



苏宏业 褚健 著
鲁仁全 嵇小辅

不确定时滞系统的 鲁棒控制理论



科学出版社

www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

不确定时滞系统的 鲁棒控制理论

苏宏业 褚健 鲁仁全 嵇小辅 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书在作者多年研究的基础上,深入浅出地阐述了不确定时滞系统的鲁棒控制理论的最新研究成果。针对不确定线性时滞系统、不确定非线性时滞系统以及不确定奇异时滞系统,采用 Lyapunov-Razumikhin 稳定性理论、Barbalat 引理以及凸优化等理论,以线性矩阵不等式、Riccati 方程作为研究工具,探讨了鲁棒稳定性、鲁棒控制器以及滑模变结构控制器的设计问题。

全书共有 9 章,主要内容有:不确定时滞线性系统的时滞独立与时滞依赖的鲁棒控制、执行器具有饱和特性的鲁棒控制、滑模变结构鲁棒控制以及具有非线性特性的不确定 Lur'e 系统、不确定 Lur'e 奇异系统的鲁棒控制等。本书注重研究方法的科学合理性,在内容上重点突出,相互衔接;避免了结果的雷同;结构上以线性系统的鲁棒控制研究到非线性系统的鲁棒控制研究为主线,结构合理,体系完备。

本书可作为控制理论与控制工程专业博士生、硕士生的教材,也可作为力学、应用数学、工程科学及与之相关的工程应用领域的教学与科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

不确定时滞系统的鲁棒控制理论/苏宏业等著. —北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-019266-0

I. 不… II. 苏… III. 不确定系统:时滞系统—鲁棒控制—理论研究 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 095791 号

责任编辑:姚庆爽 潘继敏/责任校对:朱光光

责任印制:刘士平/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>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

排版制作:科学出版社编务公司

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 7 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2007 年 7 月第一次印刷 印张: 18

印数: 1—2 500 字数: 362 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<明辉>)

序

在长期的控制工程实践中,人们早已从实际与理论两方面深刻地认识到,在设计控制系统时,基于系统的精确模型是不现实的。由于种种原因,要得到系统和外界干扰的精确数学模型也是不可能的。系统的不确定性是普遍存在的,比如控制对象的模型化误差和未知参数,以及传感器噪声和外部扰动等。因此,控制系统的设计与实现,必须考虑这样一个问题,即在存在未知不确定性的情况下,反馈控制器是否仍然能够使控制系统稳定并满足所希望的性能要求。随着对不确定性问题越来越深刻的认识和研究,就导致了专门分析和处理具有不确定性系统的控制理论——鲁棒控制理论的产生。

虽然鲁棒控制的思想可以追溯到 20 世纪上半叶 Black、Nyquist、Bode 等的工作,但早期的研究往往只限于微摄动的不确定性,即敏感性分析。这也是一种无穷小分析思想,与工程实际相距较远。鲁棒控制这一术语首次被提出是在 1972 年^①。首次在期刊论文标题中出现是 1974 年^②。通常意义下,鲁棒控制就是要试图描述被控对象模型的不确定性,并估计在某些特定界限下达到控制目标所留有的自由度。70 年代末和 80 年代初,人们从实际与理论两方面越来越深刻地认识到鲁棒控制具有的特殊实践意义和理论意义,因而鲁棒控制一直是一个非常活跃且具有挑战性的研究领域。经历了众多学者二十多年的努力,鲁棒控制理论得到了长足的发展,并取得了令人瞩目的成果,逐渐形成了相对完整的理论体系。在现代鲁棒控制研究领域受到广泛重视的有 Kharitonov 区间理论^③、 H_∞ 控制理论^④、结构奇异值理论(又简称 μ 理论)^⑤等。

近年来,对于不确定时滞系统的鲁棒控制研究成果也层出不穷。《不确定时滞系统的鲁棒控制理论》一书的作者在吸收前人有益成果的基础之上,从 20 世纪 90 年代初期开始关注不确定时滞系统的鲁棒控制问题的研究,通过多年的探索与

① Davison E J. 1972. The output control of linear time invariant multivariable systems with unmeasurable arbitrary disturbance. IEEE Trans. Automat. Contr., 17: 621-629.

