

许颜贺 周建中 / 著

抽水蓄能机组调速系统参数 辨识及控制优化

张外信



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

抽水蓄能机组调速系统 参数辨识及控制优化

许颜贺 周建中 著

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书是结合多年的研究与工程实践经验,参考国内外相关著作与文献而编写的一本面向抽水蓄能机组仿真建模与控制优化领域研究人员与电厂运维人员的参考书籍。全书针对抽水蓄能机组的特性与优化运行问题,递进式地从数学建模、动力学机理分析、模型参数辨识和控制优化等方面,介绍了当前的研究方向与创新性成果。全书共分为6章,第1章介绍了抽水蓄能机组控制优化研究的背景与意义;第2章阐述了机组调速系统建模方法及非线性动力学响应机理;第3章叙述了调速系统参数辨识方法;第4章研究了控制器设计与控制参数优化;第5章介绍了复杂工况下抽水蓄能机组导叶关闭规律多目标优化;第6章对本书的内容进行了总结及展望。全书内容安排循序渐进、逻辑清晰,书中的实例成果典型。本书可作为高等院校抽水蓄能机组优化运行方向或水力发电机组方向的研究生参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

抽水蓄能机组调速系统参数辨识及控制优化/许颜贺,周建中著. —武汉:华中科技大学出版社,2018.6

ISBN 978-7-5680-4176-8

I. ①抽… II. ①许… ②周… III. ①抽水蓄能发电机组-调速-研究 IV. ①TM312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 285997 号

抽水蓄能机组调速系统参数辨识及控制优化

许颜贺 周建中 著

Choushui Xuneng Jizhu Tiaosu Xitong Canshu Bianshi ji Kongzhi Youhua

策划编辑:范莹

封面设计:原色设计

责任编辑:李露

责任校对:李弋

责任监印:徐露

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录排:华中科技大学惠友文印中心

印刷:北京虎彩文化传播有限公司

开本:710mm×1000mm 1/16

印张:8.5

字数:201千字

版次:2018年6月第1版第1次印刷

定价:35.00元



华中出版

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

前 言

随着我国能源结构改革的不断深入,抽水蓄能电站作为可再生能源的储能地点以及有效的电网调峰、调频工具,得到了快速发展与大规模建设。抽水蓄能机组的复杂输水管道布置、可逆式的运行方式、频繁的工况转换,以及水泵水轮机固有的“S”特性区域与驼峰特性区域,使得机组调速系统呈现时变、非最小相位、复杂非线性和水-机-电强耦合等特点。这些特点不仅给机组调节、电站的稳定运行带来了极大的困难,且安全问题日益凸显,给机组的安全、稳定与高效运行带来了一系列科学前沿问题和工程技术难题。同时,大规模间歇性可再生能源接入电网和电网负荷的剧烈波动,使得机组调速系统的控制与优化运行呈现高度复杂特性,对抽水蓄能机组调速系统先进控制策略与优化运行的研究亟待开展。

本书以建立抽水蓄能机组调速系统精细化模型、探索适用于实际应用的先进控制策略为目标,系统开展了调速系统建模、动力学演化规律分析及参数辨识研究,构建了调速系统线性模型、非线性模型参数辨识的方法体系;针对抽水蓄能机组调速系统传统控制策略在处理极端工况条件下安全稳定运行问题的不足,深入研究了新型控制策略与导叶关闭规律多目标优化方法。本书可供水利工程专业师生参考,让读者了解抽水蓄能机组建模与优化控制的一般方法,同时提供先进控制模型的建模思路和优化方法。

全书分为6章。第1章为绪论。介绍本研究的背景与意义,阐述了抽水蓄能机组运行的特点与问题,重点论述了抽水蓄能机组调速系统辨识理论与研究现状,分析了抽水蓄能机组控制优化的特点与研究现状。

第2章为抽水蓄能机组调速系统建模及非线性动力学分析。阐述并建立了抽水蓄能机组调速系统各环节的数学模型,分别建立了调速系统线性模型、非线性模型以及数值计算模型;引入了非线性动力学分析方法,刻画了调速系统过渡过程的动态响应过程,探明了水泵水轮机“S”特性对于机组转速振荡的影响,揭示了机组运行在“S”特性区域的非线性动力学行为及动力灾变演化规律,为控制策略优化研究提供了理论依据。

第3章为抽水蓄能机组调速系统参数辨识。针对抽水蓄能机组由自身的运行特性引起的参数辨识难题,研究智能优化算法的非线性辨识理论,引入引力搜索算法并对其进行优化改进,构建了基于改进引力搜索算法的自适应一体化参数辨识模型;进一步,为克服神经网络辨识对于样本数据的依赖性以及对白箱辨识的不适用性,提出了一种基于调速系统白箱线性模型映射的BP神经网络参数辨识方法,

