

槽轮式补饲机颗粒动力学数值模拟与试验

闫银发^{1,2} 孟德兴¹ 宋占华^{1,2} 刘立强³ 李法德^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018;
3. 黑龙江省农业机械工程科学研究院, 哈尔滨 150081)

摘要: 为研究槽轮式补饲机颗粒饲料的排料特性,采用 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型,分析颗粒的碰撞接触力和阻尼力,建立颗粒饲料的平动运动和滚动运动方程,并采用离散元方法,数值模拟槽轮转动时颗粒群的速度分布、运动规律及单个颗粒与槽轮中心轴的距离,定性描述槽轮转速对颗粒速度分布、带动层厚度、槽轮充满系数的影响。采用临沂永澳 700 和永澳 997 颗粒饲料对四槽轮式补饲机的排料特性进行试验,得到槽轮充满系数随着槽轮转速的增加而减小,并且槽轮转速对充满系数有显著影响。同时,进行四槽轮补饲机的定比例和定量投料试验,经检测,投料计量误差最大值为 1.13%,最小值为 0.56%,平均计量误差为 0.83%,颗粒饲料的掺混质量良好。

关键词: 槽轮式补饲机; 颗粒群; 离散元; 数值模拟

中图分类号: S817.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0249-05

Particle Kinetic Simulation and Experiment for Flute-wheel Feeding Machine

Yan Yinfa^{1,2} Meng Dexing¹ Song Zhanhua^{1,2} Liu Liqiang³ Li Fade^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China
3. Heilongjiang Institute of Agricultural Mechanical Engineering Science, Harbin 150081, China)

Abstract: With the aim to research the pellets discharge characteristics of flute-wheel feeding machine, the Hertz - Mindlin no slip contact model was used to analyze the contact force and damping force between interacting particles, and then the translational motion and rolling motion equations for pellet feed were established. By using discrete element method, particles velocity distribution, law of particles motion and the distance from a single particle to central axis of flute-wheel were simulated, and the effects of flute-wheel speed on particles velocity distribution and thickness of drive layer were analyzed. Discharge characteristic experiments of four flute-wheel feeding machine were done by using Linyi Yongao 700 and Yongao 997 pellets. According to the experimental results, conclusions were drawn that the filling coefficient of flute-wheel was decreased with the increase of rotation speed, and the flute-wheel speed had a significant impact on filling coefficient. Meanwhile, the fixed proportion and fixed weight feeding experiment of four flute-wheel feeding machine was carried out, the testing result showed that the maximum measurement error of feeding was 1.13%, the minimum error was 0.56%, the average error was 0.83%, and the blend quality of pellet was good. In conclusion, four flute-wheel feeding machine can meet the precise feeding, and also it can meet the automatic mixing of a variety of fine pellets. Compared with the screw conveyor feeding machine, the flute-wheel feeding machine has advantages in simple mechanical structure, synchronous metering discharge, effective particles impingment mixing and high speed discharge.

Key words: flute-wheel feeding machine; particles; discrete element; numerical simulation

收稿日期: 2016-07-15 修回日期: 2016-08-19

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B10)

作者简介: 闫银发(1976—),男,副教授,主要从事智能农业装备和奶牛养殖机械研究, E-mail: sd28@163.com

通信作者: 李法德(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备和农产品加工机械关键技术研究, E-mail: lifade@sdau.edu.cn

引言

为了增加奶牛产奶量、节省饲料成本、降低劳动强度和 提高养殖规模,国内外研究人员以奶牛个体的泌乳阶段、产奶量、体况、基础日粮等信息为基础,研究了奶牛精细饲喂技术,并设计了奶牛精料补饲装置。国外 GARDNER 等^[1]研制了一种移动式太阳能奶牛精料补饲器;PRITCHARD 等^[2]设计了一种计算机控制奶牛精料饲喂器;LUCIEN 等^[3]提出了一种基于无线识别装置的饲喂装置;ZAPPAVIGNA 等^[4]提出了一种通过控制奶牛进入饲喂区的方式来实现自动饲喂奶牛的系统;瑞典 DeLaval 公司研制了一种可投放 4 种不同精饲料的奶牛精料自动饲喂系统^[5-6]。国内高振江等^[7-8]设计了一种自走式奶牛精确饲喂机,并提出了一种基于全混合日粮饲喂技术的精饲料精确饲喂模式;蒙贺伟等^[9]设计了一种双模自走式奶牛精确饲喂装备;李继成等^[10]设计了一种基于单片机的奶牛精确饲喂装备;倪志江等^[11]研制了一款智能化个体奶牛精确饲喂机;谭春林^[12]研制了一款基于螺旋输送的称重式奶牛精量补饲设备;蔡晓华等^[13-14]对奶牛智能化精确饲喂机器人进行了研究。

