

现代鲁棒控制

(第二版)

Advanced Robust Control
(Second Edition)

吴敏 桂卫华 何勇 著

中南大学出版社



国家杰出青年科学基金项目 资助出版
教育部青年教师奖计划项目

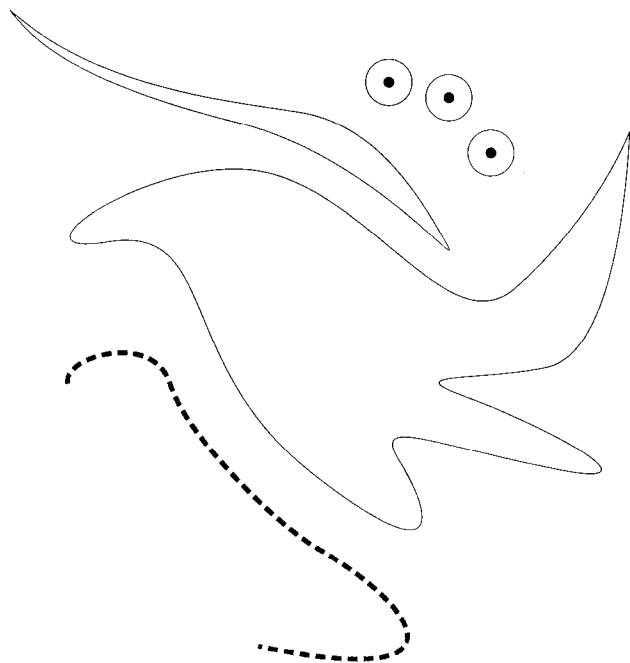
现代鲁棒控制

(第二版)

Advanced Robust Control
(Second Edition)

吴敏 桂卫华 何勇 著

中南大学出版社



图书在版编目(CIP)数据

现代鲁棒控制/吴敏,桂卫华,何勇著. —2版.
长沙:中南大学出版社,2006.7
ISBN 7-81105-381-0

I. 现... II. ①吴... ②桂... ③何... III. 鲁棒控制
IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 082193 号

现代鲁棒控制
(第2版)

吴 敏 桂卫华 何 勇 著

-
- 责任编辑 邓立荣
 责任印制 文桂武
 出版发行 中南大学出版社
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083
发行科电话:0731-8876770 传真:0731-8710482
 印 装 中南大学印刷厂

-
- 开 本 787×1092 1/16 印张 24.5 字数 622 千字
 版 次 2006年7月第2版 2006年7月第1次印刷
 书 号 ISBN 7-81105-381-0/TP·016
 定 价 60.00 元
-



吴敏 1963年7月11日生。1983年7月大学毕业于中南矿冶学院自动化专业，获工学学士学位；1986年6月研究生毕业于中南工业大学工业自动化专业，获工学硕士学位；后留校任助教，1988年5月任讲师，1991年12月任副教授，1994年9月任教授；现为中南大学控制科学与工程学科博士生导师，湖南省“芙蓉学者计划”特聘教授。1989年10月至1990年11月作为访问学者赴日本东北大学电气工程系进修。1996年4月至1999年3月作为客员研究员在日本东京工业大学控制工程系进行国际合作研究，获东京工业大学工学博士学位。2001年10月至2002年3月作为客座教授在英国诺丁汉大学材料、机械、制造与管理学院进行国际合作研究。获教育部第三届青年教师奖、国家杰出青年科学基金、新世纪百千万人才国家级人选。获国家科技进步二等奖1项，省部级科技进步一等奖1项、二等奖4项、三等奖4项。发表学术论文200余篇，出版专著2部，教材1部，译著2部，其中SCI收录36篇、EI收录86篇。1999年获国际自动控制联合会（IFAC）控制工程实践优秀论文奖。主要研究领域为鲁棒控制、过程控制和智能系统。



桂卫华 1950年8月7日生。1975年10月大学毕业于中南矿冶学院自动化系，1981年10月研究生毕业于中南矿冶学院工业自动化专业，获工学硕士学位；后留校任教，1988年9月任副教授，1991年12月任教授；现为中南大学控制科学与工程学科博士生导师，享受国家政府特殊津贴专家。1986年至1988年作为访问学者赴德国杜伊斯堡大学进修。获国家科技进步二等奖1项，省部级科技进步一等奖2项、二等奖8项、三等奖3项。发表论文200余篇，出版著作2部、译著2部，其中SCI收录46篇、EI收录95篇。主要研究领域为复杂过程建模与优化控制、工业大系统分散控制和故障诊断与预测技术。