实现了抽水蓄能机组调速系统模型的精确参数辨识。

第4章为抽水蓄能机组调速系统分数阶PID控制器设计与参数优化。针对水泵水轮机“S”特性区域引起的系统在低水头空载工况运行不稳定的问题,结合分数阶微积分思想与智能控制理论,构建了包含调速系统分数阶PID控制器与模糊分数阶PID控制器的控制策略体系,并分别引入多场景分析和改进GSA算法对控制器进行性能分析与参数优化,有效提高了机组运行在低水头空载工况系统时的控制品质。

第5章为复杂工况下抽水蓄能机组导叶关闭规律多目标优化。基于抽水蓄能机组导叶关闭规律优化的研究基础,分析了“一管-双机”抽水蓄能机组转速上升与水击压力上升的多目标优化属性,引入了水力单元调保计算安全阈值边界和调速器油速等多重约束因素,构建了考虑多重约束条件的机组导叶关闭规律多目标优化模型,为实现复杂模型的高效求解,结合多目标优化理论与本书提出的改进引力搜索算法,提出了改进多目标引力搜索算法,制定了满足控制要求的关闭规律非支配方案集,为机组的安全、优化运行提供了科学的决策支持。

第6章为总结及展望。对本书的研究内容及创新性成果进行总结归纳,并对抽水蓄能机组优化控制与运行领域下一阶段的研究方向进行了展望。

本书作者许颜贺博士与周建中教授共同所在的团队长期从事水电机组非线性建模、系统参数辨识、控制优化、故障诊断,以及状态评估理论、模型、算法和应用的研究。团队主持或承担了多项关系到我国重大决策的流域水利水电工程运行、控制、仿真与诊断研究中的关键技术与重大科学问题的科研任务,其中的一批成果在全国重大水利枢纽工程中发挥了关键性作用,团队具有协同解决重大、综合性关键问题的能力,很多研究达到了国际学术前沿水平,研究成果在学术界具有重要影响,产生了巨大的社会效益与经济效益。

由于作者水平有限,写作时间紧张,书中难免有疏漏之处,希望广大读者提出宝贵意见,以便在再版时修改和完善,甚为感谢。

作者

2018年4月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 抽水蓄能机组控制优化研究的背景及意义	(1)
1.2 抽水蓄能机组的运行特点与特性	(3)
1.3 抽水蓄能机组调速系统的辨识研究	(6)
1.4 水电机组调速系统的控制优化研究.....	(10)
第 2 章 抽水蓄能机组调速系统建模及非线性动力学分析	(17)
2.1 调速器数学模型.....	(18)
2.2 引水系统数学模型.....	(19)
2.3 水泵水轮机数学模型.....	(22)
2.4 发电/电动机及负载模型	(25)
2.5 抽水蓄能机组调速系统仿真模型.....	(25)
2.6 基于调速系统非线性模型的动力学稳定性分析.....	(29)
2.7 本章小结.....	(33)
第 3 章 抽水蓄能机组调速系统参数辨识	(35)
3.1 引言.....	(35)
3.2 引力搜索算法.....	(36)
3.3 基于改进引力搜索算法的调速系统自适应参数辨识.....	(38)
3.4 基于调速系统白箱线性模型映射的 BP 神经网络参数辨识	(51)
3.5 本章小结.....	(55)
第 4 章 抽水蓄能机组调速系统分数阶 PID 控制器设计与参数优化	(57)
4.1 引言.....	(57)
4.2 分数阶微积分原理.....	(58)
4.3 多场景模式下分数阶 PID 控制器的设计与参数优化	(60)
4.4 自适应快速模糊分数阶 PID 控制器与参数优化	(68)
4.5 本章小结.....	(77)
第 5 章 复杂工况下抽水蓄能机组导叶关闭规律多目标优化	(79)
5.1 引言.....	(79)
5.2 导叶关闭规律优化问题描述.....	(80)
5.3 改进多目标引力搜索算法.....	(84)
5.4 复杂工况下机组导叶关闭规律多目标优化模型.....	(94)

5.5 基于 IMOGSA 的导叶关闭规律多目标优化求解策略	(97)
5.6 实例分析	(101)
5.7 本章小结	(110)
第 6 章 总结及展望	(111)
6.1 总结	(111)
6.2 展望	(113)
参考文献	(114)

