



# 智能 PID 调节器<sup>1)</sup>

李清泉 郭莉

(清华大学自动化系, 北京 100084)

## 摘 要

本文提出了一种新的智能 PID 调节器, 它仅需要受控对象的阶跃响应信息, 便能实现有效的控制。文中给出了它的工作原理和实现方法, 以及用于水电站调速系统的仿真结果。

**关键词:** 智能调节器, 自整定, 自综合, 水电站调速系统。

## 一、引 言

智能调节器有三种运行状态, 它们是自整定、自综合和监控状态<sup>2)</sup>, 自整定使控制系统具有稳定鲁棒性, 自综合用来保证系统的性能鲁棒性, 监控状态用来确保系统的安全。

针对自整定要求, 文献[1]提出了一种继电反馈试验法, 它需要对实际受控对象施加继电反馈控制。由于大多数工业对象不允许出现自激振荡, 所以它的实际应用范围十分有限。

本文提出的自整定方法仅需要实际对象的阶跃响应特性, 无需在对象上进行继电反馈试验, 就能得到具有稳定鲁棒性的 PID 整定参数。在自综合状态下, 仅需几条控制规则就能保证系统的性能鲁棒性。水电站调速系统的仿真实验结果证实了本文方法的有效性。

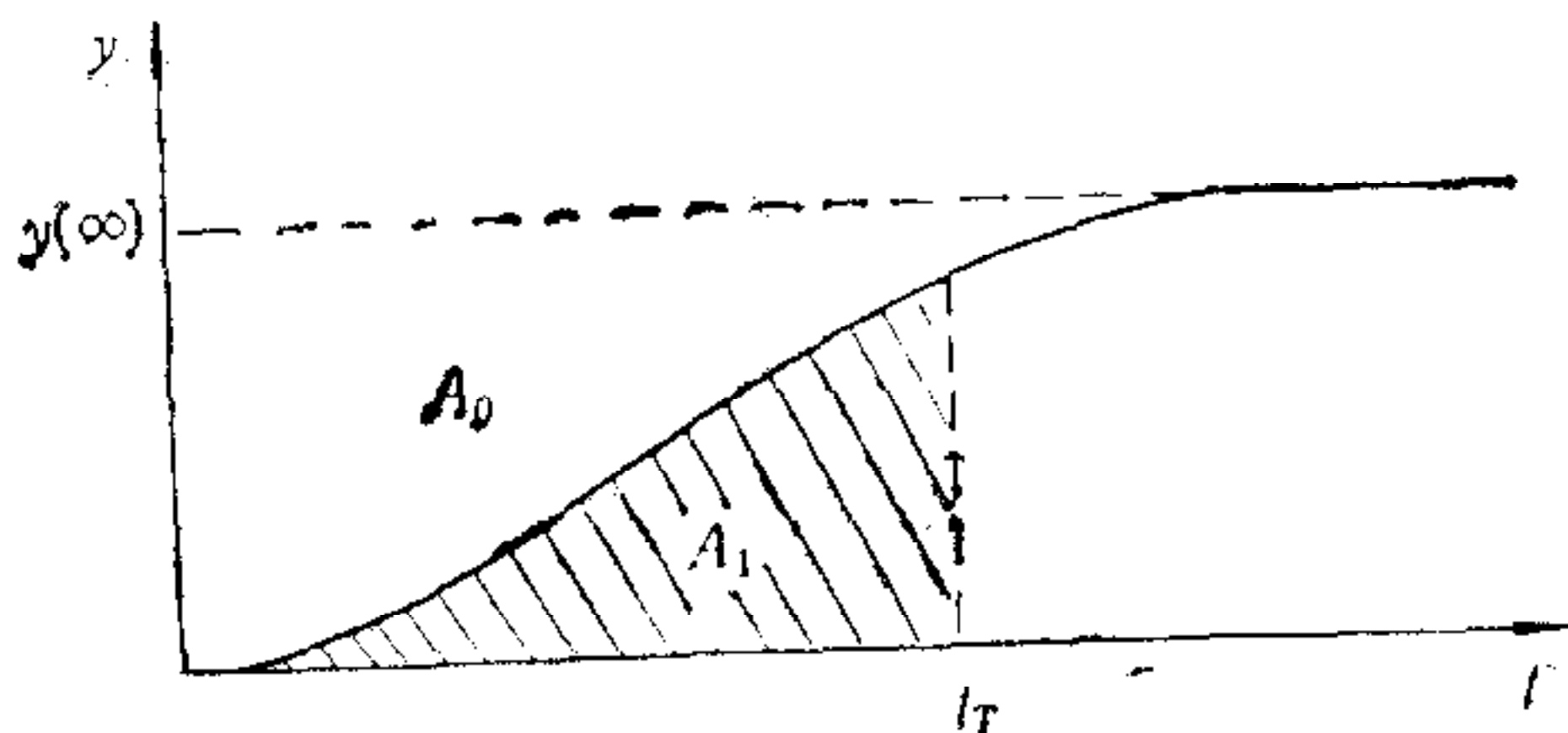


图 1 典型阶跃响应特性

## 二、实际受控对象的阶跃响应近似模型

自衡受控对象的输出  $y(t)$  对典型阶跃输入  $u(t) = u_0 \cdot 1(t)$  的响应特性如图 1 所示。

本文采用基于特征面积法的一阶模型来近似具有图 1 特征的实际工业受控对象。

根据特征面积法, 图 1 中所标注的特征参数的测算公式为

$$A_0 = \int_0^{\infty} [y(\infty) - y(t)] dt, \quad (1)$$

本文于 1992 年 2 月 14 日收到。

1) 国家自然科学基金资助课题。

2) 李清泉, 智能过程控制系统, 电气自动化理论及应用学术会议论文集, 四川重庆, 1991, 6—10。

$$t_T = A_0/y(\infty), \quad (2)$$

$$A_1 = \int_0^{t_T} y(t)dt. \quad (3)$$

这样,当通过试验得到实际阶跃响应特性后,便可由式(1)~(3)算出各特征参数.

假设实际受控对象的一阶近似模型为

$$G_a(s) = \frac{K_a}{1 + T_a s} \exp(-\tau_a s), \quad (4)$$

那么,可以证明,当测算出实际受控对象的特征参数  $A_0$  和  $A_1$  以及  $y(\infty)$  后,便可由下列各式求取对象的近似模型(4)的各个参数

