

天津大学
硕士学位论文
零售市场中电量电价弹性系数分析
姓名：秦祯芳
申请学位级别：硕士
专业：电力系统及其自动化
指导教师：余贻鑫
20031201

中文摘要

掌握电力市场中电能需求随电能价格变动的规律（即需求响应规律）对于合理确定电价与市场开拓是极为重要的。然而，由于当前我国零售电力市场尚未开放，市场参与者的选择权有限，而且传统的电能销售模式对寻求用户需求对价格的敏感度（即用户的电量电价弹性系数）分析的技术和信息支持均不完备，致使电量电价弹性系数的分析具有很大难度。

为解决这一问题，本文首先尝试基于“当前，峰谷分时电价政策的执行，使用户可以通过选择用电时间，从而间接地选择电能价格”这一现实，针对辽宁省当前零售市场中的行业用电峰谷分时电价的统计数据，运用了一元线性回归模型，挖掘出了电量电价弹性系数。又鉴于电量是受多种因素影响的，本文进而对一些典型行业选用多元线性回归方法进行了分析，给出了电价及相关经济因素对售电量的影响关系。多元回归模型与前一模型所得到的电价对售电量影响趋势相近，从而验证了前一模型的可行性。

然而，研究表明，在实际情况下，部分用户某一时刻的用电量不仅与该时刻的电价有关，还受到相邻时刻的电价影响。因此，本文进一步建立了电量电价弹性矩阵，分析了由于用户分类及电价分类不同所引起的弹性矩阵结构的不同，并在此基础上，提出了一种弹性矩阵的简化方法，给出了在我国当前零售端电力市场中，电量电价弹性矩阵的求取过程，阐明了以月为单位时自弹性系数与交叉弹性系数间的互补性。该方法不仅可以更好的反映电量电价的实际关系，而且提出了新的数据处理方法，消除了地区差异和时间周期的影响，从而扩大了可用样本数。实际应用表明，本文提出的电量电价弹性系数分析方法和模型能够反映当前市场中的需求规律，具有一定的实用价值。

小样本问题是在我国当前零售电力市场分析中经常遇到的问题，因此，本文又分析了偏最小二乘回归在小样本多元分析中的优势，及其在零售电力市场中的应用领域。实例给出了其在配电商成本分析模型中的应用。而应用偏最小二乘回归求得的成本分析指标，符合实际规律，可以用于对配电商进行评价和分析。

上述方法，已经作为核心算法在辽宁省电力市场分析与决策支持系统——电量电价关系子系统中得以应用实现。

关键词：电量电价弹性矩阵，自弹性系数，交叉弹性系数，零售电力市场，偏最小二乘回归

ABSTRACT

In order to determine the electricity price reasonably and to extend the power market, it is important to master the principle that the energy consumption quantity varies with the price in power market (called Demand Response principle). However, the current retail power market in our country has not opened and the option of the market participants is limited. On the other hand, there are not enough technologies and data needed by the customer's price sensitivity analysis (called Price Elasticity of Demand) in traditional energy sell patterns. All these have complicated the electricity price elasticity analysis.

To solve this problem, this paper first bases on the fact that the performance of Time of Use enables users to choose the price indirectly by choosing their using time. And it digs out the price elasticity by using the simple linear regression method, according to the industry consumptions in the current retail power market of province Liaoning. Because the energy consumption quantity is affected by many factors, multiple regression method has been used for analysis of the typical industries. The results have reflected the relationship between energy consumption quantity and price together with other factors. In the aspect of the tendency of price influence on energy consumption quantity, the same results have been got from above two models. This has proved the feasibility of the first model.

However, deeper study has proved that the energy consumption quantity is affected not only by current price, but also by adjacent prices. Therefore, this paper presents the constructing process of price elasticity matrix of demand, and analyses the difference of elasticity matrix structure based on different user classes and price sorts. Then it presents a simplified method for the elasticity matrix, and shows the calculating process in our current retail power market by an example. The result has shown that the self-elasticity coefficients and the cross-elasticity coefficients are compensative. This method can not only reflect the relation between energy consumption quantity and price more reasonably, but also enlarge the example number by presenting a new method for data proceeding to remove the effect of place difference and time cycle. The actual applications have proved that the models provided in this paper can reflect the Demand Response principle in current retail market, and own some practical effects.

Considering that the multivariate data analysis with few observations is often involved in current retail power market, this paper has also analyzed the advantages of partial least squares regression in multivariate data analysis with few observations and its application areas in retail power market. And an example is given to show its use in cost analysis for distribution traders. The results have shown that the calculated indexes of cost analysis are reasonable and can be used to estimate the distribution traders.

Above methods have been used as the most important arithmetic in price subsystem of power system analysis and decision-making system for Liaoning Province Power Company.

Key words: Price Elasticity Matrix of Demand, self-elasticity coefficient, cross-elasticity coefficient, retail power market, partial least squares regression

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：秦祯芳 签字日期：2003 年 12 月 10 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：秦祯芳

导师签名：余贻鑫

签字日期：2003 年 12 月 10 日

签字日期：2003 年 12 月 10 日

第一章 绪论

1.1 引言

1.1.1 电力市场概述

电力市场是采用法律、经济等手段，本着公平竞争、自愿互利的原则，对电力系统中发电、输电、供电、用户等成员组织协调运行的管理机制和执行系统的总和^[1]。

电能作为一种商品，具有许多普通商品不具有的特殊性，因此，电力市场也具有其特性。电能的生产和消费除了管理和经济方面的因素之外，还受到复杂的电磁物理特性的制约，并且电能的生产和消费必须同时进行，还要保证用户使用电能的安全性和可靠性，因此，电力市场是一个复杂的综合体，它囊括了电价、电力系统的运行、负荷管理、供用电合作以及通信和计算机系统的总和，是电力经营管理与技术的综合体。

电力系统是典型的大系统，具有天然的垄断性。为了加速电力工业的发展，国外相应地提出了解除管制（Deregulation）、输电开放（Open Access）、电力市场（Electric Power Market）等概念为电力工业的注入了新的活力。

电力市场的基本特征是：开放性、竞争性、计划性和协调性。与传统的垄断电力系统相比，电力市场具有开放性和竞争性。与不同的商品市场相比，电力市场具有网络性和协调性。电力系统是相互紧密联系的，任一成员的操作，均将对电力系统产生影响。所以要求电力市场中的电力生产、使用、交换具有计划性。同时由于电力系统要求随时做到供需平衡，所以要求电力市场中的供应者之间、供应者与用户之间相互协调。在开放电力工业的实践中普遍达成了以下共识：

- 努力加强竞争；
- 给用户更多的选择性；
- 输电服务应方便用户选择，促进供电竞争。

1.1.2 电力市场中的用户

在传统的电力系统中，只有负荷的概念而没有真正意义的用户的概

念。电力部门将负荷看作固定的、被动的、没有协作的受控制的终端。而在电力市场中，负荷作为用户参与到市场中来，是电力市场中的一个成员，即参与竞争又参与协作，具有能动性。

用户在电力市场中的能动性表现在以下几方面：

当电价较高时，用户会考虑少用电；当电价较低时，用户会考虑多用电。比如居民用户在电价较高时，会考虑暂时不开或少开空调；工业用户会调整工作时间，安排在电价较低时生产，以节约成本。当电价很高时，个别用户会考虑利用自备发电装置向电网供电，以求高额回报。目前，随着电力市场化的改革的不断深入，市场体制的不断完善。电力的消费者——用户在电力市场中的作用越来越不容忽视。

1.1.3 电力市场中的电价

1.1.3.1 电价的功能和定价的原则

电价是电力市场的杠杆和核心内容。实时电价、节点电价等不同的价格机制体现着不同的电力市场管理方式，对电力市场的运行产生重大的影响。

电力工业是生产和经营电力商品的产业，与其它市场构成一样，电力市场同样主要由供给和需求两方面组成。近年来，随着电力建设步伐的不断加快，电力供需发生了根本性变化，电力市场由过去的卖方市场逐步转向买方市场。根据经济学的基本原理，价格机制是市场机制的核心，价格是市场调节机制中传递供求变化最敏感的信号，是影响市场的关键因素。在电力市场中，电价处于核心地位。要建立规范、健康的电力市场，就必须充分发挥电力市场的杠杆——电价的调节作用。

电价是经济信息的载体和利益调节器，其基本职能是表价值能和调节职能。

- (1) 正确反映生产成本，以维持系统的简单生产。
- (2) 具有筹资功能，以扩大再生产，满足经济发展的需要。
- (3) 具有调节功能。合理的电价结构和电价体系应当在宏观和微观两方面引导供求平衡，以实现电力资源的充分利用。

电价功能决定了电价制定的原则，我国《电力法》规定，制定电价的原则是：合理补偿成本，合理确定收益，依法计入税金，坚持公平承担。

定价的原则是否正确，是影响电力改革成败的关键因素之一。美国加州管死了售电电价，而放开发电批发电价，结果造成了严重的经济危机。

1.1.3.2 电价定价的方法

电价形成机制包括定价方法和电价管理机制。电价管理机制涉及到市场结构和国家的政策、法规等。不属于本文的研究范围。根据电价形成机制适用的范围，可将定价方法分为计划经济体制下的定价方法和市场经济体制下的定价方法。

1)会计学成本定价

计划经济体制下的电价计算及综合成本（会计学成本）为基础。这种电价的代表是两部制电价。两部制电价把电价分成两部分。一部分是以用户用电的接用容量或需量计算的基本电价；另一部分是以用户耗用电量计算的电度电价；此外，以功率因素调整电价。

2)市场定价

适用于市场经济的定价方法是竞争报价，这种价格机制不在依据生产成本，而是用户效用。用户效用的概念实现了价格对供需的完全弹性，充分实现了资源的最优分配。但是，国内电力市场改革刚刚起步，短期内很难打到这种水平。

3)边际成本定价

边际成本是在系统优化规划及优化运行的基础之上，增加单位电能供应，系统所增加的成本。以边际成本为基础的电价给用户一个选择，用户根据增加电能消费的收益与增加电费支出，决定是否增加电能消费，从而实现负荷管理的功能。文献证明，与电能的短期边际成本相对应的实时电价可以实现社会利润最大化。

1.1.3.3 电价制度分类

电价体制随着电力工业和经济的发展，也在发生着变化，总结起来，电价体制主要有以下几种：

1. 单一制电价

单一电价制度不管用电的时间及其相应的设备的容量，电价是固定不变的，在我国是由国家统一制定的，电力企业不能更改。由于不管是在用电高峰期还是低谷期，电价都是一样的，所以不能调动用户在低谷期用电的积极性，这样一来，就不能通过电价来进行负荷侧的管理。并且由于存在行政的干预，使得单一制电价体制不能充分体现公平的原则，存在许多弊端。

2. 峰谷分时电价

峰谷电价就是根据电力系统负荷变化的情况，将一天中负荷重的时间作为高峰时段，将负荷轻的时间作为低谷时段，不同的时段使用不同的电价，高峰时段电价贵，低谷时段电价便宜。这种高峰时段和低谷时段的时间是人为规定的，不能变动，目的就是鼓励高峰时段的负荷转移到低谷时段，以减少高峰期的用电量，增加低谷期的用电量，使得负荷在时间上分布趋向平稳。相对于单一制电价来说有了很大的进步。

3. 两部制电价

由于电能是不能储存的，因此，不管用户是否用电，电力公司都要随时准备足够的容量供应，这样，即使用户当时不用电，供电方也要做好供电的准备，相应产生的成本，叫做电力成本，只与系统的容量有关，另外，电力公司实际发的电能，产生了相应的电量成本，由这两部分成本定出的电价，就形成了两部制电价。两部制电价考虑到了电能不能够储存的特点，因此也有了一定的进步。

4. 季节性电价

季节性电价是针对水电站的丰水期和枯水期，将全年分成几个时期，不同的时期采用不同的电价。

同时，我国还根据负荷的不同，根据国家的有关政策，对电力用户进行了分类，不同的用户使用不同的电价。

上面的电价制度，在我国计划经济时期对我国经济的发展起到了很大的促进作用，但是随着我国从计划经济向市场经济的转变，建立电力市场已经成为必然，电力市场的建立，必然打破现在的垄断经营，上述的电价制度已经不能适应实际的需要，因为它们都是按照传统的发、输、配电垂直统一管理模式的模式建立起来的电价制度，因此，研究新的、适合我国的电价制度已经成为当务之急。

5. 实时电价

实时电价是在考虑运行和基本投资的情况下，在给定的时段（一般为0.5小时或者1个小时）向用户提供电能的边际成本。这是由斯威普在八十年代提出的，到目前为止，理论研究已经相当的深入，而且已经在实际中得到了应用。

在实时电价的理论中，电价是依据边际成本理论来计算的，由经济学原理可知，边际成本定价存在收支不平衡的问题，因此，在实时电价的组成里面加入了发电收支平衡项和网络收支平衡项，以满足收支平衡的问

题。

以前的电价理论采用综合成本方法和长期边际成本方法，它们可以反映一个较长的时期内的电力生产成本及总体负荷水平，实时电价理论，能够反映短期内（0.5 小时甚至更短的时段）的生产成本和用电量信息，从而可以指导用户优化用电。

实时电价的制定可以说是电价理论的一个突破，它不仅在电价的合理性、可操作性上有了很大的进步，而且可以合理配置社会资源，并且对系统的运行方面也能够起到一定的作用。（1）实时电价可以合理的配置社会资源；（2）负荷管理的功能，鼓励用户合理用电；（3）调节系统的运行。

1.2 研究的目的和意义

因此，供电公司当前应当研究的主要问题之一是一用户对电价的响应。这是供电公司必须做好的基础工作之一，对于电力市场运行稳定性及供电公司购电预测将产生重大影响。

依据经济学原理可知，价格是国民经济发展的重要经济杠杆，而电价就是电力市场的杠杆，且需求量应与价格成反比关系的命题在电力行业中应该是同样适用的。所以掌握电力市场中电能需求随电能价格变动的规律（即需求响应规律）对于合理确定电价与市场开拓是极为重要的，随着电力市场化进程的逐步加深，这一点会显现的越发明显。

