



抗饱和研究历史与发展综述

摘要

首先介绍了饱和问题的由来,分三个时期对抗饱和研究的发展进行了说明;然后细述了一般抗饱和框架,以及抗饱和补偿器设计需要解决的问题,并指出了两个抗饱和研究难点:吸引域估计和饱和环节处理;接着概述了直接法和抗饱和法的设计思路及所运用的理论,并比较了两种方法处理含有饱和和非线性系统的优缺点;最后分线性与非线性介绍了近年来抗饱和的研究成果,并对部分拓展性饱和问题做了整理,丰富了抗饱和研究的内容。

关键词

抗饱和;稳定性;线性矩阵不等式;Lyapunov 方法

中图分类号 TP13

文献标志码 A

收稿日期 2017-04-29

资助项目 国家自然科学基金(61374003)

作者简介

查苗,女,博士生,主要研究方向为模糊控制.1074057666@qq.com

0 引言

在控制系统中,线性控制系统的优势是有目共睹的.线性有很多可用的数学理论支撑,易于理解,也便于控制框架的设计.然而,众所周知,实际系统一般都是非线性的,人们只能用线性系统粗略地接近想要描述的过程,因此,为了使线性操控点与实际偏差较少,人们在设计时常选用较小的控制信号,但在实际系统中,不能保证所有的信号都小,并且对于一些高性能应用,大的控制信号无法避免.将较大的控制信号输入到设备,可能会受到执行器自身幅值和速率的限制,执行器饱和现象在实际工程中是常见的.例如,船舶的操舵系统具有机械结构限制,致使舵角幅值受到限制;另外,操舵系统一般通过液压伺服系统驱动,致使转舵速率不能任意大.在常规的航迹航向控制中,这种饱和和约束的影响还不明显,对于舵减摇问题,由于操舵的高频特性,要求快速打舵,这就更容易遇到速率饱和问题^[1].又如,在稳定平台控制中,对于大负载光电稳定平台而言,负载、运动速度和加速度都处于一个较高的水平,相应控制器也处在较高水平,常常出现速率和幅值饱和.在某种过载工况下如果发生结构塑性变形,系统精度也不能得到保证,如果结构变形位移量分配不当会造成因材料塑性变形而产生不可恢复的永久性误差^[2].还有电制动器电压限制、液压缸流量和速率限制、飞行器偏向角限制等,这些限制会给系统性能带来明显影响,如果没有处理好这些限制,系统可能会出现一些奇怪的甚至是有害的行为.例如,美国一系列战机坠毁事故、切尔诺贝利核电站的爆炸都与执行器限制有关^[1].这一系列事件引发了人们对饱和问题的关注,抗饱和研究也越来越丰富.

1 抗饱和研究历史发展

1.1 饱和问题研究发展历程

饱和问题是早期人们在实际工业应用中发现的,由于早期控制领域发表的文章很少,很难说明抗饱和最初是由谁提出的.根据文献[3]的描述,抗饱和研究可追溯到20世纪30年代,Lozier的论文是早期定义抗饱和的重要文献之一.图1给出了抗饱和控制的发展历程.

抗饱和发展经历如下几个阶段.第一阶段,这个时期人们意识到饱和带来的问题,并采用了对应的解决措施.20世纪40年代出现了少量研究绝对稳定的文献,描述了一些抗饱和和常规方法,但这个抗饱和

