



基于多维价格弹性系数的分时电价对 负荷特性影响机理

唐文升¹, 王阳¹, 张煜², 刘席洋³, 谭清坤², 吴鹏², 陈宋宋⁴, 杨菁⁵

(1. 国家电网有限公司, 北京 100031; 2. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209; 3. 国家电网有限公司大数据中心, 北京 100052; 4. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 5. 国家电网有限公司客户服务中心, 天津 300309)

摘 要: 基于 23 个省级电力公司经营区各行业固定用户群负荷曲线, 测算多维价格弹性系数评估分时电价调整对各地区各行业峰谷时段用电的影响, 并分析峰谷段电力需求对多维价格指标的敏感性。利用多维价格弹性系数定量评估各地区各行业降低峰段电量、提升谷段电量、缩小负荷峰谷差率三维电力电量指标对提高高峰时段电价、降低低谷时段电价、拉大峰谷电价比三维价格指标的敏感性。根据多维价格弹性系数分析结果可针对不同地区、行业、时段提出分时电价优化调整策略。

关键词: 分时电价; 价格弹性系数; 负荷峰谷差率; 峰谷电量转移; 行业负荷

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202304028

0 引言

近年来, 随着新能源大规模接入、经济发展、极端气候等因素的叠加影响, 电网保供电工作形势愈发严峻。2022 年, 中国出现有记录以来持续时间最长、影响范围最广的极端高温天气, 电网负荷屡创新高, 部分区域出现了较大的电力供应缺口。根据中国电力企业联合会的预测, 2023—2025 年全国电力供需仍将保持总体紧平衡态势, 部分区域用电高峰时段电力供需偏紧。亟须挖掘负荷侧可调节潜力, 推动电网调节方式从传统的“源随荷动”向“源荷互动”转变。

作为引导源荷互动的重要手段, 峰谷分时电价政策能够通过价格杠杆引导用户避峰节电降低用电成本, 有利于缩小电网负荷峰谷差率、缓解电力供需矛盾、促进可再生能源消纳、实现资源的合理配置、保障电力系统安全稳定经济运行, 在国内外已经推广并逐渐普及^[1]。为明晰分时电

价政策调整对地区行业负荷的引导作用, 需要对负荷侧价格弹性进行深入研究分析。

目前针对价格弹性矩阵的研究主要集中在分析峰谷时段电价变化对短期用电负荷的影响, 但是缺乏长期用电需求随电价变化的规律研究。文献 [2] 引入弹性影响权重对价格弹性矩阵进行完善, 提出基于价格弹性矩阵的用户需求响应潜力评估方法; 文献 [3] 分析设备用电特征, 提出需求价格弹性矩阵评估的新方法。另外, 关于电价政策调整对负荷特性影响的研究, 主要针对电价政策调整对单个省份或者单个行业用电的影响, 未考虑地域以及行业差异, 缺乏针对地域及行业的全面系统分析。文献 [4] 借助杭州市居民用电数据分析比较了不同场景下阶梯电价实施效果; 文献 [5] 主要针对电价管制与电价市场化 2 类情景分析电价调整对于高耗能产业及新动能产业的影响; 文献 [6] 基于甘肃省工业企业数据提出工业企业电价承受能力、节能减碳和转型升级等政策建议; 文献 [7] 基于浙江省企业调研数据研究电价政策调整对工商业用户用电影响; 文献 [8-11] 主要研究分时电价在需求侧响应中的作用; 文献 [12-14] 主要研究考虑源荷不确定性、电力市场环境下的分时电价定价方法。

收稿日期: 2023-04-06; **修回日期:** 2023-08-29。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(支撑新型电力系统的负荷精准评估、调控技术研究及应用, 5108-2022 18280A-2-0-XG)。



为了更加全面分析分时电价政策调整对各地区各行业中长期负荷趋势的影响，本文选取国家电网有限公司经营区除北京、辽宁、西藏外的 23 个省级电力公司 2021 年 1 月—2023 年 4 月的 133 行业固定用户群每天 24 h 负荷数据进行研究，构建多维价格弹性矩阵实现多维电价关键指标对多维负荷关键指标影响的量化分析，揭示在中长期时间尺度上，分时电价政策调整会如何影响各地区各行业峰谷负荷，进而影响电力保供工作，并结合分析结果，提出分时电价政策动态优化调整策略。

1 国内分时电价政策概况

20 世纪 80 年代，为缓解福建电网、华北电网用电压力，中国尝试从需求侧引导用户用电，通过分时电价引导居民避免在高峰时期大量用电。

近年来，中国能源消费结构快速变化，电力系统负荷特性由夏季高峰逐渐转为“夏、冬双高峰”。据统计，国内各地夏季最热、冬季最冷时段的全年累计时间只有数十小时，但对应的尖峰电力需求可较平时高出 1 亿 kW 以上，给电力系统安全稳定运行带来巨大挑战。

2018 年国家发展改革委发布《关于创新和完善促进绿色发展价格机制的意见》（发改价格〔2018〕943 号），要求各省在销售电价总水平不变的前提下，建立峰谷电价动态调整机制，明确扩大销售侧峰谷电价执行范围，合理确定并动态调整峰谷时段，扩大高峰低谷电价价差和浮动幅度，引导用户错峰用电，取得了显著的效果。

2021 年 7 月 29 日，国家发改委发布《关于进一步完善分时电价机制的通知》（发改价格〔2021〕1093 号），进一步完善峰谷电价政策。具体涉及 2 方面：一是拉大峰谷价差，上年或当年预计最大系统峰谷差率超过 40% 的地方，峰谷电价比原则上不低于 4:1，其他地方原则上不低于 3:1；二是建立尖峰电价机制，各地结合实际情况，根据前两年当地电力系统最高负荷 95% 及以上用电负荷出现时段，合理确定尖峰时段，尖峰电价在峰段电价基础上上浮比例原则上不低于 20%。

