

文章编号 :1001 - 2486(2004)02 - 0089 - 05

机电伺服系统的预测函数控制算法研究*

刘 钢, 李圣怡, 范大鹏

(国防科技大学机电与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 针对典型机电伺服系统, 提出了一种 PFC-PID 串级透明控制策略, 通过内环 PID 控制来提高抗干扰性, 调节 PID 参数将其拟合成为一阶加纯滞后系统, 作为外环 PFC 控制的广义对象, 外环采用预测函数控制来获得良好的跟踪性能和强鲁棒性。详细分析了预测函数控制在具有参数饱和和限制环节和滞后的机电伺服系统中的实施算法, 分析了系统的闭环性能, 并得到了其稳定鲁棒性条件。通过仿真验证了方法具有良好的鲁棒性和抗干扰能力。

关键词 机电伺服系统; 预测函数控制; PFC-PID 串级透明控制结构; 鲁棒性

中图分类号 TP273 **文献标识码** A

Studies of Predictive Functional Control Arithmetic in Electromechanical Servo System

LIU Gang, LI Sheng-yi, FAN Da-peng

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract PFC-PID cascade transparent control strategy is presented with actions of typical electromechanical servo system. The random disturbance is surpassed in inner-loop with PID control, and the internal loop is the generalized control plant of the external PFC loop. The inner model of PID is the first-order plus the dead-time model which is gained by matching generalized control plant. The paper analyses the implementary arithmetic in the servo system with saturation and lag segment, and analyses the performance of the close loop to obtain the condition of stability and robustness. The simulation results show that the new PFC-PID control method is of robustness and the ability to suppress disturbance.

Key words electromechanical Servo system; predictive functional control; PFC-PID; robustness

预测函数控制(PFC, Predictive Functional Control)是近年来被广泛重视并得到应用的新型控制算法。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。另外, 由于典型的伺服系统多为非自衡系统, 而 PFC 算法仅适用于自衡系统, 为此本文使用一种预测函数控制加 PID 的串级透明控制结构, 如图 1 所示。

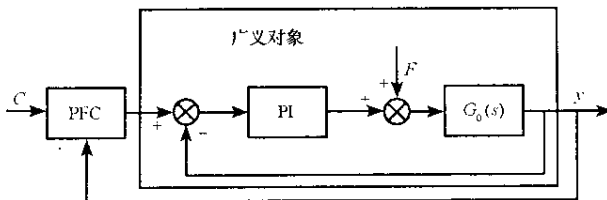


图 1 PFC-PID 串级透明控制结构

Fig. 1 PFC-PID cascade transparent control structure

内环以高采样率的 PID 控制尽快抑制干扰, 对于 PID 控制回路的高阶渐进稳定系统, 通过 PID 参数

* 收稿日期 2003 - 09 - 19

作者简介 刘钢(1975—), 男, 博士生。

的调节总可以拟合简化得到一阶加纯滞后的广义对象。内环路的 PID 控制不必追求控制参数的最优,因此,内环路采用 PI 控制,整个内环路作为 PFC 的广义对象处理。这不但有利于减小干扰引起的偏差,而且也有利于外环路的设计。外环在此基础上再用 PFC 实现优化来获得优良的跟踪性能和鲁棒性。

1 预测函数控制算法

1.1 一阶纯滞后系统的预测函数控制算法

设一阶环节的传递函数为:

$$G(s) = \frac{k}{Ts + 1} \exp(-\tau s) \quad (1)$$

1.1.1 基函数

在 PFC 中,新引入的控制函数可表示为若干已知基函数 $f_n (n = 1, \dots, N)$ 的线性组合。选取两个基函数:阶跃和斜坡函数,则控制量 $u(k+i) = \lambda_1 + \lambda_2 i (i = 0, 1, \dots, P-1)$,其中 λ_1, λ_2 为加权系数, P 为预测步长。由此可知,在控制变量优化计算时,需要求解两个未知系数 λ_1, λ_2 ,故被称为双值 PFC。

