

文章编号: 2095-4980(2024)12-1407-07

用电信息采集终端双队列缓存优化算法

马 斌, 龙存玉, 华书蓓, 杨 艳, 周子翔

(国网青海省电力公司 营销服务中心, 青海 西宁 810016)

摘 要: 为解决用电信息采集终端数据传输中的拥堵、延时、丢包率高、吞吐量低等问题, 提高缓存利用率和数据传输效率, 提出基于时间序列的用电信息采集终端双队列缓存优化算法。对用户用电的时间序列信息进行初步统计, 提取用电趋势度量和异常数据检测结果作为上传数据; 构建基于优先级的双缓存优化算法的双缓冲队列管理(DBQM-P), 根据不同业务的优先级划分队列, 并计算最佳丢弃概率; 在双队列缓存模型中实行不同的丢包策略, 实现用电信息采集终端数据的高效传输。实验表明: 该方法可采集用户时间序列信息, 根据业务的优先级缓存数据并上传至用电信息采集系统后台进行显示, 大幅提高用电信息采集终端的缓存利用率, 增加单位时间内的数据传输量, 丢包率最高值仅为 0.58%, 减少了数据损失, 保证了紧急业务与重要业务的信息传递, 提高了数据传输的实时性和可靠性。

关键词: 信息采集终端; 数据传输; 缓存优化; 双队列缓存算法; 时间序列; 缓存利用率; 智能电网

中图分类号: TP301

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023215

Optimization algorithm for dual-queue caching of electricity information collection terminals

MA Bin, LONG Cunyu, HUA Shubei, YANG Yan, ZHOU Zixiang
(Qinghai Marketing Service Center of State Grid, Xining Qinghai 810016, China)

Abstract: To address issues such as congestion, latency, high packet loss, and low throughput in the data transmission of electricity information acquisition terminals, and to improve cache utilization and data transmission efficiency, a dual-queue cache optimization algorithm for electricity information acquisition terminals based on time series is proposed. Preliminary statistics are conducted on the time series information of user electricity consumption, and electricity consumption trends and anomaly detection results are extracted as upload data. A Dual-Buffer Queue Management based on Priority (DBQM-P) dual-cache optimization algorithm is constructed, which divides queues according to the priority of different services and calculates the optimal discard probability. Different packet discard strategies are implemented in the dual-queue cache model to achieve efficient transmission of electricity information acquisition terminal data. Experiments show that this method can collect user time series information, cache data according to the priority of services, and upload it to the electricity information acquisition system background for display, significantly improving the cache utilization of electricity information acquisition terminals, increasing the amount of data transmitted per unit of time, with the highest packet loss rate being only 0.58%, reducing data loss, ensuring the transmission of urgent and important business information, and enhancing the real-time and reliability of data transmission.

Keywords: information collection terminal; data transmission; cache optimization; dual-queue caching algorithm; time series; cache utilization; smart grid

随着我国大力推进电网企业营销信息化, 用电信息采集终端的广泛覆盖使客户用电数据的采集更加方便, 也更加全面。这些采集到的数据通过用电信息采集系统进行汇总、运算和分析, 从而随时调整电力业务运营策

收稿日期: 2023-08-03; 修回日期: 2023-08-17

略^[1]。用电数据具有时间属性，按照顺序排列，时间和地区不同，用电量也会发生改变^[2]。在智能电网迅速发展之际，用电数据的采集也逐步趋向于大规模、大数据时代，这需要用电信息采集终端提供更高的数据传输能力，包括数据传输的完整性、准确性以及时效性等^[3]，因此如何提高终端数据的数据传输性能显得尤为重要。

缓存管理是一种有效的方法，可减小终端的数据丢包率，提高整体业务的吞吐量。国内外对于缓存管理进行了大量的研究，各种缓存管理机制也随之产生。田贤忠等^[4]研究了一种基于双缓存队列的中间节点选择方法，提高了数据的传输效率。李俊娥等^[5]提出了电力业务优先级队列调度方案，保证了电力业务数据传输的实时性与可靠性。但上述两种方法在缓存优化方面依然存在延时长、丢包率高、吞吐量低、缺乏公平性等问题，导致用电信息采集终端缓存利用率较低，性能没有得到充分的发挥。

