

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》

## 内容提要

- 风的类型与分类
- 风灾对建筑物的影响
- 工程结构抗风设计
- 防风减灾对策与风振控制

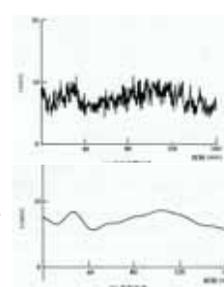
2

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 结构物的风振效应

- 实际风速时程曲线
- 平均风速

当结构物自振周期 $T > 0.25s$ ，以及高度超过30m且高宽比大于1.5的高柔房屋，需考虑风压脉动引起的结构振动



3

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 结构动力响应的统计规律

- 脉动风是一个变化的统计变量
- 在脉动风作用下，结构的响应也是一个统计变量
- 如何从统计的意义上把握：
  - 脉动风自身的分布特点
  - 随机作用和结构响应之间的关系
  - 脉动风作用下结构统计行为
- 结构动力风荷载研究的关键内容

4

清华大学研究生课程——《灾害学》

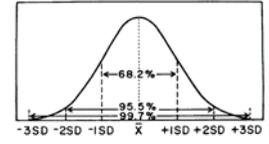
## 若干个关键数学和力学概念

- 统计学的基本概念
- 时域和频域之间的换算关系
- 单自由度和多自由度动力学基本概念

5

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 高斯概率分布

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$


- 关键参数：
  - 均值  $\mu$
  - 方差  $\sigma$

$$\sigma^2 = E(x^2) - [E(x)]^2$$

6

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 协方差和相关系数

- 协方差
 
$$\text{cov}(X, Y) = E\{[X - E(X)][Y - E(Y)]\}$$
- 标准协方差/相关系数
 
$$\rho_{xy} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma(X)\sigma(Y)}$$
- 相关系数越大，两个变量之间的关系就越密切

7

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 时域和频域

- 时域
  - 用时间 $t$ 作为自变量来描述一个时间变量
- 频域
  - 用频率 $\omega$  (或者 $f/T$ ) 作为自变量来描述一个时间变量
- 为什么要用频域来描述？
  - 很多随机变量，比如风速的大小，地震的强弱，在时间轴 $t$ 上分布很不规律，很难用统计的方法加以描述，而在频率轴上经过长时间统计后，比较容易得到其内在规律，进而可以统计描述。

8

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 维纳 - 辛钦变换公式

$$S_X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_X(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$$

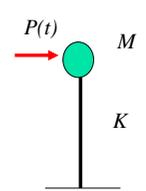
$$R_X(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_X(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$$

- 意义
  - 可以将时间过程 $R_X$ 通过傅立叶变换，到频域去进行分析
  - 也可以将频域问题经过逆傅立叶变换，到时域进行分析

9

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 单自由度体系的动力学特性



$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + Ky(t) = P(t)$$

$$y(t) = e^{-\zeta_1\omega_1 t} (c_1 \cos \omega_1' t + c_2 \sin \omega_1' t)$$

$$\omega_1' = \sqrt{1 - \zeta_1^2} \omega_1$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad \zeta_1 = \frac{C}{2\sqrt{KM}}$$

10

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 结构响应可以写作

- 根据Duhamel积分
 
$$y(t) = \int_{-\infty}^t P(t-\tau)h(\tau)d\tau$$
- 其中， $h(t)$ 是线性单自由度系统对单位脉冲 $\delta(t)$ 的响应。

11

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 结构位移响应的方差

$$\sigma(y)^2 = E(y(t)^2) - E(y(t))^2$$

$$= E\left(\int_{-\infty}^t P(t-\tau)h(\tau)d\tau\right)^2 - 0$$

该公式只是提供一个概念，详细公式将比本公式复杂，参阅相关文献

12

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 对时域响应结果进行傅立叶变换

$$\sigma(y) = \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} H(i\omega)^2 S_{pp}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \right]^{1/2}$$

- 传递函数

$$|H(i\omega)|^2 = \frac{1}{\omega_1^4 \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_1} \right)^2 \right]^2 + \left[ 2\zeta \left( \frac{\omega}{\omega_1} \right) \right]^2 \right\}}$$

13

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 所以

- 只要知道了输入荷载（风，或者地震）在频域的概率分布，就可以求得响应的结构响应的方差分布
- 注意：上述分析只是针对单自由度系统，对于多自由度系统，相当于有多个输入，这时不仅要考虑各个输入自身的概率分布，还要考虑各个输入之间的相互影响，即需要考虑其互相关性

