

PID 参数整定新方法在锅炉蒸汽压力系统中的应用

丁 虎, 张健沛

(哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001, dinghu351@sina.com.cn)

摘 要: 传统的 Ziegler-Nichols 参数整定方法已经在 PID 控制设计中得到了普遍应用, 然而由于未对超调量进行具体限制而表现出一定的局限性. 本文根据系统阶跃响应曲线的几何特性, 通过求曲线包络的面积获得在被控对象的阶跃响应超调量严格限制情况下的 PID 控制器的 3 个参数值. 该整定方法具有同时保证系统超调量小和响应速度快的双重优点, 一定程度上弥补了传统 PID 参数整定方法的不足. 把这种新的整定方法应用到锅炉蒸汽压力控制系统设计中, 在 Simulink 环境下仿真表明, 相比于经典 Ziegler-Nichols 方法, 该整定方法具有更好的控制效果.

关键词: PID 参数整定; 锅炉蒸汽压力系统; MATLAB 仿真

中图分类号: TP272

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0163-06

A new method for PID parameters tuning and its application in boiler steam pressure system

DING Hu, ZHANG Jian-pei

(College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China, dinghu351@sina.com.cn)

Abstract: Aimed at the limitation of conventional Ziegler-Nichols parameter tuning method widely used in PID controller design, based on the geometric characteristics of system step-response curve, this paper gets three parameters of PID controller changing with circumstances under the condition that overshoot is strictly limited by calculating the area enveloped by the step response curve. The new tuning method can keep the little overshoot for the system and ensure a fast response speed, which makes up for the deficiencies of traditional PID parameter tuning method to some extent. This tuning method is applied to the boiler steam pressure control system design, and the simulation results shows that the new tuning method has a better transient performance compared with the classical Ziegler-Nichols method.

Key words: PID parameter turning; boiler steam pressure system; MATLAB simulation

PID 是最通用的控制方法, 其参数整定是 PID 控制系统设计的核心内容, 它是根据被控对象的特性确定 PID 控制器的比例系数、积分时间和微分时间的大小^[1-4]. 近年来出现了许多新型 PID 控制器, 如神经网络、模糊控制、专家系统等多种 PID 参数整定方法^[4-6], 然而由于其算法复杂, 应用受到限制.

现代工业 PID 控制多采用传统 Ziegler-

Nichols 方法进行参数整定^[3-4], 它可以不依赖被控对象的数学模型直接计算 PID 参数, 在工业应用中具有很大的优越性. 然而, Ziegler-Nichols 方法没有对响应超调进行具体限制, 而实际的工业生产往往要求低超调, 这使得传统的 Ziegler-Nichols 参数整定方法在高精度的工业控制中表现出明显的不足. 为此, 本文针对该方法弊病, 基于文献[7-8]的研究结果, 利用系统的响应曲线, 提出了改进的响应曲线面积法调解 PID 参数, 该方法不但满足工程整定方法简单易行、易于掌握、不依赖被控对象数学模型的要求, 而且克服了

收稿日期: 2009-09-17.

作者简介: 丁 虎(1978—), 男, 博士研究生;

张健沛(1956—), 男, 教授, 博士生导师.

传统方法中超调量过大问题. 具体设计思想: 利用阶跃响应曲线包络的面积与系统时间常数的关系估计系统近似二阶模型, 这样就把数学模型难以建立或不易于分析的高阶模型的被控对象转化为简单的二阶系统来研究. 利用二阶系统阻尼比与超调量间的数学关系, 改变系统零极点设置, 从而分析系统的动态特性. 利用经典根轨迹法对系统稳定性进行具体分析. 这种整定 PID 参数的新方法不仅在超调量控制上具有明显的优越性, 而且保留了传统方法不依赖于被控对象数学模型的优点, 调节时间短且响应速度快, 相比于智能 PID 参数整定方法, 它具有参数整定时间短的优点, 是一种简单且可靠的 PID 参数整定方法.

1 Ziegler-Nichols 方法 PID 参数整定

为了便于将响应曲线面积法与经典 Ziegler-Nichols 方法控制效果作对比, 本节首先简单介绍 PID 控制器以及 Ziegler-Nichols 方法的参数整定过程.

