



# 可再生能源发电并网 外部性及电价研究

赵会茹 李泓泽 郭森 著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 可再生能源发电并网 外部性及电价研究

赵会杰 李泓泽 郭森 著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书对可再生能源发电并网的外部性影响机理及补偿机制进行了分析,并对外部性影响、可再生能源发电投资风险、我国可再生能源发电补贴的成本及效益、我国可再生能源电价形成机制进行了全面分析,进而对我国可再生能源发电并网的综合效益进行了评估,提出了可再生能源发电并网外部性补偿及其电价设计的政策建议。

本书可供电力行业相关管理者和研究人员,大中专院校相关专业师生使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

可再生能源发电并网外部性及电价研究/赵会茹,李泓泽,郭森著. —北京:中国电力出版社,2016.5

ISBN 978-7-5123-9133-8

I. ①可… II. ①赵…②李…③郭… III. ①再生能源-发电-效益-研究②再生能源-发电-价格-研究 IV. ①TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 061107 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2016 年 5 月第一版 2016 年 5 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12.75 印张 215 千字

定价 49.00 元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

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



## 前言

可再生能源具有环境友好、储量丰富等优点。大力发展可再生能源是我国应对环境污染日益严重和能源危机持续恶化的重要手段和途径，能够使我国能源发展轨迹由高碳走向低碳、由不清洁走向清洁、由不可持续走向可持续，从而促进社会经济又好又快地发展。目前广泛应用的可再生能源主要包括水能、风能、太阳能和生物质能等，大部分以发电形式进行利用。截至 2014 年底，我国可再生能源发电累计装机容量已达到 4.3 亿 kW，占全部电力装机容量的 32%，可再生能源发电量达到 1.2 万亿 kWh，占全部发电量的 22%，继续保持全球可再生能源利用规模第一大国地位。可再生能源发电的大力发展将对我国经济社会产生很大影响。利用可再生能源发电是将自然力转换为电能的过程，而这些自然力具有间歇性、季节性和昼夜差异性等特点，其并网将对电力系统多元主体产生一定影响，带来利益格局的调整，还会产生外部性问题。因此，对可再生能源发电并网的经济外部性进行研究，理清其对电力系统多元主体利益的影响，进而完善可再生能源电价政策，有效发挥可再生能源电价机制的调节作用，是一个值得深入研究的问题。

本书首先对可再生能源发电并网的外部性影响机理及补偿机制进行了分析，并分别从随机生产视角和准公共品生产视角对可再生能源发电并网的外部性影响进行了定量评估；基于支持向量机模型对可再生能源发电投资风险进行了定性评价，基于 CVaR 法和实物期权法对可再生能源发电投资风险进行了定量评价；利用成本收益分析法对我国可再生能源发电补贴的成本及效益进行了综合分析；运用协整理论和状态空间模型对我国可再生能源电价形成机制的有效性进行了检验，并提出了可再生能源电价形成机制的优化模型；基于上述研究，从可持续发展视角对我国可再生能源发电并网的综合效益进行了评估，提出了可再生能源发电并网外部性补偿及其电价设计的政策建议。

本书基于大量的实证数据，结合外部性理论和电价理论，综合运用电力系统随机生产模拟及节点边际电价方法、风险评估理论、成本效益分析模型、计

量经济模型、多属性决策理论对可再生能源发电外部性及电价问题进行了深入研究，不仅具有理论性，还具有较强的实用性，对从事可再生能源发电并网及可再生能源发电电价的理论研究者 and 实践工作者具有一定的参考价值。

本书是在赵会茹所主持完成的教育部人文社会科学项目《可再生能源发电并网外部性分析及电价形成机制研究》(11YJA790217)工作，以及国家自然科学基金项目(71373076)部分工作的基础上形成的，集中反映了作者近几年来在该领域的研究成果，凝练着课题组成员的心血。作者所指导的研究生符力文、王宝、苏婕、戴杰超等参加了本书相关内容的研究工作。感谢本书参考文献中所列的各位作者和国内外许多专家学者的相关研究成果给予的启迪！

可再生能源发电并网外部性和电价研究是一个新兴且重要的话题，相关的理论和实践问题尚处于研究探索之中。由于时间和水平的限制，书中难免存在疏漏和不妥之处，敬请读者谅解并给予批评指正！

