

奶牛卧床垫料抛撒机锤式抛撒机构设计与试验

范国强^{1,2} 滕翔^{1,2} 姜军鹏^{1,2} 董和银^{3,4} 王玉亮^{1,2} 齐自成⁵

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018;
3. 泰安意美特机械有限公司, 新泰 271215; 4. 泰安市畜牧智能装备产业技术研究院, 新泰 271215;
5. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250100)

摘要: 针对奶牛卧床垫料抛撒缺乏专用机械的问题,设计了一种锤式奶牛卧床垫料抛撒机。以沙子为研究对象,建立了锤式垫料抛撒机构作业的理论模型,对锤头回转半径、抛撒转速、物料抛出角、锤头数量和锤头尺寸进行了设计和计算。采用 EDEM 建立了沙子抛撒仿真模型,并对抛撒转速、抛料切线角、上挡板开启角和上挡板长度等关键因素进行了仿真分析,得出各因素对抛撒幅宽、地面堆积物料平均厚度和抛撒均匀性的影响规律。仿真分析表明,提高抛撒转速、减小抛料切线角、增大上挡板开启角和减小上挡板长度,能够显著增大物料抛撒幅宽和提高抛撒均匀性,并能够降低地面堆积物料平均厚度。选取抛撒转速 1 200 r/min、抛料切线角 35°、上挡板开启角 70°、上挡板长度 180 mm 和行驶速度 4 km/h 进行仿真分析与现场试验,结果表明,仿真分析与试验结果基本吻合,证实了仿真分析的可靠性。试验测试抛撒幅宽为 5.1 m,地面堆积物料平均厚度为 22 mm,抛撒均匀性变异系数为 31.96%,满足养殖场的使用要求。

关键词: 奶牛; 卧床垫料; 抛撒机构; 锤头; 抛撒性能

中图分类号: S817.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)05-0120-09



OSID:

Design and Experiment of Hammer Spreading Mechanism of Cow Bedding Material Spreader

FAN Guoqiang^{1,2} TENG Xiang^{1,2} JIANG Junpeng^{1,2} DONG Heyin^{3,4} WANG Yuliang^{1,2} QI Zicheng⁵

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Provincial Intelligent Engineering Laboratory of Agricultural Equipment, Taian 271018, China
3. Taian Yimeite Machinery Co., Ltd., Xintai 271215, China
4. Taian Animal Husbandry Intelligent Equipment Industry Technology Research Institute, Xintai 271215, China
5. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract: In order to provide a special spreader for cow bedding materials, a cow bedding material hammer spreader was designed. Taking sand as the research object, an operating theoretical model of the hammer spreading mechanism was established. The gyration radius of the hammer, spreading speed, spreading angle of the material, number and size of hammer were designed and calculated. The simulation model of sand spreading was established by EDEM, and the key factors such as spreading speed, tangent angle of spreading, opening angle of upper baffle, and length of upper baffle were simulated and analyzed. The influence of each factor on spreading width, average thickness of materials accumulated on the ground, and spreading uniformity was analyzed. The simulation results showed that by increasing the spreading speed and the opening angle of the upper baffle, reducing the tangent angle of spreading and the length of upper baffle, the spreading width and spreading uniformity of the sand accumulated on the ground can be improved, and the average thickness of sand accumulated on the ground can be reduced. Under the condition that the spreading speed was 1 200 r/min, the spreading tangent angle was 35°, the opening angle of the upper baffle was 70°, the length of the upper baffle was 180 mm, and the driving speed was 4 km/h, simulations and tests were carried out. Simulation results were in good agreement with experimental data, and the reliability of the simulation analysis was

收稿日期: 2020-07-28 修回日期: 2020-10-06

基金项目: 山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ008)和山东省自然科学基金面上项目(ZR2018MEE026)

作者简介: 范国强(1975—),男,副教授,博士,主要从事液压传动、畜牧机械和智能农机装备研究,E-mail: fgq1217@163.com

confirmed. The effective spreading width was 5.1 m, and the average thickness was 22 mm, and the coefficient of variation of the uniformity of spreading was 31.96%, the requirement of farms was met.

Key words: cow; bedding material; spreading mechanism; hammer; performance of spreader

0 引言

我国奶牛养殖业飞速发展,集约化、规模化和标准化养殖已成为持续提高牛奶产量、保障乳制品品质及安全的必然选择^[1]。国内外研究表明,奶牛喜欢趴在垫料充足、平整的卧床表面,卧床的舒适度与平整度是影响奶牛产奶量和乳品品质及发病与否的重要因素^[2-8]。当卧床舒适度与平整度达不到所需标准时,奶牛趴卧时间会相对减少,从而导致奶牛生理变化,最终影响奶牛健康。不达标的卧床表面还会引起奶牛乳房炎和肢体疾病,导致产奶量减少、奶品质下降,降低了养殖经济效益。为保持舒适平整、适宜躺卧的卧床表面,需每天加铺厚度 2 cm 左右的新垫料,并进行平整。在卧床垫料中,沙子卧床对乳房炎和蹄病有改善作用^[4]。

目前,欧美发达国家采用法国库恩 8100 ProTwin Slinger 为代表的侧式抛撒机,该机采用高速旋转的锤头抛撒沟肥、泥浆、堆肥、厩肥、沙粪肥和垫料等物料,对干燥物料和含水率达 99% 的物料都具有非常好的抛撒效果。锤头可自由摆动,能够吸收高速作业时大部分异物的撞击力,冲击小,作业效果良好。国内基本采用拖拉机将垫料运进圈舍,然后依靠人工进行抛撒,其作业效率低,劳动强度大。部分养殖企业采用胶带式抛撒装置进行作业,但抛撒幅宽小、均匀性差。随着养殖规模的不断扩大,卧床维护工作也越发繁重,由于缺乏专业垫料抛撒机械,使卧床舒适度较差,导致奶牛单产水平低,这成为制约奶牛养殖业发展的瓶颈。

针对我国奶牛养殖现状,本文设计一种锤式奶牛卧床垫料抛撒机,重点对锤式抛撒机构进行设计与试验,以期实现垫料抛撒全程机械化。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