1.1 抽水蓄能机组控制优化研究的背景及意义

经济全球化冲破了世界各国的贸易壁垒,实现了国际贸易自由化、非区域化,同时也加速了地球资源的消耗和生态环境的恶化。经济活动的扩张使得人类对于煤炭、石油、天然气等化石能源的消耗达到了空前的高度,随之引发了海洋污染、水污染、土地污染以及全球性的气候变暖。随着经济的快速增长,中国作为世界第二大经济体在国际社会扮演的角色越来越重要,所担负的国际责任也越来越重。2015年12月,习近平总书记在气候变化巴黎大会上向世界庄严宣布:将于2030年左右使二氧化碳排放达到峰值并争取尽早实现,2030年单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降60%~65%,非化石能源占一次能源消费比重达到20%左右,森林蓄积量比2005年增加45亿立方米左右。这不仅体现了中国以全新的身份处理国际事务时负责任的姿态,也进一步表明了我国将应对气候变化纳入生态文明建设、推动绿色能源可持续发展的决心。姿态和决心的背后则意味着我国将大力发展绿色能源,能源结构改革也将进入深水区。

近年来,我国风能、太阳能和生物质能等新能源保持着快速发展的态势,并网装机容量持续增长,发电量不断增加,有效缓解了我国对煤炭、石油等化石能源的依赖程度,推动了我国能源结构改革、绿色能源发展的进程。“十三五”规划纲要指出,我国将大力发展风能、太阳能等新能源,预计到2020年,风电装机容量将达到 2.1×10^8 kW、光伏装机容量将达到 1.5×10^8 kW。但是,随着风力发电、光伏发电等间歇性和随机波动性电能大量接入电网,电网对其消纳能力严重不足,同时,由于用户对电能质量、电网安全性以及智能化程度的要求不断提高,进一步加剧了新能源开发与能源高效利用两者之间的矛盾。风力发电、光伏发电是当前最常用的集中式、大规模新能源互补运行手段,抽水蓄能电站的灵活性弥补了风力发电和光

伏发电的随机性和不均匀性,有利于提高电网的可靠性、促进可再生能源变量的集成,抽水蓄能电站也因此被誉为水电“皇冠上的明珠”。

在绿色能源快速发展的背景下,社会资本的多元电力市场化投资机制、抽水蓄能建设的投资回报政策,以及智能电网的建设需求等,进一步增强了研究人员对抽水蓄能开发与建设的积极性,也为抽水蓄能的发展提供了宝贵的机遇。“十三五”期间,我国新建抽水蓄能电站投产 1.697×10^7 kW,新开工建设 6×10^7 kW。预计到 2025 年,抽水蓄能电站总装机容量将达到 1×10^8 kW,约占全国电力总装机容量比重的 4%。抽水蓄能的快速发展,促进了我国抽水蓄能机组及成套设备的国产化进程,安徽响水涧、浙江仙居以及安徽绩溪等抽水蓄能电站的建设与投运,标志着我国在抽水蓄能机组水泵水轮机设计核心技术、控制系统装置研发以及系统集成技术等方面取得了突破性的进展,打破了国外对抽水蓄能技术的长期垄断,为全面实现抽水蓄能机组主辅设备的国产化奠定了坚实的基础。

调速系统作为抽水蓄能机组的控制中枢,兼具控制机组启停与工况转换、调整机组负荷以及维持机组频率稳定等功能。抽水蓄能机组调速系统精确建模、参数辨识以及控制优化研究是提高控制系统装置性能的核心技术,对控制系统装置的研发和系统集成的国产化具有重要的理论意义与工程应用价值。抽水蓄能机组在实际运行中主要存在以下问题:①水泵水轮机全特性中存在水轮机反“S”特性区域和水泵驼峰区域这两个运行不稳定的区域,这导致出现低水头水轮机启动并网困难、低水头调相转发电不稳定、机组空载频率振荡、水泵启动过程中水压振荡等控制问题,严重时会造成机组过流部件损坏、运行过程中发生“跳机”等现象,这将对电站与电网的安全和稳定造成严重的影响;②在甩负荷、水泵断电等大波动工况下,由于受水泵水轮机“S”特性的影响,引水系统压力钢管内的水锤效应会造成类似导叶快速关闭的效果,使机组入流量急速减小,造成水击压力、机组转速上升率的急剧上升;③抽水蓄能机组的运行方式较常规水电机组增加了水泵运行下的多种工况及水泵/水轮机间的复杂转换,多达 24 种工况;抽水蓄能电站多为日调节型,一日之内的开机、停机、工况切换频繁,导致溜/增负荷、传感器故障、继电器故障等调速系统故障发生的概率增大。上述运行特点和各种潜在的运行事故,不仅会严重危害到抽水蓄能电站的自身安全、稳定运行,而且影响到了电力系统的安全稳定以及供电质量。因此,亟待开展抽水蓄能机组调速系统高精度建模、先进控制策略与机组优化运行研究,最终实现机组的安全、高效、稳定运行。

工欲善其事,必先利其器。高精度建模与参数辨识是调速系统控制优化研究的基础,其意义在于:首先,通过数学表达方法建立精确的调速系统模型结构;其次,当模型的部分参数不能通过计算的方式获得时,需要运用系统辨识理论构建调速系统参数辨识模型,依据实验数据或机组实际运行数据,寻求能够精确刻画系统动态响应过程的模型参数。抽水蓄能机组调速系统的精确建模与参数辨识为系统

