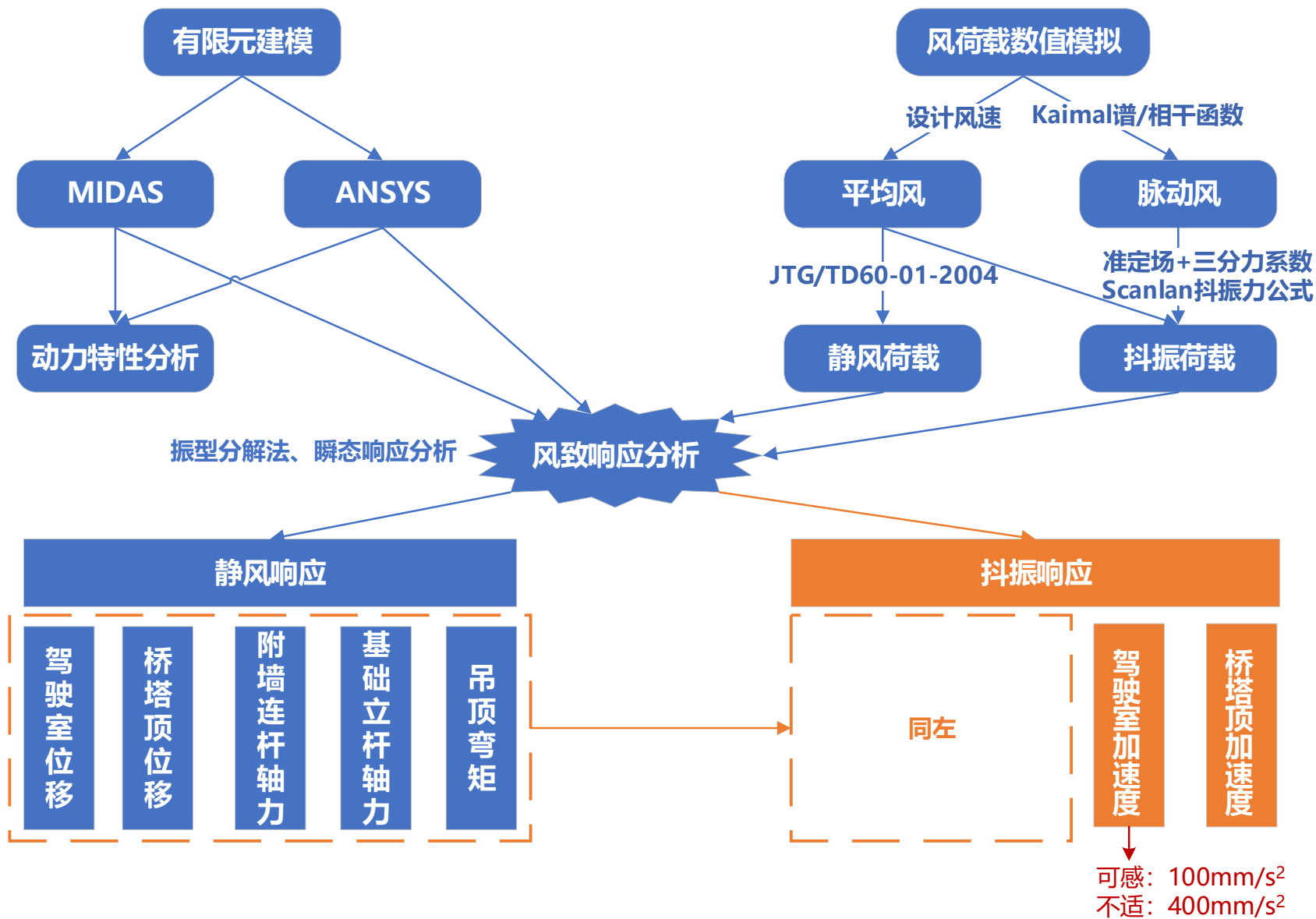


# 问题概述

## 工程背景

- 南京长江五桥：五跨三塔斜拉桥
- 南北两座边塔高167.70m，中间桥塔高173.407m
- 南北塔结构与施工方法一致，施工设备采用了中昇建机（南京）重工有限公司设计制造的ZSC2000B塔吊
- 中塔ZT10~ZT37节段塔柱钢壳选用由抚顺永茂建筑机械有限公司设计制造的STT2200塔吊
- 研究桥塔—塔吊系统的动力特性分析与抗风安全性，评估各塔吊的安全性以及使用过程中的工作性能，以确保各塔吊的正常安全使用
- **验算未完成，项目无法继续施工，项目很紧张**

# 问题概述





# 问题概述

## 研究思路

- 有限元建模 → 动力特性分析
- 风速场及风荷载数值模拟
- 风荷载时程+结构模型=风致响应分析
- 最不利工况（以南塔ZSC2000B为例）

工况1：桥塔BT36节段吊装完成

工况2：第三道附着安装完成后顶升塔机总高度至150m

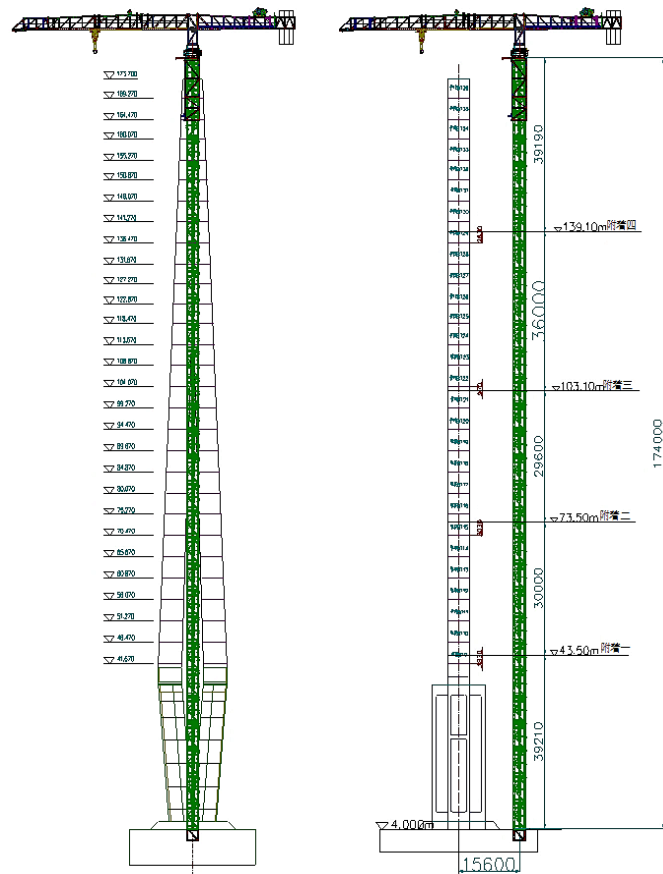
# 工况介绍

## 考虑16个工况

- 起重臂与主梁主梁：平行或垂直
- 来流方向：横桥向或竖桥向
- 起重荷载：最大或空载
- 风速：工作状态（20m/s），非工作状态（42m/s）

## 考虑6个工况

- 来流方向与起重臂同向最危险
- 非工作状态下必定空载

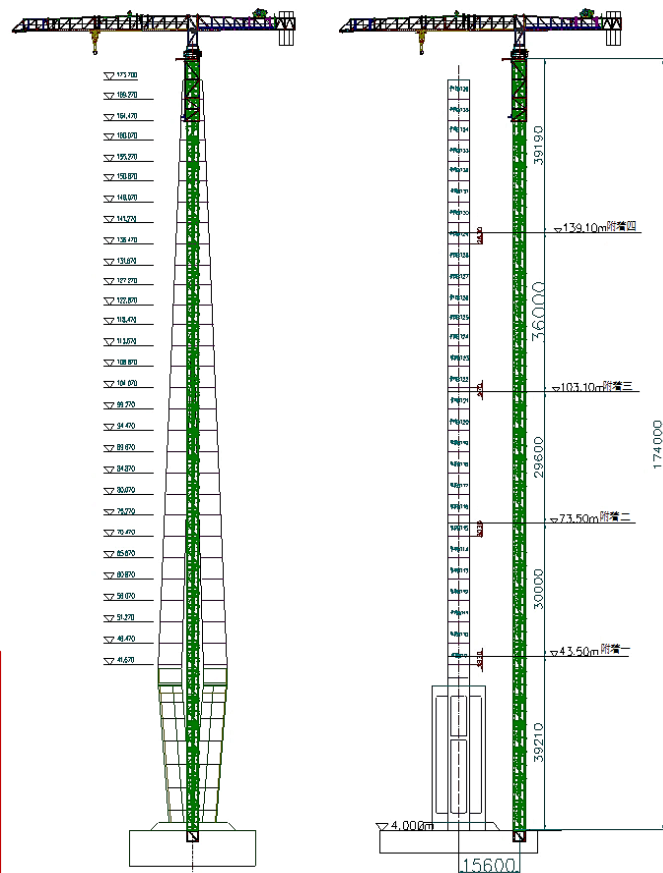


# 问题概述

## 工况 1 描述

- 子工况1.1: 起重臂垂直主梁, 横桥向来流, 空载
- 子工况1.2: 起重臂平行主梁, 纵桥向来流, 空载 **20m/s**
- 子工况1.3: 起重臂垂直主梁, 横桥向来流, 起重荷载最大
- 子工况1.4: 起重臂垂直主梁, 横桥向来流, 工作幅度最大

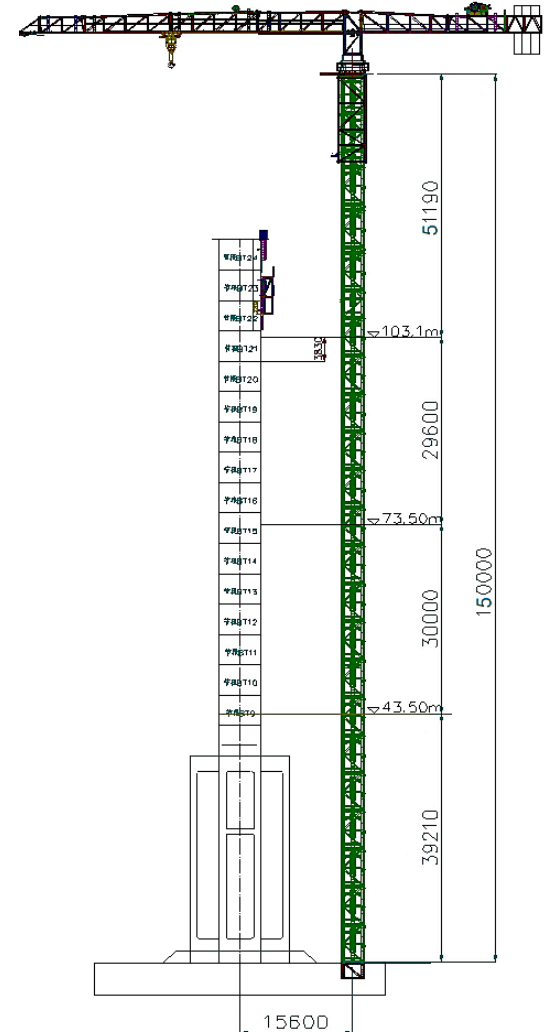
- 子工况1.5: 起重臂垂直主梁, 横桥向来流, 空载 **42m/s**
- 子工况1.6: 起重臂平行主梁, 纵桥向来流, 空载



# 问题概述

## 工况 2 描述

- 子工况1.1: 起重臂垂直主梁, 横桥向来流, 空载
- 子工况1.2: 起重臂平行主梁, 纵桥向来流, 空载 **20m/s**
- 子工况1.3: 起重臂垂直主梁, 横桥向来流, 起重荷载最大
- 子工况1.4: 起重臂垂直主梁, 横桥向来流, 工作幅度最大
- 子工况1.5: 起重臂垂直主梁, 横桥向来流, 空载 **42m/s**
- 子工况1.6: 起重臂平行主梁, 纵桥向来流, 空载



