

非线性 PID 控制器研究 — 比例分量的非线性方法¹⁾

胡包钢^{1,2}

¹⁾(中国科学院自动化研究所 北京 100080)

²⁾(中国科学院北京研究生院 北京 100039)

(E-mail: hubg@nlpr.ia.ac.cn)

摘 要 研究了基于比例控制分量非线性方法合成的新型非线性 PID 控制器 (简记为: NPID-PCA). 该控制器将比例控制分量表示为误差信号的非线性函数, 并通过三个独立非线性函数构造合成 PID 控制器. 由于比例控制分量具有最简的非线性特征, 因此该类控制器在设计上更为简洁, 非线性在控制作用方面的物理意义更为明确. 采用样条函数生成非线性作用曲线, 用户可以通过图形化交互方式直观地实现非线性设计. 通过与文献中的控制实例比较, 本文提出的新型非线性 PID 控制器可以实现更为优良的控制性能指标, 包括对带有时延或死区的被控对象. 有关 NPID-PCA 工具箱已经按照“开放源码”方式在网上发布.

关键词 PID 控制器, 非线性, 比例分量方法, 时延, 死区

中图分类号 TP273

A Study on Nonlinear PID Controllers — Proportional Component Approach

HU Bao-Gang^{1,2}

¹⁾(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

²⁾(Beijing Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

(E-mail: hubg@nlpr.ia.ac.cn)

Abstract In this paper, a nonlinear PID controller is studied based on “proportional component approach” (called “NPID-PCA”). While compatible with the conventional PID technique, this type of controllers imposes three independent nonlinear functions between the proportional forces on the error signals to synthesize nonlinear PID controllers. Due to its simplest characteristics in nonlinear proportional forces, the proposed controller provides a better means for designing and tuning of controller’s nonlinearity. A spline-based function is adopted to realize the nonlinear functions with a graphical interface. Several examples are given in comparison with the other existing nonlinear PID controllers. Simulation results confirm the superior performances of the proposed controllers for plants with time delay or dead zone. The toolbox of NPID-PCA has appeared to the public as “open source” software.

Key words PID control, nonlinearity, proportional component approach, time delay, dead zone

1) 国家自然科学基金项目 (60275025) 与创新集体 (60121302) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (60275025, 60121302)

收稿日期 2004-8-16 收修改稿日期 2005-12-1

Received August 16, 2004; in revised form December 1, 2005

1 引言

将非线性特征引入 PID 控制器设计中, 已经得到越来越多理论与应用方面的重视^[1~12]. 目前, 各种方式合成的非线性 PID 控制器包括有模糊系统^[13], 人工神经网络^[14], 以及基于经验式的非线性函数设定^[1~9] 等方法. 从原理上讲, 非线性功能的引入可以为控制过程带来诸多的益处, 如补偿被控对象中的非线性, 改善控制性能品质, 提高控制系统的鲁棒性等. 然而, 当非线性为控制器设计提供新的自由度的同时, 它也通常带来理论与应用研究中的复杂度. 可以认为, 有关非线性 PID 控制器的研究远未达到应有的重视程度. 本文最后一节提出的若干待解问题表明了这一点. 但是, 在此将主要探讨以下两个基本问题.

问题 A. 如何在 PID 控制器的基本结构与原理下合理地引进非线性?

问题 B. 如何满足 PID 控制器作为通用控制单元合理地构造非线性?

本文试图通过围绕以上两个问题的讨论, 来实现合理地设计非线性 PID 控制器. 在对文献 [7] 中提出的“比例分量非线性方法”的进一步完善基础之上, 还以科学计算自由软件 Scilab/Scicos 实现了新的非线性 PID 控制器设计以及仿真工具. 最后通过与现有文献中若干控制实例进行比较, 表明了新方法的有效性.

2 关于引入非线性作用对象的讨论

到目前为止, 已经发展出各种类型的非线性 PID 控制器. 根据控制原理, 本文大致分为两类. 一类是直接控制量 (Direct-action) 型, 另一类是增益调整 (Gain-scheduling) 型. 它们的数学表达形式分别为

直接控制量 (Direct-action) 型

$$u^{(DA)} = u_P(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_P) + u_I(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_I) + u_D(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_D) \quad (1a)$$

增益调整 (Gain-scheduling) 型

$$u^{(GS)} = K_P(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_P)e + K_I(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_I) \int edt + K_D(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}_D) \frac{de}{dt} \quad (1b)$$

这里 u, e 分别为控制量输入与控制响应误差信号. $\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}$ 分别为非线性函数的自变量向量与参数向量. 下标 P, I, D 分别对应为比例, 积分, 微分含义. 如 $u_P(\cdot), u_I(\cdot), u_D(\cdot)$ 分别代表比例, 积分, 微分三个非线性分量函数, 而 $K_P(\cdot), K_I(\cdot), K_D(\cdot)$ 分别代表比例, 积分, 微分三个非线性增益函数.

