

现代电力市场

及其当量电价

言茂松 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

参 考 文 献

现代电力市场 及其当量电价

言茂松 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书指出了西方电力市场的三大教训,并提出有别于传统电力市场的现代电力市场三大原则。要求现代电力市场必须直面寡头和短缺的市场格局,在寡头和短缺情况下,电价机制也要像完全竞争市场那样能诱导发电商自动按全额容量和真实电量成本报价,既要保持市场的效率和稳健,实现成本发现和优化功能,又要给予电力公司以充分的回报,实现电力工业高效、稳健的可持续发展等。本书不仅提出问题,而且发展了一套解决问题的科学理论和方法——当量电价。在边际成本理论的基础上,引入政府给出的“参考系”,实现容量成本的自动补偿,还引入了围绕“参考系”的双向调控,实现无条件的“囚徒困境式”的博弈均衡,从而有了完全不同于传统电力市场的优良系统特性,实现了现代电力市场的三大原则,而这在传统电力市场中是不可想象的。本书还结合电力市场运行的诸多特点,发展了水电、备用、AGC(自动发电控制)、输电以及输电阻塞管理等一系列当量电价方法及其数学模型,并求取其均衡的数值解,从而使当量电价形成了一个初步的定价体系。

该书的读者对象为有关政府(发改委、电监会、能源局等)官员,电力公司发、输、配电各环节的运行管理人员,电力市场的研究、规划、设计、开发、运作人员,大、中用户用电管理人员,电力系统及其自动化、电力经济及其管理的科研工作者、大专院校相关专业师生等。

图书在版编目(CIP)数据

现代电力市场及其当量电价/言茂松著. —北京: 中国电力出版社, 2008
ISBN 978-7-5083-7717-9

I. 现… II. 言… III. ①电力工业-市场学②电力价格
IV. F407.615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 114140 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