何勇 1969年9月2日生。1991年6月大学毕业于中南工业大学应用数学专业，获理学学士学位，1994年6月研究生毕业于中南工业大学获应用数学专业，获理学硕士学位；后留校任教，1997年9月任讲师，2003年9月任中南大学副教授。2000年9月开始在中南大学控制理论与控制工程专业攻读在职博士学位，并于2004年12月获得工学博士学位。2005年1月至2006年3月在新加坡国立大学担任Research Fellow。发表论文33篇，其中SCI检索12篇，EI检索21篇。主要研究领域为鲁棒控制、时滞控制系统、网络控制。

前 言

在过去的几十年中,鲁棒控制一直是国际自动控制界的研究热点。由于工作状况变化、外部干扰和存在建模误差,使得不确定性在控制系统中广泛存在。所谓控制系统的“鲁棒性”,是指控制系统在不确定性条件下维持稳定性和某些性能的特性。如何进行控制系统的鲁棒性分析与设计,已成为国内外研究的重要课题。

1998年我们出版了《现代鲁棒控制》一书。该书由于体系新颖、内容丰富及论述严谨,获得了较高的评价。在此基础上,我们借鉴近几年来的最新研究成果和课程教学经验,并吸纳了读者的反馈意见和有关建议,对该书进行了修订,出版《现代鲁棒控制》(第二版),增加了许多新的内容和研究成果,力求使本书内容在全面性和实用性方面得到较大的提高。

本书综合了大量的国内外鲁棒控制方面的文献资料,并结合了作者多年来的研究成果和体会,从理论和应用两个角度系统地介绍了20世纪80年代以来鲁棒控制研究的最新成果,这些成果充分体现在鲁棒稳定性理论、线性系统的 H_∞ 控制、 μ 分析和 μ 综合、时滞系统的鲁棒控制、系统分散优化控制的 H_∞ 方法、非线性系统鲁棒控制的 H_∞ 和 μ 方法等方面。这本书可供理工科高年级本科生和研究生作为教材和参考书使用,也可供自动控制以及相关领域的广大工程技术人员和科研工作者自学和参考。

本书由12章构成。第1章是全书的绪论,考察了控制系统设计的基本要求,回顾了控制理论的发展历史,阐述了鲁棒控制研究的基本问题。第2章介绍了鲁棒控制研究所需要的基础知识和基本概念。第3章针对非结构的和结构的不确定性系统,给出了 H_∞ 控制问题的基本框架和一般鲁棒控制问题,引出了结构奇异值 μ 方法。第4章论述了鲁棒稳定化控制,二次稳定化控制和参数空间稳定性分析的理论与方法。第5章研究了线性二次型鲁棒控制和 H_2 控制问题。第6章介绍了状态空间 H_∞ 控制理论,包括基于状态反馈、输出反馈和状态观测器的控制方法, H_∞ 鲁棒伺服系统控制, H_2 和 H_∞ 混合控制。第7章叙述了结构不确定性系统控制的 μ 方法,给出了基于结构奇异值的鲁棒稳定性和鲁棒性能分析方法,以及基于 H_∞ 控制的 μ 综合方法。第8章介绍了时滞系统的鲁棒控制,包括时滞系统的稳定性分析,时滞系统的 H_∞ 控制以及时滞相关鲁棒控制器设计等问题。第9章讨论了大系统分散鲁棒控制问题,提出了分散 H_2 和 H_∞ 控制的参数化方法,以及分散 H_∞ 状态反馈控制的迭代算法。第10章探讨了非线性系统鲁棒控制的 H_∞ 和 μ 方法,提出了基于反馈线性化理论进行非线性鲁棒控制的 μ 分析与 μ 综合方法。第11章和第12章分别阐述了基于线性二次型控制、 H_∞ 控制和 μ 方法的鲁棒控制应用。

本书第1章至第4章,第6章,第7章,第10章和第12章由吴敏教授编写,第5章,第

9章和第11章由桂卫华教授编写,第8章由何勇副教授编写,全书由吴敏教授统稿。

本书的一些结果引自作者的研究论文,并得到了国家杰出青年科学基金和教育部青年教师奖计划的资助,在此表示衷心的感谢。此外,本书还得到日本拓殖大学中野道雄教授,东京工科大学余锦华教授,英国哥拉摩根大学刘国平教授,北京理工大学彭志红博士,华东理工大学张凌波博士,中南大学谢永芳博士、张先明博士、何蓓博士、阎瑾硕士和刘芳硕士的支持和帮助,在此深表谢意。

限于作者的水平,书中不妥和错误之处难免,恳请读者不吝批评指正。

著 者

2006年1月10日

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 控制系统设计与鲁棒性	(1)
1.1.1 控制系统设计与不确定性	(1)
1.1.2 控制系统设计的基本要求	(2)
1.1.3 控制系统的鲁棒性	(3)
1.2 反馈控制理论的发展阶段	(4)
1.2.1 经典控制理论	(4)
1.2.2 现代控制理论	(4)
1.2.3 鲁棒控制理论	(5)
1.3 鲁棒控制理论研究的基本问题	(6)
1.3.1 不确定性系统描述	(7)
1.3.2 鲁棒性分析和设计方法	(8)
1.3.3 鲁棒控制的应用领域	(9)
2 基础知识和基本概念	(10)
2.1 状态空间模型和传递函数	(10)
2.1.1 线性时不变系统描述	(10)
2.1.2 传递函数的性质和运算公式	(11)
2.2 线性分式变换与 HM 变换	(15)
2.2.1 下线性分式变换	(15)
2.2.2 上线性分式变换	(16)
2.2.3 HM 变换	(17)
2.3 灵敏度函数和补灵敏度函数	(18)
2.3.1 灵敏度函数的定义	(18)
2.3.2 控制系统的灵敏度函数和补灵敏度函数	(18)
2.4 控制系统的稳定性	(20)
2.4.1 外部稳定性	(20)
2.4.2 内部稳定性	(21)
2.4.3 闭环控制系统的稳定性	(22)
2.4.4 可稳定性和可检测性	(25)
2.5 李雅普诺夫方程	(26)
2.5.1 李雅普诺夫方程	(26)
2.5.2 李雅普诺夫方程与稳定性	(27)

2.6	哈密顿矩阵与黎卡提方程	(27)
2.6.1	哈密顿矩阵和黎卡提方程的形式	(27)
2.6.2	哈密顿矩阵与黎卡提方程之间的联系	(28)
2.7	函数空间与 H_2 和 H_∞ 范数	(30)
2.7.1	函数空间	(31)
2.7.2	系统的 H_2 范数和 H_∞ 范数	(35)
2.7.3	H_2 范数和 H_∞ 范数的计算	(37)
2.7.4	关于 H_∞ 范数的两个基本定理	(39)
2.8	稳定化控制器	(41)
2.8.1	在 RH_∞ 上的互质分解	(41)
2.8.2	稳定化条件	(46)
2.8.3	稳定化控制器及其参数化形式	(47)
2.8.4	自由参数 $Q(s)$ 的作用	(50)
2.9	小增益定理	(51)
2.10	鲁棒控制的 LMI 方法	(52)
2.10.1	LMI 的一般表示	(53)
2.10.2	标准 LMI 问题	(53)
2.10.3	关于矩阵不等式的结论	(54)
3	鲁棒控制问题	(57)
3.1	非结构不确定性	(57)
3.1.1	加法和乘法不确定性	(57)
3.1.2	基于规范化互质分解描述的不确定性	(61)
3.2	结构不确定性	(62)
3.2.1	结构不确定性描述	(62)
3.2.2	块对角结构不确定性	(64)
3.3	标准 H_∞ 控制问题	(66)
3.3.1	问题描述	(66)
3.3.2	鲁棒稳定化问题	(67)
3.3.3	跟踪问题	(69)
3.3.4	模型匹配问题	(70)
3.3.5	最小灵敏度和混合灵敏度控制问题	(71)
3.4	标准控制问题的稳定性分析	(72)
3.4.1	内部稳定性	(72)
3.4.2	$G(s)$ 的可稳定性	(75)
3.4.3	稳定化控制器的参数化形式	(78)
3.4.4	闭环传递函数矩阵	(80)
3.5	一般鲁棒控制问题	(81)
3.5.1	H_∞ 控制的鲁棒化问题	(82)

