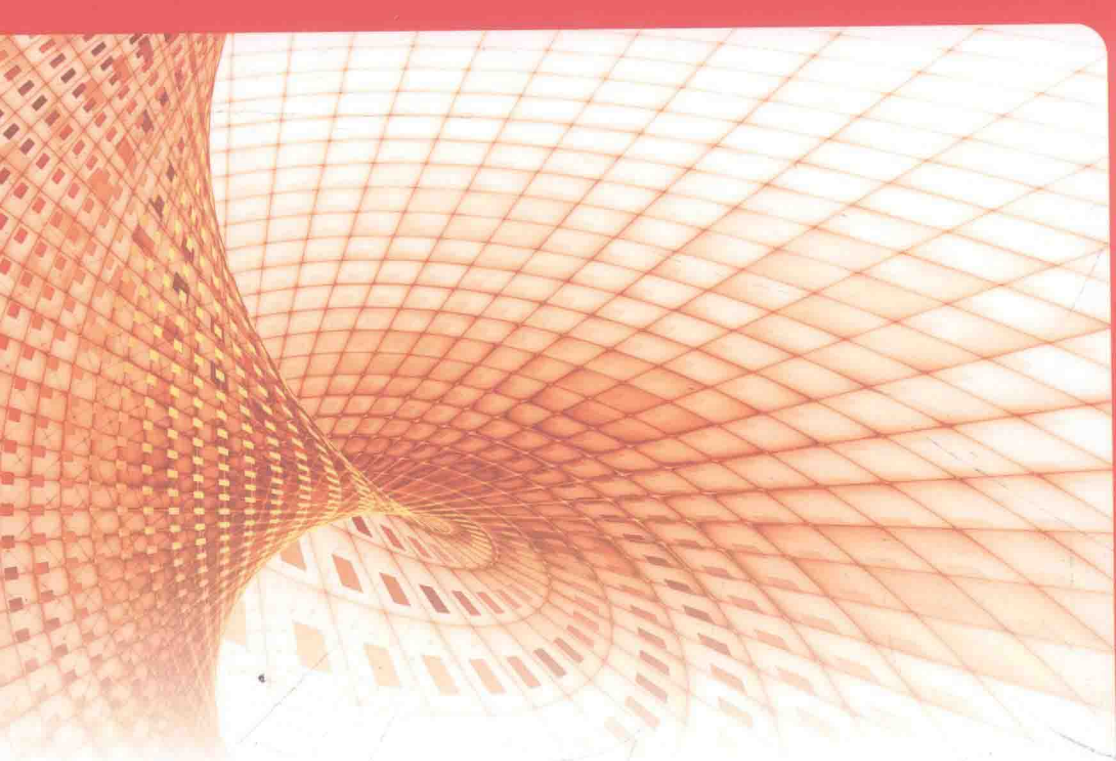
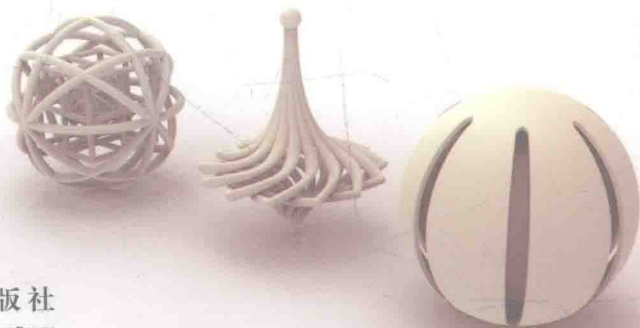




系统模型与辨识

张溥明 王志中 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

系统模型与辨识

张溥明 王志中 编著

上海交通大学出版社

内容提要

系统描述主要是建立描述系统输入-输出关系的数学模型。系统辨识是最基本的建模方法之一,本书通过介绍系统辨识的基本理论和算法,让读者学会根据系统的输入输出数据建立数学模型,使模型在输入输出关系上等价于相应的物理系统。本书主要作为信号与信息处理领域的控制科学与工程、生物医学工程学、电子信息工程专业及其他相关专业的高年级本科生和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

