



5G

5G+PLC 深度融合解决方案白皮书

施耐德电气 5G+ 边缘计算系列白皮书之一

www.se.com/cn

Schneider
Electric
施耐德电气

CAICT 中国信通院



中国联通
China unicom

声明

本白皮书所载的材料和信息,包括但不限于文本、图片、数据、观点,仅作为业务参考,不构成法律建议。本报告所有材料或内容的知识产权归施耐德电气(中国)有限公司、中国信息通信研究院、中国联合网络通信集团有限公司共有(注明是引自其他方的内容除外),并受法律保护。如需将白皮书的全部或部分內容以转载、汇编、传播、引用等方式使用,需注明出处。

施耐德电气(中国)有限公司

中国信息通信研究院

中国联合网络通信集团有限公司



编写说明

工业互联网作为新一代信息技术与工业经济深度融合形成的新兴业态和应用模式，是工业企业实现数字化转型的关键基础设施。5G 作为工业互联网网络的重要组成部分，在各个行业得到蓬勃发展。特别是过去三年，在国家 5G+工业互联网政策的鼓励下，十个工业行业和领域在制造业用户、基础电信运营商和通信企业的生态合作下，5G+工业互联网取得了很多成功案例并开始规模复制。目前 5G 网络开始向与工厂控制层面的 OT 网络深度融合方向拓展，并希望借此改变传统控制系统导致的网络拓扑结构固化及封闭的现状，以提高生产过程的柔性和透明性；通过 5G 在工厂全覆盖，实现要素资源全连接，结合工业互联网平台、边缘计算、大数据和工业模型技术，从而大幅度地提高工程和运维效率，降低生产和建设成本。

在此形势下，施耐德电气（中国）有限公司联合中国信息通信研究院、中国联合网络通信集团有限公司，结合在自身企业的 5G 应用实践，共同组织编写了《5G+PLC 深度融合解决方案白皮书》，希望能与业内同仁共享成果，共谋 5G+工业互联网的新发展。本白皮书从分析离散制造业的特点及实际需求出发，描述了 5G+PLC 的典型系统架构、应用场景分类；系统提出 5G 网络规划、网络标准化部署及网络性能要求；同时结合两个案例详细阐述了从产线分析到网络性能测试、项目实施、项目验收的完整过程；白皮书的最后对 5G+PLC 的未来发展进行了展望。

白皮书编写过程中得到了参编单位领导和专家的大力支持，也要感谢中国信息通信研究院余晓晖院长的精心指导并为白皮书作序。

编写组主要成员

施耐德电气（中国）有限公司：

王海，刘啸天，张奇，王强军，王勇，陈小淙，阎新华，李金江，马军，李泽辉，姚辉，洪岩博，赵起超

中国信息通信研究院：

王哲，黄颖，沈彬，于青民，段世惠

中国联合网络通信集团有限公司：

徐楚翌，豆思淼，赵宇，梁佳龙，胡赞，沈洲，黄璿，史全水

序言

工业控制是工业生产的核心环节，是实现大规模自动化生产的关键基础，没有先进稳定和高可靠的工业控制系统，就没有现代化的工业体系。与摩尔定律作用下快速迭代的IT设备不同，工业控制系统的功能、形态都保持了长期的稳定，其改进是稳健和渐进式的，这也反映了工业体系长期以来的内在要求。

当前，全球数字化浪潮蓬勃兴起，深刻变革着生产生活方式。数字技术与制造体系的深度融合和集成创新，推动了以工业4.0和工业互联网为代表的新工业革命，生产制造方式正向高效、精准、智能、柔性、协同转变，与此相适应，工业控制领域也正经历着一场创新性的重塑，工业控制系统从传统的封闭系统走向网络化、开放化、智能化，这场变革既是新工业革命的内在要求，也成为其重要的驱动力。

5G是具有广泛变革性赋能作用的新一代信息技术，5G的高速、低延迟和大容量特性，为工业控制系统提供了可靠、高效和灵活的通信支持，推动其向网络化、智能化、开放化演进。一方面，在5G、确定性网络等技术支持下，工业现场可实现组网融通和工业确定性通信，并通过工业算力网络协同调度算力、网络等资源，强化工控系统核心软件能力，提升应用效率。另一方面，5G融合边缘计算、大数据、人工智能等技术，通过云边协同实现“云端训练、边端推理”模式，将工业大模型、专家系统等更加广泛应用于工业控制领域，并通过对海量广泛历史数据进行智能分析预测，优化控制参数，实现智能化升级。同时，5G、实时操作系统等驱动传统ISA-95架构向云-边-端三层扁平化架构演进，编译平台、OS运行时和控制器硬件间也在逐步解耦，为控制系统的集中化/云化部署提供了可行的技术方案，加速分布式开放自动化控制体系的发展，赋能柔性化生产制造。

PLC（可编程逻辑控制器）是现代工业控制系统的典型代表，5G+PLC已经成为工业控制系统智能化变革的先导和探索热点。PLC作为工业自动化的核心控制器，与5G技术的融合，带来了功能、形态和结构的变革，可实现更智能、更可靠和更安全的工业控制，受到了产学研用各方的高度关注，其实践正逐步从物流控制等生产外围辅助环节应用向生产控制等核心环节应用深化拓展。

施耐德电气联合产业各方，积极开展5G+PLC方面的探索实践，在20家工厂进行了5G网络部署及产线改造，提质、降本、增效效果显著。《5G+PLC深度融合解决方案白皮书》基于工厂数字化改造的实践经验，由施耐德电气、中国联通和中国信息通信研究院的专家共同撰写，白皮书给出了5G+PLC赋能行业数字化转型的应用路径，提出了不同控制模型下对5G网络的性能要求及网络部署方案，并通过实际案例进行了深度剖析，为产业界开展相关实践提供了重要范例，相信值得从事相关领域的科技工作者、工程技术人员以及高校师生参阅。

余晓晖

中国信息通信研究院院长

序言

数字化洪流激荡，经济与社会全面数字化的时代已经开启。数字技术正以新理念、新业态、新模式全面融入人类经济、社会各领域和全过程，改变着人们的生产和生活方式，新的商业模式层出不穷。作为国民经济命脉的工业领域，在数字化加速发展的助力下，正迸发出无限潜能。

在驱动工业数字化转型多股交织的力量中，不断演进的5G新一代信息通信技术以其大带宽、低时延、高可靠、广覆盖等“天然”特性，为工业领域的数字化、网络化、智能化转型提供了强大的基础设施，正成为推动工业企业数字化转型的新引擎。然而，现阶段，5G在工业领域的应用仍落后于消费领域。细分门类多、行业门槛高、定制需求强、投入成本大等因素都在阻碍着新技术在工业领域的快速应用。要真正发挥5G技术的价值，使其成为实体产业高质量发展的推动力，就迫切需要与实体经济融合应用创新，需要与工业领域的运营技术（OT）深度融合，与工业自动化体系相融合。

施耐德电气自2019年开始在位于无锡和广州的工厂部署5G网络，并进行了大量的性能和安全测试，提出了5GC（5G核心网）全下沉，分散部署，集团统一管理的架构和运维模式。2022年开始落地5G多园区专网方案，遍布全国二十几家智慧工厂和物流中心，实现网络统一标准，应用快速复制和管理统一集中。例如，在**生产制造**环节，PLC南向5G连接的突破打破了工业控制最底层的固有框架，PLC可以远程控制尽可能多的底层机构和设备，打破了线体原来固定的框架，实现柔性化生产；在**仓储物流**环节，基于一张5G专用网络完成数据传输和定位，能够实现对AGV小车等可移动工装设备的管控与路线优化，提升整体效率；在**运营维护**环节，5G+AR/MR让工程师即使远在天边，也能以第一视角看到、听到甚至“摸到”现场的真实场景并远程“会诊”指导现场人员操作……在这些实际场景中，5G的技术自身的特性与施耐德电气在制造领域的深厚积淀融为一体，带来灵活性、韧性和效率的极大提升。

作为5G工业应用的积极践行者，施耐德电气也希望将自身的成功经验分享给更多工业企业，与业界共同推动产业数字化进程，共享数字技术带来的红利。当前，5G在工厂网络中更为广泛的应用还聚焦在管理层级，更加深入的自动化控制领域，如逻辑控制、运动控制和过程控制等仍鲜有涉及。5G+PLC深度融合白皮书选择工业自动化的核心控制器PLC作为“主角”，阐述5G+PLC在离散制造业的应用，涉及产线设计到运维全生命周期中的5G网络规划、部署、运维及性能要求，同时辅以应用详解，“以线带面”地展示了5G为制造业生产模式带来的深刻改变，推动未来工业领域变革。

随着5G和生产核心环节的融合成为支撑产业高速发展的全新动能，施耐德电气愿与所有合作伙伴聚力共赢，更好地利用5G技术优势，加速企业数字化转型，迈向更加开放、高效与韧性、可持续、以人为本的未来工业。

庞邢健

施耐德电气高级副总裁
工业自动化业务中国区负责人

目录

CONTENTS

1	5G+工业互联网产业发展现状	7
2	5G+PLC 在离散制造业的应用背景	10
2.1	离散制造业特点	11
2.2	5G 应用于离散制造的优势	12
2.3	5G 深入工业内网，赋能 PLC 南向控制领域	13
3	5G+PLC 应用典型系统架构	14
3.1	系统架构	15
3.2	5G+PLC 应用场景分类及对 5G 网络的需求	17
4	5G 网络规划、部署、运维及性能要求	20
4.1	5G 网络规划	21
4.2	5G 标准化网络部署	26
4.3	5G+PLC 应用的网络性能要求	27
4.4	精细化 5G 网络运营	27
5	案例详解 5G+PLC 自动化线体改造	29
5.1	产线改造前状态及痛点	30
5.2	网络性能测试	32
5.3	产线初期分析	37
5.4	项目实施注意事项	39
5.5	验收标准	40
5.6	实施效果	41
6	进阶应用——5G+PLC 半手工柔性装配	42
6.1	项目概述及背景	43
6.2	5G+PLC 控制网络架构	44
6.3	案例 5G 适配性分析	45
6.4	实施效果	46
7	未来展望	47
	附件：专有名词解释及缩略语	49
1.	施耐德电气专有名词解释	49
2.	通信专有名词解释	50
3.	缩略语	51

1 5G+ 工业互联网 产业发展现状



工业互联网是第四次工业革命的重要基石，5G的高速率、低时延和大连接三大新特性与工业互联网无线网络需求十分契合，是工业互联网的关键使能技术。5G作为新一代信息通信技术的重要演进方向，在各领域的应用落地成为商用发展的关键环节，工业互联网的垂直行业为5G提供了广阔的市场空间。5G与工业互联网融合创新有利于我国5G技术优势与工业需求的融合发展，目前已成为产业界探索的重要方向。“5G+工业互联网”是指利用以5G为代表的新一代信息通信技术，构建与工业经济深度融合的新型基础设施、应用模式和工业生态。通过以5G为代表的新一代信息技术对人、机、物、系统等的全面连接，构建起覆盖全产业链、全价值链的全新制造和服务体系，为工业乃至产业数字化、网络化、智能化发展提供了新的实现途径，助力企业实现降本、提质、增效、绿色、安全发展。“5G+工业互联网”涉及面广、参与主体多、资源投入大，覆盖5G网络建设、工业互联网基础设施建设、融合产品开发、行业应用落地等方方面面，其融合创新发展需要产业界持续探索和推进。



(1) 国家层面

2019年工业和信息化部出台《“5G+工业互联网”512工程推进方案》，对5G在工业领域的应用进行系统谋划、统筹部署，充分调动各地方积极性，组织产业各方发挥优势打“团体赛”，推动“5G+工业互联网”融合创新发展；2021年分两批发布“5G+工业互联网”十大重点行业、二十个典型应用场景，为各地区、产业各界提供实践示范。2022年发布《5G全连接工厂建设指南》，推动5G由生产外围辅助环节向核心控制环节深化拓展。一系列的指引性政策文件，为全国各地、产业各界推动“5G+工业互联网”发展提供参考。

(2) 地方层面

各地积极开展“5G+工业互联网”融合应用先导区建设。湖南省、江苏省、湖北省、四川省等地出台政策加强支持，集中探索建网模式、先导应用、商业模式等特色路径。在5G网络全覆盖基础上，实现工业核心区域和典型场景探索区内的5G室分系统建设和高密度、高质量5G网络覆盖，以满足超大带宽、超高可靠性等工业5G网络需求。在应用和创新层面，针对区内特色产业、重点优势产业、战略新兴产业开展“5G+工业互联网”应用探索，并在新产线上应用新模式。加快培育相关技术产品和解决方案，逐步推进“5G+工业互联网”供应链培育。

