

中国金融学

China Journal of Finance

四川大学金融研究所
复旦大学财务金融学系

2008

总第十五辑

蒋贤锋 史永东

实物期权在电力投资、管理领域的应用：理论回顾与评价

郭彦峰 黄登仕

沪深300指数期货的价格发现与波动性外溢

——基于仿真交易日数据的经验研究

戴晓凤 胡慧燕

我国国债利率期限结构与宏观因子动态相依性的实证研究

吴吉林 陶旺生

基于无套利和离散时间的我国动态利率期限结构研究

欧阳红兵 金飞

我国股票市场的价格聚集现象研究

崔光灿

银行信贷决定房地产市场的走势吗

尹向飞 陈柳钦

基于Copula的投资组合选择模型的研究

张俊生 曾亚敏

中国股票市场除息日股价行为研究

——基于投资者税负变化的分析

杨胜刚 龙张红 陈珂

中国外汇储备币种结构及其风险控制

——基于期货的CVaR模型及实证研究

CSSCI 来源集刊

中国金融学

2008 总第十五辑

四川大学金融研究所
复旦大学财务金融学系

 中国金融出版社

责任编辑：吕楠

责任校对：孙蕊

责任印制：尹小平

图书在版编目 (CIP) 数据

中国金融学 (Zhongguo Jinrongxue) 2008. 总第十五辑/四川大学金融研究所, 复旦大学财务金融学系. —北京: 中国金融出版社, 2009. 5

ISBN 978 - 7 - 5049 - 4980 - 6

I. 中… II. ①四… ②复… III. 金融—中国—文集 IV. F832 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 022168 号

出版 **中国金融出版社**

发行

社址 北京市广安门外小红庙南里 3 号

市场开发部 (010)63272190, 66070804 (传真)

网上书店 <http://www.chinafph.com> (010)63286832, 63365686 (传真)

读者服务部 (010)66070833, 82672183

邮编 100055

经销 新华书店

印刷 北京松源印刷有限公司

装订 平阳装订厂

尺寸 180 毫米 × 255 毫米

印张 9.25

字数 176 千

版次 2009 年 5 月第 1 版

印次 2009 年 5 月第 1 次印刷

印数 1—3490

定价 30.00 元

ISBN 978 - 7 - 5049 - 4980 - 6/F. 4540

如出现印装错误本社负责调换 联系电话 (010) 63263947

《中国金融学》编委会

主 编：俞 乔（清华大学） 赵昌文（四川大学）

本辑执行主编：何 佳（香港中文大学） 朱武祥（清华大学）

学术委员会委员（以姓氏音序为序）：

白重恩	清华大学经济管理学院	汤 敏	中国发展研究基金会
曹辉宁	长江商学院	唐 旭	中国人民银行反洗钱局
陈 晓	清华大学经济管理学院	汪昌云	中国人民大学财政金融学院
陈小悦	清华大学经济管理学院	王 江	麻省理工学院金融系
陈学彬	复旦大学金融研究院	王 燕	世界银行
陈志武	耶鲁大学金融系/长江商学院	吴国俊	休斯顿大学商学院
高 滨	北卡罗来纳州立大学管理学院/美林证券	吴世农	厦门大学管理学院
韩立岩	北京航空航天大学经济管理学院	夏新平	华中科技大学管理学院
何 华	雷曼兄弟证券	肖 耿	香港大学商学院/布鲁金斯学会
何 佳	香港中文大学金融财务系	谢 平	中央汇金投资有限公司
胡永泰	加州大学戴维斯分校经济系	邢晓林	新加坡国立大学经济系
黄登仕	西南交通大学经济管理学院	许成钢	英国伦敦经济学院
黄 明	上海财经大学/康奈尔大学商学院	姚 洋	北京大学中国经济研究中心
姜波克	复旦大学金融研究院	易 纲	北京大学中国经济研究中心
李稻葵	清华大学经济管理学院	曾 勇	电子科技大学管理学院
李善民	中山大学管理学院	张 处	香港科技大学金融系
林毅夫	世界银行	张 春	明尼苏达大学管理学院/中欧国际工商管理学院
刘芍佳	英国布魯尔大学经济与金融系	张俊喜	香港大学经济系与金融学院
刘锡良	西南财经大学中国金融研究中心	张维迎	北京大学光华管理学院
刘 力	北京大学光华管理学院	张 新	中国人民银行金融稳定局
刘 星	重庆大学经济管理学院	张 维	天津财经大学
陆 丁	新加坡国立大学经济系	张志超	英国杜伦大学东亚研究所
毛道维	四川大学工商管理学院	郑 璐	加州大学欧文分校
宋逢明	清华大学经济管理学院	郑祖康	复旦大学管理学院
宋 敏	香港大学经济与金融学院	周春生	长江商学院
孙 谦	厦门大学财务与会计研究院	朱武祥	清华大学经济管理学院

