

华中科技大学

硕士学位论文

电力市场的竞价原理与数学模型分析

姓名：胡涛

申请学位级别：硕士

专业：概率论与数理统计

指导教师：周晓阳

20060429

摘要

当前世界范围内正在逐步实现电力系统市场化的体制改革。放松管制，引入竞争，实现电力工业市场化已成为各国电力改革的大趋势。电力市场改革的第一步是开放发电侧电力市场，然后逐步开放输电市场和配电市场。竞价算法作为电力市场技术支持系统的核心，在电力市场发展的不同阶段虽然形式有所不同，但其数学模型是基本一致的，最终目的都是在满足系统安全约束和电能质量的条件下提高经济性。所以在电能交易中，要达到发电商自身利润最大化和系统购电费用最小化这个双重目标，策略竞价是至关重要的一环。本文首先对电力市场的基本结构、运行方式、交易模式等方面的内容进行了概括性的介绍，对我国电力市场改革的现状和发展前景进行阐述分析。然后对电力市场的竞价规则和竞价交易价格结算机制进行了归纳和总结，对竞价数学模型进行了完整的描述和分析。考虑到电力市场约束条件很多，整体解决比较困难，本文采用组合和分配分步骤的方法，建立了基于爬坡约束的多时段竞价模型，并通过数据模拟计算，分析比较，得到一些重要的结论。最后，本文把学习自动机理论引入电力市场，并充分考虑网络约束对发电商策略竞价的影响，建立了网络约束条件下基于学习自动机的发电商竞价模型。该模型具有连续性，并充分反映了发电商竞价策略的相互作用，值得进一步研究。

关键词： 电力市场；竞价策略；竞价模型；爬坡约束；网络约束；市场力；学习自动机

Abstract

In recent years, power markets are undergoing reform step by step to enhance their competitiveness over the world. Since the reform trend is infrangible, the deregulation and competition was brought into power industry system. The first step of the power market reform is to open supply-side market, then to transmission-side and distribution-side market step by step. As the core of the power markets' technique support system, bidding arithmetic varies in the different stage of power market, but its mathematical models in nature are the same and its purpose is to improve economic effectiveness while satisfying system security constraints and electricity quality. To maximize power producers' profit and to minimize operator's purchase cost, the Bidding strategies are very important for all the participants of electricity markets. In this paper, we first introduced the markets' structure, operation mode, trading mode and describes our nation's power market reforming and its future. In the next chapter, we first generalize power markets' bidding rule and settlement method, then describe and analysis bidding mathematical models completely. As there is so many constraints and it is hard to solve the problem wholly, a bidding model of multiple stages of time based on three constraints is described in the chapter 4, and we can draw some conclusions through computation by using this model. These conclusions will help us to improve the existent bidding models. At the end of this paper, we use learning automation to study power market and a bidding model of considering transmission network constrains is presented, this model shows the interaction of the power producers and it worth to research further.

Key words: Power market; Bidding strategy; Bidding model; Climbing constraint; Network constraint; Market power; Learning automation

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到，本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 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，即：学校有权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。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分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。

本论文属于 保密，在_____年解密后适用本授权书。
 不保密。

(请在以上方框内打“ ”)

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

1 绪论

1.1 引言

当前世界范围内正在逐步实现电力系统市场化的体制改革^[1]。放松管制，引入竞争，实现电力工业市场化已成为各国电力改革的大趋势。电力市场化的目的是打破垄断，促进竞争，使电力工业逐步面向市场。建立电力市场，本着公正、平等的原则进行电力自由贸易的方式越来越受到人们的重视。电力市场发展的第一步是开放发电市场，然后逐步开放输电和配电市场。随之而来的是，越来越多的发电公司逐渐成为一个相对独立的主体参与到贸易竞争中来，形成一种自由竞争的局面。

电力市场是电价、电力系统运行、负荷管理、电力通信系统的总和，是电力工业技术与经营管理的综合^[2]。电力市场的基本原则是公平竞争。电力生产使用过程可以分为发电、输电、配电和用电四个环节，对此，电力市场的发展可以分为四个阶段：

发电、输电、配电和用电各环节统一垄断经营；在发电环节引入竞争，而输电、配电和用电环节仍保持垄断经营；在发电和输电环节引入竞争，而配电和用电环节继续保持垄断经营；在发电、输电、配电和用电各环节间均引入竞争。电力的不可储存性要求发电、输电、配电和用电时时刻刻保持平衡，因此，电力市场既有竞争的一面，又有协调统一的一面。

我国是在现行调度体制的基础上有计划地建立和发展电力市场^[3]。因此，它应该是一种层次结构，开始是树状的，将来各层次之间会出现交叉。这套新的电力贸易体系与现行模式相比将有根本性的变化，并将与其他商品市场有更多的共同之处，同时仍然考虑到电力商品的特殊性。官方对新体制的要求是：去除电力市场中的不合理现象；对电价施加压力(政府估计批发电价大约可以下降 10%)；必须保障即时及长期供电的可靠性；提高价格透明度，使用户参加价格制订过程；进一步促进市场竞争，尤其是要给各种不同燃料以公平机会；鼓励有利于环境保护的发电项目，如天然气发电及可再生燃料发电。

国内电力市场的产生是中国改革开放的必然结果，其本质是引入公平竞争机制，

它既是一次体制改革，又是一次技术飞跃。它将引用调度、运行、计划、自动化、规划和用户等方面的一系列重大变革。随着电力企业公司制改组、商业化运营、法制化管理的不断推进和电力行政管理职能移交地方政府，政企分开、厂网分开、网配分开、配售分开等改革举措的逐步实施，电力市场化进程日益加快。在中国加入WTO后，电力工业迫于多方面压力必将是中国最后一个打破垄断的行业。为此，应充分开展理论研究、做好规约准备，建立模拟系统，优化中国实现电力市场的历史过渡。

1.2 电力市场竞价算法和竞价模型概述

掌握市场化运营已经成为当今电力工业发展的必然趋势，其目的是引入竞争机制，激发电力工业的话力。电力市场发展的第一步是开放发电市场，然后逐步开放输电市场和配电市场。价格是市场配置资源、调节生产与消费的杠杆。在电力市场中，购电电价由交易中心综合发电方报价与市场需求，同时考虑系统状况得到。它不再像电力管制时期那样由主管部门核定，而是由电力商品的价值决定，同时受供求关系影响。因此，电价包含了丰富的信息：上网机组的成本、市场的供需状况以及系统(输电网络与发电机等)的健康状况等等。

竞价算法作为电力市场技术支持系统的核心，在电力市场发展的不同阶段形式有所不同，但其数学模型是基本一致的，最终目的都是在满足系统安全约束和电能质量的条件下提高经济性。电力市场的竞价算法有排队法、等报价法、线性规划法、网络流规划法、动态规划法和对偶规划法^{[4]-[9]}等，但每种方法各有侧重点，使用条件各有不同。

发电市场是电力市场中最先开放的市场，也是发展较为成熟的部分。发电市场中的运作模式分为双边合同模式(Bilateral)和交易中心集中竞价出清模式(Pool)两大类。竞价模式有分时竞价模式、简化竞价模式和分段竞价模式。针对不同的电力市场，有许多文献提出了不同的电力市场竞价模型，本文第三章将对竞价理论和模型做简要综述，并将在第四章建立一个基于爬坡约束的多时段竞价模型，在第五章建立一个网络约束条件下基于学习自动机的竞价模型。

1.3 本文研究的主要内容和主要贡献

本文的主要工作及研究成果如下：

1) 对我国电力市场改革现状进行了概括和总结，对电力市场规则进行了扼要的阐述，并对我国电力市场发展前景进行了分析。

2) 对电力市场的竞价规则和价格结算机制进行了综述和归纳，对竞价数学模型进行了完整的描述和分析，并为今后的研究方向打下铺垫。

3) 针对电力市场竞价整体解决困难的问题，采用组合和分配分步骤的方法，以电网统一边际成本结算下的购电费用最低为目标函数，以电网功率平衡、发电容量限制和爬坡速度限制为约束条件，建立多时段的统一出清价的定价模型。

4) 以上述模型为基础，从供应函数的角度，通过相同数据的模拟计算，分析比较以下两种情况：(1) 单供应函数时，考虑爬坡约束和不考虑爬坡约束对统一出清价的影响。(2) 多供应函数时，与单供应函数比较对市场力影响。

5) 对学习自动机的原理进行了详细的描述，并把学习自动机引入电力市场。

6) 充分考虑网络约束对发电商竞价策略的影响，建立了网络约束条件下基于学习自动机的发电商竞价策略模型。

1.4 本文研究工作的意义

电力市场化改革涉及的问题非常广泛和深刻，大的方面包括政治、市场经济体制、市场经济结构、宏观控制策略等问题，深入到电力系统的经济运行、安全可靠运行诸多方面。1999 年我国发电量达到 120 亿 KWH，但基本上没有形成规范的市场竞争和市场交易行为。近几年我国一些电网和省电业局在电力市场方面做了一些有益的尝试。这些做法和最终的电力市场还有相当的差距，有关理论体系也有待完善。目前电力体制不适应社会主义经济体制的主要弊端表现在：(1) 间断经营管理的体制性缺陷日益明显；(2) 市场壁垒阻碍电力资源优化配置；(3) 现行管理方式不适应发展要求。

促进我国电力市场化发展的还有这几个特殊因素：(1) 我国经济发展不平衡，导

致了负荷分布的不均匀；(2)近几年来随着电力工业的发展和国民经济结构的调整，我国电力供需形势发生了新的变化，电力供需矛盾趋于缓和；(3)互联电网的不同区域在不同时间的发电成本有差异，让边际成本低的区域向成本高的区域供电，不仅可以节约现有资源，还能使参与交易的区域从中获得经济效益。

因此，为了适应我国电力市场改革的发展，我们建议开展中国电力市场开发的研究。其中，最主要的是电力市场竞价行为的研究，以及电力市场竞价策略优化问题的研究。规划和优化竞价市场对我国电力市场改革有非常重要的意义^[10]，主要有以下几条：

1) 促进电力企业加强内部成本的管理，提供市场竞争优势

电力企业要在竞争中保持优势，首先应具备合理的报价成本。发电企业的运行与维护费用在整个发电成本中占有较大的比重。如果企业降低了运行与维修费用，这就意味着企业具有较低的发电成本，也就意味着在同等条件下该企业比其他竞争主体更具有优势。因此企业加强内部成本管理是实现成功报价的基本条件。

2) 促使发电企业转变观念，积极关注市场信息的变化

系统边际电价是发电企业的产品价格，是企业赖以实现利润最大化的基础，因此准确地预测系统边际电价是发电企业把握未来短期市场电价信息的关键，而预测效果的好坏又是报价策略优劣的直接影响因素。

3) 为发电企业规避风险、占有市场、实现利润最大化的目标提供技术保证

由于电力市场天然的市场结构上的缺陷，使得发电企业有机会利用策略性的竞价来实现企业利润最大化的目标。在每一次竞争选择中，企业总是要面临利益与风险、得与失的考验，因此如何准确的把握市场规律，最大程度地规避风险，成为发电企业迫切需要研究的决策问题。

2 电力市场基本规则和我国电力市场改革现状

2.1 引言

近百年来，电力行业在世界各国都是传统的垄断性行业。但近年来，世界各国正在逐步实现电力系统市场化的体制改革。随着电力市场的兴起和我国社会主义经济体制的建立，引进市场经济体制，使电力工业要面向市场，已成为了我国电力工业改革的大趋势。本章将首先介绍一下电力市场的基本结构、运行方式、交易模式等方面的内容，然后对我国电力市场改革的现状和发展前景进行阐述分析。

2.2 电力市场的结构^[3]

按照竞争程度的不同，电力市场的结构大致可以分为完全竞争、垄断竞争、寡头垄断和完全垄断四种类型。由于电力生产的特殊性，如发电公司数目有限、投资规模大、输电约束（在一定程度上或一定范围内限制了某些大用户选择发电公司）和输电损耗（打击大用户购电的积极性）等，决定了在电力市场中，某些地区可能只有少数发电公司提供电力。因此电力市场不是完全竞争的市场，而是更接近于寡头垄断的市场。这样发电公司可以通过策略性报价来达到利润最大化的目标。

电力市场的发电环节和供电环节，两者各有不同的技术和经济特性，决定了发电环节不具有自然垄断性，而供电环节则具有自然垄断性。电力市场的竞争，最初是从发电市场的开放开始的。一般说来，开放发电市场，既有利于发电市场引入竞争，同时也易于管理，是包括我国在内的许多国家电力市场改革初期选择的一种平稳的过渡方式。

