

煤矿钻机用数字直驱电液控制系统设计与应用

彭光宇^{1,2*}, 姚宁平^{1,2,3}, 董洪波^{1,2}, 刘璞^{1,2,3}, 李坤², 刘若君²

1. 煤炭科学研究总院 北京 100013

2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077

3. 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083

摘要: 针对常规煤矿钻机电控系统集成度低、现场调试周期长、故障定位效率低等问题, 设计一种煤矿钻机用数字直驱式电液控制系统。采用分布式架构, 构建双通道隔离 CAN 总线通信网络, 开发数据服务与边缘计算模块, 多源异构数据采集板和基于数字阀的驱动电路; 制定专用通信协议, 开发总线在线监测、传感器故障诊断、变值触发式控制指令下发算法; 融合远程组网与 IAP 远程升级技术, 实现系统远程调试与维护。将系统应用于多种矿用钻机, 与传统电液控制系统相比, 平均调试周期缩短约 50%, 非电源短路情况下的常规电控系统故障识别率达 100%, 售后服务频次降低约 50%。本研究有效提升了电控钻机数字化水平和系统可维护性, 为矿用钻机数字化升级提供了一套可行的方案。

关键词: 数字直驱; 电液控制; CAN 总线; 远程维护; 分布式架构

中图分类号: TP271

收稿日期: 2025-12-26

Design and Application of a Digital Direct-Drive Electro-Hydraulic Control System for Coal Mine Drilling Rigs

Peng Guangyu^{1,2}, Yao Ningping^{1,2*,3}, Dong Hongbo^{1,2}, Liu Pu^{1,2,3}, Li Kun², Liu Ruojun²

1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China

2. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China

3. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083,

China;

Abstract: To address the issues of low integration, lengthy on-site commissioning cycles, and inefficient fault localization in conventional electric control systems for coal mine drilling rigs, a digital direct-drive electro-hydraulic control system for coal mine drilling rigs is designed. A distributed architecture is adopted, and a dual-channel isolated CAN bus communication network is constructed. Data service and edge computing modules, multi-source heterogeneous data acquisition boards, and digital valve-based drive circuits are developed. A dedicated

基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFB4703601); 陕西省重点研发计划项目(2024GX-YBXM-313)

第一作者: 彭光宇(1991-), 男, 副研究员, 博士研究生, 从事煤矿井下钻探装备自动化智能化技术研究。E-mail: pengguangyu@cctegxian.com, ORCID: 0009-0009-9188-2814

communication protocol is established, along with algorithms for bus online monitoring, sensor fault diagnosis, and variable-triggered control command transmission. Remote networking and IAP remote upgrade technologies are integrated to enable remote system commissioning and maintenance. The system is applied to various types of mine drilling rigs. Compared with traditional electro-hydraulic control systems, the average commissioning cycle is shortened by approximately 50%, the fault identification rate for conventional electric control systems under non-power-short-circuit conditions reaches 100%, and after-sales service frequency is reduced by about 50%. This study effectively enhances the digitalization level and system maintainability of electrically controlled drilling rigs, offering a feasible solution for the digital upgrade of mining drilling rigs.

Key words: digital direct-drive; electro-hydraulic control; CAN bus; remote maintenance; distributed architecture

煤炭作为我国的主体能源，其安全、绿色与高效开采关系到国家能源战略的稳定与安全(王国法, 2022; 袁亮, 2023; 王国法等, 2021)。随着煤矿智能化建设的持续推进，电控钻机在煤矿井下瓦斯抽采、探放水等关键作业中扮演着日益重要的角色(王清峰, 2022)。然而，煤矿井下工况复杂、空间受限、电磁干扰强，对钻机控制系统提出了小型化、高可靠性和易维护的更高要求(李晓明, 2020)。

常规矿用钻机电控系统受隔爆结构与控制架构限制，普遍存在控制器体积偏大、硬件成本较高、现场部署调试周期长、故障定位难度大等问题(张刚, 2021)，制约了钻机数字化升级与高效运维。针对煤矿井下电液控制问题，国内相关科研院所与高校开展了相关研究。高晋等人(高晋等, 2020)基于双 CAN 总线技术构建了薄煤层液压支架电液控制系统，实现了分布式控制；张晓海等人(张晓海等, 2023)设计的端头控制器提升了液压支架电液控制系统的智能化水平；杨永锴等人(杨永锴等, 2023)对总线通信故障诊断方法的研究，为系统可靠性提升提供了支撑。上述研究在分布式控制、总线通信与系统智能化等方面取得了一定进展，但在关键器件国产化、小型化与低成本设计，以及面向工程应用的快速部署与远程调试维护等方面，仍有进一步研究与完善的空间。

基于此，本文面向煤矿井下电控钻机，设计一种数字直驱式电液控制系统。采用分布式架构，设计双通道隔离 CAN 总线通信网络，以提高系统通信可靠性；研制以 STM32 为核心的多源异构数据采集板及搭载嵌入式 Linux 的数据服务与边缘计算模块，实现多源数据的采集与现场处理；开发基于数字阀的电液驱动电路、专用通信协议及故障诊断算法，并设计相应的人机交互界面，实现系统运行状态的可视化与故障快速定位；通过集成以太网内网穿透与 IAP 远程升级技术(丁远等, 2019)，构建远程调试与维护功能模块，降低系统运维成本。最后，通过多型号钻机的现场应用，对所设计系统的功能与工程应用效果进行验证。

1 系统总体方案设计

钻机是煤矿井下钻孔施工的关键设备，电控钻机通过电液控制系统实现视距遥控，有助于降低劳动强度并提高作业安全性(李坤等, 2023)。传统电控钻机电液控制系统由矿用本安型遥控器、防爆控制器、传感器组和电磁阀组组成(董洪波等, 2020)。各类传感器和电磁阀均需通过独立的防爆电缆与控制器连接，系统线缆数量多、控制器内部接线复杂，显著增加了控制器体积，也使现场安装、调试与故障排查难度显著提高。

CAN 总线以其优异的抗干扰性和可靠性，在煤矿井下被广泛应用(吴青收等, 2012; 黄增波等, 2022)。本文引入 CAN 总线防爆数字阀技术，通过数字直驱方式实现控制指令到阀芯位移的直接闭环驱动，“数字直驱”在本系统中定义为：以数字信号为指令、通过 CAN 总线直接下发目标开度，驱动数字阀内部控制器完成阀芯位置闭环控制，省去传统模拟量放大与转换环节。采用总线化架构显著减少电磁阀布线数量、简化驱动电路设计、提升系统集成度，实现防爆控制器小型化、轻量化。针对紧凑型钻机对电液控制系统数字化、集成化的需求，采用分布式设计，将数据采集、处理和显示触摸等功能模块集成设计为一个小型化的本安设备。

系统总体方案如图 1 所示，整体设计严格遵循 GB/T 3836 – 2021 系列防爆标准，其中，蓝色部分为本安 ib 保护等级电路，黄色部分为隔爆电路，绿色部分为非防爆电路，主要用于系统的远程调试与维护。

