

过程设备设计（下）



第五章 储存设备

第六章 换热设备

第七章 塔设备

第八章 反应设备

第七章 塔设备

第一节 概 述

第二节 填料塔

第三节 板式塔

第四节 塔设备的附件

第五节 → 塔的强度设计

第六节 塔设备的振动

7.5 塔的强度设计

本章重点

教学重点：

塔的强度设计。

教学难点：

塔的强度设计。

本章计算
重点

本章计算
难点

7.5 塔的强度设计

对于安装在室外，靠裙座底部的地脚螺栓固定在混凝土基础上的塔设备：

承受载荷

介质压力

各种重量

管道推力

偏心载荷

风载荷

地震载荷

包括塔体、塔内件、介质、保温层、操作平台、扶梯等附件的重量

三种工况

正常操作

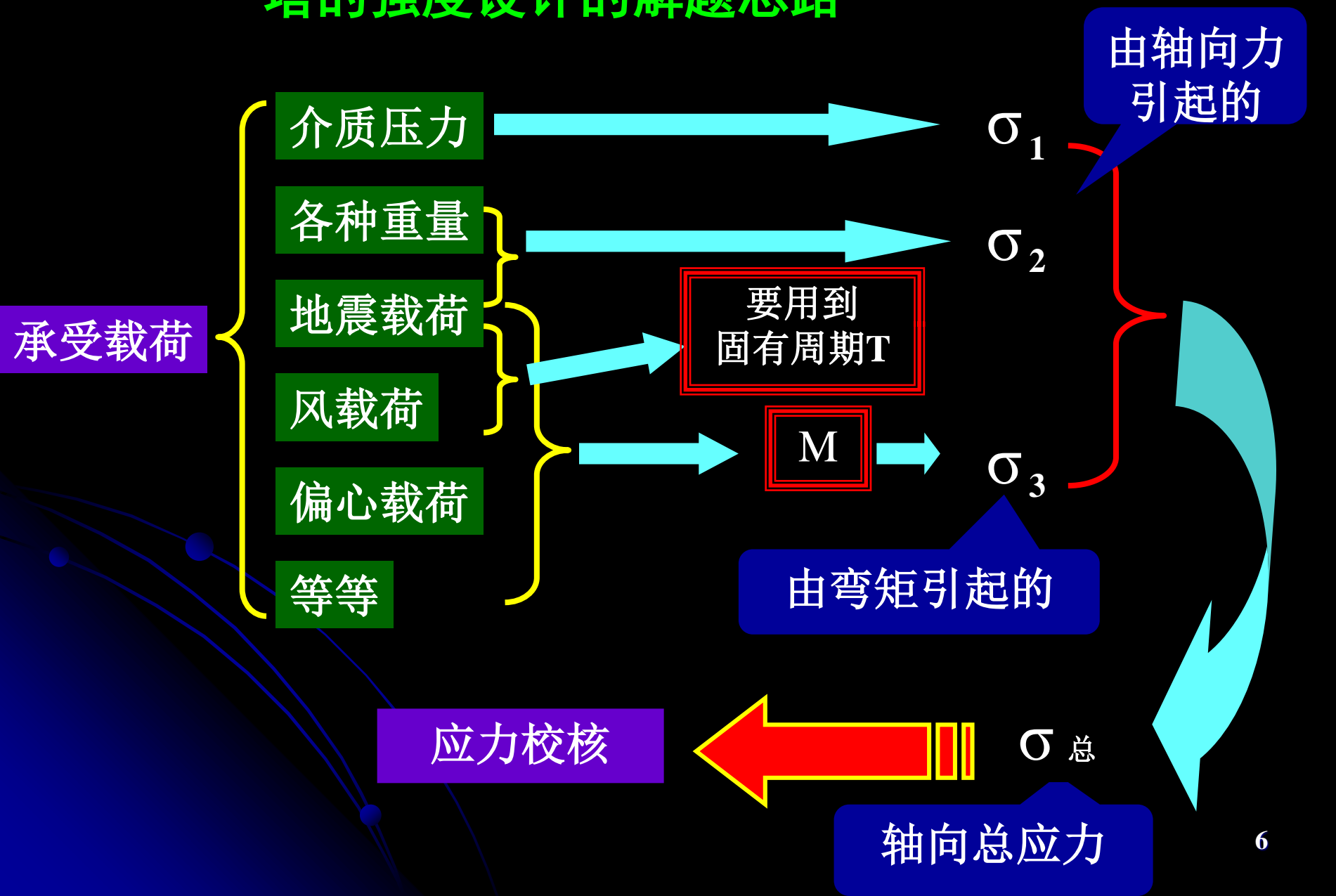
停工检修

压力试验

三种工况下轴向强度及稳定性校核的基本步骤：

- 按设计条件，初步确定塔的厚度和其他尺寸。
- 计算塔设备危险截面的载荷，包括重量、风载荷、地震载荷和偏心载荷等。
- 危险截面的轴向强度和稳定性校核。
- 设计计算裙座、基础环板、地脚螺栓等。

塔的强度设计的解题思路



7.5.1 塔的固有周期

在动载荷(风载荷、地震载荷)作用下，塔设备各截面变形及内力与塔的自由振动周期(或频率)及振型有关。

在进行塔设备载荷计算及强度校核之前，必须首先计算固有（或自振）周期。

固有周期的求解思路

振动微分方程



设通解



由边界条件



定通解



求得固有周期

塔设备——具有多个自由度体系
——具有多个固有频率(或周期)。

基本固有频率（基本频率）——最低的频率 ω_1 。

第二，第三，……频率——从低到高依次为
 ω_2 ， ω_3 ，……等。

基本固有周期（基本周期）——
与基本频率相对应的周期。

7.5 塔的强度设计

一、等直径、等壁厚塔的固有周期

1.力学模型

顶端自由、
底部固定、
质量沿高度
均匀分布的
悬臂梁

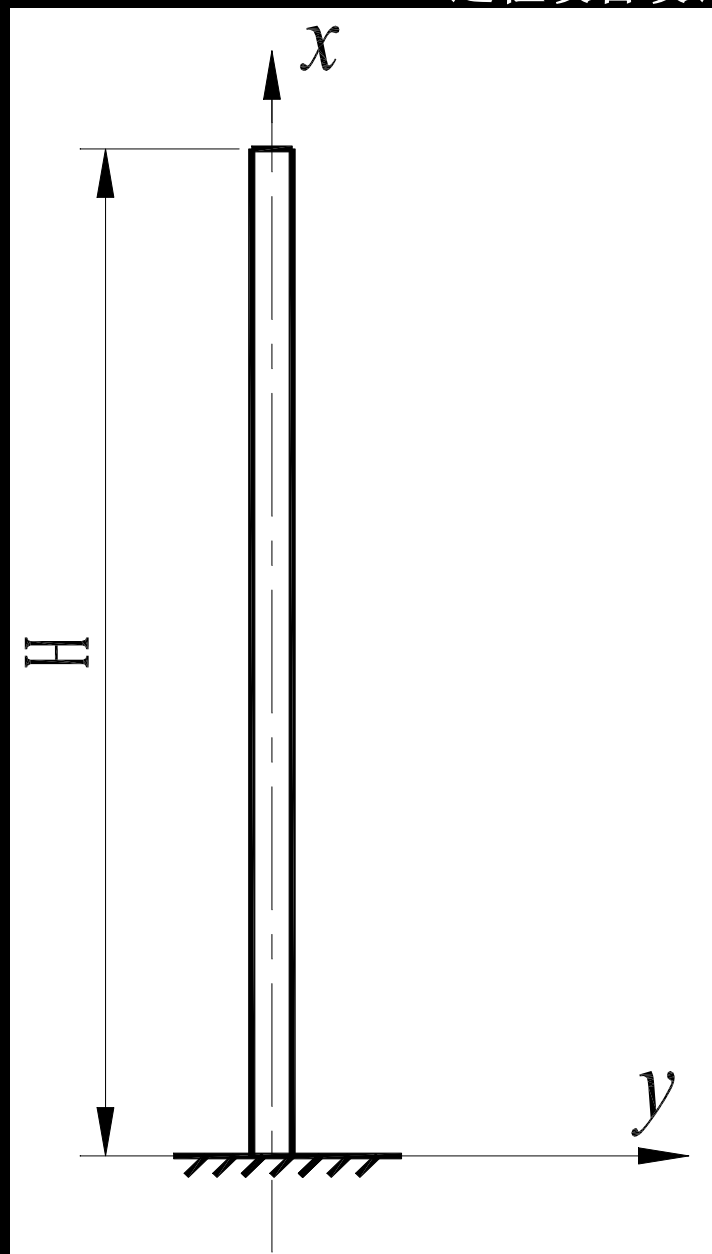


图7-74 计算模型

2. 挠度曲线方程（动载荷）

梁在动载荷作用下发生弯曲振动，
挠度曲线随时间变化，为

$$y = y(x, t)$$

3. 挠度曲线方程（静载荷）

设塔为理想弹性体、振幅很小、无阻尼、塔高与塔直径之比较大（大于5），由材料力学中弯曲理论知，在分布惯性力 q 作用下的挠曲线微分方程为：

振动微分方程

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = q$$

(7-1)

式中 E —塔体材料在设计温度下的弹性模量, Pa;

I —塔截面的形心轴惯性矩,

$$I = \frac{\pi}{64} (D_0^4 - D_i^4) \approx \frac{\pi}{8} D_i^3 \delta_e, \quad \text{m}^4;$$