# 有限元建模

## 单元特性

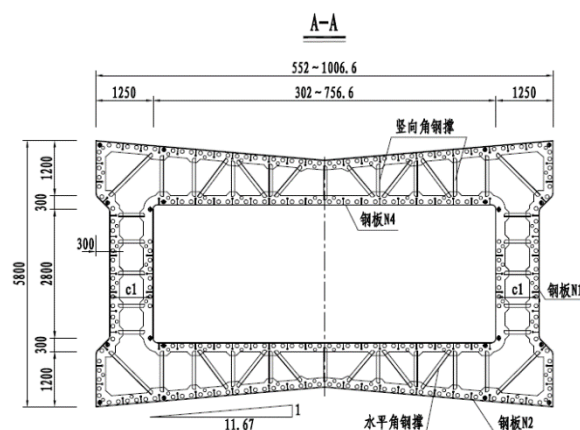
构件类型	单元类型	截面形式	材料类型
主塔	一般/变截面梁单元	由塔柱截面施工图分段导入	C50 等效弹性模量 等效质量
塔吊立柱	桁架单元	HW 200x240x12/12 HW 414x405x18/28 L 200x20	Q235 Q345
附着杆	桁架单元	B 400x12	Q235
塔吊起重臂	桁架单元	P 194x12 □ 450x250 □ 300x100	Q235 Q345
塔吊平衡臂	桁架单元	P 194x12 □ 215x215 □ 200x200 □ 150x150	Q235 Q345
吊钩 小车 回转平台 起升卷扬机 塔吊连接件 塔吊配重块	质点 (荷载转换成质量)	-	-

# 有限元建模

## 等效截面

$$\gamma_{eq} = \frac{\gamma_s A_s + \gamma_c A_c}{A_c}$$

$$E_{eq} = \frac{E_s I_s + E_c I_c}{I_c}$$



截面编号	混凝土截面抗弯惯矩	钢板截面抗弯惯矩	等效弹性模量
16	854.26	15.333	3.820E+10
15	656.343	12.786	3.851E+10
14	662.725	12.686	3.844E+10
13	658.677	12.786	3.850E+10
12	840.044	12.663	3.761E+10
10	73.785	1.556	3.884E+10
9	69.702	1.629	3.931E+10
8	71.964	1.539	3.891E+10
7	65.948	1.627	3.958E+10
6	68.608	1.486	3.896E+10
5	63.132	1.567	3.961E+10
4	131.38	2.576	3.854E+10
3	128.697	2.753	3.891E+10
2	77.817	1.688	3.897E+10

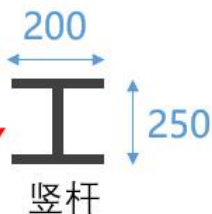
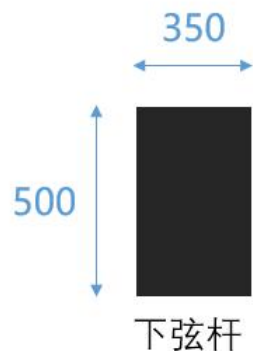
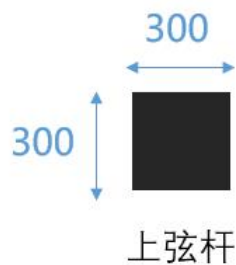
桥塔材料横桥向弯曲等效参数计算

# 有限元建模

## 起重臂

厂家不愿意提供详细尺寸——现场拍

吊臂 (通用)

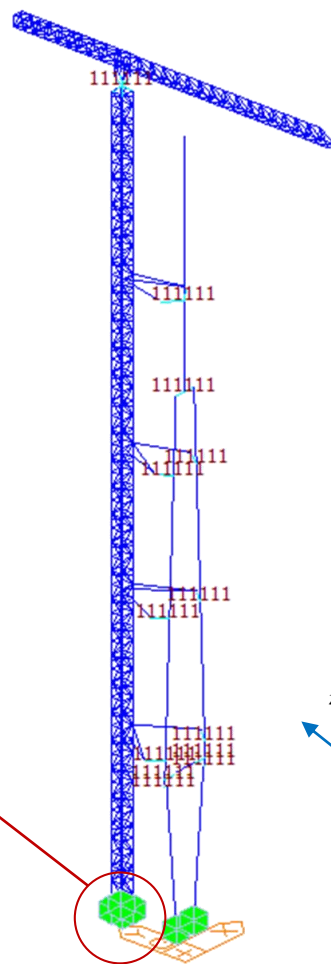
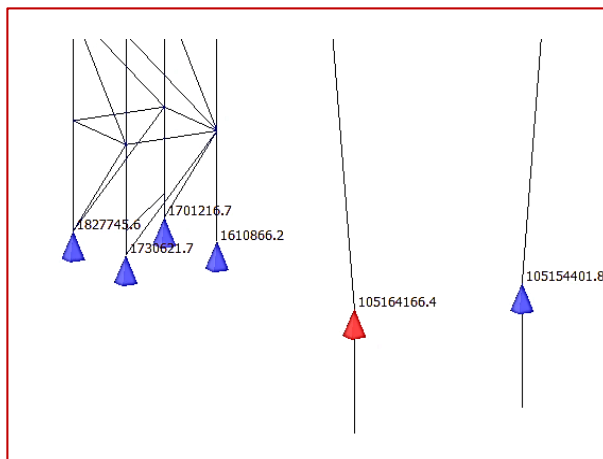


Photographed by 张玮师兄

# 有限元建模

## 建模结果

- 塔吊-桥塔系统
- 质量等效原则
- 自重支座反力

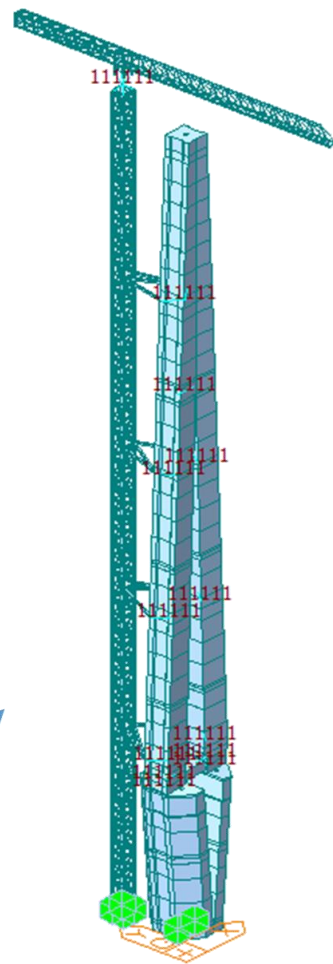


a)有限元模型离散图

回至

横桥向

纵桥向

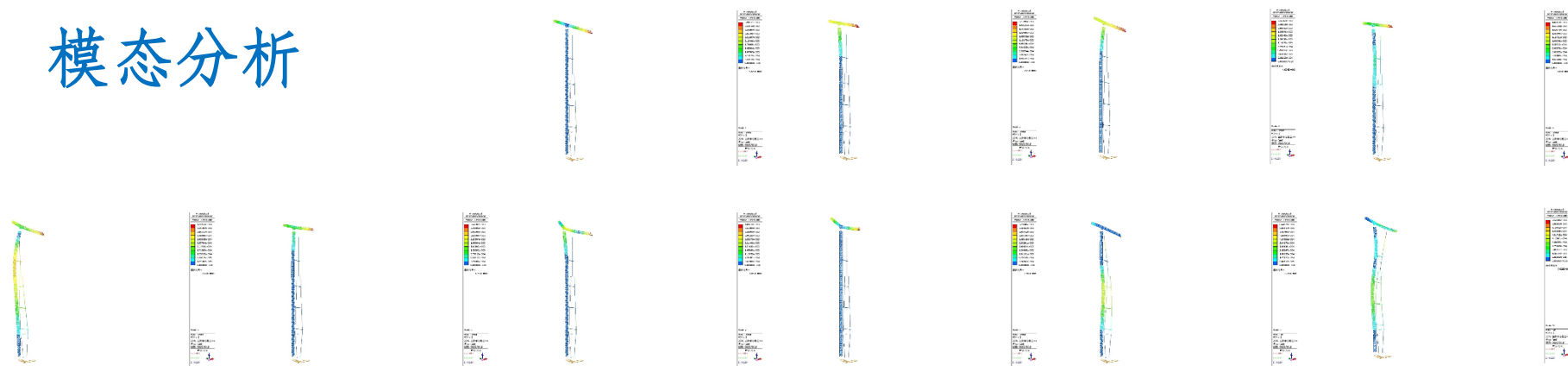


b)有限元模型外形图



# 有限元建模

## 模态分析

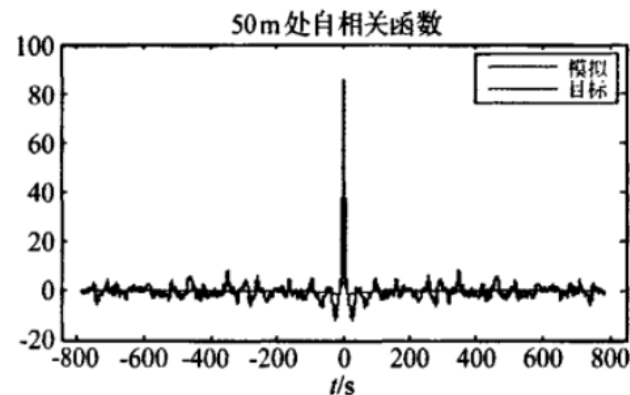


振型阶数	自振频率(Hz)	自振周期(s)	振型描述
1	0.10	9.61	塔吊起重臂水平转动
2	0.18	5.56	塔吊&桥塔一阶横桥向弯曲
3	0.22	4.63	塔吊一阶纵桥向弯曲
4	0.26	3.85	塔吊&桥塔二阶横桥向弯曲
5	0.39	2.54	塔吊&桥塔一阶纵桥向弯曲
6	0.57	1.75	塔吊一阶横桥向弯曲
7	0.95	1.05	塔吊起重臂一阶水平弯曲
8	1.12	0.90	塔吊起重臂一阶竖向弯曲
9	1.21	0.83	塔吊&桥塔三阶横桥向弯曲
10	1.31	0.76	塔吊&桥塔二阶纵桥向弯曲

# 风荷载数值模拟

## 风速场：基本理论

- 越接近地表，平均风速越小（大气边界层理论）
- 越接近地表，干扰越多，脉动风方差越大
- 脉动风速与高度无关
- 脉动风服从一定的风谱（类比反应谱）
- 脉动风沿高度方向相关（相干函数）



☆ 对数率

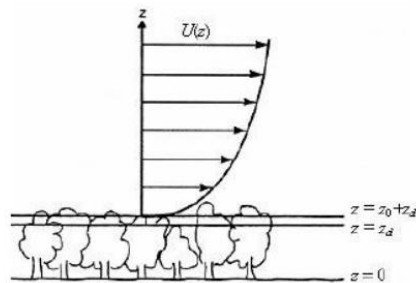
$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z - z_d}{z_0}$$

k: 冯卡门常数，一般取0.4

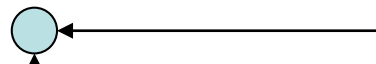
$z_d$ : 零平面位移，对于城市地貌

$$z_d = \bar{H} - \frac{z_0}{k}$$

$\bar{H}$  为城市建筑物平均高度



顺风向：平均风速+顺风向脉动风



横风向：横风向脉动风

不考虑垂直脉动风!