锤式奶牛卧床垫料抛撒机主要由轻卡底盘、车厢、螺旋输送机构、垫料抛撒机构和液压传动系统组成,整机结构如图 1 所示。

轻卡底盘的内燃机为行走系统和液压系统提供动力,车厢装载垫料。为了减小垫料残留,车厢采用 V 形结构,如图 2 所示。螺旋输送机构安装在车厢底部,主要由 2 个径向柱塞马达和螺旋输送机组成。径向柱塞马达带动螺旋输送机转动,将垫料由前向

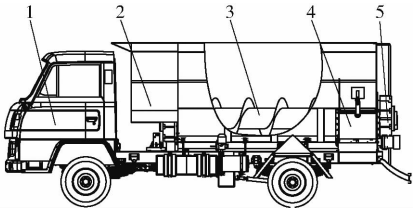


图 1 奶牛卧床垫料抛撒机结构示意图
Fig.1 Structure diagram of cow bedding material spreader
1.轻卡底盘 2.车厢 3.螺旋输送机构 4.垫料抛撒机构 5.液压传动系统

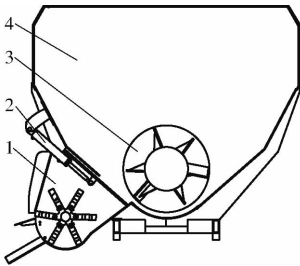


图 2 车厢结构示意图
Fig.2 Structure diagram of carriage
1.锤式垫料抛撒机构 2.料门调整机构 3.螺旋输送机构 4.箱体

后输送。垫料到达车厢后部,被拨片推向外料口,锤式垫料抛撒机构将垫料从左侧抛撒到卧床表面。

卧床垫料抛撒机设计参数如表 1 所示。

表 1 整机设计参数	
Tab.1 Design parameters of machine	
参数	数值
作业速度/(km·h ⁻¹)	3~5
螺旋输送机直径/mm	650
抛撒垫料平均厚度/mm	17~22
有效抛撒幅宽/m	≥5
抛撒均匀性变异系数/%	≤35

1.2 工作原理

奶牛卧床垫料抛撒机在作业前,首先通过液压缸将出料口的料门打开,分别通过径向柱塞马达和轴向柱塞马达启动螺旋输送机构和垫料抛撒机构,垫料经螺旋输送机构从前输送到后面,再由垫料抛撒机构从车厢的左侧均匀地抛到卧床上,完成垫料运输与抛撒作业。

1.2.1 垫料抛撒机构

垫料抛撒机构主要由出料门、锤头、抛撒主轴、抛料罩、下挡板、上挡板和箱体出料门液压缸组成,如图 3 所示。

出料门液压缸能调整出料口的开启大小,控制

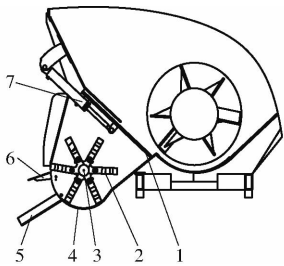


图3 垫料抛撒机构结构示意图

Fig.3 Schematic of spreading mechanism

1. 出料门 2. 锤头 3. 抛撒主轴 4. 抛料罩 5. 下挡板 6. 上挡板 7. 出料门液压缸

垫料抛撒量。呈螺旋状排列的锤头安装在抛撒主轴上,由柱塞马达带动高速旋转,将垫料抛出。通过调整下挡板角度,可以控制抛撒垫料的最近距离,使垫料落在卧床上。通过调整上挡板角度,可以控制垫料抛撒距离。

1.2.2 传动系统

采用液压系统驱动垫料螺旋输送机构与抛撒机构,液压原理如图4所示。

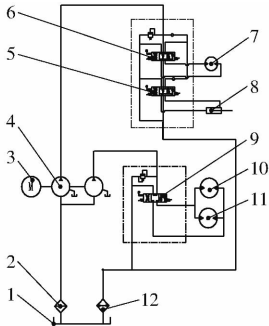


图4 传动系统原理图

Fig.4 Schematic of transmission system

1. 液压油箱 2. 过滤器 3. 发动机 4. 双联齿轮泵 5. 换向阀 I
6. 换向阀 II 7. 柱塞马达 8. 出料门液压缸 9. 换向阀 III
10. 径向柱塞马达 I 11. 径向柱塞马达 II 12. 散热器

2 结构及参数设计

2.1 锤头回转半径

锤头回转半径对抛撒主轴的平衡和振动影响较大,目前秸秆与根茬粉碎还田机的动刀回转半径在240~300 mm 范围内^[9-12]。沙子较重,考虑锤头末端线速度和主轴动平衡等因素,选取锤头的回转半径 R 为240 mm。

2.2 抛撒转速

圆盘式铲抛机把土抛到抛撒幅宽5 m 左右的末端线速度应大于20 m/s,国内外青饲料抛送装置径向叶片的端部线速度为30~43 m/s^[13-15],以30~43 m/s 为参照初选抛送主轴的转速范围,则

$$v_c = \omega R \tag{1}$$

其中 $\omega = 2\pi n' / 60$ (2)

式中 v_c ——锤头回转末端线速度, m/s
 ω ——主轴角速度, rad/s
 n' ——抛送主轴转速, r/min

计算可得: $1\,194\text{ r/min} \leq n' \leq 1\,712\text{ r/min}$ 。

由于垫料抛撒距离较近,选取抛撒主轴转速 n' 为1 200 r/min,锤头回转末端线速度 v_c 为30 m/s。

2.3 物料抛出角及锤头数量

物料抛出角 γ 是影响抛送效率以及消耗功率的关键因素,试验证明叶片式抛送装置物料抛出角最佳范围为 $60^\circ \sim 130^\circ$ ^[16-17]。本研究采用 $75^\circ \leq \gamma \leq 105^\circ$ (γ 起始于锤头末端沿抛撒室外壳开始圆周运动,终止于沙子离开抛撒室外壳),抛料切线角 β 为 $20^\circ \sim 50^\circ$,上挡板开启角 δ 为 $30^\circ \sim 100^\circ$ 。锤头数量和排列对抛撒机构的受力、振动、能耗和抛撒质量影响较大:增加锤头数量能提高抛撒质量,利于机构平衡,但功耗增大;减少锤头数量能降低功耗,但抛撒质量降低,且难以平衡。抛送青贮饲料或谷物的叶片式抛送机构叶片数常取4^[13,18-20],本研究抛送密度较高的沙子,采用单螺旋线排列,在一周螺旋线上等间隔安装6片锤头,如图5所示。