② Pearson J B, Staats P W. 1974. Robust controllers for linear regulators. IEEE Trans. Automat. Contr., 19: 231-234.

③ Kharitonov V L. 1978. Asymptotic stability of an equilibrium position of a family of systems of linear differential equations. Differentsial'nye Uravneniya, 14: 2086-2088.

④ Zames G. 1981. Feedback and optimal sensitivity: model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses. IEEE Trans. Automat. Contr., 26(2):301-320.

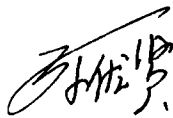
⑤ Doyel J C. 1982. Analysis of control systems with structured uncertainty. IEE Proc. Part D., 129: 242-250.

积累,逐渐形成了有自己特色的理论研究体系,在国内外主要学术期刊上发表了一系列的学术论文,获得了国家自然科学基金重点项目,国家杰出青年基金以及其他的国家重大、重点项目的资助,取得了一定的研究成果。

该书针对不确定时滞系统的鲁棒控制问题,从不确定系统的鲁棒控制基本理论入手,由浅入深、由易到难,系统地阐述了不确定时滞线性系统的时滞独立与时滞依赖的鲁棒控制问题、执行器具有饱和特性的鲁棒控制问题、滑模变结构鲁棒控制问题以及具有非线性特性的不确定 Lur'e 系统、不确定 Lur'e 奇异系统的鲁棒控制问题等。该书的主要内容来源于作者多年研究积累,部分内容是原创性的研究成果。该书注重研究方法的科学合理性,在内容上重点突出,相互衔接,避免了结果的雷同;结构上以线性系统的鲁棒控制研究到非线性系统的鲁棒控制研究为主线,结构合理,体系完备。写作上循序渐进,深入浅出,层次分明。

该书不仅可以作为控制理论与控制工程专业博士生、硕士生的教材,供力学、应用数学、工程科学及与之相关的工程应用领域的教学与科研人员阅读,也可作为相关专业研究生的一本较好的教科书或教学参考书。我相信该书的出版必将在推动不确定时滞系统控制理论与技术的发展进程中起到积极的作用。

中国工程院院士



2006 年 11 月 23 日
于浙江大学控制系

前 言

实际工程问题中总是包含不确定的非最小相位对象，总是不可避免地存在由未建模动态产生的通常在高频下不可忽略的不确定性，总是有敏感元件的噪声、外界干扰以及输入信号的限制。这些都会影响反馈控制系统达到预期的效果。正是基于这一原因，在控制系统设计过程的系统模型建立和控制器设计过程中，考虑到这种不确定性的影响对于在工程实际应用中是否可行就显得尤为重要了；另外，在工程实际中，许多实际的系统都含有时滞，如涡轮喷气式飞机、微波振荡器、核反应堆、轮船定向仪、化工系统、无损耗传输系统等。通常时滞是系统产生振荡和不稳定的根源。控制系统中存在时滞使得理论分析和工程应用增加了特殊的难度，同无时滞系统相比，滞后使系统的相应性能变差，甚至稳定性难以保证，如何将解决线性不确定系统的鲁棒控制技术应用于时滞系统便成为一个十分迫切的问题。综上所述，不确定时滞系统的鲁棒控制研究也就成为研究者所关注的主要问题之一。

本书在作者多年研究的基础上，针对不确定时滞系统的鲁棒控制问题，从不确定系统的鲁棒控制基本理论入手，由简入深，由易到难，系统地阐述了不确定时滞线性系统的时滞独立与时滞依赖的鲁棒控制问题、执行器具有饱和特性的鲁棒控制问题、滑模变结构鲁棒控制问题，以及一类具有非线性特性的不确定 Lur'e 系统、不确定 Lur'e 奇异系统的鲁棒控制问题。本书的主要内容来源于作者多年研究的积累，部分内容是原创性的研究成果，针对鲁棒控制理论领域多个问题的研究，逐渐形成了具有鲜明特点的研究体系。本书的完成，对于刚进入此领域研究的研究人员及工程技术人员具有很好的理论与应用参考价值。

