

文章编号: 1000-8152(2007)03-0407-12

滑模变结构控制理论及其算法研究与进展

刘金琨¹, 孙富春²

(1. 北京航空航天大学 自动化与电气工程学院, 北京 100083; 2. 清华大学 智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 针对近年来滑模变结构控制的发展状况, 将滑模变结构控制分为18个研究方向, 即滑模控制的消除抖振问题、准滑动模态控制、基于趋近律的滑模控制、离散系统滑模控制、自适应滑模控制、非匹配不确定性系统滑模控制、时滞系统滑模控制、非线性系统滑模控制、Terminal滑模控制、全鲁棒滑模控制、滑模观测器、神经网络滑模控制、模糊滑模控制、动态滑模控制、积分滑模控制和随机系统的滑模控制等. 对每个方向的研究状况进行了分析和说明. 最后对滑模控制的未来发展作了几点展望.

关键词: 滑模控制; 鲁棒控制; 抖振

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Research and development on theory and algorithms of sliding mode control

LIU Jin-kun¹, SUN Fu-chun²

(1. School of Automation Science & Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: According to the development of sliding mode control (SMC) in recent years, the SMC domain is characterized by eighteen directions. These directions are chattering free of SMC, quasi SMC, trending law SMC, discrete SMC, adaptive SMC, SMC for mismatched uncertain systems, SMC for nonlinear systems, time-delay SMC, terminal SMC, global robust SMC, sliding mode observer, neural SMC, fuzzy SMC, dynamic SMC, integral SMC and SMC for stochastic systems, etc. The evolution of each direction is introduced and analyzed. Finally, further research directions are discussed in detail.

Key words: sliding mode control; robust control; chattering

1 引言(Introduction)

滑模变结构控制本质上是一类特殊的非线性控制, 其非线性表现为控制的不连续性, 这种控制策略与其它控制的不同之处在于系统的“结构”并不固定, 而是可以在动态过程中根据系统当前的状态(如偏差及其各阶导数等)有目的地不断变化, 迫使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动. 由于滑动模态可以进行设计且与对象参数及扰动无关, 这就使得变结构控制具有快速响应、对参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识, 物理实现简单等优点. 该方法的缺点在于当状态轨迹到达滑模面后, 难于严格地沿着滑模面向着平衡点滑动, 而是在滑模面两侧来回穿越, 从而产生颤动.

滑模变结构控制出现于20世纪50年代, 经历了50余年的发展, 已形成了一个相对独立的研究分支, 成为自动控制系统的一种一般的设计方法. 以滑模为基础的变结构控制系统理论经历了3个发展阶段. 第1阶段为以误差及其导数为状态变量研究单输入

单输出线性对象的变结构控制; 20世纪60年代末开始了变结构控制理论研究的第2阶段, 研究的对象扩大到多输入多输出系统和非线性系统; 进入80年代以来, 随着计算机、大功率电子切换器件、机器人及电机等技术的迅速发展, 变结构控制的理论和应用研究开始进入了一个新的阶段, 所研究的对象已涉及到离散系统、分布参数系统、滞后系统、非线性大系统及非完整力学系统等众多复杂系统, 同时, 自适应控制、神经网络、模糊控制及遗传算法等先进方法也被应用于滑模变结构控制系统的设计中.

2 滑模变结构控制理论研究进展(Development for SMC)

2.1 消除滑模变结构控制抖振的方法研究(Research on chattering elimination of SMC)

2.1.1 滑模变结构控制的抖振问题(Problems of SMC chattering)

从理论角度, 在一定意义上, 由于滑动模态可以

按需要设计,而且系统的滑模运动与控制对象的参数变化和系统的外干扰无关,因此滑模变结构控制系统的鲁棒性要比一般常规连续系统强.然而,滑模变结构控制在本质上的不连续开关特性将会引起系统的抖振.对于一个理想的滑模变结构控制系统,假设“结构”切换的过程具有理想开关特性(即无时间和空间滞后),系统状态测量精确无误,控制量不受限制,则滑动模态总是降维的光滑运动而且渐近稳定于原点,不会出现抖振.但是对于一个现实的滑模变结构控制系统,这些假设是不可能完全成立的.特别是对于离散系统的滑模变结构控制系统,都将会在光滑的滑动模态上叠加一个锯齿形的轨迹.于是,在实际上,抖振是必定存在的,而且消除了抖振也就消除了变结构控制的抗扰动和抗扰动的能力,因此,消除抖振是不可能的,只能在一定程度上削弱它到一定的范围.抖振问题成为变结构控制在实际系统中应用的突出障碍.

抖振产生的主要原因有:

① 时间滞后开关:在切换面附近,由于开关的时间滞后,控制作用对状态的准确变化被延迟一定的时间;又因为控制量的幅度是随着状态量的幅度逐渐减少的,所以表现为在光滑的滑动模态上叠加一个衰减的三角波.

② 空间滞后开关:开关滞后相当于在状态空间中存在一个状态量变化的“死区”.因此,其结果是在光滑的滑模面上叠加了一个等幅波形.

③ 系统惯性的影响:由于任何物理系统的能量不可能是无限大,因而系统的控制力不能无限大,这就使系统的加速度有限;另外,系统惯性总是存在的,所以使得控制切换伴有滞后,这种滞后与时间滞后效果相同.

④ 离散系统本身造成的抖振:离散系统的滑动模态是一种“准滑动模态”,它的切换动作不是正好发生在切换面上,而是发生在以原点为顶点的一个锥形的表面上.因此有衰减的抖振,而且锥形体越大,则抖振幅度越大.该锥形体的大小与采样周期有关.

总之,抖振产生的原因在于:当系统的轨迹到达切换面时,其速度是有限大,惯性使运动点穿越切换面,从而最终形成抖振,叠加在理想的滑动模态上.对于实际的计算机采样系统而言,计算机的高速逻辑转换以及高精度的数值运算使得切换开关本身的时间及空间滞后影响几乎不存在,因此,开关的切换动作所造成控制的不连续性是抖振发生的本质原因.

在实际系统中,由于时间滞后开关、空间滞后开关、系统惯性、系统延迟及测量误差等因素,使变结

构控制在滑动模态下伴随着高频振动,抖振不仅影响控制的精确性、增加能量消耗,而且系统中的高频未建模动态很容易被激发起来,破坏系统的性能,甚至使系统产生振荡或失稳,损坏控制器部件.因此,关于控制信号抖振消除的研究成为变结构控制研究的首要工作.

2.1.2 消除滑模变结构控制抖振的几种方法(Several methods for eliminating chattering in SMC)

国内外针对滑模控制抗抖振问题的研究很多,许多学者都从不同的角度提出了解决方法.目前这些方法主要有:

1) 滤波方法.

通过采用滤波器,对控制信号进行平滑滤波,是消除抖振的有效方法.

文[1]为了消除离散滑模控制的抖振,设计了两种滤波器:前滤波器和后滤波器,其中前滤波器用于控制信号的平滑及缩小饱和函数的边界层厚度,后滤波器用于消除对象输出的噪声干扰.文[2]在边界层内,对切换函数采用了低通滤波器,得到平滑的信号,并采用了内模原理,设计了一种新型的带有积分和变边界层厚度的饱和函数,有效地降低了抖振.文[3]利用机器人的物理特性,通过在控制器输出端加入低通滤波器,设计了虚拟滑模控制器,实现了机器人全鲁棒变结构控制,并保证了系统的稳定,有效地消除了抖振.文[4]设计了带有滤波器的变结构控制器,有效地消除了控制信号的抖振,得到了抑制高频噪声的非线性控制器,实现了存在非建模动态的电液伺服马达的定位控制.文[5]为了克服未建模动态特性造成的滑动模态抖振,设计了一种新型滑模控制器,该控制器输出通过一个二阶滤波器,实现控制器输出信号的平滑,其中辅助滑动模面的系数通过滑模观测器得到.文[6]提出了一种新型控制律,即,该控制律由3部分构成,即等效控制、切换控制和连续控制,在控制律中采用了两个低通滤波器,其中一个通过一个低通滤波器得到切换项的增益,通过另一个低通滤波器得到等效控制项,并进行了收敛性和稳定性分析,有效地抑制了抖振,实现了多关节机器人手的高性能控制.

2) 消除干扰和不确定性的方法.

