

一种实用的自校正 PID 控制器设计与仿真研究

李开霞, 张金波, 曹爱华

(河海大学计算机及信息工程学院, 江苏 常州 213022)

摘要: 针对多功能除湿机的温度控制问题, 设计了一种极点配置自校正 PID 控制器, 给出了系统的 CARMA 模型, 引入带遗忘因子的最小二乘实时参数估计算法和带数字滤波器的增量式 PID 控制器算法, 同时给出了极点配置自校正 PID 的整定方法过程, 建立 PID 参数与系统参数及控制性能指标之间的关系式, 并进行了 MATLAB 仿真。仿真结果表明, 自校正 PID 控制系统能够实时估计被控对象的参数, 实时整定控制器参数, 自适应被控过程的变化, 具有较强的实时参数估计和自校正能力, 该 PID 控制器在多功能除湿机的温度控制中得到成功应用。

关键词: 自校正比例积分微分控制器; 参数估计; 极点配置; 温控系统

中图分类号: TP181 文献标识码: B

Design and Simulation of an Useful Self-tuning PID Controller

LI Kai-xia, ZHANG Jin-bo, CAO Ai-hua

(College of computer & Information Engineering Hohai University, Changzhou Jiangsu 213022 China)

ABSTRACT: In order to solve the problem of temperature control of multifunctional dehumidifier, this paper designs a self-tuning PID (Proportional-Integral-Derivative) controller based on Pole placement System CARMA model, recursive least squares method with forgetting factor and the digital filter increment PID control algorithm were presented. Pole placement self-tuning PID method and process were introduced, and the relation of PID with system parameters and Control performance parameters were formulated. Model of temperature control system of multifunctional dehumidifier was applied in MATLAB simulation with this method. Results show that the self-tuning PID control system proposed can real-time estimate system parameters, tune controller parameters and self-adapt to the variation of controlled process, therefore, it takes on powerful performance of real-time system parameters estimation and controller parameter auto-tuning. This PID controller has been used successfully in the temperature control system of multifunctional dehumidifier.

KEYWORDS: Self-tuning PID control; Parameter estimation; Pole placement; Temperature control

1 引言

本文的控制对象为某多功能除湿机的温控系统。除湿机主要应用于塑料颗粒的除湿, 基本原理是, 温度恒定的空气通过风机, 流经料桶中的塑料颗粒, 将水分带走, 达到干燥的目的。要求设计的控制器根据温度要求, 控制大功率电热丝对流通的空气进行加热, 确保流通的高燥气流温度稳定在设定温度上; 同时根据工作流程, 控制相应继电器与电磁阀, 对整机进行控制, 温度控制范围为 50-250 度, 控制精度正负 1 度。

PID 控制由于其简单, 稳定性好、可靠性高等优点, 有着其强大的生命力, 但是传统 PID 参数整定方法不仅耗时, 且对于参数未知或慢变化随机干扰严重的系统, 参数固定往

往不能得到理想的控制效果。针对以上问题, 本文设计了一种基于极点配置的带数字滤波器的增量式自校正 PID 控制器, 并以其在多功能除湿机的温控系统中的应用为例, 进行 MATLAB 仿真。这种方法采用系统辨识技术和增量式极点配置参数整定方法, 实时估计系统参数和整定控制器参数, 能够适应被控对象参数变化; PID 参数整定不依赖于固定的对象数学模型, 并且能在线调整; 具有计算量较小、跟踪性能好、鲁棒性较强, 且适合于非最小相位系统等优点, 是一种较为实用的控制算法, 在低阶过程控制中尤为实用, 仿真结果显示本文的控制策略对系统具有较好的控制效果。

2 自校正 PID 控制原理^[1]

自校正 PID 控制吸收了自适应控制和常规 PID 控制器两者的优点, 是目前应用最广的一类自适应控制方法; 其基本思想是把未知被控对象参数即系统参数的估计递推算法

与各种不同类型的 PID 控制算法结合起来, 形成一个能自动校正控制器参数的实时的计算机控制系统。参数估计和控制器的设计可以分开进行, 其自校正能力正是通过在线辨识体现出来的。本文采用的极点配置自校正 PID 控制器原理结构由三部分构成: 最小二乘递推参数估计、控制器的参数设计和 PID 控制器, 其控制系统结构如图 1 所示。

