

地下复杂洞室群施工通风智能化控制策略研究

梁 立, 黄灿新, 王 俊

(中国三峡建工(集团)有限公司, 四川 成都 610095)

摘要:地下洞室在爆破施工过程中, 洞室内短时间会聚集大量的粉尘和二氧化碳等有害气体, 使温湿度骤变, 不利于洞室连续施工作业, 影响施工进度和质量, 同时会影响工作人员的健康, 加速设备的老化。对于有施工支洞、输水系统隧洞、进场交通洞、通风兼安全洞、厂房、主变洞及尾水调压室等众多地下洞室的复杂环境隧道, 由于现有的隧道施工通风技术与方法无法满足高质量空气质量和低能耗的要求, 亟需研究并开发适用于地下复杂洞室群的施工通风智能化控制系统。该文提出地下复杂洞室群施工通风智能化控制策略, 利用物联网技术和人工智能技术优化风机, 分段通风, 智能化控制, 达到降低通风能耗, 节省硬件成本的目的。通过实践证明, 研究开发的智能化测试系统具有实时监控及精确化控制的特点, 大大降低能耗, 节约施工成本。

关键词:物联网; 人工智能; 智能控制策略; 洞室; 通风控制; 风量

中图分类号: TN99

文章编号: 1000-0682(2025)02-0111-06

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.02.020

Research on intelligent control method of tunnel ventilation

LIANG Li, HUANG Canxin, WANG Jun

(China Three Gorges Construction (Group) Co., LTD., Sichuan Chengdu 610095, China)

Abstract: The harmful gas and dust produced in the construction process of underground caverns of pumped storage power station have a continuous influence on the construction, which directly affects the construction progress and quality, and greatly endangers the physical and mental health of the construction personnel. For pumped storage power stations with construction support tunnels, water delivery system tunnels, approach traffic tunnels, ventilation and safety tunnels, plant buildings, main transformer tunnels, tailwater surge chambers and many other underground caverns, the existing tunnel construction ventilation technologies and methods cannot meet the requirements of high air quality and low energy consumption. Therefore, it is urgent to research and develop an intelligent control system for construction ventilation applicable to complex underground cavern groups, propose an intelligent control strategy for construction ventilation of complex underground cavern groups, and use artificial intelligence technology to optimize fans, segment ventilation and intelligent control, so as to reduce ventilation energy consumption and save hardware costs.

Keywords: Internet of Things; artificial intelligence; intelligent control; cavern; ventilation control; air volume

0 引言

在全球应对气候化, 实现“2030 年前碳达峰、

2060 年前碳中和”目标, 加快能源绿色低碳转型的新形势下, 抽水蓄能电站加快发展势在必行, 到 2035 年抽水蓄能电站投产总规模达到 3×10^8 kW, 为我国抽水蓄能电站领域的技术发展提供了前所未有的契机。为了建设抽水蓄能水电站, 需要在选址地开挖大量隧道及发电厂房, 因此地下复杂洞室群的数量与规模将不断的增加。地下复杂洞室群一般都需要进行施工通风, 对于部分隧道, 通风费用消耗

收稿日期: 2024-08-13

基金项目: “地下复杂洞室群施工通风智能化控制系统研究与应用”(JGSY0323001)

第一作者: 梁立(1994—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为水电工程智能建造。E-mail: 2077764499@qq.com。

巨大。由于风机选型和通风布置等多方面原因的影响,电能浪费严重,其中风机控制就存在很大的浪费。风机是保障地下施工安全的主要通风机械,功率较大且整个施工过程中昼夜运转,按照地下施工规范,对施工隧道内通风量及风速有严格规定。一般在施工设计时,通风机的容量按通风最困难时期的供风要求进行选择^[1]。在非智能控制模式下,洞室内的排风机全功率运行,直到将粉尘等有害物质全部排完,工作时间长,造成大量不必要的电能浪费^[2]。