峰谷电价比指峰段电价除以谷段电价。31 个省（自治区、直辖市）全部出台了峰谷电价政

策。部分单位各电压等级分时电价浮动比例略有差异，以截至 2023 年 4 月各地公布的 7、8 月份大工业 1~10 kV 档分时电价为例，各地的峰谷电价比如图 1 所示。从峰谷电价比例来看，河北、山东峰谷电价比例大于等于 5:1；10 个省峰谷电价比介于 4:1 与 5:1 之间；12 个省峰谷电价比介于 3:1 与 4:1 之间；峰谷电价比例最大的是河北（5.7:1），最小的为西藏（1.1:1）。南方电网供电区域峰谷电价比由高到低依次为：广东（4.5:1）、海南（4.3:1）、云南（3:1）、贵州（3:1）、广西（1.5:1）。

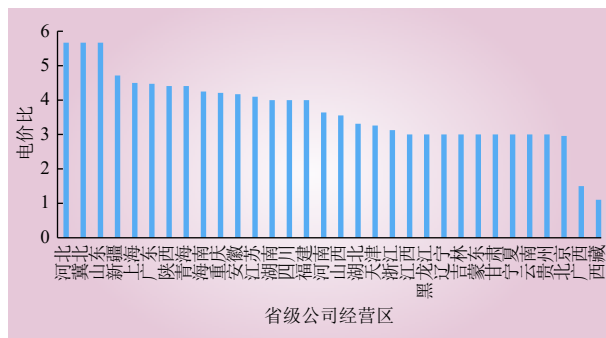


图 1 各地峰谷电价比

Fig. 1 The ratio of peak-to-valley electricity prices in various regions

尖峰电价方面，国家电网有限公司经营区除甘肃、宁夏、西藏外的 23 个省级公司经营区已出台了尖峰电价政策，其中 16 个省级公司经营区尖峰电价在峰段电价基础上再上浮 20%，湖北、上海上浮大于 20%，山东、福建、河南上浮 10%~20%，北京上浮 10%，安徽上浮不足 10%。南方电网供电区域中，广东上浮 25%，广西、云南和海南上浮 20%，贵州暂未实行尖峰电价。

2 多维价格弹性系数

传统的电力需求价格弹性系数主要探究电力整体需求与电价变化的关系^[15]。由于电力保供重点关注峰谷段电力需求变化，为了更好地研究峰谷段电力需求变化与电价变化相关性，本文借鉴材料力学中多维弹性系数概念，认为每一类电力负荷指标会类似材料受力源自多个方向，受到多维电力价格指标的影响，在传统电力需求价格弹性系数基础上提出多维价格弹性系数矩阵。将峰谷



段电力需求变化提炼成多维负荷指标，将分时电价变化提炼成多维价格指标，通过多维负荷指标与多维价格指标之间的影响映射关系构建多维价格弹性系数矩阵，从而更加全面且有针对性地探究各地区各行业峰谷段电力需求变化对多维价格指标的敏感性。

2.1 电力需求价格弹性系数

电能作为电力市场中的一种商品，具有一定的供需关系，其相互关系可表示为

$$\frac{\Delta Q}{Q} = a \frac{\Delta P}{P} \quad (1)$$

式中： a 为电力需求价格弹性系数； Q 和 ΔQ 分别为电力需求及电力需求的变化量； P 和 ΔP 分别为电价和电价的变化量。

电力需求价格弹性系数 a 表征电力需求对电价变化的敏感度， a 越大表示电力需求对电价变化的敏感度越高。

2.2 多维价格弹性矩阵构建

为了表征负荷曲线削峰填谷变化情况，基于峰谷负荷的基本属性，结合生产经验和大量数据分析，选取峰谷差率减小率、峰段电量转移率、谷段电量填充率、峰谷电量转移率作为关键负荷指标，各个变量含义如下。

1) 峰谷差率减小率 Y_1 。

月度峰谷差率为

$$C = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max}} \quad (2)$$

式中： L_{\max} 和 L_{\min} 分别为月平均24h负荷曲线的最大负荷和最小负荷。

峰谷差率减小率 Y_1 为

$$Y_1 = C_{A-\text{adj}} - C_{B-\text{adj}} \quad (3)$$

式中： $C_{A-\text{adj}}$ 为分时电价调整后月度峰谷差率； $C_{B-\text{adj}}$ 为分时电价调整前上年同期月度峰谷差率。

Y_1 为负数，表明峰谷差下降，调整分时电价起到了削峰填谷作用； Y_1 为正数，表明峰谷差上升，调整分时电价削峰填谷作用不显著。

2) 峰段电量转移率 Y_2 。

峰段（尖峰）电量占比 F 为

$$F = \frac{L_f}{L_a} \quad (4)$$

式中： L_f 、 L_a 分别为月平均24h负荷曲线高峰（尖峰）时段负荷积分和全天负荷积分。

峰段电量转移率 Y_2 为

$$Y_2 = F_{A-\text{adj}} - F_{B-\text{adj}} \quad (5)$$

式中： $F_{A-\text{adj}}$ 为分时电价调整后月峰段（尖峰）电量占比； $F_{B-\text{adj}}$ 为分时电价调整前上年同期月度峰段（尖峰）电量占比。

Y_2 为负数，表明峰段（尖峰）电量占比下降，调整分时电价起到了削峰作用； Y_2 为正数，表明峰段（尖峰）电量占比上升，调整分时电价削峰作用不显著。

3) 谷段电量填充率 Y_3 。

谷段电量占比 G 为

$$G = \frac{L_g}{L_a} \quad (6)$$

式中： L_g 为负荷曲线低谷时段负荷积分。

谷段电量填充率 Y_3 为

$$Y_3 = G_{A-\text{adj}} - G_{B-\text{adj}} \quad (7)$$

式中： $G_{A-\text{adj}}$ 为分时电价调整后月谷段负荷占比； $G_{B-\text{adj}}$ 为分时电价调整前上年同期月度谷段电量占比。

Y_3 为正数，表明谷段电量占比上升，调整分时电价起到了填谷作用； Y_3 为负数，表明谷段电量占比下降，调整分时电价填谷作用不显著。

4) 峰谷电量转移率 Y_4 为

$$Y_4 = Y_3 - Y_2 \quad (8)$$

Y_4 为正数，表明峰段电量占比下降大于谷段电量占比下降或者峰段电量占比上升小于谷段电量占比上升，调整分时电价总体上起到了削峰填谷作用； Y_4 为负数，表明峰段电量占比下降小于谷段电量占比下降或者峰段电量占比上升大于谷段电量占比上升，调整分时电价总体上削峰填谷作用不明显。

由于电价调整包含对峰谷时段电价的调整，选取高峰电价变化率 X_1 、低谷电价变化率 X_2 、峰谷电价比变化率 X_3 表征电价调整情况。

高峰电价变化率 X_1 定义为电价调整后高峰时段电价相较调整前变化比例；低谷电价变化率 X_2 定义为电价调整后低谷时段电价相较调整前变化比例；峰谷电价比变化率 X_3 定义为电价调整后峰谷电价比相较调整前变化比例。

由于高峰电价变化率 X_1 、低谷电价变化率 X_2 、峰谷电价比变化率 X_3 都会对峰谷差率减小率



Y_1 产生影响，结合式 (1) 中电力需求弹性系数的定义，可知峰谷差率减小率 Y_1 受多维电价指标的影响，其可表征为

$$Y_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + a_{13}X_3 + b_1 \quad (9)$$

式中： a_{11} 、 a_{12} 、 a_{13} 为待估的价格弹性系数； b_1 为待估常数项。

同理可以得到 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 与 X_1 、 X_2 、 X_3 的回归方程为

$$Y_2 = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + a_{23}X_3 + b_2 \quad (10)$$

$$Y_3 = a_{31}X_1 + a_{32}X_2 + a_{33}X_3 + b_3 \quad (11)$$

$$Y_4 = a_{41}X_1 + a_{42}X_2 + a_{43}X_3 + b_4 \quad (12)$$

将式 (9)~(12) 用矩阵形式表示为

$$Y = AX + b \quad (13)$$

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix} \quad (14)$$

矩阵 $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \end{pmatrix}$ 为多维价格弹性矩

阵，例如 a_{12} 即为峰谷差率减小率 Y_1 的低谷电价变化率 X_2 弹性系数。通过多维价格弹性系数矩阵 A 能够全面系统地表征各个价格关键指标对于各个负荷关键指标的影响。

基于负荷变化及价格变化的历史数据，通过求解各价格弹性系数最优解，可以得到矩阵 A 中各个弹性系数的数值大小，数值绝对值大小则表征相应负荷指标对相应价格指标的敏感程度。通过比较矩阵 A 中的各个价格弹性系数，能够有效识别各个负荷指标的核心价格影响因素，更有针对性地动态调整关键电价指标，从而更精准地发挥电价对负荷的调节作用。

2.3 数据测算说明

为充分剔除疫情、气温、生产周期、用户增长等因素对分析结果的影响，国家电网有限公司营销部组织 23 个省级电力公司抽取 2021 年 1 月—2023 年 4 月同期固定档案 133 个行业用户日 24 h 负荷数据进行研究。

1) 为避免日数据偶然性，利用 133 个行业日 24 h 负荷数据计算月平均 24 h 负荷数据作为分析

基础。

2) 为充分反映分时电价调整效果，选取分时电价调整前后数月数据进行分析，取均值作为计算结果。

3) 为减少气温对负荷的影响，选取分时电价调整前后同期月份进行对比研究。

4) 为避免用户变化的影响，对照营销用户档案抽取同一批用户负荷数据进行对比分析。

5) 为简化分析过程，各类电价统一采用 1~10 kV 档电价为代表。

3 分时电价影响机理与效果分析

分时电价政策可以通过调整峰谷时段电价来引导行业负荷进行峰谷时段的合理配置，从而达到削峰填谷、为保供电业务减轻压力的效果。然而由于电费在各行业成本中占有比例不同，各行业对于电价的价格敏感性也各不相同。另外，各行业生产模式的差异性，也使得各行业负荷调整空间各不相同。因此拉大峰谷时段价差并不一定能够在各行业取得预想的效果，为了更好地研究电价政策对行业负荷特性的影响，需要全面系统地研究分时电价政策调整对各地各行业负荷变化的影响机理与效果。

3.1 部门负荷电价敏感性分析

3.1.1 农业分时电价调整影响分析

北京、天津、上海等 11 个省级公司经营区已出台农业分时电价政策，2021—2022 年调整农业分时电价政策的省（区）为浙江、湖南、甘肃、宁夏，分时电价调整后对农业负荷影响效果如表 1 所示。

测算得到浙江、湖南、甘肃、宁夏农业分时

表 1 各地区农业分时电价调整效果

Table 1 The effects of the agricultural time-of-use electricity price adjustment in various regions

单位：个百分点

省（区）	峰谷差率 减小率 Y_1	峰段电量 转移率 Y_2	谷段电量 填充率 Y_3	峰谷电量 转移率 Y_4
浙江	-0.67	-0.70	0.76	1.46
湖南	-3.01	-0.47	0.83	1.30
甘肃	-2.54	-3.67	1.99	5.66
宁夏	-2.83	-0.08	-1.28	-1.20