3.5.2	鲁棒稳定化与鲁棒性能	(83)
3.5.3	结构奇异值 μ 的方法	(84)
4	鲁棒稳定性理论	(86)
4.1	不确定性系统的鲁棒稳定化	(86)
4.1.1	对加法不确定性的鲁棒稳定性条件	(86)
4.1.2	乘法不确定性系统的鲁棒稳定化	(87)
4.1.3	基于规范化互质分解描述的鲁棒稳定性	(89)
4.1.4	对其他一些典型不确定性的鲁棒稳定化判别条件	(90)
4.2	插值问题与鲁棒稳定化	(91)
4.2.1	插值问题	(91)
4.2.2	可鲁棒稳定化的条件	(91)
4.2.3	最小灵敏度控制	(94)
4.2.4	最大增益裕量控制	(94)
4.3	二次稳定化控制	(97)
4.3.1	稳定半径	(97)
4.3.2	二次稳定性	(99)
4.3.3	二次稳定化控制	(101)
4.3.4	二次稳定化控制与最优控制的关系	(105)
4.3.5	二次稳定化问题与 H_∞ 控制问题	(106)
4.4	参数空间稳定性分析	(107)
4.4.1	卡里托诺夫定理	(107)
4.4.2	区间矩阵和凸组合多项式的稳定性	(111)
4.4.3	棱边定理	(113)
4.4.4	系数空间中的稳定区域	(114)
4.4.5	鲁棒稳定性的度量	(116)
4.5	鲁棒稳定性分析的 LMI 方法	(119)
5	LQ 最优和鲁棒控制	(122)
5.1	引言	(122)
5.2	最优调节器问题	(122)
5.2.1	LQR 问题描述	(122)
5.2.2	最优性原理与哈密顿-雅可比方程	(123)
5.2.3	LQR 问题的求解	(124)
5.2.4	稳态调节器问题和最优性的充分条件	(127)
5.3	跟踪和扰动抑制问题	(128)
5.3.1	跟踪问题	(128)
5.3.2	扰动抑制问题	(128)
5.3.3	稳态和预见控制	(131)

5.3.4	未知扰动	(133)
5.4	最优调节器的鲁棒特性	(134)
5.4.1	鲁棒稳定性条件	(135)
5.4.2	卡尔曼不等式	(135)
5.4.3	增益和相位裕量	(138)
5.5	随机控制	(138)
5.5.1	随机微分方程	(139)
5.5.2	随机哈密顿-雅可比方程	(140)
5.5.3	加性扰动	(141)
5.5.4	乘性扰动	(143)
5.5.5	最优性的充分条件	(144)
5.5.6	随机-确定对偶性	(144)
5.6	最优输出反馈与 LQG 问题	(145)
5.6.1	卡尔曼-布西滤波器	(145)
5.6.2	分离原理——LQG 的求解	(147)
5.6.3	固定阶补偿器	(150)
5.7	鲁棒性设计方法	(153)
5.7.1	鲁棒性问题描述	(153)
5.7.2	LQG/LTR 设计	(155)
5.7.3	保成本设计	(157)
5.7.4	线性矩阵不等式(LMI)方法	(162)
5.8	H_2 控制问题的状态空间方法	(164)
5.8.1	H_2 输出反馈控制	(164)
5.8.2	H_2 全信息和全控制问题	(166)
5.8.3	H_2 扰动前馈和输出估计问题	(168)
5.8.4	有关定理和结论的证明	(169)
6	状态空间 H_∞ 控制理论	(173)
6.1	状态空间 H_∞ 控制问题	(173)
6.1.1	H_∞ 状态反馈控制问题	(173)
6.1.2	H_∞ 输出反馈控制问题	(174)
6.1.3	基于状态观测器的 H_∞ 状态反馈控制问题	(175)
6.2	关于广义控制对象的假定条件	(175)
6.2.1	假定条件及其意义	(175)
6.2.2	假定条件的等价变换	(178)
6.3	H_∞ 状态反馈控制	(180)
6.3.1	H_∞ 状态反馈控制器的一般形式	(180)
6.3.2	H_∞ 状态反馈控制器的几种简单形式	(182)
6.4	H_∞ 输出反馈控制	(184)

