DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311181

# 工业互联网数据服务建模及确定性算法研究*

胡致远[1],秦 弦[1],徐 鑫[2],曾 毅[1],游梓霖[1]
(1.重庆大学微电子与通信工程学院 重庆 400044; 2.国网重庆市电力公司电力科学研究院 重庆 401123)

**摘 要**:5G 开放的服务能力改变了工业互联网数据服务过程,工业业务向 5G 网络迁移时既应考虑云化下多数据过程的协同,也应考虑网络化服务的冲突避免。为此以电力行业为例,提出 Petri Net 数据服务模型对业务时序逻辑和网络功能统一建模分析,保证数据可达可用;并基于可达图设计了 VIKOR 网络编排算法,从时空维度保障多业务流的确定性数据过程和执行时间。仿真分析表明所提方法能规避工业业务迁移后的数据冲突,提升部署效率;电力 5G 试验网现场测试验证了本方案能保障承载层 12.03~18.35 ms 传输时延和 2.75~5.62 ms 时延抖动,电力遥控业务全过程时间为 5.96~6.68 s,业务数据质量得到提升,满足电力通信网运行要求。

**关键词**: 工业互联网;数据服务;Petri Net;确定性编排
**中图分类号**: TN915 TH701 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 510.50

# Research on data service model and deterministic algorithm of industrial internet

Hu Zhiyuan[1], Qin Xian[1], Xu Xin[2], Zeng Yi[1], You Zilin[1]
(*1. College of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;*
*2. Chongqing Electric Power Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, China*)

**Abstract**: The open service capability of 5G has changed the industrial internet data service process. When migrating industrial businesses to 5G network, the coordination of cloud-based data processes and the conflict avoidance of networked services should be considered. Taking power industry for example, to ensure data reachability and availability, a data service model based on Petri Net is proposed for unified modeling and analysis of business temporal logic and network functions. Then, based on reachability graph, VIKOR orchestration scheme is adopted to ensure the deterministic process and execution time of multiple data from space-time dimension. Simulation results show that it can avoid data conflicts after migration and improve deployment efficiency. Field test of power 5G experimental network verifies that this method can guarantee transmission delay of 12.03~18.35 ms and delay jitter of 2.75~5.62 ms of the bearer layer, the completion time of 5.96~6.68 s for power remote control business, and the data quality has been improved to meet the operational performance requirements of the power telecommunication network.

**Keywords**: industrial internet; data service; Petri Net; deterministic orchestration

## 0 引 言

工业数字化转型推动设备部署向虚拟化、网络化发展,分布式仪器仪表支撑工业测量、计量、传输等业务[1],对数据提出了可达、可用的确定性需求。服务化、云化改变了工业互联网数据服务过程[2],工业业务迁移到第五代移动通信技术(5th generation mobile communication technology,5G)中应考虑云化结构下业务因果时序关系,避免多业务流的服务功能冲突和资源竞争。为此,5G 采用虚拟网络功能转发图(VNF forwarding graph, VNF-FG)提供面向服务的网络编排与资源管理[3],然而工业互联网具有更严格的时序要求和空间依赖关系,仅从资源角度集中控制编排虚拟网络功能(virtual network function, VNF),无

收稿日期:2023-03-16 Received Date: 2023-03-16
*基金项目:国家自然科学基金面上项目(62071075)、国网重庆电科院(SGCQDK00NYJS2200181)项目资助

法保障数据服务,还需确定性算法规划业务流在应用层和承载层的确定性数据过程和执行时间。

工业互联网是信息通信与工业控制的有机结合,构建统一数据服务模型是解决上述问题的根本途径。信息通信系统基于面向对象的微服务架构,采用统一建模语言(unified modeling language, UML)、Petri Net 等方法可视分析[4];工业控制系统通过状态空间、Petri Net、信号流图等方式对本地或广域控制建模[5];Petri Net 作为通用建模方法,能有效描述功能点状态、业务工作逻辑和并发行为,建立确定性数据过程。此外,确定性执行时间包括应用时间和通信时延,现有通信网络确定性保障机制包括:1)信息年龄(age of information, AoI)优化,从链路调度、数据传输等角度提升数据交付时效性;2)IEC 62439 双发选收机制保障通信可靠;3)IEC/IEEE 60802 调整网络周期适配周期性控制业务执行时间[6];4)时间敏感网络(time sensitive network, TSN)和确定性网络(deterministic networking, DetNet)通过时间同步、调度和流量整形、资源预留等方式保证传输准时;5)5G 通过 VNF-FG 编排提供数据服务保障。AoI、TSN、DetNet 聚焦于承载层端到端的确定性,VNF-FG 编排脱离业务需求,未从机理上提供应用层工作逻辑和执行时间的保证,数据服务是业务、网络功能、资源时序逻辑的协同,需要全业务流程编排。

为此,本文采用 Petri Net 对工业互联网数据过程建模,实现设备功能和承载资源的统一抽象控制;并将业务运行的关键时空特征映射到具有拓扑空间和因果时序逻辑的可达图中,结合 MAPE-K 提出 VIKOR 确定性网络编排算法,规划业务执行时间,优化数据部署要求。配合重庆"电力源网荷储业务"5G 试点工程,现场测试验证了所提方案能提供业务迁移到 5G 网络后的时序逻辑保证和冲突避免,数据质量满足电力 5G 网络性能要求。

