

# 智能变电站通信业务优先级及其队列调度方法

李俊娥<sup>1,2</sup>, 陆秋余<sup>1,2</sup>, 刘剑<sup>3</sup>, 袁凯<sup>3</sup>, 田薇<sup>3</sup>, 彭弼君<sup>3</sup>

(1. 空天信息安全与可信计算教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学国家网络安全学院, 湖北 武汉 430072;  
3. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 电网的发展对智能变电站提出了全站一网的要求。为满足多种通信业务的不同服务质量 (QoS) 需求, 并保证网络拥塞时关键业务的实时性与可靠性, 提出了一种智能变电站业务优先级及其队列调度方法。综合考虑业务时延要求、业务对电网运行控制的重要度和业务流量大小 3 种因素, 对站内通信业务进行了优先级划分; 针对新的业务优先级, 结合严格优先级队列 (SPQ) 算法和赤字加权轮询 (DWRR) 算法的优点, 设计了分层级赤字加权轮询 (HDWRR) 队列调度算法。仿真结果表明, 所提方法对恶意流量具有较好的隔离能力, 在网络拥塞时仍能保证智能变电站关键业务的实时可靠传输。

**关键词:** 智能变电站; 业务优先级; 队列调度; 服务质量

**中图分类号:** TM73

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2021107

## Communication service priority in smart substation and its queue scheduling method

LI Jun'e<sup>1,2</sup>, LU Qiuyu<sup>1,2</sup>, LIU Jian<sup>3</sup>, YUAN Kai<sup>3</sup>, TIAN Wei<sup>3</sup>, PENG Bijun<sup>3</sup>

1. Key Laboratory of Aerospace Information Security and Trusted Computing, Ministry of Education, Wuhan 430072, China  
2. School of Cyber Science and Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China  
3. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China

**Abstract:** The future development of power grid puts forward the requirement of unified network for all the communication services in smart substation. In order to meet the different quality of service (QoS) requirements of various communication services, as well as ensure the real-time and reliability of key services when the network congestion occurs, a priority scheme and its queue scheduling method for the smart substation was proposed. The priorities of the communication services in the smart substation were assigned considering the delay requirements, the importance to power grid operation control, and the traffic of the communication services. The queue scheduling algorithm of hierarchical deficit weighted round robin (HDWRR), combining the advantages of strict priority queue (SPQ) algorithm and deficit weight round robin (DWRR) algorithm, was designed for the proposed priority scheme. The simulation results show that the proposed method has isolation ability for malicious traffic, and can ensure the real-time and reliable transmission of key services in smart substation once the network is congested.

**Keywords:** smart substation, service priority, queue scheduling, QoS

### 1 引言

智能变电站是智能电网的重要组成部分, 具有

全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化的基本特征<sup>[1]</sup>。信息通信网络是实现智能变电站的基础, 且变电站业务对通信的实时性、可靠性和

收稿日期: 2020-12-29; 修回日期: 2021-03-01

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目“针对网络攻击的电网信息物理系统协同运行态势感知与主动防御方法研究”基金资助项目 (No.SGJSDK00KJJS1800315)

Foundation Item: The Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Research on Cooperative Situation Awareness and Active Defense Method of Cyber Physical Power System for Cyber Attack” (No.SGJSDK00KJJS1800315)

安全性有着极高的要求<sup>[2]</sup>。随着智能电网的进一步发展,人们提出了全站统一组网的需求,即智能变电站通信网络的结构向着站内所有智能电子设备(IED, intelligent electronic device)接入同一网络的模式发展<sup>[3-4]</sup>。这种组网方式可以最大限度地实现信息共享、提高网络效率,但同时也会加大网络负载和网络时延的不确定性<sup>[5-6]</sup>。当智能变电站出现系统扰动或遭受网络攻击时,网络中的突发流量可能引起网络拥塞,使交换机成为通信网络的瓶颈,网络服务质量下降,导致站内关键业务分组的通信时延增加,影响继电保护等敏感设备的动作行为,从而影响电网的安全稳定运行<sup>[7-8]</sup>。虽然智能变电站在设计时通常采用了高带宽和冗余链路来避免网络拥塞,但是,其是依据正常网络通信流量设计的,当网络受到攻击时,任何高性能网络仍可能进入拥塞状态。因此,如何在网络拥塞状态下仍能保证关键业务的实时性与可靠性,是智能变电站走向“一网”必须解决的问题。

IEC61850-9-2 给出了初步建议,规定站内通信分组使用 IEEE802.1Q 优先级标签赋予不同的优先级别<sup>[9]</sup>。然而,目前的实际工程中,默认采用两级优先级<sup>[10]</sup>,将面向通用对象的变电站事件(GOOSE, generic object oriented substation event)和采样值(SV, sample value)分组承载的业务设为高优先级 4,其余业务设为低优先级 1,并在交换机上采用严格优先级队列(SPQ, strict priority queue)调度算法。然而,智能变电站中,不同类型的业务对实时性要求不同,业务失效对电力一次系统的危害程度也不同,两级优先级和 SPQ 调度策略无法针对不同类型的实时业务提供差别服务,难以在网络拥塞时保障关键业务的实时性与可靠性。

国内外学者针对变电站业务优先级划分和队列调度策略进行了一定的研究。文献[11-13]指出可以在 SPQ 算法应用下,对各类信息采取更细化的优先级,以保证关键信息的通信时延,但此方法增大了低优先级信息的时延风险。文献[14-16]提出将变电站内的各类信息划分为 4 个优先等级,即突发性 GOOSE 信息、采样值信息、设备状态信息和文件传输信息。队列调度规则为突发性 GOOSE 信息流设置单独的优先级队列,采用 SPQ 算法进行调度,其余信息流采用改进的加权公平排队(WFQ, weighted fair queuing)算法或加权循环调度(WRR, weight round robin)算法进行调度。此方案存在两

点不足:1) 突发性 GOOSE 信息流中跳闸命令和开关位置变化信息的实时性要求不同,但划入了同一优先级,在实时性保障策略上无法区别对待,与实际需求不符;2) 采样值信息和设备状态信息都具有实时性要求,若网络中出现大量突发性 GOOSE 信息,将会直接导致采样值信息和设备状态信息无法在规定时间内到达。文献[17-18]提出了基于分组信息标签的通信服务策略,通过制定分组信息标签与流量监测的方式对分组进行分类识别和过滤,并通过基于最低时延队列的定制长度加权轮询的队列调度机制实现对各类型分组的区别服务。但是,方案中对分组分类识别和过滤的方法可能会存在将正常分组识别为异常分组的可能性,且增加了交换机和发送端设备的负担。同时,按分组种类划分优先级的方法没有考虑到分组承载的各类业务具有不同的时延要求,难以满足智能变电站各类业务的差异化需求。综上所述,现有研究成果难以有效匹配智能变电站通信网络特点和满足多种通信业务共网传输的 QoS 需求,更难以有效保证网络拥塞时关键业务的实时可靠传输。因此,提出一种适用于全站统一网络下的智能变电站业务优先级及其队列调度方法具有重要的理论意义和应用价值。

本文的主要贡献如下。

1) 为匹配智能变电站内多种业务共网传输的通信服务质量需求,考虑业务对传输时延要求、业务对电网运行控制的重要程度和业务流量大小 3 种因素,对各类业务进行更细致的优先级划分。与默认两级优先级相比,在实时性保障策略上能够更好地区别对待不同的实时业务。

2) 针对新的智能变电站业务优先级划分方案,结合 SPQ 和赤字加权轮询(DWRR, deficit weight round robin)算法的优点,设计了分层级赤字加权轮询(HDWRR, hierarchical deficit weighted round robin)队列调度算法,并给出了 HDWRR 算法模型。相比于现有调度算法,HDWRR 具有较低的算法复杂度,并且能够更好地匹配新的业务优先级和智能变电站通信业务 QoS 需求。

3) 针对 HDWRR 算法的调度规则,给出了其入队函数和出队函数的伪代码,并进行了实验验证。

## 2 影响智能变电站分组通信时延的因素

IEC61850-5 中规定分组的通信时延是从发送节点将数据置于其传输栈顶到目的节点从其传输

栈顶取出数据的这段时间<sup>[19]</sup>。分组的端到端时延  $T$  由发送节点的处理时延  $T_1$ 、发送节点的发送时延  $T_2$ 、从发送节点到接收节点的网络传输总时延  $T_3$ 、接收节点的接收时延  $T_4$  和接收节点的处理时延  $T_5$  组成。其中,  $T_3$  由中间节点的接收时延  $\alpha$ 、中间节点的排队时延  $\beta$ 、中间节点的处理时延  $\gamma$ 、中间节点的发送时延  $\eta$  和通信链路上的传播时延  $\delta$  组成。

