

管链输送机研究进展及在粮油食品工业中的应用

伍维维 夏朝勇 随 赛

(郑州中粮科研设计院有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要:管链输送机凭借高效传输、全封闭运行及三维柔性空间布局等显著优势,已成为现代散料输送领域的核心装备。文章梳理了国内外管链输送机的研究现状与进展,深入剖析了其技术演进脉络、核心理论框架及行业适配性,重点综述了其在粮油食品工业中的工程应用,针对当前研究在极端工况适应性、多物理场耦合机理建模、智能运维技术的规模化落地及全生命周期能效评价体系等方面仍存在的不足,并提炼了亟待突破的关键科学问题与发展方向。

关键词:管链输送机;粮油食品工业;智能运维;数字孪生;多物理场耦合

Research progress on tubular chain conveyors and their applications in the grain, oil and food industry

WU Weiwei XIA Chaoyong SUI Sai

(COFCO Engineering & Technology (Zhengzhou) Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: Tubular chain conveyors have become core equipment in modern bulk material handling by virtue of their significant advantages, including highly efficient conveying, fully enclosed operation, and three-dimensional flexible spatial layout. This paper systematically reviews the current status and progress of research on tubular chain conveyors both domestically and internationally, and provides an in-depth analysis of their technological evolution, core theoretical framework, and industrial adaptability. Emphasis is placed on reviewing their engineering applications in the grain, oil and food industry. In view of the remaining deficiencies in current research concerning adaptability to extreme operating conditions, multi-physics coupling mechanism modeling, large-scale implementation of intelligent operation and maintenance technologies, and life-cycle energy efficiency evaluation systems, this paper extracts the key scientific issues and development directions that urgently need to be addressed.

Keywords: tubular chain conveyor; grain, oil and food industry; intelligent operation and maintenance; digital twin; multi-physics coupling

现代制造业在工业 4.0 浪潮与碳达峰碳中和战略的双重驱动下正经历着深刻的变革,智能化、绿色化已成为发展的核心趋势。散料输送系统作为贯通生产工艺全流程的核心枢纽,涵盖了装卸设备、输送设备、存储设备、辅助设备、控制系统等多种专业设备协同构成的完整体系,其运行效率、可靠性及环境友好性已成为衡量行业现代化水平的关键指标。管链输送机,也称盘片式输送机、链管式输送机,其核心特征在于独特的闭环管道结构和灵活的三维空间布局能力。该设备良好的密闭性能,使其能够有效防止物料外泄与交叉污染,链盘输送物料时特

性稳定,无冲击作用,极大降低了输送过程中物料的破损。基于上述技术优势,管链输送机已被广泛应用于粮油食品、化工制药等对生产环境的洁净度、安全性、高效性有严苛要求的领域,从辅助设施逐渐跃升为核心输送方案。

在工程实践层面,管链输送机有助于构建无尘化车间,是有效保障粮油食品安全、降低能耗及维护成本并提升空间利用率的关键手段,契合了国家关于智能制造、安全生产与绿色发展的战略需求^[1]。在学术研究层面,管链输送机的工作原理是典型的跨学科复杂系统问题,其内

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2022YFD2100200,2022YFD2100201)

通信作者:伍维维(1986—),女,郑州中粮科研设计院有限公司副研究员,硕士。E-mail:2407475732@qq.com

收稿日期:2026-03-07 **改回日期:**2026-05-28

引用格式:伍维维,夏朝勇,随赛. 管链输送机研究进展及在粮油食品工业中的应用[J]. 食品与机械, 2026, 42(6): 190-195.

Citation: WU Weiwei, XIA Chaoyong, SUI Sai. Research progress on tubular chain conveyors and their applications in the grain, oil and food industry[J]. Food & Machinery, 2026, 42(6): 190-195.

