

液压传动习题解答

田永泰 齐英杰 编著

东北林业大学

一九八六年五月

目 录

第一章 液压流体力学基础	(1)
第一节 液压油	(11)
第二节 静止液体力学	(17)
第三节 流动液体力学	(25)
第四节 液体流动中的能量损失	(32)
第五节 液体在小孔和缝隙中的流动	(43)
第六节 液压冲击	(44)
第二章 液压泵、液压马达与液压缸	(45)
第一节 液压泵和液压马达	(59)
第二节 液压缸	(71)
第三章 辅助装置	(72)
第一节 油管和油箱	(75)
第二节 蓄能器	(82)
第四章 控制阀与基本回路	(82)
第一节 方向控制阀及其基本回路	(90)
第二节 压力控制阀及其基本回路	(110)
第三节 速度控制回路	(111)
一、节流调速回路	(143)
二、容积调速回路	(156)
三、容积节流调速回路	(160)
第四节 基本回路的组成、计算、分析	(184)
第五章 液压系统的设计计算	(200)
附表 参考文献	(201)
主要使用符号表	(202)
工程单位制的名称、代号和国际单位制的换算表	(206)

第一章 液压流体力学基础

基本公式复习

一、液体的密度、重度和比重

1. 密度 ρ

流体在某一点的密度

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$$

式中: Δm ——流体微团的质量;

ΔV ——流体微团的体积。

对均质流体, 设体积 V 中的质量为 m , 则流体的密度

$$\rho = m/V$$

2. 重度 γ

将上式中质量换成重量 ΔG 及 G , 则可得流体的重度

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV}$$

对均质液体

$$\gamma = G/V$$

根据力学第二定律: $G = mg$

故

$$\gamma = G/V = mg/V = \rho g$$

3. 比重 δ

$$\delta = \frac{\text{一定体积某种均质流体的重量}}{1 \text{ 标准大气压下 } 4^{\circ}\text{C 时同体积蒸馏水的重量}}$$

二、液体的粘度

1. 绝对粘度 μ

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy}$$

式中: τ ——接触液层间单位面积上的内摩擦力;
 du/dy ——速度梯度, 即液层相对速度对液层距离的变化率。

2. 运动粘度 V

$$V = \mu/\rho$$

式中: μ ——绝对粘度;
 ρ ——密度。

3. 相对粘度

相对粘度是使用特定的粘度计, 在规定条件下可以直接测量的粘度。

用恩氏粘度计测量的恩氏粘度

$$^{\circ}E_t = t_1/t_2$$

式中: t_1 ——200cm³ 的被试液体在温度 t 下流尽的时间 s ;
 t_2 ——200cm³ 的蒸馏水在温度 20°C 时, 流尽的时间 s , t_2 的平均值是 51s。

恩氏粘度与运动粘度的换算关系:

$$V = (7.31^{\circ}E - 6.31/^{\circ}E) \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

三、流体的压缩率和体积弹性系数

1. 压缩率 β

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p}$$

式中: ΔV ——液体被压缩后体积的变化值;

V ——液体被压缩前的体积;

Δp ——液体压力的变化值。

2. 液体的体积弹性系数 K

$$K = \frac{1}{\beta} = -\Delta p \frac{V}{\Delta V}$$

四、重力作用下静止液体的压力分布规律

$$p = p_0 + \gamma h$$

式中: p ——离液面深度 h 处液体的压力;

p_0 ——液面上的压力;

γ ——液体的重度。

五、静止液体内部压力的传递

当液体静止, 且略去质量力的影响时, 液体中各点的压力相同。且都等于边界面上的压力, 即:

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

六、连续方程

$$V_1 A_1 = V_2 A_2$$

式中: V_1 、 A_1 、 V_2 、 A_2 分别为所取 1、2 断面的平均流速和断面积。

七、伯努利方程

1. 理想液体恒定流动的伯努利方程

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

2. 实际液体流束的伯努利方程

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f$$

八、动量方程

$$F = \rho Q (\beta_2 v_2 \cos \theta_2 - \beta_1 v_1 \cos \theta_1)$$

九、雷诺数

$$R_e = vd/\nu$$

式中: v ——液体在导管截面中的平均速度;

d ——导管内径;

ν ——油液的运动粘度。

十、直管中的能量损失

1. 层流状态下的能量损失

$$\Delta p = \frac{128 \mu l Q}{\pi d^4} = \frac{32 \mu l V}{d^2}$$

或

$$H = \frac{32 \nu V l}{d^2 g}$$

2. 紊流状态下的能量损失

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g} \gamma$$

十一、局部能量损失

$$\Delta p = \zeta \frac{v^2}{2g} \gamma \quad H = \zeta \frac{v^2}{2g}$$

十二、孔口流量

1. 薄壁小孔

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta p}$$

2 细长小孔

$$Q = \frac{\pi d^4 \Delta p}{128 \mu l}$$

十三、缝隙流量

1. 平行平板缝隙

$$Q = \frac{b \delta^3}{12 \mu l} \Delta p \pm \frac{b \delta}{2} v$$

2. 同心环形缝隙

$$Q = \frac{\pi d \delta^3}{12 \mu l} \Delta p$$

或

$$Q = \frac{1.54 d \delta^3 \Delta p}{\gamma v l} \times 10^3 \text{ l/min}$$

有相对速度 v' 时

$$Q = \left(\frac{1.54 \delta^3 \Delta p}{\gamma v l} \times 10^3 \pm \frac{9.42 v' \delta}{100} \right) d \text{ l/min}$$

3. 偏心环形缝隙

$$Q = \frac{\pi d \delta^3}{12 \mu l} \Delta p (1 + 1.5 \varepsilon^2) l / \text{min}$$

或
$$Q = \frac{1.54 d \delta^3 \Delta p}{\gamma \nu l} \times 10^3 (1 + 1.5 \varepsilon^2) l / \text{min}$$

十四、液压冲击压力

$$\Delta p = p \nu \frac{\sqrt{\frac{E_s}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{D E_s}{E \delta}}}$$

式中： ρ ——液体密度，

ν ——液流的速度，

E_s ——液体体积弹性系数，

D ——管子内径，

δ ——管壁的厚度，

E ——管壁材料的弹性模量。

习 题

第一节 液 压 油

题1. 在一个体积为 2 立方米的油箱内，盛有 1.8 吨重的液压油，求液压油的重度 r 、密度 ρ 和比重 δ 。

解
$$r = \frac{G}{V} = \frac{1.8 \times 10^3 \text{ kgf}}{2 \text{ m}^3} = 900 \text{ kgf/m}^3$$

$$=900 \times 9.8 \text{ N/m}^3 = 8820 \text{ N/m}^3$$

$$\rho = \frac{r}{g} = \frac{900 \text{ kg} \times g}{g \text{ m}^3} = 900 \text{ kg/m}^3$$

$$\delta = \frac{r_{\text{油}}}{r_{\text{水}}} = \frac{900 \text{ kgf/m}^3}{1000 \text{ kgf/m}^3} = 0.9$$

题2. 有重度 $r=850 \text{ kgf/m}^3$ 的油 18l, 求其重量 G 和质量 M 。

$$\text{解 } \because \quad r = G/V$$

$$\begin{aligned} \therefore G &= rV = 850 \text{ kgf/m}^3 \times 18 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \\ &= 15.3 \text{ kgf} = 149.9 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\because \quad G = Mg$$

$$\therefore M = G/g = 15.3 \text{ kg} \times g/g = 15.3 \text{ kg}$$

题3. 有 200 cm^3 的液压油, 在 50°C 时流过恩氏粘度计的时间 $t_1=153\text{s}$, 而 200 cm^3 的蒸馏水在 20°C 流过的时间 $t_2=51\text{s}$, 求该油的恩氏粘度 $^\circ\text{E}$, 运动粘度 V 、动力粘度 μ 各为多少? 在 20°C 的运动粘度 V 是多少?

$$\text{解 (1)} \quad {}^\circ\text{E} = \frac{t_1}{t_2} = \frac{153}{51} = 3$$

$$V = 7.31 {}^\circ\text{E} - \frac{6.31}{{}^\circ\text{E}} = 7.31 \times 3 - \frac{6.31}{3} = 19.83 \text{ cst}$$

$$\mu = \rho V = 0.9 \text{ g/cm}^3 \times 19.83 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$= 0.9 \times 19.83 \times 10^{-2} \times \frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{s}^2} \frac{\text{s}}{\text{cm}^2}$$

$$= 17.85 \times 10^{-2} \text{ dyns/cm}^2$$

$$=17.85 \times 10^{-2} \text{p} = 17.85 \text{cp}$$

$$=17.85 \times 10^{-2} \times 10^{-5} \text{N} \cdot \text{s} / 10^{-4} \text{m}^2$$

$$=1.785 \times 10^{-2} \text{p}_a \cdot \text{s}$$

(2) 20℃时的运动粘度

$$\nu_{20} = \nu_{50} \left(\frac{50}{t} \right)^n \quad \text{查表 } n=1.99$$

$$\nu_{20} = 19.83 \left(\frac{50}{20} \right)^{1.99} = 123 \text{cst}$$

题4. 设柱塞和油缸处于同心状态, 油缸固定, 柱塞运动。柱塞直径 $d=80\text{mm}$, 长 $l=40\text{mm}$, 缸与柱塞径向间隙 $\delta=0.05\text{mm}$, 柱塞匀速运动速度 $v=30\text{mm/s}$, 油粘度 $^{\circ}\text{E}=3$ 。现工作温度为 60°C , 求拉动柱塞所需的力 (只考虑克服液体的粘性所需的力)。

解 $\because \quad ^{\circ}\text{E}=3$

$$\therefore \quad v = 7.31 ^{\circ}\text{E} - \frac{6.31}{^{\circ}\text{E}}$$

$$= 7.31 \times 3 - \frac{6.31}{3} = 19.83 \text{cst}$$

60℃时的运动粘度

$$\nu_{60} = \nu_{50} \left(\frac{50}{t} \right)^n \quad \text{查表 } n=1.99$$

$$\nu_{60} = 19.83 \times \left(\frac{50}{60} \right)^{1.99} = 13.8 \text{cst}$$

60℃时的动力粘度

$$\mu = \nu \rho = 13.8 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{s} \times 0.9 \text{g}/\text{cm}^3$$

$$=13.8 \times 0.9 \times 10^{-2} \frac{\text{g} \cdot \text{cm}}{\text{s}^2} \frac{\text{s}}{\text{cm}^2} = 12.4 \times 10^{-2} p$$

拉动柱塞所需力

$$F = \mu A \frac{dv}{dy} = \mu \pi d l \frac{v}{\delta}$$

$$= 12.4 \times 10^{-2} \times 10^{-5} N \frac{\text{s}}{\text{cm}^2} \times \pi \times 8 \text{cm} \times 4 \text{cm} \times \frac{3 \text{cm/s}}{0.005 \text{cm}}$$

$$= 7.5 \times 10^{-2} N$$

题 5. 密闭容器内的油, 压力为 5kgf/cm^2 时容积是 $2L$ 。求压力升高到 50kgf/cm^2 时的容积 V_1 , 其压缩率是多少 (用%表示)? 取 $\beta = 6 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{kgf}$ 。

解 由 $\beta = \frac{1}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta V}{V}$

得 $\Delta V = \beta \Delta p V$

式中: $\Delta p = 50 - 5 = 45 \text{kgf/cm}^2$,

$$V = 2l = 2000 \text{cm}^3,$$

$$\therefore \Delta V = 6 \times 10^{-6} \times 45 \times 2000 = 5.4 \text{cm}^3$$

$$V_1 = V - \Delta V = 2000 - 5.4 = 1994.6 \text{cm}^3$$

压缩率

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{5.4}{2000} = 0.27\%$$

题 6. 试从压缩率 $\beta = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dv}{dp}$ 的表达式证明

$$\rho_v = \frac{p_s}{1 - \beta(p - p_s)}$$

式中: ρ_p ——压力为 p 时的密度;
 ρ_0 ——压力为 p_0 时的密度。

证明 $\because \rho_p = M/V_p, M = \rho_0 V_0, V_p = V_0 + dV,$
 $dV = -\beta V_0 dp, dp = p - p_0,$

$$\begin{aligned}\therefore \rho_p &= \frac{M}{V_p} = \frac{\rho_0 V_0}{V_0 + dV} = \frac{\rho_0 V_0}{V_0 + [-\beta V_0 (p - p_0)]} \\ &= \frac{\rho_0 V_0}{V_0 [1 - \beta (p - p_0)]} = \frac{\rho_0}{1 - \beta (p - p_0)}\end{aligned}$$

或者采用如下方法证明

$$\because dV = V_p - V_0 \quad \therefore V_0 \cdot dp \cdot \beta = -(V_p - V_0)$$

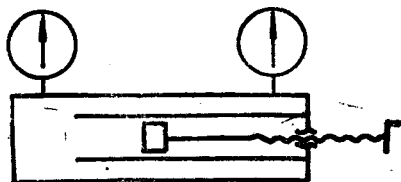
方程两边同除以质量 M , 整理后得

$$\frac{M}{V_0 (dp \cdot \beta - 1)} = -\frac{M}{V_p}$$

$$\text{又 } \because dp = p - p_0, M/V_0 = \rho_0$$

$$\therefore \frac{\rho_0}{(p - p_0) \beta - 1} = -\rho_0$$

$$\rho_p = \frac{\rho_0}{1 - \beta (p - p_0)}$$



题7 附图

题7. 如图所示: 是根据标准压力计检验一般压力计用的压力机。机内充满油液, 其压缩率 $\beta = 4.75 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{kgf}$ 。机内的压力由手轮丝杆和活

塞造成。活塞直径 $d = 1 \text{cm}$, 螺距 $t = 2 \text{mm}$ 。当压力为一大

气压时，机内油液体积 $V=200\text{ml}$ 。求为在机内形成 200 大气压，手轮需摇多少转？

解 根据 $\beta = -\frac{1}{dp} \cdot \frac{dV}{V}$ ，求出油液需要压缩的体积 dV 。

式中：压力变化量 $dp = p - p_0 = 200 - 1 = 199 \text{ kgf/cm}^2$ ，

$$\begin{aligned} \therefore dV &= -\beta \cdot dp \cdot V \\ &= -4.75 \times 10^{-5} \times 199 \times 200 = 1.9 \text{ cm}^3. \end{aligned}$$

又 $\therefore dV = \frac{\pi d^2}{4} \cdot l$ (l 是丝杆移动的距离)，

$$\therefore l = \frac{dV}{\pi d^2/4} = \frac{4 \times 1.9}{\pi \times 1^2} = 2.4 \text{ cm} = 24 \text{ mm}$$

则手轮转数

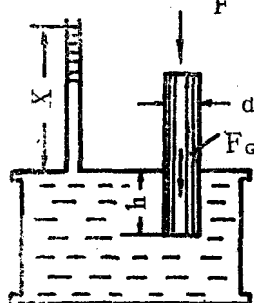
$$n = \frac{l}{t} = \frac{24}{2} = 12 \text{ r}$$

题 8. 某种液压油当温度为 50°C 时，其粘度为 20 cst ，当温度为 70°C 时，其粘度为 9.2 cst 。问在 60°C 时，其粘度为多少？

解 从粘温图上 50°C 点引出垂直温度座标的直线和由粘度 20 cst 点引出垂直粘度座标的直线交于一点 A。同样由温度 70°C 、粘度 9.2 cst 引出垂直各自座标的二直线也得一个交点 B。连两交点为一直线 AB。则所求 60°C 时的运动粘度可由 60°C 的点引出垂直温度座标的直线和 AB 交于 C 点，由 C 点向粘度座标引垂线的垂足，即可得 60°C 的运动粘度为 13 cst 。

第二节 静止液体力学

题9. 如图所示, 有一直径为 d , 重量为 F_G 的活塞浸在液体中, 并在力 F 的作用下处于静止状态。若液体的重度为 r , 活塞浸入深度为 h , 试确定液体在测压管内的上升高度 X 。



题9 附图

解 在活塞底部的液体表压力

$$p = r(X + h)$$

由作用于活塞上的力平衡关系

$$r(X + h)\pi d^2/4 = F + F_G$$

所以, 测压管内液体上升高度

$$X = \frac{F + F_G}{r\pi d^2/4} - h$$

题10. 图中容器内装有水, 容器上半部充满压力为 P 的气体, 容器内液面高度 $h = 40\text{cm}$, 小管内液体高度 $H = 1\text{m}$, 其上端与大气相通, 问容器内的绝对压力 $p_{\text{绝}}$ 、表压力 $p_{\text{表}}$ 各是多少?

解 取00为等压面, 则

$$p_{\text{绝}} + rh = p_0 + rH$$

$$p_{\text{绝}} = p_0 + r(H - h)$$

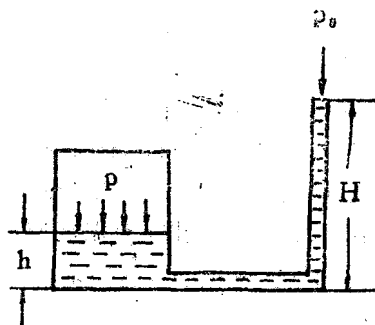
$$= 1 + (100 - 40) \times 10^{-3}$$

$$= 1.06 \text{ kgf/cm}^2$$

$$= 1.04 \text{ bar}$$

$$p_{\text{表}} = p_{\text{绝}} - p_0$$

$$= 1.06 - 1$$



题10 附图

$$=0.06\text{kgf/cm}^2=0.059\text{bar}$$

题11. 如图所示: $h=2\text{m}$, 油的重量 $r=0.9\times 10^{-3}\text{kgf/cm}^3$. 求容器内的真空度 p 是多少?

解 取液面 00 为等压面,

则

$$p_0 = p_{\text{绝}} + rh$$

$$p_{\text{绝}} = p_0 - rh = 1 - rh$$

$$= 1 - 0.9 \times 10^{-3} \times 200$$

$$= 0.82\text{kgf/cm}^2$$

$$= 0.804\text{bar}$$

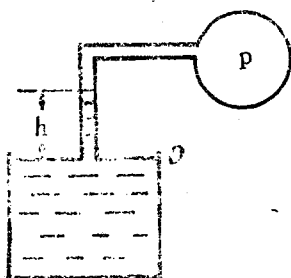
其真空度

$$p = p_0 - p_{\text{绝}}$$

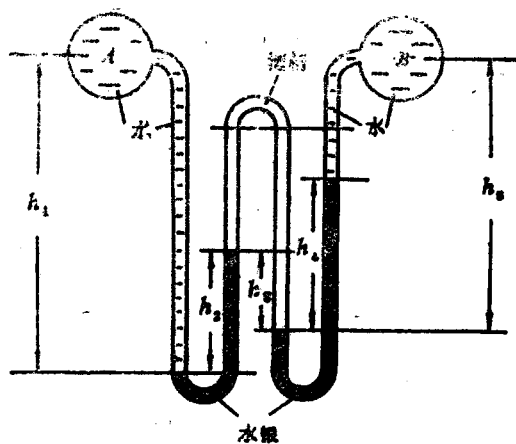
$$= 1 - 0.82 = 0.18\text{kgf/cm}^2$$

或用高度表示真空度

$$h_{\text{空}} = \frac{p_0 - p_{\text{绝}}}{r} = \frac{1 - 0.82}{0.9 \times 10^{-3}} = 200\text{cm} = 2\text{m}$$



题 11 附图



题 12 附图

题 12 如图
所示, 试求 A、
B 两点压力差。

已知 $h_1=500\text{mm}$

$$h_2=200\text{mm},$$

$$h_3=150\text{mm},$$

$$h_4=250\text{mm},$$

$$h_5=400\text{mm}.$$

$$r_{\text{酒精}}=7850$$

$$\text{N/m}^3, r_{\text{水银}}=$$

$$133416\text{N/m}^3,$$

$$r_{\text{水}}=9810\text{N/m}^3.$$

解 依等压面特性, 在图中列出 1—1、2—2、3—3 等压面方程:

$$p_1 = p_A + r_{\text{水}} h_1 \quad p_2 = p_1 - r_{\text{水银}} h_2$$

$$p_3 = p_2 + r_{\text{酒精}} h_3 \quad p_4 = p_3 - r_{\text{水银}} h_4$$

$$p_B = p_4 - r_{\text{水}} (h_5 - h_4)$$

将上面方程组等式两边分别相加, 则得

$$p_B = p_A + r_{\text{水}} h_1 - r_{\text{水银}} h_2 + r_{\text{酒精}} h_3 - r_{\text{水银}} h_4 - r_{\text{水}} (h_5 - h_4)$$

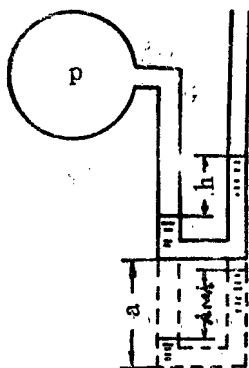
$$p_A - p_B = r_{\text{水银}} (h_2 + h_4) - r_{\text{酒精}} h_3 + r_{\text{水}} (h_5 - h_4 - h_1)$$

$$= 133416 (0.2 + 0.25) - 7850 \times 0.15$$

$$+ 9810 (0.4 - 0.25 - 0.5)$$

$$= 55426 \text{ N/m}^2 = 0.554 \times 10^5 \text{ pa} = 0.554 \text{ bar}$$

题 13 被比重 $\delta = 0.91$ 的油所充满的容器中的压力 p , 由水银压力计的读数 h 来确定, 水银的比重为 13.6, 如压力 p 不变而使压力计下移到 a 的位置, 求压力计的变化量 Δh 。



题 13 附图

解 由于压力计下移, 左边液面下降, 右边液面上升。在新位置平衡时, 由左边液面下移产生的压力, 要由右边液面上升的高度 Δh 来平衡, 该高度等于左右两边的水银下降与上升量之和, 即每边各为 $\Delta h/2$ 。因此左边液面的实际下降量为 $a + \Delta h/2$, 用平衡方程表示:

$$r_{\text{油}} (a + \Delta h/2) = r_{\text{水银}} \Delta h$$

$$\Delta h = \frac{r_{\text{油}} a}{r_{\text{水银}} - r_{\text{油}}/2} = \frac{0.91a}{13.6 - 0.91/2} = 0.0687a$$

题14 如图为5吨液压千斤顶的示意图, 柱塞2的直径 $\Phi_1=34\text{mm}$, 活塞1的直径 $\Phi_2=13\text{mm}$, 杠杆长度如图所示, 求杠杆端应加多大力 F 才能起重5吨重物?

解 由于缸内压力是由外负载决定的, 则

$$p = \frac{G}{A_2} = \frac{G}{\frac{\pi \Phi_1^2}{4}} = \frac{5 \times 10^3}{\frac{\pi}{4} \times 3.4^2} = 550 \text{ kgf/cm}^2$$

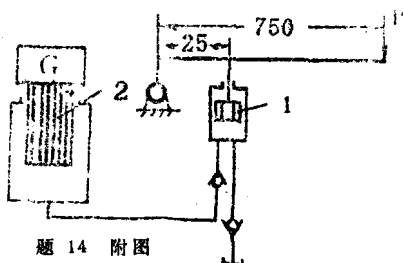
根据巴斯卡原理, 小活塞端的压力也应为 p , 则活塞1所承受的液压力

$$W = p A_1 = p \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \Phi_2^2$$

$$= 550 \times \frac{\pi}{4} \times 1.3^2$$

$$= 730 \text{ kgf} = 7154 \text{ N}$$

则杠杆端应加力



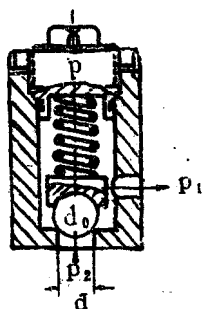
题14 附图

$$F = \frac{W \times 25}{750} = \frac{730 \times 25}{750} = 24.3 \text{ kgf} = 238 \text{ N}$$

题15 图示压力阀应在油压 $p=60 \text{ kgf/cm}^2$ 时动作, 已知钢球直径 $d_0=15 \text{ mm}$, 阀孔直径 $d=10 \text{ mm}$, 背压 $p_1=3 \text{ kgf/cm}^2$, 求弹簧压紧力 F_T (不计弹簧、钢球的重量)。

解 根据阀动作时的液压力和弹簧力相平衡的关系, 即

$$F_T + p_1 \times \frac{\pi}{4} d^2 = p \times \frac{\pi}{4} d_0^2$$



题15 附图