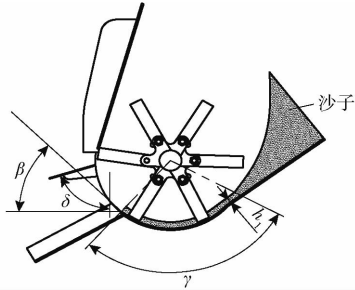


图5 沙粒抛撒示意图

Fig.5 Sand spreading diagram

2.4 锤头设计

沙子在抛送过程中受到的离心力主要聚集在锤头端部,形成一种稳定的流态,如图5所示。根据体积相等原则得

$$uS_T \frac{\gamma}{360} \pi [R^2 - (R - h_1)^2] \frac{n'}{60} r = L_1 S_1 h_2 \tag{3}$$

式中 u ——锤头缠绕圈数
 S_T ——锤头缠绕螺距, m
 h_1 ——抛送区垫料平均厚度, m
 L_1 ——垫料抛撒宽度,取5 m
 S_1 ——抛撒机每秒前进距离,取1.1 m
 h_2 ——卧床补充垫料厚度,取0.02 m
 r ——落在卧床的垫料百分比,取95%

降低抛送区物料的厚度能减小锤头抛送力,降低冲击。沙子的密度较大,初选 h_1 为0.024 m,由此得 $0.57\text{ m} \leq uS_T \leq 0.81\text{ m}$ 。

为防止漏抛,选锤头端部在螺旋轴线方向的重

合度 $\varepsilon_1 = 50\%$ 。取 $u = 1$ ，则锤头端部长度 L_7 为 $0.19 \sim 0.27$ m，此时锤头端部的尺寸较长。取 $u = 2$ ，共有 12 把锤头，重合度 $\varepsilon_1 = 50\%$ 时，端部长度为 $0.095 \sim 0.135$ m。在每个抛送角，总有 2 把锤头，相距 1 个螺距，有利于提高抛撒性能。最终确定的锤头参数如表 2 所示。

表 2 锤头主要参数
Tab.2 Main parameters of hammer

参数	数值
锤头缠绕圈数 u	2
锤头缠绕螺距 S_T/m	0.3
锤头数量/把	12
锤头端部长度 L_7/m	0.1

垫料抛撒主要依靠锤头的惯性力，锤头上部质量对惯性力和抛撒影响较小。减小上部尺寸能够减小锤头质量，降低整个抛送机构的质量，锤头形状尺寸如图 6 所示。

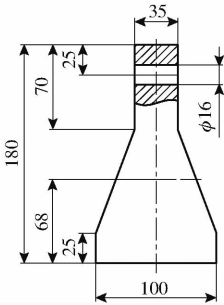


图 6 锤头形状尺寸示意图
Fig.6 Shape and size of hammer

抛撒机构工作时锤头作高速旋转运动，在离心力作用下，锤头处于圆周径向位置，锤头工作时的受力分析如图 7 所示， F 为锤头平均抛送力； F_1 为离心力； mg 为锤头的重力； R_1 为抛撒主轴中心到锤头重心的距离； θ 为锤头工作偏转角； L_2 为离心力 F_1 到销轴中心的力臂； L_3 为抛撒主轴中心到销轴中心的距离； L_4 为销轴中心到锤头端部的距离； L_5 为销轴中心到锤头重心的距离； L_6 为抛送阻力到锤头销轴中心

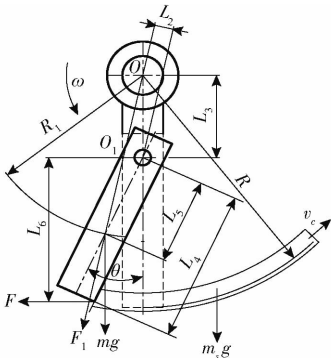


图 7 锤头受力分析

Fig.7 Analysis diagram of forces acted on hammer

的力臂。
取物料抛出角 $\gamma = 105^\circ$ ，设锤头将区域内的所有沙子全部以 30 m/s 的速度抛出，根据动能守恒定律有

$$FS_2 = \frac{1}{2}m_s v_c^2 \tag{4}$$

式中 m_s ——单锤头抛送沙子质量，取 1.58 kg
 S_2 ——单锤头沙子抛送距离，取 0.44 m
计算锤头平均抛送力 $F = 1\,616 \text{ N}$ ，忽略销轴对锤头的摩擦力矩，由图 7 可得

$$\frac{L_2}{L_3} = \frac{L_5 \sin \theta}{R_1} \tag{5}$$

作用在锤头上，相对于销轴中心 O_1 的力矩平衡方程为

$$FL_4 \cos \theta = mgL_5 \sin \theta + m\omega^2 R_1 L_2 \tag{6}$$

式中 m ——机构质量， kg
 g ——重力加速度，取 9.8 m/s^2
整理得

$$\tan \theta = \frac{F}{m \frac{L_5}{L_4} (g + \omega^2 L_4)} \tag{7}$$

由式(7)和式(4)可知，增大 m 、 L_5/L_4 和 ω 可以降低锤头偏转角 θ ，选择锤头厚度分别为 30、40、50 mm，对锤头的偏转角、机构偏心距与离心力进行计算，结果如表 3 所示。

表 3 不同厚度锤头的偏转角、机构偏心距与离心力
Tab.3 Deflection angle, mechanism eccentricity and centrifugal force of hammers of different thicknesses

厚度/ mm	偏转角 $\theta/(^\circ)$	机构质量/ kg	偏心距 e/mm	离心力/ N
30	44.6	53.7	5.1	4 323
40	36.5	63.6	4.2	4 223
50	30.5	73.5	3.5	4 095

由表 3 可知，当锤头厚度为 50 mm 时，锤头的偏转角为 30.5° ，此时锤头端部与抛料罩之间的间隙较小，能有效地实现抛料，离心力也显著降低。由于锤头高速旋转，不断与沙子产生摩擦，磨损比较严重，因此锤头材质选用 16Mn。

3 仿真分析

3.1 仿真模型建立

3.1.1 仿真模型与物料特性参数选择

颗粒离散单元法 (Discrete element method, DEM) 是模拟颗粒系统仿真分析的一种物体系统动力学数值计算方法。为简化计算过程，将沙子等效为球型颗粒，直径为 3 mm，密度为 $1\,600 \text{ kg/m}^3$ 。对物料特性参数进行测定，结果如表 4 所示。

表 4 物料特性参数

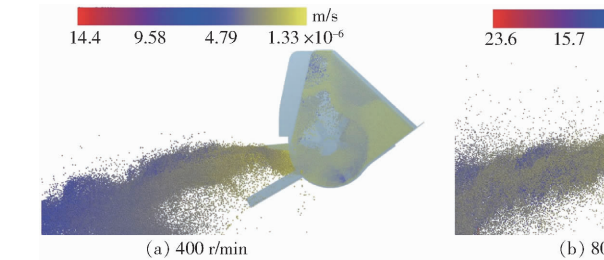
Tab.4 Material properties of particles			
参数	颗粒	地面	钢材
泊松比	0.3	0.5	0.3
剪切模量/MPa	23	110	70 000
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 600	1 250	7 800
接触力学参数	弹性恢复系数	颗粒-颗粒	0.10
		颗粒-钢材	0.20
		颗粒-地面	0.06
		颗粒-颗粒	0.545
	静摩擦因数	颗粒-钢材	0.500
		颗粒-地面	1.130
		颗粒-颗粒	0.01
		颗粒-钢材	0.01
	动摩擦因数	颗粒-地面	1.20

在 UG 中建立抛撒装置的三维实体模型,以 .stp 格式导入 EDEM 中。

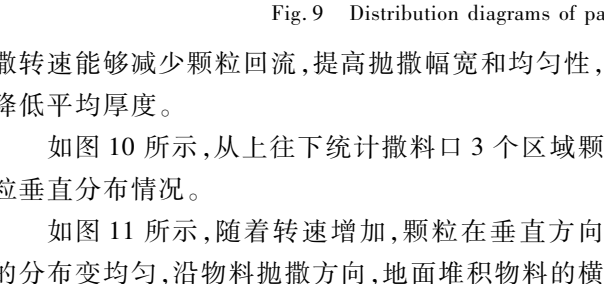
3.1.2 仿真试验设计

采用 EDEM 软件的 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型,设定颗粒总数为 1 187 500,每秒产生 475 000 个颗粒,初始速度 2 m/s。根据预试验,可知影响抛撒机构的关键因素为抛撒转速、上挡板开启角、抛料切线角和上挡板长度,以沙子抛撒幅宽、地面堆积物料厚度、抛撒均匀性变异系数(CV)为抛撒性能指标。单因素试验各因素水平如表 5 所示。

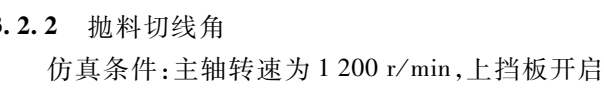
在测区内沿抛撒宽度确定的中心线上,间隔 0.5 m 选定 3 个小区,每个小区连续取 3 个测量段,每个测量段的纵向长度为 0.05 m,宽度为抛撒宽度的 0.06 倍。在规定的作业速度下作业,测量每个测量段的沙子质量,计算沙子抛撒均匀性变异系数。



(a) 400 r/min



(b) 800 r/min



(c) 1200 r/min

图 9 不同转速的颗粒抛撒速度分布

Fig.9 Distribution diagrams of particle spreading speed at different speeds

撒转速能够减少颗粒回流,提高抛撒幅宽和均匀性,降低平均厚度。

如图 10 所示,从上往下统计撒料口 3 个区域颗粒垂直分布情况。

如图 11 所示,随着转速增加,颗粒在垂直方向的分布变均匀,沿物料抛撒方向,地面堆积物料的横向分布均匀性变好。

3.2.2 抛料切线角

仿真条件:主轴转速为 1 200 r/min,上挡板开启

表 5 单因素试验的因素水平

Tab.5 Single factors and test levels				
水平	因素			
	抛撒转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	抛料切线 角/ $(^{\circ})$	上挡板开 启角/ $(^{\circ})$	上挡板长 度/mm
1	400	20	55	180
2	800	35	70	220
3	1 200	50	85	260

3.2 仿真结果分析

3.2.1 抛撒转速

仿真条件:抛料切线角为 50° ,上挡板开启角为 85° ,上挡板长度为 180 mm。如图 8 所示,抛撒转速对地面堆积物料厚度、抛撒幅宽和抛撒均匀性变异系数影响显著。随着抛撒转速增加,地面堆积物料平均厚度分别为 30.4、29、27 mm,抛撒幅宽分别为 2.4、3.6、4.4 m,抛撒均匀性变异系数分别为 33.82%、27.39% 和 22.43%。

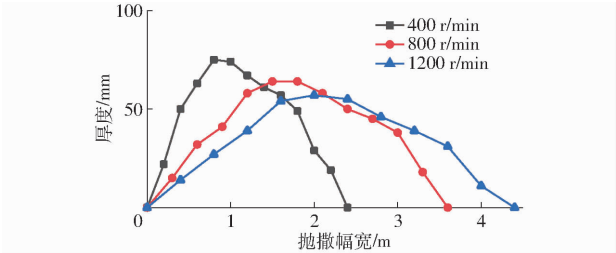


图 8 抛撒转速对地面堆积物料厚度的影响

Fig.8 Influence of spreading speed on thickness of accumulated materials on ground

颗粒抛撒速度分布如图 9 所示,随着转速增加,抛送区内沙子厚度减小,物料回流较少,绝大部分沙子被高速抛出。高速运动的沙子与上挡板发生激烈碰撞后,撒布面变宽,颗粒分布较均匀。因此提高抛

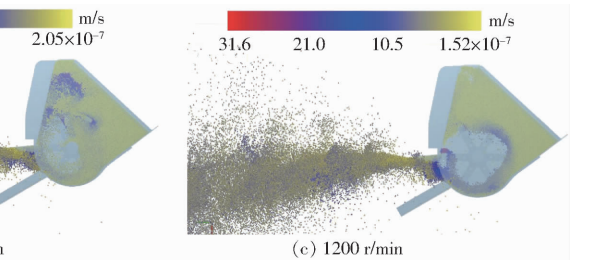


图 9 不同转速的颗粒抛撒速度分布

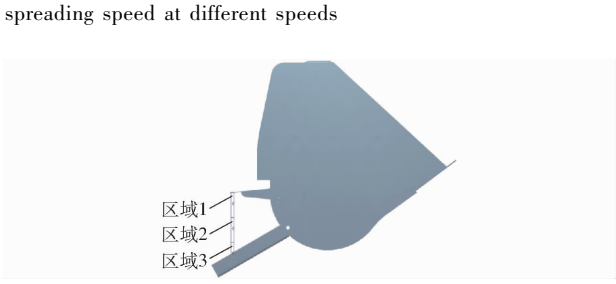


图 10 撒料口颗粒垂直方向统计区域分布示意图

Fig.10 Statistical area distribution diagram of particles in discharge outlet in vertical direction

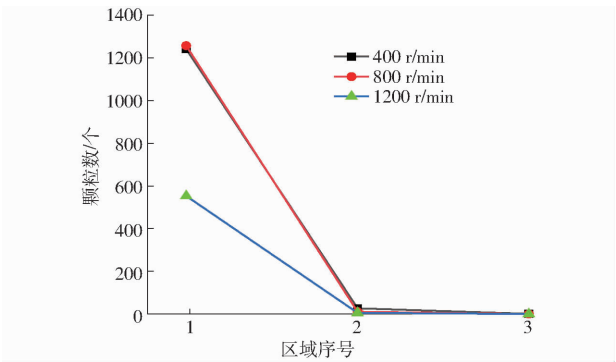


图 11 转速对撒料口颗粒垂直分布的影响

Fig. 11 Effect of spreading speed on distribution of particles in vertical direction

角为 55°,上挡板长度为 180 mm。如图 12 所示,抛料切线角对地面堆积物料厚度、抛撒幅宽和抛撒均匀性变异系数影响显著。随着抛料切线角增加,地面堆积物料平均厚度分别为 15.4、16.4、27.8 mm,抛撒幅宽分别为 6、5.5、2.5 m,抛撒均匀性变异系

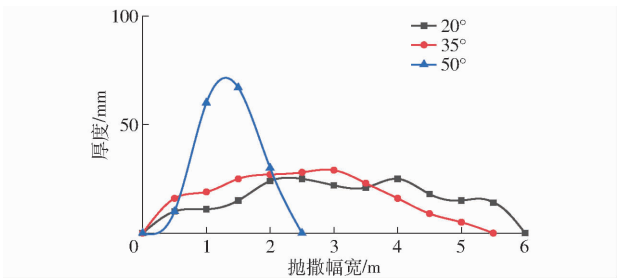


图 12 抛料切线角对地面堆积物料厚度的影响
Fig. 12 Influence of spreading tangent angle on thickness of accumulated materials on ground

数分别为 26.74%、33.88% 和 37.57%。

颗粒抛撒速度分布如图 13 所示,随着物料抛出角的增加,物料回流增加,抛送区内的沙子厚度增大。抛出的沙子与上挡板发生激烈碰撞后,撒布面变窄,颗粒分布不均匀程度增加。因此减小抛料切线角,能够减轻颗粒回流现象,提高抛撒幅宽和均匀性,降低平均厚度。

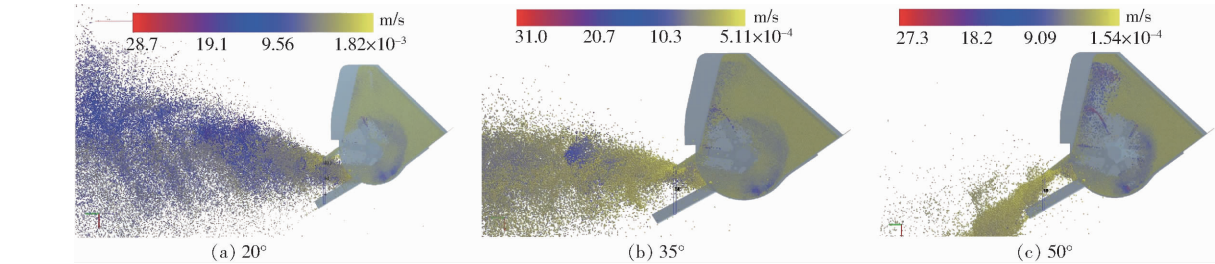


图 13 不同抛料切线角的颗粒抛撒速度分布

Fig. 13 Distribution diagrams of particle spreading speed at different spreading tangent angles

如图 14 所示,随着抛料切线角的增大,颗粒在撒料口垂直方向主要集中在区域 1 内,地面堆积物料横向分布均匀性变差。

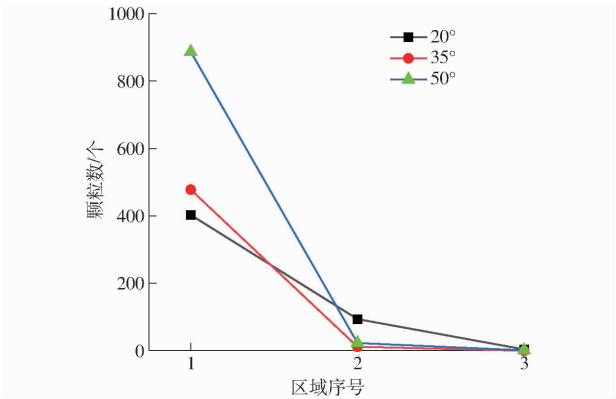


图 14 抛料切线角对撒料口颗粒垂直分布的影响

Fig. 14 Effect of spreading tangent angle on distribution of particles in vertical direction

