



工业通信与5G工业应用

文/刘 丹 机械工业仪器仪表综合技术经济研究所

文章主要从以下方面来介绍：首先是工业过程与控制系统；其次是工业通信网络及特性分析。再次是5G工业应用发展与挑战；最后进行总结和展望。

工业过程与控制系统

工业通信和工业网络都是为了工业生产、工业控制服务的，按工业生产过程变量的时间连续性，工业生产的典型过程可分为连续控制和离散控制。

连续过程（Continuous Process）工业过程产品一般都是流体的（如液体、气体），过程

的输入输出变量为时间连续和幅度连续的量，变量一般是温度、压力、流量和液位等，以连续过程为主要特征的生产行业被称为流程工业、过程控制和过程自动化（PA）典型行业为石油、化工、水/污水、电力和冶金等。

离散过程（Discrete Process）工业过程产品一般都是“固态”的、按件计量的，过程的输入输出变量为时间离散和幅度离散的量，如产品数量、开关状态等，以离散过程为主要特征的生产行业被称为制造业、离散制造和工厂自动化（FA），典型行业为烟



刘 丹

机械工业仪器仪表综合技术
经济研究所博士

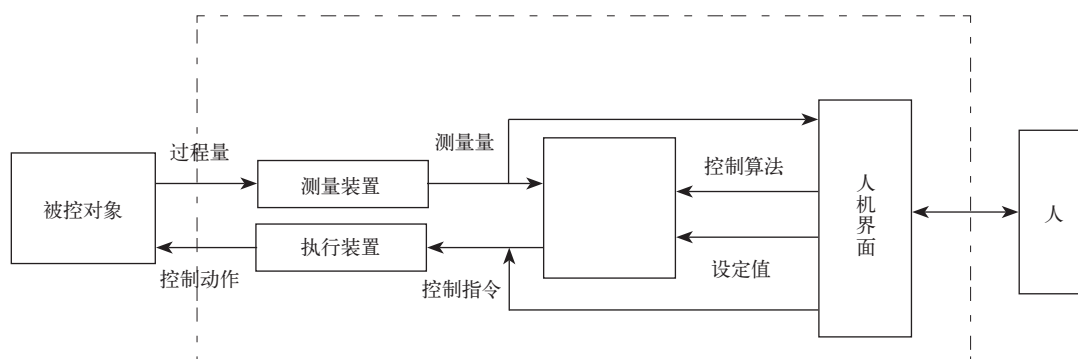


图1 工业控制系统

草、汽车、纺织和印刷等。

根据生产特性，连续控制和离散控制对于控制系统的运行方式、控制目标等有不同需求，因此产生了两种主要的控制系统，即分布式控制系统（DCS）和可编程控制（PLC）系统。当然，控制系统不仅仅是这两种控制，GB/T 30976表明工业控制系统还包括智能电子设备（IED）、监视控制与数据采集（SCADA）系统，运动控制（MC）系统、网络电子传感和控制系统、监视和诊断系统。不同的工业过程、控制系统对于通信性能的需求是不一样的，所以往往采用不同的工业网络类型。

典型的工业控制系统可以认为是一个大的闭环系统，如图1所示。其组成包括测量或检测装置、控制器、执行装置和必要的人机界面，这些要素通过工业通信网络连接起来，网络上传输的信号是数字信号，可以说工业控制系统向数字化、网络化方向发展。将工业控制系统内的所有要素连接起来的网络就是工业通信网络。抗干扰、可靠性和实时性是工业通信网络须解决的关键问题。

