文章编号:1671-251X(2024)S1-0174-05

TDS 智能干选系统分选灵活性智能控制技术

王平， 冯锦鹏， 赵彦成， 钮涛， 刘国锋

(国家能源集团宁夏煤业有限责任公司 金凤煤矿，宁夏 吴忠 751500)

摘要:为了提高选煤厂煤矸石筛选精准度,避免资源损耗,提出了 TDS 智能干选系统分选灵活性智能控制技术。通过分析 TDS 智能干选系统结构和运行方式,明确各部分装置性能和分选流程。利用双能 X 射线透射法在线测量煤矸石灰分,结合传输介质的质量吸收系数和质量厚度,计算煤碳低能 X 射线的质量衰减系数,获得分选识别函数。采用 PID 控制方法调节 TDS 智能干选系统,算出控制信号的时域与频域,令设备迅速进入稳定状态,实现分选智能控制。实验结果表明:① TDS 智能干选系统分选灵活性智能控制技术排矸频率是最佳的,且电动机功率波动最小的,整体的控制效果较好,保证精准分选煤矸石。② 在进料端发生一段 60 s 的无进料量段,TDS 智能干选系统分选灵活性智能控制技术排矸频率存在一定的缓降期,随后急剧降低,矸石排出量小,驱动电动机功率减少的不多,能保证矸石层的稳定性,且不会对矸石层的结构造成破坏。③ 在进料端速率为 400 t/h 且持续 60 s,TDS 智能干选系统分选灵活性智能控制技术排矸频率先是呈现缓慢上升的状态,然后快速上升,令排矸速度增加,驱动电动机功率增加少,能够确保分选煤和矸石过程稳定,且不会对矸石层结构造成损坏。

关键词:TDS 智能干选系统; 分选控制; 煤矸石资源; 透射通量; 衰减系数

中图分类号:TD948　　文献标志码:A

TDS intelligent dry selection system sorting flexibility intelligent control technology

WANG Ping, FENG Jinpeng, ZHAO Yancheng, NIU Tao, LIU Guofeng

(Jinfeng Coal Mine, CHN Energy Ningxia Coal Industry Co., Ltd., Wuzhong 751500, China)

0 引言

随着煤矿机械化水平的不断提高,煤中的矸石含量也出现增加。对矸石进行有效的分选已成为制约煤炭工业发展的关键问题[1-3]。为了减少原煤中的各类杂质,将其分离成多种优质产品,既满足不同用户的需要,又能减轻对环境的污染,就必须对煤炭深加工[4]。因此,选煤是燃煤预处理工艺中的一项,也是实现煤质最优利用的先决条件,能将后期的污染和成本降低到最小。

王锐等[5]提出了 R 值曲线拟合与材料厚度信息相结合的煤矸识别控制技术。采用 R 值算法对煤和矸石初判,并结合结构光摄像机获得 R 值相应的厚度信息,并和极限厚度对比,从而实现煤矸识别。根据被辨识出的煤样占总煤样的比例,完成煤矸分选智能控制。陈佳鑫等[6]提出了间断煤流硐室式煤矸石分选和连续煤流胶带式煤矸石分选控制技术。基于智能图像识别与动态称重技术,研究适合于矿井下煤室分选的紧凑型煤矸石分选设备和大巷分布的煤矸分选设备。前者采用多层滤网结构,克服粒度差异目标辨识;利用大倾角输送机,缩小设备体积。后者以小胶带轮为物料输送的主传动机构,降低能耗,并经转盘设备对矸石识别和分选,从而实现对分选设备智能控制。

针对现有研究煤和矸石分选速度较慢,煤矸石结构层易造成破坏,易生成更多的杂质的问题,本文提出了 TDS 智能干选系统分选灵活性智能控制技术。分析 TDS 智能干选系统结构和运行方式,获得煤碳低能 X 射线的质量衰减系数,识别煤和矸石,结合 PID 控制方法调节分选系统,减少干扰性,实现分选灵活性智能控制。

