

文章编号:1671-251X(2021)12-0008-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17854

煤矿 5G 通信系统安全应用技术研究

张立亚^{1,2,3}

- (1. 煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013;
2. 煤矿应急避险技术装备工程研究中心, 北京 100013;
3. 北京市煤矿安全工程技术研究中心, 北京 100013)



扫码移动阅读

摘要:针对煤矿 5G 通信系统安全应用需求,研究了 5G 核心网侧和无线接入侧的安全应用技术。在核心网侧,采用专网技术和网络切片技术实现不同煤矿业务场景的物理隔离,采用比例公平算法优化切片组内的资源块分配,实现切片资源调度,保障煤矿业务数据安全可靠传输;在无线接入侧,设计天线隔离电路实现基站输出信号本安,并将 5G 基站的射频阈功率限制在 6 W 内,杜绝由辐射能量滋生的安全隐患,实现多种煤矿井下终端设备的安全接入。井下测试结果表明,5G 基站无线覆盖半径为 100 m,覆盖范围内信号强度不低于-100 dB,上传速率不低于 520 Mbit/s,平均通信时延为 18.56 ms,用户个数为 200 时用户业务性能提升 52.8%,在保证通信系统安全可靠的基础上,满足煤矿业务数据多并发、大容量、高速率和低时延无线通信需求。

关键词:煤矿 5G 通信系统; 专网核心网; 网络切片; 切片资源调度; 5G 基站; 射频阈功率
中图分类号:TD655 **文献标志码:**A

Research on safety application technology of coal mine 5G communication system

ZHANG Liya^{1,2,3}

- (1. CCTEG China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Engineering Research Center for
- Technology Equipment of Emergency Refuge in Coal Mine, Beijing 100013, China;
3. Beijing Engineering and Research Center of Mine Safe, Beijing 100013, China)

Abstract: According to the safety application requirements of coal mine 5G communication system, the safety application technology of 5G core network side and wireless access side is studied. On the core network side, a private network technology and a network slicing technology are adopted to realize the physical isolation of different coal mine business scenarios. A proportional fair algorithm is adopted to optimize the allocation of resource blocks in a slicing group to realize the slicing resource scheduling and guarantee the safe and reliable transmission of coal mine business data. On the wireless access side, the antenna isolation circuit is designed to realize the intrinsic safety of the output signal of the base station, and the RF threshold power of the 5G base station is limited to 6 W so as to eliminate the potential safety danger caused by radiated energy, and to realize the safe access of a variety of underground mine terminal device. The underground test results show that the wireless coverage radius of the 5G base station is 100 m, the signal strength in the coverage area is not less than 100 dB, the upload rate is not less than 520 Mbit/s, the average communication delay is 18.56 ms, and the user service performance is improved by 52.8% when the number of users is 200. On the basis of ensuring the safety and reliability of the

收稿日期:2021-07-20;**修回日期:**2021-12-10;**责任编辑:**李明。
基金项目:煤炭科学技术研究院技术创新基金项目(2020CX-I-10,2020CX-I-11)。
作者简介:张立亚(1985—),男,河北定州人,副研究员,博士研究生,现主要从事智能矿山与煤矿通信技术研究工作,E-mail:zhangliya@ccrise.cn。
引用格式:张立亚.煤矿 5G 通信系统安全应用技术研究[J].工矿自动化,2021,47(12):8-12.
ZHANG Liya. Research on safety application technology of coal mine 5G communication system[J]. Industry and Mine Automation, 2021,47(12):8-12.

communication system, the 5G base station meets the requirements of multiple concurrency, large capacity, high speed and low delay wireless communication of coal mine business data.

Key words: coal mine 5G communication system; private network core network; network slicing; slicing resource scheduling; 5G base station; radio frequency threshold power

0 引言

5G 通信技术自商用以来,不断向垂直行业渗透,并已在煤矿智能化建设中初见成效。作为新一代移动通信技术,5G 因其高速率、低时延、广连接等优势,非常契合煤矿智能化对无线网络应用的需求,为解决煤矿智能化建设过程中存在的泛在感知困难、多类型数据同步传输不可靠、远程控制实时性差、融合大数据智能决策效率低等关键问题提供了有效途径^[1-5]。王国法等^[6]提出了基于混合现实的井下智能化开采和远程实时可视化操控的构想,给出了井下应用 5G 技术的总体架构。霍振龙等^[7]提出了 5G 技术在煤矿的应用场景,指出针对煤炭行业的 5G 技术应用场景还需不断挖掘和完善。孟庆勇^[8]提出了基于 NSA(Non-Standalone,非独立组网)的煤矿井下 4G 与 5G 融合网络架构,并分析了 5G 前传组网方案及适用场景,以及不同场景下 5G 组网架构的应用模式。

随着煤矿智能化技术的不断发展,煤矿综采工作面、掘进工作面、变电所、主辅运等场所对井下人员、设备、环境的智能化监测需求越来越多,对通信系统的安全性、可靠性等技术指标提出了更高要求。开发煤矿 5G 通信系统专网核心网、5G 基站等相关产品时,应考虑核心网侧和无线接入侧的安全应用设计,以保障整个系统的安全性。

本文针对煤矿 5G 通信系统安全应用需求,在核心网侧研究专网技术和网络切片技术,以实现不同业务场景的物理隔离,采用比例公平算法优化切片组内的 RB(Resource Block,资源块)分配,保障煤矿业务数据安全可靠传输;在无线接入侧,严格遵循 GB 3836.1—2010《爆炸性环境 第 1 部分:设备通用要求》进行防爆和本安设计,保证射频输出功率的安全性,杜绝由辐射能量滋生的安全隐患。

1 煤矿 5G 通信系统

煤矿 5G 通信系统主要包括专网核心网、核心交换机、5G 交换机、基站控制器、5G 基站、本安型网关、终端设备等^[6-9],如图 1 所示。

系统采用分布式组网方式,在地面部署专网核心网、核心交换机等,基站控制器下沉到井下,专网核心网通过光纤环网与 5G 基站相连。光纤环网采

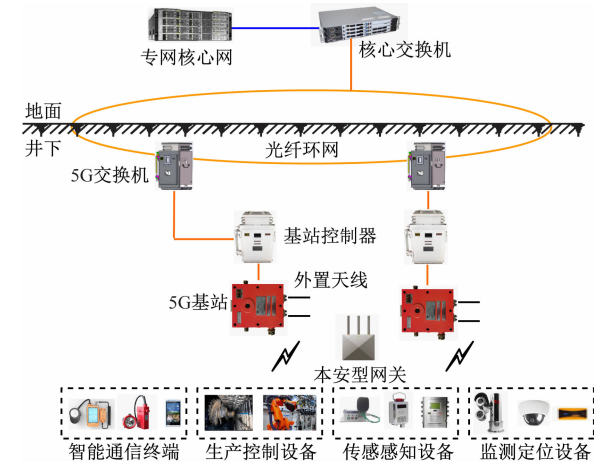


图 1 煤矿 5G 通信系统架构

Fig. 1 Architecture of coal mine 5G communication system 用 SPN(Slicing Packet Network,切片分组网)技术进行组网。煤矿工业控制过程中的终端设备,如智能通信终端、生产控制设备、传感感知设备、监测定位设备等,通过本安型网关(具有 5G 通信模组)接入 5G 通信系统。

《煤矿 5G 通信系统安全技术要求(试行)》和《煤矿 5G 通信系统安全标志管理方案(试行)》明确指出,5G 通信系统在外部网络发生故障或断开时,应能安全、独立、稳定运行,保证无线通信及数据传输的可靠性和稳定性。

2 煤矿 5G 专网核心网安全设计

2.1 总体方案

根据煤矿 5G 通信系统安全技术要求,进行煤矿 5G 专网核心网的安全应用设计。专网核心网采用 SA(Standalone,独立组网)架构,控制面集中部署在煤矿企业集团,用户面部署在各个矿区,如图 2 所示。

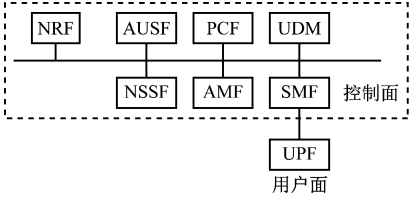


图 2 煤矿 5G 专网核心网架构

Fig. 2 Architecture of private network of coal mine 5G core network

专网核心网采用 3GPP(3rd Generation Partnership Project,第三代合作伙伴计划)标准服务化架构,在控制面进行功能重构和融合,将控制面