可以看出, 两类控制器非线性函数的作用对象是不同的. 前者是对控制分量的非线性直接设计, 而后者是对增益参数的非线性规划调整. 可以理解, 这种作用对象的不同, 将是非线性 PID 控制器设计中产生差异的最初起因. 至于是否应用模糊系统方式还是神经网络方式设计非线性只是后续方法的不同. 因此, 在非线 PID 控制器设计过程中, 本文引言中“问题 A”的解答应是“问题 B”解答的基础. 在如何选择非线性作用对象时, 一般可以根据以下两个基本条件决定.

- 1) 对控制器在非线作用方面的已有先验知识.
- 2) 对控制器在非线设计因素方面的综合考察.

考虑到非线性 PID 控制器是通用类型控制器, 可以看到目前对于公式 (1) 中的各个非线性函数在通用的先验知识方面, 只有比例控制分量 $u_P(\cdot)$ 较为充分. 它主要包含以下几个可以被控制原理所证实的非线性特征^[7]:

- 比例控制分量 $u_P(e, \boldsymbol{\theta}_P)$ 可以是误差信号 e 的连续并单调递增的非线性函数.
- 当 $e = 0$, 有 $u_P(e, \boldsymbol{\theta}_P) = 0$. 意味着零值误差对应零值比例控制分量.

— 当 $e = \max(e)$, 有 $u_P(e, \theta_P) = \max(u_P)$. 表明最大误差对应最大比例分量输出.

虽然我们对增益的非线性作用效果有所定性了解^[2], 但是缺乏可以归纳为具有通用方式的非线性特征 (第 5 节仿真实例 1 中有相关讨论). 另一方面, 由于 $u_P(\cdot)$ 可以比其它函数对象保留最简非线性几何特征, 它将从根本上大大简化非线性控制器设计.

3 新型非线性 PID 控制器结构

本节中, 我们根据比例分量非线性方法构造非线性 PID 控制器. 图 1 给出了该非线性 PID 控制器的典型结构. 有关构造非线性比例分量 $u_{Pi}(\cdot)$ 的方法将在下一节中介绍. 该控制器的基本计算形式是:

$$\hat{u} = \hat{K}_P \hat{u}_{P1}(\hat{e}, \theta_{P1}) + \hat{K}_I \int \hat{u}_{P2}(\hat{e}, \theta_{P2}) dt + \hat{K}_D \frac{d\hat{u}_{P3}(\hat{e}, \theta_{P3})}{dt} \quad (2)$$

其中, 顶标符号 “^” 表示该参数或数据是基于单位化方式的. 例如, 各增益常数为: $\hat{K}_P, \hat{K}_I, \hat{K}_D \in [0, 1]$, 量化误差信号以及量化比例分量, $\hat{e}, \hat{u}_{Pi} \in [-1, 1]$. 公式 (2) 的左端项为量化控制信号 \hat{u} , 它是各量化分量信号的和. 在控制器应用中, 量化因子 S_e 一般不在整定参数范围之内, 可以采取预定值:

$$S_e = \frac{1}{\max(|e|)} \quad (3)$$

但是, 解量化因子 S_u 如同增益常数一样, 需要设定参数的整定范围:

$$S_u = [0, \max(|u^-|, |u^+|)] \quad (4)$$

其中, u^+, u^- 分别为控制器输出信号的饱和上下限. 考虑到控制器一般都包含有饱和输出约束, 这种将饱和单元纳入本控制器结构之中 (图 1), 是有利于对实际控制作用信号进行分析. S_u 的引入虽然比传统方法多出一个线性整定参数, 但正是该参数限定了各增益常数的单位化范围. 这种单位化处理方式不仅缩减了整定参数的寻优空间 (由三维中的半无限空间转变为四维中的有限空间, 从而也减少了优化时间), 它还将提供给用户实现控制器规范化设计的便利. 该措施也有利于应用遗传算法进行控制器优化设计. 因为各参数已经合理的规定了变化区间.

