

具有大延迟特性的热工过程的改进 PI 控制器

杨永滨 (哈尔滨工业大学)

[摘要] 本文提出了一种对具有大延迟特性的热工过程的改进 PI 控制,这种控制器实际是 Smith 预估控制的一个特例。但在设计这种控制器之前,可以不对过程的数学模型有个精确了解,控制参数也可以象 PI 控制器的参数一样通过现场运行进行调整,具有广泛应用于过程控制的潜力。

关键词 PI 控制 Smith 预估控制 热工过程控制

分类号 TP291.8

1 引言

在热工过程控制中,经常遇到具有延迟特性的系统,例如锅炉的燃烧系统,典型地由惯性加延迟环节构成。过程的传递函数为

$$W(s) = \frac{K}{TS + 1} e^{-\tau s}$$

对于这种热工过程,如果采用 PID 控制,其控制效果会受到局限。PID 控制器的微分部分可以看成是预测机构,但当过程含有大延迟特性时,通过对测量信号的分进行预测是不适宜的。因此,这时还采用 PID 控制器,微分部分大部分时间是断开的,实际上仅仅使用了没有预测功能的 PI 控制器。

当过程具有大延迟特性时,由于在测量信号上没有足够的用于预测的信息,预测不得不依靠控制信号通过在控制器内部的过程仿真来实现,Smith 预估控制就是根据这一原理形成的。但是,在 Smith 预估控制参数确定前,必须对过程进行精确辨识,而且在现场运行调试中,为了达到更好的控制效果,很难直观地改变参数。

本文提出了一种对具有大延迟特性系统的改进 PI 控制器。此控制器只需要调整三个参数,适合于现场调试。此控制器实际上可以看成是 Smith 预估控制的一个特例。

2 Smith 预估控制

如果通过过程模型提供控制信号,就可以对测量信号的未来变化进行预测。Smith 预估控制就是根据这一原理构成的。Smith 预估控制器的结构如图 1 所示。其中 $W_p(s)$ 为过程模型去掉延迟特性的传递函数, $W_r(s)$ 为控制器的传递函数。控制器的输出通过过程模型和通过没有延迟的相同模型反馈到输入。用这种方式,控制器好象作用在没有延迟环节的过程上。Smith 预估控制算法通常是一个 PI 控制器。因为预测是通过没有延迟的模型反馈实现的,所以不需要微分部分。

很多热工过程的模型结构通常可表示为

$$W(s) = \frac{K e^{-\tau s}}{TS + 1} \quad (1)$$

对这种模型采用 PI 控制器的 Smith 预估

收稿日期 1993 03 12 修改定稿 1993 07 14

本文联系人 杨永滨 男 36 讲师 150006 哈尔滨工业大学动力系 241 教研室

控制(即 $W_R(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i S})$; $W_p(s) = \frac{K}{TS + 1}$) 需要确定五个参数, 即 PI 控制器参数 K_p 和 T_i , 过程模型参数 K, T, τ 。

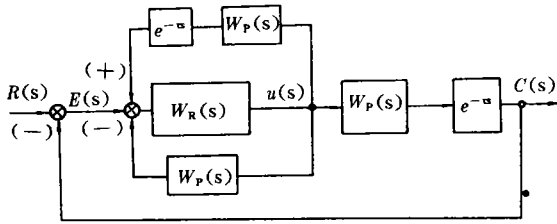


图 1 Smith 预估控制器的结构

一个 PID 控制器可以通过现场调试改变控制参数。但是, 在没有对过程进行精确的系统辨识情况下, 手工调整 Smith 预估控制器的五个参数是很困难的。因为用 Smith 预估控制代替 PID 控制大大增加了系统调整的复杂性。这正是大部分具有延迟特性的过程仍采用 PI 控制器的原因。

