

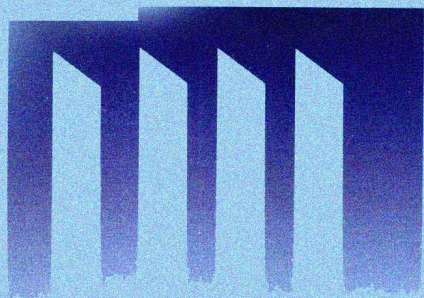


军队“2110工程”建设项目 军事航天学

系统辨识方法及应用

XITONG BIANSHI FANGFA JI YINGYONG

刘党辉 蔡远文 苏永芝 尹云霞 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

军队“2110 工程”建设项目 军事航天学

系统辨识方法及应用

刘党辉 蔡远文 编著
苏永芝 尹云霞

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书较系统地介绍了系统辨识方法的基本理论和方法,重点论述了输入设计与数据预处理方法、经典的非参数和参数辨识方法,神经网络模型和模糊集合模型辨识方法、鲁棒控制模型辨识方法,给出了系统辨识方法在飞行器试验中的应用实例,并提供了一些仿真实例的 MATLAB 代码。

本书内容简明扼要,理论紧密结合实际,较系统地阐述了系统辨识的主要步骤和内容,具有很好的实用性。本书可供从事系统建模的研究人员,工程师,研究生和相关专业的技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

系统辨识方法及应用/刘党辉等编著. —北京:国防工业出版社,2010.6
军队“2110工程”建设项目. 军事航天学
ISBN 978-7-118-06810-8

I. ①系... II. ①刘... III. ①系统辨识
IV. ①N945.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 075615 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 24 字数 453 千字

2010 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 49.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

序

空间技术及装备的发展,促进了信息化战争形态的形成,丰富了信息化战争的内容,给未来战争形式、作战力量建设、指挥控制等带来了深刻的影响。军事航天技术发展、空间力量建设、空间力量应用是军事航天学学科的主要研究内容。因此,军事航天学学科建设成为我军军事斗争准备的重要任务。

装备指挥技术学院军事航天学学科是军队“2110 工程”重点建设学科,其作战指挥学学科是国家重点(培育)学科。为了总结梳理军事航天学学科建设成果,提升学科建设水平和军事航天人才培养质量,在学院“2110 工程”教材(著作)编审委员会统一组织指导下,军事航天学学科领域的专家学者编著了一套适应军事航天指挥技术人才培养需求,对我军空间力量建设具有引领作用的系列丛书,将分别以学术专著和专业教材的形式陆续出版。

编辑这套丛书是军事航天学学科建设的重要内容,是军事航天人才培养的重要基础,也是体现军事航天学学科建设水平的重要标志。旨在通过系统、全面的梳理,总结军事航天学学科建设和军事航天人才培养理论与实践探索的重要成果和宝贵经验,促进军事航天学学科发展;围绕我军空间力量建设和军事斗争准备需要,以空间力量建设、空间力量应用、航天指挥控制为主要内容,培养高素质军事航天指挥技术人才,推动军事航天发展。

本套丛书的编著出版对于系统深入总结军事航天学学科建设和军事航天人才培养的重要成果,推进军事航天学学科建设,提高军事航天人才的培养质量,加快军队信息化建设和军事斗争准备具有重要的理论意义和现实意义。

装备指挥技术学院
军事航天学教材(著作)编委会

前 言

任何待研究的对象都可以看成是一个系统。系统的数学模型是系统本质特征的数学抽象,是建立系统状态参数之间以及与外作用之间最主要的相互作用、相互制约的数学表达式。研究系统不同侧面的特性,则反映系统基本特性的状态参数也不同。

建立系统的数学模型是人们进行科学研究和工程实践的一个常用方法。一个合适的数学模型可以帮助人们充分认识系统的本质特征,并进而做出正确的决策。“系统辨识”就是要利用系统运行或试验的输入输出数据来建立系统的数学模型的理论和方法。由于不同系统具有不同特性,如宏观与微观、线性与非线性、稳态与动态、确定性与随机性等,一般来说,建立一个合适的系统模型是一个比较复杂的问题。

