

# 等径变螺距奶牛精确饲喂给料装置设计与试验

蒙贺伟<sup>1</sup>, 高振江<sup>2</sup>, 坎 杂<sup>1</sup>, 林 海<sup>1</sup>

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832000; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘 要:** 要实现奶牛精细饲喂必须保证装备的给料精度, 该文通过对传统给料装置进行研究, 设计了基于等径变螺距的奶牛精确饲喂螺旋给料装置, 并对不同螺旋主轴转速和投料时间对试验装置的投料稳定性影响进行了试验研究, 确定了螺旋主轴转速并拟合出装置的投料模型。试验结果表明, 给料装置在 150 r/min 转速下投料最稳定, 投料精度高于 95%, 最大投料时间 11 s, 满足奶牛精细饲养给料精度的要求。

**关键词:** 变螺距, 奶牛, 精确饲喂, 给料装置

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.03.019

中图分类号: S817.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-03-0103-05

蒙贺伟, 高振江, 坎 杂, 等. 等径变螺距奶牛精确饲喂给料装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 103—107.

Meng Hewei, Gao Zhenjiang, Kan Za, et al. Design and experiment on dairy cow precision-feeding device based on equal-diameter and variable-pitch[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 103—107. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

随着电子技术与信息技术的快速发展, 研究以个体体况和生产性能信息为基础的精确饲养技术已成为现代奶牛养殖业的主要发展方向<sup>[1-2]</sup>。在实施精确饲喂技术过程中, 如何保证饲喂装备给料装置投料稳定性及投料精度成为实施精确饲喂技术的关键, 直接影响个体奶牛最终饲喂效果。给料装置其主要工作性能指标包括给料稳定性、给料精度等, 其中, 给料精度要求不低于 95%, 最大投料量条件下投料时间不超过 15 s, 给料稳定性满足奶牛精确饲喂实际生产要求。目前, 国内针对奶牛精确饲喂装备中的精确给料装置研究较少, 并且主要为传统设计的等螺距螺旋给料装置, 无法满足个体奶牛精确饲喂技术要求。因此, 研究适于精确饲喂技术要求的给料装置意义重大。本文通过对给料工作性能以及所输送物料的物料特性进行分析研究, 确定了以螺旋给料装置作为其主要工作装置。

作为机械设备中常用的构件, 传统设计的等螺距螺旋给料装置易在卸料口处出现压实的“死区”问题。经分析发现, 主要原因是由于标准螺旋输送物料的性能决定了物料只能从给料机的尾部卷入螺旋叶片, 而在其输送方向前面的螺旋叶片不能再从其上方卷入物料, 因而在卸料口处会出现不能流动的“死区”。如图 1 所示。

从尾部卷入螺叶的物料经过这段“死区”时加大了对

螺旋叶片内物料的压实力, 即增大了给料机运转的荷载, 不但影响了仓内粉料的流动, 还会造成排料不稳定, 严重时还会烧坏电机。因此, 本文对以往等螺距螺旋给料装置设计分析的基础上, 设计了基于等径变螺距的三螺旋给料装置, 并对装置给料精度及给料稳定性进行了试验研究, 为提高给料装置工作性能, 实现奶牛精确饲喂奠定了良好的基础。

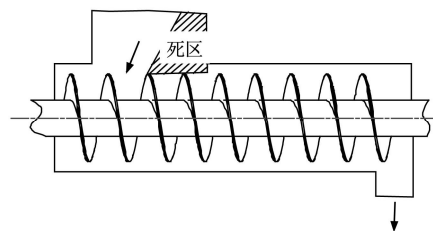


图 1 螺旋给料机进口处物料流动示意图  
Fig.1 Material flow diagram at screw feeder inlet

## 1 螺旋结构设计

### 1.1 设计分析假设

等径变螺距给料装置工作中, 其物料的实际运动状态非常复杂, 为此, 我们需在合理的假设条件下对其进行研究<sup>[3]</sup>。假设如下: 1) 假设螺旋叶片内, 物料的充满系数一致; 2) 不考虑物料在螺旋内的压缩情况; 3) 假设螺旋叶片内物料沿螺旋的轴向运动速度等于螺旋叶片的轴向推移速度, 不考虑螺旋表面对物料的摩擦情况。

