

清华大学研究生课程——《灾害学》

风灾

陆新征
清华大学土木工程系
2006

1

清华大学研究生课程——《灾害学》

风洞

- 一个按照一定要求设计的管道体系内，采用动力装置驱动可控制的气流，根据运动的相对性和相似性进行各种气动试验的设备
- 风洞试验的优势：
 - 参数可控
 - 测量方便
- 风洞试验的不足
 - 相似比例设计困难
 - 流场再现难度

2

清华大学研究生课程——《灾害学》

风洞分类

- 直流式风洞
- 回流式风洞
- 直流式风洞优点
 - 造价低
- 直流式风洞缺点
 - 试验段气流品质受外界环境影响大
 - 噪音大

3

清华大学研究生课程——《灾害学》

北京大学的直流式风洞

4

清华大学研究生课程——《灾害学》

直流式风洞

5

清华大学研究生课程——《灾害学》

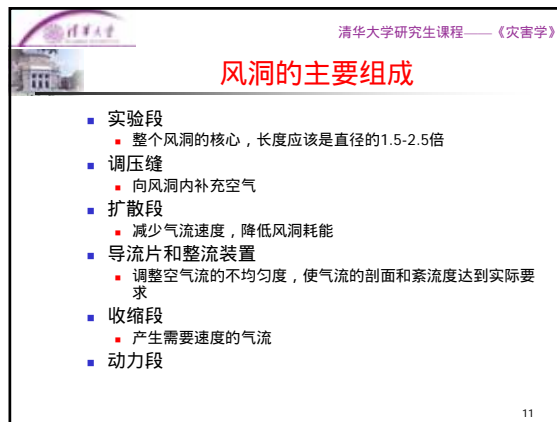
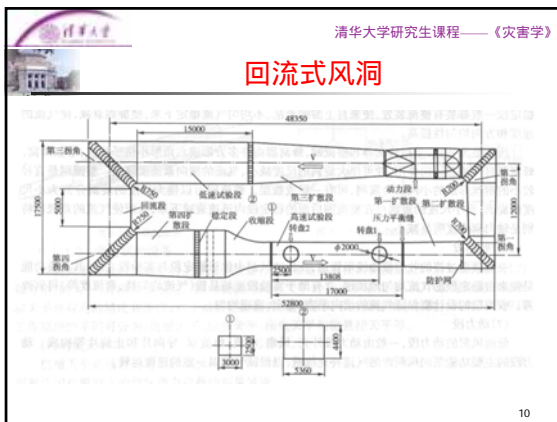
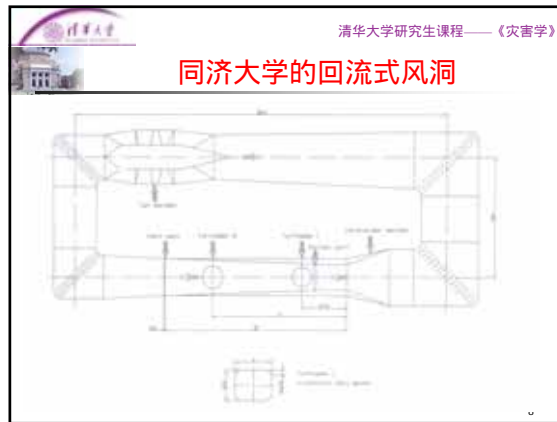
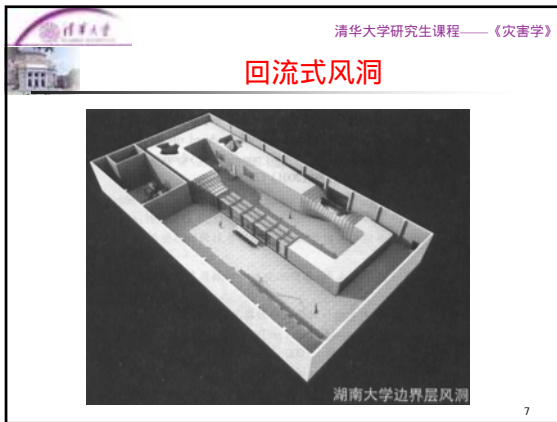
世界上主要直流边界层风洞