系统辨识应用的领域非常广阔,包括自动控制、航空、航天、天文学、海洋、医学、生物学、生态学及社会经济学等众多领域。这些领域的研究对象通常非常复杂,其内部机理部分甚至完全不清楚,通常很难应用已有理论直接获得其数学模型,只能利用观测数据来确定研究对象的数学模型及其参数。系统辨识理论经过几十年的发展,研究越来越深入,应用越来越广泛,特别是在系统的机理研究与仿真、自动控制、自适应预测和预报、故障诊断等方面获得了非常成功的应用。

依据军队院校学科专业建设需求,作者结合多年的教学实践经验,对各类系统辨识方法和应用进行了归纳总结,并给出大量仿真实例。由于系统辨识方法种类多样,涉及很多领域的知识,本书不可能详述各方面的知识,主要介绍一些基本概念和具体的辨识方法,更多公式推导过程的细节请读者参考相关文献和著作。

本书共有 14 章,在内容安排上十分注重系统辨识基础理论与实际工程应用紧密结合的特点。第 1 章从总体上介绍了系统辨识的基本内涵、特色、应用以及本书内容的总体安排。第 2 章~第 9 章分别介绍了输入设计与数据预处理、模型辨识、非参数辨识、最优化方法、参数辨识、多变量系统辨识、闭环系统辨识等理论和方法。第 10 章~第 12 章分别介绍了最新的神经网络模型辨识、模糊集合模型辨识、鲁棒控制模型的辨识方法等。第 13 章特别介绍了系统辨识在飞行器试验工程中的应用。第 14 章介绍了一些基于 Matlab 的仿真实例的软件实现。

本书涵盖了系统辨识涉及的主要步骤和内容,内容全面新颖,仿真实例典型,理论与应用结合紧密,并提供了一些 Matlab 代码使读者更容易掌握相关知识及其应用。本书可用作军队院校任职教育相关专业技术人员的培训教材,也可作为工科院校电子工程类专业、控制工程类专业、系统工程类专业的研究生教材,或相关专业的工程师和技术人员的参考资料。

本书第 4 章~第 6 章由蔡远文编写,第 7、8 章由苏永芝编写,第 12、13 章由尹云霞编写,其余章节由刘党辉编写。在本书的编写过程中参考了相关文献和最新资料,在此也向这些文献资料的作者致以诚挚的谢意!

由于作者的知识水平有限,书中难免存在不妥之处,欢迎广大读者批评指正。

作者
2009 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 系统与模型	1
1.2 系统辨识的基本思想	5
1.3 系统辨识的内容和步骤	7
1.4 系统辨识的基本原则	10
1.5 系统辨识的应用	11
1.6 系统辨识软件包	13
1.7 本书内容安排	13
习题	14
第 2 章 输入设计与数据预处理	16
2.1 随机信号	16
2.1.1 随机信号的均值和相关函数	17
2.1.2 相关函数和协方差函数的性质	18
2.1.3 相关函数和谱密度函数	19
2.2 常用输入信号	21
2.2.1 多正弦和函数信号	21
2.2.2 方波信号	22
2.2.3 白噪声	24
2.2.4 有色噪声	26
2.2.5 伪随机二位式序列	26
2.2.6 逆 m 序列	31
2.3 输入信号与开环可辨识性	33
2.3.1 输入信号与开环可辨识性问题	33
2.3.2 $2n$ 阶持续激励信号	34
2.3.3 $2n$ 阶持续激励条件	34
2.4 输入信号的选择	36
2.5 采样率的选择	37
2.6 测量数据预处理	37

2.6.1	野值的剔除和补正	38
2.6.2	数据平滑	39
2.6.3	数字低通滤波	40
2.6.4	零均值化	41
2.6.5	消除数据变化趋势	42
2.7	数据相容性检验	43
习题		43
第3章 系统模型与模型辨识		44
3.1	输入输出模型	44
3.1.1	连续型输入输出模型	44
3.1.2	离散型输入输出模型	45
3.2	状态空间模型	46
3.2.1	连续型状态空间模型	46
3.2.2	离散型状态空间模型	48
3.3	随机模型	48
3.3.1	随机系统的差分模型	49
3.3.2	随机系统的状态空间模型	49
3.3.3	随机系统的预测误差方程	51
3.4	数学模型之间的等价变换	51
3.4.1	微分方程和差分方程的互相转换	51
3.4.2	状态方程到差分方程的转换	53
3.5	模型结构的可辨识性	54
3.6	模型阶次的辨识	55
3.6.1	行列式比定阶法	55
3.6.2	PCA 定阶法	56
3.6.3	损失函数检验法	56
3.6.4	F 检验法	57
3.6.5	Akaike 准则法	58
3.6.6	预报误差准则法	58
3.6.7	Hankel 矩阵定阶法	61
3.7	模型仿真与预测	62
3.7.1	一步超前预测	63
3.7.2	n 步超前预测	64
3.8	辨识精度	65
3.8.1	参数辨识准确度评价方法	65