中国金融学

目 录

实物期权在电力投资、管理领域的应用：

理论回顾与评价 蒋贤锋 史永东 1

沪深 300 指数期货的价格发现与波动性外溢

——基于仿真交易日数据的经验研究 郭彦峰 黄登仕 32

我国国债利率期限结构与宏观因子动态相依性的

实证研究 戴晓凤 胡慧燕 45

基于无套利和离散时间的我国动态利率期限

结构研究 吴吉林 陶旺生 58

我国股票市场的价格聚集现象研究 欧阳红兵 金飞 70

银行信贷决定房地产市场的走势吗 崔光灿 88

基于 Copula 的投资组合选择模型的研究 尹向飞 陈柳钦 102

中国股票市场除息日股价行为研究

——基于投资者税负变化的分析 张俊生 曾亚敏 113

中国外汇储备币种结构及其风险控制

——基于期货的 CVaR 模型及实证研究 杨胜刚 龙张红 陈珂 130

Contents

Survey and Review of the Research on Applications of Real Options in Electricity Investment and Management	Jiang Xianfeng Shi Yongdong	1
Price Discovery and Volatility Spillovers of China 300 Index Futures: Evidence from the Simulation Transactions	Guo Yanfeng Huang Dengshi	32
Empirical Study of the Relation between Interest Rate Term Structure Model and Macro – dynamic Factors ...	Dai Xiaofeng Hu Huiyan	45
Study on Chinese Dynamic Term Structure of Interest Rate under No – arbitrage and Discrete – time Condition	Wu Jilin Tao Wangsheng	58
Study on Price Clustering Phenomena of Chinese Stock Markets	Ouyang Hongbing Jin Fei	70
Does Bank Lending Affect Real Estate Market	Cui Guangcan	88
The Research of Investment Portfolio Selection Model Based on Copula	Yin Xiangfei Chen Liuqin	102
Ex – Dividend Day Stock Price Behavior in China: A Study Based on the Change of Investor’s Taxation	Zhang Junsheng Zeng Yamin	113
Currency Composition and Risk Control of China’s Foreign Exchange Reserves: An Empirical Study of CVaR Model Based on Futures	Yang Shenggang Long Zhanghong Chen Ke	130

实物期权在电力投资、管理领域的应用：理论回顾与评价

蒋贤锋 史永东*

摘要 本文从电力市场参与者及其相互关系角度讨论发电公司、电力公司、电网公司、用户各自拥有的实物期权，梳理了发电侧、需求侧、输电侧、辅助服务领域的相关研究发展脉络及内在联系，指出电力市场现有实物期权研究的不足。

关键词 实物期权，电力投资，电力可中断合同

期权 (Financial Option)^① 在金融市场表现为金融期权，在实物市场表现为实物期权 (Real Option, Myers, 1977)。实物期权将期权思想引入一般的投资、管理等决策领域，为决策者提供更多可供选择的方案，体现出决策的“柔性” (Trigeorgis, 1996)，显示出相对于传统决策方法的优点，因此广泛应用于自然资源、研发、企业管理等领域 (Smit and Trigeorgis, 2004)。

伴随着始于 20 世纪 80 年代末至 90 年代初世界范围的电力市场化改革，实物期权思想在电力领域的应用得以凸显，其作用越来越被重视。其最直接的应用是电力项目投资、营运决策等，而将期权思想体现得淋漓尽致的则是各种可中断合同的发展，那简直是期权合约的活生生再现。此外，辅助服务等电力其他领域的决策分析也开始逐渐借鉴期权思想。

图 1 描绘了电力市场实物期权应用的脉络。其中，粗体字表示金融市场中

* 蒋贤锋 (1979 ~)，广西全州人，男，东北财经大学应用金融研究中心研究人员、人民银行金融研究所金融管理博士后，研究方向：金融工程、实物期权、实验经济学。在 *Annals of Economics and Finance*、《金融研究》等杂志发表多篇文章。www.sinavc.com, spirits77@263.net, 011-66194353 (0), 15810994760, 通讯地址：大连东北财经大学金融学院 (116025) 或北京西城区成方街 32 号人民银行研究局风险处 (100800)。

本文为第一作者博士论文《跳跃扩散过程下的实物期权及在电力投资中的应用》的一部分。两位作者感谢国家自然科学基金项目 (70801010、70671019)、第 43 批中国博士后科学基金资助 (20080430058)、中国博士后基金首批特别资助 (200801140)、教育部人文社会科学研究项目 (07JA790075)、教育部优秀人才项目 (NCET-06-0294)、辽宁省高等学校人文社会科学重点基地科学研究计划资助项目 (J05018)、辽宁省社科规划基金项目 (L07CJY054)、辽宁省教育厅 2005 年度高等学校科研项目 (05W068) 及上海财经大学现代金融研究中心 2006 年公开招标课题“国有企业股改的最佳时机、均衡对价——基于期权框架的理论和实证分析”的资助。文章结论不代表任何机构和单位的观点，文责自负。

① Option 在台湾翻译成“选择权”。笔者个人觉得这个翻译比“期权”更能反映其本质。“选择权”在投资决策、管理决策、生活决策 (譬如婚姻选择、生育决策) 等领域的应用不会让人觉得茫然。而“期权”用于是否与谁结婚的决策时，则多半让非专业人士乍一听一头雾水。不过，限于约定俗成，本文仍称之为“期权”。

