

桨叶式日粮混合机机理分析与参数优化

王德福^{1,2} 党春雪¹ 黄会男^{1,2} 刘朝贤¹

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业农村部生猪养殖设施工程重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了促进全混合日粮(简称日粮)饲喂技术的推广应用,设计了一种桨叶式日粮混合机,并对该混合机进行了性能试验与参数优化。利用桨叶式日粮混合试验装置,对混合室内日粮的混合过程进行分析,将混合室内日粮分布区域划分为积料区、提料区、滑落区和塌落区,各区域混合方式为:积料区与提料区主要发生剪切混合与对流混合,滑落区与塌落区以较强剪切混合与扩散混合为主;以混合时间、转子转速和桨叶安装角为试验因素,以变异系数与净功耗为评价指标,采用三因素五水平二次回归正交旋转组合试验方法进行试验,获得了该机试验因素对混合均匀度及净功耗的影响规律。试验结果表明:在填充率为65%时,最优参数组合为:混合时间5.3 min、转子转速8.6 r/min、桨叶安装角34°,对应的变异系数为7.01%、净功耗为51.02 kJ。该日粮混合机满足日粮的混合要求,性能较优。

关键词: 全混合日粮; 混合机; 桨叶式; 机理分析; 参数优化

中图分类号: S816.34; S817.12

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)06-0122-10

OSID:



Mechanism Analysis and Parameter Optimization of Paddle-type Ration Mixer

WANG Defu^{1,2} DANG Chunxue¹ HUANG Huinan^{1,2} LIU Chaoxian¹

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of Swine Facilities Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Harbin 150030, China)

Abstract: Coarse fodder and concentrates are separately fed by traditional feeding technology, which tends to make ruminants select feed and cause metabolic diseases. The ruminant farming gradually adopts a total mixed ration feeding technology by which coarse fodder and concentrates are mixed uniformly according to the needs of ruminant growth and production. Aiming to promote the popularization and application of the feeding technology, a paddle-type ration mixer was designed, and performance tests and parameter optimization were performed by the paddle-type ration mixing experimental equipment. The equipment was used to analyze the mixing process of the rations in the mixing chamber. The distribution area of the rations in the mixing chamber was divided into the accumulation area, lifting area, slipping area and slumping area. The mixing modes of each area were as follows: shear mixing and convection mixing mainly occurred in the accumulation area and lifting area, and shear mixing and diffusion mixing mainly occurred in the slipping area and slumping area; the mixing time, rotor speed and paddle installation angle were taken as experimental factors, and the coefficient of variation and net power consumption were used as evaluation indexes. The method of orthogonal rotational combination experiment of three factors and five levels was used in experiments. The influence of the main parameters of the mixer on the mixing uniformity and power consumption was obtained. The results showed that the paddle-type ration mixer can meet the requirements of ration mixing; when the filling rate was 65%, the optimal parameter combination was as follows: mixing time was 5.3 min, rotor speed was 8.6 r/min, and installation angle was 34°. The coefficient of variation was 7.01% and the net power consumption was 51.02 kJ. The research result can provide support for the in-depth research and application of ration mixers.

Key words: total mixed ration; mixer; paddle-type; mechanism analysis; parameter optimization

收稿日期: 2019-12-23 修回日期: 2020-01-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701301)和黑龙江省应用技术与开发计划重大项目(GA16B301)

作者简介: 王德福(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事畜牧机械研究,E-mail: dfwang0203@163.com

0 引言

为克服传统精粗料分饲形式易使反刍动物挑食、引发代谢性疾病的缺陷,根据反刍动物生长及生产需要,将粗饲料、精饲料及各种添加剂混合均匀的全混合日粮(简称日粮)饲喂技术已在国内外得到普遍应用。该技术推广应用的关键是日粮混合机的研发与应用^[1]。

近年来,国内外企业及学者已对日粮混合机进行了大量研究。国外研究起步较早,主要研发了立式搅龙日粮混合机和卧式螺旋、卷盘、链板、桨叶式日粮混合机,且各机型已趋于系列化、大型化、自动化,研发工作主要由企业完成,其研究主要侧重于已有机型的选型分析与性能试验,对日粮混合机混合机理的分析较少。如 KAMMEL^[2]对日粮混合机的类型和结构特点进行了概括与分析,为日粮混合机的选型提供了参考;BUCKMASTER 等^[3]利用整粒玉米等作为示踪剂,对两种日粮混合机进行试验,评价其混合性能;ŠÍSTKOVÁ 等^[4]研究了日粮不同组分对混合机混合性能的影响。日粮饲喂技术引入中国较晚,国内企业通过跟踪国外技术成熟的日粮混合机,已研制出立式搅龙、卧式螺旋等日粮混合机,同时国内学者对日粮混合机也进行了较多研究。文献[5-8]分别对转筒与桨叶组合式日粮混合机、转轮式日粮混合机、卧式日粮混合机与立式日粮混合机进行了试验,并对混合时间、剪切刀数量、转子转速等试验参数进行了优化,但国内对日粮混合机的研究主要是对国外成熟机型的改进或试验。综上,国内外对日粮混合机理的研究较少,尤其是国内对于桨叶式日粮混合机的机理研究欠缺。

针对所设计的桨叶式日粮混合机,本文在分区分析该混合机内混合方式的基础上,通过动力学分析及 EDEM 仿真深入分析桨叶式日粮混合机的混合机理,利用设计的桨叶式日粮混合机试验装置进行试验研究,并对该混合机进行参数优化。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

桨叶式日粮混合机试验装置主要由机体、转子、机架和传动系统等组成(如图1所示),其总体尺寸(长×宽×高)为1.7 m×0.7 m×1.4 m,机体尺寸(长×宽×高)为0.7 m×0.5 m×0.65 m,总容积0.226 m³。其中机体由上机体、下机体组成,上机体为长方体,包括进料口,下机体为半圆柱体,包括卸

料口;转子为桨叶式日粮混合机的核心部件,主要由主轴、支撑杆、桨叶组成,为强化混合作用,在中间4组支撑杆中部增加了加强桨叶。为便于对混合室内日粮的混合过程进行观察,机体由透明的有机玻璃板制作。