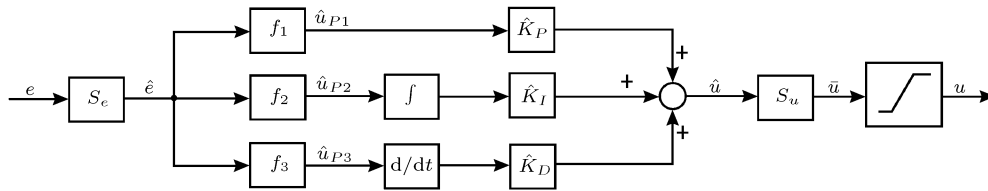


图 1 基于三个独立比例分量的非线性 PID 控制器结构

Fig. 1 The typical structure of NPID-PCA

4 关于非线性比例分量的设计

可以看到, 图 1 中的新型非线性 PID 控制器保留了传统线性 PID 的基本结构和控制原理. 控制器的非线性引入全部是通过比例分量函数 $\hat{u}_{Pi} = f_i(\cdot)$ 取得. 其中 \hat{u}_{P1} 直接对应比例增益通道, 而 \hat{u}_{P2} 与 \hat{u}_{P3} 分别对应积分, 微分增益通道. 实际应用中, 三个函数可以

是独立而不同的. 但是考虑到 \hat{u}_{P_i} 生成方法一致, 本节中只讨论单一函数 $\hat{u}_P = f(\hat{e}, \theta_P)$ 的生成方法.

实际中, 可以有各种方式生成控制器非线性, 如应用模糊推理或神经网络方法, 以至经验函数等. 在众多可行方案之中, 我们面临了引言中提出的第二个问题. 文献 [7] 总结了三条“期望特征”作为选取非线性设计方法的考虑因素, 它们分别是: “非线性函数的透明性, 非线性参数的效率, 以及方法的简单性”.

通过综合比较与分析, 我们认为“样条函数”方法在以上三个特征方面是相对最优的. PID 控制器作为底层控制单元, 应用模糊推理或神经网络方法可能并不具备优势. 因此, 本文沿用了文献 [7] 中的方法. 为了方便读者应用, 下面给出本控制器非线性函数设计的具体计算步骤.

步骤 1. 初始化选取非线性函数 \hat{u}_{P_i} 个数, 根据“简单性优先”原则, 建议先取一个非线性函数, 该函数的输出同时接入比例, 积分, 微分增益通道.

步骤 2. 初始化选取非线性参数个数 n_{nl} , 本文中只包括三种情况: $n_{nl} = 1, 2, 4$. 根据“简单性优先”原则, 建议先取 $n_{nl} = 1$.

步骤 3. 根据规定的非线性参数个数情况, 输入非线性参数向量.

$$n_{nl} = 1: \theta_P = \{P_{x1}\}, \quad n_{nl} = 2: \theta_P = \{P_{x1}, P_{y1}\}, \quad n_{nl} = 4: \theta_P = \{P_{x1}, P_{y1}, P_{x2}, P_{y2}\}$$

该参数向量的元素值分别为样条函数控制点的坐标位置, 取值范围在 $[0,1]$ 区间.

步骤 4. 根据下面样条函数建立 $\hat{u}_P = f(\hat{e}, \theta_P)$ 在 $[0,1]$ 区间的关系式:

$$\hat{e} = 3s(1-s)^2P_{x1} + 3s^2(1-s)P_{x2} + s^3 \quad (5a)$$

$$\hat{u}_P = 3s(1-s)^2P_{y1} + 3s^2(1-s)P_{y2} + s^3 \quad (5b)$$

在此, s 为 $[0,1]$ 区间的参数变量. 公式 (5) 对应 $n_{nl} = 4$ 的情况. 其它两种情况可以设定以下约束完成计算:

$$n_{nl} = 1: \text{设 } P_{x1} = P_{x2} = 1 - P_{y1} = 1 - P_{y2} = c, \quad c \in [0, 1]$$

$$n_{nl} = 2: \text{设 } P_{x1} = P_{x2} = c_1; \quad P_{y1} = P_{y2} = c_2, \quad c_1, c_2 \in [0, 1]$$

公式 (5) 的数值计算方式可以是根据已知当前 \hat{e} 值解三次函数方程 (5a), 在 $[0,1]$ 区间内必有唯一解 $s^{[7]}$, 将该 s 值代入 (5b) 中即可得到 \hat{u}_P 当前值.

步骤 5. 根据 $\hat{u}_P = f(\hat{e}, \theta_P)$ 为反对称函数性质构造该函数在 $[-1,0]$ 区间的关系式.

