

· 湖北省学术著作出版专项资金资助项目 ·

水电科技前沿研究丛书 丛书主编 周建中 张勇传



水电机组系统建模、参数辨识 及调速和励磁控制方法

周建中 李超顺◎著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

· 湖北省学术著作出版专项资金资助项目 ·

水电科技前沿研究丛书 丛书主编 周建中 张勇传



水电机组系统建模、参数辨识 及调速和励磁控制方法

周建中 李超顺◎著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书针对大型水轮发电机组控制系统模型辨识与先进控制策略研究面临的关键科学与技术问题,按照线性系统辨识、非线性系统辨识、经典控制理论、模糊控制与非线性控制的结构体系进行了全面阐述。

本书适合从事非线性系统建模与辨识、自动控制、水电生产过程自动化等方向相关学科高年级本科生、研究生学习参考使用,同样也非常适合从事水电机组辨识、控制、建模工作的研究人员和工程技术人员参考借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

水电机组系统建模、参数辨识及调速和励磁控制方法/周建中,李超顺著. —武汉:华中科技大学出版社,2016.1

(水电科技前沿研究丛书)

ISBN 978-7-5609-9100-9

I. ①水… II. ①周… ②李… III. ①水轮发电机-发电机组-系统建模-研究 ②水轮发电机-发电机组-调速-研究 ③水轮发电机-发电机组-励磁控制-控制方法-研究 IV. ①TM312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 288122 号

水电机组系统建模、参数辨识及调速和励磁控制方法

Shuidian Jizhu Xitong Jianmo Canshu Bianshi Ji Tiaosu He Lici Kongzhi Fangfa

周建中 李超顺 著

策划编辑:姜新祺 谢 婧

责任编辑:谢 婧

封面设计:刘 卉

责任校对:何 欢

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321913

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:湖北恒泰印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:19.25 插页:2

字 数:410 千字

版 次:2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:69.80 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

序

水轮发电机组的安全运行涉及水力、电力、机械、结构等诸多方面,是一类多场耦合复杂非线性动力学问题,迄今人们对它的了解还不够,尤其是在使大型水轮发电机组安全、稳定、高效运行方面还有许多亟待研究的理论问题和急需解决的实践问题。

尽管国内外对水轮发电机组发电过程控制、故障诊断等科学问题开展了一系列研究,即使随着我国大规模水电站群不断建成和巨型水轮发电机组不断投运,人们仍缺乏对机组水-机-电耦合系统复杂动力学行为机理的深刻认识,至今还没有系统的理论依据与技术对策,这将严重影响水电站及其互联电力系统的安全,并成为制约机组安全、经济运行的技术瓶颈。此外,负荷需求的不确定性对水轮发电机组运行产生不利影响的动力学效应、机组控制策略对水-机-电耦合系统故障演变模式的影响等学科交叉领域的研究严重滞后,迫切需要对水轮发电机组动力学问题进行深入研究,揭示水-机-电耦合系统运行故障的产生机理、演化过程及发展模式。因此,从复杂性科学理论的视点凝炼水轮发电机组动力学问题,阐明机组状态监测、故障诊断和优化控制等研究中涉及的科学问题,解析水轮发电机组复杂非线性动力学行为,揭示水-机-电耦合系统非平稳故障演化规律,明晰系统故障演化发展的性质、程度和范围,提出故障诊断的先进理论与方法,实现机组控制策略对机组故障蔓延、恶化的有效抑制,形成机组故障监测、智能诊断与发电优化控制有效融合的多维调控理论与技术体系,具有重要的理论意义和工程应用价值。

本书是作者十多年来从事水轮发电机组故障诊断研究工作的总结,不仅系统、深入地介绍了作者的理论研究和实践探索,而且更多反映了当前水轮发电机组故障诊断研究的动态以及作者在该领域独到的见解和取得的研究成果,提出的理论与方法更加前进了一步,并在工程实践中得到应用和检验,体现了作者宽广的学术视野和对前沿研究方向的把握能力。全书从机组复杂动力学问题的基础性研究着手,对机组的振动机理与故障演化规律,机组非平稳故障信号分析与特征提取,智能故障诊断方法以及机组状态监测与故障诊断系统等方面的研究进行了全面的论述,具有很强的系统性,是一本理论结合实际、具有重要学术价值的著作。需要指出的是,大型水轮发电机组安全、稳定运行所涉及的理论及方