表 5-1 主要直流风洞一览表

	试验段			收缩比	功率 (Hp)	速度 (m/s)	湍流度 (%)
	长 (m)	宽 (m)	高 (m)				
P. K. U.	32.00	3.00	2.00	4:1	175	1~16	1.0
C. S. U.	17.42	3.66	2.13	2.8:1	50	1.3~12	1.0
U. of W. Ontario	24.38	2.40	1.68	—	—	0~15.3	—
Oxford U.	14.00	4.00	2.00	2.8:1	—	0~30	—
EPA	18.30	3.70	2.10	2.8:1	100	0~8	0.5
CPP	22.71	3.66	2.13	—	20	0~9.1	—
RWDI	13.00	2.40	1.90	—	—	—	—

P. K. U. 北京大学; C. S. U. 科罗拉多州立大学; U. of W. Ontario 西安大略大学; Oxford U. 牛津大学; EPA 美国环保局; CPP, Cermak Petreka Petersen 风工程顾问公司; RWDI, Rowan Williams David & Irwin 风工程顾问公司

6



清华大学研究生课程——《灾害学》

风洞模型

- 几何相似
 - 根据风洞试验段尺寸的要求以及大气边界层厚度的模拟需要，在保证风洞中气流不堵塞的条件下，把建筑物按一定比例缩小，加工制作成实验模型，确保该建筑模型的外形尺寸和几何形状与实际建筑物完全相似。

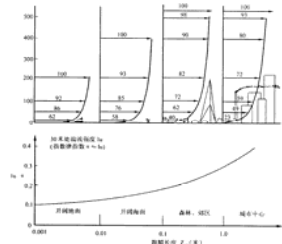


13

清华大学研究生课程——《灾害学》

风洞模型

- 大气边界层相似
 - 粘性大气流附着地面附近时，因地面粗糙度的影响，形成了很大的沿垂直方向的风速梯度，其相对增量因地表摩擦不同而异，风洞实验必须按建筑物所处环境的风速梯度的规律模拟沿高度的变化。此外大气边界层气流中具有复杂的湍流结构，其湍流强度随高度的变化及风谱规律都应得到相似的满足。



4

清华大学研究生课程——《灾害学》

风洞模型

- 动力相似（雷诺数相似）
 - 风洞模拟实验中的动力相似，是一个十分重要的相似准则，动力相似主要指实物的雷诺数（Reynolds number）与模型的雷诺数要相等或接近。因为雷诺数 Re 的大小直接影响到流体绕光滑表面的分离位置，也即从层流转换到湍流。

$$Re = \frac{V_{ref} L}{\nu}$$

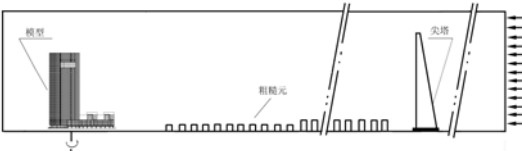
- 动力相似是风洞试验中非常重要也是非常困难的问题，需要根据具体问题按经验选择合适的模拟方法。

15

清华大学研究生课程——《灾害学》

大气边界层模拟

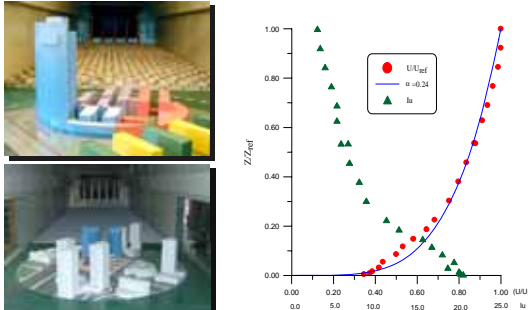
- 布置尖塔和粗糙源的目的可以促使总体气流大气边界层的形成，在模型上游布满粗糙源可以诱使地表附近初始速度亏损，最后在模型附近能形成一个具有接近地面粗糙度的流场，使其风速剖面 and 大气湍流剖面达到要求。也即满足 指数数和湍流度 Iu 的要求。