系统模型与辨识 / 张溥明, 王志中编著. —上海:
上海交通大学出版社, 2015
ISBN 978-7-313-13914-6

I. ①系… II. ①张… ②王… III. ①系统模型—研究
②系统辨识—研究 IV. ①N945.12②N945.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 240259 号

系统模型与辨识

编 著: 张溥明 王志中

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 太仓印刷厂有限公司

开 本: 787 mm×960 mm 1/16

字 数: 230 千字

版 次: 2015 年 12 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-13914-6/N

定 价: 39.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 13.75

印 次: 2015 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0512-53522925

前 言

在工程学、物理学、生物学、医学、经济学以及新兴的理工交叉、文理交叉和医工交叉等诸多学科领域,要定量地对一个系统进行分析、综合、控制和决策等,一定要先对该系统进行数学描述。对于系统,我们主要着眼于其作为一个整体的行为,重要的是其输入输出关系,而不一定去细究产生这些关系的内在机制。所以,系统描述主要涉及的是建立描述系统输入-输出关系的数学模型。系统辨识是最基本的建模方法之一,是从一类模型中选择一个特定的模型,所选定的模型在输入输出关系上等价于相应的物理系统。

对于一些极其简单的实际过程,数学模型可以根据物理定律来建立,但大多数实际过程的作用机理却不能完全被人们确切了解,这就需要设计实验,通过对实验数据的分析和处理构造其数学模型。系统辨识正是这样一种建立数学模型的有效方法。

关于系统辨识的教科书比比皆是,其中有的强调数学上的严密,而不注重数学理论与实际应用的连接;有的叙述建模方法很明了,却很不完整,建立了模型后读者不知道各参数的置信度和模型的阶数是否合理。本书主要作为信号与信息处理领域的控制科学与工程、生物医学工程学、电子信息工程专业及其他相关专业的高年级本科生和研究生的教科书,也可作为工程技术人员了解系统辨识方法的参考书。因此,我们不强调数学证明,而着重概念的清晰和实用性。读者一定要掌握各种方法的应用前提和场合,对于有的烦琐的证明可以一略而过,但必须记住结论。读者可以跳过已经熟悉或觉得难懂的章节,直接阅读第4章和第5章,在需要时再回过头来查阅前面的基本知识。本书中的基于几何

意义的方程病态程度估计,以及时间序列分析中针对小数据量的处理方法等,都是作者在长期的教学和科研工作中的经验和研究成果,具有非常实际的应用价值。读者在对建模初步入门后可以进一步阅读有关论文,以解决自己的实际问题。

由于作者水平有限,书中存在的错误和缺点,欢迎广大读者批评指正。

目 录

1 模型与辨识的基本概念	1
1.1 系统和模型	1
1.1.1 模型的表现形式与类别	1
1.1.2 建立数学模型的方法	3
1.1.3 建立数学模型的原则	3
1.2 系统辨识的概念	4
1.2.1 辨识问题的表达形式	4
1.2.2 辨识算法的基本原理	5
1.2.3 辨识的步骤	6
2 随机过程	8
2.1 随机过程的基础知识	8
2.1.1 随机过程的概念	8
2.1.2 一维随机过程的分布函数和数字特征	9
2.1.3 二维随机过程的分布函数和数字特征	11
2.2 平稳随机过程	12
2.2.1 平稳过程的概念	12
2.2.2 各态历经性	14
2.2.3 平稳过程的功率谱密度	18
2.3 线性系统对随机输入的响应	22
2.4 几种重要的随机过程	22

2.4.1	独立随机过程	23
2.4.2	独立增量过程	23
2.4.3	马尔可夫过程	25
2.4.4	正态随机过程	27
3	最优估计理论	31
3.1	最优估计理论的基本概念	31
3.1.1	估计	31
3.1.2	最优估计和估计准则	32
3.1.3	估计方法	33
3.2	最优估计的基本方法	33
3.2.1	最小二乘估计	33
3.2.2	线性最小方差估计	42
3.2.3	极大似然估计	47
3.2.4	贝叶斯估计	49
3.2.5	各种估计方法的关系	55
3.3	维纳滤波	55
3.3.1	线性离散维纳滤波问题	56
3.3.2	离散维纳滤波器的解	56
3.3.3	横向滤波器的维纳解	58
3.3.4	维纳滤波的局限性	61
3.4	卡尔曼滤波	61
3.4.1	线性离散随机系统的最优估计问题	62
3.4.2	线性离散随机系统的卡尔曼最优滤波	63
4	系统模型与辨识	72
4.1	常用数学模型的表达式	72
4.1.1	权函数模型	72

