



电力用户需求预测虚拟仿真实验设计与实践

吴玲, 牛文琪, 冯奕, 高峰

(南京工程学院 经济与管理学院, 南京 211167)

摘要: 及时和准确地预测电力用户需求是电力市场有效运行、用户开展节能减排以及落实“双碳”任务的基础。然而在电力用户需求预测的传统教学中, 存在数据获取困难且数据量庞大, 需求预测计算过程繁琐导致难以验证试错等问题。为了解决这些问题, 该文自主研发了电力用户需求预测虚拟仿真实验。该实验基于真实的电力用户数据, 搭建了虚拟实验场景, 遵循售电公司的实际业务流程, 高度仿真了电力用户需求预测活动。通过这个实验环境, 学生可以直观感受、重复试错, 并进行实际验证, 从而达到方法探究与经验积累的教学目的。

关键词: 电力用户; 需求预测; 电力市场; 虚拟仿真实验

中图分类号: G642

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240083

Design and Practice of Virtual Simulation Experiment for Power Demand Forecasting

WU Ling, NIU Wenqi, FENG Yi, GAO Feng

(School of Economics and Management, Nanjing University of Engineering, Nanjing 211167, China)

Abstract: Timely and accurate demand forecasting for electricity users is the foundation for effective operation of the electricity market, energy conservation and emission reduction efforts by users, and the implementation of the “dual carbon” task. However, there are some problems in traditional teaching methods for electricity demand forecasting, such as difficulties in obtaining data and large data volumes, and cumbersome calculation processes for demand forecasting leading to hard verification of trial and error. To address these issues, a virtual simulation experiment for electricity demand forecasting has been independently developed. This experiment builds a virtual experimental scenario based on real-world data from electricity users, follows the actual business processes of power sales companies, and highly simulates electricity demand forecasting activities. Through this experimental environment, students can intuitively experience, repeatedly try and correct, and conduct practical verification, thereby achieving the teaching objectives of method exploration and experience accumulation.

Key words: power users; demand forecasting; power market; virtual simulation experiment

电力行业一直是国家能源和环境战略的主要承担者, 在我国履行“双碳”承诺中承担了关键的任务^[1]。国家新型电力市场体系改革, 催生了开放的售电市场, 多元化的市场主体纷纷进入电力市场, 直接或代理电力交易^[2]。而电力发、供、用实时平衡的技术特征, 使得电力需求预测成为市场主体开展电力交易的一项重要的基础工作^[3-5]。预测必须及时和相对准确, 才能保证电力交易活动顺利开展、电力市场有效率运行, 也是市场主体开展节能减排、提高能源利用效率、落实“双碳”任务的基础^[6-10]。

电力用户需求预测在传统教学中存在以下

困难。

1) 数据获取困难, 数据量庞大。电力需求预测需要用户的经营和用电等数据, 其中企业经营情况属于商业机密难以获取, 用电数据因受限于用电结算点计量表计的访问权限限制而难以采集^[11]。电力需求预测需要采集多年的连续用电数据作为基础数据, 以有功电量为例, 每天 96 点的数据, 10 年则超过 35 万条数据, 数据量极其庞大。因此, 传统教学难以开展实地调查获取相关数据。

2) 需求预测计算过程繁琐, 难以验证试错。需求预测涉及大量的数学计算, 手工计算无法实

收稿日期: 2024-02-28; 修回日期: 2024-03-15

基金项目: 南京工程学院校级科研基金项目(CKJB201907); 南京工程学院教学改革与教学建设项目(LDSJ202325)。

作者简介: 吴玲(1978-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事电力和碳市场方面的研究。E-mail: wl@njit.edu.cn

现,即使通过计算机软件进行数据处理,所得结果也难以进行验证,更无法实现多次试错、重复学习、积累预测经验的目的。

教育部在2019年印发了《关于一流本科课程建设的实施意见》,提出全面开展一流本科课程建设,实施一流本科课程双万计划^[12-13]。其中,虚拟仿真实验教学一流课程是双万计划中5类一流课程之一^[14-15]。南京工程学院积极响应,依托本校的能源电力特色,自主研发了电力用户需求预测虚拟仿真实验,并于2021年获评江苏省一流本科课程虚拟仿真实验教学课程。该虚拟仿真实验基于电力用户真实数据,搭建虚拟实验场景,遵循售电公司实际流程,高度仿真电力用户需求预测活动。实验项目从售电公司视角,将电力用户用电需求作为预测对象,以完成日负荷曲线预测为最终任务。根据售电公司实际业务流程,将最终任务分解为电力客户需求调查、年度电量预测、年度电量分解、月度电量分解及日负荷预测等子任务。学生围绕任务目标,逐步完成客户资料的搜集、整理和处理分析、预测模型的构建、回测、评估和修正等仿真实验的各个环节。通过采用虚拟仿真的形式为学生提供了一个可以直观感受、重复试错、实际验证的实验环境,达成方法探究与经验积累的教学目的,有效解决了传统实验教学难以有效达成教学目标的问题。

1 实验设计原理

1.1 实验教学目标

电力用户需求预测是学习电力交易策略的基础,对学生形成电力系统观念具有重要意义,通过售电公司视角对电力用户的中长期电力需求和日负荷曲线进行综合预测,为学生进一步开展电力交易决策探究奠定基础。

1) 思政目标

传导电力市场改革的精神,培养学生实事求是、不断探究的科学态度和严谨的学术作风。

2) 知识目标

在对多种预测方法进行运算和比对的基础上,构建重要概念。帮助学生掌握电力需求预测的经典预测技术、时间序列预测技术、年度电量分解技术及日负荷预测技术。

3) 能力目标

培养学生具备针对具体工业用户的生产特

性,开展客户资料收集、用电特征分析、预测方案设计、电力负荷综合预测的能力,以及依据客户生产与用电数据做出电力需求预测的能力。

1.2 实验设计原理

实验建立在电力用户大量的历史负荷数据的基础上,运用组合预测方法,遵循和结合用户的实际生产情况,构建预测模型,实现对用户年度用电量的预测;同时,把年度电量预测值层层分解到月、日、时,实现对用户负荷的精细化管理。主要包括以下7个知识点。

1) 电力客户调查

明确调查目标,广泛收集、分析和整理预测所需的各方面资料,并对资料进行整理、分析和选择,剔除某些偶然出现的非正常因素的数据。

2) 电力负荷曲线

即在某一时间段内负荷功率随时间变化的特性曲线,按时间段可分为日、周、年负荷曲线,在直角坐标系中,纵坐标表示负荷值,横坐标表示对应的时间。

3) 电力需求预测

利用数学方法研究电力负荷变化规律,在一定精度下,确定未来某特定时刻或某特定时间段的负荷数值。该预测具有复杂性、条件性、时间性和多方案性;可按时间分类为即期预测、短期预测、中期预测和长期预测;对电力用户需求预测应综合考虑用户生产工艺、生产计划、用电设备及主要高能耗产品的接装容量和年用电量等影响因素。

4) 需求预测方法

电力需求预测的方法包括经验预测、经典预测、时间序列预测、趋势外推、灰色预测、模糊预测等多种方法;不同的方法适用于不同条件,需要依据预测的目的、占有资料的情况、对预测准确度的要求以及电力负荷的特点,选择最合适的预测方法,以保证预测的正确性。

5) 电量分解技术

电力年度双边交易,要求将年度交易电量分解至月,即长协分月电量;电力现货市场,要求中长期电量分解到月和每日的24小时,形成分时电量曲线;常用分解曲线包括年度、月度、日分解曲线;电量分解结果的不同会对售电收益产生巨大影响,通过组合探索最有利的分时电量。

6) 预测模型构建

用数学函数关系，抽象地描述经济实体及其相互关系；根据模型具体运算，求出初步预测结果；考虑到模型所没有包含的因素，对预测数值进行必要调整。

7) 预测结果检验

对各种预测结果进行分析、比较和评定，检验误差的程度，分析产生误差的原因。

实验原理和实验步骤如图 1 所示。

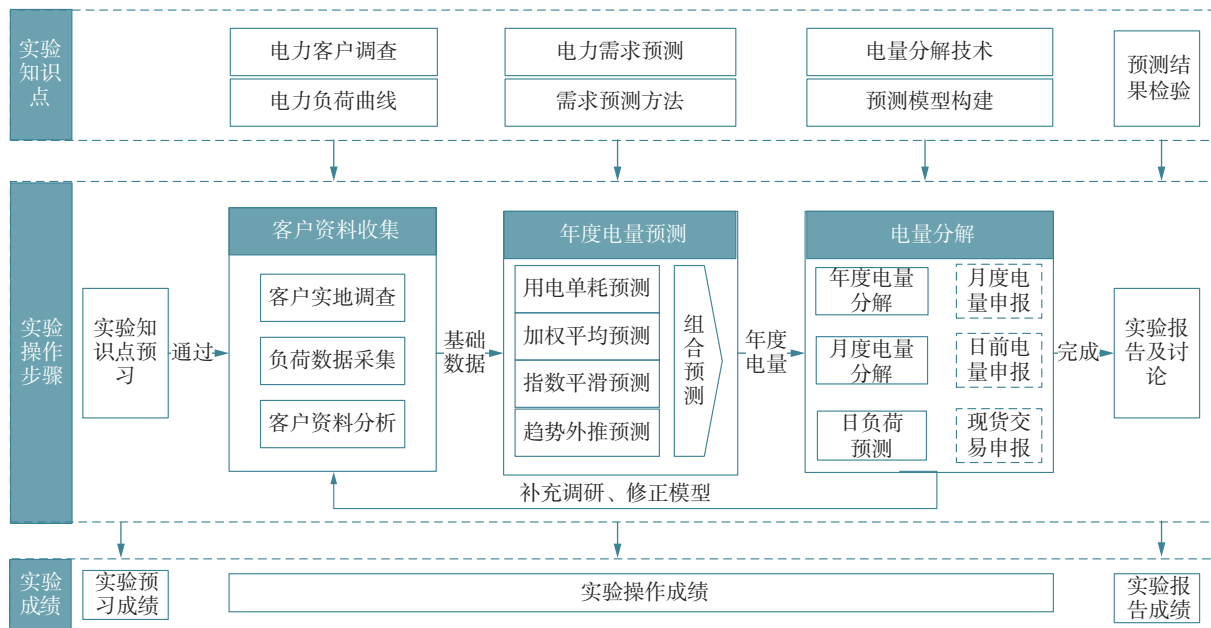


图 1 电力用户需求预测虚拟仿真实验设计原理和步骤图

2 实验步骤

实验开始时，通过预习考核模块，考查学生对电力用户需求预测相关基础知识的掌握程度。学生预习考核的正确率达到 60% 以上，方可进入后续实验环节。

2.1 阶段一：客户资料收集

系统设计了两个工业用户场景，选择其一作为预测对象。进入该用户厂区及生产现场，通过场景漫游，浏览用户全景用电设备及生产工艺，对用户生产运作现场及用电负荷构筑有全局性的认知。对用户方代表开展访谈调研，收集电力需求预测的基础数据，包括：企业总体情况、产品与生产特点、用电情况、供电设施和明年生产计划等。对收集的数据资料进行整理、分析和选择，剔除某些偶然出现的受非正常因素影响的数据，画出预测对象在观察期内的电量曲线和负荷曲线，辨明负荷轨迹的性质，为建立预测模型做准备。图 2 为在电力用户的生产现场通过访谈采集电力负荷数据的界面。

2.2 阶段二：年度电量预测

系统提供电力用户 10 年内的年产量与年度用

电量统计表及曲线，学生概括用户需求资料的轨迹，构建年度电量预测模型，并预测该用户下一年度电量，包括以下 5 个交互性实验步骤。



图 2 电力用户访谈界面

1) 用电单耗预测

利用“综合用电单耗”与“计划产量”进行预测，预测模型为：

$$W = Aq \tag{1}$$

式中：W为预测电量，A为计划产量，q为综合用电单耗。

用电单耗法需要作大量细致的统计调查工作，近期预测效果较佳。值得注意的是，影响综合耗电定额的因素很多，在确定综合耗电定额时

要分析这些因素的影响,找出变化的趋势,综合确定用电单耗。

学生观察用电单耗曲线,思考历史用电单耗变化的影响因素,确定综合用电单耗。根据客户调查阶段获取的数据,估算该用户下一年度的计划产量。构建用电单耗预测模型,对该用户下一年度用电量做出预测,如图3所示。在此操作过程中,可通过系统提供的“帮助”功能,快速回顾单耗法预测模型的知识点。



图3 用电单耗法预测用电量界面

2) 加权平均预测

将按时间顺序发生的历史数据求加权平均值,以加权平均值作为预测值。如以 x_1, x_2, \dots, x_T 表示过去 T 个时期的历史数据,用 T 个时期的加权平均值预测 $T+1$ 期的电量需求值,预测公式为:

$$\hat{x}_{T+1} = \frac{\sum_{k=1}^T w_k x_k}{\sum_{k=1}^T w_k} \quad (2)$$

式中: \hat{x}_{T+1} 为 $T+1$ 期电量预测值; w_k 为各期权数,一般最远一期为 1,以后各期顺次递增; x_k 为各期的实际值。

学生观察电力用户历史年度用电量变化曲线,剔除异常数据,选择用于预测的历史年度数据,研究历史年度用电量的影响因素,并为各年度数据赋权重,如图4所示。计算历史数据的加权平均值,作为下一年度用电量的预测值。

3) 指数平滑预测

指数平滑方法是采取渐消记忆的方式,利用逐步衰减的不等权平均办法进行数据处理的一种预测方法。一次指数平滑序列的计算公式为:

$$\hat{x}_{t+1} = ax_t + (1-a)\hat{x}_t \quad (3)$$

式中: \hat{x}_{t+1} 为 $t+1$ 预测值; x_t 为 t 期的实际值; \hat{x}_t 为 t 期的预测值; a 为平滑系数,一般取值 $0 < a < 1$, a 值的确定可以依据时间数列的波动进行选择,初始值 x_1 自定。



图4 选择年度赋权界面

学生观察历史年度用电量曲线,思考指数平滑方法初始值的取值和平滑系数 a 的取值范围。系统设计 3 个试算方案,学生通过多次试算,寻找综合误差率低的平滑系数,并计算年度电量预测值,如图5所示。



图5 多个试算方案的计算结果界面

4) 趋势外推预测

从一组数据过去的变化规律来推断今后的变化可能性。数据中明显的趋势部分可以用回归建立模型进行预测。设直线方程为:

$$y_t = a + bt \quad (4)$$

式中: y_t 为预测值, t 为时间序列编号, a 、 b 为常数。

运用最小二乘法,确定出 a 、 b 的值分别为:

$$a = \frac{1}{n} (\sum y_i - b \sum t_i) \quad (5)$$

$$b = \frac{n \sum t_i y_i - (\sum t_i)(\sum y_i)}{n \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} \quad (6)$$

式中： t_i 为时间序列的编号，为了简化计算，通常按 $\sum t_i = 0$ 的原则编号，原式可分别简化为：

$$a = \frac{\sum y_i}{n} \quad (7)$$

$$b = \frac{\sum t_i y_i}{\sum t_i^2} \quad (8)$$

在计算时，为保证 $\sum t_i = 0$ ，通常对于不同数据的时间间隔是不同的。

当 n 为奇数时，确定数据的中央一期为 0，与中央一期对称的其他各期之和也应为 0，则时间序列的时间间隔为 1，如：-2, -1, 0, 1, 2。

当 n 为偶数时，中央两期之和应为 0，与这两期相邻的其他各期之和也应为 0，则数据的时间间隔为 2，如：-5, -3, -1, 1, 3, 5。

学生观察历史年度用电量变化曲线，选择用于预测的用电量样本数据；系统基于所选择的样本数据计算系数 a 、 b 的数值。根据所选择的样本数量，学生思考并填入下一年 t 值的取值，系统计算并输出下一年度用电量的预测值，如图 6 所示。



图 6 输入预测期的 t 值界面

5) 年度电量组合预测

学生对 4 种预测结果进行比较和评定，分析 4 种预测结果的差异大小和产生差异的原因，估算不确定因素的影响程度，并进行必要的调整。综合考虑 4 种预测模型的优劣及适用条件，选取适当的权重，确定年度电量组合预测值。

2.3 阶段三：电量分解

2.3.1 年度电量分解

通过计算季节系数，描述时间序列的季节性变动规律，并以此为依据分解未来一年的年度预测电量。季节系数计算步骤如下。

1) 计算时间序列样本中历年所有月份的算术平均值为：

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (9)$$

式中： n 为时间序列样本数据个数。

2) 计算时间序列中同月份数据的算数平均值 \bar{X}_i 。

3) 计算月份的季节系数 β_i 为：

$$\beta_i = \frac{\bar{X}_i}{\bar{X}} \quad (10)$$

则未来一年第 i 月份的分解电量为：

$$y_i = Y\beta_i \quad (11)$$

式中： Y 为当年预测电量。

系统提供电力用户前 10 年的历年分月用电量曲线图，学生观察并剔除某些偶然出现的受非正常因素影响的数据，选择典型的历年分月用电量作为样本数据。学生思考该用户年度用电的周期性特点，计算所有月份的季节系数 β_i 值，运用季节系数法，计算对应的分解电量。提交月度电量，完成月度购电量申报，如图 7 所示。

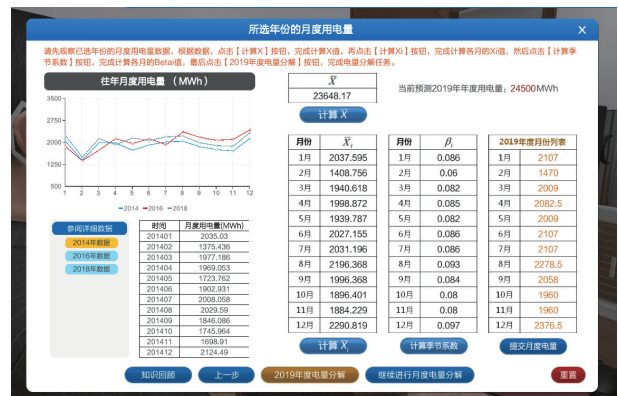


图 7 分解后的月度电量界面

2.3.2 月度电量分解

计算季节系数，并以此为依据分解未来一月的月度电量。季节系数计算步骤如下。

1) 收集至少 30 天的时间序列样本数据。

2) 计算时间序列样本中所有天数的算术平均值 \bar{x} 。

3) 计算时间序列中工作日电量数据的算数平均值 \bar{x}_1 , 与非工作日电量数据的算数平均值 \bar{x}_2 。

4) 计算工作日与非工作日的季节系数 β_i 。

5) 某月份的日分解电量为: $y_i = Y\beta_i$, 式中 Y 为当月预测电量。

学生选择需要分解的目标月, 系统提供目标月前一年 12 个月的日用电量曲线图。学生观察分析该用户 12 个月的日用电量曲线, 依据相似性、延续性等原则, 选择多个月的日用电量作为样本数据, 分析样本数据随着时间变动的周期性规律, 计算工作日与非工作日的季节系数, 运用季节系数法, 获得目标月每日用电量的预测值, 从而将电力用户月度用电量的预测值进一步分解到该月的每一天, 完成日前交易市场申报, 如图 8 所示。



图 8 计算目标月的所有日分解电量界面

2.3.3 日负荷预测

学生在系统月历中选择某一日作为被分解的目标日, 系统给出目标日前一个月的日负荷曲线。学生观察日负荷曲线, 选择多个典型 96 点日负荷曲线作为样本数据。系统生成样本数据的“平均日负荷曲线”, 同时列出平均日用电量与 96 点日负荷列表。学生对 96 点日负荷数据自行修正调整, 直到对平均日负荷曲线的形状满意为止。依据平均日负荷曲线形状, 分解目标日电量, 生成目标日从 0 点至 24 点, 每隔 15 分钟计量一次共计 96 点的瞬时光电量的预测值, 为电力现货交易提供决策支持, 如图 9 所示。

2.3.4 实验报告

学生运用归纳法, 围绕实验结果, 对常见电量预测方法的特点和准确度进行总结, 并就如何提高预测准确度做出进一步探究性讨论。



图 9 96 点日负荷预测界面

3 实验特色与实验效果

3.1 实验特色

3.1.1 力求创新性、高阶性和挑战度

本实验项目诞生于我国“新电改”背景, 实验利用海量的真实数据, 提供供电公司预测业务的仿真场景。实验通过模拟电力用户的真实负荷曲线, 针对长期(年度、月度)、中期(月内)和短期(日内), 采取逐步逼近的电力需求预测程序对学生进行训练, 涉及电力市场、电力营销、电力交易等多知识模块, 具有高阶性。学生在实验中, 需要认真观察基础数据, 运用多种方法预测, 对模型的参数进行调整, 对结果进行分析比较, 反复试错, 不断探究, 寻找准确度最高的预测方法来预测电力用户的用电需求。提高预测准确度具有较高难度, 实验具有较强的挑战度。

3.1.2 基于任务驱动的探究式教学

传统教学模式下, 电力需求预测的内容主要依靠教师课堂理论讲授、学生课后练习习题方式完成, 学生以低视角学习孤立知识点, 学习效果不好。本实验项目的目标是通过面向任务的实验教学方法让学生从更高层、更系统的视角学习掌握电力需求预测的理论和知识。以“构建主义学习”为理论指导, 以“学生学习为主, 教师教学为辅”为基本理念, 在实验过程中构建仿真场景, 将电力需求预测技术的学习和应用整合融入任务各阶段, 引导学生通过完成子任务开展探究性学习和深度学习。这种面向任务的实验教学方法给予学生最大的发挥空间, 培养了学生分析问题与解决问题的能力。

3.1.3 真实性评价、过程性评价与多元化评价结合

传统实验评价往往以教师预设结果为评价标准,存在“出题、做题、改卷”的套路。本实验项目注重真实性评价,强调实验结果与实践结果的关联性,将实验的评价标准与现实中企业运营评价相统一。本实验学生实验成果的关键指标是预测准确度,其评价依据来自真实企业的真实数据,仿真度高,让学生在虚拟学习环境中充分体会现实中电力需求预测的复杂性和挑战性。评价内容由实验预习、实验操作、实验结果和实验报告构成。通过系统随机出题测试,考查学生课外自我学习的情况;通过实验步骤的完成情况和预测误差统计,评价学生学习的直接效果;通过实验报告的质量评价,考查学生分析和运用预测方法开展电量预测的综合能力,将知识点评价与知识应用能力评价相结合。

3.2 实验效果

3.2.1 构建了与现实接近的虚拟环境

通过收集和整理现实企业大量真实用电量、负荷曲线、产量等经营数据,结合售电公司的业务流程,构建了真实企业活动场景,学生在虚拟环境下开展客户调查、需求预测与电量申报,解决现实中学生难以亲临现场体验相关业务过程的问题。

3.2.2 实现了电力用户需求预测的高度仿真

参照电力市场交易的基本规则和售电公司实际工作程序,结合行业发展动向和教学需要,实验以完成日负荷曲线预测为最终任务,通过年度电量—月度电量—日电量—日负荷曲线的预测,逐步逼近最终任务。真实反映了售电公司用户需求预测的实际流程,通过建立在电力用户真实数据基础上的需求预测基础数据库,实现了实验的结果与现实情况的高度仿真。

3.2.3 聚焦于学生实际问题能力的培养

从本科教学要求出发,选择学生易于理解的经典预测模型和预测方法,借助信息化技术,构建虚拟仿真环境,利用数据可视化手段,方便学生观察、分析、处理大量复杂数据。学生在实验操作中,运用多种预测方法,反复尝试探索,直观感受调整参数带来的预测结果的变动,最终寻找与真实结果误差最小的预测方法,有效解决在课堂教学中学生对预测模型构建的抽象原理难以理解的问题,帮助学生更好地理解电力交易决策的思路。

4 结束语

本实验开发的电力用户需求预测虚拟仿真系统,致力于解决电力市场化改革出现的教学新问题。学生在虚拟环境中开展客户调查,解决了现场调查困难、预测基础数据不易获取的问题;以实体企业的经营情况、用电量等真实数据为原型进行建设,借助信息化手段、可视化的数据处理,解决了数据量庞大、数据计算复杂的困难,从而聚焦于学生应用预测模型解决实际问题能力的培养;以售电公司实际经营活动和电力交易规则为蓝本,高度仿真电力用户需求预测的实际运作流程,通过实际数据验证、反复试错等过程,学生可以开展探究性学习,达到积累预测经验、培养预测能力的教学目的。

实验中的组合预测模型及逐步逼近式预测方法,克服了单一预测技术不能完全反映电力用户负荷的变化规律和信息、无法实现对单一电力用户负荷准确预测的问题,具有较强的推广应用价值。后续实验将继续完善和改进虚拟仿真系统的各个模块,引入中长期电力交易、电力现货交易中的价格要素,并尝试开发电力交易决策的模拟实验,使实验内容更加贴近企业的实际需求。

参考文献

- [1] 卓映君,周保荣,姚文峰,等.“双碳”目标下南方区域能源电力消费及负荷特性预测[J].南方电网技术,2023,17(9):132-140.
- [2] 杨佳泽,王灿,王增平.新型电力系统背景下的智能负荷预测算法研究综述[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版).[2023-9-26].<https://link.cnki.net/urlid/13.1212.TM.20230922.1429.002>.
- [3] 黄薇,温蜜,张照贝.考虑用户用电行为聚类的电力负荷预测方法[J].计算机仿真,2022,39(12):148-153.
- [4] 刘刚,李嘉翔,魏文浩,等.基于多目标优化组合模型的电力负荷预测[J].兰州大学学报(自然科学版),2023,59(3):380-386.
- [5] 徐先峰,赵依,刘状壮,等.用于短期电力负荷预测的日负荷特性分类及特征集重构策略[J].电网技术,2022,46(4):1548-1556.
- [6] 杨争林,曾丹,冯树海,等.电力市场实验能力建设面临的挑战及关键技术[J].电力系统自动化,2022,46(10):111-120.
- [7] 吴迪,马文莉,杨利君.二次指数平滑多目标组合模型

- 电力负荷预测[J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(8): 2541-2547.
- [8] 孔祥玉, 马玉莹, 艾芊, 等. 新型电力系统多元用户的用电特征建模与用电负荷预测综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(13): 2-17.
- [9] 成晓明, 王磊, 张鹏超, 等. 区域级电力负荷数据特性研究与短期预测[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1092-1099.
- [10] 王岗, 范旖晖, 黄成, 等. 低碳转型下省级电力现货市场建设关键问题思考[J]. 价格理论与实践, 2022(1): 77-82.
- [11] 李彦斌, 加鹤萍, 李赟. 行业特色高校虚拟仿真实验教学实践探索: 以国家级一流课程“电力市场交易决策虚拟仿真实验”为例[J]. 教育教学论坛, 2023(16): 1-4.
- [12] 中华人民共和国教育部网. 教育部关于开展国家虚拟仿真实验教学项目建设工作的通知[EB/OL]. (2018-06-05)[2024-01-10]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201806/t20180607_338713.html.
- [13] 熊宏齐. 虚拟仿真实验教学助推理论教学与实验教学的融合改革与创新[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(5): 1-4.
- [14] 许丽, 王鸿鹏, 高振元, 等. 综合性高校虚拟仿真实验教学项目群建设初探[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(12): 187-190.
- [15] 黄林冲, 戚小童. 新时代高校人才培养模式对学生的全面培养探讨: 基于虚拟仿真实验教学项目的载体作用[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(6): 1-4.

编辑 王燕

(上接第 103 页)

- [10] 于梦真, 谢红强, 李渭新, 等. 微信公众平台在大学生双创训练管理中的应用[J]. 实验室科学, 2021, 24(4): 187-190.
- [11] 蒯伟杰, 王力海. 基于微信公众号的开放实验室探索及实践[J]. 实验室科学, 2021, 24(1): 184-186.
- [12] 王雁南, 孟凤林, 卢媛, 等. 基于微信公众平台的大型仪器开放共享探索[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(1): 274-277.
- [13] 唐梅, 马玲玲. 英语学习类微信公众平台的建构与设计[J]. 无线互联科技, 2019, 16(21): 156-157.
- [14] 谢依侨, 张娜, 孟佩佩. 大型仪器使用培训新模式的研究[J]. 实验科学与技术, 2023, 21(5): 111-117.
- [15] 宜原原, 刘亚丰, 雷敏, 等. 大型仪器共享平台助力生命科学拔尖创新人才培养[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(10): 254-257.
- [16] 黄莹莹, 杨晨, 丁巧灵, 等. 利用多模式培训提高大型仪器使用效益的探索[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(8): 283-286.

编辑 葛晋