

文章编号:1674-4578(2011)06-0022-02

一阶线性时滞系统的内模控制设计

罗霄华

(太原理工大学信息工程学院,山西 太原 030024)

摘要:内模控制是近年来发展起来的一种新型控制方法,分析它的原理对于工程应用和理论研究具有重要的意义。从IMC结构分析入手揭示了内模控制的本质,证明了该系统可实现对阶跃信号的无差跟踪及在阶跃信号扰动下可实现无差控制;介绍了时滞线性系统内模控制器和内模滤波器的设计方法。并基于MATLAB仿真研究表明,线性时滞过程的内模控制具有较好的鲁棒性,有一定的应用价值。

关键词:时滞线性系统;内模控制;仿真

中图分类号:TN713 **文献标识码:**A

0 引言

1982年,Garcia C E和Morari M提出具有模型、控制、反馈环节的内模控制(internal mode control),由于具有良好的跟踪性能和抗外扰能力,并对模型不确定性有一定的鲁棒性,内模控制自面世以来,不仅在工业过程控制中获得了成功应用,而且在控制系统稳定性和鲁棒性理论分析方面也具有一定的优势。尤其是多变量内模控制可以直接调试整个闭环系统的动态性能,并对模型误差具有良好的鲁棒性,因此,内模控制也是分析与设计多变量过程控制系统的一种重要方法。在工业过程中,简单的PID控制可以解决绝大部分的控制问题,然而对于强耦合多变量过程、强非线性过程、大惯性过程和时滞过程,常规的PID控制难以得到满意的控制效果。采用内模控制结合PID控制,比单纯采用PID控制器的控制效果好。与经典的PID控制相比,内模控制结合PID控制仅需整定一个参数,参数调整与系统的动态品质和鲁棒性的关系比较明确。

1 内模控制

1.1 原理及其结构图^[1]

内模控制(Internal Model Control,简称IMC)是一种基于过程数学模型进行控制器设计的控制策略。由于其设计简单,控制性能好和在系统分析方面的优越性,因而它不仅是一种实用的先进的控制算法,而且还是研究预测控制等基于模型的控制策略的重要理论基础,以及提高常规控制系统设计水平的工具。其结构框图如图1所示。

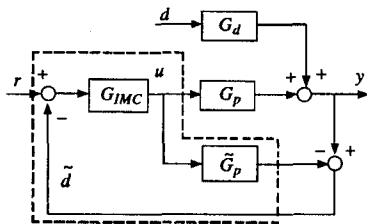


图1 内模控制框图

系统的特征方程为:

$$y(s) = \frac{G_{imc}(s)G_p(s)}{1 + G_{imc}(s)[G_p(s) - \tilde{G}_p(s)]} [r(s) - d(s)] + d(s). \quad (1)$$

$$1 + G_{imc}(s)[G_p(s) - \tilde{G}_p(s)] = 0. \quad (2)$$

$$\frac{1}{G_{imc}(s)G_p(s)} + 1 - \frac{\tilde{G}_p(s)}{G_p(s)} = 0. \quad (3)$$

当 $\tilde{G}_p(s) = G_p(s)$ 时,特征方程为: $\frac{1}{G_{imc}(s)G_p(s)} = 0$, 则当 $G_{imc}(s)G_p(s)$ 均稳定时,内模控制系统必然稳定。

当 $G_{imc}(s) = \tilde{G}_p^{-1}(s)$ 时,

$$y(s) = \frac{G_p^{-1}(s)G_p(s)}{1 + \tilde{G}_p^{-1}(s)G_p(s) - \tilde{G}_p^{-1}(s)\tilde{G}_p(s)} [r(s) - d(s)] + d(s) = r(s). \quad (4)$$

即输出可以完全复现输入。

1.2 基于内模PID鲁棒性控制器的设计^[2,3]

