

基于 LSTM 模型的四川省建筑业电气化率预测研究

魏 阳¹, 胡彭超², 刘洪利¹, 陈玉敏¹, 刘雪原¹, 刘 畅³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 四川省建设工程消防和勘察设计技术中心, 四川 成都 610042;

3. 四川省新型电力系统研究院有限公司, 四川 成都 610095)

摘 要:伴随着建筑总量的不断攀升,建筑电气化已经成为中国建筑业实现“双碳”目标的关键所在。针对现有文献较少关注建筑电气化率测算和预测的不足,结合建筑电气化率的定义,从建筑业终端电气化率和建筑业终端运行电气化率两个方面构建了测算公式。在完成 2010—2020 年四川省建筑电气化率测算的基础上,运用长短期记忆模型,对 2021—2030 年四川省建筑电气化率进行了预测。研究结果可为四川省建筑业电气化水平的评估及其“双碳”方案的实现提供有益参考。

关键词:“双碳”目标; 建筑业; 电气化率; LSTM 模型

中图分类号: TU 831 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)05-0056-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230509

Prediction on Electrification Rate of Construction Industry in Sichuan Province Based on LSTM Model

WEI Yang¹, HU Pengchao², LIU Hongli¹, CHEN Yumin¹, LIU Xueyuan¹, LIU Chang³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Sichuan Construction Engineering Fire Protection and Survey Design Technology

Center, Chengdu 610042, Sichuan, China; 3. Sichuan New Power System

Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610095, Sichuan, China)

Abstract: With the continuous increase in the total number of buildings, electrification has become the key to achieving the "dual carbon" goal for construction industry in China. In view of less attention paid to the calculation and prediction of electrification rate of construction industry in the existing literature, the calculation formulas based on the definition of building electrification rate is constructed from two aspects: the terminal electrification rate of construction industry and the terminal operation electrification rate of construction industry. Based on the calculation of electrification rate of construction industry from 2010 to 2020 in Sichuan province, the long short-term memory (LSTM) model is used to predict its electrification rate from 2021 to 2030. The above research can provide useful references for the evaluation of electrification level of construction industry in Sichuan province and the implementation of "dual carbon" plan.

Key words: "dual carbon" goal; construction industry; electrification rate; long short-term memory model

0 引 言

自工业革命以来,受益于煤炭、石油等化石能源的广泛开采和利用,人类文明取得了长足的进步。

基金项目:四川省科技计划资助项目(2023NSFSC1987)

但与此同时,化石能源的大量消费也造成了二氧化碳排放量的持续增加,进而导致了全球气候变暖,这已经成为威胁人类生存与社会发展的首要环境问题。为应对上述问题带来的严峻挑战,近年来各国政府大力倡导“低碳经济”,并积极开展碳中和行动方案,推进节能减排降碳工作^[1-2]。

中国作为负责任的大国,始终高度重视应对气候变化,在积极参与应对气候变化全球治理的同时,不断提高国家自主贡献力度。2020年9月,习近平主席向全世界庄严宣布了中国的“双碳”目标,更是彰显了中国坚持绿色低碳发展的决心和雄心^[3]。随着国家和地方各项“双碳”政策的陆续出台,关于“双碳”目标的研究,逐渐成为了各界关注的焦点^[4-5]。

“双碳”目标的实现离不开各行各业的共同努力,而建筑领域无疑是其中最为重要的产业部门之一。中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专业委员会的研究数据显示:2020年全国建筑全过程碳排放总量高达50.8亿吨CO₂,占全国碳排放的50.9%。其中,建筑运行阶段碳排放为21.6亿吨CO₂,占全国的21.7%^[6]。显然,建筑业已成为中国碳排放大户。可以预见,未来随着中国城镇化进程的进一步加速,建筑业的碳排放也势必面临更大的压力。在此背景下,建筑业的绿色低碳发展已成为亟待解决的重要课题^[7]。

从中国发布的《2030年前碳达峰行动方案》^[8]来看,改善建筑用能结构和用能效率,提升建筑终端电气化水平,无疑是实现建筑行业碳中和目标的重要举措之一。文献[9-11]基于不同的数量分析模型,分维度考察了中国建筑业碳排放驱动因素。研究结果显示:用能结构和用能效率对建筑业碳排放具有重要影响。上述结论为中国建筑业电气化水平提升的必要性提供了有力的理论依据。随后,中国电力企业联合会研究显示,建筑电气化对建筑业实现碳中和贡献可达到30%^[12]。进一步,文献[13]剖析了中国再电气化的内涵,并在此基础上结合中国现实基础,给出了工业、建筑、交通三大重点领域提升电气化水平的路径及建议。文献[14]在揭示电力对国家能源安全新战略重要性的基础上,围绕2035年和2050年两个时间点,给出了建筑电气化率提升的技术路径。文献[15]探讨了新形势下建筑等部门所面临的挑战,在此基础上评估了不同电气化方案的技术实现路径及其应用前景,并给出了针对性的发展措施与建议。