作 者

2015年8月

# 目 录

## 前言

<b>1</b>	<b>可再生能源发电并网的外部性影响机理及补偿机制分析</b> ·····	1
1.1	外部性理论概述	2
1.2	可再生能源发电并网外部性的影响机理	4
1.3	可再生能源发电并网外部性的影响分析	12
1.4	可再生能源发电并网外部性补偿机制分析	15
<b>2</b>	<b>可再生能源发电并网外部性评估</b> ·····	21
2.1	基于随机生产视角的可再生能源发电并网外部性评估	22
2.2	基于准公共品生产视角的可再生能源发电并网外部性评估	49
<b>3</b>	<b>可再生能源发电投资风险评价</b> ·····	69
3.1	可再生能源发电投资风险评价方法介绍	70
3.2	可再生能源发电投资风险定性评价：基于 SVM 法	79
3.3	可再生能源发电投资风险定量评价：基于 CVaR 法	89
3.4	可再生能源发电投资风险定量评价：基于实物期权法	96
<b>4</b>	<b>我国可再生能源发电补贴成本及效益综合分析</b> ·····	103
4.1	我国可再生能源发电补贴的稳定性和执行情况分析	104
4.2	我国可再生能源发电补贴的成本分析	109
4.3	我国可再生能源发电补贴的效益分析	114
<b>5</b>	<b>可再生能源电价形成机制分析</b> ·····	121
5.1	可再生能源电价形成机制概述	122

5.2	我国可再生能源电价形成机制有效性检验 .....	129
5.3	我国可再生能源电价形成机制优化模型 .....	142
<b>6</b>	<b>我国可再生能源发电并网的综合效益评估</b> .....	<b>155</b>
6.1	可再生能源发电并网综合效益评价指标体系的构建 .....	156
6.2	可再生能源发电并网综合效益评价模型的构建 .....	159
6.3	我国可再生能源发电并网综合效益实证评估 .....	168
<b>7</b>	<b>可再生能源发电并网外部性补偿及其电价设计的政策建议</b> .....	<b>175</b>
7.1	可再生能源发电并网外部性补偿方案及政策建议 .....	176
7.2	可再生能源电价设计政策建议 .....	183
	<b>参考文献</b> .....	<b>186</b>

# 1

## 可再生能源发电并网的外部性影响机理及补偿机制分析

---

我国风电、太阳能发电等可再生能源发电发展迅速，已成为全球可再生能源利用规模第一大国。由于可再生能源发电具有间歇性、波动性和昼夜差异性等特点，在当前我国电力市场环境和国家鼓励可再生能源发展背景下，可再生能源发电并网将给常规火电厂商、电网企业、电力用户和环境与社会等电力系统多元主体带来一定影响，从而产生外部性问题。本章基于外部性理论，对可再生能源发电并网外部性的影响机理进行分析；进而，对可再生能源发电并网对电力系统多元主体产生的外部性影响进行具体分析；在此基础上，提出可再生能源发电并网外部性补偿原则和解决途径，阐述可再生能源发电并网正、负外部性补偿的具体思路。





## 1.1 外部性理论概述

外部性是指某一经济主体的活动对其他经济主体产生的一种不能通过市场交易或价格体系体现出来(即非市场化)的影响。随着研究的深入,人们对外部性理论的认识也逐步深入。20世纪70年代以前,人们认为产生外部性的原因在于私人成本与社会成本的背离,需要政府管制。20世纪70年代,人们认为产生外部性的原因是产权界定的不清晰,可通过明晰产权、利用市场手段来解决。20世纪90年代,人们认为外部性的实质是交易成本的问题,可通过自愿协议等非正式制度来解决。

用数学语言来表述,外部效应是指某经济主体的福利函数的自变量中包含了他人的行为,而该经济主体又没有向他人提供报酬或索取补偿,即:

$$SW_j = SW_j(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_m, X_{nk}) \quad j \neq k \quad (1-1)$$

式中: $j$ 和 $k$ 为不同的个人(或厂商); $SW_j$ 为 $j$ 个人(厂商)的福利函数; $X_i$ ( $i=1, 2, \dots, n, m$ )为经济活动。

这个函数表明,某个经济主体 $SW_j$ 的福利除受到他自己所控制的经济活动 $X_i$ 的影响外,同时也受到另一个人(厂商) $k$ 所控制的某一经济活动 $X_m$ 的影响,就存在外部效应。