3 改进的 PI 控制器

讨论仅仅有三个可调参数的改进 PI 控制器, 目的是使这种控制器象传统的 PID 控制器一样可以手工调试。

改进的 PI 控制器的结构与 Smith 预估控制器一样(如图 1) 其中 $W_R(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i S})$; $W_p(s) = \frac{K}{TS + 1}$ 。控制器输出为:

$$u(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i S}) \{ E(s) - \frac{K}{TS + 1} \times [u(s) - e^{-\tau s} u(s)] \}$$

$$= K_p(1 + \frac{1}{T_i S}) E(s)$$

$$- \frac{KK_p(T_i S + 1)}{T_i S(TS + 1)} [u(s) - e^{-\tau s} u(s)] \quad (2)$$

如果将式(2)与 PID 控制器相比, 可以看到这两个控制器都有三项。其中比例项和积分项都一样, 而式(2)中的第三项是实现预测项, 它是一个低通滤波而不是微分项的高通滤波。

此控制器的设计原则是得到一个尽可能快的临界阻尼闭环系统, 由于过程是带延迟的一阶系统, Smith 预估控制又减少了延迟效果, 因此控制器参数 K_p 和 T_i 的选择可以按着过程是纯一阶系统来考虑。由于过程可看作一阶环节, 即 $W_p(s) = \frac{K}{TS + 1}$, 所以开环系统有一个极点 $-\frac{1}{T}$, 把 PI 控制器考虑进去, 闭环系统就是二阶的。即闭环系统具有临界阻尼。当开环传递函数为:

$$W(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i S}) \frac{K}{TS + 1}$$

则闭环传递函数为:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{KK_p(T_i S + 1)}{T_i T S^2 + (T_i + KK_p T_i) S + KK_p}$$

闭环极点为:

$$S_{1,2} = [-(T_i + KK_p T_i) \pm \sqrt{(T_i + KK_p T_i)^2 - 4T_i T K K_p}] / 2T_i T$$

如果要使闭环极点为双重极点 $-\frac{1}{T}$, 则:

$$\begin{cases} (T_i + KK_p T_i)^2 - 4T_i T K K_p = 0 \\ -\frac{T_i + KK_p T_i}{2T_i T} = -\frac{1}{T} \end{cases}$$

解得:

$$K_p = 1/K; \quad T_i = T \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)得:

$$u(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i S}) E(s) - \frac{1}{T_i S} [u(s) - e^{-\tau s} u(s)] \quad (4)$$

这种改进的 PI 控制器仅仅是对过程模型限制的一种 Smith 预估控制器。这个限制

是一个缺陷。另一方面,这种改进的 PI 控制器与 PID 控制器有相同的优点,即容易实现现场手工调整参数。

与 PID 控制器相比,它也能进行预测控制,特别在有较大延迟特性的过程中。而且由于预测是通过控制信号的低通滤波实现的,它没有象 PID 控制器的微分部分那样放大高频噪声。

通常认为当有负载干扰时,采用 Smith 预估控制代替 PI 控制并无明显的性能改善^[3]。下面的分析表明,对于具有大延迟特性的系统,积分绝对误差 IAE 可以降到 PI 控制器所获得的积分绝对误差 IAE 的 0.5。

对 PI 控制器有:

$$u(t) = K_p e + \frac{K_p}{T_i} \int e dt$$

在负载阶跃变化后,控制信号稳态后的增量是:

$$\Delta u = \frac{K_p}{T_i} \int e dt$$

其中积分应从负载变化时开始。对临界阻尼系统,当 $\Delta u > 0$ 时,误差的积分等于绝对误差积分。因此,假设 $\Delta u > 0$ 时

$$IAE_{PI} = \int |e(t)| dt = \frac{T_i}{K_p} \Delta u \quad (5)$$

对改进的 PI 控制器有:

$$u(t) = K_p e + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt - \frac{1}{T_i} \int [u(t) - u(t - \tau)] dt \quad (6)$$

