

基于 5G 融合组网的煤矿井下 多源信息监测系统

张雪梅¹, 任文华¹, 马慧君², 刘 叙², 王春光²

(1. 国能乌海能源信息技术有限公司, 内蒙古 乌海 016000;

2. 中国移动通信集团内蒙古有限公司 乌海分公司, 内蒙古 乌海 016000)

摘要: 井下环境复杂多变, 存在着瓦斯、煤尘及水患等多种安全隐患, 对矿工的生命安全和矿井的正常生产构成了严重威胁; 为了提高煤矿井下信息监测信息的传输效率, 利用 5G 融合组网技术, 开发一套能够实时监测井下环境参数、设备状态以及人员位置等多源信息的系统; 通过设计系统的数据采集层和物理层, 使系统能够支持更高质量的数据采集和更高效的通信, 提高系统在监测过程中的可靠性; 在此基础上, 结合 5G 井下融合组网技术, 构建通信网络, 实时传输采集的数据, 实现系统的煤矿井下信息监测; 实验结果表明, 所设计系统的丢包率在 0.1% 左右, 并将信号功率波动幅度控制在 ± 1 nm 之间, 可以有效降低温度和湿度监测误差, 同时监测范围明显扩大, 具有良好的实际应用效果。

关键词: 5G 井下融合组网技术; 煤矿井下信息; 信息监测系统

Multi-Source Information Monitoring System for Underground Coal Mines Based on 5G Fusion Networking

ZHANG Xuemei¹, REN Wenhua¹, MA Huijun², LIU Xu², WANG Chunguang²

(1. CHN Energy Wuhai Energy Information Technology Company, Wuhai 016000, China;

2. Wuhai Branch, China Mobile Group Neimenggu Co., Ltd., Wuhai 016000, China)

Abstract: The underground environment is complex and ever-changing, with various safety hazards such as gas, coal dust, and water hazards, it is a serious threat to the life safety of miners and the normal production of mines. In order to improve the transmission efficiency of underground information monitoring in coal mines, 5G fusion networking technology is used to develop a real-time detection system, which monitors multi-source information such as underground environmental parameters, equipment status, and personnel positions. By designing the data collection layer and physical layer of the system, the system can support higher quality data collection and more efficient communication, improving the reliability of the system during monitoring process; On this basis, combined with 5G underground fusion networking technology, the system constructs a communication network to transmit the collected data in real time and achieve the underground information monitoring in coal mines. Experimental results show that the designed system has a packet loss rate of about 0.1%, and the fluctuation amplitude of signal power is controlled within ± 1 nm, which can effectively reduce the monitoring errors of temperature and humidity. Meanwhile, the monitoring range is significantly expanded, and it has good practical application effects.

Keywords: 5G underground fusion networking technology; coal mine underground information; information monitoring system

0 引言

煤矿是人们在富含煤炭的地质层进行挖掘, 从而开采煤炭资源的场所。由于煤矿井下环境复杂, 且非法开采、过度开采、设备老化等原因给煤矿井下的开采行为

带来较大风险。针对当前严峻的煤矿安全生产形势, 设计并开发了煤矿井下多源信息监测系统。煤矿井下多源信息监测系统主要通过各种传感器和监测系统对井下环境和设备状态进行实时监测, 获取相关数据和信息, 为煤矿安全生产提供重要的决策依据和保障。

收稿日期: 2024-04-12; 修回日期: 2024-05-17。

作者简介: 张雪梅(1971-), 女, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 张雪梅, 任文华, 马慧君, 等. 基于 5G 融合组网的煤矿井下多源信息监测系统[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(6):

39-46.

现阶段发展较为成熟的煤矿井下多源信息监测系统主要有：文献 [1] 提出的基于 ARDUINO 的井下环境监测系统，该系统的核心硬件由 ARDUINO 开发板和 ESP8266-WiFi 模块组成，铀矿粉尘浓度、氨及其子体浓度、风速等环境参数通过相应的传感器进行实时监测，并由数据采集器按照规定的通信协议将数据传输至 ARDUINO 主控板。随后，ARDUINO 主控板对接收到的数据进行处理和分析，最终输出环境监测结果。文献 [2] 提出的基于 WaveMesh 网络与 STM32 的煤矿监测系统，该系统采用主从站结构，从站与离层仪相连，负责位移数据的采集。主站则负责数据的存储及通过光纤与井上通讯。利用 WaveMesh 低功耗无线自组网网络实现主从站间的数据传输。文献 [3] 提出的基于 LoRa 无线通信的煤矿矿井监测系统，该系统为了满足井下 LoRa 组网监控的需求，采用了菊花链式的网络拓扑结构，并开发了用于 CH₄、CO、O₂、温湿度等信号采集的 LoRa 无线发射终端和 LoRa 网关。这些设备能够实时测量并转发井下环境信号数据，从而实现井下环境的实时监控。在煤矿井下环境中，存在着复杂的信道干扰和传输延迟等问题。此外，对大量实时数据的高效处理和分析也是一个挑战。因此，需要考虑如何确保可靠的数据传输和高效的数据处理能力。

