

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181223

适应供给侧结构性改革的中长期负荷预测拓展索洛模型研究

王凌谊¹, 王志敏¹, 钱纹¹, 彭虹桥², 顾洁², 朱玥², 时亚军²

(1. 云南电网规划研究中心, 云南 昆明 650011; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 大数据工程技术研究中心, 上海 200240)

摘要: 随着供给侧结构性改革的深入, 电力需求的演变规律变得更难捕捉。传统的中长期负荷预测模型通常未考虑供给侧结构性改革因素, 难以满足新形势下中长期负荷预测精度的要求。基于此, 提出了一种适应供给侧结构性改革的中长期负荷拓展索洛预测模型(Supply-Side Reform-Extended Solow Regression Model, SSR-ESRM)。首先, 通过对供给侧结构性改革内涵的解读, 从规模、结构及效率三种效应出发, 构建了量化指标体系。其次, 在基本索洛模型的结构中, 引入供给侧结构性改革因素对模型进行拓展, 建立 SSR-ESRM 实现中长期负荷点预测。为反映供给侧结构性改革的不确定性, 建立了系统动力学模型生成多种经济发展场景, 进一步实现中长期负荷外推预测。算例分析表明, 考虑供给侧结构性改革因素的 SSR-ESRM 预测精度较高, 且对场景切换的灵敏度适中, 有利于电网规划的灵活性, 能够为实现电网规划提供有益的参考。

关键词: 供给侧结构性改革; 指标体系; 拓展索洛模型; 系统动力学; 中长期负荷预测

Extended Solow regression model for mid/long-term load forecasting adapted to supply-side structural reform

WANG Lingyi¹, WANG Zhimin¹, QIAN Wen¹, PENG Hongqiao², GU Jie², ZHU Yue², SHI Yajun²

(1. Yunnan Power Grid Planning and Research Center, Kunming 650011, China; 2. Big Data Engineering Technology Research Center, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: As the supply-side reform gets further development, the evolution of electricity demand has become less predictable. Traditional mid/long-term load forecasting models often overlook the supply-side reform factors, making it difficult to meet the requirements on the forecasting accuracy of mid/long-term load under new situation. With the aforementioned background and defect, this paper proposes a novel mid/long-term load forecasting model, named Supply-Side Reform-Extend Solow Regression Model (SSR-ESRM), to adapt to the implementation of the policy. Firstly, the quantitative indicators from scale, structure and efficiency perspective based on the connotation of the structural supply-side reform are constructed. Next, the supply-side reform indicators are introduced into the basic Solow model, extended into SSR-ESRM as underlying point forecast models. Meanwhile, to reflect the uncertainties of this policy, several economic scenarios based on system dynamics model and multiple ex-ante load forecasts are generated. It is shown that SSR-ESRM has higher forecasting accuracy and moderate sensitivity to scenario switching, which can facilitate the flexibility of power system planning and provide useful reference for realizing power grid planning.

This work is supported by National Key Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2016YFB0900101).

Key words: supply-side structural reform; indicator system; extended Solow regression model; system dynamics; mid/long-term load forecasting

0 引言

为驱动经济新常态结构对称的可持续发展, 我

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(973 计划)(2016YFB0900101)

国政府于 2015 年正式提出了供给侧结构性改革, 旨在通过资本、劳动力、技术创新及自然资源等生产要素的组合配置, 逐步实现供需平衡, 提高经济及能源体系的可持续发展潜力^[1]。电力作为能源的重要组成部分, 在生产及消费环节都受到供给侧结构性改革的影响, 主要体现在能耗水平及用电结构等

方面^[2]。因此，供给侧结构性改革背景下，电力需求将受到规模性、结构性及效率性因素的耦合作用，演变规律变得更加复杂，给未来中长期电力需求预测工作带来较大的挑战^[3]。

中长期负荷预测模型较多，回归分析模型(Regression Analysis Model)及时间序列模型(Time Series Model)^[4]等经典预测模型预测机理较为成熟，在中长期负荷预测中应用较为广泛。其中回归分析模型能够建立外生影响因素与负荷间的回归关系，具有较强的解释能力。常用的回归预测模型包括多元线性回归模型^[5]及半参数加法回归模型^[6]等；而时间序列模型如：灰色模型及生长曲线模型对平稳增长的电力需求序列预测性能较好，但对波动较大的序列预测性能较差。

现阶段，众多学者主要围绕模型或场景设定某个单一方面，对新经济常态下的负荷中长期负荷预测展开了一系列研究工作。文献[7]通过对经济增长与电力需求的均衡分析及主导因素分析，提出长期能源替代规划模型对中长期负荷进行预测；文献[8]定量分析新经济常态对电网的影响，并基于系统动力学模型对经济场景进行模拟，结合单耗法对各产业电量进行中长期预测；文献[9]基于广东省经济发展现状，综合多种时间序列模型对广东省中长期电力需求进行预测。

目前，面向新经济常态的中长期负荷预测研究成果中普遍采用国民生产总值及人口等常规因素建模，均未对供给侧结构性改革因素加以考虑。尤其在现阶段供给侧结构性改革不断深入、经济与电力需求发展不协调的情况下，模型的适应性及有效性难以保证。同时，大多中长期负荷预测模型都通过对历史数据全拟合的方式建立，导致模型对新样本的预测能力较差，产生过拟合(Overfitting)。且在进行中长期负荷预测过程中，未来不确定性场景的生成方法具有较大的主观性，缺乏有效的模型支撑。

针对上述研究现状，本文提出一种适应供给侧结构性改革的拓展索洛中长期负荷预测模型(SSR-ESRM)。通过对政策内涵的解读，从规模、结构及效率三种效应出发，构建供给侧结构性因素指标体系。并在基本索洛模型的结构上，引入供给侧结构性改革因素对模型进行拓展，完成 SSR-ESRM 的建立。为表征供给侧结构性改革的深入程度，基于系统动力学模型建立多种经济场景，最终实现适应供给侧结构性改革的中长期负荷外推预测。

1 供给侧结构性改革内涵解读及指标提取

供给侧结构性改革的主要任务是“三去一降一

补”，即去产能、去库存、去杠杆、降成本、补短板；旨在借助劳动力、资本、创新、自然资源及制度管理等五大要素，从生产领域加强优质供给，扩大有效供给，提高全要素生产率，达到供需平衡。因此，供给侧结构性改革的核心可归纳为“五大要素，五大任务”，结合我国大部分地区的政策解读，具体对应关系如图 1 所示。

