非线性控制系统镇定的若干进展*

陈彭年　韩正之　张钟俊
（上海交通大学自控系·上海，200030）

摘要：综述了最近在局部渐近镇定、全局渐近镇定、半全局渐近镇定、实用镇定、有界镇定和带状态检测器镇定等方面的进展情况，并给予简短的评述.

关键词：非线性系统；反馈控制；镇定

1 引　言

镇定始终是控制系统设计的最基本问题，因为一切能够正常运行的控制系统必要前提是稳定. 通过系统能控性概念，线性系统的镇定问题已经得到完善解决. 相对来说，非线性系统的镇定要复杂得多[1,2]. 虽然这方面的研究已有不短的历史，但是在 1987 年以前其进展显得相当迟缓. 八十年代中期，随着非线性系统的精确线性化、无交互作用控制和干扰解耦等一些重要设计问题的解决以及在实际中开始应用，理论和应用两方面都再次提出了研究非线性系统镇定的要求. 例如，理论研究提出了使系统干扰解耦的同时能保证稳定的补偿问题；在应用中，象飞行器控制、机器人控制、电力系统和过程控制，都提出了确保受控系统的稳定性要求[3,4]. 1986 年 9 月，美国 IEEE 控制委员会在 Santa Clara 大学召开了控制科学的专题会议（俗称“高峰会议”），会议形成了题为“控制的挑战：集体的观点”的决议，该决议将非线性系统的镇定列为最重要的未解决问题[5]. 1986 年以来，特别是最近 5 年中，非线性系统的镇定受到控制理论界空前的关注，取得了许多重要进展.

本文将介绍在非线性系统镇定方面研究的新进展，并给以简短评述. 限于篇幅，文章仅介绍连续时间非线性系统的有关结果.

2 局部渐近镇定

在非线性系统的镇定中，局部渐近镇定研究得最多，历史也最长，其原因固然是因为它较简单，但更因为对许多工作范围不大的控制系统来说，局部镇定已能满足要求.

考虑一般非线性控制系统

$$\dot{x} = f(x, u), \tag{2.1a}$$

$$y = h(x). \tag{2.1b}$$

其中 $x \in \mathrm{R}^n, u \in \mathrm{R}^m$ 和 $y \in \mathrm{R}^p$. 假设其中的 f 和 h 都是连续可微的（或者更方便地都是光滑的），且 $f(0,0)=0, h(0)=0$. 系统(2.1)称为反馈局部可渐近镇定的，是指存在具

* 国家自然科学基金和上海交通大学科研基金的资助项目.
本文于 1994 年 4 月 30 日收到，1995 年 2 月 28 日收到修改稿.

有一定光滑性的函数 $u=\phi(x)$, $\phi(0)=0$,使得 $\dot{x}=f(x,\phi(x))$ 的零解在 Lyapunov 意义下渐近稳定.

将 $f(x,u)$ 在 $(x,u)=(0,0)$ 处作 Taylor 展开,则得到

$$f(x,u)=Ax+Bu+\cdots. \tag{2.2}$$

其中 $A=\left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{(0,0)}$ 和 $B=\left.\frac{\partial f}{\partial u}\right|_{(0,0)}$. 由稳定性理论知道:如果$(A,B)$是可镇定的,那么系统(2.1)必是反馈局部可渐近镇定的;如果 A 有位于开的右半复平面的(A,B)不能控极点,则系统(2.1)必不能用连续可微的状态反馈镇定. 于是,对于连续可微反馈的局部镇定来说,所需要研究的只是在虚轴上存在(A,B)不能控的极点的情况,这种情形为中心流形理论的应用创造了前提.

文[6]最先用中心流形理论讨论了单输入仿射非线性系统的局部镇定,该文讨论了虚轴上只有一对(A,B)不能控极点的情形. 以后,文[7]继续用中心流形理论研究了虚轴上存在多对(A,B)不能控极点的仿射非线性系统的镇定. 文[8,9]研究了平面系统的局部镇定问题. 文[10]介绍了中心流形理论在镇定问题上的一些应用情况.