6.4.1	H_∞ 输出反馈控制器及其参数化形式	(184)
6.4.2	全信息问题	(190)
6.4.3	全控制问题	(192)
6.4.4	扰动前馈问题	(192)
6.4.5	输出估计问题	(193)
6.4.6	H_∞ 输出反馈控制器及其存在条件的证明思路	(194)
6.5	基于状态观测器的 H_∞ 状态反馈控制	(196)
6.5.1	使用同维观测器的 H_∞ 控制器设计	(196)
6.5.2	使用降维观测器的 H_∞ 控制器设计	(199)
6.6	与 H_∞ 控制理论和 LQG 控制理论的联系	(201)
6.6.1	H_2 控制问题的解	(201)
6.6.2	LQG 控制问题的解	(202)
6.6.3	把 LQG 控制问题转换成 H_2 控制问题	(203)
6.7	H_∞ 鲁棒稳定化控制	(204)
6.7.1	H_∞ 鲁棒稳定化问题转换成 H_∞ 控制问题	(204)
6.7.2	H_∞ 鲁棒稳定化控制器及其存在条件	(205)
6.8	H_∞ 鲁棒伺服系统设计	(206)
6.8.1	鲁棒伺服系统设计	(206)
6.8.2	鲁棒伺服系统的设计方法	(208)
6.8.3	H_∞ 控制问题基于扩展系统的解法	(209)
6.8.4	基于扩展系统的鲁棒伺服系统设计方法	(210)
6.8.5	通过选择加权函数的鲁棒伺服系统设计方法	(213)
6.9	H_∞ 控制的 LMI 方法	(214)
6.9.1	H_∞ 性能分析	(214)
6.9.2	H_∞ 状态反馈控制的 LMI 方法	(214)
6.9.3	H_∞ 输出反馈控制的 LMI 方法	(215)
7	鲁棒控制系统的 μ 分析和 μ 综合	(219)
7.1	鲁棒性分析和设计的一般框架	(219)
7.1.1	基本原理	(219)
7.1.2	一般框架	(221)
7.2	结构奇异值 μ 及其特性	(222)
7.2.1	基本概念	(223)
7.2.2	结构奇异值 μ 的定义	(223)
7.2.3	μ 的特性	(223)
7.2.4	关于边界的讨论	(225)
7.2.5	常数线性分式变换的良好性和性质	(227)
7.3	鲁棒稳定性和鲁棒性能的 μ 分析方法	(229)
7.3.1	鲁棒稳定性分析	(229)

7.3.2	鲁棒性能分析	(230)
7.3.3	鲁棒稳定性和鲁棒性能分析举例	(231)
7.4	μ 综合方法	(233)
7.4.1	μ 综合问题	(233)
7.4.2	$D-K$ 迭代法	(234)
7.4.3	$\mu-K$ 迭代法	(237)
8	时滞系统的鲁棒控制	(241)
8.1	时滞系统的稳定性分析	(241)
8.1.1	时滞无关稳定性条件	(242)
8.1.2	时滞相关稳定性条件	(243)
8.1.3	鲁棒稳定性分析	(248)
8.2	时滞系统的 H_∞ 控制	(252)
8.2.1	时滞系统的 H_∞ 性能分析	(252)
8.2.2	时滞系统的 H_∞ 控制器设计	(254)
8.3	时滞相关的鲁棒控制器设计	(258)
8.3.1	非线性最小化问题基于 LMI 的迭代方法	(259)
8.3.2	参数调整方法	(262)
8.3.3	时滞相关/时滞变化率无关条件的 LMI 方法	(263)
9	分散鲁棒控制	(266)
9.1	分散控制的概念	(266)
9.2	不确定性关联系统的分散鲁棒稳定化	(267)
9.2.1	满足匹配条件的不确定性关联大系统分散鲁棒稳定化	(267)
9.2.2	分散鲁棒稳定化控制器设计	(268)
9.2.3	不确定性关联时滞大系统的分散鲁棒稳定化	(273)
9.2.4	数值解不确定性广义大系统的分散鲁棒稳定化	(279)
9.3	不确定性时滞大系统的分散输出跟踪控制	(282)
9.3.1	满足匹配条件的不确定性关联时滞大系统分散鲁棒输出跟踪控制	(282)
9.3.2	数值解不确定性关联时滞大系统的分散鲁棒输出跟踪控制	(285)
9.4	不确定性关联大系统的分散鲁棒 H_∞ 控制	(289)
9.4.1	不确定性大系统分散 H_∞ 状态反馈控制	(289)
9.4.2	不确定性大系统分散 H_∞ 输出反馈控制	(293)
9.4.3	不确定性大系统分散 H_2/H_∞ 状态反馈控制	(299)
10	非线性系统鲁棒控制	(304)
10.1	非线性控制系统理论与鲁棒性问题	(304)
10.2	非线性系统的 L_2 增益分析	(305)
10.2.1	L_2 增益的定义	(306)