$T_1$ 、 $T_4$ 、 $T_5$ 、 $\alpha$  和  $\gamma$  由节点的性能和工作模式决定,  $T_2$  和  $\eta$  由节点的发送速率和分组长度决定,  $\beta$  由网络负载程度决定,  $\delta$  由传输距离和传输介质决定。对于一个确定的网络,  $\beta$  的值受通信网络实时流量的影响而波动较大, 其余时延均相对稳定<sup>[20]</sup>。在网络畅通时,  $\beta$  的值很小, 分组的通信时延能满足实时性需求; 但在网络拥塞时, 分组被放置在交换机的输出缓冲区中排队等待转发, 使  $\beta$  的值急剧增加, 从而  $T$  也随之增大, 甚至可能超出分组的通信时延要求, 当输出缓冲区被填满, 新到达的分组将会被丢弃。

由于  $\beta$  受网络负载情况的影响较大, 通过在交换机中使用合适的优先级及队列调度算法, 可以减轻关键业务  $\beta$  的不确定性。

### 3 智能变电站业务优先级划分方案

#### 3.1 智能变电站业务通信服务质量需求

智能变电站通信网络中存在的各类分组承载着多种类型业务, 这些业务实现的功能与 QoS 需求

不尽相同。通过对智能变电站的通信业务流分析, 可得到站内存在的通信业务, 为后续针对业务的优先级划分提供前提和基础。

以 D2-1 型智能变电站为例分析站内通信业务流, 如图 1 所示。D2-1 型智能变电站包含有 9 个间隔, 根据功能可划分为一个母联间隔 (S)、2 个变压器间隔 (T1 和 T2) 和 6 个馈线间隔 (F1~F6)。每个间隔单元内都含有对应的 IED, 主要有断路器 IED (breaker IED)、保护与测控 IED (P&C IED) 和合并单元 IED (MU IED), 不同间隔内的 IED 数量不等。站内采用全站统一网络的星形组网方式, 间隔内所有 IED 首先连接到该间隔的间隔交换机, 接着所有间隔交换机再连接到核心交换机, 核心交换机另有端口连接服务器和站控主机。智能变电站内的通信业务流主要包括如下几个方面<sup>[21]</sup>。

- 1) MU IED 到 P&C IED 的业务流。正常运行时, 所有间隔内的 MU IED 周期性地发送采样值信息至本间隔的 P&C IED。
- 2) Breaker IED 和 P&C IED 到服务器的业务流。正常运行时, 所有间隔内的 Breaker IED 和 P&C IED 周期性地发送设备状态信息至服务器。
- 3) P&C IED 到 Breaker IED 的业务流。假设馈线间隔 1 发生故障, 馈线间隔 1 的 P&C IED 立即向馈线间隔 1 和母联间隔的 Breaker IED 发送跳闸命令。
- 4) 传输跳闸命令后产生的业务流。Breaker IED

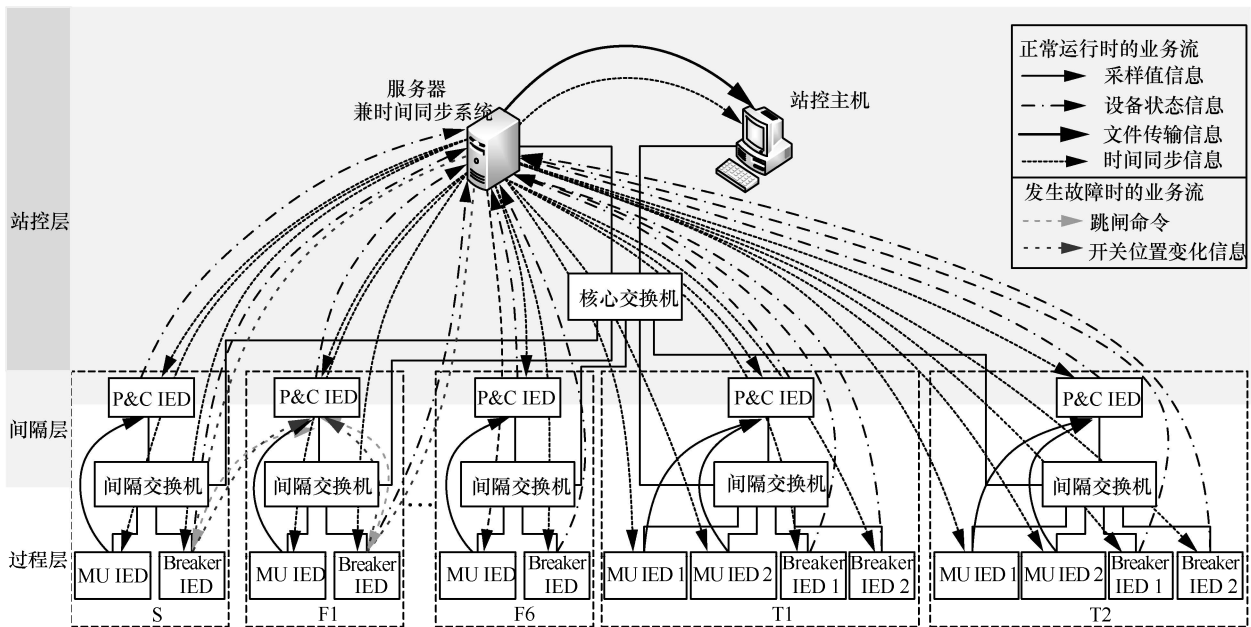


图 1 D2-1 型智能变电站的业务流示意

根据接收到的跳闸命令动作后,立即返回开关位置变化信息至 P&C IED 和服务器,同时 P&C IED 也向服务器发送开关位置变化信息。

5) 时间同步系统到所有设备的业务流。服务器同时充当时间同步系统,周期性地发送时间同步信息至网络中的所有设备。在全站统一网络下,采用全站 IEEE1588 网络对时方案最合理<sup>[22]</sup>,因此时间同步信息由 IEEE1588 分组传输。

6) 服务器到站控主机的业务流。服务器不定期地向站控主机发送大量的文件传输信息。

综上,根据业务流实现的功能不同、QoS 需求不同,智能变电站内存在的通信业务可分为 6 类,其服务质量需求如表 1 所示<sup>[18]</sup>。

### 3.2 新的智能变电站业务优先级划分方案

IEC61850 建议智能变电站通信业务使用基于 IEEE802.1Q 的优先级服务,但并未给出明确的业务优先级划分方法。在实际工程中,默认采用两级优先级:SV 和 GOOSE 分组承载的业务标记为高优先级 4,其他业务标记为低优先级 1。这样的划分方法简单易实施,但存在以下问题。

1) 将实时性要求不同的通信业务划入同一优先级别,在实时性保障策略上不能区别对待,与实际需求不符。由表 1 可知,采用 SV 和 GOOSE 分组通信的各类业务对实时性要求有较大差别,比如,设备状态信息时延要求在 100 ms 以内,跳闸命令时延要求在 3 ms 以内,这 2 种业务的时延要求相差较大,但已实施方案在优先级设定上并未区分。

2) 同一优先级的各类业务之间容易相互影响,关键业务的实时性难以保证。开关位置变化信息和跳闸命令同处于高优先级,若被攻击者恶意利用,例如重复发送大量开关位置变化分组,将直接导致跳闸命令的通信服务质量无法保证。

为解决默认两级优先级存在的不足,本文对业务进一步细分优先级,以匹配多种通信业务共网传

输的 QoS 需求。基于 IEEE802.1Q 协议的数据包在以以太网帧头的 MAC 地址后插入 4 B 的标签,标签中 3 bit 的优先级字段可设置 8 个优先级别,即优先级 0~7。但根据 IEEE802.1Q 规定,对于未标记的帧(即该帧不包含 IEEE802.1Q 标签),交换机识别后会自动给数据帧添加标签,标签中的优先级字段值默认为 1,因此不建议使用优先级 0,因为这可能导致不可预测的时延。因此,本文的业务优先级划分方案从优先级 1~7 中选择。

从电力系统安全稳定运行的角度考虑,业务分组的优先传输顺序主要由业务对时延的要求决定,同时综合考虑业务对电网运行控制的重要程度和业务流量大小。

跳闸命令的时延要求极高。从功能上来说,跳闸命令一般产生于故障发生后,是与继电保护直接相关的业务分组,其传输时间是继保护装置整体动作时间的一部分,直接影响着变电站对异常状况的处理速度。因此,跳闸命令的优先级应最高,设为 7。

开关位置变化信息的时延要求很高,但不及跳闸命令。开关位置变化信息同跳闸命令一样,一般产生于故障发生后,在断路器成功跳开后,需要通过该分组迅速告知上层设备,以便站控层和保护控制设备知晓现场情况,避免重复发送命令。因此,开关位置变化信息的优先级应次之,设为 6。

采样值信息对时延要求极高,与跳闸命令的时延要求相同。但考虑到采样值信息属于智能变电站正常运行时的常规业务,主要包含设备电压电流的实时数据,对电网运行控制的控制程度不及跳闸命令和开关位置变化信息,并且跳闸命令和开关位置变化信息只在故障时产生,短时间内集中传输,而采样值信息持续稳定传输,数据流量很大。若跳闸命令和开关位置变化信息的优先级低于采样值信息,交换机优先转发采样值信息,处理时间较长,严重影响跳闸命令和开关位置变化信息的实时性。

表 1

通信业务分类及其 QoS 需求

系统运行状态	分组类型	业务类型	时延要求/ms	数据分组丢失率要求
故障	GOOSE	跳闸命令	≤3	无数据分组丢失
	GOOSE	开关位置变化信息	≤20	无数据分组丢失
正常	SV	采样值信息	≤3	无数据分组丢失
	GOOSE	设备状态信息	≤100	无数据分组丢失
	IEEE 1588	时间同步信息	未直接定义	无数据分组丢失
	MMS	文件传输信息	无具体限制	数据分组丢失重传

若跳闸命令和开关位置变化信息的优先级高于采样值信息，则交换机优先处理跳闸命令和开关位置变化信息，对于采样值信息的实时性影响较小。因此，设采样值信息的优先级为 5。

设备状态信息对时延要求不高，属于正常运行时的常规业务，流量较稳定。设备状态信息主要包含状态量和模拟量数据，对于站控层和保护控制设备了解下层设备的真实运行情况具有重要作用。将设备状态信息的优先级设为 4。

时间同步分组对时延的要求并未在 IEC61850 标准中给出定义。但根据 IEEE1588 授时原理，其授时产生的误差主要由对时分组往返时延的对称程度决定，通过硬件打时间戳、边界时钟和透明时钟的方式进行修正，可消除往返时延的不确定性对时间精度的影响。由此可知，时间同步分组对时延的要求很低。但若时间同步分组丢失导致设备无法完成对时，可能造成关键分组丢失、错误命令下发等问题，从而导致一次设备误动或拒动。综合考虑，将时间同步信息的优先级设为 3。

文件传输信息无具体时延要求，并且，文件传输信息主要包含日常运行日记、故障记录和故障日志文件等，对一次设备和二次设备的影响较小，如果发生冲突应优先保证其他业务分组。因此，文件传输信息的优先级应最低，设为 1。

综上，智能变电站业务优先级方案如表 2 所示。实际应用中，发送端可根据表 2 中新的业务优先级方案确定待发送分组的优先级，并在 IEEE802.1Q 标签的优先级字段中填入与优先级对应的二进制值，以供交换机识别。

表 2 智能变电站业务优先级划分方案

业务类型	默认两级优先级	新的业务优先级
跳闸命令	4	7
开关位置变化信息	4	6
采样值信息	4	5
设备状态信息	4	4
时间同步信息	1	3
文件传输信息	1	1

#### 4 针对多优先级的智能变电站通信业务队列调度算法

现有常用的队列调度算法有 SPQ 算法、WFQ 算法、WRR 算法和 DWRR 算法等。

SPQ 算法严格按照队列优先级的高低进行调度，这对变电站内较低优先级的实时业务传输造成了一定压力<sup>[23]</sup>。WFQ 算法同时兼顾了分组长度和队列优先级，在公平性、时延和时延抖动方面具有较好的性能，但其算法复杂度高，不利于硬件实现<sup>[24]</sup>，并不适用于高速网络设备中。WRR 算法具有区分服务、低复杂度等优点，但其只考虑了队列优先级，并没有考虑到由于分组长度差异造成的不公平性。DWRR 算法是对 WRR 算法的改进，同时考虑了队列优先级和分组长度，且算法复杂度低，但其调度目标着重于公平性，当网络中同时存在实时业务和非实时业务时，非实时业务会占用一定的调度时间，从而增加了实时业务的时延风险。

总之，现有的常用队列调度算法均不适用于含有两级以上优先级的智能变电站通信网络。因此，需设计一种合适的队列调度算法，以匹配智能变电站通信网络的特点和多优先级调度的需求。

##### 4.1 HDWRR 队列调度算法

根据智能变电站通信业务对实时性的不同需求，可分为实时业务和非实时业务。文件传输信息对时延无具体要求，能够达到目的端即可，属于非实时业务；其余业务均有不同的时延要求，如果超出规定时延，可能导致智能变电站中的设备无法正常运行，属于实时业务。当实时业务与非实时业务发生冲突时，应优先传输实时业务，以保障其实时性；同时，在对各类实时业务进行调度时，不仅需要保证关键业务的实时性，还要保证实时业务都有得到传输的机会。

SPQ 算法的严格优先级策略可以首要保证实时业务的实时性。DWRR 算法的轮询策略可以保证实时业务之间的公平性，权重赋予策略可以防止各业务流之间的相互影响和保证跳闸命令等时延敏感性业务的实时性能，且算法复杂度低，便于交换机实现。但是，两者分别使用时无法同时保障对实时业务的优先调度和实时业务之间的公平调度。为此，本文结合两者的优点，通过将 SPQ 算法和 DWRR 算法嵌套，设计了更适用于智能变电站通信业务的队列调度算法——HDWRR 算法。

**定义 1** 设  $S_r$  表示网络节点中的一种调度规则， $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$  表示网络节点上支持的  $m$  个队列，分别对应于网络中的  $m$  类流量，将此类队列称为此节点上支持的实队列。网络节点为每一个实队列都分配有相应的存储空间。

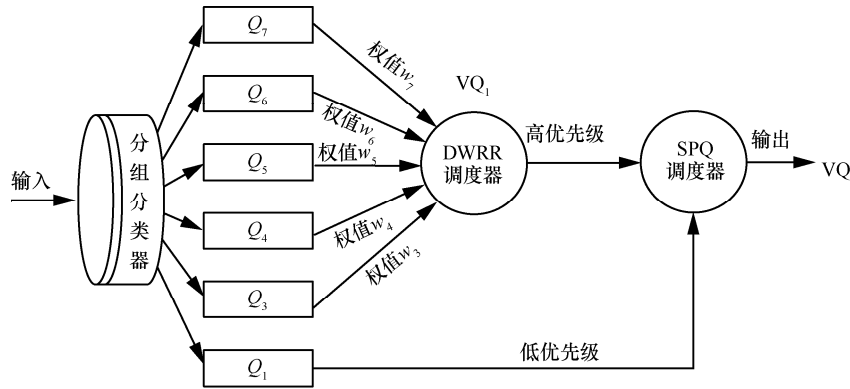


图 2 HDWRR 队列调度算法原理

**定义 2** 将若干队列通过某一调度规则重新排列形成的队列称为虚队列。虚队列没有真正的存储空间。虚队列的模型描述为

$$VQ_K = S_R(VQ_1, VQ_2, \dots, VQ_i, Q_1, Q_2, \dots, Q_j) \quad (1)$$

其中,  $VQ_1, VQ_2, \dots, VQ_i$  为虚队列;  $VQ_K$  为经过调度若干实队列和虚队列形成的新的虚队列。

基于上列定义, 可以将多种调度规则逻辑嵌套在一起, 形成新的调度规则。

**定义 3** 针对智能变电站的 HDWRR 算法模型如式(2)所示, 对应的算法原理如图 2 所示。

$$\begin{cases} VQ_1 = DWRR(Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7) \\ VQ = SPQ(VQ_1, Q_1) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $Q_1, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7$  为按优先级从低到高顺序排列的 5 个实队列, 且  $Q_1$  为非实时业务实队列,  $Q_3, Q_4, Q_5, Q_6, Q_7$  为实时业务实队列;  $VQ_1$  为将  $Q_3 \sim Q_7$  按 DWRR 调度规则重新排列后形成的虚队列;  $VQ$  为将  $VQ_1$  与  $Q_1$  按 SPQ 调度规则重新排列后形成的虚队列, 是最终输出的队列。

HDWRR 算法的入队函数和出队函数流程分别如图 3 和图 4 所示。根据流程图, 给出了 HDWRR 算法的入队函数和出队函数伪代码, 如算法 1 和算法 2 所示。对伪代码中参数和函数的解释说明如表 3 所示。

**算法 1** Enqueue(p)

- 1) PerqueSize=BufferSize/6;
- 2) if (p.prio>7) then p.prio=7;
- 3) else if (p.prio<3) then p.prio=1;
- 4) end if
- 5) if (3≤p.prio≤7) then

- 6) if (Dwrrque(p.prio).bytelen+p.size> Perque Size) then
- 7) drop(p);
- 8) return;
- 9) else
- 10) if (Dwrrque(p.prio).active==false) then
- 11) Dwrrque(p.prio).enqueue(p);
- 12) Dwrrque(p.prio).active=true;
- 13) Dwrrque(p.prio).dc=0;
- 14) InsertActiveList(Dwrrque(p.prio));
- 15) end if
- 16) end if
- 17) else if (p.prio=1) then
- 18) if (Prioque.bytelen+p.size>PerqueSize) then
- 19) drop(p);
- 20) return;
- 21) else
- 22) Prioque.enqueue(p);
- 23) end if
- 24) end if

**算法 2** Dequeue()

- 1) for (i=3 to 7) do
- 2) Dwrrque(i).w= i -2;
- 3) Dwrrque(i).q=ρ\*Dwrrque(i).w;
- 4) end for
- 5) if (Total\_Dwrrque\_Bytelen>0) then
- 6) while (true) do
- 7) Headnode=ActiveList ->next;
- 8) if (Headnode.bytelen>0) then
- 9) Headnode.dc+=Headnode.q;
- 10) pktsize=headnode.head.size;

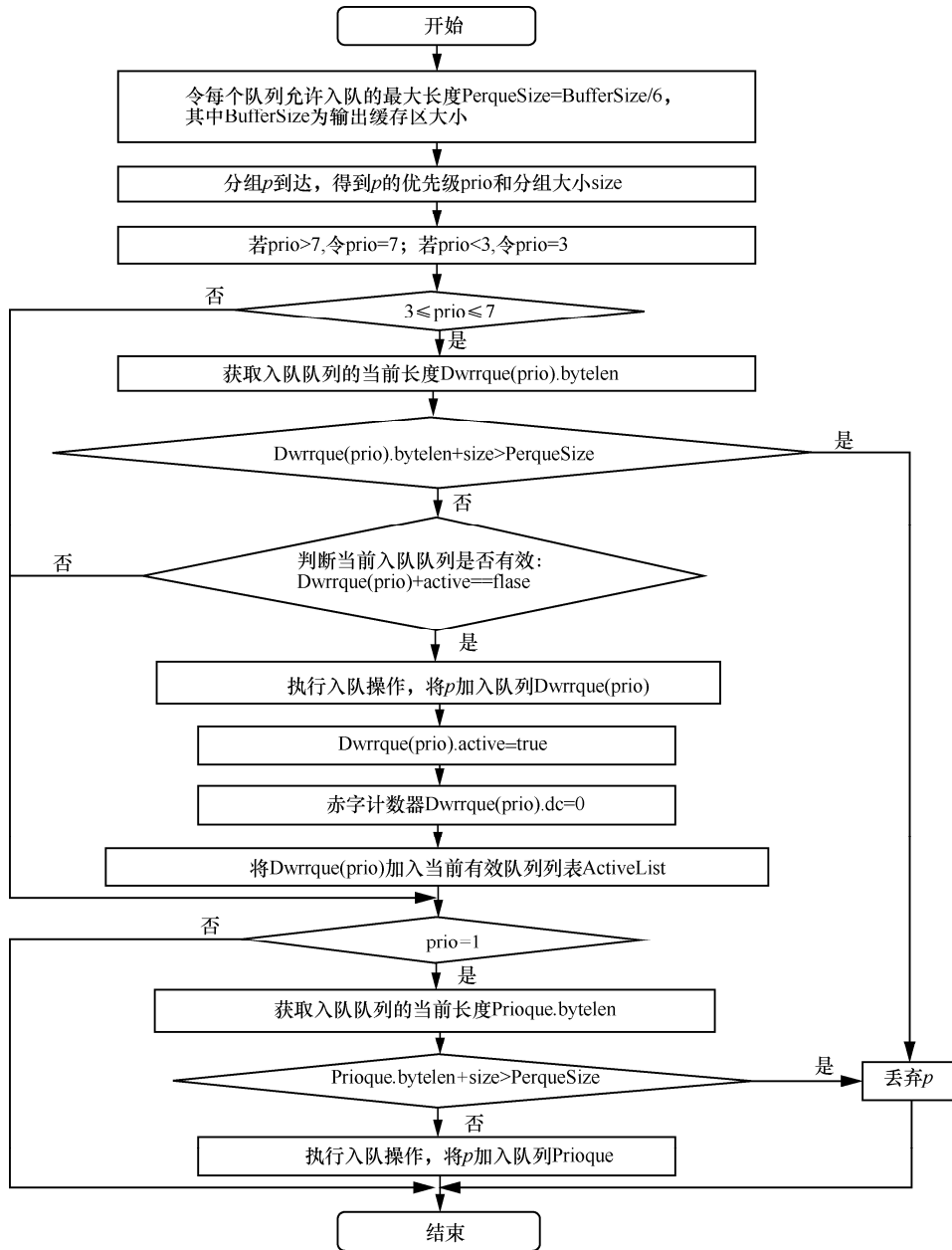


图 3 HDWRR 算法的入队函数流程

```

11) if (pktsize ≤ headnode.dc) then
12) pkt=headnode.dequeue();
13) Headnode.dc -= pktsize;
14) if (Headnode.bytelen == 0) then
15) Headnode.active=false;
16) Headnode.dc=0;
17) end if
18) end if
19) break;
20) end if
21) end while
22) else if (Total_Prioqueue_Bytelen > 0) then
23) if (Prioqueue.bytelen > 0) then
24) pkt=Prioqueue.dequeue();
25) break;
26) end if
27) end if
28) return pkt;

```

为不失一般性，HDWRR 算法还可以采用如定义 4 所示的描述，用于既具有实时业务也具有非实时业务且实时业务具有多种 QoS 需求的通信场景。

定义 4 HDWRR 算法的一般模型为

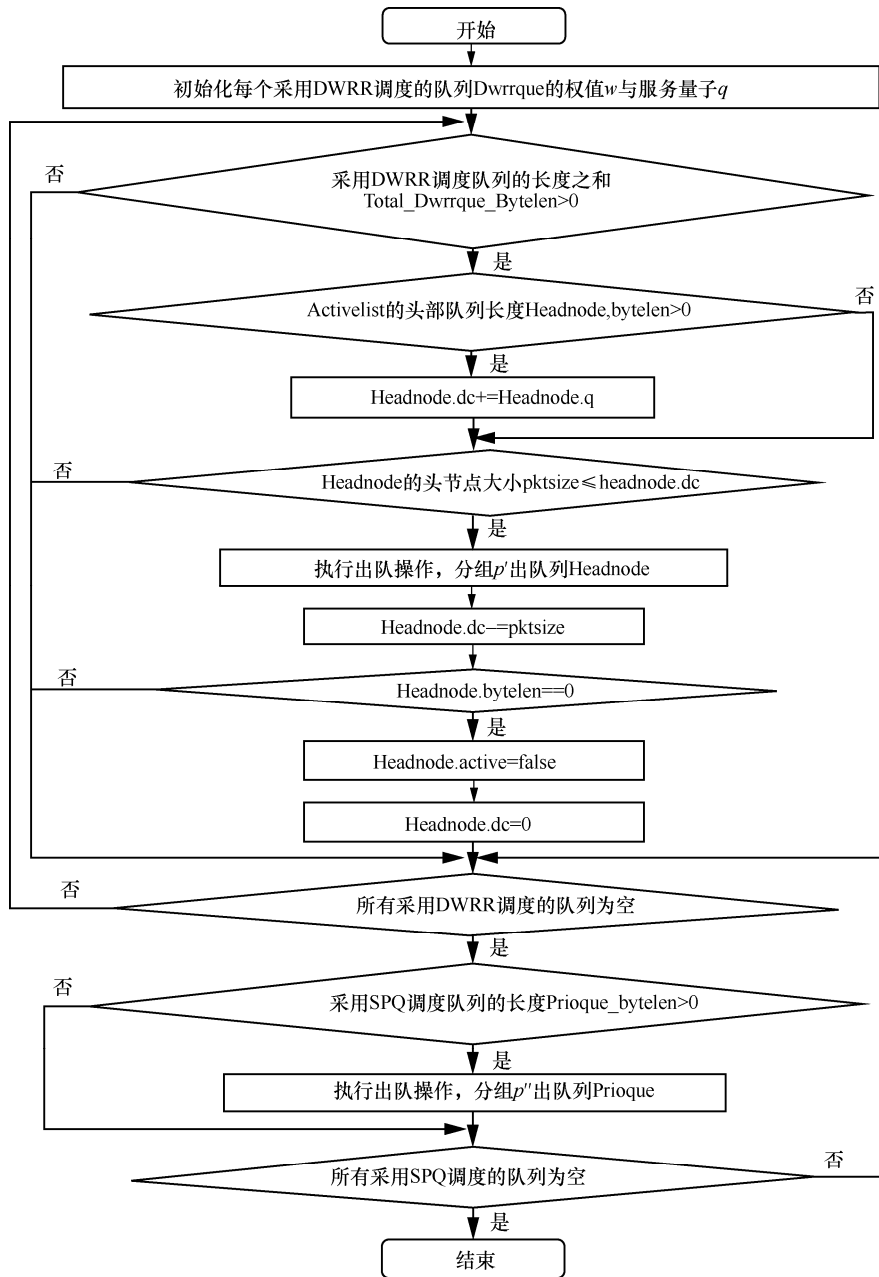


图 4 HDWRR 算法的出队函数流程

$$\begin{cases} VQ_1 = DWRR(Q_2, \dots, Q_m) \\ VQ = SPQ(VQ_1, Q_1) \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$  为按优先级从低到高顺序排列的实队列, 且  $Q_1$  为非实时业务实队列,  $Q_2, \dots, Q_m$  为实时业务实队列;  $VQ_1$  为将  $Q_2 \sim Q_m$  按 DWRR 调度规则重新排列后形成的虚队列;  $VQ$  为将  $VQ_1$  与  $Q_1$  按 SPQ 调度规则重新排列后形成的虚队列, 是最终输出的队列。

#### 4.2 HDWRR 算法复杂度分析

队列调度算法的复杂度主要包括时间复杂度

和空间复杂度。下面, 分别从这 2 个方面分析 HDWRR 算法的复杂度, 并与已有队列调度算法进行对比。

##### 1) 时间复杂度

队列调度算法的时间复杂度定义为入队操作或出队操作的时间复杂度的最大值<sup>[25]</sup>。HDWRR 算法在分组入队时根据分组头部的优先级字段可直接找到对应的优先级队列, 并将分组插入队列尾部, 时间复杂度为  $O(1)$ 。若分组在 DWRR 队列 Dwrrque 中, 出队时首先检查当前有效队列列表

Activelist 的头部确定当前服务队列，然后进行一定数量的出队操作，并更新赤字计数器  $dc$  和 Activelist；若分组在 SPQ 队列 Prioque 中，根据入队的先后顺序进行出队操作即可，时间复杂度为  $O(1)$ 。因此，HDWRR 算法的时间复杂度为  $O(1)$ 。

表 3 伪代码中参数和函数的说明

参数或函数	说明
PerqueSize	每个队列允许入队的最大长度
BufferSize	输出缓存区的大小
$p$	一个分组
prio	分组优先级大小
size	分组长度
Dwrrque()	采用 DWRR 算法调度的队列
ActiveList()	当前有效队列列表
Headnode	ActiveList 的头部队列
Prioque()	采用 SPQ 算法调度的队列
bytelen	队列当前长度
active	队列是否有效
dc	赤字计数器
$w$	权值
$q$	服务量子
$\rho$	定值，可赋值，为正整数
Total_Prioque_Bytelen	采用 DWRR 调度队列的总长度
Total_Dwrrque_Bytelen	采用 SPQ 调度队列的总长度
enqueue()	入队操作
dequeue()	出队操作
drop()	丢弃分组
InsertActiveList()	将某队列添加到 ActiveList 的尾部

## 2) 空间复杂度

HDWRR 算法为每个 Dwrrque 分配了存储权值  $w$ 、服务量子  $q$  和赤字计数器  $dc$  的空间，设队列数量为  $N$ ，则其空间复杂度为  $O(N)$ 。

## 3) 与已有队列调度算法的对比

文献[13-16]提出了针对智能变电站的通信队列调度算法，HDWRR 算法与这 4 种算法的复杂度对比如表 4 所示。表 4 中  $M = \left( \sum_{i=1}^N w_i a_i \right) / N$ ， $w_i$  为队列  $Q_i$  的权值， $a_i$  为队列  $Q_i$  在每个子周期中的调度次数。可见，HDWRR 算法与已有算法相比，具有很低的时间复杂度和空间复杂度。

表 4 HDWRR 和已有队列调度算法的复杂度对比

队列调度算法	时间复杂度	空间复杂度
HDWRR (本文算法)	$O(1)$	$O(N)$
SPQ	$O(1)$	$O(1)$
具有优先级队列的改进 WFQ	$O(N)$	$O(N)$
ISS	$O(N)$	$O(N)$
带有优先级队列的改进 WRR	$O(1)$	$O(MN)$

## 5 实验与分析

### 5.1 实验方案与仿真结果

为验证本文方案的可行性和有效性，本文参照 3.1 节的 D2-1 型智能变电站结构和业务流，在 NS2 仿真软件中建立了智能变电站通信网络模型，然后选择了如下 3 种对比方案与本文方案进行对比分析。

对比方案 1：采用目前智能变电站默认的两级优先级和 SPQ 队列调度方案。

对比方案 2：采用文献[13]方案，将突发性 GOOSE 信息（跳闸命令和开关位置变化信息）、采样值信息、设备状态信息和文件传输信息分为 4 级优先级，优先级值分别设为 7、6、5 和 1，队列调度算法采用 SPQ 算法。

对比方案 3：借鉴文献[14-16]的方案，将突发性 GOOSE 信息、采样值信息、设备状态信息和文件传输信息的优先级值设为 7、6、5 和 1，调度策略为跳闸命令和开关位置变化信息采用 SPQ 算法优先调度，其余分组采用 DWRR 算法进行调度。

在仿真模型中，每个间隔内的 IED 简化为一个 MU IED、一个 Breaker IED 和一个 P&C IED。链路的传播时延设为  $0.5 \mu\text{s}$ ，交换机端口的数据率设为  $100 \text{ Mbit/s}$ ，各类业务设定的分组长度、单个业务流的流量大小（以下简称“流量大小”）以及优先级如表 5 所示。交换机输出端口的缓冲区大小设为  $1.5 \text{ MB}$ ，所有缓冲队列平分输出缓冲区缓存。HDWRR 算法中的参数  $\rho=100$ 。其中，传播时延的设置依据智能变电站通信网络普遍采用双绞线或光纤进行组网，取电磁波在有线介质上的传播速度为  $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ <sup>[26]</sup>，介质长度以  $100 \text{ m}$  计算（变电站内通信介质长度一般不大于  $100 \text{ m}$ ），则每条链路的传播时延为  $100 \text{ m} / (2 \times 10^8 \text{ m/s}) = 0.5 \mu\text{s}$ 。

背景流量按照馈线间隔 F1 发生故障时设置。依据第 3 节中对智能变电站内通信业务流的分析，各业务流的设置具体如下。

表 5 实验中各类业务的分组长度、流量大小及优先级

业务类型	分组长度/B	流量大小/(Mbit·s <sup>-1</sup> )	优先级
跳闸命令	204	0.816	7
开关位置变化信息	145	2.266	6
采样值信息	171	5.472	5
设备状态信息	256	0.102	4
时间同步信息	100	0.000 8	3
文件传输信息	1 000	8	1

1) 仿真第 1 s, 采样值信息、设备状态信息和时间同步信息开始发送, 并持续发送至仿真结束。由于对比方案 2 和对比方案 3 并未考虑时间同步信息的优先级, 对这 2 种方案进行仿真时, 服务器不发送时间同步信息。

2) 仿真第 7 s, 文件传输信息开始发送, 并持续发送至仿真结束。

3) 仿真第 10 s, 馈线间隔 F1 发生故障, P&C IED 立即发送跳闸命令至 F1 和母联间隔 S 的 Breaker IED, 持续时间 1 s。

4) F1 和 S 的 Breaker IED 设定在仿真第 10~10.3 s 的随机时间开始返回开关位置变化信息, 持续时间 1 s。

5) 仿真第 15 s, 仿真结束。

在上述背景流量下, 仿真第 10~12 s 时所有业务流共网传输。因此, 为验证攻击流量对所有业务流产生的影响, 将攻击主机接入核心交换机, 在仿真第 10~12 s 时产生恶意流量, 并选择核心交换机与间隔交换机、服务器和站控主机相连的 11 个输出端口作为观测对象, 以观察不同流量负载情况下的分组端到端时延和数据分组丢失率变化。

为模拟实时业务和非实时业务流量剧增对其余业务的影响, 仿真基于以下 2 种攻击场景。

场景 1。仿真第 10~12 s, 攻击者以广播的形式向网络中发送大量恶意的开关位置变化信息, 分别在本文方案和对比方案 1~对比方案 3 下, 逐渐增大恶意分组的流量, 直至经过核心交换机的总流量达到输出端口允许发送数据量 (100 Mbit/s×11=1 100 Mbit/s) 的 1.5 倍。统计不同流量负载情况下, 所有业务在仿真第 10~12 s 时间段内的平均端到端时延和数据分组丢失率变化。仿真结果如图 5 和图 6 所示。

场景 2。仿真第 10~12 s, 攻击者向网络中的所有设备发送大量恶意的文件传输信息, 分别在

本文方案和对比方案 1~对比方案 3 下, 逐渐增大恶意分组的流量, 直至经过核心交换机的总流量达到输出端口允许发送数据量的 1.5 倍。统计不同流量负载情况下, 所有业务在这 2 s 时间段内的平均端到端时延和数据分组丢失率变化。仿真结果如图 7 和图 8 所示。

## 5.2 仿真结果分析

### 1) 场景 1 的仿真结果分析

图 5 和图 6 表明, 当经过核心交换机的总流量低于 1 000 Mbit/s, 即流量负载低于 90% 时, 4 种方案都能确保所有业务的时延在 IEC61850 规定范围内且无数据分组丢失现象。但是, 当流量负载超过 90% 时, 对比方案 1~对比方案 3 下, 所有业务的时延和数据分组丢失率均大幅度增加, 甚至部分业务的时延超出了规定要求。主要原因如下。① 对比方案 1 中, 跳闸命令、采样值信息和设备状态信息的时延和数据分组丢失率增加, 是因为这 3 种业务与开关位置变化信息处于同一优先级, 完全共享带宽和缓存, 当任意一种业务超量, 其他业务都会受到影响。② 对比方案 1 中, 时间同步信息和文件传输信息的时延和数据分组丢失率增加, 是因为这 2 种业务同处于低优先级队列, 当高优先级队列拥塞时, 低优先级队列中的分组长时间存于缓冲区中等待调度, 导致时延剧增, 且缓冲区逐渐被占满, 新到达的分组只能被丢弃, 数据分组丢失率逐渐增加。③ 对比方案 2 和对比方案 3 中, 跳闸命令的时延和数据分组丢失率增加, 是因为这 2 种方案没有区分突发性 GOOSE 信息流中跳闸命令和开关位置变化信息的优先级, 导致 2 种业务相互影响。④ 对比方案 2 和对比方案 3 中, 除突发性 GOOSE 信息以外的业务时延增加, 是由于突发性 GOOSE 信息与其余业务之间采用绝对优先级调度, 突发性 GOOSE 信息的流量剧增将会直接导致其余业务的时延和数据分组丢失率无法得到保障。

在本文方案下, 只有开关位置变化信息和文件传输信息的时延和数据分组丢失率增加, 其余业务的时延几乎没有变化且无数据分组丢失现象。这是由于本文方案中各类实时业务分别享有固定的带宽和缓存, 影响可以被很好地隔离开来, 所以即使开关位置变化信息大量涌入, 造成网络拥塞, 其余实时业务依然可以得到稳定的时延和数据分组丢失率保证, 且文件传输信息属于非实时业务, 数据分组丢失率的要求为数据分组丢失重传, 所以时延

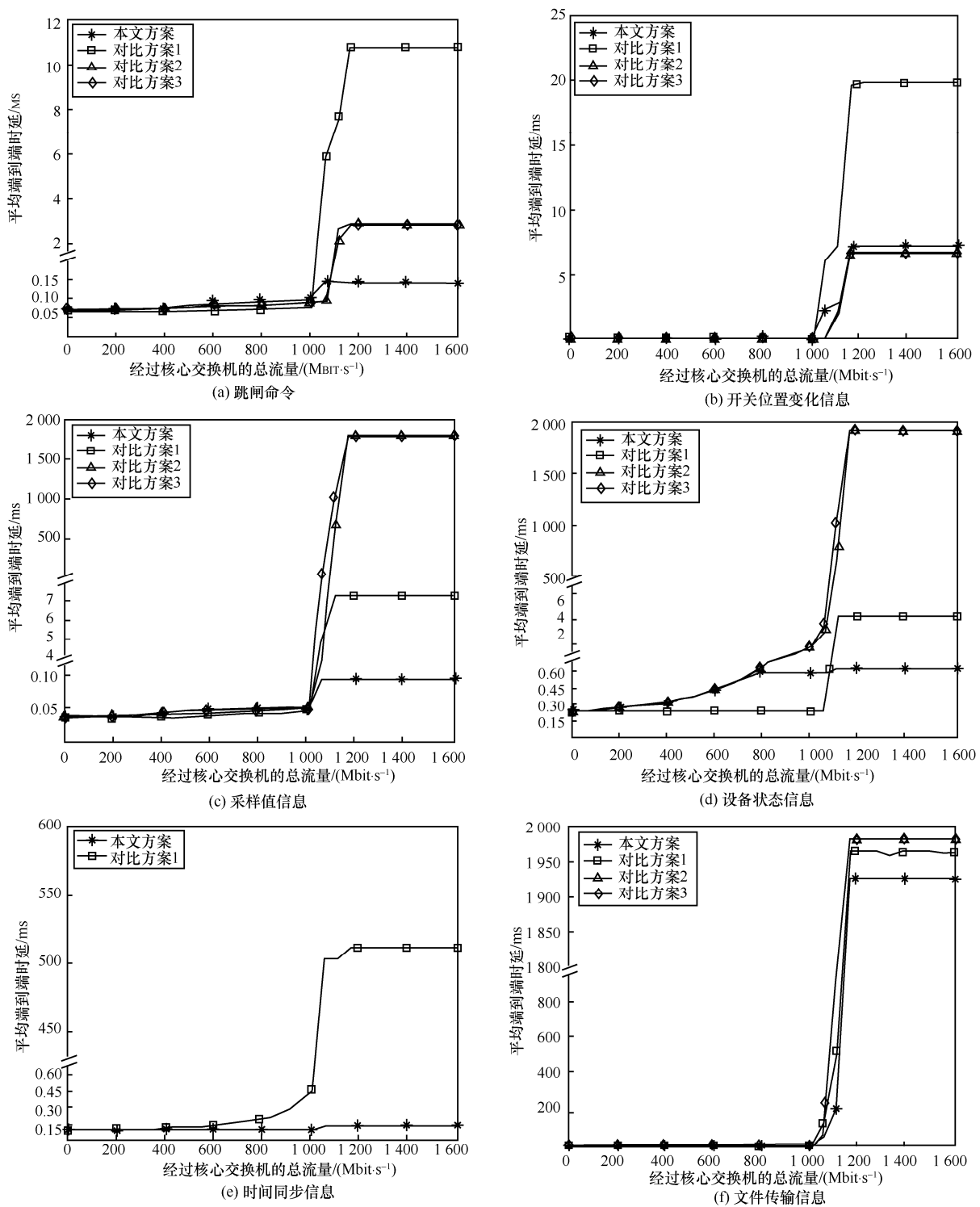


图 5 场景 1 下，开关位置变化信息流量增加时各类业务的平均端到端时延变化

和数据分组丢失率的增加对其几乎没有影响。

场景 1 的仿真结果表明，在本文方案下，任意一种实时业务流量剧增时，其余实时业务由于仍然享有固定的带宽和缓存而几乎不会受到影响，从而

更好地保障了智能变电站通信网络中关键业务的实时性与可靠性。

### 2) 场景 2 的仿真结果分析

图 7 和图 8 表明，当流量负载较低时，4 种方

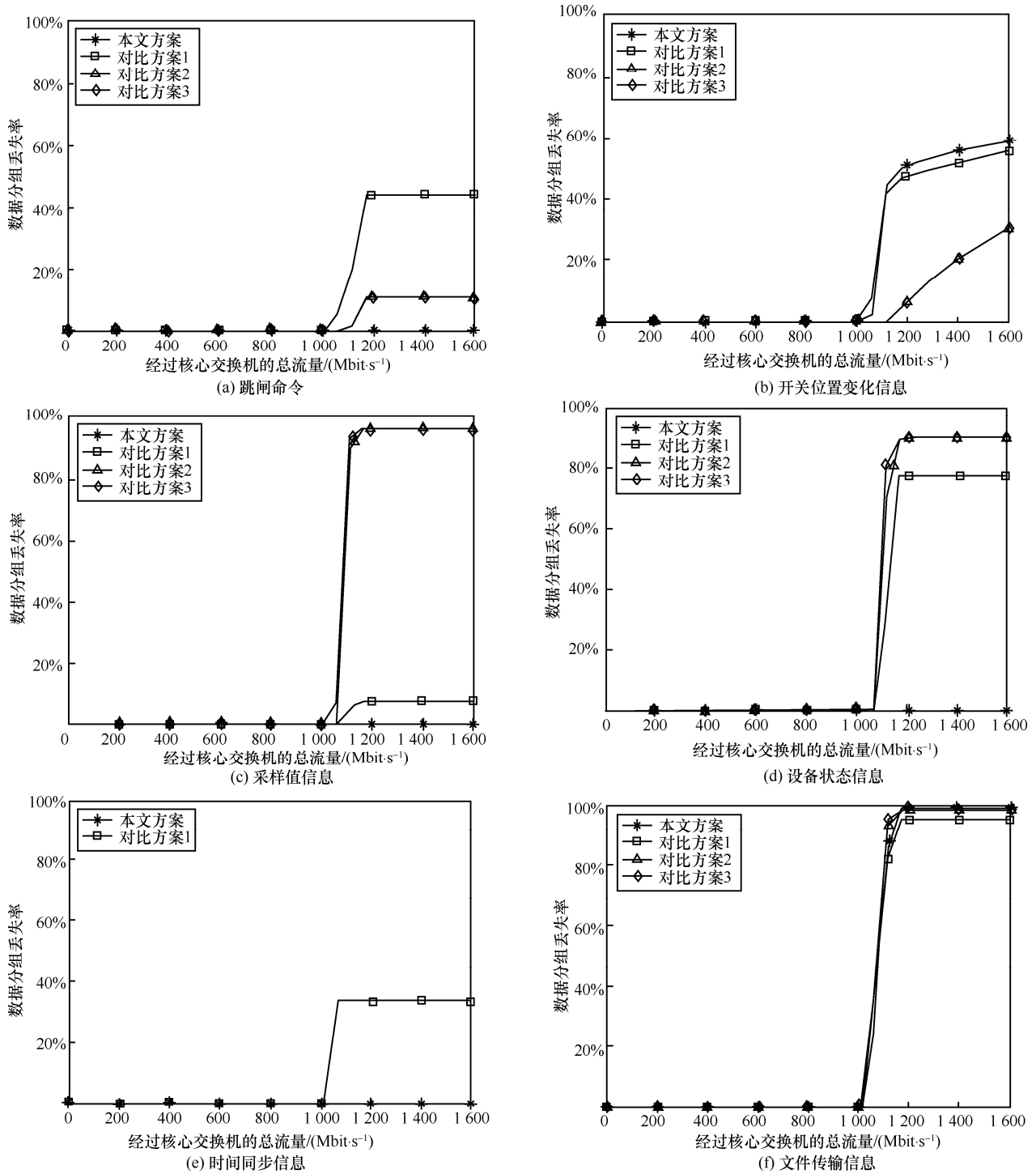


图 6 场景 1 下, 开关位置变化信息流量增加时各类业务的数据分组丢失率变化

案都能保证所有业务的时延在规定范围内且无数据分组丢失现象。但当流量负载逐渐增加时, 对比方案 1 下, 时间同步信息和文件传输信息的时延和数据分组丢失率剧增, 其余业务的时延几乎没有变化且数据分组丢失率均为零。而对比方案 2、对比方案 3 和本文方案下, 只有文件传输信息的时延和数据分组

丢失率增加, 其余业务的时延几乎没有变化且数据分组丢失率为零。

场景 2 的仿真结果表明, 本文方案 and 对比方案 2、对比方案 3 都较好地保证了实时业务的实时性, 能够抵抗由于非实时业务流大量涌入造成的网络拥塞状况。

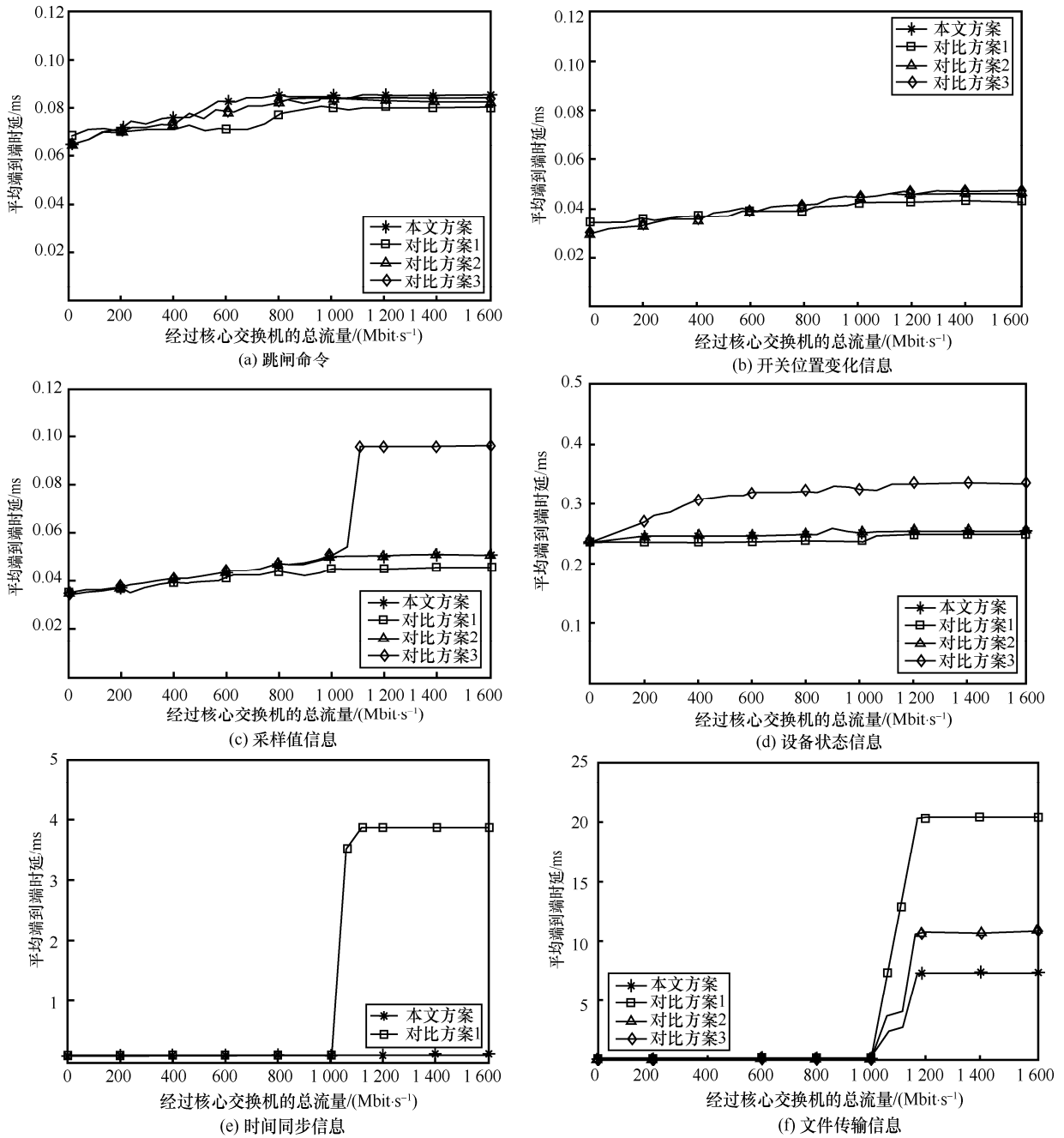


图 7 场景 2 下，文件传输信息流量增加时各类业务的平均端到端时延变化

### 6 结束语

智能变电站在全站统一网络下，所有通信业务共网传输，增加了网络拥塞导致的高时延与数据分组丢失风险。为匹配多种业务的 QoS 需求，本文对智能变电站通信业务进行了细粒度的优先级划分，解决了默认两级优先级在实时性保障策略上无法区别对待不同实时业务的问题；同时，针对新的智能变电站业务优先级划分方案，设计了 HDWRR 队

列调度算法，该算法结合了 SPQ 和 DWRR 的优点，且具有低的算法复杂度，解决了现有调度策略不能匹配新的业务优先级和智能变电站通信业务 QoS 需求的问题。仿真结果表明，本文方案不仅能够抵御非实时业务流量攻击对实时业务造成的影响，而且当存在任意一类实时业务流量攻击时，还能保障其余实时业务的实时可靠传输。这一特点可以隔离智能变电站通信网络中恶意流量的影响，最大限度地保证关键业务的实时性和可靠性。

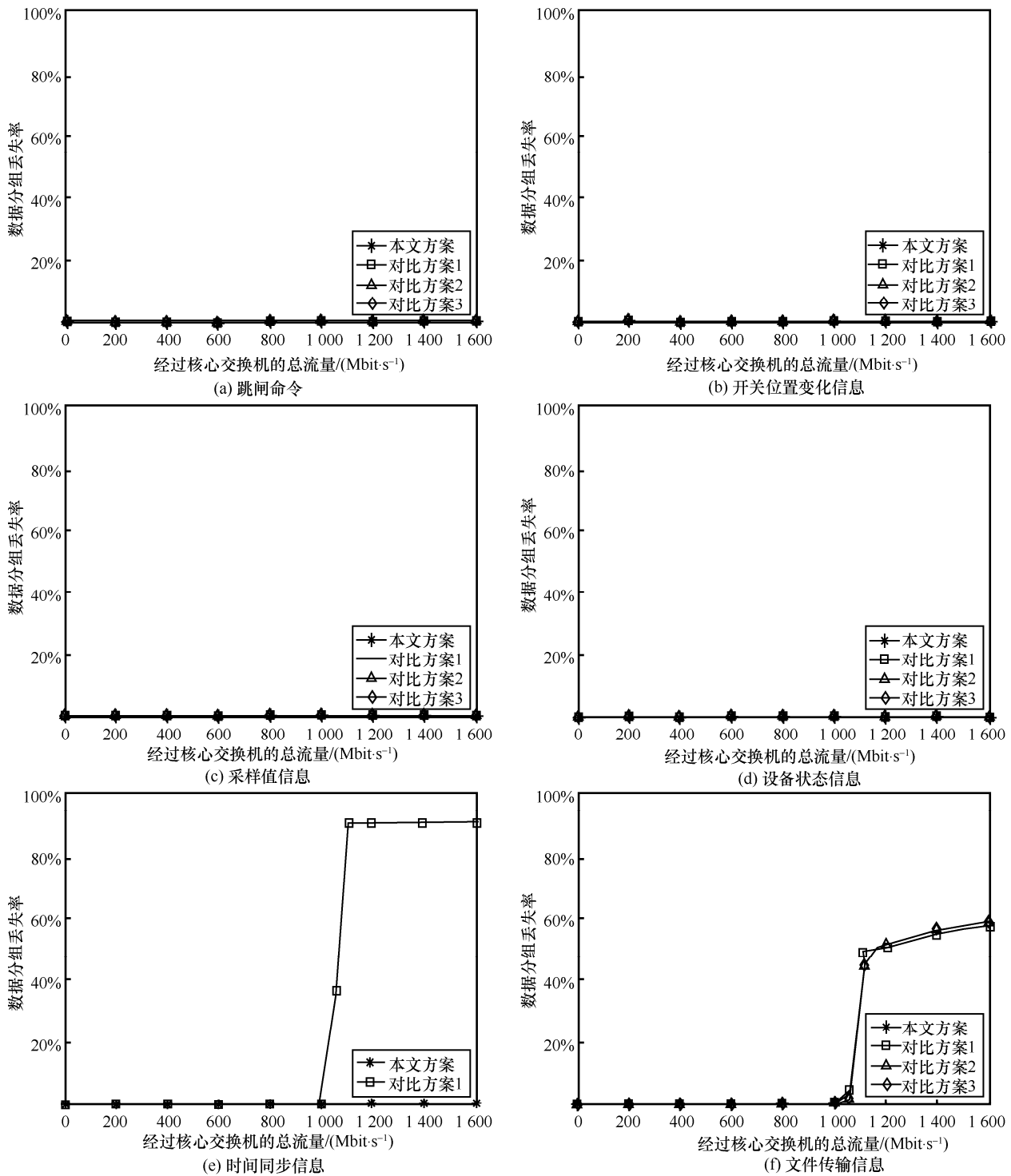


图 8 场景 2 下, 文件传输信息流量增加时各类业务的数据分组丢失率变化

本文工作为智能变电站通信网络抵抗恶意流量攻击、提高实时业务的可靠性提供了一种可行方案, 可作为未来 IEC61850 标准修订的依据, 也可为其他同时承载实时业务和非实时业务、且实时业务的服务质量要求各自不同的工业控制网络提供参考。

参考文献:

[1] 国家电网公司. 智能变电站技术导则: Q/GDW 383-2009[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.  
State Grid Corporation. Technical guidelines for smart substations: Q/GDW 383-2009[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.

[2] YANG T, ZHAO R, ZHANG W X, 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.
- [3] KHOUDRY E, BELFQIH A, BOUKHEROUAA J, et al. An overview of smart grid communication networks technologies, protocols and challenges[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Networking, Information Systems & Security. New York: ACM Press, 2019: 1-8.
- [4] 窦晓波, 胡敏强, 吴在军, 等. 数字化变电站通信网络的组建与冗余方案[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(1): 38-43.  
DOU X B, HU M Q, WU Z J, et al. Configuration and redundancy of communication networks in digital substations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(1): 38-43.
- [5] FEIZIMIRKHANI R, BRATCU A I, BÉSANGER Y, et al. Modeling of IEC 61850 GOOSE substation communication traffic using ARMA model[C]//2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [6] SIDHU T S, INJETI S, KANABAR M G, et al. Packet scheduling of GOOSE messages in IEC 61850 based substation intelligent electronic devices (IEDs)[C]//IEEE PES General Meeting. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-8.
- [7] NIVETHAN J, PAPA M, HAWRYLAK P. Modeling and simulation of electric power substation employing an IEC 61850 network[C]//Proceedings of the 9th Annual Cyber and Information Security Research Conference. New York: ACM Press, 2014: 89-92.
- [8] 石悦, 邱雪松, 郭少勇, 等. 基于改进遗传算法的电力光传输网规划方法[J]. 通信学报, 2016, 37(1): 116-122.  
SHI Y, QIU X S, GUO S Y, et al. Optimal planning of optical transmission network using improved genetic algorithm[J]. Journal on Communications, 2016, 37(1): 116-122.
- [9] IEC 61850-9-2 Communication networks and systems in substations-Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) - Sampled values over ISO/IEC 8802-3[S]. 2004.
- [10] SIDHU T S, YIN Y J. Modelling and simulation for performance evaluation of IEC61850-based substation communication systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1482-1489.
- [11] WANG W L, LIU M H, ZHAO X C, et al. Shared-network scheme of SMV and GOOSE in smart substation[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(4): 438-443.
- [12] ZHANG Y X, CAI Z X, LI X H, et al. Analytical modeling of traffic flow in the substation communication network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(5): 2119-2127.
- [13] 辛建波, 段献忠. 基于优先级标签的变电站过程层交换式以太网的信息传输方案[J]. 电网技术, 2004, 28(22): 26-30, 47.  
XIN J B, DUAN X Z. A transfer scheme based on priority-tag in switched Ethernet for substation process-level[J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 26-30, 47.
- [14] 龚石林, 王晨, 冯彦钊, 等. 基于改进加权公平队列的变电站局域网通信队列调度策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 76-81.  
GONG S L, WANG C, FENG Y Z, et al. A smart substation LAN communication queue scheduling strategy based on improved WFQ algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 76-81.
- [15] 钟熙微, 陈泽恒, 汪东, 等. 变电站通信网络的信息流队列调度策略研究[J]. 黑龙江电力, 2017, 39(4): 307-312.  
ZHONG X W, CHEN Z H, WANG D, et al. Research on scheduling strategy of information flow queue of substation communication network[J]. Heilongjiang Electric Power, 2017, 39(4): 307-312.
- [16] 沈奕菲, 高亮, 田鑫. 基于改进 WRR 算法的智能变电站内通信队列调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 85-90.  
SHEN Y F, GAO L, TIAN X. Research on smart substation inner communication queue scheduling based on improved WRR algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 85-90.
- [17] GAO J X, TONG W M, JIN X J, et al. Study on communication service strategy for congestion issue in smart substation communication network[J]. IEEE Access, 2018, 6: 44934-44943.
- [18] 佟为明, 高吉星, 卢雷, 等. 基于分组信息标签的智能变电站通信服务策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 124-129.  
TONG W M, GAO J X, LU L, et al. Communication service strategy of smart substation based on message information label[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 124-129.
- [19] DL/Z 860.5-2004/IEC 61850-5:2003, Communication networks and systems in substations Part5: Communication requirements for functions and device models[S]. 2003.
- [20] 王海柱, 蔡泽祥, 张延旭, 等. 提升智能变电站信息流实时性和可靠性的定质交换技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 156-162, 168.  
WANG H Z, CAI Z X, ZHANG Y X, et al. Custom switching technology to improve reliability and real-time performance of information flow in smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 156-162, 168.
- [21] ZHANG Z D, HUANG X Q, KEUNE B, et al. Modeling and simulation of data flow for VLAN-based communication in substations[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11(4): 2467-2478.
- [22] 赵上林, 胡敏强, 窦晓波, 等. 基于 IEEE1588 的数字化变电站时钟同步技术研究[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 97-102.  
ZHAO S L, HU M Q, DOU X B, et al. Research of time synchronization in digital substation based on IEEE 1588[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 97-102.
- [23] 薛强, 张光昭. 提供电信级 QoS 的负载自适应时隙 PQ 算法研究[J]. 通信学报, 2008, 29(5): 93-99.  
XUE Q, ZHANG G Z. Research on load-adaptive slotted priority queue scheduling providing telecomm-grade IP QoS[J]. Journal on Communications, 2008, 29(5): 93-99.
- [24] 魏德宾, 沈婷, 杨力, 等. 基于自相似流量水平分级预测的网络队列调度算法[J]. 通信学报, 2020, 41(4): 182-189.  
WEI D B, SHEN T, YANG L, et al. Network queue scheduling algo-

rithm based on self-similar traffic level grading prediction[J]. Journal on Communications, 2020, 41(4): 182-189.

[25] SHREDHAR M, VARGHESE G. Efficient fair queuing using deficit round-robin[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1996, 4(3): 375-385.

[26] 丁力, 王晓茹, 童晓阳. 基于 EPOCHS 平台的 IEC 61850 采样值传输仿真[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 67-72.

DING L, WANG X R, TONG X Y. IEC 61850 sampled value transmission simulation based on EPOCHS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 67-72.

[作者简介]



李俊娥 (1966- ), 女, 河北怀安人, 博士, 武汉大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机网络体系结构、网络安全、电力信息物理系统和电力工业控制安全等。



陆秋余 (1996- ), 女, 浙江杭州人, 武汉大学博士生, 主要研究方向为智能电网通信 QoS 保障和网络安全。



刘剑 (1976- ), 男, 湖北黄陂人, 博士, 武汉大学副教授, 主要研究方向为电力系统可靠性、风险评估、全寿命周期成本评估和智能电网的在线监测及预警等。



袁凯 (1989- ), 男, 湖北荆州人, 武汉大学博士生, 主要研究方向为智能电网通信 QoS 保障和可靠性分析。



田薇 (1992- ), 女, 四川眉山人, 武汉大学硕士生, 主要研究方向为电力系统网络通信、信息采集和电力系统自动化。

彭弼君 (1992- ), 女, 湖南长沙人, 武汉大学硕士生, 主要研究方向为电力系统网络通信。