电价多维价格弹性系数矩阵分别为

$$\begin{aligned}
 A_{\text{浙江}} &= \begin{pmatrix} 0.03 & -0.06 & 0.06 \\ 0.04 & -0.08 & 0.05 \\ 0.03 & -0.07 & 0.05 \\ 0.06 & -0.07 & 0.05 \end{pmatrix} \\
 A_{\text{湖南}} &= \begin{pmatrix} 0.003 & -0.004 & 0.012 \\ 0.004 & -0.001 & 0.010 \\ 0.001 & -0.004 & 0.011 \\ 0.006 & -0.003 & 0.010 \end{pmatrix} \\
 A_{\text{甘肃}} &= \begin{pmatrix} 0.50 & -0.62 & 0.63 \\ 0.60 & -0.67 & 0.57 \\ 1.00 & -0.87 & 0.37 \\ 1.00 & -0.37 & 0.88 \end{pmatrix} \\
 A_{\text{宁夏}} &= \begin{pmatrix} 0.45 & -0.27 & -0.36 \\ 0.10 & -0.18 & -0.21 \\ 0.12 & -0.60 & -0.47 \\ 0.24 & -0.28 & -0.31 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

可以看出浙江低谷电价变化率 X_2 对应的弹性系数绝对值较大，即在浙江降低农业低谷电价更能有效削峰填谷；甘肃高峰电价变化率 X_1 对应的弹性系数绝对值较大，即在甘肃提高农业高峰电价更能有效削峰填谷；湖南、宁夏峰谷电价比变化率 X_3 对应的弹性系数绝对值较大，即在湖南、宁夏提高峰谷电价比能有效削峰填谷。此外，农业分时电价时段设置对执行效果也有明显影响。浙江谷段设置在 11:00—13:00、22:00—08:00，谷段时段较长且包含午间时段，谷段电量填充率达到 0.76 个百分点；甘肃将谷段设置在 09:00—17:00，谷段时段在白天农业活动较活跃的时间，谷段电量填充率为 1.99 个百分点，也取得较好效果；宁夏将谷段设置在 22:30—06:30，由于夜间照明、加热负荷调整空间较小，谷段电量填充率为 -1.28 个百分点，填谷作用不明显。

3.1.2 大工业分时电价调整影响分析

去除山东、上海、黑龙江、山西、宁夏等由于调整分时电价时间较短或价格调整幅度较小，分时电价效果尚不明显的地区，表 2 展示了 18 个省级公司经营区大工业分时电价调整效果。

分析各地区大工业分时电价多维价格弹性矩阵可以发现：新疆、陕西、吉林、青海、湖南高峰电价变化率 X_1 对应的弹性系数绝对值较大，即

表 2 各地区大工业分时电价调整效果
Table 2 The adjusted effects of time-of-use electricity prices for large industries in various regions

单位：个百分点

地区	峰谷差率 减小率 Y_1	峰段电量 转移率 Y_2	谷段电量 填充率 Y_3	峰谷电量 转移率 Y_4
四川	-4.97	-2.29	2.28	4.57
新疆	-4.14	-0.04	0.61	0.65
陕西	-3.31	-0.32	1.20	1.52
浙江	-3.26	-1.34	1.61	2.96
重庆	-3.13	-2.53	4.66	7.19
吉林	-3.04	-0.65	0.74	1.40
冀北	-3.02	-1.00	0.51	1.51
湖北	-3.02	-1.11	1.39	2.50
安徽	-3.01	-0.79	0.34	1.13
河南	-2.88	-2.04	2.60	4.64
蒙东	-2.37	-0.67	0.93	1.60
天津	-2.16	1.47	2.04	0.57
福建	-1.50	-0.72	-0.95	-0.23
江西	-1.45	-0.52	0.22	-0.74
青海	-1.34	-2.92	1.56	4.48
江苏	-0.73	-0.35	-0.10	-0.25
湖南	-0.61	-1.41	0.07	1.48
甘肃	0.83	-0.94	0.92	1.86

提高大工业高峰电价更能有效对大工业负荷削峰填谷；湖北、蒙东、天津、福建、江苏、甘肃低谷电价变化率 X_2 对应的弹性系数绝对值较大，即降低大工业低谷电价更能有效对大工业负荷削峰填谷；四川、浙江、重庆、冀北、安徽、河南、江西峰谷电价比变化率 X_3 对应的弹性系数绝对值较大，即拉大大工业峰谷电价差能有效对大工业负荷削峰填谷。如图 2 所示，比较 3 类价格敏感省级公司经营区峰谷差减小率可以发现，对大工业峰谷电价比变化率 X_3 敏感的地区大工业负荷峰谷差率削减较多（平均削减 3.10 个百分点），削峰填谷效果更明显。

为进一步分析不同省级公司经营区峰谷电价变化与峰谷电量转移率的相关关系，引入第二产业经济增加值进行关联分析，依据各省级公司经营区第二产业经济增加值分为第二产业经济增加值大于 1.1 万亿元和小于 1.1 万亿元 2 类，并分别分析峰谷电量转移率与峰谷电价比例变化的相关性，其