近年来，用电信息采集系统越来越多地使用时间序列数据进行用电趋势的预测和分析，并以此为基础构建广域测量系统，进行各个电力系统的用电监测、控制和调度等，可以满足高频数据的使用条件，实现海量用电数据的存储和分析^[6]。同时结合新的缓存优化算法，可进一步提升用电信息采集终端对于用电数据的采集、处理和传输效率^[7]。

因此，本文研究了基于时间序列的用电信息采集终端双队列缓存优化算法。通过对时间序列的分析和处理，能更准确地捕捉用户用电的特征和变化情况；引入双队列结构，根据不同业务的优先级划分队列，可以更好地管理和控制数据传输过程中的缓存利用和丢包，提高系统的数据传输效率和可靠性；根据业务的优先级，计算最佳丢弃概率，使重要和紧急的业务数据得到保障，同时提高整体的数据传输效率。通过实施双队列缓存模型和不同的丢包策略，能够大幅提高用电信息采集终端的缓存利用率，并增加单位时间内的数据传输量。

1 用电信息采集终端双队列缓存优化算法

用电信息采集系统可自动采集每个客户的用电信息，进行用电趋势分析和管管理，检测电能质量，发现异常计量数据等^[8]；同时还可以实现信息发布、智能电气设备信息通信、分布式能源监控等功能。

用电信息采集系统的主要设备是用电信息采集终端，通过这些终端设备可以采集电能表数据，进行数据转发、管理、双向传输等工作^[9]，还可以通过终端设备执行控制命令。用电信息采集终端的工作流程如图 1 所示。

1.1 采集时间序列用电信息

电力企业在采集用电数据时，普遍基于时间序列。通过对这些时间序列的用电信息数据进行整理和分析，发现用户的用电趋势与规律^[10]，并进行异常监测和控制等。对于用电信息采集终端，可根据时间的连续性特征分析，采用时间 t 的连续函数表示终端处于不同时间上的反应。

假定对某个区段用户的用电情况进行记录，每个月进行一次采样，则采样间隔为一个月，即 $\Delta=1,2,\dots,12$ ；采样值为每个月观察的用电数值，用 D 表示； D_k 为第 k 个采样值，则连续函数 $D_{(t)}$ 的值 $D_{(t_0+k\Delta)}$ 如表 1 所示。

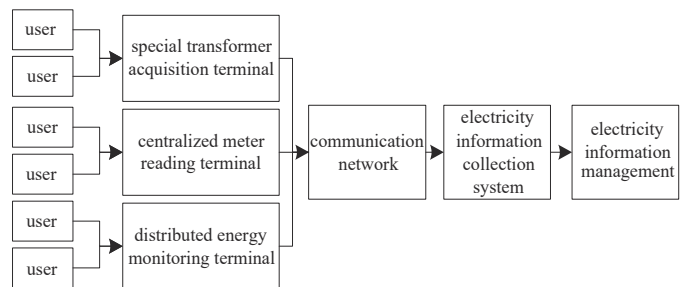


Fig.1 Workflow of electricity information collection terminal
图 1 用电信息采集终端工作流程

表 1 连续函数 $D_{(t)}$ 的值 $D_{(t_0+k\Delta)}$

Table1 Value $D_{(t_0+k\Delta)}$ of continuous function $D_{(t)}$

area	section	date	electricity consumption/(kW·h)	electricity fee/yuan	unit price/yuan
3020650	181 250 985	20220608	18 634.32	8 745	2.237 541
3020650	181 250 985	20220609	22 746.87	18 500	1.893 546
3020650	181 250 985	20220610	16 352.93	6 538	1.657 483
3020650	181 250 985	20220611	20 164.75	12 100	2.437 298
3020650	181 250 985	20220612	17 445.68	11 500	1.732 645

在用电信息终端的采样过程中，采样间隔可以相同，也可以不同。对于时间序列 $D_{(t)}$ ，假设采样间隔为 Δ ，所获得的数字时间序列为 $D_t, t=1,2,\dots$ 。

采样时，时间间隔与信息损失成正比，与采集用时、资源消耗成反比^[11]。因此需选择恰当的时间间隔，保证在信息丢失最少的情况下，也不会出现信息过剩现象^[12]。实际的采样过程中，根据电力数据采集终端的特征