3.2.3 上挡板开启角

仿真条件:抛撒主轴转速 400 r/min,抛料切线角 50°,上挡板长度 180 mm。如图 15 所示,上挡板开启角对地面堆积物料厚度、抛撒幅宽和抛撒均匀性变异系数影响显著。随着开启角的增加,地面堆

积物料平均厚度分别为 32、30.5、27 mm,抛撒幅宽分别为 2、2.5、3.5 m,抛撒均匀性变异系数分别为 44.42%、39.25% 和 33.82%。

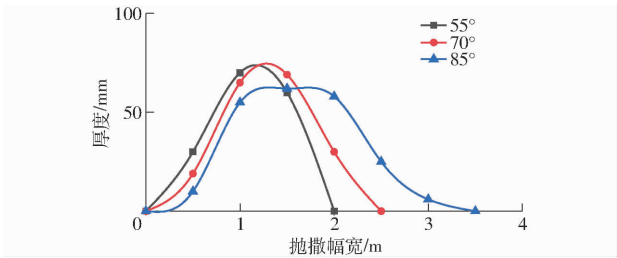


图 15 上挡板开启角对地面堆积物料厚度的影响
Fig. 15 Influence of opening angle of upper baffle on lateral thickness of accumulated materials on ground

颗粒抛撒速度分布如图 16 所示,随着上挡板开启角的增加,物料回流减小,抛送区内的沙子厚度变小。抛出的沙子与上挡板碰撞较轻,撒布面变宽,颗粒分布均匀度增加。因此增加上挡板开启角,能够减轻颗粒回流现象,提高抛撒的幅宽和均匀性,降低平均厚度。

如图 17 所示,随着上挡板开启角的增加,颗粒在撒料口垂直方向的分布变均匀,地面堆积物料横

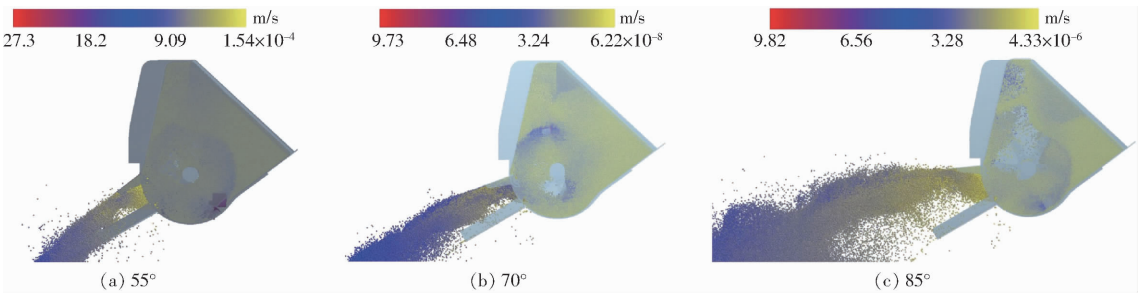


图 16 不同上挡板开启角的颗粒抛撒速度分布

Fig. 16 Distribution diagrams of particle spreading speed at different opening angles of upper baffle

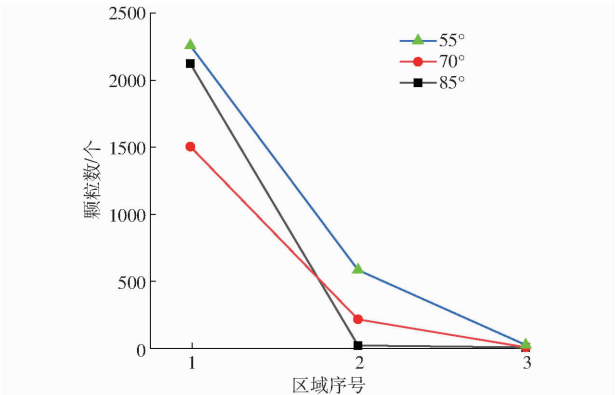


图 17 上挡板开启角对撒料口颗粒垂直分布的影响

Fig. 17 Effect of opening angle of upper baffle on distribution of particles in vertical direction

向分布均匀性变好。

3.2.4 上挡板长度

仿真条件:上挡板开启角 70°,抛料切线角 35°,抛撒主轴转速 800 r/min。如图 18 所示,随着挡板长度由 180 mm 增加至 220 mm,地面堆积物料平均厚度由 25.6 mm 增加至 32.1 mm,抛撒幅宽由 3.5 m 减少至 3 m。但挡板长度由 220 mm 增加到 260 mm 时,对地面堆积物料平均厚度和抛撒幅宽影响不显著。随着挡板长度增加,抛撒均匀性变异系数显著增大,分别为 38.13%、49.81% 和 55.41%,地面堆积物料的横向分布均匀性变差。

颗粒抛撒速度分布如图 19 所示,随着上挡板长度的增加,物料回流和抛送区内的沙子厚度变化不明显。但抛出的沙子与上挡板发生激烈碰撞后,撒布面变窄,颗粒分布不均匀程度增加。因此减小挡板长度,能够提高抛撒的幅宽和均匀性,降低平均厚度。

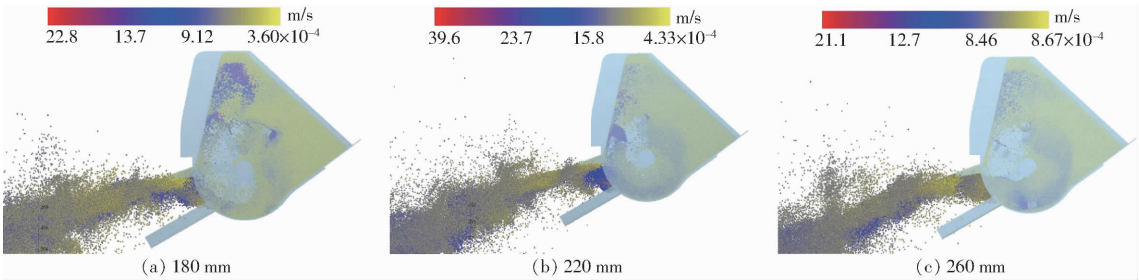


图 19 不同上挡板长度的颗粒抛撒速度分布

Fig. 19 Distribution diagrams of particle spreading speed at different lengths of upper baffle

