

低通滤波 PID 控制算法在 PCS 中的应用

张卡, 肖炳甲, 王华忠, 舒双宝

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: PID 控制是反馈控制系统中最常用的控制方法。在托卡马克装置中, 等离子体的行为是很难精确预测和控制的。托卡马克等离子体控制系统中包括了对不同控制对象的 PID 控制。基于数字滤波技术设计的低通滤波 PID 算法, 通过滤掉误差信号中的噪声信号从而提高了算法的控制效果。该算法在等离子体控制系统中得到了很好的应用。

关键词: 等离子体控制系统; 低通滤波; PID 控制算法

Application of Low Pass Filtering PID Control Algorithm in PCS

ZHANG Ka, XIAO Bing-jia, WANG Hua-zhong, SHU Shuang-bao

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

【Abstract】 PID control is the disciplinarian frequently used in feed-back control system. In Tokamak device, the behavior of plasma is difficult to analyze and control. The plasma control system of Tokamak consists of PID control for different objects. The low pass filtering PID algorithm based on the digital filtering technology is designed. The algorithm enhances the control precision by filtering the noise intermingled in the error signal and is well used in the plasma control system.

【Key words】 plasma control system; low pass filtering; PID control algorithm

在托卡马克装置尤其是非圆截面的托卡马克装置中, 等离子体的行为是很难精确预测和控制的。要维持聚变反应, 就必须对等离子体的位置、形状进行较为精确的控制。等离子体控制系统(plasma control system)包括对等离子体位置、形状的控制以及磁面的控制等^[1]。在PCS中对控制目标的控制, 主要是通过将控制对象的预设值和实际值的偏差的比例、积分和微分通过线性组合构成控制量, 对被控对象进行控制, 即PID控制。PID控制是闭环反馈控制系统中最常用的控制方法。而在实际的等离子体放电的实验环境中, 往往存在比较大的噪声信号, 这些噪声信号会影响控制算法的控制效果。因此, 本文设计了基于数字滤波技术的低通滤波PID算法, 将低通滤波器应用于控制偏差, 滤掉其中的噪声信号, 然后再对其进行积分和微分运算, 得到实际的控制量。该算法在PCS中应用, 得到了很好的控制效果。

1 算法的原理

低通滤波 PID 算法同一般的 PID 算法相比, 有其特殊的优点, 主要体现在:

(1) 将低通滤波器应用于控制偏差, 滤掉其中的高频噪声信号, 再将处理过的信号进行积分和微分运算形成控制量, 提高了控制的精度和准确性;

(2) 算法中的积分运算使用低通滤波器实现, 微分运算使用高通滤波器实现, 使得在进行 PID 运算之前不需要先计算微分量和积分量, 从而提高了算法的通用性。

低通滤波算法的控制律如下:

$$u(t) = K_p * V(t) + K_i * \int_0^t V(t) dt + K_d * \frac{dV(t)}{dt}$$

$$V(t) = filter(E(t))$$

其中, $E(t)$ 为 t 时刻的误差向量; $filter$ 表示低通滤波算法。对误差向量应用低通滤波算法, 得到新的控制向量 $V(t)$, 然后对 $V(t)$ 进行积分和微分运算。这里的积分和微分运算分别

用低通滤波器和高通滤波器实现。算法的控制框图见图 1。

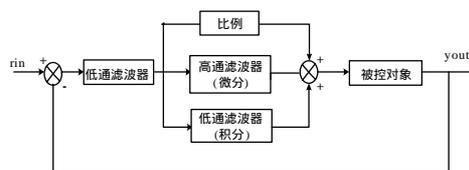


图 1 低通滤波算法的控制框图

在算法中使用的信号是离散的信号, 因此使用的滤波算法应是数字滤波算法^[2]。为了设计出应用于离散信号的数字滤波算法, 需先设计出数字滤波的冲激响应函数 $H(z)$ 。目前数字滤波器设计最通用的方法是借助于模拟滤波器的设计方法。模拟滤波器设计已经有了一套相当成熟的方法, 它不但有完整的设计公式, 而且还有较为完整的图表供查询。因此, 可先设计出与要设计的数字滤波器技术指标相同的模拟滤波器的脉冲传递函数 $G(s)$, 再按一定的规则将 $G(s)$ 转换成 $H(z)$ 。本文使用 RC 滤波器进行低通滤波算法的设计^[3]。

1.1 RC 低通滤波器

RC 低通滤波器的电路图与幅频特性如图 2 所示。

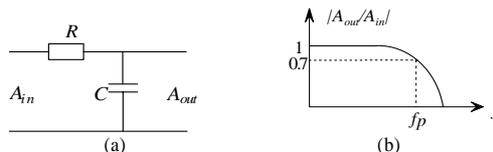


图 2 RC 低通滤波器的电路图和幅频特性

基金项目: EAST 国家大科学工程基金资助项目“计投资(1998)1303 号”

