

空气弹性支撑技术在选煤设备中的创新应用

王 进¹, 任腾越¹, 黄炎枝¹, 秦晨华¹, 张 奔¹, 米 超², 任卫华², 鲁 斌²

¹ 陕西新能选煤技术有限公司 陕西西安

² 山西汇永青峰选煤工程技术有限公司 山西朔州

【摘要】针对选煤厂振动筛传统弹簧刚度固定、阻尼不可调及易疲劳失效等问题, 研发多层膜片式空气弹性自适应支撑系统, 建立气压-变形耦合非线性刚度模型, 并构建长短期记忆网络(LSTM)预测、模糊比例-积分-微分(PID)和多传感融合闭环调控方法。试验表明: 0.4~0.6 MPa 下承载力 ≥ 30 kN, 振动传递率为 0.21; 工业应用后振动传递量降低 35%以上、噪声降低 10%以上、综合能耗降低 22%~25%。该技术可提升选煤设备减振、可靠性与智能运维水平。

【关键词】空气弹簧; 振动筛; 非线性刚度; 自适应控制; 智能监测; 选煤设备

【收稿日期】2026 年 3 月 6 日 **【出刊日期】**2026 年 8 月 20 日 **【DOI】**10.12208/j.merd.20260005

Innovative application of air elastic support technology in coal preparation equipment

Jin Wang¹, Tengyue Ren¹, Yanzhi Huang¹, Chenhua Qin¹, Ben Zhang¹, Chao Mi², Weihua Ren², Bin Lu²

¹ Shaanxi Xinneng Coal Preparation Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi

² Shanxi Huiyong Qingfeng Coal Preparation Engineering Technology Co., Ltd., Shuozhou, Shanxi

【Abstract】To address the fixed stiffness, non-adjustable damping and fatigue failure of conventional steel or rubber spring supports used in vibrating screens of coal preparation plants, a multilayer diaphragm air-elastic adaptive support system was developed. A pressure-deformation coupled nonlinear stiffness model was established, and a closed-loop control method integrating Long Short-Term Memory (LSTM) prediction, fuzzy Proportional-Integral-Derivative (PID) regulation and multisensor data fusion was constructed. The support capacity was no less than 30 kN within 0.4-0.6 MPa, the measured vibration transmissibility was 0.21, and the foundation amplitude was reduced by 36.5%. After application on ten large linear vibrating screens, vibration transmission decreased by more than 35%, operating noise by more than 10%, and comprehensive energy consumption by 22%-25%. The system integrates adjustable stiffness, redundant fault switching and condition monitoring, providing a practical solution for low-vibration, low-noise and long-period operation of coal preparation equipment.

【Keywords】Air spring; Vibrating screen; Nonlinear stiffness; Adaptive control; Intelligent monitoring; Coal preparation equipment

引言

振动筛承担原煤分级、脱介和脱水等关键任务, 其支撑系统不仅影响筛箱运动轨迹和振幅均匀性, 也直接决定基础振动、结构疲劳和作业噪声水平。传统大型直线振动筛多采用钢制螺旋弹簧或橡胶弹簧。此类支撑元件结构简单, 但刚度和阻尼在

安装后基本固定, 当入料量、粒度组成和含水率波动时, 支撑参数难以随负载变化进行匹配, 容易出现振动传递增加、局部应力集中及弹簧疲劳失效等问题^[1]。随着选煤装备大型化和智能化发展, 支撑系统已由单纯承担静载和隔振功能, 转向兼顾参数可调、状态感知、故障预警与长期可靠性的机电一体化部件。

第一作者简介: 王进(1989-)男, 硕士, 工程师, 研究方向: 选矿。

空气弹簧利用压缩气体的弹性实现承载和隔振,其等效刚度可通过工作压力、有效面积、容积及气路参数进行调节。已有研究表明,空气弹簧能够改变振动筛系统的振幅和抛掷特性,并通过附加气室或气路阻尼提高过共振区运行稳定性^[1];膜式空气弹簧的承载力和刚度具有明显非线性,其结构参数、橡胶气囊黏弹性、热力学过程及气路动态均会影响动态刚度^[2-8]。在选煤生产现场,空气弹簧还被用于筛分破碎车间声源降噪^[9],设备状态监测则逐步由单点振动检测发展到振动、温度等多参数融合诊断^[10]。然而,选煤厂高粉尘、高湿、高频振动和长周期连续运行条件对气囊密封、气源洁净度、动态稳定性和冗余安全提出更高要求,现有研究仍以元件建模或试验台验证为主,缺少了“结构-模型-控制-监测-工业验证”一体化应用研究。