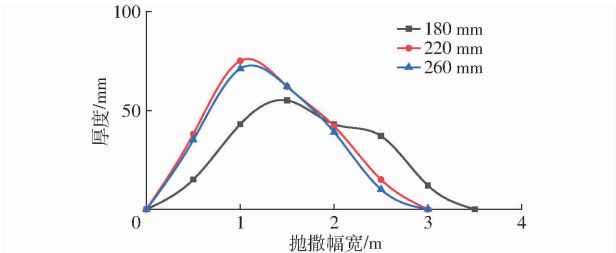


图 18 上挡板长度对地面堆积物料厚度的影响

Fig. 18 Influence of length of upper baffle on lateral thickness of accumulated materials on ground

如图 20 所示,上挡板长度由 220 mm 降至 180 mm 时,颗粒在撒料口垂直方向的分布变均匀,地面堆积物料横向分布均匀性变好。

4 试验

4.1 试验条件与测试指标

试验在宁夏回族自治区中卫市众鑫牧场进行,沙子直径小于等于 3 mm,含水率为 3%,图 21 为奶牛卧床尺寸。

为了便于采集试验数据,先在干净平整的地面进行抛撒试验并测量试验数据,如图 22a 所示,卧床作业情况如图 22b 所示。由仿真结果可知,提高抛撒转速、减小抛料切线角、增大上挡板开启角、减小上挡板长度,抛撒的距离、幅宽和均匀性越好。为提高抛撒均匀性,并尽可能地使物料落在卧床上,选取抛撒转速为 1 200 r/min、抛料切线角为 35°、上挡板开启角为 70°、上挡板长度为 180 mm 和行驶速度为 4 km/h 进行仿真分析和现场试验,取 3 次测量数据的平均值进行分析。主要测试指标:抛撒幅宽、地面

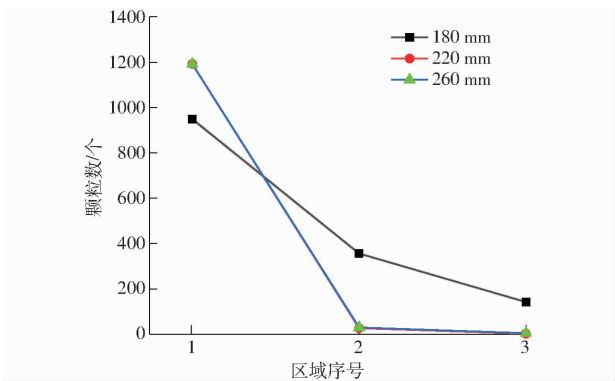


图 20 上挡板长度对撒料口颗粒垂直分布的影响
Fig. 20 Effect of length of upper baffle on distribution of particles in vertical direction

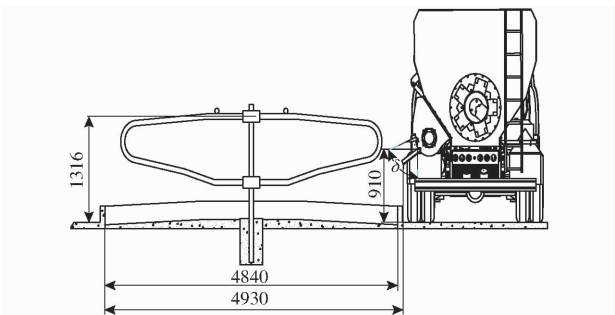


图 21 奶牛卧床尺寸
Fig. 21 Size of cow bedding



图 22 样机性能试验
Fig. 22 Performance experiment of prototype

堆积物料平均厚度、抛撒均匀性变异系数和机具作业稳定性。

4.2 试验结果与分析

仿真与试验对比如图 23 所示,两者基本吻合,证实了仿真分析的可靠性。试验测试的抛撒幅宽为 5.1 m,地面堆积物料平均厚度为 22 mm,抛撒均匀性变异系数为 31.96%,均达到了设计目标,满足了

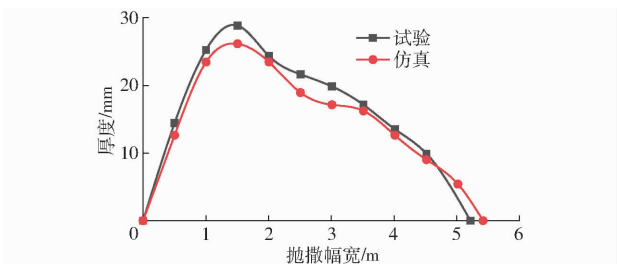


图 23 仿真与试验对比
Fig. 23 Comparison of simulation and experiment

养殖场的使用要求。

试验过程中,抛撒机各关键部件工作稳定,能够可靠地完成垫料的抛撒,没有发生堵塞现象。

5 结论

(1)设计了由轻卡底盘、螺旋输送机构、液压传动系统和锤式垫料抛撒机构组成的奶牛卧床垫料抛撒机,实现了垫料的机械化抛撒作业。建立了锤式垫料抛撒机构作业的理论模型,并对锤头回转半径、抛撒转速、物料抛出角、锤头数量和锤头尺寸进行了设计与计算。

(2)采用 EDEM 对抛撒转速、抛料切线角、上挡板开启角和上挡板长度等关键因素进行了仿真分析,结果表明,提高抛撒转速、减小抛料切线角、增大上挡板开启角和减小上挡板长度,能够显著增大物料抛撒幅宽、提高抛撒均匀性,并能够降低地面堆积物料平均厚度。

