

SAP2000 索结构分析

主讲人：张志国

北京筑信达工程咨询有限公司

2024年5月22日

索结构

❖ 悬索

在荷载等外因作用下只产生轴向**拉力**，
不产生弯矩、剪力和压力。

- 受力合理，充分利用高强度钢材；
- 减轻结构自重，降低工程造价；
- 常见应用：悬索屋盖，悬索桥等

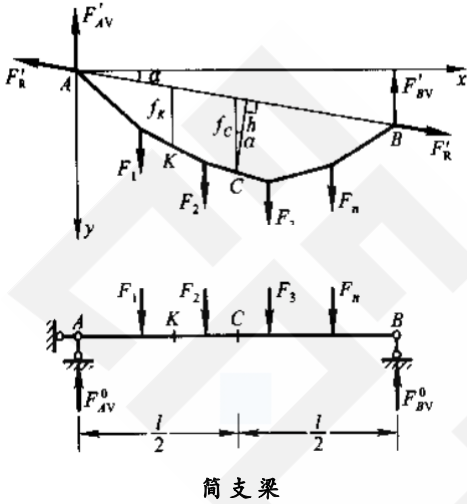
作为**柔性构件**的几何形状可变性

- 几何非线性：外荷载 vs 位移
- 平衡方程：变形后的几何形状和位置



单悬索

集中荷载



$$F'_{AV} = F_{AV}^0, \quad F'_{BV} = F_{BV}^0, \quad F'_R = \frac{M_C^0}{h}$$

$$F_H = F'_R \cos \alpha = \frac{M_C^0}{f_C} \quad \text{水平张力} \quad F_H = \frac{M_K^0}{f_h}$$

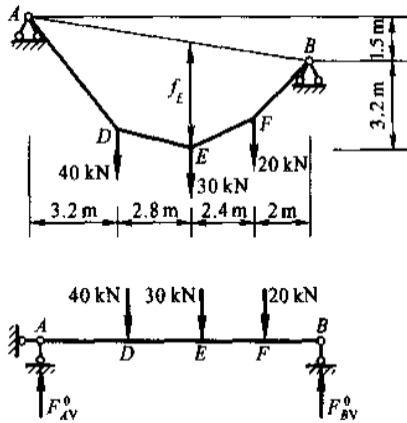
$$F_{AV} = F_{AV}^0 + F_H \tan \alpha$$

$$F_{BV} = F_{BV}^0 - F_H \tan \alpha$$

筑信达

单悬索

集中荷载



E点垂度: $3.2 + 1.5 \times 4.4 / 10.4 = 3.8346$

水平张力 $F_H = 153.38 / 3.834 = 40 \text{ kN}$

垂度 f

D点: $141.54 / 40 = 3.5385 \text{ m}$

F点: $91.54 / 40 = 2.2885 \text{ m}$

坐标 Z

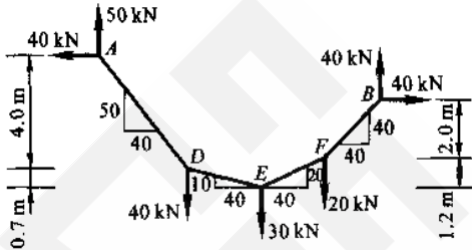
D点: $1.5 \times 3.2 / 10.4 + 3.5385 = 4.0 \text{ m}$

