

“双碳”背景下基于模糊自回归分布滞后模型的 电力需求预测方法研究

缪源诚¹, 秦康平¹, 滕晓毕¹, 宋柄兵¹, 顾洁², 韦宁², 温洪林²

(1. 国家电网有限公司华东分部, 上海 200120; 2. 上海交通大学 电气工程学院, 上海 200240)

摘要:“双碳”目标的驱动下, 社会经济发展、能源生产及消费结构等将发生较大变化, 导致电力需求预测影响因素、变化趋势等也会呈现新的特点, 电力行业是保障“双碳”目标切实实现的重点领域, 因此有必要对新形势下的电力需求预测方法开展研究。首先基于对数平均迪式分解模型(logarithmic mean index method, LMDI)和通径分析方法研究“双碳”背景下电力需求影响因素, 提取得到电气化率、清洁能源发电比例和能源强度三项碳排放相关的电力需求相关因素。进一步提出了考虑碳约束的基于模糊自回归分布滞后模型的电力需求预测方法, 在考虑政策时滞效果的自回归分布滞后模型基础上将回归系数模糊化, 通过建立最小模糊度优化模型, 得到不确定性最小的回归参数, 提升了“双碳”背景下远景年电力需求预测精度。基于我国社会经济及电力需求历史数据, 结合国家政策目标, 对不同低碳路径下我国电力需求进行了预测, 对比验证了本文所提出的电力需求预测方法的可行性与有效性。

关键词:“双碳”目标; 电力需求预测; 对数平均迪式分解模型; 模糊自回归分布滞后模型; 模糊度优化

Research on the method of electricity demand prediction based on fuzzy autoregressive distributed lag model under the background of “dual carbon”

MIAO Yuancheng¹, QIN Kangping¹, TENG Xiaobi¹, SONG Bingbing¹, GU Jie², WEI Ning²,
WEN Honglin²

(1. East Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China; 2. School of Electrical Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Driven by the “dual carbon” goal, significant changes will occur in social and economic development, energy production, and consumption structure, leading to new characteristics in factors and trends affecting electricity demand forecasting. The power industry is a key area to ensure the practical achievement of the “dual carbon” goals, so research needs to be conducted on electricity demand forecasting method under the new situation. Logarithmic mean index method (LMDI) and path analysis method are used to study the influencing factors of electricity demand under the background of “dual carbon”, and extracts three carbon emission related influencing factors of electricity demand: electrification rate, clean energy generation ratio, and energy intensity. A method for predicting electricity demand based on fuzzy autoregressive distributed lag model is proposed. The regression coefficients are fuzzified on the basis of the autoregressive distributed lag model considering policy lag effects. By establishing a minimum fuzziness optimization model, the regression parameters with the least uncertainty are obtained, which improved the accuracy of long-term electricity demand prediction under the background of “dual carbon”. Based on the historical data of China’s socio-economy and electricity demand, and in combination with the national policy objectives, the electricity demand in China under different low-carbon paths has been predicted to verify the feasibility and effectiveness of the power demand forecasting method proposed in this article.

Key words: “dual carbon” target; electricity demand prediction; LMDI decomposition; fuzzy autoregressive distributed lag model; fuzzy optimization

0 引言

由于“双碳”背景下煤炭、石油等化石能源的消费受到政策调整限制, 电能占能源消费的比重将不

断提升。随着大规模可再生能源的接入, 电能应用范围的扩大, 电力行业在生产及消费两端都发生了显著变化^[1]。

国内外针对电力负荷中长期预测方法开展了大量研究, 研究成果按所基于的数学方法可分为: 传统预测方法和新兴预测方法。随着计算机运算能力的提升, 以深度学习等算法为代表的新兴预测方法被

收稿日期: 2025-06-29; 修回日期: 2025-09-12

基金项目: 国家电网有限公司华东分部科技项目(项目编号: 52992424001A); 国家自然科学基金资助项目(52307119)

引入电力需求预测。

“双碳”目标下,电力需求的影响因素更加复杂多样,如清洁低碳约束、社会经济发展、产业结构调整、新型行业涌现、人口数量变化、用能方式转变等多方面相互融合,增加了预测的难度。

目前电力需求预测研究中,对于碳排放管理对经济增长、产业结构等传统电力需求影响因素的作用已有部分研究成果。其中,文献[2]发现碳排放量是经济发展的重要影响因素之一,存在长期均衡关系。文献[3]研究得出环境规制对产业结构升级有一定的促进效应,因此在“双碳”背景下,加强对可再生资源的循环利用将进一步推动产业结构向更高形态发展。碳排放会对电力需求影响因素产生影响,进而影响电力需求。