### 1.2 理论分析

为保证物料在螺旋叶片内全面流动, 防止“死区”及料仓“节拱”现象的出现, 必须使螺旋轴在整个下料段上的单位长度下料量相等<sup>[4]</sup>, 即每个螺距的体积应等于包括本螺距前面螺距上的下料量与料仓直接进入本螺距的下料量之和, 如图 2 所示, 数学表达式如下

收稿日期: 2010-08-16 修订日期: 2010-10-14

基金项目: 新疆生产建设兵团博士点基金资助项目 (2006JC11); 2010 年度国家农业科技成果转化资金项目 (2010GB2G410603)

作者简介: 蒙贺伟 (1982—) 男, 新疆伊犁人, 主要从事奶牛智能饲喂技术研究。Email: mhw\_mac@shzu.edu.cn

※通信作者: 高振江 (1958—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品加工及农业装备研究。Email: zjgao@cau.edu.cn

$$\begin{aligned} V_1 &= ES_1 \\ V_2 &= ES_2 = ES_1 + E(S_2 - S_1) \\ &\dots\dots \\ V_n &= ES_n = E_{n-1} + E(S_n - S_{n-1}) = EL \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $S_1, S_2, \dots, S_n$  为第 1、第 2 至第  $n$  个螺距的长度, mm; 如图 2 所示;  $E$  为单位长度每转下料体积,  $\text{mm}^3/(\text{r} \cdot \text{mm})$ ;  $V_i$  为第 1、第 2 至第  $n$  个螺距的体积,  $\text{mm}^3$ 。

即有

$$E = \frac{Q \times 10^9}{60n\rho\kappa_d L} \quad (2)$$

式中,  $Q$  为生产率,  $\text{kg/h}$ ;  $n$  为表示工作转速,  $\text{r/min}$ ;  $\rho$  为物料密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\kappa_d$  为物料的充满系数。

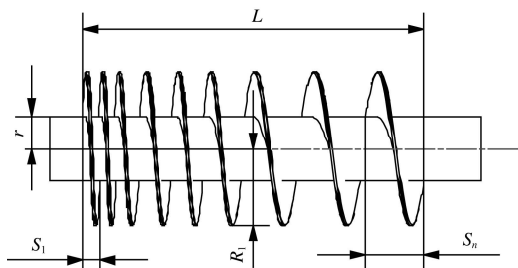


图 2 螺旋下料量及结构示意图

Fig.2 Feeding amount and schematic diagram of spiral

### 1.3 几何尺寸确定

#### 1) 螺旋叶片最小半径

由图 2 可知, 最小螺旋叶片半径  $R_1$  必须大于螺旋轴的半径  $r$ , 即有

$$R_{1\min} > r \quad (3)$$

另外, 从图 2 的几何关系和第一个螺距体积不变时可以得到, 当  $R_1$  取最大值时, 螺距  $S_1$  有最小值, 且第一个螺距单位长度上的体积不能小于单位长度的下料量。

#### 2) 螺距

对于等径变螺距螺旋结构, 由于螺距是变化的<sup>[5]</sup>。因此, 不同的螺旋截面, 其物料的流量也是不同的, 若以螺旋始端为坐标原点, 沿螺旋轴向建立坐标轴  $Z$ , 设在  $Z$  出截面的物流流量为  $Q_1$ , 在  $Z+\Delta Z$  处截面的物流流量为  $Q_2$ , 则其流量的差值为

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 \quad (4)$$

但在实际应用中要求螺旋物料均匀一致, 即使  $\Delta Z$  趋向于无穷小, 其单位长度的物料也应保持常数, 既满足方程

$$\lim_{\Delta Z \rightarrow 0} \frac{Q_2 - Q_1}{\Delta Z} = \lim_{\Delta Z \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta Z} = K \quad (5)$$

式中  $K$  为常数, 将上式以微分形式表示为

$$\frac{dQ}{dZ} = K \quad (6)$$

对其求积分即得

$$Q = KZ + Q_0 \quad (7)$$

式中  $Q_0$  为螺旋始端处的物料流量。

而

$$Q = \frac{1}{2} \omega S (R^2 - r_0^2) \quad (8)$$

将前面的 (8) 式代入 (7) 式, 则有

$$\frac{1}{2} \omega S (R^2 - r_0^2) = KZ + Q_0 \quad (9)$$

由式 (9) 可求得

$$S = \frac{2K}{(R^2 - r_0^2)\omega} Z + \frac{2Q_0}{(R^2 - r_0^2)\omega} \quad (10)$$

