

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 23220071152872

UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

一类非最小相位非线性系统的
镇定问题研究

Stabilization of A Class of Non-minimum Phase Nonlinear
Systems

杨晓燕

指导教师姓名: 兰维瑶 教授

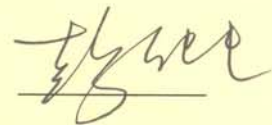
专业名称: 控制理论与控制工程

论文提交日期: 2010 年 5 月

论文答辩时间: 2010 年 6 月

学位授予日期: 2010 年 月

答辩委员会主席:



评 阅 人:

2010 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为()课题(组)的研究成果，获得()课题(组)经费或实验室的资助，在()实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：杨晓燕

2010年6月3日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：杨晓燕

2010年6月3日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

稳定性理论在系统理论和工程中具有中心的地位。在动态系统的研究中出现了很多不同类型的稳定性问题，如平衡点稳定性，输入输出稳定性和周期轨道稳定性等等。本文主要研究的是平衡点的稳定性问题，平衡点的稳定性通常在 Lyapunov 意义下描述。Lyapunov 稳定性定理给出了系统稳定、渐近稳定等的充分条件。

在过去的二十年，众多学者对各种非线性系统的控制问题进行了相关研究，如输出反馈形式的非线性系统全局镇定，非线性系统的输出调节问题，扰动抑制问题等等。然而，绝大多数研究是基于给定的非线性系统是最小相位系统这样的假设条件下进行研究的，因此，本文考虑一类非最小相位非线性系统的镇定问题，结合非线性系统的鲁棒镇定技术及 Backstepping 设计方法，提出系统的全局镇定方法，并显式地构造出系统的镇定控制律。

首先，我们研究了一类具有输入非线性的不稳定线性系统的镇定问题，建立了系统镇定问题可解性的充分条件，即如果系统的输入非线性部分满足一个线性增长的条件，那么这类输入非线性的不稳定线性系统的全局镇定问题是可解的，且增长率的上界取决于一个 Lyapunov 方程组的解。

其次，我们进一步考虑一类输出反馈形式的非最小相位非线性系统的全局镇定问题。先将给定的非线性系统转换成 SCB(special coordinate basis)结构，其中系统的零动态分为稳定和不稳定两部分，不稳定零动态系统的镇定问题可以看成是具有输入非线性的不稳定线性系统的镇定问题，然后我们结合 Lyapunov 稳定性理论和 Backstepping 设计方法，构建了解决非线性系统镇定问题所需的控制律的显式算法。

最后，我们根据研究得出的成果解决一个旋转/平移驱动器(RTAC)系统的镇定问题。仿真结果显示了理论设计的有效性。

关键词：输入非线性；非线性系统；非最小相位；镇定；后推法

厦门大学博硕士学位论文摘要库

ABSTRACT

Stability theory plays a central role in systems theory and engineering. There are different kinds of stability problems that arise in the study of dynamical systems, such as stability of equilibrium points, input-output stability and stability of periodic orbits. This paper is mainly concerned with stability of equilibrium points. Stability of equilibrium points is usually characterized in the sense of Lyapunov. Lyapunov stability theorems give sufficient conditions for stability, asymptotic stability and so on.

Over the past two decades, various control problems have been investigated for the nonlinear system, such as global stabilization in the output feedback form, nonlinear output regulation and disturbance rejection, etc. However, most of these works are based on an assumption that the given system is of minimum phase, so in this paper we consider the stabilization problem of a class of non-minimum phase nonlinear systems and develop a global stabilization technique for the non-minimum phase nonlinear systems. The stabilizing control law is constructed explicitly by combining a robust stabilization technique with backstepping design method.

Firstly, we investigate the stabilization problem for unstable linear systems with input nonlinearities. Based on the sufficient solvability condition, it is shown that the global stabilization problem of the unstable linear systems with input nonlinearities is solvable if the input nonlinear functions satisfy a linear growth condition. The upper bound of the growth ratio relies on the solution of a set of Lyapunov equations.