# 风荷载数值模拟

## 风速场：基本理论

- 平均风速数值模拟  $U_z = U_{10} \left( \frac{z}{10} \right)^\alpha$  依据规范采用谐波叠加法
- 脉动风速场数值模拟  $S(\omega) = H(\omega) \times H^*(\omega)^T$

$$S(\omega) = \begin{bmatrix} s_{11}(\omega) & s_{12}(\omega) & \dots & s_{1n}(\omega) \\ s_{21}(\omega) & s_{22}(\omega) & \dots & s_{2n}(\omega) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{n1}(\omega) & s_{n2}(\omega) & \dots & s_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad H(\omega) = \begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & 0 & \dots & 0 \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{n1}(\omega) & H_{n2}(\omega) & \dots & H_{nn}(\omega) \end{bmatrix}$$

风速：
$$u_j(t) = \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N |H_{jm}(\omega_l)| \times \sqrt{2\Delta\omega} \times \cos[\omega_{ml}t + \psi_{jm}(\omega_l) + \theta_{ml}]$$

风谱：
$$S_u(z, n) = U_*^2 \frac{200f}{n(1+50f)^{5/3}}$$

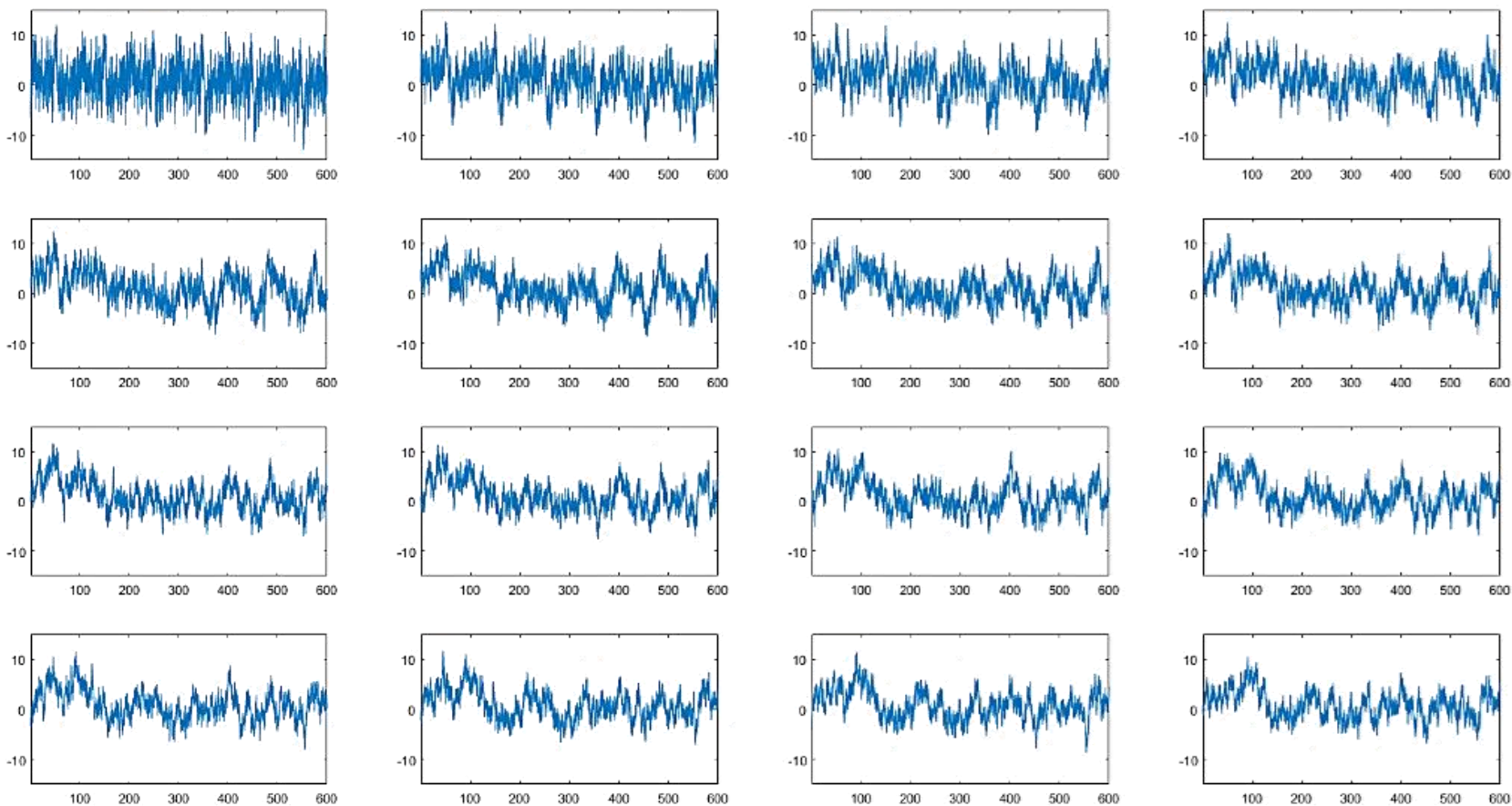
相干函数：
$$\rho_{ij}(n, x_i, x_j, z_i, z_j) = \exp\left[-\frac{n}{U} \sqrt{C_x^2(x_i - x_j)^2 + C_z^2(z_i - z_j)^2}\right]$$