在机制深度耦合了机械动力学^[2]、散体力学^[3]、摩擦学^[4]及流体力学^[5],并融合了现代控制理论^[6]和人工智能算法^[7]等前沿成果。

文章拟围绕管链输送机领域近10年的研究文献,开展系统性研究和全面综述,旨在通过对比分析国内外研究范式的异同,梳理核心理论框架的演进脉络,总结其在粮油食品领域等典型行业的应用成效,精准识别当前研究存在的瓶颈及挑战,并提出未来亟需深入探索的若干关键科学问题,旨在为后续基础理论研究与工程技术开发提供依据,助力粮油食品工业的技术升级与高质量发展。

1 管链输送机工作原理与物料运动特性

管链输送机是一种专为散装物料设计的密闭式连续输送装备。其核心工作原理是密闭管道内的容积式推送原理^[8],即链轮驱动装有盘片的链条在封闭管道内循环运动,链条上间隔安装的盘片(刮板)推动管内物料,将物料约束在相邻刮板形成的封闭腔室内,形成连续的整体流。该设备主要由封闭式管道壳体(可为圆管或方管)、牵引链条、盘片、链轮、驱动系统、张紧装置及进出料口等关键部件构成。驱动电机经减速机构带动主动链轮旋转,进而驱动牵引链条和盘片在密闭管道内循环运转,实现物料在水平、倾斜、垂直方向上连续、稳定的输送。相较于螺旋输送机的螺旋推送机制和斗式提升机的承料提升模式,管链输送机物料受力特性与运动规律更为独特,物料流稳定性显著优于螺旋输送机和斗式提升机。特别是在处理流动性差异较大的散装粮油物料时,能够有效减少物料在输送过程中的破碎和分离,适用于对物料完整性要求较高的场景。

2 国内外管链输送机技术研究现状

2.1 国外研究现状

欧美及日本等发达国家和地区在管链输送机技术领域起步较早,技术积淀深厚^[9]。当前,其研究重心已从单纯的设备制造向高度智能化、模块化、标准化设计以及极端工况适应性等维度拓展,代表了该领域的国际最高水平。近年来,国外相关研究呈现出鲜明的“算法驱动”与“技术原生”特征,不仅聚焦于前沿技术的工程化落地,更致力于基础理论的突破与原创性探索。

2.1.1 智能运维与数字孪生技术 国外研究主要聚焦于智能运维^[10]与数字孪生技术^[11]。德国慕尼黑工业大学研究团队构建了基于振动、温度、声发射等多源传感器数据融合的动态数字孪生体,引入迁移学习算法,确保模型能够适配不同工况,并能够实时预测链节疲劳寿命,形成智能诊断体系,显著降低了意外停机率,标志着该领域工作模式从被动维修向主动健康管理转变。荷兰代尔夫特理工大学课题组进一步拓展了人工智能的应用边界,在链

传动系统的声纹信号分析^[12]中使用深度置信网络(DBN)模型^[13],实现了对早期磨损的毫米级定位检测,展现了人工智能在提升设备状态感知深度和广度方面的巨大潜力。

2.1.2 新材料应用与结构创新 国外研究依托深厚的材料科学基础,继续向多尺度仿真和表面工程深度结合的方向推进。在轻量化与结构优化方面,美国普渡大学研究团队围绕碳纤维增强热塑性复合材料进行研究,突破了传统经验设计的局限,将拓扑优化与分子动力学模拟相结合,建立了从微观分子结构延伸至宏观力学性能的跨尺度分析框架,在确保抗冲击强度的前提下,成功实现了关键部件减重40%。在极端工况适应性方面,日本东京工业大学研究团队开发了自润滑链节,利用微纳加工技术在链销表面构建石墨烯基复合涂层,从摩擦机理层面显著降低了能耗与磨损,有效攻克了高温及微量腐蚀性环境下的润滑失效难题。

2.1.3 能效优化及全生命周期评价 国外研究视角也在不断拓展,从单一关注输送能效优化,转向涵盖设备全生命周期环境影响的系统性分析。瑞典皇家理工学院科研团队提出了自适应变频驱动策略,可根据实时物料流量动态调节输送机运行速度,并建立了能耗—吞吐量—设备寿命的多目标优化模型。加拿大阿尔伯塔大学则开发了一套光伏—动能回收混合供能系统,通过在长距离管链输送机上集成压电发电模块,实现对制动能量的有效回收,从而将可持续运营理念转化为具体技术实践^[14]。

