

# 大跨度煤仓项目风洞试验技术方案书

同济大学土木工程防灾国家重点实验室

2012年7月12日

# 目 录

一、概述	3
二、边界层模型及建构	3
2.1 刚性测压模型制作及周边建筑模型制作	3
2.2 大气边界层风场特性	4
三、群体建筑模型覆面风压测试风洞试验	4
3.1 试验风速与风向	4
3.2 数据采集与处理	4
3.3 试验结果	5
四、基于同步压力测量的风致结构荷载分析	5
4.1 结构风致振动分析	5
4.2 风振分析结果	5
五、风洞试验研究所需资料	6
六、费用单及时间安排	6
七、项目负责人简历表	8
八、实验室的研究能力及所用仪器和设施	9
8.1 实验设备和仪器	9
8.1.1 风洞	10
8.1.2 风速测量仪器	11
8.1.3 天平	11
8.1.4 风压测量仪器	11
九、资质材料	12

# 大跨度煤仓

## 风洞试验技术方案书

### 一、概述

遂宁大剧院造型复杂，屋面大跨度、大悬挑，大面积玻璃幕墙和穿孔铝板幕墙，是一个风敏感结构。

1、《建筑结构荷载规范》(2006年版)的7.3.1条第四款规定：对于重要的且体型复杂的房屋和构筑物，应由风洞试验确定风荷载体型系数。煤仓跨度较大，建筑表面风荷载无法应用荷载规范的方法准确确定，故需要通过风洞试验及风振分析确定屋面的体形系数。因此，进行风洞试验，确定风荷载合理取值，可以避免设计人员因为无确切参考值而盲目放大安全系数的做法，为合理控制钢构造价提供进一步保证；也可以避免设计人员过小的取用体形系数，为结构安全留下隐患。

2、煤仓是一个外形复杂的大跨度结构，这样的结构基频较低，与脉动风的卓越频率接近，其对脉动风的动态响应（风振系数问题）根据现有荷载规范无法确定。为了准确、合理的确定脉动风对结构现有的放大作用，应基于风洞试验所获得的结构表面压力分布数据进行结构风致响应分析。

基于上述两点，为了合理确定煤仓结构和维护结构设计用风荷载，应进行其风洞试验研究。本风洞试验研究主要目的是提供风洞试验及风致振动分析确定拟建遂宁大剧院的结构和维护结构设计用风荷载。具体内容包括：

- ☆ 建筑物模型和周边建筑模型制作
- ☆ 边界层模型及建构
- ☆ 覆面风压测试风洞试验
- ☆ 结构风致响应分析
- ☆ 风洞试验研究所需资料
- ☆ 报价表及研究时间
- ☆ 实验室的研究能力及所用仪器和设施

### 二、边界层模型及建构

#### 2.1 刚性测压模型制作及周边建筑模型制作

刚体模型测压风洞试验计划在我室的 TJ-3 边界层风洞中进行。为了考虑周边群体建筑的干扰效应，试验时还将对以遂宁大剧院为中心半径 600m 范围内的既有及远景规划的建筑群

及街道格局进行模拟。周边环境模型的几何缩尺比与主模型一致。考虑到建筑较矮，且要准确识别挑臂上的压力分布，根据 TJ-3 风洞和转盘的尺寸，主模型(特别是结构高度)及周边模型的几何缩尺比初步选为 1:200 左右。

模型的具体设计方案要在得到并研究了煤仓的详细设计资料后确定，并获设计方认同后开始制作模型及风洞试验。

## 2.2 大气边界层风场特性

试验中大气边界层参数在风洞中进行边界层风场的模拟，我们将依据现行《建筑结构荷载规范 GB50009 - 2001》来确定建筑场地所在城市的基本风压，根据业主提供的周边建筑图纸，试验所选用的地貌特征，我们将确定地貌类别，在遂宁大剧院位置处的平均平均风剖面、湍流强度剖面、来流功率谱将符合地貌类别的要求。

试验中大气边界层参数在风洞中进行边界层风场的模拟，采用尖披加粗躁元的大气边界层风洞模拟方法，模拟的平均风剖面、湍流强度剖面、来流功率谱、湍流尺度能满足 1:200 的缩尺比要求。

## 三、群体建筑模型覆面风压测试风洞试验

### 3.1 试验风速与风向

试验中风速参考点设在离风洞底板约 1m 的高度处，这样可避免建筑群的影响。测压试验将在 0 度 ~ 360 度范围内的不同风向角下进行，风向角间隔 15 度，共 24 个风向角。试验时的风向角将兼顾甲方提供的最大风速时的来流风向，风向角通过旋转转盘而实现。考虑到信噪比的要求，试验风速取为 14m/s 左右。

### 3.2 数据采集与处理

首先采用 DSM3000 电子式压力扫描阀系统对各测点的风压时程进行采集和记录，然后用专用软件对所记录的风压时程样本进行数据处理，获得平均风压系数，脉动风压系数、风压等结果。对于封闭建筑物结构，由于不可避免地会存在缝隙或门窗开启等情况，所以会存在一定的内压。但由于缝隙或门窗开启的随机性，所以在风洞试验中一般只进行外表面的风压测试。内压将按照现行《建筑结构荷载规范 GB50009 - 2001》中的有关条款进行修正。

测压试验前检查各个测点通道的信号，确保各个通道的工作是正常的。

采样频率将根据模型几何缩尺比、风速相似比及实际风场的截止频率确定。

### 3.3 试验结果

在试验研究报告中将提供以下各种数据的图形或表格以及相应的计算机文件：

#### 4.4.1 群体建筑刚体模型测压风洞试验

**基于规范方法给出围护结构用风荷载：**

- 1)、不同风向角下各测点100年重现期所对应的阵风风压(数据表)
- 2)、各测点100年重现期所对应的阵风风压在所有风向角中的最大值、最小值(数据表及分布图)
- 3)、提供各个角度下所有测点的阵风风压峰值的前 15 个最大值和最小值风压峰值(数据表)

**基于统计方法给出围护结构用风荷载：**

- 4)、不同风向角下各测点100年重现期所对应的极值风压(数据表)
- 5)、各测点100年重现期所对应的极值风压在所有风向角中的最大值、最小值(数据表及分布图)
- 6)、提供各个角度下所有测点的极值风压的前 15 个最大值和最小值风压峰值(数据表)

**综合 1)、4)结果，提供围护结构用风荷载的推荐值 (分布图)**

**提供结构设计用的：**

- 8)、各风向角下各测点风压系数的平均值、均方根值及极大极小值数据表
- 9)、各风向角下结构表面体形系数分布值(数据表及分布图)

## 四、基于同步压力测量的风致结构荷载分析

### 4.1 结构风致振动分析

通过刚体模型测压风洞试验获得的各测点同步脉动压力时程，将其作用于结构动力分析有限元模型上进行有限元时程分析，确定重要部位的风振位移及风振系数和关键构件的内力响应等。

### 4.2 风振分析结果

煤仓结构风振响应分析研究结果将包括：

- 1、50 年和 100 年重现期对应的关键构件内力响应平均值和在概率统计意义上的极大值（正）或极小值（负）。
- 2、50 年和 100 年重现期对应的建筑各主要控制点风振响应位移的均值及极值。
- 3、建筑表面风振系数。

## 五、风洞试验研究所需资料

本次风洞试验所需资料如下：

- （1）能充分反映以煤仓为中心半径 600m 范围内既有建筑外形和拟建建筑的有关图纸的 AutoCAD 文件。
- （2）能充分反映以遂宁大剧院外形的有关图纸的 AutoCAD 文件。
- （3）煤仓结构动力有限元模型（sap2000、Midas、ANSYS 均可）。

## 六、费用单及时间安排

费用单及时间安排

项目名称：煤仓项目风洞试验		
投标者名称：同济大学土木工程防灾国家重点实验室		
序号	测试分项：	报价：(万元 RMB 人民币)
1	周边环境及测压模型制作	5
2	幕墙压力研究(测压风洞试验、幕墙压力分析及报告)	15
3	基于同步压力测量结果进行结构风荷载及响应分析	5
<b>合计</b>		<b>25</b>

自合同确定，我们即开展研究工作。各项工作所需工作时间见下表，具体时间将按设计方进度要求做调整。

风洞试验日程表						
项目名称：煤仓项目风洞试验； 投标者名称：同济大学土木工程防灾国家重点实验室		所需周数				
		1	2	3	4	5
1	周边环境模型制作	√				
2	测压模型制作		√			
	幕墙压力风洞试验			√		
	幕墙压力分析报告				√	
3	基于同步压力测量结果进行结构风荷载及响应分析				√	
4	总报告					√

## 七、项目负责人简历表

姓名	周志勇	性别	男	年龄	40
职务	主任	职称	教授	学历	博士后
执业资格	国家重点实验室		从事负责人年限		13
Tel	13816108699	Email		z.zhou@tongji.edu.cn	
近三年作为项目负责人所完成试验项目情况					
	项目名称		开始时间		
1	卡塔尔多哈办公楼刚体模型测力、测压试验及风振响应分析	H=220m	2007,3	负责人	
2	无锡茂业城刚体模型测压试验及风振响应分析	H=280m	2007,10	负责人	
3	沈阳茂业城刚体模型测压试验及风振响应分析	H=310m	2007,10	负责人	
4	上海浦东陆家嘴金融中心区瑞明项目风洞试验研究	H=240m	2007,5	负责人	
5	厦门怡山商业中心主楼测压风洞试验及风振响应分析	H=200m	2008,11	负责人	
6	河南郑州电视塔抗风性能风洞试验研究(表面风压测试、片断刚体模型测力、风振响应分析、数值风洞)	H=388m	2007.1	负责人	
7	温州置信广场建筑群测压风洞试验及风振响应分析	H=240m	2008,8	负责人	
8	温州万川主楼测压风洞试验及风振响应分析	H=240m	2007,12	负责人	
9	常州广电大厦测压风洞试验及风振响应分析	H=310m	2008,11	负责人	
10	包头市体育中心项目风荷载分布风洞试验及风振响应分析(一场两馆)	40000 (平方米)	2007,12	负责人	
11	阜阳新客站无站台柱雨篷风荷载分布风洞试验及风振响应分析	50000 (平方米)	2007,12	负责人	
12	徐州新客站无站台柱雨篷风荷载分布风洞试验及风振响应分析	50000 (平方米)	2008,7	负责人	
13	长沙黄花国际机场项目风荷载分布风洞试验及风振响应分析	40000 (平方米)	2007,12	负责人	
14	济南奥体中心项目风洞试验研究(一场三馆)	350000 (平方米)	2007,7	负责人	
15	济宁体育中心体育场项目测压风洞试验(一场)	527957 (平方米)	2008,7	负责人	
16	南昌国际体育中心项目测压试验及风振响应分析(一场)	42000 (平方米)	2008,11	负责人	
17	广西体育中心项目测压风洞试验及风振响应分析(一场)	150000 (平方米)	2008,8	负责人	
18	三亚体育中心项目测压风洞试验及风振响应分析(一场两馆)	200000 (平方米)	2008,5	负责人	

19	无锡苏宁大厦测压风洞试验及风振响应分析	H=310m	2009,1	负责人
20	西宁海湖体育中心项目测压试验及风振响应分析(一场两馆)	190000 ( 平米 )	2009,4	负责人
21	温州瓯海建设大厦测压风洞试验及风振响应分析	H=140m	2010,2	负责人
22	大连开发区“南部滨海新区 4# - B 地块住宅项目( 加州·水郡 )” 刚体模型测压风洞试验、行人高度风环境风洞试验及风振响应 分析		2010,4	负责人
23	南京鼓楼科技园项目测压风洞试验及风振响应分析	H=200m	2010,6	负责人
24	南京滨江花园公寓测压风洞试验及风振响应分析	H=150m	2010,6	负责人
25	徐州苏宁大厦测压风洞试验及风振响应分析	H=272	2010,8	负责人
26	镇江苏宁大厦测压风洞试验及风振响应分析	H=330m	2010,9	负责人
27	南京河西 CBD 项目测压风洞试验及风振响应分析	H=400m	2010,9	负责人
28	厦门海峡广场双子塔风洞试验及风振响应分析	H=300m	2011,5	负责人
29	中交集团南方总部大厦风洞试验及风振响应分析	H=300m	2010,5	负责人
30	徐州国际广场双子塔风洞试验及风振响应分析	H=270m	2011,10	负责人
31	杭州银泰广场金属屋面风荷载分布风洞试验及风振响应分析		2011,8	负责人
32	鄂尔多斯体育中心风洞试验及风振响应分析		2011,9	负责人
33	内蒙古四王子期观礼台屋面风荷载分布风洞试验及风振响应分 析		2011,9	负责人

## 八、实验室的研究能力及所用仪器和设施

同济大学土木工程防灾国家重点实验室风洞试验室技术力量雄厚，是我国唯一一个土木工程领域国家级重点实验室。同济大学土木工程防灾国家重点实验室具有大中小三个配套的边界层风洞（见下图）以及各种紧密测试仪器，能比较全面地适应各个土木工程结构的抗风性能试验研究任务。实验设备先进，长期从事桥梁和建筑结构的抗风研究工作，先后完成了国内外 100 余座大桥、及 100 幢高耸结构和 100 多个体育场馆、机场、文化设施等大跨结构的抗风及风环境试验研究工作，在风洞试验技术、抗风理论研究等方面积累了丰富的经验。

目前有研究人员 19 位，其中中国工程院院士 1 名，长江学者 1 名；正高级职称 9 为（教授 4 位、研究员 4 为和教授级高工 1 位），副研究员 8 位，讲师、助理研究员和工程师共 2 位。在读研究生 82 位。

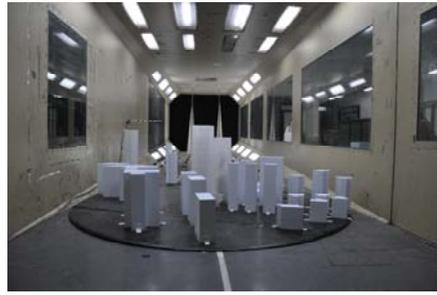
### 8.1 实验设备和仪器

目前同济大学土木工程防灾国家重点实验室具有大中小三个配套的边界层风洞（见图

8-1)以及各种紧密测试仪器,能比较全面地适应各个土木工程结构的抗风性能试验研究任务。其中与本项目试验研究有关的主要设备如下:



(a) TJ-1 风洞



(b) TJ-2 风洞



(c) TJ-3 风洞

图 8-1 风洞

### 8.1.1 风洞

TJ-3 风洞是一座闭口竖向回流式矩形截面低速风洞,试验段尺寸为 15m 宽、2m 高、14m 长,其规模在同类边界层风洞中居世界第二位。风洞由并列的 7 台风扇由直流电机驱动,每台电机额定功率为 45 千瓦,额定转速为 750 转/分。试验风速范围从 1.0m/s ~ 17.6m/s 连续可调。流场性能良好,试验区流场的速度不均匀性小于 2%、湍流度小于 2%、平均气流偏角小于 0.2°。该风洞中设有一直径为 3.8 米的钢转盘,并根据需要通过在其上增加圆木板的方法扩大转盘的直径,转盘的直径最大可达到 6.9m。转盘在电脑控制下可按需要进行转动,以改变风向。该风洞可以用于本项目的地形地貌试验、刚体模型测压试验和气弹全模型测振试验。

TJ-2 风洞为闭口回流式矩形截面风洞,整个回流系统水平布置。风洞由一台大功率为 530kW 直流电机驱动,风速的调节和控制采用计算机终端集中控制的可控硅直流调速系统。试验段尺寸为 3m 宽、2.5m 高、15m 长。试验风速范围从 0.5m/s ~ 68m/s,流场性能良好,试验区流场的速度不均匀性小于 1%、湍流度小于 0.46%、平均气流偏角小于 0.5°。该风洞配有自动调速、控制与数据采集系统,在试验段的上游端安装了浮框式六分量汽车模型应变式测力天平及转盘系统,在试验段的下游端安装了一个用于边界层建筑结构模型试验的自动转盘系统。两个转盘的直径均为 1.8m,同样可扩大至 2.8 左右。该风洞可以用于本项目的高频动态天平刚体模型测力试验、刚体模型测压试验和气弹全模型风致振动响应试验。



图 8-2 StreamLine 热线/热膜风速仪

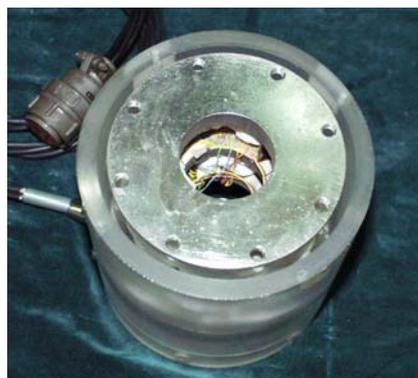


图 8-3 五分量高频测力天平

### 8.1.2 风速测量仪器

实验室拥有由丹麦 DANTEC 公司的 StreamLine 热线/热膜风速仪和配套的 A/D 板、PC 机和专用软件，可用来测量风洞中的平均风速和脉动风速。该风速仪系统可用于本项目的地形地貌试验和其它试验中大气边界层模拟风场的调试时对于平均风、脉动风的测量，以获得平均风剖面、紊流度(湍流度)、脉动风功率谱等模拟边界层风特性参数。

### 8.1.3 天平

实验室拥有数个自行研制的高精度五分量或六分量应变式测力天平。其中的底支式五分量高频天平能满足本项目中电视塔高频天平刚体模型测力风洞试验的需求，该天平的量程为：垂直天平轴向的两个侧向力  $F_x$  和  $F_y$  量程分别为 100N 和 200N；相应的两个侧弯弯矩  $M_y$  和  $M_x$  的量程分别为 50Nm 和 100Nm；扭矩  $M_z$  的量程为 10.0Nm。测量误差低于 0.3%。

### 8.1.4 风压测量仪器

实验室拥有由美国 Scanivalve 扫描阀公司生产的 DSM3000 电子式压力扫描阀系统及配套的 PC 机、信号采集程序及数据处理软件组成。可用于刚体模型风压试验中的对模型上的各测压点的风压进行同步测量、记录及数据处理。同步测量的最多通道数约 370 个。



(a) 压力扫描阀模块



(b) 控制校准模块及信号采集和数据处理系统

图 8-4 DSM3000 电子式压力扫描阀系统

### 9、资质材料