2.3 电力市场的运行方式

一个全面、高效的市场运营机构是电力市场实现电能公平、公正、公开交易的必要保证之一^[10]。

目前电力市场主要有两种运行方式：一种是电网运行调度和市场交易分立的形

华中科技大学硕士学位论文

式。如美国加州电力市场的 ISO(Independent System Operator,独立系统操作员)和 PX(Power Exchange,电力交易所)。ISO 负责监控系统安全和阻塞管理, PX 负责期货和现货交易。另一种是电网运行调度和市场交易一体化的形式,即联营体模式(Power Pool)。大多数国家的电力市场(包括中国在内)都采用这种运行方式。我国现行的 Power Pool 运行方式主要是“1+N”模式。“1”是指电力市场的单一购买者,即电网经营企业;“N”是指参与市场竞争的各个独立的发电企业。例如山东、浙江、上海等电力市场,电网经营企业是发电侧电力市场的单一购买者,负责经营所以发电企业的上网电力电量,并保证用户用电。大多数用户不能与发电方签订购电合同,只能由电网经营企业采用趸售或零售的方式供电。有些电力市场,允许少数大用户可以不通过电网经营企业,直接与发电企业签订购、售协议。

将来,随着电力市场化改革的进一步深入,用户选择权的进一步扩大,我国的电力市场会出现更加灵活的市场运行方式。

2.4 电力市场的交易模式

电力市场的交易按时间可以分为期货交易、现货交易、实时交易三种模式。期货交易是指对未来比较长的时期内,电网经营企业与各发电公司进行的大宗电力合同的买卖过程。我国的期货交易实际上包括了期货合同和长期合同。随着市场的发展和完善,长期合同的比例将逐渐减小并最终由市场决定的期货交易合同所取代。相对于期货交易而言,现货交易更接近于实际运行时间(一天后、一小时后)。发电企业根据更准确的负荷预测与电网经营企业进行交易。现货价格由竞争决定,它既与电力市场的供求关系有关,又与竞争方式有关。实时交易是指在交易日当天进行的交易。实时交易基本上作为长期合同和现货交易的补充。

2.5 中国电力市场改革现状和前景分析

电力市场是进行电力交易的场所,其方法就是将市场经济引入电力行业,运用经济规律来管理电力市场交易,以促进电力企业之间的公平竞争。自 20 世纪 70 年代以来,世界各国的电力工业从电力生产、建设规模、能源构成到电源和电网的技术

都发生了较大的变化，并逐步向市场化发展。进入 20 世纪 90 年代后，其发展逐渐形成了以下三个突出的动向：(1)世界发电量的年增长率趋缓，而一些发展中国家尤其是亚洲国家仍然维持较高的电力增长速度；(2)电力技术的发展向效率、环保的更高目标迈进；(3)电力管理体制和经营方式发生变革，由垄断经营逐步转向市场开放。放松管制，引入竞争，实现电力工业市场化已经成为不可逆转的历史趋势。

2.5.1 中国电力市场改革现状概述

我国于 1999 年 1 月在山东、浙江、上海等地陆续开展了“厂网分开，竞价上网”的试点。由此，我国电力工业改革进入了实质性阶段。“厂网分开、竞价上网”即是将电网经营企业拥有的发电厂与电网分开，建立规范的、具有独立法人地位的发电实体，单独经营核算，承担法人义务。在厂网分开的初期，它只是一种经营权的转移，并不改变产权隶属关系，电网仍根据其所占产权的多少享受投资者的权益及相应的回报。建立发电侧电力市场是我国电力工业打破垄断，引入竞争，实现全面电力市场化改革的第一个阶段。总之，与过去相比，新电力市场模式丰富了电力交易方式，为市场成员特别是需方成员提供了更多的竞争机会，增加了市场的透明度和稳定性，简化了报价形式，限制了市场投机行为，向着电力工业全面市场化迈进了一大步。

2.5.2 中国电力市场改革分析

我国电力体制改革的十年目标是，打算用十年的时间，即到 2010 年，在全国建立一个与社会主义市场经济相适应的电力体制框架。改革的内容是：在发电侧，实行市场经济的办法，让用户有权选择发电厂；在输电侧，有权保持独家经营，形成适合我国发电现状的若干区域电力市场；政府对电力的管理主要是，电网调度、维护市场的公平竞争。我国电力体制改革的五年目标是：到 2005 年，要全面实行厂网分开，初步建立发电侧的竞争市场，上网电价由市场竞争来调节，电厂可以向大用户直接供电，大用户有权选择供电厂商，实行环保排放标准、清洁能源优先的新机制。

华中科技大学硕士学位论文

未来我国电力市场在总体结构上可能分为三个层次，即国家电网电力市场、区域电网电力市场、省网电力市场。电力市场改革的近期重点是建立省网电力市场，而远期目标则是建立全国统一、开放、竞争、有序的大电力市场。我国的电力市场将由上述三个层次的电力市场耦合而成为一个有机整体。

国际电力市场改革的经验告诉我们，电力市场改革必须根据本国电力发展的特点选择适当的模式，经过研究论证，制定目标明确的计划，并在法律法规的支持下，逐步有序地实施。就我国目前电力工业发展程度和相关社会经济环节来看，这一目标必须分阶段逐步来实现。通过在电力生产的不同环节逐步引入竞争，充分考虑已形成的电力供应特性和电力网络结构，结合电网未来发展格局，分阶段选择电力市场模式，分级构筑市场结构，选择并制定适当的市场运行机制，同时建立健全市场管理体系，使电力市场改革平稳地向前发展。分三个阶段具体分析如下：

1) 第一阶段是发电侧引入竞争机制的模式

这一阶段是中国电力市场的初建阶段。在第一阶段中，国家电网电力市场尚未形成；区域电网电力市场开始起步运作。输电和配电仍需统一经营和管理。为保证各独立发电公司(或发电集团)的平等参与竞争，电力公司对买、卖的运行操作须坚持公平、公开、公正的原则，电力交易过程始终要在法律和政府的有效监督之下。初建阶段的电力市场，各市场要素都不规范、不完善。然而，重要的是，厂网分开、竞价上网使电力市场建设跨出了重要的一步，引入了竞争机制，走上了市场经济的道路。

2) 第二阶段是发电环节竞争，输电网开放模式。

输电运行机构为电量交易提供转运服务；逐步进行配电公司、大用户与发电公司的双向选择，进行期货交易和现货交易；电网经营企业作为主要购买者，在市场中发挥主导作用，体现对市场的控制力。发电商和配电公司通过市场直接交易；配电公司在其专营区对用户供电。市场以区域电网公司、省电力公司、发电公司、配电公司、大用户为主体。发电资产的重组形成以独立发电公司为主体发电侧电力市场；省电力公司在第二阶段承担输电、调度、市场运作、配电公司股东、购电者等项职能。区域电网公司承担输电、调度、市场交易中心等职能。在第二阶段，大部

分电量由买卖双方通过双向选择的竞争方式签订合同进行期货交易；小部分电量通过市场竞价进行现货交易；这种方式的竞争力度比单一购买者市场大大增强。市场管理政监分开，将作为政策制定者的政府管电部门与电力监管机构分开，设立电力监管机构。同时制定与多个购买者市场相适应的电力监管法规。输电网的开放，需要制定输电价格等配套政策。在第二阶段，国家电网电力市场初步形成框架；区域电网电力市场的交易量逐步增加。与第一阶段市场不同，市场更多地允许发电商与供电公司之间的自愿交易，可以现货交易市场上进行交易，也可以通过合同方式来实现交易。上述特点表明，这一阶段的电力市场，各市场要素逐步完善，竞争力度增大，发电环节已展开比较完全的竞争。

3) 第三阶段是零售竞争阶段

这一阶段的电力市场配电网开放，配电业务与售电业务分开，零售公司在电力零售市场展开竞争，用户对零售商有选择权。市场以国家电网经营企业、区域电网经营企业、省电力公司、配电公司、从事售电业务的公司、用户为主体。零售商向用户发出告示，用户根据电价及服务质量选择零售商，与零售商签订供用电合同。目前，以打破垄断，引入竞争，提高效率，促进发展，构建公平竞争、开放有序的电力市场体系为总体目标的新一轮电力体制改革已正式拉开序幕。电力市场的开放有一个逐渐推进的过程，除电网管理和运营外，其他领域和环节将逐步放开。这一阶段，不仅在发电环节，而且在零售环节。都展开较完全的竞争。这一阶段的市场应实行集中监管。国家和省两级电力监管机构不仅与政府管电部门分开，实行政府管电部门领导下的自主监管，而且，把“多头监管”改为“集中监管”，对电力投资和电价的监管职能也由电力监管机构统一承担。同时制定与发电环节、零售环节开展完全竞争相适应的电力监管法规。在第二阶段国家电网电力市场逐步完善；区域电网电力市场逐步与国家电网电力市场融为一体，全国电力市场的效益得到较好的发挥。

上述三阶段实施步骤，是我国电力市场模式逐步升级、市场开放程度逐步扩大、市场要素逐步完善、竞争力度逐步增强的过程，也是电力企业改革和政府机构改革逐步深化的过程。分阶段、有步骤地进行电力市场改革是必需的。同时，电力市场

的建立需要先进的技术条件支持。例如，零售竞争市场需要有坚固的电网结构、先进的通讯网络、完善的金融系统、法制系统做支持，同时需要更换复杂昂贵的表计来实现用户的自由选择权。我们可以采取分步放开用户的方法来推进改革，尤其是一些大用户，可以在第一阶段进行允许发电公司交易的试点。

2.6 本章小结

本章阐述了我国电力市场改革的现状和发展前景，重点侧重于发展前景的分析，完成的主要工作有：

- 1) 对电力市场的基本结构、运行方式、交易模式等方面的内容进行了扼要的叙述和分析。
- 2) 扼要总结了我国电力市场改革的现状，对改革内容、模式和特点进行了小结。
- 3) 对我国电力市场改革的前景进行了分析，其中对改革前景、改革的阶段性目标和带来的影响进行了比较详细的分析。

3 电力市场的竞价规则及模型

3.1 竞价概述

3.1.1 竞价市场的分类

由于电力市场波动性较大而且电力具有不可存储性,为了保证其稳定性,电力市场同时存在日前市场、实时市场、辅助服务市场和合同市场等四类市场^[11]。日前市场是电力市场最主要的特色之一,通过它可以保持电力商品的供求竞争,有利于提高电厂的生产效率。实时市场作为日前市场的补充,以保证市场供需平衡为宗旨。辅助服务市场的目的是保证在供需出现突然变故时能使系统恢复平衡,其中包括无功补偿和各种不同的有功备用。合同市场的目的是规避电力价格波动的风险,既可以是与交易中心签订的,也可以是与大用户签订的;既有远期合同,也有近期合同。对于发电商而言,这四类市场都是其参与竞争的舞台,所以为了保证年度收益最大并且风险最低,发电商必须在各个市场上合理分配参与竞价的电量和容量。本文将着重探讨发电商在日前市场的竞价策略。

3.1.2 竞价协议

竞价协议大致分为双边合同和拍卖两类,本文只讨论基于拍卖协议的电力市场。拍卖是一种将负荷分配给发电商的有效机制,不同的市场形式有不同的拍卖规则。按照不同的分类标准可以分为静态拍卖和动态拍卖(也称迭代拍卖);开放式拍卖和密封式拍卖等^[12]。静态拍卖时发电商只有一次投标机会,动态拍卖时发电商可以在观察市场出清价和其他对手的出清情况后修改自己的报价。从结算的角度分为有区别拍卖和无区别拍卖,前者是指投标成功的发电商按其报价付给报酬,后者是指按市场统一价付给其报酬。目前大多数电力市场都是采用密封无区别拍卖的形式。

3.1.3 报价协议

报价协议对于竞价来说是一个至关重要的基础。报价主要有两种形式：单一报价和复合报价。前者只要求发电商给出它将来每一时段的电价曲线，系统调度中心不负责机组启停安排，由发电商考虑机组运行的物理限制；后者要求发电商除了上报电价曲线之外，还要上报机组爬坡率、启停费用以及无负荷运转费用等参数。前者基于分散管理，在市场出清后很难保证其可行性，所以需要超短期平衡市场的支持；后者基于集中管理，在市场出清后能保证其可行性，但它在一定程度上限制了发电商的灵活性，难以保证其可行解的最优性。

报价曲线大致可分为两类^[13]：分段报价和连续报价。分段报价要求发电商根据自己的机组构成情况按阶梯报价，其中又分为上升阶梯报价和下降阶梯报价，例如英格兰电力市场属于前者，荷兰电力市场属于后者。文献^[14]对发电报价的成本曲线、单价曲线和成本微增率曲线进行了综合研究，分析了不同报价形式的特性。

3.2 策略竞价分析

按照微观经济学理论，在完美的市场条件下，边际成本是每一个市场参与者的最优报价。但是，新兴的电力市场的特点决定了它的非完美性，竞价策略是指发电商利用电力市场的这种非完美性不按边际成本报价而增加自身利益的报价行为。竞价策略的主要目标，是在考虑电力系统运行的各种规则和限制条件的基础上，通过合法地操纵市场力，合理选择报价曲线，谋求自身利益的最大化。竞价策略的实现基于实时电价的电力市场。关于实时电价的理论，文献^{[15][16]}给出了较详细的论述。实时电价以成本为基础，准确的成本分析是进行策略竞价的先决条件，即报价仍然必须基于成本曲线，所以为了制定报价策略，发电商首先必须准确掌握自身机组的成本特性。文献^{[17][18]}给出了一些有效的成本分析方法，可以作为指导竞价的基础。对竞争对手的估计是竞价的关键，因为竞争对手的行为间接影响发电商自身的获利。对竞争对手的估计分为两个方面，一是估计竞争对手的生产成本，二是估计竞争对手的竞价策略。由于竞争对手的报价是保密的，所以从市场出清信息中是不能直接

