

系统辨识 在建筑热湿过程中的应用

陈友明 王盛卫 张 冷 著

中国建筑工业出版社



系统辨识在建筑 热湿过程中的应用

陈友明 王盛卫 张 泠 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

系统辨识在建筑热湿过程中的应用/陈友明等著.

北京: 中国建筑工业出版社, 2004

ISBN 7-112-06779-0

I. 系... II. 陈... III. 系统辨识-应用-建筑物
-围护结构-建筑热工
IV. TU111.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 076193 号

系统辨识在建筑热湿过程中的应用

陈友明 王盛卫 张 玲 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10 $\frac{1}{4}$ 字数: 250 千字

2004 年 10 月第一版 2004 年 10 月第一次印刷

印数: 1—3,500 册 定价: 19.00 元

ISBN 7-112-06779-0

TU·6026(12733)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本书是作者吸收现代系统理论，在多年科研所取得的研究成果的基础上撰写而成的，较为详细、系统地介绍了系统辨识理论在建筑热湿过程中应用的最新研究成果。全书分七章：系统辨识基本知识、系统辨识算法、建筑围护结构动态热特性辨识、建筑墙体表面换热过程辨识、基于系统辨识的围护结构非稳定传热计算方法、围护结构动态吸放湿过程的理论基础及建筑表面吸放湿特性辨识。本书内容翔实，既有全面的理论知识和实验系统介绍，又有相当丰富的实验数据和研究实例。

本书可供建筑环境与设备工程、采暖通风空调工程、建筑物理和建筑技术等相关专业和领域的科学研究人员、工程技术人员和师生参考。

* * *

责任编辑：姚荣华 齐庆梅

责任设计：崔兰萍

责任校对：刘梅 刘瑛

前 言

建筑围护结构热湿传递对空调负荷、建筑能耗和居住环境热舒适性有着极其重要的影响。对建筑围护结构动态热湿特性的研究是开展空调负荷计算方法、建筑能耗分析技术、建筑节能技术及居住环境热舒适性研究的基础。影响围护结构的动态热湿特性的因素较复杂,采用理论建模方法,有时难以准确分析不同环境条件下围护结构的热湿特性。通过试验系统进行动态测试和采用适当的系统辨识算法,可以获得建筑围护结构在不同条件下动态热湿特性模型,为围护结构热湿特性分析提供符合实际条件的信息。基于现代系统理论的建筑热湿特性试验和辨识研究,可为建筑热湿特性的改善寻找有效的措施和方法,促进我国建筑热湿特性研究和建筑节能实验技术的发展,加快我国建筑节能目标的实现,改善居住环境热舒适性,有利于建筑可持续技术的进步。

作者经过几年的尝试和努力,将系统辨识方法应用到建筑热湿过程分析和研究中,建立一些实验测试和辨识系统,获得了一些研究成果,同时也丰富了系统辨识方法和内容。本书详细、系统地介绍了系统辨识理论在建筑热湿过程中应用的最新研究成果。全书由七章组成。第1章介绍了系统辨识的基本概念和知识。第2章介绍了在建筑热湿过程研究中的一些开环离散系统辨识算法。第3章详细地介绍了建筑围护结构动态热特性模型、辨识实验系统和研究实例。第4章详细地介绍了建筑墙体表面换热过程辨识实验系统、墙体表面换热系数推定方法及辨识得到的墙体表面换热系数。第5章介绍了基于系统辨识理论的计算围护结构非稳定传热的方法,并翔实地给出了算例。第6章介绍了建筑围护结构吸放湿过程的基础理论,包括吸放湿范围内的围护结构热湿同时传导方程的推导与线性化、线性方程的频率解及其性质、墙体表面吸放湿过程的传递函数分析方法。第7章介绍了墙体室内表面吸放湿特性辨识的实验方法和辨识实例。其中,第1、2、3、6章由陈友明完成,第4章由陈友明、张冷和邓宁华完成,第5章由陈友明和王盛卫完成,第7章由陈友明和裴清清完成。

本书在研究和撰写过程中得到了湖南大学博士生导师陈在康教授的热心指导和建议,在此向先生致以崇高的敬意和衷心的感谢。本书的工作得到了国家自然科学基金项目(50378033, 59708004, 59578004)、国家留学回国人员科研基金项目、湖南大学拔尖人才计划——“撷英计划”项目、香港理工大学研究基金项目的资助,在此表示衷心感谢。

