

面专家,专家可在画面中添加虚拟标注、检修步骤等信息,实现“第一视角”的远程指导,提升故障处置效率。

#### 4.2.3 跨专业协同处置

搭建跨专业的协同运维平台,整合自动化、电气、机械等领域的技术人员,当发生综合性故障时,系统自动推送相关专业人员,通过视频会议、远程桌面共享等功能开展协同排查,使复杂故障处理时间缩短 60% 以上。

### 4.3 智能化维修装备

#### 4.3.1 智能巡检机器人

搭载多模态传感器与导航系统,实现井下巷道、设备硐室的自主巡检,替代人工完成温度、振动、瓦斯浓度等参数的检测,同时可通过机器视觉识别设备外观损伤、部件松动等问题,巡检工时节约 30% 以上。

#### 4.3.2 专用维修机器人

研发针对采煤机截齿更换、皮带输送机托辊维修、液压站调试等场景的专用维修机器人,实现高危、高强度作业的自动化操作,如截齿更换机器人可在井下复杂环境中完成截齿的快速拆卸与安装,作业效率提升 50%。

#### 4.3.3 无人值守机房

对主通风机房、排水泵房等设备硐室进行智能化改造,实现设备的自动启停、参数调节与故障报警,配合定期的机器人巡检,形成“无人值守、定期巡检”的运维模式,减少固定岗位人员配置。

### 4.4 全生命周期维修管理

基于工业互联网平台,构建煤矿机电设备全生命周期的维修管理体系,为每台设备赋予专属的“电子身份证”,实现从采购、运行、检修、保养到报废的全流程数据化、可视化管理。

#### 4.4.1 设备健康档案

实时记录设备的运行参数、故障历史、维修记录、保养信息等数据,形成完整的健康档案,为设备的状态评估、故障诊断、寿命预测提供数据支撑。

#### 4.4.2 智能化备件管理

基于设备故障率、采购周期等数据,建立备件库存动态调整模型,实现备件的精准采购、智能定位与高效领用;同时通过物联网技术对备件库存进行实时监控,避免“急需的备件没有,闲置的备件积压”的问题,使备件库存成本降低 20% 以上。

#### 4.4.3 全流程数据追溯

实现设备全生命周期数据的可查询、可追溯,针对设备故障可快速调取历史运行数据、维修记录等信息,分析故障根源,为设备的技术改造、优化设计提供依据;同时通过数据闭环实现智能算法、维修方案的持续优化。

## 5 煤矿机电设备智能化诊断维修技术发展对策

### 5.1 研发适配井下工况的专用技术装备

针对井下强电磁、高尘、低照度等环境特征,研发抗

干扰、防尘防水、小型化的矿用本安型感知设备,采用小波阈值去噪、Retinex 图像增强等算法对感知数据进行预处理,提升数据质量;研发适配井下狭窄空间的小型化、防爆型智能巡检与维修机器人,优化机器人的导航、避障与作业能力。

### 5.2 加快制定行业技术标准与规范

由行业协会、龙头企业牵头,制定煤矿机电设备智能化改造的技术标准、接口规范与通信协议,统一设备的感知数据格式、故障诊断指标、维修管理流程;推动设备生产厂家按照标准进行产品设计与升级,提升设备的智能化、标准化水平,降低智能化改造成本。

### 5.3 构建复合型人才培养与引进体系

煤矿企业与中国矿业大学、河南理工大学等高校开展校企合作,开设煤炭智能化运维相关专业,培养兼具多领域知识的复合型人才;推行“操检合一”的人才培养模式,开展智能化技术专项培训,提升传统运维人员的智能设备操作、故障诊断能力,实现“停机能维护、开机会操作”;同时加大高端人才引进力度,组建专业化的智能化运维团队。

### 5.4 建立跨矿数据共享与算法优化平台

依托工业互联网平台构建煤矿机电设备运维数据共享平台,整合不同煤矿、不同企业的设备运行数据、故障样本、维修记录等信息,扩充故障样本库至百万级以上;通过迁移学习、联邦学习等技术,实现跨矿数据的安全共享与智能算法的联合优化,提升算法对不同工况、不同设备的适应性;同时升级边缘端算力,部署高性能 AI 推理芯片,提升复杂故障的本地诊断能力。

## 6 结论

煤矿机电设备故障诊断与智能化维修技术是智能矿山建设的核心组成部分,其突破了传统人工运维模式的局限性,实现了设备故障的实时监测、早期预警、精准诊断与高效维修,推动了煤矿机电设备运维从“经验驱动”向“数据驱动”、从“事后抢修”向“事前预防”、从“人工操作”向“智能协同”的根本性转变。随着人工智能、数字孪生、工业互联网等技术的不断发展,煤矿机电设备智能化诊断维修技术将向“无人化、自主化、一体化”方向发展,实现设备全生命周期的智能运维,为煤炭行业高质量发展与能源安全保障提供强有力的技术支撑。

### 参考文献

- [1] 伊春,王国强. 基于深度学习的煤矿机电设备故障智能诊断研究[J].科技与创新,2026,(02):76-78+81.
- [2] 李子耀. 煤矿机电设备智能化运行状态监测与故障诊断技术研究[J].现代制造技术与装备,2026,62(01):114-116.
- [3] 张志诚. 基于声学传感技术的煤矿机电设备振动监测系统设计与应用[J].凿岩机械气动工具,2026,52(01):19-21.

# Design of Pure Mechanical Structure and Performance Research of Wide Spectrum Precision Pneumatic Buffer Device

Shilong Fan Qi Zhang\*

Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning, 116028, China

## Abstract

To address challenges in multi-specification steel pipe conveying buffers for welding pipe production lines—including narrow adaptability range, difficulty in springback control, and complex electrical control systems—a self-designed 63 mm cylinder-diameter wide-spectrum purely mechanical pneumatic buffer device has been developed. This system eliminates electro-proportional components, achieving full-condition buffer control solely through manual throttle valve (F1/F2) opening matching, with the relief valve serving only as pressure protection. Based on momentum conservation and ideal gas isothermal process theory, a dynamic model for the buffering process was established, deriving correlation formulas between throttle valve opening and buffering characteristics, while defining controllable critical conditions for springback within 0-200 mm. Experimental validation was conducted using a test bench to evaluate buffer performance for 3-68 kg steel pipes under actual welding pipe production line speed specifications. Results demonstrate that within a conveying speed range of 2.0-3.5 m/s, the device achieves precise buffer acceleration control (8.2-24.0 m/s<sup>2</sup>) through F1/F2 opening matching, maintains stable springback within the designed 0-200 mm range, and eliminates rigid impacts across all operating conditions. This fully meets the precision buffering requirements for welding pipe production lines, providing a purely mechanical solution for multi-specification workpiece conveying.

## Keywords

pneumatic buffer device; pure mechanical structure; throttle valve opening matching; broad-spectrum adaptation; welded pipe production line

# 广谱式精密气动缓冲装置的纯机械结构与全工况性能研究

樊世龙 张琪\*

大连交通大学, 中国·辽宁 大连 116028

## 摘要

针对焊管产线中多规格钢管输送缓冲存在的适配范围窄、回弹控制难、电控系统复杂等问题, 自主设计了一种缸径63mm的广谱式纯机械气动缓冲装置。该装置摒弃电控比例元件, 仅通过F1、F2双手动节流阀的开度匹配实现全工况缓冲控制, 溢流阀仅作压力保护。基于动量守恒与理想气体等温过程理论, 建立了缓冲过程动力学模型, 推导了节流阀开度与缓冲特性的关联公式, 明确了0~200mm回弹量的可控临界条件。结合焊管产线实际速度规范, 搭建试验台对3~68kg钢管的缓冲性能进行测试验证。结果表明, 该装置在2.0~3.5m/s的输送速度范围内, 可通过F1、F2开度精准匹配, 将缓冲加速度控制在8.2~24.0m/s<sup>2</sup>, 回弹量稳定在0~200mm设计区间, 全工况无刚性冲击, 完全满足焊管产线广谱式精密缓冲需求, 为多规格工件输送缓冲提供了纯机械解决方案。

## 关键词

气动缓冲装置; 纯机械结构; 节流阀开度匹配; 广谱适配; 焊管产线

## 1 引言

高频焊管生产过程中, 钢卷经开卷、成型、焊接、矫直后定尺切割, 通过输送辊道按特定速度输送至收集段, 需

通过缓冲装置实现平稳停机<sup>[1]</sup>。不同规格钢管的质量跨度达3~68 kg, 输送速度根据管径与壁厚呈现2.0~3.5 m/s的差异化分布, 导致动量变化范围广, 传统缓冲装置难以实现全工况适配。

现有工业缓冲方案中, 电控气动缓冲装置虽适配性强, 但结构复杂、环境适应性差; 传统纯机械缓冲装置多依赖溢流阀调压, 存在小质量钢管缓冲过度、大质量钢管缓冲不足的问题, 且回弹量难以控制<sup>[2-3]</sup>。国内外学者针对气动缓冲技术开展了大量研究: 王海涛等<sup>[4]</sup>设计了基于压力反馈的

【作者简介】樊世龙(2000-), 男, 中国河北邯郸人, 硕士, 从事工业设计工程研究。

【通讯作者】张琪(1981-), 男, 中国吉林人, 硕士, 教授, 从事数字艺术/虚拟交互研究。

机械式高速气缸缓冲装置，为纯机械缓冲控制提供了新思路；姜晶等<sup>[5]</sup>研究了高速气缸缓冲稳定阶段运动特性，优化了缓冲结构参数；王丽平等<sup>[6]</sup>提出高速气缸自适应缓冲系统结构设计方案，提升了缓冲适配性。但现有研究多聚焦单一工况优化，尚未形成针对焊管产线 3~68 kg 全规格钢管的纯机械广谱适配方案。

本文自主设计缸径 63 mm、活塞杆直径 40 mm 的纯机械气动缓冲装置，基于 F1、F2 双节流阀开度匹配构建缓冲控制策略，结合动力学建模与试验验证，实现 3~68 kg 钢管、2.0~3.5 m/s 速度的全工况精密缓冲，解决传统装置的适配性与回弹控制痛点。

## 2 装置结构与工作原理

### 2.1 核心结构参数

装置采用单出杆双作用气缸结构，核心设计参数严格遵循实际加工与产线约束，修正后无结构矛盾，具体如表 1 所示。

表 1 缓冲装置核心结构参数

参数名称	数值	计算依据/说明
气缸缸径 D	63 mm	从原有 100 mm 优化，适配小质量钢管缓冲
活塞杆直径 d	40 mm	小于缸径，保证有杆腔环形受压面积
无杆腔有效面积 A <sub>1</sub>	$3.117 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	$\pi D^2/4$ ，纯截面受压
有杆腔有效面积 A <sub>2</sub>	$1.860 \times 10^{-3} \text{ m}^2$	$\pi (D^2-d^2)/4$ ，环形受压
缓冲锤总质量 m <sub>2</sub>	27.5 kg	兼顾惯性与缓冲响应特性
气源压力	0.3 MPa	产线标准气源，溢流阀锁定此压力

### 2.2 纯机械气动控制系统设计

装置的气动控制回路为纯机械结构，无任何电控调节元件，核心由三位五通中泄式电磁阀（4V330E-10）、二位三通电磁阀、F1 单向节流阀、F2 直通节流阀、单向阀 D1 组成，溢流阀仅作 0.3 MPa 压力保护，全程不参与缓冲调节。

F1、F2 为核心控制元件，功能分工明确：

1. F1（单向节流阀）：串联于有杆腔排气回路，与单向阀 D1 并联。缓冲回缩时 D1 关闭，有杆腔气体仅通过 F1 节流排出，其开度直接决定有杆腔背压，控制缓冲制动与回弹量；前伸时 D1 开启，进气无节流，保证缓冲锤快速到位。

2. F2（直通节流阀）：串联于无杆腔进气回路，双向节流。其开度控制无杆腔进气流量，决定缓冲锤的预回缩速度与跟随速度，是降低撞击刚性的核心元件。

### 2.3 工作流程

装置的工作过程严格对应气动原理图的三个核心状态，全程通过 F1、F2 开度匹配实现缓冲控制：

1. 前伸待机：K1 得电，气源向有杆腔进气，无杆腔气体经 F2 节流排出，缓冲锤平稳伸出至初始位，F2 开度控制伸出平稳性；

2. 待料释压：K3 得电，气缸两腔通大气，消除内压干扰，F1、F2 保持预设开度；

3. 回缩缓冲：钢管撞击瞬间，K2、K3 得电，气源经 F2 节流流向无杆腔进气，有杆腔气体经 F1 节流排出，缓冲锤随钢管同步回缩，完成动能吸收与回弹控制。

## 3 缓冲过程动力学建模与开度匹配理论

### 3.1 建模基本假设

结合焊管产线缓冲特性，作出合理假设：①缓冲速度  $\leq 3.5 \text{ m/s}$ ，气体压缩/拉伸过程为理想气体等温过程，满足  $pV = \text{常数}$ <sup>[7]</sup>；②忽略气缸内外泄漏与摩擦损耗，碰撞瞬间钢管与缓冲锤无相对滑动；③节流阀流量遵循亚声速薄壁小孔公式，开度与通流面积线性相关。

### 3.2 核心动力学模型

#### 3.2.1 碰撞动量守恒模型

钢管（质量  $m_1$ ）以速度  $v_1$  撞击缓冲锤（质量  $m_2$ ，预回缩速度  $v_2$ ），碰撞后形成共同运动体，动量守恒方程为：

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v_{com}$$

式中， $v_{com}$  为碰撞后共同速度。 $v_2$  由 F2 开度决定，开度越大， $v_2$  越高，撞击相对动能越小，为开度匹配提供了核心依据。

#### 3.2.2 能量守恒与节流阀关联模型

缓冲过程中，钢管与缓冲锤的动能通过气体压缩做功、节流阻尼耗散完全消耗，能量守恒方程为：

$$\frac{1}{2} (m_1 + m_2) v_{com}^2 = p_0 A_1 l_1 \ln \left( \frac{l_1}{l_1 - s} \right) - p_0 A_2 l_2 \ln \left( \frac{l_2 + s}{l_2} \right) + W_{throttle}$$

式中， $p_0$  为气源压力， $l_1$ 、 $l_2$  为前后腔初始气柱长度， $s$  为缓冲行程， $W_{throttle}$  为 F1、F2 节流阻尼耗散能。

节流阻尼耗散能与阀口开度直接相关，基于节流阀流量公式  $Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$ ，推导得  $W_{throttle}$  与 F1、F2 通流面积（开度）的反比关系：开度越小，节流阻尼越大，耗散能越高，缓冲制动效果越强。

#### 3.2.3 回弹量可控临界条件

回弹量控制在 0~200 mm 的核心临界条件为，节流阀提供的制动阻力功不小于钢管剩余动能：

$$\frac{1}{2} m_1 (v_1 - v_2)^2 \leq p_2 A_2 s_{max}$$

式中， $p_2$  为有杆腔由 F1 开度决定的背压， $s_{max} = 200 \text{ mm}$  为最大允许回弹距离。该公式明确了 F1 开度需随钢管质量与速度调整，以满足回弹控制要求。

### 3.3 开度匹配核心原则

基于动力学模型，结合焊管产线速度规范，确定 F1、F2 开度匹配的核心原则：

- 小质量钢管（3~10 kg）：F2 小开度控制预回缩速度，避免弹开钢管；F1 适中开度，防止背压过大导致回弹超差；
- 大质量钢管（30~68 kg）：F2 大开度提升跟随速度，降低撞击刚性；F1 小开度增大背压，确保动能完全吸收。