

高灿中,刘锐,陈茂强,等.巴中地区夏季气象电力负荷预测方法研究[J].陕西气象,2025(3):73-78.

文章编号:1006-4354(2025)03-0073-06

巴中地区夏季气象电力负荷预测方法研究

高灿中^{1,2},刘锐¹,陈茂强³,赵云龙⁴,黎亮¹,刘春⁴

(1. 巴中市气象局,四川巴中 636000;

2. 川东北强天气研究南充市重点实验室,四川南充 637000;

3. 内江市气象局,四川内江 641000;4. 辽阳市气象局,辽宁辽阳 111000)

摘要:利用巴中市2020—2023年夏季日最高气温资料和电力负荷资料,分析日最高气温与气象电力负荷之间的关系,采用改进型Logistics模型和BP神经网络方法模拟预测气象电力负荷,对比分析两种方法对巴中地区夏季气象电力负荷预测的优劣。结果表明:在日最高气温 $T \leq 32^\circ\text{C}$ 阶段,改进型Logistics模型预测效果更好,能体现出该阶段的气象电力负荷线性特征;在日最高气温 $T > 32^\circ\text{C}$ 阶段,BP神经网络模型预测效果更好,不仅能体现了该阶段气象电力负荷的非线性特征,更能反馈出气象电力负荷的离散特征。总体而言,改进型Logistics模型适用于长期预测,而BP神经网络模型更适用于短期预测,在气象电力负荷预测业务中,将二者结合起来使用能较大程度提高气象电力负荷预测准确度。

关键词:气象电力负荷;日最高气温;非线性关系;预测;改进型Logistics模型;BP神经网络

中图分类号:TM714

文献标识码:A

电力系统负荷预测,是指在考虑一些诸如系统运行方式、气象条件、增容改造工程、社会政治活动等影响电力系统重要因素的前提下,通过对过去负荷数据的研究,预测未来某个时刻的负荷数据的过程^[1]。影响电力负荷长期变化的因素很多,总的可以归纳为三个方面的因素:(1)电力负荷随国民经济的发展等因素作用所表现的趋势部分(经济电力负荷);(2)气象因素影响所引起的电力负荷部分(气象电力负荷);(3)随机因素的影响(随机负荷)^[2]。经济电力负荷在一定时期内比较稳定,而随机负荷的影响较小,同时考虑到日最高气温是影响气象电力负荷的最关键因子^[3-6],为此,研究主要集中分析日最高气温对气象电力负荷的影响。

目前,应用较多的电力负荷预测方法有:回归分析法、灰色系统法、卡尔曼滤波法、小波分析法

和人工神经网络法等^[7]。蔡新玲等^[8]分析了陕西省日用电量、最大负荷与气温的关系,并建立了基于平均气温的线性回归预测方程。康重庆等^[9]应用非线性回归统计方法,对历史电力负荷数据进行了加权处理,从而提高了负荷预测的精度。李伟等^[10]在灰色预测模型的框架下,对历史电力负荷数据序列进行了平滑处理,消除了脉冲干扰,有效提升了中长期电力负荷预测的准确度。邹正达等^[11]提出一种基于蚁群算法的优化网络模型,利用蚁群中的信息素分布,采用蚁群算法搜索神经网络的最优权重,使电力负荷预测在局部极小值附近的精度有较大提升。周德强^[7]利用最小二乘法估计负荷预测模型的参数,该方法对于电力负荷存在突变时,可以有效改善长期负荷预测的精准度。鉴于目前非线性预测方法众多的情况,赵洋等^[12]对支持向量机、高斯过程和前向神经网络

收稿日期:2023-12-21

作者简介:高灿中(1990—),女,四川内江人,汉族,学士,工程师,从事专业气象服务。

通信作者:陈茂强(1969—),男,四川内江人,汉族,学士,高级工程师,从事灾害性天气和气象服务研究。

基金项目:川东北强天气研究南充市重点实验室科技发展基金项目(NCQXKJ202302)

