

文章编号: 1000-5013(2009)04-0380-04

条件作用技术在PID抗饱和补偿控制器中的应用

李海霞, 李钟慎

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 为解决严重影响系统的闭环性能的执行器饱和现象,提出一种将条件作用技术与普通PID控制框架相结合的,新的抗饱和设计方法.通过引入条件作用技术中的可行参考输入的概念,设计PID(比例-积分-微分)控制框架中的抗饱和补偿控制器.经仿真结果表明,条件作用技术简化了PID控制框架中的抗饱和补偿控制器的设计,并从根本上消除了整个PID控制系统的积分饱和现象.

关键词: PID控制; 抗饱和; 条件作用技术; 参考输入

中图分类号: TP 273⁺.402

文献标识码: A

饱和和非线性系统是实际控制系统中的常见现象,这类系统的研究由于其重要的理论和实际意义,历来是控制理论的研究热点之一^[1].所有的控制系统都存在各种各样的控制输入饱和现象.导致饱和现象发生,有如下两个主要原因:(1)控制输入受限;(2)控制模式的相互切换^[2].饱和现象的本质可以归结为,被控对象的输入信号不等于控制器的输出信号^[3].所以,大量关于抗饱和的文献所采用的方法,都是类似地将 $u - u^r$ 的值反馈补偿到控制器的积分环节,从而达到削弱积分环节的作用,使系统尽快退出饱和区域.在此基础上,1994年,Kothare等^[4]针对易受输入非线性影响的线性时不变系统,提出了抗积分饱和(Anti-Windup Bumpless Transfer,AWBT)问题的统一框架.在此之前,几乎所有已知的线性时不变AWBT框架都可以被看作是统一框架的特例,而且只需要用反馈补偿器中的两个矩阵参数 α_1 和 α_2 ,就可以对线性时不变AWBT问题进行分析和设计了.抗饱和补偿控制器将仅在饱和发生时产生作用,保证饱和发生时系统的稳定性性能.但就闭环系统而言,由于其具有非线性本质,稳定性的分析往往比较困难^[5].条件作用技术是Hanuss等^[6]提出的,通过修改控制器输入信号,使控制器状态和被控对象输入重归连续,可简化控制器的设计.本文利用条件作用技术,设计了PID抗饱和补偿控制器.

1 条件作用技术

与重新计算积分项不同,为消除 $u - u^r$ 的偏差,条件作用技术是通过修正参考给定来实现的.通过重新计算参考输入,使得控制器在不进入饱和区的同时跟随新的参考输入量,保证始终有 $u = u^r$,从而消除了Windup现象.重新计算给定的作用就是,将控制器与被控对象之间的非线性环节移出,而其代价是在给定值中隐含了非线性因素^[7].

为了能更好地理解条件作用技术,首先应该理解可行的参考输入(Realizable Reference)的概念.这个概念与Fertik等^[8]在1967年提出的“有效误差”的概念密切相关.“有效误差”指的是被控对象的输出与“可行的参考输入”之间的差值.1987年,Hanus在描述条件作用抗饱和技术时明确提出“可行的参考输入”的概念.

可行的参考输入 w^r 就是当它代替实际的参考输入信号 w 输入控制器时,控制器的输出信号 u 和被控对象的输入信号 u^r 会立刻相等,而此时的被控对象的输入信号 u^r 是在控制器的输入信号为 w 时获得的.在这种情况下,被控对象的输入限制不再存在,饱和现象也将随之消失.

收稿日期: 2008-09-22

通信作者: 李钟慎(1971-),男,副教授,主要从事最优控制及时滞系统控制的研究. E-mail: lizcyw@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(E0710018);泉州市科技计划重点项目(2006G6)

2 w^r 在 PID 抗饱和和控制器中的计算

把可行的参考输入信号 w^r 应用到图 1 所示的 PID 控制器框架中. 按上面的定义, 因为 $u = u^r$, 所以应该出现图 1 中的被控对象输入饱和和消失的现象. 因此, 图 1 在引入了可行的参考输入信号之后, 将转化为图 2 所示的 PID 控制框图.