得到竞争对手的报价的，只有通过对竞争对手的机组类型和燃料市场进行分析，估计其生产成本，然后在此基础上结合市场力分析，估计其竞价策略。

优化、合理的报价是竞价的最终目的。目前国内外学者对电力市场策略竞价的研究方法大致可分为以下四类，即市场优化方法、基于博弈论的方法、估计竞争对手行为的方法和其它一些特殊的优化方法。本章接下来将对上述几种方法进行详细分析。

3.2.1 市场优化方法

市场优化方法是直接按照电力市场的结构和交易模式构造模型，同时考虑电力系统的各种约束条件，以市场买电费用最小、自身获利最大为双重目标进行优化求解。市场优化方法原理比较简单，但是它要求发电商预测系统需求，同时还要考虑市场参与者的协定、网络潮流以及传输线阻塞等，是一种计算量较大竞价方法。幸运的是随着现代电子计算机技术的快速发展，以前束缚该方法的计算量大的问题将会得到很大的改善。国内外学者对市场优化的方法作了很多研究工作。文献^[19]针对新英格兰电力市场，提出一种电厂竞标部分出力，自己安排剩余出力的模型。该文献首先求解了交易中心调度模型，然后将上述电厂竞价问题求得的收敛结果(市场出清价及各电厂出清电量)带入电厂自身的机组调度模型，优化机组之间的出力分配以及电厂的报价函数的系数。此模型的不足之处在于没有考虑竞争对手的行为。文献^[20]提出的模型基于市场统一出清价，通过解一组满足电厂自身获利最大化条件的微分方程组，得到最优竞价策略。结论表明，电厂都倾向于报出高于成本费用的电价，但此方法过于繁琐。文献^[21]假设电厂报价曲线是线性的，交易中心调度目标是买电费用最小，提出的模型是每个电厂选择自己的报价函数的系数从而最大化自身获利，同时也考虑竞争对手的期望反应。该文给出了两种求解方法，即蒙特卡罗随机模拟方法和数值计算方法，结论表明需求弹性有助于降低市场出清价；但该文给出的竞争对手参数的概率分布值得进一步研究。

总之，市场优化方法原理简单，而且考虑了电力市场的各种约束条件，是一种不

错的方法。但很多人在运用这种方法进行研究工作时，常常把电厂的边际成本函数视为发电商的报价函数，有违电力市场寡头垄断的特点，忽视了发电商的市场力，这是值得进一步改进的地方。

3.2.2 博弈论方法和竞争对手行为分析方法

博弈论是研究两个或者多个有利益冲突的个体，在有相互影响的情况下如何进行各自优化决策的理论。博弈论方法通常和竞争对手行为分析方法结合使用，两者相得益彰。博弈论与常规优化决策的不同之处在于^[22]：

- a. 博弈论中参与者在利益上有冲突；
- b. 参与者各自做优化决策，并企图使个体利益最大化；
- c. 个体的利益与其他个体的决策相关，即个体的决策会影响他人，他人的决策会影响自身；
- d. 博弈论中一般假定参与决策的个体均为“理性”的。

电力市场恰好具有这些特点。因此，近年来有很多学者将博弈论引入电力市场中来研究指导发电商的报价。在电力市场下，调度中心的负荷是公开的，即博弈的目标是给定的；博弈的参与者即电厂个数是有限的，属于寡头竞争；各个电厂的投标即报价曲线是保密的。因此，电力市场竞标属于一种非合作的不完全信息博弈，其寡头竞争特点决定了市场出清电价与每一个发电商的报价都相关，每个发电商的行为都会影响到其他发电商的获利和市场的出清电价；同时，每个发电商的获利也与其他发电商的报价策略有关。然而，每个发电商各个时刻的投标都是不确定的，所以电厂进行策略竞价有两个难点：第一个难点是如何估计竞争对手的投标行为；第二个难点是如何制定自己的报价曲线。

对于竞争对手行为的分析，学者们也提出了多种方法。文献^[21]将每个竞争对手的报价参数视为一个正态分布函数，以历史数据为基础，采用数值方法决定此分布函数的参数，得到一个随机优化模型。文献^[23]提出了三种分析竞争对手行为的方法：(1) 经过估计得到竞争对手的费用曲线后，给每个参数加上某种随机扰动，得到竞价曲

线;(2)在分析对手历史数据的基础上,估计对手的几种可能的费用曲线(例如报高价、中价、低价等),然后分别以一定概率叠加扰动;(3)在第一种方法得到的竞价曲线的基础上再叠加某种分布的随机扰动。这三种方法均有一定的可取之处,是值得进一步研究的。文献^[24]给出两个电厂竞争同一出力的情形,采用概率分布曲线来模拟竞争对手的成本函数,求解同时满足两者期望利润最大的平衡点,但是这种方法难以推广到多个体博弈的情形。文献^[25]认为电厂的获利不但与其能量成本曲线有关,而且与运行参数有关,提出了一个专门优化最小出力的模型,分析了两个电厂在其他条件相同的情况下,最小出力参数对机组竞价结果的影响,并给出了相应的算法,其结论表明通过估计竞争对手的报价行为,优化最小出力也可以增加自己的获利。文献^[26]从系统调度的角度给出了一种考虑市场中每个电厂市场力的市场出清模型,其中每个电厂根据自己的市场力对线性报价曲线进行策略修正,其结论表明电厂不按边际成本报价是能够得到更多利润的。

在正确估计了竞争对手的竞价行为之后,发电商再利用博弈论对第二个难点进行求解,即进行电价—电量分析得到发电商自身的报价方案。文献^[22]介绍了博弈论的建模以及求解过程,并粗略阐述了博弈论在电力市场中的应用。考虑到电力市场竞价属于一种非合作的不完全信息博弈,文献^[27]通过引入第三方博弈者——自然的方式把不完全信息的博弈变为信息完全但不完美的博弈来求解。每个市场参与者均对自己的竞争对手进行分类,并对每一类的可能性进行概率估计,形成一个概率意义上的期望收益矩阵,依据纳什平衡点的概念求解。但是,求解过程和结果都是一种离散状态,与费用函数连续性不符合,而且如何得到其他电厂的收益概率分布是一个难题。文献^[28]中通过引入虚拟对手的概念,将所有竞争对手等效为一个虚拟竞争对手,提出了一个基于博弈论和概率论的求解模型。但虚拟竞争对手的行为如何分析,该文并未细究,将其简单地视为线性分布函数有失偏颇。文献^[29]则将发电商竞价问题看成是竞标电厂与市场间的博弈,进而用博弈论中的零和二人混合博弈进行求解。然而,模型的前提是已知市场电价的分布规律,正如前文指出,电价的波动性是很混乱的,要预测准确很困难。而且,根据发电商在市场中的地位不同,报价应该有所不同,而该文求得的最优电价与电厂的特征无关,值得进一步细究。文献^[30]讨论了完全竞争市场和垄断市

场中发电公司的竞价策略,对具有市场势力的发电公司的竞价策略进行了定性分析,认为可以通过撤掉一部分电量或者抬高报价来提高市场电价,但没有给出具体的报价策略。考虑到多个电厂可能联盟竞标的情形,文献^[31]利用博弈论中 n 人对策理论,对独立竞标和联盟竞标情况下发电公司的行为和市场状况进行了分析,其结论表明只要保持产权独立,各参与者追求个体利益最大化,结成的联盟不会稳定,而且进一步指出即使联盟也未必获得更大的利润。

电力市场中博弈论和竞争对手行为策略的研究很多,限于篇幅,这里就不一一列举了。随着国内外学者对电力市场研究的深入和广泛,他们将会发挥更加重要的作用。

3.2.3 其他方法

不少学者将近几年出现的一些新优化算法也引入到策略竞价中来。文献^[32]将竞价看成一个 Markov 决定过程,将竞争对手模型视为竞价参数的联合概率分布,构造了一个离散随机优化方法,并给出了计算转移概率和利润的方法。但是,在实际运用中得到竞争对手的各个竞价策略的离散概率以及转移概率都是困难的。文献^[33]中将负荷分成峰荷、中荷、谷荷三类,将竞争对手分成有威胁对手、可能威胁对手、无威胁对手三类,采用 FCM(Fuzzy-C-Mean)聚类,然后构造一个输出为自身报价的神经网络模型进行非线性拟合。但是,算法需要大量历史数据,而且有些数据例如其他电厂的历史报价信息是保密的,所以此模型缺乏实用性。文献^[34]给出了一个基于序优化方法的日前市场策略竞价模型,即首先构造一个描述竞价策略影响市场出清价的近似模型;然后对给定的市场出清价利用拉格朗日松弛法解最优机组调度问题,得到一条初始报价曲线,并对曲线做一系列扰动得到一个报价曲线集;最后利用依次优化法以高概率挑选一条“足够好”的曲线。但该方法仅从自身优化考虑,没有顾及竞争对手的行为。文献^[35]采用正态分布函数描述竞争对手的投标行为,将最优竞价策略描述为随机优化问题,应用蒙特卡罗方法求解。模型的关键是竞争对手的报价函数的分布参数如何得到,这是运用此模型的前提。

现代优化算法的引进增加了解决问题的途径,但怎样更好地与电力市场结合,构造与电力市场更接近的模型,仍然是摆在学者面前的难题。

3.3 竞价交易价格结算机制

最早被利用作为电力市场竞价交易结算机制的是基于微观经济学的市场均衡理论、边际成本理论和拍卖理论的系统边际价格(SMP:system marginal price)结算机制,也即是统一市场出清价格机制。由于电力市场是一个不完全竞争的市场,采用SMP机制有其固有的缺点,因此后来针对SMP的缺点提出了按实际投标价格结算(PAB:pay as bid)的拍卖机制。但随着电力市场运行经验的积累和有关研究的深入,人们又发现PAB机制并不能完全解决SMP机制的缺点,而且缺乏市场经济学基础,于是人们又在综合SMP和PAB的优缺点的基础上,提出了其他几种价格结算机制。本节将对现有的几种竞价交易价格结算机制进行论述,并对各自的优缺点进行比较分析。

3.3.1 系统边际价格结算机制

系统边际价格(SMP)是在满足一定的约束(如系统约束、机组约束、交易约束等)条件下,按发电商(或机组)的报价由低到高的顺序分配发电负荷(即公平性准则)最后一台满足系统负荷平衡的发电商(或机组)的报价即为系统边际价格。在系统边际价格结算机制下,所有成交交易统一按系统边际价格结算。

现货市场竞价交易计划的目标一般是系统总购电费用最小(即最优性准则),按照以上一般方法确定的边际价格只有在报价曲线为“单调上升”曲线时才能定为满足系统总购电费用最小的目标,而对于“单调下降”报价曲线,为了能满足总费用最小的购电目标,可考虑采用以系统边际价格最小为目标,对中标发电商(或机组)的交易计划进行调整的优化方法来确定新的系统边际价格(即最优购电价格)^[36]。但若仅以此新边际价格及对应的电能进行结算,会违反市场交易的公平性准则,这需要通过合理的结算规则来协调(如:不改变原有的电能计划,仅改变结算价格,报价在新边

际价格以下的电能按新边际价格结算, 报价在新边际价格以上的电能按实际报价结算)。

SMP 机制的优点是(1)有丰富的微观经济学理论基础, 可提供有效的市场经济信号, 有利于实现资源的优化配置; (2)在 SMP 机制下, 市场清算价格为所有成交的最高价格, 与机组自身报价的关系很小. 发电商主要考虑的问题是如何实现成交, 因而报低价是比较保险的策略. 所以 SMP 机制能够激励发电商(除少数具有市场力的发电商外)报低价, 这不仅有利于降低 SMP, 节省购电成本, 而且也有利于中小发电商与大发电商之间的平等竞争。

SMP 机制的缺点是(1)在不完全竞争的电力市场中, 具有市场力的发电商可通过物理持留(即持留发电容量, 使高成本的发电机组进入发电序列, 从而抬高边际价格)和经济持留(即利用市场力直接抬高发电价格), 导致系统边际价格偏离正常竞争价格过高或飞升, 从而大大增大系统购电总成本。一项研究表明^[37], 当负荷占总可用发电容量的 80%以下时, 发电商通常会按成本报价; 当负荷占总可用发电容量的 80%~85%时, 发电商的报价至少会比成本高 60%; 当负荷占总可用发电容量的 85%以上时, 发电商的报价可高达其成本的 38 倍; (2)在 SMP 机制下, 市场运行实践和仿真分析都表明: 一方面存在机组报价偏离成本的高价, 另一方面又存在机组利润为负(市场出清价格低于机组发电成本)的情况, 这种矛盾的结果同时存在, 不利于市场的有效管理。目前正模拟运行的华东电力市场和东北电力市场分别在月度竞价交易、待开放的日前竞价交易中拟采用 SMP 机制。

3.3.2 投标价格结算机制

投标价格结算机制(PAB)是在满足一定的约束(如系统约束、机组约束、交易约束等)条件下, 按发电商(或机组)的报价由低到高的顺序分配发电负荷, 并按实际报价进行交易结算, 直至满足系统负荷平衡。

PAB 机制的优点是(1)在相同发电报价下, 相比于 SMP 可节省系统购电总成本; (2)在 PAB 机制下, 发电商没有持留容量的利益驱动(假定持留容量前后报价不变), 其最

优的产量决策是上报最大可用容量,从而可防止发电商在系统容量紧缺时利用持留容量措施操纵市场价格。

PAB 机制的缺点是(1)缺乏足够的经济学理论基础,不能提供有效的引导投资、生产和消费的市场经济信号;(2)在 PAB 机制下,发电商有报更高价格的倾向^[38]。因为在 PAB 机制下,发电商的清算电价完全由自身报价决定,其报价除了要考虑能否成交外,还需考虑自己的目标利润要求,因而有更直接而强烈的报高价倾向。这可能使得 PAB 在总体水平上高于 SMP,即系统总购电费可能高于 SMP 下的购电费,这种情况在发电竞价成员较少时更可能发生。一般认为 PAB 机制下的平均购电价小于 SMP,这实际上隐含着如下一个关键假设,即:市场结算规则发生变化后,发电商的投标策略仍保持不变。但这只是一厢情愿的假设,在实际竞价中很难成立;(3) PAB 机制不利于大小发电商之间的平等竞争,且对小发电商不利。这是因为市场报价信息一般不公开,具有较大市场份额的发电商拥有较大的信息优势,具有较小的经营风险;而中、小发电商则由于掌握的信息具有较大的不完全性,始终处于希望获得较高利润和担心竞价失败的矛盾之中,容易被挤出市场,从而更有利于大发电商长期维持其市场支配力,这对提高市场效率和市场稳定性不利。

3.3.3 混合价格结算机制

所谓混合价格结算机制是指以某一价格水平为基准,对报价在这一价格水平以下的中标发电商(或机组)按 SMP 机制结算,而对报价这一价格水平以上的中标发电商(或机组),按 PAB 机制结算。以上基准价格可以是无约束(不考虑网络安全约束)系统边际价格,也可以是系统综合价格。所谓系统综合价格,是指系统中中标发电商(或机组)申报价格的电量加权平均价格。当市场规则允许任意报价曲线时,为兼顾交易计划的最优性要求和公平性要求,这一基准价格还可以是根据优化模型计算确定的最优边际价格,也即是最优购电价格。混合价格结算机制综合了 SMP 和 PAB 的基本思想,在一定程度上综合了 SMP 和 PAB 的优点,即:(1)对发电厂商利用市场力进行容量持留和申报高价的两种倾向都起到了一定的限制作用;(2)相对 SMP 机制降低了系

统购电成本，又兼顾了基本的市场公平，即所有机组的清算价格不低于其报价；(3) 混合价格结算机制其经济学理论基础虽不如 SMP 充实，但仍具有一定经济学的合理性。相对 PAB 机制可提供更多的经济信号，有利于促使发电企业降低成本、提高效率，同时也对投资者具有一定的指导作用。

3.3.4 其他价格结算机制

除了以上给出的三种价格结算机制，还有系统价格权拍卖结算机制^[39]和当量价格结算机制^[40]。系统价格权结算机制的基本思想是在电价超过高价市场启动后，根据卖电商是否拥有系统价格权以及报价是否不利于缓解供需矛盾，执行 SMP 或 PAB 价格结算机制，从而加强对卖电商减少经济持留和物理持留的经济激励，以便更有效地限制市场操纵行为，抑制拍卖价格的飞升。值得强调的是我国学者言茂松提出的当量价格机制，为电力市场中抑制发电商的市场力提供了一个全新的解决方案。所谓当量价格，是指机组申报的电量价格和市场自动评定的影子容量价格之和。电量价格与由市场自动评定的影子容量价格间存在着自动相互制约关系，即：电量价格高的机组影子容量价格低，电量价格低的机组影子容量价格高。这一特性反映了基电源与峰电源在电量成本和容量成本上的区别。当量价格结算机制具有很多优良的市场特性，但其在实际电力市场中的运用涉及到基本电价制度的改革，其稳定性和可靠性还有待进一步研究。

目前我国电力市场处于从计划体制向市场机制的转轨时期，电力消费市场的需求比较旺盛，且具有一定的不确定性，发电商的报价相对平稳。在电力市场改革的初级阶段，应采取相应的政策鼓励大多数发电商参与到电力改革中，从而降低大型发电商的市场支配力，促使电力市场最终进入良性竞争的轨道。由此可见，采用 SMP 机制是必要的，但 SMP 机制不能有效激励发电商完善自身报价机制，容易产生严重违背经济规律的现象，因此，各种价格结算机制应该灵活使用，互为补充。

3.4 竞价数学模型概述

随着电力市场的兴起，发电商除了要解决好传统的机组调度问题外，还要进行策略竞价，只有这样才能使获得的利润最大化。本节以文献^{[41][42][43]}为基础，对电力市场竞争模型原理分析如下：

3.4.1 目标函数

在发电、输电、配电市场全面开放的条件下，目标函数是社会效益最高；而在仅开放发电侧电力市场的条件下，目标函数是电网的购电费用最低。根据市场结算规则的不同，目标函数分为以下两类：

A. 目标函数 1: 按电网统一边际成本结算的购电费用最低, 表达式为：

$$\min \sum_{i=1}^I C_{om} P_i \quad (O_1)$$

$$C_{om} = \max_i \{C_{o1}(P_1), C_{o2}(P_2), \dots, C_{oi}(P_i)\}$$

式中 P_i 为第 i 个发电机组竞价获得的发电量，即发电功率； i 为机组序号， $i=1, 2, \dots, I$ ； I 为机组总数； C_{om} 为电网边际成本； C_{oi} 为机组 i 的报价； $C_{oi}(P_i)$ 为机组 i 的报价曲线，是发电功率 P_i 的函数。

B. 目标函数 2: 按各发电机组实际报价结算的购电费用最低, 表达式为：

$$\min \sum_{i=1}^I C_i(P_i) = \min \sum_{i=1}^I C_{oi}(P_i) P_i \quad (O_2)$$

式中 C_i 为发电机组 i 的发电成本； $C_{oi}(P_i)$ 为发电机组 i 的发电费用曲线（由报价曲线 C_{oi} 得到），是发电功率 P_i 的函数。

3.4.2 约束条件

约束条件按不同的被控变量，约束条件分为以下三类：

A. 第一类约束——功率与容量

与发电机组功率、容量有关的机组和电网的约束条件有以下四种：

a. 电网功率平衡的等式约束条件：

$$\sum_{i=1}^I P_i - P_D = 0 \quad (C_{1.1})$$

其中 P_D 为电网总负荷功率。

b. 机组功率不等式约束条件：

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (i=1,2,\dots,I) \quad (C_{1.2})$$

其中 $P_{i,\max}$ 和 $P_{i,\min}$ 分别为机组的最大最小出力。

c. 电网负荷备用功率不等式约束条件：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I P_{i,\max} - P_D \geq P_{D,RO,U,\min} \\ P_D - \sum_{i=1}^I P_{i,\min} \geq P_{D,RO,D,\min} \end{cases} \quad (C_{1.3})$$

$P_{D,RO,U,\min}$, $P_{D,RO,D,\min}$ 分别为电网向上和向下负荷备用功率的最低要求。

d. 电网负荷旋转备用功率不等式约束条件：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I \min\{P_{i,\max} - P_i, \Delta P_{i,U,\max}\} \geq P_{D,RS,U,\min} \\ \sum_{i=1}^I \min\{P_D - P_{i,\min}, \Delta P_{i,U,\max}\} \geq P_{D,RS,D,\min} \end{cases} \quad (C_{1.4})$$

其中 $\Delta P_{i,U,\max}$, $\Delta P_{i,U,\max}$ 分别为发电机组 i 最大升功率速度和最大降功率速度；

$P_{D,RS,U,\min}$ 和 $P_{D,RS,D,\min}$ 分别为电网负荷上旋转备用功率和下旋转备用功率最低要求。

B. 第二类约束——时间

与时间有关的约束条件有以下两种：

a. 发电机组升降功率速度约束条件(微分型约束)：

$$\begin{cases} P_{i,t+1} - P_{i,t} \leq \Delta P_{i,t,U,\max} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq \Delta P_{i,t,D,\max} \end{cases} \quad (C_{2.1})$$

其中 $\Delta P_{i,t,U,\max}$, $\Delta P_{i,t,D,\max}$ 分别表示发电机组 i 在时段 t 内的最大有功功率上升量和下降量的限值。

b. 发电机组周期内发电量约束条件(积分型约束):

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^T P_{i,t} \leq W_{i,\max} \\ \sum_{t=1}^T P_{i,t} \geq W_{i,\min} \end{cases} \quad (C_{2.2})$$

其中 $W_{i,\max}$, $W_{i,\min}$ 分别为发电机组 i 在周期 T 内发电量的最大最小值。通常电网中有电量限制的发电机组不多,而且这种限制往往来源于期货合同或燃料(或水)的存储量。

C. 第三类约束——电网安全

通常,此类约束表现为状态量(或控制量)的函数限制,或者空间限制,包括以下两种:

a. 支路潮流功率不等式约束条件:

$$|P_l| \leq P_{l,\max} \quad (l=1,2,\dots,L) \quad (C_{3.1})$$

式中 P_l 为第 l 条支路上的有功潮流功率; $P_{l,\max}$ 为对应的支路潮流限值; l 为支路序号; L 为支路总数。

b. 节点电压不等式约束条件:

$$\begin{cases} V_n \leq V_{n,\max} \\ V_n \geq V_{n,\min} \end{cases} \quad (C_{3.2})$$

式中 V_n 为网络节点 n 的电压幅值; $V_{n,\max}$ 和 $V_{n,\min}$ 分别对应其上限值和下限值; n 为节点序号, $n=1,2,\dots,N$, N 为节点总数。

值得注意的是以上 2 类目标函数和 3 类约束条件只是典型竞价问题的描述,实用中还可能出现网损、交换功率、辅助服务、竞价比例等问题。同时,由于满足约束条

件 $(C_{11}) - (C_{12})$ 的 (O_1) 或 (O_2) 是一个混和整数规划问题,整体解决是非常困难的,目前基本采用组合和分配分步骤的解决方法。本文正是根据上述思想构造了基于爬坡约束条件下的多时段竞价模型,第四章将重点对此进行讨论。

3.5 本章小结

电力市场的特殊性决定了发电商除了要解决好传统的机组调度问题外,还必须进行策略竞价,才能使自身利润最大化。本章对电力市场竞价策略的研究方法、竞价数学模型和原理进行了较为详细和深刻的分析,是本论文的重点之一。其目的是为后面的竞价模型的建立和竞价策略的优化分析做铺垫,主要完成的工作有:

- 1) 对竞价市场的分类、竞价协议、报价协议进行了总结和分析。
- 2) 对目前电力市场策略竞价的研究方法进行了详细的描述,并结合多篇参考文献,对各种研究方法的优缺点进行了系统的分析。
- 3) 对现有的几种竞价交易价格结算机制进行了系统的论述,并对各自的优缺点进行比较分析。
- 4) 对电力市场竞价数学模型进行了完整的描述,对竞价原理进行了简单分析。

4 基于爬坡约束条件下的多时段竞价模型

本章的工作将分为两个方面：(一)以电网统一边际成本结算下的购电费用最低为目标函数，以电网功率平衡、发电容量限制和爬坡速度限制为约束条件，建立多时段的统一出清价的定价模型^{[44][45]}。(二)以此模型为基础，从供应函数的角度，通过相同数据的模拟计算，分析比较以下两种情况：(1)单供应函数时，考虑爬坡约束和不考虑爬坡约束对统一出清价的影响。(2)多供应函数时，与单供应函数比较对市场力影响。

4.1 预备知识

4.1.1 约束条件

所谓爬(下)坡约束，也就是第三章所提到的机组升降功率速度约束，是指一类与时间相关的微分型约束问题：即发电机组在相邻两个时段内的有功功率的差值应不大于该机组在此时段内所能升(降)功率的最大值。其数学表达公式如下：

$$q_{i,t+1} - q_{i,t} \leq \Delta q_{i,t,u,\max} \qquad q_{i,t} - q_{i,t-1} \leq \Delta q_{i,t,d,\max}$$

其中 $q_{i,t}$ 和 $q_{i,t+1}$ 分别表示发电机组 i 在时段 t 和 $t+1$ 的有功功率值。 $\Delta q_{i,t,u,\max}$ 、 $\Delta q_{i,t,d,\max}$ 分别表示发电机组 i 在时段 t 内的最大有功功率上升量和下降量的限值。