本书共分 9 章。第 1 章是绪论。考虑到今后章节需要应用矩阵不等式理论、稳定性理论以及不确定性的数学描述，故将以上内容作为第 2 章，作为数学基础。第 3~5 章，主要针对具有范数有界不确定性、匹配不确定性、秩 1 型不确定性以及凸最优不确定性的线性时滞连续及离散系统，给出了时滞独立型以及时滞相关型的鲁棒稳定、鲁棒二次镇定、保成本控制以及鲁棒控制的一些结论和方法。第 6 章，主要针对具有幅值饱和执行器约束和扇形饱和执行器约束的时变不确定时滞系统，给出了基于线性矩阵不等式的低保守性的鲁棒稳定及鲁棒二次镇定的充分条件。第 7 章，主要针对具有匹配不确定性以及非匹配不确定性的时滞系统，给出了滑模动态模型渐近稳定性的充分必要条件以及滑模控制器的设计方法。第 8、9 章，主要针对具有非线性特性的不确定 Lur'e 系统、不确定 Lur'e 奇异系统，

给出了系统绝对稳定性、绝对二次镇定的新方法，以及鲁棒 H_∞ 控制器、可靠控制器的设计方法。

在本书选题、编写过程中得到了中国自动化学会电气自动化专业委员会、科学出版社以及浙江大学先进控制研究所的大力支持和帮助，作者在此表示由衷的感谢。另外作者的历届博士研究生嵇小辅、项基、王景成、刘飞、蒋培刚、高金凤、李晓波、庄开宇、张克勤等参加了部分研究工作，提供了部分资料和数据，丰富了本书内容，作者在此一并致谢。

由于作者水平有限，书中的疏漏在所难免，殷切希望广大读者批评指正。

苏宏业

浙江大学先进控制研究所

摘 要

本书在作者多年研究的基础上,深入浅出地阐述了不确定时滞系统的鲁棒控制理论的最新研究成果。针对不确定线性时滞系统、不确定非线性时滞系统以及不确定奇异时滞系统,采用 Lyapunov-Razumikhin 稳定性理论、Barbalat 引理以及凸优化等理论,以线性矩阵不等式、Riccati 方程作为研究工具,探讨了鲁棒稳定性、鲁棒控制器以及滑模变结构控制器的设计问题。主要研究内容包括如下几个方面:

(1) 针对具有范数有界不确定性、匹配不确定性、秩 1 型不确定性以及凸最优不确定性的线性时滞连续及离散系统,提出了分别基于 Riccati 方程、线性矩阵不等式的时滞独立型以及时滞相关型的鲁棒稳定性判据、鲁棒二次镇定、保成本控制以及鲁棒 H_2/H_∞ 控制的理论和方法。

(2) 针对具有幅值饱和和执行器约束和扇形饱和和执行器约束的时变不确定时滞系统,采用不变集理论和 Lyapunov-Razumikhin 稳定性理论,研究了基于线性矩阵不等式的鲁棒稳定及鲁棒二次镇定问题,并在保守性方面,与前人的研究成果相比有较大的改进。

(3) 针对具有匹配不确定性以及非匹配不确定性的时滞系统,通过分别设计时滞无关和时滞依赖的滑模面,基于变结构控制理论,提出了滑模动态模型渐近稳定的充分必要条件以及滑模控制器的设计方法。

(4) 针对一类具有有限 Hurwitz 扇形角域与无限 Hurwitz 扇形角域的非线性时滞系统,提出了低保守性的鲁棒绝对稳定性及绝对二次镇定的新方法,并研究了基于线性矩阵不等式的输出反馈控制器、 H_∞ 控制器以及可靠控制器的设计方法。