五大任务	五大任务	政策内涵
去产能	创新、自然资源	焦炭、粗钢等高耗能行业化解过剩产能等
去库存	劳动力、制度管理	房地产行业去库存，推进农民城镇化落户等
去杠杆	资本、制度管理	降低实体经济杠杆率、负债率；加强产业的金融监管等
降成本	创新、资本、制度管理	降低工业产品成本、用能成本、用地成本、物流成本及降税减费等
补短板	劳动力、创新、自然资源	发展新兴产业、拓宽人才供给、鼓励企业技术创新、坚持脱贫攻坚等短板

图 1 供给侧结构性改革内涵解读

Fig. 1 Illustration of connotation of the supply-side structural reform

由于本文旨在建立适应供给侧结构性改革的中长期负荷预测模型，因此需从电力发展的角度对供给侧结构性改革的本质进行指标抽象及量化提取。参考文献[2]中供给侧结构性改革对能源影响的分析思路，结合文献[10]对发达国家电力经济因素选取的经验，并考虑指标因素的数据可获得性，本文从规模、结构及效率等三个角度提取适合应用于中长期负荷预测模型中的供给侧结构性改革因素来量化供给侧改革影响(表中因素均可从地区统计年鉴上获取年度统计值)，如表 1 所示。

依据表 1 所示的指标及供给侧结构性改革的协调性政策地位，建立适应供给侧结构性改革的中长期负荷预测模型的策略，包括以下三种：

- 1) 在保留模型原有影响因素的基础上，通过一定的数据挖掘方法筛选并引入合适的供给侧结构性改革指标；
- 2) 根据政策导向，用效应相近的供给侧结构性改革指标替代原模型中影响因素，模型变量个数保持不变；

3) 融合以上两种策略, 既补充合适的供给侧结构性改革因素, 同时替换不合理的驱动因素。

表 1 从电力角度筛选表征供给侧结构性改革的指标体系

Table 1 Indicators selection for representing supply-side structural reform from power systems angle

效应	指标	符号
规模	电力固定资产投资额	E_{invest}
	一产 GDP	GDP_1
	三产 GDP	GDP_3
	规模以上工业增加值	P_{IND}
结构	高耗能工业品产量	N_{HEC}
	城镇化率	R_{Urban}
效率	工业能源效率	I_{eff}
	工业生产者出厂价格指数	PPI

2 计及供给侧结构性改革因素的拓展索洛模型

由于索洛模型能较好地解释电力需求的规模、结构及效率等三方面效应, 同时为更好地考虑供给侧结构性改革因素对电力需求的影响, 本文通过引入供给侧结构性改革因素对索洛模型进行拓展, 建立适应供给侧结构性改革的拓展索洛模型, 实现中长期负荷预测。

2.1 基本索洛模型

索洛模型最初由经济学家索洛测算产出增长来源时提出, 其模型结构可由生产函数表示, 如式(1)。

$$Q = A \cdot f(C, L) \quad (1)$$

式中: Q 表示产出总量; A 表示技术进步因子; C 、 L 分别表示资本及劳动力投入量; f 表示回报函数。将式(1)对时间求导, 并左右两边同除 Q , 令:

$$q = \frac{dQ}{dt} / Q; \quad a = \frac{dA}{dt} / A; \quad c = \frac{dC}{dt} / C; \quad l = \frac{dL}{dt} / L;$$

$$\alpha = \frac{dQ}{dC} / \frac{dC}{C}; \quad \beta = \frac{dQ}{dL} / \frac{dL}{L}; \quad \text{则式(1)可写成}$$

$$q = a + \alpha \cdot c + \beta \cdot l \quad (2)$$

式中: q 、 a 、 c 、 l 分别表示产出、技术进步、资本投入及劳动力投入的增长速度; α 、 β 分别表示资金及劳动力投入对产出的弹性系数。该方程表示产出增长速度取决于技术进步、资本及劳动力投入速度。但由于该模型应用具有一定的局限性, 需要根据问题特点对索洛模型进行改进^[11]。

应用索洛模型的基本思想, 鉴于电力需求与经济具有较强的耦合规律, 可考虑将产业规模、结构及效率因素替换生产函数中的资本、劳动力投入量

及技术进步因子, 构建电力需求增长的索洛模型。将回报函数 f 拆分成规模效应回报函数 F 及结构效应回报函数 G , 采用乘法形式, 具体表达式如式(3)。

$$Y = D^\gamma \cdot F(\mathbf{Sc}) \cdot G(\mathbf{St}) \quad (3)$$

式中: Y 表示电力需求总量; D 表示表征效率效应的因素; \mathbf{Sc} 为规模效应向量, 记作 $\mathbf{Sc}=[Sc_1, Sc_2, \dots, Sc_m]$, 包含 m 个规模影响因素; \mathbf{St} 为结构效应向量, 记作 $\mathbf{St}=[St_1, St_2, \dots, St_n]$, 包含 n 个结构影响因素; γ 表示模型系数。

2.2 考虑供给侧结构性改革因素的拓展索洛模型

参考文献[12]对索洛模型拓展分析的可行性研究, 本文在上述模型(式(3))的基础上, 依据适应供给侧结构性改革的中长期负荷预测建模策略第 3 条, 通过引入供给侧结构性改革因素进行模型拓展, 模型结构如式(4)所示。

$$Y = \prod_{j=1}^J (D_j^{\gamma_j}) \cdot F(\mathbf{Sc}, \mathbf{S}_{gc}) \cdot G(\mathbf{St}, \mathbf{S}_{gt}) \quad (4)$$

式中: D_j 为包含供给侧结构性改革指标的第 j 个技术进步因子; \mathbf{S}_{gc} 表示规模效应的供给侧结构性改革指标向量, 记作 $\mathbf{S}_{gc}=[S_{gc1}, S_{gc2}, \dots, S_{gcp}]$, 包含 p 个影响因素; \mathbf{S}_{gt} 表示结构效应的供给侧结构性改革指标向量, 记作 $\mathbf{S}_{gt}=[S_{gt1}, S_{gt2}, \dots, S_{gtq}]$, 包含 q 个影响因素。

考虑因素之间的交叉效应, 将回报函数采用指数形式, 并采用乘法模型结构, 则式(4)可变为

$$Y = \prod_{j=1}^J D_j^{\gamma_j} \times \prod_{i=1}^m Sc_i^{\alpha_i} \times \prod_{ii=1}^p S_{gc_{ii}}^{\chi_{ii}} \times \prod_{j=1}^n St_j^{\beta_j} \times \prod_{jj=1}^q S_{gt_{jj}}^{\kappa_{jj}} \quad (5)$$

两边取自然对数, 可得到

$$\ln(Y) = \sum_{j=1}^J \gamma_j \ln(D_j) + \sum_{i=1}^m \alpha_i \ln(Sc_i) + \sum_{ii=1}^p \chi_{ii} \ln(S_{gc_{ii}}) + \sum_{j=1}^n \beta_j \ln(St_j) + \sum_{jj=1}^q \kappa_{jj} \ln(S_{gt_{jj}}) \quad (6)$$

将 $\ln(\bullet)$ 看成一个整体, 式(6)与不含常数项的多元线性回归模型结构形式相似, 因此, 拓展索洛模型的参数集 $\theta = [\gamma, \alpha, \chi, \beta, \kappa]$ 可由最小二乘法或极大似然法进行求解。

随着影响因素的增加, 拓展索洛模型将更容易产生过拟合及伪回归等问题; 为使索洛模型在电力需求预测中具有长期有效性, 模型中的输入变量必须符合长期均衡关系(即通过长期均衡关系筛选影响变量), 因此对输入变量与电量序列进行单整性及协整性检验, 使影响因素序列的线性组合与电量序列之间具有长期均衡关系。所述模型的建立过程如图 2 所示。

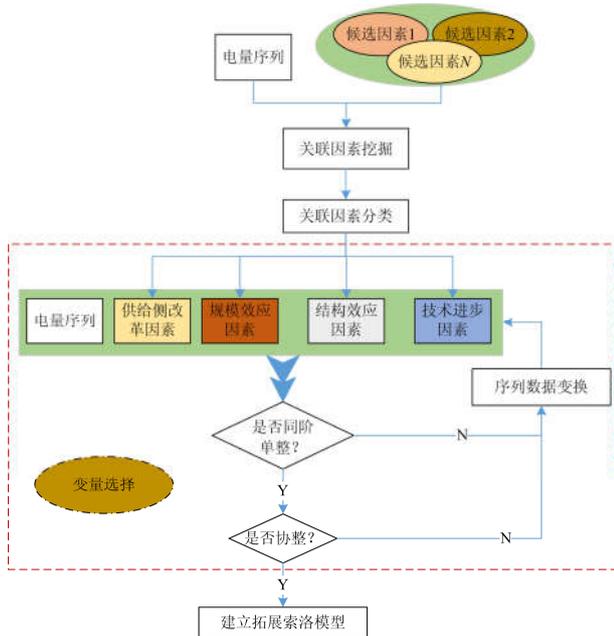


图 2 适应供给侧结构性改革的拓展索洛模型建立流程

Fig. 2 Flowchart of establishing supply-side reform-extended Solow regression model

3 基于系统动力学模型的场景生成方法

系统动力学在研究复杂系统时，认为其行为模式和特性主要取决于系统内部的动态结构与反馈机制，利用信息反馈的理论和方法，能准确反映系统内各种变量之间的因果关系。经济社会具有复杂的结构，各个因素之间相互影响，难以直接探究单个经济变量的变化规律。而利用系统动力学的理论，就能够借助因果关系图，较好地建立动态模型来反映经济社会的动态特性^[13]。系统动力学的基本原理及基于系统动力学的经济模型构建过程具体可见文献。本文直接在供给侧结构性改革背景下，结合本文第二章经济对于电力的影响分析，建立第一产业、第二产业、第三产业及基本生活电力需求的系统动力学模型。

3.1 系统动力学指标因子库的确定及指标的量化

根据本文第 1 节与第 2 节中的分析，各个经济因素对于电量需求产生不同程度的影响。在构建系统动力学模型时，依据上文分析结果构建以下指标因子库：1) 基本指标因子库；2) 特征指标因子库；3) 供给侧改革指标因子库。具体指标及其取值见表 2—表 4。

3.2 系统动力学模型

系统动力学模型构建方法参考文献[8]，由于篇幅有限，本文直接给出系统动力学模型构建结果，具体见图 3、图 4。

表 2 基本指标因子库及其取值方式

Table 2 Basic index factor library and its value way

指标分类	指标	符号	取值方式
基本指标	生产总值	GDP	各产业、行业年生产总值
	单位 GDP 电耗	Eper	各产业用电量与产业 GDP 比值
	产业结构	S	各产业 GDP 与总 GDP 的比值

表 3 特征指标因子库及其取值方式

Table 3 Feature index factor library and its value way

指标分类	指标	符号	取值方式	应用产业
特征指标	生长期日数	GDD	作物完成某一生育阶段所经历的累积有效积温值	第一产业
	采暖度日数	HDD	室外日平均温度低于某一特定温度的有效积温值	居民用电 第三产业
	制冷度日数	CDD	室外日平均温度高于某一特定温度的有效积温值	居民用电 第三产业
	生产活力	EV	企业获利能力评价指标	第二产业 第三产业

表 4 各产业指标供给侧结构性改革指标及其取值方式

Table 4 Indexes of supply-side structural reform and their value ways of industrial indexes

指标分类	指标	符号	取值方式
第一产业指标供给侧结构性改革指标	种植面积	Ar	农作物的占地面积
	农业机械化水平	MP	年化农业机械总动力
第二产业指标供给侧结构性改革指标	规模以上工业年负债率	L	负债总额与资本总额的比值
	全员劳动生产率	Y	平均每一个从业人员在单位时间内的产品生产量
	规模以上工业企业成本产值比	CR	规模以上工业企业的成本除以产值
	工业生产者出厂价格指数	PPI	工业生产产品出厂价格和购进价格的相对数
	科技研究技术服务固定投资额	TI	在科技研究服务方面支出的总费用
	主营业务收入	I	行业主营业务产生的收入
	工业能源效率	IEF	工业能源消费总量与工业增加值的比值
第三产业指标供给侧结构性改革指标	科技研究技术服务固定投资额	TI	在科技研究服务方面支出的总费用
	互联网效应	EoI	互联网对产值的影响系数
	区域互联效应	Ip	跨区合作对产值的影响系数
	主营业务收入	I	行业主营业务产生的收入

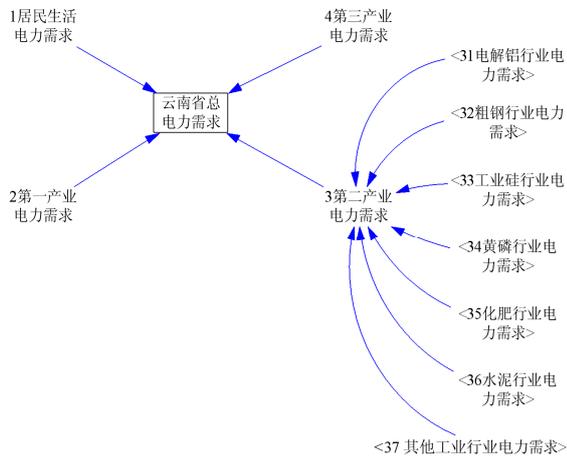
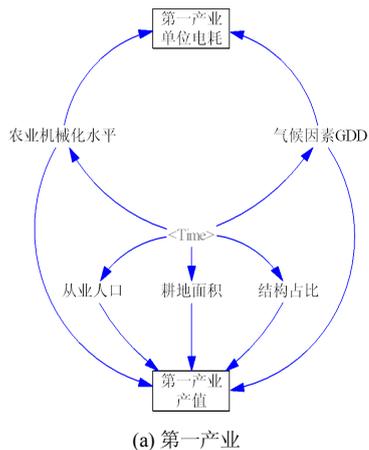
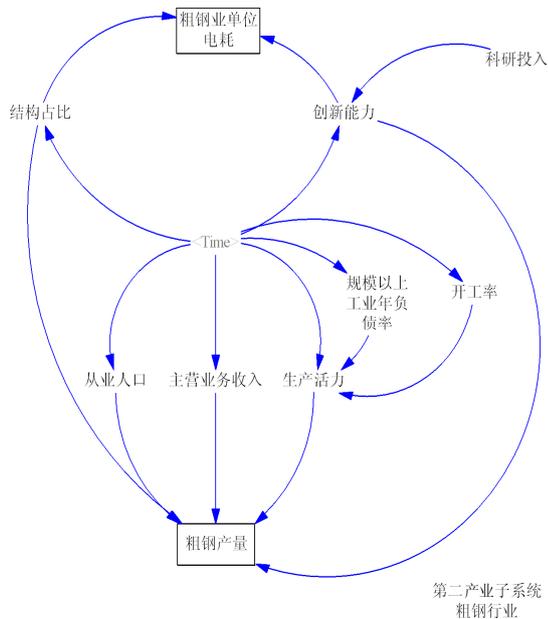


图 3 总电力需求与子系统关系图

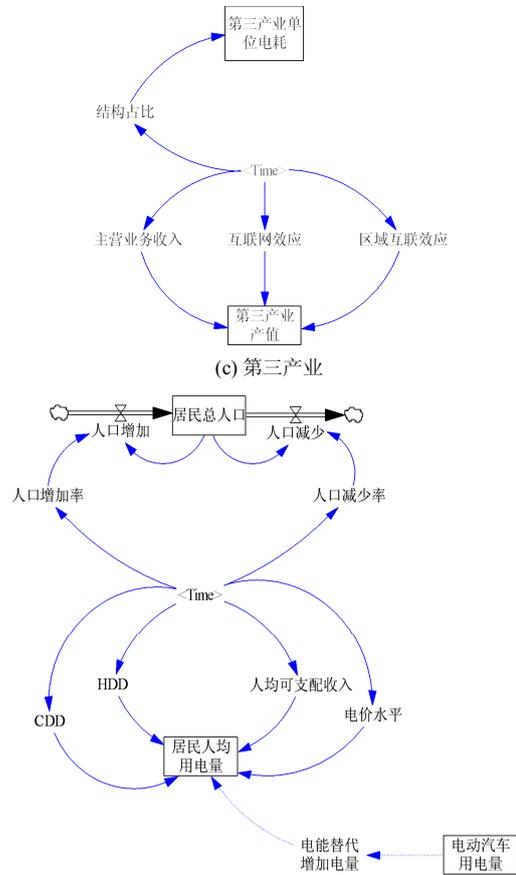
Fig. 3 Causality diagram of system dynamics model of total power demand and subsystems



(a) 第一产业



(b) 第二产业



(d) 居民用电

图 4 各产业子系统模型

Fig. 4 Causality diagram of subsystems

依据计量经济学^[14]及统计学^[15]相关理论, 现实经济现象中变量之间往往呈现非线性关系, 但在许多情况下, 又可以通过简单的变换, 使其转化为线性关系。利用著名的 Cobb—Douglas 生产函数模型并结合数据特性, 可以得到本项目所使用的对数形式的回归模型, 见式(7)和式(8)。采用对数模型还具有以下优点: 1) 可以减弱模型中数据的异方差性; 2) 数据取对数后, 再配合差分变化, 可以把绝对数变成相对数, 从而使数据更能表示变动的相关性。

$$\ln GDP = a_1 \ln A_1 + a_2 \ln A_2 + \dots + a_n \ln A_n + b \quad (7)$$

$$\ln E = c_1 \ln C_1 + c_2 \ln C_2 + \dots + c_n \ln C_n + d \quad (8)$$

式中: $A_1 - A_n$ 、 $C_1 - C_n$ 表示各种影响因素; $a_1 - a_n$ 、 $c_1 - c_n$ 表示各类影响因素对生产总值和单位产值电耗的影响。每个因素前的系数表示该影响因素对指标的影响百分比, 依据本项目所挑选出的显著因子, 利用 SAS 软件结合计量经济学理论实现系数估计。

3.3 场景生成设计

气候因素与电价政策是影响居民用电的主要外

部影响因素^[16], 依据气象学相关预测^[17], 未来云南气温均值略有上升, 高温天数增加, 低温日减少。国家在《关于推进电能替代的指导意见》中提出, “十三五”期间, 将全面推进北方居民采暖、生产制造、交通运输、电力供应与消费四大领域的电能替代, 实现能源终端消费环节替代散烧煤、燃油消费约 1.3 亿吨标煤, 带动电能占煤炭消费比重提高约 1.9%, 带动电能占终端能源消费比重提高约 1.5%, 促进电能消费比重达到约 27%。结合云南省公司经营区能源消费量、电能替代环保可行潜力, 考虑国家与云南省政府大力推行环保、电价、补贴等政策的发展预期, 可以确定“十三五”期间云南省电价水平将有所下调。

技术的进步程度与产业结构的调整是影响第一、二、三产业用电量的主要外部影响因素, 依据其与产业发展进程的关系, 结合系统动力学模型, 可以将上述两个因子作为场景设计的主要控制变量。

为了能够更全面地分析云南省中长期电力需求情况, 结合系统动力学模型, 本文针对居民用电电子系统与第一、二、三产业子系统分别设计了不同的场景, 作为电量需求的经济场景^[18]。其中场景 A 以现有的产业结构与科技水平为基础, 政府对产业结构不采取任何调整措施; 场景 B 在现有产业规模与科技水平的基础上, 政府引导产业结构调整, 减少第二产业比重, 增加第三产业比重; 场景 C 在现有产业结构基础上, 政府大力倡导科技创新, 并将节能技术大规模投入生产终端之中。场景 a 以现有的气候变化趋势及电价政策为基础, 不考虑电能替代与政府政策对电价的影响, 即未来电价仍保持现

有水平; 场景 b 在现有气候变化趋势下, 考虑电能替代与政府政策对电价的影响, 该场景下电价下行。具体场景设置见表 5。

表 5 场景设计

Table 5 Scenario design

场景设计	具体设置	
第一、二、三产业子系统	场景 A	保持产业原有发展规律, 没有调整措施。
	场景 B	在现有产业规模和技术水平基础上, 政府对产业结构进行调整, 减少二产比重, 增加三产比重。
	场景 C	在现有产业结构基础上, 大力发展节能技术科技创新, 广泛引用国外相关电气化技术, 并将其大规模投入到终端应用之中。
居民用电子系统	场景 a	气候条件按现有规律发展, 政府保持原有电价政策。
	场景 b	气候条件按现有规律发展, 政府下调电价, 实施电能替代。

4 算例分析

本文以云南省中长期负荷预测为例, 说明电力需求建模中考虑供给侧结构性改革因素的必要性及所建模型 SSR-ESRM 的有效性。

4.1 多重经济因素及供给侧结构性改革因素场景生成结果

依据所构建的系统动力学模型, 生成云南省经济场景结果见图 5 及表 6。利用 2016、2017 年数据对不同生成场景下的数值进行了误差检验, 模型整体平均相对误差为 0.66%, 可以说明本项目所用模型具有较高的准确性。

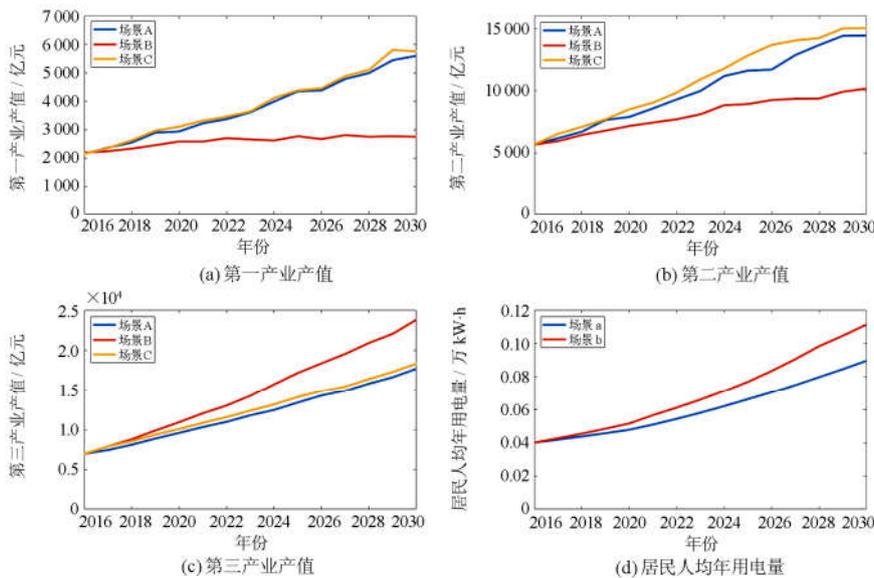


图 5 2016—2030 年云南省各产业产值及居民用电变化趋势图

Fig. 5 Trend chart of different industries and residential electricity consumption in Yunnan province from 2016 to 2030

表 6 各场景指标预测值、实际值与相对误差

Table 6 Predicted value, actual value and relative error of indicators in each scene

指标	场景	2016			2017			2020	2025	2030
		预测值	实际值	相对误差	预测值	实际值	相对误差	预测值		
第一产业产值/ 亿元	A	2 161	2 195	-1.57%	2 368	2 311	2.49%	2 939	4 350	5 598
	B	2 195	2 195	-0.02%	2 246	2 311	-2.79%	2 588	2 773	2 271
	C	2 153	2 195	-1.91%	2 357	2 311	1.99%	3 107	4 383	5 759
第二产业产值/ 亿元	A	5 689	5 690	-0.02%	6 173	6 388	-3.36%	7 884	11 601	14 425
	B	5 665	5 690	-0.43%	5 943	6 388	-6.96%	7 157	8 916	10 161
	C	5 689	5 690	-0.02%	6 525	6 388	2.15%	8 492	12 824	15 016
第三产业产值/ 亿元	A	6 943	6 903	0.58%	7 418	7 833	-5.30%	9 563	13 378	17 675
	B	6 903	6 903	0.00%	7 872	7 833	0.49%	10 907	17 145	23 802
	C	6 943	6 903	0.58%	7 874	7 833	0.52%	10 051	14 073	18 319
人均生活用电量/ (kW·h/人)	a	401	401	0.07%	419	—	—	566	663	897
	b	401	401	0.07%	427	—	—	509	770	1 113
人口/万人	—	4 771	4 771	0.00%	4 801	4 801	0.01%	4 891	4 967	5 006

注: 2017 年人均生活用电量数据未获得; 2016 年数据来源于《云南省统计年鉴》, 2017 年数据来源于《云南省 2017 年国民经济和社会发展统计公报》

4.2 适应供给侧结构性改革的拓展索洛中长期负荷预测模型的有效性验证

以云南省 2003—2016 年电量、常规影响因素(例如 GDP、人口、科研经费投入等)及供给侧结构性改革因素为建模依据, 其中, 2003—2012 年的数据为训练集, 用于训练模型的参数; 2013—2016 年共 4 年的数据为测试集, 用于对 SSR-ESRM 的有效性进行验证。不失一般性, 本文选择平均绝对百分误差(Mean Absolute Percentage Error, MAPE)评价模型点预测(Point forecast)精度指标, 具体公式见式(9)^[19]。

$$\gamma_{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right| \times 100\% \quad (9)$$

式中: γ_{MAPE} 表示平均绝对百分误差; y_t 表示真实电

量; \hat{y}_t 表示预测电量(亿 kW·h); N 表示预测(测试)样本的长度。

由于关联因素挖掘初步选取影响变量是建立拓展索洛模型的第一步, 因此不同的数据挖掘算法得到的影响变量不尽相同。基于此, 本文通过改变数据挖掘算法(如 Apriori 关联因素挖掘^[20]、PCA (Principal component analysis)主成分提取方法等^[21]), 获取不同的输入变量, 建立不同的拓展索洛模型加以比较。此外, 还选择了文献[22]提出的计量经济学模型, 经过加入供给侧结构性改革因素修正后作为其他模型结果与本文模型进行对比。而本文选择基于隶属度的 Apriori 关联因素挖掘方法作为建立 SSR-ESRM 的数据挖掘方法, 同时计及供给侧结构性改革因素。具体的索洛模型结构对比如表 7 所示。

表 7 索洛预测模型输入变量及结构

Table 7 Input variables and structures of Solow predictive models

模型名称	变量个数 k	规模性因素	结构性因素	效率性因素	供给侧改革因素
G-ESRM	5	GDP、人口	二产占比、 三产占比	科研经费投入	—
A-ESRM	7	GDP、一产 GDP、三产 GDP、 粗钢产量	二产占比、 三产占比	科研经费投入	—
PCA-ESRM	7	GDP、规模以上工业增加值、 三产 GDP、粗钢产量	二产占比、 三产占比	科研经费投入	—
C-ESRM	6	GDP、三产 GDP、粗钢产量	二产占比、 三产占比	科研经费投入	—
SSR-ESRM	9	GDP、规模以上工业增加值、 粗钢产量	二产占比、 三产占比	科研经费投入	城镇化率、工业能源效率、 电力固定资产投资

表 7 中, 前缀 G、A、PCA、C、SSR 分别表示广义(Generalized)索洛模型^[23]、基于 Apriori 关联因素挖掘的索洛模型、基于主成分分析的主导因素挖

掘的索洛模型、基于公共(Common)因素的索洛模型及考虑供给侧改革因素(Supply-Side Reform)的索洛模型。此外, 计及供给侧结构性改革因素的计

量经济学模型 (Supply side reform-Econometric Regression Model, SSR-ERM)通过对各产业(一、二、三、居民)用电量分别进行预测,并叠加至总用电量,其中各产业用电量模型的对应输入变量如表 8 所示。

表 8 SSR-ERM 各产业用电量模型的输入变量

Table 8 Input variables of energy models for various types of industries in SSR-ERM

SSR-ERM	一产用电量	二产用电量	三产用电量	居民用电量
输入变量	一产 GDP, 一产从业人口, 温度	焦炭产量, 粗钢产量	电力固定资产投资, 三产 GDP, 三产占比	人均收入, 常住人口

经回归分析,发现仅考虑常住人口变量得到居民用电量预测精度较低,因此不采用第 3 节的人均居民用电量场景,并且新增人均收入的影响因素。

对上述 6 个模型 2013—2016 年的云南省全社会用电量的预测结果进行精度评估,结果如图 6 及表 9 所示。

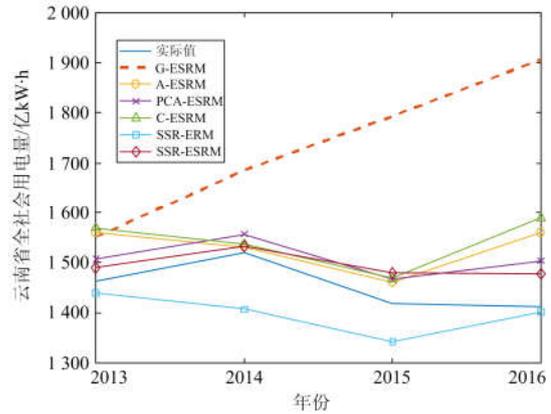


图 6 6 种模型预测结果对比

Fig. 6 Comparison of forecasting results among six models

表 9 6 种模型预测精度比较

Table 9 Comparison of point forecasting accuracy among six models

模型		G-ESRM		A-ESRM		PCA-ESRM	
年份	实际值	预测值	APE	预测值	APE	预测值	APE
2013	1462.89	1550.73	6.00%	1559.18	6.58%	1506.48	2.98%
2014	1520.29	1685.83	10.89%	1530.07	0.64%	1556.54	2.38%
2015	1418.59	1793.83	26.45%	1460.03	2.92%	1466.74	3.39%
2016	1411.06	1906.53	35.11%	1558.84	10.47%	1503.55	6.55%
MAPE		19.61%		5.15%		3.83%	
模型		C-ESRM		SSR-ERM		SSR-ESRM	
年份	实际值	预测值	APE	预测值	APE	预测值	APE
2013	1462.89	1568.97	7.25%	1438.73	1.65%	1489.17	1.80%
2014	1520.29	1537.16	1.11%	1406.65	7.47%	1531.84	0.76%
2015	1418.59	1468.55	3.52%	1342.66	5.35%	1479.20	4.27%
2016	1411.06	1589.10	12.62%	1401.82	0.66%	1477.89	4.74%
MAPE		6.13%		3.78%		2.89%	

对于供给侧结构性改革政策实施后的 2015—2016 年,云南省全社会用电量出现了罕见的“两连跌”,给中长期负荷预测工作带来极大的挑战,同时也表明供给侧结构性改革对电量具有一定的影响。由图 6 可得如下结论。

1) 在 6 个模型中,仅有 SSR-ESRM 的预测结果能反映出实际用电量的“两连跌”变化趋势。主要原因在于:① SSR-ESRM 将供给侧改革指标作为模型的输入变量,能够较好地解释电量在供给侧改革背景下变化趋势;② SSR-ESRM 并未像 SSR-ERM 对各行业电量分别预测,而对全社会用电量进行建模,更贴合供给侧改革对电量整体影响效果。

2) 结合表 9 可知,考虑供给侧结构性改革因素的预测模型(SSR-ESRM 及 SSR-ERM)相比其他不

考虑供给侧结构性改革因素的模型(G-ESRM、A-ESRM、PCA-ESRM、C-ESRM)预测精度更高,表明进入经济新常态后,建立中长期负荷预测模型考虑供给侧结构性改革因素的必要性。

3) 相比于计量经济学模型,本文提出的拓展索洛模型预测精度更高(MAPE 为 2.89%,小于 ERM 的 MAPE(3.83%));本文模型的最大相对误差值小于 5%,平均预测精度也高于其他预测模型,验证了本文模型(SSR-ESRM)预测的有效性。

4.3 供给侧结构性改革场景下中长期电量外推预测

由于目前处于供给侧结构性改革的起始阶段,政策的实施效果具有较大的不确定性,因此需要结合第 3 节系统动力学模型建立的多种经济场景,对未来云南省中长期电量进行外推预测,反映供给侧结构性改革对电量的长期作用。

对影响因素未来趋势值的设定, 本文以表 6 设定的场景指标为基础, 对未出现在表 6 但用于建模的影响因素采取以下方式补全未来趋势值:

1) 对出现在规划报告^[24]的指标因素, 采用文献[25]的存在规划值的不确定建模方法, 并从中选取 10、50 及 90 百分点, 作为高中低三个场景值, 对应表 5 的 A、B、C 场景;

2) 对未出现在规划报告^[24]的指标因素, 则采用简单的模型进行拟合外推, 补全未来该指标的数值。常见的简单模型有: 线性模型、多项式模型及指数

函数模型等。

要对未来云南省中长期电量(例如 15 年内)进行外推预测, 需要提升预测模型的泛化能力。本文基于具体模型的结构及输入变量, 将所有历史数据作为训练样本, 通过最小二乘法确定模型的具体参数。其次, 选择表 9 中预测精度较高模型: SSR-ESRM 及 SSR-ERM, 结合多种场景的构建方法, 实现多种场景下未来云南省中长期负荷预测, 结果如图 7 所示。

主要年份的电量外推预测值如表 10 所示。

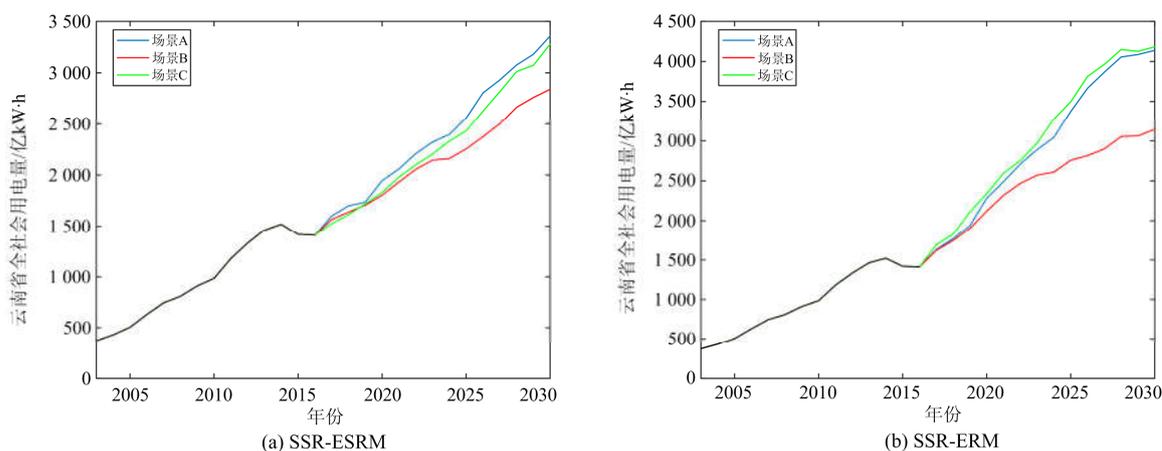


图 7 多种场景下云南省中长期电量外推预测结果

Fig. 7 Mid/Long-term ex ante forecasting for energy in Yunnan Province under multi-scenarios

表 10 三种场景下重要年份电量外推预测结果

Table 10 Forecasting results of energy extrapolation in important years under three scenarios

模型	SSR-ESRM/亿 kWh					SSR-ERM/亿 kWh					
	年份	2018	2019	2020	2025	2030	2018	2019	2020	2025	2030
场景 A		1 700.6	1 736.9	1 945.5	2 559.3	3 358.4	1 768.3	1 938.1	2 282.3	3 375.4	4 139.2
场景 B		1 639.9	1 707.7	1 804.2	2 254.8	2 841.2	1 743.4	1 901.3	2 119.8	2 757.0	3 143.8
场景 C		1 615.6	1 718.8	1 831.9	2 429.4	3 280.5	1 825.9	2 109.1	2 339.6	3 496.5	4 183.2

1) 由图 7 可知, 场景 C 下云南省电量增长潜力最大, 其次为场景 A, 最后为场景 B; 表明在保持原有的产业结构前提下, 提升电气化水平及优化外部经济条件, 能促使当地电量快速发展; 相反, 大力发展第三产业, 降低第二产业的占比, 则会使当地电量增长速度放缓。

2) 预测模型对场景切换的敏感度很大程度上表征模型预测性能的鲁棒性。本文参考文献[26]的波动率指标, 选择基准场景(本文选择场景 B), 提出场景切换敏感度指标 S , 具体公式见式(10)。

$$S = \frac{1}{N(SC-1)} \sum_{sc=1}^{SC-1} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_{i,B} - y_{i,sc}}{y_{i,B}} \right| \quad (10)$$

式中: SC 表示场景总数; N 表示外推年份总数; B 表示基准场景; $y_{i,B}$ 表示基准场景外推第 i 年的预测

值; $y_{i,sc}$ 表示其他场景外推第 i 年的预测值。一般地, S 值越小, 表示模型对场景切换的敏感度越小; $S < 10\%$ 表示模型对场景切换的敏感度适中, $S > 20\%$ 表示敏感度偏高。

对 2017—2030 年多场景下电量外推预测的结果进行敏感度计算可知, SSR-ESRM 及 SSR-ERM 的 S 值分别为 8.54%、19.28%, 表明 SSR-ESRM 对场景切换的敏感度适中, 更适合于开展未来云南省中长期负荷预测。相比于本文提出的 SSR-ESRM, SSR-ERM 由于分别对各产业电量进行建模, 供给侧结构性改革直接影响各产业电量的发展趋势, 因此 SSR-ERM 对场景切换的敏感度更高。通过对比直接对总电量预测模型建模策略及分解至各产业电量建模策略, 可知直接建模策略对场景切换的敏感

度适中,而分层建模策略对场景切换的敏感度偏高。

5 结论

本文结合系统动力学场景生成方法,提出一种适应供给侧结构性改革的中长期电量预测的拓展索洛模型,对云南省中长期电量进行预测。

1) 通过对供给侧结构性改革内涵的解读,从规模、结构及效率三种效应出发,构建反映供给侧结构性改革表征指标体系,并基于此提出了三种适应供给侧结构性改革的中长期负荷预测建模策略。

2) 与不计及供给侧结构性改革因素的预测模型利用 MAPE 的指标进行精度检验相比,表明了 SSR-ERM 及 SSR-ESRM 的预测精度更高,在中长期负荷预测模型中考虑供给侧结构性改革因素具有必要性;其次,SSR-ESRM 不仅预测精度最高,且能够把握实际电量的变化趋势,验证了本文模型的有效性。

3) 多种场景下云南省电量外推预测结果表明,在保持原有的产业结构前提下,提升电气化水平及优化外部经济条件,能促使当地电量快速发展;相反,大力发展第三产业,降低第二产业的占比,则会使当地电量增长速度放缓。

总体上,本文模型的场景切换敏感度适中,预测鲁棒性较强,增强了电网规划的灵活性。

参考文献

- [1] 乔小宁. 供给侧改革背景下的能源部门经济重要性评价[D]. 北京: 中国矿业大学, 2016.
QIAO Xiaoning. Economic evaluation of the importance of the energy sectors under the supply-side reform based on the input-output technique[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2016.
- [2] 林卫斌, 苏剑. 理解供给侧改革: 能源视角[J]. 价格理论与实践, 2015(12): 1-4.
LIN Weibin, SU Jian. Understanding supply-side reform: an energy perspective[J]. Price Theory and Practice, 2015(12): 1-4.
- [3] 郝宇, 郑少卿, 彭辉. “供给侧改革”背景下中国能源经济形势展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2017, 19(2): 28-34.
HAO Yu, ZHENG Shaoqing, PENG Hui. The perspective of China's energy economy under the background of the supply-side reform[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2017, 19(2): 28-34.
- [4] HONG Tao, FAN Shu. Probabilistic electric load forecasting: a tutorial Review[J]. International Journal of Forecasting, 2016, 32(3): 914-938.
- [5] HONG Tao, WILSON J, XIE Jingrui. Long term probabilistic load forecasting and normalization with hourly information[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 456-462.
- [6] HYNDMAN R J, FAN Shu. Density forecasting for long-term peak electricity demand[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 1142-1153.
- [7] 单葆国, 孙祥栋, 李江涛, 等. 经济新常态下中国电力需求增长研判[J]. 中国电力, 2017, 50(1): 19-24.
SHAN Baoguo, SUN Xiangdong, LI Jiangtao, et al. Analysis on the China's electricity demand growth under the new economic norm[J]. Electric Power, 2017, 50(1): 19-24.
- [8] 徐阳. 基于经济新常态的城市电网电量需求预测研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
XU Yang. Electricity demand forecast of city power grid based on the new economic normal[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [9] 郭挺, 饶建业. “新常态”下广东省中长期电力需求预测[J]. 广东电力, 2015, 28(6): 6-11.
GUO Ting, RAO Jianye. Medium and long term electric power demand forecasting for Guangdong province under the new normal[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(6): 6-11.
- [10] 王庆露. 基于协整模型与组合预测的中国电力需求分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
WANG Qinglu. The analysis of power demand in China using cointegration model and combination forecasting method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [11] 褚琳琳, 陈菁, 高志, 等. 改进的索洛模型在节水农业社会效益评价中的应用[J]. 节水灌溉, 2009(11): 34-36, 42.
CHU Linlin, CHEN Jing, GAO Zhi, et al. Application of improved Solow model in evaluation of social benefits of water saving agriculture[J]. Saving Water and Irrigation, 2009(11): 34-36, 42.
- [12] 熊俊. 经济增长因素分析模型: 对索洛模型的一个扩展[J]. 数量经济技术经济研究, 2005(8): 26-35.
XIONG Jun. Analytical model of economic growth factors: an expansion of Solow model[J]. Quantitative & Technical Economics, 2005(8): 26-35.
- [13] 顾洁, 秦玥, 包海龙, 等. 基于熵权与系统动力学的配电网规划动态综合评价[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 76-83.
GU Jie, QIN Yue, BAO Hailong, et al. Comprehensive and dynamic evaluation of the distribution network planning based on entropy weight and system dynamics[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 76-83.

- [14] 李翔. 基于高等计量经济学的电力系统负荷预测[D]. 南京: 东南大学, 2007.
LI Xiang. The power system load forecasting based on advanced econometrics[D]. Nanjing: Southeast University, 2007.
- [15] 李正明, 钱露先, 李加彬. 基于统计特征与概率神经网络的变压器局部放电类型识别[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 55-60.
LI Zhengming, QIAN Luxian, LI Jiabin. Type recognition of partial discharge in power transformer based on statistical characteristics and PNN[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 55-60.
- [16] ZHANG Yun, ZHOU Quan, SUN Caixin, et al. RBF neural network and ANFIS-based short-term load forecasting approach in real-time price environment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 853-858.
- [17] 李少娟, 黄樱, 屠拉. IPCC AR4 气候多模式对云南特征气温变化的模拟预估——滇西南区案例分析(1960-2050 年)[J]. 资源与生态学报(英文版), 2012, 3(1): 33-42.
LI Shaojuan, HUANG Ying, TU La. Projection of IPCC AR4 coupled climate models for multi-timescale temperature variation in Yunnan: a case study on southwest Yunnan from 1960 to 2050[J]. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(1): 33-42.
- [18] LI Han, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [19] 白杨, 赵冠, 窦金延, 等. 基于并行膜计算的短期电力负荷组合预测[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 35-42.
BAI Yang, ZHAO Guan, DOU Jinyan, et al. Short-term power load combination forecasting based on parallel membrane computing[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 35-42.
- [20] 张竹润, 谢康林, 张忠能. 一种提取关联规则的数据挖掘快速算法[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(4): 555-558.
ZHANG Zhurun, XIE Kanglin, ZHANG Zhongneng. A fast algorithm for mining association rules[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(4): 555-558.
- [21] 孙义豪, 李秋燕, 丁岩, 等. 基于主成分分析及系统聚类的县域电网综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 30-36.
SUN Yihao, LI Qiuyan, DING Yan, et al. County power grid evaluation system based on principal component analysis and hierarchical cluster analysis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 30-36.
- [22] 谭忠富, 张金良, 吴良器, 等. 中长期负荷预测的计量经济学与系统动力学组合模型[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 186-190.
TAN Zhongfu, ZHANG Jinliang, WU Liangqi, et al. A model integrating econometric approach with system dynamics for long-term load forecasting[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 186-190.
- [23] 顾洁, 薛季良, 杨宗麟, 等. 基于扩展索洛长期均衡模型的饱和电力需求预测[J]. 中国电力, 2014, 47(7): 62-66.
GU Jie, XUE Jiliang, YANG Zonglin, et al. Saturated power consumption forecasting based on extended Solow long-term equilibrium model[J]. Electric Power, 2014, 47(7): 62-66.
- [24] 云南省人民政府. 云南省国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[R]. 昆明, 2016.
Government of Yunnan Province. The outline of the 13th Five-year Plan for national economic and social development of Yunnan Province[R]. Kunming, 2016.
- [25] 彭虹桥, 顾洁, 宋柄兵, 等. 基于多维变量筛选-非参数组合回归的长期负荷概率预测模型[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1768-1777.
PENG Hongqiao, GU Jie, SONG Bingbing, et al. Long term probabilistic load forecasting based on multivariate selection and nonparametric combination regression model[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1768-1777.
- [26] 彭虹桥, 顾洁, 胡玉, 等. 基于混沌粒子群-高斯过程回归的饱和负荷概率预测模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 25-32, 155.
PENG Hongqiao, GU Jie, HU Yu, et al. Forecasting model of saturated load based on chaotic particle swarm and optimization-Gaussian process regression[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 25-32, 155.

收稿日期: 2018-09-27; 修回日期: 2019-01-21

作者简介:

王凌谊(1991—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划及安全稳定分析;

王志敏(1977—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划、分析研究及管理;

钱纹(1968—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划、分析研究及管理。

(编辑 魏小丽)