2.1.4 模块化设计与长距离输送技术 以德国ZEIGER、瑞士Bühler为代表的国际知名品牌,普遍确立了高度模块化的设计理念。通过将弯头、水平段、垂直段及驱动单元等核心部件进行标准化封装,实现了积木式的快速组装与部署,显著缩短了工程设计、制造及现场安装周期,降低了全生命周期成本^[15]。此外,针对大型港口粮仓和复杂地形厂区相对严苛的实际需求,当前技术已实现单机输送距离超百米及大倾角垂直提升作业。其技术核心在于对高功率密度、高稳定性的驱动系统创新优化,结合独特的链条张紧与张力控制技术,有效克服了长距离输送中链条垂度、同步性等难题。

2.2 国内研究现状

国内研究在紧跟国际前沿的同时,更加注重与国家重大工程需求相结合,展现出鲜明的问题导向特征与集成创新能力。近年来,国内研究紧密围绕性能优化、智能化升级及特殊工况适应性三大核心方向,通过提升设备运行效率、强化智能控制水平、拓展复杂工况适应能力,精准契合粮油食品行业对卫生标准、安全规范及运行效率日益严苛的要求^[16-18]。

2.2.1 核心性能优化与多物理场仿真 为突破输送效率与能耗控制瓶颈,中国的研究广泛引入计算流体力学

(CFD)与离散元法(DEM)等^[19-23]多物理场耦合仿真技术。中国矿业大学科研团队通过建立气固耦合动力学模型,运用CFD-DEM耦合仿真技术,深刻揭示了物料在弯管段拥堵的动力学机制^[24],推动相关研究现象观测向机理揭示深化,并据此提出了变径导流板直接面向工程应用的有效解决方案。东北大学机械工程学院开发了基于电阻层析成像(ERT)的物料流量监测系统,实现了提前5~10 min预警堵料,展示了先进检测技术在解决工程难题中的应用价值^[25-27]。

2.2.2 关键部件磨损与寿命提升 国内针对关键部件的磨损和寿命瓶颈的研究主要集中在材料科学、表面工程和结构优化的交叉应用。一方面,采用高分子聚乙烯、耐磨合金钢等高性能材料替代传统材质,结合渗碳、淬火等表面强化工艺,提升关键部件的耐磨性与疲劳强度;另一方面,从结构设计入手,优化转弯半径设计及支撑结构布局,消除应力集中与异常磨损点,延长部件使用寿命。在此基础上,太原科技大学科研课题组采用声学拓扑优化方法重构链轮齿形,结合阻尼合金材料,显著降低了设备工作噪声。武汉理工大学科研团队通过多体动力学仿真,优化了滚子链的预应力配置,有效提升关键部件使用耐久性,河南工业大学科研团队对管链输送机刮板磨损进行了研究分析与设计,相关成果已被成功应用于大型工业项目^[28-30]。

2.2.3 智能化监测与自动化控制 随着工业4.0的推进,中国学者在智能化技术的落地应用上进行了积极探索。基于可编程逻辑控制器(PLC)与数据采集及监视控制系统(SCADA)的深度融合^[31-33],集成多源传感器网络,能够实时监测链条张力、电机电流、轴承温度及料位堵塞等关键参数,实现故障早期预警、运行速度自适应调节及紧急连锁停机。浙江大学控制学院研发了基于数字孪生的自适应控制系统,通过激光雷达扫描构建三维点云模型,实现了弯管段速度的实时优化^[34-36]。中国多个高校及多家科研团体先后提出了基于联邦学习的分布式故障诊断框架,该框架以保护各相关机构本地数据隐私为前提,利用分布式、小样本的故障数据,协同训练出泛化能力更强的诊断模型,为工业物联网环境下数据孤岛、样本稀缺场景中的智能运维推广提供了新的技术路径^[37]。

3 技术演进脉络与理论框架

管链输送机的研究进程展现出明显的阶段性特征。早期研究聚焦于结构强度与基础传动效率优化,可视为技术发展的1.0阶段;随后进入强调专用化设计与机电一体化集成的2.0阶段;当前,该领域正迈向以智能化、网联化与绿色化深度融合为特征的3.0新阶段。在研究范式上,国外学界通常主导基础理论突破、新型材料研发及原创概念的提出,展现出深厚的理论创新优势;相比之下,