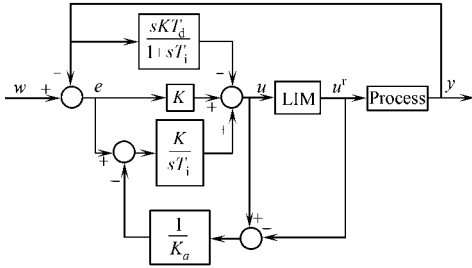


图 1 PID 抗饱和和补偿控制器

Fig. 1 PID compensator with anti-windup

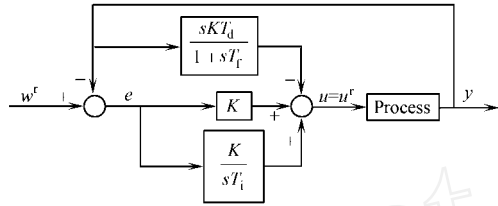


图 2 PID 抗饱和和控制器转换框图

Fig. 2 The transforming block diagram for PID compensator with anti-windup

由图 1, 2 可以看出, 两图中的 u^r 和 y 是相等的. 同时, 图 2 中已明显不包含任何可能出现的非线性, 饱和和非线性已经隐藏在可行的参考输入信号当中. 从图 2 中还可以很清楚地看出, 输出 y 不再跟踪原来的参考输入信号 w 了, 而是转而跟踪 w^r 了. 根据可行的参考输入信号的定义, 从图 2 可得

$$u^r = K(1 + \frac{1}{sT_i}) w^r - K(1 + \frac{1}{sT_i} + \frac{sT_d}{1 + sT_f}) y. \tag{1}$$

从式(1)中可得

$$w^r = \frac{1 + sT_i + \frac{s^2 T_i T_d}{1 + sT_f}}{1 + sT_i} y + \frac{sT_i}{K(1 + sT_i)} u^r. \tag{2}$$

在系统出现饱和现象, 即被控对象输入受限时, 无论采用什么样的抗饱和方法, u^r 的值都是不会发生改变的. 它是由系统本身的物理限制所决定的. 如果系统的初始条件保持不变, 系统的输出 y 也将保持不变. 这样, 从等式(2)可以得出, 可行的参考输入信号 w^r 对于所有的抗饱和方法都是一样的.

从图 2 的线性反馈抗饱和框架中, 可以得出

$$u = K(1 + \frac{1}{sT_i}) w - K(1 + \frac{1}{sT_i} + \frac{sT_d}{1 + sT_f}) y + \frac{K}{sT_i} \frac{u - u^r}{K_a}. \tag{3}$$

等式(1)中的 u^r 减去等式(3)中的 $u^{[5]}$, 可以计算出 w^r , 有

$$w^r = w + \frac{1}{K_a} \frac{1 + sK_a T_i / K}{1 + sT_i} (u^r - u) = w + G_w (u^r - u), \tag{4}$$

$$w^r - w = G_w (u^r - u). \tag{5}$$

从等式(5)可以看出, $w - w^r$ 可以表示成 $u - u^r$ 的函数.

正常情况下, G_w 是一个带有一个极点和一个零点的动态传递函数. 因此, 当执行器没有限制, 即 $u^r = u$ 时, w^r 还是不会立刻与 w 相等. 为了让系统能够真正地跟踪原来的参考输入信号 w 而退出饱和, 希望在执行器没有输入限制时, w 能够与 w^r 尽可能地接近. 因此, 可通过调节 K_a 来达到这一目的.

根据 Hanus 的条件作用技术中提到的, 在 $K_a = K$ 的情况下, G_w 将转换为一个静态增益^[7], 有

$$G_w = \frac{1}{K}. \tag{6}$$

将等式(6)代入等式(5), 可以得到

$$w^r = w + \frac{(u^r - u)}{K}. \tag{7}$$

这样, 在执行器没有发生饱和的情况下, $u^r = u$, $w^r = w$.

从以上的论述中, 可以得出另外一个非常重要的结论: 被控对象的输出在系统退出饱和的瞬间, 仍然可以跟踪原来的参考输入信号. 这样, 系统就可以不知不觉地退出饱和和区了.

对于其他的一些抗饱和方法, 只要是 $K_a = K$, w^r 就不会在执行器退出饱和的瞬间与 w 相等. 这意

意味着,被控对象的输出在执行器退出饱和时,也不会跟踪原来的参考输入信号。

这样的抗饱和系统,实际上还是能够感受到输入受限给系统带来的不利影响的。如果输出不能在执行器退出饱和后继续跟踪原来的参考输入信号,即输出和输入还是有误差,控制器中的积分环节仍然会起作用,系统的超调量和调节时间不会有所改善,系统的抗饱和性能不够完善和彻底。因此,最佳的抗饱和方法就是选择 $K_a = K$ 。

3 实例仿真

对实例 $G_{PR} = \frac{1}{(1+8s)(1+4s)}$ 进行仿真,说明条件作用技术对抗饱和的效果。采用的 PID 控制器的参数: $K=20$, $T_i=30$ s, $T_d=1$ s, $T_f=0.1$ s; 设定被控对象的输入受限值: $u_{\max}=2$, $u_{\min}=1$ 。当控制器的输入信号分别为 w , w^r 时,控制器输出信号 u 与被控对象输入信号 u^r 如图 3 所示。

从图 3(a) 可以得出,当输入信号为实际的单位阶跃信号 w 时,会引起被控对象的输入受限,使得控制器的输出信号 u^r 和被控对象的输入信号 u 不相等。从图 3(b) 可以得出,当把可行的参考输入信号 w^r 作为系统的输入信号时,控制器的输出信号 u^r 和被控对象的输入信号 u 立刻变得相等,都等于控制器的输出信号 u^r 。但是,这并不等于真正意义上的消除饱和现象。因此,还需要满足输出信号 y 跟踪原来的输入阶跃信号 w ,才能真正减小由于饱和带来的系统的超调量增大和调节时间增长的现象。

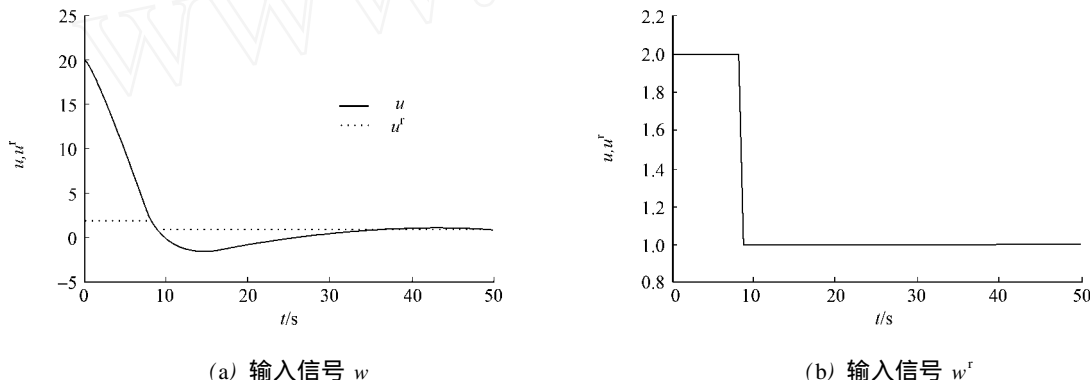


图 3 控制器输出信号和被控对象输入信号

Fig. 3 The output signal of controller and the input signal of the controlled object

可行的参考输入信号 w^r 与实际的参考输入信号 w , 如图 4 所示。从图 4 可以看出,在 30 s 左右,可行的参考输入信号 w^r 已经与原来的单位阶跃信号 w 相等了。在输入信号为可行的参考输入信号 w^r 时,即便是输出 y 跟踪 w^r ,但由于 w^r 与 w 从一开始就非常接近,且在很短的时间内就能达到完全一致。因此,整个系统就不会感觉到由于改变参考输入信号而使得输出有了大幅度的波动了。

当输入信号为 w^r 或 w 时,其输出响应如图 5 所示。事实上,图 5 已经证明,无论输入信号是 w , 还是 w^r ,系统的输出都不会发生改变,两次输出完全拟合合成一条曲线。

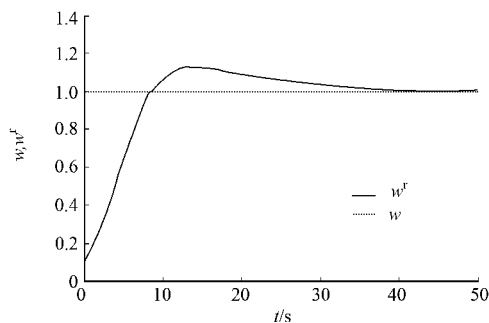


图 4 可行与实际的参考输入信号

Fig. 4 The realizable reference and the real reference input signals

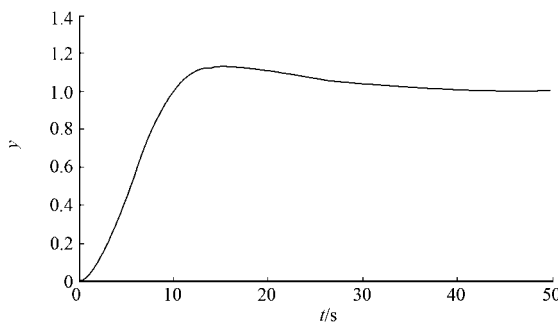


图 5 不同输入信号的输出响应

Fig. 5 The response of output VS different input signals

4 结论

给出“可行的参考输入信号”在PID抗饱和控制器中的计算过程,探讨条件作用技术如何通过PID控制器发挥抗饱和作用。

事实上,“可行的参考输入信号”是一个虚拟量,借助这个虚拟的概念,可以很方便地设计出PID抗饱和控制框架中的反馈补偿控制器。在实际执行过程中只用到反馈补偿控制器,而不需要找到“可行的参考输入信号”的确切值去代替实际的参考输入。因为在条件作用技术下,饱和和非线性已经被移出,最终的结果是可行的参考输入与实际的参考输入是近似相等的。

输出在条件作用技术的作用下依然跟踪原来的参考输入,丝毫不感觉不到饱和的存在,这样系统才真正意义上退出了饱和。由此可见,条件作用技术简化了抗饱和补偿控制器的设计,并使得系统真正退出了饱和,具有理想的抗饱和效果。

参考文献:

- [1] 戴丹,王景成.基于线性矩阵不等式的动态反馈抗饱和补偿设计[J].上海交通大学学报,2004,38(5):17-33.
- [2] 杨明,徐殿国,贵献国.控制系统Anti-Windup设计综述[J].电机与控制学报,2006,10(6):622-626.
- [3] 马东星.饱和系统的稳定性分析与抗饱和控制研究[D].杭州:浙江大学,2006.
- [4] KOTHARE M V,CAMPO P J,MORARI M,et al. A unified framework for the study of anti-windup design [J]. Automatica,1994,30(12):1869-1883.
- [5] FUNAMI Y,YAMADA K. An anti-windup control structure[C]. IEEE Int Conf on System Man and Cybernetics. Tokyo:IEEE Press,1999:74-79.
- [6] HANUS R,KINNAERT M,HENROTTE J L. Conditioning technique: A general anti-windup and bumpless transfer method[J]. Automatica,1987,23(6):729-739.
- [7] ZHANG Guang-hui,QIAN Feng,SHAO Hui-he. Anti-windup scheme for the controller of integrating process with dead-time[J]. Journal of Donghua University:English Edition,2006,23(3):79-83.
- [8] FERTIK H A,ROSS C W. Direct digital control algorithm with anti-windup feature [J]. ISA Transactions,1967,6(4):317-328.

The Application of Conditioning Technique to PID Compensator with Anti-Windup

LI Hai-xia, LI Zhong-shen

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: A new anti-windup method is proposed in which the conditioning technique is combined with the general proportional-integral-derivative (PID) control framework, to deal with the phenomenon that actuator saturation has seriously influenced the closed-loop's performance of the system. The anti-windup compensator in general PID control framework is designed by introducing the concept of realizable reference input in conditioning technique. The results of simulation show that the conditioning technique simplifies the design of the anti-windup compensator in PID control framework and eliminate the windup phenomena of the whole PID control system completely.

Keywords: proportional-integral-derivative control; anti-windup; conditioning technique; reference input

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 郑亚青)