



第13章 动荷载



主要内容

- 动荷载的概念
- 构件作匀加速运动时的应力和变形计算
- 构件受冲击荷载时的应力和变形
- 提高构件抗冲击能力的措施

• 静荷载

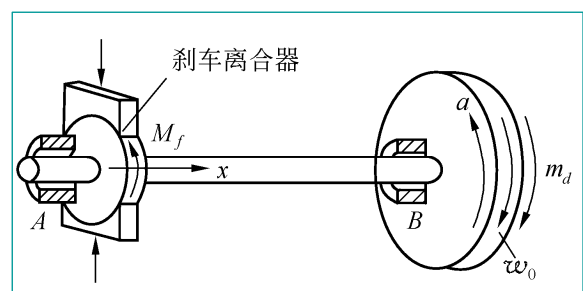
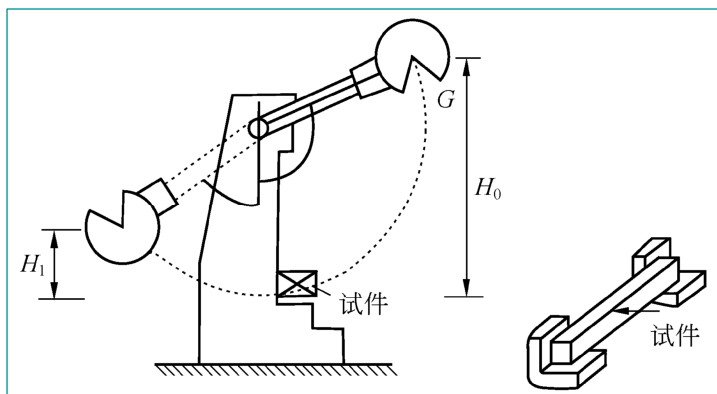
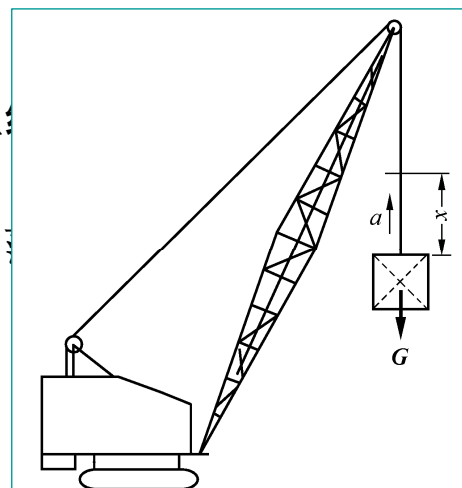
- 数值从零平缓增加至最终值后不再变化的荷载。
- 在静荷载作用下，构件各质点的加速度很小，可以忽略不计。

• 动荷载

- 作加速运动或转动的系统中构件的惯性力，以及随时间作明显变化的荷载。
- 动荷载作用下构件的应力和变形分别称为**动应力**和**动变形**。
- 动荷载实验表明，在静荷载下服从胡克定律的材料，在动荷载下依然服从胡克定律，前提是动应力不超过比例极限，且弹性模量也与静荷载下的数值相同。

• 动荷载实例

- 起重机匀加速起吊重物时的钢丝绳
- 高速旋转的飞轮
- 冲击实验中重锤从一定高度自由落下的重锤
- 因工作条件引起振动的构件
- 受波浪冲击力作用的堤岸



主要内容

- 动荷载的概念
- 构件作匀加速运动时的应力和变形计算
- 构件受冲击荷载时的应力和变形
- 提高构件抗冲击能力的措施

- 当运动物体（冲击物）以一定的速度作用于静止物体（被冲击物）时，物体的速度将在非常短暂的时间里急剧降低，这种现象称为**冲击**。
- 例如落锤打桩，用铆枪铆接，高速转动的飞轮或砂轮等的突然刹车等。
- 冲击物与被冲击物之间的相互作用力称为**冲击荷载**。
- 计算构件受冲击荷载时的应力和变形采用**能量法**。
- 冲击问题的特点是结构受外力作用的时间极短，加速度变化剧烈，难以精确计算某一瞬间结构所受的冲击荷载，工程上使用机械能守恒定律，得出近似计算冲击时构件内最大应力和最大变形的简化计算公式。

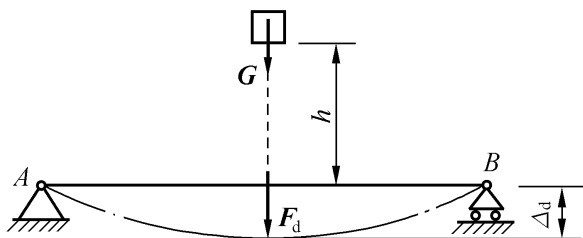
• 冲击问题的基本假设

- 冲击物为刚体，即其变形（或应变能）可忽略不计。
- 被冲击物为弹性体，在冲击过程中，材料始终处于线弹性范围，满足胡克定律，且冲击荷载与变形间的比值与静荷载时数值相同；
- 被冲击物的质量远小于冲击物的质量，可忽略不计；
- 冲击过程中，不考虑热能、光能、电能、摩擦等的损耗，可应用机械能守恒定律；
- 冲击物与被冲击物一经接触即附在一起运动，不发生回弹，直到被冲击物变形到最大时，二者速度均降为零。