(5) 针对一类不确定 Lur'e 奇异时滞系统,通过 Barbalat 引理,提出了闭环系统具有正则性、无摄动性和稳定性的充分条件以及鲁棒 H_∞ 状态反馈控制器的设计方法;并且针对一类具有常规饱和特性的不确定 Lur'e 时滞奇异系统,基于 Lyapunov-Krasovskii 方法和 S 过程,提出了保证闭环系统局部渐近稳定的鲁棒二次镇定控制器的设计方法。

目 录

序

前言

摘要

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 不确定线性系统鲁棒控制概述	3
1.2.1 问题描述	3
1.2.2 研究现状	5
1.3 不确定时滞系统描述与控制	7
1.3.1 不确定线性时滞系统的鲁棒控制	8
1.3.2 不确定 Lur'e 时滞系统的鲁棒控制	15
1.4 注记	21
参考文献	21
第 2 章 数学基础与预备知识	29
2.1 矩阵论基础	29
2.2 Riccati 方程与线性矩阵不等式	32
2.2.1 Riccati 方程	32
2.2.2 线性矩阵不等式	34
2.3 系统稳定性理论	37
2.4 鲁棒控制理论基础	39
2.5 H_∞ 控制理论基础	43
2.6 注记	47
参考文献	47
第 3 章 基于 Riccati 方程的不确定线性时滞系统的鲁棒控制	49
3.1 引言	49
3.2 不确定线性连续系统的状态反馈鲁棒镇定	50
3.3 匹配不确定线性时滞系统的鲁棒控制	57
3.4 $HF(t)E$ 型不确定线性时滞系统的鲁棒控制	59
3.5 秩 1 型不确定线性时滞系统的鲁棒控制	63
3.6 多滞后不确定线性时滞系统的鲁棒控制	66

3.7 注记	70
参考文献	70
第 4 章 基于 LMI 的不确定线性时滞系统的鲁棒控制	72
4.1 引言	72
4.2 具有范数有界不确定参数的线性时滞系统的鲁棒二次稳定	73
4.3 具有范数有界不确定参数的线性时滞系统的时滞依赖鲁棒镇定	81
4.4 具有凸多面体不确定参数线性时滞系统的鲁棒二次镇定	91
4.5 具有凸多面体不确定参数的线性时滞系统的时滞依赖镇定	96
4.6 具有凸多面体不确定参数的离散时滞系统的时滞依赖镇定	102
4.7 注记	107
参考文献	108
第 5 章 不确定线性时滞系统的性能鲁棒控制	110
5.1 引言	110
5.2 不确定线性时滞系统指定衰减度鲁棒镇定	110
5.3 不确定线性时滞系统的鲁棒 H_∞ 控制	117
5.3.1 问题描述	118
5.3.2 具有范数有界不确定的线性时滞系统的鲁棒 H_∞ 控制	121
5.3.3 具有凸多面体不确定的线性时滞系统的鲁棒 H_∞ 控制	126
5.4 不确定线性时滞系统的时滞依赖最优保成本控制	130
5.5 具有范数有界不确定性的离散时滞系统的保成本控制	136
5.6 注记	143
参考文献	143
第 6 章 具有饱和执行器的不确定线性时滞系统鲁棒控制	145
6.1 引言	145
6.2 具有输入约束的不确定线性时滞系统的局部鲁棒镇定	146
6.3 具有输入约束的不确定线性时滞系统的全局鲁棒镇定	150
6.4 具有扇形饱和特性执行器的不确定线性时滞系统的鲁棒镇定(时滞 无关方法)	158
6.5 具有扇形饱和特性执行器的不确定线性时滞系统的鲁棒镇定(时滞 依赖方法)	165
6.6 具有扇形饱和非线性特性执行器不确定线性时滞系统的鲁棒 H_∞ 控制	170
6.7 注记	175
参考文献	175
第 7 章 不确定时滞系统的滑模控制	177