等经典机器学习法,以及时间卷积深度学习方法应用于短期电力负荷预测的适用性和预测效果进行对比分析,认为深度学习方法相较于经典机器学习方法在非线性和特征学习方面更具优势。上述的预测方法已经日益成熟并应用于电力负荷预测业务,但这些方法缺乏对电力负荷非线性演变背后规律的认识。为此,采用改进的 Logistics 模型^[13]描述巴中地区夏季电力负荷,以徐士良单形调优算法为基础^[14-16],得到改进型 Logistics 模型的最优拟合,利用该模型对巴中地区夏季气象电力负荷进行预测,并与 BP 神经网络模型模拟结果进行对比分析,比较两种方法对巴中地区夏季气象电力负荷预测的优劣。

1 资料来源和方法介绍

1.1 资料来源

气象数据采用巴中市国家基本气象站 2020—2023 年夏季(6 月 1 日—8 月 31 日)日最高气温资料。电力负荷数据采用同期国家电网巴中市供电公司逐日工业负荷、商业负荷和居民消费负荷资料。据统计,2017—2023 年巴中工业和商业电力负荷占总负荷的 29—34%。研究中,将工业负荷与商业负荷之和视为经济电力负荷,将居民消费负荷视为气象电力负荷^[3],忽略随机负荷的影响^[3]。由于经济电力负荷与气象因子的相关性不强,而日最高气温是影响气象电力负荷的最关键因子^[4-6],同时考虑到夏季气象电力负荷具有显著的非线性特征,本研究选取夏季气象电力负荷和日最高气温资料来探讨气象电力负荷的非线性预测方法。

1.2 技术方法

本研究主要采用改进型 Logistics 模型和 BP 神经网络模型两种技术方法。

1.2.1 改进型 Logistics 夏季随着气温上升,气象电力负荷将快速增长;但当气温上升到一定程度,假定气象电力负荷达到一定极限将不再增长,气象电力负荷的变化总体符合 Logistics 模型^[13]要求。将上述假设用方程表示为

$$dW(T)/dT=rW(T)(1-W(T)/S), \quad (1)$$

其中, T 为日最高气温, r 为增长率($r>0$), S 为极限气象电力负荷($S>0$)。在日最高气温 T 较小

但升温较快的情况下,气象电力负荷 $W(T)$ 的变化速度 $dW(T)/dT \approx rW(T)$, $W(T)$ 增长较快;在日最高气温 T 特别高时, $W(T)$ 接近 S , $dW(T)/dT \approx 0$, $W(T)$ 近似于零增长。在上述分析中,极限气象电力负荷 S 为常数,意味着极限气象电力负荷不变。但实际情况是随着经济社会的发展,极限气象电力负荷也是在逐年增加, S 不应为常数,而应为随年际变化的变量 S_n 。因此,需要对 Logistics 模型进行改进。在研究中,将 2020—2022 年的夏季日最高气温和气象电力负荷数据进行参数拟合,并利用 2023 年的数据进行检验。为此,在模拟过程中,以年为单位,结合 Forcal 和 Matlab 软件拟合出 2020—2022 年每年极限气象电力负荷 S_n ($n=2020, 2021, 2022$),并以每年的极限气象电力负荷数据 S_n 为序列,建立回归方程,以此来预测 2023 年的极限气象电力负荷 S_{2023} ,进而对 2023 年夏季气象电力负荷进行预测。

1.2.2 BP 神经网络模型 BP 神经网络是一种按误差反向传播(简称误差反传)训练的多层前馈网络,它的基本思路是梯度下降法,利用梯度搜索技术,使网络的实际输出值和期望输出值的误差均方差为最小^[17]。由于 BP 神经网络算法采用 Widrow-Hoff 训练算法和非线性可微转移函数的多层网络,在解决非线性近似方面有很大的优势,可用于复杂的非线性函数的逼近^[18]。因此,利用 BP 神经网络模型来模拟巴中地区夏季的气象电力负荷。设向量 y 为日气象电力负荷,向量 X 为日最高气温,二者之间存在一种可逆的反演关系:

$$y=RX, \quad (2)$$

其中, R 为矩阵,但该矩阵不是常数矩阵,因此,反演关系(2)表示的不是简单的线性关系,而是复杂的非线性关系^[17]。

2 结果分析

2.1 气象电力负荷与日最高气温的关系分析

从图 1 可见,巴中 2020—2023 年各年份夏季气象电力负荷变化趋势不太一致,但总体来说,7 月下旬至 8 月上旬是气象电力负荷的高峰期,这个时间段正是巴中地区的高温时节。