存在的期权类型，粗体字下的分类是与金融期权原理类似的电力实物期权。A部分表示发电公司拥有的实物期权或投资管理的选择权。B部分表示在电力公司或电网公司和发电公司之间的实物期权，权利方既可能是发电公司，也可能是电力公司或电网公司。C部分表示在电力公司或电网公司和用户之间的实物期权，权利方既可能是用户，也可能是电力公司或电网公司。当然，各种期权的划分界限并不绝对。例如，当一些大用户和发电公司直接交易时，可中断合同就存在于发电公司和用户之间，而不是电力公司和用户之间。本文剩余部分即集中于对图1的逐层剖析，着眼于对理论发展历史的回顾和评价。

吉兴全和文福拴（2005）、张显和王锡凡（2005）、Deng 和 Oren（2006）对实物期权在电力市场的应用作了较好的回顾。尽管如此，我们的回顾与评价仍是有价值的。首先，我们按照发电公司、电力公司、电网公司和用户及其相

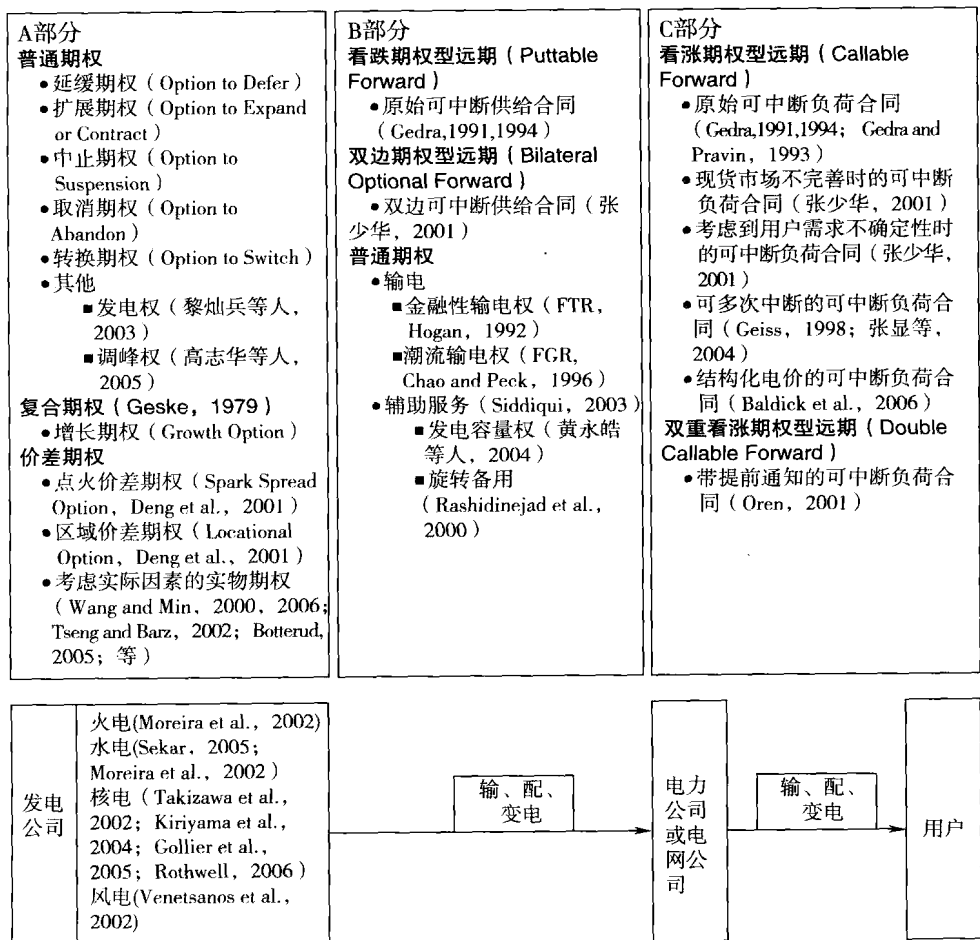


图1 电力市场中实物期权的应用输、配、变电

互关系角度考察各自及相互间的权利和义务，给出了一个清晰框架，为实际工作部门和企业提供了量身定做的基于实物期权的可供参考的投资、管理方案。譬如，发电公司可重点参考图 1 的 A 部分和下文第一节和第三节的阐述；电力公司或电网公司可重点参考图 1 的 B 部分、C 部分和下文第二节和第三节的阐述。尽管本文中的部分理论在其他各位研究者的回顾中已提及，但其中参与者的定位并不明显。

其次，本文不仅挂一漏万地回顾了历史上一些有价值的重要文献，而且注重文献和理论之间发展的内在关系。譬如，本文第一节在 Dixit 和 Pindyck (1994)、Smit 和 Trigeorgis (2004) 基础上给出实物期权的一般分析框架，接着回顾了考虑到电力市场实际因素时的实物期权分析，然后考察了针对行业特征的相关研究。本文第二节的脉络梳理则更是一目了然。以 Gedra (1991, 1994)、Gedra 和 Pravin (1993) 为基础，我们指出后来各种可中断合同对原始合同的发展之处，而其他文献回顾很少贡献如此清晰而详细的条理。

