

考虑温度模糊化的多层长短时记忆神经网络短期负荷预测

郑瑞骁, 张 姝, 肖先勇, 汪 颖

(四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:智能电表的普及为短期负荷预测提供了海量数据,使得负荷精细化预测成为可能,而温度是影响夏季负荷的重要因素。提出一种考虑温度模糊化的多层长短时记忆神经网络(ML-LSTM)短期负荷预测方法。利用隶属度函数将预测时刻的温度和当日的平均温度进行模糊化处理,减小夏季温度波动性对负荷预测的影响;建立含3层隐藏层的长短时记忆神经网络(LSTM)预测网络,并利用适应性矩估计(Adam)优化算法提高LSTM梯度参数的自适应性学习能力。利用西南某地区2018年6月至8月的实测温度和负荷数据进行验证,负荷预测结果表明,ML-LSTM模型比BP神经网络和支持向量机的负荷预测精度更高,且温度的模糊化处理提高了模型的泛化性。

关键词:短期负荷预测;多层长短时记忆神经网络;温度模糊化;Adam算法

中图分类号:TM 715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202008016

0 引言

随着智能电网的发展,以智能电表为基础的高级量测体系(AMI)在实际工程中已基本实现,智能电表可以获得以15 min为间隔的每天96组数据,为提高短期负荷预测精度提供了更可靠的依据,但实际负荷除了可从历史负荷中提取变化规律外,其在很大程度上还受所处温度条件影响,一年中,两者在夏季联系最紧密,且呈正相关关系。夏季温度多变,研究考虑温度影响的短期负荷预测方法,具有重要的理论价值和实际意义^[1]。

现有基于时间序列的最小二乘回归法^[2]、回归分析法^[3]等,因非线性处理能力有限,已逐步被机器学习算法取代。虽然现有的机器学习算法,例如BP神经网络法^[4]、小波核回归^[5]、支持向量机(SVM)法^[6]、极限梯度提升(XGBoost)^[7],能较好地解决负荷非线性问题,但其对负荷时序性特点刻画不足。有学者进一步研究以卷积神经网络(CNN)法和循环神经网络(RNN)法等为代表的深度学习方法在负荷预测中的应用^[8-10]。长短时记忆神经网络(LSTM)法^[11]在RNN模型中引入遗忘门、输入门和输出门,可更好地解决数据关联性问题。文献[12]利用主成分分析(PCA)将关联因子进行降维并建立LSTM预测模型,降低了数据冗余,但PCA降维后的输入向量物理意义不明确,且文中未对LSTM模型进行详细描述。文献[13]提出一种CNN-LSTM组合预测模型,该模型可克服各类因素的影响,但对影响因素与负

荷间关联性考虑不足,从而影响预测结果的准确性。

在夏季,负荷对温度较为敏感,尤其是温度的升高会导致空调等冷负荷在一段时间内产生波动,所以应当将温度作为负荷预测的重要变量之一^[14]。文献[15]考虑温度对负荷影响,但只将预测时刻的温度和未来一天的预测温度作为输入,未能建立预测时刻前后温度和负荷的联系;同时,由于在一年中夏季温度波动最为明显,直接将精确温度作为输入会降低模型对夏季温度变化的适应能力。文献[16]使用模糊理论将温度模糊化后输入SVM模型进行中期负荷预测,结果表明模糊温度对预测精度有一定程度提高,但SVM模型不能处理前后时间负荷数据的联系,同时该模型输入不适用于短期负荷预测。

针对上述问题,本文提出一种考虑温度模糊化的多层长短时记忆神经网络ML-LSTM(Multi-Layer LSTM)的短期负荷预测方法。首先,在日期属性的基础上,考虑将预测时刻温度和预测当日平均温度通过低、中、高温隶属度函数进行模糊化处理作为预测模型的输入;其次,建立包含3层隐藏层的LSTM预测网络,并且利用适应性矩估计(Adam)优化算法解决梯度随机下降的问题;最后,结合某西南地区2018年6月至8月的实测负荷和温度数据进行实验验证,结果表明,含多层隐藏层LSTM的负荷预测精度高于BP神经网络和SVM,同时本文对温度模糊化的处理可有效提高预测模型对温度的泛化能力。

1 LSTM及Adam算法

1.1 LSTM

LSTM是一种非常流行的RNN的变体,针对RNN由于梯度消失或爆炸的原因不能记忆长期数据的问题,其加入不同门的控制,使长时记忆和短时记忆相结合^[17]。LSTM循环结构中一个自下而上的

收稿日期:2020-01-13;修回日期:2020-06-17

基金项目:四川大学专职博士后研发基金资助项目(2019SCU12003)

Project supported by the Full-time Postdoc Research and Development Fund of Sichuan University(2019SCU12003)

隐藏层模型图见附录中图A1。

遗忘门可对信息进行选择遗忘,相关公式为:

$$f_t = \sigma(W_f[Y_{t-1}, X_t] + b_f) \quad (1)$$

其中, f_t 为遗忘门输出; $\sigma(\cdot)$ 为 sigmoid 函数; W_f 为矩阵权重; Y_{t-1} 为 $t-1$ 时刻的输出; X_t 为 t 时刻的输入; b_f 为偏置项。

输入门分为2个部分:先通过 sigmoid 层更新有用信息;再通过 tanh 层创建新的候选值向量。公式为:

$$u_t = \sigma(W_u[Y_{t-1}, X_t] + b_u) \quad (2)$$

$$h_t = \tanh(W_h[Y_{t-1}, X_t] + b_h) \quad (3)$$

其中, u_t 为输入门状态; h_t 为新增状态; W_u 和 W_h 为矩阵权重; b_u 和 b_h 为偏置项。

t 时刻的隐藏层状态 C_t 通过添加遗忘门和输入门所控制的信息部分来确定:长时间信息由 f_t 控制;短时间信息由 u_t 和 h_t 控制。公式如下:

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + u_t \cdot h_t \quad (4)$$

输出门也分为2个部分:先通过 sigmoid 层对要输出的信息进行过滤,再将 C_t 通过 tanh 层,使状态范围为 $[-1, 1]$,最后将两者相乘得到期望输出。公式为:

$$o_t = \sigma(W_o[Y_{t-1}, X_t] + b_o) \quad (5)$$

$$Y_t = o_t \cdot \tanh C_t \quad (6)$$

其中, W_o 为矩阵权重; b_o 为偏置项。

1.2 Adam 算法

Adam 算法可替代传统的梯度随机下降算法,且其可通过训练数据来更新 LSTM 的权重参数^[18]。

传统的梯度随机下降保持单一的学习率 α 对参数进行更新,而 Adam 算法会根据损失函数计算梯度的一阶矩估计和二阶矩估计来为不同参数提供独立的自适应性学习率。

Adam 算法结合了动量算法和均方根反向传播 RMSProp(Root Mean Square Prop)算法的优点。动量算法通过计算权重 W 以及偏置 b 梯度的移动指数加权平均解决迷你样本-随机梯度下降(mini-batch SGD)算法更新幅度大的问题;RMSProp 算法对权重和偏置梯度使用微分平方加权平均数,进一步加快收敛的过程。在第 t 轮迭代中的公式详见附录中式(A1)~(A6)。

2 基于模糊温度的负荷预测模型

2.1 负荷数据分析

选取西南某地区 2018 年 6 月至 8 月的真实负荷数据,将其按周一至周日 7 d 为 1 个周期,从 6 月 11 日开始至 8 月 5 日结束共 8 个周期绘图,见附录中图 A2。

选取的负荷数据是以 15 min 为一个采样点,一周共 672 个采样点。由图 A2 可见,一周负荷曲线呈现 7 个波峰和 7 个波谷,且波峰、波谷形状大致相同,这体现了负荷曲线具有日周期性的特征。各周间呈

现大致重复性,这体现了负荷曲线的周周期性。虽然负荷曲线存在日周期性,但每天负荷量有一定波动,且没有明显规律;同时对图 A2(e)、(f)中周周期性不明显的情况,若单纯用前一天或前一周的负荷数据对下一日进行预测,则不能得到理想的精度。

截取 7 月 17 日至 8 月 9 日的负荷和温度数据进行归一化处理,对比图如图 1 所示。

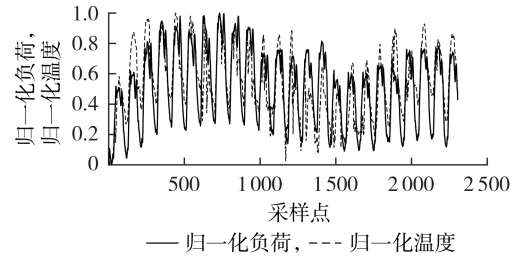


图1 负荷与温度归一化对比图

Fig.1 Comparison of normalized load and temperature

分析图 1 可知:负荷与温度的波峰与波谷均出现在相同时刻,夏季负荷与温度呈正相关关系。因此为了提高短期负荷预测精度,需抓住夏季温度对负荷的影响,输入不仅要根据日周期性和周周期性精确到每个负荷点,同时要考虑外界因素,如温度、日期属性等,这样才能提高训练模型精度。

2.2 温度的模糊化处理

在温度波动较大的夏季,为了提高预测精度和模型的泛化性,应将温度进行模糊化处理:根据所选温度数据集构造“等腰三角形”隶属度函数,将每日平均温度 T_{avg} 和 t 时刻温度 T_t 作为模糊变量的输入,将温度模糊划分为低温日(20~26 °C)、中温日(23~32 °C)和高温日(29~35 °C)。具体公式为:

$$m_1 = \begin{cases} 1 & T < A \\ \frac{B-T}{B-A} & A \leq T \leq B \\ 0 & T > B \end{cases} \quad (7)$$

$$m_2 = \begin{cases} 0 & T < C, T > D \\ \frac{T-C}{(C+D)/2-C} & C \leq T \leq (C+D)/2 \\ \frac{D-T}{D-(C+D)/2} & (C+D)/2 < T \leq D \end{cases} \quad (8)$$

$$m_3 = \begin{cases} 1 & T > F \\ \frac{T-E}{F-E} & E \leq T \leq F \\ 0 & T < E \end{cases} \quad (9)$$

其中, m_1 — m_3 分别为低温、中温、高温的隶属度函数; T 为温度; A — F 为温度参数,根据前文低温、中温、高温的划分,取 $A=20$ °C、 $B=26$ °C、 $C=23$ °C、 $D=32$ °C、 $E=29$ °C、 $F=35$ °C。

隶属度函数的示意图如附录中图 A3 所示,图中阴影区域表示模糊化区域。模糊化后温度属性为

$[\bar{m}_1, \bar{m}_2, \bar{m}_3, m'_1, m'_2, m'_3]$ 。其中 $\bar{m}_1 - \bar{m}_3$ 分别为将 T_{avg} 代入式(7)~(9)模糊化后的值; $m'_1 - m'_3$ 分别为将 T_t 代入式(7)~(9)模糊化后的值。

2.3 ML-LSTM 预测模型

基于 2.1 节对负荷数据的分析可看出,短期负荷预测对负荷时序性有一定依赖,为了使前一周的短时跨度负荷数据和前一周的长时跨度负荷数据在输入中都有权重体现,本文选择 LSTM 作为预测模型。

由于含多层隐藏层的 LSTM 能提高预测精度^[19],因此本文设置 3 层隐藏层,后文算例将对此进行分析验证,其具体结构见附录中图 A4。

模型的输入为 15 个节点,分为以下 3 个部分。

(1)模糊温度。将 t 时刻温度 T_t 与当日平均温度 T_{avg} 分别代入低温、中温、高温隶属度函数模糊化后得到 $[\bar{m}_1, \bar{m}_2, \bar{m}_3, m'_1, m'_2, m'_3]$,共 6 个节点。

(2)相关负荷。考虑负荷数据本身,假设预测 t 时刻的负荷为 L_t 。由于负荷曲线具有连续性、不突变性,因此 t 时刻前后一个时刻的负荷均和 L_t 具有较强相关性;同时由于负荷曲线具有日周期性和周周期性的特性,还应考虑前一日和前一周 $t-1$ 、 t 、 $t+1$ 时刻的负荷。因此负荷相关的输入为 $[L_{t-2}, L_{t-1}, L_{t-1}^{\text{day}-1}, L_t^{\text{day}-1}, L_{t+1}^{\text{day}-1}, L_{t-1}^{\text{day}-7}, L_t^{\text{day}-7}, L_{t+1}^{\text{day}-7}]$ 。其中, L_{t-2} 、 L_{t-1} 分别为当日 $t-2$ 时刻和 $t-1$ 时刻负荷; $L_{t-1}^{\text{day}-1}$ 、 $L_t^{\text{day}-1}$ 、 $L_{t+1}^{\text{day}-1}$ 分别为前一日 $t-1$ 时刻、 t 时刻和 $t+1$ 时刻负荷; $L_{t-1}^{\text{day}-7}$ 、 $L_t^{\text{day}-7}$ 、 $L_{t+1}^{\text{day}-7}$ 分别为前一周 $t-1$ 时刻、 t 时刻和 $t+1$ 时刻负荷。共 8 个节点。

(3)日期属性。除温度外,本文还考虑工作日和休息日的日期属性 $D_{w/t}$,工作日其值为 1,休息日为 0,共 1 个节点。

模型和输出方面,基于 1.1 节中的 LSTM 结构,从下至上依次是独立的隐藏层,每个隐藏层都包含附录中图 A1 所示结构,共 3 层,然后通过全连接层输出 t 时刻的预测负荷。

2.4 算法流程

将历史数据集按训练集 80% 和测试集 20% 的比例进行划分,先将负荷进行归一化处理,将真实负荷进行模糊化处理,构造训练数据集,再将其输入预测模型中进行训练,最后将训练好的模型进行负荷预测,预测流程如图 2 所示。

2.5 评价指标

本文选用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和预测精度(FA)作为实验的评判指标,具体公式见附录中式(A7)~(A9)。

3 算例分析

由于本文着重考虑温度对负荷的敏感性,为验证所提方法的可行性和准确性,本文实验数据选取 2018 年西南某地区夏季 6 月至 8 月的真实负荷数

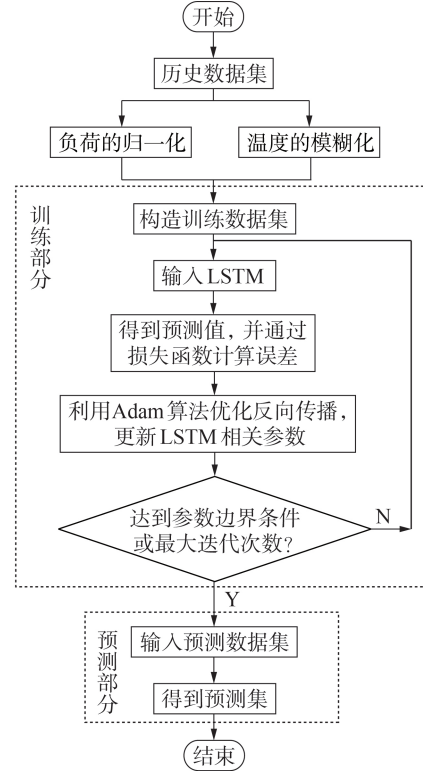


图 2 预测流程图

Fig.2 Forecasting flowchart

据集和温度数据集。本文所有算法与模型均在 MATLAB R2018b 软件上实现,电脑硬件配置为:CPU 为 Intel Core i5-7500,最高频率为 3.4 GHz;内存为 8 GB;显卡为 Intel HD Graphics 630。

