

太阳能热发电吸热塔气弹模型的风洞试验

汇报人：李正农

汇报时间：2024年9月

CONTENTS

目录

01

实验背景与意义

02

实验设计与方法

03

试验结果与数据分析

01

PART



实验背景与意义

实验背景与意义



风洞气弹试验对象为博州地区的一座正在建设的塔式太阳能发电场中高219.3m的吸热塔，底部178米为混凝土结构，上部为39.1m的钢结构。

该结构为典型的高耸结构，但是其结构特殊，上部自重很大，呈现一个头重脚轻的结构形式。

实验背景与意义

由于本项目吸热塔结构为高耸结构，且上部荷载大，需要进行风洞试验获取相应的风致响应数据：

- 1、获取吸热塔不同工况下顶部加速度情况
- 2、分析其不同工况下的风致响应变化
- 3、分析低矮周边建筑对于吸热塔风致响应的影响
- 4、分析风速变化对加速度响应的影响
- 5、为吸热塔设计建造提供参考

02

PART



实验设计与方法

模型设计

为准确模拟结构的动力响应，进行气弹模型试验时，模型与原型结构间不仅要求满足几何形状相似，还需满足气动弹性相似，在本次试验中主要的相似参数如下：

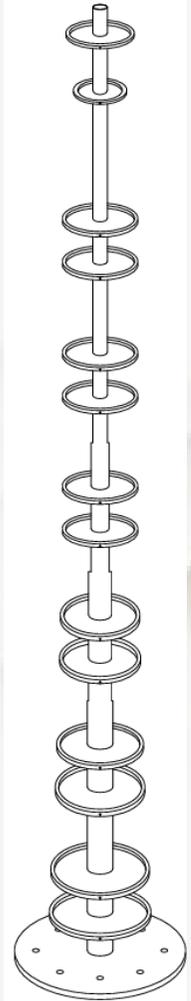
- 1、折减频率
- 2、Cauchy 数（弹性参数）
- 3、密度比
- 4、阻尼比

模型设计

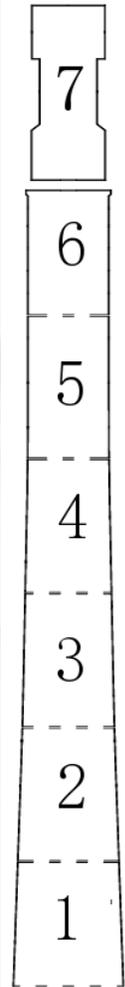
实际模型设计中的相似比情况如下表

参数	相似要求	目标相似比	
长度	$\lambda_L = L_m / L_p$	$1/n$	$1/200$
速度	$\lambda_V = V_m / V_p$	$1/m$	$1/5$
密度	$\lambda_\rho = \rho_m / \rho_p$	1	1
阻尼比	$\lambda_\xi = \xi_m / \xi_p$	1	1
质量	$\lambda_M = M_m / M_p = \lambda_\rho (\lambda_L)^3$	$1/n^3$	1.25×10^{-7}
时间	$\lambda_T = T_m / T_p = (L_m V_p) / (L_p V_m) = \lambda_L / \lambda_V$	m/n	$1/40$
频率	$\lambda_f = f_m / f_p = \lambda_V / \lambda_L$	n/m	40
加速度	$\lambda_a = a_m / a_p = \lambda_V / \lambda_T = (\lambda_V)^2 / \lambda_L$	n/m^2	8
抗弯刚度	$\lambda_{EI} = (E_m I_m) / (E_p I_p) = \lambda_\rho (\lambda_V)^2 (\lambda_L)^4$	$1/(m^2 n^4)$	2.5×10^{-11}
力	$\lambda_F = F_m / F_p = \lambda_\rho (\lambda_V \lambda_L)^2$	$1/(m^2 n^2)$	1.0×10^{-6}
弯矩	$\lambda_{BM} = \lambda_F \lambda_L = \lambda_\rho (\lambda_V)^2 (\lambda_L)^3$	$1/(m^2 n^3)$	5×10^{-9}