若过程 $G_p(s)$ 稳定,过程模型定义准确,且当 $G_p(s) = \tilde{G}_p(s)$, $G_{imc}(s) = G_p^{-1}(s)$,模型的逆 $G_p^{-1}(s)$ 存在时,则理想控制器的特性为^[3]:

$$y(s) = r(s), \text{设定值扰动下} \quad (5)$$

$$y(s) = 0, \text{外界干扰扰动下}$$

即系统可以克服任何干扰 $d(s)$,实现对参考输入的无偏差跟踪。但理想控制器的特性是在 $\tilde{G}_p^{-1}(s)$ 存在且控制器 $G_{imc}(s)$ 可以实现的条件下得到的。由于对象中常见的时滞和惯性环节,使 $\tilde{G}_p^{-1}(s)$ 中出现纯超前和纯微分环节,因此,理想控制器是很难实现的。此外,对于具有反向特性,即包含不稳定零点的过程, $\tilde{G}_p^{-1}(s)$ 中甚至还含有不稳定极点。另外,由于模型误差,闭环系统的鲁棒性也无法确定。

1.3 控制器的设计过程^[4]

1.3.1 理想的PID控制器

理想的PID控制器具有如下形式:

$$G_{PID}(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right]. \quad (6)$$

图1虚线框内等价的反馈控制器 $G(s)$ 和内模控制器 $G_{imc}(s)$ 之间有如下关系:

$$G(s) = \frac{G_{imc}(s)}{1 - G_{imc}(s)G_p^{-1}(s)}. \quad (7)$$

收稿日期:2011-08-15

作者简介:罗霄华(1961-),女,山西祁县人,高级实验师,主要从事EDA技术的研究。

1.3.2 控制器的设计

内模控制器可分为三步进行设计。首先,暂不考虑系统的鲁棒性和约束,设计一个定的理想控制器;其次,引入滤波器,通过调整滤波器的结构和参数来获得期望的动态品质和鲁棒性;最后,对系统的抗干扰性进行验证。

(1) 过程模型 $G(s)$ 的分解

$\tilde{G}_p(s)$ 可以分解成 $\tilde{G}_{p-}(s)$ 和 $\tilde{G}_{p+}(s)$ 两项即:

$$\tilde{G}_p(s) = \tilde{G}_{p+}(s) \tilde{G}_{p-}(s). \quad (8)$$

式(8)中: $\tilde{G}_{p+}(s)$ 是一个全通滤波器传递函数,对于所有频率 ω 满足 $|\tilde{G}_{p+}(s)| = 0$ 。在 $\tilde{G}_{p+}(s)$ 中包含了所有时滞和右半平面零点。 $\tilde{G}_{p-}(s)$ 是具有最小相位特征的传递函数,即 $\tilde{G}_{p-}(s)$ 稳定且不包含预测项。

(2) 鲁棒性的设计

为了增加鲁棒性,在控制环节中加入一个低通滤波器 $F(s)$ 。

$$F(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^\gamma}. \quad (9)$$

式(9)中: λ 是时间常数; γ 是使 $G(s)$ 控制可以实现的阶次。

从图1可以推导出:

$$G_{imc}(s) = \tilde{G}_p^{-1}(s) F(s) \quad (10)$$

$$G(s) = \frac{\tilde{G}_p^{-1}(s)}{(\lambda s + 1)^\gamma - \tilde{G}_{p+}(s)}. \quad (11)$$

在 IMC—PID 串级控制中, $G_{imc}(s)$ 和 $\tilde{G}_p(s)$ 等都是按照内模控制原理来设计的,与单回路 IMC 类似,只要满足一定的条件,不管多大的模型失配, $F(s)$ 中的参数都能保证闭环系统的稳定。

(3) 抗干扰性验证

与单回路控制系统相比较,由于系统在结构上多了一个副回路,所以提高了系统抑制二次干扰的能力。可用信噪比

$$As = \frac{y/r}{y/dz} \text{ 来衡量系统的抗干扰能力。}$$

2 仿真实例

对于典型一阶滞后对象,

$$G_p(s) = \frac{K_0}{1 + T_0 s} e^{-\tau_0 s}, \tilde{G}_p(s) = \frac{K}{1 + T_s s} e^{-\tau s}$$

存在建模误差

$$\left| \frac{G_p(j\omega) - \tilde{G}_p(j\omega)}{\tilde{G}_p(j\omega)} \right| = \frac{|K_0 \sqrt{1 + T^2 \omega^2} - k \sqrt{1 + T_0^2 \omega^2}|}{K \sqrt{1 + T_0^2 \omega^2}} \quad (12)$$

$$\text{滤波器选为: } f(s) = \frac{(3a + \tau)s + 1}{(as + 1)^3} \quad (13)$$

$$\text{控制器选为: } G_{imc}(s) = \tilde{G}_p^{-1}(s) \cdot f(s) \quad (14)$$

当 $K_0 = 4.56$, $T_0 = 3.21$, $\tau = 1.85$, $K = 4.50$, $T = 3.00$, $\tau = 2.00$ 时,考虑斜坡扰动,取 $a = 0.85$,可得

$$G_p(s) = \frac{4.56}{1 + 3.21s} e^{-1.85s} \quad (15)$$

$$\tilde{G}_p(s) = \frac{4.50}{1 + 3s} e^{-2s} \quad (16)$$

由式(8) - (16)得:

$$G_{imc}(s) = \tilde{G}_p^{-1}(s) \cdot f(s) = \frac{7.5s^2 + 5.5s + 1}{4.5(0.16s + a)^3} \quad (17)$$

由图1所示结构框图,在 SIMULINK 环境下,仿真框图如图2所示。

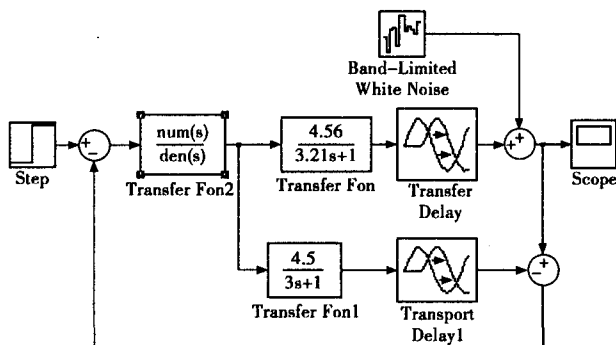
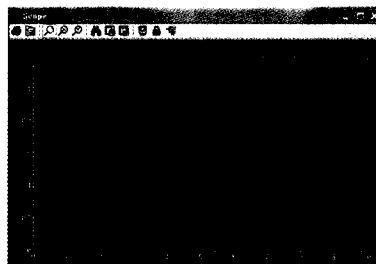
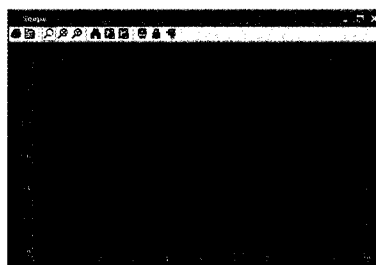


图2 simulink 仿真框图

由此框图所仿真出的效果如图3所示。



(a) 加白噪声前



(b) 加白噪声后

图3 仿真结果

3 仿真结论

由仿真结果图得出 IMC 系统能无静差地跟踪阶跃信号,此系统的设计有一定的抗干扰能力,并具有较强的鲁棒稳定性能。

参考文献

- [1] 王树青. 先进控制技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2001.
- [2] 张小娟. 时滞系统的内模控制设计及仿真[J]. 新工艺数字技术与机械加工工艺装备, 2009(11): 29-31.
- [3] 邵惠鹤. 工业过程高级控制[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1997.
- [4] 高东杰, 谭杰, 林红权. 应用先进控制技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2003.

(下转第31页)

压闭锁、无流闭锁。

(8) 非电量保护 本装置设有两个非电量保护,非电量1保护与通信9共用一个开关量输入;非电量2保护与通信10共用一个开关量输入,用于保护联跳功能。

a) 非电量1保护:当装置检测到非电量1信号,并且非电量1保护投入,启动跳闸出口;

b) 非电量2保护:当装置检测到非电量2信号,并且非电量2保护投入,启动跳闸出口;

4.2 装置告警功能

当CPU检测到装置本身硬件故障时,发出装置异常信号(装置异常继电器返回),闭锁整套保护。硬件故障包括:RAM、EPROM、定值出错。

当CPU检测到下列故障时,发出预告总信号(预告继电器动作):

(1) 过负荷告警;(2) 控制回路断线;(3) PT断线。

当CPU检测到下列故障时,发出事故总信号(事故总继电器动作):

(1) 三段时限过电流保护;(2) 反时限保护;(3) 过负荷跳闸;(4) 零流保护;(5) 低频减载;(6) 重合闸;(7) 后加速。

4.3 遥控、遥信、遥测功能

(1) 遥测功能 装置采集三相电压(U_a 、 U_b 、 U_c)、三相测量电流(CI_a 、 CI_b 、 CI_c)和三相保护电流(BI_a 、 BI_b 、 BI_c)以及一个零序电流(I_0);计算量主要有: F 、 P 、 Q 、 $\cos\phi$ 、 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca} 以及各个模入量对 U_a 的夹角等。所有这些量都实时计算,三相有功无功的计算完全不依赖于网络。精度达到

0.5级。本装置的遥测功率计算选用二表法,但B相电流正常采集。

(2) 遥信功能 装置具有CAN、RS485、RS232接口,并可采用双网通讯方式,装置能适应多种通讯媒介,如光纤,网络双绞线等。可实现16路遥信开入采集、遥信变位、事故遥信。

(3) 遥控功能 装置可实现本侧断路器遥控分、合操作;出口动作最长保持时间可由程序设定;并作事件顺序记录。

5 结束语

具备以微机保护为基础的变电所综合自动化系统是现代化电力企业的重要标志和发展方向。本实训仿真系统在真实反映变电所生产过程的同时,注重结合现代电力企业数字化、自动化的特点,采用国内变电所的先进设备配置,实现了变电所的检测、控制、监视、保护的综合自动化,可以帮助学生全面感性地了解现代电力系统运行、监控、保护原理及操作技能。满足了电力(电气)各专业课程实践教学和工程实训的需要,使培养技术应用型人才成为现实,同时也可用于企业电站运行人员的上岗培训,使教学与工程实践实现零距离结合。

参考文献

- [1] 陈小虎. 工厂供电技术[M]. 第2版. 北京:高等教育出版社,2006.
- [2] 闫军. SH变电所综合自动化的设计[D]. 大连理工大学硕士学位论文,2007,4.
- [3] 王学锋. 铁路变电所综合自动化系统研究[D]. 华中科技大学硕士学位论文,2006,5.

The Application of Microprocessor-based Protection in Simulation Training System for Power Supply and Distribution

Gu Xiu-ping

(Shanxi Engineering Vocational College, Taiyuan Shanxi 030009, China)

Abstract: Microprocessor-based protection is the main base of integrated automation system of substation. After the introduction for the basic composition and characteristics of the microprocessor-based protection system, the article makes an analysis on its function and application in the simulation training system for power supply and distribution in details.

Key words: microprocessor-based protection; integrated automation system of substation; simulation; training system

(上接第23页)

Internal Model Control Design for First-order Linear Time-delay System

Luo Xiao-hua

(College of Information Engineering Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China)

Abstract: Internal model control is a new developing control method in recent years, its principle analysis is very important in engineering application and theoretical research. From the structure of IMC, the article reveals the essence of internal model control, and then it proves that the system can not only achieve the no difference tracking for the step signal, also realizes the no difference control with the disturbance of step signal. This article introduces the internal model controller for the linear time-delay system and the method of IMC filter designing. Based on the simulation with Matlab, it shows the great robustness for the internal model control in the linear time-delay process, and has great value on application.

Key words: linear time-delay system; internal model control; simulation