单对线自动化网络技术报告

序言

邬贺铨

生成式人工智能浪潮的兴起，催动数字化技术向社会各方面纵深发展。网络技术持续推动着各行各业的变革与创新。新型工业控制、智能交通、智慧城市等泛工业领域的快速发展，对网络连接技术提出了更高的要求：更高的传输效率、更低的部署成本、更强的环境适应性。在这一背景下，单对线以太网（Single Pair Ethernet, SPE）技术的演进，为网络连接提供了一种全新的解决方案，具有重要的现实意义和广阔的应用前景。

单对线以太网（SPE）技术最大特点是通过单对双绞线实现高速数据传输和电力供应。相比于传统的多对线以太网，SPE 技术在简化布线、降低成本、提高部署灵活性等方面具有显著优势。特别是在工业自动化、车载网络、楼宇自动化等领域，SPE 技术能够有效解决复杂环境下的网络连接问题，为设备互联和数据传输提供高效、可靠的解决方案。在工业自动化领域，SPE 技术可以显著减少设备之间的布线复杂度，降低安装和维护成本，同时支持实时数据传输和设备远程控制，为智能制造提供强有力的技术支持。在车载网络领域，SPE 技术能够满足车辆内部高速数据传输和电力供应的双重需求，为智能驾驶和车联网的发展奠定基础。在楼宇自动化领域，SPE 技术可以简化智能设备的部署，提高系统的可扩展性和灵活性，为智慧城市的建设提供技术保障。这些应用场景的多样性和复杂性，充分体现了 SPE 技术的实用价值和创新意义。这种技术的出现，正是网络技术不断演进和创新的结果，也是实际应用需求驱动的必然选择。

从技术发展的角度来看，SPE 技术的持续演进顺应了网络技术高效化、灵活化和智能化的发展趋势。随着物联网（IoT）和新型工控的快速发展，传统的网

络连接方式已难以满足日益增长的数据传输需求和复杂环境下的部署要求。SPE 技术为大规模设备互联提供了全新的可能性。这种技术不仅能够满足工业场景中的高可靠性要求，还能够适应智能交通、智慧城市等领域的多样化需求，展现了极强的技术包容性和应用潜力。

从产业发展的角度来看，单对线以太网技术的推广将带动相关产业链的升级与创新。SPE 技术的应用不仅涉及网络设备制造商，还包括芯片设计、线缆生产、系统集成等多个领域。随着 SPE 技术的普及，相关产业将迎来新的发展机遇，同时也将推动网络技术标准的进一步完善。标准化是技术推广和应用的重要保障，只有建立统一的技术标准，才能实现技术的规模化应用和产业的健康发展。目前，SPE 技术的标准化工作正在稳步推进，这将为其广泛应用奠定坚实的基础。

当然，任何新技术的推广都面临一定的挑战。单对线以太网技术在实际应用中仍需解决诸如抗干扰能力、传输距离限制、兼容性等问题，提升链路感知、精准控制和网络安全能力。技术创新是一个不断迭代和优化的过程，只有通过持续的研发和实践，才能推动技术的不断完善和进步。SPE 技术的发展历程正是这一过程的生动体现。

本白皮书旨在全面介绍单对线以太网技术的概念、关键技术、应用场景及未来发展趋势，希望能够为行业从业者、技术研究者和决策者提供有价值的参考。也期待各界同仁共同努力，推动 SPE 技术的持续创新与应用，为网络技术的发展和社会经济的进步贡献力量。

中国工程院院士

前言

历经数次科技革命，人类社会已跨越蒸汽机时代、电气化时代和信息化时代，万物智能时代正加速到来。万物感知、万物互联和万物智能是智能世界的三大特征[1]，网络作为关键的底层基础设施必将发挥不可或缺的作用。在工业领域，单对线以太网（SPE，Single Pair Ethernet）由于其轻便灵活、数据线供电等优势匹配工业现场的通信需求，正在被广泛接受并大规模应用于各类工业场景中。一旦电缆在现场铺设完成，它们就如同现场设备、系统之间的神经（负责通信）和血管（供应电力），需要在现场恶劣环境下长期稳定地运行。因此，及时精确地感知电缆的状态对于现场设备长期稳定、安全运行至关重要。更广泛地，在车载网络、智能光伏、企业园区等泛工业众多领域，通信、感知、供电一体化的单对线自动化网络技术持续规模应用，并叠加 IP、以太生态的组网、协议技术，不仅支撑智能制造、柔性生产的深入发展，也必将助推泛工业智改数转加速发展。

在此过程中，泛工业现场基于自动化测量、控制等衍生的新业务、新场景将不断涌现，对网络技术持续提出新要求、新挑战。单对线自动化网络有必要持续吸收现有网络技术优势，增强多种接入技术，从连接、组网、协议技术多方面立体创新，构建开放可演进、灵活自定义的工业级和车规级网络解决方案，并持续提升广覆盖、多模式、高可靠、强确定等多维度能力。其必将在新型工控、智能光伏、智慧园区、车载系统互联等多领域发挥关键使能性作用，并跟随各行业的业务发展持续演进、不断增强。

本报告总结了多个领域的网络需求，分析了单对线自动化网络架构及关键技术，阐述了相应的应用价值，并结合典型行业实践总结了解决方案案例。希望本报告的内容对行业用户、设备厂商、产业组织等相关人员有所裨益，为泛工业领域的全面智能化略尽一点贡献。由于行业复杂性和团队认知的局限性，报告难免出现疏漏，诚挚期待各方斧正。

[1] 引用自华为《加速行业智能化白皮书》

参编单位

华为技术有限公司

中国信息通信研究院

机械工业仪器仪表综合技术经济研究所

中国科学院沈阳自动化研究所

国家管网集团北京管道有限公司

中国石油兰州石化有限公司

中国石油集团昆仑制造有限公司

中国寰球工程有限公司

杭州和利时自动化有限公司

南京紫金山实验室科技有限公司

中国电子科技集团公司第二十四研究所

裕太微电子股份有限公司

深圳市三旺通信股份有限公司

弗若斯特沙利文（北京）咨询有限公司上海分公司

目录

序言 1

前言 3

参编单位 4

第一章 行业诉求及网络面临的挑战 6

1.1 流程工业亟需详细现场数据，以促进行业 AI 应用落地 7

1.2 离散工控渴求云边充裕算力+数据，以加速智能化发展 9

1.3 精密制造、人形机器人等趋向多轴、多元、高频感控 10

1.4 车载软硬件系统迭代加速，车载数据种类、流量快速增长 11

1.5 光伏系统推进精细化管控，不断提升发电品质、效率 13

1.6 园区管理智慧化升级，园区服务效率、体验持续提升 14

1.7 工业网络面临的挑战总结 15

第二章 单对线自动化网络简介及主要技术 16

2.1 单对线自动化网络简介 17

2.2 单对线自动化网络架构 18

2.3 单对线自动化网络主要技术 20

2.4 单对线自动化网络总体优势 25

第三章 典型行业实践 27

3.1 流程工业仪表灵活接入，丰富数据流、使能智能化 28

3.2 离散工业远程感控现场设备，推进生产智能化、柔性化 30

第四章 持续发展趋势和展望 32

第一章

行业诉求及网络面临的挑战

工业在我国经济社会发展中占据核心地位，全部工业增加值占国内生产总值（GDP）比重常年维持在 30%以上[2]。同时，工业领域的先进产品与技术向外延伸，广泛应用于诸如企业园区、车载等场景，有效推动了泛工业领域的高质量发展，显著提升了我国经济发展的整体效能。

在当下数字化、智能化的大背景下，以 AI 大模型、云计算、大数据等为代表的新兴技术，正成为推动泛工业智能化改造、数字化转型的关键力量。

工业网络作为泛工业领域关键基础设施，发挥着桥梁纽带的作用，广泛连接着工业现场的人/机/料/法/环/测全要素，为泛工业各行业的稳定生产、高效运行发挥巨大作用。然而，在面向泛工业新业务、新需求时，传统基于现场总线的工业网络技术暴露出诸多不足，难以满足泛工业不同领域现场工控对网络的不同诉求。因此，打造更高性能、更灵活的新一代工业网络，是支撑构建新型工控体系至关重要且刻不容缓的一环。

1.1 流程工业亟需详细现场数据，以促进行业 AI 应用落地

流程工业作为我国工业制造体系的核心组成部分，对国家经济和社会发展具有不可替代的作用。流程工业涵盖石化、化工、能源和冶金等多个领域，其特点是连续化生产、高度自动化和大规模集成。

✧ 新业务实现、新技术应用，要求现场网络带宽持续提升

当下流程工业现场通过部署大量仪表来保障生产的安全性、稳定性、长期运行、满负荷运行及过程优化，仪表维护主要以被动响应和固定周期预防性检查为主。未来工业 AI 大模型通过收集、分析生产现场的海量数据，实现设备的预测性维护，提高设备运行平稳水平，并持续向安全预警、工艺优化、流程模拟等应用扩展，显著提升生产效率与品质。在此过程中，全面且准确地获取生产现场数据，是整个流程工业 AI 技术落地的基础。工业仪表作为获取数据的主要源头，遍布生产现场，其用于测量压力、流量、温度、物/液位等工业参数或实现相应的控制功能。即使在今天，流程工业现场大多数设备仍使用 4-20mA 等模拟信号传输技术，并叠加 HART 数字通信技术。该技术通信带宽仅为 1.2Kbps，限制了数据采集效率和工业仪表技术的快速发展。随着智能制造技术的发展，流程工业对现场网络带宽的需求不断增加。例如，自动检测液位色度、自动分辨萃取界面等智能视觉技术的应用对网络带宽有较高要求，相关工业摄像

