

控制理论

在液压伺服系统中的应用 (4)

顾瑞龙

第五章 典型元件与系统

在工程实践中,象液压缸、液压马达、变量泵、电液伺服阀这样一些典型元件,都可以用适当的传递函数来描述。本章里我们通过推导一些典型元件与系统的传递函数来说明前面几章里介绍的基础理论知识的具体运用。

5.1 阀控制液压缸与阀控制液压马达

阀控制液压缸与阀控制液压马达,二者的传递函数具有相同的形式,差别仅在于前者涉及直线运动而后者涉及旋转运动。现以阀控制液压缸为例进行传递函数的推导。

对图5-1所示的阀控制液压缸,可用下列三个基本方程来描述:

$$Q_L = K_q x_v - K_{cP_L} \quad (5-1)$$

$$Q_L = A \frac{dy}{dt} + C_{tP_L} + \frac{V_t}{4\beta_c} \frac{dP_L}{dt} \quad (5-2)$$

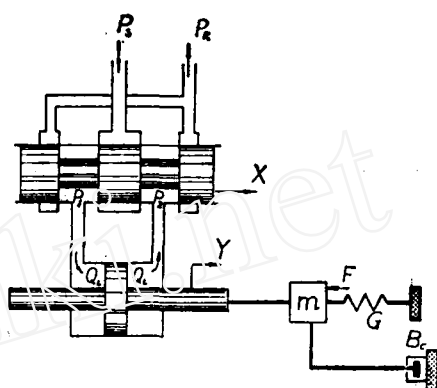


图5-1 阀控制液压缸

$$P_L = \frac{1}{A} \left(m \frac{d^2 y}{dt^2} + B_c \frac{dy}{dt} + G y \right) + \frac{F}{A} \quad (5-3)$$

式中 Q_L —负载流量 (厘米³/秒)
 K_q —滑阀的流量增益 (厘米³/秒)
 K_c —滑阀的流量压力系数 (厘米³/公斤力)

Dg和4~6Dg。使被试阀2处于全开位置。调节截止阀4和减压阀1,使转子流量计3的读数对应着被试阀的额定流量,并使被试阀的进口压力稳定于5公斤力/厘米²。用差压变送器6和水银压力计5测出被试阀的压降。

气体转子流量计是在标准状态下标定的,当测试压力及温度与标准状态不同时,应按下列公式进行换算:

$$Q_{测} = Q_{额} \sqrt{p T_0 / p_0 T} \quad (5)$$

式中 $Q_{测}$ —流量计实际指示流量 (米³/小时)

$Q_{额}$ —有压状态下的额定流量 (米³/小时)

p_0 —标定状态下流量计进口的绝对压力 (公斤力/厘米²)

p —有压状态下流量计进口的绝对压力 (公斤力/厘米²)

T_0 —标定状态的绝对温度 (开尔文)

T —测试状态的绝对温度 (开尔文)

测试时调节截止阀4,使转子流量计3的读数为 $Q_{测}$,即可保证通过被试阀的流量为 $Q_{额}$ 。

x_v —阀芯位移 (厘米)

p_L —负载压降 (公斤力/厘米²)

A —液压缸工作面积 (厘米²)

y —液压缸活塞位移 (厘米)

C_{ic} —液压缸的总泄漏系数 (厘米⁵/公斤力·秒)

V —从滑阀出口到液压缸活塞的两腔总容积 (厘米³)

β_e —油液有效体积弹性模数 (公斤力/厘米²)

m —负载质量 (公斤力·秒²/厘米)

B —负载阻尼系数 (公斤力·秒/厘米)

G —负载弹簧刚度 (公斤力/厘米)

F —外加负载力 (公斤力)