¹ 海军工程大学 理学院,武汉,430033

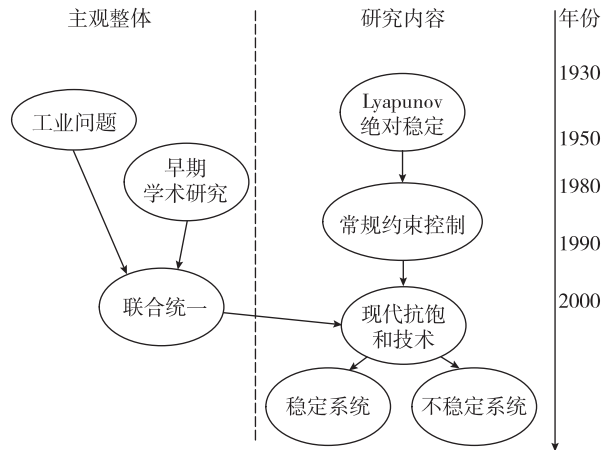


图1 抗饱和控制的发展历程

Fig. 1 The development of anti-windup control

以及绝对稳定的研究后被证明是无用的.第二阶段,学者们开始在控制系统中研究饱和问题.这个时期以 Lozier^[4]能解释PI控制器积分饱和问题为标志,随后,Fertik和Ross^[5]可能是第一个用文献记录抗饱和方法的,他们采用回馈计算和跟踪的策略,即在系统的控制器发生积分饱和期间,引入一个反馈信号来调整控制器的输出信号,以减少积分饱和对系统运行的不利影响,并使系统尽快退出饱和区.当然这期间还有很多人对此做出了贡献,如Hanus等^[6]的条件技术(conditioning technique).这些早期的文献预示着更多常规抗饱和研究的开始.但这个时候人们更多的是注重解决一些实际问题,并没有完整的证明,在Hanus的条件技术提出之后,一些学者开始将抗饱和框架进行统一,如Kothare等^[7]将这个归类到现代鲁棒控制思想中,而Edwards和Postlethwaite^[8]在抗饱和统一框架下进一步研究,定义了状态方程描述的通用方法.第三阶段,20世纪80年代后,人们开始利用Lyapunov第二方法设计一步法控制器解决输入受限问题,保证非线性闭环系统稳定.得益于输入受限问题的理论研究,现代抗饱和技术逐步发展.现代抗饱和是一种系统的方法,利用它设计出的抗饱和补偿器,稳定性和性能都有保障.在这之后,抗饱和研究分为两个方向,一部分人关注全局稳定性研究,一部分人关注局部稳定性研究.

人们对抗饱和策略的研究一直在继续,在航空航天、机械、水通道管理、电子通信网络、核反应以及硬盘驱动等领域有大量的应用实践.抗饱和研究对人们的吸引力主要在于以下几个方面:1)减少控制

律校验成本;2)充分利用执行器能力;3)便于工程师在早期选择合适的执行器.

1.2 一般抗饱和框架

在实际控制问题中,控制器一般是通过执行器来驱动受控对象的,而执行器常常存在物理限制,使得其输出和输出的变化率具有幅值约束,不可能任意大.当执行器饱和发生时,控制器的输出增大,执行器对受(被)控对象的输入却不能增大,结果是控制器的输出与实际系统的控制输入不一致,控制器的状态会被错误地更新,此现象称为执行器饱和现象,如图2所示.值得强调的是,在研究中我们应当明确区分执行器输入 u 、执行器输出 \bar{u} 和受控对象的状态.

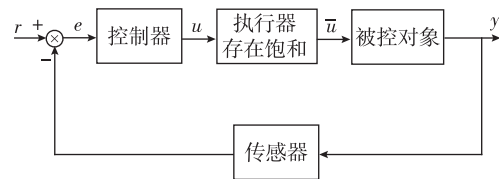


图2 执行器饱和系统的结构框图

Fig. 2 Structure of systems with actuator saturation

抗饱和补偿器的基本结构如图3所示,其中 r 为参考输入.控制器是在假定系统不存在饱和情况下按照性能指标设计好的.显然,补偿器只有在系统出现饱和时,即 $u \neq \bar{u}$ 时,才有所动作.

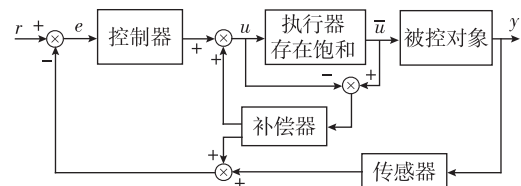


图3 抗饱和补偿器的基本结构

Fig. 3 General anti-windup architecture

抗饱和控制器设计的目标主要有两个:

- 1) 当控制信号没有使得执行器饱和时,闭环系统的性能要达到要求;
- 2) 当控制信号逐渐增大时,保证系统性能能够光滑地减弱,不至于发生持续的自激振荡等情况,且当控制信号进入执行器的饱和区时,设法使控制信号回到或靠近非饱和区,从而尽量减小饱和环节对系统性能的影响.

1.3 抗饱和补偿器设计需要解决的问题

依据文献[3]的描述,抗饱和系统设计主要解决的问题有稳定性和性能两个方面.当不存在外部干

扰时,重点在于研究系统的吸引域.对于任何初始状态,只要其在吸引域之内,那么系统渐近稳定.如果系统全局稳定,其吸引域对应整个状态空间.然而更一般的情况是,准确地描述吸引域是不实际的,通常是利用渐近稳定区域估计吸引域.