主要功能分解为多个独立的网络服务单元,包括 NSSF(Network Slice Selection Function,网络切片选择功能)、AMF (Authentication Management Function, 认证管理功能)、SMF (Session Management Function, 会话管理功能)、UDM (Unified Data Management, 统一数据管理)、PCF (Policy Control Function, 策略控制功能)、AUSF (Authentication Server Function, 鉴权服务器功能)、NRF(NF Repository Function, 网元存储功能)等。用户面主要为 UPF(User Plane Function, 用户面功能)单元。每个网络服务单元对外提供服务化接口,不同的调用者可通过同一接口消费服务。同时这些独立的网络服务单元可根据煤矿不同业务需求任意组合和编排,达到网络切片最优业务承载效果和最优网络效率。

专网核心网安全策略包括 NFV (Network Function Virtualization, 网络功能虚拟化)、SDN (Software Defined Network, 软件定义网络)、安全域隔离、切片等,利用 NFV 实现软硬件的解耦,利用 SDN 实现控制和转发的解耦,通过切片实现网络的灵活性和高效性,且凭借数据不出园区的独特优势,实现了良好的网络安全性能。本文主要针对切片技术展开研究。

2.2 网络切片技术

5G 通信网络通过切片技术为不同垂直行业提供相互隔离的网络服务,满足不同业务场景对网络能力的差异化需求。煤矿 5G 专网业务数据流向如图 3 所示。井下 5G 终端设备连接 5G 基站,通过承载网中的核心交换机将终端数据分流到煤矿企业内网,实现内网业务流的本地闭环^[10-11],保障内网数据的安全性。

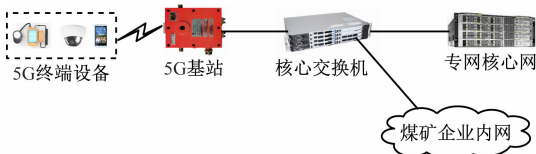


图 3 煤矿 5G 专网业务数据流向

Fig. 3 Business data flow of coal mine 5G private network

在煤矿业务流中引入网络切片技术,实现一张网络同时支持多种类型的业务场景,同时保障井下特定资源的优先权。网络切片技术针对井下不同业务类型数据(智能通信终端数据、生产控制设备数据、传感感知设备数据、监测定位设备数据等)进行分类,各业务优先级不同,对应的传输速率、带宽、时延等指标也不同。为保证高优先级业务数据可靠传输,通过比例公平算法实现无线空口资源调度分配,采用 RB 为网络切片资源业务提供优先传输。

RB 是空口资源分配的最小单位。在每个调度周期内,采用比例公平算法进行切片资源调度时,将业务的特性指标作为优先级度量因子。业务 i 在 t 时刻的优先级为

$$M_i(t) = \arg \max_{i=1,2,\dots,N} x_i \frac{r_i(t)}{R_i(t)} y_i \frac{d_i(t)}{\sum_{i=1}^N d_i(t)} \times z_i \left(-\frac{\log_2 \eta_i}{\lambda_i} \right) \tag{1}$$

式中: N 为业务类别数; x_i, y_i, z_i 分别为传输速率、传输带宽、传输时延权重, $x_i + y_i + z_i = 1$; $r_i(t)$ 为业务 i 在 t 时刻的传输速率; $R_i(t)$ 为业务 i 在 t 时刻之前的平均传输速率; $d_i(t)$ 为业务 i 在 t 时刻的传输带宽; η_i 为业务 i 等候时延与时延门限的最大比值; λ_i 为业务 i 数据包最大等候时延。

3 矿用 5G 基站安全应用设计

矿用 5G 基站的工作功率、射频能量等指标较 4G 技术有较大提升。5G 基站在煤矿井下应用需满足 GB 3836. 1—2010《爆炸性环境 第 1 部分: 设备通用要求》第 6. 6. 1 条要求,即射频总的功率须 ≤ 6 W。因此,在对矿用 5G 基站进行防爆和本安设计基础上,还需考虑射频功率的安全性。

3.1 5G 基站硬件方案

矿用 5G 基站采用 5G NR (New Radio, 新空口)技术规范,可实现煤矿多样化高清视频、语音通信功能,以及安全可靠的数据传输业务^[12],是实现井上下通信一体化、有线与无线融合通信的前端无线组网设备。5G 基站硬件组成如图 4 所示。井下 AC660, 380, 127 V 电源经变压器、开关电源转换对 5G 基站模块供电。基站模块的输入视在功率 ≤ 100 VA。基站模块具有 2 个射频端口 ATN1, ATN2,通过天线隔离板连接外置定向天线。

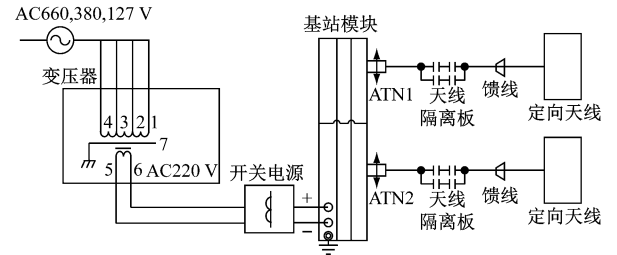


图 4 5G 基站硬件组成

Fig. 4 Hardware composition of 5G base station

天线隔离板电路如图 5 所示。隔离电容 $C_1 - C_4$ 选用 22 pF/6 kV, 为安全系数的 1.5 倍,符合 GB 3836. 4—2010 对于数据传输能量 $<1\ 500\ \mu\text{J}$ 的要求^[13]。天线隔离板对基站射频端口信号进行安全隔离,并过滤高频能量信号,将射频能量由非安转

换为本安,实现5G基站输出端的本安设计。

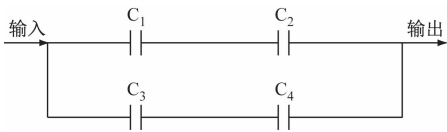


图 5 天线隔离板电路

Fig. 5 Antenna isolation board circuit

3.2 基站射频阌功率

令基站天线前端发射功率为 P ,基站工作频段的天线增益为 G ,则单路射频端口理论发射阌功率为

$$p = P + G \tag{2}$$

基站模块的射频信号经天线隔离板输出,通过天线馈线接入外置天线。该过程将产生隔离电路损耗和天线馈线损耗,则考虑发射损耗的基站天线前端发射功率为

$$P' = P - L \tag{3}$$

式中 L 为发射损耗。

单路射频端口实际发射阌功率为

$$p' = P + G - L \tag{4}$$

基站天线前端发射功率标称值为 26 dBm,天线增益标称值为 8 dBi,测量知发射损耗为 2 dB,则天线前端实际发射功率为 24 dBm,单路射频端口实际发射阌功率为 32 dBm,即 1.6 W。基站射频阌功率为 3.2 W,满足射频总的阌功率 ≤ 6 W 要求。

采用 5G 频谱分析仪测量基站天线前端发射功率。将射频端口连接天线馈线,接入频谱分析仪。参数设置:通道为 1,频宽为 98.28 MHz,分辨率带宽为 100 kHz,视频带宽为 1 MHz。测量结果如图 6 所示。可看出该通道连接天线馈线后发射功率为 24.01 dBm,与计算结果一致。

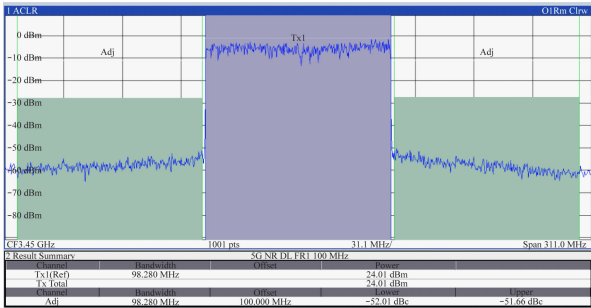


图 6 天线前端发射功率测量结果

Fig. 6 Measurement result of transmitting power in antenna front end

4 系统测试

4.1 系统部署

在矿区部署 5G 通信系统,实现井下主要场所的 5G 信号覆盖。在地面部署专网核心网、核心交

换机等设备,在井下综采工作面、变电所、水泵房、避难硐室等场所部署 4 台基站控制器、24 台 5G 基站、30 部智能通信终端。井下采用 5G 基站+定向天线模式进行覆盖,对于平直巷道,按照覆盖半径 100 m 布设,天线朝向前后 2 个方向,如图 7(a)所示。对于巷道弯曲、转弯、上下坡等特殊地点,在弯曲、转弯、上下坡处放置 1 台 5G 基站,根据信号覆盖情况缩短覆盖半径,如图 7(b)所示。