## 1　基于 Petri Net 的工业互联网数据服务模型

### 1.1　工业互联网数据过程分析

传统工业网络中,设备功能集中固定部署,与业务逻辑一致。5G 核心网(5G core, 5GC)开放的边缘计算、管理控制等能力使网络拓扑网状化,服务功能与网络结构相关,复杂了业务的因果时序逻辑。以电力控制生产区为例,图 1 的控制器与工业设备之间是受到给定的延迟或传输时间阈值限制的确定性通信[7],数据交互应符合 IEC/IEEE 60802 规范的时序关系,如图 2 所示。若缺乏对业务流的控制,会形成报文冲突、微突发、安全裕度不可计算等问题,应预先根据服务质量(quality of service, QoS)为业务流分配特定功能节点执行时间。

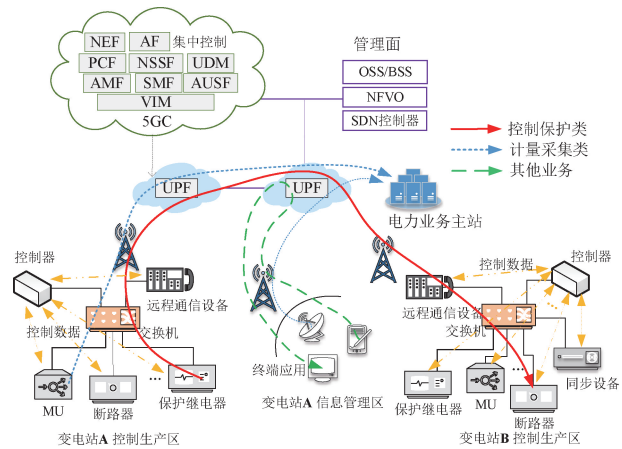



图 1　电力数据过程

Fig. 1　Data process of power grids

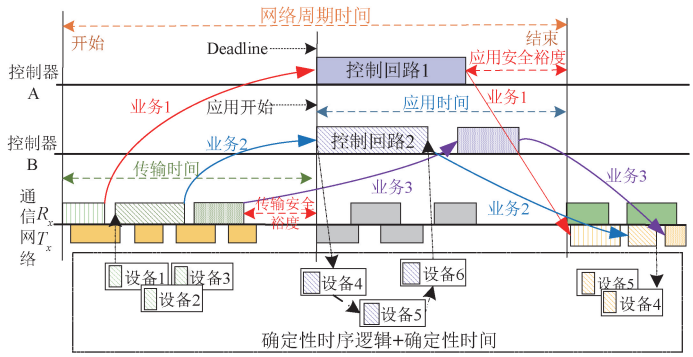



图 2　多业务流传输、控制、应用时序关系

Fig. 2　The temporal relation between transmission, control, and application processes of multi traffic

5GC 集中控制下,控制保护类、计量采集类和其他业务与网络功能共同部署,多业务流动态交互会产生复杂数据时变问题,继而引发设备、VNF 或用户面功能(user plane function, UPF)上的资源冲突、规则冲突或功能冲突[8],影响数据体验质量(quality of experience, QoE),需规划业务各节点确定性时序逻辑和确定性时间,保证数据过程的深度协同。

### 1.2 基于 Petri Net 的数据过程建模

1) Petri Net 基础理论

时延 Petri Net(timed petri net, TPN)作为 Petri Net 扩展,在全局时钟上描述事件序列的因果逻辑和时间关联[9],在工业互联网定义为 $\Phi=(P,T_L,T_G,F,M,I)$:

(1) $P=(p_1,p_2,\cdots,p_n)$ 是由 VNF、工业设备实例化的有限库所集;库所标记 token 为含流标识、预留网络资源、时间上界等属性信息的业务数据流。

(2) $T=(t_1,t_2,\cdots,t_l)$ 是由采集、存储、处理、共享和管理等数据操作抽象成的变迁,$T_L$ 是局部变迁,$T_G$ 是全局变迁,$T=T_L\cup T_G\neq\varnothing$;

(3) $F\subseteq(P\times T)\cup(T\times P)$ 表示数据流动关系;

(4) $M$ 为 Petri Net 标识,若 $M$ 在变迁序列 $\sigma$ 触发下状态更新为 $M'$,则记 $M[\sigma\rangle M'$ 或 $M\xrightarrow{\sigma}M'$。

(5) $I:T\rightarrow\mathbb{R}^+$ 代表执行时间。

可达图(reachability graph, RG)是 Petri Net 状态空间,定义 $RG=(R,T_l,L)$,其中可达标识集 $R=M_0[\,\rangle$,使能变迁集 $T_l$,旁标集 $L$。时延 Petri Net 状态 $s=(m,u)$ 包括标识 $m:M\rightarrow N$,变迁时钟 $u:T\rightarrow\mathbb{R}^+$,若 $s_0[\sigma\rangle s_1$,则 $m_1:=m_0-\sum_{t\in\sigma}t^-+\sum_{I(t)=0}t^+$,$u_1(t):=I(t)$。

2) 建模过程及分析

数据流协同需满足可达性、活性等 Petri Net 性质,冲突映射为进程顺序不合理、资源不足或分配不当造成的死锁,应避免死锁发生。以图 3 分布式控制设备对共享资源的竞争为例,控制设备需彼此协调功能运行时间和进程顺序,以满足式(1)的无死锁条件约束。

$$s_k[t_{G1}>s_{P3}\rightarrow\neg\, s_{P3}[t_{G2}>\wedge\, s_k[t_{G3}>s_{P6}\rightarrow\neg\, s_{P6}[t_{G4}> \tag{1}$$

多数据流并行时,式(1)不总成立,应进行死锁检测,定义死锁标识 $s_d$ 状态下含有死锁标识的库所集 $P_d=(p_1,p_2,\cdots,p_k)$,死锁标识总数目 $n_d$。