1.1.2 预测模型

预测模型即内部模型,是指可以获得的对象的描述。预测函数控制中既可采用传递函数或状态空间方程表示的参数模型,也可以是对象的脉冲响应或阶跃响应表示的非参数模型。

实际对象差分方程形式为:

$$y(k) = a_1 y(k-1) + b_1 u(k-1-r) \quad (2)$$

模型差分方程形式为:

$$y_m(k) = a_1 y_m(k-1) + b_1 u(k-1-r_m) \quad (3)$$

假如过程具有时滞特性,则测量信号无法体现出从当前时刻到时滞长度以内的未来变化信息。因此,用无时滞的对象模型来修正实际的测量值,用预测的未来系统输出值代替当前系统输出测量值:

$$y_{\text{max}}(k) = a_1 y_{\text{max}}(k-1) + b_1 u(k-1) \quad (4)$$

系统未来的实际输出值 $y(k+r_m)$ 在当前时刻 k 显然未知(因果系统),为此,对当前时刻的系统输出测量值 $y(k)$ 进行修正,使用线性预测的方法构造无纯滞后对象未来的输出值:

$$y_{\text{av}}(k) = y(k) + y_{\text{max}}(k) - y_{\text{max}}(k-r_m) \quad (5)$$

1.1.3 误差预测及补偿

在实际系统中,往往由于模型失配,参数时变及噪声等影响,模型输出与系统输出间常常存在误差。在 PFC 中,此误差由一个预测器在未来优化时域中进行预测,并将其作为前馈量引入参考轨迹中加以补偿。由于滞后,在进行误差预测和校正时,误差也是用修正后的过程输出和修正后的模型输出计算:

$$e_{\text{av}}(k) = y_{\text{av}}(k) - y_{\text{max}}(k) \quad (6)$$

$$\begin{cases} e_{\text{av}}(k+i) = e_{\text{av}}(k) + \beta * i \\ \beta = \frac{\sum_{j=1}^p \{j * [e_{\text{av}}(k) - e_{\text{av}}(k-j)]\}}{\sum_{j=1}^p j^2} \end{cases} \quad (7)$$

1.1.4 参考轨迹

在 PFC 中,控制系统的期望输出是由从现时实际输出 $y(k)$ 出发且向设定值 C 光滑过渡的一条参考轨迹规定的,以防止出现控制量剧烈变化和超调等现象。对于渐进稳定系统而言,参考轨迹通常选取为一阶指数函数。由于滞后,把参考轨迹计算公式修正为:

$$y_r(k+i) = \alpha^k y_{\text{av}}(k) + (1 - \alpha^k) C(k+i+r_m) \quad (8)$$

1.1.5 滚动优化

在预测函数控制中,未来控制变量计算是经迭代、优化、约束条件等一系列算法步骤来进行的。以修正后的 $y_{\text{av}}(k)$ 和 $y_{\text{max}}(k)$ 代替无滞后系统算法中的 $y(k)$ 和 $y_m(k)$,即:

$$\min J_p = \sum_{i=1}^p [y_{\text{max}}(k+i) + y_r(i) + e_{\text{av}}(k+i) - y_r(k+i)]^2 \quad (9)$$

由于一阶系统第 P 步的系统输出可以由当前时刻的对象输出和控制输入采用递推直接得到,因此可以得到最优控制的解析式:

$$u(k) = \lambda_1 = \frac{g_2(P_2) [y_f(k+P_1) - \alpha^{P_1} y_{max}(k) - e_{av}(k+P_1)] - g_2(P_1) [y_f(k+P_2) - \alpha^{P_2} y_{max}(k) - e_{av}(k+P_2)]}{g_1(P_1)g_2(P_2) - g_1(P_2)g_2(P_1)} \quad (10)$$

其中 $g_n(i)$ 为在基函数作用下受控对象的输出响应(模型函数输出),可事先离线算出。

1.2 PFC 中对参数限制非线性环节的处理

在实际的机电伺服系统中,控制输入往往是一个饱和限制环节,为了得到满足约束条件的真正可行的优化解,必须把约束条件作为 PFC 滚动优化的有机组成部分加以考虑。

可将电压限制非线性环节后的电压 $u(k)$ 看做控制输入 $u(k)$ 过程的状态变量,按照现代控制的方法建立状态观测器,滚动优化从无约束优化算法修改为有约束最优化算法。

$$\min_{u(k)} J_P = \sum_{i=1}^P [y_{max}(k+i) + y_f(i) + e_{av}(k+i) - y_f(k+i)] \quad (11)$$