上述研究表明,在“双碳”政策实施的背景下,构建电力需求预测模型时,碳排放的影响不能被忽视,如何将“双碳”政策的影响纳入考量是当前电力需求预测面临的重要问题。然而目前较少研究涉及到量化体现“双碳”背景下重要因素对电力需求预测结果的影响。文献[4]对不同低碳场景电力需求进行了分析,但在电力需求预测模型中尚未将与碳排放相关的因素考虑进去。“双碳”政策对电力需求的影响研究和探讨刚刚起步,亟需在已有方法上进行改进,将碳排放相关因素的影响纳入电力需求预测模型中。

本文提出了一种考虑碳排放影响的电力需求预测方法。首先,基于对数平均迪式分解模型(logarithmic mean index method, LMDI)和通径分析提取出影响电力行业碳排放的相关因素,根据提取得到的影响因素提出了一种考虑碳约束的基于模糊自回归分布滞后模型的电力需求预测方法,为“双碳”背景下远景年电力需求预测提供参考。

1 基于LMDI-通径分析方法的“双碳”背景下电力需求影响因素分析

“双碳”目标将进一步推动经济发展方式转变,使得未来电力消费的影响因素将更加多元化,传统电力消费影响因素体系需要更新以适应于新形势下的电力需求变化特点。本节基于LMDI得到了“双碳”背景下与电力行业相关的碳排放影响因素对碳排放的量化贡献,进而通过通径分析研究这些因素与电力需求之间的因果关系,在传统的电力需求关联影响因素外,筛选出碳排放相关的电力需求的影响因素,以支撑“双碳”背景下电力需求预测模型的建立。

1.1 碳排放影响因素分解方法

为量化分析“双碳”目标下对电力行业碳排放产生影响的因素,提出碳排放影响因素分解方法。对能源需求、能源消费等进行分解分析时,常规三类影响因素为经济效应、结构效应和强度效应。由于本文着重分析“双碳”背景下电力行业碳排放影响因素,故将电源结构、能源结构作为结构效应影响因素代表;将经济发展、人口等作为经济效应因素代表;以碳排放强度、能源强度作为强度效应因素代表,合计六个影响因素,对碳排放序列进行分解。本文采用LMDI算法进行碳排放分解。其分解法如式(1)所示

$$C = \sum_i C_i = \sum_i \frac{C_i}{E_i} \frac{E_i}{H} \frac{H}{E} \frac{E}{G} \frac{G}{P} P = \sum_i F_i e_i D Q Y P \quad (1)$$

式中: C 为二氧化碳排放总量, t ; C_i 为第 i 种能源生产电力所产生的二氧化碳排放量, t ; E_i 为第 i 种能源生产的电量, kWh ; H 为电力消费量, kWh ; E 为能源消费总量, tce ; G 为国民生产总值; P 为人口; F_i 为碳排放系数; e_i 为电源结构; D 为电气化率; Q 为能源强度; Y 为人均GDP。

假设在第0年至第 T 年间二氧化碳排放总量变化量为 ΔC , 根据公式(1), ΔC 可以表示为

$$\Delta C = C^T - C^0 = \Delta C_{em} + \Delta C_{es} + \Delta C_{int} + \Delta C_{dq} + \Delta C_{eco} + \Delta C_p \quad (2)$$

式中: ΔC 为第0年~第 T 年间的碳排放变化量, t ; C^0 和 C^T 分别为第0年、第 T 年的碳排放量, t ; ΔC_{em} 为碳排放系数的影响贡献量; ΔC_{es} 为电源结构的影响贡献量; ΔC_{int} 为电气化率的影响贡献量; ΔC_{dq} 为能源强度的影响贡献量; ΔC_{eco} 为经济发展的影响贡献量; ΔC_p 为人口的影响贡献量; T 为研究时段的总年数。

1.2 基于通径分析方法的“双碳”背景下电力需求影响因素选取

得到了“双碳”背景下对碳排放电力需求可能的影响因素后,为识别影响因素与电力需求的关联程度,利用通径分析法分析各影响因素的重要程度及其相关关系。

基于通径分析的电力需求影响因素选取过程如下:

设电力需求的影响因素为 $X_1, X_2, \dots, X_k$; λ_i 为 X_i 的偏回归系数; $\bar{X}_i$ 为 X_i 的均值; σ_{X_i} 为 X_i 的标准差; Y 为电力需求; $\bar{Y}$ 为 Y 的均值; σ_Y 为 Y 的标准差。则电力需求, 电力需求均值以及电力需求的影响因素和电力需求的影响因素均值的线性拟合表达式如(3)和(4)所示; 经过处理得到如(5)所示的标准化后电力需求关于电力需求影响因素的表达式

$$Y = \lambda_0 + \lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2 + \dots + \lambda_k X_k + e_1 \quad (3)$$

$$\bar{Y} = \lambda_0 + \lambda_1 \bar{X}_1 + \lambda_2 \bar{X}_2 + \dots + \lambda_k \bar{X}_k + e_2 \quad (4)$$

$$(Y - \bar{Y})/\sigma_Y = \lambda_1 \sigma_{X_1} (X_1 - \bar{X}_1)/\sigma_Y \sigma_{X_1} + \lambda_2 \sigma_{X_2} (X_2 - \bar{X}_2)/\sigma_Y \sigma_{X_2} + \dots + \lambda_k \sigma_{X_k} (X_k - \bar{X}_k)/\sigma_Y \sigma_{X_k} + e_3 \quad (5)$$

式中: e_1 , e_2 和 e_3 分别为相应的拟合误差。

设 C_{ij} 为 X_i 与 X_j 的相关系数, P_i 为 X_i 与 Y 的通路系数, 则有

$$P_i = Z_i + J_i \quad (6)$$

$$Z_i = \lambda_i \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_Y} \quad (7)$$

$$J_i = \sum_{j \neq i} C_{ij} Z_j \quad (8)$$

式中: Z_i 为 X_i 对 Y 的直接通路系数, 表示当 X_i 增加一个标准差单位时, Y 所变化的标准差单位; J_j 为 X_i 通过 X_j 对 Y 产生的间接影响; J_i 为 X_i 对 Y 的间接通路系数, 表示 X_i 通过作用于其他影响因素对 Y 产生的间接影响; P_i 为综合考虑直接作用和间接作用下 X_i 对 Y 的影响, 称为 X_i 对 Y 的综合系数。

通路系数判断系数 R^2 表示所选的变量解释电力需求的程度, 若判断系数较小, 则说明误差较大或者还有其他重要影响因素未考虑在内。

R^2 的表达式如式(9)所示

$$R^2 = \sum_i P_i C_{iy}, R^2 \in [0, 1] \quad (9)$$

式中: C_{iy} 为 X_i 与 Y 之间的相关系数。

2 基于模糊自回归分布滞后模型的碳排放约束下电力需求预测方法

前文得到了碳排放相关的电力需求影响因素, 由于这些因素受到政策影响, 因此不能简单地用静态模型描述, 需要考虑其长期效应。同时, 在预测模型中还需要考虑碳排放目标的约束, 以得到“双碳”背景下电力需求的合理预测结果。本章基于碳夹点的能源分配优化运行模型, 建立电力需求预测的“双碳”临界场景, 并提出综合考虑变量时滞关系和模型精度提升的模糊自回归分布滞后电力需求预测模型, 实现考虑“双碳”目标影响的电力需求预测。

2.1 “双碳”背景下电力需求预测临界场景的碳约束设计

在“双碳”目标下, 能源系统发展将受排放限制。新能源发电是减少碳排放的有效途径, 但其成本和协调问题可能抑制投资。随着经济性和环保意识提升, 新能源利用将逐步增加。研究新能源发

电的最低需求, 即临界场景, 对政策制定至关重要。本节采用碳夹点优化方法, 构建了最小清洁能源发电的“双碳”临界场景。

碳夹点技术在考虑碳排放约束下优化区域能源消费结构时的主要目标是通过规划能源供应量所产生的碳排放, 计算在碳排放和能源供应约束下清洁能源发电的最低占比, 优化模型的具体形式如(10)至(15)所示。在满足碳排放约束和能源总需求平衡的前提下, 以清洁能源发电占比最小为目标函数, 通过不同种类能源消费量的分配, 探究“双碳”临界场景。(11)至(13)分别代表了能源的供给平衡、碳排放约束和非负性约束等。

