

第 1 章 绪 论

1.1 滑模变结构控制简介

变结构控制(variable structure control, VSC)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。这种控制策略与其他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,所以又常称变结构控制为滑动模态控制(sliding mode control, SMC),即滑模变结构控制。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。

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设计方法,适用于线性与非线性系统、连续与离散系统、确定性与不确定性系统、集中参数与分布参数系统、集中控制与分散控制等。并且在实际工程中逐渐得到推广应用,如电机与电力系统控制、机器人控制、飞机控制、卫星姿态控制等。这种控制方法通过控制量的切换使系统状态沿着滑模面滑动,使系统在受到参数摄动和外干扰时具有不变性,正是这种特性使得变结构控制方法受到各国学者的重视。

1.2 变结构控制发展历史

变结构控制的发展过程大致可分为三个阶段。

(1) 1957—1962 年

此阶段为研究的初级阶段。前苏联的学者 Utkin 和 Emelyanov 在 20 世纪 50 年代提出了变结构控制的概念,其基本研究对象为二阶线性系统。

(2) 1962—1970 年

60 年代的学者开始针对高阶线性系统进行研究,但仍然限于单输入、单输出系统。主要讨论了高阶线性系统在线性切换函数下控制受限与不受限及二次型切换函数的情况。

(3) 1970 年以后

在线性空间上研究线性系统的变结构控制。主要结论为变结构控制对摄动及干扰具有不变性。1977 年, V. I. Utkin 发表了一篇有关变结构控制方面的综述论文^[1],提出了滑模变结构控制 VSC 和滑模控制 SMC 的方法。此后,各国学者对变结构控制的研究兴趣急剧上升,开始研究多维变结构系统和多维滑动模态,对变结构控制系统的研究由规范空间扩展到更一般的状态空间。K. D. Young 等^[2]从工程的角度,对滑模控制进行了全面的分析,并

对滑模控制所产生的抖振进行了精确的分析和评估,针对连续系统中的抑制抖振给出了七种解决方法,并针对离散系统在三种情况下的滑模设计进行了分析,为滑模控制在工程上的应用提供了有益的指导。

对变结构控制的研究大多集中在滑动模态上,而对进入切换面之前的运动,即正常的运动段研究较少。中国学者高为炳院士等^[3]首先提出了趋近律的概念,列举了诸如等速趋近律、指数趋近律、幂次趋近律直到一般趋近律,高氏等还首次提出了自由递阶的概念。

在解决十分复杂的非线性系统的综合问题时,变结构系统理论作为一种综合方法得到重视。但是滑模变结构对系统的参数摄动和外部干扰的不变性是以控制量的高频抖振换取的,由于在实际应用中,这种高频抖振在理论上是无限快的,没有任何执行机构能够实现;同时,这样的高频输入很容易激发系统的未建模特性,从而影响系统的控制性能。因而抖振现象给变结构控制在实际系统中的应用带来了困难。

由于人们认识到变结构系统中的滑动模态具有不变性,这种理想的鲁棒性对工程应用也是很有吸引力的。高精度伺服系统存在着许多不利于控制系统设计的因素,如非线性因素、外干扰及参数摄动等。由于离散滑模变结构控制自身的缺点,将其直接应用到高精度的伺服系统中将会有一定的困难,因为控制输出的高频抖振会损坏伺服系统中的电机和其他设备。要将离散滑模变结构控制应用到伺服系统中,使其真正发挥它的强鲁棒性,必须对传统的离散滑模变结构控制进行改进,并针对抖振现象改进离散滑模控制器,将有害的抖振减小到一定程度,并且又要保证滑模控制的不变性。因此,对传统的离散滑模变结构控制的改进、抖振的削弱成为研究的重点。

