



## 面向数字孪生电网设施虚实映射的边缘网络资源分配方法

胡平 韩琳 陈志永 李想 连浩然 邢志坤

### An Edge Network Resource Allocation Method for Virtual-real Mapping for Digital Twin Power Grid Facilities

HU Ping, HAN Jinglin, CHEN Zhiyong, LI Xiang, LIAN Haoran, XING Zhikun

引用本文:

胡平, 韩琳, 陈志永, 等. 面向数字孪生电网设施虚实映射的边缘网络资源分配方法[J]. 现代电力, 2022, 38(0): 1-13. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0367

HU Ping, HAN Jinglin, CHEN Zhiyong, et al. An Edge Network Resource Allocation Method for Virtual-real Mapping for Digital Twin Power Grid Facilities[J]. Modern Electric Power, 2022, 38(0): 1-13. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0367

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0367>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于长短期记忆网络数字孪生体的短期光伏发电预测

Short-term Photovoltaic Power Generation Prediction Based on LSTM Digital Twins

现代电力. 2023, 40(6): 899-905 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0111>

#### 含高比例光伏配电网电压安全性数字孪生预警方法

A Digital Twin Warning Method for Voltage Security of Distribution Network Containing High Proportion of Photovoltaic

现代电力. 2023, 40(2): 170-181 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0261>

#### 基于数字孪生的变电站逻辑模型移交深化应用

Deep Application of Substation Logic Model Handover Based on Digital Twin

现代电力. 2023, 40(1): 108-116 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0234>

#### 负荷网络系统下基于状态空间协同的异质热控负荷集群管控

Management and Control Heterogeneous Thermal Control Load Cluster Based on State Space Coordination in Load Network System

现代电力. 2023, 40(1): 82-91 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0202>

#### 基于非线性映射与核主成分分析的区域配电网综合评价方法

Evaluation Method of Area Distribution Networks Based on Nonlinear Mapping and Kernel Principal Component Analysis

现代电力. 2020, 37(5): 463-469 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0087>

#### 大规模可再生能源电网多源实时互补有功控制的评述

Review of Real-time Complementary Active Power Control of Multi-type Power Resources for Large Scale Renewable Energy Grid

现代电力. 2019, 36(4): 1-10 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/14/1>

# 面向数字孪生电网设施虚实映射的 边缘网络资源分配方法

胡平<sup>1</sup>, 韩璟琳<sup>1</sup>, 陈志永<sup>2</sup>, 李想<sup>3</sup>, 连浩然<sup>4</sup>, 邢志坤<sup>4</sup>

(1. 国网河北省电力有限公司, 河北省石家庄市 050000; 2. 国网河北省电力有限公司经济技术研究院, 河北省石家庄市 050000; 3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市昌平区 102206; 4. 国网河北省电力有限公司雄安新区供电公司, 河北省雄安新区 071700)

## An Edge Network Resource Allocation Method for Virtual-real Mapping for Digital Twin Power Grid Facilities

HU Ping<sup>1</sup>, HAN Jinglin<sup>1</sup>, CHEN Zhiyong<sup>2</sup>, LI Xiang<sup>3</sup>, LIAN Haoran<sup>4</sup>, XING Zhikun<sup>4</sup>

(1. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, Hebei Province, China; 2. Economic and Technical Research Institute of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, Hebei Province, China; 3. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 4. Xiong'an New District Power Supply Company of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Xiong'an New Area 071700, Hebei Province, China)

**摘要:** 数字孪生电网通过虚实映射实现物理电网的数字化, 但目前电网设施的虚实映射过程面临静态模型重建精度低和动态响应实时性差等问题。传统人工建立静态模型效率低, 且难度高, 不适用于复杂电网的模型构建, 传统云计算模式也无法满足模型重建和响应过程中大量随机传输业务的差异化需求。因此, 形成了面向数字孪生电网设施虚实映射的边缘网络资源分配方法。首先, 提出一种基于 Shi Tomasi 和 Surf 算法融合的双阈值邻比特特征匹配方法, 并进一步融合 RANSAC 算法提高相机位姿估计准确度, 提高电网设施三维模型视觉效果及重建准确度。在此基础上, 考虑模型重建和动态响应过程中不同业务的传输需求, 构建云-边-端数据交互架构, 设计面向不同传输时延以及准确率需求的效用函数, 并提出子信道及功率资源分配方法, 实现通信资源的按需分配。所提算法与 Shen 算法和信道平均分配算法相比, 在数据传输时效性方面分别能够提高 9.03% 和 31.30%, 同时能够保证数据传输的准确性, 有效支撑电网设施准确高效的虚实映射过程。

**关键词:** 数字孪生电网; 虚实映射; 异构业务; 移动边缘网络; 通信资源分配; 三维重建

**Abstract:** The digital twin power grid digitizes the physical power grid through virtual-real mapping. The current virtual real mapping process of power grid facilities, however, faces challenges in terms of limited accuracy in reconstructing static models and poor real-time dynamic response. The traditional manual establishment of static models is inefficient and challenging, making it unsuitable for construction of model in complex power grid. The traditional cloud computing model fails to meet the diverse demands of numerous randomly transmission services during model reconstruction and response processes. Therefore, in this paper we propose a new edge network resource allocation method for virtual-real mapping of digital twin power grid facilities. Firstly, a feature matching method of double threshold nearest neighbor ratio is proposed based on the fusion of Shi Tomasi and Surf algorithms. Additionally, the RANSAC algorithm is further integrated to enhance the accuracy of camera pose estimation, thereby improving the accuracy of the three-dimensional reconstruction model of power grid facilities. The aforementioned foundation serves as the basis for designing utility functions for different transmission delay and accuracy requirements, while also presents a method for subchannel and power resource allocation so as to achieve on-demand allocation of communication resources. In addition, a cloud-edge-end data interaction architecture is built to support the above process. Compared with Shen algorithm

**基金项目:** 国家电网总部科技项目: 面向清洁能源消纳的区域能源互联网建设关键技术研究及试点应用 (5100-202113564A-0-5-SF)。

Project Supported by State Grid Headquarters Science and Technology Project: Key technology research and pilot application of regional energy internet construction for clean energy consumption (5100-202113564A-0-5-SF).

and channel average allocation algorithm, our algorithm can improve data transmission timeliness by 9.03% and 31.30% respectively, while ensuring data transmission accuracy. Moreover, the algorithm effectively facilitates the accurate and efficient virtual-real mapping process of power grid facilities.

**Keywords:** digital twin power grid; virtual-real mapping; heterogeneous service; mobile edge network; communication resource allocation; three-dimensional reconstruction

**DOI:** 10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0367

## 0 引言

随着“双碳”目标的提出和新型电力系统的发展,清洁能源不断接入,电网逐步成为结构复杂、设备繁多、业务庞杂、数据海量的高维信息物理系统<sup>[1]</sup>,提升系统的资源配置、安全性能和智能互动能力成为关键问题。同时,数字技术的发展促进了生产方式和经济形态的改变<sup>[2]</sup>,其中数字孪生是解决信息世界和物理世界交互融合难题的核心支撑技术<sup>[3]</sup>,数字孪生和电力系统的结合将能源电力等产业的生产资料 and 知识转化为数字要素,在孪生空间中重塑物理电网整体形态与特征<sup>[4]</sup>。在此背景下,数字孪生电网应运而生,构建电网设施虚拟模型,并实时接收物理电网数据以进行动态响应,通过状态监测、数据分析以及预测仿真对物理对象全生命周期进行动态调控<sup>[5]</sup>,逐渐成为推进电网状态感知、网络化连接和稳定化运行的重要抓手。

物理电网中灵活的可再生资源及负荷等关键对象分布广泛且构成复杂,构建与电网复杂设施高度一致的虚拟模型<sup>[6]</sup>是数字孪生电网的建设基础。数字孪生电网通过实时的数据双向交互,满足虚拟模型关键信息的获取以及模型动态响应,其中需要处理的大量电网业务是分散、随机且需求差异化的。差异化需求的满足程度是衡量数字孪生电网的重要指标,因此,形成考虑不同需求的边缘网络资源分配模型,支撑数字孪生电网静态模型精准重建以及高效准确动态响应是保证物理实体与数字孪生模型之间的实时连接,实现数字孪生电网功能的关键技术。

