



文章编号: 1671-251X(2023)03-0124-07

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2022080078

面向综采工作面的自动化软件设计与应用

李重重, 刘清, 刘军锋, 冯银辉

(北京天玛智控科技股份有限公司, 北京 101399)

摘要: 针对综采工作面高效开采需求, 以及开采过程中面临的自动化软件产品缺乏, 通用的工业组态软件缺乏行业针对性、设备接口协议繁多、对业务场景的适应性不足等问题, 提出了一种面向综采工作面的自动化软件设计方案。面向综采工作面的自动化软件包括井下服务端、地面服务端、地面客户端3层架构。井下服务端是整个架构的基础, 由驱动层、数据库模块、模型逻辑层、数据可视化层构成。驱动层负责接入适配工作面的各类设备及通信协议, 实现与各设备的实时双向通信。数据库模块包括实时数据库和历史数据库, 实时数据库为驱动层提供实时读写服务, 历史数据库为驱动层提供数据记录服务。针对煤矿开采业务场景构建了综采工作面的数据模型, 模型逻辑层用以解决软件缺乏行业针对性和适应性不足的问题。模型逻辑层通过与驱动层交互实现设备数据的实时上传和控制指令的实时下发, 为数据可视化提供数据驱动, 并且通过加载控制分析组件, 完成各类设备的协同控制和数据分析功能。数据可视化层集成了多种数据展示技术, 便于对数据进行多维度展示。实际应用效果表明: ①在辅助生产方面, 该自动化软件应用后, 可以实现对工作面工况信息和设备状态的连续在线实时监测, 支持对工作面设备的远程集中控制, 将井下需要在各设备附近的多人值守减少至2人在监控中心远程集中监控, 有效减少了操作人员数量。②在提升自动化的高级应用方面, 该自动化软件应用后, 对各系统数据进行分类融合, 实现了多类设备自动化协同控制功能, 提升了综采工作面自动化水平。

关键词: 综采工作面自动化系统; 自动化软件; 综采设备; 井下服务端; 数据可视化

中图分类号: TD67

文献标志码: A

Automation software design and application for fully mechanized working face

LI Zhongzhong, LIU Qing, LIU Junfeng, FENG Yinhui

(CCTEG Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 101399, China)

Abstract: In view of the demand for efficient mining of fully mechanized working face, the lack of automation software products in the mining process, the lack of industry pertinence of general industrial configuration software, the variety of equipment interface protocols and the lack of adaptability to business scenes, a design scheme of automation software for fully mechanized working face is proposed. The automation software of fully mechanized working face comprises a three-layer structure of an underground server, a ground server and a ground client. The underground server is the foundation of the whole architecture, which is composed of a driver layer, a database module, a model logic layer and a data visualization layer. The driver layer is responsible for accessing all kinds of equipment and communication protocols adapted to the working face, and realizing real-time two-way communication with each piece of equipment. The database module comprises a real-time database and a historical database. The real-time database provides real-time read-write service for the driver layer, and the historical database provides data recording service for the driver layer. The data model of the fully

收稿日期: 2022-08-29; 修回日期: 2023-02-25; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2020CXGC011501)。

作者简介: 李重重(1986—), 男, 河北石家庄人, 助理研究员, 主要从事综采自动化软件设计、智能化无人开采等方面研究工作, E-mail: lzzlizhong@163.com。

引用格式: 李重重, 刘清, 刘军锋, 等. 面向综采工作面的自动化软件设计与应用[J]. 工矿自动化, 2023, 49(3): 124-130.

LI Zhongzhong, LIU Qing, LIU Junfeng, et al. Automation software design and application for fully mechanized working face[J].

Journal of Mine Automation, 2023, 49(3): 124-130.



