

模块化思想在 CGPC 控制软件中的应用

陈 栋 魏 环 李全善 赵 众* 潘立登
(北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘 要: 讨论了基于连续时间模型的广义预测控制软件的开发和应用, 避免了传统离散时间方法的采样时间选择问题。本文中的软件采用 OPC 数据采集技术, 以基于随机数搜索的连续时间模型辨识方法为基础, 实现了连续时间控制律的模块化仿真与在线控制。通过该软件平台可以计算具有多种组合形式的连续时间控制律, 并能实时在线的获取和观察各个模块的输入、输出以及状态, 设计整定控制器参数。基于 VC 平台开发的控制软件, 既有与 Matlab 类似的仿真功能, 又可以用于工业现场实时控制。通过对济南炼油厂一个实际模型的控制效果, 证明了该软件的有效性, 推广了连续时间控制律的应用。

关键词: 模块化; 连续时间广义预测控制; 软件开发

中图分类号: TP13

引 言

模型预测控制是一种先进的计算机控制算法, 30 多年的研究与发展, 已经取得了丰硕的理论与应用成果^[1], 目前国际上应用比较广泛的预测控制产品主要有 IDCOM、DMCplus、PFC 等^[2]。但是这些先进控制软件价格昂贵, 维护困难, 或者不能适应我国工厂的实际情况, 因此未能得到推广应用。为了解决这个问题, 国内已经有许多优秀的先进控制软件产品得到了成功的应用^[3-4]。

传统的预测控制算法为了适合计算机实现, 所使用的预测模型都是基于离散时间的, 即使辨识出连续时间模型, 也要在合理的采样时间选择下做离散化处理, 以适应基于离散时间模型的预测控制算法的需要。这样在模型离散化的过程中, 受到采样时间及近似方法的局限, 难免会产生模型误差。通常采样时间的选择主要靠长期的经验和扎实的控制理论知识, 如果选择不当, 甚至会导致系统不稳定。尤其是复杂的多变量系统包含有许多具有不同时间常数的过程, 若为其设计离散时间的多变量控制系统, 就不得不采用多采样速率, 或者尽管采用单一的采样速率, 但各控制变量的更新周期不相同, 因此引

入了多采样多速率情况下的预测控制, 有些学者在这方面取得较好的成果^[5-7]。另外 Gawthrop^[8]提出了一种新的控制方法——连续时间广义预测控制(CGPC), 它的适用范围更广、与时间连续的真实世界更加贴切, 避免了单纯的离散时间 GPC 方法中存在的诸如数值灵敏度、采样速率选择、非最小相位零点等问题, 而且充分发挥了连续时间方法的优点, 具有良好的鲁棒性能和抗干扰能力^[9-11]。

为此从实际应用角度出发, 本文以基于随机数搜索(NLJ)的连续时间模型辨识方法为基础, 开发了连续时间广义预测控制软件, 并给出相关的参数设计方法, 既能对算法作仿真研究, 又能实施在线控制。计算过程中将控制律分解为不同的信号流模块, 单独计算, 不用求解单独的控制器形式, 能够充分发挥连续广义预测控制器中观测器的重要作用, 解决了复杂控制律的实现问题, 为在线控制奠定基础。

1 CGPC 模块化实现

经典的控制器通常可以用一个传递函数形式表示, 但是随着工艺技术和控制要求的不断提高, 传统的单一的控制器的已经不能满足控制的要求, 因此控制理论和技术的不断发展催生了越来越复杂的控制器形式, 例如预测控制。连续时间广义预测控制采用如下单输入单输出的正则系统, 可用传递函数模型表示如下:

$$Y(s) = \frac{B(s)}{A(s)} U(s) + \frac{C(s)}{A(s)} V(s) \quad (1)$$

收稿日期: 2008-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(60774080)

第一作者: 男, 1983 年生, 硕士生

* 通讯联系人

E-mail: zhaozhong@mail.buct.edu.cn

根据 CGPC 控制理论, 最终的控制律可以表示如下:

$$U(s) = g[W(s) - Y(s)] - \frac{G_0}{C}U(s) - \frac{F_0}{C}Y(s) \quad (2)$$

CGPC 的闭环控制框图如图 1 所示, 通过适当调节 T_1 、 T_2 、 N_y 、 N_u 、 λ 及参考轨迹模型等参数便可得到 CGPC 控制器参数: g 、 G_0 、 F_0 。

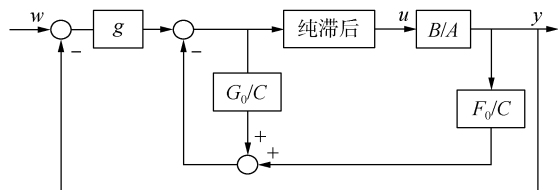


图 1 CGPC 闭环框图

Fig. 1 CGPC close loop architrave

如果将 CGPC 控制律表示成单一的控制器形式, 无法体现中间信号的作用, 观测器 $C(s)$ 的作用就被剔除了, 然而这个观测器在连续时间广义预测控制中有着非常重要的作用, 可以调节系统的鲁棒性能和保持系统结构的内部稳定性。

在进行控制系统的仿真时, 为了计算闭环系统的输出, 一般会先计算出闭环传递函数, 然后利用龙格库塔法计算该传递函数的输出。在实际中, 一方面系统的输出是通过传感器等装置检测出来再反馈给控制器; 另一方面如图 1 中的闭环系统, 观测器 $C(s)$ 的作用必须体现出来, 直接计算闭环传函就会将 $C(s)$ 从分子分母中约掉。所以控制器不可能与被控对象组成一个闭环传函。为了实现在线控制, 必须将控制器与被控对象分离, 同时为了能实时显示闭环系统中各个模块的输入、输出及状态, 将整个系统按照各传递函数分割为小模块, 对各个模块逐个求取其输出, 并作为与其相邻的下一个模块的输入, 这样就将图 1 中的系统分为了 5 个模块。

模块化在线控制方法比较直观, 对不同的对象可以很方便的修改或者添加删除模块, 甚至修改控制器的结构, 改变控制算法, 只要是基于连续模型的控制算法均能使用(如 CGPC、IMC 等)。由于可以实时的观测各模块的输入输出, 所以当被控对象参数发生漂移后, 用户可以根据实际情况修改对象模型。

2 CGPC 控制软件

该软件的主界面如图 2 所示。主要包括数据获

取、模型辨识、CGPC 控制器仿真设计几个部分。



图 2 CGPC 控制软件界面

Fig. 2 CGPC control software interface

2.1 OPC 客户端

OPC 是 OLE 技术在控制领域的应用。利用 OPC 技术控制软件可以高效、稳定地对硬件设备进行数据存取操作。目前 DCS 中一般都为用户提供了 OPC 接口, 它定义了定制接口和自动化接口, 自动化接口能为 VB 等高级语言客户程序提供极大的便利, 但数据传输效率较低, 而定制接口则为用 C/C++ 语言编写的客户程序带来灵活高效的调用手段。由于本文中开发工具为 VC, 所以选择定制接口。通过 OPC 客户端便可实现控制软件包与 OPC 服务器之间的数据通讯。客户端实时接收到给定信号 w 及被控对象的输出 y 后, 经过 CGPC 控制回路计算出相应的给定信号 u , 然后发送回服务器端, 再由服务器端送到被控对象前, 从而完成一次在线控制。

2.2 模型辨识

该控制软件所采用的模型辨识方法是 NLJ 随机搜索法。首先将模型参数初值在一定搜索区域内随机地增大或减小, 得到 n 组参数值, 然后用这 n 组参数值和闭环系统输入数据, 配合分别进行闭环系统仿真, 将这 n 组仿真得到的闭环系统输出与闭环系统实际输出比较, 分别计算偏差平方和, 找到偏差最小的一组, 用这一组的参数值作为新的参数初值, 再计算出新的 n 组参数值, 再从中找偏差最小的一组, 如此周而复始, 同时减小搜索区域, 以加快收敛速度。这样重复 20 次之后得到的参数值就是辨识结果^[12-13]。

2.3 CGPC 仿真控制

CGPC 仿真控制模块的计算流程如下。

参数整定。通过模型辨识模块获得对象模型, 然后根据模型 $B(s)/sA(s)$ 的单位阶跃响应做如下参数预设置。最大预测时域 T_2 : 模型 $B(s)/sA(s)$

的单位阶跃响应第一次达到设定值的时间,是达到设定值还是达到设定值的某个程度可以依据实际过程的快慢程度设置,如果实际过程响应较快,可以适当减小 T_2 ,就可以获得较快的跟踪响应性能。最小预测时域 T_1 :模型 $B(s)/sA(s)$ 的单位阶跃响应第一次达到设定值幅值 10% 的时间,如果系统的滞后时间可以确定, T_1 可以选择为滞后时间,如果不能确定系统的滞后时间,可以根据过程特性设置达到相应设定值幅值的时间,适当设置 T_1 值可以增强系统性能。对于非最小相位系统, T_1 值的设置必须包括所有的负向特性时间。参考轨迹参数 r :参考轨迹设置为一阶形式,其时间常数设置为 $r = T_2 - T_1$,主要用来限制系统过量的超调和较大的控制量。控制阶次 N_u :设定 $N_u = 0$,即只计算当前时刻的控制量。控制量加权系数 λ :因为参考轨迹可以很好的对控制量进行限制,因此可以设定 $\lambda = 0$,预测阶次 N_y :上述参数确定后,在无模型误差的情况下,可以确定 N_y 在一定值后系统参数 g 、 G_0 、 F_0 不再变化,此时系统的 ISE 值最小。观测多项式 $C(s)$: $C(s)$ 必须是稳定多项式,阶次 $n = \deg(A(s))$,理论上 $C(s)$ 的形式是不受约束的,为了简化参数设计,设定 $C(s) = \left(\frac{s}{\omega_c} + 1\right)^n$ 。然后根据最小增益原理设置合适的 ω_c 值。

计算出控制参数后便可按照图 1 中的闭环系统,采用龙格库塔法循环计算各模块的输出,其计算流程如下(程序中 B/A 、 G_0/C 、 F_0/C 几个模块的输出记为 BA 、 GC 、 FC ,控制量记为 u)。

给各模块的输出赋初值。 $BA[1] = 0$, $GC[1] = 0$, $u[1] = 0$,值得注意的是由于 F_0/C 模块的分子和分母阶次相等,为了防止阶跃输入时, F_0/C 模块的输入发生突变,给计算带来误差,为此将其初值 $FC[1] = 0$,如果 B/A 模块存在纯滞后环节则向后平移相应的步数。

根据(2)式计算 $u[1]$,之后利用龙格库塔法开始循环计算 $GC[1]$ 、 $BA[1]$ 、 $FC[1]$ 、 $u[2]$ 、 $GC[2]$ 、 $BA[2]$ 、 $FC[2]$...

对于带纯滞后的对象,在计算 CGPC 控制参数时,利用 Pade 近似进行处理(本文中采用二阶非对称 Pade 近似),在循环计算各模块输出时,如果也采用 Pade 近似必然会为整个系统引入一个非最小相位环节,从而会降低控制精度及系统的鲁棒性,所以本文采用了移位法,对与纯滞后相关的向量进行

移位。

3 CGPC 控制软件的实际应用

利用 NLJ 模型辨识方法,可以得到济南炼油厂某个控制回路模型如下:

$$Y(s) = \frac{0.32}{s^2 + 5.046s + 0.763} e^{-0.4s} U(s) \quad (3)$$

按照第 2 章中给出的控制参数设置原则,可以设置 CGPC 的参数如下: $T_1 = 0.4$ 、 $T_2 = 2$ 、 $N_y = 20$ 、 $N_u = 3$ 、 $\lambda = 0$,参考轨迹模型为 $\frac{1}{2s+1}$ 。计算出来的控制参数如下: $g = 17.2918$ 、 $G_0 = [43.2 \quad 120.7]$ 、 $F_0 = [514.1 \quad 1932.8 \quad 285.3]$,按照第 2 章中的方法循环计算,采样时间为 $0.01s$,由于对象中有 $0.4s$ 的纯滞后,所以 $FC[0] \cdots FC[39]$ 均为 0, $FC[40]$ 设为 514.1, $BA[0] \cdots BA[40]$ 均为 0,在计算 $BA[41]$ 时, B/A 模块的输入取 $u[0]$,即将输入向前推 40 步。该仿真软件计算出来的结果与 simulink 的仿真结果进行比较如图 3 所示。由图 3 可以看出,CGPC 的控制效果比较好,计算结果能达到比较理想的精度。

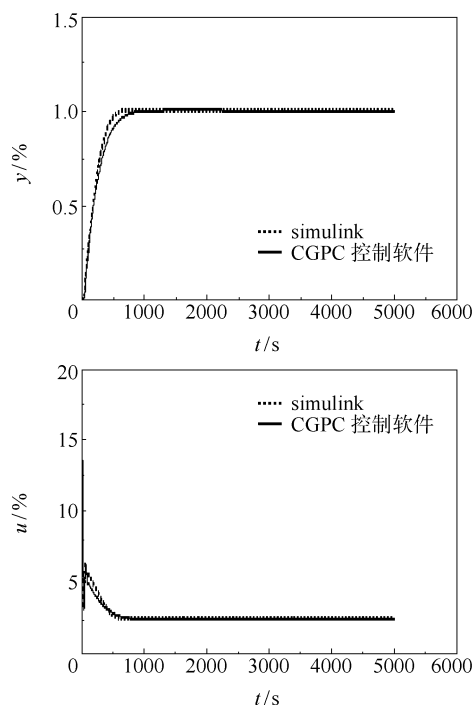


图 3 CGPC 软件与 simulink 比较图

Fig. 3 Comparison of CGPC control software and simulink

4 结束语

本文中的软件,采用了基于 OPC 数据采集技术

的模块化连续时间广义预测控制,实现了实时在线控制,通过对实际模型的控制效果分析,表明了 CGPC 这种控制算法的正确性和实用性;在计算输出及控制量时,采用了逐步递推的方法,得到的结果与 simulink 中的结果相似,这种方法也是可行的;对纯滞后的处理采用移位法,没有出现负增益的情况,而且控制精度也很理想,可见这种方法比 Pade 近似更加实用可靠。

参考文献:

- [1] 黄湘云,朱学峰. 预测控制的研究现状与展望[J]. 石油化工自动化, 2005,27(2): 27-31.
- [2] Qin S J, Badgwell T A. A survey of industrial model predictive control technology[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(7): 733-764.
- [3] 王树青. 先进控制技术的应用[M]. 北京:化学工业出版社,2001.
- [4] 邹涛,李少远. 基于 PC 平台的预测控制软件包开发与应用[J]. 中南工业大学学报:自然科学版,2003,34(4): 380-382.
- [5] 邹媛媛,刘晓华,李少远. 满足因果约束的多速率单值广义预测控制[J]. 控制与决策, 2005, 20(7): 827-829.
- [6] Embirucu M, Fontes C. Multirate multivariable generalized predictive control and its application to a slurry reactor for ethylene polymerization[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(17): 5754-5767.
- [7] 张爽,王艳秋. 广义预测控制算法及其应用研究[J]. 信息技术, 2005,34(6):20-21.
- [8] Demircioglu H, Gawthrop P J. Continuous-time Generalized Predictive Control (CGPC)[J]. Automatica, 1991, 27(1):55-74.
- [9] Demircioglu H, Karasu E. Generalized predictive control: a practical application and comparison of discrete and continuous-time versions[J]. IEEE control system magazine, 2000, 20(5): 36-47.
- [10] 李明,陈宗海,张海涛,等. 连续时间广义预测控制算法的应用研究[J]. 测控技术,2004,23(7):61-63.
- [11] 杨平,翁思义. 连续时间广义预测控制用于电厂锅炉汽压控制的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(1):50-55.
- [12] 姜景杰,甄新平,李全善,等. 一种基于改进 NLJ 算法的对象辨识方法及其应用[J]. 中国化学工程学报, 2007,15(1):88-91.
- [13] 马俊英,罗元浩,潘立登. 用改进的 NLJ 方法辨识闭环系统的模型参数及滤波器设计[J]. 北京化工大学学报:自然科学版, 2003,30(4):95-97.

Application of module theory in continuous-time generalized predictive control (CGPC) control software

CHEN Dong WEI Huan LI QuanShan ZHAO Zhong PAN LiDeng

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: In this paper, we discuss the development and application of continuous-time generalized predictive control (CGPC) software, in order to avoid the arbitrary choice of sampling time necessary in traditional discrete-time theory. This software is based on a New Luus and Jaackola (NLJ) continuous-time module identification method, incorporates Object Linking and Embedding for Process Control (OPC) data sampling technology, and allows module continuous-time simulation and online control. Using this software, various kinds of continuous-time control laws can be obtained, the real-time input, output and status can be displayed and observed, and the controller parameters can be set in real-time mode. Developed with a virtual channel (VC), this software is characterized not only by its simulation function, but also by its real-time control ability in different fields. Through its successful application on a module in a Jinan refinery, the software is shown to be effective and extends the application of continuous-time control laws.

Key words: modelize; CGPC; software development