模型设计



芯梁与圆盘
及底座



外衣

设计思路

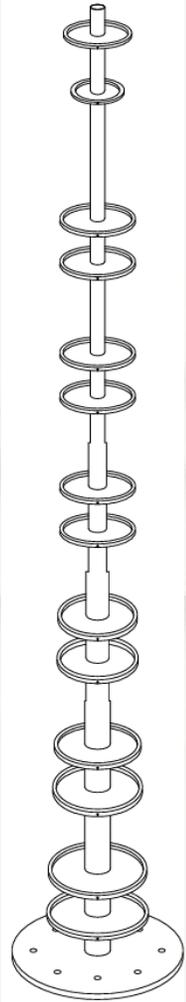
本试验拟采用“芯梁+外衣”的形式进行模型设计，吸热塔塔身的刚度采用圆截面芯梁模拟刚度相似，而外衣则模拟气动外形，如图所示，芯梁上的圆盘为配重，用于模拟质量，为减小外衣对刚度的贡献，相邻外衣段之间设置其净间距为2 mm。

芯梁材料为铝合金7a04，外衣材料为ABS塑料

模型设计

芯梁设计

本试验的芯梁为主要部分，为了实现不同段的刚度，本试验将芯梁分成7段，通过改变该六段的芯梁截面尺寸，通过统一内径改变外径以控制吸热塔气弹模型的自振频率及其振型。



芯梁与圆盘
及底座



模型设计

芯梁设计

通过分析和计算，最终确定的芯梁尺寸信息如下表，内径统一为12mm，外径最大30mm，最小17mm

段层	高度 (mm)	外径 (mm)	内径 (mm)	壁厚 (mm)
7	195	17	12	2.5
6	151	17	12	2.5
5	160	17	12	2.5
4	150	21	12	4.5
3	150	27	12	7.5
2	150	30	12	9
1	140	30	12	9