法具有很强的学科交叉性,其中的动力学问题、信号处理问题、模式识别问题是很多学科都在关注的基础性科学与技术问题。因此,该书的出版不仅丰富和发展了水轮发电机组安全、稳定运行理论研究的内涵和外延,而且是现代自然科学交叉学科的重要著作,是一部面向基础研究,面向应用,介绍新理论、新进展、新趋势的专著,可为相关研究人员提供借鉴和指导。

希望本书对推动相关领域的学术研究和工程应用技术发展能起到重要作用。

中国工程院院士:

梁维燕

2015 年 10 月

前 言

水电能源作为一种蕴含量巨大且可再生的清洁能源,在我国能源结构中占有重要地位。据统计我国水电能源蕴含量世界第一,经济可开采及技术可开采量也均为世界第一。根据国家能源“十二五”发展规划,至2020年常规水电装机容量将达3亿千瓦,开发程度达到55%。在全球化石能源逐步减少,环境问题日益严峻以及我国大力发展低碳经济的背景下,水电能源的重要性日益凸显。在大力开发水电能源的同时,一个引人注目的发展趋势是超大容量机组不断投运,如三峡电站机组单机容量70万千瓦,金沙江上开发的向家坝水电站单机容量达到80万千瓦,更大容量的机组也在研究开发中。在大规模超大容量机组并网运行背景下,机组的控制问题不仅关系机组自身的安全稳定,而且也对电网的安全稳定运行产生重要影响。

我国已建及在建的水电站存在单机容量大、引水管道长、水流惯性巨大、布置复杂等特点,控制系统呈现非最小相位、非线性强等特性,精确模型描述十分困难,导致目前国内相关研究往往采用简化模型,无法真实反映机组控制系统的动态响应特性。水轮发电机组控制系统辨识是一个重要的基础性研究课题,其意义在于提供了一种获取系统精确模型的理论方法及技术手段,是机组控制、仿真、过渡过程计算与电力系统分析等研究的基础。因此,通过系统辨识研究建立精确的水轮发电机组控制系统模型,进一步研究机组的先进控制策略,对于提高机组控制系统动态响应品质和运行稳定性具有重要的理论意义及工程应用价值。

本书针对大型水轮发电机组控制系统模型辨识与先进控制策略研究面临的关键科学与技术问题,按照线性系统辨识、非线性系统辨识、经典控制理论、模糊控制与非线性控制的结构体系进行了全面阐述。全书共分八章,第1章阐述了水轮发电机组辨识与控制研究现状,揭示辨识与控制理论发展趋势与最新研究方向;第2章讨论分析了水轮机调节系统和同步发电机励磁调节系统的非线性模型;第3章针对工程应用中广泛关注的控制系统线性模型辨识问题,研究提出了基于数学变换的参数辨识方法;第4章提出并运用引力搜索算法、混沌粒子群算法及混沌自适应差分进化算法等智能优化方法解决机组控制系统非线性模型辨识问题;第5章论述了非线性模型的模糊辨识理论,提出了机组控制系统非线性模型的高精度模糊辨识策略;第6章研究了同步发电机励磁调节系统的控制

问题,提出了控制参数优化策略和模糊控制策略;第7章以提升水轮机调节系统的控制品质为目标,研究并提出了水轮机调节系统的自适应优化控制、模糊控制、滑模控制和预测控制等先进控制方法;第8章阐述了水轮发电机组控制系统测试原理与方法,重点介绍了作者开发的水轮机调节系统仿真测试系统和励磁仿真测试系统。

本书相关研究内容主要来源于作者承担的国家自然科学基金项目“水力发电机组复杂非线性动力学建模与诊断方法(51079057)”“基于模糊辨识与多模型描述的抽水蓄能机组控制系统故障诊断方法研究(51109088)”“抽水蓄能机组的集成故障诊断非线性预测控制研究(51479076)”,以及其他国家科技支撑计划课题、国家自然科学基金重点项目和面上项目、企业委托项目的最新研究成果,并在工程实践中获得广泛应用。本书适合从事非线性系统建模与辨识、自动控制、水电生产过程自动化等方向相关学科高年级本科生、研究生学习参考使用,同样也非常适合从事水电机组辨识、控制、建模工作的研究人员和工程技术人员参考借鉴。

