



同济大学土木工程防灾国家重点实验室、桥梁工程系

高等结构动力学

——之第十二讲

桥梁风致振动作用

主讲教师：葛耀君 教授、博士



➤ 1. 设计风速定义

$$U(z, t) = \bar{U}(z) + u(z, t)$$

\bar{U} — 平均风速，随机变量

u — 脉动风速，随机过程

◆ 1.1 平均风速

$$U_d(z) = U_R \left(\frac{z}{z_R} \right)^\alpha$$

α — 地表粗糙度指数

z_R — 参考风速离地高度

U_R — 参考风速



◆ 1.2 阵风风速

$$U_g(z) = G_v U_d(z)$$

G_v 一阵风因子,可按有关规范或风环境 风洞试验确定.

《公路桥梁抗风设计规范》: 1.16 ~ 1.56.

◆ 1.3 紊流强度

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U} \text{— 可按规范确定特征高度的数值}$$

$$I_v = \frac{\sigma_v}{U} \text{— 按 } I_v = 0.88 I_u$$

$$I_w = \frac{\sigma_w}{U} \text{— 按 } I_w = 0.5 I_u$$



◆ 1.4 脉动风谱

水平来流:
$$\frac{nS_u(n)}{u_*^2} = \frac{200f}{(1+50f)^{5/3}} \quad (\text{Simiu谱})$$

垂直方向:
$$\frac{nS_w(n)}{u_*^2} = \frac{6f}{(1+4f)^2} \quad (\text{Panofsky谱})$$

◆ 1.5 相关函数

空间相关性:
$$\gamma(f, \Delta r) = \exp\left(-\frac{\lambda f \Delta r}{U_d}\right)$$

f — 特征频率

Δr — 空间相对位置坐标

λ — 衰减系数, $\lambda = 7 \sim 21$



➤ 2. 气动参数识别

识别方法 {
物理风洞试验方法
数值风洞试验方法(CFD方法)

◆ 2.1 断面流迹显示

(1) 烟雾照相 }
(2) 数值模拟 } 等压线、等速线、表面粒子

◆ 2.2 Strouhal数识别

(1) 尾流涡脱卓越频率测量
(2) CFD数值模拟计算

$$S_t = \frac{fB}{U}$$



◆ 2.3 静力系数识别

(1) 节段模型测力试验

(2) CFD数值模拟计算

$$\text{升力系数: } C_L = \frac{\frac{1}{2} \rho U^2 \cdot B}{F_L}, \frac{dC_L}{d\alpha}$$

$$\text{阻力系数: } C_D = \frac{\frac{1}{2} \rho U^2 \cdot B}{F_D}, \frac{dC_D}{d\alpha}$$

$$\text{升力矩系数: } C_M = \frac{\frac{1}{2} \rho U^2 \cdot B^2}{F_M}, \frac{dC_M}{d\alpha}$$

三分力系数也可表示成体轴系数座标, C_y, C_z 和 C_M



◆ 2.4 气动导数识别

(1) 节段模型测振试验

(2) CFD数值模拟计算

升力方向: H_i^* ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

阻力方向: P_i^* ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

升力矩方向: A_i^* ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

大多数情况下气动导数值

H_i^* 和 A_i^* ($i = 1, 2, 3, 4$)



➤ 3. 动力特性分析

◆ 3.1 结构计算模型

(1) 按施工阶段划分(缆索承重桥梁)

(a) 桥塔自立状态

(b) 主要拼梁状态

(c) 全桥成桥状态

(2) 按主梁离散划分

(a) 单梁式

(b) 双梁式

(c) 三梁式



◆ 3.2 结构振型描述

- (1) 按对称性划分—对称和反对称
- (2) 按特征值划分—一阶、二阶、...
- (3) 按振动特性划分—侧向弯曲、竖向弯曲、扭转

◆ 3.3 基本振型分析

- (1) 同类桥梁固有频率比较
- (2) 扭弯频率比
- (3) 对称或反对称振型出现次序
- (4) 扭转振型耦合特征



➤ 4. 静风性能验算

◆ 4.1 静风稳定性—扭转发散

(1) 二维计算模型

(2) 三维计算模型

} 扭转发散临界风速

◆ 4.2 静风强度

(1) 平均风荷载

(2) 脉动风荷载

} 荷载最不利组合问题

◆ 4.2 静风刚度

(1) 侧向静风位移

(2) 竖向静风位移

(3) 扭转静风位移(较小)



➤ 5. 风振性能检验

◆ 5.1 风振稳定性

- (1) 驰振临界风速
- (2) 扭转颤振临界风速— A_2^* 变号
- (3) 耦合颤振临界风速—竖弯和扭转耦合
- (4) 涡激共振锁定风速

◆ 5.2 风振强度

- (1) 抖振引起的强迫力荷载
 - (2) 涡振引起的自激力荷载
- } 荷载最不利组合



5.3 风振刚度

(1) 抖振位移

(a) 随机振动分析方法

(b) 节段模型试验法

(c) 全桥模型试验法

(2) 涡振位移

(a) 理论模型计算法

(b) 节段模型试验法

(c) 全桥模型试验法



➤ 6. 抗风性能改善

◆ 6.1 桥梁抗风性能

- (1) 主梁风振失稳(驰振、颤振)绝对避免
- (2) 主梁涡激振动尽量避免
- (3) 主梁抖振一般不作控制
- (4) 拉索风振或雨振尽量避免

◆ 6.2 主梁性能改善措施

- (1) 结构措施—刚度、质量、约束
- (2) 外形措施—导流、开槽、分流(中央稳定性)，裙板等
- (3) 阻尼措施—TMD、主动、半主动等



6.3 拉索性能改善措施

- (1) 表面处理—刻痕、螺旋线等
- (2) 内置阻尼器—锚箱内
- (3) 外置阻尼器—离索端一定距离
- (4) 稳定索系—交叉索等



➤ 7. 抗风设计发展

- (1) 概率性评价和可靠性分析
- (2) 等效风荷载问题
- (3) 基于结构性能(舒适度)的抗风设计
- (4) 风振疲劳问题
- (5) 斜拉桥拉索振动控制
- (6) 考虑周边地形影响的风振问题



小结

设计风速定义

气动参数识别

动力特性分析

静风性能检验

风振性能检验

抗风性能改善

抗风设计发展



同济大学土木工程防灾国家重点实验室、桥梁工程系

谢谢大家！