基于此,依托文家坡选煤厂振动筛改造工程,开展多层膜片式空气弹性自适应支撑技术研究。通过构建主/副气囊冗余结构和高粉尘环境适应性设计,建立气压-变形耦合非线性刚度模型,融合 LSTM 预测、高斯过程回归(GPR)刚度修正、模糊 PID 和卡尔曼滤波实现支撑参数闭环调节,并开展等效寿命、隔振承载和 10 台大型直线振动筛工业应用验证,以期选煤设备低振动、低噪声、低能耗和预测性运维提供可复制的技术方案。

1 选煤振动筛支撑工况与技术需求

1.1 传统弹性支撑的主要问题

选煤振动筛工作载荷具有显著波动性:一方面,

筛箱承受激振器产生的周期性交变载荷;另一方面,入料量和粒度组成变化会引起等效质量与质心位置改变。钢制螺旋弹簧的刚度由材料和几何尺寸确定,难以在线调节;橡胶弹簧虽然具有一定内阻尼,但其力学性能受温度和老化影响明显。当系统工作频率接近固有频率或局部支撑刚度不一致时,基础振动和筛体摆动可能被放大。工程调研中,传统钢制/橡胶弹簧还存在振动传递率高、噪声较大、易疲劳断裂及更换周期较短等问题。

因此,新型支撑系统至少需要满足 4 项要求:①承载能力覆盖振动筛带煤工况并保留足够安全裕度;②等效刚度能够随负载变化调节,避免固定参数导致的工况失配;③在高粉尘、高湿和连续振动环境下具有可靠密封、散热与防污染能力;④具备状态监测和故障冗余机制,使支撑元件由被动易损件转变为可感知、可诊断、可维护的智能功能单元。

1.2 空气弹性支撑的技术适配性

空气弹簧的承载力主要由内部气压和有效受压面积决定,改变气压即可在不更换机械弹簧条件下调节等效刚度。对振动筛而言,这一特性使支撑系统能够根据带煤量、振幅和运行温度变化进行在线匹配。与单纯追求低刚度不同,选煤设备更需在“承载-隔振-筛分运动稳定”之间取得平衡。因此,本研究将空气弹簧作为可调弹性元件,与阻尼器、比例电磁阀、传感器和可编程逻辑控制器(PLC)集成,通过实时测量振动、压力和温度,形成闭环调节。

表 1 传统支撑与空气弹性自适应支撑特征对比

对比项目	钢制螺旋弹簧	橡胶弹簧	空气弹性自适应支撑	工程意义
刚度调节	安装后固定	基本固定	0.4~0.6 MPa 气压连续调节	适应负载波动
阻尼与隔振	结构阻尼小	材料内阻尼	气体弹性+阻尼器+控制调节	降低振动传递
状态感知	无	无	振动/温度/压力在线监测	支持故障预警
故障容错	弹簧断裂后需停机处理	失效后需更换	主/副气囊冗余切换	提高连续运行能力
环境适应	耐粉尘,疲劳风险	存在老化风险	复合气囊+净化+散热+密封设计	适应选煤现场



(a) 改造前:钢制螺旋弹簧



(b) 改造后:多层膜片式空气弹簧

图 1 振动筛支撑系统改造前后现场对比

2 空气弹性自适应支撑系统结构及创新设计

2.1 多层膜片式主/副气囊冗余结构

系统由支撑板、空气弹簧模块、阻尼器、连接钢板、弹性连接件和 PLC 控制器等构成。空气弹簧模块采用主气囊与副气囊上下叠层布置, 两者中心轴线重合, 间距约 150 mm, 通过连接管和三通阀形成可切换气路; 每个气囊进气口配置比例电磁阀, 工作压力可在 0.4~0.6 MPa 范围内独立调节。与单气囊方案相比, 叠层结构一方面提高了垂向行程和对安装误差的适应能力, 另一方面为故障冗余提供硬

