

北京邮电大学



报告：内生智能驱动的 6G 网络自智能化演进研究

	分工贡献
张晨阳	完成所有参考资料的寻找和收集 完成研讨报告的完整版本的撰写
金建名	完成研讨报告的初步版本

2025 年 5 月 10 号

目录

1. 引言	1
2. 6G 网络发展概述	2
2.1. 6G 的总体愿景与发展目标	2
2.2. 与 5G 的关键差异与技术跃迁	3
3. 内生智能理论基础	5
3.1. 定义与核心理念	5
3.2. 内生智能在网络系统中的角色	6
3.3. 自智网络与内生智能的关系	6
4. 6G 网络自智能化演进路径	7
4.1. 自感知：网络数据采集与认知机制	8
4.2. 自决策：智能控制与决策引擎	10
4.3. 自优化：动态资源管理与优化策略	12
4.4. 自适应：面向异构场景的自演化能力	14
5. 关键技术支撑体系	16
5.1. 人工智能与机器学习的融合	16
5.2. 网络数字孪生	18
5.3. 联邦学习与隐私保护机制	20
6. 总结	22

1. 引言

随着移动通信技术的不断演进，全球正逐步迈向第六代移动通信系统（6G）的研发与探索阶段。

相较于 5G，6G 不仅在速度、容量和时延等传统通信指标上寻求突破，更强调网络的智能化、自主化与泛在感知能力。在这一背景下，“内生智能”（Endogenous Intelligence）成为 6G 网络设计中的核心理念之一，旨在通过引入网络内部的智能机制，实现网络的自我感知、自我学习、自主决策与持续演进，从而构建具备高度自智能化特性的下一代通信系统。

当前，尽管人工智能在 5G 中已得到初步应用，如网络流量预测、故障诊断与资源调度等方面，但大多仍处于“外部智能”辅助阶段，智能控制尚未真正内嵌于网络架构之中。与之不同，内生智能强调“从网络内部生长出来”的智能机制，其目标是使网络系统具备类似生命体的“自主感知—认知—决策—适应—演化”能力。

本报告旨在围绕内生智能如何驱动 6G 网络自智能化演进这一主题展开深入分析，系统梳理 6G 的发展愿景与技术变革，阐释内生智能的理论基础与技术体系，探讨其在网络自智能化路径中的实际应用，并对关键支撑技术与面临的挑战进行评估。

2. 6G 网络发展概述

2.1. 6G 的总体愿景与发展目标

第六代移动通信系统（6G）被广泛认为是继 5G 之后通信技术发展的下一座高峰，其愿景不仅限于传统通信能力的提升，更在于构建一个**全空间覆盖、全频谱利用、全业务融合、全智能驱动**的新型网络生态。

6G 的设计目标是满足 2030 年及以后社会数字化、智能化发展的深层次需求，服务于人—机—物三元融合的智能社会。

6G 网络的核心愿景可归纳为“**智能泛在、融合无界、绿色高效、安全可信**”。其中：

- **智能泛在**：网络将广泛嵌入人工智能，具备实时感知、智能决策、自主优化等能力，实现“网络即大脑”；
- **融合无界**：实现通信、感知、计算、控制与存储的深度融合，支持空天地海一体化的全空间覆盖；
- **绿色高效**：在提升性能的同时，注重能效优化与环境友好，推动可持续发展；
- **安全可信**：从架构设计之初便融入原生安全机制，确保数据隐私和网络安全。

6G 在性能指标上相较 5G 将实现数量级的跃升，主要包括：

- **峰值速率**：目标达到 1 Tbps（5G 为 20 Gbps）；
- **空口时延**：降低至 0.1 ms 以下，支持超低时延通信；（如下图所示）

表 3 平均通信延迟和资源开销下降率

方法	通信延迟下降率	资源开销下降率
SEA-Satellite	48.67%	45.06%
SEA-Emergency	46.37%	43.22%
Naive	4.84%	2.30%
6G-MEA	78.10%	75.54%