14

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 实测风的空间相关性

图 6-10 以间距 d(m) 为函数的左右相关性系数

15

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 风洞试验得到风的空间相关性

图 6-11 风洞试验中测得的侧向左右相关性

16

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 多点输入

- 引入空间相关性系数
- 我国规范中采用的形式

$$\rho_x = \exp\left(-\frac{|x-x'|}{50}\right)$$

$$\rho_z = \exp\left(-\frac{|z-z'|}{60}\right)$$

- 意义：作用点距离越远，则相互关系越小，共同工作能力越差

17

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 脉动风的功率谱

18

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 脉动风的功率谱

- 通过记录强风的风速时程信息，然后进行傅立叶变换，得到风的功率谱信息
- 阵风在1分钟周期左右有一个峰值，在1分钟周期内，周期越长，功率谱越大
- 所以结构越柔，受到的脉动风荷载作用就越强烈

当结构物自振周期 $T > 0.25s$ ，以及高度超过30m且高宽比大于1.5的高柔房屋，需考虑风压脉动引起的结构振动

19

清华大学研究生课程——《灾害学》

### Davenport风速谱

- 不考虑紊流尺度高度变化

$$\frac{nS_v(n)}{\bar{v}_{10}^2} = \frac{4kx^2}{n(1+x^2)^{3/4}}$$

$$x = 1200 \frac{n}{\bar{v}_{10}}$$

- $\bar{v}_{10}$
- $n$  频率
- $k$  地面粗糙系数

20

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 不同功率谱比较

图 6-7 各种风速谱经验曲线与我国实测资料的比较

21

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 脉动系数

- Davenport谱中的地面粗糙度系数 $k$ 取值离散性很大，不便于工程应用。
- 我国规范采用脉动系数来代替

保证系数

$$\mu_f(z) = \frac{\mu\sigma_{w_f}(z)}{w(z)}$$

脉动风压

$$w(z)$$

平均风压

22

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 我国规范建议的 $\mu_f(z)$

- 取保证系数 $\mu$ 等于2.0-2.5 (问题: 相当于多少保证率?)

$$\mu_f(z) = \frac{\mu\sigma_{w_f}(z)}{w(z)}$$

$$\mu_f(z) = 0.5 \times 35^{1.8(\alpha-0.16)} \left(\frac{z}{10}\right)^{-\alpha}$$

- 问题: 对于单自由度体系, 此时如何计算顺风向振动?

23

清华大学研究生课程——《灾害学》

### $\mu_f(z)$ 数值

- 地形越复杂, 脉动成分越多
- 高度越高, 相对脉动成分越小

地貌	10	20	30	40	50	60	80	100	200	300	400
A	0.39	0.36	0.34	0.33	0.32	0.31	0.30	0.29	0.27	0.26	0.25
B	0.50	0.45	0.42	0.40	0.39	0.38	0.36	0.35	0.31	0.29	0.28
C	0.65	0.56	0.52	0.49	0.47	0.45	0.43	0.41	0.35	0.33	0.31

C类地貌, 400m高度, 设计脉动风压大概是平均风压的31%

24

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 小结

- 脉动风大小和哪些因素有关？
- 1 结构自身的阻尼
  - 脉动风传递函数

$$\sigma(y) = \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} |H(i\omega)|^2 S_{pp}(\omega) e^{i\omega y} d\omega \right]^{1/2}$$

$$|H(i\omega)|^2 = \frac{1}{\omega_i^2 \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_i} \right)^2 \right]^2 + \left[ 2\zeta \left( \frac{\omega}{\omega_i} \right) \right]^2 \right\}}$$

25

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 小结

- 脉动风大小和哪些因素有关？
- 2 结构自身的频率
  - 脉动风传递函数

$$\sigma(y) = \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} |H(i\omega)|^2 S_{pp}(\omega) e^{i\omega y} d\omega \right]^{1/2}$$

$$|H(i\omega)|^2 = \frac{1}{\omega_i^2 \left\{ \left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_i} \right)^2 \right]^2 + \left[ 2\zeta \left( \frac{\omega}{\omega_i} \right) \right]^2 \right\}}$$

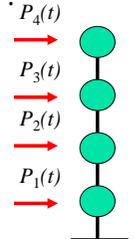
26

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 小结

- 脉动风大小和哪些因素有关？
- 3 结构自身的大小
  - 脉动风传递函数

$$\rho_x = \exp\left(-\frac{|x - x'|}{50}\right)$$

$$\rho_z = \exp\left(-\frac{|z - z'|}{60}\right)$$


27

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 小结

- 脉动风大小和哪些因素有关？
- 4 结构所处环境
  - 风功率谱或者脉动系数

$$\frac{nS_v(n)}{\bar{v}_{10}^2} = \frac{4kx^2}{n(1+x^2)^{3/4}} \quad \mu_f(z) = \frac{\mu\sigma_{wf}(z)}{w(z)}$$

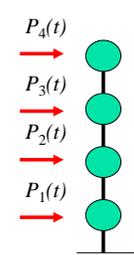
$$\mu_f(z) = 0.5 \times 35^{1.8(\alpha-0.16)} \left( \frac{z}{10} \right)^{-\alpha}$$

28

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 风振力在多自由度结构中的分布

- 将多自由度体系进行振型分解
- 将每个独立振型视作一个单自由度体系，计算该振型下的风振力
- 将不同振型的风振力叠加，得到整个结构受到的风振力



29

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 多自由度体系的风振力

静力风荷载      脉动风荷载

$$P_{sum} = P_s + P_f = P_s \left( 1 + \frac{P_f}{P_s} \right)$$

$$= \mu_s w_0 A \times \mu_z \times \left( 1 + \frac{P_f / \mu_s w_0 A}{\mu_z} \right)$$

$$= P_s \beta_z$$

30

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 风振效应的计算

$$\beta_z = 1 + \frac{\xi v \varphi_z}{\mu_z}$$

- ξ 脉动增大系数
- v 脉动影响系数
- φ<sub>z</sub> 振型影响系数

31

清华大学研究生课程——《灾害学》

## ξ 脉动增大系数

$$\xi = \sqrt{1 + \frac{x^2 \pi / 6 \zeta}{(1+x^2)^{3/4}}} \quad x = 1200 \frac{H}{v_{10}}$$

- ξ 结构阻尼比，钢 0.01，混凝土 0.05
- 相当于考虑了：
  - 阻尼比
  - 结构自振周期
  - 结构所处环境的基本风压/风速

32

清华大学研究生课程——《灾害学》

## ξ 脉动增大系数

表 7.4.3 脉动增大系数 ξ

ω <sub>0</sub> <sup>2</sup> (kNs <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.20	0.40	0.60
钢结构	1.47	1.57	1.69	1.77	1.83	1.88	2.04	2.24	2.36
有填充墙的房屋钢结构	1.26	1.32	1.39	1.44	1.47	1.50	1.61	1.73	1.81
混凝土及砌体结构	1.11	1.14	1.17	1.19	1.21	1.23	1.28	1.34	1.38
ω <sub>0</sub> <sup>2</sup> (kNs <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0.80	1.00	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00	20.00	30.00
钢结构	2.46	2.53	2.80	3.09	3.28	3.42	3.54	3.91	4.14
有填充墙的房屋钢结构	1.88	1.93	2.10	2.30	2.43	2.52	2.60	2.85	3.01
混凝土及砌体结构	1.42	1.44	1.54	1.65	1.72	1.77	1.82	1.96	2.06

注：计算 ω<sub>0</sub><sup>2</sup> 时，对地面粗糙度 B 类地区可直接代入基本风压，而对 A 类、C 类和 D 类地区应按当地的基本风压分别乘以 1.38、0.62 和 0.32 后代入。

33

清华大学研究生课程——《灾害学》

## v 脉动影响系数

$$v = \frac{\int_0^H \mu_f(z) \mu_c(z) \phi_z(z) dz}{\int_0^H \phi_z^2(z) dz}$$

$$\times \left[ \int_0^H H_1(i\omega) \right]^2 S_f(\omega) \int_0^H \int_0^H \int_0^H \mu_f(z) \mu_c(z) \mu_f(z') \mu_c(z') \mu_c(z'')$$

$$\times \rho_{\xi}(x, x', z, z', \omega) \phi_z(z) \phi_z(z') dx dx' dz dz' d\omega \Big]^{1/2}$$

$$/ I_s \left[ \int_0^H \mu_f(z) \mu_c(z) \phi_z(z) dz \right] \left[ \int_0^H H_1(i\omega) \right]^2 S_f(\omega) d\omega \Big]^{1/2}$$

- 相当于考虑了
  - 结构的大小
  - 结构所处的场地条件

34

清华大学研究生课程——《灾害学》

## v 脉动影响系数

- 考虑脉动风压的相关性
- 高度相同，宽度越大，风振效应越小

表 7.4.3 脉动影响系数 v

H/B	粗糙度类别	B 类 (B=50m)						
		50	75	100	150	200	300	500
0.5	A	0.44	0.42	0.33	0.27	0.24	0.21	0.19
	B	0.42	0.41	0.33	0.28	0.25	0.22	0.18
	C	0.40	0.40	0.34	0.29	0.27	0.23	0.20
	D	0.36	0.37	0.34	0.30	0.27	0.25	0.22
1.0	A	0.48	0.47	0.41	0.35	0.31	0.27	0.26
	B	0.46	0.46	0.42	0.36	0.36	0.29	0.27
	C	0.43	0.44	0.42	0.37	0.34	0.31	0.29
	D	0.39	0.42	0.42	0.38	0.36	0.33	0.31
2.0	A	0.50	0.51	0.46	0.42	0.38	0.35	0.33
	B	0.48	0.50	0.47	0.42	0.40	0.36	0.35
	C	0.45	0.49	0.48	0.44	0.42	0.38	0.36
	D	0.41	0.46	0.48	0.46	0.44	0.42	0.39
3.0	A	0.53	0.51	0.49	0.42	0.41	0.38	0.36
	B	0.51	0.50	0.49	0.46	0.43	0.40	0.38
	C	0.48	0.49	0.49	0.48	0.46	0.43	0.41
	D	0.43	0.46	0.49	0.49	0.48	0.47	0.46
5.0	A	0.52	0.53	0.51	0.49	0.46	0.44	0.42
	B	0.50	0.53	0.52	0.50	0.48	0.45	0.44
	C	0.47	0.50	0.52	0.52	0.50	0.48	0.47
	D	0.43	0.48	0.52	0.53	0.52	0.51	0.50
8.0	A	0.53	0.54	0.53	0.51	0.48	0.46	0.43
	B	0.51	0.53	0.54	0.52	0.50	0.49	0.46
	C	0.48	0.51	0.54	0.53	0.52	0.50	0.48
	D	0.43	0.48	0.54	0.53	0.55	0.54	0.53

35

清华大学研究生课程——《灾害学》

## 风振振型影响系数

- 顺方向风振只需考虑第一振型，横风向风振须考虑 1~4 阶振型
- 求解结构顺风向的振型
  - 结构力学方法
  - 近似公式
    - 弯曲型变形
 
$$\varphi_z = \frac{6z^2 H^2 - 4z^3 H + z^4}{3H^4}$$
    - 剪切型变形
 
$$\varphi_z = \tan \left[ \frac{\pi}{4} \left( \frac{z}{H} \right)^{0.7} \right]$$

36

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 顺方向风振算例

- 某钢筋混凝土高层建筑，矩形截面，质量和外形沿高度不变。 $H=100\text{m}$ ， $W=50\text{m}$ ，单位高度质量为 $200\text{t/m}$ ，基本风压 $w_0=0.65\text{kN/m}^2$ ，C类地貌，一阶周期 $1.54\text{s}$
- 首先根据C类地貌得到换算风压为  
 $w_{0a}=0.62 \times 0.65=0.403\text{kN/m}^2$
- $w_{0a}T^2=0.403 \times 1.54^2=0.955$
- 查表得脉动增大系数为 $\xi=1.43$

37

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 顺方向风振算例 $\beta_z = 1 + \frac{\xi v \varphi_z}{\mu_z}$

- 根据 $H/B=2$ ， $H=100\text{m}$ ，查表得脉动影响系数 $\nu=0.48$
- 10m高度处振型系数为 $\varphi_z=0.02$ ，高度变化系数 $\mu_z=0.74$
- 100m高度处振型系数为 $\varphi_z=1.0$ ，高度变化系数 $\mu_z=1.70$
- 则10m,100m高度处的风振系数为
- $\beta_{z,10}=1+1.43 \times 0.48 \times 0.02 \div 0.74=1.02$
- $\beta_{z,100}=1+1.43 \times 0.48 \times 1.0 \div 1.74=1.39$

38

清华大学研究生课程——《灾害学》

### 阵风系数 $\beta_{gz}$

- 对于维护结构，考虑到偶然风荷载的问题，需要在基本风压上考虑阵风系数

表 7.5.1 阵风系数 $\beta_{gz}$

风压高度 (m)	不同地貌类别		
	A	B	C
5	1.69	1.88	2.30
10	1.63	1.78	2.16
15	1.60	1.72	1.99
20	1.58	1.69	1.92
30	1.54	1.64	1.83
40	1.52	1.60	1.77
50	1.51	1.58	1.73
60	1.49	1.56	1.69
70	1.48	1.54	1.66
80	1.47	1.53	1.64
90	1.47	1.52	1.62
100	1.46	1.51	1.60
150	1.43	1.47	1.54
200	1.42	1.44	1.50
250	1.40	1.42	1.46
300	1.39	1.41	1.44

39