外部性可以分为正外部性(或称外部经济、正外部经济效应)和负外部性(或称外部不经济、负外部经济效应)。正外部性指一些人的生产或消费使另一些人受益而又无法向后者收费的现象;负外部性指一些人的生产或消费使另一些人受损而无法补偿后者的现象。从产生领域来看,外部性可分为生产外部性和消费外部性。生产的外部性是由生产活动所导致的外部性;消费的外部性是由消费行为所带来的外部性。20世纪70年代以前的经济理论重视的是生产领域的外部性问题,而后关于外部性理论的研究范围扩展到了消费领域。根据产生时空来看,外部性又可分为代内外部性与代际外部性。通常的外部性是一种空间概念,主要是从即期考虑资源配置是否合理,即主要是指代内的外部性问题;而代际外部性问题主要是解决人类代际之间行为的相互影响,尤其是要消除前代对后代、当代对后代的不利影响。

许多经济学家对外部性理论的发展做出了重要贡献,但在外部性理论发展进程中做出里程碑贡献的学者有马歇尔、庇古和科斯三位。

(1) 马歇尔的“外部经济”理论。马歇尔是英国“剑桥学派”的创始人,



是新古典经济学派的代表。马歇尔并没有明确提出外部性这一概念，但外部性概念源于马歇尔 1890 年发表的《经济学原理》中提出的“外部经济”概念。

根据马歇尔的论述，所谓内部经济是指由于企业内部的各种因素所导致的生产费用的节约，这些影响因素包括劳动者的工作热情、工作技能的提高、内部分工协作的完善、先进设备的采用、管理水平的提高和管理费用的减少等；外部经济是指由于企业外部的各种因素所导致的生产费用的减少，这些影响因素包括企业离原材料供应地 and 产品销售市场远近、市场容量的大小、运输通讯的便利程度、其他相关企业的发展水平等。马歇尔把企业内分工而带来的效率提高称作内部经济；而把企业间分工而导致的效率提高称作外部经济。马歇尔以企业自身发展为中心，从内部和外部两个方面考察影响企业成本变化的各种因素，这种分析方法给经济学后继者提供了无限的想象空间。

(2) 庇古的“庇古税”理论。庇古在 1920 年出版了代表作《福利经济学》，该书是西方经济学发展中第一部系统论述福利经济学问题的专著。因此，庇古被称为“福利经济学之父”。庇古首次用现代经济学的方法从福利经济学的角度系统地研究了外部性问题，在马歇尔提出的“外部经济”概念基础上扩充了“外部不经济”的概念和内容，将外部性问题的研究从外部因素对企业的影响效果转向企业或居民对其他企业或居民的影响效果。

根据庇古的论述，外部性实际上是边际私人成本与边际社会成本、边际私人收益与边际社会收益的不一致。在没有外部效应时，边际私人成本是生产或消费一件物品所引起的全部成本；当存在负外部效应时，由于某一厂商的环境污染，导致另一厂商为了维持原有产量，必须增加诸如安装治污设施等所需的成本支出，这就是外部成本。边际私人成本与边际外部成本之和就是边际社会成本。当存在正外部效应时，企业决策所产生的收益并不是由本企业完全占有的，还存在外部收益。边际私人收益与边际外部收益之和就是边际社会收益。通过经济模型可以说明，存在外部经济效应时纯粹个人主义机制不能实现社会资源的帕累托最优配置。

在边际私人收益与边际社会收益、边际私人成本与边际社会成本相背离的情况下，依靠自由竞争是不可能达到最大社会福利的，于是就应由政府采取适当的经济政策消除这种背离。庇古认为，通过这种征税和补贴的政府经济政策行为，可以实现外部效应的内部化，而这种政策建议后来被称为“庇古税”。

(3) 科斯的“科斯定理”。科斯是新制度经济学的奠基人，因他发现和澄清了交易费用和财产权对经济的制度结构和运行的意义而荣获了 1991 年度的



诺贝尔经济学奖。科斯的代表性论著《社会成本问题》多次提到庇古税问题，科斯理论是在批判庇古理论的过程中形成的。科斯对庇古税的批判主要集中在三点：①外部效应往往不是一方侵害另一方的单向问题，而具有相互性；②在交易费用为零的情况下，庇古税根本没有必要；③在交易费用不为零的情况下，解决外部效应的内部化问题要通过各种政策手段的成本及收益的权衡比较才能确定。