1.3 零售端电力市场电量电价弹性分析的现状

然而，由于当前我国零售端电力市场尚未开放，市场参与者的选择权有限，而且传统的电能销售模式对寻求需求对电价弹性（简称电量电价弹性）分析的技术和信息支持均不完备，致使电量电价弹性的分析具有很大难度。由于以上原因，国内对电价的研究主要集中在发电侧和基于成本的峰谷分时价格的制定和时段划分上，只有少数文献分析了需求侧电量对电价的弹性值^[2,3]，且只考虑了自弹性系数，而没有考虑交叉弹性系数^[4,5]；而国外由于实行了实时电价，对实时电价下的电量电价弹性作了一定的分析，但这些方法在我国现阶段的零售端电力市场中并不可行，且方法本身可以进一步发展。而且国外电力市场的研究中通常对弹性系数采取直接取值的方法，没有给出一个求取的方法或模型^[6,7,8,9,10]。

国内外多篇文献讨论了基于成本的峰谷分时价格的制定和时段划分

方法,但并没有将其应用于电量电价弹性分析。文献[2]认为电价的弹性系数是成本分摊的函数,用回归求出成本分摊,再估计弹性系数。然后又用实际数据比较了执行和不执行 TOU 的电量变化,认为执行合理的 TOU 可以使社会总收益最大化。但它没有利用 TOU 本身的特点来分析电量电价弹性系数。

在 San Diego,居民电价一般根据 5 个月的趸售的平均电价来制定,所以文献[4]构造了估计电力消费的多元回归模型。并通过 SD 与控制组 LADWP 的差来分析电力需求的价格弹性。并选用四种不同的电价定义来计算,结果发现选用前 5 个月的平均电价求得的弹性最高,为-0.06。说明居民用户对电价的反映具有滞后性,主要是通过对上一期的账单来做出反应的。文献[5]介绍一种新的电力需求预测方法——计量经济模型法,首次综合考虑 GDP、电价和气温对电力需求的影响。这类文献虽然提出了价格弹性系数的求取方法,但只考虑了自弹性系数,没有明确提出和运用交叉弹性系数的概念来提高分析的精度。

文献[6]分析了实时电价(短期)时,用户可以通过调整自己的负荷曲线轮廓来降低电费支出,并用由自弹性系数和交叉弹性系数组成的矩阵来分析用户的行为。并说明了该矩阵在机组运行和电力市场定价中的应用。文献[7]建立了基于整体最优的峰谷分时定价模型,并通过应用弹性矩阵,反复迭代,求得最优的电价和相应的电量。文献[8]分析了电力需求弹性在安全性定价中的作用。文献[9]在实时条件下,分析了不同类型用户的弹性矩阵特性,用设定的弹性矩阵估计负荷分布。这类文献提出了弹性矩阵的应用,但都是人为地给出弹性系数,没有提出求取系数的合理方法或模型。

偏最小二乘回归模型作为解决小样本问题的一个较好方法,已经被广泛应用在化工等领域。近年来,偏最小二乘回归模型在电力系统分析中也有所应用,如用于负荷预测^[30],但在零售电力市场分析中还未有应用。

1.4 本文的主要工作

本课题主要完成一下几方面内容:

- 1)、基于“当前,峰谷分时电价政策的执行,使用户可以通过选择用电时间,从而间接地选择电能价格”这一现实,针对辽宁省当前零售市场中的行业用电峰谷分时电价的统计数据,挖掘出电量电价弹性系数。又鉴于电量是受多种因素影响的,对一些典型行业

选用多元线性回归方法进行分析，给出电价及相关经济因素对售电量的影响关系。

- 2)、分析了弹性矩阵的构成和结构特点，并给出了简化的求取方法。
实例为在国内现行电力市场中，根据峰谷分时数据，求取弹性矩阵的过程。该模型不仅可以用于现行电力市场中的负荷预测和电价制定，而且在我国将来的实时电力市场中具有广泛应用前景。
- 3)、分析了偏最小二乘回归在小样本多元分析中的优势，及其在零售电力市场中的应用领域，并用实例给出了其在配电商成本分析模型中的应用。
- 4)、实际参与了程序设计和代码实现，把以上模型应用于辽宁省电力市场分析与决策支持系统——电量电价关系子系统中。

第二章 基于峰谷分时政策的电量电价弹性的求取

2.1 引言

依据经济学原理可知，价格是国民经济发展的重要经济杠杆，而电价就是电力市场的杠杆，且需求量应与价格成反比关系的命题在电力行业中应该是同样适用的。所以掌握电力市场中电能需求随电能价格变动的规律（即需求响应规律）对于合理确定电价与市场开拓是极为重要的，随着电力市场化进程的逐步加深，这一点会显现的越发明显。

然而，由于当前我国零售端电力市场尚未开放，市场参与者的选择权有限，而且传统的电能销售模式对寻求需求对电价弹性（简称电价弹性）分析的技术和信息支持均不完备，致使电价弹性的分析具有很大难度。

基于以上考虑，这一章将主要研究当前电力市场中电价变动对售电量的影响，即电量对电价的弹性问题。为解决这一问题，本文首先基于“当前，峰谷分时电价政策的执行，使用户可以通过选择用电时间，从而间接地选择电能价格”这一现实，针对辽宁省当前零售市场中的行业用电峰谷分时电价的统计数据，运用了一元线性回归模型，挖掘出了电价弹性。又鉴于电量是受多种因素影响的，进而对一些典型行业选用多元线性回归方法进行了分析，给出了电价及相关经济因素对售电量的影响关系。在电价对售电量影响趋势方面，上述两种模型得到的结果相同。结果表明，本文提出的两种电价弹性分析方法可在一定程度上反映了当前市场中的需求规律，具有一定的实用价值。

2.2 数学模型

2.2.1 基于峰谷分时电价的电价弹性

考虑到当前电力市场中，峰谷分时电价政策的执行，使用户可以通过选择用电时间，从而间接地选择了电能价格。因而，我们可以利用执行峰

谷分时电价政策环境下的消费市场中峰、谷、平电量与电价的统计数据来求取电量对电价的弹性。这样不仅能够从总体水平、实行峰谷分时电价部分和不实行峰谷分时电价部分三方面来分析电价弹性；而且可以分析执行峰谷分时电价政策对电价弹性的影响。

根据辽宁省电力公司下属的丹东供电公司和鞍山供电公司提供的 2000 年 1 月至 2002 年 10 月的数据，本文首先进行了奇异数据的检验和筛选，进而利用多种回归模型中进行了反复试算和检验，结果表明：在多种回归模型中，对数回归模型和线性回归模型能较好的反映电量电价关系。而且多数行业中，线性回归模型的拟合度更高。这里线性模型的常数项代表了其它相关项的影响。所以本文最终选取了一元线性回归模型^[11]来计算。该模型如下：

$$Y = a_0 + a_1 X \quad (2-1)$$

其中：

$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T, Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ ， n 为样本个数；

$x_i = p_i / \overline{A_p}$ ， $i = 1, \dots, n$ 是规范化后的电价值；

$y_i = q_i / \overline{A_q}$ ， $i = 1, \dots, n$ 是规范化后的电量值；

p_i 是时段 i 的电价；

q_i 是时段 i 的电能消费量。

$\overline{A_p}$ 是电价的平均值

$\overline{A_q}$ 是电量的平均值

于是可知电价弹性如下：

$$S = \frac{dY}{dX} = a_1 \quad (2-2)$$

在执行峰谷分时电价政策时，对应时段 i ，若的总电费和总电量分别为 f_{1i} 和 q_{1i} ，则总平均电价和电量为 $p_{1i} = f_{1i} / q_{1i}$ 和 q_{1i} ，相应的实行峰谷分时部分的平均电价 p_{2i} 和电量 q_{2i} ，不实行峰谷分时部分的平均电价 p_{3i} 和电量 q_{3i} 分别如下：

$$p_{2i} = \frac{f_{fi} + f_{gi} + f_{pi}}{q_{fi} + q_{gi} + q_{pi}} \quad (2-3)$$

$$q_{2i} = q_{fi} + q_{gi} + q_{pi} \quad (2-4)$$

$$p_{3i} = \frac{f_{li} - (f_{fi} + f_{gi} + f_{pi})}{q_{li} - (q_{fi} + q_{gi} + q_{pi})} \quad (2-5)$$

$$q_{3i} = q_{li} - (q_{fi} + q_{gi} + q_{pi}) \quad (2-6)$$

其中： f 代表售电电费； q 代表售电量；下标 f 、 g 、 p 分别代表峰、谷、平。

2.2.2 多元线性回归

多元回归分析研究的是一个因变量对多个解释变量的依从关系。多元线性回归的公式为：

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_mx_m \quad (2-7)$$

其中： y 为因变量； x 为解释变量，即与 y 相关的诸因素； b 为回归系数（也叫待定系数）。

由于电能是基础性能源，因此影响售电量的因素很多，加之目前电力行业的市场化程度很低，致使电价因素并非是影响售电量的主要因素。在这种情况下，用多元回归法来综合分析各种经济因素和电价对电量的影响是较为科学的。

实际应用中其计算方法是：

1、化模型（2-7）为矩阵形式： $Y = Xb$ ，其中

$$Y_{n \times 1} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad X_{n \times (m+1)} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}, \quad b_{(m+1) \times 1} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_m \end{bmatrix}$$

y_1, \dots, y_n 分别为 n 组观测值，利用偏微分方程离差平方和最小^[11]，求得

$b = (X^T X)^{-1} (X^T Y)$ ，其中

$$X^T X = \begin{bmatrix} n & \sum x_{11} & \dots & \sum x_{1m} \\ \sum x_{11} & \sum x_{11}^2 & \dots & \sum x_{11}x_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum x_{1m} & \sum x_{11}x_{1m} & \dots & \sum x_{1m}^2 \end{bmatrix}, \quad X^T Y = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum y_i x_{i1} \\ \dots \\ \sum y_i x_{im} \end{bmatrix}$$

$\sum x_i$ 为 $t=1$ 到 n 求和。

2、显著性分析：方差分析检验模型的显著性水平 $F = \frac{\text{回归均方}}{\text{剩余均方}} = \frac{U/(k-1)}{Q/(n-k)}$ 。

对于给定的置信度，查 F 分布表求得 $F_{\alpha}(k-1, n-k)$ 。则假设检验为：若 $F \geq F_{\alpha}$ ，则模型显著可靠；否则，不显著可靠，一般取 $\alpha = 0.05$ 或 0.1 。

2.3 数学模型应用中的有关问题

2.3.1 基于峰谷分时电价的价格弹性的应用

上述基于峰谷分时电价的价格弹性模型是对不同行业分别应用的。它可以进行售电量随电价的总体变动趋势、用户参与（峰谷分时电价部分）变动趋势和用户未参与（不实行峰谷分时电价部分）变动趋势分析。三者的弹性，应当是实行峰谷分时部分的价格弹性最高，总体价格弹性次之，而不实行峰谷分时电价部分的弹性最低。

2.3.2 多元线性回归应用

为了说明如何选取相关因素（解释变量）的问题，本文以农业灌溉、商业、居民和交通运输四个行业为例。具体做法是，首先根据专家经验和可能的数据来源选取了各个行业的初始相关因素，然后基于如下原则对相关因素进行调整：

- a、剔除彼此间相关度太高的因素；
- b、剔除回归时几乎不能解释因变量的因素；
- c、应用文献[12]中的分段多元回归分析，对初始相关因素进行调整。

本文最终选用的相关因素如下：

- a、农业灌溉：降水量、有效灌溉面积、农作物产量、农业排灌售电均价；
- b、商业：全省人均 GDP、最高气温、最低气温、商业售电均价；
- c、居民：人均住房面积、最高气温、居民售电均价；
- d、交通运输：交通运输产业增加值、交通运输总运量、交通运输售电均价。

2.4 示例与分析

2.4.1 基于峰谷分时电价的价格弹性示例与分析

选取商业作为实行峰谷分时电价的价格弹性示例。其历史数据如表 2—1 所示。由公式 (2—2) 计算得到的该行业的总平均电价弹性、实行峰谷分时部分的价格弹性和不实行峰谷分时电价部分的弹性, 分别为 -0.4443、-0.7806 和 0.0005。对应的电量-电价曲线如图 2—1。

表 2—1 商业历史数据

年月	总电量 /10MWh	总电费 /千元	峰电量 /10MWh	谷电量 /10MWh	平电量 /10MWh	峰电费 /千元	谷电费 /千元	平电费 /千元
200010	1671	12461	283.8	94.37	335.6	2963	329.5	2383
200011	1523	10938	245.5	183.7	335.0	2554	636.2	2316
200012	1895	13977	363.0	175.5	400.2	3773	608.9	2767
200101	1972	13077	255.0	475.1	393.8	2652	1642	2729
200102	1767	12809	273.7	166.1	360.7	2846	575.8	2503
200103	1578	11690	304.7	131.5	316.8	3164	456.0	2192
200104	1537	11342	259.3	109.0	293.3	2693	377.5	2031
200105	1444	10186	183.3	181.8	286.9	1906	628.7	1986
200106	1549	11635	326.0	111.0	366.5	3383	384.7	2536
200107	1769	13225	370.7	138.8	431.9	3847	481.0	2988
200108	1868	14027	381.2	129.5	359.8	3957	448.7	2491
200109	1574	11779	299.7	106.1	272.5	3111	367.9	1887
200110	1535	11292	262.8	124.3	310.0	2729	430.5	2146
200111	1403	10431	302.0	123.6	256.7	3135	428.5	1765
200112	2077	13940	329.2	496.6	387.7	3420	1716	2685
200201	2058	13953	270.7	417.8	340.1	2815	1444	2357
200202	1713	11432	218.2	402.6	303.3	2270	1391	2114
200203	1755	12994	339.7	146.8	367.7	3529	508.9	2546
200204	1629	12116	310.0	119.5	345.0	3220	414.0	2389
200205	1716	12874	359.0	124.2	374.8	3725	430.0	2593
200206	1816	13692	385.6	119.9	429.2	4003	415.7	2970
200207	2111	16080	516.0	151.9	549.5	5353	526.0	3802
200208	2264	17075	485.4	147.8	529.2	5037	511.9	3661
200209	2013	15171	423.2	133.2	493.3	4392	461.5	3413