1 TDS 智能干选系统结构和运行方式

TDS 智能干选系统由原煤分级筛[7]、识别装置、布料胶带、除尘装置和识别装置运行控制系统等组成,如图 1 所示。

收稿日期:2024-01-25;**编辑**:郑海霞。

作者简介:王平(1987—),男,安徽阜阳人,中级工程师,主要从事煤矿生产管理工作,E-mail:15034737@chnenergy.com.cn。

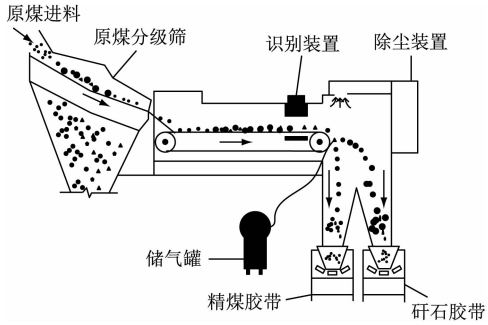

图 1　TDS 智能干选系统结构

TSD 智能干选系统的进料系统以 2436 型振动筛为主,在布料胶带和振动筛间存在挡板和梳齿[8],使原煤能够均匀地铺在胶带上;布料胶带是通过变频控制的无极调速。识别装置由 X 射线发射、接收装置构成;电磁阀[9]执行器由两排高频电磁阀组成;除尘装置由空气滤芯、除尘风机和管路等组成,采取负压除尘方法运行。

在制动阶段回收能量时,应根据制动需求选择电动机制动模式。通过逐渐增大前轴制动力,有助于制动过程中回收更多的制动能量。但电动机制动模式无法同时实现制动能量回收和最佳制动效果的最优解,导致系统的稳定性较低。

TSD 智能干选系统是针对煤质特性,建立相关解析模型,实现原煤与矸石的智能辨识,并根据辨识结果,结合打矸、打煤技术划分煤矸石。将块煤通过原煤分级筛筛分,利用梳齿和挡帘均匀地铺在布料胶带上;分选车间执行器根据辨识的原煤、矸石,控制电磁阀开关,利用喷吹形式对煤、矸石进行破碎;块精煤、矸石在高压风的作用下,运动轨迹发生变化,分别落入相应的胶带中,从而实现块煤的分选。

2　TDS 智能干选系统分选识别

由于外界干扰和设备振动,容易导致分选错误,识别装置作为关键的一环,是主要的控制对象。随着人们对煤矸石资源的综合利用及锅炉燃烧技术的进步,对发热量进行更多的关注,而灰分[10]则是影响其使用价值与价格的重要因素。由于煤的灰分较高,则发热量较小,因此,选择灰分为煤矸石的模糊模式识别的特征指标[11],即模糊子集,煤、矸石都根据灰分含量 C 的变化域为论域 $U=[0,100\%]$,此为一种客观合理的模糊模式识别方法。采用双能 X 射线透射技术,实现煤矸石的在线灰分测定。

根据 X 射线与煤矸物质作用的理论可知,X 射线幅射通量 I 是由传输介质的质量吸收系数 u[12]及质量厚度 d_m 所决定的,且需服从指数衰减定律:

$$I = I_0 \exp(-ud_m) \tag{1}$$

煤是一种典型的二元混合物,其主要成分为碳和硅。这 2 个成分对质量吸收系数 u 的影响只存在于低能区,而这一区域主要是光电效应[13]。在此区域中,随着 X 射线能量的降低,二者的吸收系数差值增大,就更有利于区分煤与矸石。在康普顿效应占优势的中能区,二者的吸收系数差别很小,这表明中能 X 射线在不同材料中的透射通量强度差异并不取决于材料的成分,而仅取决于质量厚度,有利于消除厚度对识别结果的影响。

