

一种多变量电液伺服系统的解耦控制^①

罗 安

(中南工业大学自控系, 长沙 410083)

摘 要 提出了一种多变量电液伺服系统的解耦控制方法, 该方法仅采用输出、输入信号构成前馈-反馈复合解耦控制, 能使电液伺服这类线性最小相位系统实现完全解耦, 并且, 可配置闭环系统极点。仿真和实验结果表明, 该解耦控制策略能获得满意的控制效果。

关键词 电液伺服 多变量系统 解耦控制 极点配置

多变量控制的内容很多, 如按一定要求设计的综合理论、按一定指标设计的最优化理论等等^[1, 2]。但是, 在工程实际应用中, 最突出的问题之一是如何实现多变量系统的解耦控制, 也就是采取何种措施, 把一个有耦合影响的多变量系统, 解耦为无耦合的单变量系统进行控制。随着电液伺服系统被广泛应用于机器人、各种组合精密加工机床、冶金、航空等领域中, 对多变量电液伺服系统控制策略的研究越来越引起人们的关注。

本文从工程上容易实现的解耦控制出发, 提出了一种仅利用输出和输入信号构成的前馈-反馈复合控制解耦方法。

1 系统结构

多变量电液伺服系统的实验装置如图1所示, 该装置由两只三位四通伺服阀, 二只对称液压缸、油源系统、负载、控制系统等组成, 系统的动态特征可由下面方程描述:

设伺服阀阀芯从中位右移, $x_{v1} > 0$, 中位左移, $x_{v1} < 0$ ($i = 1, 2$) 若液压缸由左往右运动, 则伺服阀的流量方程为:

$$Q_{v11} = C_d W x_{v1} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_{11})} \quad x_{v1} > 0 \quad (1)$$

$$Q_{v12} = C_d W x_{v1} \sqrt{\frac{2}{\rho} P_{12}} \quad x_{v1} < 0 \quad (2)$$

其中 Q_{v11} 为伺服阀1左边流出的流量, m^3/s ; Q_{v12} 为伺服阀1右边流入的流量, m^3/s ; C_d 为流量系数; ρ 为液体密度, kg/m^3 ; W 为阀的窗口面积梯度, m ; x_{v1} 为阀芯相对于中心的位移, m ; P_s 为油源压力, Pa ; P_{11} 为液压缸1左边的压力, Pa ; P_{12} 为液压缸1右边的压力, Pa 。

液压缸1的流量方程为:

$$Q_{11} = C_{ip} (P_{11} - P_{12}) + C_{ep} P_{11} + \frac{V_1}{\beta_e} \frac{dP_{11}}{dt} + A_1 \frac{dy_1}{dt} \quad (3)$$

$$Q_{12} = C_{ip} (P_{11} - P_{12}) + C_{ep} P_{12} + \frac{V_2}{\beta_e} \frac{dP_{12}}{dt} + A_1 \frac{dy_1}{dt} \quad (4)$$

$$Q_{11} = Q_{v11}, \quad Q_{12} = Q_{v12} \quad (5)$$

其中 Q_{11} 为液压缸1从左边流出的流量, m^3/s ; Q_{12} 为液压缸2从右边流入的流量, m^3/s ; C_{ip} 为液压缸内压力泄漏系统, $\text{m}^3/\text{N} \cdot \text{s}$; C_{ep} 为液压缸外压力泄漏系统, $\text{m}^3/\text{N} \cdot \text{s}$; V_1 为进油腔体积, m^3 ; V_2 为回油腔体积, m^3 ; β_e 为系统有效容积弹性系数, Pa ; y_1 为液压缸1的位移, m ; A_1 为液压缸1的活塞面积, m^2 。

液压缸1的力方程为:

① 湖南省自然科学基金资助项目 收稿日期: 1995-01-21; 修回日期: 1995-05-13

第1作者 罗 安, 男, 37岁, 博士, 副教授

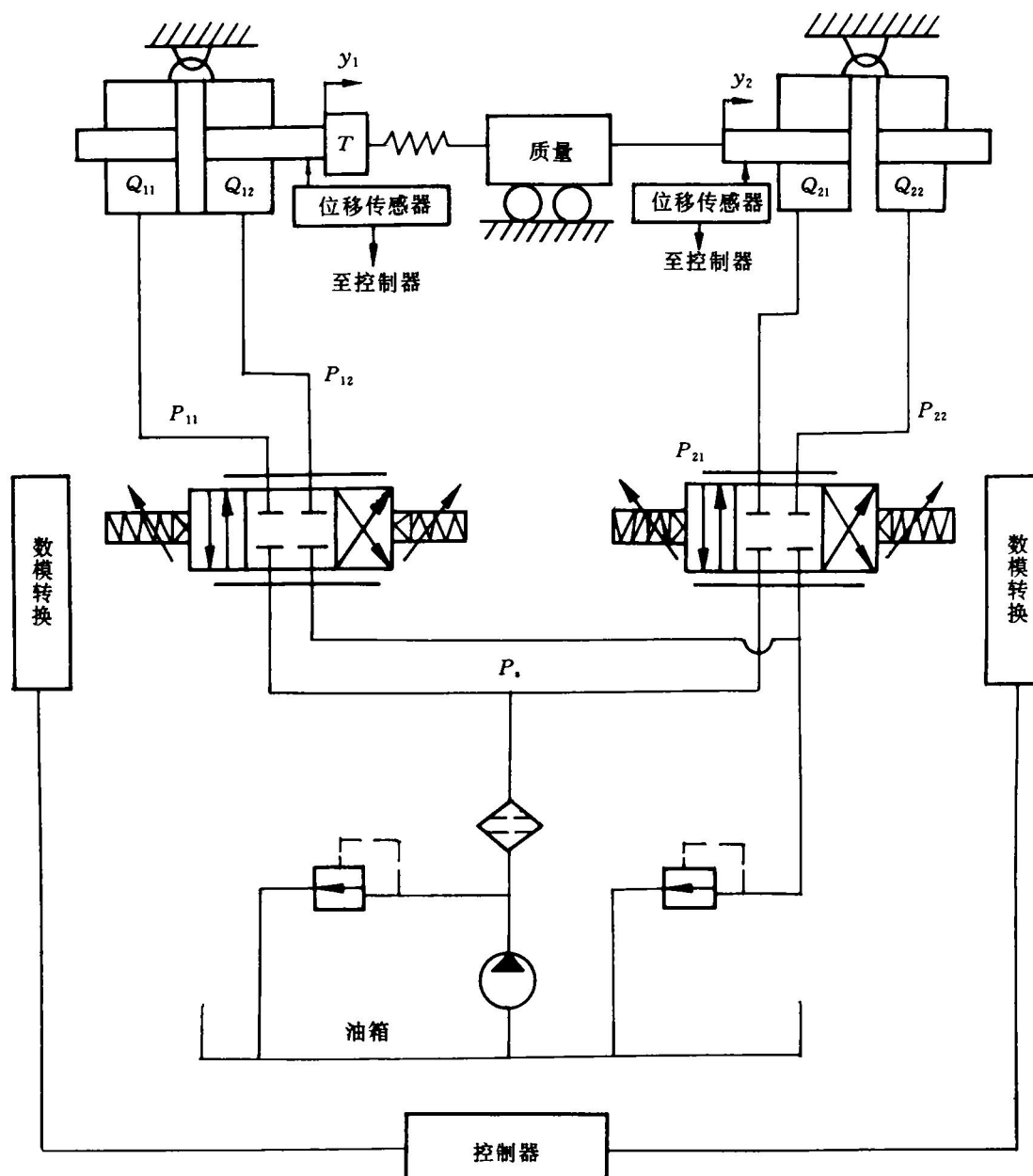


图1 多变量电液伺服系统原理图

$$A_1(P_{11} - P_{12}) + F_2 = M \frac{d^2 y_1}{dt^2} + \beta_p \frac{dy_1}{dt} + K_s y_1 + F_n \quad (6)$$

其中 F_2 为液压缸 2 对液压缸 1 施加的力, N; M 为活塞和负载的总质量, kg; β_p 为负载粘性阻尼系数, N·s/m; k_s 为弹性系数, N/

m; F_n 为外界负载力, N。

同理, 对于伺服阀 2 和液压缸 2, 有:

$$Q_{v21} = C_d W_{x_{v2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - P_{21})} \quad (7)$$

$$Q_{v22} = C_d W_{x_{v2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} P_{22}} \quad (8)$$

$$Q_{21} = C_{ip}(P_{21} - P_{22}) + C_{ep}P_{21} +$$

$$\frac{V_1}{\beta_e} \frac{dP_{21}}{dt} + A_2 \frac{dy_2}{dt} \quad (9)$$

$$Q_{22} = C_{ip}(P_{21} - P_{22}) + C_{ep}P_{22} +$$

$$\frac{V_2}{\beta_e} \frac{dP_{22}}{dt} + A_2 \frac{dy_2}{dt} \quad (10)$$

$$Q_{v21} = Q_{21} \quad Q_{v22} = Q_{22} \quad (11)$$

$$F_2 = A_2(P_{21} - P_{22}) - \beta_p \frac{dy_2}{dt} \quad (12)$$

其中 x_{v2} 为阀 2 的阀芯相对于中心的位移, m; P_{21} 为液压缸 2 左边的压力, Pa; P_{22} 为液压缸 2 右边的压力, Pa; y_2 为液压缸 2 的位移, m; A_2 为液压缸 2 的活塞面积, m^2 。

2 解耦控制策略

图 1 所示的电液伺服系统为双输入、双输出多变量最小相位系统, 令 $U(k) = \begin{bmatrix} x_{v1} \\ x_{v2} \end{bmatrix}$, $Y(k) = \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix}$, 将方程(1)~(12)离散化, 并用一阶泰勒级数进行非线性函数的线性化^[3]得:

$$A(Z^{-1})Y(k) = B(z^{-1})U(k) \quad (13)$$

其中 $A(Z^{-1})$, $B(Z^{-1})$ 为系统参数确定的矩阵多项式:

$$\begin{cases} A(Z^{-1}) = 1 + A_1Z^{-1} + \dots + A_nZ^{-n} \\ B(Z^{-1}) = B_1Z^{-1} + B_2Z^{-2} + \dots + B_nZ^{-n} \end{cases} \quad (14)$$

$A_1 \dots A_n$, $B_1 \dots B_n$ 为实常数矩阵。

解耦控制器的设计目的是选择图 2 所示的

输出的反馈阵 $K(Z^{-1})$ 和前馈补偿阵 $G(Z^{-1})$ 使闭环传递函数为对角阵, 并且 $K(Z^{-1})$ 、 $G(Z^{-1})$ 应该是可实现的。由图 2, 控制律 $u(k)$ 为:

$$U(k) = -K(Z^{-1})Y(k) + G(z^{-1})V(k) \quad (15)$$

其中:

$$\begin{cases} K(Z^{-1}) = K_0 + K_1Z^{-1} + \dots + K_nZ^{-n} \\ G(Z^{-1}) = G_0 + G_1Z^{-1} + \dots + G_nZ^{-n} \end{cases} \quad (16)$$

$K_0, K_1 \dots K_n, G_0, G_1 \dots G_n$ 为实常数矩阵

$V(k) = [V_1 \ V_2]^T$ 为指令信号

由式(13)和(15), 可得:

$$[A(Z^{-1}) + B(Z^{-1})K(Z^{-1})]Y(k) = B(Z^{-1})G(Z^{-1})V(k) \quad (17)$$

即:

$$Y(k) = T_c(Z^{-1})V(k) \quad (18)$$

其中:

$$T_c(Z^{-1}) = [A(Z^{-1}) + B(Z^{-1}) \times K(Z^{-1})]^{-1} \times B(Z^{-1})(G(Z^{-1})) \quad (19)$$

因此, 要使系统解耦, 应使 $T_c(Z^{-1})$ 是稳定的、对角的、可实现的矩阵。

$$\text{令 } T_c(Z^{-1}) = T_a^{-1}(Z^{-1})T_b(Z^{-1}) \quad (20)$$

其中:

$$T_a(Z^{-1}) = I + T_{a1}Z^{-1} + \dots + T_{an}Z^{-n}$$

$$T_b(Z^{-1}) = T_{b1}Z^{-1} + T_{b2}Z^{-2} +$$

$$\dots + T_{bn}Z^{-n}$$

$T_{ai}, T_{bi} (i = 1, 2, \dots, n)$ 是对角实常数矩

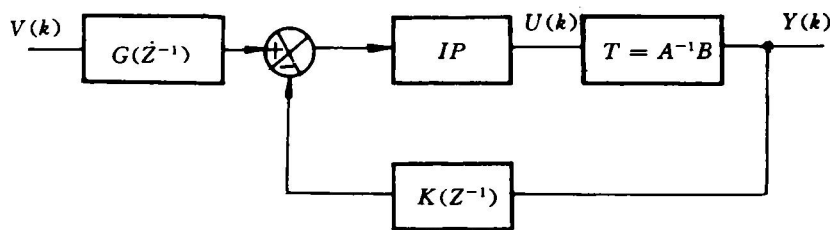


图 2 解耦系统框图

阵, $T_s(Z^{-1})$ 的极点对应于闭环系统的极点, 因此, 它的极点必须是稳定的。

由式(19)和(20), 可知:

$$T_s(Z^{-1}) = A(Z^{-1}) + B(Z^{-1})K(Z^{-1}) \quad (21)$$

$$T_b(Z^{-1}) = B(Z^{-1})G(Z^{-1}) \quad (22)$$

从式(21)、(22)可知, 解这两个矩阵方程, 将得不到 $K(Z^{-1})$ 、 $G(Z^{-1})$ 为有限阶的解。为此, 我们引入一个稳定的滤波器 $b(Z^{-1})$, 使:

$$b(Z^{-1})U(k) = -K(Z^{-1})Y(k) + G(Z^{-1})V(k) \quad (23)$$

其中:

$$b(Z^{-1}) = b_0 + b_1Z^{-1} + b_2Z^{-2} + \dots b_n \neq 0 \quad (24)$$

由解(21), (22), 可得:

$$G(Z^{-1}) = B^{-1}(Z^{-1})T_b(Z^{-1}) = \frac{[\text{adj}B(Z^{-1})]}{\det[B(Z^{-1})]}T_b(Z^{-1}) \quad (25)$$

$$K(Z^{-1}) = B^{-1}(Z^{-1})(T_s(Z^{-1}) - A(Z^{-1})) = \frac{[\text{adj}B(Z^{-1})]}{\det[B(Z^{-1})]} \times [T_s(Z^{-1}) - A(Z^{-1})] \quad (26)$$

其中:

$$\det(B(Z^{-1})) = Z^{-p}(b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots) = b(Z^{-1})Z^{-p}, b_0 \neq 0 \quad (27)$$

因为系统是最小相位系统, 即系统的 $b(Z^{-1})$ 为稳定多项式, 所以

$$G(Z^{-1}) = Z^p[\text{adj}B(Z^{-1})]T_b(Z^{-1}) \quad (28)$$

$$K(Z^{-1}) = Z^p[\text{adj}B(Z^{-1})][T_s(Z^{-1}) - A(Z^{-1})] \quad (29)$$

为有限阶多项式, 故 $G(Z^{-1})$, $K(Z^{-1})$ 为解耦系统的解。

3 仿真和实验

设被控系统为:

$$A(Z^{-1})Y(k) = B(Z^{-1})U(k)$$

其中:

$$A(Z^{-1}) = 1 + A_1Z^{-1} =$$

$$\begin{bmatrix} 1 + 0.55Z^{-1} & -0.5Z^{-1} \\ 0.5Z^{-1} & 1 - 0.85Z^{-1} \end{bmatrix}$$

$$B(Z^{-1}) = B_1Z^{-1} + B_2Z^{-2} =$$

$$\begin{bmatrix} Z^{-1} - 1.5Z^{-2} & 0.5Z^{-1} - 2.1Z^{-2} \\ -1.5Z^{-1} - Z^{-2} & 1.5Z^{-1} + Z^{-2} \end{bmatrix}$$

由(27)式 $b(Z^{-1}) = 1.95 - 0.15Z^{-1} - 0.6Z^{-2}$ 为稳定多项式。

选择期望的闭环极点分别为 $Z = 0.3$ 和 $Z = 0.4$, 则有:

$$T_s(Z^{-1}) = \begin{bmatrix} 1 - 0.3Z^{-1} & 0 \\ 0 & 1 - 0.4Z^{-1} \end{bmatrix}$$

为了保证闭环系统稳定, 并且 $K(Z^{-1})$ 、 $G(Z^{-1})$ 可实现, 选择 $T_b(Z^{-1})$ 为:

$$T_b(Z^{-1}) = \begin{bmatrix} 0.7 & 0 \\ 0 & 0.6 \end{bmatrix} Z^{-1}$$

$$T_c(Z^{-1}) = \begin{bmatrix} \frac{0.7Z^{-1}}{1 - 0.3Z^{-1}} & 0 \\ 0 & \frac{0.6Z^{-1}}{1 - 0.4Z^{-1}} \end{bmatrix}$$

$K(Z^{-1})$, $G(Z^{-1})$ 可由式(28)、(29)计算得:

$$K(Z^{-1}) = \begin{bmatrix} 0.77 & 0.375 \\ -1.775 & 1.2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1.9 & 1.445 \\ -1.6 & 1.175 \end{bmatrix} \times Z^{-1}$$

$$G(Z^{-1}) = \begin{bmatrix} 0.84 & -0.3 \\ 1.05 & 0.6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.7 & 1.2 \\ 0.7 & 0.9 \end{bmatrix} \times Z^{-1}$$

图3为输入信号 $V_1 = 2\text{m}$ 、 $V_2 = 3\text{m}$ 时, 解耦系统的仿真响应曲线, 图4为图1所示的多变量系统给定分别为 3m 和 2.5m 的响应曲线, 系统被较好的解耦, 其控制性能良好。

4 结论

本文提出的多变量解耦控制策略, 仅利用系统的输入和输出信号, 即可实现系统的解耦控制, 并且可配置期望的闭环系统极点。该控制策略算法简单、执行时间短, 因而容易应用

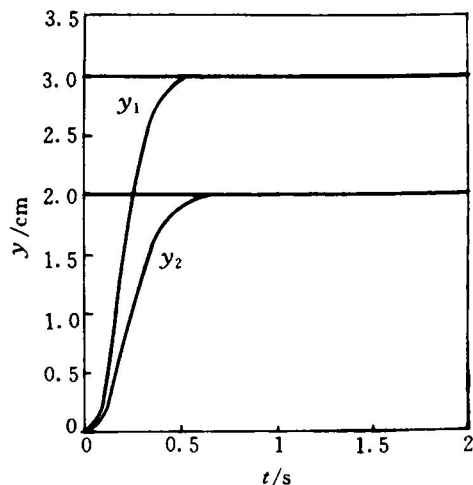


图3 多变量解耦控制仿真曲线

$$\begin{bmatrix} 1 + 0.55Z^{-1} & -0.5Z^{-1} \\ 0.5Z^{-1} & 1 - 0.85Z^{-1} \end{bmatrix} Y(k) = \begin{bmatrix} Z^{-1} + 1.5Z^{-2} & 0.5Z^{-1} - 2.1Z^{-2} \\ -1.5Z^{-1} - Z^{-2} & 1.5Z^{-1} + Z^{-2} \end{bmatrix} U(k)$$

于实际的多变量控制领域中。仿真和实验结果表明该控制策略不仅能获得满意的控制效果,而且,具有良好的参数鲁棒性。

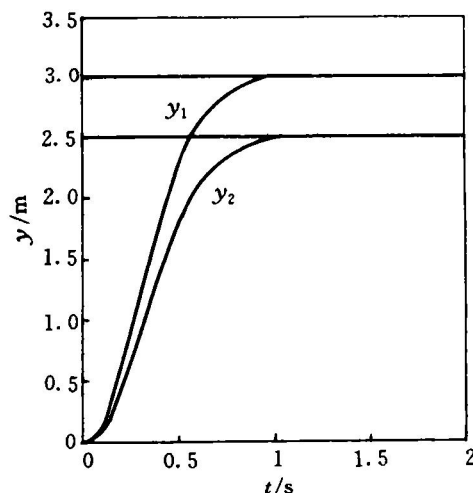


图4 多变量电液伺服控制阶跃响应曲线

$$\begin{bmatrix} 1 + 0.31Z^{-1} - 0.32Z^{-1} \\ -0.32Z^{-1} & 1 - 0.53Z^{-1} \end{bmatrix} Y(k) = \begin{bmatrix} Z^{-1} - 0.8Z^{-2} & 0.5Z^{-1} - 1.5Z^{-2} \\ -0.9Z^{-1} - 0.5Z^{-2} & 0.9Z^{-1} + 0.5Z^{-2} \end{bmatrix} U(k)$$

参考文献

- 1 Wolovich W A. IEEE Trans, 1975, AC-20: 148-154.
- 2 Bayoumi M M. Duffield T L. IEEE Trans, 1977, AC-22: 142-143.
- 3 罗 安. 博士学位论文, 浙江大学, 1993, 6.

DECOUPLING CONTROL OF MULTI-VARIABLE ELECTRIC-HYDRAULIC SERVO SYSTEM

Luo An

Department of Automatic Control Engineering,
Central South University of Technology, Changsha 410083

ABSTRACT A new decoupling control method for multi-variable electric-hydraulic servo system was presented. It uses only output and input signals as feedforward and feedback complex decoupling control, and can make electric-hydraulic servo system which is a nonlinear-minimum phase realize completely decoupling and displace poles of the closed-loop system also. The simulation and experiment results have shown that the decoupling control strategy was satisfied.

Key words electric-hydraulic servo control multi-variable system decoupling control pole displacement

(编辑 何学锋)