本文其他部分从市场参与者角度展开。第一节回顾并评价了发电公司方面的实物期权，主要对应于图 1 中的 A 部分。第二节分析作为售电方的电力公司管理用户需求时的实物期权策略，主要对应于图 1 中的 C 部分。第三节简要讨论了作为输电中介的电网公司和电力提供者间的实物期权，主要对应于图 1 的 B 部分。第四节考虑实物期权在电力辅助服务等其他领域的应用。最后指出电力市场现有实物期权研究的不足。

1. 实物期权在发电侧的应用

期权交易给人的第一印象是在交易所买卖各种金融期权或商品期权，这是一种投资。因此，期权思想在电力领域的最直接应用是电力项目投资，很自然的延伸是电力项目运营，它们都属于发电侧领域的应用。实物期权相关教科书中提及关于 NPV (Net Present Value, 净现值) 原则例子的频繁性足以表明其在投资决策应用中的自然性。传统的 NPV 原则以 0 为界限，给出要么立即投资、要么永不投资的两个可供选择决策方案。经实物期权修正的 NPV 原则仍以 0 为界限，但给出要么立即投资、要么永不投资、要么等待以后再考虑的三个供选择决策方案。多出来的等待以后再考虑的方案即是一种期权思想的体现，实际上是在寻找最佳投资时机。也就是说，决策者不仅可以不那么死板地在“是”(投资)或“否”(不投资)之间选择，还可以选择一种中间状态(等待再决策)，这显然要“柔韧”得多，基于实物期权的“柔性”体现出来，而这不过是一种最常见的实物期权——延迟期权 (Option to Defer, McDonald and Siegel, 1986; Majd and Pindyck, 1987)。更多的实物期权分析在下面逐步展开。我们首先在 Dixit 和 Pindyck (1994)、Smit 和 Trigeorgis (2004) 基础上给出实物期权分

析一般框架，然后回顾与评价考虑到实际因素时的研究。

1.1 电力投资、运营的实物期权分析一般框架

实物期权的类别一般有：延迟期权、扩展或紧缩期权（Option to Expand or Contract, McDonald and Siegel, 1985; Trigeorgis and Mason, 1987）、中止期权（Option to Suspension, McDonald and Siegel, 1985）、取消期权（Option to Abandon, Myers and Majd, 1990）、增长期权（Growth Option, Pindyck, 1988）和转换期权（Option to Switch, Margrabe, 1978），等等。顾名思义，每一种实物期权表明决策者拥有的执行某种决策或推迟执行决策的选择权。譬如，延迟期权指决策者可以选择目前执行决策还是等待未来再执行决策的权利。以电力投资为例，电力投资者在项目投资前拥有延迟期权，可选择立即建设电厂或推迟到未来建设。如果电厂建设已开工，电力投资者就拥有扩展或紧缩期权及中止期权，可以视市场情况变化而扩大或压缩电厂建设规模，甚至中止电厂建设。此外，电力投资者可能还拥有增长期权，面临着可带来另外投资机会的新电力项目。在原料价格急剧变动时，电力投资者还拥有转换期权，即可以选择转换电能的生产原料。

在实物期权分析前，应该弄清楚其是否存在及属于哪一类别。很显然，如果已经投资，则延迟投资的实物期权不复存在，而把中止期权当做扩展期权分析则会带来相反的结论。进一步，在确定存在及明确类别后，还要分清期权的执行属于欧式或美式。欧式的实物期权相对简单，但实际中的实物期权一般都属于美式的。以延迟期权为例，一般情况下的投资者可以在未来任何时刻执行期权从而投资，而不是必须等到未来某一固定时刻才投资。

明确实物期权性质之后的工作是采用相应的方法对其定价，分析最优执行时机^①及相关影响。通常的方法是或有权分析（Contingent Claims Analysis）和动态规划（Dynamic Programming）（Dixit and Pindyck, 1994；蒋贤锋和史永东，2007）。或有权分析要求市场是完全的，但对其中的折现率有更好的解释；动态规划不需要市场完全性，但折现率是外生的。在完全市场中，这两种方法在一定条件下是等价的。不完全市场下的实物期权分析及实际应用一般采用动态规划原理，但理论研究还要考虑决策者偏好（Henderson and Hobson, 2002；Henderson, 2005；Grenadier and Wang, 2006；Miao and Wang, 2006）。出于阐述方便的目的，本节下面的分析在完全市场中展开。

假设状态变量遵循如下随机过程：

$$dx(t) = \mu(x(t), t)dt + \sigma(x(t), t)dW(t) \quad (1)$$

^① 美式期权的最优执行时机选择比较明显，欧式期权的最优执行时机可理解为到期执行还是不执行。

其中, $W(t)$ 为标准布朗运动。则基于该状态变量的实物期权价值 $F(x, t)$ 遵循如下的偏微分方程:

$$\sigma^2(x, t)F_{xx}/2 + f(\mu(x, t))F_x - \beta F + F_t + \pi(x, t) = 0 \quad (2)$$