作者简介: 张卡(1983-), 女, 硕士研究生, 主研方向: 数据采集, 控制和计算机仿真计算; 肖炳甲, 研究员、博士生导师; 王华忠, 副研究员; 舒双宝, 博士研究生

收稿日期: 2006-11-21 **E-mail:** kaka@ipp.ac.cn

假设 RC 低通滤波器的时间常数为 $\tau = RC$ ，则其脉冲传递函数为

$$A(s) = \frac{1}{1 + s\tau}$$

RC 低通滤波器在 $\omega = \frac{1}{\tau}$ 时，电容器上的电压很小，因此

$A_m \cong IR = A_r$ ，此时

$$A_{out} = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int \frac{A_m}{R} dt = \frac{1}{RC} \int A_m dt$$

所以 RC 低通滤波器在满足 $\omega = \frac{1}{\tau}$ 时，可以作为积分器使用。

1.2 RC 高通滤波器

RC 高通滤波器的电路图与幅频特性如图 3 所示。

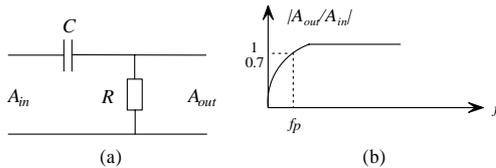


图 3 RC 高通滤波器的电路图和幅频特性

假设 RC 高通滤波器的时间常数为 $\tau = RC$ ，则其脉冲传递函数为

$$A(s) = \frac{s\tau}{1 + s\tau}$$

RC 高通滤波器在 $\omega = \frac{1}{\tau}$ 时，电阻上的电压很小，因此

$A_m \cong \frac{I}{\omega C} = A_c$ ，此时

$$A_{out} = A_r = iR = R \frac{dq}{dt} = R \frac{d}{dt} CA_c = RC \frac{d}{dt} A_m$$

所以 RC 高通滤波器在满足 $\omega = \frac{1}{\tau}$ 时，可以作为积分器使用。

1.3 使用 RC 滤波器设计数字滤波算法

要设计数字滤波算法，需要知道数字滤波器的冲激响应函数。上面已经给出了 RC 模拟滤波器的脉冲传递函数，可以使用合适的方法将其转换。将模拟滤波器的 $G(s)$ 转换成数字滤波器的 $H(z)$ 的方法通常有两种，即冲激响应不变法和双线性 z 变换法^[4]。其中，双线性 z 变换法是比较简单和直观的方法。双线性 z 变换方法由 s 平面到 z 平面的映射关系得到 s 和 z 之间的简化的变换关系为

$$s = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}, \quad z = \frac{2}{T} \frac{1+s}{1-s}$$

其中， T 为采样时间。由 s 和 z 的转换关系可以方便地将 $G(s)$ 转换为 $H(z)$ 。

将 RC 低通滤波器的脉冲传递函数中的 s 关于 z 的表达式替换，可以得到

$$L(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{L_1(1+z^{-1})}{1+L_2z^{-1}}$$

其中， $L_1 = \frac{\tau^*}{1+\tau^*}$ ， $L_2 = \frac{\tau^*-1}{\tau^*+1}$ ， $\tau^* = \frac{T}{2\tau}$ ，则

$$Y(z) = L_1U(z) + L_1z^{-1}U(z) - L_2z^{-1}Y(z)$$

对上式进行逆 z 变换，并使用 z 变换的线性和位移性的性质，可以得到在离散的时刻 T ，RC 低通数字滤波器的输入输出关系为

$$Y(T) = L_1U(T) + L_1U(T-dT) - L_2Y(T-dT)$$

其中， $Y(T)$ 、 $U(T)$ 为 T 时刻的输出和输入； $Y(T-dT)$ 、 $U(T-dT)$ 为上一个采样时刻的输出和输入。

将 RC 高通滤波器的脉冲传递函数中的 s 关于 z 的表达式替换，可以得到

$$H(z) = \frac{H_1(1-z^{-1})}{1+H_2z^{-1}}$$

其中， $H_1 = \frac{1}{1+\tau^*}$ ， $H_2 = \frac{\tau^*-1}{\tau^*+1}$ ， $\tau^* = \frac{T}{2\tau}$

对上式进行逆 z 变换，并使用 z 变换的线性和位移性的性质，可以得到在离散的时刻 T ，RC 高通数字滤波器的输入输出关系为

$$Y(T) = H_1U(T) - (H_1U(T-dT) + H_2Y(T-dT))$$

由此输入和输出的对应关系，便可将滤波器的输出和一些给定的参数通过某种运算法则计算得到，因此就可以设计出响应的低通滤波和高通滤波算法，从而实现低通滤波 PID 算法。

