

第一章 概述

§ 1-1 电价的基本功能

电能虽然不是有形的物质产品，然而它具有一般商品的基本属性，例如它的生产需要有成本（包括固定成本和可变成本）投入，它与一般商品一样具有使用价值，它的使用价值在一定程度上也要受到市场的基本规律所制约；它与一般商品一样，可以计量和有价交换，只不过受到一些时间和空间的限制。然而电能又不是一般的商品，在当前技术条件下，电能不能大规模长时间储存，其产、供、销一次完成，基本上是瞬时平衡的；它需要能适应负荷日变化的大量机组设备和巨额固定资产；它是一个资金和资产高度密集的产业；目前它还是一个有一定地区垄断性的公用事业。电能应当在有效经营的基础上，为用户提供良好的服务。电能价格的制定应根据客观的标准明确地计算，同时接受政府的监督并保证公平对待用户，而不能由企业任意决定。

因此电价应当具备下述三个最基本的功能。

一、正确反映生产成本，以维持简单再生产

首先，电价应当正确地反映它的生产成本，以维持简单再生产。这在一般商品的成本计算中不是很困难的问题，但对于电力工业来讲却有些麻烦。例如由于机组设备的建设周期和运行寿命都很长，它的投资环境受到政治、社会和经济大环境的直接影响，因此其巨额的固定资产在会计账面上，即便使用折现方法折到同一年，也缺乏可比性，亦即在电力资源利用的坐标系上，不能简单相加求和，因此它的总的固定成本是严重畸变了，这对于发展中国家特别突出。例如我国各大电力系统，均有大量发电机组，其固定资产已折旧完了，而仅存有残值，亦即其经济寿命已完结

而超期服役，在会计账面上，它的固定成本已近于零，然而它还在服役，说明它的容量是有价值的，因为如令其退役，势必要求投入相应的新机组，进而要求相应的投资。按经济学的电价理论，其容量价值应当被合理评价，并计入电价，以便筹集必要的资金，一旦其退役后，有相应新机组投入。推而广之，所有现存的电力资源，包括超期服役的老机组，其资源价值都有必要重新评价，并最终计入电价，这就需要相应的理论和方法，这正是本书有待介绍的一个主题。

二、具有筹资和投资功能，以扩大再生产，满足用户发展的需要

电价和电费不仅应当满足短期电能简单再生产的需要，而且应当满足长期电能扩大再生产的资金需要，以便保证电力工业持续、稳定地发展。世界银行能源处的专家在《发展中国家电力部门的问题与展望》的报告中指出：“绝大多数发展中国家现行电价显著地低于供电的长期边际成本”。所谓长期边际成本是一个经济学的概念，它是用增量之比的方法，而不是用总量平均的方法计算成本和电价，而且考虑若干年，以便引导长期供求平衡。它的合理性和计算方法是本书将介绍的另一个主题。

三、具有调节功能

电价应当具有调节功能，特别是在缓解系统调峰填谷的压力，其中包括引导用户合理用电和引导发电厂顶峰压谷等方方面面。电力系统在峰负荷时段，电力负荷危险地逼近电力容量的极限，由于必须开出高燃料成本和利用小时数很低的调峰机组，故其电力生产成本可能成倍增加；另一方面，在电力系统低谷时段，往往需要压火停机，同样危及系统的经济性和安全性。由于这些理由，在峰时段应有高电价，一方面抑制用电负荷，另一方面鼓励发电顶峰，而在谷时段应有低电价，以便一方面鼓励用电，另一方面引导发电厂压负荷，从而更有效地利用电力资源，降低系统的峰容量要求，并改善系统的负荷率。因此电价在电能生产消费和交换的各个环节都能起到间接调控的作用，合理的分时电价、可停

电价以及可靠性等级电价，应当有能力在宏观和微观两个方面引导供求平衡，以达到电力资源的充分利用。因此分时电价将是本书讨论的主题。

上述三个基本功能归根到底是一个电能生产消费的价值规律，即电价不能偏离其价值太远，否则必将受到相应的惩罚。例如电力发展资金不足，长期的电力短缺，与此同时电力及其资源又被大量浪费。又如调峰容量严重不足，非调峰机组被迫作调峰运行，电网的频率难以保持合格，等等。特别是在发展中国家，上述三个基本功能都直接涉及发电系统容量的投入，从而直接涉及发展中国家电力工业的稳定持续发展，因此本书的主要理论与方法将更适用于发展中国家的电力工业。