的先进控制策略优化研究、过渡过程数值计算以及大波动工况导叶关闭规律优化研究奠定了模型基础。然而,抽水蓄能机组调速系统是一个复杂的时变、非线性系统,水泵水轮机的“S”特性、驼峰特性以及强非线性特性不仅增加了数学描述的难度,而且使工况转换过程中可逆性的变化规律难以被精确描述,使得调速系统建模变得十分复杂和困难。

水力发电机组调速系统控制策略与方式从早期的PI控制、串联PID控制发展到了目前实际工程中广泛应用的并联PID控制,并联PID控制在大部分工况下可以实现对抽水蓄能机组调速系统良好的控制效果。但是,最优工况点迁移或者机组运行在低水头空载不稳定区域时,传统的PID控制难以满足抽水蓄能机组控制品质的需求,无法从根本上解决调速系统的强非线性、时变性与线性控制规律之间的适配问题。为进一步提高调速系统的控制性能,研究更先进的控制规律和策略成为抽水蓄能行业科学技术发展的驱动力。从广义的角度来看,抽水蓄能机组导叶关闭规律优化同样属于调速系统控制优化的范畴,抽水蓄能电站过渡过程计算与调节保证旨在通过数值计算的方式,分析机组在各种极端工况下运行时电站的水力、机械与电气系统的鲁棒性与稳定性。通过过渡过程计算寻求机组在遭遇极端大波动工况运行条件时导叶的最优关闭规律,对保证机组安全、高效、稳定运行具有重要的意义。

在我国绿色能源大力发展,尤其是抽水蓄能快速发展的背景下,本书通过凝练抽水蓄能机组调速系统安全、稳定、高效运行中的关键科学问题,围绕调速系统精细化建模、参数辨识和控制优化领域的研究热点与难点,解析了调速系统的动态响应机理和非线性动力学特性,深入探讨了系统大波动工况导叶关闭规律优化问题的多目标属性,全面建立了调速系统参数辨识和控制优化的理论框架与方法体系,设计开发了一种基于分布式集散型数据监测平台的抽水蓄能机组调速系统控制优化与性能评估应用系统,实现了调速系统控制性能与品质优化研究的理论探索、方法创新和应用示范,对于提高机组运行效率、促进抽水蓄能电站与电网安全和稳定运行具有重要的理论意义与工程应用价值。

1.2 抽水蓄能机组的运行特点与特性

1.2.1 抽水蓄能机组的运行特点

国内外已建成的抽水蓄能电站大都用由可逆式水泵水轮机与发电电动机组成的抽水蓄能机组完成发电与发电调相、抽水与抽水调相等基本工况任务。抽水蓄能机组可逆式的结构设计以及各工况之间的复杂切换方式,使得水泵水轮机流道内流态紊乱、水力瞬变规律呈现不确定性,机组的压力脉动和空化现象较常规水轮

发电机组更为普遍。水泵水轮机是参考水泵运行最佳效率点进行结构设计的,水泵水轮机包括水泵和水轮机两个方向,在水轮机方向时,机组通常偏离最优工况区运行,导致机组压力脉动幅值波动较大,尤其是在最低水头 50% 负荷运行时,压力脉动最为剧烈。压力脉动幅值与空化系数之间存在着密切的映射关系,刘德民等深入分析了空化系数对压力脉动幅值的影响,明确了两者之间的关系。研究表明:当空化系数降低到某一值时,压力脉动的幅值会急剧增加;当空化系数大于该值时,压力脉动的幅值将会下降,此时空化性能较差。抽水蓄能机组的复杂水力过渡过程,使得引水系统流量和水力矩发生剧烈变化,进而引发水击效应。游光华等结合天荒坪抽水蓄能电站的实际运行状况,分析了水击效应对机组调速系统的影响。在水击效应下,机组增、减负荷工况的功率超调,一次调频时固定 PID 参数不能完全适应机组的变化范围,进而引起频率的周期振荡。水击效应影响下的调速系统为非最小相位系统,在负荷变化的暂态过程初期,机组功率随导叶增大而减小,引起功率反调,造成较大的负荷响应滞后。此外,抽水蓄能电站大都为日调节型,水头变化频繁且范围大,机组功率-水头、机组功率-导叶开度之间的非线性关系,导致了功率调节时调速系统的强非线性和时变特征。

综上所述,与常规水轮发电机组相比,抽水蓄能机组具有结构复杂、运行工况多、工况转换频繁、水力特性多变等特点。同时,抽水蓄能机组调速系统是一个复杂的时变、强非线性、非最小相位系统。