10.2.2	非线性系统的有界实条件	(307)
10.2.3	与近似线性系统的关系	(309)
10.3	状态反馈非线性 H_∞ 控制	(310)
10.3.1	状态反馈非线性 H_∞ 控制问题	(310)
10.3.2	状态反馈非线性 H_∞ 控制器及其存在性条件	(310)
10.3.3	与近似线性系统的关系	(311)
10.4	输出反馈非线性 H_∞ 控制	(312)
10.4.1	输出反馈非线性 H_∞ 控制问题	(312)
10.4.2	输出反馈非线性 H_∞ 控制器及其存在性条件	(312)
10.4.3	指数稳定化的情形	(314)
10.5	其他形式的非线性 H_∞ 控制问题	(314)
10.5.1	DF 问题	(314)
10.5.2	奇异问题	(315)
10.5.3	$L_{2\infty}$ 增益条件	(316)
10.6	基于反馈线性化系统的非线性鲁棒控制 μ 方法	(316)
10.6.1	非线性系统的严密反馈线性化	(317)
10.6.2	非线性鲁棒控制问题	(320)
10.6.3	鲁棒控制器的 μ 综合方法	(321)
10.6.4	分析和设计举例	(323)
11	鲁棒控制理论的应用——线性二次型方法	(327)
11.1	应用 MATLAB 软件包求解线性二次型控制问题	(327)
11.1.1	求解 LQR 问题	(327)
11.1.2	稳定裕量研究	(329)
11.1.3	求解随机控制问题	(330)
11.1.4	求解 LQG 问题	(331)
11.1.5	鲁棒设计问题	(332)
11.2	河流污染的分散优化控制	(336)
11.2.1	河流污染的数学模型	(336)
11.2.2	河流污染的分散优化控制	(337)
12	鲁棒控制理论的应用——H_∞ 和 μ 方法	(339)
12.1	硬盘鲁棒控制	(339)
12.1.1	控制的目的	(339)
12.1.2	数学模型的建立	(340)
12.1.3	二自由度控制	(340)
12.1.4	鲁棒控制系统设计	(341)
12.2	频率分离控制	(343)
12.2.1	控制对象与控制目标	(343)

12.2.2	频率分离控制方法	(344)
12.2.3	实验结果	(344)
12.3	磁力悬浮系统鲁棒控制	(346)
12.3.1	柔性臂磁力悬浮系统及控制框图	(346)
12.3.2	理想的数学模型	(347)
12.3.3	控制用的数学模型	(348)
12.3.4	控制问题描述	(350)
12.3.5	控制系统设计	(352)
12.3.6	实验结果分析	(354)
12.4	汽车柴油机燃料喷射泵控制	(356)
12.4.1	柴油发动机电子控制系统	(356)
12.4.2	数学模型的建立	(357)
12.4.3	使控制对象具有积分器的 H_{∞} 设计方法	(359)
12.4.4	使加权函数具有积分器的 H_{∞} 设计方法	(362)
12.4.5	控制器的实现	(364)
12.4.6	实际控制结果	(365)
12.5	二惯性系统鲁棒控制	(365)
12.5.1	二惯性系统模型和控制目标	(365)
12.5.2	鲁棒控制问题描述	(366)
12.5.3	鲁棒控制器设计和实验结果	(367)
参考文献		(369)

1 绪论

控制系统就是使控制对象按照预期目标运行的系统。大部分的控制系统是基于反馈原理来进行设计的。反馈控制已经广泛地应用于工业控制、航空航天和经济管理等各个领域。在实际控制问题中,不确定性是普遍存在的。不确定性可能来自所描述的控制对象的模型化误差,也可能来自外界扰动的多样性。因此,控制系统设计必须考虑不确定性带来的影响。20世纪80年代以来,反馈控制理论获得了惊人的发展,已经变得更加严密、更加符合实际。这一时期建立起来的鲁棒控制理论为处理不确定性提供了有效的手段。本章首先考察控制系统设计的一些问题,提出鲁棒性的概念,然后简单地回顾反馈控制理论的发展历史,指出鲁棒控制理论所处的重要地位,最后阐述鲁棒控制理论研究的基本问题。通过这一章,初步展示了鲁棒控制的一些现代概念。

