



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工控应用需求与5G网络指标 转译技术报告

——离散制造领域 (2024年)

工业互联网产业联盟 (AII)
2024年10月





工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工控应用需求与 5G 网络指标转 译技术报告

——离散制造领域

(2024 年)

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟

2024 年 10 月

声 明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议，不构成法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归工业互联网产业联盟所有（注明是引自其他方的内容除外），并受法律保护。如需转载，需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

工业互联网产业联盟

联系电话：010-62305887

邮箱：aii@caict.ac.cn

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

编写说明

近年来，主流制造强国纷纷推出产业政策，推动制造业的数字化转型，以促进制造业智能化转型。2013年，德国提出“工业4.0”战略，建设高端智慧工厂和智能制造创新中心；日本发布“制造白皮书”，提出“社会5.0”计划，发展机器人、新能源汽车、3D打印等；2015年，战略，加速制造业转型升级。

在智能工厂主要5大特征（互联、优化、透明、前瞻和敏捷）中，互联是前提，也是最大的价值所在，而网络连接技术是实现人、机、料、法和环互联的基础。5G技术作为新一代移动通信技术，切合了智能制造对无线网络的应用需求，在时延、带宽和可靠性等能满足工业环境下设备互联和远程交互应用需求。

随着5G新型基础设施建设政策的发布，以及国家倡导的5G应用“扬帆”行动计划，我国5G网络加速普及并全面协同发展，从信息通信实现人与人之间的连接，迈向万物互联的数字化新时代。5G技术将应用于工业、农业、家居、医疗、物流、交通等各个领域，助力全球数字化转型。其中，工业是5G应用的重点领域，“5G+工业互联网”为传统领域带来了新的机遇与挑战。

最近几年，在离散制造业的人机料法环生产管理，例如数采、视频监控、移动巡检、MES看板、物流AGV调度等，以及矿港钢等流程行业的远控，例如天车远控、龙门吊远控、无人集卡、采煤机远控、掘进机远控等场景，5G已经开始进入1到N的批量复制阶段。而“5G+工业互联网”进入PLC级现场级控制的核心生产环节，目前还0⁻1的孵化阶段，这是真正促进柔性生产的最关键的一环，同时这也是对5G网络的低时延、低抖动，高确定性、高可靠性、高稳定性有着相对更高的需求。

本研究报告就是面向“5G+工业互联网”进入PLC级现场级控制的核心生产环节，致力于分析离散制造工控领域业务场景和应用需求对5G网络指标需求的映射与转译方法。为孵化并催熟“5G+工业互联网”真正进入核心生产环节实现柔性生产铺平一些道路。

参与编写单位：中国信息通信研究院、华为技术有限公司、中国电信股份有限公司研究院、中国移动通信有限公司研究院、中国联合网络通信有限公司研究院、菲尼克斯（南京）智能制造技术工程有限公司、吉利汽车研究院（宁

波)有限公司、精诚工科汽车系统有限公司、深圳艾灵网络有限公司、罗克韦尔自动化、高通无线通信技术(中国)有限公司、北京航空航天大学、北京科技大学、贵州大学

编写组成员(排名不分先后):

中国信息通信研究院: 黄颖、朱瑾瑜

华为技术有限公司: 包盛花、孙俊男、马刚鑫

精诚工科汽车系统有限公司: 袁占江、黄晓笠、李凡

吉利汽车研究院(宁波)有限公司: 阚小琳、王灵峰

中国电信股份有限公司研究院: 魏垚、廖洁玉、李洋

中国移动通信有限公司研究院: 侯庆东、郭姗、李晗阳

中国联合网络通信有限公司研究院: 张涛、李静、安岗、李文杰

北京航空航天大学: 刘艳强

北京科技大学: 孙雷、王健全

贵州大学: 邹赛

深圳艾灵网络有限公司: 俞一帆、耿庆官

菲尼克斯(南京)智能制造技术工程有限公司: 张龙、陈敏、富宣

罗克韦尔自动化: 李铮

高通无线通信技术(中国)有限公司: 陈卓

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

目 录

一、5G 进入现场级工控领域的价值与挑战典型场景	1
(一) 典型场景	1
(二) 关键价值	7
(三) 主要挑战	8
二、基于工控业务需求的应用 KQI 指标描述	9
(一) 现场级工控场景应用的 KQI 概述	10
(二) 应用 KQI 之一：通信服务可用性	10
(三) 应用 KQI 之二：生产节拍	15
(四) 应用 KQI 之三：安全 Safety	18
(五) 应用 KQI 之四：控制精度	25
三、网络 KPI 指标定义	28
(一) RTT 最大时延	28
(二) RTT 平均时延	28
(三) 最大 RTT 时延抖动	28
(四) 最大接收包间隔抖动	29
(五) 丢包率	30
(六) 时间同步精度	30
四、业务 KQI 对网络 KPI 需求的转译方法	30
(一) 指标转译及映射方法	30
(二) 工控 KQI 与 5G KPI 的映射模型	31
(三) 5G 网络指标的分级分档	32
(四) 转译工具工作原理	34
五、应用案例	36

(一) 通信服务可用性转译应用案例	36
(二) 生产节拍转译的案例	38
(三) 生产安全转译的案例	41
(四) 生产精度转译的案例	43
附录	46
参考文献	48



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

一、5G 进入现场级工控领域的价值与挑战典型场景

(一) 典型场景

1. 离散制造工厂的网络架构

传统工厂网络以 ISA-95 架构为基础，划分为 5 层：从上至下依次为 ERP、MES、SCADA、PLC 和现场设备。根据行业属性和企业规模不同，会进行层次优化调整：离散制造行业例如汽车制造领域以 MES+PLC 层的应用为主，SCADA 层相对简化。如图 1 所示，将汽车制造领域应用场景按照 MES、SCADA、PLC 三层进行分类，并分开说明各场景下的业务需求。

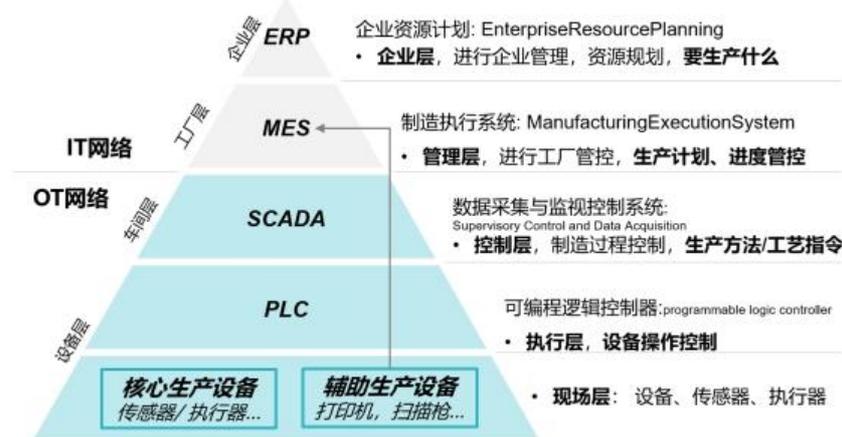


图 1 ISA95 标准定义的 5 层业务架构

ERP（企业资源计划）和 MES（制造执行系统）属于生产管理网的 IT 网络，ERP 系统需要汇总客户需求，并整合当前资源（仓储/物流/产能等），并最终将生产计划下发至工厂侧；MES 制造执行系统负责工单/人/机/料的管理，核心是提升生产管理能力，主要应用于离散型制造业（将原材料加工成零件，经部件组装和总体组装成为成品，完全按照装配方式生产加工的制造类型，例如 3C/家电/汽车）例如汽车制造中，完成生产决策到生产过程的衔接工作，其核心是生产调度（生产任务的细化，工单下达，协调）和生产管控（管理设备，生产状态，质量监控），侧重生产的人机料法环管理。

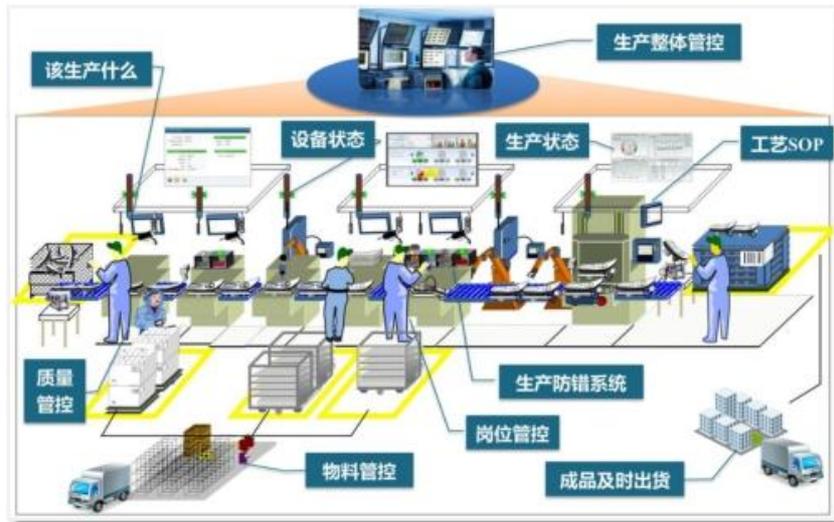


图 2 MES 系统应用场景示例（某离散工厂）

SCADA（数据采集监视控制系统）属于监督控制网，SCADA 系统负责大型设备系统实时监控和集中操控，主要应用于流程型制造业（典型的流程工业包括电力、石油、煤矿、化工、港口等）中完成例如采煤机、龙门吊、天车等设备的数据采集和监视控制工作，其核心是远距离人机交互和控制（遥测、遥信、遥控、遥调、遥视），侧重生产设备的管控。离散制造行业例如汽车制造领域的 SCADA 层的典型应用是设备控制例如物流 AGV 和设备监控诊断。



图 3 SCADA 系统应用场景示例（某煤矿开采区）

PLC 属于设备控制网，对包括如工艺 AGV、EMS 吊具、机器人、I/O 设备以及各工艺工具等实际生产产线中的设备控制。

工厂控制网络一般按照工厂 => 车间 => 生产线 => 工岛进行分层控制：

- PLC 北向： PLC 与 SCADA/MES 系统的通信，属于 SCADA/MES 层
- PLC 东西向： 包括 L2C 和 C2C
 - C2C(Controllor-to-Controllor)： 工岛 PLC 与工岛 PLC 间的通讯，以及机器人与机器人之间系统控制时的通信。
 - L2C(Line to Controllor)： 产线 PLC 与工岛 PLC 间的通讯，或线边 PLC 与工艺 AGV/EMS 间的通信。往往业界通常有会将 L2C 归为 C2C 一类。
- PLC 南向： 也称 C2D(Controllor-to-Device) 或者 C2I0(Controllor-to-I/O)，工岛 PLC 到设备之间的通信，这些设备包括：
 - I/O 类设备： 如开关量传感器/执行器
 - 智能设备类： 如工业机器人臂
 - 运动控制类： 如编码器/伺服电机

其中，PLC 东西向和南向场景就是我们一般说的 PLC 现场级控制场景，是对网络的实时性、确定性要求相对最强的场景。

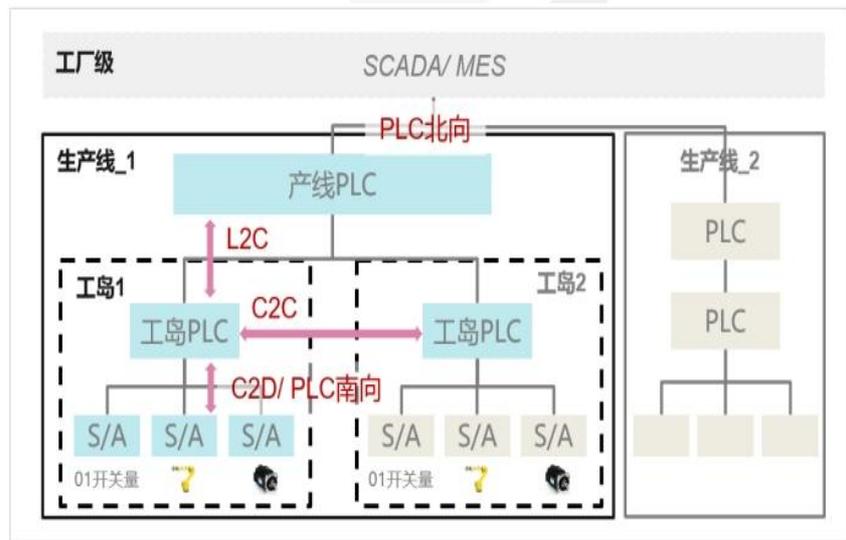


图 4 PLC 现场级控制网络架构示例（某离散制造工厂）

2. PLC 现场级控制场景

PLC 现场级控制场景是指对包括如工艺 AGV、EMS 吊具、机器人、I/O 设备以及各工艺工具等实际生产产线中的设备控制的场景，为了更加具体地描述现场级控制场景中的典型应用场景，本文以离散制造业中相对较具典型性先进性

的汽车制造生产车间为例来列举几类典型应用场景，并对比 5G 无线通信相对于传统有线通信的优势和价值。

1) C2C 场景：工艺 AGV

工艺 AGV 指与产线 PLC 有信号交互的 AGV，一般 AGV 侧有本地主控、PLC 或嵌入式控制装置，通过 WIFI 等无线手段与主线 PLC 或调度上位机/PLC 等进行交互，传统 WIFI 通讯的问题为信号覆盖面积小，部分死角无信号，抗干扰能力差，同时可在线数量低，通讯时延长等问题。5G 模式的 AGV 可解决上述问题，在通讯时延/质量/连接数/漫游等方面均有大幅提高，同时可以支持更低响应时间，提高生产节拍。

