

巴彦高勒煤矿皮带输送机智能调速系统研究

Research on Intelligent Speed Control System of Belt Conveyor in Bayangaole Coal Mine

曹浩浩, 杨东, 王杜垚(内蒙古黄陶勒盖煤炭有限责任公司巴彦高勒煤矿, 内蒙古鄂尔多斯 017300)

摘要: 巴彦高勒煤矿13盘区工作面巷道及采区皮带输送机驱动采用变频控制,按照4.0 m/s恒速运行,皮带输送机额定运输能力远超过工作面实际产能,变频器节能功能无法充分发挥且运输系统存在能耗高、磨损严重问题。为此,依据13盘区皮带运输现场情况,提出一种智能调速控制系统,该系统通过GL3-24型料流传感器、ICS-17JS电子皮带秤对工作面巷道及采区皮带输送机煤流量进行监测;结合BP神经网络、遗传算法确定带式与煤流量最佳匹配关系,通过模糊控制实现带式输送机智能调速。现场应用后,13盘区皮带输送机能耗及磨损得以明显降低,取得较为显著的应用成果。

关键词: 皮带输送机; 智能调速; 煤流监测; 节能降耗

中图分类号: TD524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)02-0088-07

Abstract: The drive of the belt conveyor in the working face and mining area of the 13th panel of Bayangaole Coal Mine adopts frequency conversion control and runs at a constant speed of 4.0 m/s. The rated transport capacity of the belt conveyor far exceeds the actual capacity of the working face, and the energy-saving function of the frequency converter cannot be fully However, the transportation system has problems of high energy consumption and serious wear and tear. For this reason, according to the situation of the belt transportation site in the 13-panel area, an intelligent speed regulation control system is proposed. Monitor; combine BP neural network and genetic algorithm to determine the best matching relationship between belt and coal flow, and realize intelligent speed regulation of belt conveyor through fuzzy control. After the on-site application, the energy consumption and wear of the 13-panel belt conveyor can be significantly reduced, and more significant application results have been achieved.

Key words: belt conveyors; intelligent speed regulation; coal flow monitoring; energy saving

1 前言

皮带输送机是煤矿井下主要运输设备,同时设备额定运输量普遍高于实际运输需要,从而导致皮带输送机能耗大、磨损严重问题^[1-3]。现阶段矿井皮带输送机多采用变频器实现软启动,但是变频器在节能降耗方面功能未充分发挥^[4-6]。巴彦高勒煤矿实际皮带运行过程中,311308工作面巷道皮带(DSJ140/300/4×500)和13盘区皮带(DTL160/380/4×710)均为持续恒速运转(4 m/s),均通过永磁变频驱动,巷道皮带和13盘区大巷设计年运量可达1 584万t和2 006万t左右,而实际上13盘区的年产量仅为400万t左右,皮带运行过程中存在严重的能耗浪费。本文以13盘区皮带及311308工作面巷道皮带为研究对象,设计皮带机变频调速智能控制系统,以便提高皮带输送机工作效率并降低

设备运输能耗。

2 智能控制系统结构

2.1 整体结构

皮带输送机智能调速控制系统根据功能可以分为皮带输送机控制单元、皮带输送机检测单元、PLC控制器单元和上位机数据分析处理单元^[7]。传感器及检测仪表通过电子皮带秤、速度传感器和料流传感器等,把皮带瞬时煤量及带速等运行参数转换为模拟量,便于传入PLC。变频器通过改变输出电流频率改变电机转速,实现运行速度调节。智能控制系统整体结构如图1所示。

2.2 硬件结构分析

2.2.1 煤流传感器确定

1) 311308工作面巷道皮带煤流量传感器确定

考虑到皮带机尾在工作面推进的过程中需要不断的移动,电子皮带秤、光波秤等称重装备不易于拆卸,井下工人工作强度较大,不推荐使用。推荐使用易于移动不需要校准的计量设备进行计量煤量。在充分分析目前国内外较为成熟的技术方案和矿井现状的基础上,选择了四个皮带调速节能方案进行

[作者简介] 曹浩浩(1993—),男,汉族,陕西省榆林市人,助理工程师,技术员,从事采掘技术、智能化、科技创新等工作。

[引用格式] 曹浩浩,杨东,王杜垚. 巴彦高勒煤矿皮带输送机智能调速系统研究[J]. 中国矿山工程,2022,51(2):88-94.