# 风荷载数值模拟

## 风速场：顺风向

- 脉动风速时程

地表粗糙，风速波动大  
高空光滑，风速波动小

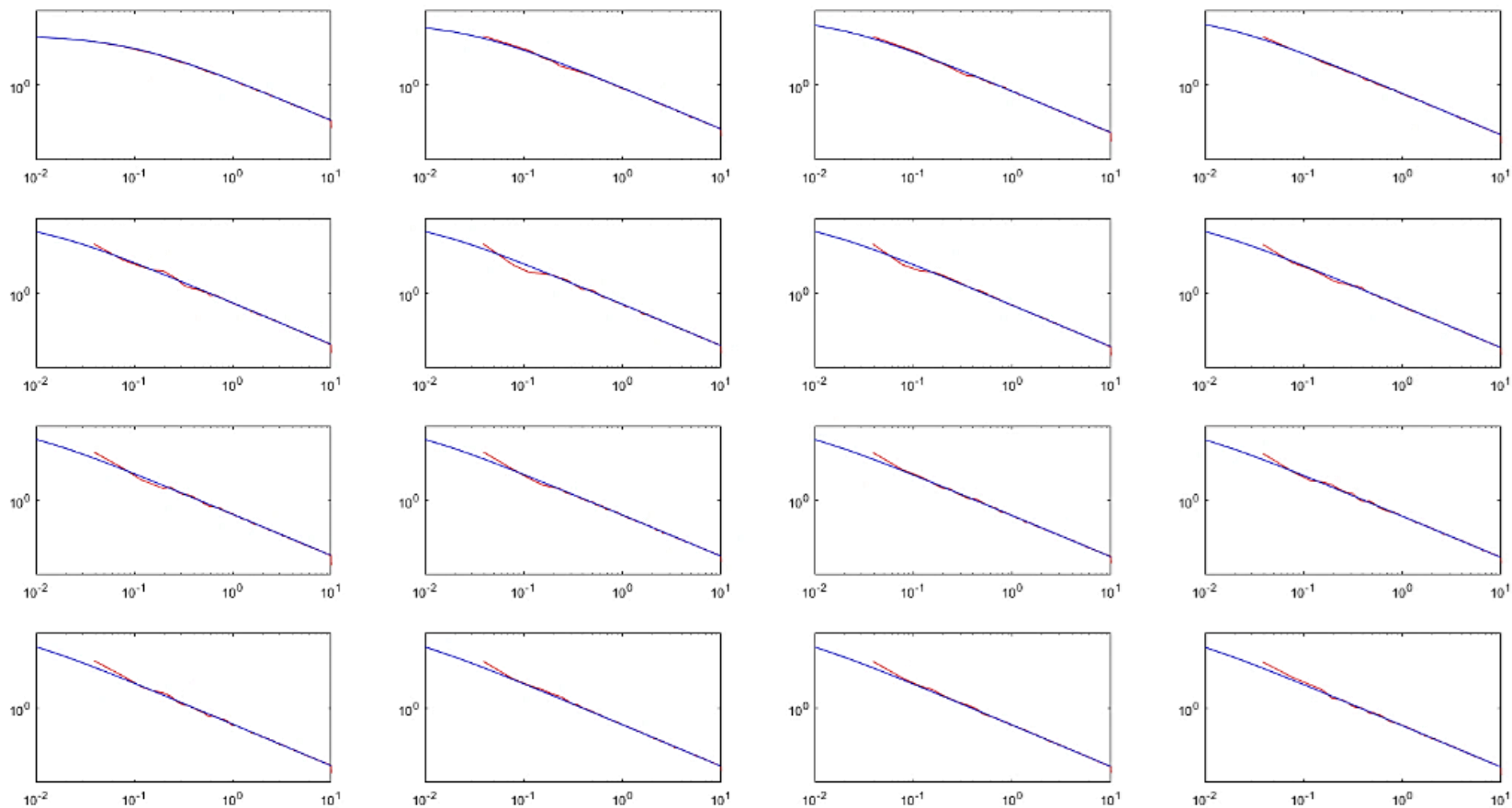


# 风荷载数值模拟

## 风速场：顺风向

- 脉动风功率谱

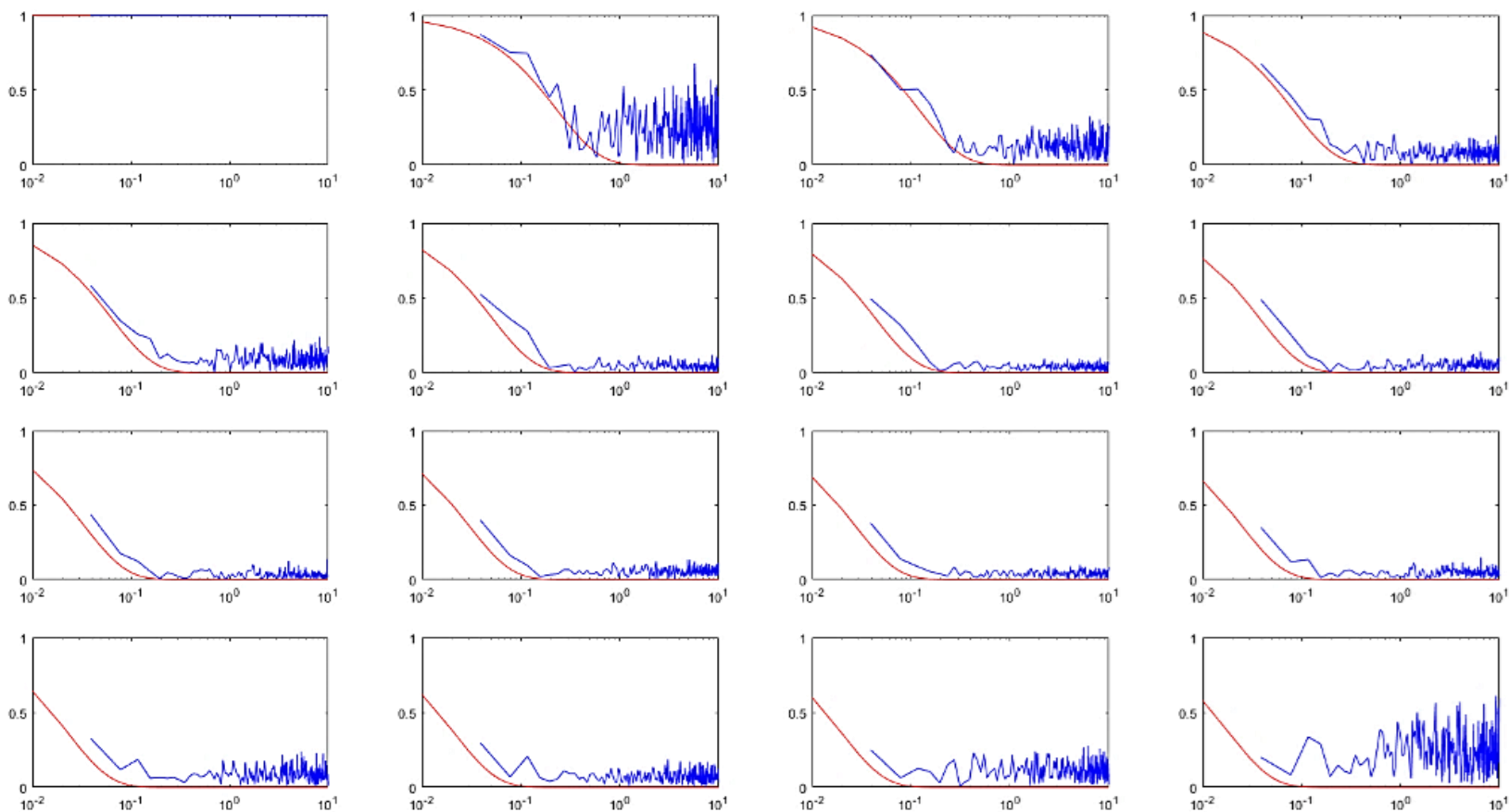
检验结果：吻合很好



# 风荷载数值模拟

## 风速场：顺风向

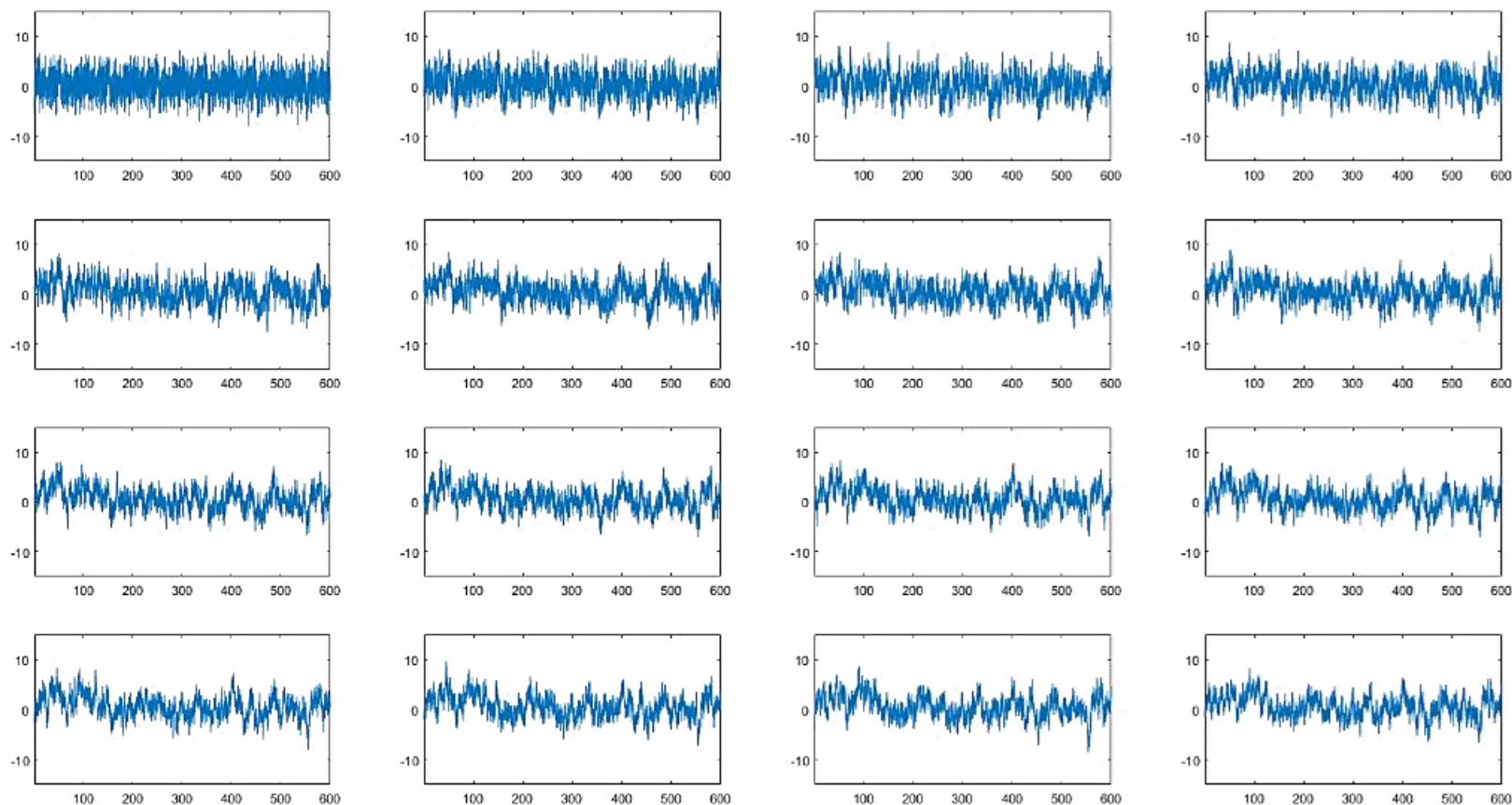
- 脉动风相干函数



# 风荷载数值模拟

## 风速场：横风向

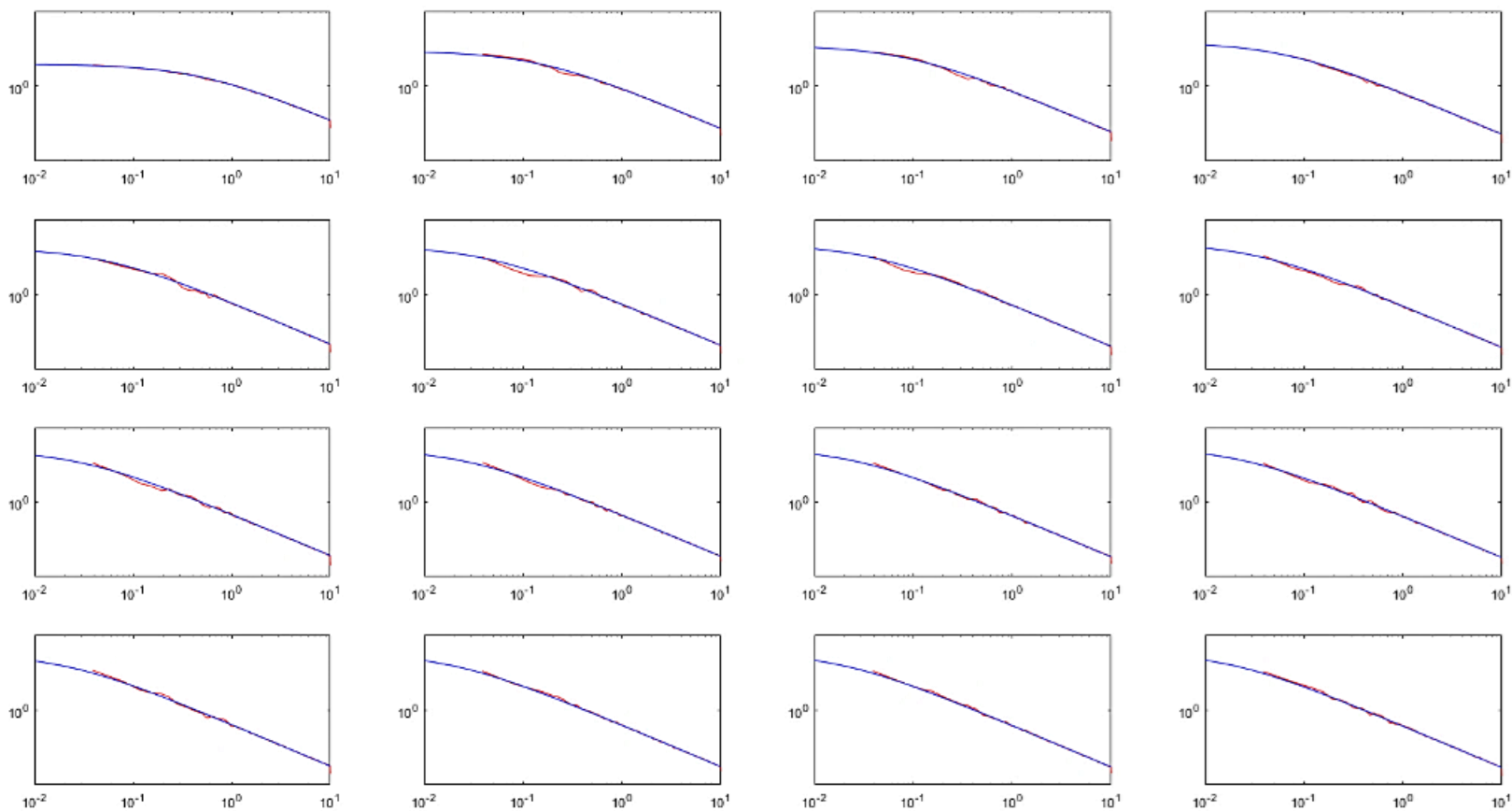
- 脉动风速时程



# 风荷载数值模拟

## 风速场：横风向

- 脉动风功率谱

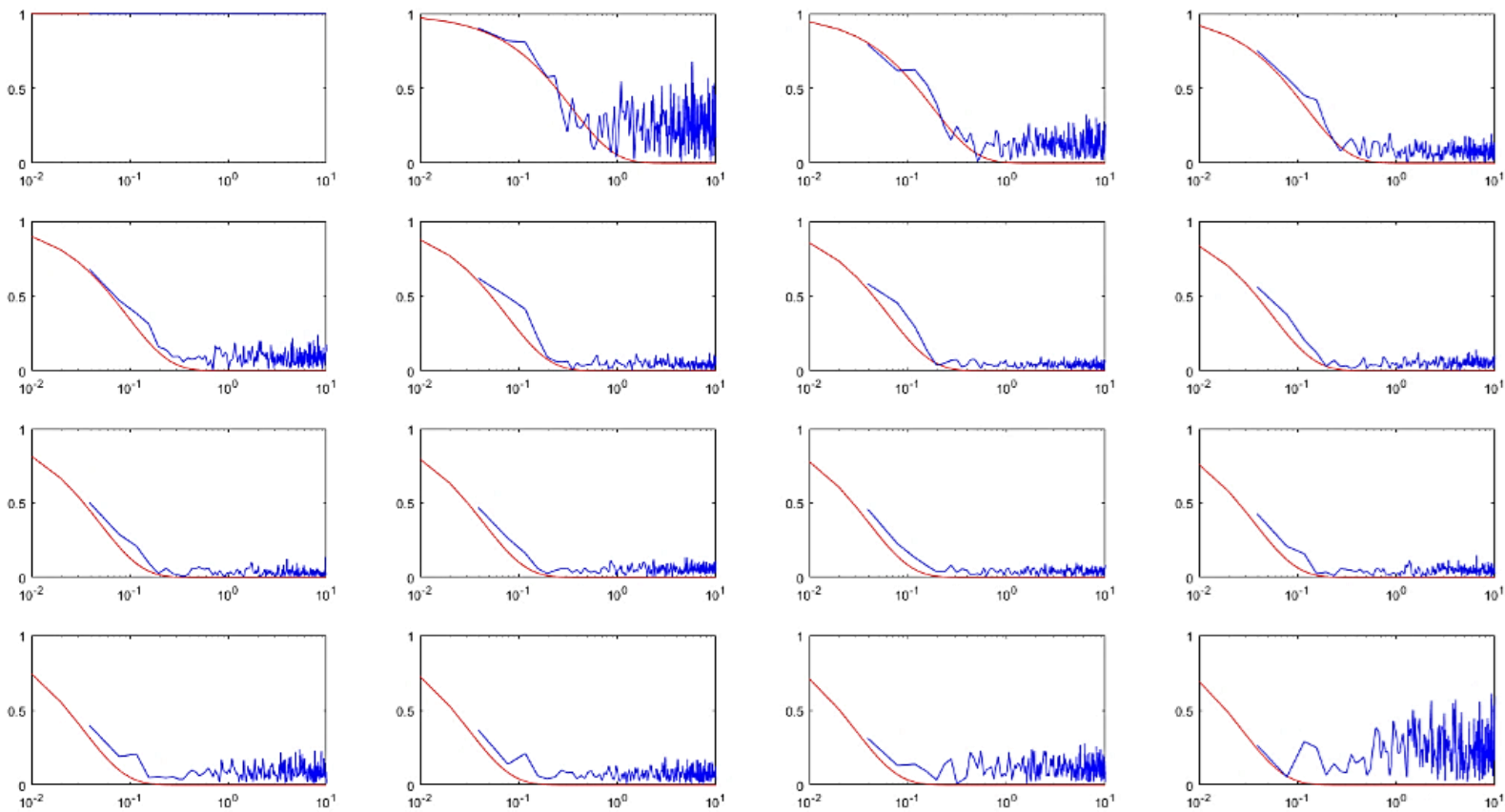




# 风荷载数值模拟

## 风速场：横风向

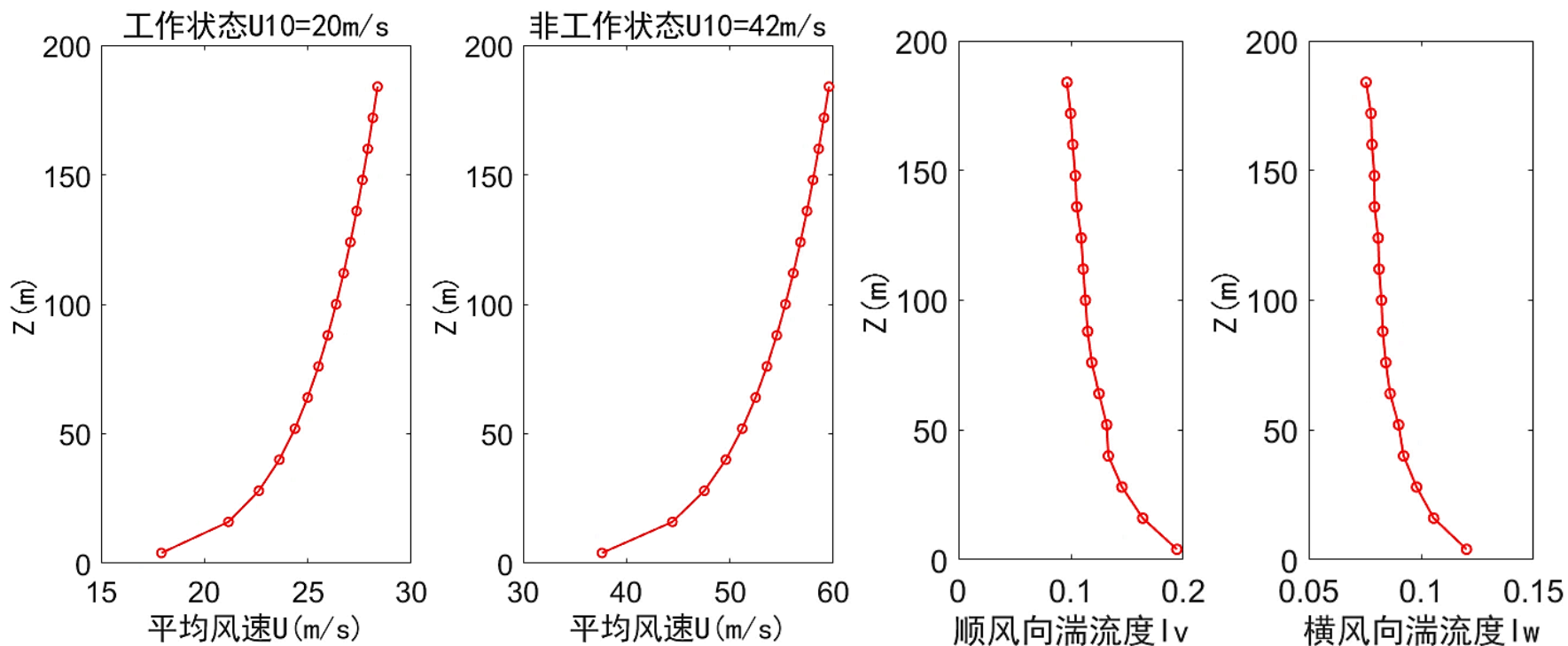
- 脉动风相干函数



# 风荷载数值模拟

## 风速场：模拟结果

- 风速剖面 and 紊流度



# 风荷载数值模拟

## 风荷载仿真

- 静风荷载  $F_H = \frac{1}{2} \rho U^2 C_H A_n$
- 抖振力： Scanlan方法

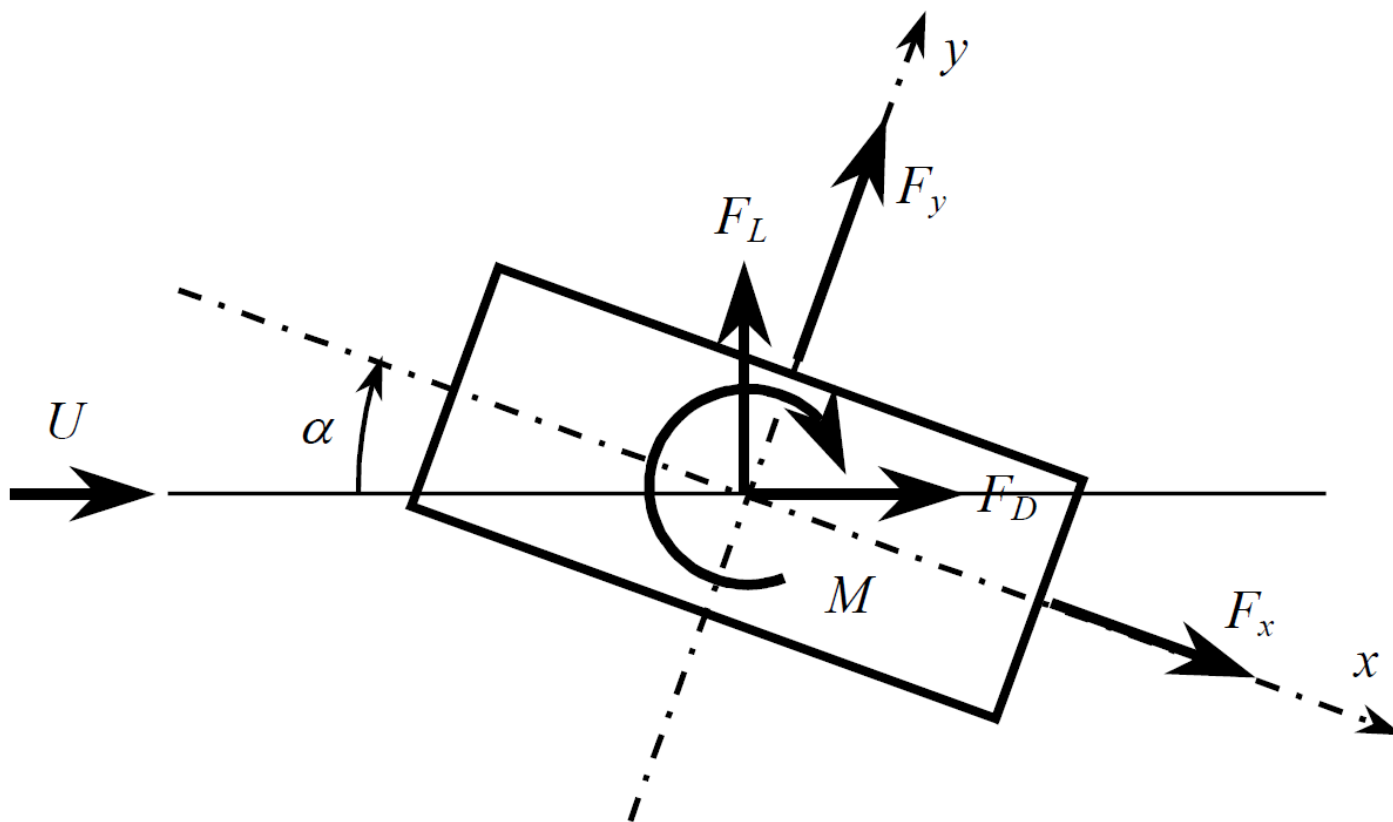
