



工业互联网产业联盟  
Alliance of Industrial Internet

# 广义确定性网络 ——需求描述与资源抽象蓝皮书

工业互联网产业联盟（AII）  
2026年6月





工业互联网产业联盟  
Alliance of Industrial Internet

# 广义确定性网络 ——需求描述与资源抽象蓝皮书 (2026 年)

工业互联网产业联盟 (AII)

2026 年 6 月

## 声 明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议，不构成法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归工业互联网产业联盟所有（注明是引自其他方的内容除外），并受法律保护。如需转载，需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

工业互联网产业联盟

联系电话：010-62305887

邮箱：aia@caict.ac.cn

# 前 言

当前，全球正经历一场由数字化、智能化引领的深刻产业变革。工业互联网、智能制造、智能交通等国家战略的加速推进，对信息网络的基础承载能力提出了日益增长的高阶要求——不仅需要海量连接，还需要具备确定性性能保障的可靠传输。在某些严苛场景下，传统网络“尽力而为”的服务模式难以满足工业生产中远程控制、精准同步等关键业务对时延、抖动、可靠性的需求，网络能力的确定性演进成为重要方向。

在此背景下，广义确定性网络作为一种新兴技术方向应运而生。它既是传统确定性网络技术要素维度和覆盖范围上的重要拓展，也是面向未来工业数字化核心场景的一次积极探索。通过将确定性保障从单一的传输领域延伸至计算、存储、能量等多维资源，进而构建了端到端的协同保障体系。

本蓝皮书旨在系统性地阐述广义确定性网络的核心理念、技术架构与实施路径。首先剖析其产生的深刻背景与战略意义，探讨其内涵定义与范式特征；进而提出一套完整的需求描述与资源抽象模型，并详细介绍基于智能调度的核心适配方法；同时，提出度量评估体系，并对未来发展路径进行展望。我们期望通过这份蓝皮书，为产业界、学术界提供清晰的技术发展参考，为制造强国、网络强国战略的实施注入新动能。

**组织单位：**工业互联网产业联盟

**编写单位（排名不分先后）：**北京交通大学、中国信息通信研究院等

**编写组成员（排名不分先后）：**张维庭、田伟康、杨冬、王洪超、张恒升、付韬等

# 目 录

第一章 发展背景与战略意义 .....	1
第二章 核心内涵与范式革新 .....	3
2.1 广义确定性的基本概念与定义 .....	3
2.2 从单维传输到多元协同的范式演进 .....	3
2.3 三大核心特征：要素扩展、范围延伸与业务融合 .....	4
2.4 与传统确定性网络的对比 .....	5
2.5 与现有确定性网络技术的协同演进 .....	6
第三章 关键模型：需求刻画与资源抽象 .....	8
3.1 面向差异化服务的需求描述体系 .....	8
3.2 支撑异构融合的资源抽象方法 .....	9
3.3 需求与资源的统一标识与映射机制 .....	11
第四章 协同适配与智能调度方法 .....	13
4.1 广义确定性资源调度面临的核心挑战 .....	13
4.2 智能调度方法的设计理念与参考实现 .....	14
4.3 参考实现示例的算法工作机制 .....	15
4.4 参考实现的性能特征 .....	16
4.5 与国内外标准化组织相关研究的协同 .....	17
第五章 体系化度量与综合评估 .....	19
5.1 核心性能指标体系 .....	19
5.2 网络效能与服务质量评估方法 .....	21
第六章 产业推进与场景深化 .....	23
6.1 典型场景分析 .....	23
6.2 产业生态与标准化推进 .....	24
第七章 广义确定性网络发展展望 .....	26

## 第一章 发展背景与战略意义

随着智能制造、智能交通等国家重大战略的深入实施，行业数字化转型对信息网络的承载能力提出了更高要求。传统网络以“尽力而为”为基本服务模式，难以满足工业控制、远程操作、自动驾驶等新兴应用对通信质量的高度确定性需求。在此背景下，确定性网络成为信息通信技术演进的重要方向。

当前，以时间敏感网络（Time-Sensitive Networking, TSN）、确定性网络（Deterministic Networking, DetNet）为代表的现有确定性技术，主要聚焦于网络传输要素（如带宽、时隙等）的保障，通过资源预留与调度机制，实现对数据流传输时延、抖动、丢包率等性能指标的严格控制。然而，随着行业应用向算网融合、绿色通信、多业务融合等复杂场景拓展，仅依赖传输要素的确定性保障，在某些复杂场景下，已不足以支撑多样化业务的端到端服务质量需求。