扫码移动阅读

mechanized working face is constructed according to the business scene of coal mining. The logic layer of the model is used to solve the problem of lack of industry pertinence and adaptability of software. The model logic layer realizes real-time uploading of equipment data and real-time issuing of control instructions through interaction with the equipment layer. The layer provides data drive for data visualization. The layer completes collaborative control and data analysis functions of various equipment through loading control analysis components. The data visualization layer integrates a variety of data display technologies to facilitate the multi-dimensional display of data. The practical application results show the following points. ① In the aspect of auxiliary production, after the application of the automation software, the continuous online real-time monitoring of working condition information and equipment state of the working face can be realized. The remote centralized control of the working face equipment is supported. The number of underground operators who need to be on duty near each piece of equipment is reduced to two persons in the monitoring center for remote centralized monitoring. This effectively reduces the number of operators. ② In the advanced application of automation, after the application of the automation software, the data of each system is classified and fused. The automatic collaborative control function of multiple types of equipment is realized. The automation level of the fully mechanized working face is improved.

Key words: automatic system of the fully mechanized working face; automation software; fully mechanized mining equipment; underground server; data visualization

0 引言

我国煤炭工业以井工开采为主,井下开采环境复杂^[1-2],劳动繁重,如何实现自动高效开采成为煤矿建设重要目标^[3-6]。工作面综采自动化可以改善劳动环境,促进工作面安全高效生产,而综采自动化的实现依赖于软件系统的支持,通过自动化软件可实现生产工况数字化监测与设备远程控制,从而达到减人提效的目标^[7-8],因此自动化软件的设计研发成为实现综采自动化的关键技术。

综采工作面自动化系统在开采装备^[9-11]、远程干预^[12]、协同控制^[13-14]、智能决策^[15-19]等方面取得了一定的研究成果,这些成果需要自动化软件作为数据载体和控制核心,而面向综采工作面的自动化软件研究较少,软件产品缺乏,导致自动化系统的优劣势和性能发挥受限,影响自动化系统的效能。通用的工业组态软件在综采工作面应用中面临接口协议各异、通信建立复杂、缺乏行业针对性、对综采自动化业务场景适应性差等问题,不能完全满足自动化系统对于软件方面的需求。

针对目前行业内自动化软件面临的问题,本文提出了一种面向综采工作面的自动化软件设计方案。阐述了软件的设计架构和核心功能,并在综采工作面部署应用,对各类综采设备进行实时监测与远程集中控制,支持综采工作面自动化高效生产。

1 软件架构

面向综采工作面的自动化软件包括井下服务端、地面服务端、地面客户端3层架构,如图1所

示。井下服务端与井下设备通信,是整个架构的基础,地面服务端作为中间桥梁,与井下服务端和地面客户端通信,地面客户端直接面向用户。

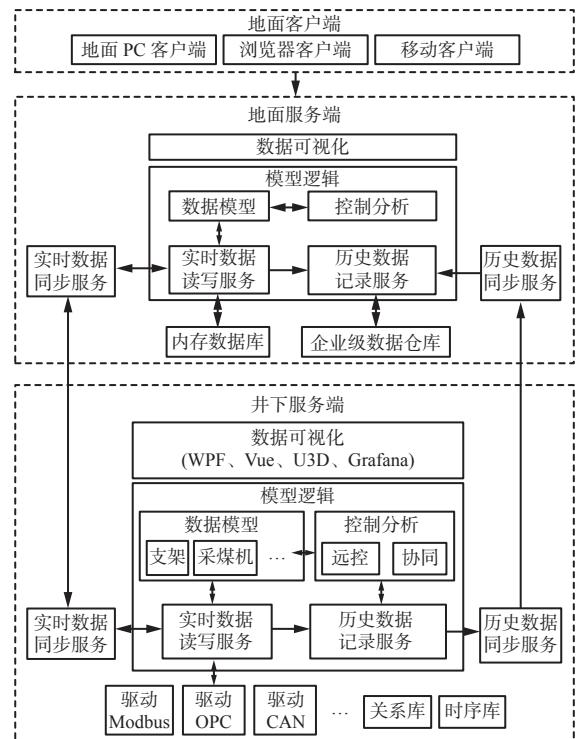


图1 面向综采工作面的自动化软件架构

Fig. 1 Automation software architecture of fully mechanized working face

井下服务端由驱动层、数据库模块、模型逻辑层、数据可视化层构成。驱动层负责接入适配工作面各类设备及通信协议,用以解决设备因接口协议繁多带来的通信复杂的问题,通过驱动层实现与各设备的实时双向通信。数据库模块包括实时数据库

和历史数据库,实时数据库为驱动层提供实时读写服务,历史数据库为驱动层提供数据记录服务。模型逻辑层是系统的内核,针对煤矿开采业务场景构建综采工作面的数据模型,用以解决软件缺乏行业针对性和适应性不足的问题。模型逻辑层通过与驱动层交互实现设备数据的实时上传和控制指令的实时下发,为数据可视化提供数据驱动,并且通过加载控制分析组件,完成各类设备的协同控制和数据分析功能。数据可视化层集成了多种数据展示技术,便于对数据进行多维度展示。

地面服务端与井下服务端架构相似,为了减少对设备的访问次数,地面服务端不与井下设备直接通信,所以地面服务端不包含驱动层,通过数据同步功能将数据由井下服务端传输到地面服务端。

地面客户端是直接面向用户的交互界面和接口,地面客户端不存储和分析数据,只进行界面显示,支持通过 PC、浏览器、移动客户端 3 类不同的终端访问地面服务端数据。

2 核心功能

面向综采工作面的自动化软件通过驱动层屏蔽各设备通信协议的差异;通过定义综采设备对应的数据模型,适应开采场景的设备数据;通过远程集控功能减少设备操作人员数量;通过数据同步功能实现数据在软件架构中各层级间的传输;通过数据可视化功能支持数据多种形式展示,便于用户实时监测工况数据,提升工作效率。

2.1 驱动层

面向综采工作面的自动化软件通过驱动层与设备通信,采集设备数据上传到模型逻辑层,并存储展示。驱动层支持常见的通信协议(包括 Modbus, OPC, CAN 等)。为使模型逻辑层便于对不同协议的数据进行读写,屏蔽不同协议接口的调用差异,驱动层以设备协议类 DeviceProtocol 作为父类,通过集合型成员 DataBuffer 在内存中缓存数据,采用 ReadData 和 WriteData 方法读写缓存数据。通信协议的具体实现类均继承父类 DeviceProtocol,根据协议规范重写 ReadData 和 WriteData 方法,如图 2 所示。

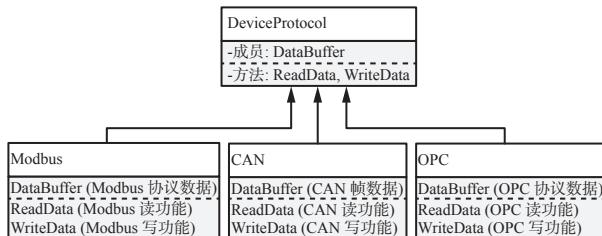


图 2 驱动层类图

Fig. 2 Class diagram of driver layer

驱动层框架如图 3 所示,底层为各协议的通信接口,中间层为实时数据读写服务,上层为综采设备的数据模型。综采设备通过通信接口与实时数据读写服务建立连接,实时数据读写服务通过统一调用 ReadData 和 WriteData 方法,实现与设备的实时通信。调用 ReadData 方法获取设备数据,将数据解析后转换为内部构建的数据模型,实现综采设备的数据上传,调用 WriteData 方法下发控制指令,实现对设备的反向控制。工作面正常供电情况下,多台设备会同时在线,为了保证与设备的并发通信,每台设备的通信用任务都在线程中执行,并使用线程池调度。

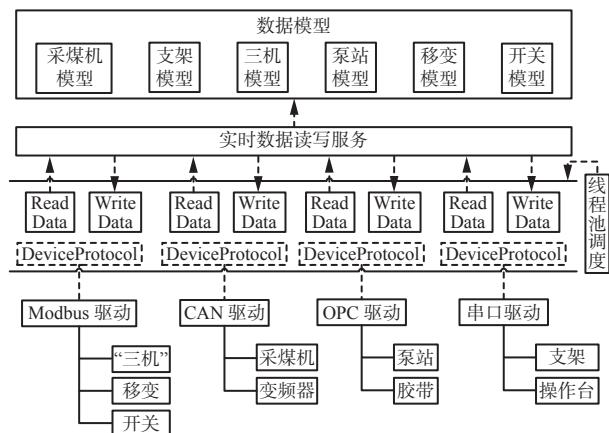


图 3 驱动层框架

Fig. 3 Framework of driver layer

2.2 数据模型

面向综采工作面的自动化软件中定义了采煤机、液压支架、运输设备、供液设备、供电设备等其他设备的数据模型,并将所有的数据模型组织为树型结构,构建成一棵多叉数据模型树,如图 4 所示。树的根节点以工作面名称命名,第一层树枝节点为采煤机、液压支架等主要设备对象,第二层树枝节点为各设备的子设备对象,最后一层叶子节点为具体的数据点位(例如传感器或设备参数)。将经过解析的设备原始数据通过驱动层上传到数据模型层后,通过遍历数据模型树找到对应的叶子节点,更新叶子节点的时间戳和数值,实现数据的实时更新。

2.3 远程集控

面向综采工作面的远程集控功能是为了方便操作员远程集中控制综采设备。由于各个综采设备的地理位置相对分散,在就地模式下需要多名人员就近完成操控。为了减少操作人员,通过矿井环网和工业总线将各设备与井下主机建立通信链路,操作人员与主机部署的软件集控界面进行交互,当各设备切换到远控模式后,只需 1~2 名操作人员即可实现对常用设备的远程集中控制。

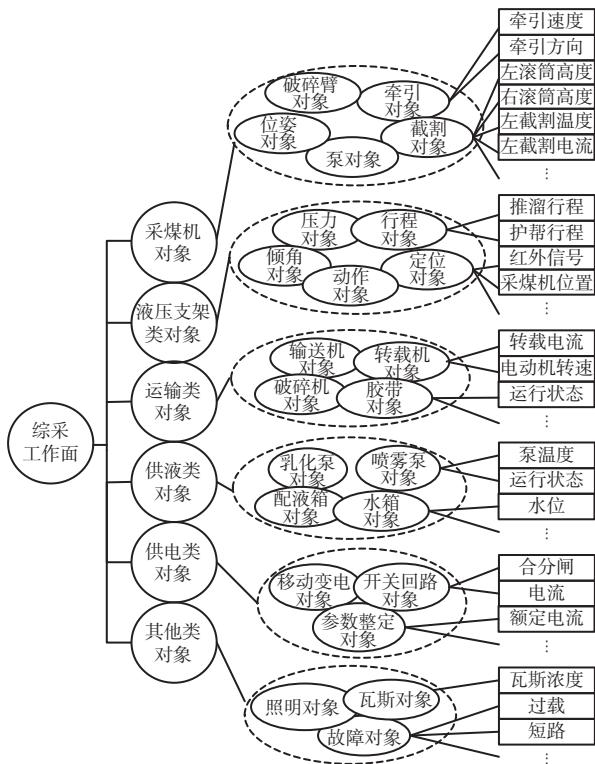


图 4 数据模型树

Fig. 4 Data model tree

集控界面上包含了采煤机、支架、“三机”、泵站、视频设备控制区,以及全部设备的一键启停控制区。各设备控制区内包含了控制设备启停和动作的界面交互元素,每个元素都绑定了数据模型,界面交互会改变数据模型中的控制点数值,模型逻辑层中的控制分析模块会实时监测控制点的数值变化,根据数值变化构造相应的远控指令,并将远控指令通过驱动层传输给设备,设备根据指令进行相应动作,构成完整的远程控制流程。

远程集控功能采用了有限状态机的模式对设备进行启停逻辑控制,如图 5 所示。

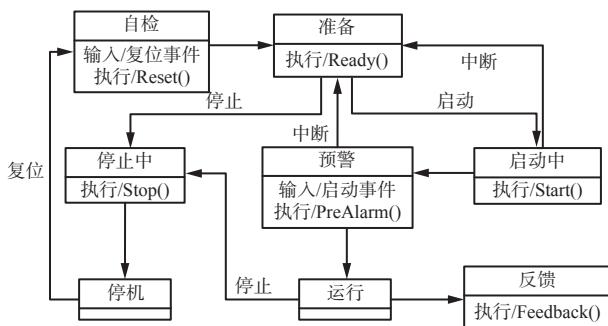


图 5 启停控制状态机

Fig. 5 Start-stop control state machine

在控制过程中,设备的状态(State)包括自检、准备、启动中、停止中、预警、运行、停机、反馈。事件(Event)包括启动、停止、中断、复位。执行动作

(Action)包括 Reset, Ready, Start, Stop, PreAlarm, Feedback。集控界面设计了响应的按键,通过按键触发事件,引发状态机内部的状态间切换。

2.4 数据同步

数据同步功能主要实现的是不同类型数据在客户端与服务端的传输。客户端显示的数据全部来源于服务端。服务端的数据分为结构化数据和非结构化数据;结构化数据包括报警数据(如过载超限)、事件数据(如用户登录)、设备上传的实时数据和历史数据;非结构化数据包括运行过程中产生的工程文件(JSON文件、XAML 配置文件、图片文件)。

数据同步功能同时支持结构化和非结构化数据的同步,支持不同客户端采用不同通信技术实现数据的获取,如图 6 所示。PC 客户端利用 Windows Communication Foundation(WCF)通信技术获取服务端的报警数据、事件数据和实时数据。本系统服务端和客户端通过 WCF 技术将不同的通信方式整合,提供一种统一的编程模型,建立可靠链接保证通信稳定及低时延。对于历史数据,客户端直接访问服务端的数据仓库,与数据库建立连接进行查询。浏览器客户端和移动客户端通过 HTTP 协议或 WebAPI 访问 WebServer 获取服务端数据,在浏览器客户端和 APP 端界面展示。

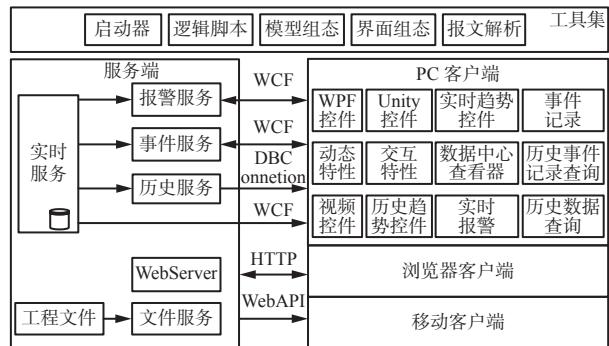


图 6 客户端与服务器端数据同步

Fig. 6 Data synchronize between client and server

为了便于数据同步功能的调试和运维工作,面向综采工作面的自动化软件提供了一套逻辑脚本、界面组态、报文解析等工具集,服务端与客户端可通过插件形式将所需工具进行集成,在部署期间调试数据同步功能。

2.5 数据可视化

数据可视化技术是一种将数据转换成图形化表达的技术,其主要功能是提供高质量的解释数据分析成果,方便用户获得更具价值的信息^[20]。随着工作的生产,自动化软件积累了大量不同设备的数据,对数据进行融合分析后实现可视化展示,便于直

观高效监测生产状况,对煤矿用户具有重要意义。

在 Windows 平台上,借助 WPF 技术开发大量的图形控件和界面模板,支持在 PC 客户端以图形组态方式生成可视化界面。在浏览器客户端和移动客户端采用 Vue 框架开发前端界面,可支持跨平台运行。

对于实时数据的可视化,以 Unity 为引擎,构建各类设备的三维模型,以实时数据作为三维模型的数据驱动,仿真综采工作面各设备的位姿信息和生产状态,实现基于数据驱动的三维实时可视化效果,如图 7 所示。

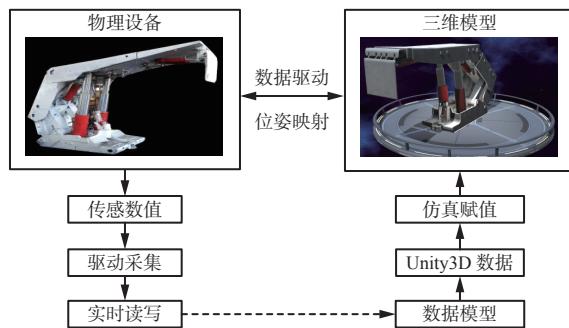


图 7 数据驱动三维实时可视化

Fig. 7 Data-driven 3D realtime visualization

对于历史数据的可视化,借助 Grafana 开源工具生成丰富的可视化图表,集合多种数据视图生成综采工作面 dashboard,根据业务需要进行多纬度的展示和统计,提供交互式的即席分析体验,让观察者更容易发现数据规律,为决策者提供更丰富详实的数据依据。

3 部署应用

3.1 部署概况

面向综采工作面的自动化软件采用分布式部署,分别部署在井下巷道和地面调度室的多台主机上,如图 8 所示。



图 8 面向综采工作面的自动化软件部署

Fig. 8 Automation software deployment of fully mechanized working face

井下巷道配置有监控中心,综采设备通过井下环网与监控中心实现网络互通,监控中心通过网络

交换机与地面调度室实现网络互通。井下服务端软件部署在监控中心的多台隔爆主机上。地面调度室或机房配置多台高性能服务器,地面服务端软件部署在高性能服务器上,地面客户端部署在 PC 或移动终端上,与地面服务端通信。

巷道的监控中心部署 3 台隔爆主机,其中第 1 台隔爆主机作为数据主机,部署关系数据库和时序数据库,用于存储历史数据,第 2 台隔爆主机作为通信主机,部署服务端的驱动层模块,通过井下环网与设备通信,第 3 台隔爆主机作为逻辑主机,部署服务端的模型逻辑模块,用于逻辑分析,并为可视化界面提供数据模型。地面调度室既可选择独立的服务器部署数据库,也可在公有云或私有云的基础上建立数据仓库。面向综采工作面的自动化软件在井下监控中心和地面调度室的显示器数量按需配置,接入主机显示不同的软件界面。

3.2 应用效果

通过面向综采工作面的自动化软件的部署应用,为用户提供了对综采设备实时监测与集中控制的技术手段,提升了综采工作面的自动化水平。

在辅助生产的基础应用方面,面向综采工作面的自动化软件应用前后井下工作人员分布如图 9、图 10 所示。由图 9 可看出,面向综采工作面的自动化软件应用前,采场需要 2 名采煤机司机和 2 名以上的支架工,并在泵站、三机、胶带、组合开关等设备附近需要有人值守,负责单机设备的启停控制与设备状态监测,设备间的控制顺序需要人工沟通,无法实现自动顺序控制,井下工作人员数量较多且沟通效率低。由图 10 可看出,面向综采工作面的自动化软件应用后,可以实现对工作面工况信息和设备状态连续在线实时监测,支持对工作面设备的远程集中控制,包括采煤机和液压支架的远程实时控制,以及其他设备的单机控制和多机顺序自动控制功能,将井下需要在各设备附近的多人值守,减少至 2 人在监控中心远程集中监控,有效减少了操作人员数量。

在提升自动化的高级应用方面,面向综采工作面的自动化软件应用前,工作面各子系统相对独立,各系统之间的数据关联性较低,产生了信息孤岛,设备间的协同控制完全依赖人工劳动(例如采煤机停机后,需采煤机司机人工喊话通知泵站工作人员关闭喷雾泵,进而停止采煤机喷雾;瓦斯浓度变化时,需要瓦斯监测员人工喊话通知采煤机司机改变采煤机速度等),这些场景亟需通过自动化的方式实现,解放人工劳动,提升自动化水平。面向综采工作面

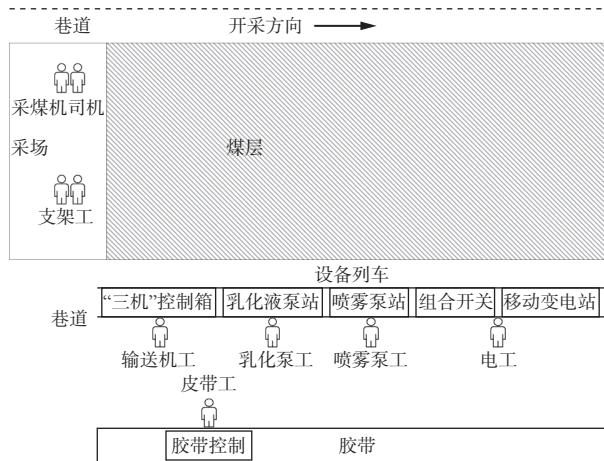


图9 自动化软件应用前井下工作人员分布

Fig. 9 Distribution of underground personnel before automation software application

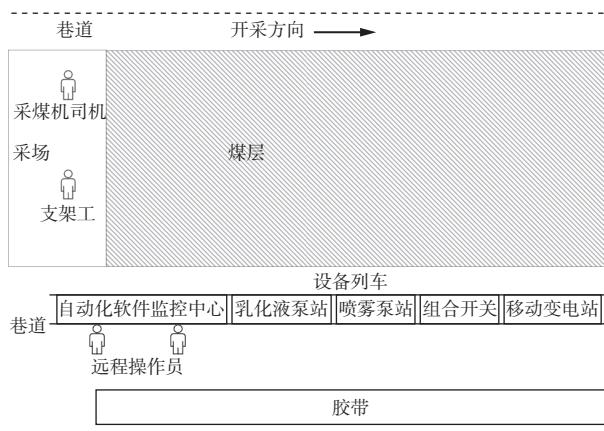


图10 自动化软件应用后井下工作人员分布

Fig. 10 Distribution of underground personnel after automation software application

的自动化软件应用后,将采煤机系统、支架电液控制系统、工作面运输系统、泵站供液系统、供电系统等有机结合,对各系统数据进行分类融合。对于控制类数据,将各系统相关的控制点位进行聚合与联锁,实现了泵站、胶带、“三机”、采煤机和支架跟机的顺序一键启停,实现采煤机喷雾与清水泵的联动启停等功能;对于传感类数据,将各系统传感类数据进行集成分析,解决了单机设备信息孤岛的问题,实现依据支架动作计算供液需求、依据“三机”电流判定运输负荷等功能;将控制类数据与传感类数据根据业务需求提取相关点位进行融合关联,实现多类设备自动化协同控制功能(例如依据瓦斯浓度控制采煤机速度、依据采煤机位置切换支架跟机工序等)。

4 结语

面向综采工作面的自动化软件包括井下服务端、地面服务端、地面客户端3层架构:井下服务端

与井下设备进行通信,是整个架构的基础;地面服务端作为中间桥梁,与井下服务端和地面客户端分别进行通信;地面客户端直接面向用户。面向综采工作面的自动化软件通过驱动层的设计,实现了与各类型综采设备的双向通信,屏蔽了协议之间的差异;依据综采设备的类别,定义了综采设备的数据模型,构建了数据模型树用以对接驱动层采集的数据,可以较好地适应综采工作面的业务场景;实现了设备的远程集控功能,减少了操作人员数量,提升了工作效率;通过数据同步功能,实现了结构化和非结构化数据在服务端与客户端之间的传输,满足用户使用多种客户端进行远程监控的需求;利用数据可视化技术为用户提供多种数据展示方式和丰富的交互界面。自动化软件采用分布式部署将各端软件分别部署在井下巷道和地面调度室。从应用效果上看:在辅助生产方面,面向综采工作面的自动化软件达到了减员提效的目的;在提升自动化的高级应用方面,面向综采工作面的自动化软件实现了多类设备自动化协同控制功能,提升了综采工作面自动化水平。

参考文献(References):

- [1] 李全生. 我国井工煤矿开采技术现状和发展展望[J]. 煤矿开采, 2002, 7(3): 1-5.
LI Quansheng. Present situation of underground coal mining technology and its prospects in China[J]. Coal Mining Technology, 2002, 7(3): 1-5.
- [2] 张世龙, 张民波, 朱仁豪, 等. 近5年我国煤矿事故特征分析及防治对策[J]. 煤炭与化工, 2021, 44(8): 101-106, 109.
ZHANG Shilong, ZHANG Minbo, ZHU Renhao, et al. Analysis of the characteristics of China's mine accidents in the past five years and countermeasures for prevention and control[J]. Coal and Chemical Industry, 2021, 44(8): 101-106, 109.
- [3] 张胜利, 汤家轩, 王猛. “双碳”背景下我国煤炭行业发展面临的挑战与机遇[J]. 中国煤炭, 2022, 48(5): 1-5.
ZHANG Shengli, TANG Jiaxuan, WANG Meng. Challenges and opportunities for the development of China's coal industry under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. China Coal, 2022, 48(5): 1-5.
- [4] 李浩荡. 减碳背景下煤炭如何直面挑战[N]. 中国煤炭报, 2021-04-01(2).
LI Haodang. How to face the challenges in the context of carbon reduction[N]. China Coal News, 2021-04-01(2).
- [5] 王国法. 煤矿高效开采工作面成套装备技术创新与发展[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(1): 63-68, 106.

- WANG Guofa. Innovation and development of completed set equipment and technology for high efficient coal mining face in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(1): 63-68, 106.
- [6] 葛世荣, 胡而已, 裴文良. 煤矿机器人体系及关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 455-463.
- GE Shirong, HU Eryi, PEI Wenliang. Classification system and key technology of coal mine robot[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 455-463.
- [7] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1-15.
- LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1-15.
- [8] 王峰. 综采无人工作面自动化开采技术研究与应用[J]. 工矿自动化, 2015, 41(7): 5-9.
- WANG Feng. Research and application of automatic mining technology of unmanned fully-mechanized coal mining face[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(7): 5-9.
- [9] 丁琰. 煤矿安全生产监控与通信技术分析[J]. 矿业装备, 2021(4): 182-183.
- DING Yan. Analysis of safety production monitoring and communication technology in coal mine[J]. Mining Equipment, 2021(4): 182-183.
- [10] 王国法. 煤矿综采自动化成套技术与装备创新和发展[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(11): 1-5, 9.
- WANG Guofa. Innovation and development on automatic completed set technology and equipment of fully-mechanized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(11): 1-5, 9.
- [11] 任怀伟, 赵国瑞, 周杰, 等. 智能开采装备全位姿测量及虚拟仿真控制技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 956-971.
- REN Huaiwei, ZHAO Guorui, ZHOU Jie, et al. Key technologies of all position and orientation monitoring and virtual simulation and control for smart mining equipment[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 956-971.
- [12] 田成金. 可视化远程干预型智能化采煤关键控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 97-102.
- TIAN Chengjin. Study on key control technology of visualized remote interference type intelligent mining[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 97-102.
- [13] 刘清, 韩秀琪, 徐兰欣, 等. 综采工作面采煤机和液压支架协同控制技术[J]. 工矿自动化, 2020, 46(5): 43-48.
- LIU Qing, HAN Xiuqi, XU Lanxin, et al. Cooperiative control technology of shear and hydraulic support on fully-mechanized coal mining face[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(5): 43-48.
- [14] 路正雄, 郭卫, 张帆, 等. 基于数据驱动的综采装备协同控制系统架构及关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 195-205.
- LU Zhengxiong, GUO Wei, ZHANG Fan, et al. Collaborative control system architecture and key technologies of fully-mechanized mining equipment based on data drive[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 195-205.
- [15] 李首滨, 李森, 张守祥, 等. 综采工作面智能感知与智能控制关键技术与应用[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 28-39.
- LI Shoubin, LI Sen, ZHANG Shouxiang, et al. Key technology and application of intelligent perception and intelligent control in fully mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 28-39.
- [16] 黄曾华. 综采装备单机智能化向智能协同模式转型的探索研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 169-175.
- HUANG Zenghua. Exploration and research on transformation from intelligent single machine equipment to intelligent synergy in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 169-175.
- [17] 葛世荣, 郝雪弟, 田凯, 等. 采煤机自主导航截割原理及关键技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 774-788.
- GE Shirong, HAO Xuedi, TIAN Kai, et al. Principle and key technology of autonomous navigation cutting for deep coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 774-788.
- [18] 冯银辉, 黄曾华, 李昊. 互联网+综采自动化专家决策平台设计与应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 73-79.
- FENG Yinhui, HUANG Zenghua, LI Hao. Design and application of internet plus experts decision making platform to fully-mechanized mining automation[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 73-79.
- [19] 杜毅博, 赵国瑞, 巩师鑫. 智能化煤矿大数据平台架构及数据处理关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(7): 177-185.
- DU Yibo, ZHAO Guorui, GONG Shixin. Study on big data platform architecture of intelligent coal mine and key technologies of data processing[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 177-185.
- [20] 葛世荣, 张帆, 王世博, 等. 数字孪生智采工作面技术架构研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1925-1936.
- GE Shirong, ZHNAG Fan, WANG Shibo, et al. Digital twin for smart coal mining workforce: technological frame and construction[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1925-1936.