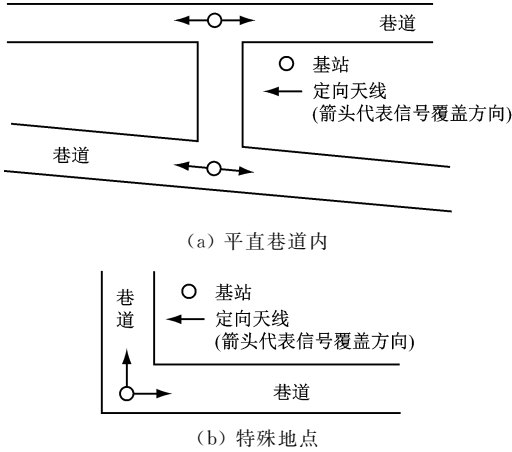


图 7 井下 5G 设备部署

Fig. 7 Layout of underground 5G equipment

4.2 测试结果

测试期间,将智能通信终端连接网络检测软件 Cellular-Z,确保终端处于 5G 基站所在小区内覆盖好点,测试信号强度、上传速率、通信时延、用户业务性能等指标^[14-15]。

为保证可靠通信,基站信号强度应不低于-100 dB。测试信号强度时,测试人员沿巷道向远离基站方向行走。在不同距离下测试 5 次求平均值,结果见表 1。可看出终端与基站之间的距离从 0 增大到 100 m 时,基站信号强度由-75 dB 减小至-98 dB,满足信号强度不低于-100 dB 的要求。

表 1 信号强度测试结果

Table 1 Test results of signal strength

序号	终端与基站距离/m	信号强度/dB	终端视频通话效果
1	0	-75	清晰/稳定
2	20	-79	清晰/稳定
3	40	-85	清晰/稳定
4	60	-88	清晰/稳定
5	80	-92	清晰/稳定
6	100	-98	清晰/稳定

为保证系统增强移动宽带特性,满足井下大带宽数据业务接入需求,基站上传速率应不低于最大上传速率的 60%。采用测试 5 次求平均值的方法测试 5G 基站上传速率,结果如图 8 所示。可看出

终端与基站之间距离从 0 增大到 100 m 过程中,上传速率最大值为 850 Mbit/s,之后随着距离增加,上传速率逐步衰减,在 100 m 处为 520 Mbit/s,为最大值的 61.2%,满足基站上传速率不低于最大上传速率 60%的要求。

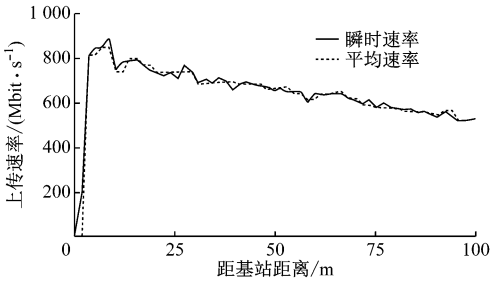


图 8 5G 基站上传速率测试结果

Fig. 8 Test results of 5G base station upload rate

通信时延测试结果如图 9 所示。基站 PING 命令时延最大值为 22 ms,抖动 2 ms;最小值为16 ms,抖动 0。多次测试后取平均值,得通信时延为 18.56 ms,满足智能矿山数据传输低时延需求。



(a) 最小时延 (b) 最大时延

图 9 通信时延测试结果

Fig. 9 Test results of communication time delay

测试用户业务性能时,分别对有无切片资源调度情况下的用户满意度(满意用户个数与接入用户个数比值)进行对比分析。设置井下小区内的接入用户个数为 40,80,120,160,200,测试结果如图 10 所示。可看出无切片资源调度情况下,用户个数由 40 增加到 200 时,用户满意度由 87.5%降至 36%;有切片资源调度情况下,用户个数由 40 增加到 200 时,用户满意度由 92.5%降至 55%,用户个数为 200 时用户满意度较无切片资源调度时提高 52.8%。

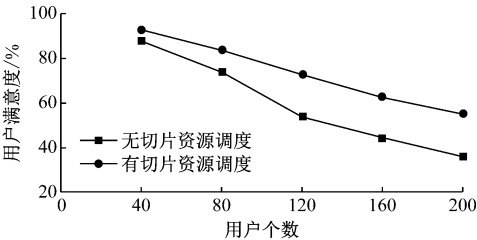


图 10 用户满意度测试结果

Fig. 10 Test results of user satisfaction

5 结语

通过研究煤矿 5G 专网核心网和 5G 基站安全应用技术,形成了矿用 5G 核心网和 5G 基站等产品,可接入多种煤矿井下终端设备。测试结果表明,基于本文专网核心网和 5G 基站安全应用设计的煤矿 5G 通信系统在信号强度、上传速率、通信时延、用户业务性能等方面均满足煤矿业务对 5G 通信的需求,实现了井下多并发、大容量、高速率和低时延无线通信,为智能矿山建设提供了稳定可靠的通信保障。