地下复杂洞室群施工中的通风问题对工人安全和工程进度具有重要影响。

通风系统智能化控制在提高施工效率、节能减排方面具有潜在优势。

1 地下复杂洞室智能化通风控制方案

1.1 技术参数要求

按地下隧道施工环境标准,洞内的氧气按体积

计算不少于 20%;一氧化碳最高容许浓度为 30 mg/cm^3 ;二氧化碳按体积计不大于 0.5%;空气中含有的粉尘浓度为 10 mg/m^3 ,其中二氧化硅粉尘约为 2 mg ,浓度在 10% 以下时,其粉尘允许含量为 10 mg/m^3 ,水泥粉尘的允许含量为 6 mg/m^3 ;洞内的风速,全断面开挖时应不小于 0.15 m/s ,坑道内不小于 0.25 m/s ,但均不应大于 6 m/s ;洞内施工人员对新鲜空气的需要量为每人 $3 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

1.2 系统方案

系统由智能监控、物联网通信、能耗管理及控制等模块组成,如图 1 所示。系统运行时传感器检测洞室内环境数据,将粉尘浓度和各类气体浓度传输给集中采集模块并发送到风机现地控制柜和云端服务器,再将传感器检测值与正常值比较,同时根据隧道长度和风管特性等信息计算输出值,通过调整风机现地控制柜内的变频器参数来控制风机运行速率^[3-5]。

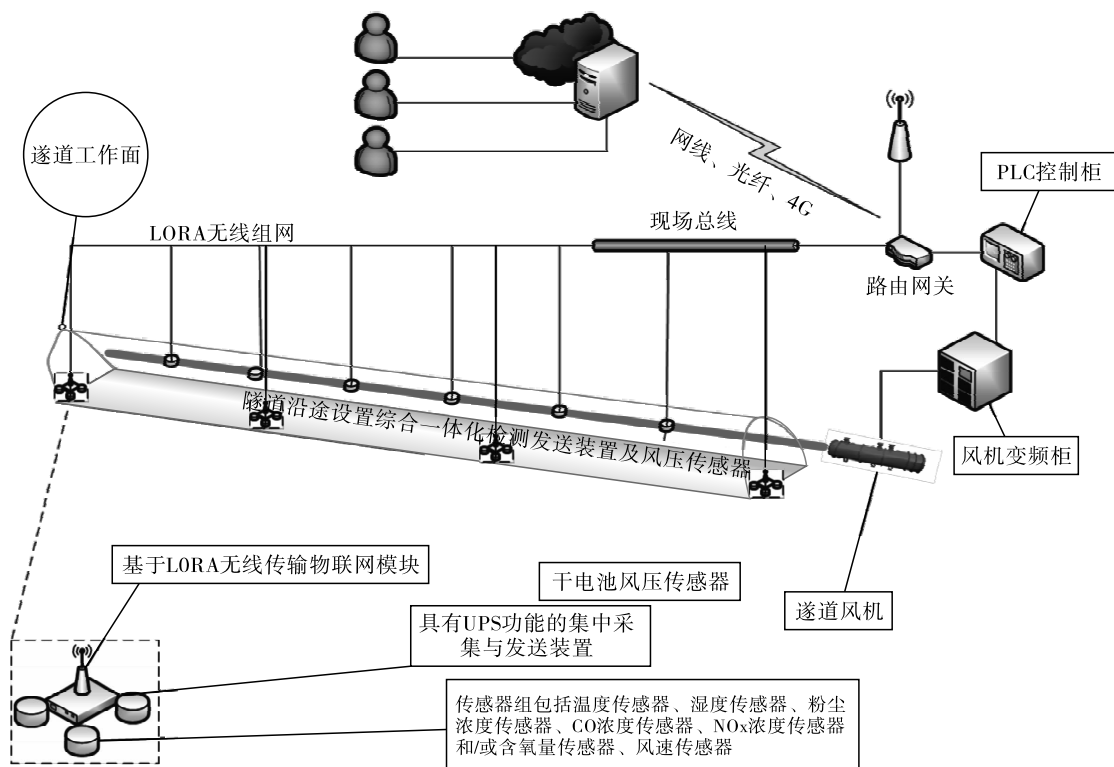


图 1 地下复杂洞室群施工通风智能化控制系统结构示意图

智能监控模块:通过实时监测地下空气质量、温度、湿度等参数,以及通风设备的运行状态,实现远程监控和预警。

智能调度:通过对地下空间的环境和施工需求进行分析,实现通风设备的智能调度和优化运行。

能耗管理:通过对通风系统的能耗进行实时监

测和数据分析,实现能耗优化和节能管理。

2 洞室环境数据计算与分析

为了做到优质节能远程可控通风,根据施工组织设计,对风量及风压进行科学论证,合理选用控制器和传感器,合理利用现有通风设备,实现智能通风

管理,为隧道施工服务。

根据地下复杂洞室群施工特点及通风需求分析,地下洞室横截面积按三级围岩进行计算,平导面积为 14.4 m^2 、正洞面积为 120 m^2 ;洞内每工作面平均施工为 30 人;爆破后风机排风时间为 30 min;风机排风管采用 2 种直径为 $\Phi 1.2 \text{ m}$ 和 $\Phi 0.8 \text{ m}$ 的软管;排风管百米漏风率 β 为 1.2%;排风管沿程摩阻系数 a 为 $3.0 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2$;最大压入通风平导长度 L 为 2000 m;正洞 L 为 125 m^[6-7]。

2.1 洞室风量计算

洞室内风量计算分为 4 种情况:一是依据洞内允许最低风速计算得到风量值 Q_1 ,二是依据洞内最多工作人员数计算值 Q_2 ,三是依据排除爆破粉尘计算值 Q_3 ,四是依据风机排出废气排放量计算值 Q_4 。通过计算,取洞内风量 Q 为 Q_1, Q_2, Q_3 和 Q_4 中最大的为洞内风量^[8-10]。

按照隧道压入式通风的风量计算关系式,可得到 Q_1 平导为 $216 \text{ m}^3/\text{min}$, Q_1 正洞为 $1512 \text{ m}^3/\text{min}$;按洞内最多工作人员数计算风量,可得 Q_2 为 $90 \text{ m}^3/\text{min}$;按稀释爆破炮烟计算风量,可得 Q_3 平导为 $750 \text{ m}^3/\text{min}$, Q_3 正洞为 $1030 \text{ m}^3/\text{min}$;按稀释内燃机车废气计算风量,可得 Q_4 为 $2550 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

对风机风量的计算,依赖于洞室内通风的长度、最大风量需求以及洞内漏风率等参数进行计算。根据洞室内通用风量计算关系式 $Q_m = Q_0 / (1 - 0.012L/100)$,可计算出平导和正洞情况下风机在单位时间内的风量大小。平导风量 Q 为 $513 \text{ m}^3/\text{min}$,正洞风量 Q 为 $2550 \text{ m}^3/\text{min}$ ^[11-13]。

2.2 洞室风压计算

洞内风压为动压强、局部压强、沿程压强之和 ($h_{\text{阻}} = \sum h_{\text{动}} + \sum h_{\text{局}} + \sum h_{\text{沿}}$),通常动压取 50 par,局部压强按沿程压强损失的 10% 估算,沿程压强计算如式(1)所示:

$$h_{\text{沿}} = agPLQ_2/S_3 \quad (1)$$

式中: a 为风道摩擦阻力系数,取 $a = 3 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}^2$; L 为风道长度,平导为 2000 m,正洞为 125 m; Q 为风机风量,平导为 $8.5 \text{ m}^3/\text{s}$,正洞为 $21.7 \text{ m}^3/\text{s}$; S 为管道截面积,平导为 0.78 m^2 ,正洞为 1.76 m^2 ; P 为管道内周长,平导为 3.14 m,正洞为 4.71 m; g 为重力加速度,取 $9.81 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

由式(1)可计算出平导和正洞情况下的压强:

$$h_{\text{平导沿}} = 2814 \text{ par}, h_{\text{正洞沿}} = 1030 \text{ par};$$

$$h_{\text{平导阻}} = \sum h_{\text{动}} + \sum h_{\text{局}} + \sum h_{\text{平导沿}} = 3145 \text{ par};$$

$$h_{\text{正洞阻}} = \sum h_{\text{动}} + \sum h_{\text{局}} + \sum h_{\text{正洞沿}} = 1183 \text{ par}。$$

综上所述,按洞室工作环境下设定的参数计算风量和风压等,根据这些参数,再通过风机送给合适的环境数据,以保障室内工作人员的安全。

3 洞室风量智能控制设计

首先通过环境数据采集传感器采集风压、温度、湿度、风速、粉尘、含氧量及有害气体等,然后根据风量及风压的需求量,通过数据分析,启动风机以补给合适的风量和风压,保障安全正常施工,这是一个实时、自主的过程,以达到节能目的。系统组成如图 2 所示。