上述国内外几种装置的计量方式采用的是容积式或称重式。容积式计量机构基本是以螺旋输送机作为计量机构,当补饲的精料为颗粒饲料时,螺旋输送机在转动的过程中,易将颗粒饲料在进料口和输送段的筒壁处挤碎,从而改变饲料容重,影响计量精度。称重式计量方式的精料补饲装置结构复杂、成本高、易受环境因素如振动、撞击等影响,且要多次分别排料,排料时间长,精料不能有效混合^[15]。针对以上问题,SONG 等^[16-18]首次提出并采用槽轮作为计量机构,设计了精料变量补饲系统并进行了试验研究,试验表明槽轮转速对排料过程和计量精度有影响。但对槽轮转速对排料过程的影响机理以及排料过程中颗粒饲料动力学特性的变化未进行研究。本文从颗粒饲料的无滑动接触模型入手,采用离散元数值分析方法,针对圆柱型颗粒饲料,模拟仿真槽轮式补饲机排料过程中颗粒饲料的速度分布和运动规律,研究排料过程中槽轮转速对颗粒饲料动力学特性变化的影响,设计槽轮式补饲机,并进行试验验证。

1 槽轮式补饲机机械结构设计

1.1 槽轮式计量排料装置

槽轮式计量排料装置如图 1 所示,主要有排料盒、槽轮、排料轴、毛刷、槽轮固定盘等组成。设计的

槽轮直径为 100 mm,槽数为 16,锥形圆弧凹槽半径为 6 mm,槽轮工作长度为 110 mm,槽轮长度也可以根据排料量进行设定。

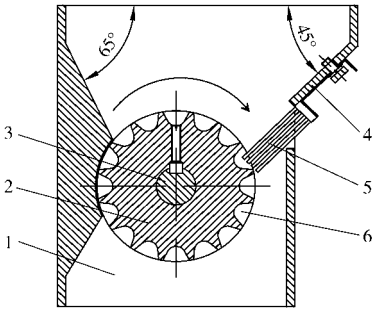


图 1 槽轮式计量排料装置示意图

Fig. 1 Diagram of flute-wheel metering and discharge device

1. 排料盒 2. 计量槽轮 3. 排料轴 4. 毛刷固定板 5. 毛刷
6. 计量槽轮固定盘

1.2 四槽轮补饲机

四槽轮补饲机主要由料仓、槽轮计量排料器、机架、出料漏斗、步进电动机及其驱动器、控制系统等组成,图 2a 为三维仿真图,其结构如图 2b 所示。

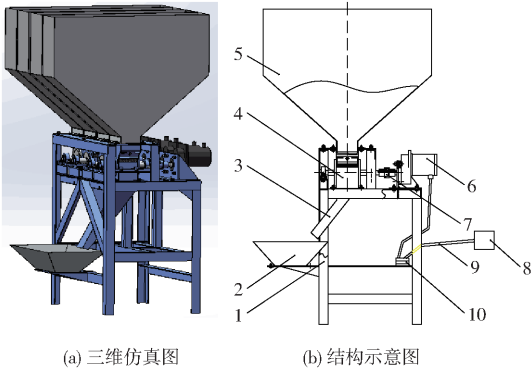


图 2 四槽轮补饲机三维仿真图和结构示意图

Fig. 2 Three dimensional simulation plot and sketch of four flute-wheel feeding machine

1. 机架 2. 饲喂槽 3. 出料漏斗 4. 槽轮计量排料器 5. 料仓
6. 步进电动机 7. 联轴器 8. 饲喂控制中心 9. 信号线 10. 步进电动机驱动器