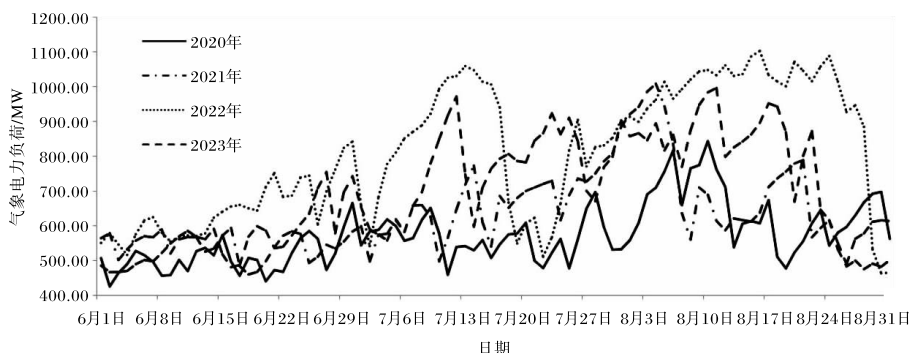


图1 巴中地区 2020—2023 年 6—8 月逐日气象电力负荷变化图

为了进一步明确气象电力负荷与气温的关系,将 2020—2023 年每年夏季日最高气温与气象电力负荷数据序列进行 Pearson 相关性分析。结果显示气象电力负荷与日最高气温呈正相关,相关系数均大于 0.6,且通过 0.01 的显著性检验,2022 年的相关性最高。

将每年日最高气温与气象电力负荷数据进行线性回归模拟(图 2),发现在高温阶段明显不符合线性特征。因此,有必要根据两者是线性还是非线性的关系,分段分析气象电力负荷与日最高

气温的关系。采用不同阈值(分段点)下的斜率变化差值来判断最优分段点。分析发现:当日最高气温 $T \leq 32^\circ\text{C}$ 时,2020—2023 年的拟合斜率分别为 0.293, 0.179, 0.332 和 0.179,日最高气温与气象电力负荷基本呈线性关系;当日最高气温 $T > 32^\circ\text{C}$ 时,拟合斜率分别为 1.002, 1.018, 0.888 和 0.642,日最高气温与气象电力负荷总体为非线性关系。以 32°C 为分段点时,前后两段样本拟合的斜率变化差值最大,因此将 32°C 作为最优分段点。

