

题目：有如图所示阀控缸电液位置伺服系统，已知负载质量 $m = 1000\text{kg}$ ，干摩擦力 $F_f = 2000\text{N}$ ，负载最大行程 $x_{p\max} = 0.5\text{m}$ ，最大速度 $t_{\max} = 10 \times 10^{-2}\text{m/s}$ ，最大加速度 $a_{\max} = 2.2\text{m/s}^2$ 。最大输入信号电压 $u_r = 5\text{V}$ ，能源压力 $p_s = 63 \times 10^5\text{Pa}$ ，油液体积弹性模量 $\beta_e = 1.4 \times 10^9\text{Pa}$ 。所选用的电液伺服阀的固有频率 $\omega_{sv} = 600\text{rad/s}$ ，阻尼比 $\xi_{sv} = 0.5$ ，阀的流量增益 $K_{sv} = 4.44 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{A}$ ，流量-压力系数 $K_c = 4 \times 10^{-12}\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{Pa}$ 。反馈增益为 $K_t = 10\text{v/m}$ 。试求：

- (1) 当幅值裕量 $K_g = 10\text{dB}$ 时的开环增益 K_v ，伺服放大器增益 K_a ，开环穿越频率 ω_c ，相位裕量 γ 。
- (2) 干摩擦力 F_f 引起的静态误差 e_f 。

计算时忽略负载的粘性阻尼和液压缸的泄漏。取总压缩容积 $V_t = 1.4A_p x_{p\max}$ 。

- (3) 如果希望上题中的静态误差 e_f 下降为原来值的 $1/4$ ，采用滞后校正，校正元件参数 α 及 ω_{rc} 应为多少？相位裕量 γ 有多少？伺服放大器增益如何调整？

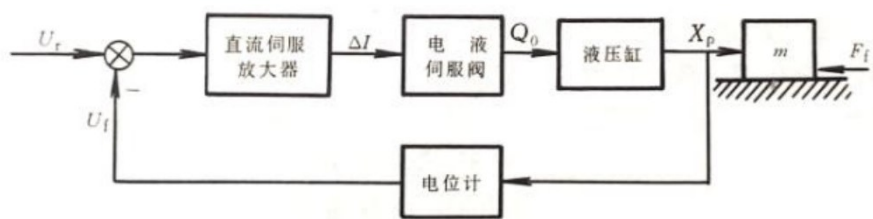


图 1 液压缸电液位置伺服系统

已知条件：

负载质量 $m = 1000\text{kg}$ ；干摩擦力 $F_f = 2000\text{N}$ ，负载最大行程 $x_{p\max} = 0.5\text{m}$ ，最大速度 $t_{\max} = 10 \times 10^{-2}\text{m/s}$ ，最大加速度 $a_{\max} = 2.2\text{m/s}^2$ ；最大输入信号电压 $u_r = 5\text{V}$ ；能源压力 $p_s = 63 \times 10^5\text{Pa}$ ；油液体积弹性模量 $\beta_e = 1.4 \times 10^9\text{Pa}$ ；电液伺服阀的固有频率 $\omega_{sv} = 600\text{rad/s}$ ，阻尼比 $\xi_{sv} = 0.5$ ，阀的流量增益 $K_{sv} = 4.44 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{A}$ ，流量-压力系数 $K_{ce} = 4 \times 10^{-12}\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{Pa}$ ；反馈增益为 $K_t = 10\text{v/m}$

(1)

在电液位置控制系统中，有 $p_L \leq \frac{2}{3}p_s$ 的限制 (P139)，取

$$p_L = \frac{2}{3}p_s = 4.2\text{MPa}$$

负载平衡方程 (P42) $m_t = m = 1000\text{kg}$

$$A_p p_L = m_t a_{\max} + F_f$$

得到液压缸活塞有效面积 $A_p = 10^{-3}\text{m}^2$

由题给条件，总压缩容积取

$$V_t = 1.4A_p x_{p\max} = 7 \times 10^{-4}\text{m}^3$$

液压固有频率 (P44)

$$\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_e A_p^2}{V_t m_t}} = 40\sqrt{5}\text{rad/s}$$