为使公式 (10) 简化, 引用符号

$$a = \frac{2K}{(R^2 - r_0^2)\omega} \quad S_0 = \frac{2Q_0}{(R^2 - r_0^2)\omega} \quad (11)$$

式中  $a, S_0$  为常数, 其中  $S_0$  为螺旋始端的螺距。

式 (10) 便可写成

$$S = aZ + S_0 \quad (12)$$

最终确定了螺距  $S_0=25$  mm、 $S_1=35$  mm、 $S_2=40$  mm, 螺旋叶片半径  $R_1=48$  mm, 螺旋轴的半径  $r=20$  mm, 装置采用三根等径变螺距螺旋进行送料以解决原有等螺距搅龙的堵料问题, 通过等径变螺距螺旋将在料仓卸料口范围内的螺距沿送料方向逐渐加大, 增大了螺旋的输送能力, 使螺旋能在料仓卸料口内的全长上卸料, 较好的消除了“死区”问题; 同时在料仓卸料口范围内螺旋的螺距逐渐加大, 可加大物料的推进速度, 防止喂料点处被物料淹没时产生过载、减小驱动阻力, 提高了投料的速度和连续性, 从机械机构上保证了投料精度, 工作时三搅龙同时起停。

## 2 试验与结果分析

本试验研究三等径变螺距给料装置在不同螺旋主轴转速和投料时间对试验装置的投料稳定性影响, 在投料稳定性的基础上, 确定螺旋主轴转速并拟合出该转速下试验装置的投料模型。然后再测定该模型下投料精度是否满足奶牛精细饲养的要求。

### 2.1 给料性能评价指标<sup>[6-7]</sup>

#### 1) 投料稳定性

本试验首先对试验装置的投料稳定性测试, 确定螺旋主轴转速并拟合出该转速下试验装置的投喂模型。在进行投料稳定性试验时, 主要分析不同水平组合的变异系数的差异。变异系数越小, 说明投料机构的稳定性越好。以下公式计算变异系数。

$$CV = S/X \quad (13)$$

式中,  $CV$  为变异系数;  $S$  为样本的标准差;  $X$  为样本的均值。

#### 2) 投料精度

试验装置的投料精度是比较测量的质量值与目标质量值 (真值) 之间的差异, 试验中采用相对误差来描述投料精度的高低。相对误差越小, 装置的投料精度越高。

$$\delta = (M - M_0) / M_0 \quad (14)$$

式中,  $\delta$  为相对误差;  $M$  为测量质量值;  $M_0$  为目标质量值。

2.2 试验原料

西部牧业新疆泉性牧业有限责任公司生产的 561-H 型泌乳期奶牛精饲料。

2.3 仪器与设备

ASC 系列电子秤（上海东南衡器有限公司）；直流调速器（MMT-24DP10BL-DBH，济南科亚电子有限公司）；RFID 无线射频设备（MR100-A）；数字型光电转速计（6234P<sup>+</sup>，深圳金达通仪器仪表公司）等。

2.4 结果分析

2.4.1 投料稳定性分析

本试验研究了搅龙转速、投料时间变化对试验装置投料稳定性的影响。采用变异系数来评价投料稳定性，变异系数越小，投料稳定性越好。表中转速由光电转速计进行测定，并通过直流调速器进行调整，时间通过单片机延时控制电路进行设定与控制，试验测得各因素水平组合的变异系数如表 1 所示。

表 1 不同水平组合变异系数

Table 1 Coefficient of variation of different level combination			
试验号	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	时间/s	变异系数
1	100	4	0.013292888
2	100	5	0.012556566
3	100	6	0.011838168
4	100	7	0.006770112
5	100	8	0.009036899
6	100	9	0.005888215
7	100	10	0.009280648
8	120	4	0.008000593
9	120	5	0.012976423
10	120	6	0.013139001
11	120	7	0.011664455
12	120	8	0.018398356
13	120	9	0.004456695
14	120	10	0.005472301
15	150	4	0.010584025
16	150	5	0.015781040
17	150	6	0.004276981
18	150	7	0.007236926
19	150	8	0.00616479
20	150	9	0.006023545
21	150	10	0.002155728

