

# 时延网络系统与非完整系统的 分析镇定与综合

袁付顺 姚合军 高芳征 著



科学出版社

# 时延网络系统与非完整系统的 分析镇定与综合

袁付顺 姚合军 高芳征 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书比较全面地介绍作者和国内外学者近年来在网络控制系统分析与综合、非完整系统方面的研究成果。书中介绍网络控制系统的离散、连续、随机、非线性等多种模型建立的方法,在此基础上结合 Lyapunov 稳定性理论及优化控制理论对系统的渐近稳定性、指数稳定性进行了分析,同时设计网络系统的状态反馈、输出反馈、优化控制器,并研究非线性参数化、时滞、随机等多种不确定非完整系统的鲁棒自适应、有限时间控制问题,最后针对实际的数值算例进行了系统仿真。

本书可作为高等院校信息与控制类专业高年级本科生及研究生教材,也可供信息与控制领域科技工作者、工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

时延网络系统与非完整系统的分析镇定与综合/袁付顺,姚合军,高芳征著. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-038353-2

I. ①时… II. ①袁… ②姚… ③高… III. ①计算机网络-自动控制  
系统-研究 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 192456 号

责任编辑:王 钰 姜天鹏 / 责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2014 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2014 年 3 月第一次印刷 印张: 12

字数: 230 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62140850 编辑部电话 010-62137026

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303



## 前 言

随着网络通信技术、计算机处理技术的产生和发展，为计算机网络技术与控制系统互相交叉和融合创造了条件，从而产生了一种新型的控制结构，即传感器、控制器、执行器之间通过共享网络进行数据交换，称为网络控制系统（networked control system, NCS）。近二十几年来，网络控制在工农业生产和军事控制中也得到广泛应用，如制造业、汽车工业和航空航天等领域。目前，网络控制系统的研究日益深入，研究对象包括连续系统、离散系统、连续+离散系统、混合动态系统等。研究内容包括系统建模、稳定性分析、保性能控制、故障诊断等。研究方法一般采用选取 Lyapunov 函数，得到保证系统稳定或具有一定性能指标的线性矩阵不等式条件。由于网络作为控制系统的传输媒介，一些非理想因素，如网络诱导时延，数据包丢失、数据包错序等现象不可避免，使控制系统的分析、设计变得非常复杂，传统的控制理论不再适用于网络控制系统。针对网络控制系统的研究主要有：在现存网络环境下，设计合理的控制器保持系统稳定且具有较好的性能指标；设计补偿控制器，弥补网络时延、丢包、错序等因素对系统性能的影响。本书就是在前人研究的基础上，进一步研究网络控制系统的控制与优化问题，因此具有一定的理论和实际意义。

“非完整”（nonholonomic）一词起源于近代分析力学。在 1894 年以前，分析力学研究中还不知道有“独立坐标数目与坐标的独立变分数目不同的系统——非完整约束系统的存在”。直到 1894 年德国学者 Hertz 才第一次把约束和系统分成完整和非完整两大类。从那时起才真正有了对非完整系统的研究。

通过这一百余年的研究表明，非完整系统具有重要的理论价值和实际意义。许多最基本的力学系统都是非完整系统。例如，力学系统著名的冰刀问题，许多带有滚动轮子的系统，如自行车、汽车、摩托车、飞机起落架的运动、火车车厢等，还有一些太空机器人系统等都

是非完整系统。正因如此，国内外对非完整系统力学的研究比较活跃，非完整系统力学研究得到了较好的发展。这也为非完整系统的研究从基本的力学研究推广应用到其他学科打下了坚实的基础。