- **连接密度**：每平方公里超过 1000 万个终端；
- **定位精度**：厘米级甚至毫米级定位能力；

- **能效与频谱效率：**实现 10 倍以上的提升；
- **智能水平：**具备端—网—云协同的智能调度、感知与优化能力。

6G 不仅面向增强的移动宽带（eMBB）、超可靠低时延通信（URLLC）和大规模机器类通信（mMTC），更将拓展至**沉浸式通信、全息交互、智慧城市、工业 4.0、数字孪生、脑机接口、自动驾驶、空天地一体网络**等新型场景。

2.2. 与 5G 的关键差异与技术跃迁

尽管 5G 已显著提升了移动通信系统的速率、时延与连接能力，为移动互联网、智能制造、车联网等提供了坚实支撑，但其在智能化水平、泛在连接能力以及跨领域融合方面仍存在明显局限。而 6G 的提出不仅是性能参数的进一步拓展，更代表着**通信网络体系结构和智能能力的范式跃迁**。

以下几个方面体现了 6G 相对于 5G 的核心差异与技术跃迁：

1) 从连接驱动向智能驱动演进

- **5G** 聚焦于“连接万物”，以高速率、低时延、大连接为核心性能目标；
- **6G** 则转向“智能万物”，强调网络具备内生智能，能进行自我学习、协同推理与自主决策，构建“自智网络”（Autonomous Network）；
- 这一转变标志着通信系统从“被动响应”走向“主动感知与自适应”。

2) 从局域智能到全局协同智能

- 5G 中的智能功能多由外部系统提供（如边缘计算、云平台），智能体分布割裂，缺乏系统内协同；
- 6G 将通过内生智能机制，构建“端—网—云”一体化协同智能系统，实现从网络基础架构层到业务应用层的全局闭环智能控制。

3) 从地面通信向空天地海融合网络演进

- 5G 主要面向地面用户的高密度接入；
- 6G 将实现空基平台（如高空平台、低轨卫星）、海洋通信节点、无人系统等异构资源的动态接入与管理，构建“空天地海”一体化泛在网络架构；
- 这意味着通信系统将在覆盖范围、服务对象和网络形态上出现质的扩展。

4) 从单一功能网络向多功能深度融合演进

- 5G 网络以通信功能为主，感知、计算、控制相对独立；

- 6G 将实现通信、感知、计算与控制的深度融合（C4 paradigm），网络将同时具备**数据传输、环境感知、智能控制与边缘计算**等多重功能；
- 特别是在智慧城市、自动驾驶、工业互联网等场景中，这种融合将成为实现实时闭环的关键。

5) 从静态优化向动态演化机制转变

- 5G 中多数网络优化依赖预设模型和静态规则；
- 6G 将引入自进化机制，通过持续的数据驱动学习实现**模型的动态更新、策略的自适应调整与系统结构的自主演进**；
- 这一能力是内生智能得以实现自智化的技术基础。

3. 内生智能理论基础

随着 6G 网络迈向高度智能化与自治化，传统依赖外部控制与规则驱动的网络管理模式已难以满足未来复杂环境的动态适应需求。为此，通信领域提出了“内生智能”（Endogenous Intelligence）这一新理念，旨在构建具备**自我感知、自我学习、自我决策与自我演化**能力的网络系统。内生智能不仅是 6G 网络实现自智化演进的理论基石，也代表着通信系统从“智能支持”走向“智能本体”的根本性转变。

3.1. 定义与核心理念

“内生智能”指的是网络系统通过对其内部状态、外部环境及运行反馈的深度感知与学习，自主构建智能模型，实现决策闭环，从而具备自适应、自优化、自修复、自进化等能力的一种系统智能形态。

其核心理念包括：

- **自组织性**：网络各部分能够在无集中控制的条件下协同运作，自主完成配置与调优；
- **自进化性**：系统通过持续学习与经验积累，动态更新智能模型，实现结构与行为的演化；
- **自决策性**：网络根据当前状态与预测结果独立做出资源分配、路径选择、策略切换等决策；
- **场景内嵌性**：智能机制深度嵌入于网络架构中，作为基础能力原生存在而非外挂组件；
- **全域闭环性**：智能不局限于某一层或模块，而是贯穿端、网、云，形成全栈闭环智能控制。