模型设计

模型质量分布

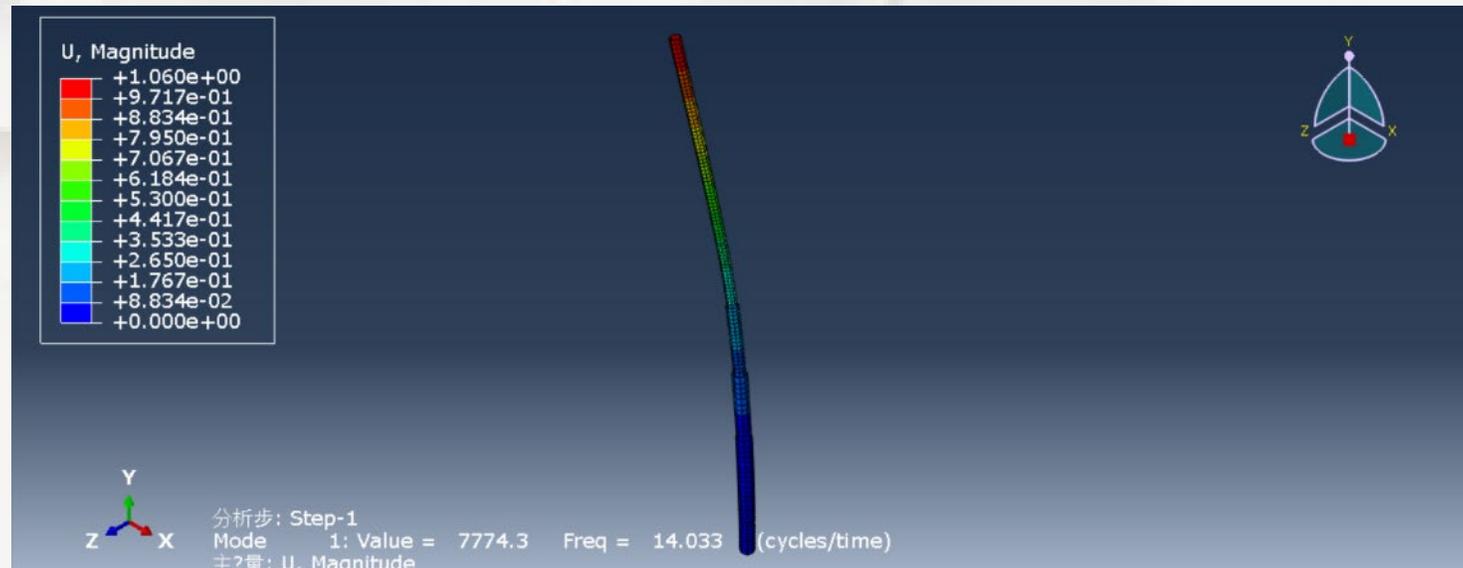
整体模型质量分配如下表，每一段的配重由芯梁，配重圆盘以及外衣构成

段层	长度 (mm)	每段总重 (kg)	芯梁 (kg)	外衣总重 (kg)	圆盘总重 (kg)
7	195	0.17216	0.06240	0.05250	圆盘×2 0.02862
6	151	0.31622	0.04832	0.11645	圆盘×2 0.15145
5	160	0.32604	0.0512	0.12339	圆盘×2 0.15145
4	150	0.40587	0.09832	0.12376	圆盘×2 0.09190
3	150	0.43448	0.19366	0.13187	圆盘×2 0.05447
2	150	0.52085	0.25027	0.14246	圆盘×2 0.06406
1	140	0.59268	0.23359	0.14559	圆盘×2 0.10675

模型设计

模型动力参数

通过有限元软件分析的该吸热塔气弹模型的简化模型的一阶振型，主要是将芯梁考虑进来，并将圆盘和外衣折合成质量点耦合在其上。其一阶自振频率为14.033 Hz，预期的吸热塔气弹模型的一阶自振频率为12.78 Hz，二者相对误差为9.8%。