$$\hat{F}_D(t) = (\rho U^2 / 2) A_n [2C_D(\alpha) * \frac{u(t)}{U} + (\frac{dC_D}{d\alpha} + C_D(\alpha)) * \frac{v(t)}{U}]$$

$$\hat{F}_L(t) = (\rho U^2 / 2) A_n [2C_L(\alpha) * \frac{u(t)}{U} + \frac{dC_L}{d\alpha} * \frac{v(t)}{U}]$$

$$\hat{F}_M(t) = (\rho U^2 / 2) A_n [2C_M(\alpha) * \frac{u(t)}{U} + \frac{dC_M}{d\alpha} * \frac{v(t)}{U}]$$

$C_D$ 、 $C_L$ 、 $C_M$ ——三分力系数

# 风荷载数值模拟



$F_D$ ——阻力

$F_L$ ——升力（源于航空机翼）

$F_M$ ——升力矩

$C_D$ ——阻力系数

$C_L$ ——升力系数

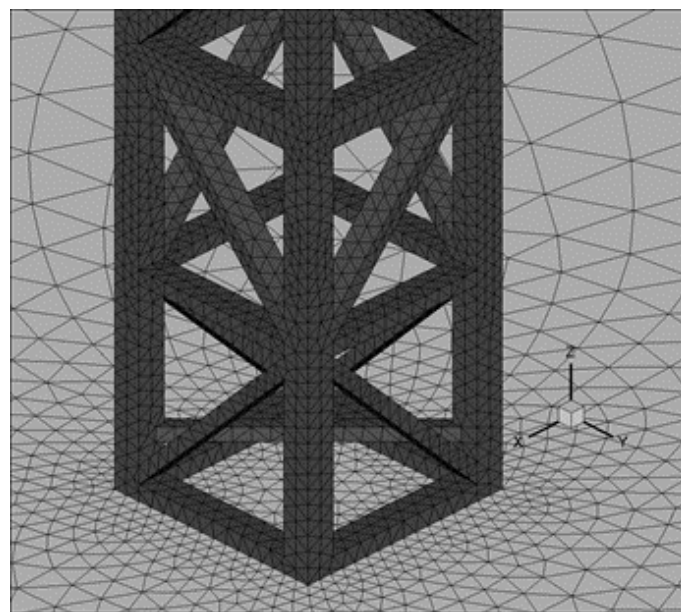
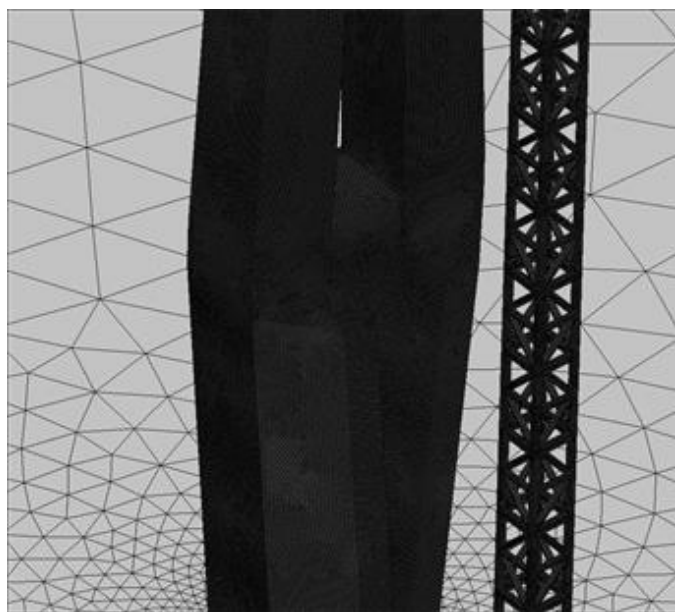
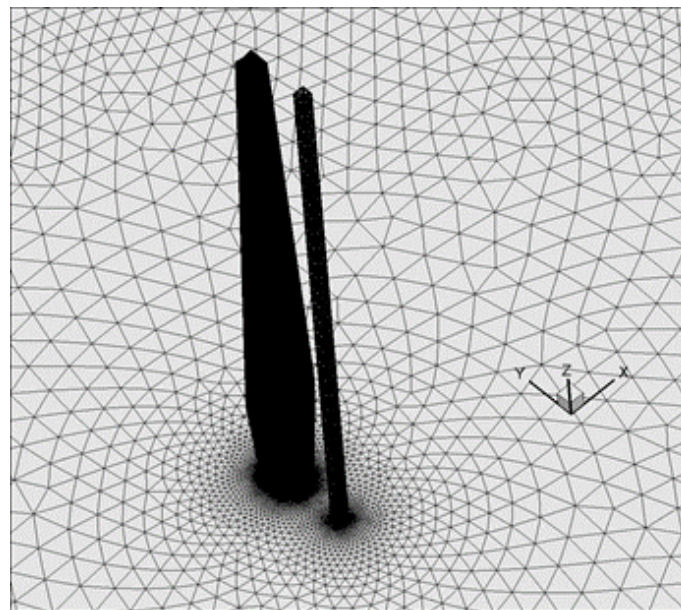
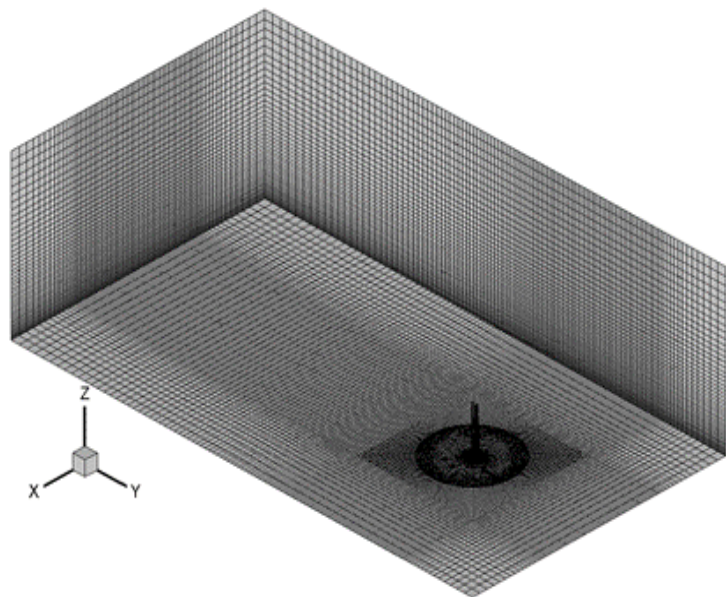
$C_M$ ——升力矩系数

