

面向节能的灭火器生产线气动系统优化理论研究

肖昌飞 姚媛

绍兴冠铭消防器材有限公司 浙江 绍兴 312000

【摘要】：气动系统是灭火器生产线的核心动力源，为零部件搬运、装配、打压检测等关键工序提供动力，其运行能耗关乎生产线运营成本与绿色发展。传统灭火器生产线气动系统因设计理念落后、调控粗放，存在气源浪费、压力损失大、负载匹配失衡等能耗问题，无法满足制造业节能降耗要求。本文依托流体力学与气动控制理论，搭建“能耗机理分析-优化目标确立-理论方法适配-节能逻辑构建”的完整学术体系。深入剖析气动系统能耗产生机制与影响因素，明确节能优化理论依据，提出基于气源优化、回路调控和负载匹配的多维度节能优化理论框架。该研究有助于实现能耗精准管控，为灭火器生产线节能转型及装备制造领域气动系统节能升级提供理论参考。

【关键词】：灭火器生产线；气动系统；节能优化；能耗机理；气动控制；负载匹配

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.067

1 引言

灭火器是消防安全领域的核心装备，其生产对自动化与稳定性要求颇高。气动系统因结构简单、响应快、适应恶劣工况，成为生产线核心动力支撑。在壳体成型、阀门装配、压力检测等关键工序中，它能把压缩空气的压力能转化为机械能，让执行元件精准动作。但传统气动系统设计侧重满足动作需求，未系统考量节能，运行能耗偏高。当下制造业向绿色低碳转型，节能降耗是企业提升竞争力的关键，灭火器生产线气动系统节能优化需求迫切。深入解析能耗机理、构建科学节能优化体系、精准管控能耗，既能降企业运营成本，又能推动消防装备制造绿色可持续发展，意义重大。

2 灭火器生产线气动系统特性与能耗机理

2.1 气动系统的核心构成与运行特性

灭火器生产线气动系统是一个“气源产生-处理-输送-执行-控制”的闭环体系，主要由空气压缩机、干燥器、过滤器、管路系统、控制阀和执行元件等构成。其中，空气压缩机是气源核心，能把机械能转化为空气压力能；处理单元可干燥、过滤压缩空气，去除水分与杂质，确保系统稳定；管路系统负责输送压缩空气；控制阀与执行元件则依据生产工序，精准调控压力、流量并执行动作。该系统运行有间歇性与负载波动性特点，各工序动作周期性明显，需频繁启停与切换压力，且不同工序负载差异大，流量和压力需求动态变化，这使能耗分布与工序紧密相关，为节能优化提供了明确方向。

2.2 气动系统能耗的产生机制

灭火器生产线气动系统的能耗核心在于压缩空气的产生与输送，其产生机制分显性能耗和隐性能耗。显性能耗主要源于空气压缩机运行，压缩机为产生压缩空气，要克服空气阻力与机械摩擦做功，能耗和排气压力、排气量直接挂钩，压力越高、排气量越大，能耗就越突出。隐性能耗来自系统运行中的能量损失，涵盖压力、泄漏和余热损失。压力损失出现在输送

环节，管路阻力、阀门节流等会使压力衰减，为满足执行元件需求，压缩机需提高排气压力，间接增耗；泄漏损失因管路接头等密封失效，压缩机频繁补压浪费能量；余热损失是压缩机产生的热能未回收，直接散失，降低了能量利用效率。

2.3 能耗的核心影响因素解析

灭火器生产线气动系统能耗受系统设计、运行调控与维护管理多因素影响。设计上，管路布局不合理增大输送阻力，元件选型不当如压缩机排量不匹配会浪费能量，压力设定偏高增加压缩机负荷。运行调控中，传统恒压供气模式无法适应工序负载动态变化，非满负荷时能耗高；系统启停控制粗放，频繁启停增加启动能耗且缩短压缩机寿命。维护管理方面，密封件老化、管路腐蚀未处理加剧泄漏，过滤器堵塞未清理增大进气阻力，缺乏能效检测评估难及时发现并解决能耗异常。这些因素相互关联，共同影响气动系统能耗水平。

2.4 传统气动系统的节能局限

传统灭火器生产线气动系统受设计理念与技术手段限制，难以高效节能运行。设计时，以满足最大负载的“冗余设计”为主，多数工况下系统非满负荷运转，能量利用率低；且对管路布局和元件选型的节能考量欠缺，多优先成本与通用性。运行中，调控手段不精准，恒压供气无法适配负载动态变化，压力流量匹配失衡；未建立能耗监测机制，节能优化缺数据支撑。维护时，以故障维修为主，缺乏预防意识，隐性能耗问题难及时发现，能耗持续偏高。这些局限使传统系统节能潜力难释放，难满足绿色生产需求。

