

《信息、控制与系统》系列教材

过程辨识

方崇智 萧德云

清华大学出版社

过 程 辨 识

方崇智 萧德云 编著

清华大学出版社

《信息、控制与系统》系列教材

出版说明

《信息、控制与系统》系列教材是一套关于信息、控制和系统学科的基本理论和应用技术的高等学校教材。选题范围包括信号和信息处理、模式识别、知识工程、控制理论、自动化技术、传感技术、自动化仪表、系统理论、系统工程、机器人控制、智能控制、计算机应用和控制等方面。主要读者对象为自动控制、计算机、过程自动化、无线电等系科的高年级大学生和研究生,以及在这些领域和部门工作的科学工作者和工程技术人员。

信息、控制与系统科学是在本世纪上半叶形成和发展起来的新兴学科。它们的应用和影响已经遍及众多的部门和领域,贯穿其中的许多思想和方法已用于经济和社会现象的研究,而以这些学科为理论基础的自动化技术的广泛应用更是实现现代化的重要标志之一。这套系列教材,正是在这样的客观要求下,为适应教学和科研工作的需要而组织编写和出版的。它以清华大学自动化系近年来经过教学实践的新编教材为主,力求反映这些学科的基本理论和最新进展,并且反映清华大学在这些学科中科学研究和教学研究的成果。我们希望这套系列教材,既能为在校大学生和研究生学习提供较为系统的教科书,也能为广大科技人员提供有价值的参考书。

组编和出版这套教材是一次尝试。我们热忱欢迎选用本系列教材的老师、学生和科技工作者提出批评、建议。

《信息、控制与系统》系列教材编委会

一九八七年三月

《信息、控制与系统》系列教材编委会

主 编	常 迺			
编 委	常 迺	童诗白	方崇智	韩曾晋
	李衍达	郑大钟	夏绍玮	徐培忠
责任编辑	蔡鸿程			

前 言

“过程辨识”是作者多年为大学高年级学生和研究生开设的一门课程。本书是在原有讲稿、讲义的基础上多次修改完善的结果,其中也包括了作者及其同事们在这个领域的一些研究成果。

过程辨识是研究建立生产过程数学模型的一种理论和方法。所谓辨识就是从含有噪声的输入输出数据中提取被研究对象的数学模型。一般说来,这个模型只是对象的输入输出特性在某种准则意义下的一种近似,近似的程度取决于人们对过程先验知识的认识深化程度和对数据集合性质的了解,以及所选用的辨识方法是否合理。或者说,辨识技术帮助人们在表征被研究的对象、现象或过程的复杂因果关系时,尽可能准确地确立它们之间的定量依存关系。

目前,辨识的理论日趋成熟,辨识的实践涉及许多学科领域。它正作为一门有着明显实用价值的学科活跃在各个领域,吸引着大批科学技术人员。这一方面是由于人们在认识自然、改造自然的过程中,对事物的变化规律需要定量地用数学模型来描述;另一方面是由于电子计算机的发展和普及推动了辨识向纵深发展。

近年来,辨识的应用领域越来越广泛,它的发展前景招引着各类专业技术人材,激励着人们产生一种把辨识理论用于自己工作实践的强烈愿望,各高等院校相继开设了“辨识”课程。然而,系统的适用的教材现在还很罕见。有鉴于此,我们编写了这本书。作者的意图是想把它写成既是自动控制类专业大学高年级或研究生的教材,又是相应专业工程技术人员的实用参考书,尤其对那些面临设计各种控制系统的工程师,希望能激起他们的特殊兴趣。考虑到读者是多层次的,本书采用了一个多层次的结构,低层次从基本概念出发,突出基础性和逻辑性,以适合初学者的需要;高层次从系统性和完整性出发,强调理论的深度和应用的广泛性,以适应提高者的要求。全书始终突出理论和实践相结合的原则,选材均有明显的应用背景和实用价值。叙述方法一般始于物理概念,用正规的格式导出理论结果,再用仿真例子或工程实例予以验证,最后阐述理论的应用前景和实践的经验体会,重要的结论以定理的形式给出,有的为方便使用总结成表格形式。书中给出的大量例题不仅有助于理论的理解,更重要的是提供了学习模仿的蓝本,以便读者自己模仿实践,从中体会辨识方法的有效性和实用性。我们近几年的教学实践证明,通过这样的模仿实践(有时可能是创造性的模仿)可以达到巩固基本知识、提高学习兴趣的目的。

本书的计划

全书共 17 章。

第 1、2、3 章着重论述辨识的基本概念和以后各章所需的基本知识。特别是第 1 章,作为全书的起点,初学者应该认真细读,并在学习过程中经常加以回顾,它对理解全书的内容有着重要的作用。

第 4 到第 9 章主要讨论各种辨识方法,这是全书的核心。在讨论经典辨识方法的同时,重点介绍现代的辨识方法。为了有利于认识各种辨识方法的共性,我们把现代的辨

识方法按其不同的基本思想分成三种类型:

- (1) 最小二乘类方法;
- (2) 梯度校正法;
- (3) 极大似然法。

这样分类阐述,可以使读者对于众多的辨识方法有一个完整的概念。

第 10 到第 12 章着重研究辨识算法的统一性。由于第 5 至 9 章主要致力于各种特定辨识方法的讨论,它们的共性未能被揭示。这三章试图揭示各种辨识方法之间的内在联系。当引入统一的模型结构后,便可导出辨识算法的一般形式;并以此为基础,进一步研究诸类辨识算法的共性及其收敛性问题。

第 13 章着重讨论 SISO (Single Input/Single Output) 过程的模型结构辨识。对于 MIMO (Multiple Input/Multiple Output) 过程的模型结构辨识,因为它与模型的结构形式有关,因此把它放到第 15 章“多变量线性过程辨识”中与参数辨识问题一起讨论。

第 14、15 章论述闭环和多变量线性过程的辨识问题。它是前面所讨论的辨识方法在复杂过程辨识问题中的应用。

第 16、17 章讨论辨识问题的一些实际考虑及其应用,包括开环可辨识性概念、模型类的选择、准则函数的选择、模型检验、时变过程和在线实时辨识等问题,以及辨识在自适应控制、自适应预报和故障检测与诊断等领域中的应用。尤其是第 16 章总结了许多实际经验,如果能和第 1 章联系起来读,收益会更大。

附录给出一些数学结果,供阅读正文的有关章节时参考。

如何阅读和讲授本书

阅读本书除了要有微分方程、差分方程、概率论、线性代数和控制理论的基本知识外,最好对随机过程也有一定的了解。如果读者没有这方面的知识,可先阅读本书的第 2 章。全书内容比较多,读者不一定都要通读全书,其中第 1→2→5→6→13→16 章是本书的基本阅读路线,其它的路线读者可以根据自己的实际情况并参考阅读路线图加以选择。

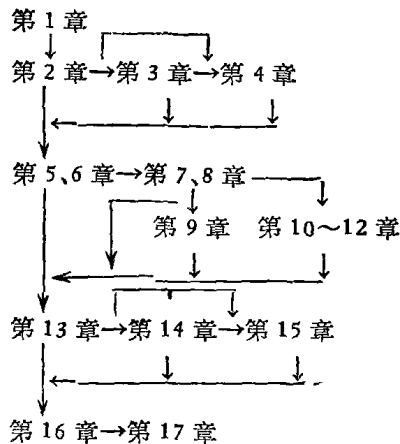


图 0.1 阅读路线图

本书在编排上强调系统性,但讲授本书的方法则可以灵活多样。对不同的读者,教师可以打破章节的界限去设计一个最合理的路线。比如,对初学者(本科生)来说,只需讲授

前 6 章或另加 13、16 章中的部分内容；对深造者(研究生)来说,要强调系统性和理论性。此外,教师可以以本书的部分章节为提纲,组织课堂讨论。实践证明,这种教学方式不仅效果好,而且对提高学生的学习积极性,培养学生的创造能力和表达能力都很有好处。另外,考虑这门课程的特点,最好能组织学生亲自完成一、两个上机实验,以加深对理论的理解。例如,本科生的实验可安排“相关分析法”和“最小二乘法”;研究生的实验可安排“各种辨识方法的比较”和“闭环可辨识性条件的研究”等(书后附有实验指示书)。

本书的编写工作得到清华大学自动化系很多同事的支持和鼓励;作者的学生也为本书做了许多工作;我们更不能忘记本书责任编辑所付出的辛勤劳动。在此,一并向他们表示衷心的感谢。

本书限于作者的水平和实践经验,缺点和不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

作者于清华大学
1987 年 10 月

目 录

前 言	xiii
第 1 章 辨识的一些基本概念	1
1.1 过程和模型	1
1.1.1 过程	1
1.1.2 模型	2
1.1.3 建立过程数学模型的基本方法	5
1.2 辨识的定义	8
1.3 辨识问题的表达形式	9
1.4 辨识算法的基本原理	11
1.5 误差准则及其关于参数的空间线性问题	12
1.5.1 输出误差	13
1.5.2 输入误差	13
1.5.3 广义误差	13
1.6 辨识的内容和步骤	15
1.6.1 辨识目的	15
1.6.2 先验知识	15
1.6.3 实验设计	17
1.6.4 数据预处理	18
1.6.5 模型结构辨识	19
1.6.6 模型参数辨识	20
1.6.7 模型检验	20
1.7 辨识的精度问题	21
1.8 辨识的应用	21
第 2 章 随机信号的描述与分析	24
2.1 随机过程的基本概念及其数学描述	24
2.1.1 基本概念	24
2.1.2 随机过程的数字特征——均值与相关函数	25
2.1.3 平稳随机过程 各态遍历性	25
2.1.4 相关函数和协方差函数的性质	27
2.2 谱密度函数	29
2.2.1 Parseval 定理与功率谱表示式	29
2.2.2 Wiener-Khintchine 关系式	30
2.3 线性过程在随机输入下的响应	31

2.3.1	线性过程在随机输入下的输出谱密度	32
2.3.2	线性过程在随机输入下的互谱密度	32
2.4	相关函数与谱密度的估计	33
2.4.1	相关函数的估计	33
2.4.2	利用 FFT 计算相关函数	35
2.4.3	周期图	38
2.4.4	谱密度的估计	39
2.5	白噪声及其产生方法	40
2.5.1	白噪声的概念	40
2.5.2	白噪声序列的产生方法	45
2.6	伪随机码的产生及其性质	54
2.6.1	M 序列的产生	54
2.6.2	M 序列的性质	60
2.6.3	M 序列的自相关函数	61
2.6.4	M 序列的谱密度	64
2.6.5	逆 M 序列的产生及其性质	66
第 3 章	过程的数学描述	71
3.1	输入输出模型	71
3.1.1	连续型输入输出模型	71
3.1.2	离散型输入输出模型	72
3.2	状态空间模型	72
3.2.1	连续型状态空间模型	72
3.2.2	离散型状态空间模型	75
3.3	数学模型之间的等价变换	75
3.3.1	SISO 过程微分方程化为差分方程	75
3.3.2	SISO 过程离散型状态方程化为差分方程	78
3.4	随机模型	81
3.4.1	一般概念	81
3.4.2	噪声模型及其分类	82
第 4 章	经典的辨识方法	84
4.1	引言	84
4.2	阶跃响应法	85
4.2.1	实验测取过程的阶跃响应	85
4.2.2	由阶跃响应求过程的传递函数	85
4.3	脉冲响应法	92
4.3.1	过程脉冲响应的辨识	92
4.3.2	由脉冲响应求过程的传递函数	95

4.4	频率响应法	100
4.4.1	实验测取过程的频率响应	100
4.4.2	由频率响应求过程的传递函数	105
4.5	相关分析法	110
4.5.1	频率响应的辨识	110
4.5.2	脉冲响应的辨识	112
4.6	谱分析法	123
4.6.1	周期图法	123
4.6.2	平滑法	124
4.7	一个工业上的应用实例	126
第5章	最小二乘类参数辨识方法 (I)	133
5.1	引言	133
5.2	最小二乘法的基本概念	134
5.3	最小二乘问题的提法	135
5.4	最小二乘问题的解	136
5.5	最小二乘估计的几何解释	139
5.6	最小二乘参数估计量的统计性质	140
5.6.1	无偏性	140
5.6.2	参数估计偏差的协方差性质	141
5.6.3	一致性	141
5.6.4	有效性	143
5.6.5	渐近正态性	144
5.7	噪声方差的估计	145
5.8	最小二乘参数估计的递推算法	146
5.8.1	依观测次序的递推算法	146
5.8.2	仿真例	149
5.8.3	问题讨论	151
5.8.4	依模型阶次的递推算法	156
第6章	最小二乘类参数辨识方法 (II)	159
6.1	引言	159
6.2	适应算法	159
6.2.1	“数据饱和”现象	159
6.2.2	遗忘因子法	160
6.2.3	限定记忆法	165
6.3	偏差补偿最小二乘法	169
6.4	增广最小二乘法	173
6.5	广义最小二乘法	175

6.6	辅助变量法	178
6.6.1	一次完成算法.....	179
6.6.2	辅助变量的选择.....	180
6.6.3	递推算法.....	181
6.6.4	问题讨论.....	182
6.6.5	仿真例.....	183
6.7	二步法	184
6.7.1	COR-LS 二步法	184
6.7.2	仿真例.....	188
6.8	多级最小二乘法	189
6.9	Yule-Walker 辨识算法	192
6.9.1	一次完成算法.....	192
6.9.2	依阶次递推算法.....	194
6.10	最小二乘类辨识方法的比较	197
6.11	工业上的一个应用实例	197
第 7 章	梯度校正参数辨识方法.....	201
7.1	引言	201
7.2	确定性问题的梯度校正参数辨识方法	201
7.2.1	权矩阵 $R(k)$ 的选择.....	202
7.2.2	应用例——脉冲响应辨识.....	206
7.3	随机性问题的梯度校正参数辨识方法	209
7.3.1	随机性问题的提法.....	209
7.3.2	随机性辨识问题的分类.....	21 ⁰
7.3.3	随机性问题的梯度校正参数估计方法.....	212
7.4	梯度校正法在动态过程辨识中的应用	216
7.4.1	状态方程的参数辨识.....	217
7.4.2	差分方程的参数辨识.....	220
7.5	实例	220
7.6	随机逼近法	222
7.6.1	随机逼近原理.....	223
7.6.2	随机逼近参数估计方法.....	225
7.6.3	随机牛顿法.....	227
第 8 章	极大似然法和预报误差方法.....	229
8.1	引言	229
8.2	极大似然参数辨识方法	229
8.2.1	极大似然原理.....	229
8.2.2	动态过程模型参数的极大似然估计.....	233

8.2.3	递推的极大似然参数估计	243
8.2.4	极大似然估计量的统计性质	248
8.2.5	一个实验研究例: 流体管线不恒定流的辨识	251
8.3	预报误差参数辨识方法	253
8.3.1	预报误差准则	254
8.3.2	预报误差方法与极大似然法之间的关系	254
8.3.3	预报误差参数估计方法	256
8.3.4	预报误差参数估计量的统计性质	259
第 9 章	其它两种辨识方法	261
9.1	Bayes 方法	261
9.1.1	基本原理	261
9.1.2	Bayes 方法用于最小二乘模型的参数辨识问题	264
9.2	模型参考自适应辨识方法	266
9.2.1	并联型的模型参考辨识算法	267
9.2.2	仿真例	272
9.3	小结	276
第 10 章	最小二乘类一次完成算法之间的内在联系	277
10.1	引言	277
10.2	信息压缩阵及其作用	277
10.2.1	信息压缩阵的定义	277
10.2.2	信息压缩阵的等价变换形式	279
10.2.3	信息压缩阵的 LDU 分解	281
10.2.4	信息压缩阵的构成	282
10.2.5	信息压缩阵的作用	285
10.3	信息滤波阵及其作用	285
10.3.1	信息滤波阵的定义	285
10.3.2	最小二乘法的信息滤波阵及其应用	285
10.3.3	广义最小二乘法的信息滤波阵及其应用	286
10.3.4	辅助变量法的信息滤波阵及其应用	289
10.4	小结	291
第 11 章	递推辨识算法的一般结构	292
11.1	引言	292
11.2	模型的一般结构	292
11.2.1	输出预报值的一般表达形式	294
11.2.2	模型的一般结构	297
11.3	递推辨识算法的一般形式	299

11.3.1	准则函数	299
11.3.2	随机牛顿法的应用	299
11.3.3	RLS 是 RGIA 的一种特例	301
11.4	RGIA 算法用于 SISO 一般模型辨识	302
11.4.1	输出预报值的表示	303
11.4.2	输出预报值关于参数 θ 的梯度	304
11.4.3	SISO 模型辨识算法的一般形式	305
11.4.4	RGIA-SS 算法的近似式	306
11.4.5	说明	308
11.5	RGIA 算法用于状态空间模型辨识	308
11.5.1	输出预报值的表示	309
11.5.2	输出预报值关于参数 θ 的梯度	310
11.5.3	状态空间模型辨识算法的一般形式	311
11.6	RGIA 算法的实现问题	313
11.6.1	U-D 分解法	315
11.6.2	快速算法	319
11.6.3	性能比较	320
11.7	小结	321
第 12 章	递推辨识算法的收敛性分析	322
12.1	引言	322
12.2	ODE 法的启发性讨论	323
12.2.1	辨识算法的伴随微分方程	323
12.2.2	辨识算法与伴随微分方程之间的联系	324
12.2.3	基本定理	327
12.3	RLS 算法的收敛性分析	329
12.3.1	RLS 算法	329
12.3.2	RLS 算法的收敛性分析	329
12.4	小结	331
第 13 章	模型阶次的确定	332
13.1	引言	332
13.2	根据 Hankel 矩阵的秩估计模型的阶次	332
13.2.1	无噪声情况	333
13.2.2	弱噪声情况	334
13.2.3	强噪声情况	334
13.3	利用行列式比估计模型的阶次	336
13.3.1	无噪声情况	336
13.3.2	白噪声情况	337

13.3.3	有色噪声情况	338
13.4	利用残差的方差估计模型的阶次	341
13.4.1	残差方差分析	341
13.4.2	统计 F 检验的应用	343
13.4.3	有色噪声过程的定阶方法	346
13.5	利用 Akaike 准则估计模型的阶次	348
13.5.1	定性解释	348
13.5.2	AIC 准则的推导	349
13.5.3	AIC 定阶法	351
13.5.4	AIC 定阶法与 F 检验定阶法的关系	354
13.6	利用最终预报误差准则估计模型的阶次	355
13.6.1	白噪声情况	355
13.6.2	有色噪声情况	357
13.6.3	FPE 定阶法与 AIC 定阶法的关系	359
13.7	小结	360
第 14 章	闭环系统辨识	361
14.1	引言	361
14.2	判明系统是否存在反馈作用的方法	361
14.2.1	谱因子分解法	361
14.2.2	似然比检验法	363
14.3	闭环系统的可辨识性概念	365
14.4	闭环辨识方法及可辨识性条件	367
14.4.1	间接辨识法	368
14.4.2	直接辨识法	372
14.4.3	关于闭环可辨识性条件的一些结论	375
14.5	闭环系统的阶次辨识	377
14.6	最小二乘法在闭环辨识中的应用	380
14.6.1	唯一性	381
14.6.2	一致性	383
14.6.3	仿真例	384
14.7	辅助变量法在闭环辨识中的应用	386
14.8	相关二步法在闭环辨识中的应用	388
14.8.1	COR-O	388
14.8.2	COR-I/O	390
14.8.3	COR-I/O/P	393
14.9	工业上一个闭环辨识实例	393
14.9.1	过程简介和辨识实验	393
14.9.2	辨识结果	395

第 15 章 多变量线性过程辨识	397
15.1 引言	397
15.2 多变量线性过程的描述	398
15.2.1 状态空间描述及其规范型	398
15.2.2 传递函数矩阵描述及其最小实现	416
15.2.3 Markov 参数矩阵描述及其最小实现	420
15.2.4 输入输出差分方程描述及其与行同伴型的关系	421
15.3 多变量线性过程的参数估计方法	424
15.3.1 传递函数矩阵参数估计方法	424
15.3.2 Markov 参数估计方法	430
15.3.3 输入输出差分方程参数估计方法	432
15.4 多变量线性过程的结构辨识	434
15.4.1 Guidorzi 方法	434
15.4.2 残差分析法	440
15.5 小结	443
第 16 章 辨识问题的一些实际考虑	445
16.1 引言	445
16.2 开环可辨识性问题	445
16.2.1 可控性、可观性和可辨识性	446
16.2.2 可辨识性与输入信号的关系	447
16.3 模型类的选择	452
16.3.1 一般考虑	452
16.3.2 SISO 模型类的选择	453
16.3.3 工程应用上的实际考虑	457
16.4 准则函数的选择	457
16.5 算法初始值的选择	460
16.6 时变过程的参数辨识方法	462
16.6.1 折息法	463
16.6.2 随机牛顿法在时变问题中的应用	465
16.7 实时在线辨识	468
16.7.1 硬件	469
16.7.2 软件	469
16.7.3 一些实际考虑	470
16.7.4 实时在线辨识实验例	471
16.8 模型检验	474
16.8.1 自相关函数检验法	475
16.8.2 周期图检验法	476
16.9 模型变换的计算机实现	478