F点: $1.5 \times 8.4 / 10.4 + 2.2885 = 3.5 \text{ m}$

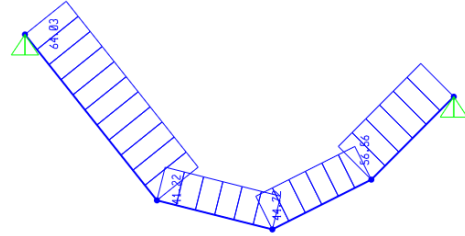
筑信达

单悬索

集中荷载



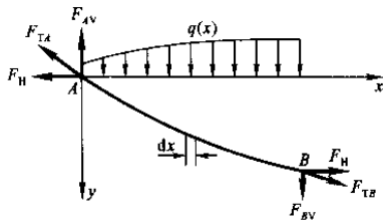
教科书



SAP2000

单悬索

分布荷载

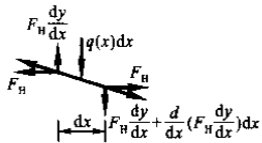


$$F_H \frac{d^2 y}{dx^2} + q(x) = 0$$

平衡微分方程

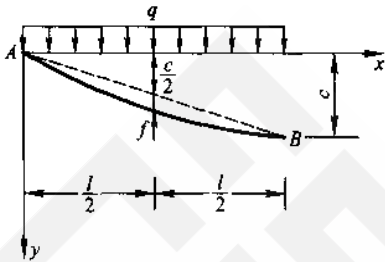
$$EI \omega'' = M(x) \longrightarrow EI \omega = -\int \left[\int M(x) dx \right] dx + C_1 x + C_2$$

等直梁的挠曲线近似微分方程



单悬索

❖ 分布荷载：沿跨度方向



$$F_H \frac{d^2 y}{dx^2} + q(x) = 0$$

平衡微分方程

$$y = \frac{q}{2F_H} x(l-x) + \frac{c}{l} x \quad \text{抛物线}$$

$$F_H = \frac{ql^2}{8f}$$

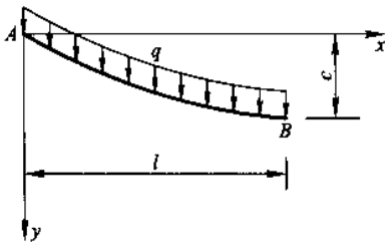
$$F_T = F_H \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}$$

$$s = \int_A^B ds = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \approx l \left(1 + \frac{c^2}{2l^2} + \frac{8f^2}{3l^2}\right)$$

筑信达

单悬索

❖ 分布荷载：沿索长度方向



$$F_H \frac{d^2 y}{dx^2} + q(x) = 0$$

平衡微分方程

$$y = \frac{F_H}{q} \left[ch \alpha - ch \left(\frac{2\beta}{l} x - \alpha \right) \right] \quad \text{悬链线}$$

$$\alpha = \operatorname{arcsh} \left[\frac{\beta c / l}{sh \beta} \right] + \beta, \quad \beta = \frac{ql}{2F_H}$$

$$f = \frac{F_H}{q} [ch \alpha - ch(\beta - \alpha)] - \frac{c}{2}$$

$$F_T = F_H \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}$$

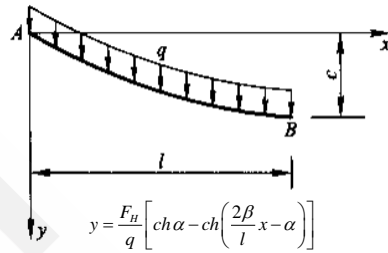
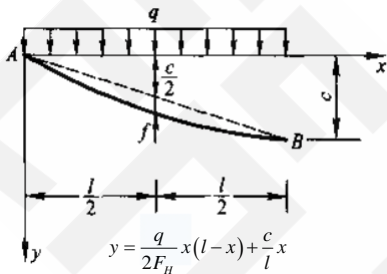
$$s = \int_A^B ds = \int_0^l \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \frac{2F_H}{q} sh \beta \times ch(\beta - \alpha)$$