科斯定理指出：如果交易费用为零，无论权利如何界定，都可以通过市场交易和自愿协商达到资源的最优配置；如果交易费用不为零，制度安排与选择是重要的。科斯定理表明解决外部性问题可以用市场交易形式，即自愿协商替代庇古税手段。随着 20 世纪 70 年代环境问题的日益加剧，市场经济国家开始积极探索实现外部性内部化的具体途径，科斯理论随之而被投入到实际应用中。在环境保护领域的排污权交易制度就是科斯理论的一个具体运用。科斯理论的成功实践进一步表明，“市场失灵”并不是政府干预的充要条件，政府干预并不一定是解决“市场失灵”的唯一方法。然而，科斯理论也存在一定的局限性：在市场化程度不高的经济中，科斯理论不能发挥作用；自愿协商方式需要考虑交易费用问题；自愿协商成为可能的前提是产权是明确界定的。但可以肯定的是，科斯理论为经济学的研究开辟了十分广阔的空间。

## 1.2 可再生能源发电并网外部性的影响机理

### 1.2.1 可再生能源发电并网外部性影响的特征

随着可再生能源的不断发展，其对各利益主体产生的外部性影响也将更为复杂。例如：可再生能源发电量上升，将明显挤压传统电厂的盈利空间，同时增加配合其上网的电厂运行成本；当可再生能源发电上网后，受资源特性影响，其电能质量并不稳定，对电网接纳能力要求较高，势必会增加电网运行成本；当可再生能源电力输送到用户端时，由于其初期发展成本较高，通过成本传导机制，购电电价也会上涨；可再生能源发电的发展减少了污染的排放，带动了相关行业的成长，推动了整个经济社会的繁荣。根据外部性类型来看，可再生能源发电融合了众多外部性的特征。

首先，由于可再生能源发电在发展成熟后，会有很多提供者，自然也会有许多承受者，因此其外部性可归为公共外部性。长远来看，利益主体都会受到



可再生能源发电外部性大范围且实质性的影响。

其次，可再生能源发电外部性具有生产外部性的特征。从庇古到科斯，厂商在生产过程中产生（而非生产结果）的外部性，一直是人们关注的重点。对于可再生能源电力而言，其外部性贯穿于整体生产过程中。由于该类型电力的生产，才使各利益主体受到了具体影响。

再次，鉴于电力“即发即用”的特点，可再生能源发电外部性也体现出时空一体的特征。具体表现为，当可再生能源电力生产之时，对各利益主体的影响便得到直接体现。传统电厂、电网、用户、环境社会等方面的反映较为明显，表现出很强的瞬时效果。

最后，可再生能源发电外部性具有代内和代际外部性的双重特征。通过对外部性维度矩阵的延伸，即制造者  $i$ 、接受者  $\delta$  从个体概念转换为整体概念（如代表地区、国家，甚至一代人）时，其外部性便体现出更丰富的含义。当  $i$ 、 $\delta$  代表地区时，可再生能源发电外部性就体现为地区间外部性。例如，可再生能源电力由一个地区输送到另一个地区时，被输送地区的用户就成为外部性的主要影响者（为解决这一问题，我国实行了全国范围内的可再生能源电价附加政策）。当  $i$ 、 $\delta$  代表一代人时，可再生能源发电外部性就体现为代际外部性。例如，可再生能源发电带来的环境效益，所影响的不仅仅只是当代人，还会从时间维度上进行积累，为后代人带来更长远的效益。这也正是积极发展可再生能源的原因之一。

综合上述分析，不难发现，可再生能源发电并网外部性问题较为复杂，涉及利益主体较多。要实现对外部性的化解，还需要从其形成原理上进一步研究。

### 1.2.2 可再生能源发电并网外部性的经济学分析

由于主体多元，可再生能源发电并网外部性的表现形式更加多样，涉及各利益主体关系也更加复杂。归纳起来，可再生能源发电产生的外部性，主要可以分为技术外部性和经济外部性两大类。技术外部性主要是指对电网稳定性、可靠性以及其他常规电厂经济运行等的影响；经济外部性则指对于可再生能源电力相关各主体经济利益的影响，这是本书研究的重点。按照可再生能源电力的生产模式，其可能影响到的各利益相关方如图 1-1 所示。