限于作者水平,书中难免有错误和不妥之处,恳请专家和读者批评指正。

陈友明

目 录

第 1 章 系统辨识的基本知识	1
1.1 系统的数学模型	1
1.1.1 模型的含义	1
1.1.2 模型的形式	1
1.1.3 数学模型分类	2
1.1.4 建立数学模型的基本方法与原则	3
1.2 系统辨识及其分类	4
1.2.1 系统辨识的定义	4
1.2.2 系统辨识的分类	5
1.3 线性动态系统的表示法	6
1.3.1 线性定常系统的传递函数表示法	6
1.3.2 线性定常系统的差分方程表示法	7
1.3.3 线性定常系统的离散状态方程表示法	8
1.3.4 线性系统的随机性方程表示法	8
1.3.5 预测误差方程	10
1.4 系统辨识的误差准则	11
1.4.1 输出误差	12
1.4.2 输入误差	12
1.4.3 广义误差	12
1.5 辨识的内容和步骤	13
1.6 系统辨识的应用	14
第 2 章 系统辨识算法	16
2.1 最小二乘辨识算法	16
2.1.1 最小二乘辨识算法	16
2.1.2 最小二乘递推辨识算法	18
2.1.3 模型结构参数的确定	20
2.2 辅助变量辨识算法	21
2.2.1 相关方程	21
2.2.2 关于最小二乘 (LS) 算法的相关性讨论	22
2.2.3 辅助变量辨识算法	23
2.2.4 辅助变量方法的多步算法	25

2.3 谱分析方法	26
2.3.1 频域分析方法	27
2.3.2 ETFE 的光滑	27
2.3.3 频率窗函数	29
2.3.4 z 传递函数的辨识计算	29
2.4 频域回归方法	31
2.5 基于神经网络的辨识方法	34
2.5.1 状态空间模型的 Markov 参数	34
2.5.2 神经网络产生 Markov 参数	34
2.5.3 本征系统的实现算法	36
2.5.4 前向神经网络的 BP 算法	36
2.5.5 化状态空间模型为 z 传递函数	41
2.6 遗传辨识算法	41
2.6.1 遗传算法基本原理	42
2.6.2 遗传算法的数学基础	44
2.6.3 用遗传算法辨识系统参数	46
2.7 预测误差辨识算法	48
2.7.1 预测误差法	48
2.7.2 最优化算法	48
2.7.3 预测误差估计量的一致性和渐近正态性	49
第 3 章 建筑围护结构动态热特性辨识	52
3.1 建筑围护结构动态热特性研究进展	52
3.1.1 围护结构动态热特性辨识的目的和意义	52
3.1.2 围护结构热特性的研究历史	52
3.1.3 围护结构动态热特性辨识的现状	53
3.2 围护结构动态热特性模型及试验信号选择	55
3.2.1 围护结构动态热特性辨识的基本含义	55
3.2.2 围护结构动态热特性辨识模型	55
3.2.3 试验信号选择	56
3.3 围护结构动态热工实验系统	56
3.3.1 实验测试对象	56
3.3.2 计算机数据采集系统	57
3.3.3 数据采集程序	57
3.4 数据处理	58
3.5 围护结构动态热特性辨识	59
3.5.1 辨识对象	59
3.5.2 用辅助变量方法辨识	60
3.5.3 用神经网络方法辨识	60

3.6 小结	63
第4章 建筑墙体表面换热过程辨识	64
4.1 建筑墙体表面换热过程研究进展	64
4.2 建筑墙体表面换热过程实验测试系统	67
4.2.1 实验测试对象	67
4.2.2 实验测试仪器及传感器	67
4.2.3 测试仪器设置	68
4.2.4 计算机数据采集系统	69
4.3 建筑墙体表面换热过程辨识数学模型	70
4.3.1 建筑墙体表面换热过程辨识离散数学模型	70
4.3.2 墙体表面换热过程的 z 传递函数及其换热系数的推定	70
4.4 墙体内部表面换热系数的辨识	71
4.4.1 辨识算例	71
4.4.2 墙体内部表面换热系数	74
4.4.3 结果分析	75
4.5 建筑墙体外部表面换热系数的辨识	77
4.5.1 辨识步骤与算例	77
4.5.2 墙体外部表面换热系数及分析	78
4.6 小结	81
第5章 基于系统辨识的围护结构非稳定传热计算	82
5.1 概述	82
5.2 围护结构非稳定传热得热计算	83
5.2.1 室内外气象参数的离散	83
5.2.2 用反应系数计算得热量	84
5.2.3 用周期反应系数计算得热量	84
5.2.4 用 z 传递系数计算得热量	85
5.3 墙体热力系统的理论频率响应	85
5.4 墙体热力系统的多项式 s 传递函数的辨识	87
5.5 墙体动态热特性参数计算	88
5.5.1 墙体反应系数	88
5.5.2 墙体周期反应系数	89
5.5.3 墙体 z 传递系数	90
5.6 计算实例	91
5.6.1 墙体反应系数算例	91
5.6.2 周期反应系数算例	92
5.6.3 z 传递系数算例	92
5.7 小结	94