另一方面随着 5G 传输能力的不断提高，对于含 PLC 的工艺 AGV 可以将本地 PLC 云化至主线 PLC 或上位 PLC 中，AGV 本地仅保留 IO 及驱动功能。注意，该方式下 AGV 本地应保留基本安全功能，如急停等功能，保障设备使用安全；



图 5 工艺 AGV 示意图

2) C2C 场景：EMS

EMS (Electrified Monorail System Conveyor) 单轨自行运输车系统，在主要应用在汽车、家电等行业的输送及装配等方面，根据其负载可分为轻载 EMS 和重载 EMS，按通讯方式可分为滑触线通讯、半波通讯、漏波通讯、波导通讯等。首先，物理连线的安装和维护要求较高，需要专业人员进行安装调试和定期检修，增加了人力成本。其次，这种物理介质通信方式与特定的分散控制器捆绑且集成技术基本被一些国外厂商垄断，增加了系统的采购成本。再者，

由于安装和维护过程繁琐耗时，它会在系统升级或故障恢复时导致生产线暂停，从而影响生产效率并带来经济损失。此外，传统系统的开放性不足，限制了与其他智能制造系统的集成能力。更换为 5G 方案可以消除对物理通信介质的依赖，从而简化了安装和维护流程，减少了因维护和升级导致的生产停滞时间，不仅降低了系统的运行成本，也提高了生产效率和系统的可靠性。



图 6 EMS 示意图

3) C2C 场景：机器人协同控制

焊装车间是汽车制造中自动化程度最高、机器人使用数量最多的车间。在焊装生产过程中，存在各种机器人与机器人协同工作的情况，如：两台或多台机器人协同焊接、协同涂胶、协同搬运。通过 5G 实现无线化，减少机器人间的线缆部署，网络简化，减少硬件成本，使产线部署更灵活。

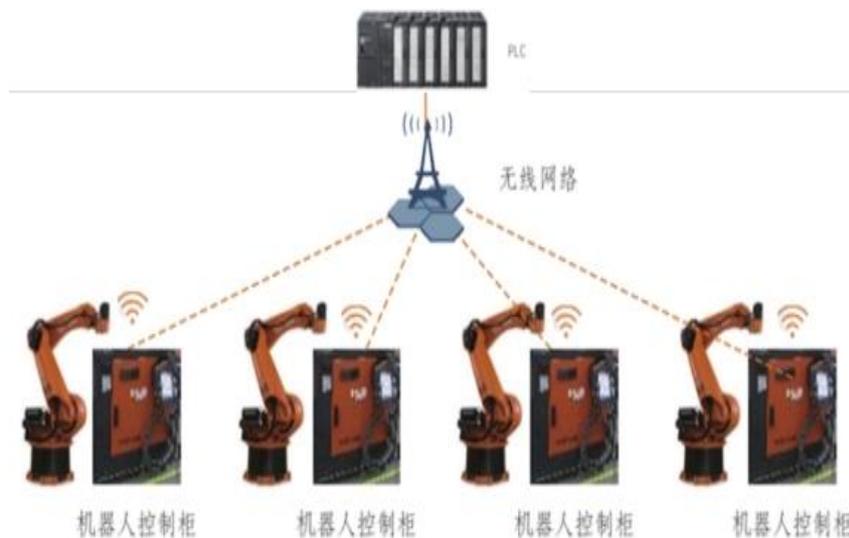


图 7 机器人协同控制组网示意图

4) C2I0 场景：工具切换/无线阀岛或 IO 设备

为适应产品制造由 MTS（备货型生产）向 MT0（按订单生产）乃至 ETO（按订单设计）的变化，产线对柔性生产的需求不断提升，机器人的工具切换，正是一项有效对策，工具切换可以使机器人在工艺流程不同阶段使用不同工具，或通过更换不同工具适应生产不同型号产品的需求，使得多型产品共线生产成为可能；抓手、焊枪、涂胶枪、拧紧枪等是机器人的工具，工具端分布式 IO 模块与机器人 PLC 通过总线通信。5G 无线化可以简化有线现场总线网络，减少硬件，减少维护工作量，减少空间旋转运动造成的物理通讯故障（断线、接头松动等），无现场总线物理对接，无通讯对接时重启等待时间，减少对接设备维护工作量，每一工具都是通讯永远在线状态，可提升生产节拍和效率。

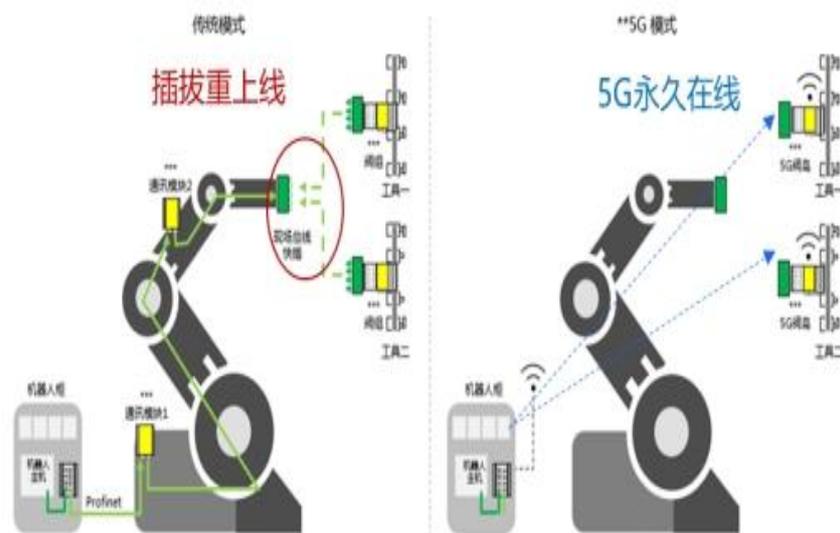


图 8 工具切换图示

5) C2I0: 随行夹具/转台/滑台等

随行夹具是汽车柔性生产线移动的工装设备，该工装设备通常有分布式 IO 设备如阀岛等，5G 无线化可简化有线现场总线网络，减少硬件，减少维护工作量，减少水平运动造成的物理通讯故障（断线、接头松动等），无现场总线物理对接，减少对接设备维护工作量，提升设备开工率；每一随行夹具都是通讯在线状态，在多车型交替生产时，便于优化程序提升生产节拍和效率。

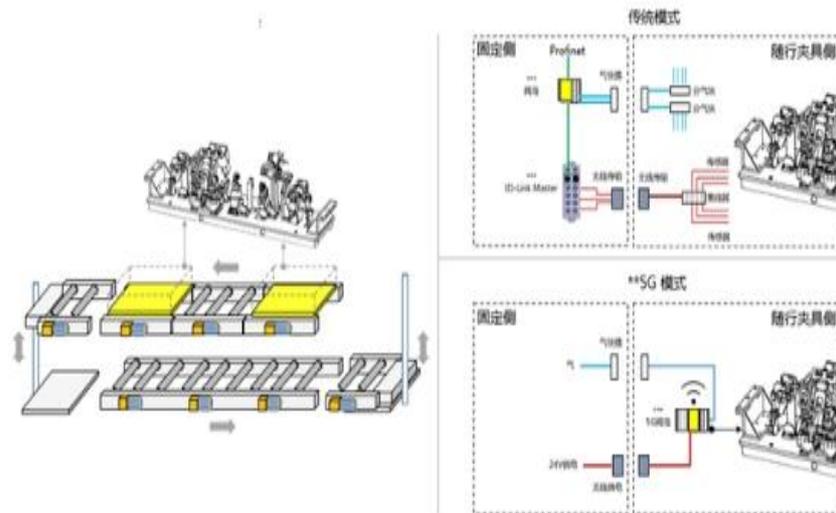


图 9 随行夹具示意图

5G 逐步进入 PLC 层级的东西向、南向的核心生产环节各应用场景后，大大使能了车间的柔性生产，降低成本，简化网络结构，减少故障时间和运维时间，提高设备开动率，提升产能，甚至可以进一步催生集中化/虚拟化 PLC 的未来产线形态趋势。

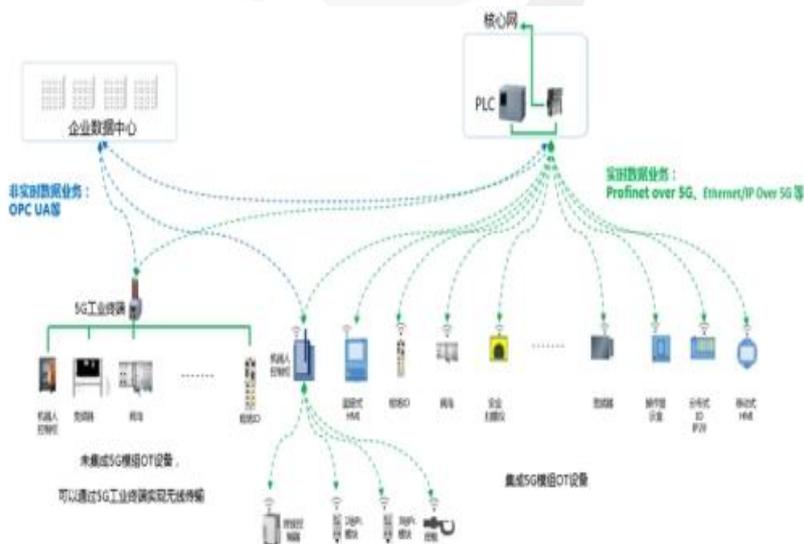


图 10 5G 无线接入的 PLC 现场级控制场景组网图示意图

(二) 关键价值

工业互联网是连接工业生产系统和工业生产各要素的信息通路，是实现“以信息为中心”的智能制造系统的基座，制造行业各生产车间的传统有线现场控制应用的网络多数是树形或者环形加树形的结构，树形拓扑工控网络受限

于组网配置与网络端口的物理绑定，难以快速灵活调整，借助移动互联网优化后的现场控制应用的网络呈现扁平化的星型网络结构，更好地使能设备布局的灵活调整，是实现柔性化生产的前提。

5G 技术是最新一代蜂窝移动通信技术，能够提供增强移动宽带、低时延高可靠和超大连接等网络能力，是赋能行业数字化转型的新型基础设施，尤其是 5G 增强的超低时延和超高可靠能力（uRLLC）可以满足现场级控制的工业以太网（Real Time）级要求，解决现有有线应用中走线复杂、改造工程大、插拔故障高和问题定位困难的痛点；同时解决现有汽车生产过程中 WIFI 的应用痛点，如网络覆盖差、干扰控制难、信道资源和连接数受限、业务保障能力低等痛点。更为重要的是 5G 技术可以与边缘计算、人工智能等新兴技术进行深度融合，将成为工厂应用创新的孵化器和使能器：其一，可通过 5G 网络全域覆盖、大连接和连接即服务等特性，实现一次开通、永久在线、灵活移动的业务连接能力，满足例如大量现场级 Sensor 数据实时采集的数字孪生以及大数据预测性维护等业务需求，而传统有线在生产调整时需要将原来的设备和线路进行改造，费时费力费钱；其二，通过 5G 网络超低时延超高可靠、内生确定性等特性，取代现场级控制场景中的插拔、移动、转动或有柔性生产需求环节的有线工业以太网总线，打破有线连接的位置束缚，快速搭建移动化、高度灵活的柔性生产线，满足各类快速上市的新品或者小批量产品的生产；其三，利用 5G 一网多能、虚拟化 PLC、云端 AI 能力，实现 5G+边缘化/虚拟化 PLC+AI 智能的端边云协同控制架构，全面使能数字化智能化的柔性产线。

（三）主要挑战

目前，5G 在现场级工业控制领域中的应用成熟度不够，依然面临多方面的挑战。

- 现场级工业控制场景对 5G 网络有不同指标要求，一张网络需要同时承载不同业务。不同的业务，不同的应用对网络不同的指标有不同的需求，如何满足不同业务需求以实现一网多能是 5G 进入工控环节面临的挑战之一。

- 当前的工业协议较多，在不同的工业协议下，即使具有相同的业务需求，对通信指标等级要求也各不相同。例如，不同的工业协议存在不同的看门狗机制，将造成安全和可用性等业务场景需求对 5G 网络指标转译的差异。如何在不同工业协议下实现业务需求到通信指标的转译是 5G 进入工控环节面临的挑战之一。

- 现有的部分工业控制场景对通信指标要求过高，例如，高精度全自动协同场景要求达到 1ms@99.999% 的时延可靠性指标。然而，5G 无线通信是靠硬软件资源以及空口资源来提供性能和容量能力的，过高的 5G 性能需求势必会牺牲其容量能力。如何尽可能满足业务需求并提高通信容量是 5G 进入工控环节面临的挑战之一。

面对这些挑战，我们首先需要明白的是，一方面，5G 超高可靠超低时延能力受限。受限于无线通信系统本身的技术特点，空口时延和可靠性受到无线传播环境中慢衰落、快衰落、干扰等影响，其丢包率要远高于有线传输，不可能无限的提升时延和可靠性能力，因此需要明确工业控制中 KQI 要求对应的网络 KPI 指标，以确定 5G 能够满足哪些应用场景，还有哪些极限场景目前的 5G 能力还无法满足；另一方面，5G 超高可靠低时延的保障能力受到系统硬件和软件资源、空口资源等影响，网络连接能力与保障要求相关。在无线通信系统中，一般通过降低码率和冗余传输等技术来降低系统重传，从而降低时延提高可靠性，但会带来空口资源消耗的增加，降低网络连接用户数。因此需要综合考虑业务连接和业务保障能力，实现成本和性能的平衡。所以首当其冲的是需要研究清楚离散制造现场级工控领域的应用场景到底有哪些应用 KQI 需求，以及这些应用 KQI 对 5G 网络的哪些指标有怎样的性能需求，这样才能让 5G 没有过设计，才能确保 5G 网络在能满足业务需求的前提下去尽量提高容量规格，以使能 5G 柔性生产的真正商用和批量复制。

二、基于工控业务需求的应用 KQI 指标描述

（一）现场级工控场景应用的 KQI 概述

在工业领域，OEE（设备综合效率）确定了真正具有生产力的制造时间的百分比，是衡量制造业生产效率的黄金标准。OEE 数值高则意味着在尽量少的停机时间的情况下尽可能快地制造优质产品。如 OEE=100% 的含义即 100% 的质量（只有好的产品）、100% 的性能（尽可能快）和 100% 的可用性（没有停机时间）。即：

$$OEE = \text{可用性} \times \text{性能} \times \text{质量}$$

从上述工业 OEE 概念可以进一步推导出现场及工控场景的 KQI（关键质量指标）：

可用性对应的是产线可用性，即产线可按照要求正常运行的时间占比：

$$\text{Availability} = (\text{计划工作时间} - \text{计划停机时间} - \text{非计划停机时间}) / (\text{计划工作时间} - \text{计划停机时间})$$

从上式不难看出，为确保产线可用性就需要让非计划停机时间符合生产要求，即减少产线停机时间。常见的停机原因一般有两个：一是通信可用性即工业以太网总线（例如 Profinet）的看门狗超时导致的产线停机；另一方面是因为安全 Safety 看门狗超时导致的产线停机。

性能其实对应的就是产线的产能或生产节拍；

质量对应于良品率，在离散制造业生产中决定良品率的其实就是控制精度，控制精度不达标，就会导致次品甚至破坏生产工具或设备。

综上，使得整体 OEE 效率达标，就是需要确保产线的可用性（通信可用性和安全 safety）、生产节拍、控制精度都满足业主需求，这也就是现场级工控场景应用的 KQI。

（二）应用 KQI 之一：通信服务可用性

1. 概述

除去设备的可用性影响，通信服务可用性主要受网络包级可靠性指标影响，即丢包、时延、抖动等网络性能指标。网络丢包，时延或抖动加大等问题会触

发工业以太网看门狗机制，从而导致宕机。由此可见，不同的看门狗机制影响 KQI 指标通信服务可用性向网络性能 KPI 指标映射模型。

2. 工业以太网看门狗机制

工业以太协议常见的两种总线机制：等停响应模式（例如 Modbus TCP）和周期性对发模式（例如 Profinet、Ethernet IP）。他们各自的工业总线看门狗机制也是不一样的，对网络的需求指标当然也是不一样的。

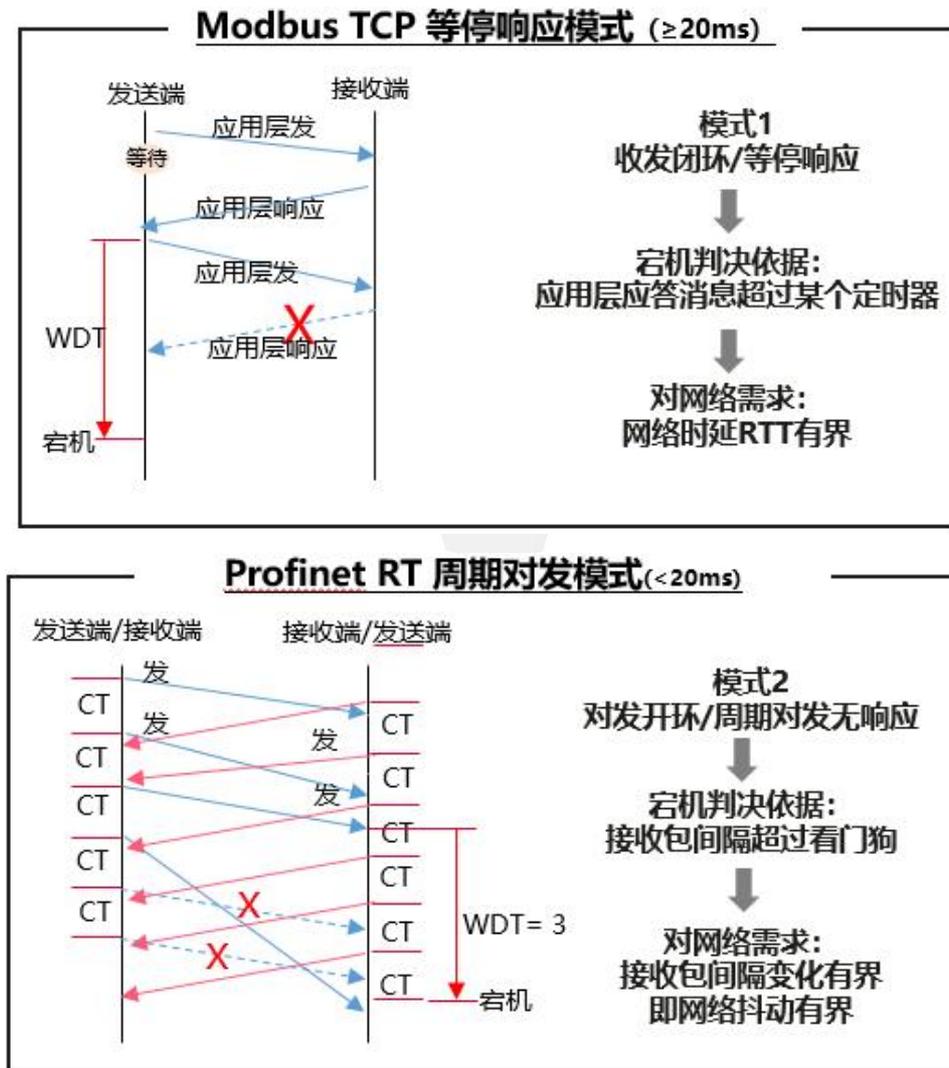


图 11 两类工业总线的通信服务可用性对网络的需求示意图

周期性对发模式中（以 Profinet 为例），工业总线或工业以太网的两个端侧对等地周期性对发报文。两侧互为发送端和接收端，两侧接收端都有看门狗机制：

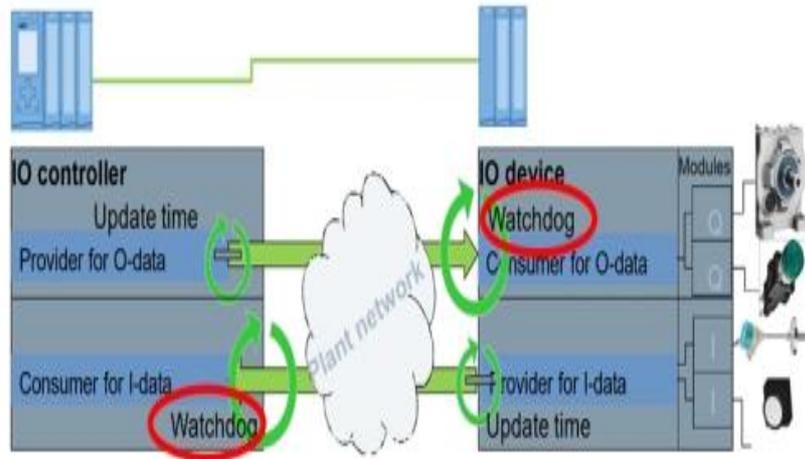


图 12 PLC 和 IO 设备两侧看门狗图示

以单侧为例，看门狗机制示意图如下：接收端收到有效（不乱序且校验通过）报文后看门狗计数器清零，当 CT 周期内没有收到有效的报文，看门狗计数器加 1，直至某 CT 节拍时判断看门狗计数器已经大于等于设定值（工业有线一般设置为 3，下图是以设置为 4 为例）时引发看门狗超时，此时移动互联网质量影响工业业务的通信服务可用性，进而影响产线可用性。

工业是通过监测接收包间隔 $\langle WDt$ (WatchDog Timer from Profinet) 来决定链路是否正常的，而网络侧是通过确保接收包间隔抖动 $\langle ST$ (Survival Time from 3GPP, $ST = WDt - CT$, CT 为工业设备发送端发包周期 Cycle Time) 来实现的。所以对网络需求是：网络的接收包间隔抖动 jitter 有界，例如 $jitter \leq x \text{ms} @ n$ 个 9。假设看门狗时间门限是 3 倍的发包周期 CT，则而对于网络来说，3 倍 CT 的看门狗时间窗口内，网络至少有三次报文传输的机会，只要有一个在看门狗时间门限内抵达接收端，看门狗就不会超时，这三次报文中，最后一次允许抖动的范围最小，不能超过一个 CT，为了简化分析，从严要求网络所有的报文的接收包间隔抖动 $jitter < CT @ n$ 个 9，在确保网络不丢包、不乱序的前提下，为方便理解和网络实现，可等效为时延抖动 $jitter < CT @ n$ 个 9。

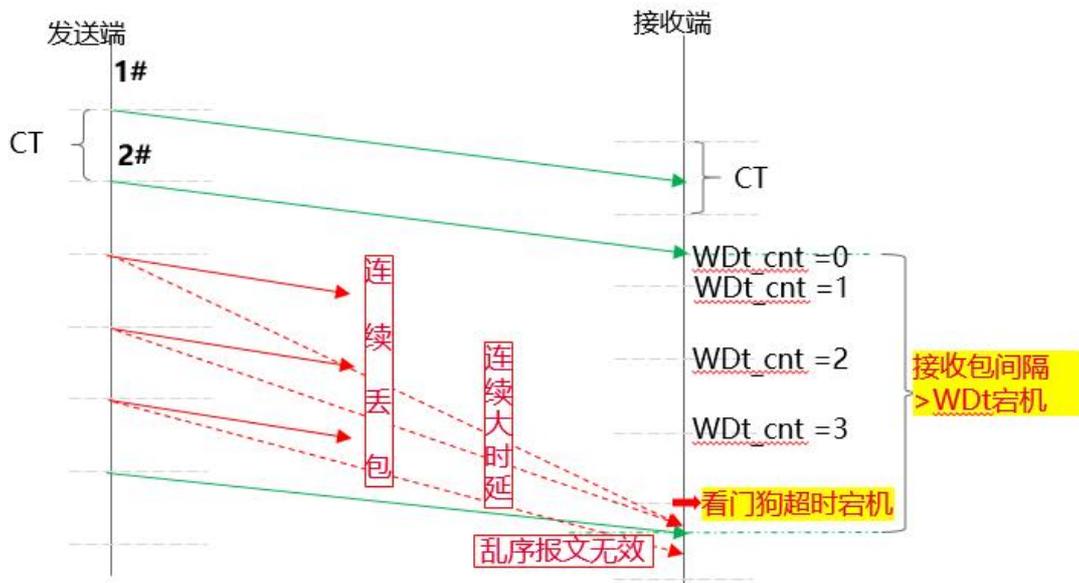


图 13 看门狗机制图示（本例中看门狗门限是以 4 倍 CT 为例示意）

等停响应模式，以 Modbus TCP 总线为例，其工业以太网协议的看门狗机制是：主站发送端应用层发送请求报文，从站收到后应用层会发送应用层响应。主站根据应用层请求报文和响应报文之间的时间来判断如果超过预先设置的 WDT 时间级看门狗超时则会引发产线宕机，从而影响到移动互联网对工业提供的通信服务可用性，所以对网络需求是：网络时延 RTT 有界，例如 $RTT \leq x \text{ms} @ n \text{个} 9$ 。

3. 产线的通信服务可用性对网络需求的转译

Step 1: 产线通信服务可用性求解

产线的可用性，工厂里计算有如下两种方式，基本是等价的。

方法一： $A_{line} = (\text{计划工作时间} - \text{计划停机时间} - \text{非计划停机时间}) / (\text{计划工作时间} - \text{计划停机时间})$

方法二： $A_{line} = (\text{计划运行时间} - \text{非计划停机时间}) / \text{计划运行时间}$

时间单位：小时。例如某工厂，全年计划运行 8000 小时，非计划停机时间全年累计低于 2 小时，则产线通信服务可用性要求 $A_{line} = (8000 - 2) / 8000 = 99.975\%$ 。

可见减少通信系统的非计划停机时间是提升通信服务可用性的关键，而非计划停机时间基本等同于工业通信系统的宕机时间，其主要受组成系统的每个通信链路可用性综合影响。

Step 2: 每个单向空口链路可用性求解

一条产线系统里 n 个设备组成，每个设备通过双向 2 条链路或者信道（如 5G 的上下行信道）接入工业通信系统，那么任何一条链路的看门狗超时都会导致整个系统宕机。为便于计算在初始模型中，假设一个系统中的这 $2n$ 条链路统计学上独立不相关，它们之间的故障为串联模式。从而从系统的通信服务可用性指标 A_{line} 可以推算出每个单向空口链路可用性指标 A_{link} 。同理也可以计算出双端无线或者是单/双端混合组网下的 A_{link} 。