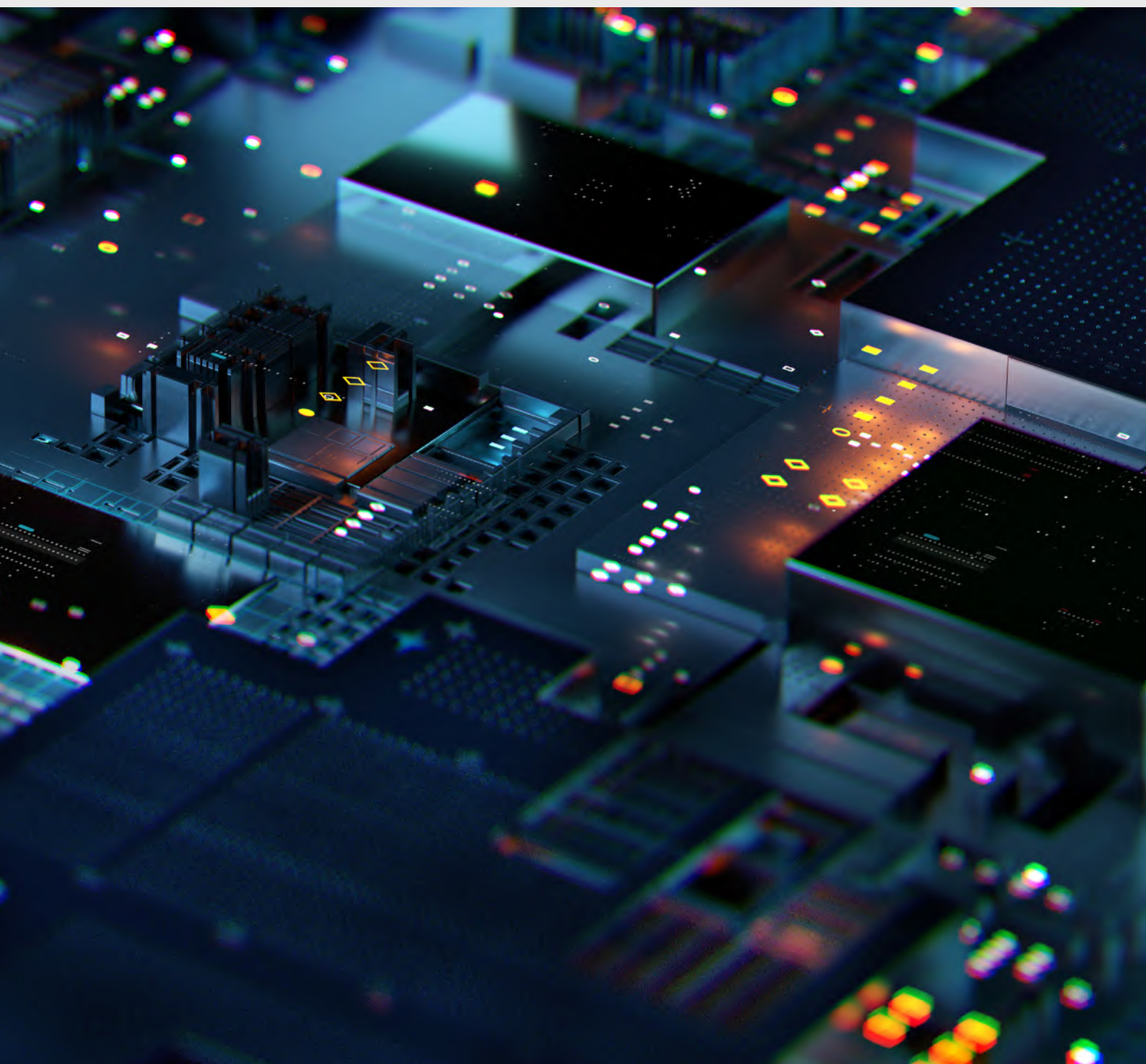
(3) 标准层面

当前“5G+工业互联网”的产业应用正处于探索初期，迫切需要推进标准化工作，以夯实其发展基础。技术产业化和标准化需覆盖融合关键技术、产品、管理和应用等方面，涉及网络、终端、安全、应用等内容，需要建立统一、综合、开放的“5G+工业互联网”融合标准体系。为了加速推进，工业互联网产业联盟（AII）及中国通信标准化协会（CCSA）在2020年5月组织了“5G+工业互联网”标准立项工作，并启动了面向航空、矿山、港口、高端装备、电网、钢铁、工业园区、水泥等领域的首批“5G+工业互联网”应用场景、技术要求和技术标准的研制。截至目前，已有12项工业互联网产业联盟标准立项，其中6项已同步在中国通信标准化协会工业互联网技术委员会（CCSA TC13）立项研制。

(4) 产业技术层面

随着5G+工业互联网发展不断提速，产业各方积极开展相关实践。一方面基础电信企业与工业企业合作开展企业内网改造，推动5G虚拟专网、混合专网等在重点行业、企业加速部署，充分利用5G网络资源提升专网服务水平，促进5G网络与其他网络融合应用，提升工业现场“哑设备”网络连接和数据互通能力。另一方面，基础电信企业发挥主体作用，培育发展新型业态，与钢铁、石化、电力等企业合作，优化流程工艺，大幅减少碳排放；与电子设备、装备制造等企业合作，促进协同研发设计，灵活调配产能，缩短物料库存周期；与采矿企业合作，打造快速感知与实时监测、优化超前预警和应急处置，促进矿山安全生产。同时，基础电信企业、工业企业、设备供应商、重点高校及科研院所合作共建产业生态，加快探索基于5G+边缘计算的云化PLC，开展工业级5G芯片、模组、网关等的研发与产业化，挖掘企业应用需求，推动工业自动化技术产业更新换代。

2 5G+PLC 在离散制造业的应用背景



2.1 离散制造业特点

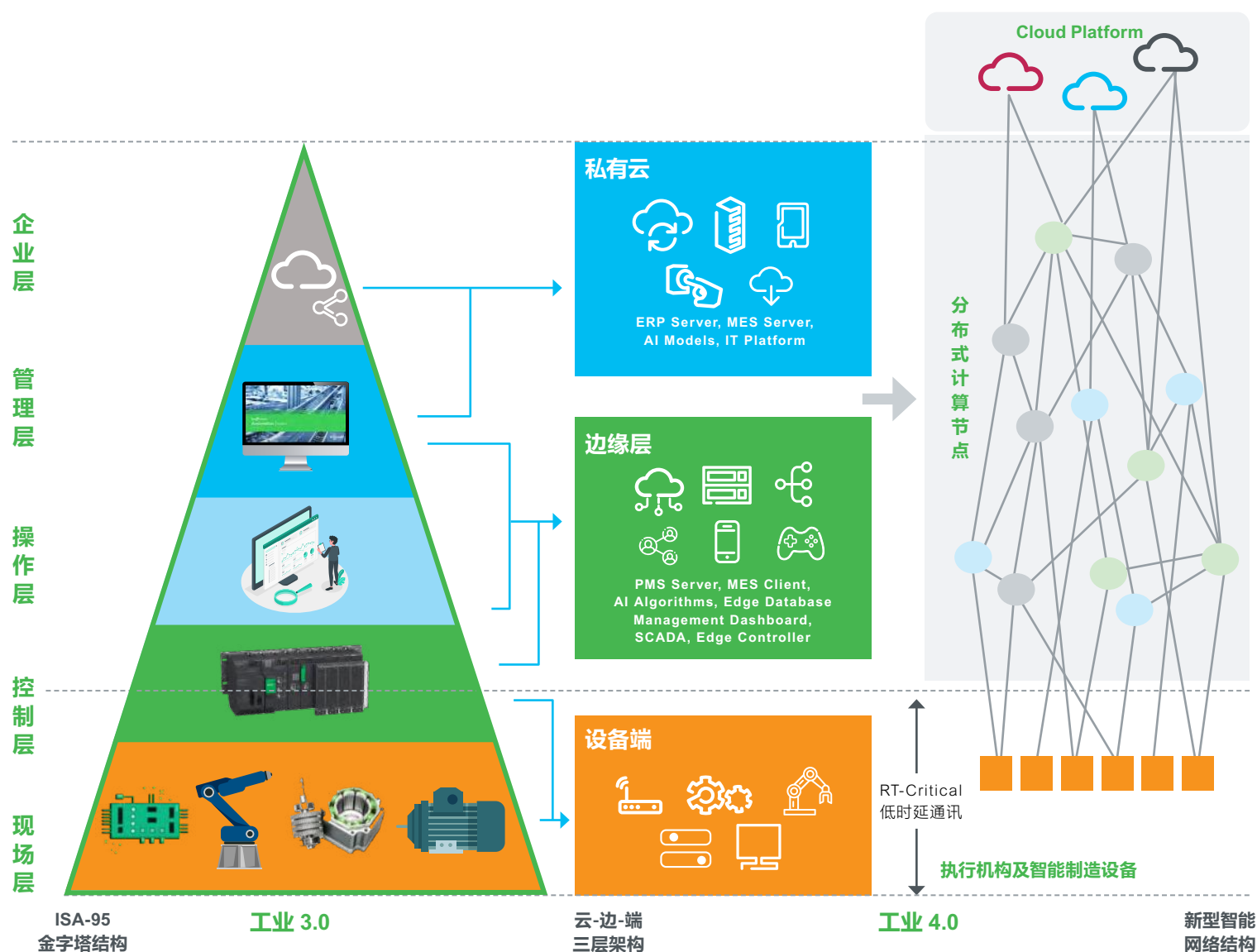
按照产品制造工艺过程特点，制造业可分为离散制造、流程制造和混合制造。离散制造的产品往往由多个零件经过一系列不连续的工序加工装配而成，即产品的生产工序分解成多个加工任务，由不同的生产设备来完成，典型的离散制造包括机械、装备、汽车、3C 电子等。

离散制造过程中，具有以下三个生产特点：

其一：生产过程中工艺与设备的柔性调整。离散制造的工艺段与工艺段之间相互独立，分别由独立的设备进行制造。生产过程中，通常会因为生产产品的变更需要进行产线工艺的调整。同时，这种分段式工艺也给生产过程中根据不同的需求定制化生产，或是生产同系列产品时进行设备的临时变动带来了可能。离散制造行业中，为了更好服务于个性化和快速升级迭代的客户需求，面向机械、装备、工业用品等行业客户的产品制造，大量存在多品种小批量的生产模式，在这个过程中，节能减排，安全高效和灵活柔性是大多数企业追逐的目标，柔性产线的设计也应运而生。此外，通过保留通用工艺设备站，仅对差异化工艺站进行设备替换，可以有效提高设备的使用效率，降低设备采购的投资成本。

其二：OT 与 IT 网络的紧密结合。与流程制造中企业的生产效率主要依赖生产设备的产能有所不同，离散制造需要通过生产管理软件的协同进行加工要素的配置优化，也就是精益化生产。在这个意义上，离散制造企业更加需要通过 OT 与 IT 的融合网络来实现现场生产要素数据到企业管理侧数据的流通和共享。

其三：新型融合的工业自动化体系。传统工业生产是基于 ISA-95 定义的五层工业自动化体系架构，即企业层、管理层、操作层、控制层、现场层，这种多层次化的网络架构，一方面导致上层的 IT 网络无法快速高效的触及现场生产系统，大量生产数据消失在工业控制层中，企业的数据资产在无形中流失，另一方面，复杂的组网架构、不断增加的设备接入需求也对企业 IT 工作人员带来了大量组网配置负担，这在离散制造企业尤为明显。随着工业数字化深入发展，工业 3.0 时代基于 ISA-95 的五层工业自动化体系架构正向工业 4.0 时代的端边云三层架构发展。MES、SCADA、ERP 在边缘计算节点或工业云上协同部署正成为业界趋势。展望未来，PLC 基于功能和实时性逐渐分化为集中化/虚拟化 PLC 和分布式控制节点（DCN），集中化/虚拟化 PLC 部署在本地边缘侧，而分布式控制单元部署在现场侧与现场设备融合形成智能化设备。这种架构要求设备端与边缘计算节点之间的网络通信具备提供大带宽、低时延以及时延确定性的能力，从而保证工业应用的数据采集和控制的业务要求。



[图 2-1] 工业3.0至工业4.0的工业自动化体系架构演进

2.2 5G 应用于离散制造的优势

在柔性生产方面，无线网络是设备快速可移动与灵活调整的刚需。5G网络低时延、高可靠、强安全的特性可支持柔性生产场景下OT网络通信的无线化诉求。集中化的PLC与运动控制器、变频器、伺服、远程I/O等通过5G网络进行连接，可大幅提升网络部署的效率，降低布线成本和复杂性，从而更便捷地实现生产设备、生产线根据生产订单进行灵活重组，满足定制化产品生产过程中快速换线的需求。

在扁平化网络架构方面，5G 使能各类工业生产设备进行扁平化通信，原有基于5层网络架构部署的工业设备与系统之间均可通过5G网络实现数据流的打通，不再需要复杂的组网配置以及有线网关端口的绑定与映射。5G网络天然提供全域一张网的能力，结合5G LAN特性的二层接入能力、5G网络切片对网络资源的灵活调配，完美契合离散制造企业OT网络与IT网络扁平化融合的发展趋势。

云化PLC，分布式控制，标准工作站和治具快速更换能力是未来产线设计的一种方向。5G网络给传统的产线设计及生产方式乃至控制方式都带来了极大的变革，使得柔性化生产等理念变得可实现。

2.3 5G深入工业内网， 赋能PLC南向控制领域

历经3GPP R15、R16、R17三个版本，5G技术正不断迭代，以更好的满足行业应用需求。5G LAN、5G切片、高精度授时等技术及配套产业链也逐渐成熟。5G行业应用在中国规模发展，据工信部统计数据，5G应用已融入了制造、港口、金融、钢铁、电网、医疗、教育、轨交等97个国民经济大类中的60个，5G行业虚拟专网已超过1.6万个，给制造业生产模式和生产形态带来了深刻改变。

虽然5G在工业领域的应用正逐年增加，但应用的深度仍有待扩展。目前，在工厂网络中，5G更为广泛的应用于ERP/MES/SCADA层级，更加深入的PLC控制领域，包括逻辑控制，过程控制、运动控制等仍鲜有涉及。随着5G技术的不断演进，R16关键特性的引入，5G可靠的低时延能力使得5G使能PLC控制领域，即支持PLC南向通信渐成为了可能。

全新的通信技术在和工业控制架构深度融合时，所产生的“水土不服”等问题也不容忽视。其一是CT和OT的性能标准的不一致性。服务于消费者领域，通常以平均时延作为5G网络的性能指标，但工业领域却更加关注时延的稳定性。其二，相比于设备有线直连的极低时延，基于5G无线网络的设备接入会带来生产效率上的损失，如何客观判断、权衡价值和损失是深度融合时需要考虑的因素。其三，网络的不稳定性会给部分机械运动设备带来安全隐患，而生产安全是工业制造的第一要务，如何解决在控制系统领域引入5G带来的安全性风险也是需要考虑的因素。这些问题都依赖于工业企业、通信企业和基础电信企业的相互配合，共同完善彼此兼容的方式，设计新的电气/机械安全架构，产线设计工具和配套方案。

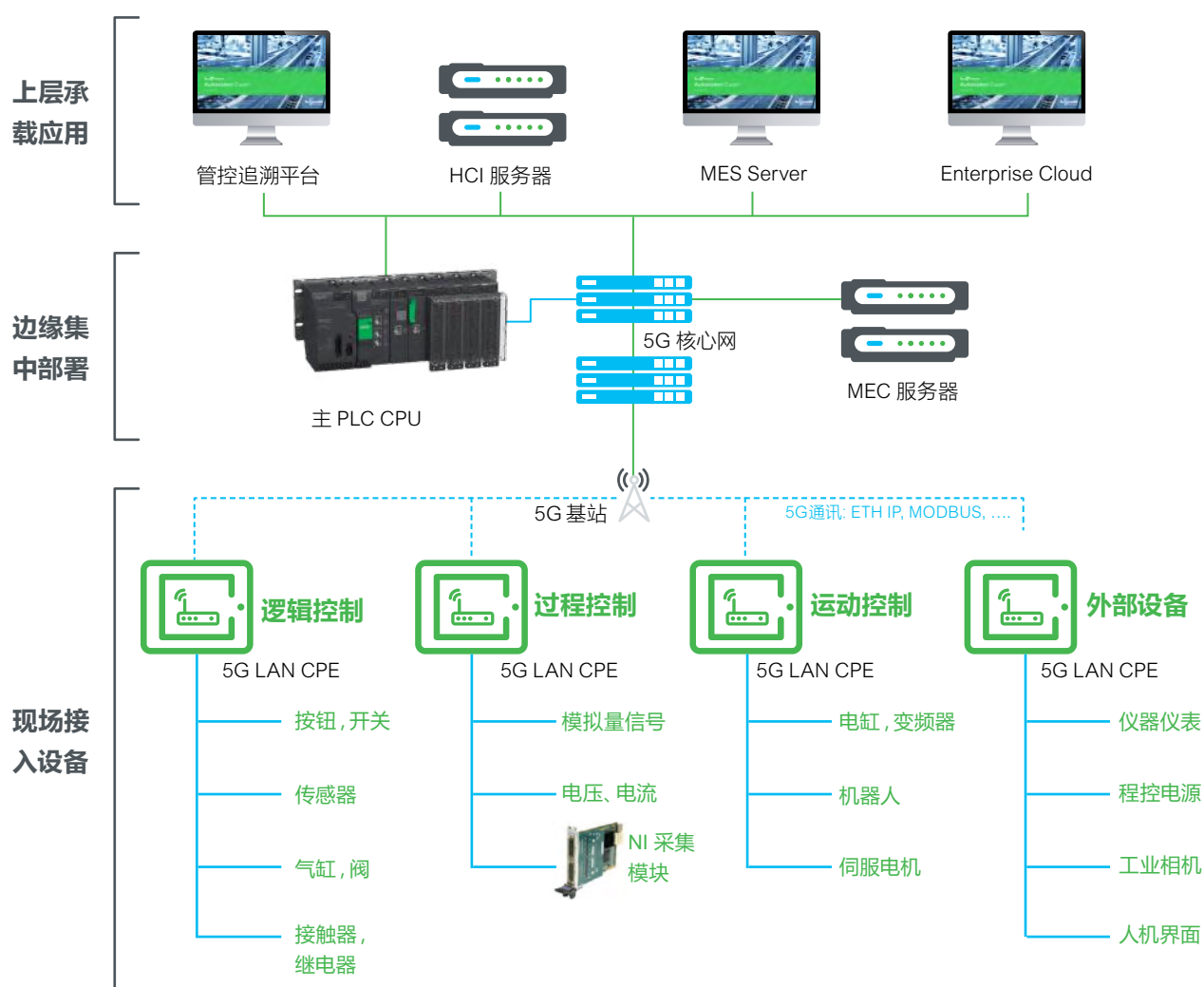
本白皮书旨在从工业产线初期分析调研开始，至全面落地进行生产为终，提供一个全面的5G+PLC深度融合的工业产线的解决方案。其中涉及到产线选择、设计、制造、验收全生命周期的管理以及产线配套的质量追溯、生产管理系统架构方案为践行未来工业领域变革踏出探索性的第一步。

3 5G+PLC 应用典型 系统架构



3.1 系统架构

为了实现5G深度融合PLC南向工业控制的目标,打造新一代的生产模式,施耐德电气提出了以下的5G+PLC典型系统架构。此架构承袭了传统PLC控制架构,尽可能的做到了对控制程序编写人员和设备制造人员的无感化,降低了其实施的难度,提高了便捷性和可复制性。



[图 3-1] 5G+PLC工厂级系统架构

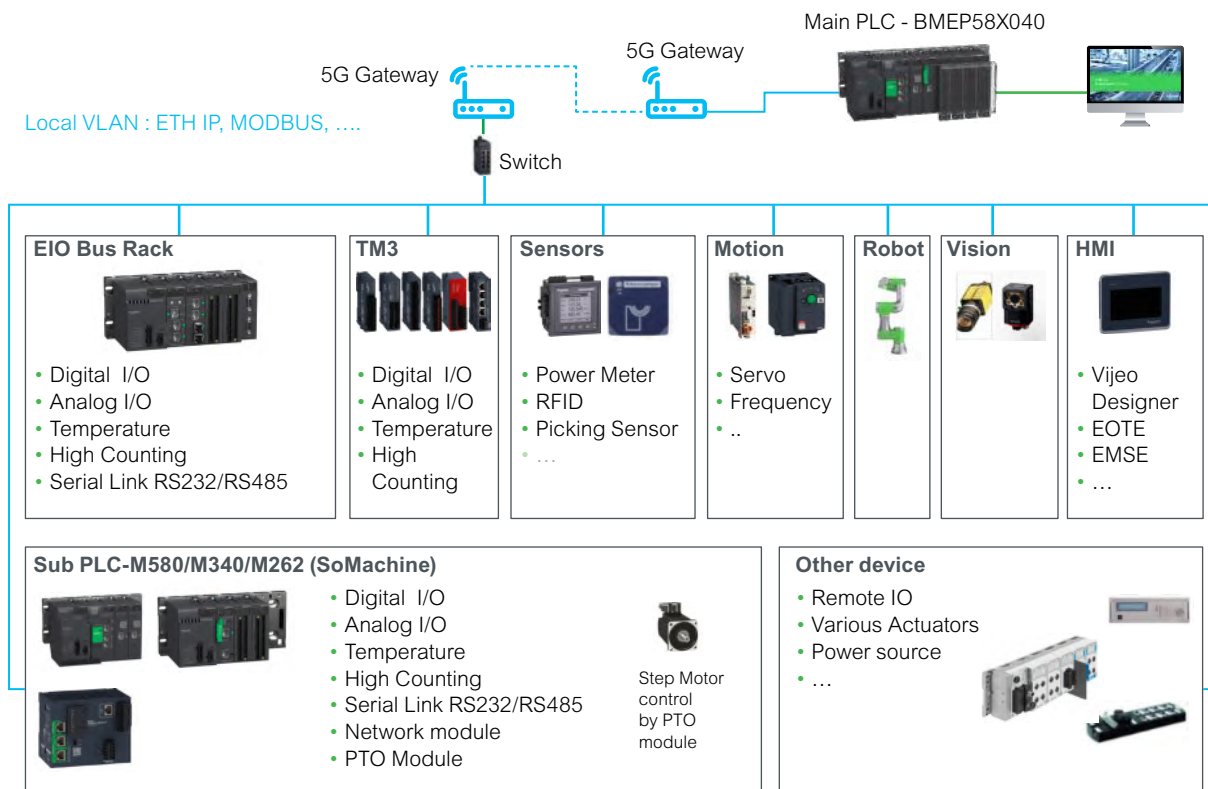
现场接入设备

实际生产场景进行了四类的划分,分别为逻辑控制场景,过程控制场景,运动控制场景和外部设备场景。根据场景不同,使用设备不同和应用要求不同,其组网架构也会出现改变。在R16阶段,南向5G通讯可覆盖约80%左右的应用场景,剩余的20%推荐以添加子PLC(Sub PLC)的方式进行东西向通讯。具体的分类指南请见5G+PLC应用场景分类及网络时延需求。

PLC与现场设备的连接称为PLC南向通信,图3-1蓝色线所示。主PLC与其他线PLC,MES系统,数据采集平台等软硬件的连接称为PLC东西向和北向通信(文中统一称为PLC北向通信),图3-1绿色线所示。在利用5G连接提供灵活便捷的同时,也要保障设备控制的可靠性,主要是设备控制的时延和稳定性的可靠,5G通信方式应用于PLC南向或是北向对于其网络性能的要求是不同的。

5G连接的最小工作单元可以为单设备,也可根据复杂程度选择远程背板通信,或远程I/O进行多个设备的连接。通常情况下,如果连接需要进行工业协议转换,则可采用远程背板,通过远程背板外接工业CPE/DTU进行5G通信。如果连接较简单,只涉及I/O信号读写的简单工站,则可使用带有通信功能的远程I/O,并外接工业CPE/DTU进行5G通信即可。

实际现场中所有需要和主PLC连接的工业设备包括但不限于:sub PLC,I/O模块,各种类型的感应器,伺服电机,步进电机,气缸,电缸,程控电源,工控机,屏幕,安全光栅/扫描仪,数字量和模拟量信号设备,以及工业/协作机器人。示意图可见图3-2。



[图 3-2] PLC南向设备连接示意图

边缘集中部署

值得注意的是,在生产现场,5G 承接 PLC 南向通信,意味着 5G 需要承接工业 OT 网络 and 各类工业协议。因此,5G 需要支持二层组网,即 5G 终端和 5G 网络需要支持 5G LAN 功能。在边缘集中部署层,除了主 PLC 以外,还有与其连接的 5G 核心网以及边缘服务器 MEC。以上设备均在同一物理位置,其连接方式为网线或光纤。

上层承载应用

上层应用属于管理层和操作层级,大部分部署在企业分布式计算节点或私有云/服务器上。这些应用包括了 MES 系统服务端,质量管控追溯平台,生产信息数据库及其他。

3.2 5G+PLC 应用场景分类及对 5G 网络的需求

(1) 5G +PLC 应用场景的单个 5G 终端的话务模型

在 5G+PLC 应用场景,考虑工业现场设备种类和数量众多且 5G 芯片模组价格仍较高,目前通常在单个工作站部署一个或若干个 5G 终端,单个工站内的多个工业现场设备通过短距离有线的方式统一连接到某个 5G 终端并与控制类设备进行通信。单个 5G 终端的典型通信话务模型如下:

[表3-1] 单 5G 终端下通信话务模型

单个 5G 终端下连接的工业现场设备数	多数情况 ≤ 10
每个包大小	100 bytes
每个连接单次通讯平均发包数	1.5个
发包频率和数量	频率约 30ms/次 总数量约 500 个/秒 (1000/30*1.5*10) 存在工业现场设备同时发包情况

(2) 5G+PLC 应用场景分类及网络时延需求

逻辑控制场景

逻辑控制针对的是工业场景适用的开关量信号，包括输入信号和输出信号，在PLC数据类型定义为布尔型变量(BOOL)。开关量信号主要来源：按钮，开关，传感器，指示灯，蜂鸣器，气缸，阀，接触器，继电器等。

在5G应用场景下，5G支持通过总线方式连接主PLC与远程背板、远程IO。总线方式包括：Ethernet/IP, Modbus TCP, Profinet 等。基于PLC轮询运行机制，所有逻辑控制通过5G连接将带来额外时延，该时延需控制在20ms~50ms之间，具体数据需根据产线/设备整体时延影响造成的效率损失来决定。逻辑控制场景往往在所有设备控制种类中占比最多，所以在设计阶段要考虑尽量减少设备串行动作，增加并行动作的可能性，以最小化引入5G带来的生产效率损失。

特定情况下，某些I/O信号需通过高速扫描(<10ms)来控制特定器件，例如运动过程中某些事件的触发。此类场景需在设备端通过硬件回路加以控制，例如通过光耦或固态继电器在硬件层面断开，同时将PLC获取的信号作为辅助控制，从而实现基于5G的控制方案。

注：逻辑控制信号时延为5G双向时延(RTT时延)的二分之一。

过程控制场景

过程控制指的是工业场景适用的模拟量信号，包括模拟量输入和模拟量输出，在PLC数据类型定义为整数。模拟量信号主要包括：电压信号，电流信号等。

在5G应用场景下，同样需要通过总线连接远程模拟量模块或远程背板。总线方式包括：Ethernet/IP Modbus TCP, Profinet 等。

模拟量信号输入输出对实时性要求不同，针对实时性要求不高的场景可采用5G方案，例如阶梯式输入输出，IIOT数据采集，电压、电流、温度、噪音测量等；如果测量系统对模拟信号实时性要求较高，需采用NI数据采集卡来获取实时数据，将最终分析结果通过5G上传至主PLC。

注：模拟量输入输出造成时延为5G双向时延的二分之一。正常时延需控制在20ms~100ms以内。

运动控制场景

运动控制是对机械运动部件的位置、速度等进行实时的控制管理，使其按照预期的运动轨迹和规定的运动参数进行运动，施耐德电气工厂主要涉及电机控制。

电机控制主要分为三大类：PTO 脉冲串控制，总线控制，I/O 控制。

PTO 脉冲串控制：因其控制机制不适用 5G 通讯控制，需采用现场 subPLC 加驱动模块来驱动。效率损失=远程主 PLC 与现场 sub PLC 通讯次数*时延/总运动时间。5G 双向时延需在 20~100ms 之间。

总线控制：主要通过 Ethernet/IP，Modbus TCP，Profinet，EtherCAT 来实现运动控制。总线型运动控制包括高速总线控制与普通总线控制。高速总线控制如 EtherCAT、CANopen，通常涉及到高精度的多轴同步，要求 4~64 及以上电机的动作同步，时差精度要求在 1ms 以内，且 5G 目前无法支持 EtherCAT 这种非 MAC 寻址的协议，故此类运动控制建议采用现场辅助运动控制器来进行驱动，效率损失=主 PLC 与辅助 PLC 通讯次数*时延/总运动时间。普通总线型运动控制时延需控制在 20ms~50ms 之间。总线控制分为开环和闭环两种：

开环控制是指无反馈信息的控制方式。一般应用与变频器，软启动类无需反馈数据的控制器。其单次运动效率损失为 5G 双向时延的二分之一。

闭环控制是指有反馈信息的控制方式。当前工业场景大部分都是闭环控制，例如：伺服电机，电缸，伺服拧紧枪等，其单次运动效率损失为 5G 双向时延。

I/O 控制：部分无需精确位置，速度控制电机可采用 I/O 方式来控制。例如：滚道电机，变频器等。上述总线控制电机也可采用 I/O 方式来控制。效率损失按实际控制方式下的开环，闭环属性来决定。开环乘数为 1/2，闭环乘数为 1，双向时延需在 20~100ms 之间。

外部设备场景

当前工业场景下会使用很多外部设备，例如：机器人，仪器仪表，扫描枪，打印机，激光刻印与焊接，程控电源，人机界面等。基于 5G 连接，所有外部设备默认推荐总线协议：Ethernet/IP，Modbus TCP，Profinet。如外部设备只有 RS232，RS485 串口通信，可借助智能网关或远程背板加串口通讯模块来实现与 5G 的连接。此类通信控制应注意实际通信次数对效率损失带来的影响，如机器人控制，因其往往执行步数较多，单次移动时间较短，需要考虑优化机器人路径，减少与 PLC 通信次数。5G 双向时延需控制在 20~100ms 以内。外部设备单次通信效率损失为：5G 双向时延/运动时间。

产线整体效率损失值建议控制在 3% 以内，效率损失值计算公式如下：

效率损失值 = T_t / T_c ，其中：

T_c = 设备节拍

T_t (总损失时间) = 所有串行动作或通信损失时间 T_s 之和

T_s (单次损失时间) = 单次动作或通信 * 5G 双向时延 * 倍率

4 5G 网络规划、部署、 运维及性能要求



施耐德电气将 5G+PLC 应用场景归纳为四类：逻辑控制场景、过程控制场景、运动控制场景和外部设备。为满足不同场景的网络需求，中国联通除提供定制网能力外，同时提供 5 种标准化网络产品，通过“基础网络+增值业务”方式提供快速高效建网能力。

4.1 5G 网络规划

(1) 网络性能分类分级

工业 5G 网络性能需求与公网消费者业务需求有较大差距，使用者可以根据自身需要和现状在网络搭建之初提出需求，或根据现有的网络搭建能力，结合后续章节的分析工具，确定 5G 网络融合生产的程度和方向。网络性能分类包括低时延、大上行、高可用、网络切片、5G LAN 等方面：



低时延

网络时延指标一般采用用户面端到端双向往返时延（RTT时延）来度量，可通过平均RTT时延和时延可靠性进行评估。时延可靠性使用累积概率分布衡量，一般用 $Ams@B\%$ 表示，指 $B\%$ 的样本RTT时延不超过 Ams 。例如 $20ms@99.99\%$ 表示99.99%的样本RTT时延小于等于20ms。

5G网络时延主要通过降低空口等待和传输时延进行优化，具体技术包括上行预调度、UL-Grant free、Non-slot、UPF下沉等。时延可靠性主要通过专有资源预留、降低空口重传和链路级冗余等手段进行保障。终端收发两侧增加路由器支持双发选收，通过链路冗余，提高终端侧的可靠性和空口稳定性。平均时延和时延可靠性分类分级见表4-1：

[表 4-1] 平均时延和时延可靠性性能分级

能力分档	第一档	第二档	第三档
平均时延	$\leq 50ms$	$\leq 30ms$	$\leq 15ms$
时延可靠性	$100ms@99.9\%$	$50ms@99.99\%$	$20ms@99.99\%$
覆盖要求	业务发生位置： $SS-RSRP \geq -95dBm@95\%$	业务发生位置： $SS-RSRP \geq -95dBm@95\%$	业务发生位置： $SS-RSRP \geq -85dBm@95\%$
核心网要求	无特殊要求	下沉UPF	下沉UPF+网络切片
承载网要求	无特殊要求		承载网下沉园区+网络切片
关键技术	SR调度 目标误码率10%	精准预调度 目标误码率1% DAPS免切换（移动场景）	上行预调度 目标误码率1% RB资源预留 基站侧PDCP乱序递交 终端侧PDCP乱序递交 低码率MCS/CQI PDCP复制* Slot聚合* Non-slot* UL-Grant Free*
终端要求	支持5G SA	支持5G SA	1. 支持5G SA 2. 支持PDCP乱序递交 3. 支持双发选收组网

注：*为可选技术，可进一步提升时延可靠性。

大上行

网络大上行能力使用上行小区容量进行评估。上行小区容量指在一定的覆盖、用户分布和业务模型下，单位时间内小区可提供的上行吞吐量能力。在工厂车间室内组网条件下，可使用 D-MIMO、频谱叠加等技术提升大上行能力。

D-MIMO 技术，将多个普通小区合并为一个分布式 Massive MIMO 小区，实现更大区域内的无切换，给 AGV 和扫描枪等移动设备提供最佳体验。此外，D-MIMO 技术，可支持在交叠区域可获得联合 Beamforming 增益，用户体验提升 50%~300%；在非交叠区域可实现空分复用 MU-MIMO 增益，实现 3~4 倍小区容量，大幅提升小区容量，使能高速率大容量业务如 CCTV、机器视觉、数据采集等应用。上行小区容量分级见表 4-2：

[表 4-2] 四档上行网络能力技术方案

能力分档	第一档	第二档	第三档	第四档
上行容量 (7:3 时隙配 比为例)	90Mbps/小区	360Mbps/小区	720Mbps/小区	1080Mbps/小区
组网方案	普通射频合路小区 100MHz 频谱	D-MIMO 小区 100MHz 频谱	D-MIMO 小区 200MHz 频谱	D-MIMO 小区 300MHz 频谱
关键技术	SU-MIMO 256QAM	SU-MIMO 256QAM	SU-MIMO 256QAM	SU-MIMO 256QAM
终端要求	无特殊要求	无特殊要求	无特殊要求	无特殊要求

高可用

高可用使用网络可用度指标衡量，具体指产品在任意随机时刻，被需要或开始执行任务时，处于可工作或可使用状态的程度。

网络可用度 A 与 MTTR（平均故障恢复时间）、MTBF（平均无故障工作时间）之间的关系：

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

其中，MTBF（平均无故障工作时间）是可修复产品可靠性的一个基本度量，指在规定状态下的特定测量区间，产品的所有部件能够在指定范围内完好工作的寿命单位均值。MTTR（平均故障恢复时间）是产品维修性的一种基本参数，其度量方法为：在规定的条件下和规定的时间内，产品在任一规定的维修级别上，修复性维修总时间与在该级别上被修复产品的故障总数之比。

端到端网络可用度等于核心网、承载网、无线网各可用度的乘积（网络可用度的计算通常不包括终端），即 $A_{\text{端到端}} = A(\text{CN, 核心网}) \times A(\text{TN, 承载传输网}) \times A(\text{RAN, 无线网络})$ 。

高可用性性能分级见表4-3：

[表 4-3] 三档高可用的网络能力技术方案

能力分档	第一档	第二档	第三档
高可用	99.9%	99.99%	99.999%
核心网	共享UPF， 1+1双机热备	独享UPF， 1+1双机热备	独享UPF， 1+1双机热备
承载网	接入环网+汇聚核心口 字型	接入环网+汇聚核心口 字型	接入环网+汇聚核心口 字型
无线网	大网基础配置	1. 主控板/基带板/电源 模块备份 2. 小区：Massive MIMO或D-MIMO 小区	1. 主控板/基带板/电源 模块备份 2. 小区：Massive MIMO或D-MIMO 小区 3. 双网冗余

A. 增强型工业CPE /DTU等预计99.99%

网络切片

针对存在的不同功能要求、不同性能要求等差异化功能场景，网络切片使能运营商提供差异化的定制网络，实现一网多用。端到端网络切片涉及终端、无线网、承载网和核心网相关能力的配置开通，针对无线网主要通过QoS优先级配置、RB资源预留和载波隔离三种方式，实现不同切片的RAN侧资源的保障策略。QoS优先级为软隔离方案，资源完全共享，针对切片用户的QoS配置进行差异化调度；RB资源预留实现资源的部分隔离，给切片组预留的静态RB不可被其它切片组抢占，同时，切片组内部按QoS优先级调度；载波隔离实现资源完全隔离，可以通过独立频谱或独立基站，实现最好的隔离效果。



[图 4-1] 网络切片的三种方式

5G LAN

工业控制网络通常都是基于二层组网架，5G与工业控制网融合要求5G具备二层组网能力，才能够实现与传统工业网络的融合和替代。此外，一些工业以太网协议，也需要二层网络支持。5G LAN可以支持L2层LAN服务，实现5G在工业控制网中的即插即用。5G LAN也支持集群（子网）管理能力，支持不同生产业务的隔离，并且支持子网内的广播、组播功能。

(2) 5G 工业级组网原则

5G 用于工业控制网络，需要在组网能力上支持内网融合及高可靠冗余等架构要求。

组网设计原则

组网设计整体按覆盖和容量目标来设计：

- A. 覆盖设计：基于业务边缘速率和边缘覆盖强度，给出覆盖的网络规划方案；
- B. 容量设计：统计网络总体容量需求及容量分布，结合单个小区网络能力（与频谱资源、时隙配比等相关），给出容量的网络规划方案；
- C. 综合容量和覆盖两个维度，给出整体的网络规划方案。
- D. 针对低时延高可靠等高SLA保障的应用，需要进行网络叠加设计。

站点部署原则

无论是室外还是室内场景，站点部署都要考虑覆盖、容量和干扰等多因素之间的平衡，具体原则如下：

均衡原则：每个小区/站点所覆盖的通信终端数量及容量相对一致，避免出现个别小区容量过载或者个别小区容量轻载；

同频站点规划：多小区场景，采用定向天线，减少小区间的干扰；

天线安装位置：室内小站建议吸顶安装，垂直向下覆盖；杆站采用贴墙或抱杆安装方式；室外站点根据现场环境确定安装位置。

利用物理环境隔离覆盖：小区边缘可以规划在物理墙体位置，利用厂房内的建筑物，如墙体来实现同频信号在物理上的隔离，减少干扰；

站高选择：典型的制造园区，站点安装高度需要根据实际可部署的点位来选择，并结合覆盖仿真来确定。

4.2 5G 标准化网络部署

为适配不同制造场景对5G网络能力和快速建网的差异化需求，中国联通除提供定制网能力外，同时提供5种标准化网络产品，通过“基础网络+增值业务”方式提供快速高效建能力。其中基础网络面向不同的业务类型和场景需求，提供基础的差异化网络产品和覆盖能力，后续可按需选择增值产品进行网络能力增强。

针对5种标准化部署方案，无线网部分使用64TR/32TR AAU基站、4通道数字化室分、杆站提供区域基础网络覆盖，根据业务场景需求，可考虑基于D-MIMO、载波聚合、URLLC等技术实现网络能力增强。核心网部分，设计共享UPF、独享UPF、独享5GC部署模式，满足不同工业场景下业务的时延、可靠性及网络安全保障。方案详情如下表。

[表 4-4] 5G 标准化网络部署方案

标准网络	基础覆盖网_室外	基础覆盖网_室内	基础覆盖网增强_室内	工控可靠网	工控可靠网增强
目标业务	数据采集，视频监控	数据采集，视频监控	数据采集、视频监控，机器视觉	数据采集、视频监控，机器视觉，PLC控制	数据采集、视频监控，机器视觉，PLC控制，位置定位
组网方案	64TR/32TR AAU 100MHz频谱带宽 RSRP≥-95dBm@95% 共享UPF	4TR 数字化室分（或） 8TR 杆站 100MHz 频谱带宽 RSRP≥-95dBm@95% 共享UPF	4TR 数字化室分（或） 8TR 杆站 100MHz 频谱带宽 D-MIMO组网 RSRP≥-95dBm@95% 共享UPF	4TR 数字化室分（或） 8TR 杆站 100MHz 频谱带宽 D-MIMO组网 RSRP≥-85dBm@95% 下沉UPF	4TR 数字化室分（或） 8TR 杆站 100MHz 频谱带宽 D-MIMO组网 RSRP≥-85dBm@95% 下沉UPF 独享5GC
基础网络能力	大上行：第1档 低时延：第1档 高可用：第1档	大上行：第1档 低时延：第1档 高可用：第1档	大上行：第2档 低时延：第1档 高可用：第1档	大上行：第2档 低时延：第3档 高可用：第2档	大上行：第2档 低时延：第3档 高可用：第2档
可选增值业务	大上行：第2档 低时延：第2档 高可用：第2档	大上行：第2/3/4档 低时延：第2档 高可用：第2档	大上行：第3/4档 低时延：第2档 高可用：第2档	大上行：第3/4档 低时延：第3档 高可用：第3档	大上行：第3/4档 低时延：第3档 高可用：第3档

4.3 5G+PLC 应用的网络性能要求

在5G网络建设方面，可以通过设置更低的BLER、双发选收等技术，实现丢包率小于万分之一，满足5G+PLC对网络指标的要求。具体网络性能要求如下：

A. 单向空口时延小于15ms（5G CPE到DCGW）

通过5G网络UPF下沉、空口预调度等技术，实现单向时延小于10~15ms（5G CPE到DCGW）等方式可以满足要求。

B. 5G覆盖指标（95%覆盖概率，参考信号电平SS-RSRP>-85dbm）

需要结合生产具体室内环境，设计pRRU的部署位置，以满足95%的区域内覆盖电平大于-85dbm，满足要求。

C. 5G 网络可用性保证达到99.9%-99.99%

如果将核心网的可用达到99.98%，无线网的可用性达到99.97%，全网络系统可达到可用性>99.95%的要求。如果需要达到更高的可用性，可以考虑在无线网BBU处进行单板冗余，RHUB冗余，pRRU交叉组网等方式。

4.4 精细化5G网络运营

工业生产安全是生产过程中的重中之重，将原有的有线方式更替为5G方式，需针对网络可靠性、时延等SLA指标进行精准管理监控，确保5G在工业内网应用过程中的安全稳定。

采用FMEA管理模式进行5G专网的精细化运维体系建设：

A. 业务端到端风险梳理

梳理端到端各个网元的容灾备份是否完善，详细剖析对应设备故障的可能性评级与故障严重性评级，得到端到端网络风险评级。对各项风险提前分析可能原因，设计容灾机制，规划应对措施，降低网络带来的业务风险影响。

B. 业务端到端失效模式分析

根据业务的具体位置定位到相应的网络设备，得到不同业务端到端失效模式。因数通设备、核心网设备、无线BBU与5G+PLC业务类型关联性不大，而无线网pRRU、RHUB设备与业务强相关，因此将集中式PLC控制产线下的pRRU、RHUB设置为关键控制点。

C. 业务运维等级匹配

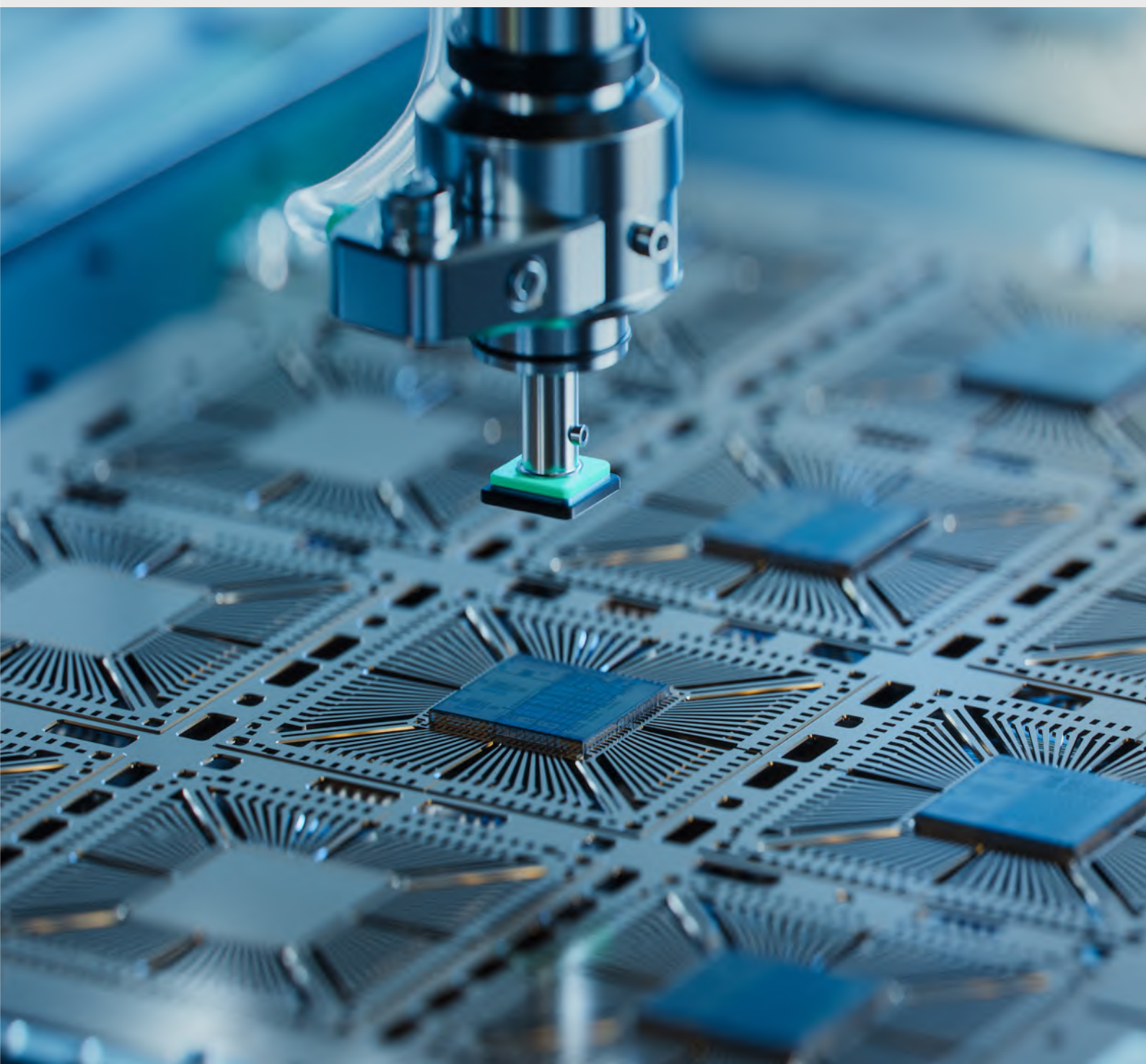
根据工厂对不同业务的重要性等级评估，结合5G专网运维要求，将各应用场景划分为四个运维等级，并设置不同的响应、处理、反馈时限。可参考以下运维等级划分模式进行规划：

[表 4-5] 5G 专网运维等级划分

运维等级划分	对业务影响说明	响应时限	阶段反馈时限	处理时限
P1	业务全阻、PLC产线、AMR业务受影响	半小时	每小时反馈	4小时
P2	AI、墨水屏等其他非关键业务受影响	1小时	每小时反馈	12小时
P3	当前所有业务无影响但存在隐患	需现场处理时2小时联系（工作时间）；软件配置等后台自行处理后邮箱反馈	每4小时反馈	根据告警严重性另分为24、48小时
P4	对业务无影响	自行签收知晓	—	—

运维体系建设后，仍需通过专网自服务平台对工业5G专网进行实时、准确的网元状态、SLA指标监控。基于5GToB切片专网一站式自助运营服务，通过“七元二阶”方法采集对接物联网卡，终端、基站、承载、边缘云、5GC、私有云等网元节点，跨专业关联基础设施、业务应用两个阶层，对网络设备、关键KPI指标进行实时监控，如时延、速率、丢包等指标，实现便捷的专网运行下网络排障分析、端到端分段定界、业务SLA动态优化闭环，推进网络与业务一体化融合的可视、可管、可维、可控，实现工业5G专网自服务定制化、网络能力显性化。保障工业5G专网稳定可靠运行，为工业行业用户提供真正具备价值的专网服务。

5 案例详解 5G+PLC 自动化线体改造



前面章节描述了5G深度融合工业控制领域的背景、系统架构及应用场景分类及对5G网络的需求、5G网络规划及部署的通用要求，以下两个章节将以实际生产场景和制造实施过程为例，分别结合全自动高速产线和半自动柔性产线两个案例给出实际指导，以供同行参考。

5.1 产线改造前状态及痛点

原产线共四台设备组成高速自动产线，节拍时间CT为3秒。有线PLC南向组网采用主机架+本地扩展控制本地IO+工业以太网或工业现场总线节点控制变频，伺服，视觉等方式。

原产线使用了4个M580 PLC进行南北向及东西向通讯，单个PLC架构如下：

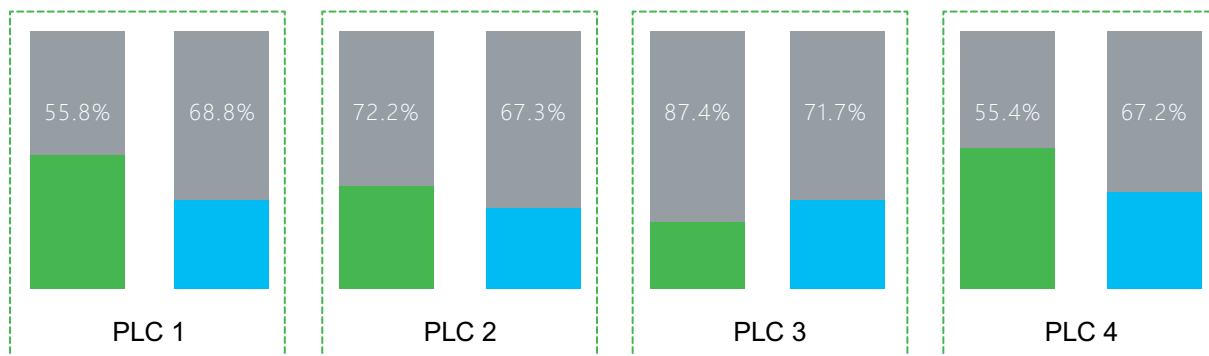


[图 5-1] 原产线单个PLC架构



基于原来系统架构，实测单PLC内存利用率约为30%，利用率较低（如图5-2所示），计划使用5G+PLC集中化部署方式进行PLC整合，提高利用率，减少投资成本。

内部存储器（程序和保存数据）



[图 5-2] 内存利用率分别为 45%、33%、29%和45%

改造方案可参考图3-2，此产线采用了远程背板的通信方式，由4个远程背板替换了原先产线的4台PLC，南向连接了气缸、阀岛、电脑、HMI、工业相机、传感器等多种设备。



5.2 网络性能测试

施耐德电气为形成5G深度融合工业控制网络标准解决方案，搭建5G+PLC测试验证平台，针对前期拟定的工业控制场景与5G时延SLA测试，希望形成面向不同控制需求的5G网络建设指标建议，提供一个全面的5G工业产线解决方案。主要测试场景包括：逻辑控制、过程控制、运动控制、外部设备通讯四类场景，涉及集中化部署的主PLC与远程背板、远程IO、现场子PLC及各类驱动器、传感设备间的5G通讯。这些测试也为前面章节的网络性能要求和运动器件的通信需求提供了数据支撑。

(1) 测试内容

以下为2022.12月在施耐德某工厂环境下的详细测试内容，其中各部分测试的必要性可以根据阅读者的实际情况进行选取参考：

A. 工厂环境下，不同SLA设计下网络质量保障测试

M580集中式PLC与远程背板、远程IO、子站PLC、伺服驱动器之间的5G无线通讯网络质量

B. 不同SLA设计下，5G无线通信对四类工业控制场景业务的影响测试，每类场景测试三大指标，包括平均时延（15ms,25ms,50ms）、最大时延（30ms,50ms,100ms）和时延溢出（千分之一，万分之一）

- a. 逻辑控制：场景为M580与远程背板、远程IO间的通讯，涉及Modbus TCP协议与Ethernet/IP协议
- b. 过程控制：涉及M580与远程背板、远程IO间的通讯，涉及Modbus TCP协议与Ethernet/IP协议
- c. 运动控制：涉及M580与变频器、伺服控制器间的通讯，涉及Modbus TCP协议与Ethernet/IP协议，涉及EtherCAT协议的高精度控制不在该测试内
- d. 其他设备通讯：其他工业设备通讯，大部分采用Modbus TCP协议

C. 5G LAN工业控制网络优化效果测试

D. 工业5G网关可靠性及性能对比测试

E. 双发选收网络保障效果测试

(2) 测试架构

工厂测试基于集中化 PLC 布置的架构，使用了多种支持 5G LAN 功能的 DTU 用于测试，各工业网关均具备 5G LAN 功能。涉及到的硬件设备见下表：

[表 5-1] 5G+PLC 测试硬件清单

设备名称	设备型号	备注
M580PLC	BMEP584040	集中式 PLC
远程背板	BMEXBP0800	分布式模组
M340CPU	BMXP342020	通讯
数字量输入输出模块	BMXDDM16022	逻辑控制
模拟量输入输出模块	BMXAMM0600	过程控制
TM3总线耦合器	TM3BCEIP	远程 I/O
TM3数字量输入输出模块	TM3DM8RG	逻辑控制
TM3模拟量输入输出模块	TM3AM6G	过程控制
变频器	ATV630U07M3	运动控制、通讯
伺服驱动器	LXM16DU07M2X	运动控制、通讯
马达	BCH16LB01330A5C2	运动控制机构
工业5G网关1	NR130	5G 终端
工业5G网关2	Z2	5G 终端
工业5G网关3	R511	5G 终端
工业5G网关4	CPE ins2.0	5G 终端
DIS	DIS LampSite	5G基站设备
5G CORE	E9000H-2	5G核心网

测试用硬件连接和系统架构如下图：



[图 5-3] 5G+PLC 测试用网络架构示意图

(3) 测试网络环境及特性

基于施耐德某工厂车间内5G专网环境进行测试，5G 小区信息如下：

[表 5-2] 5G 小区信息

组网	SA
制式	NR TDD
带宽	100M
子帧配比	7:3
专网部署模式	5GC控制面下沉厂区，厂区内鉴权，开卡、网管位于北京

业务测试过程中，网络具备以下特性：

D-MIMO 特性：D-MIMO 解决方案，区别于传统NR同频部署带来小区间干扰严重，从而影响覆盖区域内用户性能，创新性引入分布式 Massive MIMO 技术，通过将工作在相同频段上的射频模块所连续覆盖的区域合并成一个 nTnR 的小区来消除小区边界，降低小区间干扰。合并后形成的 D-MIMO 小区还可以通过 MU-MIMO 功能来提升系统的上下行容量和频谱效率。D-MIMO 解决方案适用于半封闭高大型厂房、空间开阔场景，例如制造、钢铁厂房室内空旷、无吊顶、抱杆点位丰富场景，通过宏站天线增益大、覆盖广、抱杆侧装方便，所需点位少，安装便捷优势，解决厂区部署 5G toB 的难题。

业务差异化低时延：业务差异化低时延特性实现了 QCI (QoS Class Identifier) 级别的上行预调度、SR 周期可配、SR 首包大小可配和上、下行 IBLER 目标值可配，节省调度处理时间及减少误块率和减少重传次数，降低空口时延。

低时延高可靠：低时延高可靠主要通过实现数据信道可靠性和控制信道可靠性来达到提高业务可靠性的目的。

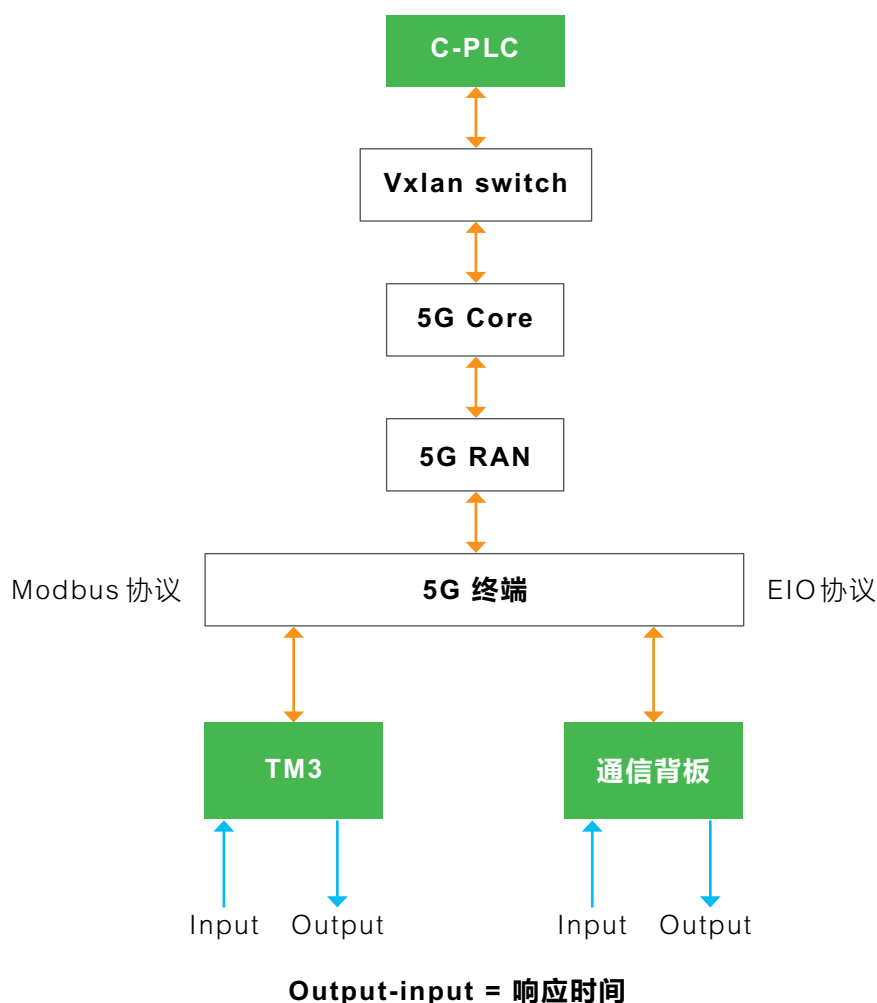
PDCCP Duplication：通过 PDCCP 层复制报文，并在多载波冗余发送数据包，提升空口的可靠性。针对制造、港口、电网等短时延高可靠网络，进一步提升业务可靠性，助力达成 RAN RTT 时延可靠性。

Slot 聚合：Slot 聚合功能可以在多个连续的 slot 上采用不同 HARQ 冗余版本传输同一个数据块，充分利用 HARQ 合并增益，提升空口传输的可靠性。

(4) 测试结果

测试选取了主流工业以太网协议 Modbus TCP、Ethernet/IP、Ethernet/IO 进行测试，并分别配置不同的协议轮询周期，通过持续发包测试不同协议下终端的响应时间。为模拟工业控制场景下实际电气动作执行的响应时间，测试选用 TM3 和 M580 通信背板，分别将 DO 输出接口与 DI 输入接口短接，使用 PLC 计时器记录从 PLC 程序控制 DO 输出到接收到 DI 输入的时间间隔作为响应时间，因该过程为闭环控制，响应时间受到两次 5G 通讯时延的影响。

测试开启了低时延特性已优化 RTT 时延。



[图 5-4] 5G 工厂测试架构

工业控制业务响应时间测试，持续发包：

[表 5-3] 工业控制业务响应时间测试

测试内容	TM3 by ModbusTCP			远程通信背板 by EIO		
	10ms	20ms	30ms	10ms	20ms	30ms
轮询周期	10ms	20ms	30ms	10ms	20ms	30ms
有线响应时间	26.67ms	39.99ms	60ms	20.01ms	20.99ms	29.99ms
5G 响应时间	40.6ms	49.55ms	60.063ms	38.48ms	40.04ms	41.18ms
响应时间增加	13.93ms	9.56ms	0.063ms	18.47ms	19.05ms	11.19ms

结论分析：在工业南向控制环节，选用不同的工业控制协议与配置不同通信参数受到 5G 化改造时延影响的程度有所不同，根据实际测试验证，随着通信轮询周期的增加，5G 无线时延对现场 I/O 动作影响显著降低。通常情况下，用户在使用远程 I/O 过程中，大多使用默认 20ms 作为轮询周期，在此基础上的工业控制场景，5G 网络配合现场机械、电气安全防护可满足大部分控制需求。

5.3 产线初期分析

(1) 产线工艺设计分析

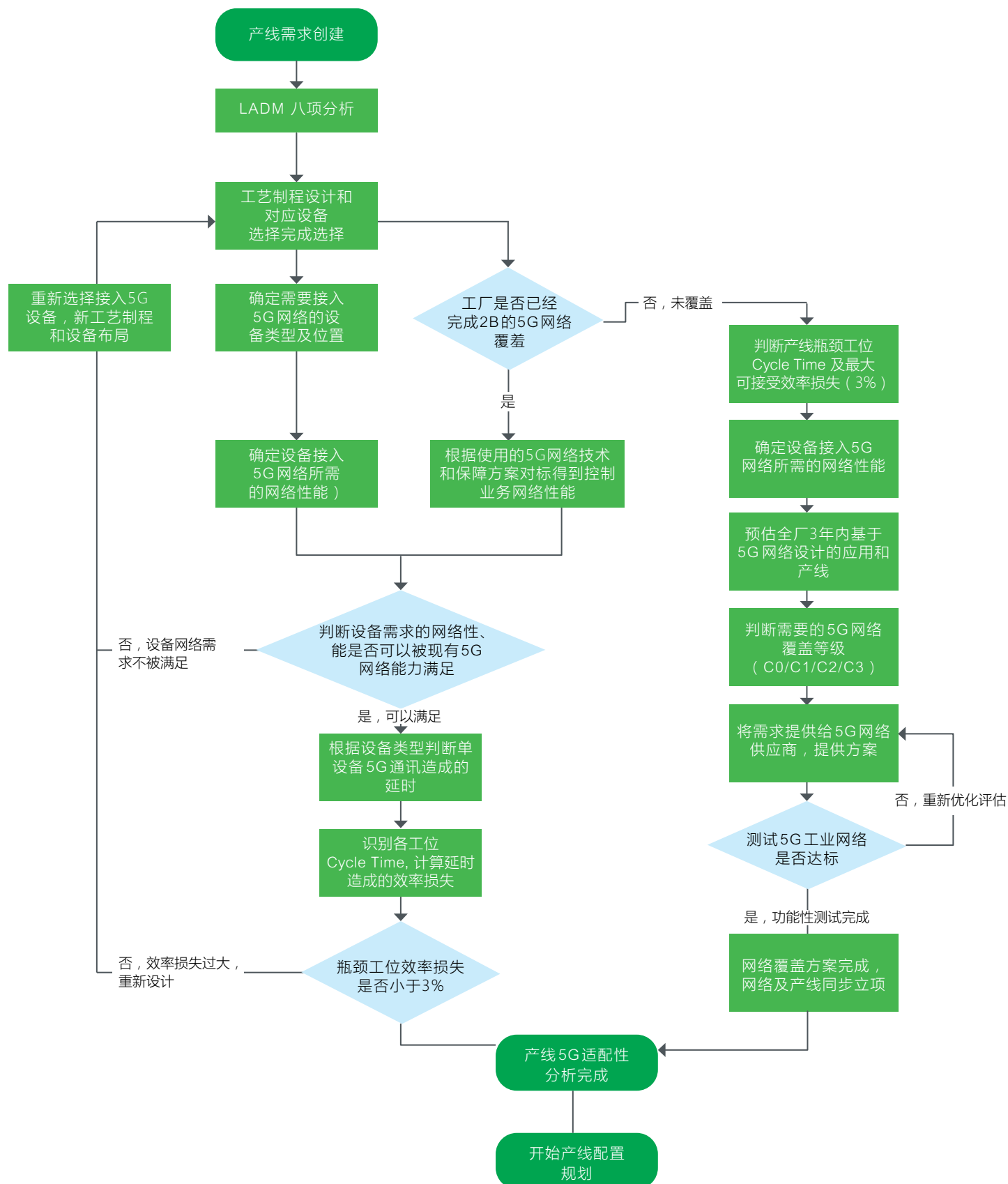
此分析可基于产线设计基础工具 LADM (Line Architecture Design Methodology) 的基本原则，从需求，供给，产品，制程，MPH，布局，管理和评估八个步骤进行分析。全流程以可迭代，可进步，可协作，可对比的原则，为工程师提供一个结构化的生产线设计准则。更详细的分析工具和方法可参考精益生产资料。

除了借助于传统线体设计标准外，在设计时需要注意区分在产线工艺制程中对于 cycle time 和时延敏感性的要求：

- A. 高速自动线：一般来说，cycle time 小于 5s 的产线被称为高速自动线，复杂的高速自动线往往对于节拍要求很高，双向 20ms 的时延可能会造成 5% 以上的效率损失。故在高速线体进行 5G 改造/制造时，需要额外进行节拍评估，在确保产能需求达标的前提下使用 5G+PLC 技术。
- B. 时延敏感线体：这里指的是其中的关键工艺制程及产品质量会受到时延影响。只要存在时延对产品质量和关键制程出现影响的场景，必须保证产品关键性能在后续制程中可被检测。建议在产线验收阶段进行质量全检，生产阶段进行高频抽检，并对产线的实时网络性能以最高优先等级进行监控。

(2) 产线5G适配性分析

本节旨在就5G+PLC产线新建/升级/替代项目给出设计流程参考指南，分析流程见图5-5所示，每一步流程所作判断依据都以之前章节内容为依据：



5.4 项目实施注意事项

(1) 5G 连接下机械、电气安全防护

机器设备的第一要义必定是安全和可靠，无论种类也不分区域，标准是确保其兑现安全可靠承诺的最重要的监管工具。

5G 网络环境下，PLC 的 CPU 和现场设备基于 5G 网络通信导致网络异常中断时，PLC 的执行指令无法正常传达至设备处，为了保障在极端情况下设备的安全性，需要确保机械、电气的安全防护完全不依赖 PLC 执行程序，完全由本地安全电路完成。

如何判断一台机器是安全的，就需要看它是否满足相应的安全标准，能否识别出机器的风险和提供相应的安全防护措施。事实上，在机械、安全设计上，行业内已有成熟且严格的标准。严格遵循标准进行设备设计可以有效避免 PLC 集中化部署带来的安全隐患。

(2) 施耐德电气 PLC 5G 下连接参数设置参考

- A. Modbus TCP 设备参数设置参考：对于 Modbus TCP，建议发包周期参数设置为 40-60ms 之间，考虑到 5G 终端和网络性能的配置，如网络性能配置足够好，可以适当缩短发包周期。
- B. Ethernet/IP 模块设定参考：对于 EIP 设备如果是使用 TCP 协议，建议使用 30-50ms 的发包周期。
- C. EIO 参数参考：应用程序扫描周期建议大于 60ms。



5.5 验收标准

(1) 功能性验收标准

功能性验收标准主要测试设备性能是否达到了技术要求的预期。应在设备到场调试完毕后，完成一段时间的生产后开始。一般的设备验收条目包括以下几种：

- A. 稳定生产节拍 Cycle Time；
- B. 机械效率 OEE；
- C. 生产一次合格率 FPY；
- D. 产品误判率（涉及到智能质检的设备）；
- E. 设备故障次数及原因；
- F. 机械安全审查；
- G. 电气安全审查。