D_i —塔的内直径, m;

D_0 —塔的外直径, m;

δ_e —塔壁的有效厚度, m。

根据牛顿第二定律，梁上的分布惯性力 q 为

$$q = -m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (7-2)$$

式中 m —塔单位高度上的质量， kg/m 。

将式（7-2）代入式（7-1）得

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{m}{EI} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (7-3)$$

根据塔的振动特性，令上式的解为

通解

$$y(x, t) = Y(x) \sin(\omega t + \varphi)$$

式中 ω —塔的固有圆频率，rad/s；

t —时间，s；

$Y(x)$ —塔振动时在 x 处的最大位移， m 。

将 $y(x,t)$ 代入振动方程式 (7-3) 得

$$\frac{d^4 Y(x)}{dx^4} - k^4 Y(x) = 0$$

(7-4)

式中 k —系数,

$$k = \sqrt[4]{\frac{m\omega^2}{EI}}$$

由边界条件求解K

式 (7-4) 边界条件:

塔底固定端,

$$Y(x) \big|_{x=0} = 0$$

$$\frac{dY(x)}{dx} \big|_{x=0} = 0$$

塔顶自由端,

$$\frac{d^2 Y(x)}{dx^2} \big|_{x=H} = 0$$

$$\frac{d^3 Y(x)}{dx^3} \big|_{x=H} = 0$$

求解此方程得塔设备前三个振型时的 k 值分别为:

$$k_1 = \frac{1.875}{H}$$

$$k_2 = \frac{4.694}{H}$$

$$k_3 = \frac{7.855}{H}$$

4. 前三个振型时的固有周期

由系数 k 值的表达式以及圆频率 ω 和周期 T 间的关系

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

，得塔在前三个振型时的固有周期分别为

$$T_1 = 1.79 \sqrt{\frac{mH^4}{EI}}$$

$$T_2 = 0.285 \sqrt{\frac{mH^4}{EI}}$$

$$T_3 = 0.102 \sqrt{\frac{mH^4}{EI}}$$

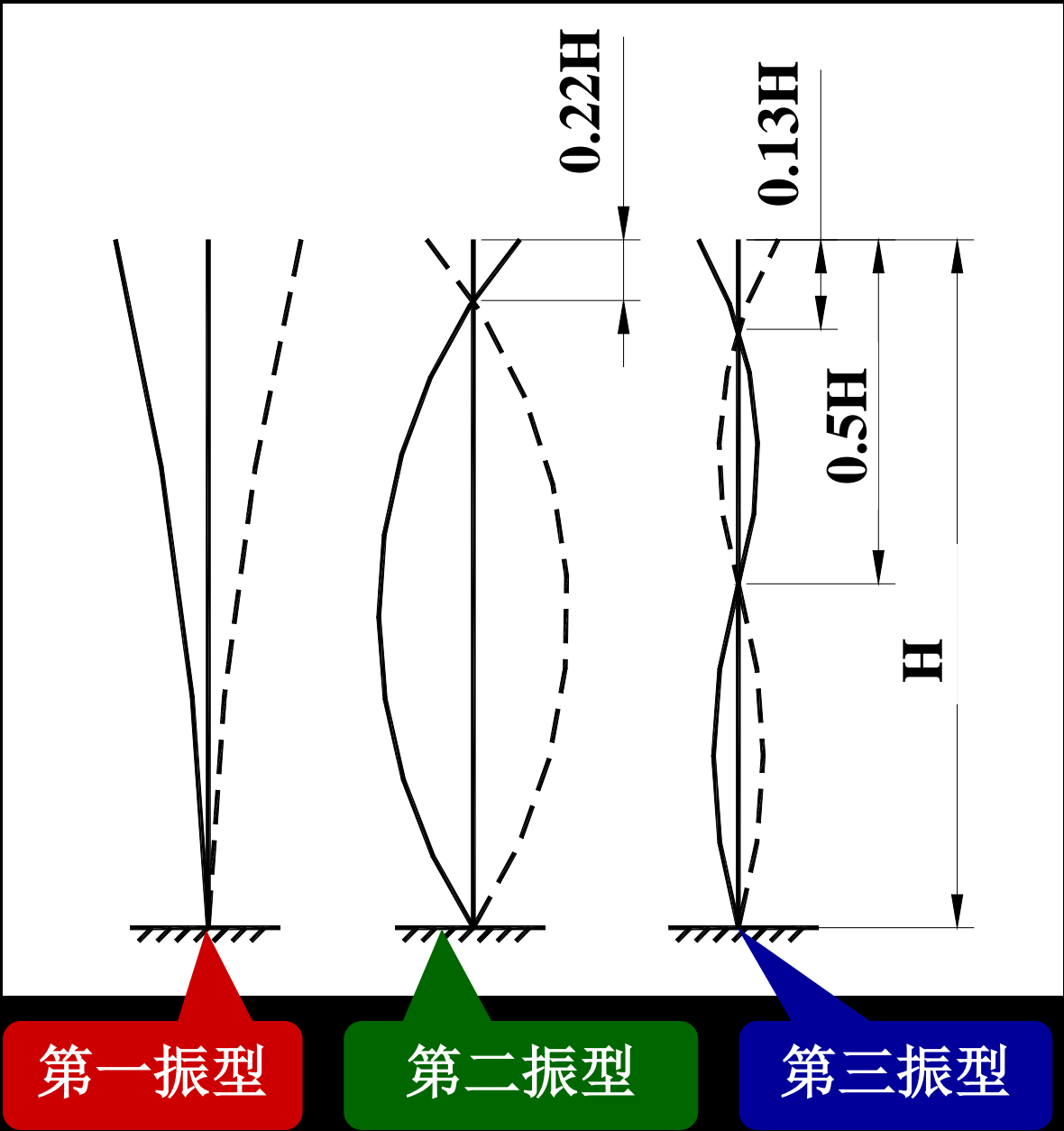
求得固有周期

(7-5)

式中 H —塔高， m 。

5. 前三个振型

图7-75
塔设备振型



二、不等直径或不等厚度塔设备的固有周期

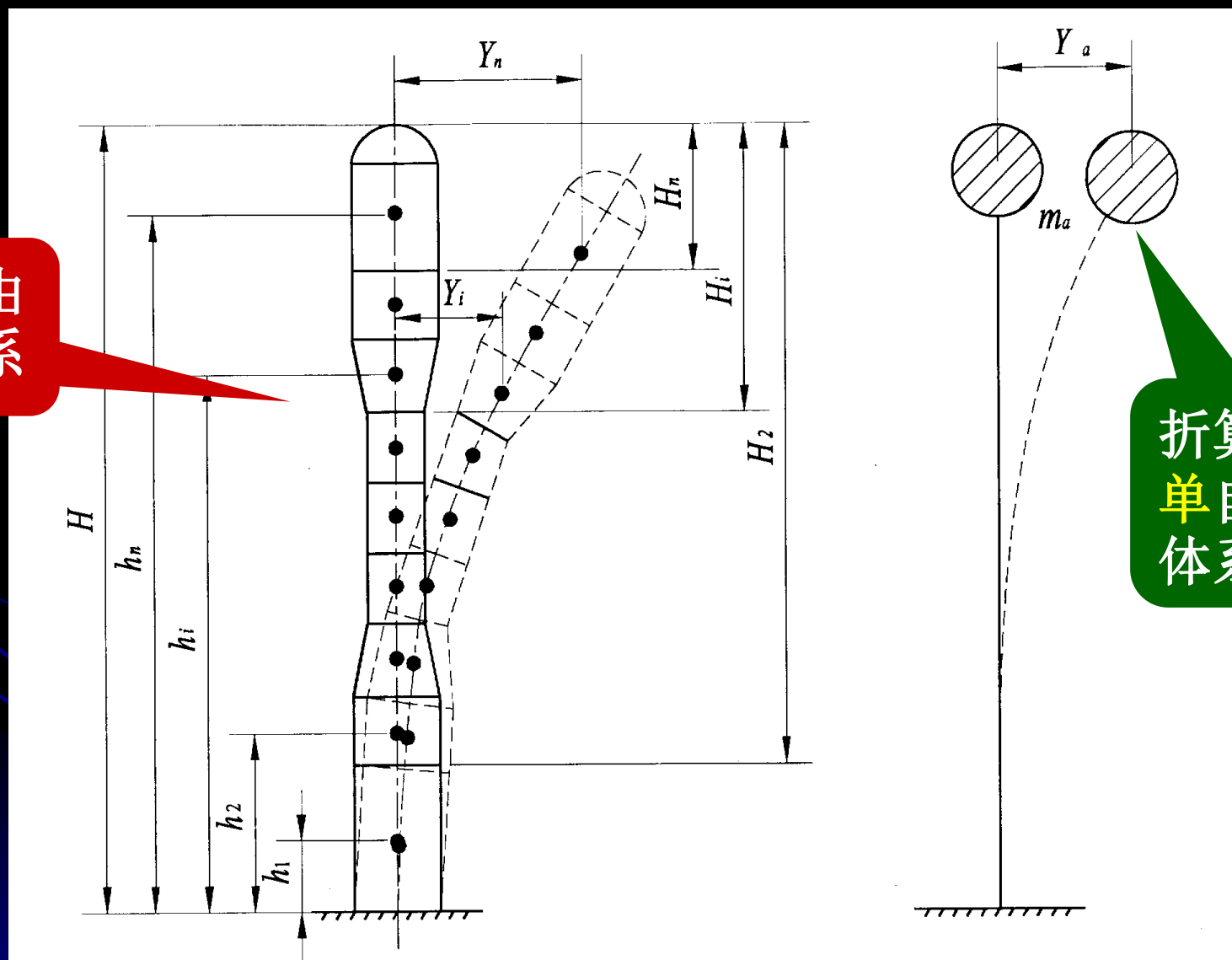


图7-76 不等直径或不等厚度塔的计算

◀ 问题：不等直径或不等厚度的塔，质量及刚度沿塔高不均匀分布，不能用类似（7-3）的振动方程求解。

解决办法：工程上将这种塔视为由多个塔节组成，将每个塔节化为质量集中于其重心的质点，并采用质量折算法计算第一振型的固有周期。
直径和厚度相等的圆柱壳、改变直径用的圆锥壳可视为塔节。