4.1.2	线性差分方程模型	74
4.1.3	从差分方程到传递函数	78
4.2	权函数模型辨识	79
4.2.1	权函数辨识的最小二乘法	79
4.2.2	最小二乘估计与互相关辨识的关系	81
4.2.3	最优输入信号	83
4.3	线性差分方程模型辨识的最小二乘类方法	86
4.3.1	基本辨识问题的最小二乘法	86
4.3.2	广义最小二乘法	89
4.3.3	辅助变量法	93
4.3.4	多级最小二乘法	96
4.3.5	递推的最小二乘法	102
4.4	线性差分方程模型辨识的近似极大似然法	108
4.4.1	极大似然法用于动态系统的参数估计	108
4.4.2	递推的极大似然法	111
5	模型检验及被估参数的置信区间	116
5.1	残差的白色度检验法	116
5.1.1	自相关函数检验法	116
5.1.2	残差方差图检验法	118
5.2	周期图检验法	118
5.2.1	周期图的概念	118
5.2.2	周期图的性质	119
5.2.3	周期图检验	120
5.3	确定模型阶次的 F 检验法	123
5.3.1	F 分布	123
5.3.2	F 检验法	124
5.4	准则函数法	125

5.4.1	最小最终预报误差准则	125
5.4.2	最小信息准则	126
5.4.3	模型定阶小结	127
5.5	模型参数的置信区间	128
5.5.1	t 分布	128
5.5.2	模型参数的置信区间	128
5.6	方程病态程度的估计	130
5.6.1	摄动分析与条件数	130
5.6.2	方程病态的几何意义	133
5.6.3	基于几何意义的方程病态程度估计指标	134
6	时间序列分析	139
6.1	时间序列分析问题	139
6.2	线性模型	141
6.2.1	AR 模型($AR(p)$)	141
6.2.2	MA 模型($MA(q)$)	142
6.2.3	ARMA 模型($ARMA(p, q)$)	142
6.3	时间序列模型的特征函数	143
6.3.1	格林函数(G 函数)	143
6.3.2	逆函数(I 函数)	143
6.3.3	自相关函数	144
6.3.4	偏相关系数	148
6.4	非平稳的时间序列模型	150
6.5	模型的初步识别与参数的估计	151
6.5.1	样本自相关函数	152
6.5.2	样本偏相关系数	153
6.5.3	模型的初步识别方法	154
6.5.4	参数的矩估计	155

6.5.5 参数的精估计	157
6.6 序列的合成、分解及季节性模型	164
6.6.1 序列的合成	164
6.6.2 序列的分解	167
6.6.3 季节性模型	171
6.7 ARMA 序列的预测方法	172
7 自适应滤波	174
7.1 自适应滤波的基本概念	174
7.1.1 基本概念	175
7.1.2 主要应用领域	176
7.2 自适应算法	178
7.2.1 最陡下降法	178
7.2.2 牛顿法	180
7.2.3 最小均方法	183
7.2.4 递推最小二乘法	185
8 盲信号处理概述	192
8.1 盲信号处理问题	192
8.1.1 问题的提出	192
8.1.2 线性瞬时混合问题	192
8.2 盲信号处理问题的发展与应用	194
8.2.1 发展历史与研究前景	194
8.2.2 应用	195
8.2.3 小结	196
附录	197
附录 1 标准误差	197

附录 2 矩阵求逆引理	199
附录 3 递推的广义最小二乘法	201
附录 4 递推的辅助变量法	202
附录 5 增广矩阵法	203
附录 6 Box-Cox 变换	204
主要参考文献	206