和以往的采集经验，需在增加数据量和减少信息损失之间进行合理的平衡，从而优化数据采集的过程。

1.2 基于时间序列的用电数据轻量化处理

由于全国用电客户的数量非常庞大，为减少用电数据采集终端储存并向用电信息采集系统后台传输的数据量，需在采集终端中度量每个用户的用电数据趋势并检测异常数据，然后将二者作为初步统计的结果上传至后台，再进行统一的数据分析和预测等。采用基于时间序列的运算方法进行用户用电数据的初步统计和异常数据检测，并获取相应的初步统计和分析结果，为后续的轻量化处理提供初步处理过的用电数据。

1.2.1 用电数据趋势度量统计

由于人们的生活习惯存在各自的规律，根据这些用电序列数据的变化趋势即可分析用户电能消耗的规律，主要分为上行、平移和下滑 3 个走势。为详细分析这些变化情况的不同规模，需定量度量这些电力运行信息的走势，使之更具有数据分析的价值。

衡量相邻 2 个时间段的用电数据变化情况。假设用电时间序列数据为 $T_F = \langle t_1, v_1 \rangle, \langle t_2, v_2 \rangle, \dots, \langle t_n, v_n \rangle$ ，用 v_i 描述 $t_i (1 \leq i \leq n)$ (n 为序列数据数量) 时刻的用电量，用 t_i 和 t_{i+1} 描述相邻的 2 个时间段，则二者之间的用电量变化趋势 $T(t_i, t_{i+1})$ 可描述为：

$$T(t_i, t_{i+1}) = \frac{v_{i+1} - v_i}{(t_{i+1} - t_i)}, (1 \leq i \leq n) \quad (1)$$

从式(1)可以看出，如果 $T(t_i, t_{i+1}) > 0$ ，表示用电量上升；反之，表示用电量下降。

T_F 中每两个前后时间的用电数据趋势 Trends(T_F) 可表示为：

$$\text{Trends}(T_F) = T(t_1, t_2), T(t_2, t_3), \dots, T(t_{n-1}, t_n) \quad (2)$$

Trends(T_F) 的第 k 项用 $T_{[k]}$ 描述，则 Trends(T_F) = $T_{[1]}, T_{[2]}, \dots, T_{[k]}$ 。

根据上述公式即可统计每个用户的用电趋势。

1.2.2 用电异常数据检测

为区分当前用户的用电情况是否正常，需对比当前时间窗数据与历史时间窗数据。将 2 个时间窗进行对比时，需计算 2 个窗口之间的距离值，如果比对结果数据趋势差距较大，说明该用户存在用电异常情况。将当前时间窗与历史时间窗对比中窗口距离的最小值用“上界(d_{\min})”描述，最大值用“下界(d_{\max})”描述。

在用电数据的规定期限 T 内，用电趋势窗口 $E(T_{[n]}, l)$ 所匹配的历史窗口数据集 CES($E(T_{[n]}, l)$) 为：

$$\text{CES}(E(T_{[n]}, l)) = \{ \text{Trends}(T_F) E(T_{[n-kT]}, l) \mid k \in (0, n/T) \} \quad (3)$$

用正整数区间定义距离区间 $G_{E(T_{[n]}, l)}$ ： $G_{E(T_{[n]}, l)} = [d_{\min}, d_{\max}]$ 。

根据历史数据可以获取 2 个窗口之间的间距值^[13]。判断用户存在用电反常情况的标准为：历史时间窗中各个窗口的间距值下界小于当前时间窗中各个窗口间距值的上界。要想及时发现用户电力数据的异常情况，需精准地比对当前时间窗和历史时间窗之间的差别。

为准确找到发生异常数据的时间窗，使用可回溯动态窗口的方式，在滑动当中逐步缩小时间窗的长度，直至找到吻合的时间窗为止，并将这些异常数据进行记录，包括用户、时间、用电量、历史偏差、异常值数据等。