质量折算法

质量折算法： 将一个多自由度体系，用一个折算的集中质量代替，将一个多自由度体系简化成一个单自由度体系，如图7-76所示。

确定集中质量原则：使两个相互折算体系在振动时产生的

最大动能相等

图7-76 (a) 中，设塔节数为 n ，塔体振动时最大动能为各质点最大动能之和，即

$$T_{\max} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i (v_i)_{\max}^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i \omega^2 Y_i \quad (7-6)$$

式中 T_{\max} —多质点体系振动时的最大动能，J；

m_i —第 i 段塔节的质量，kg；

$(v_i)_{\max}$ —第 i 段塔节重心的最大速度，m/s；

Y_i —第 i 段塔节重心的最大位移，即振幅，m。

同理，设单自由度体系的折算质量为 m_a ，则振动时产生的最大动能为

$$T_{\max}^* = \frac{1}{2} m_a Y_a^2 \omega_a^2$$

式中 T_{\max}^* —折算后单自由度体系的动能，J；

m_a —折算成单自由度体系后的质量，kg；

ω_a —折算成单自由度体系后的振动圆频率，rad/s；

Y_a —折算成单自由度体系后质点的最大位移(振幅)，m。

令

$$T_{\max} = T_{\max}^*$$

即

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_i Y_i^2 \omega^2 = \frac{1}{2} m_a Y_a^2 \omega_a^2$$

(7-7)

$$\omega = \omega_a$$

（将多自由度体系折算成等价的单自由度体系，振动圆频率相同）

$$Y_n = Y_a$$

（塔顶的最大位移即振幅相等）。

研究表明，多自由度体系的第一振型曲线可近似为抛物线，且最大位移 Y_i 和 Y_a 之间有如下关系

$$Y_i \approx Y_a \left(\frac{h_i}{H} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (7-8)$$

● 将上式代入式(7-7)得

$$m_a = \sum_{i=1}^n m_i \left(\frac{h_i}{H} \right)^3 \quad (7-9)$$

对于单自由度体系，其固有周期的计算公式为

$$T = 2\pi \sqrt{m_a \delta} \quad (7-10)$$

式中 δ —顶端作用单位力时所产生的位移，m/N。

由材料力学可知，顶端作用单位力时，变截面梁在顶端的位移为

$$\delta = \frac{1}{3} \left(\sum_{i=1}^n \frac{H_i^3}{E_i I_i} - \sum_{i=2}^n \frac{H_i^3}{E_{i-1} I_{i-1}} \right) \quad (7-11)$$

将式 (7-9) 和式 (7-11) 代入(7-10), 得不等直径或不等厚度塔设备第一振型的固有周期为

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^n m_i \left(\frac{h_i}{H} \right)^3 \left(\sum_{i=1}^n \frac{H_i^3}{E_i I_i} - \sum_{i=2}^n \frac{H_i^3}{E_{i-1} I_{i-1}} \right)} \quad (7-12)$$

式中 H_i —第*i*段塔节底部截面至塔顶的距离, *m*;

E_i —第*i*段塔节材料在设计温度下的弹性模量, *Pa*;

I_i —第*i*段塔节形心轴的惯性矩, *m*⁴;

对于圆柱形塔节,

$$I_i \approx \frac{\pi}{8} D_i^3 \cdot \delta_{ei}, \quad \text{m}^4;$$

对于圆锥形塔节,

$$I_i = \frac{\pi D_{ie}^2 D_{if}^2 \delta_{ei}}{4(D_{ie} + D_{if})}, \quad \text{m}^4;$$

D_{ie} —圆锥形塔节大端内直径, m;

D_{if} —圆锥形塔节小端内直径, m;

δ_{ei} —第 i 段塔节的有效厚度, m。

若第 i 段塔节形状为圆柱形, 则

$$D_{ie} = D_{if} = D_i$$

7.5.2 塔的载荷分析

一、质量载荷

包括：

m_{01} ——塔体、裙座质量；

m_{02} ——塔内件如塔盘或填料的质量；

m_{03} ——保温材料的质量；

m_{04} ——操作平台及扶梯的质量；

m_{05} ——操作时物料的质量；

m_a ——塔附件如人孔、接管、法兰等质量；

m_w ——水压试验时充水的质量；

m_e ——偏心载荷。

塔设备在正常操作时的质量

$$m_0 = m_{01} + m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_{05} + m_a + m_e \quad (7-13)$$

塔设备在水压试验时的最大质量

$$m_{\max} = m_{01} + m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_w + m_a + m_e \quad (7-14)$$

塔设备在停工检修时的最小质量

$$m_{\min} = m_{01} + 0.2m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_a + m_e \quad (7-15)$$

二、偏心载荷

定义：塔体上悬挂的再沸器、冷凝器等附属设备或其它附件所引起的载荷。

载荷产生的弯矩为：

$$M_e = m_e g e$$

(7-16)

式中

g —重力加速度, m/s^2 ;

e —偏心距, 即偏心质量中心至塔设备中心线间的距离, m ;

M_e —偏心弯矩, $N \cdot m$ 。

三、风载荷

1.影响:

- (1) 使塔体产生应力和变形;
使塔体产生顺风向的振动(纵向振动);
使塔体产生垂直于风向的诱导振动(横向振动)。
- (2) 过大的塔体应力会导致塔体的强度及稳定失效。
- (3) 太大的塔体挠度会造成塔盘上流体分布不均, 分离效率下降。

2.风载荷的构成:

一种随机载荷。

对于顺风向风力，认为由两部分组成：

(1) 平均风力（稳定风力），对结构的作用相当于静力的作用。

平均风力是风载荷的静力部分，其值等于风压和塔设备迎风面积的乘积。

(2) 脉动风力（阵风脉动），对结构的作用是动力的作用。

脉动风力是非周期性的随机作用力，它是风载荷的动力部分，会引起塔设备的振动。

计算时，折算成静载荷，即在静力基础上考虑与动力有关的折算系数，称风振系数。

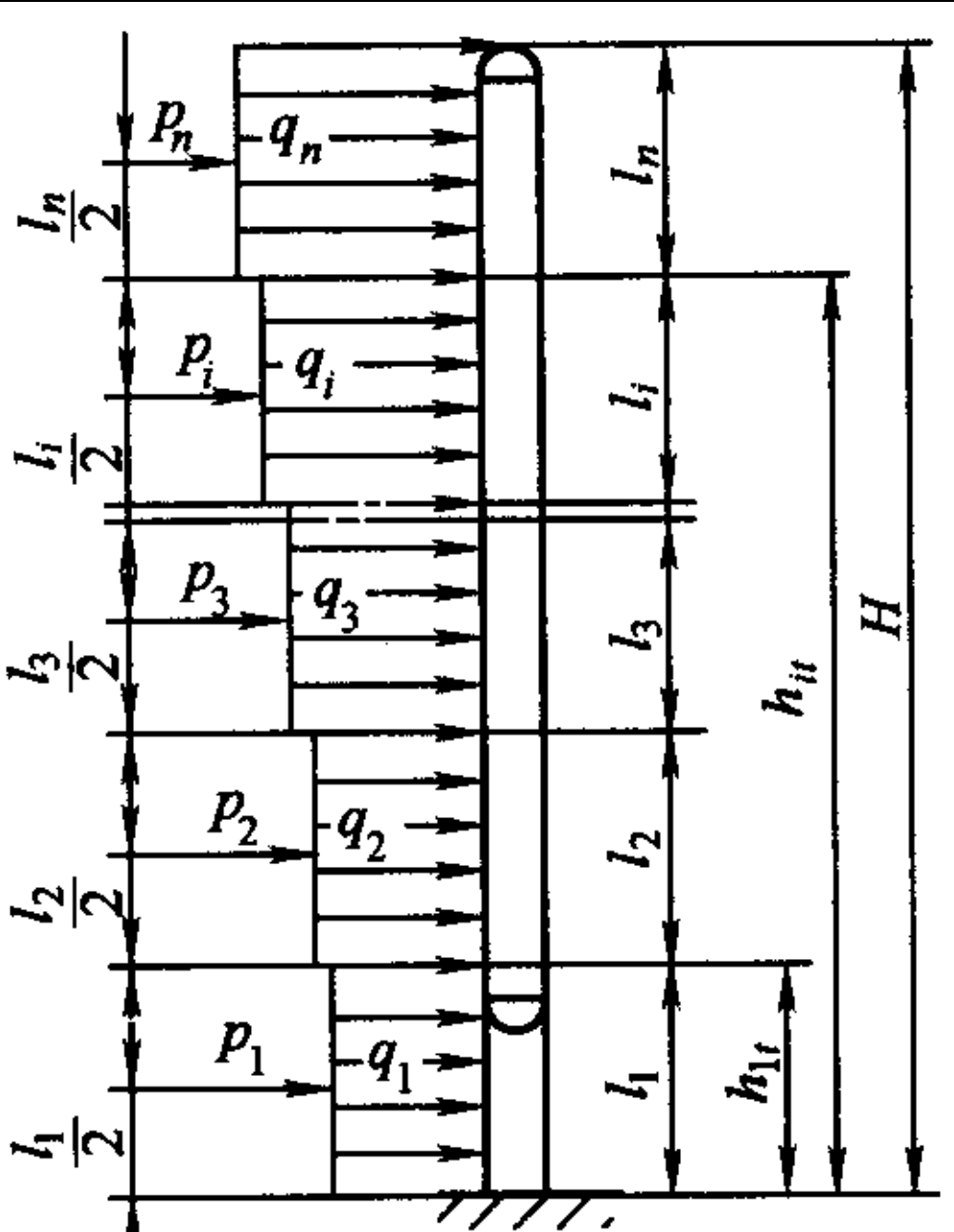


图7-77 风载荷计算简图

3. 风力计算

塔设备中第 i 计算段所受的水平风力可由下式计算

$$P_i = K_1 K_{2i} f_i q_0 l_i D_{ei} \quad (7-17)$$

式中 P_i 一塔设备中第 i 段的水平风力, N ;

K_1 一体型系数;

K_{2i} 一塔设备中第 i 计算段的风振系数;

f_i 一风压高度变化系数;

q_0 一各地区的基本风压, N/m^2 ;

l_i 一塔设备各计算段的计算高度(见图7-74), m ;

D_{ei} 一塔设备中第 i 段迎风面的有效直径, m ;

a. 基本风压 q_0

基本风压 q_0 由相应地区的基本风速 v_0 通过下式确定

$$q_0 = \frac{1}{2} \rho v_0^2 \quad (7-18)$$

式中

q_0

—基本风压, N/m^2

ρ

—空气密度, 随当地的高度和湿度而异,
 kg/m^3 ;

v_0

—基本风速, 随地区、季节及离地面的
高度而变化, m/s 。

我国设计规范规定：

空气密度 ρ ---- 根据一个大气压下、 10°C 时干空气密度计算，即 $\rho=1.25\text{ kg/m}^3$ ；

基本风速 v_0 ---- 采用离地面高度10m，30年一遇，10分钟内平均最大风速。查图。

b. 高度变化系数 f_i

- 风速或风压随离地面的高度而变化。
- 风速沿高度变化呈指数规律，风压等于基本风压 q_0 与高度变化系数 f_i 的乘积。
- 风压高度变化系数 f_i 值随地面的粗糙度类别而不同，见表7-5。

表7-5 风压高度变化系数 f_i

距地面高度 H_{it}	地面粗糙度类别			
	A	B	C	D
5	1.17	1.00	0.74	0.62
10	1.38	1.00	0.74	0.62
15	1.52	1.14	0.74	0.62
20	1.63	1.25	0.84	0.62
30	1.80	1.42	1.00	0.62
40	1.92	1.56	1.13	0.73
50	2.03	1.67	1.25	0.84
60	2.12	1.77	1.35	0.93
70	2.20	1.86	1.45	1.02
80	2.27	1.95	1.54	1.11
90	2.34	2.02	1.62	1.19
100	2.40	2.09	1.70	1.27
150	2.64	2.38	2.03	1.61
200	2.83	2.61	2.30	1.92

注：

- A 类地面粗糙度指近海海面、海岸、海岛、湖岸及沙漠地区；
- B 类指田野、乡村、丛林、丘陵及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区。
- C 类指具有密集建筑群的城市郊区。
- D 类指有密集建筑群且房屋较高的的城市郊区。

c. 风压

塔高度<10m: 按一段计算, 以设备顶端的风压作为整个塔设备的均布风压;

塔高度>10m: 分段计算, 每10m 分为一计算段, 余下的最后一段高度取其实际高度, 如图7-74所示。

其中任意计算段风压为:

$$q_i = f_i q_0 \quad (7-19)$$

式中 q_i —第*i* 段的风压, N/m^2 。

d. 体型系数 K_1

在同样风速条件下，风压在不同体型结构表面分布不相同。

细长圆柱形塔体结构，体型系数 $K_1=0.7$

e. 风振系数 K_{2i}

风振系数 K_{2i} ：是考虑风载荷的脉动性质和塔体的动力特性的折算系数。

塔的振动会影响风力的大小。

当塔设备越高时，基本周期越大，塔体摇晃越甚，则反弹时在同样的风压下引起更大的风力。

塔高 $H \leq 20\text{m}$ 的塔设备，取 $K_{2i} = 1.70$ 。

塔高 $H > 20\text{m}$ 时， K_{2i} 按下式计算

$$K_{2i} = 1 + \frac{\xi v_i \phi_{zi}}{f_i} \quad (7-20)$$

式中

ξ

—脉动增大系数，其值按表7-6确定；

v_i

—第 i 段的脉动影响系数，由表7-7确定；

ϕ_{zi}

—第 i 段的振型系数，由表7-8查得。

f. 塔设备迎风面的有效直径 D_{ei}

塔设备迎风面有效直径 D_{ei} ：该段所有受风构件迎风面宽度总和。

当笼式扶梯与塔顶管线布置成 180° 时

$$D_{ei} = D_{oi} + 2\delta_{si} + K_3 + K_4 + d_0 + 2\delta_{pi} \quad (7-21)$$

当笼式扶梯与塔顶管线布置成 90° 时，

D_{ei} 取下列两式中的较大值。

$$D_{ei} = D_{oi} + 2\delta_{si} + K_3 + K_4$$

$$D_{ei} = D_{oi} + 2\delta_{si} + K_4 + d_0 + 2\delta_{pi}$$

(7-22)

式中 D_{oi} —塔设备各计算段的外径, m ;

δ_{si} —塔设备各计算段保温层的厚度, m ;

d_0 —塔顶管线外径, m ;

δ_{pi} —管线保温层的厚度, m ;

K_3 —笼式扶梯的当量宽度, 当无确定数据时, 可取

$$K_3 = 0.40 \text{ } m;$$

K_4 —操作平台的当量宽度, m ;

$$K_4 = \frac{2 \sum A}{h_0}$$

$\sum A$ —第 i 段内操作平台构件的投影面积(不计空挡的投影面积), m^2 ;

h_0 —操作平台所在计算段的高度, m 。

4. 风弯矩计算

将塔设备沿高度分为若干段，则水平风力在任意截面处的风弯矩为（图7-74所示），

$$M_W^{I-I} = p_i \frac{l_i}{2} + p_{i+1} \left(l_i + \frac{l_{i+1}}{2} \right) + p_{i+2} \left(l_i + l_{i+1} + \frac{l_{i+2}}{2} \right)$$

$$+ \dots + p_n \left(l_i + l_{i+1} + l_{i+2} + \dots + \frac{l_n}{2} \right)$$

(7-23)

四、地震载荷

地震发生时，地面运动是一种复杂的空间运动，可分解为三个平动分量和三个转动分量。

鉴于转动分量的实例数据很少，地震载荷计算时一般不予考虑。

地面水平方向（横向）的运动会使设备产生水平方向的振动，危害较大。

垂直方向（纵向）的危害较横向振动要小，只有当地震烈度为8度或9度地区的塔设备才考虑纵向振动的影响。

(1) 地震力计算

a. 水平地震力:

地震时地面运动对于设备的作用力。

底部刚性固定在基础上的塔设备，简化成单质点弹性体系，如图7-78所示。地震力即为该设备质量相对于地面运动时的惯性力，为——

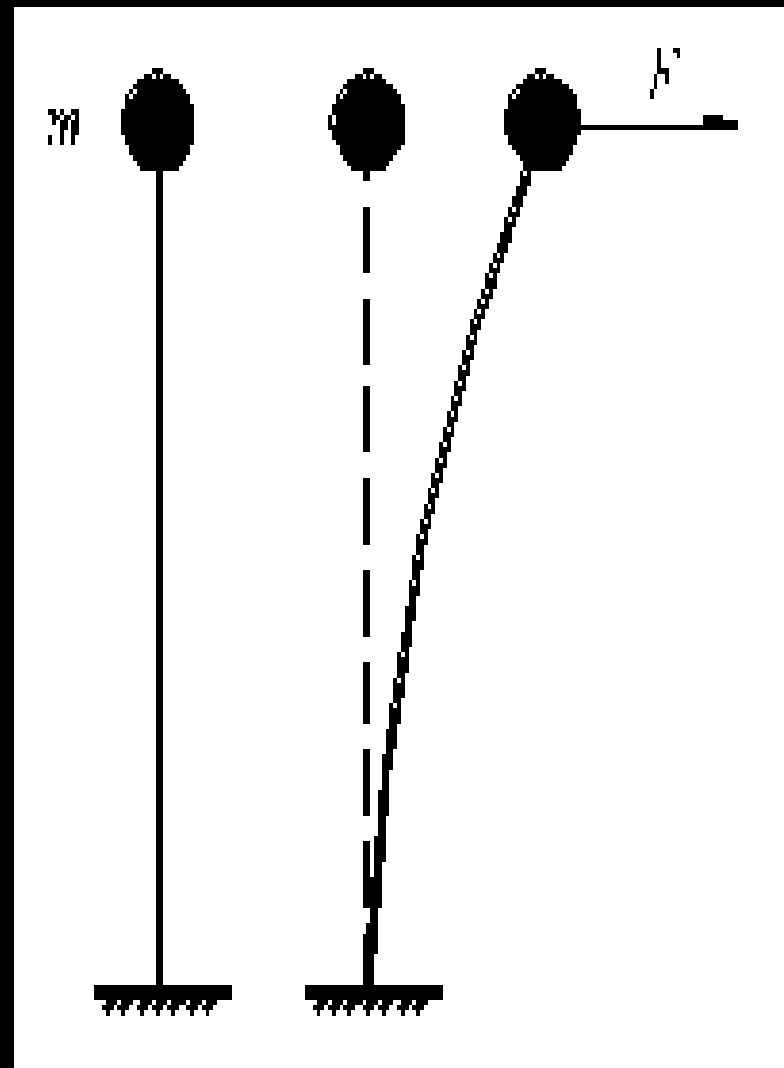


图7-78

单质点体系的地震力

$$F = \alpha m_P g$$

(7-24)