不管是何种工业生产过程，工业控制系统在其中都承担着神经中枢与控制大脑的角色，工业

通信网络是工业控制系统的重要组成部分。图2为典型过程控制DCS网络架构，图3为典型离散制造PLC系统网络架构，它们的层次关系实际上是没有区别的，只不

过是底层连接的设备有区别。比如DCS主要连接的是一些现场的仪表设备，而在离散控制里，经常看到的是大型的机器装备上面的IO设备把生产装备连接起来，

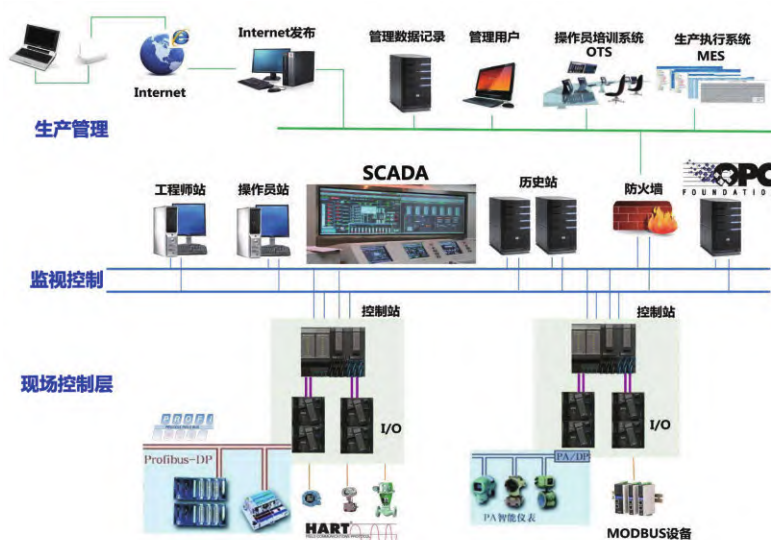


图2 典型过程控制DCS网络架构

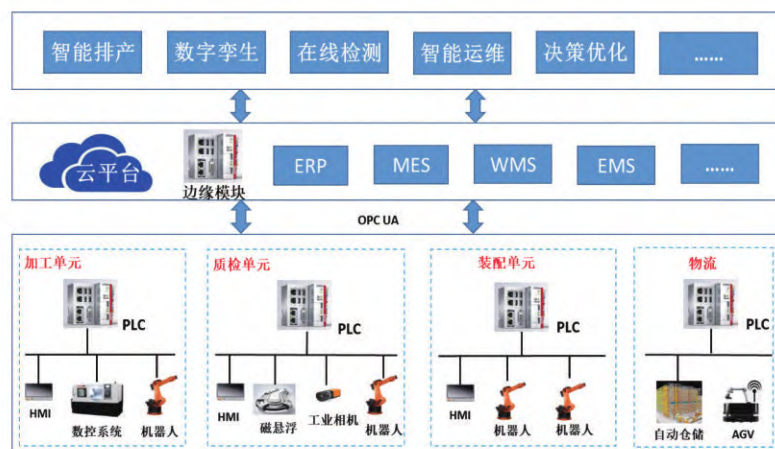


图3 典型离散制造PLC系统网络架构

但是闭环控制基本结构是不发生变化的。目前，控制系统已基本实现数字化，但代码编程、控制决策全部靠人工，很难实现复用，适应性不好。

新一代的信息技术不断的涌入，加持赋能到工业控制系统，如智能传感器可以实现泛在感知，大规模数据采集，真实反映现场实际情况，使得控制更加精准；云计算具有超强运算能力，资源共享（服务、工业软件、服务器、存储）；大数据进行优化分析、智能决策和预测性维护；软件定义可重构，灵活扩展；人工智能可以自学习、自组织、自适应和自决策；边缘计算可以快速响应和智能决策，满足实时业务、智能应用需求；区块链可以实现分布式存储，数据安全，等等。这些使能技术加速了制造模式的创新和制造系统的演进。

当前，云计算、大数据、人工智能和区块链等新一代信息技术作为使能技术，必将大幅提升工业自动化控制系统和测控网络的功能性能，并促使其向云化、智能化加速发展。当引入了新一代信息技术，从大系统大网络概念

角度，传统工业测控网系统架构将演变成云化的智能测控系统/网络，实质上也是向工业互联网演变。

工业通信网络及特性分析

从工业测控网到工业互联网，基于工业网络技术发展脉络，可以分析工业应用对于网络技术的特殊需求，从术语定义和标准化方面，理清各种工业网络技术的概念和作用范围，比对国内外概念理解上的差异，思考当前国内工业网络技术与生态建设对于智能制造应如何更好地发挥积极作用。