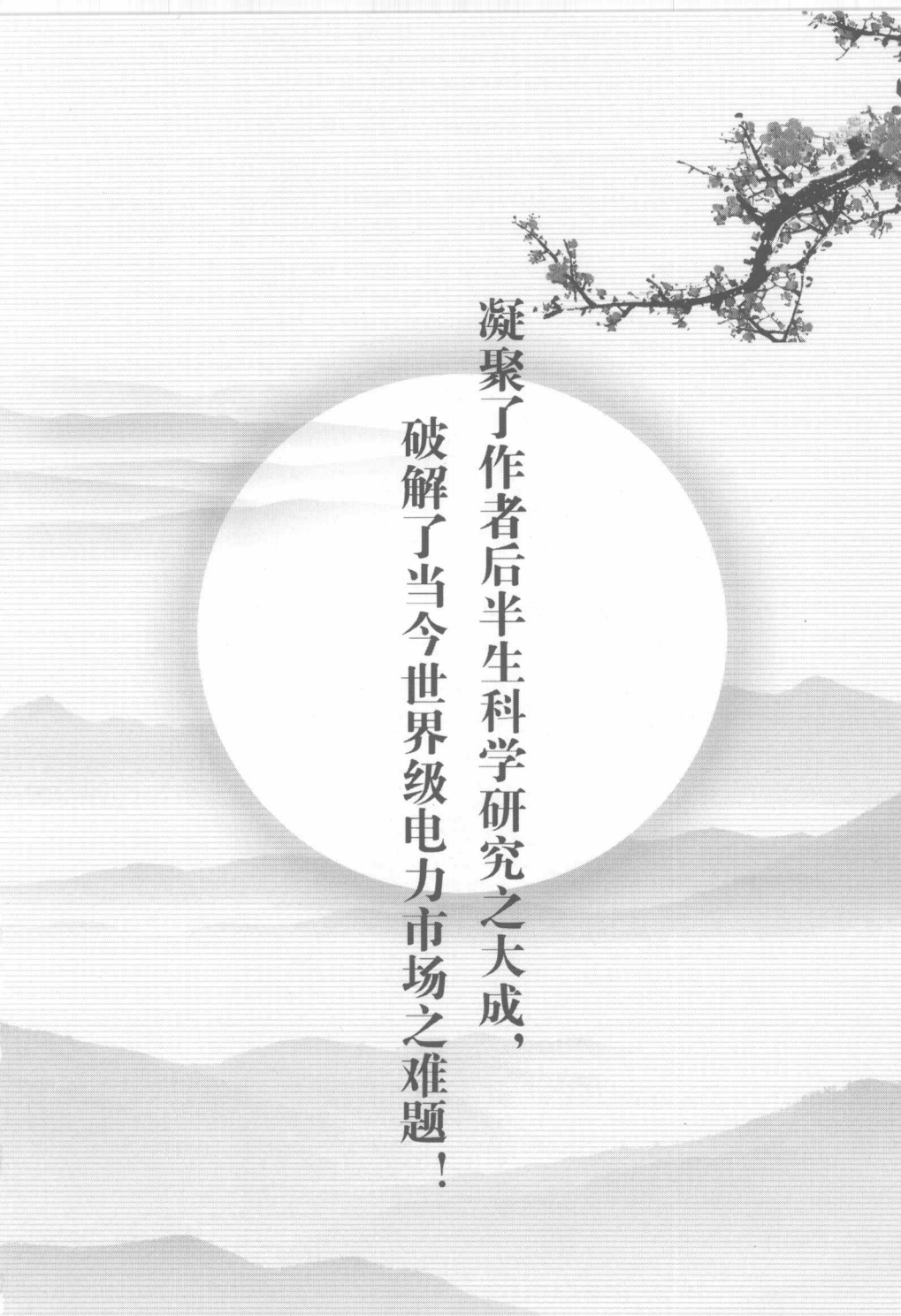
*

2008 年 9 月第一版 2008 年 9 月北京第一次印刷
850 毫米×1168 毫米 大 32 开本 9.25 印张 243 千字
印数 0001—3000 册 定价 25.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



凝聚了作者后半生科学研究之大成，

破解了当今世界级电力市场之难题！



现代电力市场 及其 当量电价

前言

本书书名中的“现代电力市场”传递了一条信息：以边际成本理论为基础的传统电力市场，不能适应电力市场的特点，因为它一方面回报不足，不可持续发展，另一方面市场力又泛滥成灾，难免陷入困境，所以全球电力市场都该换代了！

本书的全名“现代电力市场及其当量电价”传递了另一条信息：如今发展了一套系统理论和方法——当量电价，使这个换代有望率先在中国起步，实现新一代的科学发展，而且前景令人鼓舞。

这话是否说大了？

作者自 1988 年立上我国电力市场的第一个国家自然科学基金项目算起，对电力市场的研究也有 20 年了。较成熟的成果是在 5 年前发表的，包括文章和一系列演讲和汇报，但仍未敢轻易动手写书。事到如今，眼看我国、乃至全球电力改革都遇到了一些麻烦，而且还不小，每次损失竟上亿人民币，甚至高达百亿美元，称其为世界难题亦不为过。透过现象看本质，它呼唤的是电力市场理论的更新换代和现代电力市场的崛起，因此是该下手写书的时候了。写完之后才感受到它的分量。很难设想，上万亿资产，并已成功拆分了的电力市场及其改革竟如此理论缺失、期盼突破，而且国外也未必就好多少。实事求是地说，此前，全球还真没有相应的研究成果。即便是像市场稳健性这一类的基本问题，国外都还没有解决，而本书却解决了这些问题。也就是说，在该领域，我们已具备解决世界性难题的水平和能力。作者在书中严肃地指出了传统电力市场的三大问题，并给出了化解这些难题的科学理论和方法，而且实现起来并不困难，有低的成本投入

