（大点数字孪生模型，后面是数字孪生模型下两个具体的问题）

针对工业现场复杂环境下无线网络同步精度较低，节点计算性能不足的问题，拟通过在边缘节点建立数字孪生模型来降低无线网络中不确定性因素对时钟同步精度的影响；针对无线网络中节点时钟晶振受温度等因素干扰产生漂移的问题，拟基于边缘节点处的数字孪生时钟模型，研究时钟漂移量的预测与估计技术，增强本地时钟稳定性并降低时钟同步所需交互次数，以相同的能源消耗实现更高的时钟同步精度；针对主体网络的无线网络节点间的传输延迟不确定性导致的数字孪生时钟模型建模存在误差的问题，研究5G网络的载波间隔灵活分配技术，缩短通信时隙并减小传输延迟估计误差，实现主体网络的高精度时钟同步。

技术路线

研究方法

工业现场的分层多级时钟同步架构

针对工业现场多种异构网络组成的复杂网络结构，拟采用分层同步机制，上层研究5G和TSN网络之间的时间同步技术，设计5G的内生gPTP时间感知方案，提高5G-TSN主体网络时钟同步的可靠性和精确性，下层研究其他有线\无线工业网络与5G-TSN主体网络间的动态边界时钟补偿技术，修正异构网络间的时钟偏差，建立工业现场设备间统一的时间基准，支撑异构网络的高效协同调度。针对传感器数据融合、设备互操作等不同场景对于时钟同步精度的差异化需求，研究基于传输延迟和抖动等指标的时钟同步域划分技术，设计自适应的跨网时钟同步方案。

无线网络内部的精准时钟同步

针对工业现场复杂环境下无线网络同步精度较低，节点计算性能不足的问题，拟通过在边缘节点建立数字孪生模型来降低无线网络中不确定性因素对时钟同步精度的影响；针对无线网络中节点时钟晶振受温度等因素干扰产生漂移的问题，拟基于边缘节点处的数字孪生时钟模型，研究时钟漂移量的预测与估计技术，增强本地时钟稳定性并降低时钟同步所需交互次数，以相同的能源消耗实现更高的时钟同步精度；针对主体网络的无线网络节点间的传输延迟不确定性导致的数字孪生时钟模型建模存在误差的问题，研究5G网络的载波间隔灵活分配技术，缩短通信时隙并减小传输延迟估计误差，实现主体网络的高精度时钟同步。

针对工业现场多设备跨网协同需求，搭建分层时间同步架构，研发以TSN-5G为主体网络，其他工业网络为下层网络的时间同步机制，为设备协同提供统一的时间基准；针对复杂多变的工业生产环境，拟采用数字孪生技术建立高可靠时钟模型，设计时钟漂移的动态补偿机制，并采用载波分配技术提高5G网络时间同步报文的传输延迟估计准确性，提高时钟同步精度。

针对工业现场网络环境复杂，多种异构网络并存，

针对多种异构网络并存

在第五代（5G）无线技术不断扩展和部署的帮助下，分布式物理基础设施之间的及时大规模传感和控制信息交换正在成为现实[4]，导致连接设施之间的频繁交互。然而，大量设备和相关的海量数据的参与将导致意外的延迟，从而阻碍IIoT系统中分布式进程的智能化[5]。在分布式IIoT系统中，长期且不确定的网络延迟不可避免地成为及时高效信息交换的重要障碍[6]。作为保证高效分布式交互的最关键要求之一，IIoT系统内的精确时钟同步增强了分布式物理元素之间的协同作用[7]。如果工业基础设施之间没有一致的时钟基准，与时间指数不一致相关的数据包将被交换，从而导致对关键数据的不准确分析和依赖陈旧数据的决策。然而，日益复杂的工业环境对所有相关实体之间的时钟同步提出了更多挑战。一方面，随着ICT技术的广泛发展，在不久的将来，越来越多的工厂将依赖5G无线技术作为满足时间敏感应用关键需求的基本方式之一[8]。因此，基于有线标准、传统无线标准（如wirelessHART）和新兴的5G标准（如URLLC）的异构IIoT网络正在出现[9]，导致新的同步挑战，包括使用各种通信标准的分布式节点的不确定性延迟和跨标准同步[10]。另一方面，IIoT系统的动态行业操作环境使同步过程更具挑战性。正如先前研究和验证的[11]，[12]，与中等分辨率和办公室环境中的时钟相比，复杂环境中的时钟容易漂移。廉价晶体振荡器固有的温度诱导时钟漂移将不可避免地导致IIoT之间的时钟输出不一致