1.2.2 抽水蓄能机组的“S”特性

“S”特性是由水泵水轮机的可逆式设计而形成的一种固有特性,水泵工况与水轮机工况的效率最优区域并不重合,导致水泵水轮机在水轮机工况、水轮机制动工况和反水泵工况内存在“S”特性区域。“S”特性区域是机组运行的不稳定区域,在水泵水轮机全特性曲线上的具体表现为一个固定单位转速可能会对三个不同的流量点,并且其中一个流量点为负流量。为了深入研究“S”特性的产生机理和其内部的流场运动规律,Widmer C 等深入分析了水泵水轮机非定常涡流与制动失速涡产生的原因,推求出了“S”特性与转轮叶片间、转轮与活动导叶间无叶区的回流涡的关联性。陈德新、谢辉采用转轮流道压力分布测量与可视化技术,揭示了低比转速机组水轮机工况“S”特性区域的转轮内部的动态流动规律,研究表明,转轮自身的几何结构、导水机构以及整个水力系统的共同作用导致了“S”特性的产生。李君、王磊等计算并分析了不同导叶开度和不同水头下机组蜗壳、活动导叶、转轮以及尾水管的流线分布,探明了各过流部件的流态变化规律,得出由涡流形成的流道拥塞是造成水泵水轮机“S”特性的重要因素。刘锦涛提出了基于 Ehrhard 非线性湍流模型剪切应力非线性处理方法,建立了一种非线性 PANS 模型,实现了小开度模式下对水泵水轮机“S”特性的预测。朱伟、肖业祥等探讨了在导叶小

开度条件下,水泵水轮机运行在水轮机、反水泵等各工况时“S”特性区域的内部流动特性,在制动工况活动导叶和转轮间的无叶区内表现为明显的水环状流态,仅有少部分水能流入转轮;当运行在反水泵工况时,水流的流动变得更加复杂,整个流道存在大量的漩涡流;当机组运行在小流量制动工况时,流道会被无叶区内的回流堵塞,导致转轮不能在高转速下维持该小流量状态的稳定运行,进而造成在全特性曲线飞逸点附近发生“S”形的弯折。

水泵水轮机的“S”特性,会引起机组内部流态紊乱、转轮与活动导叶之间的压力脉动增大、机组自激振动剧烈,严重威胁到电站的安全、稳定运行。针对机组运行在“S”特性区域时的水力-机械振动以及运行不稳定现象,周建旭、胡明采用极限环理论分析了机组自激振动的幅频特性,推求出了相应衰减因子为正的振动模式,得出机组的自激振动是由多个衰减因子为正的振动模式叠加而成的。游光华、孔令华等通过对天荒坪抽水蓄能电站现场调试实验进行分析指出,机组运行在低水头空载工况时极易进入“S”特性区域,进而引起机组转速振荡,最终造成并网困难、甩负荷后不能达到空载稳态,从而引起跳机、带负荷运行时出现逆功率保护动作等现象;机组在“S”特性区域的运行不稳定与控制系统的相互作用,引起机组转速与测频回路来回摆动、导叶开度反复调节,加剧了机组的运行不稳定,进而引起跳机现象。针对抽水蓄能机组低水头启动困难的问题,纪兴英、赖旭引入了SST $k-\omega$ 模型,数值模拟了机组在不同开度模式、小流量水轮机工况的内部流态变化,探明了“S”特性区域运行时机组转轮进口高速、高压的挡水环是引起低水头启动困难的主要原因,研究进一步指出了横流环可以作为水泵水轮机“S”特性区域存在的判据。针对甩负荷工况下调速器导叶拒动故障时的飞逸振荡问题,杨建东、曾威等基于线性化处理方法推求出了“S”特性曲线的传递函数,建立了引水管道-水泵水轮机-发电机的常微分数学耦合模型,推导了飞逸工况稳定性判据,得出水泵水轮机“S”曲线的飞逸点斜率是导致出现飞逸振荡现象的关键因素。

1.2.3 抽水蓄能机组的驼峰特性

驼峰特性是水泵水轮机运行在水泵工况的不稳定区形成的一种特性,也是影响抽水蓄能机组稳定运行的又一重要因素。当机组在水泵工况稳定区运行时,系统的特性曲线与水泵水轮机的全特性曲线仅有一个交点,且交点处于负斜率区;而当系统的特性曲线穿过全特性曲线的驼峰特性区域时,此时两曲线有三个交点,且有一点位于正斜率区,此时机组会产生剧烈的输入功率振荡以及引水系统水击振荡,严重威胁到抽水蓄能电站与机组的安全运行。国外学者大都以传统的离心泵作为研究对象来对驼峰特性进行研究分析,专门针对水泵水轮机驼峰特性的研究较少,Braun O 等采用数值分析的方法,对水泵水轮机运行在驼峰特性区域时的流场进行模拟分析,研究表明驼峰特性与扩散流道的二次流具有相关性。随着我国