例如，在智能制造场景中，计算任务不仅要求数据传输的实时性，还需保障计算资源的确定性与协同性；在能源受限的物联网环境中，节点能量的动态分配直接影响网络的可靠运行。这些新兴需求在一定程度上暴露出传统确定性网络在要素覆盖范围、网络异构性、业务多样性等方面的局限性。

为应对上述挑战，有必要构建一种面向多要素、跨异构网络、支持混合业务流的广义确定性网络体系。广义确定性

网络不仅涵盖传输要素，还扩展至计算、存储、能量等非传输要素，实现从“网络视角”到“应用视角”的转变，提供全局协同的端到端确定性服务能力。

发展广义确定性网络，对于推动工业互联网、智能交通、能源互联网等国家关键基础设施的数字化、智能化升级具有重要战略意义。它不仅是实现“数字中国”战略的重要支撑技术，也是未来网络由“连通为中心”向“服务为中心”演进的重要路径之一。



**工业互联网产业联盟**  
Alliance of Industrial Internet

## 第二章 核心内涵与范式革新

为系统化地构建广义确定性网络的理论与技术体系，首先必须清晰地界定其核心内涵、基本定义与研究范畴。本章旨在从理念、要素、范围和应用四个维度，对“广义确定性”进行深入的阐释与定义。

### 2.1 广义确定性的基本概念与定义

传统确定性网络（如 TSN、DetNet）的核心理念是在单一网络域内，对数据传输过程中的时延、抖动和丢包率等性能指标提供有界保障。其关注焦点集中于网络传输要素，通过精细化的资源调度（如时隙、带宽预留）来消除网络本身的不确定性。

广义确定性网络在此基础上进一步拓展了理念边界，其核心在于面向多样化应用的最终体验，对影响该体验的多个维度的要素进行统一的、全局的协同保障。这源于一个基本认识：应用的最终确定性（如一个智能计算任务的完成时间、一个控制指令的闭环稳定性）不仅取决于网络传输，还可能受到计算、存储、能量等多重因素的共同影响。因此，其核心理念是从保障“管道确定性”向保障“服务确定性”扩展，实现从“单要素传输”到“多要素协同”的跨越。

### 2.2 从单维传输到多元协同的范式演进

基于上述核心理念，本蓝皮书对广义确定性网络给出如下定义：

广义确定性网络是一种能够对上层应用提供跨异构网络、融合传输、计算、存储、能量等多维资源的可量化、可保障、可承诺的端到端服务质量的网络体系。

该定义包含以下关键属性：

可量化：服务的确定性需求（如端到端时延、任务计算截止时间、能耗上限）和网络的确性能力（如链路带宽、时隙容量、CPU 算力）均能被精确地度量和描述。

可保障：网络体系具备相应的机制，能够通过资源抽象、协同调度与动态适配，确保在给定的约束条件下，满足应用提出的确定性需求。

可承诺：在应用接入前，网络能够依据其全局资源状态与调度策略，对是否能够满足应用的确定性需求做出可靠的承诺。

### 2.3 三大核心特征：要素扩展、范围延伸与业务融合

与传统确定性网络相比，广义确定性网络在研究范畴上呈现了三大扩展，构成了其“广义”特性的具体体现：

#### 1) 确定性要素的扩展

传统范畴：仅关注网络传输要素，如时延、带宽、时隙、队列等。

广义范畴：涵盖传输、计算、存储、能量等多类确定性要素。例如，在算网融合场景中，需同时保障数据的传输时延和任务的计算时长；在绿色通信场景中，需考虑节点能量

的确定性以维持网络长期稳定运行。

## 2) 网络范围的扩展

传统范畴：通常局限于单一、同构的网络技术域（如一个 TSN 域或一个 DetNet 域）。

广义范畴：面向端到端的异构融合网络。应用数据流可能跨越 5G、TSN、WiFi-6、卫星网络等多种异构网络，广义确定性网络要求在这些异构网络之上提供全局的、统一的确定性保障视角。

## 3) 应用构成的扩展

传统范畴：主要针对周期性、流量特征明确的时间敏感流（如传感器数据）。

广义范畴：支持周期流、事件触发流、实时流、控制流、音视频流等混合数据流的融合共传。能够处理不同类型、不同语义逻辑关联的数据流之间复杂且差异化的确定性需求。

## 2.4 与传统确定性网络的对比

为更清晰地展现广义确定性网络的特点，下表将其与传统确定性网络进行对比：

对比维度	传统确定性网络 (如 TSN/DetNet)	广义确定性网络
核心目标	保障数据传输的确定性	保障应用服务的确定性
保障要素	主要为传输要素（时延、抖动、丢包）	传输、计算、存储、能量等多维要素

网络范围	单一、同构的技术域	跨异构网络的端到端路径
应用对象	周期性时间敏感流	混合类型、具有语义关联的数据流集合
适配方式	基于传统静态配置或局部调度	基于全局感知与智能调度的动态协同适配

广义确定性网络是对现有确定性网络技术范畴和能力的一次拓展。它通过构建一个能够统一标识、抽象、调度和保障多维度资源的网络体系，旨在满足未来智能制造、智能交通等关键行业对复杂、异构、高可靠通信的重要需求，为数字经济的发展提供网络基础设施支撑。

## 2.5 与现有确定性网络技术的协同演进

广义确定性网络并非对 TSN、DetNet 等现有技术的替代，而是对其能力边界的拓展与上层协同的增强。二者之间呈现“兼容共存、协同演进”的关系。

### 1) 兼容关系

**TSN 作为边缘接入：**在工厂内网场景中，TSN 仍承担生产线末端的时间敏感传输保障。广义确定性网络通过统一资源抽象层，将 TSN 域的时隙、门控等能力封装为标准化的网络组件描述（Network Behavior Description, NBD）。

**DetNet 作为骨干承载：**在跨域场景中，DetNet 提供 IP/多协议标签交换（Multi-Protocol Label Switching, MPLS）网络的确定性传输保障。广义确定性网络将其视为异构网络层

的一个子域，通过组件标识（Network Identifier, NID）/连接标识（Connection Identifier, CID）映射实现端到端路径拼接。

## 2) 混合部署模式

模式	适用场景	协同方式
模式一: TSN 接入 + 5G 承载	柔性制造产线	TSN 域处理毫秒级实时闭环, 5G 作为 TSN 逻辑桥接
模式二: DetNet 骨干+多边缘接入	跨厂区协同控制	DetNet 保障跨域传输确定性, 上层统一调度计算与传输
模式三: 全栈广义调度	自动驾驶车队	异构网络 (5G+DSRC+车载) 统一抽象, 端到端协同

## 3) 演进路径

建议产业界按照以下阶段推进技术融合:

阶段一 (当前-2027): 明确广义确定性网络与 TSN/ DetNet 的接口规范, 实现单域穿透。

阶段二 (2027-2029): 构建跨域实验床, 验证混合部署模式下的端到端确定性保障。

阶段三 (2029 以后): 推动标准化组织间的联合立项, 形成统一的确定性服务描述规范。

### 第三章 关键模型：需求刻画与资源抽象

实现广义确定性网络的重要前提，是解决多样化应用需求与异构化网络资源之间的“语义鸿沟”问题。本章提出一套统一的需求描述与资源抽象模型，通过引入完备的标识空间，对上层的确定性服务需求与底层的确定性网络要素进行标准化、形式化的定义与映射，为实现精准、高效的协同适配提供理论依据与工程基础。

#### 3.1 面向差异化服务的需求描述体系

广义确定性网络的协同适配建立在差异化服务层、异构融合网络层和智慧化适配层的三层架构之上。其中，前两层分别承担了需求描述与资源抽象的重要功能，其总体关系如下图所示：

