

现代电力系统丛书

电力系统辨识

沈善德 著

清华大学出版社

致 读 者

我国社会主义现代化建设的蓬勃发展,正在促进电力系统以空前的规模和速度扩大。到本世纪末,我国各大区将建成以 500kV 超高压电网为主网,单机 300~600MW 为主力机组,装机容量达 4 万~5 万 MW 的大型电力系统。超高压直流输电技术将进一步得到应用,大型电力系统间的互联将得到发展,随着三峡水电工程的兴建,西部地区电源的进一步开发,更高电压的输电系统和全国性的联网也将提上日程。对电力系统安全性、经济性和电能质量提出了更高的要求。实践证明,电力系统的规划设计、运行管理、分析和控制手段的现代化是满足这一要求的最佳途径,许多现代科学技术成果迅速在电力系统中得到推广应和,计算机技术、现代应用数学、现代控制理论、电力电子技术、人工智能等日益广泛深入地应用于电力系统,正在促使这一传统产业迅速走向高科技化。在电力系统安全经济水平和现代化水平提高的同时,电力系统学科也得到更新、丰富与发展。当前,亟需一批反映电力系统学科新进展、新成果的系列专著,为此我们组织编写了这套《现代电力系统丛书》。

丛书旨在反映当代国内外电力系统学科的最新发展和科学技术的水平。丛书将以现代科学的新理论、新方法在电力系统中的应用为主要内容,特别对在我国电力系统中已获得应用或将获得应用的最新成果进行重点介绍。

本丛书由科学出版社和清华大学出版社出版。希望本丛书对我国电力系统的发展、电力系统学科水平的提高、科技人员知识结构的改善将有所贡献。

编 委 会

前 言

系统辨识作为控制理论的一个分支在 60 年代末开始形成,并得到迅速发展,所谓辨识问题就是确立动态系统的数学模型。随着控制理论的应用在各个领域的深入发展。辨识理论及方法也更显示出其理论意义和实用价值。

计算技术和现代控制理论在电力系统的应用,使电力系统在离线计算和实时监控中,对系统的动态数学模型及动态等值模型的需要日益迫切。电力系统辨识技术可广泛应用于:建立电力系统动态数据库,系统安全的动态监控,诊断技术,在线调试,自适应控制及系统动态等值等方面。这一技术的应用是电力系统测试和监控技术上的一项重大变革。鉴于迄今为止,尚未有专门论述电力系统辨识技术的专著问世,而一般的系统辨识书又多偏重于估计理论的论述和分析,缺少实践,编写本书并取名电力系统辨识的用意是在系统辨识理论和电力系统应用间架起金桥,使电力工程专业的学生和电力工程技术人员能尽快掌握这一新兴技术,并为推动辨识技术在电力系统领域中的应用作出贡献。全书编写的主导思想是从电力系统领域的实际需要出发,阐述系统辨识的基本理论、方法和测试技术;理论联系实际,并重视选材的实用价值,在叙述的方法上,注重物理概念,避免陷入繁琐的数学推导。

为了突出电力系统的专业性和区别于一般性系统辨识,作者在体系和内容上作了下述新的安排:在理论体系上,保留现代辨识理论中以离散模型辨识为主体的主要内容,兼顾电力系统建模中的物理要求,加进连续系统辨识这一重要章节,对当前现场测试中行之有效的经典辨识方法,加强了内容,并作了详细的阐述;在联系实际方面,以电力系统动态建模为主要线索,将发电机、励磁系统、原动机调速系统及负荷模型分别列成四章,并按数学模型、辨识方法、现场测试的顺序进行介绍。这些内容都是近十年来国内外及作者所在科研组的科研成果,提供给电力系统技术人员作为参考和借鉴。

电力系统辨识是一门新兴的理论结合实际的学科,它涉及辨识理论,测试技术、软硬件研制、现场测试及动态建模等一系列内容。本书限于篇幅,着重介绍了辨识理论及四大参数的现场测试和动态建模。本书共十一章,其中第一、二章讲述辨识的基本概念和数学模型,它是后续各章的基础。第三至第七章主要阐述各类辨识方法,是本书的理论部分。其中:第三、四章主要介绍经典辨识方法,第五、六章着重讨论现代辨识方法,第七章阐述连续时间系统辨识。第八至第十一章为联系电力系统实际的应用部分,按四大参数分章自成体系。本书可作为理工科大学电机工程类高年级学生和相关专业研究生的教材,也可作为电力系统技术人员的参考书。

在本书的著作过程中,高景德教授审阅了初稿,并对内容、体系提出了宝贵的指导意见;卢强教授,倪以信教授给予推荐和热情支持;郑逢时教授在同步机辨识领域提供了帮助;作者所在科研组的朱守真老师,赵争鸣博士及研究生们为本书提供不少资料和做了不少工作。本书所介绍的现场试验都是在东北电管局调度通讯局、东北电力试验研究院及有关厂站的领导和工程师们大力支持协作下取得的,当然更应提出本书的出版还凝聚着责任编辑辛勤劳动的结晶,在此一并向他们表示衷心的感谢。

