

或滞后导致的链路中断,也降低了不必要的频繁切换,提升网络整体的稳定性与服务一致性。

#### 4.2 轨迹预测与前瞻性切换控制

在高速铁路、干线公路与无人驾驶场景中,用户移动轨迹具有高度规律性,通过轨迹预测可强化网络的前瞻性切换能力。利用历史轨迹、速度模型、方向变化以及道路环境数据,可构建预测算法,实现对用户未来位置的高精度估计。网络在获得预测结果后,可提前为用户所在方向的目标小区预留资源,并完成部分切换准备流程,从而缩短切换执行时间。前瞻性切换机制能够有效避免传统模型中因决策滞后导致的信道崩溃或切换失败,尤其适用于线路固定、速度变化平滑的高速铁路场景。轨迹预测还可结合高分辨率地图、路况信息与环境传播条件,实现更可靠的切换区段规划,使切换在最优时机执行,提高连续覆盖能力。该方法显著提升网络对高速移动用户的服务连续性与链路可靠性。

#### 4.3 多站协作切换与协同覆盖增强

单基站的局部信息往往难以支撑高速移动环境下准确的切换决策,而多站协作机制通过站间信息共享可提升网络整体的判断能力与干扰控制水平。基站间可实时交互终端测量数据、小区负载、覆盖边界质量及干扰环境信息,实现跨站联合分析与切换判决。通过在弱覆盖边界采用多点协作传输(CoMP)、双连接(DC)或多链接(MR-DC)技术,使终端可同时保持两个或多个稳定链路,在切换前后阶段实现链路并存,从而显著降低切换中断风险。协作机制不仅强化边界区域的覆盖连续性,还能降低因单站误判导致的过早或过晚切换。在高速列车场景中,基于沿线多站的协同部署可实现覆盖走廊式切换结构,使多个小区参与切换准备,提高整个过程的鲁棒性。此类协作切换体系为提升高速移动网络的可靠性提供了关键支撑。

### 5 高速移动场景中的覆盖优化策略

#### 5.1 构建连续覆盖走廊与专用覆盖结构

高速铁路与城市轨道交通的运行速度快、路线固定,对5G网络的覆盖连续性要求极高。为减少信号衰落和覆盖缝隙,应在沿线部署具有强方向性的定向天线,形成顺线路径的覆盖指向,提高覆盖稳定性。分布式多点(DAS)系统可通过在轨旁设置多节点,缩短传播距离,从而改善信号一致性。在高速铁路场景中,可依托专用铁路线覆盖网络,通过专网频段、专用站点布局与覆盖优化策略形成沿线连续覆盖走廊,使列车全程处于稳定信号区内,避免因小区频繁穿越导致的切换失败。同时,通过对隧道、山地、桥梁等关键地形的专项覆盖方案设计,可进一步提升覆盖完整度,使高速场景的网络连贯性与服务可用性得到有效保障。

#### 5.2 高频段与低频段协同覆盖设计

5G网络通常采用高频段提供大带宽能力,而低频段具有覆盖范围大、绕射能力强等优势。将二者进行协同设计,

可构建层次分明、互补性强的复合覆盖体系,以增强高速移动环境下的网络稳定性。高频段小区在车辆高速通过时容易出现快速衰落,因此低频段宏小区可作为覆盖“锚层”,提供持续稳定的控制信道,确保关键业务不中断。同时,通过跨频段协同调度,网络可根据用户速度、位置变化及实时信道质量自动选择最优频段,实现跨层切换平滑化。该策略既减少了高速穿越场景中跨层切换的频繁发生,也提高了大带宽业务的连续性,使高速移动环境中的网络吞吐量更加稳定,整体服务体验更加可靠。