2 算法的实现

将 RC 数字滤波器的滤波算法应用在低通滤波 PID 算法中，使其实现对某个时刻的误差向量 $E(T)$ ，经过低通滤波算法后得到控制偏差 $V(T)$ ，对应的时间常数为 taup 。对 $V(T)$ 应用高通滤波算法得到微分量 $D(T)$ ，时间常数为 taud 。对 $V(T)$ 应用低通滤波算法得到 $I(T)$ ，时间常数为 taui 。令 PID 的输入比例、微分和积分系数分别为 K_p 、 K_d 和 K_i ，系统的采样时间为 dT （即两个采样时刻的差值）。算法的输入为系数 K_p 、 K_d 、 K_i 、 taup 、 taud 、 taui 和误差向量 $E(T)$ ，输出为控制向量 $P(T)$ 。则

$$P(T) = K_p * V(T) + K_i * I(T) + K_d * D(T)$$

$$V(T) = P_1E(T) + P_1E(\text{tlast}) - P_2V(\text{tlast})$$

$$D(T) = D_1V(T) - (D_1V(\text{tlast}) + D_2D(\text{tlast}))$$

$$I(T) = I_1V(T) + I_1V(\text{tlast}) - I_2D(\text{tlast})$$

其中的 P_1 、 P_2 、 I_1 、 I_2 的表达式与上小节中给出的 L_1 、 L_2 的表达式相同，只需将时间常数换成 taup 、 taui 即可， D_1 、 D_2 的表达式与上小节中给出的 H_1 、 H_2 的表达式相同，只需将时间常数换成 taud 即可。

在计算过程中，当前时刻的计算项与上一次的计算结果有关，因此设计一个全局结构体

```
Struct LastData
{
    Unsigned int tLast;
    float* Elast;
    float* Vlast;
    float* Ilast;
    float* Dlast;
};
```

该结构体用于存储上一次的计算结果， $Elast$ 、 $Vlast$ 、 $Ilast$ 、 $Dlast$ 为上一次计算的结果，对应于计算公式中的 $E(\text{tlast})$ 、 $V(\text{tlast})$ 、 $I(\text{tlast})$ 、 $D(\text{tlast})$ 。在第 1 次计算之前，这些值均赋值为 0。

用一个函数实现低通滤波 PID 算法，函数的声明如下：

`float* pid_calc(float* error, unsigned int time, float* gains);`

在放电过程中的每个采样时刻 T ，调用一次该 `pid_calc` 函数，计算一个控制向量 P ，应用于控制对象进行实际控制。

3 算法的测试

将该低通滤波 PID 算法应用于 HT-7 托卡马克装置的等离子体极向场控制系统中，测试 PID 算法的控制效果。

在极向场控制系统中,控制对象是等离子体电流和等离子体水平位移。控制目标是使得等离子体电流和等离子体水平位移按照预设波形变化。等离子体电流通过水平场电压 V_{eff} 控制,等离子体水平位移通过加热场电压 V_{oh} 控制。

在每一次放电实验前,设定等离子体的电流和等离子体水平位移的预设波形。在实际控制中,一个完整的控制过程是这样的:首先,计算 V_{eff} 命令,其 $Error$ 值为等离子体电流的预设值和采集值的差值,该差值经过低通滤波 PID 算法之后,得到控制偏差 P_{veff} ,将该控制偏差加上投入反馈时刻的水平场电压 V_{eff0} ,即可得到实际的 V_{eff} 命令;计算 V_{oh} 命令,其 $Error$ 值为等离子体水平位移的预设值和采集值的差值,该差值经过低通滤波 PID 算法后,得到控制偏差 P_{voh} ,将该控制偏差加上投入反馈时刻的加热场电压 V_{oh0} 值,即可得到实际的 V_{oh} 命令。然后,将计算出的水平场和垂直场电压发送给极向场电源系统,电源系统根据电压命令改变加在装置上的电压,从而导致等离子体电流和位置变化。之后,诊断和采集系统采集当前时刻的电流和水平位移的值,发送给极向场控制系统开始下一个控制过程。如此循环直到放电过程终止。

利用该低通滤波的 PID 控制算法对 HT-7 托卡马克的等离子体电流和水平位移进行闭环反馈控制,使得等离子体电流和水平位移能够按照预设波形进行变化,取得了预期的控