1. 工业对网络技术的严格要求

(1) 性能指标

1) 确定性 (Deterministic) 和实时性 (Real-time)。表示工业网络中数据传输时间是确定的、可预测的。确定性是通信系统的端到端传输延迟具有最大限值；实时性是系统在限定的时间内对外界事件做出处理与响应的特性。

2) 可用性 (Availability)。在给定条件下，事物在预定时间或时间间隔内处于某个状态并执

行所要求功能的能力吗，尽量缩短或避免系统停机时间。

3) 可靠性 (Reliability)。通信可靠性特指传输报文/消息在可接受延时而完整无损地到达最终目的地的概率（能力）。

(2) 物理层要求

1) 抗干扰能力。工业现场环境一般比较恶劣，比如高温、高湿、多尘和电磁干扰大等，这些都可能导致设备运行和通信质量不稳定，从而影响生产制造。

2) 流程工业。总线供电：通信线缆同时支持数据传输和设备供电。本质安全：在危险区域，要求现场仪表/设备具有本质安全（即仪表/设备在正常工作或规定的故障状态下产生的电火花和热效应均不能点燃规定的爆炸性混合物）。

(3) 安全性 (Safety & Security)

1) 功能安全 (Functional Safety)。功能安全通信是指在现场总线/工业以太网通信协议栈上定义附加的安全层协议，采取相应防护措施以避免通信过程中产生如讹误、意外重复、错序、丢失、不可接受延迟、插入、伪装



和寻址等通信错误。

2) 信息安全 (Security)。工业信息安全是指保护避免不可接受的、有意的 (计算机) 攻击或无意的工业自动化控制系统改变。

总之, 对于工业而言, 传输速率、带宽不是唯一决定性因素。

2. 工业通信性能指标

性能指标 (Performance Indicators) 规定RTE终端设备和通信网络的能力, 以及规定应用需求。IEC 61784-2中规定的指标虽然是针对工业以太网的, 但其他工业网络技术也可做参考。这些指标包括交付时间、端节点数、网络拓扑、RT吞吐量、非RT带宽、时间同步精度、非时基同步精度和冗余恢复时间等, 在工业中应用5G时, 也要参考这些性能指标的要求。当然, 不同的应用场景, 对于通信性能的要求是不一样的。

3. 工业应用实时等级与应用领域

在工业里要划分实时等级并确定应用领域, 一般可以用循环时间进行不同的实施等级的划分, 比如实施等级最严格的是电子传动, 其循环时间基本上是要要求在1 ms范围之内, 对于机床、机器人的运动控制, 要求达到10 ms/100 ms的量级, 一般离散控制的工厂自动化可以在秒级的范围之内, 因此不同的应用实际上对应不同的网络类型。

4. 工业通信

传统的工业通信网络中, 典型的自动化金字塔结构按照功能可以划分为设备层、控制层、车间层和企业层。工业通信网络有时也叫作工业控制网络或者工业测控网。包含了“测”(数据采集)与“控”(控制系统)的所有关联网络, 实现现场设备(如传感器、执行设备等)与控制

设备(如PLC、DCS控制器等)之间的互联互通; 形成各种智能生产装备、生产单元、生产线乃至整个自动化控制系统。工业测控网是主要解决工业现场“信息孤岛”问题, 实现智能制造数字化、网络化和智能化的基础网络设施; 发展呈现设备层和控制层专用网络向管理层通用网络延伸, 有线到无线, 以及新使能技术(如TSN、5G)不断融合应用的新趋势。

不同或相同层次设备、系统之间实现互联、互通和互操作, 本质上就是实现数据/信息的传输与使用。互联: 物理上分布于不同层次、不同类型的系统和设备通过网络连接并且传输数据, 但不理解用户数据(即参数); 互通: 通信双方能够一致地解析所传输数据/信息, 了解其含义; 互操作: 双方按照预先配置的逻辑关系、控制算法, 不同厂家的产品共同执行特定分布式自动化功能。通信不仅仅是纯数据的传输, 还是基于语义的信息交换。