参考文献(References):

[1] 孙继平,陈晖升. 智慧矿山与 5G 和 WiFi6[J]. 工矿自动化,2019,45(10):1-4.
SUN Jiping, CHEN Huisheng. Smart mine with 5G and WiFi6[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(10):1-4.

[2] 孙继平,张高敏. 矿用 5G 频段选择及天线优化设置研究[J]. 工矿自动化,2020,46(5):1-7.
SUN Jiping, ZHANG Gaomin. Research on 5G frequency band selection and antenna optimization setting in coal mine [J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(5):1-7.

[3] 孙继平. 煤矿智能化与矿用 5G[J]. 工矿自动化, 2020, 46(8):1-7.
SUN Jiping. Coal mine intelligence and mine-used 5G [J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8):1-7.

[4] 孙继平. 煤矿信息化与自动化发展趋势[J]. 工矿自动化, 2015, 41(4):1-5.
SUN Jiping. Development trend of coal mine informatization and automation[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(4):1-5.

[5] 孙继平. 煤矿信息化自动化新技术与发展[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1):19-23.
SUN Jiping. New technology and development of mine informatization and automation[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1):19-23.

[6] 王国法,赵国瑞,胡亚辉. 5G 技术在煤矿智能化中的应用展望[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1):16-23.
WANG Guofa, ZHAO Guorui, HU Yahui. Application prospect of 5G technology in coal mine intelligence[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1):16-23.

[7] 霍振龙,张袁浩. 5G 通信技术及其在煤矿的应用构想[J]. 工矿自动化, 2020, 46(3):1-5.
HUO Zhenlong, ZHANG Yuanhao. 5G communication technology and its application conception in coal mine [J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(3):1-5.

[8] 孟庆勇. 5G 技术在煤矿井下应用架构探讨[J]. 工矿自动化, 2020, 46(7):28-33.

- MENG Qingyong. Probe on 5G architecture applied in coal mine underground [J]. Industry and Mine Automation,2020,46(7):28-33.
- [9] 张立亚. 全矿井融合通信系统研究[J]. 工矿自动化, 2018,44(3):12-16.
ZHANG Liya. Research on mine integrated communication system [J]. Industry and Mine Automation,2018,44(3):12-16.
- [10] 张立亚,孟庆勇,温良. 煤矿应急救援中无线 Mesh 网络多信道分配算法[J]. 工矿自动化, 2015,41(6): 83-86.
ZHANG Liya,MENG Qingyong,WEN Liang. Multi-channel allocation algorithm for wireless Mesh network in coal mine emergency rescue[J]. Industry and Mine Automation,2015,41(6):83-86.
- [11] 冯登国,徐静,兰晓. 5G 移动通信网络安全研究[J]. 软件学报,2018,29(6):1813-1825.
FENG Dengguo,XU Jing,LAN Xiao. Study on 5G mobile communication network security[J]. Journal of Software,2018,29(6):1813-1825.
- [12] 周宏成. 基于分布式基站的 5G 无线网络规划方案 [J]. 电子科学技术,2017,4(4):125-128.
ZHOU Hongcheng. 5G wireless network planning based on distributed base station [J]. Electronic Science & Technology,2017,4(4):125-128.
- [13] GB 3836.4—2010 爆炸性环境 第 4 部分:由本质安全型“i”保护的设[S].
GB 3836. 4-2010 Explosive atmospheres part 4: equipment protection by intrinsic safety "i"[S].
- [14] 吴俊卿. 5G 通信系统深度覆盖分析与研究[J]. 移动通信,2019,43(4):57-62.
WU Junqing. Analysis and research on the depth coverage for 5G communication systems[J]. Mobile Communications,2019,43(4):57-62.
- [15] 李艳军. 多网融合在通信工程中的应用探讨[J]. 信息通信,2016(9):248-249.
LI Yanjun. Probe on application of multi-network fusion in communication engineering[J]. Information & Communications,2016(9):248-249.