Byrnes 和 Isidori 应用中心流形理论研究了如下仿射非线性系统

$$\dot{x}=f(x)+\sum_{i=1}^{m}g_i(x)u_i, \tag{2.3a}$$

$$y=h(x). \tag{2.3b}$$

其中 $f(x)$, $g_i(x)$, $i=1,2,\cdots,m$,和 $h(x)$ 通常假定是光滑的. 他们对仿射非线性系统引进了最小相位的概念[11],所得的一个重要结论是:

定理 2.1[11] 如果仿射非线性系统(2.3)是最小相位系统并且满足可逆性条件[11],则系统(2.3)能用光滑反馈局部渐近镇定.

Abed 和 Fu 应用分歧理论研究了非线性系统局部渐近镇定[12,13]. 但这种方法在本质上与中心流形理论方法等价.

Lyapunov 函数是微分方程稳定性研究的最重要工具,近年它逐渐进入了非线性系统反馈镇定领域. 利用 Lyapunov 函数方法,Artstein 最早研究了松弛反馈镇定[14]. 以后 Sontag 和 Tsinias 等都做了很好的工作. 以下的叙述基本上根据 Tsinias[15].

定义 2.1 系统(2.1)在 $x=0$ 处局部满足控制 Lyapunov 条件,如果存在 $x=0$ 的一个邻域 U 和函数 $V:U\to \mathrm{R}$,使得

i) V 在 U 上是正定的;

ii) $\inf\limits_{u} DV(x)\cdot f(x,u)<0$,对一切 $x\neq 0$, $x\in U$.

上述 V 称为系统(2.1)的局部控制 Lyapunov 函数.

定义 2.2 局部控制 Lyapunov 函数 $V(x)$ 称为满足有界控制性质,如果存在正定函数 $d:U\to R$, d 在 U 上有界,并对每个 $x\in U$, $x\neq 0$,存在 $u\in \mathrm{R}^m$,使得

$$\|u\|\leqslant d(x),\qquad DV(x)\cdot f(x,u)<0.$$

如果进一步有 $\lim\limits_{x\to 0}d(x)=0$,则称 $V(x)$ 满足小控制性质.

利用控制 Lyapunov 函数得到的主要结果如下:

定理 2.2[14,15] 考虑仿射非线性系统(2.3). 则有:

i) 在 $x=0$ 处存在局部控制 Lyapunov 函数的充要条件是它能用 $u=\phi(x)$ 局部渐近镇定,其中 $\phi(x)$ 是 $x=0$ 的某个邻域内除 $x=0$ 处的光滑函数;

ii) 该控制 Lyapunov 函数满足有界控制性质的充要条件是 $\|\phi(x)\| \leqslant d(x)$,其中 $d(x)$ 为定义 2.2 所要求的.如果它进一步满足小控制性质,则 $\phi(x)$ 在 $x=0$ 处连续.

后来,Sontag 给出了反馈函数 $\phi(x)$ 的具体构造[16],使得控制 Lyapunov 函数方法容易应用.Tsinias 研究了控制 Lyapunov 函数的构造方法[15,17].文[18]将这种方法推广到非线性系统的分散化镇定中.

串联积分器镇定是控制 Lyapunov 函数方法的重要应用.对系统(2.1),采用积分器的串联 $\dot{u}=v$,则成为如下的系统:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(x,u) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ I \end{pmatrix} v. \tag{2.4}$$

对于光滑反馈来说,系统(2.1)的能镇定蕴含着系统(2.4)的能镇定,因而串联积分器镇定的主要兴趣是非光滑情形[19,20].文[21]证明,如果系统(2.1)能用连续反馈镇定,则系统(2.4)能用除 $x=0$ 点外的光滑反馈镇定.

如果存在全局控制 Lyapunov 函数,那么定理 2.2 可以推广到全局的情形.因而控制 Lyapunov 函数方法是全局镇定的重要工具,但为了避免重复,在下一节我们就不再介绍这种方法.

3 全局渐近镇定

非线性系统的一个显著特点是其局部性质很难推广到全局去.文[22]用例子说明了全局镇定和局部镇定存在实质性的区别.这些例子也说明非线性系统全局镇定是一个独立的课题,不能从局部镇定引伸而来.

在非线性系统的全局镇定中,除前面提到过的控制 Lyapunov 函数方法,较成功的还有无源性理论和最优化方法.