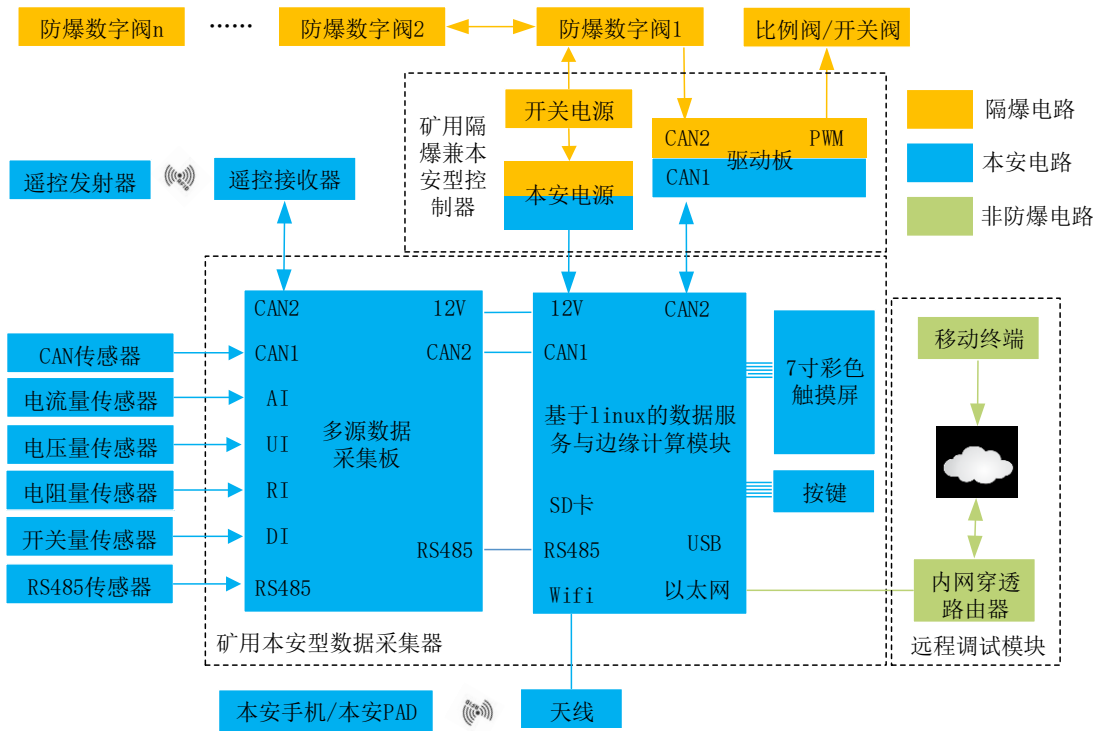


图 1 数字直驱式电液控制系统总体方案

Fig.1 Overall scheme of the digital direct-drive electro-hydraulic control system

系统工作流程如下：（1）多源数据采集板（以下简称采集板）负责采集各类传感器的信号，经处理后通过 CAN2 总线发送至基于 Linux 的数据服务与边缘计算模块（以下简称 Linux 模块）。（2）Linux 模块解析接收到的传感器数据及遥控器指令，并根据钻机施工工艺计算出驱动数字阀及部分非总线阀所需的控制数据，再通过 CAN2 发送至驱动板。（3）驱动板作为数据路由，将来自 CAN1 的数字阀驱动数据通过 CAN2 转发至相应的数字阀，同时将其其他非数字阀的控制数据映射到其 PWM 输出接口；此外，驱动板还将数字阀的状态反馈数据通过 CAN1 回传至 Linux 模块，用于系统状态监测与故障分析。

在系统运维方面，结合以太网内网穿透与远程组网技术，实现对系统运行数据的远程访问，用于支持系统远程调试与故障诊断。同时，基于 IAP 远程程序升级技术，通过本安型移动终端完成系统程序远程更新，确保系统持续保持最佳状态。

2 硬件系统设计与选型

硬件系统主要包含电源、多源数据采集模块、数据服务与边缘计算模块、驱动电路、防爆结构集成及远程调试模块六大部分，遵循“供电层—感知层—决策层—执行层—防护层”的纵向架构。

2.1 电源选型与分配

电源是保障控制系统稳定运行的基础，合理的电源分配架构对提升系统单位体积带载能力、满足本安防爆设计规范至关重要。系统电源分配方案如图 2 所示，其中黄色区域为隔爆电路，蓝色区域为本安电路。

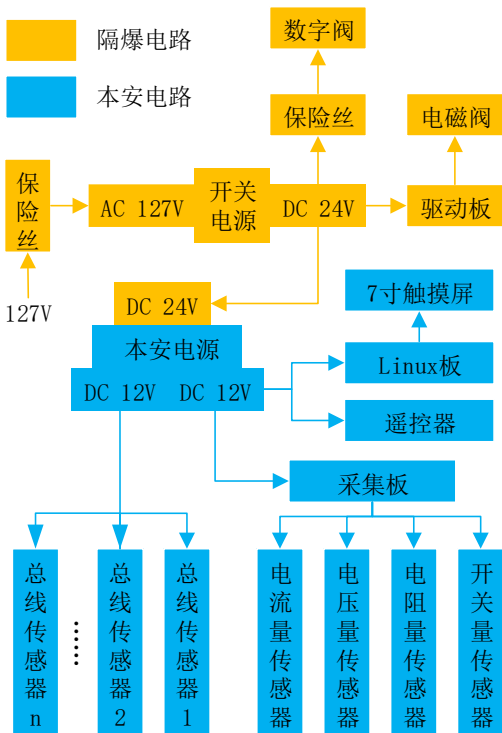


图 2 控制系统电源分配示意图

Fig.2 Power distribution diagram of the control system

煤矿井下控制系统电源以 AC 127 V 为主(杨战社等, 2025; 马龙, 2020), 因此系统选择 AC 127 V 作为输入电压。依据 CB/T 3836.1 – 2021 标准要求, 单腔防爆控制柜的功率不超过 250 W, 综合考虑设备体积与散热条件, 选用明纬 350 W 宽电压输入型开关电源作为主电源模块。该电源输出 DC 24 V, 经过熔断器后为数字阀供电; 当数字阀线路发生短路时, 熔断器迅速熔断, 保护后级本安电路与驱动板正常工作。驱动板同样采用 DC 24 V 供电, 通过程序调节 PWM 输出信号的占空比, 实现对比例阀的控制。

鉴于钻机数字化改造需接入传感器数量较多(王清峰等, 2025; 郭云飞等, 2025), 且本安电源输出功率受限, 选用一款小体积双路输出本安电源。其中一路输出本安 DC 12 V, 为遥控器、数据采集板及 Linux 模块供电; 另一路输出本安 DC 12 V, 为总线型传感器供电。其余开关量、模拟量等传感器则连接至采集板, 由采集板上的电源接口统一供电。为评估系统的最大带载能力, 采用下述模型计算可接入的传感器和阀数量。

$$P_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} p_{ij} \quad (1)$$

式中: $P_{\text{总}}$ 表示计算总功率, W; i 表示设备类型编号; m_i 表示第 i 类设备的数量; p_{ij} 表示第 j 个第 i 类设备的额定功率, W。

对于总线型传感器, 其接入总功率需满足:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} p_{ij} \leq P_{\text{本安, max}} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{本安, max}}$ 为单路本安电源的最大输出功率, W。

2.2 多源异构数据采集电路设计

为满足电控数字化钻机对多种传感器信号的采集需求, 并兼顾 GB/T 3836.4-2021 标准, 以及高可靠性、低成本和结构紧凑性要求。选用基于 ARM Cortex-M3 内核的 STM32F105RC 微控制器作为电路核心, 集成 2 路 CAN 隔离收发芯片和多路高精度 ADC 通道。电路以双通道隔离 CAN 总线为通信主干, 扩展了模拟量输入、数字量输入及 RS485 等接口, 具体类型与数量如表 1 所列。