件基础。当主气囊状态异常时, 控制系统可切换至副气囊, 避免单一弹性元件失效导致筛机支撑能力突变。

气囊主体采用芳纶纤维增强橡胶复合材料, 内层设置 0.8 mm 氟橡胶涂层, 外层覆盖耐磨帆布层; 气囊内壁布置螺距 5~10 mm 的螺旋形加强筋, 以提高径向约束能力并抑制高频振动时的褶皱变形。在支撑板和空气弹簧之外配置阻尼器, 可对支撑系统的等效阻尼进行补偿, 使气体弹性与机械阻尼协同。

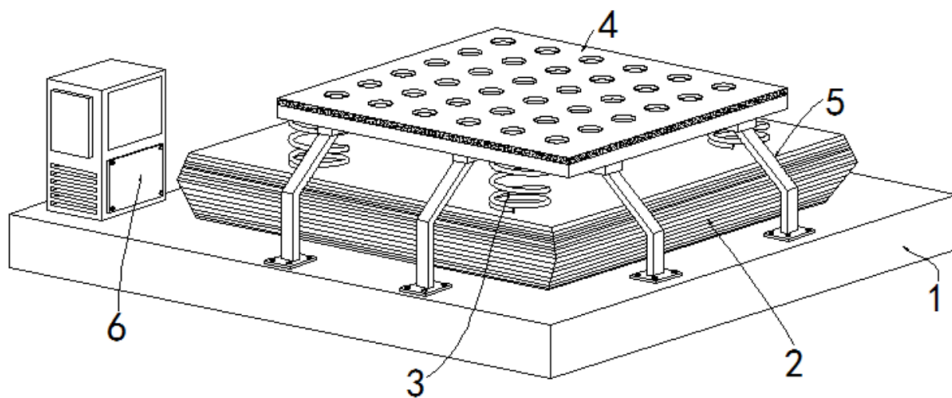


图2 空气弹性自适应支撑装置结构示意图

1—支撑板; 2—空气弹簧模块; 3—阻尼器; 4—连接钢板; 5—弹性连接件; 6—PLC 控制器

2.2 高粉尘环境可靠性设计

选煤厂空气中煤尘浓度高, 若压缩空气或散热风路夹带颗粒进入关键部件, 容易造成阀件卡滞、风机磨损和密封面污染。为此, 支撑系统对进气净化、密封和维护结构进行了专门设计, 并采用粗滤-纤维过滤-活性炭过滤的分级净化方式保护风机及气路。现场连续运行 6 个月后, 配套风机叶轮未出现明显磨损, 风量衰减小于 5%, 过滤材料更换周期可达到 3 个月, 期间未发生因风机故障造成的空气悬浮系统停运。

空气压缩与橡胶周期变形还会引起局部温升。系统在气囊底部设置导流槽, 在连接板内配置电风扇及引风孔, 构成“引风孔-导流槽-气囊表面”强制对流散热通道, 可将气囊温升控制在 15℃以内; 同时在气囊内部布置温度传感器, 在顶部布置振动传感器, 实现温度—振动同步监测。该设计将材料耐久性、热管理和状态感知前移到支撑元件内部, 为长周期运行提供保障。

3 非线性动力学模型与智能自适应控制

3.1 气压—变形耦合非线性刚度模型

空气弹簧的刚度不是常数, 而与工作气压、气体容积、有效面积、结构变形和橡胶气囊力学特性有关^[2-8]。考虑气体绝热过程及螺旋加强筋附加刚度, 本研究采用下式描述空气弹簧等效刚度:

$$k(P, x) = \gamma P A^2 / (V_0 + A x) + k_{str}$$

式中: P 为气囊压力; x 为垂向变形; γ 为绝热指数, 取 1.4; A 为有效面积, 取 0.08 m²; V_0 为初始容积, 取 0.02 m³; k_{str} 为加强筋附加刚度, 取 1 000 N/m。由此, 气压 P 与变形 x 共同决定支撑刚度, 比例电磁阀改变 P 即可实现工作点在线迁移。

将空气弹簧非线性刚度引入振动筛单自由度等效模型, 可得:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k(P, x)x = F_0 \sin(\omega t)$$

式中: m 为等效质量, 模型取 500 kg; c 为等效阻尼系数, 取 800 N·s/m; F_0 为激振力幅值, 取 10⁴ N; ω 为激振角频率, 工作频率示例为 15 Hz。该模型用于表征气压调节对振幅与振动传递的影响, 并作为