3.1 数据预处理

(1)归一化:由于输入的负荷量级较大,且和温度量级不同,直接输入会导致运算时间过长或激活函数过饱和,因此将负荷按式(10)归一化到 $[0, 1]$ 区间。经过模糊化处理的温度已经划归到 $[0, 1]$ 区间,因此不再进行归一化处理。

$$Y = \frac{(Y_{\max} - Y_{\min})(X - X_{\min})}{X_{\max} - X_{\min}} + Y_{\min} \quad (10)$$

其中, $Y_{\max}$ 和 $Y_{\min}$ 分别为 1 和 0; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为数据中最大和最小值; X 、 Y 分别为归一化前、后负荷值。

(2)数据集划分:数据集包含从 6 月 1 日至 8 月 31 日共 3 个月 92 d 的 8 832 个采样点。按照训练集 80%、测试集 20% 的比例进行划分,考虑到温度变化趋势不定,采用随机划分的方法以确保算法的准确性和所提方法的可行性。

3.2 预测模型参数选择

为验证 2.3 节中 ML-LSTM 模型的合理性,使用变量控制的方法分别对 LSTM 的隐藏层层数和隐藏层神经元个数进行分析,采用 MATLAB 深度学习训练器中的默认指标 RMSE,该指标反映预测值与真实值之间偏差,对异常值较为敏感,能有效体现单个

模型间仿真结果差异。分析结果如表1所示。

表1 不同隐藏层层数LSTM的预测误差

Table 1 Forecasting errors of LSTM with different hidden layers

隐藏层层数	最大迭代次数	RMSE / %	运算时间 / s
1	250	4.86	97
2	250	4.10	186
3	250	3.07	266
4	250	2.98	345
5	250	4.67	423
6	250	4.98	513

由表1可知,在保证其余变量相同的情况下,随着LSTM隐藏层层数的增加, RMSE开始有所降低,但在LSTM隐藏层层数增至5层时其值升至4.67%,出现过拟合现象。由于4层隐藏层时RMSE为2.98%,相较于3层隐藏层时的3.07%减少了不到0.1%,而运算时长却增长了79 s,因此综合考虑本文采用3层隐藏层的LSTM效果最佳。

表2为3层隐藏层时不同神经元个数LSTM的预测误差。由表中可知,在隐藏层为3层、每层神经元个数为40时, RMSE为3.10%,计算时长为281 s,为综合最佳;继续增加神经元个数后性能提升不明显,但计算时长明显增长。因此,最后模型达到输入层15维、隐藏层40×3维、输出层1维的框架结构。

表2 3层隐藏层时不同神经元个数LSTM的预测误差

Table 2 Forecasting errors of LSTM with different numbers of neuron and three hidden layers

神经元个数	最大迭代次数	RMSE / %	运算时间 / s
20	250	5.06	217
25	250	4.67	227
30	250	4.08	240
35	250	3.61	265
40	250	3.10	281
45	250	3.17	299
50	250	3.06	357

3.3 不同负荷预测模型对比

本节建立附录中图A3所示的ML-LSTM预测模型,并与BP神经网络以及SVM模型进行对比以验证模型的有效性。3个模型的参数设置如下。

(1)BP神经网络模型:BP隐藏层神经元个数设为50,隐藏层激活函数为sigmoid,输出层的激活函数为purelin,输入为2.3节的15维特征向量。

(2)SVM模型:SVM核函数为径向基函数(RBF),核参数设为0.1,惩罚因子设为10,输入特征向量与BP神经网络相同。

(3)ML-LSTM模型:利用MATLAB中的lstmLayer函数构造LSTM模型,隐藏层层数设为3,隐藏层神经元个数设为40,优化器为Adam,选取RMSE作为LSTM的损失函数,最大迭代次数设为250,输入特征

向量与上述2个模型相同。ML-LSTM使用MATLAB中深度学习的训练器进行训练。

最终对8月25日至8月31日的负荷数据进行预测,因预测数据较多,图3仅给出31日一天的预测曲线图,预测精度对比见附录中图A5,详细预测数据见附录中表A1。评价指标采用2.5节所述的RMSE、 R^2 以及FA,其中RMSE侧重单点之间误差大小, R^2 侧重曲线回归的拟合程度,FA则反映整体误差均值。表3为不同预测模型性能对比,表中FA平均值表示一天中96个预测时刻FA的平均值。

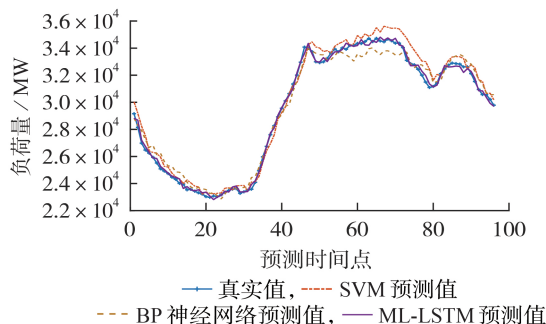


图3 8月31日不同模型预测结果对比

Fig.3 Comparison of forecasting results among different models on August 31st

表3 不同预测模型性能对比

Table 3 Comparison of performance among different forecasting models

预测日期	预测模型	RMSE / %	R^2	FA 平均值 / %
8月25日	SVM	4.83	0.978	98.25
	BP神经网络	5.44	0.970	97.70
	ML-LSTM	3.12	0.995	99.42
8月26日	SVM	4.37	0.984	98.88
	BP神经网络	4.80	0.979	98.34
	ML-LSTM	3.08	0.995	99.46
8月27日	SVM	4.79	0.980	98.48
	BP神经网络	4.82	0.979	98.29
	ML-LSTM	3.01	0.996	99.57
8月28日	SVM	4.92	0.979	98.32
	BP神经网络	5.27	0.971	97.97
	ML-LSTM	3.05	0.995	99.48
8月29日	SVM	4.28	0.985	98.89
	BP神经网络	5.59	0.968	97.69
	ML-LSTM	2.99	0.995	99.53
8月30日	SVM	3.78	0.990	99.13
	BP神经网络	4.52	0.981	98.55
	ML-LSTM	3.02	0.995	99.54
8月31日	SVM	5.01	0.975	98.16
	BP神经网络	4.55	0.979	98.30
	ML-LSTM	3.04	0.995	99.37

从图3可看出,3个预测模型在有模糊温度输入的情况下均得到较理想的结果。在一周的预测中,8月25日与26日为休息日,8月27日至31日为工作日。由表3可见:SVM存在一定预测波动,最高精度为8月30日的99.13%,最低为8月31日的98.16%;

BP 神经网络在 3 个模型中精度最低,平均精度为 98.13%;相比于 BP 神经网络和 SVM,ML-LSTM 在工作日与休息日的预测均表现稳定,且精度最高,突出了考虑 Adam 优化的 ML-LSTM 模型的预测优势,其结果和真实负荷曲线最为贴合。

3.4 不同输入特征向量对比

本节旨在测试不同输入特征向量对负荷预测精度的影响,选取 3.3 节中精度最高的 ML-LSTM 作为预测模型,模型参数与 3.3 节相同。设置 3 组输入进行对比,以 8 月 31 日预测结果进行分析:

(1) 只输入负荷相关和日期属性特征向量,共 9 维;

(2) 在(1)的基础上添加精确温度的特征向量输入,共 12 维;

(3) 在(1)的基础上添加模糊温度的特征向量输入,共 15 维。

图 4 为不同输入特征向量的预测结果对比,其预测精度对比见附录中图 A6。表 4 为不同测试结果的评价指标。

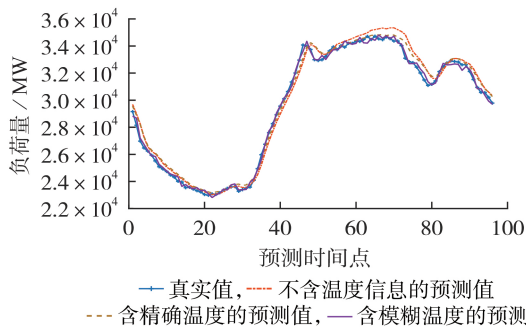


图 4 8 月 31 日不同输入特征向量预测结果对比

Fig.4 Comparison of forecasting results among different input eigenvectors on August 31st

表 4 不同输入特征向量下预测模型性能对比

Table 4 Comparison of forecasting model performance among different input eigenvectors

ML-LSTM 预测模型	RMSE / %	R^2	FA 平均值 / %
不含温度信息	4.92	0.973	98.63
含精确温度	4.27	0.982	98.78
含模糊温度	2.99	0.996	99.48

由图 A6 和表 4 可知,不含温度信息的 ML-LSTM 负荷预测精度为 98.63%,含精确温度时为 98.78%,加入模糊温度的预测结果最好,其精度达到 99.48%。因此,温度信息的加入可以提升负荷预测精度,同时对温度的模糊化处理能够增加模型对温度变化的适应性,进一步提高负荷预测精度,使预测模型具有更好的泛化性。

4 结论

本文针对夏季负荷对温度敏感性较高的特点,

提出一种考虑温度模糊化的 ML-LSTM 短期负荷预测方法。该方法将预测时刻温度和当日平均温度通过低温、中温、高温隶属度函数模糊化处理,并与负荷日期属性、历史负荷数据输入有 3 层隐藏层的 LSTM。利用 Adam 算法优化梯度参数。通过西南某地区 2018 年 6 月至 8 月实测负荷数据测试,得出以下结论。

(1) 基于 Adam 优化的 ML-LSTM 能够计及负荷时序性特性对短期负荷进行精确预测。相比于 BP 神经网络、SVM,ML-LSTM 的负荷预测精度更高。

(2) 利用隶属度函数将精确温度模糊化处理到 $[0,1]$ 区间作为预测模型特征向量输入,能够有效降低夏季温度多变和不确定带来的随机性影响,提高短期负荷预测模型对温度的泛化性。

后续笔者将在以下方面进行进一步研究:

(1) 挖掘负荷大数据特性,体现负荷数据本身的价值,更好地从负荷曲线中分析短期负荷预测输入;

(2) 为使该方法能在电网调度中得到实际应用,重点研究 LSTM 的自适应训练,从而实现实时滚动窗口的预测。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 康重庆,夏清,张伯明. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨[J]. 电力系统自动化,2004,28(17):1-11.
KANG Chongqing, XIA Qing, ZHANG Boming. Review of power system load forecasting and its development[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 1-11.
- [2] 王雁凌,吴梦凯. 经济新常态下基于偏最小二乘回归的中长期负荷预测模型[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):133-139.
WANG Yanling, WU Mengkai. Medium and long term load forecasting model based on partial least-square regression under new normal economy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 133-139.
- [3] MA M. Isolated area load forecasting using linear regression analysis: practical approach[J]. Energy and Power Engineering, 2011, 3(4): 547-550.
- [4] 张平,潘学萍,薛文超. 基于小波分解模糊灰色聚类 and BP 神经网络的短期负荷预测[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):121-125,141.
ZHANG Ping, PAN Xueping, XUE Wenchao. Short-term load forecasting based on wavelet decomposition, fuzzy gray correlation clustering and BP neural network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 121-125, 141.
- [5] 祖向荣,田敏,白焰. 基于模糊聚类与函数小波核回归的短期负荷预测方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):134-140,165.
ZU Xiangrong, TIAN Min, BAI Yan. Short-term load forecasting based on fuzzy clustering and functional wavelet-kernel regression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 134-140, 165.
- [6] 王保义,王冬阳,张少敏. 基于 Spark 和 IPPSO_LSSVM 的短期分布式电力负荷预测算法[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):117-122.
WANG Baoyi, WANG Dongyang, ZHANG Shaomin. Distributed short-term load forecasting algorithm based on Spark and IPPSO_LSSVM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,

- 36(1):117-122.
- [7] 刘波,秦川,鞠平,等. 基于XGBoost与Stacking模型融合的短期母线负荷预测[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):147-153.
LIU Bo, QIN Chuan, JU Ping, et al. Short-term bus load forecasting based on XGBoost and Stacking model fusion[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 147-153.
- [8] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436-444.
- [9] 姜亚东. 卷积神经网络的研究与应用[D]. 成都:电子科技大学, 2018.
JIANG Yadong. Research and application of convolution neural network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [10] SHI H, XU M H, LI R. Deep learning for household load forecasting: a novel pooling deep RNN[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5271-5280.
- [11] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [12] 谢明磊. 基于LSTM网络的住宅负荷短期预测[J]. 广东电力, 2019, 32(6): 108-114.
XIE Minglei. Short-term residence load forecast based on LSTM network[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(6): 108-114.
- [13] 陆继翔, 张琪培, 杨志宏, 等. 基于CNN-LSTM混合神经网络模型的短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 131-137.
LU Jixiang, ZHANG Qipei, YANG Zhihong, et al. Short-term load forecasting method based on CNN-LSTM hybrid neural network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 131-137.
- [14] 蔡舒平, 张保会, 汤大海, 等. 短期负荷预测中气象因素处理的费歇信息方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 141-146.
CAI Shuping, ZHANG Baohui, TANG Dahai, et al. Fisher information method for processing weather factors in short-term load forecasting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 141-146.
- [15] 史静, 李璇, 李冰洁, 等. 基于长短期记忆神经网络的配电网负荷预测方法研究[J]. 供用电, 2019, 36(7): 71-77, 90.
SHI Jing, LI Hu, LI Bingjie, et al. Distribution network load forecasting based on LSTM neural network[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(7): 71-77, 90.
- [16] 翟永杰, 刘林, 王朋. 基于ADE-SVM和模糊理论的电力系统中期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 110-115, 120.
ZHAI Yongjie, LIU Lin, WANG Peng. Mid-term load forecasting based on ADE-SVM and fuzzy theory[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 110-115, 120.
- [17] WANG Y, GAN D H, SUN M Y, et al. Probabilistic individual load forecasting using pinball loss guided LSTM[J]. Applied Energy, 2019, 235: 10-20.
- [18] KONG W C, DONG Z Y, JIA Y W, et al. Short-term residential load forecasting based on LSTM recurrent neural network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 841-851.
- [19] 李鹏, 何帅, 韩鹏飞, 等. 基于长短期记忆的实时电价条件下智能电网短期负荷预测[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 4045-4052.
LI Peng, HE Shuai, HAN Pengfei, et al. Short-term load forecasting of smart grid based on long-short-term memory recurrent neural networks in condition of real-time electricity price[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 4045-4052.

作者简介:



郑瑞骁

郑瑞骁(1995—),男,四川宜宾人,硕士,主要研究方向为电力负荷分析及负荷预测(E-mail: zrx_1025@163.com);

张 姝(1988—),女,四川自贡人,助理研究员,博士,通信作者,主要研究方向为配电网保护与故障诊断、电力负荷预测(E-mail: ZS20061621@163.com);

肖先勇(1968—),男,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电能质量与优质供电、超导电力及其应用、智能电网等;

汪 颖(1981—),女,重庆人,副教授,博士,主要研究方向为电能质量与优质供电。

(编辑 王锦秀)

Short-term load forecasting of multi-layer long short-term memory neural network considering temperature fuzziness

ZHENG Ruixiao, ZHANG Shu, XIAO Xianyong, WANG Ying

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The popularity of smart meters provides a large amount of data for short-term load forecasting, which makes detailed load forecasting possible, and temperature is an important factor that affecting summer loads. A short-term load forecasting method of ML-LSTM(Multi-Layer Long Short-Term Memory neural network) considering temperature fuzziness is proposed. The membership function is used to blur the temperature at the forecasting time and the average temperature of the day, which reduces the influence of summer temperature fluctuation on load forecasting. A LSTM(Long Short-Term Memory) forecasting network with three hidden layers is built, and Adam(Adaptive moment estimation) optimization algorithm is used to improve the adaptive learning ability of LSTM gradient parameters. The actual-measured temperature and load data from June to August of 2018 in a certain area of southwest region are taken for verification, and the load forecasting results show that the load forecasting accuracy of ML-LSTM model is higher than that of BP neural network and support vector machine, and the fuzziness treatment of temperature improves the generalization of the model.