约束条件:

$$L_{mu1} \leq u(k) \leq L_{mu2} \quad (12)$$

这类具有二次型性能指标且带有线性等式和不等式约束的优化问题有许多优化算法可以选用,比如复形调优法、模拟退火法、遗传算法等。

1.3 预测函数控制的参数调节

PFC 的优点在于参数对控制性能的影响恰好各有侧重,可以像 PID 控制一样易于调节,如表 1 所示。

表 1 参数设计准则

Tab.1 Parameter design rule

特性 \ 参数	基函数	预测长度	参考轨迹
精度	2	1	0
稳定性、鲁棒性	1	2	1
动态性能	0	0	2

注:相关程度从 2 到 0 递减

2 预测函数控制的闭环性能分析

预测函数控制结构可以化为内模控制结构,由于内模控制理论已经比较成熟,可以使用内模控制的性质来分析预测函数控制的闭环性能。

2.1 闭环系统稳态误差分析

稳态时 $z \rightarrow 1$,代入控制器传递函数 $G_c(z)$ 中,得:

$$G_c(1) = \frac{g_2(P_2) - g_2(P_1)}{K_m [g_2(P_2) - g_2(P_1)]} = \frac{1}{K_m} = G_m^{-1}(1) \quad (13)$$

由内模控制的理想控制器特性可知,控制器对阶跃输入和常值干扰均不存在稳态误差。

2.2 模型匹配时的闭环稳定性分析

由内模控制的对偶稳定性性质可知,当对象与模型匹配时,则系统相当于开环,因此 IMC 系统内部稳定的充要条件是:对象和控制器都是稳定的。由于对象是稳定的,控制器总是稳定的,所以对于一阶加纯滞后对象,模型匹配时双值预测函数控制总是闭环稳定的。

2.3 模型失配时的鲁棒性分析

系统闭环特征方程为:

$$1 + G_c(z) [G_p(z) - G_m(z)] = 0 \quad (14)$$

引理 实系数多项式 $z^n + a_{n-1}z^{n-1} + a_{n-2}z^{n-2} + \dots + a_1z + a_0$ 的根全部在单位圆内的充要条件是:

$$|a_{n-1}| + |a_{n-2}| + \dots + |a_0| < 1 \quad (15)$$

模型增益失配时,失配比 $r = K/K_m$,上式可化为:

$$z^{d+1} - \frac{\sigma - 1 + \alpha}{\sigma} z^d + \frac{(r-1)(1-\alpha)}{\sigma} = 0 \quad (16)$$

可以证明:

定理 对于一阶加纯滞后对象,当 $0 < r < 2$ ($r = K/K_m$) 时,系统总是闭环稳定的。

$0 < r < 2$ 是系统稳定的充分条件,当 $r \geq 2$ 时,系统稳定性确定,需要解特征方程,以确定特征根在单位圆中的位置。当模型时间常数和滞后时间失配时,失配项存在于指数位置,从而无法得到其解析解。但可以通过计算机采用数值分析的方法得到其数值解,从而确定其允许的失配范围。

3 PFC-PID 串级透明控制与 PID 速度前馈控制效果比较

以某舰载直流伺服控制系统为例进行 PFC-PID 串级透明控制与 PID 速度前馈控制效果仿真比较。其中, PID 速度前馈: $k_p = 9$; $k_i = 3$; $k_d = 0.8601$; $k_v = 1$ 。PFC-PID 串级透明控制:内环: $k_p = 1.9$; $k_i = 0.05$ 。

如图 2 所示,当模型增益和时间常数失配时,左图 PFC-PID 串级透明控制超调变大,过渡时间变长,开始有振荡,但很快稳定下来。而右图 PID 前馈控制则出现等幅振荡,性能变坏。

