

工业光网 ODN 建网白皮书

(2022 年)



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

工业互联网产业联盟 (AII)

2023 年 6 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
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟
联系电话：010-62305887

邮箱：aia@caict.ac.cn

前言

2021 年工业互联网产业联盟（AII）正式发布了《工业光网白皮书》，首次提出了工业光网的技术体系、网络架构和关键技术。工业光网的提出正逢工业企业进行生产智能化，企业数字化转型的关键时期，白皮书的发布推动了业界对工业光网概念、定位和功能理解，同时明确了工业光网作为工业互联网支撑企业数字化转型和智能化升级的关键网络技术体系的发展方向，有力的推动了工业互联网的发展。2021 年的全球工业互联网大会中，工业光网中基于全光连接的工业 PON 技术被评为近年来全球工业互联网中最具成长性的技术，基于全光连接的工业网络得到了行业的高度关注。此外随着国家制造强国战略的提出，部委和地方政府也相继出台相关政策，2021 年工业和信息化部发布的《“十四五”信息通信行业发展规划》中，明确指出推动全光接入网进一步向用户终端延伸，推广实施光纤到房间、到桌面、到机器，按需开展用户侧接入设备升级，从政策层面对光网络的应用给予了方向性指导。几年间工业光网已进入从技术体系确立到政策引导到规模化部署的快速发展阶段。

本白皮书在 AII 2021 年发布的《工业光网白皮书》基础上，进一步向业界介绍工业光网中 ODN（光分配网络）的高效、快速的建网方案和产品形态等。ODN 作为工业光网的光纤连接网络，它采用光纤介质和无源器件等提供了工业光网设备间的全光互联，是工业光网的骨架。采用面向工业现场的便捷化的 ODN 产品和建网方案，可以大幅降低建网时间，提高网络灵活性，同时降低部署成本。本白皮书通过介绍工业光网 ODN 的建网关键点和关键建网产品，指导工业光网的高效、快速的落地部署。

牵头编写单位：

中国信息通信研究院

参与编写单位：

华为技术有限公司

中国电信集团有限公司

上海飞机制造有限公司

中国汽车工业工程有限公司

长飞光纤光缆股份有限公司

中国寰球工程有限公司

中通服咨询设计研究院有限公司



工业互联网产业联盟公众号

编写组成员（排名不分先后）：

曹小波、刘谦、张恒升、李汉国、陈智勇、马志刚、张彦兵、廖远才、黄琨、周俊君、冯义、杜喆、孙慧、王筱、董志飞、刘栋、赖昊翔、林一雄、张敦峰、汪祥、鲁伟亮、秦尚云、柯刚、魏毅、徐梅香、相森



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

目 录

一、工业光网 ODN 概述	1
(一) 工业光网 ODN 建网位置和部署优势	1
(二) ODN 的网络结构和拓扑	3
(三) 不同网络拓扑在工业中的典型应用场景	6
二、实现工业光网 ODN 高效建网的典型技术和产品	8
(一) 应用于工业场景的高效 ODN 建网技术	8
(二) 典型的 ODN 建网产品	11
三、在工厂、车间级建设高效、可靠的 ODN 网络	15
(一) 工厂、车间级 ODN 建网前的规划关键点	15
(二) 可选择的 ODN 建网方案	16
(三) 典型工业场景特点和 ODN 部署示例	18
(四) 工厂、车间级 ODN 建网注意事项	22
四、在工业现场建设高效、可靠的工业光总线 ODN 网络	23
(一) 工业光总线 ODN 概述	23
(二) 工业光总线 ODN 建网前的规划关注点	24
(三) 可选择的工业光总线 ODN 建网方案	25
(四) 工业光总线 ODN 建网注意事项	29
五、为工业企业提供“自服务”能力的 ODN 运维平台	30
(一) 通过 ODN 自服务平台实现可视化运维	31
(二) 通过 ODN 自服务平台实现智慧化管理	32
(三) ODN 自服务平台的安全性保障	35
六、总结与展望	35

附录 1、相关网络技术简介	37
附录 2、文中提到的缩略语	40
附录 3、ODN 建网相关表格.....	41
附录 4、ODN 部署典型范例.....	43



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

一、工业光网 ODN 概述

（一）工业光网 ODN 建网位置和部署优势

工业光网是光网络技术在工业领域应用的技术总称。工业光网 ODN（光纤分配网络）提供了工业光网 OLT 和 ONU 设备之间的光纤连接，它采用光纤介质和无源器件等为工业光网设备提供全光互联，是工业光网的骨架。图 1 是工业光网的 ODN 建网部署位置示意图。

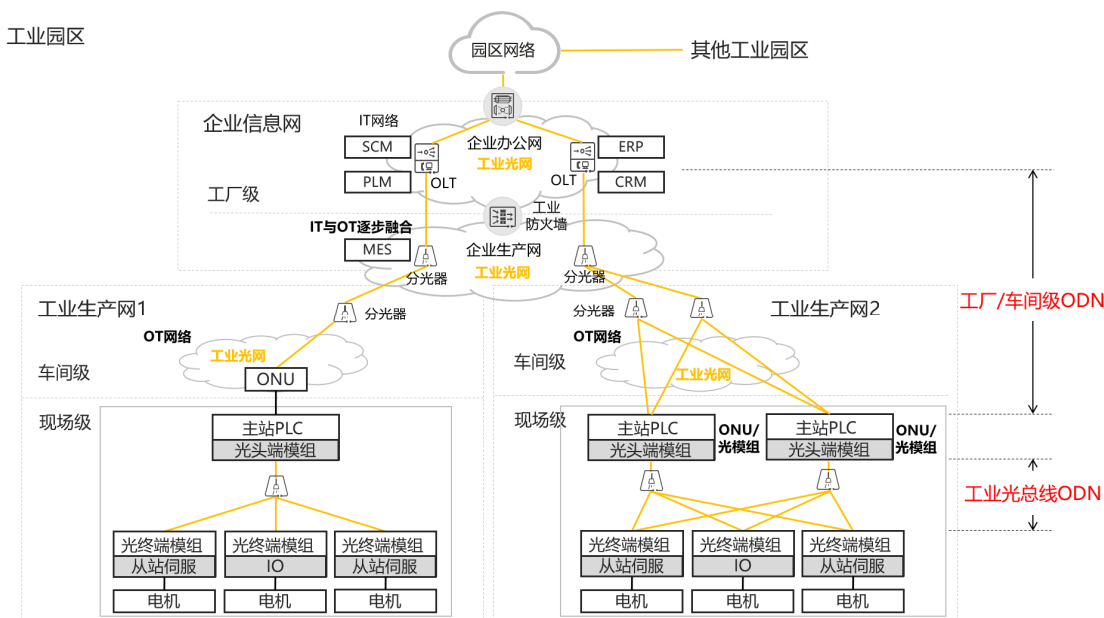


图 1 典型的工业光网 ODN 建网位置示意图

工业光网 ODN 可以部署在无特殊环境要求的常规工业企业网络中，也可以根据工业行业的不同场景应用特点部署在环境差异性较大的流程、离散行业的工业企业内。采用工业光网建网，部署 ODN 网络可以为工业企业带来以下的建网优势：

（1）建网速度快

采用了 P2MP（点到多点）的汇聚状的网络拓扑结构，在进行网络的设计施工时，主干光纤/线缆对比传统的点到点网络从原来的多条变为

一条，可以大幅节省布线空间和布线放线工作量，缩短建网时间，适合对于快速投产和灵活调整的网络应用场景。

（2）网络使用寿命长

工业光网 ODN 由无源器件和光纤组成，无需系统供电，而且通信介质光纤的抗老化性能非常出色，在网络建设完成之后可以支持长寿命的使用。另一方面，由于光纤的业务承载量大，因此在网络扩容和升级改造过程中只需要对接入设备进行调整，而无需对光基础网络器件和光纤进行更换，保证了一套 ODN 网络的长时间运行。

（3）支持多工业场景部署

在工业诸多的应用场景中，对于网络的要求不尽相同。在离散制造加工行业中，由于网络接入设备的业务点位多、总带宽需求大，ODN 网络结构可以满足生产设备多接入、业务访问量大的需求；对于部分流程行业中存在的通信距离远，供电复杂，环境要求高的特点，工业光网的无源、长距、抗干扰特性可以满足业务承载的要求。

（4）建网成本具备优势

工业光网 ODN 采用光纤连接，光纤介质价格低廉，稳定性好，且采用点到多点的拓扑结构，相比于传统网络点到点的网络布线方式，更加节省端口和通信线缆的用量。且在前期对 ODN 网络进行合理规划设计后，后期的升级扩容无需对 ODN 网络进行更换。可以进一步节省综合建网成本。

（5）提供用户自维护方案

工业光网的运维体系支持对 ODN 网络进行可视化运维保障，并可以向用户提供自运维平台和管理接口，支持对 ODN 光纤网络的故障告警上报，并支持对 ODN 的光纤网络中的光纤中断（如有）位置进行定位，从

而方便用户查障和排障。

（二）ODN 的网络结构和拓扑

1. 工业光网 ODN 网络结构

工业光网 ODN 由**光纤/光缆**和配套的**无源器件**组成。其结构按照功能段划分可以分为主干光缆段、接入光缆段、终端接入段以及现场总线接入段，图 2 是工业光网 ODN 建网逻辑结构图。

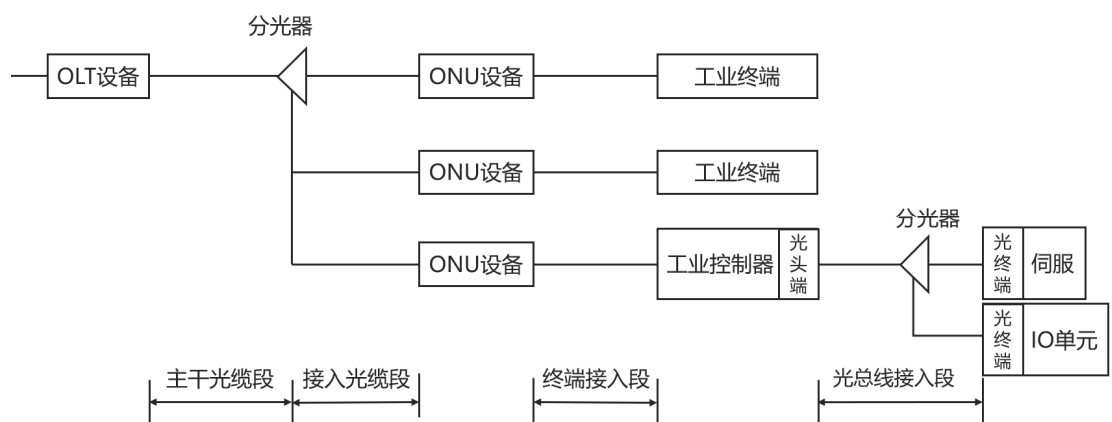


图 2 工业光网 ODN 建网逻辑结构图

根据图 2 所示，主干光缆段负责连接工业光网的 OLT 设备与分光器，分光器主要部署在工业内网的汇聚设备网络柜，如车间级网络设备柜中；接入光缆段连接分光器与工业 ONU 设备，作为一级分光点和二级分光点的连接系统；工业设备和终端按需部署于生产现场或靠近工业 ONU 设备的位置，如设备具备光接口，可以通过光纤接入工业 ONU 设备。不同的行业和差异化应用场景根据实际建网环境和位置进行部署。光总线接入段也采用一主多从的网络结构，通过光纤和无源器件连接控制系统的主站与从站，主站与从站内集成式部署光收发单元，通过光通信技术传输数据，从而构建低时延、高可靠的工业光总线网络。

2. 工业光网 ODN 建网拓扑

为满足各类工业应用要求，工业光网的 ODN 网络拓扑主要采用两种方式组网，分别为树形拓扑和链形拓扑，如图 3 和图 4 所示：

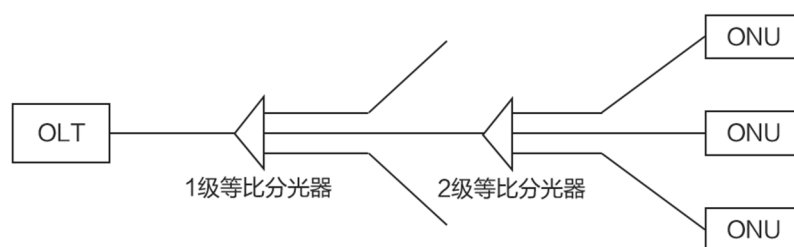


图 3 采用二级分光的 ODN 网络树形拓扑结构示意图

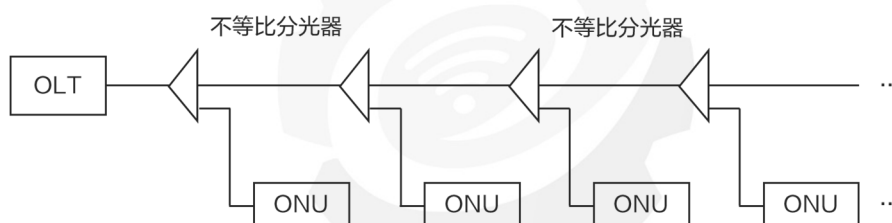


图 4 采用链式结构的 ODN 网络拓扑

网络中 OLT（光线路终端）为工业光网汇聚侧的网络单元，ONU（光网络单元）为连接工业终端的接入侧网络单元，ONU 与 OLT 设备通过 ODN 网络连接，将端侧数据通过 ONU 接入并经过 ODN 网络承载汇聚至 OLT 设备，传输至上层网络。