然而，非完整约束是对系统广义坐标导数的约束，它不减少系统的位形自由度，这使得系统的独立控制个数少于系统的位形自由度，给其控制设计带来很大困难。另外，利用非线性控制系统理论的微分几何方法已证明：非完整系统不能用连续的状态反馈镇定。因此，以研究连续状态反馈为主的现代控制理论中大量成熟的结果无法直接用于非完整系统的镇定控制研究，使得非完整控制系统研究成为当今控制领域最具挑战性的难题之一。尤其是处于复杂环境的实际系统，不可避免地外界干扰等因素的影响，使得传统控制器设计显得无能为力，因此如何发展新的强鲁棒性/自适应性镇定控制器显得尤为重要。正是出于这一研究思路与目的，作者近年来研究了具有非线性参数化非完整系统的自适应渐近镇定与有限时间控制、具有时滞的随机非完整系统的鲁棒控制、随机非完整系统的有限时间控制并把部分成果推广到更一般情形。

本专著主要总结了作者近年来的研究工作，其是在国家自然科学基金（项目编号：61073065）的资助下完成的，在此对国家自然科学基金委员会表示感谢！

由于作者水平有限，书中缺点和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2013年4月

于安阳师范学院

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 网络控制系统研究现状及研究方法 .....	2
1.3 非完整控制系统的研究现状与研究方法 .....	5
1.3.1 运动规划 .....	6
1.3.2 反馈镇定 .....	6
1.3.3 跟踪控制 .....	9
1.4 本书的主要内容 .....	9
参考文献 .....	11
<b>第 2 章 基础知识</b> .....	15
2.1 网络控制系统的基本问题 .....	15
2.1.1 节点的驱动方式 .....	15
2.1.2 网络诱导时延 .....	16
2.1.3 数据包的丢失 .....	16
2.1.4 单包传输和多包传输 .....	16
2.1.5 数据拒绝和空采样 .....	16
2.1.6 数据包乱序 .....	17
2.1.7 网络调度 .....	17
2.2 非完整约束 .....	17
2.2.1 约束的有关概念 .....	17
2.2.2 约束的分类 .....	18
2.2.3 非完整约束的应用情况 .....	18
2.2.4 小结 .....	19
2.3 非完整控制系统 .....	19
2.3.1 Pfaffian 约束对应的控制系统模型：运动学情况 .....	19
2.3.2 Pfaffian 约束对应的控制系统模型：动力学情况 .....	20
2.3.3 小结 .....	21
2.4 非完整控制系统模型 .....	21
2.4.1 运动学模型 .....	22
2.4.2 动力学模型 .....	23

2.4.3 小结 .....	24
参考文献 .....	24
<b>第3章 具有随机时延和丢包的不确定网络系统的均方指数稳定 <math>H_\infty</math> 控制</b> .....	<b>26</b>
3.1 具有随机时延和丢包的不确定网络系统的均方指数稳定控制 .....	27
3.1.1 系统描述 .....	27
3.1.2 网络控制系统模型建立 .....	27
3.1.3 均方指数稳定条件和输出反馈控制器设计 .....	28
3.2 一类具有时延和丢包的神经网络控制系统的 $H_\infty$ 均方指数稳定控制 .....	32
3.2.1 系统描述 .....	32
3.2.2 神经网络控制系统建模 .....	33
3.2.3 系统均方指数稳定条件及输出反馈控制器设计 .....	34
3.2.4 数值算例 .....	38
3.3 小结 .....	40
参考文献 .....	40
<b>第4章 具有随机时延的非线性网络系统的指数稳定控制</b> .....	<b>42</b>
4.1 具有状态时延和网络诱导时延的非线性网络系统的指数镇定 .....	42
4.1.1 系统描述 .....	42
4.1.2 指数镇定条件及模糊控制器设计 .....	44
4.2 一类具有随机时延的模糊不确定网络控制系统的指数镇定 .....	48
4.2.1 基于区间分布时延的网络系统模型建立 .....	48
4.2.2 系统均方指数稳定条件及模糊控制器设计 .....	49
4.2.3 数值例子 .....	54
4.3 基于 T-S 模糊非线性随机神经网络控制系统的指数稳定控制 .....	55
4.3.1 系统均方指数稳定条件及模糊控制器设计 .....	55
4.3.2 数值例子 .....	60
4.4 小结 .....	60
参考文献 .....	60
<b>第5章 随机时延网络控制系统的均方指数镇定及控制器设计</b> .....	<b>62</b>
5.1 具有随机时延和丢包的不确定网络系统的镇定新标准 .....	63
5.1.1 系统描述 .....	63
5.1.2 神经网络控制系统模型建立 .....	63
5.1.3 均方稳定条件和状态反馈控制器设计 .....	64
5.1.4 数值例子 .....	68
5.2 具有区间分布时延的神经网络控制系统的均方指数稳定控制 .....	68
5.2.1 系统描述 .....	68
5.2.2 神经网络控制系统模型建立 .....	69