表 1 多源数据采集板接口类型与数量

Table 1 Interface types and quantities for multi-source data acquisition board

接口类型	符号	数量	备注
电流量采集接口	AI	11 路	可复用为 AI 或 DI
电压量采集接口	UI	11 路	
电阻量采集接口	RI	2 路	
开关量采集接口	DI	8 路	
CAN 总线接口	CAN	2 路	隔离设计
RS485 总线接口	RS485	1 路	隔离设计

在模拟量采集电路中, 使用用于抑制高频噪声的 π 型 LC 滤波器和独立模拟电源网络, 有效抑制噪声, 保证采集精度(Chen et al., 2025; 厉瞳瞳等, 2026)。CAN 与 RS485 通信接口

均采用高等级隔离与防护芯片，支持总线型拓扑结构，确保在井下复杂电磁环境中的通信可靠性(Yuan et al.,2023)，其电路原理如图 3 所示。

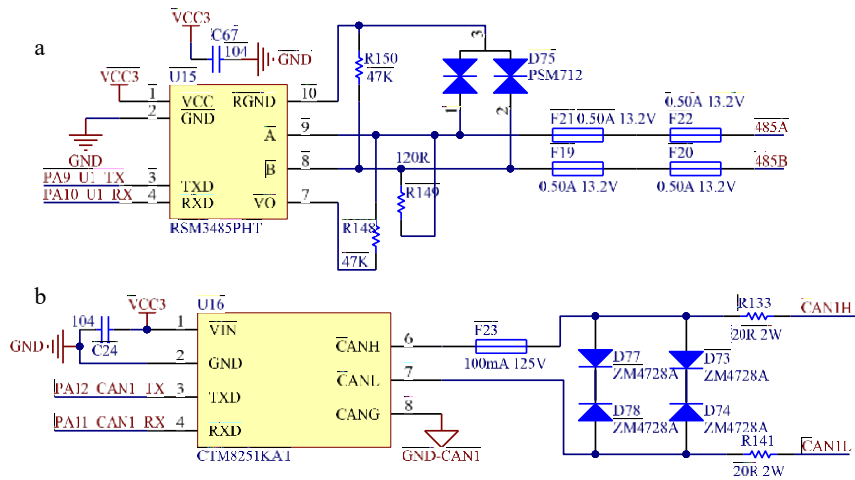


图 3 隔离 CAN 总线与 RS485 总线电路原理图

Fig.3 Schematic diagram of the isolated CAN bus and RS485 bus circuits

a.RS485 总线电路； b.CAN 总线电路

电源部分采用 TPS54560DDA DC-DC 降压芯片，将输入的+12 V 电压转换为+3.3 V，为数字与模拟电路供电。通过磁珠进行电源隔离，并设置过压与过流保护电路，确保整个采集板在井下恶劣工况下稳定运行，且符合本安设计要求。

2.3 基于嵌入式 Linux 的数据服务与边缘计算模块电路设计

该模块作为系统的核心运算单元，承担着多源数据融合、实时存储、钻机工艺解析、驱动计算以及人机交互等关键任务，对处理器的算力与实时性有较高要求。为满足功能需求并支持嵌入式 Linux 系统的稳定运行，同时兼顾本安设计对功耗的限制，选用创龙科技的 SOM-TL335x 工业核心板作为硬件平台。该核心板基于 TI Sitara 系列 ARM Cortex-A8 处理器，兼具性能与低功耗特性。

围绕该核心板，严格按照 GB/T 3836.4-2021 本安设计标准完成外围接口电路的定制化设计，集成隔离电源、双路隔离 CAN、RS485、以太网等接口，构成完整的功能模块，其主要电路接口如图 4 所示。模块搭配原生适配的 TL070A 电阻式触摸屏，充分利用核心板底层驱动资源，显著缩短显示子系统的开发周期。



图 4 Linux 核心板外围主要电路接口

Fig.4 Main peripheral circuit interfaces of the Linux core board

2.4 基于数字阀的驱动电路设计

驱动电路板在本系统中主要承担数据中转与 PWM 信号输出的功能，其通过数据透传技术实现本安 CAN1 与隔爆 CAN2 接口间的数据转发，并将接收到的 PWM 占空比数据映射至 PWM 输出接口，功能结构单一，接口定义如表 2 所示。

表 2 驱动板接口类型与数量

Table 2 Interface types and quantities of the drive board

接口类型	符号	数量	备注
CAN 总线接口	CAN1	1 路	本安
CAN 总线接口	CAN2	1 路	隔爆
PWM 输出接口	PWM	6 路	隔爆

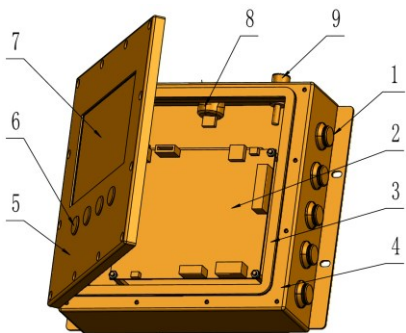
驱动板电路以 STM32F105RC 微控制器为核心，延续了采集板的双通道隔离 CAN 总线架构，结合 LM2901PT 电压比较器、SN74HC245PWR 总线驱动器及 BTS5215L 高端功率开关，构建完整的信号调理与功率驱动系统。此外，电路集成了实时状态监测与多重保护（如电流反馈与温度检测）功能，提升了驱动板在煤矿井下复杂环境中的工作可靠性。

2.5 数据采集器与防爆控制器结构设计

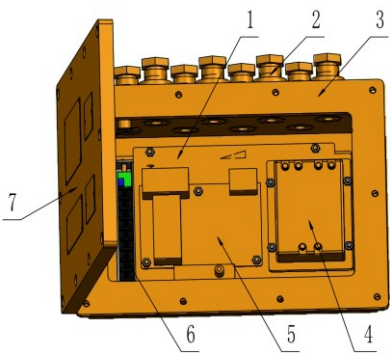
采用模块化设计思想，利用 UG NX 软件建立了采集器、Linux 模块、显示屏、驱动板及开关电源等部件的三维模型。

在满足防爆电气间隙与爬电距离要求的前提下，先完成 Linux 模块与采集板的电气连接，并通过连接柱固定，集成为“机芯组件”。依据该组件的尺寸，设计了三面密封式的采集器外壳，在外壳上布置以太网、USB、天线等防水插座。显示屏与切换界面用按钮通过螺钉与密封胶固定于采集器门盖，经排线与机芯组件相连，壳体与门盖间设置密封条密封。最终成型的矿用本安型数据采集器尺寸为 255 mm×235 mm×77.5 mm，体积仅为传统电控钻机防爆控制器的四分之一，其三维模型如图 5 a 所示。

相应地，将开关电源、本安电源与驱动板集成为控制器“机芯组件”，并据此设计防爆壳体，最终组装成尺寸为 264 mm×245 mm×117 mm 的矿用隔爆兼本安型控制器，其三维模型如图 5 b 所示。



1 防水航插, 2 采集器机芯组件, 3 门盖密封条, 4 采集器壳体, 5 门盖, 6 按钮,



1 控制器机芯组件, 2 电缆引入装置, 3 防爆壳体, 4 双路本安电源, 5 驱

7 触摸屏

动板, 6 开关电源, 7 门盖

a 采集器三维模型

b 控制器三维模型

图 5 采集器与控制器三维模型

Fig.5 Three-dimensional model of the collector and controller

2.6 远程调试模块硬件选型

远程调试模块用于实现异地计算机与 Linux 模块间的公网通信, 通过构建异地安全通信链路, 实现电液控制系统数据远程监测与程序在线更新(姜占东等, 2023)。

本文选用贝锐科技 R300A 工业路由器作为硬件平台, 该设备内置 4G 通信模块, 可不依赖本地网络接入公网, 并基于软件定义广域网 (SD-WAN) 技术自动实现内网穿透与虚拟专网构建。通过该方式, 将 Linux 模块纳入统一虚拟局域网, 建立跨地域安全通道, 为系统远程维护与专家故障诊断提供可靠通信保障。

3 通讯协议制定与软件功能开发

围绕提升系统数字化与可维护性的核心目标, 开展系统通信协议与软件功能设计。通过构建统一通信架构、开发故障诊断算法及远程维护功能, 实现系统数据的透明化监测、故障的精准定位与程序的远程更新, 从根本上提升系统的可维护性与运维效率(孙培禄等, 2025)。

3.1 数据采集系统通讯协议制定

采集板是数据采集系统的核心单元, 可采集电流型、电压型、总线型等多类型传感器数据, 并通过 CAN2 将采集到的多源异构数据发送到 Linux 模块。采集板采集接口丰富, 获取的数据量较大, 若将获取的每一个数据作为一帧 CAN 数据包发送, 大量的数据包易引发总线拥塞、数据丢包与传输时延增大, 且多类型数据结构不利于总线资源高效利用、数据标准化管理与工程化快速部署(Tinetti et al.,2018)。为此, 制定表 3 所示的采集系统通讯协议, 实现采集系统通讯协议统一, 该协议采用数据压缩与分组打包的策略, 在保证数据精度的同时, 提高总线利用率。

表 3 数据采集系统通讯协议

Table 3 Communication protocol of the data acquisition system

CAN ID	数据位							
	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
0x200	AI 个数		UI 个数		RI 个数		CAN	RS485
0x311	AI1		AI2		AI3		AI4	
0x312	AI5		AI6		AI7		AI8	
0x313	AI9		AI10		AI11		RI1	
0x314	UI1		UI2		UI3		UI4	
0x315	UI5		UI6		UI7		UI8	
0x316	UI9		UI10		UI11		RI2	
0x317	DI		SDI1		SDI2		SDI3	

0x318	CAN120	CAN121	CAN123	CAN124
0x319	CAN125	CAN126	CAN127	CAN128
0x31A	RS485-1	RS485-2	RS485-3	总线传感器故障码
0x31B	电流量短路故障码	电流量断路故障码	电压量短路故障码	电压量断路故障码

电流量、电压量和电阻量传感器产生的模拟量信号经采集板上 12 位 ADC 模块处理后，转换成 12 位的数字量，分别存储在 AI1-AI11、UI1-UI11 以及 RI1 和 RI2 中，8 路开关量信号以高低电平的形式按位依次存储在 DI 中，SDI1-SDI3 是前 3 路开关量信号在单位时间内的变化次数（频率量）。

根据公式(2)，参考行业内电控数字化钻机常用总线传感器类型和数量，再结合笔者团队近年来开发钻机电液控制系统的经验，设定 8 个 CAN 总线传感器和 4 个 RS485 传感器协议接口。其中 CAN120-CAN128 表示采集板 CAN1 接口收到的 ID 为 0x120-0x128 的 CAN 总线传感器的有效数据。RS485-1 至 RS485-3 为采集板 RS485 接口接收到的 3 个 RS485 传感器的有效数据。

3.2 传感器故障诊断与总线状态监测

采集板上各对外接口处均设有硬件短路保护电路，为软件诊断提供了基础。采用阈值判断法，分析采集板电路，推导出公式(3)-(6)。其中，公式(3)和(4)分别用于判断电流量传感器短路与断路故障，公式(5)用于判断电压量传感器对电源短路故障，公式(6)和(7)分别用于判断电阻量传感器短路与断路故障。采用基于统计的故障检测算法判断电压量传感器断路故障，统计单位时间内 UI_x 的方差 ΔUI_x ，若 $\Delta UI_x = 0$ 或 $\Delta UI_x > \Delta UI_{x\max}$ 则表示断路。在采集板程序中编写故障诊断算法，实时监测各个接口采集到的数字量，带入推导出的公式，即可判断各个传感器的故障形式，再根据表 3 中给出的协议，生成对应的故障并通过 CAN 总线发送出去。

$$AI_x > \frac{20 \times (2^n - 1) \times R_{sense}}{1000 \times V_{ref+}} \quad (3)$$

$$AI_x \leq \frac{2.5 \times (2^n - 1) \times R_{sense}}{1000 \times V_{ref+}} \quad (4)$$

$$UI_x > \frac{5 \times (2^n - 1)}{V_{ref+}} \quad (5)$$

$$RI_x \leq \frac{5 \times 2^n}{R_{ref} + 5} \quad (6)$$

$$RI_x > \frac{1000 \times 2^n}{R_{ref} + 1000} \quad (7)$$

式中： AI_x 为第 x 路电流量接口的数字量； UI_x 为第 x 路电压量接口的数字量； RI_x 为第 x 路电阻量接口的数字量； R_{sense} 为采样电阻的阻值， Ω ； V_{ref+} 为 ADC 模块的正参考电压，V； n 为 ADC 的分辨率，即位数； R_{ref} 为参考电阻值， Ω 。

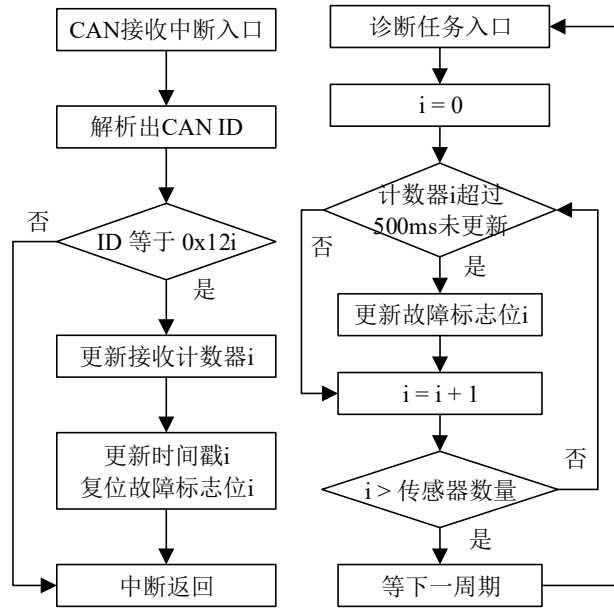


图 7 CAN 总线传感器故障诊断算法框图

Fig.6 Algorithm flowchart for CAN bus sensor fault diagnosis

对于 CAN 总线型传感器，采用基于“心跳”监测机制和时间窗口判定的诊断算法，其流程如图 6 所示。该算法在硬件中断层实时记录数据接收时间，在软件任务层周期性地判断通信链路状态，从而实现实时、准确的故障诊断。遥控器、采集板、驱动板及数字阀的状态监测算法原理与此类似，集中部署在 Linux 模块中。其中，通信中断故障指传感器、模块在设定时间窗口内无有效数据帧接收；离线故障指 CAN 总线上数字阀、采集板、驱动板等设备心跳超时；通信链路超时故障指遥控器无线连接无响应或指令交互超时。