[2] 工信部发布的工业和信息化发展情况数据

头单机带宽要求可高达 12Mbps[3]，以确保图像和视频数据能够实时、无损地传输。这种高带宽需求推动流程工业现场通信网络向 10~100Mbps 甚至更高的速率演进。

✧ 传统总线下大规模仪表终端部署复杂、施工周期长，需要轻量级、高效的仪表终端入网管理技术

当下流程工业现场仪表终端部署规模巨大，以国内某石油化工行业头部企业为例，单条十亿级投资规模、十万吨级的乙烯裂解产线已部署压力、温度、流量等工业仪表 3,000~4,000 台[4]；而在国内千亿级炼化一体化基地中，仪表规模可达 10 万量级[4]，覆盖从原油分馏到成品罐区的全流程监测。此外，为保障生产过程的连续性与稳定性，现场仪表终端还需实现高可靠性运行并保持实时在线状态。在该场景下，采用传统总线进行仪表初次部署时，面临配置低效和施工周期冗长的问题；同时考虑仪表终端能力较弱，需要轻量级、高效的仪表终端入网管理技术，支撑大规模仪表终端的高效管理，并且兼顾后期可视化简便维护、快速扩展、实时感知诉求，助力生产效率与安全水平的持续优化。

	化工产线	化工基地
投资规模	十亿级	千亿级
典型产品	乙烯、丙烯等基础化工原料	炼油、乙烯、丙烯、芳烃等全品类化工产品
工艺流程	单一流程，如乙烯裂解	多流程一体化，涵盖炼油、化工、成品油生产，乙烯生产仅为其中一部分
年产量（以乙烯为例）	30万~50万吨/年	100万~200万吨/年
仪表终端规模	3,000~4,000台	10万台量级

图 1-1：国内石油化工企业不同投资规模产线对应工业仪表规模

✧ 存量电缆规格、仪表网络接口差异，需要网络兼容适配，同时简化布线、感知电缆缺陷

流程工业现场电缆多、成本高，导致布线复杂且施工周期长。简化布线、缩短新产线施工周期成为企业一大诉求；考虑到流程工业存量、新建项目实际情况，在电缆规格、仪表网络接口等方面均存在诸多差异。因此，在升级改造逐步替换的过程中，需要网络兼容存量仪表接口（主要为 4-20mA 接口）和不同规格电缆，尽可

[3] 数据源于弗若斯特沙利文（Frost & Sullivan）对流程工业行业的调研
[4] 数据源于弗若斯特沙利文（Frost & Sullivan）对流程工业行业的调研

能利用已有投资，助力网络升级改造及新型智能仪表的推广。同时，需要网络面向仪表侧接口尽可能简单，以简化仪表终端集成，降低封装复杂度。此外，部分电缆、接头长年累月暴露在现场高温、腐蚀等恶劣环境下，其表面可能被侵蚀、破损，不仅影响通信质量，还可能造成现场安全隐患。因此，有必要及时感知电缆缺陷，并定位缺陷段位置，同时诊断缺陷类型、评估缺陷程度，支撑及时预警维护，保障长稳安全生产。

1.2 离散工控渴求云边充裕算力+数据，以加速智能化发展

离散工业是我国经济发展的重要基石，其工业增加值占全国工业增加值的比例常年维持在 50%以上[5]。离散工业负责接收上游提供的原材料，并通过高效、精密的制造加工，向下游众多行业提供制造装备和产品，具备市场多元、产品灵活多样的特点。随着各行业深入发展，客户需求日益多样化，产品定制化诉求愈发强烈，离散工业柔性化生产也从过去依赖机械化和人工调整，向依托数字化、智能化技术实现高度自动化、自适应调整和大规模个性化定制能力演进，促使离散工控趋向更灵活、更智能。

✧ **跨园区、跨产线协同生产，要求拉通 IT 和 OT 网络，并驱动现场网络向 1~10Gbps 演进**

离散工业生产从原料到成品涉及众多环节，需要多园区（厂商集中）、多产线联动协同，以高效响应市场诉求，并保障质量和成本优势。离散工业需要汇聚多产线海量现场数据，利用大数据分析和人工智能算法，在生产计划调度、生产作业协同等方面为企业提供精准的决策支持。多园区、多产线海量现场数据的传输汇聚需要拉通 IT 和 OT 网络，并连接现场大量设备。以国内某机械制造行业头部企业为例，该企业共有生产园区超 20 个，共部署了超 7,500 台生产设备，包括数控机床、焊接机器人、AGV 小车等，这些设备的带宽要求从 10Mbps~1Gbps 不等。同时，园区共部署了工业高清摄像头超 3 万个，单摄像头带宽可达 5~12Mbps ，以及超 1.5 万个工业仪表（水、电、气、油表）[6]。大规模工业仪表、工业高清摄像头、生产设备与工控端及云、边各类系统之间传输的数据上报、控制下发、管理配置等各类数据，要求现场网络带宽朝 1~10Gbps 级演进。

[5] 参考国家统计局各年发布的《全国经济普查公报》
[6] 数据源于弗若斯特沙利文（Frost & Sullivan）对国内某头部离散工业企业的调研

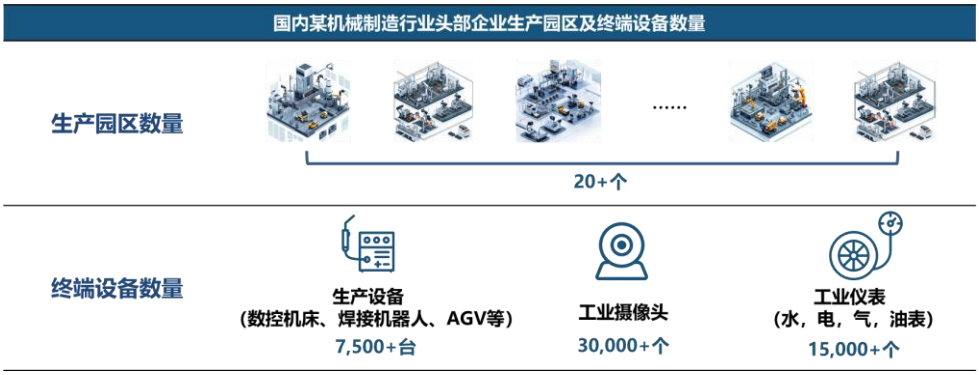

图 1-2：国内某机械制造行业头部企业生产园区及终端设备数量

✧ **柔性化生产使得离散工控需处理更多数据，并叠加智能算法，要求网络强确定、高可靠**

当前主流的离散工控系统基本全栈耦合，基于专用的硬件、软件、网络构建，满足了强确定、高可靠等要求，也保障规模生产高效、稳定地开展。随着客户需求的日益多样化，离散工业面临着从大批量标准化生产向多品种、定制化、小批量的柔性生产转变，因此离散工业产线的大脑 PLC（Programmable Logic Controller，可编程逻辑控制器）将面临更高的挑战，如：控制更复杂、调整更频繁、处理数据量更大等。同时，在人工智能技术加持下，控制系统需要集成 AOI 等智能应用，如利用深度学习算法提高缺陷检测的准确性和鲁棒性，并根据新产品或新缺陷基础扩展新能力，以保障生产更高效、更优质。在此类场景业务驱动下，传统 PLC 逐步实现软硬件解耦，利用云、边缘系统的充裕算力，实现远程集中式控制，且更方便工控系统集成新的增强功能或其他控制子系统。同时，控制端（部署在云、边缘的 PLC）和执行设备之间网络将从原来工业现场小网扩展为覆盖园区、产线和现场的跨层网络，并同时承载工控、数据上报、维护配置、视频等多种流量，对其中关键业务流须保障强确定（端到端时延百 μs 级~100ms，抖动小于 15%）、高可靠（μs 级~10ms 级故障探测恢复）。以国内某机械制造行业头部企业为例，其产线本地工控端到现场设备控制指令传输要求强确定性，端到端时延需＜50ms。

1.3 精密制造、人形机器人等趋向多轴、多元、高频感控

运动控制作为现代工业自动化的关键技术之一，直接支撑工业精密制造的发展，并在数控机床、机器人等高端装备领域起到核心作用。运动控制系统通过复杂算法和高精度的控制，使得多轴设备能够在微秒甚至纳米级别进行精细操作、紧密配合，不仅保障了加工精度，还极大地提升了生产效率和产品质量。

✧ **精密制造的多轴、高频控制，要求控制网络支持高实时**

精密制造要求更高精度、更高效率、更少人工干预，单台设备可控制数十至上百个伺服轴，同时要求兼顾高频控制，以提高响应速度、控制精度，并增强抗干扰能力。精确压射控制具备高动态特性，要求网络支撑 32 轴、20kHz 的高频闭环控制，通信时延低至 10μs；在半导体制造行业，高速高精度自动化装备生产需要纳米级的定位精度，装备中精密传感器和执行器响应及采样频率可高达 40kHz[7]；在激光加工行业，通过 MEMS 控制的振镜响应频率可高达 100kHz[7]，用于超高速、高精度的材料加工。以上多轴、高频控制场景要求控制网络支持高实时（32 轴~上百轴、10μs~1ms 通信时延）要求。

✧ **具身智能机器人融合机器视觉，且兼顾小空间和高速感控，需要千兆级大带宽和 10kHz 级刷新率**

人形机器人正从科幻银幕步入现实生活，成为具身智能的最佳载体。随着 AI 大模型和机器人传动控制技术的飞速发展和深度融合，中国人形机器人市场迅猛发展，2023 年市场规模达 27.6 亿元，预计在 2029 年增长至 750 亿元[8]。在此过程中，机器人内置传感器（力、视觉、温度、位置、触觉等）数量与价值量占比显著提升，传感器数量由当下的 60~100 个逐步增长至超 200 个[9]。此外，人形机器人还需要内置类视觉传感器来获得丰富的视觉信息，从而实现更智能和更高效的感知、决策和执行。众多传感器带来的多模态感知数据传输诉求，要求运动控制网络具备上行大带宽（大于 2Gbps），并兼顾通信线缆供电以减少线缆的空间占用。

对于多模态感知、多自由度的协同控制，人形机器人运动控制系统需要集中运行更加复杂的运动控制算法，则要求网络支持大于 20kHz 的控制刷新频率。此外，人形机器人灵巧手自由度将从 3 逐步提升至 20+[9]，以实现更精细的操作。灵巧手内置驱动器需要在小空间内实现同步控制，要求网络接口微型化、并支持 P2MP（点到多点）通信。

1.4 车载软硬件系统迭代加速，车载数据种类、流量快速增长

[7] 参考机械工业仪器仪表综合技术经济研究所、华为、华成工控等联合发布的《工业光总线技术白皮书》
[8] 数据源于首届中国人形机器人产业大会暨具身智能峰会上，由立德研究院、优必选科技、灵心巧手等联合发布的《人形机器人产业研究报告》
[9] 数据源于弗若斯特沙利文（Frost & Sullivan）对人形机器人行业的调研

汽车产业是国民经济的重要组成部分，是典型的技术密集型行业。随着汽车“新四化”——电动化、智能化、网联化、共享化的发展，车载电子软硬件系统持续增多，以 ICT 技术为基础的“数据+软件”将定义汽车功能，智能驾驶系统、智能座舱系统、智能动力系统正加速迭代演进。

✧ 车载智能设备的多种类、大流量数据，要求主干网络保障确定性和高可靠传输

智能驾驶系统、智能座舱系统和智能底盘系统的高效、稳定运行，离不开各类车载终端设备（例如传感器、摄像头等）的支持。2020 年，平均单车智能座舱系统配置传感器数量为 3.3 个，包括车载摄像头、毫米波雷达、体征测试传感器等；到 2030 年，其数量将增长至 11.3 个[10]。随着自动驾驶级别的提升，车载高清摄像头的数量相应增加（L2 级别大约配备 6~8 个摄像头，而 L3+及 L4 级别则配备 12~14 个）；此外，配备的毫米波雷达和激光雷达也同步增长（L2 级别通常配备 3~5 个毫米波雷达和 1~2 个激光雷达；L3+及 L4 级别至少配备 5 个毫米波雷达和 2~3 个激光雷达）。智能动力系统所需的动力相关传感器数量（60~80 个）则显著高于传统燃油车（45~60 个）[11]。总体上，智能网联汽车车载设备不断增多、并扩展功能，数据种类、流量持续增大，要求车载主干网络带宽向 10Gbps 级演进。

系统	设备	L1 → L2 → L2+/L3 → L3+/L4			
智能驾驶系统	摄像头	2~4个	6~8个	10~12个	12~14个
	毫米波雷达	1~3个	3~5个	3~5个	5个
	超声波雷达	6个	12个	12个	12个
	激光雷达	-	1~2个	1~3个	2~3个
	惯导定位传感器	-	-	1个	1个
系统	设备	2020 → 2030E			
智能座舱系统	传感器 舱内：车载摄像头、毫米波雷达、体征测试传感器等	3.3个		11.3个	
系统	设备	燃油车 → 新能源车			
智能动力系统	传感器 燃油车：进排气压力类、冷却液/燃油/机油温度等类型传感器 新能源车：用于电池、电机、电控的各类传感器	45~60个		60~80个	

图 1-3：汽车智能化系统对应车载设备数量

为了支撑各类车载设备数据的有效传输，车载主干网络还需保障低时延确定性传输，以实现系统的实时协同作业。车载各类末端设备需要及时准确地将数据传至中央处理单元（如惯导定位传感器时延＜30ms，激光雷达时延＜50ms，车载高清摄像头时延＜30ms），以快速响应外部变化。此外，车载主干网络还必须支持高可靠能力，包括快速探测故障、快速倒换等，保障车载关键业务稳定运行。

[10] 数据源于 HIS Markit《智能座舱市场与技术发展趋势研究白皮书》
[11] 数据源于弗若斯特沙利文（Frost & Sullivan）对新能源汽车行业的调研

传感器	带宽	时延
摄像头	1~10Gbps	<30ms
毫米波雷达	100Mbps	<150ms
超声波雷达	1~100Mbps	<300ms
激光雷达	1~10Gbps	<50ms
惯导定位传感器	10Mbps	<30ms

图 1-4：各类传感器对车载网络带宽及时延要求 [11]

✧ **车载智能设备持续增多，要求末端网络众多连接融合、并兼顾供电一体化**

智能网联汽车快速发展，越来越多的车载智能设备部署上车，其源于不同厂商，可能采用不同的总线/网络，导致车载末端网络线束、连接器的数量快速增长，成为总装产能的瓶颈点；且部分车载设备需要供应弱电，则进一步加剧末端网络复杂度。以上场景，将要求车载末端网络连接深度融合、并兼顾供电。 此外，车载高清摄像头的网络连接上行视频数据量大、下行控制等数据很小，要求非对称通信能力（上行 1~10Gbps，下行 100Mbps），以兼顾高效传输和低成本，并改善系统整体稳定性。

1.5 光伏系统推进精细化管控，不断提升发电品质、效率

近几年“碳中和”在全球范围内获得广泛关注，建设以新能源为主体的新型电力系统已成为确定性趋势。发电侧光伏、风机等新型能源比重逐步提升，有望替代传统化石能源成为主力电源。其中，光伏发电近年来装机规模高速增长，2024 年全球光伏新增装机量达 553GW，同比增长超 30%。其中，中国光伏新增装机量达 340GW，占全球总量的 60%以上[12]；负荷侧以电动汽车、电泵、电取暖为代表的诸多新用能形式大规模涌现，用电负荷变化也呈现新特点。电源侧、负荷侧的同时变化，将驱动构建新型电力系统、新型能源体系。在此过程中，能源网络不仅需要满足基本数据传输功能，还要能够支持数字化、智能化的电力管理和运营模式，为实现“碳中和”的目标贡献力量。

✧ **光伏发电容量、品质持续优化，要求通信向长距离、大带宽、低时延发展**

光伏电站普遍具有范围广、部件数量多、管理难度大的特点，且光伏系统的输出电流和功率受光照、出厂公差、异物遮挡、组件老化等因素影响，可能导致光伏组件功率失配，从而降低其整体输出功率。

[12] 数据源于国际能源署(IEA)《2025 年全球能源评估》

因此，需要从系统级集中式管控逐步深入到组件级甚至子串级管控，细“粒度”地独立实现每一块组件、子串的 MPPT（Maximum Power Point Tracking，最大功率点跟踪），并将精细管控手段延伸到更大范围的光伏阵列，以最大程度提升发电容量。同时，为保障电能品质和电网稳定，并网点电压、频率、功角必须严格匹配电力公网变化，这就要求光伏逆变器根据并网点反馈、实时调控功率因数，实现有功/无功及时调控。以上精细化、实时管控场景均要求通信技术提升带宽、降低时延、支撑长距离通信，以保障确定可靠地管控分布广、数量多的光伏板控制器及逆变器。

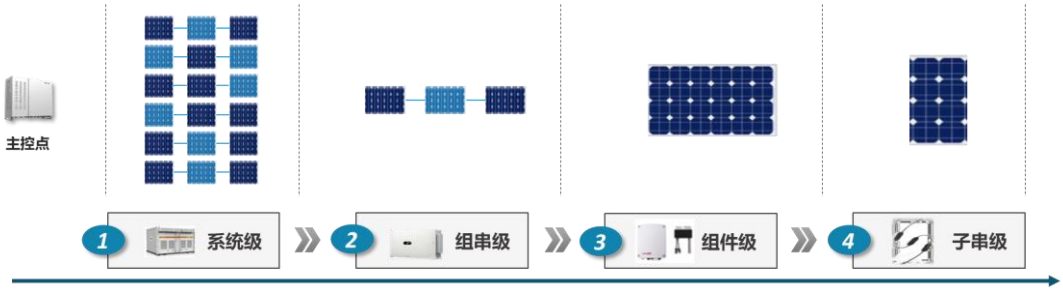

图 1-5：光伏电站管控—从系统级集中式管控发展至组件级/子串级管控

✧ 光伏系统长距离通信，要求解决通信干扰、衰减等问题，并感知电缆局部缺陷

在光伏电站建设中，常采用见缝插针的策略以适应多样化的地理环境，如崎岖的山地和易受侵蚀的沿海地区。这些高盐、高湿等特殊环境持续侵蚀电缆，造成电缆不同位置、不同程度的各种缺陷（如绝缘层开裂、浸水等），不仅影响通信质量，还影响电能输送效率；再叠加电力设备的噪音干扰、埋地线的衰减、子阵控制器到逆变器 P2MP（点到多点）阻抗失配等问题，所以光伏系统通信可靠性和稳定性的提升也是切实诉求，同时需感知定位电缆缺陷段位置、诊断缺陷类型和评估缺陷程度，更好地支撑电缆维护、系统优化工作。

1.6 园区管理智慧化升级，园区服务效率、体验持续提升

我国企业园区蓬勃发展，数量多、分布广、种类全，从 2020 年到 2025 年，我国企业园区以每年 1.4 亿平方米的速度扩张，预计到 2025 年我国园区总面积将突破 62 亿平方米[13]。企业园区的智慧化升级将为区域新发展提供全方位支撑，企业园区内水电气基础设施智慧绿色管理、多地域智能感应通信等众多场景将走向现实，

[13] 数据源于博为国际规划咨询集团《2025：产业园区生死之战》

将大幅提升园区服务效率，改善园区服务体验，并支撑绿色低碳可持续发展。

✧ **园区海量终端高效管控，要求宽带通信+宽幅供电一体化网络**

园区的海量终端设备是园区智慧化的抓手，实现园区海量设备终端互联，支撑设备终端数字化、智能化改造亦是园区的迫切诉求。对园区固定设备而言，选择兼顾通信与供电，以及 P2MP 通信的有线网络，将在安装部署、维护等方面凸显优势。园区海量固定终端设备的末端连接，要求通信长距离、带宽提升，并降低网络功耗和线束成本。此外，园区楼宇的部分执行器类设备需要较大的功率来驱动，同时为了方便现场安装部署，降低维护复杂度，避免引入专门电源，这对一体化的通信供电技术提出新的要求，如需要支持较大功率供电（数十瓦~数百瓦）以驱动电机等执行器，并排除供电及执行器运行对通信的干扰，保障终端设备平稳运行。

1.7 工业网络面临的挑战总结

工业网络作为现场的底层基础设施，承载各类数据，并支撑上层智能决策落地现场形成闭环，是企业“智改数转”成功转型的重要支柱之一。然而，当前的工业总线/网络技术大多面向特定行业诉求构建，其技术演进发展较慢。在工业智能深入发展的当下，这些技术亟需提升诸多方面的能力，但又必须同时满足行业的固有要求，如网络带宽持续升级，须同时支持千米级长距离通信（穿越各种场所环境、抗干扰）；网络高效支持 10 万量级终端组网，须同时保持使用维护简单（应用复杂度不能高于当前的总线）；跨越园区/工厂 IT 和现场 OT 的互通大网，须同时保障强确定和高可靠能力（确定性、可靠性能力不能弱于现场小范围的 OT 网络）；运控网络兼顾千兆级大带宽（承载视觉等多元传感）和微秒级低时延（承载高频控制），须同时保持网络接口微型化和整体网络集约高能效；再考虑到工业终端的普遍应用环境，网络须支持通信、感知、供电一体化，在防爆场所应支持本质安全，或者支持较大功率（数十瓦~数百瓦）供电且抗干扰可靠通信；此外，工业系统普遍要求长稳运行，网络安全性、可靠性均不能弱于传统总线或小范围专网所具备的安全、可靠机制和能力；由于工业设备投资大、生命周期长，网络还须兼容现有设备的网络接口等，尽可能复用存量资产并发挥其最大潜能。

综上，工业网络面临的挑战巨大，有必要借鉴 IT 领域以太网络大带宽、规模组网等技术，同时又必须兼顾 OT 领域各项固有诉求。

第二章

单对线自动化网络简介及主要技术

泛工业现场众多设备、系统的互联均采用单对线总线/网络（如：4-20mA 总线、CAN 总线等），在数字化、智能化大背景下，其新业务、新诉求将驱动单对线自动化网络持续增强通信感知供电一体化能力。以开放解耦的架构，从物理层、链路层、网络层分层构建多模式、广覆盖、强确定、高可靠的网络能力，并叠加精准感知、宽幅供电技术，更好地满足不同行业的差异化诉求，加速推进泛工业智改数转。

2.1 单对线自动化网络简介

基于泛工业业务特点，存在长距广连接、短距强控制两大通信场景，广泛连接现场不同类型的设备、系统，支撑泛工业万物互联、万物智能加速发展。

长距广连接通信场景，其典型行业包含流程工业油气化工、新能源光伏、智能楼宇等。单对线自动化网络需要支持千米级长距离通信、数据线供电能力，匹配线缆规格并灵活调整线缆所支持的通信速率。同时，结合实际场所的防爆要求，可支持本质安全或宽幅供电，感知电缆局部缺陷，支撑及时准确维护，保障与现场各类设备建立稳定安全的宽带连接。

短距强控制通信场景，其典型行业包含运动控制、车载系统互联、离散制造等，此类场景的通信距离相对较短。单对线自动化网络需提升确定低时延通信能力，满足 10kHz+高频通信、极致低抖动诉求，同时叠加单对线以太网的大带宽能力，可支撑此类场景传感控制、视频图像等混杂通信。

总体上，单对线自动化网络是以单对线以太网（SPE）为物理层技术基础，兼顾通信、感知、供电的网络技术体系，在泛工业长距广连接、短距强控制两大通信场景下，确定、安全、可靠地承载传感、控制各类流量，支撑泛工业业务安全、稳定、长时间、满负荷、优质、智能全面发展。

图 2-1：单对线自动化网络

2.2 单对线自动化网络架构

单对线自动化网络演进增强，其协议分层与 OSI 参考模型的关系如下图。基于单对线介质的连接能力及协议组网能力，其关键技术主要集中在物理层、链路层、网络层，各层能力解耦开放，可独立演进增强。

如下图所示，数据&供电物理层连接主要基于 SPE（Single Pair Ethernet，单对线以太网），兼顾灵活通信+宽幅供电能力，夯实宽带通信+宽幅供电的基础能力；同时叠加电缆感知能力，匹配泛工业不同业务场景对通信、感知、供电的诉求；高精度链路增强确定、低时延等能力，可承载普通以太/IP 业务、工控实时业务以及极致低时延、高精度的运动控制等多种业务。同时，物联 IP 组网增强了易用性能力，轻量级协议技术支撑 10 万量级大规模终端高效组网，并以极简高效的入网、管理能力，匹配工业系统常用习惯（如仪表终端位号等），降低网络应用门槛。整体上，单对线自动化网络各层演进增强的能力可灵活组合，更好地匹配实际业务诉求。

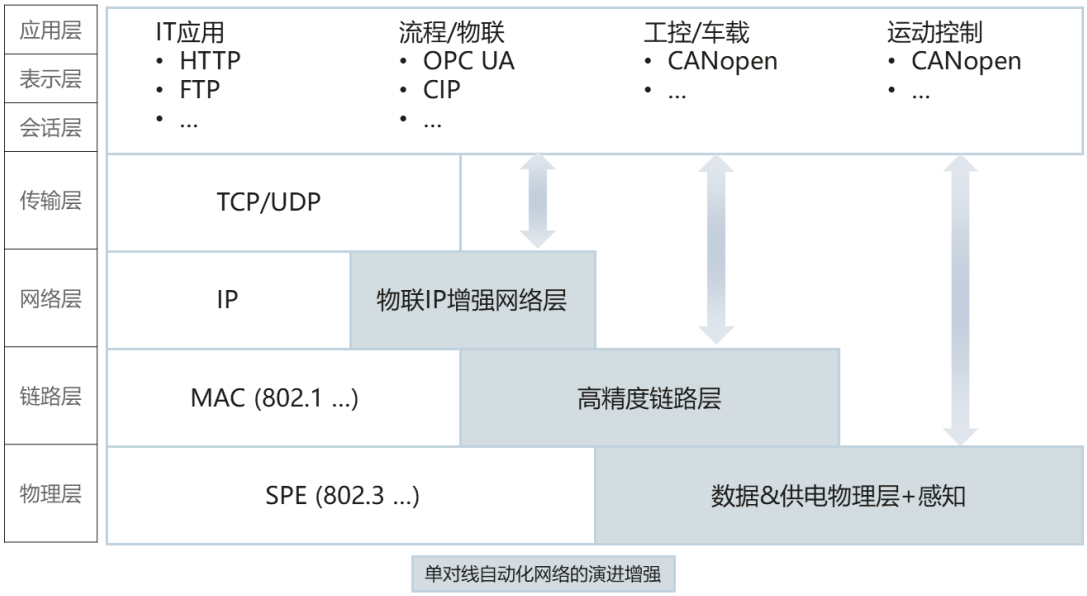

图 2-2：单对线自动化网络的协议分层与 OSI 参考模型对应关系视图

2.2.1 物理层

泛工业业务往往需要在数据通信线缆上支持供电，以降低现场终端接入部署、维护复杂度。单对线自动化网络也继承 SPE 相应的能力，通信使用 PAM（Pulse Amplitude Modulation，脉冲幅度调制）调制，并在通信线路上叠加小功率供电（不超过数十瓦），支持点到点高速通信；或者使用 OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，正交频分复用）调制，叠加较大功率的供电能力，支持点到多点通信；且均支持叠加电缆感知能力，探测穿越现场恶劣环境电缆的局部缺陷，支撑及时维护修复。除此基础能力，单对线自动化网络还支持通信距离、通信带宽的灵活适配，从 10 米级到 1000 米级，带宽从 1000Mbps 到 10Mbps，不同的距离、