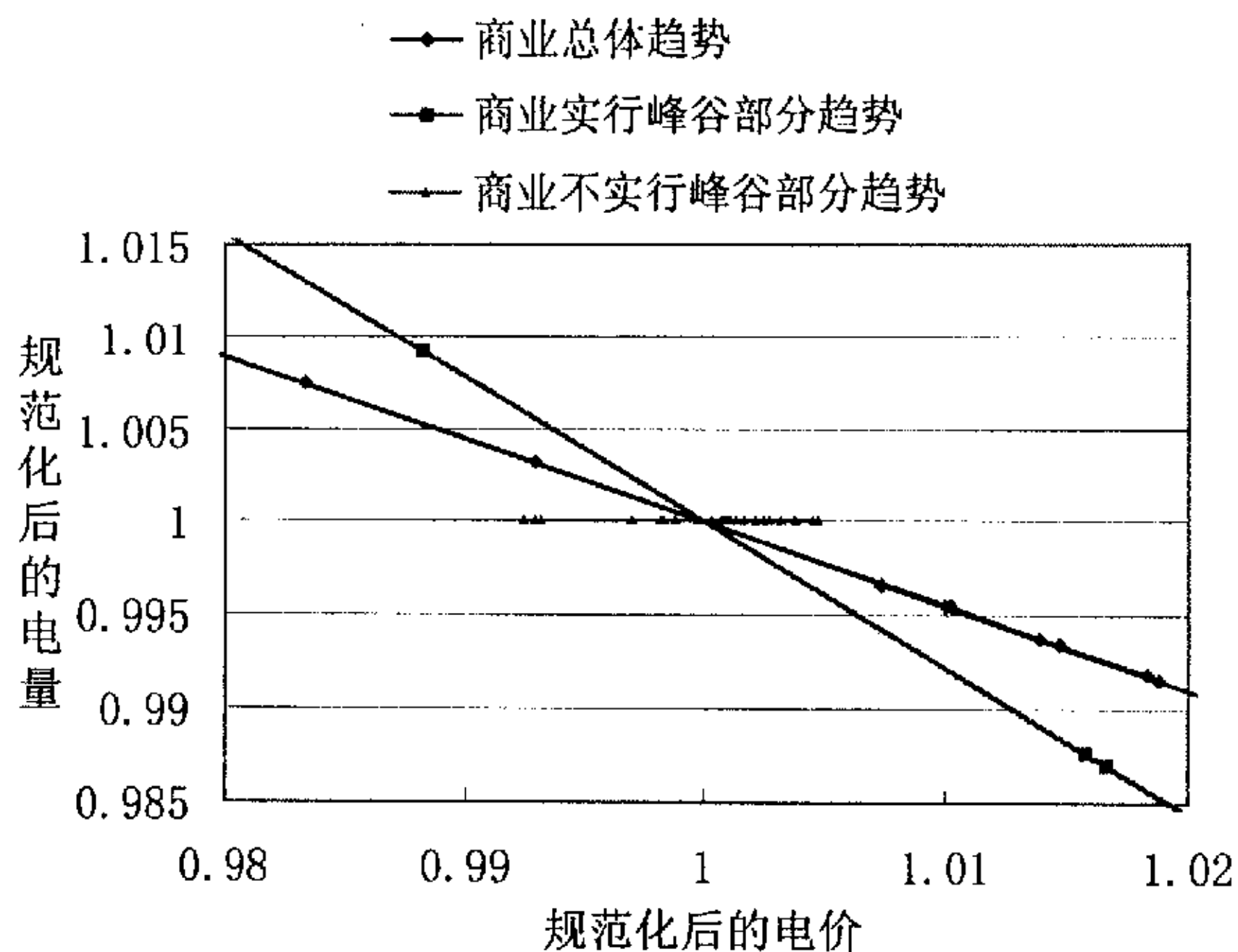


图 2-1 商业电量-电价曲线

图 2-1 中，作为规范化基值的商业总体水平、实行峰谷分时部分和不实行峰谷分时部分的电价平均值分别为 0.7302 元/kWh，0.7491 元/kWh，0.7137 元/kWh；相应的电量平均值分别为 1760×10^4 kWh， 879×10^4 kWh 和 881×10^4 kWh。

结果表明该行业的电量与电价成反比关系，且实行峰谷分时部分的电价弹性较高，而不实行峰谷分时部分的电价弹性最低（接近于零）。后者是由于该行业的不实行峰谷分时电价部分的电价几乎不变，致使其引起的电量变动几乎为零。这说明用峰谷分时无法对这部分电价弹性进行估计。真正可用作电价弹性的主要是实行峰谷分时电价部分的电价弹性。示例结果与预期的结果相吻合。证明了峰谷分时电价政策的实施，使用户能够对不同价格的电力有选择地使用，从而一定程度上反应当前市场中的需求规律。所得的结果是电价弹性的一个近似估计。

注：在辽宁省 74 个行业中选取的 30 多个行业的实际计算结果显示，大部分行业的电价和电量关系与理论分析基本一致。如图 2-2 所示为依普通工业历史数据绘制的电量-电价关系曲线。其历史数据见表 2-2，表中数据为用公式（2-3）、（2-4）、（2-5）和（2-6）计算后的数据。用公式（2-2）计算得到的总平均电价弹性、实行峰谷分时部分的电价弹性和不实行峰谷分时电价部分的弹性，分别为-5.48、-7.83 和-1.08。

表 2—2 普通工业历史数据

年月	总电量	总平均电价	峰谷平电量	峰谷平电价	不实行峰谷 平部分电量	不实行峰谷 平部分电价
	/10MWh	/元	/10MWh	/元	/10MWh	/元
200008	865	0.649	511	0.607	354	0.708
200009	865	0.645	473	0.619	392	0.677
200010	874	0.646	555	0.606	319	0.717
200011	1004	0.636	582	0.612	422	0.67
200012	1048	0.637	586	0.622	462	0.655
200101	822	0.632	462	0.614	360	0.656
200102	787	0.642	469	0.63	318	0.66
200103	880	0.644	523	0.629	357	0.665
200104	979	0.627	545	0.624	434	0.631
200105	878	0.64	491	0.624	387	0.661
200106	911	0.639	549	0.624	362	0.661
200107	820	0.646	494	0.621	326	0.684
200108	769	0.648	464	0.625	305	0.683
200109	439	0.652	248	0.619	191	0.695
200110	421	0.652	259	0.63	162	0.688
200111	443	0.648	267	0.627	176	0.68
200112	514	0.634	303	0.631	211	0.639
200201	537	0.639	315	0.638	222	0.641
200202	408	0.64	240	0.632	168	0.652
200203	490	0.637	267	0.635	223	0.639
200204	430	0.625	243	0.631	187	0.618
200205	368	0.641	229	0.616	139	0.683
200206	398	0.64	239	0.619	159	0.671
200207	367	0.645	223	0.622	144	0.681
200208	382	0.64	233	0.609	149	0.687
200209	425	0.644	254	0.62	171	0.68

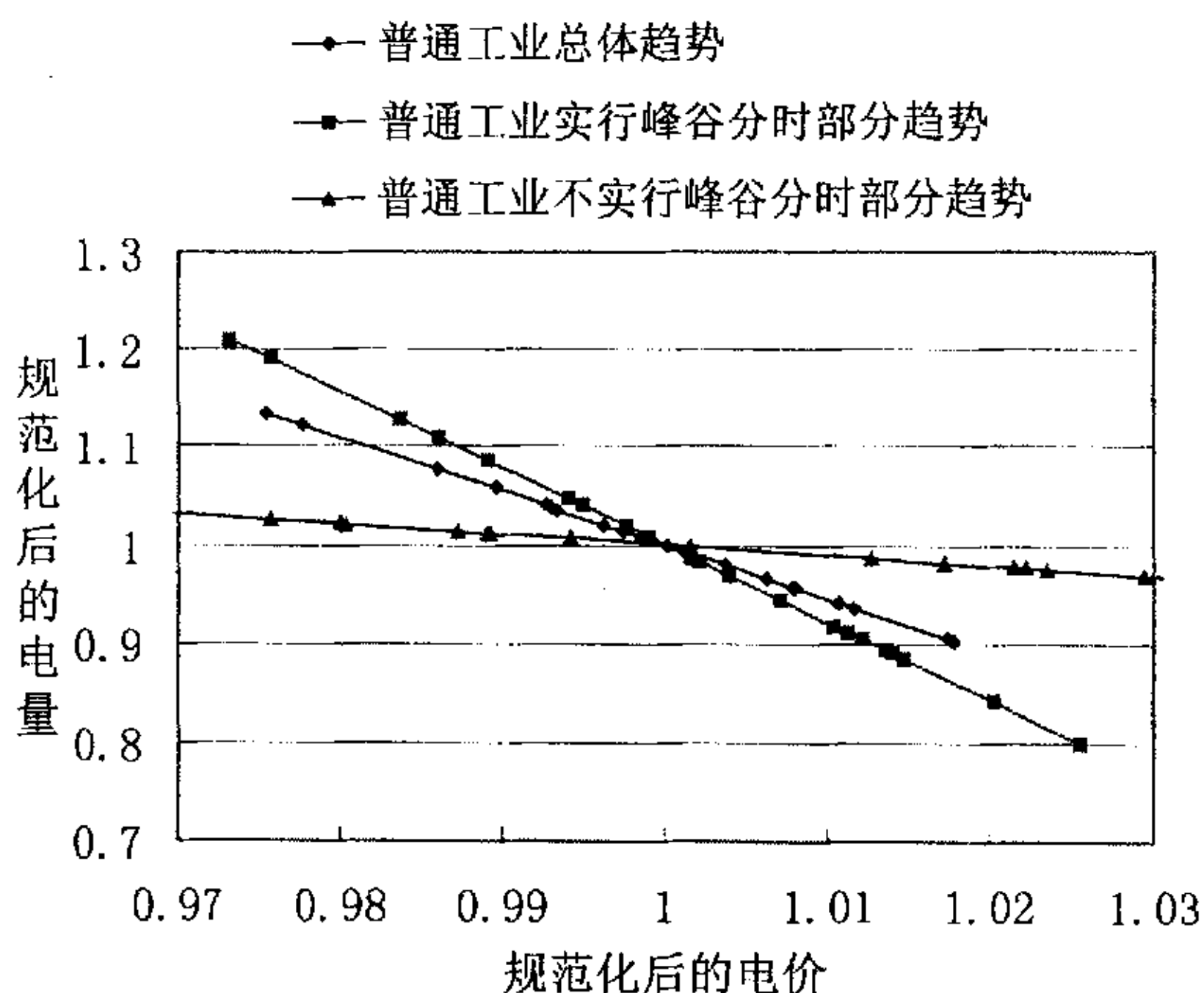


图 2-2 普通工业电量-电价曲线

图 2-2 中, 作为规范化基值的普通工业的总体水平、实行峰谷分时部分和不实行峰谷分时部分的电价平均值分别为 0.6412 元/kWh, 0.6225 元/kWh, 0.6686 元/kWh; 相应的电量平均值分别为 659×10^4 kWh, 386×10^4 kWh, 273×10^4 kWh。

此外, 部分行业的结果显示电量随电价波动的幅度较小, 其原因如下:

- 1) 不是所有行业都执行峰谷分时电价政策, 且峰谷差价小, 对用户的激励也就小。
- 2) 有些行业本身的行业性质决定了它需要连续生产, 而负荷转移的潜力很小, 致使电价的变化对其用电量的影响不大。
- 3) 目前电力行业的市场化程度很低, 使得电价对售电量影响有限。

2.4.2 多元线性回归示例与分析

以商业作为多元线性回归示例, 其相关影响因素历史数据如表 2-3 所示^[13]。

根据公式 (2-7) 计算得:

$$y = 0.01 + 1.24x_1 + 0.62x_2 - 0.34x_3 - 0.53x_4 \quad (2-8)$$

其中: y 为商业售电量; x_1 为全省人均 GDP; x_2 为最高气温; x_3 为最低气温;

x_4 为商业售电均价。为了便于比较结果系数，在计算中，这里的所有数据都用公式（2-1）中的方法进行了规范化。

表 2-3 商业用电相关影响因素历史数据

年份	全省人均 GDP	最高气温	最低气温	电价	电量
	/元	/℃	/℃	/元	/10MWh
1991	2698	34.0	-34.4	0.0950	43995
1992	2707	34.9	-28.0	0.1463	50554
1993	3254	37.3	-22.8	0.1472	65491
1994	4509	35.4	-23.9	0.2740	72044
1995	6404	36.6	-25.9	0.3437	84323
1996	6880	30.9	-15.8	0.3468	100657
1997	7730	31.4	-18.0	0.3800	109847
1998	8725	35.0	-21.2	0.4116	125400
1999	9415	32.1	-18.4	0.4220	135300
2000	10086	35.1	-18.5	0.4237	157200

由结果看商业的电量与全省人均 GDP 和最高气温成正比，与最低气温和商业售电均价成反比。并且电价对电量的影响较小。

将以上结果与基于峰谷分时电价的电价弹性分析的结果相比较可见，多元回归中的电价的系数值（即电价弹性）为-0.53，而依峰谷分时电价的电价弹性模型所得到的电价弹性为-0.4443，两者不仅趋势一致而且数值也很接近。在两种方法中，多元回归法进一步分离了其它因素的影响，从理论上说它可较真实的反映电价的弹性，但鉴于目前与其相关数据的获得较为困难，而且由于其他一些因素（如 GDP 增长）对电量变化的影响份额比电价变化对其的影响份额大得多，致使计算所得的电价的系数值（弹性）会误差较大。因而上述两种方法应该是互为补充的。