其中, $f(\mu(x, t))$ 在动态规划下即等于 $\mu(x, t)$, 在或有权分析下由 $\mu(x, t)$ 及与 x 完全相关资产的参数决定。 β 在动态规划下为外生折现率, 在或有权分析下是无风险收益率。 $\pi(x, t)$ 为实物期权持有者未执行期权时的收益。当实物期权是无限期美式时, 方程 (2) 不显含时间项, 即方程不包含 F_t 项。

为求解方程 (2), 必须根据现实问题给出相应的初始条件和边值条件, 这也构成了不同类别实物期权的主要区别。最常用的边值条件为价值匹配 (Value-Match) 条件和光滑粘贴 (Smooth Pasting) 条件。价值匹配条件指在最优执行时的收益与不执行时的收益相等; 光滑粘贴指在最优执行时的收益函数与不执行时的收益函数在连接处具有一定的光滑性, 一般要求一阶导数相等。

求解出实物期权价值后就可采用如下的扩展 NPV 原则决策:

$$\text{扩展 NPV1} = \text{传统 NPV} + \text{实物期权价值} \quad (3)$$

当实物期权价值为 0 时, 传统 NPV 与扩展 NPV1 相等。实际上, 传统 NPV 是实物期权即刻执行时的期权价值 (Dixit and Pindyck, 1994)。由于期权价值非负, 因此方程 (3) 中的扩展 NPV1 不比传统 NPV 小, 这表明在一般情况下等待一段时间再决策比立即决策要更好, 因此体现出实物期权的信息显示作用, 即等待信息明朗后再决策可增加预期利润或减少预期损失。相对于传统 NPV 原则, 扩展 NPV1 原则下决策门槛价格一般提高。关于传统 NPV 原则与扩展 NPV1 原则, 蒋贤铎 (2006) 针对辽宁和内蒙古东部地区提供了详细的个案分析。

方程 (3) 中的扩展 NPV1 其实反映的是垄断决策者的决策原则。当市场中其他的决策者也拥有同样决策权时, 决策者必须考虑相互之间的影响。对于同样一个实物期权, 如果某个决策者执行了, 那么别的决策者则可能失去该期权。为此, 扩展的 NPV 还必须加入决策者相互博弈的策略价值 (Smit and Trigeorgis, 2004), 即

$$\text{扩展 NPV2} = \text{传统 NPV} + \text{实物期权价值} + \text{策略价值} \quad (4)$$

策略价值的引入促进博弈理论和实物期权理论的融合, 其结晶即是期权博弈理论 (Option Game, Smit and Ankum, 1993; William, 1993; Grenadier, 1996, 1999, 2002)。策略价值一般是负值, 因此期权博弈的一般结论是: 实物期权提升决策权价值, 促使延迟决策; 但参与者相互间博弈的策略价值却减少决策权价值, 加快决策执行。

有时, 一个大的新项目建成运营可能改变市场供求关系从而改变市场价格, 执行决策不仅使其隐含的实物期权消失, 还可能导致企业已有项目价值的变动。此时, 扩展的 NPV 不仅要考虑实物期权的价值, 还要考虑这种期权执行

后可能造成的负面影响 (Keppo and Lu, 2003)。而且, 实际问题很复杂, 通常是有限期决策, 一般情况下不能采用上面的偏微分方程方法, 必须直接采用动态规划方法数值求解一个最优化决策问题。此时, 价值匹配条件和光滑粘贴条件变为约束条件, 还可能视具体情况加入其他约束条件, 譬如发电机组启动、停机限制等。下面即考虑具体的现实约束。

1.2 考虑实际因素时电力投资的实物期权分析

上述实物期权框架阐述了电力投资中的一般性“柔性”原则, 在具体应用中还要考虑很多实际限制。譬如, 在考虑中止期权时, 运行中的机组不能突然停工, 需要一段时间冷却原料; 同样地, 机组在开工前也需要一段预热时间。而在电力现货不可存储的情况下, 发展起来的电力期货市场可能在电力投资决策中起着更为重要的作用。此外, 很多电力集团经常面临着多个项目的投资, 实际投资必须服从企业的总体目标, 等等。当然, 监管政策对电力投资也产生重要影响。考虑这些实际因素丰富了电力投资的实物期权方法和研究范围。

1.2.1 运营限制下的电力投资

为了分析方便, 采用实物期权分析电力投资的研究多半暗含如下两个运营假设: (1) 零启动时间, 即当观察到有利价格变动时可立即启动机组; (2) 无开工限制和停产限制, 无开工限制类似于零启动时间, 无停产限制指当观察到不利价格变动时可立即关闭机组运营。上述两个假设离现实有差距, 导致电力项目投资的实物期权价值有偏估计。为此, Tseng 和 Barz (2002) 将一般实物期权框架扩展到允许有启动时间限制、有开工和停产限制的环境, 并研究了最大发电容量限制及存在损耗和可交易发电容量市场时的决策。由于实际问题的复杂性, 必须通过动态规划原理采用数值方法倒向求解。此时, 各因素对投资决策的影响不是显而易见的, 而是随着初始状态及其他参数估计值变化而变化。在外生价格服从几何布朗运动 (Geometric Brownian Motion, GBM) 和均值回复过程 (Mean - Reverting Process) 假设下, Tseng 和 Barz (2002) 的数值结果表明, 在特定情况下, 忽略上述现实限制会导致电力运营的期权价值高估 7% 到 11%, 从而可能改变最优投资时机, 过早投资导致在价格不利变动时的损失。