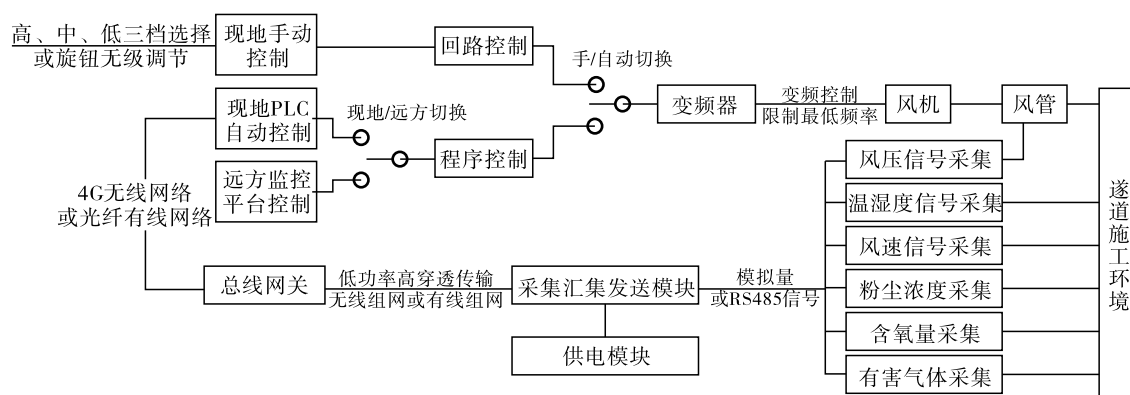


图 2 洞室风量智能化控制运行结构图

智能化系统控制分为现地手动控制、现地 PLC 自动控制和远方监控平台控制。在 PLC 程序和变频器中设定最低运行频率,对风机运行数据(如功率、频率、运行时间等)实行监视,通过变频器反馈

记录送到远方监控平台。风管可对风压信号采集传感器进行设置,检测单位距离内的风压损失量,作为风机运行频率算法及风管破损漏风的信号,多路采集传感器综合汇集从低功率高穿透及远距离多拓扑

结构来的信息,以无线组网或有线组网的方式传送到现地 PLC 控制柜和远方监控平台,现场 PLC 自动控制时,远方监控平台可对整个通风系统进行实时环境监测和故障状态评估并报警,同时记录事件和曲线波形^[14-15]。

4 物联网通信系统设计与实现

洞室工况复杂,系统在洞室内采用 LoRa 透传

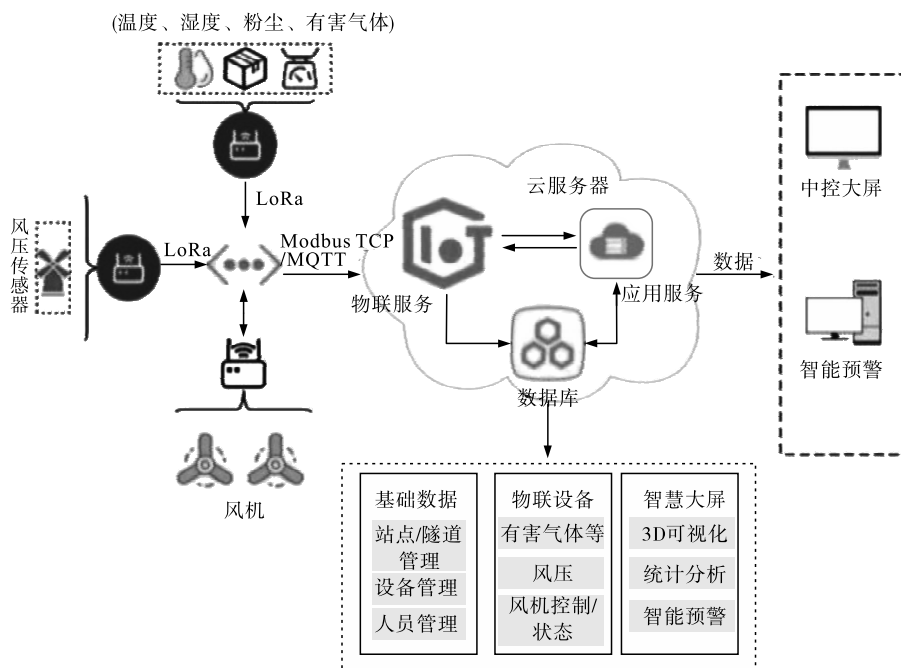


图 3 洞室数据通信结构图

本地服务器控制指令通过 PLC 控制柜向现场风机变频柜发送指令,现场风机变频柜将指令发送给风机执行,远程控制指令通过云端服务器向无线终端接收器发送指令,无线终端接收器再将指令发给 PLC 控制柜,PLC 控制柜向现场风机变频柜发送指令,现场风机变频柜将指令发送给风机执行,根据预设的控制策略,自动调节风机的运行状态,实现洞室内外空气的有效流通^[16-18]。

5 洞室通风系统软件设计与实现

服务器后台管理软件由数据库、云平台协议、数据采集与分析、远程控制及可视化展示等组成。系统软件运行后,实时采集洞室环境参数,将采集数据和目标数据进行综合分析,再发送指令调节风机工作频率,以达到智能调节的目的。程序运行流程如图 4 所示,软件系统组织结构如图 5 所示。

无线通信技术实现数据的无障碍传输,采用星型网络通信拓扑结构实现组网通信。在洞室内各环境传感器作为网络节点,通过 RS485 总线与 LoRa 中断器相连,LoRa 中断器将所在范围的传感器数据传到无线终端采集器,采集器再通过 4G 网络将数据上传到云平台,通过本地服务器进行分析管理。洞室通信系统架构如图 3 所示。

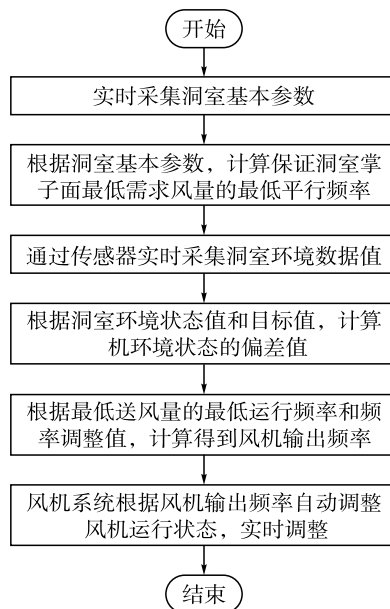


图 4 程序运行流程图

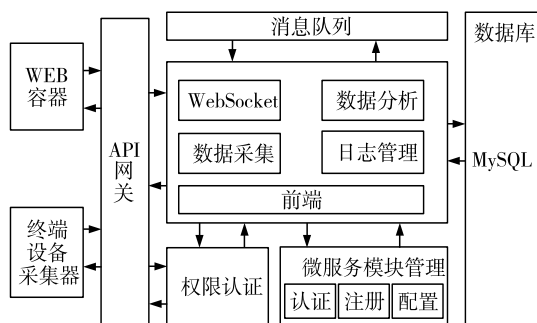


图5 系统软件组织结构图

洞室通风系统后台系统基于Java语言开发,采用前端和后台技术,主要模块如下:(1)API网关,用于过滤外部请求,包括登录认证、请求鉴权等;(2)

WEB容器,用于运行部署前端UI代码;(3)微服务模块,系统内各功能模块;(4)消息队列,消息中间件及总线设计,用于各模块之间解耦,同时对数据采集峰值进行削峰;(5)数据库,用于存储采集到的数据、可视化数据以及规则引擎数据;(6)数据库MySQL用于存储现场数据。数据传输与通信使用了Modbus TCP作为网关和云服务器的通信协议(MQTT)。可视化展示设计用户友好的界面,将监测数据和预测实时结果提供给three.js进行3D可视化展示,以便于用户理解和决策。使用数据Echart等可视化工具进行预警、报错的显示。软件可视化平台界面如图6所示。

