

文章编号: 1001-0920(2003)01-0126-03

# 一种新型非线性 PID 控制器

苏玉鑫, 段宝岩

(西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:** 将非线性函数与简单的 PID 控制器相级联, 构成一种新型的非线性 PID 控制器, 以提高现有 PID 控制器的性能。新型 PID 控制器的设计过程十分简单, 只要适当构造非线性函数, 并与原 PID 控制器级联起来便可实现。数值仿真结果表明, 所提出的 PID 控制器比简单的 PID 控制器具有更好的动态性能。

**关键词:** 非线性控制; PID 控制; 非线性 PID 控制

**中图分类号:** TP214.2

**文献标识码:** A

## A new class of nonlinear PID controller

SU Yu-xin, DUAN Bao-yan

(School of Electro-mechanical Engineering, Xidian University, Xi an 710071, China)

**Abstract:** A new class of nonlinear PID controller to enhance the performance of the fixed PID controller is proposed. The nonlinear PID controller comprises a sector-bounded nonlinear gain in cascade with a linear fixed PID controller, which is easily accomplished in practice by appropriately selecting the nonlinear gain function. The numerical simulation results of a second order system with step response show the superior performance of the nonlinear PID controller to a fixed-gain PID controller.

**Key words:** Nonlinear control; PID control; Nonlinear PID control

### 1 引言

PID 控制器结构简单、工作稳定、鲁棒性较强, 广泛应用于冶金、化工、电力、机械等工业过程控制。至今, 全世界过程控制中所用的 80% 以上仍是纯 PID 调节器, 若包括各种改进型, 则超过 90%<sup>[1]</sup>。尽管如此, 对于 PID 控制器而言, 静态与动态性能之间的矛盾, 跟踪设定值与抑制扰动之间的矛盾, 鲁棒性与控制性能之间的矛盾等, 仍没能很好地解决<sup>[2,3]</sup>。通常采用的折衷方法或二自由度设计方案, 往往不能获得最佳的控制效果<sup>[2~7]</sup>。

传统 PID 控制存在的问题, 并不是 PID 本身引

起的, 而是线性 PID 控制中 P, I, D 的线性组合, 系统特性变化与控制量之间的线性映射关系所造成的<sup>[1,4]</sup>。为了突破传统 PID 控制器的线性特性对控制性能的制约, 近年来人们提出各种非线性 PID 控制器, 以提高系统的控制性能<sup>[4,5]</sup>。

本文充分利用传统 PID 控制器的诸多特点, 采用非线性函数与传统 PID 控制器级联起来构成非线性 PID 控制器。该非线性 PID 控制器设计简单, 利用原有的 PID 控制器参数, 只需设计非线性函数中的一个参数便可实现。对二阶系统的数值仿真, 证明了所设计的 PID 控制器既能大大降低阶跃响应的

收稿日期: 2001-10-22; 修回日期: 2001-12-11。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50075065); 陕西省自然科学基金资助项目(2000C22); 中国科学院机器人学开放研究室基金资助项目(RL200104)。

作者简介: 苏玉鑫(1969—), 男, 辽宁建昌人, 副教授, 博士, 从事机电控制及自动化的研究; 段宝岩(1955—), 男, 河北冀县人, 校长, 教授, 博士生导师, 从事机电一体化、CAD/CAE 等研究。

上升时间,又有良好的跟踪设定值的能力。

## 2 传统 PID 控制器

连续系统 PID 控制算式为

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (1)$$

相应的增量式数字 PID 控制算式为

$$\begin{cases} \Delta u(k) = \\ K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + \\ K_d[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \\ u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $K_p$ ,  $K_i$  和  $K_d$  分别为比例、积分和微分系数,  $K_i = K_p \frac{T}{T_i}$ ,  $K_d = K_p \frac{T_d}{T}$ ;  $T$ ,  $T_i$  和  $T_d$  分别为采样周期、积分时间常数和微分时间常数。