1) 极差分析

为了更好的描述螺旋转速和投料时间对指标的影响，分别以螺旋转速和投料时间为横坐标，以变异系数为纵坐标作图，各因素对变异系数的极差分析如图 3 所示。从图中可看出在实验范围内转速在 150 r/min 时，变异系数最小，饲喂机投料最稳定；变异系数随着投料时间的增加而减小，说明随着投料时间的增加饲喂机越来越稳定。

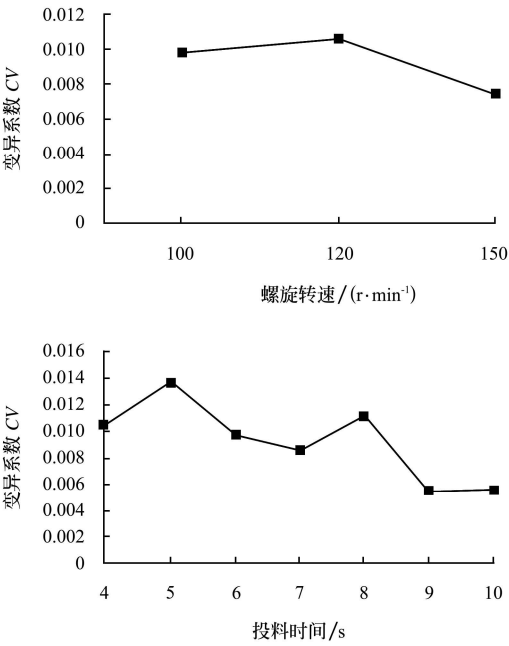


图 3 各因素对变异系数的极差分析  
Fig.3 Range analysis of various factors on the coefficient of variation

2) 方差分析

对各水平组合间的变异系数进行方差分析，其结果如表 2 所示：在试验范围内搅龙转速和投料时间对投料稳定性的影响均不显著（显著性水平  $\alpha=0.05$ ）。

表 2 变异系数的方差分析表

Table 2 Variance analysis table of the coefficient of variation						
差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit
时间	0.000163	6	2.72E-05	2.140645	0.123367	2.99612
转速	3.71E-05	2	1.85E-05	1.461794	0.270301	3.885294
误差	0.000152	12	1.27E-05			
总计	0.000352	20				

2.4.2 投料精度分析

本试验是在投料稳定性的基础上，得出选用螺旋转速为 150 r/min 时，试验装置的变异系数较小（投料稳定性较高）且投料速度较高。所以在投料精度试验中选用了 150 r/min 的螺旋转速，测定投料精度能否达到（量程）5%的精度要求。

在测试投料装置的稳定性试验中得出 150 r/min 转速下投料量随投料时间的变化曲线，如图 4 所示。

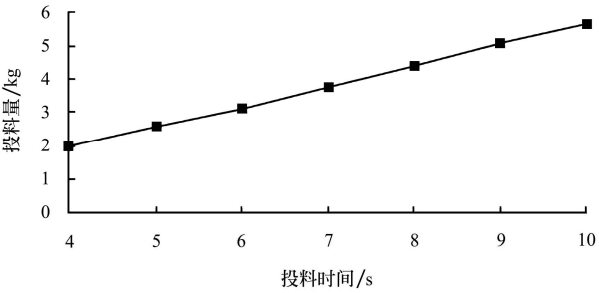


图 4 150 r/min 转速下投料量随时间变化曲线  
Fig.4 Feeding amount versus time under 150 r/min speed

由图 4 可明显看出投料量与投料时间呈一元线性关系, 因此, 利用最小二乘法计算得出一元线性回归方程如下

$$M = -0.46 + 0.61T \quad (15)$$

式中,  $M$  为投料量;  $T$  为投料时间。

进行投料精度试验时以此方程作为饲喂模型, 测定在该饲喂模型下投料精度能否达到 (量程) 95% 的精度要求<sup>[8]</sup>。

由于奶牛个体间差异 (体重、胎次、产奶量、最大产奶量、泌乳期等), 不同奶牛所需的精饲料量有很大区别, 在实际生产当中每头奶牛每餐所需经饲料在 2~6 kg 之间, 因此本试验将奶牛每次所需精饲料量分为以下几个量程范围: 2、3、4、5、6 kg/次。每个量程范围都重复测量 10 次, 观测各量程范围内投料精度是否满足要求。根据试验结果做出在不同量程下重复 10 次测量的趋势图, 如图 5 所示。