将煤碳高 Z 元素和低 Z 元素质量百分含量分别设为 C_H、$1-C_H$,将这 2 种元素的质量衰减系数设为 u_H,u_L,煤碳低能 X 射线的质量衰减系数 u' 为

$$u' = u'_L + C_H(u'_H + u'_L) \tag{2}$$

假设被识别煤矸经过中、低 2 种不同能量合成小射线,其辐射通量强度需符合兰伯特表达式。

$$I'' = I''_0 \exp(-u''d_m) \tag{3}$$

$$I' = I'_0 \exp(-u'd_m) \tag{4}$$

式中:I''、I' 分别为目标被透射时传感器探测到的中等 m、低等 L 能量 X 射线辐射通量强度;I''_0、I'_0 分别为目标没有被透射时传感器探测到的中等 m、低等 L 能量 X 射线辐射通量强度;u''为中等能量 X 射线透射时的质量衰减系数;u'为低等能量 X 射线透射时的质量衰减系数。

因为中、低能量射线透射在相同目标上,所以消除其质量厚度系数后,可得分选识别函数:

$$K = u'/u'' = (\ln I'_0 - \ln I')/(\ln I''_0 - \ln I'') \tag{5}$$

式中 K 为衰减系数比。

在中、低能量 X 射线联合作用下,衰减系数比 K 不依赖于煤矸石质量厚度因子组分的信息,所以可直接作为识别煤、矸石的标准;对于给定的 X 源活度与几何条件,只要在同一时间内测量煤矸石经过线束时段的平均辐射通量强度 I''、I',就可得到衰减系数比 K。

利用 X 射线的统计波动确定煤矸的鉴别偏差。K 的均方根误差相对值为

$$\delta K/K = (1-d_m)\{[(\delta I''/I'')/u'']^2 + [(\delta I'/I')/u']\}^{1/2} \tag{6}$$

式中:$\delta I''/I''$为中能射线辐照能强的相对误差;$\delta I'/I'$为低能的相对误差。

如果将其相应的脉冲计数[14]替换,则表达式为

$$\delta K/K = (1-d_m)[1/(u''*m) + 1/(u'*L)]^{1/2} \tag{7}$$

在满足安全性要求的前提下,适当增加中、低能 X 射线强度,从而提升单位时间脉冲计个数,可有效降低识别错误。在选择了 2 种不同类型的 X 射线源后,以质量衰减系数 u'',u'作为判定值,并用最大的矸石质量厚度作为输入,就可求出满足一定误差

的最少脉冲计个数。

3 TDS 智能干选系统分选灵活性智能控制

如果 TDS 智能干选系统一旦识别控制效果不佳，则会导致煤矸石分选出现误检错检，因此，选煤厂煤矸分选车间采用 PID 控制方法，对 TDS 智能干选系统分选灵活性智能控制进行调节，其工作原理如图 2 所示。

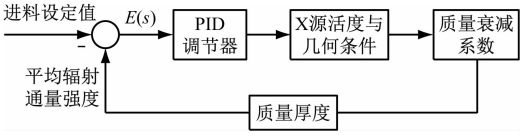

图 2 分选灵活性智能控制原理

PID 控制方法的时域与频域表达式为

$$u(t)=A_p\left[e(t)+\frac{\int_0^t e(t)\mathrm{d}t}{T_i}+\frac{T_\mathrm{d}\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right] \quad (8)$$

$$G(s)=\frac{U(s)}{E(s)}=A_\mathrm{p}\left(1+\frac{1}{T_i s}+T_\mathrm{d}s\right) \quad (9)$$

式中：$u(t)$为控制输出；A_p 为系统智能 PID 控制器的比例因子[15]；$e(t)$为控制误差；T_i 为积分时间；T_d 为微分系数；$\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}$为误差微分；$G(s)$为传递函数；$U(s)$为频域输出；$E(s)$为误差的频域；$s$ 为拉普拉斯在时域上的转换。