#### 5.3 采用智能反射面与低空平台改善覆盖

在高速移动场景中,地形复杂、传播路径多变,使传统基站难以确保全覆盖。智能反射面(IRS)技术能够通过精确调控反射单元相位,实现对入射信号的定向重构,从而增强弱覆盖区的信号质量,特别适用于隧道入口、弯道等多径丰富区域。IRS的低功耗、高柔性特性,使其能够以较低成本显著提升覆盖连续性。与此同时,低空通信平台如无人机基站和飞艇中继可以在复杂地形、临时性场景或大面积盲区中快速部署,构建动态覆盖层。其相对高度可调、覆盖范围灵活的特点,使其能够根据高速交通工具的位置变化实时优化覆盖结构<sup>[4][5]</sup>。智能反射面与低空平台的组合应用,有望成为未来高速移动网络覆盖的重要补充手段,实现传统网络架构难以达到的空间灵活性与覆盖弹性。

### 6 结语

高速移动场景对5G网络切换性能和覆盖连续性提出更高要求。本文通过对高速移动环境下切换退化机制的系统分析,揭示了信道快速变化、切换判决滞后、多层网络协同不足等根源问题,并从切换参数自适应优化、轨迹预测、协作切换架构及覆盖增强策略等方面提出解决路径。研究表明,通过构建多站协同的切换体系、提升覆盖连续性并增强链路鲁棒性,可显著降低切换失败率,提高高速场景下5G网络的服务连续性与稳定性。未来,随着5G-A与6G技术发展,移动性管理将更加智能化、预测化与网络协同化,高速移动场景下的网络优化将进入更加精细化与自动化的阶段,为智慧交通体系的演进提供关键支撑。

#### 参考文献

- [1] 张利飞.5G超密集组网越区切换性能分析与优化[D].北京交通大学,2018.
- [2] 王欣宇.高速移动场景下基于OTFS通感一体化信号的切换技术研究[D].北京邮电大学,2024.
- [3] 董雨薇.5G-R网络切片动态切换技术研究[D].北京交通大学,2024.
- [4] 张存涛.5G C/U分离架构下高铁移动网络切换性能增强方法[D].北京交通大学,2023.
- [5] 董春利,王莉.5G异构网络切换机制和自优化网络切换算法研究[J].信息技术与信息化,2023,(11):141-144.

# Application and Development Trend Analysis of Industrial Internet Technology in Intelligent Manufacturing

Shuai Cao Yingying Ge Lei Li

Changzhou Mechanical and Electrical Vocational and Technical College, Changzhou, Jiangsu, 213164, China

## Abstract

With the deep integration of next-generation information and communication technologies into manufacturing systems, the Industrial Internet has emerged as a critical infrastructure for intelligent manufacturing transformation. Grounded in the macro context of global manufacturing digitalization, this study systematically elucidates the core mechanisms of the Industrial Internet across data acquisition, resource allocation, and intelligent decision-making processes. By analyzing the implementation pathways of these technologies in specific manufacturing scenarios, it explores how platform empowerment, data-driven approaches, and ecosystem synergy are driving paradigm shifts in production models. The paper further provides forward-looking insights into diversified technological evolution trends, aiming to offer theoretical references and practical guidance for manufacturing enterprises pursuing intelligent transformation initiatives.

## Keywords

industrial internet; intelligent manufacturing; digital transformation; data-driven; application trends

## 工业互联网技术在智能制造中的应用及发展趋势探析

曹帅 葛盈盈 李磊

常州机电职业技术学院, 中国·江苏常州 213164

## 摘要

在新一代信息通信技术与制造体系深度渗透的情形下, 工业互联网逐渐成为智能制造变革的关键基础设施。本文以全球制造业数字化转型的宏观背景为立足点, 对工业互联网在数据采集、资源配置以及智能决策层面的核心机理进行系统阐述。通过对其在制造业具体场景里的落地路径展开剖析, 深入探究平台赋能、数据驱动和生态协同带来的生产范式革新。文章还对未来技术演进的多元化趋势进行前瞻性分析, 目的是为制造企业推进智能化升级提供理论参考和实践指引。