3.8.2 参数置信区间的估计	67
3.9 模型检验	69
习题	71
第4章 非参数模型辨识方法	73
4.1 相关分析法	73
4.1.1 频率响应的辨识	73
4.1.2 脉冲响应的辨识	74
4.2 谱分析法	83
4.2.1 周期图法	83
4.2.2 估计频率响应的平滑法	85
4.3 非参数模型转化为参数模型	90
4.3.1 由脉冲响应求传递函数	91
4.3.2 由频率响应求传递函数	95
习题	96
第5章 参数辨识最优化方法	97
5.1 参数估计的梯度校正法	97
5.1.1 随机逼近法	97
5.1.2 随机 Newton - Raphson 法	98
5.1.3 Marquardt 法	99
5.2 遗传算法	101
5.2.1 基本遗传算法	101
5.2.2 实数编码遗传算法	104
5.3 粒子群优化算法	106
5.3.1 粒子群优化算法	106
5.3.2 基于粒子群优化的系统辨识	107
习题	109
第6章 最小二乘法	110
6.1 最小二乘法概述	110
6.1.1 最小二乘法的基本算法	110
6.1.2 最小二乘估计的性质	112
6.1.3 最小二乘法的逐数据递推算法	114
6.1.4 递推平方根算法	116
6.1.5 最小二乘法的逐阶次递推算法	117
6.2 时变最小二乘法	119
6.2.1 限定记忆最小二乘法	119

6.2.2	遗忘因子法	120
6.2.3	分段折线最小二乘法	121
6.3	辅助变量法	123
6.4	增广最小二乘法	125
6.4.1	增广最小二乘法概述	126
6.4.2	广义的增广最小二乘法	127
6.5	多级最小二乘法	128
6.6	单输入单输出系统一般模型辨识的递推算法	131
6.6.1	递推算法	132
6.6.2	快速算法	136
6.7	系统辨识在故障检测中的应用	137
6.7.1	故障检测方法	138
6.7.2	在线故障检测方法	141
习题		144
第7章	其他参数辨识法	146
7.1	极大似然法	146
7.1.1	协方差矩阵已知的极大似然法	147
7.1.2	协方差矩阵未知的极大似然法	148
7.1.3	Newton-Raphson 迭代求解法	150
7.1.4	递推极大似然法	152
7.2	预报误差法	156
7.3	基于卡尔曼滤波器的多模参数辨识	159
7.3.1	卡尔曼滤波方程	159
7.3.2	基于卡尔曼滤波方程的多模参数辨识算法	162
7.3.3	“移动”卡尔曼滤波器组多模参数辨识	165
7.4	基于系统辨识的自适应预报	167
7.4.1	间接法	167
7.4.2	直接法	169
7.4.3	多层递阶预报方法	170
习题		171
第8章	多变量线性系统辨识	172
8.1	状态方程的规范形	172
8.1.1	代数等价系统	172
8.1.2	适宜选择路线	173
8.1.3	规范形	175

8.2	输入、输出方程	179
8.2.1	输入、输出方程一般形式	180
8.2.2	PCF 规范形对应的输入、输出方程	181
8.3	PCF 规范形的辨识	185
8.3.1	结构确定及参数辨识	185
8.3.2	求解 B^* 和 D^*	194
8.4	状态空间模型的递归辨识算法的一般形式	198
习题		204
第 9 章 闭环系统的模型辨识		205
9.1	系统反馈判别法	205
9.2	闭环系统的辨识方法	208
9.2.1	直接辨识法	209
9.2.2	间接辨识法	214
9.3	多输入多输出闭环系统的辨识	216
9.3.1	自回归模型辨识法	216
9.3.2	更换反馈矩阵辨识法	218
9.4	闭环系统的阶次辨识	219
9.5	基于系统辨识的自适应控制	221
9.5.1	基本原理	221
9.5.2	自优化自适应控制	222
习题		228
第 10 章 神经网络模型的辨识		229
10.1	单个神经元结构	229
10.2	多层前馈神经网络后向传播算法	230
10.3	三层前馈神经网络的预报误差法	235
10.3.1	神经网络建模的结构	235
10.3.2	神经网络的 RPE 算法	236
10.4	径向基神经网络	238
10.5	基于神经网络的逆模型辨识	242
10.6	神经自校正控制	247
10.6.1	神经自校正控制结构	248
10.6.2	神经网络辨识器	249
10.7	神经 PID 控制	252
10.7.1	神经网络辨识器	253
10.7.2	神经 PID 控制器	254