中国的研究则更侧重于复杂工况下的工程化应用、技术快速迭代及大型系统集成,展现出突出的工程实践与落地能力。这种差异根植于双方不同的工业基础、市场需求导向及创新理念。国内外研究优势互补,形成协同演进的全球研发格局。

管链输送机的研究框架以多层次、跨学科理论为基础,涵盖了多个前沿学科。① 多体系统动力学。作为核心理学理论,主要用于模拟整个链条—链轮—导轨系统的动力学响应,分析振动与稳定性。② 散体力学与接触力学。作为解析输送效率和功耗、物料破损和堵料等核心机制的基础,用于揭示物料与链盘、物料与管壁以及物料颗粒之间摩擦、挤压、流动等复杂的相互作用。③ 现代设计理论。应用拓扑优化理论,结构设计思路从经验试错转化为以性能目标为基础的理性建构,实现了轻量化与高性能的统一;疲劳寿命预测理论与可靠性工程则为关键零部件的设计提供了理论依据。④ 数字孪生与智能算法。作为智能运维的基础框架,建立了物理实体与虚拟模型之间的实时数据交互与双向映射,利用海量数据提取特征、识别模式进行预测和决策,是实现智能诊断和算法优化的核心。这一技术脉络清晰地展示了从静态设计到动态分析,再到智能感知与决策的螺旋式上升过程,标志着该领域研究范式已完成根本性转变。

4 管链输送机在粮油食品工业中的应用

管链输送机作为一种密闭式粉体及颗粒物料输送装备,有效克服了传统皮带输送机与斗式提升机在长距离、多拐点等复杂工况下的适配瓶颈^[38-39]。设备核心技术特性完全适配粮油食品工业对生产环境与工艺的高标准要求,具体优势体现在5个方面:① 其全密闭输送体系有效筑牢食品安全防线。物料通过全封闭管道系统实现连续输送,输送环境与外界环境完全物理隔离,有效阻断了粉尘、昆虫及微生物的侵入路径,从源头上杜绝了物料污染与氧化变质风险;同时彻底消除了物料溢撒现象,显著降低了由油料或谷物扬尘引发的生产安全隐患及车间环境污染,高度契合食品工业严格的卫生规范与合规性要求^[40-41]。② 其低破损特性符合粮油物料加工需求。粮油加工产业链对小麦、稻谷、大豆等原料和面粉、大米、预拌粉等成品的完整性有较高要求。设备通过料盘以柔性推料方式平稳输送,可大幅降低物料机械损伤。对比试验数据显示,在稻谷输送工况下,斗式提升机的破碎率约为1.2%,而管链式输送机仅控制在0.3%。经测算,每处理1万t稻谷,管链式输送机可减少约90t的物料破碎损失,直接提升了企业的加工经济效益。③ 其灵活的空间布局适应复杂的车间工艺需求。粮油食品加工厂通常空间紧凑且工艺流程复杂。管链式输送机凭借独特的结构优势,能够灵活组合水平、垂直及倾斜输送段,实现任意

角度的空间转向与路径规划。既可满足中小型粮油企业在有限空间改造中的严苛限制,也适应大型粮油集团在全自动化生产线中对于一体化、集约化输送布局的要求,展现出极强的工程适配性与空间利用率^[42-43]。④其低功耗运行有助于优化生产成本。对比气力输送等高能耗工艺,管链式输送机展现出卓越的能效优势^[44],其运行功率通常仅为气力输送系统的1/3甚至更低。对于日均处理量达数千吨的大型粮油加工企业而言,设备的能效效益具备显著的规模效应,长期连续运行能够大幅削减电力消耗,有效降低整体生产成本^[45-47]。⑤大型化系统集成与全流程覆盖。在中粮、鲁花集团等领军企业中,已部署并运行百米级管链输送系统,实现从原粮接收、成品加工到副产品处理的全流程密闭化输送,验证了管链式输送机在长距离、大流量工况下的卓越工程集成能力,标志着该技术在大型工业化场景中的成熟应用^[48-49]。

5 结论与展望

管链式输送机技术正处于由规模化应用向高质量创新转型的关键阶段。通过系统性梳理国内外研究文献,总结出该领域未来的发展机遇与核心挑战,主要聚焦于3个方面:①深化复杂工况下对多物理场耦合机理的基础理论研究,尤其需要探究非稳态流动与颗粒破碎机制等基础理论问题^[50-52];②推动智能运维技术突破实验室验证局限,促进工程化应用,解决其在车间等真实工业场景中落地部署的工程化瓶颈,提升算法在复杂工业环境下的鲁棒性;③构建覆盖设备全生命周期的可持续发展评价体系,综合纳入能耗、碳排放与材料循环利用等关键指标,推动行业绿色低碳转型。

未来技术的创新发展将高度依赖于材料科学、信息技术、机械工程及环境科学等多学科的深度交叉融合与协同创新。通过跨领域的系统化突破,有效推动管链式输送机技术向智能化、高效化、绿色化及高可靠性方向持续演进,从而为全球粮油食品工业的可持续发展奠定坚实的装备基石。

参考文献

- [1] 郎彦辉. 主要发达国家智能制造战略及启示[J]. 中国发展观察, 2020(21): 61-62.
YUN Y H. Strategies and enlightenment of intelligent manufacturing in major developed countries[J]. China Development Observation, 2020(21): 61-62.
- [2] 于飞. 带式输送机液压自动调偏装置的机械动力学仿真[J]. 机械管理开发, 2022, 37(10): 41-42, 49.
YU F. Simulation of the mechanical dynamics of a hydraulic automatic deflection device for a belt conveyor[J]. Mechanical Management and Development, 2022, 37(10): 41-42, 49.
- [3] 李杰, 谢久明, 高鹏. 基于散体力学的大倾角螺旋输送机颗粒

- 输送特性分析[J]. 机械设计, 2019, 36(7): 107-112.
- LI J, XIE J M, GAO P. Analysis on the particle transportation of the large-inclined screw conveyor based on the granule mechanics[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(7): 107-112.
- [4] 张海平. 输送带摩擦学行为及动力学特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
ZHANG H P. The tribology behavior and dynamic characteristics of the conveyor belt[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [5] KHEIRI M, PAÏDOUSSIS M P, DEL POZO G C, et al. Dynamics of a pipe conveying fluid flexibly restrained at the ends[J]. Journal of Fluids and Structures, 2014, 49: 360-385.
- [6] GUO Y, ZHU B, LI Y H. Nonlinear dynamics of fluid-conveying composite pipes subjected to time-varying axial tension in sub- and super-critical regimes[J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 101: 632-653.
- [7] MAO J, YANG Z Y, LU J N. Research on signal analysis and diagnosis of chain drive system of the scraper conveyor guided by artificial intelligence algorithm[J]. Optik, 2022, 271: 170149.
- [8] KRAUSE F, KATTERFELD A. Functional analysis of tube chain conveyors[J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2004, 21(4): 348-355.
- [9] CHONGCHITPAISAN P, SUDSAWAT S. A review on screw conveyors for bulk materials in various applications[J]. Engineering and Technology Horizons, 2022, 39(2): 1-12.
- [10] 郗存根. 带式输送机智能运维专家系统的设计与应用[J]. 现代矿业, 2023, 39(4): 127-131.
XI C G. Design and application of intelligent operation and maintenance expert system for belt conveyor[J]. Modern Mining, 2023, 39(4): 127-131.
- [11] DIHAN M S, AKASH A I, TASNEEM Z, et al. Digital twin: data exploration, architecture, implementation and future[J]. Heliyon, 2024, 10(5): e26503.
- [12] SCHMOLKE S, KATTERFELD A. Measurement signals of the chain tractive force from a closed pipe circuit[C]// Conference Proceedings MAT. Nürnberg: Messgesellschaft Nürnberg, 2001: 212-215.
- [13] 张喆, 陶云春, 梁睿, 等. 一种带式输送机故障诊断方法[J]. 工矿自动化, 2020, 46(4): 81-84, 108.
ZHANG Z, TAO Y C, LIANG R, et al. A fault diagnosis method of belt conveyor[J]. Journal of Mine Automation, 2020, 46(4): 81-84, 108.
- [14] ZAMIRALOVA M E, LODEWIJKS G. Shape stability of pipe belt conveyors: from through ability to pipe-ability[J]. FME Transactions, 2016, 44(3): 263-271.
- [15] 邱禹鑫, 于保军, 张保林, 等. 粮食烘干系统大型高效环保除尘装置模块化设计与分析[J]. 机械工程师, 2020(11): 116-117, 120.
QIU Y X, YU B J, ZHANG B L, et al. Modular design and analysis of large-scale and high-efficiency dust removal device

- for grain drying system[J]. Mechanical Engineer, 2020(11): 116-117, 120.
- [16] 闫吕美子. 粮油食品加工技术在食品安全保障中的应用策略[J]. 食品安全导刊, 2025(6): 40-42.
- YAN L M Z. Application strategy of grain, oil and food processing technology in food safety assurance[J]. Journal of Food Safety Guide, 2025(6): 40-42.
- [17] 王永刚. 粮油食品安全存在的问题与对策[J]. 黑龙江粮食, 2021(9): 93-94.
- WANG Y G. Problems and countermeasures in grain and oil food safety[J]. Heilongjiang Grain, 2021(9): 93-94.
- [18] 曹真, 林令超, 韩佳琪. 粮油食品质量安全检测的问题与解决策略分析[J]. 现代食品, 2024, 30(14): 145-147.
- CAO Z, LIN L C, HAN J Q. Analysis of problems and solutions of grain, oil and food quality safety inspection[J]. Modern Food, 2024, 30(14): 145-147.
- [19] 肖耀猛, 郑灿广, 蒋洋, 等. 基于流体仿真的气悬浮式皮带输送机匹配规律分析[J]. 机械设计与研究, 2025, 41(4): 261-267.
- XIAO Y M, ZHENG C G, JIANG Y, et al. Analysis of the matching of air-suspended belt conveyors based on fluid simulation[J]. Machine Design & Research, 2025, 41(4): 261-267.
- [20] 蔡文源. 基于 CFD-DEM 螺旋输送机内超细粉体流动特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
- CAI W Y. Study on the flow characteristics of ultrafine powder in screw conveyor based on CFD-DEM[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.
- [21] 蔡文源, 王利强, 徐立敏. 基于 CFD-DEM 的超细碳酸钙螺旋输送仿真分析[J]. 中国粉体技术, 2024, 30(3): 100-111.
- CAI W Y, WANG L Q, XU L M. Simulation analysis of ultrafine calcium carbonate spiral transportation based on CFD-DEM[J]. China Powder Science and Technology, 2024, 30(3): 100-111.
- [22] 赵志强, 李明鑫, 时套套, 等. 刮板输送机刚散耦合系统动力学特性及链环疲劳特性研究[J]. 煤矿机械, 2026, 47(4): 117-123.
- ZHAO Z Q, LI M X, SHI T T, et al. Study on dynamic characteristics of rigid-scattering coupling system and chain link fatigue characteristics of scraper conveyor[J]. Coal Mine Machinery, 2026, 47(4): 117-123.
- [23] 梅雪峰, 伍健, 孙晓霞, 等. 可伸缩带式输送机刚柔耦合多体动力学建模[J]. 起重运输机械, 2026(1): 70-75.
- MEI X F, WU J, SUN X X, et al. Rigid-flexible coupled multi-body dynamics modeling of telescopic belt conveyor[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2026(1): 70-75.
- [24] 陈洋洋, 王亲猛. 基于 MBD-DEM-FEM 耦合的刮板链系统仿真分析[C]// 北京力学学会第 32 届学术年会论文集. 北京: 北京力学学会, 2026: 324-327.
- CHEN Y Y, WANG Q M. Simulation analysis of scraper chain system based on MBD-DEM-FEM coupling[C]// Proceedings of the 32nd Annual Academic Conference of Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics. Beijing: Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2026: 324-327.
- [25] 池优阳, 阮竞兰. 基于 UDF 动网格的钢索管式刮板输送机气固两相流数值研究[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(1): 88-94.
- CHI Y Y, RUAN J L. Study on gas-solid two-phase flow of steel tube type scraper conveyor based on UDF dynamic mesh[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2018, 26(1): 88-94.
- [26] 王辉, 刘云峰, 冯兴亮, 等. 基于 ERT 的全尾砂膏体管输过程中颗粒迁移行为研究[J]. 矿业研究与开发, 2026, 46(1): 108-116.
- WANG H, LIU Y F, FENG X L, et al. Research on particle migration behavior during pipeline transportation of unclassified tailings paste based on ERT[J]. Mining Research and Development, 2026, 46(1): 108-116.
- [27] 宁小波, 章正伟, 熊凤军, 等. 电阻层析成像技术在 CFRP 缺陷检测中的激励与测量模式研究[J]. 内燃机与配件, 2025 (14): 1-4.
- NING X B, ZHANG Z W, XIONG F J, et al. Research on excitation and measurement modes of electrical resistance tomography technology in CFRP defect detection[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2025(14): 1-4.
- [28] 刘文峰. 基于 DSP 电阻层析成像系统设计及其在两相流参数测量中应用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- LIU W F. Design of DSP-based ERT system and its application research for parameter measurement of two-phase flows[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.
- [29] 王明旭, 龙璠, 张洪源. 管链输送机刮板磨损分析与设计[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(6): 53-59.
- WANG M X, LONG J, ZHANG H Y. Analysis and design of scraper wear of pipe chain conveyor[J]. Packaging and Food Machinery, 2021, 39(6): 53-59.
- [30] LIU W L, YAO Y P, GUO X P, et al. Design of horizontal tube chain conveyor scraper pitch[J]. TEM Journal, 2020, 9(4): 1 413-1 418.
- [31] 向星宇, 曹宇飞, 陈锦林. 一种卸料车刮板输送装置的研发[J]. 粮食与饲料工业, 2025(6): 16-19.
- XIANG X Y, CAO Y F, CHEN J L. Research and development of a scraper conveyor for unloading vehicle[J]. Cereal & Feed Industry, 2025(6): 16-19.
- [32] 李腾, 李朋浩, 赵一兵, 等. 基于 PLC 的煤矿刮板输送机自动化控制系统设计[J]. 自动化应用, 2025, 66(7): 64-66, 71.
- LI T, LI P H, ZHAO Y B, et al. Design of automatic control system for coal mine scraper conveyor based on PLC[J]. Automation Application, 2025, 66(7): 64-66, 71.
- [33] 聂云辉. 矿用带式输送机控制系统[J]. 自动化应用, 2025, 66 (1): 98-100.
- NIE Y H. Mine belt conveyor control system[J]. Automation Application, 2025, 66(1): 98-100.

- [34] 万雷. 煤矿机电运输系统自动化技术应用研究[J]. 中国机械, 2025(4): 81-84.
- WAN L. Research on the application of automation technology in coal mine electromechanical transportation system[J]. Machine China, 2025(4): 81-84.
- [35] LI Y R, YANG C J. Domain knowledge based explainable feature construction method and its application in ironmaking process[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2021, 100: 104197.
- [36] 李彦瑞, 杨春节, 张瀚文, 等. 流程工业数字孪生关键技术探讨[J]. 自动化学报, 2021, 47(3): 501-514.
- LI Y R, YANG C J, ZHANG H W, et al. Discussion on key technologies of digital twin in process industry[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(3): 501-514.
- [37] ZHOU H, ZHANG H F, YANG C J. Hybrid-model-based intelligent optimization of ironmaking process[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(3): 2 469-2 479.
- [38] CHEN J, TANG J H, CHEN J. Federated meta-learning framework for few-shot fault diagnosis in industrial IoT[C]// 2022 IEEE Global Communications Conference. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2022: 2 993-2 998.
- [39] 李刚. 气力输送系统和管链输送机在粉料输送中的应用比较[J]. 浙江化工, 2016, 47(8): 45-47.
- LI G. Application and comparison of pneumatic conveying system and pipe chain conveyor in the powder conveying[J]. Zhejiang Chemical Industry, 2016, 47(8): 45-47.
- [40] XU F. Recent advancement in pneumatic conveying for application in feed industry: a review[J]. Advanced Powder Materials, 2024, 3(2): 100157.
- [41] 伍维维, 阮竞兰. FLOVEYOR 钢索管式刮板输送机[J]. 粮食与饲料工业, 2011(4): 6-7.
- WU W W, RUAN J L. FLOVEYOR steel cable pipe scraper conveyor[J]. Cereal & Feed Industry, 2011(4): 6-7.
- [42] 张明环, 任守华, 胡鹏程. 管链式输送机在高大平房仓应用中的设计优化[J]. 现代食品, 2023, 29(19): 21-23.
- ZHANG M H, REN S H, HU P C. Design optimization of pipe chain conveyor in the application of tall bungalow[J]. Modern Food, 2023, 29(19): 21-23.
- [43] 季苏丹. 管链输送机在楼房仓散粮进出仓中的应用[J]. 粮食与食品工业, 2025, 32(4): 14-17.
- JI S D. Application of tube chain conveyor in bulk grain in-and-out of silo building[J]. Cereal & Food Industry, 2025, 32(4): 14-17.
- [44] 周宏. 密闭式管道化物料输送系统的技术体系构建与工业应用研究[J]. 流程工业, 2025(6): 29-31.
- ZHOU H. Construction of the technical system and industrial application research for closed pipeline material conveying systems[J]. Process, 2025(6): 29-31.
- [45] 郝慧英, 李晓岩, 赵菲菲, 等. 管链输送机在预拌粉生产线的应用[J]. 粮食与食品工业, 2023, 30(3): 36-38.
- HAO H Y, LI X Y, ZHAO F F, et al. Application of pipe chain conveyor in pre: mix flour production line[J]. Cereal & Food Industry, 2023, 30(3): 36-38.
- [46] 席建伟. 刮板输送机链轮和圆链轮结构优化研究[J]. 机械管理开发, 2024, 39(1): 80-82.
- XI J W. Research on the optimisation of scraper conveyor sprocket and round sprocket structure[J]. Mechanical Management and Development, 2024, 39(1): 80-82.
- [47] 李志军. 管链输送机故障分析与技术改进[J]. 通讯世界, 2023, 30(12): 112-114.
- LI Z J. Fault analysis and technical improvement of tubular chain conveyor[J]. Telecom World, 2023, 30(12): 112-114.
- [48] OLANREWAJU T O. Design and fabrication of a screw conveyor[J]. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal, 2017, 19(3): 156-162.
- [49] KHOBOTOV E N. Models of equipment selection for modernization of enterprises with conveyor assembly of products[J]. Automation and Remote Control, 2024, 85(10): 906-918.
- [50] 朱林枫, 刘晓鹏, 张永林, 等. 不同种类大米颗粒的离散元仿真参数标定[J]. 食品与机械, 2025, 41(10): 67-74.
- ZHU L F, LIU X P, ZHANG Y L, et al. Calibration of discrete element simulation parameters for different kinds of rice grains[J]. Food & Machinery, 2025, 41(10): 67-74.
- [51] 杨勇, 周龙, 范吉军, 等. 基于CFD-DEM耦合的碾米颗粒运动模拟与方法研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(1): 64-71.
- YANG Y, ZHOU L, FAN J J, et al. A motion simulation method for rice particles during the milling process based on CFD-DEM coupling[J]. Food & Machinery, 2026, 42(1): 64-71.
- [52] 王敏娜, 陈林涛, 马旭, 等. 基于离散元法的料仓稻种颗粒沉降特性与力链演化分析[J]. 食品与机械, 2026, 42(4): 43-58.
- WANG M N, CHEN L T, MA X, et al. Analysis of particle settlement characteristics and force chain evolution of rice seeds in silo based on discrete element method[J]. Food & Machinery, 2026, 42(4): 43-58.