控制器参数整定与工况识别的基础。工程建模进一步采用 ADAMS、ANSYS Workbench 和 ABAQUS 联合分析, 对模态、谐响应、瞬态动力学以及温度-气压耦合效应进行计算, 以识别支撑过渡区域的高响应位置和合理刚度区间。

3.2 预测式自适应控制与多传感融合

为克服传统 PID 在带煤量突变和气囊温度变化下参数固定、响应滞后的问题, 系统以 S7-1516F-3PN/DP PLC 为核心, 构建“状态融合-趋势预测-刚度修正-模糊 PID 调节-故障冗余”闭环控制架构。首先融合振动加速度、气压和温度等多源信号, 经卡尔曼滤波提高状态估计信噪比; 其次利用 LSTM 对历史振幅序列和当前气压进行短时预测, 报告模型可提前约 50 ms 预测振幅变化; 同时

使用 GPR 模型补偿温度-气压耦合造成的刚度偏差。

模糊 PID 以振幅偏差及其变化率为输入, 根据工况在线修正比例、积分和微分参数, 并输出气压调节量, 由比例电磁阀控制主/副气囊压力。系统同时设置故障阈值: 振幅偏差持续 5 s 超过 15% 判定为疑似气囊漏气, 温度骤升速率大于 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 判定散热异常, 调压指令超出 $0.4\sim 0.6\text{ MPa}$ 工作范围则判定阀件或气路异常。当主气囊故障触发时, 工程系统可在约 100 ms 内完成副气囊切换。这种控制方式将“振幅控制”与“安全冗余”统一在同一闭环中, 避免单纯追求控制精度而忽略失效工况。

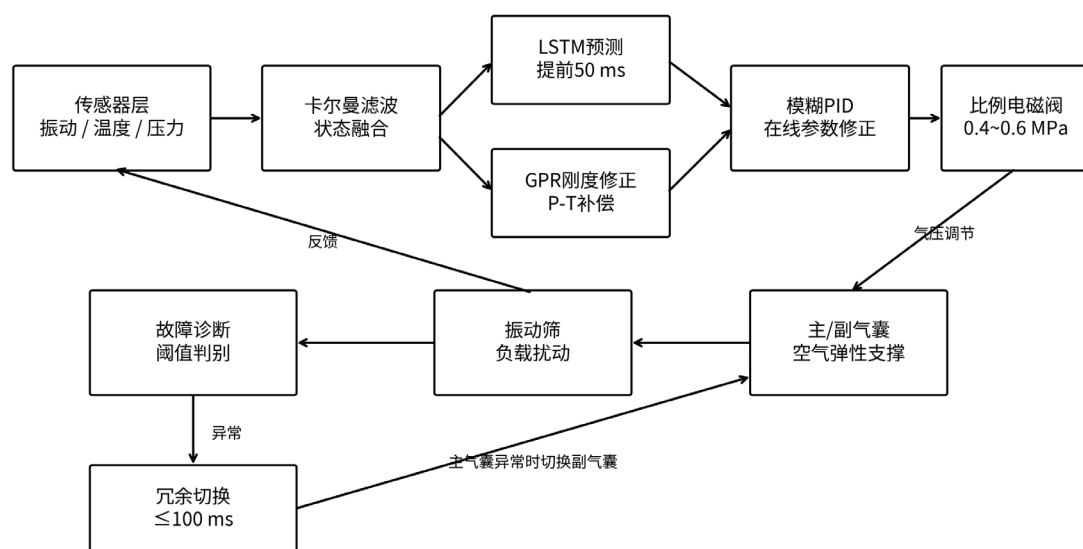


图3 空气弹性支撑智能自适应控制与故障冗余框架

4 试验方法与性能验证

4.1 空气弹簧力学特性与参数辨识

空气弹簧静态性能采用万能材料试验机进行准静态加载-卸载, 在 $0.2\sim 0.7\text{ MPa}$ 不同气压下获得载荷-位移曲线、刚度曲线和迟滞回线, 辨识非线性刚度及等效弹性参数; 动态性能采用激振试验台与动态信号分析仪, 通过正弦扫频和脉冲激振测量动态刚度、等效阻尼、相位差和频率响应函数; 疲劳及密封性能则通过高频耐久试验、气压衰减及泄漏监测等方法评价。