RS485 总线采用主从轮询通信方式，通过监测查询命令的响应超时即可判断其通信状态 (Găitan et al., 2024)。为提升系统适配不同配置钻机的灵活性，在 Linux 模块的人机界面上提供了传感器数量配置功能。配置信息通过特定 CAN 帧下发至采集板，采集板据此忽略未接入传感器的接口诊断，从而自动适应不同的现场配置。

3.3 驱动系统通讯协议制定及算法开发

防爆数字阀作为驱动系统的核心执行单元，集成了微处理器与高精度位移传感器(党健, 2024)，构成阀芯位置闭环控制系统，与驱动板通过 CAN 总线进行交互，其通信协议如表 4 所示。该协议定义了标准化的指令帧与状态反馈帧，指令帧 (ID: 0x200 + 节点号) 用于下发目标阀芯开度，反馈帧 (ID: 0x180 + 节点号) 则实时上传阀芯实际位移，实现了控制指令的精确下达与运行状态的透明化监控。

表 4 防爆数字阀 CAN 总线通信协议

Table 4 CAN bus communication protocol of the explosion-proof digital valve

ID	数据位				帧类型
	D0	D1	D2	D3	
0x180+ID	0x08	0x00	[-1000, 1000]		反馈帧
0x200+ID	0x07	0x00	[-1000, 1000]		指令帧

基于数字阀协议与驱动板 PWM 接口功能定义，制定如表 5 所示的驱动板通信协议。该协议可实现控制指令的可靠路由与系统状态的透明化监测，其中，PWM1 - PWM6 代表 6 路 PWM 通道的设定占空比（0xFF 对应 100%）；RPWM1 - RPWM6 为各通道实测输出电流的映射值（800mA 映射为 0xFF）。引入帧计数器 PF（发送）与 PS（接收），二者差值表征隔爆 CAN 总线通信丢包数，为链路可靠性提供了量化评估指标。ID 为 0x401 与 0x629 的两帧兼具“心跳帧”功能，用于实时判断模块通信状态，实现系统安全互锁。

表 5 驱动板通讯协议

Table 5 Communication protocol of the drive board

本安 CAN1	ID	数据位								隔爆 CAN2
		D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	
接收	0x401	PWM1	PWM2	PWM3	PWM4	PWM5	PWM6	PF		无
发送	0x629	RPWM1	RPWM2	RPWM3	RPWM4	RPWM5	RPWM6	PS		
接收	0x201	0x07	0x00	[-1000, 1000]			无			转发
接收	0x202	0x07	0x00	[-1000, 1000]			无			转发
接收		0x07	0x00	[-1000, 1000]			无			转发
转发	0x181	0x08	0x00	[-1000, 1000]			无			接收
转发	0x182	0x08	0x00	[-1000, 1000]			无			接收
转发		0x08	0x00	[-1000, 1000]			无			接收

传统控制指令采用全节点逐点轮询下发方式，无论各阀控制指令是否变化，均需依次遍历所有节点完成一轮发送。当数字阀节点数量较多时，总线遍历周期延长，控制指令刷新速率降低，导致系统动态响应变慢。实际钻进过程中，多数阀在一段时间内控制指令保持不变，大量无变化指令占用总线资源。为此，开发了变值触发式控制指令下发算法，算法框图如图 7 所示。核心机制为“指令变化即时下发 + 定时安全补发”，仅当某一数字阀控制指令发生变化时，立即通过 CAN 总线下发有效指令；若单阀控制指令连续 500 ms 未发生变化，则强制下发一次当前指令。该机制可大幅减少总线上冗余数据传输，提升有效指令下发效率与系统动态响应速度；同时 500 ms 定时补发兼具“心跳帧”与丢包容错功能，弥补因数据丢包可能导致的控制失灵，保障系统控制安全性与可靠性。

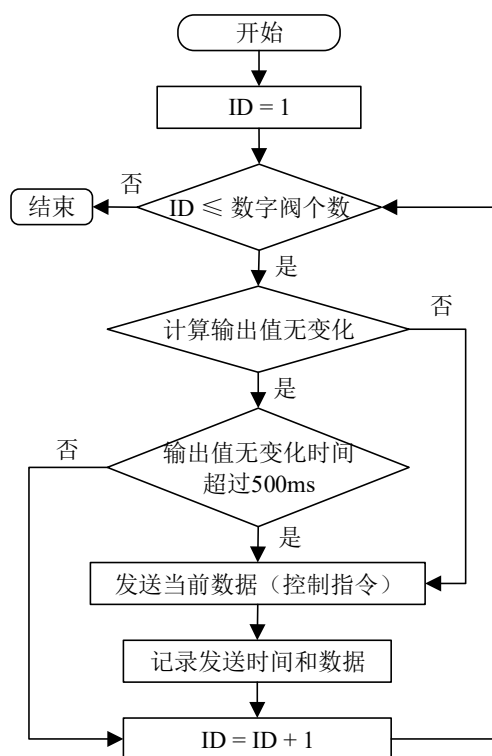


图 7 变值触发式控制指令下发算法框图

Fig.7 Algorithm flowchart for variable-value triggered control command issuing algorithm

3.4 Linux 模块功能及人机交互界面开发

Linux 模块是整个电液控制系统的核心运算单元，除完成采集系统、遥控系统和驱动系统数据解析，驱动数据计算以及系统运行状态监测与显示驱动管理外，还需要实现数据存储，以太网、CAN 与 WIFI 数据共享服务等功能。

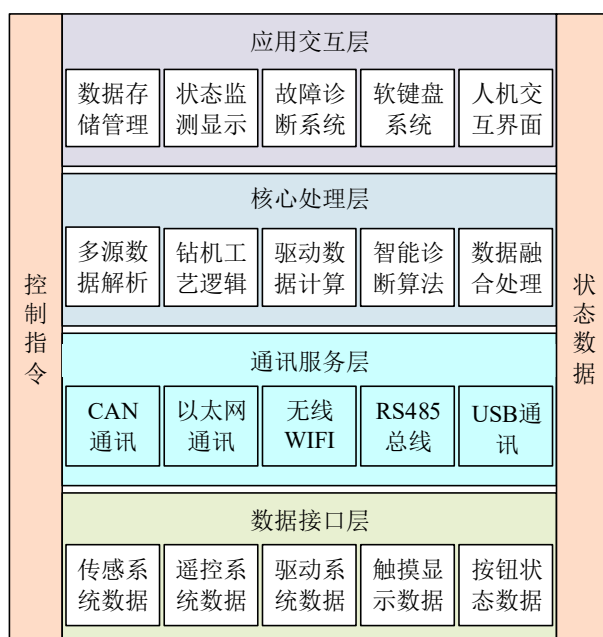


图 8 Linux 模块软件功能架构

Fig.8 Software functional architecture of the Linux module

基于核心板提供的模板开发 Linux 模块程序,采用图 8 所示的层次化架构(周翔宇等, 2025),并在 Qt 平台上使用 C++语言实现从底层硬件交互到上层应用服务构建完整的软件体系。开发过程中,各层通过全局变量进行数据交换,并遵循自底向上的处理流程(丁丹等, 2020)。数据接口层负责系统数据采集与驱动输出,通信服务层建立分布式通信通道,并基于 Linux 系统对网络协议栈进行深度优化,实现 WiFi 与以太网双通道的并行传输与数据共享;核心处理层完成多源数据融合与控制算法计算;应用服务层实现状态监测、故障诊断及人机交互功能。该架构支持模块化开发,统一通信与数据格式,有效降低系统复杂度,提升代码可维护性与可扩展性。

人机交互界面作为系统与操作人员的信息交互枢纽,其设计直接影响电液控制系统的操作直观性、运维便捷性与整体数字化水平(徐文明, 2025; Jianan et al., 2020)。为降低电控钻机在调试与维护过程中的专业门槛,本文基于 Qt 框架开发了一套以系统数据透明化与运维便捷性为核心的人机交互界面,其布局如图 9 所示。



图 9 人机交互界面

Fig.9 Human-machine interface

主界面作为系统核心交互平台,依据传感器类型和功能模块实现分区管理,实时呈现各类传感器的物理量及故障状态(如短路、断路和通信中断),并通过指示灯直观反映采集板、驱动板及数字阀等关键电控器件的连接状况。系统结合故障码与内置诊断专家库,实现故障原因及排查方法的直接显示,有效提升电控系统故障诊断与处理效率。

输入界面集中显示采集板各接口的数字量信号及总线传感器的有效数据,输出界面同步展示理论控制值与实际阀位反馈值,便于比对分析。此外,独立的 CAN 与 RS485 数据界面提供全链路数据帧的透明化查看,为深度调试与诊断提供底层数据支撑。

4 工程应用与验证

为检验系统可靠性及合规性,将自主研发的矿用本安型数据采集器、矿用隔爆兼本安型控制器及应用于钻机后的整机系统,分别送至西安煤科检测技术有限公司与国家安全生产常州矿用通讯监控设备检测检验中心,依据 GB/T 3836-2021《爆炸性环境》系列标准完成防

爆及功能性能检验，全部项目合格并取得矿用产品安全标志证书，可以应用于煤矿井下爆炸性环境。

4.1 系统搭建与应用

本文所设计的电液控制系统最先应用于如图 10 所示的 ZDY10000LDK 型窄体式遥控定向钻机。该钻机结构紧凑（宽度 ≤ 0.95 米），用于高精度定向钻孔施工，对电液控制系统的集成度、遥控精度与响应速度要求高。本文设计的数字直驱式电液控制系统，以其高度集成化、小型化及分布式架构，满足该钻机对结构空间、遥控操作与精确控制的综合需求。



图 10 ZDY10000LDK 型窄体式遥控定向钻机

Fig.10 ZDY10000LDK Narrow-Body Remote-Controlled Directional Drilling Rig

基于钻机液压原理与实际功能需求，选用经过验证的可靠遥控器、传感器及防爆电动球阀等器件(董洪波等, 2022)，搭建如图 11 所示的钻机电液控制系统。该系统中，本安型编码器与拉绳位移传感器（CAN 总线型）分别用于测量回转器角度/转速和给进位移/速度，本安型压力传感器（电流型）用于测量监测液压系统关键点（如主泵、副泵、给进油路）的压力(翁寅生等, 2014)。通过 R300A 工业路由器与数据采集器有线连接，构建远程调试通道；防爆手机通过 WiFi 与采集器通信，可实现对采集板、驱动板及 Linux 模块应用程序的 IAP 远程升级。

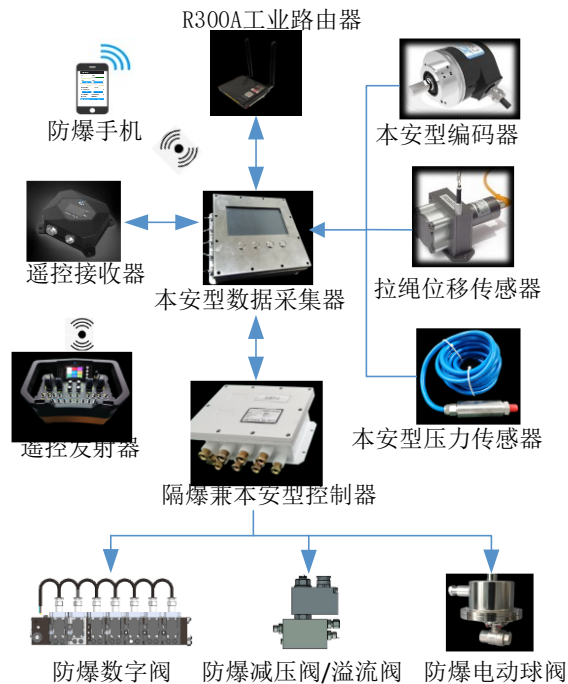


图 11 ZDY10000LDK 钻机电液控制系统组成示意图

Fig.12 Schematic diagram of the ZDY10000LDK drilling rig electro-hydraulic control system composition

自 2023 年 6 月在 ZDY10000LDK 钻机上成功应用以来，该系统的优异性能与紧凑结构优势得到充分验证，并已迅速推广至 ZDY6500LKZ、ZDY8500 - 6500LDK 及多种定制化遥控钻机中。这些钻机采用的电液控制系统核心架构与图 11 所示保持一致，主要区别在于传感器与数字阀的数量配置不同。实际部署时，只需通过 Linux 模块的触摸屏界面调整相关数量参数，并对 QT 人机界面进行适应性微调，即可快速完成工程化部署，无需修改采集板与驱动板的底层程序，充分体现了系统良好的工程复用性与部署灵活性。

4.2 关键功能试验验证

系统在广泛的现场应用中获得了大量样本，通过对这些试验样本进行统计分析，可有效验证系统各项关键功能及性能指标(Wang et al.,2018)。

4.2.1 远程调试功能验证

因防爆条件限制，远程调试功能不可用于煤矿井下，但特别适用于车间生产调试与钻机地面大修调试，调试工程师可集中于办公室，通过远程组网实时监测分布于不同地点的钻机调试状态（图 12）。通过分析系统全透明化数据，远程诊断故障、优化程序逻辑，有效解决了现场调试人才短缺的问题。经实际生产调试验证，该远程调试功能运行稳定，不仅显著提升了电液控制系统的调试效率，也降低了对现场工人的技术要求。

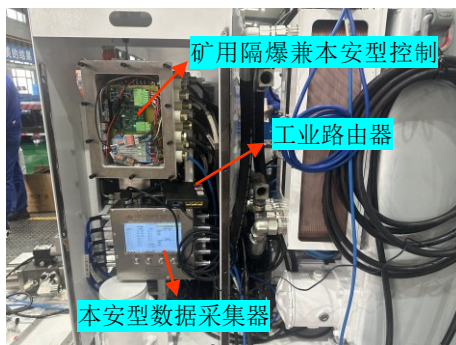


图 12 远程组网与现场设备示意图

Fig.12 Schematic diagram of remote networking and on-site equipment

为量化评估其效果，搜集了近一年的调试记录，分别选取 10 台搭载传统电液控制系统与 10 台搭载本文数字直驱系统的钻机进行对比分析。如图 13 所示，统计从调试开始至结束的总耗时，结果显示，搭载本系统的钻机平均生产调试时间缩短了约 50%。

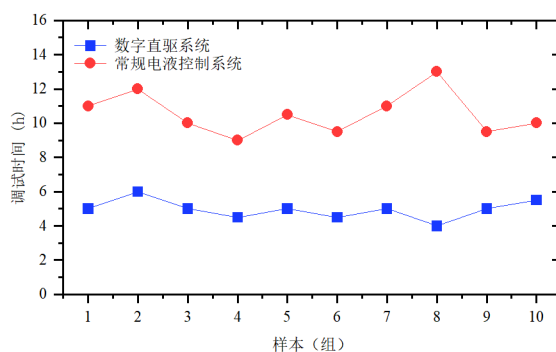


图 13 搭载不同电液控制系统的钻机调试周期对比

Fig.13 Comparison of commissioning cycles of drilling rigs with different electro-hydraulic control systems