(1) 以 $p_i\in P_d$ 为起始节点生成可达树,若出现死锁,则输出$\{s_d,P_d,n_d\}$,执行步骤(2);否则步骤(3)。

(2) 重新选择库所 $p_r\in P_d$,若 $p_r$ 是重复节点,执行步骤(3);否则重复步骤(2)。

(3) 若触发 $p_i$ 的一个输出变迁可产生 $p_r$,令 $p_i=p_r$,返回步骤(1)。

重复步骤(1)~(3),得到死锁标识集 $\{s_1,s_2,\cdots,s_n\}$,增加对应库所资源,或增设控制库所来避免死锁。

### 1.3 工业互联网数据服务模型

本节基于时延 Petri Net 构建空间拓扑、时序逻辑、功能层统一的数据服务模型,与网络编排对应,提供业务迁移至 5G 网络后的确定性保障机制。

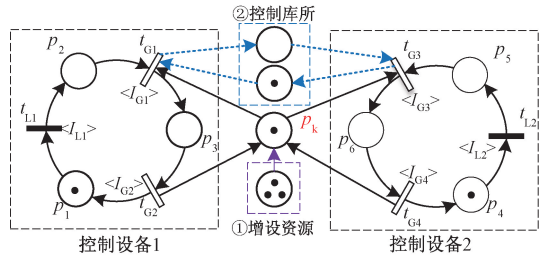



图 3 死锁问题及避免策略

Fig. 3 Deadlock and deadlock avoiding method

1) Petri Net 统一建模

工业控制与信息通信系统融合已成为工业互联网确定性趋势,图 4 以电流差动保护为例,构建工业控制类业务的全数据过程模型。由于差动保护电流互感器(differential protective current transformer, DPCT)是分布式控制设备[10],需要 5G 网络提供高实时、高可靠的数据服务保障远方设备的动作协同。Petri Net 统一建模可实现全流程设备状态和时序逻辑的管理,若满足式(2),则该时延 Petri Net $\Phi$ 全局可达,记 $G_\Phi$。

$$s_0[t_I\rangle\Rightarrow s'[t_O\rangle, s'=s_0[\sigma(t_L)\rangle \mid\ t_I,t_O\in T_G,\ t_L\in T_L \tag{2}$$

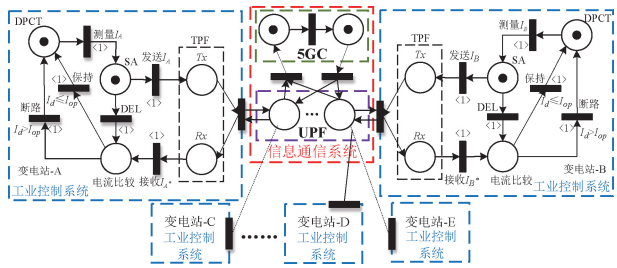



图 4 电流差动保护网络结构

Fig. 4 Current differential protection network structure

token 从初始节点触发变迁进行功能处理,同步组合可达图得到整体状态空间。如式(3),若 token 所经的顺序 Petri Net $\Phi_i$ 和并发 Petri Net $\Phi_k$ 全局可达,则数据服务可达,业务实际执行时间如式(4)。

$$G=(\bigcap_{i=1}^{n}G_{\Phi_i})\cap(\bigcup_{k=1}^{m}G_{\Phi_k}) \tag{3}$$

$$I^{\Sigma}=\sum I^{\Phi_i}(\sigma_i)+\max(\bigcup_{k=1}^{m}I^{\Phi_k}(\sigma_k)),\ \sigma_i\in T^{\Phi_i},\sigma_k\in T^{\Phi_k} \tag{4}$$

2) 基于 Petri Net 的网络编排模型

时延 Petri Net 状态 $s$ 包含如 IEC 62056 类的静态属性、交互操作、位置信息、运行时间等业务运行关键特征,可达图成为网络运行的时空“快照”,与网络编排结合可增强数据服务质量。如图 5 工业控制网络包含全部 VNF 节点,虚线框为节点内部状态机,可达图是传感、决策、执行网络各节点在不同时刻的状态组合,映射关系如式(5),可达标识需同时满足节点功能要求、时序逻辑约束和业务执行时间限制。

$$\Theta,\Theta',\Theta'' \subseteq RG(\Phi) \tag{5}$$

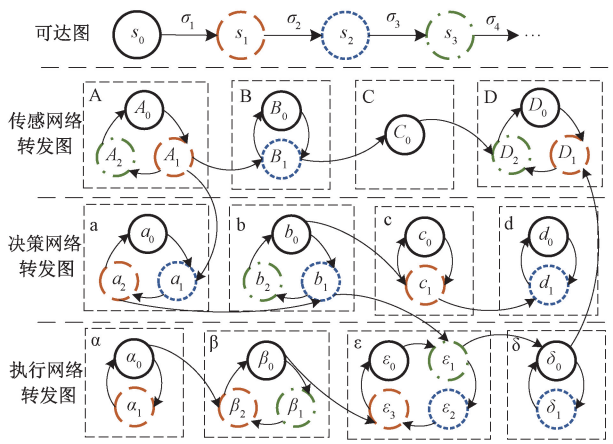



图 5　工业控制网络编排模型

Fig. 5　Orchestration model of industrial control network

单条控制链只需部分标识可用,如式(6),$\sigma_i$ 为使能变迁集,$\tau_i$ 对应变迁时间序列。转发图通过 token 和时间流将所需节点状态相连,在内部状态机运行的同时,功能节点间也存在确定性状态转移,不同于时序图只能反映单业务流程,时延 Petri Net 可以表达多业务的时序逻辑。Petri Net 数据服务模型从全局角度反映了多数据流空间拓扑和因果时间联系,实现数据可达,但仍不能保障工控业务在规模化网络中的实时性需求,还需确定性编排算法提升数据服务的可用性。