应用“样条函数”方法, 可以通过人机图形交互的方式实施非线性设计工作. 当比例分量非线性函数 $\hat{u}_P = f(\hat{e}, \theta_P)$ 确定之后, 可以同时获得等效增益 $(K_P)_{eq}$ 与 $(K_D)_{eq}$ 的非线性函数曲线^[7]:

$$(K_P)_{eq} = \frac{K_P}{s_u \hat{K}_P} = \frac{\hat{u}_P(\hat{e}, \theta_P)}{\hat{e}} = \frac{3(1-s)^2P_{y1} + 3s(1-s)P_{y2} + s^2}{3(1-s)^2P_{x1} + 3s(1-s)P_{x2} + s^2} \quad (6)$$

$$(K_D)_{eq} = \frac{K_D}{s_u \hat{K}_D} = \frac{d\hat{u}_P(\hat{e}, \theta_P)}{d\hat{e}} = \frac{(1-4s+3s^2)P_{y1} + (2s-3s^2)P_{y2} + s^2}{(1-4s+3s^2)P_{x1} + (2s-3s^2)P_{x2} + s^2} \quad (7)$$

而对于 $(K_I)_{eq}$ 的非线性函数曲线则必须要求误差信号 $e(t)$ 已知. 应用等效增益可以考察增益的非线性变化形态, 在此应该忽略常数增益及其解量化因子的作用.

可以理解, 非线性 PID 控制器能够按照“非线性逼近器”来设计与应用. 但是作为一种通用控制单元, 该控制器不能限定于针对某个特定被控对象来考虑. 不同于传统意义上的“非线性通用逼近器”用于逼近任一特定非线性函数 (如神经网络). 通用的非线性 PID 控制器应该根据逼近各种被控对象需求的非线性特征来考虑. 为了保证是基于“无模型

(model-free)”控制器设计, 这些特征应与“被控对象或问题背景无关 (process- or problem-independent)”. 满足这些特征的非线性函数可能不只是一种类型. 文献 [7] 对非线性比例分量的非线性特征进行了具体描述. 公式 (5) 中正是满足这些特征并具有简单表达形式的非线性函数, 它其中包括了四种最简的连续型非线性曲线 (分别为“C”, “反 C”, “S”, “反 S”曲线) 类型. 可以认为, 这些最简曲线应该是保证非线性 PID 控制器作为通用控制单元的基本非线性类型 (相对于更复杂的非线性类型而言). 它也构成了该控制器的非线性寻优 (或非线性自适应) 的可行域空间.

5 仿真实例

本文应用了“开放源码”方式的科学计算软件 Scilab/Scicos^[15] 实现了新型非线性 PID 控制器设计以及仿真平台软件, 通称为“NPID-PCA”(非线性 PID 控制器 — 比例分量方法) 工具箱^[18]. 该工具箱提供了以下全部实例的仿真应用.

实例 1. 无时延与有时延的一阶系统^[16]

文献 [16] 采用了模糊 PID 控制器, 它的输入输出显式表达式比较复杂. 而本文表明应用公式 (5) 中的简单表达式同样可以实施有效控制. 本例是对一阶系统的时延情况进行考察, 被控对象的传递函数及其饱和单元情况分别为

$$G = \frac{e^{-t_d s}}{s+1}, \quad u^- = 0, \quad u^+ = 10$$

该实例中包含两种时延情况: 无时延, $t_d = 0$; 有时延, $t_d = 0.2$. 图 2~3 分别显示了两种情况下的闭环控制系统单位阶跃响应曲线. 本例中应用了 PI 类型控制器. 对应两种情况, PI-A 与 PI-B 为线性 PI 控制器, NPI-A 与 NPI-B 为非线性 PI 控制器. 各控制器的整定参数见表 1, 其中设定一个非线性函数 u_P 分别输入给比例与积分通道. NPI-A 应用了 1 个非线性参数, NPI-B 应用了 2 个非线性参数.

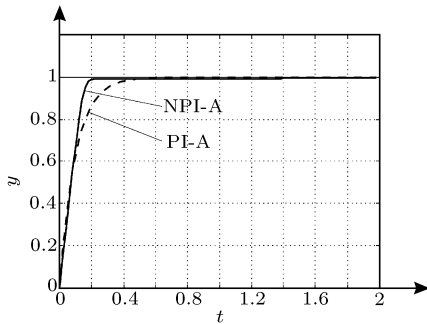


图 2 无时延一阶系统闭环控制阶跃响应

Fig. 2 Step response of the first-order process without time delay ($t_d = 0$)

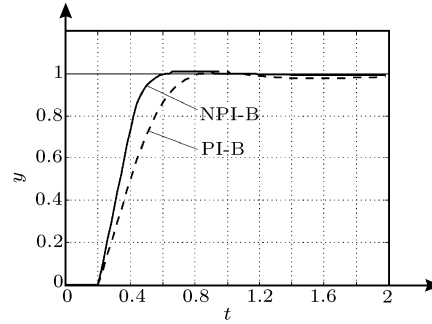


图 3 有时延一阶系统闭环控制阶跃响应

Fig. 3 Step response of the first-order process with time delay ($t_d = 0.2$)