✓ 冲击物在冲击过程中所减少的动能和势能之和将全部转化为被冲击物的弹性应变能。

• 自由落体冲击

简支梁受自由落体冲击，分析梁内最大的动应力和动变形。



冲击物所减少的势能

$$V = G(h + \Delta_d)$$

冲击物动能的变化 $T = 0$

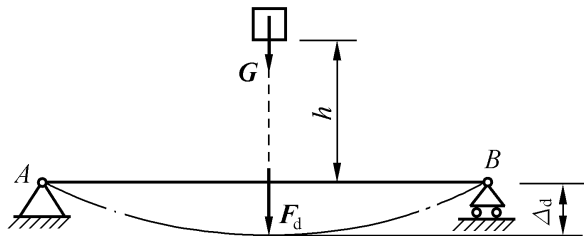
被冲击物所增加的应变能

$$V_\varepsilon = W = \frac{1}{2} F_d \Delta_d$$

$$T + V = V_\varepsilon$$



$$G(h + \Delta_d) = \frac{1}{2} F_d \Delta_d$$



静荷载: G 动荷载: F_d
 静变形: Δ_{st} 动变形: Δ_d
 静应力: σ_{st} 动应力: σ_d

$$\frac{F_d}{G} = \frac{\Delta_d}{\Delta_{st}} = \frac{\sigma_d}{\sigma_{st}} \quad \frac{F_d}{\Delta_d} = \frac{G}{\Delta_{st}} \quad \Rightarrow \quad F_d^2 \Delta_{st} - 2G \Delta_{st} F_d - 2G^2 h = 0$$

$$\Rightarrow F_d = G \pm G \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{st}}} = \left[1 \pm \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{st}}} \right] G \quad F_d = \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{st}}} \right] G$$

冲击动荷系数

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{st}}}$$



$$F_d = K_d G$$

$$\sigma_d = K_d \sigma_{st}$$

$$\Delta_d = K_d \Delta_{st}$$

突加荷载: $h = 0$ $K_d = 2$

冲击物从 h 高度落下, 以速度 v 开始冲击

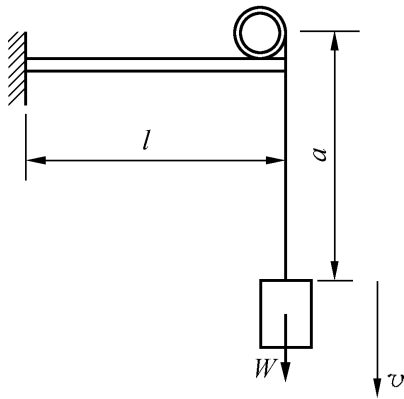
$$v = \sqrt{2gh} \quad h = \frac{v^2}{2g}$$

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{v^2}{g\Delta_{st}}}$$

构件受自由落体冲击时的强度条件

$$\sigma_{d \max} = K_d \sigma_{st \max} \leq [\sigma]$$

- 例13-5 钢制悬臂梁，在自由端安装一吊车，重量为W的物体以匀速v下落，钢丝绳长为a时吊车突然刹车，试求钢丝绳中动应力。已知梁EI，钢丝绳长l，截面积A，弹性模量E。



解：将钢丝绳和梁看成一个弹性系统

(1) 制动前系统的能量

$$T_1 = \frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2 \quad V_1 = 0$$

$$V_{\varepsilon 1} = \frac{1}{2} W \Delta_{st}$$

(2) 制动后系统的能量

$$T_2 = 0 \quad V_2 = -W(\Delta_d - \Delta_{st})$$

(3) 能量守恒

$$\frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2 + W(\Delta_d - \Delta_{st}) = \frac{1}{2} F_d \Delta_d - \frac{1}{2} W \Delta_{st} \quad V_{\varepsilon 2} = \frac{1}{2} F_d \Delta_d$$

求动荷系数

$$\frac{F_d}{W} = \frac{\Delta_d}{\Delta_{st}}$$

$$\Delta_d^2 - 2\Delta_{st}\Delta_d + \Delta_{st}^2 - \frac{v^2}{g}\Delta_{st} = 0$$

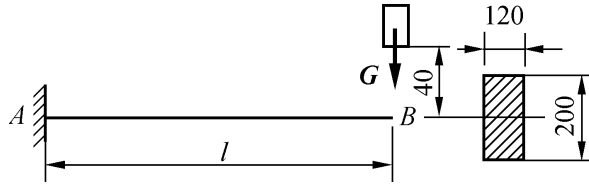
$$\Delta_d = \Delta_{st} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{v^2}{g\Delta_{st}}} \right) = K_d \Delta_{st}$$

$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{v^2}{g\Delta_{st}}} \quad \Delta_{st} = \frac{Wa}{EA} + \frac{Wl^3}{3EI}$$

(4) 钢丝绳中动应力

$$\sigma_d = K_d \sigma_{st} = \frac{W}{A} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{v^2}{g \left(\frac{Wa}{EA} + \frac{Wl^3}{3EI} \right)}} \right]$$

- 例13-6 悬臂梁，在自由端B上方有一重物自由落下，撞击到梁上。已知梁材料为木材，弹性模量 $E=10\text{GPa}$ ，梁长 $l=2\text{m}$ ，截面为 $120\text{mm}\times 200\text{mm}$ 的矩形；重物高度 $h=40\text{mm}$ ，重量 $G=1\text{kN}$ 。求梁所受的冲击荷载 F_d 和最大冲击应力 σ_d 。



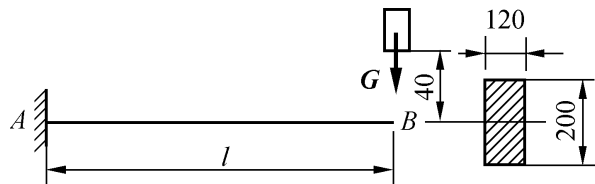
解： (1) 确定梁横截面上最大静应力

$$\sigma_{st\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} = \frac{Gl}{bh^2/6} = 2.5\text{MPa}$$

(2) 查挠度表求梁B截面的最大静挠度

$$w_{st\max} = \frac{Gl^3}{3EI} = \frac{Gl^3}{3E \cdot bh^3/12} = \frac{10}{3}\text{mm}$$

(3) 求动荷系数



$$K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{st}}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{w_{st\max}}} = 6$$

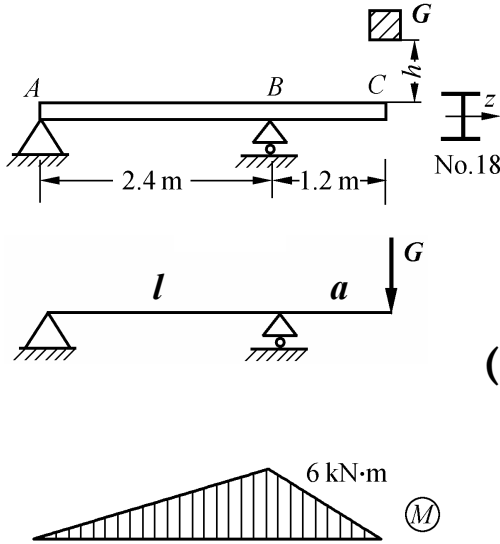
(4) 求最大冲击荷载及冲击应力

冲击荷载 $F_d = K_d G = 6\text{kN}$

最大冲击应力

$$\sigma_d = K_d \sigma_{st\max} = 15\text{MPa}$$

- 例13-7 重物 $G=5\text{kN}$ 自高度 $h=15\text{mm}$ 处自由落下冲击外伸梁。梁为No. 18工字钢，弹性模量 $E=200\text{GPa}$ ，许用应力 $[\sigma]=110\text{MPa}$ 。(1)校核梁的强度；(2)在支座B处安装一橡胶垫，其在 1kN 荷载作用下缩短 0.5mm ，求重物的许可下落高度。



✓ 解：校核梁的强度

(1) 梁横截面上最大静应力

查表 $W_z = 185\text{cm}^3$

$$\sigma_{st\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} = 32.4\text{MPa}$$

(2) 梁C截面的静位移 $I_z = 1660\text{cm}^4$

$$\Delta_{st} = \frac{Ga^2(a+l)}{3EI} = 2.6\text{mm}$$

(3) 动荷系数 $K_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta_{st}}} = 4.54$

(4) 校核梁的强度

最大冲击应力 $\sigma_{d\max} = K_d \sigma_{st\max} = 147.2\text{MPa} > [\sigma] = 110\text{MPa}$

→ 梁的抗冲击能力不够

✓ 安装橡胶垫，求重物的许可下落高度。

梁C截面的静位移

$$\Delta'_{st} = \Delta_{st} + \Delta = 2.6 + 5 \cdot 0.5 \cdot \left(\frac{3.6}{2.4}\right)^2 = 8.23\text{mm}$$

强度条件 $\sigma'_{d\max} = K'_d \sigma_{st\max} \leq [\sigma] \quad K'_d \leq \frac{[\sigma]}{\sigma_{st\max}} = 3.4$

$$K'_d = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta'_{st}}} \leq 3.4 \quad \rightarrow \quad h \leq 19.6\text{mm}$$

重物的许可下落高度 $[h] = 19.6\text{mm}$

