

基于时间序列的电力通信网络数据 传输延时补偿算法

张立杨^{1†}, 李迅¹, 王志伟¹, 隗寿晨², 陈军²

(1. 国网山东省电力公司经济技术研究院, 山东 济南 250000; 2. 山东鲁软数字科技有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要: 为了降低数据传输延迟, 保证电力系统的稳定运行, 研究了基于时间序列的电力通信网络数据传输延时补偿算法。以 TCN 网络分析采集通信延迟数据为样本输入, 利用果蝇算法优化长短期神经网络算法实现了电力通信网络数据的延迟预测, 并以预测结果为输出, 利用卡尔曼滤波器完成了数据延迟补偿与校正。实验结果表明, 改进后的 LSTM 时间序列模型预测精度高, 延时补偿准确性高, 误差小于 0.001, 延时时间更短, 补偿效果更明显。

关键词: 数据传输延迟; 果蝇算法; 卡尔曼滤波器; LSTM 时间序列模型

中图分类号: TP37

文献标识码: A

Data Transmission Delay Dompensation Algorithm of Power Communication Network Based on Time Series

ZHANG Liyang^{1†}, LI Xun¹, WANG Zhiwei¹, WEI Shouchen², CHEN Jun²

(1. Economic and Technical Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan, Shandong 250000, China; 2. Shandong Luruan Digital Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong 250000, China)

Abstract: In order to reduce the data transmission delay and ensure the stable operation of the power system, this paper studies the time-series-based data transmission delay compensation algorithm of the power communication network. With the communication delay data collected by TCN network analysis as the sample input, the fruit fly algorithm is used to optimize the long-term and short-term neural network (Long Short-Term Memory, LSTM). LSTM algorithm realizes the delay prediction of power communication network data, and takes the prediction result as output, and completes the data delay compensation and correction by Kalman filter. The experimental results show that the improved LSTM time series model has high prediction accuracy and high delay compensation accuracy, the error is less than 0.001, the delay time is shorter, and the compensation effect is more obvious.

Key words: data transmission delay; drosophila algorithm; Kalman filter; LSTM time series model

在互联网的发展过程中,信息量呈现爆炸式增长,电力通信网络的重要性也日渐凸显。电力数据在传输过程中容易受到传感器、电路、信道等外界因素的影响出现延迟^[1]。为提高网络的可靠性与高效性,减少传输拥堵,本研究将延迟补偿算法应

用到电力通信网络中,能够保证电网安全稳定运行。

为了降低数据延时,文献[2]设计了无线通信网络补偿算法,通过计算违约概率调整网络簇负载,在确定簇头后搜索各个簇头到汇聚节点的最优

路径,该方案能提升通信网络的吞吐能力,但存在误码率高、带宽小的问题;文献[3]提出了基于 5G 技术的通信网络数据低延时传输方法,构建了 MI-MO 通信网络模型,设计了数据传输终端,采用自适应公平调度法实现了数据低延时传输,但还需进一步验证更多种类数据的有效性。文献[4]构建了网络传输延迟控制系统,在分析各个环节的动作时序后设计了控制器,根据数据的时间戳得到网络传输延迟的大小,克服了数据传输延迟,但实现过程复杂;文献[5]提出了远距离数据流超低延时传输策略,通过设计二次自适应对消模型,在消除跟踪干扰后,采用多路径并行传输协议,解决了数据流传输链路抖动较高问题,但系统的稳定性较差。

为此,提出了基于时间序列的电力通信网络数据传输延时补偿算法,以 AT89C52 为主控芯片设计了数据传输系统,采用果蝇算法进行参数寻优,卡尔曼滤波器完成延时补偿,提升了数据传输延迟预测的准确性和数据质量,具有较大的工程实用意义。

