

存在常见非线性环节系统 PID 参数的整定

邢青青, 郝继飞, 白文宝

(中国矿业大学 信电学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 在实际系统中大量存在的常见非线性对系统的性能会造成很坏的影响。主要研究不带常见非线性和带有常见非线性被控对象, 在比例、积分、微分 PID (Proportional Integration Differential) 控制系统的参数变化规律。选取 4 种最常见的非线性 (饱和、死区、间隙、摩擦) 采用经验公式法加手动调节进行 Matlab 仿真。仿真说明, PID 的控制效果好; 在加有非线性与未加非线性的 PID 控制器中, PID 参数起主要作用的是比例积分调节, 微分控制只改善了系统的响应速度。

关键词: PID 调节器; 参数整定; 常见非线性

中图分类号: TM 743

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2005)05-0091-03

进行理论研究所用的模型大多是对非线性的近似线性化。但有些非线性, 不能进行线性化或者线性化就会造成很大的误差^[1]。这类非线性在实际中大量存在, 称之为常见非线性, 它对比例、积分、微分 PID (Proportional Integration Differential) 控制系统的参数整定造成很大的困难。若被控对象中的常见非线性环节不占主导地位, 则仍然可以用 PID 调节器进行控制, 但对调节器的参数整定会有一定的影响。为研究这种影响, 结合工程实际, 本文中选取 4 种最常见的非线性: 饱和、死区、间隙、摩擦进行仿真。

本文主要研究不带常见非线性和带有常见非线性 PID 控制系统^[1]的参数变化规律。研究方法主要是通过大量的 Matlab 仿真, 进行被控对象带有常见非线性时的最佳 PID 模型与无常见非线性时的 PID 最佳模型相比较, 得出被控对象带有常见非线性的 PID 控制器参数整定规律。这种规律简洁、直观, 容易被工程技术人员应用到实际中。

1 对 4 种常见非线性的仿真

在工程实际中, 大多数被控对象都可以用一阶或二阶惯性加纯滞后环节表示, 故可设定加非线性时的 PID 参数整定模型^[2], 如图 1 所示。

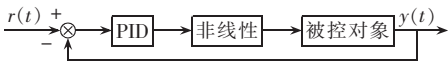


图 1 加非线性时的 PID 参数整定模型

Fig.1 PID parameter tuning model for object with nonlinearity

图 1 中 PID 调节器的传递函数为

$$G_c(s) = K_p + K_i/s + K_d s \quad (1)$$

式中 K_p, K_i, K_d 分别是比例、积分和微分增益。

被控对象是一阶惯性加纯滞后时, 传递函数 $G(s) = k e^{-\tau s} / (Ts + 1)$, 二阶惯性加纯滞后的传递函数为 $G(s) = k e^{-\tau s} / [(Ts + 1)(T_1 s + 1)]$ 。

在仿真中取 $0.2 < \tau / T < 0.9$, 滞后太大 ($\tau / T > 1$) 或太小时, PID 的控制效果都不是很好。在本文

中讨论 4 种常见的非线性^[3] 为饱和、死区、间隙、摩擦, 它们的非线性特性如图 2 所示。

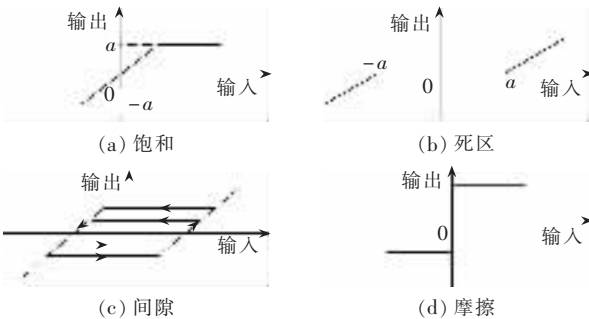


图 2 饱和、死区、间隙、摩擦非线性特性

Fig.2 The nonlinearities of saturation, dead zone, backlash and friction

1.1 饱和和非线性

默认饱和值为 1, 延迟时间 $\tau = 1$ s。采用经验公式法加手动调节进行 Matlab 仿真。图 3 是加和未加饱和和非线性时的一阶、二阶模型的仿真图 (图中未加饱和和非线性为实线, 加饱和和非线性为虚线)。