§ 1-2 会计学与经济学的电力定价模式

传统的电力企业计算总成本的会计学方法包括四个方面：固定资产的折旧费、营运费、各种税收和利润。折旧费是其固定资产在其经济寿命内合理地分配、回收，作为固定资产重置的费用。营运费包括燃料费、维修费、人工服务费、员工的工资以及区外购电等有效经营所必需的费用。税收包括各级政府规定的各种税和捐。而利润又称事业报酬（日本电气事业法）和准许溢利（香港中华电力公司管制法），它是电力事业真实有效资产价值乘以利润率所得的数值，作为总成本的构成要素，列入电价成本中（日本 1988 年电力事业报酬率为 7.2%，香港中华电力公司 1992 年电力的准许溢利率为 13.5%）。

由此可见，会计学的定价模式有如下特点：首先，它着眼于账面上的年度平衡，和一般商品的定价没有本质上的区别，即会计成本（折旧、营运、税收）加上利润。其次，总成本中占比例很大的折旧费和利润及其相应的折旧率和利润率（事业报酬率和准许溢利率）将受到政府人为的严格控制，例如我国的折旧率偏低，低于用电增长率，如果没有其他资金补充，永远不能满足扩

大再生产的资金要求。况且为了社会的稳定，政府对电价的控制，使电价水平偏低。在电力生产成本不断提高的情况下，不断牺牲电力企业的利润率，甚至在 1990 年前后有许多地区电力部门发生了亏损，连简单再生产也难以维持。第三，即使排除这些人为的干预，会计学的定价模式是静态的平衡和向后看的（即基于历史数据的简单统计平均），它也无法排除历史上巨额固定资产投入中的畸变。最后，会计学的定价模式无法产生分时电价结构。因为它是基于年平均总成本的概念，勉强产生分时电价结构，往往是采用经验的估算方法，因而缺乏科学性。

不同于会计学模式，经济学的定价模式首先着眼于电力资源的充分利用。区别于会计学模式，经济学的电价取决于经济学成本（新老电力资源的影子成本）加上效益。其次，它是利用一个以电力资源最有效利用为目标的系统优化模型严格计算的，因此模型化是它一大特点。因而，至少在原理设计阶段，最大限度地排除了人为的影响，因而加强了它的科学性。第三，在计算效益时采用了边际成本原理，也就是应用增量成本方法代替平均成本方法，因而它是向前看的（即基于需求增加后的成本变化分析）。也就是在现有供求条件下，向前增加一个单位用电量，所需生产成本的增量作为计算其效益的依据，并计入电价。因此电价中包含了引导供求动态平衡的信息。最后，经济学的定价方法将导致电能价值当量的研究。它很自然地导出分时电价结构，并大大扩展了它的应用领域。这正是第二章到第六章要介绍的内容。可见经济学的定价模式比较适合于电力企业这类公用事业的定价。

然而，对于电力企业而言，年度的财政平衡也是非常重要的。在用经济学定价原理设计电价水平与结构之后，通常有必要作会计学的校核与修正。原理上，在一个缺电的系统中，边际成本通常大于平均成本，因此这种校核与修正是可能的。这也是世界银行能源处在发展中国家推荐边际成本定价方法的原因之一。

§ 1-3 发展历史的简要回顾

与电能价值当量概念最为接近的是 SPOT 现金电价。SPOT 电价的概念最早是由美国麻省理工学院 (MIT) 以 F. C. Schweppe 为首的六位学者在 1980 年提出来的, 当时被冠以一个很特别的名称: Homeo-Static Utility Control^[1~5], 这本来是生物学中的一个术语, 意即“存在一个内在的机理, 相关各部分之间达到一种协调平衡状态”, 因而暂译为“协态效益控制”。该文中首次提出, 要改变传统的供与求的模式并建立电力市场, 主张像电力系统的电压和频率一样计算与控制电能的现价, 即 SPOT 电价, 它不仅随时间而变化, 而且不同母线上有不同电价, 而且事故情况、正常情况和安全情况的电价也不相同, 但是一般更强调它的时变性, 设想大体上每隔 5min 作一次调整, 这个时间周期取决于系统的要求。