第 6 章 建筑围护结构动态吸放湿过程的理论基础	97
6.1 建筑围护结构湿特性研究进展	97
6.1.1 围护结构湿特性研究的目的和意义	97
6.1.2 围护结构湿特性研究的历史与现状	98
6.2 建筑围护结构热湿同时传导方程及其线性化	100
6.2.1 建筑围护结构热湿同时传导基本方程	100
6.2.2 围护结构热湿同时传导方程的线性化	103
6.3 围护结构热湿同时传导线性方程的求解	104
6.3.1 基本方程的矢量表示及其边界条件	104
6.3.2 引入新变量的基本方程	105
6.3.3 单层墙体的传递矩阵与导纳矩阵	106
6.3.4 多层墙体传递矩阵及其性质	111
6.3.5 多层墙体导纳矩阵及其性质	117
6.3.6 含空气边界层的墙体传递矩阵和导纳矩阵及其性质	122
6.3.7 应用举例	126
6.4 建筑表面动态吸放湿过程的传递函数	127
6.4.1 理论模型	127
6.4.2 传递函数分析方法 (TFM)	128
6.4.3 传递函数特征方程 $A(s) = 0$ 的性质与证明	132
6.4.4 实例比较与讨论	133
6.5 小结	136
第 7 章 建筑表面动态吸放湿特性辨识初步	138
7.1 概述	138
7.2 建筑表面动态吸放湿特性辨识的数学模型及实验系统设计	138
7.2.1 数学模型	138
7.2.2 实验测试系统设计	140
7.2.3 输入输出试验数据分析	142
7.3 建筑表面吸放湿动态特性辨识	142
7.3.1 最小二乘辨识	142
7.3.2 辅助变量法辨识	144
7.3.3 预测误差方法辨识	145
7.4 小结	147
参考文献	148
作者简介	155

第 1 章 系统辨识的基本知识

系统辨识源于现代控制论，它与状态估计和控制理论是现代控制论三个互相渗透的领域。控制理论的实际应用不能脱离被控对象或系统的数学模型。有些复杂的被控对象或系统是很难或不可能用理论分析的方法推导出数学模型的。系统辨识就是一门对已经存在的系统进行试验测试获得观测数据，并通过分析处理观测数据来获得系统模型的学科。系统辨识理论正在日趋成熟，其实际应用已遍及很多领域，已成为一门应用范围很广的学科。目前不仅工程控制对象需要建立数学模型，在其他领域，如生物学、生态学、医学、天文学、社会经济学等领域也常常需要建立数学模型，并根据数学模型确定最优控制与决策，作更深入的分析研究。这些领域，由于系统比较复杂，人们对于其结构和支配其运动的机理，往往了解不多，甚至不了解，因此不可能用理论分析的方法得到数学模型，只能利用观测数据来确定数学模型，所以系统辨识受到了人们重视。目前，系统辨识的理论研究愈来愈深入，在航空、航天、海洋工程、工程控制与模拟、生物学、医学、水文学及社会经济等方面的应用愈来愈广泛。本书主要介绍系统辨识在建筑热湿过程中的应用研究成果。本章首先介绍系统辨识的一些基本知识，包括系统的数学模型与建模方法、辨识的定义与分类、动态系统的表示法、误差准则及辨识的步骤等。

1.1 系统的数学模型

1.1.1 模型的含义

所谓模型 (model) 就是把关于实际系统的本质的部分信息简缩成有用的描述形式。它可以用来描述系统的运动规律，是系统的一种客观写照或缩影，是分析系统和预测、控制系统行为特性的有力工具。实际系统到底哪些部分是本质的，哪些部分是非本质的，这要取决于所研究的问题。例如，对于寒冷地区的采暖负荷计算，建筑围护结构传热可以采用稳态模型；而对于夏热冬冷地区的空调负荷计算、建筑能耗和空调系统模拟分析，建筑围护结构传热应该采用动态模型。模型所反映的内容将因其使用目的和情形的不同而不同。