液压阻尼比 (P44)

$$\zeta_h = \frac{K_{ce}}{A_p} \sqrt{\frac{\beta_e m_t}{V_t}} + \frac{B_p}{4A_p} \sqrt{\frac{V_t}{\beta_e m_t}} = 0.1789$$

系统开环传递函数 (P115)

$$G(s)H(s) = \frac{K_v G_{sv}(s)}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} = \frac{K_v}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \frac{1}{\left(\frac{s^2}{\omega_{sv}^2} + \frac{2\zeta_{sv}}{\omega_{sv}} s + 1 \right)}$$

$$G(s)H(s) = \frac{K_v}{j\omega_x \left(-\frac{\omega_x^2}{8000} + \frac{0.1789}{20\sqrt{5}} j\omega_x + 1 \right) \left(-\frac{\omega_x^2}{360000} + \frac{1}{600} j\omega_x + 1 \right)}$$

由 $\angle G(j\omega_x)H(j\omega_x) = -180^\circ$ (虚部为 0, 实部为负) 得到 $\omega_x = 87.10 \text{ rad/s}$

幅值裕量

$$K_g = -20 \lg |G(j\omega_x)H(j\omega_x)|$$

得到 $K_v = 9.60 \text{ s}^{-1}$

流量增益 $K_q = \frac{\partial q_L}{\partial x_v}$, 流量-压力系数 $K_c = -\frac{\partial q_L}{\partial p_L}$, 压力增益 $K_p = \frac{\partial p_L}{\partial x_v}$, $K_p = \frac{K_q}{K_c}$ (P13)

开环放大系数 $K_v = \frac{K_q K_f}{A_p} = \frac{K_p K_c K_f}{A_p}$ (P68)

$$K_v = \frac{K_a K_{sv} K_t}{A_p}$$

得到 $K_a = 0.216 \text{ A/V}$

由 $-20 \lg |G(j\omega_c)H(j\omega_c)| = 0$ 得到 $\omega_c = 9.708 \text{ rad/s}$

相位裕量

$$\gamma = 180^\circ + \angle G(j\omega_c)H(j\omega_c) = 86.82^\circ$$

(2)

静摩擦力引起的死区电流为 (P123)

$$\Delta I = \frac{K_{ce}}{K_{sv} A_p} F_f = 1.80 \times 10^{-3} \text{ A}$$

总静态误差为

$$e_f = \Delta x_p = \frac{\Delta I}{K_a K_t} = 8.34 \times 10^{-4} \text{ m}$$

(3)

滞后校正网络的传递函数 (P125)

$$G_c(s) = \frac{\frac{s}{\omega_{rc}} + 1}{\frac{\alpha s}{\omega_{rc}} + 1}$$

由 $\frac{e'_f}{e_f} = \frac{K_a}{K'_a} = \frac{1}{4}$ 得到 $K'_a = 0.864 \text{ A/V}$, $K'_v = 38.40 \text{ s}^{-1}$

原系统变为

$$G(s)H(s)' = \frac{\frac{s}{\omega_{rc}} + 1}{\frac{\alpha s}{\omega_{rc}} + 1} \frac{K'_v}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \frac{1}{\left(\frac{s^2}{\omega_{sv}^2} + \frac{2\zeta_{sv}}{\omega_{sv}} s + 1 \right)}$$

取 $\alpha = 4, \omega_{rc} = 1 \text{ rad/s}$

此时 $\omega_c = 9.757 \text{ rad/s}$

相位裕量

$$\gamma = 180^\circ + \angle G(j\omega_c)H(j\omega_c) = 82.42^\circ$$

伺服放大器增益为 $K'_a = 0.864 \text{ A/m}$