4.2.2 电控系统故障诊断功能验证

电控系统故障诊断能力验证分三步进行：在算法测试环节，测试人员随机制造各类故障，观察故障识别准确性；在生产调试环节，每台钻机调试完毕后，人为随机设置两类电控故障，观察并记录系统显示屏上显示的故障，以及推送的故障解决方法是否正确；在长期的售后服务过程中，持续记录系统实际发生的真实故障与系统自主识别结果。表 6 汇总了算法测试环节，以及近一年来的电控系统故障诊断数据，其中，遥控器电源短路时，触发本安电源输出短路保护，采集器无法正常工作，无法通过显示屏观察故障识别状态，其他情况下常见电控故障的识别准确率达到 100%。

表 6 电控系统故障识别诊断统计

Table 6 Statistics of electronic control system fault identification and diagnosis

故障类别	出现次数	识别次数	识别准确率
本安型编码器通信中断	48	48	100%
拉绳位移传感器通信中断	52	52	100%
遥控器通信链路超时	27	27	100%
遥控器电源短路	6	0	0

CAN 总线传感器短路	24	24	100%
数字阀离线	26	26	100%
压力传感器断路	38	38	100%
压力传感器短路	16	16	100%
采集板离线	21	21	100%
驱动板离线	16	16	100%

在数据透明化与电控系统故障诊断功能的支持下,钻机现场售后服务的压力得到有效缓解。图 14 对比了近一年内,搭载传统系统与数字直驱系统的钻机售后服务数据(以“服务工单数/钻机总数”的比值“服务工单比”来衡量)。数据显示,采用本系统后,平均售后服务频次降低了约 50%。

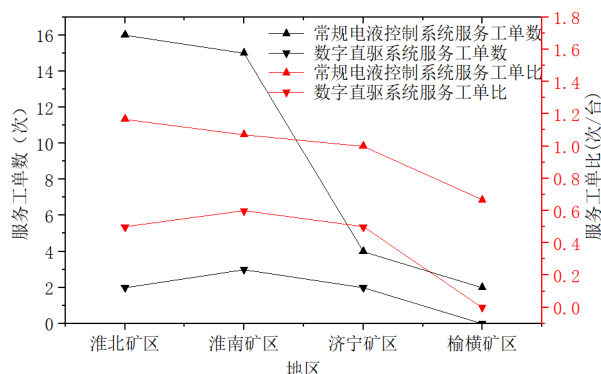


图 14 搭载不同系统的钻机售后服务频次对比

Fig.14 Comparison of after-sales service frequency of drilling rigs with different systems

5 结论

(1) 基于分布式架构与双通道隔离 CAN 总线,设计了本安型数据采集器与隔爆兼本安型控制器,实现了电液控制系统的高度集成化与小型化,为井下紧凑型钻机的数字化改造提供了有效硬件基础。

(2) 制定专用通信协议、开发多源传感器故障诊断算法,融合以太网内网穿透与人机交互技术,实现了系统状态的实时透明监控与远程调试维护。工程应用表明,该系统可将平均调试周期缩短约 50%,非电源短路情况下的电控系统故障识别率达到 100%,有效降低了运维成本。

(3) 在 ZDY10000LDK、ZDY6500LKZ 等多种型号钻机中的实际应用验证了系统的稳定性与适应性,系统支持通过人机界面快速配置系统,具备较强的工程复用性与推广潜力。

(4) 本文实现了钻机电液控制系统的数字化与远程维护功能,系统接口丰富,未来可通过增加接线盒接入更多的传感器与电磁阀,以适配自动化/智能化钻机,再引入智能优化算法,实现钻进参数自适应调整及故障预测等功能。

References

Chen J., Li J.M., 2025. FPGA-Based Design of Laser Gyro Signal Acquisition Circuit. Journal of

- Measurement Science and Instrumentation, 16(1): 107-118.
- Dang J., 2024. Research on Electro-Hydraulic System of Rotary-feed for Drilling Rig Based on Digital Proportional Valve. BeiJing: China Coal Science Research Institute.
- Ding Y., Liu P., Zou D.D., et al., 2019. , Application of IAP Remote Upgrade Technology in Coal Mine SafetyMonitoring Substation Based on ARM . Safety in Coal Mines , 50 (08): 107-110.
- Ding D., Peng X., Guo X.F., et al., 2020. Scenario-Driven and Bottom-up Microservice Decomposition Method for Monolithic Systems. Journal of Software, 31(11): 3461-3480.
- Dong H.B., Fan Q., Li K., et al., 2022. Development and Application of ZDY4500LFK Full Automatic Drilling Rig. Coalfield Geology & Exploration, 50(01): 66-71.
- Dong H.B., Yao N.P., Ma B., et al., 2020. Research on Electronically Controlled Automation Technology of Underground Drilling Rig for Coal Mine. Coalfield Geology & Exploration, 48(03): 219-224.
- Găitan, N.C., Zagan, Găitan, V.G., 2024. Proposed Modbus Extension Protocol and Real-Time Communication Timing Requirements for Distributed Embedded Systems. Technologies, 12, 187: 12100187.
- Gao J., Tian M.Q., Xu C.Y., et al., 2020. Research on Electro-hydraulic Control System of Thin Coal Seam Hydraulic Support Based on Double CAN Bus. Coal Engineering, 52(01): 143-147.
- Guo Y.F., Xu P., Li W., et al., 2025. 3D Perception and Reconstruction of Underground Coal Mine Roadways Based on Multi-Sensor Fusion. Earth Science, 1-15[2026-04-11] .
- Huang Z.B., 2022. Design and Implementation of Portable CAN Bus Analyzer in Underground Coal Mine. Coal Mine Safety, 53(01): 134-138.
- Jiang Z.D., Wei W., He J., et al., 2023. Practice of Remote Leakage Test Transformation of Low Voltage Power Equipment in Coal Mine. Automation in Mines and Factories, 49(S2): 142-145.
- Jianan L., Abas A., 2020. Development of Human-computer Interactive Interface for Intelligent Automotive. International Journal of Artificial Intelligence, 7(2): 13-21.
- Li T.T., Zhang Y., Zhang X., 2026. A cloud-edge-end collaborative architecture for intelligent operation and maintenance of high-end drilling equipment. Earth Science, 1-12[2026-04-11].
- Li K., Ting R., Yao Y.F., 2023. Key Technology of Automatic Loading and Unloading System for Dual-pipe Directional Drilling Rig and Its Application in Soft–fragmentized Coal Seam. Coalfield Geology & Exploration, 51(04): 179-186.
- Li X.M., Han J., Yao Y.F., 2020. Narrow-Body Directional Crawler Drilling Rig Used in Coal

