技术与装备

智能化开采基石
——网络型液压支架控制系统

付 振 王 朕 姜春阳 赵校朋
中煤科工集团北京天地玛珂电液控制系统有限公司

摘 要

为适应智能化无人开采技术的应用要求，中煤科工集团北京天地玛珂电液控制系统有限公司秉承集团“1245”总体发展思路，践行“创新驱动、聚焦主业”两大战略，完全自主研发新一代智能型网络控制系统，经过3年沉淀积累，突破多种关键技术，以快速迭代优化的研发思维持续改进，2019年取得2次井下工业性试验成功，至今，已在井下稳定运行累计15个月，关键设备损坏率小于5%，全面提升了液压支架控制系统关键指标，并在2020年扩大推广范围，2021年将在薄煤层工作面，大采高工作面进行示范性应用。

关键词：网络型控制系统; 车载以太网技术; 一网到底; 智能化无人化

随着智能化无人开采技术的不断发展，目前智能传感技术、多设备联合控制技术、高速率高实时性工业以太网技术、5G技术等已在井下成功应用。智能化开采进入以建立透明工作面为核心的3.0时代，北京天地玛珂电液控制系统有限公司（以下简称天玛公司），SAC、SAM、SAP三大系统逐渐由传统的低速传输、离散控制模式向高速率、大容量、低延时、智能集控模式转变。

为了满足智能化无人开采的应用需求，构建透明工作面底层技术支撑。2017年4月，中煤科工集团北京天地玛珂电液控制系统有限公司（以下简称天玛公司）针对新一代液压支架控制系统进行科研立项，2019年1月，新一代网络型控制系统研制成功，开启了国内液压支架控制系统全面进入工业以太网时代的新篇章。

2019年3月，陕西煤业化工集团黄陵一矿1005工作面，网络型控制系统与SAC液压控制系统混合使用，首次实现国产网络型控制器井下应用；同年9月，阳煤集团新元矿31004工作面，成功实现整套网络型控制系统井下运行，至今已稳定运行15个月，关键设备损坏率小于5%；2020年11月，山东能源集团郭屯煤矿完成全套系统设备安装，这是网络型控制系统在中厚煤层工作面上的又一次成功应用。

1 网络型控制系统技术原理

网络型控制系统是在原有SAC液压支架控制系统基础上设计实现的，其主要功能是通过人工操作、煤机联动等输入信息，实现液压支架的手动、自动控制，并能对液压支架的物理信息进行采集、计算、上传；同时打破以往SAC电控系统、SAM综采自动化系统独立运行的模式，通过链路融合，软件层数据分离技术，实现一条总线贯穿全工作面。在远控应用中，

作者简介：付 振（1984—），男，山东齐河人，工程师。E-mail：fuzhen@tdmarco.com
通讯作者：王 朕（1985—），男，吉林长春人，工程师，硕士。E-mail：wangzhen@tdmarco.com

有利于提高视频数据与控制数据的同步性，降低传输时延，增强远控安全性。网络型控制系统主要包括网络型控制器、网络变换器、电源箱、隔离接续器、网络云台摄像仪、常规传感器设备等。

1.1 网络型控制器技术原理

网络型控制器（图1）以Cortex-M4嵌入式微控制器为核心，搭载国产实时操作系统，外围设计驱动电路、数据采集电路，实现支架的动作控制、信息采集功能；通信总线采用百兆车载以太网和现场工业总线CAN，双冗余通信链路，实现工作面信息传递以及支架控制；界面采用3.5寸彩色显示屏和滴塑膜按键，实现人机交互的友好性和可靠性；集成红外对码和无线遥控功能，实现煤机位置定位和支架遥控操作；集成定位模块，实现人员感知和支架自动闭锁功能。控制器可以接入网络摄像仪，并利用VLAN技术、AVB实时传输技术，实现电控控制数据和视频数据分离，网络延时小于100 ms。控制器壳体采用塑料与金属相结合，利用多重冗余密封技术，达到IP68防护等级。

图1 网络型控制器

1.2 网络型变换器技术原理

网络型变换器也是以Cortex-M4嵌入式微控制器为控制核心，搭载文件系统以及以太网交换电路，实现数据的整合与计算。

网络型变换器（图2）安装在工作面机头或者机尾，将控制器传递的控制信息和传感信息打包上传到监控中心；将接收的红外信号数据进行统计计算，确定煤机位置；并可在监控中心远程网络访问网络变换器，对工作面支架和摄像仪进行IP配置，VLAN划分等。

图2 网络变换器

1.3 网络摄像仪技术原理

网络型云台摄像仪（图3）直接接入控制器，利用车载以太网技术实现视频数据在总线链路上传输，软件上使用VLAN划分技术、AVB视频传输技术，可以将视频数据延时控制在100 ms以内。

图3 网络云台摄像仪

2 系统指标与关键技术

网络型控制系统继承了以往控制系统稳定性高、应用可定制、绝对安全等特点，并且在通信带宽、配套简洁性、界面友好性、多功能集成度等方面取得了显著的提升。下面对系统指标和关键技术进行详细介绍。

2.1 系统特点与关键指标

1）双冗余通信链路。

控制器架间采用车载以太网为主通信链路，带宽可达100 Mbit/s，通信延迟小于100 ms；工作面利用接入器设备形成以太网环网，可以实现数据多通道上传。采用现场工业总线CAN做为邻架通信链路，具有500 Kbit/s通信带宽；CAN总线做为主控动作信息的冗余链路，实现通信数据双重验证，保证支架动作的绝对安全。

2）系统配置灵活。

控制器接入HUB设备，可以实现传感器设备扩展；传感器多采用总线型设计，便于进行级联安装；在软件层面，实现不同类别传感器统一编码，数据层以E/IP协议进行传输，安装灵活，可以满足大采高、多传感器工作面的现场配套需求。

3）无线通信技术。

控制器集成双通道冗余的人员安全定位模块，在工作人员接近相邻支架时，支架自动闭锁；支持遥控操作，可以进行无线选架，更加安全可靠；尤其在薄煤层工作面，无线操作的便捷优势更加明显。