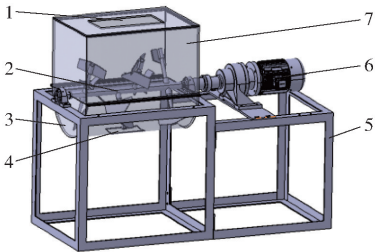


图1 桨叶式日粮混合机试验装置结构图
Fig.1 Structural diagram of paddle-type ration mixing experimental equipment
1. 进料口 2. 转子 3. 下机体 4. 卸料口 5. 机架 6. 减速电机 7. 上机体

1.2 工作原理

工作时,日粮由进料口进入混合室内,减速电机通过联轴器将动力传递给转子,转子上安装的桨叶带动日粮产生混合运动。桨叶在混合室下部推动日粮产生较弱的剪切与对流混合;当桨叶带动日粮到达混合室上部后,日粮被桨叶抛落或在重力作用下自由滑落,做不规则、无定向的运动,形成剪切与扩散混合;同时,左、右侧两组桨叶分别推动日粮从混合室两端向中间移动,形成对流混合,中部支撑杆上各增加的一个加强桨叶促进日粮从中间移动到两端,强化了对流混合作用。因此,日粮在混合室内会产生一种多方向、多方位的复合运动以实现均匀混合。混合完成后,打开卸料口,日粮在桨叶推力和自身重力的作用下排出机体。

2 关键部件设计

2.1 转子

转子是桨叶式日粮混合机的关键部件。本研究的桨叶式日粮混合机的转子采用卧式单轴结构,主要由主轴、桨叶与连接两者的支撑杆组成,在主轴上左右各设置一组桨叶,每组桨叶含3根呈螺旋排布的支撑杆(支撑杆1、2、3为一组,支撑杆4、5、6为一组),其外层桨叶将日粮从混合机的两侧向中间推动,如图2所示。对于卧式单轴混合机,支撑杆数量与相邻两根支撑杆的相位角应满足^[9]

$$360^{\circ} \leq k\psi \leq 720^{\circ} \tag{1}$$

式中 k ——主轴上支撑杆数量
 ψ ——相邻两根支撑杆间相位角,(°)
结合机体的尺寸与长宽比,由公式(1)确定支撑杆的相位角为120°。为加强日粮从中间向两端

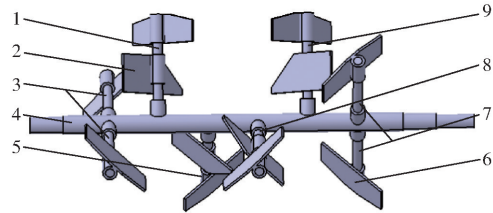


图2 转子结构图

Fig. 2 Structural diagram of rotor

1. 支撑杆 2. 加强桨叶 3. 支撑杆 4. 主轴 5. 支撑杆 3
6. 外层桨叶 7. 支撑杆 6 8. 支撑杆 4 9. 支撑杆 5

移动的能力,在中间 4 根支撑杆中部各设置一加强桨叶,同时为强化混合机两端桨叶对日粮的回推能力,在主轴两端各对称设置两个桨叶。

2.2 桨叶

为使日粮在桨叶的作用下,保证轴向运动的连续性,也为减少卸料时的残留,相邻两根支撑杆上的桨叶在轴向投影应有重叠,重叠系数计算式为

$$\zeta = L_1 / L_2 \tag{2}$$

其中 $L_1 = kL_j \cos \alpha$
式中 ζ ——轴向重叠系数
 L_1 ——外层桨叶在轴向投影的长度和,mm
 L_2 ——混合室长度,mm
 L_j ——单个桨叶长度,mm
 α ——桨叶安装角, (°)

根据文献[10],轴向重叠系数应小于 1.25,将其代入公式(2)得桨叶长度为 175 mm。

为使外层桨叶与加强桨叶的推料量均匀,使支撑杆受力均匀,考虑到实际混合过程中物料存在空隙,因此两种桨叶扫掠一圈的体积比应在 0.85 ~ 1.15 之间,在桨叶长度相同的情况下,外层桨叶与加强桨叶的宽度应满足

$$\begin{cases} p_1 = \pi [(l-x)^2 - (l-x-B_1)^2] L_j \cos \alpha \\ p_2 = \pi [(B_2+l_1)^2 - l_1^2] L_j \cos \alpha \\ l = B_1 + B_2 + l_1 + l_2 + x \\ p_2 = (0.85 \sim 1.15) p_1 \end{cases} \tag{3}$$

式中 p_1 ——外层桨叶旋转一圈扫掠的体积,mm³
 p_2 ——加强桨叶旋转一圈扫掠的体积,mm³
 l ——混合机下机体内壁半径,mm
 x ——外层桨叶上边缘到混合机下机体内壁的距离,mm
 B_1 ——外层桨叶宽度,mm
 B_2 ——加强桨叶宽度,mm
 l_1 ——加强桨叶下边缘到主轴轴心距离,mm
 l_2 ——加强桨叶与外层桨叶距离,mm

根据本设计可知混合机下机体内壁半径为 242 mm,外层桨叶上边缘到混合机下机体内壁的距

离为 10 mm,将其代入公式(3),根据设计经验可得外层桨叶宽 60 mm,加强桨叶宽 80 mm,加强桨叶下边缘到主轴轴心距离 42 mm,加强桨叶与外层桨叶的距离 30 mm。

为保证外层桨叶顶部与混合机下机体内壁的间距均匀,按桨叶安装角为 45°设计外层桨叶顶部结构为两斜线一圆弧,尺寸如图 3 所示。

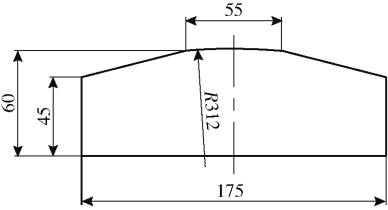


图3 外层桨叶结构图

Fig. 3 Structural diagram of outer paddle

鉴于每根支撑杆上的加强桨叶与其外层桨叶对日粮的轴向作用力方向相反,其加强桨叶与外层桨叶呈交叉设置,考虑到青贮玉米湿度大、形状细长,易缠绕、拖带、成团,为防止外层桨叶的推料面与加强桨叶顶端产生成团托料现象,避免削弱加强桨叶的混合能力,将每个加强桨叶的形状设计为矩形沿托料侧截去 ε 角(图 4)。