$$K_a = \frac{y(\infty)}{u_0}, \quad T_a = \frac{e}{y(\infty)} A_1, \quad \tau_a = \frac{A_0}{y(\infty)} - T_a, \quad (5)$$

式中  $e$  为自然对数的底.

### 三、实际对象与它的近似模型的 临界振荡参数之间的等价性

#### 1. 临界振荡周期

考虑传递函数为  $G(s)$  的线性定常系统,它的状态空间实现为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t), \\ y(t) = \mathbf{c}^T \mathbf{x}(t), \end{cases} \quad (6a)$$

$$G(s) = \mathbf{c}^T (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{b}, \quad (6b)$$

对它施加下列继电反馈控制

$$u(t) = \begin{cases} a, & \text{当 } e_c(t) > \varepsilon \\ -a, & \text{当 } e_c(t) < -\varepsilon \end{cases} \quad (7)$$

式中  $\varepsilon$  和  $a$  分别为继电控制特性的滞环宽度和幅值,  $e_c(t) = y_r(t) - y(t)$  是指令输入  $y_r$  与对象输出  $y$  的偏差. 对于上述闭环系统,有如下结果:

**定理 1** (临界振荡周期). 考虑由式(6)和(7)组成的闭环系统. 设  $H(T_s, z)$  是对应于  $G(s)$  的零阶保持采样离散时间模型的脉冲传递函数,  $T_s$  为采样周期. 若此闭环系统存在一个振荡周期,则此临界振荡周期  $T_c$  满足

$$H\left(\frac{T_c}{2}, -1\right) = -\frac{\varepsilon}{a}. \quad (8)$$

**推论.** 若对  $G(s)$  施加  $\varepsilon = 0$  的理想继电反馈控制,则  $T_c$  满足

$$H\left(\frac{T_c}{2}, -1\right) = 0, \quad (9)$$

对于具有纯滞后  $\tau$  的对象,只要

$$\frac{T_c}{2} = T_s \geq \tau, \quad (10)$$

则式(9)依然成立.

对于式(4)一阶近似模型,它对应的零阶保持脉冲传递函数为<sup>[2]</sup>

$$H_a(T_s, z) = \frac{b_{a0} + b_{a1}z^{-1}}{1 + a_{a1}z^{-1}} z^{-d_a}. \quad (11)$$

利用定理 1 和推论,可求出此一阶近似模型的临界振荡周期  $T_{ca}$ ,即

$$T_{ca} = -2T_a \ln \left[ \frac{1}{2 \exp(\tau_a/T_a) - 1} \right]. \quad (12)$$

## 2. 临界振荡周期的等价性

实际对象与它的一阶近似模型在阶跃响应特性上的等价性,可导致它们具有相近的临界振荡周期,即

$$T_c \approx T_{ca}. \quad (13)$$

针对各种不同的对象,理论计算结果表明,  $T_c$  和  $T_{ca}$  之间的最大相对误差小于 5%, 所以从工程设计观点来看,式(13)成立.

## 四、自 整 定

根据频域理论,只要知道一个受控对象的临界振荡参数,就能为它设计一个 PID 调节器,使它们组成的闭环系统具有指定的幅度裕度和相角裕度.这就意味着对于临界振荡参数相同的实际对象和它的近似模型,可用同一个 PID 调节器获得相同的稳定裕度.这样,一个实际对象的 PID 参数可按下述方法实现自整定.

自整定方法一:

- 1) 获取实际受控对象的阶跃响应特性;
- 2) 按式(5)算出一阶近似模型参数;
- 3) 在近似模型上进行继电反馈控制的仿真实验,求取临界振荡周期  $T_{ca}$  和临界增益  $K_{ca}$ ;
- 4) 用  $T_{ca}$  和  $K_{ca}$  代替实际对象的临界振荡周期  $T_c$  和临界增益  $K_c$ , 由修正后的 Ziegler-Nichols 整定表,得到保证闭环系统稳定的 PID 参数;
- 5) 将 4) 所得 PID 参数用于实际对象.

表 1 是一个可用的 Ziegler-Nichols 参数整定表<sup>[3]</sup>.

自整定方法二:

- 1) 按自整定方法一得到 PID 参数;
- 2) 将 1) 得到的 PID 参数作为初值,在近似模型上按 ITAE 准则寻优,得到一组新的 PID 参数;
- 3) 将 2) 所得 PID 参数用于实际受控对象.

表 1 Ziegler-Nichols 闭环整定参数值

调节器	$K_p$	$T_I$	$T_D$
P	$0.5K_c$	—	—
PI	$0.45K_c$	$0.8T_c$	—
PID	$0.6K_c$	$0.5T_c$	$0.12T_c$

## 五、自 综 合

对于比较复杂的受控对象,当用上述自整定参数无法达到满意的控制性能时,可利用

几条基于误差和误差导数的控制规则来动态修正 PID 参数,以获取更佳的控制品质。根据理论分析和大量的仿真实验结果,本文仅采用三条规则便达到了预期目的。为了保证系统安全,当系统有失稳趋势时, PID 参数立即恢复到自整定参数值。

## 六、仿真实验结果

考虑下列水轮机模型,

$$G(s) = \frac{1 - 2s}{(1 + 10s)(1 + 15s)(1 + 40s)}$$

它是一个三阶的逆不稳定对象,对它分别采用下列四种控制方式:

表 2 各种控制方法的仿真结果统计

控制方法	超调量(%)	过渡过程时间 (s)
1	25.0	170.5
2	6.8	216.5
3	21.0	175.0
4	1.2	99.5

- 1) 采用文献[1]的自整定方法;
- 2) 采用本文的自整定方法一;
- 3) 采用本文的自整定方法二;
- 4) 以自整定方法一所得的 PID 参数作为初值,采用本文的控制规则的自综合方法。

表 2 示出了仿真实验结果,表中的编号 1—4 分别对应于上述 1)—4) 的控制方式。这些实验结果表明,本文方法是十分有效的。

## 参 考 文 献

- [1] Åström, K. J. and Hägglund, T., Automatic Tuning of Simple Regulators with Specification on Phase and Amplitude Margins, *Automatica*, 20(1984), 645—651.
- [2] 李清泉编著,自适应控制系统理论、设计与应用,科学出版社,1990.
- [3] 李清泉,杜继宏编著,计算机控制系统及应用,机械工业出版社,1988.

## INTELLIGENT PID REGULATOR

LI QINGQUAN GUO LI

(Department of Automation, Tsinghua University Beijing 100084)

### ABSTRACT

A new intelligent PID regulator is presented in this paper. In order to perform available control, it is sufficient to know the step response of the controlled plant. Working principle and implemented technique of the regulator, and simulation results for speed control of a hydro-power station are given.

**Key words:** intelligent regulator; autotuning; autosynthesizing; speed system of hydro power station.