(3)针对幅宽 5 m 的卧床,选取抛撒转速为 1 200 r/min、抛料切线角为 35°、上挡板开启角为 70°、上挡板长度为 180 mm 和行驶速度为 4 km/h 进行 EDEM 仿真分析和现场作业试验,结果表明,仿真分析与试验结果基本一致,证实了仿真分析的可靠性。试验测试抛撒幅宽为 5.1 m,地面堆积物料平均厚度为 22 mm,抛撒均匀性变异系数为 31.96%,达到了设计目标,满足养殖场的使用要求。抛撒机各关键部件工作稳定,能够可靠地完成垫料的抛撒。

参 考 文 献

[1] DRISSLER M, GAWORSKI M, TUCKER C B, et al. Freestall maintenance: effects on lying behavior of dairy cattle[J]. Journal of Dairy Science, 2005, 88(7): 2381–2387.
[2] MARGIT B J, LENE J P, LENE M. The effect of reward duration on demand functions for rest in dairy heifers and lying requirements as measured by demand functions[J]. Applied Animal Behaviour Science, 2005, 90(3–4): 207–217.
[3] NORRING M, MANNINEN E, DE PASSILLÉ A M, et al. Effects of sand and straw bedding on the lying behavior, cleanliness, and hoof and hock injuries of dairy cows[J]. Journal of Dairy Science, 2008, 91(2): 570–576.
[4] RUSHEN J, HALEY D, DE PASSILLÉ A M. Effect of softer flooring in tie stalls on resting behavior and leg injuries of lactating cows[J]. Journal of Dairy Science, 2007, 90(8): 3647–3651.
[5] RUTHERFORD K M D, LANGFORD F M, JACK M C, et al. Hock injury prevalence and associated risk factors on organic and nonorganic dairy farms in the United Kingdom[J]. Journal of Dairy Science, 2008, 91(6): 2265–2274.

- [6] HUSFELDT A W, ENDRES M I, SALFER J A, et al. Management and characteristics of recycled manure solids used for bedding in midwest freestall dairy herds[J]. Journal of Dairy Science, 2012, 95(4): 2195 – 2203.
- [7] 李荣岭, 宫本芝, 李建斌, 等. 奶牛场“大通铺”卧床技术模式探讨[J]. 中国奶牛, 2019(5): 8 – 10.
LI Rongling, GONG Benzhi, LI Jianbin, et al. Explore on technical modes of compost bedding housing in dairy farm [J]. China Dairy Cattle, 2019(5): 8 – 10. (in Chinese)
- [8] 罗杨, 李锡智, 马翀, 等. 两种卧床垫料对奶牛趴卧行为及健康状况的影响[J]. 中国奶牛, 2018(3): 14 – 17.
LUO Yang, LI Xizhi, MA Chong, et al. Effects of different bedding materials on lying behaviors and health condition of dairy cows [J]. China Dairy Cattle, 2018(3): 14 – 17. (in Chinese)
- [9] 郑智旗, 何进, 李洪文, 等. 动定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 108 – 116.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 108 – 116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s017&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.017. (in Chinese)
- [10] 胡凯, 王吉奎, 李斌, 等. 棉秆粉碎还田与残膜回收联合作业机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 24 – 32.
HU Kai, WANG Jikui, LI Bin, et al. Development and experiment of combined operation machine for cotton straw chopping and plastic film collecting[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 24 – 32. (in Chinese)
- [11] 章志强, 何进, 李洪文, 等. 可调节式秸秆粉碎抛撒还田机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 76 – 87.
ZHANG Zhiqiang, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on straw chopper cum spreader with adjustable spreading device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 76 – 87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170910&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.010. (in Chinese)
- [12] 田阳, 林静, 李宝筏. 气力式秸秆深埋还田机输送装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 36 – 44.
TIAN Yang, LIN Jing, LI Baofa. Design and test of conveying device of pneumatic straw deep burying and returning machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 36 – 44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181205&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.005. (in Chinese)
- [13] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [14] 李明, 王金丽, 邓恰国, 等. 1GYF-120 型甘蔗叶粉碎还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 121 – 126.
LI Ming, WANG Jinli, DENG Yiguo, et al. Structural design and experiments on sugarcane leaf shattering and returning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(2): 121 – 126. (in Chinese)
- [15] 陈黎卿, 王莉, 张家启, 等. 适用于全喂入联合收割机的 1JHSX-34 型秸秆粉碎机设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 28 – 32.
CHEN Liqing, WANG Li, ZHANG Jiaqi, et al. Design of 1JHSX-34 straw crusher for whole-feeding combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 28 – 32. (in Chinese)
- [16] 翟之平, 吴雅梅, 王春光. 物料沿抛送叶片的运动仿真与高速摄像分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 23 – 28.
ZHAI Zhiping, WU Yamei, WANG Chunguang. Dynamic simulation and high-speed camera analysis on materials moving along throwing impellers[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 23 – 28. (in Chinese)
- [17] 翟之平, 高博, 杨忠义, 等. 叶片式秸秆抛送装置功耗分析与参数优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 26 – 33.
ZHAI Zhiping, GAO Bo, YANG Zhongyi, et al. Power consumption and parameter optimization of stalk impeller blowers[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 26 – 33. (in Chinese)
- [18] 翟之平, 王春光. 叶片式抛送装置气流流场数值模拟与优化[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 84 – 87.
ZHAI Zhiping, WANG Chunguang. Numerical simulation and optimization for air flow in an impeller blower[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 84 – 87. (in Chinese)
- [19] 翟之平, 杨忠义, 高博, 等. 基于 Mixture 模型的叶片式抛送装置内气固两相流模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 50 – 58.
ZHAI Zhiping, YANG Zhongyi, GAO Bo, et al. Simulation of solid-gas two-phase flow in an impeller blower based on Mixture model[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22): 50 – 58. (in Chinese)
- [20] 穆桂脂, 辛青青, 玄冠涛, 等. 甘薯秧蔓回收机仿垄切割粉碎抛送装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 53 – 62.
MU Guizhi, XIN Qingqing, XUAN Guantao, et al. Design and experiment of knife roller and throwing device for sweet potato vine recycling machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 53 – 62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191206&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.006. (in Chinese)