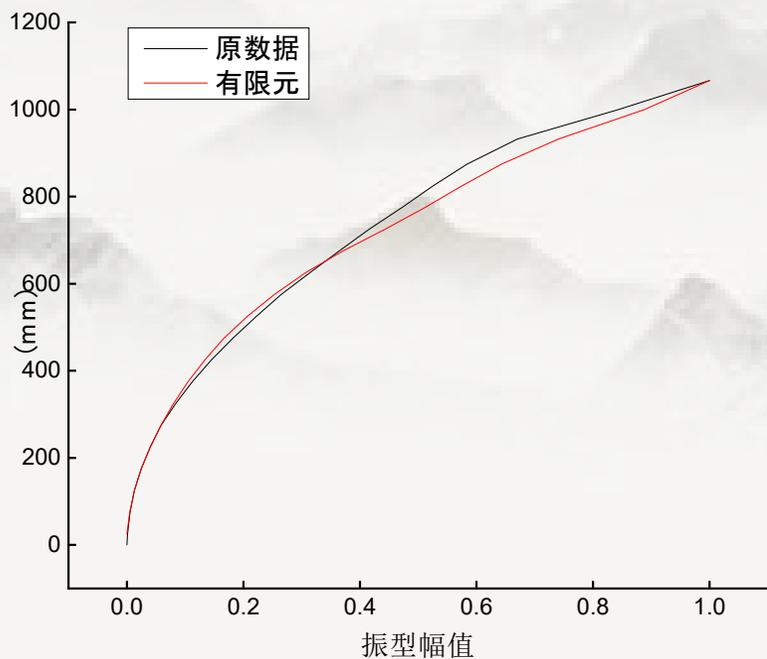


吸热塔气弹模型一阶模态

模型设计

下图和表为设计的模型的有限元计算所得到的振型和原型振型的对比，整体拟合较好，最大相对误差为10.53%，出现在刚度转换层。

高度 (mm)	原振型数据 (a_0)	有限元振型数值 (a_1)	绝对误差 ($a_1 - a_0$)	相对误差 ($(a_1 - a_0) / a_0$)
1066.5	1	1.00000	0.00000	0.00%
1000	0.84323	0.88824	0.04501	5.34%
932.5	0.67043	0.74103	0.07060	10.53%
875	0.58428	0.64366	0.05938	10.16%
825	0.52623	0.57588	0.04964	9.43%
775	0.47294	0.51247	0.03953	8.36%
725	0.41561	0.44287	0.02725	6.56%
675	0.36465	0.37090	0.00625	1.71%
625	0.31416	0.30668	-0.00748	-2.38%
575	0.26464	0.25319	-0.01145	-4.33%
525	0.22248	0.20696	-0.01552	-6.98%
475	0.18191	0.16684	-0.01507	-8.28%
425	0.14518	0.13395	-0.01123	-7.73%
375	0.11258	0.10542	-0.00717	-6.37%
325	0.08413	0.08020	-0.00392	-4.66%
275	0.05909	0.05874	-0.00035	-0.59%
225	0.04036	0.04038	0.00003	0.06%
175	0.02473	0.02506	0.00033	1.34%
125	0.01309	0.01309	0.00000	0.00%
75	0.00538	0.00480	-0.00058	-10.73%
25	0.00140	0.00049	-0.00090	-64.72%
0	0	0	0	



阵型对比图



风洞试验模型



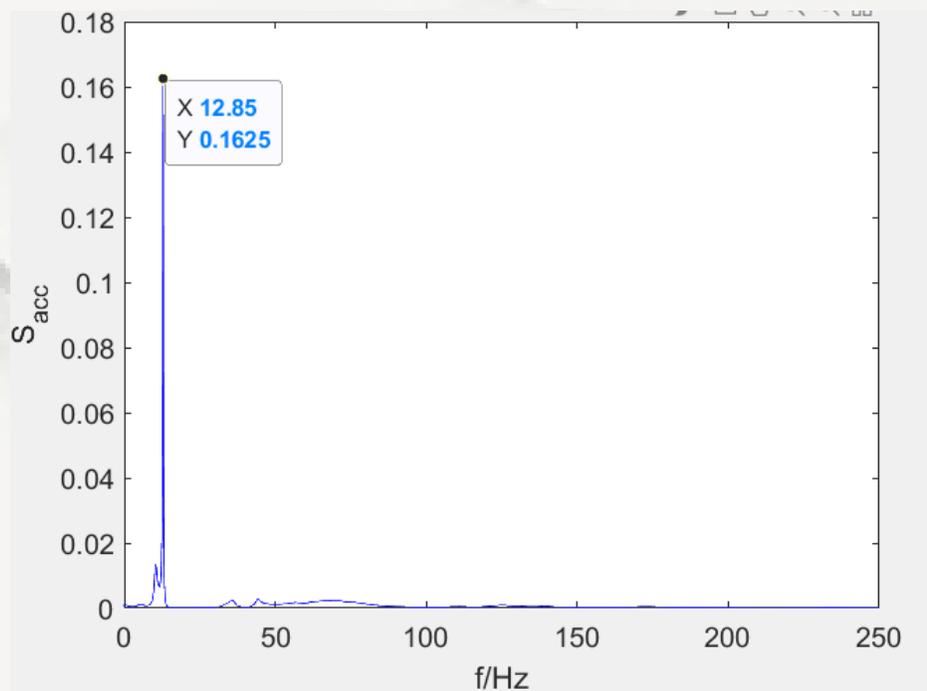
左图为模型的制作与风洞模型成品的展示，分别为芯梁制作与风洞安装模型，图中白色圆盘部分为配重盘，用于模拟质量参数，右侧为加装了外衣的完整模型