对于实际系统而言，模型一般不可能考虑到所有因素。在这种意义上来说，所谓模型是根据使用目的对实际系统所作的近似描述。当然，如果要求模型越精确，模型就会变得越复杂；相反，如果降低模型的精度要求，只考虑主要因素而忽略次要因素，模型就可以简单一些。因而在建立实际系统的模型时，存在着精确性和复杂性的矛盾，找出这两者的折衷解决办法往往是建立实际系统模型的关键。

1.1.2 模型的形式

通常，模型有如下一些形式：

(1) 直觉模型。它指系统的特性以非解析形式直接储存在人的大脑中，靠人的直觉控

制系统的变化。例如：司机对汽车的驾驶，指挥员对战斗的指挥，依靠的就是这类直觉模型。

(2) 物理模型。它是根据相似原理把实际过程加以缩小的复制品，或是实际过程的一种物理模拟。比如：风洞、水力学模型、传热学模型和电力系统动态模拟等，均是物理模型。

(3) 图表模型。它以图形或表格的形式来表现系统的特性。如：系统的阶跃响应、脉冲响应、频率特性等。图表模型也称为非参数模型。

(4) 数学模型。它以数学结构的形式来反映实际过程的行为特性。常用的数学模型有代数方程、微分方程、差分方程、状态方程、传递函数、非线性微分方程及分布参数方程等。这些数学模型又称为参数模型。例如：

①代数方程

例如：空气含湿量的表示形式可写为：

$$d = 0.622 \frac{P_q}{B - P_q} \quad (1.1)$$

式中， d 为空气含湿量， B 为大气压力， P_q 为水蒸气分压力。

②微分方程

$$\begin{aligned} y^{(n)}(t) + a_1 y^{(n-1)}(t) + \cdots + a_{n-1} y^{(1)}(t) + a_n y(t) \\ = b_0 u^{(m)}(t) + b_1 u^{(m-1)}(t) + \cdots + b_{m-1} u^{(1)}(t) + b_m u(t) + e(t) \end{aligned} \quad (1.2)$$

其中， $u(t)$ 为输入量， $y(t)$ 为输出量， $e(t)$ 为噪声项。

③差分方程

$$\begin{aligned} y(k) + a_1 y(k-1) + \cdots + a_n y(k-n_a) \\ = b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + \cdots + b_n u(k-n_b) + e(t) \end{aligned} \quad (1.3)$$

或

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) + e(k) \quad (1.4)$$

式中，

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \cdots + a_n z^{-n_a}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \cdots + b_n z^{-n_b}$$

其中， $u(k)$ 为输入量， $y(k)$ 为输出量， $e(k)$ 为噪声项， z^{-1} 表示单位时延算子，即 $z^{-1}x(k) = x(k-1)$ 。

④状态方程

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{F}\boldsymbol{\omega}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{h}w(t) \end{cases} \quad (1.5)$$

或

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{F}\boldsymbol{\omega}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{h}w(k) \end{cases} \quad (1.6)$$

其中， $\mathbf{u}(\cdot)$ 和 $\mathbf{y}(\cdot)$ 为输入输出量， $\mathbf{x}(\cdot)$ 为状态变量， $\boldsymbol{\omega}(\cdot)$ 和 $w(\cdot)$ 为噪声项。

1.1.3 数学模型的分类

数学模型的分类方法很多，常见的是按连续与离散、定常与时变、集中参数与分布参数来分类。关于这些分类的定义在有关线性系统分析的书中都有介绍，这里不多述。还可按线性与非线性、动态与静态、确定性与随机性、宏观与微观来进行分类。

(1) 线性模型。线性模型用来描述线性系统。它的显著特点是满足叠加原理和均匀

性。线性输入用 $u(t)$ 表示，输出用 $y(t)$ 表示，即满足下列算子运算：

$$\text{若} \quad u_1(t) \rightarrow y_1(t) \quad u_2(t) \rightarrow y_2(t)$$

$$\text{则} \quad a \cdot u_1(t) + b \cdot u_2(t) \rightarrow a \cdot y_1(t) + b \cdot y_2(t)$$