式中

 g —重力加速度， m/s^2 ； m_P —集中于单质点的质量， kg ； α

—地震影响系数，根据场地土特性周期及塔自振周期由图7-79确定。

7.5 塔的强度设计

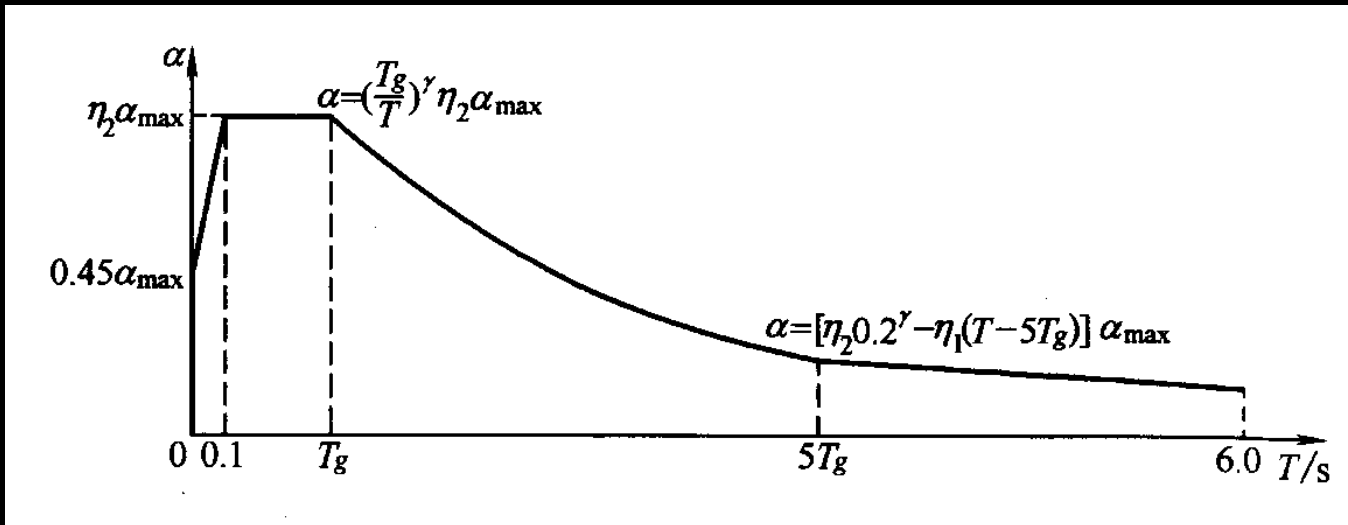


图7-79 地震影响系数 α 值

式中

T_g

——特征周期，按场地土的类型及震区类型，由表7-9确定；

α_{\max}

——地震影响系数的最大值，如表7-10所示。

γ

——衰减指数，根据塔的阻尼比按（7-26）确定；

η_2

——阻尼调整系数，按式（7-27）计算。

η_1

——直线下降段下降斜率的调整系数，按式（7-29）计算。

特性周期 T_g ：规准化的反应谱曲线开始下降点所对应的周期值

远震、近震、地方震

远震震中距大于1000公里；近震震中距在100—1000公里范围内；地方震震中距在100公里以内。 地震的范围

设计地震分组：

这主要是为了反映潜在震源远近的影响。一般而言，潜在震源远，地震时传来的地震波长周期分量比较显著。为了反映这一影响，对各城镇在规定抗震设防烈度、抗震设计地震动加速度值的同时，还给出了设计地震分组。

表7-9 场地土的特性周期 T_g

场地土类型	设计地震分组		
	第一组	第二组	第三组
I ₀	0.20	0.25	0.30
I ₁	0.25	0.30	0.35
II	0.35	0.40	0.45
III	0.45	0.55	0.65
IV	0.65	0.75	0.90

I 类场地土：坚硬场地土， II 类场地土：中硬场地土，
III类场地土：中软场地土， IV类场地土：软弱场地土。

表7-10 地震影响系数 α 的最大值

设防烈度	7	8	9
α_{\max}	0.08 (0.12)	0.16(0.24)	0.32

注：括号中数值分别用于GB50011-2001规定的设计基本加速度为0.15g和0.3g的地区。

例如，1976年唐山地震，震级为7.8级，震中烈度为十一度；受唐山地震的影响，天津市地震烈度为八度，北京市烈度为六度，再远到石家庄、太原等就只有四至五度了。

关于《抗震规范中》设计基本地震加速度与《中国地震动参数区划图》的地震动峰值加速度值的区别？设计基本地震加速度，指的是建设部1992年7月3日颁发的建标【1992】419号《关于统一抗震设计规范地面运动加速度设计取值的通知》规定的加速度值，其规定如下：
设计基本地震加速度值：50年设计基准期超越概率10%的地震加速度设计取值，其中取值 7度0.10g,8度0.20g,9度0.40g

这里的设计基本地震加速度的取值与《中国地震动参数区划图》所规定的"地震动峰值加速度"相当，只是在0.10g和0.20g之间有一个0.15g,0.20g与0.40g之间有一个0.30g的区域，这两个区分别同7度和8度地区相当，而《地震动参数区划图》提供了二类场地上，50年超越概率为10%的地震动参数。

$$\gamma = 0.9 + \frac{0.05 - \xi}{0.5 + \xi}$$

(7-26)

式中 ξ ——塔的阻尼比。

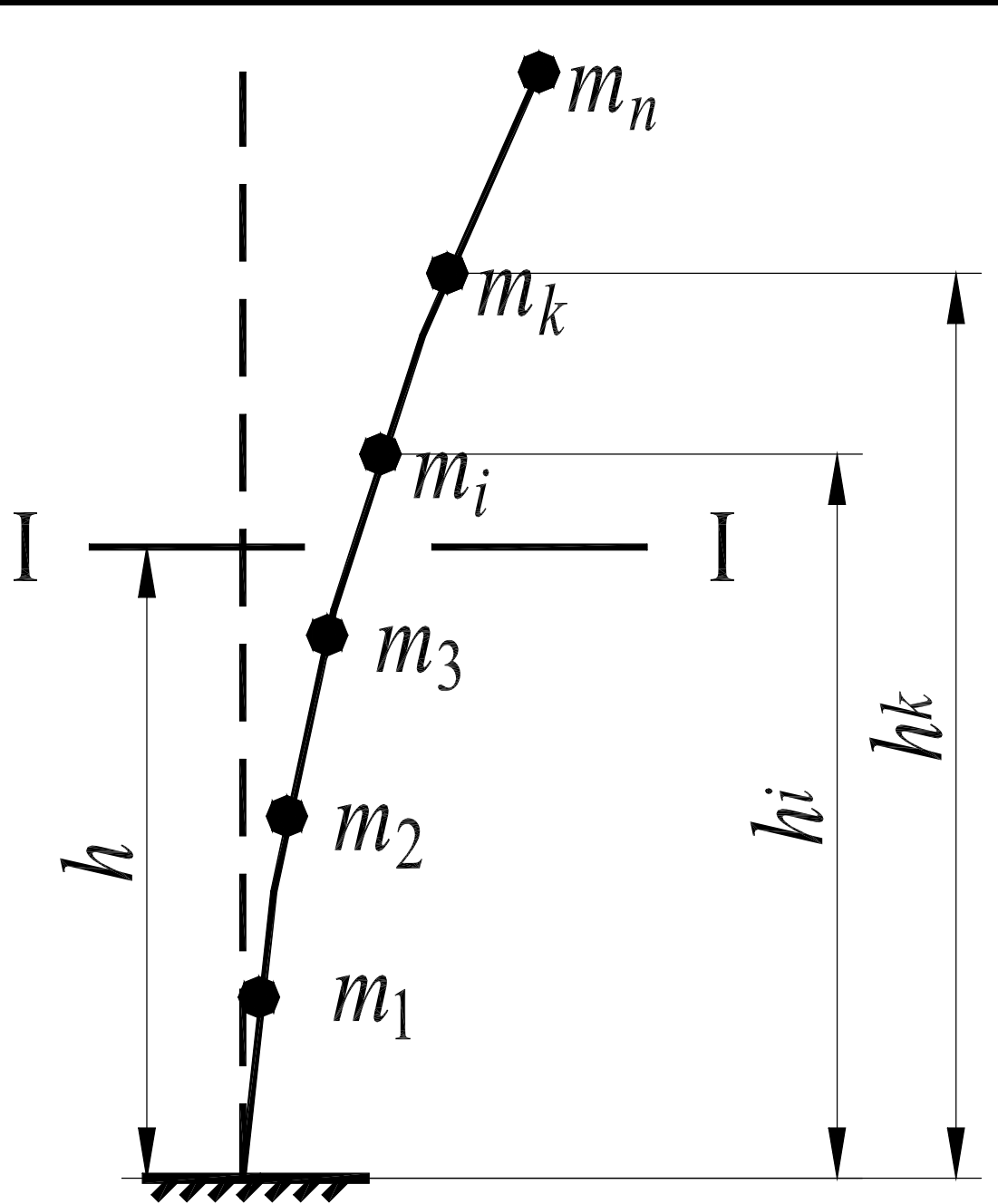
$$\eta_2 = 1 + \frac{0.05 - \xi}{0.08 + 1.6\xi}$$