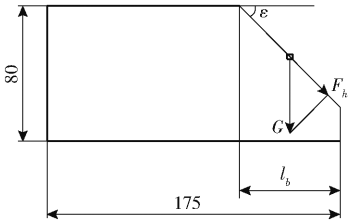


图4 加强桨叶结构图

Fig. 4 Structural diagram of strengthened paddle

其设计分析如下:在加强桨叶托料侧沿 ε 角截断,日粮在加强桨叶顶端时受重力作用产生下滑力,使日粮可以及时滑落,避免日粮成团随着桨叶转动;但截去一角的加强桨叶面积变小,降低了加强桨叶的推料能力。 ε 角与下滑力及加强桨叶面积的关系为

$$\begin{cases} F_h = G \sin \varepsilon \\ S = S_0 - l_b^2 \tan \varepsilon / 2 \end{cases} \tag{4}$$

式中 F_h ——日粮在加强桨叶顶端时的下滑力,N
 G ——日粮重力,N
 S ——加强桨叶面积,mm²
 S_0 ——未截去 ε 角时矩形加强桨叶面积,mm²
 l_b ——截去长度,为 60 mm

公式(4)中,下滑力与加强桨叶的面积越大,混合效果越好,因而可得 ε 的范围为 35° ~ 45°,取 $\varepsilon = 45^\circ$ 。经预试验研究,截去 45°角的加强桨叶可以消除成团托料现象并保证推料能力。

3 混合机理分析

3.1 力学分析

为保证日粮在桨叶的作用下,既能做周向运动,又能做轴向运动,当安装桨叶的支撑杆到达水平面时,在垂直于支撑杆的平面上,对与桨叶直接接触的日粮颗粒质点进行受力分析。如图 5 所示。

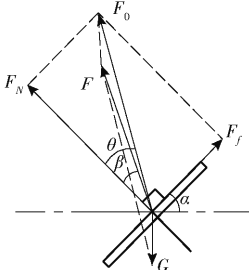


图 5 与桨叶接触的日粮颗粒质点受力分析
Fig. 5 Force analysis of ration particle contacting with paddle

桨叶安装角指桨叶平面与主轴轴线的夹角 α (图 5)。桨叶对日粮的驱动力 F_N 垂直于桨叶平面向上,同时日粮受到沿着桨叶平面向上的摩擦力 F_f 。驱动力 F_N 与摩擦力 F_f 的合力 F_0 与桨叶平面的垂线夹角为摩擦角 θ 。 F 为日粮所受的合力。合力 F 与桨叶平面的垂线夹角为 β 。若使日粮在桨叶的作用下在轴向有移动,则需满足 $\alpha > \beta$ 。由图 5 可知 $\theta > \beta$,当摩擦因数改变,摩擦角 θ 逐渐增大时, β 也随之增大,当 $\theta = \alpha$ 时, F_0 竖直向上,此时 $\beta = \theta = \alpha$, F 也竖直向上,日粮在桨叶的作用下只做圆周运动,而无轴向运动。因此只需满足 $\alpha > \theta$ 就可以满足 $\alpha > \theta > \beta$,使日粮有轴向运动。 f 为日粮与桨叶之间摩擦因数,则 $f = \tan\theta$ 。因此,日粮沿着轴向运动的条件为 $\alpha > \arctan f$ 。

3.2 运动学分析

桨叶带动日粮旋转运动,日粮受到离心力作用,为保证日粮顺利下落,需满足当桨叶到达主轴正上方时,离心力小于重力,根据公式

$$mg \geq m\omega^2 r \tag{5}$$

式中 m ——日粮颗粒质点的质量,kg
 g ——重力加速度,m/s²
 ω ——转子角速度,rad/s
 r ——日粮颗粒质点到主轴轴心的距离,m

可知转速应小于 60 r/min。当安装桨叶的支撑杆到达水平面时,在垂直于支撑杆的平面上对与桨叶接触的日粮颗粒质点进行运动学分析,如图 6 所示。当桨叶安装角 α 满足 $\alpha > \arctan f$ 时,日粮在桨叶的带动下,一边做轴向运动,一边做周向运动。 v_e 为牵连速度,即桨叶的线速度, v_r 是日粮颗粒的相对速

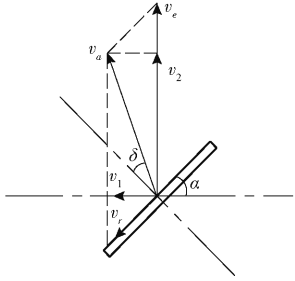


图 6 与桨叶接触的日粮颗粒质点运动学分析
Fig. 6 Kinematic analysis of ration particle contacting with paddle

度,速度方向沿着桨叶平面向下。 v_a 是日粮颗粒的绝对速度,由于合力与桨叶平面的垂线之间存在夹角 β ,因此绝对速度 v_a 与桨叶平面的垂线会产生夹角 δ ,将绝对速度 v_a 向轴向和径向投影得到日粮颗粒的轴向速度 v_1 与周向速度 v_2 ,即

$$v_1 = v_r \cos\alpha = \frac{\pi r n (\cos\alpha \sin\alpha - \cos^2\alpha \tan\delta)}{30} \tag{6}$$

$$v_2 = v_a \cos(\alpha - \delta) = \frac{\pi r n (\cos^2\alpha + \cos\alpha \sin\alpha \tan\delta)}{30} \tag{7}$$

式中 n ——转子转速,r/min

由式(6)、(7)可知,日粮颗粒的轴向速度 v_1 与周向速度 v_2 都与转子转速 n 成正比。转子转速 n 增大时,牵连速度 v_e 即桨叶运动的线速度也增大,因此,转子每转一圈,日粮沿轴向的位移随着增大。当转子转速过大时,日粮被桨叶抛起,由于玉米粉和青贮玉米的粒度、湿度、容重差距较大,易产生离析现象,进而影响混合效果。反之,转子转速 n 减小,日粮沿轴向的运动速度降低,日粮颗粒的轴向速度 v_1 与周向速度 v_2 都降低,会影响混合效率。根据有关资料^[11]可知,日粮混合机转子转速的取值范围一般在 10 ~ 50 r/min,由于青贮玉米粒度大、湿度大,玉米粉碎物粒径小、含水率低,结合预试验,将转子转速取值范围定为 6 ~ 20 r/min。

