

# 高效柔性管链式输送设备的设计与仿真分析

## Design and simulation analysis of high-efficiency flexible pipe chain conveying equipment

王震民<sup>1</sup>李永祥<sup>1</sup>王明旭<sup>1</sup>王怀庭<sup>2</sup>WANG Zhen-min<sup>1</sup> LI Yong-xiang<sup>1</sup> WANG Ming-xu<sup>1</sup> WANG huai-ting<sup>2</sup>

(1. 河南工业大学, 河南 郑州 450001; 2. 河南九域博大实业有限公司, 河南 郑州 450051)

(1. Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. Henan Jiuyu Boda Industrial Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450051, China)

**摘要:**针对现有的管链输送设备存在效率较低,清扫物料残渣时难度较大的问题。运用模块化集成设计理念,采用理论分析与仿真模拟相结合的方法,设计出带有清扫装置的柔性管链式输送设备。采用 SolidWorks 三维建模软件将设备各部分构件分块建模,并进行虚拟装配,以保证结构设计合理,确保管链输送设备可以完成输送物料、清理残渣的功能。运用 ANSYS 仿真软件,对输送设备的关键构件进行仿真分析。仿真结果表明,所设计管链输送设备在完成输送物料的同时实现对物料残渣的清理。

**关键词:**管链输送;清扫装置;模块化;高效清理

**Abstract:** Using the integrated design concept and a combination of theoretical analysis and simulation, a high-efficiency and flexible pipe chain conveyor with cleaning devices is designed. SolidWorks 3D modeling software is used to model each part of the equipment in blocks, and virtual assembly is carried out to ensure that the design structure is designed reasonably, and that the pipe chain conveyor equipment can complete the functions of conveying materials and cleaning up residue. The simulation results show that the designed pipe chain conveying equipment completes the conveying of materials while the real simulation software simulates and analyzes the key components of the conveying equipment, which verifies the rationality of the design.

**Keywords:** pipe chain conveyor; cleaning device; modular; efficient cleaning

在粮食运输、仓储等过程中,传统的输送设备存在加料和卸料位置较为单一,清理物料残渣效率低下等问题,

而管链机是连续性输送设备,输送的空间角度比较灵活,效率更高,且可实现三维输送<sup>[1-3]</sup>。但现有管链输送设备在输送黏附性物料时,存在附着物料的问题,如不及时清理,残余物料进入下一个输送环节,会使管链机的工作效率降低,降低管链机稳定性,甚至会减少设备的使用寿命<sup>[4-6]</sup>。研究<sup>[7]</sup>发现,此类黏附性物料清理难度大,而已有的清扫设备的清理效率较低,不能有效完成清扫工作。

管链机作为新型物料输送设备,输送物料适用性强,能实现空间内任意角度多种物料的封闭连续输送,可替代刮板机<sup>[8-9]</sup>、带式输送机等传统输送设备,被广泛应用于冶金、化工、建筑、粮食运输等行业<sup>[10]</sup>。但目前,针对于管链输送设备清扫装置的研究较少,谢华昆<sup>[11]</sup>针对化工产业中,物料回收时存在大量扬尘的问题,通过一种集成技术,设计了一种集成清扫设备应用于化工行业的输送系统;王庆杰等<sup>[12]</sup>针对农机播种时存在杂质,影响播种质量的问题,研究出一种适用于螺旋输送系统的清理装置,提高了螺旋输送行业的清理效率;苏冠明<sup>[13]</sup>针对空调通风管道容易堵塞导致通风效果下降的问题,设计出一种适用于矩形通风管道的清扫装置,且至今还未见高效的适用于管链输送机的清扫装置的相关研究报道。

试验拟设计一种新型高效柔性管链输送设备,设备整体采用模块化设计理念,分为进料模块、多点卸料模块、输送模块、自动清理模块等,各模块之间采用法兰连接,装配更灵活,后期设备维修、更换零部件等工作更方便。采用 SolidWorks 三维建模及虚拟装配,对产品设计的装配可行性进行分析验证。运用 ANSYS 有限元分析软件,对设备的主要部件进行力学分析,确保设计的可靠性,以期对管链输送行业提供借鉴。

### 1 管链式输送设备的整体设计及工作原理

管链式输送设备整体模型如图1所示。从动轮模块

基金项目:河南省重点科技攻关项目(编号:182102210096)

作者简介:王震民,男,河南工业大学在读硕士研究生。

通信作者:王明旭(1982—),男,河南工业大学副教授,硕士生导师,博士。E-mail:wmx20032002@163.com

收稿日期:2020-02-25

固定在尾部支架上,主要负责传动装置的转换,调节链条的张紧程度;主动轮模块固定在头部支架上,为输送设备提供动力;从动轮模块的输出端连接入料模块的输入端,输料管道的输出端接自动卸料模块的输入端,之后连接管链机主动轮模块的输出端,之间用法兰连接,方便后期的拆卸与维修。所设计的自动清理装置位于管链机输送段最后工位,在保证物料可经卸料工位运输到既定位置的同时,又可充分地完成了对残余物料的清扫工作,提高清扫效率。输料管道部分采用两个半弯管配合连接的方式,便于管链机进行后期拆卸检修维护。

根据管链机本身的结构特点,结合相关文献<sup>[14]</sup>可以推出管链机的体积效率及体积产量公式,以便后续管链机清扫装置的清扫效果公式的推导与验证。

管链机的体积效率<sup>[15]</sup>计算公式:

$$\eta_v = \frac{V - V_{ks}}{V}, \quad (1)$$

式中:

$\eta_v$  —— 管链机的体积效率, %;

$V_{ks}$  —— 链条和链板的体积,  $\text{m}^3$ ;

$V$  —— 输送管道内部的体积,  $\text{m}^3$ 。

管链机的体积效率取决于管链机链板的间距,以及链板与链条的尺寸,通常体积效率为 0.89~0.96<sup>[16]</sup>。

管链机的体积产量<sup>[17]</sup>计算公式:

$$I_v = \eta_F \eta_v A v_k = \eta_F \eta_v \frac{\pi d^2}{4} v_k, \quad (2)$$

式中:

$I_v$  —— 管链机的体积产量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

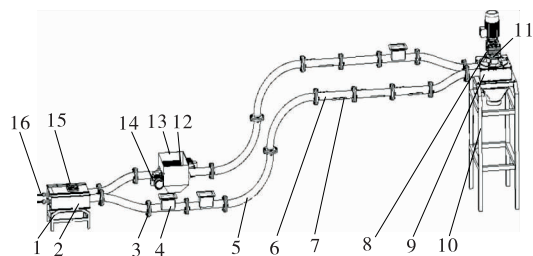
$\eta_F$  —— 输送效率, %;

$\eta_v$  —— 体积效率, %;

$v_k$  —— 输送速度,  $\text{m/s}$ ;

$A$  —— 管道面积,  $\text{m}^2$ ;

$d$  —— 管道内部直径,  $\text{m}$ 。



1. 从动模块支架 2. 固定箱体 3. 连接法兰 4. 上料口 5. 输送弯管 6. 卸料管 7. 卸料挡板 8. 驱动电机 9. 箱体 10. 支架 11. 减速器 12. 清扫刷 13. 收集料斗 14. 伺服电机 15. 轴承座 16. 张紧螺栓

图 1 管链式输送装备整体装配图

Figure 1 Overall assembly drawing of pipe chain conveyor equipment

## 2 管链式输送设备主要模块设计

### 2.1 驱动模块

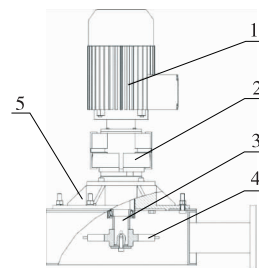
驱动模块的作用是为自动化管链输送设备提供动力,其结构如图 2 所示。伺服电动机固定在管链机驱动模块上方的电机座上。伺服电机与电机座之间装有减速器,减速器的输入端接电动机的输出端,减速器的输出端接管链输送设备头部部装的输入端。管链输送设备头部部装内部设置有传动轴、传动链轮,传动链轮的中心固定设置于传动轴上,传动轴的顶端与减速器的输出端相连接,输出位置配有检测装置,用来检测输料管道中介质的流量大小和流速,防止流速或流量过大造成管链输送设备的过度磨损。

### 2.2 从动模块

管链机从动轮模块包括支撑箱体、张紧机构等,其结构如图 3 所示。张紧机构和链板位于箱体上方,驱动轴位于箱体内部,轴承座、链轮和链板位于箱体底部。链轮与链板相连接,链轮的中心固定于驱动轴上,轴承座与驱动轴连接。在箱体内部位于管链机尾部部装的输出端设置有连接位,连接输料管将箱体中的介质输出。管链机尾部部装由张紧螺栓与输料管道紧固连接,用来调节连接处的张紧度。

### 2.3 自动卸料装置

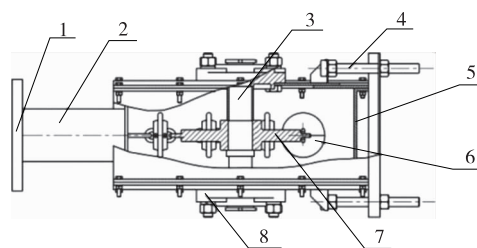
自动卸料装置如图 4 所示。该装置左右两端各有一个连接法兰,可在输料管不同位置接入,实现多点自动卸



1. 伺服电机 2. 减速器 3. 传动轴 4. 传动链轮 5. 电机座

图 2 管链机驱动模块

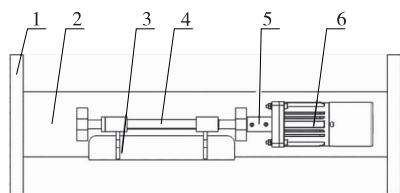
Figure 2 Pipe chain drive module



1. 连接法兰 2. 输料管 3. 驱动轴 4. 张紧螺栓 5. 箱壁 6. 链板 7. 链轮 8. 轴承座

图 3 管链机从动模块

Figure 3 Pipe chain machine driven module



1. 连接法兰 2. 输料管 3. 卸料挡板 4. 方形转轴 5. 联轴器 6. 电机

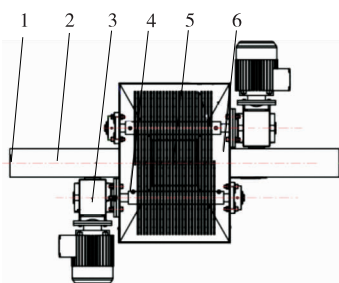
图 4 管链机自动卸料装置

Figure 4 Automatic unloading device of pipe chain machine

料,以提升卸料效率,并且卸料工位可根据实际需要自行调整,灵活度较高。当输送物料到达卸料位时,电机转动,带动方形转轴,打开卸料挡板,输料管内的物料在重力作用下,在对应的下料口卸出。当该位置不需要卸料时,电机转动,带动方形转轴反向转动,闭合卸料挡板,输送管内的物料即可继续向前输送。卸料时根据实际情况选择不同的卸料口,既能提高卸料工位的选择性,又可实现多个卸料口同时卸料,提高卸料效率。

#### 2.4 清扫装置设计

清扫装置的主要作用是在物料经管链输送设备到达卸料位后,对链板、链条上附着的残余物料进行清扫作业,并收集残余物料,避免残余物料影响输送设备的稳定性以及输送物料的质量。如图 5 所示,清扫装置主要由余料收集器、清扫器以及传动部分组成。其中传动部分由清扫轴、轴承支架、伺服电机、清扫轴承组成。清扫毛刷固定在清扫轴上,清扫轴通过轴承与轴承支架固定在清扫区外壳上,清扫电机通过换向器为清扫装置提供动力,为保证清扫效果,采用两个毛刷对称分布的布局。链板、链条由管道经过清理装置时,一侧伺服电机首先带动清扫毛刷转动,迅速将链板和链条上的附着物料清理掉,落入漏槽,进入下方余料收集装置中。在输送大量物料时,设备的运输速度会有所提升,随着输送设备输送速度增加,链板链条上的残余物料附着程度也会逐渐增加,根



1. 连接法兰处 2. 输送管 3. 驱动电机 4. 链板、链条 5. 毛刷 6. 漏槽

图 5 自动清理装置示意图

Figure 5 Schematic diagram of automatic cleaning device

据物料粘附程度,设定速度阈值,在管链机输送速度达到既定阈值时,速度检测装置输出信号,控制清扫装置尚未启动的伺服电机开始带动清扫毛刷进行清扫工作,清理过程无需人工干预,提高了设备的工作效率。由于管链机输送物料的多样性,在进行清理工作时受输送物料种类、物料状态影响,清扫效果有所不同,可根据实际情况调整毛刷的清扫圈数来达到最优的清扫效果。

### 3 管链式输送设备关键部件仿真分析

#### 3.1 仿真参数

根据实际情况,将链轮、链节材料属性选为 45 # 钢,在 ANSYS Workbench 材料库中选择 Structural steel,结合国内外相关文献<sup>[18]</sup>及软件内置 GEMM 数据库,对材料离散元仿真参数进行设置,各仿真参数的取值:弹性模量  $E=210 \text{ GPa}$ ,剪切模量  $G=70 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\mu=0.269$ ,材料密度  $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$ ,安全系数  $n=1.34$ 。根据管链机实际工作情况,对仿真构件定义约束并施加稳态的惯性力、外部施加的作用力、温度载荷及位移载荷。

#### 3.2 仿真模型

运用 SolidWorks 三维建模软件,建立传动装置链轮、链条以及清扫轴三维模型(图 6),将模型导入 ANSYS 中划分网格,并进行仿真。

#### 3.3 传动构件的仿真分析

通常管链输送设备产生的故障缘于链轮、链条构件,而主动轴是传动模块最主要的构件之一,故对主动轴、链轮及链条进行仿真分析。运用 ANSYS 仿真软件,对所设计的管链输送设备传动部分进行仿真分析。

3.3.1 主传动链轮 链轮在转动过程中,受力的齿为上部与链条接触的齿,下部 3 个齿与链条并不接触,不会受到链条的作用力。由图 7 可知,链轮下部 3 个齿应力值最小,颜色显示为蓝色,最大的应力点位出现在与链接触的齿面部位和齿根部位,应力集中主要发生在啮合部位,其最大应力为  $152.91 \text{ MPa}$ ,材料极限应力  $\sigma_s=355 \text{ MPa}$ ,由式(3)可计算许用应力:

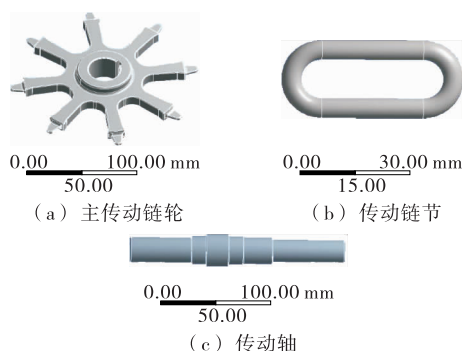


图 6 传动装置链轮、链条及清扫轴的三维模型

Figure 6 Three-dimensional model of transmission sprocket, chain and cleaning shaft

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{S}, \quad (3)$$

式中:

$[\sigma]$ ——许用应力,MPa;

$S$ ——安全系数,取 1.2~1.5。

取  $S$  为 1.34,由式(3)求得许用应力为 264.93 MPa,因此链轮部分可以满足使用要求。

3.3.2 主传动链 由于链条为多个单元链节组成,受力集中在链节间接触的圆弧处,且集中于圆弧内侧,取单个链节进行仿真分析。由图 8 可知,链节内侧应力云图呈红色,可见此处为最大应力集中区域,其最大集中应力为 71.173 MPa,材料许用应力为 269.93 MPa,因此链节部分可满足使用要求。

由仿真结果可知,所设计链轮、链条部分均可满足设计预期,加工时对链轮齿部应进行高频淬火、回火处理,

以保证链轮齿部耐磨性。

3.3.3 主传动轴 分析结果如图 9 所示,在主传动轴轴肩位置应力云图颜色介于深黄色与红色之间,因此应力主要集中在该部位,其所承受的最大应力为 114.75 MPa,远小于材料的许用应力 269.93 MPa,因此该构件可满足使用要求,故由仿真结果可得所设计的清扫装置能够满足要求。

## 4 结论

在传统输送装置基础上,基于模块化设计思想设计了一种高效柔性管链式输送设备。仿真结果表明,设计的高效柔性管链输送设备清扫装置解决了传统输送装置加料、卸料位置单一,输送空间不灵活的问题,可实现多点加料、卸料,能够自动有效地清理运输物料残渣,可以降低设备的清扫难度,提高管链输送设备的输送效率及

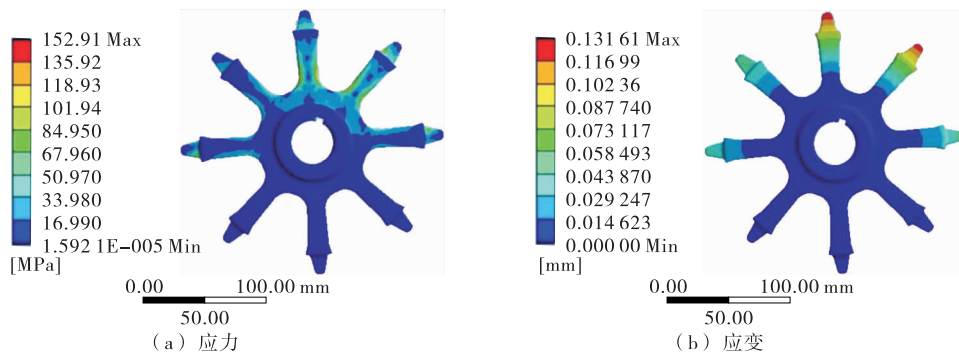


图 7 主传动链轮的应力和应变图

Figure 7 Stress and strain diagram of the main drive sprocket

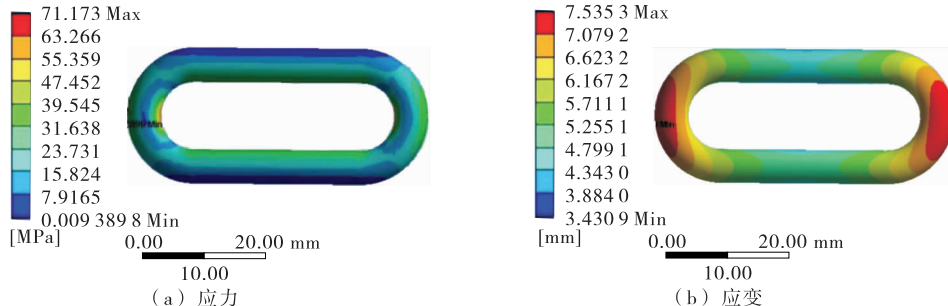


图 8 主传动链链节的应力和应变图

Figure 8 Stress and strain diagram of main drive chain links

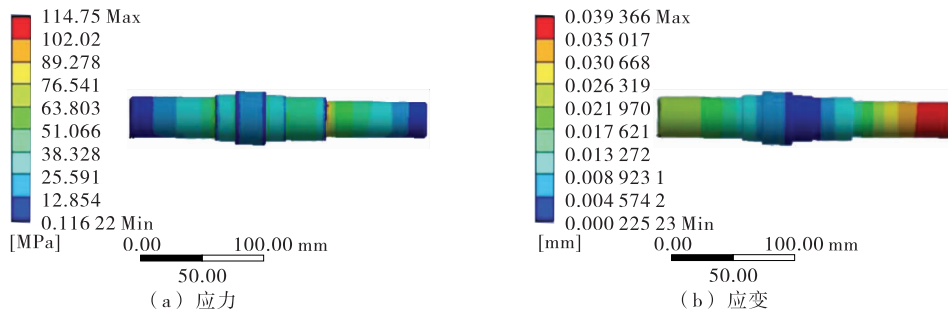


图 9 主传动轴的应力和应变图

Figure 9 Stress and strain diagram of the main drive shaft

(下转第 96 页)

强弱以及所呈现出来的特征。根据其特性提出了改进加热管形状和加强对流换热方式对温度场的均匀性的影响是正面的。同时,基于对烤箱内部流场的分析,拟合出了烤箱内部气流在通过后部挡风板时的分布规律,根据其规律推导出表征风量分配的计算公式。根据此公式设计了新型挡风板。对改进挡风板前后的烤箱进行仿真,得到其升温过程的最大温差数据。对比结果表明,改进后的挡板能显著提升烤箱的温度均匀性。后续仿真时可以进行负载烤箱的仿真,并考虑食物在烘焙过程中水分的蒸发,从而使仿真工况更接近实际工况。

### 参考文献

- [1] 袁宏, 吴大转, 秦世杰, 等. 强制对流烤箱温度场特性及其优化研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(6): 73-78.
- [2] 顾明敏, 杨哪, 徐学明. 感受器辅助微波烘焙的面包性质研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(24): 92-96.
- [3] MISTRY H, GANAPATHISUBBU S, DEY S, et al. A methodology to model flow-thermals inside a domestic gas oven[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(1): 103-111.
- [4] 程丽丽. 草莓保鲜运输中强制通风预冷与温度分布的相关性[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 151-154.
- [5] 余冰妍, 邓力, 程芬, 等. 基于多孔介质热/质传递理论的流体—颗粒食品热处理数值模拟研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 209-215.
- [6] 张汝怡, 李锋, 焦阳. 基于三维扫描和射频加热的食品升温过程模拟[J]. 食品与机械, 2019, 35(7): 39-44.
- [7] 虞文俊, 吴瑞梅, 李红, 等. 基于 Fluent-EDEM 耦合的茶叶

红外杀青机滚筒内流场数值模拟[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 104-109, 120.

- [8] 项琳琳, 刘东, 任悦, 等. 某烤箱内腔温度场均匀性的优化研究[J]. 建筑热能通风空调, 2016, 35(2): 45-48, 87.
- [9] 王璟, 刘东, 项琳琳. 某烤箱不同运行阶段内部的传热机理研究[J]. 节能技术, 2015, 33(6): 539-545.
- [10] 张蓝心, 刘东, 项琳琳. 不同运行模式下烤箱内腔温度场的优化研究[J]. 建筑热能通风空调, 2015, 34(3): 33-35, 16.
- [11] 顾思源, 刘东, 项琳琳. 影响烤箱内腔温度场均匀性的关键因素分析[J]. 建筑热能通风空调, 2015, 34(2): 54-58.
- [12] 姚靖, 王振华, 尹访宇, 等. 关于烤箱加热的传热模型及器皿最优形状选择问题的研究[J]. 西安文理学院学报(自然科学版), 2014, 17(1): 77-82.
- [13] 李保强, 任天平, 刘玲玲. 模糊自适应 PID 在叶腊石烤箱温度控制中的应用[J]. 机械设计与制造, 2010(12): 77-78.
- [14] 田松涛, 高振江. 基于 Fluent 的气体射流冲击烤箱气流分配室改进设计[J]. 现代食品科技, 2009, 25(6): 612-616.
- [15] CHHANWAL N, INDRANI D, RAGHAVARAO K, et al. Computational fluid dynamics modeling of bread baking process[J]. Food Res Int, 2011, 44(4): 978-983.
- [16] KOKOLJ U, SKERGET L, RAVNIK J. A numerical model of the shortbread baking process in a forced convection oven[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111(1): 1 304-1 311.
- [17] PINELLI M, SUMAN A. Thermal and fluid dynamic analysis of an air-forced convection rotary bread-baking oven by means of an experimental and numerical approach[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 117(5): 330-342.

(上接第 81 页)

输送物料的品质。后续将针对实体样机开展试验探究,以进一步验证设备的有效性及其可靠性。

### 参考文献

- [1] 陈洪亮, 李申岩, 刘玲, 等. 露天矿端帮自移式大倾角输送设备结构形式的研究[J]. 煤矿机械, 2019, 40(6): 149-151.
- [2] 齐梦学, 车新宁, 李秀云. 复合式大倾角皮带机在地铁施工中的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2019(9): 1 530-1 536.
- [3] 李荣隆, 龙飞帆, 骆燕, 等. 定点落料输送机轻量化设计与试验[J]. 机械设计与制造, 2019(8): 131-134.
- [4] 左青, 左晖. 国产大型输送设备改进[J]. 中国油脂, 2017, 42(1): 156-160.
- [5] 何柏岩, 孙阳辉, 聂锐, 等. 矿用刮板输送机圆环链传动系统动力学行为研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 50-56.
- [6] 左青, 杨伟峰, 张伟春. 大型国产输送设备在油厂的应用[J]. 中国油脂, 2010, 35(10): 61-65.
- [7] 杨鹏民. 国外带式输送机输送带清扫装置[J]. 煤炭科学技术, 2005(8): 7-10.
- [8] 冯伟元, 陈祥伟. 双层埋刮板输送机常见故障分析研究[J]. 中国油脂, 2007, 32(4): 68-69.
- [9] 高昌乐, 闵令江, 林翔. 刮板输送机驱动张力特性分析与仿

真[J]. 煤矿机械, 2019, 40(1): 64-66.

- [10] 徐乃兵, 李光凡. 浅谈通用型埋刮板输送机的选型与设计[J]. 中国油脂, 2007, 32(4): 70-71.
- [11] 谢华昆. 集成清扫技术在硫磺输送系统中的研究与应用[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(6): 92-97.
- [12] 王庆杰, 李洪文, 何进, 等. 螺旋刀型垄台清理装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 109-113.
- [13] 苏冠明. 矩形通风管道清洁机器人机构设计与作业性能分析和仿真[D]. 南京: 东南大学, 2017: 18-27.
- [14] FRIEDRICH Krause, ANDRE Katterfeld. Functional analysis of tube chain conveyors [J]. Particle and Particle Systems Characterization, 2004, 21(4): 348-355.
- [15] KATTERFELD A, WILLIAMS K. Functional analysis of tube chain conveyors, Part 1: General design and calculation principles[J]. Bulk Solids & Powder-Science & Technology, 2008, 3(1): 23-32.
- [16] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 北京工业出版社, 2016: 89-107.
- [17] 杨文武, 马旭, 马瑞峻, 等. 滚筒式毛刷清扫土装置的设计与试验[J]. 农机化研究, 2015, 37(12): 197-200.
- [18] 覃安松. 基于 ANSYS 的旋转轴件静力学分析[J]. 中国设备工程, 2020(10): 121-123.