

文章编号 1000 5013(2004) 03 0294 04

典型对象特性的优化控制器设计 及其参数整定

陈 芸 王 永 初

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要 从理论和实践上证明, 不完全微分型 PID 控制器, 要比完全微分型 PID 控制器具有更好的控制性能. 但在参数整定方法上, 不完全微分型 PID 控制器却没有现成的方法可循. 文中根据闭环控制理论, 研究在最优工作状态时 PID 控制器的幅频与相频特性, 导出一种比较简便的工程整定方法, 而且通过仿真验证该方法的可用性和有效性.

关键词 优化控制器设计, 参数整定, 不完全微分型 PID

中图分类号 TP 272; TP 273⁺. 24 **文献标识码** A

现在, 控制理论越来越完善和丰富, 工业自动化也随之迅速发展. 然而, 不管工业自动化如何发展, 系统设计依然是控制理论中的重要部分. 具有纯滞后加一阶惯性环节, 即

$$G(s) = K_0 \cdot \exp(-\tau_s) \cdot (T_0s + 1)^{-1}$$

在生产过程中是非常典型与常见的. 所以, 研究这类对象的控制器设计具有普遍意义. 系统设计归根到底就是控制器的设计, 而控制器的设计则包含了控制规律的确定和对控制器参数的整定^[1].

1 控制器的选择

在工业自动化生产中, 有关控制器的选择几乎都是 PID 类型的, 而且是完全微分型的 PID. 对于具有广义特性

$$G(s) = K_0 \cdot \exp(-\tau_s) \cdot (T_0s + 1)^{-1}$$

的对象, 应采用什么样的控制器最合适值得讨论. 对这个问题进行探讨的学者甚多. 本文从达林控制原理出发, 导出这类对象最适合的控制是不完全微分型的 PID 控制器. 图 1 表示的是闭环反馈控制系统的结构图. 图中 $C(s)$ 表示控制器, $G(s)$ 表示广义对象, $R(s)$ 与 $Y(s)$ 分别表示给定值信号与被控制信号. 由图 1 可得出系统的闭环传递函数为

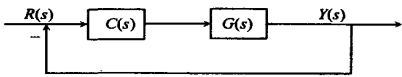


图 1 闭环反馈控制系统方框图

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = W(s), \tag{1a}$$

其中

$$W(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}. \tag{1b}$$

达林设计原理, 它预期系统闭环传递函数 $W(s)$ 应满足

$$W(s) \cong 1, \quad W(s) = 1/(Ts + 1), \quad W(s) = e^{-\tau_s}.$$

当对象包含 $e^{-\tau_s}$ 的特性时, 由于 $e^{-\tau_s}$ 是一种不可控因素, 所以 $W(s)$ 最佳的状态, 应该是预期系统闭环传递函数满足

$$W(s) \cong e^{-T_0 s}.$$

由此, 可得

$$C(s) = \frac{W(s)}{G(s)[1 - W(s)]} = \frac{T_0 s + 1}{K_0} \cdot \frac{1}{1 - e^{-T_0 s}}. \tag{2}$$

本文对 $e^{-T_0 s}$ 用 1/1 阶 Pade 近似, 把

$$e^{-T_0 s} = \frac{1 - 0.5 T_0 s}{1 + 0.5 T_0 s} \tag{2}$$

代入式(2), 得

$$C(s) = \left(\frac{T_0 s + 1}{K_0 T_0} \right) (1 + 0.5 T_0 s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{is}} \right) \cdot (1 + T_d s). \tag{3}$$

在式(3)中, $K_p = 0.5 T_0 / K_0$, $T_i = T_0$, $T_d = 0.5 T_0$.

从式(3)控制器的表达式可知, 这是一个不完全微分型的 PID 控制器. 所以, 我们选择不完全微分型 PID 作为该闭环反馈控制系统的控制器.

本文对控制器的选择是和实际的工程应用相一致的. 不完全微分型 PID 比完全微分型 PID 更适用于本文讨论的广义对象. 其理由: (1) 完全微分型 PID 对噪声的干扰非常敏感; (2) 在给定值信号阶跃变化时, 完全微分型 PID 会使得控制器的输出迅速走向极端, 不论从安全角度还是从调节品质的角度, 都是不利的^[3]. 所以, 本文选择不完全微分型 PID 调节器是合理而且实用的. 在实际应用中, 为减少系统噪声的影响, 对式(3)的 PID 控制器加入一个一阶惯性环节的滤波器后, 得

$$C(s) = \left(1 + \frac{1}{T_{is}} \right) \cdot \left[\frac{T_d s + 1}{\frac{T_d}{r} s + 1} \right]. \tag{4}$$

式(4)这种控制器, 具有非常广泛的适用性.