另一方面,一些应用中,只关注给定一系列的初始状态下的系统稳定,那么这些初始状态就可被设定为系统的实际操作区域.对于不存在外部干扰时,设计重点为对闭环系统增设的两个抗饱和和环设计抗饱和和增益以扩大系统吸引域.在存在外部干扰时,研究重点在于保证一定程度的性能,也就是外部输入到性能输出的 L_2 增益有限,这种情形下,需要解决的问题具体描述为确定抗饱和系数矩阵以及尽可能大的吸引域,使得:1) 闭环系统在不存在外部干扰时,对于任意属于吸引域的初始状态,系统渐近稳定;2) 系统 L_2 增益有限.在这个过程中,饱和环节的处理是一大难点,常用的饱和环节处理办法有扇形区域法和线性凸包法.

2 抗饱和控制研究成果

饱和是一种典型的非光滑特性,不能进行线性化处理,这就给控制系统设计带来很大的难度.目前,对含饱和的非线性系统的控制策略基本上可以分为直接法和抗饱和法两大类.

1) 直接法的特点是不回避饱和环节,一步设计控制器,如文献[9-10].直接法设计基本是从“零”开始的,需要保证满足所有的性能要求,包括处理执行器饱和和限制.一般思路为,先设定一性能指标,利用 Lyapunov 稳定性理论找出满足系统稳定的控制律和吸引域,再运用最优控制理论找出性能最优时使系统稳定的最大化的吸引域及控制律.这种方法在理论上是可行的,但设计出的控制器常较为复杂,且带有一些附加限制,在一些实际应用中缺乏可操作性.且该方法过于保守,对于每个系统都需进行独立设计,设计成本较高.

2) 抗饱和法,顾名思义是一种避免饱和因素对闭环系统性能产生影响的方法.早期的抗饱和法主要有抗重置饱和、高增益常规抗饱和等^[11].现代抗饱和和法分两步进行控制器设计:第一步,先不考虑饱和特性,直接利用标准的线性工具设计控制器;第二步,加入抗饱和和补偿器处理饱和和限制问题.补偿器的目的是当饱和发生时保证系统性能稳定(或至少在原点附近某一区域内)且性能恶化程度小于没有添

加补偿器.其基本思路是基于 Lyapunov 稳定性理论设计闭环系统的状态反馈或输出反馈控制律,然后以控制器输出和执行机构输出之间的误差信号作为输入,设计抗饱和补偿信号为系统减弱饱和环节的影响.常用的研究方法为:含有饱和和非线性的系统都可改写成死区非线性形式,利用死区非线性所满足的若干条件,并通过寻找合适的 Lyapunov 函数或 Lyapunov 泛函,求 Lyapunov 函数或 Lyapunov 泛函沿闭环系统的全导数,再利用 Lyapunov 稳定性理论或 Barbalat 引理或 LaSalle 不变原理得到使抗饱和和增益矩阵满足的线性矩阵不等式(LMI)形式,并利用 Matlab 的线性矩阵不等式工具箱求出满足要求或最大化闭环系统吸引域的抗饱和控制律.基于线性微分包含(LDI)的方法生成的多面体模型应用较为广泛.使用 LDI 模型有个缺点,即允许计算抗饱和和增益的条件通常是双边线性矩阵不等式(BMI)^[3].扇形区域法,用扇形区域处理死区,再用圆判据或 Popov 判据判断系统稳定性.该方法优点是对于一些情形可直接建立 LMI,缺点是局限性较强,需先设定一系列条件.

抗饱和法是在直接法的基础上发展起来的,许多直接法的相关结果都为抗饱和法的研究提供了支撑,如文献[12-13].抗饱和法在应用中操作性更高,因为设计常规的线性控制器是十分容易的,有大量现成的理论支撑,且当饱和没有发生时,该线性控制器可独自保证闭环系统的性能,只有饱和发生时才激活抗饱和补偿器调整闭环系统的性能.