无量纲化

不考虑升力矩!

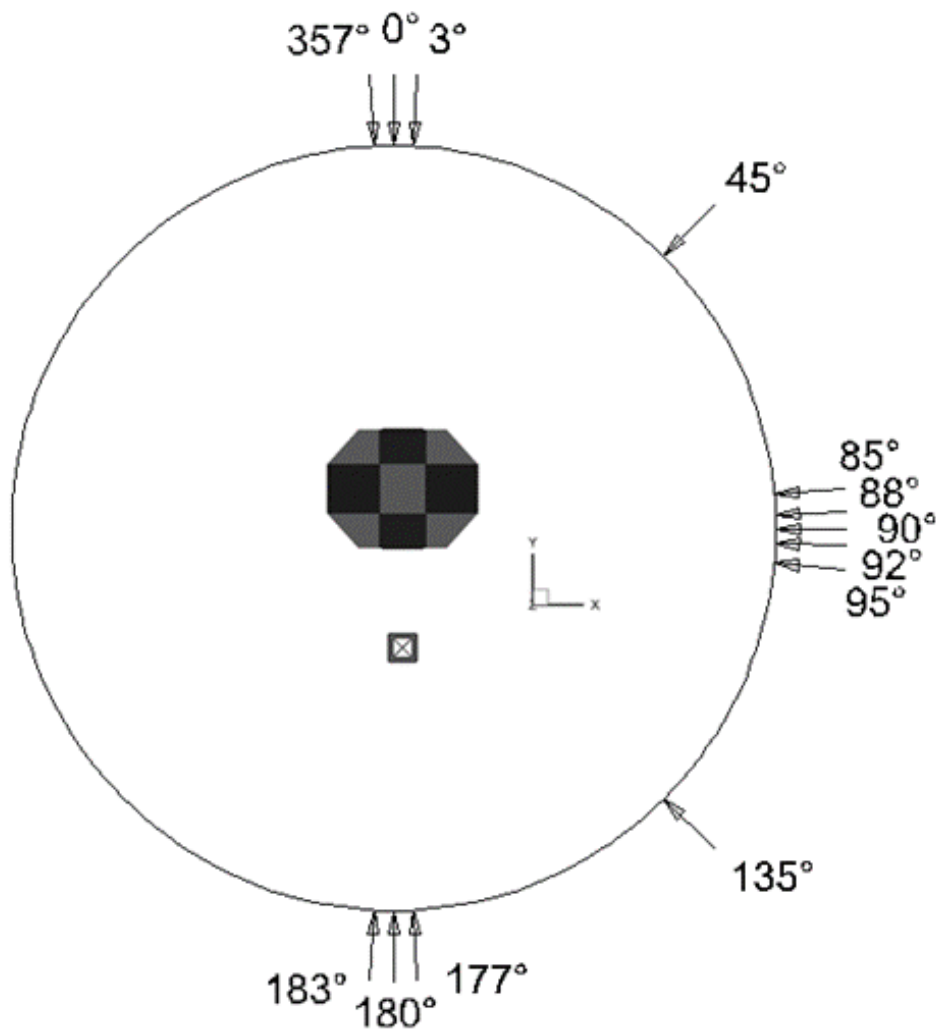
# 风荷载数值模拟

## CFD求三分力系数——建模



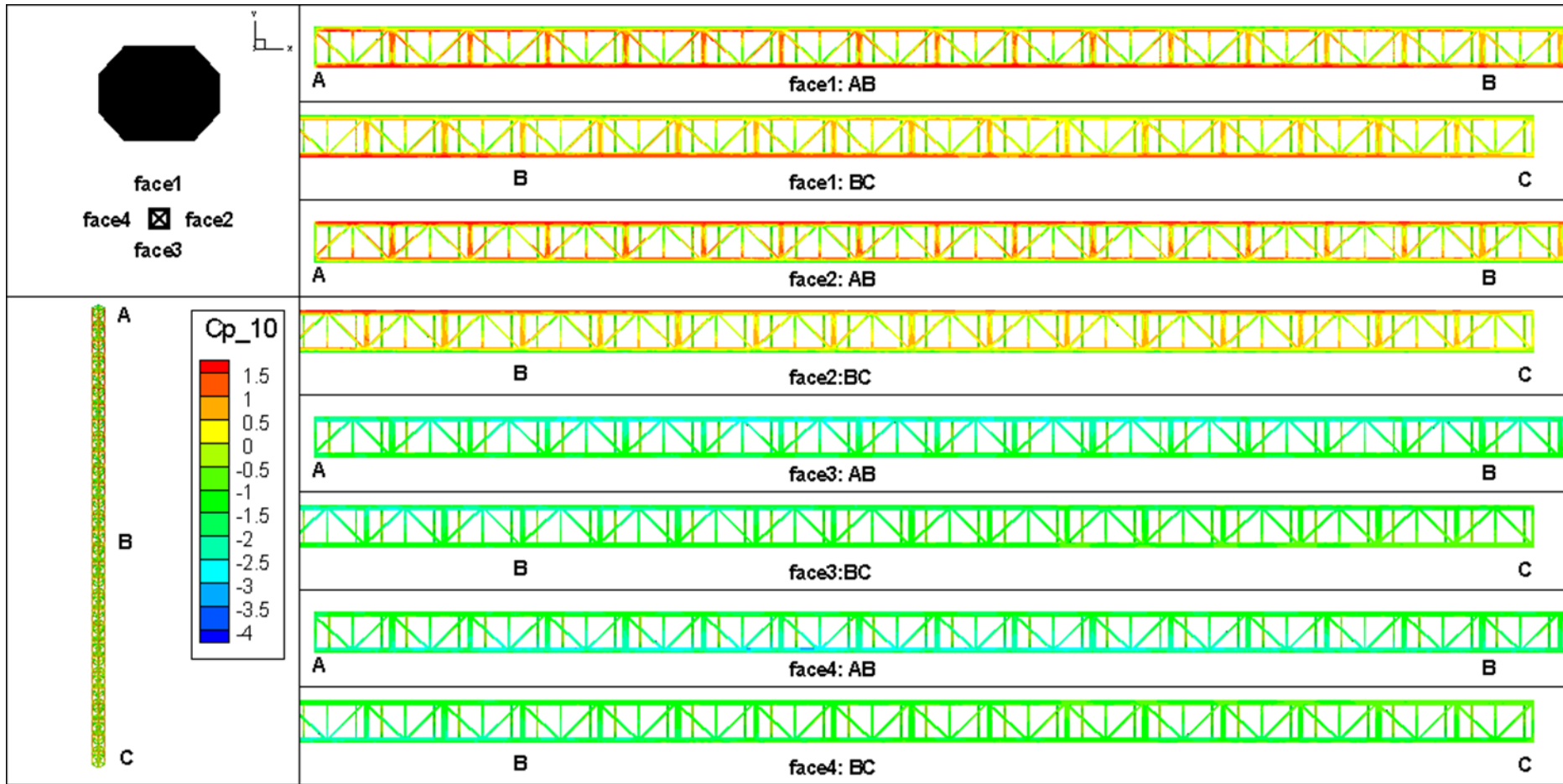
# 风荷载数值模拟

## CFD求三分力系数——工况



# 风荷载数值模拟

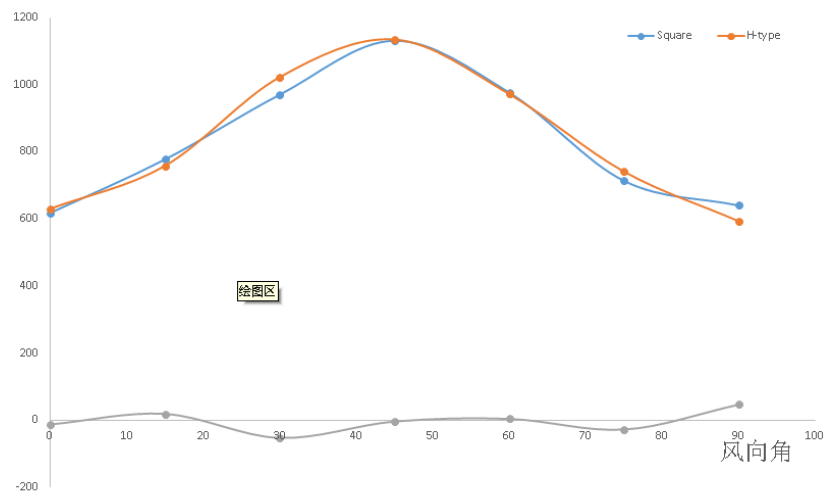
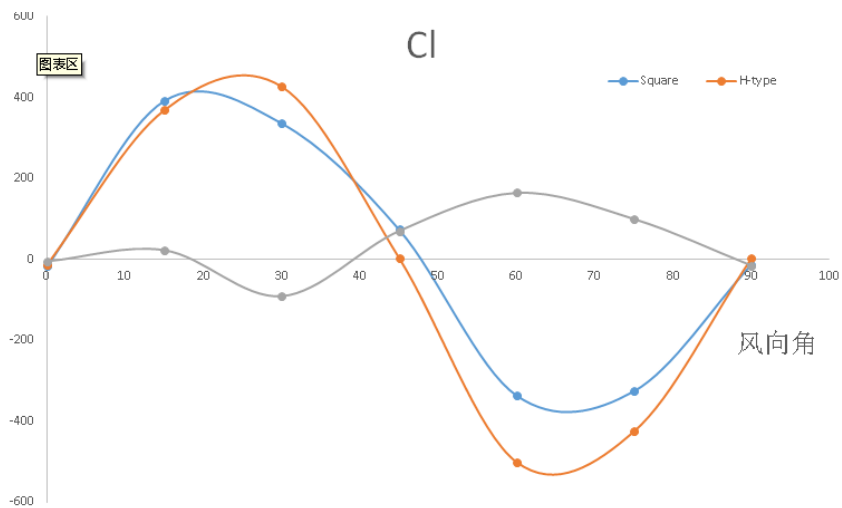
# CFD求三分力系数——结果