(2) 网络性能验收标准

网络性能验收分为全厂 5G 网络覆盖能力验收及生产线组网和性能验收。

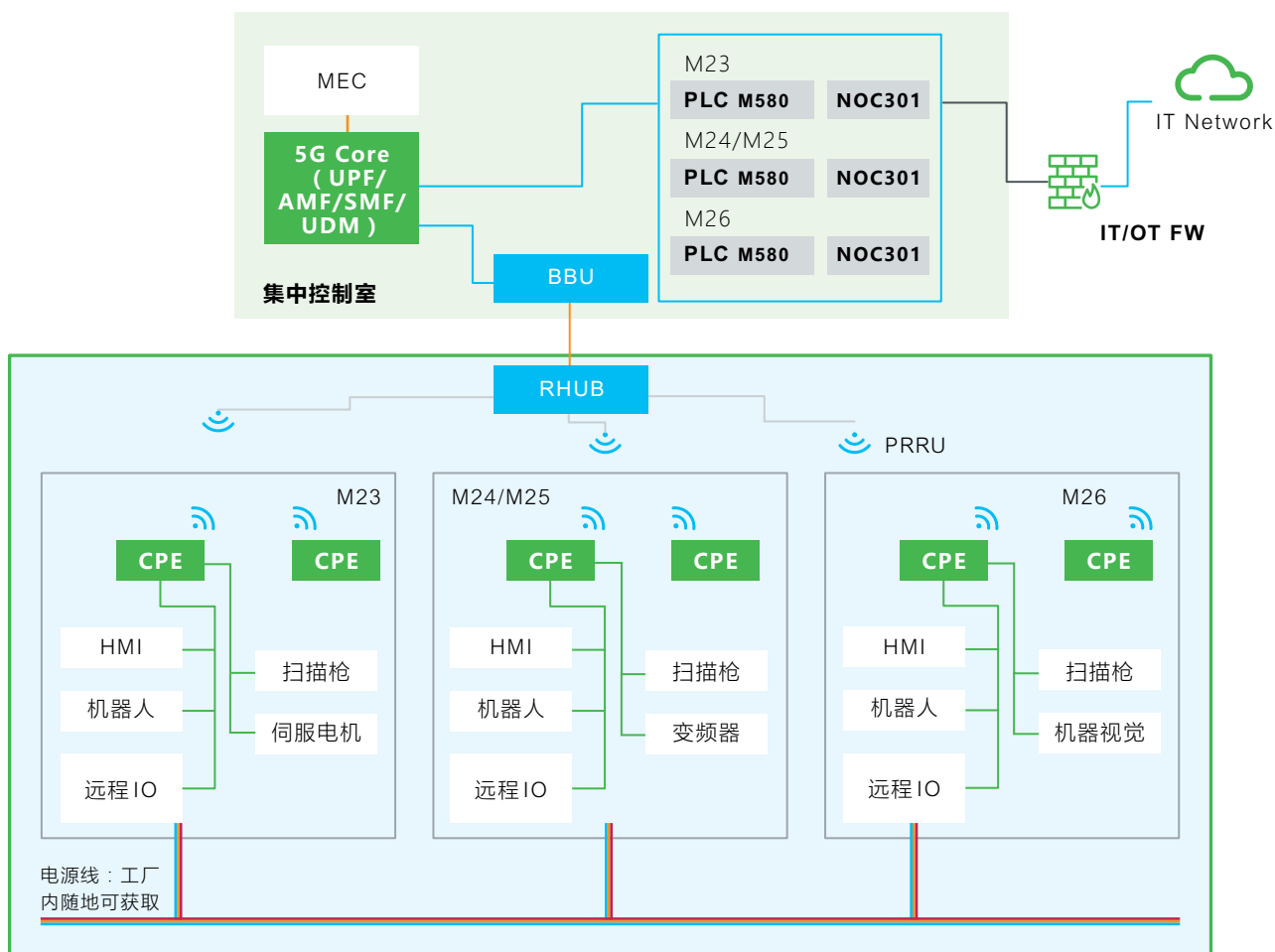
全厂网络覆盖由网络性能分级及网络招标时技术要求为基准，进行信号覆盖检测，30万次下平均时延和时延稳定性检测，故障处理流程和响应速度压力测试等。标准情况下，符合 5G 下 PLC 南向工业控制的网络条件需要满足：信号强度大于-85dbm，双向时延小于20ms，满足 99.9%-99.99%的可靠性。同时网络运维恢复时间小于4小时。

在生产线组网后的网络性能测试中，要求 PLC 南向网络具备以下特征：

- A. 终端和物联网卡具备 5G LAN 功能；
- B. 开通低时延特性和 QoS 功能；
- C. 根据实际需求，E2E 支持 Vlan 划分功能；
- D. 基于单一会话，提供实时网络性能检测功能；
- E. 平均双向时延稳定在15ms以下，无明显波动。

5.6 实施效果

进行改造后，PLC 在机房进行了集中化部署，并从4台 PLC 集合成了3台，未来将进一步进行3台合并为2台的编程改造。改造后的PLC组网架构如下：

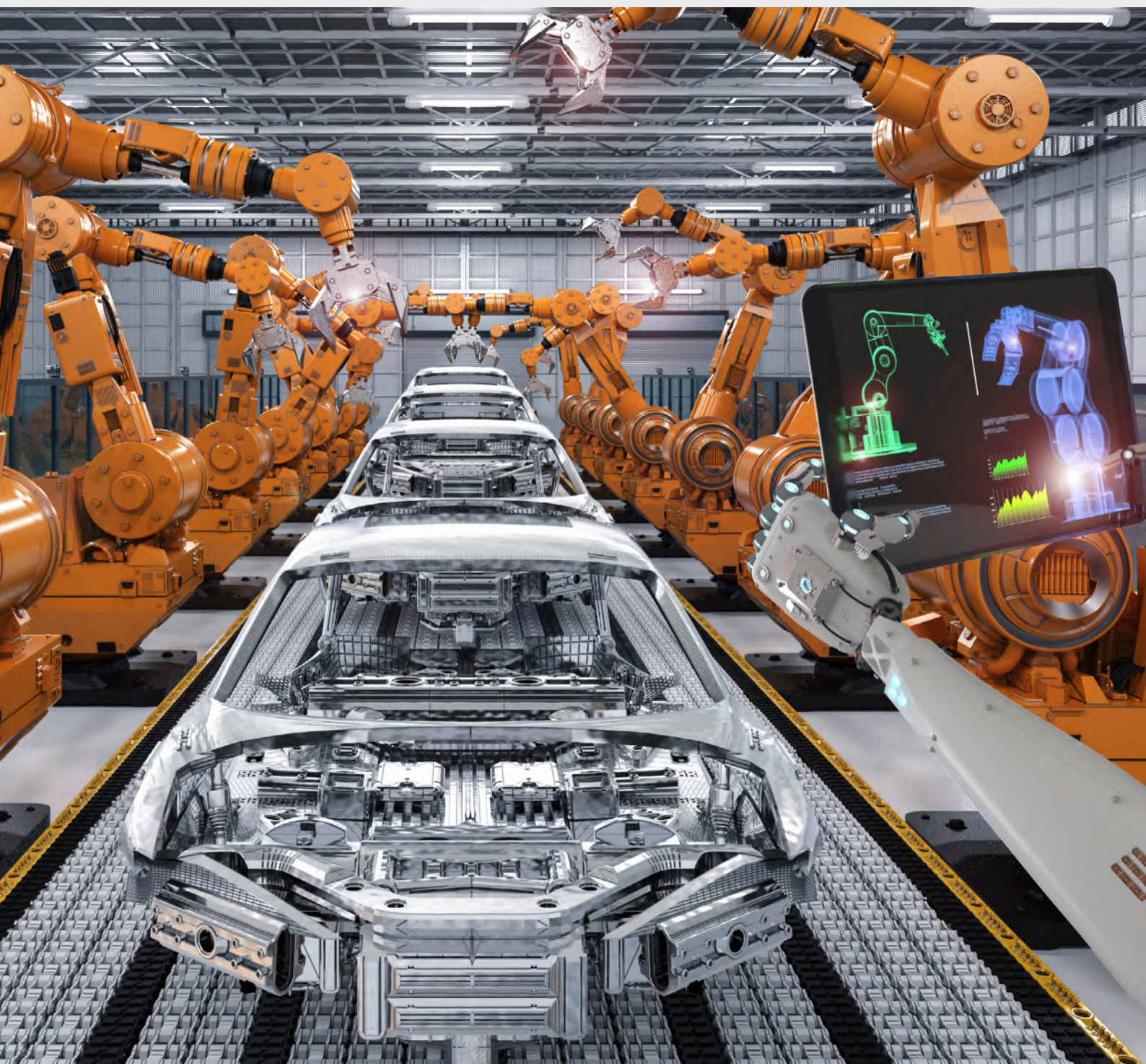


[图 5-6] 改造后的5G+PLC组网架构

本生产线已成功于2023年2月正式进入商用环境下运行，其生产的产品都已经通过最终质量检测并交付客户使用。改造稳定后效率损失约为3%以内，符合预期，且生产过程中的一次合格率未受到影响。本次改造项目成功验证了5G+PLC南向控制方案可以在高速生产自动线（CT < 5s）上使用，5G改造前后设备产品质量保持一致。预期可节约硬件成本6万元。

在此高速产线上积攒的经验可快速进行复制，单条产线的改造时长从2周缩短至3天内，其经济效益和规模化效果显著。以单个工厂为例，其可改造线体超过50条，年增加经济效益可达300万元。一旦此方案在行业内进行大规模运用，将有效降低产线对于PLC数量的依赖程度，减少控制设备固定资产投资，提高运维效率，并进一步实现软硬件解耦，使得终端执行机构有更灵活的部署方式，实现柔性生产。

6 进阶应用—— 5G+PLC 半手工 柔性装配

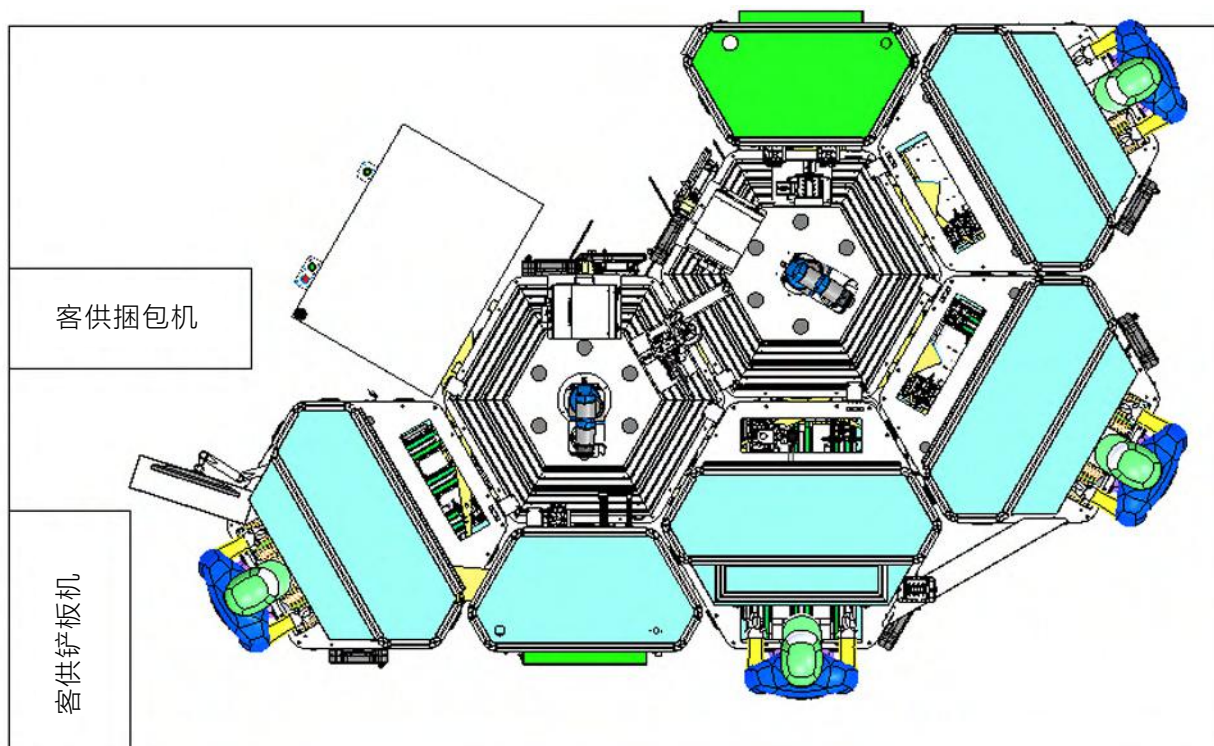


6.1 项目概述及背景

施耐德电气某工厂的5G+PLC半手工柔性装配线是一整条接触器柔性组装线，包含了一个电气接入台，四个工作台，两个中心岛台，两台协作机器人，一台检测激光设备，一台电性能测试设备以及相应的工装夹具，货架，PLC，感应器。全线使用了工业DTU 8台，施耐德电气PLC M580一台（机房集中式部署），所有的PLC南向连接设备均通过5G连接，连接设备包含了：气缸及感应器；协作机械臂；视觉检测相机；二维码打标机，电机/变频器；螺钉供料器；激光刻印机，HMI和工控机。产品示例图如下：

本产线为原U形产线的替代升级，一方面解决了原产线负载率极低（改造前3%），空间占用高的问题，同时也为产能紧张的接触器产线提供了额外的产能（改造后增加12%）。全产线设备通信连接均通过5G组网，生产配方通过PMS下发，统一产品族内换型时间低于1分钟，跨产品族换型低于15分钟。所有的模块都可快速更换，电气接口快接设计，解决了维修困难的问题，同时降低了设备维修对生产的影响。总投资185W元，总设计时间2个月，总工期4个月，投资回报率1.7年。

该产线设计理念运用了施耐德电气实用新型专利。设计方案由上海施耐德工厂，施耐德电气工业化团队以及非标设备供应商联合设计，网络架构支持由中国联合网络通信集团有限公司装备制造行业军团，华为技术有限公司无线网络产品线，以及5G+PLC联合创新小组共同提供。PLC编程，总控程序PMS由施耐德内部装备制造中心提供。设计概念布局图可见下图：

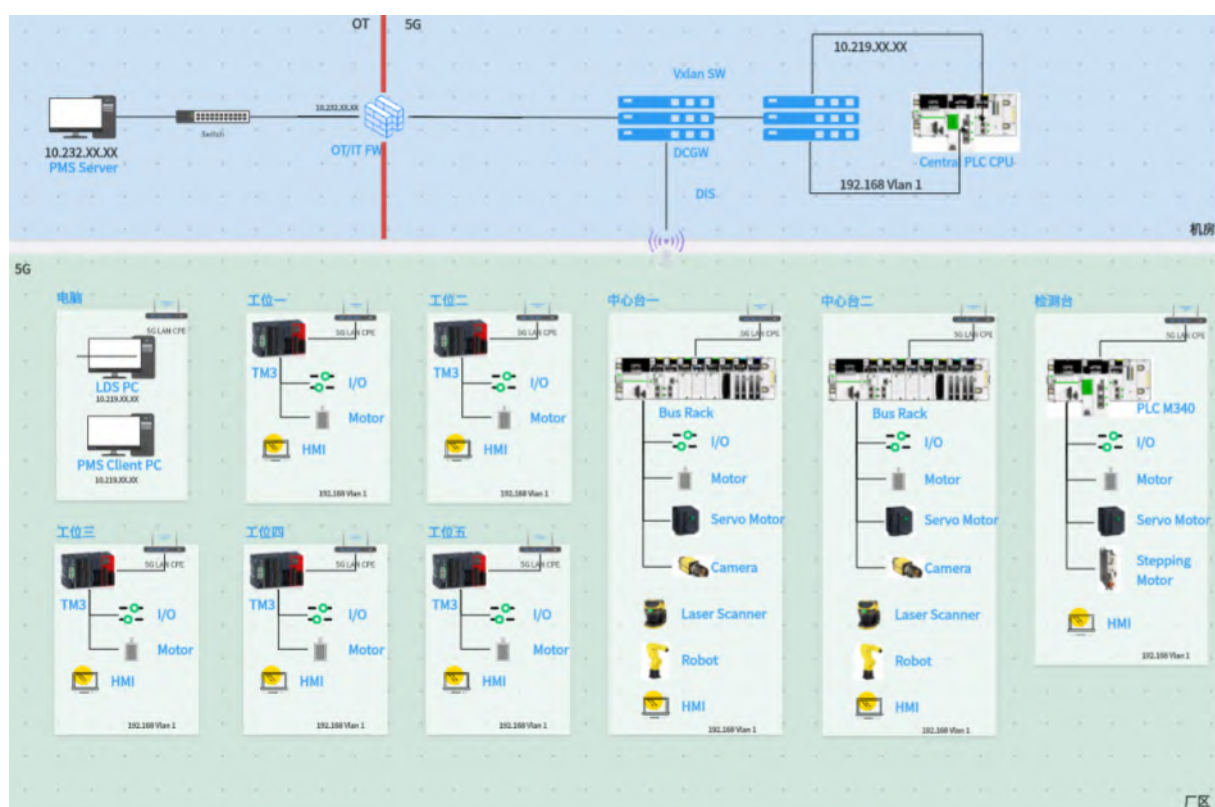


[图 6-1] 施耐德半自动柔性产线布局图

6.2 5G+PLC 控制网络架构

图6-2是 5G+PLC 控制网络架构图。机房集中化部署的 PLC 南向直接控制除检测台外的 8 台设备，其中手工工位由远程 IO 执行夹具和工装动作，自动工位由远程背板集成伺服电机，机械臂，打标机，扭矩螺钉枪等等。检测台因涉及到高频次模拟量采集，故使用了子 PLC 进行数据集成，并和机房主 PLC 进行东西向通信。