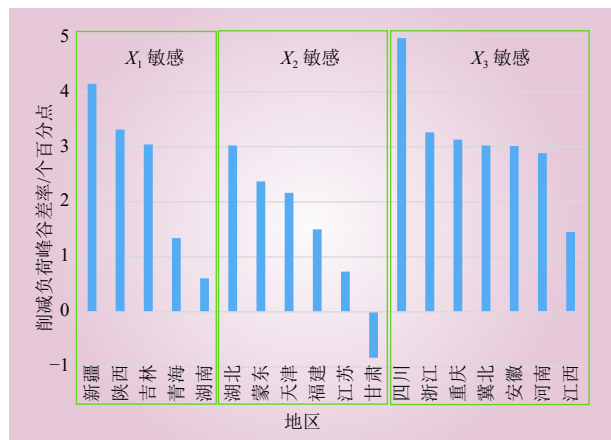


图 2 各地区大工业负荷对多维价格指标的敏感性分类

Fig. 2 The sensitivity classification of large industrial loads to multi-dimensional price indicators in various regions

线性回归相关系数 R^2 分别为 0.86、0.71。深入分析后发现，第二产业经济增加值在 1.1 万亿元以上的浙江、四川、湖北、安徽、冀北、陕西、重庆等省级公司经营区在 2021—2022 年分时电价调整后峰谷电价比率变化基本在 10 个百分点以上，电价调整力度较大，根据拟合曲线可得峰谷电价比变化每增加 1 个百分点，峰谷电量转移率上升 0.10 个百分点；第二产业经济增加值在 1.1 万亿元以下的陕西、辽宁、新疆、青海等在 2021—2022 年分时电价调整后峰谷电价比率变化基本在 10 个百分点以内，电价调整力度较小，但根据拟合曲线可得峰谷电价比变化每增加 1 个百分点，峰谷电量转移率上升 0.35 个百分点。由此可见，第二产业经济增加值在 1.1 万亿元以下的地区电价敏感性较高，拉大峰谷电价比可更有效促进峰谷电量转移，移峰填谷潜力空间较大。

3.1.3 一般工商业分时电价调整影响分析

去除山东、上海等调整分时电价时间较短或价格调整幅度较小，分时电价效果尚不明显的地区，表 3 展示了 18 个省级公司经营区一般工商业分时电价调整效果。

分析各地区一般工商业分时电价多维价格弹性矩阵可以发现：安徽、江苏、吉林、福建、重庆、新疆、浙江高峰电价变化率 X_1 对应的弹性系数绝对值较大，即提高一般工商业高峰电价能更有效对一般工商业负荷削峰填谷；天津、青海、蒙东、甘肃、陕西低谷电价变化率 X_2 对应的弹性

表 3 各地区一般工商业分时电价调整效果
Table 3 The adjusted effects of time-of-use electricity prices for general industry and commerce in various regions

单位：个百分点

地区	峰谷差率 减小率 Y_1	峰段电量 转移率 Y_2	谷段电量 填充率 Y_3	峰谷电量 转移率 Y_4
安徽	-5.40	-1.73	5.02	6.75
天津	-4.71	-1.29	5.25	6.54
江苏	-3.73	-2.58	8.31	10.89
青海	-3.72	1.21	0.81	-0.39
吉林	-3.32	-1.73	4.22	5.94
冀北	-3.30	-0.70	1.50	2.19
福建	-3.29	-0.08	0.70	0.78
河南	-3.20	-1.07	3.93	5.00
重庆	-2.87	-4.59	-5.88	-1.29
浙江	-2.40	-2.39	3.43	5.82
新疆	-2.31	-0.09	0.48	0.57
江西	-2.28	-0.23	0.25	0.48
蒙东	-2.27	-0.65	0.15	0.80
四川	-2.22	-1.56	2.14	3.70
湖南	-1.57	-1.14	0.30	1.44
甘肃	-1.32	-3.03	-2.48	0.55
湖北	-0.68	-0.69	0.01	0.69
陕西	-0.18	-0.47	0.81	1.28

系数绝对值较大，即降低一般工商业低谷电价能更有效对一般工商业负荷削峰填谷；冀北、河南、江西、四川、湖南、湖北峰谷电价比变化率 X_3 对应的弹性系数绝对值较大，即拉大一般工商业峰谷电价差能更有效对一般工商业负荷削峰填谷。如图 3 所示，比较 3 类价格敏感地区峰谷差率减小率可以发现，对一般工商业高峰电价变化率 X_1 敏感地区的一般工商业负荷峰谷差率削减较多（平均削减 3.62 个百分点），削峰填谷效果更明显。

进一步引入第三产业经济增加值分析峰谷电量转移率与第三产业经济增加值的关系，其线性回归相关系数 R^2 为 0.88，发现一般工商业分时电价调整后，第三产业经济增加值越高的地区，其峰谷电量转移率越高，削峰填谷作用越显著，其中江苏、浙江的第三产业经济增加值较高，分别为 5.99 万亿元、4.01 万亿元，其峰谷电量转移率

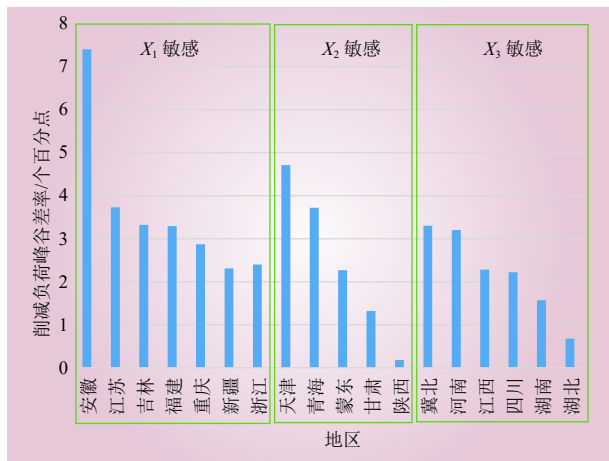


图 3 各地区一般工商业负荷对多维价格指标的敏感性分类
Fig. 3 The sensitivity classification of general industrial and commercial loads in various regions to multi-dimensional price indicators