5.2.3	网络控制系统均方指数稳定条件及状态反馈控制器设计	70
5.2.4	数值例子	73
5.3	小结	73
	参考文献	74
<b>第6章</b>	<b>时延网络控制系统的优化变结构控制</b>	<b>76</b>
6.1	不定时延网络控制系统的变结构保成本控制	76
6.1.1	网络控制系统描述	76
6.1.2	保成本变结构控制器设计	77
6.1.3	滑模面的稳定性	78
6.2	网络控制系统的全程最优滑模控制	80
6.2.1	网络控制系统描述	80
6.2.2	全程最优滑模面设计	81
6.2.3	滑模控制器设计	83
6.2.4	数值例子	83
6.3	小结	84
	参考文献	84
<b>第7章</b>	<b>时延系统的指数镇定及输出反馈滑模控制</b>	<b>86</b>
7.1	一类不确定离散时延系统的指数稳定滑模控制新方法	86
7.1.1	时延系统描述	86
7.1.2	系统指数稳定滑模面设计	88
7.1.3	变结构滑模控制器设计	92
7.1.4	数值例子	94
7.2	一类不确定离散时延大系统的变结构控制	95
7.2.1	系统描述	95
7.2.2	变结构滑模控制器设计	97
7.2.3	数值例子	99
7.3	非线性时延系统的 $H_\infty$ 输出反馈滑模控制	102
7.3.1	系统描述	102
7.3.2	输出反馈滑模面的稳定性	103
7.3.3	变结构控制器设计	107
7.3.4	数值例子	107
7.4	小结	108
	参考文献	109
<b>第8章</b>	<b>时延系统的指数稳定控制器设计</b>	<b>111</b>
8.1	一类离散时延大系统的指数稳定非脆弱控制器设计	111
8.1.1	系统描述	111



8.1.2	指数稳定条件及非脆弱控制器设计 .....	112
8.1.3	系统镇定和控制器设计条件的线性化 .....	115
8.2	基于观测器的模糊时延系统的指数稳定控制 .....	117
8.2.1	系统描述 .....	117
8.2.2	模糊时延系统指数稳定条件的提出 .....	118
8.2.3	动态输出反馈模糊控制器设计 .....	119
8.2.4	指数镇定和模糊控制器设计条件的线性化 .....	121
8.2.5	数值例子 .....	121
8.3	小结 .....	122
	参考文献 .....	122
<b>第 9 章</b>	<b>非线性参数化非完整系统的鲁棒自适应控制</b> .....	<b>124</b>
9.1	问题描述 .....	125
9.2	自适应控制器的设计 .....	126
9.3	切换控制和主要结果 .....	131
9.4	小结 .....	133
	参考文献 .....	133
<b>第 10 章</b>	<b>非线性参数化非完整系统的自适应有限时间镇定</b> .....	<b>135</b>
10.1	问题描述及预备知识 .....	136
10.2	自适应有限时间控制 .....	138
10.3	切换控制策略和主要结果 .....	142
10.4	仿真例子 .....	144
10.5	小结 .....	146
	参考文献 .....	146
<b>第 11 章</b>	<b>非线性参数化的高阶非完整系统的自适应镇定</b> .....	<b>148</b>
11.1	问题描述 .....	149
11.2	自适应控制器的设计 .....	150
11.3	切换控制和主要结果 .....	155
11.4	仿真例子 .....	156
11.5	小结 .....	158
	参考文献 .....	158
<b>第 12 章</b>	<b>含时变时滞的随机非完整系统的状态反馈镇定</b> .....	<b>159</b>
12.1	问题描述 .....	160
12.2	鲁棒控制器的设计 .....	161
12.3	切换控制和主要结果 .....	166
12.4	仿真例子 .....	167

---

12.5 小结 .....	169
参考文献 .....	169
<b>第 13 章 随机非完整系统的有限时间镇定 .....</b>	<b>171</b>
13.1 符号与基本结论 .....	172
13.1.1 本章的主要符号 .....	172
13.1.2 随机非线性系统的相关定义有限时间稳定定理 .....	172
13.2 问题描述 .....	173
13.3 有限时间镇定 .....	174
13.3.1 $x_0(0) \neq 0$ 的情形 .....	174
13.3.2 切换控制和主要结果 .....	178
13.4 仿真例子 .....	179
13.5 小结 .....	181
参考文献 .....	181

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 引 言

利用通信网络实现地域上分布的现场传感器、控制器及执行器之间的信息相互交换,以实现被控对象的实时反馈控制,这样的一类控制系统被称为网络控制系统(NCS)。与传统的点对点控制系统相比,NCS具有可实现复杂大系统和远程控制、可实现资源共享、具有高的诊断能力、交互性好、减少系统的布线、增加系统柔性和可靠性、安装维护方便等诸多的优点。然而,网络给NCS带来各种优点的同时,也使系统的分析和设计变得异常复杂。在NCS中,传感器以异步的方式将信息包传输到网络上,控制器接受并对数据进行处理,然后将控制量发送到执行器。数据包的传输可能有时变时延,甚至丢失;通信链接也可能被切断或被阻塞;传感器和执行器可能失效;新的传感器、执行器和控制器可能被加入该系统,并自动地进行重新配置以使用新的资源。所有这些因素都迫切地要求发展与NCS相适应的分析和设计理论。NCS的发展顺应了计算机、网络和控制技术融合的潮流,已经成为国际控制领域的一个研究热点。它的出现为解决复杂大系统控制和远程实时控制中遇到的技术难题,促进控制论、计算机、微电子和通信技术等多门学科的交叉渗透提供了一种新的方法和途径,使控制理论和技术进入一个崭新的阶段。

综上所述,网络的引入虽然大大简化了复杂的控制系统,但也不可避免地引入一些在传统控制系统中不存在或可以忽略的问题,增加了网络控制系统分析和设计的复杂性。传统的控制理论在对系统进行分析时,往往做了很多理想化的假设,如单率采样、同步控制、无时滞采样和执行等,而在网络控制系统中由于控制回路中存在网络,上述假定通常是不成立的,因此传统的控制理论给出的控制设计和分析方法已经不再适用,必须针对网络控制系统的特点给出控制设计与系统分析的新概念和新方法,研究开发适合网络环境的控制策略。

非完整系统是指典型的受非完整约束(非完整约束是指含有系统广义坐标导数且不可积的约束)系统,包括车辆、移动机器人、某些空间机器人、水下机器人、欠驱动机器人和运动受限机器人等。因此,非完整系统的控制研究具有广泛应用背景和重要应用价值。

自 1894 年德国数学家 Hertz 将系统所具有的约束划分为完整和非完整两大类以来, 世界各国学者深入研究了非完整系统动力学模型的构造和特点, 为非完整系统的研究从基本力学推广应用到其他学科打下了坚实的基础。近年来, 随着移动机器人技术和航天技术的发展, 非完整系统的控制问题越来越受到世界各国学者的关注。由于非完整约束是对系统广义坐标导数的约束, 它不减少系统的位形自由度, 这使得系统的独立控制个数少于系统的位形自由度, 给其控制设计带来很大困难。另外, 利用非线性控制系统理论的微分几何方法已证明: 非完整系统不能用连续的状态反馈镇定。因此, 以研究连续状态反馈为主的现代控制理论中大量成熟的结果无法直接用于非完整系统的镇定控制研究, 使得非完整控制系统研究成为当今控制领域最具挑战性的难题之一。