围绕工业通信网络技术建立了比较完善的标准体系, 包括各种通信协议、通信行规、安全通信行规、信息安全行规、安装导则和高可用性网络等技术标准。

工业通信网络协议标准不涉及所传输的用户数据的内容和含义。因此, 面向不同行业应用时, 通常还需根据行业需求和设备特点, 定义特定的设备行规或数据字典, 约定设备的数据和行为特性, 以及设备行规、数据字典的描述语言或建模语言。

5. 智能制造对强大通信网络的需求

智能制造产生个性化定制、网络协同制造和远程运维等众多制造新模式, 对于网络开放性和互

联性和灵活性等提出新的需求与挑战。企业层和车间层属于IT网络范畴, 设备层、控制层、控制层属于OT网络范畴, 监视控制层和车间层和企业层的界限会逐渐被打破, 未来智能工厂内部网络可能会分为现场控制层、业务管理层。

为了实现跨层次的网络互联, 端到端的数据交互, 工业网络已经发生了较大变化。比如说, 控制层、车间层和企业层带宽的需求越来越小, 实时性要求和越来越严格, 要实现预测性维护、能源管理和状态监测等, 还有一些设备上的新要求。

总的来说, 智能制造对强大通信网络的需求包括服务质量、低延迟、健壮性、带宽、运行时接入、运行期灵活性、互操作性、基于名称的寻址、信息安全、云端连接、有价值的数据、资源需求低和可扩展协议栈等; 出现的技术包括TSN、IPv6、OPC UA、信息安全、语义描述和5G等, 以此满足对于网络的新的需求和挑战。

5G工业应用发展与挑战

1. 5G工业应用典型场景与案例

根据通信距离, 无线通信技术可分类为近场通信技术、短距离通信技术、中长距通信技术和超长距通信技术, 5G技术是4G技术的延伸, 比4G具有更高速率、更大带宽和更短时延。按照5G超高带宽、超低时延和超大链接特点, ITU定义如下三大应用场景。第一大场景是增强移动宽带eMBB: 在现有移动宽带业务场景基础上的大流量移动宽带业务提升, 聚焦对带宽有极高需求的业务, 例如高清视频、虚拟现实VR/增强现实AR等, 满足数字化生活需求。第二大场景是超高可靠、

超低时延通信uRLLC：聚焦对时延极其敏感的业务，例如自动驾驶/辅助驾驶、远程控制等，满足数字化工业需求。第三大场景是大规模机器类通信mMTC：针对大规模物联网传感与数据采集业务，例如智慧城市、环境监测和智能农业等，满足数字化社会需求。

2021年，工业和信息化部发布“5G+工业互联网”十个典型应用场景和五个重点行业，十个典型场景为协同研发设计、远程设备操控、设备协同作业、柔性生产制造、现场辅助装配、机器视觉质检、设备故障诊断、厂区智能物流、无人智能巡检和生产智能监测。五个领先行业应用实践包括电子设备制造业、装备制造业、钢铁行业、采矿行业和电力行业。

机器视觉检测场景有：OCR解码-屏幕信息识别，对屏幕、铭牌和标签字符进行图像信息采集，经5G网络上传至云端图像识别和分析，可以实现无接口设备、老旧仪表的智能数据采集，也可以实现基于OCR解码的自动分拣；产品缺陷检测，通过工业摄像头拍摄待检测物品，经5G网络上传至云端进行图像识别和分析，实现产品的缺陷实时监测和产线的自动分拣；空间引导——机械臂视觉引导，在自动装配和生产过程中，机器视觉空间引导通过视觉测量报告相关机器设备的位置和方向，实现对环境变化的实时测量，从而控制机器设备或机器人能够实现定位、对齐组件，或者多设备协同工作。

