

电力系统非线性辨识

鞠 平 著



河海大学出版社

电力系统非线性辨识

鞠 平 著

河海大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电力系统非线性辨识/鞠平著. - 南京:河海大学出版社,1999.12

ISBN 7-5630-1235-4

I.电… II.鞠… III.电力系统-系统辨识,非线性 IV
.TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 76402 号

河海大学出版社出版发行

(南京西康路 1 号 邮政编码:210098)

河海大学印刷厂印刷 江苏省新华书店经销

1999 年 12 月第 1 版 1999 年 12 月第 1 次印刷

开本:850×1168 毫米 1/32 印张:8

字数:208 千字 印数:1~2 000 册

定价:16.00 元(精) 12.00 元(平)

本书为

国家自然科学基金项目成果

(项目编号 59677014)

内 容 提 要

本书的宗旨是:针对电力系统的特点,以计算机技术为支撑,以现代辨识理论为基础,研究电力系统非线性辨识问题。本书的总体思路是:直接针对非线性本质,间接借鉴线性理论;从可辨识性分析入手,以模拟进化方法为工具;以理论为先导,以应用为目标。实际上,这些也是本书的重要特点。

本书共分 6 章。第一章介绍一些基本概念。第二章给出可辨识性的概念和定义,研究线性系统和非线性系统可辨识性分析方法。电力系统模型参数的可辨识性研究在国内外属首次,具有重要的理论意义和应用价值。第三章率先将模拟进化方法引入电力系统辨识,提出了电力系统非线性参数辨识的统一方法,该方法具有全局收敛性和强鲁棒性。第四至第六章则分别针对同步发电机模型、动态等值模型、电力负荷模型进行参数辨识研究,得到了一系列明确而重要的结果,并给出了大量仿真算例和应用实例。

本书可供电力、电机、自动化行业的科技工作者、工程技术人员和研究生阅读参考。

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 模型与辨识的基本概念	(1)
1.1.1 模型	(1)
1.1.2 建模	(1)
1.1.3 辨识	(2)
1.2 电力系统参数辨识	(3)
1.3 本书主要内容	(5)
第二章 系统模型的可辨识性分析	(8)
2.1 可辨识性的基本概念	(8)
2.1.1 两个例子	(8)
2.1.2 通用完整模型	(10)
2.1.3 可辨识性定义	(11)
2.2 线性模型的可辨识性分析	(11)
2.2.1 拉氏传递函数法	(12)
2.2.2 台劳级数展开法	(15)
2.2.3 马尔柯夫参数矩阵法	(16)
2.2.4 模态矩阵法	(17)
2.2.5 模型穷举法	(19)
2.3 非线性模型的可辨识性分析	(20)
2.3.1 输出量高阶求导法	(20)
2.3.2 线性化法	(22)
2.3.3 等高线法	(23)
第三章 系统模型的参数辨识方法	(26)
3.1 引言	(26)
3.1.1 电力系统辨识方法概述	(26)

3.1.2 优化搜索方法概述	(27)
3.2 参数辨识的遗传法	(30)
3.2.1 基本原理	(30)
3.2.2 对遗传算法的改进	(34)
3.2.3 应用于参数辨识	(35)
3.3 参数辨识的进化策略法	(39)
3.3.1 基本原理	(39)
3.3.2 应用于参数辨识	(40)
3.4 参数辨识的模拟淬火法	(42)
3.4.1 基本原理	(42)
3.4.2 应用于参数辨识	(43)
3.5 几种模拟进化方法的比较	(44)
第四章 同步发电机模型的辨识	(48)
4.1 引言	(48)
4.1.1 研究意义	(48)
4.1.2 研究概况	(48)
4.2 同步发电机模型	(52)
4.2.1 概述	(52)
4.2.2 六阶 BPA 模型	(53)
4.2.3 五阶综合稳定计算模型	(54)
4.2.4 三阶机电暂态模型	(55)
4.3 同步发电机模型的可辨识性	(56)
4.3.1 电气参数的可辨识性	(56)
4.3.2 机械参数的可辨识性	(60)
4.4 同步发电机模型的参数辨识	(65)
4.4.1 基本原理	(65)
4.4.2 浙江衢化热电厂应用实例	(66)