## 1.2 网络控制系统研究现状及研究方法

针对网络控制系统的研究, 开始于 20 世纪 90 年代。Ray 等提出的集成通信控制系统可以看成是现在的网络控制系统的雏形, 在此后的十几年中, 网络控制系统受到越来越多的关注, 成为控制界的一个研究热点。关于网络控制系统的研究可以分为两个方面: 一是对网络的控制, 即改善网络的性能, 减少网络诱导时延和数据包丢失的可能性, 从而提高网络控制系统的性能; 二是在网络和通信协议为已知的情况下, 考虑网络诱导时延、数据包丢失等因素, 研究系统的控制策略设计问题, 来保证系统的稳定性和控制性能。现在也有两种研究途径互相交叉, 即调度与控制协同设计的趋势。自 Ray 提出集成通讯控制系统的概念以来, NCS 的研究取得了一系列的研究成果, 最初研究的是原先设计的控制器, 在网络介入后系统保持稳定的条件, 然后发展到考虑特定的网络条件(网络诱导时延、多包传输、数据包丢失等), 如何设计控制器使闭环系统稳定并具有一定的性能, 以及设计网络协议和信息调度策略, 改善网络的运行性能, 进一步协同设计调度算法和控制算法, 优化网络控制系统的综合性能。下面分别予以介绍。

### 1. 稳定性分析

NCS 的稳定性问题是 NCS 研究中的基本问题, 是指无网络时设计的控制系统, 当网络介入后能否保证系统的稳定性, 主要研究成果有: 保证系统稳定的网络节点发送数据的最大允许传输间隔、保证系统稳定的最大允许时延上界等。目前关于确定网络化控制系统的稳定性方面, 已从不同的角度进行了很多研究, 用来保证网络化控制系统在一定的条件下保持稳定, 然而, 没有一般意义上的网络化控制系统的稳定性判据。大多数的稳定性分析技术受到网络结构、网络协议和

所使用的控制技术的影响,在分析中还作了一些假设,如假设网络无错传输、采样时间偏置恒定、网络无过载、延迟小于采样时间等。

## 2. 随机控制方法

在早期的 NCS 研究中,针对时变的网络诱导时延,利用接收缓存和队列技术将时变时延转换成固定时延,将 NCS 建模为确定性系统,然后用确定性控制方法设计控制器,形成 NCS 的确定性控制方法。但确定性控制方法人为扩大了系统中的时延,从而降低了系统性能,因此,很多学者考虑网络传输中网络诱导时延的随机特性,提出随机控制方法,并将其扩展到随机数据包丢失的情况。当网络诱导时延的概率分布已知时,文献 [1] 推导了随机时延下闭环网络控制系统的数学模型,指出网络控制系统可以用混杂系统模型来表示,同时研究了网络控制系统零状态均方指数稳定性的充分条件;文献 [2] 讨论了长时延下 NCS 的随机最优控制问题,分离设计了完全状态反馈控制器和 Kalman 滤波器;文献 [3] 针对控制器和执行器均为事件驱动,且网络诱导时延的上限大于一个采样周期时,建立了 MIMO 网络控制系统的离散模型,研究了闭环系统的稳定性,给出随机最优控制器的设计方法;文献 [4] 研究了长时延下当系统指数均方稳定时,NCS 的完全状态、部分状态和输出反馈控制;文献 [5] 将随机网络时延建模为服从 Bemouh 分布的随机变量的函数,在此基础上,基于状态观测器,设计使系统指数稳定并具有  $H_\infty$  扰动抑制的控制器;文献 [6] 针对随机长时延网络控制系统,研究了系统的数学模型和稳定条件,并从稳定条件中得到最大允许时延和控制器设计方法;文献 [7] 假设网络诱导时延小于一个采样周期,且为一相互独立、同分布、统计特性已知的随机变量序列,设计了网络控制系统的 LQG 随机最优控制器和状态估计器。文献 [8] 假设网络控制系统的节点工作在不同的驱动方式下,网络时延具有马尔可夫延迟特性时,设计了网络控制系统的控制律。文献 [9] 研究了基于马尔可夫时延特性的 NCS 的闭环稳定性问题,提出一种新的控制模式,即传感器节点和执行器节点采用时间驱动的工作方式,而控制器节点采用事件驱动的工作方式。同时在传感器和控制器节点发送端设置发送缓冲区,以确保信息按产生的时间先后依次到达接收端。采用这种控制模式,得到具有随机时变传输延迟的网络控制系统的数学模型。进一步利用马尔可夫链理论和随机最优控制理论,得到满足给定二次型性能指标的最优控制律。文献 [10] 将网络时延建模为隐马尔可夫模型,并在概率分布未知时,设计了随机最优控制器。