Key words: short-term load forecasting; ML-LSTM; temperature fuzziness; Adam algorithm

附录：

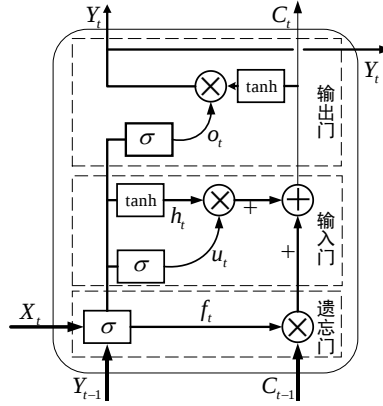


图 A1 LSTM 隐藏层结构

Fig.A1 Structure of LSTM hidden layer

$$M_{dw}^c = \frac{M_{dw}}{1 - \beta_1^t} \quad (A1)$$

$$M_{db}^c = \frac{M_{db}}{1 - \beta_1^t} \quad (A2)$$

$$R_{dw}^c = \frac{R_{dw}}{1 - \beta_2^t} \quad (A3)$$

$$R_{db}^c = \frac{R_{db}}{1 - \beta_2^t} \quad (A4)$$

$$W = W - \alpha \frac{M_{dw}^c}{\sqrt{R_{dw}^c} + \varepsilon} \quad (A5)$$

$$b = b - \alpha \frac{M_{db}^c}{\sqrt{R_{db}^c} + \varepsilon} \quad (A6)$$

其中， M_{dw} 、 M_{db} 为 Momentum 算法计算的参数； R_{dw} 、 R_{db} 为 RMSProp 算法计算的参数； M_{dw}^c 、 M_{db}^c 、 R_{dw}^c 、

R_{db}^c 为 Adam 做出的偏差修正； β_1^t 为 Momentum 算法里的梯度指数，一般取值为 0.9； β_2^t 为 RMSProp 算法里的梯度指数，一般取值为 0.999； ε 为平滑项，一般取值为 10^{-8} 。

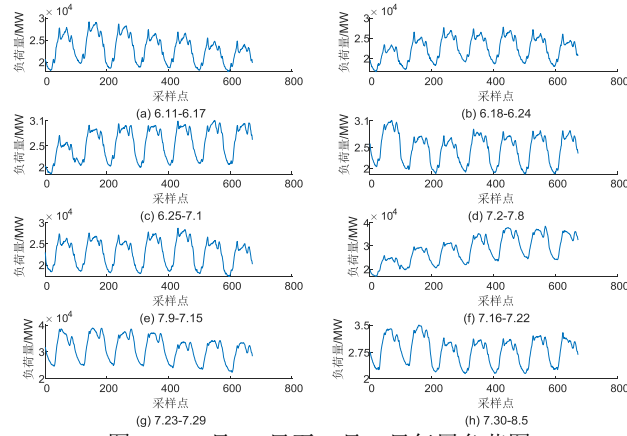


图 A2 6月11日至8月5日每周负荷图
Fig.A2 Weekly load chart from Jun. 11 to Aug. 5

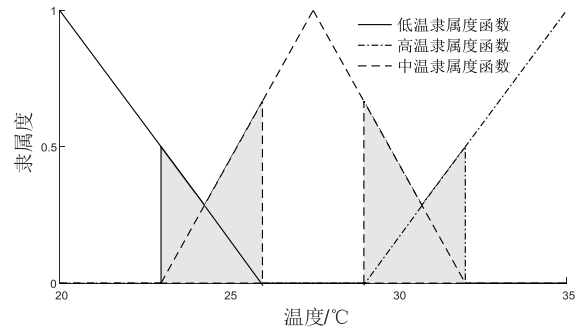


图 A3 隶属度函数示意图
Fig.A3 Schematic diagram of membership function

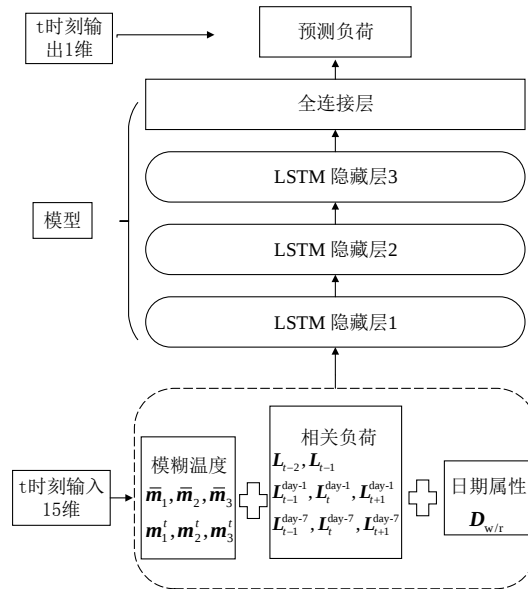


图 A4 ML-LSTM 结构
Fig.A4 Structure of ML-LSTM

$$I_{R^2} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Y_{\text{real},t} - Y_{\text{pred},t})^2}{\sum_{t=1}^n (Y_{\text{real},t} - Y_{\text{avg}})^2} \quad (\text{A7})$$

$$I_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Y_{\text{real},t} - Y_{\text{pred},t})^2} \quad (\text{A8})$$

$$I_{\text{FAr}} = (1 - \frac{|Y_{\text{real},t} - Y_{\text{pred},t}|}{Y_{\text{real},t}}) \times 100\% \quad (\text{A9})$$

其中， n 为预测时间总量； $Y_{\text{real},t}$ 和 $Y_{\text{pred},t}$ 为 t 时刻负荷的真实值和预测值； Y_{avg} 为负荷的平均值。

表 A1 实验预测数据
Table A1 Experimental forecasting data

测量点	真实值/MW	算例 1						算例 2			
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
1	24854.79	25965.43	4.47	25962.95	4.46	25090.03	0.95	25812.47	3.85	25741.23	3.57
2	24586.99	25473.32	3.60	25693.26	4.50	24178.24	1.66	25290.12	2.86	25121.93	2.18
3	24301.05	25166.00	3.56	25345.45	4.30	24043.97	1.06	24943.86	2.65	24698.80	1.64
4	23816.57	24 898.56	4.54	24926.70	4.66	23837.82	0.09	24676.57	3.61	24424.47	2.55
5	23611.42	24492.44	3.73	24733.77	4.75	23390.90	0.93	24268.72	2.78	23997.87	1.64
6	23350.09	24168.79	3.51	24546.67	5.12	23168.33	0.78	23906.92	2.38	23635.05	1.22
7	23169.91	23895.01	3.13	24277.33	4.78	22899.43	1.17	23613.18	1.91	23351.77	0.78
8	22988.57	23560.87	2.49	23835.29	3.68	22660.33	1.43	23311.98	1.41	23064.14	0.33
9	22706.11	23368.67	2.92	23454.39	3.30	22540.23	0.73	23103.19	1.75	22922.60	0.95
10	22542.19	23239.07	3.09	23335.79	3.52	22528.84	0.06	22875.30	1.48	22763.15	0.98
11	22358.00	23050.35	3.10	23154.19	3.56	22394.93	0.17	22649.95	1.31	22553.41	0.87
12	22206.97	22877.32	3.02	23009.61	3.61	22206.06	0	22477.86	1.22	22395.77	0.85
13	22059.57	22694.60	2.88	22848.12	3.57	22062.32	0.01	22298.18	1.08	22220.59	0.73
14	21987.02	22544.89	2.54	22795.15	3.68	21869.42	0.53	22139.40	0.69	22068.81	0.37
15	21779.22	22471.53	3.18	22720.55	4.32	21915.79	0.63	22050.96	1.25	22020.81	1.11
16	21776.61	22310.37	2.45	22520.90	3.42	21734.98	0.19	21916.72	0.64	21888.52	0.51
17	21909.24	22256.54	1.59	22480.10	2.61	21738.64	0.78	21829.28	0.36	21804.35	0.48
18	21616.73	22277.23	3.06	22387.94	3.57	21912.74	1.37	21879.65	1.22	21881.60	1.23
19	21453.14	22068.89	2.87	22140.76	3.21	21514.22	0.28	21760.46	1.43	21737.58	1.33
20	21508.93	21944.66	2.03	22087.74	2.69	21384.52	0.58	21588.47	0.37	21565.92	0.26
21	21665.50	22019.92	1.64	22193.28	2.44	21640.53	0.12	21577.35	0.41	21585.53	0.37
22	21781.83	22076.97	1.36	22031.81	1.15	21854.00	0.33	21664.40	0.54	21677.66	0.48
23	21834.95	22115.25	1.28	21908.29	0.34	21892.41	0.26	21799.89	0.16	21819.29	0.07
24	21796.45	22151.45	1.63	21855.13	0.27	21896.08	0.46	21854.68	0.27	21866.49	0.32
25	22031.23	22265.61	1.06	22033.67	0.01	22016.05	0.07	21909.82	0.55	21928.89	0.46
26	22519.38	22484.52	0.15	22176.45	1.52	22440.70	0.35	22093.17	1.89	22132.00	1.72
27	22832.49	22633.37	0.87	22043.41	3.46	22728.79	0.45	22392.07	1.93	22405.26	1.87
28	23006.86	22721.47	1.24	22100.19	3.94	22861.68	0.63	22643.41	1.58	22650.04	1.55

续表

测量点	真实值/MW	算例 1						算例 2			
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
29	22425.73	22841.41	1.85	22367.98	0.26	22950.65	2.34	22850.14	1.89	22907.19	2.15
30	22581.63	22644.95	0.28	22257.17	1.44	22430.98	0.67	22695.24	0.50	22761.18	0.80
31	23071.38	22761.88	1.34	22184.36	3.84	22788.25	1.23	22631.43	1.91	22724.84	1.50
32	23211.36	23314.15	0.44	23000.38	0.91	23503.27	1.26	23042.63	0.73	23186.64	0.11
33	23865.64	23659.62	0.86	23346.64	2.17	23746.31	0.50	23491.18	1.57	23661.36	0.86
34	24871.25	24373.41	2.00	24224.93	2.60	24514.66	1.43	24001.76	3.50	24194.34	2.72
35	25606.23	25259.44	1.35	25364.20	0.95	25813.48	0.81	24706.27	3.51	24878.63	2.84
36	26501.77	25864.80	2.40	25757.75	2.81	26202.47	1.13	25471.61	3.89	25596.88	3.41
37	26851.38	26690.71	0.60	26537.46	1.17	27193.21	1.27	26253.69	2.23	26419.06	1.61
38	27288.48	27089.14	0.73	26965.10	1.19	27428.53	0.51	26782.69	1.85	26913.96	1.37
39	27794.44	27363.38	1.55	27286.84	1.83	27651.75	0.51	27151.15	2.31	27276.64	1.86
40	28402.04	27790.77	2.15	27729.61	2.37	28196.55	0.72	27603.98	2.81	27758.88	2.26
41	28710.88	28364.74	1.21	28269.91	1.54	28858.99	0.52	28130.79	2.02	28312.38	1.39
42	29054.54	28697.09	1.23	28652.49	1.38	29135.94	0.28	28425.53	2.16	28552.58	1.73
43	29350.11	28962.57	1.32	28980.79	1.26	29306.15	0.15	28719.74	2.15	28833.85	1.76
44	29881.74	29338.52	1.82	29301.69	1.94	29933.81	0.17	29188.72	2.32	29391.13	1.64
45	30629.89	29701.10	3.03	29668.10	3.14	30429.66	0.65	29607.42	3.34	29815.78	2.66
46	31395.76	30288.48	3.53	30294.70	3.51	30777.21	1.97	30110.41	4.09	30287.17	3.53
47	31279.31	30816.74	1.48	30869.11	1.31	31282.23	0.01	30638.88	2.05	30746.98	1.70
48	30928.49	30727.33	0.65	30766.60	0.52	30521.64	1.32	30788.82	0.45	30776.36	0.49
49	29746.39	30430.70	2.30	30436.70	2.32	30238.36	1.65	30621.67	2.94	30635.07	2.99
50	29465.51	29612.59	0.50	29697.49	0.79	29158.96	1.04	29925.63	1.56	29944.87	1.63
51	29382.92	29158.71	0.76	29226.12	0.53	29309.68	0.25	29402.68	0.07	29516.41	0.45
52	29692.31	29074.42	2.08	29097.82	2.00	29458.69	0.79	29236.12	1.54	29369.07	1.09
53	29805.93	29232.10	1.93	29177.25	2.11	29806.23	0.00	29329.53	1.60	29474.75	1.11
54	29879.27	29298.58	1.94	29207.13	2.25	29844.90	0.12	29489.64	1.30	29614.08	0.89
55	29848.51	29356.45	1.65	29230.55	2.07	29772.97	0.25	29605.76	0.81	29739.61	0.36
56	29855.25	29431.51	1.42	29249.04	2.03	29984.92	0.43	29690.42	0.55	29876.29	0.07
57	30068.81	29449.05	2.06	29286.63	2.60	30020.74	0.16	29712.43	1.19	29912.27	0.52
58	30182.74	29566.83	2.04	29362.68	2.72	30214.71	0.11	29843.34	1.12	30059.67	0.41
59	30182.34	29731.50	1.49	29549.78	2.10	30266.37	0.28	30004.69	0.59	30222.57	0.13
60	30428.87	29824.40	1.99	29635.17	2.61	30325.39	0.34	30103.93	1.07	30351.52	0.25
61	30634.36	29959.49	2.20	29769.09	2.82	30603.04	0.10	30215.31	1.37	30460.30	0.57
62	30891.23	30110.28	2.53	29936.00	3.09	30570.58	1.04	30379.53	1.66	30586.43	0.99
63	30789.47	30316.70	1.54	30042.39	2.43	30876.00	0.28	30609.31	0.59	30828.18	0.13
64	30652.80	30362.34	0.95	30129.34	1.71	30751.13	0.32	30667.05	0.05	30865.47	0.69
65	30707.66	30265.94	1.44	30055.90	2.12	30653.61	0.18	30564.99	0.46	30764.91	0.19