根据各利益主体所处环节的不同，其受到的影响程度也有区别。因此，结合利益主体特点，将这种外部性用四种不同维度反映，如表 1-1 所示。

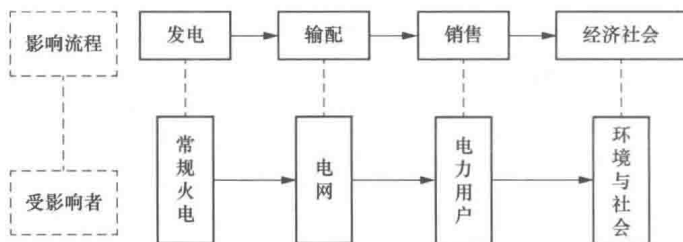


图 1-1 可再生能源发电可能影响的各利益主体

表 1-1 可再生能源发电外部性的维度化矩阵

项目		受影响者数目 ( $\delta$ )	
		少数	大量
制造者数目 ( $i$ )	少数	I ( $i=1, \delta=1$ ) 可再生能源发电与传统电厂	II ( $i=1, \delta=\infty$ ) 可再生能源发电与电网
	大量	III ( $i=\infty, \delta=1$ ) 可再生能源发电与用户	IV ( $i=\infty, \delta=\infty$ ) 可再生能源发电与环境社会

注 1 代表少数,  $\infty$ 代表大量。

由表 1-1 可知, 当可再生能源发电发展初期, 发电规模较小 (即  $i=1, \delta=1$  时), 可再生能源发电与传统电厂的关系处于第 I 象限, 反映了可再生能源发电对传统电力的冲击, 主要体现为同行业之间的业内竞争, 影响范围较小。此时, 制造者与受影响者关系明确, 当一方制造外部性, 另一方受外部性影响时, 双方关系为单一直接影响关系, 具体表现为可再生能源发电上网电量的增加将直接导致传统发电厂商营业收入的下降。

可再生能源发电发展之初, 所接入的电网规模较大时 (即  $i=1, \delta=\infty$  时), 可再生能源发电与电网的关系位于第 II 象限, 说明少数可再生能源发电上网时, 可能会对电网产生较大影响。此时这种能源稳定性较差, 电网一时难以适应, 具体表现为电网可靠性下降, 运行维护费用升高等现象。

在可再生能源发电发展较为成熟, 但其消费对象较为单一时 (即  $i=\infty, \delta=1$  时), 可再生能源发电与用户的关系处于第 III 象限, 说明了可再生能源发电大量并网时对单一用户的影响。此时, 单一用户可能仅表现为自愿购买绿色电力的人群。该情况下, 主体受到的外部性冲击较大, 具体表现为购电电价的上升。

当可再生能源发电发展成熟, 经济社会环境完善时 (即  $i=\infty, \delta=\infty$  时), 可再生能源发电与环境社会的关系处于第 IV 象限, 反映了可再生能源发电得到



广泛推广后,对环境与社会产生的重大影响。处于该阶段时,可再生能源发电对环境与社会的外部性影响显著,具体表现为可再生能源发电发展促进了环境与社会的可持续发展,如环境污染物排放的减少、就业的增加等。

同时应注意到,表 1-1 中各利益主体的象限位置,仅体现了可再生能源发电与各利益主体某一时期的关系。随着利益主体发展阶段的变化,其位置也会动态地改变。例如,当少数可再生能源发电影响到大量传统电厂时,可再生能源发电与传统电厂将移至第Ⅱ象限,其余情况以此类推。

这种外部性维度矩阵,一定程度上反映了可再生能源发电对各利益主体产生的外部性的复杂性和动态性。假设产生的外部性为负外部性,各象限的实际意义为:位于第Ⅰ象限的双方,其外部性影响较小,较易调整,等同于吸烟者对不吸烟室友的影响,可视为私人外部性,一般通过谈判或协议方法解决;位于第Ⅱ象限的双方,其外部影响较大,但制造外部性的主体较弱小,也可调整,等同于一家工厂对整个地区造成污染的影响,可视为局部公共外部性,出现这种情况时,常用的方法是通过法律或其他措施令外部性制造者停止施加外部性的行为;位于第Ⅲ象限的双方,表现为外部性制造者数量众多,规模庞大,受外部性影响的主体较弱小,其等同于许多火车过站时对路边某一住户的影响,可视为局部公共外部性,针对这种现象,一般可采用对受影响者进行补贴等方法予以解决;位于第Ⅳ象限的双方,表现为外部性制造者和受影响者均规模庞大,外部性关系复杂,由于利益主体众多,所受影响各异,很难通过谈判或协商方式予以调解,这种情况等同于多家支柱型工厂排放烟气对整个地区造成的污染,可视为公共外部性。要解决这种外部性问题,仅依靠一两种具体措施难以奏效。针对该问题,经济学家从不同角度进行了研究,从“庇古税”到“产权定理”,从“政府管制”到“政府市场联合调节”等,形成了不同流派,在实践中也取得了一些成效。整体而言,无论哪种理论,其共性在于只有通过设计相关机制,从根本上对公共外部性进行把握,才能进行有效调节。因此,有必要对可再生能源发电外部性做进一步挖掘。