根据公式(6)可得日粮颗粒的轴向速度 v_1 与桨叶安装角的关系如图 7 所示。图 7 显示夹角 δ 的正切值分别等于 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1,桨叶安装角 α 由 0°到 90°变化时,轴向速度 v_1 的变化。因在桨叶安装角为 0°~90°之间时,日粮不能向反方向移动,因此曲线在横坐标以上有效。由图 7 可知,当桨叶安装角不变时,日粮与桨叶之间的摩擦因数越大,轴向运动速度越小;随着桨叶安装角的增大,轴向速度 v_1 先增加后减小。

根据公式(7)可得周向速度 v_2 与桨叶安装角 α 的关系如图 8 所示,图 8 为夹角 δ 正切值分别等于 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1,桨叶安装角 α 由 0°到 90°变化时,周向速度 v_2 的变化。周向速度 v_2 随着桨叶安

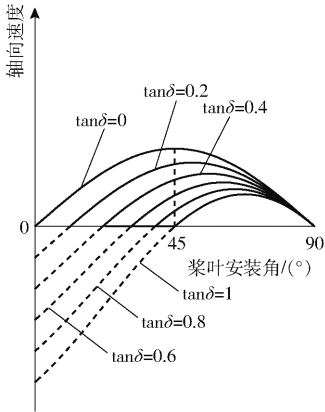


图 7 桨叶安装角对轴向速度的影响

Fig.7 Effect of installation angle on axial speed

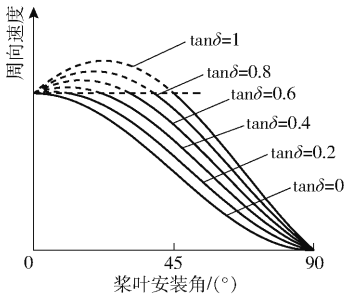


图 8 桨叶安装角对周向速度的影响

Fig.8 Effect of installation angle on circumferential speed

装角 α 的增大递减。由此可知,桨叶安装角影响混合室内轴向和周向的混合速度,两者混合速度越快、越接近,越能快速地实现均匀混合。转子转速 n 确定的情况下,当桨叶安装角 α 增大时,日粮沿桨叶表面轴向移动速度增大,但周向速度降低,因此本试验中桨叶安装角取值范围为 $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。根据图 7 可知,在不考虑摩擦的理想条件下,桨叶安装角为 45° 时桨叶的回推能力最大,由于加强桨叶旋转半径较小,且只在中间 4 根支撑杆上安装,为强化其轴向推动能力,固定加强桨叶的安装角为 45° ;两端桨叶只将日粮从两端回推,因此将两端桨叶的安装角也确定为 45° 。本文只讨论中间外层桨叶的安装角对混合性能的影响。

随着混合不断进行,日粮的混合均匀度逐渐提

高,当混合均匀度达到最高后,如果混合仍在继续,会出现过混合现象^[12],这时,不仅增大功耗,增加生产成本,同时由于日粮原料的容重、粒径相差较大,日粮开始离析,混合均匀度随之下下降。因此混合时间也是影响混合的重要因素。由文献[13]可知,一般混合机的混合时间为 $4 \sim 10 \text{ min}$,结合预试验、机体大小以及实际生产中混合时间的范围,确定本试验中混合时间范围为 $2 \sim 8 \text{ min}$ 。

3.3 运动轨迹分析

为直观反映出桨叶式日粮混合机的混合效果,利用 EDEM 软件对日粮颗粒的运动轨迹进行仿真分析。为简化仿真模型,以玉米粉(锤片式粉碎机孔径 5 mm 筛片粉碎物)与青贮玉米粗饲料(平均切碎长度为 10 mm)代表日粮,以大米为示踪物颗粒,建立颗粒离散元模型。依据理论分析得出的混合参数范围,模拟一组填充率 65% 、转子转速 20 r/min 、桨叶安装角 45° 、混合时间 60 s 的混合过程。利用 EDEM 软件的 Manual Selection 功能在混合机右端标记某一示踪物颗粒,追踪其不同混合时间的运动轨迹,分析其混合运动特征^[14-17]。

由图 9 可知,从 10 s 到 40 s ,随着混合进行,颗粒在周向上的轨迹逐渐覆盖整个混合室的截面,说明加强桨叶的安装并不阻碍颗粒的周向运动,颗粒可以到达混合室的每一处;颗粒在下机体右侧外层桨叶附近时,呈明显、半径稳定的绕轴旋转运动,说明颗粒在径向上几乎不发生改变;在下机体右侧加强桨叶附近,日粮颗粒轨迹复杂,这是因为加强桨叶使日粮颗粒在日粮间渗透、变位、相互镶嵌,表明加强桨叶促进了混合过程;在下机体上部、下机体右侧处,颗粒轨迹有一向上的拐角,说明此时该颗粒在上升过程中,失去混合机机体的支撑,向桨叶外端滚动并回落;颗粒在上机体右侧的轨迹较平缓,在上机体左侧的轨迹明显陡峭,说明发生的扩散混合与剪切混合较剧烈。

由图 10 可知,从 10 s 到 40 s ,颗粒轨迹大致按螺旋线沿轴向展开。颗粒运动轨迹可按日粮颗粒

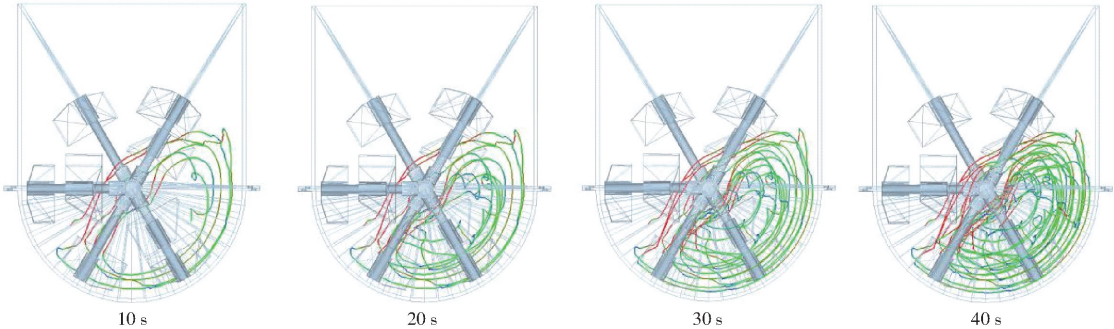


图 9 日粮颗粒轨迹侧视图

Fig.9 Side views of ration particle trajectory

轴向运动的往返范围分为两种：大循环，从一端开始做半径不断变化的螺旋运动到另一端，由另一端的某个外层桨叶推回；小循环，从一端做半径不断变化的螺旋运动到中间或还未到中间就被某一加强桨叶推回。一个日粮颗粒的运动轨迹中，大