最初, 上述论文受到广泛的批评, 特别是来自电力工业界的批评。主要的意见是它不现实, 没有证据证明“协态效益控制”能提供更低的供电成本, 顶多它是一种负荷管理。然而电力公司非常关心在峰负荷情况的容量需求, 因为峰负荷已经危险地逼近发电资源的极限, 电力公司同样关心在谷负荷时剩余电力的销售, 以保证电力生产的平稳运行。峰负荷时的高电价可以减少系统的容量需求, 而谷负荷时的低电价可以鼓励用户多用电, 以吸收系统多余的电力。出于这个实际的需要, 美国一些电力公司和州的电力协调委员会开始对 SPOT 电价发生了兴趣, 美国威斯康星州的 PSC 电力公司率先支持一项 SPOT 电价的可行性研究, 作为负荷管理计划的一部分^[6]。密西根州的 Detroit Edison 电力公司, 加州的 San Diego 煤气电力公司, 以及俄亥俄州的 Toledo Edison 电力公司也曾在工商业负荷中引入部分 SPOT 电价。在 1983 年南加州 Edison 电力公司和加州 PG&E 电力公司试验将 SPOT 电价在系统中在线应用^[7,49]。

1981 年, M. Munasinghe 叙述了应用边际成本原理定价的理论框架^[8], 他建议首先用严格的长期边际成本确定总体的电价水平, 然后利用一个大大简化的峰负荷模型在峰谷两时段间分担, 其结果是峰时段除了应承担与燃料消耗有关的电量成本外还应承担与投资有关的容量成本, 而谷时段只承担电量成本。进一步考虑负荷预测及其电价响应特性, 计入用户缺电损失优化可靠性水平, 以及长期与短期边际成本的反复迭代、协调一致等方面, 该文第一次比较系统地论述了边际成本电力定价方法, 然而基本上还只是一个框架, 而没有解决它的模型化问题。

1983~1987 年, T. Oyama 成功地应用数学规划方法度量电力的边际成本^[10,11], 采用自然峰、峰、腰和基时段的假设, 应用线性规划的对偶解, 即内生的影子价格作为各时段的边际成本, 它解释为容量成本的增加减去燃料成本的节约, 并通过最优基矩阵的逆来计算。这是一个用模型化方法计算电力的边际成本, 并分时段定价的最初尝试。

1989~1993 年, A. K. David 指出: 虽然在目前未达到电力市场的水平, 但竞争性的环境是有现实意义的^[33-38]。A. K. David 应用 K-T 条件建立了动态电价的一般表达式, 研究了各种损失和约束情况下的附加费用的表达式, 研究了需求特性, 包括它们的时间相关性对动态电价的影响。1992 年 M. L. Baughman 应用 Monte Carlo 随机模拟方法研究了短期现金 (SPOT) 电价的计算^[12], 利用随机数发生器决定发电机与输电线的状态, 考虑了等微增率经济调度、用户的电价响应、供电品质、电量短缺成本以及峰电厂容量年金成本等, 得到了日时变的现金电价, 同时还考虑了网损及输电限制, 因而得到了输电网各结点上时变的现金电价曲线族, 他首次应用系统模型化方法展现了现金电价的时空特性。1993 年 M. L. Baughman 进一步将它扩展为区别可靠性要求的实时电力定价^[13]。

这些理论研究无疑具有重要的学术意义, 但距离现实还有相当距离。电力公司之所以越来越对电力的实时定价感兴趣, 一个

主要的原因是由于电力市场上越来越强化的市场竞争。虽然在理论上它要求在时间的每个瞬间使价格与成本相匹配，但是事实上只需要讨论小时价格就足够了。考虑电力系统运行的特点，预测一天以后的小时级的实时电价更有实际意义。美国纽约州 Syracuse 市的 Niagara Mohawk 电力公司在 80 年代后期就开展了这项研究^[6]。它计算次日的小时边际成本，并在当日下午 4:00 将次日 24 小时的电价传送给被选择的一部分用户，其中次日的边际成本由边际运行成本和边际退役成本两部分组成。其中边际运行成本用一个经改造过的具有安全约束的经济调度模型与软件计算，其中计入那些在运行中起作用约束的影子价格。由于考虑了输电约束，因而可以区分不同区域的边际运行成本。进而 L. D. Krisch 等人定义了边际退役成本^[6]，给出了三种计算边际退役成本的方法，第一种方法就是直接利用发电系统容量扩建规划中的容量成本。第二种方法是通过价格试验，评定用户的支付意愿和需求弹性而估计。最后一种方法是直接估计由于容量不足而退役造成的经济损失，包括利用系统可靠性指标，但文中没有给出该公司最终采用了哪种方法。这项由电力公司支持的实时电价研究，说明了电力工业界已直接参与了现金（SPOT）电价的发展研究，并使它具有实用价值。