风洞试验模型

在风洞试验前测量了模型的自振频率和阻尼比，自振频率通过模型底部的测力天平测量，图示为通过外部激励测量自振频率，通过在每一层增加等量配重块来调节，最终测得自振频率为12.85，与目标频率值12.78误差为0.55%。



自振频率试验



功率谱分析图

风洞试验模型

图示为阻尼比的测量，在顶部设置加速度传感器，通过加速度传感器进行测量，阻尼比为0.0133，与目标阻尼比0.0125误差为6.4%，通过测试，自振频率和阻尼比均满足试验要求。



风洞气弹模型

风洞试验模型

在对模型进行测试时发现，加速度传感器对于结构的动力参数有着不可忽视的影响，特别是自振频率，由于结构本身配重较轻，在顶部的配重只有28g，而加速度传感器本身重量达5.5g，放置两个加速度传感器后，达到了配重的40%，对于实验的影响很大，会减小结构的自振频率，从而影响试验结果。将加速度传感器计入配重即可减小影响。



加速度传感器

技术指标:

动态指标

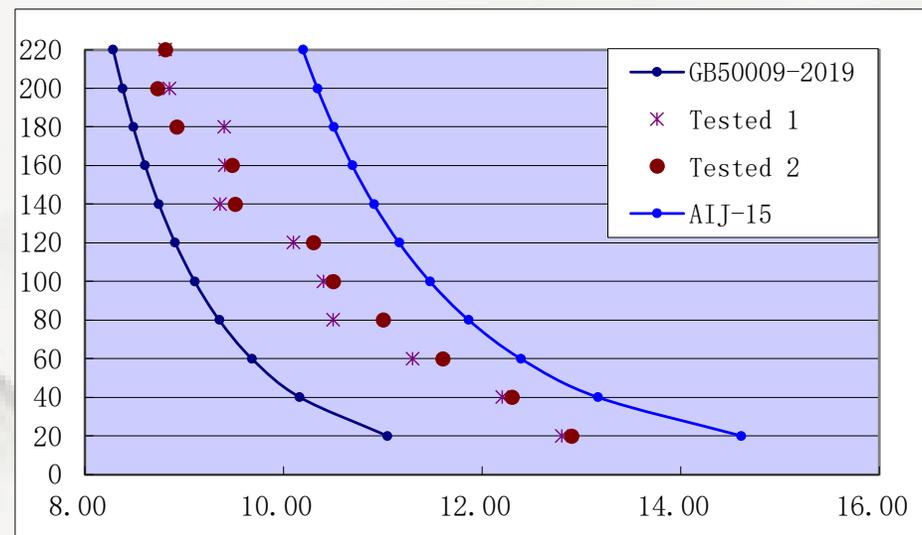
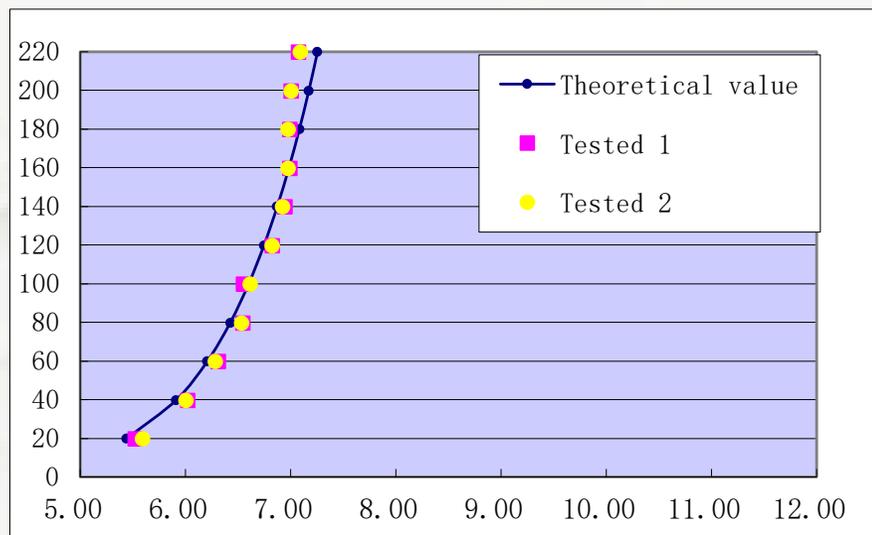
轴向灵敏度 (23±5℃)	约 10 mV/g
量程	±500g
最大横向灵敏度	<5%
频率响应 (±10%)	1~10000 Hz
安装谐振频率	>35kHz
极性 (加速度方向从底部到传感器)	正向