5G 融合组网技术是一种先进的网络技术，将 5G 技术与井下网络进行有机融合，旨在提供更高效、更可靠、更安全的井下网络通信服务。同时，5G 融合组网技术还具有高可靠性、高安全性、高稳定性等特点，能够满足井下通信的严格要求。该技术的应用可以大幅度提高地下矿产资源的开采效率和生产安全，为现代矿业的发展提供强有力的技术支持。因此，基于 5G 融合组网设计煤矿井下多源信息监测系统，以期能够提升对煤矿的监测，间接地提升煤矿井下行为的安全性。

1 监测系统设计

1.1 系统总体结构

煤矿井下多源信息监测系统的总体结构如图 1 所示。

如图 1 所示，煤矿井下多源信息监测系统包括数据采集层、物理层、控制层和应用层。1) 数据采集层包括传感器和采集信息处理器，传感器负责采集煤矿井下的各种信息数据，如气体浓度、温度、湿度等。采集信息处理器则是对传感器采集到的数据进行处理、整合和转换，将数据传输给上层系统；2) 物理层中的通信网络设备负责在传输介质上传送数据采集层中得到的数据信号，确保通信的可靠性和稳定性；3) 控制层中需要进行系统抗干扰电路设计，用于保证系统在复杂环境中稳定运行，减少外界干扰对系统的影响；4) 应用层中

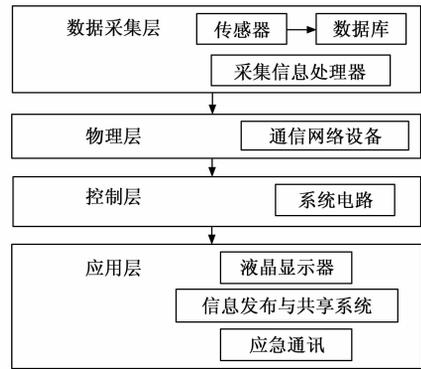


图 1 煤矿井下多源信息监测系统总体结构

的液晶显示器用于展示处理后的数据信息，为矿工或管理员提供直观监测结果；信息发布与共享系统用于将重要的监测数据、分析结果和预警信息通过门户网站、手机 APP 等渠道发布给相关人员，实现信息的实时共享；应急通讯用于确保在紧急情况下能够进行有效的沟通和协调。

1.2 采集层设计

1.2.1 煤矿井下传感器设计

传感器大多采用载体催化原件，制作水平低、质量差，导致容易磨损、使用寿命短，且对各项数据的监控存在偏差。而煤矿井下的环境复杂多变，包括各种气体浓度、温度、湿度等参数需要实时监测。因此，为了实现井下环境的精确监测和数据分析，根据数据采集内容的不同，将传感器分为温湿度传感器、瓦斯传感器、甲烷传感器以及压力传感器等多种类型。其中，选取 DHT11 型温湿度传感器，具有已校准的数字信号输出，精度为 $\pm 5\%RH$ 和 $\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ ，量程为湿度 $5\% \sim 95\%RH$ ，温度 $-20 \sim +60\text{ }^\circ\text{C}$ 。瓦斯传感器的型号为 MJC4/3.0L MC112，工作电压为 $3.0 \pm 0.1\text{ V}$ ，工作电流为 $110 \pm 10\text{ mA}$ ；1% 甲烷的灵敏度为 $20 \sim 40\text{ mV}$ ；1% 丁烷的灵敏度为 $30 \sim 50\text{ mV}$ ；1% 氢气的灵敏度为 $25 \sim 45\text{ mV}$ 。甲烷传感器的型号为 GJC4，测量范围为 $0 \sim 4.00\% \text{ CH}_4$ ；负载能力： $0 \sim 400\text{ }\Omega$ 。压力传感器的型号为 HX710，压力为 $0 \sim 40\text{ kPa}$ ；精度为 24 位。

改装温湿度传感器，使其内部结构包括温度和相对湿度传感器、运算放大器、模/数转换器、校准寄存器、CRC 校验寄存器以及 I2C 串行接口等组成部分。在运行过程中，传感器会首先通过相对湿度或温度传感器采集环境中的温湿度信号，逐一输入到放大器与 A/D 转换器中^[4]。同时，还会对信号进行校准与纠错，最后通过 I2C 串行接口将符合 I2C 总线协议的串行数字信号送至 CC2530 芯片。另外，煤矿井下气压传感器的工作原理如图 2 所示。

