



水电站动态 不确定优化调度模型 及决策系统研究与应用

张仁贡 著
杨 炯 主审



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

TV737

16

水电站动态 不确定优化调度模型 及决策系统研究与应用

张仁贡 著
杨 炯 主审



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

水电站动态不确定优化调度模型及决策系统研究与应用 / 张仁贡著. —杭州: 浙江大学出版社, 2015. 11

ISBN 978-7-308-14613-5

I. ①水… II. ①张… III. ①水力发电站—调度模型—决策系统—研究 IV. ①TV737

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 078188 号

水电站动态不确定优化调度模型及决策系统研究与应用

张仁贡 著

杨 炯 主审

责任编辑 王元新

封面设计 林智广告

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州林智广告有限公司

印 刷 杭州日报报业集团盛元印务有限公司

开 本 710mm×1000mm 1/16

印 张 11.75

字 数 148 千

版 印 次 2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-14613-5

定 价 38.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: (0571) 88925591; <http://zjdxbs.tmall.com>

序

长期以来,水电站厂内优化调度是国内外研究的重点和难点,它涉及水轮发电机组动力特性的获取、优化调度模型的建立、优化算法的求解以及软件系统的编制等诸多难点内容。

水轮发电机组动力特性是实现水电站厂内优化调度的基础,一般而言,水轮发电机组动力特性要通过水轮机真机试验获取,但国内大多数水电站并没有条件做水轮机真机试验,这大大限制了水电站厂内优化调度成果的推广与应用。本书作者通过对水轮机模型综合特性曲线、引水管道水头损失曲线和发电机效率曲线等原始资料的分析 and 研究,获取了典型机组段水头下的模糊动力特性方程,然后挖掘水电站计算机监控系统历史数据库的实际运行数据,采用“质心法”、“指数衰减法”、“可拓神经网络训练法”等对典型机组段水头下的模糊动力特性方程从“点”、“线”、“面”三个层次进行修正,以获取较为准确的水轮发电机组动力特性方程。动力特性方程获取方法的创新和突破,拓宽了水电站厂内优化调度的应用范围。

目前,国内外对水电站厂内优化调度的研究仅停留在确定性优化调度模型研究与求解,即在系列确定的约束条件下,建立确定约束组数学表达式和优化目标函数,然后采用确定性模型的求解方法如常规的动态规划法、遗传算法、粒子群算法等求解,确定性优化调度模型太趋向于理想化,在水电站的实际运行中价值很低。

其实水电站在电力生产过程中,存在诸多不确定因素,本书作者从实际运行的诸多动态不确定因素中提取了模糊动力特性变化、负荷计划瞬变和不确定检修计划三大重要的不确定因素,结合电力平衡、负荷区间限制、气蚀、振动等区域约束,建立了动态不确定优化调度模型。动态不确定优化调度模型的建立和验证,突破了传统确定性模型的应用局限,使得优化调度模型进一步贴合了水电站电力生产的实际。

动态不确定模型建立之后,常规的动态规划法、遗传算法、粒子群算法等无法求解该模型,本书作者通过系列研究,改进了动态规划法和遗传算法,形成了时空动态规划法和螺旋法向遗传算法,适应了动态不确定优化调度模型的求解,同时将动态不确定优化调度模型拓展到抽水蓄能电站的实际应用研究,求解方法的创新和突破,掘深了水电站厂内优化调度的研究程度。

本书作者不但对动力特性方程获取方法、动态不确定优化调度模型以及求解方法进行了长期深入的研究,而且将研究成果转化为实用的产品,开发了水电站动态不确定优化调度决策系统,该系统能在高水头混流式水电站、中低水头轴流式水电站、超低水头河床贯流式水电站、抽水蓄能电站等大中型水电站应用,提高了水电站优化调度效益 $2\%\sim 5\%$,对长期运行大中型水电站,将是非常可观的效益。且当动力特性获取方法创新后,该系统可以应用到国内诸多小型水电站,这对提高水电站发电效益、节约宝贵水能资源、推动节能减排等方面具有重要意义。