7.1 引言	177
7.2 滑模控制	177
7.2.1 滑模控制的基本概念	177
7.2.2 滑模控制的内在本质	181
7.3 匹配不确定时滞系统的滑模控制	184
7.4 非匹配不确定时滞系统的滑模控制	191
7.4.1 时滞依赖	193
7.4.2 时滞无关	197
7.4.3 数值例子	199
7.5 注记	200
参考文献	200
第 8 章 不确定 Lur'e 时滞控制系统的鲁棒控制	202
8.1 引言	202
8.2 不确定 Lur'e 时滞系统绝对稳定性与绝对二次镇定条件	203
8.2.1 问题描述	203
8.2.2 绝对稳定性条件	204
8.2.3 绝对二次镇定条件	208
8.2.4 数值仿真例子	211
8.3 不确定 Lur'e 时滞系统的 H_∞ 输出反馈控制器的设计	212
8.3.1 问题描述	212
8.3.2 没有参数不确定的输出反馈控制	214
8.3.3 具有参数不确定的输出反馈控制	220
8.3.4 数值仿真例子	222
8.4 不确定 Lur'e 系统可靠 H_∞ 控制	224
8.4.1 问题描述及故障模型	224
8.4.2 具有执行器故障的可靠控制器的设计	228
8.4.3 具有传感器故障的可靠控制器的设计	232
8.4.4 数值仿真例子	234
8.5 注记	236
参考文献	236
第 9 章 不确定 Lur'e 奇异系统的鲁棒控制	239
9.1 引言	239
9.2 不确定 Lur'e 时滞奇异系统的鲁棒稳定性	240
9.2.1 系统描述和定义	240
9.2.2 标称自治系统鲁棒稳定性分析	240

9.2.3 不确定 Lur'e 时滞奇异系统鲁棒稳定性分析	245
9.3 不确定 Lur'e 时滞奇异系统的鲁棒 H_∞ 控制	250
9.3.1 问题描述与定义	250
9.3.2 主要结果	252
9.3.3 数值例子	257
9.4 具有饱和执行器的不确定 Lur'e 时滞奇异系统的鲁棒二次镇定	259
9.4.1 系统地描述和定义	259
9.4.2 标称系统的鲁棒局部稳定性分析	261
9.4.3 无扰动条件下($w(t)=0$)的鲁棒二次局部镇定	265
9.4.4 有扰动条件下($w(t)\neq 0$)的鲁棒二次局部镇定	272
9.4.5 数值仿真例子	273
9.5 注记	274
参考文献	274

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

控制理论是研究被控对象状态的运动规律，其基础是反馈控制。反馈控制的主要目的是：

- (1) 稳定被控对象；
- (2) 改善被控对象的时间响应；
- (3) 降低扰动对系统稳定性的影响，进一步，在系统稳定的前提条件下，降低扰动对系统性能的影响；
- (4) 当被控对象不确定或变化时，仍能在稳定的状态下运行(稳定鲁棒性)，进一步，在系统稳定的前提条件下，当被控对象不确定或变化时，仍能在一定性能指标要求下运行(性能鲁棒性)。

通常情况下，设计一个控制系统包括很多步骤，典型步骤如下：

- (1) 研究被控系统，决定采用哪种敏感元件和执行机构以及它们放置的位置；
- (2) 建立所得到的被控系统的模型；
- (3) 如果需要，简化模型以便于处理；
- (4) 分析得到的系统模型，确定它的性质；
- (5) 确定性能指标；
- (6) 确定所采用的控制器的类型；
- (7) 如果可能，设计控制器以满足性能指标；否则，修改性能指标或拓宽欲寻找的控制器的类型；
- (8) 在计算机上或在实验模型上仿真被控系统；
- (9) 如果有必要从第一步开始重复；
- (10) 选择硬件和软件并实现控制器；
- (11) 如果需要，在线调整控制器。