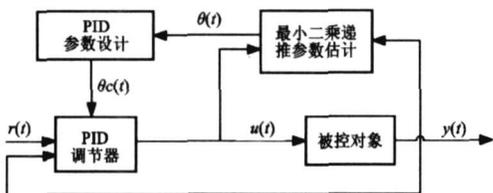


图 1 自校正 PID 控制系统结构

在线采集被控对象的输入量 $u(t)$ 和输出量 $y(t)$, 根据这些量应用递推最小二乘法算出被控对象的参数估计 θ 根据这些参数估计结果按照系统控制性能指标要求利用极点配置整定方法计算出 P、I、D 三参数, 最后根据数字增量式 PID 算法得到 PID 控制器输出 $u(t)$ 对被控对象进行控制, 它的动态性能的优劣依赖于极点位置得正确与否, 需要将极点的位置配置好。

3 自校正控制系统各部分的数学描述

下面分别对自校正 PID 控制系统各部分进行数学描述及算法说明。

3.1 被控对象的 CARMA 数学模型描述

设受控过程的数学模型可用受控自回归滑动平均 (Controlled Auto-Regression Moving Average CARMA) 模型描述。考虑结构参数 n_a , n_b 和 d (输出延迟数) 已知时的输入输出模型:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-d) + C(q^{-1})e(t) \quad (1)$$

其中:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a};$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b}, (b_0 \neq 0);$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{n_c}q^{-n_c}$$

$\{u(t)\}$ 和 $\{y(t)\}$ 分别是模型的输入和输出序列, $\{e(t)\}$ 为有色噪声干扰 (不可测)。

3.2 实时参数估计算法^[2]

式 (1) 中的 $a_i (i = 1, 2, \dots, n_a)$ 和 $b_j (j = 1, 2, \dots, n_b)$ 及 $c_k (k = 1, 2, \dots, n_c)$ 均为未知参数, 需要在线辨识。本文仿真的实时参数估计采用遗忘因子递推最小二乘法, 其算法描述如下。

根据式 (1) 可得:

$$y(t) = \phi^T(t)\theta + e(t) \quad (2)$$

其中未知参数向量 θ 为:

$$\theta^T = [a_1, a_2, \dots, a_{n_a}, b_1, b_2, \dots, b_{n_b}, c_1, c_2, \dots, c_{n_c}]$$

数据信息向量为:

$$\phi^T(t) = [-y(t-1), -y(t-2), \dots, -y(t-n_a), u(t-d),$$

$$u(t-d-1) \dots u(t-d-n_b), e(t-1), \dots, e(t-n_c)]$$

令根据 N 次观测 $\{y(i), u(i): i = 1, 2, \dots, N, N \geq a_a + n_b + 1\}$ 对 θ 的估计为 $\hat{\theta}$ 对于第 t 次观测, 实际观测值 $y(t)$ 与估计模型计算值 $y_m(t) = \phi^T(t)\hat{\theta}$ 之间的偏差为 $\varepsilon(t)$ (残差), 引入随机变量 ε , 所谓的最小二乘估计, 就是使目标函 $J = \varepsilon^T \varepsilon$ 为最小的参数估计, 得到参数的 θ 的估计。为了反映参数的时变性, 对于慢时变参数采用渐消记忆法, 即采用加权最小二乘估计。所以采用带遗忘因子递推最小二乘算法, 其算法表达式如下:

$$\begin{cases} K(t) = \frac{P(t-1)\phi(t)}{\rho + \phi^T(t)P(t-1)\phi(t)} \\ P(t) = \frac{1}{\rho} [1 - K(t)\phi^T(t)]P(t-1) \\ \hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t)[y(t) - \phi^T(t)\hat{\theta}(t-1)] \end{cases} \quad (3)$$

其中 ρ 为遗忘因子, 其大小应根据参数时变性由经验或实验决定, 一般范围为 0.95-0.99, 参数变化快时取值低, 变化慢时取值高。

3.3 数字增量式 PID 算法^[3]

所研究的温度控制系统具有滞后性、时变性和非线性的特性, 建立该系统的精确数学模型是不可能的, 因此如果使用常规的线性控制理论, 要达到满意的控制效果非常困难。

本文采用增量式数字 PID 控制算法, 控制律为:

$$u(t) = u(t-1) + K_p[e(t) - e(t-1)] + \frac{T_s}{T_i}e(t) + \frac{T_D}{T_s}(e(t) - 2e(t-1) + e(t-2)) \quad (4)$$

式中 $e(t) = r(t) - y(t)$, $u(t)$ 为当前的控制量, K_p, T_p, T_D, T_s 分别为比例增益, 积分时间常数, 微分时间常数, 采样周期。增量式 PID 能够较容易的通过加权处理获得较好的控制效果。