2.5 小结

（1）峰谷分时电价的电价弹性模型，是利用执行分时峰谷电价政策环境下的消费市场峰、谷、平电量与电价的统计数据求取电量对电价的弹性的一种可行方法。辽宁电力市场的示例表明，选取一元线性回归模型，最终可计算出较为合理的电价弹性。这对于今后的电价制定以及实行峰谷分

时电价等政策的制定具有指导意义。

(2) 影响售电量的因素很多，且电价因素并非是影响售电量的主要因素，因而应用多元回归法来综合分析各种相关经济因素和电价对电量的影响是较为科学的。本文所推荐的多元线性回归法及相关因素的选择方法，在辽宁省部分典型行业的使用中给出了较为合理的电价及相关经济因素对售电量的影响关系。

上述两种电价弹性计算模型所得的结果，不仅趋势相同，而且数值上接近。在目前我国零售端电力市场中数据获取困难较大的情况下，两种计算模型均有一定的实用价值。

第三章 零售电力市场中的电量电价弹性矩阵

3.1 引言

电力工业是生产和经营电力商品的产业。与其它市场构成一样，电力市场同样主要由供给和需求两方面组成。近年来，随着电力建设步伐的不断加快，电力供需发生了根本性变化，电力市场由过去的卖方市场逐步转向买方市场。根据经济学的基本原理，价格机制是市场机制的核心。因此，要建立规范、健康的电力市场，就必须充分发挥电力市场的杠杆——电价的调节作用。而供电公司当前应当研究的主要问题之一是对用户对电价的响应。从理论上讲，用户对电价的反应与用户需求对价格的敏感度（即用户的价格需求弹性）有关。

然而，在目前国内电力市场的研究中，只有少数文献分析了电量电价弹性系数^[8,3]，但只考虑了自弹性系数，而没有考虑交叉弹性系数^[4,6]；而国外电力市场的研究中通常对弹性系数直接取值，没有给出一个求取的方法或模型^[6,7,8,9,10]。本文给出了电量电价弹性矩阵的建立过程，并分析了由于用户分类及电价分类不同所引起的弹性矩阵结构的不同。在此基础上，提出了一种弹性矩阵的简化方法。并通过算例，进一步给出了在我国当前零售端电力市场中，根据峰谷分时数据，电量电价弹性矩阵的求取过程。结果分析表明，在这种情况下，自弹性系数与交叉弹性系数是互补型的。实际应用表明该模型能够反映当前市场中的需求规律，具有一定的实用价值。该模型不仅可以用于现行电力市场中的负荷预测和电价制定，而且在我国将来的实时电力市场中具有广泛应用前景。

3.2 原理与模型

3.2.1 电量电价弹性矩阵的建立

电量电价弹性是指电价的相对变动引起的电能需求量的相对变动。即在一定的时段内，用电量变化的百分率与相应的价格变化的百分率之比。由经济学原理知，典型的需求曲线如图 3-1 所示：

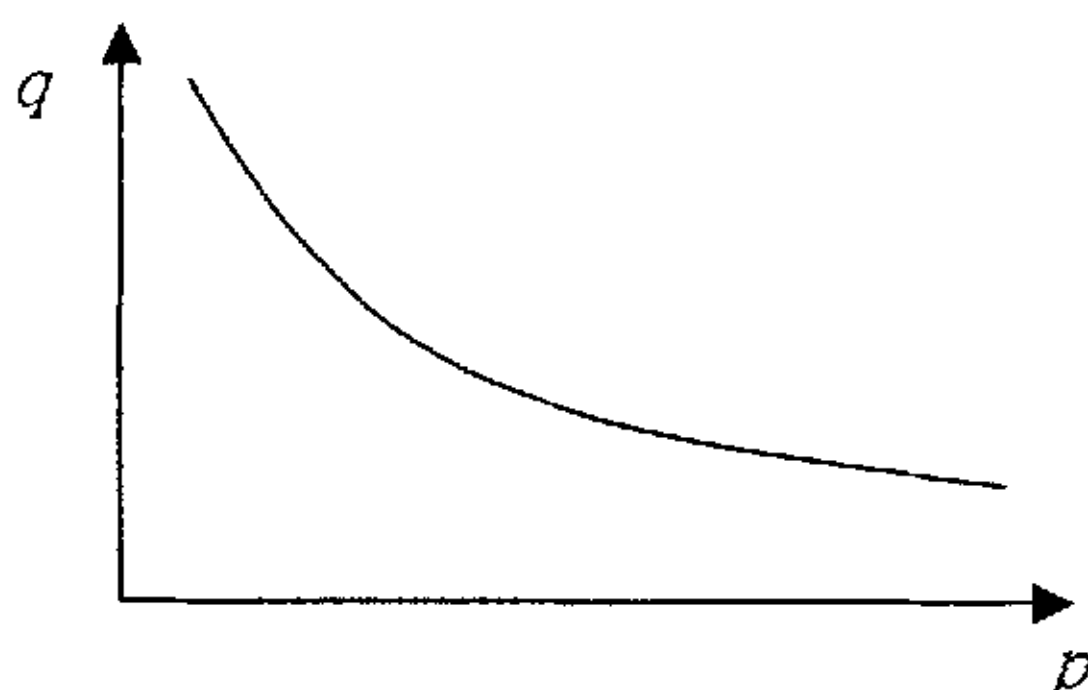


图 3-1 电量电价需求曲线

其中 q 表示电量， p 表示电价。

由于该曲线的确定很困难，所以在经济学中通常把它进行线性化处理。于是定义了如下的电量电价弹性系数：

$$\varepsilon = \frac{\Delta q / q}{\Delta p / p} \quad (3-1)$$

其中 Δq 和 Δp 分别表示电量 q 和电价 p 的相对增量。

一般来说，用户对电价的响应主要有两种形式，即单一时段响应和多时段响应。单一时段响应指的是用户决定某一时段多用电还是少用电只与当时的电价有关。比如居民的照明用电，当电价较高时，用户只能简单地以减少开灯作为反应。这种单一时段响应一般发生在用电量较少且为非必需用电的情况下；而所谓多时段响应，是指用户不是简单地降低自己的用电量，而是将负荷从高电价时段转移到低电价时段，故不仅与当时的电价有关，而且与其它时段电价有关。比如在一个企业中，不能因电价升高而单纯地降低生产量，而是重新安排生产，使生产同样多的产品而付更少的电费。这种多时段响应也与用户生产的连续性有关。

在实际情况下，多数用户某一时刻的用电量不仅与该时刻的电价有关，还受到相邻时刻的电价影响。因此，本文运用了自弹性系数和交叉弹性系数的概念。则由 (3-1) 式推出自弹性系数和交叉弹性系数的公式如下：

$$\varepsilon_{ii} = \frac{\partial q_i / q_i}{\partial p_i / p_i} \quad (3-2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\partial q_i / q_i}{\partial p_j / p_j} \quad (3-3)$$

其中 i, j 代表不同的时间段。公式运用了偏导符号是为了表明 i 时刻电量不仅是 i 时刻电价的函数，而且也是其它时刻电价的函数^[8]。

则对于某时间段 $1 \sim n$ ，得到如下的公式^[6]：

$$\begin{bmatrix} \partial q_1 / q_1 \\ \partial q_2 / q_2 \\ \dots \\ \partial q_n / q_n \end{bmatrix} = \mathbf{E}^* \begin{bmatrix} \partial p_1 / p_1 \\ \partial p_2 / p_2 \\ \dots \\ \partial p_n / p_n \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

其中 $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \dots & \varepsilon_{1n} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \dots & \varepsilon_{2n} \\ & & \dots & \\ \varepsilon_{n1} & \varepsilon_{n2} & \dots & \varepsilon_{nn} \end{bmatrix}$ 为弹性矩阵。

3.2.2 对应于不同用户响应的电量电价弹性矩阵结构

3.2.2.1 用户分类

不同用户的电量电价弹性是不同的，因此，可以把用户分为以下几类：

- (1) 敏感型用户。这类用户的电量电价弹性较大。用电时间的转移不仅有利于他们自己，使他们的电费减少，也有利于电力市场，使系统有效地削峰填谷。
- (2) 一般用户。这类用户对电价不是太敏感，但是他们也会随着电价的变化而改变他们的用电量。他们也能从电力市场中获利，也有利于电力市场，只是影响不如敏感型用户大。
- (3) 不敏感型用户。电价的变化基本上不影响这类用户的用电量。因而电力市场对他们影响不大。

3.2.2.2 电力市场中电价分类

电力市场中的电价可以分为以下三类：

- (1) 24 小时(或 48 个半小时)实时电价。每小时(或半小时)电价变化一次，主要适用于大型的工业和商业用户。这类用户用电量大，且具有较高的测量和通讯技术，能较快地获得电价信息，有较强的电价反应能力。
- (2) 峰谷分时电价(TOU)。将一天分为 2 到 3 个阶段，即高峰期、低谷期和平均负荷期，每一阶段的电价是不一样的，每天这几个阶段的起止时间和具体电价也各不相同。这种电价主要适用于中型的工业和商业用户，它们不需要特别高的测量和通讯技术，其采集电价信息的周期为

月或日。

(3) 固定电价。价格可以数月或一年更新一次。用户不需要专门的测量和通讯系统，一般一个地区同一类用户的电价都相同。

3.2.2.3 电量电价弹性的结构分析

由以上分析知，对于不同的用户和不同的电力市场电价类型，矩阵 E 的非零元素的分布是不同的。例如，当用户对于整个时间段 $1 \sim n$ 的电价信息都可知时，矩阵的上三角和下三角都有非零元素分布。如果用户只知道当前时刻 i 以前的电价（时刻 $1 \sim i$ 的电价），则矩阵只有下三角有非零元素（如图 3-2 (a) 中画点部分所示）。假设用户对于整个时间段 $1 \sim n$ 的电价信息都是可知的，则如果用户对电价较敏感且能够在较长的时间段里重新调整他们的用电量，则非零元素沿对角线分布较宽（如图 3-2 (b) 中画点部分所示）；反之，如果他们只能在较小的时间范围内调整他们的用电量或对电价不太敏感，则非零元素沿对角线分布较窄（如图 3-2 (c) 中画点部分所示）。

$$\begin{array}{ccc}
 \begin{bmatrix} \cdot & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \cdot & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \cdot & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \cdot \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \cdot & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \cdot & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \cdot & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \cdot \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \cdot & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \cdot & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \cdot & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \cdot \end{bmatrix} \\
 (a) & (b) & (c)
 \end{array}$$

图 3-2 电量电价弹性矩阵的结构

3.2.3 电量电价弹性矩阵的简化求取方法

为了求取式 (3-4) 中的弹性矩阵 E ，基于文献 [7, 8, 9] 中对 E 特征的分析，本文做了如下假设：

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{11} &= \varepsilon_{22} = \dots = \varepsilon_{nn} = \varepsilon_0 \\
 \varepsilon_{12} &= \varepsilon_{23} = \dots = \varepsilon_{(n-1)n} = \varepsilon_1 \\
 \varepsilon_{13} &= \varepsilon_{24} = \dots = \varepsilon_{(n-2)n} = \varepsilon_2 \\
 &\dots\dots \\
 \varepsilon_{21} &= \varepsilon_{32} = \dots = \varepsilon_{n(n-1)} = \varepsilon_{-1} \\
 \varepsilon_{31} &= \varepsilon_{42} = \dots = \varepsilon_{n(n-2)} = \varepsilon_{-2} \\
 &\dots\dots
 \end{aligned}$$

该假设的含义为：对于给定的时间间隔 l ，任意时刻 i 的电价对时刻 $(i+l)$ 的同一类电能消费具有相同的影响。

则公式 (3-4) 化简为：

$$\partial q_i / q_i = \sum_{l=-m}^{+m} \varepsilon_l (\partial p_{i+l} / p_{i+l}) \quad i=1, \dots, n, \quad 0 \leq m < n \quad (3-5)$$

其中 p_{i+l} 表示与 i 时刻相邻距离为 l 的时段的电价， ε_l 为相应弹性系数， m 表示了对 i 时刻电量有影响的时段的范围。由于选定的整个时间段为 $1 \sim n$ ，所以当 $i+l < 1$ 或者 $i+l > n$ 时，取 $\partial p_{i+l} / p_{i+l} = 0$ 。

对于如图 3-2 (a) 所示类型的用户， $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_m = 0$ ；对于如图 3-2 (b) 所示类型的用户， m 的取值较大；对于如图 3-2 (c) 所示类型的用户， m 的取值较小。

这样做的目的是为了在简化求取过程的同时，加大样本容量，提高求解的可行性。当用户实行实时电价时，时段以小时或半小时为单位，取 $1 \sim 24$ 或 $1 \sim 48$ 等分段。当用户实行峰谷电价或分时段电价 (TOU)，可采用月或天为单位，也可把一天分成 2 至 3 个时段。