2015年5月9日

前 言

目前我国有 55000 多座水电站没有开展真机动力特性试验,无法建立动力特性方程,导致水电站厂内优化调度与决策只能凭借经验,浪费了大量的水能资源。本书对水电站机组动力特性、动态不确定优化调度模型及其求解方法等进行了深入研究,并将研究成果集成开发为企业版应用软件,能在国内诸多类型水电站中应用与推广,这对提高水电站的发电效益、节约有限水能资源、推动节能减排和可清洁能源的发展、推动新农村建设和服务“三农”等都具有重要意义。本书的主要工作如下:

1. 水电站水轮机组动力特性分析与研究。从模型特性资料和水电站计算机监控历史数据库出发,通过“质心法”、“指数衰减法”、“可拓神经网络训练法”、最小二乘法、插值等方法获取和修正动力特性方程,打破只能从真机试验获取动力特性的模式,并将新方法应用到国内多家水电站,从实践中不断改进和完善,同时结合计算机技术,建立了动力特性数据存储策略。

2. 水电站动态不确定优化调度模型研究。对传统的确定性模型进行改进,将模糊动力特性实时修正、日负荷计划瞬变、检修计划瞬变等不确定因素引入到模型建立过程中,建立了动态不确定优化调度模型。

3. 水电站动态不确定优化调度算法研究。改进了传统的动态规划法和遗传算法,建立了适应动态不确定优化调度模型求解

的时空动态规划递推求解方法和 SVGA 算法,并对两种求解方法进行了实例分析和比较研究。

4. 抽水蓄能电站动态不确定优化调度研究。针对大电力系统的诸多约束和抽水蓄能电站的特殊性,改进了动态不确定优化调度模型,对 SVGA 算法进行扰动改进,实证动态不确定优化调度在特殊水电站的应用可行性。

5. 水电站动态不确定智能调度决策系统设计与应用。将理论研究成果集成到软件设计与开发之中,成功实现了集成化的企业版软件应用系统。目前本系统已推广应用到国内各种类型的水电站。

总之,系列研究成果在实际工程中得到推广与应用,能提升水电站发电效益 2%~5%。

在本书撰写过程中,得到浙江水利水电学院校长叶舟教授、浙江省水电管理中心主任葛捍东教授、水利部农村电气化研究所所长徐锦才博士等的审核、指导与帮助,在此表示衷心的感谢。

研究是无止境的,后续需要进一步加强动力特性分析方法的多样化研究、动态不确定优化调度模型的多条件约束研究、多种求解算法的改进研究、潮汐水电站的动态不确定优化调度研究以及软件的完善与升级等。

笔者

2015 年 4 月

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪 论	1
1.1 背景与研究意义	1
1.2 水电站动力特性研究现状	3
1.3 水电站厂内优化调度研究综述	4
1.4 水电站厂内优化调度智能决策研究现状	8
1.5 主要研究内容	11
1.6 研究的结构体系	13
第 2 章 水电站水轮机组的动力特性分析与研究	15
2.1 引 言	15
2.2 水电站机组动力特性基本原理	16
2.3 模糊动力特性数据的获取	22
2.4 模糊动力特性数据的处理方法	24
2.5 基于指数衰减方法的点线静态修正	27
2.6 基于可拓神经网络训练的全局动态修正	30
2.7 动力特性数据存储策略	33
2.8 应用实例分析	36
本章小结	42

第 3 章 水电站动态不确定优化调度模型研究	43
3.1 引 言	43
3.2 动态不确定因素分析	44
3.3 确定性约束和不确定性约束	45
3.4 动态不确定优化调度模型的建立	47
3.5 动态不确定优化调度模型的计算机实现方法	51
3.6 应用实例分析	52
本章小结	58
第 4 章 水电站动态不确定优化调度的算法研究	60
4.1 引 言	60
4.2 基于时空动态规划法的优化调度研究	60
4.3 基于螺旋法向逼近遗传算法的优化调度研究	67
4.4 应用实例分析	74
本章小结	87
第 5 章 抽水蓄能电站动态不确定优化调度研究	88
5.1 引 言	88
5.2 抽水蓄能电站动态不确定优化调度模型	88
5.3 基于模糊扰动的螺旋法向逼近遗传算法	92
5.4 仿真实例分析	96
本章小结	103
第 6 章 水电站动态不确定智能调度决策系统设计与应用	104
6.1 引 言	104
6.2 总体框架设计	105