4 极点配置 PD 参数自校正^[4]

4.1 极点配置自校正控制器

极点配置的主要思想是寻求一个反馈控制律, 使得闭环传递函数的极点位于希望的位置。闭环计算机控制系统结构如图 2 所示。

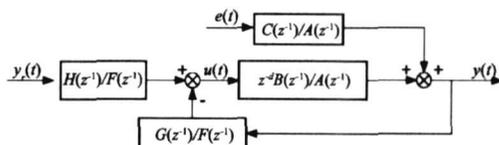


图 2 闭环计算机控制系统结构

系统的闭环方程为:

$$y(t) = \frac{q^{-d}B(z^{-1})H(z^{-1})y_r(t) + F(z^{-1})C(z^{-1})e(t)}{A(z^{-1})F(z^{-1}) + z^{-d}B(z^{-1})G(z^{-1})} \quad (5)$$

其中 $H(z^{-1}), F(z^{-1}), G(z^{-1})$ 分别为 z^{-1} 的多项式。由式

(5) 可见, 按增广型自校正闭环极点配置要求, 闭环特征多项式应满足:

$$A(z^{-1})F(z^{-1}) + z^{-d}B(z^{-1})G(z^{-1}) = C(z^{-1})T(z^{-1}) \quad (6)$$

其中 $T(z^{-1})$ 为期望的特征多项式, 有设计者根据实际工况和性能指标要求确定。根据 (6) 式解 Diophantine 方程可得出 $F(z^{-1})$ 和 $G(z^{-1})$ 参数。有以上可直接写出自校正控制器输出 $u(t)$ 的表达式为:

$$u(t) = \frac{H(z^{-1})}{F(z^{-1})}y_r(t) - \frac{G(z^{-1})}{F(z^{-1})}y(t) \quad (7)$$

4.2 温控系统的自校正 PID 控制器设计

温度的控制在科学实验和工业过程中极为普遍, 具有典型的意义, 而温控系统通常是时变的、非线性的、具有纯滞后的复杂大惯性系统, 控制效果与采用的控制算法有很大的关系。一般温度控制系统, 受控对象可近似用一阶惯性环节加延迟环节 (具有纯滞后的一阶惯性环节) 来表示, 其传递函数为:

$$G(s) = \frac{K_p e^{-\tau s}}{T_p s + 1} \quad (8)$$

式 (8) 带零阶保持器的广义对象脉冲传递函数为:

$$G_p(z^{-1}) = \frac{b_0 z^{-d}}{1 + a_1 z^{-1}} \quad (9)$$

上式中 $a_1 = -e^{-T/T_p}$, $b_0 = K_p(1 - e^{-T/T_p}) = K_p(1 + a_1)$, $N = \tau/T$, $d = N + 1$, 采样周期 T 的选择原则见参考文献 [5]。对大纯滞后对象, 通常选择滞后时间等于采样周期的整数倍, 这里选择 $T = \tau$ 则 $N = 1$, $d = 2$, 被控对象的 CARMA 模型为:

$$(1 + a_1 z^{-1})y(k) = b_1 z^{-2}u(k) + C(z^{-1})e(t) \\ (A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1}, B(z^{-1}) = b_0) \quad (10)$$

为简化参数估计, 式 (10) 中的 $C(z^{-1})$ 多项式的选择原则, 根据参考文献 [6], 应避免在系统输出端产生突变而造成振荡, 故选择:

$$C(z^{-1}) = 1 + 0.5z^{-1} + 0.1z^{-2} \quad (11)$$

注: 不带零阶保持器的控制对象脉冲传递函数为:

$$G_p(z^{-1}) = \frac{b_1 z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1}}$$

其中: $a_1 = -e^{-T/T_p}$, $b_1 = K_p/T_p$, 此时被控对象的 CARMA 模型为:

$$(1 + a_1 z^{-1})y(k) = b_1 z^{-1}u(k) + C(z^{-1})e(t)$$

从极点配置的观点出发, 通常以典型的二阶系统的闭环传递函数的标准形式作为目标,

$$G_n(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (12)$$

式 (12) 的特征方程对应的离散特征多项式为:

$$T(z^{-1}) = 1 + A_{m1}z^{-1} + A_{m2}z^{-2} \\ = 1 - 2e^{-\xi\omega_n T} \cos\omega_n T \sqrt{1 - \xi^2} z^{-1} + e^{-2\xi\omega_n T} z^{-2} \quad (13)$$