这种智能形态本质上突破了“外部 AI 辅助网络”的模式，强调智能“内生于网络本体之中”，从而实现真正的自智网络。

3.2. 内生智能在网络系统中的角色

在未来 6G 网络中，内生智能将成为构建网络自智能能力的核心驱动因子，其角色主要体现在以下几个方面：

- **状态感知器（Perception Layer）**：通过多源数据采集、边缘智能与语义理解，实时获取网络运行状态、用户行为模式与环境变化；
- **认知与学习单元（Cognition & Learning）**：基于强化学习、图神经网络、联邦学习等 AI 算法构建动态知识库与环境模型；
- **决策控制器（Decision Engine）**：针对资源分配、服务调度、故障恢复等任务，进行自适应的策略制定与执行；
- **反馈与演化模块（Evolution Module）**：将运行反馈持续输入学习过程，实现模型的在线迭代与策略的自我优化。

3.3. 自智网络与内生智能的关系

“自智网络”（Autonomous Network）是 6G 智能化演进的重要目标，其基本特征包括自配置、自修复、自优化和自保护。而要实现这些能力，必须以**内生智能作为基础支撑机制**。

两者的关系可归纳为以下几点：

- **目标与能力的对应**：自智网络是目标导向的系统形态，而内生智能是实现该目标的智能能力集合；
- **结构与功能的融合**：内生智能深度嵌入网络的结构设计中，使得智能成为网络的一部分，而非外挂模块，从而保障了自智能能力的原生性；
- **分层协同机制**：内生智能可在接入层、传输层、控制层等多层级部署，构建分布式、协同化、模块化的自智网络体系；
- **演化路径的一致性**：自智网络的演进路径与内生智能的发展路径高度一致，均遵循从感知—认知—决策—演化的闭环推进模式。

4. 6G 网络自智能化演进路径

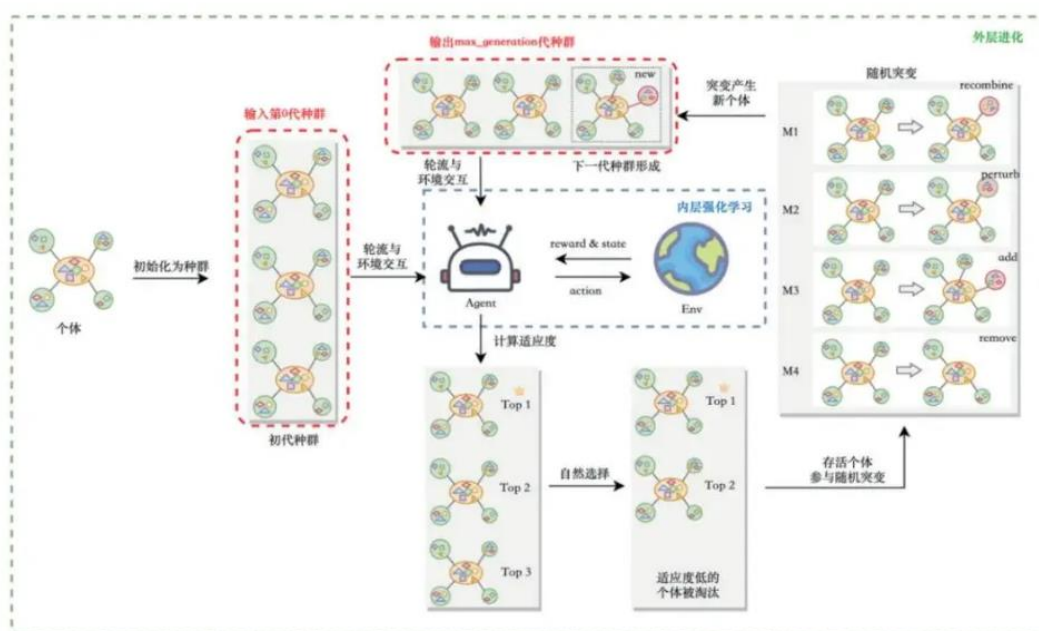


图2 6G网络形态自演进算法（6G-MEA）流程示意图

上图展示了 6G 网络形态自演进算法（**6G-MEA, 6G Morphological Evolution Algorithm**）流程。6G-MEA 的内层负责智能体的参数更新，智能体在学习最优的策略、争取获得较大的奖励值；外层负责根据由奖励值反映的适应度执行进化过程，包括自然选择和基因突变。