远程设备操控场景有：5G远程对刀。运用5G、无线测头等技术实现自动化对刀。同时，利用5G低时延、大带宽的特性，将对

刀过程数据实时传送至远程控制中心，改造后可规避工伤风险，大幅提升加工效率；机器人控制，依托5G网络环境，建立上层集中控制平台与现场工业机器人的高速、安全通信链路，进行工业机器人运动数据的实时采集与控制指令远程下发，实现远程控制；场内产线设备控制，基于5G网络，打通产线和集中控制中心数据链路，实现产线远程集中控制，将产线设备数据备份，形成产线设备数据闭环，优化控制策略，提升生产效率。

生产现场监测场景有：生产安全行为分析，在生产车间及园区中，通过高清摄像头拍摄现场人员行为及生产环境状态，经5G网络上传至云端进行图像识别分析，实现对人员异常行为和环境影响异常状态的实时监控以及预警，提高生产安全和人员管理水平；AGV控制，在生产车间及园区中，通过视觉、雷达和无线等多种技术进行融合定位和障碍物判断，经低时延5G网络上传位置和运动信息，实现AGV的自动避障，同时实现工业场景中AGV远程控制，提升产线自动化水平；大规模数采，生产与施工现场大量环境传感器可以通过5G网络在极短时间内进行电压、电流、振动、温度、湿度、亮度、空气质量和污染等信息状态的上报，可以实现设备的监控，也可以实现环境监控。

现场辅助装配场景有：AR辅助，在设备生产与远程诊断、维修过程中，通过AR技术对工业设备、管道仪表和电力装置进行智能巡检，以及生产和运维过程的远程专家指导，提升生产效率，降低运维成本；AR复杂装配，基于5G网络环境与AR技术，建立工

业设备装备过程的AR模型，为安装人员提供模拟操作技能培训的过程，提升培训效率，降低培训成本，也可以提供装备过程中的装配步骤指导和纠错等。

以榆林化学5G网络建设及应用项目为例，规划5G基站32个，已建18个，它是一个典型的流程行业，通过智能巡检系统，采用5G巡检手持终端，巡检信息实时上传。同时上传到集中控制平台，然后进行集中监测。一期方案室内采用NB-IoT/蓝牙地标，室外采用GPS进行定位，定位、园区物料和手环上其他信息通过NB网络回传到中心平台，室内定位精度1~5 m，分钟级上报。二期方案采用5G基站定位，可以实现室内亚米级定位。廊道和罐区采用5G巡检机器人巡检，全厂配备5G智能消防机器人和应急无人机。对企业的价值体现在提升安全性，监控园区物料信息、人员活动区域及人员身体状态，发生危险及时处理。

截至2022年5月底，我国建成5G基站160万个，占全球60%以上。5G工业应用中覆盖了装备制造、电子制造、港口、煤矿、冶金和石油石化等主要离散、流程型数百个行业/细分行业。在我国，主要运营商每年都有上千个工业应用的实践产生。

5G工业应用面临的挑战：①技术满足度，将通信的低时延、可靠性和安全性作为首要目标，5G的性能目前还有待进一步提升和验证；②价值满足度，5G工业应用如何满足企业的实际需求，产生实际价值；③兼容满足度，5G与现有工业控制网络的融合方法与技术还有待深入研究；④认证满足度，应用终端及5G网络在工业现场的验收

标准、设备和技术都处于探索阶段，有待进一步加强；⑤生态完整性，从5G芯片、模组、工业终端和集成等包含ICT和工业制造商、集成商、用户的生态需要构建。

2. 5G工业应用流程与解决方案

5G工业应用通用流程：①梳理工业应用场景对通信的要求，通过映射转换形成运营商建设工业5G网络的性能指标；②运营商根据用户提出的工业5G网络性能需求和自身的工业5G网络方案，进行工业5G网络的规划及建设；③工业集成商需要综合工业5G网络、边缘计算、大数据分析和人工智能等技术实现用户工业应用场景的需求；④评估机构及用户对建设内容进行评估及验收，以验证工业5G网络是否满足工业应用的需求。作为为运营商网络而生的技术，5G网络天然就是要构建一张巨大的公网，但这个网络跟日常工业企业的内网需求存在显著差别，工厂内部不同的业务需要的网络不同，更重要的是工厂网络一般是局域网，为了安全很多都追求与公网的物理隔离。