第五章 动态等值模型的辨识	(69)
5.1 引言	(69)
5.1.1 研究意义	(69)
5.1.2 研究概况	(70)
5.2 动态等值模型	(73)
5.2.1 动态等值模型结构	(73)
5.2.2 动态等值模型方程	(73)
5.3 动态等值模型的可辨识性	(78)
5.3.1 动态等值模型的可辨识性分析	(78)
5.3.2 增加条件解决可辨识性问题	(83)
5.4 动态等值模型的参数辨识	(85)
5.4.1 动态等值模型仿真验证	(85)
5.4.2 几个重要问题分析	(92)
5.4.3 华中电网现场实验验证	(105)
第六章 电力负荷模型的辨识	(107)
6.1 引言	(107)
6.1.1 研究意义	(107)
6.1.2 从负荷的影响看系统对负荷建模的要求	(108)
6.1.3 负荷建模的两条途径	(111)
6.2 电力负荷模型	(115)
6.2.1 静态负荷模型	(115)
6.2.2 机理动态负荷模型	(116)
6.2.3 非机理动态负荷模型	(127)
6.3 电力负荷模型的可辨识性	(132)
6.3.1 静态负荷模型的可辨识性	(132)
6.3.2 感应电动机综合负荷模型的可辨识性	(136)
6.3.3 非机理动态负荷模型的可辨识性	(144)
6.4 电力负荷模型的参数辨识	(156)
6.4.1 感应电动机负荷模型的辨识结果	(157)

6.4.2 非机理动态负荷模型的辨识结果	(163)
附录 A 电力系统非线性辨识软件界面简介	(168)
A1 辨识系统功能	(168)
A2 人机界面设计基础	(170)
A3 同步电机辨识软件界面	(173)
A4 动态等值辨识软件界面	(178)
A5 电力负荷辨识软件界面	(180)
附录 B 模拟进化方法源程序	(184)
B1 遗传(GA)方法源程序	(184)
B2 进化策略(ES)方法源程序	(201)
B3 模拟淬火(SA)方法源程序	(228)
参考文献	(236)
后 记	(242)

第一章 绪 论

1.1 模型与辨识的基本概念^[1,2]

1.1.1 模 型

模型是对实际系统本质的简化描述,这包含两层涵义:一是模型必须能够正确描述系统的本质;二是模型应该尽量简单。模型的精确性和简单性之间往往存在着矛盾,一般需要根据对模型的要求找出这两者的折衷解决办法,这经常成为建立系统模型的关键。

现有的模型大体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,通过模型试验来研究系统的特性,电力系统动态模拟就是典型的例子。数学模型以数学表达式来描述实际系统的特性,通过数字仿真计算来分析其过程。物理模型具有物理概念明确、能自然包含各种复杂物理因素的优点,但模型实验代价高且费时费力,有的情况因受到实际限制而不能进行模拟。数学模型虽然有时难以包含所有物理因素,但随着计算机技术的迅速发展,用数字仿真计算进行分析研究已愈来愈显示出其简便、灵活、代价小等优越性。因此,这两种模型因特点互补而并存,甚至发展出将两者综合在一起的混合模拟技术。

1.1.2 建 模

数学模型的建立通常有两种途径。

一种途径是按机理建模,即根据系统的内在机理,按照基本物

理、化学等定理和定律来导出模型,所得模型称之为机理模型,比如描述同步电机过渡过程的派克(Park)方程、描述感应电动机的滑差方程等。按机理建模的优点是:用连续时间模型(如微分方程)描述,模型参数的物理概念清晰,便于计算和分析。但机理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和一些实际因素,有时难以描述或无法计及。例如,负荷的一些复杂因素,发电机的饱和、涡流、非线性影响等。

另一种途径是根据建模对象的运行及试验数据建立模型,这类方法称之为辨识建模,所得模型称之为非机理模型,也称为输入输出(IO)模型。辨识建模的特点是:无需确切知道系统的内部结构和参数;用现场辨识(测试)动态建模,可计及运行中的一些实际因素;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,但物理意义不明确。

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,在建模过程中可以对系统内部过程所知不多,因此可以把系统(也称过程)看成“黑箱”。与此相反,我们把机理建模称为“白箱”建模。对于许多系统(如电力系统)来说,其内部机理大体是已知的,因此可按机理列出数学模型方程,但模型参数却不知道。这时可按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”建模。灰箱建模既具有物理概念明确的优点,又可以获得系统的实际参数,因此应该尽量采用。

1.1.3 辨 识

L. A. Zadeh 曾给辨识下过这样的定义:“辨识就是在输入和输出的基础上,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:输入输出数据、模型类、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,要按照 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。从实用观点出