式中， a 、 b 为任意常数。

(2) 非线性模型。非线性模型用来描述非线性系统，一般不满足叠加原理。

(3) 动态模型。动态模型用来描述系统处于过渡过程时的各状态变量之间的关系，一般为时间的函数。

(4) 静态模型。静态模型用来描述系统处于稳态时（各状态变量的各阶的时间导数均为零）的各状态变量之间的关系，一般不是时间的函数。

(5) 确定性模型。由确定性模型所描述的系统，当状态确定之后，其输出响应是惟一确定的。

(6) 随机性模型。由随机性模型所描述的系统，当状态确定之后，其输出响应仍然是不确定的。

(7) 宏观模型。宏观模型用来研究事物的宏观现象，一般用联立方程或积分方程描述。

(8) 微观模型。微观模型用来研究事物内部微小单元的运动规律，一般用微分方程或差分方程描述。

另外，在讨论线性和非线性问题时，需要注意以下两点区别。

(1) 系统线性与关于参数空间线性的区别：如果模型的输出关于输入变量是线性的，称之为系统线性；如果模型的输出关于参数空间是线性的，称之为关于参数空间线性。例如，对于模型 $y = a + bx + cx^2$ 来说，输出 y 关于输入 x 是非线性的，但关于参数 a 、 b 、 c 却是线性的，即模型是系统非线性的，却是关于参数空间线性的。

(2) 本质线性与非本质线性的区别：如果模型经过适当的数学变换可将本来是非线性的模型转变成线性模型，则原来的模型称作本质线性，否则原来的模型称作本质非线性。

1.1.4 建立数学模型的基本方法与原则

一般来说，建立数学模型常采用理论分析和测试两种基本方法。

1. 理论分析法

理论分析法又称为机理分析法或理论建模。这种方法主要是通过分析系统的运动规律，运用一些已知的定律、定理和原理，例如质量守恒原理、能量平衡方程、化学动力学原理、力学原理、生物学定律、牛顿定理、传热传质原理等，利用数学方法进行推导，建立起系统的数学模型。

理论分析法只能用于较简单系统的建模，并且对系统的机理要有较清楚的了解。对于比较复杂的实际系统，这种建模方法有很大的局限性。这是因为在理论建模时，对所研究的对象必须提出合理的简化假定，否则会使问题过于复杂。但是，要使这些简化假设都符合实际情况，往往是相当困难的。系统内部因素可能在不断变化，这时的简化和假设难以准确描述问题。

2. 测试法

系统的输入输出信号一般总是可以测量的。由于系统的动态特性必然表现于这些输入输出数据中，故可以利用输入输出数据所提供的信息来建立系统的数学模型。这种建模方

法就是系统辨识。

与理论分析法相比,测试法的优点是不需深入了解系统的机理,不足之处是必须设计一个合理的试验以获取所需的最大信息量,而设计合理的试验往往是困难的。因而在具体建模时,常常将理论分析法和测试法两种方法结合起来使用,机理已知部分采用理论分析法,机理未知部分采用测试法。

在建立数学模型时应遵循如下基本原则:

- (1) 建模的目的要明确,因为不同的建模目的可能需要采用不同的建模方法。
- (2) 模型的物理概念要明确。
- (3) 系统具有可辨识性,即模型结构合理,输入信号持续激励,数据量充足。
- (4) 符合节省原理,即被辨识模型参数的个数要尽量少。

1.2 系统辨识及其分类

1.2.1 系统辨识的定义

1. Zadeh 的定义

L. A. Zadeh 于 1962 年曾给系统辨识下过这样的定义^[1]:“辨识就是在输入和输出数据的基础上,从一组给定的模型类中,确定一个与所测系统等价的模型。”这个定义明确了辨识的三大要素:①输入输出数据;②模型类;③等价准则。其中,数据是辨识的基础;准则是辨识的优化目标;模型类是寻找模型的范围。当然,按照 Zadeh 的定义,寻找一个与实际过程完全等价的模型无疑是非常困难的。从实用观点来看,对模型的要求并不需如此苛刻。

2. Eykhoff 的定义

P. Eykhoff 于 1974 年给系统辨识下了一个比较实用的定义^[2]:“辨识问题可以归结为用一个模型来表示客观系统(或将要构造的系统)本质特征的一种演算,并用这个模型对客观系统的理解表示成有用的形式”。V. Strejc 对 P. Eykhoff 的定义做了如下解释:“这个辨识定义强调了一个非常重要的概念,最终模型只应表示动态系统的本质特征,并且把它表示成适当的形式。这就意味着,并不期望获得一个物理实际的确切的数学描述,所要的只是一个适合于应用的模型”。