## 3. 鲁棒控制方法

鲁棒控制理论是针对实际工程中模型不确定性发展起来的,将其用于 NCS

控制设计时,关键是要将网络时延、数据包丢失转化为系统的一个不确定块或是系统的扰动,然后再针对转化后的系统设计鲁棒控制器,这样设计出的控制器能同时保证 NCS 的鲁棒稳定性和性能指标,该性能指标并非概率意义上的性能指标,而是确定性的性能指标。相比于随机控制方法,鲁棒控制方法不需要事先获得网络诱导时延、数据包丢失等的概率分布或马尔可夫特性,只需知道相应的上界即可,相比之下,应用更为方便。文献 [11] 建立了 NCS 的增广模型,将不确定时延转化为系统矩阵的不确定性,在此基础上,给出稳定控制器的设计方法;文献 [12] 建立了网络控制系统的一种多时延模型,推导了状态反馈鲁棒性能控制器存在的条件和控制器的设计方法。文献 [13] 用增广方法将不确定时延 NCS 建模为参数不确定系统,在此基础上研究了使闭环系统二次稳定的状态反馈控制器存在的充分条件;文献 [14] 针对一类具有网络诱导时延和数据包丢失的 NCS,通过切换 Lyapunov 函数的构造,推导了鲁棒控制器存在的充分条件;文献 [15] 将长时延且有数据包丢失的 NCS 建模为切换系统,然后用线性矩阵不等式方法设计鲁棒状态反馈控制器。

#### 4. 智能控制方法

在网络控制系统中,设计者关心的显然不仅仅是控制的性能,网络通信的质量通常是必须考虑的问题。由于通信质量往往是不确定的,而且这种不确定性的特征一般难以描述(如其概率分布、可估计的界等无法预先知道),那么如何设计统筹考虑系统的控制性能与通信质量并使二者都得到改善的控制规律是一个焦点问题。有研究者认为智能控制技术是解决这个问题一个途径。Lian 在文献 [16] 中提出一个设想:可以设计出一种智能控制器,能够估计出网络当前通信状况,并根据当前的通信状况在多种控制行为模式之间切换,以使网络性能与控制性能同时保持在某一满意范围。目前,智能控制在 NCS 中的应用主要表现为模糊控制技术在 NCS 中的应用。目前网络控制系统的智能控制在理论上的研究尚不完善,在设计控制器时,难以进行深入的理论分析,因此还处于初级阶段,有待继续深入研究。

#### 5. 预测控制方法

预测控制采用了多步预测的方式,扩大了反映过程未来变化趋势的信息量,因而能在各种复杂生产过程控制中获得好的应用效果,并具有较高的鲁棒性,因此近年来,国内外学者开始研究将模型预测控制方法应用于网络控制系统中。文献 [17] 提出网络控制系统的预测控制模型,基于模型匹配和多步预测补偿的思想来改善控制性能,通过采集到的传感器端到控制器端的时滞来估算控制器端至