对比抗饱和法和直接法可以看出,直接法在设计控制时无论控制器状态是否进入饱和区,都对整个饱和非线性进行处理(例如将饱和环节放入扇区非线性、凸包等框架下研究),而抗饱和法设计的控制器起初不考虑饱和和限制,而在控制状态进入饱和区后补偿器才发挥作用.因此,抗饱和法的保守性明显小于直接法,而且抗饱和补偿器的设计集中关注 u 和 \bar{u} 的误差对控制效果的影响,而对执行器本身的特殊结构和性态关注较少,因而这套方法更有望推广到其他非光滑环节,例如死区和间隙特性等.抗饱和控制已有不少研究成果.

2.1 线性系统

目前抗饱和控制的研究对象还主要集中在线性时不变系统,可以基于线性矩阵不等式(LMI)框架给出解决方案^[14].Ran 等^[15]和 Ran 等^[16]基于二次型 Lyapunov 函数和 Lyapunov 稳定分析方法,分别就最小化外界输入诱导的 L_2 范数^[15]和最大化闭环系

统吸引域^[16]导出了可保证闭环系统渐近稳定的静态和(或)动态抗饱和控制器设计. Turner 等^[17]基于 LMI 途径,研究了有限维线性时不变系统的稳定性,并在文献[18]中引入一非平方运算,利用两个连接死区的连通性,得到一个更一般性的线性矩阵不等式,解决延迟和抗饱和问题. 针对斜率限制系统的 Lyapunov 方程和 L_2 增益范围, Turner 等^[19]做出了进一步研究,得出了在外源输入和给定输出情况下优于常规结果的 L_2 增益紧界. Gayadeen 等^[20]基于内模控制(IMC),使用代数 Riccati 方程和积分二次约束(IQC)框架设计控制器增强闭环系统的稳定性. Mercorelli^[21]在饮用水净化控制问题中,用启发式最优策略处理 PI 控制器参数,根据 Lyapunov 方法和代价方程获得控制器参数,这种方法可以较快地得出最优解. Wakasa 等^[22]利用虚拟参考迭代优化和抗饱和 PID 控制架构设计了一个简单的缓和输入饱和影响的方法,并将此方法应用到直流电机的控制系统中进行了验证. Ran 等^[23]针对线性系统多级抗饱和问题,提出粒子群系统最优化方法决定多级抗饱和节点,为建立的迭代方法设置初始条件,这种方式可有效扩大吸引域.

Oliveira 等^[24]将积分滑模抗饱和控制器应用于感应电动机的速度控制,取得了较好的控制效果. 刘希等^[25]提出一种抗饱和预测补偿算法,这一方法建立在滑模控制的基础上,并应用于具有输入饱和和限制的多输入多输出(MIMO)系统,适用范围广泛,并能够得到良好的控制性能. Sassano 等^[26]采用合适的逻辑变量激活不同控制架构中的组件,当设备输出超过限制后,控制框架基于合适的重定义律允许控制器对输出信号进行操作,解决单输入单输出线性闭环模型抗饱和和恢复.

李钟慎^[27]利用条件技术针对一类新的 AIMC 结构设计抗饱和和控制器,控制器能够同时解决饱和和扰动问题,具有较好的抗饱和效果. Berger 等^[28]针对具有执行器幅度饱和的不确定 LTI 反馈系统稳定性问题提出了一种新的解决问题的视角,通过将控制器参数化和基于描述函数的极限环回避方法相结合,设计了一种新颖的抗饱和结构.

2.2 非线性系统

对于非线性系统抗饱和,王乃洲等^[29]提出了一种基于 LMI 的设计抗饱和控制器的方法,通过将原有的非线性系统进行处理,分成非线性和线性两部分,设计综合的抗饱和控制器. Hussain 等^[30]针对非

线性系统输入饱和连续区间变化问题,利用内部模型抗饱和架构和解耦抗饱和补偿器,提出了基于 LMI 设计的动态抗饱和补偿器,这种方法适用于很多非线性时延系统. 当非线性系统可表示为状态变量(或变换后的状态变量)的有理函数且在无输入饱和的情况下原系统可动态输出反馈镇定的假设下,文献[31]给出了一类静态抗饱和控制器. 对于一类可状态反馈线性化系统以及一类高阶非线性仿射非线性系统,严路等^[32-33]给出了相应的静态抗饱和和自适应抗饱和控制器设计. 利用单点模糊化、乘积推理和中心平均去模糊化模糊推理方法,可以将非线性系统化为 T-S 模糊模型,从而可用线性系统理论对非线性系统进行控制器设计^[34]. 用 T-S 模糊模型重构系统结构,系统状态的幅值会受到一定的限制,因此设计相应的抗饱和和反馈控制律时需要考虑系统状态的限制,文献[35-36]采用两步法、文献[37-38]采用一步法分别给出了用 T-S 模糊模型重构系统结构的抗饱和和控制律. 结合凸包理论和 Lyapunov 泛函分析方法,何汉林等^[39]设计了细胞神经网络的输入饱和抗饱和和控制律.