Secondly, we further study on a class of non-minimum phase nonlinear systems in output feedback form and investigate the global stability of the nonlinear system. The given system is firstly transformed into a special coordinate basis structure, in which the system zero dynamics is divided into a stable part and an unstable part. The stabilization problem of the unstable part can be viewed as the stabilization problem of the unstable linear systems with input nonlinearities. Then combining Lyapunov stability theory with backstepping technology, we get the explicit algorithms for

constructing the required control laws for solving the nonlinear stabilization problem.

Finally, the obtained results are utilized to solve a stabilization problem on a rotational/translational actuator (RTAC) system. The numeral simulation shows the validity of the proposed design approach.

Key words: input nonlinearity, nonlinear systems, non-minimum phase, stabilization, backstepping

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 非线性系统镇定的研究现状	4
1.3 不确定非线性系统镇定的研究现状	6
1.4 本文工作	8
第二章 预备知识	10
2.1 非线性系统模型	10
2.2 解的存在性和唯一性	11
2.3 Lyapunov 稳定性	12
2.3.1 Lyapunov 稳定性定义	13
2.3.2 Lyapunov 稳定性基本定理	13
2.4 Backstepping 设计方法	14
2.4.1 Backstepping 设计的基本思想	15
2.4.2 Backstepping 设计过程	16
2.5 小结	20
第三章 具有输入非线性的指数不稳定线性系统的镇定问题	21
3.1 问题描述	21
3.2 控制器设计	22
3.3 本章小结	26
第四章 一类非最小相位非线性系统的镇定	27
4.1 引言	27
4.2 一类非最小相位非线性系统的镇定	27
4.2.1 问题描述	27
4.2.2 基于 Backstepping 的状态反馈控制器设计	30
4.3 仿真实例	36

4.4 本章小结	40
第五章 总结与展望	42
5.1 全文工作总结	42
5.2 课题展望	42
参考文献	44
作者在攻读硕士期间发表的论文	50
致 谢.....	51

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Table of Contents

Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Background and Significance	1
1.2 Research on Stabilization of Nonlinear Systems	4
1.3 Research on Stabilization of Uncertain Nonlinear Systems	6
1.4 Main Work of This Dissertation	8
Chapter 2 Preliminary Study	10
2.1 Model of Nonlinear Systems	10
2.2 Existence and Uniqueness of Solution.....	11
2.3 Lyapunov Stability	12
2.3.1 Define of Lyapunov Stability.....	13
2.3.2 Thoerem of Lyapunov Stability	13
2.4 Backstepping	14
2.3.1 Ideas of Backstepping	15
2.3.2 Design Procedure of Backstepping.....	16
2.5 Conclusion	20
Chapter 3 Stabilization of Exponentially Unstable Linear Systems with Input Nonlinearities	21
3.1 Problem Formulation	21
3.2 Design of Controller.....	22
3.3 Conclusion	26
Chapter 4 Stabilization of A Class of Non-minimum Phase Nonlinear Systems.....	27
4.1 Introduction.....	27
4.2 Stabilization of A Class of Nonlinear Systems	27
4.2.1 Problem Formulation	27

4.2.2 Design of State-Feedback Controller Based on Backstepping	30
4.3 Simulation Example.....	36
4.4 Conclusion	40
Chapter 5 Summary and Outlook.....	42
5.1 Summary.....	42
5.2 Subject Outlook.....	42
References	44
Publication List	50
Appendices.....	51

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

系统控制理论和实践被认为是20世纪对人类生产活动和社会生活产生重大影响科学领域之一。控制系统有线性性和非线性之分,严格来说,理想的线性系统在实际中并不存在。随着现代工业对控制系统要求开始不断提高,很多实际控制过程中的非线性问题不断出现,许多领域(例如飞机和宇宙飞船控制、机器人学、过程控制、生物医学工程、电力系统等)都存在着强烈的非线性,传统的线性控制理论已经难以满足各种实际需要,因此,非线性系统开始成为控制理论研究的主流^[1]。与线性系统相比,非线性系统的控制问题要困难和复杂得多。首先,由于非线性系统在解的存在性及解的表示上的困难,使得对非线性系统的研究没有建立在解的表达式基础上的直接方法;其次,由于非线性使得系统结构之间的差异很大,使得对非线性系统的研究难以建立一个统一的理论框架;第三,从更深层次上看,非线性系统具有比线性系统更复杂的动态特性和不确定性,这使得对非线性系统的研究需要更多、更复杂的数学理论支持。非线性系统的这些特征导致非线性系统控制理论包含着各种各样的问题,研究也呈现纷繁复杂的面貌,一些具有非线性系统独特的概念、理论不断出现和创新,各种控制对象和设计方法层出不穷,因而使得非线性控制理论渐渐形成一个庞大的理论体系^[2]。作为很有前途的控制理论,非线性控制理论将成为21世纪控制理论的主旋律,并将为我们人类社会提供更先进的控制系统,推动自动化水平迈向更大的飞跃。

在分析非线性系统时,人们一般会想到使用在工作点附近小范围内线性化的方法,当实际系统的非线性程度不是很严重时,采用线性方法去进行研究是可行并具有实际意义的。但是,当实际系统的非线性程度比较严重时,就不能够采用这个方法去进行研究,否则会产生较大的误差,甚至会导致错误的结论。这时候我们应采用非线性系统的研究方法进行研究。

20世纪80年代以来,人们开始加强对生产过程的建模、系统辨识、自适应控制、鲁棒控制等对非线性控制系统的研究,已取得一些显著的进展。主要的分析方法有:相平面法、李亚普诺夫法、描述函数法、Popov(波波夫)法和极点移

动法等。

相平面法：适用于一、二阶非线性系统的分析比较精确全面，但对于高阶系统的分析比较困难，甚至是不可能的。运用相平面法或数字计算机仿真可以求得非线性系统的精确解，进而分析非线性系统的性能，可以判断稳定性，自持振荡(没有外力作用下存在的等幅振荡)，计算动态响应。

李亚普诺夫法：一个多世纪以前，俄国力学家 A.M.Lyapunov 在 1892 年发表的《动态稳定性的一般问题》论文中，首次提出运动稳定性的一般理论。这一理论把由常微分方程组描述的动力学系统的稳定性分析方法区分为本质上不同的两种方法，现今称为 Lyapunov 直接法和 Lyapunov 间接法。间接法属于小范围稳定性分析方法，基本思路是将非线性自治系统运动方程在足够小邻域内进行泰勒展开导出一次近似线性化系统，再根据线性化系统特征值在复平面上的分布推断非线性系统在邻域内的稳定性，经典控制理论中对稳定性的讨论正是建立在 Lyapunov 间接法基础上的。直接法属于根据系统结构判断内部稳定性的方法，通过借助一个 Lyapunov 函数直接对系统平衡状态的稳定性做出判断，从能量的角度对系统进行稳定性的分析，也就是说，如果一个系统被激励后，它存储的能量随着时间的推移逐渐衰减，等到达平衡状态时，能量达到最小，那么系统的这个平衡状态是渐近稳定的，如果系统存储的能量既不增加也不减少，那么这个平衡状态也称为是稳定的。直接法直接面对非线性系统，概念直观，理论严谨，物理含义清晰，因此当 Lyapunov 直接法在 1960 年前后被引入系统控制理论后，很快显示出它在理论和应用上的重要性，成为现代系统控制理论中研究系统稳定性的主要工具。总的说来，Lyapunov 法适用于任何系统，时变的定常的，有维的无限维的，但是该方法的局限性就是难以对一个给定的系统找出一个合适的 Lyapunov 函数。

描述函数法：是一种近似分析方法，把非线性系统在正弦信号作用下产生的输出用基波分量来近似替代，获得非线性系统近似的频率特性。适用于非线性程度较低特性对称的非线性元件，但要求线性部分具有良好的低通滤波特性。核心是计算非线性特性的描述函数和它的负倒特性。由于描述函数是系统状态作周期运动的描述，一般不考虑外作用。所以它一般用于分析稳定性自持振荡，但不能得到系统的响应。建立在描述函数基础上的谐波平衡法可以对非线性系统做出定

性分析，是分析非线性系统的简便而实用的方法，尤其在解决工程实际问题时，不要求精确解的情况下更为有效。

Popov(波波夫)法：与奈奎斯特方法类似，根据修正频率特性 $G^*(j\omega)$ 和波波夫线的关系就可以判断单回路系统的稳定性。适用于由定常线性部件与一定常非线性部件组成的单回路反馈系统。可以用于高阶系统(优于相平面法)，可以准确判断系统稳定性(优于描述函数法)。波波夫判据通过分析系统线性部分的频率特性就能判断整个系统的绝对稳定性。

极点移动法：把波波夫定理应用到线性部分不是渐近稳定的某些非线性控制系统，就得到了极点移动法，拓宽了波波夫法的适用范围。当然对于非线性部件的限制条件要多于 popov 法。

尽管这些方法都已经被广泛应用于实际的非线性系统问题，但是，它们大多数有一定的局限性，不能成为分析非线性系统的通用方法。比如，用相平面法虽然能够获得系统的全部特征，如稳定性、过渡过程等，但如果系统大于三阶，就无法应用向平面法去求解了；李亚普诺夫法分析系统的绝对稳定性问题，要求非线性元件的特性必须满足一定条件。近些年来，国内外有不少学者一直在相关方面进行研究，也探索出一些新的方法，如广义圆判据，输入输出稳定性理论等。目前非线性控制系统理论仍处于发展阶段，远未完善，很多问题都还有待研究和解决，涉及的领域十分宽广。

总的来说，非线性科学是 20 世纪中叶以来理论自然科学进步和发展的主要标志，非线性思维(the nonlinear thought)已然成为科学思维的时代特征。诚如克劳斯·迈因策尔(Mainzer,K.)所说，“在自然科学中，从激光物理学、量子混沌和气象学直到化学中的分子建模和生物学中对细胞生长的计算机辅助模拟，非线性复杂系统已成为一种成功的求解问题方式。另一方面，社会科学也认识到，人类面临的主要问题也是全球性的、复杂的和非线性的。线性的思维方式以及把整体仅仅看作其部分之和的观点，显然已经过时了。换句话说，研究非线性才是当今世界科学的前沿与热点，涉及自然科学和人文社会科学的众多领域，具有重大的科学价值。

1.2 非线性系统镇定的研究现状

自从控制理论建立以来,系统的镇定问题就一直是控制设计的中心问题,它是所有控制设计首先要考虑的问题,几乎所有的控制问题,诸如输出调节问题^[3]、跟踪问题^[4]、自适应控制^[5,6]、 H_∞ 控制^[7,8]等,都包含着镇定问题。可以说,镇定始终是控制系统设计的最基本问题,一切控制系统能够正常运行的必要前提是稳定。在线性系统中,如果系统通过状态反馈实现镇定是能观的,则可以利用系统的输出建立系统状态观测器,然后根据所谓的分离原则构造输出反馈实现系统的镇定。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,非线性系统由于一般意义下的分离原则不再成立,利用输出反馈实现系统的镇定就是一个非常困难且复杂的问题。二十世纪八十年代中期,随着非线性系统的近似线性化、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它们在实际中的应用,研究非线性系统镇定的问题有了不少突破口,理论研究提出了使系统干扰解耦的同时保证稳定的补偿问题,例如飞行器控制、机器人控制、电力系统和过程控制等,都提出了确保受控系统的稳定性要求。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^[9]。

非线性系统的镇定主要可以分为四个方向:局部渐近镇定,全局渐近镇定,半全局镇定和有界镇定^[10]。

(1) 局部渐近镇定

局部渐近镇定在非线性系统中研究得最多,历史也最长,其原因主要是因为它较简单,且对许多工作范围不大的控制系统来说,局部镇定已能满足系统控制要求。

定义 1.1 考虑一般的非线性控制系统

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (1.1)$$

其中, $x \in R^n$, $u \in R^m$, $y \in R^p$, f 和 h 都是光滑的连续可微的函数,且 $f(0,0) = 0$, $h(0) = 0$ 。系统(1.1)称为局部可渐近镇定,是指存在具有一定的光滑

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库