在本书的撰写过程中,周建中教授主要负责第1、2、6、7、8章的撰写工作,李超顺副教授主要负责第3、4、5章的撰写工作。作者所在实验室近年来毕业和在读的部分博士研究生也参与了本书相关章节的撰写工作,寇攀高博士参与了第4、7章撰写,贺徽博士参加了第2、6章撰写。周建中教授负责全书大纲的拟定与审定工作,并具体负责统稿和定稿。夏鑫、张炜博、付文龙、薛小明等博士生协助周建中教授负责全书校订和插图绘制工作。书中的一些内容是作者在相关研究领域工作成果的总结,在研究过程中得到了相关单位以及有关专家、同仁的大力支持,同时本书也吸收了国内外专家学者在这一研究领域的最新研究成果,在此一并表示衷心的感谢。

由于系统辨识与控制理论和方法在实际应用中受影响因素较多,加之作者水平有限,书中不当之处在所难免,恳请广大专家同行和读者批评指正。

作 者

2015年10月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 系统辨识理论与水电机组控制系统辨识	(2)
1.1.1 系统辨识理论	(2)
1.1.2 水电机组控制系统辨识研究现状	(6)
1.2 水电机组控制方法与研究现状	(10)
1.2.1 水轮机调速系统控制研究现状	(10)
1.2.2 水电机组励磁控制研究现状	(12)
第 2 章 水电机组控制系统模型特性分析	(16)
2.1 水轮机调速系统数学模型	(16)
2.1.1 调速器数学模型	(16)
2.1.2 压力引水系统数学模型	(20)
2.1.3 水轮机数学模型及特性分析	(22)
2.1.4 水轮发电机及负载数学模型	(27)
2.1.5 不同调节模式下水轮发电机调速系统模型	(29)
2.2 水轮机调速系统仿真平台	(31)
2.2.1 线性系统仿真	(31)
2.2.2 非线性系统仿真	(32)
2.2.3 仿真实例	(33)
2.3 同步发电机励磁系统数学模型	(37)
2.3.1 同步发电机模型	(37)
2.3.2 电力网络模型	(45)
2.3.3 励磁系统的模型及特性研究	(47)
2.4 同步发电机励磁系统仿真平台	(52)
2.4.1 线性系统仿真	(52)
2.4.2 非线性系统仿真	(53)
第 3 章 水电机组控制系统线性模型参数辨识	(54)
3.1 基于微分及积分变换的线性模型参数辨识	(55)
3.1.1 微分变换法	(55)
3.1.2 积分变换法	(60)

3.2 基于多新息理论的水轮机调速系统参数辨识	(64)
3.2.1 多新息最小二乘辨识理论	(65)
3.2.2 水轮机调速系统多新息最小二乘算法参数辨识	(67)
3.2.3 仿真实验及参数辨识实例	(71)
第4章 水电机组控制系统非线性模型参数辨识	(76)
4.1 基于引力搜索的调速系统非线性模型辨识	(77)
4.1.1 引力搜索算法及其改进	(77)
4.1.2 基于 IGSA 的调节系统参数辨识	(80)
4.2 基于改进粒子群优化算法的水轮发电机及其调速系统参数辨识	(90)
4.2.1 粒子群优化算法及量子粒子群优化算法	(91)
4.2.2 基于 IQPSO 的水轮发电机调速系统参数辨识	(92)
4.3 基于 PSO-QO 的同步发电机非线性模型参数辨识	(100)
4.3.1 粒子群-量子操作优化算法	(100)
4.3.2 水轮发电机数学模型	(101)
4.3.3 辨识策略及适应度函数	(102)
4.3.4 实例分析	(103)
4.4 基于动态系统设计的同步发电机非线性模型参数辨识	(112)
4.4.1 同步发电机数学模型及可辨识性分析	(112)
4.4.2 基于动态系统设计的参数辨识基本思想	(114)
4.4.3 以 Hopfield 神经网络为例的动态系统参数辨识	(116)
4.4.4 实例分析	(118)
第5章 水电机组控制系统非线性模型的模糊辨识	(126)
5.1 模糊模型辨识理论	(126)
5.1.1 T-S 模糊模型	(126)
5.1.2 混沌优化策略	(127)
5.2 基于变尺度混沌优化的模糊模型辨识	(128)
5.2.1 T-S 模糊模型结构	(128)
5.2.2 T-S 模糊模型参数	(128)
5.2.3 模型结构和参数的一体化辨识	(129)
5.2.4 辨识实例	(129)
5.3 基于模糊 C 回归模型聚类算法的辨识策略	(131)
5.3.1 新型模糊 C 回归聚类算法(NFCRMA)	(131)
5.3.2 前提部分参数辨识	(133)
5.3.3 结论部分参数辨识	(134)