总控程序 PMS 由施耐德内部装备制造中心提供。设计概念布局图可见下图：



[图 6-2] 5G+PLC控制网络架构

6.3 案例5G适配性分析

以上所有的工艺制程和设计均运用了章节：产线初期分析中的5G网络适配性分析。在施耐德电气上海某工厂的5G网络部署条件下，产线适配性分析结果如下：

[表 6-1] 项目的5G 适配性分析

序号	电气接入台	数量	工位一	数量2	倍率	工位二	数量3	倍率4	工位三	数量5	倍率6	工位四	数量7	倍率8
1	HMI	1	逻辑控制IO 双手按钮	1	0.5	逻辑控制IO 双手按钮	2	0.5	逻辑控制IO 双手按钮	1	0.5	逻辑控制IO 电机启动	1	0.5
2			逻辑控制IO 气缸进退	2	0.5	逻辑控制IO 气缸进退	4	0.5	逻辑控制IO 气缸进退	2	0.5	二维码扫描	1	1
3			逻辑控制IO 电机启动	1	0.5	逻辑控制IO 电机启动	1	0.5	逻辑控制IO 电机启动	1	0.5	二维码打 标机	1	1
4			二维码打 标机	1	1	二维码 扫描	1	1	二维码 扫描	1	1	HMI	1	
5			HMI	1		HMI	1		HMI	1				
时延 乘数				3.0X			4.5X			3.0X			2.5X	

序号	中心台一	数量9	倍率10	中心台二	数量11	倍率12	激光台	数量13	倍率14	测试台	数量15	倍率16
1	逻辑控制 IO 工位1	1	1	机器人动作	12	1	逻辑控制 IO	8	0.5	Sub PLC	1	1
2	伺服螺丝刀	8	1	伺服螺丝刀	2	1	激光机通讯	3	1	工控机	1	0
3	机器人动作 工位1	10	1	逻辑控制 IO	3	1	二维码扫描	1	1	HMI	1	
4	机器人动作 工位2	1	1	二维码扫描	1	1	HMI	1				
5	逻辑控制 IO 工位3	1	1	HMI	1							
6	机器人动作 工位3	5	1									
7	相机通讯	3	1									
8	二维码扫描	1	1									
	HMI	1										
时延 乘数			30X			18X			8X			1X
需求 延时			20ms									
效率 损失			0.94%									

最终结论：八个工位中只有一个工位需要双向20ms的时延保障，其余工位提供100ms时延保障即可，总效率损失1.29%，在可接受范围内。本产线为半自动产线，手工装配较多，故对于时延及稳定性影响敏感度较低，是一个经典的，对网络需求较低的产线模板。

[表 6-2] 5G 柔性产线中的网络需求

柔性线	总工位数量	8	个
	7个工位时延要求	100	ms
	1个工位时延要求	30	ms
	单包大小	100	bytes
	发包周期	30	ms
单个 CPE下	最大单个工位连接数	10	个
	每个包大小	100	bytes
	每个连接普遍发包数	1.5	个
	发包数量按照30ms发送频率	500	每秒

6.4 实施效果

将 5G+PLC 南向进行无线连接，解放了 PLC 的物理位置限制，可以让南向的所有设备进行任意移动、拼接、组合而不影响网络架构和通信质量。柔性线体可以适配多品种小批次的产品进行高效生产，降低生产使用面积，提高效率和换型速度，进一步提高供应链弹性。

该柔性生产线第一阶段可兼容20余种不同型号、不同产品族的产品组装生产，单次换型时间小于15分钟。全流程质量管控和工艺互锁，保证了产品的质量和可追溯性。最终节省了50%的占地面积，提高了12%的产出，直接经济效益超过120万元/每年。

7 未来展望



在国家发布5G产业政策的支持引导下，各个行业应用都取得了非常多的突破和成绩。在工业方面，尤其是《5G全连接工厂建设指南》的发布，终将推动5G由生产外围辅助环节向核心控制环节深化拓展，同时5G新版本标准和新的技术也会加快IT和OT在工厂控制层面进行深度融合，我们也看到传统自动化厂家正在积极拥抱ICT新的技术，共同解决工业企业在数字化转型过程中遇到的实际困难。

总体架构方面，在绿色智能制造，IT/OT深度融合及工业互联网快速发展的时代背景下，工厂传统的IT和OT的系统架构将随着客户日益复杂的需求及新技术的发展产生巨大的变化，系统将变得更加智能，开放及灵活。以便在工厂的建设、运营，维护等方面大幅提升效率，降低成本。本白皮书中5G+PLC在施耐德电气工厂的应用就是这种需求的大胆探索及有效实践。

硬件方面：随着5G Redcap等技术的发展及成熟，将大幅降低终端设备集成5G技术的成本，期待有更多的厂家进行原生融合5G技术的工业网关、边缘控制器、远程IO站、变频伺服传动装置、智能仪表、执行机构等硬件的研究和产品的开发，丰富5G工业控制系统的生态、真正打造“即插即用”的5G硬件设备。随着5G原生融入工业控制系统的各个环节，将进一步简化系统网络架构，带来更多的灵活及敏捷性，降低总体拥有成本。

软件方面：随着以施耐德电气EcoStruxure开放自动化平台（EcoStruxure™ Automation Expert，EAE）等软硬件解耦系统的出现，虚拟化PLC能够在很大程度上提高OT系统的灵活性，结合面向对象的应用建模技术，虚拟化、容器化的软件技术，自动化应用可以灵活地部署在通用的边缘IT计算设备甚至在云端，让通用的IT设备进入生产控制的环节，让低成本的硬件也有可能完成先进的自动化控制系统的任务、打造企业数字化的基础设施、真正实现“以软件为中心的自动化”。

5G+基于开放技术的虚拟化PLC将在端、边、云融合，企业数字化基础设施建设方面发挥巨大的作用。在后续的系列白皮书中，将对这类应用做详细的描述。

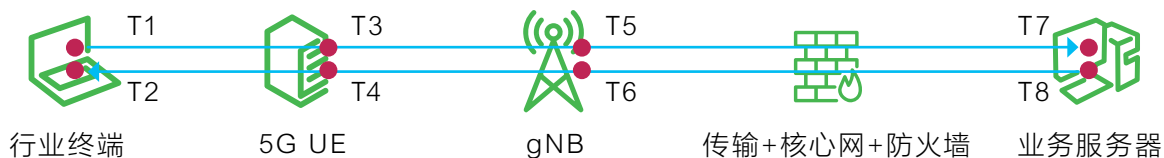
附件：专有名词解释及缩略语

1 施耐德电气专有名词解释

- DT (Design Time) : 工艺制程中的标准动作时间
- KER (非增值时间) : 制定的标准工艺时间和实际员工花费时间之间的差值。
- LDS (Lean Digitization System) : 施耐德电气的制程管理解决方案, 用于监控和提升产线制造关键KPI。
- MPH (Material Providing & Handling) : 材料供应与处理物料/半成品供给规划, 涉及到全厂, 全产线, 单工位的物料运送, 摆放, 获取的标准制定。
- OT 网络 (Operation Technology Network) : 用来连接各个自动化生产设备和生产系统的生产网络。
- PMS (Process Management System) : 施耐德独创的制程控制管理系统, 是基于传统MES系统的一种创新, 带有来料控制, 制程下发, 工位互锁等功能, 适合高产能, 快节奏的生产产线。
- Takt Time (节拍时间) : 两个产品生产间隔时间, 为产线制程的关键指标。
- WDT (WatchDog Timer) : 看门狗定时器, 本质上是一个计数器, 如果系统运行正常, 每隔一段时间会发出指令让看门狗重新开始计数。如果看门狗增加到设定值就认为系统没有正常工作, 保护性触发系统宕机事件。
- 步进电机 : 一种将电脉冲信号转换成相应角位移或线位移的电动机。每输入一个脉冲信号, 转子就转动一个角度或前进一步, 其输出的角位移或线位移与输入的脉冲数成正比, 转速与脉冲频率成正比。步进电动机又称脉冲电动机。
- 伺服电机 : 伺服系统中控制机械元件运转的发动机, 是一种补助马达间接变速装置。伺服电机可以控制速度, 位置精度非常准确, 可以将电压信号转化为转矩和转速以驱动控制对象。伺服电机转子转速受输入信号控制, 并能快速反应, 在自动控制系统中, 用作执行元件, 且具有机电时间常数小、线性度高等特性, 可把所收到的电信号转换成电动机轴上的角位移或角速度输出。
- 远程IO : 具有通信功能的数据采集/传送模块, 自身没有控制调节功能。只是将现场数据送到控制中心 (比如PLC), 或者接受控制中心的数据, 对现场设备进行调度。通信方式包含Profibus、Modbus等。

2 通信专有名词解释

- OTT (One-Trip Time) : 表示数据包从发送端到接收端的时间。3GPP TS22.261中也称为E2E时延。
- RTT (Round-Trip Time) : 表示从发送端发送数据开始,到发送端收到来自接收端的确认经历的时间。
- 接收包间隔:接收端接收到的相邻数据包之间的时间差。
- 丢包率:在一定时间内(当前定义2s)没有达到接收端的数据包比例。
- 抖动:连续接收的两个帧时延之差的绝对值。
- 网络可用性:网络正常运行的概率,其关键是设备可用度(包括网络设备、电源等)。
- 连接稳定性:终端与网络间连接状态长期保持的稳定性。
- 时延可靠性:业务包的在确定时延范围内传输的可靠性,包括单包和多包的可靠性。
- 时延定义:在本白皮书中,单向时延定义为下图T1~T7或T8至T2信息传输所需的时间。双向时延定义为T1~T2之间信息传输所需的时延。

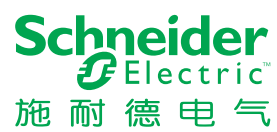


[图8-1] 时延定义示例图

3 缩略语

3GPP	the 3rd Generation Partner Project	第三代合作伙伴计划
5G	5th Generation of Cellular Mobile	第五代蜂窝移动通信技术
5QI	5G QoS identifier	5G服务质量指示标识
AGV	Automated Guided Vehicle	自动导航车
CPE	Customer Premises Equipment	客户终端设备
DCN	Distributed Control Node	分布式控制节点
D-MIMO	Distributed Multi-Input Multi-Output	分布式多入多出技术
DTU	Data Transfer Unit	数据传输单元
HMI	Human Machine Interface	人机界面
IBLER	Initial Block Error Rate , IBLER	初传误块率
MAC	Media Access Control	媒体访问控制
MEC	Multi-access Edge Computing	多接入边缘计算
MES	Manufacturing Execution System	制造执行系统
MTBF	Mean Time Between Failure	平均故障间隔时间
MTTR	Mean Time To Repair	平均恢复时间
PDCCP	Packet Data Convergence Protocol	分组数据汇聚协议
PLC	Programmable Logic Controller	可编程逻辑控制器
PHY	PHYsical layer	物理层
QoS	Quality of Service	服务质量
RAN	Radio Access Network	无线接入网络
RLC	Radio Link Control	无线链路控制
RRC	Radio Resource Controller	无线资源管理
RSRP	Reference Signal Received Power	参考信号接收功率
SLA	Service Level Agreement	服务等级协议
TCP	Transmission Control Protocol	传输控制协议
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication	低时延高可靠通信
VLAN	Virtual Local Area Network	虚拟局域网
VxLAN	Virtual extensible Local Area Network	虚拟扩展局域网

Life Is On



施耐德电气（中国）有限公司
Schneider Electric(China)Co.,Ltd.

北京市朝阳区望京东路6号
施耐德电气大厦
邮编：100102
电话：(010) 8434 6699
传真：(010) 8450 1130

Schneider Electric Building, No. 6,
East WangJing Rd., Chaoyang District
Beijing 100102 P.R.C.
Tel: (010) 8434 6699
Fax: (010) 8450 1130

2023年9月

©2023 施耐德电气保留所有权。文中出现的施耐德电气产品商标为施耐德电气及其子公司和附属公司财产。文中出现的其他企业或品牌商标为其所有者财产。未经施耐德电气书面授权，不得以任何方式复制、抄袭、影印、翻译本文档的任何内容。凡转载或引用本文任何观点、数据等信息，请注明来源：施耐德电气。

998-22890729