对式 (13), 例如当二阶系统最佳阻尼比 $\xi = 0.707$ (或者根据实际工况自调整) 时, 在阶越作用下的超调量 $\sigma = 4$

3%, 相角稳定裕量 $\gamma(\omega_c) = 65^\circ$, 它为二阶最佳动态响应模型。

采样周期 T 和 ω_n, ξ 的关系, 根据文献 [7] 可按下式计算:

$$T = \frac{2\pi}{N_T \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}} \quad (N_T = 10 - 20) \quad (14)$$

在数字系统中, 通常采用带数字滤波器的 PID 控制器算法:

$$u(z^{-1}) = \frac{g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2}}{(1 - z^{-1})(1 + f_1 z^{-1})} e(z^{-1}) \quad (15)$$

根据式 (4) 得出式 (15) 中 $g_0 = K_p(1 + \frac{T}{T_1} + \frac{T_D}{T})$; $g_1 = -K_p(1 + 2\frac{T_D}{T})$; $g_2 = K_p \frac{T_D}{T}$, 对此 K_p, T_I 和 T_D 有唯一解:

$$K_p = -\frac{g_1 + 2g_2}{g_0 + g_1 + g_2}; T_I = -\frac{g_1 + 2g_2}{g_0 + g_1 + g_2} T; T_D = -\frac{g_2}{g_1 + 2g_2} T \quad (16)$$

为了将极点配置自校正控制器转换成增量型 PID 控制器, 根据式 (15), 可选用如下形式: $F(z^{-1}) = (1 - z^{-1})(1 + f_1 z^{-1})$, $G(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2}$ 。根据极点配置自校正 PID 控制思想 (按增广型自校正闭环极点配置要求) 闭环特征多项式应满足 (6) 得到对应的 Diophantine 方程成立, 令方程式两边系数相等即可得到 f_1, g_0, g_1, g_2 , 代入 (16) 得到极点配置自校正 PID 控制器参数: K_p, T_I 和 T_D 。由于 g_0, g_1, g_2 为系统参数的函数, 所以 K_p, T_I 和 T_D 也随系统参数的变化而变化, 因此 PID 实时参数整定能力是通过系统的参数辨识体现出来的。

5 控制算法步骤

综上所述, 针对温度控制系统, 极点配置自校正 PID 控制算法步骤如下:

- 1) 确定采样周期 T 和纯滞后时间 τ (一般取 $T = \tau$), 得出 d , 确定被控对象的 CARMA 模型;
- 2) 确定阻尼比 ξ 和 N_T , 并确定目标特征方程得离散特征多项式 (13);
- 3) 采用带遗忘因子递推最小二乘法对被控对象进行参数辨识, 得到 a_p, b_0 (或 b_1);
 - A. 设定系统参数向量初值 θ 协方差 P 的初值以及遗忘因子 β
 - B. 对控制对象实施新的 $u(t)$ 并采集相应新的观测数据 $y(t)$ (≥ 2 次) 利用遗忘因子递推最小二乘法进行系统参数估计;
- 4) 采用带数字滤波器的 PID 控制器算法, 利用 (3) 中得到的系统参数得到 $F(z^{-1})$ 和 $G(z^{-1})$ 的参数: f_1, g_0, g_1 和 g_2 ;
- 5) 根据 g_0, g_1 和 g_2 的值求得 K_p, T_I 和 T_D ;
- 6) 利用数字 PID 增量型控制算法得到新的 $u(t)$, 对系统进行控制, 并重复 3) - 6)。

6 仿真验证

针对本文的控制对象——多功能除湿机的温控系统,应用以上 PD 控制策略,以控制近似对象 $G(s) = \frac{2.8e^{-0.5s}}{178s+1}$ 为例进行相关仿真,验证本文的控制策略的实用性。取 $T = \tau = 40$, $\xi = 0.707$, $N_T = 10$, $P(0) = 10^8 I_2$, $\theta^T = [a_1 \quad b_0] = [0 \quad 4 \quad -0.4]$, $\rho = 0.99$ 根据控制算法步骤编写相应得仿真程序:

```

.....
Wn = 2 * pi / (NT * T * sqrt(1 - kesi)); % 极点配置,根据实际要求确定
Am1 = - 2 * exp(- kesi * Wn * T) * cos(Wn * T * sqrt(1 - kesi^2)); Am2 = exp(- 2 * kesi * Wn * T);
.....
for j= 0 : 1 : N
Phi = [- y1 u2]; K = P * Phi / (rou + Ph * P * Phi); I = eye(2); % 参数估计递推
P = (I - K * Phi) * P / rou; Xt = Xt + K * (y0 - Phi * X t); % 新的参数估计结果
.....
fl = 1.5 + Am1 - a1; g1 = (0.1 * Am1 + 0.5 * Am2 + a1 * fl) / b0; % 计算 F(z) 和 G(z) 参数值
g2 = (0.1 * Am2) / b0; g0 = (0.1 + 0.5 * Am1 + Am2 + fl - a1 * fl + a1) / b0;
KP = -(g1 + 2 * g2); TI = -(g1 + 2 * g2) * T / (g0 + g1 + g2); TD = -g2 * T / (g1 + 2 * g2); % 计算 PD 值
.....