抽水蓄能技术的快速发展,国内学者对水泵水轮机驼峰特性的研究不断深入,冉红娟、张瑶等考虑到流道边壁的 y -plus 分布因素,建立了能准确模拟驼峰特性的水泵水轮机 SST k - ω 湍流模型,深入分析了其内部流动特性,得出转轮入口的复杂漩涡与全流道的非对称性是造成驼峰特性的主要原因。陶然、肖若富等采用非定常分离涡模拟法,探讨了产生驼峰特性的具体原因,研究表明,转轮出口紊乱的流动特征使转轮内部与扩散段中产生涡结构与二次流结构,造成过流部件水力损失显著上升、扬程下降,形成了扬程-流量曲线的驼峰特性区域。虽然针对驼峰特性的产生机理与流场分布的研究在不断深入,但是目前仍没有有效的措施避免水泵水轮机产生驼峰区域。因此,优化抽水蓄能机组在水泵工况的运行方式,尽量避免机组运行进入驼峰区域,进而削弱驼峰特性对机组稳定性的不利影响,是值得广大学者进一步开展深入研究的方向。

1.3 抽水蓄能机组调速系统的辨识研究

1.3.1 系统辨识的理论与方法

20 世纪 60 年代以来,控制系统与控制理论经历了从状态空间法、贝尔曼动态规划、卡尔曼滤波器到自适应控制、模糊控制、预测控制等先进控制策略的研究发展历程,但是这些先进的控制策略在实际工业生产中的应用具有很多局限性,究其原因,工业生产过程准确的数学模型表达是阻碍这些基于精确模型表达的控制方法应用的主要原因之一。模型建立与控制器设计是控制理论与控制工程的两大主题,它们之间互相依赖、互相渗透、互相发展。系统辨识源于实际工业生产过程控制,是根据系统的实验数据确定系统数学模型的方法,同时可为控制方法的研究和应用奠定模型基础。作为现代控制理论的一个重要分支,系统辨识从诞生时起就是以系统控制为导向的,同时,系统辨识也具备系统仿真、系统预测、系统分析、故障诊断和验证机理模型等功能。

在控制理论领域对于系统辨识有许多不同的定义。1962 年,美国自动控制领域的专家 Zadeh L A 从数学的角度给出了系统辨识的定义: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。基于此可推断,在系统辨识前应该具有一个模型类库,依据辨识筛选出与待辨识的系统相对应的一个模型。但是,对于某些复杂的工业生产系统,很难建立与实际动态特性完全等价的模型。Eykhoff P 定义系统辨识为: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,并用这个模型把客观系统表示成有用的形式。该定义没有对待辨识系统通过严格的机理推导得出实际系统的等价模型,而是将实际系统的本质特征通过有用的形式进行表征。进一步,

Eyckhoff P 也提出了在已知模型结构中,通过最小二乘法、极大似然法等经典系统辨识方法来辨识模型参数。1978 年,Ljung L 教授对于系统辨识给出了更加通俗的定义:辨识只有三个要素,即数据、模型类和准则,其中数据是辨识的基础,准则是辨识的依据,模型类是辨识的范围。辨识就是按照一个准则在一组模型中选择一个与数据拟合得最好的模型。

系统辨识的优化是提高辨识收敛性、精度的基础,基于四要素的系统辨识定义为:系统辨识是针对真实的系统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,构造误差准则函数,用优化方法确定一个与系统实验数据拟合得最好的模型。基于四要素的系统辨识定义,可将系统辨识的步骤归纳为测量数据、辨识模型、构造准则函数和提出辨识方法。

在进行数据测量时,首先通过对实际系统施加激励,获取激励作用下的实验输入、输出数据;其次,采用剔除与修正数据奇异点、进行低通滤波以及数据相容性检查等手段进行实验数据处理,完成辨识数据重构。

在建立辨识模型时,依据对待辨识系统机理的理解程度,可将系统分为白箱系统、黑箱系统和灰箱系统。白箱系统是指系统内部结构和运动规律均已知,具有相对明确的解析表达模型,并可通过测量确定模型参数。黑箱系统是指在系统的结构、机理和客观规律都未知的情况下,只能依据实验的方法获取系统的输入、输出数据,进而构造出黑箱网络,通过辨识技术建立系统的黑箱模型,李超顺将黑箱系统的辨识称为系统模型的整体辨识。对于灰箱系统,已知系统的内部结构和某些运动规律,但是仍有部分机理还未能探究清楚。抽水蓄能机组调速系统的引水系统、调速器、水泵水轮机和发电机的机理建模研究已经取得了一定的成果,但是对于某些模型参数,如水泵水轮机线性模型的六个系数、执行机构的时间常数等,依据现有的机理推导计算方法还不能完全满足优化控制研究对系统模型实时状态的需求,灰箱系统辨识尤其适合解决此类系统的辨识问题,灰箱系统辨识也称为系统参数辨识。

准则函数,也称为损失函数,系统辨识可以看作是通过极小化模型误差准则函数,采用优化的方法确定系统模型。常用的准则函数由模型输出数据与系统实验输出数据的误差构成,如式(1-1)所示。Li C 等在式(1-1)的基础上引入了状态输出对于辨识精度的权重向量 ω ,构建了一种新的准则函数。

$$J = \begin{cases} \int_0^{\infty} [y(t) - \hat{y}(t)]^2, & \text{连续系统} \\ \sum_{t=0}^{\infty} [y(t) - \hat{y}(t)]^2, & \text{离散系统} \end{cases} \quad (1-1)$$

辨识方法是依据实验数据、辨识模型和准则函数实现系统数学模型辨识的具体手段。

1. 线性系统辨识方法

线性系统的输入-输出满足叠加原理,待辨识系统可用线性模型描述是线性系统进行辨识的前提,线性系统辨识方法主要包括脉冲响应、阶跃响应、频率响应、最小二乘法、相关分析法和极大似然法等方法。阶跃响应、脉冲响应对系统施加阶跃、脉冲扰动,并得到扰动实验的响应输出辨识来确定系统模型。相关分析法采用伪随机二进制序列作为系统的激励输入信号,辨识得到系统模型的传递函数,由于相关分析法不会干扰到系统的正常运行,因此其可以实现对系统的在线辨识。阶跃响应、脉冲响应以及相关分析法均为基于时域信号的辨识方法,如果将时域信号通过傅里叶变换转换为频域特征,则可构成频域辨识方法。最小二乘法和极大似然法都是参数估计方法,这两种方法均要求系统输入信号已知且具有多样性,但是在实际工业生产中,这种要求往往很难达到,因为极大似然法计算效率低且容易陷入局部最优。虽然线性系统辨识在电力系统建模研究中得到了广泛应用,但是水轮机、汽轮机等原动机的复杂非线性,以及发电系统的多维耦合特性使得线性系统辨识方法在进行系统精细化建模时具有一定的局限性。

2. 非线性系统辨识方法

由于非线性系统具有时变、强耦合等特性,其辨识方法研究还没有形成比较完善的体系,常见的非线性系统模型辨识以及参数辨识方法主要包括:级联模型辨识方法、模糊模型辨识方法、神经网络模型辨识方法,以及智能算法系统辨识方法。

其中,常用的级联模型主要有 Wiener 模型和 Hammerstein 模型。Wiener 模型是由非线性系统辨识研究的先驱 Wiener 提出的,主要有 Wiener I 型模型和 Wiener II 型模型两类。Wiener I 引入了 Fourier-Hermite 级数表达非线性系统; Wiener II 则采用 Wiener 核与输入乘积的正交泛函级数来描述非线性系统。Wiener 模型辨识集中于输入激励信号设计, Wiener I 中的 Wiener 系数以及 Wiener II 中 Wiener 核的估计极其复杂。张广莹等引入了小波变换分析系统的信息,实现了 Wiener 模型的非线性增益辨识。张艳等引入了粒子群优化算法,提高了 Wiener 模型在参数空间的辨识精度,验证了 Wiener 模型应用于连续退火机组加热炉数学模型辨识的实用性和有效性。Hammerstein 模型是由非线性静态增益单元和线性动态子系统级联而成的,袁廷奇依据系统的测量输出重构了系统的中间输入,提出了一种多变量 Hammerstein 模型辨识的非线性部分静态影响的动态分离方法,使系统线性部分的参数一致。此外, Wiener 模型与 Hammerstein 模型的组合模型也在非线性系统辨识中得到了应用,针对含有过程噪声的 Wiener-Hammerstein 模型,李妍等引入了矩阵张量积逼近最小二乘的权重系数,提高了参数分离辨识精度。柯晶等将非线性模型辨识问题转化为非线性不可微函数的优化问题,提出了一种基于进化策略的多输入-单输出形式的 Wiener-Hammerstein

模型辨识新方法。

基于模糊集合的模糊模型辨识方法在非线性系统辨识中得到了广泛应用。模糊模型辨识主要包括模型结构辨识和模型参数估计两个层级,它在处理复杂、病态系统,时变、多输入-单输出的复杂非线性系统辨识问题时均具有独特的优势。20世纪80年代,Takagi T和 Sugeno M提出了一种 T-S 模糊模型,T-S 模糊模型以局部线性化为基础,通过模糊推理实现了全局的非线性化处理,且具有模型结构简单、辨识精度高等特性。

神经网络良好的非线性映射能力使得其为解决不确定非线性系统的辨识问题开辟了新的思路。神经网络可以对任意非线性映射进行无限逼近,同时利用其自学习、自适应和并行信息处理的特点,通过调整网络的权重矩阵实现非线性系统的辨识建模。根据待辨识系统的输入、输出数据与神经网络模型的输入、输出数据的对应关系,基于神经网络的系统辨识建模可以分为正向建模、直接逆向建模和间接逆向建模三种。BP、RBF 和 Hopfield 神经网络被广泛应用于光伏发电、风力发电以及系统控制等领域的非线性系统建模。针对 BP、RBF 神经网络在辨识过程中收敛速度慢、易陷入局部最优等缺点,学者们提出了不同的改进策略,提高了神经网络模型辨识的效率和精度。基于聚类约减技术,Sarimveis H提出了一种径向基函数 RBF 神经网络训练算法。基于 Davidon 最小二乘和阻尼最小二乘,Qing Z提出了一种基于递归平方根的神经网络辨识算法。随着智能优化算法的日趋成熟和其在各研究领域应用的快速发展,进化算法、遗传算法、粒子群算法以及引力搜索算法也被广泛应用于神经网络模型辨识中。神经网络模型辨识将可调参数和网络的连接权值用于逼近待辨识系统,忽略了系统的内部结构和参数,而且需要大量的样本数据。胡鹏飞等利用模型映射理论,提出了一种基于系统白箱模型映射的神经网络参数辨识方法,克服了神经网络模型辨识对大量样本数据的依赖性,实现了系统白箱模型的参数辨识,拓展了神经网络在非线性系统辨识建模领域的应用范围。

将系统辨识的准则函数值作为智能算法的适应度值、灰箱系统的模型参数映射作为算法中的个体,则系统辨识问题就转化为智能优化算法的参数优化问题。根据智能优化算法的进化策略迭代调整个体的状态,直至获得准则函数的最优值,输出待辨识系统模型的最优参数。随着群体智能算法的大规模兴起和迅速发展,智能优化算法具有不依赖于系统模型机理、可提供有实际物理意义的模型参数,以及可在高维、强非线性空间完成参数的搜索优化等优势,因此,基于智能优化的系统辨识方法在拥有具体的模型类库的电力系统、航天工程,以及机械工程等领域得到了广泛应用。

1.3.2 抽水蓄能机组调速系统的辨识

抽水蓄能机组调速系统的高精度建模对于刻画非线性动力学演化规律,探明系统水力、机械、电气动态响应规律,开展调速系统的控制器设计与参数优化研究,提高机组的控制品质,降低机组在水泵水轮机“S”特性区域和驼峰特性区域运行的风险,以及保证机组安全、稳定运行具有重要的意义。抽水蓄能机组调速系统是一类复杂、时变、强非线性的高维耦合系统,尤其在水泵水轮机全特性曲线的“S”特性区域和驼峰特性区域使得水泵水轮机建模呈现高度复杂特性。抽水蓄能机组调速系统辨识的主要目的是建立对象的高精度模型,为系统仿真、稳定性分析以及调速系统控制器设计与优化控制研究提供模型支持。用基于机组调试实验数据和运行数据的系统辨识建模,以及用调速系统模型结构进行参数辨识的建模方法,是解决抽水蓄能机组调速系统建模的有效途径。

抽水蓄能机组调速系统建模和控制优化研究尚处于起步阶段,国内外文献鲜有关于抽水蓄能机组调速系统辨识与建模研究的介绍,巩宇基于抽水蓄能机组静态、动态实验数据,分别采用最小二乘法和遗传算法对原动机和调速器模型进行了参数辨识。常规水轮发电机组调节系统与抽水蓄能机组调速系统相比,区别在于水泵水轮机和发电机的可逆式设计不同,而对于发电工况,两者具有类似的运行方式。基于辨识方法的普适性和水电机组的共性,常规水电机组用于调节系统线性模型的最小二乘辨识方法、非线性模型神经网络辨识方法、模糊模型辨识方法以及智能优化辨识方法等都可作为抽水蓄能机组调速系统辨识的理论基础。

1.4 水电机组调速系统的控制优化研究

水电机组在电力生产中的比重越来越大,在“十三五”期间,以水电为主的新能源将成为我国西部六省位居前列的几大能源之一。水电机组调速系统的运行工况复杂,引水系统具有最小相位环节等特点,由此,水电机组的稳定运行对于电网的安全具有重要作用。因此,针对常规水轮发电机组与抽水蓄能机组调速系统控制策略的研究成为控制领域、水力发电领域学者们的研究热点。研究者在深入分析抽水蓄能机组调速系统的运行特点、动态过程响应特性以及动力学演化规律的基础上,开展调速系统控制优化研究,旨在通过引入智能控制策略来设计新型控制器和探求最优的运行方式,进而提高调速系统的控制品质,增强系统运行的鲁棒性,实现调速系统在各工况条件下的安全、稳定、高效运行。本书从广义的优化控制角度出发,将抽水蓄能机组调速系统控制器设计与参数优化、导叶关闭规律优化统归于调速系统控制策略优化的范畴。