PID 控制是一种比例、积分、微分并联控制器, 其运动方程为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right]. \quad (1)$$

式中: $u(t)$ 和 $e(t)$ 分别为系统的控制信号和误差信号, K_p 、 T_i 、 T_d 为需要调节的参数, 其相关传递函数为

$$K(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right). \quad (2)$$

经典的 Ziegler-Nichols 调节方法具有很好的扰动抑制能力, 但通常超调较高, 而过高的控制信号易导致激励饱和. 经典 Ziegler-Nichols 方法主要包括临界比例法和响应曲线法两种, 下面对两种方法的参数整定过程分别进行简单介绍.

1.1 Ziegler-Nichols 临界比例法 PID 整定

Ziegler-Nichols 临界比例法整定比例系数 K_p 的思想是, 首先置 $K_d = K_i = 0$, 然后增加 K_p 直至系统开始振荡 (即闭环系统极点在 $j\omega$ 轴上) 再将 K_p 乘以 0.6, 即为整定后的比例系数 $K_p^{[1,5]}$.

整定公式如下:

$$K_p = 0.6 K_m, K_d = \frac{K_p \pi}{4 \omega_m}, K_i = \frac{K_p \omega_m}{\pi}. \quad (3)$$

式中: K_m 为系统开始振荡时的 K 值, ω_m 为振荡频率. 利用根轨迹法可以确定 K_m 和 ω_m . 对于给定的被控对象传递函数, 可以得到其根轨迹对应穿越 $j\omega$ 轴时的增益即为 K_m , 而此点的 ω 值即为 ω_m .

1.2 Ziegler-Nichols 响应曲线法 PID 整定

Ziegler-Nichols 响应曲线法是一种不需要建立被控对象的数学模型而仅依赖于设备阶跃响应曲线的参数整定方法. 根据 Ziegler-Nichols 响应曲线法, 控制器参数可获得:

- 获得设备阶跃响应.
- 画出阶跃响应曲线最陡峭的切线.
- 记录如图 1 所示参数 a 和 L .
- 根据表格 1 设置控制器参数.

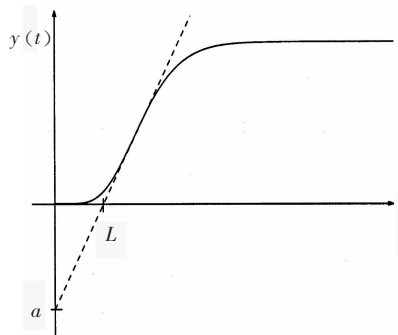


图 1 Ziegler-Nichols 响应曲线法参数记录

表 1 Ziegler-Nichols 响应曲线法 PID 参数整定

控制器	K_p	T_i	T_d
P	$1/a$		
PI	$0.9/a$	$3L$	
PID	$1.2/a$	$2L$	$L/2$

2 PID 参数整定阶跃响应面积法

本文以文献[7]提出的阶跃响应面积法为基础, 与锅炉蒸汽压力回路控制的实际应用相结合, 在此基础上做出改进, 因此对于原阶跃相应面积法的理论推导过程有必要在这里做一个简略介绍.

众所周知, 几乎所有的高阶系统都可以近似为二阶系统来分析, 即被控设备传递函数可近似为二阶系统传递函数模型:

$$G(s) = \frac{K}{(\tau s + 1)^2}. \quad (4)$$

上式经过拉普拉斯反变换得到系统的阶跃响应输出为 $y(t) = KA \left(1 - \frac{1}{\tau} t e^{-\frac{t}{\tau}} - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$, 当时 $t \rightarrow \infty$ 时, $y(t) \rightarrow KA$, 因此参数 K 可如下获得: 记录阶跃信号放大系数 A 及如图 2 所示的 A_0 和 y_∞ , 计算 $K = y_\infty / A$.