1 模型与辨识的基本概念

系统辨识是一种根据系统的输入数据和输出数据建立数学模型的方法。本章将叙述模型与辨识的基本概念,包括模型的概念、建模的方法、系统辨识的定义、原理和步骤等。

1.1 系统和模型

在对工业过程、生物对象等进行研究时,通常将研究对象抽象为一个系统,对其建立数学模型,进而定量地分析和探讨研究对象的性质和特征。所谓系统,是指由相互关联、相互制约、相互作用的若干组成部分按照一定规律组合而成的具有特定整体功能和综合行为的整体,如工程系统、生物系统、经济系统、社会系统等。系统理论,则是抽去具体系统的物理或者社会含义而把它抽象化为一个一般意义下的系统而加以研究,以揭示系统的一般特性的理论,如系统工程、系统生物等。

系统的概念具有相对性,系统的每个组成部分也可以是一个系统,而系统本身又可以是一个更大系统的组成部分。系统最基本的特征是它的整体性,系统的行为和性能是由其整体决定的。

模型是对客观事物的主观描述,对实体的特征和变化规律的抽象,对客观实体的本质方面所作的抽象或者表达。大多数情况下,建立模型的目的并不在于将实体的所有方面都反映出来,而只是要求模型在人们所要研究的主题范围内描述出实体的特征和它的变化规律。所以,系统的模型是根据一定的应用目的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,而且模型越精确,就越复杂。

1.1.1 模型的表现形式与类别

由于表达方式和应用目的不同,模型具有多种表现形式,常见的有如下

3种:

(1) 直觉模型。这种模型是将系统的特性以非解析的形式直接储存在人脑中,靠人的直觉控制系统,例如司机靠直觉模型控制汽车的方向盘等。

(2) 物理模型。这种模型是指根据相似原理把实际系统加以缩小的复制品,或者是对实际系统的一种物理模拟,如风洞模型、水力模型、传热模型等。

(3) 数学模型。这是在进行定量分析时最常用的一种模型形式。这种模型利用数学结构反映实际系统内部之间、内部与某些外部因素之间的精确的定量关系。其主要功能是用来模拟系统的行为,而不是去描述系统的实际结构。常用的有代数方程、微分方程、差分方程和状态方程等参数模型,也包括以图形或表格形式表现系统特性的非参数模型,如阶跃响应、脉冲响应和频率响应等。

数学模型是本书讨论的模型表现形式,根据不同的特征标准也有不同的分类。按照系统输入输出的个数,可分为单输入单输出(single input single output, SISO)模型和多输入多输出(multi-input multi-output, MIMO)模型;根据系统参数的性质,可分为分布参数和集总参数模型、线性和非线性模型、连续和离散模型、离线和在线模型、参数和非参数模型等。其中,参数模型的表征形式有包含系数或者参数的微分方程、差分方程、传递函数、状态空间方程等。在一定的模型结构下,如果参数或系数确定,模型就确定了。而非参数模型事先不需要对模型的结构作任何假设,常常通过实验获得脉冲响应、阶跃响应和频率响应等特性,以图形的形式出现(如伯德图等),没有明显的参数。参数模型和非参数模型之间可以通过适当的变换方法进行转换。

从系统理论的观点来看,精确地测量输入和输出数据以后,我们就能准确地判断并获得系统模型方程中的未知参数。但是实际上,输入和输出数据会受到噪声的影响,而且模型方程本身像系统一样具有随机干扰。所以系统参数的确定,从本质上讲是一个统计问题,即要寻求一个特殊的数学模型,使得它的输出信号能与具有噪声的观测数据相拟合。

模型类别的选择主要取决于对所研究对象已有的先验知识和建模的目的。本书主要讨论的是差分方程这类最常用的数学模型形式,它是一种描述集总参数、离散、定常、线性动态随机系统的模型,而建立模型的主要任务则在于对差分方程的阶数和参数进行确定。

1.1.2 建立数学模型的方法

对系统的了解程度不同,模型的用途不同,则建立数学模型的方法也不同,通常有3种建模方法,分别是机理分析法、测试法和混合建模法。

机理分析法,也称“白箱”建模法,即运用一些已知的定律、定理和原理等,如生物学定律、能量平衡方程、牛顿运动定理、传质传热原理等,根据系统的结构数据,推导出系统的数学模型,通常称之为理论模型、机理模型或解析模型。这种方法只能用于简单系统的建模,对于复杂系统来说,这种方法的局限性较大。因为通常需要给出一些假设来对复杂系统进行简化,否则过于复杂,但假设往往并不一定符合实情,同时,实际系统的机理也并非完全知道,而且,系统的某些因素也可能不断变化,难以精确描述。

测试法,即系统辨识,也称“黑箱”建模法。这种方法是利用系统的输入、输出数据所提供的信息,经过加工处理,建立系统的数学模型。测试法的关键之一在于必须设计一个合理的实验,以使得输入和输出数据中蕴含所研究系统性能的最大信息量。本书主要讨论这种建模方法。

混合建模法,就是将机理分析法和测试法结合起来使用,通常也称“灰箱”建模法。对于系统中机理已知的部分采用机理分析的方法,机理未知的部分采用测试的方法,这样可以充分发挥两种方法各自的优点,是一种广泛使用的建模方法。

1.1.3 建立数学模型的原则

从上面的叙述可以知道,数学模型有多种表现形式和类别,建立模型也有多种方法,那么,在建立数学模型的过程中,该如何进行选择呢?一般来说,建模工作需要从目的性、实用性、可辨识性和节省原理等4个方面综合考虑,简单地说,就是要遵循以下4点原则:

(1) 目的性。目的不同,如控制、仿真、预测预报、过程诊断、估计物理参数等,相应的建模的方法可能不同。

(2) 实用性。用于系统评价的模型,物理概念要明确;对于实时应用的模型主要考虑的是计算机的运算速度,否则再合适的模型,如果计算机来不及处理也就没有实际意义。

(3) 可辨识性。模型结构要合理,输入信号必须是持续激励的,数据要

充足。

(4) 节省原理。待辨识的模型参数个数要尽可能少。

1.2 系统辨识的概念

系统辨识是指从对系统进行观察和测量所获得的信息中提取数学模型的一种理论和方法。

1956 年 Zadeh 提出“辨识(identification)”这个名词来定义利用实验确定系统特性的方法。1962 年他进一步给出了明确的定义：系统辨识是在对被辨识系统进行输入、输出观测而获得其输入、输出数据的基础上，从一组设定的模型类中，确定一个与被辨识系统等价的数学模型。简单地说，系统辨识就是通过实验，从观测到的含有噪声的系统输入输出数据中提取数学模型的一种建模方法。

从定义中我们知道，系统辨识具有三大要素：输入输出数据、模型类、等价准则。其中，输入输出数据是建立模型的基础，模型类是寻找模型的范围，而等价准则是系统辨识的优化目标。

这里需要强调一点，辨识得到的模型只反映系统的输入数据和输出数据之间的特性，对系统内在的信息则无法反映。

1.2.1 辨识问题的表达形式

线性离散模型是最常用的一种模型形式，所以本书主要讨论这种模型的辨识问题，如图 1-2-1 所示。

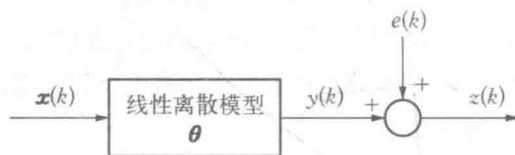


图 1-2-1 辨识问题的表达形式

图中， $x(k)$ 和 $z(k)$ 分别是系统的输入、输出数据，均为可观测量， $y(k)$ 是系统的真实输出， $e(k)$ 是观测噪声， θ 是未知的模型参数。定义如下：

$$x(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_N(k)]^T \quad (1-2-1)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T \quad (1-2-2)$$

则线性离散模型的输出可表示为

$$z(k) = \sum_{i=1}^N x_i(k)\theta_i + e(k) = \mathbf{x}^T(k)\boldsymbol{\theta} + e(k) \quad (1-2-3)$$

这种线性组合关系就是本书将重点阐述的辨识问题的基本表达形式,称为最小二乘格式。一般来说,线性过程或者本质线性过程,其模型都能化成这种格式。

1.2.2 辨识算法的基本原理

辨识的目的是根据系统的输入输出信息,在某种准则意义下,估计出模型的未知参数,其基本原理如图 1-2-2 所示。

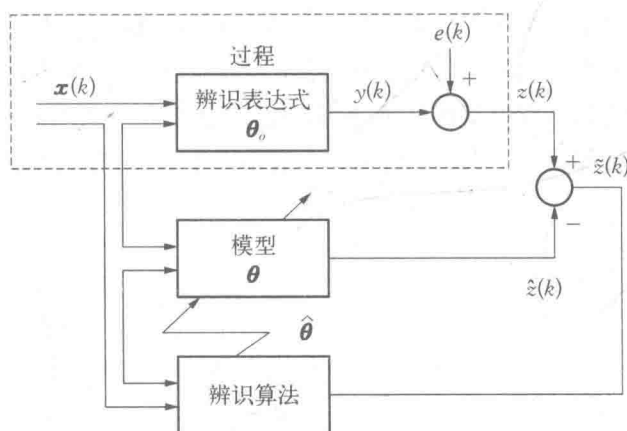


图 1-2-2 辨识的基本原理

系统的输出量 $z(k)$ 和输入量 $x(k)$ 都是可观测的。通常基于观测得到的输入输出数据 $x(k)$ 和 $z(k)$, 采用逐步逼近的方法, 对模型参数 $\boldsymbol{\theta}$ 进行估计, 得到估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 。在 k 时刻, 根据前一时刻的估计参数 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)$ 计算出模型该时刻的输出, 即系统输出预报值 $\hat{z}(k)$:

$$\hat{z}(k) = \mathbf{x}^T(k)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) \quad (1-2-4)$$

同时计算输出预报误差 $\tilde{z}(k)$, 或称为“新息”:

$$\tilde{z}(k) = z(k) - \hat{z}(k) \quad (1-2-5)$$

其中观测得到的系统的输出量为

$$z(k) = \mathbf{x}^T(k) \boldsymbol{\theta}_0 + e(k) \quad (1-2-6)$$

式中: $\boldsymbol{\theta}_0$ 为系统真实参数, 即系统真实输出 $y(k) = \mathbf{x}^T(k) \boldsymbol{\theta}_0$, $e(k)$ 为观测噪声。然后将新息 $\tilde{z}(k)$ 反馈到辨识算法中去, 在某种准则条件下, 计算出 k 时刻的模型参数估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$, 并据此更新模型参数。这样不断迭代下去, 直至对应的准则函数达到最优, 这时模型的输出 $\hat{z}(k)$ 在该准则意义下最好地逼近系统的输出值 $z(k)$, 于是便获得了所需要的模型。

1.2.3 辨识的步骤

根据对系统事先了解的程度, 将系统辨识问题分成完全辨识问题和部分辨识问题。如果事先完全不了解系统任何基本特性, 那么进行的就是完全辨识问题, 即“黑箱”问题。如果对系统的某些基本特性是已知的, 即有部分先验知识, 那么进行的就是部分辨识问题, 这时黑箱问题就退化为“灰箱”问题。

系统辨识过程如图 1-2-3 所示。一般情况下, 进行系统辨识, 需要如下 5 个步骤:

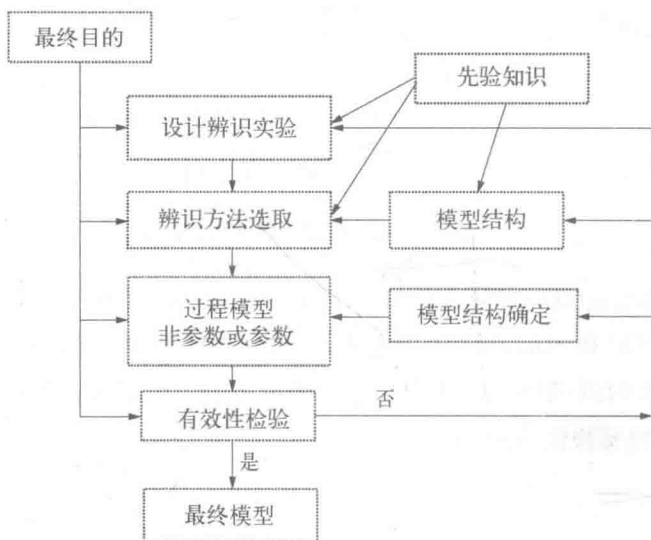


图 1-2-3 系统辨识过程