2 散粒体数值模拟模型及动力学分析

2.1 颗粒的数值模拟模型

试验所用的饲料为临沂永澳饲料有限公司的永澳 700 和永澳 997 饲料。颗粒饲料物理特性参数如表 1 所示。

根据永澳颗粒饲料的物理特性参数,在 EDEM 中采用多个球体叠加组合模型,外观近似为圆柱体,建立 2 种颗粒饲料的仿真模型,模拟永澳 700、永澳 997 颗粒饲料的模型如图 3 所示。模拟的颗粒为干颗粒,颗粒与颗粒之间以及颗粒与边界之间的相互作用是多体作用,且遵循颗粒 Hertz 法向接触理论和 Mindlin - Deresiewicz 切向接触理论,采用 Hertz -

表 1 颗粒饲料物理特性及仿真参数

参数	数值	
	永澳 700	永澳 997
容重/(g·cm ⁻³)	0.63	0.65
直径/mm	3.2	5.7
长度/mm	8.5	14.6
泊松比	0.4	0.4
剪切模量/Pa	1.1×10 ⁷	1.1×10 ⁷
颗粒间恢复系数	0.6	0.6
颗粒间静摩擦因数	0.5	0.5
颗粒间动摩擦因数	0.1	0.1
颗粒与料仓内壁的恢复系数	0.45	0.45
颗粒与料仓内壁的静摩擦因数	0.5	0.5
颗粒与料仓内壁的动摩擦因数	0.05	0.05
颗粒总数	60 000	60 000

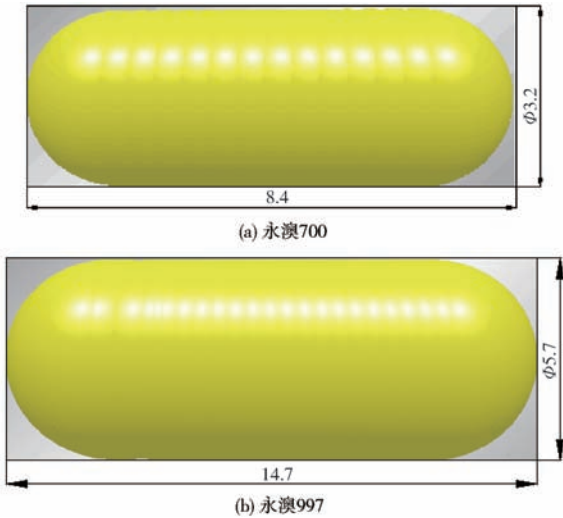


图 3 2 种饲料颗粒的数值模拟模型

Fig. 3 Simulation models of two types of pellet

Mindlin 无滑动接触模型^[19-22],在 EDEM 软件中设定的颗粒仿真参数如表 1 所示。

2.2 颗粒的动力学分析

每个圆柱形颗粒的碰撞接触力及阻尼都可分解为法向力和切向力,其中法向碰撞接触力计算式为

$$F_n = \frac{4}{3} E_0 \sqrt{R_0 \delta^3} \tag{1}$$

其中
$$\frac{1}{E_0} = \frac{1 - \nu_1^2}{2(1 + \nu_1) G_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{2(1 + \nu_2) G_2} \tag{2}$$

式中 E_0 ——2 个相互作用颗粒的等效弹性模量

R_0 ——等效半径

δ ——2 个颗粒间的法向重叠量

$\nu_1、\nu_2$ ——2 个颗粒的泊松比

$G_1、G_2$ ——2 个颗粒的剪切模量

颗粒的等效半径计算式为

$$R_0 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{3}$$

式中 $R_1、R_2$ ——2 个颗粒的半径

法向阻尼力计算式为

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln \varepsilon}{\sqrt{\ln^2 \varepsilon + \pi^2}} \sqrt{2 E_0 m_0} \sqrt[4]{R_0 \delta} v_{nrel} \tag{4}$$

其中
$$m_0 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \tag{5}$$

式中 ε ——颗粒间恢复系数

m_0 ——等效质量

v_{nrel} ——法向相对速度

$m_1、m_2$ ——2 个颗粒的质量

切向碰撞力计算式为

$$F_t = -8 G_0 \sqrt{R_0 \delta} \delta_t \tag{6}$$

其中
$$\frac{1}{G_0} = \frac{2 - \nu_1}{G_1} + \frac{2 - \nu_2}{G_2} \tag{7}$$

式中 G_0 ——2 个相互作用颗粒的等效剪切模量

δ_t ——2 个颗粒间的切向重叠量

切向阻尼力计算式为

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln \varepsilon}{\sqrt{\ln^2 \varepsilon + \pi^2}} \sqrt{2 E_0 m_0} \sqrt[4]{R_0 \delta_t} v_{trel} \tag{8}$$

式中 v_{trel} ——切向相对速度

根据牛顿第二定律,颗粒的平动动力学方程为

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i g + \sum_{i=1}^n (F_n + F_n^d + F_t + F_t^d) \tag{9}$$

式中 m_i ——颗粒 i 的质量

v_i ——颗粒 i 的运动速度

g ——重力加速度

n ——与颗粒 i 接触的颗粒总数

在排料过程中,由于颗粒与颗粒之间的相互作用以及颗粒与料仓臂之间的相互作用,颗粒也会发生转动。颗粒的切向力矩计算式为

$$T_t = R (F_t + F_t^d) \tag{10}$$

式中 R ——颗粒重心到接触点的距离

颗粒的滚动摩擦力矩计算式为

$$T_r = -\mu_r F_n R \hat{\omega} \tag{11}$$

式中 $\hat{\omega}$ ——接触点处颗粒的角速度

μ_r ——滚动摩擦系数

颗粒的转动方程为

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{i=1}^n (T_t + T_r) \tag{12}$$

式中 I_i ——颗粒 i 的转动惯量

ω_i ——颗粒 i 的角速度

3 槽轮式排料器颗粒运动数值模拟

3.1 颗粒群运动速度分布规律

采用永澳 997 饲料仿真模型,如图 3b 所示。数

据采集间隔设为 0.04 s,在 1 s 时刻槽轮开始沿顺时针方向转动。槽轮转速在 20、40、60、80 r/min 时,分别仿真颗粒群的速度分布和运动规律。图 4 为各转速下颗粒群运动仿真的剖面图,剖面垂直于槽轮中心轴。颗粒群的速度分布采用流线矢量表示,红色代表速度最快,蓝色代表速度最慢,分别用 3 号、2 号和 1 号黄线标注,箭头方向标示颗粒群速度方向。

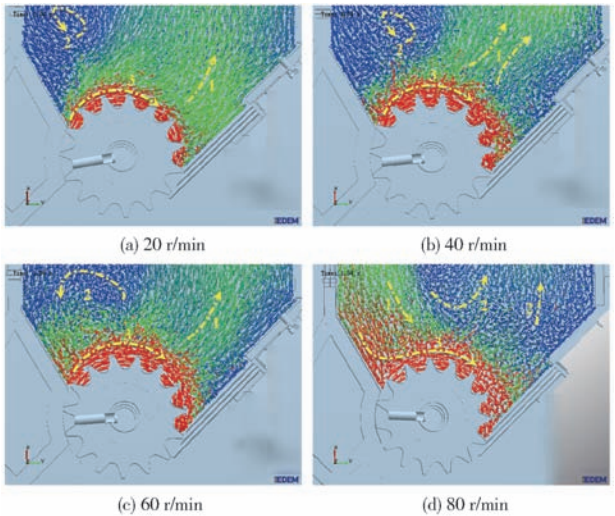


图 4 不同转速下颗粒群的速度分布
Fig.4 Particles velocity distributions at different rotation speeds

当槽轮转速为 20 r/min 时,如图 4a 所示,3 号线标示的颗粒群的速度最快,1 号线标示的颗粒受到槽轮带动颗粒的挤压,沿箭头方向作大面积的慢速运动,并在 2 号标示线位置形成慢速的颗粒涡旋,颗粒可以完全填充槽轮凹槽,充满系数大;随着转速增加,如图 4b、4c 所示,3 号线标示的颗粒群厚度和面积都增大,带动层也发生变化,1 号线标示的速度区域减小,2 号线标示的涡旋区域增大,且二者之间的界限模糊;当转速增加到 80 r/min 时,如图 4d 所示,3 号线标示区域明显扩大,慢速区域分布由左侧变化到右侧,并形成 2 个不同方向的速度分布。中速区域分布由右侧变化到左侧,且与红色的快速区域有交叉混叠,同时,带动层变厚,带动层颗粒的速度明显加快;另外,随着转速增加,颗粒填充槽轮凹槽不紧实,充满系数减小。

3.2 单个饲料颗粒的运动仿真分析

选取 1320 号颗粒,在槽轮转速分别为 20、40、60、80 r/min 时,建立该颗粒在运动过程中相对于槽轮中心轴的距离曲线,如图 5 所示。

在 0~1 s 时间段,为料仓填料阶段,颗粒快速下落,在下落的最后阶段和其他颗粒发生碰撞,下落速度减缓,采样的数据点变得密集并有些波动;从 1 s 时刻开始,槽轮开始转动,颗粒落入槽轮并随槽

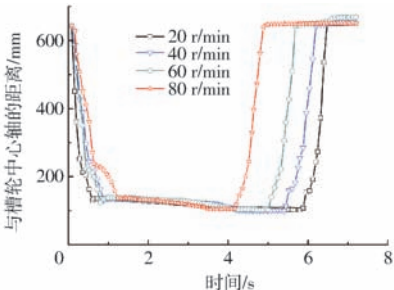


图 5 不同转速下颗粒与槽轮中心轴的距离
Fig.5 Distance between pellet and central axis at different rotation speeds

轮转动,该颗粒与槽轮中心轴的距离基本不变。转速越快,颗粒从槽轮排出的时间越短,如图 5 所示,转速为 20 r/min 时,颗粒从槽轮排出在 6 s 时刻,转速在 80 r/min 时,颗粒从槽轮排出大约在 4.2 s 时刻;颗粒从槽轮排出后,沿出料漏斗下落,并快速远离槽轮中心轴;当下落到饲喂槽后,颗粒与槽轮中心轴的距离不变。

4 槽轮式补饲机排料及掺混试验

选用永澳 997 颗粒饲料,在 10 个不同转速下,槽轮连续旋转 5 r,分别称量投料量,重复 5 次,取平均值作为该转速下槽轮连续转 5 r 所投放精料的质量,并计算槽轮的充满系数。槽轮转速与充满系数的关系如图 6 所示,槽轮充满系数随着槽轮转速的增加而减小,呈直线下降的趋势,其决定系数 R^2 为 0.973 3。槽轮转速对槽轮的充满系数有着明显的影响,从而转速也会影响槽轮的投料精度。

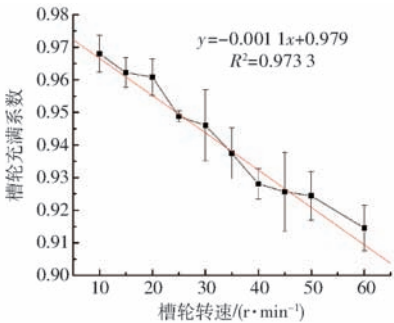


图 6 槽轮转速对充满系数的影响
Fig.6 Effect of rotation speed on filling coefficient of flute-wheel

用临沂永澳 700 和永澳 997 饲料为试验颗粒料。4 个料仓内的颗粒料按照 54%、36%、5%、5% 的比例进行投料混合,投料量设定为 1 200、1 700、2 100 g,分别检测投料精度和掺混均匀性,计量误差最大值为 1.13%,最小值为 0.56%,平均计量误差为 0.83%。颗粒饲料的投放掺混均匀度如图 7 所示。国家机械工业畜牧机械产品质量监督检测中心对设计的四槽轮补饲机的投料精度和掺混均匀进行

了检测,2 项指标均满足奶牛饲喂相关要求。



图 7 4 种颗粒饲料的掺混均匀度
Fig. 7 Blending uniformity of four kinds of pellets

5 结论

(1)采用离散元分析方法,数字模拟槽轮式排

料器在不同转速下颗粒群的速度分布和运动规律,随着槽轮转速的增加,发现带动层变厚,槽轮凹槽的颗粒充满系数减小,经试验验证,槽轮的充满系数随着槽轮转速的增加而减小,从而也会影响排料精度。

(2)通过建立选定颗粒在运动过程中与槽轮中心轴的距离曲线,发现槽轮转速增加可以明显加快颗粒的排出速度。

(3)对四槽轮补饲机进行定比例、定量混合投料试验,经过检测,计量误差最大值为 1.13%,最小值为 0.56%,平均计量误差为 0.83%。经国家机械工业畜牧机械产品质量监督检测中心测定,四槽轮补饲机的投料精度和掺混均匀度均满足奶牛饲喂相关要求。