上述现金（SPOT）电价一般指供方与用户之间的，然而它的概念和方法同样可适用于其它方面，例如发电公司与发电公司之间的。在发展历史的回顾中应当特别提到英国在 1990 年一次意义深远的改组，在那年英国中央发电局（CEGB）一分为四，三个发电公司（National Power、Power Gen 和 Nuclear Electric）和一个输电公司（National Grid）为促进供方的竞争^[53]，电力的销售交易通过一个电力联营体（Electricity Pool）来实现，它像一个经纪人，每小时设定两个电价，购买价 PPP 和销售价 PSP。PPP 由电量成本和容量成本组成，其中电量成本基于系统的短期运行边际成本，而容量成本基于电力短缺损失和电力不足概率。PSP 略高于 PPP，其差值用于联营体所承担的旋转备用成本、调频调压的

成本以及由于输电限制而附加的成本。此外发电公司与输电公司之间也可以有一个长期协议,以保证价格的稳定。其投标过程是上午 10:00 要求各发电公司提供各发电机组的各种成本(起动成本、在线运行成本和微增成本)和可用性参数(最小上下时间、爬坡率、最小技术出力等),下午 3:00 由输电公司发布次日的短期运行边际成本和电力不足概率,它作为一个信息站,在保持某些数据的机密性的同时,允许交叉检验,还有一个事后登录的电子系统。经营过程是很复杂的,发电者可以完全出于商业的目的、偏离其实际成本而报价,也可以提供‘虚假’的可用性参数而无需说明理由。这创造了一个电力经营的市场环境。文献^[53]还指出了在投标、经营和电力定价等方面的问题以及未来可能的发展。

现金(SPOT)电价不论是在理论上还是在实际上都还处于发展之中,系统地加以总结还为时过早,然而当今的世界包括中国的电力工业,由于分时电价的推广,需要有一个合理的但又可行的定价方法,也就是既吸取现金(SPOT)电价理论与方法的科学性的一面,又考虑现时电力系统现实性的一面,意即在引向理想的现金(SPOT)电价的过程中,寻求科学性与可行性的一个较好的折衷与统一。

§ 1-4 电能价值当量理论及分时 电价计算梗概

现阶段对电能价值当量的研究是在下述简化假设条件下进行的。

(1) 不企图建立一个通用的全能的定价模型,而是针对特定的目标,考虑特定的约束,产生特定的小时电价。例如为了制定抽水蓄能电站抽水与发电的分时电价,其模型是建立在抽水蓄能电站运行与规划优化的基础之上的。又如为了制定互联线路上的电力交换分时电价,其模型则建立在互联系统最优运行与规划的基础之上。这些模型没有必要一样,更没有必要包罗万象。

(2) 首先突出它的时间特性, 暂不或基本不考虑主要由网损和输电限制引起的区域间差价的空间特性。在研究中, 除非某些特殊情况, 输电成本按发电成本的一个附加百分比而计入。例如我国输电投资大约占发电投资的 15%~25%, 而网损大约占 5%~10%, 视不同系统情况而略有不同。除了由于实际上发电成本占总成本绝大部分以外, 还由于在我国长期以来在投资与经营体制上均以发电系统为主。另一个原因是如果要精确计入输电成本, 则将大大增加模型的复杂性和输入数据的要求, 因此是否精确计入输电成本, 基本上是精确性与工作量之间的折衷。然而当用于次日发电上网电价预测时, 输电服务的定价将另作考虑^[56~58]。

(3) 考虑到传统的电力定价一般都采用会计学方法, 大多数制定和执行电价的人员熟悉的也是会计学方法, 诸如折旧率、贴现率、两部制电价等等。在研究中, 为了便于与传统观念和方法衔接, 分时电价或电能价值当量均由两部分组成, 即成本部分和效益部分。成本部分大体上是为了维持简单再生产, 所不同的只是电能价值当量及由此而生成的分时电价计入了有限电力资源内生的影子价格, 以保证折旧和还贷。而效益部分是为了扩大再生产, 它应用微增或边际原理计算, 以保证必要的收益与利润, 以及发展的投资和筹资。这样的定义与划分易于为广大的电价决策者和管理者所接受。

