

基于AI技术的采煤机和运输机双闭环自动调速控制系统

尹灵通

工作面转载机、前部运输机、后部运输机（简称“三机”）大部分都已经采用变频器驱动控制，变频器具有启动转矩大、调速范围宽、调速灵活的优点。但在使用时大部分“三机”的转速都设置为定值，变频器仅起到软启动器的作用，变频器主要的调速、节能降耗的优点没有充分利用。采煤机虽采用变频驱动，但速度控制大部分根据煤机司机经验操作，工作面集控各子系统之间缺少数据交互、信息互联，整体效率有待进一步提升。在此应用环境下，笔者介绍一种基于AI技术的采煤机和“三机”之间的双闭环调速设计应用研究，在国能神东煤炭集团有限责任公司已得到应用验证。

“三机”自动调速现状

自动控制水平较低

《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》要求科学规范有序开展煤矿智能化建设，加快建成多种类型、不同模式的智能化煤矿，到2025年大型煤矿基本实现智能化，2035年各类煤矿基本建成智能感知、决策、执行的煤矿智能化体系。从近几年煤矿智能化建设情况来看，整体智能化水平偏低，虽然大部分矿井通过中级验收，但整体利用率低，实现方式不具备常态化应用能力。当前矿井配套设备种类及数量多，通信接口和协议不同，各设备厂商之间技术壁垒难以突破，数据获取权限等问题制约智能化发展。

“三机”自动调速主要方法是根据运输设备本身的煤量信息来调节速度，同时需要采集前后部运输机和转载机自身负荷量及相互之间运行工艺。直接

方法是在工作面安装煤流量传感器测试运输设备负荷量，根据负荷大小调节前后部运输机、转载机运行速度。目前，煤流量监测传感器的种类很多，常用的是连续称重式、激光断面扫描、视频识别等，但都存在故障率较高、价格昂贵等缺点，经过多年探索实践，仍然无法克服其缺点，因此煤流量传感器没有得到推广应用。采煤机自动运行时牵引速度根据截割牵引负反馈控制算法实现调节，并与前后部运输机之间无数据交互对接，无负载均衡控制，子系统之间也独立控制运行。

运维人员技能水平参差不齐

智能化系统建设后需要一批较高专业水平的运行维护人员对日常设备检修维护、故障排查诊断，而目前各矿井智能化专业技术人员的技能水平参差不齐。

不同矿企对新装备的尝试和人才培养存在政策差异，大部分对新技术、新设备、新工艺、新材料的使用比较排斥，多采用传统的控制模式，制约技术的进一步创新，难以引入打破常规的技术和装备。一些矿企对人员培训和再教育投入不足，缺乏对先进自动控制理念、智能化管理的学习培训。

智能化系统常态化应用不足

目前，国内矿井仅有少量综采（放）工作面具有各子系统之间信息交互、系统互联的成功使用案例，大部分矿井不具备或深度不够，不满足AI技术调速功能控制；部分矿井通过在工作面加装煤流量传感器进行调速，但因价格昂贵、故障率高、维护要求苛刻等原因均未达到理想调速效果，未能实现

常态化应用功能；部分设备供应商通过变频器输出转矩、电流等信息实现调速，仅实现了局部小范围内的速度波动调节，不符合调速的预期目标。矿企需要更多地依靠科技进步，结合矿井实际情况，追求生产效益和环境效益的长远潜力出发，利用先进的人工智能技术和工艺装备，充分挖掘设备潜能、规范设备管理等。

双闭环自动调速控制系统设计

双闭环自动调速控制系统作为一种先进的调速控制方法，将“三机”调速系统分为“三机”控制内环和采煤机控制外环2个部分。内环调速系统结合“三机”负载量实现闭环速度控制，外环调速系统用于和采煤机信息交互实现闭环速度控制。

构建工作面物联网

智能化工作面建设关键应用技术在于工作面物联网建设，将工作面不同厂家、不同类别的设备接入统一平台，实现各子系统数据交互、信息互联。建设工作面物联网应包含工作面WiFi系统、采煤机电控系统、液压支架电液控系统、“三机”控制系统等部分，在工作面物联网技术上实现采煤机、液压支架、运输“三机”直接或间接对话控制，数据交互共享，彼此渗透融合，为“三机”智能调速控制建立交互路径。工作面物联网建设架构如图1所示。

调速原理

结合常州联力自动化科技有限公司多年积累的

$$V_1 = f(\text{工作面采高, 采煤机位置, 截割电流, 牵引速度, 自动化工艺步骤})$$

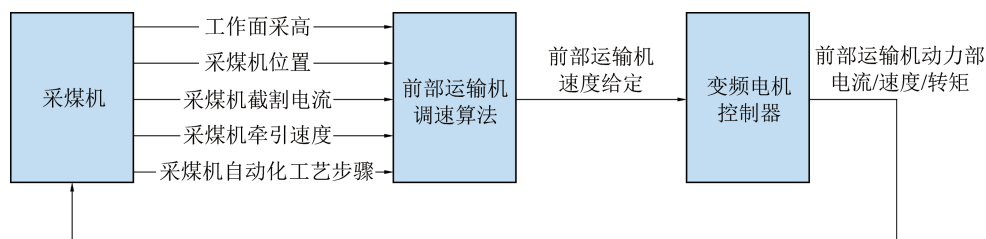


图2 前部运输机自动调速原理

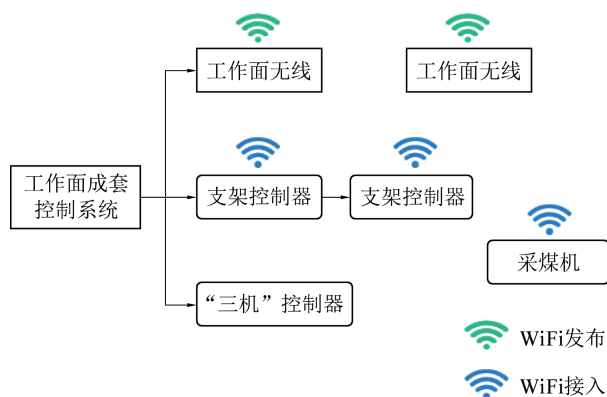


图1 “三机”调速控制系统物联网架构

自动化割煤技术（基于人工智能的预测割煤技术）、无红外收发器的液压支架电控技术、综采工作面成套设备集群控制技术，探索了根据采煤机运行工况信息，利用人工智能算法实现采煤机、液压支架与前后部运输机、转载机自动调速控制。该方法无需使用煤流量传感器，不仅完全克服了煤流量传感器故障率高的缺点，还大幅简化了系统，降低了成本，提高了系统可靠性。

(1) 前部运输机调速原理

正常生产情况下，前部运输机煤量由工作面条件和采煤机运行工况信息决定，工作面采高越大，采煤机距离机头越远，采煤机截割电流越大，牵引速度越快，往往刮板输送机上的煤量越多，反之煤量越少。根据这个原理，刮板输送机速度为工作面采高、采煤机位置、采煤机截割电流、采煤机牵引速度的函数，建立函数关系即可推算出煤流量，前部运输机自动调速原理如图2所示。

因此，前部运输机速度为

其中, f 为基于人工智能、自学习算法的前部输送机煤量估算算法。

双闭环自动调速控制系统计算生成前部输送机速度给定值后, 将数值发给变频器, 由变频器控制电机实现前部输送机调速控制且实时获取前部输送机的速度、电流、转矩值, 根据前部输送机的负载情况再控制采煤机的牵引速度, 形成闭环, 防止前部输送机过载、防压死。

(2) 后部输送机调速原理

$$V_2 = f(\text{工作面采高, 正在放煤数量, 放煤持续时间})$$

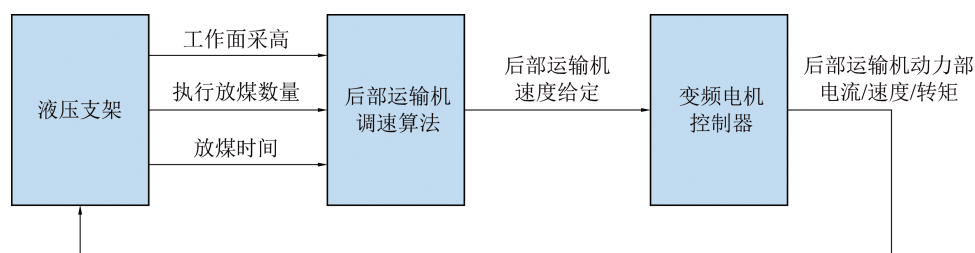


图3 后部输送机自动调速原理

其中, f 为基于人工智能、自学习算法的后部输送机煤量估算算法。

双闭环自动调速控制系统计算生成后部输送机速度给定值后, 将数值发给变频器, 由变频器控制电机实现后部输送机调速控制, 且实时获取后部输送机的速度、电流、转矩值, 根据后部输送机的负载情况反向控制液压支架放煤数量及尾梁插板姿态, 形成闭环, 防止后部输送机过载、防压死。

(3) 转载机调速原理

转载机煤量信息由前部输送机煤量、后部输送机煤量和采煤机运行工况状态共同决定, 根据前后部输送机及采煤机运行信息估算当前转载机煤量信息, 从而调节转载机速度, 调速原理如图4所示。

因此, 转载机速度为

$$V_3 = f(\text{前部输送机煤量, 后部输送机煤量, 采煤机运行工况})$$

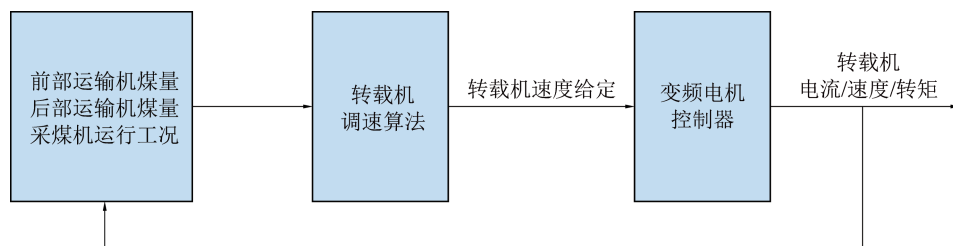


图4 转载机自动调速原理

其中, 函数 f 为基于人工智能、自学习算法的转载机煤量估算算法

双闭环自动调速控制系统计算生成转载机速度

给定值后, 将该数值发给变频器, 由变频器控制电机实现转载机调速控制且实时获取转载机的速度、电流、转矩值, 根据转载机的负载情况反向控制前

后部运输机和采煤机运行,形成闭环,防止转载机过载、防压死。

基于上述煤流控制思路,可以将调速功能扩展为主运调速控制系统,实现无煤流量传感器的综采和主运系统无级调速,以及矿井运输系统智能化控制,提高自动化水平,降低能耗。

功能分析

基于人工智能的转载机、前后部运输机的双闭环调速设计主要目的是改善设备控制方式,在设备性能指标范围内充分挖掘设备潜能、减少无效功耗,根据负载均衡控制策略动态调节输出转速,有效提高设备利用率,降低设备机械损耗及材料投入(节材),减少水资源利用及水资源管理(节水),节约电能消耗(节能),达到节能减排增效目的。双闭环自动调速控制系统可实现以下功能:

(1) 前后部运输机速度闭环控制(内环调速系统)

当采煤机在工作面生产割煤时,如果停止牵引,则运输机将刮板上煤块拉空后控制运输机减速,以最低能耗运行;当煤机再次割煤时,运输机立即加速,以适应正常采煤需求。

前后部运输机根据调速算法给定速度值运行,结合自身转矩值计算出运输机的负荷率,在运输机性能满足条件下跟随给定速度动态调节,以适应负载均衡控制。

根据采煤机自动化割煤工艺过程进行运输机速度动态调节,两侧三角区域工艺段降低运输机速度,满足运输要求。

(2) 采煤机牵引速度闭环控制(外环调速系统)

采煤机根据左右截割和牵引电流进行闭环调速控制,当采煤机截割电流过大,反馈控制系统触发牵引减速,实现采煤机牵引速度闭环调节。

当运输机或转载机达到性能上限(过载)时,双闭环自动调速控制系统限制采煤机牵引速度;当煤机牵引速度较快,则控制采煤机减速,以适应运输机运载能力。

采煤机根据自动化割煤过程中不同工步、不同煤机位置,动态调整牵引速度,过载减速、轻载空载加速,充分挖掘设备潜能,提高开采效率。

双闭环自动调速控制系统优点如下:

(1) 子系统互相之间信息共享融合,互联互通,一体化控制。

(2) 机电设备管理规范,设备潜能充分挖掘,避免资源浪费,节约能耗,改善煤质。

(3) 参数设定好之后各子系统自动控制,不受外部因素限制。

(4) 可改善井下工人劳动强度和作业环境。

现场验证

煤用电量对比

国能神东煤炭集团有限责任公司某矿工作面自2021年8月18日开始使用双闭环自动调速控制系统,通过对比2021年5—7月与2021年9—11月的用电情况可知,这6个月内的吨煤最大节约电能是0.34 k·Wh。具体用电情况见表1。