利用相对阶的概念,总可以将仿射非线性系统分解成线性和非线性两部分(见下面(3.1)).很显然,非线性部分是不能观的,而这样获得的线性部分 (C,A,B) 是能控又能观的.

$$\dot{x}=f(x,\xi), \tag{3.1a}$$

$$\dot{\xi}=A\xi+Bu, \tag{3.1b}$$

$$y=C\xi. \tag{3.1c}$$

系统 $\dot{x}=f(x,0)$ 称为(3.1)的零动态子系统.Byrnes 和 Isidori 曾证明,对于单输入系统,当 ξ 是一维的时候,那么当零动态子系统是全局渐近稳定时,整个系统(3.1)能用反馈全局渐近镇定,并暗示这种方法有可能推广到 ξ 维数大于1的情形[23].文[22]首先发现这种推广是不可能的.Sussmann 和 Kokotovic 等探讨了 $n=1$ 的结论推广到 $n>1$ 时所需附加的条件[24,25].这里的 n 是 ξ 的维数.下面的定理是这方面的重要结果.

定理 3.1[25] 如果系统(3.1)具有 $f(x,\xi)=f(x,0)+G(x,\xi,y)y$ 的形式,并且满足:i) 其零动态子系统是全局渐近稳定的;ii) 线性部分 (C,A,B) 是右可逆的弱最小相位系统,那么系统(3.1)能用动态状态反馈全局渐近镇定.

有关用状态反馈全局渐近镇定的结果可参阅文[24].

众所周知,线性系统按二次指标的最优控制设计的闭环系统同时是全局渐近稳定的.于是人们设想对一类仿射非线性系统形式地定义一个二次指标,然后按最优反馈律实施控制,也应该导致全局渐近稳定.这就形成了全局渐近镇定的最优控制方法.

考虑仿射非线性系统

$$\dot{x} = A(x)x + B(x)u, \tag{3.2}$$

其二次性能指标为

$$J(u) = \int_0^\infty (x^{\mathrm{T}}Qx + u^{\mathrm{T}}Ru)\mathrm{d}t. \tag{3.3}$$

其中 $Q \geqslant 0$ 和 $R > 0$ 都是常数矩阵.

文[26]利用最优控制的方法得到了下面的结果:

定理 3.2 如果对每个固定的 x,$(A(x),B(x))$ 都是可镇定的,且$(Q,A(x))$ 是能观的,那么控制系统(3.2)和(3.3)能用反馈律

$$u = - R^{-1}B^{\mathrm{T}}P(x)x.$$

实现全局渐近镇定.其中 $P(x)$ 满足 Riccati 方程:

$$P^{\mathrm{T}}(x)A(x) + A^{\mathrm{T}}(x)P(x) - P^{\mathrm{T}}(x)B(x)R^{-1}B^{\mathrm{T}}(x)P(x) + Q = 0. \tag{3.4}$$

一般说,解方程(3.4)是困难的,文[26]讨论了某些特殊情况下的求解问题.

非线性系统的全局渐近镇定还有其他一些方法,尤其是对齐次向量场,并且在实际中有所应用,有兴趣的读者可参阅文[27~31],关于齐次向量场的研究可参阅文[32,33].

4 半全局镇定和实用镇定

在许多场合,全局渐近镇定是很困难的.文[34]曾对造成这种困难的原因作过探讨.而另一方面局部渐近镇定可能满足不了实际要求.于是人们寻找一些新的镇定方法,半全局镇定和实用镇定便应运而生了[35].

定义 4.1 系统(2.1a)称为是半全局可渐近镇定的,如果对 R^n 中的任意包含原点的有界区域 D,存在反馈律 $u = \phi(x)$,$\phi(0) = 0$,使得闭环系统的零解是渐近稳定的,而且 D 在其吸引区域内.

从定义 4.1 可以看到,反馈律 $\phi(x)$ 可以与 D 有关,因而它是比全局渐近镇定弱的概念.即使如此,半全局镇定还是相当困难.文[36,37]研究了部分线性化系统的半全局镇定.下面是这方面的主要结果:

定理 4.2[36] 如果系统(3.1)满足:i) (A,B) 可镇定; ii) (C,A,B) 右可逆,且其不变零点都位于闭的左半复平面; iii) 零动态子系统全局渐近稳定;则系统(3.1)能用仅依赖于线性部分状态 ξ 的动态状态反馈半全局镇定.

该文继续指出:如果线性部分(C,A,B)是方的可逆的,且具有一致阶[38],则能用静态反馈半全局镇定.

实用镇定源于实用稳定性,在文献中其含义稍有不同,我们介绍 Hahn 的定义.

定义 4.3[39] 设 $\beta > \alpha > 0$,系统 $\dot{x} = f(x,t)$ 称为是关于(α,β,t_0) 实用稳定的,如果当 $\|x_0\| < \alpha$ 时,有 $\|x(t,t_0,x_0)\| < \beta, t > t_0$,其中 $x(t,t_0,x_0)$ 是上述系统满足 $x(t_0,t_0,x_0) = x_0$ 的解.

实用稳定性不同于 Lyapunov 稳定性，在某些情况下更接近实际要求. 但目前对其研究还相当弱. 文[15]给出了实用镇定的 Lyapunov 型条件. 实用稳定性在鲁棒镇定中有较广泛的应用[40].

5 有界镇定

在讨论控制系统的渐近稳定性时，通常不考虑外输入，即要求系统(2.1)的 $u=0$. 然而许多实际系统的外输入不一定为零尤其是因为对非线性系统来说渐近稳定性不等于有界稳定性[41]. 在系统(2.1)中，一般至少要求 $h(x)$ 是连续的，因而状态 x 的有界就能保证输出 y 的有界. 故目前研究较多的是有界输入-有界状态稳定性.

定义 5.1 系统(2.1)称为是有界输入-有界状态稳定的，如果存在 K 类函数 α 和 KL 类函数 β[41]，使得系统(2.1)的状态响应 $x(t,x_0,u)$ 满足

$$\| x(t,x_0,u) \| \leqslant \beta(\| x_0 \|, t) + \alpha(\| u \|). \tag{5.1}$$

文[41]首先用 Lyapunov 函数的方法证明了下面的结果.

定义 5.2[41] 在仿射非线性系统(2.3)中，如果 $\dot{x}=f(x)$ 是全局渐近稳定的，那么必存在形如 $u=\varphi(x)+v$ 的反馈，$\varphi(0)=0$，使得闭环系统是有界输入-有界状态稳定的.

但是对于一般的非线性系统(2.1)，定理 5.2 未必成立[42]. Sontag 证明了如果 $\dot{x}=f(x,0)$ 是全局渐近稳定的，那末必定存在形如 $u=\varphi(x)+G(x)v$ 的反馈；使得闭环系统是有界输入-有界状态稳定的. 文[42]给出了 $G(x)$ 的构造方法.

6 带状态检测器的镇定

在线性系统设计理论中，当系统状态不能直接测量，仅输出可直接利用时，分离原理有着重要的作用，它使得各单元——观测器和反馈律可以分开设计. 线性系统的镇定设计是满足分离原理的一个重要例子. 但是在非线性系统中却未必成立，文[43]给出了一个反例.

Vidyasagar 最先研究了非线性系统的带状态检测器的镇定[44]，他对检测器的定义如下：

考虑下列系统(6.1)，其输入 y 和 u 分别是系统(2.1)的输出和输入.

$$\dot{\xi}=\psi(\xi,y,u). \tag{6.1}$$

如果对由(2.1)和(6.1)组成的复合系统，存在 $V(x,\xi)>0$ 和正数 δ，使得在 $\|x\|<\delta$，$\|\xi\|<\delta$ 和 $\|u\|<\delta$ 时成立

$$\alpha_1(\| x-\xi \|) \leqslant V(x,\xi) \leqslant \alpha_2(\| x-\xi \|), \tag{6.2a}$$

$$D_x V(x,\xi)\cdot f(x,u) + D_\xi V(x,\xi)\cdot \psi(\xi,h(x),u) \leqslant -\alpha_3(\| x-\xi \|). \tag{6.2b}$$

其中 $\alpha_i, i=1,2,3$，都是 K 类函数. 则称(6.1)为(2.1)的一个弱检测器；如果 $\delta=+\infty$，那么称它是一个全局检测器.

Vidyasagar 用(6.2)式代替关于偏差 $e=x-\xi$ 的微分方程的渐近稳定性，因为对于非线性系统来说，通常不能得到 e 的显式方程.

关于用检测器的镇定我们有下述结论.

定理 6.1[43] 在局部范围内，下列四条等价：

i) 系统(2.1)能用状态反馈渐近镇定；

ii) 系统(2.1)能用状态反馈有界输入-有界状态镇定;

iii) 系统(2.1)能用弱检测器输出渐近镇定;

iv) 系统(2.1)能用弱检测器输出有界输入-有界状态镇定.

定理 6.1 说明,如果只考虑局部性质,那么线性系统和非线系统有相似之处,但是文[43]指出,定理 6.1 不可能推广到全局. 文[44,45]分别讨论了上述定理推广到全局需要增加的条件.

7 镇定的必要条件

非线性系统镇定的必要条件从 Brockett 的文[46]开始,近年来,从拓扑、代数和分析等各方面得到许多新的必要条件.

下面是最基本的一个结论.

定理 7.1[46] 如果 f 和 u 都是 C^1 类的,而且 $u(0)=0$,那么闭环系统 $\dot{x}=f(x,u(x))$ 在原点渐近稳定的必要条件是:

i) 一阶线性化系统中正实部的极点都是能控的;

ii) 对 R^n 原点某邻域中的 ξ,存在一个定义在 $[0,+\infty)$ 上的控制 $u_\xi(\cdot)$,使得在这个控制作用下,系统响应 $x(t,\xi,u_\xi)$ 满足 $\lim\limits_{x\to+\infty} x(t,\xi,u_\xi)=0$.

iii) f 将 R^{n+m} 原点的邻域映成 R^n 原点的邻域.

上述定理中,条件 i)和 ii)是简单的或者是难以验证的,而条件 iii)却是十分有价值的.

文[47]从拓扑学观点分析了系统(2.1)能全局渐近镇定的必要条件.

8 结束语

上文我们介绍了非线性系统反馈镇定研究的若干进展. 由于近年来这方面的结果十分丰富,许多方面都没有提及,例如算子方法. 我们已经知道,非线性系统的互质分解和可镇定等价. 一旦求得了互质分解表达式,就可以方便地设计出镇定器来. 对于离散非线性系统,Hammer 进行了系统的研究,给出了分解的方法[48]. 但对于连续系统来说,几乎还没有找到分解的途径. 另外用奇摄动方法研究的高增益反馈也值得一提. 虽然非线性系统反馈镇定理论有很大发展,但尚有许多问题需要进一步探讨. 例如非最小相位系统镇定,实际工程中的系统许多是非最小相位系统,这方面的研究甚少. 当实际系统的初始扰动并非很小时,渐近镇定并不是一种合适的方法. 因此需要研究象实用镇定和半全局镇定那样的新方法. 从理论角度讲,镇定的必要性也需进一步研究. 随着研究的深入,必会开拓出新的镇定理论和方法来.

参考文献

[1] 韩正之,刘建华,郑毅,张钟俊. 非线性控制系统的特性(Ⅱ),控制与决策,1994,9(6):471—478

[2] Sontag,E. D.. Feedback Stabilization of Nonlinear Systems. Proc. of International Symposium MTNS-89,Ⅱ,61—81

[3] Van Der Schaft,A. J.. Stabilization of Hamiltonian Systems. Nonlinear Anal. Theor. Meth. and Appl.,10(11):1021—1035

[4] Marino, R.. Hamilton Techniques in Control of Robot Arms and Power Systems. in Theory and Applications of Nonlinear Control System. Elsevier: Science Publisher, 1986, 65—73

[5] Report on the Workshop: Challenges to Control: A Collective View. IEEE Trans. Automat. Contr., 1987, AC-32 (4): 275—285

[6] Aeyles, D.. Stabilization of a Class of Nonlinear Systems by a Smooth Feedback Control. Syst. Contr. Lett., 1985, 5(3): 289—294

[7] Behtash, S. and Sastry, S. S.. Stabilization of Nonlinear Systems with Uncontrollable Linearization. IEEE Trans. Automat. Contr., 1988, AC-33(6): 585—590

[8] Dayawansa, W. P. and Marin, C. F.. Asymptotic Stabilization of Two Dimensional Real Analytic Systems. Syst. Contr. Lett., 1989, 12(3): 205—211

[9] Bacciotti, A. and Boieri, P.. Linear Stabilizability of Planar Nonlinear Systems. Math. Contr. Sign. Syst., 1990, 3 (2): 183—193

[10] Cheng, D.. Center Manifold Theory and the Stabilization of Control Systems. Proc. of National Conference on Control Theory and Its Applications, 1989, 640—644

[11] Byrnes, C. I. and Isidori, A.. Local Stabilization of Minimum Phase Nonlinear Systems. Syst. Contr. Lett., 1988, 11(1): 9—17

[12] Abed, E. H. and Fu, F. H.. Local Feedback Stabilization and Bifurcation Control(I): Hopf Bifurcation. Syst. Contr. Lett., 1986, 7(1): 11—17; (II): Stationary Bifurcation. Syst. Contr. Lett., 1987, 8(5): 467—473

[13] Fu. H. J. and Abed. E. H.. Smooth Feedback Stabilizability of Nonlinear Systems. Control: Theory and Advanced Technology, 1990, 6(4): 559—571

[14] Artstein, Z.. Stabilization with Relaxed Controls. Nonlinear Anal. Theor. Meth. and Appl., 1983, 7(11): 1163—1173

[15] Tsinias, J.. Existence of Control Lyapunov Functions and Applications to State Feedback Stabilizability of Nonlinear Systems. SIAM J. Contr. Optimiz., 1991, 29(4): 457—473

[16] Sontag, E. D.. A "Universal" Construction of Artstein's Theorm on Nonlinear Stabilization. Syst. Contr. Lett., 1989, 13(2): 117—123

[17] Tsinias, J.. On the Existence of Control Lyapunv Funetions: Generalization of Vidyasagar's Theorem on Nonlinear Stabilization. STAM J. Contr. Optimiz., 1992, 30(4): 879—893

[18] Han, Z. Z., Gao, F. and Zhang, Z. J.. Stabllization for Nonlinear Interconnected Systems. Appl. Math. Comp. Sci., 1993, 3(4): 699—711

[19] Dayawansa, W. P., Martin, C. F. and Knowles, G.. Asymptotic Stabilization of a Class of Smooth Two-Dimensional Systems. SIAM J. Contr. Optimiz., 1990, 28(6): 1321—1349

[20] Coron, J. N. and Praly, L.. Adding an Integrator for Stabilization Problem. Syst. Contr. Lett., 1991, 17(2): 89—104

[21] Tsinias, J.. A Local Stabilization Theorem for Interconnected Systems. Syst. Contr. Lett., 1992, 18(5): 429—434

[22] Sussmann, H. J.. Limitations on the Stabilizability of Global Minimum Phase Systems. IEEE Trans. Automat. Contr., 1990, AC-35(1): 117—119

[23] Byrnes, C. I. and Isidori, A.. Global Feedack Stabilization of Nonlinear Minimum Phase Systems. Proc. of 24th CDC. 1985, 1031—1037

[24] Kokotovic, P. V. and Sussmann, H. J.. A Positive Real Condition for Global Stabilization of Nonlinear Systems. Syst, Contr. Lett., 1989, 12(2): 125—133

[25] Saberi, A., Kokotovic, P. V. and Sussmann, H. J.. Global Stabilization of Partially Linear Composite Systems. SIAM J. Contr. Optimiz., 1990, 28(6): 1491—1503

[26] Banks. S. P. and Mhana. K. J.. Optimal Control and Stabilization for Nonlinear Systems. IMA J. Math. Contr. Inform., 1992, 9(2): 179—196

[27] Seibert,P. and Suarez,R.. Global Stabilization of a Certain Class of Nonlinear Systems. Syst. Contr. Lett.,1991, 16(1):17—32

[28] Marino,R. and Tomei,P.. Dynamic Output Feedback Linearization and Global Stabilization. Syst. Contr. Lett., 1991,17(2):115—121

[29] Andriano,V.. Global Feedback Stabilization of the Angular Velocity of a Symmetric Rigid Body. Syst. Contr. Lett.,1993,20(5):361—364

[30] Byrnes,C. I. and Isidori,A.. On the Attitude Stabilization of Rigid Spacecraft. Automatica,1991,27(1):87—95

[31] Linw,D. C.. and Abed,F. H.. Stabilization of Tethered Satellites During Station Keeping,IEEE Trans. Automat. Contr.,1990,AC-35(10):1186—1196

[32] Kawski,M.. Homogenous Stabilizing Feedback Laws. Control:Theory and Advanced Technology,1990,6(4): 497—516

[33] Tsinias,J.. Remarks on Feedback Stabilizability of Homogenous Systems. Control: Theory and Advanced Technology,1990,6(4):533—542

[34] Sussmann,H. J. and Kokotovic,P. V.. The Peaking Phenomenon and Global Stabilization of Nonlinear Systems. IEEE Trans. Automat. Contr.,1991,AC-36(4):424-440

[35] Byrnes,C. I. and Isidori,A.. Asymptotic Stabilization of Minimum Phase Nonlinear Systems. IEEE Trans. Automat. Contr.,1991,AC-36(10):1122—1137

[36] Lin,Z. and Saberi,A.. Semi-global Stabilization of Partially Linear Composite Systems via Feedback of the State of Linear Part. Syst. Contr. Lett.. 1993,20(3):199—207

[37] Teel,A. R.. Semi-Global Stabilization of Minimum Phase Nonlinear Systems on Special Normal Forms. Syst. Contr. Lett.,1992,19(3):187—192

[38] Sannuti,P. and Saberi,A.. Special Coordinate Basic of Multivariable Linear Systems-Finite and Infinite Zero Structure,Square Down and Decoupling. Int. J. Control, 1987,45(6):1655—1704

[39] Hahn,W.. Stability of Motion. Berlin:Springer-Verlag. 1967

[40] Chen,Y. C.. Design of Robust Controller for Uncertain Dynamical Systems. IEEE Trans. Automat. Contr., 1988,AC-33(4):487—491

[41] Sontag,E. D.. Smooth Stabilization Implies Coprime Factorization. IEEE Trans. Automat. Contr.,1989,AC-34 (4):435—443

[42] Sontag,E. D.. Further Facts about Input and State Stabilization. IEEE Trans. Automat. Contr.,1990,AC-35 (4):437—442

[43] 韩正之,潘丹杰,张钟俊. 非线性系统用状态检测器的有界镇定. 系统科学与数学,1992,12(2):229—239

[44] Vidyasagar,M.. On the Stabilization of Nonlinear Systems Using State Detection. IEEE Trans. Automat. Contr.,1980,AC-25(3):504—509

[45] Tsinias,J.. Sontag's "Input to State Stability Condition" and Global Stabilization Using Detection. Syst. Contr. Lett.,1993,20(3):219—226

[46] Brockett,R. W.. Differentical Geometric Control Theory. Basel-Boston:Birkhaüser,1983,181—191

[47] Nikitin,S.. Topological Necessary Conditions of Smooth Stabilization in the Large. Syst. Contr. Lett.,1993,21 (1):35—41

[48] Hammer,J.. Fraction Represntations of Nonlinear Systems: A Simplified Approach. Int. J. Control,1987,46(2): 455—472

Development on the Stabilization of Nonlinear Control Systems

CHEN Pengnian,　HAN Zhengzhi　and　ZHANG Zhongjun

(Department of Automatic Control, Shanghai Jiaotong University • Shanghai, 200030, PRC)

Abstract: The paper summaries the important development on the stabilization of nonlinear control systems achieved in the last decade. It includes locally asymptotic stabilization, globally asmptotic stabilization, simi-globally asymptotic stabilization, practical stabilization, bounded stabilization and stabilization via state detection. Some improtant conclusions as well as the feedback design are given. Some new necessary conditions for stabilization are also included.

Key words: Nonlinear systems; feedack control; stabilization

本文作者简介

陈彭年　1948 年生. 1982 年毕业于厦门大学，并获硕士学位. 现为中国计量学院副教授. 现在上海交通大学自控系做访问学者. 曾从事常微分方程稳定性和控制理论的研究. 目前的研究领域为常微分方程稳定性，交换环上线性系统理论和非线性系统控制等.

韩正之　1947 年生. 1988 年毕业于华东化工学院自动化研究所，获工学博士. 1990 年上海交通大学博士后流动站出站. 现为上海交通大学教授、博士生导师. 长期从事控制理论的教学和研究，目前的研究方向是非线性控制系统的设计.

张钟俊　见本刊 1995 年第 2 期第 223 页