3. Ljung 的定义

L. Ljung 于 1978 年给系统辨识下了一个更加实用的定义^[3]:“辨识有三个要素——数据、模型类和准则。辨识就是按照一个准则在一组模型类中选择一个与数据拟合得最好的模型”。

总而言之,辨识的实质就是从一组模型类中选择一个模型,按照某种准则,使之能最好地拟合所关心的实际过程的动态特性。例如,一个太阳加热的房间,如图 1.1 所示,用太阳加热太阳板中的空气,太阳板填充有透明软管,加热的空气用风扇送至填充蓄热材料的储热器中,储存的热量再逐渐传递给房间的空气。太阳加热房间系统描述如图 1.2 所示。欲建立房间空气温度 y 与风机转速 u 、太阳辐射强度 I 之间的模型,来模拟房间温度受风机转速及太阳辐射的影响的变化情况。经观测得到一组输入输出数据,记作 $\{y(k)\}$ 和 $\{u(k)\}$ 、 $\{I(k)\}$, $k=1, 2, 3, \dots, N$ 。同时,选定一组模型类

$$\begin{aligned}
 & y(k) + a_1 y(k-1) + \cdots + a_n y(k-n) \\
 & = b_0 u(k) + \cdots + b_m u(k-m) + c_0 I(k) + \cdots + c_r I(k-r) + e(k) \quad (1.7)
 \end{aligned}$$

和一个等价准则

$$\begin{aligned}
 J &= \sum_{k=1}^N e^2(k) \\
 &= \sum_{k=1}^N [y(k) + a_1 y(k-1) + \cdots + a_n y(k-n) - b_0 u(k) - \cdots - b_m u(k-m) \\
 &\quad - c_0 I(k) - \cdots - c_r I(k-r)]^2 \quad (1.8)
 \end{aligned}$$

那么，太阳加热房间的温度 y 、风机转速 u 和太阳辐射强度 I 的数学模型辨识问题就是根据所观测到的数据 $\{y(k)\}$ 、 $\{u(k)\}$ 和 $\{I(k)\}$ ，从模型类(1.7)式中，寻找一个模型，也就是确定(1.7)式的未知参数 m 、 n 、 r 及 a_j ($j=1, 2, \dots, n$)、 b_j ($j=1, 2, \dots, m$)、 c_j ($j=1, 2, \dots, r$)，使准则 $J = \min$ 满足。

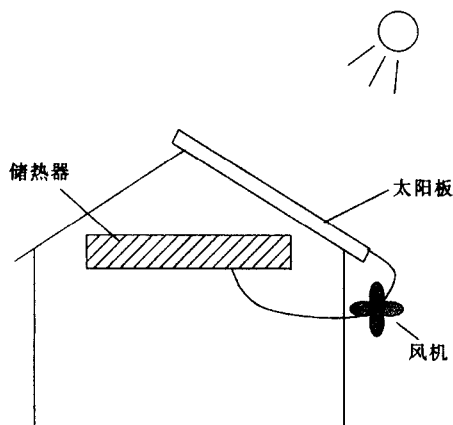
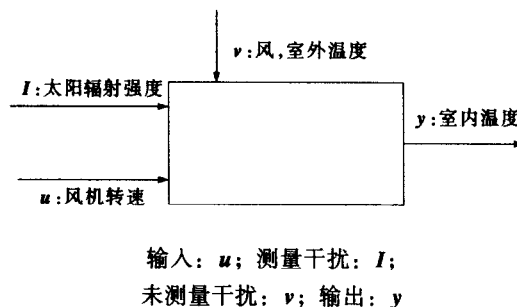


图 1.1 太阳加热房间示意图



输入: u ; 测量干扰: I ;
未测量干扰: v ; 输出: y
图 1.2 太阳加热房间系统

值得注意的是，由于观测到的数据一般都含有噪声，因此辨识建模实际上是一种实验统计的方法，它所获得的模型只不过是与实际过程外特性等价的一种近似描述。

1.2.2 系统辨识的分类

系统辨识的分类方法很多，根据描述系统数学模型的不同可分为线性系统和非线性系统辨识、集中参数系统和分布参数系统辨识；根据系统的结构可分为开环系统与闭环系统辨识；根据参数估计方法可分为离线辨识和在线辨识等。另外还有经典辨识与近代辨识、系统结构辨识与系统参数辨识等分类。由于离线辨识与在线辨识是系统辨识中常用的两个基本概念，下面将对这两个基本概念加以解释。

1. 离线辨识

在经过试验测试获得全部记录数据之后，选好系统的模型结构，确定模型阶数，用最小二乘法等参数估计方法，对数据进行集中处理，得到模型参数的估值，这种辨识方法称为离线辨识。

离线辨识的优点是参数估值的精度比较高，缺点是需要存储大量数据，要求计算机有

较大的存储量，辨识时运算量也比较大；而且可以反复调整模型的结构和阶次以获得最准确的模型。对于建筑热湿过程的研究，一般采用离线辨识。

2. 在线辨识

对于在线辨识，系统的模型结构和阶数是事先确定好的。当获得一部分输入和输出数据后，马上用最小二乘法等参数估计方法进行处理，得到模型参数的不太准确的估值。在获得新的输入和输出数据后，用递推算法对原来的参数估值进行修正，得到新的参数估值。所以在线辨识要用到递推、最小二乘法等估计算法。