小循环都可能出现，并且一个大循环中可能包括若干个小循环。综上所述，由日粮颗粒运动轨迹可以推断出日粮的混合运动：日粮在混合室内往复做半径不断变化的螺旋运动，并随机伴有波动。

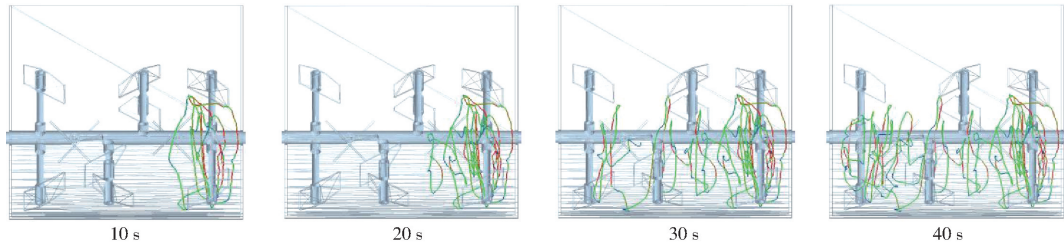


图 10 日粮颗粒轨迹正视图
Fig. 10 Front views of ration particle trajectory

3.4 混合过程分析

根据日粮在不同区域内发生的主要混合运动，将混合室按侧向分为：积料区、提料区、滑落区、塌落区。

日粮在积料区时(图 11a)，由于混合机下机体的支撑作用以及日粮间的相互作用，日粮在径向的分布几乎不发生改变，由于同一支撑杆上加强桨叶与外层桨叶对日粮的轴向力相反，因此同一根支撑杆附近的日粮在外层桨叶与加强桨叶之间发生分别向左右两边移动的层流，同时两相位角相同的桨叶同时到达积料区时，使日粮产生对流，进而产生较弱的剪切与对流混合。此区域内桨叶主要起推送日粮作用。

日粮在提料区时(图 11b)，桨叶的背面不再接触日粮。被带动的日粮与积料区的日粮出现空隙。当桨叶带动日粮上升到主轴轴心高度时，少量日粮

由于缺少混合机下机体外壁的支撑，在自身重力的作用下滚落回积料区，发生扩散混合与对流混合；大部分日粮由桨叶带入滑落区，此时支撑杆附近的日粮发生剪切混合。因此，提料区是以剪切混合与对流混合为主，并伴有扩散混合。

日粮在滑落区时(图 11c)，由于滚动摩擦角与桨叶安装角的存在，部分日粮沿着桨叶面向下滑落或滚落的同时在轴向有一定位移，发生剪切混合、扩散混合与对流混合。此时加强桨叶起到导流作用：部分顶端的日粮在外层桨叶的作用下向一侧运动，当其滚落到加强桨叶处被分流，一部分继续之前的方向，一部分沿加强桨叶面向另一侧滚落，加强了混合作用。

日粮在塌落区时(图 11d)，日粮脱离桨叶的作用，在自身重力及离心力作用下，日粮快速向下塌落或抛落到积料区，发生较强的扩散混合与剪切混合。

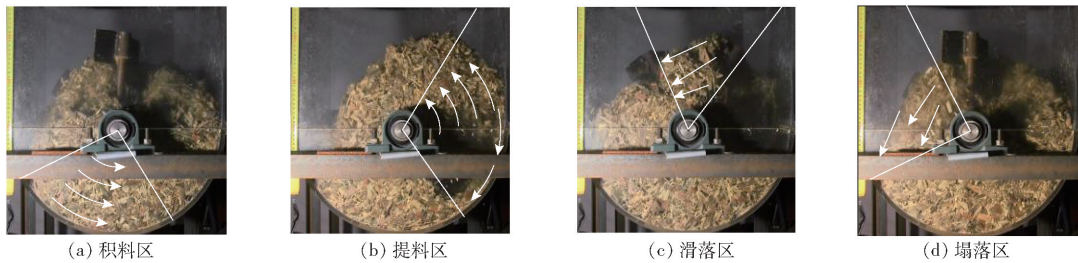


图 11 日粮运动状态
Fig. 11 Movement states of ration

4 试验与结果分析

为进一步探究桨叶安装角、转子转速以及混合时间对混合过程的影响，根据相关资料与预试验^[18]，将混合机的填充率定为 65%，按卧式日粮混合机先干后湿、先精后粗的装料原则^[19]，先加玉米粉碎物后加青贮玉米。以大米为示踪物，示踪物被抛撒在已经装填好日粮的混合机顶部。

4.1 试验材料与设备

参考文献[3, 13, 20]，以干物质质量确定试验日粮精粗比 40: 60，粗饲料为含水率 70% 的青贮玉米，精饲料为含水率 9.5% 的玉米粉碎物(40 目筛下物、40 目筛上物、1 mm 筛上物质量比为 5: 3: 2)。

示踪剂：大米(按每吨添加 6 kg 计)。

桨叶式日粮混合试验装置如图 12 所示。仪器包括：BSA32025 型电子天平、扭矩传感器、TS-5F

型智能数字测试仪、变频调速控制器、摄像机 (Sony FDR-AX700)、卷尺、秒表以及量角器等。

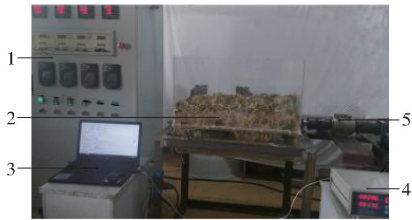


图 12 试验装置

Fig. 12 Experimental equipment

1. 变频调速控制器 2. 桨叶式日粮混合试验装置 3. 计算机
4. TS-5F 型智能数字测试仪 5. 扭矩传感器

4.2 评价指标

为探究桨叶式日粮混合机的混合性能,依据文献[21-22],选用变异系数和净功耗作为评价指标。

(1) 变异系数

选择大米作为示踪物,每次试验后均匀地取出 10 份样品,计算每 100 g 样品中的大米粒数 C ,去掉最高最低的两组,计算其变异系数^[23]。

变异系数计算公式为

$$Y_1 = \frac{S_c}{\bar{C}} \times 100\% \tag{8}$$

式中 Y_1 ——变异系数, %

S_c ——样品中大米粒数的标准差

$\bar{C}$ ——样品中大米粒数的算术平均值

(2) 净功耗

利用扭矩传感器将试验装置工作时的瞬时功率以电信号的形式传给 TS-5F 型智能数字测试仪,通过 USB 转 232 串口线与计算机相连,然后利用 stc-isp-15xx-v6.85H 的串口助手功能将每一次混合过程中的数据收集、保存。采集到的数据是离散的,计算各个混合过程中所消耗的净功耗

$$W_i = P_i \Delta t \tag{9}$$

$$W_f = \sum_{i=1}^q W_i \tag{10}$$

$$Y_2 = W_f - W_k \tag{11}$$

式中 P_i ——第 i 次采集到的瞬时功率, kW

Δt ——TS-5F 型智能数字测试仪采集数据间隔时间,为 0.062 5 s

q ——某一次混合过程采集数据次数,次

Y_2 ——净功耗,主要包括带动日粮时重心上移及克服内摩擦所需的功耗, kJ

W_f ——总功耗,某一混合过程中,维持桨叶式日粮混合试验装置、功率测控系统和变频器等运行所需的功耗, kJ

W_k ——空载功耗,空载时维持桨叶式日粮混合试验装置、功率测控系统和变频器等运行所需的功耗, kJ

4.3 试验方案与结果分析

4.3.1 试验方案与结果

通过混合机理分析及预试验,确定以混合时间、转子转速与桨叶安装角为试验因素,以变异系数 Y_1 与净功耗 Y_2 为试验评价指标,采用三因素五水平二次回归正交旋转组合试验设计方法安排试验。通过试验,对影响试验评价指标的 3 个因素进行显著性分析,根据实际需求对各参数组合进行优化,最终获得较为合适的因素组合。编码如表 1 所示,试验方案及试验结果如表 2 所示。 A 、 B 、 C 为因素编码值。

表 1 试验因素编码

Tab. 1 Coding of experimental factors

编码	试验因素		
	混合时间 t / min	转子转速 n / ($r \cdot \min^{-1}$)	桨叶安装角 α / ($^{\circ}$)
1.682	8.0	20.0	60
1	6.8	17.2	52
0	5.0	13.0	40
-1	3.2	8.8	28
-1.682	2.0	6.0	20

表 2 试验方案与结果

Tab. 2 Experimental plan and results

序号	A	B	C	Y_1 /%	Y_2 /kJ
1	-1	-1	-1	14.47	32.96
2	1	-1	-1	9.41	58.79
3	-1	1	-1	9.59	59.02
4	1	1	-1	15.63	125.22
5	-1	-1	1	19.79	32.42
6	1	-1	1	10.81	68.47
7	-1	1	1	15.87	68.76
8	1	1	1	16.69	138.85
9	-1.682	0	0	18.33	29.40
10	1.682	0	0	14.45	116.07
11	0	-1.682	0	9.91	36.07
12	0	1.682	0	13.43	119.02
13	0	0	-1.682	7.96	66.37
14	0	0	1.682	15.55	71.11
15	0	0	0	6.72	67.89
16	0	0	0	6.39	70.62
17	0	0	0	5.24	74.41
18	0	0	0	6.59	72.86
19	0	0	0	7.59	71.45
20	0	0	0	6.89	73.62
21	0	0	0	6.18	66.66
22	0	0	0	6.28	72.38
23	0	0	0	6.03	73.34

4.3.2 试验结果分析

利用 Design-Expert 软件对试验结果进行二次回归分析,并进行多元回归拟合,得到以变异系数为试验指标的回归方程,并检验其显著性^[24]。对表 2 中变异系数的方差分析结果如表 3 所示。

表 3 变异系数方差分析

Tab.3 Variance analysis of variation coefficient

变异来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	458.24/458.19	9/8	50.92/57.27	105.10/126.36	< 0.000 1/ < 0.000 1
<i>A</i>	13.75/13.75	1/1	13.75/13.75	28.39/30.34	0.000 1/ < 0.000 1
<i>B</i>	6.22/6.22	1/1	6.22/6.22	12.85/13.73	0.003 3/0.0024
<i>C</i>	52.69/52.69	1/1	52.69/52.69	108.76/116.24	< 0.000 1/ < 0.000 1
<i>AB</i>	54.60/54.60	1/1	54.60/54.60	112.71/120.46	< 0.000 1/ < 0.000 1
<i>AC</i>	10.44/10.44	1/1	10.44/10.44	21.56/23.04	0.000 5/0.000 3
<i>BC</i>	0.048	1	0.048	0.099	0.757 8
<i>A</i> ²	204.96/204.96	1/1	204.96/204.96	423.09/452.18	< 0.000 1/ < 0.000 1
<i>B</i> ²	58.75/58.75	1/1	58.75/58.75	121.26/129.60	< 0.000 1/ < 0.000 1
<i>C</i> ²	60.60/60.60	1/1	60.60/60.60	125.08/133.69	< 0.000 1/ < 0.000 1
残差	6.30/6.35	13/14	0.48/0.45		
失拟	2.97/3.02	5/6	0.59/0.50	1.43/1.21	0.311 5/0.391 0
纯误差	3.33/3.33	8/8	0.42/0.42		
总和	464.54/464.54	22/22			

注：斜线后面为剔除不显著因素后，变异系数 Y_1 方差分析结果； $P < 0.01$ 为差异极显著水平； $0.01 < P < 0.05$ 为差异显著水平； $0.05 < P < 0.1$ 为差异较显著水平； $P > 0.1$ 为差异不显著水平。

由 P 可判断各因素对变异系数的影响，由表 3 可知，各试验因素中，桨叶安装角对变异系数的影响最大，其次是混合时间，最后是转子转速。各因素的交互项和平方项对变异系数的影响由大到小依次为 A^2 、 C^2 、 B^2 、 AB 、 AC 、 BC 。其中， BC 不显著 ($P > 0.1$)。将不显著的交互作用项的回归平方和及自由度并入残差项后，再进行方差分析，结果如表 3 所示。得到各因素对变异系数影响的回归方程^[25]

$$Y_1 = 80.293\,72 - 14.019\,31t - 4.401\,18n - 0.656\,77\alpha + 0.345\,57tn - 0.052\,894t\alpha + 1.108\,51t^2 + 0.109n^2 + 0.013\,562\alpha^2 \quad (12)$$

对回归方程 (12) 进行失拟性检验，如表 3 所示，其中 $P = 0.391\,0$ ，不显著 ($P > 0.1$)，证明不存在其他影响评价指标的主要因素，试验因素与试验评价指标存在显著的二次关系。

4.3.3 响应曲面分析

通过 Design-Expert 软件对数据处理，得出混合时间、转子转速与桨叶安装角之间显著交互作用对变异系数影响的响应曲面，如图 13 所示。

图 13a 为桨叶安装角为 40° (中心水平值) 时，转子转速和混合时间对变异系数的交互作用响应曲面。由图可知，当混合时间一定，混合时间在 $3.2 \sim 4.1\text{ min}$ 时，变异系数随着转子转速增大而降低；混合时间在 $4.1 \sim 6.8\text{ min}$ 时，变异系数随着转子转速增大而逐渐增加；最优的转子转速范围为 $8.8 \sim 13.0\text{ r/min}$ ；当转子转速一定时，随着混合时间的增加，变异系数先减小后增大；最优的混合时间范围为 $4.1 \sim 6.0\text{ min}$ 。图 13b 为转子转速为 13 r/min (中心

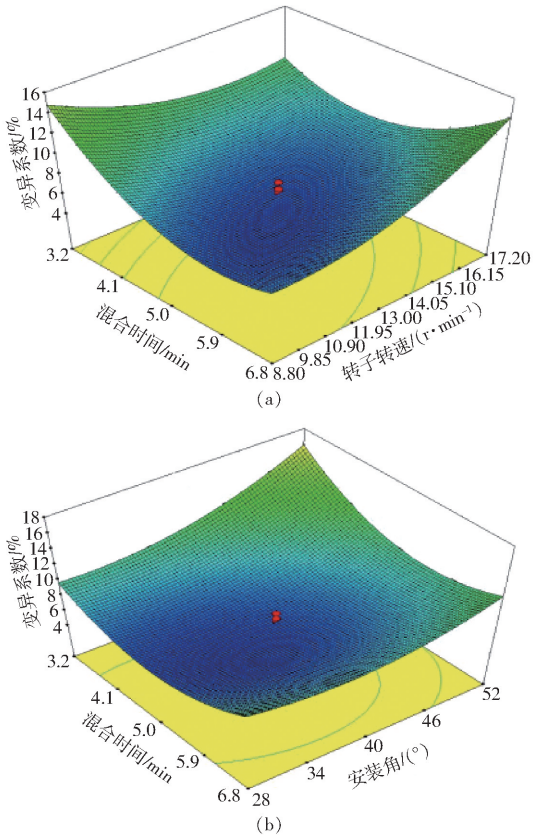


图 13 变异系数的响应曲面

Fig.13 Response surfaces of variation coefficient

水平值) 时，桨叶安装角和混合时间对变异系数的交互作用响应曲面。由图可知，当混合时间一定时，变异系数随着桨叶安装角的增加先减小后增加；最优的桨叶安装角范围为 $28^\circ \sim 45^\circ$ ；当桨叶安装角一定时，随着混合时间的增加，变异系数先减小后增大；最优的混合时间范围为 $4.1 \sim 5.9\text{ min}$ 。

4.3.4 参数优化及试验验证

利用 Design-Expert 软件中 Optimization 模块进行参数优化,根据混合机的实际工作性能要求及上述相关模型分析结果,选择优化约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(t,n,\alpha) \\ \min Y_2(t,n,\alpha) \\ 4\text{ min} \leq t \leq 8\text{ min} \\ 6\text{ r/min} \leq n \leq 20\text{ r/min} \\ 20^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ \end{cases} \quad (13)$$

对其参数进行求解,得到混合性能最优时对应的参数组合为:混合时间 5.3 min、转子转速 8.6 r/min、桨叶安装角 34°,此时变异系数为 6.95%,净功耗为 49.08 kJ。

根据上述试验条件以及获得的优化参数进行试验验证(各试验条件与 4.1 节相同),得到变异系数 7.01%、净功耗 51.02 kJ,优化结果与验证结果基本

一致,误差在试验允许范围内,其混合性能满足变异系数小于 10%的要求^[11],净功耗较低。

5 结论

(1) 通过对日粮混合过程进行分析,将桨叶式日粮混合机混合室内日粮分布区域划分为积料区、提料区、滑落区和塌落区。积料区发生较弱的剪切混合与对流混合;提料区以剪切混合与对流混合为主,扩散混合为辅;滑落区发生剪切混合、扩散混合与对流混合;塌落区发生较强的扩散混合与剪切混合。

(2) 通过试验证实,本研究设计的桨叶式日粮混合机满足日粮的混合要求。桨叶式日粮混合机在填充率为 65% 时的最优参数组合为:混合时间 5.3 min、转子转速 8.6 r/min、桨叶安装角 34°,此时变异系数可达 7.01%,净功耗为 51.02 kJ,其混合性能较优,净功耗较低。

参 考 文 献

[1] SCHINGOETHE D J. A 100-year review:total mixed ration feeding of dairy cows[J]. Journal of Dairy Science,2017,100(12): 10143 – 10150.

[2] KAMMEL D W. Design,selection and use of TMR mixers[C]//Tri-State Dairy Nutrition Conference,1998.

[3] BUCKMASTER D R, WANG D, WANG H. Assessing uniformity of total mixed rations [J]. Applied Engineering in Agriculture,2014, 30(5): 693 – 698.

[4] ŠÍSTKOVA M,PŠENKA M,KAPLAN V,et al. The effect of individual components of total mixed ration (TMR) on precision dosing to mixer feeder wagons[J]. Journal of Microbiology Biotechnology & Food Sciences,2017,5(1):60 – 63.