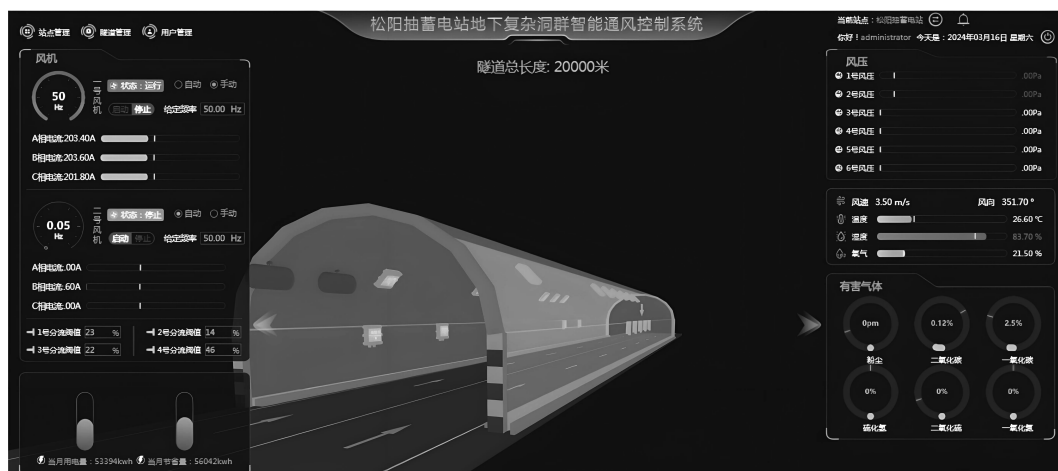


图6 上位机软件可视化平台

6 系统测试

通过对系统硬件和软件的研究,对松阳抽水蓄能电站地下洞室施工通风项目进行了测试,测试项目包括氧气、有害气体、粉尘、风管压力、隧道风速及风机能耗等。

6.1 氧气含量数据测控

洞室内未作业情况下,给予最小量送风,测试氧气含量数据为正常值;当施工中发生爆破等大型工程量时,系统采用最大送风量工作模式,以尽快排除有害气体和粉尘。氧气含量测试数据如图7所示,可以看出,正常情况下,洞内含氧量均大于20%;爆破后氧气急剧下降,最低达2%,通过系统控制风量后,在很短的时间内恢复氧气量,从而保证作业环境有充足的氧气。

6.2 二氧化硫气体含量数据测控

洞室正常情况下,二氧化硫气体含量均在国家标准值的范围内。国家规定的安全作业环境,二氧化硫安全浓度标准值为 5 mg/m^3 ,也就是二氧化硫

浓度在 1.9 ppm 以下;而爆破后的瞬间,隧道内的二氧化硫浓度飙升至 17 ppm ,超过安全值近10倍。二氧化硫气体测试数据如图8所示,控制系统在爆破后采用最大风量送风,快速降低隧道内二氧化硫的浓度,在约20 min时间内,隧道内二氧化硫浓度又恢复正常值。

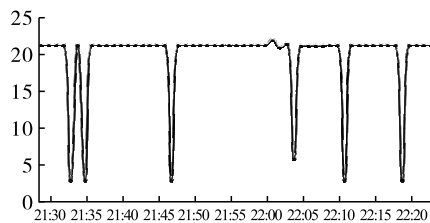


图7 氧气含量测控试数据图

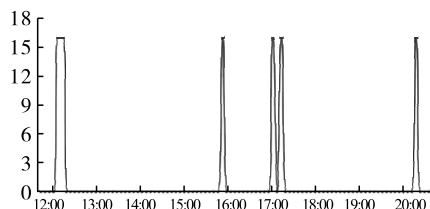


图8 二氧化硫气体含量测控数据图

6.3 一氧化碳气体含量数据测控

在一氧化碳气体正常情况下,给予最小送风,其浓度均小于 3%;当发生爆破作业后,一氧化碳浓度迅速达到 18%,风机启动,并按照浓度值适时调整送风量,以便在最佳的功耗下,用最短时间清除有害气体。一氧化碳气体含量测控数据如图 9 所示。

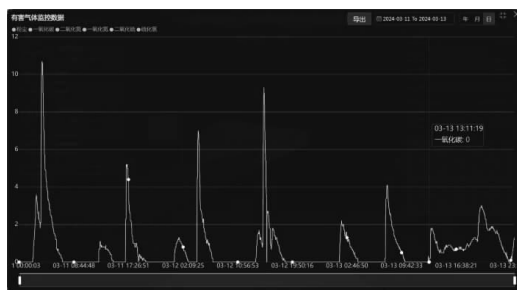


图 9 一氧化碳气体含量测控数据图

6.4 风机能耗管理测试

在正常作业情况下,对洞室内 1 天内风机的用电能耗进行监测,将每时每刻的用电量绘制成能耗消耗曲线,如图 10 所示。从图中分析可知,系统根据作业情况适时调整风机的功率,在爆破情况下,根据有害气体和粉尘情况分别调整不同的送风量,以最小的能耗在最短的时间内使洞室环境数据恢复正常,能耗曲线始终根据需求智能化调整。相比传统的全功率作业管理,大大降低了能耗成本。

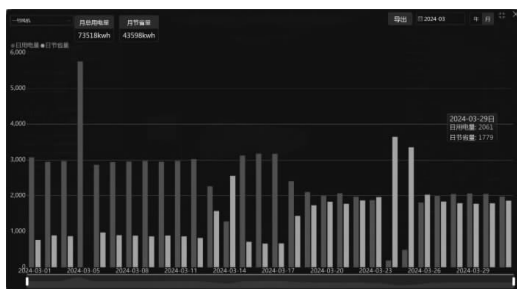


图 10 风机能耗管理测控数据图

7 结语

地下复杂洞室群施工通风智能化控制系统融入了系统仿真和数值模拟的通风方案优化模式,该模式在考虑风量需求的时变性和动态性的基础上,合理布置通风系统,便于掌控实际通风效果。研究表明,该方法能定量分析自然通风效果以及风机不同位置的影响等关键问题,为通风方案的优化设计提

供理论依据和技术支持。

参考文献:

- [1] 夏春华. 龙岗特长铁路隧道矿山法段施工通风方案研究[J]. 山西建筑, 2024, 50(06): 159 - 162.
- [2] 刘王平. 高海拔长大铁路隧道施工通风方案优化[J]. 铁道建筑技术, 2024(02): 143 - 147.
- [3] 邓海峰, 李良策, 赵晨. 欧洲规范下隧道施工通风系统研究[J]. 公路, 2024, 69(02): 157 - 161.
- [4] 黄飞, 钟小凤, 罗太友, 等. 我国瓦斯隧道施工技术进展及主要问题探讨[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(01): 53 - 68.
- [5] 任高平, 章猛. 隧道掌子面通风施工技术[J]. 云南水力发电, 2024, 40(01): 125 - 128.
- [6] 王静华, 陈强, 田万良. 长斜井特长隧道施工通风设计研究与应用[J]. 公路, 2024, 69(01): 416 - 424.
- [7] 孙登峰. 高速公路隧道工程瓦斯段施工的通风控制技术[J]. 工程机械与维修, 2024(01): 162 - 164.
- [8] 姚宇洪, 刘东, 周小生, 等. 施工隧道污风集流口流线性化与正交优化[J]. 工业安全与环保, 2024, 50(01): 7 - 12.
- [9] 陈星宇, 吴剑, 任松, 等. 高海拔隧道施工期污染物扩散规律[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(01): 176 - 187.
- [10] 颜植炜. 跃龙门隧道施工通风方案研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(18): 188 - 190.
- [11] 张恒, 杨家松, 高辉, 等. 锦屏隧道施工通风研究[J]. 广西水利水电, 2008(5): 11 - 13.
- [12] 刘亚进, 李友华, 常瑞. 溪洛渡水电站左岸地下厂房大型洞室群通风规划[J]. 水力发电, 2008(9): 12 - 14.
- [13] 李力, 危宁. 隧道施工通风系统模糊控制方法研究[J]. 人民长江, 2008(2): 43 - 45.
- [14] 申明亮, 赵彦贤, 宋媛媛. 溪洛渡地下洞室群施工通风方案仿真与优化[J]. 长江科学院院报, 2008(4): 36 - 39.
- [15] 赵艳亮, 卢文波, 孙晓勇. 水电工程大型地下洞室群施工通风系统数值计算[J]. 水力发电学报, 2007(2): 108 - 113.
- [16] 杨庆学, 郑家祥. 大型地下洞室群施工通风动态仿真研究[J]. 水电站设计, 2003(1): 1 - 5.
- [17] 谭金龙. 大型地下工程洞室群施工期通风研究[D]. 天津: 天津大学, 2007: 1 - 53.
- [18] 李雪林. 地下长大隧洞施工通风方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.