6.3 数据库系统的设计与开发	106
6.4 动力特性分析模块的设计与开发	113
6.5 动态不确定优化调度组件的设计与开发	119
6.6 智能决策模块的设计与开发	121
6.7 仿真实例分析	127
本章小结	137
第7章 结论与展望	138
7.1 结 论	138
7.2 展 望	141
符号说明	144
附 录	148
参考文献	166
索 引	000

第 1 章 绪 论

1.1 背景与研究意义

1.1.1 背 景

水电站厂内优化调度是国内外长期以来研究的重点和热点。水电站依托水能资源进行开发,而水能资源依托河流而存在,其大小由河流的实际蕴藏量决定。因此,从世界范围看,水能资源是有限的,世界上很多国家的水能资源开发率已经超过 60%^[1],如美国约 82%,日本约 84%,德国约 73%,加拿大约 65%,法国、挪威、瑞士均在 80%以上。当水能资源的开发达到很高程度时,不能再通过新建水电站获取更大效益,此时如何通过水电站群调度和厂内优化调度来提高水能资源的利用率就成为重点关注的问题。本书重点选取水电站厂内优化调度进行深入研究,旨在提高水电站厂内优化调度的决策水平和提升水电站厂内优化调度的效益。

1.1.2 研究意义

中国水能资源蕴藏量和技术可开发量皆居世界首位。据统计,全国水能资源理论蕴藏量为 6.944 亿 kW,每年可发电 6.083 万亿度,其中水能资源技术可开发量为 5.42 亿 kW,每年可发电 2.474 万亿度^[2]。水电站为中国广大地区提供着电能,推动了中国

的能源结构优化和电气化建设。相比火电、核电等能源形式,水电是清洁的可再生能源,水电的建设与发展,减少了燃煤的消耗量、二氧化碳的排放量,节能减排效益显著。截至 2012 年底,在全国江河 10 大流域和省、自治区和直辖市行政区域范围内,共有 300 多座大中型水电站(5 万 kW 以上)、55000 多座小型农村水电站(5 万 kW 及以下)以及约 30 座抽水蓄能电站,总装机容量突破了 2.3 亿 kW,位居世界首位^[2-4],它们在中国经济社会发展中发挥了重要作用。

从世界发达国家的水电发展经验来看,当水电建设发展到一定程度时,其发展重点将从新建水电站转移到水电站的更新改造和优化调度决策上^[5-9]。就优化调度决策而言,包括水电站群(梯级)优化调度和水电站厂内优化调度。针对水电站群(梯级)的优化调度研究比较多且相对比较成熟,而针对水电站厂内优化调度的研究却仍然停留在理论研究、零星算法研究或单个水电站的算法应用研究等较低水平,尚未形成系统的现代理论与实践体系,更没有专业化的、企业版的水电站厂内优化调度决策产品,其主要原因是水电站在电能生产过程中具有诸多不确定性因素,诸如:① 全国水电站普查资料显示^[2-3],大部分水电站地处偏僻山区,存在测试仪器安装条件差、经济条件差等原因,未进行水轮发电机组真机试验,导致机组动力特性模糊,而机组动力特性是进行水电站厂内优化调度的基础和必备条件,机组动力特性是否清晰直接影响水电站厂内优化调度决策的精度高低。② 水电站相比火电、核电等发电能源其开停机比较灵活^[10],在电能生产过程中电网往往采用水电站进行调峰、调频和调相,时常采用负荷瞬时给定方式,从而导致水电站日负荷计划具有不确定性,而日负荷计划也是水电站厂内优化调度决策的基础。③ 国内很多水电站建设早(1990 年前建设的有 2.2 万余座)^[3],运行时间长,水电站机组老化,导致振

动厉害、噪声大、故障多,在运行过程中时常有机组出现故障或事故停机,导致检修计划的瞬时变化。这些动态不确定因素使得传统的或其他领域常用的全局确定性优化调度模型无法在水电站电能生产过程中得到广泛应用与推广。

目前,中国水电站电能生产过程的机组负荷厂内调度基本上凭借经验,其长期运行的结果是浪费了大量宝贵的水能资源^[10-12]。因此,建立动态不确定环境下的水电站电能生产优化调度模型、研究和改进模型求解方法以及开发专业化的企业版软件,以解决农村水电站的电能生产优化调度问题,已经迫在眉睫。

综上所述,研究和有效解决诸多动态不确定环境下的水电站电能生产优化调度问题,对提高水电站的发电效益、节约有限水能资源和节能减排,推动可清洁能源的发展和新农村建设等具有重要意义。

1.2 水电站动力特性研究现状

水电站水力机组的动力特性是由动力平衡原则来表示的,水电站在水能转变为电能的阶段,其能量变化、损失的特性,常用相应的动力特性方程来表示。通常包含以下五种典型的动力特性方程:功率损失特性方程、功率流量特性方程、效率特性方程、耗水率特性方程和微增率特性方程^[10,13]。

水轮机的动力特性方程用于表达水轮机在不同工作状况下的能量转换及空化等方面的水力性能、出力特性及其他性能^[14]。这些特性是水流在水轮机内部流动规律的外部表现^[11,12]。目前的一些理论方法还很难全面地、精确地计算水轮机的各种性能,因此,水轮机的动力特性通常通过现场真机试验的方法获得。将试验所获得的水轮机性能参数绘制成不同形式的曲线图,以指导水电站

水轮机组的运行^[11]。

但是,目前国内已经做过现场真机试验的水电站并不多,其原因是:①水电站地处偏僻,受到各种现场条件的限制无法安装测量仪表。②基于动力特性的流量测量需要从最小机组段水头到最大机组段水头的测量,它是一个长期的过程,最好采用长期在线测量,然而在线实时流量测量仍是世界难题。③现场真机试验过程很长,要求很高,测量过程对水电站的耗水较大,将带来较大的发电损失,许多水电站具有反对情绪。因此,通过水轮机的模型特性资料获取动力特性成为一种必要的方法,但是通过模型特性资料获取的动力特性数据准确性不高,虽然一些相关教科书上有这方面的获取步骤介绍^[14],但目前国内外还没有相关文献报道研究如何通过有效方法包括数据处理、数据存储、数据挖掘等来提升模糊动力特性数据的准确性和可靠性。

1.3 水电站厂内优化调度研究综述

水电站厂内优化调度也叫水电站厂内经济运行,其实质是电力系统调度在某时刻给定水电站总负荷的情况下,如何分配机组间的发电负荷;或在一个调度时期内,如何确定水电站厂内运行的机组台数、开停机次序以及机组间负荷的最优分配^[14]。其最终目的是使水电站在运行周期内耗水最小化或发电效益最大化。水电站厂内优化调度研究主要涉及两个方面:一是水电站厂内优化调度模型研究;二是水电站厂内优化调度模型的求解算法研究。

1.3.1 水电站厂内优化调度模型研究现状

目前建立水电站厂内优化调度模型主要涉及以下几个方面的准则:国民经济效益最大或国民经济费用最小准则、电力系统支

出费用最小准则、电力系统总耗煤量最小准则、水电站发电量最大准则、水电站耗水量最小准则等^[15]。无论采用何种准则,其实质依然是水电厂的运行效益最大化,其模型主要包括目标函数和约束条件两个方面。

早在1946年,美国人Masse就将优化概念引入水电站和水库的优化调度中。1955年,李特尔(Little)采用马尔柯夫过程原理建立了动态规划模型,这是水库电站优化调度的开创性研究成果。1960年,霍华特(Howard)在《动态规划与马尔柯夫过程》一书中建立了马氏决策规划模型^[16]。20世纪70年代,国外陆续发表的研究成果表明,单一水电站优化调度的马氏决策规划模型已日趋完善^[17—19]。

中国开展水电站厂内优化调度的研究始于20世纪60年代初,几十年来,水电站厂内优化调度取得了显著的效果。1984年,张勇传把模糊等价聚类、模糊映射和模糊决策的概念引入水电站厂内优化调度研究中^[10]。1998年,张勇传在《水电站经济运行原理》^[14]一书中以成本最小为准则,建立了基于动态规划法求解的确定性厂内优化调度模型,该模型以机组分配的耗流量最小为目标,以机组电气和机械最大出力约束为条件,同时考虑了电力系统的电力平衡和水电站各机组的动力平衡,但依然是一个单目标的确定性厂内优化调度模型。

虽然水电站的厂内优化调度准则比较单一,但是就整个水库而言,其功能除了水电站发电之外,还有防洪、灌溉、供水、航运、旅游等功能,因此有学者结合水库的调度,提出多目标的优化调度决策模型^[20]。张亚平^[21]提出了多目标多阶级模糊优选模型的基本原理和解法。他把动态规划和模糊优选理论有机地结合起来,建立了多目标多阶级的水库优化调度模型并开发了决策支持软件。柳焯、徐海茹、夏清、蔡兴国、朱敏等研究了大系统中优化理论和模

模糊优选决策理论在梯级水电站系统中的应用,这些研究成果为水库和水电站梯级联合模糊优化调度奠定了理论基础。随着研究的深入,多目标优化理论也逐步应用到水库和水电站的梯级优化调度中,且粒子群算法相对流行^[22-38]。但就水电站的厂内优化调度而言,水库的功能再多也只能作为其约束条件引入,从水电站的运行效益最大化目标出发,建立的数学模型依然是单一的目标函数。

目前,水电站厂内优化调度模型的约束条件基本上采用了电力平衡限制、出力限制和状态限制,这些限制都是确定性的,在实际的水电站运行过程中属于理想的状态。其实在水电站运行过程中除了上述确定性约束之外,还有动力特性模糊及实时修正变化、负荷计划实时瞬间调整变化、机组事故或故障停机的检修计划变化等不确定约束,同时需要考虑机组的振动区域和气蚀区域等。因此,如何建立基于动态不确定约束的水电站厂内优化调度模型,是提升模型适应实际水电站优化运行的关键所在。但目前国内外尚没有基于动态不确定水电站厂内优化调度模型的研究报道。

1.3.2 水电站优化调度算法研究现状

国内外学者为求解确定性的水电站厂内优化调度模型,曾采用拉格朗日乘子法、动态规划法、遗传算法、粒子群优化算法、神经网络算法等。仿真研究结果表明,这些求解方法能够有效求解水电站厂内优化调度确定性模型。

1. 拉格朗日乘子法

拉格朗日乘子法^[14]有利于水电站机组的等微增率曲线求解,其优点在于可以通过手工绘图的方法来求解模型以获取最优分配方案。另外,随着机组数的增加,计算量增长近似于线性,没有“维数灾难”问题,且机组数目越多,算法效果越好。但是,拉格朗日乘子法的缺点也很明显:①拉格朗日乘子法要求等微增率曲线为凸

性,若等微增率曲线为非凸性的水电站,用其进行对偶法求解时,存在对偶间隙,出现“拉格朗日松弛”现象;② 拉格朗日乘子法的迭代过程有可能出现振荡或奇异现象,有时需要采取加快收敛的措施;③ 当模型的约束条件增加,会使计算量大大加大,并变得相当复杂,因此求解难度指数也相应增加。

2. 动态规划法

动态规划法大约产生于 20 世纪 50 年代,它随着运筹学的发展而来^[14]。1951 年,美国数学家贝尔曼等人,为了把多阶段决策问题变换为一系列互相联系的单阶段问题,提出了“最优性原理”,结合运筹学创建了一种新的最优化问题求解方法即动态规划法。动态规划法的优点在于可以全局性搜索最优调度方案,无需担心计算震荡、“早熟”、无法收敛等问题。但是,动态规划法存在一个至今难以克服的缺点,即“维数灾难”问题^[39—40]。当水电站机组较多、约束条件较多等因素存在时,其求解维数将呈指数增长,导致求解速度慢,无法满足实时性要求或者出现“死机”。

3. 遗传算法

遗传算法是由模拟生物进化过程发展而来的,它由美国 Michigan 大学 John H. Holland 教授等^[41]于 20 世纪 60 年代末到 70 年代初最先提出的,在 1975 年出版的 *Adaptation in Natural and Artificial System* 一书中,系统地阐述了遗传算法的基本理论与方法。1985 年, Davis^[42]首次将遗传算法应用于优化调度问题,此后遗传算法应用越来越广泛。它将求解目标函数进行编码,编制基于适应度计算的进化规则,通过杂交、变异、淘汰等机制,实现模型的优化求解。由于遗传算法可以控制为局部收敛以求得满足要求的最优解,因此该方法计算速度快且容易控制。但其缺点是需要调整杂交率、变异率、淘汰率、收敛精度等参数,参数值调整不好,就可能出现“早熟”或“进化呆滞”现象。所谓“早熟”即可能