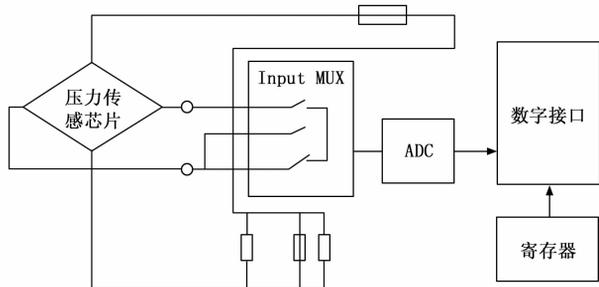


图 2 煤矿井下气压传感器原理图

将煤矿井下的所有传感器设备分别与系统供电电路和处理器连接, 保证实时采集数据能够直接导入到处理器中。

考虑到煤矿井下多源信息监测系统需要收集大量的环境参数数据, 如粉尘浓度、氡及其子体浓度、风速等。这些数据的存储和管理是至关重要的, 以便后续数据分析和决策支持^[5]。为此, 在传感器中装设数据库表, 可以有效地组织和存储大量的煤矿温度、湿度、气压、瓦斯浓度、人员分布数据、传感器装设等数据, 并提供快速的数据检索和查询功能。数据库表的构建情况如表 1 所示。

表 1 煤矿井下传感器装设数据库表

字段名称	字段说明	存储类型	存储长度/byte
Sensor_ID	传感器 ID	integer	8
Sensor_name	传感器名称	varchar	50
Sensor_model	传感器型号	varchar	30
Sensor_Manufacturer	出厂商	varchar	100
Sensor_frequency	传感频率	integer	20
Sensor_position	安装位置	varchar	50
Sensor_ele	剩余电量	integer	20

按照上述方式可以得出数据库中所有数据库表的构建结果, 并根据数据之间的逻辑关系形成链接, 保证数据的交互与调取能力。数据库中的实时表存储最新监测数据, 根据测点提取数据的周期进行更新^[6]。历史表只存储最近 3 个月的监测数据, 一旦超过这个时间, 数据需要被转移至备份表, 以防止数据过多影响调用速度。

1.2.2 煤矿井下采集信息处理器设计

采集信息处理器可以对从传感器采集到的原始数据进行预处理, 包括数据清洗、滤波、校正等, 确保采集到的数据准确可靠。为了给煤矿井下多源信息监测系统软件功能的实现提供硬件支持, 选择 ARM920T 处理器替换传统系统中的信息处理器, 如表 2 所示。

该处理器采用了 16/32 位 RISC 架构, 包含了 31 个 32 位通用寄存器, 这些寄存器可以用来传输和暂存数据, 并保存运算结果。ARM 体系结构支持多达 7 种处理器模式, 每种模式在任意时刻都有与其对应的寄

存器。

表 2 ARM920T 处理器

寄存器位	作用	值
31 : 4	实施者	0 * 41
23 : 20	规范修订	0 * 1
19 : 16	体系结构 (ARMv4T)	0 * 2
15 : 4	零件编号	0 * 920
3 : 0	布局修订	修订

1.3 物理层设计

煤矿井下需要监测的信息类型众多, 包括瓦斯浓度、温度、湿度、压力及人员定位等, 因此采集层中不同传感器和设备存在数据同步和校准的问题。为了确保各个传感器之间的数据一致性和准确性, 将 PCB 电路板作为核心组成部分, 与网络协调器、路由器等关键部件紧密配合构成物理层。PCB 电路板具有高度的集成性和稳定性, 能够容纳多个电子元件、芯片和接口, 使得传感器和设备的连接更加紧密和高效。与此同时, PCB 电路板与网络协调器、路由器等关键部件紧密配合, 形成了一个高效的数据传输和处理网络。网络协调器负责协调各个传感器之间的通信, 确保数据按照预定的格式和时序进行传输; 路由器则负责数据的路由和转发, 确保信息能够准确、快速地到达目的地。通过这种方式可以实现多源信息的有效融合, 这使得煤矿井下多源信息监测系统能够实时、准确地获取各类监测数据, 为煤矿的安全生产提供了有力的技术保障。

PCB 电路原理如图 3 所示。

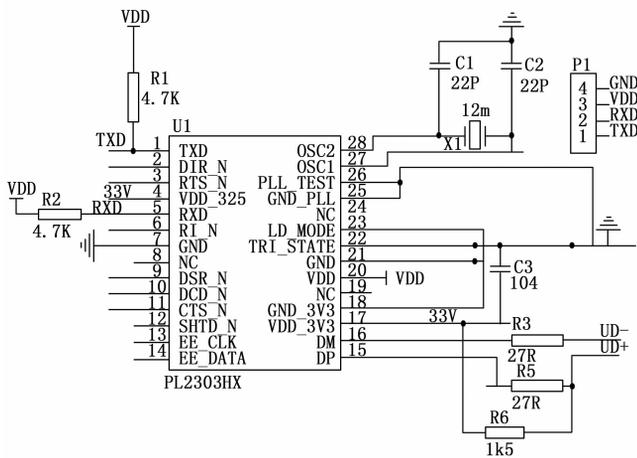


图 3 PCB 电路原理图

PCB 电路板承载着各种电子元器件, 包括传感器、处理器、通信模块等。这些元器件通过 PCB 电路板上的电路布局和走线实现相互连接, 形成一个完整的硬件系统。传感器负责采集井下环境参数和设备状态信息, 处理器对采集到的数据进行处理和分析, 而通信模块则