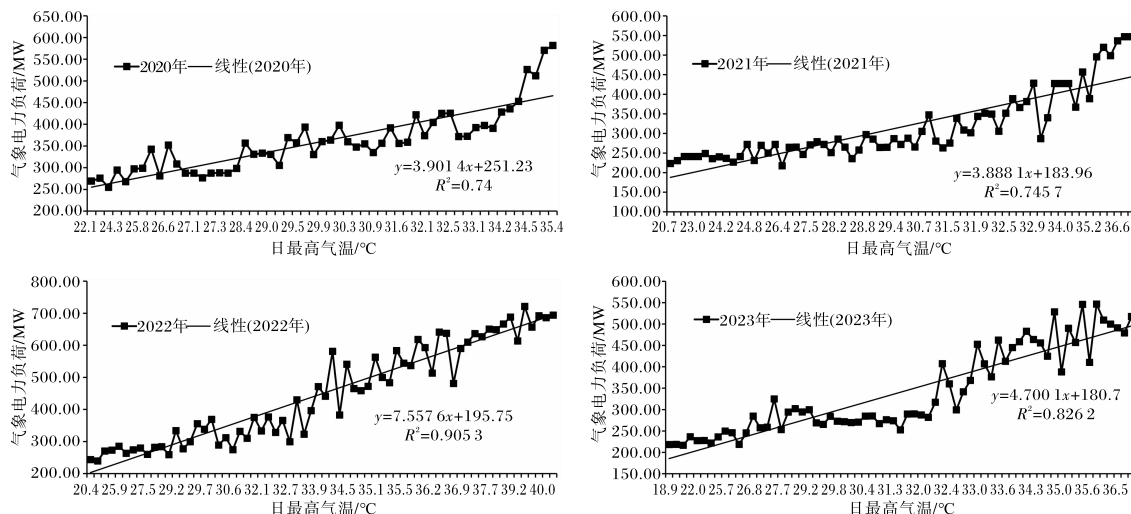


图2 巴中地区 2020—2023 年夏季气象电力负荷随日最高气温的变化图

2.2 改进型 Logistics 模型的拟合和预测结果

改进型 Logistics 模型采用分段模拟:当日最高气温 $T \leq 32^\circ\text{C}$ 时,采用线性回归模型模拟;当日最高气温 $T > 32^\circ\text{C}$ 时,采用 Logistics 模型模拟。由于线性回归模型模拟较为常见,文章不再赘述。下面对 Logistics 模型模拟进行详细阐述。

为了进一步揭示日最高气温 T 与气象电力

负荷 $W(T)$ 之间的关系,根据常微分方程(1),需要确定方程的参数 r 和 S 。为此,令 $r = r_0(T_{\max} - T)$, r_0 为气象电力负荷禀赋增长率, $T_{\max}$ 为巴中地区有气象记录以来日最高气温极值,为 41.3°C ; r_0 和 S 需通过微分方程参数拟合确定。根据徐士良单形调优算法^[14-15],利用 Forcal 和 Matlab 软件计算得到最优拟合参数: $r_0 = 0.25$, $S_{2020} =$

703 MW, $S_{2021}=612$ MW, $S_{2022}=723$ MW。根据上述参数,利用 Matlab 软件对微分方程(1)进行积分计算,结合 $T \leq 32$ °C 时的线性回归模型,可以得到 2020—2022 年的巴中地区夏季气象电力负荷(见图 3)。2020—2022 年改进型 Logistics 模型拟合的 R^2 分别为 0.799, 0.889 和 0.905,比线性回归拟合的(0.744, 0.745, 0.845)有明显的提升,而这种提升主要是由非线性拟合获得的。为此,使用该方法对 2023 年的气象电力负荷进行预测检验。

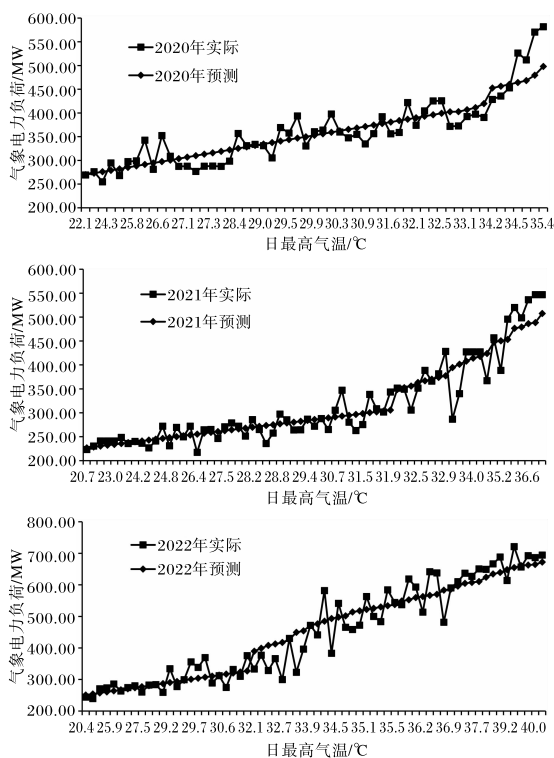


图3 2020—2022年巴中地区夏季实际气象电力负荷与改进型 Logistics 模型拟合的气象电力负荷随日最高气温的变化对比

由 2020—2022 年的极限气象电力负荷拟合值 S_n 及其回归方程,结合巴中的年最高气温的预测值(38 °C 左右,来源于巴中夏季气候预测报告),可得 $S_{2023}=652$ MW。为此,将其带入到方程(1)中,积分得到 2023 年夏季的气象电力负荷预测值(图 4)。2023 年改进型 Logistics 模型的 R^2 为 0.888,线性拟合的为 0.826,可见改进型 Logistics 模型的预测结果较线性回归预测模型有较大提升。