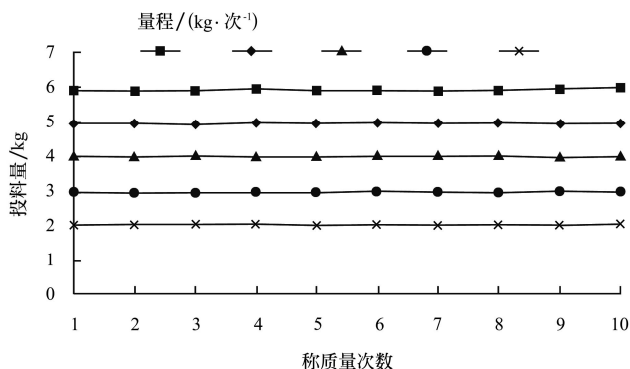


图 5 不同量程下重复 10 次测量结果

Fig.5 Measurements under different scales of 10 times repeated

从测量结果趋势图 5 可见: 在各量程水平下, 重复十次的测量结果之间的变异程度小, 试验装置在各量程范围内投料比较稳定, 在各量程重复测量条件下, 各测量值与目标值的相对误差结果如表 4 所示。

表 4 不同量程下重复测量的相对误差

Table 4 Relative error of repeated measurements under different scales

投料时间	目标值	平均相对误差/%	误差上界/%	误差下界/%
4.0	2	2.35	3.30	1.50
5.7	3	-0.33	0.93	-1.00
7.3	4	0.43	1.15	-0.20
9.0	5	-0.59	-0.20	-1.68
10.6	6	-0.72	0.03	-1.40

从表 4 的计算结果可知, 在不同量程条件下均值对目标值的相对误差都小于 5%, 各量程条件下的相对误差上界和相对误差下界均达到奶牛精细饲养要求的误差范围以内。不同量程下重复测量的相对误差趋势如图 6 所示。

#### 2.4.3 不同量程下投料时间分析

本饲喂机投喂不同精饲料量条件下所需投料时间如图 7 所示。由图可见在奶牛每次所需投料量范围内, 在最大投料量条件下投料时间不超过 11 s。

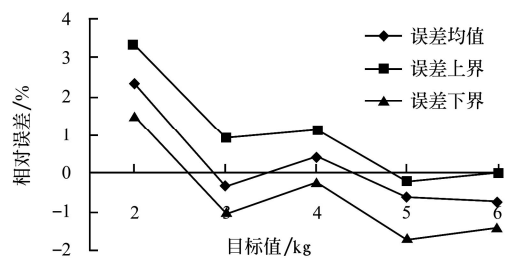


图 6 不同量程下重复测量的相对误差

Fig.6 Relative error of repeated measurements under different scales

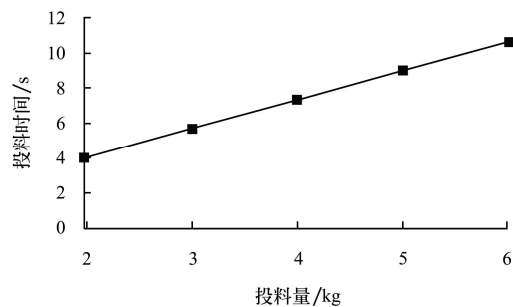
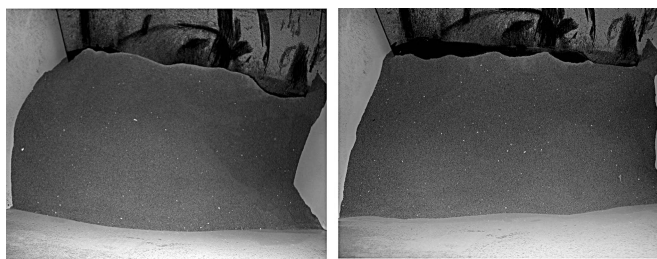