分别为 10.89 个百分点、5.82 个百分点，削峰填谷效果显著；甘肃、青海的第三产业经济增加值较低，分别为 0.54 万亿元、0.40 万亿元，其峰谷电量转移率分别为 0.55 个百分点、-0.39 个百分点，削峰填谷作用不明显。

3.1.4 居民分时电价调整影响分析

目前，国家电网有限公司经营区已有 15 个省级公司经营区出台了居民峰谷电价政策，但峰谷电价价差相对较小，平均仅为 1.99。一些地区仅设定平段电价和谷段电价，未设定高峰电价，且除上海、四川外的 13 个省级公司经营区允许居民用户自行选择是否执行峰谷电价，其中 7 个省居民执行率不足 1%。总的来看，叠加居民阶梯电价影响^[16]，此次进一步完善分时电价机制对居民用电价格的影响较小^[17]，居民分时电价调整对居民用电影响不大。

3.2 行业负荷电价敏感性分析

3.2.1 133 个行业整体影响分析

分时电价政策对大多数行业起到了降低负荷峰谷差率的效果，如图 4 所示。总体来看，133 个行业中有 103 个行业（占比 77.5%）平均负荷峰谷差率下降，下降超过 2 个百分点的有 25 个行业（占比 18.8%）、下降 1~2 个百分点的有 38 个行业（占比 28.6%）、下降低于 1 个百分点的有 40 个行业（占比 30.1%）。

效果最显著的 5 个行业分别是酒/饮料及精制茶制造业（峰谷差率降低 3.27 个百分点，下

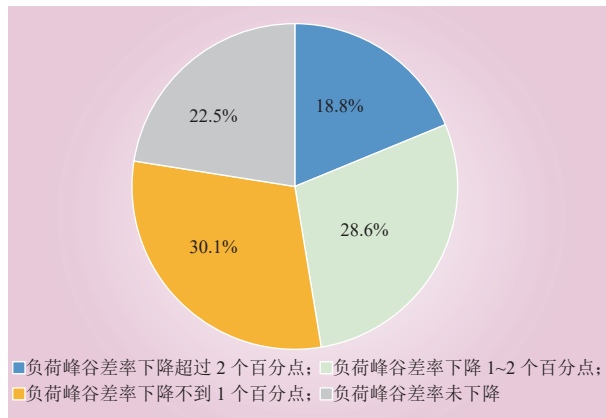


图 4 133 个行业负荷峰谷差率变化情况
Fig. 4 Changes of load peak-to-valley differences in 133 industries

同）、汽车制造业（2.82 个百分点）、电气机械和器材制造业（2.81 个百分点）、非金属矿采选业（2.45 个百分点）、建筑业（2.39 个百分点）；效果最不明显的 5 个行业分别是软件和信息技术服务业（-4.21 个百分点）、风能原动设备制造（-2.80 个百分点）、林业（-1.84 个百分点）、铅锌冶炼（-1.75 个百分点）、港口岸电（-1.53 个百分点）。

3.2.2 电量与负荷占比较高行业影响分析

按行业电量与负荷在全社会用电中占比从高到低排列，选取 18 个占比前列行业进行分时电价调整效果对比分析。除非金属矿物制品业外，其余 17 个行业本轮分时电价调整后行业平均负荷峰谷差率都有不同程度下降。非金属矿物制品属于非连续型的四大高载能行业，其响应分时电价的积极性非常高，生产时间高度集中在谷段，继续调整空间较小，所以本轮削峰填谷效果不明显。总体来看，拉大分时电价峰谷价差对大多数行业起到了削峰填谷效果。

不同行业电费成本占比、用电特性、利润率决定了行业分时电价执行效果。电费占成本比重较高、负荷调整灵活的行业执行效果较好，如电费占成本比例超过 10% 的铝冶炼（峰谷差率缩小 2.18 个百分点，下同）、采矿业（2.14 个百分点）、纺织业（1.70 个百分点）、石油/煤炭及其他燃料加工业（1.63 个百分点）对电价较为敏感，通过生产调度优化多用低谷电降低用电成本，分时电价执行效果较好。电费占成本比重较低但毛利率较低的行业，执行效果也较好，如计算机/通



信和其他电子设备制造业（2.26个百分点）虽然电费占成本比例不到2%，但由于行业毛利率也不到10%，依然有动力响应分时电价，且行业多为非连续型生产企业，有较大空间根据分时电价时段调整生产计划降低负荷峰谷差率。连续均衡生产行业基本不受影响，信息传输/软件和信息技术服务业（0.71个百分点）、橡胶和塑料制品业（0.67个百分点）等连续生产行业峰谷平三段用电均衡，生产安排调整空间不大^[18-19]。电费占成本比重较低且难以调整生产安排的行业，几乎不会针对分时电价改变生产安排，如房地产业（0.06个百分点）、金属制品业（0.38个百分点）。

3.2.3 高载能行业影响分析

非金属矿物制品业、有色金属冶炼和压延加工业、黑色金属冶炼和压延加工业、化学原料和化学制品制造业的峰谷电量转移率分别上升6.4个百分点、2.4个百分点、1.9个百分点和0.4个百分点，表明本轮分时电价调整起到了引导四大高载能行业用户分时用电的作用，具有一定削峰填谷效果^[20-21]。

分析各地区高载能行业分时电价多维价格弹性矩阵可以发现：河南、江苏、辽宁、青海、陕西、新疆高峰电价变化率 X_1 对应的系数绝对值较大，即提高大工业高峰电价更能有效对高载能行业负荷削峰填谷；吉林、冀北、蒙东、四川、浙江、重庆低谷电价变化率 X_2 对应的系数绝对值较大，即降低大工业低谷电价更能有效对高载能行业负荷削峰填谷；安徽、黑龙江、湖北、湖南、宁夏峰谷电价比变化率 X_3 对应的系数绝对值较大，即拉大大工业峰谷电价差能有效对高载能行业负荷削峰填谷。

4 结语

本文提出了一种多维价格弹性系数构建方法，能定量评估分时电价调整对各地区、各行业峰谷时段负荷影响。根据多维价格弹性系数矩阵分析得出各地区各行业电力电量指标对多维价格指标的敏感性结论可以作为未来有针对性地优化各地区用电价格政策、制定分行业差异化分时电价政策的理论依据。

需要特别说明的是，本文提出的多维价格弹

性系数具备灵活的扩展性，可以根据实际需要拓展分析不同的价格指标和负荷指标，如尖峰时长、峰段时长、谷段时长、负荷率、最高负荷、最低负荷等，定量测算不同负荷指标对各价格指标的敏感性。结合各地区产业结构、分行业负荷特性、企业生产特点等，定期开展电价调整效果精细分析评估工作，可有效支撑第三监管周期省级电网输配电价改革相关工作。

参考文献：

- [1] 钟锐, 易庚, 宋新甫. 分时电价政策分析与完善建议[J]. 中国电力企业管理, 2022(16): 64-65.
- [2] 张若愚, 刘敏, 李震. 基于价格弹性矩阵的用户响应潜力评估方法[J]. 电力科学与工程, 2022, 38(7): 17-24.
ZHANG Ruoyu, LIU Min, LI Zhen. Evaluation method of user response potential based on price elasticity matrix[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2022, 38(7): 17-24.
- [3] 徐广达, 张利, 梁军, 等. 基于设备用电特征的居民电力需求价格弹性评估[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13): 48-55.
XU Guangda, ZHANG Li, LIANG Jun, et al. Estimation of price elasticity for residential electricity demand based on electricity consumption features of appliances[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(13): 48-55.
- [4] 刘自敏, 杨丹, 冯永晟. 阶梯定价调整、需求弹性测度与中国电价政策评估[J]. 财经问题研究, 2017(2): 35-42.
LIU Zimin, YANG Dan, FENG Yongsheng. Tiered pricing adjustment, measurement of demand elasticity, and evaluation of China's electricity price policy[J]. *Research on Financial and Economic Issues*, 2017(2): 35-42.
- [5] 李虹, 王帅, 李晨光, 等. 电价调整对宏观经济及产业结构的影响[J]. 资源科学, 2022, 44(1): 156-168.
LI Hong, WANG Shuai, LI Chenguang, et al. Impact of electricity price adjustment on macro economy and industrial structure[J]. *Resources Science*, 2022, 44(1): 156-168.
- [6] 许杰, 黎珍羽, 闫敬德. 碳达峰、碳中和目标下工业企业电价承受能力研究: 基于对甘肃省工业企业电价承受能力相关数据的测算与比较[J]. 价格理论与实践, 2021(8): 78-81.
XU Jie, LI Zhenyu, YAN Jingde. Analysis on the industrial enterprise's electrovalence affordability and strategy under the goal of carbon peak and carbon neutrality—based on the calculation and comparison of data related to industrial enterprise's electrovalence



- affordability in Gansu[J]. *Price:Theory & Practice*, 2021(8): 78–81.
- [7] 丁伟斌. 电价政策调整对工商业用户用电影响研究: 基于浙江省企业调研数据的分析 [J]. *价格理论与实践*, 2021(12): 38–43.
DING Weibin. Impacts of electricity price policy adjustment on electricity consumption of industrial and commercial users: empirical study based on enterprise survey data in Zhejiang province[J]. *Price:Theory & Practice*, 2021(12): 38–43.
- [8] 刘浩田, 陈锦, 朱熹, 等. 一种基于价格弹性矩阵的居民峰谷分时电价激励策略 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(5): 116–123.
LIU Haotian, CHEN Jin, ZHU Xi, *et al.* An incentive strategy of residential peak-valley price based on price elasticity matrix of demand[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(5): 116–123.
- [9] 赵爽, 林铮, 付娅璐, 等. 考虑电力用户响应特性的分时电价规划研究 [J]. *电力科学与工程*, 2022, 38(8): 56–62.
ZHAO Shuang, LIN Zheng, FU Yalu, *et al.* Time-of-use electricity price planning considering power user response characteristics[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2022, 38(8): 56–62.
- [10] 张效言, 李先允. 计及需求响应的峰谷分时电价研究 [J]. *电气自动化*, 2022, 44(3): 25–27.
ZHANG Xiaoyan, LI Xianyun. Research on peak and valley time-of-use electricity price considering demand response[J]. *Electrical Automation*, 2022, 44(3): 25–27.
- [11] 郭曼兰, 陈皓勇, 肖文平, 等. 计及浮动高峰电价的购售双方优化模型 [J]. *南方电网技术*, 2021, 15(5): 79–88.
GUO Manlan, CHEN Haoyong, XIAO Wenping, *et al.* Optimization model for both purchase and sale considering variable peak price[J]. *Southern Power System Technology*, 2021, 15(5): 79–88.
- [12] 李艳梅, 任恒君, 张致远, 等. 考虑储能系统调度与风电消纳的峰谷分时电价优化模型研究 [J]. *电网技术*, 2022, 46(11): 4141–4149.
LI Yanmei, REN Hengjun, ZHANG Zhiyuan, *et al.* Optimization model of peak-valley time-of-use electricity prices considering energy storage system dispatching and wind power consumption[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(11): 4141–4149.
- [13] 况夫良. 电力市场环境峰谷分时售电定价方法研究 [D]. 上海: 上海电力大学, 2022.
KUANG Fuliang. Research on pricing method of time-of sale in peak-valley under power market environment[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2022.
- [14] 万玉良, 尚国政, 刘蒙聪, 等. 考虑源荷不确定性的分时电价动态修正机制研究 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(11): 493–500.
WAN Yuliang, SHANG Guozheng, LIU Mengcong, *et al.* Research on dynamic correction mechanism of time-of-use electricity price considering uncertainty of source and load[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2022, 43(11): 493–500.
- [15] 何英静, 叶泽, 魏文. 考虑用户需求价格弹性的峰谷分时电价时段划分研究 [J]. *价格月刊*, 2022(12): 1–9.
HE Yingjing, YE Ze, WEI Wen. Research on time division of peak-valley tariff considering price elasticity of user demand[J]. *Prices Monthly*, 2022(12): 1–9.
- [16] 刘思强, 丁娜, 孙英楷, 等. 电价交叉补贴收入再分配效应及阶梯电价改进 [J]. *中国电力*, 2023, 56(9): 79–86.
LIU Siqiang, DING Na, SUN Yingkai, *et al.* Income redistribution effect of electricity price cross-subsidies and improvement of ladder electricity price[J]. *Electric Power*, 2023, 56(9): 79–86.
- [17] 徐庆华, 穆永保, 王自姣. 基于峰谷分时电价的居民生活用电分析 [J]. *大众用电*, 2022, 37(4): 19–20.
- [18] 朱凯. 分时电价下无等待流水车间调度优化研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
ZHU Kai. Research on scheduling optimization of no wait flow shop under time-of-use electricity price[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [19] 黄姗姗, 叶泽, 罗迈, 等. 中国电力中长期市场分时段交易价格形成机制及模型 [J]. *中国电力*, 2023, 56(1): 17–27.
HUANG Shanshan, YE Ze, LUO Mai, *et al.* Time-sharing trading price formation mechanism and model of China's mid to long-term electricity market[J]. *Electric Power*, 2023, 56(1): 17–27.
- [20] 薛明远, 叶春明. 基于 MOMA 算法的分时电价下炼钢生产调度研究 [J]. *智能计算机与应用*, 2022, 12(8): 174–178.
XUE Mingyuan, YE Chunming. Research on steelmaking production scheduling under time-sharing electricity prices[J]. *Intelligent Computer and Applications*, 2022, 12(8): 174–178.
- [21] 单葆国, 刘青, 张莉莉, 等. 新形势下“十四五”后三年中国电力需求形势研判 [J]. *中国电力*, 2023, 56(3): 1–11.
SHAN Baoguo, LIU Qing, ZHANG Lili, *et al.* Analysis of China's power demand situation in the last three years of the "14th five-year plan" under the new situation[J]. *Electric Power*, 2023, 56(3): 1–11.

作者简介:

唐文升 (1968—), 男, 硕士, 高级经济师, 从事电力市场营销工作, E-mail: wensheng-tang@sgcc.com.cn;

王阳 (1985—), 女, 博士, 高级工程师, 从事售电市场分析预测和电动汽车研究, E-mail: yang-wang@sgcc.com.cn;



张煜（1983—），男，通信作者，博士，高级工程师，从事售电市场分析预测、电力供需分析研究，E-mail: zhangyu2@sgeri.sgcc.com.cn;

刘席洋（1991—），男，博士，工程师，从事用电需求分析预测和电力系统分析研究，E-mail: ncepulxy@126.com;

谭清坤（1988—），男，博士，工程师，从事电能替代、需求侧管理、虚拟电厂、多能互补、综合能源等研究，E-mail: tanqingkun@sgeri.sgcc.com.cn;

吴鹏（1978—），男，硕士，正高级工程师，从事电力市场营销工作，E-mail: wupeng@sgeri.sgcc.com.cn;

陈宋宋（1987—），男，博士，高级工程师，从事智能用电互动和人工智能应用技术研究，E-mail: chensongsong2010@163.com;

杨菁（1989—），女，博士，高级工程师，从事电力市场分析预测和数据管理运营研究，E-mail: jing-yang@sgcc.com.cn。

（责任编辑 李博）

Influence Mechanism of Time-of-Use Electricity Prices on Industry Load Characteristics Based on Multi-dimensional Price Elasticity Coefficient Matrix

TANG Wensheng¹, WANG Yang¹, ZHANG Yu², LIU Xiyang³, TAN Qingkun²,
WU Peng², CHEN Songsong⁴, YANG Jing⁵

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 2. State Grid Energy Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 3. Big Data Center of State Grid Corporation of China, Beijing 100052, China; 4. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China; 5. Customer Service Center of State Grid Corporation of China, Tianjin 300309, China)

Abstract: Based on the load curves of fixed user groups of various industries in 23 provinces, a multi-dimensional price elasticity coefficient is proposed to evaluate the impact of time-of-use electricity price adjustment on the peak and valley electricity consumption of various industries in various provinces, and the sensitivity of peak-valley power demand to multi-dimensional price indicators is analyzed. The multi-dimensional price elasticity coefficient was used to quantitatively evaluate the sensitivity of the three-dimensional power indicators of various industries in different regions, including reducing peak electricity, increasing valley electricity and reducing the load peak-valley difference rate, to the three-dimensional price indicators, including increasing the peak electricity price, reducing the valley electricity price and increasing the peak-to-valley electricity price ratio. The time-of-use electricity price optimization and adjustment strategies can be proposed for different regions, industries and time periods according to the analytical results of multi-dimensional price elasticity coefficient.

This work is supported by Science and Technology Project of SGCC (Research and Application of Precise Load Assessment and Regulation Technology to Support New Power Systems, No.5108-202218280A-2-0-XG).

Keywords: time-of-use electricity prices; price elasticity coefficient; load peak-to-valley difference; peak-to-valley power transfer; industry load