由于一些客观条件的限制，考虑到仿真手段能在很大程度上反映工程实际中的控制系统的工况运行以及仿真手段具有经济、高效等优点，本文将侧重于该控制系统设计过程中的步骤(4)~(8)。

实际问题中总是包含不确定的非最小相位对象，总是不可避免地存在由未建模动态产生的通常在高频下不可忽略的不确定性，总是有敏感元件的噪声、外界干扰以及输入信号的限制。这些都会影响反馈控制系统达到预期的效果。正是基

于这一原因,在控制系统设计过程的系统模型建立和控制器设计过程中考虑到这种不确定性的影响对于在工程实际应用中是否可行就显得尤为重要了。

系统鲁棒性的研究最早可追溯到研究微分方程解对初值和参数具有连续依赖性的工作。这就是要求解在给定区间的任意小变化可以由参数的充分小变化来保证。这种无穷小分析的思想在不同领域引发了不同的概念与结论。例如,偏微分方程中的适定性研究、计算方法中关于误差的灵敏性等。在控制系统的研究中,人们感兴趣的常常不是一个过程(或解)对参数变化的灵敏性,而是系统的某个性质或某个指标对参数变化的敏感程度。通常最基本的是系统的稳定性在参数变化下保持的可能性。就常系数线性系统的稳定性而言,系统的稳定性参数常在参数空间中由一组不等式加以描述,这样稳定参数常组成一个开集,这就使系统的稳定性相对参数的无穷小扰动总能保持。

实际上系统中参数是不能视为不变或仅具有无穷小扰动的,系统工作环境的变化、模型的不精确、降阶近似、非线性线性化等均可化成一种参数扰动而论,有时系统受控对象可能有几个不同的工作状态,当用同一控制器来控制这种对象时,人们也把由于不同工作状态所对应的参数的差别视为一种扰动,当然这种参数的变化只能视为有界扰动而不是无穷小扰动。现代鲁棒性分析的最重要特点就是要求讨论参数在有界扰动下系统性能保持的能力。

20 世纪初,控制系统设计方法主要是基于 Bode 曲线和 Nyquist 曲线,可以用间接的方法处理系统不确定性问题,发展了在增益和相位存在变化时仍能保证闭环系统稳定的增益裕度和相位裕度概念。然而,遗憾的是这些处理方法大多数局限于单变量输入单变量输出(SISO)系统。随着时间的推移,科学技术的发展要求处理大量的多变量输入多变量输出(MIMO)系统的设计问题,以二次型最优控制(LQ)为代表的一类多变量控制系统设计和最优化方法应运而生。但是随着其在实际工程中的应用,发现基于 LQ 理论设计出来的控制器对系统不确定性因素反应较为敏感,也就是说,不能保证闭环系统具有一定的稳定鲁棒性和性能鲁棒性,而且控制器设计过程要求准确知道干扰过程的全部统计特性,这一要求使该理论的工程应用受到工程实际条件的某些限制(Zames et al., 1983)。另外,在实际工程应用的过程中很难得到被控对象的精确数学模型,在控制系统设计过程中所采用的模型常常是在一定程度上的经过近似化处理的数学模型,数学模型的这种不确定性必须在控制系统设计时进行考虑,因此在控制系统设计中的稳定鲁棒性和在稳定鲁棒性要求的前提条件下的性能鲁棒性问题是值得进行研究的。从广义上来说,系统不确定性按其结构可以分为以下两类:

- (1) 不确定性的结构未知,仅仅已知不确定性变化的界限;
- (2) 不确定性的结构已知,存在着参数的变化(参数不确定性)。

第一类不确定性的鲁棒控制研究导致了 H_∞ 控制理论,第二类不确定性的鲁

棒控制研究导致了参数鲁棒控制理论。

根据用于反馈的信号是采用系统状态还是系统输出,可将反馈控制分为状态反馈控制和输出反馈控制。显然状态反馈控制实现起来比较容易,但在实际工程应用中,大多数系统的状态很难直接测量得到以实现反馈控制。尽管可以采用状态观测器等技术来达到系统状态重构的目的,但总不尽如人意。输出反馈控制虽然实现起来相对困难一些,但是大多数系统的输出可以直接测量得到,从而可以方便地构成反馈控制系统。