5.3.4 算例分析	(135)
5.4 基于超平面原型聚类的模糊模型辨识	(140)
5.4.1 基于超平面原型的模糊聚类	(140)
5.4.2 T-S 模糊模型及其辨识方法	(142)
5.4.3 水轮机调速系统的模糊模型辨识	(142)
第 6 章 水轮机调速系统控制方法研究	(147)
6.1 基于 BFO-PSO 算法的调速系统 PID 参数优化整定	(148)
6.1.1 目标函数分析	(149)
6.1.2 水轮发电机调速系统稳定性分析及稳定域搜索	(152)
6.1.3 参数优化实例分析	(155)
6.2 模糊 PID 控制在水轮机调速系统控制中的应用	(158)
6.2.1 模糊控制理论	(158)
6.2.2 PID 控制	(160)
6.2.3 水轮机调速系统的模糊 PID 控制	(162)
6.2.4 实例仿真	(163)
6.3 水轮机调速系统的滑模控制	(167)
6.3.1 水轮发电机调速系统模型及改进	(168)
6.3.2 基于滑模控制的水轮发电机调速系统控制	(171)
6.3.3 算例分析	(172)
6.4 基于引力搜索模糊模型辨识的水轮机调速系统预测控制	(175)
6.4.1 基于 T-S 型模糊模型的预测控制	(175)
6.4.2 基于引力搜索超平面聚类的 T-S 型模糊模型辨识	(176)
6.4.3 水轮机调速系统控制实例	(178)
第 7 章 同步发电机励磁系统控制方法研究	(181)
7.1 基于引力搜索算法的励磁控制系统 PID 参数优化	(182)
7.1.1 基于引力搜索算法的 PID 控制参数优化原理	(182)
7.1.2 励磁控制系统 PID 参数优化实例研究	(183)
7.2 基于混沌自适应 DE 算法的励磁系统 PID 参数优化	(187)
7.2.1 混沌自适应 DE 算法	(187)
7.2.2 实例仿真	(191)
7.3 基于反弹自适应 PSO 算法的励磁系统控制参数优化	(193)
7.3.1 反弹自适应 PSO 算法	(193)
7.3.2 实例仿真	(195)
7.4 基于模糊理论的非线性励磁控制寻优策略	(199)

7.4.1 模糊 PID 励磁控制器设计	(199)
7.4.2 模糊非线性励磁控制实例仿真	(202)
第 8 章 水电机组控制系统仿真测试平台开发	(210)
8.1 调速系统仿真测试系统	(211)
8.1.1 测试仪系统结构设计	(211)
8.1.2 测试仪上位机软件	(229)
8.1.3 试验应用	(234)
8.2 励磁系统仿真测试系统	(243)
8.2.1 仿真测试系统概述	(244)
8.2.2 硬件电路设计	(246)
8.2.3 系统软件设计	(258)
8.2.4 系统功能验证及典型动态过程试验	(271)
参考文献	(287)

第 1 章 绪 论

随着我国电力需求的快速增长以及碳排放压力的与日俱增,作为清洁能源的水电能源在我国能源结构中的地位与作用越来越重要。水电机组的控制关乎水电电能的品质和机组的安全稳定运行,一直是国内外研究的重点。水电机组控制主要包含频率控制和电压控制,分别由调速系统和励磁系统完成。水电机组调速系统也称为水轮机调速系统或水轮机调节系统,由调速器、引水系统、水轮机与发电机及负载组成,承担水电机组频率和负荷的调节。励磁系统由励磁机、电压调节器、功率单元和发电机组成,负责水电机组的电压调节。水电机组调速系统和励磁系统均为典型的工业控制系统,均由控制器与控制对象组成,进行闭环调节。两者在系统辨识与控制研究方面具有相似性,为方便表述,本书将水电机组调速系统、励磁系统进行概化,统称为水电机组控制系统。

