

华为技术有限公司  
地址：深圳市龙岗区坂田华为总部办公楼  
邮编：518129  
网址：<https://www.huawei.com>  
客户服务邮箱：[support@huawei.com](mailto:support@huawei.com)  
客户服务电话：4008302118



版权所有©山东能源集团、华为技术有限公司2024。保留一切权利。  
本报告中所涉及的图片、表格及文字内容的版权归山东能源集团、华为技术有限公司所有。其中部分数据在标注有来源的情况下，版权归属原数据公司所有。本白皮书取得的部分数据来源于公开资料，如有涉及版权纠纷问题，请及时联络我们。  
任何机构，个人在引用本白皮书的数据或转载白皮书相关内容时，需注明来源。

商标声明  
和其他华为商标均为华为技术有限公司的商标。  
本档提及的其他所有商标或注册商标，由各自的所有人拥有。

注意  
您购买的产品、服务或特性等应受华为公司商业合同和条款的约束，本档中描述的全部或部分产品、服务或特性可能不在您的购买或使用范围之内。除非合同另有约定，华为公司对本文档内容不做任何明示或暗示的声明或保证。  
由于产品版本升级或其他原因，本文档内容会不定期进行更新。除非另有约定，本文档仅作为使用指导，本文档中的所有陈述、信息和建议不构成任何明示或暗示的担保。

# 井下新一代网络技术白皮书

山东能源集团有限公司  
华为技术有限公司





# 目录 CONTENTS

---

<b>编写说明</b>	01
<b>引言</b>	02
<b>1.煤矿智能化业务发展对通信网络的要求</b>	<b>03</b>
1.1 煤矿智能化业务发展概况	03
1.2 煤矿智能化对通信网络的要求	05
<b>2.煤矿井下网络的现状和挑战</b>	<b>06</b>
2.1 煤矿井下网络的现状	06
2.2 煤矿井下网络的挑战	07
<b>3.煤矿井下新一代网络解决方案</b>	<b>08</b>
3.1 煤矿井下新一代网络定义	08
3.2 煤矿井下新一代网络架构	08
3.3 煤矿井下新一代网络关键特征	09
3.4 煤矿井下新一代网络关键技术	10
<b>4.基于智能IP技术的井下新一代网络优势</b>	<b>17</b>
<b>5.煤矿井下新一代网络应用场景</b>	<b>18</b>
<b>6.煤矿井下新一代网络实践</b>	<b>20</b>
6.1 李楼煤业有限公司井下新一代网络实践	20
<b>7.总结与展望</b>	<b>25</b>
<b>8.缩略语</b>	<b>26</b>
<b>9.相关规范</b>	<b>27</b>

## 编写说明

本白皮书在撰写过程中得到了多家单位的大力支持，在此特别感谢以下顾问专家、著作单位和参编人员。

### 顾问专家：

孙继平

### 著作单位：

山东能源集团有限公司

华为技术有限公司

### 参编人员：

山东能源集团有限公司：

王立才、徐加利、胡立全、侯双双、张硕、杨木易、汪洋、李奇蓬、崔希国、杜晓斌

华为技术有限公司：

蒋旺成、赵志鹏、程剑、古锐、杨新峰、陈文丰、杨宗莹、孙建刚、刘英彬、余建东、项凌、宋双、

王思生、孙志勇、田哲恺、王萍萍、罗武军、杜俊杰

## 引言

2020年2月26日，国家发展改革委、国家能源局、应急管理部、国家煤矿安监局、工业和信息化部、财政部、科技部、教育部等八部门联合印发了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》（发改能源〔2020〕283号），明确了煤矿智能化发展的阶段性目标：2021年，建成多种类型、不同模式的智能化示范煤矿；2025年，大型煤矿和灾害严重煤矿基本实现智能化，形成煤矿智能化建设技术规范 and 标准体系；2035年，各类煤矿基本实现智能化，建成智能感知、智能决策、自动执行的煤矿智能化体系。因此，加快推进煤矿智能化建设是保障煤炭安全稳定供应的关键举措，是实现煤炭行业高质量发展的必由之路。煤炭行业正全面贯彻党的二十大精神，紧紧抓住当前煤矿智能化建设的历史机遇和有利局面，强化责任担当，细化政策措施，以开拓进取、奋发有为的精神状态，全力推进煤矿智能化建设。

山东能源集团有限公司（以下简称“山东能源集团”）深入贯彻落实党中央、国务院“四个革命、一个合作”能源安全战略，大力实施煤矿智能化建设，加快推进机械化换人、自动化减人、智能化少人，技术装备、创新能力、管理水平得到明显提升。目前，山东能源集团矿井智能化生产水平居行业前列，9处矿井入选首批国家级智能化示范矿井并已全面通过验收。

山东能源集团和华为技术有限公司成立联合创新项目组，针对井下新一代网络的建设和发展方向进行了深入探索和实践。此白皮书基于先进的网络信息通信技术在山东能源集团的创新成果，阐述并总结了煤矿井下网络的网络架构、网络优势及发展方向。目的是进一步深化先进网络技术在煤矿领域的应用，帮助煤矿行业实现网络的换代升级，助推煤矿智能化发展。



# 煤矿智能化业务发展 对通信网络的要求

## ▶ 1.1 煤矿智能化业务发展概况

智能化煤矿建设开启了煤炭行业全面创新和技术变革的新时代，煤矿井下通信网络是煤矿智能化建设的基础。随着煤炭行业向智能化发展，煤矿随探随掘或超前探测、复杂条件智能开采、煤矿机器人、辅助设备远程操控、安全隐患监测预警等智能化应用快速发展，对工业网络的可靠性、高带宽、低延时、简单运维等方面提出了更高的要求。

山东能源集团党委书记、董事长李伟在其署名文章《推进企业绿色低碳转型和高质量发展》中表示，煤矿智能化发展，需要企业不断推进研发创新，聚焦主导产业，“强基补链”“一业一策”提升产业创新能力，攻克一批关键核心技术。做到智能开采技术领先行业，引领煤炭行业第四次技术革命。在煤矿智能化建设过程中，华为希望将先进的ICT技术与煤矿行业深度融合，发挥各自优势，助力煤矿行业数字化和智能化转型，实现“少人、安全、增效”。围绕整个目标，行业也实践了一批智能化应用，这包括：

### 高清视频类应用

要把生产控制从井下移到井上，需要能够在井上对于井下的各个工作场景看得清、看得全，尤其是采煤工作面。通过部署高清摄像头，结合全景视频拼接和人工智能算法，可为井下集控中心和井上调度中心的工作人员真实地还原综采工作面的作业现场，较好地实现对综采工作面远程监控和操控，向井下少人无人的目标迈进重要一步。

### 安全监测类应用

为保证井下安全、高效的生产作业，需要对煤矿生产过程中的各项环境指标进行实时的监测，例如瓦斯浓度、温度、湿度等，各项数据通过可靠的网络回传至数据管理控制中心，为管理人员提供决策支持，提高煤矿井下作业安全性，帮助煤矿企业优化生产和管理流程。

### 无线通讯类应用

井下存在大量的移动场景，包括综采面、掘进面、机器人巡检、基于智能单兵装备的巡检等，部分矿井已部署井下Wi-Fi或5G（5th Generation Mobile Communication，第五代移动通信系统，简称5G）等无线通信网络，满足移动作业场景的需求。如：综采面和掘进面基于5G网络低时延、高可靠的特性实现装备的远程操作；巡检机器人代替人工在井下实现硐室巷道巡检视频、环境数据的实时回传；工人借助信息化矿灯，在井下与井上指挥中心随时随地通讯，实现井上井下面对面，工作更安全高效。

### 远程控制类应用

提升生产安全和实现井下无人少人是煤矿智能化的目标，传统煤矿采煤工作面设备噪声大、粉尘浓度高、事故频发，人员健康受到严重威胁。通过先进的ICT网络技术，将人员从工作面解放出来，实现采掘作业远程控制，提升生产的安全性。此外，还可通过远程操控机器人，实现对井下硐室、巷道区域的远程巡检。



## ► 1.2 煤矿智能化对通信网络的要求

进一步减少煤矿井下作业人员数量，是煤矿安全生产和煤矿智能化发展的必然选择。煤矿井下设备无人操作、地面远程控制，需要将煤矿井下视频、音频、传感器和执行器等数据实时、准确地传输至地面调度控制中心，并将控制命令实时、准确地传输至被控设备。承载视频、远控等数据上传和下达的新一代井下信息网络，必须满足大带宽、低时延、高可靠等要求：

### (1) 传输带宽大

以基于全景视频拼接技术的远控采煤为例，长度300m的综采工作面大约需要200台防爆摄像机，每台4K高清矿用摄像机数据压缩后平均传输带宽为20Mbit/s，1个综采工作面平均需要传输带宽约4Gbit/s。此外，煤矿井下有多个采掘工作面，巷道长度大（巷道累计长度达几十千米），机电硐室多，机电设备和矿用车辆多，需要大量的矿用摄像机、传感器和执行器。因此，井下网络所需的传输带宽将超过万兆。

### (2) 传输时延小

传输时延是实现地面远程实时控制的关键，井下网络传输时延越小越好。为满足地面远程实时控制的需要，井下网络传输时延应不大于20ms。

### (3) 可靠性高

可靠性是实现地面远程可靠控制的关键，井下网络可靠性越高越好，支撑远控的网络可靠性应大于99.99%。

### (4) 多业务综合承载

煤矿井下有安全监测、高清视频、无线通讯、远程控制等业务，对传输带宽、实时性、可靠性有不同的要求。传统不同要求的业务采用独立网络承载带来井下网络节点多、布线复杂、运维困难等问题，实现多业务综合承载是未来煤矿智能化网络发展的趋势。

## 02

# 煤矿井下网络的现状和挑战

## ► 2.1 煤矿井下网络的现状

目前煤矿井下网络包括矿用有线调度通信网、煤矿安全监测监控网和工业以太网，如煤矿井下使用5G，还需要增加5G通信网，部分煤矿因为工业视频抢占网络带宽影响其他业务，也会专门建设工业视频网。除有线调度通信网之外，其他网络普遍采用以太网技术。

### 矿用有线调度通信网

矿用有线调度通信网主要传输矿用有线调度通信系统的语音信号，一般由调度台、语音通信交换机、安全栅、本质安全防爆固定电话机、电缆等组成，具备不需要电源、高可靠性等优点，即使瓦斯超限等造成停电，系统依然能够正常工作，因此，矿用有线调度通信系统兼做矿井应急通信系统，要求必须独立组网。

### 煤矿安全监测监控网

安全监测监控网络承载安全监控系统，实现对煤矿安全生产的总体监控。当前安监网络设备以工业交换机为主，采用二层VLAN方案，将井下各种传感器数据上送到安全监控平台，进行安全监测。因为涉及生产安全，要求独立组网，保障监控数据不受视频等大流量业务和网络风暴的影响。

### 工业以太网

工业以太网也叫工业环网，承载井下定位、Wi-Fi、语音、图像和监控信号。随着智能化业务需求越来越多，相应的应用也在逐步扩展，井下摄像头部署将大幅增加，原有千兆网络的带宽逐渐成为瓶颈。目前许多大中型煤矿开始部署万兆环网，综合承载井下各类数据。

### 5G通信网

5G通信网承载井下综采面和掘进面等移动数据业务，包括综采面远控、工作面视频回传、机器人巡检和手机通信等。基于5G网络大带宽、低时延、高可靠、广连接的特点，已在部分中大型煤矿得到应用。



## 工业视频网

因为视频带宽较大，并且可能会有突发，影响其他业务，许多煤矿采用独立建设工业视频网的方式，避免视频业务突发对其他业务造成干扰，保障控制和定位类业务的高可靠性。

## ► 2.2 煤矿井下网络的挑战

目前，高清视频应用、无线通讯应用、远程控制应用等智能化应用在煤矿的规模部署，一方面极大地改善了井下矿工的工作环境，提升了安全性，另一方面也给现有的井下网络带来巨大挑战，主要包括：

**井下多网林立：**井下视频监控、生产控制、安全监控等不同业务系统采用不同的以太工业环网承载，造成井下多网林立，网络重复建设。煤矿井下现网交换机设备不支持时间同步、网络切片等关键特性，不支持5G承载，需要单独建设5G网络，导致井下网络越来越多，网络建设和维护成本高。

**网络风暴及业务相互影响：**现有网络主要为传统万兆环网，采用二层交换技术，通过VLAN进行网络隔离与管理，对广播风暴缺少有效抑制，易由于物理环路产生广播风暴，导致大范围网络通讯中断，且问题难以快速定位，只能通过人工插拔端口进行逐级排查，故障排除时间长。另外VLAN网络的业务相互抢占带宽、相互影响，特别是大量工业视频业务的增加，网络负载率不断升高，网络延时和抖动增大，导致其他业务产生卡顿、丢包等情况。

**网络带宽不足：**井下环网大多只有1Gbit/s或10Gbit/s，而人工智能等智能化应用需要井下综采面和掘进面高清摄像头的规模部署，接入侧网络缺乏万兆本安设备，环网带宽的压力不断增大。

**无线覆盖不全：**工作面光纤易折损，需要部署5G和Wi-Fi等无线网络满足智能化装备数据可靠传输。当前部分煤矿井下部署的基于Wi-Fi 4或Wi-Fi 5制式的无线网络，存在带宽小、时延大、覆盖不全等问题，无法满足巡检机器人、信息化矿灯等移动类智能应用需求。

**网络运维困难：**智能化应用的增加推动网络规模持续扩张，传统网络管理手段单一，网络出现故障往往需要运维人员下井排查故障，故障定位时间以小时计，甚至需要更长时间才能排除问题，故障处理期间严重制约煤炭生产效率。

## 03

## 煤矿井下新一代网络解决方案

### ► 3.1 煤矿井下新一代网络定义

基于煤矿智能化业务发展需求，结合煤矿井下网络的现状，山东能源集团和华为公司在李楼煤业和南屯煤矿实践的基础上，共同推出了煤矿井下新一代网络解决方案。煤矿井下新一代网络是采用新一代网络技术的煤矿综合承载网络，基于“SDN（软件定义网络）+切片”架构，通过“IPv6+”技术，实现“一网打尽、一切到底”的目标。煤矿井下新一代网络可以统一承载井下工业视频、工作面远控、人员定位、5G通信、安全监测等智能化业务，达到数据统一承载、业务互不干扰、带宽灵活扩容、故障快速处置的效果，满足煤矿智能化建设趋势下，综合管控、工作面远控、巡检机器人、人工智能等智能化应用对井下网络大带宽、低时延、高可靠、易运维的要求。

### ► 3.2 煤矿井下新一代网络架构

煤矿井下新一代网络基于“SDN（软件定义网络）+切片”架构进行设计，整体网络架构如下图5-1所示。煤矿井下新一代网络架构分为三层：井上核心、井下骨干、井下接入。

#### 井上核心

矿井数据模型主要是南北向流量，井下生产网主干环在井上部署两台核心节点，承载井下数据和井上控制业务。同时旁挂AC（Access Controller，接入控制器），对井下AP（Access Point，接入点）做Wi-Fi网络集中控制。

#### 井下主干

主干层由主干路由器组成，承载井下所有的流量，利用切片技术，建立物理隔离的网络通道，实现不同业务之间无干扰稳定运行。

### 井下接入

由接入路由器和AP组成，提供井下终端有线和无线业务的接入，建议成环，提高网络可靠性。其中，如果AP数量较多，可以由交换机进行汇聚，再接入环网。接入路由器支持切片，实现端到端业务隔离。

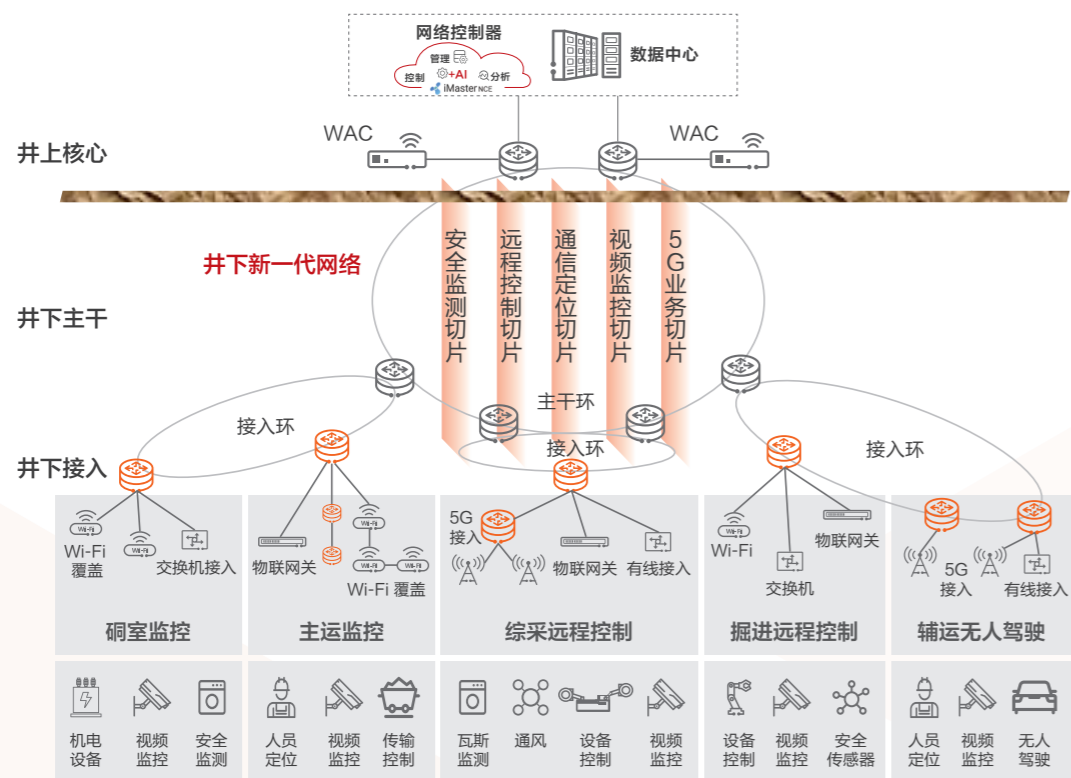


图3-1 煤矿井下新一代网络架构

## 3.3 煤矿井下新一代网络关键特征

煤矿井下新一代网络具备一网承载、超宽覆盖、智能运维、专网专用、网络可靠五大特征：

### 1、一网承载：多业务统一承载，一网打尽，一切到底

网络采用路由器建设，环网带宽可平滑升级到五万兆或十万兆，在接入层工作面现场采用万兆本安路由器，满足井下工业视频、巡检机器人、综采面远控、安全监测、5G等多业务发展的要求。新一代网络支持切片技术，针对不同类型的业务，划分不同的切片，切片间进行网络隔离，业务互不干扰，实现业务“一网打尽、一切到底”的目标，大幅度简化网络架构和网络运维。业务承载采用EVPN（Ethernet Virtual Private Network，以太网虚拟专用网）+SRv6（Segment Routing over IPv6，基于IPv6转发平面的分段路由）方

式，IPv4和IPv6终端可统一承载，满足点对点、点对多点、多点对多点等不同业务承载的需求。

### 2、超宽覆盖：承载无线网络，满足多种移动业务接入需求

井下新一代网络支持5G和Wi-Fi无线网络承载，在采掘等工作面可部署5G网络，满足远控业务要求，为井下工作面远程控制实现无人少人奠定网络基础。在巷道、硐室等区域，基于Wi-Fi 6技术，可实现井下无线全覆盖，支持单基站吞吐率>100Mbps，覆盖半径不小于400米，并与UWB同覆盖，实现无线数据传输和人员高精度定位同站址、共传输，提高部署和维护效率。

### 3、智能运维：实现网络质量可视、可管、可控

运维中心部署SDN（Software Defined Network，软件定义网络）网络控制器，可对切片配置自动化部署，切片拓扑可视，并动态调整各切片网络带宽。基于SDN管控析融合架构，具备网络设备统一管理和拓扑呈现能力，实现业务部署和运维的自动化。基于IFIT（In-situ Flow Information Telemetry，随流检测）业务质量监测技术，远程控制等重要业务可实时监测时延、抖动、丢包率等指标。

### 4、专片专用：保障安监网络免干扰、高可靠

针对安全监测监控网络的高可靠要求，需要与视频监控网络隔离避免干扰，可以部署单独的网络切片，保障视频等其他业务故障或流量突发，对安全监测监控网络切片无影响。

### 5、网络可靠：避免广播风暴，故障快速定位

基于SRv6路由技术，流量基于路由转发，避免广播风暴影响；基于网络可靠性技术，井下网络出现链路故障时，可实现自动检测和快速倒换备份网络，业务不中断；基于随流检测技术，可以看到网络中哪个位置出现网络中断、网络丢包和时延增大等问题，及时调整业务路径，保障业务可靠性。

## 3.4 煤矿井下新一代网络关键技术

为满足煤矿智能化业务的统一承载要求，煤矿井下新一代网络支持网络切片技术、SRv6技术、时钟同步技术、网络高可靠技术、随流检测技术、Wi-Fi 6远距离覆盖技术等关键技术，相对传统以太环网技术实现了技术升级，解决当前井下多网林立、业务质量难以保证、运维困难、无线网络覆盖不全等问题。

业务需求	关键技术	井下新一代网络	传统以太环网
工业视频/人工智能	网络切片技术、网络高可靠技术、随流检测技术	50/100G大带宽，切片隔离不干扰，智能运维故障定位快	10G带宽，VLAN隔离视频抢占带宽干扰其他业务，逐条排查故障
工作面远控	网络切片技术、SRv6技术、时钟同步技术、网络高可靠技术、随流检测技术	切片网络隔离不干扰，网络丢包可视化，智能运维故障定位快，高精时钟同步保障时延	共用万兆环网或单独建网，网络故障靠业务上报，时延不可控
工作面远控	网络切片技术、Wi-Fi 6远距离覆盖技术	切片网络不受其他业务干扰，Wi-Fi 与 UWB实现同覆盖	共用万兆环网，Wi-Fi覆盖距离短，覆盖不全
安全监测监控系统	网络切片技术、SRv6技术、网络高可靠技术、随流检测技术	切片网络不受其他业务干扰，网络丢包可视化，智能运维故障定位快	单独组网，故障逐条排查时间长
5G通信	网络切片技术、SRv6技术、时钟同步技术、网络高可靠技术、随流检测技术	50/100G大带宽，切片隔离不干扰，网络丢包可视化，智能运维故障定位快，高精时钟同步保障时延	不支持高精时钟同步，无法承载5G，需要单独建设5G承载网络

下面，我们详细介绍一下井下新一代网络解决方案的各项关键技术。

### 网络切片技术

煤矿井下网络需要承载远控、视频、定位、通信等业务，各业务需要互不干扰，从而实现一张网承载多种业务。网络切片，是通过网络资源预留的方式，实现业务隔离的一种网络虚拟化技术。在煤矿井下网络引入网络切片技术，可以保障不同业务互相隔离，避免视频等大带宽业务对远控和安监等高可靠业务造成影响。如果把通信网络类比为交通系统，数据包是“车辆”，网络则是“道路”。随着车辆的增多，城市道路变得拥堵不堪，为了缓解交通拥堵，交通部门需要根据不同的车辆类型、运营方式进行车道划分和车流量管理，比如设置快速公交通道、非机动车专用通道等。网络亦是如此，通信网络对网络实行“车道”划分和流量管理，即网络切片的设计原则。

切片网络通过在一个物理网络上配置形成多个具有独立管理、独立控制、独立转发的互相隔离的虚拟网络，保障业务互不影响。网络资源的隔离，包含管理面、控制面和数据面三个方面的隔离。

**管理面隔离：**包括独立的切片网络管理、独立分片拓扑、业务管理配置、性能监控、告警和日志、故障处理等。

**控制面隔离：**包括独享的协议信令处理CPU资源、IP（Internet Protocol，网际互连协议）/MPLS（Multiprotocol Label Switching，多协议标签交换）协议配置、SDN控制器、隔离的转发表项等。

**数据面隔离：**包括带宽、拓扑和节点。

- 带宽：链路的带宽分配，可以基于物理接口、逻辑子接口、FlexE（Flexible Ethernet，灵活以太网）接口等进行带宽保证。
- 拓扑：每个网络切片都有自己的节点、链路视图，切片也能感知诸如链路故障和转发环路等事件，网络切片能创建与物理拓扑解耦的客户化的切片逻辑拓扑。
- 节点：节点资源是包含管理、控制、数据资源的一个整体，从硬件资源的角度可以分为单板、端口、子接口、端口组等资源形式。

通过部署端到端切片网络，可以实现不同业务统一承载，并对不同业务进行精细化管理，如图3-2所示。在综采面远控场景，从业务角度来看，既需要部署大量摄像头做监控，又需要保障远控指令不受视频突发的影响，两个业务一个是高带宽、高突发诉求，另一个是低时延、高可靠诉求。通过在一张网上部署两个切片，一个承载视频监控业务，另一个承载采煤远控业务，可实现二者业务流量转发过程中物理隔离，视频监控的流量突发，不会对远控业务产生影响。

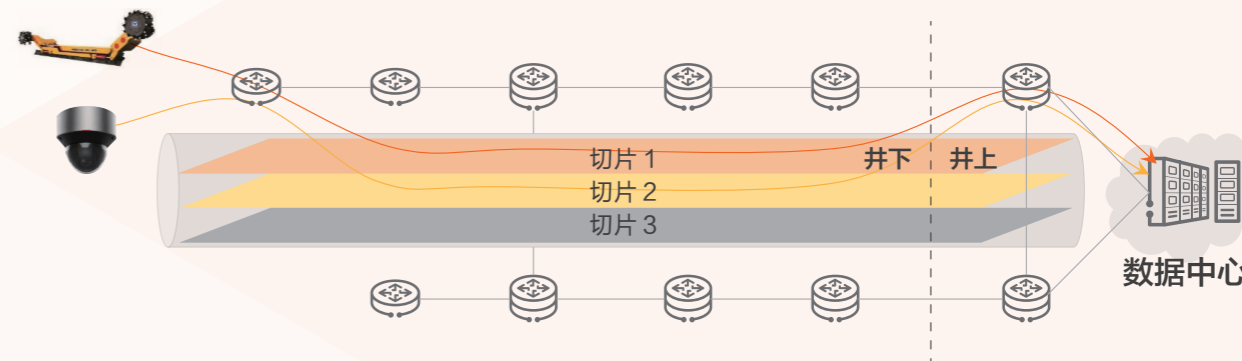


图3-2 网络切片技术应用



### SRv6 (Segment Routing over IPv6) 技术

煤矿井下环境恶劣，光纤在部署和运行中容易发生故障，比如井下安装拉扯、车辆刮蹭等情况可能造成光纤损伤。当链路质量差，时断时续时，会严重影响远控业务的可靠性。

SRv6技术可以有效解决以上问题。SRv6是指SR (Segment Routing, 段路由) 转发层使用IPv6封装格式的技术，它为每个节点或链路分配段 (Segment)，头节点把这些段组合起来形成“段序列 (Segment 路径)”，指引报文按照“段序列”进行转发，从而实现网络的编程能力，可以指定转发路径、优化传输时延。

SRv6具有三大优势，包括自定义、高可靠、可扩展：

- 自定义：面向业务的网络可编程，段ID不仅可以指示网元节点或链路，还可以指示业务功能，从而可以基于业务定义转发行为；
- 高可靠：SRv6的TI-LFA (Topology-Independent Loop-Free Alternate, 拓扑无关无环路备份) 机制，实现IGP (Interior Gateway Protocol, 内部网关协议) 域内任意拓扑任意故障的本地快速重路由，提供小于50ms的故障恢复性能；

新一代网络除了应提供链路中断快速倒换能力外，当井下光纤损伤，可靠性较低时，对于重要的业务，比如采煤机、掘进机、液压支架等设备的远程控制，应该有更智能的手段去保障。新一代网络通过SDN控制器基于SRv6技术可以定义远控业务的主备路径，当检测到业务通信质量开始劣化，SDN控制器基于SRv6定义的路由策略及时调整业务路径，保证远控类业务的可靠性和连续性。如图3-3所示。

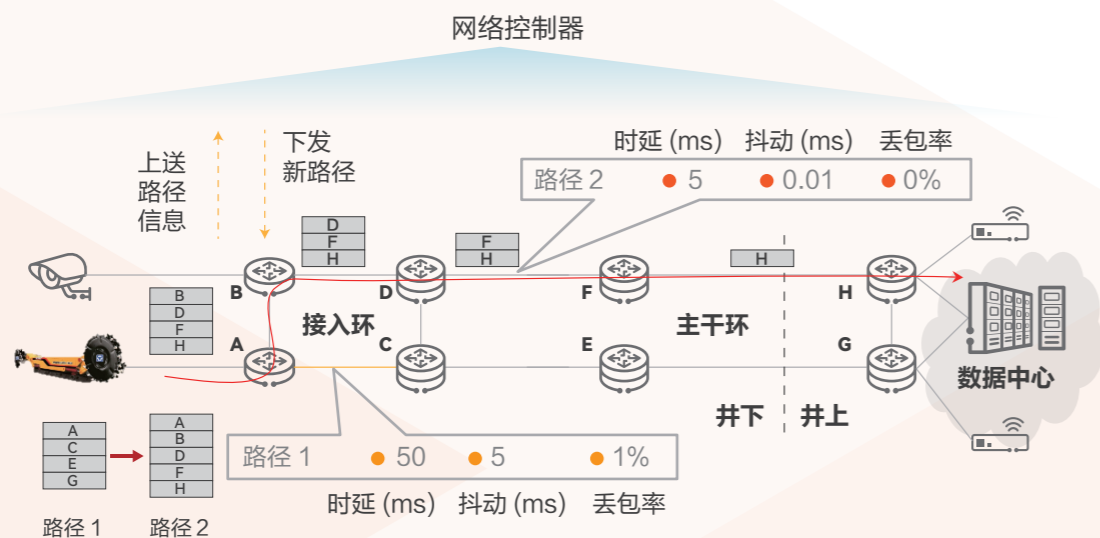


图3-3 SRv6路径调优

### 高精时钟同步技术

数据通信网络本身并不要求时钟/时间的同步，但是4G/5G基站对时钟/时间同步有要求。无线承载网络需要实现无线基站之间的时钟同步，不同基站之间的频率必须同步在一定精度之内，否则终端进行基站切换时会出现掉线。

因此，井下网络承载5G业务，需要具备高精度时钟同步能力。目前高精度时间同步采用IEEE 1588v2解决方案，IEEE 1588v2是网络测量和控制系统的精密时钟同步协议标准，定义了以太网络的PTP(精密时钟同步)协议，实现频率同步和时间同步，满足5G承载端到端300ns同步精度的目标，设备同步精度达到±30ns。

高精度时间满足5G、LTE等业务的需求。外部时钟源可通过设置优先级形成保护。设备会根据优先级、跳数等自动选择跟踪源，跟踪源变化时，能自动切换到最优源跟踪。200ns级单网元倒换可保证时钟高可靠性。同时网络控制器提供图形化时钟管理，实现业务快速部署。

### 网络高可靠技术

网络的高可靠性技术包含多个层面的技术组合，分别为故障检测、网络级可靠性保障、业务级可靠性保障，满足煤矿对各种业务的可靠性需求。

**故障检测：**采用BFD (双向转发检测) 技术，检测周期为3\*10ms (可配置3\*3.3ms检测周期)。当监测到网络故障时，通过TI-LFA (拓扑无关无环路备份) /主备路径技术对网络进行保护，可以满足端到端快速倒换要求。

**网络级可靠性保障：**井下新一代网络提供网络链路故障保护倒换能力，实现故障场景下业务快速自愈。

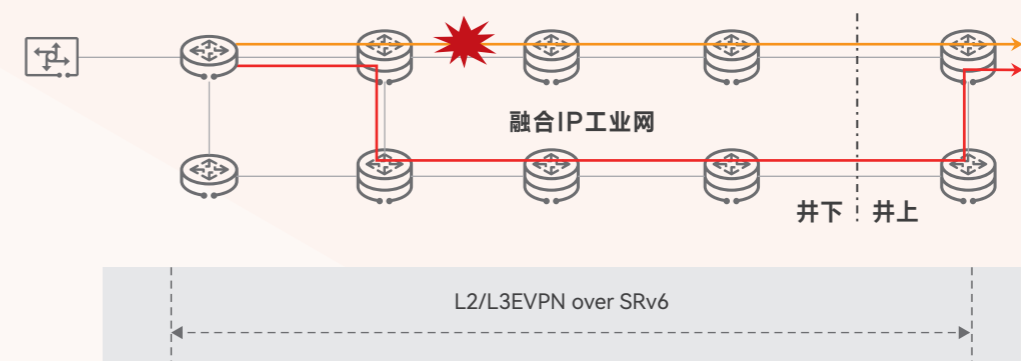


图3-4 网络故障切换示例

**业务可靠性保障：**采用SRv6 TE Policy（IPv6分段路由流量工程策略）隧道方式，可以利用IFIT（随流信息测量）技术，在链路还未中断时，基于链路质量情况，规划最优路径，保障重要业务比如：工作面远控、安全监测监控等业务可靠性。

### 随流检测技术

煤矿井下环境复杂，故障排查费时费力，人员上下井一次，在途时间就要两三个小时。此外，井下通信故障后，没有很好的定位手段确认故障点，故障恢复时间长。

随流检测技术IFIT（In-situ Flow Information Telemetry，随流检测），不产生任何探测报文，而是将OAM（Operation Administration and Maintenance，操作、管理和维护）的指令携带在用户报文中，中间的网元根据报文中的OAM指令信息收集数据并处理。IFIT通过对实际业务流进行特征标记（染色），网络设备根据染色标识进行丢包、时延测量并上送控制系统，控制系统实现端到端或逐跳的业务丢包、乱序和时延的检测。相对于传统网络测量方法，IFIT测量的结果更准确，且不会对业务实际流量模型产生影响，尤其适用于高可靠业务的质量保证和快速定位。如图3-5所示，通过随流检测可以快速定位故障，并监测重要业务的通信质量。

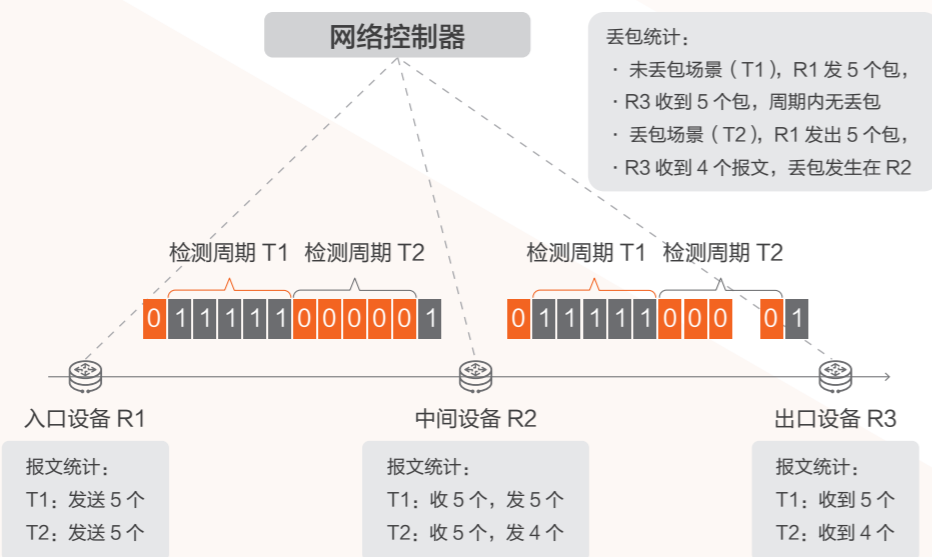


图3-5 IFIT技术原理

### Wi-Fi 6远距离覆盖技术

在井下无人化、少人化的大趋势下，煤矿井下智能化终端越来越多，对无线接入需求越来越多，很多煤矿已经在井下部署UWB（Ultra-Wideband，超宽带）+Wi-Fi融合基站。当前井下以Wi-Fi 4和Wi-Fi 5技术为主，相比UWB的覆盖距离更短，导致Wi-Fi网络覆盖不全，或者需要补充单独的Wi-Fi基站进行补充覆盖。

Wi-Fi 6是下一代802.11ax标准的简称。Wi-Fi 6继承了Wi-Fi 5（802.11ac）的特性，并新增多项新能力。主要包括：

- OFDMA（Orthogonal Frequency Division Multiple Access，正交频分多址接入）：OFDMA是通过将整个信道资源划分成多个子载波（也可称为子信道），子载波又按不同RU（Resource Unit，资源单位）类型被分成若干组，每个用户可以占用一组或多组RU以满足不同带宽需求的业务。RU数量越多，发送小包报文时多用户处理效率越高，吞吐量也越高。
- MU-MIMO（Multi-User - Multiple-Input Multiple-Output，多用户多输入多输出）：MU-MIMO使用信道的空间分集来在相同带宽上发送独立的数据流，与OFDMA不同，所有用户都使用全部带宽，从而带来多路复用增益。实现同一时刻AP（Access Point，接入点）与多个终端之间同时传输数据，大幅提升吞吐量。Wi-Fi 6标准允许OFDMA与MU-MIMO同时使用，但OFDMA与MU-MIMO技术是有区别的。OFDMA支持多用户通过细分信道（子信道）来提高并发效率；MU-MIMO支持多用户通过使用不同的空间流来提高吞吐量。
- 更高阶的调制技术：Wi-Fi 5采用的256-QAM（Quadrature Amplitude Modulation，正交幅度调制），每个符号传输8 bit数据（ $2^8 = 256$ ）；Wi-Fi 6采用1024-QAM（正交幅度调制），每个符号位传输10 bit数据（ $2^{10} = 1024$ ）。从8到10提升了25%，也就是相对于Wi-Fi 5来说，Wi-Fi 6的单条空间流数据吞吐量又提高了25%。

如图3-6所示，Wi-Fi 6带来更大的覆盖范围和带宽，做到与UWB精确定位基站在相同覆盖范围内。大容量、高可靠的Wi-Fi 6无线网络和高精度UWB定位系统结合，实现无线数据通信系统和高精度人员定位系统同覆盖、共站址、共电源、共传输，减少运维设备数量以及潜在故障点，满足井下人员定位、巡检机器人、单兵装备、井下打车等井下智能化应用的网络诉求。

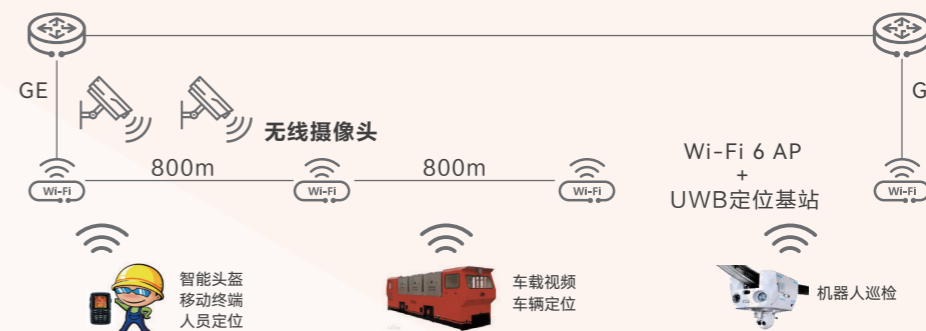


图3-6 Wi-Fi 6与UWB同覆盖技术应用



## 04

## 基于智能IP技术的 井下新一代网络优势

井下新一代网络具有5G承载、网络切片、带宽易扩展、可靠性高等特性，加持了基于IPv6的SRv6隧道技术、随流检测技术等，并引入了SDN网络控制器作为煤矿网络的神经中枢，使网络的业务开通、业务扩展及网络运维实现智能化。相对于传统的交换机环网，基于网络切片的井下新一代网络具备以下五大优势：

· **一网打尽，一切到底：**支持网络切片，实现了在一张物理网络上承载5G、视频、工业控制等多种业务，业务之间严格隔离，互不干扰。有效地将现有的多张交换机环网简化为一张环网，网络节点数量减少60%以上，节省纤芯数量，简化网络架构和网络运维。

· **稳定可靠，避免环路：**传统的井下网络通常采用二层以太网组网，容易导致因人工配置错误或连线错误发生的网络风暴。而基于路由器的网络切片是三层组网，业务流量转发不再是简单的以太报文查MAC表转发，而是基于IP协议的路由表三层转发。路由协议可以保障网络无环路，杜绝网络风暴的发生。

· **超大带宽，弹性扩展：**路由器支持五万兆/十万兆端口，主干环网带宽达到十万兆，在现有万兆环网基础上带宽提升了10倍，满足煤矿未来5-10年的带宽增长需求，有力地保障了综采面视频拼接、主运智能视频分析业务的广泛部署。

· **5G承载，Wi-Fi覆盖：**传统的煤矿工业交换机不支持同步以太网、IEEE1588V2等协议，无法满足5G基站精确时间同步的要求，因此无法直接接入5G基站。基于网络切片路由器的矿用综合承载网具有时钟同步功能，支持5G承载。Wi-Fi 6无线技术具有覆盖距离远、可与UWB共站部署的特点（同覆盖），可有效简化井下无线分站的类型，实现井下无线全覆盖。

· **智能运维，快速定障：**业务质量端到端可视，通过智能管理系统可实时监控业务的丢包、时延等参数。在业务质量出现下降的情况下，可以实现故障的快速定位，定位时长可降低到分钟级，减少网络运维人员下井频次。

## 05

## 煤矿井下新一代 网络应用场景

智能煤矿井下业务越来越丰富，基于智能IP技术的新一代网络实现了井下多业务承载，切片技术保证了业务之间相互隔离，五万兆/十万兆大带宽保证高清视频等业务传输。

### · 5G业务承载

矿用5G通信系统目前多应用于采煤工作面、掘进工作面及井下重点场所，采用井下新一代网络可以直接划分独立的5G业务切片网络，分配独占的10G带宽承载井下5G远控业务，基于IFIT智能运维技术对5G业务的网络丢包、时延等进行实时监控和预警，保障业务的高可靠性。

### · 安全监测监控

井下传感器（包括瓦斯、温度、风速、一氧化碳、氧气浓度等）、综合分站可以就近接入井下新一代网络，为了保证安全监测监控网络不受工业视频等突发业务干扰，采用网络切片技术为安全监测监控网络分配独立的网络信道，分配独占的1G带宽，基于IFIT智能运维技术对安全监测监控业务的网络丢包、时延等进行实时监控和预警，保障业务的高可靠性。

### · 远程控制

综采面远控对网络的可靠性要求较高，基于IFIT智能运维技术对远控业务的网络丢包、时延等进行实时监控和预警，可以为远控业务提供高可靠、低时延的稳定可靠网络。基于井下新一代网络承载远控业务，需要分配独立的网络切片，分配独占的10G带宽，当远控业务通信质量开始劣化时，SDN控制器计算新的合适路径，快速完成路径切换，保证业务连续性。

### · 视频传输

随着煤矿智能化建设的不断深入，视频监控应用范围也越来越广泛。以某煤矿采煤工作面为例，采面长度340米，全景视频需要230+路摄像头，每路带宽8Mbps，需要约2Gbps的传输带宽诉求，未来若考虑4K高清应用，则带宽诉求还会相应增加。通过井下新一代网络为视频监控分配独立的切片，分配独占的20G带宽，可以保证所有高清视频的接入，并可以根据视频业务流量增长灵活调整切片带宽。

· 人员定位及语音通信

煤矿人员定位系统又称煤矿井下人员位置监测系统、煤矿井下作业人员管理系统。具有监测井下人员位置、统计持卡人员出/入井时间、在重点区域和限制区域的出/入时间、人员工作时间、井下和重点区域人员数量、记录井下人员活动路线等功能。基于Wi-Fi 6的基站与UWB共部署，同时实现人员定位数据回传和井下全无线覆盖。基于Wi-Fi 6的语音/视频通信，与其他应急通信系统融合，实现井下随时随地与井上进行通信。

· 无轨胶轮车、电机车、单轨吊等场景

井下无轨胶轮车、电机车、单轨吊等场景，可以采用基于Wi-Fi 6技术结合有线确定性切片网络的方案进行远程无人监控。变电所、水泵房、皮带机、大巷等场所的移动巡检业务，同样可以采用基于Wi-Fi 6的零漫游技术实现自动巡检。通过Wi-Fi 6提供高可靠、低时延、大带宽的井下无线网络，支持单兵设备的无线数据回传。

Wi-Fi 6网络可针对不同的无线业务，设置不同SSID (Service Set Identifier, 服务集标识)，划分不同逻辑网络。如果有重要业务要和其他无线业务隔离，可通过划分不同频域的方式，实现空口切片，保障业务独立性。Wi-Fi 6无线网络应用场景如图5-1所示。

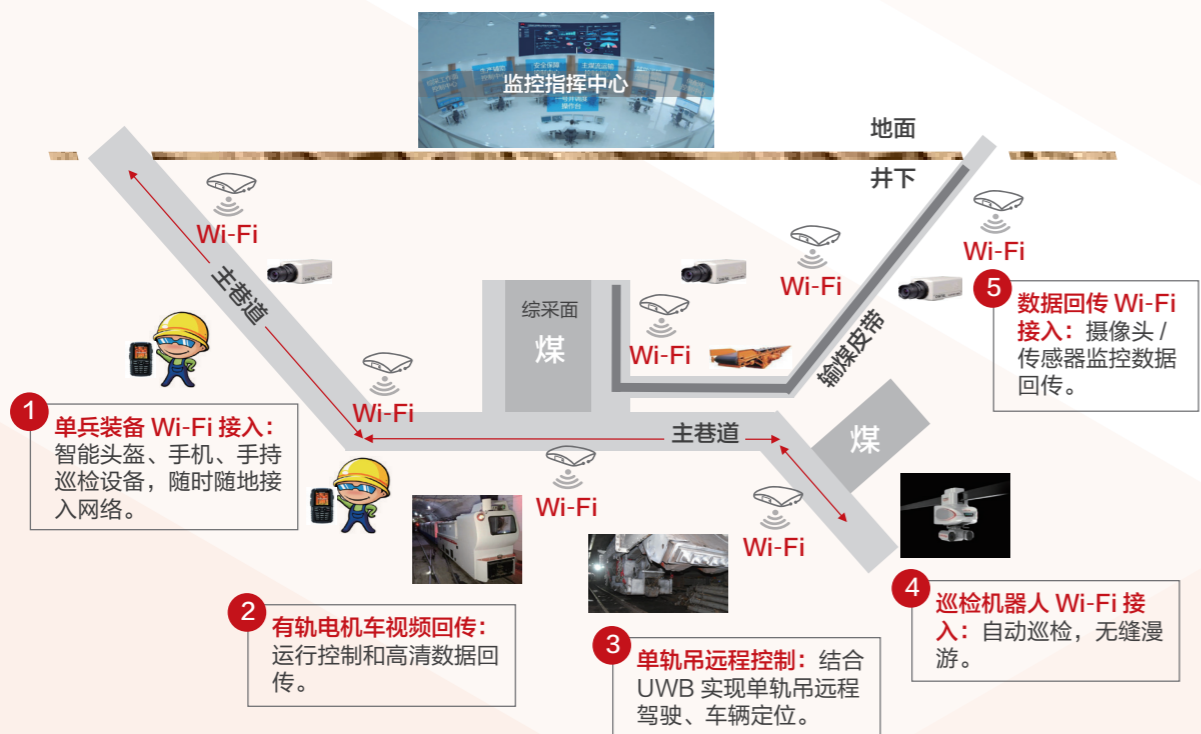


图5-1 Wi-Fi 6无线网络覆盖

# 06 煤矿井下新一代网络实践

2021年以来山东能源集团已投入180多亿元，推进集团范围内所有煤矿智能化建设全覆盖，建成了一批多种类型、不同模式的智能化矿井。鲍店煤矿、转龙湾煤矿等9处煤矿成功入选国家首批智能化示范煤矿建设名单，目前均全部完成建设并以优异成绩通过验收。2022年建成15处符合国家示范标准的智能化煤矿，2023年规划的10处煤矿正在开展智能化建设。集团现有智能采掘工作面130个，其中智能采煤工作面95个，智能掘进工作面35个，智能开采产量达到总产量的86%。

为了响应国家智能化煤矿的建设要求，基于山东能源集团智能化建设实际，山东能源集团权属的李楼煤业有限公司和南屯煤矿对煤矿井下网络进行了升级改造，部署了井下新一代网络，通过切片承载多种业务，满足多种业务对带宽、时延、可靠性的要求，有力支撑了煤矿的智能化建设。

## ▶ 6.1 李楼煤业有限公司井下新一代网络实践

山东能源集团鲁西矿业李楼煤业有限公司，位于山东省菏泽市巨野县巨野煤田的北部，煤田面积198平方公里，优质稀缺炼焦煤地质储量达10.8亿吨，可采储量1.78亿吨，年核定生产190万吨，是目前山东省内可开采储量最大、矿井服务年限最长的现代化大型矿井之一。

为落实山东能源集团聚力打造世界一流能源企业的目标，鲁西矿业李楼煤业着力打造智能化示范矿井。目前李楼煤业智能化工作面正规范循环率达到90%以上，作业期间两顺槽实现无人化生产，“自动控制为主、人工干预为辅”的采煤方式大幅提升工时效率，降低了工人劳动强度。为进一步夯实网络基础，结合李楼煤业现场实际，计划对现有工业网络进行升级改造，以满足基于视频监控的人工智能价值场景应用、智能管控平台、采掘工作面视频拼接、融合通信等智能化示范应用的建设需求。



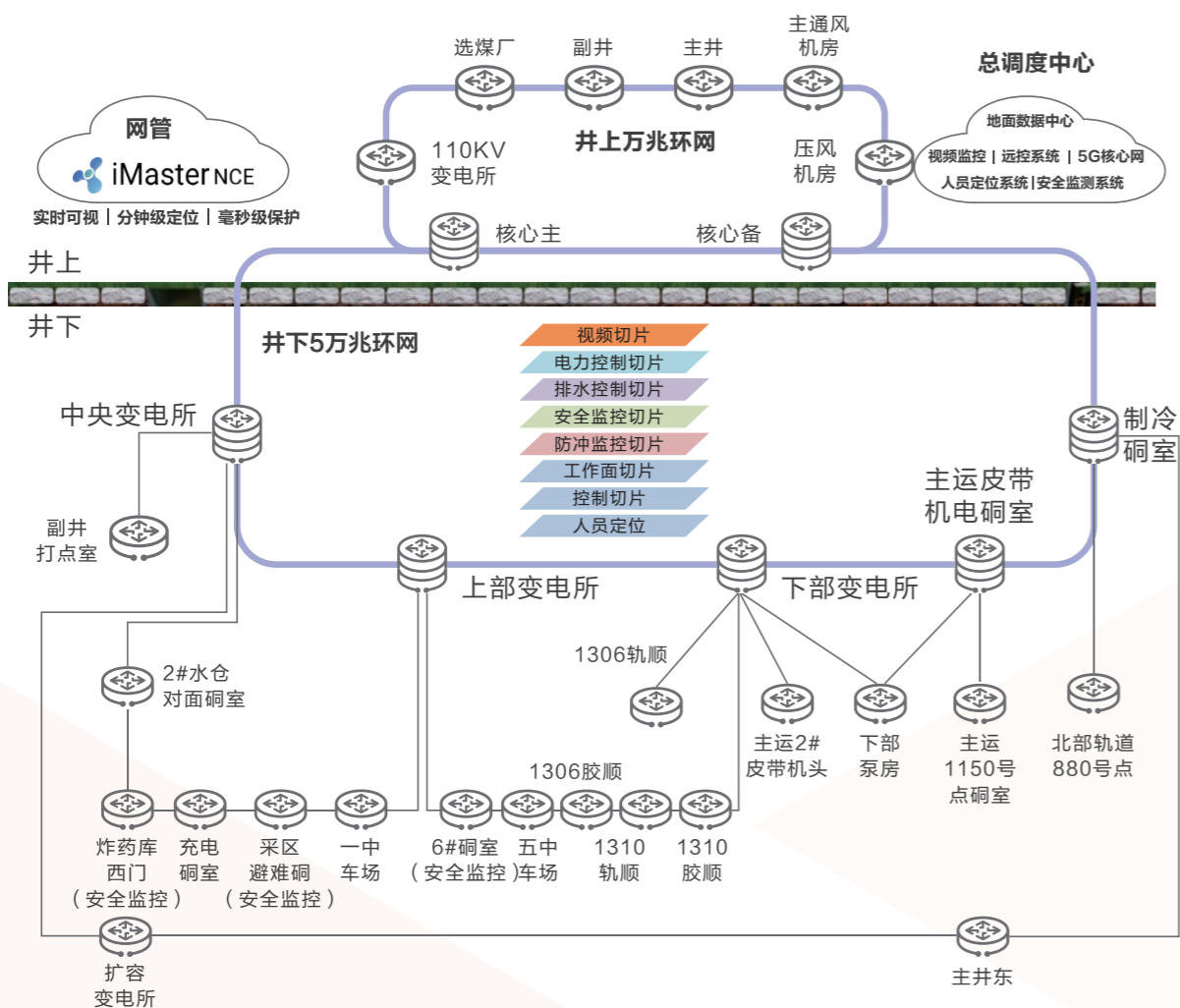


图6-1 李楼煤业井下新一代网络拓扑图

根据当前李楼煤业网络业务规划设计，共划分安全监控、工业视频、人员定位、电力控制、排水控制、井下控制、防冲控制、工作面、地面控制、选煤、煤炭销售等12个切片网络，每个切片网络分配独立的网络带宽，各业务流量互不干扰，各切片网络带宽可按需动态扩容，满足未来平滑扩容需求，主要应用包括：

1、建设一张五万兆融合IP切片网络，实现带宽大幅升级。切片网络采用冗余环形结构和三层路由技术，实现网络冗余功能，当某条链路断开，通过智能路由实现网络路径快速切换，经测试验证，满足网络自愈时间小于50ms的要求，达到智能化矿山基础网络通信标准。

2、采用骨干网五万兆环网与子网兆环网相结合方式，保障网络的高可靠性。根据现场情况，因地制宜进行合理网络布局设计，建设了五万兆骨干环网井下联4个兆接入子网环网，既保证业务传输的可靠性，又减少项目实施工作量，实现网络的合理负载，保障了各类业务系统的合理接入。

3、通过网络切片实现业务隔离传输。划分12个业务硬切片，分别为视频、安全监控、定位通信、电力控制、排水控制、井下控制、防冲监控、工作面、地面控制、选煤、煤炭销售等，并分别给不同业务切片分配不同带宽，如视频切片分配20G带宽，人员定位切片分配2G带宽。后续业务切片可以根据实际带宽需求，通过软件配置动态调整带宽大小，无需改变物理网络。各业务系统接入到对应的业务切片，如视频监控接入到视频切片、人员定位接入定位切片，实现业务相互隔离，互不抢占，互不影响。

4、安全监控接入切片网络，实现真正一网承载。按照即将颁布的煤矿安全新规程，经过报备后，将安全监控系统接入到切片网络的单独物理切片。安全监控系统井上下分站及传感器数据，通过单独切片传输至地面服务器，并上传至上级监管部门，经测试验证，系统稳定运行，满足现场安全监控及监管要求。

5、切片网络启用环路检测和阻断，实现网络风暴抑制。在切片网络建设过程中，业务从原有网络迁移至切片网络时，经多次验证，切片网络可以快速检测出环路并进行端口阻断，达到网络风暴抑制的效果，保护业务系统不受影响，大幅提高网络健壮性。

6、切片网络实现供电等系统的低延时高可靠传输。为保障供电系统的防越级功能正常动作，网络需满足20ms以内的低延时、低抖动、稳定传输要求。经测试验证，切片网络达到了供电系统对网络的高可靠性要求。

7、利用新一代网络时钟同步、网络高可靠等技术特性，支持5G网络承载，为后续井下部署5G奠定基础，不需要再额外部署承载网络。。

李楼煤业切片网络应用情况如下所示：

**设备安装部署图**



图6-2 李楼煤业切片路由器部署

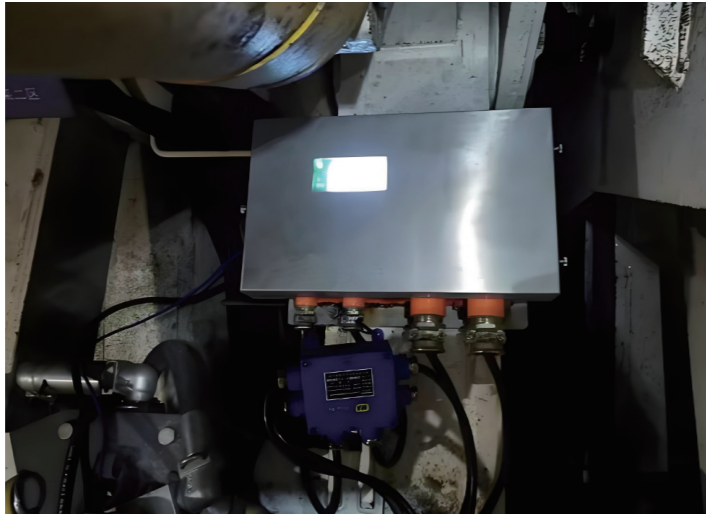
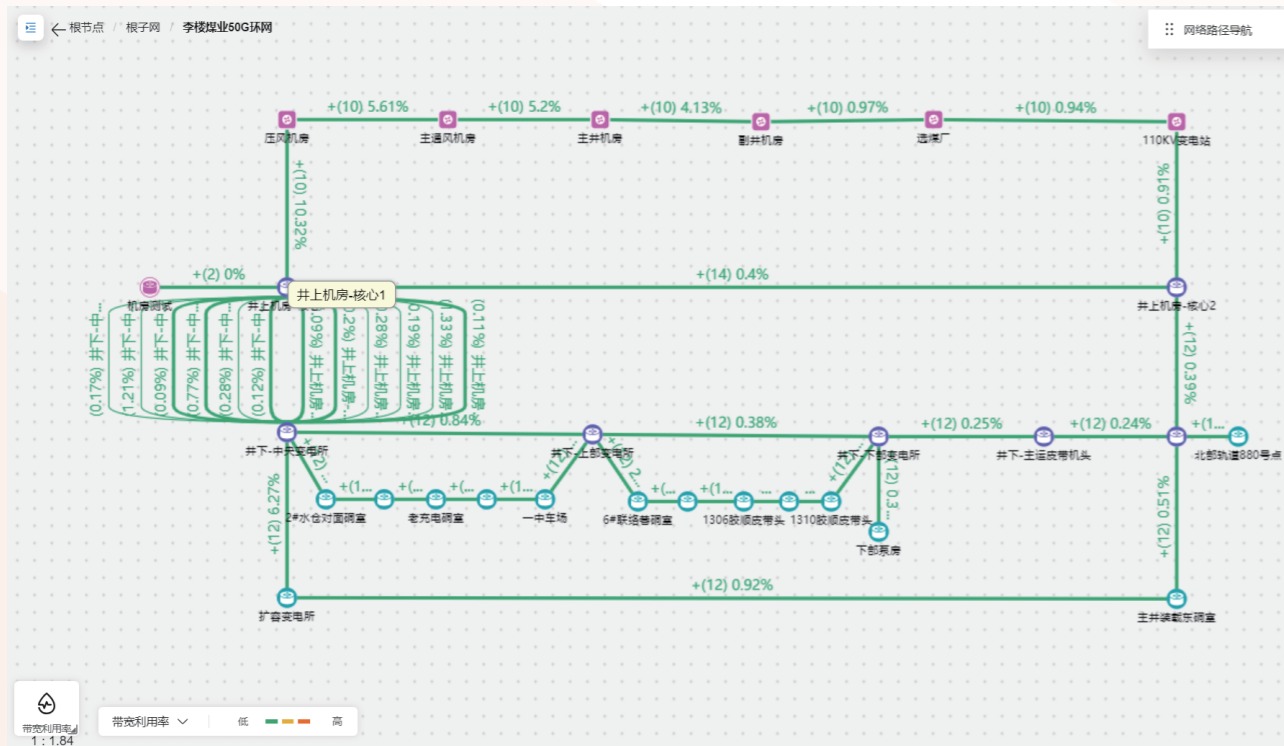


图6-3 李楼煤业安全监测专用切片部署

李楼煤业井下新一代网络的建设实践，为煤矿井下网络向“一网打尽、一切到底”升级提供了宝贵的经验。解决了传统井下多张网布线复杂、运维困难、升级替换周期长、业务共享带宽互相干扰、广播风暴等问题。通过切片网络技术实现了井下所有业务一网打尽、互不干扰、动态扩容、灵活接入，网络容量提高5倍，接入带宽提升10倍；通过随流检测技术，能够实时感知李楼煤业井下关键性业务的质量，主动监控业务丢包等异常，在业务中断前早发现早修复，网络中断减少20%。

通过网管可直观展示网络拓扑、链路切片、切片状态、切片带宽利用率等信息：



通过网管进行切片管理，切片带宽实时可视，按需使用动态调整，如下图：



在业务迁移至切片网络过程中，进行了充分测试验证。例如视频出现拥塞卡顿，其他切片上的业务正常，没有任何影响；业务割接时进行环路测试，切片网络自动检测并阻断环路端口，防止网络风暴，告警精准定位产生环路的端口，指导问题快速解决，如下图显示环路告警，产生告警的设备和端口：



上面列举了部分切片网络应用情况，传统网络的很多问题或不足在切片网络中得到了解决，展现了切片网络的一网承载、业务隔离、广播风暴抑制、业务带宽按需使用、弹性扩展等效果；这些功能在网管上可视可控，简化了运维工作量。



## 07 总结与展望

山东能源集团和华为联合创新推出的煤矿井下新一代网络契合了煤矿智能化发展方向，引入了网络切片、SRv6、IFIT随流检测、Wi-Fi 6等业界领先的网络技术，构建多网融合、超宽承载、灵活接入、网络可靠、智能运维、自主可控的新一代网络，为煤矿智能化应用提供可靠保障，树立煤矿行业智能网络新标杆。

展望未来，随着煤矿智能化水平的不断提高，井下网络将承载越来越多的新型智能应用，这对网络的安全可靠提出更高的要求。需要产学研合作，共同推动煤矿智能化技术升级，共同编制新一代网络技术标准，共同落实“一网打尽、一切到底”的井下新一代网络实践应用，为建设少人则安、无人则安、智能生产、降本增效的智能煤矿奠定坚实基础。



## 08 缩略语

英文缩写	英文全称	中文全称
5G	5th Generation Mobile Communication	第五代移动通信系统
AI	Artificial Intelligence	人工智能
AP	Access Point	接入点
BE	Best Effort	尽力而为服务
EVPN	Ethernet Virtual Private Network	以太网虚拟专用网
FlexE	Flexible Ethernet	灵活以太网
HQoS	Hierarchical QoS	层次化的QoS
IFIT	In-situ Flow Information Telemetry	随流检测
IGP	Interior Gateway Protocol	内部网关协议
IP	Internet Protocol	网际互连协议
MPLS	Multiprotocol Label Switching	多协议标签交换
MU-MIMO	Multi-User - Multiple-Input Multiple-Output	多用户多输入多输出技术
OAM	Operation, Administration and Maintenance	操作、管理和维护
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	正交频分多址接入
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	正交幅度调制
RU	Resource Unit	资源单位
SDN	Software Defined Network	软件定义网络
SLA	Service-Level Agreement	服务等级协议
SRv6	Segment Routing over IPv6	基于IPv6转发平面的分段路由
SSID	Service Set Identifier	服务集标识
TE	Traffic Engineering	流量工程
TI-LFA	Topology-Independent Loop-Free Alternate	拓扑无关无环路备份
UWB	Ultra-Wideband	超宽带
VPN	Virtual Private Network	虚拟专用网
Wi-Fi 6	Wireless Fidelity 6	基于IEEE 802.11系列标准的第六代无线局域网

## 09 相关规范

序号	文件名称	发布单位
1	《爆炸性气体环境用电气设备通用要求》	国家市场监督管理总局、中国国家标准化管理委员会
2	《煤矿安全规程》	应急管理部
3	《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》	国家发展和改革委员会等八部门
4	《煤矿智能化建设指南（2021年版）》	国家能源局、国家矿山安全监察局
5	《煤矿信息综合承载网通用技术规范》	国家能源局