技术指标



风洞试验

风洞试验在湖南大学大气边界层风洞实验室HD-3中进行，风剖面 and 湍流强度剖面图如图所示



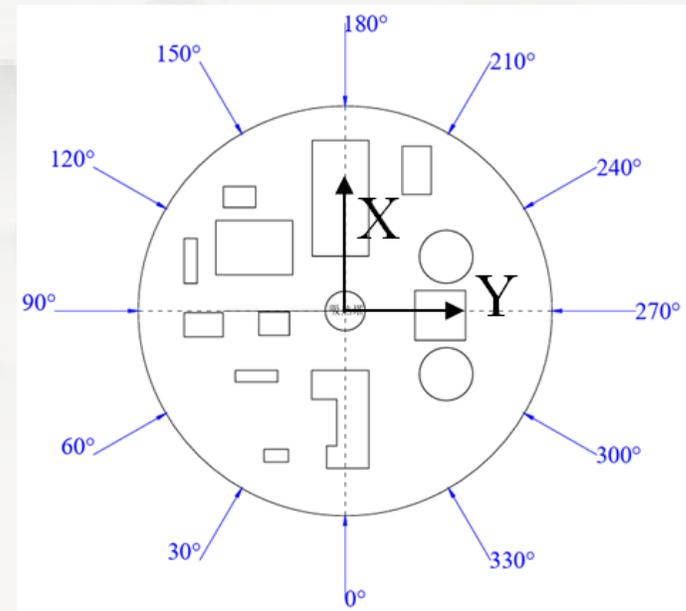
风剖面 and 湍流强度剖面图

风洞试验

由于本项目的吸热塔周围有厂房等建筑，本试验进行12个风向（ 0° ~ 360° ，间隔 30° ，逆时针旋转）的顶部加速度的测量，风向角示意图如图所示，本次试验针对到达吸热塔顶部风速为 7m/s 、 5m/s 和 4m/s 时的加速度进行了测量