将风压依照抖振力公式无量纲化得到三分力系数

# 风荷载数值模拟

# CFD求三分力系数——结果



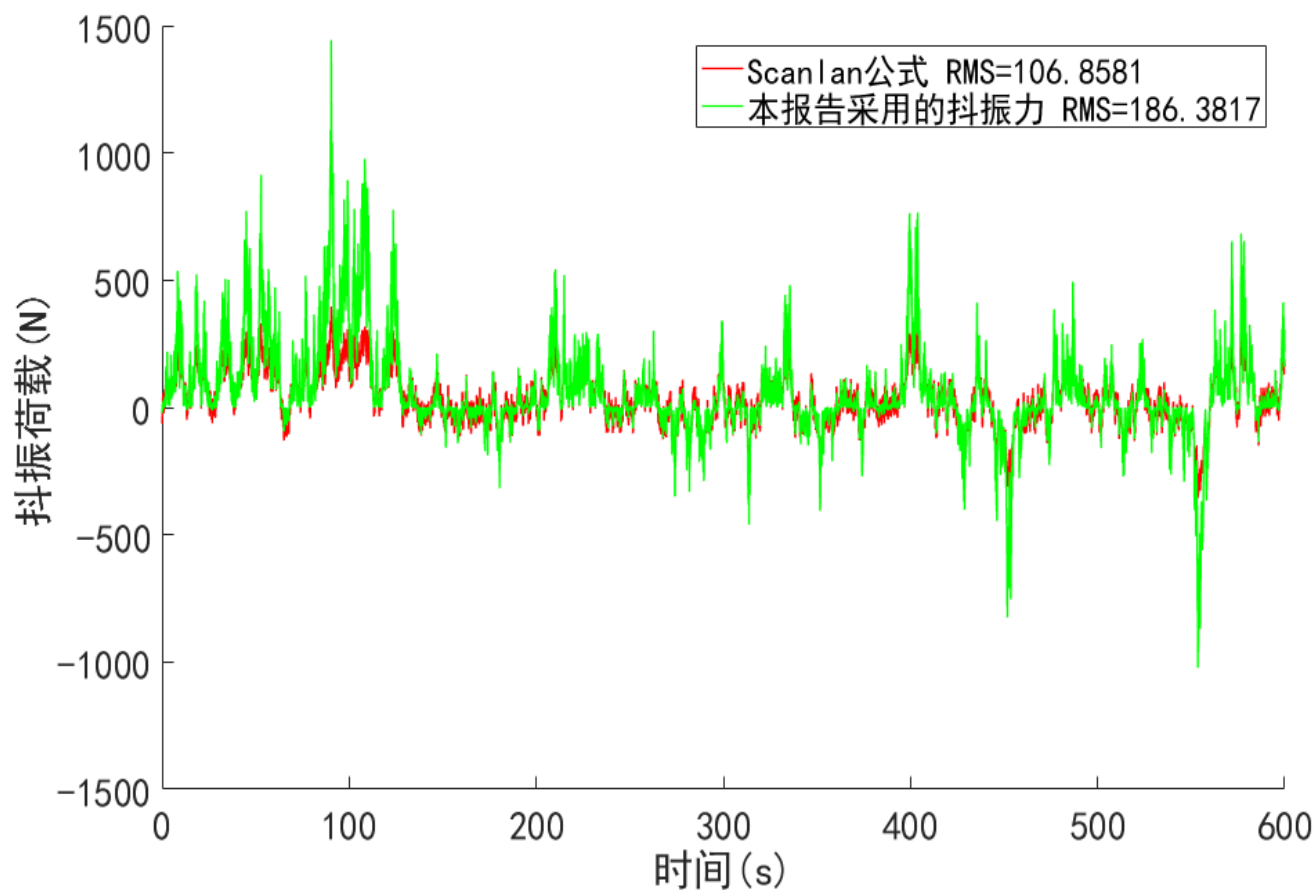
三分力系数-风攻角曲线



# 风荷载数值模拟

## 风荷载仿真

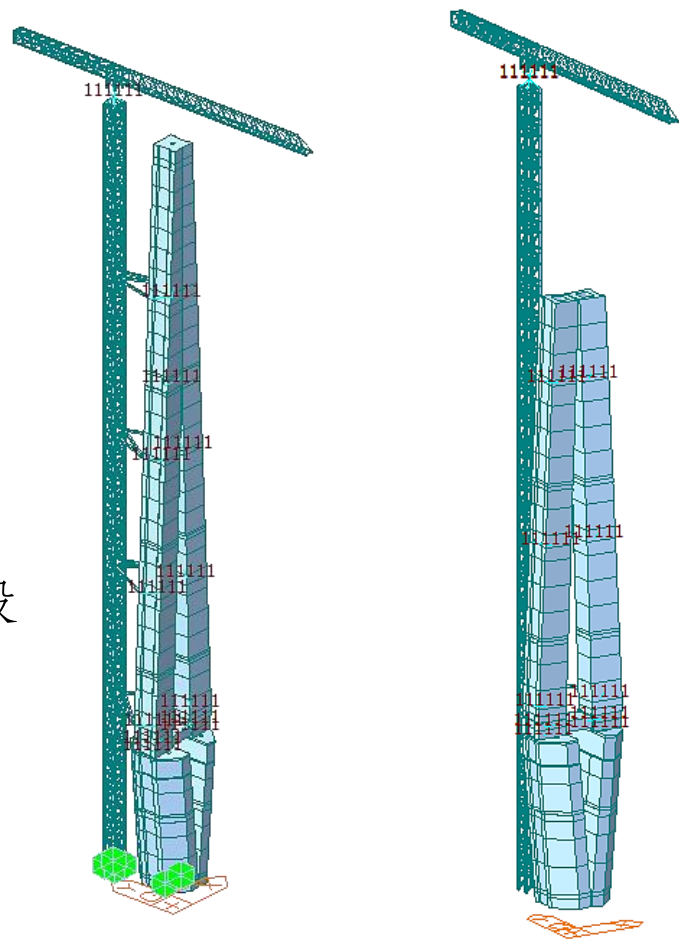
- 风阻系数，考虑安全系数



# 风载响应分析

## 分析准备

- 振型分解法
- 系统的前50阶振型
- 总时长600s，时间步长取0.01s
- 风谱最高频率10Hz
- 振型阻尼比均取0.9%（桥塔自立阶段  
阻尼比较小）



# 风载响应分析

## 分析结果：子工况 1.1

	静风响应	抖振响应最值		静风+抖振最值
驾驶室顺桥向位移(mm)	1.91	9.80	-12.11	11.71
驾驶室横桥向位移(mm)	443.36	28.52	-21.45	471.88
驾驶室顺桥向加速度(mm/s <sup>2</sup> )	-	24.09	-24.31	-24.31
驾驶室横桥向加速度(mm/s <sup>2</sup> )	-	30.44	-31.59	-31.59
附墙3-1轴力(t)	-21.52	1.41	-2.09	-23.61
附墙3-2轴力(t)	-0.96	1.17	-1.01	-1.97
附墙3-3轴力(t)	-22.9	2.25	-1.73	-24.63
附墙4-1轴力(t)	24.37	4.90	-4.5	29.27
附墙4-2轴力(t)	-0.24	3.23	-2.75	-2.99
附墙4-3轴力(t)	24.97	2.51	-2.04	27.48
基础节底部竖杆1轴力(t)	-168.5	0.7	-0.49	-168.99
基础节底部竖杆2轴力(t)	-161.03	0.3	-0.38	-161.41

# 风载响应分析

## 分析结果：工况 1 汇总

	子工况编号					
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
驾驶室顺桥向位移(mm)	11.71	-192.23	-13.12	-10.65	68.69	277.66
驾驶室横桥向位移(mm)	471.88	16.75	173.32	-227.79	1175.53	83.91
驾驶室顺桥向加速度(mm/s <sup>2</sup> )	-24.31	-19.36	-22.81	-24.98	-151.87	-147.97
驾驶室横桥向加速度(mm/s <sup>2</sup> )	-31.59	-27.31	-21.91	-24.71	-269	-158.06
附墙3-1轴力(t)	-23.61	13.43	18.36	22.81	-44.83	12.35
附墙3-2轴力(t)	-1.97	21.59	1.8	1.82	-6.64	-8
附墙3-3轴力(t)	-24.63	-31.84	20.05	24.23	-46.36	-14.67
附墙4-1轴力(t)	29.27	-17.15	-11.75	-14.5	77.95	133.56
附墙4-2轴力(t)	-2.99	13.14	2.8	2.9	19.27	-102.14
附墙4-3轴力(t)	27.48	4.79	-10.21	-14.07	70.21	-40.56
基础节底部竖杆1轴力(t)	-168.99	-163.88	-188.68	-180.98	-166.89	-144.95
吊顶顺桥向弯矩(t·m)	-3.69	-961.8	-40.09	-3.42	-22.08	-989.5

# 风载响应分析

## 分析结果：子工况 2.1

	静风响应	抖振响应最值		静风+抖振最值
驾驶室顺桥向位移(mm)	21.69	24.62	-18.44	46.31
驾驶室横桥向位移(mm)	570.74	21.97	-12.96	592.71
驾驶室顺桥向加速度(mm/s <sup>2</sup> )	-	28.50	-30.91	-30.91
驾驶室横桥向加速度(mm/s <sup>2</sup> )	-	31.06	-29.73	-31.06
附墙1-1轴力(t)	8.44	0.60	-0.44	9.04
附墙1-2轴力(t)	-3.21	0.21	-0.23	-3.44
附墙1-3轴力(t)	8.20	0.30	-0.17	8.5
附墙2-1轴力(t)	-27.85	1.85	-27.1	-54.95
附墙2-2轴力(t)	-15.44	1.01	-0.96	-16.4
附墙2-3轴力(t)	-17.23	0.87	-0.97	-18.2
基础节底部竖杆1轴力(t)	-166.81	0.40	-0.29	-167.1
基础节底部竖杆2轴力(t)	-159.02	0.64	-0.54	-159.56

# 风载响应分析

## 分析结果：工况 2 汇总

	子工况编号					
	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
驾驶室顺桥向位移(mm)	46.31	218.97	50.858	40.82	141.62	850.47
驾驶室横桥向位移(mm)	592.71	22.8	-284.59	-360	1178.71	89.98
驾驶室顺桥向加速度(mm/s <sup>2</sup> )	-30.91	-33.77	-32.23	-24.96	-154.7	-205.11
驾驶室横桥向加速度(mm/s <sup>2</sup> )	-31.06	-19.91	-25.95	-23.36	-173.3	-136.76
附墙1-1轴力(t)	9.04	4.7	2.2	1.4	22.6	20
附墙1-2轴力(t)	-3.44	-2.4	-1.7	-1.4	-4.8	-4.13
附墙1-3轴力(t)	8.5	-1.2	1.7	1	21.5	-15.32
附墙2-1轴力(t)	-54.95	24.8	20.3	25.5	-62.9	-23.14
附墙2-2轴力(t)	-16.4	-28.4	-13.8	-13.1	-21.9	11.88
附墙2-3轴力(t)	-18.2	-3.9	28.7	33.4	-43	11.97
基础节底部竖杆1轴力(t)	-167.1	-161.6	-189.2	-181	-173.3	-139.25
吊顶横桥向弯矩(t·m)	-46.3	-1.8	1040.7	1272.3	-1187.1	15.69