在常规滑模控制中,往往需要很大的切换增益来消除外加干扰及不确定项,因此,外界干扰及不确定项是滑模控制中抖振的主要来源.利用观测器来消除外界干扰及不确定性成为解决抖振问题研究的重点.文[7]为了将常规滑模控制方法应用于带有较强外加干扰的伺服系统中,设计了一种新型干

扰观测器,通过对外加干扰的前馈补偿,大大地降低了滑模控制器中切换项的增益,有效地消除了抖振.文[8]在滑模控制中设计了一种基于二元控制理论的干扰观测器,将观测到的干扰进行前馈补偿,减小了抖振.文[9]提出了一种基于误差预测的滑模控制方法,在该方法中设计了一种观测器和滤波器,通过观测器消除了未建模动态的影响,采用均值滤波器实现了控制输入信号的平滑,有效地消除了未建模动态造成的抖振.文[10]设计了一种离散的滑模观测器,实现了对控制输入端干扰的观测,从而实现对干扰的有效补偿,相对地减小了切换增益.

3) 遗传算法优化方法.

遗传算法是建立在自然选择和自然遗传学机理基础上的迭代自适应概率性搜索算法,在解决非线性问题时表现出很好的鲁棒性、全局最优性、可行性和高效率,具有很高的优化性能.

文[11]针对非线性系统设计了一种软切换模糊滑模控制器,采用遗传算法对该控制器增益参数及模糊规则进行离线优化,有效地减小了控制增益,从而消除了抖振.针对不确定性伺服系统设计了一种积分自适应滑模控制器,通过该控制器中的自适应增益项来消除不确定性及外加干扰,如果增益项为常数,则会造成抖振,为此,文[12]设计了一种实时遗传算法,实现了滑模变结构控制器中自适应增益项的在线自适应优化,有效地减小了抖振.文[13]采用遗传算法进行切换函数的优化,将抖振的大小作为优化适应度函数的重要指标,构造一个抖振最小的切换函数.

4) 降低切换增益方法.

由于抖振主要是由于控制器的不连续切换项造成,因此,减小切换项的增益,便可有效地消除抖振.文[14]根据滑模控制的Lyapunov稳定性要求,设计了时变的切换增益,减小了抖振.文[15]对切换项进行了变换,通过设计一个自适应积分项来代替切换项,实现了切换项增益的自适应调整,有效地减小了切换项的增益.文[16]针对一类带有未建模动态系统的控制问题,提出了一种鲁棒低增益变结构模型参考自适应控制新方法,使系统在含未建模动态时所有辅助误差均可在有限时间内收敛为零,并保证在所有情况下均为低增益控制.文[17]提出了采用模糊神经网络的切换增益自适应调节算法,当跟踪误差接近于零时,切换增益接近于零,大大降低了抖振.

5) 扇形区域法.

文[18]针对不确定非线性系统,设计了包含两个滑动模面的滑动扇区,构造连续切换控制器使得在开关面上控制信号是连续的.文[19]采用滑动扇区法,在扇区之内采用连续的等效控制,在扇区之外采

用趋近律控制,很大程度地消除了控制的抖振.

6) 其他方法.

文[20]针对滑模变结构控制中引起抖振的动态特性,将抖振看成叠加在理想滑模上的有限频率的振荡,提出了滑动切换面的优化设计方法,即通过切换面的设计,使滑动模态的频率响应应具有某种希望的形状,实现频率整形.该频率整形能够抑制滑动模态中引起抖振的频率分量,使切换面为具有某种“滤波器”特性的动态切换面.文[21]设计了一种能量函数,该能量函数包括控制精度和控制信号的大小,采用LMI(linear matrix inequality)方法设计滑动模面,使能量函数达到最小,实现了滑动模面的优化,提高了控制精度,消除了抖振.

2.2 准滑动模态滑模控制(Quasi-sliding mode control)

80年代在滑动模态控制的设计中引入了“准滑动模态”和“边界层”的概念^[22],实现准滑动模态控制,采用饱和函数代替切换函数,即在边界层以外采用正常的滑模控制,在边界层内为连续状态的反馈控制,有效地避免或削弱了抖振,为变结构控制的工程应用开辟了道路.此后,有许多学者对于切换函数和边界层的设计进行了研究.

① 连续函数近似法.

文[23]采用Sigmoid连续函数来代替切换函数.文[24]针对直流电机伺服系统的未建模动态进行了分析和描述,设计了基于插补平滑算法的滑模控制器,实现了非连续切换控制的连续化,有效地消除了未建模动态对直流电机伺服系统造成的抖振.

② 边界层的设计.

边界层厚度越小,控制效果越好,但同时又会使控制增益变大,抖振增强;反之,边界层厚度越大,抖振越小,但又会使控制增益变小,控制效果差.为了获得最佳抗抖振效果,边界层厚度应自适应调整.

文[25]提出了一种高增益滑模控制器,设控制信号输入为 u ,切换函数为 $s(t)$,将 $|\dot{u}|$ 作为衡量抖振的指标,按降低控制抖振来设计模糊规则,将 $|s|$ 和 $|\dot{u}|$ 作为模糊规则的输入,模糊推理的输出为边界层厚度的变化,实现了边界层厚度的模糊自适应调整.文[26]针对不确定性线性系统,同时考虑了控制信号的降抖振与跟踪精度的要求,提出了一种基于系统状态范数的边界层厚度在线调整算法.文[27]提出了一种新型的动态滑模控制,采用饱和函数方法,通过设计一种新型非线性切换函数,消除了滑模到达阶段的抖振,实现了全局鲁棒滑模控制,有效地解决了一类非线性机械系统的控制抖振问题.文[28]为了减小边界层厚度,在边界层内采用了积分控制,既获得了稳态误差,又避免了抖振.边界层的方法仅能保

证系统状态收敛到以滑动面为中心的边界层内,只能通过较窄的边界层来任意地接近滑模,但不能使状态收敛到滑模。

2.3 基于趋近律的滑模控制(Sliding mode control based on trending law)

高为炳利用趋近律的概念,提出了一种变结构控制系统的抖振消除方法^[29]。以指数趋近律 $\dot{s} = -\varepsilon \cdot \text{sgn } s - k \cdot s$ 为例,通过调整趋近律的参数 κ 和 ε ,既可以保证滑动模态到达过程的动态品质,又可以减弱控制信号的高频抖振,但较大的 ε 值会导致抖振。文[30]分析了指数趋近律应用于离散系统时趋近系数造成抖振的原因,并对趋近系数与抖振的关系进行了定量的分析,提出了趋近系数 ε 的自适应调整算法。文[31]提出了将离散趋近律与等效控制相结合的控制策略,离散趋近律仅在趋近阶段起作用,当系统状态到达准滑模模态阶段,采用了抗干扰的离散等效控制,既保证了趋近模态具有良好品质,又降低了准滑动模态带,消除了抖振。文[32]将模糊控制应用于指数趋近律中,通过分析切换函数与指数趋近律中系数的模糊关系,利用模糊规则调节指数趋近律的系数,其中切换函数的绝对值 $|s|$ 作为模糊规则的输入,指数趋近律的系数 κ 和 ε 作为模糊规则的输出,使滑动模态的品质得到了进一步的改善,消除了系统的高频抖振。

2.4 离散系统滑模变结构控制(Sliding mode control for discrete system)

连续时间系统和离散时间系统的控制有很大差别。自80年代初至今,由于计算机技术的飞速发展,实际控制中使用的都是离散系统,因此,对离散系统的变结构控制研究尤为重要。对离散系统变结构控制的研究是从80年代末开始的,例如, Sarpturk 等于1987年提出了一种新型离散滑模到达条件,在此基础上又提出了离散控制信号必须是有界的理论^[33], Furuta 于1990年提出了基于等效控制的离散滑模变结构控制^[34],高为炳于1995年提出了基于趋近律的离散滑模变结构控制^[35]。他们各自提出的离散滑模变结构滑模存在条件及其控制方法已被广泛应用。

然而,传统设计方法存在两方面不足:一是由于趋近律自身参数及切换开关的影响,即使对名义系统,系统状态轨迹也只能稳定于原点邻域的某个抖振;二是由于根据不确定性上下界进行控制器设计,可能会造成大的反馈增益,使控制抖振加剧。近年来国内外学者一方面对离散系统滑模变结构控制的研究不断深入。文[36]提出了基于PR型的离散系统滑模面设计方法,其中P和R分别为与系统状态有关的

正定对称阵和半正定对称阵,在此基础上设计了稳定的离散滑模控制器,通过适当地设计P和R,保证了控制器具有良好的性能。文[37]针对离散系统提出了一种新型滑模存在条件,进一步拓展了离散滑模控制的设计,在此基础上设计了一种新型滑模控制律。针对离散系统中滑模控制的不变性和鲁棒性难以有效保证,文[38]提出了3种解决方法,在第1种方法中,采用了干扰补偿器和解耦器消除干扰,在第2种方法中,采用回归切换函数方法来消除干扰,在第3种方法中,采用回归切换函数和解耦器相结合的方法来消除干扰,上述3种方法已成功应用于数控中。文[39]针对数字滑模控制的鲁棒性进行了系统的研究,提出了高增益数字滑模控制器。文[40]针对带有干扰和未知参数的多输入多输出离散系统的滑模控制进行了研究,并采用自适应律实现了未知项的估计。

2.5 自适应滑模变结构控制(Adaptive sliding mode control)

自适应滑模变结构控制是滑模变结构控制与自适应控制的有机结合,是一种解决参数不确定或时变参数系统控制问题的一种新型控制策略。文[41]针对线性化系统将自适应Backstepping与滑模变结构控制设计方法结合在一起,实现了自适应滑模变结构控制,文[42]针对一类最小相位的可线性化的非线性系统,设计了一种动态自适应变结构控制器,实现了带有不确定性和未知外干扰的非线性系统鲁棒控制。在一般的滑模变结构控制中,为了保证系统能够达到切换面,在设计控制律时通常要求系统不确定性范围的界已知,这个要求在实际工程中往往很难达到,针对具有未知参数变化和干扰变化的不确定性系统的变结构控制,文[43]设计了一种新型的带有积分的滑动模面,并采用一种自适应滑模控制方法,控制器的设计无需不确定性及外加干扰的上下界,实现了一类不确定伺服系统的自适应变结构控制。针对自适应滑模控制中参数估计值无限增大的缺点,文[44]提出了一种新的参数自适应估计方法,保证了变结构控制增益的合理性。

近年来,变结构模型参考自适应控制理论取得了一系列重要进展,由于该方法具有良好的过渡过程性能和鲁棒性,在工程上得到了很好的应用。文[45]设计了一种新型动态滑动模面,滑动模面参数通过采用自适应算法估计得到,从而实现了非线性系统的模型参考自适应滑模控制。文[46]针对一类不确定性气压式伺服系统,提出了模型参考自适应滑模控制方法,并在此基础上提出了克服控制抖振的有效方法。

2.6 非匹配不确定性系统的滑模变结构控制(Sliding mode control for systems with mismatched uncertainties)

由于大多数系统不满足变结构控制的匹配条件, 因此, 存在非匹配不确定性系统的变结构控制是一个研究重点. 文[47]利用参数自适应控制方法, 构造了一个变参数的切换函数, 对具有非匹配不确定性的系统进行了变结构控制设计. 采用基于线性矩阵不等式LMI的方法, 为非匹配不确定性系统的变结构控制提供了新的思路, Choi针对不匹配不确定性系统, 专门研究了利用LMI方法进行变结构控制设计的问题^[48~50]. Backstepping设计方法通过引入中间控制器, 使控制器的设计系统化、程序化, 它对于非匹配不确定性系统及非最小相位系统的变结构控制是一种十分有效的方法. 采用Backstepping设计方法, 文[51]实现了对于一类具有非匹配不确定性的非线性系统的变结构控制. 将Backstepping设计方法、滑模控制及自适应方法相结合, 文[52]实现了一类具有非匹配不确定性的非线性系统的自适应滑模控制.

2.7 针对时滞系统的滑模变结构控制(Sliding mode control for time-delay system)

由于实际系统普遍存在状态时滞、控制变量时滞, 因此, 研究具有状态或控制时滞系统的变结构控制, 对进一步促进变结构控制理论的应用具有重要意义. 文[53]对于具有输入时滞的不确定性系统, 通过状态变换的方法, 实现了滑模变结构控制器的设计. 文[54]研究了带有关联时滞项的大系统的分散模型跟踪变结构控制问题, 其中被控对象的时滞关联项必须满足通常的匹配条件. 文[55]采用趋近律的方法设计了一种新型控制器, 采用了基于LMI的方法进行了稳定性分析和切换函数的设计, 所设计的控制器保证了对非匹配不确定性和匹配的外加干扰具有较强的鲁棒性, 解决了非匹配参数不确定性时滞系统的变结构控制问题. 文[56]针对带有输出延迟非线性系统的滑模控制器的设计进行了探讨, 在该方法中, 将延迟用一阶Pade近似的方法来代替, 并将非最小相位系统转化为稳定系统, 在存在未建模动态和延迟不确定性条件下, 控制器获得了很好的鲁棒性能. 国内在时滞系统的滑模变结构控制方面也取得了许多成果, 针对时滞系统的变结构控制器设计问题和时滞变结构控制系统的理论问题进行了多年的研究, 取得了许多成果^[57~59].

2.8 非线性系统的滑模变结构控制(Sliding mode control for nonlinear system)

非线性系统的滑模变结构控制一直是人们关注的热点. 文[60]研究了具有正则形式的非线性系统

的变结构控制问题, 为非线性系统变结构控制理论的发展奠定了基础. 目前, 非最小相位非线性系统、输入受约束非线性系统、输入和状态受约束非线性系统等复杂问题的变结构控制是该领域研究的热点. 文[61]将Anti-windup方法与滑模控制方法相结合, 设计了输入饱和的Anti-windup算法, 实现当输出为饱和时的高精度变结构控制, 文[62]利用滑模变结构控制方法实现了一类非最小相位非线性系统的鲁棒控制, 文[63]利用输入输出反馈线性化、相对度、匹配条件等非线性系统的概念, 采用输出反馈变结构控制方法实现了一类受约束非线性系统的鲁棒输出跟踪反馈控制. 文[64]利用Backstepping方法, 实现了非线性不确定性系统的变结构控制.

2.9 Terminal滑模变结构控制(Terminal sliding mode control)

在普通的滑模控制中, 通常选择一个线性的滑动超平面, 使系统到达滑动模态后, 跟踪误差渐进地收敛为零, 并且渐进收敛的速度可以通过选择滑模面参数矩阵任意调节. 尽管如此, 无论如何状态跟踪误差都不会在有限时间内收敛为零.

近年来, 为了获得更好的性能, 一些学者提出了一种Terminal(终端)滑模控制策略^[65~67], 该策略在滑动超平面的设计中引入了非线性函数, 使得在滑模面上跟踪误差能够在有限时间内收敛到零. Terminal滑模控制是通过设计一种动态非线性滑模面方程实现的, 即在保证滑模控制稳定性的基础上, 使系统状态在指定的有限时间内达到对期望状态的完全跟踪. 例如, 文[68]将动态非线性滑模面方程设计为 $s = x_2 + \beta x_1^{q/p}$, 其中 $p > q$, p 和 q 为正的奇数, $\beta > 0$. 但该控制方法由于非线性函数的引入使得控制器在实际工程中实现困难, 而且如果参数选取不当, 还会出现奇异问题. 文[69]探讨了非奇异Terminal滑模控制器的设计问题, 并针对N自由度刚性机器人的控制进行了验证. 文[70]采用模糊规则设计了Terminal滑模控制器的切换项, 并通过自适应算法对切换项增益进行自适应模糊调节, 实现了非匹配不确定性时变系统的Terminal滑模控制, 同时降低了抖阵. 文[71]中只对一个二阶系统给出了相应的Terminal滑模面, 滑模面的导数是不连续的, 不适用于高阶系统. 文[72]设计了一种适用于高阶非线性系统的Terminal滑模面, 克服了文[71]中的滑模面导数不连续的缺点, 并消除了滑模控制的到达阶段, 确保了系统的全局鲁棒性和稳定性, 进一步地, 庄开宇等[73]又针对系统参数摄动和外界扰动等不确定性因素上界的未知性, 实现了MIMO系统的自适应Terminal控制器设计, 所设计的滑模面方程既保

证跟踪误差在指定时间收敛为零,又能保证系统的全局鲁棒性.

2.10 全鲁棒滑模变结构控制(Global sliding mode control)

在变结构控制系统中,系统的运动可分为两个阶段^[74]:第一阶段是到达运动阶段,即滑模控制中的趋近过程,在该过程中,由到达条件保证系统运动在有限时间内从任意初始状态到达切换面;第二阶段是系统在控制律的作用下保持滑模运动.由于变结构控制的优点在于其滑动模态具有鲁棒性,即系统只有在滑动阶段才具有对参数摄动和外界干扰的不敏感性.如果能缩短到达滑模时间,将有效地改善系统的动态性能,而如何缩短到达时间则是变结构控制的一个重要研究方向.