1 电力通信网络数据延迟预测方案设计

在电力通信网络数据传输中,若数据量过多就会出现网络拥堵,形成传递失真和数据丢失。造成数据传输延迟的原因有很多,包括通信距离、通信容量、通信速率、传感器延时、运算延时等。虽然新型的网络通信设备不断更新,数据的交换速率也在提高,但网络通信延迟的问题依然存在。面对这种情况,本研究基于时间序列分析传输信息,对通信状态做出预测,得到数据的时序特征,从而完成了对数据的延时补偿,延时预测的总体设计如图 1 所示。

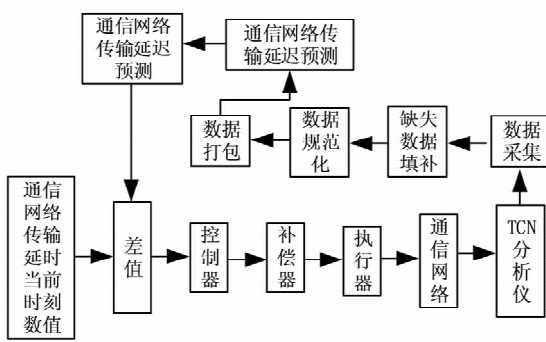


图 1 电力通信网络数据传输延时预测框图

在图 1 中,当 TCN 分析仪抓拿到网络的延迟数据后,为了保证数据的完整性,需对延迟数据进行

行缺失填补和规范化处理,经过打包后得到了延迟样本,再输入改进的 LSTM 时间序列模型预测的延迟数值,并计算当前时刻与预测时刻的差值,输入到控制器中,经过卡尔曼滤波,就实现了电力通信网络数据的补偿。

由于电力数据的发送、传输和处理需要一定的时间,很多数据都是通过公共介质进行传输的,会产生时间延迟,使接收到的信息产生滞后。为了提高数据传输效率,本文使用果蝇算法改进 LSTM 时间序列模型建模,选择卡尔曼滤波算法对传输信息进行状态预测和补偿。时间序列是描述多个变量的数据统计特性方法,具有随机性、方便实用、建模样本数量少等特点,其应用范围包含了天气预报、能源消耗、洪水预报等领域;果蝇算法是基于果蝇觅食的群智能搜索算法,与遗传算法、粒子群算法相比,该算法具有收敛效果好、搜索速度快的优点;本文将果蝇算法与 LSTM 时间序列模型相结合,增强了网络的泛化能力和通信质量。卡尔曼滤波器是线性滤波器,在对输入的预测值和观测值做出滤波处理后,就能使估计结果更加接近真实值,误差明显变小,提高电力数据延迟的预测精度^[6]。

2 电力通信网络数据延迟预测具体实现

1.1 电力通信网络数据预处理

随着时间的累积,传输延迟会越来越严重。特别是在利用 TCN 分析仪采集多种属性的数据后,由于采集设备的影响,会出现数据缺失的情况,需要对初始数据进行预处理^[7]。为保证数据的质量和后续提供补偿数据的准确性,本文首先对缺失数据进行填补,再进行规范化处理,最终完成了数据预处理。通过历史数据得到历史通信数据的相关因子 R ,再列出缺失序列,得到拟合值 S_1 ,再寻找和缺失序列相关维度最高的时间序列,得到拟合值 S_2 ,通过 R 可以得到相关权重,如式(1)所示。

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{R}{2} \\ \omega_2 = \frac{2-R}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, ω_1 、 ω_2 表示 S_1 、 S_2 的权重。通过权重便能得到最终拟合值如式(2)所示。

$$S_3 = \omega_1 S_1 + \omega_2 S_2 \quad (2)$$

在式(2)中, S_3 变为缺失值。电力通信网络数据规范化是让延迟数据具备统一的标准,如式(3)所示。

$$\hat{S} = \frac{S - \bar{S}}{\Delta S} \quad (3)$$

式中, S 为原始数据, $\bar{S}$ 和 ΔS 分别为延时数

据的平均值和标准差, $\hat{S}$ 为经过规范的电力通信网络延时数据。

1.2 基于电力通信网络数据传输系统设计

为了提高数据传输的抗干扰性和可靠性,对数据延时进行补偿,本研究以 GSM 网络和 AT89C52 单片机为核心设计了电力通信网络数据传输系统,结构如图 2 所示。