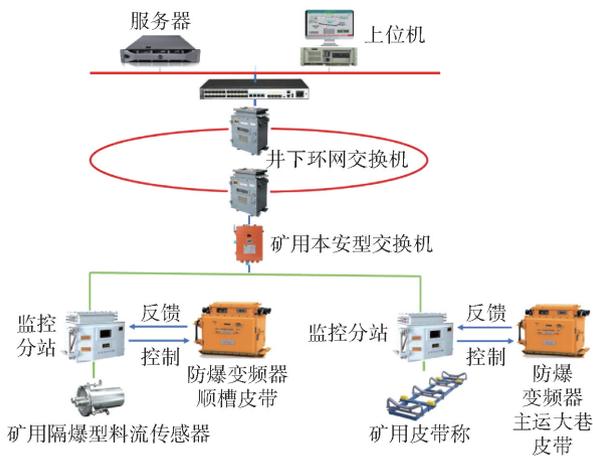


图1 智能控制系统整体结构

分析论证,各方案参数详见表1^[8-10]。

上述4个方案中,方案四(电流感应计量煤量)成本最低,但是该方案对煤流量变化不敏感,无法对瞬时煤量进行监测,容易造成堆煤事故,故不推荐方案四。方案一(料流传感器计量煤量)、方案二(摄像头计量煤量)、方案三(激光发射器加摄像头计量煤量)均属于非接触法测量瞬时煤量,受限于井下的复杂环境,计量精度均不高;相较于料流传感器,摄像头计量准确度略高些,价格却高出近7倍,考虑到投入费用和节能效果的平衡关系,推荐使用方案一,即根据料流传感器计量巷道皮带的瞬时煤量,实现311308工作面巷道皮带的速度智能调节。采用的料流传感器型号为GL3-24型,结构如图2所示,技术参数见表2。

表1 各方案对比表

方案比较	方案一(料流传感器计量煤量)	方案二(摄像头计量煤量)	方案三(激光发射器加摄像头量煤量)	方案四(电流感应计量煤量)
工作原理	使用料流传感器计算过煤厚度,进而估算出煤流量大小	通过摄像头来监控皮带机上煤流宽度,判断煤流量大小	通过激光发射器、摄像头来模拟出皮带上煤流的实时体积	监控皮带机电机的实时电流变化
巷道煤量计量设备	料流传感器	摄像头	激光发射器和摄像头	无
影响因素	受井下煤尘及煤颗粒度影响较大	受井下煤尘及煤颗粒度影响较大	受井下煤尘及煤颗粒度影响较大	无法预知皮带上的煤量分布情况
核心控制系统	PLC编程模块	PLC编程模块	PLC编程模块	PLC编程模块
成本情况(仅比较计量部分成本)	7.5万	50万	50万	0万



图2 GL3-24 矿用隔爆型料流传感器

2)13 盘区大巷皮带煤流量传感器确定

13 盘区大巷皮带来煤方向主要是311308工作面和掘进工作面,可在工作面巷道机头附近安设计量装备对巷道煤量进行计量;掘进工作面不设计量装备,结合实际最大出瞬时煤量进行估算。在充分分析目前国内外较为成熟的技术方案和矿井现状的基础上,选择了单秤体电子皮带秤,双秤体电子皮带秤和阵列式电子皮带秤对皮带计量进行分析论证,各方案参数详见表3。

综合比较可知,双秤体电子皮带秤和阵列秤在

表2 料流传感器主要参数

供电电压	工作电流	模拟量输出	最大发光功率	相应速度	测量距离	测量误差	输出信号范围	外形尺寸
DC 10 ~ 30 V (±10%)	≤100 mA	4 ~ 20 mA	≤0.5 Mw	≤6.5 m/s	0.07 ~ 1 m	±2.5%	4 ~ 20 mA	170 mm × 176 mm × 220.5 mm

称重准确度,实物标定重复性、耐久性等方面均优于传统的皮带秤,故排除传统的皮带秤。阵列秤实际准确度仅比双秤体电子皮带秤高出0.05%,而价格

却高出25万,故推荐使用双秤体电子皮带秤进行计量。考虑到井下工况等实际情况,本次选用ICS-17JS电子皮带秤,具体技术参数见表4。

表3 煤量计量装置对比表

项目	传统皮带秤	双秤体电子皮带秤	阵列秤
称重准确度	实际准确度 1~5%	实际准确度 0.25%	实际准确度 0.2%
间歇给料准确度	称重误差明显加大,无法准确计量。	对称重基本无影响	对称重,基本无影响
耐久性	长期使用准确度 1~5%,不经调整和维护将无法正常使用	数年不需调整托辊,适当调整称重系数即可满足需要	数年都不需调整托辊,适当调整称重系数即可满足需要
日常维护	专业人员进行维护,经常需要重新调整托辊高度,各支点多需要进行调整;使用准确度依赖于日常维护的好坏	没有需要调整和更换的部件(除传感器损坏外);使用准确度与维护无关	日常免维护,没有需要调整和更换的部件(除传感器损坏外);使用准确度与维护无关
维修难度	出现故障需使用人员进行判断,制造厂只能通过用户间接了解情况	绝大多数故障可通过远程专家系统进行故障判断	绝大多数故障可通过远程专家系统进行故障判断
技术成熟度	技术成熟,常用在井下	技术成熟,常用在井下	技术先进,井下使用案例较少
价格	3万左右	15万左右	60万左右

表4 电子皮带秤技术参数

环境温度	相对湿度	额定输入电压	输入视在功率	皮带秤准确度等级	运行精度
-10℃ ~ +40℃	≤95%	AC 127V/50Hz	≤75 VA	0.5 级	标定精度优于 ±0.25%, 长期运行精度优于 ±1%

3) 传感器安装位置

工作面刮板输送机及转载机由于本身的结构不易于装设煤量计量装备,为及时采集巷道皮带煤量,计量装备应安装在皮带机机尾附近。在 13 盘区 311308 工作面巷道皮带机机尾附近设置一台料流传感器,根据料流传感器采集的瞬时煤量;在 13 盘区 311308 工作面巷道皮带机头附近设置一台防爆电子秤,根据电子秤采集的瞬时煤量,对 13 盘区大巷皮带的速度进行控制,具体电子秤布置方案如图 3 所示。

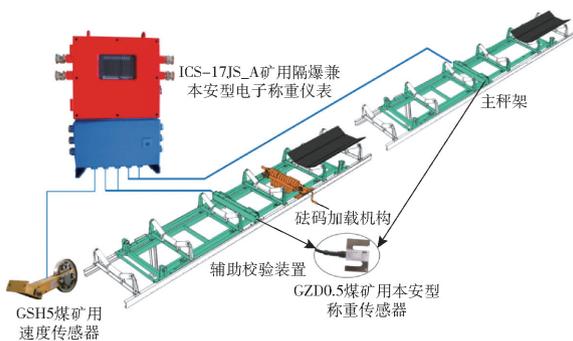


图3 电子秤布置方案

2.2.2 变频器

变频器通过改变输入电机电流频率来控制电机的转速,PLC 通过输出不同的模拟信号控制变频器改变频率,最终改变电机转速,即皮带输送机的带速。变频器和各部分之间的关系如图 4 所示。

2.2.3 PLC

PLC 的主控模块用来数据存储和逻辑运算,并

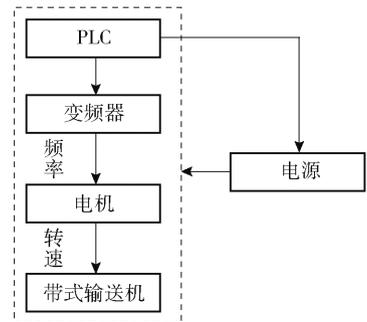


图4 变频器线路连接图

拥有以太网通信模块,可以通过 TCP/IP 协议,方便的连接上位机,进行数据传输,具体 PLC 与其他硬件连接情况如图 5 所示。

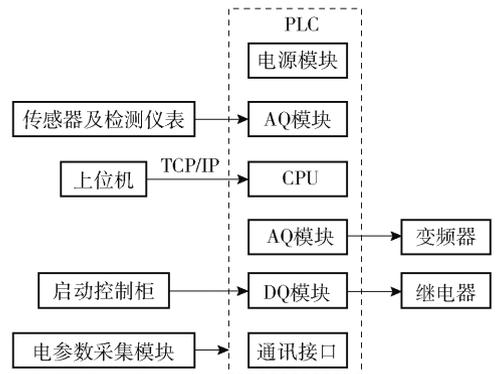


图5 PLC与其他硬件连接示意图

在皮带输送机智能调速系统中 PLC 煤量输入信号有两个,一个为 311308 巷道的流传感器输入信号(4~20 mA),另一个为 13 盘皮带上的电子皮带

秤输入信号(4 ~ 20 mA);考虑到井下工况等实际情况,本次选用西门子 PLC,具体参数见表 5。

表 5 PLC 技术参数

设备名称	数量	型号	备注
CPU	3	6ES7 288-1ST20-0AA0	
数字量输入模块	1	6ES7 288-3AE04-0AA0	数字量输入及输出分别为 13 点、8 点,
数字量输出模块	1	6ES7 288-1AQ02-0AA0	模拟量输入及输出分别为 2 点、1 点
模拟量输入输出模块	1	6ES7 288-1AM03-0AA0	

2.2.4 上位机

上位机不仅能够实时在线的监控皮带输送机系统的运行状态和各个参数的变化,而且还具有强大的数据处理能力和计算能力。上位机由组态软件力控来搭建系统界面及功能,上位机选用研华 IPC-610,配 24 寸显示器。

3 皮带输送机智能控制

3.1 皮带输送机煤流量与带速模型确定

为实现皮带输送机智能控制,首先应实现煤流量与带速最优匹配。因此,构建皮带输送机煤流量、带速和电动机功耗的 BP 神经网络模型,并用遗传算法优化 BP 模型参数,得出煤流量与带速的最优匹配关系。

3.1.1 构建皮带输送机 BP 神经网络节能模型

在输送机煤流量变化比较小的时间段内设煤流量为 Q ,此时调节变频器使得带速从最小值 V_{\min} 经历到最大 V_{\max} ,记录每个速度 V 对应的功耗 P ,选取功耗最小值 P_{\min} 对应带速 V 。这时得到一组数据:即煤流量为 Q 时、电动机功耗为最小值 P_{\min} 时所对应带速 V 。用相同的方法测得不同煤流量时带速和最小功耗。通过现场测得 61 组实验数据:即煤流量为 Q_1, Q_2, Q_3 时,使得电动机功耗为最小为 $P_{\min 1}, P_{\min 2}, P_{\min 3}$ 时所对应的输送机速度值 V_1, V_2, V_3 ,该实验数据可作为建立 BP 神经网络节能模型的样本数据。

采用 Matlab 建立煤流量、带速、电动机功耗间的 BP 节能模型,具体如图 6 所示。隐含层的激活函数选择 S 型激活函数,输出层选择线性激活函数。其中输入节点数为 2,分别表示煤流量和带速;输出层节点数为 1,代表皮带输送机电动机功耗。

图 6 中, r 为输入维数, q 为样本个数, S_1 为隐含层节点数, S_2 为输出层节点数, F_1, F_2 分别为隐含层与输出层的激励函数, W_1, W_2 分别为隐含层与输出层的权值矩阵; B_1, B_2 分别为隐含层与输出层的偏差矩阵, A_1, A_2 分别为隐含层与输出层的输出。经过构建 BP 神经网络节能模型,进行循环训练,当最大循

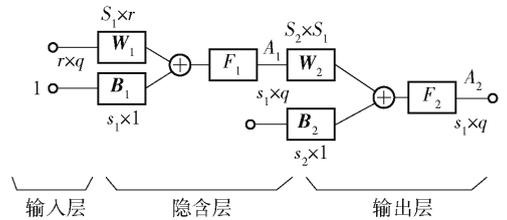


图 6 BP 网络节能模型

环次数,训练时间训练误差性能指标中有参数到达之前设定的数值时,此时完成训练。这时便建立了带式输送带煤流量,皮带速度和电动机功耗三者之前的非线性节能模型,用测试得到的现场数据作为参考,对模型进行优化训练。

3.1.2 遗传算法优化 BP 网络节能模型

在确定了皮带输送机 BP 神经网络节能模型后,应用遗传算法对该模型进行参数优化。遗传算法优化 BP 神经网络算法流程如图 7 所示,图中虚线部分为神经网络算法部分。节能模型公式为: $P = f(x_1, x_2)$, 式中, x_1, x_2 为需进行优化的变量,分别代表皮带输送机的煤流量和皮带速度。

现在假定皮带输送机煤流量 x_1 为 1 500 t/h, 皮带速度 x_2 的取值范围为 (1.5, 2), 即 1.5 ~ 2 m/s。该问题可转换为在区间 [1.5, 2] 中找寻能使得 P 取最小值点的问题。所以 [1.5, 2] 中的所有点 x_2 就是所有个体, 函数值 $f(x_1, x_2)$ 则对应成为 x 的适应度, 区间 [1.5, 2] 成为它的解空间。根据 13 盘区现场情况, 确定的遗传算法适应度函数进化过程如图 8 所示。

由图 8 可知,遗传算法得到的最优解为:当煤流量为 1 500 t/h 时,带速设置为 1.98 m/s,功耗为最小值 816.09 kW。在程序中改变 X 和 Y 值,可以得到皮带输送机煤流量为任意值时,使得功耗最小所对应的带速值。

3.1.3 皮带运量与速度最优对应关系确定

在煤矿实际生产中,皮带输送机在运行中,煤流量时刻在变动,而且变化范围比较大,不可能固定在一个值。所以结合优化结果和煤矿实际生产,煤

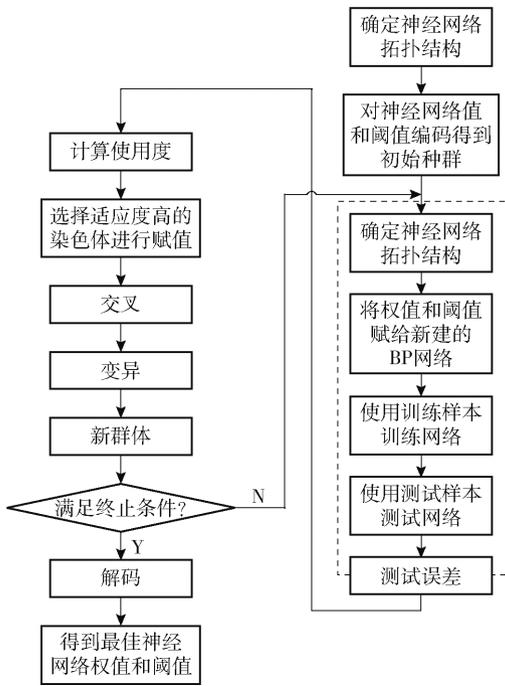


图7 遗传算法优化BP神经网络算法流程图

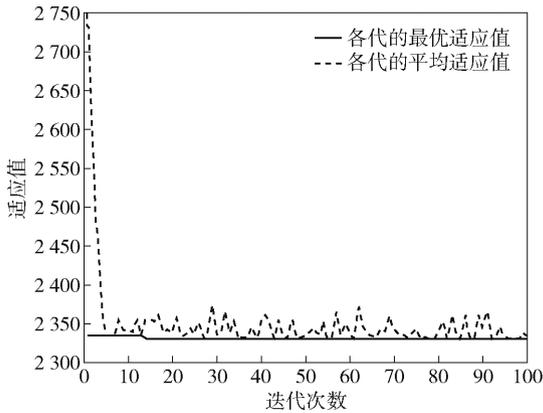


图8 遗传算法适应度函数进化过程

流量一定变化范围内,通过遗传算法得到最优的带速,从而实现煤流量与带速间的最优匹配,实现分阶段调速。运量和速度对应关系具体见表6、表7。

表6 311308工作面巷道皮带运量与速度最优对应关系

运量/t	带速/m·s ⁻¹
0~1500	1.98
1500~2000	2.67
2000~2500	3.33

表7 13盘区大巷皮带运量与速度最优对应关系

运量/t	带速/m·s ⁻¹
0~1500	1.76
1500~2000	2.37
2000~2500	2.96

3.2 皮带输送机调速控制

采用合适的控制算法,根据得出的最优匹配结果设计模糊控制器,由PLC实现模糊控制,完成皮带输送机自适应节能控制。

3.2.1 控制方式选择

常用的智能调速控制方案有PID控制、模糊控制等。PID控制是目前工业自动化领域应用最广泛的线性控制系统,模糊控制是应用最广泛的非线性控制系统。具体两种控制方式对比结果见表8。模糊控制在鲁棒性、抗干扰性和适应性等方面都明显优于常规PID控制,但是在精确性方面劣于常规PID控制。考虑到皮带输送机系统的工作环境比较恶劣,经常会出现来自各方面的干扰和波动,而且相比精确性,稳定性显得更为重要。综合考虑,文中基于模糊控制理论设计合适的模糊决策实现皮带输送机节能控制。

表8 PID-模糊控制对比结果

控制方式	PID	模糊控制
设计难易程度	复杂	简单
本质属性	线性控制器	非线性控制器
智能化	无	有
参数控制作用	明显	不明显

3.2.2 模糊控制器设计

为使皮带输送机节能运行,要合理匹配带速 V 和煤流量 Q ,调节电流频率 f 。模糊控制器的输入量选取运行速度偏差 E 、运行速度偏差变化率 E_c ,电流频率 f 作为模糊控制器的输出量。采用模糊控制来实现负载的智能跟踪控制,具体控制系统过程如图9所示。

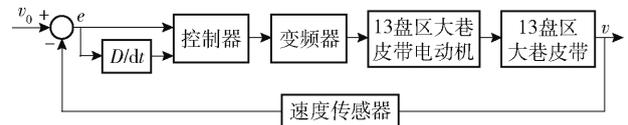


图9 皮带输送机变频调速节能控制系统过程

3.3 控制方式选择

本系统控制方式分为3种:集中控制、手动控制和就地控制。在这3种控制方式下,集中控制可以使系统运行按照与事先编辑好的程序运行;手动控制可以通过组态界面自定义的进行速度调节;就地操作模式可以让工作人员在井下实地进行操作。针对以上所说的3种工作模式,在系统工作的过程中不能同时运行,在组态页面上有3个按钮可以控制

3个控制方式。当智能调速系统出现故障时,皮带自动调为高速,同时隔离智能节能系统,确保生产安全。

4 现场应用分析

4.1 现场应用情况

皮带输送机智能调速系统经过进行前期开发和现场安装调试后,系统已在巴彦高勒煤矿13盘区皮带和311308工作面巷道皮带实现了皮带分阶段调速功能,系统进入工业试用阶段。从系统运行至今,矿井现场信号采集、网络传输和中心服务器均工作稳定,无硬件与软件故障,在皮带速度有效控制和节能降耗方面取得了较好的效果。具体智能调速系统运行情况如图10所示。

使用前,运行速度为4.5 m/s,经计算,消耗的功率 $N_{\text{轴}} = 1\ 023\ \text{kW}$;系统使用后,平均速度为 $1.98 \times 1.25 = 2.5\ \text{m/s}$ (其中,1.25为安全系数),经计算,消耗的功率 $N_{\text{轴}} = 673\ \text{kW}$;按上述功率计算,每年可以节电1 849 630度电,电费按0.46元/度,每年可以节省电费约计85.1万元。

2) 311308工作面巷道皮带输送机

311308工作面巷道皮带输送机的最大运量为3 000 t/h,按照400万吨/a计算,平均运量约为758 t/h;系统使用前,运行速度为4.0 m/s,经计算,消耗的功率 $N_{\text{轴}} = 918\ \text{kW}$;系统使用后,平均速度为 $1.76 \times 2.0 = 3.5\ \text{m/s}$ (其中,2.0为安全系数),经计算,消耗的功率 $N_{\text{轴}} = 832\ \text{kW}$;按上述功率计算,每年可以节电453 845度电,电费按0.46元/度,每年可以节省电费约计20.9万元。综上所述,皮带输送机智能调速系统使用后,年节省电费近106万元,由此可见,节电效果十分明确。

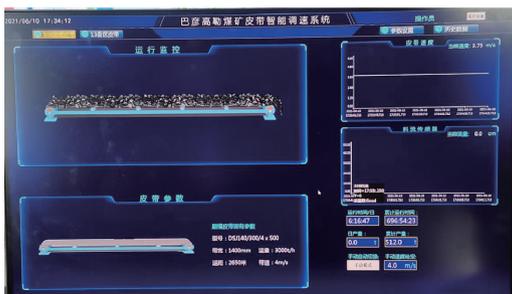
4.3 降低损耗效果

矿用皮带输送机在工作运行中,以电能消耗为主。此外,机械损耗也是一个非常重要而不能忽略的因素,这是由轴承、滚筒、托辊和皮带之间的摩擦造成的。当带速升高,其滚筒和轴承的转速就会加快,因而机械损耗就增加。由于带速的波动,由于皮带输送机运行的带速不同,托辊与皮带因为摩擦造成的损耗程度也不一样。当输送机速度降低时,在相同的时间内,托辊与皮带因为摩擦造成的损耗也相应的降低,换句话说随着带速的降低,输送带的机械磨损度也随之降低。

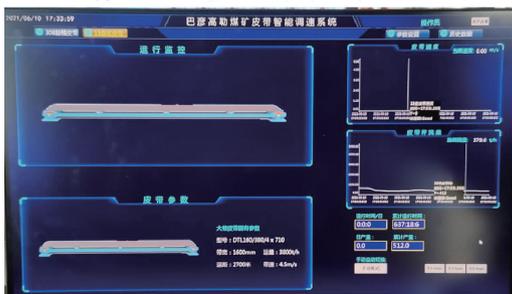
5 结论

(1)从煤矿皮带运行和维护实际情况出发,针对目前在煤矿皮带一直固定高速运行的问题,将变频调速思维引入到煤矿皮带设备管理领域,研发出一套皮带输送机智能调速系统。系统以料流传感器及电子皮带秤双重煤量计量及PLC为核心,根据煤流量的实时检测数据,通过PLC编程控制逻辑对变频器进行调速,实现“煤多快跑,煤少慢跑”的智能调速功能。

(2)采用料流传感器及电子皮带秤对13盘区瞬时煤量进行计量,结合运量与速度的关系,分阶段的控制皮带速度,实现皮带输送机“煤多快跑、煤少慢跑”,避免空载、轻载高速运行现象,有效的



(a) 311308工作面巷道皮带运行状态图



(b) 13盘区皮带运行状态图



(c) 智能调速系统参数调整界面

图10 智能调速系统系统运行情况

4.2 能耗节约效果

1) 13盘区大巷皮带输送机

13盘区大巷皮带输送机的最大运量为3 800 t/h,按照400万t/a计算,平均运量约为758 t/h;系统

节约电耗,从而达到节能降耗的目的。建立一套由料流传感器与电子皮带秤相结合的煤量计量体系,两种计量方式相关校准,从而是计量更加高效准确。构建煤量与速度的模糊匹配体系,准确的掌握煤量与速度的对应关系,从而达到高效节能的目的。

(3)在应用实践阶段,经过巴彦高勒煤矿的试运行,本系统软件及硬件工作运行稳定,实现了对皮带输送机的自动调速;减少了皮带配件的磨损,降低了皮带运行的耗电费用,提高了皮带运行的效率,延长皮带使用寿命,实现煤矿的节能降耗、高效安全生产。

[参考文献]

- [1] 马晓琳. 基于计算机视觉技术矿山运输智能调速控制系统研究[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(5): 67-70.
- [2] 高昆. 原煤智能皮带输送系统的研究[J]. 设备管理与

维修, 2021(19): 18-20

- [3] 董志勇. 矿用带式输送机智能调速控制系统的应用研究[J]. 机械管理开发, 2021, 36(8): 266-268.
- [4] 张帆. 煤矿带式输送机智能调速控制系统的应用研究[J]. 机械管理开发, 2021, 36(6): 228-230.
- [5] 王惠臣. 小保当一号煤矿主斜井带式输送机智能调速电控系统设计[J]. 煤炭工程, 2021, 53(6): 17-22.
- [6] 徐鹏. 模糊变频控制在带式输送机调速中的应用研究[J]. 煤炭技术, 2021, 40(5): 174-177.
- [7] 张高阳. 带式输送机智能控制系统设计及其应用[J]. 山东煤炭科技, 2021, 39(4): 129-131.
- [8] 刘冰, 郝存根. 煤矿智能主运输控制系统的设计[J]. 煤矿机械, 2020, 41(3): 1-3.
- [9] 于勇. 皮带运输机变频调速控制系统的改造与应用[J]. 机械管理开发, 2019, 34(9): 202-203.
- [10] 康敏. 皮带运输机变频调速控制系统的改造与应用[J]. 机械管理开发, 2019, 34(8): 204-205.

(上接第78页)

[参考文献]

- [1] 姜福兴. 微震监测技术在矿井岩层破裂监测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 147-149.
- [2] 杨承祥, 罗周全, 唐礼忠. 基于微震监测技术的深井开采地压活动规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 818-824.
- [3] 李庶林. 试论微震监测技术在地下工程中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 122-128.
- [4] 张君. 冬瓜山铜矿围岩破坏震源机制与微震活动响应规律研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [5] 张达, 石雅倩, 刘强, 等. 基于能量分布特征的矿山微震和爆破信号自动识别研究[J]. 中国矿业, 2021,

30(10): 84-89.

- [6] 唐礼忠, 潘长良, 杨承祥, 等. 冬瓜山铜矿微震监测系统及其应用研究[J]. 金属矿山, 2006(10): 41-44+86.
- [7] 朱权洁, 姜福兴, 于正兴, 等. 爆破震动与岩石破裂微震信号能量分布特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 723-730.
- [8] 曹安业, 窦林名, 秦玉红, 等. 高应力区微震监测信号特征分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007(2): 146-149+154.
- [9] 张楚旋, 李夕兵, 董陇军, 等. 微震监测传感器布设方案评价模型及应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 594-598+608.