全滑模控制为具有全程滑动模态的变结构控制器,在该控制器的作用下,消除滑模控制的到达运动阶段,使系统在响应的全过程都具有鲁棒性,克服了传统变结构控制中到达模态不具有鲁棒性的特点.全局滑模控制是通过设计一种动态非线性滑模面方程来实现的,即在保证滑模控制稳定性的基础上,消除滑模控制中的趋近过程.文[75]将动态非线性滑模面方程设计为 $s = \dot{e} + ce - f(t)$,其中函数满足以下3个条件:1) $f(0) = \dot{e}_0 + ce_0$; 2) 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $f(t) \rightarrow 0$; 3) $\dot{f}(t)$ 存在且有界.通过上述设计,使控制器在稳定条件下,具有全局鲁棒性.文[75]提出了一种全局鲁棒的滑模控制器GSMC,在该控制器中,考虑了对象的不确定性、外加干扰.针对控制输入信号的限制,对滑模线进行了优化设计,使对象按理想的轨迹跟踪,并有效地利用了电机的输出.该控制器成功地应用于直流无刷电机的控制中.文[76]在文[75]研究的基础上对滑线进行了改进,使对象在有限的控制输入内沿着理想的轨迹运行,并按最短时间到达.文[77]基于滑模运动方程与系统期望特性的等价性设计了一种非线性切换函数,提出了一类具有全程滑动模态的变结构控制器,即全滑模控制器,使系统在响应的全过程都具有鲁棒性,克服了传统变结构控制中到达模态不具有鲁棒性的特点.文[78]针对一类具有不确定性离散系统,设计了全鲁棒滑模控制器,通过选择切换函数,使系统轨线一开始就落在切换面上.

2.11 滑模观测器的研究(Sliding mode observer)

通过滑模观测器,可实现状态部分可测或完全不可测情况下的控制.利用滑模变结构方法设计非线性观测器是一个重要研究方向^[79].文[80]设计了一种非线性自适应滑模观测器,并将该观测器用于电机控制中.文[81]将滑模观测器用于解决对传感器

的故障诊断和重构问题.文[82]采用自适应滑模观测器,实现了电机定子电流和转子流量的精确估计,在滑模观测器中采用了 H_∞ 方法,使观测精度得到了提高.文[83]采用滑模观测器实现了状态方程中未知参数的估计,在滑模观测器中采用了 H_∞ 方法,降低了滑模控制器的增益.

2.12 神经滑模变结构控制(Neural sliding mode control)

神经网络是一种具有高度非线性的连续时间动力系统,它有着很强的自学习功能和对非线性系统的强大映射能力.神经网络用于滑模变结构控制,可降低抖振,并实现自适应滑模控制.

2.12.1 基于神经网络的降抖振研究(Chattering elimination in SMC by neural network)

文[84]采用神经网络实现了对线性系统的非线性部分、不确定部分和未知外加干扰的在线估计,实现了基于神经网络的等效控制,有效地消除了抖振.文[85]提出了一种新型神经网络滑模控制方法,采用两个神经网络分别逼近等效滑模控制部分及切换滑模控制部分,无需对象的模型,有效地消除了控制器的抖振,该方法已成功应用于机器人的轨迹跟踪.文[86]利用神经网络的逼近能力,设计了一种基于RBF神经网络的滑模控制器,将切换函数作为网络的输入,控制器完全由连续的RBF函数实现,取消了切换项,消除了抖振.文[87]将滑模控制器分为两部分,一部分为神经网络滑模控制器,另一部分为线性反馈控制器,利用模糊神经网络的输出代替滑模控制中的切换函数,保证了控制律的连续性,从根本上消除了抖振.

2.12.2 基于神经网络的自适应滑模控制研究(Adaptive neural sliding mode control)

文[88]将传统方法与神经网络相结合,无需对象的精确模型,设计了基于RBF网络的滑模控制器,该控制器成功地应用于非线性单级倒立摆的自适应控制.文[89]针对一类非线性离散机器人力臂系统设计了自适应滑模控制器,在该控制器中采用两个神经网络实现了非线性系统 $x^{(n)} = f(x, t) + g(x, t)u$ 中未知函数部分的逼近,从而实现了基于神经网络的滑模自适应控制.文[90]提出了一种新型神经网络滑模控制方法,采用RBF网络辨识系统不确定部分的上界,该方法已成功应用于机器手的轨迹跟踪.文[91]采用BP网络代替带有切换的滑模控制器,通过神经网络权值的在线调整,实现了针对变频器的抗抖振自适应滑模控制.文[92]将BP网络学习算法与滑模控制相结合,构成新的闭环控制系统,利用BP网络的在线学习功能,提出了一种新型滑模-神

经网络控制器,实现了感应电机的自适应滑模控制。

2.13 模糊滑模变结构控制(Fuzzy sliding mode control)

2.13.1 基于模糊系统降低抖振的研究(Chattering elimination in SMC by fuzzy system)

根据经验,以降低抖振来设计模糊规则,可有效地降低滑模控制的抖振。模糊滑模控制柔化了控制信号,即将不连续的控制信号连续化,可减轻或避免一般滑模控制的抖振现象。模糊逻辑还可以实现滑模控制参数的自调整。在常规的模糊滑模控制中,控制目标从跟踪误差转化为滑模函数,模糊控制器的输入不是 (e, \dot{e}) 而是 (s, \dot{s}) ,通过设计模糊规则,使滑模面为零,可消除滑模控制中的切换部分,从而消除抖振。文[93]采用等效控制、切换控制和模糊控制3部分构成模糊滑模控制器,在模糊控制器中,通过模糊规则的设计,降低了切换控制的影响,有效地消除了抖振。文[94]利用模糊控制对系统的不确定项进行在线估计,实现切换增益的模糊自调整,在保证滑模到达条件满足的情况下,尽量减小切换增益,以降低抖振。文[95]建立了滑模控制的抖振指标,以降低抖振来设计模糊规则,模糊规则的输入为当前的抖振指标大小,模糊规则的输出为边界层厚度变化,通过模糊推理,实现了边界层厚度的自适应调整。文[96]提出了一种基于模糊逻辑的连续滑模控制方法,使用了连续的模糊逻辑切换代替滑模控制的非连续切换,避免了抖振。

2.13.2 模糊自适应滑模控制(Adaptive fuzzy sliding mode control)

采用模糊滑模控制方法,可通过模糊系统逼近未知项或切换项,无需建模,实现模糊自适应滑模控制。

文[97]设计了分层模糊滑模控制器,首先将耦合系统分解为多个子系统,针对每个子系统设计滑动模面,并采用模糊自适应算法调节耦合系数,以获得最佳的解耦效果。文[98]提出了一种基于模糊滑模面的模糊控制器,将滑模面进行模糊划分,设计基于稳定的模糊控制器。文[99]利用模糊系统逼近未知函数,只要知道未知函数的边界,便可设计基于模糊的自适应滑模控制器。文[100]采用模糊系统的输出代替滑模等效控制,并通过模糊自适应学习,使模糊系统的输出渐进逼近滑模等效控制。文[101]将控制器设计为 $u = \hat{u} + K_f(s, \dot{s})$ 的形式,滑模面 $s(t)$ 采用一种积分滑模函数的形式, K_f 为基于 (s, \dot{s}) 输入的滑模模糊控制系统的输出。文[102]在滑动模面中加入了积分项,通过模糊规则设计了模糊滑模控制器,

并通过自适应算法实现了对切换项系数的自适应估计。文[103]采用模糊规则设计了基于等效控制的模糊滑模控制器,其中控制器的切换项增益通过隶属函数来调节,为了降低抖阵,设计了抖阵指标,通过采用遗传算法来优化隶属函数,实现了抖阵的消除。文[104]研究了非线性系统的多输入多输出自适应模糊滑模控制方法。

2.14 动态滑模变结构控制(Dynamic sliding mode control)

传统的滑模控制方法中切换函数一般只依赖于系统状态,与控制输入无关,不连续项会直接转移到控制器中。动态滑模方法将常规变结构控制中的切换函数通过微分环节构成新的切换函数,该切换函数与系统控制输入的一阶或高阶导数有关,可将不连续项转移到控制的一阶或高阶导数中去,得到在时间上本质连续的动态滑模控制律,有效地降低了抖振。

Bartolini等^[105~108]针对积分滑模变结构控制问题进行了一系列研究,通过设计切换函数的二阶导数,实现了对带有未建模动态和不确定性的机械系统的无抖振滑模控制,并将该方法扩展到多输入系统中。通过采用动态滑模控制器,得到在时间上本质连续的动态变结构控制律,有效地消除了抖振,已成功应用于带有库仑摩擦的机械系统、机器人力臂控制系统中。文[109]将动态滑模控制用于机器人力臂的控制,有效地消除了抖振。文[110]采用动态滑模控制实现了移动机器人的跟踪控制,明显地消除了抖振。文[111]提出了基于多滑模面的动态滑模控制,为了避免求模型及建模误差的微分而导致的奇异问题,采用了动态滑模控制的方法,所设计的方法解决了非匹配不确定高度非线性不确定系统的控制问题。

2.15 积分滑模变结构控制(Integral sliding mode control)

普通的滑模变结构控制在跟踪任意轨迹时,若存在一定的外部扰动,则可能会带来稳态误差,不能达到要求的性能指标。为了解决这一问题,Chern等^[112~116]针对积分滑模变结构控制问题进行了一系列研究,提出了一种积分变结构控制方案,并且在伺服电机、机械臂等系统上得到了成功的应用。然而,常规积分变结构控制具有一定的局限性,它要求控制对象的系统模型是可控标准型,不包括任何零点。为了克服这一局限性,文[117]给出了另一种积分变结构控制方法,该方法成功地解决了对象的局限性,而且在满足匹配的条件下,该方法对于最小相位系统及非最小相位系统均适用。文[118]采

用LMI方法设计积分滑动模面 and 控制器, 实现了针对带有时变延迟对象的积分滑模控制.