和好的操作性。一个高效稳健、有序竞争、持续发展、赏罚分明、两手并用的现代电力市场必将取代困难重重、左右为难的传统电力市场，从而有了“现代电力市场”的新概念、新思路、新方法和新结果。由于该书直面新一代电力市场的全新问题，书中绝大部分内容都来自于原创。鉴于以上事实，冠以“现代电力市场”或许不为过。

而今我最大的期盼是：本成果能在我国的电力改革中应用，哪怕是部分的、初步的应用。但我深知，改电价，涉及万亿资产和国计民生，非同寻常。

感谢“国家自然科学基金委”的多次支持，包括国内唯一的电力市场国家级重点项目的支持，它使我摆脱了市场的局部利益，而有了更多的科学和公正。

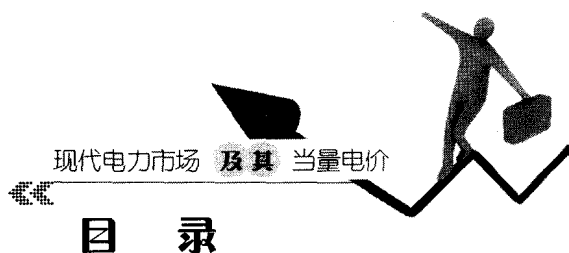
还要感谢我的研究生们，他们的学位论文部分内容已编入了本书。

书中内容或许并非十全十美，还需要改进和发展；有一些研究结果，作者感到还不太成熟，因而没有编入。这里想说的是：写完就感到，今后的事还很多、路还很长。

相信关心电力市场及其改革的读者，读了第一章和最后一章之后，不会无动于衷；或许这还只是个开始……。

言 茂 松

2008年5月1日于上海

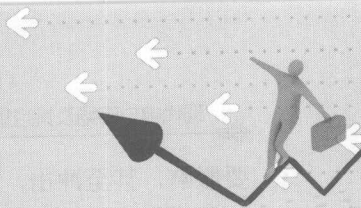


目 录

前言

第 1 章 现代电力市场的三大基本原则	1
1.1 电力市场从“全球辉煌”到“屡遭困惑”的 20 年	1
1.2 20 年来西方电力市场的若干启示	8
1.3 西方电力市场的三大教训	21
1.4 现代电力市场第一原则——市场的稳健原则	24
1.5 现代电力市场第二原则——市场的可持续发展原则	26
1.6 现代电力市场第三原则——市场的公平原则	30
1.7 本章小结	34
第 2 章 发电上网的当量电价	37
2.1 发电市场的边际成本理论及必要的预备知识	38
2.2 发电上网的当量电价法	50
2.3 当量电价的右端点原理	58
2.4 当量电价的伯川博弈市场特性分析	61
2.5 当量电价的古诺博弈市场特性分析	67
2.6 当量电价的长期市场机制	70
2.7 当量电价三纵三横的内在机制和科学原理	73
2.8 本章小结	79
第 3 章 电力市场博弈均衡特性的智能代理仿真	82
3.1 电力市场智能代理仿真的必要性和意义	83
3.2 电力市场强化学习的智能代理仿真	89
3.3 罗斯-伊雷夫 (Roth-Erev) 强化学习算法	91
3.4 一个简单的算例	95
3.5 智能代理仿真结果及其比较分析之一	98

3.6	智能代理仿真结果及其比较分析之二	114
3.7	本章小结	122
第 4 章	水电、备用、自动发电控制市场的当量电价	125
4.1	现代水电市场的当量电价	130
4.2	现代备用市场的当量电价	143
4.3	现代 AGC (自动发电控制) 市场的当量电价	160
4.4	当量电价体制下合同市场的发展	171
4.5	本章小结	180
第 5 章	现代输电市场及其阻塞管理的当量电价	184
5.1	现代输电市场及其当量电价	186
5.2	现代输电市场的阻塞管理	213
5.3	本章小结	223
第 6 章	现代电力市场的改革意义和科学发展	228
6.1	现代电力市场的改革意义	229
6.2	现代电力市场的科学发展	245
6.3	本章小结	258
附录 A	负荷损失概率 LOLP	263
附录 B	发电机组的短期强迫停运率	271
附录 C	传送分布系数的定义与计算	275
参考文献		277