基于三维重建的实景建模是数字孪生电网基础设施静态模型构建的关键方法<sup>[7]</sup>。考虑人工重建效率低、技术难度大,而传统激光雷达重建方法存在设备成本高<sup>[8]</sup>、易受体外噪声影响<sup>[9]</sup>以及

重建区域局限的问题。当前,基于计算机视觉的三维重建技术因其较高的重建效率和精度且重建场景具有扩展性,在电力系统领域受到更加广泛的关注。文献<sup>[10]</sup>通过多个视图几何体提取相机外在函数,利用影像完成了输电线路三维建模。文献<sup>[11]</sup>通过稀疏地图构建、稠密几何构建和纹理贴图,实现变电站视觉快速三维重建。文献<sup>[12]</sup>以图像为输入,提出基于倾斜摄影建模技术的变电站的三维建模方法。但由于航拍高度较高,上述方法不利于对变电设备复杂结构、局部细节的复现,同时电网设施具有结构复杂、颜色单一、纹理弱等特点,导致图像特征点提取与匹配困难,进而影响模型重建细节完整性问题的解决方法。而直观体现电气设备的细节特征又是数字孪生电网的必备要求<sup>[13]</sup>,因此,通过改进图像特征提取与匹配和相机位姿估计等关键步骤,形成高精度的复杂电网设施重建方法是数字孪生电网虚实映射的关键问题。

高效的通信网络架构及资源分配方式是支撑数字孪生电网设施虚实映射的关键。数字孪生电网中多种业务交互需求的异构性往往体现在传输时延、准确率和能耗等方面。通过研究负载分配策略<sup>[14]</sup>和联合优化路由控制与资源分配的智能任务调度模型<sup>[15]</sup>,缩短用户业务的平均处理时延;研究宽带电力线载波物理层资源分配算法<sup>[16]</sup>和考虑三边匹配的通信与缓存资源分配方法<sup>[17]</sup>提升带宽利用率与网络吞吐量;研究多目标优化模型<sup>[18-19]</sup>和基站选取策略<sup>[20]</sup>最小化业务时延和边缘服务器能耗;上述算力资源分配研究侧重于业务时延需求,以及提高边缘算力网络中存储和计算资源的利用率。在考虑不同业务需求进行资源分配方面,文献<sup>[21]</sup>根据不同业务特征,设计基于业务分类和节点分区的差异化混合缓存机制。文献<sup>[22]</sup>建立多业务网络切片运行经济性最优数学模型,联合分配通信与计算资源。同样,数字孪生电网中的静态模型构建、模型数据动态响应和调控指令传输等场景中业务传输的需求不同,具有较强的异构性。应全面分析不同物理对象、灵活性资源、多元化业务所涉及的数据特性、传输及通信需求,构建能够有效支撑其运行的通信架构,研究针对数字孪生电网不同业务需求的资源分配模型,结合业务需求及应用场景,对通信资源协同分配进行系统性研究。

为全面提升电网的数字化能力，考虑基础设施虚实映射异构业务资源分配关键问题，本文提出一种面向数字孪生电网设施虚实映射的边缘网络资源分配方法。首先，考虑数字孪生电网设施虚实映射中异构业务需求，形成包含平台层、传输层和物理层的云-边-端网络架构。然后，研究数字孪生电网设施虚实映射关键技术，包括基于运动恢复结构原理的电网设施静态模型重建方法以及面向数字电网动态信息交互的通信资源分配方法。分析数据交互过程中各类业务的传输需求，建立面向不同传输时延及准确率需求的效用函数；基于效用函数提出面向电网业务传输的通信资源分配模型；利用优化算法求解得到子信道及功率资源分配方案。最后，进行仿真验证和对比分析，结果表明所提关键技术可以实现静态模型重建，降低各业务传输的时延并提高准确率，实现数字孪生电网设施虚实映射过程中通信资源的按需分配和高效利用。

## 1 系统架构及原理

### 1.1 数字孪生电网设施虚实映射系统架构

数字孪生电网开辟了数字化电网的建设与管理新模式，依托物理对象与数字电网的实时映射和数据交互实现全领域协同管理是技术实用化的价值所在。同时，数字电网建设对数据交互的需求愈加强烈，对形式复杂多样的数据进行实时关联分析，对业务数据的实时高效处理及传输的实时性和可靠性都提出了更高的要求。分析不同物理对象、灵活性资源、多元化业务所涉及的数据特性、传输及通信需求，构建虚拟模型库和有效支撑数字孪生电网运行的通信架构，并结合重建业务需求及应用场景协同分配通信资源，成为支撑数字孪生电网全面融合的关键。

物理电网中基础设施复杂，设备重要数据不可见，利用数字孪生技术构建虚拟模型有利于信息流、能量流的实时展示，实现物理实体与虚拟模型的双向映射。在数字孪生电网构建过程中，运动结构恢复 (structure from motion, SFM) 技术保障了对电气设备进行信息采集和三维重建的速度和准确性，建模成本也远低于同级别的激光扫描等技术。为确保物理对象与虚拟静态模型之间的一致性，形成了重建设施模型库，为后续利用

数据交互技术实现数字电网与物理对象的映射连接提供基础。

数字孪生电网的设施虚实映射过程中，其数据交互业务具有数据量大、类型复杂多样、数据价值密度低、实时性要求高以及边缘节点缓存空间有限的特性，为边缘网络的通信能力带来了很大的挑战。因此，需要分析电网边缘侧业务传输需求，建立面向电网边缘侧业务差异化传输需求的通信资源分配模型。保证物理设施在孪生空间的实时映射以及对电网运行状态的全息仿真和精准预测。

针对传统集中式云计算模式中存在响应时延高、带宽压力大等问题，考虑数字孪生电网中的异构业务需求，形成包含平台层、传输层和物理层的云-边-端网络架构支撑数字孪生电网设施虚实映射中的数据交互。底层真实电网作为物理层实现设施本体及电气运行参数的智能感知，同时执行边缘服务器下达的指令；传输层引入边缘网络，利用考虑业务特性的网络资源分配模型辅助物理层和平台层之间进行海量数据交互；平台层基于虚拟模型库和模型动态响应的支撑，实现对物理电网的实时映射，实现物理电网的主动管理，包含实时监测、状态推演、决策优化和智能运维等。最终形成的数字孪生电网设施虚实映射架构如图 1 所示。

### 1.2 计算机视觉下电网设施静态模型重建

电力设施虚拟实体的构建是实现数字孪生电网建设的关键环节，其中三维静态模型是电网虚拟实体的重要模型支撑。为推动数字孪生电网虚拟实体的建设，提出一种基于运动恢复结构原理的电网设施三维静态模型重建方法。相比于通过 Unity3D、Solidworks 等软件的传统手工建模方法，该方法不仅能克服人工建模的诸多弊端，而且能有效满足高速、实时性的需求。

针对运动恢复结构原理的特征点提取与匹配、相机位姿估计、点云稠密化等关键步骤，首先提出一种基于 Shi Tomasi-Surf 算法的双阈值近邻比特征提取与匹配方法，克服部分电网设施颜色单一、纹理弱导致特征点难以提取，且特征点匹配精度低的问题，有效实现电网设施在计算视觉下特征点提取与匹配过程。其次，采用融合随机抽样一致性 (random sample consensus, RANSAC) 算法于八点法中计算相机位姿，能够有效提高相机