本书介绍的电能价值当量理论正是在上述三个简化假设条件下建立的。然而它也有可能发展为更为理想的现金 (SPOT) 电价, 而在观念上没有任何不可逾越的鸿沟。

应当适当区分现金 (SPOT) 电价、电能价值当量、分时电价之间的区别^[39]。现金 (SPOT) 电价是一个理想化的在空间展开的瞬时动态电价, 它要求几乎瞬时 (5~10min) 在电网的各处 (各主要供电节点) 使电价与成本相匹配, 包括系统事故情况。它更强调的是电价的第三功能——调节功能, 以致于在它提出之初即与系统电压和频率的调节相联系, 并称之为协态效益控制 (Homeo-Static Utility Control)。而分时电价一般更强调长期条件下电价

与成本相匹配，以引导长期供求平衡，其事故情况的影响用统计学方法计入，因而它更强调电价的第一、第二功能——维持和扩大电力的再生产。而电能价值当量将在现金（SPOT）电价与分时电价之间架起一座桥梁，它企图使短期目标和长期目标相协调，在一个可接收的时间与空间，使期望电价与期望成本相匹配，因而它是一个准理想化的、次优的动态电价，并作为一个分析手段，进而综合并简化为可操作的分时电价。

电力消费的日循环负荷特性和电力生产的瞬时平衡特性，决定了电能的生产成本和效益两者可以表示为一个日循环的时间函数。这就是电能价值在时间轴上的一维展开。另一方面，担负基荷的电源，其生产成本和效益主要体现在电量（ $\text{MW} \cdot \text{h}$ ）上，而担负峰负荷的电源，其电量不多，其生产成本和效益主要表现在容量（ MW ）上，因此电能生产的成本和效益，沿基载到峰载也可以表示为负荷的函数。这就是电能价值在负荷轴上的另一维展开。图 1-1 给出了一个基本的电能价值当量图表，它的横坐标是一天 24 小时的时间轴，它的纵坐标是基电厂到峰电厂的顺序编号，对应于相应负荷，因而也可视作负荷轴。因此它的包络线类似一个典型日负荷曲线。其中某一电厂某一小时的电能价值当量值（元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ），表示在某一个方格子中，它的横断面表示某一电厂的电能价值当量在一天 24 小时中的变化，基电厂有较小的电价差。例如第一台编号为 1 的基电厂的电能价值当量一天中的变化为 $0.33 \rightarrow 0.56 \rightarrow 0.87 \rightarrow 1.15 \rightarrow 0.84 \rightarrow 0.60 \rightarrow 0.36$ 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ；而峰电厂有较大的电价差，例如第 21 台编号为 21 的峰电厂的电能价值当量，为 $0.00 \rightarrow 0.00 \rightarrow 2.10 \rightarrow 1.95 \rightarrow 0.00 \rightarrow 0.00$ 元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。而它的纵断面表示某一时刻，峰电厂与基电厂的电价差。在峰时段的关键时刻，峰电厂如能顶上去，将有较高的电能价值当量。然而在谷时段，峰电厂如果抢发电，其电能价值当量几乎等于零。这些电能价值当量的数字特征与直观的工程经济观念是非常的一致。图 1-2 给出了相应于图 1-1 的三维图，它形象地表达了电能价值当量的时空特性，特别是基电厂