依据外部性和经济建模理论,可再生能源发电对各利益主体的影响主要与发电量相关。据此,构建可再生能源发电的理论效用函数如下:

$$\begin{cases} U = \sum_{i=1}^4 U_i(G) \\ G = \sum_{j=1}^4 g_j \end{cases} \quad (1-2)$$



式中： $g_j \in [0, \infty)$  为第  $j$  类的可再生能源发电量（如风电、太阳能发电、生物质发电、潮汐发电等）， $j=1, 2, 3, 4$ ；结合可再生能源发电生产特点，将受影响的利益主体分为传统发电厂商、电网公司、电力用户和环境与社会。

$U = \sum_{i=1}^4 U_i(G)$  为影响 4 个利益主体的可再生能源发电总效用； $U_i$  为不同主体  $i$  从单位可再生能源发电量中得到的效用。

假设社会能够接纳的最大可再生能源发电量为  $G_{\max}$ ， $\frac{\partial U}{\partial G} < 0$ ， $\frac{\partial^2 U}{\partial G^2} < 0$ 。

当  $G < G_{\max}$  时， $U_i(G) > 0$ ；当  $G \geq G_{\max}$  时， $U_i(G) = 0$ 。

同样，假设可再生能源发电对不同主体的单位成本为  $c$ ，则不同主体  $i$  的效用函数为：

$$u_i(g_1, \dots, g_j, \dots, g_4) = g_j U(G) - g_j c \quad (1-3)$$

可得，最优化一阶条件：

$$\frac{\partial u_i}{\partial g_j} = u(G) + g_j u'(G) - c = 0 \quad (1-4)$$

由此，可得 4 个反应函数：

$$g_j^* = g_j(g_1, g_2, g_3, g_4)$$

因为

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial g_j^2} = U'(G) + U'(G) + g_j U''(G) < 0$$

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial g_i \partial g_j} = U'(G) + g_i U''(G) < 0$$

所以

$$\frac{\partial g_i}{\partial g_j} = - \frac{\frac{\partial^2 u_i}{\partial g_i \partial g_j}}{\frac{\partial^2 u_i}{\partial g_j^2}} < 0 \quad (1-5)$$

式 (1-5) 表明，第  $i$  个主体从可再生能源发电所得到的最佳效用随着其他主体效用的递增而减少。例如，传统发电厂商效益下降时，整体经济社会利益上升。

因此，根据纳什均衡理论，4 个反应函数的交点为纳什均衡点。

$$g^* = (g_1^*, \dots, g_j^*, \dots, g_n^*) \quad (1-6)$$

此时，纳什均衡的总可再生能源发电量为：



$$G^* = \sum_{j=1}^n g_j^*$$

累加 4 个一阶条件, 可得:

$$-U(G^*) + \frac{G^*}{4}U'(G^*) = -c \quad (1-7)$$

因为社会最优的目标是社会总福利最大化:  $\text{Max}_G [GU(G) - Gc]$ , 所以最优化一阶条件为:

$$v(G^{**}) + G^{**}U'(G^{**}) = c \quad (1-8)$$

式中,  $G^{**}$  为社会最优的可再生能源发电量。

研究表明,  $G^* > G^{**}$  说明了尽管每个主体都考虑了可再生能源发电所带来的效用和负外部性, 但仅考虑了对个体效用影响, 而不是总影响。因此, 最优点上个体边际成本小于社会边际成本达到纳什均衡时, 可再生能源发电总量超过社会所需的最优可再生能源发电量, 其负外部性效果可能会增加。由此可见, 倘若完全依靠经济规律对可再生能源发电量进行调节, 有可能造成过度的负外部性, 严重影响社会总体福利。因此, 还需要配合相应的政府调控措施对可再生能源发电量进行调节。接下来, 将从理论上分析相关调控措施的可行性。