16

清华大学研究生课程——《灾害学》

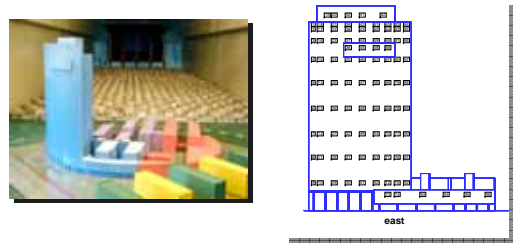
大气边界层模拟



17

清华大学研究生课程——《灾害学》

风洞模型和测压孔



18

清华大学研究生课程——《灾害学》

风洞模型和测压孔



SPC3000 气源驱动器

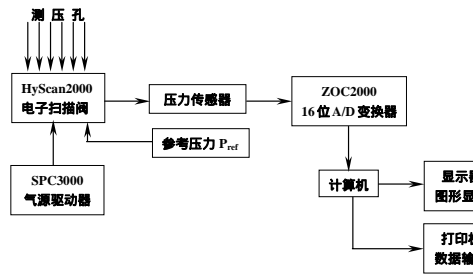
HyScan2000 电子扫描阀

测压孔

19

清华大学研究生课程——《灾害学》

风压量测



20

清华大学研究生课程——《灾害学》

风速测量

- 热线风速仪是利用电流通过金属导线时会使导线温度升高而当流体流经金属表面时会带走部分热量的原理来测量流体的速度。当探针 (probe) 上探测元 (sensor) 所在位置的电阻R值因温度的改变而改变时, 会使电桥失去平衡。

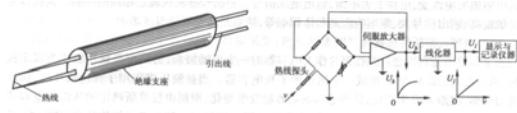


图 9-1-6 热线探头

图 9-1-7 恒流式热线风速仪工作原理图

21

清华大学研究生课程——《灾害学》


热线风速测量



22

清华大学研究生课程——《灾害学》

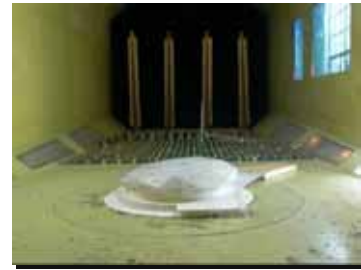
建筑模型风洞试验



23

清华大学研究生课程——《灾害学》

建筑模型风洞试验



24

清华大学研究生课程——《灾害学》

全桥风洞试验

25

清华大学研究生课程——《灾害学》

节段模型风洞试验

26

清华大学研究生课程——《灾害学》

刚性节段模型风洞试验

图 9-2-1 刚性悬挂节段模型示意图

27

清华大学研究生课程——《灾害学》

弹性节段模型风洞试验

28

清华大学研究生课程——《灾害学》

风洞试验结果

- 结构表面风压
- 结构体形系数

east north west

清华大学研究生课程——《灾害学》

动力风试验

- 由于风洞中模型尺寸过小，想实现动力比相似是非常困难的，
- 可以采用近似的方法：
 - 测量结构上受到的风速时程
 - 建立结构的计算模型
 - 将实测风速时程施加到结构上，计算结构的动力响应，推算结构受到的动力作用

30

清华大学研究生课程——《灾害学》

风环境评价

- 风洞实验室所量测到各风向测点风速除以边界层厚度处风速使其成为无量纲化风速。
- 利用无量纲风速和实际风场成比例的关系求得边界层高度的评估风速。
- 将边界层高度的评估风速代入各风向风速机率函数，求得各风向测点发生机率。
- 最后将各风向测点发生机率分别累加，则各测点发生机率为所求。

活动性	通用的区域	相对舒适性		
		可容忍	不舒适	危险
快步	人行道	6	7	8
慢步	公园	5	6	8
短时间站立，坐	公园，广场	4	5	8
长时间站立，坐	室外餐厅	3	4	8
可接受代表性准则		<1次/1周	<1次/1月	<1次/1年


31

清华大学研究生课程——《灾害学》

建筑物附近风环境

■ 建筑物附近发生大风的概率

i	风向	频率 f _i (%)	平均风速(m/s)	c(i)(m/s)	k(i)
1	NW	15.11	4.96	5.10	1.60
2	NNW	13.40	4.75	5.00	1.74
3	N	7.64	3.28	3.10	1.72
4	NNE	7.55	2.70	2.45	1.51

$$p(V > V_0) = \sum_{i=1}^{16} \alpha(i) \exp[-(V_0 / c(i))^{k(i)}]$$


33

清华大学研究生课程——《灾害学》

风压数值模拟

- 土木工程结构尺度较大，风洞实验相似比复杂，实验模拟难度较大
- 数值模拟可以较好地克服模型尺寸效应的影响
- 土木工程结构大部分为钝体，流体力学同样面临很多困难

33

清华大学研究生课程——《灾害学》

流体力学的基本方程

- Navier-Stokes方程
 - 对于牛顿流体

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} (R_{ij})$$
- 解法
 - 直接数值模拟(DNS)
 - 大涡模拟(LES)
 - Reynolds平均法