4.2 加速寿命、隔振及承载试验

为验证在选煤工况下的长期可靠性, 按项目研

究报告确定的工况进行加速寿命和振动耐久试验。试验压力范围为 $0.4\sim 0.6\text{ MPa}$, 每日模拟 $\pm 0.05\text{ MPa}$ 气压波动; 带煤量按 80 t/h 等效加载, 振动频率提高至 15 Hz 进行加速; 依据设备年运行 $8\,000\text{ h}$ 折算, 等效模拟至 $24\,000\text{ h}$, 同时交替模拟 $-10\sim 45^{\circ}\text{C}$ 和 $30\%\sim 85\%$ 相对湿度环境。隔振试验在 10 Hz 、 $\pm 2\text{ mm}$ 输入激励、 0.5 MPa 气压和 30 kN 载荷条件下测定振动传递率及基础振幅; 承载试验分别在 0.4 、 0.5 、 0.6 MPa 下静态加载至 30 kN 并保压 10 min 。

4.3 试验结果

等效运行 $10\,000\text{ h}$ 时支撑气囊无泄漏, 位移偏差为 0.03 mm ; $18\,000\text{ h}$ 时支架未出现变形且气压保持

稳定；24 000 h 等效试验结束后未出现部件失效，性能保持率为 96.8%，满足 3 年以上设计寿命要求。在 0.5 MPa、30 kN 条件下，测得振动传递率为 0.21，基础振幅降低 36.5%；在 0.4~0.6 MPa 不同压力下，

承载力均不低于 30 kN，未出现异常变形、泄漏和结构损坏。结果说明气压调节并未以牺牲静态承载为代价，空气弹性系统能够同时满足隔振、承载与耐久要求。

表 2 空气弹性支撑关键试验条件

试验项目	主要参数	环境/载荷条件	评价指标
加速寿命	P=0.4~0.6 MPa; ±0.05 MPa 波动	80 t/h; 15 Hz; -10~45 °C; RH 30%~85%	泄漏、位移、结构状态、性能保持率
隔振性能	P=0.5 MPa	10 Hz; ±2 mm; 30 kN	振动传递率、基础振幅降低率
承载性能	P=0.4/0.5/0.6 MPa	静载 30 kN, 保压 10 min	变形、泄漏、结构损伤
静/动态特性	P=0.2~0.7 MPa	准静态加载、扫频/脉冲激振	刚度、阻尼、迟滞、频率响应

表 3 空气弹性支撑性能验证结果

指标	测试结果	判定	说明
等效寿命	24 000 h 后无结构失效，性能保持率 96.8%	满足	对应 3 年等效运行
振动传递率	0.21	满足	0.5 MPa、30 kN 条件
基础振幅降低率	36.5%	满足	台架隔振试验
承载能力	0.4~0.6 MPa 下均≥30 kN	满足	无异常变形和泄漏
设计使用寿命	≥3 年	满足	试验与工业应用综合评价

5 工业应用与运行效果

5.1 现场实施

空气弹性自适应支撑系统在文家坡选煤厂 10 台大型直线振动筛上完成工程应用，将原有钢制或橡胶弹簧支撑替换为多层膜片式空气弹簧，并集成比例调压、温度/振动/压力监测和故障预警功能。实际运行时，控制器根据带煤量和振动状态在 0.4~0.6MPa 范围内调节气压，使支撑刚度随负载变化而动态匹配。改造采用模块化安装方式，尽量利用原设备支撑空间和连接位置，降低对筛箱主体结构的二次改造量。

5.2 减振降噪与能效效果

工业对比试验显示，改造后振动传递量平均降低 35%以上，运行噪声降低 10%以上，综合能耗降低 22%~25%，设计使用寿命不低于 3 年。与台架试验中基础振幅降低 36.5%的结果相互印证，说明该系统在实际入料波动和复杂环境下仍具有稳定隔振能力。研究报告还显示，支撑系统平均无故障时间由约 500 h 提高至 800 h 以上。对选煤厂而言，这种提升不仅降低基础和相邻结构的振动暴露，也减少弹簧异常造成的非计划维护风险。