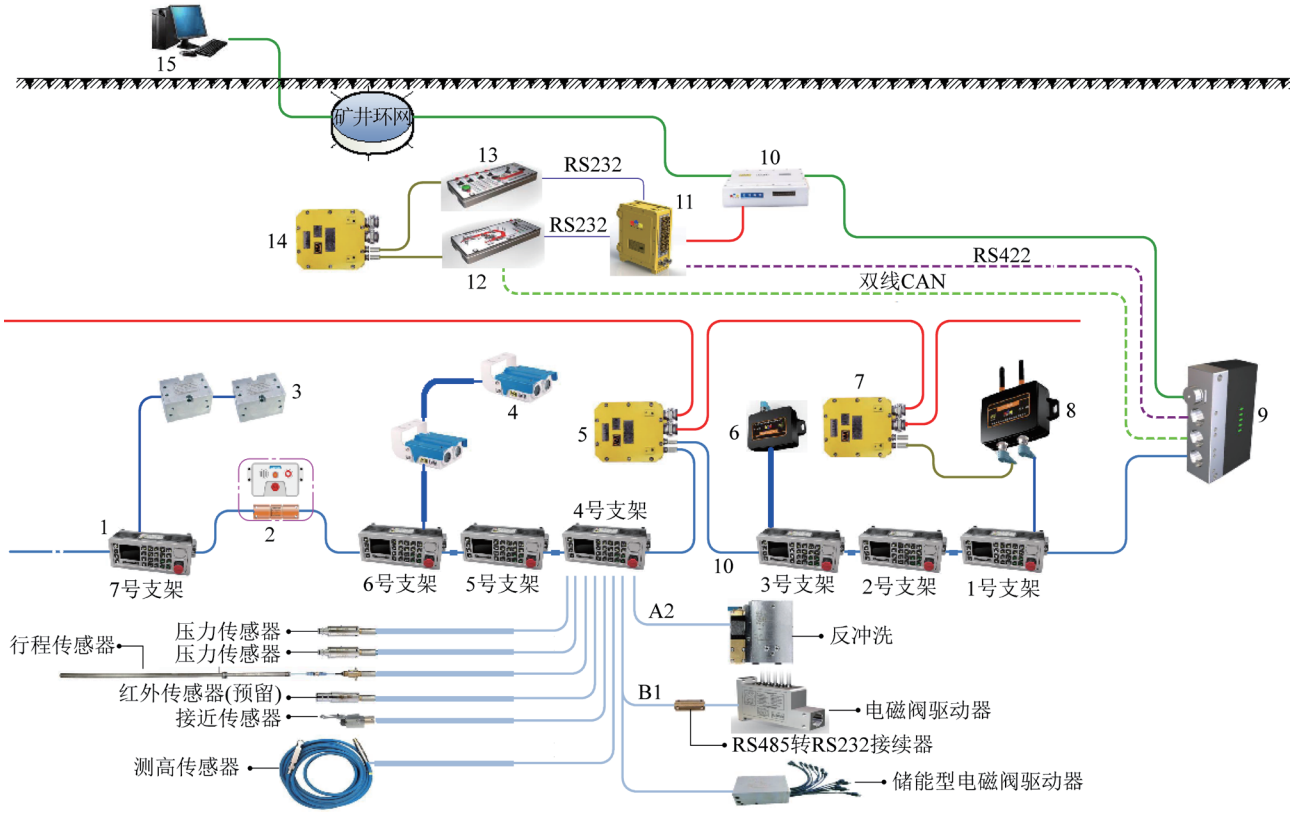
4）软件高级功能。

控制器支持跨平台在线编程，支持参数化配置；

自诊断能力强，具备深度学习能力。不仅可用在支架控制上，也可用在“三机”、泵站等多种场合，只需要进行简单的参数设置即可切换到相应的控制界面。

2.2 系统关键技术

在产品研发过程中，项目组对技术难点进行逐一攻坚，例如：突破车载以太网15m传输限制、国产操作系统移植、塑料壳体与金属壳体契合、网络风暴抑制、无线通信穿透能力、网络时延控制等难关，研制出适合煤矿井下应用的网络型控制系统（图4）。下面对几个典型的关键技术进行介绍。



1—网络型控制器；2—隔离接续器；3—倾角传感器；4—网络摄像仪；5、7—4路电源箱；6、8—人员定位传感器；9—网络变换器；10—网络交换机；11—隔爆主机；12—支架操作台；13—采煤机操作台；14—双路电源箱；15—井上监控主机

图4 网络型控制系统典型架构

2.2.1 突破通信距离限制

车载以太网技术有效通信距离通常在15 m以内，研发人员对此项技术进行重点技术攻关，从协议标准、信号特性等方面着手，首次在煤矿井下实现百兆车载以太网40 m距离点对点稳定传输，全工作面设备通信延时小于100 ms，全工作面程序升级时间小于5 min。

2.2.2 可靠性提升

为了实现轻量化与环保的设计要求，网络型控制器采用了塑料和金属壳体相结合的设计结构。由于塑料的老化变形，以及金属壳体的不平整度等特性的影响，给产品的整体防护性设计增加了诸多困难，项目组从材料材质、加工精度、以及多种冗余设计等方面着手，成功将外壳防护等级提升至IP68，实现与全金属壳体的防护等级无差异。网络型控制器剖面如（图5所示）

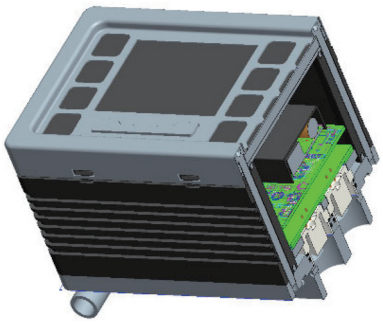


图5 网络型控制器剖面

2.2.3 软件定制化开发技术

系统中关键设备都采用国产实时操作系统作为运行核心，采用最先进的MVVM软件架构技术将设备

层、系统层、应用层进行分离。尤其是应用层软件开发时，利用快速的配置开发模式，只需要更改极少量的代码，即可实现软件的定制化。

3 井下示范性应用

作为国家重点研发计划项目《煤矿智能开采安全技术与装备研发》子课题“面向复杂工作面的综采成套装备智能控制系统”，网络型控制系统选择阳煤集团新元矿31004工作面作为示范工作面（图6），由天玛公司研发人员、技术服务人员组成了现场攻关小组，新元矿依托机电部、综采队组成了自动化小组，共同完成了“可编程网络型智能控制装置”成套系统的落地，并进行了高瓦斯破碎顶板地质条件智能化采煤的工艺研究。全工作面于2019年9月1日开始井下安装，9月24日试刀生产；10月底整个工作面系统常态化运行。12月中旬中部跟机自动化常态化运行。至今已使用15个月，设备运行基本稳定，关键设备损坏率小于5%。高清摄像仪直接接入控制器，通过控制器的工业以太网上传到监控中心，接入矿井环网，电液控系统、自动化系统合用一条链路。2020年6月，中央电视台对新元矿31004工作面智能化工作面结合5G技术，进行了全面报导。

图6 新元矿31004工作面实景

4 总结与展望

天玛公司一直以来都秉承集团公司“以科技为基础，以人才为根本，以市场为导向，以客户为中心，引领行业进步”的发展理念，将产品研发、科技创新列为公司发展的首要任务，网络型控制系统在此大环境下应运而生，成为铺垫智能化开采技术的基石。随着5G时代的到来，项目组准备对网络型控制系统进行进一步优化提升，千兆工业以太网主链路贯穿整个工作面，融合5G、无线传感技术，实现综采数据信息实时传输；网络链路贯穿“三机”系统、泵站系统，真正达到“一网到底”，实现所有地质条件下的无差别智能化开采。

■ 责任编辑：赵　瑞