3.3 求取当前零售端市场中电量电价弹性系数的算法

以下给出了根据辽宁省电力公司下属 13 个地区提供的 2001 年 1 月至 2002 年 12 月的数据，建立求取行业电量电价弹性的算法。这里之所以用行业统计数据来求取电量电价弹性，是由于行业统计数据的变化是用户自身对电价变化的响应的宏观表现。由于辽宁省电力公司现在实行的主要是峰谷价格和时段不变的 TOU，所以这里时段以月为单位，用户属于图 3-2 (a) 所示类型。数据选用行业中执行峰谷电价的部分的电价和电量的平均值。对应时段 i ，实行峰谷分时部分的平均电价 p_i 和电量 q_i ，分别如下：

$$p_i = \frac{f_{fi} + f_{gi} + f_{pi}}{q_{fi} + q_{gi} + q_{pi}} \quad (3-6)$$

$$q_i = q_{fi} + q_{gi} + q_{pi} \quad (3-7)$$

其中： f 代表售电电费； q 代表售电量；下标 f 、 g 、 p 分别代表峰、谷、平。

图 3-3 给出了弹性系数算法过程的简要流程图。

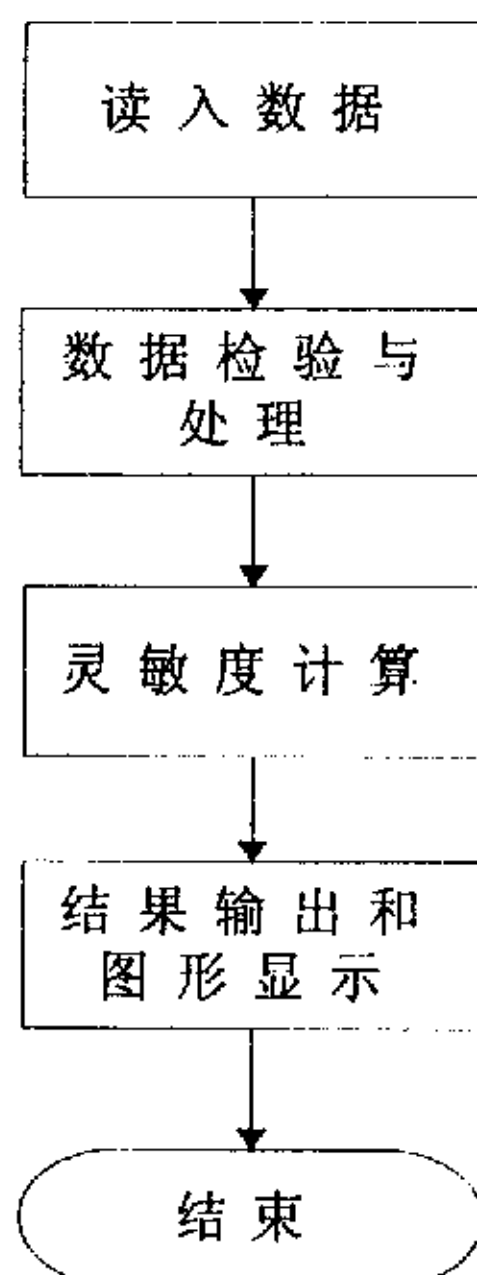


图 3-3 弹性系数算法过程的简要流程图

3.3.1 异常值的检验与处理

选用拉依达准则（ 3σ 准则）来剔除样本中的异常值。若残差

$$|v_k| = X_k - \bar{X} > 3\sigma \quad (3-8)$$

则认为该值为异常值。

由于标准偏差 σ 通常不可知，所以用实验标准偏差 $s(X_k)$ 来取代 σ 。实验标准偏差的公式如下^[15]：

$$s(X_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2 \right]} \quad (3-9)$$

其中 X_k 表示第 k 个样本的值， \bar{X} 表示样本均值。该准则不适用于 $n \leq 10$ 的情况。（注意数据完备性，如有空数、0 和负数，数据不全的城市数据样本可全去除）。

3.3.2 计算电量和电价的变化率

公式 (3-5) 中电量和电价的变化率分别用式 (3-10) 和 (3-11) 来计算：

$$\partial q_i / q_i = \frac{q_{i2} - q_{i1}}{q_{i1}}, \quad i = 1, \dots, n \quad (3-10)$$

$$\partial p_i / p_i = \frac{p_{i2} - p_{i1}}{p_{i1}}, \quad i = 1, \dots, n \quad (3-11)$$

其中： p_{i2} 是目标年（算例中为2002年）第*i*月的执行峰谷电价的部分的电价平均值； p_{i1} 是基准年（算例中为2001年）第*i*月的执行峰谷电价的部分的电价平均值。它们用式（3-6）求取。

q_{i2} 是目标年第*i*月的执行峰谷电价的部分的电量平均值； q_{i1} 是基准年第*i*月的执行峰谷电价的部分的电量平均值。它们用式（3-7）求取。

这样处理的意义如下：

- (1) 用同期数据来比较，消除了电量受月份波动的影响；
- (2) 用相对变化量的形式来比较，消除了地区间行业规模的干扰，使不同地区的样本具有可比性，克服了样本太少的缺点。

图3-4给出了从数据检验与处理到电量和电价的变化率部分的流程图。

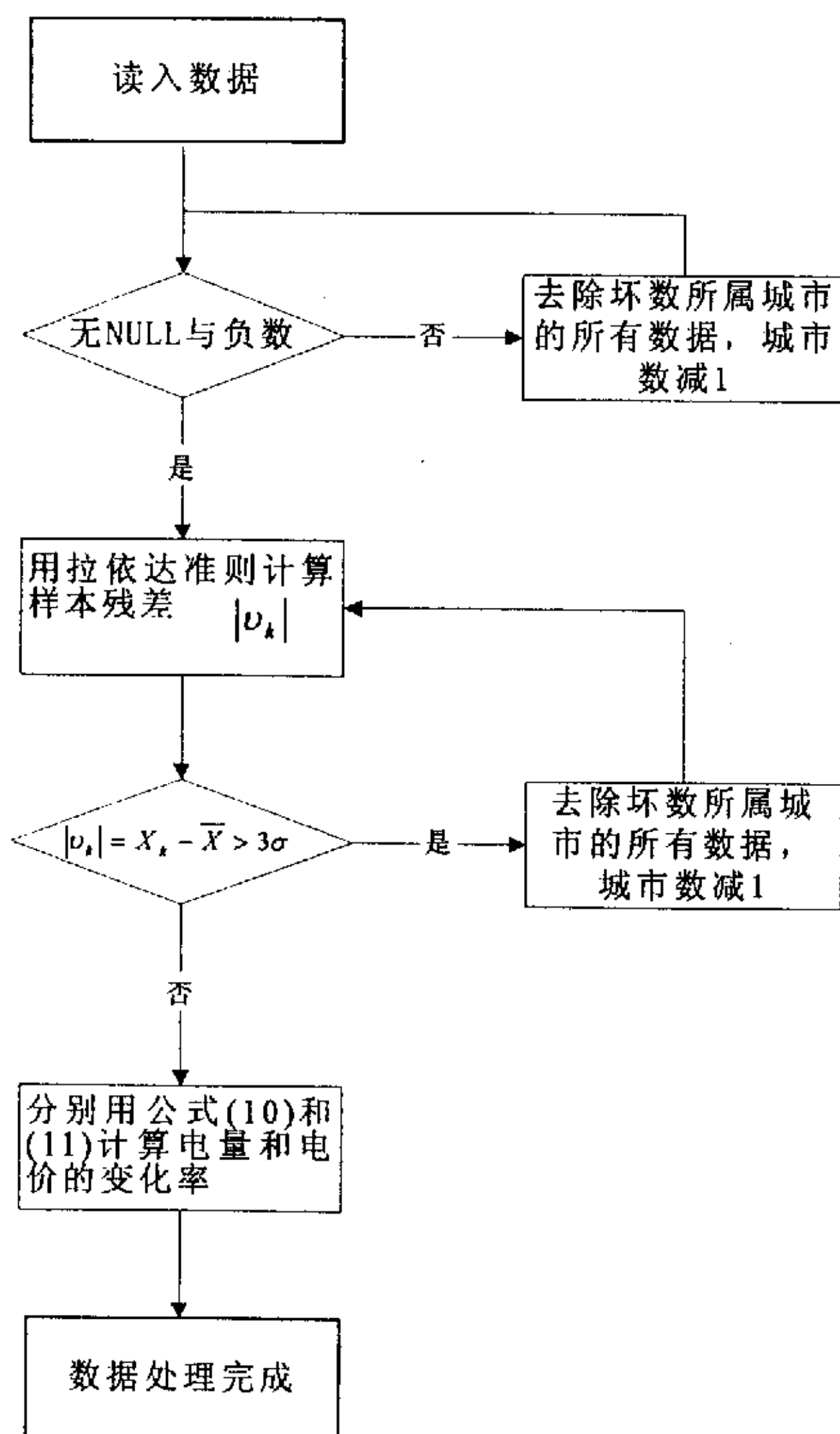


图 3-4 从数据检验与处理到电量和电价的变化率部分的流程图

3.3.3 计算电量电价的弹性系数

根据式(3-5)，应用多元回归法计算出电量电价弹性系数 ε_l , ($l = -m, \dots + m$)。

3.4 算例结果与分析

在天津大学与辽宁省电力公司合作开发的“辽宁省电力市场开发决策支持系统”中，上文提出的方法得以应用。

表 3-1 给出了选取 $m=2$ 时的部分计算结果。其中常数项代表了其它因素引起的电量的自然增长率。

表 3-1 电量电价弹性系数计算结果

行业名称	常数项	ε_{-2}	ε_{-1}	ε_0
食品饮料和烟草制造业	0.0124	-0.6095	-0.9456	-2.9001
纺织业	0.0545	-0.2537	-0.6193	-2.7702
农林牧渔水利合计	0.1516	-0.7167	-0.6919	-1.1230
电力蒸汽热水生产和供应业	0.2866	0.0501	-0.1194	-4.6014
化学工业	0.1065	-0.1192	-0.2351	-1.4462
橡胶及塑料制品业	-0.0110	-0.1334	-0.4295	-2.8022
交通运输电气电子设备制造业	0.0147	0.1578	-0.4209	-1.6041
机械工业	-0.0419	-0.0316	-0.0808	-1.6563

分析算例结果，可以看出在我国当前的零售端电力市场中，电量电价的自弹性系数为负，交叉弹性系数亦为负（互补型）。这是因为当以月为时间间隔时，不同月间的电量的变动主要是由于增加或减少月用电量引起的。对于算例中的情况，当第 i 月之前月份的电价上涨时，用户由于电费账单的增长，会相应的考虑减少第 i 月的用电量，反之亦然。

此外，由结果可以看出多数行业的第 i 月的电量对本月的弹性系数（自弹性系数）绝对值最大，对 $i-1$ 月的弹性系数（交叉弹性系数）绝对值次之，对 $i-2$ 月的弹性系数（交叉弹性系数）绝对值最小。这反映出离时刻 i 越远的时刻的电价对时刻 i 的电量的影响越小。而部分行业（如：电力蒸

汽热水生产和供应业), 对 $i-2$ 月的弹性系数 (交叉弹性系数) 为正且很小, 这说明这些行业属于图 3-2 (c) 的情况, 对离时刻 i 较远时刻的电价不太敏感。

如果用短期数据来计算 (以小时为单位), 基于文献 [6, 7] 中对 E 特征的分析, 结果应当是自弹性系数为负, 交叉弹性系数为正 (替代型)。这是因为当以小时为时间间隔时, 不同时间的电量的变动主要是由于负荷的转移引起的。当时刻 i 的电价上涨时, 用户会相应的考虑减少时刻 i 的用电量, 而增加其它时刻的用电量, 反之亦然。

表 3-1 求得的电量电价弹性系数, 可以用于电力市场中电价对电量影响的分析和电价定价的参考。例如, 表 3-2 为全省纺织业历史数据。图 3-4 和表 3-3 给出了由实际的纺织业电价变动求得的 2003 年 3 月全省纺织业电量变动的预测值和真实值。

表 3-2 纺织业历史数据

	1 月电价	2 月电价	3 月电价	3 月电量
2002 年	0.3869	0.3906	0.398	37825512
2003 年	0.3806	0.3854	0.391	42631612
相对变化量	-0.0164	-0.0135	-0.0175	0.1271

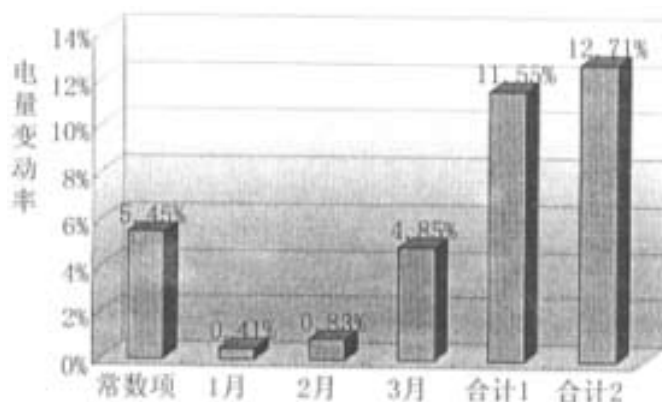


图 3-4 由弹性系数求得的电量变化率

(注: 图中从左到右前四个柱形分别表示了常数项、1月、2月和3月的电价相对变

动量所引起的 3 月份电量相对变动的百分率；合计 1 为前四项之和，即预测的总的电量变动率；合计 2 为实际的总的电量变动率。)

表 3-3 纺织业计算结果

2003 年 3 月电量	预测值	真实值	误差百分率
与去年同期的相对变化量	12.71%	11.55%	-9.06%
绝对量	42194586	42631612	-1.03%

由结果可知，电量绝对量的预测误差较小，检验了弹性模型的合理性。因此，可以根据不同的电价变动率，应用该模型分析出相应电量变动率，以便供电部门相关人员参考定价。

3.5 小结

- 1) 本文分析了电量电价弹性矩阵的建立与结构特点。并在此基础上提出了一种弹性矩阵的简化方法。
- 2) 通过算例，进一步给出了在我国当前零售端电力市场中，电量电价弹性矩阵的求取过程。结果分析表明，在这种情况下，自弹性系数与交叉弹性系数是互补型的。
- 3) 上述方法可以计算某一时期内电量电价弹性系数，结果可以应用于负荷预测或电价制定。在实际工程中得到良好应用结果。

第四章 工程应用简介

4.1 辽宁电力市场分析与决策系统总体设计

第二章和第三章的研究内容,得以应用于辽宁省电力市场分析与决策支持系统——电量电价关系子系统中。

辽宁省电力市场分析与决策支持系统是基于对辽宁省电力公司及其下属各地区电力公司的市场开发部业务需求分析基础上,开发的用于辅助电力市场开发决策的解决方案。该项目主体部分由负荷预测子系统、电量电价关系子系统和经济因素分析子系统三部分组成,如图 4-1 所示。