负责数据的传输和指令的接收。在 PCB 电路板中添加隔离变压器到电源与电网之间，以防止电网干扰对电路的影响。较低电平的子系统应与总地线保持较近的距离。信号线应采用 STP 双绞线，每条线都有各自的屏蔽层。其中屏蔽双绞线扭结数越多，抗干扰能力越强。

网络协调器的组成如图 4 所示。

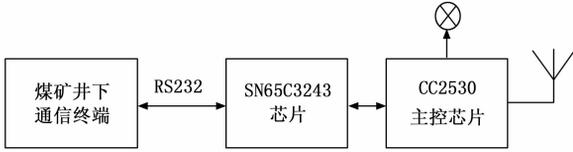


图 4 网络协调器

网络协调器作为系统中的重要组成部分，负责通过无线收发方式与路由器节点或者终端节点进行数据传输，同时以有线的方式与计算机进行数据传输。根据通信网络的执行内容，调整网络协调器的工作状态，一般情况下，通信网络的任务执行内容包括数据发送和数据接收两种，在发送状态下，网络协调器中的主控芯片获取数据信号，并通过调制器，根据网络信道特征对初始发送数据进行转换，在满足信道传输要求的同时，缩小数据在信道中的占用率，将 TTL 电平转换至低电平状态，将该数据发送至目标终端。接收数据过程中，CC2530 芯片先接收到数据信号，然后经 SN65C3243 将 TTL 电平转换为 RS232 的标准电平，数据接收终端通过软件观测矿井下环境数据来对井下信息进行实时监控，并将接收到计算机发送的指令通过无线传输给井下各个分节点。路由器设计采用了 CC2530 及外围电路组成，CC2530 是由 CC2430 升级的新一代片上系统。路由器需要随时准备接收移动节点传输的数据，因此需要保持持续工作状态，这对电量的消耗较大。因此，路由器通过电网进行供电，并配备了备用电源。

路由器则负责井下无线网络的构建和维护，确保各个节点之间的通信畅通。它采用 CC2530 等新一代片上系统，具备高性能和低功耗的特点，能够持续稳定地工作。为了确保路由器的持续供电，通常通过电网进行供电，并配备备用电源以应对突发情况。网络路由器结构如图 5 所示。

综上，依赖于采集层和物理层提供的大量实时数据，控制层可以通过启动通风系统或发出警报来确保井下安全；应用层可以为用户提供有关煤矿井下状况的深入理解，并帮助优化生产流程、提高安全性能。通过对采集层和物理层进行设计，使其能够支持更高质量的数据采集和更高效的通信，以满足控制层和应用层对于实时性、准确性、可靠性的更高要求，从而实现精准控制和高级应用。

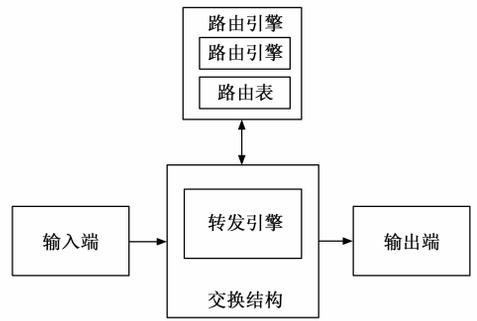


图 5 网络路由器

2 煤矿井下监测

基于 5G 融合组网的煤矿井下多源信息监测系统中，物理层的通信网络设备负责在传输介质上传送数据采集层中得到的数据信号，并确保通信的可靠性和稳定性。引入 5G 通信技术可以提高数据传输速率和信号覆盖范围，增强系统的实时监测能力，从而更好地支持煤矿井下监测系统的运行和数据传输^[7]。通过使用 5G 通信技术，物理层可以更快速、准确地将采集到的数据传输给其他层，以实现煤矿环境及工作状态的实时监控和分析。

2.1 煤矿井下数据传输

煤矿井下环境复杂，机械设备众多，岩层分布不均，这些障碍物会对无线信号的传播造成阻碍，导致信号能量衰减，覆盖范围减小。此外，岩层中的矿物质也可能对信号产生吸收和散射作用，进一步加剧了信号干扰的问题。这会导致得到的煤矿井下环境与工作数据在传输数据时遇到信号覆盖不足，影响煤矿井下的数据传输效率。而 5G 利用毫米波通讯技术，能够更好地穿透障碍物，提高在复杂环境中的信号覆盖范围和传输性能。因此，将 5G 技术应用于井下环境，通过构建 5G 井下融合通信网络，将煤矿井下的实时采集数据上传给系统监测终端，实现数据传输。5G 井下融合组网技术原理如图 6 所示。