4.1.2 市场出清

日前市场是电力市场的最主要的特色。它要求参与竞价的发电商按照报价协议向市场组织者上报自己所属机组次日每时段（一般为半小时）的电价和电量曲线。然后由市场组织者按照竞价协议计算处理得到系统合成供给曲线，与系统合成需求曲线进行匹配，得到市场出清价和出清负荷。最后根据各个厂商的报价情况决定其出清电量。现阶段对市场出清方法的研究很多，如排队法，等报价法，动态规划法，网络流规划法，线性规划法以及对偶规划法。但每种方法各有侧重点，使用条件各

有不同。

4.1.3 市场力

经济学对市场力^{[46][47]}的定义为：“一个或一组企业对某一行业价格和生产决策的控制程度。”在电力市场中，市场力是发电商为获得更多利润而使市场价格高于边际成本的能力。也就是说，如果发电商可以通过策略性投标而非降低成本来成功地增加利润，则称该发电商具有市场力。电力行业由于进入的资金壁垒、技术壁垒都非常高，而且具有典型的规模经济性，因此，无论在发达国家还是在我国的某一区域的电力市场，电力主要都是由几家大型发电企业来提供。从电力企业规模效应看，发电企业的竞争有明显的寡头垄断性质。在理想的、完美竞争的电力市场中，发电商的最优投标策略是将电力价格设立在边际成本。在寡头垄断的电力市场，为实现企业利润最大化，发电商没有以边际成本作为投标策略，而试图通过市场结构的不完美，利用市场力，采用策略性投标来增加利润。例如，由于单发电商面对的是需求曲线是递减曲线，各发电商往为了追求自身的最大利润而限制产量，使市场的价格高于完全竞争市场的价格，从而获得超额利润。

市场力的大小由市场的实际价格与该企业产品的边际价格的相对偏差来表示，通常采用 Lerner 指数 L 来衡量，其表达式为：
$$L = \frac{I - MC}{MC}$$
。式中： I 为电力市场的出清价， MC 为发电商所属机组的边际成本。我们知道 MC 基本上是由发电厂的机组构成和市场燃料价格决定。发电商在知道竞争对手机组构成情况和市场燃料价格的前提下，可以较准确地估计出竞争对手的成本曲线，从而得到竞争对手的边际成本曲线，而 I 是可知的，这样就可以估计出每个竞争对手的市场力。

影响市场力的因素有机组的装机容量、机组可调幅度、市场成员的数量、发电商的联盟、市场成员的报价策略、电力供需关系、负荷弹性、合约电量和输电网络约束。本章将详细的分析发电商的报价策略对市场力的影响。

4.2 竞价数学模型

本文以电网统一边际成本结算下的购电费用最低为目标函数，以电网功率平衡、发电容量限制、爬坡速度限制为约束条件，在这些约束条件下，多时段的统一出清价的定价模型为：

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^T \max \{ I_1(q_1^t), I_2(q_2^t), \dots, I_r(q_r^t) \} Q_t \right\} \quad (1)$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^r q_i^t = Q_t \quad q_{i,\min} \leq q_i^t \leq q_{i,\max} \quad (2)$$

$$q_i^{t+1} - q_i^t \leq \Delta q_{i,u,\max}^t \quad q_i^t - q_i^{t+1} \leq \Delta q_{i,d,\max}^t \quad i=1,2,\dots,r \quad t=1,2,\dots,T \quad (3)$$

其中 $q_i^t, I_t(q_i^t)$ 分别为机组 i 在时段 t 的出力和报价函数 ($i=1,2,\dots,r; t=1,2,\dots,T$)。

目标函数中的优化变量 $\bar{q}^t = (q_1^t, q_2^t, \dots, q_r^t), t=1,2,\dots,T$ 为 t 时段各机组的出力向量。 Q_t 为 t 时段负荷预测值。式 (2) 对应着电网功率平衡和机组功率不等式约束条件，其中 $q_{i,\min}, q_{i,\max}$ 分别为机组 i 的出力下界和上界。式 (3) 是机组升、降功率速度约束条件。这是一个与时间有关的微分型约束，即发电机组在相邻两个时间段内的有功功率的差值应不大于该机组在此时段内所能升、降功率的最大值。其中 $\Delta q_{i,u,\max}^t, \Delta q_{i,d,\max}^t$ 表示发电机组 i 在时段 t 内允许的最大有功功率上升量和下降量的限值。

事实上，上述模型可以转化为如下表达：

$$\min_{(q_1^t, \dots, q_r^t, I_t)} \left\{ \sum_{t=1}^T I_t Q_t \right\} \quad (4)$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^r q_i^t = Q_t \quad I_t(q_i^t) \leq I_t \quad q_{i,\min} \leq q_i^t \leq q_{i,\max} \quad (5)$$

$$q_i^{t+1} - q_i^t \leq \Delta q_{i,u,\max}^t \quad q_i^t - q_i^{t+1} \leq \Delta q_{i,d,\max}^t \quad i=1,2,\dots,r \quad t=1,2,\dots,T \quad (6)$$

这里 I_t 为 t 时段的价格参数，且满足 $I_t = \max \{ I_1(q_1^t), \dots, I_r(q_r^t) \}$ 。这样转化的好处是如果报价函数 $I_t(q_i^t)$ 为线性函数时，优化模型 (6) 式就可以归结为易于求解的线性规

划模型。我们可以用解线性规划的专用软件 LINDO 来解它。

注意到市场需求是有弹性的，并且市场需求的波动直接影响着市场出清价格。文献^[21]基于美国加州电力市场模型，以购电费用最小为目标，并假设厂商的报价函数是线性的，提出的模型是每个发电厂商选择自己的报价函数的系数从而最大化自身利润，同时也考虑对手的期望反应。该文给出了两种求解方法，即蒙特卡罗随机模拟方法和数值计算方法，结论表明需求弹性有助于降低市场出清价。鉴于此，若我们考虑需求弹性：设第 t 个时段的需求函数为 $Q_t - r_t I_t$ ，其中 r_t 为时段 t 的弹性系数， $(t=1,2,\dots,T)$ 。则多时段的统一出清价的定价模型为

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^T I_t (Q_t - r_t I_t) \right\}$$

其中电网功率平衡约束条件变为 $\sum_{i=1}^r q_i^t = Q_t - r_t I_t$ 。其余约束条件不变。如果厂商报价函数 $I_t(q_i^t)$ 为线性函数时，上述模型就可以归结为易于求解的二次规划模型，我们可以调用程序 LINGO 来解。

4.3 算例分析

(1) 单供应函数

设有六个机组，机组的成本函数设为二次函数 $C(q_i) = a_i q_i^2 + b_i q_i + c_i$ ，同时考虑三个时段，并采用边际成本函数的倍数作为其报价函数，即

$$I_t = m_t \cdot \frac{dC(q_i)}{dq_i} = m_t \cdot (2a_i q_i + b_i)。这里 i=1,2,\dots,6 \quad t=1,2,3$$

下面给出 6 个机组的成本系数和供应产量

华中科技大学硕士学位论文

表 1 6 机组的成本系数和供应产量

机 组	a	b	c	最小出力(mw)	最大出力(mw)
1	0.0370	180	0	0	200
2	0.0400	240	0	0	200
3	0.0750	165	0	0	200
4	0.0950	230	0	0	200
5	0.1050	230	0	0	200
6	0.1250	100	0	0	200

这里厂商具有非对称的成本数据，并按成本斜率系数由小到大对发电厂商进行编号，便于对比。厂商的最大供给被设置为对称的，即诸厂商有相同的供应规模。这样的案例代表了由若干规模大体相当的寡头竞争对手组成的电力市场，供应规模的对称性保证了观察不受某些细节的干扰，有助于得到有价值的结论。设 $m_1 = m_3 = m_6 = 1.2$ ， $m_4 = m_5 = 1.4$ ， $m_2 = 1.5$ 并设三个时段的预测负荷为 695.80MW，897.48MW,1008.40MW.直接调用 LINDO 程序，得到如下结果：

表 2 考虑爬坡约束的三个时段的统一出清价和机组出力

I_1	360.00	I_2	365.196	I_3	368.796
q_1^1	200.00	q_1^2	200.00	q_1^3	200.00
q_2^1	0.000	q_2^2	43.30	q_2^3	73.30
q_3^1	191.62	q_3^2	200.00	q_3^3	200.00
q_4^1	95.93	q_4^2	145.93	q_4^3	175.93
q_5^1	88.25	q_5^2	138.25	q_5^3	159.17
q_6^1	120.00	q_6^2	170.00	q_6^3	200.00

仍然以表 1 的数据，不考虑爬坡约束，则得到如下结果：

表 3 不考虑爬坡约束的三个时段的统一出清价和机组出力

I_1	360.00	I_2	361.637	I_3	368.796
q_1^1	200.00	q_1^2	200.00	q_1^3	200.00
q_2^1	0.000	q_2^2	13.65	q_2^3	73.30
q_3^1	200.00	q_3^2	200.00	q_3^3	200.00
q_4^1	0.0000	q_4^2	149.01	q_4^3	175.93
q_5^1	129.25	q_5^2	134.82	q_5^3	159.17
q_6^1	166.55	q_6^2	200.00	q_6^3	200.00

华中科技大学硕士学位论文

比较表 2 和表 3 给出的 6 个厂商各时段出力情况，我们可以清楚的看见，如果不考虑爬坡约束，当系统负荷较低时，会导致竞标失败的厂商的个数增加。所以爬坡约束可以看成是厂商是否竞价成功的一个不可忽视的指标。并且注意到有爬坡约束和无爬坡约束的发电机组组合是有很大大差异的，所以爬坡约束也是机组优化组合的一个重要指标。这也从另一个方面阐述了爬坡约束对市场出清电量的影响作用。

(2) 多供应函数

即是厂商一个时段一个报价函数，此时报价函数的表达式为：

$I_i(q_i^t) = k_i^t(2a_i q_i^t + b_i), i=1,2,\dots,6, t=1,2,\dots,T$ 仍然沿用表 1 所给出的数据，并取三个时段，各个时段的负荷预测值分别为 695.80MW, 897.48MW, 1008.40MW。但应该注意到 k_i^t 除了对不同的机组取不同的值以外，对同一机组的不同时段也取不同的值，而变量 q_i^t 也是如此。由于第一个时段负荷较低，考虑到竞争的激烈，各个厂商会采取稳妥的报价策略。为简化计算，第一个时段的竞价策略取 $k_i^1 = 1.1(i=1,\dots,6)$ 。第二个时段取 $k_1^2 = k_3^2 = k_6^2 = 1.2, k_4^2 = k_5^2 = 1.3, k_2^2 = 1.4$ 。第三个时段取 $k_1^3 = k_3^3 = k_6^3 = 1.3, k_4^3 = k_5^3 = 1.4, k_2^3 = 1.5$ ，计算结果如表 4。

表 4 多供应函数时考虑爬坡约束的统一出清价和机组出力

I_1	273.05	I_2	340.85	I_3	368.80
q_1^1	200.00	q_1^2	200.00	q_1^3	200.00
q_2^1	41.62	q_2^2	43.30	q_2^3	73.30
q_3^1	150.00	q_3^2	200.00	q_3^3	200.00
q_4^1	95.93	q_4^2	145.93	q_4^3	175.93
q_5^1	86.79	q_5^2	136.79	q_5^3	159.17
q_6^1	121.46	q_6^2	171.46	q_6^3	200.00

比较表 2 和表 4，我们不难发现多供应函数的市场出清价跳跃度很大，使市场价格动荡不安。而单供应函数的市场出清价平稳增加，很好的抑制了市场力，是一种好的报价机制。

4.4 本章小结

我国电力市场改革才刚刚起步，建立发电侧电力市场是我国电力工业改革的第一步。在发电侧电力市场中，目标函数是社会利益最大化即社会购电费用最低。本章建立了基于爬坡约束下的多时段的竞价模型，并依托此模型，通过数据模拟计算，我们发现爬坡约束对市场统一出清价有一定的影响，对机组的出清电量起着关键作用，是机组优化组合的一个重要指标。另外，尽管目前大多数厂商都是以多供应函数进行报价，但实验结论表明单供应函数更能比较好的抑制市场力。作为一个初步的研究工作，本章尚未考虑电网安全约束及电网负荷旋转备用功率不等式约束等约束条件，有待接下来进一步研究。同时由于电力市场的波动性较大且电力具有不可存储性，如何构造与市场更接近，行之有效的模型，是摆在学者面前的难题。