电 厂 编 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
22										3.21	3.06													
21										2.10	1.95													
20									1.07	1.36	1.20	1.00	1.10	1.04	1.04	1.05	0.94			1.01				
19									0.98	1.26	1.12	0.94	1.01	0.95	0.95	0.96	0.85	0.74	0.76	0.92	0.72			
18									0.96	1.24	1.09	0.92	0.99	0.93	0.93	0.94	0.82	0.72	0.73	0.98	0.70			
17									0.96	1.24	1.09	0.92	0.99	0.93	0.93	0.94	0.83	0.72	0.73	0.90	0.70			
16									0.64	0.95	1.23	1.00	0.91	0.98	0.92	0.92	0.92	0.81	0.71	0.72	0.89	0.69		
15									0.64	0.94	1.22	1.08	0.91	0.97	0.91	0.91	0.92	0.81	0.70	0.72	0.88	0.68	0.60	
14									0.63	0.94	1.22	1.07	0.90	0.97	0.91	0.91	0.91	0.80	0.70	0.71	0.87	0.67	0.59	
13									0.62	0.93	1.21	1.06	0.89	0.96	0.90	0.90	0.90	0.79	0.69	0.70	0.87	0.67	0.58	0.48
12									0.63	0.93	1.21	1.06	0.89	0.96	0.90	0.90	0.91	0.80	0.69	0.70	0.87	0.67	0.58	0.40
11	0.36	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.38	0.58	0.88	1.17	1.02	0.85	0.92	0.85	0.85	0.86	0.75	0.64	0.66	0.82	0.62	0.54	0.43
10	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.36	0.56	0.87	1.15	1.00	0.83	0.90	0.84	0.84	0.84	0.73	0.62	0.64	0.00	0.60	0.52	0.42
9	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.36	0.56	0.87	1.15	1.00	0.83	0.90	0.84	0.84	0.84	0.73	0.62	0.64	0.00	0.60	0.52	0.42
8	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.36	0.56	0.87	1.15	1.00	0.83	0.90	0.84	0.84	0.84	0.73	0.62	0.64	0.00	0.60	0.52	0.42
7	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.36	0.56	0.87	1.15	1.00	0.83	0.90	0.84	0.84	0.84	0.73	0.62	0.64	0.00	0.60	0.52	0.42
6	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.36	0.56	0.87	1.15	1.00	0.83	0.90	0.84	0.84	0.84	0.73	0.62	0.64	0.00	0.60	0.52	0.42
5	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.36	0.56	0.87	1.15	1.00	0.83	0.90	0.84	0.84	0.84	0.73	0.62	0.64	0.00	0.60	0.52	0.42
4	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.36	0.56	0.87	1.15	1.00	0.83	0.90	0.84	0.84	0.84	0.73	0.62	0.64	0.00	0.60	0.52	0.42
3	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.36	0.56	0.87	1.15	1.00	0.83	0.90	0.84	0.84	0.84	0.73	0.62	0.64	0.00	0.60	0.52	0.42
2	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.36	0.56	0.87	1.15	1.00	0.83	0.90	0.84	0.84	0.84	0.73	0.62	0.64	0.00	0.60	0.52	0.42
1	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.36	0.56	0.87	1.15	1.00	0.83	0.90	0.84	0.84	0.84	0.73	0.62	0.64	0.00	0.60	0.52	0.42

时间 (时)