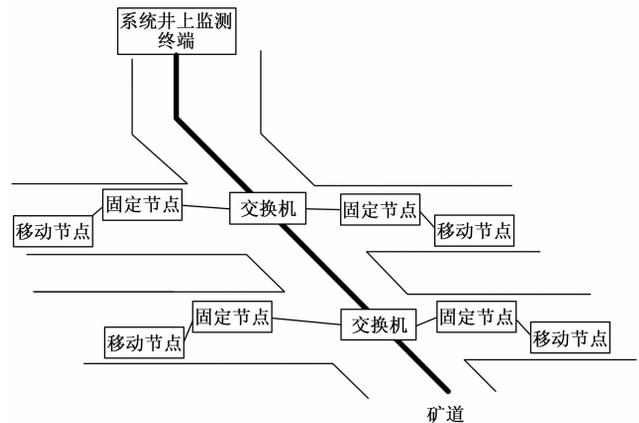


图 6 5G 融合组网技术原理图

图 6 将煤矿井下物联网作为 5G 副载波传输用户数据, 终端连接方式为 5G 与物联网双连接^[8]。为保证煤矿井下数据传输的安全性, 设置路由协议作为传输任务的约束条件, 路由协议由网络层、应用层和安全服务提供层等多部分组成, 而物理层作为整个协议栈的基础, 规范着其最底层。它具有 915 MHz 和 2.4 GHz 两种工作频段, 能够适应煤矿井下与井上等多种环境下的数据传输任务。两种工作频段提供信道的频段中心可以表示为:

$$\begin{cases} C_{915} = 906 + 2X(J - 1) & J = 1, 2, \dots, 10 \\ C_{2.4} = 2045 + 5X(J - 11) & J = 11, 12, \dots, 26 \end{cases} \quad (1)$$

式中, J 为组建 5G 井下融合通信网络的信道编号。

网络层的地址域会随着广播标志子域的变化而变化。当广播标志子域的值 1 时, 目的地址为组网 GroupID; 而当其值为 0 时, 目的地址则为设备网络地址。应用层主要包含应用支持子层、应用框架、设备对象等部分, 为数据的传输工作提供支持和约束^[9]。构建的 5G 井下融合网络由多个信道组成, 由于传感器型号与工作方式不同, 会形成多个不同带宽的传输信道, 在实时传感数据的传输过程中, 需要根据待传输数据大小, 选择合适信道。任意信道的传输容量可以表示为:

$$W(i) = L \times \lg[1 + P_x(C_{915} \cup C_{2.4})] \quad (2)$$

式中, L 为信道带宽, 该参数具体取值由传感器工作参数决定, P_x 为传输信号功率。

在传输信道选择过程中主要是比较调制信息与信道之间的大小关系, 若传输信息大于信道容量, 则对网络传输信道进行重新选择, 否则认为该信道能够满足信息传输要求, 执行传输操作。利用组建的 5G 井下融合通信网络, 将实时采集的煤矿井下环境与工作数据传递给系统监测终端, 在数据传输状态下, 系统监测终端的工作流程如图 7 所示。

系统终端节点程序首先需要通过主芯片进行初始化, 发送数据传输请求, 等待路由由节点响应并分配网络地址。成功接入网络后, 如果此时将路由节点模块通过串口的扩展接口与计算机进行连接, 该节点的某些数据信息将会在串口调试助手软件上显示^[10]。同时, 该软件还可以显示煤矿井下传感器采集到的数据信息。

煤矿井下巷道是井下信息的主要监测对象, 通常采用拱形截面。这会导致信号在传播过程中发生反射、折射和散射等现象, 影响 5G 信号的覆盖范围和穿透能力, 导致部分区域信号弱或信号无法到达。为了达到最有效的监测目的, 降低煤矿井下环境因素对数据传输质量的干扰, 布置一定数量的传感器节点测量井下不同区域的信号强度值^[11], 通过对比不同区域的信号强度值, 确定哪些区域是信号覆盖的薄弱环节, 即问题区域^[12]。针对问题区域, 增加传感器节点的密度或采取其他措施来增强信号覆盖范围和穿透能力。进而实现对井下环境