表 1 无时延与有时延一阶系统的线性与非线性 PI 控制器整定参数表
Table 1 Parameters of linear and nonlinear controllers for step responses of the first-order process with and without time delay

| 时延情况 控制器类型 | $t_d = 0$ | | $t_d = 0.2$ | |
|---------------|--|--|--|---|
| | PI-A | NPI-A | PI-B | NPI-B |
| 线性控制参数 | $\hat{K}_P = 1, \hat{K}_I = 1$ $S_u = 10$ | $\hat{K}_P = 1, \hat{K}_I = 0.394$ $S_u = 7.32$ | $\hat{K}_P = 1, \hat{K}_I = 0.874$ $S_u = 2.52$ | $\hat{K}_P = 1, \hat{K}_I = 0.961$ $S_u = 3.7$ |
| 非线性控制参数 | 无 | $\theta_P = \{P_{x1}\} = \{0.1\}$ | 无 | $\theta_P = \{P_{x1}, P_{y1}\} = \{0.7, 0.2\}$ |

可以看到,非线性 PI 控制器可以提供更好的响应性能. 当时延引入后,比例分量对应误差信号的非线性变化趋势有着显著的不同(图 4~5). 等效比例增益情况也是如此. 注意 $\hat{u}_P(\hat{e})$ 是反对称函数, $(K_P(\hat{e}))_{eq}$ 是对称函数. 但是图 4~5 只显示了各函数在第一象限中的情况. 图中给出了生成 \hat{u}_P 函数的控制点 P_i (相当于非线性参数个数等于 1 或 2). 应用控制点位置可以方便地交互式设计出控制器的非线性曲线. 当 \hat{u}_P 函数确定后,非线性比例(以及微分)增益可以同时用图形显示.

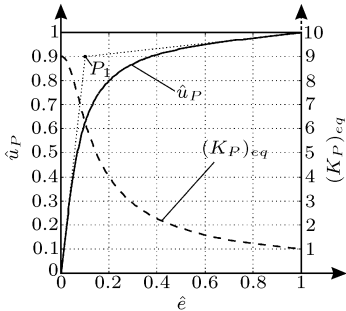


图 4 非线性比例分量与非线性等效比例增益曲线 (对应图 2 中 NPI-A 控制实例, 无时延)

Fig. 4 Plots of \hat{u}_P and $(K_P)_{eq}$ for NPI-A in Fig. 2

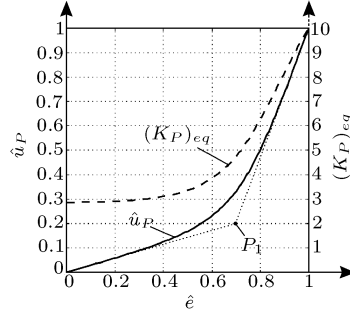


图 5 非线性比例分量与非线性等效比例增益曲线 (对应图 3 中 NPI-B 控制实例, 有时延)

Fig. 5 Plots of \hat{u}_P and $(K_P)_{eq}$ for NPI-B in Fig. 3

在进行控制器设计过程中,一般采用线性 PID 起步(设定 $P_x = P_y$, 即获得 $\hat{u}_P = \hat{e}$). 整定完线性参数后,可以施加各种非线性曲线. 通过本例可以理解为什么不容易直接设计 $K_P(\hat{e})$ 等增益类非线性函数. 因为,当 $\hat{e} = 0$ 时,一般无法判断增益的当前值,以及增益随被控对象的变化趋势.

实例 2. 有控制死区的二阶系统^[17]

对于已知的控制死区情况,文献 [17] 中应用了死区补偿单元加线性 PID 控制器方式实施控制方案(图 6). 而本文将应用简单光滑的非线性比例分量方法实现有效控制. 文献 [17] 并未给出被控对象的明确数学表达式,经仿真估计,可以得到被控对象的传递函数为:

$$G = \frac{2}{s^2 + 4.4s}, \quad u^- = -10, \quad u^+ = 10, \quad I_1 = \pm 0.5$$

其中, I_1 是文献 [17] 中给出的死区上下限. 图 7 给出了三种控制器情况下的单位阶跃响应曲线. 按照原文方式,全部控制器采用 PD 类型. 其中 NPD-LD 控制器为文献 [17] 中的线性 PD 加死区补偿单元,而其它 NPD-A 与 NPD-B 为应用本文方法. 全部整定参数见表 2.