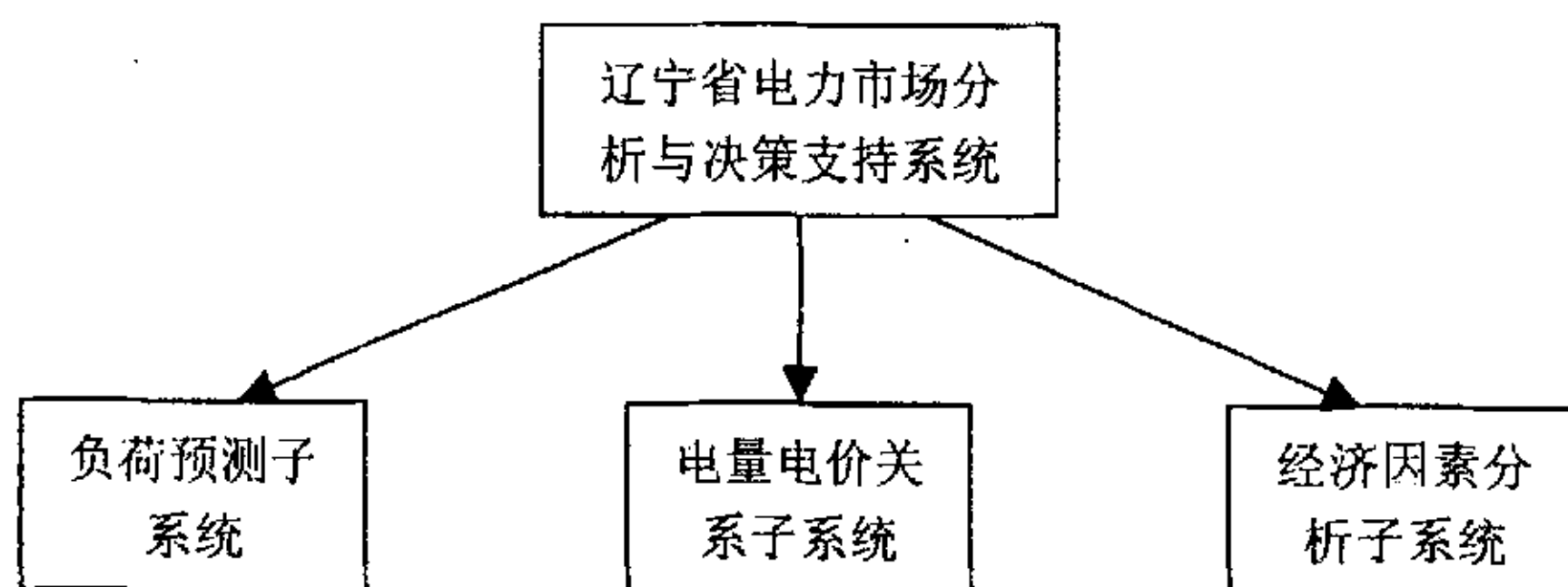


图 4-1 系统总体结构

其中电力需求预测子系统,以年预测、月预测、特定预测、大用户预测及节假日预测为核心功能。

电量电价关系子系统主要研究当前电力市场中电价波动对电能销售的影响,即价格弹性系数问题。针对当前电力市场中与确定电价与电量关系的相关数据不够完备情况,本系统采用两种角度(用电分类、行业分类)对价格弹性系数进行分析。

经济因素分析子系统,应用经济学原理,利用获得的各种经济因素数据,分析经济因素对售电量的影响。

三个子系统相对独立,但又相互关联,所以在系统建模时,一期工程三个子系统分别分析建模;二期工程在一期的基础上进一步深入研究的同时,应用数据挖掘、聚类等技术,加强了各个子系统间的联系。

4.1.1 开发工具介绍

操作系统: Microsoft Windows 2000 Server

开发过程在操作系统 MS Win2K Server 上进行, 开发小组成员的电脑都通过网络互连, 并采取客户机/服务器模式, 保证了开发出来软件的稳定性、网络功能的先进性和对不同操作系统的兼容性。

算法开发: Microsoft Visual C++ 6.0

采用完全面向对象的开发技术周密组织各种算法, 确保各种数据传输的高效率。

界面开发: Microsoft Visual Basic 6.0

Visual Basic 作为目前主流的开发环境, 不仅功能强大, 而且与其它编程语言有良好的接口。VB 开发的软件界面外观简洁、优美, 操作简便、快捷。

数据库: Microsoft SQL Server 2000

SQL Server 2000 是现代企业数据库管理系统的主流, 支持功能强大的网络功能。与 Foxpro 等桌面数据库管理系统相比, SQL Server 2000 采用客户机/服务器模式, 能够方便地对大规模的数据进行处理, 并能方便的对数据进行分级安全权限管理。

4.1.2 软件结构体系

图 4 — 2 给出了整个系统的软件结构体系。

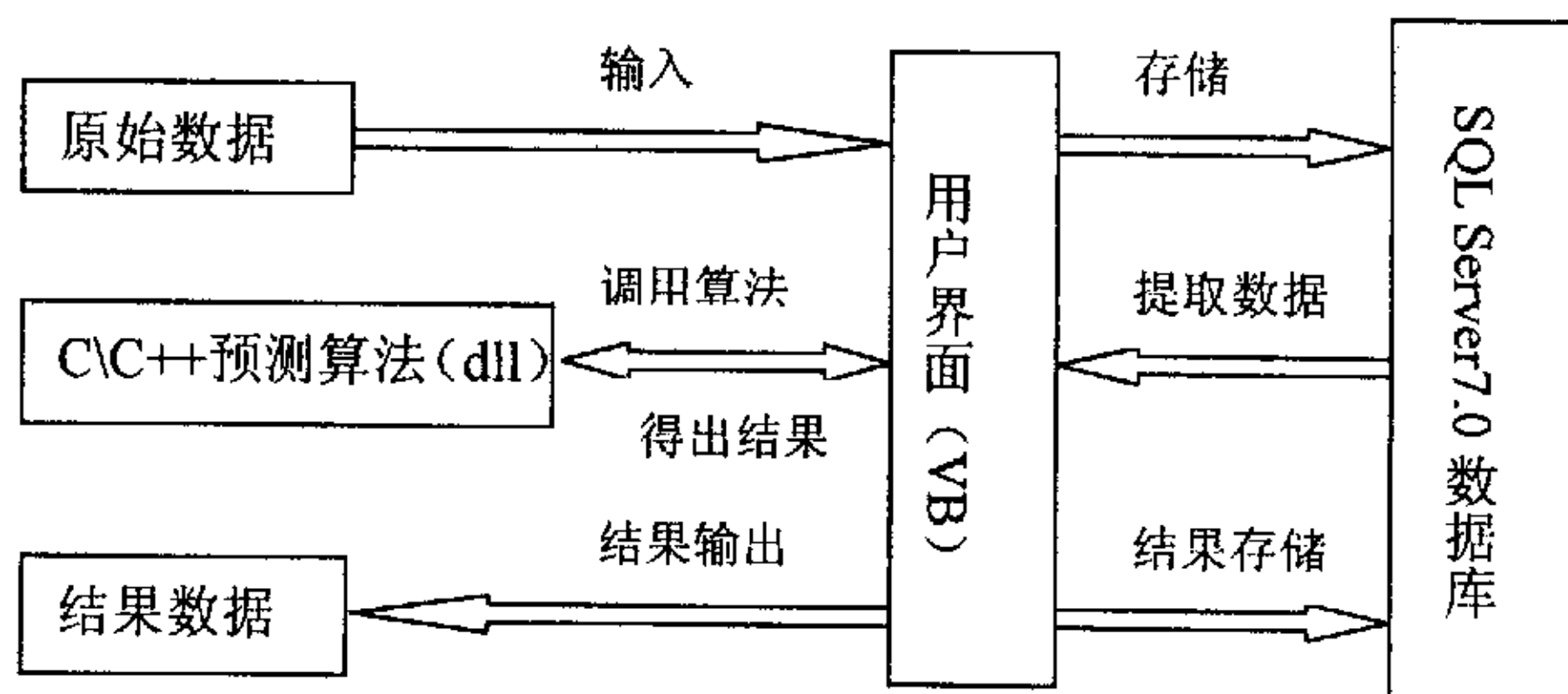


图 4 — 2 系统的软件结构体系

4.2 电量电价关系子系统

电量电价关系子系统主要研究当前电力市场中电价波动对电能销售的影响，即价格弹性系数问题。图 4—3 给出了用户界面体系的主要内容。

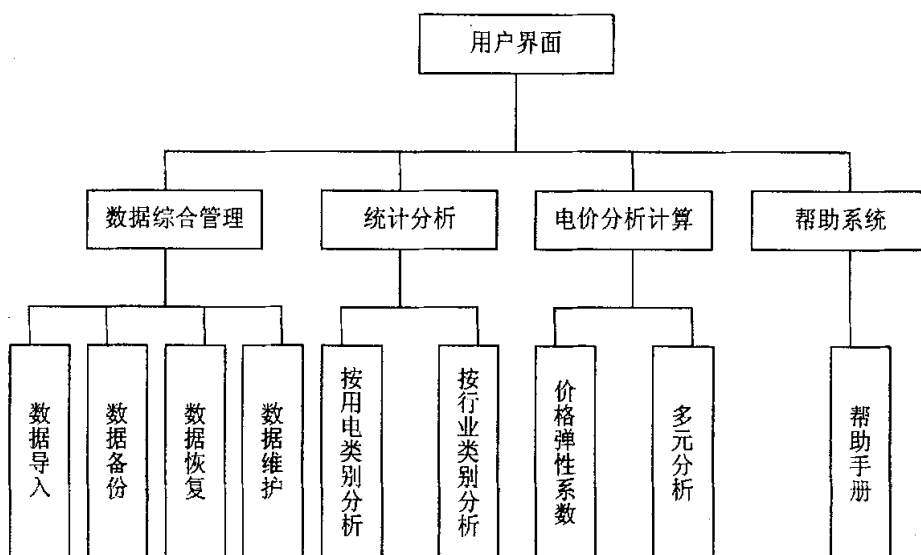


图 4—3 用户界面体系

4.2.1 数据综合管理

数据库是整个系统的基础，要想得到及时合理的分析与计算，首先要对数据库进行及时的更新。本功能主要完成对数据库的修改、备份、恢复等管理功能。

- 1、数据导入：添加、删除或修改数据库里的数据。如果需要把显示的当前页生成 Excel 表。
- 2、数据备份：为了保存已有的数据库，用于防止可能的数据丢失、将来的数据恢复或拷贝它用，此功能备份当前完整数据库到指定的路径下。
- 3、数据恢复：如果不慎修改或删除了现有数据库中有用的信息，可选择信息破坏前最近的数据备份，将全部数据库恢复到用户对数据库备份前的状态。
- 4、数据维护：维护多元分析和自定义行业数据库结构。多元分析维护可以添加或删除多元分析的分析项、相关项及两者之间的关系。自定义行业维护可以添加或删除自定义行业名称。

图 4—4 给出了数据管理时，用户界面显示示例。



图 4-4 数据管理用户界面显示示例

4.2.2 统计分析

这一功能以历史数据为依据，通过统计分析来得到对历史状况的总体了解，分为按行业类别分析与按用电类别分析两大类。每一类的分析功能都包括以下四项。

- 1、省内各地区售电比重分析：分析所选定的行业（或用电分类），在全省范围内，各市的售电比重。
- 2、售电结构分析：根据所选定的地区，分析所选择的各个行业的售电量在本地区所占的比例。给出用于参照的各个行业总的平均电价。
- 3、峰谷比例与结构分析：根据所选定的地区，分析所选择的各个行业的执行峰谷平部份的售电量在本行业总售电量中所占的比例。给出所选择的各个行业的执行峰谷平部份的平均电价。给出用于参照的各个行业总的平均电价。
- 4、基本电费比例与结构分析：根据所选定的地区，分析所选择的各个行业的基本电费在本行业总电费中所占的比例。给出所选择的各个行业的基本电费部份的平均电价。给出用于参照的各个行业总的平均电价。

图 4-5(a)、4-5(b)、4-5(c)分别给出了该部分示例的初始界面、分析计算结果和结果图形显示。



图 4-5(a) 示例的初始界面



图 4-5(b) 示例的分析计算结果



图 4—5(c) 示例结果图形显示

4.2.3 电价分析计算

该部分依据第二章和第三章的内容，分析电量电价弹性系数，这里也分按行业类别、按用电类别和自定义行业三大类。多元分析作为辅助分析方法，主要用于典型行业分析中。图 4—6 (a)、4—6(b)、4—6(c)、4—6(d) 分别给出了该部分示例的部分结果显示。