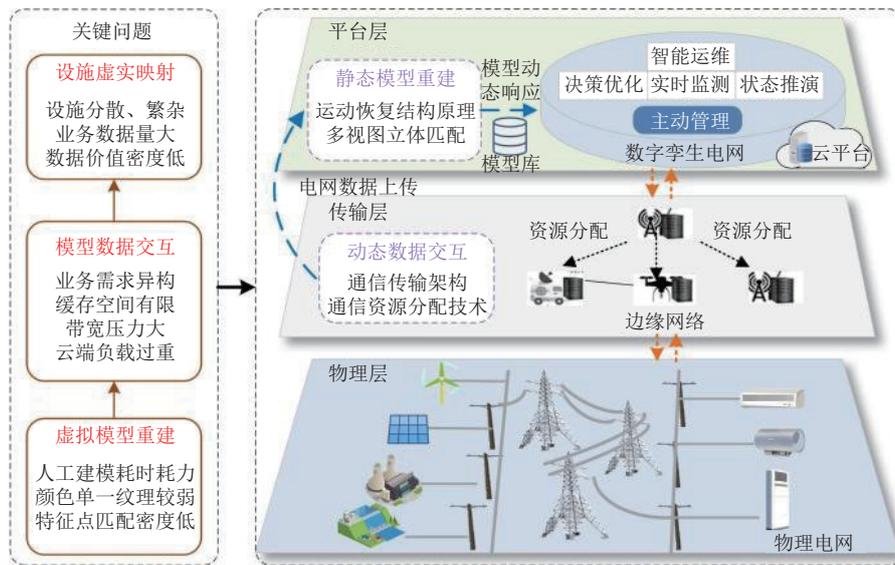


图1 数字孪生电网设施虚实映射系统架构

Fig. 1 Architecture of virtual real mapping system for digital twin power grid facilities

位姿估计准确度，提升三维静态模型重建精度。最后，引入基于面片模型的密集匹配 (patch-based multi-view stereo, PMVS) 算法的点云稠密化方法，解决稀疏点云视觉效果较差和重建物体的完整性需求问题，提升重建模型视觉效果。本文所提算法能够有效快速地构建电网设施静态模型，为数字孪生电网的实现提供有效支撑。

### 1.3 面向数字电网动态数据交互的通信资源分配

在电网物理设施静态模型建立的基础上，为实现物理实体和静态模型的动态虚实映射，需要传输大量的数据信息，以支撑电网“全要素、全业务、全流程”的数字化转型过程，由此产生了多种特性及传输需求的电网业务。针对急速增长的业务传输需求，优化通信资源的管理和分配方式，保证海量业务的传输需求是十分必要的。在电网海量分散数据的感知及传输需求下，本文考虑利用多个边缘节点分散采集电网信息，并将采集信息传输至电网中心云平台进行处理的场景，针对电网信息上传的过程，研究各边缘节点通信资源的分配方法，实现物理电网与数字电网间可靠的信息交互。

由于数字孪生电网在电网建设、运维及电力调度等不同应用中发挥重要作用，电网数字化建设过程需要海量数据作为支撑，同时各数据对传输时延和准确率这两类网络服务性能指标有较高的要求。考虑到不同应用需要不同的业务作为支

撑，同时各类业务的特性及传输需求差异明显，在通信资源有限的场景下，根据各业务的传输需求为其分配通信资源，提高资源利用率。为此，本文从各类电网业务特性和传输需求出发，建立面向不同传输时延及准确率需求的效用函数，用以衡量各边缘节点对所获得业务传输性能的满意程度，并基于效用函数提出面向电网业务传输的子信道及功率资源分配方法，实现通信资源的按需分配，保证各业务的传输需求。

最终，形成电网设施模型重建和动态数据交互的数字孪生电网设施虚实映射关键技术，如图2所示。

下文按基于运动恢复结构的电网设施模型重建和面向数字孪生电网模型动态响应时信息交互的通信资源分配两部分，介绍支撑数字孪生电网模型构建和模型动态响应的关键技术。

## 2 数字孪生电网设施虚实映射关键技术

### 2.1 基于运动恢复结构的电网设施静态模型重建

本节首先介绍计算机视觉下针对电网设施表面特性，提出图像数据集特征点提取与匹配方法；其次，基于已匹配特征点，估计相机位姿与稀疏点云位置；最后，结合稀疏点云稠密化方法，形成电网设施静态模型重建方案。

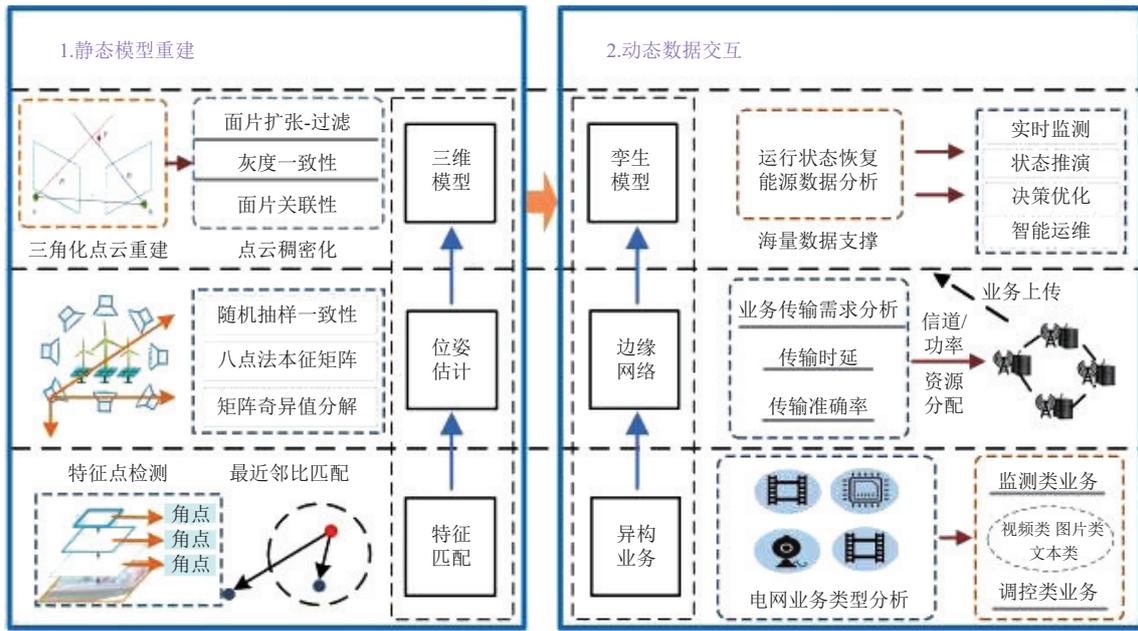


图 2 数字孪生电网模型构建和数据交互关键技术

Fig. 2 Key technology of digital twin power grid model construction and data interaction

2.1.1 基于改进 Shi Tomasi-Surf 算法的图像特征提取与匹配

在计算机视觉领域，通常用式 (1) 解释像素坐标  $(u, v)$  系和世界坐标  $(X_w, Y_w, Z_w)$  系之间的转化关系。

$$Z_C \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $M_1$ 、 $M_2$  分别为相机内参矩阵与相机外参矩阵，已知  $M_1$ 、 $M_2$ ，便可实现二维图像到三维物体的转化。

部分电网设施颜色单一、纹理较弱，导致相机生成图像特征点难以提取、特征点间的错误匹配问题都会影响相机的位姿估计结果，最终影响重建点云的位置精度与视觉效果。因此，提出一种 Shi Tomasi 和 Surf 融合的双阈值近邻比特特征匹配算法，在有效提取图像大量特征点的同时保持高匹配准确度。该算法的具体步骤如下：首先，基于 Shi Tomasi 算法提取图像特征点；其次，基于 Surf 特征描述符构建原理为各特征点赋予 64 位特征描述符；最后，基于双阈值近邻比进行特征点匹配。

双阈值近邻比的特征点匹配具体流程如下：

首先，针对任意两幅图像特征点集  $N_1$  和  $N_2$ ，计算点集间任意两点的欧式距离  $D_{\eta\mu}$ ，若此距离小于一定阈值，判断其初步匹配。

$$D_{\eta\mu} = \left[ \sum_{\varepsilon=0}^{64} (X_{\eta\varepsilon} - X_{\mu\varepsilon})^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中： $X_{\eta\varepsilon}$  为第  $\eta$  个特征点 64 位描述子中的第  $\varepsilon$  个描述子元素； $X_{\mu\varepsilon}$  为第  $\mu$  个特征点 64 位描述子中的第  $\varepsilon$  个描述子元素。

其次，记两幅图像间的特征点初步匹配数为  $n$ ，计算点集  $N_1$  中上述匹配特征点在  $N_2$  中的最近欧式距离  $D_z$  以及次近欧式距离  $D_c$  的比值集合  $G$ ，如下所示：

$$G = \left( \frac{D_z^1}{D_c^1}, \frac{D_z^2}{D_c^2}, \frac{D_z^3}{D_c^3}, \dots, \frac{D_z^n}{D_c^n} \right) \quad (3)$$

最后，对比值集合  $G$  进行升序排列，并剔除前 10% 和后 10% 数据，取剩余比值的平均值作为初始化阈值。若上述初步匹配点的最近邻及次近邻之比小于此阈值，则判定其初匹配成功。

2.1.2 相机位姿估计与点云稠密化

本质矩阵  $(E)$  包含现实空间中两相机的相对位置关系，对本征矩阵的奇异值分解，可得到相机之间的  $T$  和  $R$  关系。基于对极几何原理可知，若空间中存在任意一点  $X$ ，其在两个相机坐标系

下的归一化坐标向量分别为  $\mathbf{X}_1$ 、 $\mathbf{X}_2$ ，则二者存在如下关系：

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{R}\mathbf{X}_1 + \mathbf{T} \quad (4)$$

以上述匹配成功的特征点对为输入，结合八点法即可对  $\mathbf{E}$  进行估计，进一步融合 RANSAC 算法对其估计结果精度进行有效提升。具体实现流程如下：

1) 设定迭代次数为  $c$ ，并随机从数据集中选取 8 对匹配特征点，基于八点法计算本质矩阵。

2) 对  $\mathbf{E}$  进行奇异值分解，获取相应的  $\mathbf{R}$  与  $\mathbf{T}$ ，遍历集合中其余点是否符合以上模型，即判断式 (4) 的变形  $\|\mathbf{R}\mathbf{X}_1 + \mathbf{T} - \mathbf{X}_2\|$  是否小于设定阈值，符合的点记为内点，并统计内点数。

3) 重复上述步骤进行迭代，直到迭代次数完成或内点数占比大于一定阈值时结束，选取内点数最多的模型作为最终求解结果。

基于以上方法可有效求解相机的外参矩阵  $\mathbf{M}_2$ ，实现相机位姿的估计。结合相机内参矩阵  $\mathbf{M}_1$ ，以三角化的方式将上述特征点转化为三维稀疏点云。

PMVS 算法以 SFM 原理得到的稀疏点云为输入，通过初始化面片生成、面片扩张和面片过滤三步反复迭代来完成面片的生成和筛选，最终得到足够稠密和高质量的面片，实现稠密点云重建。其具体实现流程如下：

1) 初始化面片：以上述步骤得到的稀疏点云为输入，点转面片并初始化面片的 3 个基本属性，即面片  $p$ 、面片中心点  $c(p)$ 、单位法向量  $\mathbf{n}(p)$ 。将面片对应的某一参考图像定义为  $r(p)$ ，将能看见某一面片的所有图像集合定义为可视集  $v(p)$ 。可视集  $v(p)$  通过面片中心到相机光心连线与面片法向量的夹角确定，该夹角范围通常为  $\pm 60^\circ$ 。

2) 面片扩张：首先，判断每一稀疏面片周围的可扩张单元，并在可扩张单元上以面片  $p$  的  $\mathbf{n}(p)$ 、 $r(p)$ 、 $v(p)$  属性作为新扩张面片  $p^*$  的初值，二者仅有  $c(p^*)$  不同。其次，通过最小化灰度一致性函数对  $c(p^*)$ 、 $\mathbf{n}(p^*)$  进行优化，灰度一致性函数如式 (5) 所示。最后，添加可视图像，并通过视差图进行测试，获取更新后的可视图集  $v(p^*)$ 。若此时更新后的可视图集  $v(p^*)$  大于阈值  $\gamma$ ，则面片生成成功。

$$g(p) = \frac{1}{|v(p) - r(p)|} \sum_{I \in [v(p) - r(p)]} h[p, I, r(p)] \quad (5)$$

式中： $v(p) - r(p)$  为面片  $p$  的可视集  $v(p)$  去掉参考图像  $r(p)$  外的其他图像集合； $|v(p) - r(p)|$  表示该集合中图像的个数，也就是出现面片  $p$  的图像个数减去 1； $h(p, I_1, I_2)$  是指图像  $I_1$  和  $I_2$  间的灰度一致性函数。

3) 面片过滤：首先，基于灰度一致性约束滤除在同一个网格单元中，但并非邻近面片的粗差情况。其次，通过视差图测试滤除较少图像上能看到的面片。最后，基于面片间的关联性，滤除在相邻网格单元中相邻面片个数占总面片数小于 1/4 的面片。

4) 以过滤后的面片为输入，迭代多次上述“扩张—过滤”策略，并以灰度一致性约束和面片间的关联性两个条件不断反复过滤当前稠密面片集合，滤除部分冗余、灰度差异过大、低质量的面片。

## 2.2 面向数字电网动态信息交互的通信资源分配

本节首先通过分析模型动态响应过程中各类业务的传输需求，建立面向不同传输时延及准确率需求的效用函数；其次，基于效用函数提出面向电网业务传输的通信资源分配模型；最后，利用优化算法对模型进行求解，得到子信道及功率资源分配方案。

### 2.2.1 数字孪生电网业务效用函数

效用函数能够反映用户对所获得业务传输性能的满意程度。通过分析不同场景下业务的特性以及传输需求，建立面向不同传输需求的效用函数，有效区分不同业务在网络中的传输需求，并根据不同需求分配通信资源。为对电网运行状态及各种用能信息的实时监测，并为电网建设、规划及电力负荷管控提供精细化的指导意见，业务传输实时性及准确性对提高电网调度决策生成的及时和准确性至关重要。因此，从传输时延和准确率两个方面出发，建立面向不同类业务传输需求的效用函数，具体叙述如下。

1) 用于监测电网日常运行状态的业务，称为监测类业务。此类业务通常以视频、图像或传感器数据的形式传输，且对传输时延的敏感度较低，即不需要过低的时延就可获得较高的效用值，如图 3 所示。

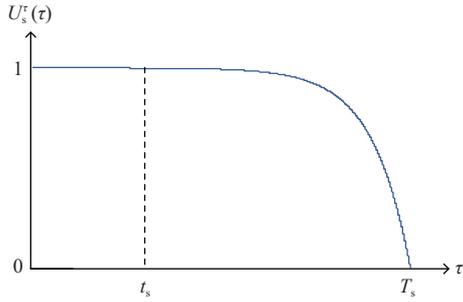


图 3 监测类业务传输时延效用函数

Fig. 3 Transmission delay utility function for monitoring service

将监测类业务的时延效用函数  $U_s^{\tau}(\tau)$  表示如下：

$$U_s^{\tau}(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau < t_s \\ 1 - e^{\alpha_s^{\tau}\tau - \beta_s^{\tau}}, & t_s \leq \tau < T_s \\ 0, & \tau \geq T_s \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\tau$  为业务传输时延； $t_s$ 、 $T_s$  分别为监测类业务的最小和最大传输时延需求； $\alpha_s^{\tau}$ 、 $\beta_s^{\tau}$  为函数调节系数。

对于视频及图像，传输数据量大，对数据传输错误的敏感度较低，即不需要过低的传输准确性就可以获得较高的效用值；而对于传感器数据，传输数据量相对较低，对数据传输错误有较高的敏感度，即需要维持较高的传输准确性以获得高的效用值。如图 4 所示， $U_{s,v}^q(q)$ 、 $U_{s,w}^q(q)$  分别表示视频及图像形式监测类业务的传输时延和准确率效用函数。