5 基于学习自动机的发电商最优报价策略

5.1 引言

在电力市场中,策略竞价的主要目标,是在考虑电力系统运行的各种规则和限制条件的基础上,通过合法的操纵市场力,合理选择报价曲线,谋求自身利益的最大化。在竞价过程中,对竞争对手的估计是竞价的关键,因为竞争对手的行为间接影响发电商自身的获利。对竞争对手的估计分为两个方面,一是估计竞争对手的生产成本,二是估计竞争对手的竞价策略。每个发电商都通过对竞争对手的行为的分析和估计,不断的修改自己的报价策略,从而使系统达到均衡和自身利润达到最大化。同时,网络约束也是决定发电商报价策略的一个很重要的约束条件。若发电商在一个有网络约束的电网中进行策略性投标,将会导致利润在发电商、用户和输电网拥有者之间重新分配。网络约束的存在将进一步为某些市场成员提供机会,即使发电商的市场力很小,网络约束也有可能分割市场,而且网络约束的存在将导致电网中各个节点的电价不同,因为它限制了潮流从低生产成本的节点流向高用电价值节点。在这种情况下,那些发电成本较低的,并且愿意多发电的发电商不能够多发电;也有一些用电效益较高的,并且愿意多用电的用户不能够多用电。因此,发电商应在自己的投标策略中充分考虑网络约束的影响^[48]。策略性投标有可能使发电商从输电网拥有者那里获得更大的利润。当发生输电阻塞时,某些市场成员(发电商)就有可能行使这个策略。本章将延续这个思路,在基于网络约束的条件下,利用学习自动机的方法来构造发电商的最优报价策略。同时,由于网络约束的存在,电力交易与调度中心为了保证系统安全运行,必须要进行潮流校核,本章将用直流潮流算法来计算电网支路潮流。

5.2 预备知识

5.2.1 网络约束

网络约束来源于电力市场中输电网络的物理因素,是指电网每条支路上的有功潮流功率应小于支路电流的最大限值。其表达式为:

$$|P_l| \leq P_{l,\max} \quad (l=1,2,\dots,L)$$

式中 P_l 为支路 l 上的有功潮流功率, $P_{l,\max}$ 为对应的潮流限值。网络约束是电力市场中一个很重要的约束条件,它的存在将进一步为某些市场成员提供机会行使市场力,从而分割电力市场。

5.2.2 直流潮流^[49]

在电力系统分析的某些应用领域,人们对潮流计算提出了一些特殊的要求。例如在实时控制等在线应用中,要求潮流计算方法计算快速、收敛可靠。为实现这一目标,人们发展出各种快速有效的潮流计算方法,直流潮流算法就是其中的一种。直流潮流算法是通过潮流模型的简化发展出来的,它只给出电力系统中有功潮流的分布,不需要计算各节点的电压幅值。对于那些对计算精度要求不高,而对计算速度要求较高的研究工作,用直流潮流进行计算将是一个不错的选择。直流潮流的基本思想如下所述:

对于支路 (i, j) , 如果忽略其并联支路,则支路有功潮流方程为:

$$P_{ij} = (U_i^2 - U_i U_j \cos \mathbf{q}_{ij}) g_{ij} - U_i U_j \sin \mathbf{q}_{ij} b_{ij} \quad (1)$$

式中 g_{ij} 是支路电导, b_{ij} 是支路电纳。根据电力系统运行的特点,节点电压在额定电压附近,支路两端相角差很小,超高压电力网线路电阻比电抗小很多。因此,可做如下简化假设,即 $U_i = U_j = 1$, $\sin \mathbf{q}_{ij} = \mathbf{q}_{ij}$, $\cos \mathbf{q}_{ij} = 1$, $r_{ij} = 0$ 。则(1)式可以简化为

$$P_{ij} = (\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j) / x_{ij} \quad (2)$$

华中科技大学硕士学位论文

式中 x_{ij} 是支路电抗, q_i, q_j 是支路电压相角。

而对于节点 i , 应用基尔霍夫电流定律, 得到直流潮流方程的矩阵形式为:

$$P^{SP} = B_0 q \quad (3)$$

其中 P^{SP} 是 $n \times 1$ 维节点注入有功功率列矢量, 不包括平衡节点 N , 这里 N 为网络中节点的个数, 且 $N = n + 1$ 。 B_0 是 $n \times n$ 阶节点导纳矩阵, 不包括平衡节点所对应的行和列, 其元素的计算公式为:

$$B_0(i, i) = \sum_{j \in i, j \neq i} 1/x_{ij} \quad B_0(i, j) = -1/x_{ij} \quad (4)$$

而 q 是节点电压相角矩阵, 并认为平衡节点的相角为零。我们可以先用(3)式求解出节点电压相角, 再用(2)式计算各个支路的有功潮流, 这就是直流潮流的解算过程。

为了进一步描述直流潮流的计算过程, 下面用一个三母线电力系统进行说明。

其网络拓扑图如右图所示, 支路电抗

和节点注入功率由图上给出, 下面用直流潮流计算支路有功潮流分布。

选取节点 3 作为参考节点, 该节点的电压相角为零。由公式(4)得到节点的

导纳矩阵为 $B_0 = \begin{bmatrix} 15 & -5 \\ -5 & 10 \end{bmatrix}$, 而节点的

有功功率矢量为 $P^{SP} = \begin{bmatrix} -2 \\ 0.5 \end{bmatrix}$, 所以节点

电压相角矩阵为 $q = B_0^{-1} P^{SP} = \begin{bmatrix} -0.14 \\ -0.02 \end{bmatrix}$, 从而得到支路有功潮流为:

$P_{12} = (q_1 - q_2)/x_{12} = -0.6$, $P_{13} = (q_1 - q_3)/x_{13} = -1.4$, $P_{23} = (q_2 - q_3)/x_{23} = -0.1$, 负值表示潮流的流向与所取的序号相反。由计算结果我们可以发现, 节点 3 注入的 $1.5mw$ 有功功率, 有 $1.4mw$ 经支路 3-1 到达节点 1, 而另外的 $0.1mw$ 经支路 3-2 到达节点 2, 并和节点 2 外部注入的 $0.5mw$ 有功功率一起经支路 2-1 到达节点 1, 这样节点 1 的注入功

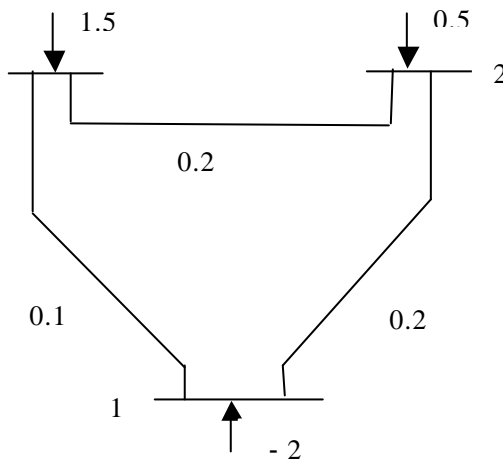


图 1 三节点网络图

率为 $2mw$ ，方向向外。这和题设是一致的。

值得说明的是平衡节点的选取是一种计算的需要，有一定的任意性，但为了使潮流计算符合实际，常把平衡节点选在有较大调节余量的发电机节点。

直流潮流的解没有收敛性问题，而且在超高压电网，由于其线路的电阻远小于电抗，所以直流潮流的计算误差通常在 $3\% \sim 10\%$ ，这使得直流潮流模型在电力系统规划和电网在线静态安全分析中得到了广泛的应用。

5.2.3 学习自动机 (Learning Automation)

学习自动机(LA)是一种基于强化学习(Reinforcement Learning)机制的概率自动机^{[50][51][52]}。它对解决非线性和包含高度不确定性的问题,具有明显的优越性。一个 LA 通常总是与一个随机环境构成一个闭合回路。在任一时刻,LA 按照一定的概率分布从有限的备选行动集中随机地选出一个行动,并输出给环境。环境则向 LA 返回一个奖励或惩罚信号,作为对相应的行动选择的反应。然后 LA 根据环境的反应,修改更新其行动选择概率,并按照修改后的新的选择概率选择新的行动。一开始,所有行动的奖罚概率都是未知的,故 LA 先按均匀分布,等概率地选择各个行动。但随着与环境的反复作用,LA 会逐渐了解环境的奖罚特征,并最终以较大的概率选择受奖概率大、受罚概率小的行动。一个 LA 的学习行为与性能,取决于其行动选择概率的更新函数,也就是我们通常所说的巩固再励算法(Reinforcement Scheme)。巩固再励算法有很多种,例如 Narendra-Shapiro 巩固再励算法,Luce 巩固再励算法等,当然也可以根据实际情况来制定相应的方案。

本章假设 $S = \{s^1, s^2, \dots, s^l\}$ 是可供选择的行动集合,在 t 时刻,学习自动机基于当前的行动选择概率分布函数 $p(t) = \{p^1(t), p^2(t), \dots, p^l(t)\}$ 随机的选择一个行动 $s(t) \in S$, 这里 $p^1(t) + p^2(t) + \dots + p^l(t) = 1$ 。自动机把这些行动投入到环境中,环境反馈回来一个信号 $R(t)$, $R(t) = 0$ 表示奖励, $R(t) = 1$ 表示惩罚。行动选择概率更新公式为:

$$p^k(t+1) = p^k(t) + \mathbf{h}(1-R(t))(1-p^k(t)) - \mathbf{k}R(t)p^k(t) \quad \text{若 } s^k = s(t)$$

$$p^j(t+1) = p^j(t) + \mathbf{h}(1-R(t))p^j(t) - \mathbf{k}R(t)((l-1)^{-1} - p^j(t)) \quad \text{若 } s^j \neq s(t)$$

其中 \mathbf{h}, \mathbf{k} 分别为奖励和惩罚因子。

5.3 竞价数学模型

为便于叙述，本文假设电力市场中有 k 个发电商，且每个发电商只拥有一台发电机组(下述情况对于一般情况同样适用)。发电商基于自己的生产成本和对风险的偏好，并通过对市场电力需求的预测和对其他发电商报价行为的估计，来确定自己的报价策略。

本文假设发电商 i 有二次成本函数： $C(q_i) = a_i q_i^2 + b_i q_i + c_i$ ，其中 a_i, b_i, c_i 为成本系数， q_i 为第 i 个发电商的出力，满足约束条件 $\underline{q}_i \leq q_i \leq \bar{q}_i$ ，其中 $\bar{q}_i, \underline{q}_i$ 分别为第 i 个发电商的出力上、下限值。 $i = 1, 2, \dots, k$ 。每个发电商 i 采用边际成本的倍数作为其报价函数(简称边际成本倍数报价)，即：

$$I = I_i(q_i) = s_i \cdot \frac{dC(q_i)}{dq_i} = s_i \cdot (2a_i q_i + b_i)$$

这里 $s_i \in S_i = \{s_i^l, l = 0, \pm 1, \dots, \pm L_i\}$ ，其中 $s_i^l = s_i^0 + l \cdot \mathbf{d}_s, s_i^0 = 1, \mathbf{d}_s > 0$ 为离散策略间距。一开始，每个发电商以相同的概率从各自的报价策略集中随机的选择一个报价策略 s_i 。当电力交易与调度中心收到发电公司的报价后，首先进行无约束调度，即不考虑输电系统的容量约束。假设电力交易与调度中心进行无约束调度，得到各发电商的出力为 q_i ，市场出清价为 I 。

然而，在网络约束存在的情况下，电力交易与调度中心进行预调度所得到的各个发电公司的出力往往不能按计划实现。所以，电力交易与调度中心要对其调度结果进行校核，也即是计算电网中每条线路的潮流。本章采用直流潮流计算，其原理和方法在第一节已经进行了详细的介绍，这里不再重复叙述了。

华中科技大学硕士学位论文

当线路潮流校核完成,电力交易与调度中心就需要对发生阻塞的线路进行阻塞管理,并修改各自的发电计划,即确定发电公司发电出力的调整量 Δq_i ,以消除阻塞。

下面给出一种阻塞管理的模型,目标是使阻塞管理所引起的附加购买成本最小。

显然,阻塞成本是电力交易与调度中心进行阻塞管理修改发电调度后的购电费与无约束调度时的购电费用之差。设无约束调度时的购电费用为:

$$\sum_{i=1}^k (I q_i + C_p \bar{q}_i), \quad \text{其中 } C_p \text{ 为容量费, } \bar{q}_i \text{ 为出力上限。}$$

阻塞调度后的购电费用为:

$$\sum_{i=1}^k (I q_i + \int_{q_i}^{q_i + \Delta q_i} s_i \cdot (2a_i x + b_i) dx + C_p \bar{q}_i)。$$

二者之差即为购电附加成本: $C_{con} = \sum_{i=1}^k \{s_i \cdot [a_i \Delta q_i^2 + (2a_i q_i + b_i) \Delta q_i]\}$ 。因此,阻塞管理

可以描述成以下优化问题

$$\min_{\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_k} C_{con}$$

满足:(1) 机组出力约束 $\underline{q}_i \leq q_i + \Delta q_i \leq \bar{q}_i$

$$(2) \text{ 系统功率平衡约束 } \sum_{i=1}^k (q_i + \Delta q_i) = D \quad \text{即 } \sum_{i=1}^k \Delta q_i = 0$$

(3) 潮流约束。这里采用直流潮流计算,表示如下: $\mathbf{q} = B_0^{-1} P^{SP}$ 式中: \mathbf{q} 为电力系统中各个节点的电压相角向量; B_0 为导纳矩阵; P^{SP} 为节点净注入功率向量。

(4) 输电网络容量约束: $P_{ij} \leq P_{ij \max}$ 式中 $P_{ij}, P_{ij \max}$ 分别为支路 $i-j$ 经阻塞管理后的有功功率潮流和该线路的输送容量极限。