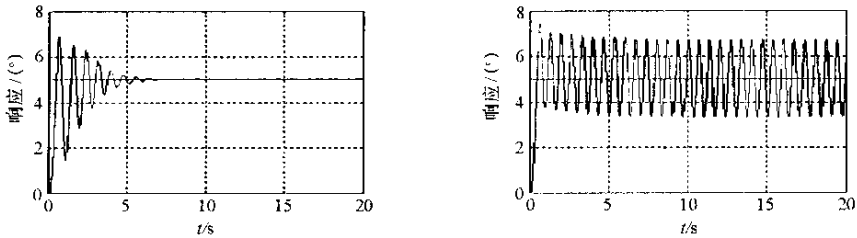


图 2 对象模型参数失配时阶跃响应及误差曲线
Fig.2 Step response curve of model parameter dis-matching

同样,如图 3 所示,当模型纯滞后时间失配时,即给伺服系统开环数学模型增加一个 0.12s 的纯滞后环节,右图 PID 前馈出现振荡,已不可控,而左图 PFC 虽然在控制起始阶段有波动,但很快稳定,误差较小。

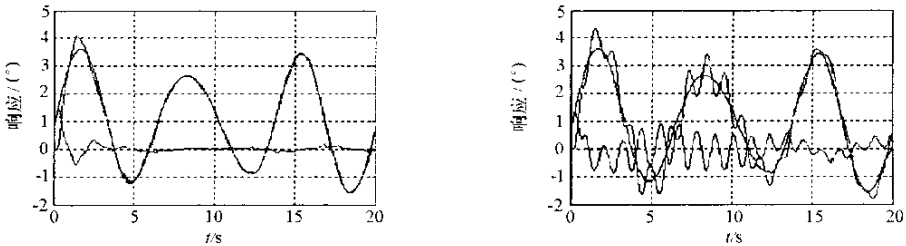


图 3 滞后时间失配时跟踪船体晃动响应及误差曲线
Fig.3 Ship sway curve of time lag dis-matching

为了验证系统抵抗外部扰动的能力,在 $t = 10s$ 时刻加入 20% 的负载阶跃扰动。两个系统都很快地抑制了扰动,使输出稳定在设定值。如图 4 所示。

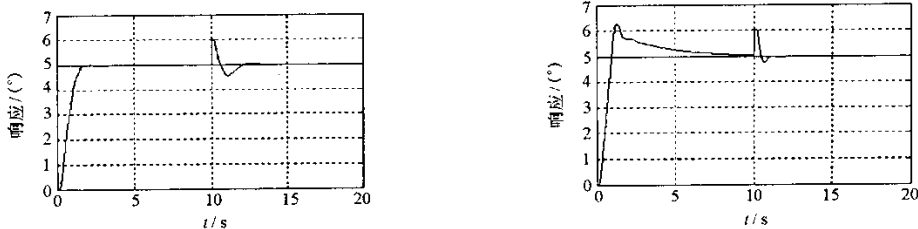


图4 对外部负载扰动响应曲线

Fig.4 Disturbance response curve of external load

4 结论

预测函数控制为机电伺服系统提供了一种切实有效、简便易行的控制方法。针对典型机电伺服系统的特点,将PFC和PID控制相结合,提出了PFC-PID串级结构透明控制,并给出了具有参数饱和和限制环节和滞后的具体实施算法,分析了系统的闭环性能,得到了其稳定鲁棒性条件。仿真表明该方法具有良好的跟踪性能、鲁棒性和抗干扰性能。

参考文献:

- [1] Kuntze H B, Jacubasch A, Richalet J, Arber C. On the Predictive Functional Control of an Elastic Industrial Robot [C]. Proc 25th CDC. Athens, Greece, 1986: 1877 - 1881.
- [2] Richalet J, et al. Predictive Functional Control application to Fast and Accurate Robots [C]. IFAC 10th World Congress, Munich, FRG, 1987, 256 - 258.
- [3] Kuntze H B, Jacubasch A, Hirsch U, et al. On the Application of a New Method for Fast and Robust Position Control of Industrial Robots [J]. CH2555 - 1/88/0000/1574@1998 IEEE.
- [4] Richalet J, Estival J L, Fiani P. Industrial Applications of Predictive Functional Control to Metallurgical Industries [J]. 0 - 7803 - 2550/95@ 1995 IEEE.
- [5] 诸静,等. 智能预测控制及其应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.
- [6] 王树青,等. 先进控制技术及其应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [7] 席裕庚. 预测控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