由图 2 可知

$$A_0 = \int_0^\infty [KA - y(t)] dt = KA \int_0^\infty \left[\frac{1}{\tau} t e^{-\frac{t}{\tau}} - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] dt. \quad (5)$$

计算得 $A_0 = 2KA\tau$, 因此有

$$\tau = \frac{A_0}{2y_\infty}. \quad (6)$$

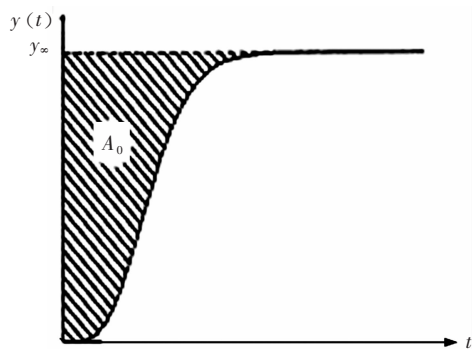


图2 阶跃响应曲线记录 A_0 和 y_∞

PID 参数整定是一个重新设定系统开环零点的过程,为便于对控制后的系统做零极点分析,可将式(2)写成如下形式:

$$K(s) = \bar{K}_p \frac{(s + z_1)(s + z_2)}{s}. \quad (7)$$

其中: z_1 和 z_2 (假设 $|z_1| > |z_2|$) 是控制器零点.

$$\bar{K}_p = K_p T_d, \quad z_1 + z_2 = \frac{1}{T_d}, \quad z_1 z_2 = \frac{1}{T_i T_d}. \quad (8)$$

式(8)表明控制器参数的选择决定于 $\bar{K}_p, z_1$ 和 z_2 (如图3). 使用根轨迹法分析系统稳定性,已知系统开环传递函数:

$$Q(s) = G(s)K(s) = \frac{\bar{K}_p K(s + z_1)(s + z_2)}{s(\tau s + 1)^2}. \quad (9)$$

由系统开环传递函数看出系统有一个原极点和一个双极点 $-1/\tau$, 零点 $-z_1$ 等于 $-1/\tau$, 则闭环系统可看为二阶系统, 零点 $-z_2$ 位于 $-z_1$ 左边时, 根轨迹在零点附近分离, 远离虚轴, 将提高系统暂态响应和相关稳定裕度.

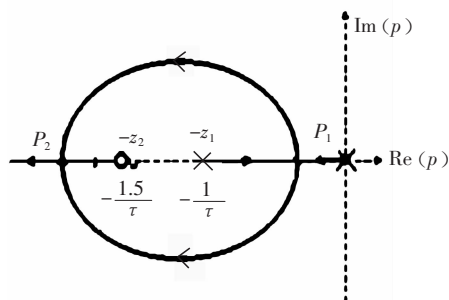


图3 闭环系统根轨迹图^[3]

根据经验, 最佳选择为 $Z_2 = 1.5/\tau$ 闭环传递函数为 $Q(s) = \frac{\bar{K}\bar{K}_p(s + z_2)}{s(s + 1/\tau)}$, 其中, $\bar{K} = K/\tau^2$, 闭环特征多项式 $p_c(s) = s(s + 1/\tau) + \bar{K}\bar{K}_p(s + z_2)$,

令闭环特征多项式 $p_c(s) = 0$, 系统为临界阻尼, 有

$$\bar{K}_p = \frac{1}{\bar{K}} \left[2(z_2 \pm \sqrt{z_2^2 - \frac{z_2}{\tau}}) - \frac{1}{\tau} \right], \quad (10)$$

可见 $\bar{K}_p$ 的选择和根轨迹中点 $P_1 P_2$ 相关, 选择较小的 $\bar{K}_p$, 将 $z_1 = 1/\tau, z_2 = 0.5/\tau, \bar{K} = K/\tau^2$ 带入式(8)和式(10)得

$$K_p = \frac{0.6699}{K}, T_i = \frac{5\tau}{3}, T_d = \frac{2\tau}{5}. \quad (11)$$

因此, PID 参数可按如下方法获得:

a) 记录阶跃信号放大系数 A , 阶跃响应输出信号 $y(t)$.

b) 计算阶跃响应稳态值 y_∞ 和 A_0 .

c) 计算时间常数为 $\tau = \frac{A_0}{2y_\infty}$.

d) 设置控制器参数为

$$K_p = \frac{0.6699}{K}, T_i = \frac{5\tau}{3}, T_d = \frac{2\tau}{5}.$$

上述方法相比于 Ziegler-Nichols 方法, 阶跃响应面积法能够使得 PID 控制器有更小的超调量. 然而, 该方法应用于部分时间常数较大的系统时, 响应速度过慢. 为了使得阶跃响应面积法的应用范围更广且灵活性更强, 在下一节给出改进算法.