执行器端的时滞，并给出传感器端和执行器端数据处理的算法；文献 [18] 采用动态矩阵控制算法来预测数据打包中人为延迟的状态信息，并进行控制量的计算，解决当负载过大，数据利用率低时而产生的网络冲突和预测不准问题；文献 [19] 基于模型预测算法来克服 NCS 中的网络诱导时延、空采样和数据拒绝等问题，其中在控制器或执行器在给定的时间间隔内没有接收到新数据时，采用预测值来代替。仿真结果表明算法能有效提高系统的控制性能。文献 [20] 提出改进的 Smith 补偿控制算法来解决网络时延不确定使预估补偿器控制效果差的问题，仿真结果表明该控制策略实现简单，能很好地补偿网络不确定时延。文献 [21] 用改进的模型预测控制器和改进的 Smith 预估器设计了一种新的 NCS 控制方法来补偿随机通信时延。该算法中，充分用了预测控制算法的冗余控制量，用上一次的未来控制量来补偿前向通道时延导致的控制信号延误或丢失，用 Smith 预估器来补偿反馈通道中的时延，并设计了一个滤波器来提高 NCS 的鲁棒性。文献 [22] 提出一种网络预测控制方案。在此方案中，包含一个控制量预测器和一个时延补偿器，控制预测器产生能保证控制性能的预测控制量，网络时延补偿器对网络诱导时延进行补偿。在此网络预测控制方案的基础上，提出恒定时延和随机通信时延下闭环网络预测控制的稳定性准则。文献 [23] 针对基于因特网远程控制系统中网络存在的不确定时延和数据包丢失，采用改进的 Smith 补偿控制算法和改进的广义预测控制算法相结合，对控制信息进行反馈和对控制信息加上时标的方案，利用广义预测控制中的冗余控制信息对被控对象进行控制。仿真结果表明，该方法能够动态补偿时延，在预测模型准确时，能够解决数据包丢失引起的性能下降问题。

## 6. 调度与控制协同设计方法

NCS 的调度与控制协同设计的研究主要是将控制性能和网络运行性能等多个目标加权求和，转化为单目标优化问题，在系统稳定性和网络资源可调度性的双重约束下，优化系统的性能。文献 [24] 提出一种网络调度器，通过动态资源分配来提高系统的性能，调度器通过动态调整各回路的优先级实现资源的分配。文献 [25] 提出一种基于调度和控制系统设计来补偿随机网络诱导时延的 NCS 设计框架，在此框架下，用调度算法确定控制回路的最优采样周期以保证网络的性能，同时设计自适应模糊 PID 控制器以保证控制性能，通过一个多回路 NCS 的实例说明该设计框架对网络的不确定性具有鲁棒性。

## 1.3 非完整控制系统的研究现状与研究方法

非完整控制系统问题属于非线性控制系统范畴，由于非完整约束的特性，对

于大多数的非完整控制系统,用一般线性控制理论和标准的非线性控制方法是很难解决的。同时,非完整控制系统的难点不仅在于系统存在非完整特性,而且还在于系统要达到什么样的控制目标。非完整控制系统控制的目标可以分为:运动规划、反馈镇定、跟踪控制三个方面。本节简要介绍一下这三类问题的研究情况。

### 1.3.1 运动规划

运动规划问题是指采用一组控制序列使系统能在有限时间内从任意初态到达任意终态。这类问题一般属于开环控制问题。对于一般规划问题没有特别的控制目标要求,只要能保证系统在有限时间内从任意初态到达任意终态即完成了任务。现有的研究方法较多,比较常用的是基于微分几何的方法。

李括号、李代数是非线性系统几何方法的核心之一。许多实际运用的运动规划方法都是基于李代数方法的<sup>[26]</sup>。受李代数方法的启发,定义向量场  $g_1, g_2$  的李括号运算为

$$[g_1, g_2](q) = \frac{\partial g_2}{\partial q} g_1(q) - \frac{\partial g_1}{\partial q} g_2(q)$$