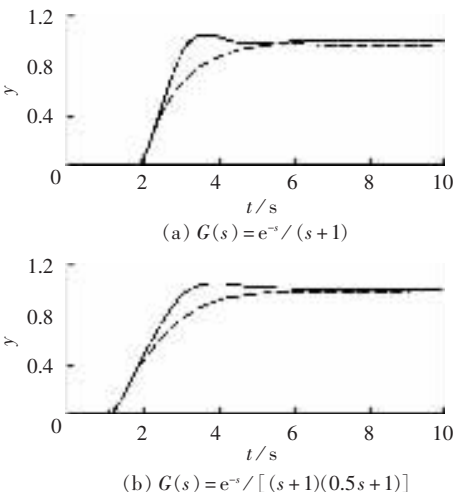


图 3 加饱和和非线性和未加饱和和非线性的仿真比较

Fig.3 Comparison between simulations with and without saturation nonlinearity

表 1~4 记录的是对应着每个被控对象 $G(s)$ 调节到最佳 PID 模型时的参数和性能指标。表中的参数 K_p, K_i, K_d 对应着式(1)中的 K_p, K_i, K_d ; t_s 表示调节时间。

通过对被控对象为一阶、二阶惯性环节加纯滞后环节的仿真,可以得出,加入饱和和非线性后系统 PID 参数调节的规律是: K_p 应变大, K_i 应变小, K_d 变化规律不是很明显。

1.2 死区非线性

默认死区值为 1, 仍然根据图 1 通过经验公式法加手动调节进行 Matlab 仿真。得出仿真的数据记录如表 2 所示。

加入死区非线性后, 系统 PID 参数的变化规律是: K_p 应变大, K_i 应变大, K_d 起的作用仍然不是很明显, 只需将 K_d 调到一个合适的位置即可。

表 1 带有饱和和非线性时最佳 PID 模型时的参数和性能指标
Tab.1 The optimal PID parameters and performance indices(with saturation nonlinearity)

$G(s)$	不带饱和和非线性					饱和值	带有饱和和非线性				
	K_p	K_i	K_d	$\sigma/\%$	t_s/s		K_p	K_i	K_d	$\sigma/\%$	t_s/s
$e^{-s}/(s+1)$	1.00	0.64	0.30	4.8	3.5	1.10	1.12	0.59	0.20	3.75	4.10
$e^{-s}/(4s+1)$	3.72	0.65	1.56	7.9	5.5	1.20	4.00	0.35	0.10	4.50	7.30
$2e^{-s}/(s+1)$	0.49	0.33	0.10	6.5	4.1	0.55	0.52	0.30	0.12	4.50	4.00
$e^{-2s}/(s+1)$	0.65	0.34	0.30	6.0	6.6	1.10	0.64	0.34	0.30	3.50	5.30
$e^{-s}/[(s+1)(0.5s+1)]$	0.90	0.49	0.40	4.5	4.2	1.10	1.00	0.46	0.35	3.90	4.60
$e^{-s}/[(4s+1)(0.5s+1)]$	1.40	0.37	0.10	7.5	10.0	1.15	1.48	0.28	0.10	7.80	17.90
$e^{-0.5s}/[(s+1)(0.5s+1)]$	1.30	0.75	0.30	6.5	4.2	1.10	1.50	0.67	0.30	6.90	6.90
$2e^{-s}/[(2s+1)(0.5s+1)]$	0.55	0.22	0.20	6.5	7.2	1.10	0.65	0.22	0.20	4.30	4.68

表 2 带有死区非线性时最佳 PID 模型时的参数和性能指标
Tab.2 The optimal PID parameters and performance indices(with dead-zone nonlinearity)

$G(s)$	不带死区非线性					带有死区非线性				
	K_p	K_i	K_d	$\sigma/\%$	t_s/s	K_p	K_i	K_d	$\sigma/\%$	t_s/s
$e^{-s}/(s+1)$	1.00	0.64	0.30	4.2	3.16	1.04	0.87	0.26	4.8	3.60
$e^{-s}/(4s+1)$	3.72	0.65	1.56	7.5	5.18	3.95	0.94	1.61	7.5	5.30
$2e^{-s}/(s+1)$	0.49	0.33	0.14	4.7	3.82	0.51	0.41	0.14	4.6	5.67
$e^{-2s}/(s+1)$	0.55	0.33	0.30	5.5	9.70	0.55	0.39	0.30	5.2	10.40
$e^{-s}/[(s+1)(0.5s+1)]$	1.00	0.50	0.40	7.5	5.30	1.10	0.63	0.36	5.0	5.10
$e^{-s}/[(4s+1)(0.5s+1)]$	1.50	0.37	0.10	6.5	8.90	1.70	0.50	0.15	5.7	7.10
$e^{-0.5s}/[(s+1)(0.5s+1)]$	1.30	0.75	0.30	6.2	4.20	1.40	1.00	0.25	5.7	4.30
$2e^{-s}/[(2s+1)(0.5s+1)]$	0.68	0.20	0.20	6.1	5.80	0.90	0.42	0.40	6.5	6.20