34

清华大学研究生课程——《灾害学》

DNS方法

- 直接对N-S方程进行数值求解
- 优点：
 - 无需对湍流进行任意假设，理论上可以得到精确的结果
- 缺点：
 - 目前计算机水平无法实现
 - 0.1 × 0.1m的流动区域内，高Reynolds情况下湍流最小尺度10μm，计算网格要达到10¹²量级，积分步长要小于100μs

35

清华大学研究生课程——《灾害学》

LES方法

- 为了模拟湍流，要求计算域要大于最大的涡流，网格要小于最小的涡流
- LES方法的基本思想：
 - 对涡流进行分类
 - 对大涡用直接法求解
 - 对小涡用平均法求解
 - 计算量大大减小，精度有效提高
 - 目前还在研究阶段，很热

36

清华大学研究生课程——《灾害学》

Reynolds平均法

- 不直接求解瞬时的N-S方程，而是求解平均化以后的Reynolds方程
- 思路：
 - 建立平均意义上的湍流模型，例如湍流的动能和耗散率等
 - 将N-S方程作时域上的平均化处理，用湍流的平均动能增加和平均能量耗散来建立Reynolds方程
- 联想：钢筋混凝土有限元中不分别求解骨料和砂浆，而是视作一种均匀材料

37

清华大学研究生课程——《灾害学》

Reynolds平均法（续）

- 关键问题：
 - 构造合理的湍流模型，可以较好地模拟流体的平均效果
 - 构造合适的分析网格，得到合理的差分解

38

清华大学研究生课程——《灾害学》

著名的流体计算软件

- CFX

是一种实用流体工程分析工具，用于模拟流体流动、传热、多相流、化学反应、燃烧问题。其优势在于处理流动物理现象简单而几何形状复杂的问题。CFX采用有限元法，自动时间步长控制，SIMPLE算法，代数多网格、ICCG、Line、Stone和Block Stone解法。能有效、精确地表达复杂几何形状，任意连接模块即可构造所需的几何图形。
- FLUENT

FLUENT是目前国际上比较流行的商用CFD软件包，在美国的市场占有率为60%。举凡跟流体/热传递及化学反应等有关的工业均可使用。它具有丰富的物理模型、先进的数值方法以及强大的前后处理功能，在航空航天、汽车设计、石油天然气、涡轮机设计等方面都有着广泛的应用。

39

清华大学研究生课程——《灾害学》

ANSYS软件中的流体计算

- FLOTRAN模块
- 收购了CFX，FLUENT公司，加强在该方面的能力
- 可以分析二维、三维，层流、湍流，稳态、瞬态流动问题
- 可以考虑流体和固体的相互作用