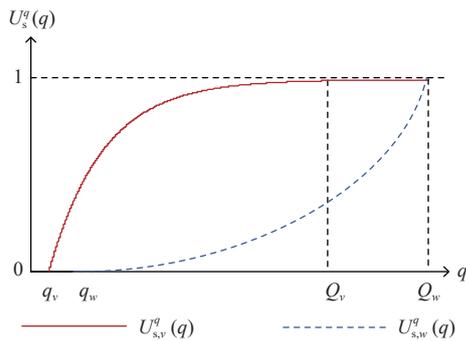


图 4 监测类业务传输准确率效用函数

Fig. 4 Transmission accuracy utility function for monitoring service

将效用函数  $U_{s,v}^q(q)$  表示为如下形式：

$$U_{s,v}^q(q) = \begin{cases} 0, & q < q_{s,v} \\ 1 - e^{-\alpha_{s,v}^q q + \beta_{s,v}^q}, & q_{s,v} \leq q < Q_{s,v} \\ 1, & q \geq Q_{s,v} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $q$  为业务传输准确率； $q_{s,v}$ 、 $Q_{s,v}$  分别为视频及图像形式监测类业务的最小和最大传输准确率需求。

将效用函数  $U_{s,w}^q(q)$  表示如下：

$$U_{s,w}^q(q) = \begin{cases} 1, & q \geq Q_{s,w} \\ (q - q_{s,w})^{\alpha_{s,w}^q}, & Q_{s,w} \leq q < q_{s,w} \\ 0, & q < q_{s,w} \end{cases} \quad (8)$$

式中  $q_{s,w}$ 、 $Q_{s,w}$  分别为传感器数据形式监测类业务的最小和最大传输准确率需求。

2) 用于电力需求响应、配电自动化等业务，称为调控类业务，通常以文本数据的形式传输。为能够根据能源出力、用户负荷用电以及电网异常等信息，实现电网的实时精准调控，此类业务需要保证较高的实时性和准确性，如图 5 所示。

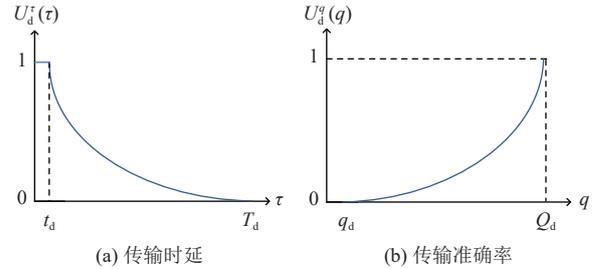


图 5 调控类业务效用函数

Fig. 5 Utility functions for regulation service

将调控类业务的时延效用函数  $U_d^{\tau}(\tau)$  表示如下

$$U_d^{\tau}(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau < t_d \\ (\beta_d^{\tau} - \tau)^{\alpha_d^{\tau}}, & t_d \leq \tau < T_d \\ 0, & \tau \geq T_d \end{cases} \quad (9)$$

式中  $t_d$ 、 $T_d$  分别为调控类业务的最小和最大传输时延需求。

另外，可以将调控类业务的传输准确率效用函数  $U_d^q(q)$  表示如式 (8) 所示的函数形式。

### 2.2.2 通信模型

本文采用频分多址数据传输方式，通信频带被分为多个子信道，供不同的节点使用。业务传输子信道总数为  $K$ ，单信道传输带宽为  $b$ ；边缘节点总数为  $M$ ，第  $m$  个节点分配到子信道的数量为  $K_m$ ，将节点分配到的各子信道表示为  $k_{m,j}$ ，第  $k_{m,j}$  条子信道的信道增益为  $|G_{k_{m,j}}|^2$ ，噪声功率为  $P_{k_{m,j}}$ ，每个节点的总发射功率为  $P_{\max}$ ，分配到第  $k_{m,j}$  条子信道上的功率为  $P_{k_{m,j}}$ 。

下文就传输时延以及准确率的计算方法展开

介绍。

1) 传输时延模型: 节点  $m$  业务的数据传输速率  $\rho_m$  为

$$\rho_m = \sum_{j=1}^{K_m} b \log_2 [1 + (P_{k_{m,j}} |G_{k_{m,j}}|^2) / \sigma_{k_{m,j}}^2] \quad (10)$$

本文仅考虑业务传输过程产生的时延, 因此定义边缘节点  $m$  上传业务的总时延  $\tau_m$  为

$$\tau_m = l_m / \rho_m \quad (11)$$

式中  $l_m$  为边缘节点  $m$  业务传输的数据量。

2) 传输准确率模型: 数据传输准确率通常用误码率衡量。节点  $m$  经信道  $k_{m,j}$  传输的误码率  $e_{m,j}$  [23] 为

$$e_{m,j} = 1 - \exp \left[ -\sigma_{k_{m,j}}^2 / \left( p_{k_{m,j}} |G_{k_{m,j}}|^2 \right) \right] \quad (12)$$

节点  $m$  业务传输的准确率  $q_m$  可以定义为

$$q_m = 1 - e_m \quad (13)$$

式中  $e_m = (1/l_m) \sum_{j=1}^{K_m} e_{m,j} \rho_{m,j} \tau_m$  为边缘节点  $m$  业务传输的总误码率。

### 2.2.3 通信资源分配模型

本节重点研究电网业务由边缘节点上传至中心云平台过程中的通信资源分配, 包括子信道和功率资源。旨在解决频谱资源短缺的情况下, 资源利用率低而难以满足海量异构业务传输需求的问题。因此, 在满足电网各业务差异化传输时延和准确率需求的前提下, 最大化系统各边缘节点的效用和  $U$ , 将边缘网络的通信资源分配模型建立为如下问题:

$$\begin{aligned} \text{P1: } \max U &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [\omega_\tau U_m^\tau(\tau) + \omega_q U_m^q(q)] \\ \text{s.t. } \text{C1: } &U_m^\tau(\tau) > 0, U_m^q(q) > 0, m = 1, \dots, M \\ \text{C2: } &\sum_{m=1}^M K_m \leq K, K_m \in \mathbf{N} \\ \text{C3: } &\sum_{s=1}^{K_m} P_{k_{m,j}} \leq P_{\max}, P_{k_{m,j}} \geq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $\omega_\tau$ 、 $\omega_q$  分别为业务传输时延和准确性在网络中的权重; C1 表示各业务传输时延不大于最大传输时延需求, 准确率不低于最小准确率需求; C2 表示信道数量上限; C3 表示各边缘节点总发射功率上限。

### 2.2.4 通信资源分配模型求解方法

由于上述资源分配模型为混合整数非线性规划问题, 难以直接求解。将其拆分为三部分进行求解, 包括各节点的子信道数量分配、具体子信道分配以及子信道功率分配。首先, 引入灰狼算法更新节点的子信道数量分配策略; 其次, 根据节点分配到的子信道数, 利用双边匹配实现节点与具体子信道的最佳匹配; 最后, 利用注水算法分配子信道功率。

1) 基于灰狼算法的子信道数量分配。灰狼算法一般将狼群分为  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$  和  $\omega$  狼 4 个等级。 $\alpha$  狼的位置为该群体的潜在最优解,  $\beta$  狼和  $\delta$  狼的位置分别对应次优解和第三优解,  $\omega$  狼根据  $\alpha$  狼、 $\beta$  狼和  $\delta$  狼位置的引导搜索更新位置。灰狼  $i$  (可属于 4 个等级中的任一等级) 当前位置为  $X_i(t)$ , 由  $\alpha$  狼引导更新的下一位置为

$$\begin{aligned} X_i^\alpha(t+1) &= X_\alpha(t) - A \cdot D \\ D &= |CX_\alpha(t) - X_i(t)|, A = 2a \cdot r_1 - a, C = 2r_2 \end{aligned} \quad (15)$$

式中:  $X_\alpha(t)$  为猎物的位置, 在优化问题中即为  $\alpha$  狼的位置;  $r_1$  和  $r_2$  为分量取值在  $[0,1]$  内的随机向量;  $a$  中各分量的取值在迭代过程中由 2 线性递减到 0。