## 关键词

工业互联网; 智能制造; 数字化转型; 数据驱动; 应用趋势

## 1 引言

当前, 一场深刻的系统性变革在全球制造业领域上演, 传统大规模流水线生产模式正逐步被以个性化定制、柔性制造为核心的新型业态所取代。于工业 4.0、中国制造 2025 等战略的引领之下, 工业互联网作为连通工业全要素的枢纽, 凭借构建“人机料法环”全连接体系的方式, 将信息孤岛打破。

## 2 工业互联网技术在智能制造中的核心优势

### 2.1 泛在互联, 构筑全域感知神经网络

工业互联网技术借助 5G、物联网等前沿手段, 实现智

能制造全流程、全要素的泛在互联, 把生产设备、原材料、产品以及操作人员、管理系统紧密联结成一个有机整体<sup>[1]</sup>。它打破传统生产环节的信息壁垒, 让各类生产数据能够实时传输、无缝衔接, 相当于为智能制造体系搭建起一张全域覆盖的感知神经网络。这张网络可精准捕捉生产过程中的每一个细微变化, 小到设备的微小故障隐患, 大到生产流程的整体波动, 都能被及时感知并且反馈, 为后续生产调控提供最直观、最及时的基础数据支撑。

### 2.2 数据驱动, 赋能精准决策智能化

工业互联网技术的核心价值之一, 就在于对生产全流程产生的海量数据进行高效采集、清洗以及分析处理, 将分散的碎片化数据转化为具有实际指导意义的价值信息。依托大数据分析模型与人工智能算法, 这些数据能够精准呈现生产效率、产品质量、设备运行状态等核心指标的变化规律, 还能提前预判生产过程中可能出现的各类问题。基于这些精

【基金项目】江苏省“青蓝工程资助”。

【作者简介】曹帅(1985-), 男, 中国湖北咸宁人, 硕士, 副教授, 从事物联网、工业互联网研究。

准的数据分析结果，企业管理层能够摆脱传统经验决策的局限，做出更科学、更高效的生产调度、质量管控以及设备维护决策，真正实现智能制造决策的智能化与精准化。

### 2.3 云边协同，提升系统响应敏捷性

工业互联网技术构建的云边协同架构，完美兼顾云端的海量数据存储、深度分析能力与边缘端的实时处理、快速响应优势。边缘节点可就近处理生产现场产生的实时数据，比如设备运行参数、生产工艺反馈等，无需将所有数据全部上传至云端，极大降低数据传输延迟，让生产现场的突发问题能够得到即时响应、快速解决。云端则负责对边缘端上传的汇总数据进行深度挖掘、长期存储以及全局优化，为生产流程优化、长期规划制定提供支撑。这种云边协同的模式，有效提升了智能制造系统的整体响应敏捷性，让生产调度更灵活、设备运维更高效。

## 3 工业互联网技术在智能制造中的具体应用

### 3.1 设备预测性维护与健康健康管理

设备预测性维护与健康健康管理是工业互联网技术在智能制造领域的核心应用之一，其核心逻辑是通过工业互联网平台整合设备运行过程中产生的各类数据，依托大数据分析以及机器学习算法，实现对设备运行状态的实时监测、异常识别以及故障预判。智能制造场景下的生产设备往往具备高精度、高负荷、高联动的特点，一旦出现故障停机，不仅会影响生产进度，还可能造成不小的经济损失<sup>[2]</sup>。工业互联网技术通过在设备关键部位安装各类传感器，实时采集振动、温度、能耗、运行时长等核心数据，再将这些数据传输至云端平台进行深度解析，精准识别设备运行过程中的微小异常信号，提前预判可能出现的故障类型、故障部位以及发生时间。相较于传统的定期检修模式，这种维护方式能够有效避免过度检修造成的资源浪费，同时杜绝因检修不及时导致的突发故障，让设备始终保持最佳运行状态，进而保障智能制造生产线的连续稳定运行，降低设备维护成本，提升生产效率。

### 3.2 生产全流程可视化与数字化管控

生产全流程可视化与数字化管控依托工业互联网技术，打破智能制造各生产环节的信息壁垒，实现从原材料进场、生产加工、质量检测到成品出库的全链条数字化覆盖以及可视化监管。在智能制造车间中，工业互联网平台能够整合生产计划、设备运行、物料流转、人员调度等各类信息，通过可视化界面实时呈现各环节的运行状态，让管理人员能够直观掌握生产进度、资源利用情况以及潜在问题。管理人员无需深入生产现场，就能通过终端设备查看每一道工序的加工参数、产品合格率、物料库存等关键数据，同时可根据实时数据对生产过程进行动态调控，比如调整生产节拍、优化人员配置、调配物料供应。这种管控方式彻底改变了传统生产管理中信息滞后、沟通不畅的问题，让生产管理更加精准高效，同时能够及时发现生产过程中的浪费现象以及质量隐

患，助力企业实现精细化生产，提升产品质量稳定性，降低生产运营成本。

### 3.3 基于数字孪生的虚拟仿真与调试

基于数字孪生的虚拟仿真与调试是工业互联网技术与智能制造深度融合的重要体现，其核心是通过工业互联网技术构建与物理生产系统 1:1 对应的数字孪生模型，将物理世界的生产设备、生产流程、环境参数等全部映射到虚拟空间<sup>[3]</sup>。在智能制造生产线搭建以及工艺优化过程中，工作人员可借助虚拟仿真模型，提前对生产流程、设备布局、工艺参数进行模拟调试，无需动用物理设备就能验证生产方案的可行性，发现并解决潜在的设计缺陷以及流程冲突。

### 3.4 供应链协同优化与柔性配置

供应链协同优化与柔性配置借助工业互联网技术，打破智能制造企业与上下游合作伙伴之间的信息孤岛，实现供应链各环节的信息实时共享、协同联动以及柔性调度。智能制造的核心需求之一是快速响应市场变化，而传统供应链模式存在信息传递滞后、协同效率低下、资源配置僵化等问题，难以满足柔性生产需求。工业互联网平台能够整合供应商、生产商、分销商、客户等全链条资源，实时采集供应链各环节的库存、产能、订单、物流等数据，通过大数据分析实现供应链资源的精准匹配以及动态优化。

### 3.5 个性化定制的规模化生产模式

个性化定制的规模化生产模式依托工业互联网技术，破解了传统制造业中个性化定制与规模化生产之间的矛盾，实现了“一对一”定制与批量生产的有机结合，这也是智能制造的重要发展方向。在传统生产模式下，个性化定制往往意味着生产效率低、成本高、周期长，难以实现规模化推广，而工业互联网技术通过整合客户需求、生产资源、工艺技术等各类信息，构建起柔性生产体系。企业可通过工业互联网平台收集客户的个性化需求，将这些需求数据转化为生产指令，再通过数字化生产线实现柔性加工，同一生产线可同时处理不同规格、不同样式的定制产品，无需进行大规模的生产线调整。

## 4 工业互联网技术在智能制造中的发展趋势

### 4.1 平台开放化：构建互通共享生态圈

未来，工业互联网平台将逐步走向开放化发展，打破以往平台封闭运行、资源分散的格局，构建起互通共享、互利共生的工业互联网生态圈，这也是工业互联网发展的必然趋势。开放化的工业互联网平台，会打破行业壁垒、地域限制以及技术边界，向产业链上下游企业、科研机构、第三方服务商等开放核心能力与资源，包括数据接口、算法模型、应用开发工具以及算力资源等，让各类主体都能依托平台开展创新合作。比如中国联通格物 Unilink 工业互联网平台，作为国家级双跨平台，正逐步开放自身的连接能力与核心中台资源，汇聚各类生态伙伴，为不同行业企业提供全流