

控制科学与工程学科
研究生教学用书

鲁棒控制理论

Robust Control Theory

吴敏 何勇 余锦华



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

鲁棒控制理论

LUBANG KONGZHI LILUN

Robust Control Theory

吴敏 何勇 余锦华



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书综合鲁棒控制领域的大量国内外文献资料,并结合作者多年来的研究成果和体会,系统地阐述了近二十年来鲁棒控制研究的最新成果,主要体现在鲁棒稳定性理论,线性系统 H_∞ 控制, μ 分析和 μ 综合,时滞系统鲁棒控制,非线性系统鲁棒控制,重复控制等方面。

全书共10章。第一章是全书的绪论,主要考察控制系统设计的基本要求,回顾反馈控制理论的发展历史,阐述鲁棒控制理论研究的基本问题。第二章介绍鲁棒控制研究所需要的基础知识和基本概念。第三章针对非结构的和结构的不确定性系统,给出 H_∞ 控制问题的基本框架和一般鲁棒控制问题的结构,引出结构奇异值 μ 方法。第四章论述鲁棒稳定性理论,包括稳定性与镇定控制、二次镇定控制和参数空间稳定性分析的理论与方法。第五章研究状态空间 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。第六章介绍鲁棒控制系统的 μ 分析和 μ 综合方法。第七章叙述非线性系统的鲁棒控制。第八章和第九章介绍时滞系统控制的鲁棒性分析与设计,包括时滞系统的稳定性分析、时滞系统镇定与 H_∞ 控制以及时滞相关鲁棒控制器设计。第十章探讨鲁棒重复控制的相关问题。

本书可作为控制科学与工程及其他相关专业和研究方向的研究生、高年级本科生的教材或参考书使用,也可供自动控制以及相关领域的广大工程技术人员和科技工作者自学和参考。

图书在版编目(CIP)数据

鲁棒控制理论/吴敏,何勇,余锦华编著. —北京:
高等教育出版社,2010.9
ISBN 978-7-04-030143-4

I. ①鲁… II. ①吴…②何…③余… III. ①鲁棒
控制—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第140587号

策划编辑 陈思宇 责任编辑 魏芳 封面设计 李卫青
责任绘图 尹莉 版式设计 范晓红 责任校对 金辉
责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120

经销 蓝色畅想图书发行有限公司
印刷 北京外文印刷厂

开本 787×960 1/16
印张 29.75
字数 560 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 2010年9月第1版
印次 2010年9月第1次印刷
定价 55.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究
物料号 30143-00

前 言

在过去的二三十年中，鲁棒控制 (Robust Control) 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性能的特性。如何进行控制系统的鲁棒性分析和设计，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、内容丰富和论述严谨，获得了较高的评价。通过一段时间的使用，我们借鉴新的研究成果和课程教学经验，并吸纳读者的反馈意见和有关建议，对该书进行了修订，于2006年出版了《现代鲁棒控制》(第二版)。本书在已出版的《现代鲁棒控制》基础上，进一步总结了近年来鲁棒控制领域的国内外最新研究成果，并结合我们在时滞系统鲁棒控制和鲁棒重复控制方面所取得的研究成果，面向研究生和高年级本科生教学，进行了全面的整合，力求使本书内容在全面性和实用性上得到较大的提高。

本书综合鲁棒控制领域的大量国内外文献资料，并结合作者多年来的研究成果和体会，系统地阐述了近二十年来鲁棒控制研究的最新成果，主要体现在鲁棒稳定性理论，线性系统 H_∞ 控制、 μ 分析和 μ 综合，时滞系统鲁棒控制，非线性系统鲁棒控制，重复控制等方面。本书既可作为理工科研究生和高年级本科生的教材或参考书使用，也可供自动控制以及相关领域的广大工程技术人员和科技工作者自学和参考。