利用灰狼算法对各节点分配的信道数量进行迭代,  $\omega$  狼第  $t$  代的位置向量为  $X_\omega(t) = [x_{1,1}(t), \dots, x_{K,1}(t)]$ 。根据式 (16) 可知, 利用  $\alpha$  狼、 $\beta$  狼和  $\delta$  狼的位置  $X_\alpha(t)$ 、 $X_\beta(t)$  和  $X_\delta(t)$ , 引导更新得到  $\omega$  狼的位置。

$$X_\omega(t+1) = [X_\omega^\alpha(t+1) + X_\omega^\beta(t+1) + X_\omega^\delta(t+1)] / 3 \quad (16)$$

根据问题 P1 将灰狼的位置向量、问题解向量代入, 求得系统各边缘节点的效用和  $U$ , 不断迭代更新灰狼的位置至整个狼群中的最大效用和收敛, 此时种群中  $\alpha$  狼的位置向量即为问题的最优解。

2) 基于双边匹配算法的具体子信道分配。在已知各节点分配的信道数量后, 利用双边匹配算法为各节点分配具体的子信道。各边缘节点和子信道均根据当前信道增益建立各自的降序偏好列表  $L_m^m(k)$ 、 $L_k^k(m)$ , 由各节点向其偏好列表  $L_m^m(k)$  中前  $K_m$  个子信道发出匹配申请, 各子信道根据其偏好列表  $L_k^k(m)$  选择向其发出请求的最优边缘节点完成匹配, 而拒绝其他边缘节点的匹配申请。已匹配子信道数量  $K_{mn} < K_m$  的各边缘节点将拒绝

其申请的子信道，移除其偏好列表，可得到新的节点偏好列表  $L_m^{\tilde{m}}(k)$ ，并继续向  $L_m^{\tilde{m}}(k)$  中第  $K_{mm}+1$  至第  $K_m$  条子信道发送匹配请求，直到所有设备完成匹配。

3) 基于注水算法的子信道功率分配。在完成为各节点分配具体的子信道后，为各子信道分配发射功率。功率分配算法可根据信道质量调整功率分配，以获得最佳的信道传输容量，功率分配模型为

$$\begin{aligned} \max \rho_m &= \sum_{j=1}^{K_m} b \log_2 \left[ 1 + \left( P_{k_m,j} |G_{k_m,j}|^2 \right) / \sigma_{k_m,j}^2 \right] \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^{K_m} P_{k_m,j} \leq P_{\max}, P_{k_m,j} \geq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

注水算法是一种合理且有效的功率分配方法。该方法根据信道质量的好坏，调整发射端信道的功率分配，进而提升系统性能。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 电网设施三维静态模型重建效果及精度分析

本节依次对静态模型重建算法所实现的视觉效果以及相关改进算法对重建模型精度的提升进行仿真验证。

##### 3.1.1 三维静态模型重建方法验证与分析

本文以电网中的典型设施光伏发电板为例，实现三维静态模型重建方法的验证与分析，所涉及光伏板多角度图像集均来自于相机实际拍摄，并基于张正友标定法获取相机的内参矩阵。

首先，由于部分电网设施存在颜色单一、纹理较弱的情况，导致相机生成图像的特征点提取困难。针对以上问题，本文选用 Shi Tomasi 算法进行图像特征点的提取，其对特征点的判定情况依赖于自身阈值的设定，即使在弱纹理区域也有较好效果。进一步，通过 Surf 算法为每一特征点赋予 64 位描述符，并基于所述双阈值近邻比特特征匹配方法，实现特征点间的相互匹配。对本文提出的改进方法与传统方法的特征点提取与匹配结果进行定量对比，结果如表 1 所示。从表 1 可以发现，相比于传统 Surf 算法的单阈值欧式距离特征提取与匹配，本文基于 Shi Tomasi-Surf 算法的双阈值近邻比特特征提取与匹配方法，在提取图像特征点数量更多的同时，匹配精度也更高。

表 1 不同算法的特征点选取与匹配结果对比  
Table 1 Comparison of feature point selection and matching results of different algorithms

算法	本文算法	Shi Tomasi+Surf算法	传统Surf算法
匹配对数	647	647	268
匹配准确率/%	96.8	85.6	92.5

其次，基于两幅图像间的特征点匹配情况，融合八点法和 RANSAC 算法求解本征矩阵 ( $E$ )，并分解为相机间的旋转 ( $R$ ) 和平移 ( $T$ ) 信息，估计相机的位姿。正确估计图像间的匹配点及相机间的参数信息后，进一步通过三角化的方式，即可得到三维稀疏点云。

最后，以稀疏点云为输入，基于 PMVS 算法实现稀疏点云稠密化，并通过泊松表面重建算法实现点云网格化。最终实现的光伏发电板三维模型如图 6 所示。



图 6 光伏发电板三维静态模型重建结果  
Fig. 6 Results of 3D static model reconstruction for photovoltaic panels

从仿真结果可以看出，重建模型较为完整，且与物理实体间存在良好的时空一致性，视觉效果良好。以上结果可以证明通过本文算法能有效构建电网设施三维静态模型，能为数字孪生电网的实现及三维可视化提供有效的技术支撑。

##### 3.1.2 三维静态模型重建精度验证与分析

三维静态模型的重建精度与特征点间的匹配准确度和相机位姿估计结果存在直接关联，特征点匹配准确度越高，相机位姿估计越准确，最终形成的三维静态模型重建精度越高。

三维静态模型的重建精度通常由重投影误差衡量，重投影误差越小，点云的重建精度越高。近年来，基于多视角图像的三维重建方法中，文献 [24] 提出一种改进的基于加速的核化自适应区域提取 (accelerated-kernelized-adaptive-zone-extrac-

tion, AKAZE) 特征提取的全局式三维重建算法; 文献 [25] 提出一种室内场景弱纹理的 SFM 三维重建方法。但文献 [24] 在特征匹配过程中仅基于汉明距离进行特征匹配, 文献 [25] 在相机位姿估计中也并未进行相机位姿估计精度提升工作。相比之下, 本文引入双阈值近邻比的方式改进传统 Surf 算法特征匹配方案提升图像特征点匹配准确度, 并在此基础上融合八点法与 RANSAC 算法提升相机位姿估计准确度, 实现电网设施三维静态模型重建精度的提升。

为验证本文算法在提升三维静态模型重建精度上的良好效果, 基于以上算法及本文算法进行对比验证。从 3 种算法生成的点云中随机抽取  $5n \times 10^4$  ( $n$  为正整数) 个点云, 计算其平均重投影误差, 如图 7 所示。由图 7 可见, 在点云数量相同的情况下, 采用本文算法的平均重投影误差更小, 表明本文算法重建模型的精度更高。

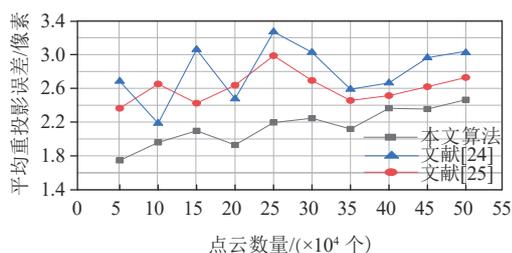


图 7 固定点云数量下平均重投影误差  
Fig. 7 Mean reprojection error under a fixed point-cloud number

### 3.2 通信资源分配效果验证

本节通过设置业务传输场景, 依次对本文算法的收敛性及在保障业务传输实时性和准确性方面的优越性进行仿真验证。

#### 3.2.1 通信资源分配方法收敛性验证

为验证本文通信资源分配方法的收敛能力, 以 5 个边缘节点传输不同类型电网业务的场景为例, 设置仿真参数如表 2 所示。

本文利用灰狼算法和双边匹配算法相结合的方法为各节点分配子信道资源, 分为子信道数量分配和具体子信道分配两个阶段。在子信道数量分配阶段用灰狼算法进行迭代优化, 以节点总数  $M$  为灰狼位置向量, 即解向量的维度, 以子信道集合  $\{1, 2, \dots, K\}$  表示位置向量中分量的解空间, 可以得出该问题解空间的大小为  $K^M$ ; 若仅使用灰狼算法进行子信道分配, 需要用 0-1 二维矩阵表