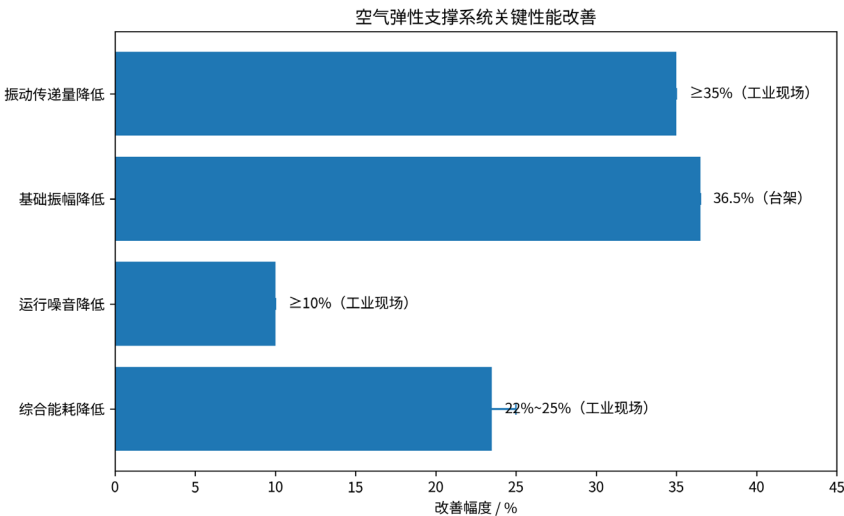


图 4 空气弹性支撑系统关键性能改善

5.3 状态监测与维护方式变化

传统减震弹簧多数在裂纹、断裂或振幅异常后由人工巡检发现, 具有明显的事后维修特征。空气弹性支撑将振动、温度和气压数据纳入控制系统, 可对气囊泄漏、散热异常和阀件失效进行阈值判断, 并利用主/副气囊实现故障后快速切换。项目考核指标中, 智能系统数据采集准确率要求不低于 99%, 故障预警准确率不低于 95%, 人工干预频次降低 40%。尽管这些指标仍需在不同类型振动筛和更长运行周期中持续统计, 但工程实践表明, 支撑系统已由“机械弹簧+人工巡检”转变为“可调执行器+在线监测+故障冗余”的智能部件。

这一变化与选煤设备预测性维护的发展方向一致。已有研究在大型振动筛布置加速度和温度传感器后, 可通过状态趋势识别实现减震弹簧和传动部件故障预警^[10]。空气弹性支撑进一步将监测结果直接用于气压和刚度调节, 使诊断系统不仅“发现故障”, 还能够在正常工况下主动修正支撑参数, 形成感知-预测-控制-诊断的闭环。

6 创新性与工程适用边界

6.1 技术创新点

(1) 由单一弹性元件向多层膜片冗余支撑转变。主/副气囊上下叠层、独立调压并配置切换气路, 使空气弹簧同时承担承载、隔振和失效冗余功能。相比单气囊方案, 系统在支撑元件发生异常时具有更强的连续运行能力。

(2) 由固定刚度向气压驱动的在线刚度调节转变。通过气压-变形耦合非线性模型, 将 0.4~0.6 MPa 工作压力作为可控变量, 使支撑系统能够匹配带煤量、温度及振幅变化。该思路与已有空气弹簧振动筛动力学研究中“通过初始气压调节振幅”的结论一致^[1], 但进一步扩展到工业闭环控制。

(3) 由反馈调节向预测式多模型协同控制转变。LSTM 用于短时振幅预测, GPR 用于温度-压力刚度修正, 卡尔曼滤波用于多传感状态融合, 模糊 PID 执行在线气压调节, 使数据驱动模型与物理刚度模型协同工作。该策略兼顾瞬态响应和长期参数漂移, 更适用于物料负载频繁变化的选煤工况。

(4) 由单纯减振部件向高粉尘环境智能机电单元转变。通过复合气囊材料、螺旋加强筋、强制散热、进气净化、温度/振动监测以及冗余切换, 解决实验室空气弹簧技术向选煤工业现场迁移时的环境

适应性问题。

6.2 工程应用边界及注意事项

空气弹性支撑并非对所有振动筛均可直接采用同一组参数。不同筛机质量、激振频率、安装倾角及入料冲击条件会改变固有频率和支撑受力, 因此工程实施前应开展模态和受力校核, 并根据额定载荷重新确定气囊有效面积、工作压力、阻尼和安装位置。对于多点支撑大型筛机, 还应控制各支点压力偏差, 避免局部高度变化引起筛箱扭转。

