

分布参数变结构控制系统

胡跃明 周其书 著

国防工业出版社

分布参数变结构控制系统

胡跃明 周其节 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

分布参数变结构控制系统/胡跃明,周其节著. —北京:国防工业出版社,1996.1

ISBN 7-118-1465-6

I. 分… II. ①胡…②周…③ III. 分布参数系统-自动控制系统 N. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 06559 号



国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8½ 216 千字

1996 年 1 月第 1 版 1996 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1~2000册 定价:12.40 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由**国防科技图书出版基金**资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

CA025/01

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄 宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允
	曾 铎		
秘 书 长	刘琯德		
委 员	尤子平	朱森元	朵英贤
(按姓氏笔划为序)	刘 仁	何庆芝	何国伟
	何新贵	宋家树	张汝果
	范学虹	胡万忱	柯有安
	侯 迁	侯正明	莫梧生
	崔尔杰		

序

随着现代科学技术的发展以及实际工程控制系统(例如空间飞行器、柔性机器人、化工过程等)设计的需要,分布参数系统的控制问题已成为控制界一个十分重要的研究领域。近 30 年来,这一领域已取得了比较丰富的理论与应用成果,特别是在系统的分析方面,对线性分布参数控制系统已作了较系统的研究,得到了关于能控性、能稳性、能观性及最优控制等方面比较完整的理论结果;对非线性分布参数控制系统的研究近年来也开始活跃起来,我国控制理论工作者做了大量的分析研究工作,并且出版了专著^[30,51,52,53]。但是,理论与应用之间仍然存在着一定的距离。这是因为许多理论,往往要求受控对象的参数及结构是确定的,而实际系统不可避免地存在着各种随机干扰因素的影响,此外在系统建模时,也不得不忽略各种非线性因素的影响。由于分布参数系统的复杂性,迄今为止还缺乏有效的实时辨识方法。因此当系统参数变化甚至结构不确定时,将理论上很完美的控制规律应用于实际系统也往往效果不佳,甚至会导致系统不稳定。随着现代工程控制系统对控制精度及技术要求的不断提高,分布参数系统的鲁棒性与自适应控制已成为一个在工程系统设计中迫切需要解决的问题。

近年来,随着计算机技术的高速发展以及高速切换电路的产生,变结构控制方法由于具有对干扰等不确定因素的不变性、能分解并降低问题的阶数、算法简单且易于实现等优良特性而引起国际控制界的高度重视,特别是在电机及机器人等复杂系统中的成功应用,大大推进了这一领域的研究工作。分布参数控制系统除了受不确定性因素的影响外,还由于在实时控制时往往采用各种离

散及近似方法,因而对系统的鲁棒性能要求也相应增加,变结构控制方法所具有的优良特性无疑为解决分布参数控制系统的鲁棒性与自适应控制问题提供了可能,近 10 年来已取得了一系列的理论与应用结果,并且有越来越活跃的趋势。但是国内外还未有专著介绍这一方面的研究成果,因此我们认为很有必要系统地总结有关的研究方法与成果。期望本书的出版能为推动这一领域的研究工作尽微薄之力。

由于分布参数系统的变结构控制理论与应用研究尚在发展之中,加上作者的水平有限,书中的缺点在所难免,敬请读者及国内同行指正。

最后,作者衷心感谢国家自然科学基金委员会及华南理工大学在该项研究中所给予的资助,同时也衷心感谢国防工业出版社在本书出版过程中所给予的大力支持与帮助。中山大学赵怡教授与华南理工大学刘永清教授在百忙中仔细阅读了初稿,提出了许多宝贵修改意见,在此作者深表谢意。

著 者

内 容 简 介

利用变结构控制方法设计分布参数控制系统,对于干扰及参数变化等具有良好的自适应性,无需测量系统的干扰及不确定量而仅需知道其变化范围即可,控制算法简单易于实现,因而越来越受到人们的重视。本书介绍了作者及国内外有关学者在这一领域的主要研究成果及方法,论述了分布参数系统的变结构控制基本理论及综合方法,并介绍了它们在空间飞行器、柔性机器人等实际系统中的应用。

本书可供自动控制、应用数学专业的研究生与研究人员及从事工程设计的技术人员参考。

ISBN 7-118-01465-6/TP · 203

定价:12.40 元

目 录

第一章 绪论	1
§ 1 引言	1
§ 2 变结构控制系统的概念	2
§ 3 变结构控制的一般原理	5
§ 3.1 跳变系统的数学描述	6
§ 3.2 滑动模的存在性	8
§ 3.3 滑动模的不变性原理	9
§ 3.4 利用分解原理来综合变结构控制系统	11
§ 3.5 分布参数系统变结构控制的有关问题	13
§ 4 分布参数系统的变结构控制理论及应用的 发展概况	14
第二章 分布参数变结构控制系统的滑动模	16
§ 1 引言	16
§ 2 正则化方法	17
§ 3 滑动模的数学描述	19
§ 4 一类二阶分布参数系统的滑动模	33
§ 4.1 滑动模的数学描述	33
§ 4.2 有限维近似	39
§ 5 滑动模的基本性质	43
§ 6 滑动模方程解的存在唯一性	45
第三章 分布参数变结构控制系统的综合	48
§ 1 引言	48
§ 2 基于状态值的变结构控制律	49
§ 3 切换流形的设计	54
§ 3.1 滑动模的极点配置	54
§ 3.2 滑动模的优化	56

§ 3.3 非线性滑动模的稳定性	58
§ 4 无限时间区间上等价控制法的合理性	61
§ 5 偏微分方程描述的分布参数变结构系统 的综合	63
§ 5.1 李雅普诺夫直接法	64
§ 5.2 基于状态输出值的变结构控制律	68
§ 5.3 基于状态测量值的变结构控制律	70
§ 6 热处理问题的变结构控制	72
第四章 一类双线性分布参数系统的变结 构控制	77
§ 1 引言	77
§ 2 一类双线性分布参数系统的数学模型	77
§ 3 双线性系统的综合	80
§ 3.1 一类双线性分布参数系统的控制(一)	80
§ 3.2 一类双线性分布参数系统的控制(二)	83
§ 3.3 一般情形	87
§ 4 滑动模的存在性	89
§ 4.1 滑动模的存在性条件及表示	89
§ 4.2 对干扰的不变性条件	93
§ 4.3 实际滑动模的近似	94
§ 5 模型跟踪问题的变结构控制	96
§ 5.1 利用不变性条件实现模型跟踪控制	96
§ 5.2 进一步讨论	100
第五章 滞后系统的变结构控制	113
§ 1 引言	113
§ 2 滑动模的数学表示	114
§ 2.1 线性情形	114
§ 2.2 非线性情形	118
§ 3 综合	121
§ 3.1 线性定常情形	121
§ 3.2 非线性情形	126
§ 4 一类多滞后线性变结构系统的综合	128

§ 5 模型参考自适应控制滞后系统	133
§ 6 一类非线性滞后大系统的分散控制	139
§ 7 一般线性滞后系统的变结构控制及其 实现问题	146
§ 7.1 一般滞后系统的变结构控制	146
§ 7.2 滞后系统的状态观测器	152
§ 7.3 滞后系统变结构控制的观测器实现	157
第六章 有限维变结构控制器	161
§ 1 引言	161
§ 2 有限维近似	161
§ 2.1 问题的提法	161
§ 2.2 近似的合理性	164
§ 3 有限维状态反馈变结构控制	166
§ 3.1 有限维状态反馈变结构控制器的设计	166
§ 3.2 闭环系统的稳定性分析	168
§ 4 有限维状态观测器	174
§ 4.1 观测器的存在性条件	174
§ 4.2 基于近似模型的有限维状态观测器设计	177
§ 5 变结构控制的观测器实现	179
§ 6 一类不确定分布参数系统的有限维变结构控制	182
§ 6.1 系统的描述及有限维近似	182
§ 6.2 滑动模的部分不变性概念及鲁棒设计	185
§ 6.3 变结构控制器的设计	189
§ 6.4 闭环系统的稳定性	190
§ 7 结束语	192
第七章 若干分布参数受控对象的变结构控制	194
§ 1 引言	194
§ 2 移动控制系统	194
§ 2.1 运动方程	195
§ 2.2 稳态及偏差模型	197
§ 2.3 变结构控制方法	200
§ 3 模态控制	205

§ 4 分布参数热交换器的变结构控制	208
§ 4.1 模型的建立	208
§ 4.2 变结构控制方法	211
§ 4.3 一个例子	213
§ 5 其他问题	214
第八章 柔性空间飞行器及柔性机器人的变	
结构控制	215
§ 1 引言	215
§ 2 柔性空间飞行器的变结构控制	215
§ 2.1 系统的动力学模型	215
§ 2.2 状态观测器	218
§ 2.3 动态输出变结构控制	220
§ 2.4 轨迹跟踪问题	223
§ 3 单杆柔性机器人的变结构控制	226
§ 3.1 动力学模型	226
§ 3.2 变结构控制器设计	228
§ 4 多杆柔性机器人的变结构控制	239
§ 4.1 动力学模型	239
§ 4.2 变结构控制器设计	243
§ 4.3 结束语	249
参考文献	249

第一章 绪 论

§1 引 言

许多现代工程控制系统,例如空间飞行器、柔性机器人、化工过程等,都是以偏微分方程、积分微分方程或泛函微分方程来描述其状态变化规律的,这种类型的控制系统都是具有无穷自由度的系统,其参数是空间或时间分布的,故称为分布参数系统。由于分布参数系统的状态空间是一无限维空间,系统在每一时刻的状态是一个函数,一般情况下很难用解析式子表示出来,因此其控制问题比起用常微分方程描述的集中参数系统来说要困难与复杂得多,它涉及到泛函分析、无限维系统控制理论与方法、数值近似等多门学科及各种实时控制技术。从60年代开始,随着空间科学技术的发展,引起了国内外学者对这一领域的极大关注,在探讨系统的能控性、能稳性、能观性、最优控制、参数与系统辨识等方面取得了可喜的进展。我国学者在分布参数系统的控制这一领域的研究工作,几乎与国际上同时起步,林伟、王康宁、赵怡等先后出版了专著,还有许多学者在系统的分析方面做了大量工作。

应该看到,目前分布参数系统的控制研究领域还主要局限于系统的分析方面,综合方面的工作还很少。此外,理论与应用之间仍存在着很大的距离,这是因为迄今为止的绝大多数工作往往要求受控对象的结构与参数是确定与已知的,而实际系统不可避免地存在着各种随机因素的干扰(例如空间飞行器、柔性机器人负载的变化),以及建模时忽略了一些非线性因素的影响;另一方面,由于分布参数系统的复杂性,迄今为止尚无快速实用的实时辨识方

法,因此将理论上很完美的控制策略应用于实时系统控制时也往往效果较差,甚至导致系统是不稳定的。于是,分布参数系统的自适应与鲁棒性控制就成为工程系统设计中迫切需要解决的问题。

近年来,随着计算机技术的高速发展及大功率电子切换器件的出现,变结构控制方法由于具有对于干扰与参数变化的不变性、能分解并降低问题的阶数、控制算法简单且易于实现、节省能源等优点而引起了国内外学者的高度重视,并已成功地应用于电机和机器人等复杂系统。由于分布参数系统具有无穷自由度,在实时控制时不得不引进各种近似方法(例如有限元法、模态设定法),通过适当的观测点测量值来设计控制器,从而对系统的鲁棒性能要求也更高,变结构控制方法所具有的上述优良特性无疑为解决这一问题开辟了捷径。另一方面,实际控制量也往往呈 Bang-Bang 形式的,也即是变结构的,因此无论从理论上还是从实际上讲,研究分布参数系统的变结构控制问题都是有重要意义的。

§ 2 变结构控制系统的概念

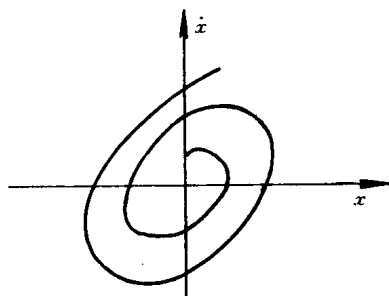
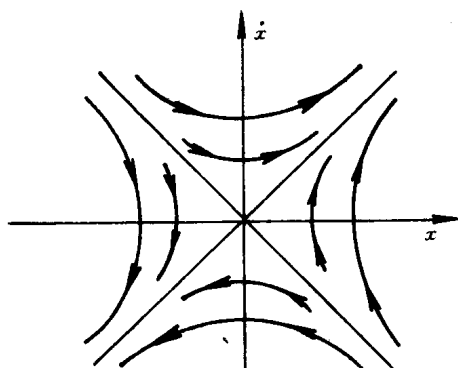
为了阐明变结构控制系统的基本概念,考虑下列二阶系统

$$\ddot{x} - \xi \dot{x} = u, \xi > 0 \quad (1.2.1)$$

设状态反馈为

$$u = -\psi x \quad (1.2.2)$$

设 ψ 的值可取为 α 或 $-\alpha$ ($\alpha > 0$), 当 $\psi = \alpha$ 时, 相当于负反馈, 此时微分方程有一对共轭复特征值, 其实部为正数, 相轨迹图如图 1-1 所示, 相平面坐标原点是不稳定的焦点。当 $\psi = -\alpha$ 时, 则相当于正反馈, 系统的特征值为实数且一正一负, 从而坐标原点是鞍点, 相轨迹图如图 1-2 所示。显然, 对应这两种结构, 系统均不稳定, 仅在 $\psi = -\alpha$ 的情况下有收敛到原点的相轨线, 即沿着这一结构的稳定特征向量方向的相轨线。如果系数 ψ 按下述规律在此直线和 $x = 0$ 上进行切换, 即

图 1-1 $\psi = \alpha$ 时的相轨迹图图 1-2 $\psi = -\alpha$ 时的相轨迹图

$$\psi = \begin{cases} \alpha & \text{若 } xs > 0 \\ -\alpha & \text{若 } xs < 0 \end{cases}$$

其中 $s = \dot{x} + cx$, $c = -\frac{\xi}{2} + \sqrt{\frac{\xi^2}{4} + \alpha}$, 则 $s=0$ 直线两侧的轨线都最终落在此直线收敛到原点, 因此相应的系统是渐近稳定的, 如图 1-3 所示。

若取切换线为 $x=0$ 及 $s = \dot{x} + cx = 0$, 并且参数 $c \in (0, -\frac{\xi}{2} +$

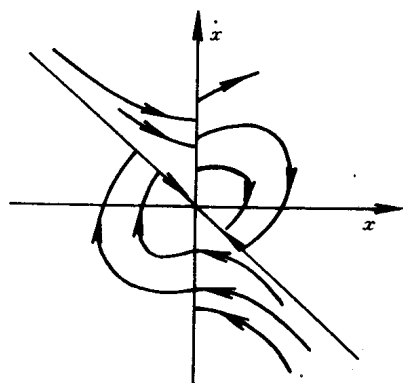


图 1-3 有切换的相轨迹图

$\sqrt{\frac{1}{4}\xi^2 + \alpha}$), 则得到图 1-4 的相轨迹。由图可见, $s=0$ 两侧的相轨线都引向切换线 $s=0$ 。因此状态一旦到达此直线上, 就沿此直线

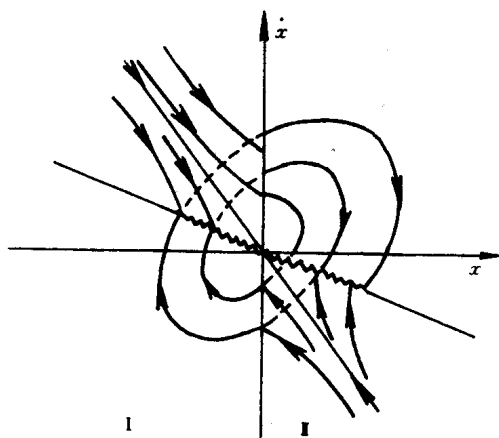


图 1-4 变结构系统的相轨迹图

收敛到原点, 这种沿 $s=0$ 滑动至原点的特殊运动称之为滑动模。这是在任何一种固定结构 I 或 II 下所没有的。直线 $s=0$ 称之为切