Tseng 和 Barz (2002) 的方法比较复杂, 只适于短期电力项目决策, 对时间跨度长达数年甚至数十年的长期项目决策在计算上是不可行的。为此, Deng (1999)、Deng 和 Oren (2003) 提出一种处理长期项目的相对简化方法, 并且也考虑了 GBM 和均值回复过程的假设, 表明上述运营限制的作用受发电效率的影响。发电效率越高, 运营限制作用越小。

1.2.2 基于价差期权的电力投资

与一般实物期权及金融期权不一样的是，电力实物期权的基础资产具有如下两个显著特征：（1）电力现货不可储存性决定了电力现货市场的不完全性；（2）原材料价格构成生产某些电能的主要成本，火电尤其如此。对第一个特征，Deng 等人（2001）提出用电力期货来套期保值。由于电力期货的实际交易在未来发生，因而在一定程度上解决了电力现货的不可储存性。对第二个特征，Hsu（1998）提出了点火价差期权（Spark Spread Option）来套期保值，点火价差指电能市场价格与生产成本之差，一般用于火电行业。点火价差期权指当电力价格超出燃料价格一定程度时，电厂有权利而非义务选择电力投资和生产。因此点火价差期权是一种以燃料价格为执行价格的看涨期权。进一步，Deng 等人（2001）在 Margrabe（1978）、Shimko（1994）基础上给出了基于期货市场的点火价差期权定价公式，并提出区域价差期权（Locational Spread Option）的思想和定价公式。区域价差期权指当甲地电力价格超出乙地电力价格一定程度时，乙地电厂有权利而非义务选择用本地电力和甲地电力交换。因此甲地区域价差期权是一种以乙地电力价格为执行价格、甲地电力价格为标的价格的看涨期权。

Deng 等人（2001）的点火价差期权是一次性权利。但有时发电公司可能计划未来某段时间多次建设、运营某类项目或多次购买原料，此时采用摆动期权（Swing Option）原则可能更合理。在摆动期权设计下，拥有者在未来一段时间可多次执行某种权利，执行数量可在合约规定的基本数量一定范围内波动，执行总数量及次数有限制，超出限制范围则受到处罚。Keppo（2004）给出电力摆动期权定价公式，马歆和蒋传文等人（2004）、马歆和侯志俭等人（2004）提出了发电公司应用摆动期权的具体思路。

1.2.3 相互关联的多个电力项目投资

随着技术的发展，电力能源形式越来越丰富。除了传统的火电、水电之外，风力发电、热能发电、核能发电等其他电能比重日益增加。有的电力集团或大的发电公司可能同时面临多个电力项目的投资，既要上马水电，又要投资风电。此外，随着体制和制度的许可，一般发电公司还可能参股核电厂。在市场开放、监管放松和竞争加剧的条件下，各种电力价格的相互影响逐渐加深并日益复杂。譬如，火电价格和风电价格可能是负相关的，而风电价格和核电价格却可能是正相关的。因此，现实不仅要考虑单个电力项目的投资决策，还须考虑交叉影响的多个电力项目的投资组合。此时，各个项目间的相互关系不能被忽视。Wang 和 Min（2000）从实物期权角度考虑了两个相互影响的电力项目的投资组合。进一步，Wang 和 Min（2006）考虑了多个电力项目的投资决策问题。基于外生价格服从 GBM 过程的假设，Wang 和 Min（2006）提出一种离散

的网格逼近方法 (Lattice Process) 对其中的实物期权定价。其基本思想如下: 采用一个具有上升、下降两个状态的离散过程逼近连续分布的 GBM 过程。因此, 若在 t 时刻面临 n 个电力项目, 则这 n 个项目在 $t+k$ 期的可能状态就有 $(k+1)^n$ 个。譬如, 3 个项目的状态经过 1 期后就会产生如下 $8 \left((1+1)^3 \right)$ 个, 即 (u_1, u_2, u_3) 、 (u_1, u_2, d_3) 、 (u_1, d_2, u_3) 、 (u_1, d_2, d_3) 、 (d_1, u_2, u_3) 、 (d_1, u_2, d_3) 、 (d_1, d_2, u_3) 、 (d_1, d_2, d_3) 。其中 u_i (d_i) 表示第 i 个项目经过一期后上升 (下降) 的状态。在一系列假设下, Wang 和 Min (2006) 证明面临多项目投资的实物期权价值由各变量的初始值、各项目间相关关系决定, 在实际应用中可采用倒向随机规划方法求解。在他们的三个项目仿真案例中, 当项目 1 和项目 2 的相关系数由 0.35 高估为 0.5; 并且项目 2 和项目 3 的相关系数由 -0.25 低估为 -0.7 时, 最终投资组合价格会高估 4%, 从而可能投资一些本来不应该投资的低盈利项目。

项目间关联性还有另一种表现: 已建项目足够大到影响市场供求而改变市场价格并进一步影响已有项目的盈利性。此时, 一方面新建项目带来利润增加, 另一方面市场价格下降可能导致已有项目利润下降。综合起来, 决策时不仅要考虑到其中隐含的期权价值增加, 还要考虑可能的价值损失 (Keppo and Lu, 2003), 这对大电力集团尤其重要。