40

清华大学研究生课程——《灾害学》

ANSYS中的湍流模型

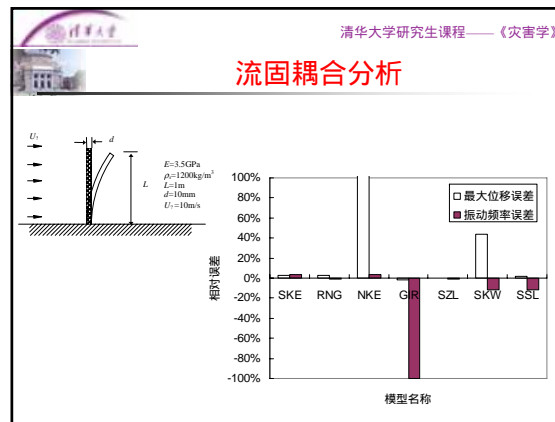
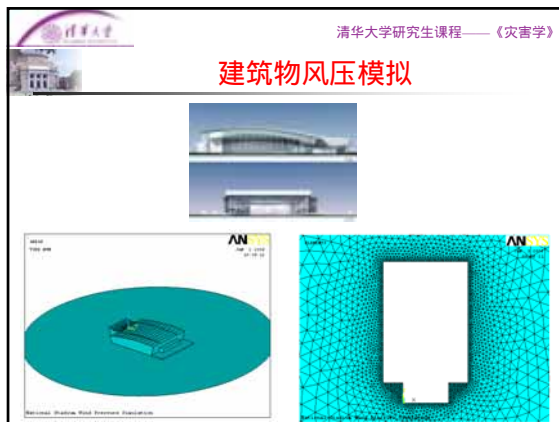
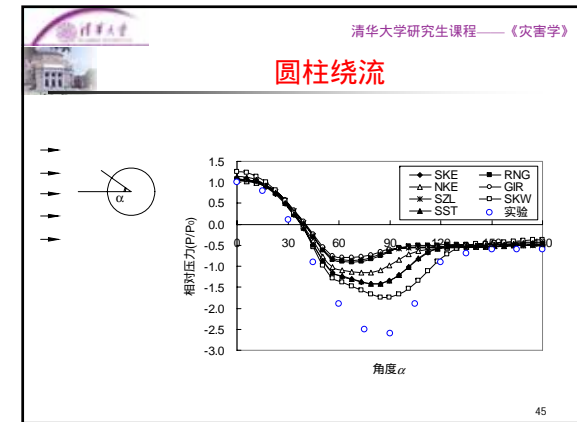
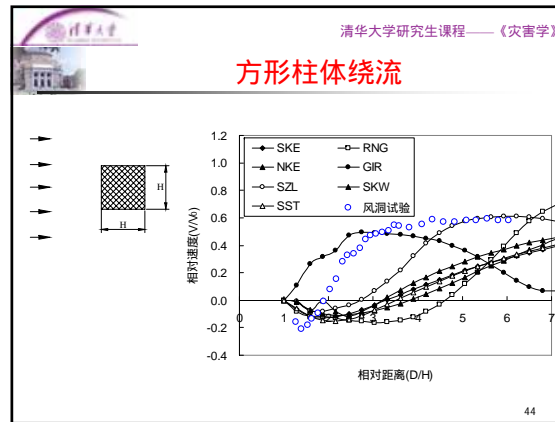
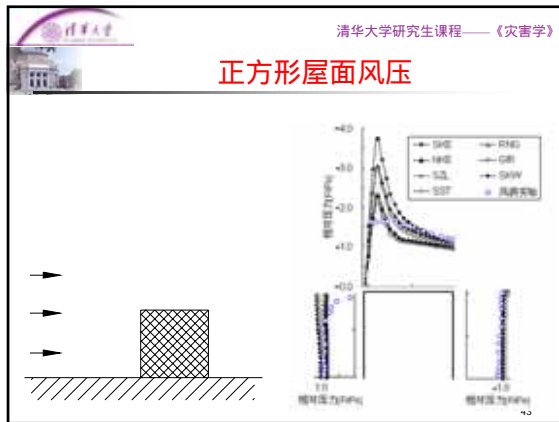
- Standard k- ϵ model (简称SKE模型)
- Re-Normalized Group Turbulence model (简称RNG模型)
- k- ϵ Model due to Shih (简称NKE模型)
- Nonlinear Model of Girimaji (简称GIR模型)
- Shih, Zhu, Lumley Model (简称SZL模型)
- k- ω Turbulence Model (简称SKW模型)
- Shear Stress Transport Turbulence Model (简称SST模型)

41

清华大学研究生课程——《灾害学》

不同湍流模型计算效果比较

42



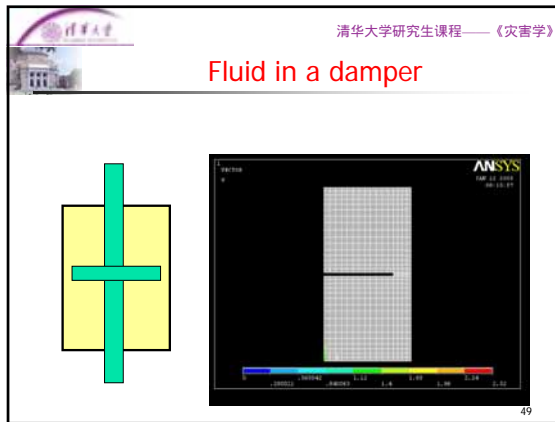
清华大学研究生课程——《灾害学》

对不同湍流模型的评价

	SKE	RNG	NKE	GIR	SZL	SKW	SST
正方形屋面风压分布	×						
正方形柱体绕流	×	×	×			×	×
圆柱体绕流 (压力分布)		×		×	×		
圆柱体绕流 (流场分布)	×		×			×	×
带隔板流固耦合			×	×		×	

符号说明：○：较好；○：一般；×：较差

48



- 清华大学研究生课程——《灾害学》
- ### CFRP索流固耦合风振分析
- 模型参数：
 - $E=200\text{GPa}$, $\rho=1400\text{kg/m}^3$, $L=100\text{m}$, $R=0.1\text{m}$
 - 预应力
 - 500MPa
 - 200MPa
 - 100MPa
 - 平稳风压
- 50