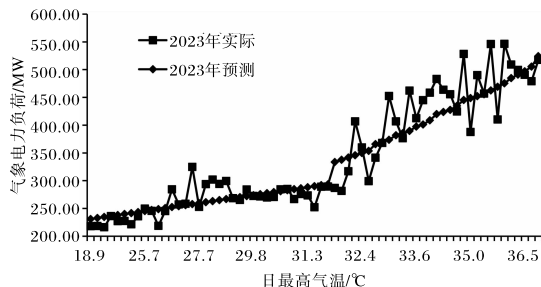


图4 改进型 Logistics 模型预测的 2023 年巴中地区夏季气象电力负荷与实际气象电力负荷随日最高气温的变化对比

2.3 BP 神经网络模型预测结果

利用 BP 神经网络模型,使用 2020—2022 年的样本数据进行训练,得到相应的权重系数和阈值,进而得到 2023 年夏季的气象电力负荷预测(图 5)。2023 年 BP 神经网络模型计算的巴中夏季气象电力负荷预测值的 R^2 为 0.59。尽管 BP 神经网络模型整体拟合效果欠佳,但当 $T > 32$ °C 时,巴中夏季气象电力负荷预测值的 R^2 为 0.89,拟合效果较好。

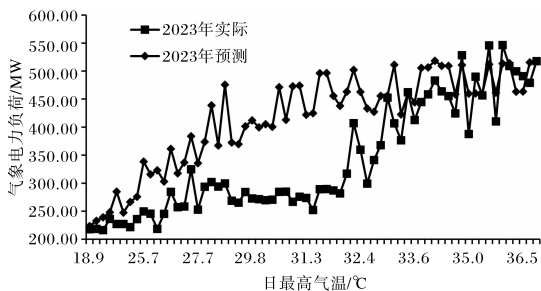


图5 BP 神经网络模型预测的 2023 年巴中地区夏季气象电力负荷与实际气象电力负荷随日最高气温的变化对比

BP 神经网络模型在 $T > 32$ °C 时模拟效果较好,但在 $T \leq 32$ °C 时的效果不好,这主要有两个原因:一是训练数据样本较少,仅有 3 a 的样本;二是数据的一致性较差,2020—2023 年气象电力负荷数据随气温的走势不完全相同。

2.4 改进型 Logistics 模型和 BP 神经网络模型的对比分析

改进型 Logistics 模型和 BP 神经网络模型对巴中 2023 年夏季气象电力负荷的预测结果(图 4、图 5):在 $T > 32$ °C 阶段,改进型 Logistics 模型

预测值与实际值基本保持一致,体现了该阶段非线性特征,但在精确性上差强人意,不能很好地体现气象电力负荷的离散特征;而 BP 神经网络模型预测值效果最佳,不仅在趋势上与实际值一致,甚至在精确性上表现突出。在 $T \leq 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 阶段,改进型 Logistics 模型预测值基本与实际值一致,而 BP 神经网络模型预测值与实际值相差较大。BP 神经网络模型在 $T \leq 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 阶段预测效果不如改进型 Logistics 模型,是因为这一阶段气象电力负荷的线性特征明显。而 BP 神经网络模型选择的基函数为非线性函数,加之数据少,训练后的调制参数不能很好地体现该阶段线性特征。改进型 Logistics 模型通过分段设计,能较好地地区分线性和非线性特征。改进型 Logistics 模型预测值在 $T > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 阶段预测精度不如 BP 神经网络模型,是因为高温阶段气象电力负荷同时具有强非线性特征和离散特征,并且一致性较好;而 BP 神经网络的非线性基函数经历史数据(2020—2022 年)训练后能较好地反馈出上述特征,因而其预测精度较好。而改进型 Logistics 模型是微分方程模型,能反馈出强非线性特征,但不能反馈出离散特征,因而其趋势预测较好而精度较差。由于 BP 神经网络模型在预测时,需要更多的历史数据和临近数据来反馈预测值的特征,因此适合短期气象电力负荷预测。而改进型 Logistics 模型中的线性模型和 Logistics 模型都属于确定型模型,有初始值,就可以得到预测值,因此适合长期气象电力负荷预测。