3 改进的阶跃响应面积法在锅炉系统中的应用

3.1 锅炉蒸汽回路动态模型

本文所用锅炉模型以低循环倍率锅炉为例^[9]. 在低倍率循环锅炉的蒸发系统内, 有分布参量的双向蒸发管段和集中参量的汽水分离器, 形成 3 个闭环反馈回路, 如图 4 所示^[9].

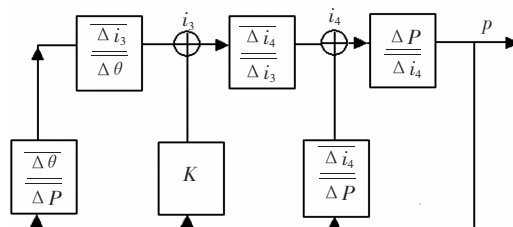


图4 锅炉蒸发系统反馈回路

其中, $\frac{\Delta i_4}{\Delta i_3} = \frac{1 - 14.64S}{1 + 4.79S + 15.5S^2}$, $\frac{\Delta P}{\Delta i_4} = \frac{0.853}{1 + T_p S}$, $T_p = 54$ s, 当蒸发系统中的介质压力为 190 绝对大气压时, $K = -0.257$, 得到对该锅炉蒸发系统工况起决定作用的蒸发系统中间反馈回路模型如图 5 所示.

3.2 新方法在锅炉系统应用中的改进

标准的锅炉系统一般具有多变量、强非线性

等特点,其真实零点使系统的阶跃响应曲线具有飞升曲线的特点,如图6所示。

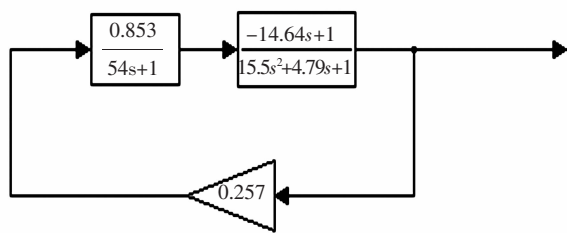


图5 蒸发系统中间反馈回路

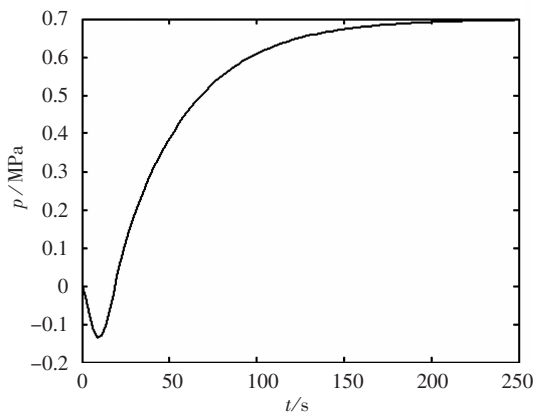


图6 锅炉系统飞升曲线

这种特性使系统 K 值的选取不能简单等同于一般的 S 形阶跃响应系统,应按照图7所示设定系统的近似 K 值。

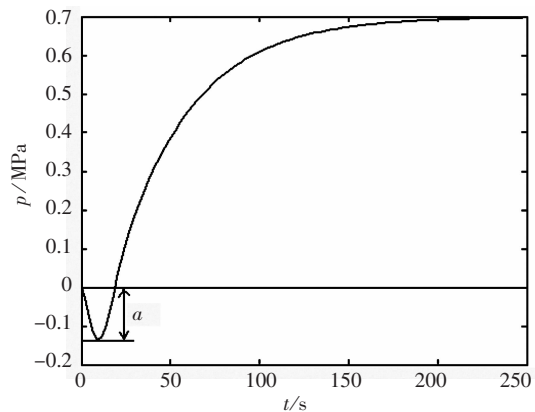


图7 锅炉系统 K 值选取

$K = \frac{y_{\infty} + a}{A}$. 对于一般的锅炉系统,通常时

间常数较大,则响应时间较长。为了改善系统的响应速度,需要对文献[9]中提出的新方法进行改进,这样能够满足不同的锅炉系统阶跃响应动态性能指标。具体改进思路及方法如下:

如图8所示,在原PID控制器基础上并联一个PI控制器,以加快系统的响应速度,根据新方法的控制策略,PID控制器传递函数

$$K_1(s) = \bar{K}_p \frac{(s + z_1)(s + z_2)}{s},$$

其中, $\bar{K}_p = 0.26796\tau/K$, $z_1 = 1/\tau$, $z_2 = 0.5/\tau$,即

PID控制器传递函数

$$K_1(s) = \frac{0.26796\tau(s + 1/\tau)(s + 1.5/\tau)}{Ks}. \quad (12)$$

经过该PID控制器的调节后的闭环系统阶跃响应为临界阻尼阶跃响应,但是一般的工业锅炉时间常数很大,响应时间比较长,做具体控制时,我们既希望被控系统超调量得到控制,又能希望控制后的系统拥有快速的响应速度,加入新的PI控制器后,系统的开环零点位置改变,闭环响应由原来的临界阻尼变为欠阻尼。

设PI控制器传递函数如下:

$$K_2(s) = K'_p \left(1 + \frac{1}{T'_i s}\right). \quad (13)$$

为使系统简化为二阶系统便于分析,取 $T'_i = \tau$,此时,系统开环传递函数

$$Q(s) = G(s)(K_1(s) + K_2(s)) = \frac{\bar{K}_p K(s + 1/\tau)(s + 1.5/\tau) + K K'_p(s + 1/\tau)}{s(\tau s + 1)^2}.$$

化简后得

$$Q(s) = \frac{\bar{K}_p K(s + 1.5/\tau) + K K'_p}{\tau^2 s(s + 1/\tau)}. \quad (14)$$

得系统闭环特征多项式改变为

$$p_c(s) = s^2 + \frac{1.26796}{\tau}s + \frac{0.40194 + K'_p K}{\tau^2}. \quad (15)$$

此时,系统阻尼比为

$$\xi = \frac{0.63398}{\sqrt{\frac{0.40194 + K'_p K}{\tau^2}}}. \quad (16)$$

得 $K'_p = \frac{1}{K} \left(\frac{0.63398^2}{\xi^2} - 0.40194 \right)$, 由于超调量与阻尼比有如下关系^[7]:

$$\sigma(\%) = \exp\left(\frac{-\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) \times 100\%. \quad (17)$$

因此,对于不同系统阻尼比的选取视被控系统具体动态性能指标要求而定,对于本文选取的锅炉蒸汽压力回路系统来说,阻尼比在0.5~0.6之间时,超调量在10%~20%,控制效果比较理想,PI参数可根据以下公式计算

$$K'_p = \frac{1}{K} \left(\frac{0.63398^2}{\xi^2} - 0.40194 \right), T'_i = \frac{1}{\tau}. \quad (18)$$

改进后的阶跃响应面积法克服了原方法应用于部分时间常数较大的系统时,响应速度过慢的缺陷,使得阶跃响应面积法的应用范围更广且灵

活性更强,总结其参数整定步骤如下:

a) 记录阶跃信号放大系数 A , 阶跃响应输出信号 $y(t)$.

b) 计算阶跃响应稳态值 y_{∞} 和 A_0 .

c) 计算时间常数: $\tau = \frac{A_0}{2y_{\infty}}$.

d) PID 基础上并联 PI 控制器传递函数为

$$K_2(s) = K'_p \left(1 + \frac{1}{T'_i s} \right).$$

e) 根据系统性能指标要求选取阻尼比:

$$\sigma(\%) = \exp\left(\frac{-\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) \times 100\%.$$

f) 设置控制器参数:

$$K_p = \frac{0.6699}{K}, T_i = \frac{5\tau}{3}, T_d = \frac{2\tau}{5},$$

$$K'_p = \frac{1}{K} \left(\frac{0.63398^2}{\xi^2} - 0.40194 \right), T'_i = \frac{1}{\tau}.$$

4 改进的新方法与 Ziegler-Nichols 法在锅炉控制中的仿真对比

在 Simulink 中创建用 PID 控制锅炉蒸汽回路的结构图如图 8 所示^[10-11].

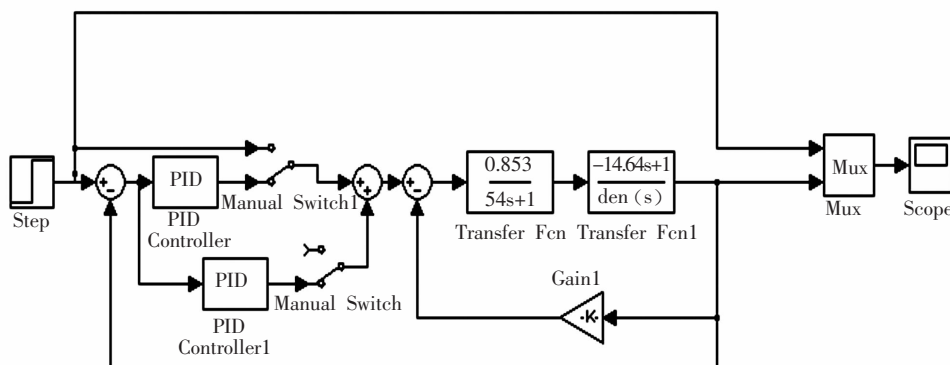


图8 Simulink 仿真图

1) Ziegler-Nichols 临界比例法 PID 整定, 见图

9. 取相关参数分别为

$$k_m = 3.8129, w_m = 0.1234, k_p = 2.2824, k_d = 14.5250, k_i = 0.0897.$$

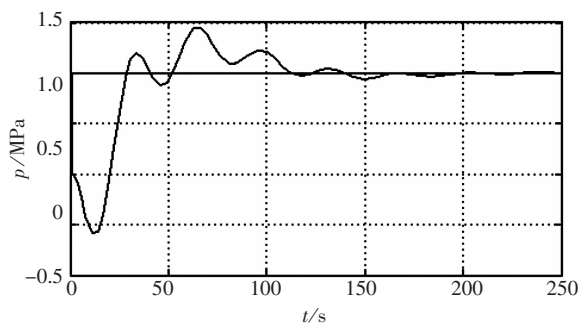


图9 Ziegler-Nichols 临界比例法 PID 控制结果

2) Ziegler-Nichols 响应曲线法 PID 整定, 见图

10. 取相关参数分别为

$$a = 0.7, L = 18, k_p = 1.7143, k_i = -0.0476, k_d = 15.4286.$$

3) 阶跃响应面积法 PID 参数整定, 见图 11. 稳态值

$$d_c = 0.6996, A_0 = 42.0411, k_p = 0.7853, k_i = 0.0157, k_d = 9.4384.$$

4) 改进后的阶跃响应面积法 PID 参数整定, 见图 12. PID 的参数依然取 3) 中给出的数值. 另外取

$$k'_p = 1.32, k'_i = 0.044.$$

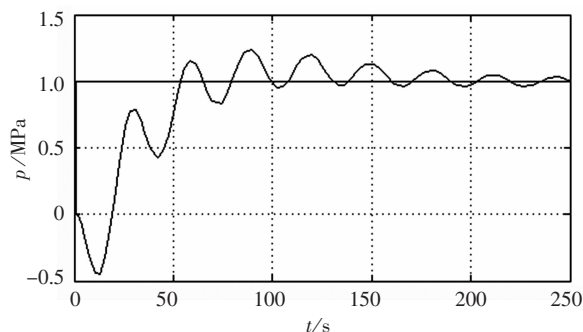


图10 Ziegler-Nichols 响应曲线法 PID 控制结果

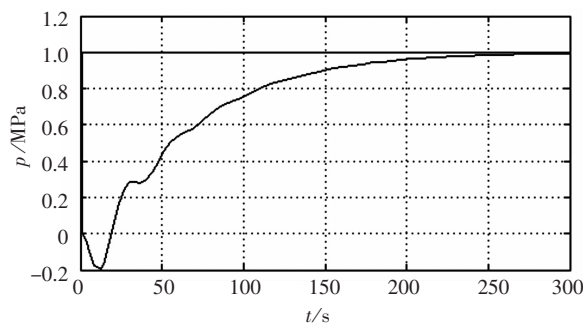


图11 阶跃响应面积法 PID 控制结果

表 2 给出了采用 Ziegler-Nichols 法与改进的阶跃响应面积法进行 PID 参数调节后的系统阶跃响应性能对比, 这里包括调节时间 t_s , 上升时间 t_r

和峰值时间 t_p , 以及响应超调量。

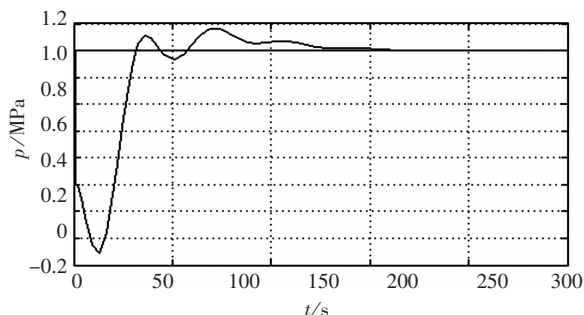


图12 改进后阶跃响应面积法PID控制结果

表2 不同方法PID控制阶跃响应暂态性能对比

控制器	$\sigma_p/\%$	t_s/s	t_r/s	t_p/s
Ziegler-Nichols 临界比例法	48	110.0	6.5	33.8
Ziegler-Nichols 响应曲线法	24	230.2	31.9	58.3
原阶跃响应面积法	-	200.0	151.4	-
改进后的阶跃响应面积法	13	80.0	8.0	33.2

由对比结果看出:

1) Ziegler-Nichols 方法与原阶跃响应面积法控制效果相比, Ziegler-Nichols 整定后的 PID 控制的闭环系统阶跃响应拥有较高的超条量及调节时间, 对于相同的反馈系统, 原阶跃响应面积法严格地保证了系统的零超调, 但是调节时间并没有减少, 系统阶跃响应上升时间过长, 牺牲了系统的响应速度。

2) 原阶跃响应面积法与改进后的阶跃响应面积法控制效果相比, 可以看出, 改进后的阶跃响应面积法超调量小, 且同时有效加快了系统的响应速度, 减少了阶跃响应上升时间。

3) Ziegler-Nichols 参数整定方法与改进后的阶跃响应面积法进行对比, 改进后的方法不仅仅超调量小, 而且响应速度快, 在各个时域性能指标上体现出明显的优越性, 控制效果比较理想。

在经过新方法校正后的 PID 控制作用下, 低循环倍率锅炉蒸汽回路中的蒸汽压力的控制效果的得到了显著改善, 有效地减小了蒸汽压力受扰动后的震荡幅度及震荡时间。

5 结 论

利用阶跃响应曲线面积法估计被控对象的近似二阶模型, 与根轨迹分析相结合, 进行 PID 控制器参数整定, 该方法适用于大多数的工业控制系统设计。它不仅克服了传统控制方法响应超调大

的不足, 而且保留了传统 Ziegler-Nichols 方法不依赖设备模型的优点, 计算方法简便、整定速度快。利用该方法对低倍率循环锅炉蒸汽回路做具体控制, 从获得的阶跃响应仿真结果对比看出, 该方法调节效果远优于经典 PID 参数整定方法, 这不仅仅实现了减小超调量的要求, 而且实现了加快上升速度, 满足了系统暂态响应指标要求, 控制效果理想。该调节方法将对实际工业控制问题的 PID 参数调节的改进具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] MANN G K I, HU B G, GOSINE R G. Time - domain based design and analysis of new PID tuning rules[J]. Control Theory and Applications, 2001, 148(3): 251 - 261.
- [2] BENNETT S. The past of PID controllers[C]//Proc IF-AC Workshop on Digital Control: Past, Present and Future of PID Control. Spain: [s. n.], 2000: 1 - 11.
- [3] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 157 - 168.
- [4] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 123 - 131.
- [5] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 第二版. 北京: 电子工业出版社, 2004: 214 - 222.
- [6] 魏克新. MATLAB 语言与自动控制系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 78 - 85.
- [7] ÅSTRÖM K J. Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control[J]. Journal of Process Control. 2004, 14(6): 635 - 650.
- [8] BASILIO J C, MATOS C. Design of PI and PID controllers with transient performance specification[J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. 2002, 45(4): 364 - 370.
- [9] 张静媛, 冯明池, 陈广利, 等. 低循环倍率锅炉的汽温特性与运行调整[J]. 电力学报, 2000, 3(2): 24 - 28.
- [10] 薛定宇. 反馈控制系统设计与分析——MATLAB 语言应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 134 - 145.
- [11] 楼顺天. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——控制系统[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000: 78 - 83.

(编辑 赵丽莹)