$$\begin{aligned}
&s_0 \xrightarrow{\sigma_1\tau_1} s_1 \xrightarrow{\sigma_2\tau_2} s_2 \xrightarrow{\sigma_3\tau_3} s_3 \xrightarrow{\sigma_4\tau_4}\\
\text{s. t. }\ &\sigma_i = [t_1,t_2,\cdots,t_n] \in T, i = 1,2,3,4;\\
&\tau_i = [I(t_1),I(t_2),\cdots,I(t_n)], t_n \in \sigma_i;\\
&m_0 = [A_0,B_0,C_0,D_0;a_0,b_0,c_0,d_0;\alpha_0,\beta_0,\varepsilon_0,\delta_0;\cdots];\\
&m_1 = [A_1,D_1;a_2,c_1;\alpha_1,\beta_2,\varepsilon_3;\cdots];\\
&m_2 = [B_1;a_1,b_1,d_1;\varepsilon_2,\delta_1;\cdots];\\
&m_3 = [A_2,D_2;b_2;\beta_1,\varepsilon_1;\cdots].
\end{aligned} \tag{6}$$

## 2　基于 Petri Net 的确定性编排方案

### 2.1　网络编排算法相关工作概述

网络编排最早通过整数规划模型求解[11],但此方式难以应对端到端管理运营复杂度增长带来的挑战。为此 IBM 提出 MAPE-K 实现自适应优化决策,ETSI ENI 引入人工智能、大数据分析等技术为自动化编排提供服务保证和服务智能[12]。目前编排工作集中在基于特定问题的概率型算法应用,如随机令牌、分层协调、多目标优化用于协调控制循环和避免冲突,遗传算法用于混合 NFV 环境的 VNF 部署[13],深度强化学习自适应在线编排[14],上述工作未考虑可达性、可用性等系统非功能需求,且较少考虑时间规划问题。因此本文提出具备确定数据过程和执行时间的网络编排方案。

### 2.2　确定性网络编排方案

基于网络编排模型和 MAPE-K,提出 VIKOR 网络编排算法,在构建自适应策略阶段引入资源和时间约束,动态规划 token 传输路径和各功能节点执行时间。

1)网络编排模型及分析

确定性网络编排方案应切合工业控制逻辑,遵循“监测-分析-计划-执行”MAPE-K 控制循环。可达图与控制决策均以解答空间的状态和操作为基础,标识 $s$ 触发变迁递增建立变化序列,更新时标 $u$,影响前向路径。将全数据过程抽象为有向图 $G=(V,E)$, Petri Net 标识 $m$: $M \to V, V=\{v_1,\cdots,v_h\}$ 包含 $h$ 个库所,变迁序列 $\sigma: T \to E$, $E=\{e_{ab} \mid a,b \in V\}$,物理资源 $Z=\{z_1,z_2,\cdots,z_k\}$,物理链路 $W=\{w_{mn} \mid m,n \in Z\}$,数据流集 $J=\{j_1,j_2,\cdots,j_r\}$。确定性编排需保障任意数据流按时序逻辑顺序经过功能点,动态调用分布式网络资源,以最小化全局时延和资源能耗进行传输,即:

$$\min \boldsymbol{F} = \sum_{j=1}^{r}\Big[\sum_{e_{ab}\in E} I_{e_{ab}}^{j} + \sum_{v_h \in V}\sum_{z_k \in Z} q_k^h \cdot c(v_h) + \sum_{e_{ab}\in E}\sum_{w_{mn}\in W} g_{mn}^{ab} \cdot b(e_{ab})\Big] \tag{7}$$

应用层和承载层约束条件包括:

(1)时间约束。实际执行时间不超过时间上界:

$$\forall \sigma \in T, \sum_{e_{ab}\in E} I_{e_{ab}}(\sigma) \leqslant I^{\Sigma}(\sigma) \tag{8}$$

(2)时序逻辑约束。具有强依赖的库所节点严格按序排列并定义为集合 $Y \in V$, $\forall y_n, y_m \in Y$, $y_n$ 是 $y_m$ 的前序功能,则 $y_n$ 开始处理时间需严格早于 $y_m$:

$$y_n[t_n > \wedge \neg\, y_n[t_m >, y_n[t_m > y_m \to y_m[t_m >;\ y_n \geqslant 0 \cup y_m \tag{9}$$

(3)计算资源约束。$v_i$ 对 CPU 的计算资源请求量 $c$ 不能超过物理节点 $z_k$ 的 CPU 计算资源可用量 $c_a$:

$$\sum_{v_i} q_k^i \cdot c(v_i) \leqslant c_a(z_k), \quad \forall z_k \in Z \tag{10}$$

(4)带宽资源约束。物理链路 $w_{mn}$ 承载的带宽请求 $b$ 不能超过可用带宽资源 $b_a$:

$$\sum_{e_{ab}} g_{mn}^{ab} \cdot b(e_{ab}) \leqslant b_a(w_{mn}), \quad \forall w_{mn} \in W \tag{11}$$

式(10)、(11)中, $q_k^i, g_{mn}^{ab}$ 是二进制决策变量。

2)VIKOR 网络编排算法

解答空间搜索按节点扩展方式不同分为宽度优先搜索(breadth-first search, BFS)等无信息搜索,和 Dijkstra 等启发式搜索,由于业务 QoE/QoS、网络资源等因素均影响多数据流动态规划过程,本文采用启发式多属性决策方法 VIKOR 为数据流决策全局代价最小的可达路径[15],编排目标重述为式(12)。在时延 Petri

Net 中即为待扩展库所及其使能变迁优化问题，伪代码如算法 1 所示。

$$\min \boldsymbol{F} = [f(s_1), f(s_2), \cdots, f(s_n)]$$
$$\text{s.t.} \quad o_n(j_i) \leqslant 0, \ n = 1,2,3,4 \tag{12}$$