如果延迟时间充分长,当负载有阶跃扰动时,控制信号 u 在延迟时间内处于新稳态值上。式(6)最后一项积分近似可由下式给出:

$$\int [u(t) - u(t - \tau)] dt = \tau \cdot \Delta u$$

因此,在负载阶跃扰动后,稳态时控制的增量是:

$$\Delta u = \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt - \frac{\tau}{T_i} \Delta u$$

假设系统为临界阻尼,则此改进的 PI 控制器的积分绝对误差 IAE_{NPI} 为

$$IAE_{NPI} = \int |e(t)| dt = \frac{T_i + \tau}{K_p} \Delta u \quad (7)$$

为了比较 PI 控制器和改进的 PI 控制器的积分绝对误差 IAE,必须有控制器参数的典型值。对临界阻尼的 PI 控制器,合理的值应为 $K_p = \frac{1}{4K}$ 和 $T_i = \frac{\tau}{2}$ (见[5])。因此:

$$IAE_{PI} = 2K\tau\Delta u \quad (8)$$

对改进的 PI 控制器,由式(3)知:

$$IAE_{NPI} = K(T + \tau)\Delta u \quad (9)$$

因此,

$$IAE_{NPI} = \frac{T + \tau}{2\tau} IAE_{PI} \quad (10)$$

式(10)当 $\tau > T$ 时,改进的 PI 控制器优于传统的 PI 控制器,特别是当延迟特性比较大时。对于非常大的延迟系统,改进的 PI 控制器的积分绝对误差可以达到传统的 PI 控制器的积分绝对误差的 50%。对 $\tau = 5, K = 1, T = 1$ 的过程进行仿真得:

$$\frac{IAE_{NPI}}{IAE_{PI}} = 0.73$$

改进的 PI 控制器的积分绝对误差减少了大约 30%。

4 讨论

Smith 预估控制和本文提出的改进 PI 控制器的结构是一样的,但参数整定不一样。

Smith 预估控制器有五个可调参数: K, T, τ, K_p 和 T_i ; 而本文提出的控制器有三个可调参数: K_p, T_i 和 τ 。

如果在控制调试以前,已经对过程进行了精确的辨识实验,得到过程参数 K, T 和 τ , 并且不希望对控制器进行现场重新调试,可采用 Smith 预估控制。

如果在没对过程进行精确的辨识情况

下,可采用易于现场重新调试参数的改进PI控制器。在此控制器中,改变增益 K_P 和积分时间常数 T_i 的原则仍然有效。即增加增益和减小时间常数会给出快速响应和减小的阻尼控制;而减小增益和增加积分时间常数会给出较慢的响应和更加稳定的控制。这就有可能在系统达不到满意的控制效果时对控制器的参数进行细调。如果采用手工现场调试,可首先给过程延迟时间 τ 一个适当值,然后调整 K_P 和 T_i 参数。

5 结论

本文描述的这种控制器适合于具有大延迟特性的过程,这种过程在热工过程中是常见的。与传统PID控制器相比,它具有预测测量信号的优点,特别是当过程具有大延迟特性和存在测量噪声的情况。这点通过分析和仿真已得到证明。

本文所述的改进型PI控制器与Smith

预估控制器有相同的结构,但可调整的参数限制为三个。由于给出较少的自由度,所以这实际上是个缺陷。另一方面,它与传统的PID控制器一样,能够现场直观地调整控制参数,所以,具有广泛的应用潜力,特别是在对象具有大延迟特性的热工过程中。

参 考 文 献

- 1 王永初 编著. 自动调节系统工程设计. 机械工业出版社, 1983年
- 2 王广雄 著. 自动控制系统设计. 宇航出版社, 1986年
- 3 Rivera D F, et al. Internal model control. Part 4 PID controller design. Ind. Eng. chem. Process Des. Dev. PP252-265, 1986
- 4 徐基豫 等编著. 锅炉汽轮机自动调节. 机械工业出版社, 1987年
- 5 Hagglund T, et al. Industrial adaptive controllers based on frequency response techniques. Automatica 1991, 27: 599-609
- 6 张亮明, 夏桂娟 编. 工业锅炉自动控制. 中国建筑工业出版社, 1987年