图 1-1 电能价值当量图表

Fig 1-1 Electricity Value Equivalent (EVE) Chart

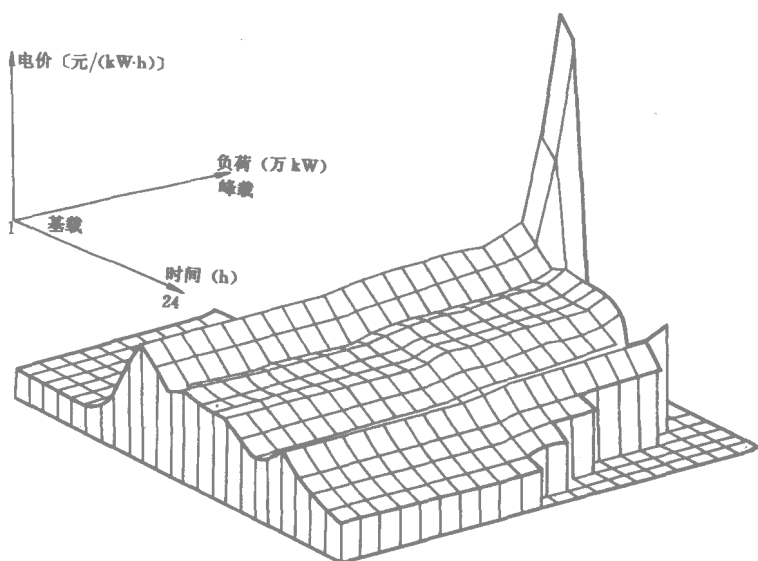


图 1-2 电能价值当量的三维图

Fig 1-2 The Three Dimensions Chart of EVE

与峰电厂之间的差异。

基于上述电能价值当量图表，针对不同的应用环境的要求，可以综合并简化为可供操作的分时电价图表。例如按电量加权平均的三时段分时电价图表。

电能价值当量是怎样计算得到的呢？

第一步：建立一个电力系统的优化模型。它类似于一个电力系统规划模型，然而又有所区别。它的目标函数及其规划期应当体现电价信息引导供求平衡的最终理想状态；它的约束条件应当体现电价设计中所考虑的有限电力资源；这个优化模型还应当有能力产生这些有限电力资源的影子价格。因此不是任何电力系统规划模型都适合于电能价值当量的计算，而且，可作电能价值当量计算的优化模型也不是唯一的。

第二步：利用上述优化模型，评定相应电力系统的经济学成本（通常分解为容量成本和电量成本），它是基于影子成本原理这

个过程可能涉及到新电源的规划、现存电源的价值评价和退役分析、区外购电的价值评价、纯现存电源情况下的容量价值参考系等问题。

第三步：利用上述优化模型，评定相应的电力系统效益（通常也分解为容量效益和电量效益），它是基于边际成本原理，应用负荷微增方法计算的。

第四步：为了将上述成本和效益分配到每一机组和每小时，需要分别建立它们的分担准则，将它们在一个负荷曲线上，沿负荷轴和时间轴作两维展开。最简单的分担准则是按电量加权平均，它计算简单，容易理解，特别是用在成本的分担上，但未必是最理想的。本文采用电力不足概率 *LOLP* 来分担与容量有关的效益，还用电量不足期望值 *EUE* 来分担与电量有关的效益。这是一类风险分担准则，不同的分担准则对应于稍有不同的电能价值当量。

第五步：构造持续形式或时序形式的电能价值当量图表，而持续形式的电能价值当量图表不便于应用。利用典型日负荷曲线，将持续形式的电能价值当量图表转换为时序形式，即一天的 24 小时形式（如图 1-1 所示），也可以直接构造时序形式的电能价值当量图表。

最后，根据不同应用要求，用电量加权方法，将上述电能价值当量图表综合并简化为可操作的分时电价表。例如三时段的分时电价表，区分不同负荷率段的三时段分时电价表，等等。

不同的优化模型可能有不同的电能价值当量和相应的计算方法，不同的应用要求也可能有不同的分时电价形式。例如，第六章正是为了预测全年小时级的分时电价过程，制定抽水蓄能电站抽水与发电电价，评估其还贷能力而建模的。这是一个更为复杂的电能价值当量分析，包括了与经济运行、调峰、事故备用等复杂机理有关的综合成本与效益的分析与评估，并最终反映到分时电价过程的预测上。可见不同的问题，不同的模型，可能有不同的分析方法和结果，但是以下的步骤大体上是必需的：

系统的优化

- >经济学成本的评价
- >经济学效益的评价
- >成本与效益的分担
- >电能的价值当量图表的生成
- >相应的分时电价计算

第二章 确定性模型的理论准备

这一章可以根据你的基础和需要有选择地阅读。

§ 2-1 线性规划与影子价格

一、两个例子

1. 生产收益最大化的线性规划例子

设一个生产系统有两类产品，每单位产品 1 的售价是 20 元，每单位产品 2 的售价是 30 元，设产品 1 的产量决策变量为 x_1 ，设产品 2 的产量决策变量为 x_2 ，则该系统的总收益为 $20x_1 + 30x_2$ 。优化的目标是确定 x_1 和 x_2 ，使系统的总收益 z 最大，即

$$\max z = 20x_1 + 30x_2$$

又设该系统生产上述两类产品需要消耗两类资源。每生产 1 个单位产品 1，需要消耗 6 个单位资源 1；每生产一个单位产品 2，需要消耗 1 个单位资源 1。而资源 1 是有限的，资源 1 的最大允许消耗量为 100，则资源 1 的不等式约束为

$$\text{S. T. } 6x_1 + x_2 \leq 100$$

同理，每生产 1 个单位产品 1，需要消耗 2 个单位的资源 2；每生产 1 个单位产品 2 需要消耗 7 个单位的资源 2。而资源 2 也是有限的，资源 2 的最大允许消耗量为 140 则资源 2 的不等式约束为

$$\text{S. T. } 2x_1 + 7x_2 \leq 140$$

进而，考虑产量决策变量 x_1 、 x_2 不能为负值，则其线性规划模型为

$$\left. \begin{array}{l} \max z = 20x_1 + 30x_2 \\ \text{S. T.} \quad 6x_1 + x_2 \leq 100 \\ \quad \quad 2x_1 + 7x_2 \leq 140 \\ \quad \quad x_1 \geq 0 \\ \quad \quad x_2 \geq 0 \end{array} \right\} \quad (2-1)$$