图 7 不同量程所需投料时间

Fig.7 Feeding time required for the different scales

## 2.5 输料装置工作情况对比

设计的等径变螺距螺旋给料装置, 与动力连接端的尾部送料能力降低, 料仓内靠近卸料口端的螺旋叶片能够从料仓上端再旋入物料, 较之前搅龙工作更加稳定, 而且卸料平面也明显平缓很多。改进前后搅龙卸料情况对比如图 8a、b 所示。



a. 原来下料情况

b. 现在下料情况

图 8 加工前后搅龙卸料情况对比图

Fig.8 Comparison chart of auger discharge situation before and after processing

## 3 结论

1) 设计了基于等径变螺距的奶牛精确饲喂装备给料装置, 解决了原有等螺距搅龙的堵料问题, 增大了螺旋的输送能力, 较好的消除了“死区”问题; 同时提高了投料的速度和连续性, 从机械机构上保证了投料精度;

2) 进行了给料装置性能测试, 结果显示螺旋转速在 150 r/min 时, 变异系数最小, 饲喂机投料最稳定; 在不同量程条件下均值对目标值的相对误差都小于 5%; 在最大投料量条件下投料时间不超过 11 s。

## [参 考 文 献]

- [1] 熊本海, 钱平, 罗晓清, 等. 基于奶牛个体体况的精细饲养方案的设计与实践[J]. 农业工程学报, 2005, 10(10): 118—120.  
Xiong Benhai, Qian Ping, Luo Qingyao, et al. Design and realization of solution to precision feeding of dairy cattle based on single body status[J]. Transactions of the CSAM, 2005, 10(10): 118—120. (in Chinese with English abstract)
- [2] 谭春林, 坎杂, 曾明军, 等. 奶牛饲喂技术与设备的现状分析[J]. 农机化研究, 2007(12): 240—245.  
Tan Chunlin, Kan Za, Zeng Mingjun, et al. Analysis of the situation about cow-feeding technique and equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(12): 240—245. (in Chinese with English abstract)
- [3] 宋亚英. 变螺距螺旋结构参数的理论研究[J]. 苏州大学学报, 1996, 12(4): 96—100.  
Song Yaying. Theory study on structure parameters of variable-pith augur[J]. Journal of Suzhou University: Ntural Science, 1996, 12(4): 96—100. (in Chinese with English abstract)
- [4] 邱爱红, 龚曙光, 谢桂兰, 等. 变径变螺距螺旋轴参数化模型及性能仿真[J]. 机械工程学报, 2008(5): 131—136.  
Qiu Aihong, Gong Shuguang, Xie Guilan, et al. Parametric model and performance simulation on the screw conveyor of variable diameters and variable pitches[J]. Transactions of the CSAM, 2008(5): 131—136. (in Chinese with English abstract)
- [5] 冯静安, 张宏文, 梅卫江, 等. 立式 TMR 搅拌机的混合原理及其搅龙参数的设计[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2009(4): 503—506.  
Feng Jing'An, Zhang Hongwen, Mei Weijiang. Vertical TMR mixer mixing theory and design of the auger parameters[J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2009(4): 503—506. (in Chinese with English abstract)
- [6] 方小明. 智能化移动式奶牛装置的设计及试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2008.  
Fang Xiaoming. Design and Experimental Investigation on the Movable Intelligent Feeding Machine for Dairy Cow[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [7] 高雪. 奶牛精确饲喂控制系统的设计研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2008.  
Gao Xue. Study on an Auto-Control System of Dairy Cows Recision-Feeding[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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. Design and experiment on intelligent precising feeding machine for single dairy cow[J]. Transactions of the CSAM, 2009, 40(12): 205—209. (in Chinese with English abstract)

## Design and experiment on dairy cow precision-feeding device based on equal-diameter and variable-pitch

Meng Hewei<sup>1</sup>, Gao Zhenjiang<sup>2</sup>, Kan Za<sup>1</sup>, Lin Hai<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electronical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to achieve the precision-feeding of dairy cow, the device accuracy must be assured. Based on the study of traditional feeding device, dairy cow precision feeding spiral device was designed using equal-diameter and variable-pitch methods in this study. The effect of different spiral spindle speeds and feeding times of testing device on the stability of precision feeding were studied through the experiment. Then, the spiral spindle speed was determined and the feeding model was designed. The experimental results showed that the 150 r/min was the most stable screw speed, feeding precision was above 95% and the maximum time of feeding was 11 s. The precision of feeding can meet the requirements of precision feeding of dairy cow.

**Key words:** variable-pitch, dairy cow, precision-feeding, feeding device