1.1 控制系统设计与鲁棒性

最基本的反馈控制系统如图1-1所示,由控制对象、传感器和控制器等三个部分组成。一般地,执行机构已归并到控制对象中。

控制系统设计的任务是,对于给定的控制对象和传感器,寻找一个控制器,使反馈控制系统能够在实际工作环境中按预期目标运行。

1.1.1 控制系统设计与不确定性

基于控制理论进行控制系统设计,必须要知道控制对象的模型。图1-2粗略地给出了实际控制对象和它的模型与控制理论之间的关系。

实际控制对象就是具体的装置、设备或生产过程。通过各种建模方法,可以建立实际控制对象的模型。针对控制对象的模型,应用控制理论提供的设计方法设计出控制器,对实际控制对象实施控制。很显然,控制系统的控制效果在很大程度上取决于实际控制对象模型的准确性。然而,要找到一个完全反映实际控制对象特性的模型是

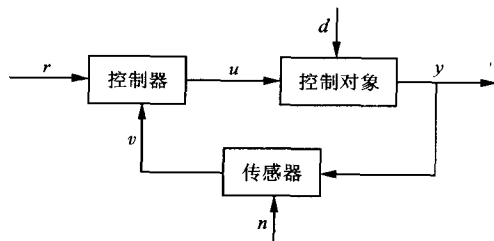


图 1-1 基本的反馈控制系统

r —目标输入; y —控制对象输出; u —控制输入;
 v —传感器输出; n —传感器噪声; d —外部扰动

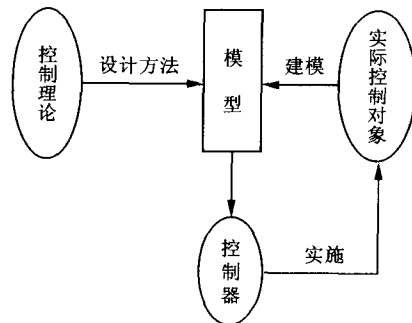


图 1-2 控制系统设计中的模型

取决于实际控制对象模型的准确性。然而,要找到一个完全反映实际控制对象特性的模型是

非常困难的。因此,在控制系统设计中采用的模型与实际控制对象存在着一定的差异,即存在着模型不确定性。为了保证控制系统的控制效果,在控制系统中必须考虑模型不确定性的影响。

同时,控制系统的运行也受到周围环境和有关条件的制约。例如,在图 1-1 中,传感器噪声 n 和外部扰动 d 分别来自控制系统本身和控制系统所处的环境,它们往往是一类未知的扰动信号。这种扰动不确定性对控制系统的运动将产生的影响,也是控制系统设计中必须考虑的。

可见,在控制系统设计中需要考虑的不确定性可以归纳为下述两个方面:

- (1) 来自控制对象的模型化误差;
- (2) 来自控制系统本身和外部的扰动信号。

这样,就需要一种能克服不确定性影响的控制系统设计理论。这就是鲁棒控制所要研究的课题。

1.1.2 控制系统设计的基本要求

在控制系统设计中,往往把图 1-1 所示的反馈控制系统更一般化,考虑如图 1-3 所示的单位反馈控制系统,其中 P 是控制对象, C 是控制器。

在图 1-3 中, e 是目标输入 r 与控制对象输出 y 之差,即

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (1.1)$$

反馈控制系统设计的基本要求包括稳定性、渐近调节、动态特性和鲁棒性等四个方面。

(1) 稳定性。这是控制系统设计的最基本要求,大体上分为内部稳定性和外部稳定性(输入-输出稳定性)两种。前者意味着控制系统内从工作点附近任意初始状态出发的轨迹在时间处于 ∞ 时收敛于工作点,后者由于保证了对有界的输入可得到有界的输出,因而一般是一个比内部稳定性弱的概念。

(2) 渐近调节。这意味着对于一类给定的目标输入 r 和外部扰动 d ,一个反馈控制系统必须能够保证

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \quad (1.2)$$

即保证控制系统的稳态误差为 0。渐近调节的特性反映了控制系统的稳态性能。对于一类给定的目标输入 r 和外部扰动 d ,往往采用阶跃信号或斜坡信号,有时为一种周期信号。

(3) 动态特性。这是指反馈控制系统的动态性能必须满足一组给定的设计指标,有目标跟踪特性和扰动抑制特性等。对于目标跟踪特性,如图 1-4 所示阶跃响应下的上升时间 t_r ,超调量 σ 和调节时间 t_s 以及不同信号之间的非耦合程度等是主要的设计指标,其中 t_r , σ 和 t_s 分别满足

$$y(t_r) = 0.9r(t_r) \quad (1.3a)$$

$$\sigma = \frac{y(t_h) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1.3b)$$

$$y(t_s) = 0.95r(t_s) \quad (1.3c)$$

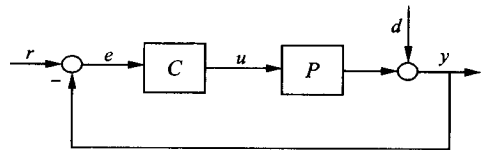


图 1-3 单位反馈控制系统

这里 $y(\infty)$ 是 $y(t)$ 的稳态值, 即

$$y(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) \quad (1.4)$$

t_h 是 $y(t)$ 到达最大值时的时刻, 有

$$y(t_h) = \max_t \{y(t), t \geq 0\} \quad (1.5)$$

对于扰动抑制特性, 要求扰动的暂态响应尽可能的小。动态特性的要求也经常以一组频率指标的形式出现, 此时对动态特性的要求被转换为对有关函数的频率特性要求。

(4) 鲁棒性 这是指当不确定性在一组给定的范围内发生变化时, 必须保证反馈控制系统的稳定性、渐近调节和动态特性不受影响。

在上述四个方面的要求中, 渐近调节和动态特性反映了控制系统的性能要求, 即稳态性能和动态性能。要实现上述四个方面的

设计要求, 并不是一件很容易的事情, 主要的困难在于控制系统的稳定性和性能与不确定性之间存在着矛盾。在控制系统设计中必须要在性能和不确定性这两个方面之间选取一个合适的折衷方案, 才能够确保设计既能实现又能满足要求。在以往的控制系统设计往往只强调稳定性、渐近调节和动态特性这三个方面, 而这里则主要是把注意力放到鲁棒性这一方面。

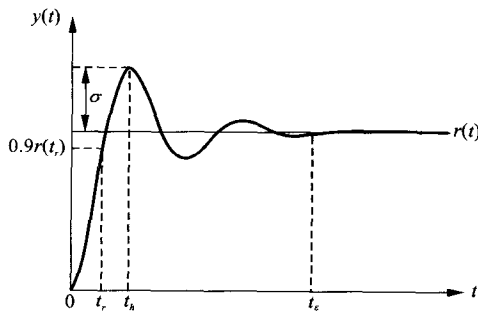


图 1-4 阶跃响应曲线

1.1.3 控制系统的鲁棒性

一个反馈控制系统是鲁棒的, 或者说一个反馈控制系统具有鲁棒性, 就是指这个反馈控制系统在某一类特定的不确定性条件下具有使稳定性、渐近调节和动态特性保持不变的特性, 即这一反馈控制系统具有承受这一类不确定性影响的能力。

很显然, 控制系统的鲁棒性贯穿着稳定性、渐近调节和动态特性这三个方面的内容, 即分别有鲁棒稳定性、鲁棒渐近调节和鲁棒动态特性, 其中鲁棒渐近调节和鲁棒动态特性反映了控制系统的鲁棒性能要求。

(1) 鲁棒稳定性是指在一组不确定性的作用下仍然能够保证反馈控制系统的稳定性。

(2) 鲁棒渐近调节是指在一组不确定性的影响下仍然可以实现反馈控制系统的渐近调节功能。

(3) 鲁棒动态特性通常称为灵敏度特性, 即要求动态特性不受不确定性的影响。

从工程技术的角度看, 一个反馈控制系统的设计问题就是, 根据给定的控制对象模型, 寻找一个控制器, 以保证反馈控制系统的稳定性, 使反馈控制系统达到期望的性能, 并对模型不确定性和扰动不确定性具有鲁棒性。

具有鲁棒性的控制系统称为鲁棒控制系统。在实际控制问题中, 不确定性往往是有界的。因此, 在鲁棒控制系统设计中, 一般是假定不确定性在一个可能的范围内变化来进行控制器的设计, 这就意味着设计出来的控制器, 在这个可能的不确定性范围内均能使控制系统的稳定性和性能保持不变, 换句话说, 就是确定不确定性可能变化的范围界限, 在不确定性