这是一个典型的线性规划问题，用向量表示的典型形式是

$$\left. \begin{array}{l} \max z = c^T x \\ \text{S. T.} \quad Ax \leq b \\ \quad \quad x \geq 0 \end{array} \right\} \quad (2-2)$$

式中： c 、 x 为 n 维向量； b 为 m 维向量； A 为 $m \times n$ 维矩阵（ $m \leq n$ ）。 A 的 n 列中存在 m 个线性无关的列，即 m 个约束式是相互独立的，不重复的。由 A 中线性无关列组成的非奇异的 $m \times m$ 维子矩阵称为 A 的基 A_B ，则根据线性规划原理，上述规划的基本可行解是

$$x_B^* = A_B^{-1}b \quad (2-3)$$

现在研究当资源向量 b 发生微变时，在系统目标 z 中引起的微变。它反映了资源在此优化系统中的边际价值，其量纲为单位资源的货币值，因此正是资源的影子价格。按上述定义，资源的影子价格

$$y^* = \frac{\partial z}{\partial b} = \frac{\partial c_B^T x_B^*}{\partial b} = \frac{\partial c_B^T A_B^{-1}b}{\partial b} = (c_B^T A_B^{-1})^T$$

式中： c_B 是对应于基变量 x_B 的 c 向量，则

$$y^* = (A_B^T)^{-1}c_B \quad (2-4)$$

在这个例子中由于

$$c_B = c = \begin{bmatrix} 20 \\ 30 \end{bmatrix}, A_B = A = \begin{bmatrix} 6 & 1 \\ 2 & 7 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 100 \\ 140 \end{bmatrix}$$

并代入式 (2-3), 得最优产量决策

$$x^* = \begin{bmatrix} 6 & 1 \\ 2 & 7 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 100 \\ 140 \end{bmatrix} = \frac{1}{40} \begin{bmatrix} 7 & -1 \\ -2 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 100 \\ 140 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 14 \\ 16 \end{bmatrix}$$

将 x^* 代入式 (2-4), 得资源的影子价格

$$y^* = \begin{bmatrix} 6 & 2 \\ 1 & 7 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 20 \\ 30 \end{bmatrix} = \frac{1}{40} \begin{bmatrix} 7 & -2 \\ -1 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 20 \\ 30 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 4 \end{bmatrix}$$

这个结果表明:

(1) 产品 1 和产品 2 的最优产量决策

$$x_1 = 14, \quad x_2 = 16$$

(2) 这时有最大的总收益

$$z = 20x_1 + 30x_2 = 20 \times 14 + 30 \times 16 = 760 \quad (\text{元})$$

(3) 资源 1 和资源 2 的影子价格

$$y_1 = 2, \quad y_2 = 4$$

(4) 影子价格反映了该有限资源在这项优化了的生产系统中的价值。资源 1 每单位值 2 元, 资源 2 每单位值 4 元, 则资源 2 比资源 1 更可贵。

(5) 影子价格是通过资源约束条件 (起作用的) 上限的边界值 b 微变后求得的, 因此影子价格本质上是一类边际信息。

(6) 资源的影子价格可能不同于市场价格, 如果资源 1 的市场价格大于每单位 2 元, 或者资源 2 的市场价格大于每单位 4 元, 则总收益 z 将下降。

2. 资源消耗最小化的对偶线性规划例子

在理想情况下, 一个企业的生产系统, 追求最大生产收益和追求最小资源消耗的目标是一致的。上述例子完全可以用另一种方式叙述, 即设该生产系统要消耗两类资源。资源 1 的最大限量为 100, 它的影子价值为 y_1 , 资源 2 的最大限量为 140, 它的影子价值为 y_2 。如果这两类资源都得到了充分利用, 该系统的总资源价值的消耗为 $100y_1 + 140y_2$, 优化的目标是总资源价值的消耗 ω