速率匹配不同的业务场景，更好地满足泛工业通信多样化诉求。

此外，单对线自动化网络的物理层通过统一串行 MII 接口极大地减少集成引脚数，降低整体集成复杂度。同时，双模接口支持盲插，极大方便现场部署应用；在 PCS 子层通过增强的编码方案，提升信道检错、纠错能力，更加适应工业现场的恶劣通信环境，并兼顾 PHY 低时延能力，实现一 PHY 多用，更加拓宽了单对线自动化网络的应用场景；安全性方面，还提供 PHYsec 加密通信能力， 其 10ns 级的极低开销，对上层业务/协议透明，不影响上层业务/协议运行；针对电力、执行电机等干扰场景，通过抗干扰、信道优化手段，保障长距宽带高可靠通信。

图 2-3：单对线自动化网络演进的协议层次视图

2.2.2 协议层

单对线自动化网络在链路层、网络层的能力均需要通过协议来实现，针对泛工业差异化诉求，构建基础协议、转发、组网等方面的对应能力。

面向泛工业可靠性、确定性的必备诉求，单对线自动化网络构建 0 丢包的可靠性能力和 0 抖动的确定性能力，其基于硬件的微秒级故障探测能力，支撑亚毫秒级快速恢复且 0 丢包的高可靠能力；深入硬件层面的切片能力则可为不同业务提供 0 抖动的专用传输通道。此外，高精度软时钟可以不依赖时钟同步专用硬件，又能提供 10μs 级的高精度的时钟同步能力；增强分级异步确定性则根据实际业务不同类别流量，灵活提供分级别的确定性报文传输，且无需时钟同步，更好地匹配泛工业不同业务场景通信诉求。

为降低业务应用复杂度，单对线自动化网络提供轻量级终端入网管理协议，为终端提供位号映射、地址分配，以及入网认证授权鉴权三合一能力，实现终端入网

管理流程归一，支撑 10 万量级大规模终端高效组网、低成本接入管理。同时，复合环网自动配置，实现 0 手工配置破环，在多产线、多设备/系统互联互通的复杂场景，可避免误操作引发故障，极大提升了网络的易用性。

安全性方面，从终端入网开始，把关入网认证鉴权，保障网络中工业终端身份合法，并提供多层次的数据加密防伪能力，更好的匹配不同业务的安全诉求。

2.3 单对线自动化网络主要技术

2.3.1 多模灵活的连接技术

泛工业业务多样、场景丰富，各个业务的实际条件也存在多方面的差异。线缆方面，海量的存量及新建项目采用了不同规格的线缆，其通信距离、通信速率均有差距，而且部分线缆并不满足 10Mbps 或 100Mbps 的标准速率传输要求，需要灵活适配线缆所能支持的实际带宽利用和实际通信距离；通信接口方面，不同终端仪表存在接口差异，如：流程工业传统仪表大多采用 4-20mA 接口，而新型仪表采用基于 10BASE-T1L 的 APL 接口，也需要兼容适配不同接口。诸如此类的差异，均需要构建多模式、广覆盖的连接技术，以满足不同行业的诉求。

针对存量、新建项目不同规格线缆，单对线自动化网络演进的 FlexRate 灵活速率技术利用单工无回波、接收端易快速收敛的优势，先快速识别速率上界，再由高到低进行全双工变速训练。相比逐速率点训练的传统方法，极大地提高了效率。同时，FlexRate 能根据线缆实际规格，灵活选择最优的线缆信道速率，充分利用线缆信道带宽容量，更好地支撑上层业务高效运行。

针对流程工业不同终端仪表接口，其双模兼容接口技术利用多参数感知和可重构模拟前端模块，支持自动识别接入设备的接口类型（10BASE-T1L/APL、4-20mA）并进行配置，减少客户现场配置的复杂度，支持 4-20mA 仪表和 10BASE-T1L/APL 仪表混合盲插，有力地支撑 4-20mA 传统仪表向新型仪表演进。

单对线自动化网络基于单对线的优势，其现场线缆安装部署非常简便。面向终端侧也要求简便的集成接口，Uni-SMII（统一串行媒体独立接口）基于扩展的字节编码，在相同的串行通道中传输数据、控制、管理信息，并将集成引脚数从 10+（RMII 引脚数为 12，MII 引脚数为 18）降为 4，简化了集成封装复杂度，降低了物料成本，支撑了工业现场仪表终端的大规模集成应用。

单对线自动化网络面向泛工业众多场景，其物理层作为通信底座能力，需要兼容多种模式，以适配不同场景的差异化诉求。在部分场景通信环境相对较好、需要极致低时延（如运动控制）时，其极致低时延模式下的物理层 PHY 收发时延小于 1.5μs，满足运动控制业务通信诉求。而在长距离（500m）、通信环境较恶劣的场景下，其可灵活增加 FEC 编码，以提升纠错能力，同时通过 Hi-8B6T 融合正交子集码组实现本安直流平衡和 1.4dB 编码增益，

保障恶劣环境下通信正常开展。两种模式实现一 PHY 多用，灵活应对泛工业不同业务。

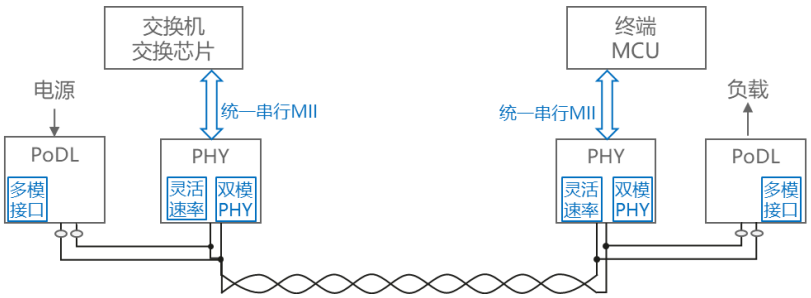

图 2-4：单对线自动化网络 SPE 物理层连接技术

2.3.2 确定可靠的转发技术

工业网络的确定性、可靠性是工控系统的基本诉求。当前，工控系统需要更快速响应市场诉求，需要更灵活集成、更快速扩展功能，也需要处理更多的数据，其对算力资源和确定可靠的网络均提出更高要求。

单对线自动化网络增强分级异步确定性技术，使确定性业务的流量在端侧或网络入口节点按照其确定性要求携带特征信息（流 ID，优先级，状态等），在每个网络节点根据报文状态和网络节点忙闲状态进行综合调度，实现端到端百微秒级确定性低时延，且不依赖时钟同步，极大降低了编排调度的复杂度。

此外，在时钟同步必备的工控场景，其发展创新的时钟同步算法提供 10μs 级精度端到端时钟同步能力，且不依赖专用的时钟同步硬件，灵活支撑泛工业场景的时钟同步诉求。

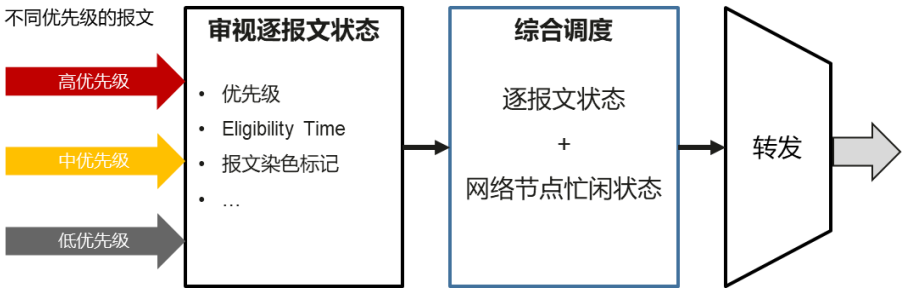

图 2-5：单对线自动化网络分级异步确定性技术

针对工业网络强确定性应用场景，单对线自动化网络增强发展硬切片确定性技术，基于不同速率的单对线以太网络，采用时隙硬切片的方式，为多个关键业务提供 0 抖动的硬管道（如 10Gbps 带宽可切分为近百个 10Mbps 硬管道），避免关键业务之间彼此竞争网络带宽资源，确保关键业务低时延、0 抖动传输。此外，通过实时监控硬管道的运行情况，发现异常可实现快速迁移到新的硬管道，保障业务数据的高可靠传输。

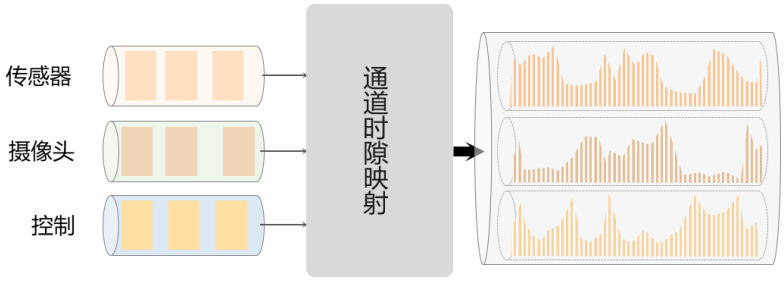

图 2-6：单对线自动化网络硬切片确定性技术

工业组网常常采用冗余链路连接冗余设备，追求故障快速恢复，通常需要针对特定组网设计实施相应的网络配置，以避免数据报文环形转发，并且在后续的网络调整修改过程中须同步更新。单对线自动化网络可通过环回报文的实现、学习，实现连接即避免环网风暴，并自动获取到冗余的下一跳且保持热备，免去破环的复杂配置，同时大大缩短了网络收敛时间，极大地方便了工业网络后续的调整维护。

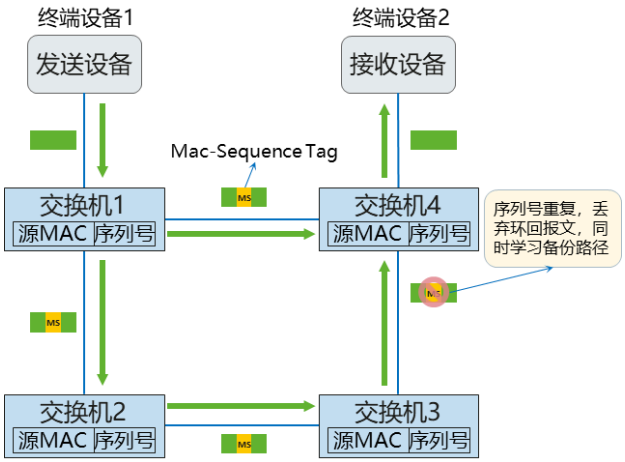

图 2-7：单对线自动化网络免配置破环、快速收敛技术

此外，单对线自动化网络还深入网络底层，在物理层帧间隙发送探测序列，实现微秒级故障探测。在探测到故障后，基于发送端口缓存窗口、折叠倒换技术以及冗余报文去重技术实现环网故障倒换零丢包，以极小代价实现双发选收技术效果，大大降低组网开销和部署成本，保障工业环网极致高可靠。

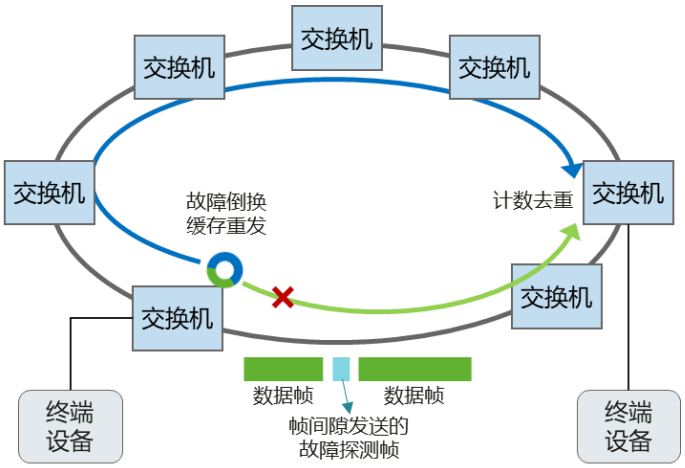

图 2-8：单对线自动化网络零丢包高可靠技术

2.3.3 安全智简的组网技术

工业生产的平稳、顺畅地开展，离不开遍布产线的大量仪表终端。如何保障海量仪表终端入网和全过程运行管理的安全、高效，关系到产线能否快速投产、保质保量利用产能。

单对线自动化网络发展融合入网管理协议，支持轻量化数据面防伪能力，在仪表终端入网过程中即完成仪表终端的秘钥分发，极大地简化了安全参数协商流程，无需维护复杂的安全上下文。同时，支持灵活调整数据的保护等级，保护范围和 ICV（Integrity Check Value，完整性校验值）长度。其中，ICV 校验值可同时兼顾数据防伪和 MAC 防伪，降低仪表终端的资源开销，匹配不同要求的安全诉求。

此外，其融合入网管理协议技术还融合了 MAC 地址学习、IP 地址分配、入网认证、以及仪表终端必备的 OT 位号上报功能。基于简化的交互流程，一次 RTT（Round Trip Time，往返路程时间）交换中即自动完成仪表终端管理类信息的映射关联，入网效率高，支持即插即用，降低了整体门槛和仪表终端复杂度。面向上层应用，融合入网管理协议提供基础管理能力，包括 IP-位号映射查询、校验位号中嵌入的位置信息防止误接入，并将 IP-位号转换能力内嵌在协议栈，方便上层应用调用。

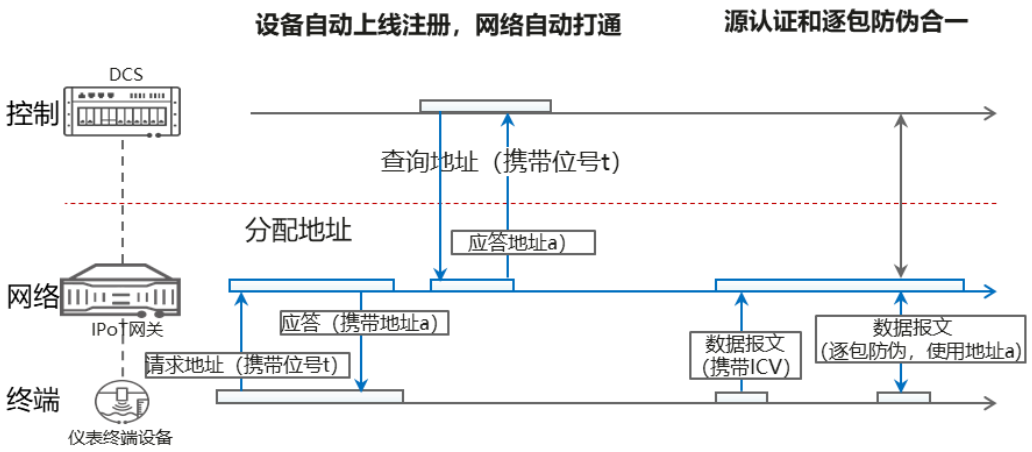

图 2-9：单对线自动化网络融合入网管理协议技术

单对线自动化网络还在物理层构建了安全通信能力 PHYsec，加解密过程额外耗时数 10ns（不同带宽的 PHY 实现差异），对上层协议应用透明（如完全不影响 Cut-through 转发等），对工业设备业务无影响。如下图所示，PHYsec 对完整比特流加密，保护全部数据帧内容，彻底掩盖帧长度等信息，更全面保障双方通信安全。

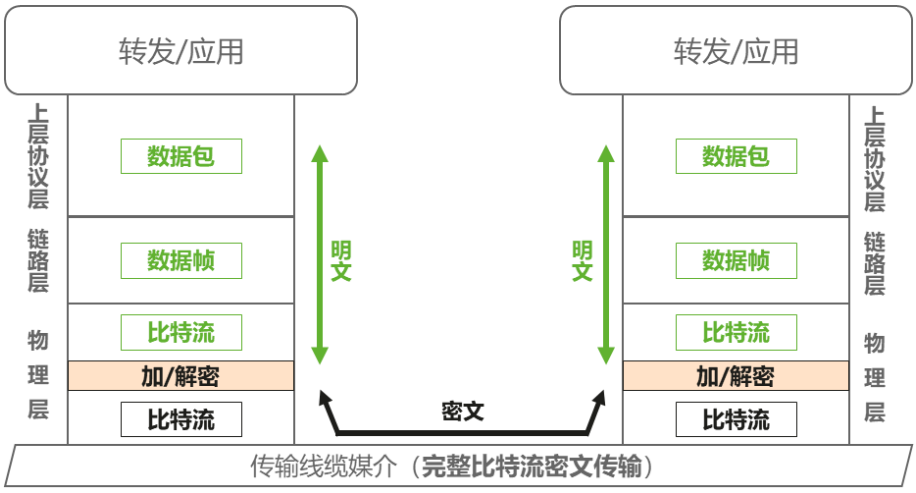

图 2-10：单对线自动化网络 PHYSEC 物理层加密技术

2.3.4 精细灵敏的感知技术

电缆作为泛工业现场通信、供电功能的重要载体，如同现场系统设备间的神经和血管。然而，现场复杂恶劣的环境（如高温、受潮、电场力、化合物、微生物等的腐蚀或侵蚀），容易导致电缆在长期运行过程中出现绝缘层破损、缓冲层白斑、老化等问题，在电缆局部位置形成缺陷段，由于现场电缆铺设后通常不具备直接观察手段，带缺陷运行的电缆不仅会影响现场通信质量，严重还可能引发安全事故。

单对线自动化网络基于通信手段，在电缆一端注入脉冲信号，再测量分析其反射波的差异，包括时域反射、频域反射，并辅助以信号补偿、时频变换技术，以米级精度定位电缆缺陷段的位置。此外，通

过扫频信号等进一步提取电缆局部位置的缺陷特征参量，分析阻抗幅值峰值相位及周期等电气参数，实现电缆缺陷类型诊断和缺陷程度评估，支撑及时准确地实施现场电缆维护修复工作，保障现场生产长稳安全。

2.3.5 高低兼顾的供电技术

通信供电一体化能力是泛工业大部分场景的基本诉求，而所连接终端类型的不同和使用场所的不同，则对供电功率大小也存在不同诉求，如防爆场所要求满足本质安全低功耗要求，其他传感器类终端需要较小的功率（数瓦~数十瓦）；而执行器类终端（包含电机等动设备）则需要较大的功率（数十瓦~数百瓦），且兼顾宽带通信隔离、抗干扰能力，以避免供电、执行器运行对通信的影响。

单对线自动化网络基于通信供电一体化基础能力，演进发展高低兼顾的供电技术体系，针对执行器类设备应用场景，支持低压（不超过 48V）、10A 级大电流共模供电能力，通过差分通信、隔离优化手段，排除大电流及执行器运行对通信干扰，实现通信、供电 30dB 隔离度；同时保留支持较小功率供电及本质安全低功耗供电能力。整体上，高低功率兼顾的宽幅供电技术，更好地满足现场设备不同功率的供电通信诉求。

2.4 单对线自动化网络总体优势

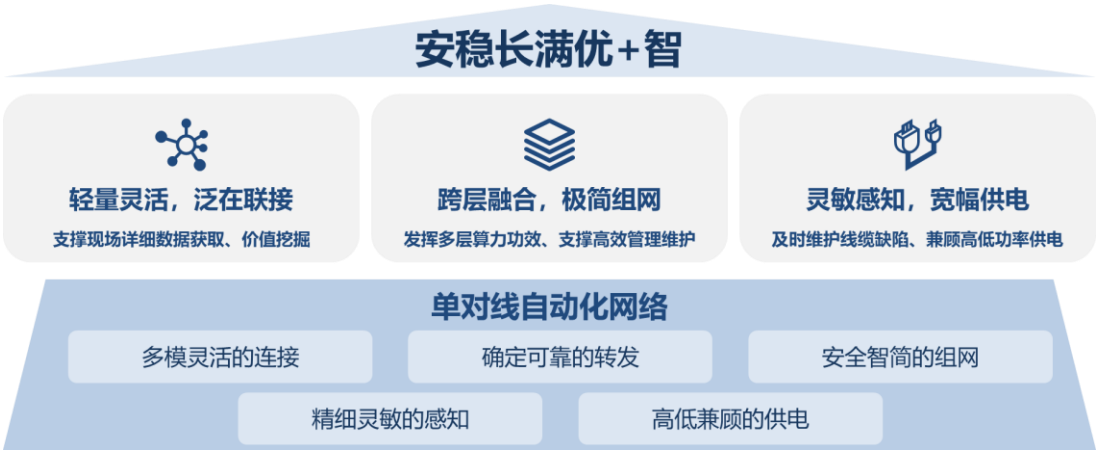

图 2-11：单对线自动化网络体系的总体优势

2.4.1 轻量灵活，泛在联接

泛工业业务领域多，不同行业对网络技术要求差异大，单对线自动化网络作为基础设施，通信感知供电一体化能力，满足泛工业业务轻量级、低功耗、易部署的固有属性，并支持不同距离、不同速率、强确定、高可靠等能力，可满足本质安全防爆要求，灵活适配、满足不同行业场景的诉求。长距离、灵活速率通信能力支持千米级连接大规模流程工业仪表终端；短距高速通信广泛连接离散制造或各类载具的智能设备、传感器；点到点/点到多点通信实现园区泛在物联；轻量级的入网管理协议、轻量级的软时钟同步技术均降低

各类终端设备应用门槛等等。总之，在泛工业众多行业，单对线自动化网络广泛连接现场各类工业智能设备、智能仪表，获取现场详细数据，使能泛工业领域数据价值挖掘，支撑泛工业领域数字化、智能化转型。

2.4.2 跨层融合，极简组网

单对线自动化网络发挥以太、IP 优势生态的协议组网能力，针对工控端远程集中部署到园区/产线边缘节点的趋势诉求，支持连接园区、产线、现场大规模设备/系统，承载工业系统的各种混杂流量，并保障强确定、高可靠、高安全。支持 10 万量级大规模终端的组网能力，其轻量级的融合入网管理协议保障终端设备入网高效、管理简化、维护低成本。安全能力从多层人手，支持终端入网认证、加密防伪等能力，保障安全能力应用简单、对业务透明。

总体上，单对线自动化网络基于分层架构，融合各层优势，各层独立演进、持续增强，支撑工业系统整体能力升级发展。

2.4.3 灵敏感知，宽幅供电

单对线自动化网络在通信能力基础上，叠加感知、供电技术，更好地满足泛工业众多行业业务的诉求。感知恶劣环境对电缆局部造成的缺陷，支持米级缺陷位置定位精度，并支持分析缺陷程度、识别缺陷类型，保障通信质量及生产安全；宽幅供电技术支持本质安全低功耗供电或高功率供电，满足更多设备的供电诉求，且在高功率供电场景，通信相应增强了抗干扰能力，同时不降低通信质量。

第三章

典型行业实践

3.1 流程工业仪表灵活接入，丰富数据流、使能智能化

单对线自动化网络将流程工业仪表接入网络带宽从传统总线的 1.2~38.4Kbps 提升到 10~100Mbps，通信距离支持 500~1000m，支持本质安全供电，并兼容传统仪表 4-20mA 接口；其灵活速率能力支撑复用现场存量电缆，保护存量投资并发挥电缆最大速率潜力；其 0 丢包高可靠环网技术确保数据传输极致高可靠；利用融合入网管理协议简化大规模仪表终端（10 万+）入网管理，改变了传统总线无组网、业务数据和运维数据不分离的状态，并支持仪表入网安全认证、数据防伪及完整性保护，有力保障流程工业智能仪表的安全平稳运行，加速流程工业向数字化、智能化转型的步伐。

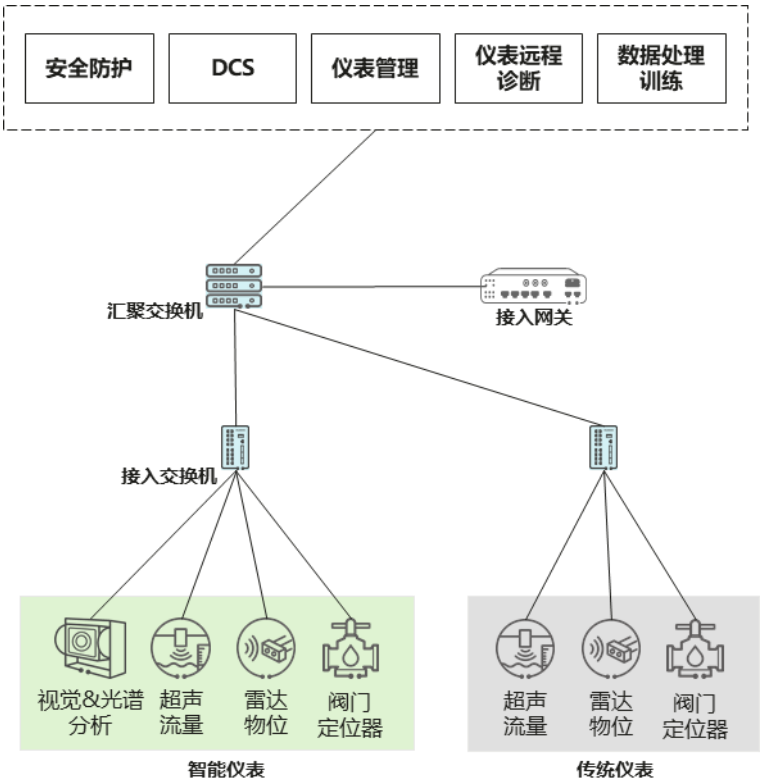

图 3-1：行业应用-流程行业

在流程工业仪表远程诊断、预测维护等业务诉求驱动下，仪表智能化、仪表网络宽带化加速落地应用。由机械工业仪器仪表综合技术经济研究所牵头，国内流程工业产业链上下游多家企业联合推进，共同开展了智能仪表、控制系统、芯片、网络等研制落地工作，并以国家管网公司内蒙古托克托压气站作为实施工程目的地。

图 3-2：托克托压气站工艺区

国家管网托克托压气站网络化测控项目	
项目概述	托克托压气站为北京管道有限公司主导建设的国家天然气基础设施互联互通的重点工程，实现天然气管道“全国一张网”格局，提升管道输送能力，最大限度发挥天然气调峰能力，保障民生用气的基础性工程，支撑陕京管道的年输气能力从 154.32 亿方提高至 212.59 亿方，增强国产气和中亚进口气向华北地区主力用气市场的输送能力，实现天然气资源在区域间的优化配置，确保华北地区供气平稳，对首都稳定供气发挥关键作用。 网络化测控项目于 2023 年正式启动，旨在通过开放解耦的网络化智能工控架构，构建 IP 化智能仪表、宽带化仪表接入管理网络，并以国标制造装备集成信息模型（GB/T-40209）打通云、边、管、端数据流，全面落实智慧生产理念并遵循最高安全标准，打造智能化与可持续生产的典范。
应用价值	• 项目采用单对线自动化网络技术，实现 10~100Mbps 带宽、500~1000m 长距离通信，并兼容存量仪表 4-20mA 接口，实现仪表测量、工控等详细数据实时回传，相比现场总线、HART 技术提速成百上千倍； • 采用双绞线替代传统铜芯电缆，显著降低电缆成本和安装费用； • 以太化一网到底，避免了多次数模/模数转换，无需传统控制室内的 IO 和接线机柜，大幅缩减控制室面积； • 实现控制配置数据与维护管理数据分流，支撑厂商仪表工况、诊断数据远程调用，同时确保生产数据不出网； • 安全智简组网技术提升仪表入网效率，简化运维并降低维护成本； • 实时获取仪表数据，并打通云、边、端宽带数据流，实现控制、配置与诊断、管理数据的分离，助力压气站巡检与故障诊断，推动远程诊断及智能预测性维护能力逐步提升。

图 3-3： 应用实践——国家管网托克托压气站网络化测控项目

3.2 离散工业远程感控现场设备，推进生产智能化、柔性化

离散工业控制系统在应用 AOI 识别、集成智能算法过程中，需要更多的数据和算力，通常将原来在产线/现场就近部署的 PLC（Programmable Logic Controller，可编程逻辑控制器）拉远集中部署到园区或产线的边缘数据中心，并利用通用硬件为 PLC 提供丰裕的算力资源，通过确定、可靠的网络连通现场设备。

单对线自动化网络利用百 μs 级的异步确定性和零丢包倒换技术，贯通工业园区/产线、现场的 IT 网络、OT 网络，形成跨园区/产线、现场的强确定、高可靠的网络，以此承载不同种类的流量，保障工业工控等业务流的确定性，并支撑工业系统的控制端充分利用算力资源，集成智能算法、实现复杂控制功能等。同时，现场设备端可上报详细数据，进一步促进控制端、整体工业系统数字化、智能化能力的提升。

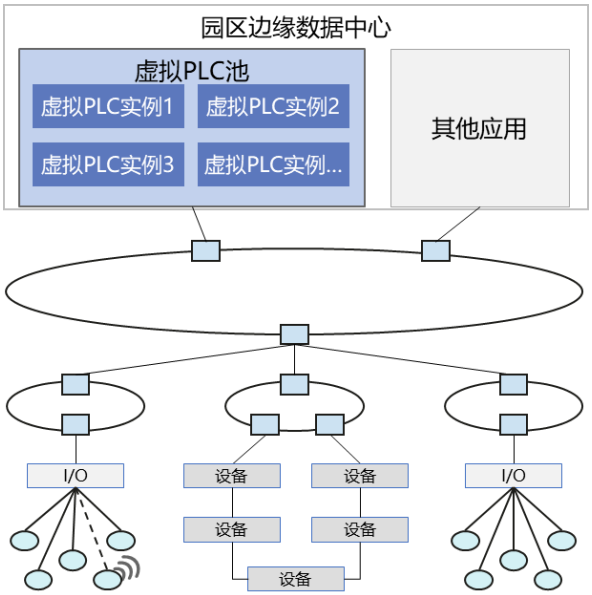

图 3-4：行业应用-离散行业

当前，市场个性化、小批量的诉求驱动离散制造型企业产线调整日趋频繁，而产线的频繁调整使得产线大脑 PLC 调试工作更加频繁，这不仅耗时耗力，降低了生产效率，还存在一定的安全隐患。在此需求驱动下，某大型电器公司率先采取行动，利用单对线自动化网络、FusionCube 等组合方案，将 PLC 从传统分散式部署转变为集中拉远部署，并依托其确定可靠的网络，成功实现了 PLC 运维的简化和安全，同时提升了产线的自动化和智能化水平。

某净水工厂 PLC 集中部署项目	
项目概述	某大型电器公司净饮工厂主要生产饮水机、净饮机、净水设备，拥有 20 条产线，年产能超过 700 万台，年产值 220 亿+，是国内最具规模和实力的饮水设备制造

	企业。其 PLC 分散式部署在产线各工位，市场需求驱动产线时常变更触发频繁的 PLC 调试操作，需要供应商现场调试，费时费力，且存在安全隐患。
应用价值	• 单对线自动化网络与 FusionCube 等组合方案，支撑 PLC 向集中拉远新架构转变，实现确定性、高可靠连接，简化运维并保障系统稳定运行，减少非计划停机； • 支撑双摄像头 AI 工位视频质检，通过 AI+确定可靠网络，利用边缘充裕算力的开展实时推理，实现对产线工人动作 ms 级识别、判断反馈，系统端到端判断时延<40ms，提升产品质量并降低客户投诉率； • 确定可靠的转发技术可同时支撑 IT 与 OT 业务，将 PLC 远程集中规模部署到边缘云，利用边缘云充裕的算力支撑系统能力持续增强，灵活扩展并实现全局协同，兼顾柔性产线高效转产与网络安全； • 支持多类型、多厂家 PLC 虚拟化与归一化管理，简化 PLC 维护与扩展； • 支撑持续增强扩展 AI 能力、集成新 AI 算法，同时，灵活适配多种型号，新型号上线时间小于 10 分钟，大幅提升智能化水平。

图 3-5： 应用实践——某净水工厂 PLC 集中部署项目

第四章

持续发展趋势和展望

万物互联、万物智能驱动泛工业持续升级，蓬勃发展。泛工业行业众多、场景多样、诉求不同，在数字化、智能化转型过程中，数据、算力、网络共同支撑泛工业持续演进、发展壮大，而网络作为底层基础设施需要超前规划、提前建设，才能支撑数据、算力发挥作用。

单对线自动化网络在泛工业众多领域已经开始应用，业务的不断发展、应用的不断深入，将驱动其持续演进发展。本报告的起草单位也联合产业链伙伴积极探索，共同展望其未来发展方向。结合行业业务的发展，单对线自动化网络发展有如下趋势：

产业规模将不断扩大：流程工业行业智能化转型（年新增仪表规模上亿台），各类载具智能网联化（车载网络端口规模达 10 亿级），具身智能各类新型终端全面放量（新型终端内年新增端口规模上亿个），并向更多工业级、车规级、消费级、宇航级应用领域扩展，将引领众多产业持续发展、扩大规模；

技术发展将更加活跃：将持续参考工业、车规、能源等多领域技术要求，吸收相应技术优势，如更长通信距离、P2MP 通信更多节点，并持续继承 IT 领域技术生态优势及新兴技术，如新的传输技术、抗干扰技术，基于通信、感知、供电、安全的技术体系将更坚实；

技术能力将全面增强：将持续吸取工业 OT 总线、IT 网络的优势，在满足工业业务必备要求基础上，现场网络带宽将超过 10Gbps 向 100Gbps 迈进，网络连接的终端规模扩大 10 倍，能效比提升 10 倍，通信线缆供电功率提升到上千瓦，抗干扰能力提升 10 倍，易用性自动配置等能力向维护环节延伸，可靠性保障让业务无感知、避免计划外停机，支撑上层业务不断演进增强。

总体上，单对线自动化网络在泛工业领域具备较好的发展应用基础，在当前工业智能、行业大模型深入发展的大背景下，需要继续聚焦泛工业不同行业的新业务、新场景，不断加深对泛工业业务及对应网络技术的认知和理解，持续汲取 OT 领域、IT 领域等跨领域技术优势，不断增强通信、感知、供电一体化能力，以适合的功效、性能支撑其在泛工业各行业广泛落地应用。本报告编写组希望联合泛工业更多的行业伙伴，持续深入合作，梳理制定面向泛工业更多行业的单对线自动化网络解决方案，助力泛工业各行业/企业的数字化、智能化转型。

附录：缩略语

缩略语	英文全称	中文全称
AI	Artificial Intelligence	人工智能
AOI	Automatic Optic Inspection	自动视觉检测
APL	Advanced Physical Layer	高级物理层
HART	Highway Addressable Remote Transducer Protocol	可寻址远程传感器高速通道的开放通信协议
ICT	Information and Communications Technology	信息及通信技术产品
ICV	Integrity Check Value	完整性校验值
MAC	Media Access Control	媒体接入控制
MII	Media Independent Interface	媒体无关接口
MPPT	Maximum Power Point Tracking	最大功率点跟踪
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
P2MP	point-to-multipoint	点到多点（通信）
PAM	Pulse Amplitude Modulation	脉冲幅度调制
PLC	Programmable Logic Controller	可编程逻辑控制器
RTT	Round Trip Time	往返路程时间
SPE	Single Pair Ethernet	单对线以太网

华为技术有限公司

深圳市龙岗区坂田华为基地
电话：(0755) 28780808
邮编：518129
www.huawei.com

中国信息通信研究院
北京市海淀区花园北路 52 号
电话：(010) 62301618
邮编：100191

机械工业仪器仪表综合技术经济研究所
北京市西城区广安门外大街甲 397 号
电话：(010) 63261819
邮政：100055
www.itei.cn

中国科学院沈阳自动化研究所
辽宁省沈阳市浑南区创新路 135 号
电话：(024) 23970012
邮编：110169
www.sia.cn

商标声明

，是华为技术有限公司的商标或者注册商标。
，中国信通院，是中国信息通信研究院的商标或者注册商标。
，ITEI，是机械工业仪器仪表综合技术经济研究所的商标或者注册商标。
，中国科学院沈阳自动化研究所，是中国科学院沈阳自动化研究所的商标或者注册商标。
在本手册中以及本手册描述的产品中，出现的其他商标、产品名称、服务名称以及公司名称，由其各自的所有人拥有。

免责声明

本文档可能含有预测信息，包括但不限于有关未来的财务、运营、产品系列、新技术等信息。由于实践中存在很多不确定因素，可能导致实际结果与预测信息有很大的差别。因此，本文档信息仅供参考，不构成任何要约或承诺，华为、中国信通院、机械工业仪器仪表综合技术经济研究所、中国科学院沈阳自动化研究所不对您在本文档基础上做出的任何行为承担责任，也可能不经通知修改上述信息，恕不另行通知。

版权所有 ©华为技术有限公司 ©中国信息通信研究院 ©机械工业仪器仪表综合技术经济研究所 ©中国科学院沈阳自动化研究所 2025。保留一切权利。非经华为技术有限公司、中国信息通信研究院、机械工业仪器仪表综合技术经济研究所、中国科学院沈阳自动化研究所书面同意，任何单位和个人不得擅自摘抄、复制本手册内容的部分或全部，并不得以任何形式传播。