

文章编号: 2095-4980(2025)05-0446-07

基于时敏网络的全时全域通信网时延保障方法

王忠钰¹, 尹喜阳¹, 王 林¹, 岳顺民², 王 凯¹, 郝 毅¹, 朱 睿³

(1. 国网天津市电力公司 信息通信公司, 天津 300140; 2. 国网天津市电力公司, 天津 300010; 3. 天津大学, 天津 300072)

摘 要: 随着数字化新型电力系统的大力建设, 传统的电力通信网正逐步向更加坚强、弹性、多业务承载的全时全域通信网转变。针对全时全域通信网多类型终端业务同时接入以及海量数据传输带来的时间敏感业务确定性时延难以保障的问题, 本文提出了一种基于时间敏感网络的全时全域通信网确定性时延保障技术。首先, 基于对全时全域电力通信网中各类型业务的特点、重要度、周期性及时延需求的分析, 建立了相应的业务模型并进行了优先级划分。然后, 提出了基于时间敏感网络感知整形的流量调度机制, 以确保门控调度表的计算能够满足时间敏感流在传输周期内的确定性低时延传输。为了实现最小化端到端时延的目标, 采用了基于遗传算法和禁忌搜索算法联合输出时间敏感流量的门控列表计算算法, 平均端到端时延较单优化算法降低 15%, 且将时间敏感流量时延抖动控制在 2 μ s 左右, 提高调度性能, 为全时全域电力通信网的稳定安全运行提供了有力支撑。

关键词: 全时全域通信网; 时间敏感网络; 确定性时延; 遗传算法; 禁忌搜索算法

中图分类号: TM732

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2024336

A latency guarantee method for all-time and all-domain communication networks based on time-sensitive networking

WANG Zhongyu¹, YIN Xiyang¹, WANG Lin¹, YUE Shunmin², WANG Kai¹, HAO Yi¹, ZHU Rui³

(1.State Grid Tianjin Electric Power Information & Telecommunication Company, Tianjin 300140, China;

2.State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China; 3.Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: With the vigorous construction of the digital new power system, the traditional power communication network is gradually transforming into a more robust, resilient, and multi-service-bearing all-time and all-domain communication network. To address the issue of difficult-to-guarantee deterministic latency for time-sensitive services due to the simultaneous access of multiple types of terminal services and massive data transmission in the all-time and all-domain communication network, a deterministic latency guarantee technology is proposed for all-time and all-domain communication networks based on Time-Sensitive Networking(TSN). Firstly, based on the analysis of the characteristics, importance, periodicity, and latency requirements of various types of services in the all-time and all-domain power communication network, the corresponding service models are established and prioritized. Then, a traffic scheduling mechanism based on TSN perception and shaping is proposed to ensure that the calculation of the gate control schedule meets the deterministic low-latency transmission of time-sensitive flows within the transmission cycle. To achieve the goal of minimizing end-to-end latency, a combined algorithm based on genetic algorithm and tabu search algorithm is employed to calculate the gate control list of time-sensitive flows. The average end-to-end latency is reduced by 15% compared with single optimization algorithm, and the latency jitter of time-sensitive flows is controlled at about 2 μ s. This

收稿日期: 2024-07-01; 修回日期: 2024-08-06

引用格式: 王忠钰, 尹喜阳, 王林, 等. 基于时敏网络的全时全域通信网时延保障方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(5): 446–452. DOI: 10.11805/TKYDA2024383.

Citation format: WANG Zhongyu, YIN Xiyang, WANG Lin, et al. A latency guarantee method for all-time and all-domain communication networks based on time-sensitive networking[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(5): 446–452. DOI: 10.11805/TKYDA2024336.

improves the scheduling performance and provides strong support for the stable and safe operation of the all-time and all-domain power communication network.

Keywords: all-time and all-domain communication network; Time-Sensitive Networking(TSN); deterministic latency; genetic algorithm; tabu search algorithm

在“双碳”目标指引下,新型电力系统大力建设,数字化升级趋势明显。电力通信网作为新型电力系统的信息传输通道和神经中枢,正逐步向更加坚强、弹性、多业务承载的全时全域通信网转变^[1],支撑源网荷储一体化发展。然而,大规模终端设备密集接入带来海量业务数据,分布式新能源、电动汽车智慧充电等新兴业务不断涌现,对全时全域通信网业务数据低时延、高可靠传输的需求日益明显。其中,保护控制、调度控制等业务通常对确定性时延要求最高,例如,继电保护业务需要在毫秒级内检测和隔离故障,防止设备损坏和电网崩溃^[2];相量测量单元业务需要同步采集和传输电网的电压、电流相量信息,用于实时监控和分析电网状态,数据传输的时延需控制在几十毫秒内^[3],上述场景的时延抖动要求均在微秒级,相比之下采集类业务的确定性传输需求较为宽松。因此,面向全时全域通信网海量业务场景,有必要依托先进的通信技术,设计有效的流量调度策略,为时间敏感型业务流量提供确定性的有界低时延传输保障,优化网络性能。

当前的工业领域的几种扩展以太网技术存在一些共同的问题^[4]:一是彼此之间往往无法兼容,二是难以与标准以太网设备进行无缝集成,且缺乏时间敏感网络(Time-Sensitive Networking, TSN)所需的时钟同步、带宽预留、数据分组优先级和过滤等管理机制,使得现有的扩展以太网技术在应用中难以为关键工业控制系统提供足够的时延和抖动保障,影响了其广泛应用和普及。因此,尽管这些技术为实现工业通信的确定性做出了重要贡献,但在面对像全时全域电力通信网等更高要求的应用场景时,仍需要进一步的改进和创新。

时间敏感网络(TSN)是一组由IEEE 802.1工作组制定的标准^[5],通过时间同步、调度和流量整形、流量预留、资源管理等技术,旨在确保在标准以太网的基础上增加时间敏感性的功能,从而实现高可靠性、低延迟和抖动的网络通信。TSN流量调度机制通过门控列表(Gate Control List, GCL)来定义各个时刻队列门的状态,使得时间敏感流量的每一帧都能在计划时隙内进行无争用通信。然而计算流量调度表被认为是一个非确定性多项式时间(Nondeterministic Polynomial time, NP)难题^[6],当前求解方法主要有可满足性模理论和优化模理论、启发式算法和元启发式算法、整数线性规划方法等。文献[7]介绍了一种结合可满足性模理论和优化模理论的方法,首先利用可满足性模理论找到符合调度和时间约束的方案,然后通过优化模理论优化最小化队列数量的目标。尽管这种方法在理论上有效,但高复杂度限制了应用。文献[8]则探讨了元启发式算法的应用,特别是禁忌搜索在等待时间敏感流调度中的使用。虽然在某些情况下能够有效减少求解空间,但实际应用效率仍较低,难以满足高效、实时调度的需求。

为此,本文提出一种基于时间敏感网络的全时全域电力通信网多业务确定性时延保障方法。该方法首先分析全时全域通信网多类型电力业务的特点、重要度、周期性及时延需求,建立了业务模型并进行优先级划分。在此基础上,提出基于时间敏感网络感知整形的流量调度机制,为确保门控调度表计算满足时间敏感流在传输周期内确定性低时延传输,对网络的传输调度添加了一定的约束。最后,面向最小化端到端时延的目标,基于遗传算法和禁忌搜索算法联合的启发式优化算法,提出时间敏感流量调度算法,计算输出时间敏感流量的门控列表,提高调度性能,保障全时全域电力通信网时间敏感业务确定性时延。

1 全时全域电力通信网业务优先级划分

在TSN中,数据流通常分为时间触发(Time-Triggered, TT)和非时间触发2种流量。TT流常见于周期性的实时数据传输,例如工业控制和自动化系统中,需要确保这些流具有确定性的低时延和抖动,从而提高传输性能和系统稳定性。非TT流则包括音视频桥接流、尽力而为流或非周期的零星流,这些流对时延和抖动的要求较低。将TSN技术引入全时全域电力通信网,通过分析各类业务的通信网络需求,按照业务的时延要求和对电网运行控制的重要性,对电力通信网中的多类型业务进行优先级划分。

全时全域电力通信网包括电力控制与保护业务、电力调度与实时数据监测业务、电力信息化与管理业务及多媒体与增值服务业务。具体包括如下业务:

1) 电力控制与保护业务:包括远程控制业务,如开关、重合闸等远方控制操作;保护控制业务如继电保护、自动化装置控制、故障隔离等;自动化控制业务如调度自动化系统、自动发电控制、自动负荷控制等。该类业务传输周期性实时数据,要求超低时延(小于10 ms),甚至部分保护业务要求时延低于3 ms,以实现快速响应和切换,保证电网安全稳定运行。

2) 电力调度与实时数据监测业务：包括实时电力系统调度数据、实时潮流数据等调度数据传输业务；变电站设备状态监测、环境监测、变压器在线监测等监测与告警业务；动态电力调度、电力系统优化、输电网状态估计与优化等调度优化业务。该类业务低时延要求通常在 10~100 ms 之间，以支持电网的稳定运行。

3) 电力信息化与管理业务：包括计量业务如用电信息采集系统、远程抄表、用户用电分析等；企业管理系统业务如企业资源计划、客户关系管理、供应链管理；信息业务如电力市场信息、企业公告等。该类业务具有中等时延要求，通常在 100~500 ms 之间，对实时性要求较低，主要关注数据的完整性和可靠性。

4) 多媒体与增值服务业务：主要包括视频监控业务如变电站、输电线路的监控视频传输；视频会议业务用于内部通话、客户服务电话系统；语音通信业务如内部通话、客户服务电话系统等。该类业务具有中低时延要求，通常在 200~1 000 ms 之间。

进一步细分，在上述业务中，继电保护、自动化装置保护、高压直流输电控制等业务传输周期性实时数据，时延通常小于 10 ms，对电力通信网的稳定运行产生极为重要的影响；监控和数据采集系统(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)、配电自动化系统、变电站自动化系统、故障录波、负荷调节信号等业务传输非周期性实时数据，时延通常在 10~20 ms 之间，非常重要；动态电压恢复器控制、电能质量监测等业务时延在 20~50 ms 左右，具有高重要度；非实时数据采集和监控、设备状态监控、安全警报系统、配电网状态监测等业务时延在 50~100 ms 左右，具有中高重要度；日常调度指令、资源调度系统等业务时延在 100~200 ms 左右，具有中等重要度；生产管理系统、运营支持系统、常规数据传输、内部视频会议等业务时延在 500~1 000 ms 左右，具有中低重要度；网络浏览和普通文件传输、内部文件备份等业务时延在 1 000 ms 左右，具有最低等重要度。

综上所述，本文采用 IEEE 802.1Q 协议的优先级字段，将不同类型的数据划分为 8 个优先级。周期性实时数据由于其对通信实时性和周期性的高要求，被标记为最高优先级。这些数据需要最小的时延和抖动，确保电力系统的高效和稳定运行。非周期性实时数据则被标记为次高优先级，以确保其具有较低的通信延迟。剩余的优先级根据流量类型和数据用途进行标记，确保每种数据流都能根据其重要性和时延需求获得适当的优先级。不同优先级的数据对应不同的优先级缓冲队列，通过这种方式，TSN 技术能够确保数据的有序传输，满足电力通信网中各种业务的特定需求。最高优先级的数据流会首先被处理，保证关键任务的优先执行，从而提高整个电力系统的可靠性和效率。

2 基于时间感知整形的流量调度机制

时间感知整形(Time Aware Shaper, TAS)是 TSN 中一项被引入 IEEE 802.1 Qbv 标准中的新技术，旨在提升不同优先级数据帧的传输效率。其核心目标在于优化通信时间的利用，通过划分成等长周期，并利用门控列表来有效管理数据传输的优先级。在具体实践中，TAS 可以暂停传输低优先级数据流，只允许高优先级且具有时间敏感性质的数据通过，从而有效减少传输时延和时延抖动，确保信息传递的及时性。门控列表中记录着各优先级队列的开关状态，通过 8 位二进制数表示，每一位对应一个优先级队列。当门状态随着同步时钟的变化而定期更新时，系统得以实时调整以满足网络通信的需求。

将全时全域电力通信网的拓扑结构建模为 $G=(E,V)$ ，其中 E 表示通信网中所有的链路集合， V 表示通信网中所有的节点集合，业务流 $f_i \in F$ 从起始节点 $v_1 \in V$ 按照周期 T 发送数据，经过交换节点到达终节点 v_2 。利用 TAS 的门控列表，将通信时间进一步划分为周期，每个周期再细分为两个时间片。在第一个时间片内打开具有最高优先级的队列的门；而在第二个时间片内，则是将优先级 0 到 5 的队列的门状态打开，以允许非实时性数据的传输。与此同时，非周期性实时数据则不受门状态的限制，在其周期性数据传输间隔内进行传送，并且还可以优先于低优先级的非实时数据进行传输。

每个周期的末尾设置了一个保护带，以避免上个周期未完成的数据传输对下个周期的传输造成影响。最高优先级的周期性实时数据进入缓冲队列后，会根据门状态和预留的传输带宽，在第一个时间片内进行传输，并将其传输时间记录在流预留信息表中。对于非周期性数据，在传输过程中，首先查阅流预留信息表，然后在周期性数据传输的空闲时段进行传送。如果发送端口正在传输低优先级的非实时数据，则非周期性实时数据可以中断其传输，优先进行传输。基于上述流量调度机制，需要在每个链路上施加一定的约束，以确保门控调度表计算能够满足时间敏感流在传输周期内实现确定性低时延传输的需求。具体约束如下：

1) 帧约束：规定了数据帧在整个传输过程中的时间窗口，要求数据帧在这个时间窗口内按照指定的传输路径顺利完成传输。首先，在传输路径的第一条链路上，数据帧不能在规定的发送时间之前开始传输，以确保传输过程按照预定的时间顺序进行。其次，在传输路径的最后一链条路上，数据帧必须在规定的截止时间之前完

成传输，以确保数据能够及时到达目的地。约束表达式为：

$$\begin{cases} \forall f_i \in F: \chi_{f_i, v_1, v_j} \geq r_{f_i} \\ \forall f_i \in F: \chi_{f_i, v_k, v_2} \geq (p_{f_i} - L_{f_i, v_k, v_2} - ld_{v_k, v_2}) \end{cases} \quad (1)$$

式中： v_j 和 v_k 分别为第2个节点和倒数第2个节点； χ_{f_i, v_1, v_2} 为流 f_i 的传输偏移量； r_{f_i} 、 p_{f_i} 分别为流 f_i 的发送时间和截止时间； L_{f_i} 为传输任意数据帧所用的时间。

2) 端到端时延约束：要求在TT流传输过程中，各个节点和链路之间的传播、处理和传输所需时间都被有效控制在一定范围内。这包括了数据从发送端出发到达接收端所经历的所有时间延迟，如传播时延、处理时延和传输时延，以确保数据能够在规定的时间内到达目的地。一个交换节点到下一个交换节点之间的时延 D 的表达式如式(2)所示：

$$D = d_{v_n}^{\text{proc}} + d_{v_{n-1}}^{\text{prop}} + d_{v_{n-1}, v_n}^{\text{prop}} \quad (2)$$

式中： $d_{v_n}^{\text{proc}}$ 为流 f_i 在节点 v_n 的处理时延； $d_{v_{n-1}}^{\text{prop}}$ 为流 f_i 在节点 v_{n-1} 的传播时延； $d_{v_{n-1}, v_n}^{\text{prop}}$ 为流 f_i 从节点 v_{n-1} 到节点 v_n 的传播时延。

流 f_i 从发送端经过 j 个交换机到达接收端的端到端时延应小于等于 D_i ，约束表达式为：

$$(d_{v_1, v_j}^{\text{prop}} + d_{v_k, v_2}^{\text{prop}}) + \sum_{i=1}^{j-1} d_{v_i, v_{i+1}}^{\text{prop}} + \sum_{i=1}^j d_{v_i}^{\text{proc}} \leq D_i \quad (3)$$

3) 链路约束：对于同一链路上的每对不同帧，一帧的传输必须在另一帧的传输开始之前完成，反之亦然。这意味着在链路上传输的每个数据帧都必须在下一个数据帧开始传输之前完成，以确保数据传输的顺序性和可预测性。同时，链路约束必须在循环周期中考虑所有数据帧的出现，以确保整个传输过程的稳定性和一致性。约束表达式为：

$$\begin{cases} \forall (v_i, v_j) \in E, \forall f_i, f_j \in F, \chi_{f_i, v_i, v_j} < \chi_{f_j, v_i, v_j} \\ \forall a \in \left\{0, \dots, \frac{L(T_i, T_j)}{T_i} - 1\right\}, \forall b \in \left\{0, \dots, \frac{L(T_i, T_j)}{T_j} - 1\right\}, \\ \left(\left(\chi_{f_i, v_i, v_j} + aT_i \right) \geq \left(\chi_{f_j, v_i, v_j} + bT_j + L_{f_j, v_i, v_j} \right) \right) \vee \left(\left(\chi_{f_j, v_i, v_j} + bT_j \right) \geq \left(\chi_{f_i, v_i, v_j} + aT_i + L_{f_i, v_i, v_j} \right) \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中： T_i 为TT流的周期；门控列表的循环周期等于所有流的最小公倍数 L 。

4) 队列约束：要求在网络传输中，每个数据帧都必须按照其优先级和目的地被正确地分配到相应的传输队列中。约束表达式如下：

$$\begin{cases} \forall (v_a, v_b) \in E, \forall f_i \in F, \lambda_{f_i, v_a, v_b} \geq 1 \\ \forall (v_a, v_b) \in E, \forall f_i \in F, \lambda_{f_i, v_a, v_b} \leq Q_{v_a, v_b} \end{cases} \quad (5)$$

式中： λ 为帧存储的队列信息； Q 为链路出口端口上可用的队列数。

3 基于遗传禁忌搜索联合优化的时间敏感流量调度算法性能分析

基于前述的时间感知整形流量调度机制，将时间敏感流量的最小端到端时延作为优化目标。鉴于TSN流量调度问题的NP难度，必须借助启发式算法来计算输出的时间敏感流量门控列表。

在启发式算法的选择上，遗传算法以其并行搜索和计算、自适应性和自学习能力著称，适合解决调度计算问题，并具备优秀的全局搜索能力。但它的局部搜索能力相对较弱。相反，禁忌搜索算法通过避免短期内的重复路径或有选择性地避免特定路径，表现出较强的局部搜索能力，但全局搜索能力较弱。鉴于此，本文提出了一种结合了遗传算法和禁忌搜索算法的时间敏感流量调度算法，以充分利用两者的优势，提高整体调度性能。流程图如图1所示。

具体的实施步骤如下：

1) 设定遗传算法的参数，包括种群数量、交叉概率、变异概率以及最大迭代次数。这些参数的选择对算法的性能和收敛速度至关重要。其中，种群数量决定了每一代中个体的数量，交叉概率决定了交叉操作在种群中

的应用程度, 变异概率则影响了个体基因的变异程度, 而最大迭代次数则规定了算法执行的最大次数。

2) 利用 IEEE 802.1Qcc 标准中的集中用户配置(Centralized User Configuration, CUC)和支持 NETCONF 或 RESTCONF 协议的集中网络配置(Centralized Network Configuration, CNC)提供了完备的集中管理机制支持。CUC 负责为关键应用程序提供时间敏感流的注册服务, 而 CNC 则负责计算和配置门控列表(Gate Control List, GCL)以应对在大规模网络模型中进行动态调度时的严格实时要求。当流量或网络拓扑发生变化, 利用该机制及时更新算法相关参数, 并调整个体基因, 以确保算法的正常迭代。

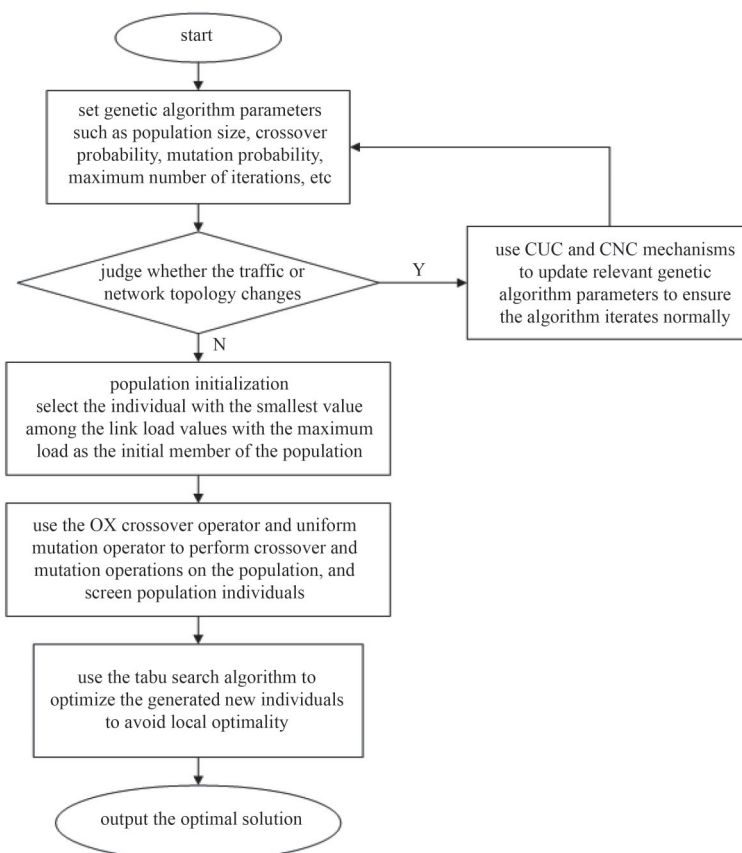


Fig.1 Flow chart of time-sensitive traffic scheduling algorithm

图1 时间敏感网络调度算法流程图

3) 种群初始化阶段, 首先随机初始化每个流的发送端和接收端之间的所有可行路由。然后, 计算每个流所选路由的笛卡尔积, 并从中选择算法所需初始化的种群数量。接着, 验证生成的个体是否符合约束条件。如果符合, 则生成对应的个体基因; 否则, 将其丢弃。在路由优化初始化阶段, 对每条链路中的负载数据量进行累加, 并选出具有最大负载的链路负载值, 最终从中选择最小的个体作为种群的初始化成员。个体被选择用于繁殖的概率与其适应度成正比。设 p_i 为第 i 个个体被选择的概率, 则

$$p_i = \frac{f(x_i)}{\sum_{j=1}^N f(x_j)} \quad (6)$$

式中: $f(x_i)$ 为第 i 个个体的适应度; N 为种群中个体的总数。

4) 通过使用 OX 交叉算子和均匀变异算子对群体进行交叉操作和变异操作。在 OX 交叉算子操作中, 随机选择 2 个交叉点位置(即 2 个切割点), 将染色体分为 3 个部分: 左段、中段和右段。从一个父母个体(父本或母本)中继承中段的基因到子代个体的对应位置。将另一个父母个体(母本或父本)中的基因按照其顺序填充子代个体的剩余位置, 但不能出现重复基因。本文在具体操作时是从第 2 个父母个体的右段开始依次遍历, 然后是左段。选择的个体通过交叉操作生成新的后代, 如果交叉点为 k , 并且考虑 2 个个体 x_i 和 x_j , 后代 x_{new} 可表示为:

$$x_{\text{new}} = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}, x_{j(k+1)}, \dots, x_{jn}) \quad (7)$$

突变以小的概率修改新生个体的某些基因，以引入变异，增加种群的多样性。对于基因 x_{nk} ，突变操作可以表示为：

$$x'_{nk} = x_{nk} + \delta \text{ with probability } \mu \quad (8)$$

然后按照端到端时延的优胜劣汰原则筛选种群中的个体。

5) 接着利用禁忌搜索算法对产生的新个体进行优化，避免搜索过程中出现循环现象，导致陷入局部最优。最后经过一定次数的迭代后得到最小端到端时延的调度方案。

通过以上算法有效计算出符合时间敏感流量调度要求的门控列表，以提高网络通信的时延优化和性能。

4 算法性能分析

为验证算法的可行性，采用 Python 中提供的 networkx 包生成网络拓扑进行仿真实验。实验设置中使用了 4 个网络，每个网络由 9 个交换机组成，每个交换机连接 3 个端系统设备，终端节点和交换机之间的链路传输速率为 100 Mbit/s，而 2 个交换机之间的链路传输速率为 1 Gbit/s。所有链路传输时延均设定为 1 μ s，节点时延为 10 μ s。在同一拓扑结构下针对不同数量的终端节点进行实验验证，以更全面地评估算法的性能。为确保流的及时传输，设置了流的最早发送时间上限，并确保最迟接收时间和最早发送时间之间的差值覆盖了流传输周期的 20%~50%。遗传-禁忌搜索联合算法的各项参数分别为：遗传代数 50，禁忌迭代步数为 50，种群数量为 30，变异概率为 0.05，交叉概率为 0.9，禁忌长度为 10。适应度函数为目标端到端时延的倒数，交叉操作使用 OX 交叉算子，变异操作则采用均匀变异算子。采用互换法生成邻域解，即随机交换 2 条流的开始传输顺序，邻域结构中最优的几个解作为候选解。针对每条流的源节点和目的节点，直接使用 Dijkstra 算法算出每条流的最短路径。

实验采用单遗传算法、单禁忌搜索算法与本文提出的联合调度方法对比，图 2 为不同全局流数量影响下 TT 流平均端到端时延下的运行结果。可以看出，采用联合启发式调度方法时，时间敏感流的平均端到端时延最低，遗传算法比联合遗传禁忌搜索算法所得结果平均高 15.79%，禁忌搜索算法比联合遗传禁忌搜索算法的结果平均高 10.48%。由此可以得出，联合遗传禁忌搜索算法对 TSN 中的流量调度的平均端到端时延有明显改善。

图 3 显示了当流量调度约束中联合考虑了路由约束及调度约束时，时间敏感流的平均时延抖动非常小，优先级最高和次高的业务流的时延抖动只有 2 μ s 左右，这是因为门控调度优先保证了时间敏感流的时延抖动，确保全时全域电力通信网中重要的时间敏感流量的端到端确定性传输。但是非时敏流的传输延时抖动在开启门控调度之后较大，最低优先级的业务流的时延抖动达到了 50 μ s 左右。这是因为门控调度的时隙优先划分给了时间敏感流，在保证时间敏感流的传输要求后，将空余的时隙划分给非时间敏感流，导致非时间敏感流的传输延时抖动得不到保证，所以延迟抖动较大。

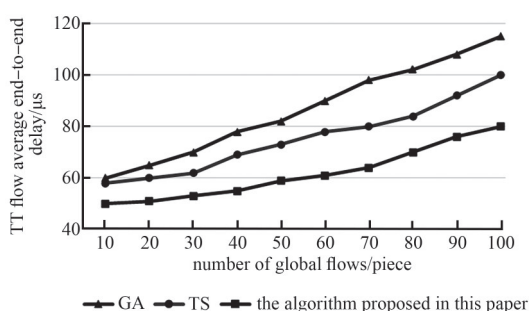


Fig.2 End-to-end latency of TT flows under different scheduling methods

图2 不同调度方法下的TT流端到端时延

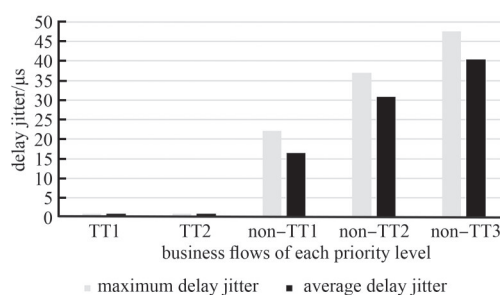


Fig.3 Latency jitter of each priority business flow

图3 各优先级业务流的时延抖动

综上所述，本文所提方法可有效保证全时全域通信网重要时间敏感业务的确定性时延，并降低其时延抖动。

5 结论

随着数字化新型电力系统的不断发展，传统的电力通信网正向更加强大、弹性和多业务承载的全时全域通信网转型。针对全时全域通信网络中多类型终端业务同时接入和海量数据传输带来的时间敏感业务确定性时延保障难题，本文提出了一种基于时间敏感网络的全时全域通信网确定性时延保障技术。首先，通过分析全时全域电力通信网中各类型业务的特点、重要性、周期性以及时延需求，建立了相应的业务模型并进行了优先级划

分。接着提出了基于时间敏感网络感知整形的流量调度机制,以确保门控调度表的计算能够满足时间敏感流在传输周期内的确定性低时延传输。为了实现最小化端到端时延的目标,采用了基于遗传算法和禁忌搜索算法联合输出时间敏感流量的门控列表计算算法,通过仿真时延,证明了该算法相比其他算法能更好地提高调度性能,保障时间敏感业务的确定性时延,为全时全域电力通信网的稳定安全运行提供了有力支撑。

参考文献:

- [1] 孙媛媛,许庆桑,马钊,等. 数字化背景下新型电力系统谐波溯源关键技术[J]. 电力系统自动化, 2024,48(6):154–169. (SUN Yuanyuan,XU Qingshen,MA Zhao,et al. Key technologies for harmonic source tracing in new power system in background of digitalization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024,48(6):154–169.) DOI:10.7500/AEPS20230613002.
- [2] 卢超,唐大童,葛萌,等. 基于电力骨干传输网的通信业务运行方式分析[J]. 电力信息与通信技术, 2023,21(5):81–88. (LU Chao,TANG Datong,GE Meng,et al. Analysis of communication service operation modes based on power backbone transmission network[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(5): 81–88.) DOI: 10.16543/j. 2095–641x. electric.power.ict.2023.05.12.
- [3] 邓建锋,肖焯,黄宝鑫,等. 面向智能电网移动终端的轻量级认证方案[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2023,35(6):1087–1097. (DENG Jianfeng,XIAO Chao,HUANG Baoxin,et al. Light weight authentication scheme for smart grid mobile terminals[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2023,35(6):1087–1097.) DOI:10.3979/j.issn.1673–825X.202212060356.
- [4] 崔涛,黎军,李琪,等. 基于门控制的星载时间敏感网络调度算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(11):1150–1155, 1162. (CUI Tao,LI Jun,LI Qi,et al. On-board time-sensitive network scheduling algorithm based on gate control[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(11):1150–1155,1162.) DOI:10.11805/TKYDA2020485.
- [5] YANG Ting,ZHAO Rui,ZHANG Weixin,et al. On the modeling and analysis of communication traffic in intelligent electric power substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017,32(3):1329–1338. DOI:10.1109/TPWRD.2016.2573320.
- [6] STÜBER T, OSSWALD L, LINDNER O, et al. A survey of scheduling algorithms for the time-aware shaper in time-sensitive networking(TSN)[J]. IEEE Access, 2023(11):61192–61233. DOI:10.1109/ACCESS.2023.3286370.
- [7] PATTI G, LEONARDI L, BELLO L L, et al. Deadline-aware online scheduling of TSN flows for automotive applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023,19(4):5774–5784. DOI:10.1109/TII.2022.3184069.
- [8] YANG Ting,ZHANG Yajian,LI Wei,et al. Decentralized networked load frequency control in interconnected power systems based on stochastic jump system theory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020,11(5):4427–4439. DOI:10.1109/TSG.2020.2978029.

作者简介:

王忠钰(1995–),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力通信系统建设与运维 .email:1217968131@qq.com.

尹喜阳(1978–),男,学士,高级工程师,主要研究方向为电力通信系统运行规划.

王 林(1991–),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力通信.

岳顺民(1966–),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电网企业数字化转型.

王 凯(1992–),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电力信息与通信技术.

郝 毅(1981–),男,学士,高级工程师,主要研究方向为电力系统调度运行规划.

朱 睿(2000–),男,在读硕士研究生,主要研究方向为电力通信.