吉兴全和文福拴 (2005a) 也考虑了多个电力项目的投资决策并根据 Black-Scholes (B-S) 模型提出基于遗传算法的求解方法, 但未考虑各项目间的相互影响。

1.2.4 考虑负荷不确定性及市场结构的电力投资

上述研究没有考虑负荷变化及不同市场结构对发电公司的决策影响, 这两方面在王勇等人 (2005) 的工作中得以扩展。王勇等人 (2005) 考虑到负荷的随机变化及其他发电公司装机容量随机变化情况下不同市场结构对发电公司决策的影响。第一种市场结构是单一能量市场模式, 即发电公司只能获得实际售电收益。第二种市场为容量费用模式, 即由一集中组织或机构采用一定方法确定市场容量价格, 装机容量水平由市场决定, 又称为基于价格的容量市场模式。在此种模式下, 无论发电机组是否被实际调用, 只要其可用就可获得相应的容量费用。第三种市场模式是装机容量 (ICap, Installed Capacity) 模式, 即由一集中组织或机构采用一定方法确定每个负荷服务公司 (Loading Service Entity, LSE)^① 须满足的装机容量责任要求, 每个 LSE 可通过各种途径达到所需容量要求, 一旦达不到, LSE 即会受到处罚。装机容量价格由市场决定, 因此又称为基于量的容量市场模式。后两种模式都是容量付费模式, 发电公司既可获取实际售电收益, 又可获取容量费用补偿或支付相应处罚。利用 Barraquand

^① 可以理解为发电公司。

和 Martineau (1995) 的数值方法, 王勇等人 (2005) 的案例仿真表明, 相对于单一能量市场模式, 容量费用模式和装机容量模式都可以降低最优投资时的负荷阈值。

1.2.5 考虑企业目标时的电力投资

在分析投资决策时, 必须考虑到电力企业目标, 即以社会福利最大化为目标, 还是以自身利润最大化为目标, 或者为别的目标服务。前一种目标适合于类似计划经济体制中的集中决策环境, 后一种目标适合于类似于市场经济体制的分散决策环境。Botterud 等人 (2005) 建立了这两种决策环境中电力投资的实物期权模型。与其他电力价格外生的研究不一样的是, 他们模型中的价格由供求关系内生决定, 分别是供给、需求的分段线性函数。但求解该模型仍需采用数值方法动态递归, 经济学意义不甚明确。在完全市场中, 不同目标环境下的企业决策一样。但当市场不完全或存在监管限制时, 不同目标环境下的企业决策则是两样。在具体的案例分析中, 以完全市场的集中决策环境为基准, Botterud 等人 (2005) 分别分析了不同决策目标环境下企业的最优投资和社会福利。与一般实物期权分析结论相似的是, 若投资者初始时占有一定市场份额从而具有一定的市场力 (Market Power), 则分散决策环境中最优投资时的价格门槛高于完全市场集中决策环境中的价格门槛。分散决策环境中的征税会提高最优投资价格门槛, 但容量补贴 (Capacity Payments) 政策^①则会降低该门槛。在社会福利方面, 完全市场集中决策环境下的社会福利最高, 但却以损失投资者利润为代价, 具有一定市场份额或存在价格限制或能量补贴政策分散决策环境中的社会福利较之完全市场有所下降, 但投资者却获得更高利润。

1.2.6 监管政策对电力投资的影响

在 Botterud 等人 (2005) 以企业目标为研究内容前, Teisberg (1994) 关于监管政策对电力投资影响的研究作出了有价值的贡献, 较早地将实物期权思想引进电力监管。Teisberg (1994) 考虑了相关会计准则的作用后, 发现电力企业投资的实物期权价值 (F) 遵循如下的偏微分方程:

$$\sigma^2 v^2 F_{vv}/2 + (r - \delta(v))vF_v - rF - kF_k - k = 0 \quad (5)$$

如果把 k 看成时间 t , 那么式 (5) 与每期产生现金流 $-t$ 的经典无限期实物期权的偏微分方程 (2) 非常类似。所不同的是, 这里 F_t 前面的系数不是 1 而是 $-t$ 。成本补贴和重置价值等相关会计准则由 $\delta(v)$ 和相应的边值条件体现。式 (5) 不存在显示解, 只能通过数值方法求解。在 Teisberg (1994) 的案例中, 尽管不确定性增加电力投资的实物期权价值从而增加电力投资的灵活性, 但成本补贴和重置价值准则则可能增加或减少这种灵活性。特别地, 增加

^① 给新装电力予以补贴的优惠政策。

重置成本价值可增加企业利润,从而增加项目初建时的激励,但在项目快要建成时却可能诱使企业退出投资。此外,减少成本摊销方面的在建资金补贴(Allowance for Funds Used during Construction, AFUDC)一方面导致最优建设时期加快建设进程,另一方面却导致项目利润下降。

1.3 分行业的实物期权分析

上述的研究适用于一般电力行业,在分行业的投资决策时还要考虑各自的行业特征。Sekar (2005) 比较了实物期权方法与其他方法在煤电投资中的应用。排放二氧化碳是煤电的一大特点,如何有效控制二氧化碳排放量即构成电力投资的主要内容。Sekar (2005) 显示煤电投资中二氧化碳排放选择决策具有很大灵活性,企业在实际应用中应基于具体环境考虑使用实物期权方法还是别的方法。风电则具有相对于煤电等火电的环保优势, Venetsanos 等人 (2002) 采用传统 B—S 模型分析了风电投资决策。Moreira 等人 (2004) 考虑了巴西的火电与水电互补性。尽管在巴西的电力能源中水电占绝大比重,但在一个集中最优调度 (Centralized Optimal Dispatch) 体制中,考虑到投资灵活性时,火电仍是水电的有益补充。

核电具有相对于传统电能的优点,包括更经济、环保、安全和更可靠等 (赵华, 2006), 因此在各国电力能源总供给中比重日益增加。伴随着核电能源的重要性上升,核电领域的实物期权研究也越来越多。Takizawa 等人 (2001) 按照经典的实物期权原则考虑了单个核电项目的最优投资问题。在外生核电价格和原料价格遵循 GBM 假设下, Takizawa 等人在核电期货和可交易资产构成的资产空间中对核电投资的实物期权进行定价,得出与一般实物期权结论类似的结论,即最优核电投资时刻的门槛价格高于传统 NPV 原则下的价格。Kiriyaama 和 Suzuki (2004) 从环境政策出发,考虑了核电不会排放二氧化碳而具有的相对于传统电力能源的优势,并利用实物期权原则给这种优势进行定价。Gollier 等人 (2005) 在 Arrow 和 Fischer (1947)、Dixit 和 Pindyck (1994)、Henry (1974) 基础上比较了不同的核电投资策略:一次性大规模投资或分阶段中小规模投资。在分阶段中小规模投资策略中,投资者在每次投资后都可以等待市场信息透明之后选择再投资或不投资,具有相对于一次性大规模投资的更多灵活性。因此在一般情况下,分阶段中小规模投资策略中的最优投资触发价格低于大规模投资策略中的触发价格,并可获取相对于一次性大规模投资策略的更高预期利润。Rothwell (2006) 利用 Dixit (1992) 的结果并结合回归拟合估计了得克萨斯州 (Texas) 建立一个高级沸水反应堆 (Advanced Boiling Water Reactor) 的最优触发价格。

2. 实物期权在需求侧管理的应用

由于电力事故突发性的危害及电力需求的周期性波动，电力装机容量^①通常大于平均电力负荷^②。然而，一旦突发事件发生或负荷高峰来临，仍然会出现电力供不应求的情形。此时，要么新建电厂，增加装机容量；要么削减部分用户负荷。由于电厂新建需要时间较长、成本也大，因此可能“远水解不了近渴”，或者电厂建成后负荷已恢复正常水平导致电力浪费。因此，新建电厂虽是解决之道，但其时效性有所欠缺。

相比之下，削减负荷可迅速缓解电力供需矛盾而显得更具可操作性。这种针对需求操作的措施称为需求侧管理（Demand-Sided Management, DSM）。需求侧管理的常见方法是电力公司向用户提供可中断负荷合同（Interruptible Load Contract, ILC）。可中断负荷合同与一般电力供应合同可能在合同本身支付价格上有所不同，但更重要的是允许电力公司在负荷高峰时削减用户的部分电力负荷，以维护电力系统稳定，同时给被削减负荷用户适当补偿。实物期权在需求侧的应用主要体现在可中断负荷合同的设计。

可中断负荷合同最早在天然气行业中出现（Troxel, 1949; Smith, 1946），Raver（1951）和 Lee（1953）提到了电力行业中的应用。据 Baldick 等人（2006）的观点，Brown 和 Johnson（1969）开始了关于该类合同的最早理论研究。实际上，可中断负荷合同相当于把用户划分成不同等级，中断非优先等级用户服务而继续对优先等级用户服务（Tschirhart and Jen, 1979）。Chao 和 Wilson（1987）进一步从等级数量及市场效率方面贡献了有意义的研究。

1991 年，Gedra（1991）开始将期权思想引进可中断负荷合同的设计，实物期权在电力需求侧的威力显现出来。Gedra（1991）的成果后来在杂志公开发表（Gedra and Pravin, 1993; Gedra, 1994）。其后，借助金融工程的思想，研究者们针对实际问题设计出各种有价值的可中断负荷合同。

2.1 可中断负荷合同的基本原理及意义

基本的可中断负荷合同可看做一种期权型远期（Optional Forward）^③（Ge-

① 装机容量指发电厂根据设计在连续运转但对发电厂并不造成损坏情况下的最高输出功率，单位为瓦（W）、千瓦（kW）、百万瓦（mW）。

② 电力系统中电气设备所需用的电功率称为负荷，单位为瓦（W）、千瓦（kW）、百万瓦（mW）。电力负荷构成电力需求。

③ 国内有的研究者称其为“可选择远期”（张少华，2001；张少华等人，2001、2002；钟德成等人，2003；罗朝春，2005）。