本书限于作者水平和实践经验,缺点和不足之处还望读者批评指正。

作者于清华园

1993 年 2 月

• V •

目 录

第一章 概论	1
1.1 模型和建模途径	1
1.2 系统辨识的定义	2
1.3 辨识方法分类	4
1.4 辨识的内容与步骤	5
1.5 系统辨识在电力系统中的应用	9
第二章 动态系统的数学模型	11
2.1 概述	11
2.2 连续系统的经典描述	11
2.3 连续系统的状态空间方程	14
2.4 离散系统的经典描述	18
2.5 离散系统的状态空间方程	21
2.6 电力系统动态数学模型的特点	24
第三章 经典辨识法(一)——相关辨识法	26
3.1 确定性信号的分类	26
3.2 随机信号的统计描述	28
3.3 白噪声和伪随机码	36
3.4 卷积辨识法	39
3.5 相关辨识法基本原理	42
3.6 多维系统的辨识	46
3.7 相关辨识技术的应用	48
第四章 经典辨识法(二)——频域辨识法	51
4.1 频域辨识法的基本原理	51
4.2 多维系统的辨识	54
4.3 频域辨识法框图	57
4.4 时域响应曲线拟合求传递函数	60
4.5 频域伯德图求传递函数	65
4.6 频域响应曲线拟合求传递函数	69
4.7 频域辨识法的应用	74
第五章 现代辨识法(一)——最小二乘估计	79
5.1 最小二乘估计法	79
5.2 递推最小二乘估计	87
5.3 非参数型最小二乘估计	92
5.4 多维系统的辨识	96
5.5 系统阶次的确定	97
5.6 非线性系统的最小二乘估计	100
5.7 广义最小二乘估计	104
5.8 辅助变量法	111
5.9 自适应最小方差预报	113
5.10 ARMA 模型的最小方差预报	115
第六章 现代辨识法(二)	117
6.1 卡尔曼滤波	117
6.2 推广卡尔曼滤波	126

6.3	增广状态方程和变参数嵌入辨识法	129
6.4	梯度校正参数辨识法	132
第七章	连续系统的辨识	135
7.1	概述	135
7.2	非参数模型辨识	135
7.3	连续系统的直接辨识法(一)——状态变量滤波法	136
7.4	连续系统直接辨识法(二)——矩形脉冲函数法	138
7.5	连续系统直接辨识法(三)——分段线性多项式函数法	145
7.6	连续系统的间接辨识法	148
7.7	非线性连续系统的最小二乘辨识法	152
第八章	同步发电机模型及参数辨识	157
8.1	电力系统参数辨识	157
8.2	电力系统参数辨识的特点	158
8.3	同步发电机基本方程	158
8.4	单机-无穷大系统的简化数学模型	163
8.5	同步发电机参数的抛载测试法	167
8.6	同步发电机参数的频域辨识法	171
8.7	同步发电机详细模型的时域辨识法	179
第九章	励磁系统模型及参数辨识	186
9.1	励磁调节系统的数学模型	186
9.2	励磁系统参数的频域辨识法	193
9.3	励磁系统参数的时域辨识法	196
9.4	测试硬件的配置	202
9.5	现场测试励磁系统参数	204
第十章	原动机、调速系统模型及参数辨识	208
10.1	原动机和调速系统数学模型	208
10.2	时域最小二乘辨识法	215
10.3	分段线性多项式函数辨识法(PLPF法)	221
10.4	测试硬件配置	224
10.5	原动机及调速系统参数的现场测试	226
第十一章	电力系统负荷的建模	230
11.1	概述	230
11.2	静态负荷模型及参数辨识	233
11.3	动态负荷机理型模型的辨识	240
11.4	动态负荷传递函数模型的辨识	247
11.5	动态负荷差分方程模型的辨识	250
参考文献		254

第一章 概 论

系统辨识(System Identification)是现代控制理论的一个分支。在现代控制领域中,控制理论阐述控制设计的准则,状态估计给出系统运行的状态,而系统辨识则是建立数学模型的依据,三者相辅相成,缺一不可。1967年国际自动化会议(IFAC 布拉格会议)上,系统辨识被正式列为独立的学科分支。迄今二十多年来,在辨识理论、试验技术及实际应用等方面都取得了较大的发展。

何谓系统辨识?简言之,即为“动态建模”,即利用被控制系统的输入、输出数据,经计算机数据处理后,估计出系统的数学模型。现代科学的发展,对数学模型的需求愈加迫切。在工程领域上,各类系统的动态计算、分析都要有精确的数学模型。以电力系统为例,系统动、暂稳定计算离不开系统的数学模型,包括发电机、原动机、各类控制系统及负荷模型等。现代控制工程中,设计、调试及在线控制一个系统都需要建立实时系统的数学模型和实测参数,例如常规的PID控制、线性优化控制和自适应控制等。随着计算技术的迅速发展,对数学模型的要求已突破传统的自然科学及工程领域,而进一步发展到社会科学和生态科学等范畴。一些社会科学,如经济规划、人口预测、生态环境等课题,也都涉及相应的数学模型。系统辨识恰是适应这一需要而产生的新兴学科,目前它的理论正在日趋成熟,而其实际应用却是方兴未艾。

