

# 算网一体技术研究及发展探讨

孙滔

中国移动研究院

2023年7月



**1 算网一体提出的背景**

**2 算网一体新技术探索**

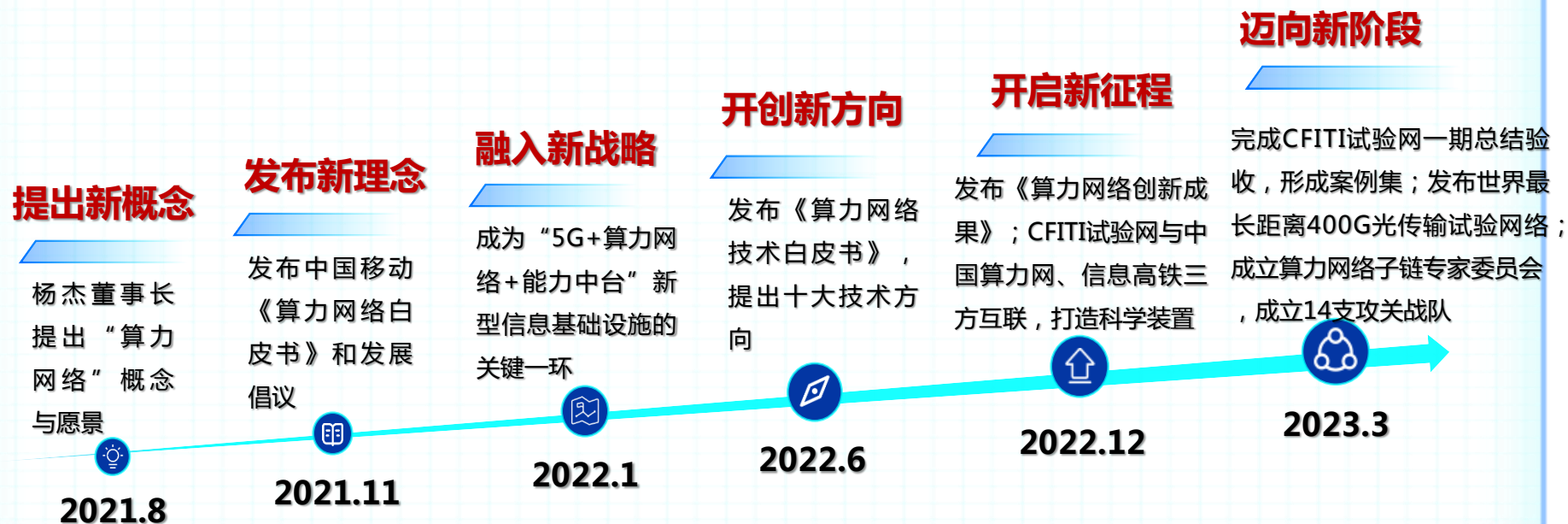
**3 总结与展望**

# 中国移动提出“算力网络”新理念

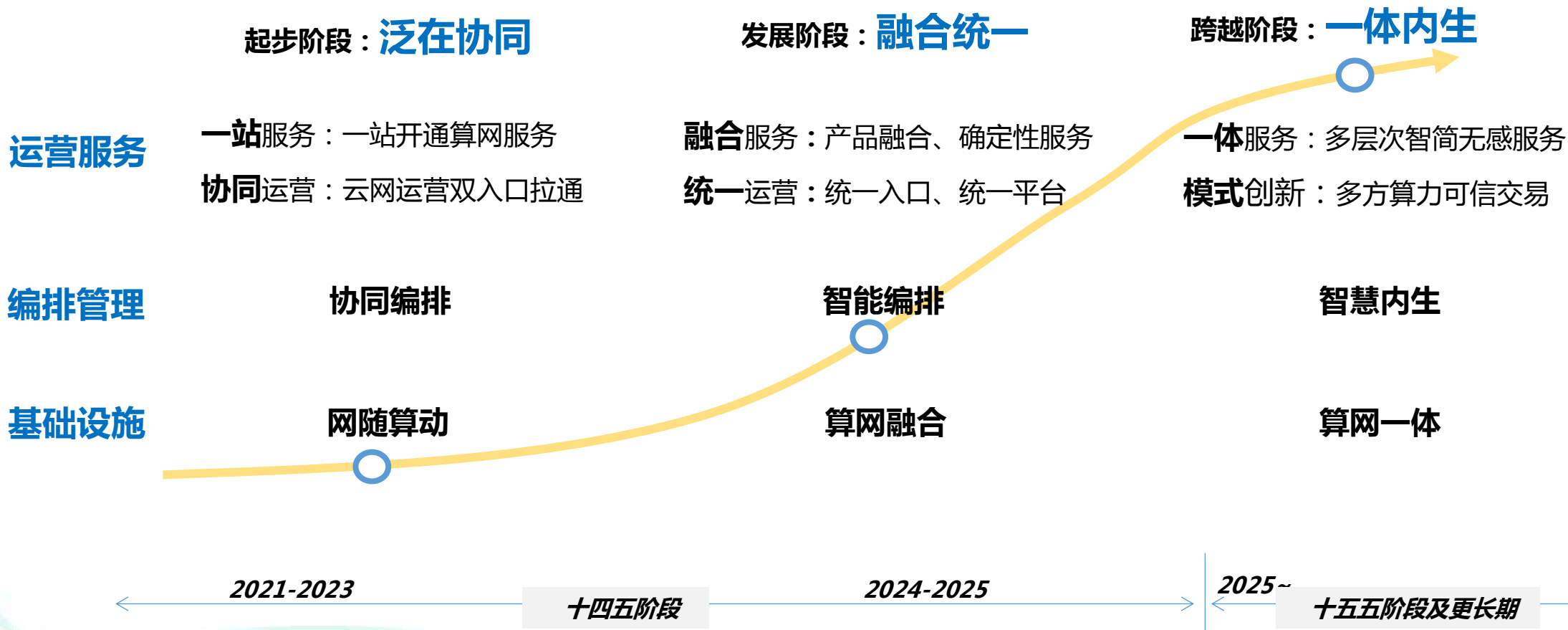
一年多来持续开拓创新，全力推进算力网络发展，形成一系列创新成果，在业界取得了广泛共识

“算力网络是以算为中心、网为根基，网、云、数、智、安、边、端、链（ABCDNETS）等深度融合、提供一体化服务的新型信息基础设施。”