显然,上述问题是一个有约束的二次规划问题,用现有的方法不难求解,此处从略。

设电力交易与调度中心进行阻塞管理之后得到的各发电商新的出力 \tilde{q}_i 和市场出

清价 \tilde{I} ，此时，对每一个厂商，其所得的利润函数为： $p(\tilde{q}_i) = \tilde{I}\tilde{q}_i - C(\tilde{q}_i)$ ，并设厂商的期望利润为： $u_i^{ref}(Q, r) = x_i \cdot (2a_i\tilde{q}_i + b_i)$ 。其中 x_i 为厂商的期望水平参数，且 $x_i > 1$ 。当负荷和市场需求弹性固定时，每个发电商将会努力采用新报价使其实际利润大于期望利润 $u_i^{ref}(Q, r)$ 。由于电力市场是一个寡头垄断的市场，发电商有理由也有能力追求更大的利润，所以这是一个合理的假设。设厂商的实际利润为 $u_i^{real}(Q, r)$ ，当 $u_i^{real} \geq u_i^{ref}$ 时，环境反馈给学习自动机信号 $R(t) = 0$ ，当 $u_i^{real} < u_i^{ref}$ 时，反馈信号 $R(t) = 1$ 。学习自动机基于反馈信号，修改自己下一轮的行动选择概率，产生更有利于发电商的投标策略。

5.4 本章小结

由于电力市场是一个更接近于寡头垄断的市场，发电商有理由也有能力追求更大的利润。但发电商在追求更大利润的同时，一方面需要考虑网络约束对其竞价策略的影响，另一方面也要考虑发电商之间行为的相互作用。本章在这种思想的基础上，把网络学习自动机方法引入电力市场研究，建立了网络约束条件下基于学习自动机的发电商竞价策略模型。作为一个初步的研究，本章提出的模型具有连续性，即发电商在不断的投标、学习和修改策略的过程中确定他们的一组最优报价策略。但值得注意的是，网络约束的存在将导致电力市场的分割，此时对每一个区域电力市场仍然使用同一个统一出清价，是否合理？另外，由于网络约束的存在，使得那些生产成本低、愿意多发电的厂商不能多发电，如何对他们进行补偿？而对于那些成本高的发电商，由于其优越的地理位置不得不让他们参与发电计划，此时如何抑制他们报高价？这些都将是下一步的研究工作。

6 全文总结

6.1 本文的主要研究工作

国内电力市场的产生是中国改革开放的必然结果，其本质是引入公平竞争机制，它既是一次体制改革，又是一次技术飞跃。它将对调度、运行、计划、自动化、规划和用户等方面的一系列重大变革。随着电力企业公司制改组、商业化运营、法制化管理的不断推进和电力行政管理职能移交地方政府，政企分开、厂网分开、网配分开、配售分开等改革举措的逐步实施，电力市场化进程日益加快。在中国加入 WTO 后，电力工业迫于多方面压力必将是中国最后一个打破垄断的行业。为此，应充分开展理论研究、做好规约准备，建立模拟系统，优化中国实现电力市场的历史过渡。

本文顺应这种潮流，对电力市场竞价行为进行了分析，提出了基于爬坡约束的多时段竞价模型和基于学习自动机的发电商最优竞价策略模型。本文的主要工作及研究成果如下：

1) 对我国电力市场改革现状进行了概括和总结，对电力市场规则进行了扼要的阐述，并对我国电力市场发展前景进行了分析；

2) 对电力市场的竞价规则进行了综述和归纳，对竞价数学模型进行了完整的描述和分析，并为今后的研究方向打下铺垫。

3) 针对电力市场竞价整体解决困难的问题，采用组合和分配分步骤的方法，以电网统一边际成本结算下的购电费用最低为目标函数，以电网功率平衡、发电容量限制和爬坡速度限制为约束条件，建立多时段的统一出清价的定价模型。

4) 以上述模型为基础，从供应函数的角度，通过相同数据的模拟计算，分析比较以下两种情况：(1) 单供应函数时，考虑爬坡约束和不考虑爬坡约束对统一出清价的影响。(2) 多供应函数时，与单供应函数比较对市场力影响。

5) 对学习自动机的原理进行了详细的描述，并把学习自动机引入电力市场。

6) 充分考虑网络约束对发电商竞价策略的影响，建立了网络约束条件下基于学习自动机的发电商竞价策略模型，并通过算例分析，证明了该模型的有效性和可行性。

6.2 本文的研究发展前景展望

电力市场是一个既具有社会经济学特征,也具有极强的物理背景的大规模复杂系统。面对这样的复杂系统,经典的研究方法显得力不从心。为此,文献^[53]力图突破经典方法的瓶颈,基于市场经济规律,结合电力生产、交易和电力系统运行的特点,建立了电力市场的框架模型,倡导用实验电力市场方法探索电力市场和电力系统的内在规律。我们认为这种解题思路具有重要的指导意义。

科学发展正处于一个新的转折点,其突出标志之一就是复杂性科学的兴起。复杂性科学主要研究复杂系统与复杂性。尽管目前它仍处在萌芽和发展形成阶段,但已引起了科学界的广泛重视。复杂性科学有三个主要特点:(1)研究对象是复杂系统;(2)研究方法是定性判断与定量计算相结合,微观分析与宏观分析相结合,还原论与整体论相结合,科学推理与哲学思辩相结合;(3)研究深度不限于对客观事物的描述,而是着重于揭示客观事物构成的原因及其演化的历程,并力图尽可能准确地预测其未来的发展。现代科学越来越要求人们从整体思维的角度去观察和分析问题。因此,把复杂性科学应用于电力市场,将会极大的促进电力市场的发展和完善。本文正是遵循这一规则进行研究工作的。作为一个初步性的研究,本文提出的模型主要着眼于电力市场的上层研究,具有一般的规律性,要与实际电力市场相结合还有待进一步的研究,而且具体的仿真程序还有待开发。同时本文对发电公司竞价策略的优化分析还只停留在理论上,要与实际电力市场相结合还有待进一步的研究。最后需要指出的是网络学习自动机在电力系统中的应用有着广阔的前景,但目前的应用还处于初期阶段,还需要大量的研究工作要做。

致 谢

时光飞逝，转眼三年的研究生生涯即将结束。三年来，在众多老师和同学的关怀和帮助之下，我顺利完成了硕士阶段的学习，在此我谨向他们表示最真挚最衷心的感谢。

首先，感谢我的导师周晓阳教授三年来的悉心教导和谆谆教诲，他不但在大的方面高屋建瓴，而且在具体细节上精益求精。周老师渊博的学识、活跃的学术思想、实事求是的工作作风、严谨的治学态度、积极探索的科学精神、真诚待人的风范和乐观豁达的性格将成为我终生收益的宝贵财富，并时时激励我在今后的工作中不懈努力。本文的顺利完成得益于周老师提供的便利条件，也跟周老师的耐心审阅分不开的。在此谨对周老师的辛勤培养和关心表示崇高的敬意和衷心的感谢！

其次，感谢数学系所有老师对我的关心和支持。

再次，感谢王刃、刘建辉、董秀明、冯丽等，她们的发言以及与她们的交流使我受益匪浅。

接着，感谢审稿老师在百忙之中审阅我的论文。

最后，感谢我的父母和家人，是他们无私的爱，时刻激励着我，让我奋发向上。

谨以此文献给所有关心着作者成长的人们！

参考文献

- [1] 王锡凡,王秀丽,陈皓勇.电力市场基础.西安:西安交通大学出版社,2003.
- [2] Hyde M. Merrill.Reginal Transmission Organization: FERC Order2000, IEEE Engineering Review Vol.20 No.7 July 2000.
- [3] 于尔铿,韩放,谢开等.电力市场.北京:中国电力出版社,1998.
- [4] 于尔铿,周京阳,吴玉生.发电竞价算法(一)排队法.电力系统自动化,2001,25(4):16~19.
- [5] 于尔铿,周京阳,吴玉生等.发电竞价算法(二)等报价法.电力系统自动化,2001,25(5):10~13.
- [6] 于尔铿,周京阳,王功涛等.发电竞价算法(三)动态规划法.电力系统自动化,2001,25(6):19~22.
- [7] 周京阳,吴玉生,王功涛等.发电竞价算法(四)网络流规划法.电力系统自动化,2001,25(7):23~26.
- [8] 王功涛,于尔铿,周京阳等.发电竞价算法(五)线性规划法.电力系统自动化,2001,25(8):20~23.
- [9] Madrigal M, Quintana V H. Existence and Determination of Competitive Equilibrium in Unit Commitment Power Pool Auctions: Price Setting and Scheduling Alternatives. IEEE Trans on Power Systems,2001,16(3):380~388.
- [10] 曾鸣,孙昕,张启平.电力市场交易与电价理论及其应用.中国电力出版社,2003.
- [11] 雷兵,王秀丽,王锡凡.独立发电商在日前市场的竞价策略分析.电力系统自动化,2002,25(11):8~14.
- [12] 耿建,王锡凡,陈皓勇,等发电市场的迭代竞价机制.电力系统自动化,2002,26(9):1~6.
- [13] Lai S Y,Baldick R.Unit Commitment with Ramp Multipliers.IEEE Trans on Power Systems,1999,14(1):58~64.
- [14] 于尔铿,周京阳,吴玉生.发电报价曲线研究.电力系统自动化,2001,25(2):23~26.
- [15] Schweppe F C, Caramanis M C, Tabors R D. Spot Pricing of Electricity. Boston:

华中科技大学硕士学位论文

Kluwer Academic Publishers,1988.

- [16] Chao H,Peck S. A Market Mechanism for Electric Power Transmission. *Journal of Regulatory Economics*,1996,8(3):25 ~ 29.
- [17] 赵会茹,曹景山.上网电价确定方法的研究.现代电力,1999,16(2):71 ~ 77.
- [18] 谭忠富,胡威,练笔占.论我国上网电价的计算模式和改革思路.现代电力,2000,17(2):95 ~ 102.
- [19] Zhang Daoyuan, Wang Yajun. Optimization Based Bidding Strategies in the Deregulated Market. *IEEE Trans on Power Systems*, 2000,15(3):981~986.
- [20] Hao Shangyou. A Study of Basic Bidding Strategy in Clearing Pricing Auctions.*IEEE Trans on Power Systems*,2000,15(2):975~981.
- [21] Wen Fushuan, David A.K. Optimal Bidding Strategies and Modeling of Imperfect Information Among Competitive Generation. *IEEE Trans on Power Systems*.2001,16(1):15~22.
- [22] 刁勤华,林济铿,倪以信等.博弈论及其在电力市场中的应用.电力系统自动化,2001,25(1):19 ~ 23.
- [23] Wen F S, David A K. Oligopoly Electricity Market Production under Incomplete Information. *IEEE Power Engineering Review*, 2001,21(4):58 ~ 62.
- [24] Lamont JW, Rajan S. Strategic Bidding in an Energy Brokerage.*IEEE Trans on Power Systems*,1997,12(4):1729 ~ 1733.
- [25] Shrestha G B,Kai Song, Goel L. Strategic Bidding for Minimum Power Output in the Competitive Power Market.*IEEE Trans on Power Systems*,2001,16(4):813 ~ 819.
- [26] Elia E, Maiorano A,Song Y H. Novel Methodology for Simulation Studies Of Strategic Behavior of Electricity Producers.*IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*.2000,4:2234 ~ 2241.
- [27] Ferrero R W, Rivera J F. Application of Games with Incomplete Information for Pricing Electricity in Deregulated Power Pools. *IEEE Trans on Power Systems*,1998,13(1):184 ~ 190.
- [28] 武智勇,康重庆,夏清等.基于博弈论的发电商报价策略.电力系统自动化,2002,26(9):7 ~ 11.

华中科技大学硕士学位论文

- [29] 尚金成,黄永皓,张维存.一种基于博弈论的发电商竞价策略模型与算法.电力系统自动化,2002,26(9):12 ~ 15.
- [30] 曾次玲,张步涵.浅析发电公司的竞价策略.电网技术,2002,26(5):49 ~ 53.
- [31] 郭家春,何光宇,王稹,等.发电公司报价决策行为的分析.电力系统自动化,2002,26(5):5 ~ 8.
- [32] Song Haili,Liu C C. Optimal Electricity Supply Bidding by Markov Decision Process.IEEE Trans on Power Systems,2000,15(2):618 ~ 624.
- [33] Hong Y Y,Tsai S W. Bidding Strategy Based on Artificial Intelligence for a Competitive Electric Market.IEEE Proc-GenerTransm Distrib, 2001, 148(2):159 ~ 164.
- [34] Guan Xiaohong,Ho Yuchi,Lai Fei.An Ordinal Optimization Based Bidding Strategy for Electric Power Suppliers in the Daily Energy Market.IEEE Trans on Power Systems,2001,16(4):788 ~ 798.
- [35] 马莉,文福拴,David A K.采用分段报价规则的竞价策略初探.电力系统自动化,2002,26(9):16 ~ 19.
- [36] 江健健,康重庆,夏清等.一种新的边际电价制定体系.电力系统自动化,2001,25(22):10 ~ 14.
- [37] Bunn D W,Oliverim F S.Agent-based simulation:an application to the new electricity trading arrangements of England and Wales.IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2001,5(5):493 ~ 503.
- [38] 李晓刚,言茂松,谢贤亚.三种定价方法对发电厂商价策略的诱导机理.电力系统自动化,2003,27(5):20 ~ 25.
- [39] 段刚,王心丰,白玮等.抑制电价飞升的系统边际价格与报价价格混合拍卖机制.电力系统自动化,2002,26(9):30 ~ 35.
- [40] 言茂松.实用当量电价体系及相关制度设计(二)发电上网的实用当量电价法及其市场特性.电力系统自动化,2003,27(18):1 ~ 9.
- [41] 余志文,郭志忠,于尔铿,赵慧.电力市场竞价算法研究综述.华中电力大学学报.2001,25(1):12 ~ 16.

