

基于群体智能的 电力系统优化调度 理论与方法

张景瑞 刘厚德●著



Power system optimal dispatch
theory and method based
on swarm intelligence

清华大学出版社



基于群体智能的 电力系统优化调度理论与方法

Power system optimal dispatch theory and
method based on swarm intelligence

张景瑞 刘厚德●著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书针对电力调度员调度决策,适应调度自动化系统智能化发展趋势,系统介绍了作者在基于群体智能的电力系统优化调度领域的最新研究成果,集中体现了近年来电力系统调度优化研究的新进展和新方法。本书重点内容包括采用群体智能优化方法(包括粒子群算法、差分进化算法、教与学优化算法等)解决电力系统经济负荷分配、考虑网络约束的电力系统机组组合、含梯级水电的水火电联合调度、最优潮流和电力系统多目标优化调度等问题。同时结合市场化下电力调度的多准则现状,分别从发电公司和电网的角度探讨电力系统优化调度问题。

本书可作为电气工程、水力发电、能源与动力、系统工程、计算机等专业本科生、研究生以及相关科学领域研究人员的参考书,也可供从事电力调度的管理、技术、科研人员和高等院校教师阅读与参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

基于群体智能的电力系统优化调度理论与方法 / 张景瑞, 刘厚德著. — 北京: 清华大学出版社, 2016

ISBN 978-7-302-44662-0

I. ①基… II. ①张… ②刘… III. ①电力系统调度—系统优化—研究 IV. ①TM73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 179947 号

责任编辑:朱敏悦

封面设计:汉风唐韵

责任校对:王荣静

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62770175 转 4506

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:22.5 字 数:502 千字

版 次:2016 年 9 月第 1 版 印 次:2016 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:55.00 元

产品编号:062726-01

致 谢

本研究得到国家自然科学基金(61403321 和 60774084)、广东省自然科学基金(2014A030310318)、深圳市基础研究项目知识创新计划(JCYJ20130327150859765)和福建省软科学项目(2014R0093 和 2015R0080)的资助。

前言

20 世纪 80 年代末期,国际上对群体智能的研究进入了兴旺期。群体智能优化算法在各行各业都获得广泛关注。并逐渐被引入以求安全、求稳定而著称的电力系统。以遗传算法为代表的一大批群体智能优化算法被应用于包括电力系统调度在内的各类电力优化问题的求解。近五年来,国际上所出版的基于群体智能算法的电力系统优化领域的论文数量比以往任何时期都要多。然而,也存在一些问题:首先,学术界的兴趣大于电力工业界,因群体智能算法本身的随机性和不确定性,其仍难以被电力工业界所接受,群体智能算法在电力调度实际应用的案例仍较少;其次,尽管电力系统优化中涌现出众多群体智能算法并发表在各种杂志和学术会议上,然而却缺少相关专门介绍其在电力系统应用的系统性专著。鉴于以上情况,笔者结合自己多年来从事电力调度优化研究的情况,积多年的研究心得和研究结果,并结合国内外电力调度优化的最新成果,写成本书,供相关爱好者参考,希望起到抛砖引玉的作用。

全书共分 8 章。第 1 章介绍电力系统、电力系统调度自动化、发电调度优化的基本概念。第 2 章阐述了传统电力调度优化的理论与方法,给出了不同调度优化问题的区别,并结合一些具体例子进行介绍。第 3 章详细阐述了梯级水电系统建模方法,并采用粒子群算法和蚁群算法求解不同的梯级水电站群优化调度问题。第 4 章建立考虑政策因素的流域梯级水电站群优化调度模型并从流域公司的视角进行相关应用的研究。第 5 章从水火电联调的角度考虑含梯级水电站群的水火电力系统短期协调问题,并逐步提出采用改进粒子群算法、带加速操作的粒子群算法、小种群粒子群算法和改进混沌差分进化算法进行求解。第 6 章在考虑参与调度机组的状态基础上,分别用粒子群算法求解纯火电系统机组组合优化问题和水火电机组合优化问题,并将小种群粒子群算法扩展到能处理含离散和连续变量的混合变量优化问题。第 7 章考虑输电网络的影响,建立更加符合实际的优化调度模型,实质上是动态最优潮流模型,并分别用差分进化和粒子群算法进行求解。第 8 章从多目标的角度,建立水火电力系统和梯级水电站群的多目标优化模型,并分别从两个不同的角度设计粒子群算法求解方案。

本书适合作为高年级本科生、硕士研究生、博士研究生、电力调度决策者和群体智能优化算法爱好者研究和学习的教材或参考书。为此,作者在叙述上力求通俗易懂、深入浅出。

本书是笔者在攻读博士学位期间研究成果的基础上写成的,感谢华中科技大学岳超源教授的精心指导和关心。本书少部分内容为和同实验室同学陈阳、谢红胜、岳嵌、李金



鹏共同完成的成果。本书部分成果得到华中科技大学系统工程研究所齐欢教授、武汉大学管理学院王先甲教授和中国人民解放军国防信息学院王厚生教授的审阅。清华大学刘厚德博士负责撰写本书的第一章和第二章大部分内容,厦门大学曾涛博士负责撰写2.6—2.8节内容,笔者本人负责撰写余下部分并统筹全稿。另外,笔者的学生林爽、唐清慧、雷婧婷、郭逸然、黄健、许彬彬等人做了大量的实验工作和文字工作,对本书的成稿做了一定的贡献。感谢我的妻子对我工作的支持,是她的辛勤持家,我才有更多的时间从事科研与写作。同时,感谢所有支持、关心我的朋友和同事!

由于作者水平有限,不足之处敬请专家和读者批评指正! 作者 E-mail: zjr@xmu.edu.cn。

张景瑞

目 录

第一章 电力系统调度优化概述	1
1.1 电力系统特点及其基本概念	1
1.2 电力系统调度的主要任务	1
1.3 电力调度自动化系统	2
1.3.1 电力调度自动化在电网中的地位与作用	2
1.3.2 调度自动化系统基本结构与功能	3
1.3.3 电力调度自动化系统的发展	4
1.4 电力系统发电优化调度研究现状	5
1.4.1 机组组合与经济调度	5
1.4.2 梯级水电站群优化	6
1.4.3 水火协调	7
1.4.4 最优潮流	8
1.5 调度优化算法研究现状	8
1.5.1 单目标调度优化方法	8
1.5.2 多目标调度优化方法	9
参考文献	10
第二章 传统电力调度优化方法	11
2.1 概述	11
2.1.1 优化问题一般描述	11
2.1.2 最优化问题的数学模型及分类	13
2.1.3 最优化方法概述	14
2.2 经济调度的等微增率准则	17
2.2.1 概述	17
2.2.2 耗量特性	17
2.2.3 原理	18
2.2.4 算例	19
2.3 基于 Lambda 迭代法的经济调度	21
2.3.1 概述	21
2.3.2 Lambda 迭代法求解经济调度原理	21
2.3.3 算例	23



2.4 基于梯度法的经济调度	25
2.4.1 概述	25
2.4.2 梯度法求解经济调度原理	25
2.4.3 算例	26
2.5 基于牛顿法的经济调度	28
2.5.1 概述	28
2.5.2 牛顿法基本概念	28
2.5.3 牛顿法求解经济调度原理	28
2.5.4 算例	29
2.6 基于拉格朗日松弛法的机组组合	30
2.6.1 拉格朗日松弛算法概述	30
2.6.2 动态规划方法概述	33
2.6.3 电力调度的机组组合问题	34
2.6.4 拉格朗日松弛算法求解机组组合优化问题的思想	35
2.6.5 基于拉格朗日松弛法的机组组合模型及算法	36
2.6.6 算例	39
2.7 基于拉格朗日松弛与动态规划结合的水火电协调	43
2.7.1 水电系统建模方法	43
2.7.2 水电系统优化模型及其求解算法	44
2.7.3 基于拉格朗日松弛与动态规划的水火电协调优化	45
2.8 小结	48
参考文献	48
第三章 流域梯级水电站群优化调度的群体智能算法	49
3.1 概述	49
3.1.1 梯级水库调度特点	50
3.1.2 梯级电站群结构及衔接方式	50
3.1.3 梯级水电系统特性分析	51
3.1.4 梯级水电系统参数定量描述	52
3.2 考虑电价政策的流域梯级水电站群优化调度	55
3.2.1 引言	55
3.2.2 考虑电价政策的优化调度模型	56
3.2.3 粒子群优化方法	57
3.2.4 基于粒子群算法的调度问题求解	57
3.2.5 案例分析	59
3.2.6 小结	62
3.3 基于多向导粒子群算法的流域梯级水电站群长期优化调度	62
3.3.1 问题描述	63
3.3.2 标准粒子群算法	64



3.3.3 多向导粒子群算法	64
3.3.4 基于多向导粒子群算法的流域梯级水电站优化调度	66
3.3.5 案例研究	66
3.3.6 小结	70
3.4 基于粒子群算法的水电厂经济运行	70
3.4.1 问题描述	70
3.4.2 粒子群算法求解步骤	71
3.4.3 案例分析	71
3.4.4 小结	78
3.5 基于蚁群算法的流域梯级水电站群短期优化调度	79
3.5.1 市场条件下梯级水电站群优化调度概述	79
3.5.2 梯级水电站群短期优化调度准则	80
3.5.3 市场机制下流域梯级水电站群短期优化调度模型	83
3.5.4 基本蚁群算法优化的基本原理及算法描述	84
3.5.5 动态自适应蚁群算法	88
3.5.6 基于动态自适应蚁群算法的梯级水电站短期优化调度	91
3.5.7 案例研究	96
参考文献	107
第四章 考虑政策因素的流域梯级水电站群调度优化模型及其应用	111
4.1 概 述	111
4.2 考虑政策因素的流域梯级水电站群优化调度模型	112
4.2.1 目标函数	112
4.2.2 约束条件	113
4.2.3 数据预处理	115
4.3 调度优化模型应用	117
4.3.1 不同电价政策对流域公司收益水平的影响	117
4.3.2 “统一电价”和“一站一价”对流域公司的收益水平及水资源利用程度的影响	119
4.3.3 不同调度方式对流域公司收益水平及水资源综合利用程度的影响	120
4.3.4 各种防洪要求对流域梯级水电站群正常运行的影响	120
4.3.5 航运、灌溉、环境等政策对梯级最优运行方案的影响	121
4.3.6 为流域发电公司发电计划制订提供参考	122
4.4 澜沧江流域案例研究	122
4.4.1 相关参数	122
4.4.2 一站一价与统一电价	124
4.4.3 不同库区防洪约束	128
4.4.4 不同航运约束	128
4.4.5 不同调度方式	128



4.4.6 不同政策因素下求解结果分析	142
4.5 清江流域案例研究	144
4.5.1 相关参数	144
4.5.2 长期调度优化	146
4.5.3 短期调度优化	149
4.5.4 结果分析	155
4.6 小结	157
参考文献	157
第五章 基于 PSO 和 DE 算法的水火电协调优化	159
5.1 水火电协调优化概述	159
5.2 水火电协调优化问题描述	160
5.2.1 STHS 问题目标函数	160
5.2.2 STHS 问题约束条件	161
5.3 粒子群算法及其改进方向	162
5.3.1 粒子群算法起源	162
5.3.2 粒子群算法基本原理	163
5.3.3 粒子群算法流程	164
5.3.4 相关改进	164
5.4 DE 进化算法及其改进方向	166
5.4.1 差分进化算法概述	166
5.4.2 差分进化算法基本操作	166
5.4.3 差分进化算法基本步骤	167
5.4.4 相关改进	168
5.5 基于改进粒子群算法的 STHS	168
5.5.1 改进粒子群算法关键操作	169
5.5.2 基于 MPSO 算法的水火电力系统短期优化调度步骤	170
5.5.3 案例仿真	171
5.5.4 小结	174
5.6 基于 DE 加速的粒子群算法求解 STHS 问题	174
5.6.1 基于 DE 加速的粒子群算法	174
5.6.2 基于 DE 加速的 PSO 求解水火联调问题步骤	176
5.6.3 案例研究	177
5.7 基于小种群粒子群算法的 STHS	183
5.7.1 概述	183
5.7.2 小种群粒子群算法关键框架	183
5.7.3 基于 SPPSO 算法的 STHS 步骤	186
5.7.4 案例仿真	187
5.7.5 参数敏感性分析	193



5.8 基于改进的混沌差分进化算法的 STHS 问题	196
5.8.1 概述	196
5.8.2 改进的混沌差分进化算法求解水火联调	196
5.8.3 案例仿真	200
参考文献	212
第六章 基于 PSO 的电力系统机组组合优化	216
6.1 概述	216
6.2 电力系统机组组合优化	216
6.2.1 问题描述	216
6.2.2 机组组合优化求解方法研究现状	218
6.3 基于改进粒子群算法的机组组合优化	221
6.3.1 标准粒子群算法	222
6.3.2 基于改进粒子群算法的机组组合优化	222
6.3.3 案例仿真	224
6.4 基于小种群二进制粒子群算法的机组组合优化	228
6.4.1 二进制粒子群算法	228
6.4.2 基于小种群的 BPSO 算法及其机组组合优化	228
6.4.3 案例研究	235
6.4.4 小结	243
6.5 水火电力系统机组组合优化问题描述	243
6.5.1 概述	243
6.5.2 水火电力系统机组组合问题描述	244
6.6 基于小种群混合二进制粒子群算法的水火电力系统机组组合	246
6.6.1 基于小种群的混合二进制粒子群算法	246
6.6.2 基于 SPHPSO 算法的 STHUC	246
6.6.3 案例研究	249
6.6.4 总结	251
参考文献	251
第七章 基于群体智能优化方法的最优潮流	256
7.1 概述	256
7.2 潮流计算	257
7.2.1 潮流计算基本方程	257
7.2.2 潮流计算最优化模型	258
7.2.3 基于粒子群算法的潮流计算	259
7.2.4 案例仿真	261
7.3 基于差分进化算法的最优潮流	268
7.3.1 潮流优化问题描述	268



7.3.2	增广直角坐标牛顿法潮流计算	269
7.3.3	基于差分进化算法的最优潮流步骤	274
7.3.4	案例仿真	275
7.4	基于 PSO 算法的水火电力系统多时段最优潮流	289
7.4.1	问题描述	290
7.4.2	基于粒子群算法水火电最优潮流模型求解	291
7.4.3	案例仿真	293
7.5	考虑输电网络约束的电力系统机组组合优化及其 PSO 解法	298
7.5.1	问题描述	298
7.5.2	基于改进粒子群算法的问题求解	299
7.5.3	案例仿真	301
7.5.4	小结	309
	参考文献	309
第八章	水火电力系统及流域梯级水电站群多目标优化调度	314
8.1	概述	314
8.2	水火电力系统多目标优化调度	314
8.2.1	水火电力系统多目标优化模型	314
8.2.2	水火电力系统多目标优化算法	316
8.3	基于 SPPSO 算法的水火电力系统环境经济调度	319
8.3.1	环境经济调度模型转换	319
8.3.2	求解框架	320
8.3.3	案例研究	320
8.3.4	小结	327
8.4	基于 Pareto 支配的小种群多目标粒子群算法	327
8.4.1	多目标粒子群算法	327
8.4.2	基于 Pareto 支配的小种群的多目标粒子群算法关键框架	328
8.5	基于 SPMP SO 的水火电力系统多目标优化	332
8.5.1	SPMP SO 求解水火电力系统多目标优化关键步骤	332
8.5.2	案例研究	333
8.5.3	小结	336
8.6	澜沧江流域梯级水电站群多目标优化	337
8.6.1	引言	337
8.6.2	流域梯级水电站群多目标优化模型	337
8.6.3	基于 SPMP SO 的澜沧江流域梯级电站多目标优化调度步骤	338
8.6.4	仿真结果	339
8.7	本章总结	343
	参考文献	344

第一章 电力系统调度优化概述

1.1 电力系统特点及其基本概念

电力系统由发电厂、输变电系统、配电系统和各种不同类型的负荷等组成。目前,我国的电力系统已基本形成大电网、大机组、高电压输电和大区互联的格局。这种地理分布广阔、规模巨大的现代电力系统,在经济性和稳定性方面带来显著优势,但也带来诸多弊端:(1)系统规模大给调度提出了更高的要求,发生大规模连锁故障风险增大,安全分析更加困难,稳定问题较突出;(2)各子系统间如何协调,全局和局部利益如何统筹考虑,水火电如何配合等都具有挑战性。

为确保规模庞大的电力系统安全、优质、稳定、经济地运行,必须要建设一套高度信息化、自动化和可靠的调度自动化系统,实现对电力系统在线监控与调度决策,必须提高电力系统调度优化的水平。目前,我国电网运行实行统一调度、分级管理,各级调度中心对系统的运行进行控制和管理。电力系统调度有“狭义”与“广义”之分,狭义的调度指辅助调度员值班的辅助决策功能,广义的调度则涵盖了调度中心全专业的自动化,通过自动化手段服务于坚强的输电网,本书则倾向于狭义的调度。从处理时限上,电力系统调度可分为中长期调度(规划)、短期调度(日前调度)、超短期调度以及实时调度(自动发电控制),本书倾向于关注日前调度。

1.2 电力系统调度的主要任务

《电力法》规定:各级调度机构对各自调度管辖范围内的电网进行调度,依靠法律、经济、技术并辅以必要的行政手段,指挥和保证电网安全稳定经济运行,维护国家安全和各利益主体的利益。

(1) 保证系统运行的安全水平

电力调度的首要任务是保障电网安全、稳定、正常运行和对电力用户安全可靠供电。系统运行方式和调度水平不同,系统承受事故冲击的能力就不同。调度部门要预先通过大量的计算分析,制定应对意外事故的安全措施,装设安全自动装置和机电保护设备,并做好事故预想和处理预案。更重要的是防患于未然,通过实时监控和分析决策系统,实时监测电网的运行状态,根据实时负荷水平优化电网运行方式,提高系统安全裕度。



(2) 保证供电质量

电能质量主要用系统频率、波形和母线电压水平来衡量,这些因素由供需双方动态平衡来决定。由于电能不能储存,应时刻保持供需平衡。若有功负荷超过发电有功,系统频率就要下降;无功负荷超过发电无功,母线电压就要降低。一般要求将电压和频率控制在某一给定范围内。因此调度必须提前预测系统需求,并进行事前的电力电量平衡,编制不同时段的发电调度、检修和备用计划。

(3) 保证系统运行的经济性

在同样负荷水平下,发电机功率分配方案不同,运行的经济性也不同。在规划阶段,需要综合考虑国家政策,合理配置不同类型发电厂、燃料与运输,以及水电网络建设;在运行阶段,根据负荷水平,要实时调度安全机组启停,分配机组出力,提高发电机组的经济性,减低输电损耗。

(4) 保证提供有效事故后恢复措施

解除超载运行设备的过载,使系统运行恢复正常;恢复已经失电的区域的电力供应。

调度的4大任务中,前3项是调度自动化的主要内容,目前都用计算机完成,第4项主要靠调度员人工处理。实际上本书所涉及的调度优化主要针对调度的第3个任务并在适当兼顾第1个任务。

1.3 电力调度自动化系统

1.3.1 电力调度自动化在电网中的地位与作用

电力系统运行的可靠性及电能质量与电力系统的自动化水平有密切联系。为了电力系统安全经济运行,各种继电保护和自动装置组成了信息就地处理的自动化系统,对电力系统的情况做出快速反应。但由于信息就地处理的自动化系统获得的信息是局部的,因而不能从全局的角度来处理问题。如频率及有功功率自动调节装置,虽然可以跟踪负荷的变化,但不能实现有功功率的经济分配。信息就地处理自动装置一般只能“事后”处理出现的事件,不能“事先”从全局的角度对系统的经济性与安全性做出全面的评价。以现代电力系统的运行要求来看,仅依靠信息就地处理的自动化系统还不能保证电力系统安全、优质、经济运行,因为这些装置往往都是根据局部的、事后的信息来处理电力系统的故障,而不能以全局的、事先的信息来预测、分析系统的运行情况和处理系统中出现的各种情况。

调度自动化系统又称为信息集中处理的自动化系统,它有着独特的不可替代的作用。调度自动化系统通过设置在发电厂和变电站的远动终端采集电网运行的实时信息,通过信道传输到设置在调度中心的主站上,主站根据收集到的全局信息,对电网的运行状态进行安全性分析、负荷预测以及发电计划、机组优化组合、经济调度、自动发电控制等。当系统发生故障,继电保护装置动作切除故障线路后,自动化系统便可将



继电保护和断路器的动作状态采集后送到调度员的监视器屏幕和调度模拟屏上显示。调度员在掌握这些信息后可以分析故障原因，并采取相应措施恢复供电。但由于信息的采集、传输需要一定的时间，所以目前在发生故障时还不可能依靠信息集中处理系统来切除故障。信息集中处理和就地处理各有特点，互相补充而不可替代。

1.3.2 调度自动化系统基本结构与功能

电力调度自动化系统由 4 个子系统组成（图 1-1），即信息采集和控制执行子系统、信息传输子系统、信息处理子系统和人机联系子系统。

信息采集和控制执行子系统主要起两方面的作用：

- （1）采集调度管辖的发电厂、变电站中各种表征电力系统运行状态的实时信息，并根据需要向调度控制中心转发各种监视、分析和控制所需的信息。采集的量包括遥测、遥信量、电度量、水库水位、气象信息以及保护的信号等；
- （2）接受上级调度中心根据需要发出的操作、控制和调节命令，直接操作或转发给本地执行单元或执行结构。执行量包括开关投切操作、变压器分接头位置切换操作、发电机功率调整、电压调整、电容电抗器投切、发电调相切换甚至继电保护的整定值修改等命令。

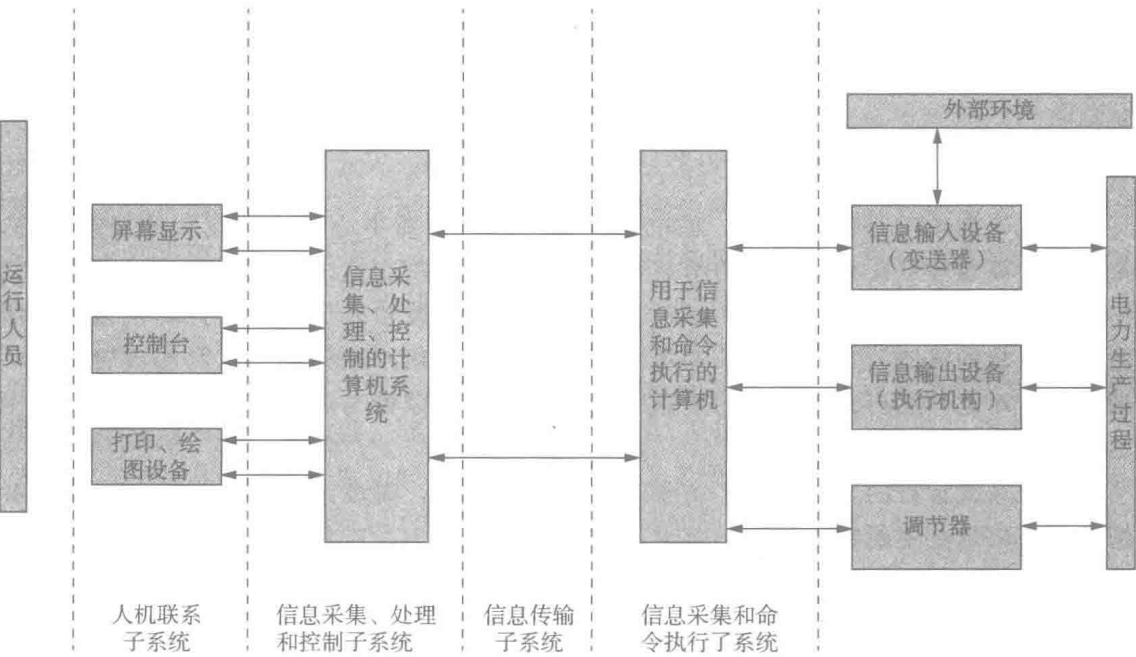


图 1-1 调度自动化系统基本结构

信息采集和控制执行子系统是调度自动化的基础，相当于自动化系统的眼和手，是自动化系统运行的保证。

信息传输子系统将信息采集子系统采集的信息及时、无误地送给调度控制中心。现代电力系统中，信息传输系统的传输信道主要采用电话、电力线载波、微波、同轴电缆和光纤，亦有少量卫星通信。信息传输系统也是调度自动化的一项基础设施，犹



如自动化系统的神经系统。该系统分布广，而且易受天气、环境等影响。

信息处理子系统是调度自动化系统的核心，主要由计算机系统组成。它主要完成以下功能：

- (1) 实时信息处理，包括形成能正确表征电网当前运行情况的实时数据库，确定电网的运行状态，对超越运行允许限值的实时信息给出报警信息，提醒调度员注意；
- (2) 离线分析，可以编制运行计划和检修计划，进行各种统计数据的整理分析；
- (3) 现代信息处理系统具有能对运行中的电力系统进行安全、经济和电能质量几方面的分析决策功能，而且是高度自动化的；
- (4) 保证系统安全，包括对系统的安全监视、安全分析和安全校正；
- (5) 保证经济性，主要由计算机做出决策，调整系统中的可调变量使系统运行在最经济的状态，这些通过各种发电调度计划及 AGC（自动发电控制）等功能协同完成；
- (6) 提高电能质量，由自动发电控制 AGC 维持系统频率在额定值，及联络线功率在预定的范围之内。自动无功电压控制 AVC 保证系统电压水平在允许范围之内，同时尽可能降低系统的网损。

人机联系子系统以对调度员最为方便地形式将计算机分析的结果显示给调度员。人机联系系统包括模拟盘、图形显示器、控制台键盘、音响报警系统，记录、打印和绘图系统。

习惯上把信息处理和人机联系子系统称为主站端系统，而把数据采集和控制执行子系统称为厂站端系统。

1.3.3 电力调度自动化系统的发展

现代电力系统是由发电网、输电网、配电网和负荷中心组成的庞大的能量系统，需要一个高度信息化和自动化的信息系统来监控和调度。这个系统就是现代能量控制中心系统，是一个集数据采集、控制、通信和分析决策功能于一身的计算机系统。随着电力系统的发展，装机容量不断增加，输电电压等级不断升高，电网的覆盖范围不断扩大，对电网运行管理手段的要求越来越高，电力监控与调度控制技术也随着电网的发展而发展。

电力系统运行的早期阶段，由于通信设备的限制，调度人员要花很长时间才能掌握有限的信息，主要靠一些自动装置、电话以及运行人员的经验来调度和操作，因此不能很有效地管理电网。随着电子元器件和数字逻辑技术的发展，我国在 20 世纪 60 年代中期数字综合远动装置中采用了数模转换技术，实现了数字遥测，精度大为提高，将数据通信、计算机技术引进远动技术领域，使远动技术在原理上有了一个飞跃，这些技术原理即使在现在的微机运动中仍被继续采用。将微机技术应用于远动技术后，远动技术发生了重大变化，原来许多不易实现的功能，采用微机技术后便迎刃而解。20 世纪 60 年代后期国际上出现的大面积停电事故以后，电力系统加强了全网的安全监视、分析和控制，包括 SCADA、自动发电控制与经济运行、网络分析、调度管理和计划功能的能量管理系统开始出现。1970 年以来，状态估计和最优潮流的理论研究取得了重大进展。一些大停电事故的发生增强了人们对电力网络安全评估重要性的认识，



欧洲的停电事故表明调度员培训仿真模拟、紧急情况下采取校正控制和电压稳定性方面的重要性。1976 年出现了调度员培训仿真系统 (DTS) 的概念, 并在 20 世纪 70 年代末出现世界上第一台 DTS。20 世纪 80 年代中后期, 对于中低压配电网络开始实施配电自动化用于提高供电可靠性和用电质量。20 世纪末, 电力市场化改革热潮掀起, 把经济理论引入电力系统分析决策中, 逐步发展出电力市场支持系统。2003 年欧美大停电事故中, 广域测量系统 (WAMS) 给出的大量系统崩溃过程的相量信息, 为事故分析提供了大量翔实的信息。21 世纪以来, 高速数据网技术的成熟和推广使得调度自动化系统有可能实现深度互联, 逐渐发展成为一个分层、分布的智能超级控制中心系统。

1.4 电力系统发电优化调度研究现状

发电调度计划是规定如何利用电源以符合安全判据和经济判据的规划过程。因为它是一个规划过程, 所以调度计划要提前完成, 调度的实质是资源在有限时间内的分配问题。发电调度计划必须提供以下信息: 哪些机组将处于旋转状态; 旋转发电机组发出的电量、成本; 与电源可用性相关的不确定性; 发电机组在需要时可以提供的额外潜力和服务。调度计划制定的依据是优化算法, 根据经济判据优化电源的使用, 但要受技术、安全、环境和规范的制约。

在电力系统调度运行中, 提供电能的发电机组类型及特性都有一定差异, 为保证其正常的使用寿命, 发电机组要受到各种运行条件的限制, 如发电机组功率的调整速度、最小开停机时间、计划与非计划检修所需要的时间等。这样, 在制定日前、超前及在线的发电调度计划时, 为满足呈一定概率规律且周期性变化的负荷需求, 需要考虑各因素的不确定性和差异性, 同时要兼顾电力系统运行安全、可靠的准则, 追求电力系统的经济运行, 这就是电力系统运行调度理论的核心问题。具体讲, 电力系统运行调度是一个复杂的运筹问题, 在追求一定的目标下, 要处理好两类约束条件, 一是构成系统的各元件 (如发电机组、输电元件等) 自身约束; 二是时间断面间的耦联约束 (一定周期内的水库水量、燃料限制、环境污染、机组输出功率速率限制等)。本书按调度自动化系统发电调度功能模块将电力系统优化调度分为: 经济调度、机组组合、水火电协调、梯级水电调度以及最优潮流等, 下面分别概述。

1.4.1 机组组合与经济调度

机组组合通常是指在一个确定的调度周期中, 合理确定机组状态, 给出在线机组的出力安排并满足系统电量需求及电力系统各种复杂约束, 尽可能节约煤耗成本和机组启停费用。机组组合对电力系统经济、安全调度具有重要影响, 它不仅可以节省大量的经济成本还能通过保持一定的旋转备用来提高电力系统的可靠性。机组组合优化是电力系统优化调度的模块之一, 它规定调度周期内不同时段哪台机组“在线”, 哪台机组“离线”。

机组组合问题的决策变量不仅涉及表示机组运行状态 (在线和离线分别用 0 和 1