(7-27)

$$\eta_1 = 0.02 + \frac{0.05 - \xi}{4 + 32\xi}$$

(7-29)

7.5 塔的强度设计



式 (7-24) 中 αg 可以理解为质点的绝对加速度。

实际上，塔设备是一多质点的弹性体系，如图7-80。

图7-80
多质点体系

- ◆ 对于多质点体系，具有多个振型。
- ◆ 根据振型迭加原理，可将多质点体系的计算转换成多个单质点体系相叠加。
- ◆ 对于实际塔设备水平地震力的计算，可在前述单质点体系计算的基础上，为考虑振型对绝对加速度及地震力的影响，引入**振型参考系数**

$$\eta_k = \frac{Y_k \sum_{i=1}^n m_i Y_i}{\sum_{i=1}^n m_i Y_i^2}$$

(7-30)

塔设备的第一振型曲线可以近似为式(7-8))所表示的抛物线。将式(7-8))代入 η_k 的表达式,

可得相应于第一振型的振型参与系数 η_{k1}

$$\eta_{k1} = \frac{h_k^{1.5} \sum_{i=1}^n m_i h_i^{1.5}}{\sum_{i=1}^n m_i h_i^3}$$

$$Y_i \approx Y_a \left(\frac{h_i}{H} \right)^{\frac{3}{2}}$$

(7-31)

因而，第 k 段塔节重心处(k 质点处)产生的相当于第一振型(基本振型)的水平地震力为：

$$F_{k1} = \alpha_1 \eta_{k1} m_k g$$

(7-32)

式中 α_1 一对应于塔器基本固有周期 T_1 的地震影响系数 α 值；

h_k 一第 k 段塔节的集中质量 m_k 离地面的距离， m ；

m_k 一第 k 段塔节的集中质量(见图7-80)， kg ；

7.5 塔的结构设计

b. 垂直地震力

在设防烈度为8度或9度的地区，考虑垂直地震力的作用。

一个多质点体系见图7-81，在地面的垂直运动作用下，塔设备底部截面上的垂直地震力为

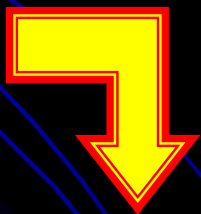
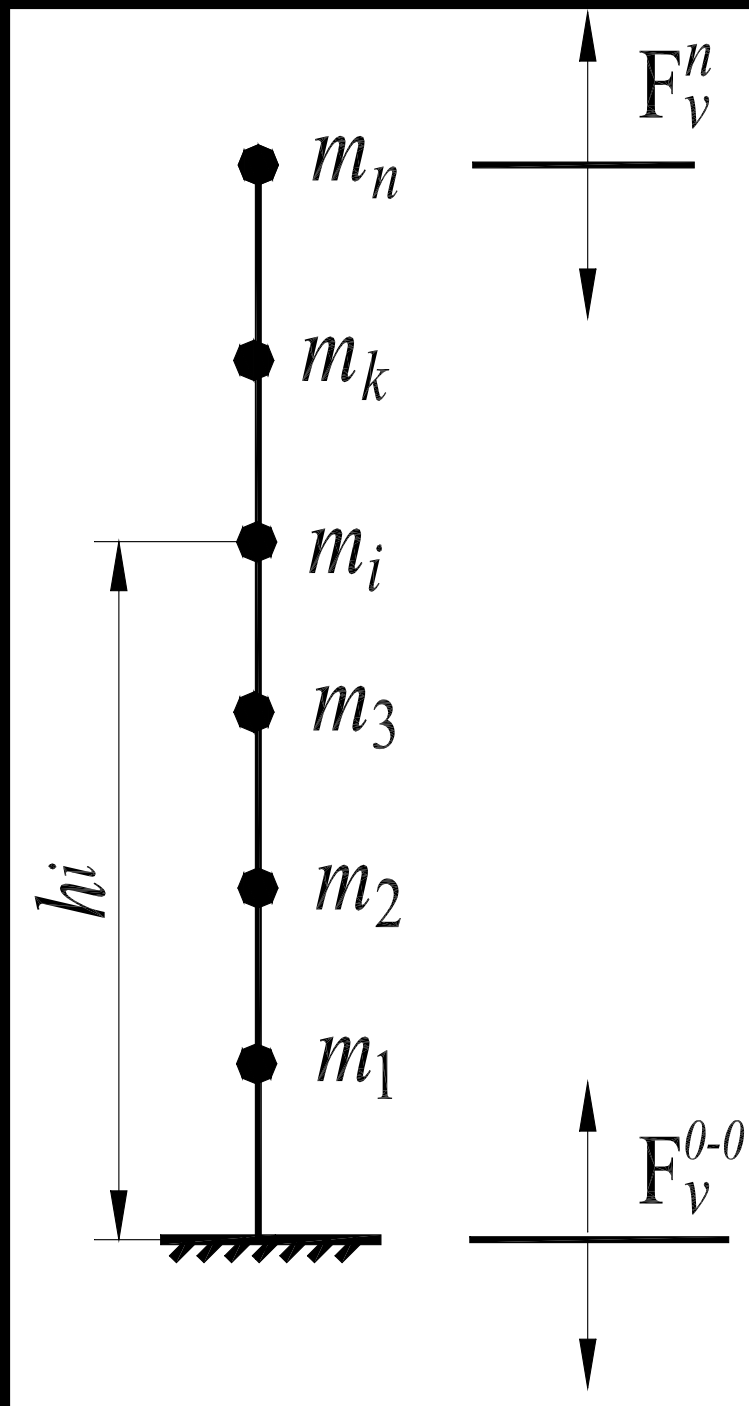


图7-81 多质点体系的垂直地震力



$$F_V^{0-0} = \alpha_{V \max} m_{eq} g \quad (7-33)$$

式中 $\alpha_{V \max}$ —垂直地震影响系数的最大值，取

$$\alpha_{V \max} = 0.65 \alpha_{\max} ;$$

m_{eq} —塔设备的当量质量，取

$$m_{eq} = 0.75 m_0 , \text{ kg} ;$$

m_0 —塔设备操作时的质量，kg。

塔任意质点 i 分配到的垂直地震力为

$$F_V^{i-i} = \frac{m_i h_i}{\sum_{k=1}^n m_k h_k} F_V^{0-0} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

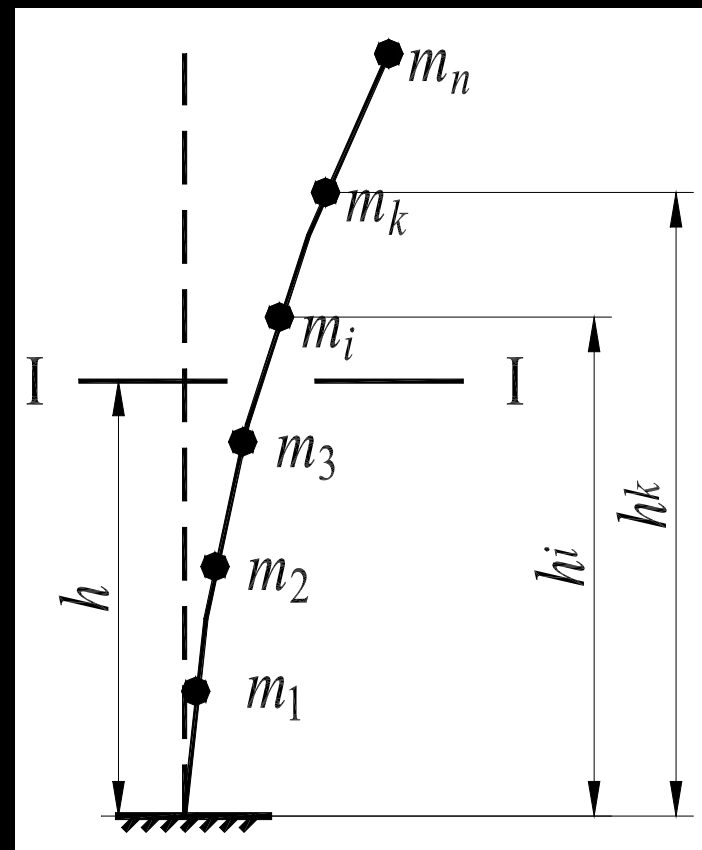
$$F_V^{I-I} = \sum_{k=i}^n F_{Vi} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

(7-34)

(2) 地震弯矩

在水平地震力的作用下，塔设备的任意计算截面I-I处，基本振型的地震弯矩为

$$M_{E1}^{I-I} = \sum_{K=1}^n F_{K1} (h_k - h)$$



式中 M_{E1}^{I-I} —任意截面I-I处基本振型的地震弯矩，N m。

等直径、等壁厚的塔，质量沿塔高是均匀分布的。

如图7-74所示。在距离地面高度为 x 处，取微元 dx ，则质量为 mdx ，其振型参考系数为

$$\eta_{k1} = \frac{h_k^{1.5} \int_0^H mh^{1.5} dh}{\int_0^H mh^3 dh} = 1.6 \frac{h_k^{1.5}}{H^{1.5}}$$

则水平地震力 dF_{k1} 为

$$dF_{k1} = \alpha_1 m_k g \left(1.6 \frac{h_k^{1.5}}{H^{1.5}} \right) = 1.6 \frac{\alpha_1 m g}{H^{1.5}} x^{1.5} dx$$

设任意计算截面I-I距地面的高度为 h (见图7-80)，基本振型在I-I截面处产生的地震弯矩为

$$\begin{aligned} M_{E1}^{I-I} &= \int_h^H (x-h) dF_{k1} = \int_h^H 1.6 \frac{\alpha_1 m g}{H^{1.5}} x^{1.5} (x-h) dx \\ &= \frac{8\alpha_1 m g}{175 H^{1.5}} (10H^{3.5} - 14hH^{2.5} + 4h^{3.5}) \end{aligned}$$

(7-36)

当 $h=0$ 时，即塔设备底部截面0-0处，由基本振型产生的地震弯矩为

$$M_{E1}^{0-0} = \frac{16}{35} \alpha_1 mg H^2 \quad (7-37)$$

以上计算是按塔设备基本振型(第一振型)的结果。

当 $H/D > 15$ 或塔设备高度大于等于20m时，还必须考虑高振型的影响。

这时应根据前三个振型，即第一、二、三振型，分别计算其水平地震力及地震弯矩。然后根据振型组合的方法确定作用于 K 质点处的最大地震力及地震弯矩。

一种简化的近似算法是按第一振型的计算结果估算地震弯矩，即

$$M_E^{I-I} = 1.25 M_{E1}^{I-I}$$

(7-38)

五、最大弯矩

- ◆ 确定最大弯矩时，偏保守地设为风弯矩、地震弯矩和偏心弯矩同时出现，且出现在塔设备的同一方向。
- ◆ 但考虑到最大风速和最高地震级别同时出现的可能性很小，在正常或停工检修时，取计算截面处的最大弯矩为

$$M_{\max} = \begin{cases} M_W + M_e \\ M_E + 0.25M_W + M_e \end{cases}$$

(7-39)

取其中较大值

在水压试验时，由于试验日期可以选择且持续时间较短，
取最大弯矩为

$$M_{\max} = 0.3M_w + M_e$$

7.5.3 筒体的强度及稳定性校核

◆ 根据操作压力(内压或真空)计算塔体厚度之后, 对正常操作、停工检修及压力试验等工况, 分别计算各工况下相应压力、重量和垂直地震力、最大弯矩引起的筒体轴向应力, 再确定最大拉伸应力和最大压缩应力, 并进行强度和稳定性校核。

◆ 如不满足要求, 则须调整塔体厚度, 重新进行应力校核。

一、筒体轴向应力

(1) 内压或外压在筒体中引起的轴向应力 σ_1

$$\sigma_1 = \frac{PD_i}{4\delta_{ei}}$$

(7-40)

式中 — P 设计压力，取绝对值， Pa 。

(2) 重力及垂直地震力在筒壁中产生的轴向压应力 σ_2

$$\sigma_2 = - \frac{9.8m_0^{I-I} \pm F_V^{I-I}}{\pi D_i \delta_{ei}} \quad (7-41)$$

式中 m_0^{I-I} —任意截面I-I以上塔设备承受的质量, kg ;

F_V^{I-I} —垂直地震力, 仅在最大弯矩为地震弯矩参与组合时计入此项, N 。

(3) 最大弯矩在筒体中引起的轴向应力 σ_3

$$\sigma_3^{I-I} = \frac{M_{\max}^{I-I}}{W_I} \quad (7-42)$$

式中 M_{\max}^{I-I} —计算截面I-I处的最大弯矩，由式(7-39)确定， $N \cdot m$ ；

W_I —计算截面I-I处的抗弯截面模量，

$$W_I = \frac{\pi}{4} D_i^2 \delta_{ei}, \quad m^3。$$

二、轴向应力校核条件

- 最大弯矩在筒体中引起的轴向应力沿环向是不断变化的。
- 与沿环向均布的轴向应力相比，这种应力对塔强度或稳定失效的危害要小一些。
- 在塔体应力校核时，对许用拉伸应力和压缩应力引入载荷组合系数 K ，并取 $K=1.2$ 。

(1) 正常操作和停工检修工况:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\text{总的轴向应力}} &= \sigma_1 \text{ 内、外压} + \sigma_2 \text{ 重力、垂直地震力} \\
 &\quad + \sigma_{M_{\max}} \text{ 最大弯矩引起的轴向应力} \\
 &= \frac{PD_i}{4\delta_{ei}} + \left(-\frac{9.8m_0^{I-I} \pm F_V^{I-I}}{\pi D_i \delta_{ei}} \right) + \frac{M_{\max}^{I-I}}{W_I}
 \end{aligned}$$

迎风侧最大拉伸应力: $\sigma_{\text{总的轴向应力}} \leq 1.2 [\sigma]^t \phi$

背风侧最大压缩应力: $\sigma_{\text{总的轴向应力}} \leq \min \begin{cases} 1.2[\sigma]^t \\ 1.2B \end{cases}$

其中B为许用轴向压缩应力。 $[\sigma]^t$ 和B的确定参见本书第4章。

(2) 压力试验工况:

轴向拉伸应力用

$\sigma_{\text{总的轴向应力}} \leq 0.9K\sigma_s\phi$ (液压试验)

$\sigma_{\text{总的轴向应力}} \leq 0.8K\sigma_s\phi$ (气压试验)

其中， σ_s 为筒体材料屈服点。

轴向压缩应力用

$\sigma_{\text{总的轴向应力}} \leq \min \left\{ \begin{array}{l} 0.9K\sigma_s \\ KB \end{array} \right.$

无 ϕ

或按《钢制塔式容器》JB4710—92写为:

轴向拉伸应力校核:

对内压塔:

$$\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma \frac{I-I}{3} M_{\max} \leq 1.2 [\sigma]^t \phi$$

对外压塔:

$$- \sigma_2 + \sigma \frac{I-I}{3} M_{\max} \leq 1.2 [\sigma]^t \phi$$

轴向压缩应力校核:

对内压塔:

$$\sigma_2 + \sigma \frac{I-I}{3} M_{\max} \leq [\sigma]_{cr}$$

对外压塔:

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma \frac{I-I}{3} M_{\max} \leq [\sigma]_{cr}$$

7.5.4 裙座的强度及稳定校核

一、裙座筒体

受到重量和各种弯矩的作用，但不承受压力。

危险截面：

裙座底部截面，重量和弯矩在裙座底部截面处最大。

裙座上的检查孔或人孔、管线引出孔的孔中心所在横截面处。

应力校核:

只校核危险截面的最大轴向**压缩**应力。

因为裙座筒体不受容器内压力作用，
轴向组合拉伸应力总是小于轴向组合
压缩应力。

二、裙座基础环

裙座基础环的结构如图7-79及7-80所示，分为无筋板的结构及有筋板的结构两类。基础环的内、外直径可按式选取

$$D_{ob} = D_{is} + (0.16 \sim 0.40)m \quad (7-43)$$

$$D_{ib} = D_{is} - (0.16 \sim 0.40)m \quad (7-44)$$

7.5 塔的强度设计

(1) 基础环应力分布

基础环上受到的力：

- 塔设备的重量，
- 风载荷、地震载荷及偏心载荷引起的弯矩通过裙座筒体作用在基础环上的力。

基础环上的应力：

在基础环与混凝土基础接触面上，重量引起均布压缩应力，弯曲引起弯曲应力，压缩应力始终大于拉伸应力，最大压缩应力为 σ_{\max} ，应力分布如图7-84所示。基础环板应有足够厚度来承受这种应力。