(渠源历 编辑)

【 测量仪表 】

先进的火焰监测器

据“Power”1993年10月号报道,火焰监测系统一度主要用于安全目的,现在正应用于燃烧各种燃料的锅炉。芬兰Vantaa市Imatran Voima Oy公司已推出了一种先进的火焰监测和分析系统—DIMAC系统并已成功应用于芬兰电站。

该系统的主要部件是监测各个燃烧器的一些空气冷却半导体式照相机,每个照相机安装在保护罩内并与要监测的燃烧器成90°角伸入炉膛。这些照相机产生模拟的视频信号,这些信号在系统图象分析板上被转换成数字形式,然后对这些数字值进行加工处理,以便测得与燃烧有关的各参数。这些图象也被显示在锅炉控制间的监测器上。

取得的大量火焰特性数据使锅炉操作人员了解许多有关燃烧的有价值信息,如燃料/空气比对NO_x控制是否优化,到每个燃烧器的燃料流是否均衡。Ruuhalahti电站运用结果表明,能使锅炉效率提高0.45%,从而每年节省153000美元,使NO_x排放减少10%,节省了辅助燃料油消耗,使得每年节省80000美元,并使操作人员可以探测燃烧器问题而不用停机。

(学牛 供稿)

() Through a series of experimental study and analysis of four types of connecting modes of headers in a horizontal parallel tube system the authors have come up with a method for calculating the pressure distribution of in-header gas-liquid two-phase flows in the said tube system. The calculation results are in good agreement with those obtained by tests. Thus is provided an essential formula for calculating the flow distribution of gas-liquid two-phase flows in a horizontal parallel tube system, **Key words:** *gas-liquid two-phase flow, header, pressure distribution*

(176) **Optimized Design of Flexible Membrane Couplings** ····· Wang Xingfeng, Fang Honghuai (*Mechanical Engineering Department of Nanjing Aeronautical Institute*)

By introducing an improvement on Powell's unconstrained optimization method, the authors propose an efficient constrained function method. With the use of this method a study has been conducted of the optimized design and calculation aimed at the attainment of coupling minimum weight and rigidity under the condition of meeting strength, rigidity and vibration requirements. The membrane strength and rigidity calculation being based on a finite element analysis, it is essential to solve a series of issues concerning finite element pre-processing (automatic division of elements, automatic division of loads) and post-processing (the drawing of isolines). The authors have also developed a set of relatively refined software system for the optimized design of membrane configurations (designated ODFC for short). **Key words:** *optimization, membrane, coupling*

(180) **Development of a Microcomputer-based Multi-channel Intelligent Flowmeter** ····· Zhu Deshu, et al. (*East China Shipbuilding Institute*)

This paper deals with the hardware and system software of a microcomputer-based multi-channel intelligent flowmeter with a detailed description of the creation of a flow measurement compensation model for the said flowmeter. Practical operation has shown that the above-cited model plays a key role in enhancing the measurement precision during operations under off-design conditions. **Key words:** *steam flow, compensation measurement, orifice plate, multi-channel intelligent flowmeter*

(186) **An Improved PI Controller of Thermotechnical Processes with Substantial Time Delay Characteristics** ····· Yang Yongbin (*Harbin Institute of Technology*)

The author has proposed an improved PI controller of thermotechnical processes with substantial time delay characteristics. The controller virtually constitutes a specific example of Smith forecast control. However, prior to the design of such a controller, it is not necessary to have a precise understanding of the mathematical model of the processes. The control parameters can also be adjusted on the basis of on-site operation results just like those of the PI controller. The said controller has significant potential for widespread applications in process control. **Key words:** *PI control, Smith forecast control, control of thermotechnical processes*