模型周边建筑



试验工况图

03

PART



试验结果与数据分析

风洞试验数据处理

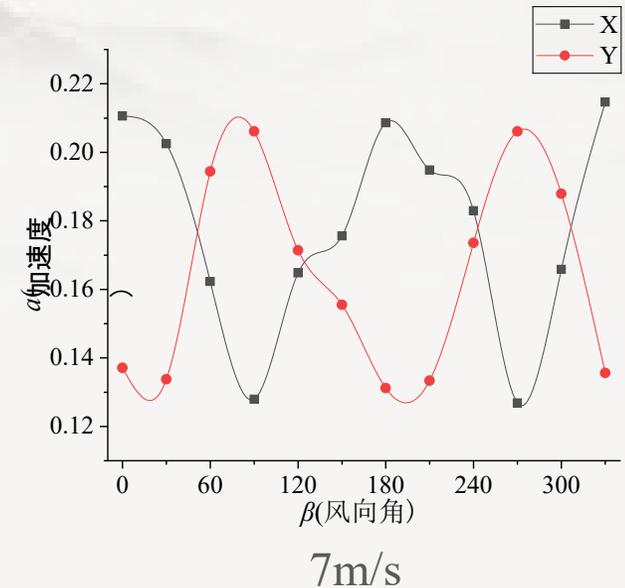
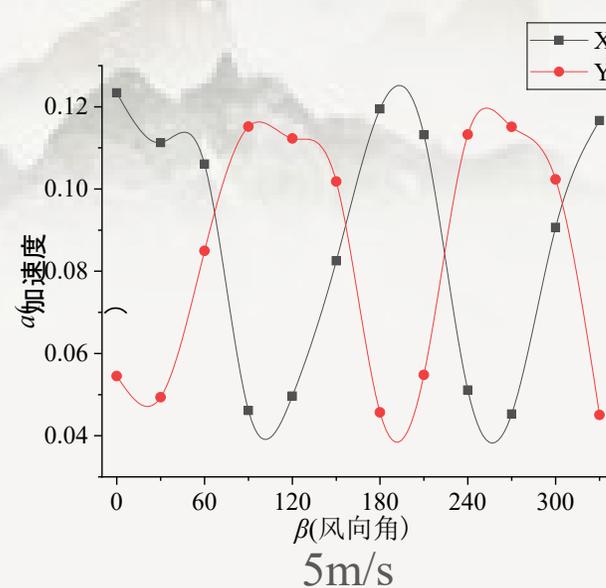
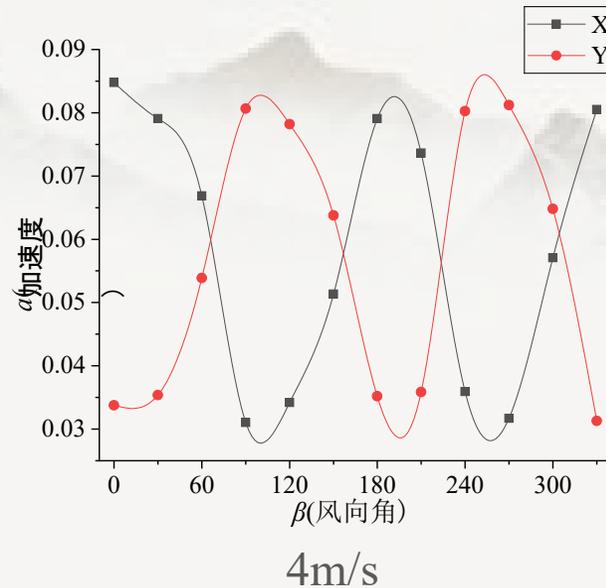
对每次测试工况，均记录了 n 个数据，将吸热塔气弹试验所测得的加速度时程序列 a_{xi} 和 a_{yi} 取均方根：

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n a_{xi}^2}{n}}$$
$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n a_{yi}^2}{n}}$$