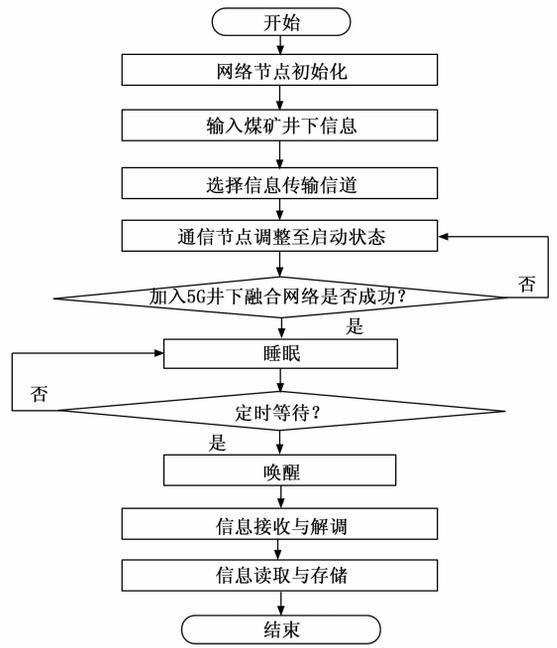


图 7 数据传输状态下系统监测终端工作流程图

的全面监测, 并及时采取相应的措施。

煤矿井下信息监测系统中任意传感器发射信号在任意位置上的信号强度可以表示为:

$$B(d) = W(i)[B_{\text{transmit}} - 10\kappa_{\text{attenuation}} \lg(d) + F] \quad (3)$$

式中, B_{transmit} 为传感器初始发射的信号强度, d 为煤矿井下任意监测位置与传感器之间的距离, $\kappa_{\text{attenuation}}$ 为路径衰减因子, F 为正态分布函数^[13]。

当 $B(d) < B_{\text{transmit}}$ 时, 则认为该位置的信号薄弱, 为问题区域。则在问题区域布设监测点时, 要求任意两个传感器之间的间隔距离满足如下条件:

$$\Delta d = 10^{[B_{\text{transmit}} - B(C_0/C_1) + F]/10\kappa_{\text{attenuation}}} \quad (4)$$

式中, C_0 和 C_1 分别为首个煤矿井下测点和 1 个测点。

按照上述方式可以得出煤矿井下所有测点位置的设置结果, 并将传感器设备安装在测点位置上。那么系统监测终端实际接收的煤矿井下数据可以表示为:

$$x_{\text{receive}} = \Delta d \kappa_m \kappa_e x^{-\kappa_{\text{attenuation}}(C)}, x \in X, C = C_{915}, C_{2.4} \quad (5)$$

式中, κ_m 和 κ_e 分别为传输数据的调制与解调系数, $\kappa_{\text{attenuation}}(C)$ 为对应传输信道的衰减系数。按照上述流程, 将实时采集的传感器数据输入到 5G 井下融合通信网络中, 综合考虑传输数据大小与信道容量、信道状态和监测点, 在选择的传输信道下, 完成煤矿井下实时数据信息的传输工作。

2.2 煤矿井下信息监测

根据上述传输得到的煤矿井下实时数据信息, 得到了煤矿井下信息监测需要的相关参数: 温度^[14]、湿度、矿压、瓦斯浓度^[15]、甲烷浓度、氧气浓度、空气质量等。以实时接收的上述煤矿井下信息为数据支持, 对上

述监测参数的具体取值进行计算。根据煤矿井下传感器的工作原理，温度和湿度数据可通过煤矿井下传感器直接得出^[16-17]，而瓦斯、甲烷以及氧气浓度监测参数的计算结果为：

$$\begin{cases} C_{\text{gas}} = \frac{x_{\text{receive-gas}}}{V_{\text{gas}}} \\ C_{\text{CH}_4} = \frac{x_{\text{receive-CH}_4}}{V_{\text{CH}_4}} \\ C_{\text{O}_2} = \frac{x_{\text{receive-O}_2}}{V_{\text{O}_2}} \end{cases} \quad (6)$$

式中， $x_{\text{receive-gas}}$ 、 $x_{\text{receive-CH}_4}$ 和 $x_{\text{receive-O}_2}$ 分别为接收数据中的瓦斯含量、甲烷含量和氧气含量， V_{gas} 、 V_{CH_4} 和 V_{O_2} 分别为瓦斯、甲烷和氧气传感器的感应区域体积^[18]。将实时接收数据代入公式 (9) 中，即可得出煤矿井下信息监测参数的计算结果，按照上述方式可以得出其他所有监测参数的计算结果，最终将 5G 井下融合网络中各个测点位置上监测参数的计算结果通过显示器进行可视化输出，完成系统的煤矿井下信息监测功能。

3 系统测试

3.1 煤矿项目概况

此次系统测试实验选择某煤矿项目作为研究对象，该煤矿由 3 个煤层组成，每个煤层的平均埋藏深度约为 200 m。煤矿矿井的总面积达到 12 平方公里，可采煤层的厚度为 4.5 m。煤矿资源的平均埋藏深度约为 237 m，工作面进风顺槽与开切眼贯通处的底板标高为 580 m。煤矿使用矿井作为开采环境，矿井由井筒、巷道、工作面、通风系统、排水系统、供电系统等部分组成，为煤矿的开采工作提供支持。根据基于 5G 井下融合组网技术的煤矿井下信息监测硬件系统的设计结果，在选择的煤矿矿井中设置多个测点，并将相应的传感器以及网络通信设备安装在测点位置上。煤矿矿井局部位置的测点实际安装情况如图 8 所示。

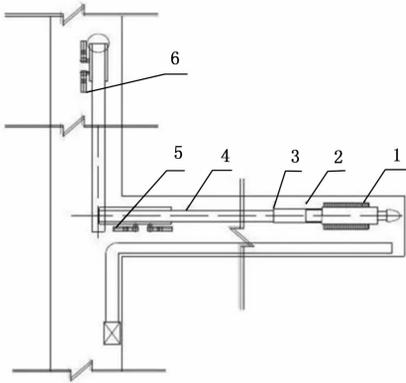


图 8 测点位置

3.2 系统设置

设计基于 5G 井下融合组网技术的煤矿井下多源信

息监测系统采用 IAR Embedded Workbench 工具作为集成开发环境。完成程序编写后，需要进行编译、连接、下载时，常规操作步骤为：在 Project 菜单中选择 Make 进行编译和连接，若工程无错误，即可进行下载与运行。煤矿井下多源信息 5G 井下融合组网监测系统如图 9 所示。

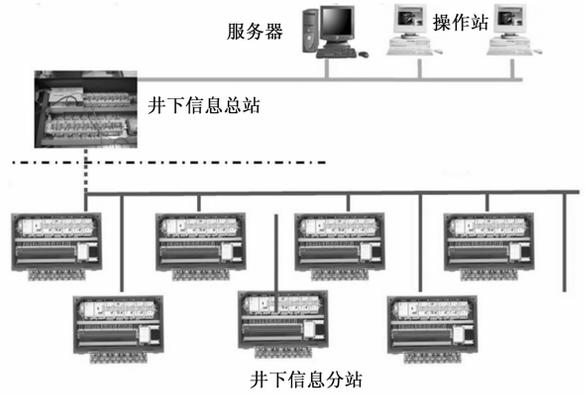


图 9 煤矿井下多源信息 5G 井下融合组网监测系统

按照上述方式完成对硬件系统中其他硬件设备的安装，为保证 5G 井下融合组网技术在煤矿井下多源信息监测系统中的应用性能，在通信设备的支持下组建煤矿井下环境的 5G 融合通信网络，并对网络环境进行配置，具体配置情况如表 3 所示。

表 3 5G 井下融合网络配置情况

参数名称	参数值
信号频段	5G NR mmWave 频段
中心频率	28 GHz
基站传输功率	20 dBm
接收灵敏度	-120 dBm
中心基站覆盖半径	100 m
辅助节点(AP)数量	5 个
每个节点覆盖范围	20 m
数据传输速率	1 Gbps
调制编码	256-QAM

结合表 3 中的配置情况，利用开发工具对煤矿井下多源信息监测系统软件部分进行评估，得出该系统的评价结果如图 10 所示。

从图 10 中可以看出，煤矿井下多源信息监测系统的丢包率在 0.1% 左右，且在数据传输过程中，可以将信号功率波动幅度控制在 ±1 nm 之间。这是因为 5G 技术采用了更高频段的信号传输，具有较大的带宽和稳定的信号传输性能，能够保证数据传输时的稳定性。同时 5G 技术支持更高速率的数据传输，能够更快地完成数据传输过程，减少传输过程中因干扰或信号弱导致的数据丢失情况。同时，融合组网技术允许设备在不同网络之间无缝切换，保证数据传输的连续性和稳定性，这有

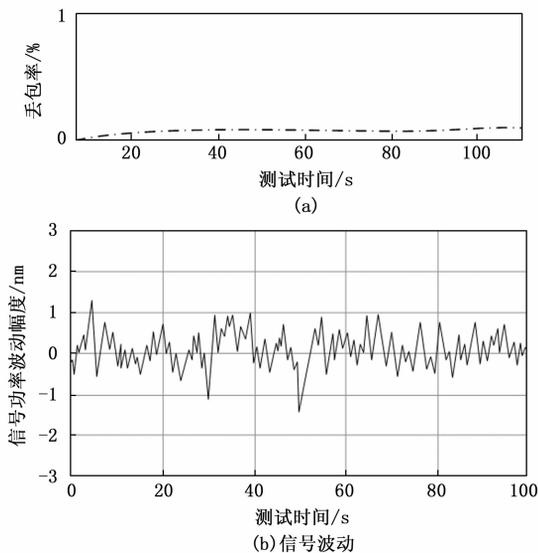


图 10 煤矿井下多源信息监测系统评估结果

助于提高整体的数据传输成功率。

3.3 结果与分析

为了进一步体现出设计系统的性能优势, 设置文献 [1] 基于 ARDUINO 的井下环境监测系统和文献 [2] 基于 WaveMesh 网络与 STM32 的煤矿监测系统作为实验的对比系统, 利用选择的开发工具, 完成对比系统的开发, 并得出对应的监测结果。