表 2 仿真参数设置  
Table 2 Setting of simulation parameters

参数	数值
传输带宽/MHz	5
子信道数量/条	192
单个边缘节点的总功率/W	5
噪声功率谱密度/(W/Hz)	$10^{-8}$
节点1参数	调控类业务、文本、1 Mbit
节点2参数	监测类业务、图像、3 Mbit
节点3参数	调控类业务、文本、0.8 Mbit
节点4参数	监测类业务、视频、20 Mbit
节点5参数	监测类业务、文本、1.5 Mbit

示节点与子信道间的关系, 即解向量的维度为  $M \times K$ , 向量中各分量的解空间为  $\{0, 1\}$ , 则该问题的解空间的大小为  $2^{M \times K}$ 。综上分析可知, 在表 2 设置的场景下, 本文算法的解空间远小于仅用灰狼算法的解空间, 能有效提高算法的收敛速度。将本文算法与灰狼算法以及遗传算法、粒子群算法进行对比, 图 8 为 4 种算法的迭代曲线图。

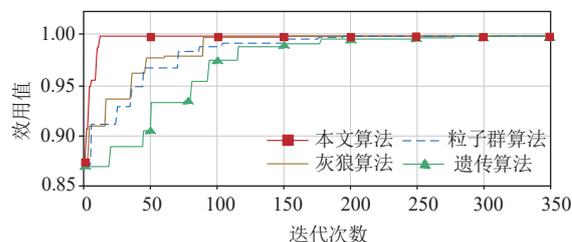


图 8 算法迭代曲线  
Fig. 8 Iterative curve of algorithm

从图 8 可以看出, 本文算法的迭代曲线在第 10 代左右收敛至效用最大值, 而灰狼算法、粒子群算法和遗传算法分别在 150、200、280 代左右收敛至最大值, 结果表明本文算法能够有效提高收敛速度。

#### 3.2.2 通信资源分配方法的有效性分析

为分析本文提出的通信资源分配方法在电网多样化业务传输方面的优越性, 以表 2 设置的场景为例, 与信道平均分配算法以及 Shen 算法 [26] 进行对比。其中, 信道平均分配算法将信道平均分配给各边缘节点, 不考虑各业务的差异化传输需求, 仅按信道质量进行平均分配; Shen 算法是一种经典的信道分配算法, 该算法考虑了业务传输速率需求, 按传输速率需求的比例为各用户分配子信道, 而未考虑其他传输需求。图 9 展示了

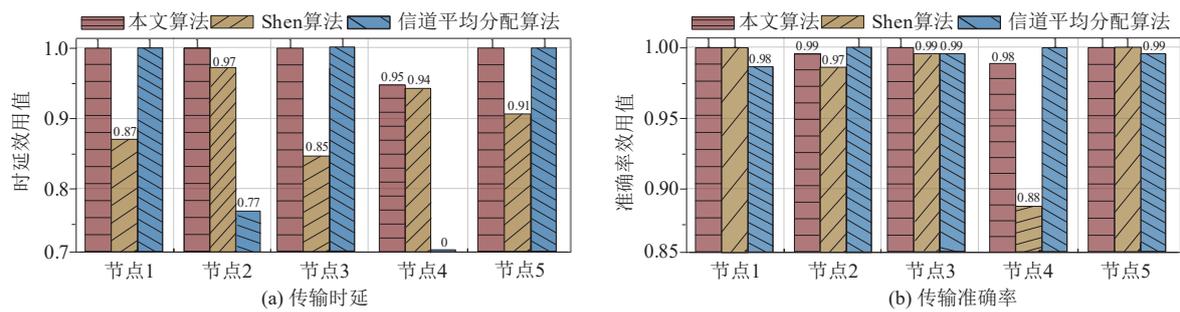


图 9 时延和准确率效用对比

Fig. 9 Delay and accuracy utility comparison

3种资源分配算法计算得到的5个边缘节点业务传输时延和准确性效用值。

从图9可以看出，在业务平均传输时延效用方面，本文提出的子信道和功率资源分配算法相较于Shen算法和信道平均分配算法分别能够提高9.03%和31.30%。上述分析表明，本文算法相较于其他算法能够有效提升业务传输时延效用，虽然在业务传输准确率效用方面相较于其他算法

没有明显提升，但仍可以保证较高的传输准确率效用。

为验证本文算法在不同数量边缘节点业务传输场景下的适用性，设置不同的边缘节点数量进行对比，如图10所示。由图10可以看出，设置节点数量为3~10个时，本文算法与其他算法相比均能有效提升业务平均传输时延效用，并保证传输准确率效用。

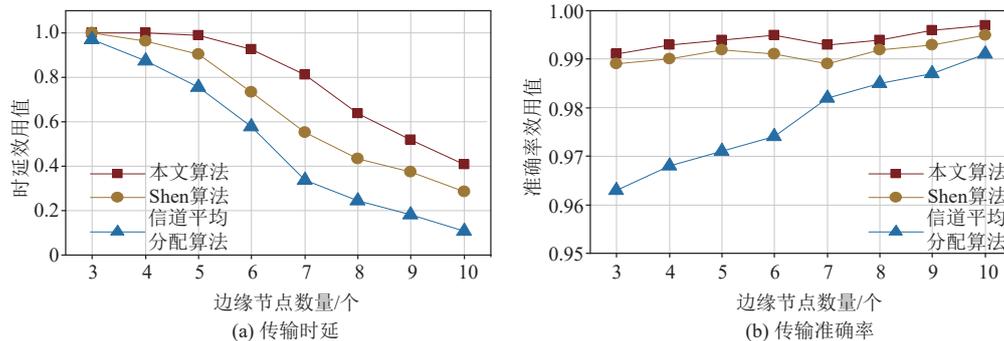


图 10 不同节点数量下业务传输时延和准确率对比

Fig. 10 Comparison of service transmission delay and accuracy with different number of nodes

## 4 结论

为实现电网物理设施在数字空间内的三维可视化以及物理电网与数字模型间的动态映射，推动数字孪生电网的建设，本文提出了一种面向数字孪生电网设施虚实映射的边缘网络资源分配方法，具体结论如下：

1) 考虑到数字孪生电网设施虚实映射过程中对大量分散且随机的业务交互需求，搭建了由平台层、传输层和物理层组成的面向电网虚实交互过程的云-边-端网络架构。在平台层静态模型建立的基础上，传输层引入边缘网络辅助各类业务的实时处理，支撑电网静态模型构建与物理电网的动态映射。

2) 为满足数字孪生电网虚实映射过程对模型的需求，提出面向数字孪生电网设施的图像特征匹配与提取方法；基于随机抽样一致性算法改进相机位姿估计方法，以提高三维点云重建精度；结合多视图立体面片算法稠密化稀疏点云，提升三维静态模型可视化效果。最终形成面向数字孪生电网设施的三维静态模型重建方法，支撑电网设施虚拟模型的高效构建。

3) 为满足数字孪生电网设施虚实映射过程中的业务数据交互需求，根据各业务的特性分类研究其传输需求，建立面向各业务传输需求的效用函数；在保证业务传输需求的前提下，最大化系统传输时延及准确率效用和，基于效用函数建立边缘网络中子信道和功率资源分配模型；结合