```

运行仿真程序得出以下仿真曲线,系统参数估计值的变化曲线图如图 3 所示,仿真曲线显示,该自校正 PD 控制系统可以较好的对系统参数进行较准确的实时估计,图 4 为系统响应曲线。其中 $y(t)$, $u(t)$ 分别为系统输出和控制量,图中可以看出在得到系统参数估计后,系统呈现较好的控制效果(超调量 $\sigma = 2\%$, 调节时间 $t_s = 80s$)。在系统运行到 500s 时,加入噪声干扰信号,控制器将振荡幅度控制在了很小的范围内,并最终将系统输出趋向于设定值。这样的效果归结于系统能够在线辨识控制对象的参数并利用带数字滤波器的 PD 控制器极点配置算法来修正控制器参数,以达到对系统的有效控制,可见该自校正控制方法具有较好的输入跟踪能力和自适应能力,能够满足温度控制的要求。

7 结论

本文中的极点配置自校正增量式 PID 控制器具有自动辨识被控对象参数、自动整定 PID 控制器参数、能够适应被控对象参数变化的能力;具有计算量较小、跟踪性好、鲁棒性较强的优点;并在多功能除湿机的温控系统中得以验证,控制策略对被控对象实现了较好的控制,此算法尤其对温控系统有着很好的实用性。同时还可以将其做进一步的深入研究和改进,用于更多工程实际系统的分析研究,对于

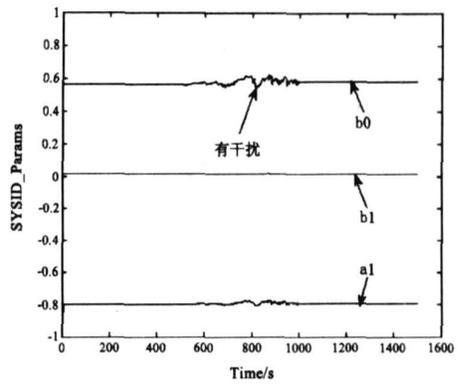


图 3 系统参数估计值曲线图

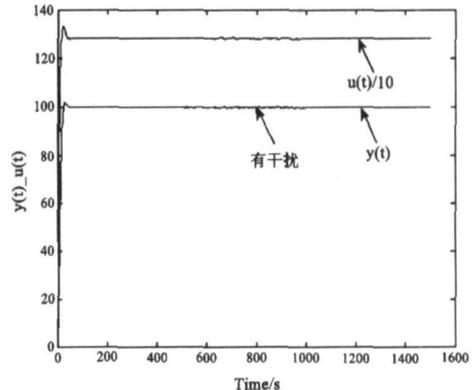


图 4 系统响应曲线图

工程实际应用具有较强的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 闫秀英,任庆昌,孟庆龙.一种自校正 PD 控制器设计与仿真研究[J].系统仿真学报,2006,18(增刊 2): 753-756.
- [2] 韩曾晋.自适应控制[M].北京:清华大学出版社,1995.85-86.
- [3] 于海生.微型计算机控制技术[M].北京:清华大学出版社,1999.84-85.
- [4] 陶永华.新型 PID 控制及其应用[M].北京:机械工业出版社,2002.58-60.
- [5] 刘伯春.离散系统采样周期的选择[J].化工自动化及仪表,1989(1): 28-33.
- [6] 刘伯春.离散时间自适应控制算法的一种新统一格式[J].控制理论与应用,1989(增刊 2): 59-64.
- [7] 胡寿松.自动控制原理[M].北京:科学出版社,2001.83-90.

[作者简介]



李开霞(1982-),女(汉族),河北保定人,硕士研究生,主要研究方向为检测技术及自动化装置;

张金波(1967-),男(汉族),黑龙江双城市人,副教授,硕士,主要从事电力电子及微机控制方向的教学和科研工作;

曹爱华(1983-),女(汉族),天津人,硕士研究生,主要研究方向为检测技术及自动化装置。