采用传统的 Ziegler-Nichols 规则,基于临界振荡方法提取特征值  $K_r$  和  $T_r$ ,则 PID 控制器的参数计算公式为

$$K_p = 0.6K_r, \quad T_i = 0.5T_r, \quad T_d = 0.125T_r \quad (3)$$

对于简单的 PID 控制器,上述参数一经整定,在整个过程中便一直保持不变。这样的控制器很难同时满足跟踪设定值和抑制扰动的要求,也无法适应过程特性的变化,而且传统 PID 控制器中的线性组合常引起快速性与超调量之间的矛盾<sup>[4]</sup>。

## 3 非线性 PID 控制器

利用误差  $e$  构成的非线性函数与简单的 PID 控制器级联起来,是实现非线性 PID 控制最简单的一种方式<sup>[6]</sup>。采用上述方式实现非线性 PID 控制的系统框图如图 1 所示。

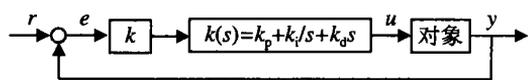


图 1 非线性 PID 控制系统框图

这种由误差  $e$  构成的非线性函数可有多种选择,一种最简单的非线性函数形式如下

$$k(e) = \text{ch}(k_0 e) = \frac{\exp(k_0 e) + \exp(-k_0 e)}{2} \quad (4)$$

$$e = \begin{cases} e, & \hat{u}\hat{e} \leq e_{\max} \\ e_{\max} \text{sgn}(e), & \hat{u}\hat{e} > e_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

上述双曲余弦函数的值域为  $[1, +\infty)$ 。如果不对非线性函数施加任何限制,在误差变化较大的区域,则可能出现非线性补偿引起系统的比例增益过大而使系统振荡的现象。为此,采用上述函数来限制  $k(e)$  的大小。

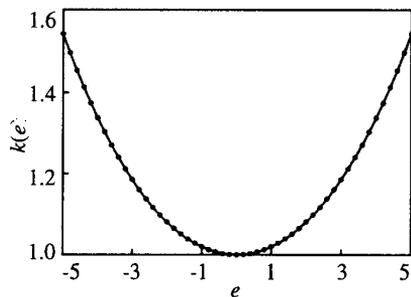


图 2 非线性函数  $k(e)$  随误差  $e$  的变化曲线

对于上述非线性增益函数  $k(e)$ ,当  $k_0 = 0.125$ ,  $e_{\max} = 5$  时,  $k(e)$  随误差  $e$  的变化曲线如图 2 所示。

## 4 数值仿真结果

本文分别对传统 PID 和非线性 PID 的控制性能进行了数值仿真。被控对象为典型的二阶系统,其传递函数为

$$G(s) = \frac{25}{s^2 + 20s + 25}$$

采用传统的 Ziegler-Nichols 规则整定固定增益的传统 PID 控制参数为:  $K_p = 5$ ,  $K_i = 15$ ; 确定非线性增益的参数为:  $k_0 = 0.125$ ,  $e_{\max} = 5$ 。在上述参数条件下,传统 PID 控制器与非线性 PID 控制器的阶跃响应如图 3 所示。图 3 同时示出了控制器的输出控制作用。

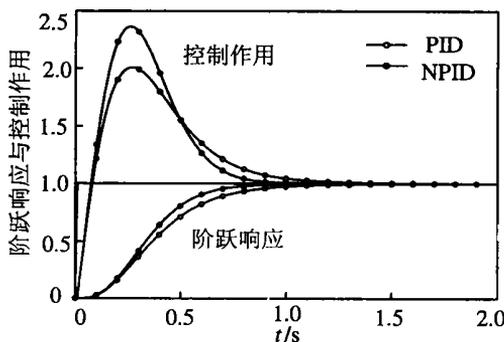


图 3 传统 PID 与非线性 PID 控制性能比较

由图 3 可见,非线性 PID 的阶跃响应速度明显优于传统固定增益 PID 的响应速度,相比传统 PID 控制器,其过渡过程时间  $t_s$  由 1.2 s 下降到 0.7 s,并且二者都没有超调。这种优良的动静态控制性能得益于非线性增益的作用。非线性增益在整个调节过程中的变化如图 4 所示。

由图 4 可见,在调节过程中,非线性增益  $k$  从 1 急剧变化为 1.02,虽然变化幅度不是很大,但控制系统的性能却有很大的提高。当达到稳态时,  $k$  又恢复为 1,即只有固定增益的传统 PID 控制器起作用。

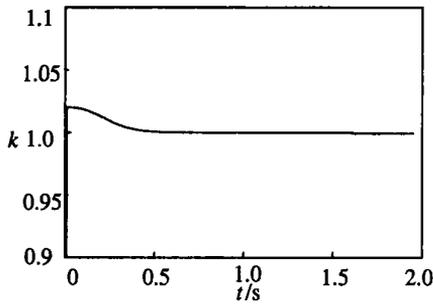


图 4 非线性增益 k 的变化

### 5 结 语

本文针对固定增益的传统 PID 控制器不能同时获得满意的动静态控制性能的弱点,提出一种利用非线性函数来构造非线性 PID 控制器的新方法。该非线性 PID 控制器构造简单,通过传统方法整定的固定增益 PID 控制器与非线性函数相串联便可实现。非线性函数仅涉及两个参数,根据被控对象的过程特点很容易构造。通过对二阶系统的阶跃响应仿真,证明了所提出的非线性 PID 控制器较固定增益的 PID 控制器具有更好的动静态性能。

若将非线性 PID 控制器作为一个环节加入被控系统,则可将整个被控系统看作一个非线性系统。系统的稳定性将是后续研究所要解决的主要问题。此外,非线性函数中  $k_0$  和  $e_{max}$  的确定与系统的稳定性直接相关,这也是后续研究所要解决的问题之一。

### 参考文献(References):

[1] 王伟,张晶涛,柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报,2000,26(3):347-355.  
(Wang Wei, Zhang Jingtao, Chai Tianyou. A survey of advanced PID parameter tuning methods [J]. Acta Autom Sinica, 2000, 26(3): 347-355.)

[2] 李卓,萧德云,何世忠. 基于 Fuzzy 推理的自调整 PID 控制器[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(2): 238-242.  
(Li Zhuo, Xiao Deyun, He Shizhong. A self-tuning PID controller based on fuzzy inference [J]. Control Theory Appl, 1997, 14(2): 238-242.)

[3] Wang Q G, Lee T H, Fung H W, et al. PID tuning for improved performance[J]. IEEE Trans Control Systems Tech, 1999, 7(4):457-465.

[4] 韩京清. 非线性 PID 控制器[J]. 自动化学报, 1994, 20(4): 487-490.  
(Han Jingqing. Nonlinear PID controller [J]. Acta Autom Sinica, 1994, 20(4): 487-490.)

[5] Xu Y, Hollerbach J M, Ma D. A nonlinear PD controller for force and contact transient control[J]. IEEE Control System Magazine, 1995, 15(1): 15-21.

[6] Homayoun Seraji. A new class of nonlinear PID controllers with robotic applications[J]. J Robotic Systems, 1998, 15(3): 161-181.

[7] Brian Armstrong, Bruce A Wade. Nonlinear PID control with partial state knowledge: Damping without derivatives[J]. Int J Robotics Res, 2000, 19(8): 715-731.

## 下 期 要 目

微粒群算法综述.....	谢晓锋, 等
一类不确定模糊动态时滞系统保成本控制.....	巩长忠, 等
基于传感器与执行器同时失误的鲁棒可靠 $H_\infty$ 控制 .....	陈 兵, 张嗣瀛
Delta 算子不确定系统的多目标鲁棒 $H_\infty$ 控制 .....	张端金, 等
改进的多模态遗传算法及其在投资组合中的应用.....	刘洪杰, 等
一种基于粗糙集的近似质量求取属性约简的决策算法 .....	徐德友, 胡寿松
基于可能性理论的案例决算方法研究.....	周凯波, 等
一种基于免疫突现计算的生物网络结构的设计 .....	丁永生, 任立红
卫星的智能规划与调度 .....	代树武, 孙辉先
一类开关切换系统的输出反馈镇定.....	王泽宁, 等
线性广义时滞系统的 $H_\infty$ 状态反馈控制器 .....	冯俊娥, 程兆林
时滞系统的状态预测观测器及预测控制器设计.....	唐功友, 等
参数和时延不确定性离散时间系统的 $H_\infty$ 鲁棒控制 .....	姜培刚, 等