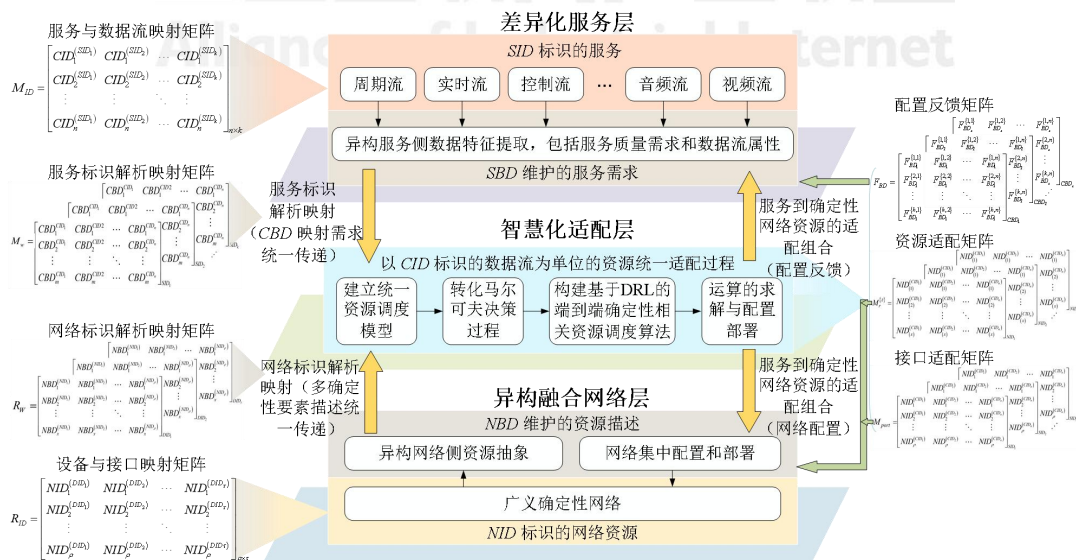


图1 完备标识空间广义确定性网络体系架构

差异化服务层：负责从应用视角出发，对服务的确定性

需求进行统一标识与结构化描述。

异构融合网络层：负责从网络视角出发，对底层异构资源的确定性能力进行统一抽象与形式化表达。

智慧化适配层：作为中间层，负责对上述两类信息进行融合与计算，完成从需求到资源的匹配与调度。

本模型的核心在于定义了服务标识（Service Identifier, SID）、服务描述（Service Behavior Description, SBD）、网络组件标识 NID、网络组件描述 NBD 等关键标识符，并通过解析映射矩阵，实现了从服务到数据流、从网络设备到物理接口的逻辑映射。

### 3.2 支撑异构融合的资源抽象方法

为精确描述应用的确定性需求，本模型在差异化服务层建立了从“服务”到“数据流”的两级描述体系。

#### 1) 服务与数据流标识

服务标识 SID: 标识一个应用下的一个逻辑服务单元(如一个自动驾驶应用下的“刹车服务”)。

连接标识 CID: 标识一个服务下的单条数据流(如该服务下的一条“视频流”或“控制流”)。

服务与数据流映射矩阵  $M_{ID}$ : 定义一个  $n \times k$  的矩阵，其中  $n$  为总数据流数， $k$  为总服务数。矩阵元素  $CID_i^{(SID_j)}$  表示第  $i$  条数据流是否属于第  $j$  个服务，从而清晰地描述了服务与数据流的承载关系。

## 2) 确定性需求描述与量化

服务描述 **SBD**: 维护一个服务的整体确定性需求。

连接描述 **CBD**: 维护单条数据流的确定性需求, 这是保障服务确定性的基础。

服务需求与数据流需求映射矩阵  $M_{BD}$ : 通过矩阵运算, 将服务的总体需求解析并映射到其包含的每一条数据流上, 形成数据流确定性需求的三维矩阵  $M_W$ 。

数据流的确定性需求 **CBD** 被量化为多个可测量的维度, 包括但不限于:

时延 **CBD<sub>1</sub>**: 端到端时延  $delay^{(j)}$  需满足  $delay^{(j)} \leq S_d^{(j)}$ , 其中  $S_d^{(j)}$  为时延上限需求。

抖动 **CBD<sub>2</sub>**: 端到端的时延抖动  $jitter^{(j)}$  需满足  $jitter^{(j)} \leq S_j^{(j)}$ 。

可靠性 **CBD<sub>3</sub>**: 以端到端丢包率  $f_{loss}^{(j)}$  衡量, 需满足  $f_{loss}^{(j)} \leq S_f^{(j)}$ 。

吞吐量 **CBD<sub>4</sub>**: 用户  $u$  的吞吐量  $T_p$  需满足  $S_{low}^{(u)} \leq T_p \leq S_{up}^{(u)}$ 。

负载均衡度 **CBD<sub>5</sub>**: 网元资源占用率的标准差需低于设定阈值  $S_r$ 。

通过此模型, 上层复杂、多样的业务需求被解构为一系列具有精确数学约束的数据流网络特征, 为后续资源调度提供了明确的优化目标。

### 3.3 需求与资源的统一标识与映射机制

为屏蔽底层网络技术的异构性，本模型在异构融合网络层对各类确定性资源进行了统一抽象。

#### 1) 网络资源标识

设备标识 **DID**: 标识一个物理网络设备（如交换机、服务器）。

网络组件标识 **NID**: 标识一个网络设备上的物理接口（如网卡端口）。

设备与接口映射矩阵  $R_{ID}$ : 定义一个  $\rho \times \tau$  的矩阵，描述每个网络设备所拥有的物理网络接口。

#### 2) 多确定性要素能力抽象

网络组件描述 **NBD**: 维护一个网络接口上所能提供的各类确定性资源的能力上限。

网络资源能力映射矩阵  $R_W$ : 通过矩阵运算，将每个网络接口上的多种确定性资源能力抽象出来，形成一个三维矩阵  $R_W$ 。矩阵中的元素  $NBD_i^{(NID_j)}$  表示第  $j$  个网络接口上第  $i$  种确定性资源的能力上限。

网络侧的确定性要素 **NBD** 抽象包括:

网络流量 **NBD<sub>1</sub>**: 基于网络流量守恒定律，描述接口的数据转发能力约束。

时隙容量 **NBD<sub>2</sub>**: 在时分复用网络中，保证在特定时隙内传输的数据量不超过其容量  $Q_{le}$ 。

频率带宽 NBD<sub>3</sub>: 在频分复用网络中, 保证在子载波上传输的数据率不超过最大数据率  $C_k$ 。

功率 NBD<sub>4</sub>: 对无线链路, 发射功率需满足上限约束, 并影响信噪比与能耗。

计算资源 NBD<sub>5</sub>: 以 CPU 周期、处理器频率等衡量, 确保分配的计算量不超过服务器算力。

存储资源 NBD<sub>6</sub>: 确保数据流在服务器上占用的存储空间  $v$  不超过其分配容量  $\eta_v$ 。

需求描述与资源抽象模型通过引入完备的标识空间与矩阵化映射方法, 实现了应用侧差异化确定性需求与网络侧异构化资源能力的统一表征。该模型具有高度的结构性与可扩展性, 能够灵活容纳新的确定性需求维度与资源类型, 为构建具备全局视野的智慧化适配调度机制提供了重要的、标准化信息输入。基于此模型, 网络系统能够“理解”应用的诉求与自身的状态, 从而实现精准、高效的资源协同调度。

## 第四章 协同适配与智能调度方法

在明确了应用侧的确定性需求与网络侧的异构资源能力之后，如何高效、智能地完成两者之间的协同适配，成为实现广义确定性保障的核心挑战。在某些复杂场景下，传统的调度方法在应对多要素、跨异构、混合流共传的复杂场景时，可能存在计算复杂度高、灵活性差、难以寻获全局最优解等问题。以基于深度强化学习的端到端确定性资源调度算法（End-to-end Deterministic Resource Scheduling, E2eDet）为例，可将其作为智慧化适配层的一种实现方案。该算法所依托的广义确定性网络架构与相关技术在 CCSA 行业标准《工业互联网面向应用的确定性 总体要求》中完成标准化，相关成果应用于工业质检场景并入选 2022-2023 年中国物联网大会“物联网十大科技进展”，相关产品已通过工业互联网产业联盟“时间敏感网络产业链名录计划”首批测试认证。

### 4.1 广义确定性资源调度面临的核心挑战

广义确定性网络的资源适配问题在理论上是一个高维、动态、多目标的优化问题，其主要挑战体现在：

**问题复杂度高：**需要同时为多条混合类型的数据流，在跨越多个异构网络的路径上，协同分配传输（时隙、带宽）、计算、存储等多种资源，决策空间较大。

**约束条件较为苛刻：**需要同时满足每条数据流在时延、抖动、可靠性等多维度的确定性需求，以及网络侧各类资源

的能力上限约束。

需求动态变化：网络中的业务流可能会动态增删，网络状态亦实时变化，要求调度算法具备在线快速响应和自适应能力。

优化目标多元：不仅需要最大化可成功调度的数据流数，还需兼顾全网负载均衡、能效等多个可能相互冲突的目标。

## 4.2 智能调度方法的设计理念与参考实现

针对 4.1 节所述的核心挑战，学术界与产业界已提出多种调度策略。本节以端到端智能调度算法 E2eDet 为例，展示一种基于深度强化学习的参考实现方案。该方案的设计理念如下：

端到端统一调度：打破传统方法局限于单一网络域或单一资源类型的桎梏，尝试从全局视角出发，为数据流提供从发端到收端、跨越多个异构网络的统一资源协同分配。

感知-决策-反馈的闭环智能：将资源调度过程建模为一个智能体与环境持续交互的学习过程。智能体感知网络状态与应用需求，做出调度决策，并根据决策执行后的效果（奖励）来不断优化其策略，最终形成自主进化、逐步提升的智能调度能力。

面向数据流粒度的精准适配：以每一条数据流为基本的调度单位，根据其确定性需求，为其匹配所需的端到端资源组合，从而实现差异化的服务质量保障。

需要说明的是，E2eDet 仅为一种可行的技术路径。实际部署中，可根据场景需求选择其他调度算法（如启发式算法、线性规划或其他智能优化方法），本蓝皮书提出的需求描述与资源抽象模型具有良好的算法无关性。该示例算法的具体实现已通过行业测试认证，可供产业界参考借鉴。

### 4.3 参考实现示例的算法工作机制

以 E2eDet 算法为例，其采用深度强化学习框架，工作流程可简要概括为：

**状态感知：**算法从网络中持续收集信息，构建一个全面的状态视图。该状态不仅包括各类网络资源（如时隙、带宽、算力、存储）的当前占用情况，也包括等待调度的数据流的具体需求（如时延上限、所需算力等）。

**智能决策：**算法核心的生成网络根据当前的状态，输出一个动作。该动作代表了一套资源分配方案，指明了应为当前数据流选择哪条路径、分配哪些网络接口上的何种资源（如特定时隙、多少计算周期等）。

**环境反馈与学习：**当资源分配方案被执行后，网络环境会发生变化。算法会评估此决策的效果，并形成奖励信号。例如，若一条数据流被成功调度且满足其确定性需求，则给予正奖励；若因资源分配不当导致需求无法满足，则给予负奖励。这个奖励信号与新的网络状态一同被送回算法。