式中：$o_n(j_i)$ 表示上节约束条件。

算法 1：VIKOR 确定性网络编排算法

**输入**：工业互联网时延 Petri 网 $\Phi = (P, T_L, T_G, F, M, I)$
**输出**：调度周期内最优路径 $\theta^*$，规划时间 $I^*(t)$
1 **for** 数据流 $j_i \in J$ do
2 标记起始节点 $s_0$“New”，标记终止节点 $s_n$ “End”
3 **while** 存在标记为“New”的节点 **do**
4 按业务时序逻辑和 QoS 要求选择符合约束条件的新标识 $s$
5 **if** $s$ 中存在使能变迁 $t \in T_l, \exists s[t\rangle s'$ **then**
6 更新待扩展节点集合 $S$
7 **for** 每个待扩展节点 $s' \in S$ **do**
8 **if** $RG$ 不包括顶点 $s'$ **then**
9 在 $RG$ 中加入顶点 $s'$，标记为“New”，引入弧 $(s,s')$
10 **end**
11 **end**
12 **else if** $s$ 不存在使能变迁 $t$ **then**
13 标记“Deadlock”，增设控制库所或系统资源
14 **end**
15 **if** 选择标记为“End”的节点 **then**
16 **compute** 可达图 $RG$ **and** 可达路径 $\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_n$
17 **end**
18 移除标记
19 **end**
20 **for** $\theta_i \in \theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_n, i = 1,2,\cdots n$ **do**
21 **compute** 路径 $\theta_i$ 各库所的 $I_{ave}$ 和 $I_d$，得到对应属性矩阵 $x$
22 **compute** $F, S_i, R_i$，以及路径 $\theta_i$ 的 $Q$ 值
23 **end**
24 $\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_n$ 按 $Q$ 值从小到大排列，预选 $Q$ 值小的路径
25 **compute** 数据流 $j_i$ 全局时延，CPU 和带宽能耗
26 更新标识集和库所属性矩阵 $x$
27 **end**
28 最小化业务流集合 $J$ 的时延消耗及资源代价
29 输出编排目标下各数据流的最优路径 $\theta^*$，和各库所规划时间 $I^*(t)$

图 6 中，数据流可由 $s_0$ 经 $\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_n$ 到达 $s_n$，由于 $\forall t \in T, u(t) \leqslant I(t)$，功能点逻辑可达不一定时间可用，需具体协调进程时间。由于 token 排队时延是主要影响因素[16]，本文基于 IEEE 802.1 Qch 建立库所入端口缓冲区，衡量排队时延 $I_d = k_i \cdot I_c$，其中 $k_i$ 为等待次数，$I_c$ 为 Webster 最佳信号周期公式初始化的队列周期：

$$I_{ave} = \frac{I_c}{8(1-2p)} + \frac{s^2}{2p(1-p')} - 0.65\left(\frac{I_c}{p^2}\right)^{\frac{1}{3}} p' \frac{9}{2} \tag{13}$$

式中：$I_{ave}$ 为数据流平均时延，$p$ 为库所实际吞吐量，$p'$ 为实际吞吐量与最大吞吐量之比。

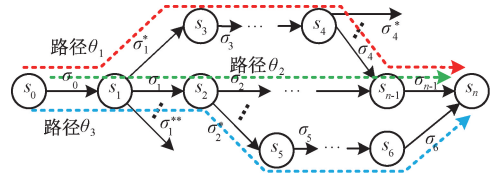



图 6 可达图多条可达路径

Fig. 6 Multiple reachable paths of reachable graphs

定义状态 $s_i[\sigma >$ 在不同可达路径 $\theta_i$ 的待扩展节点集合 $\boldsymbol{S} = [s_0, s_1, \cdots, s_n]$，$\boldsymbol{x} = [I, I_d, c, c_a, b, b_a]$ 为节点属性，对应权重向量 $\boldsymbol{w} = [w_1, w_2, \cdots, w_6]$。

决策矩阵 $\boldsymbol{X} = [s_0, s_1, \cdots, s_n]^{\mathrm{T}}[I, I_d, c, c_a, b, b_a]$，经式(14)归一化后，得到标准化决策矩阵 $\boldsymbol{F}$。

$$\boldsymbol{f}_{ij} = \frac{\boldsymbol{x}_{ij}}{\| \boldsymbol{x}_{ij} \|}, i = 1,2,\cdots,n; j = 1,2,\cdots,6; \boldsymbol{f}_{ij} \in \boldsymbol{F}, \boldsymbol{x}_{ij} \in \boldsymbol{X} \tag{14}$$

基于 $L_P$ - *metric* 计算与理想解的加权海明距离和加权切比雪夫距离，平衡群体效益 $S_i$ 和个体遗憾 $R_i$。

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} \boldsymbol{w}_j \frac{|\boldsymbol{f}_j^* - \boldsymbol{f}_{ij}|}{|\boldsymbol{f}_j^* - \boldsymbol{f}_j^-|}, j = 1,2,\cdots,m \tag{15}$$

$$R_i = \max_j \left( \boldsymbol{w}_j \frac{|\boldsymbol{f}_j^* - \boldsymbol{f}_{ij}|}{|\boldsymbol{f}_j^* - \boldsymbol{f}_j^-|} \right), j = 1,2,\cdots,m \tag{16}$$

其中，$\boldsymbol{f}_j^*$ 是库所属性的正理想解，$\boldsymbol{f}_j^-$ 为负理想解。

由式(17)计算待扩展节点的 $Q$ 值并排序，优先选择低 $Q$ 值节点，对应属性时间即为规划时间。

$$Q_i = \eta \frac{S_i - \min\limits_i S_i}{\max\limits_i S_i - \min\limits_i S_i} + (1-\eta) \frac{R_i - \min\limits_i R_i}{\max\limits_i R_i - \min\limits_i R_i} \tag{17}$$