参 考 文 献

- 1 GARDNER M O, BUCKMASTER D R, MULLER L D. Development of a mobile solar-powered dairy concentrate feeder[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1995, 11(6): 785-790.
- 2 PRITCHARD D E, EASTRIDGE M L, WINKLER J E. Computerized concentrate feeders for dairy cows[EB/OL] (2003-04-30). <http://ohioline.osu.edu/as-fact/0004.html>.
- 3 LUCIEN Eliza Niels, BERG Karel, HOWARD Sie. A device for and a method of automatically supplying feed and/or drink to animal;EUROPEAN,EP1661454B1[P]. 2009-03-25.
- 4 ZAPPAVIGNA P, LIBERATI P, CHIAPPINI U. Feeding control system for dairy cows[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 71(4): 321-329.
- 5 宋占华. 智能化槽轮式奶牛个体精料变量补饲机的研制[D]. 泰安:山东农业大学, 2010.
- 6 李法德,宋占华,颜世涛,等. 奶牛精料自动补饲装置的研究进展[C]//中国农业工程学会 2009 年学术年会论文集,2009: 254-257.
- 7 高振江,李辉,蒙贺伟. 基于全混合日粮饲喂技术的精饲料精确饲喂模式[J]. 农业工程学报, 2013,29(7):148-154.
- 8 高振江,郭跃虎,蒙贺伟,等. 自走式奶牛精确饲喂机控制系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 226-230,236. GAO Zhenjiang, GUO Yuehu, MENG Hewei, et al. Design of self-propelled precise feeding machine control system for single dairy cow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 226-230,236. (in Chinese)
- 9 蒙贺伟,郭跃虎,高振江,等. 双模自走式奶牛精确饲喂装备设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 52-56. MENG Hewei, GUO Yuehu, GAO Zhenjiang, et al. Design and experiment on dual-mode self-propelled precise feeding equipment for dairy cow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 52-56. (in Chinese)
- 10 李继成,高振江,肖红伟,等. 基于单片机的奶牛精确饲喂装备设计与试验[J]. 农业机械学报,2011, 42(1):101-105. LI Jicheng, GAO Zhenjiang, XIAO Hongwei, et al. Design and experiment on dairy cow precise feeding equipment based on MCU[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(1):101-105. (in Chinese)
- 11 倪志江,高振江,蒙贺伟,等. 智能化个体奶牛精确饲喂机设计与实验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12):205-209. NI Zhijiang, GAO Zhenjiang, MENG Hewei, et al. Design and experiment on intelligent precisising feeding machine for single dairy cow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(12):205-209. (in Chinese)
- 12 谭春林. 奶牛饲喂装置的设计研究[D]. 石河子:石河子大学,2007.
- 13 蔡晓华,刘俊杰,吴泽全,等. 奶牛精确饲喂机器人:中国,200620020426.4 [P]. 2006-03-21.
- 14 杨存志,李源源,杨旭,等. FR-200 型奶牛智能化精确饲喂机器人的研制[J]. 农机化研究,2014(2):120-122.
- 15 李法德,宋占华,颜世涛,等. 一种饲养精料自动补饲设备的槽轮式计量装置:中国,200920019530.5[P]. 2009-12-09.
- 16 SONG Zhanhua, YAN Yinfa, YAN Shitao, et al. Design and experimental study on flute-wheel concentrate feeding mechanism for dairy cow[J]. Intelligent Automation and Soft Computing, 2010, 16(6): 1051-1060.
- 17 YAN Yinfa, WANG Ranran, SONG Zhanhua, et al. Study on intelligent multi-concentrates feeding system for dairy cow [J]. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2010, 317: 275-282.
- 18 颜世涛,闫银发,宋占华,等. 奶牛个体智能化精料变量补饲系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2):168-172. YAN Shitao, YAN Yinfa, SONG Zhanhua, et al. Design and experiment on intelligent variable concentrate feeding system for individual dairy cow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(2):168-172. (in Chinese)
- 19 ISTVAN Keppler, LASZLO Kocsis, ISTVAN Oldal, et al. Grain velocity distribution in a mixed flow dryer[J]. Advanced Powder Technology,2012,23(6):824-834.
- 20 FABIAN Weigler, JOCHEN Mellmann. Investigation of grain mass flow in a mixed flow dryer[J]. Particuology,2014,12:33-39.
- 21 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):114501.
- 22 吴迪平,李星祥,秦勤,等. 离散颗粒层被横向推移过程中的力学行为研究[J]. 物理学报,2014,63(9):098201.