在线辨识的优点是所要求的计算机存储量较小，辨识计算时运算量较小，适合于进行实时控制，缺点是参数估计的精度差一些。为了实现自适应控制，必须采用在线辨识，要求在很短的时间内把参数辨识出来，参数辨识所需时间只能占一个采样周期的一小部分。

1.3 线性动态系统的表示法

系统辨识应用较多的研究对象是动态系统，主要用于确定动态系统的模型。下面将讨论线性动态系统的数学模型的表示形式。

在动态系统中，任何时刻输出变量的值，一般来说，决定于输入变量的过去的值。施加在系统上的原因变量（输入变量）和所得到的效果变量（输出变量）之间，存在着时间上的延迟，即系统具有记忆作用。对于这种动态系统，它们的数学模型将由常微分方程组（对连续时间系统）或差分方程组（对离散时间系统）来描述，或者是由偏微分方程组（对多变量系统）来描述。

假定系统不受任何噪声干扰，可以建立动态系统的确定性数学模型。对于任何一个动态系统，我们可以把它看作为输入量与输出量之间的动态变换。这种动态变换，可以用输入输出关系直接描述系统。当已知 $t = t_0$ 时的输出量 y 及其各阶导数，并规定了在这时刻以后的输入激励 $u(t_0, t)$ ，就可以完全确定过程或系统未来的行为 $y(t)$ 。描述这个系统的行为的一种重要方法就是微分方程表示法。在描述系统的微分方程中，包含有激励函数（输入函数） $u = u(t)$ 、响应函数（输出函数） $y = y(t)$ 以及它们对应于独立时间变量的各阶导数。微分方程就是这些函数的线性组合，即所谓的外部表示法。在已知初始条件时，微分方程可以通过拉普拉斯变换得到动态系统的传递函数表示形式。通过引进系统的一组状态变量 x 来间接地描述系统，即状态方程表示法。如果在 $t = t_0$ 时已知 $x(t) = x(t_0)$ ，当已经确定了在 $t \geq t_0$ 时的输入变量 $u(t)$ ，则在 t_0 时刻以后的状态变量 $x(t)$ 就可惟一地确定，输出变量 $y(t)$ 亦可由起始状态 $x(t_0)$ 和输入变量 $u(t)$ 惟一确定。实际上，状态变量表征了系统的内部动态变化，它比输出变量更能本质地反映系统的内在行为。所以，状态方程表示法又称为动态系统的内部表示法。对于离散时间系统，对应的外部表示法和内部表示法分别是差分方程和离散时间状态方程。

1.3.1 线性定常系统的传递函数表示法

线性定常单输入—单输出系统的微分方程在初始条件为零的情况下，通过拉普拉斯变换得到传递函数的表示形式。

$$Y(s) = G(s)U(s) = \frac{B(s)}{A(s)}U(s) \quad (1.9)$$

式中 $Y(s)$ ——系统输出变量的拉普拉斯变换;

$U(s)$ ——系统输入变量的拉普拉斯变换;

$G(s)$ ——系统的传递函数;

$$A(s) = 1 + a_1s + a_2s^2 + \cdots + a_n s^n$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1s + b_2s^2 + \cdots + b_{n_b} s^{n_b}$$

如果用系统辨识方法来建立单输入—单输出系统传递函数 $G(s)$, 需要辨识的参数数目为 $N = n_a + n_b + 1$ 。

1.3.2 线性定常系统的差分方程表示法

1. 单输入—单输出系统

线性定常单输入—单输出系统可用下列 n 阶线性差分方程描述为

$$\begin{aligned} y(k) + a_1y(k-1) + a_2y(k-2) + \cdots + a_n y(k-n_a) \\ = b_0u(k) + b_1u(k-1) + b_2u(k-2) + \cdots + b_{n_b}u(k-n_b) \end{aligned} \quad (1.10)$$

式中 k ——整数, 表示第 k 个取值时刻;

$y(k)$ —— k 时刻系统的确定性输出量;

$u(k)$ —— k 时刻系统的确定性输入量;

$a_j(j=1, 2, \cdots, n_a)$ 和 $b_j(j=0, 1, \cdots, n_b)$ ——常系数。

或写成

$$y(k) + \sum_{j=1}^{n_a} a_j y(k-j) = \sum_{j=0}^{n_b} b_j u(k-j) \quad (1.11)$$