本章主要介绍系统辨识的一些基本概念,包括辨识定义、建模途径、方法分类以及辨识内容和步骤及电力系统辨识的范畴等。

1.1 模型和建模途径

模型是用来描述一个动态过程运动规律的客体,它把实际过程的本质部分以信息形式表达。常用的模型可分为物理模型和数学模型两大类。物理模型是根据相似原理构成的一种物理模拟,例如水力学模型、电力系统动态模拟等;数学模型是指以数学表达式来描述过程的动态特性,在时域上常用的形式有代数方程、微分方程、差分方程、状态方程等。两种模型的形式不同,其研究方式也相异。物理模型通常通过模型试验来达到动态特性的研究,例如在动态模拟实验室,可以进行电力系统各种暂态过程的模拟试验,从而来分析其动态性能;而数学模型则需通过数字仿真计算来阐述动态过程。由于计算技术的发展,用数字仿真进行动态计算研究已愈来愈显示出其优越性。

数学模型的建立通常有两个途径:按物理机理建模和按辨识建模。

1.1.1 物理机理建模

适用于对物理机理了解较透彻的学科,如物理、化学等学科,用内在物理机理给出的一些定理和定律来写出模型。在电力系统中人们所熟悉的描述同步电机过渡过程的派克(park)方程,小干扰动态过程的Heffron模型以及网络潮流方程等都属于这一类。用物理机

理建模的优缺点是:

- (1) 用连续时间模型、微分方程形式描述,模型参数的物理概念清晰,便于计算和分析。
- (2) 模型是在一定的假设和简化条件下得出的,具有局限性。对一些较复杂的生产过程,例如锅炉的燃烧过程等,准确地描述就有困难。
- (3) 无法计及动态过程中的一些实际因素,例如发电机数学模型中,对电磁元件引起的诸如饱和、涡流、非线性影响等。

1.1.2 辨识建模

利用待测系统动态过程提供的输入、输出数据,经计算处理后建立数学模型,如图 1.1 所示。图中 X 是输入向量, Y 是量测向量, ω 是量测噪声, Z 是输出向量, θ 是模型参数向量。

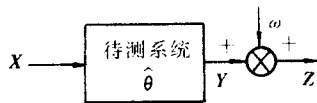


图 1.1 辨识建模

辨识建模的特点是:

- (1) 无需确切知道系统的物理机理。
- (2) 用现场辨识(测试)动态建模,可计及运行中的一些实际因素。
- (3) 适用于一些物理机理尚不清楚或难以用简单规律描述的动态过程,特别是一些新兴学科如生物工程等。

由于辨识建模从原理上讲仅需利用输入、输出信息,即只关心其外特性,因此可以把系统(也称过程)看成“黑箱”(Black-box)。也就是说在建模过程中可以对系统内部过程所知不多。与此相反,我们把机理建模称为“白箱”建模。

电力系统学科建立在较严谨的电工理论上,一些动态机理多数是已知的,但又不完全,例如数学模型可按机理列出,而模型参数却不知道。这时可按物理机理先列出数学模型,再用系统辨识求出参数。这种方法可称之为“灰箱”(Grey-box)建模。灰箱建模是电力系统辨识的一个特点。

1.2 系统辨识的定义

1.2.1 辨识的定义

由于系统辨识是一门新兴学科,所以迄今为止还没有统一的系统辨识定义。常用的定义有:

定义一 (Zadeh 1962)——辨识是指在输入和输出数据的基础上,从给定的一组模型中确定一个与所测系统等价的模型。

定义二 (L. Ljung 1978)——辨识即是按规定准则在一类模型中选择一个与数据拟合得最好的模型。

上述两定义,定义一较为严格,但要找出一个与实际系统完全等价的模型是比较困难的。而按照定义二,辨识的实质可理解为数据拟合的优化,比较切合实用。可用图 1.2 来说明辨识建模。

规定一代价函数(或称等价准则) J_θ ,它是量测误差 e 的函数。原型(M_M)和模型(M_θ)在同一激励信号 x 的作用下,产生原型输出信号 Z_M 和模型输出信号 Z_θ 。其误差为 e ,经辨识准

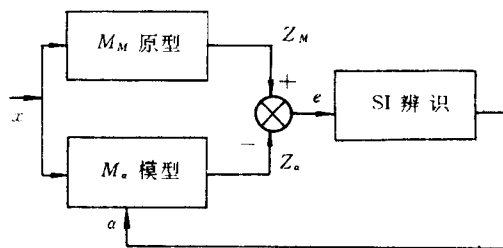


图 1.2 系统辨识原理图

则计算后,去修正模型参数。反复进行,直至误差 e 满足代价函数最小为止。数学表述可写为,令

$$J_\theta = F(e)$$

找出模型 $M_a \in \phi, \phi$ 为给定模型类,使

$$J_\theta \longrightarrow \min$$

则

$$M_a \equiv M_M$$

系统即被辨识。

由上述分析可见:数据 (X, Z) 、准则 (J_θ) 及模型 (M_a) 构成系统辨识的三要素。而模型的精度由 J_θ 决定(也即由 e 决定)。

1.2.2 误差的讨论

等价准则是系统辨识的核心问题,它是用来衡量模型品质的指标,可写成

$$J(\theta) = F(e(k))$$

$e(k)$ 是定义在一定区段的误差函数,这一误差函数应从广义角度上加以理解,可以是输出误差,也可以是广义误差(或称方程误差)。

1. 输出误差 $e(k)$

如图 1.1 单输入单输出系统,输出误差以脉冲传递函数表示为

$$e(k) = M_M(k) - M_a(k)$$

$$M_a(k) = B(z)/A(z)$$

式中

$$A(z) = 1 + \sum_{i=1}^n a_i z^{-i}$$

$$B(z) = \sum_{i=1}^n b_i z^{-i}$$

则 输出误差

$$e(k) = Z_M(k) - \frac{B(z)}{A(z)} x(k)$$

代价函数

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^m \left[Z_M(k) - \frac{B(z)}{A(z)} x(k) \right]^2$$