- Mine. Coal Mine Safety, 51(11): 142-145.
- Ma L., 2020. Power Supply Technology of 5G Equipment in Underground Coal Mine. Coal Mine Safety, 51(05): 111-113.
- Sun P.L., Liu X., Zhang G., et al., 2025. Digital Twin-Driven Remote Operation and Maintenance Method for Electromechanical Equipment. Journal of Xi'an Jiaotong University, 59(08): 20-31.
- Tinetti F.G., Romero F.L., Perez A. D., 2018. CAN Bus Experiments of Real-Time Communications. IEEE Latin America Transactions, 16(1): 207-214.
- Wang G.F., 2022. New Technological Progress of Coal Mine Intelligence and Its Problems. Coal Science and Technology, 50(01): 1-27.
- Wang G.F., Xu Y.J., Zhang J.H., et al., 2021. New Development of Intelligent Mining in Coal Mines. Coal Science and Technology, 49(01): 1-10.
- Wang J.P., Zhang W.S., Shi Y.K., et al., 2018. Industrial Big Data Analytics: Challenges, Methodologies And Applications. Journal of Industrial Information Integration, 10: 1-10.
- Wang Q.F., Chen H., Du L., et al., 2025. Research Progress of Key Technology of the Intelligent Drilling Field in Coal Mine. Journal of China Coal Society, 1-14[2025-12-09].
- Wang Q.F., Chen H., Zhou T., 2022. Development History and Prospect of Automatic Drilling Technology and Equipment in Coal Mine. Mining Safety & Environmental Protection, 49(4): 45-50.
- Weng Y.S., Yin X.S., Zhao L., 2014. Design of Drilling Parameter Measuring System of Drill Rig in Soft Coal Seam. Coalfield Geology & Exploration, 42(05): 100-103.
- Xu W.M., 2025. Research on Intelligent Control System and Control Method of Dry Dust Removal Vehicle. Journal of Mechanical Science and Technology, 1-13[2025-12-09].
- Yang Y.K., Zhang M.L., Xu C.Y., et al., 2023. Fault Detection and Diagnosis Method for Bus Communication in Hydraulic Support Electro-Hydraulic Control System. Automation in Mines and Factories, 49(12): 70-76.
- Yang Z.S., Zhang C., Rong X., 2025. Current Situation and Development Trend of Line Selection Method for Single-Phase Grounding Fault in Mine Power Supply System. Coal Mine Safety, 56(01): 212-219.
- Yuan L., 2023, Theory and Technology Considerations on High-quality Development of Coal Main Energy Security in China. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 38(01): 11-22.
- Yuan L., Zhang J., Liang Z., et al., 2023. EMI Challenges in Modern Power Electronic-Based Converters: Recent Advances and Mitigation Techniques. Frontiers in Electronics, 4: 1274258.

- Wu Q.S., Shi Z., Liang H., 2012. Design of Underground Intelligent Controller Based on CAN Bus and Its Application. Automation in Mines and Factories, 38(07): 102-104.
- Zhang G., 2021. Fault Monitoring of Electric and Hydraulic Control System of Remote Control Drilling Rig. Coal Mine Safety, 52(05): 154-157.
- Zhang X.H., Tian M.Q., Zhang M.L., et al., 2023. Design of End Controller for the Electrohydraulic Control System of Intelligent Working Face Hydraulic Support. Automation in Mines and Factories, 49(08): 30-36.
- Zhou X.Y., Liu Y.Z., Zhao Y.J., et al., 2025. Hierarchical Spatial Embedding BiGRU Model for Destination Prediction. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 59(06): 1211-1218.

附中文参考文献:

- 党健, 2024. 基于数字比例阀的钻机回转给进电液系统研究. 北京: 煤炭科学研究总院.
- 丁丹, 彭鑫, 郭晓峰, 等, 2020. 场景驱动且自底向上的单体系统微服务拆分方法. 软件学报, 31 (11): 3461-3480.
- 丁远, 刘鹏, 邹德东, 等. 2019, 基于 ARM 的煤矿监控分站 IAP 远程升级技术. 煤矿安全, 50 (08): 107-110.
- 董洪波, 范强, 李坤, 等, 2022. ZDY4500LFK 全自动钻机开发与应用. 煤田地质与勘探, 50 (1):66-71.
- 董洪波, 姚宁平, 马斌, 等, 2020. 煤矿井下坑道钻机电控自动化技术研究. 煤田地质与勘探, 48(03):219-224.
- 高晋, 田慕琴, 许春雨, 等, 2020. 基于双 CAN 总线的薄煤层液压支架电液控制系统研究. 煤炭工程, 52 (01): 143-147.
- 郭云飞, 徐鹏, 李伟, 等, 2025. 基于多传感器融合的煤矿井下巷道三维感知与重建方法. 地球科学. 1-15[2026-04-11].
- 黄增波, 2022. 便携式煤矿井下 CAN 总线分析仪的设计与实现. 煤矿安全, 53 (01): 134-138.
- 姜占东, 魏巍, 何军, 等, 2023. 煤矿井下低压电力设备远程漏电试验改造实践. 工矿自动化, 49 (S2): 142-145.
- 厉瞳瞳, 张毅, 雷彪, 等, 2026. 云边端协同高端钻探装备智能运维体系架构. 地球科学, 1-12[2026-04-11].
- 李坤, TING Ren, 姚亚峰, 2023. 碎软煤层双管定向钻具自动加卸系统关键技术与应用. 煤田地质与勘探, 51(04):179-186.
- 李晓明, 韩健, 姚亚峰, 2020. 煤矿用窄体小型履带式定向钻机. 煤矿安全, 51 (11): 142-145.
- 马龙, 2020. 5G 设备煤矿井下电源供电技术. 煤矿安全, 51 (05): 111-113.

- 孙培禄,刘馨,张耿,等, 2025. 数字孪生驱动的机电设备远程运维方法. 西安交通大学学报, 59 (08): 20-31.
- 王国法, 2022. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨. 煤炭科学技术, 50(01):1-27.
- 王国法, 徐亚军, 张金虎, 等, 2021. 煤矿智能化开采新进展. 煤炭科学技术, 49(01):1-10.
- 王清峰, 陈航, 杜雷, 等, 2025. 煤矿智能化钻场关键技术研发进展. 煤炭学报, 1-14[2025-12-09].
- 王清峰, 陈航, 周涛, 2022. 煤矿井下自动化钻进技术及装备的发展历程与展望. 矿业安全与环保, 49 (4):45-50.
- 翁寅生, 殷新胜, 赵良. 2014. 松软煤层坑道钻机钻进参数测量系统设计. 煤田地质与勘探, 42 (05): 100-103.
- 徐文明, 2025. 干式除尘车智能化控制系统及控制方法研究. 机械科学与技术, 1-13[2025-12-09].
- 杨永锴, 张敏龙, 许春雨, 等, 2023. 液压支架电液控制系统总线通信故障检测与诊断方法. 工矿自动化, 49 (12): 70-76.
- 杨战社, 张程, 荣相, 2025. 矿井供电系统单相接地故障选线方法现状与发展趋势. 煤矿安全, 56 (01): 212-219.
- 袁亮, 2023. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考. 中国科学院院刊, 38 (01): 11-22.
- 吴清收, 史珍, 梁辉, 2012. 井下 CAN 总线智能控制器的设计及应用. 工矿自动化, 38 (07): 102-104.
- 张刚, 2021. 遥控钻机电液控制系统故障监控. 煤矿安全, 52 (05): 154-157.
- 张晓海, 田慕琴, 张敏龙, 等, 2023. 智能工作面液压支架电液控制系统端头控制器设计. 工矿自动化, 49 (08): 30-36.
- 周翔宇, 刘毅志, 赵肆江, 等, 2025. 面向目的地预测的层次化空间嵌入 BiGRU 模型. 浙江大学学报(工学版), 59 (06): 1211-1218.

作者贡献: 作者 1 彭光宇 系统搭建, 算法开发, 初稿撰写; 作者 2 姚宁平 研究方法, 实验实施; 作者 3 董洪波 项目管理, 资源保障; 作者 4 刘璞 概念设计, 论文框架; 作者 5 李坤 技术支持; 作者 6 刘若君 验证结果, 数据整理。