3. ODN 建网冗余保护拓扑

在工业场景中，采用传统的以太网交换机部署时可以采用环形组网方式对链路进行保护。对于 ODN 网络来说，同样可以采用对 ODN 光缆段部署保护链路的方式实现网络的冗余保护，提供不大于 50ms 的保护倒换能力，以满足工业场景所需的可用性要求。其中典型的链路保护方案拓扑组网图如下方图 5、6、7、8 所示：

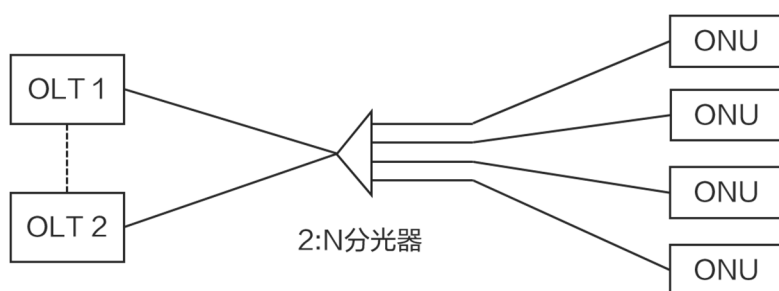


图 5 Type B 组网

Type B 保护：在 OLT 的下行接口、主干段光纤采用双路冗余的保护。采用的分光器一般为 2:N 的分光器，保护的链路为主干段光纤链路。当主干段的主链路出现断纤，设备会自动切换到备用链路上从而保障网络通信的连续性，如图 7 所示。

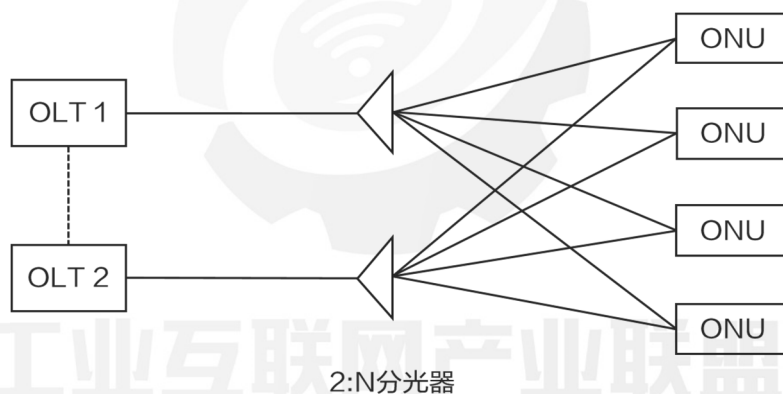


图 6 Type C 组网

Type C 保护：在 OLT 的下行口、ONU 的上行口、主干段光纤、光分路器和接入段光纤均采用双路冗余的保护。采用的分光器一般为 1:N 的分光器。保护的链路为整个链路。当主链路的任何一个节点出现断纤，设备会自动切换到备用链路上，如图 8 所示。

当接入终端的位置呈长距离带状分布时，还可以采用不等比分光的方案实现 TYPE C 保护组网（也称为手拉手保护），如图 7 所示：

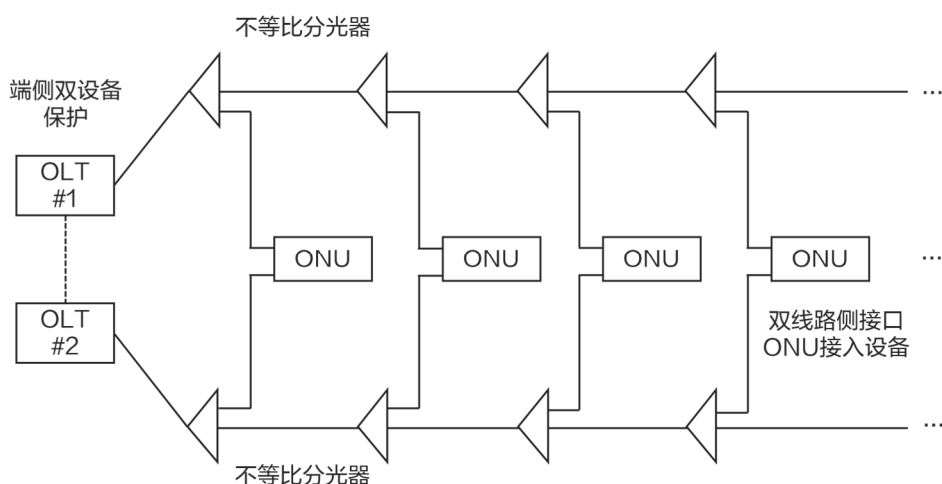


图 7 具有 TYPE C 增强保护的 unequal 分光方案拓扑

工业光网的拓扑支持灵活调整，例如 TYPE C 保护组网模式的拓扑可以构建成环形拓扑，不仅提供双冗余链路保障光路的备份，而且还可以防止多点失效引起的整个网络的故障，环形的 TYPE C 组网模式见如下图 8 所示：

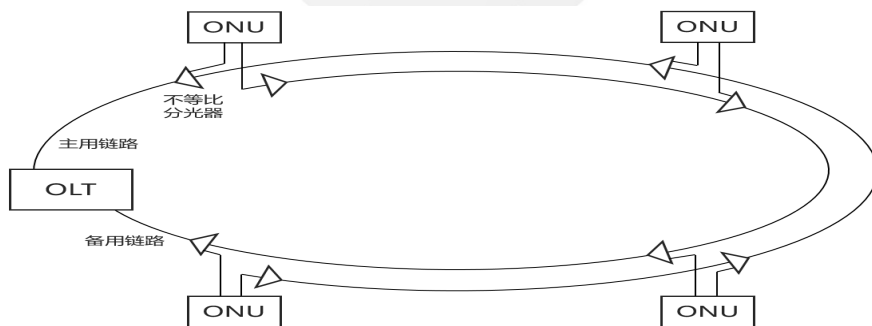


图 8 具有 TYPE C 增强保护的环形 unequal 分光方案拓扑

综合考虑部署成本、便捷性等因素，在常规场景下，通常推荐采用 Type B 保护组网；对可靠性要求更高的专用场景，可以采用 Type C 保护组网，实现全光纤光缆保护。

（三）不同网络拓扑在工业中的典型应用场景

在工业场景中，众多终端设备需要通过 ODN 网络进行连接数据承载，

例如工业生产现场的机器、办公网络场景中的计算机、传感监控场景中的摄像头等。当承载传统企业办公区域的网络数据时，ODN 可以采用树形拓扑结构，便于覆盖区域内的终端接入和扩展，其逻辑结构如图 9 所示：

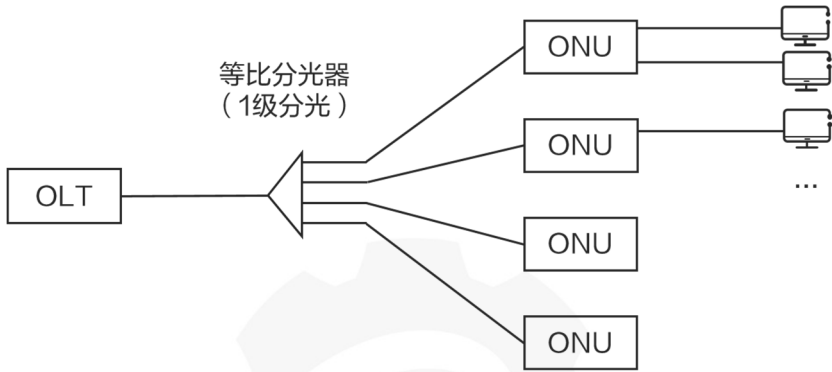


图 9 ODN 部署于工业办公网络示意图

在工业生产网络中，接入的工业终端的位置取决于工厂生产线的数据采集点分布或实际制造生产的工作流程。某些场景下，工业生产线的纵向上的跨度可以达到上百米的规模，因此树形拓扑可能不是连接这些机器的好选择，采用 ODN 链式拓扑为该场景提供了更好的解决方案，如图 10 所示。链式拓扑中的 ONU 以级联方式连接，使用不等比光功率分配器代替等比光功率分配器，可以接入更多的数据采集点。

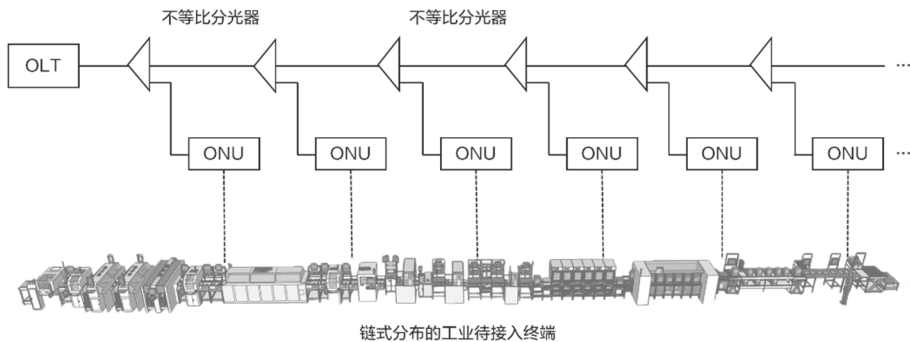


图 10 工业场景中的链式拓扑应用场景示意图

二、实现工业光网 ODN 高效建网的典型技术和产品

（一）应用于工业场景的高效 ODN 建网技术

1. 光纤机械连接技术

（1）光纤预成端技术

ODN 网络中的光缆布放涉及到光纤的现场熔纤接续和测试工作，而经过充分的前期网络规划设计，可以将光缆的熔纤接续、成端和测试等工作在供应商工厂的特定环境下完成。在企业现场部署施工时，仅需要将已成端的光缆进行现场组装，即插即用，降低部署时间，提高部署效率。预连接技术可以实现工程现场的快速布线，适用于工业环境复杂，对、高可靠性布线需求高的工业企业，是一种新型的高效 ODN 部署方案。

（2）光纤快速连接器

光纤/光缆在用户现场进行布线和成端/接续也是网络现场部署施工时常见的工作之一。传统光纤布线和接续一般分为光纤热熔和采用快速连接器两种方式。采用光纤热熔进行光纤现场接续操作较为复杂，多用于铺设长距离传输光纤。对于工厂内快速布线来说，采用快速连接器进行接续操作更为简便，光纤快速连接器内部由经过了预抛光的插针和机械头组成，端接时不需要熔接机和研磨，可以适应多种工业布线环境。

2. 分光技术

ODN 通过分光器实现 P2MP（点到多点）的数据传输。分光器是将光信号功率进行耦合及分配的光无源器件。按照功率分配的形式可以分为等比分光和不等比分光。

光分路器一般带有一个上行光接口和若干个下行光接口，从上行光接口传输的光信号会被分配到所有的下行光接口中并进行传输；而从多

个下行光接口输入的光则会集中到一个上行光接口中。分光功能会降低单个光接口的光信号强度，单个光接口的光功率会有所下降。对于常规场景的 ODN 部署，光分路器一般采用等比分光，即每个下行接口的光信号输出强度是等比的。而对于一些特殊的工业场景，由于接入节点数量较多、分布分散，所需的分光比差异性较大、分支点多，因此可采用不等比光分路器进行级联，即每个下行接口的光信号输出强度可根据组网要求按需分配，满足实际场景的灵活布线设计和扩展。

等比与不等比光分路器示意图见图 11，以 1:8 等比分光和 1:9 不等比分光为例。

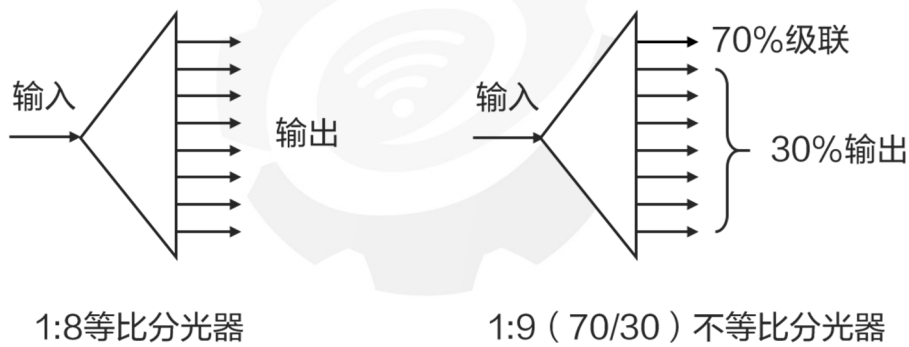


图 11 1:8 等比分光器和 1:9 (70/30) 不等比分光器

图 11 中 1:8 等比分光器的 8 个输出端口的平均分配输入的光功率。1:9 (70/30) 不等比分光器的级联口会分出 70%的光功率，并连接下一级的分光器。8 个输出端口会平均分配剩余 30%的光功率。

3. 光电混合技术

工业光网的应用范围覆盖生产、办公、监控网络，在部署中可能遇到以下问题：（1）设备的远程供电；（2）如何简化工业厂区原本密集的线缆铺设。为解决上述问题，可以采用光电混合技术。光电混合技术是指将光纤线缆和馈电线缆复合，同时传输光信号和电能或（和）电信

号的技术，在保障通信光终端数据传输同时还可以保障光终端的供电，并且简化了缆线的布放。

新型光电混合技术在工业光网的 ODN 网络中得到了大范围的应用。不仅包括低成本小体积光电混合缆线，还有与之配套的光电混合分路器和带输电功能的可插拔光模块。光电混合分路器即提供光分路的功能，也提供电源分配的功能。

4. 自运维管理技术

工业企业部署的 ODN 与传统的运营商家庭网络部署的 ODN 不同，属于独立的自有网络，往往需要单独的网络资源管理和运维，便于工业企业对 ODN 进行自服务。通过将 ODN 的资源信息、链路信息、配套的工业 PON 设备等运维信息进行提取组合，并可以与工厂的 GIS 信息技术结合，形成场景化的运维视图。此外还可以通过 AI 技术辅助提升智慧化的运维管理能力，对 ODN 物理链路可能出现的故障进行预判并对 ODN 的资源使用情况和资源变动情况实现动态化、自动化管理。在资源管理上，可以结合图像（资源二维码和条形码）识别技术进行快速的 ODN 资源识别和录入，如图 12 所示。典型的 ODN 在线资源监测和故障诊断技术介绍见附录 1。

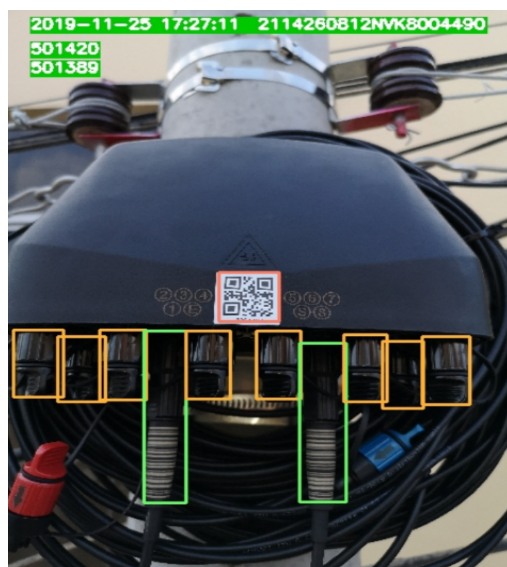


图 12 采用图像识别快速录入识别 ODN 运维资源信息

(二) 典型的 ODN 建网产品

1. 预连接光分纤盒（墙挂式）



图 13 预连接分线盒及连接光缆

预连接光分纤盒主要用于现场不具备固定安装位置的场景，可以采用独立挂墙安装，如图 13 所示。其内部可以预制分光器或者尾纤，光纤连接适配器预制于分纤盒的面板上，在安装时免开盒，施工方便。分纤盒具备盘纤功能，可以将多余的配线缆进行盘储。

接入光缆采用预制连接器，在现场施工时即插即用，免熔接，施工

方便，与光纤现场成端比较，可靠性更佳。

2. 预连接光分纤盒（上架式）



图 14 预连接配线架及连接预制光缆

预连接配线架主要用于室内上架式安装，如图 14 所示。
接入光缆采用预制连接器，在现场施工时即插即用，免熔接，施工方便，与光纤现场成端比较，可靠性更佳。

3. 光电混合缆

光电混合缆按照结构可以为蝶形缆和圆型缆，见图 15。

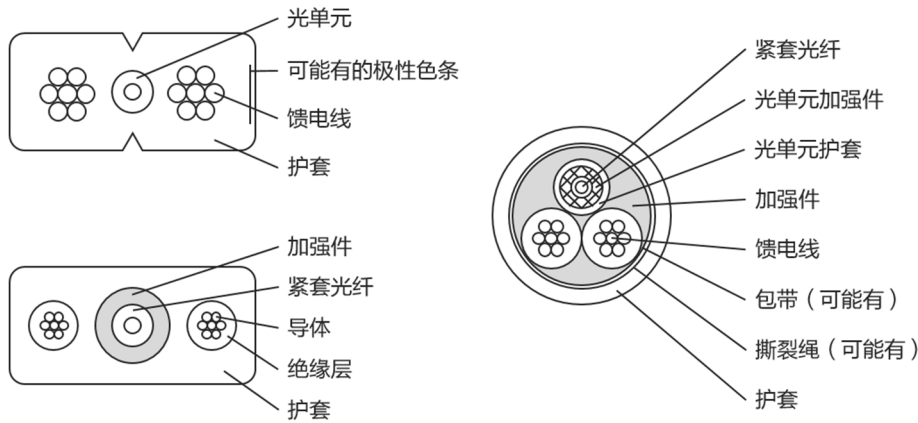


图 15 光电混合缆结构图

圆形缆的直径一般不大于 4.3mm。蝶形缆的尺寸一般不大于 2.2*5.3mm。由于产品过重不便于搬运，因此每公里的重量不超过 28kg，每盘不超过 1kg。混合缆中电缆正极有明显的红色色条标识，用于区分

出正负极。为了适应工业复杂场景要求，混合缆中的光缆可以采用 G. 657A2 及以上的弯曲不敏感光纤；混合缆的性能和可靠性要求满足 YD/T 1997.4。为了便于施工和维护，提升网络的可靠性，应选用光电一体化的连接器。连接器要能与光插座以及其他设备的输入/输出端口相匹配。

4. 光电连接器

光电连接器如图 16 所示。

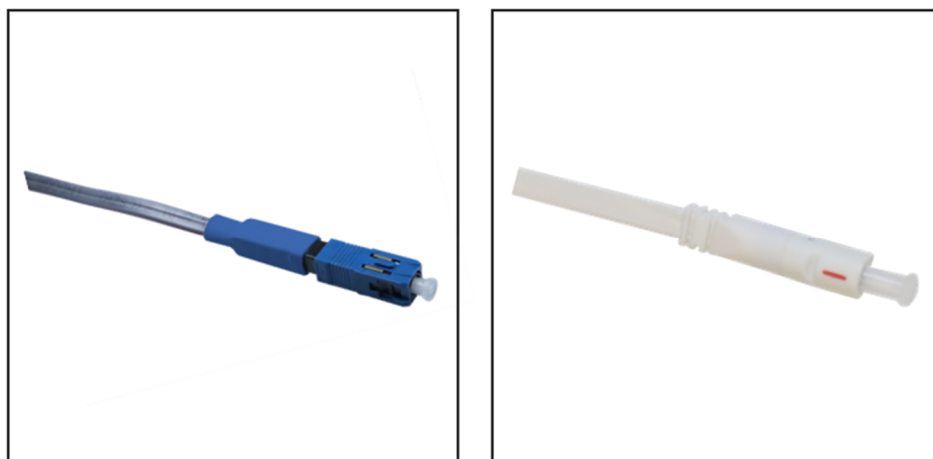


图 16 光电连接器示例图

用于工业场景的光电连接器接口类型一般为 SC 型或者 XC 型；连接器导通电阻 $\leq 20\text{m}\Omega$ ；最大插损 $\leq 0.3\text{dB}$ ，回损 $\geq 50\text{dB}$ 。

5. 光电混合分路器

以图 17 为例，图示中的光电混合分路器的供电输出接口为 SC 型光电一体连接器。光电一体连接器具有一次插拔可以实现供电+通光的功能，便于施工和维护。交流电源输入口为 220V，输出口为不超过 56V 的直流输出口。为了安全考虑，供电单元需要具备短路保护功能。为了便于规划和安装，分光器需要内置于供电单元内。



图 17 带输电功能的可插拔光模块

6. 矿用接头盒和预制光纤

矿用 ODN 产品与非矿用 ODN 产品相比最大的区别在与矿用 ODN 产品需要满足防静电、阻燃等要求。而且需要经过相关的安全标准认证以满足矿区井下作业场的场景要求，如空间狭小、区域狭长等场景特点，矿用 ODN 部署优选体积小重量轻的预连接产品，使光纤即插即用，无需现场熔纤，提高安全性。此外多采用不等比级联方案，以便接入更多的数据采集点。矿用接头盒和预制光纤产品示例图见图 18。



图 18 矿用接头盒和预制光纤产品

7. ODN 自运维管理平台

ODN 自运维管理平台是用于管理维护 ODN 的系统，传统电信网络的 ODN 运维是通过电信运营商的管理平台进行统一纳管，而对于工业企业来说，工业网络的维护往往由企业自身完成，因此需要 ODN 运维管理系统具备用户独立运维的能力。目前业界以运营商和设备厂商为代表均推

出了为工业企业使用的“自服务平台”以实现 ODN 的自维护和管理，“自服务平台”具备可视化、智能化的管理能力。

三、在工厂、车间级建设高效、可靠的 ODN 网络

（一）工厂、车间级 ODN 建网前的规划关键点

工业光网 ODN 在建网前需要进行建网规划，规划内容主要包括：设备位置和容量规划、分光位置和模式选择、终端配电方式设计等内容，以下简要介绍主要的规划内容。

（1）ODN 关联设备的选型和位置规划

ODN 连接了工业光网中的 OLT 和 ONU 设备，通过分析网络承载的业务需求，对设备进行选型并对部署位置等进行规划，可以基本确定 ODN 网络的拓扑结构，作为后续 ODN 网络规划的基础。

OLT 宜部署在网络机房，对于已部署传统汇聚交换机网络的企业，可以将 OLT 设备与现有交换机同节点放置。对于需要多台 OLT 设备的场景，尽量集中设置 OLT 节点，对于生产、办公、安防统一建网的工业企业，建议多种业务共用 OLT 设备以节省投资和设备部署空间。ONU 一般体积较小且采用无风扇设计，适合部署在生产、办公场所中距离信息接入点附近的位置，建议部署在信息箱或者设备机柜中，以减少对信息点至 ONU 之间的网线长度，降低电磁干扰对网络传输可靠性的影响。在信息接入点较多的监控场景，宜采用支持 POE 供电功能的 ONU，满足 100 米范围内的摄像机网络接入需求。

（2）ODN 分光位置和模式选择

合理的规划分光器的安装位置可以节省较多光纤的使用量。若网络

采用的分光比为 1: N，分光器宜安装在距离 N 个 ONU 距离总和最短的位置。分光模式选择上，ODN 网络的一级分光器件宜设在节点覆盖区域内偏端侧节点的一侧，且安全、隐蔽、便于施工维护、不易受到异常环境影响。对于终端接入节点数量过多或部署场景要求需要采用二级分光部署的 ODN 网络，二级分光器件宜设置在距离终端设备近的位置。在分光比选择上，为了有效降低后续扩容的网络投资，提高性价比，可以一次性部署成熟的大分光比 ODN 网络。

（3）终端配电方式设计

在 ONU 和终端设备取电不方便时宜在 ODN 配置光电混合缆进行远程取电和通信。在功率允许的条件下可以通过一次布线，实现通电通光，避免了强电布线对 ONU 和终端安装位置的限制。

（二）可选择的 ODN 建网方案

传统工业企业的工厂、车间级网络多采用交换机组网，对汇聚节点设备供电、部署空间和安全性都有一定要求。采用工业光网 ODN 时，可以降低汇聚点的组网复杂度和对空间、供电等的环境要求，部署更加便捷。并且与端设备通过光纤连接可以增加传输距离，提高传输带宽。ODN 网络根据终端设备取电的便捷性以及部署便利性可以选择采用纯光连接方案或光电混合连接方案组网。图 19 将传统以太网网络、工业光网 ODN 的纯光连接方案和光电混合连接方案进行横向展示。

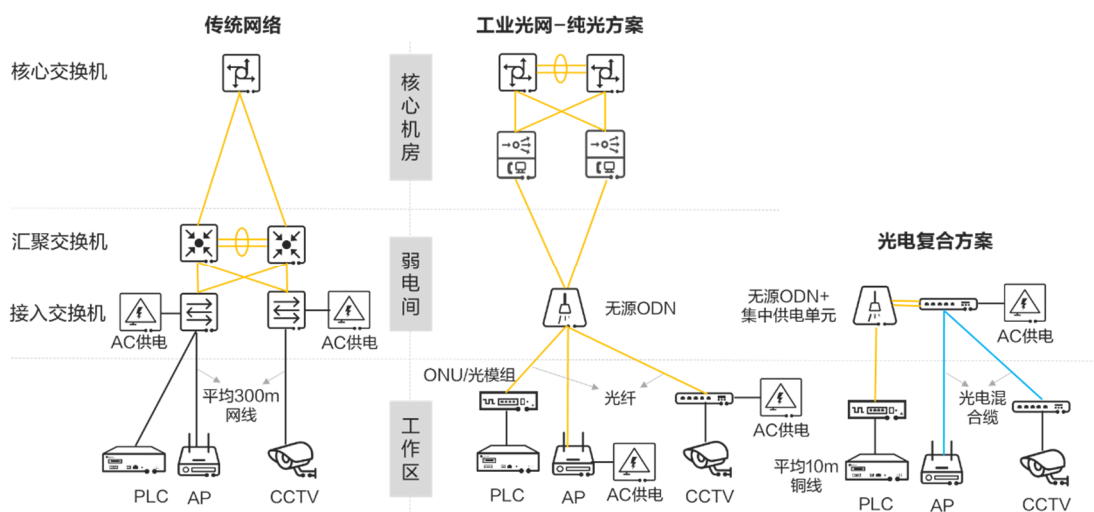


图 19 以太网与 ODN 建网方案视图

1. 纯光连接方案

纯光连接方案是指当位于工作现场 ONU 设备具备从周边环境取电的条件时，ODN 可以采用全光纤连接组网。在分光模式的选择方面，当工业现场终端数量较多，且各终端设备距离分光器的通信距离较短时，宜采用一级分光，光分路器可以放置于弱电间或机柜当中，如图 20 所示。

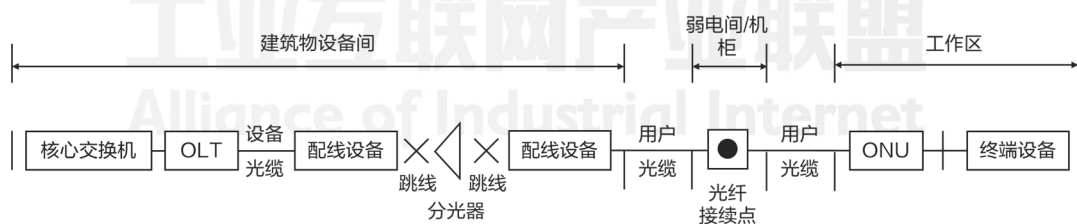


图 20 一级分光的纯光方案组网示意图

当工业现场内终端接入设备存在多个相对集中分布点的情况时，从节省布线的角度考虑，可采用二级分光，光分路器分别放置在设备间和楼层弱电间或机柜当中，如图 21 所示。

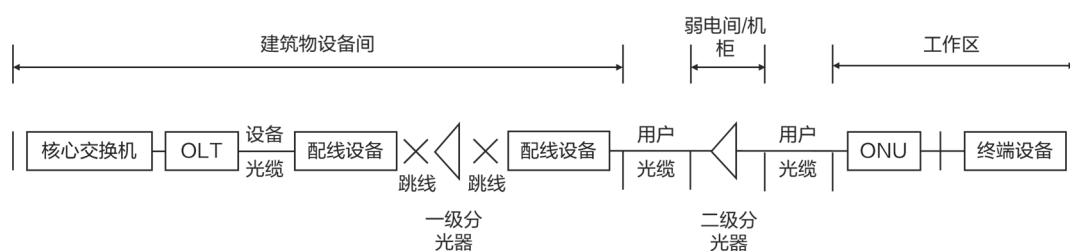


图 21 二级分光的纯光方案组网示意图

2. 光电混合连接方案

光电混合连接方案是指当位于工作现场终端和 ONU 设备取电不方便时，ODN 采用光电混合缆连接接入端设备，使数据可以通过光纤承载的同时，ODN 还可以为终端提供额外的供电能力。

如图 22 所示，ODN 的光电混合连接组网方案由集中供电单元（分光器+供电单元+光电混合连接器）、光电混合缆、ONU 三块组成，集中供电单元把光信号和电信号通过光电混合连接器连接并同时引入光电混合缆，向终端设备同时提供数据传输和远程供电功能，适用于工业网络中 ONU、AP 和摄像头等终端设备取电难的场景。

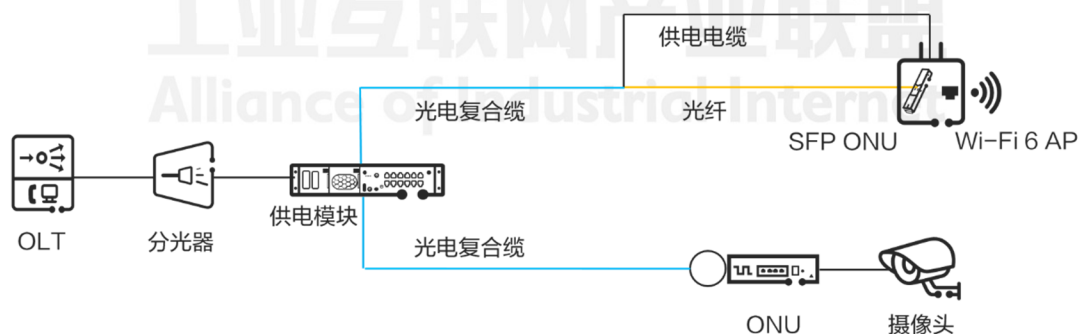


图 22 采用光电混合缆连接的 ODN 部署示例图

（三）典型工业场景特点和 ODN 部署示例

1. 常规生产和办公环境中部署 ODN

• 场景特点

对常规的生产和办公环境，例如办公区或者类办公区的场景，属于温度湿度可控的温和环境。按照 IEC61753-1:2018 标准，室内场景温度一般在 -10°C ~ 60°C ，湿度一般在 5%~95%Rh，企业内部具有设备间，办公楼宇也会有弱电间，ODN 网络设备安装空间充足，取电较为方便。

以常规中小制造业企业为例，其建网场景涵盖生产制造车间、员工的办公楼宇和企业的安防监控网络等，场景的网络部署环境属于常规的室内温度、湿度范围，无特殊或极端的场景环境要求。企业通常采用建设一张网络覆盖生产、办公及安防区域。

- ODN 的部署方式

在常规生产和办公环境中，以常规中小制造业企业为例，结合环境要求和成本控制的原则，可以通过部署一张工业光网覆盖生产、办公和安防数据承载需求。ODN 的部署根据接入设备的数量、位置和网络覆盖范围优先选择纯光连接方案。为简化网络架构和规划难度，可以采用一级分光，分光器放置在楼层弱电间（条件允许的情况下）。集中设置 OLT 节点对生产、办公、安防网络传输数据进行汇聚，建议共用 OLT 设备以节省投资和设备部署空间。安防网络可以采用 POE 供电的 ONU 接入监控终端设备，以保证部署的灵活性。

2. 离散制造行业中部署 ODN

- 场景特点

相较于常规行业的场景特点，离散制造行业的 ODN 网络场景具有如下特点：

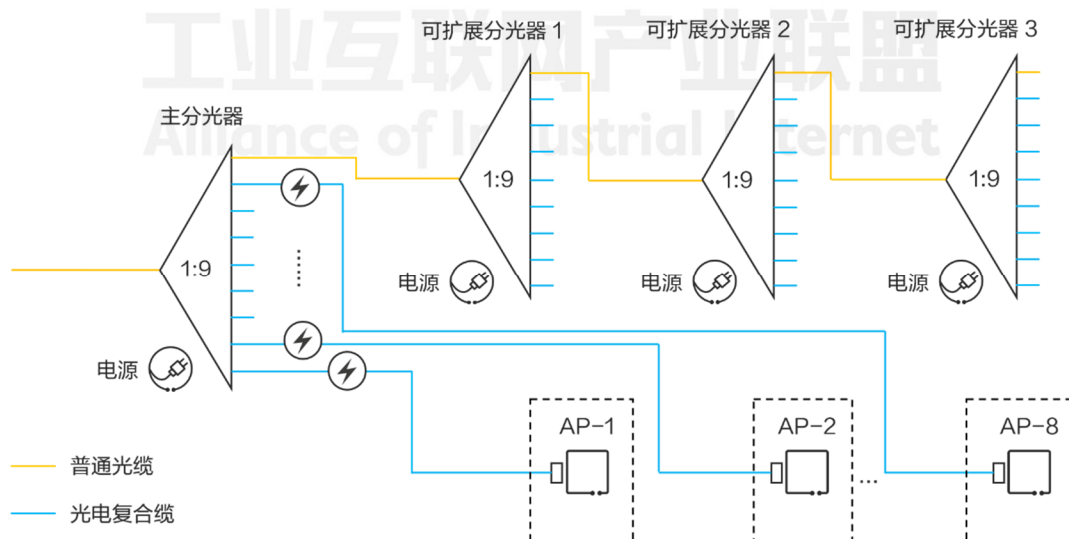
- 1) 网络接入点位多，生产备份点位多，点位密度较大；
- 2) 部分生产环境存在机械振动、冲击加速度等情况；
- 3) 部分生产环境中存在较高浓度的油污和颗粒物；

- 4) 生产产线面积大，部分生产区域存在取电困难的可能性；
- 5) 部分生产场景对 EMC 要求较高。

以大型的生产制造车间为例，其整体生产线长度长，覆盖面加大，控制单元分布广泛，要求数据采集的点位较多。在通过大型机械做生产制造过程中，周边环境存在机械振动或其他特殊环境要求。企业对简化网络部署的需求迫切。

• 部署 ODN 关注点

在特殊离散生产制造场景中，可以部署工业光网承载生产信息数据。如图23所示，ODN网络的部署根据制造车间的生产线区域分布、接入设备的数量和终端供电等环境要求等可以选择光电混合连接方案，满足不同区域的终端接入要求。对于产线终端数量多并存在无线终端接入的情况，可以选择在现场接入侧安装AP设备并利用光电混合缆供电。此外为扩大全光覆盖面积，可以采用级联可扩展的不等比分光器的方式扩大全光网络的覆盖面积，以便接入各个区域的生产终端。



注：可扩展分光器采用 1:9 分光器为示意，可按需配置不同分光比

图23 离散制造业采用光电混合连接部署ODN示意图

在特殊的制造加工环境下，如在冲击振动的环境中，在冲击不强烈的机械设备（如加工中心、车床、铣床、铸造设备等）附近，需要满足 TIA-1005-A 标准中 M2 等级以上的抗振动/抗冲击要求，ODN 连接用光纤连接器可以选用 XC、SC、LC、FC 的接头类型。在强烈振动/冲击设备附近（如：锻造设备），需要能满足 TIA-1005-A 标准中 M3 等级的抗振动/抗冲击要求下。ODN 网络中的光纤连接器可以选用 ST 接头类型，以保证连接的可靠性。此外在存在油污的环境中，ODN 光缆护套需要至少满足 TIA-1005-A 标准中 C2 等级耐油污的要求。在存在油污的环境中，光缆护套材料优选 TPU 或 PVC 材料。LSZH 等耐油能力差的材料需慎用或不用。

3. 特殊流程行业部署 ODN

• 场景特点

相较于常规行业的场景特点，特殊流程制造行业 ODN 网络的应用场景有如下特点：

- 1) 生产区域覆盖面积较大、拓扑复杂，需要满足长距离通信要求；
- 2) 生产区域网络可能会在室外，需要器件满足相应的 IP 防护需求，最高可达 IP68；
- 3) 生产区域中会存在易燃易爆气体和粉尘，需要相关器件、设备满足相应防爆需求；
- 4) 生产区域可能存在腐蚀性气体环境，如硫化氢、二氧化硫、氨气等；
- 5) 个别场景通信设备无法取电，需要总线为通信设备供电。

• 部署关注点

以煤矿等生产环境举例，其生产区域多在井下，控制侧与端侧需要较长的通信距离，且井下多存在易燃易爆气体和粉尘的恶劣环境，网络设备需要满足相应的防爆需求。同时在网络部署过程中，需要尽可能减少建网环节可能导致的安全隐患。在部署 ODN 时，如图 24 所示，通过采用不等比分光器级联并结合高可用组网的方式以提供采矿作业面各类终端的长距离接入和数据传输，使 ODN 光链路形成类似环网的链路结构以具备快速的链路保护倒换能力。接入终端处连接支持矿用的本安型终端，满足相应的防爆要求。

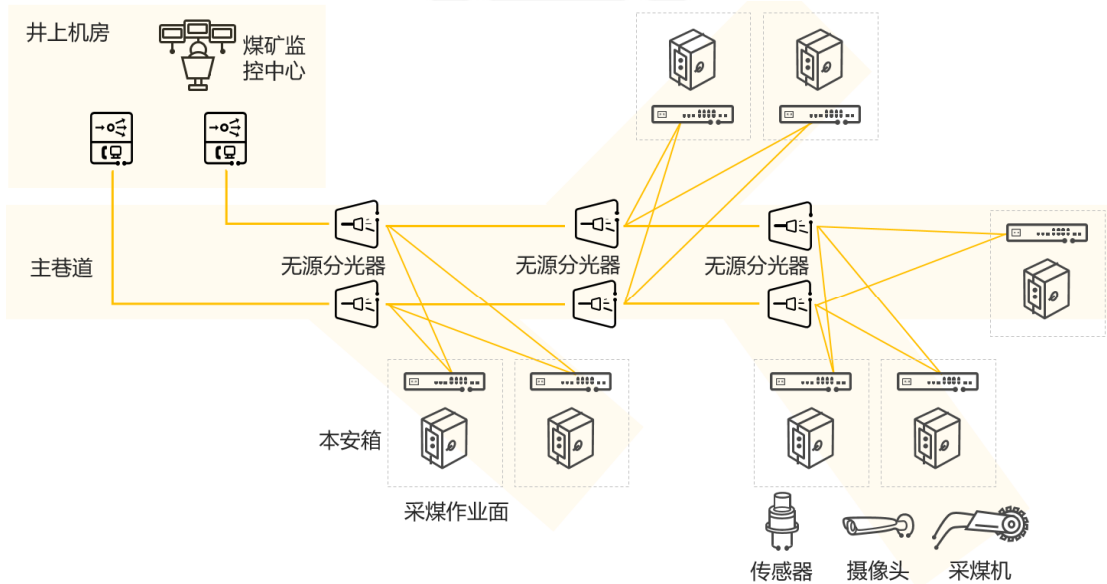


图24 煤矿生产环境部署高可用ODN的拓扑示意图

（四）工厂、车间级 ODN 建网注意事项

（1）ODN 建网应保证在网以及建网后业务承载的安全可靠，需要结合现场环境选择最优的建网技术和部署方式，将光纤网络尽可能一次性规划和延伸铺设至终端。

（2）光缆容量和路由应综合考虑，厂区内新布放的光缆纤芯数量应预留冗余。

(3) ODN 拓扑主要采用树型或链型结构，在部署面向生产制造等关键数据承载的 ODN 时还应考虑建设主用光纤的保护链路。

(4) 光通道损耗是 ODN 建网重要的网络性能指标。光功率衰减与分光器的分光比、活动连接数量、光缆长度等有关，在工程设计阶段，需要控制 ODN 中最大的衰减值，使其符合光链路端到端的功率预算要求。应对网络中最远用户的光通道衰减进行核算，采用最坏值法进行 ODN 光通道衰减核算，检查全网的光通道损耗是否满足要求。光通道衰减计算可以参考附录 3 的 ODN 建网链路损耗表。

(5) 部署 ODN 时尽量减少光纤熔接点，减少光纤线路活接头数量。并在建设中合理采用预连接产品等减少施工现场的熔纤工作。在建网过程中宜配置 OTDR 等维护工具实现对 ODN 布放光纤质量的端到端评估。

四、在工业现场建设高效、可靠的工业光总线 ODN 网络

(一) 工业光总线 ODN 概述

工业光总线是将工业总线技术与光网络技术结合以提供现场级终端设备总线互联的网络技术，工业光总线的定义内容参见《工业光网白皮书》。工业现场环境复杂，对光总线中的设备、线缆、连接器提出苛刻的要求，因此构建易安装、易维护、易扩展和高可靠的工业光总线 ODN 网络非常重要。

以用于工业控制系统的光总线架构举例，见图 25。其中内置于伺服、IO 等机器中的光终端模组通过光总线 ODN 连接位于控制端的光头端模组。光总线 ODN 部件主要包含：分光器、光纤光缆、光纤连接器、线槽、光分纤盒（可选），其中可以将不等比分光器集成在光终端中。在实际部

署时，应该着重考虑这几个 ODN 组件和配套设备的要求。

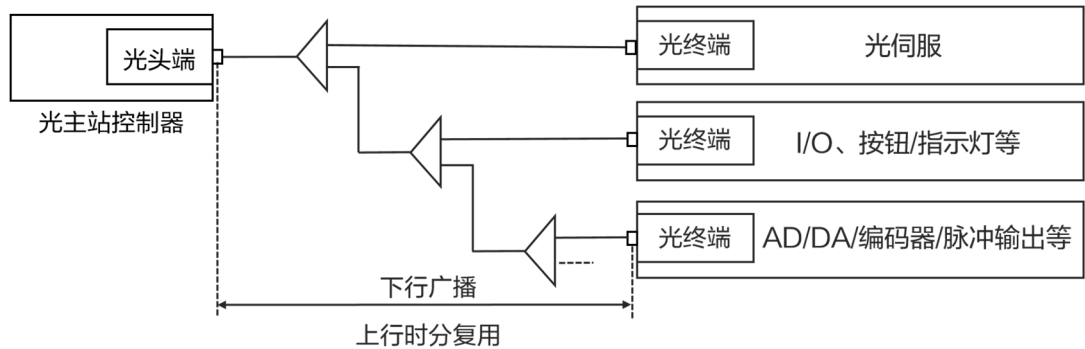


图25 工业现场光总线ODN示意图

（二）工业光总线 ODN 建网前的规划关注点

根据用户对工业现场环境需求及相关约束条件，遵循高可靠性原则，对光纤入口分布、从站分布、电源分布、线槽分布以及设备内部空间等基本情况，给出工业现场光总线ODN的规划建议，参考因素包括：

（1）布设设备内的环境，如密闭/开放环境、温度、湿度、震动、反复弯折、IP防护要求等；

（2）资源状况，如光纤入口位置、供电位置、从站放置位置、布设路径等；

（3）业务对网络的需求，接入数据点位对带宽的需求、对网络性能要求、对可靠性和冗余的要求；

（4）建设成本要求，结合业务需求和用户对总线网络的预期成本要求。

工业光总线 ODN 建设因为场景和客户要求的不同，具有不确定性。构建一个高可靠性、易安装、易维护和易扩展的网络是光总线 ODN 规划实现的目标。

（三）可选的工业光总线 ODN 建网方案

1. 光总线 ODN 部署结构

传统的工业现场总线多采用串行级联部署方式，如图26所示。这种方案可以清晰化光纤布线结构和对从站设备进行排序和定位。

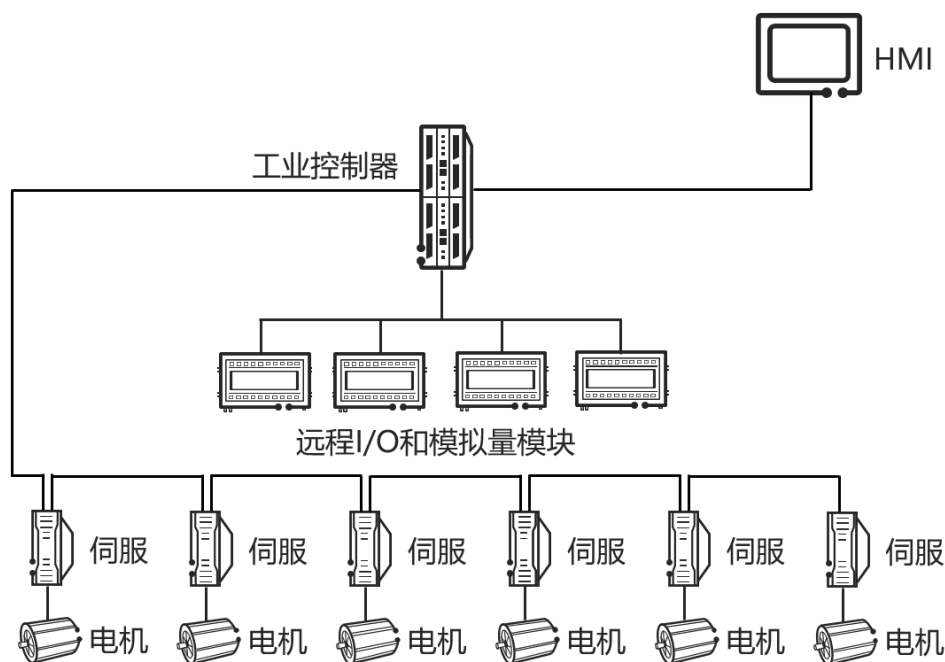


图26 传统的工业现场布线布线图

为了方便现场施工人员的施工习惯和便于对端口的识别，参考传统工业现场布线方式，工业光总线同样可以采用串行级联的拓扑结构，并结合 ODN 中分光器的类型和使用方式将光总线的 ODN 结构分为以下两种典型结构：不等比分光器级联和等比+不等比分光器级联。

由于不等比分光器体积较小，为保证光总线运行的可靠性，减少线缆和连接的数量，可以将不等比分光器集成至光终端中，从而大大减少线缆的数量，提升了现场施工便利性。图 27 是不等比分光器集成至光终端的结构示意图。

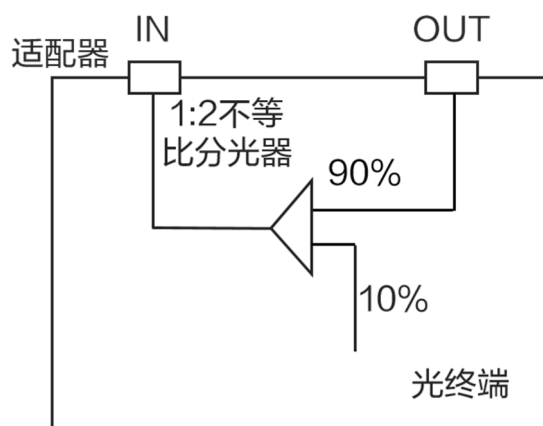


图27 1:2（10/90）不等比分光器集成至光终端结构示意图

对于从站数量较少的场景，可以采用不等比分光器级联结构。不等比级联结构是指光头端与光终端之间使用 1(2):2 不等比光分路器，每个分光器的级联端连接下一级分光器的输入端，每个分光器的信号端连接光终端，逐级连接。如果使用 2 分分光器，则其中一路分光器可以做为备份使用，图 28 是不等比分光器级联结构示意图。

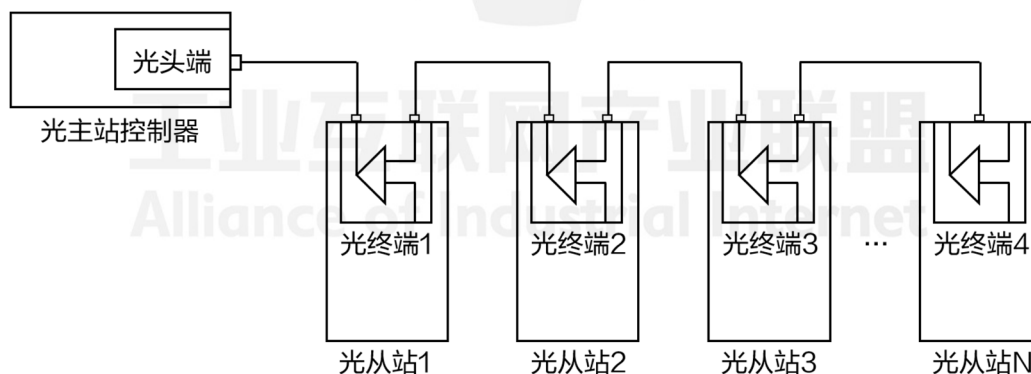


图28 不等比级联结构示意图

对于从站数量较多的场景，建议采用等比+不等比分光器级联结构。等比+不等比分光器级联结构是指光头端与光终端之间使用一个 1(2):N (N>2) 等比分光器+多个 1(2):2 不等比光分路器串行级联的方式。其中等比分光器的所有输出端均与不等比分光器的输入端直接连接，所有

不等比分光器采用串行级联的连接方式。如果使用 2 分分光器，其中一路分光器可以做为备份使用。图 29 是等比+不等比分光器级联结构示意图。

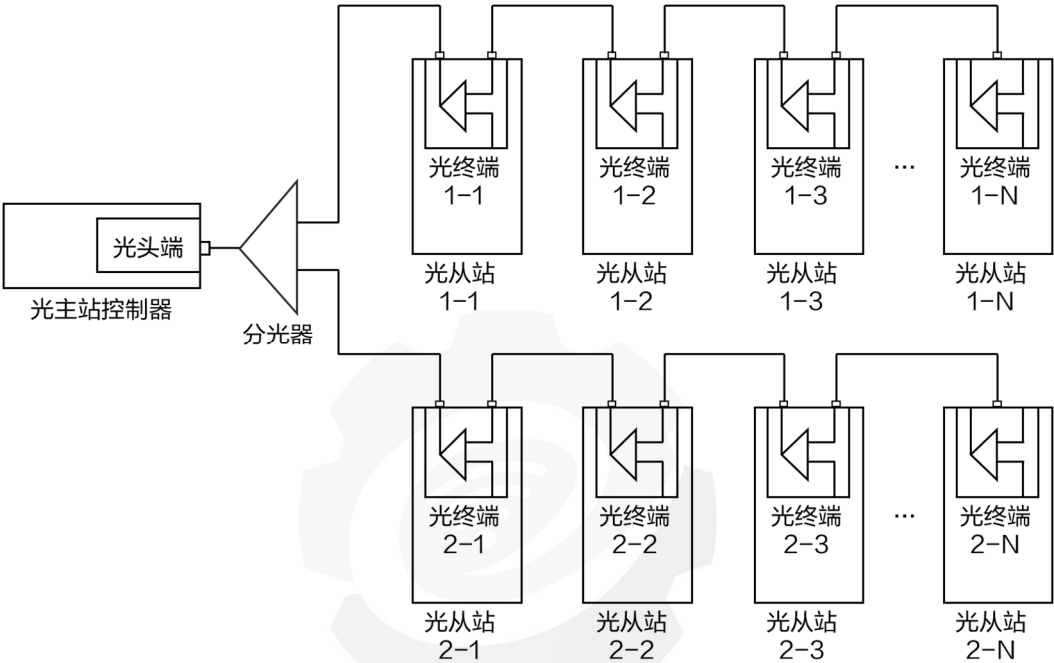


图29 等比+不等比级联结构示意图

选择光总线网络结构时，应根据用户需求、从站分布情况、安装成本，网络扩展和管理维护等来确定。一个实际的光总线网络需要选择不同的结构，以适应不同的工业场合。

上文提到的两种链式结构，其优点是组网方式灵活，节省分支光缆。实际布放时，采用 1:2（10/90）不等比分光级联结构，如在光模组中使用 Class B+级别的光模块可以支持链型组网级数 12 级。在光头端出口增加 1 个 1:2 等比分光器，可以支持双链共 16 级级联。

2. 工业光总线设备节点位置

（1）光头端位置

优先选择光头端位置，光头端应该尽量靠近上位机，充分利用机台

内已有的配电系统、业务设备、机架、配线系统等资源，实现设备集中管理和维护，降低运维费用。

（2）分光器位置

- 由于不等比分光器体积较小，可以考虑将不等比分光器集成至光终端中提升分光器的可靠性，减少线缆和连接的数量。
- 等比分光器由于独立于设备部署和安放，应尽量采用盒式或者插片式分光器，对分光器本体进行保护。
- 光纤与光纤的连接采用跳接方式连接，便于测试维护和升级。
- 等比分光器的位置应便于光缆出入，便于现场操作维护。

（3）光终端位置

- 光终端模组位于从站内部，与从站在内部采用异步并口/SPI 等方式与工作设备进行连接器，对外预留光纤接口。

3. 工业光总线 ODN 组件选型建议

在不同的使用场景下，设备对于光总线 ODN 部件的性能要求各不相同，需要根据实际的使用要求和相关场景设计和选择满足要求的 ODN 组件，保证工业光总线网络的长期施工的可靠性和寿命，可参考第三章典型工业场景下的 ODN 部署相关要求对光总线 ODN 部件的选型。表 1 列举了部分典型场景对于 ODN 组件选型的重点使用要求作为参考。

表1 部分特殊场景下ODN组件选型重点使用要求

使用场景	重点使用要求
机床主轴等	振动
机床主轴等	冲击
注塑机等	高温
链式输送机/电梯/SMT 贴片机等	反复弯曲
化工设备	化学腐蚀

4. 光缆布放

对于光缆的布放，可以按照光总线网络覆盖区域内的从站总容量，同时考虑 10% 左右的光纤资源冗余以满足未来新业务发展需求，一次性完成光缆敷设。

光缆路由的确定通常与从站分布、现有线槽情况、机台内空间、电源位置等因素有关，需要在成本，运维需求，可实施性，可靠性等多方面进行综合考虑。工程设计中，需要通过实地勘查来确定最佳的路由，路由选择必须确保光缆线路安全可靠，便于施工和维护，工程建设经济合理。

根据实际情况，光缆敷设通常采用扎带、线槽、卡钉或者波纹管等方式进行布设。以机台内为例，在机台内空间足够的情况下，可以优先采用线槽或者波纹管方式进行光纤固定，能够更好的对光纤进行保护。在线槽布设困难的区域（如空间较小），可选择卡钉或者扎带等方式固定光缆。可参考图 30 的典型光纤布线方式示意图。



图 30 典型光纤布线方式示意图

（四）工业光总线 ODN 建网注意事项

（1）在不同的使用场景下，设备对于光总线 ODN 部件的性能要求

各不相同，需要根据实际的使用要求和相关场景设计和选择满足要求的 ODN 部件，保证工业光总线网络的施工可靠性和寿命。

（2）光通道损耗是 ODN 建网最重要的网络性能指标。光功率衰减与分光器的分光比、活动连接数量、光缆长度等有关，在工程设计时，必须控制 ODN 中最大的衰减值，使其符合光头端和光终端之间的光功率预算要求。设计中应对网络中最远用户的光通道衰减进行核算，采用最坏值法进行 ODN 光通道衰减核算，检查全网的光通道损耗是否满足要求，并根据需要对网络设计方案做适当调整。

（3）机台内光缆布设过程中需要对光纤进行保护，防止光纤在机台运行过程中发生弯折、机械冲击等意外，确保布设完成后光缆满足选用光纤的最小弯曲半径。图 31 列出了不同类型单模光纤最小弯曲半径建议值。

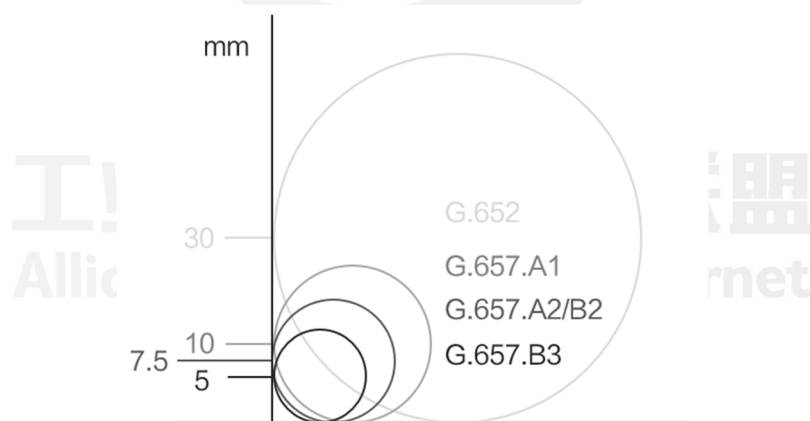


图 31 不同类型单模光纤最小弯曲半径建议值

五、为工业企业提供“自服务”能力的 ODN 运维平台

为了便于工业企业自行维护和管理 ODN 网络，工业企业可以部署独立的 ODN 运维管理系统，目前业界已经推出了为工业企业使用的“自服

务平台”以实现 ODN 的自维护和管理。“ODN 运维自服务平台”参考工业用户的使用习惯，结合智能化辅助手段，将 ODN 资源数据可视化的展现出来，并为用户提供 ODN 主动的运维能力。以下介绍 ODN 自服务运维平台的相关特性。

（一）通过 ODN 自服务平台实现可视化运维

1. 基于全方位网格划分，实现 ODN 拓扑可视化

ODN 拓扑可视化是指对 ODN 组件及组网拓扑等实现可视化运维管理。基于不同功能区域进行 ODN 组网模式规划和网络拓扑运维，结合 GIS 网格，覆盖多种功能区域，包括：生产车间、工业场地、工厂园区和办公区域等。在 GIS 网格信息视图上采用不同颜色予以区分，对 ODN 快速识别定位和运行维护。可以基于 GIS 网格内显示的光节点进行 ODN 的逐段管理，包括：OLT 汇聚节点、主干光节点、接入光节点、网关节点，不同段光纤/光缆也通过颜色区分管理。

2. 基于多维度数据处理，实现 ODN 资源可视化

对光缆分纤盒、光分路器设备和光缆接头盒、到光纤、光缆，以及在用/空闲 ODN 资源信息等方面进行多维度的数据信息提取和处理，从而支持设备、线路和链路的可视化管理。支持可视化管理体系的内容包括：

设备资源可视化：ODN 网络中部署的各类光交接箱、光缆分光分纤盒、光缆分光盒、光分路器等设备，将这些设备的型号、容量纳入可视化管理体系。此外，还包括 ODN 相关光节点信息，例如：汇聚节点 OLT 设备的 PON 口（包含制式 EPON/GPON/10G EPON/XG-PON），一级或二级光分路器（光分路器类型、一级或多级分光、分光比），以及接入节点 ONU 网关的型号、类型，端口/接口数量和类型等；

线路资源可视化：将 ODN 中布放的光纤和光缆实现数值化信息提取，使线路的光纤和光缆的类型、长度、芯数及路由等信息可以纳入可视化管理体系。

链路资源可视化，将 OLT 经过 ODN 最后到 ONU 网关的光链路路由连接信息、括在用/空闲资源信息实现可视化管理，例如将所有光纤、光分路器端口资源均标识出“在用”和“空闲”两类，使链路资源可以纳入可视化管理体系。

3. 自动化 ODN 监测，实现 ODN 状态可视

通过结合 OTDR 检测技术和 PON OLT 自身诊断功能可以检测 ODN 网络性能，以实现 ODN 状态可视化管理。具体内容包括：a) 光模块信息，例如：PON 设备光模块对应的发送光功率、接收光功率、工作电流、电压和温度等信息；b) 光纤长度及对应的损耗信息，例如：光纤/光缆长度，对应的总损耗和每公里衰减等信息；c) 光分路器分光比及对应的损耗信息，例如：分光比，对应的总损耗和每一分支的损耗等信息；d) 其他无源器件/光接头性能信息，例如：一般包括损耗，反射性能等信息。此外还可以通过光纤链路感知技术感知网络拓扑、用户与 ODN 线路连接关系的变化等实现网络拓扑和资源的实时监测更新和状态可视化。

（二）通过 ODN 自服务平台实现智慧化管理

ODN 智慧化运维是指以 ODN 信息数据作为支撑，运用大数据分析统计功能，结合智能化的辅助手段，提供更简单易用的 ODN 运行维护方法。ODN 的智慧化运维依托 ODN 管理信息数字化能力及 ODN 的运维自动监测能力。

1. ODN 管理信息数字化

工业场景下 ODN 的扩容、运维过程涉及相关资源变动，需要实时更

新并形成最新的健康档案数据库，可以提取 ODN 的资源数据和网络节点及连接关系信息并结合 AI 等技术实现 ODN 的精确化、智慧化管理。

通过采集设备信息和 ODN 产品标识实现快速的现场资源录入，并在后台进行数据管理，如图 32 所示。这里的 ODN 标识信息是指在 ODN 产品上预制了图像识别所需要的信息，包括：

- 光分纤盒箱体二维码：包含的信息能够体现设备的型号和规格，可以采用全球唯一标识。
- 光缆条码：配线缆采用双端预制缆，两端自带相同一维条码。接入缆单端预制一维条码。
- 连接信息：通过 OLT 获取与 ONU 网关的连接逻辑信息，以及通过 ODN 网络性能监测分析获取 ODN 资源的变化(例如 OTDR 监测)等手段，完成 ODN 资源状态的更新和动态管理。

ODN 设备和线缆上预置的产品信息码可以通过用户终端（如手机）安装配套的 APP 应用进行快速的拍照和精准识别，将信息传输至运维管理系统数据库，帮助装维人员快速完成 ODN 资源信息录入和精准管理。

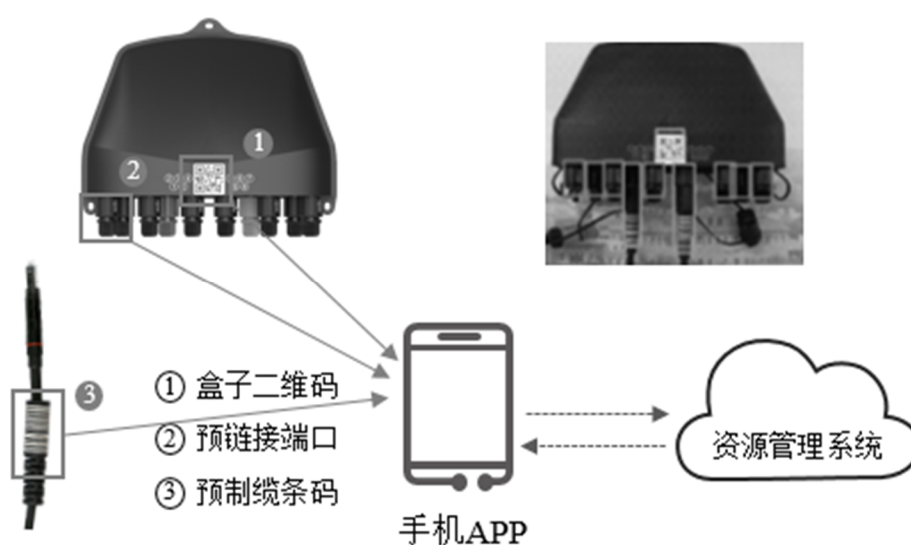


图 32 通过收集 APP 进行 ODN 资源图像识别和数据上传

采集到的 ODN 资源信息、连接信息、设备信息如 OLT 设备光节点、网关节点等的各类数据等，可以同步 GIS 信息一并录入自服务平台，在自服务平台上完成整体网络拓扑和资源信息的动态管理。

2. ODN 管理运维智慧化

在运维阶段，可借助多种监测手段（包括 PON DDM 信息查询、OTDR 在线监测等）进行 ODN 状态监测，检测数据与健康档案数据进行比对后给出检测报告，针对 ODN 故障给出预测和告警。工业光网 ODN 检测可分为人工发起一键检测，以及按策略/周期自动发起检测，并给出 ODN 质量状态及维护建议。对于存在故障的光纤光缆/段或光节点，应有故障告警，选择结合 GIS 网格的信息视图可以对故障点突出显示，例如光纤/光缆段或光节点呈红色闪烁状。故障修复后，GIS 网格信息视图中的告警状态自动消除。

此外，针对工业网络运维管理需要人工介入多、故障预知和故障症断难等问题，可以结合 AI 算法对接入 ODN 网络中的不同终端链路的光信号特征进行分析，自动识别终端的接入端口和链路拓扑信息，提高 ODN 网络的运维自动化监测和故障定界定位能力。图 33 采用智慧化 ODN 运维工具的故障定位视图，可以对 ODN 网络中的链路故障进行主动化定界，并做可视化的显示。

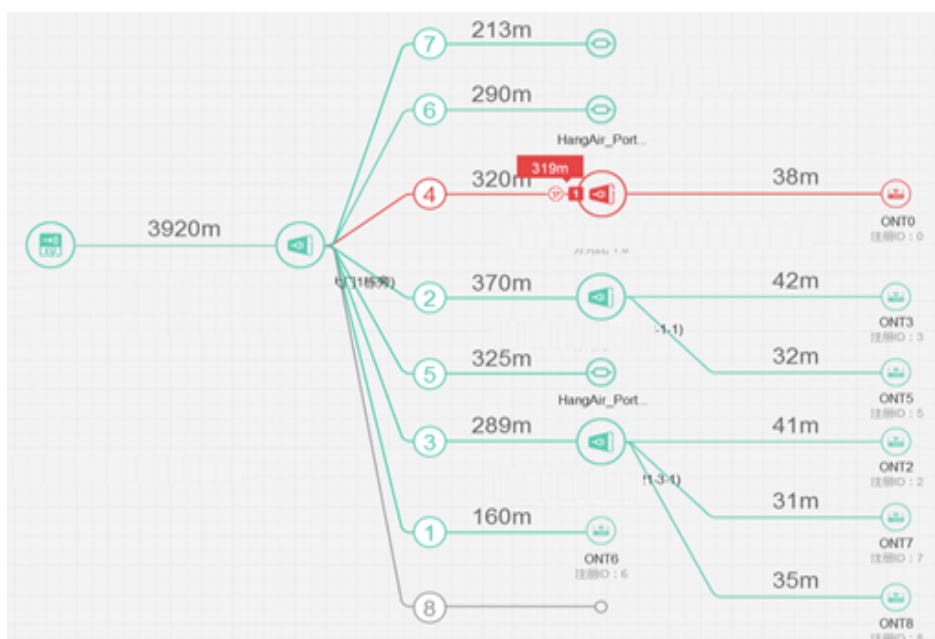


图 33 智慧化 ODN 运维工具的故障定位视图

（三）ODN 自服务平台的安全性保障

ODN 智能运维平台支持用户采用分权分域方式进行管理操作，包括：例行 ODN 测试权限、ODN 测试数据浏览权限，以及 ODN 资源录入/管理权限等，为不同用户灵活设定其操作权限。同时，系统操作日志可记录所有操作，做到异常操作可溯源、可反查。

六、总结与展望

工业是中国经济发展的重要支柱，随着制造业向智能化、数字化转型，生产不断向柔性化、精细化、低碳化的方向发展，工业光网具有巨大的发展机会，也会越来越得到业界的认可，成为主流的新一代工业互联网技术。ODN 作为工业光网的光纤连接网络，集合了光器件的无源特性和光纤的大容量承载、长距离传输等特点。随着工业光网的普及，ODN 的应用部署会逐步提高，带动 ODN 网络的进一步发展。ODN 的发展方向

包括:

- (1) 工业网络中的覆盖范围进一步扩大: 随着工业光网的应用范围逐步扩大, ODN 建网会进一步向工业生产现场网络延伸, 作为广泛的工业现场生产设备的数据承载网络, 成为覆盖工业企业现场生产控制、数据采集汇聚、办公和监控网络的全光连接载体;
- (2) ODN 建网过程逐步标准化、流程化: 为满足工业企业场景需求多样化、需求多样化, 快速建网的要求, ODN 在面向不同行业的建网过程中会逐步探索标准化的建网方法, 从而进一步提高建网效率, 降低建网成本, 同时针对不同行业开发个性化的 ODN 组件和产品, 提供场景化、流程化的快速建网能力。
- (3) 提供准确的、可预测性 ODN 智能自运维服务: 现有 ODN 运维自服务平台已经提供了 ODN 的数字化管理和可视化自服务能力, 随着 ODN 建网范围的扩大, ODN 的运维管理会逐步与多样的 AI 能力结合为工业企业提供简便的网络预测性主动运维服务, 使 ODN 运维由用户自服务运维向主动的自动化运维发展。

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

附录 1、相关网络技术简介

1.1 工业光网

工业光网是采用光网络技术互联工业企业全生产要素的组网形式，采用光纤作为传输媒质，网络具有高带宽承载、低时延传输、抗干扰等特点，属于工业互联网中有线网络。工业光网由工业 OTN、工业 PON、工业光总线等光网络技术组成。（详见 AII 发布的《工业光网白皮书》）

1.2 基于 OTDR 技术的 ODN 光链路检测技术

ODN 的 OTDR 检测方案主要包括：基于高性能 OTDR 检测方案和基于反射器的 OTDR 检测方案两种。

1. 基于高性能 OTDR 的检测方案

在 ODN 网络中，由于引入了光分路器（包括等比和不等比光分路器），导致通过分光器后的 OTDR 检测光脉冲的大幅度衰减。为此，可以通过采用高性能 OTDR 设备来实现 ODN 的链路监测和故障诊断。高性能 OTDR 设备需要具备高动态范围、精度高、盲区小等特性。OTDR 检测信号能够穿透 ODN 中各类光分路器设备，同时还要对工业 PON 系统本身的业务运行不产生影响。高性能 OTDR 设备推荐采用外置独立式 OTDR 架构。

外置独立式 OTDR 架构中主要硬件设备包括了基于 SFF-8472 的光链路监测功能的工业 PON OLT 设备/工业 PON 网关设备；基于外置独立式的 OTDR 设备、光开关、光合波器等。该架构中，ODN 的诊断测试解决方案结合了 OTDR 测试诊断能力、工业 PON 系统光链路监测能力和故障监测能力，对应的由集成在工业 PON 自服务平台中的 PON ODN 测试诊断系统提供。该测试诊断系统包括了 PON 设备监测与诊断模块，OTDR 测试与诊断模块和 OTDR 控制模块。外置 OTDR 设备通过多端口的光开关和光合

波器，连接到一个或多个 OLT 中 PON 口下，实现一或多个 OLT 的 PON ODN 的诊断和测试。

2. 基于反射器的 OTDR 检测方案

在 ODN 网络中，由于引入了光分路器（包括等比和不等比光分路器），导致通过分光器后的 OTDR 检测光脉冲的大幅度衰减。以等比分光器为例，分光后每一路引入光纤中的光信号强度降低为 $1/N$ （ N 为分光比）。同时，在分支光纤上发生的衰减事件导致的背向散射信号会与其他 $N-1$ 路分支光纤的背向散射信号叠加，分支光纤上的衰减事件很容易被淹没，为此利用传统 OTDR 技术很难检测分支光纤上的衰减事件。而采用高性能 OTDR 设备又会带来昂贵建设成本。为此，可以在 ONU 侧安装一个无源的波长选择性的反射器，通过对 OTDR 检测信号的强反射，并结合历史数据的对比，实现对分支光纤衰减等故障的有效检测和定位。典型基于反射器 OTDR 检测的应用部署如图 34 所示。基于反射器的 OTDR 检测方案主要采用设备光模块内置 OTDR 的方式，也可以采用外置独立式 OTDR 设备。

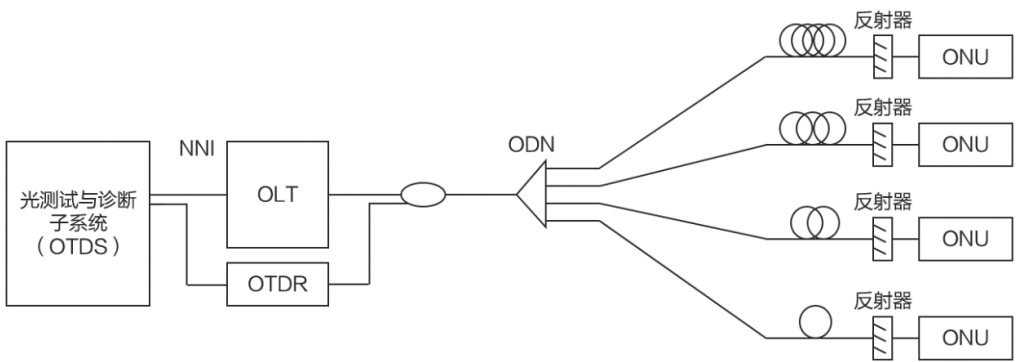


图 34 基于反射器 OTDR 检测的应用部署示意图

光模块内置 OTDR 架构中主要硬件设备包括了基于 SFF-8472 的光链路监测功能的 OLT 设备/工业 ONU 网关；OTDR 模块内置在 OLT 设备的每

个下行口的光模块。该架构中，工业光网 ODN 诊断测试的解决方案结合了 OTDR 测试诊断能力、系统光链路监测能力和故障监测能力，对应的由集成在工业 PON 自服务平台中的工业光网 ODN 测试诊断系统提供。



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

附录 2、文中提到的缩略语

AI	Artificial Intelligence	人工智能
APP	Application	应用软件
AP	Access Point	接入点
EMC	Electromagnetic Magnetic Compatibility	电磁兼容
GE	Gigabit Ethernet	吉比特以太网
GIS	Geographic Information System	地理信息系统
HMI	Human Machine Interface	人机接口软件
IO	Input/Output	输入/输出
LSZH	Low Smoke Zero Halogen	低烟无卤材料
ODF	Optical Distribution Frame	光纤配线架
ODN	Optical Distribution Network	光分配网络
OLT	Optical Line Terminal	光线路终端
ONU	Optical Network Unit	光网络单元
OTDR	Optical Time-Domain Reflectometer	光时域反射仪
P2MP	Point to Multiple Point	点到多点
PLC	Programmable Logic Controller	可编程逻辑控制器
POE	Power Over Ethernet	以太网供电
PON	Passive Optical Network	无源光纤网络
PVC	Polyvinyl Chloride	聚氯乙烯
SFP	Small Form Pluggable	小封装热拔插光模块
SPI	Serial Peripheral Interface	串行外设接口
TPU	Thermoplastic Polyurethanes	热塑性聚氨酯

附录 3、ODN 建网相关表格

(1) ODN 建网链路损耗表

序号	名称	描述	光损耗典型值 (dB)	
1	光缆 (G. 652)	1310 nm (db/km)	0.35	
		1490 nm (db/km)	0.25	
		1550 nm (db/km)	0.21	
		1270 nm (db/km)	0.4	
2	连接点	熔接点	0.1	
		适配器	0.3	
		预连接	0.3	
		FMC	0.5	
		冷接	0.2	
		MPO	0.7	
3	分光器	1: 2 等比分光器 (FBT)		3.6
		1: 4 等比分光器		7.2
		1: 8 等比分光器		10.4
		1: 16 等比分光器		13.6
		1: 32 等比分光器		16.8
		1: 64 等比分光器		20.3
		1: 9 (70/30)	级联端口 (70%)	1.9
			接入端口 (30%/8)	15.7
		1: 5 (85/15)	级联端口 (85%)	1.6
			接入端口 (15%/4)	15.5
		1: 2 不等比分光器 (95/5)	95%	0.6
			5%	13.6
		1: 2 不等比分光器 (90/10)	90%	0.8
			10%	11
		1: 2 不等比分光器 (85/15)	85%	1.1
			15%	8.9
		1: 2 不等比分光器 (70/30)	70%	1.8
			30%	5.6

备注：2:N2:N2:N 分光器的损耗在 1:N 的基础上增加 0.3dB。

(2) 光电复合缆技术参数表

功能类别	技术要求及指标
外观、尺寸和重量	1、圆形缆的直径不大于 4.3mm。蝶形缆的尺寸不大于 2.2*5.3mm。 2、圆缆的外护套厚度 $\geq 0.4\text{mm}$。蝶形缆的外护套厚度 $\geq 0.2\text{mm}$。 3、每公里的重量不得超过 28kg，每盘 1kg。（产品过重不便于搬运） 4、电缆的正极有明显的红色色条标识，能容易的区分出正负极。
电学特性	1、当 PoE 传输距离小于 150m，导线为裸铜；铜线直径不得小于 0.48mm，由 7 根 0.16mm 的铜丝组成；电阻 $\leq 140\Omega/\text{km}$（@20℃）。可以支撑 60V（DC）工作电压和 0.5A（DC）的工作电流。 2、当 PoE 传输距离在 150~600m，导线为裸铜；铜线直径不得小于 0.93mm，由 7 根 0.31mm 的铜丝组成；电阻 $\leq 34.6\Omega/\text{km}$（@20℃）。可以支撑 60V（DC）工作电压和 1.5A（DC）的工作电流。 3、当 PoE 传输距离在 600~800m，导线为无氧铜；铜线直径不得小于 1.17mm，有 7 根 0.39mm 的铜丝组成；电阻 $\leq 21\Omega/\text{km}$（@20℃）。可以支撑 60V（DC）工作电压和 2A（DC）的工作电流。
光学特性	1、采用 G.657A2 及以上的弯曲不敏感光纤； 2、光纤的衰减满足：$\leq 0.37\text{dB}/\text{km}$（@1310nm），$\leq 0.36\text{dB}/\text{km}$（@1383nm），$\leq 0.23\text{dB}/\text{km}$（@1550nm），$\leq 0.24\text{dB}/\text{km}$（@1625nm）。
可靠性	1、满足单根垂直燃烧（IEC60332-1）性能。透光率 $\geq 60\%$（IEC 61034-2），酸性气体含量 $\text{PH} \geq 4.3$（IEC-60754-2）； 2、最小静态弯曲半径不得大于 42mm，动态最小弯曲半径不得大于 84mm。 3、短期抗拉性能不得小于 150N，长期抗拉性能不得小于 80N。 4、温升不得大于 10℃（参考 IEC61156-1-4）。

附录 4、ODN 部署典型范例

东方日升新能源股份有限公司是中国光伏制造龙头企业，2021年东方日升联合华为在其建筑面积65万平方米的世界级超级工厂全面部署了全光制造网络方案，见图35。基于华为工业光网方案实现光纤到机器，长距离传输，应对400米超长光伏生产线控制设备的网络联接。可以支撑近百个AI检测机台每天500G以上的检测数据高效稳定传输。部署的光链路具备50ms链路保护倒换能力，使关键业务不掉线。同时，网络支持业务平滑升级和扩容。

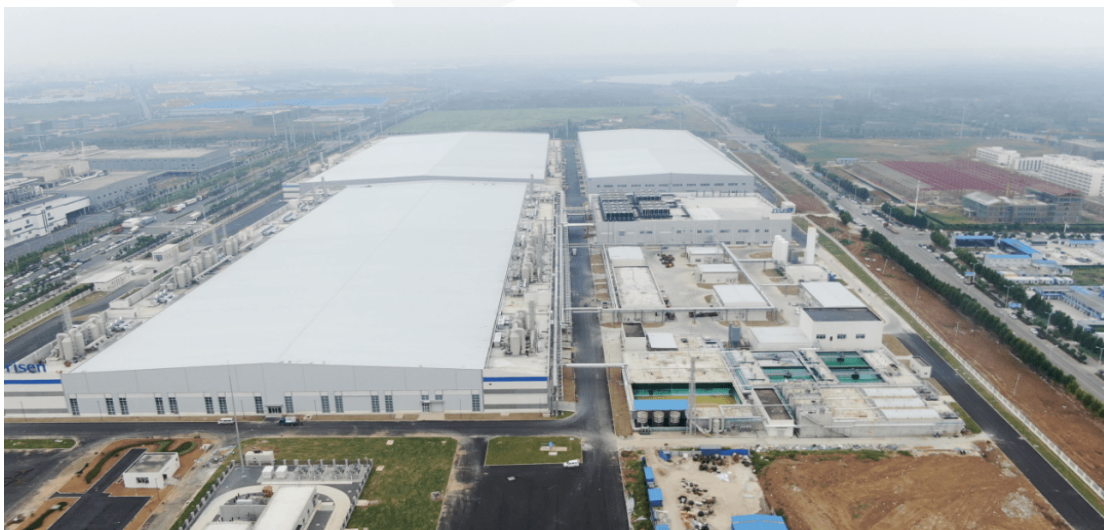


图35 东方日升滁州工厂视图

1. 项目建设背景

随着日益庞大的市场需求，促使东方日升迫切需要提升生产效率，而生产效率的提升，如今已经离不开各种数字化手段，打造“智慧工厂”已成为其迫切需要实现的目标。

2020年，东方日升与安徽省滁州市经济技术开发区签约5GW高效电池及光伏组件项目，总投资43.77亿，是总建筑面积65万平方米的世界

级超级工厂。这个工厂的建设速度非常快，同年12月开工，半年建成投产。滁州工厂是东方日升新扩建的组件和电池工厂，目标是建成无人智慧工厂，提升生产效率，成为行业标杆，2021年6月底完工交付。滁州工厂大力投入信息化，各个模块都要求最先进的方案与技术，网络上采用F5G全光制造网络方案，要求光纤直达机器，助力产线7x24小时持续高效作业。

东方日升滁州生产基地致力打造光伏制造行业无人工厂标杆。基地光伏组件和光伏电池厂房（10条产线）新建网络需求，产线长度约700-800米，网络覆盖电池车间、组件车间等场景，单条产线需部署150-350个点位。同时，东方日升滁州工厂的检测环节已经大规模应用了AI设备。在产品检测环节，每一个成品电路板都会进行拍照，近百个检测机台每天产生500G以上的检测数据，通过AI设备来进行智能筛选和识别，这同样离不开高速稳定的网络支撑。

滁州工厂是作为一个标杆工厂，在各种硬件和智慧配套上，都采用了比较超前的部署，网络基础设施需要满足智慧工厂对于高速网络传输的要求。此外光伏行业生产线都非常长，一条光伏生产线长度大概在几百米左右，甚至更长，这成为了网络部署的一个挑战。同时，电池片一天满载的设计产能是126万片，所以对网络稳定性要求非常高，出现问题的时候能够及时诊断是非常重要的。通过部署工业光网，在光纤链路或者端口故障时，可实现50毫秒内的故障恢复，保证关键业务不掉线，生产流程稳定开展。

2. 项目建设方案

东方日升滁州光伏制造工厂网络解决方案组网结构如图36所示。生产网、监控网、办公和无线网全部采用了全光网络架构。

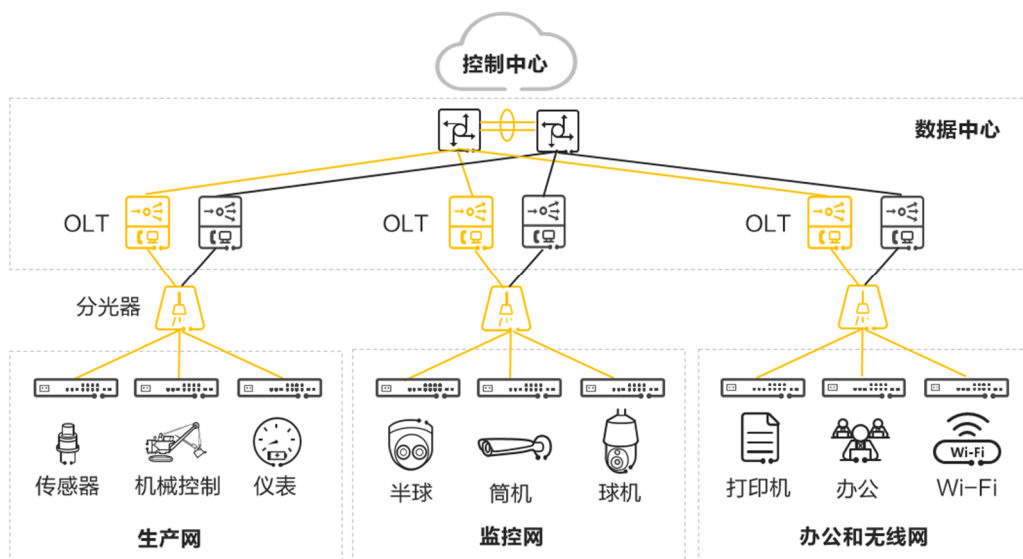


图36：东方日升全光连接光伏工厂组网架构

（1）设备方案

滁州基地生产网根据业务需求配置4台OLT，光终端使用面板式ONU，安装在86盒中，安装方式和车间传统网口面板类似；视频安防监控网采用了2台OLT，采用4口ONU，带有POE功能；办公环境的有线及无线设备接入采用同一套OLT设备进行承载，通过一套光纤链路对各自业务进行了网络隔离。办公网供电点位较多，接入节点的ONU设备采用4口不带POE的ONU，无线网络使用4口带POE的ONU。

（2）ODN部署方案

项目ODN部署重点在工厂、车间区域。其中面向生产和办公网络采用纯光连接方案；面向视频监控网络采用光电混合连接方案，以满足监控网络中摄像头的供电问题，供电距离约800米。不同工作区域的ODN拓扑均采用树形拓扑，并部署TypeB链路保护，实现对OLT的下行接口、主干段光纤的双路冗余保护。其ODN分光模式采用一级分光。从中心汇聚机房OLT分出的主干光缆通过ODF配线架分出多跟光纤连接至楼层弱电室的配线柜，分光器配置在配线柜中，在配线柜中通过分光器将分散在各

个业务场景的ONU设备连接起来（包括一部分在配线柜中的ONU），形成整个P2MP的ODN网络，如图37所示：

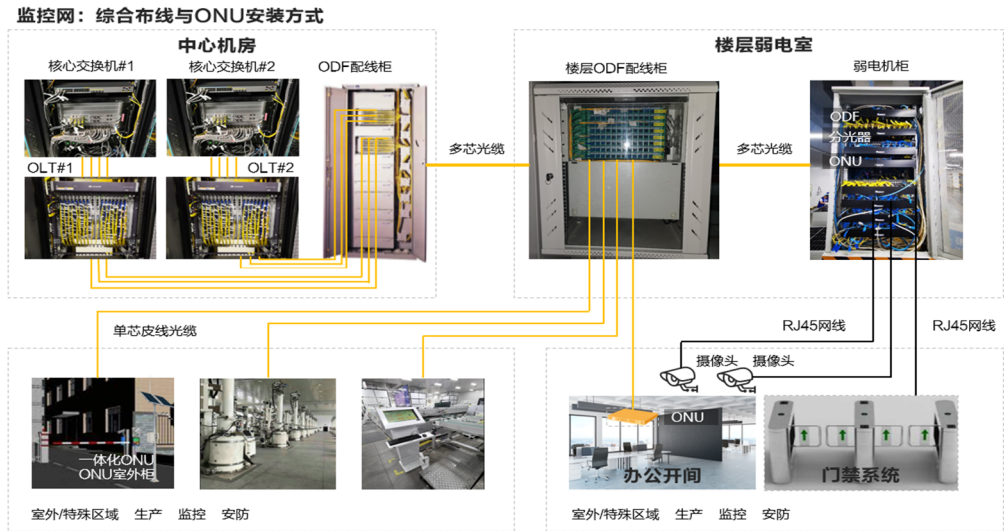


图37 东方日升滁州工厂ODN组网示意图

方案中的ODN网络支持长距通信，OLT到ONU打破了传统以太网线的100m距离限制，实现多点500M以上的长距通信。

由于ODN采用无源分光器，替代传统网络的有源汇聚交换机，免取电、无需弱电机房配套设施，节省人力和物力投入。

项目方案仅采用一次分光的结构做到设备全部链接，支持光纤到桌面、到机器，通过ONU单元承载所有信息点业务，由于采用了扁平化的网络，降低了端到端的传输时延。

（3）ODN网络的在线管理方案

项目中的ODN管理运维采用了网络管理软件，通过一套网管把生产、视频安防监控、办公和无线业务网络统一管理起来；通过网管远程批量配置光终端，进行业务的自动下发和自动开通；通过网络管理软件自动生成网络拓扑图，可结合车间内的地图来呈现，可快速定位到设备的具体位置。维护人力减少到原三分之一。

通过华为**ODN自服务平台**对ONU设备进行预配置，做到即插即通，免调试，零配置上线，提高了部署效率，且可以在管理界面中增加地图信息，标注制造工厂信息点位置，做到精准运维。此外，管理模式采用**分权分域管理**，支持对管理权限的划分和控制，能对设备结点、业务数据分区域管理，并能对不同区域划分具有不同管理和操作权限的用户。

3. 项目收益

东方日升滁州基地使用全光网络后：

（1）车间内不需再部署网络箱，节省车间的空间占用和设备投入；

（2）全光ODN网络在未来带宽升级时可利旧线缆系统，避免基础网络的重复建设和改造；

（3）网络运维更加简单和高效，整个网络通过一个平台即可完成业务的配置下发和网络的状态监视，节省了维护成本。

（4）网络本身的可靠性得到了提升。由于ODN网络的抗干扰、拓扑简单的特点，可有效缓解案例中有电磁干扰、高温、强震、设备密集等问题。

（5）传统交换机网络会有大量汇聚交换和接入交换设备放在弱电间，不仅占用空间，且故障点较多，同时存在一定的消防隐患。而部署的ODN网络由无源器件组成，减少了网络有源故障点，降低了总体维护成本。