2.3 综合性问题类

针对系统控制器切换的抗饱和问题, Qin 等^[40]为控制器切换提出了一种改进的抗饱和和无扰传输结构,通过线性插值的方法实现控制平滑切换. 在统一框架下选择合适的时序信号,不同控制器可平滑切换. Li 等^[41]为多输入系统设计了一种开关抗饱和和补偿器,区分输入空间,为每个空间设计抗饱和增益,用开关实现各空间的切换,这种方法能有效扩大系统吸引域. 此外,文献[42]为线性系统嵌套输入饱和设计了抗饱和和切换,扩大了其吸引域. Jungers 等^[43]针对具有输入饱和和限制的离散切换系统设计了抗饱和和补偿控制器,将静态和动态的抗饱和和控制器相结合,旨在得到最大化的闭环系统的吸引域估计.

由于实际系统会随着系统工作条件或环境的变化、系统元件的老化、测量噪声、系统未建模动态、非线性项的线性化、建模时忽略考虑的各种干扰信号、被控对象本身的时变特性等一系列因素,造成了系统模型普遍存在不确定性. 为保证闭环系统在一定范围的不确定性和一定程度的未建模动态存在的情况下,闭环系统的性能仍然能够得到满足,文献[44-45]做出了相应研究. 对于自主式水下机器人系统,文献[46]设计了一类参考模型自适应抗饱和和控制方法.

传统抗饱和设计都是控制信号在执行器饱和后

抗饱和和机制才开始作用,Wu等^[47-48]设计一种提前预期饱和的方法,提前激活补偿器,与常规设计相比,其吸引域更大,且做出比较后发现动态补偿器比静态补偿器有更大的吸引域.这种方式经仿真验证可大大提高系统性能.Ran等^[49]设计了一种延迟抗饱和框架,只有在饱和到达一定程度之后抗饱和才作用,以满足不同控制系统的需求.

3 扩展性问题研究

幅值饱和是抗饱和研究中的一大类,除此之外还有速率饱和、时滞系统抗饱和、传感器饱和等.传感器饱和和出现的比较少,其发生原因主要是设计控制器时使用了变化范围不恰当的传感器导致的.这里主要讨论比较常见的速率饱和和时滞系统抗饱和.

3.1 速率饱和

实际应用中,对执行器饱和而言,传输信号速率比幅值大小限制对系统的影响更为显著.机械系统中,执行器不同组件的惯性使得信号变化不会很快,因而需要限制控制信号的速率,保证其能通过设备.速率饱和研究中建模方式与一般抗饱和框架不同,文献[3]给出了一个常见的速率饱和和级联闭环反馈模型,如图4所示.

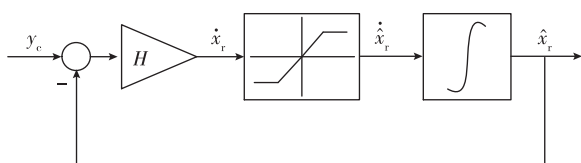


图4 速率饱和模型

Fig. 4 Model of rate limit

u_0 为系统速率限制, H 为执行器线性带宽,状态方程描述如下:

$$\dot{\hat{x}}_r = \text{sat}_{u_0}(H(y_c - \hat{x}_r)), \quad (1)$$

$$u = \hat{x}_r. \quad (2)$$

这种表述方法有两点优势:1)它明确地表示了速率限制,包括执行器线性动态和非线性速率限制;2)执行器非线性部分用标准饱和函数描述,这样幅值饱和和里的技术便可很容易应用到此类系统中.速率饱和引起系统出现的一系列问题,如飞行员诱发振荡(PIO)导致的坠毁事件^[50],吸引了人们的广泛关注.

3.2 时滞系统

时滞现象出现在很多控制系统当中(如化学、机械和通信系统),且它是系统性能恶化和不稳定的重

要因素.带饱和时滞系统稳定性研究,通常使用 Razumikhin 或 Lyapunov-Krasovskii 泛函,另一个比较常用的方法是利用 Pade'近似接近延迟,这种方法会使闭环系统的阶次增加.文献[51-52]对只有输入和输出时滞系统设计了一动态抗饱和策略.在文献[53]中时延是用一阶 Pade'近似替代的.

4 总结

本文主要讨论抗饱和研究的历史发展与当前的研究成果.抗饱和技术源自工业应用,其发展初期各类方法甚至是不相关的,后来逐步形成统一的一般抗饱和框架,到20世纪末出现的现代抗饱和技术,更加丰富了抗饱和的理论.由于抗饱和研究主要考虑稳定性和性能两个问题,从而引出吸引域估计以及饱和处理方法的具体研究对象.当前基于线性矩阵不等式(LMI)的方法比较成熟,尤其是在线性系统中已形成一些具体的方法.非线性系统抗饱和研究出现得比较晚,其主要原因还是非线性系统较为复杂,也有一些非线性系统抗饱和出现,如基于反馈线性化自适应控制和神经网络控制等,这类问题必将在以后得到更多的关注.另外,本文还对速率饱和、延时抗饱和和还有传感器饱和等问题进行了讨论.将抗饱和策略进一步向非线性以及综合性系统扩大,必将成为现代抗饱和和技术研究的重点.

参考文献

References

- [1] 周丽明.饱和控制系统理论及应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009
ZHOU Liming.Study of theory and application for control systems subject to actuator saturation[D].Harbin:Harbin Engineering University,2009
- [2] 雷金利.大负载光电稳定平台技术研究[D].长春:长春理工大学,2009
LEI Jinli.Research on the platform technology of photoelectric stabilized with heavy loading[D].Changchun:Changchun University of Science and Technology,2009
- [3] Tarbouriech S, Turner M. Anti-windup design: An overview of some recent advances and open problems[J]. IET Control Theory & Applications,2009,3(1):1-19
- [4] Lozier J C.A steady-state approach to the theory of saturable servo systems[J].IRE Transactions on Automatic Control,1956,1(1):19-39
- [5] Fertik H A, Ross C W. Direct digital control algorithm with anti-windup feature[J].ISA Transactions,1967,6(4):317-328
- [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] Kothare M V, Campo P J, Morari M, et al. A unified framework for the study of anti-windup designs[J]. *Automatica*, 1994, 30(12): 1869-1883
- [8] Edwards C, Postlethwaite I. Anti-windup and bumpless transfer schemes[J]. *Automatica*, 1998, 34(2): 199-210
- [9] Tu J J, He H L. Guaranteed cost synchronization of chaotic cellular neural networks with time-varying delay [J]. *Neural Computation*, 2012, 24(1): 217-233
- [10] He H L, Yan L, Tu J J. Guaranteed cost stabilization of time-varying delay cellular neural networks via Riccati inequality approach[J]. *Neural Processing Letters*, 2012, 35(2): 151-158
- [11] 吴风,王景成,方小生,等.抗饱和控制的一些新进展 [J]. *化工自动化及仪表*, 2007, 34(2): 1-6
WU Feng, WANG Jingcheng, FANG Xiaosheng, et al. New developments in anti-windup control[J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2007, 34(2): 1-6
- [12] 陶洪峰,胡寿松. 执行器饱和 T-S 模糊系统的鲁棒耗散容错控制 [J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(2): 521-537
TAO Hongfeng, HU Shousong. Robust dissipative tolerant-control of Takagi-Sugeno fuzzy systems with actuator saturation[J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(2): 521-537
- [13] 张玉东,方勇纯.一类输出饱和系统的学习控制算法研究[J]. *自动化学报*, 2011, 37(1): 92-98
ZHANG Yudong, FANG Yongchun. Learning control for systems with saturated output[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(1): 92-98
- [14] Tarbouriech S, Garcia G, Gomes da Silva J M Jr, et al. Stability and stabilization of linear systems with saturating actuators [M]. London: Springer-Verlag, 2011
- [15] Ran M P, Wang Q, Ni M L, et al. Simultaneous linear and anti-windup controller synthesis: Delayed activation case [J]. *Asian Journal of Control*, 2015, 17(3): 1027-1038
- [16] Ran M P, Wang Q, Dong C Y, et al. Multistage anti-windup design for linear systems with saturation nonlinearity: enlargement of the domain of attraction [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 80(3): 1543-1555
- [17] Turner M C, Kerr M L, Sofrony J. Tractable stability analysis for systems containing repeated scalar slope-restricted nonlinearities [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2015, 25(7): 971-986
- [18] Turner M C, Herrmann G. A non-square sector condition and its application in deferred-action anti-windup compensator design [J]. *Automatica*, 2014, 50(1): 268-276
- [19] Turner M C, Kerr M. Lyapunov functions and L_2 gain bounds for systems with slope restricted nonlinearities [J]. *Systems & Control Letters*, 2014, 69(1): 1-6
- [20] Gayadeen S, Duncan S R. Discrete-time anti-windup compensation for synchrotron electron beam controllers with rate constrained actuators [J]. *Automatica*, 2016, 67: 224-232
- [21] Mercorelli P. An optimal and stabilising PI controller with an anti-windup scheme for a purification process of potable water [J]. *IFAC-Papers Online*, 2015, 48(25): 259-264
- [22] Wakasa Y, Adachi S. Fictitious reference iterative tuning considering input saturation [J]. *IEEE Transactions on Electrical & Electronic Engineering*, 2015, 10(sup1): S159-S161
- [23] Ran M P, Wang Q, Dong C Y, et al. Multistage anti-windup design for linear systems with saturation nonlinearity: Enlargement of the domain of attraction [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 80(3): 1543-1555
- [24] Oliveira C M R, Aguiar M L, Monteiro J R B A, et al. Vector control of induction motor using an integral sliding mode controller with anti-windup [J]. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2016, 27(2): 169-178
- [25] 刘希,孙秀霞,徐嵩,等. MIMO 系统滑模控制的快速抗饱和和预测补偿算法 [J]. *信息与控制*, 2014, 43(6): 690-696
LIU Xi, SUN Xiuxia, XU Song, et al. Fast anti-windup predictive compensation control for MIMO system based on sliding mode control [J]. *Information and Control*, 2014, 43(6): 690-696
- [26] Sassano M, Zaccarian L. Model recovery anti-windup for output saturated SISO linear closed loops [J]. *Systems & Control Letters*, 2015, 85: 109-117
- [27] 李钟慎. 采用条件技术设计 AIMC 结构的抗饱和控制器 [J]. *控制工程*, 2015(1): 129-132
LI Zhongshen. Design of anti-windup controller in AIMC using conditioning technique [J]. *Control Engineering of China*, 2015(1): 129-132
- [28] Berger A, Gutman P O. A new view of anti-windup design for uncertain linear systems in the frequency domain [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2015, 26(10): 2116-2135
- [29] 王乃洲,裴海龙,汤勇. 一类饱和非线性系统抗饱和控制器设计 [J]. *控制与决策*, 2015, 30(12): 2225-2232
WANG Naizhou, PEI Hailong, TANG Yong. Anti-windup controller design for a class of nonlinear systems subject to actuator saturation [J]. *Control and Decision*, 2015, 30(12): 2225-2232
- [30] Hussain M, Rehan M. Nonlinear time-delay anti-windup compensator synthesis for nonlinear time-delay systems: A delay-range-dependent approach [J]. *Neurocomputing*, 2016, 186: 54-65
- [31] Gomes da Silva J M Jr, Oliveira M Z, Coutinho D, et al. Static anti-windup design for a class of nonlinear systems [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2014, 24(5): 793-810
- [32] 严路,何汉林,江梅. 可状态反馈线性化系统静态抗饱和设计 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(9): 14-18
YAN Lu, HE Hanlin, JIANG Mei. Static anti-windup design for state feedback linearizable systems [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 42(9): 14-18
- [33] 严路,何汉林,江梅. 基于自适应滑模抗饱和控制及其应用 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(7): 72-75
YAN Lu, HE Hanlin, JIANG Mei. Anti-windup control and applications based on adaptive sliding-mode [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nat-*

- ural Science Edition),2014,42(7):72-75
- [34] 熊萍,何汉林,涂建军.T-S 模型输入饱和扰动抑制及在 Lurie 系统中的应用[J].系统工程与电子技术,2013,35(6):1286-1290
XIONG Ping,HE Hanlin,TU Jianjun.Disturbance attenuation to T-S model with input saturation and its application to Lurie system[J].Systems Engineering and Electronics,2013,35(6):1286-1290
- [35] Du H P,Zhang N.Fuzzy control for nonlinear uncertain electrohydraulic active suspensions with input constraint [J].IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2009,17(2):343-356
- [36] Cao Y Y,Lin Z L.Robust stability analysis and fuzzy-scheduling control for nonlinear systems subject to actuator saturation[J].Transactions on Fuzzy Systems,2003,11(1):57-67
- [37] Zhang T J,Feng G,Liu H P,et al.Piecewise fuzzy anti-windup dynamic output feedback control of nonlinear processes with amplitude and rate actuator saturations [J].IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2009,17(2):253-264
- [38] Nguyen A T,Dequidt A,Dambrine M.Anti-windup based dynamic output feedback controller design with performance consideration for constrained Takagi-Sugeno systems [J].Engineering Applications of Artificial Intelligence,2015,40:76-83
- [39] He H L,Xu W W,Jiang M.Guaranteed cost anti-windup stabilization of discrete delayed cellular neural networks [J].Neural Processing Letters,2017,DOI:10.1007/s11063-017-9583-9
- [40] Qin G Z,Duan Z S,Wen G H,et al.An improved anti-windup bumpless transfer structures design for controllers switching [J].Asian Journal of Control,2014,16(4):1245-1251
- [41] Li Y L,Lin Z L.A switching anti-windup design based on partitioning of the input space [J].Systems & Control Letters,2016,88:39-46
- [42] Li Y L,Lin Z L.Saturation-based switching anti-windup design for linear systems with nested input saturation[J].Automatica,2014,50(11):2888-2896
- [43] Jungers M,Tarbouriech S.Anti-windup strategies for discrete-time switched systems subject to input saturation [J].International Journal of Control,2016,89(5):919-937
- [44] Morales R M,Li G,Heath W P.Anti-windup and the preservation of robustness against structured norm-bounded uncertainty [J].International Journal of Robust & Nonlinear Control,2014,24(17):2640-2652
- [45] Andrievsky B,Kuznetsov N,Leonov G.Convergence-based analysis of robustness to delay in anti-windup loop of aircraft autopilot [J].IFAC Papers Online,2015,48(9):144-149
- [46] Sarhadi P,Noei A R,Khosravi A.Model reference adaptive PID control with anti-windup compensator for an autonomous underwater vehicle [J].Robotics & Autonomous Systems,2016,83(C):87-93
- [47] Wu X J,Lin Z L.Dynamic anti-windup design for anticipatory activation:Enlargement of the domain of attraction [J].Control Conference,2014,57(1):876-881
- [48] Wu X J,Lin Z L.Dynamic anti-windup design in anticipation of actuator saturation [J].International Journal of Robust and Nonlinear Control,2014,24(2):295-312
- [49] Ran M P,Wang Q,Ni M L,et al.Simultaneous linear and anti-windup controller synthesis:Delayed activation case [J].Asian Journal of Control,2015,17(3):1027-1038
- [50] Duda H.Prediction of pilot-in-the-loop oscillations due to rate saturation [J].Journal of Guidance Control and Dynamics,1997,20(3):581-587
- [51] Park J K,Choi C H,Choo H.Dynamic anti-windup method for a class of time-delay control systems with input saturation [J].International Journal of Robust and Nonlinear Control,2000,10(6):457-488
- [52] Zaccarian L,Nesic D,Teel A R. L_2 anti-windup for linear dead-time systems [J].Systems & Control Letters,2005,54(12):1205-1217
- [53] Biannic J M,Tarbouriech S.Optimization and implementation of dynamic anti-windup compensators with multiple saturations in flight control systems [J].Control Engineering Practice,2009,17(6):703-713

An overview of anti-windup design development

ZHA Miao¹ HE Hanlin¹

¹ College of Sciences,Naval University of Engineering,Wuhan 430033

Abstract The origin of the saturation problem is introduced,and the development of anti-windup technique is divided into three periods.The general anti-windup scheme and some key problems are talked about.Two difficulties exist in anti-windup studies,including estimation of the attraction domain and processing of saturation.The design ideas of and the theory applied in direct and anti-windup methods are briefly summarized.The advantages and disadvantages of the two methods are compared.The lately results are introduced separately in linear and non-linear systems.Some extensions are discussed to enrich the anti-windup research.

Key words anti-windup;stability;Linear Matrix Inequality (LMI);Lyapunov method