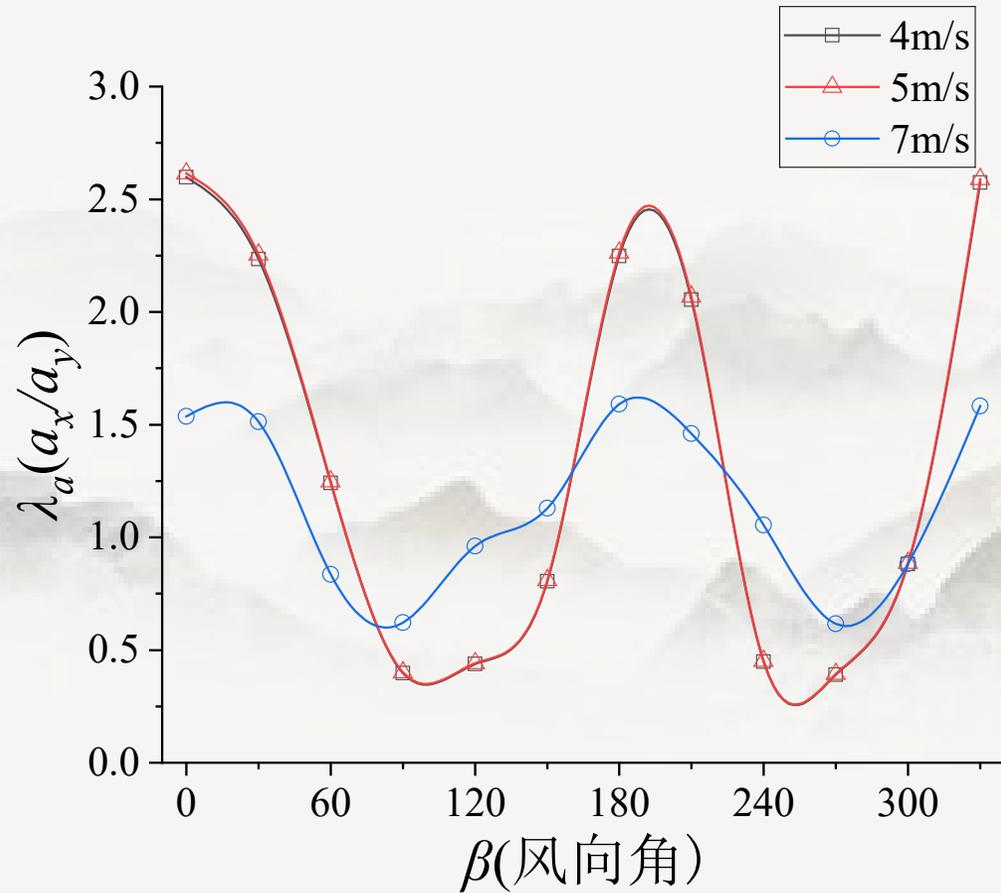
式中， σ_x 和 σ_y 是吸热塔测点X向和Y向的加速度时程序列的均方根值， n 是数据采样个数

风洞试验结果分析

下图不同风速下，不同风向角工况的顶部加速度曲线图，图中 a 为加速度均方根值， β 为水平风向角，X和Y在 0° 风向角时分别为顺风向和横风向，坐标轴随着风向角转动，从图中我们可以看出在风向角 0° 和 180° ， 90° 和 270° 时，X方向的值基本相等，Y方向的值也基本相等，可以表明下部建筑对于顶部加速的基本不造成影响，从而可以推断出下部周边建筑对于吸热塔的风致响应基本无影响。



风洞试验结果分析



为了进一步分析不同风速下吸热塔顶部加速度响应的变化情况，通过计算X和Y向的加速比值来分析加速度随着风速的变化情况，如右图，图中 λ_a 为X向与Y向加速度均方根比值(a_x/a_y)， β 为水平风向角。

在4m/s 和5m/s工况下比值很接近，在7m/s 工况下，比值出现了明显的变化，顺风向与横风向比值明显减小

◆ 风洞试验结果分析

当风速为7m/s时，风速比为1:5，对应实际风速为35m/s，超过了临界风速28.9m/s，使得顶部出现了跨临界风振，增大了顶部横风向加速度，使得X和Y向的比值变化。临界风速计算如下：

$$v_{cr} = \frac{D}{T_i S_t}$$

D---结构截面直径

T_i ---结构第*i*阵型的自振周期

S_t ---斯托罗哈数，对圆截面结构取0.2

但是吸热塔结构特殊，横截面变化大，不会同时发生横风向共振引起整体的共振，只需要注意顶部横风向加速度增大。

风洞试验结果分析

基于风洞气弹试验我们可以得出如下结论：

- 1、低矮的周边建筑对于吸热塔风致响应无影响
- 2、加速度传感器会影响实验结果，需要将其计算为配重，降低影响
- 3、不同风速下的风致响应规律基本一致
- 4、当风速超过临界风速会发生跨临界风振
- 5、由于吸热塔的特殊结构，顶部跨临界风振不会引起整体共振
- 6、跨临界风振会使得横风向加速度增大，需要予以考虑



谢谢观看 THANKS