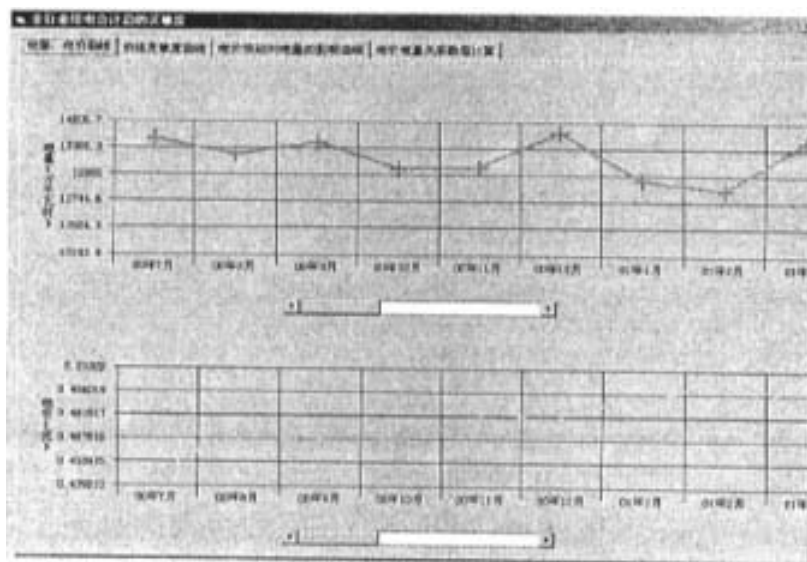


图 4—6 (a) 示例的电量电价曲线



图 4—6 (b) 示例的部分电量电价关系数值计算



图 4—6 (c) 示例的多元分析历史曲线

说明：历史曲线给出了所选行业的电量及相关量的相对历史曲线（以第一年为基准）。

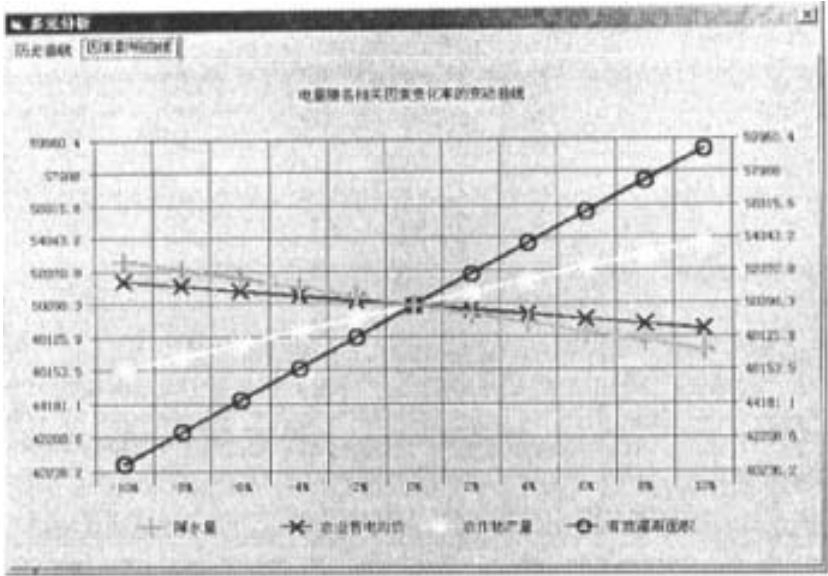


图 4—6(d) 示例的多元分析因素影响曲线

说明：因素影响曲线给出了所选行业的电量随各相关因素变化的曲线。

第五章 小样本多元数据分析

5.1 引言

在工程技术与经济管理的分析和预测研究中,多元线性回归分析是一种很常用的技术方法。然而,由于传统的电能销售模式对寻求需求对电价弹性(简称电价弹性)分析的信息支持不完备,在实际的模型应用中存在样本较少的问题,这加大了精确分析电价弹性的难度。在实际的应用中它受到很多方面的限制,主要表现在以下两方面:

- (1) 实际应用中普遍存在变量间的多重相关性问题,它严重影响了多元线性回归模型的参数估计,扩大了模型的误差,破坏了模型的稳定性。
- (2) 多元线性回归对样本容量的要求较高。为了保证良好的统计有效性一般要求 $n \geq 30$ 或 $n > k + 5$ 或 $n > 2k$ [28]。在许多问题的实际应用中这是很难达到的。这时在自变量较多的情况下,为了保证统计的有效性,不得不筛选掉一些有较大解释作用的自变量,造成信息损失,模型的精度和预测效果变差。

5.1.1 小样本的概念

一般把不能满足 $n \geq 30$ 或 $n > k + 5$ 或 $n > 2k$ 的一组样本界定为小样本 [28]。这样的小样本多元数据的统计问题一本不适于用普通的多元回归分析,而必须另辟蹊径。

5.1.2 解决小样本问题的方法

小样本统计问题就其实质而言是信息不足。因此,其建模方法的有效性也主要体现在小样本数据潜在信息的挖掘和缺失数据的补充两个方面,以增大数据的信息量。参考文献现在解决这一问题有多种建模方法,例如:基于贝叶斯统计分析,基于主成份分析,基于偏最小二乘回归,基于统计

学习理论，基于人工神经网络，基于模糊系统等。

5.2 偏最小二乘回归分析

偏最小二乘回归（PLS）方法是一种新型的多元统计数据分析方法。S. Wold 和 C. Albano 等人于 1983 年首次提出了这一方法。并首先应用于化工领域，在国内最早对此进行系统研究的学者是北京航空航天大学的王惠文教授。

偏最小二乘回归方法的一个突出特点是它集多元线性回归分析、主成分分析和典型相关分析的基本功能为一体，将建模预测类型的数据分析方法与非模型是的数据认识性分析方法有机地结合起来，即

$$\text{偏最小二乘回归} \approx \text{多元线性回归分析} + \text{典型相关分析} \\ + \text{主成分分析}$$

熟悉多元统计数据分析的人们知道，多元统计数据分析方法有两大类。一类是模型式的方法，以回归分析和判别分析为主要代表。其特点是在变量集合中有自变量和因变量之分。该类方法希望通过分析数据，找到因变量与自变量之间的函数关系，建立模型，用于预测。

而另一类则是认识性的方法，以主成分分析、聚类分析为代表，典型相关分析亦属于此类方法。这类方法的主要特征是在原始数据中没有自变量和因变量之分，而通过数据分析，可以简化数据机构，观察变量间的相关项或样本点的相似性。长期以来，这两类方法的界限是十分清楚的。而偏最小二乘回归则把它们有机的结合起来，在一个算法下，可以同时实现回归建模（多元线性回归分析）、数据结构简化（主成分分析）以及两组变量间的相关分析（典型相关分析）。这给多元系统分析带来极大的便利。这是多元统计数据分析中的一个飞跃。

偏最小二乘回归方法在处理样本容量小、自变量多、变量间存在严重多重相关性问题方面具有独特的优势。该方法归纳起来有以下几个优点：（1）模型的建立并不要求有大量样本。通过主成分分析和综合变量提取，允许在样本少于自变量个数的条件下进行回归建模。这是普通多元回归无法解决的问题。

(2)能有效地防止输入数据的多重共线性，也就是说具有一定的自变量自动选择能力。该方法通过对数据信息分解和筛选的方式，提取对因变量解释性最强的综合变量，辨识系统中的信息和噪声，从而有效的克服变量的多重相关性。

(3)可以比最小二乘回归更便捷的进行自变量的筛选。其辅助分析技术可以在建模的同时实现对自变量的筛选。

(4)经过成分提取，所获得的成分与因变量间有较好的线性相关关系。也克服了主成分分析对因变量缺乏解释能力的缺点。

(5) 允许在最终模型中包含原有全部自变量，最大限度的利用数据信息，使得其在相同的数据信息情况下，比普通的多元回归模型具有更高的有效性。

(6)数据结构的化简，使得可以在二维平边上对多维数集的特性进行观察，图形功能强大。^[29, 30]

5.2.1 偏最小二乘回归法的算法和思路

可以简单描述如下：设有两组变量 X 和 y 。 X 为自变量，由 p 个分量 (x_1, \dots, x_p) 构成； y 为应变量。偏最小二乘回归分析首先在 X 中提出成分 t_1 (t_1 是 x_1, \dots, x_p 的线性组合)。在成分提取时要满足下列两个要求：

- (1) t_1 尽可能大的携带 X 数据表中的变异信息；
- (2) t_1 和 y 的相关程度能够达到最大。

这就表明，自变量的成分 t_1 在应尽可能好的代表数据表 X 的同时， t_1 对 y 又有最强的解释能力。在第一成分 t_1 被提取后，偏最小二乘回归分析分别实施 X 对 t_1 的回归及 y 对 t_1 的回归。如果回归方程已达到满意的精度，则终止运算。否则，将利用 X 被 t_1 解释后的残余信息及 y 被 t_1 解释后的残余信息进行第二轮的成分提取。如此反复，一直达到满意的精度为止。若最终对 X 提取了 m 个成分 t_1, \dots, t_m ，偏最小二乘回归将通过实施 Y 对 t_1, \dots, t_m 的回归，然后再表达成 Y 关于原变量 x_1, \dots, x_p 的回归方程。

5.2.2 偏最小二乘回归法的主要步骤

1) 数据标准化处理

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, k$$

$$E_0 = (x_{ij}^*)_{n \times p}, \quad F_0 = \left(\frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \right)_{n \times 1}, \quad i = 1, 2, \dots, k$$

2) 从 E_0 中抽取一个成分, $t_1 = E_0 w_1$, 其中 $w_1 = \frac{E_0' F_0}{\|E_0' F_0\|}$, 且 $\|w_1\| = 1$ 实施 E_0 和

$$F_0 \text{ 在 } t_1 \text{ 上的回归 } E_0 = t_1 p_1' + E_1$$

$$F_0 = t_1 r_1 + F_1$$

式中, p_1, r_1 是回归系数, 即

$$p_1 = \frac{E_0' t_1}{\|t_1\|^2}, \quad r_1 = \frac{F_0' t_1}{\|t_1\|^2}$$

记残差矩阵 $E_1 = E_0 - t_1 p_1'$ 3) 精度判别 (交叉有效性)

建模完成后还要判断模型是否合理, 这就需要用到交叉有效性的概念:

假定目前要提取 h 个成分。首先, 将除去某样本点 i 的所有样本点集合 (含 $i-1$ 个样本) 采用 h 个成分拟合一个回归方程; 然后把刚才被排除的样本点 i 代入前面拟合的方程, 即可求出 y 在样本点 i 上的拟合值 $\hat{y}_{h(-i)}$ 。分别对每一个样本 $i = 1, 2, \dots, n$ 重复上述步骤, 得到 y 的预测误差平方

$$\text{和 } PRESS_h = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{h(-i)})^2$$

再采用所有样本点拟合含 h 个成分的回归方程。若记第 i 个样本点的预测值为 \hat{y}_{hi} , 则可定义 y 的误差平方和 $SS_h = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{hi})^2$ 。

SS_{h-1} 是用全部样本点拟合的含 $h-1$ 个成分的方程的拟合误差。 $PRESS_h$ 增加了一个成分, 但却含有样本点的扰动误差。如果 h 个成分回归方程的扰动误差能在一定程度上小于 $h-1$ 个成分回归方程的拟合误差, 则可以认为增加第 h 个成分会使预测精度明显提高。我们希望 $(PRESS_h / SS_{h-1})$ 的比

值越小越好。

定义第 h 个成分的交叉有效性为 $Q_h^2 = 1 - \frac{PRESS_h}{SS_{(h-1)}}$

当 $Q_h^2 \geq 0.0975$ 就认为增加第 h 个成分是有意义的，反之则认为增加第 h 个成分对减小方程预测误差无明显改善作用。

4) 循环 2) 至 3) 步，直到满足精度，把 y 对 t 的回归还原为 y 对 x 的回归。

5.3 偏最小二乘回归与其它模型的比较

在小样本分析的多种模型中，偏最小二乘回归模型的优点较为突出。例如神经网络和模糊系统理论虽然在多元统计分析中有许多成功的应用范例，在其训练效果在很大程度上依赖于样本容量的大小。其对样本容量的要求明显高于偏最小二乘回归模型。这一节主要分析偏最小二乘回归与多元线性回归以及主成分回归的比较。

5.3.1 偏最小二乘回归与多元线性回归的比较

偏最小二乘回归具有普通最小二乘回归所难以比拟的优点。他们的特点比较列于表 5—1 中。

表 5-1 偏最小二乘回归和普通多元线性回归的比较

	普通多元线性回归	偏最小二乘回归
对样本容量的要求	较高,一般应大于 30 或大于自变量数的 2 倍。	没有特殊要求。但一般应大于提取的主成分个数的 3 倍(一般主成分取 1~3 个)。
对自变量个数的要求	较高。为保证统计的有效性和避免严重的变量多重相关性,应尽量少地选取自变量。	没有严格要求。允许自变量数多于样本数量。
能否进行自变量的筛选	可以,但要求较高。在保证样本容量的基础上用逐步回归法筛选,而样本容量不足时只能借助于其他方法。	很方便。但需要结合变量间的相关关系分析而进行。
消除变量间多重相关性的难易程度	很难。只能借助于岭回归等方法,但岭回归存在岭参数估计问题,对此目前还没有一种成熟的方法。	容易。通过主成分的提取,使各主成分相互独立。
自变量信息的利用率	较差。没有被选取的自变量的信息完全损失。	好。可以利用较多的自变量且提取 2~3 个主成分一般就可概括因变量 90% 以上的信息。但应对自变量作初步的筛选以排除明显的噪声干扰。
模型的精确度、预测效果和稳定性	极大的依赖于样本的容量、自变量自己的选取和变量的多重相关性程度。	较好。
图形显示功能	较差。难以作直观的观察和分析。	十分强大。可以将多维数据映射在二维平面内采用多种辅助分析技术进行直观的观察和分析。

5.3.2 偏最小二乘回归与主成分分析的比较

偏最小二乘回归和主成分回归都采用了主成分提取的方法进行建模,但两者在建模原理和实际应用效果上有本质的区别:采用主成分回归提取

的主成分，虽然能很好地概括自变量系统中的信息，却往往对因变量缺乏解释能力；采用偏最小二乘回归提取的主成分，则能很好地概括自变量系统的同时，最好的解释因变量，并排除系统中的噪声干扰。

主成分回归的建模思路是在提取主成分时，完全撇开因变量 y ，单独考虑对自变量集合进行主成分提取，这样得到的主成分对 y 的解释能力却不一定好。

在主成分回归分析中，往往采取截尾的方式，舍去一些对原始数据集合概括能力较少的变量，从而达到简化变量系统的效果。但往往正是某个对 X 概括能力较小的成分对 y 有最好的解释能力。

而偏最小二乘回归的原则要求提取的主成分在很好地概括 X 中信息的同时，还要对 y 的解释能力达到最大。这样对因变量无解释能力的噪声就被自然排除掉了。因此，偏最小二乘回归模型比主成分回归模型计算结果更为可靠。

5.4 偏最小二乘回归在零售电力市场中的应用

偏最小二乘回归由于有样本需求量少、解释能力强、自变量筛选容易等优点，在零售电力市场中可以有广泛的应用。例如，第二章多元分析部分计算、第三章电量电价弹性系数计算（包含交叉弹性系数时）等，在样本较少时，偏最小二乘回归都能够发挥其优点，得到较好的结果。此外，对于多自变量的小样本模型分析，偏最小二乘回归都可以得到应用。例如下文给出了，偏最小二乘回归在配电商成本分析模型中的应用。