1.3 DBQM-P 双队列缓存优化算法

在用电信息采集终端将采集到的时间序列信息进行初步的统计和轻量化处理后，将这些数据缓存并上传至用电信息采集系统的后台。但即使简化后，这些用电数据依然很庞大。采用 DBQM-P 双队列缓存优化算法进行用电信息采集终端的缓存优化，构建双队列缓存模型，根据用电信息采集终端不同业务的重要程度划分优先级，从而减少丢包率，提高用电信息采集终端数据传输的吞吐量，根据不同业务的优先级计算最佳丢弃概率，在满足传输要求的同时，提高传输效率。

1.3.1 双队列缓存模型

根据用电数据采集终端发送的各种业务重要程度，将其进行优先级划分，主要分为紧急业务和非紧急业务，将紧急业务划分到高优先级业务中，将非紧急业务划分到低优先级业务中。在双队列缓存的处理能力达到极限时，终端会将拆除的业务量进行部分抛弃操作，根据优先级先后进行丢弃^[14]。

假设 R_1 、 R_2 为 2 个队列缓存， A_1 、 A_2 分别为二者的容量，2 个队列都可以接收不同优先级的业务。在进行数据处理时，用 α_{\min} 表示 2 个队列缓存的最小限入值， α_{\max} 表示最大限出值，则双队列缓存的模型如图 2 所示。

1.3.2 DBQM-P 算法

DBQM-P 算法中，影响其性能的最主要因素为丢包概率。综合考虑用电信息网络传输环境的复杂程度，以及数据的庞大规模，改进了传统的单队列缓存随机早期检测 (Random Early Detection, RED) 算法，使用双队列的结构进行缓存。在处理不同优先级业务时，根据缓存区域业务量的大小实行不同的丢包策略^[15]，分为以下 3 种情况：

- 1) 业务量小于最小限入值 α_{\min} ，无需丢弃任何业务；
- 2) 业务量大于最大限出值 α_{\max} ，除了当前时刻之前到达的业务以外，后面全部业务丢弃；
- 3) 业务量处于最小限入值 α_{\min} 与最大限出值 α_{\max} 之间，根据业务优先级选择性丢弃部分业务。

采用非线性函数求解综合业务的丢包概率，分为高优先级业务舍弃率 O_h 和低优先级业务舍弃率 O_l ：

$$O_h = \begin{cases} \frac{1}{4} O_{\max} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{(L_{\text{cur}} - \alpha_{\min})^2}{(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})^2}} \right) & 1, L_{\text{cur}} \geq \alpha_{\max} \\ 1, L_{\text{cur}} \geq \alpha_{\max} \\ 0, L_{\text{cur}} \leq \alpha_{\min} \\ \alpha_{\min} < L_{\text{cur}} < \alpha_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

$$O_l = \begin{cases} O_{\max} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{(L_{\text{cur}} - \alpha_{\min})^2}{(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})^2}} \right) & \alpha_{\min} < L_{\text{cur}} < \alpha_{\max} \\ 0, L_{\text{cur}} \leq \alpha_{\min} \\ 1, L_{\text{cur}} \geq \alpha_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中： L_{cur} 为队列缓存的业务量； O_{\max} 为最大丢包概率。

高优先级的业务需要紧急处理，因此相对的丢包概率较小，而低优先级的业务对于吞吐量要求不高，任何时候处理都可以，因此相对的丢包概率较高。

DBQM-P 优化算法改进了单队列缓存管理的弊端，可优化用电信息采集终端的丢包率和吞吐量，详细的计算流程如图 3 所示。

2 实验及分析

2.1 实验环境设置

选择某电力企业某区段的 35 台用电信息采集终端进行数据仿真实验。使用 `readtable` 函数，将采集前 6 个月的历史时间序列数据和近 1 个月的时间序列数据导入 Matlab 中，并提取所需的数据列，删除无效或异常数据点等。根据双队列缓存优化问题设定，构建一个目标函数，考虑丢包率和吞吐量的权衡。设定缓存限入值、限出值和总量的范围，并将其作为约束条件，缓存最小限入值为 250 packets，最大限入值设定为 600 packets；缓存最小限出值设定为 800 packets，最大限出值为 900 packets；2 个缓存的总量均为 1 500 packets。

在 Matlab 中选择 `ga` 函数进行优化，设置合适的算法参数：业务优先级比例为 1:1 左右；业务转发速率为 300 packets/s；丢包概率为 0.35。初始化种群大小为 100 个个体；交叉概率为 0.8，表示在每次迭代中进行交叉的