水电机组控制系统精确建模研究是一项基础性的研究工作,是控制系统动态特性分析、电力系统稳定性分析以及机组过渡过程计算的基础,具有重要的理论及工程应用价值。系统辨识是依据实验数据构建系统模型的一种理论与方法,适用于对系统机理难以获得的对象进行建模,已逐步成为一种重要的建模手段。开展水电机组控制系统辨识研究的意义在于提供了一种获取系统精确模型的理论方法及技术手段。比如,水轮机调速系统是一个复杂的时变非线性系统,同时也是一个非最小相位系统,其精确模型描述一直以来都是相关研究的重点及难点。困难在于:调速器电液随动系统存在大量非线性,如死区非线性、迟滞非线性、限幅非线性等,对这些非线性进行精确描述难度较大;压力引水管道的的水击模型是一个复杂的非线性模型,精确的模型计算时空代价大,在仿真建模中为了简化计算一般采用简化模型;水轮机的精确解析数学模型还未被人们认知,机理难以准确描述,在实际工程中多采用简化线性模型,现有水轮机非线性模型大多依赖水轮机全特性曲线,给建模工作带来不便。采用系统辨识理论建立水轮机调速系统模型可以精确表达系统特性,克服因机理不清或结构难以描述造成的水轮机及调速器液压系统等非线性系统建模的难题,能为水轮机调速系统精确建模提供重要技术保障。水电机组励磁系统在精确建模时同样存在数学模型复杂、非线性环节众多等难题,因此通过系统辨识理论与方法对实现励磁系统高精度模型描述也具有重要理论与工程应用价值。

水电机组控制系统辨识研究的意义还在于为实现调速系统与励磁系统基于模型的先进控制规律奠定基础。水轮机调速系统的主要功能就是调整机组出力、控制机组频率,从而保证机组稳定高效运行,其中,合理的调节规律是水电机组优化运行的关键。研究先进的控制方法是水电机组运行所面临的核心问题,也是长期存在的理论和技术难题。水轮机调速器控制规律从早期的PI控制发展到目前广泛应用的PID控制,虽然PID控制规律在设计工况点控制效果良好,但随着工况点偏离设计工况点,传统的固定参数PID控制效果很难满足要求,为此学者们进行了广泛深入的研究,提出了许多新型控制规律,其中自适应控制的研究令人瞩目。所谓自适应控制,是指调节规律或控制参数随着对象特性的变化自动调整,从而实现所有工况点的优化控制。自适应控制的基础是对对象模型的认知,在控制过程中需要不断估计模型参数,使参数辨识成为自适应控制的基础。为此,开展水轮机调速系统辨识研究对实现水电机组的自适应控制,提高生产效率及保持系统稳定性具有重要意义。

本书正是在我国水电大开发及大型机组陆续投运的背景下,针对机组安全稳定运行面临的关键科学问题及技术难题,结合模糊理论与智能优化方法对水电机组系统辨识与控制方法进行研究,解析了水电机组控制系统模型特性,全面系统地建立了水电机组控制系统的参数辨识及整体辨识的研究框架,深入开展了水电机组控制理论与方法研究,对全面认识机组特性,维护水电机组的稳定运行,保障水利枢纽与电网安全,具有重要的创新意义及工程应用价值。

1.1 系统辨识理论与水电机组控制系统辨识

1.1.1 系统辨识理论

系统辨识、控制理论与状态估计构成了现代控制理论中的三大研究领域,三者密切相关。系统辨识通过系统输入/输出数据,按照一定的选择办法,建立了系统数学模型,为后续系统控制器设计及状态估计奠定基础;控制理论在系统模型和结构已知的前提下,分析不同激励输入下系统输出的响应特征,研究先进控制规律的设计方法;状态估计在已知系统模型结构及参数的基础上,根据可获取的量测数据估计无法直接获取的动态系统内部运行状态,对于控制系统设计具有重要意义。因此,系统辨识是现代控制论中的基础,是控制理论的综合、状态估计研究得以进行的前提。

系统辨识包括系统结构和阶次辨识、系统参数估计、系统辨识方法收敛性分析、可辨识性分析与辨识精度等问题。著名的控制理论专家Zadeh给出的系统辨识的定义为“辨识就是在输入和输出数据的基础上,从一组给定的模型中,确定一个与所测系统等价的模型”。该定义指出了系统辨识的三大要素:系统的输入/输出数据、给定的模型类以及等价原则,但实际上寻找与实际过程完全等价的模型无疑是非常困难

的。著名系统辨识学者 L. Ljung 给出了更为实用的系统辨识定义:“系统辨识以数据、模型集和评价准则三要素为基础,系统辨识就是根据一定的评价准则从模型集中选择与数据吻合最好的模型。”以上两种定义突出强调数据、模型及准则三要素,我国系统辨识学者丁锋从辨识方法收敛性的角度指出,优化方法在系统辨识中也极为重要,在综合以往辨识定义的基础上,他给出了包含四要素的系统辨识定义:“系统辨识是通过设计适当的输入信号,利用实验的输入/输出数据,选择一类模型,构造一误差准则函数,用优化方法确定一个与数据拟合的最好的一个模型。”与其他辨识定义相比较,该定义更为全面、准确,突出强调了系统辨识中的输入信号设计、优化方法,更加吻合实际辨识实验设计。

根据对系统机理的了解程度,辨识方法可以分为机理辨识方法和统计辨识方法。机理辨识方法即所谓的白箱建模方法,通过运用能量定理、动量定理、连续性定理等物理学、热力学定理推导出系统模型解析表达式,并使用测量方法获取系统参数。机理辨识方法仅适用于系统机理清晰的对象,对于水轮机调速系统及同步发电机而言,常规的同步发电机参数辨识根据机理分析及数学变换建立数学模型,并通过一定条件下的实验测定出模型的物理参数,该过程属于机理辨识。然而对于机理复杂、难以使用解析表达式来描述的对象,如水轮机,即使对象工作机理十分清晰,但仍难以通过机理辨识方法建立其精确数学模型。统计建模方法由于不关心系统的内部结构及工作机理,只根据系统外部输入和输出数据序列就能确定系统数学模型,尤其适合解决此类对象的辨识问题。结合黑箱辨识与白箱辨识的特点,统计辨识中另一类方法为灰箱辨识方法。对于同步发电机及水轮机调速系统而言,由于灰箱辨识方法能够提供反映被描述对象系统动力学特性的物理参数,并且某些辨识方法适用于在线辨识,因而广泛应用于工程实际。

1.1.1.1 线性系统辨识方法

按照模型的属性,系统辨识可以分为线性系统辨识和非线性系统辨识。线性系统的输入/输出满足可叠加性原理,系统数学模型通常采用微分方程、差分方程、传递函数、状态空间方程、阶跃响应、脉冲响应、频率响应来表示。常见的线性系统辨识方法主要有以下几种。

1. 经典辨识方法

经典辨识方法通过阶跃响应、频率响应、脉冲响应等实验测得对象以时间或频率为自变量的实验曲线,因而所获得的模型是非参数模型,故经典辨识方法又称非参数化辨识方法。与参数化模型辨识相比,非参数化模型辨识具有一些独特的优点:① 系统辨识前需要较少的先验知识,仅需确定系统的脉冲响应或频率响应曲线;② 引入相关滤波后,噪声条件下非参数辨识获得满意的辨识效果;③ 不需要选择模型结构,也无必要估计模型参数,适用于描述任意复杂的系统。经典辨识的主要方法有阶跃响应法、脉冲响应法、频率响应法和相关分析法等,当获得系统的非参数模型

后,根据不同模型的转换方法,可以获得传递函数、状态空间方程等参数化模型表达式。除相关辨识外,其余经典辨识方法均假设系统是确定性的,即要求系统输入/输出无噪声或噪声很小,否则辨识误差较大;另一方面,这些方法无法应用于在线辨识,只能应用于离线辨识,因此在实际应用中会受到限制。

2. 现代辨识方法

在模型结构、误差准则函数确定的条件下,现代辨识方法根据可获得的测量对象输入/输出数据,通过极小化模型与对象之间的误差准则函数来确定模型参数,因此,辨识所得模型为参数模型,如差分方程、脉冲传递函数、离散状态方程等。若模型结构或阶数难以确定,应首先通过模型阶次分析等方法辨识出模型结构。

依据辨识算法的基本原理,可以将现代辨识方法分为三种类型:最小二乘系列辨识算法、梯度校正法和极大似然法。其中,最小二乘系列辨识方法通过极小化广义误差平方和准则函数来确定模型参数;梯度校正法根据快速下降寻优原理更新待辨识参数使之沿着误差准则函数关于辨识参数负梯度方向,逐步逼近参数真实值。与前两种方法不同,极大似然估计方法根据观测数据与待辨识对象未知参数均具有随机性这一特征,通过建立随机观测数据与未知参数间的概率特性和统计关系,使似然函数达到极大值来确定模型参数。

与经典辨识方法相比,现代辨识方法表现出以下特点:①一般以广义误差作为准则函数,考虑了系统中随机噪声的影响,属于随机系统的辨识建模方法;②理论上现代辨识方法要求输入激励信号为白噪声,工程实际中常采用伪随机信号,由白噪声信号及伪随机信号的功率谱可知,输入信号能量分布在很宽的频率范围内,因而信号强度较低,对系统正常运行影响较小;③现代辨识法具有一系列递推算法,适用于在线或实时辨识;④基于现代辨识方法的闭环系统可辨识性理论及判别条件较为成熟,使得现代辨识方法能与现代控制规律相结合,构成自适应控制规律。

3. 自适应滤波辨识方法

常见的自适应滤波算法包括 Bayes 自适应滤波、Kalman 自适应滤波和模型参考自适应滤波。Bayes 滤波算法从信号的随机性角度出发,根据动态系统的输入/输出观测数据中包含模型参数信息这一特征,将待辨识参数处理为服从一定分布的随机变量,通过观测与该参数相关联的其他变量来推断未知参数;Kalman 滤波算法是现代控制理论的一个重要支柱,被广泛应用于实时状态变量估计;Kalman 滤波算法将待估计状态变量作为随机变量,根据状态变量与可观测输入/输出变量的关系,推断出不可观测的状态变量。当将 Kalman 滤波器应用于参数辨识时,可将待辨识参数与待辨识状态变量构成待估计状态变量,通过 Kalman 滤波器迭代公式估计出参数真实值。模型参考自适应滤波的基本思想是,将实际系统作为参考模型并假设可调模型结构已知,根据可调模型与参考模型之间的输出误差进行一定运算,根据运算结果不断修改可调节模型参数,使得相同输入下,可调节模型的输出尽可能逼近参考模型的输出。当可调节模型输出与参考模型输出之间差别无法改善时,认为可调节模

型参数即为参考模型(实际系统)参数的估计值。

与其他辨识方法相比,自适应滤波辨识方法表现出以下特点:① 不仅能够估计出系统的状态变量而且可以估计出系统的参数,实现了系统状态变量与参数的联合估计;② 不仅适用于离线辨识,而且适用于在线实时估计;③ 部分算法,如 Bayes 估计算法、Kalman 滤波算法经过进一步扩展,可以应用于非线性系统参数估计。

1.1.1.2 非线性系统辨识方法

根据系统输出(或经过变化后的系统输出)与系统参数之间的关系,非线性系统可以分为线性参数非线性系统(linear in parameter nonlinear system, LIPNS)和非线性参数非线性系统(nonlinearity in parameter nonlinear system, NLIPNS)。对于线性参数非线性系统而言,通过数学变换能够写出其相应的线性回归表达式,因而,线性系统辨识方法能够解决部分非线性系统参数辨识问题。但对于非线性参数非线性系统,常规的线性系统辨识方法不再适用。由于非线性环节形状各异、模型复杂,难以写出统一表达式,不可能存在统一的非线性系统(主要是非参数非线性系统)辨识理论,常见的非线性系统模型辨识及参数辨识方法主要包括:级联模型、神经网络、模糊系统与智能优化等。