表 2 有控制死区的二阶系统的非线性 PD 控制器整定参数表
Table 2 Parameters of nonlinear controllers for step responses of the second-order process with a dead zone

| 控制器类型 | NPD-LD ^[17] | NPD-A | NPD-B |
|---------|---------------------------|--|---|
| 线性控制参数 | $K_P = 3.21, K_D = 0.043$ | $\hat{K}_P = 1, \hat{K}_D = 0.15$ $S_u = 3.0$ | $\hat{K}_P = 1, \hat{K}_D = 0.15, S_u = 10$ |
| 非线性控制参数 | 应用死区补偿单元 | $\theta_P = \{P_{x1}, P_{y1}\}$ $= \{0.01, 0.9\}$ | $\theta_{P1} = \{P_{x1}, P_{y1}, P_{x2}, P_{y2}\}$ $= \{0.01, 0.9, 0.9, 0.01\}$ $\theta_{P3} = \{P_{x1}, P_{y1}\}$ $= \{0.01, 0.9\}$ |

注意 NPD-A 控制器采用了“C”曲线为非线性比例分量函数(图 8),它与文献 [17] 中死区补偿单元有着相似的形状. 如果继续增加表 2 中参数 $S_u (= 3.0)$,该控制器的响应曲线将逐渐出现超调情况. 为了进一步改善控制性能, NPD-B 应用了两个独立的非线性比例分量函数(图 9). 当 \hat{u}_{P3} (用于生成非线性等效微分增益)保留“C”曲线时, \hat{u}_{P1} (用于生成非线性等效比例增益)已改变为“反 S”曲线(该曲线由 2 个控制点或 4 个非线性参数确定). 选

择“反 S”曲线是由于在零值误差附近，该曲线与死区补偿单元有着相似的形状。这时， S_u 增加后 (=10)，系统响应速度明显提高，而未产生超调。两种控制器中的非线性比例增益变化趋势基本相同。这说明非线性比例分量具有更好的灵敏度，适合于作为非线性设计变量。本例表明新型非线性 PID 控制器提供的简单光滑非线性不仅可以有效补偿控制死区，同时可以显著改善性能品质。

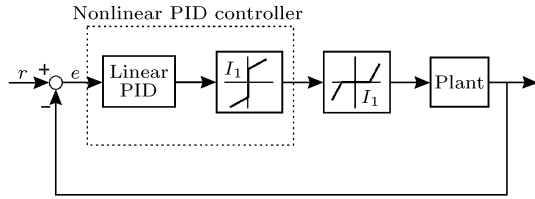


图 6 文献 [17] 中非线性 PID 控制器设计方案
Fig. 6 Nonlinear PID controllers in [17]

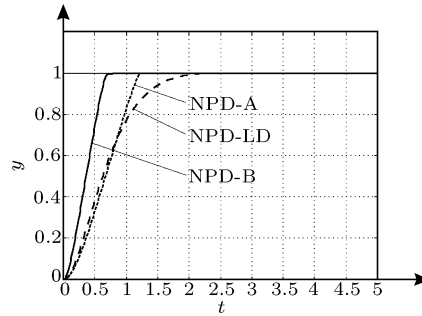


图 7 有控制死区的二阶系统闭环控制阶跃响应
Fig. 7 Step responses of nonlinear controllers for a second-order process with dead zone

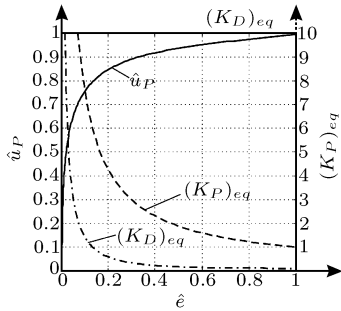


图 8 非线性比例分量及等效增益曲线
当 $\hat{e} = 0, (K_P)_{eq} = (K_D)_{eq} = 90$
(对应图 7 中 NPD-A 控制器实例)
Fig. 8 Plots of \hat{u}_P and $(K_P)_{eq}$ for NPD-A in Fig. 7

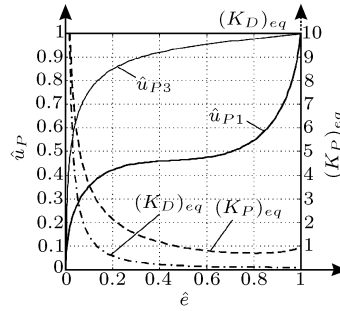


图 9 非线性比例分量及等效增益曲线
当 $\hat{e} = 0, (K_P)_{eq} = (K_D)_{eq} = 90$
(对应图 7 中 NPD-B 控制器实例)
Fig. 9 Plots of \hat{u}_P and $(K_P)_{eq}$ for NPD-B in Fig. 7