1.3 滑模变结构控制基本原理

滑模变结构控制是变结构控制系统的一种控制策略。这种控制策略与常规控制的根本区别在于控制的不连续性,即一种使系统“结构”随时间变化的开关特性。该控制特性可以迫使系统在一定特性下沿规定的状态轨迹作小幅度、高频率的上下运动,即所谓的“滑动模态”或“滑模”运动。这种滑动模态是可以设计的,且与系统的参数及扰动无关。这样,处于滑模运动的系统就具有很好的鲁棒性。

滑动模态控制的概念和特性如下：

(1) 滑动模态定义及数学表达

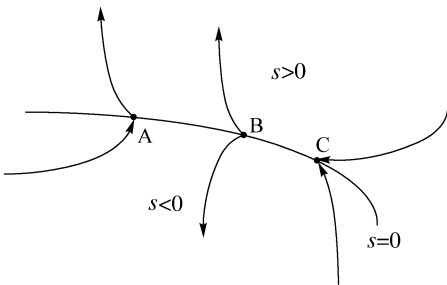


图 1-1 切换面上三种点的特性

考虑一般的情况,在系统

$$\dot{x} = f(x) \quad x \in \mathbf{R}^n \tag{1.1}$$

的状态空间中,有一个切换面 $s(x) = s(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$,它将状态空间分成上下两部分 $s > 0$ 及 $s < 0$ 。在切换面上的运动点有三种情况,如图 1-1 所示。

通常点——系统运动点运动到切换面 $s = 0$ 附近时,穿越此点而过(点 A);

起始点——系统运动点到达切换面 $s = 0$ 附

近时,从切换面的两边离开该点(点 B);

终止点——系统运动点到达切换面 $s=0$ 附近时,从切换面的两边趋向于该点(点 C)。

在滑模变结构中,通常点与起始点无多大意义,而终止点却有特殊的含义。因为如果在切换面上某一区域内所有的运动点都是终止点,则一旦运动点趋近于该区域,就会被“吸引”到该区域内运动。此时,称在切换面 $s=0$ 上所有的运动点都是终止点的区域为“滑动模态”区,或简称为“滑模”区。系统在滑模区中的运动就叫做“滑模运动”。

按照滑动模态区上的运动点都必须是终止点这一要求,当运动点到达切换面 $s(x)=0$ 附近时,必有

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s} \leq 0 \quad \text{及} \quad \lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{s} \geq 0 \quad (1.2)$$

或者

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s} \leq 0 \leq \lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{s} \quad (1.3)$$

式(1.3)也可写成

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \dot{s} \leq 0 \quad (1.4)$$

此不等式对系统提出了一个形如

$$v(x_1, x_2, \dots, x_n) = [s(x_1, x_2, \dots, x_n)]^2 \quad (1.5)$$

的李雅普诺夫(Lyapunov)函数的必要条件。由于在切换面邻域内函数式(1.5)是正定的,而按照式(1.4), s^2 的导数是负半定的,也就是说在 $s=0$ 附近 v 是一个非增函数,因此,如果满足条件式(1.4),则式(1.5)是系统的一个条件李雅普诺夫函数。系统本身也就稳定于条件 $s=0$ 。

(2) 滑模变结构控制的定义

滑模变结构控制的基本问题如下:

设有一控制系统

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad x \in \mathbf{R}^n, u \in \mathbf{R}^m, t \in \mathbf{R} \quad (1.6)$$

需要确定切换函数

$$s(x), \quad s \in \mathbf{R}^m \quad (1.7)$$

求解控制函数

$$u = \begin{cases} u^+(x) & s(x) > 0 \\ u^-(x) & s(x) < 0 \end{cases} \quad (1.8)$$

其中, $u^+(x) \neq u^-(x)$, 使得

① 滑动模态存在,即式(1.8)成立;

② 满足可达性条件,在切换面 $s(x)=0$ 以外的运动点都将于有限的时间内到达切换面;

③ 保证滑模运动的稳定性;

④ 达到控制系统的动态品质要求。

上面的前三点是滑模变结构控制的三个基本问题,只有满足了这三个条件的控制才叫滑模变结构控制。

1.4 滑模变结构控制理论的研究方向

1.4.1 滑模变结构控制系统的抖振问题

从理论角度上讲,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界干扰无关,因此滑模变结构控制系统的鲁棒性要比一般常规的连续系统强。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,都将会在光滑的滑模面上叠加一个锯齿形的轨迹。于是,在实际系统中,抖振是必定存在的,而且若消除了抖振,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。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模面上叠加一个衰减的三角波。

(2) 空间滞后开关

开关的空间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无限大,因而系统的控制力也不能无限大,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体的表面上。因此有衰减的抖振,而且锥形体越大,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的控制的不连续性是抖振发生的根本原因。

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抖振,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,关于变结构控制信号抖振消除的研究成为变结构控制研究的首要问题。

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,有代表性的研究工作主要有以下几方面。

(1) 准滑动模态方法

20 世纪 80 年代 Slotine 等^[4]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,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,有许多学者对切换函数和边界层的设计进行了研究。

① 连续函数近似法

S. C. Y. Chung 等^[5]采用 Sigmoid 连续函数来代替切换函数。J. X. Xu 等^[6]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,控制效果变差。为了获得最佳抗抖振效果,边界层厚度应自适应调整。

K. Erbaturo 等^[7]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 ,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。M. S. Chen 等^[8]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。P. V. Vicente 等^[9]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 s ,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。S. Seshagiri 等^[10]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) 趋近律方法

高为炳^[3]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。以指数趋近律 $\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - ks$ 为例,通过调整趋近律的参数 k 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。翟长连等^[11]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。于双和等^[12]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,采用抗干扰的离散等效控制,这样既保证了趋近模态具有良好的品质,又降低了准滑动模态带,消除了抖振。K. Jiang 等^[13]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 ϵ 和 k 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。

(3) 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。

W. C. Su 等^[14] 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。P. Kachroo 等^[15] 在边界层内,对切换函数 $s(x)$ 采用了低通滤波器,得到平滑的 $s(x)$ 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。B. P. Kang 等^[16] 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。H. Yanada 等^[17] 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,实现了存在未建模动态的电液伺服马达的定位控制。D. Krupp 等^[18] 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 s 的系数通过滑模观测器得到。J. X. Xu 等^[19] 提出了一种新型控制律,即 $u = u_c + K(t)u_s + u_v$,该控制律由三部分构成,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,其中通过一个低通滤波器得到切换项的增益 $K(t)$,通过另一个低通滤波器得到等效控制项 $u_v(t)$,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。

(4) 观测器方法

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项成为解决抖振问题研究的重点。

A. Kawamura 等^[20] 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,大大降低了滑模控制器中切换项的增益,有效地消除了抖振。Y. S. Kim 等^[21] 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。H. Liu^[22] 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。Y. Eun 等^[23] 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,相对减小了切换增益。宋立忠等^[24] 提出了一种新型离散趋近律,其特点是可以使系统状态稳定于原点,并针对系统的不确定部分设计了扰动预测器,对常值或变化率较慢的扰动具有很高的估计精度,有效地减弱了抖振。

(5) 动态滑模方法

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 s 通过微分环节构成新的切换函数 σ ,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。

G. Bartolini 等^[25~28]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,该方法已成功地应用于带有库仑摩擦的机械系统及机器人力臂控制系统中。M. Hamerlain 等^[29]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。晁红敏等^[30]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。

(6) 模糊方法

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。

Q. P. Ha 等^[31]采用等效控制、切换控制和模糊控制三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,有效地降低了抖振。K. Y. Zhuang 等^[32]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。S. H. Ryu 等^[33]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值,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。张天平等^[34]提出了一种基于模糊逻辑的连续滑模控制方法,使用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。孙宜标等^[35]提出了一种基于模糊自学习的滑模变结构控制方法,控制器输出为 $u = u_{eq} + u_{vss}$,即采用模糊滑模控制器来代替滑模控制的切换部分 u_{vss} ,保证了控制律的连续性,通过模糊基函数的自学习,达到满足滑模存在条件和减少抖振的目的。

(7) 神经网络方法

H. Morioka 等^[36]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。M. Ertugrul 等^[37]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,该方法已成功地应用于机器人的轨迹跟踪。S. J. Huang 等^[38]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 s 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。达飞鹏等^[39]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符号函数,保证了控制律的连续性,从根本上消除了抖振。

(8) 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、可并行性和高效率,具有很高的优化性能。

K. C. Ng 等^[40]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。

F. J. Lin 等^[41]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, F. J. Lin 等开发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。C. F. Zhang 等^[42]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。

(9) 切换增益方法

由于抖振主要是由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。

C. L. Hwang^[43]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。L. J. Wong 等^[44]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。林岩等^[45]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。F. J. Lin 等^[46]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。

(10) 扇形区域法

J. X. Xu 等^[47]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。D. Y. Yang 等^[48]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。

(11) 其他方法

Y. Konno 等^[49]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 H_∞ 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。C. Edwards^[50]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, 线性矩阵不等式) 的方法设计滑动模面,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。

上述各种方法中,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。

(1) 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的情况下会有很好的降抖振效果,在不确定性或干扰较大时,需要采用其他方法。

(2) 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。

(3) 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。

1.4.2 离散系统滑模变结构控制

连续时间系统和离散时间系统的控制有很大差别。自 20 世纪 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 20 世纪 80 年代末开始的,例如, S. Z. Sarpturk 等^[51]于 1987 年提出了一种新型离散滑模到达条件,并在此基础上提出了离散控制信号必须是有界的理论; K. Furuta^[52]于 1990 年提出了基于等效控制的离散滑模变结构控制; 高为炳^[53]于 1995 年提出了基于趋近律的离散滑模变结构控制。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。近年来国内外学者对离散系统滑模变结构控制的研究不断深入。Y. D. Pan 等^[54]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。A. J. Koshkouei 等^[55]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, J. H. Kim 等^[56]提出了三种解决方法,在第一种方法中,采用了干扰补偿器和解耦器消除干扰;在第二种方法中,采用回归切换函数方法来消除干扰;在第三种方法中,采用回归切换函数和解耦器相结合的方法来消除干扰。上述三种方法已成功地应用于数控中。S. V. Emelyanov 等^[57]针对数字滑模控制的鲁棒性进行了系统的研究,设计出了高增益数字滑模控制器。

1.4.3 自适应滑模变结构控制

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。R. H. Sira 等^[58]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。M. R. Bolivar 等^[59]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, F. J. Lin 等^[60]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, G. Wheeler 等^[61]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(VSS-MRAC)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。N. Bekiroglu

等^[62]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。J. B. Song 等^[63]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抖振的有效方法。

1.4.4 非匹配不确定性系统的滑模变结构控制

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成为一个研究重点。C. M. Kwan^[64]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,H. H. Choi^[65~67]针对非匹配不确定性系统,专门研究了利用 LMI 方法进行变结构控制设计的问题。Backstepping 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,J. Li^[68]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,A. J. Koshkouei 等^[69]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。

1.4.5 针对时滞系统的滑模变结构控制

由于实际系统普遍存在状态时滞、控制变量时滞问题,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。F. Gouaisbaut 等^[70]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。C. H. Chou 等^[71]研究了带有时滞关联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。Y. Q. Xia 等^[72]采用趋近律的方法设计了一种新型控制器,采用基于 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,解决了非匹配不确定性时滞系统的变结构控制问题。Y. B. Shtessel 等^[73]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。

1.4.6 非线性系统的滑模变结构控制

非线性系统的滑模变结构控制一直是人们关注的热点。V. I. Utkin^[74]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。Y. F. Chang 等^[75]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,可以实现当输出为饱和时的高精度变结构控制,X. Y. Lu 等^[76]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