制效果。

4 结束语

低通滤波 PID 控制算法通过对误差信号进行滤波,滤掉其中的噪音,从而提高了算法控制的准确性和精度。该算法的另一个特殊的优点在于其通用性很强,对于一般的反馈控制系统,给定合适的控制系数和误差向量就可以算出控制偏差。低通滤波 PID 算法在 HT-7 的极向场控制系统中得到了检验和测试,取得了很好的控制效果。该算法在 DIII-D 的 PCS 系统中已经得到成功的应用,并将应用于 EAST 的等离子体控制系统中。

参考文献

- 1 Wan Yuanxi, HT-7 Team, HT-7U Team. Overview of Steady State Operation of HT-7 and Present Status of the HT-7U Project[J]. Nucl. Fusion, 2000, 40(6).
- 2 郑君里, 应启珩. 信号与系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- 3 Humphreys D A, Rerron J R. Advanced Tokamak Operation Using the DIII-D Plasma Control System[C]/Proc. of the 22th Symposium on Fusion Technology. 2003: 663-667.
- 4 Ferron J R. Real Time Equilibrium Reconstruction for Tokamak Discharge Control[J]. Nucl. Fusion, 1988, 38(7): 1055-1066.

(上接第 239 页)

部。因此,在设计 MIAS 时这些都是应考虑的重要因素,这对现有软件设计方法是一次变革。

从对第 2 节模型结构的分析可知,研究和实现 MIAS 的基本要素包括系统中 Agent 的表示及编码,度量系统中 Agent 间交互的亲合力函数的设计,管理系统中 Agent 动态行为的典型算法。因此,对大多数复杂应用的开发来说,系统设计的主要步骤可描述如下:

step1 应用的描述说明:(1)问题和任务的总体需求说明;(2)系统中需要处理的基本应用要素的详细描述(比如变量、常量、Agent、函数和应用的特有参数等)。

step2 适合于具体应用的 MIAS 模型和算法描述。不同的应用可以选取不同的 MIAS 模型和算法来解决,有时甚至可以开发多个 MIAS 协作来解决一个实际应用,主要工作原理如第 2 节所述。

step3 MIAS 模型算法的实施和运行:(1)定义 SAG 和 NAG 的类型和集合;(2)SAG 和 NAG 的表示和编码,选择相应的亲合力函数;(3)执行 MIAS 算法中相应的动态行为(抗体浓度必须反映抗原和抗体的匹配程度);(4)MIAS 的亚动力学功能应和 Step3.3)相关(抗体可从网络中插入或删除,并可设计一种机制来产生候选抗体进入 MIAS,从而阻止 MIAS 行动或创造力的改变)。

step4 MIAS 解决方案的实现:(1)解码 MIAS 解决方案;(2)将被解释的解决方案在实际中应用。

综上所述,从方法学的角度来看,任何复杂软件系统的设计观点首先应考虑从基于组件的框架思想转向基于 Agent 的框架思想,为达到系统所要求的复杂性,其每一个 Agent 应具有进化性、防御性、记忆性和耐受性的特点。基于免疫

计算的 Multi-agent 系统设计方法就是将生物意义上的多细胞组织机制延伸到软件系统,通过 MIAS 模型和进化算法的构造,免疫 Agent 交互和协作的设计,用于抵御恶意缺陷和不可预测的事件,从而达到其生存目的。

4 结束语

本文通过分析和讨论基于免疫计算的 Multi-agent 分布式软件系统的开发方法,试图通过扩充多细胞生物体的组织概念给软件系统的设计和开发带来更多的启示,使所构造的复杂系统不仅仅在设计阶段能准备好,而且能实时地自适应于不可预测情形和恶意缺陷。扩展多免疫 Agent 的应用领域,特别是在分布式过程监控、故障诊断和模式识别等领域的应用,实现一些示范性应用工程,将是下一步的研究工作。

参考文献

- 1 Negoita M. Artificial Immune Systems—An Emergent Technology for Autonomous Intelligent Systems and Data Mining[C]/Proc. of Int'l Workshop on AIS-ADM, Petersburg, Russia. 2005.
- 2 de Castro L N, Timmis J I. Artificial Immune Systems as a Novel Soft Computing Paradigm[J]. Soft Computing, 2003, 7(8): 526-544.
- 3 陈光柱, 李志蜀, 蒋亚平. 基于免疫计算的 Agent 系统研究[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(15): 13-16.
- 4 张晓阳, 孙宇. 基于生物免疫机制的复杂系统健康监测与评估[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1212-1215.
- 5 Sathyanath S, Sahin F. AISIMAM—An Artificial Immune System Based Intelligent Multi-Agent Model and Its Application to a Mine Detection Problem[C]/Proceedings of the 1st International Conference on Artificial Immune Systems, Kent, UK. 2002: 22-31.
- 6 Lau H Y K, Wong V W K. Immunologic Responses Manipulation of AIS Agents[C]/Proc. of the 3rd Int'l Conf. on AIS, Italy. 2004:65-79.