筑信达

单悬索

❖ 悬索线形

- 外荷载 + 水平张力 → 悬索线形
- 外荷载 + 索的垂度 → 悬索线形

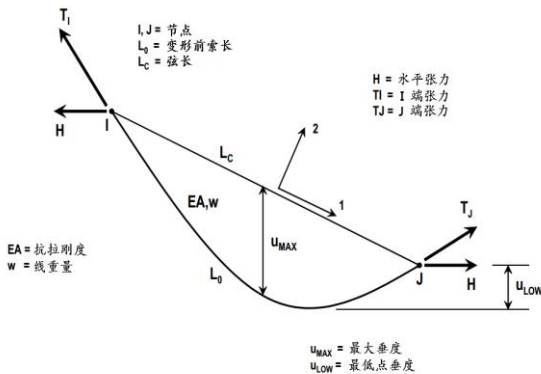


筑信达

单悬索

❖ SAP2000 形状设计器

$$F_H \frac{d^2 y}{dx^2} + q(x) = 0 \quad y = \frac{q}{2F_H} x(l-x) + \frac{c}{l} x \quad y = \frac{F_H}{q} [ch\alpha - ch(\frac{2\beta}{l}x - \alpha)]$$



对象参数	
对象类型	索
索类型	索 - 水平张力分量
截面属性	索 - I端最小张力
	索 - J端最小张力
起点	索 - I端张力
	索 - J端张力
终点	索 - 水平张力分量
	索 - 最大竖垂度
<input type="checkbox"/> 应用直框架模拟索	索 - 最低点竖垂度
	索 - 未变形长度
	索 - 相对未变形长度

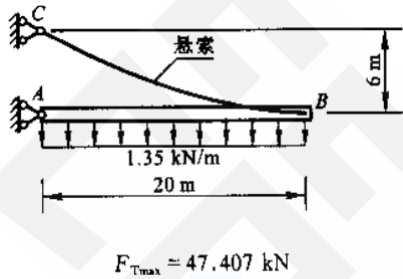
筑信达

单悬索

❖ SAP2000 形状设计器

试计算图示支承屋盖悬索的最大拉力。悬索自重为 0.135 kN/m 。

$$\text{水平张力 } H = 1.35 * 20^2 / 2 / 6 = 45.0$$



索参数		刷新
分段数量	1	
单位长度的附加重量	0.135	
沿跨度方向的均布荷载	0	
I端张力	47.4068	
J端张力	46.5971	
张力水平分量	45.	
最大垂度	变形后: 0.1566	变形前: 6.607E-14
最低点垂度	0.	0.
长度	20.8835	20.8761
相对长度	1.0001	0.9998

悬链线

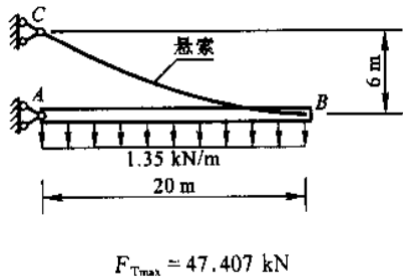
筑信达

单悬索

❖ SAP2000 形状设计器

试计算图示支承屋盖悬索的最大拉力。悬索自重为 0.135 kN/m 。

$$\text{沿跨度方向的线荷载 } 0.135 * 20.88 / 20 = 0.141 \text{ kN/m}$$



索参数		刷新
分段数量	1	
单位长度的附加重量	0.	
沿跨度方向的均布荷载	0.141	
I端张力	47.4071	
J端张力	46.5968	
张力水平分量	45.	
最大垂度	变形后: 0.1567	变形前: 6.607E-14
最低点垂度	0.	0.
长度	20.8835	20.8761
相对长度	1.0001	0.9998

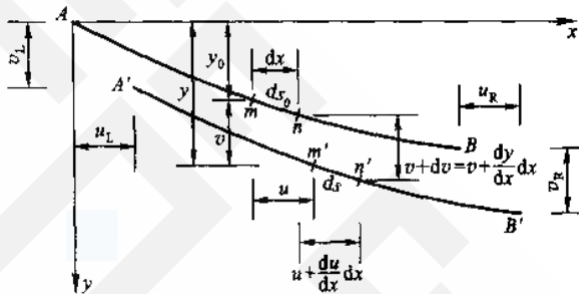
抛物线

筑信达

单悬索

❖ 初态和终态

悬索实际计算问题的一般模式为:给定一**初始状态**,在此状态中,悬索承受荷载 q_0 ,位置 y_0 和内力 F_{H0} 均已知,求解荷载产生增量 Δq ,即荷载在**最终状态**成为 $q = q_0 + \Delta q$ 时,悬索的位置 y 与内力 F_H 。