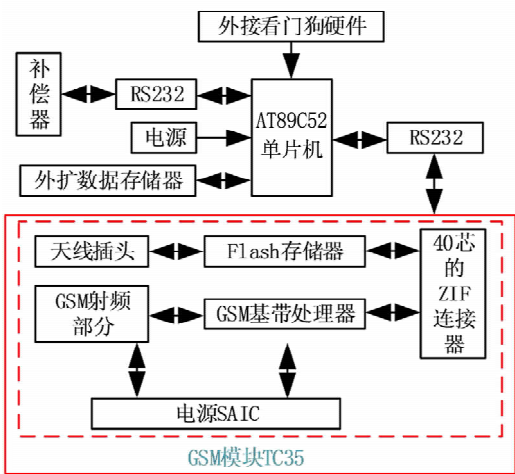


图 2 电力通信网络数据传输系统结构图

在图 2 中, ATC89C52 通过控制补偿器和 GSM 模块 TC35 完成了数据传输。本研究采用 MAX232 电平转换芯片扩展出两个 RS232 串行数据口,以分时复用的方式传输数据。在读取大量历史数据时,数据会暂存在外扩数据存储器中。GSM 模块选择功耗低、设计简单的 TC35 蜂窝通信引擎,该模块由 GSM 基带处理器、GSM 射频电路、天线插头等部分组成,通过 40 芯 ZIF 连接蜂窝应用部分,支持 FR、HR 和 EFR 的语音和信道编码,数据接口符合 RS232 接口标砖,支持 AT 指令集。TC35 模块能识别以 ASC II 表示的字符串的 AT 指令集,在接收到新消息后,会自动向 AT89C52 发送通知。

系统软件采用模块化设计,由可视化编程语言 C++ Builder 开发,使用 MSComm 控制 PC 机的 COM 接口。C++ Builder 通过多线程技术,让上位机能同时接收和发送数据,解决了通信时的信息阻塞问题,保证了电力通信网络数据的实时传输^[8]。

2 电力通信网络数据传输延迟模型建立

2.1 时间序列模型

通信网络关系着电力系统的启停、调度,一旦出现延迟信息传递就会受到影响。为了避免数据

传输延迟影响用户体验,本文采用改进的 LSTM 时间序列模型,对数据延迟进行自动预测和优化,提升了数据质量和传输信息的准确性,预测流程如图 3 所示。

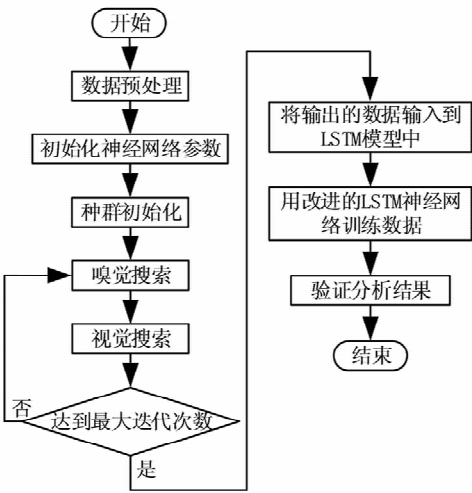


图 3 基于改进的 LSTM 模型出数据延迟预测流程

LSTM 是常用的时序预测模型,可以根据历史时间序列预测未来时间的序列数据,属于特殊的循环神经网络(Rerrent Neural Network, RNN),其预测精度高,结构如图 4 所示。