5G与工业应用融合建设：在工业网络的不同位置/层次接入具备5G通信功能的终端，采用QoS/切片技术、UPF下沉到企业等方式，利用边缘计算、人工智能和大数据分析等技术，实现设备层、控制层、车间层、企业层和云平台之间的互联互通和智能化。

基于5G工业模组的融合建设方案：采用5G模组（工业设备嵌入5G通信模组），通过集成到设备内部，实现5G与工业通信的深层融合应用。

基于网关、CPE的融合建设方案：采用集成网关实现数据汇

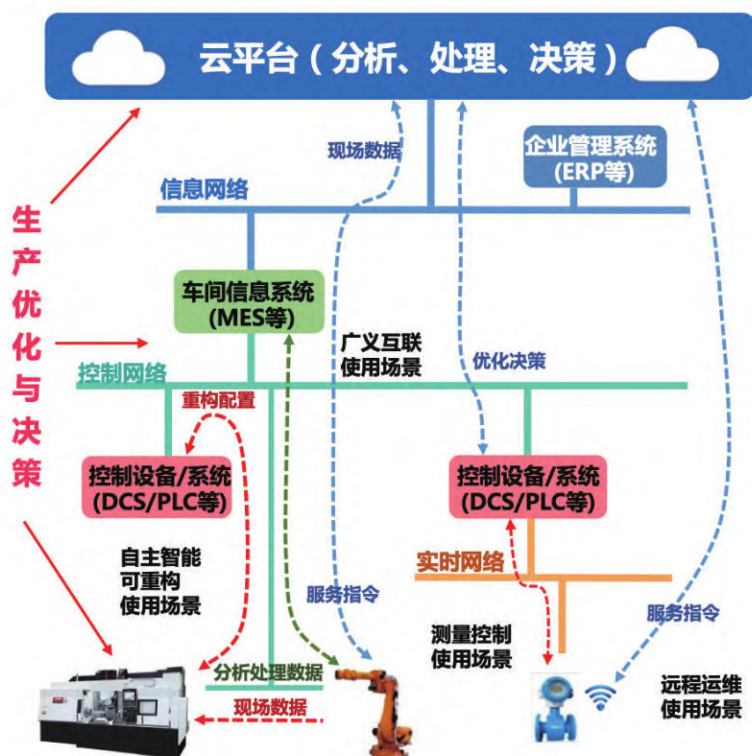


图4 工业网络发展趋势

聚；控制层、车间层等以工业网络通信（传统有线）为基础，可采用CPE、路由器等方式接入5G网络。

总结与展望

工业网络发展趋势与需求——与通用信息技术融合，如图4所示。

1) 支持新的工业大数据传输——数据种类和量级变化。无人或少人的智能工厂需要大量现场数据做决策支撑；远程诊断、预测性维护等智能应用使得现场设备上云已成“刚需”；视觉检测要求同时传输实时结构化数据和大带宽非结构化数据。

2) 支持灵活组网与网络融合。灵活组网：个性化定制要求生产线具有更高的灵活性，可实现生产线重构，要求网络配置简单，支持设备即插即用。大规模

设备互联，设备统一唯一标识，例如具有IP地址。打破控制网络与信息网络界限，实现一网到底，物理网络共存，使用相同的协议（更高）。但首要前提条件是更高的安全性。

工业网络将打破传统的封闭特性，从局域网向广域网发展，因此，在进行网络架构设计时，需从整体考虑网络、计算、储存和业务等一体化设计，有效实现端边云协同。EA

（本文源自《2022数字化车间和智能工厂》在线论坛第三期：布局工业通信和5G+工业互联网，编辑整理：朱金凤）



扫描二维码了解更多