在调整期间，A_p、T_i、T_d 作为线性相加。PID 控制器的比例因子 A_p 起到了改变 TDS 智能干选系统响应速率，提高调节准确度的作用。随着 A_p 的增大，控制系统的工作时间变得更短，质量衰减系数会发生超调，且在一定的系数内发生剧烈的震荡，从而导致了质量衰减系数不确定；同时，A_p 也不能设得太小，因为在 A_p 很小的时候，会导致产率不佳，工作效率下降，从而增加系统分选时间，使系统的动态和静态性能恶化。采用 PID 控制器积分时间 T_i，可有效地消除系统的稳态误差。T_i 取值越大，则越能发挥出较好的整合效果，越快地将系统分选控制调整到越少的时间；当 T_i 值过大时，在自动调整的初始阶段和转捩阶段，很可能会造成输出的饱和，使得质量衰减系数数值超出了设定的范围，从而影响分选控制系统的灵活性。T_i 取值太小，将削弱积分效应，难以将质量衰减系数调节到设定值，并导致首次分选与预期分选时间相差较大，不能很快进入稳态，进而对控制系统的调控精度及动态特性产生不利影响。

PID 控制器的微分系数 T_d 起到了提高分选灵活性控制效果的作用。PID 控制器的微分系数影响着分选质量厚度与预期值之间的变化率，T_d 的作用是阻止偏差的改变，并预先纠正偏差；在发现分选质量厚度存在超调现象的情况下，T_d 可预先抑制 PID 的输出。T_d 取值太大，将造成执行机构过度超前抑制，进而使分选时间过长，影响整体控制系统的抗干扰性能。

4 实验验证

4.1 实验模型

TDS 智能干选机实验数据：带宽为 2.4/m，功率为 30 kW，处理能力为 220-240 t/h，风压为 0.65-0.80 MPa，外形尺寸为 12.0×4.3×3.9 m，带速为 2.0～2.7 m/s，分选粒径为 40～200 mm。

在 TDS 智能干选机的实际参数基础上，对其进行设置和计算，其下限为 35 kW，上限为 75 kW；在 290 t/h 的进料速度下系统基本稳定。在实验过程中，采用 R 值曲线拟合技术、间断和连续煤流分选技术与本文所提技术，对驱动电动机功率、排矸电动机功率进行实时监测，获得概率曲线。驱动电动机功率的变化反应了煤矸石数量的变化，随着进料量的增加，电动机功率也会随之增加，而对排矸电动机频率进行快速调整，可将来料的不均匀性迅速地恢复稳定时的水平。

进料量小范围波动变化的排矸频率和驱动电动机功率曲线如图 3、图 4 所示。可看出在进料量很小的变化时，虽然 3 种控制中的排矸频率和驱动电动机功率波动曲线走向都是相同的，但能明显看出所提技术的排矸频率是最佳的，且电动机功率波动最小，整体的控制效果较好，保证精准分选煤矸石。

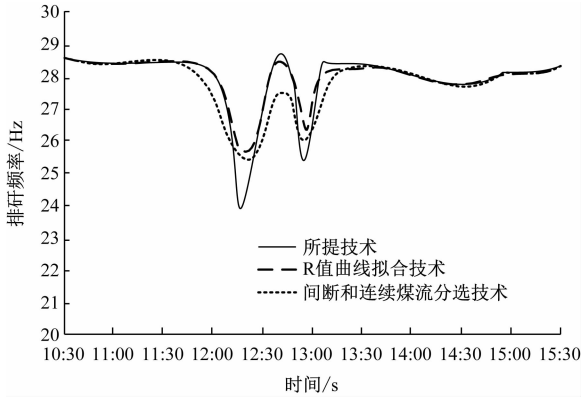

图 3 进料量小范围波动变化的排矸频率

在进料端发生一段 60 s 的无进料量段，曲线波动情况如图 5、图 6 所示。可看出所提技术排矸频率存在一定的缓降期，随后急剧降低，矸石排出量小，而 R 值曲线拟合技术、间断和连续煤流分选技术排矸频率下降速度始终小于所提技术。与 R 值曲线拟合技术、间断和连续煤流分选技术相比，所提技术的驱动电动机功率减少的不多，能保证矸石层的稳定性，且不会对矸石层的结构造成破坏。经过