本书由10章构成。第一章是全书的绪论，主要考察控制系统设计的基本要求，回顾反馈控制理论的发展历史，阐述鲁棒控制理论研究的基本问题。第二章介绍鲁棒控制研究所需要的基础知识和基本概念。第三章针对非结构的和结构的不确定性系统，给出 H_∞ 控制问题的基本框架和一般鲁棒控制问题的结构，引出结构奇异值 μ 方法。第四章论述鲁棒稳定性理论，包括稳定性与镇定控制、二次镇定控制和参数空间稳定性分析的理论与方法。第五章研究状态空间 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。第六章介绍鲁棒控制系统的 μ 分析和 μ 综合方法。第七章叙述非线性系统的鲁棒控制。第八章和第九章介绍时

滞系统控制的鲁棒性分析与设计,包括时滞系统的稳定性分析、时滞系统镇定与 H_∞ 控制以及时滞相关鲁棒控制器设计。第十章探讨鲁棒重复控制的相关问题。

本书陈述的结论均引自相关的文献和作者的研究论文,并得到国家杰出青年科学基金项目(60425310)、国家自然科学基金项目(60574014, 60674016, 60974026和60974045)、国家博士点基金项目(20050533015, 200805330004)、湖南省杰出青年科学基金项目(08JJ1010)和教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0679)的资助,在此表示衷心的感谢。

本书还得到国内外同仁的大力支持。作者要特别感谢中南大学蔡自兴教授、日本拓殖大学(Takushoku University)中野道雄教授、早稻田大学(Waseda University)横山隆一教授、东京工业大学(Tokyo Institute of Technology)广田薰教授、新加坡国立大学(National University of Singapore)王庆国教授、英国格拉摩根大学(University of Glamorgan)刘国平教授和石碰教授、利物浦大学(University of Liverpool)钟庆昌博士、布鲁内尔大学(Brunel University)王子栋教授、新加坡南洋理工大学(Nanyang Technological University)谢立华教授、浙江工业大学俞立教授、燕山大学关新平教授、澳大利亚中央昆士兰大学(Central Queensland University)韩清龙教授、哈尔滨工业大学高会军教授、青岛大学林崇教授、湖南大学文桂林教授、北京理工大学彭志红副教授、华东理工大学张凌波副教授和中南大学张先明副教授给予的大力帮助。中南大学张杰、张艳、张传科、扶凌云、曾进、徐宝岗、周兰、何蓓、刘芳、阎谨、冯志勇等博士和硕士研究生承担了本书的文字录入与校对工作,并在一些研究成果中作出了相应的工作,在此深表谢意。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

吴 敏 何 勇 余锦华

2009年12月31日

符号说明

符号	意义
Re	取实部
Im	取虚部
R	实数域
R^n	实 n 维列向量集合, n 维实向量空间
$R^{n \times m}$	$n \times m$ 实矩阵集合
R_+	正实数集
\overline{R}_+	非负实数集
C	复数域
C^n	复 n 维列向量集合, n 维复向量空间
$C^{n \times m}$	$n \times m$ 复矩阵集合
C_+	集合 $\{w \in C : \text{Re } w > 0\}$
\overline{C}_+	集合 $\{w \in C : \text{Re } w \geq 0\}$
$I(I_n)$	具有适当维数 (n 维) 的单位矩阵
$\text{diag}\{\cdot\}$	对角矩阵
P^{-1}	矩阵 P 的逆
P^T	矩阵 P 的转置
P^*	矩阵 P 的共轭转置
P^{-T}	矩阵 P 的逆的转置
$\det(P)$	矩阵 P 的行列式
$\text{rank}(P)$	矩阵 P 的秩
$\lambda(P)$	矩阵 P 的特征值
$\lambda_{\max}(P)$	矩阵 P 的最大特征值
$\lambda_{\min}(P)$	矩阵 P 的最小特征值
$\sigma_{\max}(P)$	矩阵 P 的最大奇异值
$\sigma_{\min}(P)$	矩阵 P 的最小奇异值
$\rho(P)$	矩阵 P 的谱半径

符号	意义
$P > 0 (P \geq 0)$	P 为正定 (半正定) 矩阵
P^\perp	矩阵 P 的正交补
$\text{trace}(P)$	矩阵 P 的迹
$\dim(P)$	矩阵 P 的维数
$\text{span}(P)$	矩阵 P 的扩张
$\ \cdot\ $	矩阵范数
$\text{col}(\cdot)$	列方向排列
$P \oplus Q$	矩阵 P 与 Q 的直和
$\text{Ric}(\cdot)$	Riccati 代数方程的镇定解
$\begin{bmatrix} X & Y \\ * & Z \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} X & Y \\ Y^T & Z \end{bmatrix}$
$\text{deg}(\cdot)$	多项式的最高次数
$E(\cdot)$	数学期望
$\mathcal{L}^{-1}[f(s)]$	取 $f(s)$ 的拉普拉斯反变换
$L_2[0, \infty)$	在 $[0, \infty)$ 上平方可积的函数集合
l_2	平方可加的序列 $\{x(k), k = 1, 2, \dots\}$ 集合
$\max[f(x)]$	函数 $f(x)$ 的最大值
$\min[f(x)]$	函数 $f(x)$ 的最小值
$\sup[f(x)]$	函数 $f(x)$ 的上确界
$\inf[f(x)]$	函数 $f(x)$ 的下确界
$L_f h(x)$	$h(x)$ 对 $f(x)$ 的李导数
$ad_f h(x)$	$h(x)$ 对 $f(x)$ 的李括号

目 录

第一章 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	4
1.2 反馈控制理论的发展阶段	5
1.2.1 经典控制理论	5
1.2.2 现代控制理论	6
1.2.3 鲁棒控制理论	7
1.3 鲁棒控制理论研究的基本问题	8
1.3.1 不确定性系统的描述方法	8
1.3.2 鲁棒性分析和设计方法	10
1.3.3 鲁棒控制理论的应用领域	12
习题	12
第二章 基础知识和基本概念	13
2.1 状态空间模型和传递函数矩阵	13
2.1.1 线性时不变系统描述	13
2.1.2 传递函数矩阵的性质和运算公式	14
2.2 线性分式变换与 HM 变换	20
2.2.1 下线性分式变换	21
2.2.2 上线性分式变换	22
2.2.3 HM 变换	23
2.3 灵敏度函数和补灵敏度函数	24
2.3.1 灵敏度函数的定义	24
2.3.2 控制系统的灵敏度函数和补灵敏度函数	25
2.4 控制系统的稳定性	27
2.4.1 外部稳定性	27

2.4.2	内部稳定性	28
2.4.3	闭环控制系统的稳定性	30
2.4.4	可镇定性和可检测性	34
2.5	李雅普诺夫方程与稳定性	35
2.5.1	李雅普诺夫方程	35
2.5.2	李雅普诺夫方程与稳定性	36
2.6	哈密顿矩阵与黎卡提方程	37
2.6.1	哈密顿矩阵和黎卡提方程的形式	37
2.6.2	哈密顿矩阵与黎卡提方程之间的联系	38
2.7	函数空间与 H_2 和 H_∞ 范数	42
2.7.1	函数空间	42
2.7.2	系统的 H_2 范数和 H_∞ 范数	48
2.7.3	H_2 范数和 H_∞ 范数的计算	51
2.7.4	关于 H_∞ 范数的两个基本定理	54
2.7.5	小增益定理	57
2.8	镇定控制器	60
2.8.1	在 RH_∞ 上的互质分解	60
2.8.2	镇定条件	66
2.8.3	镇定控制器及其参数化形式	69
2.8.4	自由参数 $Q(s)$ 的作用	73
2.9	LMI 方法	74
2.9.1	LMI 的一般表示	74
2.9.2	标准 LMI 问题	75
2.9.3	关于矩阵不等式的结论	77
	习题	79
第三章 鲁棒控制问题		81
3.1	非结构不确定性	81
3.1.1	加性和乘性不确定性	81
3.1.2	基于规范化互质分解描述的不确定性	86
3.2	结构不确定性	87
3.2.1	结构不确定性描述	88
3.2.2	块对角结构不确定性	90
3.3	标准 H_∞ 控制问题	93

3.3.1	问题描述	94
3.3.2	鲁棒镇定问题	95
3.3.3	跟踪问题	98
3.3.4	模型匹配问题	100
3.3.5	最小灵敏度和混合灵敏度控制问题	101
3.4	标准控制问题的稳定性分析	103
3.4.1	内部稳定性	104
3.4.2	$G(s)$ 的可镇定性	107
3.4.3	镇定控制器的参数化形式	111
3.4.4	闭环传递函数矩阵	113
3.5	一般鲁棒控制问题	115
3.5.1	H_∞ 控制的鲁棒化问题	116
3.5.2	鲁棒镇定与鲁棒性能	118
3.5.3	结构奇异值 μ 方法	120
	习题	122
第四章	鲁棒稳定性理论	123
4.1	不确定性系统的鲁棒镇定	123
4.1.1	加性不确定性系统的鲁棒稳定性条件	123
4.1.2	乘性不确定性系统的鲁棒镇定	125
4.1.3	基于规范化互质分解描述的鲁棒稳定性	127
4.1.4	对其他一些典型不确定性的鲁棒镇定判别条件	129
4.2	插值问题与鲁棒镇定	131
4.2.1	插值问题	131
4.2.2	可鲁棒镇定的条件	131
4.2.3	最小灵敏度控制	134
4.2.4	最大增益裕量控制	136
4.3	二次镇定控制	139
4.3.1	稳定半径	139
4.3.2	二次稳定性	143
4.3.3	二次镇定控制	146
4.3.4	二次镇定控制与 LQ 最优控制的关系	150
4.3.5	二次镇定问题与 H_∞ 控制问题	151
4.4	参数空间稳定性分析	153

4.4.1	卡里托诺夫定理	153
4.4.2	区间矩阵和凸组合多项式的稳定性	158
4.4.3	棱边定理	161
4.4.4	系数空间中的稳定区域	163
4.4.5	鲁棒稳定性的度量	166
4.5	鲁棒稳定性分析的 LMI 方法	168
	习题	172
第五章	状态空间 H_∞ 控制理论	173
5.1	状态空间 H_∞ 控制问题	173
5.1.1	H_∞ 状态反馈控制问题	173
5.1.2	H_∞ 输出反馈控制问题	174
5.1.3	基于状态观测器的 H_∞ 控制问题	175
5.2	关于广义控制对象的假定条件	177
5.2.1	假定条件及其意义	177
5.2.2	假定条件的等价变换	181
5.3	H_∞ 状态反馈控制	183
5.3.1	H_∞ 状态反馈控制器的一般形式	184
5.3.2	H_∞ 状态反馈控制器的几种简单形式	187
5.4	H_∞ 输出反馈控制	189
5.4.1	H_∞ 输出反馈控制器及其参数化形式	189
5.4.2	全信息问题	198
5.4.3	全控制问题	200
5.4.4	扰动前馈问题	201
5.4.5	输出估计问题	202
5.4.6	H_∞ 输出反馈控制器及其存在条件的证明思路	203
5.5	基于状态观测器的 H_∞ 控制	205
5.5.1	使用全维观测器的 H_∞ 控制器设计	206
5.5.2	使用降维观测器的 H_∞ 控制器设计	210
5.6	与 H_2 控制和 LQG 控制的联系	213
5.6.1	H_2 控制问题的解	214
5.6.2	LQG 控制问题的解	216
5.6.3	把 LQG 控制问题转换成 H_2 控制问题	218
5.7	H_∞ 鲁棒镇定控制	219

5.7.1	H_∞ 鲁棒镇定问题转换成 H_∞ 控制问题	220
5.7.2	H_∞ 鲁棒镇定控制器及其存在条件	221
5.8	H_∞ 鲁棒伺服系统设计	223
5.8.1	鲁棒伺服系统设计	223
5.8.2	鲁棒伺服系统的设计方法	225
5.8.3	H_∞ 控制问题基于扩展系统的解法	227
5.8.4	基于扩展系统的鲁棒伺服系统设计方法	228
5.8.5	基于选择加权函数的鲁棒伺服系统设计方法	231
5.9	H_∞ 控制的 LMI 方法	232
5.9.1	H_∞ 性能分析	232
5.9.2	H_∞ 状态反馈控制的 LMI 方法	233
5.9.3	H_∞ 输出反馈控制的 LMI 方法	235
	习题	238
第六章	鲁棒控制系统的 μ 分析和 μ 综合	240
6.1	鲁棒性分析和设计的一般框架	240
6.1.1	基本原理	240
6.1.2	一般框架	242
6.2	结构奇异值 μ 及其特性	244
6.2.1	基本概念	244
6.2.2	结构奇异值 μ 的定义	246
6.2.3	μ 的特性	247
6.2.4	关于边界的讨论	249
6.2.5	常数线性分式变换的良定性和性质	251
6.3	鲁棒稳定性和鲁棒性能的 μ 分析方法	254
6.3.1	鲁棒稳定性分析	254
6.3.2	鲁棒性能分析	256
6.3.3	鲁棒稳定性和鲁棒性能分析举例	257
6.4	μ 综合分析法	261
6.4.1	μ 综合问题	261
6.4.2	$D-K$ 迭代法	263
6.4.3	$\mu-K$ 迭代法	267
	习题	271

第七章 非线性系统鲁棒控制	273
7.1 非线性控制系统理论与鲁棒性问题	273
7.2 非线性系统的 L_2 增益分析	275
7.2.1 L_2 增益的定义	275
7.2.2 非线性系统的有界实条件	277
7.2.3 与近似线性系统的关系	280
7.3 状态反馈非线性 H_∞ 控制	281
7.3.1 状态反馈非线性 H_∞ 控制	281
7.3.2 状态反馈非线性 H_∞ 控制器及其存在性条件	281
7.3.3 与近似线性系统的关系	282
7.4 输出反馈非线性 H_∞ 控制	283
7.4.1 输出反馈非线性 H_∞ 控制问题	283
7.4.2 输出反馈非线性 H_∞ 控制器及其存在性条件	284
7.4.3 指数镇定的情形	286
7.5 其他形式的非线性 H_∞ 控制问题	287
7.5.1 DF 问题	287
7.5.2 奇异问题	288
7.5.3 $L_{2\infty}$ 增益条件	289
7.6 基于反馈线性化系统的非线性鲁棒控制 μ 方法	290
7.6.1 非线性系统的严密反馈线性化	290
7.6.2 非线性鲁棒控制问题	295
7.6.3 鲁棒控制器的 μ 综合方法	297
7.6.4 分析和设计举例	300
7.7 具有多个非线性执行机构的 Lur'e 控制系统绝对稳定性	304
7.7.1 系统描述	305
7.7.2 绝对稳定性	307
7.7.3 鲁棒绝对稳定性	312
习题	313
第八章 时滞系统稳定性分析	314
8.1 时滞系统基本知识	314
8.1.1 时滞系统相关概念	314
8.1.2 稳定性相关概念	317
8.2 时滞无关稳定性分析	320

8.2.1	频域分析方法	320
8.2.2	拉什密辛函数方法	323
8.2.3	李雅普诺夫 - 克拉索夫斯基泛函方法	325
8.3	时滞相关稳定性分析	327
8.3.1	频域分析方法	327
8.3.2	拉什密辛函数方法	329
8.3.3	确定模型变换方法	334
8.3.4	自由权矩阵方法	343
8.3.5	改进型自由权矩阵方法	349
8.4	鲁棒稳定性分析	355
8.4.1	时变结构不确定性系统	355
8.4.2	多项式型不确定性系统	356
	习题	358
第九章	时滞系统镇定与 H_∞ 控制	360
9.1	镇定控制器设计	360
9.1.1	问题描述	361
9.1.2	时滞无关镇定控制器设计	362
9.1.3	时滞相关镇定控制器设计	365
9.2	H_∞ 性能分析	373
9.2.1	H_∞ 性能问题	373
9.2.2	时滞无关有界实条件	373
9.2.3	时滞相关有界实条件	375
9.3	时滞无关 H_∞ 控制器设计	383
9.3.1	无记忆状态反馈 H_∞ 控制器设计	383
9.3.2	动态输出反馈 H_∞ 控制器设计	384
9.4	时滞相关 H_∞ 控制器设计	388
9.4.1	基于模型变换 IV 的参数调整方法	389
9.4.2	基于模型变换 III 的 CCL 迭代方法	390
9.4.3	基于自由权矩阵的 CCL 迭代方法	393
9.4.4	基于改进型自由权矩阵的 ICCL 迭代方法	396
	习题	400

第十章 鲁棒重复控制	402
10.1 重复控制原理	402
10.1.1 重复控制系统的基本结构	403
10.1.2 基本重复控制系统	404
10.1.3 改进型重复控制系统	404
10.2 重复控制系统的稳定性分析	405
10.3 重复控制系统的设计方法	406
10.3.1 频率域设计方法	406
10.3.2 状态空间设计方法	408
10.3.3 离散系统重复控制器设计	410
10.4 二维重复控制系统设计方法	413
10.4.1 连续/离散二维混合模型	414
10.4.2 基于二维混合模型的重复控制系统设计	415
10.5 重复控制器设计实例与应用	420
10.5.1 正弦波逆变控制系统	420
10.5.2 高精度转速控制系统	425
10.5.3 二维重复控制系统的应用	435
10.6 今后的发展动向	437
习题	438
名词索引	440
参考文献	443

第一章 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，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。这一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阶段，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，初步展示鲁棒控制的一些基本概念。

1.1 控制系统设计与鲁棒性

如图 1.1 所示，最基本的反馈控制系统由控制对象、传感器和控制器三个部分组成。一般地，执行机构已归并到控制对象中。在图 1.1 中， r 为目标输入， y 为控制对象输出， u 为控制输入， v 为传感器输出， n 为传感器噪声， d 为外部扰动。

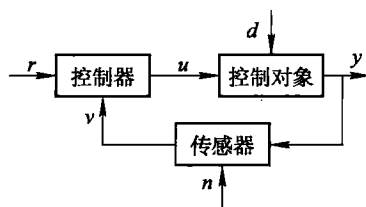


图 1.1 基本的反馈控制系统

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之间存在着一定的差异，即存在着模型不确定性。为了保证控制系统的控制效果，在控制系统设计中必须考虑模型不确定性的影响。

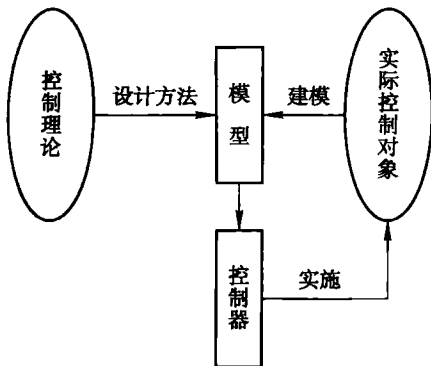


图 1.2 控制系统设计中的模型

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行将产生影响，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

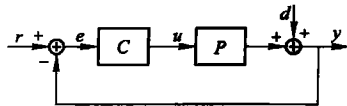


图 1.3 单位反馈控制系统

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

反馈控制系统设计的基本要求包括稳定性、渐近调节、动态特性和鲁棒性四个方面。