通过这样的选择机制，种群整体趋向于具有更适应环境的形态，能够更好地应对通信环境的动态变化。在整个演进过程中，个体间的基因突变模拟了随机性，保证了网络形态的多样性，个体的优胜劣汰则确保了种群整体形态结构朝着更优方向发展。

下面我们从四个方面介绍理解 6G 网络的自智能化演进。

4.1. 自感知：网络数据采集与认知机制

自感知（Self-Perception）是内生智能体系中的第一环节，是 6G 网络实现自智能化演进的基础能力。通过多维度的数据采集与智能认知机制，网络能够**实时感知运行状态、用户行为、资源变化以及外部环境信息**，为后续的自决策、自优化等智能环节提供感知支撑和语义理解。

（1）感知范围的拓展

6G 自感知能力将显著拓展传统网络的感知边界，不仅包括通信相关参数（如链路质量、负载状态、拓扑结构），还包括：

- **环境感知**：利用无线信号反射、折射等物理特性进行场景建模，实现通信与感知的融合（如射频感知、毫米波雷达）；
- **用户感知**：识别用户的移动模式、业务意图与 QoE（用户体验质量）反馈，实现面向服务的自适应；
- **设备与资源感知**：实时监测终端状态、接入能力、计算资源、能耗水平等；
- **安全态势感知**：识别潜在入侵、恶意行为、数据异常等安全隐患。

这种全域多维感知能力，使网络具备了类似“感官系统”的能力，为智能决策创造基础条件。

（2）感知数据的采集机制

自感知能力依赖于**高效、智能、分布式的数据采集机制**，主要包括：

- **边缘采集与融合**：通过边缘节点（如基站、路由器）实时采集本地流量、信道状态与用户行为，并进行初步融合与筛选；
- **上下行协同感知**：利用下行广播与上行回传形成反馈闭环，提高感知精度与实时性；
- **跨域协同采集**：实现网络控制面、数据面与管理面之间的数据共享与交互，打破信息孤岛；
- **事件驱动与连续监测结合**：对关键事件进行高频采样，同时保持对网络整体态势的低频监测，兼顾效率与全局性。

（3）语义认知与建模机制

仅有数据采集并不足以实现智能，6G 网络需要引入**语义认知与环境建模机制**，对感知信息进行抽象理解，形成可用于推理与决策的知识模型：

- **语义感知与标签化**：借助自然语言处理与语义嵌入技术，将用户意图、业务类型等信息进行结构化表示；
- **知识图谱构建**：融合历史数据与实时感知结果，构建网络运行状态的知识图谱，支持动态关联与因果分析；
- **情境理解与预测建模**：基于深度学习模型对未来状态进行预测，如负载趋势、移动轨迹、风险概率等，提升预见性；
- **自监督学习机制**：引入自监督学习与在线学习框架，使网络感知能力持续进化，适应环境变化。

4.2. 自决策：智能控制与决策引擎

在 6G 网络的内生智能架构中，自决策（Self-Decision）是承上启下的关键环节。它基于自感知阶段采集并建模的数据，通过智能推理与策略优化机制，实现资源分配、业务调度、服务编排、安全防御等方面的自主决策。这一过程体现了网络“认知—判断—行动”的闭环智能控制逻辑，是实现智能化能力的核心体现。

（1）自决策的核心任务

6G 网络自决策模块需具备应对复杂动态环境的多目标、多约束、多时空尺度决策能力，其典型任务包括：

- **资源调度：**根据用户需求、负载状态和拓扑结构，自主决定频谱、功率、计算和存储等资源的最优分配；
- **路径与路由选择：**结合链路质量、拥塞状态与服务等级协议（SLA），动态选择最优传输路径；
- **服务编排与迁移：**在边缘与云之间灵活部署、迁移网络功能与应用服务，实现服务连续性与时延最小化；
- **安全策略控制：**在检测到异常流量或攻击行为时，快速做出拦截、隔离或切换策略；
- **QoE 保障策略：**在多业务并发情况下，基于用户行为预测与体验评估，优先保障关键服务质量。