发,1978年 L. Ljung 给辨识下的一个实用性定义是:“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^[2]。

辨识的基本过程如图 1.1 所示,即利用待测系统动态过程提供的输入、输出数据,不断调整模型结构和参数,使模型结果尽量接近实际结果。图中 X 是输入向量, Y 是输出向量, ω 是量测噪声, Z 是误差向量, θ 是模型参数向量(包含结构)。

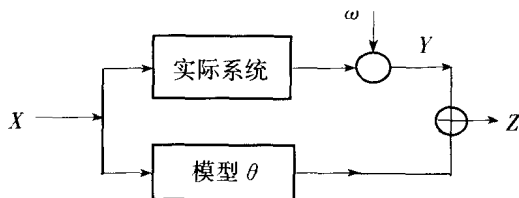


图 1.1 辨识过程

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。

此外,从辨识数据的处理过程看,辨识又可分为离线辨识和在线辨识两种。前者先在现场记录数据,再离线用计算机处理数据以获得数学模型。后者用微机在线采集并处理数据求得参数模型,并可进一步用于适应性控制,构成在线辨识数学模型。

1.2 电力系统参数辨识

随着我国电力系统的迅猛发展,超高压输电线路与大容量机

组的相继投入,给电力系统动态稳定计算、策略研究、安全监控、事故分析等带来更高的要求。在计算机与高级应用软件不断发展的今天,正确的元件模型和符合实际的电网参数则是基础。目前所用的系统计算程序虽然都给出了发电机、励磁系统等数学模型,但缺少实际参数,在计算中只能查用工厂或手册的典型数据,或不得已采用简化模型。由于数据不全,且均未计及涡流、磁滞、饱和等运行工况的影响,所以计算结果常与实际工况不符,严重影响计算的准确度和可信度,这些情况已为国内外一些文献所证实。例如在动、暂态稳定计算中,采用不考虑励磁系统作用的 E'_q 恒定模型,多数情况下使计算结果偏于保守,不能挖掘机组潜力。又如现场试验证实,计及饱和效应的发电机稳态电抗 x_d 实测值可比不计饱和效应的 x_d 设计值小 25% 左右,这将对机组的稳态运行角度及静态稳定储备产生显著的影响。有鉴于此,近年来国内电网对四大参数(即发电机、励磁系统、调速系统和综合负荷模型的参数)测试和动态建模的呼声相当高,在 1990 年全国电网会议上被列为急需解决的课题之一。

文献[1]对电力系统参数辨识的理论、方法和应用作了很好的阐述,为我国这方面的研究作出了重要贡献,也为今后的工作奠定了坚实的基础。

电力系统本质上属于高阶、非线性、复杂的随机系统范畴,所以把参数辨识技术用于电力系统要比其它工程领域显得困难。此外,电力系统的动静态过程属于快过程,给在线辨识在速度和方法上带来困难。所有这些,使辨识技术在电力系统领域中的应用不如其它领域。

电力系统辨识按对象的复杂程度分为两类^[1]:第一类为单个元件的测试辨识;第二类为复杂系统的动态等值。同步发电机、励磁系统的动态响应试验、传递函数测定、模型测试求取都属于第一类。而对于复杂的、高阶的电力系统,一般难于直接辨识其原型,通常用降价的模型系统来动态拟合原型系统,即所谓动态等值。

电力负荷建模也属于后者。一般来说,单个元件的测试辨识比之复杂系统的动态等值要简单些。因为前者往往范围小、元件单一且机理清楚,而后者则范围大、元件多且复杂。

由于系统辨识方法中,最小二乘估计、卡尔曼滤波等行之有效的估计方法,多数适宜于线性系统,因此,以往电力系统辨识大都采取线性化一类的近似方法,这就容易产生准确性及收敛性等问题。

在电力系统辨识研究中,还常常遇到一些模型参数变化大,有时结果明显不合理的现象。这很值得分析研究。因为在电力系统中,系统元件参数的准确与否对很多问题的结论影响较大,有时甚至导致结论性的错误,这是应用者所不希望的。造成参数辨识不稳定现象的原因可能是多方面的,笔者认为其主要原因有两方面:

(1)模型参数的可辨识性,即能否根据测量数据唯一确定模型参数。在根据测量数据进行参数辨识的过程中,人们自然很想知道能否成功地辨识出模型参数。当模型本身的结构决定了参数不能唯一辨识(包括参数变化很大的情况),则仅通过扰动中的测量数据来辨识模型参数将会事倍功半,甚至是徒劳的。因此模型的可辨识性问题应该受到广泛重视。