10.8 神经模型参考自适应控制	257
习题	260
第 11 章 模糊系统的模型辨识	262
11.1 模糊集合	262
11.1.1 隶属函数	262
11.1.2 模糊集的逻辑运算	264
11.1.3 模糊规则和模糊推理	265
11.2 基于 T-S 模型的模糊辨识	266
11.2.1 结论参数的辨识	268
11.2.2 前提参数的辨识	269
11.2.3 前提变量的选择	270
11.3 基于模糊划分的模糊辨识	271
11.3.1 基于 T-S 模型的广义变形模型的模糊辨识	271
11.3.2 基于正交最小二乘法的模糊辨识	276
11.4 基于模糊模型辨识的自适应预测与控制	277
11.4.1 基于模糊模型的自适应广义预测控制	277
11.4.2 电力系统短期负荷预测的模糊建模方法	282
11.4.3 炼钢中的模糊建模方法	285
习题	287
第 12 章 面向控制的鲁棒辨识	289
12.1 基于频域数据的鲁棒辨识	289
12.1.1 鲁棒辨识问题的描述	289
12.1.2 非线性两步算法	291
12.2 基于时域数据的鲁棒辨识	294
12.2.1 Caratheodory-Fejer 插值算法	294
12.2.2 基于 l_1 范数的时域数据鲁棒辨识	297
12.3 基于时/频混合数据的鲁棒辨识	300
12.3.1 插值算法	301
12.3.2 混合数据鲁棒辨识的凸规划算法	304
第 13 章 系统辨识在飞行器试验中的应用	307
13.1 基于参数辨识的运载火箭动力系统故障诊断	307
13.1.1 强跟踪滤波器	307
13.1.2 运载火箭故障诊断数学模型	309
13.1.3 仿真结果	310
13.2 基于参数辨识的空中飞行模拟器自适应控制	312

13.2.1	参数自适应模型跟随飞控系统方案	313
13.2.2	飞机运动模型建立及控制律形成	313
13.2.3	快速采样多变量模型跟随控制	316
13.2.4	多模参数自适应控制系统的综合	318
13.2.5	仿真系统构成及仿真试验	321
13.3	固定翼飞行器气动参数辨识	323
13.3.1	空气动力数学模型	323
13.3.2	气动参数辨识方程组	325
第 14 章	基于 Matlab 的系统辨识实例	331
附录 A	χ^2 分布值表 ($\alpha=0.05$)	364
附录 B	F 分布值表 ($\alpha=0.05$)	365
参考文献		367

第1章 绪 论

在工业控制、航空航天、天文学、海洋、医学、生物学、生态学及社会经济学等众多领域,研究的对象通常非常复杂,其内部机理部分甚至完全不清楚,通常很难应用已有理论直接获得相应的数学模型,只能利用观测数据来确定研究对象的数学模型及其参数,这就是系统辨识所要解决的问题。系统辨识理论经过几十年的发展,研究越来越深入,应用越来越广泛,已在上述领域获得了十分成功的应用。

1.1 系统与模型

任何待研究的对象都可以看成是一个系统。在数学上,系统的基本特性可以用状态参数加以描述,状态参数一经确定,系统也就确定了。系统的数学模型是系统本质特征的数学抽象,是建立系统状态参数之间以及与外作用之间最主要的相互作用、相互制约的数学表达式。研究系统不同侧面的特性,则反映系统基本特性的状态参数也不同。模型一般不可能考虑所有因素,通常仅考虑主要因素而忽略次要因素,以便简化模型,但是模型的精度可能有所降低。如何折中模型的精确性和复杂性是建模中需要考虑的一个关键问题。

对于一些系统,可以从已知的原理、定律和定理出发,通过机理分析研究,找出系统内在的运动规律,推导出系统中各状态参数与外作用之间的解析关系式,即数学模型,这种方式称为系统的理论建模。由于这类系统的基本规律已知,在控制论中称之为“白箱”问题。对于另一些系统,由于对系统的客观规律不清楚,只能从系统的输入和输出测量数据来建立其数学模型,称之为“黑箱”问题,通常采用辨识建模方法。还有一些系统,其某些部分的机理清楚,可直接用理论建模的方法加以解决,对其中机理不清楚的部分,可使用辨识建模的方法,这种方式通常称之为“灰箱”问题。

实际上,对于一个未知机理的系统,由于仅仅可利用输入输出数据,对这种“黑箱”模型的辨识是一个复杂的工作,需要利用很多相关知识和方法。因此,一般尽可能在一定的理论分析基础之上建立或假设模型,然后对模型中相关参数进行辨识,即采用混合建模的思想解决实际问题,这样就可以大大降低建模的复杂度。下面给出一些辨识方法应用实例。

【例 1.1】 求 0 ~ 100℃ 之间水的定压比热容随温度变化的数学模型。表 1.1 是在一个大气压下,由试验测出的水的定压比热容 C_p 随温度 T 的变化关系表。

表 1.1 一个大气压下水的比定压热容 C_p 随温度 T 的变化关系

温度/℃	定压比热容/ (cal/(g · °C))	温度/℃	定压比热容/ (cal/(g · °C))	温度/℃	定压比热容/ (cal/(g · °C))
0	1.00762	35	0.99818	70	1.00091
5	1.00392	40	0.99828	75	1.00167
10	1.00153	45	0.99849	80	1.00253
15	1.00000	50	0.99878	85	1.00351
20	0.99907	55	0.99919	90	1.00461
25	0.99852	60	0.99967	95	1.00586
30	0.99826	65	1.00024	100	1.00721

注:1cal=4.1868J

解:在压力不变时,物体所含热量 Q 是温度 T 的函数:

$$Q = f(T) \tag{1.1.1}$$

在温度一定的变化范围内,物质的比热容 C_p 定义为

$$C_p = \frac{dQ}{dT}/m$$

其单位为 cal/(g · °C),即为热容 C_p 为 1g 物质温度升高 1℃ 所需的热量。

画出定压比热容与温度的关系,如图 1.1 所示,曲线类似于一个抛物线。采用“黑箱”建模方法,用多项式进行曲线拟合,设模型为

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \tag{1.1.2}$$

用最小二乘法可求得模型为

$$C_p = 1.005956 - 4.629274T + 7.759288T^2 + 3.058133 \times 10^{-8}T^3 \tag{1.1.3}$$

忽略系数很小的三次项,模型为

$$C_p = 1.005956 - 4.629274T + 7.759288T^2 \tag{1.1.4}$$

【例 1.2】 图 1.2 所示是一个用电枢电流控制直流电机的转角和角速度系统。电机有一个惯性负载和一个黏性摩擦负载,假如电机输出力矩是与电枢电流成正比,比例常数是 K_T ,且电动势与角速度成正比,比例常数是 K_g ,设 J 为转动惯量, B 为黏性摩擦系数, R 为电枢回路电阻, L 为电枢回路电感, e_a 为输入电压, e_b 为电枢反电动势, i_a 为电枢电流。

解:采用混合建模方法。对本系统的动力学部分,采用牛顿第二定律,有

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = -B \frac{d\theta}{dt} + K_T i_a \quad (1.1.5)$$

式中: θ 为电机的转角。

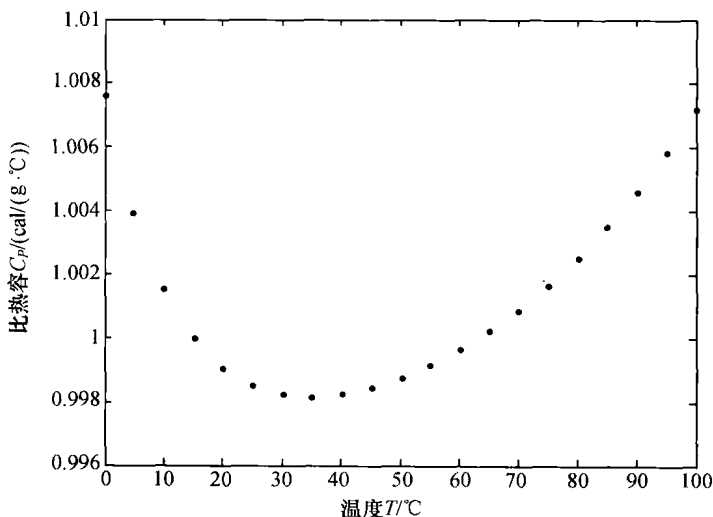


图 1.1 比热容随温度变化曲线

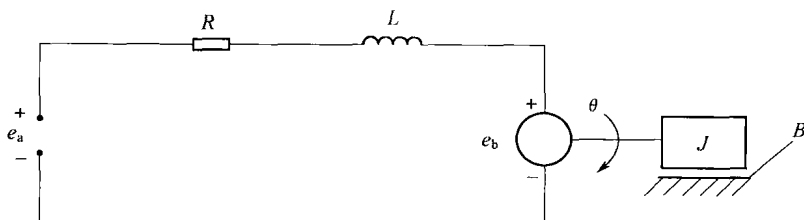


图 1.2 电枢电流控制系统

对电枢电流用基尔霍夫定律,有

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_b = e_a$$

$$e_b = K_e \frac{d\theta}{dt} \quad (1.1.6)$$

假如 i_a 和 θ 是可测量的,且 i_a 和 θ 是输出变量,而 e_a 由外界控制,是输入变量。令

$$f_1 = -B/J, \quad f_2 = -K_T/J, \quad f_3 = K_e/L, \quad f_4 = -R/L$$

$$c = 1/L, \quad x_1 = \theta, \quad x_2 = \frac{d\theta}{dt}, \quad x_3 = i_a, \quad u = e_a \quad (1.1.7)$$

则系统模型可写为

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= f_1 x_2 + f_2 x_3 \\ \frac{dx_3}{dt} &= f_3 x_2 + f_4 x_3 + cu\end{aligned}\quad (1.1.8)$$

式中: $\{x_1, x_2, x_3\}$ 为状态变量; $\{f_1, f_2, f_3\}$ 为待辨识模型参数; u 为输入变量; $\{\frac{dx_1}{dt}, \frac{dx_2}{dt}, \frac{dx_3}{dt}\}$ 为输出变量。

【例 1.3】 图 1.3 给出了一个太阳能供热房间的热交换控制系统。太阳加热太阳能采集器中的空气, 热空气然后被泵传送到网络所示的热存储单元。这些存储的热能以后能被泵传送到房间内。那么, 太阳能辐射强度、泵转速与热存储单元的温度之间存在什么关系?

解: 设在 kT_0 (T_0 为采用周期) 时刻, $I(k)$ 是太阳辐射强度, $x(k)$ 是太阳能采集器的温度, $y(k)$ 是热存储单元的温度, $u(k)$ 是泵的速度, 则太阳能采集器中空气温度的变化 $x(k+1) - x(k)$ 等于太阳提供的热能 $d_2 I(k)$ 减去环境的热能损失 $d_3 x(k)$ 后, 再减去输入到热存储单元中的热能 $d_0 x(k)u(k)$, 即

$$x(k+1) - x(k) = d_2 I(k) - d_3 x(k) - d_0 x(k)u(k) \quad (1.1.9)$$

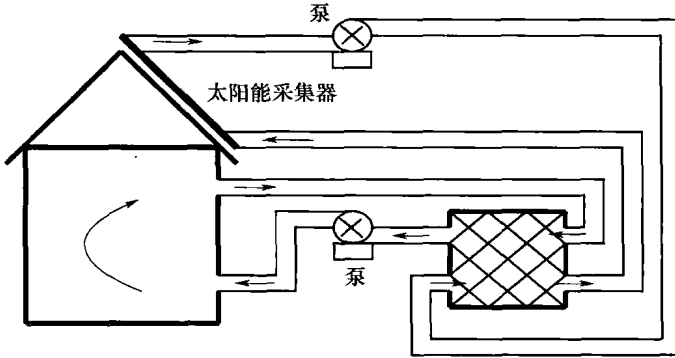


图 1.3 太阳能供热房间的热交换控制系统

同样地, 存储单元温度的增加量 $y(k+1) - y(k)$ 等于太阳能采集器传入的热能 $d_0 x(k)u(k)$ 减去环境的热能损失 $d_1 y(k)$, 即

$$y(k+1) - y(k) = d_0 x(k)u(k) - d_1 y(k) \quad (1.1.10)$$

上面两个方程中的系数 d_k 都是待定的未知常量。由于没有测量 $x(k)$, 所以