（2）决策引擎的关键技术支撑

为实现高效、自主的决策能力，6G 网络将引入以下智能技术构建决策引擎：

- **强化学习（RL）与深度强化学习（DRL）：**通过与环境的持续交互，学习最优策略，适用于复杂资源调度与策略优化问题；
- **图神经网络（GNN）：**建模网络拓扑结构及节点属性，提升在动态网络中的结构化推理能力；
- **多智能体系统（MAS）：**在分布式网络架构中部署多个智能体，协同完成局部感知与联合决策，增强系统鲁棒性；

- **博弈论与博弈学习**：用于处理多个网络实体间的资源竞争与协同问题，实现利益均衡；
- **因果推理与可解释 AI**：提升决策透明度与可控性，支持面向安全与合规需求的智能决策。

(3) 决策反馈与闭环优化机制

自决策不是一次性**静态**行为，而是**持续闭环的动态过程**，需配套反馈机制以实现实时优化与演化：

- **策略评估反馈**：通过实际执行效果（如时延、丢包、能耗等）对当前决策进行评估与打分；
- **模型自更新**：根据反馈结果更新决策模型参数，提升决策的适应性与泛化能力；
- **异常修正机制**：引入监督模块对不合理决策进行纠偏，防止失控行为扩散；
- **协同共享机制**：多个智能体之间共享感知与决策经验，实现知识迁移与联合优化。

4.3. 自优化：动态资源管理与优化策略

自优化（Self-Optimization）是 6G 网络实现持续高性能运行的核心机制，是在自感知与自决策的基础上，通过动态调整网络参数与资源配置，持续提升网络性能与服务质量的一种智能过程。其本质是让网络系统具备在复杂环境中自我调整与适应变化的能力，以实现稳态运行与性能最优。

（1）自优化的基本目标

6G 网络的自优化过程通常围绕以下关键目标展开：

- **最大化网络资源利用率**：在多业务并发、资源稀缺的场景下，提升频谱、算力、存储等资源的复用率与配置效率；
- **优化用户体验（QoE）**：通过智能感知与策略调整，保障关键业务的服务质量，降低用户感知时延和卡顿；
- **增强系统能效与绿色通信能力**：在保证服务能力的前提下，动态关闭冗余节点或调整功率，降低整体能耗；
- **维持服务连续性与系统鲁棒性**：应对网络故障、拥塞或突发事件，实现快速恢复与负载迁移。

（2）关键优化机制与方法

为实现上述目标，6G 网络的自优化过程融合了多种动态优化方法和技术工具：

- **基于 AI 的在线优化算法**：
 - 结合深度强化学习（DRL）、元学习（Meta-Learning）等算法，根据实时反馈动态更新优化策略；
 - 实现“探索—学习—适应”的闭环资源调度过程；
- **多目标优化与资源协同**：
 - 面对延迟、带宽、能耗等多目标约束，引入演化算法（如 NSGA-II）或分层优化模型；
 - 通过端—网—云协同优化策略，实现资源全域调度；
- **跨层动态调整机制**：

- 联动物理层、MAC 层、网络层和应用层的资源配置，实现整体性能最优；
- 如根据链路状态动态调整调制方式、功率分配与路由路径；
- **自适应负载均衡与拥塞控制：**
 - 实时检测流量热度图与负载状态，自动在不同链路/节点间进行负载迁移；
 - 优化入流策略与缓存机制，避免瓶颈形成。

(3) 自优化过程中的反馈与演化

有效的自优化不仅依赖决策模型本身，还必须配套完善的反馈闭环与演化机制：

- **性能指标驱动的反馈评估：**
 - 以时延、吞吐量、能效、失败率等关键 KPI 作为评估依据；
 - 利用在线监测结果对优化策略进行调整与再训练；
- **模型持续更新与迁移学习：**
 - 在新场景或突发事件中快速适应，通过迁移学习复用历史经验，加快模型收敛；
- **演化策略管理平台：**
 - 构建统一的策略管理与优化平台，实现策略版本的回滚、切换与组合；
 - 支持多智能体间的知识共享与策略协同，提升优化效率。

4.4. 自适应：面向异构场景的自演化能力

自适应（Self-Adaptation）是 6G 网络实现长期稳定运行与多场景适配的关键能力之一，旨在使网络能够在**面对环境变化、业务动态与系统扰动时自动调整运行策略与系统结构**，从而保持服务性能、资源效率与系统稳定性的最优状态。进一步而言，自适应不仅是对当前状态的响应调节，更是网络实现自主演化（Self-Evolution）能力的前提。

（1）多维异构场景下的自适应需求

6G 网络将服务于多种高度异构的通信场景，带来前所未有的适应性挑战，包括：

- **异构接入环境**：支持从低功耗终端到高速移动终端，从地面站到卫星通信的全频谱、多制式接入；
- **多样化业务需求**：同时满足增强型移动宽带（eMBB）、超低时延通信（URLLC）、大规模物联网（mMTC）、全息传输、数字孪生等业务；
- **动态拓扑变化**：网络节点可能频繁上下线（如无人机、中继站），网络结构呈高度可变特性；
- **环境扰动与异常事件**：如设备故障、网络攻击、突发负载、自然灾害等，要求网络具备动态应对与弹性恢复能力。

这些挑战要求网络具备强大的情境感知、动态配置与结构演化能力，才能真正实现泛在、连续、高效的服务交付。

（2）自适应机制的关键技术路径

为了实现上述自适应能力，6G 网络将在以下关键路径上构建完整的技术体系：

- **策略迁移与快速适应**：
 - 引入迁移学习（Transfer Learning）与元学习（Meta-Learning）机制，支持在未知环境中快速迁移已有策略；
 - 适应新场景、新设备或新业务类型时，无需从零训练，大幅降低训练成本与响应时间；
- **结构级自演化能力**：

- 网络架构与功能模块可根据实际负载与服务场景进行动态重构（如按需部署边缘节点、动态合并或分裂虚拟网元）；
- 网络拓扑结构可根据连接需求自组织，形成最优覆盖与最小时延路径；
- **分层自适应协同机制：**
 - 在接入层、控制层、服务层等不同层级部署自适应代理，实现自下而上的分布式协同；
 - 如边缘侧实现低延时响应，核心网负责策略融合与调控；
- **情境驱动的策略动态重构：**
 - 利用情境感知引擎实时分析场景特征（如密度、干扰、行为模式），触发策略切换或结构调整；
 - 支持策略生命周期管理与优先级动态排序。

（3）从自适应到自演化：网络智能的升级路径

在 6G 的长期演进中，网络自适应能力将进一步发展为具备**学习能力、结构可塑性**与**长期演化能力**的“**自演化网络**”（Self-Evolving Network）：

- **在线学习与知识积累：**网络通过长期运行过程中的反馈持续学习，建立知识库，实现跨任务迁移与泛化能力；
- **规则进化与策略创新：**网络不仅执行现有规则，还可自主发现新策略、优化现有机制，具备“创新型智能”；
- **系统演化闭环构建：**实现从数据采集 → 知识抽象 → 策略演进 → 架构变更 → 效果评估的完整闭环；
- **适应性评估与自我调整：**网络具备对自身适应状态的评估能力，可自主判定是否需演化或重构。

5. 关键技术支撑体系

5.1. 人工智能与机器学习的融合

人工智能（AI）与机器学习（ML）技术的发展为 6G 网络的智能化演进提供了坚实的技术支撑。作为“内生智能”体系的计算核心，AI/ML 的深度融合不仅拓展了网络的智能边界，还实现了**从感知、认知到决策与演化的全过程智能驱动**。6G 网络不同于传统以规则驱动为主的系统，它需要在极其复杂、多变、不确定的环境下具备实时分析、自主判断与自适应能力，而这一切的实现高度依赖于 AI/ML 在网络中的原生融合。

（1）AI/ML 在网络中的融合场景

6G 网络中的 AI/ML 不再是“外挂式优化工具”，而是深入嵌入网络架构中的“内生智能模块”，其融合场景包括但不限于：

- **智能资源管理**：基于 ML 的预测模型对用户行为、流量模式和网络负载进行预测，实现频谱、算力、带宽等资源的动态最优分配；
- **智能接入控制**：通过 AI 算法进行终端状态识别、信道质量评估和干扰预测，提升接入效率与稳定性；
- **故障诊断与自修复**：利用图学习与异常检测模型识别潜在网络故障，提前预警并触发自恢复机制；
- **业务识别与 QoE 保障**：结合深度学习识别业务类型与用户意图，实现差异化服务调度；
- **网络安全防护**：通过强化学习与联邦学习等技术识别异常流量、攻击行为，实现智能防御策略调整。