式(5-1)是线性化伺服阀流量方程,式(5-2)是液压缸工作腔流动连续性方程,式(5-3)是液压缸的力平衡方程。这三个方程就确定了阀控制液压缸的特性。

式(5-1)、式(5-2)和式(5-3)的拉氏变换式为

$$Q_L = K_q X_v - K_c P_L \quad (5-4)$$

$$Q_L = A s Y + (C_{ic} + \frac{V_t}{4\beta_e} s) P_L \quad (5-5)$$

$$P_L = -\frac{1}{A} (ms^2 + B_c s + G) Y + \frac{1}{A} F \quad (5-6)$$

根据式(5-4)可画出图5-2所示的方块图。

式(5-5)可改写为

$$P_L = (Q - A s Y) / (C_{ic} + \frac{V_t}{4\beta_e} s) \quad (5-5')$$

据此可画出图5-3所示的方块图。

式(5-6)可改写为

$$Y = \frac{A}{ms^2 + B_c s + G} (P_L - \frac{1}{A} F) \quad (5-6')$$

据此可画出图5-4所示的方块图。

合并图5-2、图5-3、图5-4,即可得出阀控制液压缸系统的方块图,如图5-5所示。该系统的输入为 X_v ,输出为 Y ,运用

马森定理可求出从 X_v 至 Y 的传递函数为

$$\frac{Y}{X_v} = K_q \cdot \frac{1}{C_{ic} + \frac{V_t}{4\beta_e} s} \cdot \frac{A}{ms^2 + Bs + G} / \left(1 + \frac{K_c}{C_{ic} + \frac{V_t}{4\beta_e} s} + \frac{1}{C_{ic} + \frac{V_t}{4\beta_e} s} \cdot \frac{A^2 s}{ms^2 + B_c s + G} \right) \quad (5-7)$$

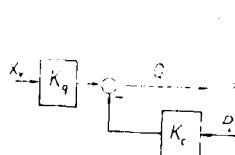


图5-2 式(5-4)的方块图

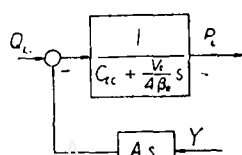


图5-3 式(5-5')的方块图

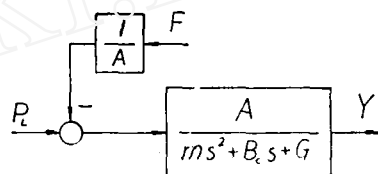


图5-4 式(5-6')的方块图

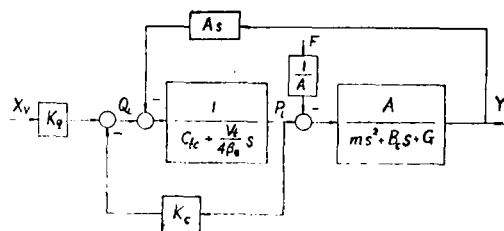


图5-5 阀控制液压缸系统的方块图

外力 F 其实也是一种输入信号。以 F 为输入,以 Y 为输出,可以把系统方块图改画成图5-6。据此可求出从 F 至 Y 的传递函数为

$$\frac{Y}{F} = \frac{1}{A} \cdot \frac{A}{ms^2 + B_c s + G} / \left[1 + \frac{A}{ms^2 + B_c s + G} \cdot \frac{1}{C_{ic} + \frac{V_t}{4\beta_e} s} \right] \quad (5-8)$$

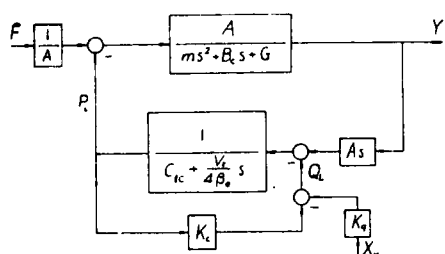


图 5-8 以F为输入的阀控制液压缸系统方块图

当 X_v 与 F 同时输入时, 系统总输出为

$$Y = \frac{Y}{X_v} \Big|_{F=0} \cdot X_v - \frac{Y}{F} \Big|_{X_v=0} \cdot F$$

$$= \left[AK_q X_v - \left(K_c + C_{lc} + \frac{V_t}{4\beta_e} s \right) F \right] /$$

$$\left\{ \frac{V_t m}{4\beta_e} s^3 + \left[(K_c + C_{lc})m + \frac{V_t B_c}{4\beta_e} \right] s^2 + \right.$$

$$\left. + \left[(K_c + C_{lc}) B_c + \frac{V_t G}{4\beta_e} + A^2 \right] s + G (K_c + C_{lc}) \right\} \quad (5-9)$$

在不考虑外力 F 时, 阀芯位移 X_v 至活塞位移 Y 的传递函数为

$$W(s) = \frac{Y}{X_v}$$

$$= (AK_q) / \left\{ \frac{V_t m}{4\beta_e} s^3 + \left[(K_c + C_{lc})m + \right. \right.$$

$$\left. + \frac{V_t B_c}{4\beta_e} \right] s^2 + \left[(K_c + C_{lc}) B_c + \frac{V_t G}{4\beta_e} + \right.$$

$$\left. + A^2 \right] s + G (K_c + C_{lc}) \left. \right\} \quad (5-10)$$

式(5-10)是全面考虑负载惯量、阻尼、刚度及油液弹性、液压缸泄漏等各种因素时的阀控制液压缸的传递函数。实际应用中可以忽略一些因素而使传递函数大大简化。如表 5-1 所示。从表 5-1 可以看出, 当不考虑负载刚度时, 该系统总是有一积分环节出现。另外, 比较第 1、第 2 两种情况可以看出, 考虑油液弹性时的系统传递函数较不考虑油液弹性时提高了一阶。

表 5-1 忽略不同因素所得的简化传递函数

情况	考虑因素	忽略因素	传递函数 $\frac{Y}{X_v}$	传递函数 $\frac{Y}{Q}$
1	负载惯量 m 、油液弹性 β_e	负载阻尼 B_c 、负载刚度 G 、液压缸泄漏 C_{lc}	$\frac{K_q/A}{s \left(\frac{V_t m}{4\beta_e A^2} s^2 + \frac{K_{cm}}{A^2} s + 1 \right)}$	$\frac{1/A}{s \left(\frac{V_t m}{4\beta_e A^2} s^2 + \frac{K_{cm}}{A^2} s + 1 \right)}$
2	负载惯量 m	负载阻尼 B_c 、负载刚度 G 、油液弹性 β_e 、液压缸泄漏 C_{lc}	$\frac{K_q/A}{s \left(\frac{K_{cm}}{A^2} s + 1 \right)}$	$\frac{1/A}{s \left(\frac{K_{cm}}{A^2} s + 1 \right)}$
3	负载阻尼 B_c	负载惯量 m 、负载刚度 G 、油液弹性 β_e 、液压缸泄漏 C_{lc}	$\frac{K_q/A}{s \left(\frac{K_c B_c}{A^2} + 1 \right)}$	$\frac{1/A}{s \left(\frac{K_c B_c}{A^2} + 1 \right)}$
4	负载刚度 G	负载惯量 m 、负载阻尼 B_c 、油液弹性 β_e 、液压缸泄漏 C_{lc}	$\frac{K_q A / G K_c}{\frac{A^2}{G K_c} s + 1}$	$\frac{A / G K_c}{\frac{A^2}{G K_c} s + 1}$
5		负载惯量 m 、负载阻尼 B_c 、负载刚度 G 、油液弹性 β_e 、液压缸泄漏 C_{lc}	$\frac{K_q/A}{s}$	$\frac{1/A}{s}$

在实际应用中,还会出现以流量 Q 为输入量的情况,见图5—7。此时的传递函数 Y/Q 也列在表5—1中。

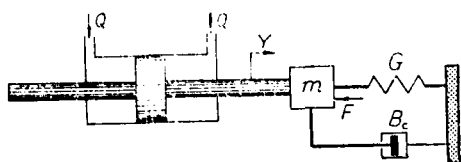


图5—7 流量驱动液压缸

阀控制液压马达的传递函数见表5—2。
表中文字代号含意如下:

⊖—液压马达的转角(弧度)

D—液压马达的排量(厘米³/弧度)

J—负载及马达的总惯量(公斤力·厘米·秒²/弧度)

B_m —负载阻尼系数(公斤力·厘米·秒/弧度)

G_m —负载刚度(公斤力·厘米/弧度)

其他代号与前同。

表5—2 液压马达的传递函数

情况	传递函数 $\frac{\Theta}{Q}$
1	$\frac{1/D}{s \left(\frac{V_t J}{4\beta_c D^2} s^2 + \frac{K_c J}{D^2} s + 1 \right)}$
2	$\frac{1/D}{s \left(\frac{K_c J}{D^2} s + 1 \right)}$
3	$\frac{1/D}{s \left(\frac{K_c B_m}{D^2} + 1 \right)}$
4	$\frac{D/G_m K_c}{D^2 s + G_m K_c}$
5	$\frac{1/D}{s}$

以阀芯位移 X_v 为输入、以负载压力 P_L 为输出时,阀控制液压缸系统的方块图见图5—8,其传递函数为:

$$\frac{P_L}{X_v} = \frac{K_q}{(K_c + C_{te})G} (ms^2 + B_c s + G) / \left[\left(\frac{V_t m}{4\beta_c} (K_c + C_{te})G s^3 + \left(\frac{V_t B_c}{4\beta_c} (K_c + C_{te})G + \frac{m}{G} \right) s^2 + \left(\frac{A^2 + \frac{V_t}{4\beta_c} G}{(K_c + C_{te})G} + \frac{B_c}{G} \right) s + 1 \right) \right] \quad (5-11)$$

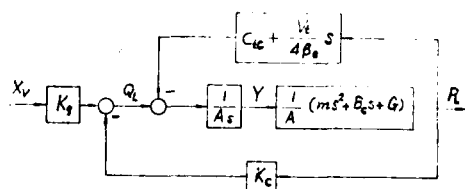


图5—8 以 P_L 为输出的阀控制液压缸系统方块图

如果不考虑负载阻尼及液压缸泄漏,即

$$C_{te} = 0, B_o = 0$$

注意到 $K_r = K_q/K_c$, 式(5—11)可改写成

$$\frac{P_L}{X_v} = K_p \left(\frac{m}{G} s^2 + 1 \right) / \left[\frac{V_t m}{4\beta_c K_c G} s^3 + \frac{m}{G} s^2 + \left(\frac{A^2}{K_c G} + \frac{V_t}{4\beta_c K_c} \right) s + 1 \right] \quad (5-12)$$

以负载压力 P_L 为输出的传递函数由于不能忽略负载刚度 G 而没有积分环节,这是它与以负载位移 Y 为输出的传递函数(表5—1)的最明显的不同点。

对马达来说,与式(5—12)对应的传递函数为:

$$\frac{P_L}{X_v} = K_p \left(\frac{J}{G_m} s^2 + 1 \right) / \left[\frac{V_t J}{4\beta_c K_c G_m} s^3 + \frac{J}{G_m} s^2 + \left(\frac{D^2}{K_c G_m} + \frac{V_t}{4\beta_c K_c} \right) s + 1 \right] \quad (5-13)$$

5.2 泵控制液压缸

泵控制液压缸的工作原理见图5—9。该系统可用下列方程描述:

$$Q_L = K_p N \cdot \phi \quad (5-14)$$

$$Q_L = A \frac{dy}{dt} + C_{te} P_1 + \frac{V_o}{\beta_c} \frac{dp_1}{dt} \quad (5-15)$$

$$P_1 = \frac{1}{A} \left(m \frac{d^2 y}{dt^2} + B_c \frac{dy}{dt} \right) + \frac{1}{A} F \quad (5-16)$$

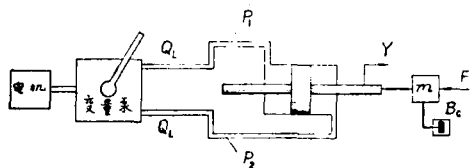


图 5-9 泵控制液压缸

式中 ϕ — 泵的斜盘倾角 (度)

N_P — 泵的转速 (弧度/秒)

K_P — 泵的排量梯度 (厘米³/弧度·度)

p_1 — 泵输出压力 (公斤力/厘米²)

其他代号同前。在泵控制液压缸系统中一般不考虑负载刚度。将式(5-14)、(5-15)、(5-16)进行拉氏变换,即可据以画出图5-10所示的方块图。根据此方块图,液压缸的总输出位移为

$$Y = \left[\frac{K_P N_P}{A} \Phi - \frac{C_{tc}}{A^2} \left(1 + \frac{V_0}{\beta_c C_{tc}} s \right) F \right] / \left[\frac{V_0 m}{\beta_c A^2} s^3 + \left(\frac{C_{tc} m}{A^2} + \frac{B_c V_0}{\beta_c A^2} \right) s^2 + \left(1 + \frac{B_c C_{tc}}{A^2} \right) s \right] \quad (5-17)$$

由于 $B_c C_{tc}/A \ll 1$, 式(5-17)可简化为

$$Y = \left[\frac{K_P N_P}{A} \Phi - \frac{C_{tc}}{A^2} \left(1 + \frac{V_0}{\beta_c C_{tc}} s \right) F \right] / \left[\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\delta_n}{\omega_n} s + 1 \right] \quad (5-18)$$

式中 ω_n — 无阻尼液压固有频率 (弧度/秒)

δ_n — 液压阻尼比

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\beta_c A^2}{V_0 m}} \quad (5-19)$$

$$\delta_n = \frac{C_{tc}}{2A} \sqrt{\frac{\beta_c m}{V_0}} + \frac{B_c}{2A} \sqrt{\frac{V_0}{\beta_c m}} \quad (5-20)$$

式(5-18)在形式上是与式(5-9)相同的,但对应的参数值却有很大差别。首先,阀控制液压缸的无阻尼液压固有频率要比式(5-19)给出的 ω_n 高得多。其次,泵控制液压缸的增益 $K_P N_P/D_m$ 和 C_{tc}/A^2 要比阀控制液压缸的增益 K_q/A 和 $(K_o + C_{tc})/A^2$ 更为恒定,这对预测整套装置的特性是有利的。

与表 5-1 相对应的泵控制液压缸的传递

函数见表 5-3。表中没有情况 4,因为在泵控制液压缸中一般不考虑负载刚度。

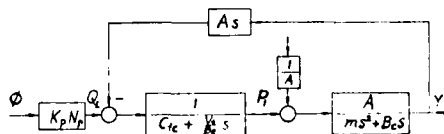


图 5-10 泵控制液压缸系统的方块图

表 5-3 泵控制液压缸传递函数

情况	传递函数 $\frac{Y}{\Phi}$
1	$\frac{K_P N_P / A}{s \left(\frac{V_0 m}{\beta_c A^2} s^2 + \frac{C_{tc} m}{A^2} s + 1 \right)}$
2	$\frac{K_P N_P / A}{s \left(\frac{C_{tc} m}{A^2} s + 1 \right)}$
3	$\frac{K_P N_P / A}{s \left(\frac{V_0 B_c}{\beta_c A^2} s + \frac{B_c C_{tc}}{A^2} + 1 \right)}$
5	$\frac{K_P N_P / A}{s}$

5.3 液压力矩放大器

液压力矩放大器由伺服阀、液压马达和反馈丝杠副三部分组成,其工作原理见图5-11。

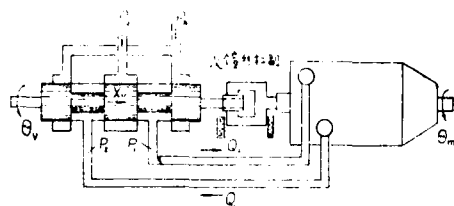


图 5-11 液压力矩放大器

输入转角 θ_v 经阀芯端部的丝杠螺母副变成阀芯位移 X_v ,控制进出液压马达的压力油的流量与流动方向。马达轴带动反馈螺母旋转,通过丝杠使阀芯复位。结果,马达轴完全跟踪输入转角而转动。但是马达的输出力矩要比移动阀芯所需要的输入力矩大得多,所以把这种装置叫做力矩放大器。这种力矩放大器其实就是在阀

控制液压马达上加设反馈丝杠副而形成的闭环系统。假定第1种负载情况,根据表5-2,可写出从阀芯位移 X_v 至马达转角 Θ_m 的传递函数为

$$\begin{aligned}\frac{\Theta_m}{X_v} &= \frac{K_q \Theta_m}{Q} \\ &= \frac{K_q/D}{s \left(\frac{V_i J}{4\beta_e D^2} s^2 + \frac{K_c J}{D^2} s + 1 \right)} \quad (5-21)\end{aligned}$$

丝杠螺母副既是把转角 Θ 变成阀芯位移 X_v 的转换机构,又是把输入转角 Θ_v 与马达转角 Θ_m 进行比较的机构,其关系式为

$$X_v = \frac{T}{2\pi} (\Theta_v - \Theta_m) \quad (5-22)$$

式中 T —螺距(厘米)

根据式(5-21)和式(5-22)可画出如图5-12所示的液压力矩放大器方块图。引入开环增益 K 、液压固有频率 ω_h 和液压阻尼比 δ_h :

$$K = \frac{TK_q}{2\pi D} \quad (5-23)$$

$$\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_e D^2}{V_i J}} \quad (5-24)$$

$$\delta_h = \frac{K_c}{D} \sqrt{\frac{\beta_e J}{V_i}} \quad (5-25)$$

则该系统的开环传递函数可写为

$$W(s) = \frac{K}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\delta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (5-26)$$

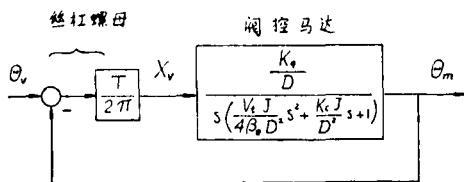


图5-12 液压力矩放大器方块图

该系统的开环博德图见图5-13。

该系统的闭环传递函数为

$$\begin{aligned}\Phi(s) &= \frac{W(s)}{1 + W(s)} \\ &= \frac{1}{\frac{s^3}{\omega_h^2 K} + \frac{2\delta_h}{\omega_h K} s^2 + \frac{s}{K} + 1} \quad (5-27)\end{aligned}$$

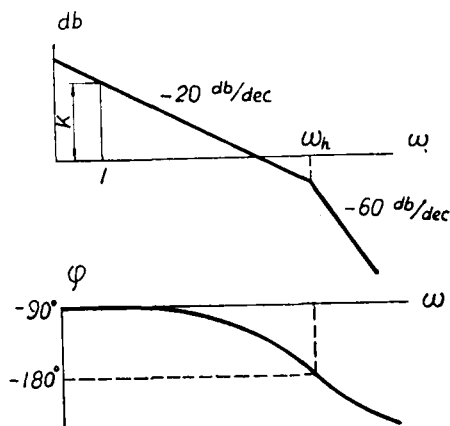


图5-13 液压力矩放大器的开环博德图

5.4 液压仿形刀架

液压仿形刀架由伺服阀、液压缸及反馈机构三部分组成(图5-14)。液压缸活塞杆固定而缸体移动,伺服阀的阀套与缸体刚性连接。触头碰到样板,触头处输入位移 x ,杠杆牵动阀芯产生位移 x_v 。阀芯相对阀套的位移形成控制节流口的开度,控制进出液压缸的压力油的流量与流动方向。缸体带动刀架运动的同时,使控制节流口逐渐关小,直到恢复阀套相对阀芯的原始位置。结果,刀架完全跟踪触头而运动。但是,车刀上的切削力要比触头上的靠模力大得多,所以仿形刀架其实是一个力放大器。假定第1种负载情况,根据表5-1,可写出阀芯相对阀套位移 X_e 至液压缸输出位移 Y 的传递函数为

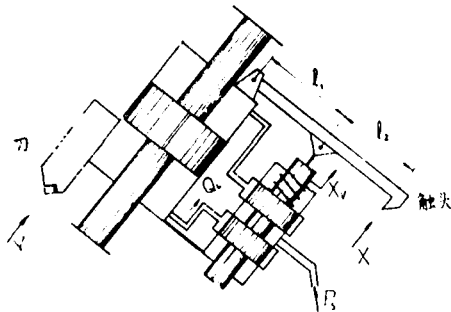


图5-14 液压仿形刀架

$$\frac{Y}{X\epsilon} = \frac{K_q}{A} / s \left(\frac{V_m}{4\beta_s A^2} s^2 + \frac{K_c m}{A^2} s + 1 \right) \quad (5-28)$$

阀芯相对于阀套的位移 $X\epsilon$ 等于输入位移 X 造成的位移减去液压缸输出位移 Y 反馈回来的位移,即

$$X\epsilon = \frac{l_1}{l_1 + l_2} X - \frac{l_2}{l_1 + l_2} Y \quad (5-29)$$

根据式(5-28)和式(5-29)可画出如图5-15所示的液压仿形刀架方块图。引入开环增益 K 、液压固有频率 ω_h 和液压阻尼比 δ_h :

$$K = \frac{l_2 K_q}{(l_1 + l_2) A} \quad (5-30)$$

$$\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_s A^2}{V_m}} \quad (5-31)$$

$$\delta_h = \frac{K_c}{A} \sqrt{\frac{\beta_s m}{V_m}} \quad (5-32)$$

则控制环路的开环传递函数可写为

$$W(s) = \frac{K}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\delta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (5-33)$$

此式与式(5-26)的形式完全一样,按此式画出的博德图与图5-13所示者一样。整个仿形刀架的闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{Y}{X} = \frac{l_1/l_2}{\frac{s^3}{\omega_h^2 K} + \frac{2\delta_h}{\omega_h K} s^2 + \frac{s}{K} + 1} \quad (5-34)$$

通常把输入杠杆设计成 $l_1 = l_2$, 即 $l_1/l_2 = 1$ 。于是,式(5-34)就与式(5-27)完全一样了。

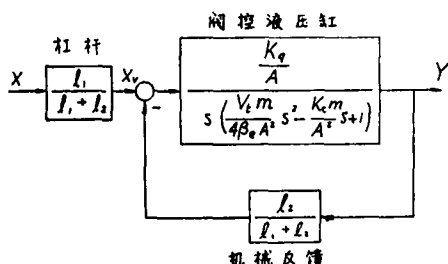


图 5-15 液压仿形刀架方块图

5.5 力反馈电液伺服阀

力反馈电液伺服阀由力矩马达、喷嘴挡板阀及滑阀三部份组成,其工作原理见图5-16。

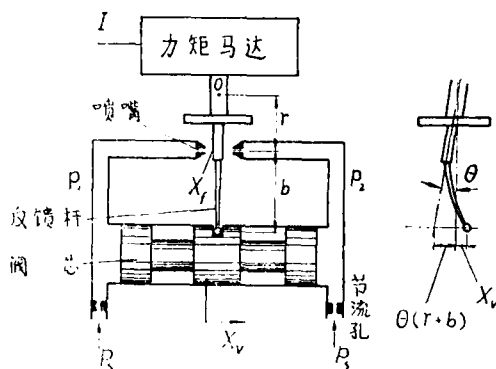


图 5-16 力反馈伺服阀

控制电流输入力矩马达时,力矩马达产生电磁力矩使挡板绕弹簧管的O点旋转。挡板偏置在阀芯两端产生的压差推动阀芯移动。阀芯位移通过反馈杆产生反馈力矩,使挡板在某个位置达到平衡。此时阀芯处在偏离零位的某个平衡位置,滑阀的液压输出与输入电流的大小和极性有关。下面推导从控制电流 i 至阀芯位移 x_v 的传递函数。

力矩马达产生的电磁力矩为

$$T = K_t I \quad (5-35)$$

式中 T —电磁力矩(公斤力·厘米)

K_t —力矩马达的力矩系数(公斤力·厘米/安)

I —输入电流(安)

此电磁力矩与挡板组件的惯性力矩、阻尼力矩、弹性力矩、负载力矩相平衡:

$$J_s s^2 \Theta + B_s s \Theta + (K_s - K_{s'}) \Theta + T_L = T \quad (5-36)$$

负载力矩 T_L 为

$$T_L = (r+b) K_t [(r+b) \Theta + x_v] \quad (5-37)$$

式中 Θ —挡板转角(弧度)

x_v —阀芯位移(厘米)

J_s —挡板组件转动惯量(公斤力·厘米·秒²)

B_s —挡板组件阻尼系数(公斤力·厘米·

秒)

K_s —弹簧管刚度 (公斤力·厘米/弧度)

K_m —力矩马达磁性刚度 (公斤力·厘米/弧度)

K_f —反馈杆刚度 (公斤力/厘米)

r —喷嘴处挡板的回转半径 (厘米)

b —反馈杆长度 (厘米)

挡板位移与挡板转角成正比:

$$X_t = r\theta \quad (5-38)$$

式中 X_t —挡板位移 (厘米)

阀芯位移与挡板位移的关系如下:

$$X_v = \frac{K_{qp}/A}{s} X_t \quad (5-39)$$

式中 K_p —喷嘴挡板阀的流量系数 (厘米²/秒)

A —阀芯端面积 (厘米²)

把式(5-37)代入式(3-38), 并引入综合刚度

$$K_c = K_s - K_m + (r+b)^2 K_f \quad (5-40)$$

可得

$$J_s^2 \theta + B_s \theta + K \theta + (r+b) K_f X_v = T \quad (5-41)$$

根据式(5-35)、式(5-41)、式(5-38)、式(5-39)可画出图5-17所示的方块图。据此可写出闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{K_t r K_{qp}}{A} \left/ \left[s(Ts^2 + B_s s + K_c + \frac{K_{qp} K_f}{A} r(r+b)) \right] \right. \quad (5-42)$$

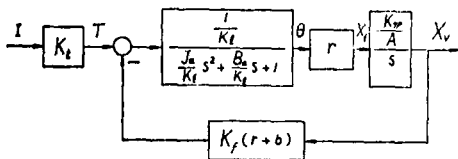


图5-17 力反馈电液伺服阀的方块图

通常, 力矩马达的固有频率很高、阻尼很小, 所以可把图5-17简化成图5-18。此时系统的传递函数简化为

$$\Phi(s) = \frac{K_t/K_f(r+b)}{\frac{AK_c}{K_{qp}K_f r(r+b)} s + 1} \quad (5-43)$$

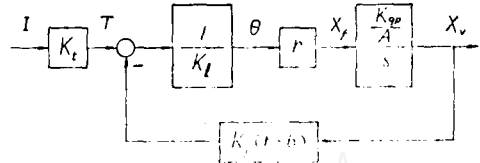


图5-18 力反馈电液伺服阀的简化方块图

在实际调试电液伺服阀时, 往往调成 $K_c \approx K_m$, 于是式(5-40)可写为

$$K = (r+b)^2 K_f \quad (5-44)$$

把式(5-44)代入式(5-43), 得

$$\Phi(s) = \frac{K_t/K_f(r+b)}{\frac{(r+b)A}{rK_{qp}} s + 1} \quad (5-45)$$

就是说, 经过了一系列的简化之后, 可以把力反馈电液伺服阀看成一个惯性环节, 其时间常数为

$$\tau = \frac{(r+b)A}{rK_{qp}} \quad (5-46)$$

根据图5-17绘制的力反馈电液伺服阀的开环博德图也和图5-13所示者相同, 但具体参数不同。在这里, 开环增益为

$$K = \frac{K_t K_f r(r+b)}{AK_c} \quad (5-47)$$

固有频率为

$$\omega = \sqrt{\frac{K_c}{J_s}} \quad (5-48)$$