按照庇古理论, 市场经济无法自动解决市场失灵, 需要依靠政府采取适当的政策消除负外部性, 实现社会福利最大化。也就是通过征收“庇古税”来消除负外部性, 其经济学含义如图 1-2 所示。

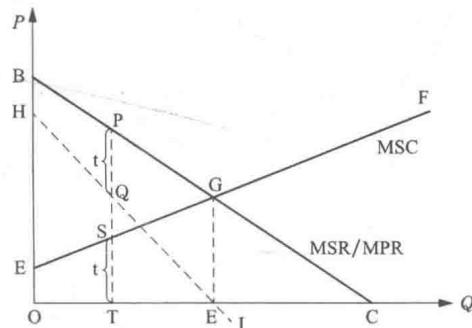


图 1-2 矫正外部性的庇古税经济原理

图 1-2 中, 横轴代表经济主体 A 的行为水平, 斜线 BC 代表 A 的个人边际收益 (当不考虑正外部性时, 个人边际收益 MPR 等于社会边际收益 MSR), 斜线 EF 反映了 A 行为的社会边际成本 MSC。当无其他外部约束时, A 的效用最大化行为将表现为 OC ( $\text{MPR} = \text{MPC} = 0$ )。斜线 BC 与 EF 相交于 G 点, 表明社会边际收益等于社会边际成本。在 OE 的行为水平下, 达到了帕累托最优产出, EC 反映了社会的过量产出。

假设公共部门对 A 行为的外部性进行管制, 较为可行的管制政策就是对 A 的行为征收等价于社会边际成本的税收。图 1-2 中 A 的边际收益便调整为斜线 HI, 反映了交纳庇古税后的个人边际收益。此时, A 的效用最大化行为将





导致其行为水平为 OE ( $MPR = MPC$ ), 同时,  $MSR = MSC$ , 达到社会帕累托最优产出。由此, 从经济学理论上说明了用庇古税管制可再生能源发电外部性的必要性。

但是, 在实践应用中, 直接的庇古税可能未必完全有效, 主要原因有以下几方面。

(1) 可再生能源发电并网对各主体造成的外部性与其发电量的函数关系难以确定。由于利益主体不同, 同样的发电量所产生的外部性影响是不同的。

(2) 庇古税未考虑交易成本或假设交易成本较低, 但若计入政策执行及变动成本时, 该方法便不再有效。

(3) 庇古税中所设定的边际外部性较难度量, 在应用到度量可再生能源发电外部性问题时, 将会陷入要“经济”还是要“环境”的两难抉择。由此, 很难用货币度量出外部性, 进而无法准确确定庇古税额度。

(4) 庇古税仅考虑经济效率和环境目标, 未考虑公平等社会目标。

因此, 庇古税的有效性是建立在信息完全对称、产权明晰、监督成本低、管制者公正无私并追求社会福利最大化等系列经典假设之上。当这些经典假设不被满足时, 则需要根据庇古税原理采取一些修正性政策或替代性政策予以调节。因此, 本书将具体分析可再生能源发电并网过程中各利益主体受外部性影响的情况, 包括外部性的表现形式和影响程度等。从而, 为设计有效调节可再生能源发电并网外部性的机制提供科学依据。

### 1.2.3 可再生能源发电并网外部性的表现形式

可再生能源发电并网涉及主体众多, 仅从产业链的角度纵向分析, 就包含了装备制造、发电企业、电网企业、电力用户等, 此外还包括横向相关的运输公司、建设公司、科研机构等辅助配套单位。可再生能源在发电并网中, 均会影响到这些主体的生产、运营等。这些影响中, 有些可以从发电成本中体现出来, 即转化为可再生能源发电的内在因素; 有些则较难被内部化, 即产生了外部性。具体情况如表 1-2 所示。

表 1-2 可再生能源发电并网作用主体一览

作用主体	影响性质	作用主体	影响性质	作用主体	影响性质
设备制造业	内部化	电网公司	外部化	科研机构	内部化
可再生能源发电企业	内部化	电力用户	外部化	建设公司	内部化
运输公司	内部化	常规发电厂商	外部化	环境与社会	外部化