显然代价函数 $J(\theta)$ 是模型参数 (A, B) 的非线性函数,求最优解的方法比较困难。在电力系统的频域传递函数辨识中会遇到类似问题。

2. 广义误差 $e'(k)$, 若定义广义误差为

$$e'(k) = e(k)A(z)$$

即 $e'(k) = A(z)Z_M(k) - B(z)x(k)$

代价函数

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^m [A(z)Z_M(k) - B(z)x(k)]^2$$

可见 $J(\theta)$ 是模型参数 (A, B) 的线性函数, 求最优解就容易了。辨识课题中一般采用这一形式。

其误差框图如图 1.3 所示。

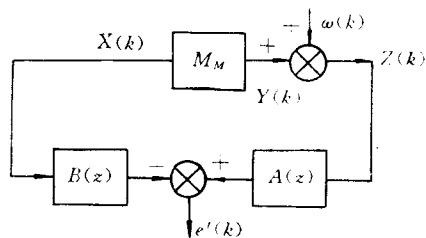


图 1.3 广义误差图

1.3 辨识方法分类

按照对待测系统的了解程度, 可较形象地把系统分为三类, 即

黑箱 (Black box): 对系统一无所知, 其模型结构、阶数、参数等均未知。

灰箱 (Grey box): 对系统部分了解, 如已知模型结构、阶数、待测模型参数。

白箱 (White box): 系统模型可用物理机理写出。

电力系统中的辨识建模多数属于灰箱建模, 如发电机、原动机及其控制系统中的励磁系统、调速系统等。

根据辨识理论, 辨识方法可分为经典辨识法和现代辨识法两类。经典辨识法是与经典控制理论相对应的, 其建立的数学模型如时域脉冲响应, 频域相频、幅频特性等均属此一范畴; 现代辨识法适应现代控制理论的需要, 其建立的数学模型有状态空间方程、差分方程等。表 1.1 概括了两类辨识方法的特点和数学模型。

表 1.1 辨识方法分类

	方 法	特 点	数 学 模 型
经典法	卷积辨识法	确定型、时域非参数型	时域脉冲响应
	相关辨识法	随机性、时域非参数型	时域脉冲响应
	频域 FFT 法	随机性、频域非参数型	频域、幅频特性、相频特性
现代法	最小二乘估计法	随机性、时域、参数型	状态空间方程、 差分方程等
	极大似然法		
	卡尔曼滤波法		

从此表可见, 经典辨识法所获取的数学模型不论是时域的脉冲响应, 还是频域的频率特性, 均属非参数型。但这些特性可以进一步用动态拟合的方法, 求得其传递函数, 即所谓间接辨识法。而现代辨识法求得的数学模型为状态空间方程或差分方程, 属于参数型。因为是一步求得参数, 故又称为直接辨识法。

此外, 从辨识数据的处理过程看, 辨识又可分为离线辨识 (图 1.4a) 和在线辨识 (图 1.4b) 两种。前者把辨识过程分为两个步骤: 第一步, 在现场用磁带记录仪录取数据, 第二步, 离线用计算机处理数据以获取数学模型。这一种方法多半用于非参数辨识, 间接求取数学模型。后者用微机在线处理数据, 直接求得参数型模型, 并可进一步用于适应性控制, 构成在线辨识数学模型。

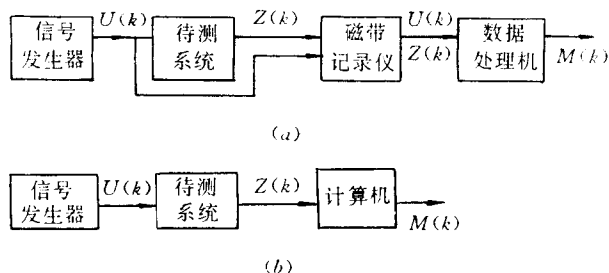


图 1.4 辨识过程

(a) 离线辨识; (b) 在线辨识

1.4 辨识的内容与步骤

系统辨识是一门理论结合实际,理论性和应用性都很强的学科,内容分为三个方面:

(1) 系统辨识原理和方法。包括经典辨识理论、现代辨识理论、动态数学模型及一些相应的基础知识。

(2) 试验设计及测试。将涉及试验信号、试验方法、软硬件设备等。

(3) 辨识应用。结合介绍辨识技术在电力系统中的应用实例。

在处理一个辨识课题前,首先必须明确模型应用的具体对象,因为这将决定模型的类型、精度和辨识方法。例如,电力系统的参数辨识,不论是电力元件参数(发电机参数等)或控制系统(励磁系统)参数一般都可按物理机理列出动态方程,辨识的目的是验证参数值,所以通常采取连续时间的数学模型,并用离线辨识的方式求取参数。对于负荷模型,因为已经是综合等效的结果,故可以用连续时间模型,也可以用离散时间模型。在调节控制方面,对常规的模拟量控制系统,与传统的频域控制相适应,一般采用连续频域模型即传递函数;而自适应数字控制系统,多数采用在线辨识、离散时间模型。

表 1.2 列出模型应用对象对辨识方法模型的要求,可供参考。

表 1.2 模型应用对象对辨识方法、模型的要求

辨 识 目 的	模 型 类 型	辨 识 方 法
模型用于系统分析、理论验证	线性、连续、非参数或参数模型	离线辨识经典辨识法 (时域或频域响应)
校正或优化控制参数	线性连续、非参数或参数模型	离线或在线辨识、经典辨识法 (时域或频域响应)
数字计算机辅助设计或控制	线性离散参数模型	在线辨识、现代辨识法
自适应数字控制	线性离散参数模型	在线闭环辨识现代辨识法
监视过程参数和故障诊断	线性或非线性参数模型	在线辨识 现代辨识法
预 报	线性或非线性参数模型	离线或在线辨识 现代辨识法

在根据辨识的目的选定数学模型及辨识方法(广义讲指用何种辨识方法,离线还是在线,开环还是闭环)后,即可进入具体辨识过程的设计。

辨识过程的设计包括四个方面:试验设计,数学模型和辨识方法的选定,模型结构和参数的辨识,模型的动态校核。

1.4.1 试验设计

在试验设计前,要通过分析等手段对待测系统有一个粗略的了解,即所谓一些先验知识的收集,如系统的预计动态特性、时间常数、过渡过程时间、截止频率、有效频带、静态增益、噪声特性及系统的运行条件等。这些将在试验设计中起主要作用。

试验设计包括扰动信号的选择,采样方法和间隔的决定,采样区段(采样数据长度)的设计以及辨识方式(离线,在线及开环,闭环)的考虑。

1. 扰动信号的选择

为了达到辨识的目的,待测系统必须产生一个满足辨识条件的动态过程,可以利用系统本身存在或人为干预的动态激励。例如电力系统本身存在的随机噪声,线路或机组投切以及系统的短路故障。但这种扰动常受一些因素制约:随机噪声在幅度与频带上常不能满足要求;设备投切要受运行方式限制,不能任意切换;系统事故信号的捕捉,在机遇上十分困难。为此一般希望外加激励信号使系统产生扰动,所施加信号按性质可分为脉冲信号、阶跃信号、斜坡信号及白噪声信号(工业测试用伪随机信号)。对扰动信号的要求是输入信号必须能充分激励系统的所有模态,换句话说,从频谱分析角度看,输入信号的频谱应有较宽的频带,可以覆盖系统的频谱。此外,从测试角度看,应当有尽量小的振幅,以减轻扰动信号对待测系统工作信号的影响。因此一般认为具有可调频带且能量均匀分布在频带上的准白噪声信号——伪随机信号是较理想的辨识扰动信号,因而被广泛应用于工业测试作为经典辨识法和现代辨识法中的扰动信号,特别是在在线闭环辨识中。而作为传统扰动信号的脉冲信号、阶跃信号等在一定条件下也还在现场试验中应用。

从工程角度看,扰动信号应具备:① 频带宽度足以覆盖系统频带;② 信号的功率和幅度应不影响系统的运行。幅度应适中,不宜过大,以免进入非线性区;也不宜过小,影响测试精度。③ 要易于调整、应用。表 1.3 列出扰动信号分类。

表 1.3 扰动信号分类

扰动方式		信号特点	适用场合
系统自身随机扰动		系统噪声随机性大、幅度较小	负荷模型动态建模
外加扰动信号	脉冲信号 斜坡信号 阶跃信号	直接产生脉冲响应、斜坡响应、阶跃响应	实验室或工业试验
	白噪声信号 伪随机信号	频谱覆盖宽、能量均匀分布,是较理想的扰动信号	广泛用于经典辨识及现代辨识的现场试验中

2. 采样方法和采样间隔

对待测系统进行辨识时,系统的输入输出信号都要经过采样处理。离线辨识时,通常先在现场用磁带记录仪将模拟信号录下,然后再用 A/D 变换将信号转换为数字量后再输入计算机;在线辨识时,则在现场直接将信号用数字采样送入计算机。不论用哪一种方式,都要经过数字采样,而采样间隔的选择将直接影响辨识模型的精度,虽然原则上可以用优化准则求取最优采样时间,但计算复杂。工程上一般是从实际情况出发,根据系统工作频率选择合适的采样时间,并考虑下述因素:① 应满足采样定理,即采样速度不低于信号截止频率的两倍,通常为 3~5 倍左右。② 采样间隔应顾及辨识算法、计算速度及中间变换器的响应速度等。③ 采样间隔的长短直接影响模型辨识效果。采样间隔过长,信息损失太多,将直接影响模型精度,高阶模型会退化为低阶模型;采样时间过短,会遇到硬件速度和数值计算中病态的麻烦。

3. 辨识时间(数据采样时间)

辨识时间在具体问题中考虑的因素较多。原则上讲,在时域相关辨识法与频域 FFT 法中所施加信号为具有一定周期的伪随机信号。为了保证多次平均来消除一些随机噪声,通常把辨识时间取为

$$T = n T_0$$

式中 T 为辨识时间;

T_0 为伪随机信号的周期;

n 为倍数。

倍数 n 应适当, n 过大则辨识时间延长,待测系统平稳性不易保证; n 过小则消除噪声效果差。

4. 辨识方式

辨识方式决定于辨识的应用目的。通常在系统模型辨识、参数测试等场合采用离线辨识。这样,用磁带记录仪采样后,可以在计算机上仔细推敲计算数学模型。以后将论述的电力系统参数辨识多数用这一方式。在适应性控制和故障诊断等方面,显然要用在线辨识的方式。由于受计算机实时计算速度、内存及数据处理技术的限制,在线辨识在技术上远比离线辨识困难,在实际应用上所受限制也多。

开环和闭环也是两个不同的辨识条件。开环辨识是指待测系统在开环条件下运行,显然在此条件下,辨识比较简单,精度也容易保证;而在待测系统闭环条件下,一些测量噪声通过系统闭环混杂其间,将影响辨识的精度,所以应尽量采用开环辨识。但是电力系统多数是处在闭环连续运行中,这就给辨识带来了一定的困难。我们通常采用开环测试和闭环测试相结合的办法。例如在励磁系统参数辨识中,励磁调节器的部分环节可以脱离系统开环测试,而励磁机及其可控硅整流部分必须在线闭环测试。

1.4.2 数学模型和辨识方法的选定

数学模型和辨识方法有一定的内在联系,由表 1.1 可见,时域或频域的非参数连续模型通常选用经典辨识方法,而时域的参数型离线模型一般用现代辨识方法。所以在辨识前首先要确定应用目的。如果是提供系统分析、计算所用数学模型,由于电力系统分析多数在连续系统中进行,参数含有物理意义,所以以采用经典辨识法的相关辨识或频域 FFT 法为宜。如

用于适应性控制,数字计算机直接接在控制系统中,当然以采用差分方程的数学模型为好,也可用状态方程,使参数与系统相适应。总之,模型和辨识方法的选定是重要的一环。

1.4.3 模型结构和参数的辨识

这一步是辨识的实质性环节。模型结构在连续时间系统中可理解为微分方程的阶次,在离散时间系统中反映为差分方程的阶次。相应的在频域中为传递函数与 Z 函数的阶次。这些表征方程结构的阶次,可以用已知物理机理(原理、定理等)写出。也可事先确定一个验前模型、再用模型鉴别方法选出合适模型。简单地讲是用不同阶次模型试验,选择一个与实际动态响应较吻合的模型,即所谓模型阶次的确定。

模型参数的辨识是在模型结构确定后,运用在线测试数据进行动态拟合。动态拟合的方法有表 1.1 所列经典法及现代法多种,其中最小二乘法是应用最广泛的一种,在多数工程问题应用中可取得满意的效果。

在模型参数辨识中数据预处理是不可缺少的环节。由于输入输出数据中通常含有直流成分或低频成分,它们在各种辨识方法中都将影响辨识的效果和精度。当然有效频带以外的,高频部分也是不利的。所以在数据输入辨识主程序进行计算前必须进行预处理,消除直流、低频和高频成分的影响。

预处理方法随辨识方式而异。在离线辨识用磁带记录仪进行录波时,可以用隔直、低通滤波和高通滤波来消除影响。这一方法在经典辨识中已被认为是行之有效的手段。在现代辨识中,用微机直接采样时,一般可用零均值化和数字滤波办法解决。

零均值平均法的递推形式为

$$\hat{U}_0(k) = \hat{U}_0(k-1) + \frac{1}{k}[U(k) - \hat{U}_0(k-1)]$$

$$\hat{Z}_0(k) = \hat{Z}_0(k-1) + \frac{1}{k}[Z(k) - \hat{Z}_0(k-1)]$$

由上式可得零均值化处理关系:

$$\bar{U}(k) = U(k) - \hat{U}_0(k)$$

$$\bar{Z}(k) = Z(k) - \hat{Z}_0(k)$$

式中 $U(k)$ 为输入量测量;

$Z(k)$ 为输出量测量;

$\hat{U}_0(k)$ 为输入直流分量估计值;

$\hat{Z}_0(k)$ 为输出直流分量估计值;

$\bar{U}(k)$ 为消直后输入量;

$\bar{Z}(k)$ 为消直后输出量;

k 为估计次数。

1.4.4 模型校验

模型校验是考核模型辨识是否成功的手段。模型校核失败,必须重新开始建模。由于辨识建模本质上是一种逼近,所以不能预期得到与实际系统完全一致的模型。通常在主要动态指标或过程得到一定误差范围的吻合,且误差又满足工程要求时,即可认定模型成立。据此

常用下列四种模型校核法。

(1) 利用原型输出动态特性和模型输出动态特性进行比较,后者是以辨识模型算得的动态特性。按均方误差计算,如误差在规定允许范围以内即可认为模型成立。

(2) 利用不同工况或不同时间区段采集的数据,分别建立模型。如动态特性基本相符则模型基本可信。

(3) 在同一组模型辨识数据中,增加辨识使用的数据长度或辨识迭代次数。如果模型代价函数 J_θ 接近收敛,不再显著下降,也可认为模型基本可信。

(4) 检验原型与模型的输出残差序列 $\{e(k)\}$ 的白色性。如残差序列特性属于零均值的白噪声序列,也可认为模型可用。

更主要的是最终模型校验,应将模型的动态仿真计算与实际系统的动态特性相比较,看其是否吻合。例如在电力系统中,可以用开断线路、起停机组的动态特性,或用系统中发生的真实故障来进行校验。

整个辨识过程的框图如图 1.5 所示。

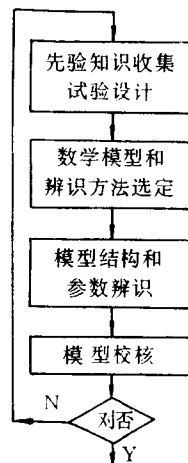


图 1.5 辨识过程框图

1.5 系统辨识在电力系统中的应用

系统辨识是一门新兴的学科,而电力系统则是一个较成熟的工业领域,所以将系统辨识技术应用到电力系统,有一个相互结合和发展的过程。目前还处于起始阶段,但可以预期有广泛的应用前景。总的说,系统辨识可以为电力系统的数据处理、计算分析、在线调试、闭环控制、故障诊断、工况预报及动态等值等方面提供新的手段。它将促进电力系统监控技术和动态建模技术的新变革,并对提高电力系统运行的可靠性和提高经济效益起重大作用。其有关应用方面,归纳如下。

(1) 动态信息的测试和处理。随着电网中各类新型用电设备的投入,电力系统中的谐波问题更为突出。利用频谱分析研究各次谐波并寻求对策已成当务之急。此外,如系统中的故障录波分析、大机组次同步扭振分析,都要用到频谱分析技术。

(2) 电力系统计算分析用的数学模型。电力系统中的离线分析计算是生产调度决策的重要手段,而数学模型及参数则是计算的主要依据,但电力系统中传统的数学模型是用物理机理写出,其参数则采用设计值,由出厂铭牌数据给出(如发电机、励磁机参数等),由于电机的铁磁元件在运行中存在饱和、磁滞、涡流等现象,实际参数与设计值有较大差异,因此必将直接影响计算分析的准确度和可信度。而利用动态辨识建模则可以做到模型参数符合运行方式,所以被认为是当前辨识技术用于电力系统中最有前途的方面。目前我国利用辨识技术建立电力系统四大参数(即发电机、励磁系统、原动机及调速系统、综合负荷)数据库的工作已在积极研究进行中。

(3) 电力系统及其控制系统的在线调试。现代电力系统的自动控制系统日趋复杂,一些新型的控制系统,诸如电力系统稳定器(PSS),静止无功补偿器(SVC)、直流输电控制系统(HVDC),已陆续在系统中投入运行。为了使这些装置发挥作用,必须依靠在线测试其动态

特性和数学模型并进一步调整和优化其参数。国内一些生产部门也已开始采用这一新技术。

(4) 自适应控制。适应性控制被认为是当今控制领域中最具有吸引力的一种方式。特别是由于电力系统运行方式的随机性变动,采用适应性控制的随运行工况变动自动寻优的工作原理更其适合。在自适应控制系统中,在线辨识器是其核心环节。有关科研部门已在从事这方面的研究。

(5) 故障诊断(在线监控)。随着微机技术的发展,已逐步可以实现在线检测系统的运行工况和测试装置的参数结构,并对此作出判断,从而检测事故苗头于未然,这是当前提高运行水平的重要手段。在故障诊断中,作为检测手段的运行状态观测器和参数辨识器都要用到辨识技术。

(6) 工况预报。如目前正在研究应用的中、长期负荷预报,其负荷建模就是用辨识原理建成的。

(7) 电力系统动态等值。在大系统的离线计算分析中为缩短机时和节约内存,需要对被研究系统以外部分按一定条件进行动态等值。一些在线实时分析的课题中,计算时间是突出问题,更需要等值处理。目前在电力系统等值的研究中,有三种方法:即特征值等值,同摆等值和估计等值。最后一种方法即属于系统辨识范畴。其特点是无需提供详细的外部系统模型,故被认为是较有发展前途的方法。

第二章 动态系统的数学模型

2.1 概 述

众所周知,一个动态系统按其描述方法和分析定义域的不同可以表达成不同的数学方程。所以在系统辨识过程中,弄清各类数学模型的表达形式、相互转换及其应用场合将是十分必要的。

按照系统所加信息的特征可分为连续模型与离散模型两大类。连续系统所加的是连续信号,生产过程中绝大部分系统属于这一类,它们以连续模拟量的参数作为建模的依据。离散系统是指系统所加信号是离散的(或断续的),计算机进行数字控制的系统即属于这一类,它们以离散数字量的参数作为建模的依据。随着计算机应用的发展,离散数学模型日趋重要,但当前的一些传统工业,如电力、化工等领域中连续数学模型还占主要地位。