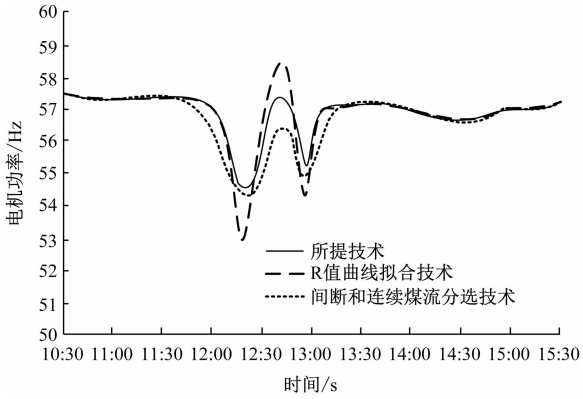

图 4　进料量小范围波动变化的驱动电动机功率

60 s 的进料端恢复,所提技术控制比 R 值曲线拟合技术、间断和连续煤流分选技术控制更快,稳定性更好。

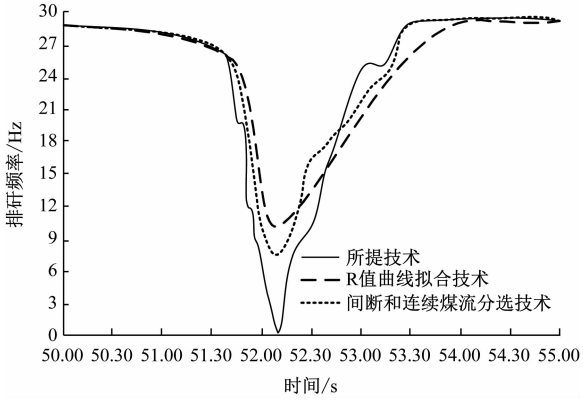

图 5　无进料量波动变化的排矸频率

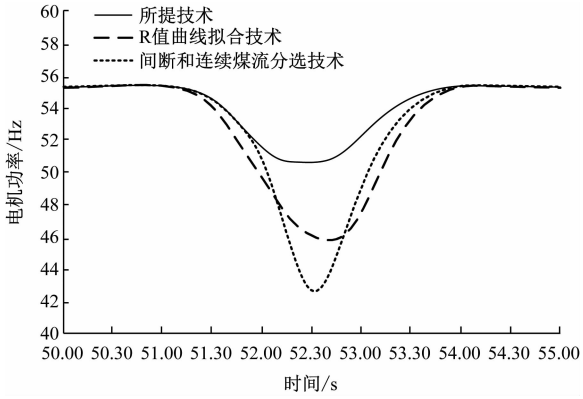

图 6　无进料量波动变化的驱动电动机功率

在进料端速率为 400 t/h 且持续 60 s,曲线波动情况如图 7、图 8 所示。可看出所提技术排矸频率先是呈现缓慢上升的状态,然后快速上升,令排矸速度增加,而 R 值曲线拟合技术、间断和连续煤流分选技术的排矸频率一直都是速度缓慢,导致控制效果不佳。与 R 值曲线拟合技术、间断和连续煤流分选技术比较,所提技术驱动电动机功率增加少,能够确保分选煤和矸石过程稳定,且不会对矸石层结构造成损坏。在恢复了进料量之后,所提技术控制比 R 值曲线拟合技术、间断和连续煤流分选技术控制效果佳,实现快速稳定。

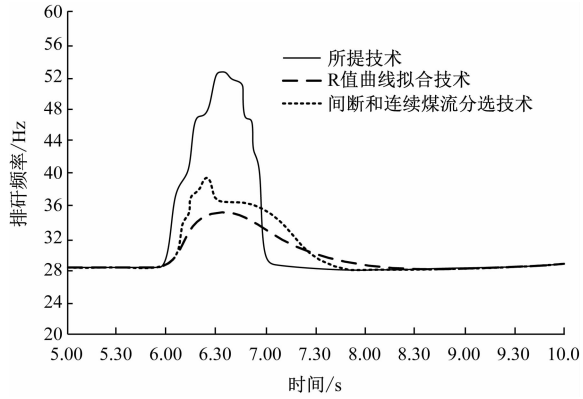

图 7　进料量为 400 t/h 波动变化的排矸频率

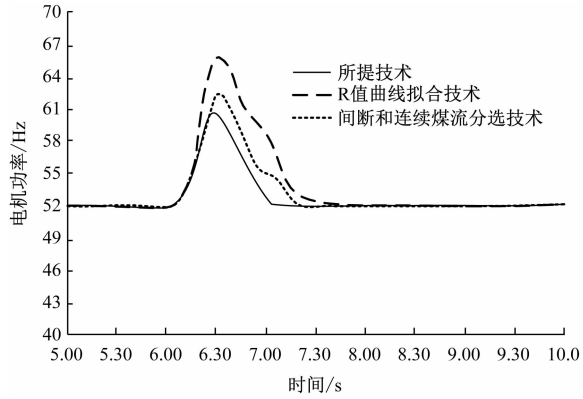

图 8　进料量为 400 t/h 波动变化的排矸频率

煤和矸石相应灰度指标见表 1。可看出所提控制技术能够有效的实施 50 mm 以上粒度的块煤和矸石分离,相应灰度指标符合煤与矸石浮沉特性。说明所提技术能够实现系统分选灵活性智能控制,保证煤与矸石的精准分离。

表 1　煤和矸石相应灰度指标

日期	重量/kg	粒度/mm	产品名称	重量/kg	产率/%	灰分/%
5.5	594.4	>50	煤	184.65	30.56	33.48
			矸石	379.34	63.82	73.43
		<50	透筛物	30.41	5.62	39.07
5.6	684.5	>50	煤	227.46	33.23	35.86
			矸石	421.38	61.56	75.53
		<50	透筛物	35.66	5.21	40.21
5.7	489.6	>50	煤	146.34	29.89	34.46
			矸石	323.18	66.01	72.02
		<50	透筛物	20.02	5.1	38.05
5.8	543.2	>50	煤	211.03	38.85	35.35
			矸石	296.09	54.51	71.63
		<50	透筛物	36.08	6.64	39.16
5.9	658.9	>50	煤	216.44	32.85	33.96
			矸石	392.11	59.51	72.84
		<50	透筛物	50.35	7.64	40.01

5 结语

针对现有研究煤和矸石分选速度较慢，煤矸石结构层易造成破坏，容易生成更多的杂质的问题，提出了 TDS 智能干选系统分选灵活性智能控制技术。通过对 TDS 智能干选机的组成与运行模式研究，用低能 X 射线测定煤和矸石的质量衰减系数，并利用 PID 调整分选系统，降低扰动，完成分选智能控制。通过实验，证明所提技术能够使 TDS 智能干选系统控制分选效果更佳，保证煤和矸石准确划分，减少精煤中的杂质。

参考文献：

[1] 王玉佳，方伟，徐涛，等. 基于遗传模糊树的海空对抗无人机智能决策模型[J]. 系统工程与电子技术，2022，44(12)：3756-3765.

[2] 王雪纯，陈红坤，陈磊. 提升区域综合能源系统运行灵活性的多主体互动决策模型[J]. 电工技术学报，2021，36(11)：2207-2219.

[3] 唐文虎，申悦晴，钱瞳，等. 双碳目标下城市楼宇群能源系统灵活性量化分析与调控技术研究现状与展望[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3423-3436.

[4] 李岩，陈夏，李巍巍，等. 基于智能软开关与联络开关并联的柔性配电网互联结构与控制技术研究[J]. 中国电机工程学报，2022，42(13)：4749-4760.

[5] 王锐，桂志国，刘祎，等. 基于 X 射线和结构光相机的煤矸石分拣方法研究[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2021，42(2)：123-128，134.

[6] 陈佳鑫，赵国贞，程伟，等. 基于动态称量和图像识别技术的井下煤矸石智能分选装置研发[J]. 矿业研究与开发，2023，43(2)：178-183.

[7] 康红普，冯彦军，张震，等. 煤矿井下定向钻孔水力压裂岩层控制技术及应用[J]. 煤炭科学技术，2023，51(1)：31-44.

[8] 任帅，王方田，李少涛，等. 深井超高水充填工作面小煤柱稳定性规律及控制技术[J]. 煤矿安全，2021，52(6)：243-249，254.

[9] 阿伦，齐虎春，白艳姝. 基于遗传算法的 SVM 决策模型在选煤监控系统中的应用[J]. 煤炭技术，2022，41(9)：243-245.

[10] 陈彪，卢兆林，代伟，等. 基于轻量化 HPG-YOLOX-S 模型的煤矸石图像精准识别[J]. 工矿自动化，2022，48(11)：33-38.

[11] 谭云亮，范德源，刘学生，等. 煤矿深部超大断面硐室群围岩连锁失稳控制研究进展[J]. 煤炭学报，2022，47(1)：180-199.

[12] 杨修宇，孙健舒，刘玉娇，等. 气网管存与电转气协调运行提升电-气互联系统灵活性的调度策略[J]. 电网技术，2023，47(1)：236-247.

[13] 王闰泽，郎利影，席思星. 用于智能煤矸分选机器人的改进型 VGG 网络煤矸识别模型[J]. 煤炭技术，2022，41(1)：237-241.

[14] 张吉雄，屠世浩，曹亦俊，等. 煤矿井下煤矸智能分选与充填技术及工程应用[J]. 中国矿业大学学报，2021，50(3)：417-430.

[15] 王云刚，康军保，杜炳成，等. 金能煤矿软岩掘进巷道变形破坏特征及控制技术研究[J]. 科学技术与工程，2023，23(12)：5340-5347.

(上接第 164 页)

[12] SLOTWINSKI A, REZK M. Compact fiber optic geometry for a counter-chirp FMCW coherent laser radar: US7139446[P]. 2006-11-21.

[13] TAO Long, LIU Zhigang, ZHANG Weibo, et al. Frequenc y-scanning interferometry for dynamic absolute distance measurement using Kalman filter [J]. Optics Letters, 2014, 39(24): 6997-7000.

[14] 赵潇，杨海马，强佳，等. 基于卡尔曼滤波的高精度相干激光测距方法[J]. 光学学报，2020，40(14)：115-123.

[15] SHANG Yue, LIN Jiarui, YANG Linghui, et al. Precision improvement in frequency scanning interferometry based on suppression of the magnification effect[J]. Optics Express, 2020, 28(4): 5822-5834.

[16] 柴晓博，吴腾飞，殷璞芙. 基于激光自混合测振的 FSI 测距误差补偿方法[J]. 激光与光电子学进展，2021，58(11)：206-212.

[17] 李雅婷，张福民，潘浩，等. 调频连续波激光测距系统的振动补偿仿真研究[J]. 中国激光，2019，46(1)：166-173.

[18] 张广娜，叶会英，薛琦，等. 基于适度光反馈自混合干涉技术的位移测量系统[J]. 激光与光电子学进展，2008，45(3)：66-70.

[19] 徐赵龙，解研，王迎新，等. 太赫兹量子级联激光器自混合干涉测量技术研究[J]. 光学学报，2020，40(11)：154-161.

[20] 姚艳南，张福民，曲兴华，等. 基于硬件的等光频间隔采样及频谱分析方法[J]. 光学学报，2016，36(12)：113-122.