上述的理论研究,较好地揭示了中国建筑业电气化水平提升的动因、内涵与路径等,这为“双碳”目标下中国建筑业电气化提升策略的设计、路径与方案选择等提供了有益的参考。但同时应当看到,

现有文献较少关注于建筑业的电气化率测算与预测,这一定程度上也影响了建筑业电气化水平提升策略的针对性和差异性。事实上,一个区域的建筑业电气化率的测算与预测结果反映了该区域建筑业的整体电气化水平,而不同水平的建筑业电气化率往往亟需差异化的提升路径。目前,已有学者基于多元线性回归模型^[16]、自回归移动平均模型^[17]、神经网络模型^[18]、长短期记忆(long short-term memory, LSTM)模型^[19]等对特定情境下的建筑能耗进行了测算和预测,其中LSTM法更是在长序列问题预测上表现出强适用性而被广泛使用。因此,若能结合建筑电气化率指标公式完成测算,并利用LSTM模型对其未来趋势进行预测,那势必将更好地助力建筑业的绿色低碳发展。

综合分析,下面以四川省为对象,对其建筑电气化率测算与预测展开研究。研究结果将有助于更好地了解四川乃至西部地区建筑电气化发展现状及其趋势,进而可以为四川乃至西部地区城乡建设领域“双碳”方案的实现提供辅助决策参考。

1 LSTM 模型

1.1 基本介绍

在传统的神经网络(neural network, NN)模型中,层与层的节点之间保持着完全连通性,但每层内部的节点之间却没有任何连接,这导致传统的NN模型无法有效处理时间序列问题。在此背景下,循环神经网络(recurrent neural network, RNN)模型应运而生。与NN模型相比,RNN模型在隐藏层内部增加了节点之间的连接,因而在时间序列的演进方向上可以展现出递归性^[20]。受益于其递归性特点,RNN模型表现出强大的短期记忆能力,在很长一段时间被视为是处理时间序列问题的有效方法。

但与此同时,随着所需处理时间序列长度的增加,过多的历史信息会导致RNN模型在训练时出现梯度消失、爆炸等问题,进而影响其预测的精准性^[21]。LSTM模型对RNN模型进行了完善,除增加“细胞”状态外,还添加了一些“门”用以解决存储和遗忘时间序列信息,因而被认为是目前处理时间序列预测问题最适合的方法之一^[22]。

1.2 结构与原理

从模型的结构来看,LSTM模型的关键是“细胞

状态”,它类似于传输带,可以让信息在序列连中实现有效的传递,如图 1 所示。具体而言,LSTM 模型的每个时间序列点,都存在一个记忆细胞,作用是赋予 LSTM 模型记忆选择的功能,使得 LSTM 模型可以在每个时间序列点自由选择相应的记忆。为实现上述功能,LSTM 模型在结构上增加了 4 个关键部分:1)输入门,决定哪些信息将被输入到记忆细胞中;2)遗忘门,决定哪些信息将被遗忘和忽略;3)细胞状态,决定记忆细胞保留哪些信息;4)输出门,决定哪些信息将会被输出到下一个时间序列点。

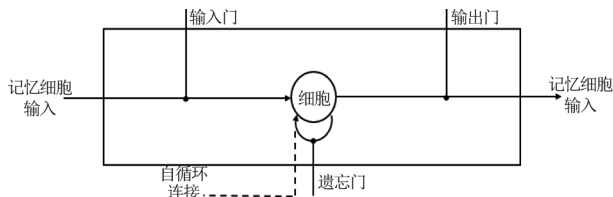


图 1 LSTM 基础结构

从模型运行流程来看,当利用 LSTM 模型开展建筑业电气化率预测时,首先,需要对原始的时间序列数据进行相应的处理,如时间序列数据异常值的辨识与处理、时间序列数据的归一化处理等;其次,在完成时间序列数据的处理后,进一步将时间序列数据转化为监督学习型数据,对于时间序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 而言, $\{x_n\}$ 为预测的目标值。为实现对时间序列数据的多步预测,在操作时,可采取逐点迭代的预测方式,将建筑业电气化率观测数据的滑动时间窗口宽度固定为 m ,那对于 $\{x_n\}$ 而言,时间序列 $\{x_{n-m}, x_{n-m+1}, \dots, x_{n-1}\}$ 则是滑动时间窗口包含的所有观测数据。基于前述分析,当滑动时间窗口宽度为 m 时,对应的 $(n-m) \times m$ 维输入矩阵 X 和 $(n-m)$ 维输出矩阵 Y 可表示为:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_m \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{m+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n-m} & x_{n-m+1} & \dots & x_{n-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Y = \begin{bmatrix} x_{m+1} \\ x_{m+2} \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

最后,结合式(1)、式(2),将建筑业电气化率的历史测算数据代入 LSTM 模型进行数据训练。通过

训练结果比较,挑选出误差最小的值作为建筑业电气化率预测的参数。进一步,利用 LSTM 模型开展建筑业电气化率最终预测,即可得未来各时点的建筑业电气化率的数值预测结果。

2 四川省建筑业电气化率测算与预测

2.1 建筑业电气化率指标测算公式

参考 GB/T 4754—2017《国民经济行业分类》^[23]以及前期理论研究成果,可将建筑电气化率分为建筑业终端电气化率和建筑业终端运行电气化率。

2.1.1 建筑业终端电气化率

建筑业终端电气化率是指整个建筑业中终端电能消费在终端能源消费中所占比例。根据 GB/T 4754—2017 可知,建筑业主要分为房屋建筑业、土木工程建筑业、建筑安装业、建筑装饰、装修和其他建筑业。基于建筑电气化率定义,建筑业终端电气化率的测算公式为:

$$\text{建筑业终端电气化率} = \frac{\text{建筑业终端电能消费量}}{\text{建筑业终端能源消费量}} \quad (3)$$

2.1.2 建筑业终端运行电气化率

建筑业终端运行电气化率是指各类建筑业终端运行中电能消费在终端能源消费中所占比重。按照建筑类型的不同,建筑业终端运行能源消费分为公共建筑终端能耗(批发、零售业和住宿、餐饮业和其他行业)、居住建筑终端能耗(居民生活消费)。基于建筑电气化率定义,建筑业终端运行电气化率的测算公式为:

$$\text{建筑业终端运行电气化率} = \frac{\text{建筑业终端运行电能消费量}}{\text{建筑业终端运行能源消费量}} \quad (4)$$

借鉴文献[24—25]的前期研究成果,可得建筑业终端运行电能消费量和建筑业终端运行能源消费量的测算公式为:

$$\text{建筑业终端运行电能消费量} = \text{批发、零售业和住宿、餐饮业终端运行电能消费量} + \text{其他行业终端运行电能消费量} + \text{居住建筑业终端运行电能消费量} \quad (5)$$

建筑业终端运行能源消费量 = 批发、零售业和住宿、餐饮业终端运行能源消费量(扣除 95% 的汽油消费和 35% 的柴油消费) + 其他行业终端运行能源消费量(扣除 95% 的汽油消费和 35% 的柴油消

费)+居住建筑业终端运行能源消费量(扣除汽油消费和 95%的柴油消费) (6)

2.2 2010—2020 年四川省建筑业电气化率测算

2.2.1 2010—2020 年四川省建筑业终端电气化率

查阅《中国能源统计年鉴》^[26]数据,并根据折算标准煤系数,将四川省建筑业终端能源消费量折算为标准煤的实际消耗量,可得 2010—2020 年间四川省建筑业终端电能消费量(折算标准煤)和四川省建筑业终端能源消费量(折算标准煤)的测算结果,见图 2 所示。



图 2 2010—2020 年四川省建筑业终端电能和终端能源消费量(折算标准煤)

基于图 2 的数据结果,利用式(3)可得 2010—2020 年四川省建筑业终端电气化率的测算结果,如图 3 所示。从测算结果来看,2010—2020 年期间,四川省建筑业终端电气化率呈现出先下降后上升的 U 型发展态势,从 2010 年的 20.57%下降至 2017 年的 10.31%,再上升至 2020 年的 13.17%。2020 年四川省建筑业终端电气化率低于 2010 年 7.40 个百分点。

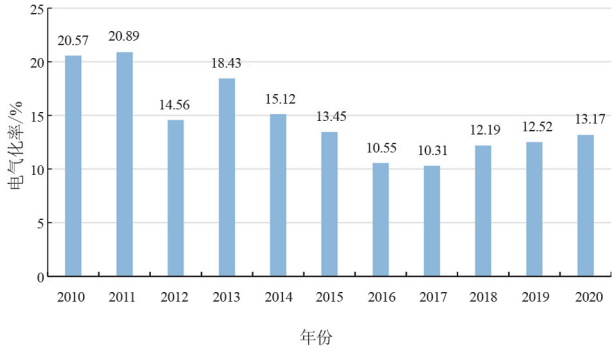


图 3 2010—2020 年四川省建筑业终端电气化率测算值

2.2.2 2010—2020 年四川省建筑业终端运行电气化率

查阅《中国能源统计年鉴》数据,并根据折算标准煤系数,将建筑业终端运行能源消费量折算为标准煤的实际消耗量,可得 2010—2020 年期间四川省建筑业终端运行电能消费量(折算标准煤)和四川

省建筑业终端运行能源消费量(折算标准煤)的测算结果,见图 4 所示。

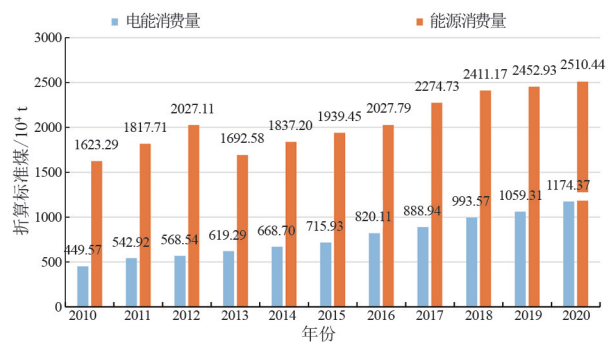


图 4 2010—2020 年四川省建筑业终端运行电能消费量和终端运行能源消费量(折算标准煤)

基于图 4 的数据结果,利用式(4)可得 2010—2020 年四川省建筑业终端运行电气化率测算结果,如图 5 所示。从测算结果来看,2010—2020 年期间,四川省建筑业终端运行电气化率逐年攀升,从 2010 年的 27.69%已提升至 2020 年 46.78%,累计提升 19.08 个百分点。从 2016 年开始,四川省建筑业终端运行电气化率突破 40%,进入新的上升阶段,2016—2020 年平均增速达 3.71%,表现出稳中有进的发展态势。

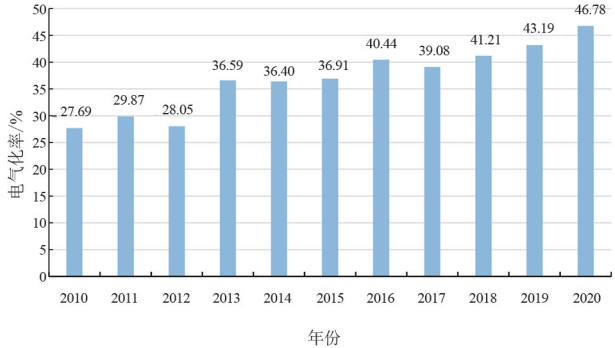


图 5 2010—2020 年四川省建筑业终端运行电气化率测算值

2.3 2021—2030 年四川省建筑业电气化率预测

将 2010—2020 年四川省建筑业终端电气化率和建筑业终端运行电气化率作为学习样本,各自代入 LSTM 模型进行训练。通过训练结果比较,挑选出各自误差最小的值作为其预测的参数。进一步,利用 LSTM 模型开展 2010—2020 年四川省建筑业终端电气化率和建筑业终端运行电气化率的预测,可得 2021—2030 年四川省建筑业终端电气化率和建筑业终端运行电气化率的预测数据,详见图 6。

由 LSTM 模型的预测结果来看,2021—2030 年期间,四川省建筑业终端电气化率和终端运行电气

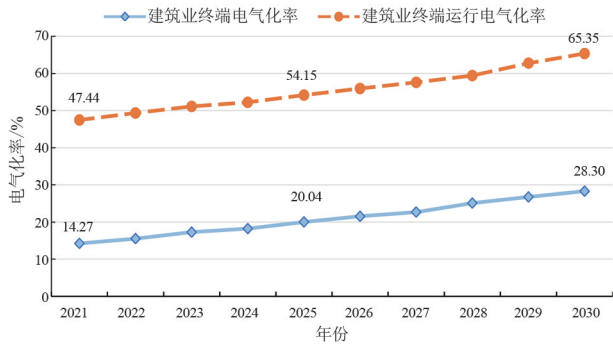


图 6 2021—2030 年四川省建筑业终端电气化率和终端运行电气化率预测值

化率均将呈稳步攀升的发展趋势。其中,四川省建筑业终端电气化率的年均增速约为 7.91%,四川省建筑业终端运行电气化率的年均增速约为 3.62%。基于上述增速,LSTM 模型预测:到 2025 年,四川省建筑业终端运行电气化率将达到 54.15%,接近完成住建部提出的“2025 年全国电能占建筑业终端运行能耗比例超过 55%”的目标;到 2030 年,四川省建筑业终端运行电气化率将达到 65.35%,顺利完成住建部提出的“2030 年全国电能占建筑业终端运行能耗比例超过 65%”的目标。

3 结 论

在“双碳”战略背景下,建筑电气化已经成为建筑业绿色低碳发展的重要抓手。上面针对现有文献较少关注建筑电气化率测算与预测,结合建筑电气化率的定义,从建筑业终端电气化率和建筑业终端运行电气化率两个方面构建了测算公式。在此基础上,运用《中国能源统计年鉴》中四川能源平衡表(实物量)数据,完成了 2010—2020 年四川省建筑电气化率的测算。并基于前述四川建筑业电气化率测算数据,运用 LSTM 模型,对四川省建筑电气化率的未来发展趋势进行了预测。结果显示:2021—2030 年期间,四川省建筑业终端电气化率和终端运行电气化率均将呈稳步攀升的发展态势;到 2025 年,四川省建筑业终端运行电气化率将达到 54.15%,接近完成住建部提出的 55% 的建筑业终端电气化率目标;到 2030 年,四川省建筑业终端运行电气化率将达到 65.35%,顺利完成住建部提出的 65% 的建筑业电气化率目标。

总体而言,所做研究为四川省建筑业电气化率的结果测算与趋势预测提供了一种工具和方法。从

结果来看,四川省建筑业在实现 2025 年短期电气化率目标方面还存在一定的压力,亟需加大政策和措施的推行力度,以确保全省建筑业“双碳”目标的顺利实现。

应当指出,虽然相比于传统的 NN 模型和 RNN 模型,LSTM 模型在适用性和预测精度上有独特的优势,但当前“双碳”环境的快速变化一定程度上会影响到时间序列数据的走势,进而会削弱基于 LSTM 模型的四川省建筑业电气化率预测结果的精准性。因此,在未来的研究中还需要更长的时间序列数据用以训练,以最大可能地减少预测误差。

参考文献

[1] MAHONE A, SUBIN Z, MANTEGNA G, et al. Achieving carbon neutrality in California[R]. New York: Energy and Environmental Economics, 2020.

[2] Natural Capital Partners. The carbon neutral protocol[R]. Europe: Natural Capital Partners, 2020.

[3] 习近平.在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL].(2020-09-22)[2023-02-09].http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527647.htm.

[4] 郭楷模,孙玉玲,裴惠娟,等.趋势观察:国际碳中和行动关键技术前沿热点与发展趋势[J].中国科学院院刊,2021,36(9):1111-1115.

[5] 于贵瑞,郝天象,朱剑兴.中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J].中国科学院院刊,2022,37(4):423-434.

[6] 中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专业委员会.2022 中国建筑能耗与碳排放研究报告[R].重庆,2022.

[7] 刘俊伶,项启昕,王克,等.中国建筑部门中长期低碳发展路径[J].资源科学.2019,41(3):509-520.

[8] 国务院.国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL].(2021-10-24)[2023-02-09].http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.

[9] 金柏辉,李玮,张荣霞,等.中国建筑业碳排放影响因素空间效应分析[J].科技管理研究,2018(4):238-245.

[10] HUO T F, CAO R J, DU H Y, et al. Nonlinear influence of urbanization on China's urban residential building carbon emissions: New evidence from panel threshold model[J]. Science of The Total Environment, 2021, 772: 145058.

[11] 袁润松,丰超.基于共同前沿生产理论的中国建筑业

碳排放驱动因素分解:2000—2020 年[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(1): 161-170.

[12] 中国电力企业联合会. 中国电气化年度发展报告 2021[R]. 北京, 2021.

[13] 舒印彪, 谢典, 赵良, 等. 碳中和目标下我国再电气化研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 195-204.

[14] 洪博文, MIKETA Asami, GIELEN Dolf 等. 基于可再生能源的全球电气化路径与远景分析 [J]. 中国电力, 2020, 53(3): 159-166.

[15] 张运洲, 鲁刚, 王芃, 等. 能源安全新战略下能源清洁化率和终端电气化率提升路径分析 [J]. 中国电力, 2020, 53(2): 1-8.

[16] GUO Q, TIAN Z, DING Y, et al. An improved office building cooling load prediction model based on multivariable linear regression [J]. Energy and Buildings, 2015, 107: 445-455.

[17] SINGH S N, MOHAPATRA A. Repeated wavelet transform based ARIMA model for very short-term wind speed forecasting [J]. Renewable Energy, 2019, 136: 758-768.

[18] 于军琪, 杨思远, 赵安军, 等. 基于神经网络的建筑能耗混合预测模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(6): 1220-1231.

[19] 魏光普, 康瑜, 范浩文, 等. 重工业城市建筑业碳

排放核算与预测研究[J]. 生态经济, 2022, 38(9): 43-48.

[20] ELMAN J L. Finding Time in Structure[J]. Cognitive Science, 1990, 14(2): 179-211.

[21] PASCANU R, MIKOLOV T, BENGIO Y. On the difficulty of training recurrent neural networks [C]. Proceedings of the 30th International Conference on Machine Learning, Atlanta: ICML, 2013: 1310-1318.

[22] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long Short-term Memory [J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.

[23] 中国标准化研究院.国民经济行业分类:GB/T 4754—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.

[24] 王庆一. 中国建筑能耗统计和计算研究[J]. 节能与环保, 2007(8): 9-10.

[25] 尹伟华, 李继峰, 高亚锋, 等. 中国近年来终端能源需求特征研究——基于能源平衡表数据[J]. 中国能源, 2019, 41(6): 27-31.

[26] 国家统计局能源统计司.中国能源统计年鉴 2021[M]. 北京:中国统计出版社,2021.

作者简介:
魏 阳(1987),女,硕士,高级经济师,主要从事双碳技术创新、大数据应用研究。
(收稿日期:2023-04-27)

(上接第 26 页)

[5] 段江伟. 大气压非平衡等离子体射流产生的活性氮氧化物(RONS)穿透生物组织的研究[D].武汉:华中科技大学,2020.

[6] 杨文斌,周江宁,李斌成,等.激光诱导氮气等离子体时间分辨光谱研究及温度和电子密度测量[J].物理学报,2017,66(9):267-274.

[7] 董丽芳,冉俊霞,尹增谦,等.大气压氩气介质阻挡放电中的电子激发温度[J].光谱学与光谱分析,2005(8): 1184-1186.

[8] 姜梦琦,杨勃行,郝胜智,等.朗缪尔三探针方法脉冲火花放电等离子体诊断[J].真空科学与技术学报,2022, 42(6):411-416.

[9] 杨晨.氩气等离子体射流光谱空间分布分析[J].中国设备工程,2022(3):16-18.

[10] 李作召.用于创面缝合的冷等离子体射流技术研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2016.

[11] 迟钧文. 氮等离子体发生系统建模与优化控制[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2022.

[12] 屠昕,陆胜勇,严建华,等.大气压直流氩等离子体光谱诊断研究[J].光谱学与光谱分析,2006(10):

1785-1789.

[13] 吴蓉,李燕,朱顺官,等.等离子体电子温度的发射光谱法诊断[J].光谱学与光谱分析,2008(4):731-735.

[14] 李磊,陈晓东,袁承勋,等.Ar 等离子体射流发射光谱诊断研究[J].发光学报,2019,40(8):1049-1054.

[15] CHRISTOVA M, DIMITRIJEVI M S, SAHAL-BRÉCHOT S. Stark broadening of Ar I spectral lines emitted in surface wave sustained discharges[J]. Memorie Della Societa Astronomica Italiana Supplementi, 2005, 7(238): 145-146.

[16] DONG L F, RAN J X, MAO Z G. Direct measurement of electron density in microdischarge at atmospheric pressure by Stark broadening [J]. Applied Physics Letters, 2005,86(16):161501.

作者简介:
张大伟(1975),男,硕士,副教授,研究方向为高压技术、等离子体技术;
陈晓颖(1996),女,硕士研究生,研究方向为先进仪器和网络化测控技术;
郝 莎(1989),女,博士,讲师,研究方向为气体放电、高电压绝缘技术。
(收稿日期:2023-02-14)