3)时间补偿机制

若突发流量、网络拥塞或资源变动等事件造成规划时间和实际时间不一致[17]，则启用时间补偿机制。如图 7 所示，若 token 在 $t_0 \in T$ 的实际执行时间 $I'(t_0)$ 偏离规划值 $I^*(t_0)$，则为后续变迁 $t_i \in T$ 增加等待时间 $\Delta I(t_i)$，使 token 按预定时间到达 $p_n$，若在 $t_{n-1}$ 处未能修正时间，则丢弃 token，时间约束需满足式(18)。

$$\sum_{i=1}^{n-1} \Delta I(t_i) = I'(t_i) - I^*(t_0)$$
$$\text{s.t.} \quad I^*(t_i) + \Delta I(t_i) \leqslant I(t_i), t_i \in T \tag{18}$$

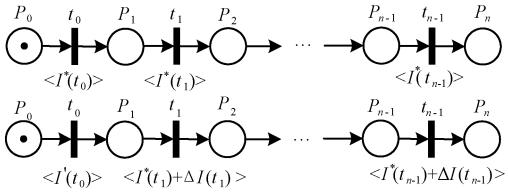



图 7　时间补偿机制

Fig. 7　Time compensation mechanism

## 3　仿真分析及现场测试

### 3.1　Petri Net 动态性质分析

为验证 Petri Net 建模可实现性,在 PIPE 搭建图 4 电力差动保护模型进行动态性质分析。实验设定变电站 A 的 DPCT 为起始节点,变电站 B 的 DPCT 为终止节点,以模拟单向控制过程。表 1 表明采用 Petri Net 建模分析数据服务过程,能满足系统活性、可达性、无死锁等非功能性需求,能实现控制动作快速响应。

**表 1　动态性质分析**

**Table 1　Dynamic property analysis**

| 性质 | 有界 | 活性 | 死锁 | 状态搜索/s | 可达图生成/s | 稳态分析/s |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 参数 | True | True | False | 0.03 | 0.029 | 0.056 |

### 3.2　VIKOR 网络编排算法仿真

实验采用 OMNET++搭建拓扑,设定数据请求服从平均到达率 $\lambda$ 的泊松分布,库所包含 Rand(2,6)个线程,应用时间如图 5,等待时间遵循[0,1]正态分布。初始计算和带宽资源请求量服从[1,30]均匀分布,物理节点资源可用量服从[40,100]均匀分布,节点负载阈值为 70%。将本文算法与 BFS、Dijkstra、TOPSIS 算法比较,重复 10 次,剔除 2%最大最小数据值后取均值。

设定节点负载率 10%增长来模拟网络状态,如图 8 所示,随着负载增加,BFS 耗费过多计算资源,Dijkstra 不考虑节点属性,性能下降较多。当负载率接近 70%时,源节点 Socket 认定数据不可达,重新调整连接,到达率均有下降;本文算法预规划功能顺序和确定执行时间,并应用时间补偿方案,初始到达率为 98.15%,在高负载下也能保证 65.52%数据流准时到达。

图 9 为节点利用率和虚拟网络接受率随运行时间变化图。BFS 和 Dijkstra 只关注节点位置,利用率最低,仅有 53.75%和 57.63%。TOPSIS 和 VIKOR 针对节点属性排序,提高了近 10%节点利用率,由于阈值限制,VIKOR 节点利用率保持在 68.38%。随着数据服务请求增多,新的请求可能由于资源紧缺被拒绝,BFS 搜索空间大,Dijkstra 是单源静态最短路径算法,资源分配不合理,稳

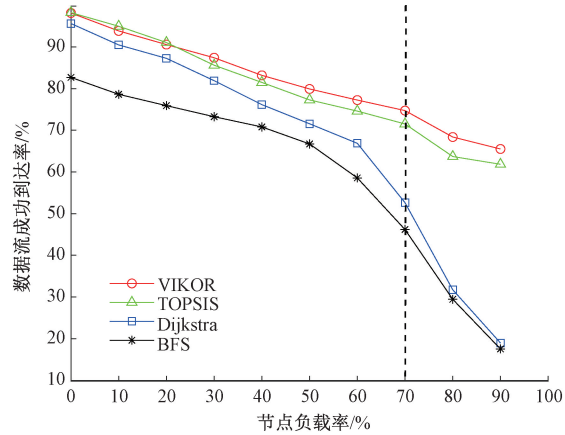
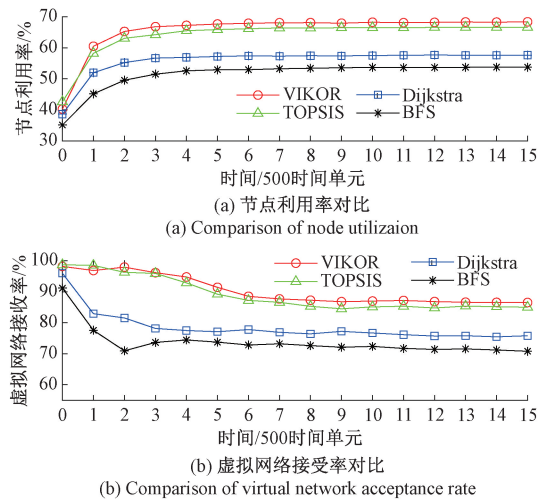



图 8　数据流成功到达率

Fig. 8　Successful arrival rate of data flow




(a) 节点利用率对比

(a) Comparison of node utilizaion

(b) 虚拟网络接受率对比

(b) Comparison of virtual network acceptance rate

图 9　节点利用率和虚拟网络接受率

Fig. 9　Node utilization and virtual network acceptance rate

态时虚拟网络接受率仅有 70.81%和 75.46%。TOPSIS 缺少对全局信息的感知,易陷入局部最优,稳态时低于 VIKOR1.51%,VIKOR 虚拟网络接受率为 86.52%,优于其他算法,提升了部署效率。

### 3.3　电力 5G 试验网现场测试

国家电网与中国电信、中国移动在重庆开展了“电力源网荷储业务”的 5G 试点工作,网络结构如图 10 所示。本文提供模板及描述符、部署接口、操作等参数,进行以下测试工作。

承载层测试选取重庆市区 6 个试点,在完成 UPF 配置、客户终端设备(customer cremise equipment,CPE)调测等步骤后,进行 Ping 测试,结果如表 2,平均传输时延为 12.03 ~ 18.35 ms,时延抖动为 2.75 ~ 5.62 ms,满足 IEC61850 90-5 规定的配电自动化等电力 5G 业务通信需求,有效验证了承载网络连通性和数据可用性。

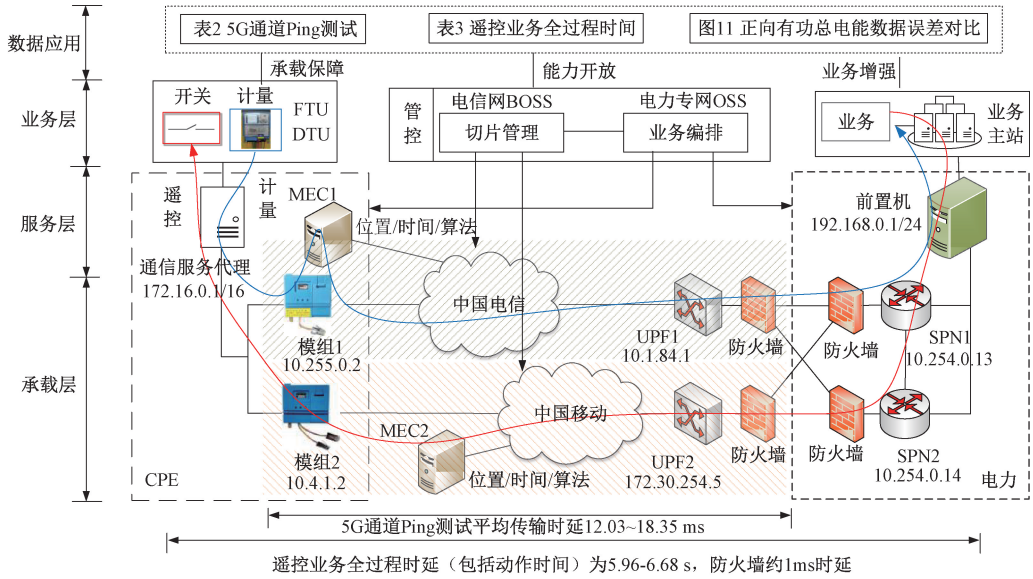



图 10 电力 5G 试验网网络结构及地址配置

Fig. 10 Network structure and address configuration of power 5G experimental network

**表 2 5G 通道 Ping 测试**

**Table 2 5G channel Ping test** ms

| 试点 | 平均时延 | 时延抖动 |
|---|---|---|
| 渝北区 xx 街道 | 13.84 | 4.39 |
| 渝北区 xx 有限公司 | 18.35 | 5.62 |
| 两江新区 xx 有限公司 | 12.03 | 4.11 |
| 巴南区 xxx 有限公司 | 15.46 | 2.75 |
| 巴南区 xx 公司 | 12.61 | 2.97 |
| 江津区 xxx 有限公司 | 18.28 | 3.77 |

电力业务测试选择某架空线路，远程遥控断路器开关。从主站向下达 IEC60870-5-104 报文指令、开关合闸/分闸、再到报文反馈开关变位的全过程时间如表 3，单次总时延（包括开关动作、加密时间）为 5.96~6.68 s，业务平均时间为 1.6 s，保障了远程遥控业务的确定性时序逻辑控制。

**表 3 开关参数及全过程时间**

**Table 3 Switch parameters and full process time**

| 开关名称 | 网络形式 | 全过程时间/s |
|---|---|---|
| 01#断路器 | 双网单待 | 移动：4.9，6.8，5.7，7.5，6.6<br>电信：5.1，6.4，5.8，8.5，7.6 |
| 02#断路器 | 双网双待 | 7.5，6.4，5.1，4.3，8.9，<br>6.1，6.7，7.6，6.4 |
| 03#断路器 | 双网双待 | 5.9，8.1，5.7，6.5，5.8，4.9，<br>8.2，6.1，6.6，8.3 |
| 04#断路器 | 双网单待 | 移动：6.7，4.8，7.5，5.2，5.6<br>电信：5.2，6.8，6.7，5.9，5.5 |

此外，选取某街道 00:00~20:00 期间正向有功总电能，将现场侧、主站侧与经处理的数据相比较。数据误差如图 11，部署本方案后，标准差从 0.009 减小到 0.001 1 kW·h，方差从 $8.11\times10^{-5}$ 降低至 $1.27\times10^{-6}$，电力计量采集类业务数据质量得到明显提升。

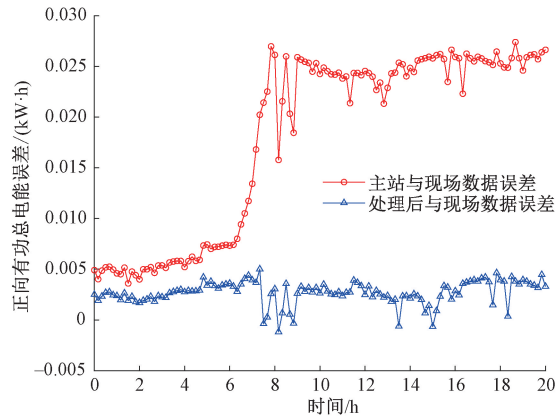



图 11 正向有功总电能数据误差对比

Fig. 11 Comparison of errors in total positive active energy

## 4 结 论

为解决工业业务向云化 5G 网络迁移中的数据服务适配问题。本文首先采用 Petri Net 对工业数据过程统一建模，实现业务时序逻辑控制。其次，结合可达图和 MAPE-K 提出 VIKOR 网络编排算法，综合考虑业务 QoS 和网络资源保障数据过程和确定性时间，满足数据可达

可用。最后,重庆电力 5G 试验网现场测试验证了所提方案正确性,能保障承载层 12.03~18.35 ms 传输时延和 2.75~5.62 ms 时延抖动,远程遥控等电力 5G 业务在 5.96~6.68 s 内完成,满足“电力源网荷储业务”性能要求;5G 数据服务增强使电力计量采集类业务数据的标准差降低 0.007 9,数据质量显著提升。本文为工业互联网确定性数据服务提供技术探索,后续将围绕如下 2 个问题进一步研究:1)数据服务和编排方案未考虑网络安全性能;2)随着网络规模的增加,Petri Net 状态空间的计算是 NP-Hard,需引入机器学习优化。

## 参考文献


[1] 中国电子技术标准化研究院. 工业大数据白皮书[R/OL]. (2019-04-01)[2022-10-11], http://www.cesi.cn/201904/4955.html.
Chinese Electronics Standardization Institute. Industrial big data white paper[R/OL]. (2019-04-01)[2022-10-11], http://www.cesi.cn/201904/4955.html.

[2] RAFIQUE W, QI L Y, YAQOOB I, et al. Complementing IoT services through software defined networking and edge computing: A comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2020, 22(3): 1761-1804.

[3] RAFAEL S, KELVIN D, STENIO F. NFV data centers: A systematic review[J]. IEEE Access, 2020, 8: 51713-51735.

[4] MECHERAOUI K, LOMAZOVA I A, BELALA N. A petri net extension for systems of concurrent communicating agents with durable actions[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2021, 155: 14-23.

[5] 尹高扬, 翟禹尧, 史贤俊. 基于 GSPN 与 BN 的测试性建模方法[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(6): 205-212.
YIN G Y, ZHAI Y Y, SHI X J. Testability model method based on GSPN and BN[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(6): 205-212.

[6] IEC/IEEE. TSN profile for industrial automation: IEC/IEEE 60802[S]. 2018.

[7] XUE J, SHOU G, LI H, et al. Enabling deterministic communications for end-to-end connectivity with software-defined time-sensitive networking[J]. IEEE Network, 2022, 36(2): 34-40.

[8] Architecture Working Group. View on 5G architecture[R]. Europe: The 5G Infrastructure Public Private Partnership, 2021.

[9] REGGIE D. Petri nets for modeling of large discrete systems[M]. Singapore:Springer Singapore, 2021.

[10] IEC. Communication networks and systems for power utility automation-Part 90-1: Use of IEC 61850 for the communication between substations[S]. 2010.

[11] ABDELAAL M A, EBRAHIM G A, ANIS W R. High availability deployment of virtual network function forwarding graph in cloud computing environments[J]. IEEE Access, 2021, 9:53861-53884.

[12] ETSI. Experiential networked intelligence; Definition of data processing mechanisms: ETSI GS ENI 009[S]. 2021.

[13] CAO J, ZHANG Y, WEI A N, et al. VNF-FG design and VNF placement for 5G mobile networks[J]. Science China Information Sciences, 2017, 60(4): 2-5.

[14] CHEN J, CHEN J, ZHANG H K. DRL-QOR: Deep reinforcement learning-based QoS/QoE-aware adaptive online orchestration in NFV enabled networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18(2): 1758-1774.

[15] OPRICOVIC S, TZENG G H. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 2(156): 445-455.

[16] ROY A, PACHUAU J L, SAHA A K. An overview of queuing delay and various delay based algorithms in networks[J]. Computing, 2021, 103(10):2361-2399.

[17] 方子涵, 李旦, 蒋鹏,等. 无线传感器网络中延迟补偿的分布式时钟同步算法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12): 92-100.
FANG Z H, LI D, JIANG P, et al. Distributed clock synchronization for Kalman based delay estimation in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 92-100.

## 作者简介

**胡致远**(通信作者),2000 年于西北工业大学获得博士学位,现为重庆大学教授,主要研究方向为工业互联网、5G 网络。

E-mail:hzy@cqu.edu.cn

**Hu Zhiyuan** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2000. He is currently a professor at Chongqing University. His main research interests include industrial internet, and 5G network.

**秦弦**,2021 年于重庆大学获得学士学位,现为重庆大学硕士研究生,主要研究方向为工业互联网。

E-mail:412458979@qq.com

**Qin Xian** received her B. Sc. degree from Chongqing University in 2021. She is currently pursuing her master degree at Chongqing University. Her main research interest is industrial internet.

**徐鑫**,2009 年于重庆大学获得博士学位,现为国网重庆市电力公司电力科学研究院高级工程师,主要研究方向为电力通信、5G 技术。

E-mail:cqxuxin@163.com

**Xu Xin** received his Ph. D. degree from Chongqing University in 2009. He is currently a senior engineer at Chongqing Electric Power Research Institute. His main research interests include power communication and 5G technology.