实例 3. 小阻尼二阶系统^[6]

本例是为了与文献 [6] 中提出的高性能非线性 PI 控制器进行比较。原文中给出两种 NPI 设计形式：

$$NPI5 - SS : u(t) = [K_p + g_P e^{\lambda|e(t)}]e(t) + K_I \xi(t)$$

$$NPI6 - SS : u(t) = \frac{a_0 + a_1|e(t)|}{b_0 + b_1|e(t)|}e(t) + K_I \xi(t)$$

$$\frac{d\xi(t)}{dt} = \frac{e(t)}{1 + \mu e^2(t)}, \quad \xi(0) = 0$$

其中，NPI5-SS 与 NPI6-SS 分别为 5 参数与 6 参数非线性 PI 控制器。原文中给出的仿真实例是一个小阻尼二阶系统：

$$G = \frac{s + 1}{s^2 + 0.01s + 1}$$

表 3 中分别给出了文献 [6] 中三个控制器的整定参数。这些参数是通过优化最小误差与控

制作用力积分和获得的. NPI-C 为应用本文方法, 共有 4 个整定参数的非线性 PI 控制器. 本文是应用手工完成参数整定的.

表 3 小阻尼二阶系统的 PID 控制器整定参数表
Table 3 Parameters of controllers for step responses of the second-order process with small damping

| 控制器类型 | PI-SS ^[6] | NPI5-SS ^[6] | NPI6-SS ^[6] | NPI-C |
|---------|------------------------------|--|--|---|
| 线性控制参数 | $K_P = 3.15$ $K_I = 3.38$ | $K_P = 2.36$ $K_I = 267.39$ | $K_I = 270.0$ | $\hat{K}_P = 1, \hat{K}_I = 0.1$ $S_u = 6$ |
| 非线性控制参数 | 无 | $g_P = 171.0, \lambda = -90.99$ $\mu = 37.01$ | $a_0 = 19.36, a_1 = 19.04, b_0 = 0.5748$ $b_1 = 13.01, \mu = 30.17$ | $\theta_P = \{P_{x1}\} = \{0.01\}$ |

图 10~11 分别给出了四种控制器的阶跃响应及其控制信号记录. 本实例中阶跃响应高度为 3, 因此 NPI-C 控制器中设定 $S_e = 1/3$. 该控制器具有最快的响应性能 (图 10, 稳定时间比原控制器减少 30%), 其代价是消耗了略多的能量 (图 11). 可以认为新型控制器与文献中提出的 5 或 6 参数非线性控制器基本相当. 但是新控制器的各个整定参数物理意义更为简单明确 (有关非线性函数的物理意义可以通过各非线性增益在误差域中的变化曲线获得).

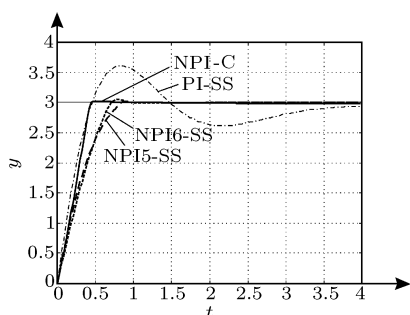


图 10 小阻尼二阶系统闭环控制阶跃响应
Fig. 10 Step response for the second-order plant with small damping

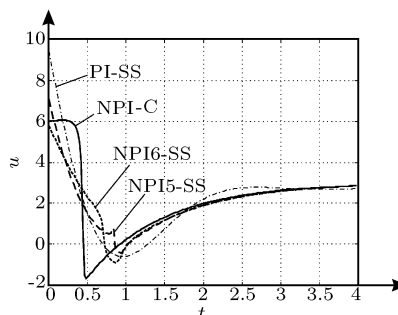


图 11 小阻尼二阶系统闭环控制信号
Fig. 11 Plots of u for the controllers in Fig. 10

6 未完成的结束语

本文探讨了非线性 PID 控制器设计中的两个基本问题: 非线性变量的选择与非线性合成方法的选择. PID 技术为什么得到了最广泛的应用, 主要原因在于它工作原理的有效性与简单性. 当对线性 PID 控制技术引入非线性功能时, 新的控制器应该最大程度地保留原有控制器单元的优良特性. 本文提出的设计方法正是这样一种尝试. 在引入“最简单”的非线性控制作用的同时还强调了控制器设计规范化体系的建立. 如新方法中规定了控制器各个参数的定义域, 结构设计中引入饱和单元, 采用交互式图形化非线性设计等措施. 这些, 都将有利于工程应用的规范化. 文中给出的若干仿真实例表明了新方法的有效性. 各实例中的响应结果用户可以应用 NPID-PCA 工具箱^[18] 加以验证并进行改进.