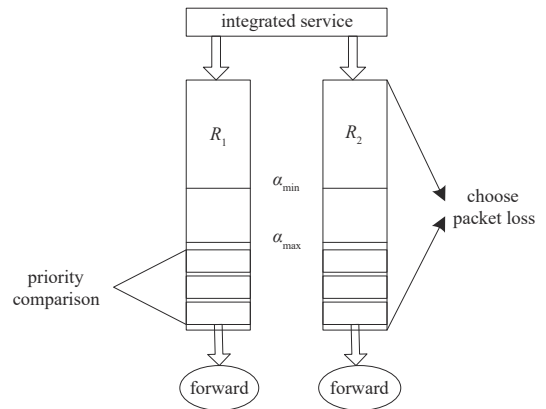


Fig.2 Dual-queue caching model
图 2 双队列缓存模型

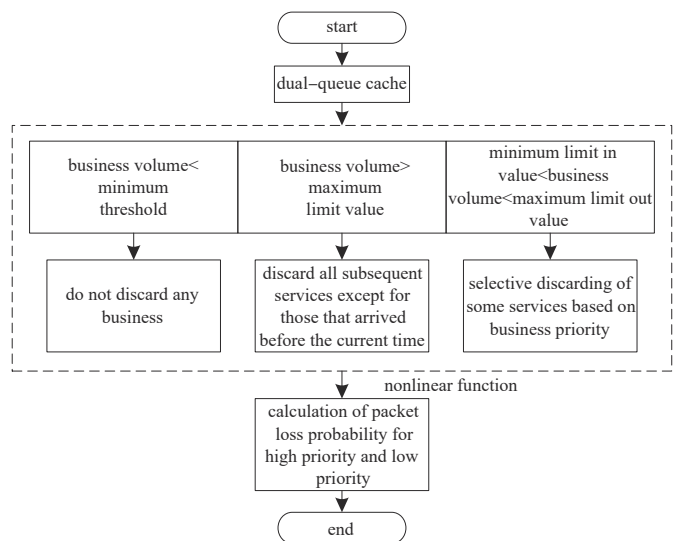


Fig.3 Flow chart of DBQM-P dual queue cache optimization algorithm
图 3 DBQM-P 双队列缓存优化算法流程图

概率；变异概率为 0.05，表示在每次迭代中进行变异的概率；权值为 0.003；数据仿真时间为 15 min。

运行编写好的优化算法代码，通过迭代过程不断优化目标函数，寻找最优解。根据优化结果，结合实验数据和设定的参数，使用 Matlab 进行丢包率和吞吐量的计算。根据公式和实验数据统计，计算每个终端的丢包率和吞吐量。并根据丢包率和吞吐量 2 个常用指标评估所提算法的性能。

2.2 可行性实验

选用某台用电信息采集终端采集的某个用户用电信息进行数据仿真实验，采集 1 个标准月的时间序列数据，采集间隔为 1 h，每天进行 24 次记录，采集的部分时间序列数据样本如表 2 所示。

表2 用户用电时间序列数据
Table2 Time series data of user electricity consumption

user ID	date	time	electricity consumption/(kW·h)	electricity fee/yuan	unit price/yuan
2181250985	20220501	5:00	2.87	1.748 4	0.627 541
		6:00	8.32	5.158 4	0.627 541
		7:00	9.93	6.156 6	0.627 541
		8:00	10.75	6.665 5	0.627 541
		9:00	12.68	7.861 6	0.627 541
...

用电信息采集终端根据时间序列数据的特点和规律，对收集到的用户用电时间序列数据进行初步统计，实现轻量化处理，然后将用户用电趋势和异常数据统计结果通过 DBQM-P 双队列缓存优化算法，根据业务的优先级进行缓存并上传至用电信息采集系统后台，实验结果如图 4 所示。

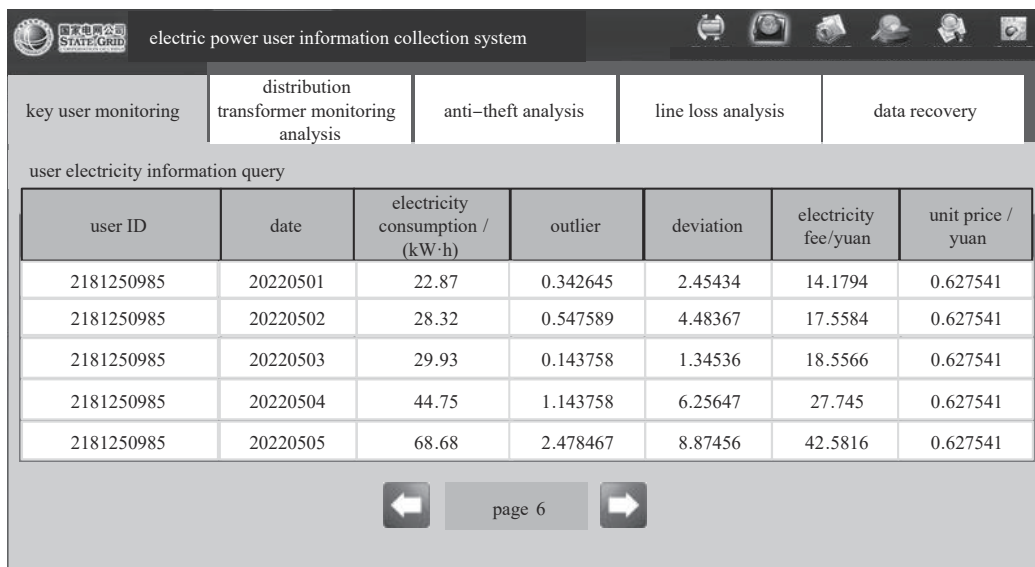


Fig.4 Data uploaded from the electricity information collection terminal to the background
图4 用电信息采集终端上传后台的数据

观察表 2 和图 4 可以发现，应用所提方法后，用户用电信息查询结果中的记录数量相比于原始数据(表 2)有所减少。表 2 中的用户用电时间序列数据中，每一小时都记录了用户的用电量、电费等信息。但在图 4 的用户用电信息查询结果中，仅显示了部分数据。这说明在运用 DBQM-P 双队列缓存优化算法进行数据处理时，对用电信息进行了筛选和压缩，只保留了部分重要的信息，并将其他不是很重要的信息进行了缓存或延迟上传。因此，所提方法成功减少了上载到用电信息采集系统后台的数据总量，有助于降低数据传输的负荷和网络带宽的占用，提高数据传输效率。

2.3 不同缓存管理算法仿真对比实验

为进一步验证所提算法在缓存管理方面的优化性能，在相同的环境下，分别采用不同的缓存管理算法进行数据传输仿真实验，将所提方法与传统的随机早期检测(RED)算法、改进自适应随机早期检测(Adaptive Random

Early Detection, ARED) 算法、稳定随机早期检测 (Stabilized Random Early Detection, SRED) 3 种方法进行丢包率和吞吐量的对比, 分析结果分别如图 5 和图 6 所示。

从图 5 可以看出, 在仿真实验过程中, 所提方法的丢包率最低, 最高值才 0.58%, 远远低于其他 3 种算法的丢包率。因为所提方法划分了业务优先级, 因此时间越长, 双队列缓存的利用率就越高, 丢包率就越低。说明所提方法大幅度降低了用电信息终端数据传输的丢包率, 降低了数据损失, 提高了数据上传的可靠性。

从图 6 可以看出, 仿真实验中, 所提算法的吞吐量最高, 明显多于其他 3 种算法的吞吐量, 说明使用所提方法进行用电信息采集终端的缓存优化计算, 可大幅度提高数据传输的吞吐量, 在单位时间内可以输送更多的重要业务到用电信息采集系统后台, 从而提高数据传输效率, 加快后期的电力数据统计和运算速度。

3 结论

本文研究了基于时间序列的用电信息采集终端双队列缓存优化算法, 在采集时间序列信息后, 通过数据轻量化处理, 减少数据传输量, 使用基于优先级的双队列缓存优化算法 DBQM-P 进行终端的缓存优化。实验表明:

1) 所提方法可有效采集用户时间序列信息, 经轻量化处理后, 根据业务的优先级进行缓存并上传至用电信息采集系统后台进行显示。

2) 所提方法可大幅度提高用电信息采集终端的数据传输效率, 降低丢包率, 减少数据损失, 保证紧急业务与重要业务的信息传递, 提高数据传输的实时性和可靠性。

3) 所提方法可以增加数据传输的吞吐量, 在单位时间内可以输送更多的重要业务, 从而加快用电信息采集系统对于电力数据的统计。

参考文献:

- [1] 冯瑛敏, 刘瑾, 黄丽妍, 等. 基于复合量度的电力光纤多电路配置可靠性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(7): 732-737. (FENG Yingmin, LIU Jin, HUANG Liyan, et al. Reliability of power fiber multi-circuit configuration based on compound measurement[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022, 20(7): 732-737.) doi:10.11805/TKYDA2020326.
- [2] 王登峰, 窦圣霞, 汪海燕, 等. 基于用电信息大数据的时间序列分析研究[J]. 电子器件, 2022, 45(1): 199-204. (WANG Dengfeng, DOU Shengxia, WANG Haiyan, et al. Research on time series analysis based on big data of electricity consumption information[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2022, 45(1): 199-204.) doi:10.3969/j.issn.1005-9490.2022.01.035.
- [3] 肖堃. 基于加权队列的跨平台进程间通信调度算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(4): 1470-1475. (XIAO Kun. Cross-platform inter-process communication scheduling algorithm based on weighted queue[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2021, 51(4): 1470-1475.) doi:10.13229/j.cnki.jdxbgxb20200339.
- [4] 田贤忠, 丁军, 姚超, 等. 一种基于双缓存队列的能量捕获网络中继选择方案[J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(10): 2152-2156. (TIAN Xianzhong, DING Jun, YAO Chao, et al. Relay selection scheme based on double buffer queue for energy harvesting network[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2020, 41(10): 2152-2156.) doi:10.3969/j.issn.1000-1220.2020.10.021.
- [5] 李俊娥, 陆秋余, 刘剑, 等. 智能变电站通信业务优先级及其队列调度方法[J]. 通信学报, 2021, 42(7): 25-40. (LI Jun'e, LU Qiuyu, LIU Jian, et al. Communication service priority in smart substation and its queue scheduling method[J]. Journal on Communications, 2021, 42(7): 25-40.) doi:10.11959/j.issn.1000-436x.2021107.
- [6] 张可, 崔乐. 基于 PCA-LSTM 模型的多元时间序列分类算法研究[J]. 统计与决策, 2020, 36(15): 44-49. (ZHANG Ke, CUI Le. Research on multivariate time series classification algorithm based on PCA-LSTM model[J]. Statistics & Decision, 2020, 36(15):