3 面向节能的气动系统优化理论基础

3.1 节能优化的核心内涵与理论框架

面向节能的灭火器生产线气动系统优化，核心是基于流体力学与气动控制理论，经系统设计优化、运行调控精准、维护管理科学，达成“气源高效产生-能量精准输送-负载最优匹配”的全流程节能目标。其理论框架以“能耗机理分析-优化目标确

立-优化变量筛选-理论方法适配-效果评估”为逻辑主线：能耗机理分析锁定能耗关键环节与因素；优化目标聚焦降低压缩机能耗等，构建多目标协同体系；优化变量涵盖压力、管路等参数；理论方法融合多学科适配方案；效果评估借能耗与稳定性指标，验证方案可行有效。

3.2 节能优化的核心理论支撑

气动系统节能优化有三大理论支撑。流体力学理论为管路优化提供依据，解析流体阻力损失规律，指导管路直径、布局和弯头数量优化，减少能量损失；还能借流体连续性方程与伯努利方程，精准计算压力流量分布，支撑负载匹配优化。气动控制理论助力运行模式优化，用比例、伺服等精准控制技术，动态调控供气压力流量，适配负载波动；构建控制模型可提升调控精度与稳定性。优化理论通过智能算法求解多目标优化问题，得出优化变量最优组合，实现能耗与运行稳定性协同优化。

3.3 节能优化的核心评价指标

面向节能的气动系统优化要建立科学评价指标体系，涵盖能耗、运行稳定性与经济性三类核心指标。能耗指标是关键依据，有单位产品气动能耗，直接体现节能效果；压缩机比功率，衡量气源产生环节能量利用效率；压力损失率与泄漏率，反映输送环节能量损失。运行稳定性指标保障系统可靠运行，压力波动范围在允许区间，确保执行元件动作精准；动作响应速度满足生产需求，不影响效率；系统故障率反映优化对可靠性的影响。经济性指标衡量应用价值，节能改造投资回收期 and 年均节能效益为企业节能决策提供参考。

3.4 优化变量的筛选与适配逻辑

优化变量筛选与适配是节能优化核心，遵循“影响显著性-调控可行性-协同性”原则。先筛选关键变量，如压缩机排气压力、管路直径与布局、控制阀流量特性、执行元件型号、运行供气模式等。压缩机排气压力要根据工序最大需求精准设定，防压力冗余；管路直径与布局结合流量和输送距离优化，减阻力损失；元件选型与负载精准匹配，避免浪费。变量适配要考虑协同关系，像供气模式优化要和管路参数、负载特性协同。此外，变量调控要可行，防止因技术难或成本高，使优化方案无法落地。

4 气动系统节能优化的理论逻辑与实现路径

4.1 节能优化的核心思路

面向节能的灭火器生产线气动系统优化的核心思路是“源头降耗-过程节能-管理提效”的多维度协同管控。源头降耗聚焦空气压缩机的高效运行，通过优化运行模式、精准匹配排量，降低气源产生环节的能耗；过程节能围绕压缩空气的输送与利用环节，通过管路系统优化、泄漏控制、压力精准调控，减少输送过程中的能量损失，提升能量利用效率；管理提效则通过建立科学的维护管理体系与能耗监测机制，保障节能优化效果

的长期稳定。这一思路突破了传统单一环节节能的局限，构建了全流程、多维度的节能优化体系，确保节能效果的全面性与持续性，同时兼顾系统的运行稳定性与生产适应性。

4.2 气源产生环节的节能优化机理

气源产生环节节能优化遵循“负荷匹配-高效运行”逻辑，旨在提升能量利用效率。一方面，以变压力供气模式取代传统恒压模式，依据灭火器生产各工序负载波动，动态调整压缩机排气压力，规避压力过高造成的能量浪费；多台压缩机并联时，采用负荷分配优化策略，按总供气需求精准调控各压缩机运行，防止部分压缩机低负荷低效运行。另一方面，优化压缩机吸气参数，保证吸气顺畅、降低阻力，提升容积效率；借助余热回收利用理论，将压缩机余热用于车间供暖或热水供应，从能耗源头实现显著节能效果。

4.3 输送与利用环节的节能优化机理

输送与利用环节节能优化围绕“减少损失-精准匹配”，核心是降输送损失、实现精准供需。管路系统优化依流体力学理论，增大关键管路直径、减少弯头与阀门、优化布局缩短距离，降低阻力损失；选用内壁光滑管材，减少摩擦损失。泄漏控制方面，采用高性能密封材料提升密封可靠性，建立定期检测机制，及时处理泄漏点。压力与流量精准调控则借助比例、流量控制阀等精准元件，依执行元件需求动态调整，避免浪费；针对不同工序压力差异，采用分级供气模式，为各工序提供适配压力，实现负载与能量供给精准匹配。

4.4 维护管理环节的节能优化机理

维护管理环节节能优化遵循“预防性维护-动态监测”逻辑，保障节能效果长期稳定。建立预防性维护体系，定期检查维护压缩机、管路等关键部件，及时更换老化密封件、清理堵塞过滤器，防止部件性能下降致能耗升高；定期检测系统压力、流量等关键参数，发现能耗异常及时优化调整。构建能耗动态监测机制，安装监测传感器与数据采集系统，实时采集压缩机运行能耗等数据并建立数据库；基于数据分析，找出能耗偏高环节与原因，为后续优化提供数据支撑。此环节虽不直接降耗，但能保障节能措施持续有效，避免能耗反弹。

4.5 多环节协同优化的理论逻辑

灭火器生产线气动系统能耗是各环节协同作用所致，单一环节优化难达理想效果，需构建多环节协同优化理论。其核心在于明确各环节优化优先级与关联，让优化措施有机融合。气源产生环节压力设定要与输送环节压力损失、利用环节负载需求协同，避免压力冗余；输送环节管路优化需适配利用环节流量需求，满足工序动态变化；维护管理环节监测数据要为气源产生与输送利用环节优化提供支撑，实现动态调整。如此，可实现全流程能耗精准管控，最大程度释放节能潜力，保障系统运行稳定与生产适应。

5 节能优化的应用价值与保障体系

5.1 核心应用价值：节能与效益协同提升

面向节能的气动系统优化，核心在于实现节能与运营效益双提升。全流程优化能大幅降低灭火器生产线气动系统能耗，节省能源成本，减轻压缩机等设备运行负荷，延长其寿命、降低维护成本。减少泄漏与压力损失，可提升压缩空气利用率，保障执行元件精准稳定，减少生产中断，提高生产效率和产品质量。此外，还能推动生产线绿色转型，契合政策导向，提升企业形象与竞争力，达成“节能-提质-增效-降本”多赢，支撑可持续发展。

5.2 技术保障：优化实施的规范与支撑

节能优化有效实施依赖完善技术保障体系，涵盖优化设计规范、能耗监测标准与技术验证流程。优化设计规范明确各环节技术要求与步骤，如压缩机参数优化范围、管路布局标准、控制元件选型依据，保障设计科学规范；能耗监测标准规范数据采集范围、频率与分析方法，确保数据准确完整，为效果评估提供可靠依据；技术验证流程借助仿真分析，验证方案能耗降低效果与运行稳定性，评估对生产工序影响，确保方案可行适用，提升优化结果可靠性。

5.3 管理保障：全生命周期的节能管控

节能优化效果需全生命周期管理保障，实现从设计、实施到运行维护的全过程节能管控。设计阶段，建立节能设计专项评审机制，把节能需求融入整体方案，保证系统性与前瞻性；实施阶段，严格依优化方案改造，强化施工质量控制，防止效果下降；运行维护阶段，建立常态化能耗监测评估机制，定期分析数据、调整措施；开展人员专业培训，提升节能意识与技

能，确保措施落实。此模式突破传统，实现节能效果持续优化巩固，推动节能理念长期落地。

6 研究结论与展望

6.1 研究结论

本文基于流体力学与气动控制理论，对面向节能的灭火器生产线气动系统优化理论体系展开系统研究，得出主要结论：其一，该系统能耗贯穿气源产生、输送与利用全流程，系统设计、运行调控和维护管理是核心影响因素，传统系统因缺乏全流程节能考量，节能局限明显。其二，节能优化核心在于构建“源头降耗-过程节能-管理提效”多维度协同体系，以相关理论为支撑，精准筛选与适配优化变量，兼顾能耗降低与运行稳定。其三，各环节优化机理逻辑清晰，气源、输送利用、维护管理环节各有侧重。其四，优化落地需技术与管理协同保障，应用价值实现多赢，助力生产线绿色转型。

6.2 研究展望

本文研究成果为灭火器生产线气动系统节能优化提供了理论支撑，未来研究可在以下方向深入：一是融合智能化优化方法，引入机器学习算法构建能耗与运行参数映射模型，实现参数自适应优化，提高精准度与效率；结合物联网搭建智能能耗监测平台，实现数据实时采集、分析及优化决策自动推送。二是开展新型节能元件与材料应用研究，探索低阻力管路、高效密封、节能压缩机等技术在气动系统的应用，优化适配逻辑提升节能效果。三是推进全生产线节能协同优化，突破单一系统局限，构建全生产线绿色节能理论。四是构建行业标准与规范，推动建立相关行业标准，加速节能技术推广，助力消防装备制造制造业绿色升级。

参考文献：

- [1] 杨珂,周生乾,李连湖.电气机械自动化生产线的节能优化策略[J].电站辅机,2025,46(1).
- [2] 钟俊伟.压缩空气余热利用系统设计及经济性分析[J].能源与节能,2025(8).
- [3] 周玉印.自动化生产线物料加工单元数字孪生系统设计[J].科技创新与应用,2023,13(20).
- [4] 周昊,刘博.自动化生产线优化设计与调度策略研究[C]//2024 人工智能与工程管理学术交流会论文集.2024:1-4.