

文章编号: 1001-0920(2002)01-0120-03

# 液压机器人的预测函数控制

张智焕, 王树青, 王 宁

(浙江大学 工业控制技术国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 针对液压机器人系统存在较大的不确定性及干扰, 其特征参数将随工况的变化和外载及环境的影响产生大幅度变动的特点, 提出一种预测函数控制(PFC)和PID相结合的新方法。该方法相当于一个PFC-P控制结构, 通过其本身内环来克服随机干扰, 外环采用预测函数控制来获得优良的跟踪性能和鲁棒性, 实现目标和控制的分层。仿真结果表明, 该PFC-P控制方法能兼顾跟踪性、鲁棒性和抗干扰性等性能指标, 可获得满意的控制效果。

**关键词:** 液压机器人; 预测函数控制; 鲁棒性

**中图分类号:** TP 273      **文献标识码:** A

## Predictive function control of hydraulic robot

ZHANG Zhi-huan, WANG Shu-qing, WANG Ning

(National Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The predictive function control (PFC) with PID of a hydraulic robot system is presented with actions of random disturbance and uncertain parameters, such as the hydraulic nature frequency, the hydraulic damping factor and external load disturbance, in which characteristic parameter is greatly varied with the hydraulic robot system work state, the external load and environment. It is similar to PFC-P control structure. The random disturbance is surpassed in inner-loop. The good tracking performance and robustness are obtained by predictive function control in external loop. The layer of goal and control is divided. The simulation results show that the new PFC-P control method has satisfactory tracking performance, robustness and the ability to suppress disturbance.

**Key words:** hydraulic robot; predictive function control; robustness

## 1 引 言

液压机器人的特征参数, 如液压固有频率、液压阻尼比以及外负载干扰等, 将随着工况的变化及环境的影响而产生大幅度的变化, 有时这些变化还带有随机性, 给控制系统的设计带来困难。预测控制是近年来广泛重视并得到应用的一类新型控制方法。它对模型要求低, 具有很好的跟踪性能, 并对模型失

配有较强的鲁棒性, 这些都是传统的PID控制无法相比的。然而, 在抗干扰性方面, 预测控制的效果却往往不如传统的PID控制。

要在鲁棒性和抗干扰性之间寻求折衷, 通常是液压机器人控制系统设计的难点之一。为此, 本文提出一种新的预测函数控制加(PID)比例的串级结构。通过在内环采用常规PID控制克服外负载干扰, 在外环采用预测函数控制来获得优良的跟踪性

收稿日期: 2000-06-20; 修回日期: 2000-11-13

作者简介: 张智焕(1964—), 男, 浙江新昌人, 副教授, 博士, 从事工业过程模型化与预测控制、非线性控制等研究; 王树青(1939—), 男, 浙江仙居人, 教授, 博士生导师, 从事工业过程模型化与优化控制、预测控制等研究。

能和鲁棒性, 从而克服液压固有频率及液压阻尼比的参数变化。仿真结果表明了这种方法的有效性。

## 2 液压机器人的 PFC-P 串级控制

液压机器人的数学模型见文献[1], 由于液压机器人对象的特殊性, 一般的控制方法往往不能获得好的控制效果, 主要原因在于:

- 1) 其特征参数(如液压固有频率和液压阻尼比) 随着工况及环境的影响产生大幅度的变化;
- 2) 随机干扰(外负载干扰)  $F$  变化幅度大。

因此, 要求所设计的控制器既能克服干扰的影响, 又要具有一定的鲁棒性。然而, 抗干扰性与鲁棒性往往存在直接矛盾, 如果采用常规控制方式, 若提高对模型失配的鲁棒性, 就必然会降低抗干扰性。这也是控制的困难所在。本文提出一种新的预测函数控制与(PID) 比例控制相结合的方法, 使被控系统的各项性能都比较满意。其原理框图如图 1 所示。

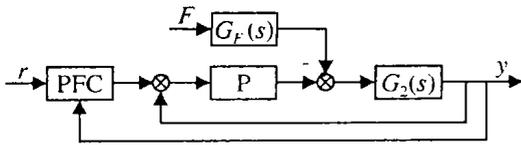


图 1 PFC-P 串级控制

设计图 1 串级控制系统时, 选择副回路对象为

$$G_2(s) = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2\omega_n \xi_n s + \omega_n^2)} \quad (1)$$

并且副回路中含有系统的主要干扰  $F$ , 干扰通道传递函数为

$$G_F(s) = \frac{K_{ce}}{A} \left[ 1 + \frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}} s \right] \quad (2)$$

副回路控制的主要目的在于及时抑制进入对象的快速干扰, 这是一种(准)连续控制。PID 控制可以获得较好的随动性能, 并对进入副回路的随机干扰  $F$  有较好的抑制作用。应该指出, 对于副回路的 PID 控制, 不必追求其参数的最优性, 只要能快速抑制干扰并与广义对象相比动态足够快即可, 一般用比例调节器(P) 便可满足要求。这里取  $P = K_v$ 。

主回路的设计采用预测函数控制, 其广义对象为

$$Y(s) = \frac{K_v \omega_n^2 u(s) - \frac{K_{ce}}{A} \left[ 1 + \frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}} s \right] \omega_n^2 F(s)}{s^3 + 2\omega_n \xi_n s^2 + \omega_n^2 s + K_v \omega_n^2} \quad (3)$$

其中,  $\omega_n$  和  $\xi_n$  分别为液压固有频率及液压阻尼比, 是随工况变化的特征参数;  $F$  为集中考虑作用到液

压主动关节上的等效力, 其内模为

$$Y_m(s) = \frac{K_v \omega_n^2 u(s)}{s^3 + 2\omega_n \xi_n s^2 + \omega_n^2 s + K_v \omega_n^2} \quad (4)$$

## 3 过程输出预测

PFC 认为, 模型输出  $y(k+j)$  由两部分组成: 模型的自由响应  $y_l(k+j)$  和模型的受迫响应  $y_f(k+j)$ , 即

$$y_m(k+j) = y_l(k+j) + y_f(k+j)$$

1) 模型的自由响应  $y_l(k+j)$ : 是在假设  $u(k+i) = 0 (i > 0)$  前提下模型的输出值, 它仅仅依赖于过去时刻的控制量及输出量, 而与当前及将来时刻的控制量无关;

2) 模型的受迫响应  $y_f(k+j)$ : 是从当前时刻起加入控制作用后新增加的模型响应。

考虑预测模型为状态空间模型结构

$$\begin{cases} X(k) = GX(k-1) + Hu(k-1) \\ X(0) = X_0 \\ y(k) = CX(k), \quad k = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (5)$$

由式(5) 得

$$\begin{aligned} y(k+1) &= CX(k+1) = CGX(k) + CHu(k) \\ y(k+2) &= CX(k+2) = CG^2X(k) + \\ &\quad CGHu(k) + CHu(k+1) \\ &\quad \vdots \end{aligned}$$

由数学归纳法可得将来  $k+j$  时刻( $j = 1, 2, \dots, P$ ) 的模型自由响应  $y_l(k+j)$ , 以及模型的受迫响应  $y_f(k+j)$

$$y_l(k+j) = CG^j X(k) \quad (6)$$

$$y_f(k+j) = C \sum_{i=0}^{j-1} G^{j-i-1} H u(k+i) \quad (7)$$

PFC 认为, 控制输入结构是确保控制性能的关键。在 PFC 中, 控制作用可表示为若干已知基函数  $f_n (n = 1, 2, \dots, n_B)$  的线性组合, 即

$$u(k+i) = \sum_{n=1}^{n_B} \mu_n f_n(i) \quad (8)$$

其中,  $f_n (n = 1, 2, \dots, n_B)$  称为基函数,  $\mu_n$  是线性组合系数,  $f_n(i)$  表示基函数在  $t = iT$  时的值,  $n_B$  为基函数的个数,  $P$  为预测优化时域长度。基函数的选取依赖于被控对象的性质和期望轨线的要求。当设定值在预测时域内的变化率小于或等于某一值时, 可取一个基函数, 一般选用阶跃函数, 即

$$u(k+i) = u(k) = \mu_1 \quad (9)$$

当设定值在预测时域内的变化率大于某一值时, 可

取两个基函数,一般选用阶跃函数和斜坡函数,即

$$u(k+i) = \mu_1 + \mu_2 i \quad (10)$$

其中  $\mu_1$  和  $\mu_2$  是加权系数。基函数在不同时刻的取值分别为

$$f_1(i) = 1, \quad f_2(i) = i$$

根据设定值的特点,将式(9)或(10)代入(7)便可计算出模型的受迫响应,从而得到过程的预测输出。

## 4 控制规律设计

在 PFC 的在线优化算法中,未来控制作用是通过迭代、最优化和约束处理等一系列步骤实现的。最常用的方法是使在优化时域上参考轨迹和过程预测输出的平方和最小,其优化性能指标一般采用二次型性能指标

$$\min J = \sum_{j=1}^P [w(k+j) - \hat{y}(k+j)]^2 \quad (11)$$

其中参考轨迹

$$w(k+j) = r(k+j) - \alpha^j [r(k) - y(k)]$$

式中,  $\alpha = e^{-T_s/T_r}$ ,  $T_s$  是采样周期,  $T_r$  是参考轨迹时间常数,  $r$  是设定值,  $y$  是系统输出。而预测值

$$y(k+j) = y_m(k+j) + e(k+j) = y_i(k+j) + y_f(k+j) + e(k+j) \quad (12)$$

将式(12)代入(11)得

$$J = \sum_{j=1}^P [w(k+j) - \hat{y}(k+j)]^2 = \sum_{j=1}^P [\mu^T y_f - d(k+j)]^2$$

其中

$$\begin{aligned} \mu &= [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{n_B}]^T \\ y_f &= [y_{f1}(j), y_{f2}(j), \dots, y_{fn_B}(j)]^T \\ d(k+j) &= r(k+j) - \alpha^j [r(k) - y(k)] - CG^j X(k) - e(k+j) \end{aligned}$$

极小化性能指标  $J$  得系数  $\mu$ , 即

$$\partial J / \partial \mu = 2(Y_f Y_f^T \mu - Y_f d) = 0$$

其中  $Y_f$  是一个矩阵,其列为  $y_f$ , 即

$$Y_f = \begin{bmatrix} y_{f1}(1) & y_{f1}(2) & \dots & y_{f1}(P) \\ y_{f2}(1) & y_{f2}(2) & \dots & y_{f2}(P) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{fn_B}(1) & y_{fn_B}(2) & \dots & y_{fn_B}(P) \end{bmatrix}$$

$$d = [d(k+1), d(k+2), \dots, d(k+P)]$$

则  $\mu = (Y_f Y_f^T)^{-1} Y_f d$

因此  $k+i$  时刻的控制作用为

$$u(k+i) = \sum_{n=1}^{n_B} \mu_n f_n(i)$$

而  $k$  时刻的控制为

$$u(k) = \sum_{n=1}^{n_B} \mu_n f_n(0)$$

## 5 仿真实验

液压机器人被控对象随机特征参数的变化范围  $\omega = 80 \sim 138$ ,  $\xi_n = 0.1 \sim 0.2$ , 随机干扰变化范围  $F = -10\,000 \sim 10\,000$ , 放大系数  $K_v = 35$ ,  $K_\omega = 0.05$ ,  $\beta = 100$ ,  $A = 10$ ,  $V_t = 0.1$ 。虽然机理模型中液压固有频率  $\omega$  和液压阻尼比  $\xi_n$  会产生大幅度变动,但可选定其中一组以构成预测模型。如取  $\omega_n = 100$ ,  $\xi_n = 0.1$ 。

预测长度  $P = 6$ , 采样周期  $T_s = 1$  ms, 参考轨迹时间常数  $T_r = 10$  ms。基函数的个数  $n_B = 2$ ,  $\omega = 80$ ,  $\xi_n = 0.1$ 。当  $t = 1\,000$  ms 时,加入随机干扰  $F = 10\,000$ , 系统响应的仿真结果如图 2 所示。

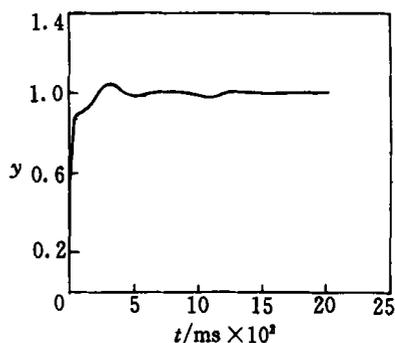


图 2 系统影响仿真结果

仿真结果表明,本文提出的 PFC-P 控制方法能兼顾跟踪性、鲁棒性和抗干扰性等各方面的性能指标,可获得满意的控制效果,是一种有效的液压机器人控制新方法。

参考文献(References):

- [1] 孔令富, 黄真, 蔡鹤皋. 一种带干扰力补偿的液压并联机器人 MRACS[J]. 机器人(Robot), 1994, 17(4): 218-222.
- [2] Kuntze H B, Jacobasch A, Richalet J. On the predictive function control of an elastic industrial robot[A]. Proc 25th CDC[C]. Athens, 1986. 1877-1881.
- [3] Richalet J. Predictive functional control—Application to fast and accurate robots[A]. IFAC 10th World Congress[C]. Munich, 1987. 251-258.