本书在作者多年研究的基础上,针对不确定时滞系统的鲁棒控制问题,从不确定系统的鲁棒控制基本理论入手,由浅入深、由易到难,系统地阐述了不确定时滞线性系统的时滞独立与时滞依赖的鲁棒控制问题、执行器具有饱和特性的鲁棒控制问题、滑模变结构鲁棒控制问题,以及一类具有非线性特性的不确定 Lur'e 系统的鲁棒控制问题。

本书的主要内容来源于作者多年研究的积累,都是一些原创性的研究成果,针对鲁棒控制理论领域多个问题的研究,逐渐形成了具有鲜明特点的研究体系。本书的完成,对于刚进入此领域研究的研究人员及工程技术人员具有很好的理论与参考价值。

1.2 不确定线性系统鲁棒控制概述

1.2.1 问题描述

控制科学主要研究如何修正动力学系统的行为以实现预定目标,这涉及被控系统、期望的性能指标以及控制手段,即如何利用控制器 K , 通过信息的变换和反馈作用,使系统 P 稳定并满足一定的性能或要求,如图 1.2.1 所示,显然反馈对系统的控制和稳定起着决定性的作用。

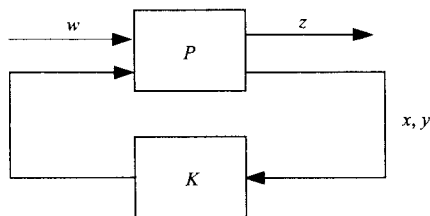


图 1.2.1 控制系统结构

控制理论主要的研究问题就是:给定系统,求反馈控制器,使得相应的闭环系统满足期望的性能指标。根据反馈信号是状态还是输出,分别地称为状态反馈控制器和输出反馈控制器。

20 世纪 50 年代, 经典线性控制理论基于传递函数数学模型, 以拉普拉斯变换为工具, 主要采用频率响应法求解, 其性能指标一般以系统状态或输出的响应时间、超调量、衰减度等表示。60 年代以卡尔曼提出的状态空间方法为代表, 现代控制理论采用微分方程模型描述系统, 直接在时域中求解, 可实现对诸如 LQ 性能指标的最优控制。一般来讲, 综合或设计控制器, 经典线性控制理论立足于满足一定的性能指标, 而现代控制理论则追求性能指标最优, 由此优化在控制中起着重要的作用。然而实际系统不可避免地要遇到各种不确定性, 包括诸如系统的未建模动态、模型参数的不确定性、工作环境的变化, 降阶及线性化近似等系统本身的不确定性, 以及外部干扰的不确定性, 如一般统计特性未知等情形。如图 1.2.2 所示, 其中 ΔP 代表对象 P 的不确定部分, 由此不确定系统控制问题为: 对不确定系统求反馈控制器, 使得相应的闭环系统保证一定的性能指标。

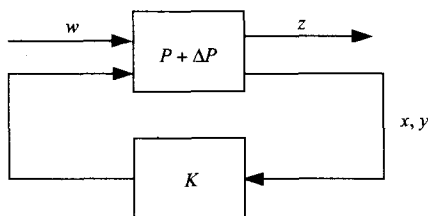


图 1.2.2 不确定对象控制系统结构

不确定对象的基本描述方法是用一个集合来代表对象的模型, 该集合可以是结构化的或者非结构化的, 前者主要是一些参数不确定性, 而后者是一些未建模动态(也称动态不确定性), 一般来讲结构化不确定性提供的信息更具体, 因而保守性更小, 实际上结构化不确定性模型可以嵌入到非结构化模型中。在鲁棒分析和综合过程中, 非结构化模型更多的是应用于频域(Doyle et al., 1992)。在时域状态空间下, 参数不确定性描述有多种形式(详见本书第 2 章), 将图 1.2.2 进一步分解为图 1.2.3, 其中 Δ 代表对象的时变不确定部分。