2.16 随机系统的滑模变结构控制(Sliding mode control for stochastic systems)

关于滑模控制的研究成果大都是在确定性模型下取得的, 而对于随机系统, 常用的等效控制法不能直接运用, 因此必须通过构造的方法设计随机系统的变结构控制器. 对于随机系统, 滑动模的描述、滑动模的可达性的刻画均是重新研究的问题, 更主要的是, 滑动模的可达性难以研究, 因为随机噪声的出现, 滑动运动方程仍含有开关函数, 滑动模的稳定性研究也有较大的难度. 所以对于随机系统的滑模变结构控制理论的研究进展缓慢. 文[119]在依概率稳定的意义下研究了离散时间随机系统的变结构控制, 文[120]在依概率稳定的意义下研究了一类连续时间随机系统的变结构控制. 文[121]在矩稳定意义下研究了连续时间一般随机系统、滞后随机系统和随机大系统的变结构控制, 提出了随机系统变结构控制设计的一种方法-构造法.

2.17 迭代学习滑模控制(Sliding mode control based on iterative learning tactics)

迭代学习控制可保证系统在重复运行方向的收敛性, 而变结构控制可以保证控制系统在时间轴方向的收敛性. 迭代学习显著的特点是控制算法非常简单, 控制精度很高, 可以达到任意精度跟踪给定, 但其主要问题之一是鲁棒性问题, 虽然已在理论上严格地证明了稳定的充分性条件, 但条件与动态过程参数有关, 且实际动态过程中存在着各种不确定的扰动、偏差. 而变结构控制对于系统参数和外部干扰具有不变性, 因而具有强鲁棒性, 而它的一个明显缺点是系统存在颤抖. 这一明显缺点是由于采用不连续切换控制规律, 系统状态会产生高频颤动, 从而影响控制的精确性. 文[122]将迭代学习控制和滑模控制结合, 并运用于倒立摆系统, 既获得了很高的控制精度, 同时也具有强鲁棒性. 文[123]在考虑可重复跟踪任务时提出了学习变结构控制(LVSC-learning variable structure control), 基于内模原理, 将变结构控制作为鲁棒部分, 而迭代学习作为智能部分, 通过这种方式有机地结合, 完全消除了跟踪误差.

2.18 其他方法(Other sliding mode control tactics)

滑模控制方法还可以与其它方法相结合, 形成具有特色的新的控制方法. 例如, 文[124]针对机器人跟踪周期指令信号的位置控制问题, 为了保证控制系统的鲁棒性, 将基于指数趋近律的滑模控制方法应用于重复控制中, 提出了基于滑模控制的重复鲁

棒控制器, 大大提高了控制的收敛速度和精度. 高阶滑模控制是近年来提出来的新方法, 文[125]提出了一种高阶滑模控制方法, 该方法无需精确的数学模型, 可以有效地消除抖振, 并提高收敛精度.

近年来, 滑模变结构控制方法获得广泛关注, 有大量关于滑模变结构控制理论及仿真设计的著作出版^[126~133]. 同时, 滑模变结构控制在实际控制中逐渐得到推广应用^[134], 如电机与电力系统控制^[127]、机器人控制^[135]、飞行控制^[136]等.

3 结论与展望(Conclusions and prospects)

根据目前滑模控制的发展状况, 作者对未来滑模控制的主要发展方向进行如下预测:

1) 在滑模控制的抖振消除方法中, 每种方法都有各自的优点和局限性. 针对具体的问题需要进行具体的分析. 针对不同的问题, 需要采用不同的方法. 例如, 趋近律方法在不确定性及干扰小情况下会有很好的降抖振效果, 在不确定性或干扰较大时, 需要采用其它方法. 对于同一问题, 可以采用不同的方法. 例如, 对于外加干扰引起的抖振, 可以采用干动态滑模方法来消除抖振, 或采用变切换增益法来降低抖振. 每种方法都有各自的局限性. 针对复杂的控制问题, 需要各种方法相互结合、相互补充, 才能达到理想的无抖振滑模控制. 例如采用模糊或神经网络方法可实现摩擦补偿, 采用干扰观测器法可消除干扰造成的抖振, 采用滤波法可消除未建模动态造成的抖振, 采用准滑动模态法可进一步降低抖振. 又如, 利用遗传算法来优化模糊规则或神经网络, 可达到消除抖振的最佳效果;

2) 在线调整切换项的增益是消除抖振的有效方法. 采用先进的智能方法(模糊算法、神经网络、遗传算法等)在线调整滑模控制切换项的增益, 实现切换项增益的在线优化, 从而最大限度地降低切换项的增益, 是消除滑模控制抖振的有效方法. 但目前在线调整切换项增益的方法实时性较差, 如何设计实时性好的切换项增益估计算法是未来的研究重点;

3) 动态滑模控制理论发展迅速. 动态滑模方法将不连续项转移到控制的一阶或高阶导数中去, 可得到在时间上本质连续的动态滑模控制律, 可从根本上消除抖振. 但目前的动态滑模控制方法主要是基于连续系统, 如何实现离散系统的动态滑模控制是未来的研究重点;

4) 终端滑模控制理论需要进一步发展. 目前终端滑模控制方法主要是指在有限时间内收敛为零. 如何将有限时间扩展到有限空间中去, 实现系统状态在有限空间内收敛为零, 是该方法的进一步发展方向;

5) 离散滑模控制有待深入研究. 目前, 滑模控制

方法的研究主要停留在连续系统的滑模控制设计上,有关离散滑模控制的研究相对较少.模糊滑模控制、神经滑模控制、Terminal滑模控制和反演滑模控制的离散化设计及分析以及多输入多输出离散系统的滑模控制是今后努力的研究方向;

6) 将几种新型滑模控制方法相结合可得到性能更佳的新型滑模控制器.例如,动态滑模控制和终端滑模控制方法过于依赖模型,采用模糊系统和神经网络逼近方法,可实现无需建模的动态滑模控制和终端滑模控制.又如,采用动态滑模控制方法设计终端滑模控制,可实现无抖振的动态终端滑模控制;

7) 新理论和新方法在滑模控制中的应用,为滑模控制理论的发展提供的机遇.由滑模控制的发展进程可见,新理论和新方法的出现(如Backstepping设计方法、LMI设计方法、Terminal吸引子等方法),为滑模控制理论的发展带来了新的生机;

8) 目前,新型滑模控制方法(如Terminal滑模控制、反演滑模控制、动态滑模控制等)大都停留在理论研究阶段.将新型滑模控制方法应用于实际工程系统中,用于解决实际工程问题是未来研究的重点;

9) 对于随机系统,其变结构控制不能由确定型系统的变结构控制理论简单推广而成,对于随机系统滑动模态及其可达性的描述是需要重新研究的问题.高阶系统的滑模控制是最新提出的很有发展前途的新的方法,有许多问题有待研究.

参考文献(References):

- [1] SU W C, DRAKUNOV S V, OZGUNER U, et al. Sliding mode with chattering reduction in sampled data systems[C] // *Proc of the 32nd IEEE Conf on Decision and Control*. San Antonio, USA: IEEE Press, 1993, 12: 2452 – 2457.
- [2] KACHROO P, TOMIZUKA M. Chattering reduction and error convergence in the sliding-mode control of a class of nonlinear systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41(7): 1063 – 1068.
- [3] KANG B P, JU J L. Sliding mode controller with filtered signal for robot manipulators using virtual plant/controller[J]. *Mechatronics*, 1997, 7(3): 277 – 286.
- [4] YANADA H, OHNISHI H. Frequency-shaped sliding mode control of an electrohydraulic servomotor[J]. *J of Systems and Control and Dynamics*, 1999, 213(1): 441 – 448.
- [5] KRUPP D, SHTESSEL Y B. Chattering-free sliding mode control with unmodeled dynamics[C] // *Proc of American Control Conf*. San Diego: IEEE Press, 1999, 6: 530 – 534.
- [6] XU J X, PAN Y J, LEE T.H. A gain scheduled sliding mode control scheme using filtering techniques with applications to multi-link robotic manipulators[J]. *J of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2000, 122(4): 641 – 649.
- [7] KAWAMURA A, ITOH H, SAKAMOTO K. Chattering reduction of disturbance observer based sliding mode control[J]. *IEEE Trans on Industry Applications*, 1994, 30(2): 456 – 461.
- [8] KIM Y S, HAN Y S, YOU W S. Disturbance observer with binary control theory[C] // *Proc of the 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conf*. Baveno, Italy: IEEE Press, 1996, 6: 1229 – 1234.
- [9] LIU H. Smooth sliding mode control of uncertain systems based on a prediction error[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 1997, 7(4): 353 – 372.
- [10] EUN Y, KIM J H, KIM K, et al. Discrete-time variable structure controller with a decoupled disturbance compensator and its application to a CNC servomechanism[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 1999, 7(4): 414 – 422.
- [11] NG K C, LI Y, MURRAY-SMITH D J, SHARMAN K C. Genetic algorithms applied to fuzzy sliding mode controller design[C] // *Proc of the First Int Conf on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications*. Galesia, U K: Institution of Electrical Engineers, 1995, 9: 12 – 14.
- [12] LIN F J, CHOU W D. An induction motor servo drive using sliding-mode controller with genetic algorithm[J]. *Electric Power Systems Research*, 2003, 64(2): 93 – 108.
- [13] 张昌凡, 王耀南, 何静, 等. 遗传算法和神经网络融合的滑模控制系统及其在印刷机中的应用[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(2): 217 – 222. (ZHANG Changfan, WANG Yaonan, HE Jing, et al. GA-NN-integrated sliding-mode control system and its application in the printing press[J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(2): 217 – 222.)
- [14] HWANG C L. Sliding mode control using time-varying switching gain and boundary layer for electrohydraulic position and differential pressure control[J]. *IEE Proc: Control Theory and Applications*, 1996, 143(4): 325 – 332.
- [15] WONG L J, LEUNG F H F, TAM P K S. A chattering elimination algorithm for sliding mode control of uncertain non-linear systems[J]. *Mechatronics*, 1998, 8(7): 765 – 775.
- [16] 林岩, 毛剑琴, 操云甫. 鲁棒低增益变结构模型参考自适应控制[J]. *自动化学报*, 2001, 27(5): 665 – 670. (LIN Yan, MAO Jianqin, CAO Yunpu. A robust VS-MRAC with a low variable structure control gain[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(5): 665 – 670.)
- [17] LIN F J, WAI R J. Sliding-mode-controlled slider-crank mechanism with fuzzy neural network[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2001, 48(1): 60 – 70.
- [18] XU J X, LEE T H, WANG M, YU X H. Design of variable structure controllers with continuous switching control[J]. *Int J Control*, 1996, 65(3): 409 – 431.
- [19] YANG D Y, YAMANE Y, ZHANG X J, ZHU R Y. A new method for suppressing high-frequency chattering in sliding mode control system[C] // *Proc of the 36th SICE Annual Conf*. Tokyo, Japan: IEEE Press, 1997, 7: 1285 – 1288.
- [20] KONNO Y, HASHMOTO H. Design of sliding mode dynamics in frequency domain[C] // *IEEE Workshop on Variable Structure and Lyapunov Control of Uncertain Dynamical Systems*. Sheffield, U.K: IEEE Press, 1992, 2: 120 – 125.
- [21] EDWARDS C. A practical method for the design of sliding mode controllers using linear matrix inequalities[J]. *Automatica*, 2004, 40(10): 1761 – 1769.
- [22] SLOTINE J J, SASTRY S S. Tracking control of nonlinear systems using sliding surfaces with application to robot manipulator[J]. *Int J Control*, 1983, 38(2): 465 – 492.
- [23] CHUNG S C Y, LIN C L. A transformed Lure problem for sliding mode control and chattering reduction[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(3): 563 – 568.

- [24] XU J X, LEE T H, PAN Y J. On the sliding mode control for DC servo mechanisms in the presence of unmodeled dynamics[J]. *Mechatronics*, 2003, 13(7): 755 – 770.
- [25] ERBATUR K, KAWAMURA A. Chattering elimination via fuzzy boundary layer tuning[C] // *Proc of the 28th Annual Conf of the Industrial Electronics Society*. Sevilla, Spain: IEEE Press, 2002, 11: 2131 – 2136.
- [26] CHEN M S, HWANG Y R, TOMIZUKA M. A state-dependent boundary layer design for sliding mode control[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(10): 1677 – 1681.
- [27] VICENTE P V, GERD H. Chattering-free sliding mode control for a class of nonlinear mechanical systems[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 2001, 11(12): 1161 – 1178.
- [28] SESHAGIRI S, KHALIL H K. On introducing integral action in sliding mode control[C] // *Proc of the 41st IEEE Conf on Decision and Control*. Las Vegas: IEEE Press, 2002, 12: 1473 – 1478.
- [29] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [30] 翟长连, 吴智铭. 一种离散时间系统的变结构控制方法[J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(5): 719 – 722.
(ZHAI Changlian, WU Zhiming. Variable structure control method for discrete time systems[J]. *Shanghai Transportation University College Journal*, 2000, 34(5): 719 – 722.)
- [31] 于双和, 强文义, 傅佩琛. 无抖振荡离散准滑模控制[J]. 控制与决策, 2001, 16(3): 380 – 382.
(YU Shuanghe, QIANG Wenyi, FU Peichen. Chattering-free Discrete Quasi-sliding Mode Controller[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(3): 380 – 382.)
- [32] JIANG K, ZHANG J G, CHEN Z M. A new approach for the sliding mode control based on fuzzy reaching law[C] // *Proc of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Shanghai, China: Press of University of Science and Technology of China, 2002, 6: 656 – 660.
- [33] SARPTURK S Z, ISTEфанOPULOS Y, KAYNAK O. On the stability of discrete-time sliding mode control system[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1987, 32(10): 930 – 932.
- [34] FURUTA K. Sliding mode control of a discrete system[J]. *Systems & Control Letters*, 1990, 14(2): 145 – 152.
- [35] GAO W B, WANG Y F, HOMAIFA A. Discrete-time variable structure control systems[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1995, 42(2): 117 – 122.
- [36] PAN Y D, FURATA K. Discrete-time VSS Controller Design[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 1997, 7(4): 373 – 386.
- [37] KOSHKOU EI A J, ZINOBER A S I. Sliding mode control of discrete-time systems[J]. *J of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2000, 122(4): 793 – 802.
- [38] KIM J H, OH S H, CHO D I, HEDRICK J K. Robust discrete-time variable structure control methods[J]. *J of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2000, 122(4): 766 – 775.
- [39] EMELYANOV S V, KOROVIN S K, MAMEDOV I G. *Variable Structure Control Systems: Discrete and Digital*[M]. Moscow, Russia: CRC Pr I Llc, 1995.
- [40] CHEN X K. Adaptive sliding mode control for discrete-time multi-input multi-output systems[J]. *Automatica*, 2006, 42(3): 427 – 435.
- [41] SIRA R H, LLANES S O. Adaptive dynamical sliding mode control via backstepping[C] // *Proc of the 32nd IEEE Conf on Decision and Control*. San Antonio, USA: IEEE Press, 1993, 12: 1422 – 1427.
- [42] BOLIVAR M R, ZINOBER A S I, SIRA R H. Dynamic Adaptive sliding mode output tracking control of a class of nonlinear systems[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 1997, 7(4): 387 – 405.
- [43] LIN F J, CHIU S L, SHYU K K. Novel sliding mode controller for synchronous motor drive[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(2): 532 – 542.
- [44] WHEELER G, SU C H, STEPANENKO Y. A sliding mode controller with improved adaptation laws for the upper bounds on the norm of uncertainties[J]. *Automatica*, 1998, 34(12): 1657 – 1661.
- [45] BEKIROGLU N, BOZMA H I, ISTEфанOPULOS Y. Model reference adaptive approach to sliding mode control[C] // *Proc of American Control Conf*. Washington: IEEE Press, 1995, 6: 1028 – 1032.
- [46] SONG J B, ISHIDA Y. A Robust Sliding Mode Control for Pneumatic Servo Systems[J]. *Int J of Engineering Science*, 1997, 35(8): 711 – 723.
- [47] KWAN C M. Sliding mode control of linear systems with mismatched uncertainties[J]. *Automatica*, 1995, 31(2): 303 – 307.
- [48] CHOI H H. A new method for variable structure control system design: A linear matrix inequality approach[J]. *Automatica*, 1997, 33(11): 2089 – 2092.
- [49] CHOI H H. An explicit formula of linear sliding surface for a class of uncertain dynamic systems with mismatched uncertainties[J]. *Automatica*, 1998, 34(8): 1015 – 1020.
- [50] CHOI H H. On the existence of linear sliding surface for a class of uncertain dynamic systems with mismatched uncertainties[J]. *Automatica*, 1999, 35: 1707 – 1715.
- [51] LI J. Backstepping variable structure control of nonlinear systems with unmatched uncertainties[C] // *Proc of the 14th IFAC World Congress*. Beijing: Elsevier Science Press, 1999, 7: 67 – 71.
- [52] KOSHKOU EI A J, ZINOBER A S I. Adaptive backstepping control of nonlinear systems with unmatched uncertainty[C] // *Proc of the 39th IEEE Conf on Decision and Control*. Sydney, Australia: IEEE Press, 2000, 12: 4765 – 4770.
- [53] GOUAISBAUT F, PERRUQUETTI W, RICHARD J P. A sliding mode control for linear systems with input and state delays[C] // *Proc of the 38th IEEE Conf on Decision and Control*. Phoenix, USA, 1999, 12: 4234 – 4239.
- [54] CHOU C H, CHENG C C. Decentralized mode following variable structure control for perturbed large scale systems with time-delay interconnections[C] // *Proc of American Control Conf*. Chicago: IEEE Press, 2000, 6: 641 – 645.
- [55] XIA Y Q, JIA Y M. Robust sliding-mode control for uncertain time-delay systems: a LMI approach[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(6): 1086 – 1091.
- [56] SHTESSEL Y B, ZINOBER A S I, SHKOLNIKOV I A. Sliding mode control for nonlinear systems with output delay via method of stable center[J]. *J of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2003, 125: 158 – 165.
- [57] 胡跃明, 周其节. 带有滞后影响的控制系统的变结构控制[J]. 自动化学报, 1991, 17(5): 587 – 591.
(HU Yueming, ZHOU Qijie. Variable structure control for a control system with time-delay[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1991, 17(5): 587 – 591.)
- [58] 郑锋, 程勉, 高为炳. 一类时滞系统的变结构控制[J]. 自动化学报, 1995, 21(2): 221 – 225.
(ZHENG Feng, CHENG Mian, GAO Weibing. Variable structure control of a class of time-delay system[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1995, 21(2): 221 – 225.)
- [59] 高存臣, 袁付顺, 肖会敏. 时滞变结构控制系统[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [60] UTKIN V I. *Sliding Modes in Control Optimization*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- [61] CHANG Y F, CHEN B S. A robust performance variable structure PI/P control design for high precise positioning control systems[J]. *Int J of Machine Tools and Manufacture*, 1995, 35(12): 1649 – 1667.

- [62] LU X Y, SPURGEON S K. Control of nonlinear non-minimum phase systems using dynamic sliding mode[J]. *Int J of System Science*, 1999, 30(2): 183 – 198.
- [63] WANG J, ZHENG Y, LU X P. Robust output tracking of constrained nonlinear systems[C] // *Proc of 14th IFAC World Congress*, Beijing, China: Pergamon Press, 1999, 7: 37 – 40.
- [64] BARTOLINI G, FERRARA A, GIACOMINI L. Modular backstepping design of an estimation-based sliding mode controller for uncertain nonlinear plants[C] // *Proc of 1998 American Control Conf*. Philadelphia: IEEE Press, 1998, 6: 574 – 578.
- [65] MAN Z H, PAPLINSKI A P, WU H R. A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robot manipulators[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(12): 2464 – 2469.
- [66] YU X H, MAN Z H. Model reference adaptive control systems with terminal sliding modes[J]. *Int J Control*, 1996, 64(6): 1165 – 1176.
- [67] MAN Z H, YU X H. Terminal sliding mode control of MIMO linear systems[C] // *Proc of the 35th IEEE Conf on Decision and Control*. Kobe, Japan: IEEE Press, 1996, 12: 4619 – 4624.
- [68] WU Y, YU X H, MAN Z H. Terminal sliding mode control design for uncertain dynamic systems[J]. *Systems & Control Letters*, 1998, 34(5): 281 – 288.
- [69] FENG Y, YU X H, MAN Z H. Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators[J]. *Automatica*, 2002, 38(2): 2159 – 2167.
- [70] TAO C W, TAUR J S, CHAN M L. Adaptive fuzzy terminal sliding mode controller for linear systems with mismatched time-varying uncertainties[J]. *IEEE Trans on Systems*, 2003, Part B: 1 – 8.
- [71] Park K B, TERUO T. Terminal sliding mode control of second-order nonlinear uncertain systems[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 1999, 9(11): 769 – 780.
- [72] 庄开宇, 张克勤, 苏宏业, 褚健. 高阶非线性系统的Terminal滑模控制[J]. 浙江大学学报, 2002, 36(5): 482 – 485.
(ZHUANG Kaiyu, ZHANG Keqin, SU Hongye, CHU Jian. Terminal sliding mode control for high-order nonlinear dynamic systems[J]. *J of Zhejiang University*, 2002, 36(5): 482 – 485.)
- [73] ZHUANG K Y, SU H Y, ZHANG K Q, CHU J. Adaptive terminal sliding mode control for high order nonlinear dynamic systems[J]. *J of Zhejiang University Science*, 2003, 4(1): 58 – 63.
- [74] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [75] LU Y S, CHEN J S. Design of a global sliding-mode controller for a motor drive with bounded control[J]. *Int J Control*, 1995, 62(5): 1001 – 1019.
- [76] CHOI H S, PARK Y H, CHO Y S, LEE M H. Global Sliding Mode Control[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(3): 27 – 35.
- [77] 肖雁鸿, 葛召炎, 周靖林, 等. 全滑模变结构控制系统[J]. 电机与控制学报, 2002, 6(3): 233 – 236.
(XIAO Yanhong, GE Zhaoyan, ZHOU Jinglin, et al. Global sliding mode variable structure control system[J]. *The Electric Machine and the Control College Journal*, 2002, 6(3): 233 – 236.)
- [78] 米阳, 李文林, 井元伟, 等. 线性多变量离散系统全程滑模变结构控制[J]. 控制与决策, 2003, 18(4): 460 – 464.
(MI Yang, LI Wenlin, JING Yuanwei, et al. Global sliding mode control for uncertain discrete time systems[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(4): 460 – 464.)
- [79] YU X H, XU J X, Ed. *Variable Structure Systems: Towards the 21th Century*[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
- [80] ZHENG Y H, FATTAH H A A, LOPARO K A. Non-linear adaptive sliding mode observer-controller scheme for induction motors[J]. *Int J of Adaptive Control and Signal Processing*, 2000, 14(3): 245 – 273.
- [81] TAN C P, EDWARDS C. Sliding mode observers for robust detection and reconstruction of actuator and sensor faults[J]. *Int J of Robust and Nonlinear Control*, 2003, 13(5): 443 – 463.
- [82] KIM S M, HAN W Y, KIM S J. Design of a new adaptive sliding mode observer for sensorless induction motor drive[J]. *Electric Power Systems Research*, 2004, 70(1): 16 – 22.
- [83] LEE S S, PARK J K. Design of power system stabilizer using observer/sliding mode, observer/sliding mode-model following and H/sliding mode controllers for small-signal stability study[J]. *Int J of Electrical Power & Energy Systems*, 1998, 20(8): 543 – 553.
- [84] MORIOKA H, WADA K, SABANOVIC A, JEZERNIK K. Neural network based chattering free sliding mode control[C] // *Proc of the 34th SICE Annual Conf*. Tokyo, Japan: IEEE Press, 1995, 7: 1303 – 1308.
- [85] ERTUGRUL M, KAYNAK O. Neuro Sliding Mode Control of Robotic Manipulators[J]. *Mechatronics*, 2000, 10(1-2): 239 – 263.
- [86] HUANG S J, HUANG K S, CHIOU K C. Development and application of a novel radial basis function sliding mode controller[J]. *Mechatronics*, 2003, 13(4): 313 – 329.
- [87] DA F P. Decentralized sliding mode adaptive controller design based on fuzzy neural networks for interconnected uncertain nonlinear systems[J]. *IEEE Trans on Neural Networks*, 2000, 11(6): 1471 – 1480.
- [88] LIN S C, CHEN Y Y. RBF network based sliding mode control[C] // *IEEE Int Conf on Systems, Man, and Cybernetics*. San Antonio, USA: IEEE Press, 1994, 10: 1957 – 1961.
- [89] MUNOZ D, D.SBARBARO D. An adaptive sliding-mode controller for discrete nonlinear systems[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2000, 47(3): 574 – 581.
- [90] MAN Z H, YU X H, ESHRAGHIAN K, PALANISWAMI M. A robust adaptive sliding mode tracking control using an RBF neural network for robotic manipulators[C] // *IEEE Int Conf on Neural Networks*. Perth, Australia: IEEE Press, 1995, 11: 2403 – 2408.
- [91] CARRASCO J M, QUERO J M, RIDAO F P, PERALES M A, FRANQUELO. Sliding mode control of a DC/DC PWM converter with PFC implemented by neural networks[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, 1997, 44(8): 743 – 749.
- [92] PARMA G G, MENEZES B R, BRAGA A P, COSTA M A. Sliding mode neural network control of an induction motor drive[J]. *Int J of Adaptive Control and Signal Processing*, 2003, 17(6): 501 – 508.
- [93] HA Q P, NGUYEN Q H, RYE D C, DURRANT-WHYTE H F. Fuzzy sliding-mode controllers with applications[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2001, 48(1): 38 – 41.
- [94] ZHUANG K Y, SU H Y, CHU J, ZHUANG K Q. Globally stable robust tracking of uncertain systems via fuzzy integral sliding mode control[C] // *WCICA2000*. Hefei, China: Press of University of Science and Technology of China, 2000, 6: 1827 – 1831
- [95] RYU S H, PARK J H. Auto-tuning of sliding mode control parameters using fuzzy logic[C] // *Proc of American Control Conf*. Arlington, USA: IEEE Press, 2001, 6: 618 – 623.
- [96] 张天平, 冯纯伯. 基于模糊逻辑的连续滑模控制[J]. 控制与决策, 1995, 10(6): 503 – 507.
(ZHANG Tianping, FENG Chunbo. Fuzzy logic based continuous sliding mode control[J]. *Control and Decision*, 1995, 10(6): 503 – 507.)
- [97] Lin C M, MON Y J. Decoupling control by hierarchical fuzzy sliding-mode controller[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 2005, 13(4): 593 – 598.
- [98] KIM S W, LEE J J. Design of a fuzzy controller with fuzzy sliding surface[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1995, 71(3): 359 – 367.