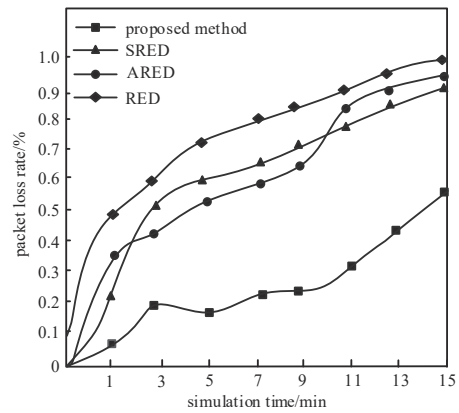


Fig.5 Comparison of packet loss rates among different algorithms
图 5 不同算法丢包率对比

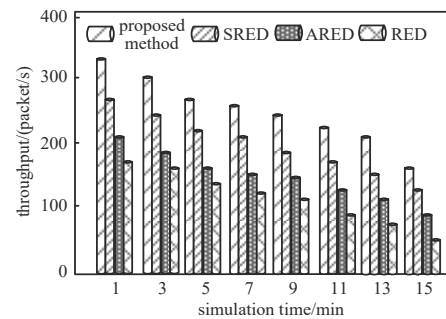


Fig.6 Comparison of throughput of different algorithms
图 6 不同算法吞吐量对比

- 44-49.) doi:10.13546/j.cnki.tjyc.2020.15.009.
- [7] 张雷,李琳,陈鸿龙,等.一种面向工业边缘计算应用的缓存替换算法[J].计算机研究与发展,2021,58(7):1533-1543.(ZHANG Lei,LI Lin,CHEN Honglong,et al. A cache replacement algorithm for industrial edge computing application[J]. Journal of Computer Research and Development, 2021,58(7):1533-1543.) doi:10.7544/issn1000-1239.2021.20200672.
- [8] 黄公跃,付婷婷,林思远,等.用电信息采集系统电能计量数据异常识别研究[J].电网与清洁能源,2023,39(4):25-30,46.(HUANG Gongyue,FU Tingting,LIN Siyuan,et al. A study on abnormal identification of electric energy measurement data in electric energy information acquisition system[J]. Power System and Clean Energy, 2023,39(4):25-30,46.) doi:10.3969/j.issn.1674-3814.2023.04.004.
- [9] 刘宣,唐悦,卢继哲,等.基于概率预测的用电采集终端电量异常在线实时识别方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(19):99-106.(LIU Xuan,TANG Yue,LU Jizhe,et al. Online real time anomaly recognition method for power consumption of electric energy data acquisition terminal based on probability prediction[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(19):99-106.) doi:10.19783/j.cnki.pspc.201534.
- [10] 吴裔,郭棋林,陈颢天,等.电力时间序列的分布式索引算法[J].哈尔滨理工大学学报,2021,26(6):81-86.(WU Yi,GUO Qilin,CHEN Haotian,et al. A distributed algorithm for indexing power time series[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2021,26(6):81-86.) doi:10.15938/j.jhust.2021.06.011.
- [11] 刘晓彤,车文刚.基于自适应步长的多元时间序列 Motif 优化算法[J].陕西理工大学学报(自然科学版),2021,37(4):32-39.(LIU Xiaotong,CHE Wengang. Motif optimization algorithm for multivariate time series based on adaptive step size[J]. Journal of Shaanxi University of Technology(Natural Science Edition), 2021,37(4):32-39.) doi:10.3969/j.issn.1673-2944.2021.04.005.
- [12] 郑国权,窦健,卢继哲,等.基于冗余分析的用电信息采集系统数据压缩方法[J].电测与仪表,2022,59(5):70-77.(ZHENG Guoquan,DOU Jian,LU Jizhe,et al. Data compression method of electric energy data acquisition system based on redundancy analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022,59(5):70-77.) doi:10.19753/j.issn1001-1390.2022.05.009.
- [13] 石克翔,保利勇,丁洪伟,等.基于生成时间序列均匀优化的混沌人工蜂群算法[J].计算机科学,2021,48(7):270-280.(SHI Kexiang,BAO Liyong,DING Hongwei,et al. Chaos artificial bee colony algorithm based on homogenizing optimization of generated time series[J]. Computer Science, 2021,48(7):270-280.) doi:10.11896/jsjcx.200800087.
- [14] 单思洋,冯春燕,朱光宇,等.面向新生内容需求的缓存放置与替换联合算法[J].北京邮电大学学报,2021,44(2):68-74.(SHAN Siyang,FENG Chunyan,ZHU Guangyu,et al. A joint cache placement and replacement algorithm for cache requirements of new contents in CCN[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021,44(2):68-74.) doi:10.13190/j.jbupt.2020-086.
- [15] 吴菲,徐平平.云平台中多宿主等待队列动态预测调度算法[J].计算机仿真,2022,39(1):451-455.(WU Fei,XU Pingping. Dynamic prediction and scheduling algorithm for multi host waiting queue in cloud platform[J]. Computer Simulation, 2022,39(1):451-455.) doi:10.3969/j.issn.1006-9348.2022.01.094.

作者简介:

马 斌(1991-),男,硕士,工程师,主要研究方向为电能计量,email:michael910327@163.com.

龙存玉(1997-),女,学士,助理工程师,主要研究方向为电能计量.

华书蓓(1993-),女,学士,工程师,主要研究方向为电能计量.

杨 艳(1986-),女,学士,高级工程师,主要研究方向为电能计量.

周子翔(1999-),男,本科,助理工程师,主要研究方向为电能计量.

勘误:《太赫兹科学与电子信息学报》2024年第8期878页:

原:通信作者 高志强 email:hzcail@szu.edu.cn

修改为:通信作者 高志强 email:gao_zhiqiang@hit.edu.cn

P887页 作者简介:

原:高志强(1971-);修改为:高志强(1972-)