续表

测量点	真实值/MW	算例 1				算例 2					
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
66	30989.33	30298.72	2.23	30141.46	2.74	30755.77	0.75	30553.20	1.41	30763.06	0.73
67	31027.89	30462.72	1.82	30296.41	2.36	31055.05	0.09	30684.13	1.11	30880.47	0.48
68	30989.41	30536.96	1.46	30342.96	2.09	30974.80	0.05	30790.64	0.64	30959.90	0.10
69	31064.89	30595.36	1.51	30466.49	1.93	31019.44	0.15	30827.02	0.77	31009.67	0.18
70	31167.56	30615.56	1.77	30530.23	2.04	31099.71	0.22	30841.56	1.05	31007.99	0.51
71	31060.19	30616.69	1.43	30485.94	1.85	31043.28	0.05	30882.56	0.57	31014.62	0.15
72	30629.50	30457.22	0.56	30242.91	1.26	30806.96	0.58	30787.48	0.52	30858.93	0.75
73	30303.38	30164.34	0.46	29989.19	1.04	30174.29	0.43	30490.05	0.62	30532.56	0.76
74	29877.68	29940.27	0.21	29767.03	0.37	30100.40	0.75	30161.71	0.95	30239.82	1.21
75	29592.47	29566.28	0.09	29455.82	0.46	29618.31	0.09	29782.71	0.64	29856.38	0.89
76	29468.67	29139.60	1.12	29067.03	1.36	29267.91	0.68	29358.72	0.37	29400.51	0.23
77	28986.66	29068.43	0.28	28928.72	0.20	29055.22	0.24	29191.04	0.71	29271.23	0.98
78	28668.98	28801.66	0.46	28710.44	0.14	28963.46	1.03	28867.78	0.69	28967.25	1.04
79	28634.72	28450.24	0.64	28511.76	0.43	28379.87	0.89	28491.62	0.50	28582.66	0.18
80	28677.90	28489.27	0.66	28478.54	0.70	28770.20	0.32	28405.45	0.95	28579.85	0.34
81	28949.90	28588.57	1.25	28553.91	1.37	28865.02	0.29	28085.13	2.99	28196.69	2.60
82	29557.71	28819.80	2.50	28739.43	2.77	29580.04	0.08	28357.12	4.06	28518.01	3.52
83	30172.68	29242.94	3.08	29066.73	3.67	30203.54	0.10	29150.18	3.39	29467.21	2.34
84	30309.90	29661.78	2.14	29419.49	2.94	30625.13	1.04	29637.91	2.22	29902.93	1.34
85	30108.01	29791.38	1.05	29547.49	1.86	30354.77	0.82	29872.35	0.78	30057.72	0.17
86	30099.81	29597.48	1.67	29373.71	2.41	29876.09	0.74	29771.88	1.09	29893.71	0.68
87	29889.70	29482.63	1.36	29247.04	2.15	29800.35	0.30	29682.15	0.69	29787.40	0.34
88	29527.88	29252.23	0.93	29053.56	1.61	29488.32	0.13	29483.07	0.15	29523.34	0.02
89	29008.65	28834.87	0.60	28817.13	0.66	28802.95	0.71	29049.77	0.14	28989.50	0.07
90	28432.81	28505.55	0.26	28660.03	0.80	28321.11	0.39	28602.02	0.60	28532.57	0.35
91	27750.90	28125.15	1.35	28486.92	2.65	27878.77	0.46	28128.74	1.36	28081.40	1.19
92	27110.71	27667.68	2.05	28219.52	4.09	27137.03	0.10	27596.22	1.79	27564.47	1.67
93	26946.89	27306.75	1.34	27869.46	3.42	26614.88	1.23	26874.76	0.27	26806.73	0.52
94	26989.19	27049.78	0.22	27577.93	2.18	26909.78	0.29	26541.17	1.66	26482.27	1.88
95	26427.82	26885.60	1.73	27225.89	3.02	26831.44	1.53	26686.79	0.98	26670.90	0.92
96	25935.75	26549.48	2.37	26820.59	3.41	25952.75	0.07	26324.79	1.50	26276.81	1.32
97	25266.30	26135.08	3.44	26369.74	4.37	25514.26	0.98	25788.36	2.07	25756.36	1.94
98	24945.97	25590.46	2.58	25964.93	4.08	24937.84	0.03	25260.44	1.26	25244.17	1.20
99	24583.57	25171.22	2.39	25703.64	4.56	24648.05	0.26	24798.34	0.87	24782.09	0.81
100	24252.95	24785.98	2.20	25323.46	4.41	24229.98	0.09	24467.30	0.88	24460.92	0.86
101	23951.60	24518.01	2.36	25057.07	4.62	24039.59	0.37	24145.42	0.81	24163.90	0.89
102	23680.71	24191.95	2.16	24616.75	3.95	23720.92	0.17	23852.26	0.72	23876.36	0.83

续表

测量点	真实值/MW	算例 1				算例 2					
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
103	23413.92	23958.27	2.32	24372.95	4.10	23503.95	0.38	23592.32	0.76	23628.39	0.92
104	23208.70	23713.73	2.18	24177.11	4.17	23209.78	0.00	23328.86	0.52	23357.41	0.64
105	23152.80	23435.64	1.22	23759.84	2.62	22994.36	0.68	23102.79	0.22	23137.32	0.07
106	22795.14	23338.76	2.38	23678.13	3.87	23027.21	1.02	22968.89	0.76	23025.50	1.01
107	22823.21	23090.26	1.17	23477.76	2.87	22592.84	1.01	22747.60	0.33	22791.63	0.14
108	22562.08	23022.52	2.04	23404.87	3.74	22751.70	0.84	22610.86	0.22	22681.40	0.53
109	22444.45	22773.28	1.47	22987.86	2.42	22430.28	0.06	22476.45	0.14	22544.84	0.45
110	22314.16	22683.51	1.66	23003.60	3.09	22374.72	0.27	22288.67	0.11	22357.36	0.19
111	22188.69	22513.27	1.46	22705.22	2.33	22221.81	0.15	22175.22	0.06	22251.79	0.28
112	21941.91	22424.81	2.20	22556.84	2.80	22225.28	1.29	22106.85	0.75	22219.79	1.27
113	21889.83	22160.25	1.24	22092.56	0.93	21928.32	0.18	21922.82	0.15	22004.95	0.53
114	21836.17	22016.07	0.82	21920.01	0.38	21742.33	0.43	21778.87	0.26	21842.83	0.03
115	21521.71	21996.58	2.21	21940.74	1.95	21792.14	1.26	21747.26	1.05	21851.48	1.53
116	21569.14	21914.59	1.60	22041.77	2.19	21556.93	0.06	21616.46	0.22	21723.29	0.71
117	21664.35	21910.59	1.14	21932.68	1.24	21721.09	0.26	21546.50	0.54	21648.80	0.07
118	21671.15	21916.34	1.13	21752.62	0.38	21803.78	0.61	21603.85	0.31	21687.50	0.08
119	21633.03	21868.27	1.09	21571.16	0.29	21748.89	0.54	21646.19	0.06	21719.28	0.40
120	21902.90	21914.32	0.05	21699.47	0.93	21709.56	0.88	21697.49	0.94	21788.50	0.52
121	22055.38	22198.03	0.65	22046.14	0.04	22229.02	0.79	21908.28	0.67	22058.80	0.02
122	22331.60	22392.93	0.27	22124.29	0.93	22437.45	0.47	22120.59	0.94	22254.04	0.35
123	22658.40	22529.73	0.57	22001.80	2.90	22617.77	0.18	22313.24	1.52	22405.29	1.12
124	22869.49	22534.55	1.46	21913.07	4.18	22746.36	0.54	22468.20	1.75	22498.04	1.62
125	22752.40	22598.56	0.68	22121.76	2.77	22684.36	0.30	22675.55	0.34	22730.80	0.09
126	22721.64	22803.61	0.36	22583.91	0.61	22932.04	0.93	22802.65	0.36	22959.16	1.05
127	22802.71	22838.52	0.16	22435.32	1.61	23027.77	0.99	22777.67	0.11	22918.73	0.51
128	23242.20	23025.34	0.93	22573.49	2.88	23044.79	0.85	22903.72	1.46	23034.15	0.90
129	23784.47	23684.04	0.42	23560.78	0.94	23904.62	0.51	23338.38	1.88	23536.98	1.04
130	24579.81	24289.87	1.18	24119.01	1.87	24590.40	0.04	23888.78	2.81	24070.84	2.07
131	25674.12	24991.98	2.66	24946.37	2.83	25311.38	1.41	24569.80	4.30	24729.21	3.68
132	26441.59	25830.05	2.31	25831.60	2.31	26450.45	0.03	25418.18	3.87	25565.81	3.31
133	26929.57	26496.90	1.61	26316.46	2.28	26864.26	0.24	26189.18	2.75	26292.50	2.37
134	27441.28	27093.68	1.27	26882.32	2.04	27353.19	0.32	26756.41	2.50	26883.06	2.03
135	27797.54	27660.69	0.49	27408.02	1.40	27937.49	0.50	27280.41	1.86	27446.04	1.26
136	28093.49	28034.61	0.21	27748.56	1.23	28276.38	0.65	27703.23	1.39	27873.40	0.78
137	28600.44	28264.11	1.18	28013.15	2.05	28421.22	0.63	27997.30	2.11	28160.78	1.54
138	28859.14	28699.26	0.55	28405.73	1.57	28971.39	0.39	28387.14	1.64	28577.42	0.98
139	29361.41	29067.14	1.00	28806.53	1.89	29197.75	0.56	28761.69	2.04	28964.40	1.35
140	29841.70	29557.19	0.95	29304.69	1.80	29951.21	0.37	29196.09	2.16	29463.18	1.27
141	30397.72	30067.06	1.09	29823.69	1.89	30582.88	0.61	29683.31	2.35	29972.43	1.40

续表

测量点	真实值/MW	算例 1				算例 2					
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
142	31225.85	30370.36	2.74	30322.05	2.89	30926.34	0.96	30034.21	3.82	30259.32	3.10
143	31441.23	30895.35	1.74	30931.37	1.62	31154.11	0.91	30503.08	2.98	30629.64	2.58
144	31038.88	31048.90	0.03	31072.10	0.11	30881.96	0.51	30832.02	0.67	30852.98	0.60
145	30121.45	30828.98	2.35	30760.20	2.12	30166.58	0.15	30694.96	1.90	30679.43	1.85
146	29448.68	30343.73	3.04	30234.47	2.67	29729.26	0.95	30096.34	2.20	30135.20	2.33
147	29754.24	29700.50	0.18	29691.70	0.21	29307.83	1.50	29502.01	0.85	29612.10	0.48
148	29865.80	29723.70	0.48	29679.30	0.62	30052.68	0.63	29443.32	1.41	29624.56	0.81
149	29967.90	29834.22	0.45	29900.30	0.23	29972.08	0.01	29589.48	1.26	29738.00	0.77
150	30092.04	29880.36	0.70	29999.27	0.31	29985.65	0.35	29752.75	1.13	29923.37	0.56
151	30185.52	29968.80	0.72	30102.97	0.27	30140.14	0.15	29895.87	0.96	30076.27	0.36
152	30164.98	30101.15	0.21	30229.29	0.21	30277.23	0.37	30010.82	0.51	30205.20	0.13
153	30042.80	30141.36	0.33	30291.08	0.83	30307.35	0.88	30087.72	0.15	30297.89	0.85
154	30518.88	29970.29	1.80	30179.75	1.11	30065.70	1.48	30031.73	1.60	30234.70	0.93
155	30477.42	30337.86	0.46	30469.86	0.02	30647.81	0.56	30261.51	0.71	30498.71	0.07
156	30551.33	30487.24	0.21	30683.74	0.43	30660.87	0.36	30442.26	0.36	30671.82	0.39
157	30612.13	30540.90	0.23	30738.93	0.41	30726.66	0.37	30481.63	0.43	30718.29	0.35
158	30733.23	30547.18	0.61	30790.15	0.19	30730.76	0.01	30528.49	0.67	30745.21	0.04
159	30713.09	30548.00	0.54	30832.29	0.39	30623.91	0.29	30598.27	0.37	30790.58	0.25
160	30748.49	30614.81	0.43	30903.15	0.50	30610.72	0.45	30657.90	0.29	30852.89	0.34
161	30788.77	30745.90	0.14	30976.04	0.61	30825.00	0.12	30714.82	0.24	30938.66	0.49
162	30829.73	30759.95	0.23	31007.65	0.58	30939.87	0.36	30752.16	0.25	30977.29	0.48
163	31224.21	30759.71	1.49	31030.36	0.62	30817.91	1.30	30764.84	1.47	30960.27	0.85
164	30972.84	31059.52	0.28	31309.63	1.09	31250.24	0.90	31004.35	0.10	31219.82	0.80
165	31158.32	31049.88	0.35	31339.17	0.58	30980.95	0.57	31045.33	0.36	31235.92	0.25
166	31276.95	31057.05	0.70	31337.15	0.19	31196.45	0.26	31031.46	0.78	31222.59	0.17
167	31037.54	31089.18	0.17	31390.44	1.14	31135.29	0.31	31088.54	0.16	31215.75	0.57
168	30865.05	30894.60	0.10	31199.87	1.08	30665.03	0.65	30950.97	0.28	31025.50	0.52
169	30253.02	30733.42	1.59	30941.63	2.28	30551.11	0.99	30729.71	1.58	30790.06	1.78
170	29676.20	30251.84	1.94	30427.79	2.53	29832.31	0.53	30287.07	2.06	30317.41	2.16
171	29529.84	29742.95	0.72	29856.79	1.11	29371.74	0.54	29746.93	0.74	29810.65	0.95
172	29051.14	29440.20	1.34	29443.42	1.35	29297.86	0.85	29373.18	1.11	29444.39	1.35
173	28677.29	29000.83	1.13	29018.99	1.19	28618.17	0.21	28888.79	0.74	28900.70	0.78
174	28572.12	28719.37	0.52	28629.00	0.20	28419.91	0.53	28719.70	0.52	28823.61	0.88
175	28173.06	28643.79	1.67	28454.91	1.00	28610.91	1.55	28633.46	1.63	28818.02	2.29
176	28196.64	28386.58	0.67	28303.29	0.38	28169.27	0.10	28266.71	0.25	28412.16	0.76
177	28333.23	28445.45	0.40	28293.36	0.14	28492.30	0.56	27892.44	1.56	27964.81	1.30
178	29168.58	28589.20	1.99	28486.17	2.34	29082.18	0.30	28094.08	3.68	28234.72	3.20
179	29520.51	29021.86	1.69	28945.10	1.95	29662.54	0.48	28949.84	1.93	29206.15	1.06
180	29966.43	29310.10	2.19	29458.54	1.69	29610.21	1.19	29336.45	2.10	29520.03	1.49

续表

测量点	真实值/MW	算例 1				算例 2					
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
181	29948.47	29667.37	0.94	29839.23	0.36	29907.17	0.14	29655.53	0.98	29853.49	0.32
182	29791.80	29770.76	0.07	29988.91	0.66	29932.94	0.47	29798.70	0.02	29980.59	0.63
183	29442.58	29553.23	0.38	29784.20	1.16	29608.41	0.56	29663.98	0.75	29812.18	1.26
184	29049.05	29186.42	0.47	29411.31	1.25	29080.56	0.11	29344.84	1.02	29442.73	1.36
185	28748.93	28762.14	0.05	28961.26	0.74	28577.08	0.60	28884.44	0.47	28928.29	0.62
186	28302.39	28415.33	0.40	28570.37	0.95	28307.52	0.02	28469.57	0.59	28473.12	0.60
187	27708.63	28022.99	1.13	28196.66	1.76	27880.66	0.62	28082.63	1.35	28066.64	1.29
188	27064.25	27622.31	2.06	27738.02	2.49	27294.11	0.85	27656.55	2.19	27676.93	2.26
189	27062.32	27199.73	0.51	27227.32	0.61	26911.00	0.56	27157.56	0.35	27231.73	0.63
190	27061.67	26953.58	0.40	26835.14	0.84	26982.68	0.29	26862.91	0.73	26939.20	0.45
191	26732.23	26790.95	0.22	26671.25	0.23	26636.29	0.36	26779.36	0.18	26816.85	0.32
192	26317.16	26496.05	0.68	26510.41	0.73	26221.16	0.36	26522.96	0.78	26542.61	0.86
193	25523.66	26107.55	2.29	26617.33	4.28	25792.37	1.05	26098.41	2.25	26124.34	2.35
194	24931.86	25606.66	2.71	26036.42	4.43	25165.80	0.94	25534.06	2.42	25527.32	2.39
195	24444.38	25067.53	2.55	25368.85	3.78	24634.52	0.78	24886.17	1.81	24889.55	1.82
196	24115.96	24660.12	2.26	24859.50	3.08	24201.57	0.35	24364.26	1.03	24374.08	1.07
197	23966.18	24325.82	1.50	24388.36	1.76	23909.66	0.24	23956.71	0.04	23970.09	0.02
198	23682.95	24031.76	1.47	23910.46	0.96	23762.13	0.33	23707.72	0.10	23731.22	0.20
199	23415.83	23796.44	1.63	23626.54	0.90	23462.71	0.20	23479.82	0.27	23508.57	0.40
200	23443.74	23609.30	0.71	23499.10	0.24	23272.76	0.73	23254.39	0.81	23309.22	0.57
201	22926.26	23415.97	2.14	23288.76	1.58	23339.26	1.80	23135.37	0.91	23206.13	1.22
202	22799.39	23140.70	1.50	23008.56	0.92	22693.90	0.46	22881.89	0.36	22939.05	0.61
203	22839.61	22888.20	0.21	22851.63	0.05	22756.51	0.36	22616.37	0.98	22701.84	0.60
204	22697.73	22787.31	0.39	22738.67	0.18	22685.98	0.05	22554.67	0.63	22647.88	0.22
205	22402.35	22690.40	1.29	22683.25	1.25	22584.26	0.81	22472.28	0.31	22580.17	0.79
206	22397.68	22448.40	0.23	22396.86	0.00	22274.36	0.55	22245.21	0.68	22343.69	0.24
207	22287.11	22270.73	0.07	22238.01	0.22	22273.12	0.06	22093.66	0.87	22201.36	0.38
208	21948.87	22148.97	0.91	22114.40	0.75	22121.57	0.79	22023.85	0.34	22148.31	0.91
209	21898.96	21969.59	0.32	22031.83	0.61	21876.09	0.10	21823.32	0.35	21957.38	0.27
210	21720.74	21761.36	0.19	21797.73	0.35	21806.21	0.39	21632.22	0.41	21760.40	0.18
211	21651.17	21670.74	0.09	21866.07	0.99	21566.20	0.39	21522.49	0.59	21658.44	0.03
212	21517.57	21540.83	0.11	21745.74	1.06	21680.11	0.76	21449.42	0.32	21628.40	0.52
213	21548.49	21452.49	0.45	21512.17	0.17	21566.32	0.08	21363.55	0.86	21532.01	0.08
214	21502.45	21422.72	0.37	21444.02	0.27	21557.74	0.26	21319.65	0.85	21477.75	0.11
215	21626.30	21442.24	0.85	21477.46	0.69	21546.10	0.37	21346.39	1.29	21516.34	0.51
216	21696.40	21535.82	0.74	21606.26	0.42	21816.95	0.56	21441.22	1.18	21634.92	0.28
217	21866.99	21653.99	0.97	21584.99	1.29	21852.64	0.07	21570.24	1.36	21755.47	0.51
218	22317.39	21894.29	1.90	22010.38	1.38	22112.27	0.92	21738.00	2.60	21926.38	1.75
219	22496.84	22196.26	1.34	22281.21	0.96	22569.66	0.32	22058.91	1.95	22250.23	1.10

续表

测量点	真实值/MW	算例 1				算例 2					
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
220	22845.94	22301.85	2.38	21909.02	4.10	22590.83	1.12	22297.50	2.40	22445.30	1.75
221	22428.16	22387.36	0.18	21910.32	2.31	22761.34	1.49	22514.10	0.38	22661.68	1.04
222	22579.08	22351.72	1.01	21809.59	3.41	22361.04	0.97	22463.02	0.51	22592.48	0.06
223	22659.35	22412.13	1.09	22200.70	2.02	22689.06	0.13	22470.47	0.83	22652.09	0.03
224	23038.13	22704.73	1.45	22819.00	0.95	23003.09	0.15	22682.44	1.54	22887.54	0.65
225	23563.96	23175.22	1.65	23578.64	0.06	23563.05	0.00	23035.88	2.24	23261.44	1.28
226	24327.22	23904.22	1.74	24481.15	0.63	24359.54	0.13	23612.14	2.94	23863.00	1.91
227	25354.63	24625.16	2.88	25185.47	0.67	25310.35	0.17	24310.56	4.12	24551.82	3.17
228	26078.47	25350.19	2.79	25623.66	1.74	26094.96	0.06	25109.27	3.72	25301.38	2.98
229	26489.88	26049.06	1.66	26011.19	1.81	26476.98	0.05	25805.05	2.59	25938.55	2.08
230	27071.74	26571.52	1.85	26467.81	2.23	26835.67	0.87	26324.02	2.76	26437.49	2.34
231	27704.61	27054.25	2.35	27024.12	2.46	27489.98	0.77	26872.11	3.00	27012.30	2.50
232	28250.89	27614.12	2.25	27645.83	2.14	28175.03	0.27	27488.75	2.70	27668.94	2.06
233	28836.31	28129.89	2.45	28157.11	2.36	28823.98	0.04	28015.64	2.85	28209.61	2.17
234	29141.53	28669.23	1.62	28667.53	1.63	29325.54	0.63	28531.81	2.09	28746.87	1.35
235	29533.49	29124.63	1.38	29083.89	1.52	29827.64	1.00	28984.36	1.86	29239.61	1.00
236	30281.21	29553.93	2.40	29505.60	2.56	30271.37	0.03	29350.83	3.07	29644.42	2.10
237	31118.08	30193.20	2.97	30094.77	3.29	31110.89	0.02	29928.95	3.82	30282.34	2.69
238	31922.81	30915.95	3.15	31087.58	2.62	32032.85	0.34	30590.43	4.17	30935.89	3.09
239	32285.13	31452.88	2.58	31874.08	1.27	32206.85	0.24	31149.17	3.52	31381.35	2.80
240	32086.41	31566.13	1.62	31538.16	1.71	31863.11	0.70	31567.31	1.62	31689.61	1.24
241	31462.52	31284.99	0.56	30804.67	2.09	31419.99	0.14	31590.73	0.41	31625.27	0.52
242	30990.54	30964.91	0.08	30620.09	1.20	31037.88	0.15	31263.32	0.88	31353.25	1.17
243	31085.83	30689.76	1.27	30592.15	1.59	31262.75	0.57	30917.06	0.54	31111.01	0.08
244	31249.96	30658.08	1.89	30773.80	1.52	31337.49	0.28	30803.89	1.43	31028.42	0.71
245	31679.72	30787.30	2.82	30920.04	2.40	31436.51	0.77	30920.40	2.40	31165.32	1.62
246	31856.18	31026.91	2.60	31112.53	2.33	31804.60	0.16	31284.43	1.79	31574.12	0.89
247	31781.12	31213.52	1.79	31228.23	1.74	31994.65	0.67	31570.15	0.66	31843.04	0.19
248	31881.70	31203.21	2.13	31206.78	2.12	31749.47	0.41	31544.98	1.06	31789.21	0.29
249	31952.52	31301.53	2.04	31262.39	2.16	31884.55	0.21	31656.66	0.93	31956.47	0.01
250	32091.17	31405.60	2.14	31342.09	2.33	32271.04	0.56	31766.88	1.01	32092.56	0.00
251	31935.13	31503.17	1.35	31500.03	1.36	32064.80	0.41	31827.63	0.34	32123.93	0.59
252	31945.38	31502.68	1.39	31492.07	1.42	31966.11	0.06	31794.57	0.47	32091.56	0.46
253	31834.96	31501.20	1.05	31516.10	1.00	31998.87	0.51	31742.88	0.29	32058.22	0.70
254	32065.15	31482.79	1.82	31604.60	1.44	31888.18	0.55	31687.27	1.18	31995.24	0.22
255	31994.02	31546.93	1.40	31662.00	1.04	32054.60	0.19	31748.98	0.77	32066.85	0.23
256	31927.62	31592.32	1.05	31657.42	0.85	32000.64	0.23	31775.52	0.48	32078.84	0.47
257	31936.67	31566.95	1.16	31701.09	0.74	31933.21	0.01	31677.93	0.81	31978.45	0.13

续表

测量点	真实值/MW	算例 1				算例 2					
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
258	32110.61	31638.14	1.47	31781.50	1.02	32066.66	0.14	31708.88	1.25	32054.38	0.18
259	32128.00	31711.85	1.30	31886.47	0.75	32272.06	0.45	31784.09	1.07	32130.72	0.01
260	32096.27	31772.98	1.01	31897.01	0.62	32003.17	0.29	31828.42	0.83	32147.39	0.16
261	32192.66	31813.08	1.18	31948.99	0.76	32221.62	0.09	31843.24	1.09	32186.85	0.02
262	32350.63	31808.20	1.68	31939.33	1.27	32204.16	0.45	31804.52	1.69	32116.51	0.72
263	32239.42	31827.74	1.28	31875.17	1.13	32182.07	0.18	31899.59	1.05	32176.12	0.20
264	32235.90	31659.18	1.79	31551.51	2.12	31944.18	0.90	31851.43	1.19	32069.87	0.52
265	31769.40	31401.90	1.16	31133.25	2.00	31690.79	0.25	31752.76	0.05	31901.88	0.42
266	31218.16	31099.17	0.38	30817.79	1.28	31296.15	0.25	31509.98	0.93	31648.09	1.38
267	30963.62	30648.28	1.02	30442.84	1.68	30907.95	0.18	30957.65	0.02	31086.82	0.40
268	30902.84	30267.50	2.06	30026.10	2.84	30521.71	1.23	30523.85	1.23	30635.77	0.86
269	30340.87	30089.68	0.83	29677.81	2.19	30601.90	0.86	30307.09	0.11	30424.42	0.28
270	29853.54	29762.47	0.31	29383.37	1.57	29991.98	0.46	30131.79	0.93	30307.68	1.52
271	29713.98	29387.67	1.10	29139.32	1.93	29589.74	0.42	29748.08	0.11	29947.49	0.79
272	29725.93	29224.11	1.69	29020.66	2.37	29762.58	0.12	29331.78	1.33	29580.59	0.49
273	30149.94	29371.89	2.58	29161.95	3.28	30105.14	0.15	29472.89	2.25	29842.53	1.02
274	30785.91	29736.35	3.41	29535.73	4.06	30773.19	0.04	29754.89	3.35	30201.73	1.90
275	31363.19	30253.81	3.54	30189.76	3.74	31200.07	0.52	30197.60	3.72	30628.72	2.34
276	31754.83	30710.38	3.29	30745.32	3.18	31686.03	0.22	30740.90	3.19	31156.68	1.88
277	31767.44	30977.91	2.49	30998.76	2.42	31714.76	0.17	31126.42	2.02	31471.10	0.93
278	31953.82	30972.97	3.07	30847.07	3.46	31556.06	1.24	31240.05	2.23	31512.22	1.38
279	31472.40	30885.93	1.86	30591.44	2.80	31646.04	0.55	31296.22	0.56	31515.93	0.14
280	31281.97	30627.54	2.09	30280.13	3.20	31110.91	0.55	31082.09	0.64	31243.77	0.12
281	30851.42	30307.03	1.76	29962.34	2.88	30968.49	0.38	30740.18	0.36	30882.07	0.10
282	30315.98	29924.56	1.29	29526.13	2.61	30358.99	0.14	30345.93	0.10	30429.37	0.37
283	29628.04	29426.09	0.68	29064.87	1.90	29690.90	0.21	29795.42	0.56	29831.58	0.69
284	28995.57	28965.29	0.10	28802.00	0.67	29107.34	0.39	29242.84	0.85	29304.31	1.06
285	29016.65	28558.87	1.58	28646.75	1.27	28887.97	0.44	28707.95	1.06	28832.30	0.64
286	28815.21	28338.13	1.66	28556.70	0.90	28906.79	0.32	28446.01	1.28	28582.06	0.81
287	28249.66	28119.36	0.46	28442.38	0.68	28412.37	0.58	28291.81	0.15	28384.11	0.48
288	27556.53	27635.14	0.29	28196.46	2.32	27609.82	0.19	27824.08	0.97	27853.66	1.08
289	26889.79	27036.78	0.55	27771.20	3.28	26740.05	0.56	27182.58	1.09	27183.49	1.09
290	26287.13	26381.70	0.36	27079.87	3.02	26205.86	0.31	26548.32	0.99	26567.81	1.07
291	25787.81	25801.09	0.05	26469.83	2.64	25714.96	0.28	25941.52	0.60	25988.18	0.78
292	25264.00	25378.23	0.45	25946.97	2.70	25384.74	0.48	25421.35	0.62	25507.69	0.96
293	25084.36	24927.34	0.63	25356.32	1.08	24924.98	0.64	24914.31	0.68	25003.25	0.32
294	24673.55	24602.44	0.29	24919.21	1.00	24760.86	0.35	24578.68	0.38	24670.38	0.01
295	24302.92	24378.02	0.31	24589.78	1.18	24399.64	0.40	24323.32	0.08	24427.99	0.51
296	24215.07	24005.62	0.86	24090.29	0.52	24068.77	0.60	23950.52	1.09	24037.44	0.73

续表

测量点	真实值/MW	算例 1				算例 2					
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
297	23611.60	23716.55	0.44	23817.80	0.87	23846.95	1.00	23745.11	0.57	23840.69	0.97
298	23366.35	23430.50	0.27	23476.20	0.47	23386.79	0.09	23439.34	0.31	23564.69	0.85
299	23441.72	23125.09	1.35	22967.63	2.02	23271.68	0.73	23086.79	1.51	23229.02	0.91
300	23621.93	22966.81	2.77	22785.25	3.54	23265.89	1.51	22986.81	2.69	23128.47	2.09
301	23508.55	23053.24	1.94	23081.89	1.81	23416.76	0.39	23087.60	1.79	23264.49	1.04
302	23403.94	22990.42	1.77	23089.32	1.34	23345.22	0.25	23078.09	1.39	23272.51	0.56
303	23154.58	22851.98	1.31	22900.97	1.10	23147.92	0.03	22916.13	1.03	23094.57	0.26
304	23297.31	22629.82	2.87	22650.59	2.78	22832.70	1.99	22728.03	2.44	22914.92	1.64
305	22895.29	22545.60	1.53	22758.27	0.60	23110.90	0.94	22683.89	0.92	22921.98	0.12
306	22644.66	22351.42	1.29	22443.85	0.89	22606.56	0.17	22504.33	0.62	22727.24	0.36
307	22895.88	22065.73	3.63	22052.27	3.68	22430.20	2.03	22202.59	3.03	22433.60	2.02
308	22804.87	22037.52	3.36	22214.18	2.59	22710.50	0.41	22224.03	2.55	22495.30	1.36
309	22834.76	22059.34	3.40	22282.65	2.42	22637.56	0.86	22262.71	2.51	22541.16	1.29
310	22707.38	22059.47	2.85	22283.69	1.87	22686.96	0.09	22262.54	1.96	22556.82	0.66
311	22817.24	22031.35	3.44	22164.53	2.86	22625.91	0.84	22248.42	2.49	22543.98	1.20
312	22923.33	22047.91	3.82	22115.72	3.52	22743.44	0.78	22293.34	2.75	22597.25	1.42
313	23066.42	22222.93	3.66	22386.02	2.95	22942.13	0.54	22461.54	2.62	22786.00	1.22
314	23123.91	22404.19	3.11	22488.00	2.75	23182.01	0.25	22619.54	2.18	22929.29	0.84
315	23160.87	22569.69	2.55	22524.20	2.75	23133.51	0.12	22771.54	1.68	23047.53	0.49
316	23238.17	22567.02	2.89	22286.03	4.10	23137.16	0.43	22796.94	1.90	23017.44	0.95
317	22758.46	22571.20	0.82	22313.25	1.96	22905.27	0.65	22860.62	0.45	23067.59	1.36
318	22598.59	22397.34	0.89	22086.97	2.26	22677.89	0.35	22718.28	0.53	22948.53	1.55
319	23072.45	22316.20	3.28	21966.45	4.79	22631.98	1.91	22558.18	2.23	22806.66	1.15
320	23337.87	22629.66	3.03	22796.92	2.32	23384.93	0.20	22856.61	2.06	23167.74	0.73
321	23772.01	23146.04	2.63	23560.54	0.89	23790.61	0.08	23294.09	2.01	23612.78	0.67
322	24555.86	23749.12	3.29	24395.10	0.65	24496.26	0.24	23773.18	3.19	24111.53	1.81
323	25197.60	24498.84	2.77	24911.62	1.13	25492.00	1.17	24456.02	2.94	24792.51	1.61
324	26019.05	25137.18	3.39	25258.97	2.92	25908.46	0.43	25090.40	3.57	25352.69	2.56
325	26449.80	25817.07	2.39	25854.77	2.25	26557.26	0.41	25739.90	2.68	25976.18	1.79
326	27327.09	26431.39	3.28	26391.95	3.42	27069.75	0.94	26375.97	3.48	26623.46	2.57
327	28042.53	27109.76	3.33	27078.50	3.44	28065.92	0.08	27113.78	3.31	27409.90	2.26
328	28539.59	27838.76	2.46	27817.16	2.53	28702.36	0.57	27858.48	2.39	28166.03	1.31
329	29216.83	28388.47	2.84	28349.81	2.97	29144.99	0.25	28395.00	2.81	28705.15	1.75
330	29915.51	28932.19	3.29	28843.79	3.58	29633.35	0.94	28954.29	3.21	29283.82	2.11
331	30522.72	29624.58	2.94	29413.43	3.63	30457.92	0.21	29670.01	2.79	30069.62	1.48
332	30898.76	30331.37	1.84	29936.79	3.11	31345.38	1.45	30338.27	1.81	30793.89	0.34
333	31706.57	30928.95	2.45	30595.47	3.50	31758.74	0.16	30805.12	2.84	31288.97	1.32
334	32674.65	31560.75	3.41	31489.29	3.63	32470.64	0.62	31390.23	3.93	31901.72	2.37
335	33188.58	32245.10	2.84	32084.61	3.33	33004.27	0.56	32149.14	3.13	32593.79	1.79

续表

测量点	真实值/MW	算例 1				算例 2					
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
336	32930.32	32597.38	1.01	31608.76	4.01	33011.81	0.25	32704.00	0.69	33002.71	0.22
337	31906.00	32432.67	1.65	31100.58	2.52	32416.94	1.60	32743.54	2.62	32918.00	3.17
338	31478.14	31899.38	1.34	30954.83	1.66	31548.14	0.22	32170.27	2.20	32339.22	2.74
339	31532.19	31491.21	0.13	31410.56	0.39	31588.17	0.18	31608.95	0.24	31882.40	1.11
340	31843.59	31494.22	1.10	31621.88	0.70	31794.72	0.15	31513.98	1.04	31871.29	0.09
341	31662.56	31730.47	0.21	31929.29	0.84	32225.68	1.78	31699.45	0.12	32111.39	1.42
342	31655.29	31753.98	0.31	32073.51	1.32	31769.58	0.36	31666.85	0.04	32042.08	1.22
343	31380.65	31703.52	1.03	32068.60	2.19	31659.78	0.89	31587.80	0.66	31971.67	1.88
344	31424.88	31607.15	0.58	31957.92	1.70	31497.67	0.23	31307.84	0.37	31677.41	0.80
345	31632.19	31572.12	0.19	31940.76	0.98	31548.07	0.27	31044.20	1.86	31414.46	0.69
346	31595.44	31662.85	0.21	32079.21	1.53	31848.05	0.80	31447.29	0.47	31897.69	0.96
347	31396.03	31692.26	0.94	32062.19	2.12	31233.32	0.52	31660.02	0.84	32133.42	2.35
348	31248.34	31579.94	1.06	31969.80	2.31	31293.99	0.15	31401.58	0.49	31806.86	1.79
349	31179.57	31483.35	0.97	31840.35	2.12	31161.40	0.06	31321.23	0.45	31754.28	1.84
350	31126.46	31421.44	0.95	31780.43	2.10	31158.43	0.10	31247.56	0.39	31699.60	1.84
351	30966.28	31349.20	1.24	31684.66	2.32	30953.22	0.04	31115.02	0.48	31526.07	1.81
352	30817.99	31259.83	1.43	31571.71	2.45	30826.71	0.03	30975.56	0.51	31375.58	1.81
353	30399.06	31175.63	2.55	31417.86	3.35	30772.12	1.23	30839.70	1.45	31254.96	2.82
354	30576.82	30965.47	1.27	31054.35	1.56	30467.55	0.36	30576.06	0.00	31002.11	1.39
355	30704.24	30904.56	0.65	30981.21	0.90	30585.61	0.39	30495.14	0.68	30936.97	0.76
356	30690.13	31024.22	1.09	31146.32	1.49	30747.08	0.19	30587.72	0.33	31023.64	1.09
357	30960.15	31086.04	0.41	31166.16	0.67	30836.84	0.40	30644.13	1.02	31091.56	0.42
358	30848.47	31191.42	1.11	31314.14	1.51	31000.21	0.49	30777.28	0.23	31223.24	1.21
359	30746.56	31206.92	1.50	31288.75	1.76	30808.38	0.20	30832.32	0.28	31259.52	1.67
360	30761.22	31042.75	0.92	31146.66	1.25	30660.98	0.33	30716.82	0.14	31106.77	1.12
361	30301.34	30850.85	1.81	30861.38	1.85	30382.68	0.27	30632.22	1.09	30959.75	2.17
362	29958.90	30559.46	2.00	30510.19	1.84	29889.60	0.23	30404.56	1.49	30701.86	2.48
363	29789.28	30244.77	1.53	30168.89	1.27	29761.91	0.09	30003.75	0.72	30314.31	1.76
364	29419.69	29957.56	1.83	29867.19	1.52	29646.43	0.77	29661.58	0.82	29938.18	1.76
365	29019.52	29580.27	1.93	29448.81	1.48	28979.24	0.14	29353.98	1.15	29575.11	1.91
366	28719.32	29231.30	1.78	29171.52	1.57	28671.85	0.17	29026.98	1.07	29264.61	1.90
367	28750.57	28981.36	0.80	28970.02	0.76	28617.73	0.46	28715.89	0.12	28986.08	0.82
368	28721.58	28999.00	0.97	29000.87	0.97	28873.43	0.53	28657.66	0.22	28994.87	0.95
369	28827.83	29153.93	1.13	29108.44	0.97	29217.22	1.35	28824.18	0.01	29261.30	1.50
370	29483.07	29368.76	0.39	29254.89	0.77	29349.11	0.45	28915.33	1.93	29412.34	0.24
371	30074.57	29801.05	0.91	29588.47	1.62	29998.71	0.25	29196.51	2.92	29724.50	1.16
372	30507.18	30284.50	0.73	30154.94	1.15	30376.14	0.43	29738.42	2.52	30242.93	0.87
373	30597.66	30686.77	0.29	30689.94	0.30	30562.78	0.11	30207.44	1.28	30699.95	0.33
374	30592.38	30808.04	0.70	30971.27	1.24	30552.05	0.13	30346.59	0.80	30772.83	0.59

续表

测量点	真实值/MW	算例 1				算例 2					
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
375	30307.70	30747.36	1.45	30946.26	2.11	30179.53	0.42	30333.83	0.09	30699.09	1.29
376	30053.05	30536.08	1.61	30717.27	2.21	29976.54	0.25	30180.84	0.43	30507.56	1.51
377	29580.03	30189.06	2.06	30278.05	2.36	29545.67	0.12	29883.70	1.03	30145.75	1.91
378	29119.12	29722.69	2.07	29726.59	2.09	28948.82	0.58	29465.66	1.19	29651.63	1.83
379	28518.45	29196.84	2.38	29196.27	2.38	28417.13	0.36	28983.29	1.63	29112.68	2.08
380	27931.31	28740.46	2.90	28771.85	3.01	27993.36	0.22	28530.50	2.15	28672.05	2.65
381	27832.82	28286.20	1.63	28355.79	1.88	27759.49	0.26	28009.79	0.64	28170.05	1.21
382	27797.36	27957.32	0.58	28067.29	0.97	27528.41	0.97	27650.81	0.53	27774.03	0.08
383	27173.27	27686.48	1.89	27798.73	2.30	27261.05	0.32	27507.88	1.23	27567.06	1.45
384	26856.36	27170.19	1.17	27321.43	1.73	26474.00	1.42	27106.35	0.93	27099.45	0.91
385	26155.17	26612.73	1.75	26637.39	1.84	26278.39	0.47	26720.76	2.16	26721.12	2.16
386	25611.59	25994.73	1.50	26206.77	2.32	25586.04	0.10	26197.17	2.29	26172.01	2.19
387	25217.71	25378.27	0.64	25685.73	1.86	25126.29	0.36	25619.10	1.59	25575.83	1.42
388	24858.53	24985.35	0.51	25250.16	1.58	24829.63	0.12	25205.20	1.39	25180.09	1.29
389	24616.99	24626.64	0.04	24790.13	0.70	24603.39	0.06	24851.98	0.95	24836.68	0.89
390	24417.21	24296.01	0.50	24353.11	0.26	24265.69	0.62	24553.41	0.56	24536.51	0.49
391	23891.31	24122.76	0.97	24055.05	0.69	24165.13	1.15	24367.72	1.99	24389.32	2.08
392	23814.52	23667.52	0.62	23479.26	1.41	23602.75	0.89	23965.00	0.63	23961.65	0.62
393	23467.69	23422.12	0.19	23047.44	1.79	23418.32	0.21	23676.63	0.89	23685.85	0.93
394	23408.00	23293.70	0.49	22933.71	2.03	23291.68	0.50	23501.20	0.40	23563.33	0.66
395	23290.93	23324.22	0.14	22925.69	1.57	23475.90	0.79	23385.05	0.40	23498.48	0.89
396	22975.73	23216.38	1.05	22686.98	1.26	23333.52	1.56	23300.89	1.42	23397.75	1.84
397	22714.20	22941.74	1.00	22252.01	2.03	22845.07	0.58	23084.79	1.63	23138.86	1.87
398	22639.73	22700.50	0.27	21931.67	3.13	22561.93	0.34	22818.42	0.79	22851.92	0.94
399	22527.46	22664.13	0.61	21903.75	2.77	22539.56	0.05	22711.11	0.82	22763.00	1.05
400	22474.32	22545.17	0.32	21826.20	2.88	22486.58	0.05	22604.40	0.58	22650.50	0.78
401	22230.14	22358.44	0.58	21659.12	2.57	22201.63	0.13	22485.76	1.15	22509.24	1.26
402	22289.54	22314.52	0.11	21679.74	2.74	22123.36	0.75	22381.41	0.41	22449.51	0.72
403	22184.26	22381.17	0.89	21736.88	2.02	22403.73	0.99	22318.38	0.60	22408.47	1.01
404	22117.70	22281.69	0.74	21588.49	2.39	22133.79	0.07	22282.81	0.75	22341.83	1.01
405	22060.27	22223.63	0.74	21554.20	2.29	22105.46	0.20	22219.92	0.72	22282.62	1.01
406	22061.67	22193.95	0.60	21511.26	2.49	22032.83	0.13	22198.55	0.62	22269.09	0.94
407	22101.58	22258.33	0.71	21568.92	2.41	22171.97	0.32	22214.96	0.51	22309.29	0.94
408	22252.18	22330.18	0.35	21636.40	2.77	22227.87	0.11	22246.18	0.03	22335.79	0.38
409	22306.69	22441.43	0.60	21741.58	2.53	22393.28	0.39	22326.84	0.09	22411.47	0.47
410	22703.45	22472.14	1.02	21737.32	4.26	22380.98	1.42	22399.41	1.34	22467.04	1.04
411	23033.86	22714.48	1.39	22029.52	4.36	22838.31	0.85	22622.75	1.78	22719.43	1.37
412	23170.19	22813.74	1.54	22262.85	3.92	23052.75	0.51	22866.69	1.31	22956.56	0.92
413	22844.44	22839.92	0.02	22442.25	1.76	22923.78	0.35	22996.08	0.66	23094.98	1.10

续表

测量点	真实值/MW	算例 1				算例 2					
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
414	22783.75	22842.22	0.26	22584.37	0.88	22836.39	0.23	22963.24	0.79	23135.58	1.54
415	23162.80	22933.42	0.99	22610.59	2.38	23137.55	0.11	22903.21	1.12	23114.36	0.21
416	23484.77	23210.27	1.17	22795.64	2.93	23523.14	0.16	23146.24	1.44	23361.61	0.52
417	24227.24	23689.03	2.22	23495.18	3.02	24029.09	0.82	23623.37	2.49	23886.90	1.40
418	25370.43	24400.92	3.82	24337.74	4.07	25043.06	1.29	24194.96	4.63	24490.90	3.47
419	26395.79	25400.52	3.77	25610.88	2.97	26177.33	0.83	25071.36	5.02	25376.36	3.86
420	27588.37	26369.15	4.42	26567.51	3.70	27174.61	1.50	26055.93	5.55	26367.23	4.43
421	28169.41	27540.28	2.23	27487.71	2.42	28287.97	0.42	27117.88	3.73	27464.20	2.50
422	28987.19	28425.68	1.94	28094.00	3.08	28986.00	0.00	27956.21	3.56	28318.72	2.31
423	29580.64	29138.49	1.49	28478.45	3.73	29686.08	0.36	28614.95	3.26	28961.80	2.09
424	30080.96	29817.64	0.88	29005.69	3.57	30164.82	0.28	29303.42	2.58	29645.07	1.45
425	30649.36	30423.12	0.74	29644.77	3.28	30797.41	0.48	29880.64	2.51	30238.08	1.34
426	31184.47	30946.14	0.76	30405.77	2.50	31383.14	0.64	30425.67	2.43	30769.15	1.33
427	31951.73	31406.97	1.70	31074.98	2.74	31818.29	0.42	30922.83	3.22	31221.71	2.28
428	32428.21	32122.18	0.94	31683.84	2.30	32599.32	0.53	31619.09	2.50	31928.92	1.54
429	33030.73	32751.43	0.85	32256.63	2.34	33348.40	0.96	32329.15	2.12	32664.17	1.11
430	34062.64	33225.74	2.46	32960.94	3.23	33949.22	0.33	32847.17	3.57	33124.84	2.75
431	34328.86	33837.25	1.43	33223.45	3.22	34590.16	0.76	33531.95	2.32	33672.62	1.91
432	33997.02	33871.23	0.37	32468.89	4.49	34099.12	0.30	33955.98	0.12	33858.93	0.41
433	33337.34	33590.30	0.76	32233.66	3.31	33269.49	0.20	33708.58	1.11	33452.16	0.34
434	33032.47	33308.57	0.84	32775.78	0.78	33072.18	0.12	33330.91	0.90	33128.79	0.29
435	33181.76	33130.00	0.16	33070.07	0.34	33161.32	0.06	33164.26	0.05	33120.29	0.19
436	33325.35	33096.20	0.69	33191.62	0.40	33478.27	0.46	33076.07	0.75	33038.91	0.86
437	33391.59	33113.13	0.83	33213.95	0.53	33322.14	0.21	33089.48	0.90	32995.93	1.18
438	33483.95	33113.90	1.11	33231.02	0.76	33391.34	0.28	33061.45	1.26	32939.10	1.63
439	33547.55	33165.16	1.14	33233.36	0.94	33405.14	0.42	33149.89	1.19	33022.38	1.57
440	33501.83	33286.76	0.64	33297.45	0.61	33519.27	0.05	33203.90	0.89	33084.82	1.24
441	33560.98	33304.23	0.77	33284.21	0.82	33450.87	0.33	33034.33	1.57	32863.24	2.08
442	33706.95	33210.08	1.47	33247.27	1.36	33694.00	0.04	33302.34	1.20	33242.66	1.38
443	33674.52	33291.38	1.14	33200.10	1.41	33611.75	0.19	33611.32	0.19	33551.25	0.37
444	33643.82	33263.35	1.13	33185.64	1.36	33651.05	0.02	33511.61	0.39	33368.70	0.82
445	33766.11	33248.84	1.53	33189.59	1.71	33676.10	0.27	33556.47	0.62	33412.66	1.05
446	33790.88	33258.09	1.58	33157.24	1.88	33807.26	0.05	33655.94	0.40	33503.76	0.85
447	33927.96	33218.89	2.09	33061.05	2.56	33723.54	0.60	33678.79	0.73	33473.04	1.34
448	33881.95	33166.09	2.11	32855.34	3.03	33836.44	0.13	33718.04	0.48	33463.52	1.23
449	33840.83	33152.85	2.03	32754.40	3.21	33660.95	0.53	33776.28	0.19	33508.36	0.98
450	34106.19	33210.17	2.63	32789.95	3.86	33942.36	0.48	33782.09	0.95	33545.57	1.64
451	33951.13	33336.05	1.81	32842.61	3.27	34263.43	0.92	33869.94	0.24	33603.34	1.02
452	33926.77	33363.86	1.66	32854.97	3.16	33908.54	0.05	33792.50	0.40	33489.84	1.29

续表

测量点	真实值/MW	算例 1				算例 2					
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
453	33994.98	33339.95	1.93	32956.88	3.05	34103.00	0.32	33590.54	1.19	33295.72	2.06
454	33891.34	33311.59	1.71	32943.23	2.80	34042.83	0.45	33654.35	0.70	33387.36	1.49
455	33402.96	33299.32	0.31	32914.29	1.46	33796.15	1.18	33704.20	0.90	33482.51	0.24
456	32907.35	32979.93	0.22	32738.16	0.51	33162.06	0.77	33329.70	1.28	33064.11	0.48
457	32222.27	32589.74	1.14	32301.98	0.25	32421.61	0.62	32810.74	1.83	32548.54	1.01
458	32248.49	32131.66	0.36	31857.54	1.21	31812.49	1.35	32233.78	0.05	32053.07	0.61
459	32201.38	32015.66	0.58	31564.59	1.98	32055.78	0.45	31903.83	0.92	31792.59	1.27
460	31863.13	31914.73	0.16	31174.01	2.16	31852.47	0.03	31777.12	0.27	31655.92	0.65
461	31373.28	31698.78	1.04	30703.85	2.13	31487.32	0.36	31544.10	0.54	31439.94	0.21
462	30869.45	31383.99	1.67	30385.81	1.57	31122.81	0.82	31182.51	1.01	31135.00	0.86
463	30592.16	31027.00	1.42	30095.49	1.62	30808.61	0.71	30720.36	0.42	30727.98	0.44
464	30681.15	30743.23	0.20	29945.39	2.40	30587.95	0.30	30373.04	1.00	30434.40	0.80
465	30878.27	30924.53	0.15	30111.04	2.48	30953.30	0.24	30623.50	0.83	30852.56	0.08
466	31746.64	31183.86	1.77	30565.53	3.72	31624.46	0.38	30816.48	2.93	31108.18	2.01
467	32456.68	31770.17	2.12	31350.22	3.41	32358.60	0.30	31157.18	4.00	31382.53	3.31
468	33096.38	32378.11	2.17	32107.60	2.99	32858.96	0.72	31878.59	3.68	32071.50	3.10
469	33215.73	32852.06	1.09	32519.37	2.10	33244.44	0.09	32495.75	2.17	32626.61	1.77
470	33321.52	32930.22	1.17	32543.80	2.33	33175.68	0.44	32780.42	1.62	32806.77	1.54
471	33315.84	32874.12	1.33	32429.83	2.66	33119.50	0.59	32884.66	1.29	32856.71	1.38
472	32731.07	32776.79	0.14	32022.13	2.17	33073.94	1.05	32900.36	0.52	32823.21	0.28
473	32269.63	32332.13	0.19	31409.28	2.67	32244.59	0.08	32512.24	0.75	32373.17	0.32
474	31902.22	31848.16	0.17	30798.36	3.46	31805.29	0.30	31957.31	0.17	31831.39	0.22
475	31198.38	31464.66	0.85	30125.91	3.44	31370.50	0.55	31508.53	0.99	31401.29	0.65
476	30407.35	31040.63	2.08	29636.29	2.54	30685.54	0.91	30980.62	1.89	30936.20	1.74
477	30036.71	30479.05	1.47	29284.94	2.50	30198.91	0.54	30293.90	0.86	30336.82	1.00
478	30080.44	29865.24	0.72	28972.84	3.68	29828.94	0.84	29701.91	1.26	29760.74	1.06
479	29509.68	29715.91	0.70	28796.94	2.42	29676.87	0.57	29528.61	0.06	29605.99	0.33
480	28860.31	29286.10	1.48	28616.72	0.84	29054.30	0.67	29183.11	1.12	29249.85	1.35
481	28133.80	28565.51	1.53	28353.57	0.78	28187.75	0.19	28537.00	1.43	28586.89	1.61
482	27551.68	27889.71	1.23	28024.11	1.71	27572.62	0.08	27874.08	1.17	27955.12	1.46
483	26587.32	27280.34	2.61	27597.90	3.80	27111.71	1.97	27255.98	2.51	27367.70	2.94
484	26260.68	26430.87	0.65	26989.49	2.78	26116.93	0.55	26515.23	0.97	26625.97	1.39
485	25766.98	25953.97	0.73	26444.76	2.63	25988.82	0.86	25987.78	0.86	26143.37	1.46
486	25421.83	25444.95	0.09	25988.26	2.23	25395.94	0.10	25556.82	0.53	25681.40	1.02
487	25230.44	25045.69	0.73	25512.52	1.12	25025.29	0.81	25176.18	0.22	25309.62	0.31
488	25338.82	24846.63	1.94	25200.08	0.55	25038.19	1.19	24925.81	1.63	25081.51	1.02
489	25054.68	24819.56	0.94	25179.08	0.50	25139.05	0.34	24891.52	0.65	25066.29	0.05
490	24752.63	24676.35	0.31	25036.70	1.15	24912.98	0.65	24791.41	0.16	24979.75	0.92
491	24518.52	24332.77	0.76	24620.77	0.42	24526.49	0.03	24485.62	0.13	24653.72	0.55

续表

测量点	真实值/MW	算例 1				算例 2					
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
492	24274.51	24050.60	0.92	24274.42	0.00	24208.86	0.27	24206.39	0.28	24366.91	0.38
493	24059.45	23872.49	0.78	24066.18	0.03	24043.74	0.07	23980.96	0.33	24161.66	0.42
494	23847.91	23692.16	0.65	23874.59	0.11	23928.50	0.34	23769.43	0.33	23964.59	0.49
495	23618.25	23511.53	0.45	23636.52	0.08	23717.69	0.42	23583.70	0.15	23782.13	0.69
496	23418.88	23273.39	0.62	23338.54	0.34	23463.60	0.19	23374.34	0.19	23564.35	0.62
497	23197.60	23114.33	0.36	23135.05	0.27	23251.57	0.23	23196.40	0.01	23393.61	0.84
498	23124.42	22979.95	0.62	22952.04	0.75	23147.48	0.10	23006.97	0.51	23208.40	0.36
499	22891.13	22849.84	0.18	22734.26	0.69	23024.09	0.58	22869.59	0.09	23057.89	0.73
500	22909.95	22674.75	1.03	22535.53	1.63	22788.78	0.53	22728.20	0.79	22911.12	0.01
501	22761.57	22658.52	0.45	22499.24	1.15	22872.95	0.49	22663.96	0.43	22864.33	0.45
502	22842.10	22588.60	1.11	22423.42	1.83	22733.38	0.48	22618.52	0.98	22820.12	0.10
503	22893.82	22655.02	1.04	22498.48	1.73	22899.73	0.03	22629.48	1.15	22849.09	0.20
504	23083.30	22714.02	1.60	22554.69	2.29	22970.26	0.49	22686.06	1.72	22898.11	0.80
505	23084.46	22915.56	0.73	22843.71	1.04	23229.25	0.63	22840.20	1.06	23067.33	0.07
506	23471.83	23062.34	1.74	23014.74	1.95	23371.78	0.43	22978.98	2.10	23207.20	1.13
507	23606.82	23289.10	1.35	23129.34	2.02	23765.28	0.67	23211.38	1.68	23428.48	0.76
508	23686.29	23270.37	1.76	23031.57	2.76	23633.41	0.22	23397.01	1.22	23562.49	0.52
509	23318.72	23260.53	0.25	23090.71	0.98	23514.53	0.84	23469.12	0.64	23631.39	1.34
510	23443.55	23200.84	1.04	23144.11	1.28	23325.96	0.50	23383.85	0.25	23585.30	0.60
511	23670.31	23380.40	1.22	23268.85	1.70	23787.38	0.49	23389.91	1.18	23636.66	0.14
512	24096.71	23722.19	1.55	23693.80	1.67	24124.21	0.11	23668.89	1.78	23937.35	0.66
513	24631.08	24409.46	0.90	24679.83	0.20	24988.50	1.45	24196.17	1.77	24545.82	0.35
514	25743.59	25116.41	2.44	25398.84	1.34	25665.09	0.30	24770.89	3.78	25123.52	2.41
515	26741.16	26154.09	2.20	26372.66	1.38	26821.63	0.30	25613.91	4.22	25973.50	2.87
516	27562.53	27083.68	1.74	26964.67	2.17	27740.89	0.65	26591.42	3.52	26921.22	2.33
517	28438.84	27863.46	2.02	27539.79	3.16	28220.65	0.77	27429.59	3.55	27728.53	2.50
518	29002.18	28744.90	0.89	28245.45	2.61	29207.34	0.71	28246.75	2.60	28578.44	1.46
519	29529.63	29304.69	0.76	28819.27	2.41	29549.96	0.07	28867.84	2.24	29160.13	1.25
520	30197.53	29823.55	1.24	29383.34	2.70	30055.05	0.47	29420.46	2.57	29735.16	1.53
521	30518.32	30438.82	0.26	29997.89	1.71	30732.88	0.70	30092.11	1.40	30446.81	0.23
522	31032.99	30851.16	0.59	30416.20	1.99	31069.52	0.12	30619.72	1.33	30986.40	0.15
523	31617.05	31270.20	1.10	30814.87	2.54	31670.88	0.17	31022.63	1.88	31381.81	0.74
524	32295.54	31751.27	1.69	31566.23	2.26	32096.59	0.62	31553.82	2.30	31901.19	1.22
525	33242.06	32453.93	2.37	32444.26	2.40	32911.94	0.99	32273.33	2.91	32681.08	1.69
526	34090.70	33262.90	2.43	33195.89	2.62	33951.49	0.41	33022.41	3.13	33384.32	2.07
527	34455.60	33910.01	1.58	33511.63	2.74	34215.15	0.70	33732.95	2.10	33910.70	1.58
528	34166.84	34168.26	0.00	33063.59	3.23	34138.72	0.08	34219.92	0.16	34224.62	0.17
529	33575.57	34049.42	1.41	32711.90	2.57	33694.32	0.35	34090.32	1.53	33916.02	1.01
530	33232.23	33758.74	1.58	32932.00	0.90	33260.57	0.09	33746.22	1.55	33621.67	1.17

续表

测量点	真实值/MW	算例 1				算例 2					
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
531	33653.43	33478.21	0.52	33174.94	1.42	33357.17	0.88	33587.10	0.20	33578.19	0.22
532	33772.85	33626.35	0.43	33328.26	1.32	33774.44	0.00	33665.40	0.32	33671.99	0.30
533	33920.44	33816.97	0.31	33310.85	1.80	33786.31	0.40	33769.24	0.45	33714.07	0.61
534	33732.94	33931.21	0.59	33325.40	1.21	33897.52	0.49	33804.08	0.21	33730.01	0.01
535	33756.52	33836.85	0.24	33242.82	1.52	33690.96	0.19	33809.67	0.16	33739.37	0.05
536	33778.73	33783.31	0.01	33292.04	1.44	33770.43	0.02	33863.59	0.25	33833.71	0.16
537	33909.52	33830.70	0.23	33352.64	1.64	33889.63	0.06	33940.83	0.09	33916.68	0.02
538	34156.88	33892.49	0.77	33399.17	2.22	34061.25	0.28	34014.82	0.42	33969.63	0.55
539	33998.15	34040.61	0.12	33394.82	1.77	34159.87	0.48	34206.71	0.61	34128.20	0.38
540	33980.82	34020.82	0.12	33406.50	1.69	34013.53	0.10	34247.18	0.78	34138.11	0.46
541	33934.00	33977.08	0.13	33487.93	1.31	34016.69	0.24	34201.84	0.79	34090.53	0.46
542	34099.48	33944.09	0.46	33546.41	1.62	33907.32	0.56	34214.85	0.34	34097.38	0.01
543	33937.74	34027.19	0.26	33592.34	1.02	34084.57	0.43	34284.48	1.02	34157.39	0.65
544	34187.97	33959.42	0.67	33482.49	2.06	33778.72	1.20	34251.52	0.19	34073.14	0.34
545	34100.18	34116.87	0.05	33615.57	1.42	34082.95	0.05	34362.31	0.77	34213.39	0.33
546	34227.48	34131.62	0.28	33587.44	1.87	34100.80	0.37	34391.95	0.48	34197.34	0.09
547	34234.48	34126.98	0.31	33572.47	1.93	34038.65	0.57	34395.29	0.47	34163.96	0.21
548	34369.52	34194.52	0.51	33604.65	2.23	34198.39	0.50	34395.66	0.08	34147.13	0.65
549	34222.23	34256.83	0.10	33607.31	1.80	34328.45	0.31	34344.83	0.36	34076.98	0.42
550	34322.13	34088.79	0.68	33273.43	3.06	33954.11	1.07	34284.24	0.11	33994.22	0.96
551	33973.39	33964.77	0.03	32939.93	3.04	33957.86	0.05	34301.53	0.97	34011.83	0.11
552	33704.06	33670.72	0.10	32598.53	3.28	33573.94	0.39	34077.51	1.11	33726.98	0.07
553	33353.04	33522.68	0.51	32844.86	1.52	33184.43	0.51	33798.33	1.34	33484.32	0.39
554	33004.96	33403.91	1.21	33081.40	0.23	33220.87	0.65	33528.35	1.59	33299.94	0.89
555	32675.14	33027.21	1.08	32944.66	0.82	32819.42	0.44	33127.98	1.39	32919.73	0.75
556	32679.00	32605.47	0.22	32612.49	0.20	32311.20	1.13	32720.48	0.13	32530.19	0.46
557	32237.09	32468.74	0.72	32403.74	0.52	32228.82	0.03	32495.79	0.80	32339.15	0.32
558	31859.93	32198.34	1.06	32145.77	0.90	31767.63	0.29	32214.85	1.11	32084.89	0.71
559	31890.48	31993.21	0.32	31908.88	0.06	31597.14	0.92	31885.04	0.02	31847.40	0.14
560	31768.78	32032.46	0.83	31952.82	0.58	31922.47	0.48	31794.68	0.08	31854.78	0.27
561	32082.73	32104.15	0.07	31958.03	0.39	32102.15	0.06	32008.62	0.23	32229.76	0.46
562	32776.90	32362.62	1.26	32197.51	1.77	32725.28	0.16	32213.75	1.72	32507.25	0.82
563	33123.44	32870.00	0.77	32810.33	0.95	33413.79	0.88	32551.09	1.73	32809.18	0.95
564	33360.01	33222.04	0.41	33196.66	0.49	33554.68	0.58	32992.94	1.10	33194.65	0.50
565	33363.74	33390.68	0.08	33250.88	0.34	33446.89	0.25	33213.66	0.45	33333.05	0.09
566	33223.01	33446.30	0.67	33223.64	0.00	33383.85	0.48	33313.55	0.27	33385.61	0.49
567	32935.86	33198.77	0.80	32929.07	0.02	33065.88	0.39	33176.65	0.73	33166.86	0.70
568	32446.32	32829.99	1.18	32629.13	0.56	32437.22	0.03	32882.16	1.34	32802.67	1.10
569	32063.89	32439.32	1.17	32525.76	1.44	32020.40	0.14	32460.75	1.24	32385.05	1.00

续表

测量点	真实值/MW	算例 1				算例 2					
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
570	31587.10	31969.44	1.21	32107.74	1.65	31664.17	0.24	31992.54	1.28	31911.05	1.03
571	31156.99	31413.61	0.82	31421.49	0.85	30958.46	0.64	31511.56	1.14	31402.06	0.79
572	30474.66	31055.42	1.91	31098.45	2.05	30556.17	0.27	31077.08	1.98	31007.16	1.75
573	30545.95	30631.86	0.28	30742.91	0.64	30161.96	1.26	30578.15	0.11	30583.91	0.12
574	30856.26	30446.15	1.33	30474.36	1.24	30465.23	1.27	30294.58	1.82	30341.89	1.67
575	30331.58	30532.38	0.66	30295.35	0.12	30437.00	0.35	30378.02	0.15	30386.97	0.18
576	29635.64	30187.30	1.86	29711.46	0.26	29706.01	0.24	30139.00	1.70	30104.60	1.58
577	29156.19	30029.59	3.00	28817.53	1.16	28818.87	1.16	29685.18	1.81	29558.07	1.38
578	28148.28	29174.64	3.65	28311.28	0.58	28677.98	1.88	29007.74	3.05	28902.94	2.68
579	26978.47	28223.61	4.62	27907.50	3.44	27197.84	0.81	28257.70	4.74	28211.02	4.57
580	26474.31	27534.72	4.01	27247.03	2.92	26738.19	1.00	27274.78	3.02	27319.20	3.19
581	26238.82	26404.02	0.63	26660.68	1.61	26290.69	0.20	26566.45	1.25	26652.15	1.58
582	25938.36	26298.58	1.39	26826.80	3.43	25898.90	0.15	26239.29	1.16	26312.66	1.44
583	25518.65	26233.98	2.80	26121.00	2.36	25846.12	1.28	26031.22	2.01	26093.15	2.25
584	25085.25	25944.41	3.42	26225.75	4.55	25262.79	0.71	25725.92	2.55	25808.30	2.88
585	24919.52	25270.53	1.41	25618.96	2.81	25032.31	0.45	25346.96	1.72	25465.33	2.19
586	24732.40	25215.01	1.95	25299.30	2.29	24768.28	0.15	25059.90	1.32	25177.20	1.80
587	24473.70	24775.55	1.23	25296.46	3.36	24551.08	0.32	24862.51	1.59	24969.31	2.03
588	24313.80	24494.26	0.74	24855.14	2.23	24453.37	0.57	24633.58	1.32	24735.42	1.73
589	24009.29	24351.47	1.43	24835.78	3.44	24336.08	1.36	24419.50	1.71	24518.04	2.12
590	23958.36	23995.27	0.15	24577.78	2.59	23637.01	1.34	24179.77	0.92	24282.40	1.35
591	23537.89	24271.25	3.12	24095.82	2.37	23771.78	0.99	23993.30	1.93	24087.21	2.33
592	23569.31	24045.59	2.02	23747.32	0.76	23535.27	0.14	23741.64	0.73	23835.17	1.13
593	23437.23	23816.69	1.62	23601.87	0.70	23463.97	0.11	23562.16	0.53	23646.82	0.89
594	23315.68	23749.82	1.86	23713.35	1.71	23539.62	0.96	23468.30	0.65	23547.37	0.99
595	23220.24	23204.00	0.07	23618.35	1.71	23318.32	0.42	23347.75	0.55	23432.73	0.92
596	23035.41	23381.41	1.50	23555.89	2.26	23358.18	1.40	23234.07	0.86	23324.48	1.25
597	22980.21	23269.12	1.26	23266.01	1.24	23085.61	0.46	23118.41	0.60	23227.41	1.08
598	23079.24	23245.18	0.72	23334.51	1.11	22811.61	1.16	23032.67	0.20	23158.89	0.35
599	23036.75	23279.86	1.06	23086.77	0.22	23005.09	0.14	23084.83	0.21	23223.79	0.81
600	23164.87	23304.18	0.60	22862.42	1.31	23128.59	0.16	23122.25	0.18	23269.33	0.45
601	23360.45	23651.94	1.25	23222.49	0.59	23435.25	0.32	23220.38	0.60	23375.39	0.06
602	23491.72	23697.70	0.88	23616.51	0.53	23372.06	0.51	23397.38	0.40	23549.17	0.24
603	23586.90	23535.82	0.22	23729.16	0.60	23747.22	0.68	23561.87	0.11	23725.38	0.59
604	23621.95	23831.44	0.89	23598.21	0.10	23818.39	0.83	23615.48	0.03	23775.76	0.65
605	23274.34	23845.85	2.46	23608.64	1.44	23375.89	0.44	23655.92	1.64	23805.63	2.28
606	23391.10	23865.16	2.03	23720.63	1.41	23390.23	0.00	23550.88	0.68	23708.76	1.36
607	23511.08	23426.70	0.36	23727.72	0.92	23409.90	0.43	23551.82	0.17	23742.14	0.98
608	23581.79	24115.42	2.26	24446.23	3.67	23930.24	1.48	23754.38	0.73	23973.36	1.66

续表

测量点	真实值/MW	算例 1				算例 2					
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
609	24086.72	24137.03	0.21	24505.52	1.74	24208.56	0.51	24028.95	0.24	24261.81	0.73
610	24942.86	24527.15	1.67	25207.91	1.06	24859.07	0.34	24492.53	1.81	24775.17	0.67
611	25974.60	25594.07	1.46	25964.06	0.04	25612.98	1.39	25223.73	2.89	25557.79	1.60
612	26745.48	26417.05	1.23	26756.43	0.04	26778.38	0.12	26132.87	2.29	26461.38	1.06
613	27603.42	26939.06	2.41	27724.63	0.44	27729.57	0.46	26956.22	2.34	27268.51	1.21
614	28269.79	27579.00	2.44	28388.95	0.42	28103.62	0.59	27691.43	2.05	27987.71	1.00
615	28924.36	28777.44	0.51	28782.37	0.49	29052.90	0.44	28391.98	1.84	28673.46	0.87
616	29558.11	29246.68	1.05	29091.46	1.58	29598.90	0.14	28987.75	1.93	29267.29	0.98
617	30105.61	29665.71	1.46	29708.43	1.32	30144.62	0.13	29577.76	1.75	29877.15	0.76
618	30639.31	30690.10	0.17	29834.54	2.63	30518.27	0.40	30130.54	1.66	30436.51	0.66
619	31346.26	31280.27	0.21	30845.90	1.60	31042.11	0.97	30678.87	2.13	30992.39	1.13
620	32005.45	31441.51	1.76	31583.98	1.32	32165.61	0.50	31331.30	2.11	31640.40	1.14
621	32963.23	32249.81	2.16	32292.48	2.03	33005.03	0.13	32034.58	2.82	32345.84	1.87
622	34077.79	33018.62	3.11	33241.83	2.45	33602.74	1.39	32822.06	3.68	33114.93	2.83
623	33972.93	34254.01	0.83	33967.26	0.02	34352.02	1.12	33702.82	0.80	33915.78	0.17
624	33743.43	34461.01	2.13	33766.41	0.07	33571.31	0.51	34092.92	1.04	34245.23	1.49
625	32989.02	34084.77	3.32	33622.78	1.92	33020.79	0.10	33985.38	3.02	34068.57	3.27
626	32926.88	34010.49	3.29	33517.26	1.79	32965.06	0.12	33645.58	2.18	33713.98	2.39
627	32987.30	33745.24	2.30	33502.42	1.56	33298.19	0.94	33376.68	1.18	33468.97	1.46
628	33242.51	33815.77	1.72	33081.08	0.49	33007.40	0.71	33397.96	0.47	33494.94	0.76
629	33636.61	33635.40	0.00	33152.17	1.44	33409.99	0.67	33529.81	0.32	33540.08	0.29
630	33934.88	34134.98	0.59	33431.90	1.48	33725.43	0.62	33814.00	0.36	33755.52	0.53
631	33730.05	34330.72	1.78	33787.87	0.17	33728.75	0.00	34142.61	1.22	33979.24	0.74
632	34017.78	34452.93	1.28	33655.90	1.06	33905.61	0.33	34235.77	0.64	34009.13	0.03
633	33912.80	34628.80	2.11	33499.03	1.22	34371.12	1.35	34353.57	1.30	34111.85	0.59
634	34198.64	34191.95	0.02	33314.71	2.58	34206.09	0.02	34445.58	0.72	34219.92	0.06
635	34200.10	34320.51	0.35	33042.85	3.38	34134.24	0.19	34552.74	1.03	34328.12	0.37
636	34352.73	34936.37	1.70	33573.93	2.27	34193.58	0.46	34678.90	0.95	34440.01	0.25
637	34334.14	34700.43	1.07	33367.55	2.82	34635.53	0.88	34789.51	1.33	34530.58	0.57
638	34490.08	35052.58	1.63	33441.96	3.04	34236.47	0.74	34869.67	1.10	34587.28	0.28
639	34708.44	34876.04	0.48	33951.86	2.18	34214.01	1.42	34982.52	0.79	34660.24	0.14
640	34475.00	35024.14	1.59	34025.59	1.30	34563.43	0.26	35163.53	2.00	34787.72	0.91
641	34723.14	35516.44	2.28	33735.62	2.84	34419.36	0.87	35211.76	1.41	34804.24	0.23
642	34528.43	35180.23	1.89	33519.74	2.92	34808.28	0.81	35272.04	2.15	34819.53	0.84
643	34468.58	35618.98	3.34	33794.78	1.95	34576.54	0.31	35327.47	2.49	34851.81	1.11
644	34668.17	35542.61	2.52	33800.48	2.50	34752.50	0.24	35268.80	1.73	34773.06	0.30
645	34545.23	35463.88	2.66	33702.07	2.44	34552.19	0.02	35337.61	2.29	34825.81	0.81
646	34365.88	35480.07	3.24	33493.06	2.54	34723.85	1.04	35344.41	2.85	34809.16	1.29
647	34367.77	35421.53	3.07	33483.15	2.57	34230.22	0.40	35206.50	2.44	34660.47	0.85

续表

测量点	真实值/MW	算例 1						算例 2			
		SVM		BP 神经网络		ML-LSTM		无温度数据		精确温度数据	
		预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%	预测值/MW	误差/%
648	34036.96	35082.50	3.07	33711.00	0.96	34153.11	0.34	35068.48	3.03	34511.38	1.39
649	33099.35	34724.87	4.91	33703.95	1.83	33448.80	1.06	34848.09	5.28	34307.65	3.65
650	32851.80	34230.90	4.20	32827.55	0.07	32698.80	0.47	34216.48	4.15	33752.04	2.74
651	32772.73	33837.05	3.25	32536.06	0.72	32706.70	0.20	33601.52	2.53	33267.10	1.51
652	32438.17	33448.02	3.11	32799.44	1.11	32749.44	0.96	33281.67	2.60	33058.34	1.91
653	32008.30	33042.10	3.23	32758.12	2.34	32295.54	0.90	32960.06	2.97	32819.54	2.53
654	31489.32	33006.49	4.82	32450.26	3.05	31978.49	1.55	32533.68	3.32	32452.56	3.06
655	31094.58	32445.09	4.34	32373.09	4.11	31357.40	0.85	32059.68	3.10	32076.40	3.16
656	31169.86	31622.56	1.45	31442.33	0.87	31137.12	0.11	31646.59	1.53	31762.08	1.90
657	31428.59	32059.17	2.01	31530.47	0.32	31266.85	0.51	31573.70	0.46	31750.30	1.02
658	32111.35	31959.00	0.47	31596.96	1.60	32004.62	0.33	31771.09	1.06	31984.13	0.40
659	32469.55	32616.33	0.45	32395.16	0.23	32716.14	0.76	32212.30	0.79	32412.75	0.17
660	32750.68	33084.20	1.02	32832.04	0.25	32606.06	0.44	32649.73	0.31	32801.15	0.15
661	32895.59	33346.93	1.37	33298.83	1.23	32624.80	0.82	32919.31	0.07	33013.21	0.36
662	32858.07	33373.63	1.57	33422.98	1.72	32674.41	0.56	33077.19	0.67	33109.95	0.77
663	32821.90	33362.38	1.65	33536.75	2.18	32646.25	0.54	33071.56	0.76	33053.80	0.71
664	32614.53	33232.02	1.89	33383.86	2.36	32205.06	1.26	32979.42	1.12	32901.19	0.88
665	32625.71	32460.29	0.51	32957.78	1.02	32479.77	0.45	32807.84	0.56	32675.01	0.15
666	32118.63	32786.74	2.08	32823.93	2.20	32284.96	0.52	32666.22	1.70	32491.30	1.16
667	31530.16	32543.67	3.21	32294.05	2.42	31755.92	0.72	32329.99	2.54	32142.74	1.94
668	30944.52	31671.45	2.35	31691.84	2.42	30848.92	0.31	31821.10	2.83	31657.90	2.31
669	30570.23	31535.34	3.16	31356.98	2.57	30846.44	0.90	31334.98	2.50	31222.71	2.13
670	30560.59	30645.15	0.28	30704.43	0.47	30373.07	0.61	30867.58	1.00	30834.81	0.90
671	30217.05	30675.62	1.52	30555.88	1.12	29931.64	0.94	30599.18	1.26	30590.55	1.24
672	29785.88	30185.29	1.34	30567.12	2.62	29707.40	0.26	30337.80	1.85	30270.22	1.63

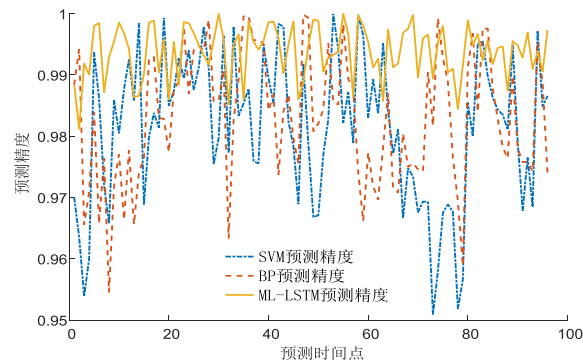


图 A5 8 月 31 日不同模型预测精度对比

Fig.A5 Comparison of forecasting accuracy among different models on Aug. 31

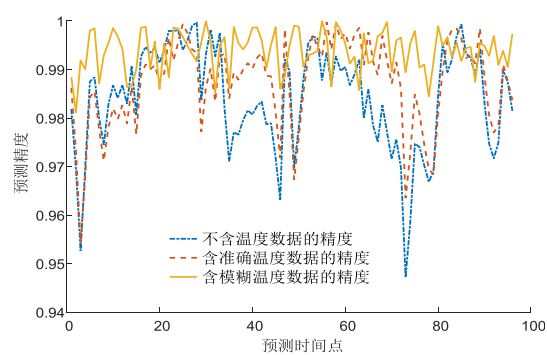


图 A6 8 月 31 日不同输入特征向量预测精度对比

Fig.A6 Comparison of forecasting accuracy among different input eigenvectors on Aug. 31