$$\min L_t \quad (10)$$

$$\text{s.t. } W_{i,t} + F_{i,t} = S_{i,t} \quad (11)$$

$$L_t + \sum_{i=1}^n F_{i,t} = D_t \quad (12)$$

$$C_t = \sum_{i=1}^n C_{i,t} F_{i,t} \quad (13)$$

$$C_t \leq CS_t \quad (14)$$

$$L_t, F_{i,t} \geq 0 \quad (15)$$

式中: L_t 、 $W_{i,t}$ 、 $F_{i,t}$ 和 $S_{i,t}$ 分别为 t 年能源系统消耗清洁能源量, t 年第 i 种能源中未被利用的量, t 年第 i 种能源的利用量和 t 年第 i 种能源的供给量, tce; $C_{i,t}$ 为 t 年第 i 种能源的碳排放系数; C_t 和 CS_t 分别为 t 年总碳排放量和碳排放约束上限值, t; D_t 为 t 年能源总需求量, tce。

将“双碳”目标, 即: 2030 年实现碳达峰, 2060 年实现碳中和, 纳入模型的约束条件, 将式(14)变为式(16)和式(17)。

$$\left. \frac{dC_t}{dt} \right|_t < 0 \quad t > 2030 \quad (16)$$

$$C_t \Big|_{t=2060} \leq CL \quad (17)$$

式中: CL 为系统总碳汇, tCO₂。

2.2 基于模糊自回归分布滞后模型的电力需求预测方法

动态时间序列模型通过滞后变量反映变量随时间的变化, 与仅对事件做出反应的静态模型不同。在电力需求预测中, 需要考虑政策等多因素的长期影响, 而不仅仅是短期效应。

而自回归分布滞后模型则可以结合电力需求影响因素(自变量)、电力需求本身(因变量)及其滞后值进行建模预测。

自回归分布滞后模型表达式如(18)所示

$$y_t = a_0 + a_1 t + \sum_{i=1}^p \varphi_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^k \sum_{m=0}^q \beta_{i,m} x_{j,t-m} + \varepsilon_t \quad (18)$$

式中: a_0 为常数; a_1 , φ_i , $\beta_{i,m}$ 分别为时间 t 、电力需求

时滞因变量 y_{t-i} 和电力需求影响因素的时滞自变量 $x_{j,t-m}$ 的回归系数； p 为自回归阶数； k 为影响因素个数； q 为自变量的最大滞后阶数； ε_t 为误差项。

为考虑“双碳”政策影响下的电力需求变化规律,构建基于模糊自回归分布滞后模型的电力需求预测方法,以预测“双碳”背景下的电力需求。

记模糊数 $\tilde{A}$ 的隶属函数为

$$\tilde{A}(x) = L\left(\frac{X - \alpha}{\beta}\right), \beta > 0, X \in \mathbf{R} \quad (19)$$

若隶属函数 L : 满足(20)至(22),则称模糊数 $\tilde{A}$ 为对称模糊数。

$$L(-x) = L(x) \quad (20)$$

$$L(0) = 1 \quad (21)$$

$$\begin{cases} L(x_1) \leq L(x_2) \\ 0 \leq x_2 \leq x_1 \end{cases} \quad (22)$$

将 L 的隶属度函数记为 (α, β) , α 称作隶属度函数的中心,而 β 称作隶属度函数的扩展形,当 $\beta = 0$ 时,模糊关系不存在,模糊数 $\tilde{A}$ 即成为实数。模糊自回归分布滞后模型的具体建立过程如下:

(1) 为表达回归系数的不确定性,采用模糊数来改造历史数据中的回归系数。具体方法如(23)所示,将(15)中的回归系数用模糊数表示。

$$\tilde{y}_t = \tilde{a}_0 + \tilde{a}_1 t + \sum_{i=1}^p \tilde{\varphi}_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^k \sum_{m=0}^q \tilde{\Omega}_{j,m} x_{j,t-m} = \tilde{A}_t X_t \quad (23)$$

式中: $X_t = [1, t, y_{t-1}, x_{1,t-1}, \dots]$ 为电力需求影响因素向量,即人均GDP、能源强度、人口、清洁能源占比、电气化率等电力需求影响因素; $\tilde{A}_t = [\tilde{a}_0, \tilde{a}_1, \tilde{\varphi}_i, \tilde{\Omega}_{j,m}]^T$ 为模糊变量回归系数向量,设置回归系数为三角模糊数,由于三角模糊数存在线性性质,则可以计算得到 $\tilde{A}_t$ 的中心和扩展型 (α_i, β_i) 。