5.4.1 配电商成本分析模型

成本是配电商定价的基础，是市场监管者进行监管的依据。成本分析模型很多，但都存在严重的信息不对称。本文以生产函数理论为基础，应用偏最小二乘回归方法建立了配电商的成本分析模型。

配电商的运行成本包括：电网线路和输变电设备的建设成本和维护成本、电能计量和收费成本，主要包括以下因素：系统最大负荷、服务客户数量、服务客户类型、营业区域范围、电能销售量、系统安全性能、配电线路长度、变电容量。配电商成本分析数学模型公式如下：

$$f(C) = C/Y = AC(Y, PL, PC, LVSH, AVGL, LF, CD, SL, OTSH, T) \quad (5-1)$$

$$AC = f = \beta_0 + \beta_1 Y + \beta_2 Y^2 + \beta_3 PL + \beta_4 PC + \beta_5 LVSH \\ + \beta_6 LF + \beta_7 AVGL + \beta_8 AVGM + \beta_9 CD + \beta_{10} DLL + \beta_{11} T \quad (5-2)$$

其中：C 为总成本（万元）

$f(C)$ 为平均成本函数（元/kWh）

Y 为电能销售量（万 kWh）

PL 为劳动力成本（元/人年）

PC 为资金成本（元/kVA）

LVSH 为低压客户比例（%）

LF 为负荷因子（%）

AVGL 为低压客户平均电能消费水平（kWh/户）

AVGM 为中压客户平均电能消费水平（MWh/户）

CD 为客户密度（户数/km²）

DLL 为配电线路长度（km²）

T 为时间变量

5.4.2 配电商成本分析

应用式（5-1）模型，分析得到平均成本函数 $f(C)$ ，进一步得到如下分析指标：

1、经济规模：

$$RS = \frac{1}{1 + \frac{\partial f}{\partial Y} \frac{Y}{f}} \quad (5-3)$$

RS 代表了衡量配电商成本变动水平的经济规模指标（大于 1，属增长型）；

2、经济客户密度：

$$RCD = \frac{1}{1 + \frac{\partial f}{\partial Y} \frac{Y}{f} + \frac{\partial f}{\partial CD} \frac{CD}{f}} \quad (5-4)$$

RCD 代表了衡量配电商成本变动水平的经济客户密度指标（大于 1，属增长型）；

3、经济耗量密度：

$$ROD = \frac{1}{1 + \frac{\partial f}{\partial Y} \frac{Y}{f} + \frac{\partial f}{\partial AVGL} \frac{AVGL}{f} + \frac{\partial f}{\partial AVGM} \frac{AVGM}{f}} \quad (5-5)$$

ROD 代表了衡量配电商成本变动水平的经济耗量密度指标 (大于 1, 属增长型)。

应用式 (5-3)、(5-4)、(5-5) 分析配电商的成本结构和水平, 监管者可以对式中的成本 C 实施分析和监管。

5.4.3 配电商成本分析算例和结果分析

表 5-2 给出了算例中的配电商成本分析历史数据, 数据样本为 22 个, 而自变量个数为 11 个, 所以该算例是一个小样本问题。表 5-3 给出利用偏最小二乘回归计算得到的计算结果。

表 5-2 配电商成本分析历史数据

单位	时间	平均成本			资金成本	劳动力成本
		总成本 C (万元)	函数 AC (元/kWh)	售电量 Y / 万度	PC (元/kVA)	PL (元/人年)
铁岭*	1999	7269.298	5.183	140250	484.507	24975.6
铁岭*	2000	7852.984	5.353	146697	512.172	20078.4
铁岭*	2001	11855.34	8.043	147394	628.425	45748.8
鞍山*	2000	27913	3.831	728669	854.537	19046
鞍山*	2001	30266	4.132	732444	1004.27	29182
两锦*	1995	15505	3.258	475834	710.767	23484
两锦*	1996	17948	3.579	501476	822.233	30090
两锦*	1997	16245	3.042	534105	717.773	34873
两锦*	1998	18284	3.607	506964	687.123	42259
两锦*	1999	22884	4.571	500633	807.511	38855
两锦*	2000	32548	5.894	552269	990.2	49776
两锦*	2001	47608	8.656	550001	1214.96	48658
丹东*	1993	16417.58	7.691	213477	1018.33	5001
丹东*	1994	13716.54	6.297	217839	1148.66	8909
丹东*	1995	18769.53	7.093	264604	1153.7	13591
丹东*	1996	23046.2	8.947	257580	1054.25	15204
丹东*	1997	23862.14	10.23	233262	869.752	16255
丹东*	1998	24738.71	12.44	198854	950.87	19606
丹东*	1999	26747.77	14.66	182476	1568.06	18727
丹东*	2000	28947.58	14.33	202008	1359.46	17328
丹东*	2001	17313.3	10.99	157577	1833.86	29440

表 5-2 配电商成本分析历史数据 (续)

单位	低压客户平		高压客户平		客户密度 CD (户数 /km ²)	配电线路 DLL (km ²)
	例 LVSH(%)	负荷因子 LF (%)	均电能消费	均电能消费		
			水平 AVGL (kWh/户)	水平 AVGM (MWh/户)		

铁岭*	0.253	0.707	2450.727	49859.517	12.805	1509
铁岭*	0.262	0.693	2456.569	47504.497	13.818	1571
铁岭*	0.267	0.705	2283.032	49214.23	14.985	1567
鞍山*	0.07	0.726	972.8673	111422.37	63.22	4072
鞍山*	0.07	0.745	973.8644	95898.562	64.292	3610
两锦*	0.101	0.86	1400.066	396827.75	17.075	2808
两锦*	0.114	0.87	1614.505	405258.5	17.58	2845
两锦*	0.081	0.84	1229.254	209627.92	18.168	2859
两锦*	0.082	0.85	1109.194	178223.13	19.305	2901
两锦*	0.087	0.86	1103.717	150696.39	20.533	2918
两锦*	0.085	0.87	1181.292	143967.63	20.912	2979
两锦*	0.09	0.87	1154.957	109692.23	22.936	2944
丹东*	0.18	0.83	1683.506	81720.42	16.389	1374.92
丹东*	0.2	0.844	1820.422	78054.56	17.197	1400.44
丹东*	0.167	0.86	1711.966	93199.324	18.493	1430.60
丹东*	0.17	0.836	1588.669	75947.808	19.91	1492.50
丹东*	0.207	0.834	1762.877	167506.57	18.731	1513.82
丹东*	0.25	0.812	1689.354	134781.35	20.046	1553.95
丹东*	0.257	0.821	1721.553	35940.374	20.359	1405.30
丹东*	0.267	0.827	2010.785	41109.846	19.982	1396.55
丹东*	0.257	0.827	1481.484	32420.356	20.351	1174.31

表 5-3 配电商成本分析计算结果

自变量	自变量中位数	系数	系数值
T	0.36364	B1	0.1791
Y	-0.48704	B2	-0.1155
Y2	-0.58978	B3	-0.1089
PL	-0.060251	B4	0.4014
PC	-0.2124	B5	-0.0455
LVSH	0.026957	B6	0.1959
LF	0.34317	B7	0.1375
AVGL	0.053354	B8	-0.043
AVGM	-0.31012	B9	-0.1845
CD	-0.24622	B10	0.0422
DLL	-0.66644	B11	-0.1495

根据表 5—3，计算得到的成本分析指标 RS、RCD、ROD 为：

$$RS=1/(1+(B1+2*Y*B2)*Y/F)=1.018$$

$$RCD=1/(1+RS+B10*CD/F)=1.337$$

$$ROD=1/(1+RS+B8*AVGL/F+B9*AVGM/F)=1.299$$

由结果看 RS、RCD、ROD 均大于 1，说明：

- 1、随着配电商售电量的增长，成本将继续下降；
- 2、随着用电客户数量的增长，配电商成本将继续下降；
- 3、随着客户户均耗电量的增长，成本将继续下降。

以上结果符合实际规律。成本分析的三个指标，可以对配电商给予评价和分析。为研究市场监管提供了一种基本方法。

第六章 结论

要建立规范、健康的电力市场,就必须充分发挥电力市场的杠杆——电价的调节作用。而供电公司当前应当研究的主要问题之一是对用户对电价的响应。从理论上讲,用户对电价的反应与用户需求对价格的敏感度(即用户的电量电价弹性)有关。因此,掌握电力市场中电量电价弹性,对于合理确定电价与市场开拓是极为重要的。本文针对这一问题,得到如下研究成果:

1. 所建立的峰谷分时电价弹性模型,是利用执行分时峰谷电价政策环境下的消费市场峰、谷、平电量与电价的统计数据,求取电量电价弹性系数的一种可行模型。辽宁电力市场的示例表明,选取一元线性回归模型,最终可计算出较为合理的电价弹性。这对于今后的电价制定以及实行峰谷分时电价等政策的制定具有指导意义。
2. 在实际情况下,部分用户某一时刻的用电量不仅与该时刻的电价有关,还受到相邻时刻的电价影响。因此,本文分析了电量电价弹性矩阵的建立与结构特点。并在此基础上提出了一种弹性矩阵的简化方法。通过算例,进一步给出了在我国当前零售端电力市场中,电量电价弹性矩阵的求取过程。结果分析表明,在这种情况下,自弹性系数与交叉弹性系数是互补型的。该方法不仅可以更好的反映电量电价的实际关系,而且提出了新的数据处理方法,消除了地区差异和时间周期的影响,从而扩大了可用样本数。上述方法可以计算某一时期内电量电价弹性系数,结果可以应用于负荷预测或电价制定。在实际工程中得到良好应用结果。
3. 由于数据信息有限,使得零售电力市场中的研究多遇到样本较少的问题。本文分析了偏最小二乘回归在小样本多元分析中的优势,及其在零售电力市场中的应用领域,并用实例给出了其在配电商成本分析模型中的应用。结果符合实际规律,可以对配电商给予评价和分析,为研究市场监管提供了一种基本方法。

本文提出的电量电价弹性系数分析方法和模型得以应用于“辽宁省电力市场分析与决策支持系统”中,实际应用结果能够反映当前市场中的需求规律,具有一定的实用价值。今后,随着电力市场的进一步发展,当实际数据进一步积累后,电量电价弹性系数的分析方法可以进一步完善,化简的弹性矩阵的时间划分也可从月到日到小时,从而研究短期甚至实时市场中的电量电价弹性。

参考文献

- [1] 于尔铿, 韩放, 谢开等, 电力市场, 北京: 中国电力出版社, 1998, 1~50
- [2] Sheen J N, Chen C S, Wang T Y, Response of large industrial customers to electricity pricing by voluntary time-of-use in Taiwan, IEE, Proc.-Gener. Transm. Distrib, 1995, 142(2): 157~166
- [3] 王建新, 彭巨等, 电力市场营销分析中的两类建模问题, 电力需求侧管理, 2001, 3(2):24~27
- [4] Bushnell James, Mansur Erin. The impact of retail rate deregulation on electricity consumption in San Diego, University of California Energy Institute, Technical report, 2001,1~42
- [5] 曹世光, 慈义, 电力需求预测模型研究, 中国电力, 1997, 30(11):16~18
- [6] Daniel S. Kirschen, Goran Strbac, Factoring the Elasticity of Demand in Electricity Prices, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, MAY 2000,15(2):612~617
- [7] Y.Q.He, A.K.David, Time-of-use electricity pricing based on global optimization for generation expansion planning, Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, November 1997
- [8] Rajesh Rajaraman, The effect of demand elasticity on security prices for the PoolCo and multi-lateral contract models, IEEE, August 1997, 12(3): 1177~1184
- [9] A.K.David, Y.Z.Li, Consumer rationality assumptions in the real-time pricing of electricity. IEE, JULY 1992, 139(4): 315 -322
- [10] Mika Rasanen, Jukka Ruusunen, Identification of consumers' price responses in the dynamic pricing of electricity, IEEE, 1995,2: 1182 -1187
- [11] 古扎拉蒂著, 计量经济学, 中国人民大学出版社, 2000
- [12] 蒋平, 任开军等, 多元组内回归分析的模型及其算法, 模糊系统与数学, 2002,16(3):99~103

- [13] 辽宁统计年鉴, 辽宁省人民政府主办, 2000~2001
- [14] 李扬, 王治华, 卢毅, 李军红, 张长沪, 峰谷分时电价的实施及大工业用户的相应, 电力系统自动化, 2001, 25 (8): 45~48
- [15] 钱绍圣, 测量不确定度, 清华大学出版社, 2002
- [16] 曹妨, 韩放, 杨以涵等, 实时电价的意义与实现, 电网技术, 1995, 19(10): 56~59
- [17] Caves D W, Herriges J A, Windle R J, Customer response to interruptible and curtailable rates, EPRI, Christensen L R Associates Inc., Technical report, 1988
- [18] Daniel S.Kirschen, Demand-side view of electricity markets, IEEE Transactions on Power Systems, May 2003, 18(2): 520~529
- [19] A.K.David, Y.Z.Li. Effect of inter-temporal factors on the real time pricing of electricity, IEEE Transactions on Power Systems, February 1993, 8(1): 44~52
- [20] J-N Sheen, C-S Chen, T-Y Wang, Response of large industrial customers to electricity pricing by voluntary time-of-use in Taiwan, IEE Proc-Gener. Transm. Distrib, March 1995, 142(2): 157~166
- [21] J-N Sheen, C-S Chen, J-K Yang, Time of use pricing for load management programs in Taiwan power company, IEEE Transactions on Power Systems, February 1994, 9(1): 388~396
- [22] A.K.David, Y.Z.Li. A comparison of system response for different types of real time pricing, IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong, November 1991. 385~390
- [23] S.Rahman, Rinaldy, An efficient load model for analyzing demand side management impacts, IEEE Transactions on Power Systems, August 1993, 8(3): 1219~1226
- [24] Michele Benini, Mirko Marracci, Paolo Pelacchi, Day-ahead market price volatility analysis in deregulated electricity markets, Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, July 2002, 3: 1354 ~1359
- [25] Gerard L.Doorman, Ivar Wangensteen, Demand side provision of peaking capacity and reserves in Deregulated power systems, Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, Jan 2000, 3: 1766~1771