华中科技大学硕士学位论文

- [42] 于尔铿,周京阳,张学松.电力市场竞价模型与原理.电力系统自动化,2000,25(1):24~27.
- [43] David W penn. Deregulation Mythmaking Aside,the Answer is Market Structure.The Electricity Journal,2000,13(5):50~56.
- [44] 李涛,蒋传文,候志俭.发电侧电力市场的成本报价模型.水电能源科学,2001,19(9):20~23.
- [45] 袁辉,武亚光,于尔铿.电力市场爬坡约束问题的一种实用算法.电力系统自动化,2001,25(7):17~19.
- [46] 周莉萍,黄海波.电力市场的市场力研究评述.技术经济与管理研究,2004,25(2):48~50.
- [47] Newbery D M. Power Markets and Market Power. Energy. 1995,16:39~66.
- [48] 韩学山,柳焯.考虑机组爬坡速度和网络安全约束的经济调度解耦算法.电力系统自动化,2002,26(13):32~37.
- [49] 张伯明,陈寿孙.高等电力网络分析.北京:清华大学出版社,1996.
- [50] 陶仁骥.自动机引论.北京:科学出版社,1986.
- [51] 韩景红,秦世引.学习自动机的原理及其应用.技术报告.北京:北京工业大学,1999.
- [52] 顾国庆.自动机网络复杂系统的模拟研究.自然杂志,1997,19(增刊).
- [53] 薛禹胜.电力市场稳定性与电力系统稳定性的相互影响.电力系统自动化,2002,26(21):1~61.

附录 1 攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 胡涛, 周晓阳. 基于爬坡约束条件下的多时段竞价模型. 应用数学, 2005, vol18(增): 136 ~ 140.

作者：[胡涛](#)
 学位授予单位：[华中科技大学](#)

相似文献(10条)

1. 学位论文 [冯丽](#) 电力市场竞价策略的博弈学习研究 2006

近年来,世界上许多国家的电力工业都开展了一场解除管制、引入竞争的市场化体制改革,因此与电力市场相关的理论、技术等问题的研究也就随之成为了一个重要研究领域。其中,将博弈理论应用于电力市场研究是电力市场理论研究领域中的重要方向之一。

本文首先概述了电力市场的定义和特点,对电力市场的交易方式和发展模式进行了详细的说明,并介绍了国内外电力市场的发展历程和现状。在第二章中简单介绍了博弈理论,对现有文献中博弈论应用于发电商竞价研究的成果进行了阐述,并在此基础上提出了将要研究的内容和研究的意义。之后详细介绍了古诺调节和虚拟行动两种博弈方法,又基于实际引入一种新的学习方法:价格逼近学习方法。最后采用IEEE30成本参数(6厂商)作为实验案例,基于古诺调节和虚拟行动及价格逼近学习方法对发电商竞价方法进行研究和演示了电力市场出清价格的演化状态。据此研究发电商的策略、利润,由此对比了古诺调节和虚拟行动两种博弈学习模型,发现它们在均衡价格、价格调整过程、厂商持留容量倾向均有着显著差异。同时讨论了价格调整过程对市场的影响,在这些情形下价格序列可能会剧烈波动,因而对市场造成不可忽视的冲击,这些在文献中鲜有讨论。而在基于价格逼近学习方法的仿真实验中,发现发电商的利润却会因为出错而增加。由此得出一些有益的结论。如:在近似寡头垄断的电力市场中,发电商不采用边际成本报价的话会获得超额利润,从而可能导致市场的不稳定。而这些结论对防范电力市场的风险有一定的意义。

2. 期刊论文 [陶春华](#), [马光文](#), [涂扬举](#), [唐明](#), [过夏明](#), [TAO Chun-hua](#), [MA Guang-wen](#), [TU Yang-ju](#), [TANG Ming](#), [GUO Xia-ming](#) 主电力市场和旋备用市场联合竞价策略 - 电力系统及其自动化学报 2006, 18 (6)

针对目前发电侧电力市场环境发电商间日益激烈的竞争,介绍了一种发电商根据竞争对手竞价历史数据优化主电力市场和旋备用市场联合竞价策略的方法。该方法首先对竞争对手的历史数据进行分析并确定其概率密度分布,然后用蒙特卡洛对竞争对手竞价策略进行抽样,最后对各抽样结果采用退火遗传算法优化竞价策略,优化结果的期望即可作为发电商的竞价策略。文中给出由六个发电商组成的市场模拟算例,计算结果表明该方法是可行的。

3. 学位论文 [聂中](#) 关于电力市场下发电公司竞价策略的研究 2000

该论文中从研究发电公司的竞价理论出发,结合经济学的基础理论知识,对发电公司进行了的成本分析,盈亏分析;针对发电公司所处的垄断或完全竞争市场,分别提出了他们的单时段和多时段的报价方式;通过对中国特色的电力市场运行数据的分析,得到了我国电力市场模式下系统边际电价的一些特点,从而有利于进行边际电价的预测和成为建立收入最大这个目标函数的理论依据;该文也特点分析了现行情况下山东和浙江的运营模式,提出了相应的竞价策略,并对理想情况下的竞价策略也加以了讨论,计算出了多时段情况下的最佳上报发电量。另外该文对电力市场情况下发电公司的风险规避也加以了论述。

4. 期刊论文 [陈星莺](#), [谢俊](#) 计及风险的输配分离电力市场供电公司最优竞价策略 - 电力系统自动化 2005, 29 (1)

供电公司采取竞价策略时面临着一定的风险,这种风险来自于联营体下网电量不足而造成对终端用户售电收入的大幅减少,或者联营体下网电量过多使得供电公司向联营体付出不必要的高额购电费用。针对基于联营体的输配分离电力市场,在假设的联营体现货交易规则的前提下,构造了计及风险的供电公司最优竞价策略的模型框架,给出了直接优化方法对模型进行求解。最后,以有3家供电公司、3家大用户、3家发电公司参与的现货市场为例,用仿真结果数据说明了所提出的供电公司竞价策略模型的基本特征。

5. 学位论文 [曾次玲](#) 电力市场中竞价策略及相关问题研究 2002

该文从理论和实际两方面对Pool模式中发电公司利用市场势力竞价的情况进行研究,并取得了一些成果。(1)基于Pool模式,推导获得了完全竞争市场中发电公司的优化竞价策略。对垄断竞争市场中发电公司利用市场势力竞价的情况进行了深入研究,成功地解释了电力市场中所出现的发电公司利用市场势力抬高电价的现象,并利用澳大利亚电力市场的数据对这一现象进行了分析。(2)在电力消费者没能充分参与市场之前,市场势力仍然是一个很严重的问题。该文分别对HHI、Lerner指数、Cournot模型的优缺点进行了分析,指出HHI、Cournot模型的不足之处,并提出了四种市场势力和平抑措施。(3)指出了电力市场运行模拟的重要性,并采用Cornell大学电力系统工程研究中心(PserC)开发的Power Web软件平台,对多时段发电竞价问题进行了模拟,实验证明,在Pool模式中,当市场处于安全竞争状态时,发电公司按边际成本报价可以使发电商获利最大且市场效率最大。

6. 会议论文 [陈星莺](#), [谢俊](#) 计及风险的输电网开放电力市场供电公司最优竞价策略 2004

在输电网开放的电力市场环境下,供电公司将参与到市场竞争中来。供电公司在采取竞价策略时面临着一定的风险,这种风险来自于下网电量不足而造成供电公司对最终用户售电收入的大幅减少。针对基于联营体的输电网开放电力市场,在本文假设的联营体现货交易规则的前提下,构造了计及风险的供电公司最优竞价策略的模型框架,采用直接优化方法对模型进行求解。最后,以有3家供电公司、3家大用户、3家发电公司参与的现货市场进行仿真,结果表明了本文所提出的供电公司竞价策略模型的基本特征。

7. 学位论文 [郭新杰](#) 电力市场中发电厂竞价策略的研究 2003

电力市场化是当今电力工业发展的必然趋势,它引起了电力工业产权结构的变革,同时引发了一系列新的技术问题。本文针对电力市场中的发电商竞价策略问题进行了研究,首先介绍了电力日前交易市场的运作机制,然后讨论了三种发电商竞价的策略和一种基于博弈论的竞价方法,即把竞价问题看成是竞价者和市场之间的零和二人混合对策问题来制定竞价方案的方法,给出了竞价方案并对其进行了仿真分析,指出了发电厂应根据自己成本来进行竞价。接下来讨论了成本曲线和竞价曲线,分析了成本曲线与电厂的一些基本设备如锅炉、汽机运行效率之间的关系,以及怎样根据成本曲线来构筑报价曲线,分析了发电厂竞价的几种曲线及其与成本曲线及其他相关因素的关系。基于上面对成本的分析,第五章用概率论工具对电力市场中发电商的基本竞价行为进行了分析,指出了发电商不会总是根据自己的成本报价的原因,揭示了发电厂一定会根据自己在边际价的几率大小而在自己的成本上加上一一定的屏蔽值,所加屏蔽值的大小可以从所有竞标者的成本分布、市场需求、和竞标者人数计算出来。

8. 期刊论文 [刘吉来](#) 一种有效的电力市场竞价策略 - 商场现代化 2009, "" (9)

在电力市场中运作中,电厂的报价反映了电厂的运作成本和市场需求信息,准确的预测边际电价信息,对电力供应商的竞价决策有重要意义。应用基于模糊聚类(FCM)和关节控制器神经网络(CMAC)的电力市场竞价策略,可以精确预测边际电价和电厂竞价电价,以使发电厂获得更多的中标机会。通过澳大利亚昆士兰州电力市场的数据作为计算实例进行预测,预测结果表明:输出稳定性好、计算速度快、预测精度较高。

9. 学位论文 [廖家平](#) 电力市场的博弈论研究及决策支持系统的实现 2006

电力工业从垄断运营走向市场竞争已在世界范围内形成一种趋势。我国的电力市场已初步建立并逐步得到推广。在电力市场环境下,发电厂商作为电力商品的提供者,必然要按照市场的规则参与发电竞争。对于发电厂商来说,要想在竞争中处于不败之地,在很大程度上取决于采取何种竞价策略。本文致力于发电厂商在电力市场环境下各种竞价策略的研究,特别是博弈论在电力市场中的应用研究,使之在决策支持系统中得以实现。取得了一定成果。

发电商作为电力市场中的一个重要组成部分,在实际运营中,其总是期望采取最优的竞价策略以满足其自身的利益的最大化。本文从研究基于边际电价预测的竞价策略问题入手,此竞价策略的难点在于对边际电价的预测。文中采用了BP神经网络学习算法来预测边际电价,并通过大量数据进行了训练和预测分析,表明该预测模型具有良好的预测结果。同时给出了基于SMP预测的报价模型及竞价方法,求解了一定条件下发电商的最优报价策略。

作为一个竞价模型,其也可以看作是一个博弈模型。本文进行了博弈论在电力市场中的研究。从基于博弈论的竞价策略引入经济学上的古诺模型,假定发电厂生产成本的不完全信息,用不完全信息静态博弈的方法分析了不对称的不完全信息和对称的不完全信息两种情况下的发电商竞价策略问题。

本文在对发电厂商竞价策略的各种理论研究的基础上,实现了在发电报价决策系统中的应用。该系统主要包括机组参数查询、历史交易查询、电价成本分析、报价决策等模块。其目的是为了帮助发电厂决策人员和报价人员在电力市场中进行合理地报价。

10. 期刊论文 [祖向荣](#), [徐燕](#), [王素琴](#) 电力市场发电公司竞价策略仿真模型 - 华北电力大学学报 2005, 32 (1)

分析了发电公司在电能日交易市场,通过对市场历史信息的学习,优化竞价策略,最大化日收益行为,并应用竞价策略增强学习算法对发电公司的竞价行为建模,同时给出系统与市场主体管理对象在考虑发电机组物理与经济约束、电网约束的条件下,最小化电网购电费用,优化发电顺序,确定市场交易清算价格的行为模型以及用户负荷需求模型。最后应用Java技术建立基于Internet的电力市场仿真环境。

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_D047244.aspx

授权使用: 上海海事大学(wf1shyxy), 授权号: e0b99ea6-adf2-4eea-b220-9de4012979b9

下载时间: 2010年9月1日