(2)辨识方法的鲁棒性,即在各种不同的情况下辨识方法能否获得好的结果。当参数唯一可辨识时,好的方法应能收敛并得到相同或相近的结果。

以往这两方面的研究还很不够,这也是本书要重点解决的问题。

1.3 本书的主要内容

本书成果是在国家自然科学基金资助下取得的,同时也吸收了受洪堡基金资助在德国期间的部分研究成果。获1999年度国家电力总公司科技进步二等奖。

本书的宗旨是针对电力系统的特点,以计算机技术为支撑,以现代辨识理论为基础,研究电力系统非线性辨识问题。总体思路是:直接针对非线性本质,间接借鉴线性理论;从可辨识性分析入手,以模拟进化方法为工具;以理论为先导,以应用为目标。实际上,这也正是本书的重要特点。主要内容如下:

第一章介绍一些基本概念。

第二章给出可辨识性的概念和定义,研究线性系统 and 非线性系统可辨识性分析方法。其中,提出了非线性系统可辨识性分析的两种新方法,即线性化方法和等高线方法。电力系统模型参数的可辨识性研究在国内外属首次,开辟了电力系统辨识新的研究领域。其理论意义在于为电力系统参数辨识提供理论指导和依据,实用价值在于可以使电力系统辨识工作者做到心中有数、事半功倍。

第三章中率先将模拟进化方法引入电力系统辨识,提出了电力系统非线性模型参数辨识的统一方法。其最大的优点是全局收敛性和强鲁棒性,虽然时间较长,但在计算机高速发展的今天已不是大问题。文中对几种模拟进化方法进行了比较,给出了推荐意见。

第四章研究同步发电机模型的辨识问题。首先分析其可辨识性,得出电气参数唯一可辨识而机械参数有时不唯一可辨识有时难以辨识的重要结论。然后将第三章提出的方法应用于同步发电机模型参数辨识,通过对浙江衢化热电厂的应用检验了可辨识性分析的结论以及辨识方法的有效性,并揭示了一些规律。

第五章研究电力系统动态等值模型的辨识问题,提出了动态等值模型,分析了这种模型的可辨识性,并提出了解决这种模型不唯一可辨识的办法。将模拟进化辨识方法应用于动态等值问题,进行了单机仿真、全华中电网仿真以及现场试验,结果表明,提出的动态等值模型合理,可辨识性分析结论正确,辨识方法有效。还研究解决了一系列有关的理论和应用问题。

第六章研究电力负荷模型的辨识问题。首先对现有负荷模型进行比较研究,为电力负荷模型的选择提供参考。然后分析现有各种主要负荷模型的可辨识性,并提出了解决三阶感应电动机综合负荷模型不唯一可辨识的办法。将模拟进化辨识方法应用于负荷模型,通过仿真算例研究了影响辨识结果的因素,对国内外实际负荷进行了应用研究。结果表明,直接辨识与可辨识性理论分析一致,非机理负荷模型既可用于描述感应电动机类负荷模型也可用于描述冬季加热型负荷。

第四至第六章的应用结果表明:从可辨识性分析入手、以模拟进化方法为工具可以较好地解决参数辨识不稳定问题。

第二章 系统模型的可辨识性分析

在电力系统辨识研究中人们常常发现:模型的参数有时变化很大,但不同参数模型的动态响应却相差不大,而且与实测的结果也吻合甚好。这表明该模型能够描绘系统行为,但对该模型的研究工作并未结束。因为在电力系统分析中,模型参数准确与否对很多问题的结论影响较大,有时甚至导致定性不同。同时研究者在根据测量数据进行参数辨识的过程中自然很关心:他能否成功地辨识出参数;当模型本身的结构决定了参数不能唯一地辨识出来,则仅通过测量数据来辨识参数多半是不会成功的。因此,电力系统非线性模型的可辨识性问题应该得到深入的研究和广泛的重视。但是,以往却未见有关的研究报道。而从可辨识性分析入手、以模拟进化方法为工具,则是本书的基本研究思路,也是本书的特点。

本章首先介绍一些可辨识性的基本概念,然后介绍线性模型的可辨识性分析方法,最后给出非线性模型可辨识性分析的三种方法。

2.1 可辨识性的基本概念^[3]

2.1.1 两个例子

在给出正式定义之前,我们先给出一个示例来介绍可辨识性的概念。

例 2.1 开环系统

考虑一个简单的一阶线性模型: