

文章编号: 1000-8152(2001)04-0613-04

# 一种拟无模型的鲁棒控制方法——开关控制新析

季钦南

施颂椒

(上海市卢湾区业余大学·上海, 200062) (上海交通大学自动化系·上海, 200030)

**摘要:** 给出一种直接跟踪输入信号的控制方法. 该方法将输入与输出的误差符号信息馈送到系统的输入端作为控制信号, 对各种缓变输入信号直接进行跟踪控制. 该方法只需要很少的控制对象的先验知识, 设计与调节简便, 对参数扰动和未建模动态具有鲁棒性, 控制效果好, 是一种拟无模型的鲁棒控制方法.

**关键词:** 拟无模型; 输出误差符号信息; 鲁棒控制

**文献标识码:** A

## A Quasi-Modelless Robust Control Approach ——A New Analysis of Switching Control

Ji Qinnan

(Shanghai Luwan Spare-Time University · Shanghai, 200062, P. R. China)

SHI Songjiao

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University · Shanghai, 200030, P. R. China)

**Abstract:** This paper proposes a new tracking control by using the sign of output error. It can track various kinds of slowly varying input signals directly. It is featured by quasi-modelless, good dynamical and static performance, easy design and adjustment, robustness to parameters and unmodelled dynamics disturbances. Theoretical analysis and simulations of this paper verify the above conclusion.

**Key words:** quasi-modelless; sign of output error; robust control

### 1 引言(Introduction)

通常, 在对控制系统进行综合时, 首先要对控制对象进行分析, 作离线或在线的辨识以估计控制对象的结构与参数, 或测定控制对象的阶跃或脉冲响应以得出控制对象的预测模型, 然后再设计控制装置. 一般情况下, 当输入不属于固有类信号, 系统便不能准确地跟踪输入作用, 存在跟踪的稳态误差.

本文使用继电器型开关控制方法, 将系统输出与输入之间误差的符号信息作为被控对象的控制信号, 以实现使被控对象能够直接跟踪各类缓变输入信号的控制目的. 除了要求被控对象传递函数的零、极点基本分布在开左半  $s$  平面上, 以及不含有阻尼比过小的共轭极点之外, 不需要已知控制对象的其它信息, 因此, 该方法可称得上是一种拟无模型(quasi-modelless)的控制方法.

### 2 相对阶等于 1 的情形(Relative degree = 1)

设一 SISO 系统, 输入为  $r$ , 输出为  $y$ , 其传递函数为

$$W_p(s) = \frac{k_p N_p(s)}{D_p(s)} \quad (1)$$

$W_p(s)$  为一零、极点基本分布于开左半  $s$  平面的传递函数, 而且不包含阻尼比过小的共轭极点.  $k_p > 0$ ,  $\deg[D_p(s)] = n$ ,  $\deg[N_p(s)] = m$ , 相对阶  $n^* = n - m = 1$ . 定义系统输出误差  $e_1 = r - y$ . 将系统输出误差的符号信息  $k_e \text{sgn}(e_1)$  ( $k_e > 0$ ) 馈送到被控对象的输入端作为控制输入. 系统的结构图如图 1 所示. 其中,  $k_f$  用以调节静态增益为 1, 对上述控制对象  $k_f$  是易于确定的(以下假设  $k_f$  为 1).

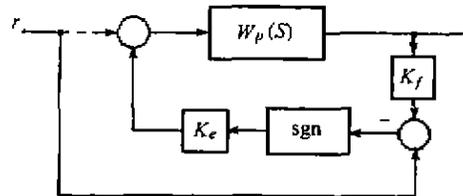


图 1 系统的结构图

Fig. 1 System configuration

用  $k_e$  表示  $k_e \text{sgn}(e_1)$  环节的控制增益, 并将系统的输出误差作为系统的输出, 则系统的误差传递函数可表示为:

$$W_e(s) = \frac{1}{1 + k_s W_p(s)}. \quad (2)$$

用  $k_s$  表示  $k_s \operatorname{sgn}(e_1)$  环节的控制增益, 则当  $|e_1| = 1$  时, 控制增益  $|k_s| = k_s$ . 而随着  $|e_1|$  的减小, 控制增益也随之增大. 若  $e_1 \rightarrow 0$ , 则  $k_s \rightarrow \infty$ . 此时, 因  $|k_s W_p(s)| \gg 1$ ,

$$W_e(s) \approx \frac{1}{k_s W_p(s)} = \frac{D_p(s)}{k_s k_p N_p(s)}. \quad (3)$$

定义此时的  $W_e(s)$  为近似误差传递函数, 并记为  $\tilde{W}_e(s)$ . 虽然  $\tilde{W}_e(s)$  分子的阶数比分母的阶数大 1, 但只相当于在位于前向通道内的正则有理分式前串入了一个零点分布于负实轴上的一阶微分环节, 对系统的稳态性能没有影响. 而且, 由于  $N_p(s)$  为一首一 Hurwitz 多项式, 系统是稳定的. 最终, 由于  $k_s \rightarrow \infty$ , 将迫使  $e_1 \rightarrow 0$ , 使系统输出  $y$  准确地跟踪输入  $r$ . 另一方面, 此时从输入到输出的函数为

$$W(s) = \frac{k_s W_p(s)}{1 + k_s W_p(s)} \approx 1, \quad (4)$$

输出与输入几乎相等, 从而实现了跟踪输入的目的. 此时控制对象传递函数对控制性能的影响大为减弱, 系统可近似看作一个比例环节, 因此采用该方法一般可获得上升速度快、无超调、无振荡或超调振荡都很微小的优异的阶跃响应曲线.

当输出误差较大时

$$W_e(s) = \frac{D_p(s)}{D_p(s) + k_s k_p N_p(s)}, \quad (5)$$

$W_e(s)$  的分母有可能是一个不稳定的多项式. 但由于前向通道传递函数  $W_p(s)$  是稳定的, 而且不包含阻尼比过小的共轭极点, 因而其输出  $y$  将随着其输入  $k_s \operatorname{sgn}(e_1)$  而变动, 输出误差  $e_1$  幅值逐渐减小, 使系统的传递函数由  $W_e(s)$  变为  $\tilde{W}_e(s)$ . 如前所述, 最终将迫使  $e_1 \rightarrow 0$ , 从而实现了跟踪输入控制. 但对  $W_p(s)$  是非最小相位的系统来说, 当  $e_1$  很小时由 (3) 式  $\tilde{W}_e(s)$  趋向于不稳定, 以至其动、静态性能下降, 甚至于失稳.

对自平衡控制对象, 在控制对象输入端还可加入输入信号, 使对象的输入变成  $r + k_s \operatorname{sgn}(e_1)$  (添加图 1 所示虚线). 这时系统的输出

$$y = W_p(s)r + W_p(s)k_s e_1 = r - \frac{1 - W_p(s)}{1 + k_s W_p(s)} r, \quad (6)$$

稳态时  $W_p(0) \rightarrow 1$ , 而且  $k_s \rightarrow \infty (e_1 \rightarrow 0)$ , 从而使  $y \rightarrow r$ . 该方法不适用于非自平衡控制对象, 如包含

积分环节的控制对象, 由于  $W_p(0) \rightarrow \infty$ , 将导致输出发散.

对阶数不同、零极点分布不同的多个被控对象的仿真实验表明, 当反馈控制输入采用系统输出误差符号信息时, 无论系统输入取方波、锯齿波或正弦波, 都可获得好的、甚至是相当理想的控制效果. 不过对一些具有小阻尼比的共轭极点的控制对象, 例如, 对具有阻尼比  $\zeta < 0.1$  的共轭极点的控制对象, 系统的动静态性能可能下降甚至大幅度下降. 但对那些有个别极点分布在靠近虚轴的左开平面或虚轴上(包括一阶积分环节)的被控对象, 仿真效果却不错. 甚至于对某些有个别极点分布在右半  $S$  平面靠近虚轴部位的被控对象, 仅采用输出误差的符号信息进行控制, 只要 (3) 式成立, 系统仍有可能是稳定的.

通常的比例控制其放大系数是不变的, 因此它的控制作用(指作用在输入端的控制信号的绝对值的大小)随着输出误差的减小而减小, 当  $e_1 \approx 0$  时, 控制作用也几乎为零. 而采用系统的输出误差的符号信息作为控制信号其控制增益随着输出误差的减小而增加, 控制作用保持不变, 即使  $e_1 \approx 0$ , 控制作用也很强, 当选取较大的  $k_s$  时, 该方法具有全程的强有力的控制作用, 因此上升速度快. 同时这也说明了为什么采用该方法后, 在较强的缓变扰动作用下, 系统的稳态误差仍可保持在一个可忽略的范围之内.

### 3 相对阶大于 1 的情形(Relative degree > 1)

当系统相对阶大于 1 时,  $\tilde{W}_e(s)$  分子的阶数比分母的阶数大于 1, 有可能导致系统动态与静态性能的下降. 此时, 可将一个一阶惯性环节  $\frac{k_b}{s+b}$  与被控对象  $W_p(s)$  并联<sup>[1]</sup>. 这样, 被控部分的传递函数便变为

$$\tilde{W}_p(s) = \frac{k_p N_p(s)(s+b) + k_b D_p(s)}{D_p(s)(s+b)}. \quad (7)$$

易证,  $\tilde{W}_p(s)$  的相对阶为 1 而与  $W(s)$  的相对阶无关. 但是, 当控制对象的传递函数不含积分环节时, 该惯性环节将在系统的输出端导入输出误差.

$$\frac{k_b}{s+b} u, \quad (8)$$

其中  $u$  为被控部分的输入. 尤其当系统的输入为阶跃信号时, 可能造成比较明显的稳态误差. 此时, 可在系统的输入通道上并入一个相同的惯性环节作补偿. 并联惯性环节不受被控对象包含的滞后与各种非线性因素及作用于输出端的干扰的“污染”, 因此,

它的引入有利于克服由上述原因造成的不利影响<sup>[2]</sup>。如文[1]所述,通过适当地选择并联惯性环节还有可能改变系统的非最小相位性质,从而实现非最小相位系统的控制。

#### 4 仿真实验(Simulations)

例1 设控制对象传递函数为

$$W_p(s) = \frac{3(s^2 + 3s + 2)}{s^3 + 5s^2 + 6s + 6}$$

$W_p(s)$  包括一个分布在负实轴上的极点  $-3$ , 一对共轭极点  $-1 \pm j$ , 两个分布在负实轴上的零点  $-1, -2$ , 相对阶  $n^* = 1$ 。考虑到继电型控制实际上存在时间上的滞后<sup>[2,3]</sup>, 在反馈通道中串入了一个滞后为  $0.01$  秒的传递延迟。采用变结构控制中经常使用的光滑函数  $\frac{e_1}{|e_1| + \delta}$  以消除继电型控制与时间滞后所引起的“抖振”现象 ( $\delta = 0.02, k_e = k_f = 1$ )<sup>[3,4]</sup>。图2为输出阶跃响应曲线。从仿真结果可以看出,控制效果很理想,无“抖振”现象发生。

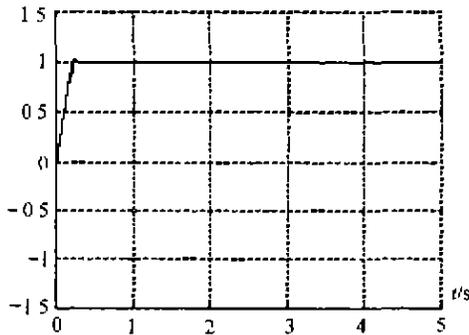


图2 例1的阶跃响应

Fig. 2 Step response of example 1

例2 采用二阶滞后控制对象模型

$$W_p(s) = \frac{24}{(s+1)(s+2)} e^{-0.5s}$$

图3是文[5]给出的输出阶跃响应仿真曲线,其中①为使用模糊神经网络推理自组织控制方法时的仿真曲线,曲线②为模糊控制,曲线③为常规PID控制。图4为使用本文方法时的输出阶跃响应曲线 ( $k_e = 0.4, k_f = 0.0833, \delta = 0.4$ )。从仿真结果可以看出,该方法优于常规PID控制、模糊控制以及文[5]采用的模糊神经网络推理自组织控制器。

上述仿真结果表明,光滑函数也可减小由相对阶  $n^* > 1$  所引起的动态性能下降的现象。因此,若采用光滑函数作为控制输入,有时可以不使用3节所述的降低相对阶的方法,从而简化了控制结构。该方法在静态增益为1时只需调节  $k_e$  和  $\delta$  两个参数,与PID控制的参数整定相比更为简便。

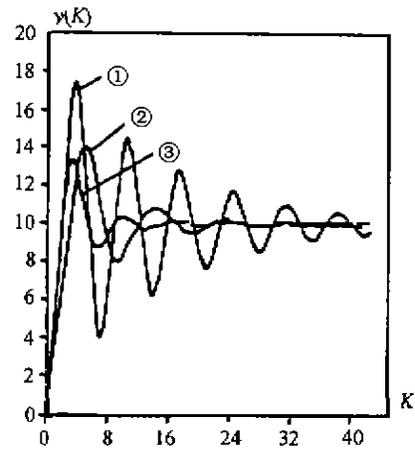


图3 例2的阶跃响应

Fig. 3 Step response of example 2

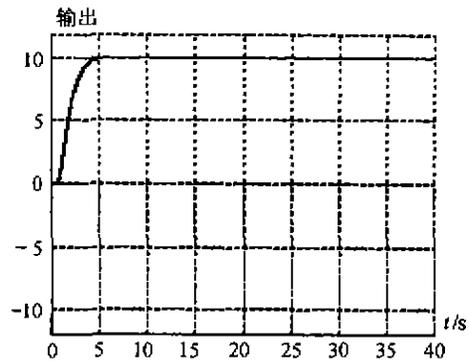


图4 例2的阶跃响应

Fig. 4 Step response of example 2

#### 5 结论(Conclusion)

从以上的讨论与分析中可知,采用系统的输出误差的符号信息作为控制信号,可实现对缓变输入信号,包括多种确定性输入信号的直接跟踪控制。对被控对象的先验知识仅要求系统的零、极点基本分布于左半  $s$  平面之上,而且不含阻尼比过小的共轭极点,这已包括了相当一部分常见的被控对象。因此该方法可称是一种拟无模型的控制方法。正因为该方法对模型依赖小,只要参数扰动与未建模动态不影响控制对象的稳定性,系统总是稳定的,因而一般不存在由参数扰动与未建模动态引起的稳定鲁棒性问题<sup>[6]</sup>。而且当参数扰动与未建模动态的影响不大时,系统仍可保持良好的跟踪性能。该方法设计与调节简便,然而从许多仿真实验的结果看,控制效果比较好。其对多种输入信号的响应均优于串联校正、常规PID控制、常规模糊控制以及其它一些控制方法。

#### 参考文献(References)

- [1] Kaufman H, Bar-Kana I, Sobel K. Direct Adaptive Control Algorithms: Theory and Applications [M]. New York: Springer-Verlag, 1994

- [2] Boshi Chen. Automatic Control Systems [M]. Beijing: China Machine Press, 1981 (in Chinese)
- [3] Weibing Gao. Foundations of Variable Structure Control [M]. Beijing: China Science and Technical Publishers, 1990 (in Chinese)
- [4] Gang Feng. Variable structure model reference adaptive control with integration [J]. Int. J. of Adaptive Control and Signal Processing, 1996, 10:489-497
- [5] Yaonan Wang. Intelligent Control Systems—Fuzzy Logic, Expert System and Neuro-net Control [M]. Changsha: Hunan University Press, 1996 (in Chinese)
- [6] Zhongsheng Hou, Zhigang Han. Robust modelless learning adaptive control of nonlinear systems [J]. Control and Decision, 1995, 10 (2):137-142 (in Chinese)

#### 本文作者简介

季钦南 1948年生,1982年毕业于上海交通大学电工及计算机科学系,现任中国管理科学研究院学术委员会特约研究员,中国未来研究会未来研究所特约研究员,上海市卢湾区业余大学讲师,1998年任上海交通大学自动化系访问学者,长期从事电气自动化教学工作,主要研究兴趣为自适应控制,符号控制,智能控制及知识数字化等。

施颂椒 见本刊2001年第1期第11页。