（2）关键算法技术体系

为支持上述应用，6G 网络将融合多种 AI/ML 算法体系，构建复杂动态系统中的智能核心，包括：

- **监督学习与非监督学习**：分别用于已知模式下的性能建模、未知异常的聚类检测；

- **深度神经网络（DNN）与卷积神经网络（CNN）**：用于图像/信号处理、业务识别与特征提取；
- **循环神经网络（RNN/LSTM）**：适用于序列数据建模，如用户行为预测与负载趋势分析；
- **强化学习（RL/DRL）**：通过与环境的持续交互，学习优化策略，广泛应用于资源调度与路径优化；
- **图神经网络（GNN）**：建模网络拓扑、节点关系等结构化数据，适用于路由、自组织结构分析；
- **元学习与自监督学习**：提高模型在小样本、新环境下的快速适应能力；
- **联邦学习（FL）与隐私增强学习**：在保护数据隐私的同时实现模型协同训练，特别适用于边缘智能场景。

（3）融合路径与部署方式

AI/ML 与 6G 网络的融合应体现在架构、平台与能力三个层次：

- **架构层融合**：构建“智能原生”网络架构，将 AI 模块嵌入控制面、数据面与服务面，形成端—网—云智能协同；
- **平台层支撑**：设计统一的 AI 训练与推理平台，支持在线学习、模型管理、知识迁移与策略部署；
- **能力层开放**：网络开放 AI 能力接口，支持业务层按需调用智能服务，实现智能网络与智能应用的融合发展。

5.2. 网络数字孪生

“网络数字孪生”（Network Digital Twin, NDT）是 6G 内生智能架构中的关键支撑技术之一。它通过在虚拟空间中构建一个高保真、可交互、可演化的网络镜像系统，实现对物理网络的全局感知、预测推演和智能控制。NDT 不仅是通信系统迈向自智能化、自演化的桥梁，更是构建“可视化、可控化、可验证化”智能网络的核心平台。

（1）网络数字孪生的定义与基本组成

网络数字孪生指通过实时采集物理网络中的多维数据，结合 AI 建模与仿真技术，在虚拟空间中创建一个与实际网络系统结构、行为和状态高度一致的数字映射体。

其基本组成包括：

- **数据采集层：**通过感知系统获取网络状态、流量数据、业务日志、拓扑变化等原始数据；
- **建模与仿真层：**利用 AI/ML、图模型、知识图谱等工具构建网络拓扑、传输逻辑、用户行为等虚拟模型；
- **决策分析层：**在虚拟环境中运行策略模拟、风险评估、容量规划等任务，输出优化建议；
- **反馈同步层：**将优化结果或预测信息回馈给实际网络，实现虚实同步与策略驱动。

（2）关键技术特征与能力

6G 网络中的数字孪生具备以下关键能力：

- **实时同步性：**能够对物理网络状态进行高频更新与精确映射，实现“分钟级”甚至“秒级”同步；
- **高保真建模能力：**准确还原网络设备、协议流程、资源状态与用户行为，支持端到端的仿真；
- **可预测性与推演性：**基于历史数据与智能模型，预测网络拥塞、故障演化趋势与业务流量变化；

- **智能协同性：**支持与 AI 决策引擎联动，在虚拟环境中测试策略效果并指导现实系统动态调整；
- **安全演练能力：**在不影响真实系统运行的前提下开展攻击模拟、灾备演练与鲁棒性测试。

(3) 典型应用场景

在 6G 内生智能体系中，网络数字孪生将广泛应用于以下场景：

- **智能资源编排：**在孪生空间中模拟多种资源调度方案，优选最优策略部署至物理网络；
- **网络演化与架构规划：**对新技术、新协议或新架构进行演化仿真，预测其在不同场景下的性能表现；
- **故障预警与恢复演练：**提前识别潜在风险点，制定恢复路径并进行可控测试；
- **业务级 QoE 保障：**在用户业务路径虚拟映射中动态优化转发路径与调度策略；
- **网络安全沙箱测试：**构建虚拟攻击环境，评估系统在不同威胁场景下的防御策略有效性。