**策略优化：**算法利用这些反馈数据（状态、动作、奖励、

新状态)持续训练其内部的神经网络。通过不断迭代,算法能够学习到在何种网络状态下应采取何种资源分配策略,才能获得长期、累积的最大奖励,即逐步逼近最优的调度策略。

该流程仅为一种实现范例。实际系统中可根据算力约束、实时性要求等条件,替换为更轻量或更传统的调度算法。

#### 4.4 参考实现的性能特征

以 E2eDet 算法为参考实现,其在仿真环境中展现出以下性能特征:

**高调度能力:** 通过联合优化多种确定性资源, E2eDet 能显著提升网络中可成功调度的数据流数量。实验表明,其调度能力远超基于规则的传统算法和仅优化单一资源的深度学习方法。

**优异的负载均衡:** 算法在优化目标中融入了负载均衡考量,能够自动避免将流量或计算任务过度集中到某些网络节点或服务器上,从而提升整个网络的资源利用效率和稳健性。

**良好的计算效率:** 尽管基于复杂的深度学习模型,但 E2eDet 通过其端到端的推理模式,避免了传统优化算法中耗时的迭代搜索过程,能够在可接受的时间内完成大规模网络的资源调度计算,实现了调度能力与计算时间的良好权衡。

**强大的自适应性及灵活性:** 得益于强化学习的本质, E2eDet 能够适应网络流量模式和资源状态的动态变化,并对新出现的、未见过的业务流类型具备良好的泛化调度能力。

E2eDet 算法作为广义确定性网络智慧化适配层的核心技术，通过引入深度强化学习，将复杂的多要素、跨异构网络资源调度问题转化为一个可自主学习、持续优化的智能决策过程。它不仅是实现广义确定性保障的基础性支撑，也代表了未来网络向自治、自优化方向演进的重要技术路径。

上述性能特征具有算法依赖性，不同调度方法在不同场景下各有优劣，需结合实际工程需求进行选型与适配。

#### 4.5 与国内外标准化组织相关研究的协同

广义确定性网络的需求描述与资源抽象模型，与当前多个标准化组织的研究方向形成互补与协同关系：

##### 1) 3GPP (TSN 与 5G 融合)

第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)第 16/17 版已定义 5G 系统与 TSN 网络的桥接机制，实现 5G 作为 TSN 逻辑网桥的能力。本模型可为其提供上层跨域协同的抽象接口，将 TSN 域的确定性需求与 5G 网络切片能力统一描述与编排。

##### 2) ETSI ZSM (端到端智能闭环)

欧洲电信标准化协会 (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) 零接触网络与服务管理 (Zero-touch network and Service Management, ZSM) 聚焦端到端网络切片管理与智能闭环自动化。本模型的服务标识 SID 与需求描述体系，可作为 ZSM 框架中业务意图到网络策略映射的标

准输入。

### 3) CCSA (算力网络与算网协同)

中国通信标准化协会 (China Communications Standards Association, CCSA) 的 TC3、TC7、TC13 等工作组已开展算力网络、算网协同的标准预研。本模型对计算、存储等多维资源的统一抽象方法, 可为其提供跨域资源建模的参考。

### 4) IETF DetNet

互联网工程任务组 (Internet Engineering Task Force, IETF) 的 DetNet 工作组定义了确定性网络在 IP/MPLS 域的数据面与控制面框架。本模型可视为 DetNet 的上层编排与扩展, 在 DetNet 提供的单域传输确定性基础上, 增加跨异构网络与多要素协同的能力。

总体而言, 本蓝皮书提出的需求描述与资源抽象模型, 不替代上述组织已有的标准工作, 而是提供一种统一的、跨组织协同的需求-资源描述语言, 为不同标准化体系之间的互联互通奠定基础。

## 第五章 体系化度量与综合评估

为确保广义确定性网络能够有效满足其设计目标，并指导其持续优化与演进，需要建立一套科学、全面、可操作的度量与评估体系。本章从网络调度能力、资源利用效率、服务质量保障及算法执行效率四个维度，构建核心性能指标，并阐述其评估方法。

### 5.1 核心性能指标体系

#### 1) 网络调度能力维度

该维度衡量网络系统接纳并成功服务业务需求的总容量，是网络效能的最直接体现。

数据流调度成功率：在特定时间窗口内，网络成功满足其所有确定性需求的数据流数量，与同期内请求调度的总数据流数量的比值。该指标直接反映了网络在复杂约束下满足业务需求的能力。

可接纳流数量上限：在网络资源与约束条件固定的情况下，系统能够同时保障其确定性需求的最大数据流数量。此指标用于评估网络的规模服务潜力。

#### 2) 资源利用效率维度

该维度评估网络在提供确定性保障的同时，对多维资源的综合利用情况，关乎网络的经济性与可持续性。

多维度资源负载均衡度：衡量传输、计算、存储等各类资源在不同网络节点或设备上的使用分布情况。一个均衡的

系统能够避免局部过载或资源闲置，提升整体稳健性。通常可以通过统计各类资源利用率的标准差或基尼系数等参数来量化。

全局资源利用率：在保障所有已调度数据流确定性需求的前提下，全网各类资源的平均使用率。高效的系统应在提供高等级服务保障的同时，维持较高的资源利用率。

### 3) 服务质量保障维度

该维度从最终用户或应用的视角，检验网络是否切实提供了所承诺的确定性体验。

端到端时延保障符合度：统计所有已调度数据流的实际端到端时延，验证其是否 100% 满足各自预设的端到端时延上界需求。

时延抖动控制符合度：统计所有已调度数据流的实际端到端时延抖动，验证其是否 100% 满足各自预设的抖动上界需求。

可靠性保障符合度：通过测量实际丢包率，验证其是否满足应用设定的可靠性目标。

吞吐量保障符合度：验证用户或数据流实际获得的吞吐量是否持续稳定在承诺的范围内。

### 4) 算法执行效率维度

该维度评估调度算法本身在部署与运行时的性能，直接影响系统的实时响应能力。

调度决策时间：从接收到数据流调度请求，到算法输出资源分配结果所花费的平均时间。较短的决策时间支持业务的快速上线与动态调整。

策略收敛速度：对于基于学习的算法，其性能在训练过程中从初始状态提升到稳定最优状态所需的时间。快速的收敛意味着算法能更快地适应新环境。

## 5.2 网络效能与服务质量评估方法

为了对上述指标进行客观评估，建议采用以下方法：

### 1) 仿真与实验床验证相结合

大规模仿真：利用网络仿真平台，构建包含 5G、TSN、WiFi-6 及算力服务器等元素的异构网络拓扑，注入大规模、混合类型的业务流，进行可重复、可控制的性能测试。

原型实验床验证：在物理实验床上部署广义确定性网络原型系统，进行小规模但更贴近真实场景的验证，尤其用于检验设备兼容性、协议交互及时序精度等仿真难以完全模拟的细节。

### 2) 对比基准选择

评估时应选择有代表性的基线算法进行对比，例如：

传统启发式或规则式算法：如随机调度算法，作为性能的下界参考。

经典优化算法：如基于线性规划的方法（若可求解），作为理论性能参考。

领域内主流智能算法：与针对确定性网络设计的其他深度学习或强化学习算法进行对比，以凸显评估算法的先进性与独特性。

### 3) 动态与增量场景测试

评估不应仅限于静态场景，还需模拟网络动态。

业务流动态加入与离开：测试系统在面对持续变化的业务负载时的适应能力。

网络资源动态变化：模拟节点故障、链路带宽波动等异常情况，检验系统的鲁棒性。

该度量与评估体系为广义确定性网络的技术研究、系统开发与部署运营提供了参考性的性能标尺。通过综合运用上述指标与方法，可以较为全面、深入地洞察网络系统的能力边界与效能表现，从而支撑广义确定性网络技术在实践中的不断成熟与完善。

## 第六章 产业推进与场景深化

### 6.1 典型场景分析

#### 1) 柔性制造产线

在柔性制造场景中，工业控制业务对端到端时延、抖动和可靠性有较高要求。传统方案通常聚焦于网络传输环节，而实际闭环控制系统的稳定性也受到边缘节点的计算处理时延的影响。

广义确定性网络在此类场景中的核心价值在于：将可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller, PLC）的计算任务时延与 TSN 网络的传输时延纳入统一的确定性保障框架。当视觉质检数据流与运动控制流共存时，系统可依据服务标识 SID 识别二者的语义关联，在计算节点预留推理算力的同时，为控制流预留传输时隙，有助于实现从感知到执行的端到端确定性闭环。

部署该类场景的挑战包括：TSN 域与计算节点之间的时钟同步精度，以及在控制程序主备切换时的资源重分配时效。

#### 2) 自动驾驶编队

在自动驾驶卡车编队场景中，车辆之间需周期性交换位置、速度、制动等状态信息，并在紧急情况下实现毫秒级协同响应。该场景涉及车载以太网（Automotive Ethernet, AE）和专用短程通信（Dedicated Short-Range Communications, DSRC）、5G 等多种异构网络。

广义确定性网络在此处的价值体现为：对异构网络资源进行统一抽象，使调度系统能够在车辆移动过程中，根据轨迹预测提前在多个基站预留资源，有助于减少切换期间的服务中断。同时，将车辆边缘计算节点的算力资源纳入调度视野，可支持分布式协同决策的实时执行。

挑战包括：高速移动场景下的资源预留策略，以及安全加密处理对时延抖动的潜在影响。

## 6.2 产业生态与标准化推进

### 1) 产业链协同要点

广义确定性网络的落地有赖于芯片、设备、运营、集成等多个环节的协同推进。芯片侧可增强时间同步与门控调度的硬件加速能力；设备侧可完善 TSN/DetNet 交换机和 5G TSN 网桥产品；运营侧可探索网络切片与确定性保障的融合服务模式；集成侧则需深入理解行业场景，完成需求到资源的映射适配。

### 2) 标准化工作方向

当前，3GPP、ETSI ZSM、IETF DetNet、CCSA 等组织已在确定性网络和算网协同领域开展标准化工作。本蓝皮书提出的需求描述与资源抽象模型，可作为上述工作的统一输入，重点推动以下方向的标准化：确定性服务需求 SBD 的描述格式与北向接口规范；异构网络资源的统一抽象建模与南向接口；跨确定性域的服务标识 SID 与连接标识 CID 的映射

机制。

### 3) 发展路线图建议

广义确定性网络的发展可尝试划分为三个阶段。第一阶段，以模型构建与标准共识为核心，推动需求描述与资源抽象方法在产业联盟内形成初步认识。第二阶段，以原型验证与行业试点为重点，在智能制造、自动驾驶等领域建设实验床，验证端到端协同调度的可行性。第三阶段，以规模部署与生态完善为目标，推动设备互通测试、认证体系建设，探索形成可商用的完整产品体系。



工业互联网产业联盟  
Alliance of Industrial Internet

## 第七章 广义确定性网络发展展望

广义确定性网络是应对未来工业数字化、智能化挑战的重要新型网络基础设施方向之一。它通过构建集传输、计算、存储、能量等多维资源于一体的全局协同保障体系，在传统网络“尽力而为”服务模式的基础上，进一步为千行百业的关键业务提供可量化、可承诺、可保障的端到端服务质量。其发展对于推动产业升级、构筑国家数字竞争力具有至关重要的战略意义，是赋能智能制造、智能交通等重大战略实施的关键技术支撑之一。

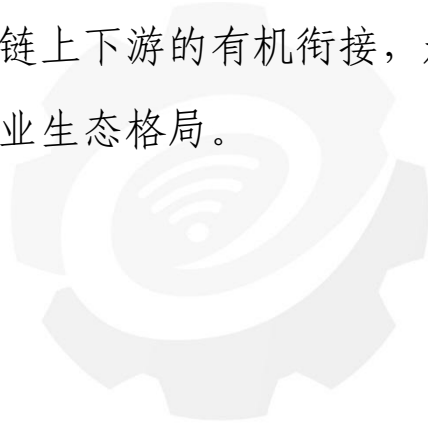
为加快构建自主可控的新型广义确定性网络体系，需着力推动理论创新、场景落地与协同共建三大路径的深度融合，积极推进技术成熟与产业布局。

在理论创新层面，未来需持续深化广义确定性网络的体系化认知与模型构建。一方面，要突破多约束条件下资源协同优化的基础理论瓶颈，探索智能算法与网络控制理论的深度融合，为超大规模场景下的高效调度提供理论支撑。另一方面，需构建跨域多维资源的统一描述方法与建模体系，为网络架构的确定性能力设计奠定基础。

在场景落地层面，应坚持以行业痛点为导向，推动技术方案在真实环境中的验证与迭代。重点选择智能制造、电力调控、远程医疗等具有强确定性需求的领域，开展技术方案的场景化适配与性能验证。通过构建行业测试床和示范网络，

积累部署经验，优化技术路径，形成分阶段、可操作的实施指南，推动技术从实验室走向产业化。

在协同共建层面，需要构建跨领域、多主体的协同发展机制。鼓励网络设备商、软件开发商、系统集成商与垂直行业用户形成创新联合体，共同攻克技术瓶颈和应用难题。同时，加快建立涵盖技术标准、测试认证、安全规范的产业共识体系，促进产业链上下游的有机衔接，形成技术、资本、市场良性互动的产业生态格局。



**工业互联网产业联盟**  
Alliance of Industrial Internet