1. 级联模型

级联模型包括 Hammerstein 非线性模型、Wiener 非线性模型、Hammerstein-Wiener 非线性模型与 Wiener-Hammerstein 非线性模型四种。Weiner 非线性模型由线性时不变子系统、静态非线性增益子系统构成,Hammerstein 非线性模型由静态非线性增益子系统、线性时不变子系统构成,后两种则由 Wiener 模型、Hammerstein 模型组合而成。

2. 神经网络

神经网络因具有逼近任意非线性系统的能力而被广泛应用于系统辨识。根据连接形式,神经网络可以分为无反馈的前向网络和相互连接型神经网络。从信息传播规律来看,已有的神经网络可以分为:前向网络、反馈网络和自组织网络。根据建模方向,基于神经网络的系统辨识可分为正向建模和逆向建模。正向建模又分为串并联辨识结构和并联辨识结构;逆向建模又分为直接逆向结构和特殊逆向结构。

正向串并联辨识结构中,实际系统被设置为参考模型,神经网络模型即为参数可调节模型,参考模型的输入/输出向量作为神经网络的输入,神经网络的输出参考模型输出的估计值,系统辨识过程中根据参考模型和辨识系统的输出误差,利用神经网络的学习算法不断调节神经网络参数,直到神经网络模型参数收敛到相应的期望值。该模型中,神经网络的训练等同于静态非线性函数的逼近问题。基于神经网络正向串并联辨识研究思路,BP、RBF 神经网络等前向神经网络被广泛应用于非线性辨识。

3. 模糊系统

模糊逻辑理论能够以任意精度逼近任意非线性函数,不仅适用于辨识复杂和病态结构系统,而且能辨识具有大时延、时变、多输入多输出(Multi-Input and Multi-Output, MIMO)的非线性系统,可以得到被辨识对象的定性与定量相结合的模式。在已知系统的输入/输出数据的条件下,模糊逻辑理论通过建立模糊模型,实现对非线性系统的输入/输出特性的映射。常用的模糊模型为 T-S 模糊模型,该模型结构简单、逼近能力强,被广泛应用于非线性系统模型辨识。

4. 智能优化辨识算法

系统辨识本质上是优化问题,因而不同的优化算法构成不同的辨识算法。基于智能优化算法的辨识策略根据该原理,将参数辨识问题转化为一定评价函数下的参数优化问题,将待辨识参数映射为智能优化算法的“粒子”或“染色体”等个体,根据智能优化算法的进化策略不断调整个体的状态,直到由辨识系统与实际系统输出误差构成的评价函数达到满意程度。由于基于智能优化算法的参数辨识能够提供系统的物理参数,因而被广泛应用于电力系统、混沌系统等非线性系统参数辨识。

1.1.2 水电机组控制系统辨识研究现状

水电机组系统辨识作为电力系统辨识的重要组成部分,包括水轮机调速系统参数辨识和励磁控制系统参数辨识,不仅对水电机组的动态特性分析、控制器设计有着重大影响,而且直接影响到电力系统的安全稳定经济运行,受到研究者的广泛关注。在现有的研究中,水电机组控制系统参数辨识方法可以分为线性系统辨识和非线性系统辨识。

1.1.2.1 线性系统辨识

尽管实际运行中的水轮发电机及其调速系统表现出参数时变、复杂非线性、非最小相位等特点,但是当工况变动较小时,可以在运行工况点附近将非线性模型线性化,从而获取线性模型。因此,线性系统辨识理论适用于辨识相应模型的参数。

1. 经典辨识方法

水电生产过程中,由于现场各种干扰和噪声较严重、水电机组的自身惯性较大,导致经典辨识方法的应用受到限制。对于阶跃响应实验而言,当阶跃信号幅度较小时,由于信噪比较小和机组的非最小相位特性影响,实验难以获取满意的传递函数模型;当阶跃信号幅度较大时,虽然提高了信噪比,但此时的水轮机调速系统非线性不容忽视,测试的模型难以确定所对应的运行工况。

对于同步发电机参数辨识而言,频域响应实验、时域响应实验是目前同步发电机参数测试中的重要实验。根据电机的运行工况和实验手段,同步发电机频率响应实验可分为静止频率响应(standstill frequency response, SSFR)实验、在线频率响应(on-line frequency response, OLFR)实验和多输入多输出带宽激励测试方法(multi-