3 结论和讨论

通过对 2020—2023 年巴中地区夏季(6 月 1—8 月 31 日)的日最高气温和气象电力负荷的分析,采用改进型 Logistics 模型和 BP 神经网络模型对日最高气温和气象电力负荷进行拟合(训练)和预测,并对这两种模型进行了对比分析。

(1)在日最高气温 $T \leq 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 阶段,改进型 Logistics 模型预测效果更好,能体现出该阶段的气象电力负荷线性特征;在日最高气温 $T > 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 阶段,BP 神经网络模型预测效果更好,不仅能体现了该阶段气象电力负荷的非线性特征,更能反应出气象电力负荷的离散特征。

(2)改进型 Logistics 模型属于微分动力系统,其初值可以决定其后续任意阶段的值,但由于其连续性质,无法精确预测实际气象电力负荷情况,因此适用于长期预测;而 BP 神经网络模型需要更多的数据来反馈其非线性信息,在电力负荷预测时需要逐日的日最高气温数据,因此更适用于短期预测。在开展电力负荷预测业务应用时,应将改进型 Logistics 模型和 BP 神经网络模型结合起来使用。

(3)虽然巴中地区夏季电力负荷预测方法预测效果较好,但仍存在以下问题:一是电力负荷样本数据较少,导致 BP 神经网络训练不充分,预测不够精确;二是气象电力负荷除了与日最高气温有关,实际还与空气湿度、风速等气象要素有关,后续还需要进一步分析。

参考文献:

- [1] 周英,尹邦德,任铃,等. 基于 BP 神经网络的电网短期负荷预测模型研究[J]. 电测表与仪表,2011,48(2):73-76.
- [2] 谢开贵,李春燕,周家启. 基于神经网络的负荷组合预测模型研究[J]. 中国机电工程学报,2002,22(7):85-89.
- [3] 刘晨晖. 电力系统负荷预报理论与方法[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1986.
- [4] 罗森波,纪忠萍,马煜华,等. 2002—2004 年广东电力负荷的变化特征及预测[J]. 热带气象学报,2007,23(2):153-161.
- [5] 浩宇,管靓,张曦,等. 西安市日最大电力负荷率与气象因子相关关系分析预报模型的建立[J]. 气象科学,2020,40(3):421-426.
- [6] 李琛,郭文利,吴进,等. 北京市夏季日最大电力负荷与气象因子的关系[J]. 气象与环境学报,2018,34(3):99-105.
- [7] 周德强. 基于最小二乘法的 GM(1,1)模型及在负荷预测中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(1):107-110.
- [8] 蔡新玲,贺皓,李建科,等. 陕西省日用电量、最大负荷的气象预报模型[J]. 陕西气象,2004(3):40-42.
- [9] 康重庆,夏清,刘梅. 应用于负荷预测中的回归分析的特殊问题[J]. 电力系统自动化,1998,22(10):

- 38-39.
- [10] 李伟,袁亚南,牛东晓. 基于缓冲算子和时间响应函数优化灰色模型的中长期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(10):59-60.
- [11] 邹正达,孙雅明,张智晨. 基于粗糙集和决策树的自适应神经网络短期负荷预测方法[J]. 电力自动化技术,2005,29(10):30-34.
- [12] 赵洋,王瀚墨,康丽,等. 基于时间卷积网络的短期电力负荷预测[J]. 电工技术学报,2022,37(5):1242-1251.
- [13] 桂占吉. 生物动力学模型与计算机仿真[M]. 北京:科学出版社,2005:3-21.
- [14] 徐士良. 数值分析与算法[M]. 北京:机械工业出版社,2003:192-206.
- [15] 徐士良. C 常用算法程序集[M]. 北京:清华大学出版社,1996:265-274.
- [16] 刘春,张春辉,郭萨萨. 基于能量模型的水稻生长模型[J]. 应用气象学报,2013,24(2):240-247.
- [17] HAYKI Simon. 神经网络原理[M]. 叶世伟,史忠植,译. 北京:机械工业出版社,2004:33-175.