其次, 空气弹性系统依赖稳定气源和阀件, 压缩空气洁净度、储气能力和断气保护必须纳入可靠性设计。粉尘过滤组件需要按压差或运行时间维护, 比例阀和压力传感器应定期校准; 若气源中断, 应保证主/副气囊、机械限位或备用支撑能够维持安全状态。此外, 当前 24 000 h 为等效加速寿命结果, 工业现场仍应继续跟踪橡胶材料老化、温湿度循环、粉尘侵蚀和长期气密性, 以建立实际寿命模型。

最后, 智能控制应设置安全边界优先级。模型预测和数据驱动算法只能在机械承载、允许振幅、气压和温度限制范围内进行优化; 当传感器异常、模型输出超限或通信中断时, 应自动降级为安全压力保持和冗余支撑模式, 避免算法失效扩大为结构风险。

7 结论

(1) 针对选煤振动筛传统钢制/橡胶弹簧刚度固定、阻尼不可调和故障后缺乏冗余的问题, 构建了多层膜片式主/副气囊空气弹性支撑系统。气压可在 0.4~0.6 MPa 范围内调节, 并通过复合气囊材料、加强筋、散热和净化结构提高高粉尘工况适应性。

(2) 建立了气压-变形耦合非线性刚度模型及振动筛动力学模型, 形成 LSTM 预测、GPR 刚度修正、卡尔曼滤波和模糊 PID 协同的闭环调控方法, 实现支撑刚度随负载和运行状态自适应调节, 并通过阈值诊断和主/副气囊切换提高故障容错能力。

(3) 24 000 h 等效寿命试验后系统无结构失效, 性能保持率为 96.8%; 在 0.4~0.6 MPa 范围内承载力均≥30 kN, 振动传递率为 0.21, 基础振幅降低 36.5%, 表明系统具有较好的承载、隔振和耐久性能。

(4) 在文家坡选煤厂 10 台大型直线振动筛上的应用表明, 空气弹性支撑使振动传递量平均降低 35%以上、运行噪声降低 10%以上、综合能耗降低 22%~25%。该技术实现了选煤设备支撑从固定参数

机械元件向“可调刚度-状态感知-预测控制-故障冗余”智能单元的转变, 具有进一步推广应用价值。

参考文献

- [1] 刘德洋, 彭利平, 王浩宇, 等. 附加气室空气弹簧隔振的振动筛动力学建模与分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1901-1908.
- [2] 陈俊杰, 张盛蓬, 刘昊, 等. 复杂轮廓膜式空气弹簧非线性结构参数统一模型[J]. 振动与冲击, 2023, 42(23): 240-252.
- [3] 陈俊杰, 殷智宏, 等. 带节流阻尼孔和附加气室的空气弹簧系统建模和动态特性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(8): 166-174.
- [4] WU M Y, YIN H, LI X B, et al. A new dynamic stiffness model with hysteresis of air springs based on thermodynamics[J]. Journal of Sound and Vibration, 2022, 521: 116693.
- [5] ZHENG Y Q, SHANGGUAN W B. A combined analytical model for orifice-type and pipe-type air springs with auxiliary chambers in dynamic characteristic prediction[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 185: 109830.
- [6] MENDIA-GARCIA I, FACCHINETTI A, BRUNI S, et al. Analysis and modelling of the dynamic stiffness up to 400 Hz of an air spring with a pipeline connected to a reservoir[J]. Journal of Sound and Vibration, 2023, 557: 117740.
- [7] HU Y H, ZHANG J H, LONG J Q. Influence of rubber's viscoelasticity and damping on vertical dynamic stiffness of air spring[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 9886.
- [8] SHI Y, XU S F, LI Z L, et al. Dynamic frequency response characteristics of a compound regulative quasi-zero stiffness air spring system[J]. Science China Technological Sciences, 2023, 66: 2013-2024.
- [9] 杨阳. 煤炭筛分破碎车间噪声治理及智能监测研究[J]. 选煤技术, 2024, 52(2): 80-87.
- [10] 郭宣, 龚国龙, 李旭东, 等. 振动筛智能监测诊断系统在小保当选煤厂的应用[J]. 选煤技术, 2025, 53(4): 83-91.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS