

基于5G专网模式的油田智能化运维 Application of Intelligent Operation and Maintenance in Oil Fields Based on 5G Private Network Mode

实践应用

张新超,王鸿泰,祁江伟,高奕,赵刘乾(中国移动通信集团新疆有限公司,新疆乌鲁木齐830063)
Zhang Xinchao,Wang Hongtai,Qi Jiangwei,Gao Yi,Zhao Liuqian(China Mobile Group Xinjiang Co.,Ltd.,Urumqi 830063,China)

摘要:

在以往戈壁场景的油井作业过程中,运维管理采用无线网桥方式进行作业数据传输,由于其延迟高、组网困难、维护成本高等问题,已不适应于目前的生产需求。介绍了一种基于5G无线技术的油田智能化专网方案,通过5G 700 MHz基站、无线切片、5G数据安全管控技术,提升了戈壁场景油田作业的智能运维管理能力,并为实际生产带来一定的效益。

关键词:

5G专网;油田智能运维;无线切片;RB资源预留
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.01.017
文章编号:1007-3043(2026)01-0082-05
中图分类号:TN929.5
文献标识码:A
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

In the past, during the oil well operation process in the Gobi scenario, wireless bridge was used for operation and maintenance management to transmit operation data. Due to its high latency, difficult networking, and high maintenance costs, it is no longer suitable for the current production needs. It introduces an intelligent dedicated network solution for oil fields based on 5G wireless technology. Through 5G 700 MHz base stations, wireless slicing, and 5G data security management technology, the intelligent operation and maintenance management capabilities of oil field operations in the Gobi scenario are improved, and certain benefits are brought to actual production.

Keywords:

5G private network; Intelligent operation and maintenance of oil fields; Network slices; RB resource reservation

引用格式:张新超,王鸿泰,祁江伟,等.基于5G专网模式的油田智能化运维实践应用[J].邮电设计技术,2026(1):82-86.

1 概述

自2019年5G商用以来,诸多行业领域依托5G新技术,进行了新兴生产力的变革,完成信息化生产的转型,持续对企业的发展提供动力。在以往的生产模式下,油井的生产指标监控数据以网桥设备作为无线传输主链路来完成生产现场图像信息、生产数据、设备运转等数据的实时动态传输。网桥建设方式是依据油井建设位置设立多点网桥中继点位形成传输链路,并且一点范围内建设网桥总节点收集和回传数

据,存在延迟较高、流量控制不足、不适合大型网络组建、使用条件苛刻、维护量大、可扩展性相对较弱以及建设成本高的问题,不能满足油田大量井口的建设,不能满足全量井口监控的新业务场景的需求^[1]。相比传统信息交互作业模式,5G具有大带宽(eMBB)、低时延(uRLLC)、大连接(mMTC)三大特性场景,更加具有灵活性、安全性、机动性^[2]。在5G技术的赋能下,新疆区域油气生产模式迎来了新机遇,数字化转型、智能化发展成为石油石化行业的重要发展方向。

2 5G油田专网需求分析

2.1 覆盖需求分析

收稿日期:2025-11-03

5G 油田专网需求区域处于克拉玛依白碱滩区域,属于典型的戈壁、沙漠区域,地势相对平坦。需求油田约有油井 500 个,油井之间距离为 500 m~3 km 不等,分布较为分散,各个油井均有智能运维终端需求以及巡检作业人员的通信需求。

2.2 智能化场景需求分析

智能化场景的需求如下:油田生产区内人员通信、人员定位打卡、设备维护数据上传需求;油田生产区内生产视频数据实时回传需求,视频回传分辨率要求 1080P 级别,每个油井均有一个 5G 无线回传摄像头。具体应用场景需求情况如表 1 所示。

表 1 应用场景

应用场景	无线需求	终端数量
视频巡检(1080P)	上行带宽:2 Mbit/s 下行带宽:无要求	约 500 个
数据采集传感器(生产设备固定安装)	上行带宽:1 Mbit/s 下行带宽:无要求	约 100 个
手持定位巡检终端(CPE)	上行带宽:500 kbit/s 下行带宽:无要求	约 200 个

3 5G 油田专网解决方案

根据油区井口分布情况以及目前的智能化需求,无线网桥传输方式已不能满足信号覆盖。结合实地勘察结果,确定采用 CPE+5G APN 专线模式进行生产数据回传的整体组网(见图 1)。

数据传输采用克拉玛依中心局 5G-UPF 下沉组网方式,视频巡检等终端通过 5G 基站将数据进行无线回

传至生产调度中心,通过 5G 切片将工控网、视频网与办公网进行分离传输,满足低时延、高带宽以及网络切片等特性,增强数据的安全性和隐私保护能力。

3.1 无线覆盖规划方案

5G 油田专网覆盖环境为戈壁、沙漠场景,无阻挡,属于广覆盖需求;结合油井分布区域来分析,油井分布较为分散,每个油井均配置智能终端,且有无无线摄像头,属于带宽需求量较高场景;且油井作业区域已有 5G 700 MHz 网络为部分作业点提供无线覆盖(见图 2)。为了保证专网终端平稳运行以及平衡项目收益情况,最终考虑复用公网资源,对于不满足专网需求的区域,通过新建 700 MHz 站点来满足需求。覆盖补点建设要求基站挂高 30 m 以上,单扇区覆盖油井数量不超过 14 个,油井距离基站直线距离不超过 1.5 km (同覆盖场景实测,700 MHz 频段,挂高 40 m 站点,边缘覆盖上行速率约 30 Mbit/s,可满足边缘油井终端需求),总体规划建设 700 MHz 基站 13 个,扇区 38 个(含专网实施前已落地基站)。

3.2 无线容量及 RB 资源预留方案

3.2.1 无线容量评估

本 5G 专网油田项目主要涉及手持巡检终端、数据采集、视频回传 3 个应用场景,手持巡检终端、数据采集数据量不大,且分布零散,对于单小区容量要求低,因此专网业务主要以视频回传业务为主,是专网容量的主要需求。

如表 2 所示,项目要求单摄像头分辨率为 1080P 级别,编码方式为 H.265。单摄像头实际传输带宽可

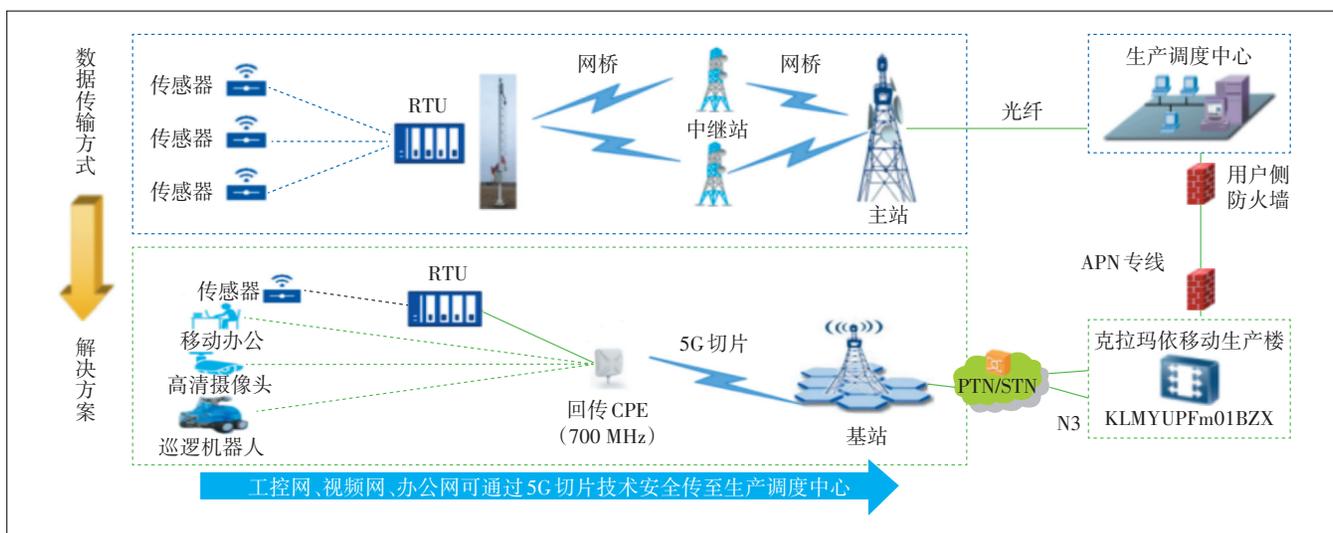


图 1 5G 油田专网组网结构

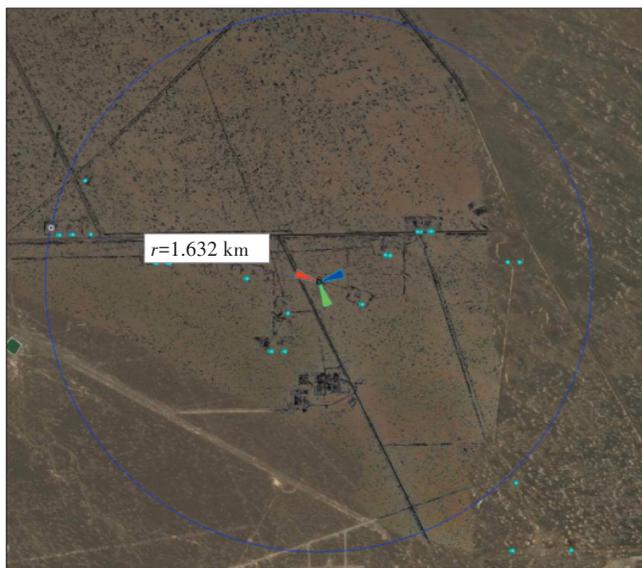


图2 油田700 MHz基站覆盖油井情况

表2 项目内无线摄像头视频码流设置情况

参数	设定值
编码格式	H.265
分辨率	1080P
帧率	30
I帧间隔	60
标准码流/(kbit/s)	512~1 804

由式(1)计算。

$$\frac{(R_p \times C_p) \times (3RGB \times R_n) \times F_r}{S} \times C_r^{-1} \times 10^{-6} \quad (1)$$

其中, R_p 、 C_p 表示视频一帧整体画面的行像素数与列像素数,1080P级别的画面分辨率为1 920×1 080; RGB表示1个像素点包含的原色像素数,取值3; R_n 表示一个像素所包含的资源数,一般为4 bit; F_r 表示视频传输的帧率,表示每秒传输多少帧画面,这里取值30 fps; S 表示时间,这里计算1 s的传输带宽, S 取值1; C_r 表示编码方式的压缩比,编码格式为H.265,一般取值400。由式(1)可得出1080P级别视频回传的宽带需求约为1.8 Mbit/s,后续按2 Mbit/s计算,留有一定带宽余量。

专网实际场景为单小区下有多摄像头同时并发回传数据,单摄像头回传的帧结构中有I帧与P帧2种帧结构^[3],I帧表示关键帧,是一种自带全部信息的独立帧;P帧为帧间预测编码帧,表示这一帧与前一帧的差别,一般I帧的传输带宽为视频码率的6~10倍。多路摄像头同时回传的时候,会发生多个摄像头同时回

传I帧数据的情况,即I帧碰撞,整体回传速率大于标准码率与摄像头数量的乘积。

表3所示为路摄像头并发回传I帧碰撞概率,从表3可以看出,本专网方案中,单扇区至多覆盖14个摄像头,这里以15个摄像头并发的情况为例,为了不浪费带宽资源,按照3个摄像头并发I帧数据进行需求带宽测算,如式(2)所示。

表3 多路摄像头并发回传I帧碰撞概率

摄像头数	非碰撞概率/%	2个I帧碰撞概率/%	3个I帧碰撞概率/%	4个I帧碰撞概率/%	5个I帧碰撞概率/%	6个I帧碰撞概率/%
1	100	0	0	0	0	0
5	65	34	2	0	0	0
10	13	72	14	1	0	0
15	0	56	38	6	1	0
20	0	25	57	15.6	0.2	0.02

$$\text{需求带宽} = D_r \times N \times x + D_r \times y \quad (2)$$

其中, D_r 表示视频的标准码流带宽,前面已经计算出摄像头回传实际码流为2 Mbit/s; N 表示I帧回传速率的系数,结合大量实际测试的结果,建议系数取值7.5; x 为发生I帧碰撞摄像头数量,取值3; y 为剩余不发生I帧碰撞摄像头数量,这里取值12。由式(2)可计算出单扇区覆盖15个摄像头时,视频回传需求带宽为69 Mbit/s。

3.2.2 RB资源预留方案

针对5G油田专网场景,考虑到要满足公网用户(油田作业区人员)的日常需求以及专网智能化终端应用的带宽需求,兼顾项目成本,可采用5G网络切片技术保障无线容量。在3G/4G网络中,通过QoS对业务进行切分^[4],针对不同的业务优先级,网络分配不同的资源,给予不同的服务质量。相比QoS,5G网络切片最大的特点是端到端隔离,传统QoS虽然实现了一定程度的隔离,但只是核心网(或接入网、承载网)内部的隔离,属于“小隔离”;而5G网络切片横向贯穿了接入网、承载网和核心网,从整个网络上进行隔离,是“大隔离”。技术上通过NFV技术和SDN技术实现端到端的切片功能,通过NFV技术^[5]部署虚拟化软件平台,对计算资源(例如CPU、内存等)、存储资源(例如硬盘)、网络资源(例如网卡)等进行统一管理,按需分配;SDN技术是在网络上建立一个SDN控制器节点^[6],统一管理和控制下层设备的数据转发,从而实现端到端的无线资源切分^[7]。如图3所示,无线侧现有资源预留切片方式有QoS(5QI)、RB资源预留、独立频谱预

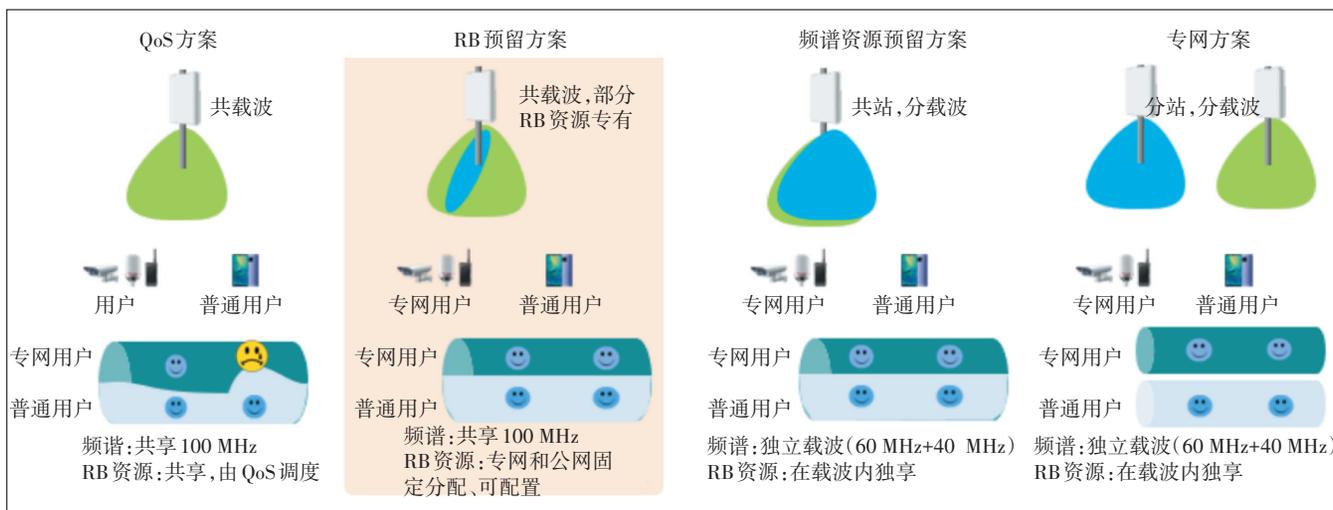


图3 5G多种无线资源切片保障方式

留和独立专网4种^[8]。

QoS基于业务类型和服务质量等级对网络流量进行管理,它可以实现对不同业务流量分类,分配带宽资源,从而保证网络服务的可靠性和稳定性^[9]。但由于QoS缺乏对大规模用户的细致管理和控制,因此它无法实现对所有用户业务流量的精细化保障,不适用于本专网场景。而独立频谱预留与独立专网造价过高,尤其是独立专网涉及到新建5G站点,新增建设及后期维护成本,因此需考虑RB资源预留方式是否能够满足专网需求。

油区规划均为中国移动700 MHz站点,基站版本为v5.65.10,可支持PRB预留最小力度为1%,已经计算出单扇区视频回传需求带宽为69 Mbit/s。现在需要考虑预留多少RB资源给视频回传终端使用,由需求分析可知,无线视频监控终端与CPE通过光纤连接,CPE与5G基站进行无线数据传输,CPE为2T4R传输模式。可用式(3)计算1%RB资源传输数据能力,再推算需要预留多少RB资源。

$$R_{\text{peak}} = V_1 \times Q_m \times R_{\text{max}} \times N_{\text{prb}} \times 12 \times (1 - \text{OH}) \times (1000^{-1} \times \frac{1}{2} \times 14^{-1}) / 10^{-6} \quad (3)$$

其中, V_1 表示MIMO的层数,取值2; Q_m 表示调制阶数,这里按照调制编码模式64QAM计算(油田空旷区域,无线传播环境良好),调制阶数为4; R_{max} 表示编码速率,参考3GPP TS 38.214,当调制阶数为4时,编码速率=466/1 024=0.455 1; N_{prb} 为PRB个数,这里取值1,即计算1个RB资源的上行吞吐速率;12表示每PRB含12个子载波;OH表示资源开销占比,典型OH资源

开销占比参考值为下行14%,上行8%,取值8%。计算得出1个PRB的上行速率为1.13 Mbit/s。700 MHz网络含PRB资源160个,若要保障视频回传终端69 Mbit/s的上行速率,需要预留38.16%的RB资源,为了保证视频回传业务,确定预留40%RB资源(网管设置预留下限40%,上限50%)。核查油区基站日常利用率在10%左右,因此视频回传业务上线后不会对大网用户的感知产生影响。

3.3 安全性分析

5G专网安全主要从5G终端接入安全、接口和信令安全、用户面数据安全3个方面进行考虑。首先,终端接入需要二次鉴权(Secondary Authentication)^[10],终端在Serving Network CoreNetwork中进行初始化注册时进行一次主鉴权^[11],然后在Home NetworkCore Network进行会话建立流程之前进行第二次辅鉴权。以此来确保了专网用户高级别的安全性(见图4)。

其次,接口和信令安全主要从AS层信令安全、NAS层信令安全、N2接口安全、N4接口安全和核心网服务化接口安全入手^[12],5G专网gNB可开启AS层信令机密和完整性保护,能够对RRC信令进行机密性和完整性保护;针对NAS层信令安全,通过开启NAS层机密和完整性保护,能够对NAS信令进行机密性和完整性保护^[13];N2接口安全、N4接口安全和核心网服务化接口安全通过5G专网N2、N4接口支持物理隔离、UPF应支持N4接口会话防劫持机制,UPF能够拒绝非法发起的N4会话消息,通过以上机制达到接口与信令控制面的安全隔离,5G专网核心网的NF间服务化接口支持3GPP标准要求的HTTP2.0协议及参数配置^[14],

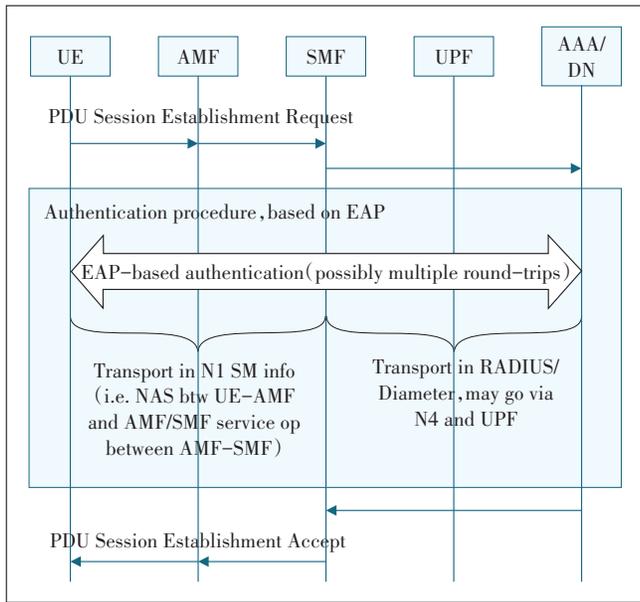


图4 终端二次授权的过程

支持使用TLS提供安全保护的能力。最后,5G专网支持终端与gNB之间的用户面数据机密性保护机制,gNB和UPF(N3接口)支持物理隔离,或者具备用户面完整性和机密性机制,对gNB与UPF之间的用户面数据进行完整性和机密性保护^[15]。通过以上手段达到专网方案的安全性要求。

4 方案成效

基于5G专网模式下的油田智能化运维解决方案具备以下优势。

a) 通过5G切片技术,可为公网用户、专网终端提供差异化的5G网络保障,对无线资源进行灵活分配。

b) 终端通过5G无线网络接入,相比以往网桥方案,网桥传输带宽为20M左右,端到端的时延为50ms,完全不能满足大带宽应用的需求;并且网桥易受物理环境、天气的影响,维护工作量大,可扩展性相对较弱,建设成本高。如表4所示,通过整体测算,5G专网设备建设成本在221万元左右(单站点成本约17万

元),设备维护成本约10.4万元/年(单站维护成本为0.8万元),利用5G专网后,可远程监控运行状态,省去巡检成本,因此5G专网支撑油田运维工作总体成本节省30%左右。

c) 满足了生产作业终端的接入以及用户面数据的安全性要求。

参考文献:

- [1] 王笑鸣. 5G技术在智慧油田建设中的研究与应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(5): 255-256.
- [2] 吴文广. 基于5G网络实现的通信大数据行程卡用户行程记录[J]. 信息通信技术, 2022, 16(5): 28-33, 40.
- [3] 童剑军. 面向高清视频存储的无编解码快速降帧压缩方法[J]. 计算机应用, 2023, 43(S2): 176-181.
- [4] 牛海斌, 苏昕, 孙文龙, 等. 具有用户QoS要求的无小区mMIMO系统最优下行功率分配策略[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(6): 1006-1012.
- [5] 赵圣隆. 5G背景下计算机网络关键技术的应用研究[J]. 信息记录材料, 2023, 24(8): 131-133.
- [6] 王超, 冯瑞, 佳苟洋, 等. SDN的通信网络管理策略分析[J]. 集成电路应用, 2024, 41(4): 335-337.
- [7] 中国移动集团. 5G安全在智慧地铁领域的技术研究[J]. 新型工业化, 2021, 11(10): 169-172.
- [8] 郑洁莹, 张丽伟, 邓超. 5G RB资源管理及QoS调度策略在方舱应用的验证与建议[J]. 移动通信, 2022, 46(8): 99-105.
- [9] 陈三强, 乔思远, 罗海龙, 等. 面向垂直行业的5G专网安全解决方案的研究[J]. 信息通信技术, 2022, 16(6): 32-41.
- [10] 王飞飞, 孙颖, 曹亚平. 面向5G 2B业务的5G LAN解决方案分析[J]. 电子技术应用, 2023, 49(12): 56-59.
- [11] 康亚利. 5G赋能智能制造的安全防护技术研究[J]. 通信技术, 2024, 57(4): 423-428.
- [12] 周欣, 谷群, 赵际洲, 等. 面向垂直行业的N4接口解耦技术[J]. 移动通信, 2021, 45(1): 71-75.
- [13] 毕晓宇. 5G移动通信系统的安全研究[J]. 信息安全研究, 2020, 6(1): 52-61.
- [14] 李健翔, 贾艺楠, 田晓阳, 等. 5G定位关键技术与标准进展[J]. 移动通信, 2023, 39(11): 137-144.
- [15] 王凯, 汪剑桥, 卜寅. 5G MEC的网络安全研究[J]. 邮电设计技术, 2023(8): 81-84.

作者简介:

张新超, 毕业于石河子大学, 硕士, 主要研究方向为无线网络规划、5G垂直行业项目无线解决方案等; 王鸿泰, 毕业于西安邮电大学, 学士, 主要研究方向为无线网络演进、场景化无线网络解决方案、多层网协同规划及优化等; 祁江伟, 毕业于西安邮电大学, 学士, 主要研究方向为移动通信、无线网络技术、新业务研究等; 高奕, 毕业于西南石油大学, 学士, 主要从事LTE/5G协同组网规划、优化工作; 赵刘乾, 毕业于武汉工程大学, 学士, 主要研究方向为网络规划演进、现场优化及维护方案解决以及5G垂直行业无线解决方案等。