

# 基于无动力辊子输送机的改进设计与仿真分析

The improved design and simulation study based on unpowered roller conveyor

刘志海 崔鑫龙 柏海龙

LIU Zhi-hai CUI Xin-long BAI Hai-long

(山东科技大学交通学院, 山东 青岛 266590)

(College of Transportation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**摘要:**为了在潮湿的豆腐加工厂房内搬运食品盒,设计了一款气动输送机,由气缸伸缩为整台输送机提供动力。对输送机的基本结构与工作原理进行了说明,出于后期设备改进与控制的需要,推导了输入元件与输出元件之间的速度关系。利用流体力学仿真软件 Flow 3D 对输送机的工作过程进行了仿真试验,验证了其实际可行性。

**关键词:** 气动;输送机;Flow 3D;仿真分析

**Abstract:** Because of the humidity in the tofu factory, a pneumatic conveyor was designed to carry food boxes in the humid factory. The cylinder telescoped to provide power for the whole conveyor. In this study, the basic structure and working principle of the conveyor were described, and the velocity relationship between the input and output components was deduced for the need of equipment improvement and control. The working process of the conveyor was simulated by using the fluid dynamics simulation software flow 3D, which verified its practical feasibility and provided a data reference for the later electro-mechanical control.

**Keywords:** pneumatic; conveyor; Flow 3D; simulation analysis

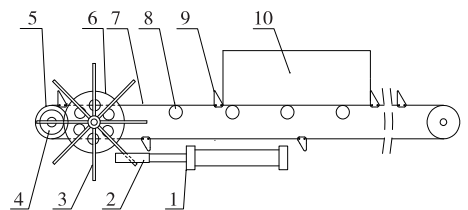
豆腐是一种传统的大豆制品,其制作过程主要包括热处理、凝固、压制和成型<sup>[1]</sup>。目前,在中国的一些中大型豆腐加工厂中,豆浆从磨浆桶转移到点浆机,豆腐脑从点浆机转移到成型机,以及豆腐从成型机转移到储运盒等过程,常见的是先将其装入不锈钢食品盒,然后采用人工搬运或板车运输的方式在厂房内进行转移,费时、费力且效率低下。由于厂房内部环境过于潮湿,为了安全起见,企业经营者们并不推荐使用传统的电动输送机,而是希望能有一款气动输送机来改变现有的工作模式。如今市面上气动输送设备样式繁多,

常熟市百联自动机械有限公司<sup>[2]</sup>设计了一款可应用于服装厂的气动流水线,能通过气缸伸缩来循环搬运周转筐;段华荣等<sup>[3]</sup>设计了一种用于步进输送的气缸输送机构,满足了长物料如拖拉机桥壳类零件的横向步进输送需求;刘建芳等<sup>[4]</sup>设计了一种气动悬浮式非接触自动输送装置,实现了重载物体的非接触输送。但由于这些气动输送设备都是针对特定的作业需求设计,所以根本无法实际应用到豆腐厂中。

基于上述情况,对传统的无动力辊子输送机进行改进,设计了一款新型的气动输送机,该气动输送机通过气缸伸缩,经齿轮链轮将动力传递到链条上,利用固定在链条上的拨块推动食品盒在辊子上移动,从而解决了潮湿厂房中运输难题。本研究对该新型气动输送机的结构原理做了介绍,对食品盒在输送机上的速度变化做了推导,并借助流体仿真软件 Flow 3D 对输送机输送豆浆这一过程进行了仿真,以期为后期输送机的速度控制提供了重要依据。

## 1 结构与工作原理

气动输送机是在传统的无动力辊子输送机的基础上改进设计而来,在保留原有主要结构的基础上增加了一套气动驱动系统。输送机主要由辊子台架、气缸、驱动舵轮、齿轮、链轮、链条等组成(图 1),其中,辊子台架起主要支撑作用,气缸为整台输送机提供动力,并经一系列齿轮、链轮将动力传递到链条上。使用时,将食品盒放置在辊子台架上,使其置于 2 个拨块之间,通过气缸伸缩以利用单向推杆推动驱动舵



1. 气缸 2. 单向推杆 3. 驱动舵轮 4. 齿轮 5. 链轮 6. 齿轮 2  
7. 链条 8. 辊子 9. 拨块 10. 食品盒

图 1 输送机输送原理

Figure 1 Schematic diagram of conveyor

**基金项目:**山东省研究生教育质量提升计划建设项目;山东省教育厅 2017 年研究生导师指导能力提升项目(编号:SDYY17032)

**作者简介:**刘志海(1972—),男,山东科技大学副教授,博士。

E-mail: zhihliu@126.com

**收稿日期:**2018-07-21

轮单向旋转,与驱动舵轮同轴固连的齿轮2将带动与其啮合的齿轮1转动,齿轮1会带动与其同轴连接的链轮转动,链条运动时便可通过固定在上方的拨块推动食品盒在辊子上移动,从而实现对食品盒的运输。根据实际需要,将多台输送机进行首尾拼接便可实现远距离运输。

## 2 食品盒运动速度分析

研究气缸的伸缩速度  $v_q$  与食品盒在输送机上的运动速度  $v_h$  之间的关系对后期相应的设备改进与控制具有重大意义。气缸做直线往复运动,作用区间为点 a 至点 b(图 2),每一次伸缩推动驱动舵轮旋转  $45^\circ$ ,循环往复。假设气缸推杆作用终端从点 a 移动到点 c,推动驱动舵轮旋转过的角度为  $\theta$  ( $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ ),在这一旋转过程中(图 3),可将速度  $v_q$  (m/s) 分解为垂直于杆的  $v_{q1}$  与沿杆的  $v_{q2}$ ,则

$$v_{q1} = v_q \cos(45 - \theta), \tag{1}$$

$$v_{q1} = \frac{2\pi n_1 l}{60}, \tag{2}$$

$$\tan(45 - \theta) = \frac{l - v_q t}{l}, \tag{3}$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} = \frac{d\theta}{dt}, \tag{4}$$

式中:

$n_1$ ——驱动舵轮转速,r/min;

$l$ ——点 O 与点 b 之间的距离,m;

$t$ ——驱动舵轮转过角度  $\theta$  所经历的时间,s;

$\omega_1$ ——驱动舵轮的角速度,rad/s。

由上可推出气缸伸缩速度  $v_q$  与驱动舵轮转速  $n_1$  满足以下关系:

$$n_1 = \frac{30v_q \cos(45 - \theta)}{\pi l}, \tag{5}$$

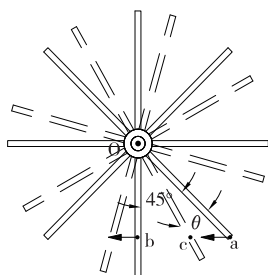


图 2 驱动舵轮旋转示意

Figure 2 Diagram of driving rudder

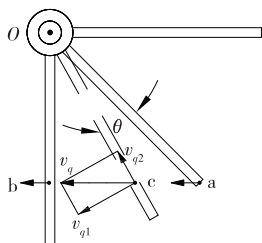


图 3 驱动舵轮速度分析

Figure 3 Analysis of velocity about driving rudder

$$n_1 = \frac{30v_q}{\pi(2l - 2v_q t + \frac{v_q^2 t^2}{l})}. \tag{6}$$

驱动舵轮与齿轮 2 同轴固连,齿轮 1 与链轮同轴固连,齿轮 2 与齿轮 1 相互啮合,则相应的速度关系满足如下:

$$n_2 = n_1, \tag{7}$$

$$n_3 = \frac{n_2}{i}, \tag{8}$$

$$n_4 = n_3, \tag{9}$$

式中:

$n_2$ ——齿轮 2 转速,r/min;

$i$ ——两齿轮之间的传动比;

$n_3$ ——齿轮 1 转速,r/min;

$n_4$ ——链轮转速,r/min。

链轮将动力传递到链条上,不考虑链传动多边形效应的情况,链的平均速度  $v_l$  为<sup>[5]</sup>:

$$v_l = \frac{zn_4 p}{60 \times 1000}, \tag{10}$$

式中:

$z$ ——链轮的齿数;

$P$ ——链条的节距,mm。

食品盒的运动速度  $v_h$  与链条的运动速度  $v_l$  同步,综上所述可得食品盒运动速度  $v_h$  与气缸伸缩速度  $v_q$  关系如下:

$$v_h = \frac{v_q z p \cos(45 - \theta)}{2000\pi l i}, \tag{11}$$

$$v_h = \frac{z p v_q}{2000\pi i (2l - 2v_q t + \frac{v_q^2 t^2}{l})}. \tag{12}$$

针对青岛某豆制品加工厂 A 的实际需求,所设计的输送机数字化样机见图 4。其中输送机部分相关参数见表 1。结合表 1 与式(11)、(12)可得出食品盒运动速度  $v_h$  与气缸伸缩速度  $v_q$  之间的关系为:

$$v_h = 1.4v_q \cos(45 - \theta), \tag{13}$$

$$v_h = \frac{965}{1357 - 7540v_q t + 20944v_q^2 t^2}. \tag{14}$$

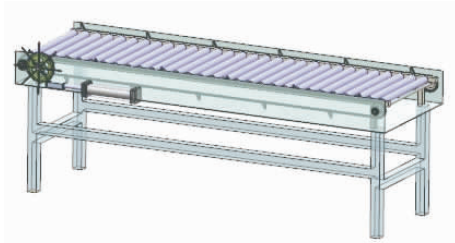


图 4 输送机数字化样机

Figure 4 Digital model machine of conveyor

表 1 输送机部分参数

Table 1 Partial parameters of conveyor

点 O 与点 b 之间的距离 $l$ /m	两齿轮之间的传动比 $i$	链轮的齿数 $z$	链条的节距 $p$ /mm
0.18	0.6	19	50.8

### 3 输送过程仿真

气缸的伸缩速度  $v_q$  影响着输送机的输送效率  $Q$ , 为了提高  $Q$ , 应适当增大  $v_q$ , 当食品盒内盛装的是豆腐或豆腐脑时,  $v_q$  值可以适当增大, 但当食品盒内盛装豆浆时, 为了防止豆浆溅出, 速度不宜过快, 控制好速度才能获得相对更佳的最佳速度, 故利用流体仿真软件 Flow 3D 探讨输送豆浆时的最佳速度, 以便为后期实际应用提供参考。

#### 3.1 流体参数设置及仿真模型建立

Flow 3D 自带的流体数据库中并没有豆浆这一流体, 需新建。豆浆的黏度一般  $>4 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ <sup>[6]</sup>, 密度与水的密度接近<sup>[7]</sup>, 故流体参数黏度一栏中设定黏度为  $4 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ , 密度设为  $1 \text{ g/mL}$  便可满足仿真需求。拟推广应用的加工厂 A 目前所使用的食品盒为  $0.8 \text{ mm}$  厚不锈钢板加工成的长  $520 \text{ mm}$ 、宽  $360 \text{ mm}$ 、高  $160 \text{ mm}$  的长方箱体, 利用 UG 建立好模型后导出 stl 格式文件, 然后将 stl 文件导入到 Flow 3D 中。

当采用 Flow 3D 进行数值模拟时, 网格尺度会直接影响模拟结果<sup>[8]</sup>, 网格尺度越小, 对水流的解析度越高<sup>[9]</sup>, 考虑到计算时间和数据处理量, 决定选用最小结构尺寸  $0.1$  倍的网格尺度模拟结构。在食品盒三维模型内部添加初始流体区域, 完全按照实际加工情况, 令流体上表面低于食品盒上边缘  $3 \text{ cm}$ , 同时在食品盒正下方设置一虚拟平板 Baffles。Baffles 在 Flow 3D 中是没有厚度的孔隙孔板, 用于测量通过某断面的水流流量且完全不影响水流流动<sup>[10]</sup>。本研究利用 Baffles 设置追踪器监测食品盒运动过程中是否有豆浆溅出, 建立的仿真模型见图 5。



图 5 仿真模型

Figure 5 The entity model

#### 3.2 速度参数设置

一般情况下, 气缸的使用速度需  $>40 \text{ mm/s}$ <sup>[11]</sup> 且  $<3 \text{ m/s}$ , 若速度  $<40 \text{ mm/s}$ , 由于气缸的密封、润滑、供气压力、温度等因素产生的不稳定摩擦力影响<sup>[12]</sup>, 气缸活塞可能不会稳定地移动, 时走时停, 出现“爬行”现象, 若速度  $>3 \text{ m/s}$ , 气缸缓冲效果不明显, 寿命会严重缩短<sup>[13-14]</sup>。

为更准确地把握输送豆浆时气缸相对更佳的速度, 令  $v_q$  取值随仿真次数变化如下:

$$v_q = 0.04i, \quad (15)$$

式中:

$i$ ——仿真次数。

即令气缸的速度变化梯度为  $0.04 \text{ m/s}$ , 模拟在不同  $v_q$  取值下, 食品盒以相应速度在输送机上的运动情况, 仿真过程中暂不考虑实际情况下可能由电磁阀或气缸缓冲装置等造成的气缸伸缩换向时的延时以及抖动。其中第 1 次仿真, 当  $v_q = 0.04 \text{ m/s}$  时, 食品盒的移动速度变化如图 6 所示。

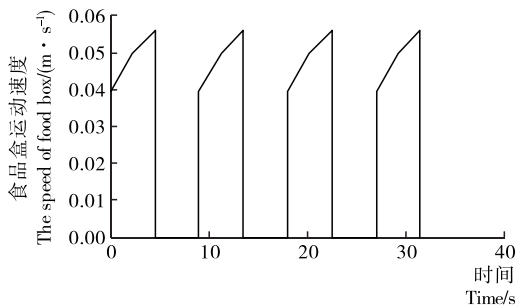


图 6 食品盒运动速度

Figure 6 Speed of food box movement

#### 3.3 仿真结果及分析

Flow 3D 采用 VOF(volume of fluid)方法进行自由表面追踪, 此方法的核心是通过求解流体体积函数的运输方程来重构运动的自由液面, 并将自由液面以分段常数来近似表示<sup>[15]</sup>。前 8 次仿真, 追踪器监测到流经虚拟平板的流量皆为 0, 表明当气缸速度  $v_q$  低于  $0.32 \text{ m/s}$  时, 食品盒内盛装的豆浆不会溅出。第 9 次仿真过程中部分时刻液面活动情况见图 7, 由于食品盒运动速度较快, 导致液面活动剧烈。

追踪器监测到流经虚拟平板的流量统计结果见图 8, 曲线表明从  $2.3 \text{ s}$  左右开始有流体流经虚拟平板, 即气缸的伸缩速度  $v_q$  达到  $0.36 \text{ m/s}$ , 食品盒以相应的速度在输送机上运行时, 食品盒内部的豆浆会溅出。以加工厂 A 目前的实际情况来看, 当食品盒的平均速度  $\geq 0.2 \text{ m/s}$  时便可满足生产节拍, 部分工序速度需求可能更低, 故所设计的气动输送机可以满足加工厂的实际需求。

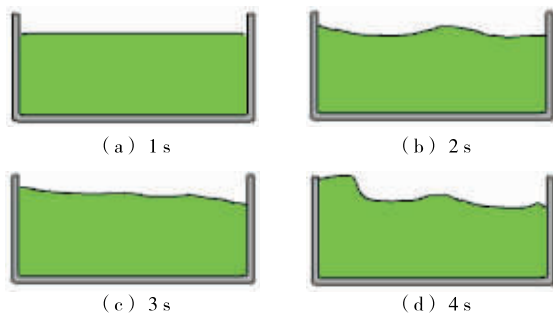


图 7 不同时刻自由液面的活动情况

Figure 7 Activity of free surface at different times

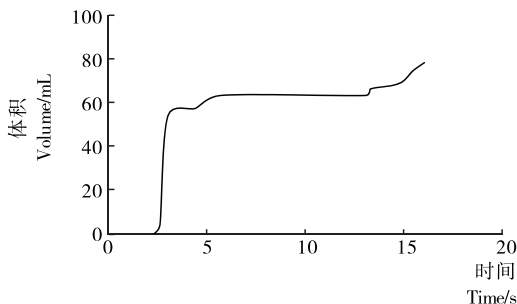


图 8 流经追踪面的流体体积变化曲线

Figure 8 Volume change curve of the fluid flowing through the tracking surface

## 4 结论

(1) 根据加工厂的的实际作业需求,在传统无动力辊子输送机的基础上进行改进,设计了一款气动输送机,由气缸伸缩提供动力,利用固定在链条上的拨块推动食品盒在辊子台架上移动。并且经推导,得出了在气缸伸缩速度一定的前提下,食品盒移动速度与驱动舵轮转角之间的函数关系,函数表明,食品盒移动速度将随驱动舵轮转角增大而增大。整台输送机结构简单,易于制造生产,实现了在潮湿环境下安全输送,具有一定的应用价值。

(2) 结合实际条件,通过 Flow 3D 对输送机输送豆浆这一过程进行了仿真验证和分析。结果表明,该输送机可以保证食品盒在气缸伸缩速度低于 0.32 m/s 时稳定地被输送,满足加工厂的的实际需求。

此次仿真试验仅在食品盒内豆浆体积一定的前提下对输送机输送豆浆时的稳定性做了探讨,为适应不同环境下的需要,后期可针对食品盒不同装载量时的输送情况作进一步探究。

### 参考文献

- [1] 李小雅, 许慧, 江杨娟, 等. 加工工艺对北方豆腐品质特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(6): 261-266.
- [2] 常熟市百联自动机械有限公司. 气动流水线: 中国, 201120412520.5[P]. 2012-07-04.
- [3] 段华荣, 高鸣, 杨启帆, 等. 长物料横向步进输送的气缸驱动机构研制与应用[J]. 拖拉机与农用运输车, 2016, 43(4): 61-66.
- [4] 刘建芳, 陈洪霞, 刘国君. 气动悬浮非接触输送装置的输送性能[J]. 吉林大学学报, 2015, 45(3): 814-819.

(上接第 48 页)

## 4 结论

试验过程中,称量、提取、仪器测定等过程均会引入不确定度。通过分析发现,标准溶液配制过程中使用的移液器和玻璃量器对不确定度的贡献比较大,其次是样品测量的重复性、仪器本身的精密度和标准曲线的拟合引入的不确定度分量。因此实际检测过程中,在兼顾经济成本的情况下,用单标线吸量管或刻度吸管移液对不确定度的降低可能有一定的效果。另外,还可以通过增加标准系列溶液和平行样的测定次数,提高检验者的操作技能,加强仪器的维护保养以提高仪器的灵敏度等方法来减小不确定度,确保检验结果的准确有效。

本研究用气相色谱—质谱法(外标法)测定 3 种塑化剂的回收率比较高,均在 96% 以上,但是 DEHP 的 Z 值为 2.57,属于可疑值,经分析检测全过程并仔细查找原因,认为可能是由仪器瞬间抖动造成。由于 GB 5009.271—2016 的第一法是气相色谱—质谱法(同位素内标法),在以后的工作中,应加强探索内标法和外标法的测量研究,不断提高检验检测技术能力。

### 参考文献

- [1] 王红, 彭瑾, 朱宽正, 等. 白酒塑化剂危害及应对措施[J]. 中国卫生检验杂志, 2014, 24(4): 601-602.
- [2] 郑校先, 俞剑葵, 冉宇舟, 等. 白酒“塑化剂”食品安全风波分析及白酒包装材料问题[J]. 酿酒科技, 2013(10): 62-64.
- [3] 刘仁绿, 连宾. 白酒塑化剂及食品安全分析[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(5): 220-226.

- [5] 程明. 基于 Recurdyn 链传动的仿真与分析[J]. 机械设计, 2013, 30(9): 42-46.
- [6] 董巧, 汪厚银, 欧克勤, 等. 干湿豆浆浆模式下自制豆浆营养与感官品质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(3): 1 109-1 115.
- [7] 王观, 赵莉君, 熊善柏, 等. 豆浆机刀具结构及其力学效应对豆浆品质的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(7): 162-167.
- [8] CORNELISSEN J T, TAGHIPOUR F, ESCUDIÉ R, et al. CFD modelling of a liquid-solid fluidized bed[J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(22): 6 334-6 348.
- [9] 崔贞, 王珊, 傅宗甫, 等. 不同网格尺度对浮体水动力学性能的影响[J]. 水电能源科学, 2016, 34(12): 101-105.
- [10] 王兵, 张凤德, 贺昌海. 基于 Flow-3D 的堤防堵口水力条件数值模拟[J]. 中国农村水力水电, 2017(5): 77-80.
- [11] 钱鹏飞, 陶国良, 刘昊, 等. 基于进口节流调速气缸爬行特性[J]. 浙江大学学报, 2012, 46(7): 1 189-1 194.
- [12] XIE Zhu-gang, TAO Guo-liang. Study on cylinders at very low velocities[C]// Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Fluid Power Transmission and Control (IS-FP' 2003). Wuhan: [s.n.], 2003: 358-361.
- [13] 沈婵, 路波, 惠伟安. 气动技术的发展与创新[J]. 流体传动与控制, 2011(4): 7-10.
- [14] 黄崇溪. 高速气缸动力学与缓冲性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 1-9.
- [15] 靖树一, 王亮, 杜辉, 等. FLOW-3D 在流固耦合数值模拟中的应用[C]// 吴有生, 颜开, 孙宝江. 第十三届全国水动力学学术会议暨第二十六届全国水动力学研讨会文集. 北京: 海洋出版社, 2014: 423-428.

- [4] 沈玮, 张一帆. 白酒中塑化剂来源、危害及检测方法的研究进展[J]. 山东化工, 2017, 46(5): 55-58.
- [5] 赵康, 江小平. GC-MS 法测定塑料包装材料中 DBP 含量的不确定评估[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(2): 103-105.
- [6] 马荣山, 韩营, 王凤兰, 等. 白酒酿造过程中塑化剂来源分析[J]. 食品科学, 2015, 36(20): 242-246.
- [7] 李静, 胡继贯, 陈蓉. 白酒中塑化剂检测方法的分析[J]. 食品与发酵科技, 2017, 53(1): 111-114.
- [8] 应全红, 王霓, 白德奎, 等. 白酒中塑化剂 GC-MS 检测方法的研究[J]. 中国酿造, 2013, 32(11): 136-138.
- [9] 汪龙, 田明慧, 林亲录, 等. 白酒中塑化剂的检测方法与控制策略[J]. 食品工业科技, 2013, 34(11): 384-387
- [10] 徐皓, 唐莹, 司冠儒, 等. 白酒中塑化剂检测方法的分析研究[J]. 酿酒, 2015, 42(1): 111-114.
- [11] 宁霄, 金绍明, 梁瑞强, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法测定猪肉中  $\beta$ -受体激动剂残留量的不确定度分析[J]. 食品科学, 2017, 38(6): 315-320.
- [12] 高家敏, 曹进, 丁宏. 超高效液相色谱-串联质谱法测定化妆品中地塞米松含量的不确定度分析[J]. 中国药师, 2018, 21(3): 539-543.
- [13] 刘佳, 毛新武, 王成龙, 等. 气相色谱-三重四极杆质谱法测定蔬菜中氟虫腈残留量的不确定度评定[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(1): 74-80.
- [14] 孟繁磊, 李刚, 蔡玉红, 等. UPLC-MS/MS 法测定花生中黄曲霉毒素的不确定度评定[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(7): 154-159.
- [15] 李小霞, 石潇璇, 周丹, 等. 气质联用仪测定白酒中氨基甲酸乙酯的不确定度的评定[J]. 酿酒, 2018, 45(2): 111-115.