Step 3: 单包可靠性计算

对于单链路可靠性而言，在指定时间内所有看门狗时限都不超时才可以保证可靠性，这是属于故障的串联模型。而每个看门狗时限内发送的报文中，只要其中有一个报文在看门狗时间门限内抵达接收端，看门狗就不会超时。假设这 N 个单包之间具备独立不相关性，则它们之间的故障模式属于并联模型，即都故障才故障。

以 Profinet 协议为例，假设看门狗时间门限 WDT 是 N 倍的发包周期 CT ，即发送侧在每个看门狗时间内会发送 N 个报文，这 N 个报文全部没有送达才会引发触发一次看门狗超时，所以当单条链路的单位时间 T 内的发送报文数 M 时，中最多有 $M-(N-1)$ 次看门狗机制生效机会。这些看门狗中一次都不能出现超时，该链路才可靠，从而可以计算出单包可靠性 P 。

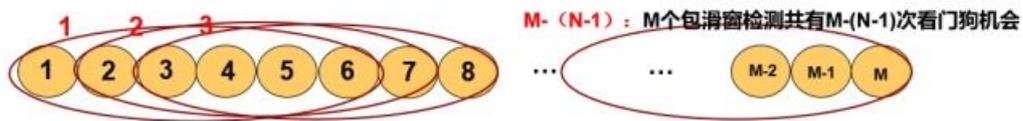


图 14 看门狗滑窗机制示意图

具体从通信服务可用性到网络单包可靠性转译的应用案例详见 5.1 章节。

(三) 应用 KQI 之二：生产节拍

1. 产线生产节拍的机制

产能是制造业最重要的生产力和竞争力，一个工厂的生产节拍直接决定了工厂全年的产能能力，生产节拍的定义：在产线的成品出口处相邻两次成品下线的时间间隔即为生产节拍，例如某汽车产线每 60 秒下件一个成品，则该产线的生产节拍是 60 秒，生产节拍越短，说明生产效率越高，全年产能也就越高。

离散制造工厂的一条产线通常有多个工岛组成，每个工岛由若干机器人、闸岛、I/O 模块，以及其他工艺设备组成。图 X 是一个简单产线示意图，不同颜色为不同工岛。整个生产流程从原始待加工件从物料入口上件开始，依次经过多个工岛的不同工序的串行加工，例如涂胶、焊接等，最终从成品出口处下线。被加工件经过产线的多个串行工序完成加工。

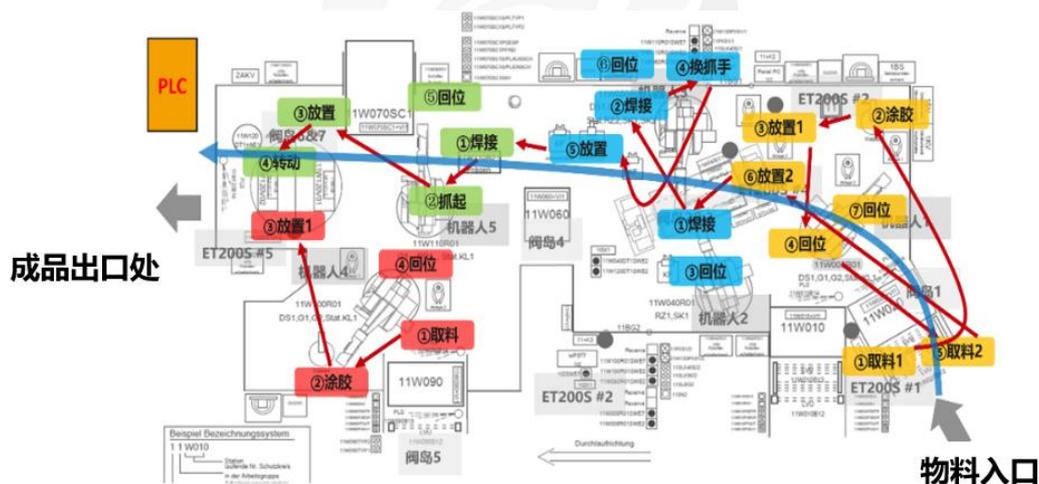


图 15 离散制造某产线加工流程示意图

实际上，生产节拍只受限于瓶颈工岛的加工耗时，即生产节拍=瓶颈工岛串行加工动作总耗时，如下示例：某产线由 4 个并行工作的工岛组成，生产节拍指成品出口处相邻两件成品下件的时间差，工岛 1 串行动作多总耗时最长，是瓶颈工岛。工岛 1 的串行加工动作总耗时即为该条产线的生产节拍。

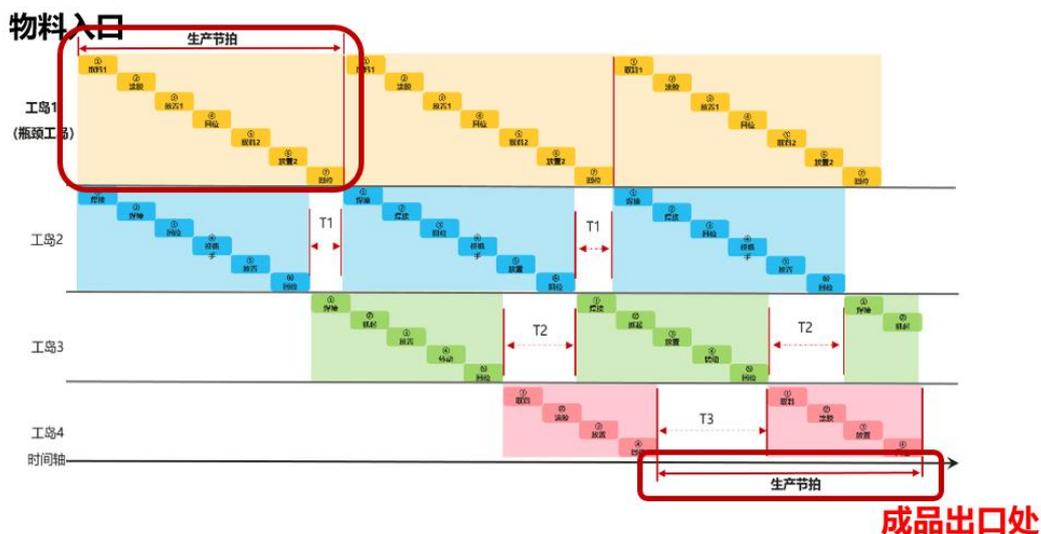


图 16 离散制造某产线生产节拍示意图

在瓶颈工岛中每个工序里通常有几个动作，每个动作的流程简化理解就是传感器感知状态并通知 PLC/机器人控制器，PLC/机器人控制器进行运算后通知执行器进行某动作的执行。所以该瓶颈工岛各串行生产动作总耗时除了占比最高的各加工步骤中工艺设备的机械运动时延（这部分时延是生产节拍中时延构成的最大组成部分，估计占比在 95%以上甚至更高），以及所有串行步骤中 PLC 以及各机器人控制器、I/O 设备、工艺设备的有效 CPU 执行周期和工业总线刷新周期外，还包括瓶颈工岛这若干个加工步骤中 PLC、机器人控制器与各 I/O 设备、工艺设备之间有效串行交互过程中引入的网络时延总耗时，即生产节拍对网络 KPI 指标中的平均时延有需求。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

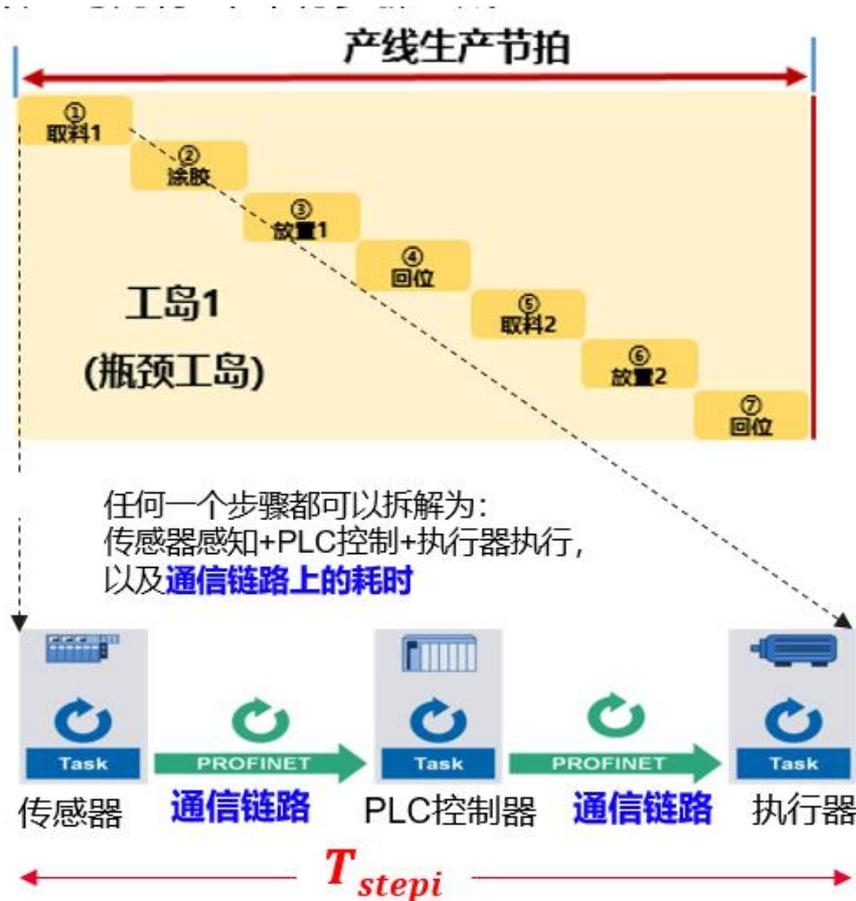


图 17 离散制造某瓶颈工岛工序示意图

2. 产能节拍对网络需求的转译

无线替代有线后，定量分析对生产节拍可能带来的影响是非常重要的，便于业主和集成商评估影响是否在可以接受的范围内以及评估可能的产线布局、工艺流程等方面的优化以抵消这部分影响。

Step 1: 评估瓶颈路径上的串行交互次数 $n1/n2$

我们需要重点关注的瓶颈工位中一系列串行工序中所包含的有效的 PLC 与其下挂设备，以及机器人控制柜与其下挂的设备之间的所有有效串行消息交互次数，这个过程需要有专业的工艺规划师和 PLC 以及机器人控制器程序开发人员共同来根据整个工序程序设计情况，对期间所有有效串行消息交互次数进行计数，不同的离散制造行业，不同的产线，不同的工岛，其工序图都是不尽相同的需要有针对性的统计。由于产线中各节点的无线接入方式可能存在单端无

线接入和双端无线接入两种方式，消息交互的时延路径会有不同，所以串行交互次数需要区分接入方式；

Step 2: 计算无线接入后对生产节拍的影响

无线接入后对生产节拍的影响主要体现在如下几方面：

工业以太网总线刷新周期 CT 可能的增加，例如有线场景下通常 CT 配置为 2ms，而切到无线时 CT 修改为 8ms；

通信路径上平均时延 RTT-agv 的增加，例如有线场景下通信路径上的时延是 us 级别的可以忽略不计，但切到无线后，一般可能有数毫秒级别的平均时延的增加

根据步骤 1) 中的瓶颈路径上串行交互步骤数 n1 和 n2，累计计算 CT 和平均时延增加对生产节拍的影响值 $\Delta T_{\text{产线生产节拍}}$ 。

变量名称	变量符号
有线场景下的工业以太网总线刷新周期	CT-有线
5G 场景下的工业以太网总线刷新周期	CT-无线
5G 的平均时延	RTT-agv
单端无线节点参与生产节拍中的有效串行消息交互次数	n1
双端无线节点参与生产节拍中的有效串行消息交互次数	n2
原有线场景下的生产节拍	$T_{\text{有线生产节拍}}$
5G 无线化后对生产节拍的绝对影响	$\Delta T_{\text{产线生产节拍}}$
5G 无线化后对生产节拍的相对影响	$\Delta T_{\text{产线生产节拍}}\%$

具体从生产节拍到网络平均时延需求转译的应用案例详见 5.2 章节。

(四) 应用 KQI 之三：安全 Safety

1. 安全 Safety 概述

制造业的安全风险遍及生产各个环节，安全功能是生产的基础。如下图所示例的安全急停，安全光栅扫描仪，安全护栏/门等。

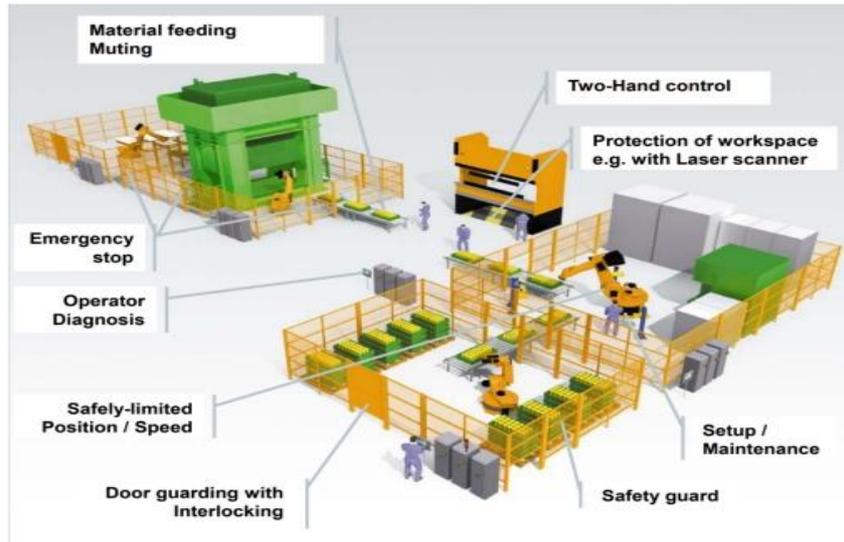


图 18 某产线安全节点示意图

安全 (Safety) 的定义: 工业对 safety 的定义一般指故障安全或功能安全, 安全系统通过适当的技术或组织措施, 来确定性地防止危险或将其风险降低到可容忍程度。安全功能 (Safety Function) 失效后, 会立即造成人员和机械设备风险的功能。