第 1 章

现代电力市场的三大基本原则



1.1 电力市场从“全球辉煌”到“屡遭困惑”的 20 年

20 世纪 80 年代末到 90 年代末,西方电力市场曾经有过近 10 年的辉煌。以澳大利亚新南威尔士的太平洋电力公司公布的统计数据为例,数据显示:1988~1995 年改制的前后 7 年间,实际平均销售电价大幅下降了 26.03%,不仅使广大百姓和社会得益,而且实际平均成本降得更多,达到 32.85%,且销售量也增加了 24.65%,因此电力公司也能从中获利,债务也减少了。另一方面,其技术数据也表现出色:设备利用率提高了 41.85%,意外事故停机率却下降了 85.52%,热电效率提高 6.88%。同时人员也减少了 59%,人均生产效率提高了 3 倍,而且这类数据并非特例或个案,而是具有代表性。开放电力市场后的英国、丹麦、新西兰、北欧等国的电力公司也取得了平均电价大体下降了 1/4,而成本则大幅下降约 1/3 的类似业绩,改制的西方电力工业一改当年夕阳工业的老态,又呈现出了活力。更可贵的是,多年来在公司赢利的时候,社会也广为受益,这就不可避免地在全球掀起了电力市场化改革的浪潮,人类第一次看到了电力工业打破垄断、市场化改制的潜力。

当时我国正值推行社会主义市场经济改革并实行开放国策的初期,上述电力市场化的国际动向不可避免地也对我国产生了重

要影响，甚至冲击，我国各级政府、各级电力公司、国家和地方的各类学会等纷纷组团或派人出国访问学习，还请进来举行甚高规格的报告会、研讨会。这一国内外形势进一步推动了以市场化为导向的改革，特别是我国在 1986 年开始，并在 20 世纪 90 年代大力推行的、以电力投资体制改革为核心的改革，如最初的电力投资的“拨改贷”、在上网电价中实行“新电新价、老电老价”，在终端销售电价中征收“电力建设基金”（俗称两分钱基金）、直到广泛推行“集资办电”、“省为实体”等等一系列措施。在这一系列政策措施的导向下，不仅大大促进了我国电力工业的发展，而且也在体制改革层面上迈出了电力资产多元化的、最初也是最重要的一步，从此我国开始走上了电力市场化改革之路。10 年后的 1996 年成立国家电力公司，并和电力部两块牌子并列，到 1998 年，在东南亚金融危机大背景下，经济发展减速，居然改变了我国近 50 年来的电力短缺，并首次出现了全国性的富裕，同年撤销了电力部。这一段历史表明，我国的电力改革已经起步，并取得了显著成果，其势不可挡。

但是，就在我国迈上改革之路的 1998 年及以后，西方电力市场却陆续出了问题，主要表现为电力投资不足和容量短缺，电价反升且不确定性增加，甚至威胁到电力系统的安全，这集中表现为 2000 年并持续了近 10 个月的美国加州电力危机。当时的加州电力市场没有设立合同市场，发电市场的交易几乎全部在日前的和实时的市场中完成。加州电力市场的日前市场采用按时段（半小时）报价，并将所报的容量按其报价由低到高排序，直到与该时段的平均负荷平衡，报价更高的容量则在该时段不能上网而出局，而最后与负荷平衡的容量报价称作边际电价，并且以此边际电价对所有排上了序、上了网的容量统一出清和结算，从而被称作“优良排序，统一出清方法”，或简称为“统一出清法”，这是边际成本理论的一类典型应用，直到现在还广为采用。图 1-1 给出了加州电力市场 1998~2000 年 3 年间的月平均上网电价记录，还给出了相应的市场力指标，即发电商能够操纵市场电价的