表 3 带有间隙非线性时最佳 PID 模型时的参数和性能指标
Tab.3 The optimal PID parameters and performance indices(with backlash nonlinearity)

$G(s)$	不带间隙非线性					带有间隙非线性				
	K_p	K_i	K_d	$\sigma/\%$	t_s/s	K_p	K_i	K_d	$\sigma/\%$	t_s/s
$e^{-s}/(s+1)$	1.00	0.64	0.30	4.4	3.18	0.75	0.40	0.30	4.5	3.42
$e^{-s}/(4s+1)$	3.72	0.65	1.56	7.5	5.50	1.65	0.26	0.01	4.1	4.70
$2e^{-s}/(s+1)$	0.49	0.33	0.10	5.5	3.91	0.22	0.01	0.03	6.3	4.30
$e^{-2s}/(s+1)$	0.55	0.32	0.28	7.1	7.20	0.58	0.20	0.21	5.6	7.70
$e^{-s}/[(s+1)(0.5s+1)]$	0.90	0.48	0.40	3.2	4.15	0.65	0.23	0.20	5.4	6.10
$e^{-s}/[(4s+1)(0.5s+1)]$	1.57	0.35	0.10	3.8	6.42	2.50	0.50	0.30	4.7	6.22
$e^{-0.5s}/[(s+1)(0.5s+1)]$	1.30	0.72	0.26	4.5	3.14	0.80	0.36	0.20	4.0	3.54
$2e^{-s}/[(2s+1)(0.5s+1)]$	0.50	0.24	1.25	5.7	7.80	0.23	0.03	0.33	5.5	6.20

表 4 带有摩擦非线性时最佳 PID 模型时的参数和性能指标
Tab.4 The optimal PID parameters and performance indices(with friction nonlinearity)

$G(s)$	不带摩擦非线性					带有摩擦非线性				
	K_p	K_i	K_d	$\sigma/\%$	t_s/s	K_p	K_i	K_d	$\sigma/\%$	t_s/s
$e^{-s}/(s+1)$	1.00	0.64	0.30	3.9	3.2	0.48	0.06	0.10	9.5	7.9
$e^{-s}/(4s+1)$	3.82	0.65	1.38	7.5	5.7	1.50	0.10	0.10	8.1	17.6
$e^{-0.25s}/(s+1)$	0.89	1.00	0.20	4.1	3.3	0.90	0.25	0.21	9.5	7.5
$e^{-2s}/(s+1)$	0.55	0.36	0.30	8.6	9.1	0.28	0.02	0.03	10.5	7.1
$e^{-s}/[(s+1)(0.5s+1)]$	1.00	0.50	0.40	7.5	5.2	0.47	0.06	0.15	14.1	14.1
$e^{-s}/[(4s+1)(0.5s+1)]$	1.57	0.37	0.10	6.5	8.9	1.00	0.05	0.07	8.1	20.1
$e^{-s}/[(s+1)(s+1)]$	0.80	0.37	0.10	5.5	6.7	0.39	0.06	0.10	13.5	20.1
$e^{-0.5s}/[(s+1)(0.5s+1)]$	1.30	0.75	0.30	6.2	4.2	0.39	0.10	0.07	11.0	14.5

1.3 间隙非线性

间隙非线性常存在于齿轮、连杆传动机构中。由于加工精度和装配上的限制,就不可避免的造成齿轮啮合中的间隙。另外,由于安装、制造误差及机械运转过程中的正常磨损使得机构运动副中必然存在着间隙,而且随着机器运转时间的加长,间隙就会加大,影响系统的动态性能^[4]。同样,Matlab 仿真数据记录如表3所示。

加入间隙非线性后,系统调节最佳后发现PID调节器的 K_p 减小,目的是为了照顾系统的稳定性, K_i 减小。此时不同于饱和、死区非线性, K_d 作为微分控制,已经开始起比较明显的作用。 K_d 比未加非线性时PID控制器参数最佳时的小。微分作用加快了系统的响应速度,对系统的快速性有一定的改进。

1.4 摩擦非线性

摩擦非线性对小功率角度的伺服系统是一个很重要的非线性因素^[5]。它相当于在执行机构中引入了死区,从而造成了系统的稳态误差,这和死区的影响类似。Matlab 的仿真数据记录如表4所示。

加入摩擦非线性后,系统调最佳后PID控制器参数有如下变化: K_p 、 K_i 均应变小, K_d 起的作用仍然无明显变化。按照以上规律调节,系统能获得比原来好的特性,但并不能达到未加非线性时的水平。

2 结论

根据以上分析可以看出,加有非线性与未加非线性的PID控制器中,PID参数起主要作用的是比例积分调节,微分作用除了在改善系统的响应速度上起明显的作用外^[6~8],在其他的情况下,主要起辅助调节作用。

参考文献:

- [1] 韩京清. 非线性PID控制器[J]. 自动化学报,1994,20(4): 488-490.
HAN Jing-qing. Nonlinear PID controller[J]. *Institute of System Science*,1994,20(4): 488-490.
- [2] GANG Tao,KOKOTOVIC P V. Adaptive control of plants with unknown dead - zones[J]. *IEEE Trans. on Auto-*

matic Control,1994,39(1): 59-68.

- [3] SCHMITENDOR FW,BARMISH B. Null controllability of linear systems with constrained controls[J]. *SIAM J Control and Optimization*,1980,(18): 327-345.
- [4] SABERI A,LIN Zong-li,TEEL A R. Control of linear systems with saturating actuators[J]. *IEEE Trans. Automat. Contr.*,1996,41(3): 368-378.
- [5] 王毅,苏宝库. 高精度伺服系统的非线性校正[J]. 哈尔滨工业大学学报,2001,33(3): 406-409.
WANG Yi,SU Bao-ku. A nonlinear compensator of high precision servo system[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*,2001,33(3): 406-409.
- [6] 高峰,林永君,王兵树. 基于非线性补偿的PID控制器[J]. 华北电力大学学报,2004,31(4): 52-54.
GAO Feng,LIN Yong-jun,WANG Bing-shu. A PID controller based on nonlinear compensation[J]. *Journal of North China Electric Power University*,2004,31(4): 52-54.
- [7] 顾生杰,刘春娟. 基于模糊自整定PID控制器的非线性系统仿真[J]. 兰州交通大学学报,2004,23(3): 62-64.
GU Sheng-jie,LIU Chun-juan. Simulation of nonlinear control system based on self-adjusting PID controller of fuzzy inference[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*,2004,23(3): 62-64.
- [8] 胡健闻,曾益,柴苍修. 演化非线性参数估计在PID控制器设计中的应用研究[J]. 计算机仿真,2004,21(5): 86-88.
HU Jian-wen,ZENG Yi,CHAI Cang-xiu. Application of nonlinear regression based on evolution computation in the design of PID controllers[J]. *Computer Simulation*,2004,21(5): 86-88.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

邢青青(1983-),女,江苏射阳人,硕士研究生,从事控制理论与智能仪器研究(E-mail: qingqing921559@163.com);

郝继飞(1955-),男,吉林舒兰人,教授,从事控制理论与智能仪器研究;

白文宝(1981-),男,江苏徐州人,从事电气工程及自动化专业研究。

Tuning of PID controller parameters for system with common nonlinearity

XING Qing-qing,HAO Ji-fei,BAI Wen-bao

(China University of Mining and Technology,Xuzhou 221008,China)

Abstract: Common nonlinearities existed in real systems usually bad effect on system performances. The tuning rules of PID(Proportional Integration Differential) controller parameters are studied for the controlled object with and without common nonlinearity. Four common nonlinearities are considered:saturation,dead zone,backlash and friction. Experiential formula together with manual tuning is applied in Matlab simulation. Results show the effectiveness of PID control. The comparison of PID parameters for systems with and without common nonlinearities show that,the proportional and integral coefficients make main contribution,while the differential coefficient just improves the system response speed.

Key words: PID controller; parameter tuning; common nonlinearity