所以,对于非完整控制系统而言,通过在向量场之间的切换,可以产生出新的李括号,新的运动方向,而更加复杂的切换可以产生对应更为高阶的李括号。如果  $g_1, g_2, \dots, g_m$  构成的李代数分布满秩(完全非完整情况),即该分布张成空间,这保证一定存在控制序列使得系统从任意初态运动到任意终态。

为了使  $g_1, g_2, \dots, g_m$  如构成的李代数满秩,取基的方法之一是列出所有生成元和李积。李积指的是纽的任意一组嵌套李括号,如  $[[g_1, g_2], [g_1, g_2]]$ 。对于一般系统,这也是不容易的。

文献[27]考虑了特殊的一类幂零分布系统的运动规划问题,提出一种采用分段定常输入的运动规划方法。对于非幂零情况,可以证明,当起点和终点较接近时,该方法可使原系统更加接近目标,接近程度至少一半。将路径分为许多小段,重复运用该算法,就可以任意接近该目标。

### 1.3.2 反馈镇定

反馈镇定问题是指采用反馈控制律使得闭环系统被渐近镇定到平衡点。对线性定常系统而言,如果所有的不稳定特征根均是可控的,则存在线性静态时不变反馈控制律使得原点被渐近镇定。对非完整系统来说,情况就并非如此,非完整系统在平衡点的线性化系统一般是不可渐近镇定的,所以有关的线性镇定工具甚至无法局部应用<sup>[33]</sup>。另外,非完整系统还存在另一个区别于线性系统的本质问题:不存在光滑时不变状态反馈控制律。这一结果是由 Brockett 在更为一般的情



况下给出的<sup>[28]</sup>。

为了避开 Brockett 必要条件的限制,非完整控制系统反馈镇定问题的一般解决方法主要有非连续时不变反馈、时变反馈以及前两者的混合。

### 1. 非连续时不变反馈

非连续时不变反馈方法又可分为非光滑变换方法、分段连续方法以及滑模控制方法等。

#### 1) 非光滑变换方法

文献 [27] 利用  $\sigma$  过程,对满足条件的一类非完整系统进行了巧妙的变换,将对原系统的非线性设计问题转变成对线性定常系统的设计过程,该方法充分利用了非完整系统的结构特点,是解决非完整控制系统反馈镇定问题的一种重要方法。文献 [29] 将该方法推广到欠驱动水面舰船系统的反馈镇定问题中,得到非连续的反馈控制律使得闭环系统以指数形式渐近镇定。文献 [30] 将该方法推广到扩展链式系统,提出非连续的指数镇定律。

$\sigma$  过程的定义<sup>[31]</sup>:一种奇点的分解方法,使得奇点附近很小的位移对应坐标很大的变化,或称之为奇点的膨胀。简单而言,过程就是由  $(x, y)$  坐标当  $x \neq 0$  时变为坐标  $(x, u = \frac{y}{x})$ 。该方法充分考虑了非完整控制系统的优点,该方法可适用于链式、幂式等一类非完整系统,设计巧妙简单,得到的控制结果理想。

#### 2) 分段连续方法

Sussman 在文献 [32] 中证明了对一类非线性可控系统存在分段连续的状态反馈控制律使得闭环系统被渐近镇定。文献 [27] 构造出分段的 Lyapunov 函数,得到分段连续的时不变状态反馈镇定律。文献 [30] 对非完整移动机器人的反馈镇定问题进行了研究,提出分段连续的反馈镇定律。针对一些具体的非完整控制系统,文献 [34] 给出分段连续镇定律的设计方法,这些方法中系统状态为指数收敛的。

#### 3) 滑模控制方法

滑模控制方法就是设计控制律,使得系统沿着某一滑动面趋于原点,系统在有限时间内到达原点。文献 [35] 利用滑模控制方法对带有不确定性的非完整控制系统进行了研究。采用滑模控制方法的优点是设计简单、收敛性能好,缺点是不易推广到一般的非完整系统。

一般来说,采用非连续时不变反馈方法的优点是设计一般较为简单、易得到指数收敛控制律;缺点是控制律非连续且不易工程实现、算法推广性较差。