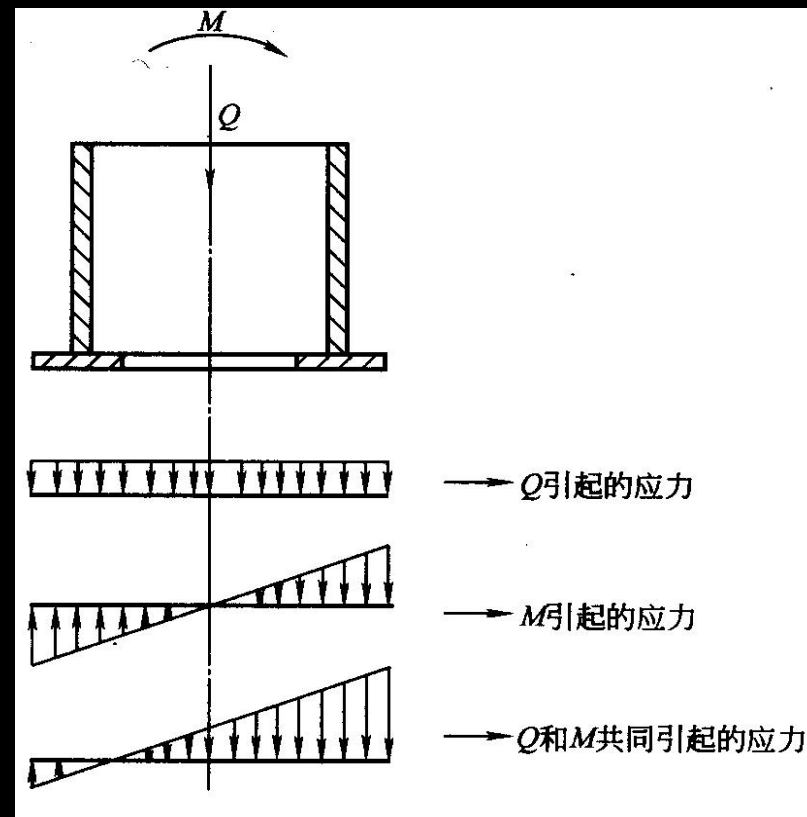


图7-84 基础环的应力

(2) 基础环厚度

a. 无筋板基础环

假想把基础环沿圆周方向拉直，当作受到均布载荷作用的悬臂梁，梁的长度等于 b ，如图7-82所示。设拉直后梁的宽度为 L ，则梁所受的最大弯矩为

$$M = \frac{1}{2} b^2 L \sigma_{b \max}$$

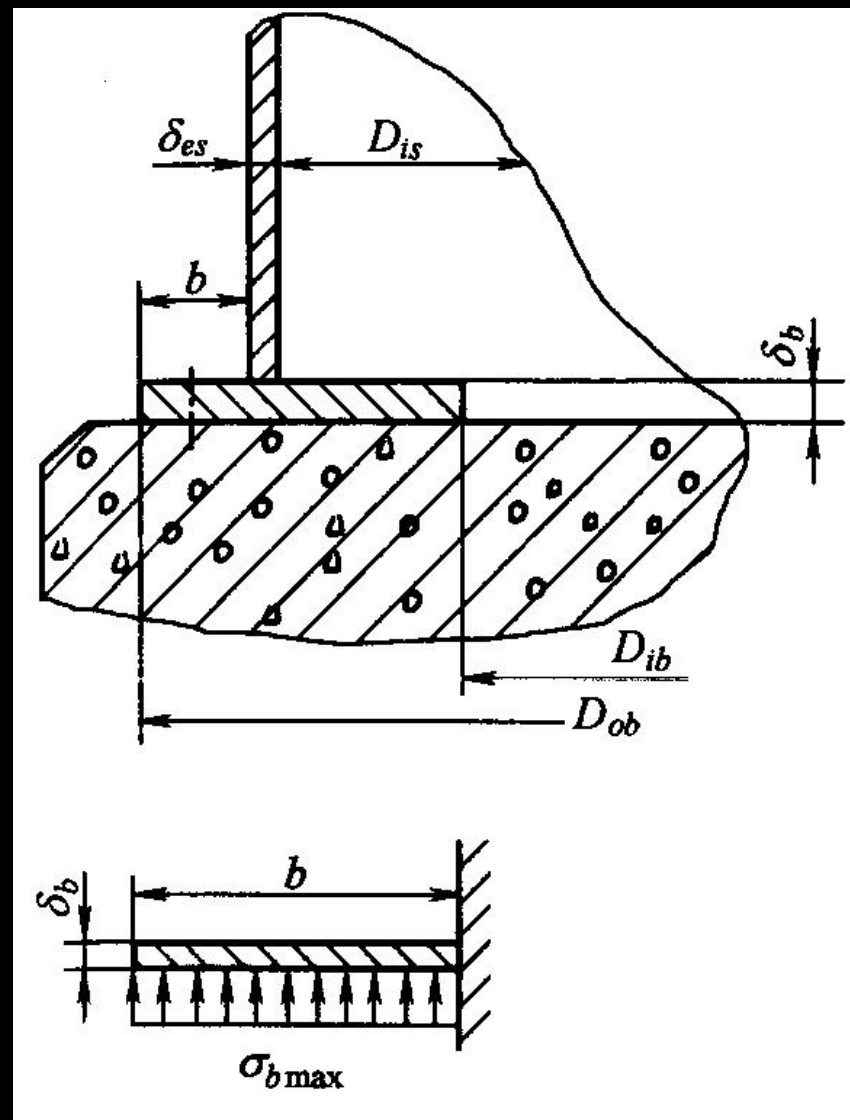


图7-82

无筋板的基础环

由弯矩引起的最大弯应力位于梁根部的上下表面，其值应小于基础环材料的许用应力 $[\sigma]_b$ ，即

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} = \frac{6M}{L\delta_b^2} \leq [\sigma]_b$$

因此，基础环所需的厚度 δ_b 为

$$\delta_b = 1.73b \sqrt{\frac{\sigma_{b \max}}{[\sigma]_b}}$$

(7-45)

7.5 塔的强度设计

b. 有筋板基础环

两相邻筋板之间的基础环板可近似为受均布载荷的矩形板($b \times l$)

有筋板的两侧边(边长为 b)视为简支, 与裙座筒体连接的边缘(边长视为 l)作为固支, 基础环的外边缘(长度视为 l)作为自由边。

根据平板理论, 可以计算板中的最大弯矩, 此时, 基础环的厚度为

$$\delta_b = \sqrt{\frac{bM_s}{[\sigma]_b}}$$

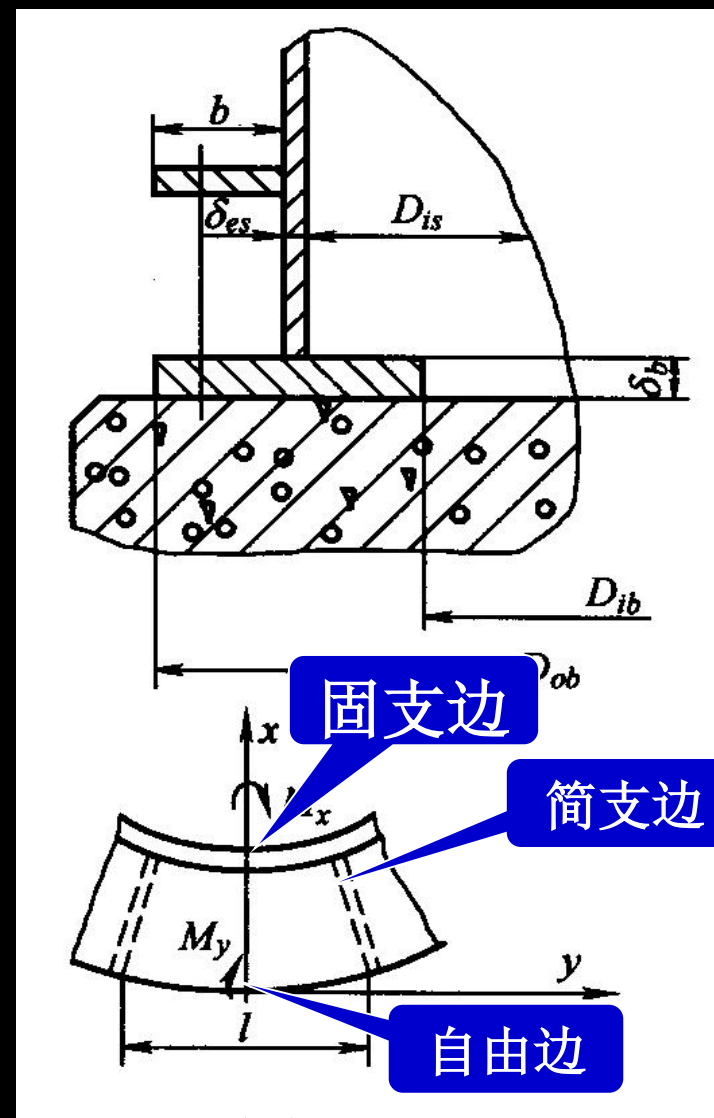


图7-83

有筋板的基础环

三、地脚螺栓

作用

使高的塔设备固定在混凝土基础上，以防风弯矩或地震弯矩等使其发生倾倒。

(1) 如图7-84所示，在重量和弯矩作用下，如果迎风侧地脚螺栓承受的应力 $\sigma_B < 0$ ，则表示塔设备自身稳定而不会倾倒，原则上可不设地脚螺栓，但是为了固定设备的位置，还应设置一定数量的地脚螺栓；

(2) 如果 $\sigma_B > 0$ 则必须安装地脚螺栓并进行计算。

四、裙座与塔体连接焊缝

裙座直接焊接在塔体的底部封头上。

焊缝形式

搭接焊缝

搭接焊缝是裙座焊在壳体外侧的结构。

焊缝承受由设备重量及弯矩产生的切应力。这种结构受力情况较差，但安装方便，可用于小型塔设备。

对接焊缝

对接焊缝主要校核在弯矩及重力作用下迎风侧焊缝的拉应力。

思考题

1. 试分析塔在正常操作、停工检修和压力试验等三种工况下的载荷？
2. 简述塔设备设计的基本步骤。
3. 塔设备设计中，哪些危险截面需要校核轴向强度和稳定性？