

IMC-PID 鲁棒控制器设计及其在蒸馏装置上的应用

王文新¹ 潘立登^{*1} 孔德宏² 张玉伟² 胡江涛²

(1. 北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029; 2. 新疆克拉玛依石化公司, 新疆克拉玛依 834003)

摘要: 文中提出一种简便的闭环系统辨识算法和内模控制系统的设计方法。该方法便于在 DCS 上用组态来实现, 使 DCS 的 PID 控制算法方便地转换为 IMC-PID 鲁棒控制算法, 该系统几乎免维修, 控制速度快, 鲁棒性很好。该方法还使闭环辨识算法与 IMC-PID 鲁棒控制器设计结合起来, 形成一个软件包, 将它用于常减压蒸馏装置上, 使控制系统性能与鲁棒性大为提高, 取得很好的控制效果。

关键词: 闭环系统辨识; IMC-PID 鲁棒控制器; DCS; 常减压蒸馏装置; 加热炉

中图分类号: TP273.5; TQ316.331

作为鲁棒控制之一的内模控制^[1-4]具有兼顾鲁棒稳定性和控制性能的优点, 其控制性能要明显优于传统的 PID 控制, 而基于内模控制的 IMC-PID 鲁棒控制器, 不仅具有内模控制的一切优点, 并有 PID 控制器的简单结构, 而设计参数的整定却更为方便, 便于在 DCS 组态实现。因此, 在工业过程推广应用内模控制系统, 发挥 DCS 控制性能具有重大意义。

为了便于工业应用, 需要解决工业过程模型的建模问题。本文提出一种简便的闭环系统辨识算法, 与 IMC-PID 鲁棒控制器设计结合起来, 开发一个软件包, 将它用于某厂常减压蒸馏装置上, 使控制系统性能与鲁棒性大为提高, 取得很好的控制效果。

1 闭环系统辨识

闭环辨识对生产影响很小, 工厂容易接受, 但由于对象受输出反馈的影响, 使其输入与输出存在相关性, 致使系统辨识的技术难度较大。它不仅受到闭环可辨识性的限制, 还要寻找合适的辨识算法和试验条件。现在采用另外一种闭环辨识算法, 它不受闭环可辨识性的限制, 而且试验条件简单, 算法易于实现。该算法是一种用随机数直接搜索的最优化方法, 经多次改进后的 NLJ 方法^[5], 效果更好。它的特点是简单方便, 能有效地解决多约束、多目标的优化问题。

该过程模型的闭环辨识问题是: 将闭环系统中的过程模型用一阶带纯滞后模型或二阶带纯滞后模型来近似, 在实际过程 PID 控制器参数下, 写出闭环系统的传递函数, 过程模型的参数是待辨识的参数。用 NLJ 最优化方法, 以随机数直接取代过程模型中的参数, 反复迭代, 最终获得过程模型的参数。

将该方法用于辨识某常减压蒸馏装置中的温度、压力、流量等被控对象, 都能较准确地辨识出过程模型。本文以某一温度闭环控制系统举例说明。采用二阶加纯滞后模型的辨识方法按二阶加纯滞后模型来近似后, 可以看出辨识得到的模型能很好地复现实际现场被控对象。实际模型与辨识模型阶跃响应如图 1 所示, 可以用辨识出来的模型代替真实被控对象模型。

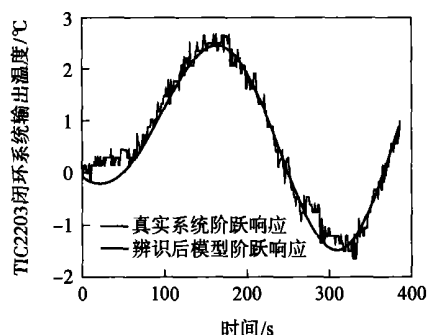


图 1 用 NLJ 法辨识现场被控对象模型参数

Fig. 1 Identified model parameters of controlled field object with NLJ optimization algorithm

2 IMC-PID 鲁棒的设计

IMC-PID 鲁棒控制器设计的另一个核心问题

收稿日期: 2003-11-09

基金项目: 中国石油克拉玛依石化分公司(H98110)

第一作者: 男, 1965 年生, 博士生

*通讯联系人

E-mail: KLwwx @263.net

是如何将过程模型与内模控制器结合起来,再与 PID 控制器合二而一进行设计。下面就深入分析该问题。

IMC-PID 鲁棒控制器的设计需要考虑鲁棒控制的三个基本问题:模型不确定性信息、鲁棒稳定性和性能指标。求取模型的不确定性界,然后初步设计控制器使系统满足标称性能,然后调整滤波器时间常数使系统同时满足鲁棒稳定性和鲁棒性能。

控制系统的性能指标采用平方误差积分 $I = \int_0^{\infty} (y - y_s)^2 dt$, 鲁棒性指标采用 M 值, $M = \|\tilde{p}\|_{\max}$, \tilde{p} 是互补灵敏度函数, $\tilde{p}(s) = \frac{\tilde{p}C}{1 + pC}$ 。 I 值越小,系统控制性能越好;而 M 是互补灵敏度函数的模在频域的最大值,用来表征鲁棒性, M 值越小,鲁棒性越好。与相稳定和幅值稳定裕度相比, M 值求取方便,而且表征的是频域下模型不确定时的鲁棒性,因而更合适于表征鲁棒性。

所设计的 IMC-PID 鲁棒控制系统如图 2 所示。

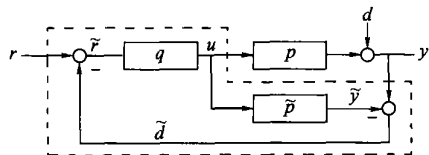


图 2 内模控制系统方框图

Fig. 2 Block diagram of internal model control system

图中 p 为过程函数; \tilde{p} 为过程模型函数; q 为内模控制器函数。

将 IMC-PID 控制器的设计步骤总结如下:

第一步,将模型分解

将 p 分解成两部分,一部分是 p_+ , 另一部分是

p_-

$$p = p_+ p_- \quad (1)$$

式中 p_+ 应包含 p 中所有的 RHP 零点和时滞; p_- 是最小相位部分对应的函数。

第二步,设计内模控制器

$$q = p_-^{-1} \quad (2)$$

为改善鲁棒性,需要串联一个滤波器,即

$$q = qf \quad (3)$$

$$\text{式中 } f = \frac{1}{s+1} \quad (4)$$

第三步,将使内模控制器的功能在 DCS 实现,需要将图 2 方框图虚线部分转化为选定的 PID 控制器 C 函数。根据控制理论的关系,虚线内的 PID 控制器的传递函数应为

$$C = \frac{q}{1 - pq} \quad (5)$$

第四步,整定滤波器常数,使控制系统兼顾鲁棒性和控制性能。

工业过程模型可用一阶加纯滞后和二阶加纯滞后的模型来近似,DCS 的 PID 算法也有多种形式。因此,鲁棒 IMC-PID 控制器的设计就可以针对各种模型和控制算法展开。这里以如下的模型和 PID 算式为例来设计 IMC-PID 鲁棒控制器。

$$G_{pid} = K_c + \frac{1}{T_i s} + \frac{1 + T_d s}{1 + T_f s} = \frac{(K_c T_i T_f + T_i T_d) s^2 + (K_c T_i + T_f + T_i) s + 1}{T_i s (T_f s + 1)} \quad (6)$$

$$p = \frac{1}{a s^2 + b s + c} e^{-ds} \quad (7)$$

对于过程模型中的纯滞后项 $\exp(-ds)$ 的近似问题,本文采用非对称二阶 Pade 近似,可获得较好的效果。将辨识得到的过程模型 p 和所设计的内模控制器代入式(5),则得

$$C = \frac{\frac{a s^2 + b s + c}{1 + s}}{1 - \frac{1 + \frac{1}{2} d s + \frac{1}{2} d^2 s^2}{1 + d s} \cdot \frac{1}{1 + s}} \cdot \frac{c \left(\frac{a + \frac{1}{2} b d s^2 + \frac{1}{2} c d + b s + 1}{c} \right)}{(d + \frac{1}{2} d^2) s \left(\frac{d - \frac{1}{2} d^2}{d + \frac{1}{2} d} s + 1 \right)} \quad (8)$$

式(8)所实现的控制算法,应该与式(6)等效,因此可以获得如下的恒等式

$$\begin{cases} T_i = \frac{d + \frac{1}{2} d^2}{c} \\ K_c T_i T_f + T_i T_d = \frac{a + \frac{1}{2} b d}{c} \\ K_c T_i + T_f + T_i = \frac{c d + b}{c} \\ T_f = \frac{d - \frac{1}{2} d^2}{d + \frac{1}{2} d} \end{cases} \quad (9)$$

接着将 DCS 中的控制算法按式(6)进行组态,按式(9)设计 PID 控制器参数,就完成了 IMC-PID 鲁棒控制器的设计任务。

3 在常减压蒸馏装置上的应用

为了使 IMC-PID 鲁棒控制器设计软件包顺利应用,需要对现场的 DCS 控制回路重新进行组态。重新组态工作很简单,只要将原来的 PID 算法修改为 PI 算法,再串一个超前滞后环节。

对于串级控制,只要将主环控制回路的组态按上述方法进行改造,把主对象与副回路合在一起作

为广义对象,用 IMC-PID 鲁棒控制器设计软件包对它进行闭环辨识和设计。

某常减压蒸馏装置使用 IMC-PID 鲁棒控制器之后,取得很好的效果。现选择原为初馏塔液体填充率与常压塔进料流量的串级均匀控制回路的系统,实施这种控制方法前后的现场运行对比曲线,如图 3 所示。

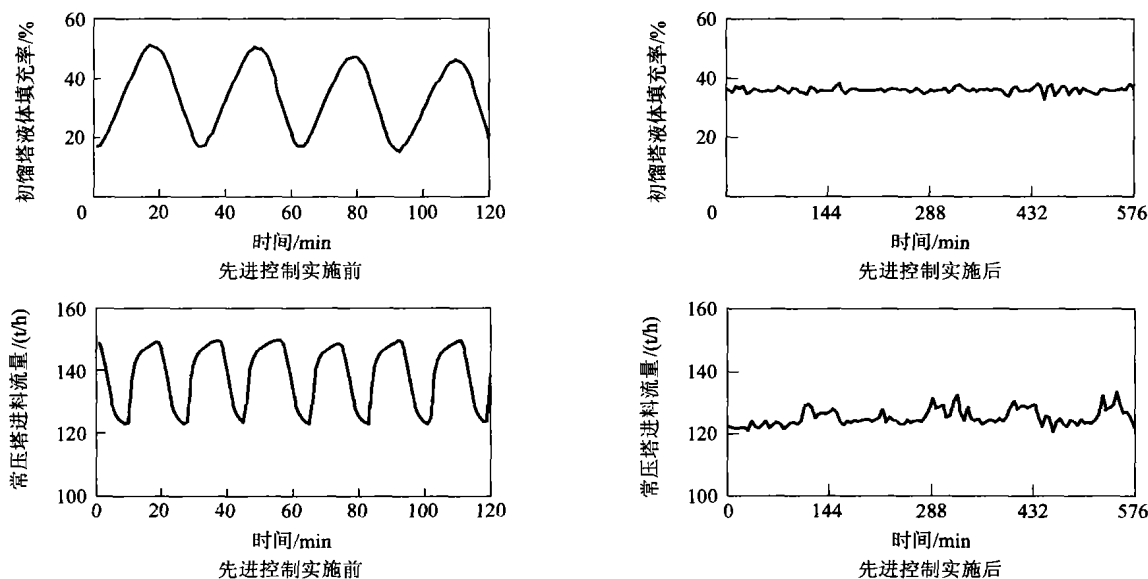


图 3 初馏塔液位与常压塔进料流量串级均匀控制系统

Fig. 3 Cascade averaging control system of flow rate and liquid level

4 结论

本文首次提出用自主开发的 IMC-PID 鲁棒控制器设计软件包设计控制器参数,经现场运行考核,获得很好的效益。证实 NLJ 方法是一种成功的闭环辨识算法,它不受闭环可辨识性的限制,而且试验条件简单,算法易于实现;将辨识模型与内模控制器结合起来,再与 PID 控制器合二而一进行设计,而且便于在 DCS 上组态实现;该系统几乎免维修,控制速度快,鲁棒性很好。这些系统已经过长期运行,该装置经过大修之后,起初生产很不稳定,一些未改造的控制系统,运行得很不好,温度都在 $5 \sim 10$ 范围变化,而实施 IMC-PID 鲁棒控制的上述系统,温度只有 $1 \sim 3$ 的范围变化,其性能远高于其它系统。当装置稳定运行之后,这些系统的波动范围仅在 1 左右,说明它的鲁棒性和性能指标是很好的。

符 号 说 明

- y ——系统无量纲化实际输出
- y_s ——系统无量纲化计算输出
- 滤波器常数
- S ——拉氏变换算子
- G_{pid} ——PID 控制器传递函数
- K_c ——比例常数
- T_i ——积分时间, min
- T_d ——微分时间, min
- T_f ——滞后时间, min
- a, b, c, d ——无量纲模型参数
- $1, 2, \dots$ ——非对称二阶 Pade 近似因数

参 考 文 献

- [1] Laughlin D L, Rivera D E, Morari M. Smith predictor design for robust performance [J]. INT J CONTROL, 1987, 46(2): 477 - 504
- [2] Rivera D E, Morari M, Skogested S. Internal model control 1.4. PID controller design [J]. Ind Eng Chem

- Process Des Dev, 1986, 25(1): 252 - 265
- [3] 龚剑平,游浩,潘立登. 应用改进的滤波器增强内模控制系统的抗干扰能力[J]. 信息与控制,1999,28(增刊):166 - 169
- [4] 龚剑平,朱凤成. SOPDT 模型不确定性及其在内模控制器设计中的应用[J]. 化工学报,2001,52(5):468 - 470
- [5] 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,2003,30(4):95 - 97

Design of robust IMC-PID controller and its application to atmospheric and vacuum distillation unit

Wang Wen-xin¹ Pan Li-deng¹ Kong De-hong² Zhang Yu-wei² Hu Jiang-tao²

(1. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. Karamay Petrochemical Complex, Karamay 834003, China)

Abstract: A method for the process model identification in a closed-loop is presented and a design approach of IMC-PID in terms of robust stability and robust performance is developed. The algorithm of IMC-PID is implemented in DCS via module configuration. It promotes robust stability and the robust performance of PID. Its control action is very quick and the system is maintenance-free. As its application a software for the process model identification in the closed-loop and the design of IMC-PID is developed. Applying this system to an atmospheric and vacuum distillation unit, the result is perfect.

Key words: system identification in a closed-loop; IMC-PID robust controller; DCS; atmospheric and vacuum distillation unit; heating oven

(责任编辑 刘同帅)

“25MLB-100-1.5 型单端宫螺旋泵”通过鉴定

由机电工程学院黎镜中、张有忱等完成的“25MLB-100-1.5 型单端迷宫螺旋泵”项目 9 月 19 日通过了北京市科委主持和组织的技术鉴定。

鉴定委员会认真地审阅了鉴定资料,听取了单端迷宫螺旋泵的工作报告、研制报告,经认真讨论对项目的整体工作和水平进行了评价。

与会专家一致认为:我校设计的单端迷宫螺旋泵为国内首次开发成功,设计独特,达到了国际先进水平。

25MLB-100-1.5 单端迷宫螺旋泵与国外同类产品相比有如下优点:国外单端迷宫螺旋泵的转子螺纹是单一齿型组成(单一螺纹),而我校的单端迷宫螺旋泵的转子螺纹是两种以上齿型组成(复合螺纹)。可以充分发挥每种齿型的性能优势。这种型号的单端迷宫螺旋泵的转子是整体结构,可以减少迷宫螺旋泵的转子在制造和装配过程中的累积误差,提高泵的转子精度。另外,这种 25MLB-100-1.5 单端迷宫螺旋泵的定子是简单的圆柱形,简化了加工,提高了通用性。

通过长期运行考核,证明该泵运行平稳,使用寿命长,维修方便,可以部分替代柱塞泵、多级离心泵、旋涡泵等。