按照系统分析的定义域可分为时域和复域(频域)两种。经典法中微分方程和现代控制法中的状态空间方程都是属于时域的范畴,离散模型中的差分方程和离散状态空间方程也属此。属于频域范畴的则是传递函数和传递函数阵,与其相应的在离散模型中有 Z 变换的传递函数。一般在经典控制论中多采用频域传递函数建模,而在现代控制论中则采用时域状态空间方程建模。

此外,动态系统尚可按描述模型的方式分为参数型和非参数型。所谓参数型是指用模型的系数来描述系统,如微分方程和传递函数的 A_i, B_i 系数,状态空间方程中的系数矩阵 A, B, C, D 。非参数型是指模型用响应曲线来描述,如时域中的脉冲响应、频域中的频率响应。从发展上看,在以往动态系统的设计和控制分析中非参数模型曾得到广泛的应用,即使在目前也有很多实际的用途,但随着计算技术的发展,参数型模型已是发展的主流。而辨识技术可为非参数模型转化为参数模型提供手段,可以用动态拟合的方法,从响应曲线求取传递函数或系数矩阵。

在本章中,我们将把线性动态系统分成连续型和离散型来进行讨论,并提出各种建模方式,其中,每一种数学模型都以不同的方式表述了系统的动态特征。这些数学模型包括:连续模型中的微分方程、传递函数、状态空间方程、脉冲响应和卷积;离散模型中的差分方程、 Z 变换传递函数、离散状态空间方程、频率响应等。由于这些数学模型之间存在着对应关系,所以,只要系统的任一种数学模型被建立后,就可以认为它已经完全被辨识了(或确定了数学模型),而各种数学模型之间可以相互转换。

2.2 连续系统的经典描述

2.2.1 连续系统的微分方程和传递函数

一个线性连续的动态系统可以分别用时域的微分方程或频域的传递函数来表示。

连续时间、线性、定常系统,在单输入量 $u(t)$ 和单输出量 $y(t)$ 的情况下,如图2.1所示。

它的动态特性可以用 n 阶微分方程表示, 即

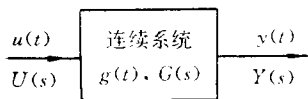


图 2.1 单输入输出系统

$$\begin{aligned} \frac{d^n}{dt^n}y + a_{n-1}\frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}}y + \cdots + a_1\frac{d}{dt}y + a_0y \\ = b_m\frac{d^m}{dt^m}u + b_{m-1}\frac{d^{m-1}}{dt^{m-1}}u + \cdots \\ + b_1\frac{d}{dt}u + b_0u \quad n \geq m \end{aligned} \quad (2-1)$$

微分方程的阶和系数 $a_j (j=1, \cdots, n-1)$, $b_j (j=1, \cdots, m)$ 决定了系统的动态特性, 它们也就是系统需要辨识的参数。利用古典法, 可求出在任意输入信号 $u(t)$ 下系统输出的解 $y(t)$, 但比较麻烦。这种用微分方程描述系统动态过程的方法称为时域法。

若对(2-1)式进行拉氏变换, 在假定初始条件为零的条件下, 可写成复域形式为

$$\begin{aligned} (s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots + a_1s + a_0)Y(s) \\ = (b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \cdots + b_1s + b_0)U(s) \end{aligned} \quad (2-2)$$

其传递函数定义为

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{Y(s)}{U(s)} \\ &= \frac{b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \cdots + b_1s + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots + a_1s + a_0} \end{aligned}$$

简写为

$$G(s) = \frac{B(s)}{A(s)} \quad (2-3)$$

式中 $A(s)$, $B(s)$ 分别为传递函数的分母多项式与分子多项式。

当对(2-1)式进行傅氏变换后, 可得频率响应函数为

$$H(f) = \frac{Y(f)}{U(f)} \quad (2-4)$$

(2-3)、(2-4)两式将是我们在频域上进行系统辨识的基本关系式。

方程(2-2)的描述可推广到多输入多输出系统。考察一 l 个输入、 r 个输出的系统(图 2.2a), 定义输入向量 $U(s)$ 和输出向量 $Y(s)$ 为

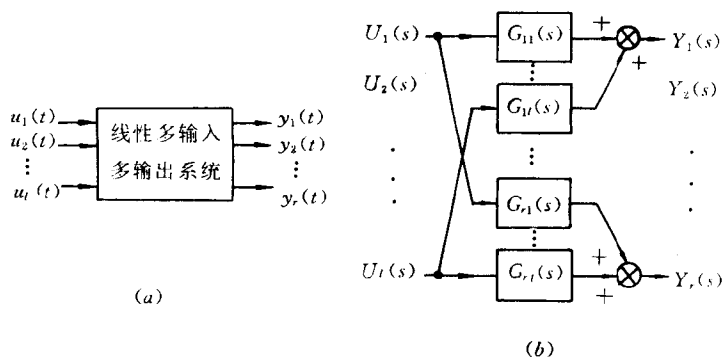


图 2.2 多输入输出系统

(a) 框图; (b) 传递矩阵图