

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.015

在线近红外饲料品质监测平台设计与试验

金楠 常楚晨 王红英 陈媛媛 方鹏

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为实现在线近红外技术在饲料生产线上的有效应用,设计了一种针对非接触式近红外探头的在线饲料监测平台,该平台安装于斗式提升机与旋转分配器之间的下料溜管处,通过平台内部加入挡板结构、形成集料空间,影响饲料颗粒的运动轨迹,降低料流速度,提高料流的均匀稳定性。基于平台的几何结构参数构建了 EDEM - Recurdyn 耦合仿真模型,以在线近红外饲料监测平台的方管长度、方管宽度、固定挡板角、固定挡板长度为试验因素,以饲料颗粒在平台内的平均速度和变异系数为评价指标,进行了四因素三水平正交试验。试验和极差分析表明,方管宽度对饲料料流速度和均匀度特性的影响最显著;平台结构参数的最优方案为:方管长度 850 mm、方管宽度 250 mm、固定挡板角 20°、固定挡板长度 180 mm,此时饲料颗粒的平均速度为 0.87 m/s,变异系数为 5.32%。通过样机试验验证了仿真优化结果的有效性,该平台可连续获得满足在线分析要求的近红外光谱曲线。

关键词: 饲料; 在线近红外; 监测平台; 仿真; 离散元法

中图分类号: S816.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)07-0129-09

OSID:



Design and Experiment of Online Near-infrared Feed Quality Monitoring Platform

JIN Nan CHANG Chuchen WANG Hongying CHEN Yuanyuan FANG Peng

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to realize the effective application of online near-infrared technology in feed production line, an online monitoring platform for non-contact near-infrared probe was designed. The platform was installed at the delivery chute between the bucket elevator and the rotary distributor. The aggregate space formed by the baffle structure was added inside the platform to affect the trajectory of the feed particles, so as to reduce the speed of the feed flow and improve the uniform stability of the feed flow. The EDEM - Recurdyn coupling simulation model was constructed based on the geometric structure of the platform. Taking the length of square tube, width of square tube, fixed baffle angle, and length of fixed baffle as influencing factors, and the mean velocity and coefficient of variation of feed particles in the online near-infrared monitoring platform as evaluation indicators, a four-factor and three-level orthogonal test was carried out. The range analysis results of orthogonal test showed that the width of the square tube had the most significant influence on the feed flow velocity and uniformity characteristics. The optimal scheme for the platform structure parameters could be obtained under the condition that the length of square tube was 850 mm, width of square tube was 250 mm, fixed baffle angle was 20°, and length of fixed baffle was 180 mm. In this case, the mean velocity of feed particles was 0.87 m/s and the coefficient of variation was 5.32%. The effectiveness of simulation optimization results was verified through prototype tests. The platform could continuously obtain near-infrared spectral curves meeting the requirements of online analysis.

Key words: feed; online near-infrared; monitoring platform; simulation; discrete element method

收稿日期: 2020-05-11 修回日期: 2020-06-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0500600)

作者简介: 金楠(1993—),男,博士生,主要从事饲料加工工艺技术与装备研究,E-mail: jinnan2016@163.com

通信作者: 王红英(1966—),女,教授,博士生导师,主要从事饲料加工工艺及畜禽养殖技术与装备研究,E-mail: hongyingw@cau.edu.cn

0 引言

在保证饲料原料品质的前提下,科学、合理的饲料配方及在饲料加工过程中实现饲料配方的保真是饲料生物学效价的重要保证^[1]。传统的饲料品质监测采用人工取样、离线分析的方式,其耗费时间长、操作步骤多,且存在漏检的不合格产品,对指导、调整饲料配方具有滞后性^[2]。采用在线近红外监测技术可实时、快速检测饲料原料及产品的营养成分,动态调整饲料原料的配制,以实现精准营养和既定配方的保真加工。

近红外光谱分析是一种快速、无损的检测技术,已在食品、农业、制药、烟草、化工等领域得到了广泛应用^[3-9]。文献[10-14]研究表明,近红外在定量分析饲料粗蛋白、粗纤维、氨基酸、水分等成分和饲料掺假等品质方面的研究已相对成熟。而关于在线近红外饲料品质监测方面的研究还相对较少,目前尚处于探索应用阶段。文献[15]结合远程反射光纤与近红外技术测量了饲料的粗蛋白、醇提取物和粗纤维,为使用长距离光纤传输实现对饲料原料工厂化的在线分析提供了重要依据。文献[16]在豆粕加工生产线上安装了在线近红外探头,建立了近红外定量分析模型,并评价其预测效果。文献[17]将实验室近红外模型转移到饲料生产企业进行在线应用,定量分析豆粕的含水率和粗蛋白含量。文献[18]配合使用100 m 光纤近红外探头采

集了静态和动态的蛋白饲料原料近红外光谱,结果表明,100 m 光纤探头不影响定量分析模型的预测精度和准确度。目前,在线近红外光谱的有效获取极大地限制了在线近红外监测技术在饲料生产线上的应用,主要表现为生产线上饲料流动速度快,在近红外探头处料流不均匀,且料层厚度未达到监测要求,导致监测时产生光程不定和光散射效应,获取的光谱不连续、存在较大噪声和误差。

为实现在线近红外技术在饲料生产线上的应用,本文设计一种在线近红外饲料监测平台,以降低饲料料流速度,提高料流的均匀稳定性,满足在线近红外监测光谱获取的要求。基于平台的几何结构参数构建 EDEM - Recurdyn 耦合模型,通过正交试验仿真模拟饲料颗粒在平台内的运动状态,确定平台结构参数的最优方案,并在此基础上完成样机试验。

1 在线近红外监测平台设计

1.1 在线近红外监测设备及位点布局

如图1所示,饲料生产工艺流程主要包括原料的接收清理、粉碎,配料,混合,调质制粒,冷却,成品的包装及发放等工序^[19]。经过粉碎的饲料原料由斗式提升机提升后由溜管输送至旋转分配器,根据原料种类和品质配送到各配料仓,近红外探头安装于斗式提升机与旋转分配器之间的下料溜管处,原料分仓前进行饲料营养物质的成分分析和品质监测。

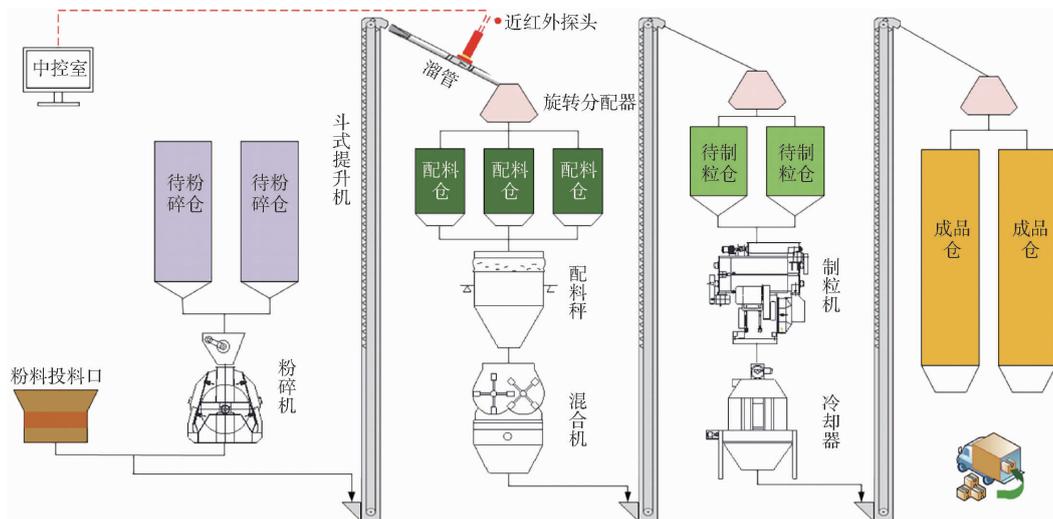


图1 饲料生产工艺流程及在线近红外监测平台布置

Fig. 1 Feed production flowsheet and layout of online near-infrared monitoring platform

在线近红外设备要与生产线的生产状况、产能等相匹配,并确保足够的量程和测量范围。在线近红外设备主要包括傅里叶变换非色散型和滤光片色散型两类。本文采用 Matrix - F 型在线傅里叶变换近红外光谱仪(布鲁克仪器有限公司,德

国),其具有信噪比高、重现性好、扫描速度快等特点,波数范围为 $12\ 000 \sim 4\ 000\ \text{cm}^{-1}$,波数精度优于 $0.1\ \text{cm}^{-1}$,在线获得的饲料样品光谱信息数据通过光纤传输至位于中控室的主机,实时分析结果数据。

1.2 在线近红外监测平台结构和工作原理

饲料生产线上的下料溜管通常为圆形管,斗式提升机卸料后,饲料在溜管中下落速度快,料流不均匀且厚度未达到监测要求,导致光程不定且存在光散射效应,获得的光谱不连续、噪声大并存在明显误差,对饲料成分的预测精度产生极大影响^[20]。因此,需要设计用于搭载在线近红外探头的监测平台。

图2为本文设计的在线近红外监测平台结构图,整体为方形管状结构,一方面便于近红外探头的安装,另一方面增大饲料流道的横截面积可降低料流速度;在方形管道内壁焊装2个呈一定角度对称缩口的固定挡板,料流在输送过程中撞击到挡板改变料流方向并降低料流速度;活动挡板通过活动轴覆盖安装在固定挡板上,根据饲料的流量上下浮动仿形,加强集聚效应的同时防止料流堵塞。应用时将整个平台嵌入焊接于截断的圆形溜管段的适当位置。

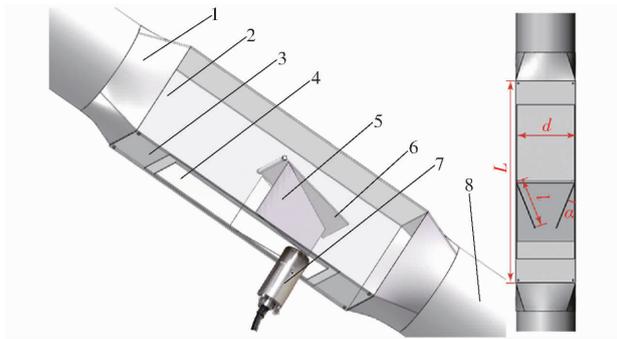


图2 在线近红外监测平台结构图

Fig. 2 Structure of online near-infrared monitoring platform

1. 方圆过渡曲面 2. 方形管 3. 盖板 4. 探头安装板 5. 固定挡板 6. 活动挡板 7. 近红外探头 8. 圆形溜管

圆形溜管与方形管过渡段长度为100 mm,且受限于平台在饲料生产线溜管上的安装工况,方管长度 L 不得长于1 000 mm,因此确定方管长度范围为700~1 000 mm。由于圆形溜管直径为250 mm,为实现饲料颗粒的降速和流通顺畅,方管宽度 d 需大于圆形溜管直径,确定其尺寸范围为250~350 mm。挡板组是平台内的核心结构,包括固定挡板和活动挡板,如图3所示,为形状近似漏斗状的集料空间。固定挡板形状设计为直角梯形,直角边紧贴于盖板壁面,根据生产线饲料走料量确定梯形上底边长度为150 mm、下底边长度为80 mm,固定挡板角 α 和长度 l 根据近红外探头直径80 mm确定尺寸范围分别为 $18^\circ \sim 22^\circ$ 、180~240 mm。活动挡板自固定挡板上底边至下底边完整覆盖,其长度 s 的计算式为

$$s = \frac{l \cos \alpha}{\cos \beta} = \cos \alpha \sqrt{(150 - 80)^2 + l^2} \quad (1)$$

式中 β ——活动挡板与盖板平面夹角, ($^\circ$)

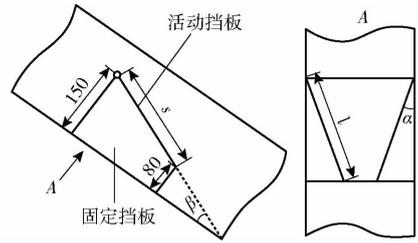


图3 挡板组结构示意图

Fig. 3 Schematic of baffle group

为防止活动挡板与方形管壁的摩擦,活动挡板宽度略小于方管宽度,为 $d - 10$ mm。

本文所设计的在线近红外饲料监测平台,通过在方管内部加入挡板结构来影响粉碎后饲料的运动轨迹,把料流在圆形溜管中的无序自由落体运动,改变为在挡板形成的近似漏斗结构空间内的集料输送,降低料流速度、提高料流的均匀稳定性,将原本分散的饲料颗粒集中于近红外探头安装位置。

2 在线近红外监测平台 EDEM - Recurdyn 仿真模拟

2.1 离散元接触模型选取

颗粒离散元接触模型是包含颗粒运动信息的一系列方程,颗粒碰撞时产生相互作用力,在颗粒接触点处产生重叠量,以此反映颗粒的运动过程,EDEM仿真主要解决颗粒间接触力的计算迭代问题^[21]。鉴于粉碎后的饲料颗粒含水率较低、形状较规则,且颗粒间不发生黏附作用,因此本文选取 Hertz - Mindlin 接触模型,如图4所示,假设颗粒 i 与颗粒 j 间的接触力为非线性,将接触力和阻尼分解为法向和切向^[22]。

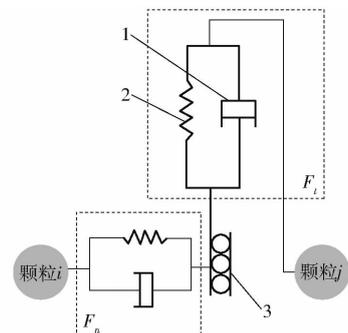


图4 接触力学模型

Fig. 4 Contact mechanics model

1. 阻尼器 2. 弹簧 3. 摩擦器

Hertz - Mindlin 接触模型法向接触力 F_n 为^[23]

$$F_n = \frac{4}{3} E_0 \sqrt{R_0 \delta_n^3} \quad (2)$$

其中

$$\frac{1}{E_0} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j} \quad (3)$$

$$\frac{1}{R_0} = \frac{R_i + R_j}{R_i R_j} \quad (4)$$

式中 E_0 ——等效弹性模量, Pa
 R_0 ——等效接触半径, m
 δ_n ——法向叠合量, m
 E_i, E_j ——颗粒 i, j 的弹性模量, Pa
 ν_i, ν_j ——颗粒 i, j 的泊松比
 R_i, R_j ——颗粒 i, j 的球体半径, m

切向接触力 F_t 为

$$F_t = -S_t \delta_t \quad (5)$$

其中 $S_t = 8G_0 \sqrt{R_0 \delta_n} \quad (6)$

$$G_0 = \frac{2 - \nu_i^2}{G_i} + \frac{2 - \nu_j^2}{G_j} \quad (7)$$

式中 S_t ——切向刚度, N/m
 δ_t ——切向叠合量, m
 G_0 ——等效剪切模量, Pa
 G_i, G_j ——颗粒 i, j 的剪切模量, Pa
 法向和切向阻尼力 F_n^d 和 F_t^d 分别为^[24]

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln \varepsilon}{\sqrt{\ln^2 \varepsilon + \pi^2}} \sqrt{S_n m_0 v_n^{\text{rel}}} \quad (8)$$

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln \varepsilon}{\sqrt{\ln^2 \varepsilon + \pi^2}} \sqrt{S_t m_0 v_t^{\text{rel}}} \quad (9)$$

其中 $\frac{1}{m_0} = \frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \quad (10)$

式中 ε ——恢复系数
 S_n ——法向刚度, N/m
 m_0 ——等效质量, kg
 m_i, m_j ——颗粒 i, j 的球体质量, kg
 v_n^{rel} ——接触点相对速度的法向分量, m/s
 v_t^{rel} ——接触点相对速度的切向分量, m/s

2.2 仿真参数设置

仿真模型中几何体和颗粒的材料及相互作用参数如表 1 所示, 仿真所选物理参数尽量接近实际情况^[25], 饲料颗粒粒径参考粉碎后饲料原料的平均粒径^[26], 设备相关几何体材料为镀锌钢板, 仿真全域设置 9.8 m/s^2 的重力加速度。

斗式提升机的每个畚斗分别设置上升、圆周、下降 3 种运动形式参数, 如表 2 所示, 使得畚斗能够沿着牵引带连续运动直至完成卸料。由于近红外监测平台内的活动挡板无驱动力, 仅受颗粒的冲击沿轴转动, 所以在 Recurdyn 软件中设置活动挡板的从动转动副, 通过配置文件传输 Wall 数据实现 EDEM - Recurdyn 耦合。

实际生产中, 饲料颗粒由粉碎机供给后由斗式提升机输送, 为缩短仿真时间、提高仿真效率, 颗粒

表 1 EDEM 模型中材料参数设置

Tab.1 Material parameter setting in EDEM model

类型	参数	数值
饲料颗粒	粒径/mm	0.358
	泊松比	0.3
	剪切模量/MPa	24
镀锌钢板	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	700
	泊松比	0.29
	剪切模量/MPa	8.0×10^4
颗粒间接触	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7801
	恢复系数	0.4
	静摩擦因数	0.8
颗粒与钢板间接触	滚动摩擦因数	0.07
	恢复系数	0.2
	静摩擦因数	0.3
	滚动摩擦因数	0.2

表 2 斗式提升机运动参数设置

Tab.2 Motion parameter setting of bucket elevator

运动过程	运动形式	速度
上升	线性平移	$v = 1.6 \text{ m/s}$
圆周	线性旋转	$\omega = 6.4 \text{ rad/s}$
下降	线性平移	$v = 1.6 \text{ m/s}$

工厂设置于畚斗内, 每个畚斗内采用 Generate 方法生成粒径为正态分布的球形颗粒。离散元模型的时间步长设置为瑞利时间步长的 40%, 完成 8 个畚斗抛料的仿真时间共 1 s, 数据输出的保存时间间隔为 0.05 s。

2.3 饲料流动特性仿真及结果分析

以试验因素均设定为零水平为例分析饲料流动特性的仿真结果, 即: 方管长度为 850 mm、方管宽度为 300 mm、固定挡板角为 20° 、固定挡板长度为 210 mm。仿真几何体在 SolidWorks 软件生成后导入到 EDEM 中, 如图 5 所示。

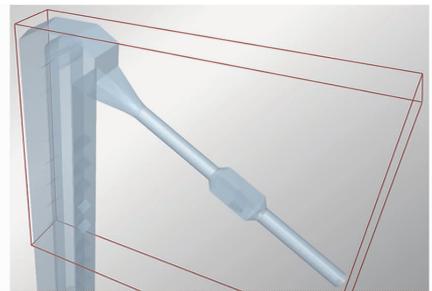


图 5 EDEM 仿真模型

Fig.5 EDEM simulation model

在 EDEM 模型仿真中, 不同仿真时间 t 对应的饲料料流分布和运动状态结果如图 6 所示。饲料颗粒的运动形式主要有 3 种, 即: 在畚斗内相对静止, 随畚斗向上提升; 在斗式提升机机头处脱离畚斗, 发生抛料运动; 进入溜管和在线近红外监测平台后, 受自身重力、颗粒间碰撞力及颗粒与几何体间碰撞作用的滑动^[27]。

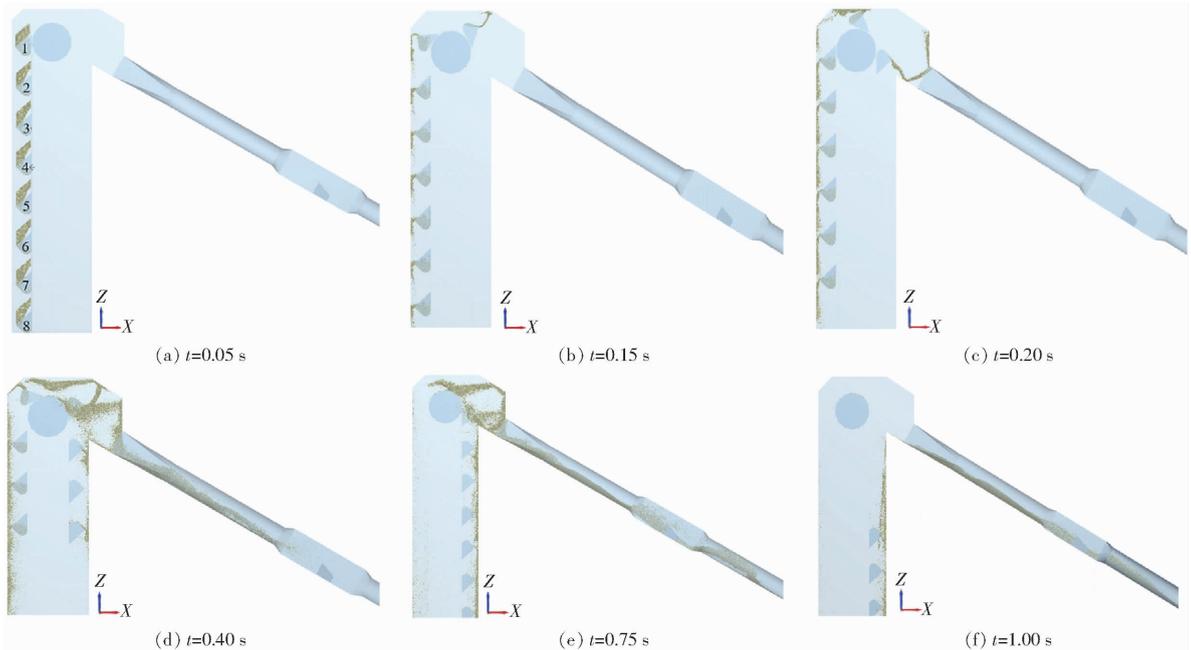


图 6 饲料料流分布和运动状态

Fig. 6 Distribution and motion state of feed flow

颗粒工厂从 $t = 0$ s 开始生成饲料颗粒,装满畚斗后随畚斗一起沿着牵引带向上运动;在 $t = 0.05$ s 时,畚斗 1 上升到头轮位置开始绕传动轴做圆周运动(图 6a);畚斗经过头轮顶端,在 $t = 0.15$ s 时,畚斗 1 内颗粒开始抛料,畚斗 2 开始做圆周运动(图 6b);当 $t = 0.20$ s 时,畚斗 1 内颗粒全部抛出,饲料颗粒在斗式提升机与溜管接口处运动状态混乱不均,随后沿着圆形溜管向下滑动(图 6c);当 $t = 0.40$ s 时,饲料颗粒开始进入在线近红外监测平台(图 6d);各个畚斗重复相同的作业过程,在 $t = 0.75$ s 时,8 个畚斗内的颗粒全部卸料,畚斗沿着牵引带下降(图 6e);仿真模拟的全过程为 1 s,饲料颗粒在通过近红外探头安装位置时,受监测平台内挡板的阻挡作用,料流能较好地稳定集中在方管底部,料层厚度合理且未出现堵料现象(图 6f)。仿真过程中会有颗粒从畚斗内流出或未抛进下料溜管而沿着斗式提升机机壳回落。

仿真模型整体作业过程合理,与实际工况较为吻合,可以用于模拟粉碎后饲料颗粒的提升和输送过程。所设计的在线近红外监测平台可以起到对饲料料流的降速和均匀效果。

3 试验设计与指标测定

3.1 正交试验设计

由在线近红外监测平台的结构设计和光谱采集条件可知,近红外探头采集光谱的优劣与饲料料流在监测平台中的运动状态密切相关,平台的方管和

挡板尺寸参数(图 2)影响饲料颗粒的速度和运动轨迹。方管长度 L 对探头的安装位置和饲料颗粒流速有影响;方管宽度 d 会影响颗粒流速和流量;若固定挡板角 α 过大、固定挡板长度 l 过长,则会造成饲料输送效率的大幅降低,甚至堵料;而如果 α 过小,则对料流的集聚功能有所减弱。

因此,本文以方管长度 L 、方管宽度 d 、固定挡板角 α 、固定挡板长度 l 为试验因素,进行四因素三水平的正交试验,并根据饲料厂实际工况对在线近红外监测平台安装位置和尺寸的许用条件,确定各因素水平如表 3 所示。

表 3 正交试验因素水平

Tab. 3 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素			
	方管长度 L/mm	方管宽度 d/mm	固定挡板角 $\alpha/(\text{°})$	固定挡板长度 l/mm
1	700	250	18	180
2	850	300	20	210
3	1 000	350	22	240

3.2 指标测定

通过 EDEM 软件仿真后处理模块,在近红外探头安装位置处设置颗粒捕捉单元,如图 7 所示,将此区域划分为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的网格,监控仿真中流经此区域饲料颗粒的数量、速度等运动行为参数,根据颗粒捕捉单元采集的信息,确定颗粒平均速度和变异系数为正交试验的 2 个指标。

颗粒平均速度表示一段时间内饲料颗粒流经

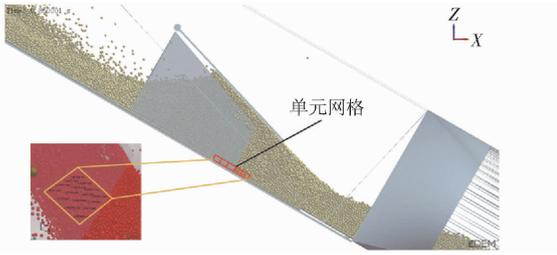


图7 颗粒捕捉单元网格示意图

Fig. 7 Schematic of particle capture unit grid

近红外探头安装位置处的流动速度,既不能流速过快,以保证探头有足够的时间采集光谱,又不能流速过慢,以保证生产线饲料料流的通畅。其计算公式为

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{t} \quad (11)$$

式中 \bar{v} ——颗粒平均速度, m/s

n ——网格数量

v_i ——第 i 个网格中颗粒的平均速度, m/s

变异系数表示颗粒的均匀程度,反映饲料颗粒在平台内的流动状态,变异系数越小,料流越均匀稳定,趋向层流状态。其计算公式为

$$C_v = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (12)$$

其中

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (13)$$

式中 C_v ——变异系数, %

S ——颗粒数量的标准差

\bar{X} ——颗粒数量的平均值

X_i ——第 i 个网格中颗粒的数量

4 仿真试验结果与分析

根据表3中各因素水平,采用 $L_9(3^4)$ 标准正交表完成四因素三水平正交仿真试验^[28],共计9组结构参数组合仿真方案及结果,如表4所示,表中A、B、C、D分别为方管长度、方管宽度、固定挡板角、固定挡板长度的水平值。并利用极差分析法确定各试验因素水平对颗粒平均速度和变异系数2个指标的影响。

4.1 料流速度的影响分析

颗粒平均速度均小于实际饲料在溜管中的经验流速2 m/s,说明设计的在线近红外监测平台对饲料料流起到了明显的降速效果。表5为颗粒平均速度的极差分析。通过极差分析可知,各因素对料流速度的影响程度从大到小依次为方管宽度、固定挡

板角、固定挡板长度、方管长度。

表4 正交仿真试验设计与结果

Tab. 4 Orthogonal design and simulation results

方案	因素				颗粒平均速度 $\bar{v}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	变异系数 $C_v/\%$
	A	B	C	D		
1	1	1	1	1	1.48	7.61
2	1	2	2	2	1.40	15.91
3	1	3	3	3	1.65	58.03
4	2	1	2	3	0.98	8.01
5	2	2	3	1	1.76	15.57
6	2	3	1	2	1.98	56.25
7	3	1	3	2	1.05	12.84
8	3	2	1	3	1.87	24.27
9	3	3	2	1	1.96	56.71

表5 颗粒平均速度极差分析

Tab. 5 Range analysis of mean velocity of particles

项目	因素			
	A	B	C	D
K_1	4.53	3.51	5.34	5.19
K_2	4.71	5.04	4.35	4.44
K_3	4.89	5.58	4.47	4.50
k_1	1.51	1.17	1.78	1.73
k_2	1.57	1.68	1.45	1.48
k_3	1.63	1.86	1.49	1.50
R	0.12	0.69	0.33	0.25

注: K_1 、 K_2 、 K_3 为某因素下各水平的颗粒平均速度总和; k_1 、 k_2 、 k_3 为某因素下颗粒平均速度总和的平均值。 R 为各因素的极差,下同。

为直观展示各因素对料流速度的影响,以因素水平的变化为横坐标,颗粒平均速度为纵坐标,绘制图8所示的指标关系图。随着方管长度的增加,颗粒平均速度单调增大,这是由于方管长度的延长增加了颗粒在平台内的滑动时间,到达近红外探头位置处就有更高的速度;方管宽度与颗粒平均速度的关系也为单调增加,方管宽度的增加实际上增大了固定挡板开口的间距,降低了颗粒集中度,减少了颗粒碰撞作用,从而促进颗粒快速通过平台;随着固定

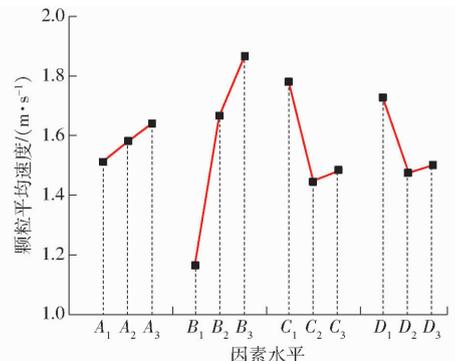


图8 颗粒平均速度与试验因素的指标关系

Fig. 8 Relationship between mean velocity of particles and test factors

挡板角和长度的增加,颗粒平均速度有先减小后增大的趋势。

4.2 料流均匀度的影响分析

饲料颗粒的变异系数变化范围较大,为 7.61% ~ 58.03%。表 6 为颗粒变异系数的极差分析,由分析可知,各因素对料流均匀度的影响由大到小分别为方管宽度、方管长度、固定挡板长度、固定挡板角。

表 6 变异系数极差分析

Tab. 6 Range analysis of coefficient of variability

项目	因素			
	A	B	C	D
K_1	81.54	28.47	88.14	79.89
K_2	79.83	55.74	80.64	84.99
K_3	93.81	171.00	86.43	90.30
k_1	27.18	9.49	29.38	26.63
k_2	26.61	18.58	26.88	28.33
k_3	31.27	57.00	28.81	30.10
R	4.66	47.51	2.50	3.47

注: K_1 、 K_2 、 K_3 为某因素下各水平的变异系数总和; k_1 、 k_2 、 k_3 为某个因素下变异系数总和的平均值。

饲料颗粒变异系数与试验因素的指标关系如图 9 所示。方管宽度对颗粒变异系数的影响最为明显,其他 3 个因素的影响程度大致相同,随着方管宽度的增加,变异系数急剧增大,这是由于方管宽度的增加,增大了饲料颗粒在监测平台内的扩散空间,颗粒在平台内的运动状态更加混杂,从而增大了颗粒变异系数。

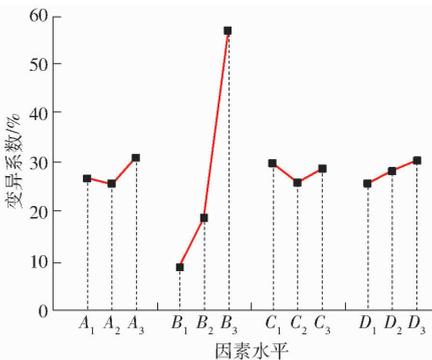


图 9 变异系数与试验因素的指标关系
Fig. 9 Relationship between coefficient of variability and test factors

4.3 最优方案的确定及验证

由料流速度的影响分析确定的最优水平组合为 $A_1B_1C_2D_2$,由料流均匀度特性确定的最优水平组合为 $A_2B_1C_2D_1$,考虑到本文对料流均匀度的要求更高,且所有组合方案均有明显的降速效果,方管长度和固定挡板长度对 2 个指标的影响较小,因此确定最优方案为 $A_2B_1C_2D_1$,即:方管长度 $L = 850$ mm、方

管宽度 $d = 250$ mm、固定挡板角 $\alpha = 20^\circ$ 、固定挡板长度 $l = 180$ mm。

以确定的最优方案为参数进行仿真验证,得到颗粒的平均速度为 0.87 m/s,变异系数为 5.32%,仿真结果均优于正交试验,且料层厚度远高于 2 mm,达到在线近红外监测要求。

5 样机试验

为进一步验证仿真结果的有效性,取经过正交试验优化后的最优尺寸参数组合将在线近红外监测平台加工成型,安装于湖南中联饲料厂生产线上,如图 10 所示,并进行饲料样品的近红外光谱实时采集。



图 10 在线近红外监测平台的生产安装图
Fig. 10 Online near-infrared monitoring platform installed on production line

1. 在线监测平台 2. 近红外探头 3. 圆形溜管

经验证,该平台可实现在饲料生产过程中持续获得有效的近红外光谱曲线,图 11 为收集到的粉碎豆粕的近红外光谱曲线,可以看到光谱平滑、连续且趋势合理,大部分谱线波峰一致。虽然部分波段存在微量噪声、吸光度略有差异,但所获取的光谱已符合近红外建模要求,相关指标性能良好。仿真优化后的在线近红外监测平台满足设计要求。

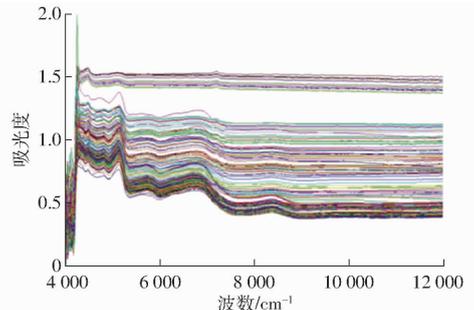


图 11 近红外光谱曲线

Fig. 11 Near-infrared spectrum curves

6 结论

(1)为实现在线近红外技术在饲料生产线上的应用,设计了一种在线近红外饲料监测平台,通过在

方管内部加入挡板结构、形成近似漏斗状的集料空间,影响饲料的运动轨迹,降低料流速度,提高料流的均匀稳定性,将原本分散的饲料颗粒集中于近红外探头安装位置,满足在线近红外监测光谱获取的要求。

(2)基于平台的几何结构参数构建了 EDEM - Recurdyn 耦合模型,以饲料料流在近红外监测平台

内的平均速度和变异系数为评价指标,通过四因素三水平正交试验,得到平台结构参数的最优方案为:方管长度 850 mm、方管宽度 250 mm、固定挡板角 20°、固定挡板长度 180 mm,此时饲料颗粒的平均速度为 0.87 m/s,变异系数为 5.32%。通过样机试验验证了仿真优化结果的有效性,该平台可持续获得满足在线分析要求的近红外光谱曲线。

参 考 文 献

- [1] 袁建敏. 家禽饲料原料生物学效价评定进展与存在的问题[J]. 饲料工业, 2020,41(6):1-6.
YUAN Jianmin. Progress and problems in the evaluation of biological value of poultry feedstuff[J]. Feed Industry, 2020, 41(6):1-6. (in Chinese)
- [2] 王勇生, 李洁, 王博, 等. 基于近红外光谱扫描技术对高粱中粗脂肪、粗纤维、粗灰分含量的测定方法研究[J]. 中国粮油学报, 2020,35(3):181-185.
WANG Yongsheng, LI Jie, WANG Bo, et al. Research on measurement of crude fat, crude fiber and ash contents in sorghum using near-infrared reflectance spectroscopy method[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020,35(3):181-185. (in Chinese)
- [3] 李阳阳, 彭黔荣, 刘娜, 等. 复烤片烟常规化学成分的傅里叶变换近红外光谱法的模型转移[J]. 理化检验(化学分册), 2019,55(5):497-503.
LI Yangyang, PENG Qianrong, LIU Na, et al. Model transfer of routine chemical components in redried lamina on Fourier transform near infrared spectroscopy[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2019,55(5):497-503. (in Chinese)
- [4] 彭彦昆, 杨清华, 王文秀. 基于近红外光谱的猪肉水分在线检测与分级[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(3):347-353.
PENG Yankun, YANG Qinghua, WANG Wenxiu. On-line detection and classification of pork moisture based on near-infrared spectra[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(3):347-353. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180343&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.043. (in Chinese)
- [5] RAMIREZ-MORALES I, RIVERO D, FERNANDEZ-BLANCO E, et al. Optimization of NIR calibration models for multiple processes in the sugar industry[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2016,159:45-57.
- [6] PRAJAPATI P, SOLANKI R, MODI V, et al. A brief review on NIR spectroscopy and its pharmaceutical applications[J]. International Journal of Pharmaceutical Chemistry and Analysis, 2016,3(3):117-123.
- [7] 薛俊杰, 韩鲁佳, 杨增玲, 等. 玉米秸秆饲料营养成分 NIRS 在线检测[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(7):216-223.
XUE Junjie, HAN Lujia, YANG Zengling, et al. On-line measurement of nutrient content of corn stover using NIRS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(7):216-223. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160730&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.030. (in Chinese)
- [8] 褚小立, 史云颖, 陈瀑, 等. 近五年我国近红外光谱分析技术研究与应用进展[J]. 分析测试学报, 2019,38(5):603-611.
CHU Xiaoli, SHI Yunying, CHEN Pu, et al. Research and application progresses of near infrared spectroscopy analytical technique in China in past five years [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2019,38(5):603-611. (in Chinese)
- [9] 李洋, 吴志生, 潘晓宁, 等. 在线近红外光谱在我国中药研究和生产中应用现状与展望[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10):2632-2638.
LI Yang, WU Zhisheng, PAN Xiaoning, et al. Applications and prospects of on-line near infrared spectroscopy technology in manufacturing of Chinese materia medica[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014,34(10):2632-2638. (in Chinese)
- [10] FONTAINE J, HERR J, SCHIRMER B. Near-infrared reflectance spectroscopy enables the fast and accurate prediction of the essential amino acid contents in soy, rapeseed meal, sunflower meal, peas, fishmeal, meat meal products, and poultry meal [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001,49(1):57-66.
- [11] 牛智有, 韩鲁佳. 饲料中肉骨粉含量的近红外反射光谱检测方法[J]. 农业工程学报, 2008,24(4):271-274.
NIU Zhiyou, HAN Lujia. Prediction of meat and bone meal content in feed by near infrared reflectance spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(4):271-274. (in Chinese)
- [12] COZZOLINO D, CHREE A, MURRAY I, et al. The assessment of the chemical composition of fishmeal by near infrared reflectance spectroscopy[J]. Aquaculture Nutrition, 2002,8(2):149-155.
- [13] ZHOU L, ZHANG L, ZHANG E, et al. Rapid determination of swine available energy and amino acids in corn distillers dried grains with solubles by near-infrared reflectance spectroscopy[J]. Animal Feed Science and Technology, 2012,175(3/4):198-202.
- [14] DASZYKOWSKI M, WROBEL M, CZARNIK-MATUSEWICZ H, et al. Near-infrared reflectance spectroscopy and

- multivariate calibration techniques applied to modelling the crude protein, fibre and fat content in rapeseed meal[J]. *The Analyst*, 2008,133(11):1523 - 1531.
- [15] GONZALEZ-MARTIN I, ALVAREZ-GARCIA N, HERNANDEZ-ANDALUZ J L. Instantaneous determination of crude proteins, fat and fibre in animal feeds using near infrared reflectance spectroscopy technology and a remote reflectance fibre-optic probe[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2006,128(1/2):165 - 171.
- [16] 王乐, 史永革, 李勇, 等. 在线近红外过程分析技术在豆粕工业生产上的应用[J]. *中国油脂*, 2015,40(1):91 - 94.
WANG Le, SHI Yongge, LI Yong, et al. Application of online near-infrared process analytical technology in industrial production of soybean meal[J]. *China Oils and Fats*, 2015,40(1):91 - 94. (in Chinese)
- [17] 杨增玲, 杨钦楷, 沈广辉, 等. 豆粕品质近红外定量分析实验室模型在线应用[J/OL]. *农业机械学报*, 2019,50(8):358 - 363.
YANG Zengling, YANG Qinkai, SHEN Guanghui, et al. Online application of soybean meal NIRS quantitative analysis model from laboratory to factory[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019,50(8):358 - 363. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190839&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.039. (in Chinese)
- [18] GARRIDO-VARO A, SANCHEZ-BONILLA A, MAROTO-MOLINA F, et al. Long-length fiber optic near-infrared (NIR) spectroscopy probes for on-line quality control of processed land animal proteins[J]. *Applied Spectroscopy*, 2018,72(8):1170 - 1182.
- [19] BEHNKE K C. Feed manufacturing technology: current issues and challenges[J]. *Animal Feed Science Technology*, 1996,62(1):49 - 57.
- [20] 张倩暄, 张广军, 李庆波. 一种植物叶片生化成分光谱无损检测的光程长校正方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010,30(5):1310 - 1314.
ZHANG Qianxuan, ZHANG Guangjun, LI Qingbo. A path-length correction method on biochemical parameter nondestructive measuring of folium[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010,30(5):1310 - 1314. (in Chinese)
- [21] XU L, LI Y, CHAI X, et al. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow to predict the cleaning performance of rice combine harvesters[J]. *Biosystems Engineering*, 2020,190:11 - 24.
- [22] 刘扬, 韩燕龙, 贾富国, 等. 椭圆颗粒搅拌运动及混合特性的数值模拟研究[J]. *物理学报*, 2015,64(11):258 - 265.
LIU Yang, HAN Yanlong, JIA Fuguo, et al. Numerical simulation on stirring motion and mixing characteristics of ellipsoid particles[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015,64(11):258 - 265. (in Chinese)
- [23] 蒋权. 带式输送机转运站无动力抑尘设计[D]. 太原: 太原科技大学, 2015.
JIANG Quan. Non-power-drive dust suppression design of transfer point of belt conveyors chute [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [24] 彭飞, 王红英, 方芳, 等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J/OL]. *农业机械学报*, 2018,49(4):140 - 147.
PENG Fei, WANG Hongying, FANG Fang, et al. Calibration of discrete element model parameters for pellet feed based on injected section method[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018,49(4):140 - 147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180416&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.016. (in Chinese)
- [25] 彭飞, 方芳, 王红英, 等. 基于 CFD-DEM 的饲料调质器物料运动模拟与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018,49(12):355 - 363.
PENG Fei, FANG Fang, WANG Hongying, et al. Numerical simulation and experiment on raw material in feed conditioner based on coupled CFD-DEM[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018,49(12):355 - 363. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181242&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.042. (in Chinese)
- [26] 金楠, 孔丹丹, 王红英, 等. 主要能量饲料粉碎特性的差异性分析[J]. *饲料工业*, 2018,39(5):8 - 12.
JIN Nan, KONG Dandan, WANG Hongying, et al. Analysis of the difference of grinding characteristics among main energy feed[J]. *Feed Industry*, 2018,39(5):8 - 12. (in Chinese)
- [27] 蒋权, 李小博, 孟文俊. 基于 EDEM 的转运站落料管转运物料的离散元分析[J]. *矿山机械*, 2014,42(4):51 - 55.
JIANG Quan, LI Xiaobo, MENG Wenjun. Discrete element analysis on material in chutes of transfer station based on EDEM [J]. *Mining and Processing Equipment*, 2014,42(4):51 - 55. (in Chinese)
- [28] 王兆文, 白国军, 黄胜, 等. 基于正交设计的燃油蒸发系统电磁阀综合性能优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2017,48(4):327 - 334.
WANG Zhaowen, BAI Guojun, HUANG Sheng, et al. Optimization on integrated performance of solenoid valve in fuel evaporation system based on orthogonal design[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017,48(4):327 - 334. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170443&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.043. (in Chinese)