2 PID 参数整定

式(4)所表示的 PID 控制器, 具有 4 个可调参数(K_p , T_i , T_d , r). 如何寻找一组最优的整定参数并不是一件很容易的事, 通过排列组合也是很难找到的. 在早期的控制工程研究中, 前人已经对参数整定做了大量的研究工作, 也有大量的成果见诸于手册或教科书. 这些手册或教科书给出的参数整定仅适用于完全微分型 PID, 即适用于

$$C(s) = K_p^* \cdot \left[1 + \frac{1}{T_i^* s} + T_d^* s \right]. \tag{5}$$

这就是说, 本文提出的最适合的控制器参数整定没有现成的规律可循. 为了能应用到前人的成果, 本文将式(4)近似于式(5). 在假设的情况下, 式(4)就可近似写成式(5), 其中

$$K_p^* = K_p \cdot F, \quad T_d^* = \frac{T_d}{F}, \quad T_i^* = F \cdot T_i, \quad F = 1 + \frac{T_d}{T_i}. \tag{6}$$

符号的上标凡有“*”号的, 表示属于完全微分型 PID 的参数整定. 在系统控制时, 先按完全微分型 PID 寻找参数(K_p^* , T_i^* , T_d^*). 然后, 根据式(6), 换算成不完全微分型 PID 的参数整定. 根据等幅振荡 PID 参数整定规则, 有

$$K_p^* = 0.6 K_{ps}, \quad T_i^* = 0.5 T_s, \quad T_d^* = 0.125 T_s \tag{4}, \tag{7}$$

其中 K_{ps} 为比例控制时该系统等幅振荡时所对应的 K_p 的值, T_s 为等幅振荡时的周期. 这种方法虽然比较普遍应用, 但是精确性仍然存在问题, 因为式(5)是以 $r \gg 1$ 的假设为前提的. 这样, 使得 T_d/r 达到近似于零的程度, 也就可以将式(4)中的 $1/(\frac{T_d}{r}s + 1)$ 项忽略. 但是事实上, 这个滤波器的影响还是存在的. 为此将式(5)重新写为

$$C(s) = K_p^* \left(1 + \frac{1}{T_i^* s} + T_d^* s \right) / \left(\frac{F \cdot T_d^*}{r} \cdot s + 1 \right) = C^*(s) / f(s), \tag{8}$$

其中 $f(s) = \frac{F \cdot T_d^*}{r} \cdot s + 1$.

本文采用一种新的概念来讨论不完全微分型 PID 控制器的参数整定问题. 首先, 我们设在系统最优整定条件(即式(7))下, 由

$$T_d^*/T_i^* = 1/4, \quad F = 1 + T_d/T_i$$

联立, 可以得出不完全微分型 PID 最优整定参数的一个重要规则为

$$T_i = T_d. \quad (9)$$

$C(s)$ 在最优整定条件下的振幅与相位是可知的, 即

$$C(\omega) = 0.6K_{ps} \times [1 + \frac{1}{0.5T_s s} + 0.125T_s s] / (\frac{2 \times 0.125T_s}{r} \cdot s + 1). \quad (10)$$

若取 $r = 20$, 并将 $s = j\omega$; $\omega = 2\pi/T_s$ 代入式(10), 则有

$$|C(\omega)| = 0.66K_{ps}, \quad (11a)$$

$$\angle C(\omega) = 20.5^\circ. \quad (11b)$$

其次, 根据闭环系统的稳定性边界条件为

$$|C(\omega)| |G(\omega)| = 1, \quad (12a)$$

$$\angle C(\omega) + \angle G(\omega) = -180^\circ. \quad (12b)$$

可得

$$|G(\omega)| = \frac{1}{0.66K_{ps}}, \quad (13a)$$

$$\angle G(\omega) = 200.5^\circ. \quad (13b)$$

因为对象是已知的, 所以由式(13a)与式(13b)可以求出 T_s 及不完全微分型 PID 控制器的参数.

兹举如下一例说明. 已知被控对象的广义特性为

$$G(s) = \frac{K_0 e^{-\tau_s}}{T_0 s + 1},$$

其中 $K_0 = 2$, $\tau_s = 5$ s, $T_0 = 10$ s, 代入得

$$|G(\omega)| = K_0 / [(\frac{2\pi T_0}{T_s})^2 + 1]^{-\frac{1}{2}}, \quad (14a)$$

$$\angle G(\omega) = -\frac{360^\circ \cdot \tau_s}{T_s} - \arctan(\frac{2\pi T_0}{T_s}). \quad (14b)$$

由式(13a), (13b) 和式(14a), (14b), 可以求出 $T_s \approx 14.6$ s, $K_{ps} = 3.35$. 再由式(6), (7), 可得 $T_d = T_i \approx 3.65$ s, $K_p^* \approx 2$, $K_p \approx 1$.

3 小结

根据上文的推导, 我们已知道

$$G(s) = K_0 \cdot \exp(-\tau_s) \cdot (T_0 s + 1)^{-1}$$

这类典型对象特性的最适合的控制是不完全微分型 PID 控制. 现综述不完全微分型 PID 控制器的参数整定方法.

在 $r = 20$ 的情况下, 把对象

$$G(s) = K_0 \cdot \exp(-\tau_s) \cdot (T_0 s + 1)^{-1}$$

的系数(τ_s , T_0 , K_0)代入式(15a)与式(15b), 得

$$|G(\omega)| = \frac{1}{0.66K_{ps}} = K_0 / [(\frac{2\pi T_0}{T_s})^2 + 1]^{-\frac{1}{2}}, \quad (15a)$$

$$\angle G(\omega) = -200.5^\circ = -\frac{360^\circ \tau_s}{T_s} - \arctan(\frac{2\pi T_0}{T_s}). \quad (15b)$$

由此, 可得等幅振荡的周期(T_s)和相对应的比例系数(K_{ps}). 再根据式(7), 得到不完全微分型 PID 的参

数(K_p , T_i , T_d) 为

$$T_d = T_i = 0.25 T_s, \quad K_p = 0.3 K_{ps},$$

(16)

4 仿真

在图 2 与图 3 这两个仿真图中, 曲线的超调量都是 25% . 图 2, 3 中的曲线 1 都是在本文提出的参数整定方法下, 不完全微分型 PID 控制的闭环反馈控制系统的被控制信号的曲线图; 曲线 2 则是完全微分

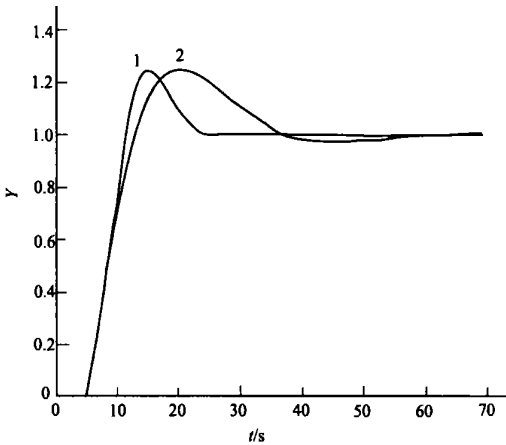


图 2 对象为 $\frac{2e^{-5s}}{10s+1}$ 的 Matlab 仿真图

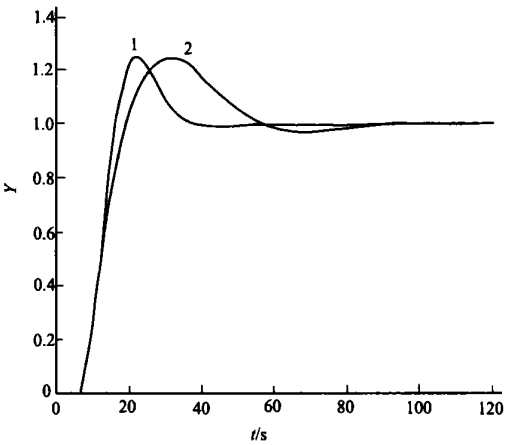


图 3 对象为 $\frac{5e^{-7s}}{15s+1}$ 的 Matlab 仿真图

型PID 控制下的被控制信号的曲线图. 从曲线 1, 2 的比较可以看到在相同超调量的情况下, 本文的不完全微分型 PID 控制比完全微分型 PID 控制的调节时间更短. 本文提出的参数整定方法, 结果证明是合理的、有效的.

参 考 文 献

1 方康玲. 过程控制系统[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2002. 69~ 70

2 王永初. 自动调节系统工程设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983. 468~ 471

3 任秀珍, 王永初. 工业自动化仪表及其系统问答 200 例[M]. 北京: 原子能出版社, 1985. 202~ 203

4 机械工程手册/电机工程手册编辑委员会编. 电机工程手册第九卷自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982. 64 ~ 65

Designing an Optimized Controller with Typical Object
Characteristic and Setting Its Parameters

Chen Yun Wang Yongchu

(College of Electromech. Eng. & Auto., Huaqiao Univ., 362021, Quanzhou, China)

Abstract The PID controller of incomplete differential type has a better controlling performane than the one of complete differential type. However, it has no established method can be followed in the method of parameter setting. Based on closed loop control theory, the authors made a study on amplitude frequency characteristic and phase frequency characteristic of PID controller under optimal operating condition. A fairly handy method of engineering adjusting and setting is derived; and availability and validity of this method are verified by simulation.

Keywords design of optimized controller, parameter setting, PID controller of incomplete differential type