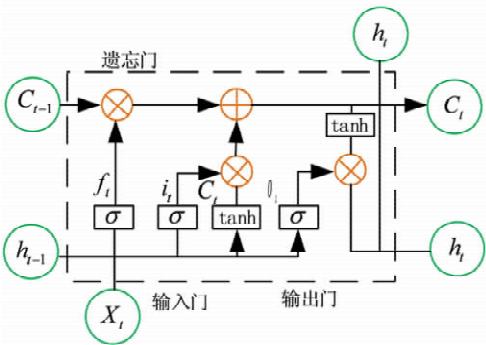


图 4 LSTM 模型示意图

在图 4 中,LSTM 模型包含遗忘门 f_t 、记忆门 i_t 、输出门 O_t ,可以控制电力通信网络数据传输到 LSTM 单元的信息量^[9]。LSTM 模型的数值参数如式(4)所示。

$$\begin{cases} f_t = \sigma(W_f \times [h_{t-1}, X_t] + b_f) \\ i_t = \sigma(W_i \times [h_{t-1}, X_t] + b_i) \\ O_t = \sigma(W_o \times [h_{t-1}, X_t] + b_o) \\ C_t = \tanh(W_c \times [h_{t-1}, X_t] + b_c) \\ h_t = O_t \times \tanh(C_t) \end{cases} \quad (4)$$

在式(4)中, σ 属于激活函数, C_t 为记忆单元状态, h_t 为记忆单元输出, $\tanh$ 为待选电力通信网

络信息, W_f 、 W_i 、 W_o 、 W_c 为各个指标的权重, b_f 、 b_i 、 b_o 、 b_c 为不同偏置项的特征向量, X_i 为输出总量。

利用 LSTM 模型预估电力通信网络延迟会造成训练模型过拟合, 本研究选择果蝇算法对参数进行全局寻优, 设果蝇的初始位置为 (X_axis , Y_axis), 个体果蝇搜寻食物的距离与方向如式(5)所示。

$$\begin{cases} X_i = X_axis + (2 \times \text{Random}() - 1) \times R \\ Y_i = Y_axis + (2 \times \text{Random}() - 1) \times R \end{cases} \quad (5)$$

在式(5)中, R 为果蝇搜索半径, 由于无法找不到食物的位置, 需判断到原点 D_i 的位置, 如式(6)所示。

$$D_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \quad (6)$$

味道浓度判定值 S_i 为距离的倒数, 如式(7)所示。

$$S_i = \frac{1}{D_i} \quad (7)$$

通过 S_i 求出最高(最低)味道浓度的果蝇个体, 如式(8)所示。

$$[\text{bestSmell} \quad \text{bestIndex}] = \max / \min (f(S_i)) \quad (8)$$

保留最佳浓度值, 即电力通信网络数据的最优参数, 果蝇向该位置飞去, 直到迭代结束, 如式(9)所示。

$$\begin{cases} X_axis = X(\text{bestIndex}) \\ Y_axis = Y(\text{bestIndex}) \end{cases} \quad (9)$$

当把传输延迟数据样本输入到优化后的 LSTM 模型中后, 就完成了基于时间序列的电力通信网络传输延迟预测。

2.2 电力网络通信数据延时补偿及优化

信息经过信号处理后, 主机将按照实时传输协议(RTP)打包发送给接收方, 并给每个数据包打上时间戳, 接收方根据数据包到达时间和时间戳, 就能算出通信延时 T_d 。

针对电力网络通信数据的传输延时, 本文采用卡尔曼滤波算法, 对延时 T_d 后的目标状态 $Y(k)$ 进行补偿^[10]。系统的状态方程和观测方程如式(10)所示。

$$\begin{cases} X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k,k-1} W_k \\ Y_k = H_k X_k + V_k \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\Phi_{k,k-1}$ 为系统转移矩阵, Γ 为系统噪声矩阵, W_k 为系统噪声, 是 LSTM 时间序列模型估计误差; H 为量测矩阵, $H = [1, 0, 0]$, V_k 为量测

噪声。假设 X_k 、 Z_k 、 W_k 和 V_k 满足式(11)。

$$\begin{cases} E[W_k] = 0, E[W_k, W_j^T] = Q_k \delta_{kj} \\ E[V_k] = 0, E[V_k, V_j^T] = R_k \delta_{kj} \\ E[W_k V_j^T] = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, Q_k 、 R_k 分别为系统、量测噪声方差阵。目标状态的估计 $\bar{X}_k$ 如式(12)所示。

$$\begin{cases} \bar{X}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \bar{X}_{k-1} \\ \bar{X}_k = \bar{X}_{k/k-1} + K_k (Z_k - H_k \bar{X}_{k/k-1}) \\ K_k = P_{k/k-1} H_k^T (H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \\ P_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T \\ P_k = (1 - K_k H_k) P_{k/k-1} (1 - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \end{cases} \quad (12)$$

若给定初始值 X_0 、 P_0 , 根据 k 时刻的目标状态 $Y(k)$, 便能算出 X_k 。由式(12)可知, $\Phi_{k,k-1}$ 能实现从 $k-1$ 到 k 的预测, 利用状态转移矩阵设为 $\Phi_{k,k-m}$, 能实现 $k-m$ 到 k 的多步预测, 最终完成了对电力网络通信数据传输的延时补偿。

卡尔曼滤波是不断迭代并优化参数的过程, 其预测值会越来越逼近真实值^[11]。为了实现更好地补偿效果, 本文以滤波器接收信号的延迟帧数为依据, 进行预测滤波, 就能完成对数据的补偿校正。

3 实验结果与分析

为了测试基于时间序列的电力通信网络数据传输延时补偿算法的性能, 本研究的计算机配置为 Inter Core i7-10875 @ 2.3GHz 处理器, Linux CenstOS7.1 操作系统, 通过 MATLAB 软件进行建模和仿真, 实验环境如图 5 所示。

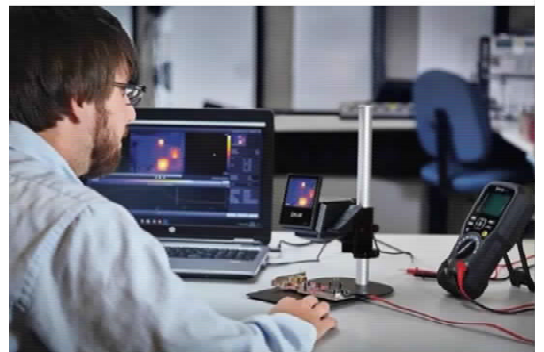


图 5 实验环境

数据传输延迟会影响电力通信网络的可靠性, 为此本研究利用 TCN 分析仪采集到电力通信网络延迟数据后, 得到了训练样本和测试样本进行实

例测试,部分样本如表 1 所示。

表 1 电力通信网络传输延迟数据样本

时间/s	发送延迟/s	传播延迟/s	处理延迟/s	排队延迟/s
1	0.21	0.12	0.05	0.54
2	0.24	0.14	0.08	0.57
3	0.26	0.16	0.10	0.58
4	0.28	0.18	0.12	0.60
5	0.30	0.20	0.14	0.62
6	0.31	0.21	0.15	0.63
7	0.34	0.25	0.17	0.65
8	0.35	0.26	0.19	0.67
9	0.38	0.27	0.20	0.68
10	0.39	0.30	0.24	0.70

根据表 1 训练样本,本文先利用对果蝇算法找到延时补偿最优输入参数,再对 LSTM 传输延迟预测模型进行训练,果蝇算法 MATLAB 仿真结果如图 6 所示。

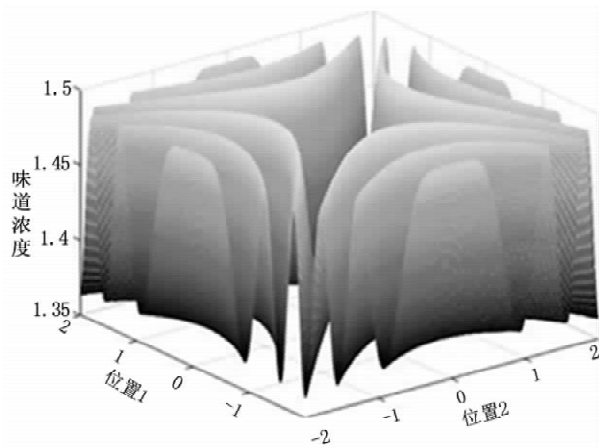


图 6 果蝇算法 MATLAB 仿真

在图 6 中,果蝇算法寻优能力强,收敛速度快,拟合效果好,可以提高 LSTM 模型的预测精度^[12]。LSTM 模型的训练结果如图 7 所示。

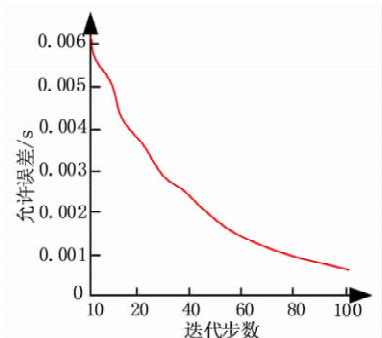


图 7 LSTM 时间序列模型传输延迟预测训练

由图 7 可知,当迭代步数达到 86 时,LSTM 时间序列模型的预测误差小于 0.001,能被应用于延迟补偿,为了验证该模型的准确性,本研究对不同延时值进行估计,如表 2 所示。

表 2 延时估计值

延时实际值/ms	估计延时值/ms
100	103
200	203
300	302

由表 2 可知,LSTM 时间序列模型能较准确地估计电力通信网络数据的延时值,误差在 5 ms 以内。数据传输延迟会使网络的稳定性遭到破坏,因此本文在相同测试条件下,和文献[2]的无线通信网络补偿算法和文献[3]的 MIMO 通信网络数据超低延时传输方法进行对比,如图 8 所示。

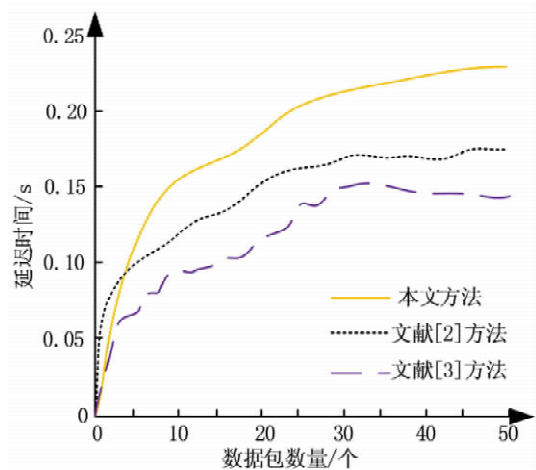


图 8 不同节点的传输延时曲线

由图 8 可知,本文方法的延时时间更短,证明了该方法的有效性。为了使电力系统稳定运行,本研究对通信延时进行补偿处理,经过补偿后,延时样本数据的拟合率更高,也就是说延迟预测结果与真实发生情况较吻合,因此本文以拟合率为指标,对比不同算法的效果,如图 9 所示。

由图 9 可知,随着时间的推移,3 种模型的拟合率都有所下降,但本文方法的拟合率一直在 95% 以上,说明基于 LSTM 时间序列模型的误差小。为了进一步验证数据延时补偿的性能是否优越,本文从电力通信网络节点中随机选取 10 个节点,以数据传输延时为检验指标,对比不同算法的补偿的效果,各节点传输延时曲线如图 10 所示。

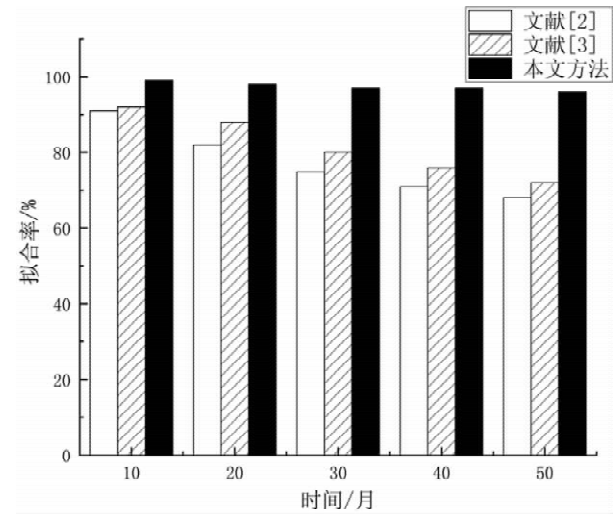


图 9 不同方法拟合率对比结果

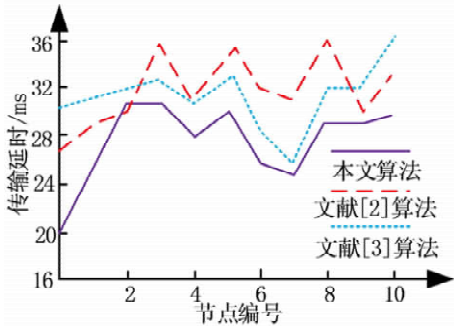


图 10 不同节点的传输延时曲线

由图 10 可知,本文算法节点的数据传输延时小,补偿效果比较好,更适用于对电力通信网络数据进行延时补偿。

4 结 论

为了避免数据传输延迟影响用户体验,建立了数据传输系统,经过数据处理后将果蝇算法与 LSTM 时间序列模型相结合,通过卡尔曼滤波算法得到了电力网络通信数据的延时补偿量,获得了较好的应用效果。与其他算法相比,本文算法提高了数据传输的准确度,消除了通信过程中传输信号的延迟,具有成本低、拓展性好的优势。但电力通信网络包含很多不确定性,且没有将延迟丢包问题考虑在内,还需要对其做出进一步的深入研究。

参考文献

[1] 陈丽琴,顾静军. 基于无线传感器网络的地铁通信传输延迟优化方法 [J]. 传感技术学报, 2022, 35 (5): 698—702.

[2] 杨峰,马铭. 无线多跳通信网络数据传输延时补偿算法 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (4): 146—149+253.

[3] 陈禹岐. 基于 5G 技术的 MIMO 通信网络数据超低延时传输方法 [J]. 自动化与仪器仪表, 2023(10): 1—5.

[4] YAN L C, LAN L X. Networked control for linear systems with forward and backward channels in presence of data transmission delays, consecutive packet dropouts and disordering [J]. Journal of the Franklin Institute, 2021, 358 (8): 4121—4140.

[5] 周立炎,王天闻. 船舶远距离通信网络数据流低延时传输方法设计 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44 (24): 169—172.

[6] 王伟屹,赵晔. 卡尔曼滤波算法下电力通信自动化监测系统设计[J]. 西安工程大学学报, 2021, 35(5): 50—55.

[7] 张人杰,胡超,刘威. 空间延迟容忍网络中多链路数据拥塞控制算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50 (4): 1472—1477.

[8] 赵雷,路美娜,宋茂新,等. 基于 PCIe 和 M—LVDS 的数据传输系统设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2023(9): 104—111.

[9] 相富钟,赵庆海. 基于 LSTM 模型的光通信网络数据传输负载预测方法[J]. 激光杂志, 2023, 44(2): 154—158.

[10] 王伟屹,赵晔. 卡尔曼滤波算法下电力通信自动化监测系统设计[J]. 西安工程大学学报, 2021, 35(5): 50—55.

[11] 王晓品. 基于 Kalman 滤波算法的通信链路环境参数采集系统[J]. 西安工程大学学报, 2021, 35(2): 35—40.

[12] 阎峻,黄建德,孙鹏玉,等. 基于模糊强化学习和果蝇优化的 WSN 数据聚合算法 [J]. 计算机系统应用, 2021, 30 (8): 219—224.