5.3. 联邦学习与隐私保护机制

在 6G 网络日益强调数据驱动和人工智能融合的背景下，**隐私保护与数据安全**成为智能能力落地的核心瓶颈。传统的集中式机器学习方法往往依赖于大规模数据的集中采集与训练，容易引发数据泄露、隐私侵犯及合规风险。为此，**联邦学习**（Federated Learning, FL）作为一种分布式、隐私友好的机器学习范式，成为 6G 内生智能实现的重要支撑技术之一。

（1）联邦学习的基本原理与优势

联邦学习是一种“数据不出端，模型共训练”的分布式学习方法，其核心思想是在多个数据源本地训练模型，仅**共享**模型参数或梯度，而不传输原始数据。

其主要优势包括：

- **隐私保护性强**：数据保留在设备本地，减少了用户隐私泄露的风险；
- **分布式计算能力利用**：充分利用终端、边缘与云的计算能力，实现更高效的模型训练；
- **通信开销更低**：与传统集中式训练相比，仅传输模型更新参数，大大减少数据传输量；
- **适应异构环境**：支持不同终端的数据量、计算能力与网络条件差异，具备良好的鲁棒性；
- **合规与可信**：满足《GDPR》《数据安全法》等法规要求，提升系统的合规性与用户信任度。

（2）6G 网络中联邦学习的应用场景

在 6G 自智网络中，**联邦学习**可广泛应用于多个关键场景：

- **终端行为建模与业务预测**：在不暴露用户数据的情况下，学习用户业务偏好、流量模式，辅助 QoE 优化；
- **无线资源管理**：通过分布式训练方式构建小区负载预测模型，优化频谱和功率分配；
- **入侵检测与安全威胁识别**：端侧设备协同训练恶意流量检测模型，提升全网安全响应能力；

- **智能边缘协同：**边缘节点共同参与模型训练与推理，推动“边云协同智能”的落地；
- **服务个性化优化：**构建终端本地智能体，实现业务调度、缓存策略、能耗优化等个性化策略学习。

（3）联邦学习的关键技术机制

为确保联邦学习在 6G 网络中高效、安全地运行，需要结合以下关键机制：

- **模型聚合算法：**
 - 如 FedAvg（联邦平均）、FedProx、FedNova 等，用于聚合本地模型参数，生成全局共享模型；
- **差分隐私保护（DP）：**
 - 在上传模型时加入噪声，确保单个用户数据无法被逆向还原，提升数据安全性；
- **加密与可信计算机制：**
 - 引入安全多方计算（SMC）、同态加密（HE）与可信执行环境（TEE），保障模型参数交换过程的安全；
- **异步协同与容错机制：**
 - 支持不同终端异步上传与不稳定通信环境，增强训练鲁棒性；
- **系统资源调度与分层部署：**
 - 根据终端能力与业务优先级智能分配训练任务，实现边—端—云分层协同。

6. 总结

随着人类社会进入全面智能化与深度数字化的新时代，通信网络正从以连接为核心的 5G 阶段迈向以智能为内核的 6G 新纪元。

本报告围绕“内生智能驱动的 6G 网络自智能化演进”主题，系统探讨了 6G 网络的总体发展愿景、内生智能的理论基础、网络自智能化的关键路径以及支撑技术体系。

首先，6G 不仅追求性能参数的跃升，更致力于构建一个全空间覆盖、全业务融合、全智能驱动的通信生态系统。在这一过程中，“内生智能”作为 6G 架构的核心理念，推动网络从传统的被动管理走向主动感知、自主决策与持续优化。

其次，通过对自感知、自决策、自优化与自适应四个核心能力的深入分析，我们梳理了 6G 网络自智能化演进的闭环路径，展现了其在多维异构场景下的智能演化能力。

此外，人工智能与机器学习的深度融合、网络数字孪生的虚实映射能力、联邦学习的隐私友好机制、以及智能中台的协同控制架构，构成了支撑内生智能实现的关键技术体系。

总体而言，内生智能不仅是 6G 网络发展的关键驱动器，更是未来网络实现“自组织、自决策、自演化”能力的根本支撑。

它将促使网络从“可连接”转向“可理解、可思考、可成长”，为构建一个自主、可信、高效的未来通信系统奠定技术与理论基础。