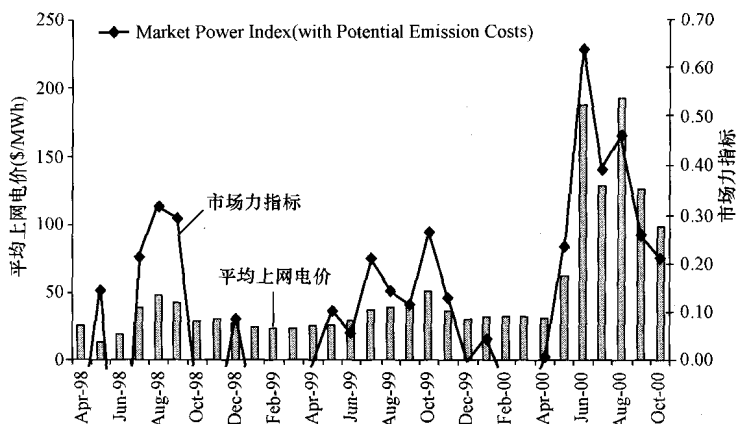


图 1-1 加州电力市场 1998~2000 年的月平均上网电价和市场力指标

“潜在能力”指标。图中显示，第 1 年在开放市场的初期，虽然市场力指标较高，但因初入市谨慎，电价仅为 $0.02 \sim 0.05$ $\$/\text{kWh}$ ，还比较正常，但到第 3 年，发电商的市场力指标不仅大增，并且放肆地操控电价，致使月平均上网电价大幅飞升到 $0.12 \sim 0.18$ $\$/\text{kWh}$ ，短时电价甚至曾达到过 10 $\$/\text{kWh}$ ；个别时段甚至曾达到价格上限，达 99 $\$/\text{kWh}$ 。加州电力危机的直接表现为发电商哄抬电价，包括持留容量不报，人为加剧或造成电力短缺，使市场电价进一步被发电商操纵。据加州政府估计，半年内发电商暴利达 500%，而事实上只要有 10% 的利润就可以正常吸引投资，且如此高的暴利也不能持续地正常吸引投资，因为这意味着大起大落的风险。由于终端的销售电价被州政府严加管制，导致电网公司只能高价从发电商那里买进，低价卖出，半年内直接造成 PG&E 等三大配售电公司亏损达 120 亿美元，从而引发公司的财政危机，最大的 PG&E 公司申请破产，而银行不可能放贷给濒临破产的公司，州政府只好动用紧急备用基金抢救，并加以干预，包括降低价格上限、延缓债务、批准拉闸限电等。最终导致 2001 年 1 月 12 日因容量备用率下降到 1.5% 以下而宣布为三级紧急状态；2001 年 1 月 17 日实行了二战后第一次灯火管制，拉闸限电

总电量达 10.5GWh, 后又实行了多次灯火管制。加州电力危机持续了近 10 个月才有所缓解, 随后虽然没有完全关闭电力市场, 但关闭了电力交易中心 PX, 其业务归并到电力调度中心 ISO (独立系统运行人), 并对发电商的报价予以非常严厉的限制; ABB 公司承担系统软件开发的老总们集体下课, 和交易中心 PX 一起成了替罪羊。此次电力危机还波及政治, 州政府改选时, 由于州政府有近 400 亿美元的赤字, 其中近一半赤字来自电力, 从而造成政界老手戴维州长的下台, 影星施瓦辛格的上台。这一加州电力危机不仅震惊了克林顿总统, 也震惊了世界。

概言之, 加州电力市场经历了以下曲折过程:

- (1) 基于“边际成本理论”开放电力市场;
- (2) 在市场配置下 2 年来的大体正常的运行;
- (3) 抑制了当时过度的电力投资;
- (4) 持续的抑制使电力投资萎缩;
- (5) 若干年后就出现了容量的短缺;
- (6) 供不应求后上网电价飞涨而失控;
- (7) 直到暴发电力危机;
- (8) 政府不得不出资抢救并出面干预。

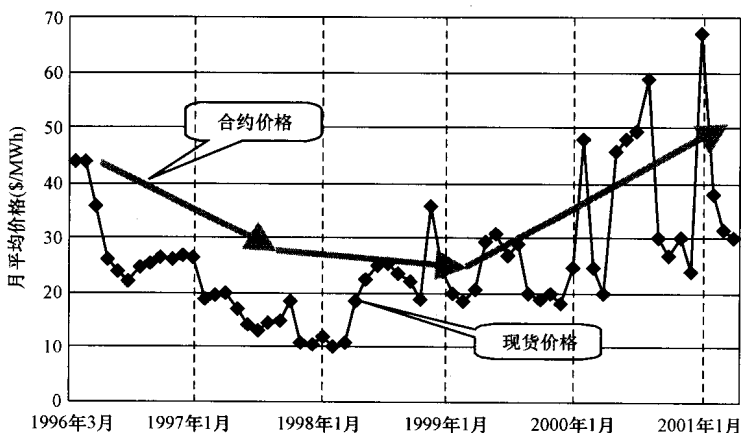


图 1-2 澳大利亚太平洋电力市场 1996~2000 年的电价记录



加州电力危机并非是个特定的孤立事件,有意思的是,西方电力市场几乎都在此时先后出了问题。再以本节一开始所述的澳大利亚太平洋电力公司公布的数据为例,如前所述,改制后的1989~1995年的6~7年间,该公司业绩辉煌,过度投资受到抑制,月平均上网电价下降,但还在正常的45\$/MWh水平,并在上下5\$/MWh小幅波动。但到1996年后情况发生了变化,如图1-2所示,电价持续下降,到1998年1月,月平均上网电价均值甚至降到了最低的10\$/MWh(即1¢/kWh),且波动幅度增加到上下10\$/MWh,甚至出现短时的0电价,此举不仅导致电力投资因抑制过了头而萎缩,而且正在运行的一些外资发电厂由于电价太低,发得多就亏得多,纷纷停产,甚至撤资。因停产、撤资过度,随后又出现了电力供应不足,因电力供不应求,1998年1月之后月平均上网电价又开始回升,到3年后的2001年1月,月平均上网电价竟又回到1995年的45\$/MWh水平并持续上涨,并在上下20\$/MWh大幅波动,这期间政府果断将当初卖掉的发电厂又买了回来,以保持供需的基本平衡,总算没有出现类似加州的危机。可见2000年前后,几乎全球电力市场大小都出了点问题,表现虽有不同,但问题的本质却都是投资不足。甚至2004年8月14日的美加大停电,虽然更多地表现为电网的安全问题,直到暴发十分激烈的系统同步稳定运行的破坏,几天就损失掉了约300亿美元。但是,如果从电力市场的角度,在若干年的跨度上来观察“8·14”大停电,输电市场竟和发电市场类似,市场化后投资逐渐萎缩,若干年后出现输电的容量不足,阻塞加剧,如果不加干预,就会危及系统安全,甚至演变到突发“8·14”这类灾难的地步。

就在西方电力市场出现问题的时候,我国以2002年国务院5号文为标志,全面启动以厂网分开、竞价上网为主要内容的电力市场化改革,其中厂网分开包括从国电公司分出有独立法人地位的五大发电公司(华能,华电,中电投,大唐,国投),以及两大电网公司(国网公司和南网公司);而竞价上网包括以东北和



华东两大电网为代表的区域电力交易市场的试点。这两个具有基础意义的试点，5 年下来虽然投入了不少人力和财力，却遭遇重大困难。这两大电网竞价上网的试点，形式上是在国家电监会的领导下，委托这两大区网公司操办，但其关键的价格和机制却始终由发改委直接审批，甚至在交易市场之外还另设国际上都没有的、由发改委直接审批并担保到机组的容量电价，其立意是消耗一次能源的电量运行调度部分放开市场，并按边际成本原理设计，而容量投资回报部分由政府管制审批并担保，简称两部制电价（请注意，完全不同于不竞价的供用电领域的两部制电价）。如果说此举的出发点是好的，半开放为的是“稳步推进”电力市场发展，可结果却不理想。按照发改委的指令，东北区域电力市场试点基本上是按照这两部制电价原则设计的，试运行的结果，不因为容量电价的审批和担保，电量市场的上网电价就会回归理性，相反，电价照样飞涨到了价格上限。实际市场的情况是：处于东北电力市场南部的辽宁省地区的发电商，先是持留部分容量不报，造成由北向南的输电通道阻塞，北部电力无法再向南部支援，使南部辽宁地区电网成了卖方市场的孤岛，然后，南部辽宁地区的发电商们默契串谋、哄抬报价，网公司不得不高价悉数收购；又由于网公司向下的销售电价被政府低价完全锁定，网公司高价买进、低价卖出，致使东北电网公司 16 天就亏损 3.2 亿元人民币，简直就是 2000 年加州电力危机的小型重演。整个过程与事先的成本核算无关，也与政府事先的容量电价的审批担保无关，而市场根本没有成本和价格发现功能，完全是一场博弈较量、即 Game，中国人算是第一次自己体验到了发电商市场力的厉害。

而另一个华东区域电力市场的试点，基本上采用西方常用的单一制电价，它本质上就是网损修正后的优良排序、统一出清。不同于东北区域电力市场，华东区域电力市场规定试运行的第 2 阶段，按报价排序只决定调电计划，而结算价格仍按原有发改委审批的计划价格结算，出发点仍然是为了“稳步推进”。这样一来，市场排序出来的边际价格对发电商没有了意义，然而机组或



者容量段按报价排序之后，能不能上网，工作位置好不好，电量能否卖得出去，就成了发电商主要、甚至是唯一的目标。应当说为了稳妥，只调电不按市场价结算的用心也是好的，但结果是：第1天平均电价是199.12元/MWh，还算好；第2天是179.81元/MWh；第3天只有42.78元/MWh，电价不断走低，直到多数发电商选报零电价！其原因就在于报价与结算无关，而只与排序有关，从而报价高了、工作位置就高，利用小时数和发电量都上不去，甚至还可能上不了网而出局，因此发电商都不敢报高价，甚至还竞相报低电价，直到零电价。显然，零电价也高兴不起来，特定的市场规则，引来了特定的市场行为和结果。中国人算是再一次领教到了发电商市场力的厉害！

进而在试运行的第3阶段：既调电、又按市场价结算。事实上华东电力市场把报价规则定得比较复杂，每个容量段一天竟要报96个电价，仅仅几天的试运行，还不足以诱导发电商轻举妄动，即便短期过得去，也不能保证中长期平安无事，随着市场条件的变化和发电商报价能力的提高，事态会进一步发展，加州电力市场是2年后才出了问题，事先没有充分的研究，谁敢担此风险？

总而言之，通过这两大区域电力市场的试点可得出：

(1) 应当承认，目前绝大多数人，特别是担当电力交易市场的规划与设计的政府和网公司，对电力市场的内在机理还很不了解，存在一个很大的未知领域，需要好好学习；至少要让更多的人领会到，电力市场只有会计学的成本核算是远远不够的，必须正视电力市场的特殊性，直面电力市场博弈行为及其均衡这一新问题。

(2) 现有的竞价上网电价体制的确存在很多问题，以上仅为问题中的某些表现，在一定条件下，甚至会严重到使电力市场不能正常运行，以致屡屡陷入困境，亟待突破与发展。这不仅仅是中国电力市场的难题，也是全球电力市场的难题，以至于有必要引入新理论和新方法，建立新一代的电力交易市场的理论基础。对于我国而言，一个基础性的好的电力交易市场如果迟迟建不起来，必将直接影响一系列后续的电力改革，毫不夸张地说，我国

甚至全球的电力改革正面临严峻挑战。

可以告慰读者，这方面我们已经有了关键性的突破和一系列的发展，它将预示着新一代电力市场的诞生。

1.2 20 年来西方电力市场的若干启示

西方电力市场发生、发展和博弈的整个过程中最让人触目惊心的是：发电商为了获取超额利润，有能力操纵市场的边际电价，危害市场安全，也就是存在危及市场安全的市场力（Market Power）问题，或者更准确地称作是电力市场的稳健性问题。但是，这 20 年的教训绝不仅止于此，为了吸取教训并有所发现、有所发展，有必要先从不同角度作必要的论述，用若干启示把问题先一步一步地展开来。

第一条启示 在传统电力市场中，经典的边际成本理论所要求的完全竞争的市场条件基本不成立，甚至接近于完全竞争的充分竞争的市场条件，在现实的电力市场中基本上也不成立，以至于在现实的电力市场中市场力广泛存在，并严重威胁市场安全，更准确地说存在严重的市场稳健性问题。

事实上，传统的电力市场理论并没有完全忽视这个问题，只不过把它作为一个市场条件来描述，即所谓的完全竞争或充分竞争的市场条件，并用一系列指标来测度，如先验的 HHI 指标和后验的勒纳指数等等。的确，传统的边际成本理论已经被证明：在满足完全竞争的条件下，任何一个市场成员都不能用其市场行为来影响市场价格，而只能是市场价格的接受者（Price taker），而不是市价格的操纵者（Price maker），这样的市场就完全没有了市场力及其危害。在实际的电力市场中，完全竞争或充分竞争的市场条件具体表现为两个内容：一是市场成员被拆分得足够小，不存在寡头势力；二是供大于求，有足够的备用，不存在“你报价再高我也得悉数收购”的被动的卖方市场局面。市场结构没寡头，供需关系不短缺，看起来是两条要求，或者是两类问题，但下面



还要指出：这两条却是相关的；而且正是这两条，对于现实的电力市场而言，却是个非常苛刻的条件，实际上难以满足；甚至可以说，完全竞争的电力市场在现实中基本上不存在！换言之，在现实的电力市场中市场力广泛存在，并严重威胁市场安全，更准确地说是存在严重的市场稳健性问题。

这条启示有必要作较多的展开。当今全球电力市场几乎被经典的边际成本理论所统治，以至于用边际成本理论构建的电力市场可以称为传统电力市场。而其中按报价排序，统一出清的方法具有代表性，它还是发电日前现货市场中广为采用的方法，因而也是最重要的有代表性的方法。日前统一出清的定价规则是：日前已知预测的某时段的（例如每半小时的或每1小时的）平均电力需求，交易中心面对该时段的负荷，按各发电商对该时段的报价，由低到高，将申报的容量排序，然后从低到高逐一计划购买，直到购买量与需求量相等为止；最后购买容量的价格为该时段的边际电价，作为市场该时段的统一出清电价，所有被购买的容量都按照这统一出清电价支付。这种定价方式是短期边际成本定价原理最简单而又直观的表述。在经典的经济学层面上（注意，仅此层面）它的相对合理性可作如下解释：

（1）要求所有成员都按全额容量和真实的电量成本报价，真实的电量成本包含2点：

- 1) 报真实的电量成本，没有虚报成分；
- 2) 报价不包括与投资有关的容量成本，而只是电量成本。

（2）高效机组的电量成本很低，可以报出很低的电价，从而有很强的竞争力，排序在前，担任基载负荷，低效机组排在后面，担任腰载或峰载负荷，这符合经济学原理。

（3）统一出清的边际电价减去其电量成本报价的差值，即为市场承认的容量电价，也就是边际成本理论中的影子容量成本。事实上，由于高效机组的科技含量高，一方面使其可变的电量成本降低而高效，另一方面为了高效，其投资的固定容量成本也就不得不高，一个低、一个高，这二者之和在该时段各个上网机组