PID 控制已经是自动控制工程中最成熟的技术之一^[19,20]. 但是, 在非线性理论与应用方面我们还知之不多, 许多基本问题亟待解决. 下面若干问题给出了非线性控制理论与应用方面的挑战. 在这之中, PID 仍将是基本的控制单元, 值得我们去进一步的认识和探索.

- “非线性与稳定性”的关系
- “非线性与鲁棒性”的关系

- “非线性与响应品质”的关系
- “光滑非线性”对各种类型非线性的补偿控制
- “时变”类型的非线性 PID 控制器设计
- 非线性与时延被控对象的实时控制
- 非线性与耦合多变量过程控制
- 非线性 PID 参数整定规则
- 各种类型非线性 PID 控制器的系统化比较研究
- 非线性控制器可张成“非线性空间”的测度

.....

致谢

作者感谢与刘国平 (Liu Guo-Ping) 教授的学术讨论. 在 Scilab/Scicos 软件平台应用中曾得到法国 INRIA 研究人员的帮助, 作者对他们表示感谢.

References

- 1 Han J Q. Nonlinear PID controller. *Acta Automatica Sinica*, 1994, **20**(4): 487~490
- 2 Chen Z, Yan W, Li Z S, Wang G J, Xu G Y. HSIC-based nonlinear PID controller. *Control and Decision*, 2003, **18**(6): 694~697
- 3 Rugh W J. Design of nonlinear PID controllers. *AIChE Journal*, 1987, **33**(10): 1738~1742
- 4 Jutan A. A nonlinear PI(D) controller. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1989, **67**(6): 485~493
- 5 Xu Y, Hollerbach J M, Ma D. A nonlinear PD controller for force and contact transient control. *IEEE Control Systems Magazine*, 1995, **15**(1): 15~21
- 6 Shahruz S M, Schwartz A L. Nonlinear PI compensators that achieve high performance. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, Transactions ASME*, 1997, **119**: 105~110
- 7 Hu B G, Mann G K I, Gosine R G. Control curve design for nonlinear (or fuzzy) proportional actions using spline-based functions. *Automatica*, 1998, **34**(9): 1125~1133
- 8 Bucklaew T P, Liu C S. A new nonlinear gain structure for PD-type controllers in robotic applications. *Journal of Robotic Systems*, 1999, **16**(11): 627~649
- 9 Armstrong B, Neevel D, Kusiak T. New results in NPID control: Tracking, integral control, friction compensation and experimental results. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001, **9**(2): 399~406
- 10 IFAC. Special Issue on PID Controller, *Control Engineering Practice*, 2001, **9**(11).
- 11 IEE. Special Issue on PID control, *IEE Proceedings D - Control Theory and Applications*, 2002, **149**(1).
- 12 Gao Z. From linear to nonlinear control means: a practical progression. *ISA Transactions*, 2002, **41**(2): 177~189
- 13 Hu B G, Ying H. Review of fuzzy PID control techniques and some important issues. *Acta Automatica Sinica*, 2001, **27**(4): 567~584
- 14 Ruano A E B, Fleming P J, Jones D I. Connectionist approach to PID autotuning. *IEE Proceedings D - Control Theory and Applications*, 1992, **D139**(3): 279~285
- 15 INRIA-ENPC, Scilab/Scicos. [Online], available: <http://scilabsoft.inria.fr/>, March 1, 2006
- 16 Hu B G, Mann G K I, Gosine R G. New methodology for analytical and optimal design of fuzzy PID controllers. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1999, **7**(5): 521~539
- 17 Liu G P, Daley S. Optimal-tuning nonlinear PID control of hydraulic systems. *Control Engineering Practice*, 2000, **8**(9): 1045~1053
- 18 Hu B G. NPID-PCA user guide. A simulation toolkit of nonlinear PID control on Scilab/Scicos. [Online], available: <http://liama.ia.ac.cn/hubg/Scilab/NPID-PCA>, March 1, 2006.
- 19 Wang W, Zhang Y T, Chai T Y. A survey of advanced PID parameter tuning methods. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(3): 347~355
- 20 Tan K K, Wang Q G, Hang C C. *Advances in PID*. New York: Springer, 1999

胡包钢 中国科学院自动化研究所模式识别国家重点实验室及中法联合实验室 (LIAMA) 研究员, IEEE 高级会员. 研究兴趣为智能系统, 机器学习与植物生长建模.

(**HU Bao-Gang** Professor at Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, IEEE senior member. His research interests include intelligent system, machine learning, and plant growth modeling.)