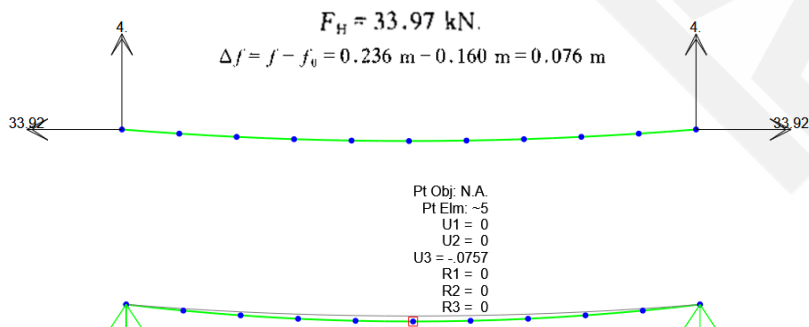
变形协调方程

筑信达

单悬索

❖ 初态和终态

例 15-3 现有承受均布荷载抛物线悬索,已知 $A = 67.4 \text{ mm}^2$, $E = 166.6 \text{ GPa}$, $l = 8 \text{ m}$, $q_0 = 0.4 \text{ kN/m}$, $F_{H0} = 20 \text{ kN}$, $q = 1.0 \text{ kN/m}$ 。试求悬索最终状态水平张力 F_H 及跨中垂度增量。

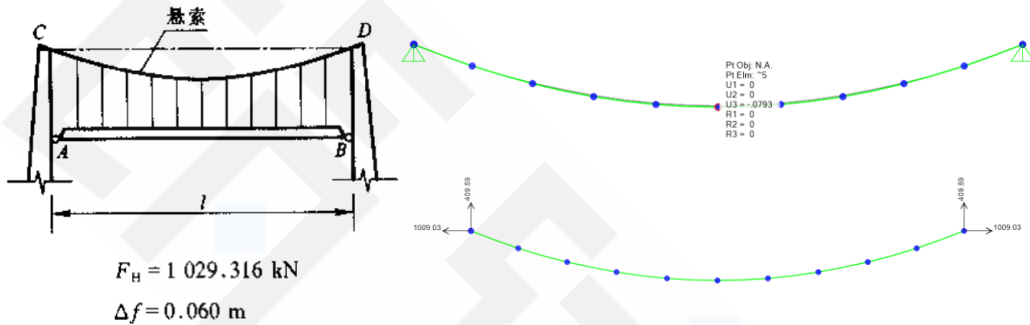


筑信达

单悬索

❖ 初态和终态

15-3 图示抛物线悬索桥跨度 $l = 30$ m. 桥自重(包括索重)传至悬索时按均布荷载 $q_0 = 8$ kN/m 计. 跨中初始垂度 $f_0 = 3$ m, 当车队通过时按 $\Delta q = 20$ kN/m 计. 试求这时悬索张力水平分量 F_H 及跨中垂度增量 Δf_c . 已知悬索横截面 $A = 4\,044$ mm², $E = 166.6$ GPa.



筑信达

谢 谢



"The idea that an expert-system computer program, with artificial intelligence, will replace a **creative human** is an insult to all structural engineers."

加州大学伯克利分校终身名誉教授 Edward L. Wilson (著名的结构分析设计软件 SAP 的创始人) 在《Three Dimensional Static and Dynamic Analysis Of Structures》(<http://www.edwilson.org/Book/book.htm#Personal>) 一书中提到:

"Don't use a structural analysis program unless you fully understand the theory and approximations used within the program"

"Don't create a computer model until the loading, material properties and boundary conditions are clearly defined"