因为安全在生产环节中至关重要, 所以行业都有相关的安全标准和行规。IEC61508 是功能安全基础标准, IEC61784-3 是其在通信领域的延伸。

说明	安全完整性等级 SIL (Safety integrity level)	误动作等级 STL (Spurious trip levels)
计算基础	平均失效危险机率 (PFD/PFH)	平均失效安全机率 (PFS)
概念描述	安全功能在应动作的时候未动作的几率	安全功能在不应动作时动作的几率
代表	Safety 可用度	Process 可用度
表示方式	SIL (标准规定)	STL (根据用户要求)
等级的范围	1 到 4	客户自定义
目标	防止拒动 (避免带来伤害风险)	防止误动 (避免带来经济损失)

安全功能两个属性：安全性 SIL，可用性 STL。以一个安全光栅防护系统为例介绍，该系统要求当人员闯入光栅的时候，设备立即安全停机。



图 19 机器人工作区安全光栅示意图

①安全完整性等级（SIL）：安全功能应动作的时候未动作的几率，是控制系统安全等级的评判标准。目标是防止拒动。例如，人员闯入光栅，出现了安全风险，但设备未安全停机，安全拒动。例如汽车制造工厂的 SIL 等级一般要求 SIL3。

SIL	每小时危险失效概率 (高要求或连续操作模式)
1	$\geq 10^{-6}$ 且 $< 10^{-5}$
2	$\geq 10^{-7}$ 且 $< 10^{-6}$
3	$\geq 10^{-8}$ 且 $< 10^{-7}$
4	$\geq 10^{-9}$ 且 $< 10^{-8}$

SIL 等级定义表（摘自 ISO 13849-1: 2006）

②误动作等级（STL）：安全功能在不应当动作时误动作的几率。目标是防止误动。例如，没有人员闯入光栅，不存在安全风险，但设备意外安全停机了，安全误动。

SIL 代表系统的安全性，目标是防止拒动，影响人员和财产安全；STL 代表系统的可用性，目标是防止误动，可能造成意外停机，影响生产；5G 承载的目标是：确保安全，提升产能。

2. 安全通信“黑色通道”机制

当前工业领域功能安全通信都是采用 IEC61784-3 定义的“黑色通道”机制进行，即在原有标准通信两端叠加安全通信应用层，所有安全数据均只在该层进行数据解包和校验，该应用层通过了序列号、CRC、看门狗等校验措施，对底层通信的丢失、不可接受的时延、意外重复、讹传、错序、插入、伪装、寻址等错误进行校验，保证通信的时效性、真实性、完整性，确保底层出现任何错误均可以将系统返回到安全状态。安全通信应用层以下全部称为“黑色通道”，“黑色通道”中采用任何技术均不影响安全通信应用层的校验功能。目前主流的工业通讯协议均有符合 IEC61784-3-1 定义的安全通信层规范的安全通讯协议，例如：FOUNDATION Fieldbus，SERCOS, Profibus/Profinet, INTERBUS, CC-LINK, EtherCAT, Ethernet POWERLINK, EPA, RAPIEnet, SafetyNET 等。

① 在通信两端，叠加安全通信应用层，实现通信错误校验措施，下层通信任何的错误都将触发安全动作，即：宁可误动，也不拒动，确保安全。

② 将安全通信应用层以下全部看做“黑色通道”，5G 作为“黑色通道”最底层的传输链路，是“黑色通道”一部分。

③ 以 PROFIsafe 为例，协议架构为：PROFIsafe 安全通信应用层 over Profinet over 以太网 over 5G。

④ 安全通信应用层（e.g. PROFIsafe）直接为安全性负责，无论底层采用什么通信技术。即底层采用 5G、WIFI 亦或有线，都不影响安全性，但这些技术产生的通信错误（e.g. 丢包、大时延等）可能触发安全误动，影响可用性。

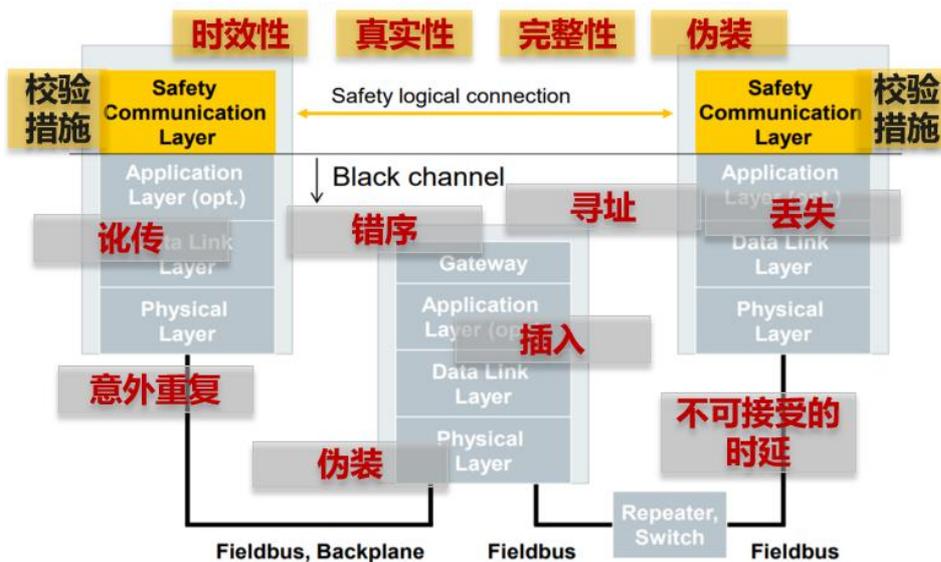


图 20 安全 Safety 协议相关示意图

总结：安全性由安全通信应用层协议保证（例如 PROFIsafe、CIP Safety 应用层协议），5G、WIFI、有线等都是“黑色通道”的一部分，都不会影响安全 SIL，但可能因为传输链路的通信错误（e.g. 丢包、大时延等），造成安全误动，产生意外停机，影响可用性 STL。

3. 安全通信的网络需求转译

上文从原理上已经介绍了 5G 网络传输不会影响安全性，但可以影响可用性，造成意外停机，本章节将针对安全通信对 5G 网络的可用性需求进行转译分析介绍。本章节将通过业务 KQI 需求到 5G 网络 KPI 需求推导的流程进行介绍，反之也可以通过 5G 网络 KPI 能力推导出业务配置需求及业务 KQI 能力。

安全通信 5G 网络 KPI 需求计算流程如下：

步骤	计算流程名称	输入信息	输出结果
1	安全功能响应时间	防护措施、安全距离 S、移动速度 K、穿越距离 C	SFRT
2	安全看门狗	安全功能响应时间、安全传感器处理时间、安全执行器处理时间	T_{SWDT}
3	传输时延	安全看门狗、安全主站处理时间、安全从站处理时间、工业以太网看门狗	RTT

Step 1: 安全功能响应时间 SFRT

安全功能响应时间与安全距离和移动速度有关，不同防护措施有不同的计算要求，例如安全光栅（垂直部署于危险源），计算公式为 $S=SFRT \cdot K+C$ ，其中 S 为安全距离， K 为移动速度， C 为穿越距离。不同防护措施、不同的设备参数， K 、 C 取值不同，具体参照对应的 IEC/ISO 安全防护标准。

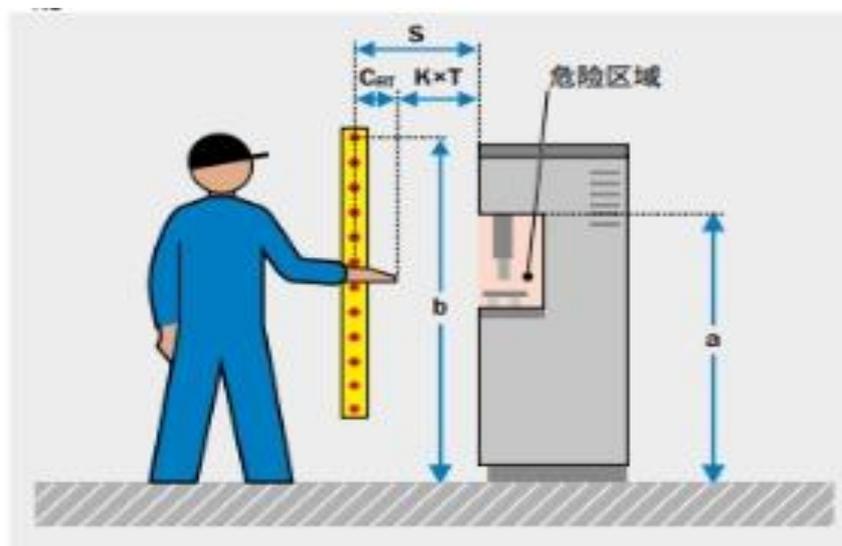


图 21 安全距离示意图

参数名	参数描述	参数来源	输入/输出
S	安全距离	防护措施、防护标准、工程部署	输入
K	移动速度	防护措施、防护标准	输入
C	穿越距离	防护措施、防护标准	输入
SFRT	安全功能响应时间	工程部署	输出

Step 2: 安全看门狗

一个完成的安全功能由安全输入、安全输出以及两对安全通信链路组成，因此，安全看门狗与安全功能响应时间、安全输入延迟、安全输出延迟进行计算。



图 22 安全 SFRT 路径示意图

参数名	参数描述	参数来源	输入/输出
SFRT	安全功能响应时间	防护措施、防护标准、工程部署	输入
T_{ID}	输入延迟	传感器等硬件性能	输入
T_{OD}	输出延迟	执行器等硬件性能	输入
T_{SWDT}	安全看门狗	组态配置	输出

Step3: 5G 传输时延

一对完整的安全传输链路由安全主站、安全从站、工业以太网协议以及传输链路组成，因此，5G 传输链路往返时延与安全看门狗、安全输入延迟、安全输出延迟、工业以太网传输延迟进行计算。

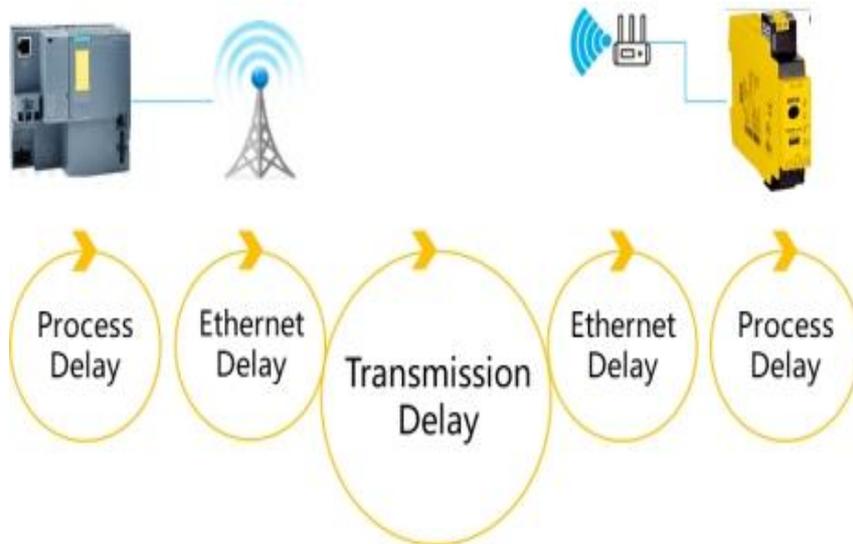


图 23 5G 无线化后的 E2E 传输路径示意图

参数名	参数描述	参数来源	输入/输出
T_{SWDT}	安全看门狗	组态配置	输入
T_{SPD}	安全从站 处理延迟	安全从站硬件性能	输入
T_{MPD}	安全主站 处理延迟	安全主站硬件性能	输入
T_{ED}	工业以太网 延迟	Profinet 看门狗 组态配置	输入
RTT	5G 往返传输时延	网络性能	输出

（五）应用 KQI 之四：控制精度

1. 精度控制场景的概述

精度控制场景，通常就是指运动控制场景下的精度控制。运动控制（Motion Control）是指让系统中的可动部分以可控制的方式移动的系统，通常包括控制器、驱动器、电动机、执行器 4 个核心部分。网络作为运动控制系统的组成部门，对控制系统稳定性、快速性、准确性的影响属于网络控制系统（NCS, Network Control System）问题。



图 24 开环控制示意图

根据控制方式区分可以分为开环控制、半闭环控制和闭环控制，开环控制无反馈信息的控制系统，系统的输入量不受输出量影响的控制系统；闭环控制系统有反馈信息的系统控制方式，输出量直接或间接反馈到输入端形成闭环、参与控制。半闭环控制与闭环控制有一定的区别，半闭环控制反馈信号来自于电机而不是最终执行器，而闭环控制的反馈信号则来自于最终执行器。

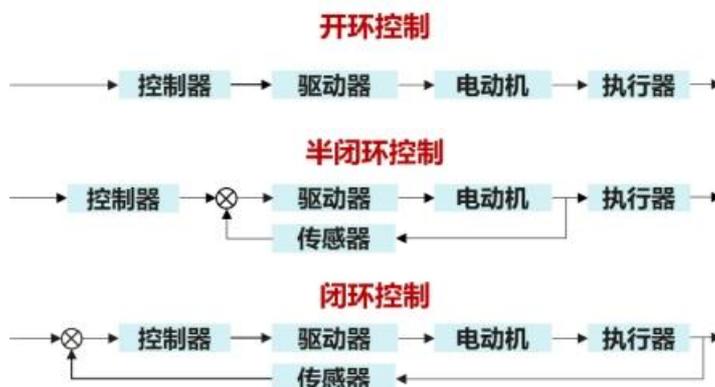


图 25 开环/半闭环/闭环控制示意图

控制链路和反馈链路的网络性能将直接决定运动控制的控制精度。

2. 精度控制的机理

控制精度与整个控制回路的响应时间有关，例如下图是一个典型变频电机运动控制逻辑组网图，从传感器采集反馈信息后到 PLC 根据反馈信息下发控制指令，再到执行器执行新控制指令的整个回路响应时间。控制精度与传感器的采集周期、输入模块的采样周期、总线发送周期、链路传输时间、控制器 CPU 处理周期、输出模块的采样周期、执行器的执行周期均有关。其中链路传输的时延抖动与其他环节一样，也是通过影响控制回路响应时间进而影响控制精度。



图 26 闭环运动控制响应时间示意图

3. 精度控制场景对网络需求的转译

以一个典型的运动控制工艺分析网络对控制精度的影响，PLC 控制执行器匀速运动，当传感器检测到到位信号后，PLC 下发制动指令，执行器的停止位置偏差即为控制精度。整个回路时延分解为，传感器检测到到位信号后，被输入模块采集到，再通过工业以太网协议发出、经过链路传输时间到达控制器、经过 CPU 处理时间完成控制命令生成、再经过工业以太网协议发出、经过链路传输时间到达电机执行器、经过执行器处理延迟及机械运动时间后，最终在经过 S 的制动距离，执行器完成停止，控制原理及参数如下所示。

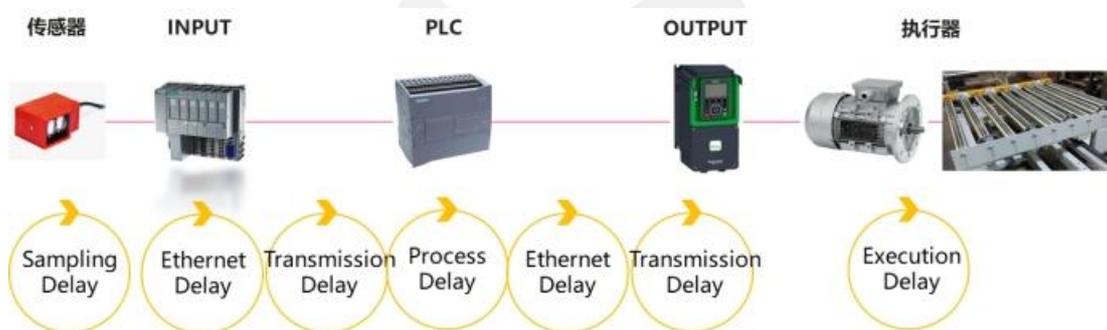


图 27 闭环运动控制响应时间构成示意图

参数名	参数描述	参数来源	输入/输出
$T_{\text{采集}}$	传感信号采集延迟	硬件性能及组态配置	输入
T_{ED}	工业以太网延迟	组态配置	输入
T_{TD}	传输链路时延	网络性能	输入
T_{CPU}	PLC 处理延迟	性能性能及组态配置	输入
T_{EXD}	执行器机械延迟	硬件性能	输入
V	运行速度	硬件性能	输入
S	运动距离	计算	输出

三、网络 KPI 指标定义

本文的核心内容就是要完成离散制造现场级控制领域的业务应用 KQI 指标到 5GS 网络 KPI 指标的映射与转译，为便于读者理解，本小节将定义相关的网络 KPI 指标。

（一）RTT 最大时延

RTT (Round-Trip Time) 时延：往返时延，通常是指从发送方发送报文开始，到发送方接收到来自接收方的确认消息（假设接收端收到数据后便立即发送确认）所经过的时间，通常包括传输时延、处理时延、排队等待时延等。由于本文是基于业务 E2E 角度来分析对 5GS 的网络指标需求的，所以本文的 RTT 时延路径不仅仅包括基站在内，还包括 UPF、传输、UE 在内 5GS 端到端往返时延。

RTT 最大时延是指在一段统计时间内所有报文 RTT 时延的最大值，通常采用概率分布的方式来表征：最大时延@可靠性，这里的可靠性即为时延小于等于某上边界的样本数与发送端发送的总样本数的比例，而这个上边界即为对应可靠性要求下的最大 RTT 时延。

（二）RTT 平均时延

RTT 平均时延是指在统计时间内，所有收到的时延样本的平均值。

注：平均时延的统计对象中不包括接收端没有收到的丢包报文，所以平均时延通常会与丢包率配套使用。

（三）最大 RTT 时延抖动

最大 RTT 时延抖动是在一段统计时间内，所有报文实际 RTT 时延与期望的最大 RTT 时延之间的最大偏离程度。通常采用概率分布的方式来表征：最大 RTT 时延抖动@可靠性，这里的可靠性即为 RTT 时延抖动小于等于某上边界的样本数与发送端发送的总样本数的比例，而这个上边界即为对应可靠性要求下的最大 RTT 时延抖动。

(四) 最大接收包间隔抖动

IEC 62657-1 标准中定义的接收包间隔 (Receive Interval, 标准中的名词是 Update Time) 是指 ProfiNet 等周期性对发模式的总线上的接收端相邻接收到的两个有效报文之间的本地时刻之差, 即:

$$\text{Receive Interval} = \text{ReceiveTime}_y - \text{ReceiveTime}_x$$

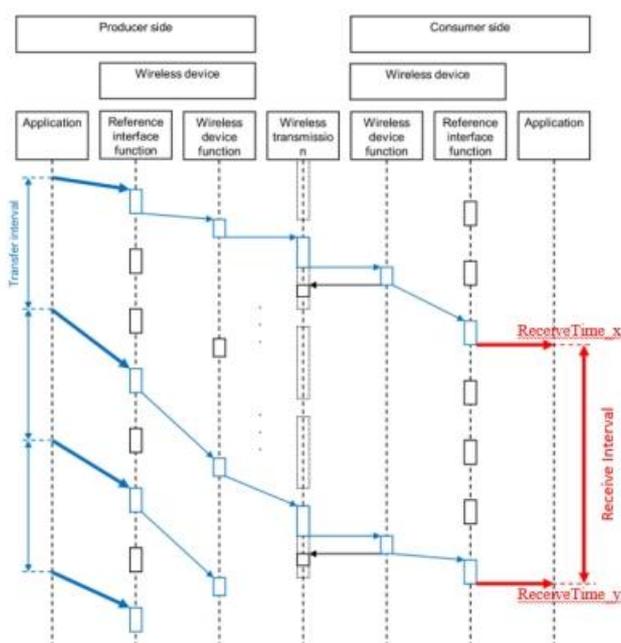


图 28 接收包间隔示意图

其中有效报文是指接收到的正确的新报文, 即有效报文的包序号需要大于之前收到的有效报文的包序号, 乱序报文会被接收端丢弃。

如图 28 所示, 接收包间隔 (Receive Interval) 减去发送包间隔 (Transfer Interval, 若不考虑发送端的发送抖动, 发送包间隔就是 CT) 即为传输路径所引入的抖动, 称之为接收包间隔抖动, 是剔除 OT 属性后的网络性能指标。当接收包间隔抖动超过 ST (3GPP 22.104 定义的 Survival Time, 实际 $ST=WDT-CT$) 时, 该工业以太总线将出现看门狗超时, 产线将出现宕机。

最大接收包间隔抖动是指在一段统计时间内所有报文的接收包间隔抖动的最大值, 通常采用概率分布的方式来表征: 最大接收包间隔抖动@可靠性, 这里的可靠性即为接收包间隔抖动小于等于某上边界的样本数与发送端发送的总样本数的比例, 而这个上边界即为对应可靠性要求下的最大接收包间隔抖动。

（五）丢包率

丢包率是指时延样本中大于超时门限的样本数（包括接收端未收到的报文）与总样本数的比例。超时门限取决于应用场景下的最大容忍时延。

（六）时间同步精度

时间同步精度是指经时间同步后，被授时终端时钟输出的时间与授时时钟（例如 GPS）输出的时间的差异。

四、业务 KQI 对网络 KPI 需求的转译方法

（一）指标转译及映射方法

5GtoB 制造领域市场快速增长，应用场景加速成熟并逐步进入 PLC 级核心生产环节，工控应用对于网络需求愈加严苛，目前存在几个痛点问题：

- ① 相同应用场景不同出处，5G 网络需求不同。
- ② 相同应用场景相同出处，在不同业务需求、工程参数配置、不同协议参数下，5G 需求不同。
- ③ 相同应用场景不同出处，5G 网络需求不同。
- ④ 相同应用场景相同出处，在不同业务需求、工程参数配置、不同协议参数下，5G 需求不同。

在 5G 项目实施过程中，场景设计和需求提取阶段没有专业方法进行业网需求匹配，部分项目直接将有线连接方式时设置的工程参数应用于工业 5G 网络，部分项目则直接根据项目现场网络能力进行应用部署并作为该类应用的需求基线。

因此需要构建业务到网络需求转译及映射方法（如图 29 所示），业主生产需求、工程集成商参数与工业协议配置参数之间的协同，形成第一层转译，生成工控业务的应用 KQI 指标；工控业务应用 KQI 指标向网络 KPI 指标的量化转换，形成第二层转译，从而完成工控业务需求的向可量化的网络 KPI 指标要求

的转译。进一步将网络的 KPI 要求向 5G 网络进行映射分解，指导 5G 网络规划部署及配置。



图 29 应用 KQI 与网络 KPI 转译示意图

在项目设计之初即可完成需求映射，提出准确的网络需求确保项目快速上线；如果网络能力无法达到业务需求，转译工具也能根据网络能力提出对业务进行适配调整的建议，帮助客户选择更准确了解不同网络能力对业务性能的影响，以选择更经济的网络方案。

(二) 工控 KQI 与 5G KPI 的映射模型



图 30 应用 KQI 与网络 KPI 映射示意图

根据第 2 章节的分析，从工业的 OEE 法则出发，现场级工控场景的应用的 KQI 主要分为通信服务可用性、生产节拍、安全 Safety 以及控制精度四个方面，分别对不同的网络 KPI 有需求：

通信服务可用性根据工业总线协议的不同对不同的网络 KPI 指标有需求，等停响应模式工业总线通常对网络的 RTT 最大时延有需求、周期性对发模式工业总线通常对网络的最大接收包间隔抖动有需求，间接对最大 RTT 时延抖动有需求；

生产节拍对网络的平均时延有需求；

控制精度通常对网络的最大 RTT 时延和 RTT 时延抖动都有需求，如果是高速高精度控制场景下可能还对时间同步精度有需求；

功能安全 Safety 通常对网络的最大 RTT 时延有需求；

丢包率虽然并不一定直接影响应用 KQI，但连续丢包或者丢包率高也是会对业务有负面影响，是网络质量的重要评价指标。

（三）5G 网络指标的分级分档

第一章我们对离散制造业现场级工控领域进行了部分典型应用场景的举例，第二章详细分析了业务的应用 KQI 需求以及业务对 5G 网络 KPI 的需求转译方法，在这两个分析基础上，我们可以在满足业务需求前提下，结合 5G/5G-A 的技术演进，面向行业提供分级分档的网络能力，从而更好地统一行业需求、降低业务连接成本，实现不过保障、不欠保障，促进 5G 更快更稳地进入离散制造的核心生产环节。故对业务对网络的 SLA 需求分级分档汇总如下，为完整起见，档位的划分同时考虑了已批量商用的 MES 和 SACADA 级场景、现在正在开始逐步孵化和首商用的现场级控制场景，以及属于 5G 未来探索的 IRT 级别的应用场景对网络 SLA 的需求：

挡位 (L0-L5)	应用场 景分类	详细场景子类	适配工业协议	业务对网络SLA需求分档 (L0-L5)
---------------	------------	--------	--------	----------------------

面向 规模 商用	Level 0 (MES-工厂级)	5G全连接 工厂 MES生产管理	① 物流全连接：扫码枪/扭矩枪交互等 ② 测试数据实时回传 ③ 数据采集 ④ 园区安防监控	MQTT/RTSP/OPCU A/http/TCP/Modbus TCP/S7等	业务参数配置 ①模式1：事件触发 ②模式2：周期触发≥100ms 网络SLA需求： ①RTT时延：100ms@99.9% ②RTT平均时延：30ms
	Level 1 (SCADA-车间级)	SCADA 远控/集控	① 物流AGV/无人叉车交互 ② 车间SCADA数据采集与控制 ③ 移动HMI（人机）设备调试 ④ 视频AI检测	S7/Modbus TCP/UDP/TCP等	业务组态配置： CT>=50ms WDT>=4*CT 网络SLA需求： ①RTT时延：50ms@99.99% ②RTT平均时延：30ms
	Level 2 (WiFi/小无线-设备级)	现场级控制C2C	① 柔性产线：工艺AGV/EMS/RGV等 ② 分拣机、堆垛机等物流自动化设备	Modbus TCP/EtherNet/IP /PROFINET RT/CC-Link IE等	业务组态配置： CT>=16/32ms WDT>=4*CT 网络SLA需求： ①RTT时延：20ms@99.99% ②RTT平均时延：16ms ③RTT时延抖动：16ms@99.99%
	Level 3 (有线RT 60%-设备级)	现场级控制C2IO	① 无线阀岛/无线IO等控制 ② PLC集中化/云化	Modbus TCP/EtherNet/IP /PROFINET RT/CC-Link IE等	业务组态配置： CT>=8ms WDT>=4*CT 网络SLA需求： ①RTT时延：12ms@99.99% ②RTT平均时延：8ms ③RTT时延抖动：8ms@99.99%
面向 未来 演进	Level 4 (有线RT 80%-设备级)	现场级控制C2IO	① 柔性产线增强（收编更多种类设备5G无线化） ② 初步进入部分精度控制场景	Modbus TCP/EtherNet/IP /PROFINET RT/CC-Link IE/POWERLINK/EtherCAT等	业务组态配置： CT>=4ms WDT>=4*CT 网络SLA需求： ①RTT时延：6ms@99.99% ②RTT平均时延：4ms ③RTT时延抖动：4ms@99.99%

探索中	Level 5 (有线IRT-设备级)	运动控制 C2M	① 高精度运动控制 ② 全自动协同	PROFINET IRT/EtherCAT	业务组态配置: CT >= 1ms WDT >= 4*CT 网络SLA需求: ① RTT时延: ~1ms@99.999% ② RTT平均时延: ~1ms ③ 时间同步精度: 1us
-----	------------------------	-------------	----------------------	--------------------------	---

(四) 转译工具工作原理

在 5G 项目实施过程中，场景设计和需求提取阶段没有专业工具进行行业网需求匹配，部分项目直接将有线连接方式时设置的工程参数应用于工业 5G 网络，部分项目则直接根据项目现场网络能力进行应用部署并作为该类应用的需求基线，导致网络与业务需求的不匹配。通过研发业务到网络需求转译工具，并集成到 OT、CT 既有平台中，在项目设计之初即可完成需求映射，提出准确的网络需求确保项目快速上线。

面向 OT 领域的需求转译工具主要服务对象是集成商，建议集成到工控组态软件中，集成商可以在组态过程中提出对 5G 网络的需求并根据 5G 网络能力进行业务配置调整；面向 CT 领域的需求转译工具主要服务对象是运营商，建议集成到运营商网络规划及部署平台，可以根据需求转译结果准确得到建网需求，并提供标准化分级分档网络供客户评估业务影响程度。

工具转译流程图建议如下：

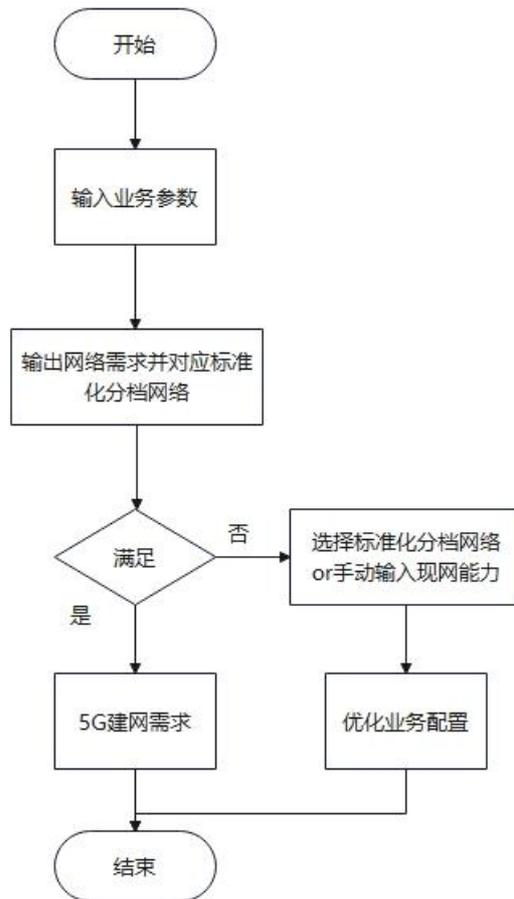


图 31 转译工具流程示意图

以面向 OT 领域的需求转译工具介绍典型流程案例，工具使用流程也与集成商进行传统有线项目工业组态的流程一致，融入集成商的使用习惯中，具体流程如下：

- ① 集成商规划和设计一个工控项目，评估哪些工艺环节和控制子站使用有线传输，哪些需要使用无线传输。
- ② 集成商开始组态配置，如果全部工艺环节、全部控制子站均使用有线传输，则组态完成后即可进行业务调试。
- ③ 如果某些工艺环节和控制子站需要使用 5G 传输，则在组态软件中调用 5G 需求转译工具。
- ④ 在需求转译工具中输入或自动获取业务需求及部署参考等，自动计算出 5G 网络需求，并对应到标准化的分级分档网络。
- ⑤ 集成商将计算出的 5G 网络需求及分档网络提交给业务或运营商，供其评估该能力是否可以达成，如果可以达成，则该需求即为 5G 建网需求，组态完成。

- ⑥ 如果业务或运营商评估该需求无法达成，则给出当前可以提供的标准化分档网络能力，或者提供预期可提供的网络能力，集成商选择该能力，自动计算出业务参数调整建议以及对业务性能的影响程度。
- ⑦ 集成商根据工具建议，评估对业务的硬性程度，调整组态配置。

五、应用案例

（一）通信服务可用性转译应用案例

EMS 是汽车制造的总装车间里最常用的空中有轨运输系统，如下图所示：



图 32 EMS 图示

EMS 系统一般由吊具和线边主 PLC 组成，线边主 PLC 与吊具控制系统之间进行通信以交互控制指令与状态上报信息。传统 EMS 系统采用滑触线或者波导管进行通信，存在安装要求高、与外购分散控制器捆绑销售价格昂贵、安装和定期维修耗时长、开放性不够等困难，改造成 5G 方案，不仅成本大大降低，还能省去定期更换管道等复杂耗时费钱的运维投入和施工期间因为长时间停产带来的经济损失。

某汽车工厂总装产线吊具场景的 5G 无线改造应用场景，EMS 吊具数量近 100 个，5G 组网示意图如下，EMS 吊具是单端无线接入 5G 网络：



图 33 无线接入的 EMS 示意图

为确保 5G 无线化改造后的 EMS 总装产线的可用性，需要根据通信服务可用性的业务需求和产线规模以及相关组态参数，推算出对网络的需求以及可能的对组态参数中看门狗参数的修改述求。

该 EMS 产线全年计划运行 8000 小时，非计划停机时间全年累计低于 2 小时，吊具数量近 100 个，无线改造后 CT 为 32ms，按照 2.2 章节的转译逻辑，在 $WDT=3*CT$ 的假设前提下，计算出的网络单包可靠性要求：

变量名称	变量符号	取值/计算结果
计划运行（小时）	T _{Scheduled} Run Time	8000
非计划停机时间（小时）	T _{Unscheduled} Down Time	2
发包周期（ms）	CT	8
看门狗超时门限中 CT 的次数	N	3
5G 终端个数	n	100
产线通信服务可用性	A _{line}	99.975%
产线中每个单向空口链路可用性	A _{link}	0.9999987
1 小时内的工业报文数	$M = \left\lfloor \frac{1\text{hour}}{CT} \right\rfloor$	112500

单包可靠性需求	P	99.9777% ≈ 99.99%
---------	---	-------------------

需要说明的是，由于上文计算过程都假设了空口报文独立不相关等前提，而实际场景中，并不存在完全独立不相关的前提，所以为了确保产线的稳定可靠运行，一般建议在 5G 无线接入的产线应用中，将总线组态配置中的看门狗门限中 CT 的次数从有线默认的 3 修改为 4 或者以上。故本项目中，5G 无线场景下的实际配置看门狗门限中的 CT 次数是 4，经过项目实际验证，完成了 16 个吊具的连续一周时间以上的稳定运行，工业总线没有出现看门狗超时，初步满足了项目的验收，为下一步更高规模的 5G 吊具商用奠定了坚实的基础。

（二）生产节拍转译的案例

在现代化离散制造行业，柔性化生产追求越来越高，例如汽车制造产线中，在多车型交替的柔性生产中，需要经常切换随行夹具（工装），随行夹具在运输过程中是离线状态，到达目标工岛后与固定侧进行插针通信对接，反复插拔对接也可能存在插针接口积灰、氧化、接触不良等故障；工岛上也可能存在转台，通过转台的转动让机器人手臂进行待加工件不同部位的加工。在传统有线通信时，转台的水平往返旋转运动容易造成断线、接头松动等物理通讯故障；工岛中也存在使用地轨工业机器人走地轴底座以扩展机器人工作范围，滑台的水平往返运动容易造成断线、接头松动等物理通讯故障；另外也存在一个机器人在一套工序中需要更换数次不同工具的情况，传统产线多数是以有线+通信中继或者转接头+插针的方式进行工具的反复插拔切换，电气接口插针存在容易积尘、损坏、氧化、接触不良等影响通讯从而最终影响产能的情况。改成 5G 接入后，简化有线现场总线网络，减少硬件，减少维护工作量，减少插拔或水平往返旋转/移动运动造成的物理通讯故障（断线、接头松动等），提高设备开工率，最终提升生产产能。

某汽车制造的产线的瓶颈工岛的组态拓扑示意图如下，工岛 PLC 有线接入 5GS，PLC 直接下挂的传感器 IO 设备、夹具阀岛、滑台变频器、安全 IO 以及两个机器人控制器都是属于单端无线接入 5GS；而两个机器人控制柜下分别下挂的工艺设备和抓手阀岛，则属于双端无线接入 5GS。

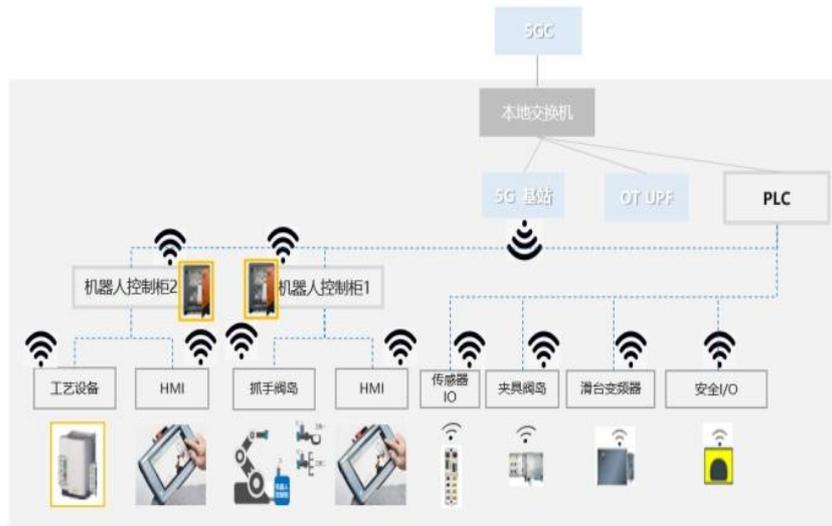


图 34 某瓶颈工岛组态拓扑示意图

再来看该工岛的整个生产节拍中的流程，从如下工序图的右上角可以看出该工岛的生产节拍为 110s，图中存在几处较短的并行的工序流程，这些过程中产生的通信链路上的交互次数都将不被计入有效串行消息交互次数。我们需要关注的是下图红色长线箭头所示意的一系列串行工序中所包含的有效的 PLC 与其下挂设备，以及机器人控制柜与其下挂的设备之间的所有有效串行消息交互次数，这个过程需要有专业的工艺规划师和 PLC 以及机器人控制器程序开发人员共同来根据整个工序程序设计情况，对期间所有有效串行消息交互次数进行计数，不同的离散制造行业，不同的产线，不同的工岛，其工序图都是不尽相同的需要有针对性的统计。下图示例中整个 110s 的生产节拍中 PLC 与其下挂设备的有效串行消息交互次数是 24 步，机器人控制柜与其下挂的设备之间的有效串行消息交互次数是 8 步。

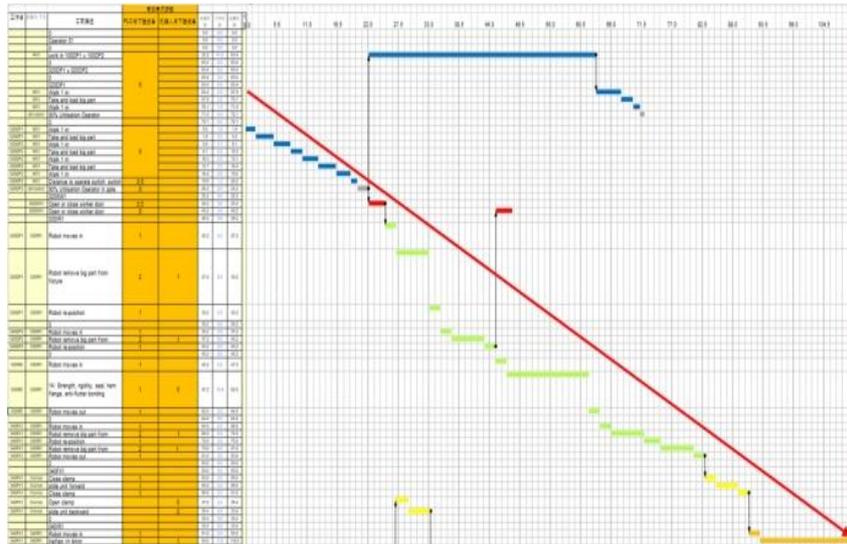


图 35 某汽车制造的瓶颈工岛工序示意图

本项目中明确了如上各设备的无线接入方式，以及单端无线和双端无线接入方式下的各自的有效串行消息交互次数，结合原有线下的 CT 配置是 2ms，以及无线化后新调整的 CT 配置是 4ms，无线化后的网络平均时延水平是 4ms，就可以根据上小节的计算公式来计算无线相对与有线通信部分引入的对生产节拍的影响程度了：无线后相对于有线由于 CT 和平均时延的放大，对生产节拍的绝对影响约 224ms，影响占比约 0.2%。

CT- 有线 ms	有 线 生 产 节 拍 s	CT- 无线 ms	RTT-agv ms	单端无线串 行交互数	双 端 串 行 交 互 数	无线化后对 生产节拍的影响	
						Δ生产节拍 绝对值 ms	Δ生产节拍 百分比%
2	110	8	10	24	8	592	0.538181818
2	110	4	4	24	8	224	0.203636364

从如上计算统计结果可以看出不同 CT 设置和网络 RTT 平均时延对生产节拍的绝对影响和影响百分比情况。目前跟部分业主和集成商交流，认为对生产节拍的绝对影响控制在 1s 内，或者影响百分比控制在 1%以内，是基本可以接受的。另外无线化带来的产线柔性程度提高、故障时间的缩短等，本身也会带来生产效率上的提升。

（三）生产安全转译的案例

功能安全是工业生产的基础，汽车制造行业作为自动化程度最高的行业，大量使用机器人、夹具、焊机等设备，安全风险覆盖整个生产流程。当前汽车行业除了遵循功能安全基础国际标准 IEC61508 等，也需要遵循汽车行业国际标准 ISO26262 等，各个国家也将汽车行业的功能安全写入法规，汽车行业各大 OEM 和零部件供应商也都组建了己功能安全团队，制定了功能安全开发和验证过程，将功能安全风险在设计阶段就尽可能降低到需求范围。

焊装工艺作为汽车行业的四大工艺之一，肩负着车身成型，为整车提供支撑框架的重要使命，焊装车间也是整车生产工艺中自动化程度最高的工艺环节，机器人、焊机等自动化设备的安全防护是设计的重点，通过 5G 承载可以极大提升布局和工艺的灵活性，满足当前汽车快速换型、定制化选配等需求。



图 36 焊装产线示意图

如下这个焊装工艺的安全 Safety 场景：机器人在围栏内工作，如果突然有人员从光栅外闯入，光栅检测到后会立刻通知 PLC 去触发机器人紧急制动以确保人员安全，即在闯入人员光栅进入安全区域，在抵达围栏前，机器人必须已经完全停止才能确保人员的绝对安全。

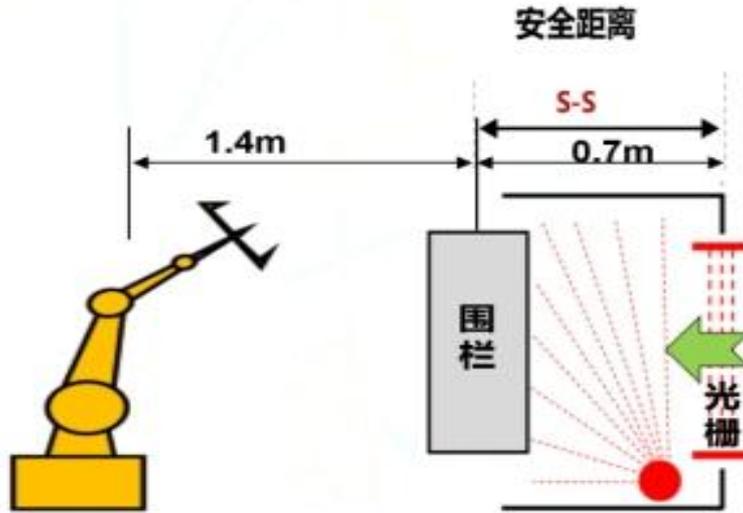


图 37 机器人安全示意图

根据 ISO 标准，人体运动速度一般标称值为 1.6m/s；假设原有线时， $CT = 2ms$ ， $T_{wdr} = 3 * CT = 6ms$ ，有线通信时延近似于 0；

5G 改造后，根据无线传输性能，假设： $CT = 8ms$ ， $T_{wdr} = 4 * CT = 32ms$ ，假设 5G 往返传输时延最大值为 13ms，其他各相关参数都不变，包括：传感器例如（光栅）检测响应时间 T_{SDL} ，机器人停止时间 T_{ADL} ， T_{MSC} 安全主站 PLC 安全处理周期， T_{SSC} 安全从站安全处理周期，计算 5G 改造后对安全看门狗、安全功能响应时间、安全距离的影响：如果原有线时的安全看门狗设置裕量较大，则很可能无线替代有线后，仍能满足原安全看门狗设置，则无线替代后也不会影响安全功能响应时间，也就不会影响安全距离；若原本有线下的安全看门狗并无额外裕量，则需要详细计算无线化后对安全看门狗、安全功能响应时间、安全距离的影响，并采取加大安全看门狗配置以及适当放宽安全距离等措施确保安全以后者为例有线及无线的变化参数如下表所示：

参数名	参数描述	参数来源	值
T_{ED}	工业以太网延迟	有线下组态配置	$2ms * 3$ 倍
RTT	往返传输时延	有线下传输链路时延	0ms

参数名	参数描述	参数来源	值
T_{ED}	工业以太网延迟	5G 下组态配置	$8ms * 4$ 倍

RTT	往返传输时延	5G 下传输链路时延	13ms
$\Delta SFRT_{avg}$	安全功能响应时间 平均影响	计算	0.05s
ΔS_{avg}	安全距离平均影响	计算	0.08m
$\Delta SFRT_{max}$	安全功能响应时间 最大影响	计算	0.13s
ΔS_{max}	安全距离最大影响	计算	0.208m

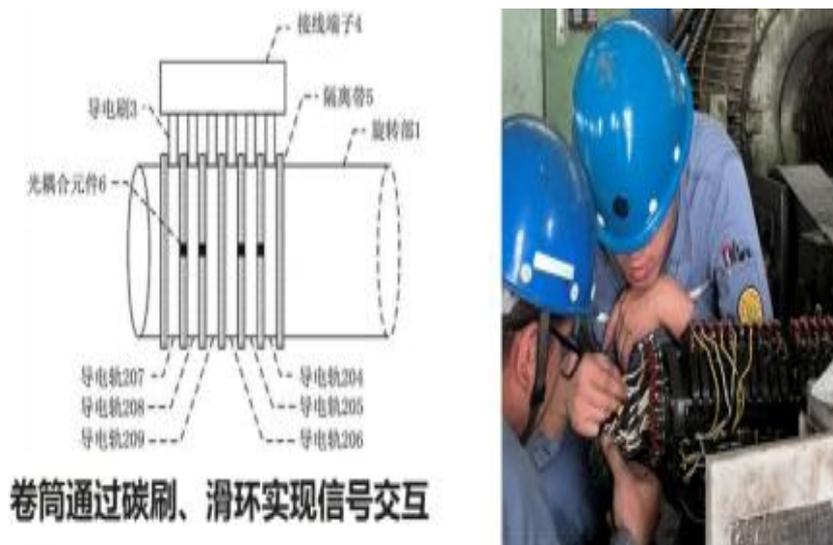
即无线化后需要将原有线场景下安全距离平均增大 0.08m，最大增加 0.208m，评估工程参数部署是否已经留有足够的余量，或者通过参数优化等方式，控制整个安全控制回路减少 0.13s 的耗时。

（四）生产精度转译的案例

智能制造是我国钢铁行业实现新型工业化的关键任务，依托 5G、人工智能等科技创新，深入推动高端化、智能化、绿色化转型。其中，库区无人化、智慧化是行业重要趋势，通过 5G 使能 IT 和 OT 融合，支撑控制、视频、HMI 等应用协同，引用钢铁行业智能化改造。

电缆卷筒在钢铁、港口等领域大型移动设备应用广泛，但是该方案存在如下痛点：

- ① 通信不稳定：电源和信号同时传输，对信号有干扰；滑环磨损和积碳也会导致网络性能不稳定。
- ② 限制多：线缆和传感器一一对应，传感器无法灵活增减。
- ③ 成本高：进口为主，单价几十万量级，施工周期长，单台部署周期在 4 人天以上。



卷筒通过碳刷、滑环实现信号交互

图 38 传统电缆卷筒方案示意图

如下传统电缆卷筒改造项目，存在精度控制场景：通过 5G 控制吊具的旋转和夹钳的开合，精准调取钢卷输送到指定位置，其中吊具旋转通过编码器反馈运行精度，通过 PLC 生成控制指令，进行精准控制；夹钳开合通过到位传感器反馈运动精度，通过 PLC 生成控制指令，进行精准控制。两个工艺均有精度范围需求，5G 取代后解决传统滚筒通信易损坏不易维护的痛点，但需要达成控制精度要求。



图 39 5G 吊具精度控制场景示意图

以吊具旋转工艺，评估 5G 取代后对控制精度影响，根据工艺设计，设备接近目标值时的运动速度是 $1.5^\circ /s$ ；假设原有线时， $CT = 2ms$ ，有线通信时延近似于 0；

5G 改造后，根据无线传输性能，假设： $CT = 8ms$ ，假设 5G 往返传输时延最大值为 13ms，其他各相关参数都不变，包括：传感器采集时间、CPU 处理时间、机械设备执行时间等。有线及无线的变化参数如下表所示：

参数名	参数描述	参数来源	值
T_{ED}	工业以太网延迟	有线下组态配置	2ms
T_{TD}	传输链路时延	有线下传输链路时延	0ms

参数名	参数描述	参数来源	值
T_{ED}	工业以太网延迟	有线下组态配置	8ms
T_{TD}	传输链路时延	5G 下传输链路时延	13ms
ΔS	控制精度影响	计算	0.03°

即 5G 取代后，控制精度仅仅影响了 0.03° ，该场景要求的精度范围是 2° ，影响程度小于 1%，该场景下控制精度预留了足够的余量，5G 取代后依然可以达成精度要求。其他精度项目也可通过该方法评估对控制精度的影响，以得出是否进行工厂部署调整，以及优化控制回路传输时延。

附录

缩略语

5G: 第五代移动通信技术 (5th Generation Mobile Communication Technology)

AGV: 自动导引运输车 (Automated Guided Vehicle)

CRC: 循环冗余码校验 (Cyclic Redundancy Check)

CT: 周期时间 (Cycle Time)

EMS: 空中悬挂的电动单轨系统 (Electrical Monorail System)

ERP: 企业资源计划 (Enterprise Resource Planning)

GPS: 全球卫星定位系统 (Global Positioning System)

HMI: 操作控制人机接口 (Human Machine Interface)

KPI: 关键性能指标 (Key Performance Indicator)

KQI: 关键质量指标 (Key Quality Indicator)

MES: 管理执行系统 (Management Execution System)

IRT: 等时同步实时 (Isochronous Real Time)

IT: 信息技术 (Information Technology)

OEE: 设备综合效率 (Overall Equipment Effectiveness)

OT: 操作技术 (Operation Technology)

PLC: 可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller)

RT: 实时 (Real Time)

RTT: 往返路程时间 (Round Trip Time)

SCADA: 监控及数据采集系统 (Supervisory Control And Data Acquisition)

SFRT: 安全功能响应时间 (Safety Function Response Time)

SIL: 安全完整性等级 (Safety integrity levels)

STL: 误动作等级 (Spurious trip levels)

uRLLC: 超高可靠性超低时延通信 (ultra-reliable low-latency communication)

WDT: 看门狗 (超时) 时间 (Watch Dog Time)



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

参考文献

- 1、 [1] 3GPP TS 22.104 Technical Specification Group Services and System Aspects; Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains; Stage 1
- 2、 [2] IEC61784-3-3 Industrial communication networks - Profiles - Part 3-3: Functional safety fieldbuses - Additional specifications for CPF 3
- 3、 [3] IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, IEEE Std 1588 TM - 2008, 24 July 2008
- 4、 [4] IEC 62657-1 Ed1.0: Industrial communication networks - Wireless communication networks - Part 1: Wireless communication requirements and spectrum considerations, 2016-03-25
- 5、 [5] IEC 62657-2 Ed2.0: Industrial communication networks - Wireless communication networks - Part 2: Wireless coexistence, 2016-03-25
- 6、 文中图 8/9/10/34/37 均出自上海勃傲自动化系统有限公司相关文稿。