因变量电力需求 $\tilde{y}_t$ 的隶属度 $L_{\tilde{y}_t}(\tilde{y}_t)$

$$L_{\tilde{y}_t}(\tilde{y}_t) = \begin{cases} \frac{L(\tilde{y}_t - \mathbf{X}^T \mathbf{a}_t)}{\beta_t^T \mathbf{X}} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $\mathbf{X}^T$ 为 $\mathbf{X}$ 的转置。

(2) 构建最小模型不确定性优化模型

由(23)可知,模型模糊化后回归模型预测的误差由回归系数的模糊性引起。因此,可以通过构建优化模型最小化模糊自变量回归系数向量 $\tilde{A}_t$ 的模糊性,来提升回归模型的预测精度。

研究表明扩展形 β 可以反映模糊数的模糊性。以最小化 β_i 为目标函数,得到优化模型如下

$$\min \beta_i \quad (25)$$

$$\tilde{A}_t X_t - |L^{-1}(h)| \beta_i X_t \leq y_t \quad (26)$$

$$\tilde{A}_t X_t + |L^{-1}(h)| \beta_i X_t \geq y_t \quad (27)$$

式中: $L^{-1}(h)$ 为隶属函数 $L(h)$ 的倒数。

方法的具体流程如图1所示。

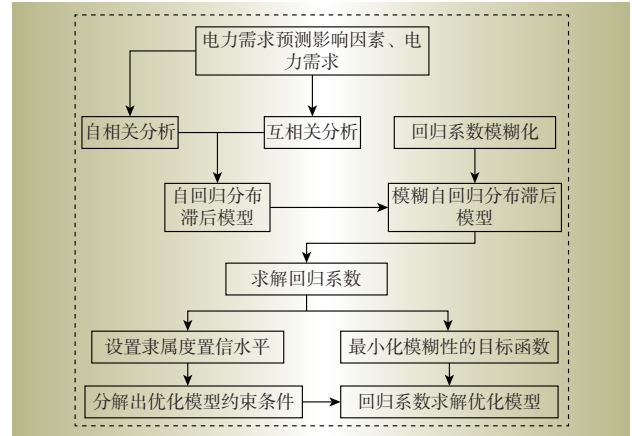


图1 基于模糊自回归分布滞后模型的电力需求预测方法计算流程

Fig. 1 Flow chart of power demand prediction method based on fuzzy autoregressive distributed lag model

通过优化模型可以得到可以最大程度降低模型不确定性的模型回归参数,从而确定模糊变量回归系数向量后,代入式(23)得到电力需求预测模型的表达式。

为获取电力需求预测模型中影响因素预测值,需结合不同发展场景设置,对各影响因素分析预测。在不考虑“双碳”影响的对比场景中,人均GDP、能源强度、人口等宏观经济指标,可用时间序列预测方法,结合历史数据和未来经济发展趋势预测;对于清洁能源占比、电气化率等能源结构指标,要考虑政策导向、技术进步、市场需求等因素,采用系统动力学模型、情景分析法等预测。同时,可结合专家经验和问卷调查等修正优化预测结果,提高准确性和可靠性。获取各影响因素预测值后,代入电力需求预测模型,可得未来电力需求预测结果。

3 算例分析

为验证本文所提出预测方法的有效性,采用我国1998—2022年间的电力需求及社会经济发展因素的历史数据(摘自《中国统计年鉴》(1999—2023)^[5]进行建模,对我国2023—2060年电力需求进行预测。

3.1 电力需求影响因素分析

考虑到碳排放相关政策推出的时间并不长,本文依据2014年至2022年我国历史数据搭建LMDI模型,对计算得到的电力行业碳排放量进行影响因

素分解,得到各影响因素对碳排放变化的贡献量如表1所示。

表1 各影响因素对我国电力行业碳排放变化的贡献量

Table 1 Contribution of various influencing factors to carbon emissions in China's power industry

年份	碳排放系数	清洁能源发电比例	电气化率	能源强度	经济发展	人口
2014	-0.4	-1.1	2.3	-2.1	2.4	0.2
2015	-0.4	-0.7	3.0	-2.4	2.8	0.2
2016	-0.3	-0.2	1.8	-3.0	4.0	0.2
2017	-0.2	-0.5	2.7	-2.7	4.0	0.2
2018	-0.2	-1.0	2.3	-1.7	2.9	0.1
2019	-0.2	-0.7	1.7	-0.2	1.1	0.1
2020	-0.5	-0.4	2.3	-3.3	5.8	0.0
2021	-0.2	-1.1	3.9	-2.1	2.8	0.3

基于分解结果,选取传统的人口、人均GDP以及碳排放相关的能源强度、电气化率、清洁能源发电比例,通过通径分析方法研究各影响因素对电力需求的影响。

通径分析的R2值为0.992 3,说明选定的变量对电力需求有很高的解释力。本文基于所选定的变量,即:能源强度、电气化率、清洁能源发电比例、人均GDP,建立电力需求预测模型。

3.2 场景设置

为研究“双碳”目标下电力需求趋势,设定了4个场景:基准、临界、“超低碳”和不考虑“双碳”影响的参照场景。各场景参考文献[6]中方法设置,具体如下:

(1) “双碳”临界场景:为确保不同情况下,设置的最小清洁能源发电占比的能源消费折算成碳排放后都能满足“双碳”目标的要求,各项影响因素根据能源消费子系统生成的未来能源消费序列值,设置为“双碳”目标达成的临界情况^[6-7],基于碳夹点方法建立优化模型。这里以2031年的能源结构计算过程为例对该场景的含义进行说明,由于按照“双碳”目标,2030年将实现碳达峰,因此2031年碳排放量应小于“双碳”临界场景下2030年碳排放预测值,即11 804.79亿tCO₂。为计算新能源发展滞后于预期目标的情况下,要实现碳达峰目标清洁能源占比最低值,对本场景进行碳夹点计算,得到结果如图2所示。经过调整后,清洁能源占一次能源消费比重从24.09%缩小至18.09%,表示在新能源发展不如预期的情况下,清洁能源占一次能源消费比重最低必须保持在18.09%以上,才能实现碳达峰的目标。

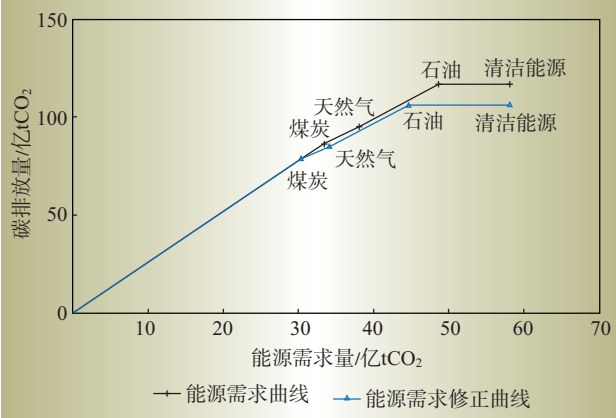


图2 碳约束下基于最小清洁能源占比的能源需求修正图
Fig. 2 Energy demand correction based on the minimum proportion of clean energy under carbon constraints

(2) 超低碳场景:此情景假设我国的低碳发展进程快于预期。这一场景下电源装机参考中国电力联合会《电力行业碳达峰碳中和发展路径研究》报告中新能源加速发展的场景设置。其余参数的设置参考文献[8]对我国最大程度进行碳减排后的发展场景的研究。

(3) 不考虑“双碳”目标影响的参考场景:此情景用以分析“双碳”政策及不同发展场景对电力需求的影响。在此场景中,电气化率、能源强度和发电清洁能源占比未受到“双碳”相关政策影响,均维持历史趋势发展,用传统的差分自回归移动平均模型模型对各电力需求影响因素变量进行模拟。

各场景和碳排放量结果如表2所示。超低碳场景和基准情景由于政策执行力度较强,分别于2027和2028年提前完成碳达峰目标,2050年和2055年提前完成碳中和目标。“双碳”临界场景在碳约束下遵循经济性原则,分别在2030年和2060分别完成碳达峰和碳中和目标。若各电力需求影响因素按历史趋势进行发展,不加以引导和管理则我国可能无法及时实现碳达峰、碳中和的目标,需要采取相关的政策措施,以促进“双碳”目标的实现。

表2 不同场景碳排放量预测结果
Table 2 Prediction results of carbon emissions in different scenarios

场景	碳达峰时碳排放量/亿tCO ₂	碳达峰年份	碳中和年份
基准场景	113.31	2028	2055
“双碳”临界场景	117.80	2030	2060
超低碳场景	111.13	2027	2050
不考虑“双碳”目标影响的参考场景	230.21	2046	未实现

3.3 电力需求预测结果

基于不同场景和本文所建立的基于模糊自回归分布滞后的电力需求预测模型,对我国 2023 年—2060 年的电力需求进行预测。

(1) 预测模型参数估计

将待预测年份 t 的人均 GDP、人口、能源强度、清洁能源发电比重和电能占终端能源消费比重 $[x_{GDP,t}, x_{POP,t}, x_{INT,t}, x_{ES,t}, x_{EC,t}]^T$ 作为输入,预测电力需求 E_t 。

将相关性 0.9 以上的电力需求、电气化率和清洁能源发电比例的一阶时滞变量作为预测模型的输入变量。为了消除异方差性,原始数据采用对数预处理。基于模糊最小优化确定预测模型的参数,得到结果如表 3 所示。

表 3 回归模型参数估计值
Table 3 Regression model parameter estimates

参数	回归系数
常数	(2.115 3, 0)
Y_{t-1}	(-0.668, 0)
$x_{GDP,t}$	(0.21, 0)
$x_{pop,t}$	(2.94, 0)
$x_{EC,t}$	(1.95, 0.034 5)
$x_{EC,t-1}$	(-0.231, 0)
$x_{ES,t}$	(0.233 3, 0)
$x_{ES,t-1}$	(-0.004 3, 0)
$x_{INT,t}$	(-0.227, 0)

(2) 利用 1998 至 2022 年数据,预测四个场景下我国 2023 至 2060 年的电力需求序列,结果如图 3 所示。2035 年前,我国电力需求呈现上升趋势,2035 年后电力需求年增长率出现下降的趋势,基准场景、超低碳场景和“双碳”临界场景中电力需求分别于 2054 年、2047 年和 2057 年达峰。

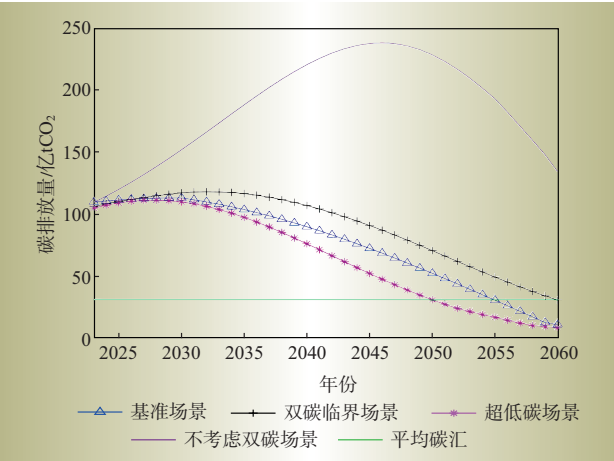


图 3 不同场景电力需求预测结果
Fig. 3 Prediction results of electricity demand in different scenarios

低碳情景中的电力需求始终高于高碳情景下的电力需求,分析其原因可能是由于在低碳情景下高耗煤产业发展受到了限制,商业、服务业等以消耗电力为主的产业占比上升。对于不考虑“双碳”目标影响的参考场景,电力需求保持持续增长,但需求量与考虑“双碳”的情况差距较大,最高仅至 12.68 万亿 kWh,这主要是由于此场景依照历史数据递推,电气化程度相对较低且可再生能源占比上升程度较小,在碳排放约束下用户使用电力的意愿减小的缘故。

(3) 预测结果分析

本文电力需求预测结果与中国工程院《“能源战略 2035”专题报告》和清华大学能源经济研究所报告《2060 年碳中目标下的低碳能源转型情景分析》的结论总体趋势相近,如表 4 所示,但预测结果均高于上述报告。

表 4 相关机构电力需求预测结果与本文基准场景电力需求预测结果对比

Table 4 Comparison between scene prediction values and related research values

研究报告	年份	预测值/ 万亿 kWh	本文基准 场景预测 值/万亿 kWh	相差比 例/%
中国石油经研院 《2050 年世界与 中国能源展望》	2025	8.20	9.11	9.99
	2030	9.10	10.10	9.90
	2035	10.60	11.49	7.75
	2040	11.10	13.27	16.35
	2045	11.80	15.19	22.32
	2050	12.20	16.77	27.25
中国工程院《“能 源战略 2035”专 题报告》	2025	8.70	9.11	4.50
	2030	10.20	10.10	-0.99
	2035	11.80	11.49	-2.70
	2040	13.00	13.27	2.03
	2045	14.10	15.19	7.18
	2050	14.70	16.77	12.34
清华大学能源经 济研究所报告 《2060 年碳中目 标下的低碳能源 转型情景分析》	2025	8.60	9.11	5.93
	2035	11.60	11.49	0.95
	2050	14.50	16.77	13.53
	2060	15.10	16.72	9.69

4 结束语

为准确预测新形势下未来的电力需求,合理规划电力系统的发展,本文提出了一种适应新形势的电力需求预测方法。首先基于 LMDI 分解法实现了

碳排放变化影响因素分解,结合通径分析提取出电气化率、清洁能源发电比例和能源强度3项碳排放相关的电力需求相关因素。通过考虑政策时滞效果的自回归分布滞后模型基础上将回归系数模糊化,通过建立最小模糊度优化模型,得到不确定性最小的回归参数,提升了“双碳”背景下远景年电力需求预测精度。可以得到以下结论:

(1) 采用LMDI方法将电力行业碳排放的变化分解为各个影响因素的作用,结果表明在经济因素外,电源结构、能源强度和电气化率3类影响因素对电力行业碳排放贡献值较大。

(2) 对电力需求与能源强度、电气化率、清洁能源发电比例和传统的电力需求影响因素人口、人均GDP的通径分析表明,上述5种影响因素与电力需求均具有强相关性。

(3) 提出了一种考虑时滞效应的多变量输入的基于模糊自回归分布滞后模型的电力需求预测方法,分别在基准场景、基于模糊“双碳”临界场景、超低碳场景和不考虑“双碳”目标影响的参考场景下进行预测,结果表明我国电力需求近年将保持增长,但于2050年左右会后达到峰值。与直接对影响因素进行时间序列外推相比,本文提出的模型降低了拟合误差。D

参考文献:

- [1] 雷少波,全晨华,肖斌,等. 中国电力行业碳排放时空分布及影响因素研究[J]. 计量科学与技术, 2024, 68(11): 29-33, 70.
LEI Shaobo, TONG Chenhua, XIAO Bin, et al. Study on the spatial and temporal distribution and influencing factors of carbon emission in China's power industry [J]. Metrology Science and Technology, 2024, 68(11): 29-33, 70.
- [2] 刘章发,高建刚,何丽娜. 中国经济增长、能源消费与二氧化碳排放互动关系研究——基于面板VAR的实证分析[J]. 重庆社会科学, 2023, (9): 111-124.
LIU Zhangfa, GAO Jiangang, HE Lina. Study on the interaction between economic growth, energy consumption and carbon dioxide emissions in China —— empirical analysis based on panel var [J]. Chongqing Social Sciences, 2023, (9): 111-124.
- [3] 游铭豪,顾洁,储琳琳,等. “双碳”背景下结合系统动

力学和弹性网络回归的区域电力需求中长期预测方法[J]. 供用电, 2024, 41(7): 72-83.

YOU Minghao, GU Jie, CHU Linlin, et al. A medium- and long-term forecasting method for regional power demand combining system dynamics and elastic net regression under the “dual carbon” background [J]. Distribution and Utilization, 2024, 41(7): 72-83.

- [4] 马燕如,王宝,贾健雄,等. “双碳”“双区”背景下电力需求预测方法研究实践[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(16): 12-15.

MA Yanru, WANG Bao, JIA Jianxiong, et al. Research and practice of power demand forecasting method under the background of “double carbon” and “dual zone” [J]. Technology Innovation and Application, 2024, 14(16): 12-15.

- [5] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999-2023.

National bureau of statistics of China. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 1999-2023.

- [6] 王利宁,彭天铎,向征艰,等. 碳中和目标下中国能源转型路径分析[J]. 国际石油经济, 2021, 29(1): 2-8.

WANG Lining, PENG Tianduo, XIANG Zhengjian, et al. Analysis of China's energy transition path under the goal of carbon neutrality [J]. International Petroleum Economics, 2021, 29(1): 2-8.

- [7] 叶爱山,李晓华,邓洋阳,等. “双碳”目标下中国碳达峰预测和减排路径研究[J]. 科技和产业, 2023, 23(23): 34-43.

YE Aishan, LI Xiaohua, DENG Yangyang, et al. Research on China's carbon peak prediction and emission reduction path under the “two-carbon” target [J]. Science Technology and Industry, 2023, 23(23): 34-43.

- [8] ZHOU Y, HAO F, MENG W, et al. Scenario analysis of energy-based low-carbon development in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(8): 1 631-1 640

作者简介:

缪源诚(1983),男,江苏南京人,博士,高级工程师,主要从事电网规划和运行管理工作。

(责任编辑 安然)