# 抗风安全性评价

## 安全舒适性评价

- 附墙处连杆容许内力：

附墙	连杆	容许压力(t)	容许拉力(t)	附墙	连杆	容许压力(t)
附墙1	1	99	99	附墙2	1	119
	2	77	77		2	77
	3	119	119		3	98
附墙3	1	95	95	附墙4	1	194
	2	109	109		2	156
	3	140	140		3	92

- 评价

安全性：塔吊、附墙连杆在施工期工作风速（20m/s）及非工作极限风速（42m/s）下都是安全的。

舒适度：20m/s风速时，加速度峰值均小于人有感范围，可正常工作；42m/s风速时，加速度峰值大于人有感范围，可能引起操作人员不适。

# 结论与展望

## 结论

- 塔吊安全性复核中以南塔参数为例，结论亦偏安全地适用于北塔塔吊。
- 安全性：ZSC2000B塔吊、附墙连杆在施工期（工况1，2）工作风速（20m/s）及设计风速（42m/s）下都是安全的；
- 舒适度：20m/s风速时，加速度峰值小于人有感范围，可正常工作；42m/s风速时，加速度峰值进入人有感范围，可能引起操作人员不适。
- 42m/s风速，子工况1.5，阻尼比0.02时，驾驶室顺风向最大加速度184 m/s<sup>2</sup>；阻尼比0.009时，最大加速度-269m/s<sup>2</sup>，阻尼比0.0015时，驾驶室顺风向最大加速度411 m/s<sup>2</sup>，大于400 m/s<sup>2</sup>。故如果测试结果发现前阻尼比小于0.15%，则需采取减震措施。



# 结论与展望

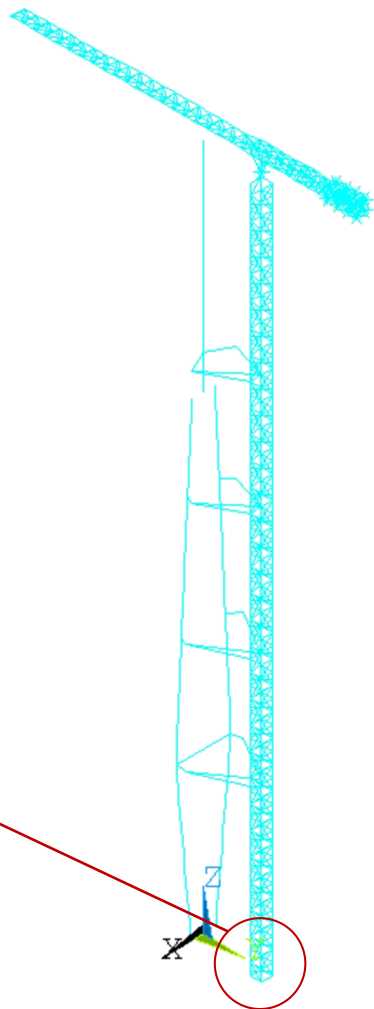
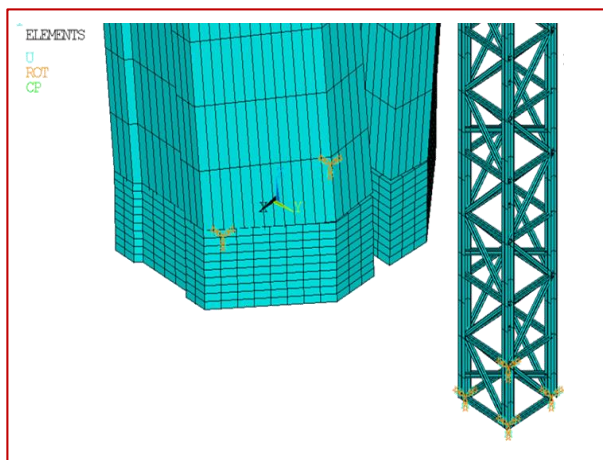
## 建议

- 1) 采用计算流体动力学 (CFD) 方法模拟风场对主塔、塔吊的风致响应效应，计算三分力系数，获取更精确的动力分析结果；（**现在进行时ing**）
- 2) 在各个施工阶段对主塔及塔吊在环境荷载激励下的动力响应进行检测，确保桥塔结构的阻尼比不超过临界值。

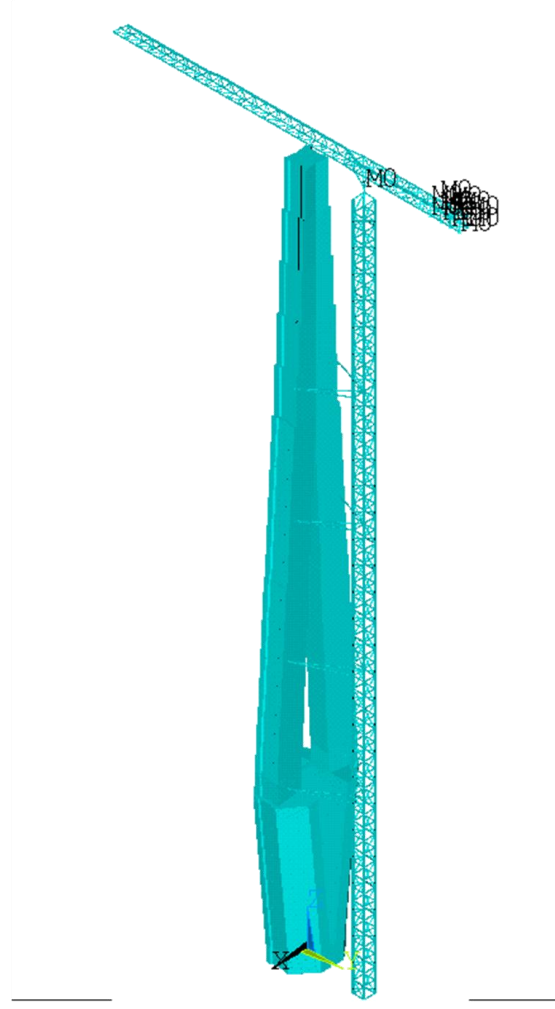
# 有限元建模

## 建模结果

- 塔吊-桥塔系统
- 质量等效原则
- 自重支座反力



a)有限元模型离散图

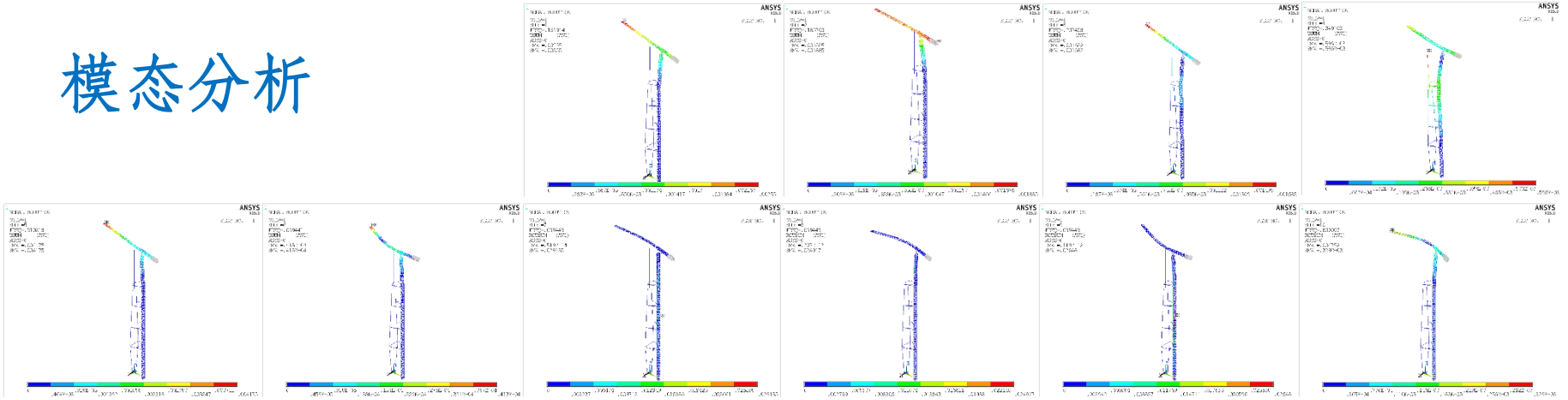


b)有限元模型外形图

# 中塔-塔吊

## 有限元建模

## 模态分析



振型阶数	自振频率(Hz)	振型描述
1	0.16191	塔吊一阶纵桥向弯曲
2	0.18570	塔吊起重臂一阶横桥向弯曲
3	0.23746	塔吊&桥塔一阶横桥向弯曲
4	0.34910	塔吊&桥塔二阶横桥向弯曲
5	0.51022	塔吊一阶横桥向弯曲
6	0.65944	塔吊二阶横桥向弯曲
7	0.65945	塔吊一阶扭转振动
8	0.65945	塔吊二阶扭转振动
9	0.65945	塔吊三阶扭转振动
10	0.83001	塔吊起重臂一阶竖向弯曲

# 风载响应分析

## 分析结果：子工况 1.3

	静风响应	抖振响应最值		静风+抖振最值
驾驶室顺桥向位移(mm)	-0.8	-12.57	17.98	17.18
驾驶室横桥向位移(mm)	92.6	-8.61	23.01	115.61
驾驶室顺桥向加速度(mm/s <sup>2</sup> )	-	-17.56	18.52	-
驾驶室横桥向加速度(mm/s <sup>2</sup> )	-	-13.30	13.43	-
附墙3-1轴力(t)	10.6	-0.61	0.62	11.22
附墙3-2轴力(t)	39.4	-0.57	0.41	39.81
附墙3-3轴力(t)	45.4	-0.90	0.69	46.09
附墙4-1轴力(t)	-7.4	-1.59	1.85	8.99
附墙4-2轴力(t)	-44.1	-1.41	0.91	45.51
附墙4-3轴力(t)	-49.8	-1.12	1.49	-50.92
基础节底部竖杆1轴力(t)	-171	-0.53	0.25	-171.53
基础节底部竖杆2轴力(t)	-172	-0.12	0.17	-172.12

# 风载响应分析

## 分析结果：工况 1 汇总

静风响应	子工况编号			
	1.1	1.2	1.4	1.5
驾驶室顺桥向位移(mm)	1.91	-0.8	-2.15	-4.18
驾驶室横桥向位移(mm)	443.36	92.6	-215.57	-74
附墙3-1轴力(t)	1.02	10.6	11.7	-5.1
附墙3-2轴力(t)	2.61	39.4	43.5	10.2
附墙3-3轴力(t)	3.4	45.4	50.1	13.4
附墙4-1轴力(t)	-0.9	-7.4	-8.2	-4.48
附墙4-2轴力(t)	-9.2	-44.1	48.1	-37.6
附墙4-3轴力(t)	-10.1	-49.8	-54.2	-41.1
基础节底部竖杆1轴力(t)	-151	-171	-163	-157
基础节底部竖杆2轴力(t)	-151	-172	-164	-143
顺桥向塔顶位移(mm)	0.0012	0.271	0.295	0.192
横桥向塔顶位移(mm)	0.187	13.6	140.4	44.5

# 结论与展望

## 结论

- 1) 将中塔与STT2200塔吊联合体系和南/北塔与ZSC2000B塔吊联合体系的分析结果进行对比。不同之处在于有限元分析软件不同（Midas, ANSYS），类似之处在于二者的静力、动力响应相差10%以内，动力特性类似，也验证的模型的合理性；
- 2) 安全性评价：ZSC2000B塔吊、附墙连杆在施工期（工况1.1等4工况）工作风速（20m/s）及设计风速（42m/s）下，满足强度要求；
- 3) 舒适度评价：施工状态下（工况1.3，20m/s风速），塔吊顶操作室的加速度峰值均小于人有感范围，可正常工作；
- 4) 各工况的安全性与舒适性还需进一步研究和复核，临界阻尼还需进一步计算。

谢谢