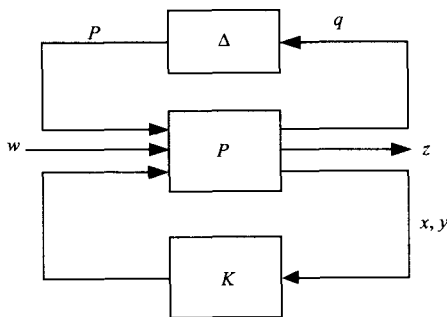


图 1.2.3 不确定对象结构框图

一般地,对此问题依据系统及其不确定性的数学描述,其求解可采用随机控制的方法、自适应控制的方法、鲁棒控制的方法、容错控制方法,模糊控制方法以及其他人工智能控制方法。鲁棒控制方法给出的是一个确定性的控制律,易于进行稳定性和其他性能分析,其基本内涵实质上是线性系统理论的深层次发展。就应用而言,控制器综合或设计可离线进行,对计算量要求不高,但由于所得到的控制器适用于所有允许的不确定性,一方面难以达到最优的性能指标,只能保证一定的指标界,另一方面不可避免带来保守性。

1.2.2 研究现状

系统鲁棒性问题也许可追溯到无穷小分析的思想,例如,微分方程解在给定区间的任意小变化依赖于初值和方程系数的充分小变化,再如偏微分方程中的稳定性研究、计算方法中关于误差的灵敏性等。鲁棒控制问题事实上最初在具有摄动的精确系统的大增益反馈器设计时就有所体现,1932年 Nyquist 稳定性判据明确给出了反馈增益与控制系统动态稳定性关系,1945年 Bode 图用幅值和相位稳定裕量得到系统稳定所能容忍的不确定性范围,这些讨论一般主要针对单输入单输出反馈控制系统,属于经典线性控制理论范畴,其基础是参数微小摄动的微分灵敏度分析方法,以 Rosenbrock(1972)提出的多变量系统逆 Nyquist 阵列设计方法为代表,其思想也推广至多输入多输出情形。在鲁棒控制理论建立过程中,Zames(1963)提出的小增益定理影响深远,至今仍是频域分析非结构不确定性系统鲁棒稳定性的基本工具,Kalman(1964)讨论了单输入单输出系统线性二次型最优状态反馈控制律(LQ)的鲁棒性,证明其具有无穷大增益稳定裕量和 60° 相位稳定裕量。

真正意义上的现代多变量鲁棒控制理论的重要标志是在参数有界扰动(而不是无穷小扰动)下讨论系统性能保持的能力,20世纪70年代以后很多工作开创性地推动了鲁棒控制的发展: Davison(1976)提出的鲁棒调节器设计方法,当对象的参数发生微小变化,可以保证闭环稳定及输出渐近调节; Youla 等(1976)针对一个特定对象给出了所有镇定控制器的参数化表示; Kharitonov (1978)针对区间多项式族表示的系统不确定性,通过由四个区间端点作为系数的多项式的稳定性来判别区间多项式族的稳定性; Doyle (1982)提出可根据范数界限扰动有效地描述模型不确定性,由此发展了判别鲁棒稳定性和鲁棒性能的强有力工具——结构奇异值方法; Vidyasagar(1987)提出一个控制器对若干被控对象同时镇定问题; Safonov(1980)把经典频域分析和设计方法与现代多变量控制方法联系起来,可以对 Lyapunov 稳定性和输入输出稳定性进行统一处理; 对于外部不确定性,假定干扰的统计特性未知但属于某一已知信号集合, Zames (1981)首次提出用其灵敏度函数的 H_∞ 范数作为指标,设计的反馈控制器在可能发生的最坏干扰下使系统稳定并且相应的范数指标极小,同时 Zames 还指出, LQG 的平方积分型优化指标不能保证基于状态空