[5] 李利桥,王德福,李超,等. 转筒与桨叶组合式日粮混合机设计与试验优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(10):67 – 75. Li Liqiao, WANG Defu, LI Chao, et al. Design and experimental optimization of combined-type ration mixer of drum and blade [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10):67 – 75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171008&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.008. (in Chinese)

[6] 于克强,李利桥,何勋,等. 转轮式全混合日粮混合机试验设计与机理分析[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(7):109 – 117. YU Keqiang,LI Liqiao,HE Xun,et al. Experimental design and principle analysis on paddle-wheel total mixed ration mixer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(7):109 – 117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150717&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.017. (in Chinese)

[7] 刘江涛,张志杰. 单轴卧式全混日粮混合机加工性能试验研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2009,37(7):218 – 222,228. LIU Jiangtao,ZHANG Zhijie. Study on characteristics of the single-shaft horizontal total mixed ration mixer[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2009,37(7):218 – 222,228. (in Chinese)

[8] 冯静安,张宏文,梅卫江,等. 立式 TMR 饲料搅拌机工作参数优化试验研究[J]. 机械,2013,40(6):18 – 20,34. FENG Jing'an,ZHANG Hongwen,MEI Weijiang,et al. Vertical TMR fodder mixer working parameters optimization with test research[J]. Machinery,2013,40(6):18 – 20,34. (in Chinese)

[9] 冯忠绪. 仿真设计与模型试验[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1997.

[10] 赵立锦. 双卧轴沥青混合料试验搅拌机参数优化及仿真分析[D]. 西安:长安大学,2017. ZHAO Lijin. Parameter optimization and simulation analysis of the twin-horizontal-shaft asphalt mixture mixer[D]. Xi'an: Chang'an University,2017. (in Chinese)

[11] 于克强. 转轮式全混合日粮混合机混合机理分析及试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015. YU Keqiang. Experimental study and mechanism analysis of paddle-wheel total mixed ration mixer[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2015. (in Chinese)

[12] 郭强. 生物质颗粒破碎以及生物质与煤混合颗粒的流动特性研究[D]. 上海:华东理工大学,2012. GUO Qiang. Study on the breakup of biomass particles and the flow abilities of biomass and coal blends[D]. Shanghai:East China University of Science and Technology,2012. (in Chinese)

[13] 张伟,张兆旺,卢新杰,等. 对不同类型饲料混合机最佳混合时间的研究[J]. 饲料工业,2006(5):1 – 4.

- ZHANG Wei,ZHANG Zhaowang,LU Xinxie,et al. Studying on the best mixing time of different kinds of feed mixer[J]. Feed Industry Magazine, 2006(5):1-4. (in Chinese)
- [14] 顿国强,于春玲,杨永振,等. 大豆育种排种盘型孔参数仿真优化与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(19):62-73. DUN Guoqiang,YU Chunling,YANG Yongzhen,et al. Parameter simulation optimization and experiment of seed plate type hole for soybean breeding[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(19):62-73. (in Chinese)
- [15] 曹成茂,罗坤,彭美乐,等. 山核桃物料风选机理与风选性能试验研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):105-112. CAO Chengmao,LUO Kun,PENG Meile,et al. Experiment on winnowing mechanism and winnowing performance of hickory material[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9):105-112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190912&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.012. (in Chinese)
- [16] 罗伟文,胡志超,吴峰,等. 全秸硬茬地小麦播种机碎秸导流装置参数设计与优化[J]. 农业工程学报,2019,35(18):1-10. LUO Weiwen,HU Zhichao,WU Feng,et al. Design and optimization for smashed straw guide device of wheat clean area planter under full straw field[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(18):1-10. (in Chinese)
- [17] 姜萌,刘彩玲,魏丹,等. 小麦宽苗带精量播种施肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(11):53-62. JIANG Meng,LIU Cailing,WEI Dan,et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11):53-62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191106&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.006. (in Chinese)
- [18] 庞声海,饶应昌. 配合饲料机械[M]. 北京:农业出版社,1989:162-163.
- [19] 陈玉华,田富洋,闫银发,等. 国内外日粮饲喂技术及其制备机的研究进展[J]. 中国农机化学报,2017,38(12):19-29. CHEN Yuhua, TIAN Fuyang, YAN Yinfa,et al. Research progress of domestic and foreign TMR feeding technologies and mixers [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2017,38(12):19-29. (in Chinese)
- [20] 李利桥,王德福,李超. 回转式日粮混合机混合机理分析与性能试验优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(8):123-132. LI Liqiao,WANG Defu,LI Chao. Mixing process analysis and performance experiment of rotary ration mixer [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8):123-132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170813&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.013. (in Chinese)
- [21] 王震涛,于雯婧,刘扬,等. 螺旋搅拌混合机颗粒混合工艺参数优化研究[J]. 饲料工业,2019,40(19):6-10. WANG Zhentao,YU Wenjing,LIU Yang,et al. Optimization of process parameters for particle mixing in spiral mixer[J]. Feed Industry Magazine,2019,40(19):6-10. (in Chinese)
- [22] 王德福,李超,李利桥,等. 叶板式饲料混合机混合机理分析与参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):98-104. WANG Defu,LI Chao,LI Liqiao,et al. Mechanism analysis and parameter optimization of blade-type feed mixer [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(12):98-104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171211&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.011. (in Chinese)
- [23] 郑会超,黄新,杨金勇,等. 立式全混合日粮搅拌机混合均匀度检测方法研究[J]. 粮食与饲料工业,2018(6):28-30. ZHENG Huichao,HUANG Xin,YANG Jinyong,et al. Determination for mixing homogeneity of total mixed ration by vertical TMR feed mixer[J]. Cereal & Feed Industry,2018(6):28-30. (in Chinese)
- [24] 吕金庆,王鹏榕,杨晓涵,等. 舀勺式马铃薯播种机排种器清种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):51-60. LÜ Jinqing,WANG Pengrong,YANG Xiaohan,et al. Design and experiment of seed-clearing device for cup-belt type potato seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):51-60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190705&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.005. (in Chinese)
- [25] 何为,薛卫东,唐斌. 优化试验设计方法与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2012.