

Abstract

Firstly, the paper analyses basic states of current power market in China, then, based on the principle of energy-saving generation dispatching and actual situations of Chinese power system operation and dispatch, the paper makes a thorough research on application of energy-saving generation dispatching under the environment of junior power market. Combining with basic states of Hunan power grid, the paper launches a research on energy-saving generation dispatching and deducing hydroelec spinning reserve based on principles of energy-saving generation dispatching. Finally, basic frame work and development of energy-saving and generation dispatching technology system based on J2EE is designed.

The essential of energy-saving generation dispatching is, according to the principle of energy-saving and economy and dispatching renewable resource in priority, sorting generators by its energy consumption and emission and dispatch fossil resource generator in order to minimize resource consumption and emissions. Based on analysis of current power market, the paper researches basic application of Energy-Saving Generation Dispatching in power system from three aspects such as short-time power load forecasting, designing of generator sorted table and emission model.

Strengthen of interconnected super-grid presents higher requirements as for power grid security, stability and economy. The accuracy of power grid's spinning reserve becomes an important way to keep the grid secure. Base on research of spinning reserve forecasting methods currently, methods such as linearization, polynomial fitting, similar-day selection and probability statistics and so on are proposed in the paper.

On the basis of the above-mentioned theory research and combined with research subject of Hunan power grid, the paper elaborates the research findings of energy-saving generation dispatching and deducing hydroelec spinning reserve based on principles of energy-saving generation dispatching. The research refers to such aspects as spinning reserve forecasting and distribution, disposal of constraint condition, examine of AGC generator and evaluate benefit of reserve.

To follow, considering current states of power system dispatching in our country, research on how to revise quoted price by considering factors of energy consumption, loss and emission. The paper proposes to sort generator by its price by introducing

energy consumption factor、 loss factor and emission factor into generation bidding rules. Collective model of Energy-Saving Generation Dispatching and Generation Bidding is proposed to conduct as the basis of Energy-Saving Generation Dispatching. The example demonstrates that the method can achieve the goals of energy-saving、 environmental protection and economy more effectively.

Finally, basic frame work energy-saving and generation dispatching information management system based on J2EE three-layers architecture is designed and the realization of systematic functions modules is described. The J2EE based systematic software design, database design and security design are provided.

Research findings in this paper possess vital theoretical research meanings and utility value, it provides a feasible plan for the application of energy-saving generation dispatching and development of its technology system. It benefits greatly the optimization of social resources allocation in entire country, reducing of emissions of pollutants, and advancement of the development of power industry.

Key Words: Power System; Power Market; Energy-Saving Generation Dispatching; Spinning Reserve; J2EE

插图索引

图 1.1 市场改革后英国电力市场基本结构.....	1
图 2.1 超短期负荷预测与实际负荷对比.....	12
图 2.2 2008 年 12 月 18 日超短期负荷预测偏差图	13
图 2.3 机组的调用顺序以及负荷的作用示意图	15
图 3.1 系统备用容量与系统 EEENS 的关系.....	20
图 3.2 系统备用容量启动情况	21
图 3.3 备用容量预测图.....	24
图 3.4 2008 年 12 月 15 日旋转备用容量对比图	25
图 3.5 1 次拟合结果.....	26
图 3.6 5 次拟合结果.....	26
图 3.7 10 次拟合结果.....	27
图 3.8 20 次拟合结果.....	27
图 3.9 30 次拟合结果.....	27
图 3.10 传统备用与优化备用曲线图.....	30
图 3.11 各种满足概率情况下备用曲线比较立体图.....	34
图 3.12 各种满足概率情况下备用曲线比较	34
图 3.13 1 时段各种满足概率情况下备用率曲线	34
图 3.14 时段 1 的概率分布函数曲和附加有正态密度曲线的直方图.....	35
图 3.15 时段 1 小于 0.02 的概率和时段 1 正态分布概率图形	35
图 4.1 湖南电网近 7 年来火电发电量变化曲线图	38
图 4.2 湖南电网近 7 年来水电发电量变化曲线图	38
图 4.3 湖南省历年水、火电发电量占总发电量比例对照图	39
图 4.4 火电备用分配流程.....	42
图 4.5 水电备用分配流程.....	43
图 4.6 水电机组耗水特性.....	44
图 4.7 专家系统框图.....	47
图 4.8 约束处理流程图.....	48
图 5.1 机组燃料消耗特性.....	57
图 6.1 节能发电调度系统登陆界面.....	65
图 6.2 系统技术实现流程.....	65

图 6.3 系统的主要模块功能图	66
图 6.4 火电煤耗管理.....	66
图 6.5 电网备用分配结果.....	67
图 6.6 开停机指导界面.....	67
图 6.7 基于三层架构的系统总体架构图.....	68
图 6.8 约束处理机制.....	69
图 6.9 系统层次结构.....	73

附表索引

表 1.1 辅助服务的主要内容	2
表 2.1 传统发电调度与节能发电调度的区别	8
表 2.2 超短期负荷预测结果	12
表 2.3 湖南电网统调火电机组煤耗排序	14
表 3.1 旋转备用预测结果	25
表 3.2 传统备用与优化备用比较	29
表 3.3 不同可靠性对应的备用率	31
表 4.1 2007 年电力行业节能减排统计	37
表 4.2 不同水头和出力情况下对应的耗水量	45
表 4.3 火电机组 AGC 调节性能要求表	50
表 4.4 水电机组 AGC 调节性能要求表	50
表 5.1 机组相关参数	62
表 5.2 机组每小时的参数计算	62
表 5.3 各种排序方法的效果比较	62

湖南大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明:所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外,本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体,均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名: 李川

日期: 2009年5月21日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定,同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1、保密, 在_____年解密后适用本授权书。

2、不保密.

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名: 李川 日期: 2009年5月21日

导师签名: 李川 日期: 2009年5月21日

第 1 章 绪 论

1.1 电力市场基本理论研究概述

根据国务院国发[2002]5 号文件精神,把具有自然垄断性的电网基础设施运营管理业务与具有竞争性的发电与售电企业的经营业务分开,即逐步放开发电与售电市场,是我国电力工业改革的必然发展方向。我国电力工业必然要打破垄断,引入竞争,实行“厂网分开、竞价上网”,逐步实现发电、配电、输电、和售电四个环节分离,实现全国联网、西电东送,建立规范有序的电力市场,在省级、区域级电网直至全国联网范围内引入电力市场竞争机制。目前我国电力市场改革已进入“厂网分开”的实质性操作阶段,“南北互供、西电东送、全国联网”步伐加快,迫切要求制定出符合市场经济规律的发电侧电力市场竞价交易模式和具体实施方案^[1~7]。有关电力市场的理论研究主要有以下几个方面:

(1) 电力市场模式及其交易方式

电力工业市场化改革在不同的国家与地区实行的过程中形成了几种不同的模式。如果从全球的范围考察电力工业的实际组成,大体上可以分成四种工业组织模式——垂直一体化模式、单一买方模式、批发竞争模式和零售竞争^[8]。

国内在电力市场的研究,主要是借鉴国外的经验,研究 PX(Power Exchange)、ISO(Independent System Operator)与 AS(Ancillary Service)等的组合、分工、协调;研究在把发电、输电、电能交易、系统调度职能分开后,从电力工业发展和改革的稳健性考虑,如何协调好各方利益去培育具有竞争力的发电公司;研究对我国的输电网职能细分到何种程度才能够满足竞争性、透明性和公平性等。批发竞争模式与零售竞争模式在电力市场实践中都有许多国家分别采用。

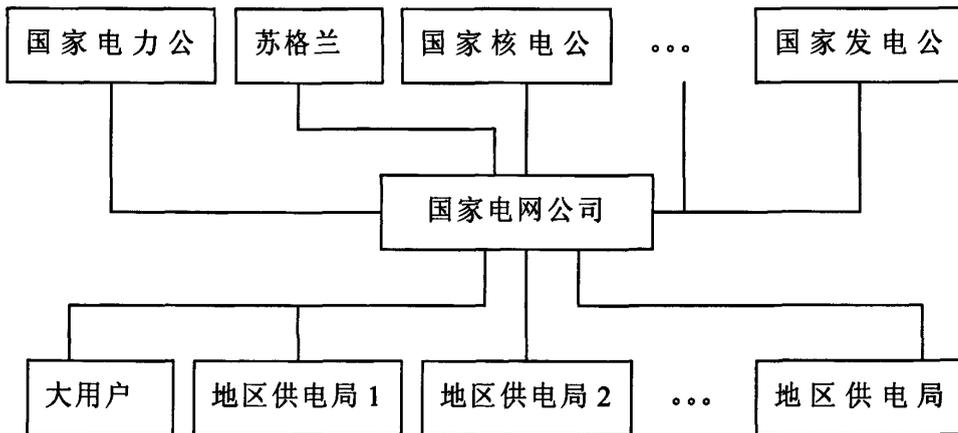


图 1.1 市场改革后英国电力市场基本结构

(2) 竞价交易机制

市场交易机制是电力市场理论的核心。其中，交易机制中的竞价上网模式和发电公司竞价策略的研究是电力市场理论的难点，有很强的随机性和实时性要求。该问题不仅与电力系统的经济效益有关，而且直接影响电力系统的安全性和可靠性。对发电企业来讲，竞争的目标是获取最大利润，如何制定最优竞价策略、形成最优竞价模型是十分重要的问题。国内外在这方面开展了许多有意义的研究探讨工作，提出了多种发电竞价策略。电力调度和交易部门面对的是在保证系统安全稳定运行的前提下，如何选择发电厂商以使得购电费用最小，研究比较集中的竞价模式有两部制电价竞价模式、限量竞争模式、基于差价合同的竞价模式等。

(3) 电价的形成机理及其电价预测的理论与算法

电价体系的研究是电力市场理论的价格基础，涉及到电力系统运行的各个阶段、各个环节。电价预测理论对于开放的电力市场是非常重要的。电力市场环境下电源优化规划、电网优化规划、增加发电容量、区域间电能交易以及市场风险分析等，在很大程度上都依赖于电价预测。考虑各种约束条件的比较完善的系统市场清算电价和输电费用模型已经获得应用。价格预测领域已经提出了多种模型和算法：时间序列法、灰色预测算法、指数平滑法、回归分析法、神经网络模型及博弈模型等。

(4) 辅助服务定价理论与方法

辅助服务是为满足电力系统的安全性、经济性，保证一定的电能质量而采取的一系列必要措施。辅助服务的种类根据需要转运的负荷所在的位置及电源的位置和能量的不同而不同，包括调压、电压和无功功率控制、各种系统备用、稳定控制等^[9]。表 1.1 给出了辅助服务的主要内容：

表 1.1 辅助服务的主要内容

主要内容	主要内容
频率控制	有功网损补偿
旋转备用	事故后的恢复
运行备用(非旋转备用)	系统安全控制
无功备用和电压控制	发电再计划

(5) 电力市场环境下电力系统安全运行及可靠性

电力市场环境下引入竞争机制，在某种程度上意味着对电力工业放松管制，但由于电力供应中安全的重要性和保证安全供电的复杂性，对电网安全可靠运行的管理不能放松，电网安全原则是电力市场运营的基本原则。发输电、配电分离开来，各发电企业可能分属于不同的利益团体，传统的集中管理被分散的决策所替代，在这种情况下如何保证电力系统的安全运行及可靠性是一项技术性、操作性要求很高的工作。具体说来主要涉及：电网的安全运营与可靠性理论研究、各

种交易市场的竞价方式与交易模型、辅助服务的定价理论与方法以及市场条件下的保护和安全管理。

1.2 本文的研究背景以及国内外研究现状

1.2.1 本文的研究背景

20 世纪 80 年代,为鼓励投资发电,尽快扭转缺电局面,施行了“大平均”调度模式,即按照机组容量,大致平均分配发电利用小时数。按照此种调度规则,调度指标将决定发电机组每年发电利用小时数。这种做法在一定时期内调动了投资电源项目建设的积极性,促进了电力工业的快速发展,但也导致了高效环保的大火电机组、水电及核电等清洁能源机组的发电能力无法充分发挥,高污染、高能耗的小火电机组却能多发电的情况,造成了能源浪费和环境污染。事实上,在平均分配电量的调度模式下,推行“以大代小”、“电量置换”等节能降耗措施,均很难取得理想的效果。

为减少能源消耗和污染物排放,2007 年 8 月 2 日,《节能发电调度办法(试行)》(以下简称《办法》)颁布,为改革我国多年来的“大平均”调度模式和实施节能发电调度提供了依据。节能发电调度是指在保障电力可靠供应的前提下,按照节能、经济的原则,优先调度可再生发电资源,按机组能耗和污染物排放水平由低到高排序,依次调用化石类发电资源,最大限度地减少能源、资源消耗和污染物排放。

我国电网的调度方式为统一调度、分级管理。电力调度机构分为国调、网调、省调、地调和县调五级(南方电网分为网调、省调、地调和县调四级)。大部分机组在省级进行调度。各省电网的调度模式基本一致:由省级政府主管部门确定年度发电目标计划,调度机构根据有关合同和年度目标计划,以“三公”原则编制月度计划和日发电计划,当日按照电网实际情况、供需变化等进行实时调度。优化调度的主要目标是电力系统运行的经济性,同时兼顾发电的污染物排放最小等环境保护目标。

实施节能发电调度是对我国现行发电调度制度的重大改革,在我国电力市场体制不够健全的情况下,必须充分发挥市场机制的资源配置作用和政府的宏观调控作用。

本论文研究方案是在湖南省电力公司的直接领导下,课题组的同志先后深入调研,广泛收集国内外相关资料,经一年多时间艰苦研究的成果。本论文研究方案根据我国电力市场的发展趋势,依据节能发电调度办法,紧密结合湖南电网水节能发电调度的实际需求,开展了基于节能调度、减少水电旋转备用的研究,研发了节能发电调度技术支持系统。

1.2.2 国内外研究现状

节能减排是国家的一项基本国策，而节能发电调度是以节能减排为核心目标提出的电力工业发电调度规则，是在以往实行的等煤耗微增调度方式的基础上，对现行调度方式的制度性变革，旨在建立一种以能耗和排放水平为基准的发电调度方式，最大限度发挥可再生及其他清洁能源的作用，最大限度减少化石燃料的使用。在国家提出建设资源节约型社会和“十一五”期间节能降耗的战略目标后，电网企业采取了很多措施以实现节能调度^[10]。

例如：江苏实行的“替代发电”明确要求 20 万 kW 及以下机组必须拿出 50% 的发电计划让大机组替代，发电企业间的协商替代只能在效率最高的 60 万 kW 机组和小机组之间进行，提出了根据燃料成本确定高耗能机组最低报价的指导性意见。

南方电网充分利用南网大平台，加强水火互剂和省间互补；加强调峰管理，充分挖掘全网火电机组和核电机组的调峰能力，最大限度吸纳汛期低谷弃水电量。南方电网公司还加强了节能发电调度技术支持系统建设。广东、贵州电网已建立了基于节能发电调度的日计划编制系统、烟气脱硫实时监测系统、热负荷实时监测系统及节能发电调度信息发布系统。云南电网建成了火电烟气运行监测与分析系统。贵州电网脱硫监测系统已接入 16 个电厂的 41 台机组（容量 952 万千瓦），占脱硫机组容量的 94%；广东电网 71 台脱硫机组已全部接入脱硫实时监测系统。

河南采取简便易行的办法对煤耗排序、差别电量计划和以大代小，即对同类型火电机组发电小时按基本一致的原则进行安排，拉大不同类型机组差距；提高负荷中心、受端地区发电机组发电小时以引导电源优化布局；开展发电机组轮流停机备用，提高发电负荷率。

自 2008 年 1 月 1 日贵州电网公司在全国率先启动节能发电调度试点运行以来，通过优化调度，多发水电，最大限度地减少一次能源消耗和污染排放，取得了显著的社会经济效益。1-7 月，贵州电网公司综合节能降耗折合标准煤 83 万吨，折合原煤 127 万吨。1-7 月贵州电网水电发电量累计完成 81 亿千瓦时，同比增长 36.1%，折合节省标准煤 71 万吨；水能利用率大幅提高，水电耗水率降至 3.99 立方米/千瓦时，减少 0.1 立方米/千瓦时，降幅 2.4%，折合节省标准煤 7 万吨；梯级蓄能值 31 亿千瓦时，同比增长 5.3%，折合节省标准煤 5 万吨。下一步，贵州电网公司将积极做好相关技术支持系统的建设，完成《贵州节能发电调度煤耗在线监测系统》鉴定验收和实用化，力争形成完善的组织体系、管理体系、技术体系。

这些措施都取得了较为显著的节能降耗的效果。可见，通过节能发电调度，电力工业节能降耗是大有潜力的，节能发电调度的措施也是可行的。

文献[11]结合四川电网发电运行特点，依据节能减排发电排序表，采用小步

长最优次序法，以发电能耗最少为目标函数建立了节能发电调度模型；文献[12]对节能发电调度，更多的是从政策、策略方面探讨和研究；文献[13]介绍和比较了2种发电调度方法，突出了节能发电调度的优越性，针对目前我国节能减排的要求，结合国内外发展趋势论证了实行节能调度的必要性和可能性；文献[14]首先给出了在设计节能发电调度模式（模型）及运作机制时需要遵循的一般原则；然后结合中国国情，以电网安全稳定运行及连续可靠供电为约束，以节能、环保、经济、公平为目标，设计了实施节能发电调度的7种主要模式并进行了比较研究，分析了每种模式的优缺点，设定了每种模式实现的前提条件；同时设计了节能发电调度在过渡期内的4种经济补偿机制和结算模式，并进行了比较分析。最后提出了节能发电调度由纯行政命令模式向完全市场竞争模式过渡的几种过渡方式。文献[15]结合中国国情提出了兼顾政府宏观调控（计划调控）与市场机制的节能发电调度模式及其运作机制。

1.3 本文主要内容和所做的工作

1.3.1 本文主要内容

本文主要分7章对电力市场环境实施节能发电调度这一课题展开分析和阐述。

第1章为绪论，主要介绍了电力市场研究的主要内容、本课题研究背景和国内研究现状以及本文研究的主要方法与总体思路。

第2章通过对节能发电调度原则的分析和研究，分别对短期负荷预测、发电机组排序、排污模型等相关问题进行了研究。

第3章结合工程实际，对电网旋转备用容量预测进行了研究，提出了几种相对简单易行的预测方法。

第4章结合实际项目研究，阐述了基于节能发电调度，实施减少水电旋转备用的实际课题的研究。

第5章基于节能发电调度基本原则，提出在发电竞价规则中引入能耗因子、网损因子、环境排放因子进行排序等，建立了节能发电调度与发电竞价机制结合的模型。

第6章介绍了基于J2EE的省级电网节能调度技术支持系统的基本架构和研发与实现。

1.3.2 本文所做的工作

本文首先概述了电力市场基本理论研究和节能发电调度的原则和研究现状。根据当前我国电力市场发展基本情况，基于节能发电调度实施办法，结合电力系统运行和调度的实际情况，对电力市场环境下节能发电调度实施的若干问题进行

了深入研究和阐述，详细论述了省级电网节能发电调度技术支持系统的研发。

(1) 通过对节能发电调度原则的分析和研究，分别对超短期负荷预测、发电机组排序、排污模型等相关问题进行了研究。

(2) 结合湖南省电力调度中心实际课题研究，阐述了基于节能发电调度，实施减少水电旋转备用的研究成果。

(3) 基于节能发电调度的基本原则，提出了在发电竞价规则中引入能耗因子、网损因子、环境排放因子等进行排序，建立了节能发电调度与发电竞价机制结合模型。

(4) 设计了基于 J2EE 平台开发的三层架构模式的省级电网节能调度技术支持系统的基本架构，描述了系统功能模块的实现，给出了 J2EE 构架下系统的软件设计、数据库设计和安全设计。

本论文研究成果具有重要的理论研究意义和实用价值，为电力系统的实施节能发电调度以及其技术支持系统的开发提供了切实可行的方案，有利于电力市场的运营和平稳过渡，有利于实现全国和省内资源的优化配置、降低污染排放，促进电力工业的稳定发展。

第2章 节能发电调度相关内容研究与建模

2.1 节能发电调度内容解析

在建设资源节约型、环境友好型社会的全局大背景下，当前全国大部分地区实现了电力供需平衡，电力投资体制逐步理顺，市场竞争初现端倪，原来同一电网内同类型机组安排基本相同的利用小时数的调度方式，不利于电力工业节能减排、结构调整和有序发展目标的实现，需要适时予以调整改革。2007年国务院办公厅依据《中华人民共和国电力法》、《电网调度管理条例》和《电力监管条例》发布了《节能发电调度办法》。

2.1.1 基本思想及其改进

办法规定了节能发电调度基本原则和使用范围如下^[16]：

(1) 节能发电调度是指在保障电力可靠供应的前提下，按照节能、经济的原则，优先调度可再生发电资源，按机组能耗和污染物排放水平由低到高排序，依次调用化石类发电资源，最大限度地减少能源、资源消耗和污染物排放。

(2) 基本原则。以确保电力系统安全稳定运行和连续供电为前提，以节能、环保为目标，通过对各类发电机组按能耗和污染物排放水平排序，以分省排序、区域内优化、区域间协调的方式，实施优化调度，并与电力市场建设工作相结合，充分发挥电力市场的作用，努力做到单位电能生产中能耗和污染物排放最少。

(3) 适用范围。节能发电调度适用于所有并网运行的发电机组，上网电价暂按国家现行管理办法执行。对符合国家有关规定的外商直接投资企业的发电机组，可继续执行现有购电合同，合同期满后，执行本办法。

从中可以看出，节能发电调度以节能、环保为目标，来实现电力系统调度的优化和改进，是初级电力市场环境实现节能减排的重要举措，节能发电调度的主要改进表现在以下方面：

(1) 《办法》明确规定“优先调度可再生发电资源”，从制度安排的角度给可再生能源以优先上网发电的保障，从环保角度出发，提出了可再生能源发电的激励机制。

(2) 在安排机组排序时，考虑了节能与减排的因素，同类型火电机组按照能耗水平由低到高排序，节能优先；能耗水平相同时，按照污染物排放水平由低到高排序。

(3) 电力调度机构应积极开展流域水电优化调度和水火联合优化调度，提高水能资源利用率，并充分发挥水电的调峰、调频等作用。

(4) 结合我国电力市场基本情况，以发电调度改革为契机，逐步实现以行政安排为主要手段向市场机制调节为主过渡。

节能发电调度与传统的发电调度的区别如表 2.1 所示：

表 2.1 传统发电调度与节能发电调度的区别

比较内容	传统发电调度	节能发电调度
优化前提	安全、稳定、可靠	安全、经济、节能、环保
目标函数	安全	节能、环保
约束条件	系统安全约束	安全、经济、环境约束等
准则	行政计划(调度)	能耗、排污水平
分配原则	大平均模式	优化资源配置
产生的后果	高污染、高能耗、低效率	经济、环保、高效率

2.1.2 机组发电序位的编制

机组发电排序的序位表（以下简称排序表）是节能发电调度的主要依据。各省（区、市）的排序表由省级人民政府责成其发展改革委（经贸委）组织编制，并根据机组投产和实际运行情况及时调整。排序表的编制应公开、公平、公正。

各类发电机组按以下顺序确定序位：

1. 无调节能力的风能、太阳能、海洋能、水能等可再生能源发电机组；
2. 有调节能力的水能、生物质能、地热能等可再生能源发电机组和满足环保要求的垃圾发电机组；
3. 核能发电机组；
4. 按“以热定电”方式运行的燃煤热电联产机组，余热、余气、余压、煤矸石、洗中煤、煤层气等资源综合利用发电机组；
5. 天然气、煤气化发电机组；
6. 其他燃煤发电机组，包括未带热负荷的热电联产机组；
7. 燃油发电机组。

大型火力发电机组按照能耗水平由低到高排序，节能优先；能耗水平相同时，按照污染物排放水平由低到高排序。机组运行能耗水平暂依照设备制造厂商提供的机组能耗参数排序，逐步过渡到实测数值排序，对因环保和节水运行引起的煤耗实测数值增加要做适当调整。

2.1.3 机组发电组合方案的制订

省级发展改革委认真组织开展年、季、月、日电力负荷需求预测及管理工作，并定期向相关部门及电网和发电企业发布预测信息；根据负荷预测和发电机组实际运行情况，制定本省年、季、月发电机组发电组合的基础方案。

各级电力调度机构应按照排序表和发电组合的基础方案，并根据电力日负荷预测和发电机组的实际发电能力、电网运行方式，综合考虑电网安全约束、机组启停损耗等各种因素，确定次日机组发电组合的方案。

区域电力调度机构在各省机组次日发电组合方案的基础上，依据本区域内各省排序表、各机组申报的可调发电能力、跨省输电联络线的输送电能力和网损，进一步优化调整本区域内发电机组的启停机方式。即：进一步对各省边际机组考虑网损因素后的边际供电煤耗率进行比较，对边际供电煤耗率较高的省依次调整安排停机，对边际供电煤耗率较低的省依次调整安排启机，直至区域中各省的边际供电煤耗率趋同，或跨省输电联络线达到输送容量的极限。

国家电网公司和南方电网公司电力调度机构依据跨区域输电联络线的输送电能力、网损以及发电机组排序结果，协调所辖各区域的发电机组启停机方式，形成各区域机组日发电组合方案，下发电力调度机构执行，并抄报有关省发展改革委和区域电力监管机构。

2.1.4 机组负荷分配与安全校核

依据办法规定，各级调度机构对已经确定运行的发电机组合理分配发电负荷和编制日发电曲线应该依照以下原则：

1.除水能外的可再生能源机组按发电企业申报的出力过程曲线安排发电负荷。

2.无调节能力的水能发电机组按照“以水定电”的原则安排发电负荷。

3.对承担综合利用任务的水电厂，在满足综合利用要求的前提下安排水机组的发电负荷，并尽力提高水能利用率。对流域梯级水电厂，应积极开展水库优化调度和水库群的联合调度，合理运用水库蓄水。

4.资源综合利用发电机组按照“以（资源）量定电”的原则安排发电负荷。

5.核机组除特殊情况外，按照其申报的出力过程曲线安排发电负荷。

6.燃煤热电联产发电机组按照“以热定电”的原则安排发电负荷。超过供热所需的发电负荷部分，按冷凝式机组安排。

7.火力发电机组按照供电煤耗等微增率的原则安排发电负荷。

节能发电调度要坚持“安全第一”的原则。电力调度机构应依据《电力系统安全稳定导则》的要求，对节能发电调度各环节进行安全校核，相应调整开停机方式和发电负荷，保障电力系统安全稳定运行和连续可靠供电。

2.1.5 机组检修、调峰、调频及备用安排

发电机组的检修由发电企业按照有关规程的规定和实际需要提出申请，经相应电力调度机构批准后执行。燃煤、燃气、燃油发电机组检修应充分利用年电力负荷低谷时期、丰水期进行。各级电力调度机构应依据负荷预测结果和排序表，

在保证系统运行安全的前提下，综合各种因素，优化编制发电机组年、月检修计划；依据短期负荷预测结果，安排日设备检修工作。各类机组的检修安排信息要及时予以公布。

所有并网运行的机组均应按照调度指令参与电力系统的调频、调峰和备用。电网调峰首先安排具有调节能力的水电、燃气、抽水蓄能机组和燃煤发电机组，然后再视电力系统需要安排其他机组。必要时，可安排火电机组进行降出力深度调峰和启停调峰。

为保证电力系统安全稳定运行，各级电力调度机构应根据有关规定和安全审核的要求，安排备用容量。备用容量安排应以保证电网运行安全为前提，按照节能环保要求，统筹考虑，合理分布。

2.2 基于线性差值的超短期负荷预测

超短期电力负荷预测是电力系统优化调度的基础工具，是电力企业日常经营管理工作的重要组成部分，也是电力系统安全、经济运行的基础。准确地短期电力负荷预测是制定发电计划和做好电网供需平衡的关键，有利于制定合理的电源建设规划，有利于合理安排电网运行方式和机组检修计划，有利于节煤、节油和降低发电成本，有利于提高电力系统的经济效益和社会效益，是实现节能发电调度的基础和前提^[17]。

2.2.1 电力负荷预测基本模型

九十年代，随着世界各国电力市场的发展，负荷预测受到了人们更加广泛的重视。至今，国内外的许多专家学者在预测理论和方法方面做了大量的研究工作，取得了许多卓有成效的进展。针对影响系统负荷的因素，电力系统某一时刻的总负荷预测模型一般可以按四个分量模型^[18]，描述如下：

$$L(t)=B(t)+W(t)+S(t)+V(t) \quad (2.1)$$

式中： $L(t)$ 为 t 时刻的系统总负荷；

$B(t)$ 为 t 时刻的基本正常负荷分量；

$W(t)$ 为 t 时刻的天气敏感负荷分量；

$S(t)$ 为 t 时刻的特别事件负荷分量；

$V(t)$ 为 t 时刻的随机负荷分量。

在过去的十几年中得到了很大的发展，各种预测方法和模型被引入超短期负荷预测中，超短期电力负荷预测研究现状大致分类介绍如下：

回归模型预测技术^[19, 20]是电力负荷预测的一种常见的方法，根据过去的负荷历史资料，建立可以进行数学分析的数学模型，对未来的负荷进行预测；时间序

列法^[21]把负荷数据看作是一个按季节、周、天以及小时周期性变化的时间序列，并将实际负荷和预测负荷之间的差值看作一个平稳的随机过程，进行分析和处理，是应用较早、最为广泛、发展比较成熟的一种方法；模糊推理系统是用一组模糊 if-then 规则来表示系统输入输出之间的非线性映射关系，通过对输入输出空间的划分，模糊推理系统可以逼近任意复杂的非线性关系；小波分析^[22]是一种时域—频域分析方法，在时域和频域上同时具有良好的局部化性质，能很好的处理微弱或突变的信号；运用人工神经网络技术进行电力负荷预测，其优点是可以模仿人脑的智能化处理过程，对大量的非结构性、非精确性规律具有自适应功能，具有信息记忆、自主学习、知识推理和优化计算的特点；文献[23, 24]指出，在相同的信息条件下，基于支持向量机方法的预测精度高于已有的其它方法，而且训练时间非常短。

2.2.2 基于线性差值的超短期负荷预测模型的确立

通过综合预测模型的构成，根据权重方式的不同选择综合模型又可以分为平均权重方式、方差分析方式和最优虚拟预测方式。至于到底采用哪种模型来求解，这要根据各个地方的实际情况。根据湖南省的实际情况，综合考虑各种负荷预测方法的性能，我们采用平均权重方式的综合模型，即是取 $w_k = 1/q (k=1, \dots, q)$ ，具体模型如下：

$$P_{i+1}(t) = (Z_{i+1}(t) + Y_{i+1}(t)) / 2 \quad (2.2)$$

式中， $P_{i+1}(t)$ 为待预测点负荷， $Z_{i+1}(t)$ 为其中一种单一方法预测的， $Y_{i+1}(t)$ 为第二种方法预测出的待预测点负荷。

下面来介绍待预测点负荷的求法：

由于负荷曲线具有一定的连续性，所以可以假定当前日的负荷曲线会与系统前一天的负荷曲线相似，从而可以用前一天的负荷数据以及当前日已知时刻的数据来做超短期负荷预测。

假设当前时刻为 i ，当前日期前一天的负荷数据为 $p_{r-1}(t) (t=1, \dots, n)$ ，当前时刻系统负荷数据为 $p_r(t)$ ，则有

$$P_r(t+1) = P_{r-1}(t+1) + (\sum_{i-j}^i P_r(t) - P_{r-1}(t)) / j \quad (2.3)$$

式中 $p_r(t+1)$ 为预测点负荷， $p_{r-1}(t+1)$ 为当前下一时刻前一天负荷数据， $p_{r-1}(t)$ 为前一天当前时刻负荷数据， j 为选取用来做预测的负荷个数。

设当前时刻为 i ，取之前 n 组负荷数据 (x_i, y_i) ， $i=1, \dots, n$ 。这 n 个点很象是分布在某条直线附近，令该直线方程为 $y=ax+b$ ，进而利用数据来求参数 a 和 b 。由于该直线只是数据近似满足关系式，故 $y_i - (ax_i + b) = 0$ 一般不成立，但我

们希望 $\sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2$ 趋于最小。此式对 a 和 b 的偏导数均为 0，解相应的方程组，求得式 2.4（其中 \bar{x} ， \bar{y} 为平均值）：

$$\begin{cases} a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \\ b = \bar{y} - a\bar{x} \end{cases} \quad (2.4)$$

最后由 $y_{i+1}(t) = ax_i + by_i$ 就可以求出 $Y_{i+1}(t)$ 。

用上述方案分别对2008年12月17日到12月19日三天湖南电网统调负荷，每天96个点负荷进行预测，对于每个负荷点，如相对误差大于2%则认为预测失败。预测结果见下表2.2。可见超短期负荷预测模型准确率和稳定性都比较高。

表 2.2 超短期负荷预测结果

日期	坏点数	准确率
2008-12-17	3	96.88
2008-12-18	5	94.79
2008-12-19	7	92.71

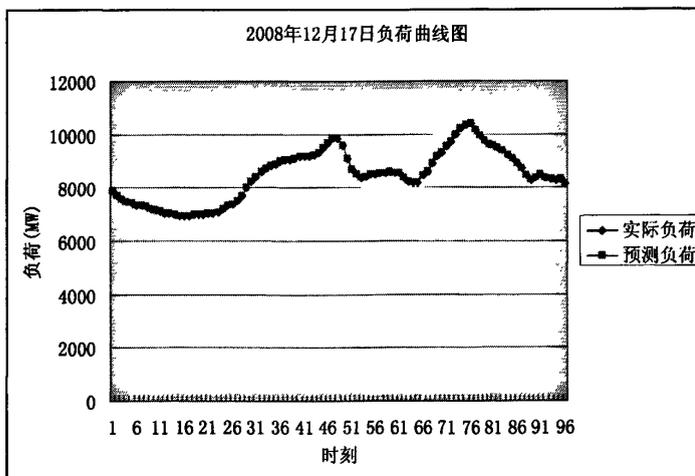


图 2.1 超短期负荷预测与实际负荷对比

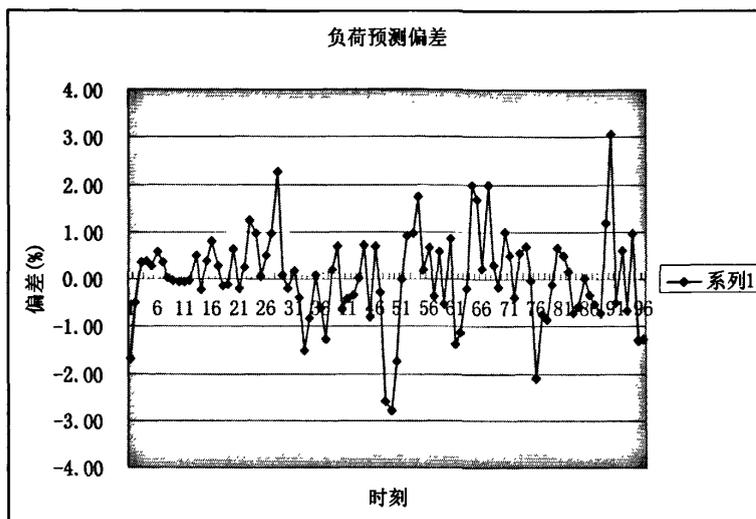


图 2.2 2008 年 12 月 18 日超短期负荷预测偏差图

2.3 机组发电排序的序位表(以下简称排序表)

《办法》规定：节能发电调度以机组发电排序的序位表(以下简称排序表)为依据，依序安排发电机组发电。各省(区、市)的排序表由省级人民政府责成其发展改革委(经委、经贸委)组织编制。考虑到火电机组的特殊性，本文首先讨论火电机组排序问题，然后依据节能发电调度原则对排序表的制定进行探讨。

2.3.1 火电机组排序

依据节能发电调度基本原则，按照各类发电机组类型、能耗水平事先排序，对发电机组的启停和出力分配进行优化，优先利用可再生和清洁发电资源，依能耗和污染物排放水平调用化石类发电资源，按照既定排序和优化结果依次进行发电调度。

同类型火力发电机组按照能耗水平由低到高排序，节能优先，机组实际运行能耗水平近期暂依照设备制造厂商提供的机组有关能耗参数排序，逐步过渡到按照实测数据排序，对因环保和节水设施运行引起的煤耗实测数据增加做适当调整；能耗水平相同时，按照污染物排放水平由低到高排序，污染物排放水平以环保部门最新测定的数据为准。

在保证电网安全和连续供电的前提下，对已确定运行的发电机组合理分配发电负荷，编制日发电曲线。首先将满足电网安全校核的机组优先排序，安排电力电量。其次根据电网负荷情况和合理备用容量，根据上述原则编制的排序表安排统调机组启停顺序，确定供电煤耗率，高于边际供电煤耗率的机组安排停机备用。低于边际供电煤耗率的机组安排并网运行，其日发电曲线按全网机组煤耗微增率合理安排，形成发电能耗水平最优的日发电计划。据此，对湖南电网统调火电机

组煤耗排序如表 2.3 所示。

表 2.3 湖南电网统调火电机组煤耗排序

煤耗排序	电厂	机组	标准煤耗(g/kwh)
1	长沙电厂	#1、#2G	315
2	湘潭 II 期	#3、#4G	315
3	益阳 II 期	#3、#4G	315
4	金 B	#1、#2G	315
5	大唐石门	#1、#2G	330
6	华电石门	#3、#4G	330
7	潭 B	#1、#2G	330
8	华能	#1、#2G	330
9	华能新厂	#3、#4G	330
10	株新	#3、#4G	330
11	益阳电厂	#1、#2G	340
12	耒 II	#3、#4G	350
13	耒阳老厂	#1、#2G	360

2.3.2 排序表的制定

依据《办法》规定，各类发电机组按下顺序确定序位：

- (一)无调节能力的风能、太阳能、海洋能、水能等可再生能源发电机组；
- (二)有调节能力的水能、生物质能、地热能等可再生能源发电机组和经省级以上环保部门验收满足环保要求的垃圾发电机组。
- (三)核能发电机组；
- (四)余热、余气、余压、煤层气等非燃煤资源综合利用发电机组；
- (五)国家确定的示范发电机组及国家统一安排发电机组；
- (六)燃煤热电联产机组；
- (七)由省级以上环保部门认定达标排放，并经国家发展改革委和省级发展改革委(经委、经贸委)按照审核权限认定的煤矸石或洗中煤等资源综合利用发电机组；
- (八)天然气、煤气化发电机组；
- (九)其他燃煤发电机组，包括热电联产机组超出“以热定电”以及资源综合利用机组超、出“以(资源)量定电”的部分；
- (十)燃油发电机组。

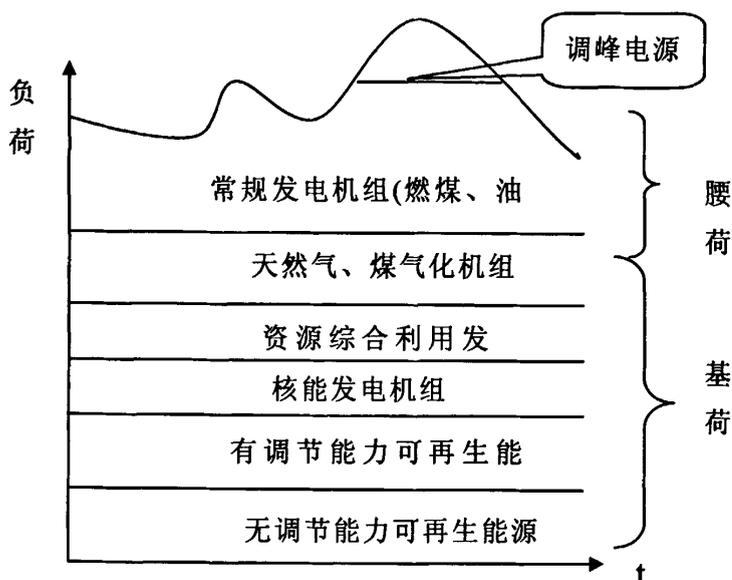


图 2.3 机组的调用顺序以及负荷的作用示意图

根据以上原则，在制定日发电计划时，只要在次日的预计负荷曲线中，分别依次减去可再生能源发电、不可调度的发电量、核电等可预测电量，剩下的发电量就可以按常规的经济调度方法来制定日前发电计划。根据电网的实际情况和汛期，分别选择利用水电调峰，常规火电厂按等微增率法进行调度或者小火电调峰，水电发电^[25]。基于此，机组的调用顺序以及负荷的作用示意图如图 2.3 所示。

2.4 机组污染排放模型

节能发电调度（环境-经济调度）的核心问题是如何建立合理反映各发电机组的污染排放的模型，然后根据模型去获得机组的排污指标，以建立节能发电调度所需的排序表。排放模型的函数取决于排放物的类型。对于 SO_2 ，众所周知，其排放量与火电厂锅炉所消耗的电煤数量成正比。所以，在经济调度计划制定中，污染排放模型的函数与机组燃料消耗函数相同^[26]。 NO_x 污染物的排放函数与发电功率 P 成高度的非线性比例， dE/dP 的变化率并不是一直增加的(呈 U 型变化)^[27]，这使得算法变得更加复杂化。美国洛杉矶污染事故小组使用了由 Gent 和 Lamont 所提出的使用下面的函数 E_i 作为综合污染指数的模型^[28]：

$$E_i = A_1 + A_2 P_{Gi} + A_3 \exp(A_4 P_{Gi}) + A_5 \exp(A_6 P_{Gi}) \quad (2.5)$$

Gent 和 Lamont 提出的模型忽略了一点，这里 A_1, A_2, A_3, A_4 这四个参数都是在各机组污染排放试验的基础上使用最小二乘法估计出来的。文献[29]提出了用程序来估计这些参数的程序。其他研究者采用了二项式函数模型：

$$E_i = A_1 + A_2 P_{Gi} + A_3 P_{Gi}^2 \quad (2.6)$$

在发电调度中直接采用上述模型的难点在于，这些模型并没有考虑气象因素。气象因为影响地面污染排放的浓度，所以采用基于天气因素修正的污染排放模型

来取代上述模型，如式(2.7)所示：

$$\epsilon_i(x_i, y_i) = M_i(x_i, y_i) * E_i \quad (2.7)$$

这里， E_i 是单元发电机组 i 的排放函数， $M_i(x_i, y_i)$ 是气象折算系数：

$$M_i(x_i, y_i) = \frac{10^6}{2\pi C_y C_z U X^{(M_y, M_z)}_i} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{y_i^2}{C_y^2 x_i^{2M_y}} + \frac{h_i^2}{C_z^2 x_i^{2M_z}}\right)\right\} \quad (2.8)$$

其中， x_i ， y_i 分别是发电机组 i 到污染最严重的地方的顺风 and 侧风的距离。 h_i 为有效堆积高度， U 为平均风速， C_y 和 C_z 分别是水平和垂直扩散常数， M_y 和 M_z 分别为水平和垂直的大气稳定参数。

其他研究者采用不同的扩散模型：

$$\begin{cases} M_i(x_i, y_i, z) = \frac{1}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} Y_i [Z_{1i} + Z_{2i}] \\ Y_i = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{y_i}{\sigma_y}\right)^2\right\} \\ Z_{1i} = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-h_i}{\sigma_z}\right)^2\right\} \\ Z_{2i} = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+h_i}{\sigma_z}\right)^2\right\} \end{cases} \quad (2.9)$$

其中， Y_i 是 Y 方向的高斯分布， Z_{1i} 是 Z 方向的高斯分布， Y_i 是用来解释地面反应的高斯分布， σ_y 是 y 方向的标准偏差。

研究以上模型后，我们发现，考虑气象因素的污染排放模型能够精确和有效的反映发电机组的实际排放情况，但是需要考虑的因素太多，并且这些因素都会随着气象因素的变化而变化，给实时在线监测和控制带来很大的不便，同时，这些随机因素的增加也会使得实施起来更加困难。考虑到节能发电调度中，需要通过污染监测系统实时的对电厂机组的排放情况根据监测，并以此作为排序依据调度上网，系统的实时性要求非常高，所以在本文我们采用式(2.6)所示的二项式函数模型，根据模型来计算排污量，根据排污量作为火电机组上网调度的排序，以此达到环保的目标。

2.5 本章小结

本章在分析节能发电调度办法的基础上，从短期电力负荷预测、机组排序表设计和机组污染排放模型三个方面着手，研究电力系统实施节能发电调度的问题。短期电力负荷预测是电力系统优化调度的基础工具，是电力企业日常经营管理工作的的重要组成部分，也是电力系统安全、经济运行的基础。准确地短期电力负荷

预测是电网调度机构制定发电计划和做好电网供需平衡的关键，有利于合理安排电网运行方式和机组检修计划，有利于节煤、节油和降低发电成本，有利于提高电力系统的经济效益和社会效益；机组排序表的编排是整个节能发电调度的核心，即在整個调度期内，在已知的负荷需求和满足大量约束条件的前提下，确定出各类型机组的出力顺序和负荷大小，避免或尽量减少弃水，以便充分地利用水力资源，最大限度地节省火电燃料成本和减少污染排放，以达到使整个系统的经济、环保、安全运行；污染排放模型是安排火电机组出力顺序的依据，合理安排火电机组出力可以减少能耗和污染，是节能发电调度的重要环节。

第3章 节能发电调度的电网备用容量预测方法研究

在实际电力系统中，发电机随机停运、负荷波动、线路故障等都会破坏系统的平衡状态，出现有功功率不足，严重时甚至造成大范围停电，为此必须保持一定的有功备用容量。备用就是指电力系统除满足预计负荷需求外，为保证电能质量和系统安全稳定运行而保持的有功功率储备。

在备用容量确定的问题上，电网运营部门在调度时按照规程规定预留负荷备用容量。另外，系统准备一些事故备用容量和检修备用容量。我国电力系统技术导则中规定：“事故备用容量为最大发电负荷的10%左右，但不小于系统最大一台机组的容量”；“负荷备用容量为最大发电负荷的2%~5%，低值适用于大系统，高值适用于小系统”。上述预留备用容量，完全立足于系统运行的安全、可靠性考虑，经济性只是次要因素。调度员为了保证系统安全运行要求发电厂无偿地提供备用容量支持服务和对用户进行拉闸限电，只保证电网安全运行而没有遵循市场经济的原则。

随着大电网互联的加强，对电网安全、稳定、经济运行提出了更高要求，如何确保电网快速旋转备用已成为保电网安全的重要手段之一。近年来为了提高能源使用效率、减少污染，国家大力推进节能环保政策，对电网企业而言转变观念，合理的制定相关制度，逐步推进节能调度，因此开展节能调度势在必行。

3.1 备用容量相关概念

3.1.1 备用容量定义及分类

电力系统的容量是指总装机容量。在总装机容量中，有一部分正在运行并担负着有功出力，这部分叫做工作容量；正在运行但不担负有功出力或虽不在运行但随时准备投入运行的部分叫做备用容量，前者叫旋转备用，后者叫非旋转备用。非旋转备用按其带负荷的快慢又分快速启动备用(如水电、油电、气电)和普通备用(如煤电、核电)。

3.1.1.1 按备用响应时间分

国际上大部分研究数据在对备用进行分类时都是按照这种方式来分的，只是由于备用的研究正在发展之中，以下是几种主要的分类：

(1)将备用分为旋转备用、非旋转备用、替代备用、黑启动备用。其中前三者的区别是：对于旋转备用，机组始终处于开机状态，可在极短的时间内响应需要；对于非旋转备用，机组处于停机状态，但可在10min内成为可调度机组；替代备用是指可以在1h内成为可用的发电容量。黑启动备用指系统崩溃后，为重新建立

电力平衡而首先启动的机组。

(2)将备用分为瞬时回应备用(AGC)、在线同步运行且能在 10min 内带上负荷的 10min 旋转备用(TMSR)、异步运行,但可在 10min 内启动并带上负荷的 10min 非旋转备用(TMNSR)及异步运行的可以在 30min 内启动并带上负荷的 30min 运行备用(TMOR)。

(3)将备用分为 10min 旋转备用(TMSR)、10min 非旋转备用(TMNSR)、30min 非旋转备用(TMOR)、可调用备用及安装容量。

(4)在实际电力市场中倾向于将备用分为瞬时回应备用(AGC)、10min 旋转备用(TMSR)、10min 非旋转备用(TMNSR)、30min 运行备用(TMOR)、60min 运行备用和冷备用。

3.1.1.2 按备用的用途分

按备用的用途可分为负荷备用、事故备用和检修备用。

(1)负荷备用。电力系统的负荷随时都在波动,有时高,有时低,有时受到较大的冲击;此外我们对电力负荷曲线的预测也不一定准确,有时实际负荷能满足负荷的要求,使频率不超标、不崩溃,供电不中断,必须留有一部分备用容量来平衡负荷的波动和调节预测的偏差,这部分容量叫做负荷备用容量,负荷备用主要由 AGC 承担。

(2)事故备用。由于电力系统是由成千上万的装置所构成,从系统可靠性的角度来看,各种装置必然存在一定的事故率。当系统出现事故,为了保证系统的稳定和供电可靠性,系统必须拥有一部分热备用或快速启动冷备用容量用于救急,这部分容量叫事故备用容量。事故备用主要由 TMSR 和 TMNSR 来承担。

(3)检修备用。在发电设备检修时为保证系统出力要求而设置的备用容量叫检修备用容量。负荷备用、事故备用和检修备用容量之和就是系统的总备用容量,其中负荷备用和事故备用是系统最主要的备用,检修备用的时间跨度大,所以备用问题主要是研究系统的负荷备用和事故备用问题。

当然,备用还有其它分类方法,比如从运行状态来分,备用机组无非以冷或热状态存在,称为热备用和冷备用。其中火电机组的热备用又可根据机组出力状况分为压火停机热备用和剩余容量热备用;根据增减出力的调整方向不同可将备用分为上备用和下备用等。

3.1.2 备用容量效益分析

备用对电力系统的安全性和可靠性起着重要的作用,这是因为电力系统中总是要面临可能突然发生的事故和无法预测的负荷波动,保持一定容量的备用可以避免供电中断,并保证系统的安全性和可靠性,这就是备用的主要作用。备用越多,系统可靠性越高,但是随着备用的升高,其边际效益会逐渐降低,如图 3.1

所示：

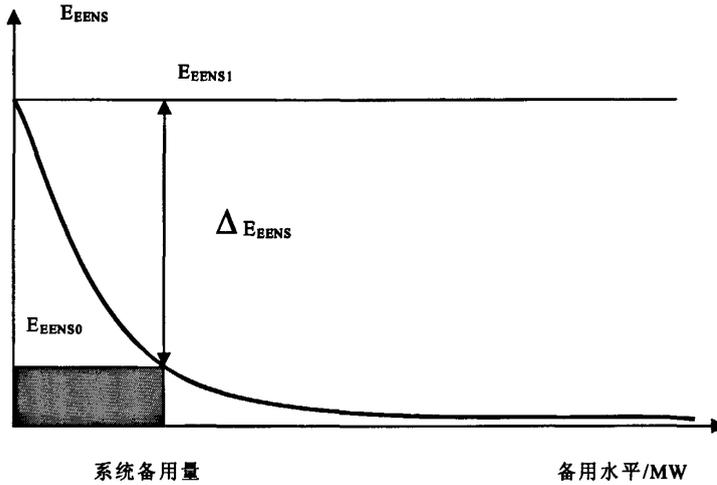


图 3.1 系统备用容量与系统 E_{EENS} 的关系

其中， E_{EENS1} 和 E_{EENS0} 分别为购买备用容量前后系统的电量不足期望值。备用对可靠性的价值主要体现在减少电量不足期望值 ΔE_{EENS} 。

很显然，系统购买的被备用越多，则购买备用后系统的电量不足期望值就会越小，即系统可靠性会越高，但这毫无疑问要增加备用的购买成本。当系统不够买任何备用时，系统的可靠性最低，也就是系统的电量不足期望值 E_{EENS} 最大。系统备用容量与系统 E_{EENS} 的关系如图 3.1 所示。可以看出，电力系统购买一定的备用容量之后， E_{EENS} 会大大降低，系统可靠性和经济性能也会随之提高。

电力工业市场化改革以后，系统运行的可靠性与经济性之间的联系更加紧密，对于停运成本的评估就越来越受到广泛重视。系统购买一定的备用容量的社会效益体现在：如果不购买这部分容量作为备用，会导致系统可靠性下降，电量不足期望值 E_{EENS} 增加，从而使得停运成本增加。电量不足期望值是指在一定时期内由于供电不足而造成用户停电损失电量的期望值。

购买备用前后停运成本的变化量就是购买备用的社会效益 B_s ：

$$B_s = \alpha \Delta E_{EENS} = \alpha (E_{EENS1} - E_{EENS0})$$

$$E_{EENS} = \sum_{R-X>0} (X-R)P(R)t \quad (3.1)$$

式中：系数 α 表示每 kWh 电能的停运成本，包括调度调节成本、中断成本和消费者剩余损。在用户停电损失方，可以取的指标有 IEAR(interrupted energy assessment rates)或 VOLL(value of lost load)。

系统频率发生变化时，发电功率也会相应变化，这就是发电频率特性。发电频率特性与系统的备用投入的容量和时间有关。当系统频率降低时，首先由发电机调速器动作投入临时备用。当低频持续时间较长时，系统的自动调频装置(AFC)

起作用，投入运行备用，当时间更长时，可以启动备用水轮发电机、燃气发电机甚至汽轮发电机。当系统失去大电源时，备用容量的启动情况如图 3.2 所示：

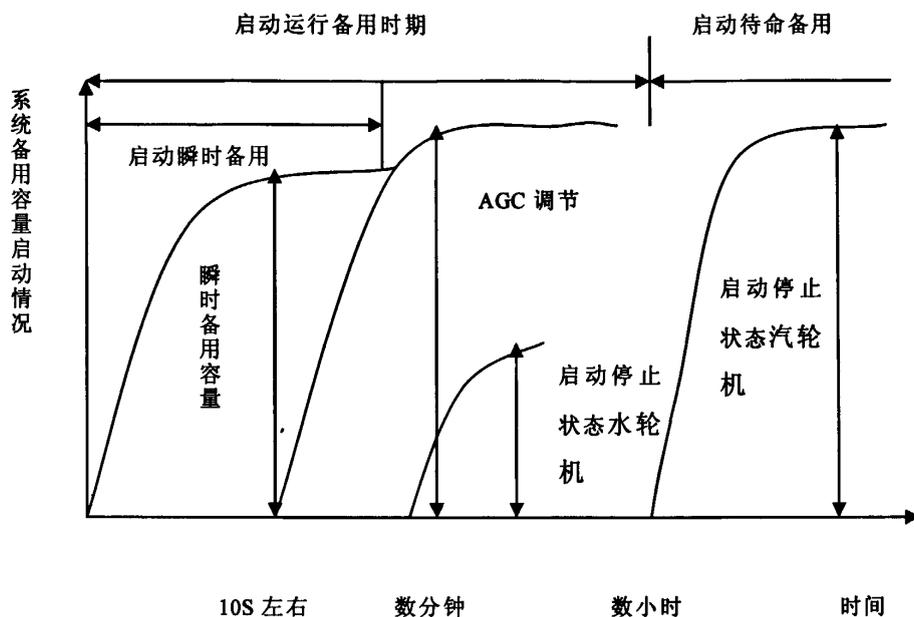


图 3.2 系统备用容量启动情况

当系统因较大事故出现严重的有功功率缺额时，其缺额超过了正常的备用可以调节的能力，频率随之急剧下降，可能导致频率崩溃或者电压崩溃。此时，自动低频减负荷装置启动，切除部分负荷，使系统恢复安全稳定水平继续运行。

3.2 备用容量预测方法

负荷备用容量的大小主要取决于负荷波动的范围和负荷预测误差，事故备用容量大小则取决于系统容量、最大单机容量、机组强迫停运率和用户对供电可靠性的要求，按照技术导则的要求，负荷备用容量为最大发电负荷的 2%~5%。低值适用于大系统，高值适用于小系统。事故备用容量为最大发电负荷的 10%左右，但不小于系统 1 台最大机组的容量。

市场环境下，系统的可靠性、最大在线机组出力、在线机组的可靠性、系统容量的大小、备用的成本以及电网公司对可靠性和经济性的重视，都使得备用容量的正确选择变得非常重要。备用容量的供需关系受诸多因素的影响，对市场环境下，如何快速准确确定备用容量提出了更高的要求。但是随着大机组、大容量电网的发展，系统间的联络线容量逐渐增大，系统安全性也不断提高。

传统法预留系统备用容量可以保证系统的稳定性，但是它是牺牲系统的经济性为代价的。由于负荷曲线的变化，不同时刻系统所需的备用也会有差异，而传统上的做法并没有考虑这些，无论负荷怎么变，系统留有的备用率都是一样的。

虽然这种做法很简单，但是显然它是不经济的。

3.2.1 国内研究现状

同步旋转并准备带负荷的备用容量称为旋转备用。目前，国内外已经提出很多方法来评估系统的旋转备用需求。通常这些方法可分类，即确定性方法和概率性方法。其中，确定性方法按负荷或运行容量的百分比留一定的容量裕度。

美国佛罗里达电力联合集团(FCG)采用如下策略：总旋转备用至少等于 FCG 所有发电机中最大一台发电额定峰值功率；备用分配依据各电力公司的最大一台发电机功率和负荷峰决定备用比例；运行备用至少等于最大发电机功率的 2 倍。美国西部电网备用策略如下：运行备用为调度负荷容量的 7%。或者，也可以采用 N-1 准则来确定系统备用容量。

确定性方法在评估旋转备用过程中并没有考虑到系统性能、用户元件如发电机组、线路、变压器故障的随机特性即概率特性。而概率方法可模拟系统各元件的随机行为，并组合所有元件以进行旋转备用评估。主要包括以下几种方法：

①频率和持续时间法 (Interval Frequency and fraction duration—F&D)：该方法是由加拿大学者 Roy Billinton 教授 1973 年提出的一种短期可靠性评估方法。它不仅能计算发电容量不足的概率，而且能给出容量短缺发生的频率和可能的持续时间指标，它们是分析暂态行为的指标，与稳态的指标存在着概念上的区别。这种指标更能充分反映机组故障率和修复率以及负荷模式区间的变化，在短期可靠性评估中是一种非常有用的指标。

②PJM 法：PJM 法是由美国宾西法尼亚-新泽西-马里兰互联系统在 1963 年提出来对所需旋转备用容量进行评估的一种方法。其基本内容是计算在发电容量不能被替代的时间期间内，已投入运行的发电容量刚好满足或刚好不满足期望负荷的概率。

③安全函数法：计算系统的安全函数作为控制准则评估系统违反安全的概率。在评估过程中必须穷举全部可能的系统状态。穷举计算限制了它在风险评估中的普遍应用。

就电力市场环境下所需备用容量的确定和获取问题，学术界已经做了不少探索性的研究工作。例如，文献[30]在计及系统运行约束的前提下，提出了根据系统实际运行情况调整运行备用要求，力图寻求兼顾运行备用获取成本和系统可靠性水平的折中方案。文献[31]在给定备用容量价格和停运成本的前提下，通过容量一可靠性之间的相关性分析确定最优的运行备用容量及其价格，并以此为基础建立了一种监控市场势力有否被滥用的机制。文献[32]提出了一种基于保险理论的分散式备用容量获取方法，允许配电公司或大用户自己确定所需备用容量并从备用容量的供应商(发电公司)直接购买，通过具有奖惩机制的保险合同将停运损

失转嫁给保险商，从而诱导出最优的备用容量。文献[33]对电力需求价格弹性、系统可靠性、备用成本等和系统最优备用水平的关系进行了研究。文献[34]在协调运作的模式下对区域电力市场运行备用容量需求和获取进行了初步的讨论。文献[35]提出了一种基于保险理论的分散式备用容量获取方法，允许配电公司或大用户自己确定所需备用容量并从备用容量供应商(发电公司)直接购买，即通过采用具有奖惩机制的保险合同将停运损失转嫁给保险商从而诱导出最优备用容量，这是一种很有意义的探索。文献[36]针对电力市场环境下的电网公司运营效益最大化问题，试图在备用容量费用和切负荷赔偿费用方面取得平衡，并在此基础上确定所需的最优事故备用容量。

在本文中，根据工程实际需要，提出了以下几种简单易行并且预测精度相对较高的方法，具体如下：

- (1)最小二乘拟合线性差值预测法
- (2)多项式拟合法
- (3)相似日选取法
- (4)概率统计法

3.2.2 最小二乘拟合线性插值预测法

3.2.2.1 原理介绍

插值运算是非常有用的运算，用于以下情况：

- (1)已知有限数据，做曲线插值
- (2)查阅函数值(单点插值)
- (3)简约数据集

插值函数中，`table()`为线性表法，仅适应于线性插值；`interp()`可选插值方法；`spline()`为三次样条函数插值，插值精度高，实用性较宽。

负荷备用是用来平衡负荷波动以及负荷预测误差的，所以旋转备用预测的问题可以按以下方法确立：

$$P(t+1) = P_f(t+1) - P(t) + \varphi \quad (3.2)$$

式中 $p(t+1)$ 为当前时刻 t 的下一时刻的旋转备用， $p_f(t+1)$ 当前时刻 t 的下一时刻的负荷预测数据， $p(t)$ 为当前时刻 t 的负荷数据， φ 为负荷预测误差。其中 φ 的确定我们采用最小二乘法，具体做法如下：

通过系统采集我们可以得到 t 时刻及 t 时刻之前的系统负荷数据 $p(t), \dots, p(t-m)$ 加上预测点的负荷 $p_f(t+1)$ 共 $m+1$ 个数据。将数据画在平面直角坐标系中，见图一。我们可以用一条直线 $y_i = at + b$ 来拟合这 $m+1$ 个数据并且让直线通过 $p_f(t+1)$ 。下面我们要做的就是来求参数 a 和 b 。由于该直线只是数据近似满足的关系式，故 $y_i - (at + b) = 0$ 一般不成立，但我们希望式 3.3 趋于最小。

$$\sum^{m+1} [y_i - (at + b)]^2 \quad (3.3)$$

此式对 a 和 b 的偏导数均为 0，解相应方程组，求得：

$$\begin{cases} a = \frac{\sum^{m+1} (t - \bar{t})(y_i - \bar{y})}{\sum^{m+1} (t - \bar{t})^2} \\ b = \bar{y} - a\bar{t} \end{cases} \quad (3.4)$$

(其中 \bar{t} , \bar{y} 为平均值)。求出参数 a 和 b 后，我们就可以得到拟合直线 $y_i = (at + b)$ 了，我们再将 $t = t-1, t-2, \dots, t-m$ 回代到直线 $y_i - (at + b) = 0$ 就可以解出相应的 y'_i 。再由 $\varphi = \max(y_i - y'_i)$ 就可以解出 φ 了。

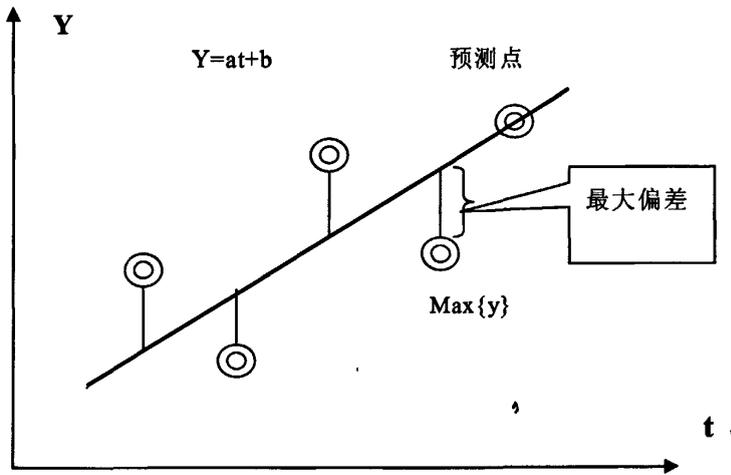


图 3.3 备用容量预测图

3.2.2.2 算例分析

举 2008 年 12 月 15 日为例，比较一下传统备用容量预测与基于最小二乘法的备用容量预测，负荷预测偏差如图 3.4 所示。

3.2.2.3 最小二乘法备用容量预测安全性分析

旋转备用容量的预留是为了防止冲击负荷对系统造成的影响，所以备用是否充足直接关系到系统的安全稳定性。用 P_{by} 作为预留备用容量是否充足的判断依据。具体计算公式如式 3.5 所示：

$$P_{by} = \sum_{i=1}^{288} |(Y_i + P_i - \bar{Y}_i) > 0| \quad (3.5)$$

式中 Y_i 表示第 i 点的预测负荷， P_i 表示第 i 点预留的备用容量， \bar{Y}_i 表示第 i 点的实时负荷。 P_{by} 表示满足安全性的点数。

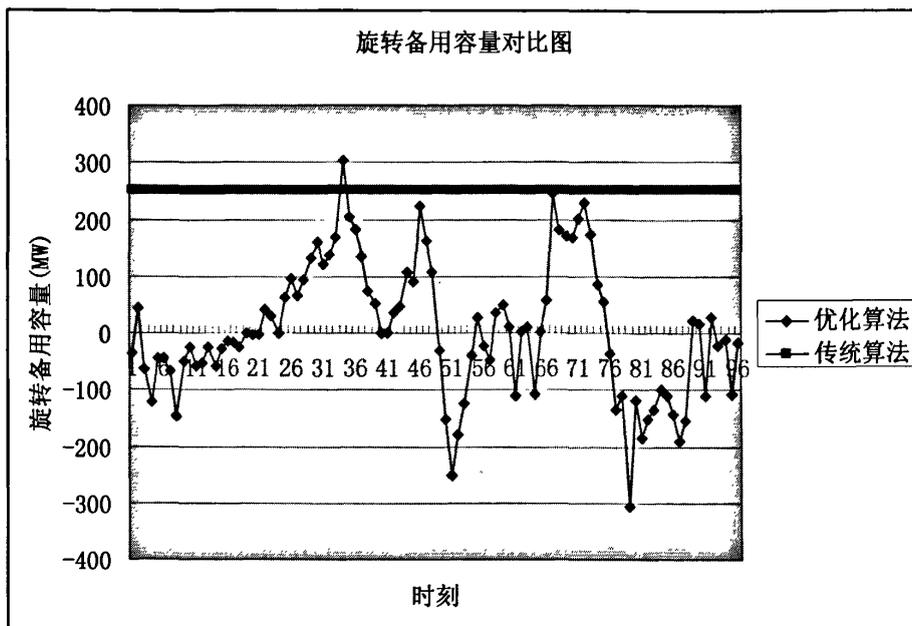


图 3.4 2008 年 12 月 15 日旋转备用容量对比图

取 2008 年 12 月 17 日到 19 日的备用预测数据作验证，具体数据如表 3.1 所示：

表 3.1 旋转备用预测结果

日期	P_{by}	准确率 (%)
2008-12-17	288	100
2008-12-18	287	99.6
2008-12-19	288	100

3.2.3 多项式拟合法

多项式函数是形式比较简单的函数：

$$f(x)=a_0+a_1(x-x_1)+a_2(x-x_2)^2+a_3(x-x_3)^3 \quad (3.6)$$

多项式拟合一般指，用多项式函数逼近一个函数，常用方法为利用泰勒公式，将函数展开为拉格朗日级数麦克劳林级数等。一般对于同一组数据，用高一阶或低一阶的多项式拟合曲线，往往较难判别哪一个优劣。

本文采用 Matlab 来实现多项式拟合。Matlab 是一种高效率的用于科学计算的高级语言，它具有语法规则简单、编程效率高、库函数丰富等优点，其较强的绘图、图像及动画功能也非常便于进行数据分析、图像显示与动态模拟，而且便于实现，大大地提高了实验数据处理的效率和精确度。

在 Matlab 中，用 polyfit 函数来求得最小二乘拟合多项式的系数，再用 polyval 函数按所得的多项式计算所给出的点上的函数近似值。一个拟合的多项式并不是

阶数越高越好，因为一些高阶项往往对 y 影响很小，我们就在拟合方程中删除他们，以其建立更为简单的多项式方程。一般总是先从低阶开始拟合，然后根据判别规则决定是否需要提高阶数进行拟合。这个判别规则非常复杂。但是如果利用 Matlab 问题就变得很简单，如 k 阶是最佳拟合，不需要进行更高阶拟合，当你输入阶数大于 k 时，计算机就会显示：Polynomial is in bed conditioned 等等。

polyfit 函数的调用格式为：

$$[P, S]=polyfit(X, Y, m)$$

函数根据采样点 X 和采样点函数值 Y ，产生一个 m 次多项式 P 及其在采样点的误差向量 S 。其中 X, Y 是两个等长的向量， P 是一个长度为 $m+1$ 的向量， P 的元素为多项式系数。

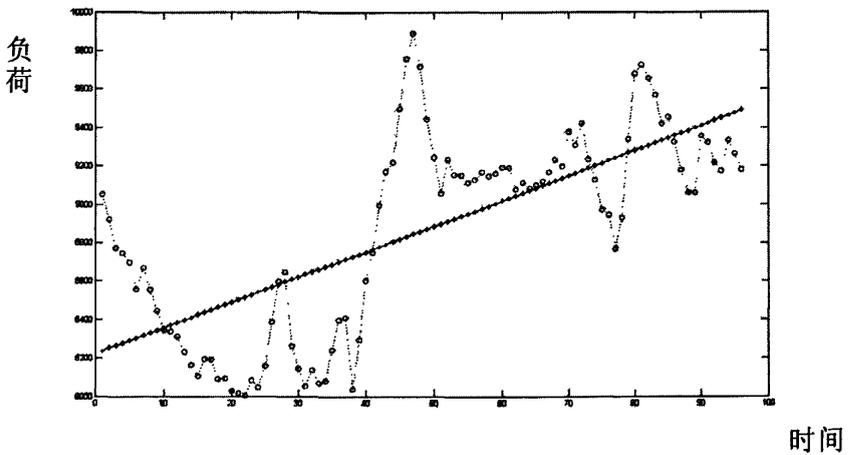


图 3.5 1 次拟合结果

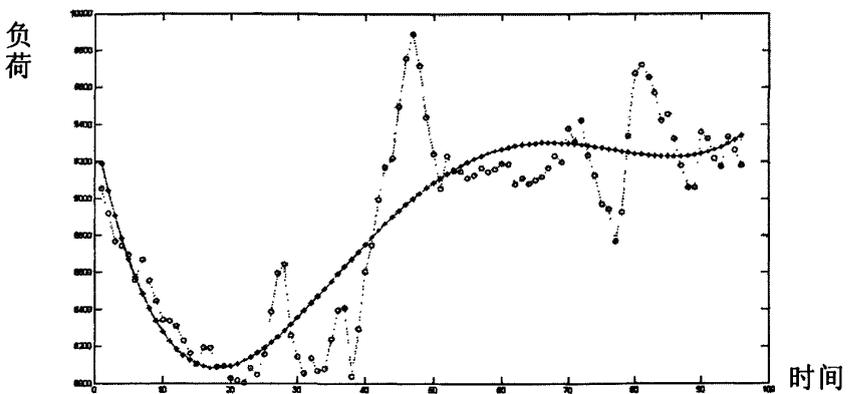


图 3.6 5 次拟合结果

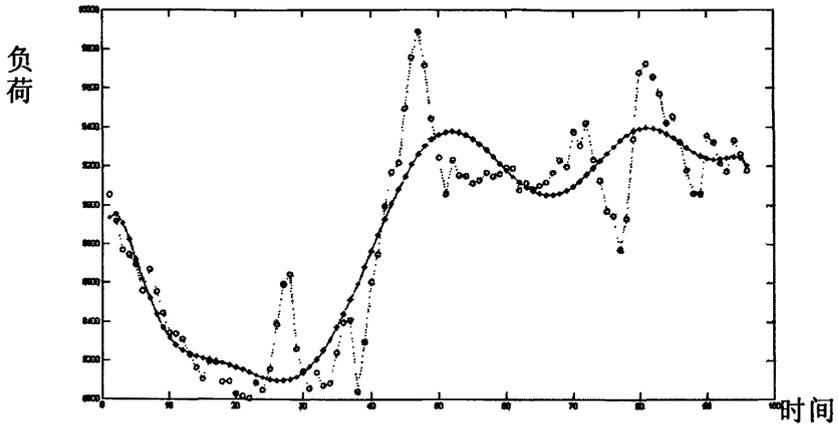


图 3.7 10 次拟合结果

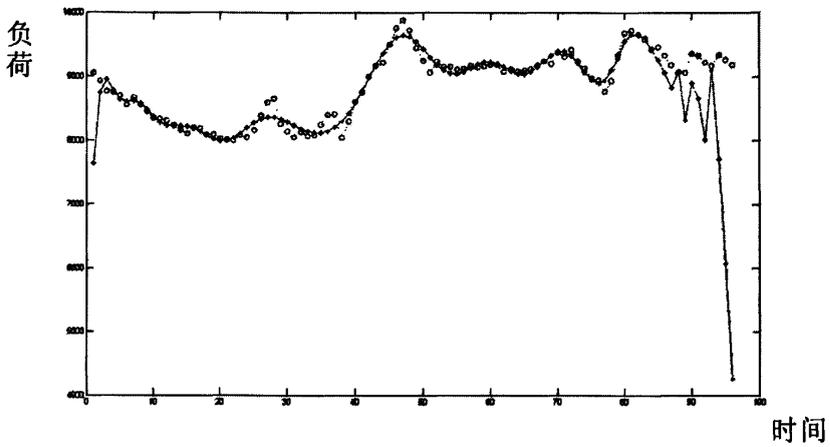


图 3.8 20 次拟合结果

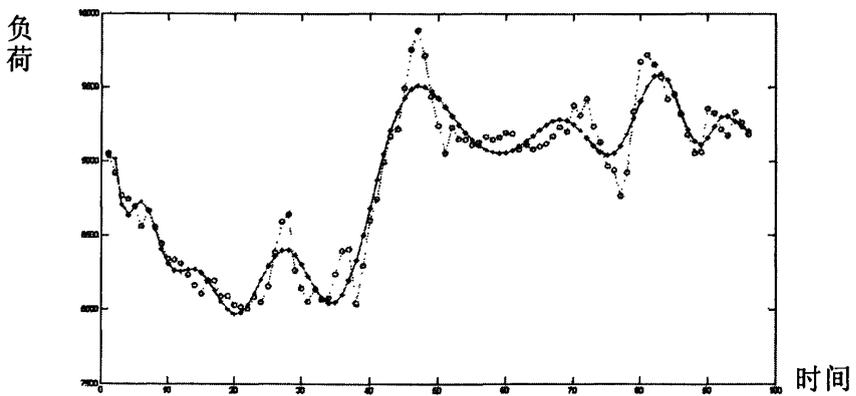


图 3.9 30 次拟合结果

可以看出，开始高阶多项式比低阶多项式更接近所测数据，但高于最佳多项式阶数时，曲线变化不大，到 $k=n$ 阶时，曲线已不是光滑曲线，而是在相邻的测

量点间出现剧烈的摆动，这显然不是要求的。我们可以对不同阶数所出现的图线进行分析，就可以确定最佳阶数。此方法可应用到一切无确定函数形式的实验中。

3.2.4 基于负荷值和负荷增量的相似日选取法

电网负荷随不同季节、气候特征呈规律变化，如何获取水电机组最小旋转备用容量，是完成本项目关键技术之一。可通过获取电网负荷变化量，采取相应的技术处理，得到一个基本满足电网快速变化的数据作为水电机组最小旋转备用。具体实现可采用以下手段：收集大量电网负荷运行数据，对其进行相应的分析和处理，研究备用容量与电网运行方式、电力系统负荷之间的关系，然后得出相应的模型。本文中备用容量确定流程如下：

1. 进行超短期负荷预测。对 EMS 系统中超短期负荷预测数据进行提取，获得日 96 点实时负荷预测数据。

2. 相似日选取。相似日的查找暂时采用欧氏距离法寻找最有可能与预测日负荷相似的相似日。利用相似性原理，提出了通过使用负荷以及负荷增量来计算历史日与预测日的距离，从而来选择相似日的方法，并在计算过程中引入了权重。相似日选择的步骤如下：

(1) 给定“距离”的阈值；

(2) 从最临近预测日的历史日开始，计算每个历史日与预测日的“距离”。以历史日的负荷值和负荷增量值为分量，用公式(3.7)计算 M 出值，保留接近 1 的数据；y 为以负荷增量值、负荷值、负荷类型作为分量的列向量。我们把星期一到星期日分别称为七个类型日。

$$M(y_k, y_l) = \frac{y_k^T y_l}{|y_k| * |y_l|} \quad (3.7)$$

$$|y_k| = \sqrt{y_k^T \bullet y_k} \quad (3.8)$$

(3) 对保留下来的数据，计算出 N 值；权重的选取：负荷的权重为 0.05，负荷增量的权重为 0.95。

(4) 比较步骤(3)计算出的 N 值，如果小于阈值，则说明该历史日是预测日的相似日。

$$N = \sqrt{\sum_{k=0}^{k-m-1} \alpha (\Delta y^k)^2} \quad (3.9)$$

$$\Delta y^k = y_i^k - y_{i-1}^k P_{\max} \quad (3.10)$$

3. 对相似日 96 点日负荷曲线研究，历史负荷数据参考误差统计分析：初步选取前后 3 年和 2 周之内相同时段的数据偏差（预测值与实际负荷的偏差），取最大偏差修正负荷预测数据，来选取备用容量。

表 3.2 传统备用与优化备用比较

时段	传统备用		优化备用	
	备用容量	备用率(%)	备用容量	备用率(%)
0	580.44	5.00	643.62	5.5442
1	555.41	5.00	470.36	4.2343
2	531.34	5.00	288.85	2.7181
3	514.50	5.00	372.22	3.6173
4	500.00	5.05	148.73	1.5033
5	500.00	5.15	306.66	3.1607
6	491.60	5.00	462.77	4.7068
7	500.00	5.12	163.72	1.6752
8	500.00	5.16	680.54	7.0269
9	527.76	5.00	319.68	3.0286
10	551.04	5.00	567.90	5.1530
11	587.99	5.00	4.52	0.0384
12	593.14	5.00	200.92	1.6937
13	597.11	5.00	181.90	1.5232
14	596.11	5.00	470.32	3.9449
15	585.87	5.00	253.69	2.1651
16	572.95	5.00	145.46	1.2694
17	576.43	5.00	189.99	1.6480
18	555.43	5.00	501.20	4.5118
19	536.79	5.00	1019.78	9.4989
20	588.11	5.00	197.31	1.6775
21	600.76	5.00	360.98	3.0043
22	594.45	5.00	154.02	1.2955
23	608.47	5.00	131.39	1.0797

通过对湖南电网历史数据和相似日分析，对 2008 年度夏季大方典型日(2008 年 7 月 28 日)备用进行优化(取 24 时段)，湖南电网传统备用容量为系统总负荷的 5%或者单台发电机最大容量中的最大值，结果如表 3.2 和图 3.10 所示：

从中可以看出，最优备用容量明显小于《导则》7%-10%要求，该日备用容量成本比传统备用成本大大降低。传统备用容量分布比较平均，优化后的备用实时变化，更加负荷实际和电网运行经济性的要求。

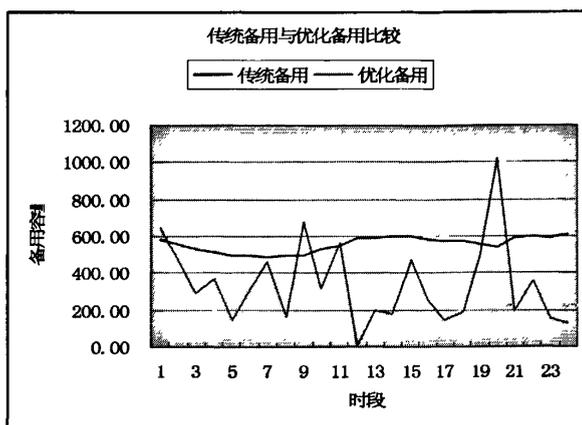


图 3.10 传统备用与优化备用曲线图

3.2.5 概率统计法

旋转备用的变化主要取决于负荷的波动，并受一些相关因素的影响。因此，备用的变化既有规律性又有随机性。旋转备用预测的任务是挖掘规律性，降低预测中的误差。旋转备用变化的随机因素是客观存在的，任何预测方法都存在误差，对旋转备用规律性的研究成为节能调度研究的又一领域。

本章提出了一种基于概率统计的备用容量规律性评价方法，通过对原始误差的分析统计，评价备用自身的规律性，排除了预测方法带来的干扰，并对统计误差的上限、下限进行估计，实践表明该方法可行的。文中选取湖南电网一年的历史数据作为实验数据，利用概率统计和相关知识进行分析。

定义按照正态分布 $N(\mu, \sigma)$ 的备用容量比例的平均值为 μ ，方差为 σ ，正态分布的概率值表示为 $P(x) = \Phi((x - \mu)/\sigma)$ ，本文应用正态分布的概率值去估计备用容量在满足一定的可靠性要求时的数值，以此作为实际备用的计算值。

设 $X \sim N(0, 1)$ ，若 u_α 满足条件

$$P(X > u_\alpha) = \alpha, \quad 0 < \alpha < 1, \quad (3.11)$$

则称点 u_α 为标准正态分布的上 α 分位点。

根据可靠性要求，设置 α 分位点，然后求出对于的 u_α ，即对应的备用容量百分比。采用 MATLAB 来实现上述功能比较方便，MATLAB 基本统计分析函数位于工具箱主包的 datafun 中，c: \matlab\toolbox\matlanb\datafun。MATLAB 中的逆累积分布函数是已知 $F(X) = P\{X \leq x\}$ ，求 x 。求解正态分布的累积概率值函数 normcdf。利用 MATLAB 统计分析出不同可靠性要求对应的备用容量的百分比数据如表 3.3 所示：

表 3.3 不同可靠性对应的备用率

时段	系统备用可靠性(%)								
	99.9	99.8	99.7	99.6	99.5	99.4	99.3	99.2	99.1
1	0.018	0.016	0.015	0.014	0.013	0.013	0.012	0.012	0.011
2	0.022	0.020	0.018	0.017	0.016	0.016	0.015	0.015	0.014
3	0.031	0.028	0.026	0.025	0.024	0.023	0.023	0.022	0.022
4	0.025	0.023	0.021	0.020	0.020	0.019	0.018	0.018	0.017
5	0.023	0.021	0.020	0.019	0.018	0.017	0.017	0.016	0.016
6	0.026	0.024	0.023	0.022	0.021	0.020	0.020	0.019	0.019
7	0.020	0.018	0.017	0.016	0.015	0.015	0.014	0.014	0.014
8	0.022	0.020	0.019	0.018	0.018	0.017	0.017	0.016	0.016
9	0.023	0.021	0.020	0.019	0.018	0.018	0.017	0.017	0.016
10	0.029	0.027	0.025	0.024	0.024	0.023	0.022	0.022	0.021
11	0.024	0.022	0.021	0.020	0.020	0.019	0.018	0.018	0.018
12	0.026	0.024	0.022	0.021	0.021	0.020	0.019	0.019	0.018
13	0.024	0.022	0.021	0.020	0.019	0.019	0.018	0.018	0.018
14	0.023	0.021	0.020	0.019	0.019	0.018	0.018	0.017	0.017
15	0.025	0.023	0.022	0.021	0.020	0.020	0.019	0.019	0.018
16	0.027	0.025	0.024	0.023	0.023	0.022	0.021	0.021	0.021
17	0.028	0.026	0.025	0.024	0.023	0.023	0.022	0.022	0.021
18	0.027	0.025	0.024	0.023	0.022	0.022	0.021	0.021	0.020
19	0.028	0.027	0.025	0.025	0.024	0.023	0.023	0.022	0.022
20	0.030	0.028	0.027	0.026	0.025	0.025	0.024	0.024	0.024
21	0.035	0.033	0.031	0.030	0.030	0.029	0.029	0.028	0.028
22	0.040	0.037	0.036	0.035	0.034	0.034	0.033	0.033	0.032
23	0.049	0.047	0.045	0.044	0.043	0.042	0.042	0.041	0.041
24	0.053	0.051	0.049	0.048	0.047	0.046	0.045	0.045	0.044
25	0.058	0.056	0.054	0.053	0.052	0.051	0.050	0.050	0.049
26	0.060	0.057	0.055	0.054	0.053	0.052	0.051	0.051	0.050
27	0.053	0.050	0.049	0.048	0.047	0.046	0.045	0.044	0.044
28	0.033	0.030	0.027	0.025	0.024	0.023	0.022	0.021	0.020
29	0.057	0.053	0.051	0.049	0.047	0.046	0.045	0.044	0.043
30	0.066	0.062	0.060	0.058	0.056	0.055	0.054	0.053	0.052
31	0.067	0.063	0.060	0.058	0.057	0.056	0.055	0.054	0.053
32	0.068	0.063	0.060	0.058	0.056	0.054	0.053	0.052	0.051

(续表)

时段	系统备用可靠性(%)								
	99.9	99.8	99.7	99.6	99.5	99.4	99.3	99.2	99.1
34	0.058	0.055	0.054	0.053	0.052	0.051	0.050	0.049	0.049
35	0.046	0.044	0.042	0.041	0.040	0.039	0.039	0.038	0.038
36	0.042	0.040	0.039	0.038	0.037	0.036	0.036	0.035	0.035
37	0.036	0.034	0.033	0.032	0.031	0.031	0.030	0.030	0.029
38	0.037	0.035	0.033	0.032	0.032	0.031	0.030	0.030	0.029
39	0.034	0.032	0.031	0.030	0.029	0.028	0.028	0.028	0.027
40	0.038	0.036	0.034	0.033	0.032	0.032	0.031	0.031	0.030
41	0.039	0.037	0.036	0.035	0.034	0.033	0.032	0.032	0.031
42	0.044	0.042	0.040	0.039	0.038	0.038	0.037	0.036	0.036
43	0.049	0.046	0.045	0.043	0.043	0.042	0.041	0.041	0.040
44	0.054	0.052	0.050	0.049	0.048	0.048	0.047	0.046	0.046
45	0.057	0.055	0.053	0.052	0.052	0.051	0.050	0.050	0.050
46	0.030	0.028	0.027	0.026	0.025	0.025	0.024	0.024	0.024
47	0.013	0.011	0.010	0.009	0.009	0.008	0.008	0.007	0.007
48	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
49	0.009	0.007	0.005	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002	0.001
50	0.022	0.019	0.018	0.017	0.016	0.016	0.015	0.014	0.014
51	0.020	0.018	0.017	0.016	0.016	0.015	0.015	0.014	0.014
52	0.023	0.022	0.021	0.020	0.019	0.019	0.018	0.018	0.017
53	0.030	0.028	0.027	0.026	0.026	0.025	0.024	0.024	0.024
54	0.028	0.026	0.025	0.024	0.023	0.023	0.022	0.022	0.022
55	0.031	0.029	0.028	0.027	0.027	0.026	0.025	0.025	0.025
56	0.031	0.029	0.028	0.027	0.026	0.026	0.025	0.025	0.024
57	0.032	0.030	0.029	0.028	0.028	0.027	0.027	0.026	0.026
58	0.030	0.028	0.027	0.026	0.026	0.025	0.025	0.024	0.024
59	0.029	0.027	0.026	0.025	0.025	0.024	0.024	0.023	0.023
60	0.015	0.014	0.012	0.011	0.011	0.010	0.010	0.009	0.009
61	0.023	0.021	0.020	0.019	0.019	0.018	0.018	0.017	0.017
62	0.023	0.021	0.020	0.020	0.019	0.018	0.018	0.018	0.017
63	0.028	0.026	0.025	0.024	0.023	0.023	0.022	0.022	0.021
64	0.031	0.029	0.028	0.027	0.026	0.025	0.025	0.024	0.024
65	0.042	0.039	0.038	0.037	0.036	0.035	0.035	0.034	0.034

(续表)

时段	系统备用可靠性(%)								
	99.9	99.8	99.7	99.6	99.5	99.4	99.3	99.2	99.1
67	0.048	0.046	0.044	0.043	0.042	0.042	0.041	0.041	0.040
68	0.044	0.042	0.041	0.040	0.039	0.038	0.038	0.037	0.037
69	0.042	0.040	0.039	0.038	0.037	0.037	0.036	0.036	0.035
70	0.036	0.033	0.032	0.031	0.031	0.030	0.029	0.029	0.029
71	0.051	0.048	0.046	0.044	0.043	0.042	0.041	0.040	0.040
72	0.076	0.071	0.068	0.065	0.064	0.062	0.061	0.059	0.058
73	0.049	0.045	0.043	0.042	0.041	0.040	0.039	0.038	0.037
74	0.050	0.047	0.045	0.043	0.042	0.041	0.040	0.040	0.039
75	0.060	0.057	0.054	0.053	0.051	0.050	0.049	0.048	0.048
76	0.051	0.048	0.045	0.043	0.042	0.041	0.040	0.039	0.038
77	0.058	0.054	0.052	0.050	0.049	0.047	0.046	0.046	0.045
78	0.069	0.065	0.063	0.061	0.059	0.058	0.057	0.056	0.055
79	0.073	0.068	0.065	0.063	0.062	0.060	0.059	0.058	0.057
80	0.051	0.047	0.045	0.043	0.042	0.041	0.040	0.039	0.039
81	0.028	0.026	0.025	0.024	0.023	0.022	0.022	0.021	0.021
82	0.019	0.017	0.016	0.015	0.014	0.013	0.013	0.013	0.012
83	0.015	0.013	0.012	0.011	0.010	0.010	0.009	0.009	0.009
84	0.017	0.015	0.014	0.013	0.012	0.012	0.011	0.011	0.010
85	0.012	0.010	0.009	0.009	0.008	0.007	0.007	0.006	0.006
86	0.011	0.009	0.008	0.008	0.007	0.006	0.006	0.005	0.005
87	0.008	0.006	0.005	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002	0.002
88	0.032	0.030	0.029	0.027	0.027	0.026	0.025	0.025	0.024
89	0.100	0.096	0.093	0.092	0.090	0.089	0.088	0.087	0.086
90	0.026	0.023	0.022	0.021	0.020	0.020	0.019	0.019	0.018
91	0.019	0.017	0.016	0.015	0.014	0.014	0.013	0.013	0.012
92	0.031	0.029	0.028	0.027	0.026	0.025	0.025	0.024	0.024
93	0.065	0.061	0.059	0.058	0.057	0.056	0.055	0.054	0.053
94	0.021	0.018	0.017	0.016	0.016	0.015	0.014	0.014	0.013
95	0.016	0.014	0.013	0.012	0.011	0.011	0.010	0.010	0.009

利用所得出的数据，对上表中的数据分别绘出各种满足概率情况下备用曲线比较立体图和各种满足概率情况下备用曲线比较以及1时段各种满足概率情况下备用率曲线分别如图 3.11、图 3.12 和图 3.13 所示：

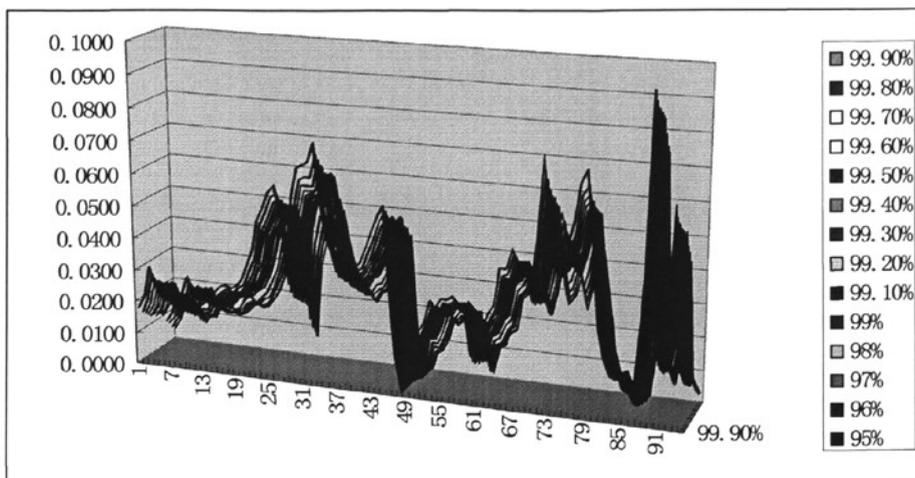


图 3.11 各种满足概率情况下备用曲线比较立体图

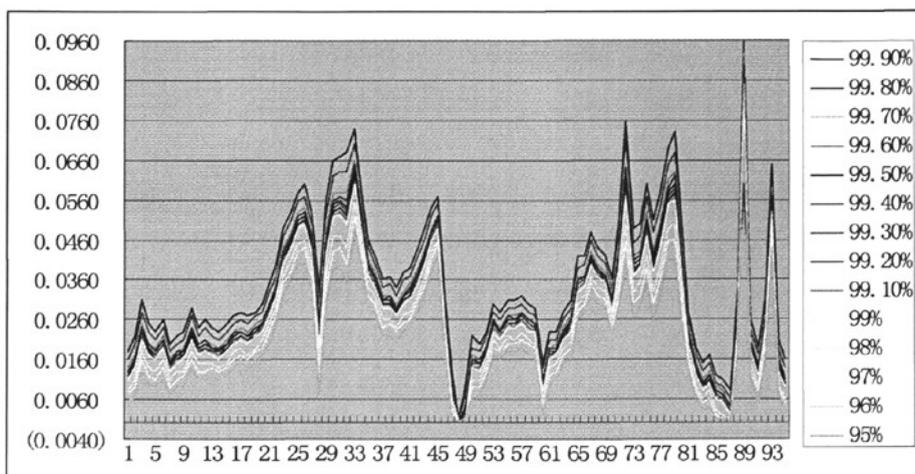


图 3.12 各种满足概率情况下备用曲线比较

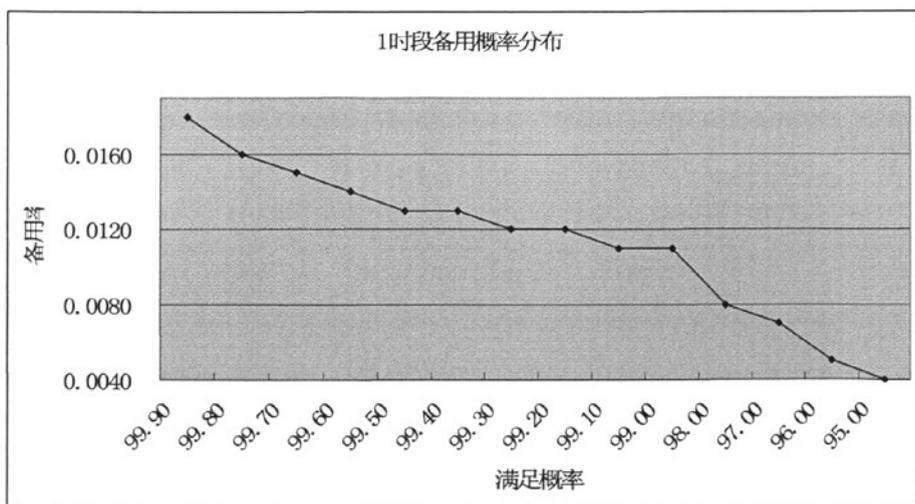


图 3.13 1 时段各种满足概率情况下备用率曲线

通过对上面的结果进行分析可以看到，优化后备用容量根据实际负荷和时段

的不同而不同，同时备用比例大大减小，以 1 时段为例，通过 Matlab 对时段 1 的备用容量概率分布函数、正态密度曲线、正态分布概率和备用小于百分之二的概率分别绘图如如 3.14 和图 3.15：

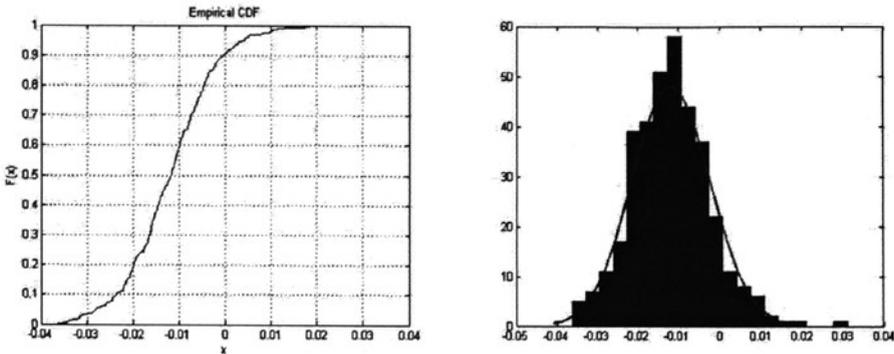


图 3.14 时段 1 的概率分布函数曲和附加有正态密度曲线的直方图

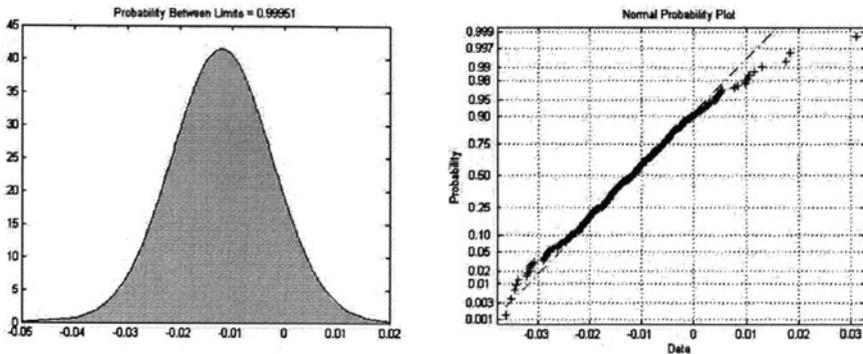


图 3.15 时段 1 小于 0.02 的概率和时段 1 正态分布概率图形

从中得知，1时段备用容量比例的概率主要分布在-0.02和0.01之间，并且1时段备用容量小于百分之二的概率达到了99.951%，可靠性非常高，但是备用容量却大大减小，与传统备用容量相比，减少了三个百分点。以湖南电网为例，系统负荷为10000MW，则可以减少系统备用容量300MW，相当于减少一个中型火电厂的容量，而按照湖南省火电厂平均煤耗为330g/kwh来计算，单时段(15分钟)可以节省电煤为24750Kg标准电煤，按照每吨电煤400元计算，15分钟产生的经济效益将近1000元。由此可以看出，备用预测的经济效益和环境效益都是非常高的。

3.3 小结

通过对前面的研究，我们得到优化算法比传统算法误差要小得多。其中概率统计法要以大量和真实的历史数据为基础，多项式拟合和最小二乘法则相对实施起来比较简单。本文所提出的这些方法，在实际工程应用中实施起来比较简易行，并且精度也能够达到实际的要求。

以湖南电网 2008 年 12 月 15 日负荷数据为例，我们比较一下传统备用容量预

测与基于最小二乘法的备用容量预测，示意图如 3.4。从图中可以看出，传统使用的备用容量获取结果中，并没有考虑当前和未来负荷变化情况，而是按照固定的比例或者固定的备用容量，采用优化算法以后，根据负荷实际情况来决定电网所需备用容量，更能体现备用容量的作用，同时极大的减少了资源浪费。

高精度的备用容量预测，达到了电网实际运行状态下的要求，实现电网安全运行的同时又极大的减少了能源的消耗，意味着污染排放的减少，是节能发电调度的一种重要实施途径。

第 4 章 基于节能发电调度减少水电旋转备用研究

4.1 引言

为建立资源节约型和环境友好型社会，促进经济社会可持续发展，我国大力加强节能减排工作，明确了“十一五”能源消耗和主要污染物排放总量控制目标。电力行业作为节能降耗和污染物减排的重点领域，2007 年积极推动实施上大压小、差别电价、节能调度、发电权交易等多种措施，节能减排工作取得明显成效。经粗略估算，2007 年电力行业仅通过提高能效（包括降低线损率和供电煤耗）、发展可再生能源发电和加强需求侧管理三项措施，即相当于节约一次能源 6492 万吨标煤，减少二氧化硫排放约 103 万吨（约占 2006 年电力二氧化硫排放的 7.65%，全国二氧化硫排放的 3.99%），减少二氧化碳排放约 1.8 亿吨。国家电监会统计数据如表 4.1 所示（单位：万吨）：

表 4.1 2007 年电力行业节能减排统计（单位：万吨）

指标	供电煤耗降低	线损率降低	核电增发电量	可再生能源增发电量	需求侧管理	总计
二氧化硫减排	39.29	3.06	4.14	39.74	17	103.23
二氧化碳减排	6916	539	729	6995	3000	18179

电网统一调度是实现电能可靠交易的必要条件，是实现电力系统的生产、管理、运行效益最优的基本保障。电能的特性决定了必须设置足够的发电备用才能保证系统安全、可靠、连续供电。

我国过去的发电调度大多是按照同类机组平均分配发电利用小时数的办法。此办法表象公平，操作公开，在一定时期内调动了业主投资火电项目建设的积极性，促进了发电装机的快速扩张，但在过分要求平均分配发电时，也导致了高效环保机组发电能力无法充分发挥，造成了能源浪费和过量排放。

国务院转国家发改委的《节能发电调度办法（试行）》发布后，要求实施节能发电调度。节能发电调度就是按照节能、环保、经济的原则，以保证电网安全运行，保障电力可靠供应为前提，以合理的运行方式，满足用电需求的条件下，在电力生产、供应的环节中，达到全网节能、降耗、减排等综合效益最大。本章在此背景下，在节能发电调度办法的指导下，开展了对湖南电网实行节能发电调度，减少水电旋转备用的研究。

4.2 湖南电网现状

湖南电网水电资源丰富，水电装机比重较大，约占统调负荷 57%左右。电网快速旋转备用主要由水电机组承担，火电机组基本不参与调整，大量水电备用容量势必产生空载、轻载耗水，降低水电水能利用率，导致大量水能资源浪费不利于电网经济运行；且火电机组不能实时承担电网备用容量，削弱了电网调整能力不利于安全稳定运行；不同的火电机组煤耗差距很大，600MW 机组煤耗远低于 300MW 机组煤耗，600MW 机组多发电将降低煤耗，节约电煤。

湖南电网的主要特点：电源结构水电比重大，小水电丰富，总体调节性能差，主网负荷水平及电网运行方式随季节、气候变化较大；湘西北电源较集中，湘中负荷中心电源支撑季节性不足，呈现出西电东送的格局。湖南电网湘西北往湘中外送出力岗市 220kV 西电东送通道受到毛玉线、迎天线的限制；云田、沙坪主变 500kV 下网功率受到华中主网稳定性限制；湘中地区的开机方式受到电压稳定的制约。图 4.1 和 4.2 分别为湖南省近 7 年来火电、水电发电量变化曲线图。

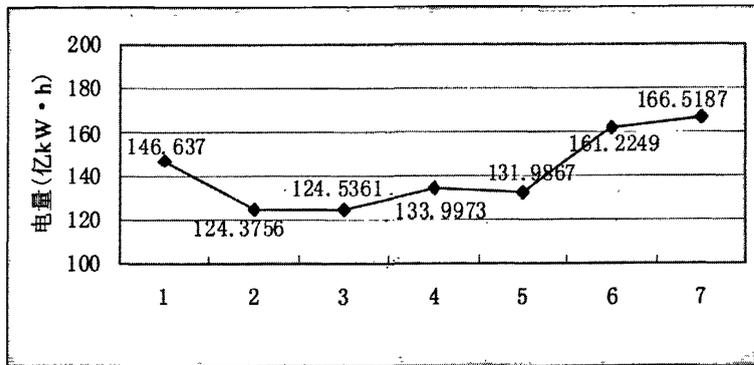


图 4.1 湖南电网近 7 年来火电发电量变化曲线图

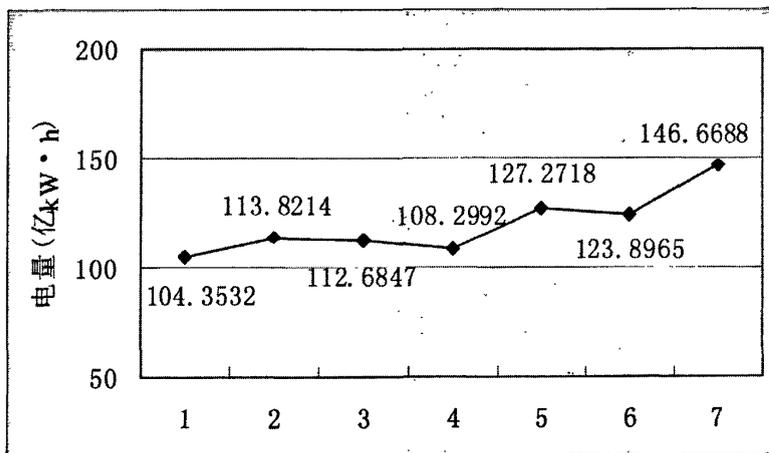


图 4.2 湖南电网近 7 年来水电发电量变化曲线图

湖南省水力资源丰富，水、火电调度的基本原则是：丰水期间，发电以水电

为主，火电调峰；枯水期间，发电以火电为主，水电调峰。

图 4.3 所示是湖南省历年水、火电发电量占总发电量比例对照图。湖南省水力发电受气候条件影响很大，如果遇到枯水或来水过于集中年份，则湖南电网的水力发电形势不容乐观。湖南电网依靠水、火电联合优化调度和外网经济电量交易是很有潜力可挖的。

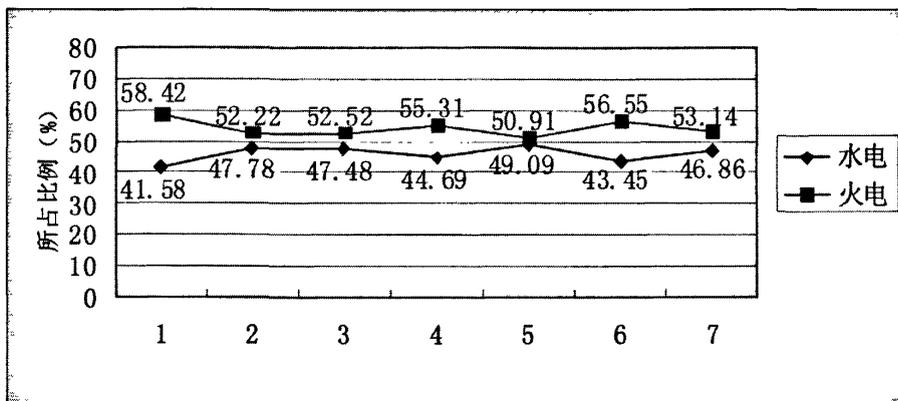


图 4.3 湖南省历年水、火电发电量占总发电量比例对照图

在确保电网满足安全稳定运行的前提下，如何合理的充分发挥火电机组调节能力以及减少水电备用容量；如何合理分配备用容量，调整发电计划以降低煤耗。因此开展基于节能调度、减少水电旋转备用的研究开发具备很大的现实工程意义和经济价值。

4.3 主要研究内容

基于节能调度、减少水电旋转备用的项目通过加强火电机组 AGC 管理和考核、加大火电机组 AGC 投入容量，以使火电机组 AGC 调节速率和调节范围达到要求，以便火电机组能够承担更多备用容量，减轻水电机组负荷调节负担。

本课题通过优化快速备用的研究，使火电机组能快速参与电网负荷调整，并及时指导调度员开停水电机组，实现减少水电旋转备用和节能调度的目的，并最终实现计算节省煤、水能资源。课题的主要研究方向：负荷预测及备用容量的预测、火电机组 AGC 调节能力、备用容量的分配机制、水电平均耗水率、基于安全约束的断面备用容量分配，备用优化的效益等。

上述研究方向存在几个难点：基于断面安全约束条件下，如何分配水火电机组备用容量？如何确定水电机组最小旋转备用容量、备用容量的原则、EMS 数据库与节能调度数据库的交互。

4.3.1 电网旋转备用容量预测和分配

4.3.1.1 旋转容量预测

常用的确定系统所需备用容量的方法主要有：①系统峰荷的固定比例(如7%~10%);②系统中的单机最大容量^[37]。电网备用容量的原则首先应满足电网稳定运行要求(即根据电网实时发电负荷确定备用容量),而快速备用应满足电网负荷变化的需求,电网负荷变化需求可通过超短期负荷预测及备用预测实现。因此在优化电网快速旋转备用时,如何在备用容量与快速备用之间寻找平衡点,既能满足电网快速调整要求,又能经济运行,关键在于备用优化算法。快速备用的定义:水发电机组已开出的机组备用+火电机组 AGC 速率 \times 时间。备用容量的定义:开机不受限的水电机组容量-水电负荷-水电受限+火电开机容量-火电负荷-火电受限。本章中,采用第三章所介绍的选择备用预测方法,利用最小二乘拟合线性差值预测备用容量,在此对其原理介绍省略。

4.3.1.2 旋转容量分配原则

负荷备用容量要求的速率较高。一般是指接于母线立即可以带负荷的旋转备用容量;事故备用容量是指在规定时间内(一般 10 min 内)可供调用的备用容量,其中至少有 50%是在系统频率下降时能自动投入工作的备用容量。满足规定时间要求的可切除负荷也可以作为事故备用容量中的非旋转备用部分考虑。我们做旋转容量分配的时候就要考虑负荷备用速率方面的要求。综合考虑之后我们采用以下原则进行分配:

(1) 首先安排 AGC 调整容量作为备用,加强火电机组 AGC 管理和考核、加大火电机组 AGC 投入容量。其中火电厂间,我们又按机组煤耗情况设置优先级,尽量让低煤耗、大机组承担发电任务,从而实现节能的目的。

(2) 安排水电机组,当用电早高峰来临前,部分水电机组提前启动并网发电迎接用电高峰的到来。当负荷平稳后,水电厂主要起着调频和事故备用的功能。当电力系统出现较大幅度的负荷下降时(如午间休息时间、工厂下班后),水电机组首先减负荷、停机或转调相运行作为系统的旋转备用。晚间灯光用电高峰后,水电机组基本上均停机,迎接新的一天到来。当电力系统发生事故,系统频率下降时,不仅发电的机组立即增加出力,而且要将调相的机组改为发电。水电机组依据水耗情况以及水头水位情况我们也可以设置优先等级,在安排发电任务的时候尽量让水情良好、水耗低的机组承担任务。水电机组有功负荷分配的原则可以是按耗水量等微增率分配,当机组微增率特性相同时可简化为按机组容量等比例分配方式。为了使各机组负荷分配值合理,负荷分配值由运行限制条件对其进行合理性检验。水电机组具有开停机方便负荷调节速率快等特点,因此在电力系统中起着调频调峰和事故备用的功能。

(3) 当水电备用全部启动仍然不能满足负荷和备用需求时,提醒调度人员开启冷备用的火电机组发电。

(4) 在备用容量的配置上,应采取以下原则:相对分散,避免集中在某个电厂或地区;综合考虑电网实际运行方式,电网相对薄弱处应留足备用容量;根据不同季节、不同气候特征,合理安排水、火电机组备用容量比重,使电网既能满足负荷调节要求,又满足备用容量需求。

(5) 在优化快速备用的基础上,使火电机组能快速参与电网负荷调整,并及时指导调度员开停水电机组,实现减少水电旋转备用和节能调度的目的,并最终实现计算节省煤、水能资源。

4.3.1.3 旋转容量优化分配

第三章中,已经得到了系统所需的旋转备用,如何实现旋转备用的最优分配是本章要讨论的问题。由于负荷备用在调节速度方面要求比较高,所以系统的负荷备用都是由实现 AGC 管理的火电机组和水电机组承担。

(1) 火电备用容量分配

火电备用的安排,一般是依据以下公式来分配:

$$\begin{aligned} N_{火,平} &= N_{备用,平} * \eta_{平} \\ N_{火,谷} &= N_{备用,谷} * \eta_{谷} \\ N_{火,峰} &= N_{备用,峰} * \eta_{峰} \end{aligned} \quad (4.1)$$

式中: $N_{火,平}$ 、 $N_{火,谷}$ 、 $N_{火,峰}$ 分别是水电厂在平段、谷段与峰段的合理备用; $N_{备用,平}$ 、 $N_{备用,谷}$ 、 $N_{备用,峰}$ 分别为电网在平段、谷段和峰段所需备用容量; $\eta_{平}$ 、 $\eta_{谷}$ 、 $\eta_{峰}$ 分别为电网负荷备用分摊给水电厂的比例。由于水电调节速度比火电快,所以在旋转备用较大的时候水电承担的比例会大一些。

通过火电承担备用的比例可以计算得出火电承担的备用大小。计算火电开机机组的可调备用大小,计算公式如下:

$$P_{火,可调} = \min\{AGC * T, P_{火,max} - P_{火,受限} - P_{火,当前}\} \quad (4.2)$$

其中 $AGC * T$ 为火电机组 AGC 的可调出力, $P_{火,max}$ 为火电机组最大出力, $P_{火,受限}$ 为火电机组受限容量, $P_{火,当前}$ 为火电机组当前出力。

计算出各火电开机机组的最大可调出力后,实现火电机组的最优配置就可以转化成如下模型:

$$\begin{aligned} \text{Min} Z_{火,备用} &= \sum_{i \in M} P_{i,火} / H_{i,火} \\ \text{S.t.} P_{火,备用} &= \sum_{m \in I} P_{m,火} \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$0 < H_{1,火} < H_{2,火} \dots < H_{m,火}$$

$$0 < P_{m,火} \leq P_{m,火,可调} (m \in I)$$

其中 $\text{Min} Z_{火,备用}$ 是使火电机组耗煤最小的目标函数

$P_{i,火}$ 为第*i*台火电机组承担的备用容量

$H_{i,火}$ 为第*i*台火电机组的空载煤耗率

$m \in I$ 为参与备用调节的火电机组的集合。

火电备用分配的计算机求解过程如流程图 4.4 所示：

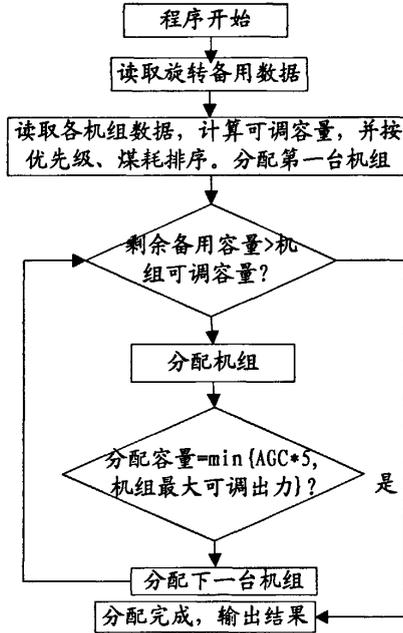


图 4.4 火电备用分配流程

(2) 水电备用容量分配

通过水电承担备用的比例可以计算得出水电承担的备用大小。

$$\begin{aligned}
 N_{水,平} &= N_{备用,平} * \eta_{平} \\
 N_{水,谷} &= N_{备用,谷} * \eta_{谷} \\
 N_{水,峰} &= N_{备用,峰} * \eta_{峰}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

式中： $N_{水,平}$ 、 $N_{水,谷}$ 、 $N_{水,峰}$ 分别是水电厂在平段、谷段与峰段的合理备用； $N_{备用,平}$ 、 $N_{备用,谷}$ 、 $N_{备用,峰}$ 分别为电网在平段、谷段和峰段所需备用容量； $\eta_{平}$ 、 $\eta_{谷}$ 、 $\eta_{峰}$ 分别为电网负荷备用分摊给水电厂的比例。由于水电调节速度比火电，所以在旋转备用较大的时候水电承担的比例会大一些。

计算水电开机机组的可调备用大小，计算公式如下：

$$P_{水,可调} = P_{水,max} - P_{水,当前} \tag{4.5}$$

其中 $P_{水,max}$ 为水电机组在当前水头下的最大可调出力， $P_{水,当前}$ 火电机组当前出力。

计算出各水电开机机组的最大可调出力后，实现水电机组的最优配置就可以转化成如下模型：

$$\begin{aligned} \text{Min} Z_{\text{水,备用}} &= \sum_{i \in n} P_{i,\text{水}} / H_{i,\text{水}} \\ \text{ST} \dots P_{\text{水,备用}} &= \sum_{n \in I} P_{n,\text{水}} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$0 < H_{1,\text{水}} < H_{2,\text{水}} \dots < H_{n,\text{水}}$$

$$0 < P_{m,\text{水}} \leq P_{n,\text{水,可调}} (n \in I)$$

其中 $\text{min} Z_{\text{水,备用}}$ 是使水电机组耗煤最小的目标函数， $P_{i,\text{水}}$ 为第 i 台水电机组承担的备用容量， $H_{i,\text{水}}$ 为第 i 台水电机组的空载耗水率， $n \in I$ 为参与备用调节的水电机组的集合。

水电备用分配的计算机求解过程如流程图 4.5 所示：

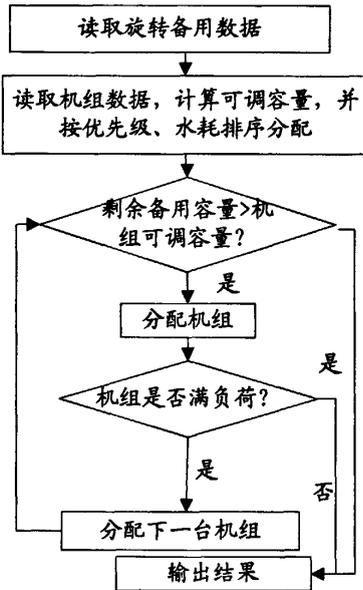


图 4.5 水电备用分配流程

4.3.2 如何考虑断面安全约束条件

电网分区运行，要求实现水火电机组备用的优化分配，必须确保区域断面安全稳定。通过电网超短期负荷预测及区域内各发电机组运行情况，计算当前电网的快速备用容量是否满足要求，不满足要求，则考虑加、减负荷方案或停机方案，并对方案进行扫描（递归式潮流计算），将安排的开机计划传至 EMS 总站，通过调用 EMS 的潮流计算程序，对方案的潮流进行计算，然后对潮流中的联络线是否越限、线路功率是否越限以及电网安全性进行校验，直到满足所有约束安全，并将该方案报出作为调度员负荷调整的指导。

4.3.3 水电厂的耗水量特性

由于水是自然界的直接能源，所以其发电量与经济支出基本上没关系，因此，在系统调度运行时，应尽量利用水电厂代替火电厂。但是水资源的充分和综合利

用也非常重要，应当充分利用水电，从而最大限度减少火电厂的燃料消耗，达到节能、经济、环保的目的。因此，研究水电厂的耗水量特性，以合理使用有限的水资源，是十分重要的。

水电厂利用水坝提高河流水位，若水坝的上游水位为 H_s ，水轮机尾水管出口处的下游水位尾 H_x ，则水电厂总水头为：

$$H_d = H_s - H_x$$

水轮发电机组的耗水量特性，即水轮机的耗水量 W_G 与发电机发出的有功功率 P_G 之间的关系，与总水头的大小有关。在同样的功率下，总水头愈高，则需要的耗水量就愈小。如图 4.6 所示，一般来说，水耗量特性曲线为下凹曲线。在运行过程中，根据水头选择相应的耗水量特性。

当水电厂由多台发电机组组成时，一般由总耗水量最小的条件来决定参加运行的机组数，从而决定整个电厂的耗水特性。

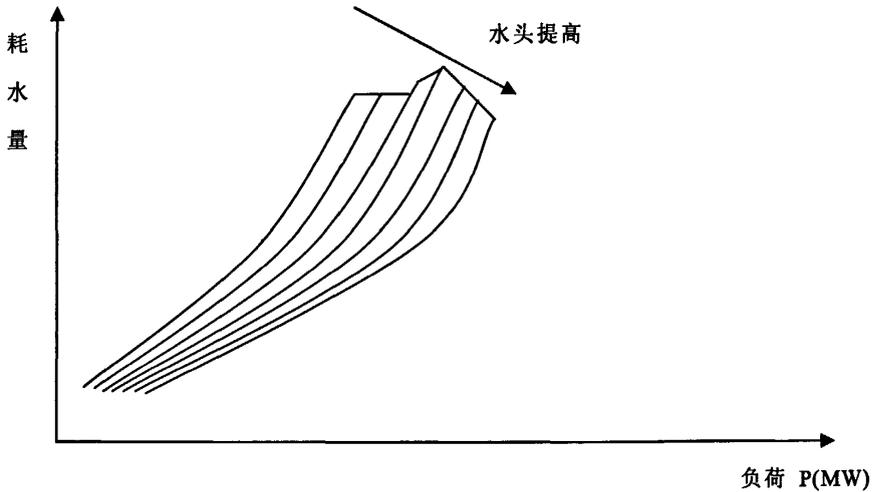


图 4.6 水电机组耗水特性

一般来说，水头高时单位水量可发的电能比较多。若以 Q_j 、 P_j 及 η_j 分别表示机组 j 的单位时间耗水量 (m^3/s)、发电有功功率 (MW) 及运行效率，以 h 表示水库的水头 (m)，则它们之间的关系可以用下式描述：

$$Q_j = \frac{1000}{9.81} \cdot \frac{P_j}{h \eta_j}$$

水头 h 的存在，使得水电机组耗水量特性复杂化。我们以湖南电网柘溪 7 # 机组为例，下表表示的是不同水头和出力情况下对应的耗水量如表 4.2 所示：

水电厂运行时应该满足如下约束条件：

$$\int_0^T Q dt = W$$

表 4.2 不同水头和出力情况下对应的耗水量

出力 (MW)	水头(m)					
	54	55	56	57	58	59
10.0	23.7	23.3	22.9	22.5	22.1	21.7
11.0	25.6	25.1	24.7	24.3	23.9	23.5
12.0	27.5	27.0	26.5	26.1	25.6	25.2
13.0	29.4	28.8	28.4	27.9	27.4	26.9
14.0	31.1	30.5	30.0	29.5	29.0	28.5
15.0	32.8	32.2	31.7	31.1	30.6	30.1
16.0	34.5	33.9	33.3	32.8	32.2	31.7
17.0	36.5	35.9	35.2	34.6	33.9	33.3
18.0	38.6	37.9	37.1	36.4	35.6	34.9
19.0	40.6	39.8	39.0	38.2	37.4	36.5

T 为运行调度周期，W 为调度周期内保持较高水头时所给定的消耗水量，Q 为电厂单位时间内的耗水量。若电厂有 N 台机组组成，则：

$$Q = \sum_{j=1}^N Q_j$$

为简单起见，一般水电厂都在固定水头情况下运行，此时耗水量与发电功率的关系可以简化为二次函数表示，即：

$$Q_j = a_j P_j^2 + b_j P_j + c_j$$

其中， a_j 、 b_j 、 c_j 为水电机组 j 的耗水量特性参数。

利用拉格朗日乘子法引入目标函数，对水电机组负荷分配进行优化，并求其极值，所得到的类似火电机组的极值条件如下：

$$\frac{dQ_1}{dP_1} = \frac{dQ_2}{dP_{21}} = \dots = \frac{dQ_N}{dP_N} = \lambda$$

对于所求出的结果，仍可用 Kuhn-Tucker 最优性条件及机组本身技术约束条件去检验。上面就是等微增原理在水电机组有功功率优化调度中的应用。

4.3.4 节能调度水电空耗的计算

根据水电机组本身启动迅速的特点，电网的备用任务多由水电承担。由于水电站要承担电网的负荷备用任务，这样，水电站的机组既要完成电网的负荷任务，又要承担负荷备用，必然产生非发电出库水量，在这些出库水量中部分是承担电网负荷所必需的，有些则是调度不当，负荷备用过多造成的空耗水量。合理利用水能资源，充分发挥水电效益，减少水电站弃水损失，实现水火资源优化配置，是电网调度面临的一个重要问题。为了提高水能利用率，有必要对水电站的空耗

子水量进行计算并考核，以提高调度管理水平。

空耗水量的理论计算方法：根据电网分配给水电站的实时负荷任务、当前电网所需的负荷备用、水电厂各台机组情况以及水库的实时水情，计算出最优的开机方式，若实际开机情况所用的流量超过最优的开机方式所需的流量，则这部分流量就是空耗掉的，造成了不合理弃水。

水电站空耗水量的理论计算公式为：

$$W = \sum_{i=1}^m \left(\frac{H_{i,c}}{H_{i,\max}} N_{i,\max} - N_{i,c} \right) * t - \sum_{j=1}^n \left(\frac{H_{j,c}}{H_{j,\max}} N_{j,\max} - N_{j,c} \right) * t \quad (4.7)$$

$$N_x = \sum_{i=1}^m (N_{i,\max} - N_{i,c}) \quad (4.8)$$

$$N'_x = \sum_{i=1}^m (N_{i,\max} - N_{i,c}) \quad (4.9)$$

式中： W 为水电站空耗水量(m^3)； t 为造成空耗时段长度(s)； $N_{i,\max}$ 为第*i*个水电站在当前水头下和当前开机方式下的最大可调出力(kW)； $N_{i,c}$ 为第*i*个水电站的当前实际出力(kW)； $H_{i,c}$ 为第*i*个水电站在当前出力下的耗水率(m^3 / Kwh)； $H_{i,\max}$ 为第*i*个水电站在最大可调出力下的耗水率(m^3 / Kwh)； N_x 为传统方法预留的备用容量； $\sum_{i=1}^m \left(\frac{H_{i,c}}{H_{i,\max}} N_{i,\max} - N_{i,c} \right) * t$ 为传统方法预留备用容量而浪费的水量； N'_x 为优化算法预留的备用容量； $\sum_{j=1}^n \left(\frac{H_{j,c}}{H_{j,\max}} N_{j,\max} - N_{j,c} \right) * t$ 为优化算法预留备用容量而浪费的水量。

空耗水量的计算可以通过水电机组的空载流量进行近似计算。在水电厂运行过程中，如果实际备用超过了电网所需要的合理备用，同时超出的部分达到一台机组的可调出力，说明目前所开水电机组台数不合理，造成了一台或一台以上机组的浪费，即可以理解为有一台或一台以上机组空载，通过空耗的机组台数就可以计算空载所浪费的水量作为空耗水量；如果没有超过一台机组的可调出力，则认为造成的空耗是合理的。由于机组本身的运行特点，开停机组数至少为一台，因此要对造成空耗的台数进行取整处理。

水电站空耗水量的简化计算公式为：

$$W = \sum \text{int} \left(\frac{N_{\max} - N_s - N_x}{N_n} \right) * Q_{\text{空载}}(H) * t \quad (4.10)$$

式中： W 为水电站空耗水量(m^3)； t 为造成空耗时段长度(s)； N_{\max} 为水电站在当前水头下和当前开机方式下的最大可调出力(kW)； N_s 为水电站的实际出(kW)； N_x 为电网需要水电站提供的合理备用(kW)； N_n 为机组单机可调出力； H 为水头(m)； $Q_{\text{空载}}(H)$ 为水头*H*下机组的空载流量； $\text{Int}[(N_{\max} - N_s - N_x) / N_n]$ 为取整得到的是造成空耗的机组台数。

进行空耗水量计算时要满足的约束条件是：水电站实际多留的备用超过了单机可调出力，即： $N_{\max} - N_s - N_x \geq N_n$ 。可以看出，简化计算的关键是确定合理备用 N_x 、最大可调出力 N_{\max} 和单机可调出力 N_n ，这是与水电站的实际情况有关的。

4.3.5 EMS 数据库与节能发电调度数据库的交互

节能调度数据存储水电机组、火电机组经济技术指标、最小水电备用等数据及相关算法，而 EMS 数据存储电网运行各种数据，EMS 的数据存储与节能调度数据库是两个不同数据库系统，两个数据库内部如何实现接口，快速相互调用数据，并对 EMS 中安全约束进行扫描的要求。

鉴于湖南省调度中心新 EMS 系统即将投运，并考虑到节能发电调度系统的进一步升级，在本研究和系统的开发中，建立节能发电调度信息系统数据库。本系统由于在安全性和稳定性方面都有很高要求，因此宜采用 Oracle 作为数据库服务器。

4.3.6 系统约束安全问题

专家系统是一个用基于知识的程序设计方法建立起来的计算机系统，它拥有某个特殊领域内专家的知识 and 经验，并能像专家那样运用这些知识，通过推理，在那个领域内做出智能决策。从而克服单一算法的片面性，同时，全过程的程序化，使本方法具有快速决断的优点。不同的专家系统，其功能与结构不尽相同。通常，一个以规则为基础，以问题求解为中心的专家系统，可用图 4.7 所示的系统框图描述：

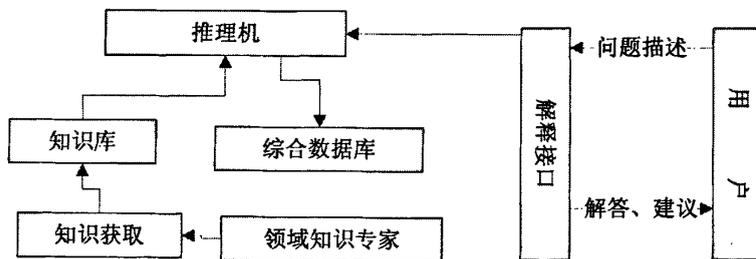


图 4.7 专家系统框图

对于约束条件的处理，采用类似专家系统思想，由于节能发电调度模型为高维数、非线性的优化模型且动态变化等特点，并且现在还没有一种成熟的快速可靠的编排算法。本文利用人工智能技术思想，设计了一种基于专家系统思想解决约束条件的系统：采用专家系统思想，利用知识库、推理规则辅助推理机制，智能处理众多约束条件，科学、合理地安排负荷分配，提高电网运行的可靠性和经济性，具有快速可靠的优点。将调整结果返回 EMS 中进行安全扫描，不满足条件则返回节能调度数据库重新分配，直至满足要求。考虑到水火电机组受安全约束、水电机组受电水头以及火电机组煤质的对负荷的影响。水火电机组安全受限

可由设定，水机组与水头的关系可通过查找水头与发电曲线表得出。

基于专家思想处理约束（安全校核）的流程图如下：

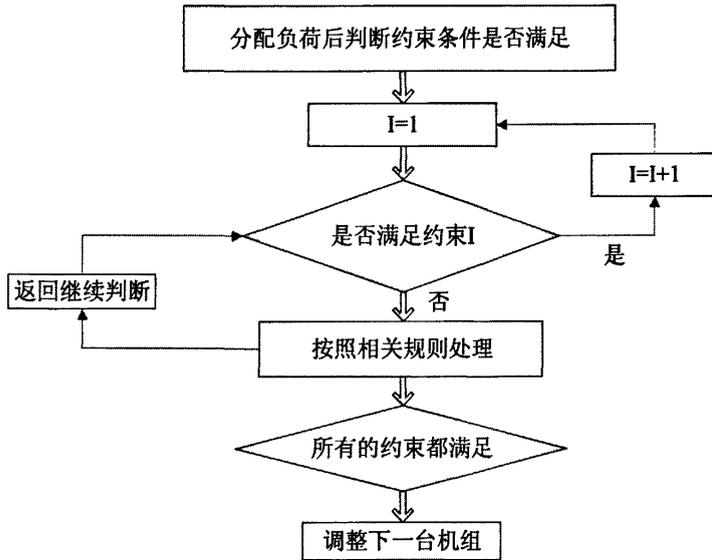


图 4.8 约束处理流程图

4.3.7 备用分配策略——级差分配机组功率

在处理水电机组负荷分配时，以耗水量而言，水轮发电机组按等微增率分配有功功率是最经济的。但是，这是忽略了水轮机的机械磨损对发电成本的影响。而水轮机的机械磨损主要是在功率调整过程中发生的。如果每次给定不管大的功率的变化，全网所有参与 AGC 运行的机组都将进行相应的调节，显然这是不合理的^[38]。为此，采用“级差分配机组功率”的方法，基本上可实现每次给定功率的变化只发生在极少的机组上。

所谓“级差分配机组功率”即机组的给定功率变化是阶梯形的，而每一个阶梯的“级差” ΔP 是有限的（如 10MW，20MW 等）。这样，机组间的功率分配是有差别的，但和等微增率分配差别不大，其最大的误差就是功率分配阶梯的“级差”。级差 ΔP 的确定可以参考下面式子：

$$\Delta p = (P_{\max} - P_{\min}) / N \quad (4.11)$$

其中， P_{\max} 、 P_{\min} 分别为日最大和最小负荷， N 为参与快速旋转备用调整机组的台数。

目前湖南电网 AGC 运行方式是每隔八秒钟给定功率刷新一次，但给定功率一般变化不大。采用“级差分配机组功率”方法后，每次给定功率发生变化，只需一至二台机组响应即可。选择适当的“级差”值，一定能达到既可满足机组的可靠性要求，同时也满足了系统对频率质量的要求。

4.3.8 AGC 机组的考核

电力系统自动发电控制（AGC）原先称为“电力系统频率与有功功率的自动控制”，对这项技术的研究可以追溯到几十年前，但它的发展和应用还是在电力系统扩大以后，尤其是二十世纪五十年代以来，随着战后经济的发展，电力系统的容量不断增长，各工业发达国家的电力系统通过研究和试验，相继实现了频率与有功功率的自动控制。

采用自动发电控制（AGC）的技术手段，对电力系统中的大部分发电机组，根据其本身的调节性能及在电网中的地位，分类进行控制，自动地维持电力系统中发供电功率的平衡，从而保证电力系统频率的质量。根据电网运行对 AGC 机组的要求，AGC 机组的调节性能主要包括 3 个要素：调节容量、调节速率和调节精度。

1.调节容量。所谓调节容量，就是指正常情况下 AGC 机组受控期间所能达到的最大负荷和最小负荷的差值。一般来说，机组的调节容量为相对固定的值，在机组控制系统调试期间就能确定机组的调节容量。例如 300MW 机组调节容量为 120MW(即调节范围从 180MW~300 MW)，有的则为 140 MW(即调节范围从 160MW~300MW)。调节容量是决定 AGC 机组效能的重要方面，显然调节容量大的机组对系统贡献大，反之则小。

2.调节速率。调节速率即是指机组响应负荷指令的速率，它包括上升速率和下降速率，调节速率也反映了机组对系统的贡献大小。实际生产过程中，为了保证发电机组的安全，机组分散控制系统设置了指令变化速率限值，该值一般要求和机组实际速率一致。例如 300MW 机组上升、下降速度一般设定为 3MW/min，125MW 机组通常设定为 1MW/min。

3.调节精度。调节精度是指机组最后稳定负荷和给定值之间的差值，在对 AGC 机组调节容量、调节速率性能进行定量统计的同时，还需对其调节精度进行测定和考核，对调节精度低的机组则进行一定程度的经济惩罚。

并网发电厂单机 100MW 及以上火电机组和单机容量 40MW 及以上非贯流式水电机组应具有 AGC 功能。并网发电机组 AGC 的可投率和调节精度、调节范围、响应速度等应满足要求。加装 AGC 设备的并网发电厂应保证其正常运行，不得擅自退出并网机组的 AGC 功能。考核规则如下：

以机组为单位，每月对机组的 AGC 投运率和 AGC 调节性能进行考核。对于具有 AGC 功能的机组，按其 AGC 的可用率、调节容量、调节速率和调节精度进行考核：

1.AGC 的月可用率必须达到 90% 以上。每低于 1 个百分点（含不足一个百分点），每台次记考核电量 5 万千瓦时。经调度机构同意退出的时间段，不纳入考

核范围；

2.具备 AGC 功能的机组，应按调度指令要求投入 AGC，无法投入 AGC 功能或 AGC 调节性能不满足规定基本要求，每日按 0.5 万千瓦时记为考核电量；

3、在电网出现异常或由于安全约束限制电厂出力，导致机组 AGC 功能达不到投入条件时，不考核该机组 AGC 服务。

火电机组的 AGC 调节性能要求表如表 4.3 所示：

表 4.3 火电机组 AGC 调节性能要求表

额定容量	调节范围下限 (额定容量的 百分数)	调节范围上限 (额定容量的 百分数)	调节速度(每分 钟额定容量的百 分数)	调节精度
100MW(含)~200MW	75%	100%	2.0%/Min	±3%
200MW(含)~300MW	66%	100%	2.0%/Min	±3%
300MW(含)~600MW	60%	100%	2.0%/Min	±3%
600MW 及以上	55%	100%	2.0%/Min	±3%

水电机组的 AGC 调节性能要求表如表 4.4 所示：

表 4.4 水电机组 AGC 调节性能要求表

调节形式	调节范围下限(额定 容量的百分数)	调节范围上限(额 定容量的百分数)	调节速度(每分钟额 定容量的百分数)	调节精度
全厂方式	最低振动区上限	100%	最大机组的 80/Min	±3%
单机方式	最低振动区上限	100%	80%/Min	±3%

4.3.9 备用优化的效益评估

电网在不同时段对备用容量的需求不同，根据电网负荷特性，负荷变动大的负荷点对快速备用要求较高，而对负荷变化较平稳的点，快速备用要求较低。通常对于负荷变化平稳的时段主要考虑电网负荷的扰动，而对于负荷变化大的时段快速备用应考虑电网负荷扰动及备用预测的要求。

负荷平稳变化的时段仅需考虑电网负荷扰动，减少快速备用，可视为减少水电备用，根据电网开机情况，算出水能提高率；而高效率火电机组多发电相当于减少低能耗火电机组的电量，可计算节约电煤。

4.4 总结

本文从湖南电网实际情况出发，依据节能发电调度原则，开展了基于节能调度、减少水电旋转备用的研究，设计开发相关应用软件。基于节能发电调度思想，利用基于概率统计和典型日选取来进行备用容量的预测，通过对备用容量的合理

分配，以减少水电快速备用，达到节水节煤的目的；对于备用容量分配采用“有级分配机组功率”；对于约束条件的处理，采用类似专家系统思想，同时采用采用迭代的方法处理高维数、非线性的优化模型，以获得对最优解的逼近；通过加强对 AGC 机组的考核，提高了系统的安全性和经济性；最后对通过节能调度的备用优化分配以后所产生的经济效益的评估进行了分析。文章的研究具有很大的经济和社会效益，是对节能发电调度办法的切实的落实。

第5章 基于节能发电调度的竞价与竞耗上网机制研究

本章从我国电网优化调度现状分析出发,结合发电调度基本原则,提出在发电竞价规则中引入能耗因子、网损因子、环境排放因子并按报价排序等,研究如何在电量报价将能耗、网损、及污染排放进行折算关系和理论计算公式,提出了竞价与竞耗上网结合的综合模型,以作为发电调度决策的依据,通过在发电侧引入节能因子,将节能发电调度办法的实施落到实处,实现节能、环保和经济目标。并用简单实例对该模型进行了说明。

5.1 电力系统优化调度

5.1.1 传统电力系统经济调度模型

传统电力系统的经济调度是在保证电力系统安全、稳定、可靠的前提下,以发电成本或者运行成本最小为目标函数进行优化,遵循电力系统整体最优的原则,实现电力系统的经济调度。其中,机组负荷优化分配和机组优化组合是电力系统经济调度的重要环节,在国内外经过了长期的研究和广泛的应用。

传统经济调度的简单数学模型为^[39-42]

$$F = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I C_i(P_i^t) \quad (5.1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^I P_i^t - P_D^t = 0 \quad (5.2)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i^t \leq P_{i,\max} \quad (5.3)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I P_{i,\max} \cdot u_i^t - P_D^t \geq P_{D,RO,U,\min}^t \\ P_D^t - \sum_{i=1}^I P_{i,\min} \cdot u_i^t \geq P_{D,RO,D,\min}^t \end{cases} \quad (5.4)$$

上式中: $C_i(P_i)$ 为机组发电成本函数,一般取 $C_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i$; P_i^t 为第 i 个发电机组的调度时段 t 发电出力,即发电功率; i 为机组序列号, $i = 1, 2, 3, \dots, I$; T 为一个调度周期的总的时段数, $t = 1, 2, \dots, T$ 。 $P_{D,RO,U,\min}^t, P_{D,RO,D,\min}^t$ 分别为电网调度时段 t 向上负荷和向下负荷备用功率的最低要求。 u_i^t 表示调度时段 t 机组 i 的开停机状态; I 为机组总数; P_D^t 为系统调度时段 t 的总负荷功率; $P_{i,\max}, P_{i,\min}$ 分别为发电机组的最大、最小出力限制。

5.1.2 电力系统优化调度方法

电力市场化改革以前,各国的电力行业大多以垂直一体化的垄断模式运行。

电力系统运行调度的准则是满足安全可靠供电前提下的经济调度，即优化调度的目标是安全约束下运行成本最小。在环境保护越来越得到重视、发电生产中污染物排放限制越来越严格的情况下，环保目标被引入发电调度。发电调度成为一个多目标优化问题，优化目标是安全约束下运行成本和污染排放最小。我国传统调度方法采用统一的行政干预，分级调度。

市场机制的基本点是以价格信号配置资源，逐步实现市场价格趋近于边际成本的经济性目标，交易中心基于报价形成机组发电排序。因此，在集中竞价市场中，电力调度方式变为以报价为基础，在满足电网安全约束的前提下绝大部分电量按照发电商自主调度意愿进行调度以实现双边合同。但是从长远出发，还应该考虑成本、环保和可靠性等因素。

5.1.3 我国发电调度现状分析

我国电网的调度方式为统一调度、分级管理。电力调度机构分为国调、网调、省调、地调和县调五级，大部分机组在省级进行调度。优化调度的主要目标是电力系统运行的经济性，同时兼顾发电的污染物排放最小等环境保护目标。

在《办法》出台后，各电网公司采取了诸多措施以实现节能调度。例如：山东执行了降低小火电机组上网电价的政策；山西根据单机容量确定发电机组的基准利用小时数，每相差一个级别单机容量，对应的发电基准利用小时数相差 50h；河南按照煤耗简单排序进行调度。这些措施都取得了较为显著的节能降耗的效果。与此同时，在节能发电调度的实施中也存在一些问题和困难需要进一步研究和解决。

在集中竞价的电力市场中，按照发电机组报价进行发电排序。节能调度是按煤耗排序，暂时仍按批复电价作为上网电价，因此目前的节能发电调度办法没有市场的价格发现功能。在这种情况下，怎样在报价中设计合理的价格构成，将能耗和环保的目标内部化，是实现节能调度与发电竞价机制结合的关键。

在完善的市场机制下，电力市场价格趋近边际成本，如果燃料价格也服从市场均衡规律，环保外部成本实现内部化，那么按照煤耗大小排序调度和按照报价进行调度的排序结果应该是一致的，能够实现节能、环保和经济性的统一。但是我国现行市场机制下，不论是发电燃料市场（主要是煤炭）还是电力供应价格，都存在着价格扭曲。因此，现行的竞价机制可能会使节能和经济性目标不一致，需要制定新的交易规则，在报价中引入节能因子和环境排放因子，以实现节能、环保和经济的目标。实施节能发电调度要考虑的决策因素包括以下方面：

- (1)符合国家产业政策，整个电网中所有发电的燃料消耗为最少。
- (2)遵循市场经济的客观规律，努力争取会整体购电成本最低。
- (3)保护自然环境，减少排放污染，优先保证洁净能源的生产。

(4)维持市场投资环境,保证投资者应得的回报,承诺的发电量合同应该尽可能的兑现。

(5)电网输电能力的约束。

(6)发电机组设备的约束。

(7)市场中连续运作的可靠性要求等约束

5.2 现有的发电侧电力市场竞价交易模式

随着“厂网分开”和独立发电公司的出现,形成了发电公司与电网公司之间的平等经济关系。电网公司不能直接向独立发电公司下达行政命令,涉及生产和经营者的各种问题,只能通过合同、协议来解决。为此,在建立和开放发电市场时,要按照“公平、公正、公开”的市场准则,形成发电竞价上网机制。发电竞价上网必须以实现最大范围内的资源优化配置为目标,在保证电网安全稳定运行的基础上,以最小的购电成本,满足电网负荷需求。但是由于历史原因和建设年限的不同,各发电公司在一次能源种类、规模、折旧年限、“还贷”周期、“还贷”利率等方面存在较大的差别。因此,在确定“发电竞价”上网模式时,既遵循市场公平竞争原则,又兼顾考虑这些历史遗留问题。目前,国内外已对发电竞价交易模式进行了较深入的研究,概括起来,主要有两部制电价、发电超基数竞价、差价合同加现货市场四种^[43-48]。

5.2.1 两部制电价

两部制电价,又称霍普金森电价。两部制电价是将电价分解为容量电价和电量电价,其中容量电价是按照设备容量的固定成本确定的,电量电价是按照变动成本(如燃料、维修等)确定的。容量电费可保证发电企业回收其容量成本,与上网协议中规定的保证年发电量有关,与实际发电量无关,即多发与少发,均付给发电企业同样的容量电费,多发的电量只按电量费率计算付费,而少发的电量仍付给容量电费,不付电量电费。此方法对售购双方均是公平合理的,是国际上独立发电厂上网电价最常用的电价制度。

两部制电价优点是有益于在较短的时期内建立电量电价的上网竞价机制,提高新电厂的运行负荷,激发电厂投资办电的积极性等。但是会在一定程度上延滞电价的统一进程,而且企业不发电就能得到一定收入,这不利于企业重视市场分析与开拓,以及从长远角度控制成本等。

5.2.2 发电超基数竞价

竞价采用价格优先的原则,是在竞标总电量确定的情况下,标书价格低的将获得竞争的电量。竞标的结果使得发电竞争的总电量的平均电价比较低,从而得

到良好的经济效益。电力交易中心对机组的报价实行最高、最低限制。电网公司与各发电公司签订购和售电合同，明确合同电量与合同电价，并将机组的合同电量分解到日。

根据发电机组竞价的上网电量，按日计算，机组上网电量在合同电量 (Q_c) 之内的部分按合同电价 (ρ_c) 结算，超出合同电量的部分按竞争电价的平均值 (ρ_p) 结算；上网电量小于合同电量时，其差额电量按合同电价减去机组变动成本电价 (ρ_v) 予以补偿。

即发电公司某机组应得的发电收入为：

$$R = \begin{cases} Q_c \rho_c + (Q - Q_c) \rho_p + R_a & (Q > Q_c) \\ Q_c \rho_c + R_a & (Q = Q_c) \\ Q \rho_c + (Q_c - Q)(\rho_c - \rho_v) + R_a & (Q < Q_c) \end{cases} \quad (5.5)$$

式中 Q 为某机组的实际发电量， R_a 为辅助服务收入

5.2.3 差价合同+现货市场

在供需直接见面的电力市场，普遍采用差价合同 (Contract for differences)，也称之为期货合同 Hedge Contract) 来实现风险控制。

“差价合同+现货市场”模式通过差价合同解决现有各发电公司存量资产不同，投资主体因历史沿革不同而反映在利益上的差异，从而使不同利益主体、不同历史时期、不同建设成本、不同负担的发电机组处于同一竞争起点。差价合同中记载着合同电量和合同电价，由电网公司依此包销。竞价时按全电量竞价，根据报价由低到高组织电量上网。上网电量按差价合同进行正、负补差，电费结算由差价合同付费和现货市场电量付费两部分组成。

分析比较后可以看出：发电超基数竞价较易实行，它适用于从垄断体制过渡到发电竞价的前期阶段，但随着发电竞价的扩展，该方法就暴露出它对市场竞争的束缚。差价合同+现货市场已在浙江省电力市场实际应用，已被证明是一种容易与日后全面开放的电力市场接轨的较为成功的发电侧电力市场模式。两部制电价的关键问题是要解决机组容量电价的确定问题，如果机组容量电价确定得公平、科学、合理，则该方法可有较强的适应性。不过，两部制电价以电量电价报价排序上网，上网结算电价与发电公司效益联动，因此，容易出现“恶劣竞争”和扭曲报价行为，例如美国加州电力市场就出现过这样的情况。

依据节能发电调度原则，对水电、火电、核电、太阳能、风能发电，可通过发电竞价环保取费的方法实行优化组合，或通过发电竞价的环保取费对洁净能源予以扶持。

5.3 与节能发电调度相关因素研究

竞价过程是电力市场运营的关键，市场的公平、公正、公开原则都应充分反映在其中，因此算法是非常重要的。我国电力工业正处在网厂分开、竞价上网、开放电力市场的前夕，发电竞价上网的定价方法牵动全局，事关各方的利益。不同类型的电厂、不同机组类型，不同的电气距离，其煤耗（能耗）、排放与可变成本的变化率有所不同。如何将能耗、排放与可变成本有机地结合，建立综合决策模型，是实现节能发电调度与发电竞价机制融合的关键。

用竞价上网与竞耗上网相结合的方式开展节能发电调度，需要对发电机组按容量差距制定分级标准，对现有发电机组进行分类。节能发电调度对于不同类型的机组，按该类机组的平均能耗排序进行竞耗上网；对于同一类型机组按上网电价高低排序，实行竞价上网。

5.3.1 发电报价

目前采用的两部制电价，以电量电价报价排序上网，上网结算电价与发电公司效益联动^[49]。具体流程如下：发电厂商上报最大容量、单位电量成本等数据，电力交易中心(Pool 或 PX)应用实际机组的电量成本报价 B_s ，在预测的次日负荷曲线上，对每一时段负荷由小到大排序，并找到该时段满足负荷需求的电量成本报价最高的边际机组。

该模式由于只按电厂申报的电价进行排序上网，因此控制变量直观，市场规则简洁。但是由于上网电价的报价易受到发电商的投机操纵或联盟控制，从而使货币形式的表面公平掩盖了资源配置的低效，而且能耗与污染排放难以兼顾控制。

当前发电市场交易调度的标准主要是按照发电商报价排序上网，单一的竞价标准并不能有效地对能耗与排放进行控制，实施节能发电调度，必须对能耗、网速、排污、阻塞等因素加以修正。

5.3.2 能耗（煤耗）

发电机组的实际煤耗率由多方面因素决定，设备状况、负荷出力、气温、煤质变化都会引起机组煤耗率变动。火电厂通常由锅炉、汽轮机和发电机三部分组成，锅炉输入的燃料消耗量为 F_G ，输出为发电机的有功功率 P_G ，这种输入输出的特性成为机组的燃料消耗特性，显然，它是一条下凸的曲线，如图 5.1 所示：

由于坑口电厂与负荷中心电厂的电气距离不一致，煤耗（能耗）、排放与可变成本的变化率有所不同，不同类型的电厂、不同机组类型所耗费的一次能源品种不一，其耗量也大不相同。比如，100MW 机组满负荷标准煤耗为 400 克/KWH，而同类型 600MW 机组的煤耗只有 310 克/KWH，相差甚远。基于上述原因，在节能发电调度的竞价模式中，应当对发电报价进行煤耗影响因素进行修正。

按照节能发电调度办法要求：机组运行能耗水平近期暂依照设备制造厂商提供的机组能耗参数排序，逐步过渡到按照实测数值排序。考虑到目前大部分 EMS 系统省端无法采集到实时的能耗参数，煤耗曲线难以得到，可以采用加权的最小二乘法来拟合火电机组的煤耗特性曲线，可以保证曲线满足预定要求，即保证二次多项式的二次

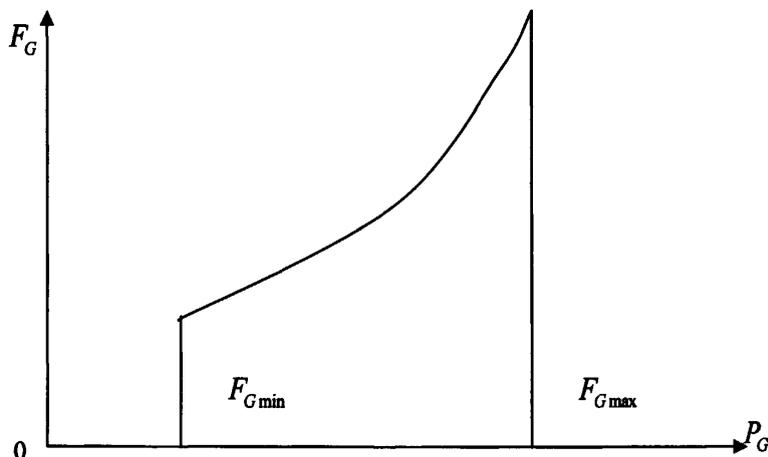


图 5.1 机组燃料消耗特性

系数 a 为正数。火电厂燃料消耗特性如下：

$$F_G = aP_G^2 + bP_G + c \quad (5.6)$$

$$st. P_{Gmin} < P_G < P_{Gmax}$$

使用燃料耗量特性 $F(P)$ 作为电厂能源消耗依据是十分直接的方法，目前，我国电力系统一直采用此法。但是由于各发电厂所处的地理位置不同，距离煤炭等资源的距离不同，且不同地区煤炭价格差距很大，使得燃料耗量并不能反应出电厂的成本或者经济特性。因此，如果以火电厂成本特性 $C(P)$ 作为考核依据，采用类似与等耗量微增率的原则，以机组发电总成本最小为依据，利用 lagrange 乘子法求得实现极值的条件，可以得到如下结果：

$$\frac{dC_1}{dP_1} = \frac{dC_2}{dP_2} = \dots = \frac{dC_N}{dP_N} = \lambda \quad (5.7)$$

依据上述等费用微增率的原则来给各发电机组(厂)分配有功负荷功率 P_i ，则得到的结果就是经济调度的最优结果，得到的发电总成本是最小的。对于出现的功率越限的情况，仍然按照 Kuhn-Tucker 最优性条件——“越限为限”进行处理，即： $P_i > P_{imax}$ ，则 $P_i = P_{imax}$ ； $P_i < P_{imin}$ ，则 $P_i = P_{imin}$ 。

5.3.3 网损

电能输送过程中，由于电网机组位置和传输地点之间电气距离的不同，所引起的各机组输电损耗也不同，因此节能发电调度必须考虑由输电距离产生的网络

损耗。网损系数也称“线损系数”，用来反映各电厂地理位置不同产生的网损的情况，它服从“欧姆定律”，反应了电网拓扑结构的电气特性，由 EMS 中的 SCADA 系统实时产生。

考虑输电损耗修正的功率平衡方程应为：

$$\sum_{i=1}^I P_i - P_D - P_L = 0 \quad (5.8)$$

式中： P_L 表示输电网络中的网损。

随着经济调度计算机程序的出现与应用，传统电力系统的网损处理也经历了一个很长的发展时期。从理论上来说，可以通过牛顿潮流计算中的雅克比矩阵对网络损耗及其微增率进行处理，在实际应用当中，对网络损耗进行合理的简化，以 B 系数法进行网损处理，是常用而且非常实用的办法。

B 系数法作为电力系统网损计算的最重要的处理方法之一，自从被提出之后就受到广泛的关注和不断改进，它要求所求系统的负荷为同期负荷，主要基于以下假设：

(1) 假设系统每个负荷变化与总负荷变化之间存在某种线性关系；

(2) 假设每个发电厂或发电机组的无功出力变化和有功出力变化之间存在某种线性的关系；

(3) 假设运行中的发电机母线电压相角和幅值之间的变化不大，可视为常数。

以 B 系数法表述的网损的一般形式为

$$P_L = P_G^T B_{GG} P_G + P_G^T B_{G0} + B_{00} \quad (5.9)$$

由式 (4.5) 所得到的网损微增率的计算公式为

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_G} = 2B_{GG} P_G + B_{G0} \quad (5.10)$$

B 系数法总的模型可以表示为：

$$\begin{cases} B_{GG} = Z_{NN}^T G_{NN} Z_{NN} \\ B_{G0} = 2Z_{NN}^T G_{NN} (Z_{NN} P_D) \\ B_{00} = P_{L_v} + (Z_{NN} P_D)^T G_{NN} Z_{NN} P_D \end{cases} \quad (5.11)$$

但是上式只适合于在负荷 P_D 的水平下计算 P_L ，因此，应选用几个典型的负荷水平计算不同负荷条件下的网损 B 系数，并且以最小二乘的方式对 B 系数进行拟合，可以获得工程应用所需精度的网损 B 系数函数序列，从而对对应的负荷水平可以直接通过该函数序列求取合适的 B 系数。

相比于采用雅克比矩阵的网损及网损微增率的处理方法，B 系数法尽管在理论上精度相对较差，但是由于其计算量小，需要的原始数据少，而且实际上由于负荷预测准确性的影响通过最小二乘模拟之后的网损修正精度完全能满足工程要求，因此在工程中获得了广泛的应用。

在目前的华东电力市场实际运营当中，电厂的网损修正是按照电厂所在电气节点对网络中的参考节点之间的网损修正系数进行网损修正的。采用基于微增网损的计算方法，即给定一种典型的电力系统运行方式，在上网节点增加一单位的发电出力，在区域参考节点增加相应的负荷，全网仍能保持电能平衡，计算系统网损的增加量，同时将网损因子定义为（1-该增加量/单位发电出力），最终的静态网损因子为取多个典型电力系统运行方式下的加权平均值。

在市场运营当中，全网的负荷预测值为假设为参考节点的负荷需求，将所有的发电机组报价通过网损因子进行修正。令 $\lambda = \frac{\partial P_L}{\partial P_G}$ ，则以 B 系数法为基础，有

$$\lambda = 2B_{GG}P_G + B_{G0} \quad (5.12)$$

对机组 i ，其所应承担的网损份额 η_i 为

$$\eta_i = \frac{\lambda_i \times P_L}{\sum_{j=1}^N (\lambda_j \times P_L)} \quad (5.13)$$

则相应的发电成本或者发电报价应被修正为

$$C'_i(P_i) = C_i(P_i) \times \frac{1}{1 - \eta_i} \quad (5.14)$$

以修正后的发电成本或者发电报价 $C'_i(P_i)$ 代替 $C_i(P_i)$ 作为机组的报价。机组的网损罚因子 K_p 可以简化如下：

$$K_p = \frac{1}{1 - \partial P_L / \partial P_i} \quad (5.15)$$

式中： $\partial P_L / \partial P_i$ — 表示网损微增率；

网损微增率由对应潮流计算出来。能量管理系统（EMS）的潮流应用软件提供两种网损及其微增率的计算形式：一是通过雅可比矩阵直接计算某一潮流方式的网损微增率；二是通过几个潮流方式回归计算 B 系数。它反映本机组增加单位出力时，系统网损的增加量。网损因子给出了发电机节点的位置信号，在根据发电机组报价曲线进行竞价排序时，必须将发电机组的报价除以发电机的网损因子，以反映发电机组所在位置对其效率所产生的影响，这样才能最终确定合理的市场统一结清价。这种处理方式与常规经济调度中的罚因子具有相同的含义。

另外，边际网损系数法由于能够反映各节点造成全网网损的微增成本信息，提供经济信号，已成为国外电力市场中最典型、最有应用前景的一种网损分摊方法。也可以采用边际网损系数作为节能发电调度中的罚因子，对机组发电报价进行修正。

5.3.4 污染排放

发电机组消耗煤炭等化石燃料时，向空气中排放大量 SO₂ 等有害气体，随着电力需求发展，燃煤机组有害气体排放量大幅增加。我国燃煤机组分布数量广泛，单机容量小、设备老化、技术落后、治污设施差，因此我国电力系统的污染主要来自子火电机组。鉴于此，在节能发电调度中提出：按机组能耗和污染物排放水平由低到高排序，依次调用化石类发电资源，最大限度地减少能源、资源消耗和污染物排放。同类型火力发电机组按照能耗水平由低到高排序，节能优先。

对火电机组来说，由于机组本身设计指标限制，在确定出力的情况下，污染物排放水平基本已经确定，因此安装机组脱硫装置是减少污染物排放的有效措施。不同的机组类型，不同的机组容量，不同的燃料类型（煤质），不同的发电出力，污染物排放水平是不同的，甚至相差很大。机组污染排放模型如下^[50]：

$$E_i = \alpha_i P_i^2(t) + \beta_i P_i(t) + \gamma_i \quad \text{或者}$$

$$E_i = A_1 + A_2 P_{Gi} + A_3 \exp(A_4 P_{Gi}) + A_5 \exp(A_6 P_{Gi}) \quad (5.16)$$

污染物排放水平可以通过实测，安装烟气排放在线检测系统，或者通过实验暂时建立上述模型。对于火电机组，可以在不同时段按照污染排放综合指标进行排序，取得出清污染排放指标 E_s，依次调用。污染排放综合指标可以包括：烟囱空气排放、灰渣液排放等。这里暂时只考虑污染气体的排放。

除已考虑的网损、能耗、排污水平等因素外，还要考虑机组启停产生的损耗，尤其是大容量火电机组。另外，由于网络阻塞造成的电价增量也应该考虑进去。

5.4 节能发电调度的竞价与竞耗上网机制结合模型

节能发电调度的竞价与竞耗上网机制结合模型，必须同时考虑发电报价、网损、煤耗、排污以及输电阻塞、起停损耗等因素，才能实现在按照竞价排序的调度模式下，贯彻和实施节能发电调度思想。

对于网损罚因子的处理，可以在机组报价中将线损系数引入发电报价中，作为机组报价参数中的一部分，将各机组的网损根据“欧姆定律”进行归算，折合到电量报价中，作为发电报价的修正。修正公式如下：

$$\text{电价参数} = \text{电量报价} * K_p \quad (5.17)$$

实行节能发电调度，要少污染或者不污染环境，仅靠上网电价的定价模式中的环保条件约束(即对污染超标的电厂或(机组)不允许上网)是不够的，还必须把环保指标量化，即实行环保指标量化为上网电价，使那些对环保设施投资大，环保措施得力的企业获得利益^[51]。这样，才能激发众多的电厂为净化环境而努力。如果将火电清污染排放指标 E_s 达标度为 1，则创立考虑环保指标后的上网某机组的报价的公式为：

$$\text{电价参数} = \text{电量报价} * (1 + E_i / E_s) \quad (5.18)$$

使环保指标具体量化，融入到上网电价排序中，使环境保护做得好的企业获得优先上网的权利。真正体现节能发电调度的基本思想。

对于电厂来说，能耗费用是上网电价的主要组成部分，并且能耗越大，污染越大，这是由燃料燃烧的自然定律决定的。所以，排污和电价在很大程度上已经反映出机组的能耗水平。鉴于此，参考污染因子设置，能耗因子的设置 $(1 + F_i / F_s)$ 。

通过上述分析，在报价中引入节能因子、网速修正、环境排放因子后，即充分考虑到节能、经济、环保各因素后，对申报电价进行修正，形成综合电价指数，然后再对单时段的机组进行发电排序，按照排序情况根据负荷需求，依次调用。

$$\rho_i = \rho_{ie} * (1 + F_i / F_s) * (1 + E_i / E_s) * (1 / (1 - \partial P_L / \partial P_i)) \quad (5.19)$$

为了减少发电成本，优化市场资源配置，在各独立发电企业报价完成后可以采用本方案提出的模型计算出机组在各出力段的竞价排序电价，然后以此排序电价为基础，用优先顺序法求解机组最优负荷分配。

由以上竞价方案可以看出，本方案既充分体现了竞价的公平性原则，又兼顾了节能减排的能源政策导向，建立统一的发电竞价模式，用同一个公式将其表示出来，这样更符合电网实际，可以减轻电力市场调度部门的工作强度，简化市场运营机制，促进发电侧电力市场健康、有序地发展和节能发电调度的顺利实施。

推行竞耗与竞价相结合的节能调度方式，既能达到立竿见影的节能降耗效果，又能约束发电企业降低煤耗外的其他成本，比单纯的竞耗上网更合理、科学。以竞价上网与竞耗上网结合，既可以弥补现有节能发电调度规则中没有考虑劳动效率和综合成本的缺陷，又可避免同一组级内的机组，为提高微小的煤耗率排序所采取的不计成本的设备投资行为，既提高了效率，又体现了公平。

5.5 算例分析

由于本模型所需参数均需通过实时通信系统或者 SCADA 系统采集，然后根据模型去排序，这对数据的实时性和准确性要求很高。实时监控子系统 (SCADA) 是架构在 OPEN-2000E 统一支撑平台上的最基本应用，接收前置子系统 (FES) 送来的实时数据，实现完整的、高性能的实时数据监控与处理，是 EMS 其它应用的数据基础。其主要功能包括：数据处理、数据计算与统计考核、控制和调节、事件和告警处理、拓扑着色、事故追忆 (PDR) 及反演、人工操作等。这为模型的实际应用提供了可能。以单时段独立系统为例，说明该模型下机组排序和组合所带来的效益，系统参数如表 5.1 所示。为简化计算，做如下假设：

1. 独立系统，无交换功率产生；
2. 电网机组容量全部相同，均为 300MW；
3. 水电机组利用水煤换算系数，转换为标煤；

4.为体现排序选择机组带来的节能减排效益。

表 5.1 机组相关参数

机组	报价(元/Mwh)	网损惩罚因子	能耗(g/Kwh)	污染(g/Kwh)
1#	350	1.02	260	6.5
2#	343	1.07	320	7.2
3#	302	1.08	350	8
4#	274	1.18	340	8.2
5#	252	1.22	420	6.2
6#	227	1.04	290	7
7#	224	1.06	300	7.5
8#	222	1.1	200	0

假设全网 8 台机组中 5 台参与发电计划即可满足系统负荷和备用需求，其中 8#机组为水电机组。机组之间能耗的差别是因为机组的制造特性和使用材料等不同的结果，排污的差别来自与煤质的不同和是否安装脱硫设备。取能耗参数与费用参数的换算系数为 400 元/吨，则一小时的购电费用、煤耗、污染排放计算如表 5.2:

表 5.2 机组每小时的参数计算

机组	发电(万千瓦时)	购电费用(元)	能耗(吨/时)	能耗费(元/时)	排污(吨/时)
1#	30	10500	78	31200	1.95
2#	30	10290	96	38400	2.16
3#	30	9060	105	42000	2.4
4#	30	8220	102	40800	2.46
5#	30	7560	126	50400	1.86
6#	30	6810	87	34800	2.1
7#	30	6720	90	36000	2.25
8#	30	6660	60	24000	0

分别采用按照电价、能耗、排污量和本法进行排序，选择入围机组，电网的经济和社会效益比较结果如表 5.3 所示:

表 5.3 各种排序方法的效果比较

排序依据	机组组合	购电费用(元)	能耗(吨)	排污(吨)
电价	8-7-6-5-4	35970	465	8.67
能耗	8-1-6-7-2	38700	435	8.97
排污量	8-5-1-6-2	41820	447	178800
本方法	8-6-7-5-1	38250	441	8.16

在本例中，如果以电价参数为控制变量，则4#机组为标杆机组，电价高于改机组的1#、2#、3#号机组不能入围；若以能耗为控制变量，则2#机组为标杆机组，电价高于改机组的3#、4#、5#机组不能入围；若以污染物排放量为控制变量，则2#机组为标杆机组，电价高于改机组的3#、4#、7#机组不能入围；以综合电价指数为控制变量后，分别与上述三种情况比较，分别将污染比较高的4#机组、能耗相对较高的2#机组和7#机组进行了置换。8#机组水电机组能耗低，并且排污为零，电价相对较低，所以水电机组排序最高，这也符合节能发电调度优先调用可再生能源的要求。实例证明，采用综合指标排序，在购电费用、能耗和污染排放方面都取得了很好的效果，兼顾了节能、环保、经济目标。

第 6 章 基于 J2EE 平台的省级电网节能发电调度技术支持系统设计

6.1 引言

加强节能发电调度信息管理,做好节能发电调度基础数据的维护,是贯彻和实施节能发电调度的基础。为此,设计了基于 J2EE 平台开发的省级电网节能调度技术支持系统的基本架构,描述了系统功能模块的实现,给出了 J2EE 构架下系统的软件设计、数据库设计和安全设计。系统采用分布式三层结构,具有很好的兼容性和可扩展性;依据节能发电调度基本原则,加强节能调度相关信息管理。该系统能方便实用,能很好的满足省级电网节能发电调度管理的需要。

6.2 系统的设计思路和总体结构

6.2.1 设计思路

本系统结合湖南省电力调度通信局的实际系统配置,采用基于 J2EE 的采用 B/S 模式,可将整个系统划分为数据层、业务层和客户层。同时,引入矢量可标记语言 VML(Vector Markup Language)技术进行图形设计,所有的图形都将在系统中动态地生成,实时地显示^[52]。采用 WEB 服务器和 ORACLE 数据库,配置和开发系统,并着重在优化算法和人机交互方面进行深入开发。

根据节能发电调度原则,分别对相关的信息进行管理、统计和分析,分别从 EMS 和 DMIS 中读取负荷、机组、发电计划等信息,进行节能发电调度的优化和管理管理。

6.2.2 总体结构框架

按照 J2EE 体系结构,系统 B/S 部分由客户层、Web 层、逻辑层和数据层组成,是典型的 J2EE 体系分层应用结构。本系统采用 B/S 模式开发,服务器设在湖南电力调度中心。它的主要功能模块有机组管理、备用管理、备用容量分配、节能管理、系统管理、系统帮助等。系统的登陆界面如图 6.1 所示

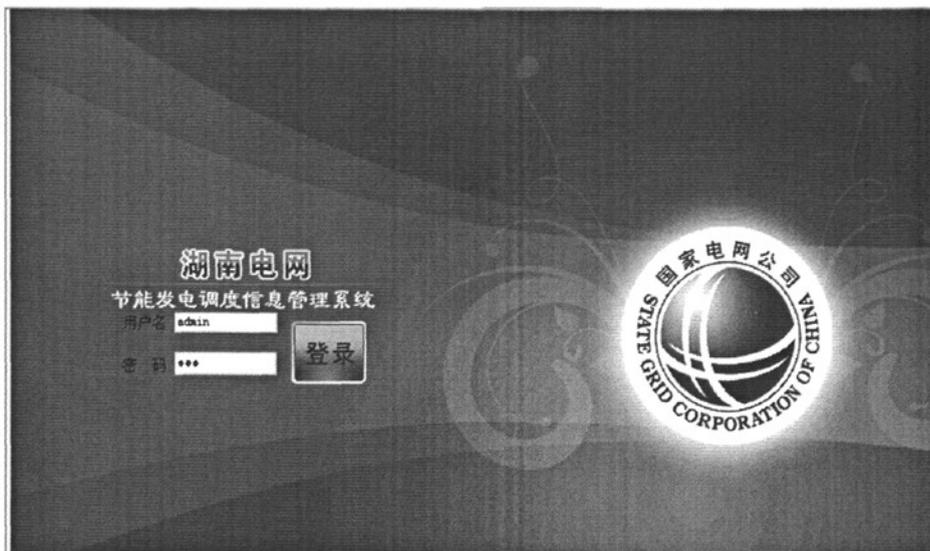


图 6.1 节能发电调度系统登陆界面

6.3 功能模块规划

6.3.1 工作流程

基于节能调度、减少水电旋转备用的研究项目是以 EMS 平台为基础，利用 EMS 高级应用软件功能及相关数据，完成节能调度功能，并对 EMS 应用功能进行深度开发。项目的技术实现流程如图 6.2 所示：

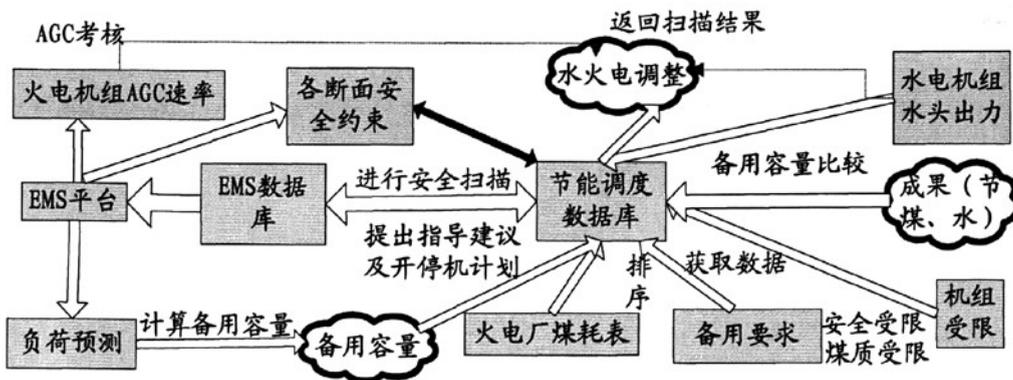


图 6.2 系统技术实现流程

6.3.2 系统功能结构

系统的主体功能目前包括与 EMS 的数据接口、动态安全约束、水情信息管理、水电机组水头出力情况、备用容量管理、受限管理、煤耗信息、超短期负荷预测数据接入及数据管理、水火电调整情况、节能处理分析、节能优化调度、手工优化调度、节能统计、节能调度效果报告。系统的主要模块功能图如图 6.3 所示下：

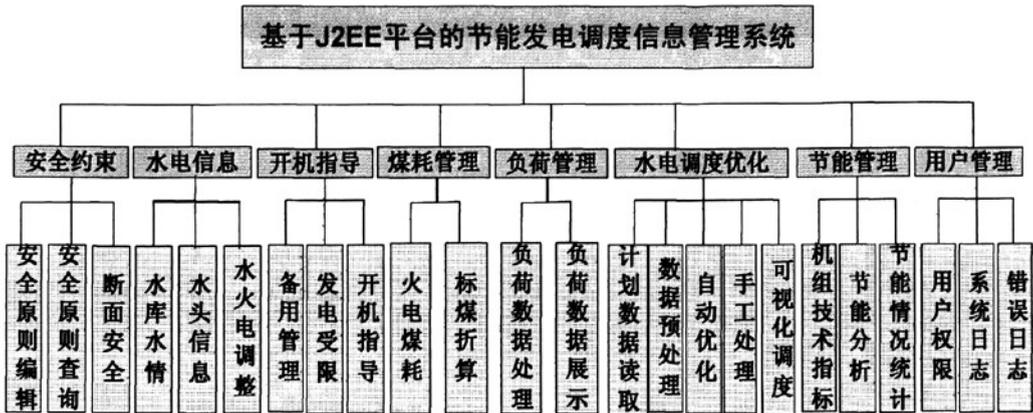


图 6.3 系统的主要模块功能图

分析节能发电调度系统的需求，根据节能发电调度原则：以确保电力系统安全稳定运行和连续供电为前提，以节能、环保为目标，通过对各类发电机组按能耗和污染物排放水平排序，以分省排序、区域内优化、区域间协调的方式，实施优化调度，并与电力市场建设工作相结合，充分发挥电力市场的作用，努力做到单位电能生产中能耗和污染物排放最少。根据上述原则，系统主要的功能模块介绍如下：

(1) 机组管理

包括水电水位和最大出力、火电 AGC 管理、机组受限管理、火电厂煤耗、水电空载损耗、机组排序管理以及机组经济技术指标等功能。同时具备手动实时调整、查询、管理、导出、打印等功能，这是节能发电调度系统数据库的基础部分。火电煤耗管理和排序界面如图 6.4 所示：

电厂名称	机组容量 MW	耗煤 (g/kwh)
湘潭	600	310
长沙	600	310
韶山1	600	310
湘潭	600	310
益阳2	600	310
黔东	600	310
华能	600	310
华能2	300	330
株洲	300	330
湘潭2	300	330
石门	360	330
益阳	300	330
沅江	300	330
湘潭	300	330
华能石门	300	330
金竹山	300	330
长沙	300	330
李阳2	300	330
黔东		

图 6.4 火电煤耗管理

(2) 备用容量管理

从 EMS 读取负荷预测数据，在历史数据负荷特性分析的基础上，考虑可预知

因素，对电网快速旋转备用、总备用容量等数据进行预测，同时采用 VML 以图形化显示预测数据和报表显示等。电网备用分配结果如图 6.5 所示：

开始时间	结束时间	电厂名	炉/大电/水	容量(单位:MW)
2008-12-21 00:15:00	2008-12-21 00:15:00	华电石门4号机	火	-36.9
2008-12-21 00:15:00	2008-12-21 00:15:00	株洲4号机	火	-9.3
2008-12-21 00:15:00	2008-12-21 00:15:00	石门1号机	火	-2.7
2008-12-21 00:15:00	2008-12-21 00:15:00	长沙1号机	火	-113.8
2008-12-21 00:30:00	2008-12-21 00:30:00	华电石门4号机	火	-23.9
2008-12-21 00:30:00	2008-12-21 00:30:00	株洲4号机	火	-9.9
2008-12-21 00:30:00	2008-12-21 00:30:00	石门1号机	火	-1.4
2008-12-21 00:30:00	2008-12-21 00:30:00	长沙1号机	火	-109.7
2008-12-21 00:45:00	2008-12-21 00:45:00	湘潭2号机	火	46.9
2008-12-21 01:00:00	2008-12-21 01:00:00	湘潭2号机	火	5.3
2008-12-21 01:15:00	2008-12-21 01:15:00	华电石门4号机	火	-2.1
2008-12-21 01:30:00	2008-12-21 01:30:00	湘潭2号机	火	15.1

图 6.5 电网备用分配结果

(3) 开停机指导

在备用容量优化的基础上，读取发电计划、机组排序、水电信息、检修计划等数据，安排节能发电调度原则，在原有发电计划的基础上进行节能发电调度的优化。通过优化快速备用，使火电机组能快速参与电网负荷调整，并及时指导调度员开停水电机组，实现减少水电旋转备用和节能调度的目的，并最终实现计算节煤、节水资源。系统开停机指导结果界面如图 6.6 所示，对每一时段机组的开停都进行了详细的列举。

日期	电厂名	机组	开/停机
2008-12-21	三峽溪电厂	2.0	停
2008-12-21	平江电厂	3.0	停
2008-12-21	平江电厂	4.0	停
2008-12-21	五强溪电厂	3.0	停
2008-12-21	五强溪电厂	4.0	停
2008-12-21	溁江电厂	3.0	停
2008-12-21	溁江电厂	5.0	停
2008-12-21	溁江电厂	7.0	停
2008-12-21	株洲电厂	2.0	停
2008-12-21	韶山电厂	4.0	停
2008-12-21	韶山电厂	5.0	停
2008-12-21	平江电厂	4.0	停

图 6.6 开停机指导界面

(4) 节能管理

在备用容量优化、开机指导的基础上，结合水电空载耗损率、火电煤耗曲线、机组污染排放指标等，对实施节能发电调度和备用优化后所产生的经济效益和环保效益进行统计分析，并以报表形式输出，使调度人员能够清楚地了解节能发电

调度所产生的效益。

6.4 系统关键技术创新

系统在数据库设计、优化算法、平台设计、模型选择、设计技术方面都实现了在电力系统应用方面的创新，主要包括以下几个方面：

6.4.1 先进的基于 VML 的图形化处理技术

为了能更好地表述系统的内容，本项目设计采用多种图形方式进行内容展示。系统中将甘特图进行变形，从而产生新的管理图表。例如将甘特图的文字部分保留，而将图形部分改为曲线表述。总之，丰富的图形展示是本系统的一大特点和创新。

系统中采用 VML 技术进行图形设计，所有的图形都将在系统中动态地生成，实时显示。VML 是微软 1999 年 9 月附带 IE5.0 发布的，是 Word 和 HTML 结合的产物，而且结合 JavaScript 等脚本语言，是制作 web 动态图形的上好工具。系统中调用 JavaScript 中 VML Chart 控件中的 VerticalLineChart() 函数、VerticalBarChart() 函数和 Shape 对象，这种方法可以实时动态地显示图形。

6.4.2 基于 J2EE 的三层架构 B/S 模式

系统根据本项目的设计方案，并通过对系统业务的分析，确定项目的开发模式为三层架构的 B/S 模式，将整个系统流程分布在数据层、业务层和客户层上，创新性的利用各种开发语言和数据库工具，通过数据层进行数据的交换和处理，通过业务层来实现客户所需的需求，并运用 JSP(Java Server Pages)、VML、XML 和 javaScript 以动态网页的形式将结果展示给客户，提供了良好的人机界面和交互功^[53~54]，其总体框架图如图 6.7 所示：

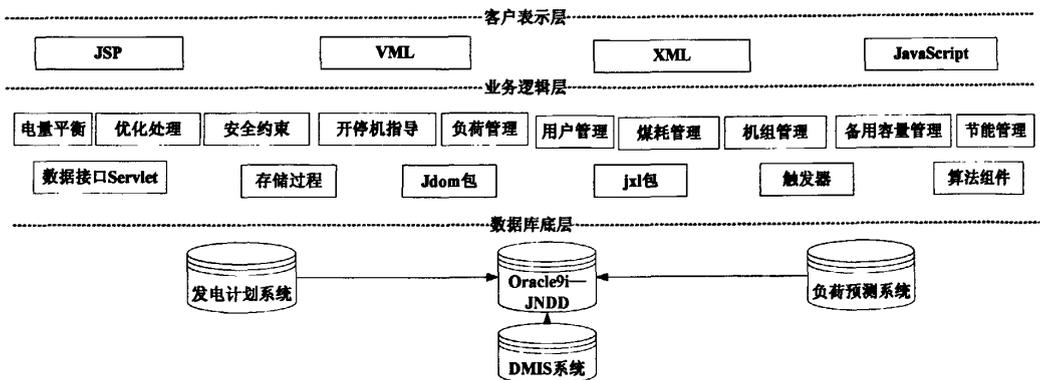


图 6.7 基于三层架构的系统总体架构图

6.4.3 灵活的约束编辑

系统采用记忆累计的方式记载和审视每一项约束条件，分三级保存模式进行数据记忆保存。它们的保存环节示意如图 6.8 所示：

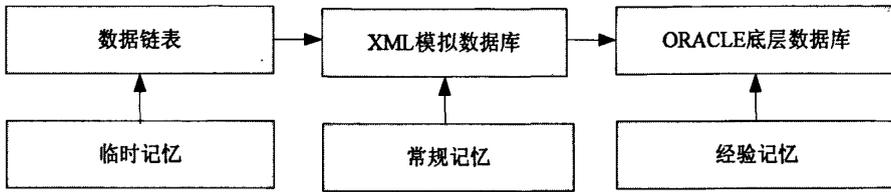


图 6.8 约束处理机制

对于经常发生改变的安全约束条件和原则，我们采用临时记忆的办法只将其存储在数据链表中。对于发生改变的频率不是很高的一些约束条件和原则，我们存储在 XML 文档数据库中，以便系统调用。另外，系统通过长期的使用会形成一些常规的经验性调度原则，并将其长期储存到经验数据库当中。

6.4.4 与 EMS 数据接口实现

6.4.4.1 采用 XML 实现外部关系型数据接口

由于 XML 具有跨平台性，在异构数据库平台中解决了平台无关性；XML 简单规范，因而对 XML 的查询变得简单；另外，XML 以文本方式存储，这使得 HTTP 传输变得容易，从而可以使异构数据库平台以 Web 方式实现，扩大了异构数据库的应用规范；XML 的自描述性对描述数据库的数据字典提供了简单、便捷、高效的方法。对于远程数据接口，使用 XML 的方法来解决系统与外部的数据接口问题是切实可行的

6.4.4.1 采用共享联动解决内部数据接口

对于本系统内部的数据接口问题，我们采用共享联动的方式进行解决。共享联动可以利用后台程序来实现，也可以直接进行数据编程来实现。数据接口方式可以采用被动取数据的方法，也可以采用主动送数据的方法。不管数据接口方法如何，我们都要保证数据的精简和在系统中的畅通无阻。

6.4.5 系统约束安全问题

对于约束条件的处理，采用类似专家系统思想，由于节能发电调度模型为高维数、非线性的优化模型且动态变化等特点，并且现在还没有一种成熟的快速可靠的编排算法。本文利用人工智能技术思想，设计了一种基于专家系统思想解决约束条件的系统：采用专家系统思想，利用知识库、推理规则辅助推理机制，智能处理众多约束条件，科学、合理地安排负荷分配，提高电网运行的可靠性和经济性，具有快速可靠的优点。将调整结果返回 EMS 中进行安全扫描，不满足条件则返回节能调度数据库重新分配，直至满足要求。考虑到水火电机组受安全约

束、水电机组受电水头以及火电机组煤质的对负荷的影响。水火电机组安全受限可由设定，水电机组与水头的关系可通过查找水头与发电曲线表得出。

6.5 系统开发方案

6.5.1 设计原则

根据电力调度工作的特点和信息系统的性能要求，系统的设计遵循以下原则^[55]：

- 系统具有友好的人机交互功能，界面简洁美观、风格统一，符合用户的计算机操作习惯，保证用户操作的方便性；
- 紧密结合现阶段节能发电调度业务实际情况，实用性强，真正达到节能调度的信息化管理的目的，提高整体工作的效率；
- 具有良好的适应性和前瞻性，采用开放式体系结构，以利于系统的集成扩充和发展，适应技术发展和电力逐步完善的需要；
- 充分保证系统的稳定可靠性，具备强大的容错能力，充分考虑它与相关系统的接口与协调；
- 保证数据共享与数据安全。在网络结构设计上注意局域网和公用网之间的衔接和数据交换，考虑身份鉴定，密码设计等安全措施，保证系统的安全。同时，还应注重整个系统的数据流向及数据间相互关系的建立；
- 采用先进成熟的技术和多层体系结构进行设计；
- 考虑系统管理功能，考虑数据备份，系统故障全停等意外情况下的应急措施和恢复措施；

6.5.2 开发方法

常用的软件系统开发方法有：生命周期法、原型法、面向对象法等。

1) 生命周期法。又称结构化设计方法，是由自顶向下的软件系统总体设计思想发展而成的。利用该方法可以和需求分析阶段所采用的结构化分析方法很好地衔接。但该模式需要在初始阶段即对用户的所有需求都充分掌握，这在实际开发过程中是很困难的，而且由于此模式严格按照一定的顺序进行，也不符合实际开发中需要面对的重复工作。

2) 快速原型法。该模式首先取得基本的需求，迅速构造一个功能简单的系统原型，然后通过对原型系统逐步求精，进行重复评价和修改，最终得到用户满意的系统。该模式与生命周期法相比较开放性较强，由于其支持用户的参与，降低了系统开发的风险，因而能够大量节省开发成本和开发周期。该方法缺点是缺乏整体性，难以掌握系统的整体动态状况，且浪费了大量的原型资源。

3) 面向对象方法。面向对象设计方法是面向过程技术和面向数据技术相结合的产物，它的特点是通过分析实际问题的分析，从中抽象出包含一定功能的对象，

然后再用程序语言来表现它，其过程主要是：识别对象中的子对象并识别出对于子对象的操作，然后再根据子对象的操作开发出一个系统。该模式的突出优点是可重用性强，而且由于对各功能对象进行封装，当出现业务需求变化时，只需要对相应对象进行调整即可，维护性强。

通过比较以上各开发模式可以看出，面向对象方法在软件开发过程中的突出优点，能够在不浪费资源的情况下最大程度地满足实际的需要，也能够节省开发周期和维护费用，因而是一种切实可行的软件开发方法。

6.5.3 体系结构

6.5.3.1 人机交互模式

从客户机与服务器交互的角度考虑，当今软件系统在结构设计上主要分为 C/S 模式和 B/S 模式。具体比较如下：

(1) C/S 模式是一种两层结构的系统，第一层在客户机上安装了客户机应用程序，第二层在服务器上安装服务器管理程序。在 C/S 模式的工作过程中，客户机程序发出请求，服务器程序接收并且处理客户机程序提出的请求，然后返回结果。

C/S 模式有以下特点：

- 1.C/S 模式将应用与服务分离，系统具有稳定性和灵活性
- 2.C/S 模式配备的是点对点的结构模式，适用于局域网，有可靠的安全性
- 3.由于客户端实现与服务器端的直接连接，没有中间环节，因此响应速度快
- 4.在 C/S 模式中，作为客户机的计算机都要安装客户机程序，一旦软件系统升级，每台客户机都要安装客户机程序，系统升级和维护较为复杂

(2) B/S 模式，即浏览器/服务器模式，是一种从传统的两层 C/S 模式发展起来的新的网络结构模式，其本质是三层结构的 C/S 模式。在用户的计算机上安装浏览器软件，在服务器上存放数据并且安装服务应用程序，服务器有万维网服务器和文件服务器等。用户通过浏览器访问服务器，进行信息浏览、文件传输和电子邮件等服务。B/S 模式有以下特点：

- 1.系统开发、维护和升级方便

每当服务器应用程序升级时，只要在服务器上升级服务应用程序即可，用户计算机上的浏览器软件不需要修改，系统开发和升级维护方便

- 2.B/S 模式具有很强的开放性

在 B/S 模式下，用户通过通用的浏览器进行访问，系统开放性好

- 3.B/S 模式的结构易于扩展

由于 Web 的平台无关性，B/S 模式的结构可以任意扩展，可以从包含一台服务器和几个用户的小型系统扩展成为拥有成千上万个用户的大型系统

- 4.用户使用方便

B/S 模式的应用软件都是基于 Web 浏览器的，而 Web 浏览器的界面是类似的。对于无用户交换功能的页面。用户接触的界面都是一致的，用户使用方便

通过 B/S 模式实现业务逻辑、数据以及客户层的分离，使得系统显得层次分明，而 C/S 模式将客户层与业务处理混合在一起，层次混乱；更重要的是，B/S 模式只需要将开发出来的系统装在服务器端即可，对客户机没有要求，安装维护比 C/S 方便。采用 B/S 模式进行系统开发有着 C/S 结构软件无法比拟的优势，因而系统开发宜采用 B/S 模式。

6.5.3.2 基于 J2EE 的应用程序模型

J2EE 由 Sun Microsystems 于 1999 年发布，是一个标准的中间件体系结构，旨在简化和规范分布式多层企业应用系统的开发和部署。J2EE 体系结构的实施可显著地提高企业应用系统的可移植性、安全性、可伸缩性、负载平衡和可重用性。J2EE 是包含 JSP、Servlet、Java 消息服务(JMS-java messaging service)、Java 数据库连接(JDBC-java data base connectivity)、Java 验证和授权服务(JAAS-java authentication authorization service)、Java 管理扩展 (JMX-java management extensions) 和 EJB 等在内的一系列技术，同样也是有关如何共同使用这些技术建立解决方案的一组指导原则和模式。

利用 J2EE 进行开发时需要在考虑系统规模、安全性、响应速度等方面进行技术方案配置和性能比较，一般比较难以上手，且在界面的美化程度上不如.NET。但其适应性强，能够独立运行在各种服务器上，且类封装性好，在系统的可移植性和可维护性上比.NET 好。通过对两种开发平台的比较，考虑到系统的维护方便性本系统采用 J2EE 应用程序模型，实现分布式分层的 WEB 应用。

采用 J2EE 体系结构可将整个系统划分为多个不同的层，典型的 J2EE 结构应用程序包括四层：客户层、表示逻辑层(Web 层)、业务逻辑层和企业信息系统层，如图 6.9 示。

业务逻辑层：运行于应用服务器上，由 J2EE 标准组件 EJB 等实现。EJB 组件用于实现特定的应用逻辑，它能够从客户端或 Web 容器中收到数据并将处理过的数据传送到企业信息系统层来存储，还能够从数据库检索数据并送回到客户端。EJB 按功能的不同分为会话 Bean(Session Bean)、实体 Bean(Entity Bean)和消息驱动 Bean(Message Driven Bean)三类，会话 Bean 用于实现业务逻辑，当客户端请求时为客户端服务，还可以直接或者实体 Bean 实现数据访问；实体 Bean 是域模型对象，用于实现 O/R 映射，

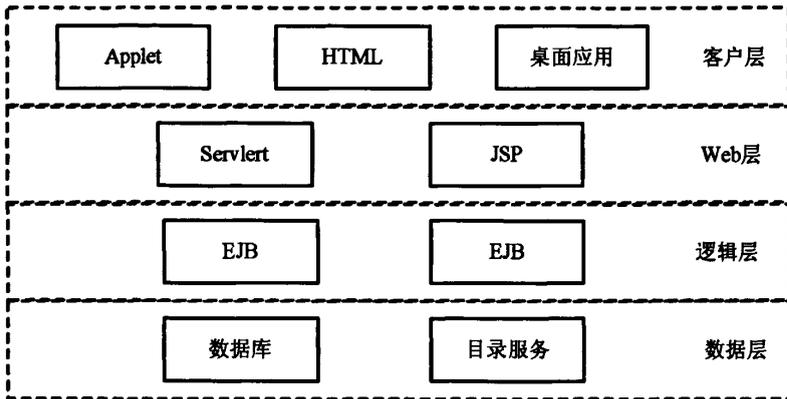


图 6.9 系统层次结构

负责将数据库中的表记录映射为内存中的实体对象；消息驱动 Bean 基于 JMS 消息，只能接收客户端发送的 JMS 消息然后处理，它实际上是一个异步的无状态 Session Bean，适合于需要异步处理请求的场合。

Web 层：运行于应用服务器上，由 J2EE 标准组件 JSP、Servlet 等实现。Servlet 实质上是一些用于动态处理 HTTP 请求和生成网页的 java 代码类；JSP 是 Servlet 的变形，它允许 Java 类动态地嵌入到页面中，这为应用程序开发提供了方便。

客户层：可以是 Web 浏览器、Applet 或桌面应用程序。Web 浏览器通常只进行简单的人机交互，不执行像查询数据库、执行复杂业务规则等操作；Applet 是一个较小的用 Java 语言编写的程序，运行在浏览器上的虚拟机里，通过 HTTP 协议和服务器进行通信；桌面应用程序通过 Swing 或 AWT 等应用程序接口建立图形用户界面，需要在客户端进行安装。

企业信息系统层：又称为数据层，主要用于企业信息的存储管理，包括数据库系统、目录服务等。

6.5.3.3 网络体系结构

系统通过构建网络实现不同层次数据的获取、传输与处理。对于数据层，负荷预测数据、机组煤耗、实际出力等外部数据通过接口程序进行读入，并将系统所有相关的数据都存储在节能发电调度数据库服务器中；对于客户层，调度操作人员通过电力内部局域网实现与系统的交互，通过 Internet 广域网进行对发电企业进行实施监测和管理；对于业务逻辑层和 Web 层，各种功能模块如机组排序、发电计划安排、节能管理等由 Web 应用服务器进行处理；利用防火墙技术和网络传输加密等技术实现数据的安全传输；各层次之间的数据通信通过交换机、路由器、调制解调器等网络设备和通信线路实现。

6.5.4 数据库设计

数据库设计是信息系统设计很重要的部分，数据库设计对数据的质量、数据

库的可扩展性以及数据的运行效率都有着深远的影响。目前市场上数据库的主流厂商及产品有 Oracle、Microsoft SQL Server、Informix、IBM DB2、Sybase 等。著名的 Oracle 公司研制开发的大型数据库管理系统 Oracle，具有功能强大、使用灵活和形式多样的特点，使用 Oracle 产品创建和管理数据库，能够提高管理信息系统的性能，使系统具有良好的安全性、可维护性和可扩展性，以满足企业管理现代化的需要。

数据库的合理设计是建立在对业务的熟悉基础上的，通过从大量的管理信息数据中筛选出对本系统有用的信息，根据需求分析建立对象实体，通过对实体属性、关联等特点进行分析得到系统需要创建的数据库表、主键、索引、关联等。在对数据库表进行操作时，可根据需要设定权限约束和安全约束等约束条件，以保证数据的安全性。同时设定数据校验规则，以保证数据的完整性和合法性。

本系统采用 Oracle 9i 作为数据库服务平台，数据库设计主要考虑以下方面 [56]。

(1)规范命名。所有的库名、表名、域名必须遵循统一的命名规则，并进行必要说明。

(2)控制字段的引用。在设计时，可以选择适当的数据库设计管理工具，以方便开发人员的分布式设计和数据小组的集中审核管理。

(3)库表重复控制。在设计过程中，如果发现大部分字段都已存在，开发人员应怀疑所设计的库表是否已存在。通过对字段所在库表及相应设计人员的查询，可以确认库表是否确实重复。

(4)并发控制。设计中应进行并发控制，即对于同一个库表，在同一时间只有一个人有控制权，其他人只能进行查询。

(5)必要的讨论。数据库设计完成后，数据小组应与相关人员进行讨论，通过讨论来熟悉数据库，从而对设计中存在的问题进行控制或从中获取数据库设计的必要信息。

(6)数据小组的审核。库表的定版、修改最终都要通过数据小组的审核，以保证符合必要的要求。

(7)头文件处理。每次数据修改后，数据小组要对相应的头文件进行修改（可由管理软件自动完成），并通知相关的开发人员，以便进行相应的程序修改。

与小型数据库相比，大型数据库的设计与开发要复杂得多，因此在设计、开发过程中，除了要遵循数据库范式理论、增加系统的一致性和完整性外，还要在总体上根据具体情况进行分布式设计，紧紧把握集中控制、统一审核的基本原则，保证数据库设计结构紧凑、分布平衡、定位迅速。在数据库操作上，要采用一定的技巧提高整个应用系统的执行效率，并注意适当超前，以适应不断变化的应用及系统发展的要求。

6.5.5 接口设计

系统与外部关系型数据库的数据接口，一般采用以下方法加以实现：

1) ODBC 与 JDBC。

对于开放型的关系数据库来说可以利用 ODBC 和 JDBC 的解决方案，来完成对外的数据接口。对于大部分开放型关系数据库来说，都提供了 ODBC 或 JDBC 的接口。可以将连接信息存储在文件中或者直接写入程序中，由于 JSP 的强大功能我们可以很轻松地实现数据库信息的更改，对于外部数据的连接来说也是非常方便灵活的。

2) 数据转换工具。

利用已有的数据转换工具，如 PowerBuilder 的 DataPipeline、SQLServer 的 DTS、Oracle 的 SQL 等，实现与外部关系型数据库的接口。

1) 利用 XML 的解决方案。

XML (eXtensible Markup Language) 即可扩展标记语言，它与 HTML 一样，都是 SGML(Standard Generalized Markup Language, 标准通用标记语言)。XML 是 Internet 环境中跨平台的，依赖于内容的技术，是当前处理结构化文档信息的有力工具。扩展标记语言 XML 是一种简单的数据存储语言，使用一系列简单的标记描述数据，而这些标记可以用方便的方式建立，虽然 XML 占用的空间比二进制数据要占用更多的空间，但 XML 极其简单易于掌握和使用。

XML 与 Access、Oracle 和 SQL Server 等数据库不同，数据库提供了更强有力的数据存储和分析能力，例如：数据索引、排序、查找、相关一致性等，XML 仅仅是展示数据。事实上 XML 与其他数据表现形式最大的不同是：他极其简单。这是一个看上去有点琐细的优点，但正是这点使 XML 与众不同。

由于 XML 具有跨平台性，因而在异构数据库平台中应用 XML 这一特性解决了平台无关性；XML 简单、规范，因而对 XML 的查询变得简单；另外，XML 以文本方式存储，这使得 HTTP 传输变得容易，从而可以使异构数据库平台以 Web 方式实现，扩大了异构数据库的应用规范；XML 的自描述性对描述数据库的数据字典提供了简单、便捷、高效的方法。使用 XML 的方法来解决系统与外部的数据接口问题，是一种切实可行的，而且通用性很强的方法。数据一旦建立，XML 能被发送到其他应用软件、对象或者中间层服务器做进一步地处理。或者它可以发送到桌面用浏览器浏览。XML 和 HTML、脚本、公共对象模式一起为灵活的三层 Web 应用软件的开发提供了所需的技术。对于远程数据接口，一般可以考虑采用它。

对于本系统内部的数据接口问题，采用共享联动的方式进行解决。共享联动可以利用后台程序来实现，也可以直接进行数据编程来实现。数据接口方式可以

采用被动取数据的方法，也可以采用主动送数据的方法。不管数据接口方法如何，都要保证数据的精简和在系统中的畅通无阻。

6.6 系统实现

6.6.1 开发环境

J2EE 是一个开放的、基于标准的开发和部署的平台，用于构建 N 层的、基于 Web 的、以服务端计算为核心的、模块化的企业应用。目前 J2EE 应用开发环境分为两大类：基于命令行的开发环境和集成开发环境。基于命令行的开发环境利用简单的文本编辑器编写代码，通过运行 Java 命令实现程序的编译、发布、运行等操作。这种开发方式对于开发人员要求较高，且比较烦琐、易出错，不易掌握。采用集成开发环境进行系统的开发，能够加快软件开发进度，缩短生命周期。Eclipse 是由 IBM 公司开发的开源 IDE 工具，可对其进行灵活自由的扩展，是 JAVA 集成开发环境的良好选择。

本系统开发中，采用 JDK1.5.0+TomCat5.5.20+Eclipse3.2.1+MyEclipse5.0.1 搭建 J2EE 环境终极解决方案。

6.6.2 运行环境

6.6.2.1 硬件环境

服务器：IBM 专用服务器，内存不小于 521M，硬盘容量超过 40G

网络通讯设备：交换机、网卡、MODEM、集线器等。

客户机：PIIICPU 的 PC 机，内存不小于 64M，硬盘容量超过 1G

6.6.2.2 软件环境

服务器操作系统：Linux/Unix/Windows 2000 server

客户端操作系统：Windows 98 及以上

数据库服务器：Oracle9i

WEB 服务器：Tomcat 5.5

6.6.2.3 支撑软件

操作环境软件：Office 2000 以上、IE5.0 以上

开发工具软件：Eclipse 3.2、DreamWear 8、JDK1.5

数据库设计工具：PL/SQL Developer 7.1

结 论

电力工业的市场化改革给电力系统的运行与管理带来了巨大的变化。由于厂网经营权分离,各经济实体追求经济利益的最大化是市场发展的客观规律。《节能发电调度办法》的颁布,为改革我国传统的“大平均”调度模式和实施节能发电调度提供了依据。

自办法颁布以来,国内外学者对节能发电调度问题作了广泛的研究与探讨。研究和实践均表明,节能发电调度实质上是一个多目标、多约束的优化问题。目前关于节能发电调度的研究大多都停留在政策层面,部分省网公司已经按照节能发电调度原则开展了相关的改进,包括以大代小、煤耗排序、污染监测系统研发、节能发电调度技术支持系统研发等工作,这些为贯彻和实施节能发电调度都奠定了基础,也是节能减排在电力行业实施的重要举措。

文章首先研究了与节能发电调度实施联系紧密的相关问题,包括节能发电调度基本思想、超短期负荷预测、节能调度排序表以及发电机组污染排放模型,做了前期的准备。然后结合实际项目,对电网旋转备用容量的预测方法进行了研究,提出了几种相对简单易行的工程使用方法,在此基础上,开展了湖南电网基于节能发电调度,减少水电旋转备用的研究,以节能发电调度思想为指导,开展电网旋转备用容量的预测、分配研究,同时,为积极推进国家节能发电调度的改革,从湖南电网的实际出发,开发了基于 J2EE 平台的省级电网节能调度技术支持系统,为调度决策和实施节能发电调度提供决策辅助分析。

基于 J2EE 的省级电网节能调度技术支持系统很好地实现了节能发电调度需要的机组信息管理、水电优化调度、备用容量管理、开停机指导、节能管理等功能,结构简单、功能完善、界面友好、易于维护、可移植性强,是节能发电调度的技术支持系统,也数字电力系统的一种体现。调度人员利用节能发电调度信息管理系统进行节能调度信息的管理等计算,大大减轻了计算负担,为电力调度人员进行发电调度提供了极大的便利。合理安排发电计划,减少旋转备用和检修费用,降低煤耗,节约电煤,为配合电力市场改革的深入和节能减排计划的实施提供了必要的支持,也是节能发电调度的具体措施之一。

随着电力市场的进一步发展和市场机制的不断健全,发电公司和电网公司之间的行为将主要以经济目标为取舍,以价格为杠杆。在节能发电调度中,如何彻底改变传统大平均模式分配电量,如何建立节能调度的执行机构,以及如何如何规范和完善发电调度的管理机制,建立起统一的数学模型并实用化,是后续研究中需要解决的问题。

参考文献

- [1] 姚建刚,章建.电力市场分析.北京:高等教育出版社,1999,20-24
- [2] 姚建刚,章建,银车来.电力市场运营及其软件开发.北京:中国电力出版社,2002,72-87
- [3] 于尔铿,刘广一,周京阳.能量管理系统.北京:科学出版社,1998,112-134
- [4] 于尔铿,韩放,谢开,等.电力市场.北京:中国电力出版社,1998,56-63
- [5] 沈瑜,夏清.中国电力市场模式的探讨.电力系统自动化,2000,24(4):6-9
- [6] 史连军,韩放.中国电力市场的现状与展望.电力系统自动化,2000,24(3):1-4
- [7] 陆延昌,姜绍俊. 21世纪初期中国电力工业展望.中国电力,2000,33(7):1-8
- [8] 邹斌,周浩,李晓刚.电力市场原理与实践.北京:中国林业出版社,2006,20-28
- [9] 贺辉.电力市场下辅助服务的研究:[湖南大学硕士学位论文].长沙:湖南大学,2001,5-20
- [10] 曾鸣,史连军,董军,等.与市场机制相协调的节能发电调度相关问题研究.电力技术经济,2007,19(5):1-5
- [11] 王超,张晓明,唐茂林,等.四川电网节能减排发电实时调度优化模型.电力系统自动化,2008,32(4):89-92
- [12] 赵风云.对新型节能发电调度方式的探讨.电业政策研究,2007,(3):23-24
- [13] 艾琳,华栋.电力系统节能发电调度研究.电业政策研究,2008,36(9):85-89
- [14] 尚金成.兼顾市场机制的主要节能发电调度模式比较研究.电网技术,2008,32(4):78-85
- [15] 尚金成.兼顾市场机制与政府宏观调控的节能发电调度模式及运作机制.电网技术,2007,31(24):55-62
- [16] 国务院、国务院办公厅关于转发发展改革委等部门《节能发电调度办法(试行)》的通知(国办发[2007]53号文)
- [17] 李刚.水火电系统短期节能发电调度研究与应用:[大连理工大学博士学位论文].大连:大连理工大学,2007,51-57
- [18] 张晓.电力系统短期负荷预测研究:[四川大学硕士学位论文].成都:四川大学,2001,21-30
- [19] A.D.Papalexopoulos,T.C.Hesterberg.A regression-based approach to short-term system load forecasting. IEEE Transaction on Power Systems,1990,5(4):1535-1547
- [20] Charytoniuk W,Chen M.S., Olinda P.V. Nonparametric Regression Based Short-Term Load Forecasting. IEEE Transaction on Power Systems,1998,13(3):

725-730

- [21] Dipti Srinivasan. Evolving artificial neural networks for short-term load forecasting. *Neurocomputing*, 1998, 23: 265-276
- [22] 崔锦泰(美)著,程正义译.小波分析导论.西安:西安交通大学出版社,1997,10-80
- [23] 赵登福,王蒙,张讲社,等.基于支持向量机的短期负荷预测.中国电机工程学报, 2002, 22(4): 26-30
- [24] 杨镜非,程浩忠. SVM在电网短期负荷预测中应用研究. 电力自动化设备, 2004, 24(2): 30-32
- [25] 傅书遒,王海宁.关于节能减排与电力市场的结合.电力系统自动化, 2008, 32(6): 31-34
- [26] Tsuji, A. Optimal Fuel Mix and Load Dispatching under Environmental Constraints, *IEEE Trans. on PAS*, 1981, 100: 2357-2364
- [27] Hess, S. W., Parker, D., et al. Planning System Operations to meet NO Constraints, *IEEE Computer Applications in Power*, 1992, 5(31): 10-14
- [28] Gent, M. R., Lament, J. W. Minimum-Emission Dispatch *IEEE Trans. on PAS*, 1971, 90: 2650-2660
- [29] El-Hawary, M. E., El-Hawary, et al. NO_x Emission Performance Models in Electric Power Systems. Inc: Proceedings of the 1992 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Canada, 1992, 1002-1015
- [30] Wen Fushuan, David A K. Optimal Bidding Strategies and Modeling of Imperfect Information among Competitive Generators. *IEEE Transactions on Power Systems* 2001, 16(1): 15-21
- [31] Conejo A. J., Nogales F. J., Arroyo J. M. Price-Taker Bidding Strategy under Price Uncertainty *IEEE Transactions on power Systems*, 2002, 17(4): 1081-1088
- [32] Wen F S, David A K. Strategic Bidding in Reserve Market. In: Proceeding of the 5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, 2000, Hong Kong, 80-85
- [33] Arroyo J M, Conejo A J. Optimal Response of a Thermal Unit to an Electricity Spot Market. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000, 15(3): 1098-1104
- [34] 赵学顺,文福拴,汪震,等.区域电力市场运行备用容量的确定和获取初探.电力系统自动化, 2004, 28(13), 2004: 7-12
- [35] Chan C. Y., Chan T. K., Ni Y. X., et al. A decentralized approach for operating reserve procurement. In: Proceeding of 6th International Conference on APSCOM. Hong Kong, 2003, 123-142
- [36] 谭伦农,张保会,市场环境下的事故备用容量.中国电机工程学报, 2004, 22(11):

54-58

- [37] 王乐余,志伟,文福拴.基于机会约束规划的最优旋转备用容量确定.电网技术,2006,30(20):14-19
- [38] 刘维烈.电力系统调频与自动发电控制.北京:中国电力出版社,2006,112-120
- [39] Shoults R.R., Chang S.K., Helmick S., et al. A practical approach to unit commitment, economic dispatch, and saving a location for multiple-area pool operation with import/export constraints. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1980,99(2): 625-635
- [40] Chao-An Li, Johnson R.B., Svoboda A J. A new unit commitment method. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 113-119
- [41] Hobbs B.F., Jitrapaikulsarn S., Konda S., et al. Analysis of the value for unit commitment of improved load forecasts. IEEE Transactions on Power Systems, 1999,14(4):1342-1348
- [42] Fan J.Y., Zhang L., Mcdonal J.D. Enhanced techniques on sequential unit commitment with interchange transaction. IEEE Transactions on Power Systems, 1996,11(1):93-100
- [43] 姚建刚,贺辉,欧阳永熙.效率优先与差价合同相结合的竞价上网模式.中国电机工程学报,2001,21(12):25-28
- [44] Shangyou Hao.A study of basic bidding strategy in clearing pricing auctions. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(3):975-980
- [45] Fushuan Wen,A.Kumar David.Optimal bidding strategies and modeling of imperfect information among competitive generators. IEEE Transactions on Power Systems, 2001,16(1):15-21
- [46] Zhang Daoyuan, Wang Yajun. Optimization Based Bidding Strategies in the Deregulated Market. IEEE Transactions on Power Systems,2000,15(3):981-986
- [47] Makansi J.California's Electricity Crisis Rooted in Many Failings.IEEE Spectrum,2001,38(2):54-59
- [48] 姚建刚,秦红三,王路,等.电力市场中输电与配电分开的方略初探.电网技术,25(3):70-73
- [49] 姚建刚,唐捷,李西泉,等.发电侧电力市场竞价交易模式的研究.中国电机工程学报,2004,24(5):718-83
- [50] J.H.Talaq,Ferial and M.E.El-Hawary.A summary of environmental-economic dispatch algorithms.IEEE Transactions on Power System,1994,9(3):1508-1516
- [51] 姚建刚,付维生,陈庆祺等.电力市场中电价与能源及环境保护的研究.中国电机工程学报,2000,20(5):71-75

- [52] 夏立民,王华.基于VML的矢量图形动态生成过程的研究.计算机技术与发展,2006,16(11):218-232
- [53] 杨争林,宋燕敏,沈利华.基于J2EE的电力市场技术支持系统研究.电力系统自动化,2004,28(8):35-39
- [54] 李川,姚建刚,陈亮.基于J2EE和VML的发电机组检修计划优化管理系统.广东电力,2009,22(1):59-64
- [55] 湖大华龙电气与信息技术有限公司.湖南省电力公司节能发电调度信息管理系统设计说明书.长沙:湖南湖大华龙电气与信息技术有限公司,2008,1-5
- [56] 张喜铭.发电企业商业运营及竞价决策研究与系统实现:[湖南大学硕士学位论文].长沙:湖南大学,2003,31-50

致 谢

论文从接收课题、收集资料、课题研究到最后顺利完成,这一切都与导师姚建刚教授的悉心指导是分不开的。两年来,在姚老师的严格要求下,我从事了许多电力方向的课题研究,这不仅大大提高了我的理论水平,同时也给我创造了许多理论联系实际、提高实践能力的机会,这对于自己今后的发展将是受益匪浅的;姚老师严谨的科学态度、渊博的知识、积极的人生态度与诲人不倦的师道精神始终积极的影响着我,促使我前进;在生活上,更受到了姚老师及师母全老师无微不至的关怀与照顾。在此,谨向姚老师及师母致以崇高的敬意及深深的感谢,恩师对我的教诲,我将铭记于心。

感谢罗滇生教授,两年来罗老师给予了我不少指导。同时感谢办公室的王劲松老师和田蜜老师对我的关怀与帮助。

感谢电力专业教研室的各位老师多年来对我无私的帮助。感谢李佐胜、葛亮、王健、张红旭、杨洪、李继光、龚陈雄等诸多师兄弟及湖大华龙公司的同事们,多年来的共同学习、工作,使我们建立了深厚的感情,谢谢他们一直以来对我的支持与帮助。

我要感谢我的家人,特别是我的父母,我的每一步成长都倾注了他们无限的关怀与期望,无论在顺境还是逆境他们总是不断鼓励我、鞭策我、支持我,他们永远是我坚强的后盾。在未来的工作学习当中,我当不负他们期盼,不断地开拓进取。

向所有关心、爱护和支持我的师长、同学和朋友致以深深的祝福。

感谢评审论文的各位专家、教授,谢谢你们!

李川

2009年3月

附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录

- [1] 李川, 姚建刚, 陈亮. 基于 J2EE 和 VML 的发电机组检修计划优化管理系统. 广东电力, 2009, 22(1): 59-64
- [2] 李川, 姚建刚, 张红旭. 机组检修计划的改进多蚁群伪并行寻优算法. 电力系统及其自动化学报, 已接受, 待发表, 文章编号 0620-8203
- [3] 姚建刚, 王健, 李川, 等. 考虑节能发电调度的发电竞价上网机制研究, 电力系统及其自动化学报, 已接受, 待发表, 文章编号 0922-8344
- [4] 李辉, 李川, 姚建刚, 等. 基于 J2EE 的节能发电调度信息管理系统, 微计算机信息, 已接受, 待发表, 文章编号 200809110753204484

附录 B 攻读学位期间所参加的科研项目目录

- [1]湖南省电力公司调度通信局—节能发电调度研究及支持系统研发
- [2]广东电网公司电力调度中心—发电机组检修优化管理工具研发
- [3]衡阳市中低压配电网规划