问题：本地时钟受环境因素影响

采用方法：利用数字孪生技术在边缘节点处建立时钟模型，并通过反馈估计不断更新时钟模型，控制时钟模型精度在可接受范围内。增强本地时钟稳定性，降低时钟同步所需交互次数，减少能源损耗。

问题：复杂网络环境

采用方法：分层时钟同步的架构，建立以5G，TSN为主体的时钟同步架构。主干网络采用TSN+5G的形式，与其他无线网络和工业有线网同步。对于不同层级的网络，将分配不同的同步性能指标，对于不同的时钟模型精度，将采用不同频率的时间戳交互偏移补偿处理（OCP）。5G与TSN之间的传输延迟较小，数据包延迟（PDV）变化较小，时钟模型较为准确，可以采用以时钟模型补偿校正为主，OCP为辅的同步方法。TSN和5G与其他无线网络之间PDV较大，时钟模型精度较低，则采用OCP为主，时钟模型预测补偿的为辅的同步方法。从而为每个层次的网络分配合适的同步频率并保证整体同步精度在要求范围内。

问题：PDV变化较大

个别节点跨网时钟同步时PDV较大的问题，多次OCP仍然无法保证时钟同步精度，并且过多OCP浪费资源，此时对这些节点传输信道进行建模分析，估计PDV的变化规律，并对这些节点进行补偿。

针对本地时钟受环境因素影响

针对网络的复杂性，

针对本地时钟随温度等因素漂移的问题，通过建立时钟理论模型，得到温度等因素和时间t的关系式，将本地时钟数据上传到边缘数字孪生节点，并通过建立范蒙德矩阵求解线性方程来得到各系数的估计值，通过本地时钟反馈时间戳来判断估计值误差保证所建立时钟模型的准确性，并根据所得参数为底层设备本地时钟进行时钟漂移补偿，实现增强本地时钟的稳定性，降低时钟同步所需交互次数的功能。

基于有线标准（如ethercat，TSN）、无线标准（如WIA-PA，Wifi6）和新兴的5G标准（如URLLC）的异构IIoT网络正在出现，导致新的同步挑战，针对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，采用分层同步的方式，建立以5G，TSN为主体的时钟同步架构。主干网络采用TSN+5G的形式，5G以网桥的形式和TSN网络进行对接。传统的现场总线和工业以太网通过有线的方式与TSN交换机连接，根据802.1AS标准进行高精度时钟同步；TSN主干网附近无线网络节点，采用聚类的方式进行同步，每个类选取头节点通过转换器向TSN交换机进行同步；远离TSN主干网的无线节点通过5G网络与TSN交换机实现同步，这些节点以终端的形式接入5G网络，再通过5G网桥实现与TSN交换机之间的同步。

针对5G和TSN跨网时钟同步时传输延时不确定的问题，采用数字孪生的方式进行补偿。将跨网关键节点的时钟数据上传到边界节点，计算得到时钟模型，预测时钟偏差并与真实时钟偏差进行比较，得到延迟的非确定部分延迟估计。通过反复迭代训练使得非确定部分的估计误差与实际误差差距在所要求精度范围内，从而实现跨网高精度时钟同步。