16.9.1	离散模型转换成连续模型	479
16.9.2	连续模型转换成离散模型	480
16.10	辨识软件包	481
16.11	小结	481
第 17 章	辨识的应用	482
17.1	引言	482
17.2	辨识在自适应控制中的应用	482
17.2.1	自适应控制的基本原理	482
17.2.2	控制算法	486
17.2.3	参数自适应控制算法	493
17.3	辨识在自适应预报中的应用	501
17.3.1	间接法	502
17.3.2	直接法	503
17.3.3	多层递阶预报方法	504
17.4	辨识在过程故障检测中的应用	508
17.4.1	过程故障检测方法	509
17.4.2	一点说明	518
17.5	小结	519
习题	520
上机实验说明	538
附录 A	变量符号·记号约定·缩写	543
附录 B	随机变量基本知识	547
附录 C	矩阵运算	551
附录 D	估计理论	553
附录 E	分布值表	555
参考文献	557

第 1 章 辨识的一些基本概念

辨识 (Identification)、状态估计和控制理论是现代控制论三个互相渗透的领域。辨识和状态估计离不开控制理论的支持, 控制理论的应用又几乎不能没有辨识和状态估计技术。随着控制过程复杂性的提高, 控制理论的应用日益广泛。但是, 它的实际应用不能脱离被控对象的数学模型。然而在多数情况下, 被控对象的数学模型是不知道的, 或在正常运行期间模型的参数可能发生变化, 因此利用控制理论去解决实际问题时, 首先需要建立被控对象的数学模型。比如, 为了分析、设计一个控制系统, 需要建立控制对象(生产设备或生产过程)的数学模型; 对生物规律、药物反应或社会经济等问题进行定量分析时, 也需要建立相应的数学模型。总之, 充分掌握研究对象的运动规律, 在表征它们的因果关系时, 确立对应的数学模型, 这是控制理论能否成功地用于实际的关键之一。辨识正是适应这一需要而形成的一门学科, 它的理论正在日趋成熟, 它的实际应用已遍及许多领域。

所谓辨识就是通过测取研究对象在人为输入作用下的输出响应, 或正常运行时的输入输出数据记录, 加以必要的数据处理和数学计算, 估计出对象的数学模型。这是因为对象的动态特性被认为必然表现在它的变化着的输入输出数据之中, 辨识只不过是利用数学的方法从数据序列中提炼出对象的数学模型而已。

本章主要论述辨识的一些基本概念, 包括建模的方法、辨识的定义、表达形式、辨识算法原理、误差准则及辨识的内容和步骤等。

1.1 过程和模型

1.1.1 过程

过程 (Process) 本身的含义是比较广泛的, 可以指某个工程系统、某个生物学系统, 也可以指某个经济的或社会的系统。本书所说的过程主要指工业生产过程, 比如各种化工装置、锅炉设备、核反应堆、造纸设备、窑炉、换热器、飞机和船舶驾驶等生产过程。不过, 本书不是研究这些过程的工艺, 而是研究如何建立这些过程的数学模型, 以便更好地分析过程的机理, 预报、理解过程的性能, 设计合理的过程控制系统, 等等。众所周知, 许多实际工业过程的机理是非常复杂的, 建立它们的数学模型不是一件容易的事。但是, 如果只关心过程的外特性, 则可以把过程看成“黑箱”, 如图 1.1 所示。根据“黑箱”所表现出来的输入输出信息, 建立与

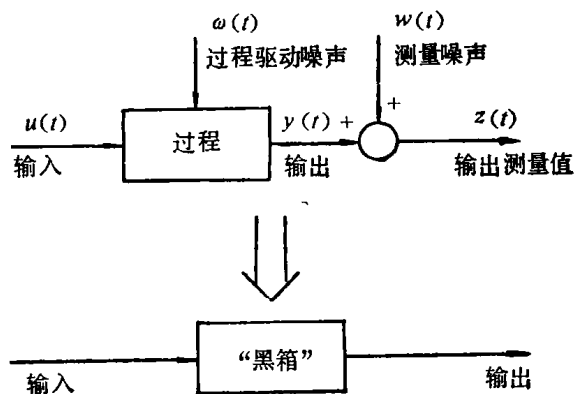


图 1.1 过程的“黑箱”模型

可以把过程看成“黑箱”, 如图 1.1 所示。根据“黑箱”所表现出来的输入输出信息, 建立与