灰狼算法与双边匹配算法实现子信道分配, 并利用注水算法进行子信道功率分配, 实现了数字孪生电网设施虚实映射过程中边缘网络通信资源的合理分配。

## 参考文献

- [1] 盛戈峰, 钱勇, 罗林根, 等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势 [J]. 高电压技术, 2023, 49(05): 1765-1778.  
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Linggen, *et al.* Key technologies and development trends of digital power equipment for new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(05): 1765-1778(in Chinese).
- [2] 白浩, 周长城, 袁智勇, 等. 基于数字孪生的数字电网展望和思考 [J]. 南方电网技术, 2020, 14(08): 18-24+40.  
BAI Hao, ZHOU Changcheng, YUAN Zhiyong, *et al.* Prospect and thinking of digital power grid based on digital twin[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(08): 18-24+40(in Chinese).
- [3] 邵天睿, 尚涛, 李显旭. 数字孪生电网安全分析 [J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(08): 60-65.  
SHAO Tianrui, SHANG Tao, LI Xianxu. Security analysis of digital twin of power systems[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(08): 60-65(in Chinese).
- [4] 李鹏, 习伟, 蔡田田, 等. 数字电网的理念、架构与关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5002-5017.  
LI Peng, XI Wei, CAI Tiantian, *et al.* Concept, architecture and key technologies of digital power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5002-5017(in Chinese).
- [5] 郭嘉, 谢景海, 孙密, 等. 一种变电站数字孪生体的轻量化构建方法 [J/OL]. 电测与仪表 [2023-10-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20221019.1451.012.html>.  
GUO Jia, XIE Jinghai, SUN Mi, *et al.* A lightweight construction method for substation digital twin[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation[2023-10-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20221019.1451.012.html> (in Chinese).
- [6] 王鑫, 王霖, 余芸, 等. 数字孪生电网的特性、架构及应用综述 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44(11): 3721-3733.  
WANG Xin, WANG Lin, YU Yun, *et al.* Survey on characteristics, architecture and applications of digital twin power grid[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(11): 3721-3733(in Chinese).
- [7] 王朔, 轩莹莹, 张骥, 等. 实景建模技术在电网数字孪生系统中的应用分析 [J]. 电力勘测设计, 2023(02): 78-82.  
WANG Shuo, XUAN Yingying, ZHANG Ji, *et al.* The real scene modeling technology application in the power grid digital twinning system[J]. Electric Power Survey & Design, 2023(02): 78-82(in Chinese).
- [8] QIAO Yiya, XI Xiaohuan, NIE Sheng, *et al.* Power pylon reconstruction from airborne LiDAR data based on component segmentation and model matching[J]. Remote sensing, 2022, 14(19): 4905-4911.
- [9] GUO Jianlong, FENG Weixia, HAO Tengfei, *et al.* Denoising of a multi-station point cloud and 3D modeling accuracy for substation equipment based on statistical outlier removal[C]//2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Wuhan, China: IEEE, 2020: 2793-2797.
- [10] MORARJEE B. Using multiple view geometry for transmission tower reconstruction[D]. Cape Town: University of Cape Town, 2016.
- [11] 陈英达, 曾群生, 陈彬, 等. 面向电网变电站的视觉三维重建及语义分割技术研究 [J]. 电力大数据, 2022, 25(10): 45-52.  
CHEN Yingda, ZENG Qunsheng, CHEN Bin, *et al.* Research on visual 3D reconstruction and semantic segmentation technology for power grid substation[J]. Power Systems and Big Data, 2022, 25(10): 45-52(in Chinese).
- [12] 杨梓瀚. 一种基于倾斜摄影的变电站三维实景建模方法 [J]. 电子测试, 2022, 36(09): 126-128.  
YANG Zihan. A 3D real-scene modeling method for substation based on tilt photography[J]. Electronic Test, 2022, 36(09): 126-128(in Chinese).
- [13] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(01): 1-18.  
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, *et al.* Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(01): 1-18(in Chinese).
- [14] 张秋雨, 蒋云峰, 张常稳, 等. 面向新型电力系统的最小服务延迟的负载分配算法研究 [J]. 电测与仪表, 2022, 59(01): 1-9.  
ZHANG Qiuyu, JIANG Yunfeng, ZHANG Changwen, *et al.* Research on load distribution algorithm for minimum service delay in new power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(01): 1-9(in Chinese).
- [15] 孙钰坤, 张兴, 雷波. 边缘算力网络中智能算力感知路由分配策略研究 [J]. 无线电通信技术, 2022, 48(01): 60-67.  
SUN Yukun, ZHANG Xing, LEI Bo. Study on intelligent computing aware route allocation policy in edge computing-

- aware networks[J]. Radio Communications Technology, 2022, 48(01): 60–67(in Chinese).
- [16] 王清, 荆臻, 李琮琮, 等. 宽带电力线载波通信物理层资源分配新算法 [J]. 电测与仪表, 2021, 58(07): 124–129.  
WANG Qing, JING Zhen, LI Congcong, *et al.* A novel algorithm of physical layer resource allocation for broadband power line carrier communication[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(07): 124–129(in Chinese).
- [17] 王海洲. 面向差异化业务需求的无人机群带宽资源分配方法研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.  
WANG Haizhou. Research on resource allocation algorithm oriented to differentiated service requirements of the UAVswarm[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021(in Chinese).
- [18] 卢阳光. 5G 增强网络中边缘计算无人机任务调度策略研究 [D]. 北京: 北京信息科技大学, 2022.  
LU Yangguang. Research on UAV task scheduling strategy for edge computing in 5G enhanced network[D]. Beijing: Beijing Information Science and Technology University, 2022(in Chinese).
- [19] 张泽维, 李陶深, 许钧智. 面向多用户的移动边缘计算任务分级处理卸载机制 [J]. 北京邮电大学学报, 2023, 46(05):72-79.  
ZHANG Zewei, LI Taoshen, XU Junzhi. Multi-User-Oriented MEC task hierarchical processing offloading mechanism[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023, 46(05):72-79 (in Chinese).
- [20] 付雄, 房磊, 王俊昌. 面向能耗优化和负载均衡的边缘服务器放置研究 [J]. 计算机科学, 2023, 50(S1): 631–635.  
FU Xiong, FANG Lei, WANG Junchang. Edge server placement for energy consumption and load balancing[J]. Computer Science, 2023, 50(S1): 631–635(in Chinese).
- [21] 刘贵财, 兰巨龙. CCN 中基于业务分类和节点分区的混合缓存机制 [J]. 计算机应用研究, 2019, 36(04): 1181–1185.  
LIU Guicai, LAN Julong. Hybrid CCN caching scheme based on service classification and node partition[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(04): 1181–1185(in Chinese).
- [22] 于浩, 汪筱巍, 王韬, 等. 基于 SDN 与 NFV 的电力 5G 网络切片差异化资源分配方案 [J]. 电测与仪表, 2021, 58(09): 89–95.  
YU Hao, WANG Xiaowei, WANG Tao, *et al.* Differential resource allocation scheme for electric 5G network slices based on SDN and NFV[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(09): 89–95(in Chinese).
- [23] CHEN Mingzhe, YANG Zhaohui, SAAD W, *et al.* A joint learning and communications framework for federated learning over wireless networks[J] IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(1): 269-283.
- [24] 郝豪杰, 李朝奎, 方军, 等. 改进的 AKAZE 特征提取的全局式 SFM 三维重建算法 [J]. 测绘科学技术学报, 2021, 38(05): 492–498.  
HAO Haojie, LI Zhaokui, FANG Jun, *et al.* Improved AKAZE feature extraction global SFM 3D reconstruction algorithm[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2021, 38(05): 492–498(in Chinese).
- [25] 张庆鹏, 曹宇. 室内场景下弱纹理物体三维重建算法的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(08): 197–203.  
ZHANG Qingpeng, CAO Yu. Research on three dimensional reconstruction algorithm of weak textured objects in indoor scenes[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(08): 197–203(in Chinese).
- [26] SHEN Zukang, ANDREWS J G, EVANS B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints[J]. IEEE Press, 2005, 4(06): 2726–2737.

收稿日期: 2023–10–24

作者简介:

胡平 (1968), 男, 硕士, 正高级工程师, 通信作者, 研究方向为电力系统及其自动化, E-mail: [lx2429109351@163.com](mailto:lx2429109351@163.com);

韩璟琳 (1989), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统及其自动化, E-mail: [jinglinoliver@163.com](mailto:jinglinoliver@163.com);

陈志永 (1971), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化, E-mail: [18207750059@163.com](mailto:18207750059@163.com);

李想 (1999), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化, E-mail: [2429109351@qq.com](mailto:2429109351@qq.com);

连浩然 (1992), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统及其自动化, E-mail: [1317359485@qq.com](mailto:1317359485@qq.com);

邢志坤 (1983), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化, E-mail: [1913330860@qq.com](mailto:1913330860@qq.com).