设备磨损情况改善

自双闭环自动调速控制系统投入使用后,基于自动控制设备无功运转情况减少,有效地延长了设备使用寿命,避免了无功能耗的浪费;并且该矿综采工作面因运输“三机”故障月度影响次数最高降至0次,故障率最高下降至0%。该矿综采工作面2021年5—11月故障统计情况见表2。

总结

(1) 基于人工智能技术实现的采煤机和运输“三机”双闭环调速功能的应用在节能降耗方面应用表现显著。

(2) 通过双闭环自动调速控制系统的应用对机电设备的使用管理更加规范,减少设备无用磨损,提高机电设备稳定性,提高整个采掘系统平均无故

表1 综采工作面2021年5—11月用电情况

月份	5	6	7	8	9	10	11
产煤量/t	210 971	529 962	599 430	507 819	730 626	382 287	527 046
用电量/k·Wh	434 753	1 115 810	1 349 601	1 112 339	1 463 827	763 131	1 005 296
吨煤用电量/k·Wh	2.06	2.11	2.25	2.19	2.00	1.99	1.91

表2 综采工作面2021年5—11月故障统计情况

月份	故障影响次数	故障影响时间/h	有效生产时间/h	故障率/%
5	1	5.91	241.75	2.45
6	2	8.66	459.73	1.89
7	2	4.58	490.08	0.94
8	2	11.92	428.33	2.78
9	1	3.33	518.57	0.64
10	0	0	293	0
11	0	0	293	0

障时间。

(3) 双闭环自动调速控制系统功能及稳定性现场验证，证实了工作面集控系统各子系统之间的信息交互、融合，互联互通功能的应用优势。

(4) 通过现场应用展示了双闭环自动调速控制

系统对人工要求的降低，改善了工人劳动环境，减少了劳动强度。

(5) 通过工作面现场常态化使用，验证了双闭环自动调速控制系统技术的可靠稳定性及拓展性，具备延伸到主运控制系统条件，可实现智能调速控制。

■ 责任编辑：李金松

作者简介：

尹灵通，工程师，现任常州联力自动化科技有限公司研发部经理，主要从事煤矿智能化电气设备与系统研发工作。E-mail: yinlingtong58@sina.com

作者单位：常州联力自动化科技有限公司

热点问答

我国煤矿巷道掘进智能化处于起步阶段体现在哪些方面？

(1)掘进工作面空间狭小、作业工序复杂，掘、支、锚、运协同作业困难。受煤层赋存条件及安全作业要求，巷道掘进后需要进行及时支护，复杂条件巷道的空顶距很小，难以实现连续作业；根据《煤矿安全规程》等相关文件规定，要求有掘必探，地质探测、掘进、支护、锚护等相关工序均需要协同配合，现有技术尚难以实现复杂条件的各工序自动化连续作业，平均巷道月进尺不超过300 m，如何实现快速掘进仍然是巷道掘进亟需解决的技术难题。

(2)截割与支护设备的可靠性、适应性有待提高。国产掘进机、掘锚一体机的可靠性较低，对复杂围岩条件的适应性较差，截割部、液压系统、电控系统、传感器等故障率高，设备综合开机率低，尚缺少高效的临时支护设备，锚固、铺网等工艺流程的自动化程度较低，制约了巷道快速掘进的实现。

(3)强干扰、高粉尘、狭长作业空间难以实现掘进设备的定姿、定位。巷道掘进头空间狭小，多种机电设备产生强电磁干扰，掘进过程中产生大量的粉尘、水雾等，传统定位技术、设备位姿检测技术等难以满足要求，制约了巷道掘进过程实现自动化、智能化控制。

(4)智能化快速掘进相关技术与装备投入低，技术进步缓慢。由于我国煤层赋存条件复杂多样，巷道掘进设备对不同巷道围岩条件的适应性差异很大，前期巷道快速掘进研发投入分散、资金投入不足，相关技术与装备的研发进展缓慢，近两年巷道快速掘进受到重视，但尚未出现突破性、革命性的技术与装备成果。

——来源：《中国煤矿智能化发展报告(2022年)》