——中国移动《算力网络白皮书》

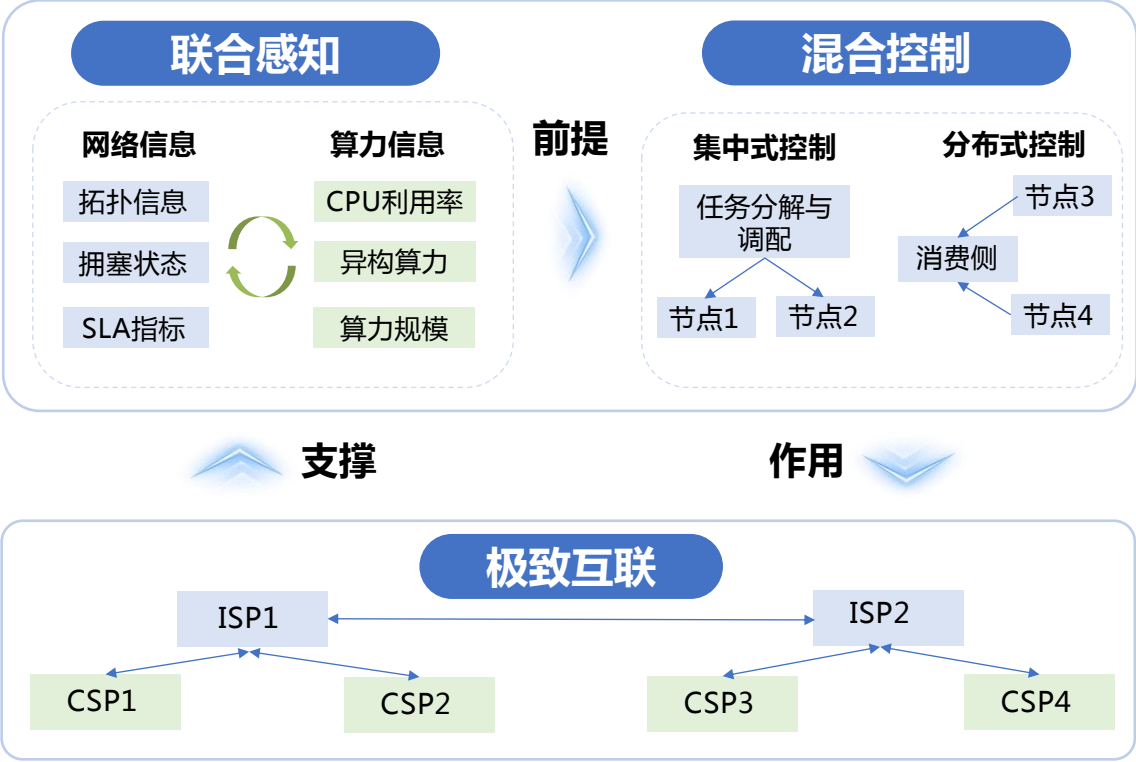


## 算力网络的发展经过三个阶段的发展，逐渐深化



算网一体通过“联合感知”“混合控制”“极致互联”构建面向智能化时代的数字基础设施

架构



关键技术

广域吞吐敏感网络

突破RDMA长距传输瓶颈，  
实现广域高性能互联

算力路由

创新互联网架构协议，基于算网资源  
联合感知实现动态融合决策选路

在网计算

网络内生算力，基于集中式控制，实现  
计算任务跨云、网、边、端分布式协同

• ISP：网络服务提供者； CSP：算力服务提供者

**1 算网一体提出的背景**

**2 算网一体新技术探索**

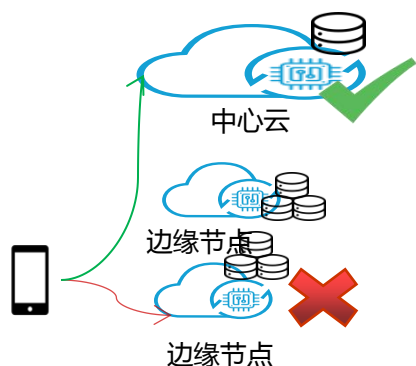
**3 总结与展望**

# 1、算力路由：概念和技术

2018年开始研究算网融合技术，面向云边协同和边边协同的“性能反转”等问题，提出在路由域引入计算信息进行联合调度

## 发现问题

云边以及边边调度之间出现“性能反转”



- 计算负载高及网络队列深的条件下，边缘响应平均时延及尾时延远大于中心云

- 算的负载状态以及网的拥塞情况均是问题来源

## 问题本质

计算和网络是独立系统，算的负载和网的拥塞信息没有产生关联

算：降低负载、计算资源预留...

问题：造成大量计算资源的闲置

网：增加带宽、配置专线...

问题：增加网络建设、运维成本

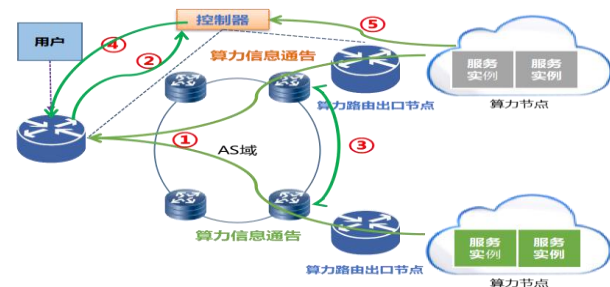
## 解决思路

在路由中引入计算信息，进行联合调度，

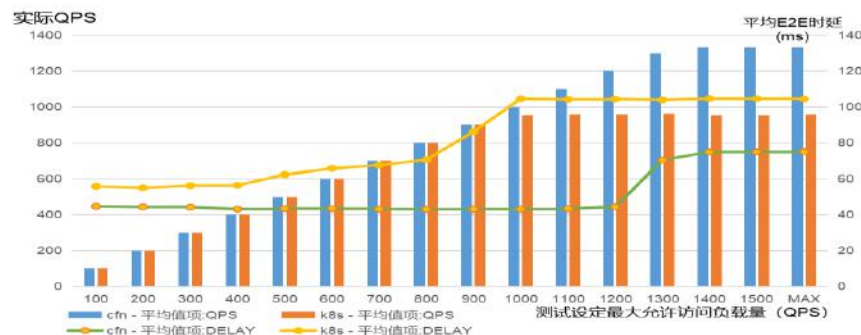
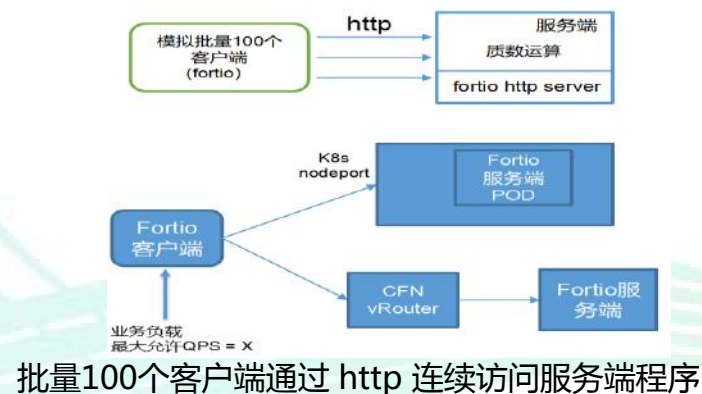
(1) 感知：路由系统感知计算资源

(2) 路由：综合网络和计算信息寻址选路

形成算力感知网络CAN的核心方向-算力路由



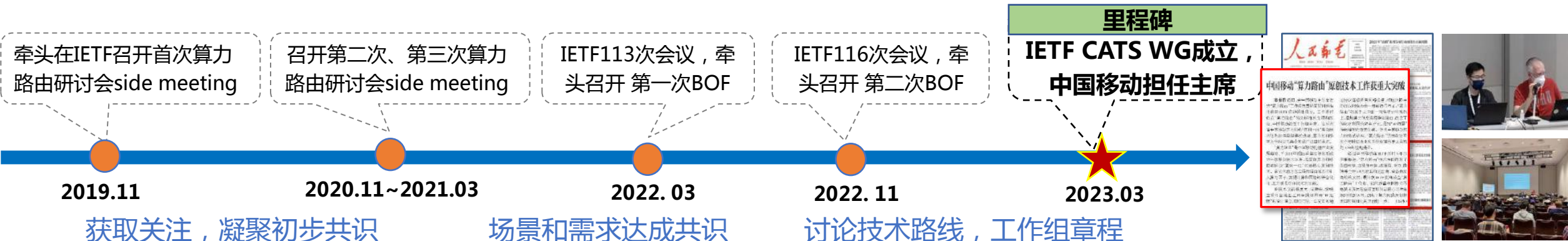
通过仿真发现在路由中引入算力信息在低、中、重载情况下均有一定的优化效果





# 1、算力路由：得到国际同行高度认可

历经4年，中国移动在IETF发起成立算力路由工作组(CATS, Computing-Aware Traffic Steering)并担任主席，是IETF 7大领域133个工作组中近10年由中国高校/公司牵头成立的两个工作组之一



CATS面向AR/VR、车联网等新型多节点部署服务的场景，制定算力路由的场景、需求、架构标准

| Computing-Aware Traffic Steering (cats) |               |                                  |         |
|---|---------------|----------------------------------|---------|
| About                                   | Documents     | Meetings                         | History |
| WG                                      | Name          | Computing-Aware Traffic Steering |         |
|   | Acronym       | cats                             |         |
|   | Area          | Routing Area (rtg)               |         |
|   | State         | Active                           |         |
| Personnel                               | Chairs        | Adrian Farrel, Peng Liu          |         |
|   | Area Director | Jim Guichard                     |         |
|   | Secretary     | Cheng Li                         |         |

当前，许多服务会创建多个服务实例，这些实例通常在地理上分布在多个站点。CATS工作组主要考虑网络边缘节点如何引导服务的客户端和提供服务的站点之间的流量的问题。——CATS WG Charter

## 范围

- 基础工作：问题声明、场景、需求、技术分析等
- 总体架构：定义、组网、功能模块等
- 其他基础工作：计算指标的分析、控制面和数据面的定义、基于现有协议的实现、潜在新协议需求的分析

## 里程碑/计划

- 2023年7月，采纳问题声明、场景、需求、技术分析等基础文稿
- 2024年7月，采纳架构文稿
- 2025年11月，提交架构文稿至RFC发布序列



CATS目前已经有20篇文稿，即将在IETF117召开第二次会议，聚焦在架构、需求、计算指标定义等

## CATS 架构核心组件

### Ingress CATS-Router：

- CATS Traffic Classifier(C-TC): 区分是否是CATS流量，决定服务节点
- CATS Path Selector (C-PS)：选择网络转发路径

### Egress CATS-Router：

- CATS Network Metric Agent(C-NMA): 收集和分发网络指标
- CATS Service Metric Agent(C-SMA): 收集和分发服务和计算指标

### CATS-control center：

- CATS Computing information Base(C-CIB)：维护细粒度的计算信息
- CATS Network Metric information Base(C-NIB): 维护细粒度的网络信息
- CATS Path Calculation Unit(C-PCE): 计算最合适的网络路径和选择服务节点
- CATS-SBI interface: CATS-control center与CATS-Router的接口

<https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ldbc-cats-framework/>  
<https://datatracker.ietf.org/doc/draft-yao-cats-awareness-architecture/>

## CATS WG目前的个人文稿

**场景：** draft-yao-cats-ps-usecases-00，即将立项  
draft-an-cats-usecase-ai-00，CATS+AI大模型场景

**需求：** draft-yao-cats-ps-usecases-00，  
draft-yuan-cats-end-to-end-problem-requirement-00  
draft-huang-cats-ps-and-requirements-of-l2-cats-01

**架构：** draft-ldbc-cats-framework-01  
draft-yao-cats-awareness-architecture-00

**计算Metric:** draft-du-cats-computing-modeling-description-00  
draft-dunbar-cats-edge-service-metrics-00

### 其他：

- draft-ddcb-cats-sfc-bgp-applicability-00 (sfc-bgp方案)
- draft-jaehwoon-cats-mobility-00 (cats支持移动性方案)
- draft-wang-cats-green-challenges-00 (cats绿色低碳考虑)
- draft-shi-cats-ipv6-based-con-00 (cats与IPv6的应用)

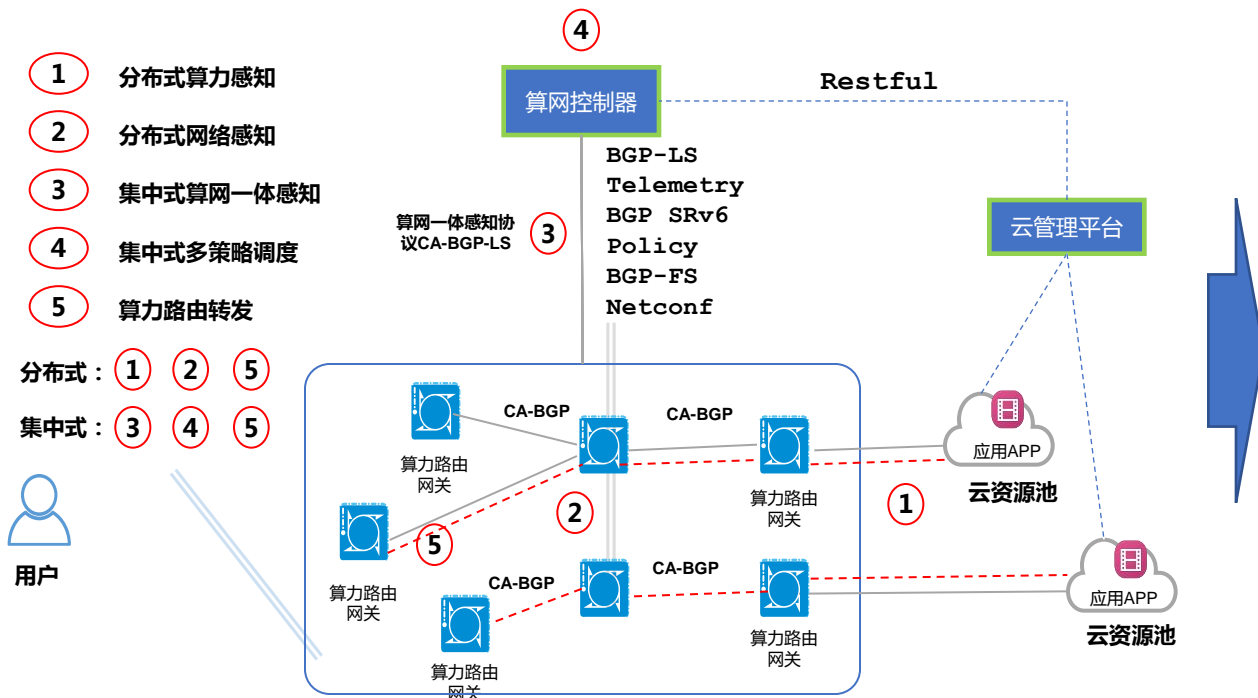


<https://datatracker.ietf.org/wg/cats/document/>

# 1、算力路由：实践进展

算力路由系统的实现根据网络部署情况，支持集中式、分布式、混合式等多种组网方案。从集中式方案开始，分阶段逐步推进算力路由实验验证

## 总体测试方案



## 阶段I集中式方案

- 完成算网控制器和算力路由网关原型样机开发，构建业内首个集中式算力路由验证系统
- 推进广东珠海现网试点验证，验证业务承载量提升30%以上，算网综合资源利用率提升32%以上



算网控制器



算力路由网关

## 阶段II 端到端算力路由系统验证

- 开展规模性部署的CATS技术方案验证
- 开展CA-BGP等新型协议的验证测试
- 分布式算力路由样机已进入平台测试阶段



分布式算力路由样机



《算网一体技术体系关键技术创新案例》荣获CCSA TC6102022年度“最佳实践案例”



《算力感知和算力路由构建算网一体化调度》荣获工信部2022年ICT优秀案例“卓越科技创新奖”



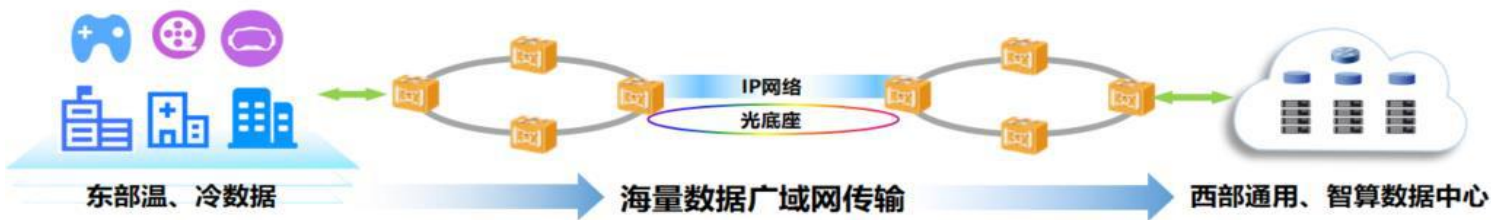
《算力感知和路由方案》通信世界全媒体“2023年度算力应用案例十大标杆”

## 2、广域吞吐敏感网络：数据异地迁移的需求越来越多

海量数据跨广域网传输的场景越来越多，数据异地上云、云迁移等场景的数据规模越来越大

### 东数西算需求

- 东数西存
- 东数西训
- 东数西渲
- ...



2025年中国数据量将达到48.6ZB，其中适合东数西算的温、冷数据占比95%

### 数据上云需求

- 自动驾驶
- 影视制作
- 科学计算

自动驾驶训练数据上云

单车日产数据几TB至十几TB，完成L3训练预计产生8EB数据，L4训练预计产生20EB数据

综艺原始素材上云

综艺原始素材总量一年达500PB，10TB~100TB量级/日/节目

基因测序数据上云

国内某基因企业基因测序数据年数据100PB，TB~100TB量级/次

FAST观测数据上云

FAST每年200+以上观测项目，产生数据15PB左右，TB~PB量级/次

### 云迁移需求

- 云迁移
- 多云灾备
- 多云协同计算
- ...

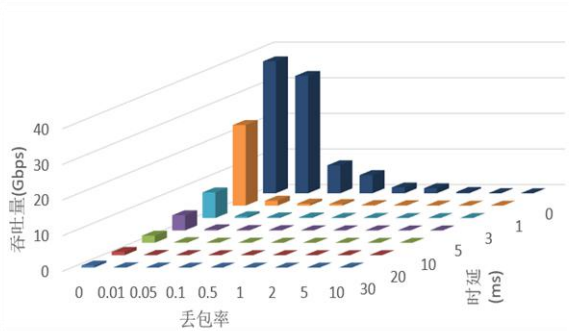
为保证数据的安全存储以及有效管理，云灾备市场规模不断扩大，2019年达到了32亿元，2023年达到了51亿元，年复合增长率约为12.4%

## 2、广域吞吐敏感网络：以“两高两低”为目标

实现高吞吐、高可靠、低时延、低算力损耗“两高两低”特性的算网高性能互联网络

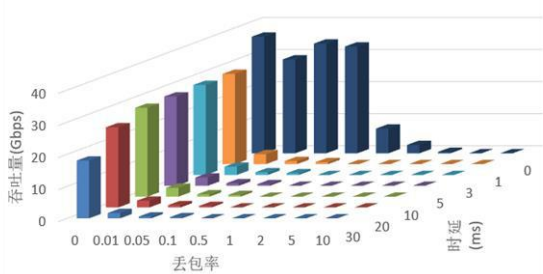
### 广域网TCP传输吞吐受限

时延由1ms增加到10ms时，吞吐下降10倍



### 原生RDMA丢包敏感，难以直接用于广域网

丢包率达到0.5%，有效吞吐接近为0



### 广域吞吐敏感网络

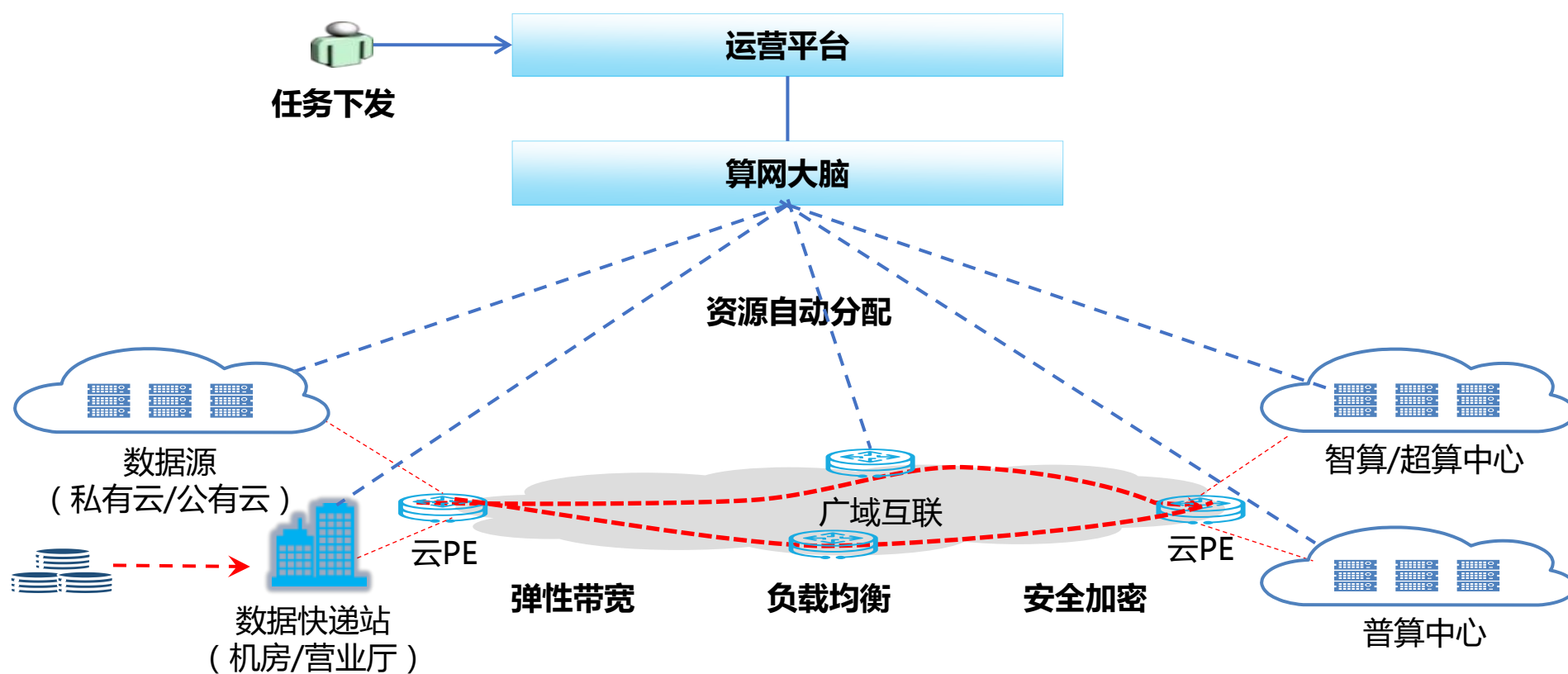
#### 4个关键技术，实现长距高吞吐传输

- ① 新型拥塞控制算法，提升吞吐，降低丢包
- ② 丢包快速恢复算法，减少重传，降低时延
- ③ 丢包精确重传机制，实现RDMA有损部署
- ④ 数据安全加密协议，实现数据高安全传输

- ① 人工硬盘快递：操作复杂、流程繁琐、占用人工多，且快递过程中存在硬盘损坏、丢失等风险
- ② 在线网络传输：“低带宽等不起，高带宽用不起”，公网传输速率太慢，专网按月付费模式性价比低

## 2、广域吞吐敏感网络技术：组网架构

实现海量数据长距传输即送即达，满足数据高效低成本搬运和安全迁移的需求



**多**

数据量大  
TB~PB/次

**快**

专线传输  
小时达

**好**

数据可靠  
安全加密

**省**

综合成本低  
一站式服务

**差异化  
服务**

**小时达**

超高带宽实时传输  
数十TB/小时

**当日达**

聚合空闲带宽实时传输  
数百G~数TB/小时

**次日达**

夜间空闲带宽错峰传输  
数十TB/小时

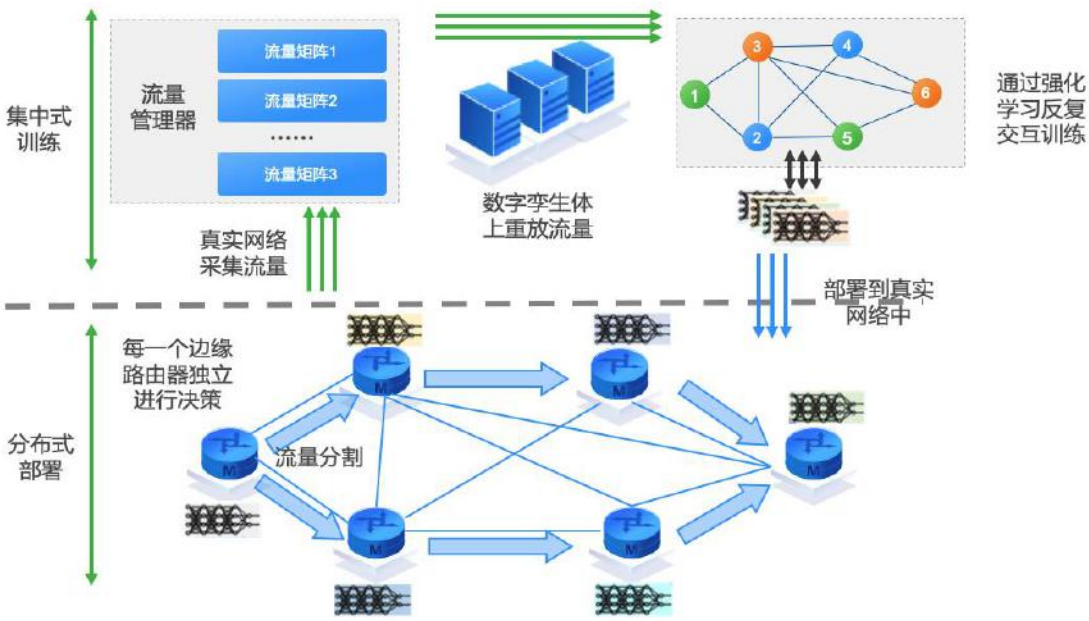


### 3、数字孪生网络：典型应用场景

数字孪生网络（DTN）通过网络本体与虚拟孪生体间的**实时交互映射**，助力实现网络的**全生命周期管理**以及创新优化策略的**低风险、高效率部署**，是面向算网一体的关键技术之一

#### 分布式流量工程

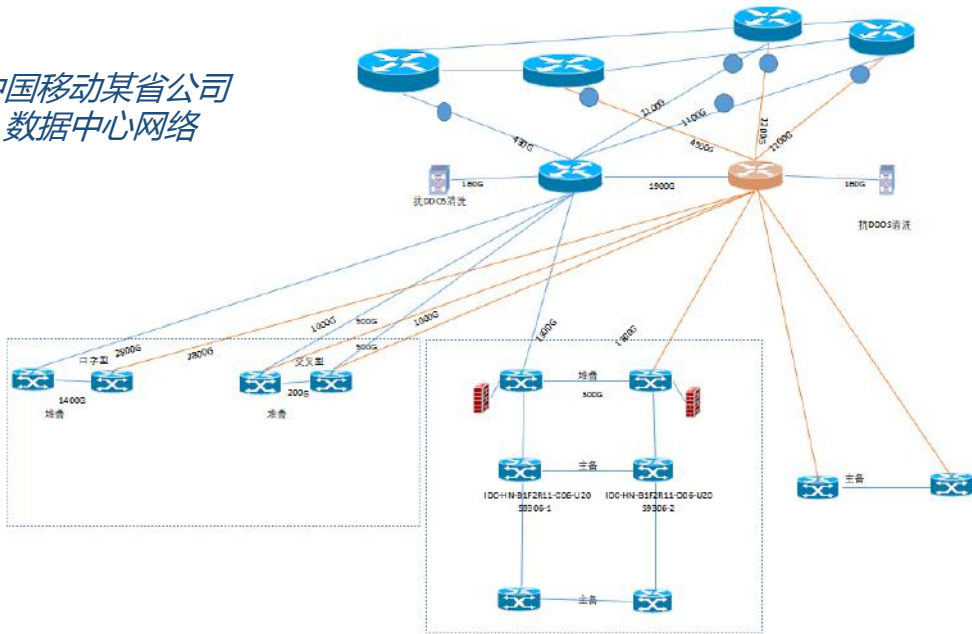
- 数字孪生网络**感知真实网络流量状态**
- 为模型训练提供充分空间，可提升路由决策的有效性
- 策略下发前的孪生预验证，可降低对物理网络的影响



#### 数据中心网络运维

- 网络的高保真呈现、状态的实时监控
- 网络流量均衡调度，异常流量识别和处理等场景
- 网络配置预验证，网络策略的双闭环验证

中国移动某省公司  
数据中心网络

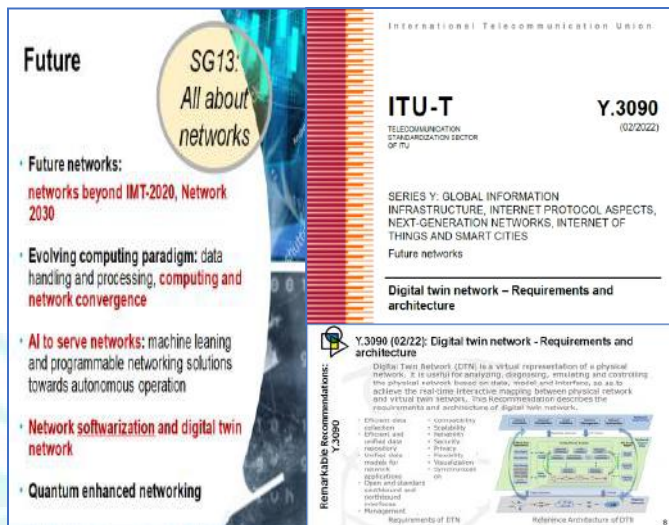


# 3、数字孪生网络：国际标准

## 牵头构建数字孪生网络国际化标准体系，在国际标准化组织ITU-T、IETF中同步推进多个标准项目

### ITU-T：需求、架构、能力评估等

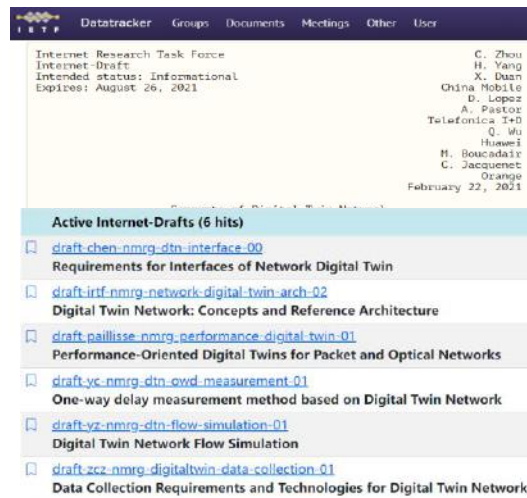
- 中国移动2019在ITU-T SG13完成DTN首个标准立项
- 2022年3月，发布全球首个DTN标准Y.3090：DTN需求和架构，被评为四个优秀标准之一
- DTN方向成为SG13重点研究方向之一
- 基于Y.3090，正在同步推进3个标准项目：DTN能力分级及评估方法，DTN数据域技术要求，DTN管理和编排



|   |   |
|---|---|
| INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION<br>TELECOMMUNICATION STANDARDIZATION SECTOR<br>STUDY GROUP 13<br>Original: English            |   |
| Question(s): 22/13  | Geneva, 13-24 March 2023                                    |
| Source: ITU   | TD  |
| Title: Draft new Recommendation ITU-T Y DTN-CapLevel "Digital Twin Network - Capability Level and Evaluation Methods"               |   |
| Contact: Cheng Zhou<br>China Mobile<br>E-mail: zhoucheng@chinamobile.com  | Tel: +86 1381015248<br>E-mail: zhoucheng@chinamobile.com    |
| Contact: Yuanxi Tu<br>China Mobile<br>E-mail: tyuanxi@chinamobile.com   | Tel: +86 15011564042<br>E-mail: tyuanxi@chinamobile.com     |
| Contact: Lu Lu<br>China Mobile<br>E-mail: lulu@chinamobile.com  | Tel: +86 13010556279<br>E-mail: lulu@chinamobile.com        |
| Contact: Jingsong Cao<br>MIIT<br>E-mail: caojingsong@caict.ac.cn  | Tel: +86 010 62300051<br>E-mail: caojingsong@caict.ac.cn    |
| Contact: Chang Li<br>China Unicom<br>E-mail: lichang@chinaunicom.cn   | Tel: +86 18981102572<br>E-mail: lichang@chinaunicom.cn      |
| Contact: Du Wang<br>Asia Info<br>E-mail: wangdu3@asiainfo.com   | Tel: +86 10 82166888<br>E-mail: wangdu3@asiainfo.com        |
| Contact: Shaoxin Wang<br>China Telecom<br>E-mail: wangshaoxin@chinatelecom.cn   | Tel: +86 18909539968<br>E-mail: wangshaoxin@chinatelecom.cn |
| Contact: Jie Zhang<br>MIIT<br>E-mail: zhangjie@caict.ac.cn  | Tel: +86 10 622090251<br>E-mail: zhangjie@caict.ac.cn       |
| Contact: Shaoxin Wang<br>China Telecom<br>E-mail: wangshaoxin@chinatelecom.cn   | Tel: +86 18909539968<br>E-mail: wangshaoxin@chinatelecom.cn |
| Keywords: IMT-2020, Digital twin network, Management and Orchestration  |   |
| Abstract: This is the latest version of the draft Recommendation ITU-T Y DTN-CapLevel output of the SG13 meeting, 13-24 March 2023. |   |

### IETF：架构及关键技术

- 2020年，在IETF牵头开启DTN标准化研究
- 2022年3月在NMRG组完成《DTN概念及架构》立项，得到多家单位支持，DTN概念、架构、应用场景和价值已形成共识，预期2023年底推进发布Informational RFC
- DTN已成为NMRG当前三大研究方向之一
- 目前5个项目在研，多厂家（华为、法电、Telefonica，NICT）共同推进：数据采集，DTN接口，性能评估，基于DTN的流量模拟，基于DTN的时延测量





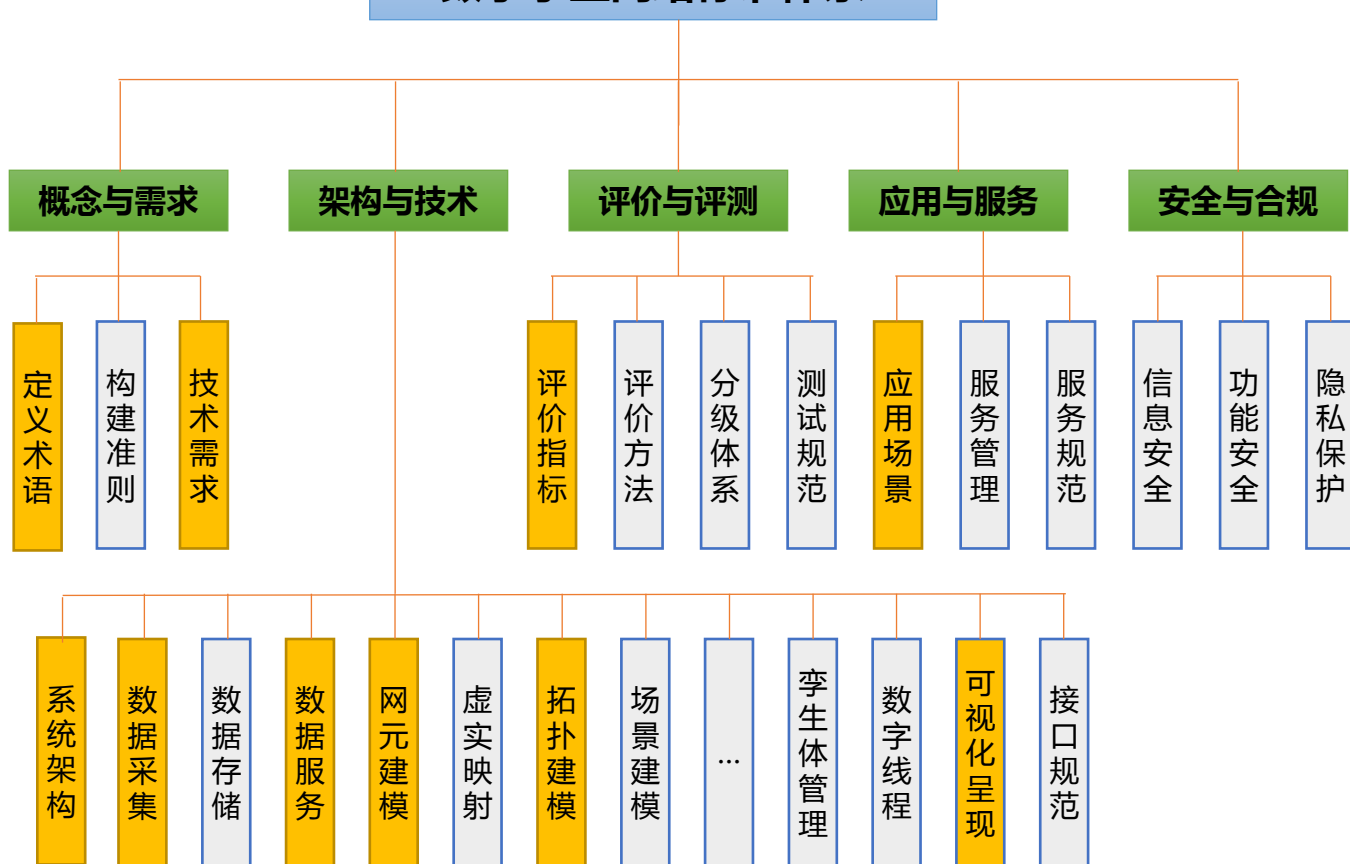
### 3、数字孪生网络：国内标准

面向信息通信网络的业务和管理需求，CCSA TC3 成立“数字孪生网络”工作子组，已凝聚国内DTN研究核心力量，推进DTN标准体系构建

#### 工作子组研究进展

- 2021年10月，中国移动牵头成立“数字孪生网络”子工作组；中国移动，中国电信，中国联通，华为，中兴，信通院、中信科等多家单位参与
- 已召开5次子组会议：60+专家参会
- 11个项目同步推进：中国移动牵头4项（总体技术要求，数据服务，网络建模和数字地图），参与5项。其中总体技术要求、评估方法2个项目待报批，数据服务、网络建模、数字地图、DTN路由控制等9个项目在研

#### 数字孪生网络标准体系



### 3、数字孪生网络：数据生成和优化关键技术（1/3）

**AI模型**可助力构建实时性高、轻量级、高精度的DTN，但面临**数据挑战**

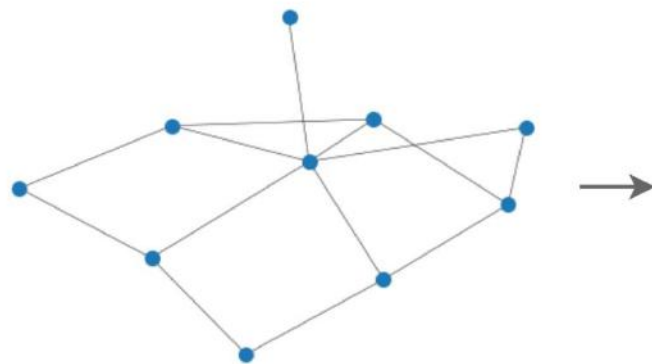
#### DTN AI建模的数据挑战

- **真实数据缺失**：生产网络数据具有较高价值，但较难获取，且数量、类型和精度有限
- **多源数据**：网络数据来源多样，质量不一，难以直接用于DTN AI模型

#### 问题抽象

- **问题设置**：基于某DTN AI模型（如RouteNet-Fermi模型），基于小规模网络生成高质量训练数据，能够扩展到大规模网络
- **评价指标**：路径平均时延的预测平均绝对百分误差

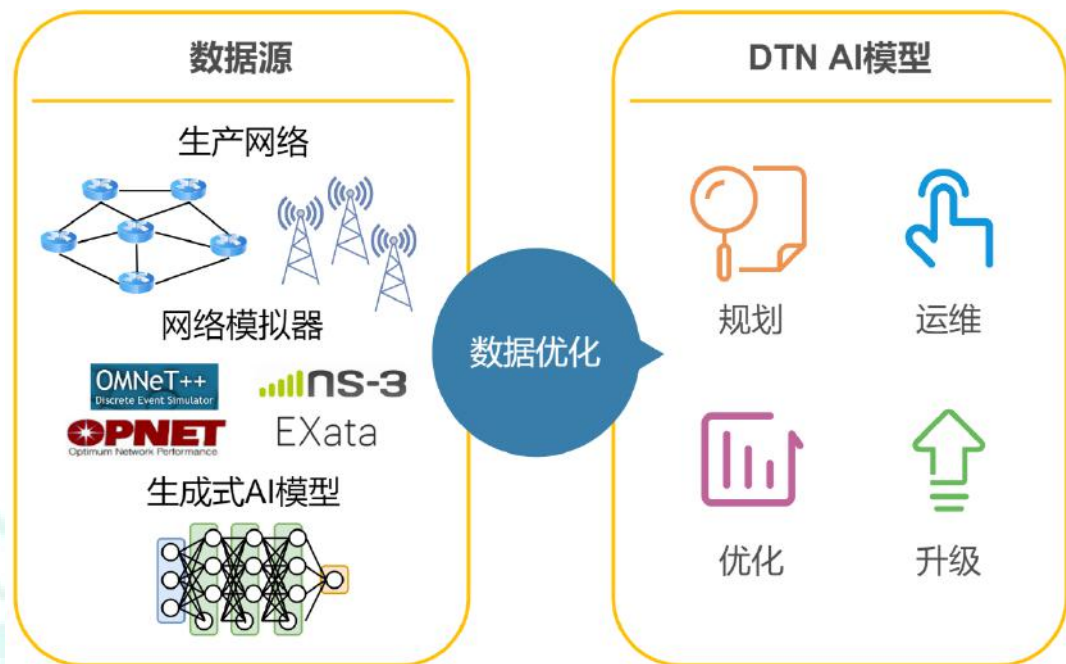
$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right|$$



训练数据  
(最多包含10个结点的小规模网络)



验证数据&测试数据  
(包含50~300个结点的大规模网络)



### 3、数字孪生网络：数据生成和优化关键技术（2/3）

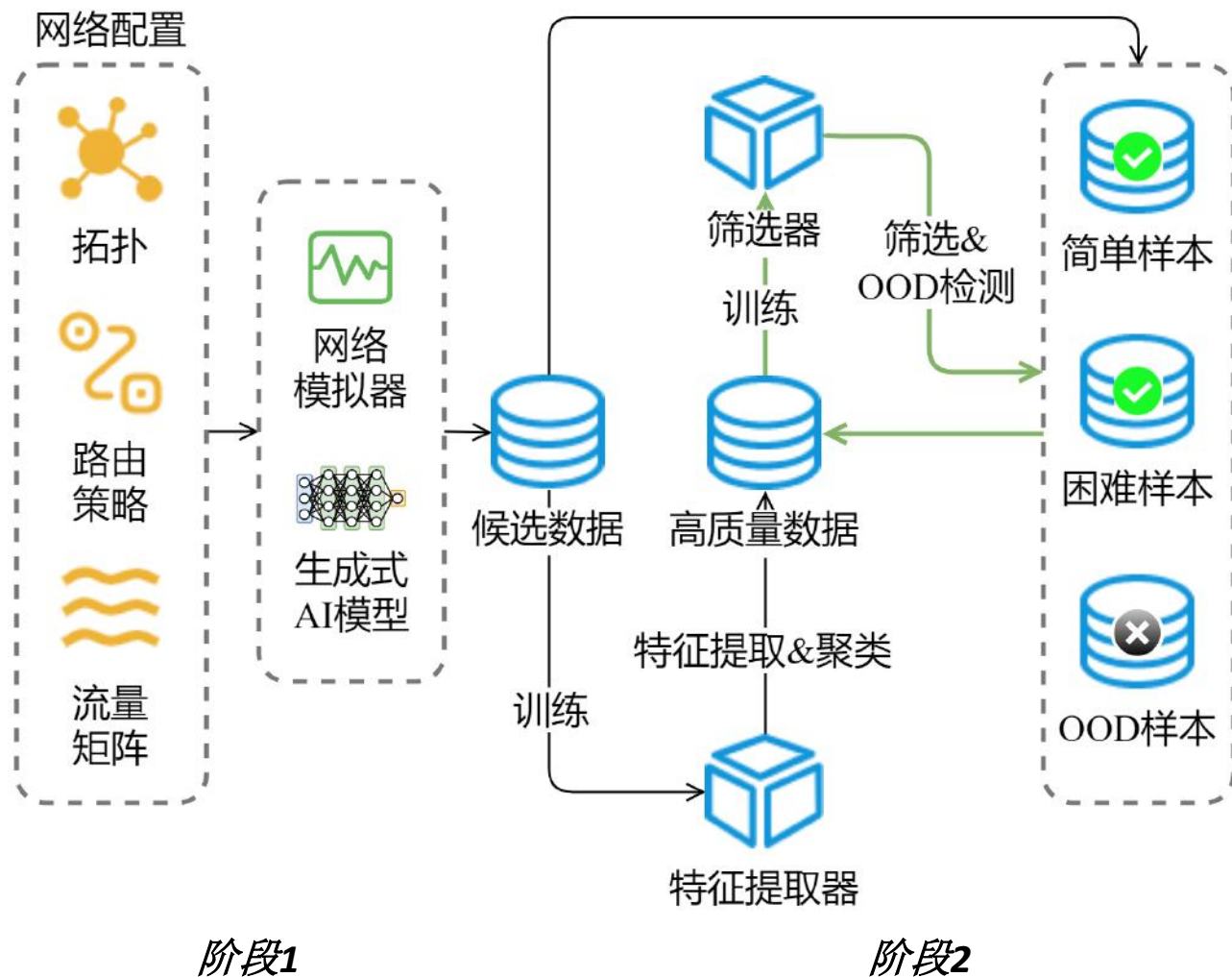
面向DTN AI模型构建，提出AutoOPT方案，通过数据生成和优化，得到高质量数据

#### 数据生成（阶段1）

- 基于历史流量数据及多样化配置，生成模拟数据
  - 生成网络配置**：尽可能覆盖更多场景，包含拓扑（PLOD算法）、路由策略（最短路径及其变种）和流量矩阵（多样化流量密度）
  - 生成候选数据**：利用模拟器（OMNeT++，NS-3等）或AIGC技术（GPT，LLaMA等）生成模拟数据

#### 数据优化（阶段2）

- 从多源数据中自动筛选出高精度、多样化、且贴合真实数据实际情形的高质量数据
  - 种子样本选择**：训练特征提取器&特征提取（链路状态/队列状态/流状态）->聚类->选择类中心&最近邻->领域知识验证
  - 增量优化**：筛选器对剩余候选数据进行筛选（简单样本选择->困难样本挖掘->分布外(OOD)检测->领域知识验证），得到高质量数据



### 3、数字孪生网络：数据生成和优化关键技术（3/3）

实验结果表明通过**AutoOPT**可得到高质量数据，能够**提升DTN AI模型精度和泛化能力**

#### 效果测试

- 可扩展性（表1）
- 数据优化的有效性（表2）

TABLE I: Generalization to large networks.

| Topology Size | Validation MAPE | Test MAPE |
|---------------|-----------------|-----------|
| ALL           | 6.63%           | 8.55%     |
| 50 nodes      | 5.38%           | 5.80%     |
| 75 nodes      | 5.44%           | 5.24%     |
| 100 nodes     | 5.27%           | 5.32%     |
| 130 nodes     | 6.62%           | 7.34%     |
| 170 nodes     | 6.83%           | 8.21%     |
| 200 nodes     | 6.31%           | 8.35%     |
| 240 nodes     | 7.64%           | 8.15%     |
| 260 nodes     | 7.56%           | 8.76%     |
| 280 nodes     | 7.66%           | 9.33%     |
| 300 nodes     | 7.75%           | 9.03%     |

TABLE II: Performance of data optimization.

| Iteration | Training Samples  | Validation MAPE | Test MAPE |
|-----------|-------------------|-----------------|-----------|
| 1         | 20 (seed samples) | 10.96%          | 12.38%    |
| 2         | 38                | 9.46%           | 11.34%    |
| 3         | 57                | 8.43%           | 10.76%    |
| 4         | 79                | 7.13%           | 9.43%     |
| 5         | 100               | 6.63%           | 8.55%     |

#### 与已有方法相比结果接近，但开销更低

- 已有方法
  - 细粒度验证集分析（例如，Snowyowl）
  - 大规模候选数据（例如，GhostDucks生成270,000个候选样本）
- AutoOPT
  - 粗粒度验证集分析
  - 较小规模候选数据（阶段1生成约500个候选样本）

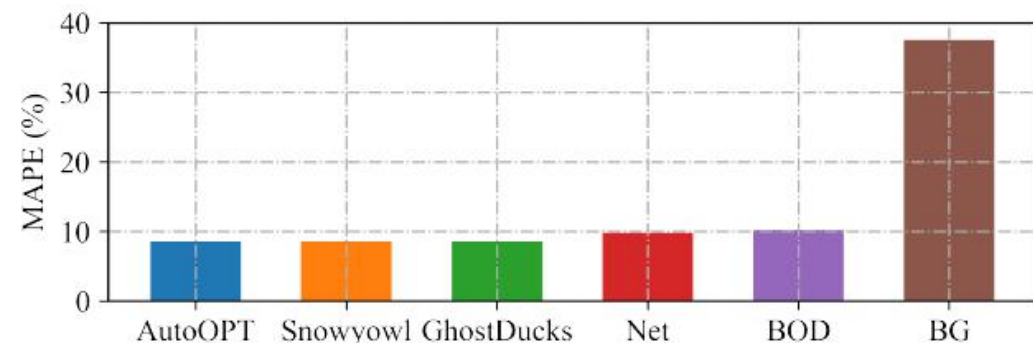
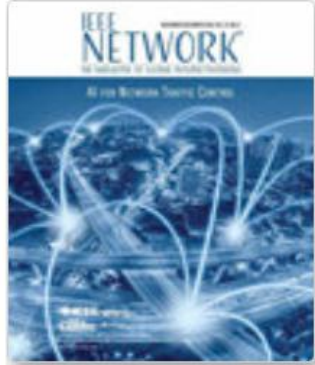


Fig. 6: MAPE of AutoOPT and baseline methods.



# 4、数字孪生网络：学术期刊/专刊征稿

## 《IEEE NETWORK》 数字孪生网络专刊



所属分类：首页 > SCI期刊 > 工程技术

期刊名：IEEE NETWORK

期刊名缩写：IEEE NETWORK

期刊ISSN：0890-8044

E-ISSN：1558-156X

2022年影响因子/JCR分区：10.294/Q1

学科与分区：COMPUTER SCIENCE, HARDWARE & ARCHITECTURE - SCIE(Q1);  
COMPUTER SCIENCE, INFORMATION SYSTEMS - SCIE(Q1); ENGINEERING,  
ELECTRICAL & ELECTRONIC - SCIE(Q1); TELECOMMUNICATIONS - SCIE(Q1)

Home / Publications / Magazines / IEEE Network / Call for Papers / Network Digital Twin



## Network Digital Twin

Guest Editors

Yong Cui

Tsinghua University, China

Jiangchuan Liu

Simon Fraser University, Canada

Minlan Yu

Harvard University, USA

Junchen Jiang

The University of Chicago, USA

Liang Zhang

Huawei AI4Net Lab, China

Lu Lu

China Mobile Research Institute, China

### Important Dates

Manuscript Submission Deadline: 15 July 2023

Initial Decision Notification: 15 September 2023

Revised Manuscript Due: 15 October 2023

Final Decision Notification: 1 November 2023

Final Manuscript Due: 20 November 2023

Publication Date: January/February 2024

<https://www.comsoc.org/publications/magazines/ieee-network/cfp/network-digital-twin>

截稿日期：2023年7月15日，欢迎踊跃投稿！



## IEEE DTPI Session: Digital Twin Network

Session Chairs

截稿日期：2023年7月15日

Dr. Tao Sun Dr. Diego R. Lopez

Submission Link:

China Mobile

Telefonica

<https://2023.dtpi.org/submission/online-submission>



《Digital Twin》国际期刊  
DT网络通信领域，长期欢迎投稿！



### 14大领域

- DT智能制造
- DT航空航天
- DT智慧城市
- DT工业工程
- DT机器人
- DT工程管理
- DT医疗健康
- DT交通运输
- DT能源电力
- DT农业养殖
- DT智能矿山
- DT生态环境
- DT标准规范
- DT网络通信

### Digital Twin (ISSN: 2752-5783)

Digital Twin为全球首个专注数字孪生领域的国际期刊，主要发表与数字孪生研究有关的高质量原创科研论文、综述、案例、软件工具、数据注释、简报及评论等。Digital Twin 采取开放获取形式发表研究成果，论文投稿达到期刊要求之后，将在14个工作日内完成首轮评审，评审通过后即分配DOI号上线发表。之后期刊提供公开透明的同行评审流程。

Taylor & Francis Group  
an informa business  
<https://digitaltwin1.org/>

**1 算网一体提出的背景**

**2 算网一体新技术探索**

**3 总结与展望**

- “算网一体、智能内生” 将是未来网络领域后续几年最大的发展趋势
- 算网一体是我国主导提出的原创技术体系，目前在算力路由、网络数字孪生、在网计算等关键技术方向取得了积极成果
- “联合感知”、“混合控制”、“极致互联”是算网一体的特征
- 相关技术将继续在未来几年吸引大家的关注，存在很大的创新空间
- 算网一体将对6G网络架构的设计起到重要影响