引入单位时延算子 z^{-1} , 并定义为 $z^{-1}x(k) = x(k-1)$

设多项式

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \cdots + a_n z^{-n_a}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \cdots + b_{n_b}z^{-n_b}$$

则差分方程 (1.10) 和 (1.11) 可表示为

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) \quad (1.12)$$

或写成

$$y(k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(k) \quad (1.13)$$

如果用系统辨识方法来建立单输入—单输出系统差分方程模型, 需要辨识的参数数目为 $N = n_a + n_b + 1$ 。

2. 多输入—多输出系统

设系统有 r 个输入量和 m 个输出量, 定义向量

$$\mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ \vdots \\ u_r(k) \end{bmatrix}, \mathbf{y}(k) = \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \\ \vdots \\ y_m(k) \end{bmatrix}$$

分别为系统的输入和输出向量, 则系统可用差分方程表示为

$$y(k) + \sum_{j=1}^{n_a} A_j y(k-j) = \sum_{j=0}^{n_b} B_j u(k-j) \quad (1.14)$$

式中, A_j 为 $m \times m$ 矩阵, B_j 为 $m \times r$ 矩阵。引入单位时延算子 z^{-1} , 则式 (1.14) 可表示为

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) \quad (1.15)$$

式中

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) &= 1 + A_1 z^{-1} + A_2 z^{-2} + \cdots + A_{n_a} z^{-n_a} \\ B(z^{-1}) &= 1 + B_1 z^{-1} + B_2 z^{-2} + \cdots + B_{n_b} z^{-n_b} \end{aligned}$$

如果用系统辨识方法来建立多输入—多输出系统差分方程模型, 需要辨识的参数数目为 $N = n_a \times m \times m + (n_b + 1) \times m \times r$ 。

1.3.3 线性定常系统的离散状态方程表示法

一个线性定常确定性离散系统的状态方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \end{cases} \quad (1.16)$$

式中, $\mathbf{x}(k)$ 为 n 维状态向量; $\mathbf{u}(k)$ 为 r 维输入向量 (或控制向量); $\mathbf{y}(k)$ 为 m 维输出向量 (或观测向量); \mathbf{A} 为 $n \times n$ 系统状态矩阵; \mathbf{B} 为 $n \times r$ 输入矩阵 (或控制矩阵); \mathbf{C} 为 $m \times n$ 输出矩阵 (或观测矩阵); \mathbf{D} 为 $m \times r$ 输入—输出矩阵。

如果用系统辨识方法来建立上述状态方程模型, 需要辨识的参数数目为 $N = n^2 + nr + mn + mr = (n+m) \times (n+r)$ 。

1.3.4 线性系统的随机性方程表示法

实际系统或多或少总是受到各种干扰。在建立模型时, 假定系统不受干扰, 只是一种对系统进行理想化和简化的处理方法。对于现实系统更确切的描述应当考虑到它总是在受到干扰的环境下工作的。这里的干扰包括对系统本身的干扰和在对系统进行观测过程中的干扰。例如在实验观测过程中, 必然会引入测量误差等随机干扰。在系统辨识过程中, 我们特别关心的是系统所受的随机性干扰噪声。在随机性干扰不可忽略的情况下, 描述现实动态系统的模型需要采用随机性模型。在建立系统的数学模型时, 多种随机干扰因素对系统特性的影响, 往往可用少量的集中的随机干扰源来替代它们。

对于线性定常系统, 当系统受到噪声污染时, 根据叠加原理, 认为所有的随机干扰因素可以由一个等价的在输出端的随机噪声 v 来代替。这样, 离散时间系统的随机性差分模型可由式 (1.13) 改写为

$$y(k) = \frac{B_1(z^{-1})}{A_1(z^{-1})} u(k) + v(k) \quad (1.17)$$

一般来说, $v(k)$ 是有色噪声。在不同时刻有色噪声过程的值是相关的。这往往给整个问题的分析带来复杂性。而由于不同时刻白噪声过程的值之间是互不相关的, 离散时间情况下的白噪声就是由一串互不相关的随机变量序列所组成的随机过程。这将给整个随机系统的分析带来很大的方便。随机过程的谱分解定理和表示性定理告诉我们, 对于具有有理谱密度的平稳随机过程, 我们能够以白噪声作为输入, 通过稳定的具有脉冲传递函数为 H 的动态系统产生出这样的随机过程。以有理函数 H 作为脉冲传递函数的动态系统被称为