设置煤矿井下温度与湿度数据监测误差作为系统监测精度性能的量化测试指标, 监测误差指标的数值结果为:

$$\begin{cases} \epsilon_T = |T_{\text{system}} - T_{\text{set}}| \\ \epsilon_H = |\mu_{\text{system}} - \mu_{\text{set}}| \end{cases} \quad (7)$$

式中, T_{system} 和 μ_{system} 为系统输出的温度监测值和湿度监测值, T_{set} 和 μ_{set} 分别为温度与湿度的设定值。计算得出温度与湿度数据监测误差越小, 证明对应系统的监测精度越高。另外系统信息监测范围的量化测试指标为监测面积, 该指标的测试结果如下:

$$A = \pi R_{\text{max}}^2 \quad (8)$$

式中, R_{max} 为系统最大监测半径, 该变量可通过度量监测中心与最远监测点之间距离得出具体取值。最终计算得出监测面积越大, 证明对应系统的监测范围越广。

3.3.1 监测精度测试结果

温度和湿度是煤矿井下信息监测中的重要参数。相比于其他参数, 温度和湿度受到的干扰和影响因素较小。煤矿井下环境往往较为封闭且稳定, 温度和湿度变化受外界因素的影响较小, 如天气变化等。因此, 温度和湿度数据更容易准确地反映煤矿井下工作环境的真实情况。因此, 监测精度测试通过不同系统采集和监测井下相关信息, 得出反映煤矿井下多源信息监测系统监测精度性能的测试结果, 如表 4 所示。

表 4 煤矿井下多源信息监测系统监测精度性能测试数据表

测点编号	设置值		文献[1]系统		文献[2]系统		设计系统	
	温度 / $^{\circ}\text{C}$	湿度 /%						
1	38.4	48.6	37.2	47.7	38.0	48.2	38.5	48.5
2	36.6	49.4	34.3	48.3	36.1	49.8	36.5	49.5
3	39.1	60.5	37.8	61.6	39.6	60.9	39.0	60.5
4	37.5	61.7	38.9	62.4	37.9	61.2	37.5	61.7
5	40.2	58.3	42.1	57.5	40.7	58.0	40.2	58.2
6	39.7	55.2	38.0	54.1	39.4	55.7	39.5	55.2

将表 4 中的数据代入公式 (7) 中, 计算得出两种对比系统温度监测误差平均值分别为 1.63°C 和 0.49°C , 平均湿度监测误差分别为 1.01% 和 0.41% , 而设计系统温度和湿度监测误差的平均值分别为 0.06°C 和 0.06% , 相对较小, 这是因为 5G 井下融合组网技术的应用为数据传输提供了强大的支持。通过 5G 网络的高速传输和低时延特性, 设计系统能够实现实时、准确的数据传输。此外, 5G 网络还具有较高的抗干扰能力和稳定性, 能够在煤矿井下复杂多变的环境中保持稳定的通信质量。这不仅确保了数据的实时性和准确性, 还降低了温度和湿度监测的误差。因此, 设计系统的温度和湿度监测误差的平均值相对较低。

3.3.2 监测范围测试结果

监测范围测试是针对煤矿井下多源信息监测系统中不同系统的无线信号传输范围测试, 评估系统在不同位置和距离下的监测性能和覆盖范围。通过监测位置与最远监测点位置的确定、距离度量以及公式 (8) 的计算, 得出系统信息监测范围的测试对比结果, 如图 11 所示。

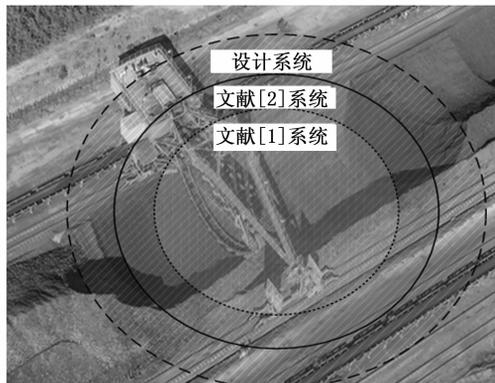


图 11 煤矿井下多源信息监测系统监测范围对比结果

从图 11 中可以直观地看出, 与两种对比监测系统相比, 设计系统的监测范围几乎覆盖了煤矿的整个区域。这是因为设计系统通过精心设计和优化传感器网络布局, 实现更密集、更全面的数据采集。同时, 5G 网络的广覆盖性和高可靠性也确保了监测范围的扩大和监测数据的准确性。使得设计系统的监测范围更广。