- [99] YOO B, HAM W. Adaptive fuzzy sliding mode control of nonlinear system[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1998, 6(2): 315 – 321.
- [100] LU Y S, CHEN J S. A self-organizing fuzzy sliding-mode controller design for a class of nonlinear servo systems[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1994, 41(5): 492 – 502.
- [101] LIANG C Y, SU J P. A new approach to the design of a fuzzy sliding mode controller[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2003, 139(1): 111 – 124.
- [102] WAI R J, LIN C M, HSU C F. Adaptive fuzzy sliding-mode control for electrical servo drive[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2004, 143(2): 295 – 310.
- [103] CHEN J Y. Expert SMC-based fuzzy control with genetic algorithms[J]. *J of the Franklin Institute*, 1999, 336(4): 589 – 610.
- [104] LABIOD S, BOUCHERIT M S, GUERRA T M. Adaptive fuzzy control of a class of MIMO nonlinear systems[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, 151(1): 59 – 77.
- [105] BARTOLINI G, FERRARA A, USANI E. Chattering avoidance by second-order sliding mode control[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(2): 241 – 246.
- [106] BARTOLINI G, FERRARA A, USAI E, UTKIN V I. On multi-input chattering-free second-order sliding mode control[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(9): 1711 – 1717.
- [107] BARTOLINI G, PUNTA E. Chattering elimination with second-order sliding modes robust to coulomb friction[J]. *J of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2000, 122(4): 679 – 686.
- [108] BARTOLINI G, PISANO A, PUNTA E, USAI E. A Survey of applications of second-order sliding mode control to mechanical systems[J]. *Int J Control*, 2003, 76(9): 875 – 892.
- [109] HAMERLAIN M, YOUSSEF T, BELHOCINE M. Switching on the derivative of control to reduce chatter[J]. *IEE Proc: Control Theory and Applications*, 2001, 148(1): 88 – 96.
- [110] 晁红敏, 胡跃明. 动态滑模控制及其在移动机器人输出跟踪中的应用, 控制与决策, 2001, 16(5): 565 – 568.
(CHAO Hongmin, HU Yueming. Dynamical sliding mode control and its applications to output tracking of mobile robots[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(5): 565 – 568.)
- [111] HEDRICK J K, YIP P P. Multiple sliding surface control: theory and application[J]. *J of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2000, 122(4): 586 – 593.
- [112] CHERN T L, WU Y C. Design of integral variable structure controller and application to electrohydraulic velocity servosystems[J]. *IEE Proceedings-D*, 1991, 138(5): 439 – 444.
- [113] CHERN T L, WU Y C. Integral variable structure control approach for robot manipulators[J]. *IEE Proceedings-D*, 1992, 139(2): 161 – 166.
- [114] CHERN T L, WU Y C. An optimal variable structure control with integral compensation for electrohydraulic position servo control systems[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1992, 39(5): 460 – 463.
- [115] CHERN T L, WU Y C. Design of brushless DC position servo systems using integral variable structure approach[J]. *IEE Proceedings-B*, 1993, 140(1): 27 – 34.
- [116] CHERN T L, WONG J S. DSP based integral variable structure control for motor servo drives[J]. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 1995, 142(5): 444 – 450.
- [117] WANG J D, LEE T L, JUANG Y T. New methods to design an integral variable structure controller[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41(1): 140 – 143.
- [118] NIU Y G, HO D W C, LAM J. Robust integral sliding mode control for uncertain stochastic systems with time-varying delay[J]. *Automatica*, 2005, 41: 873 – 880.
- [119] ZHENG F, CHEN M, GAO W B. Variable Structure Control of Stochastic Systems[J]. *Systems & Control Letters*, 1994, 22(3): 209 – 222.
- [120] 夏常弟, 李治. 具有随机量测噪声的变结构控制[J]. 控制与决策, 1994, 9(3): 226 – 229.
(XIA Changdi, LI Zhi. Variable structure control with stochastic measurement noises[J]. *Control and Decision*, 1994, 9(3): 226 – 229.)
- [121] 邓飞其, 冯昭枢, 刘永清. 随机系统的变结构控制[J]. 自动化学报, 1997, 23(2): 267 – 270.
(DENG Feiqi, FENG Zhaoshu, LIU Yongqing. Variable structure control for stochastic system[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1997, 23(2): 267 – 270.)
- [122] SHAO J Y, QI X D, HAN R C, PAN F, ZHI Z Y. Application of an iterative learning-sliding mode controller to inverse pendulum system[C] // *Proc of the Third Int Conf on Machine Learning and Cybernetics*. Shanghai, China: IEEE Press, 2004, 8: 788 – 791.
- [123] XU J X, CAO W J. Learning variable structure control approaches for repeatable tracking control tasks[J]. *Automatica*, 2001, 37(7): 997 – 1006.
- [124] LIU T S, LEE W S. A repetitive learning method based on sliding mode for robot control[J]. *J of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2000, 122(1): 40 – 48.
- [125] LEVANT A. Homogeneity approach to high-order sliding mode design[J]. *Automatica*, 2005, 41(5): 823 – 830.
- [126] EDWARDS C, SPURGEON S K. *Sliding Mode Control, Theory and Applications*[M]. Taylor & Francis, 1998.
- [127] UTKIN A, GULDNER SHI J X. *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*[M]. Taylor & Francis, 1999.
- [128] YU X H, XU J X. *Advances in Variable Structure Systems*[M]. Singapore: World Scientific Publishing, 2000.
- [129] PERRUQUETTI W, BARBOT J P. *Sliding Mode Control in Engineering*[M]. New York, American: Marcel Dekker Inc, 2002.
- [130] 胡跃明, 周其节. 分布参数变结构控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [131] 姚琼荪, 黄继起, 吴汉松. 变结构控制系统[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1997.
- [132] 胡跃明. 变结构控制理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [133] 刘金琨. 滑模变结构控制Matlab仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [134] YOUNG K D, UTKIN V I, OZGUNER U. A control engineer's guide to sliding mode control[J]. *IEEE Trans on Control Systems Technology*, 1999, 7(3): 328 – 342.
- [135] YANG J M, KIM J H. Sliding mode motion control of nonholonomic mobile robots[J]. *Control Systems Magazine*, 1999, 19(1): 15 – 23.
- [136] YEH F K, CHIEN H H, FU L C. Design of optimal midcourse guidance sliding-mode control for missiles with TVC[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(3): 824 – 837.

作者简介:

刘金琨 (1965—), 男, 副教授, 主要研究方向为滑模控制、智能控制, E-mail: ljk@buaa.edu.cn;

孙富春 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为鲁棒控制、智能控制。