

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.008

# 转筒与桨叶组合式日粮混合机设计与试验优化

李利桥<sup>1,2</sup> 王德福<sup>1,2</sup> 李超<sup>1,2</sup> 李东红<sup>1,2</sup> 江志国<sup>1,2</sup> 平忠源<sup>1,2</sup>

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

**摘要:** 根据我国推广日粮饲养技术的需要及日粮混合机自主创新研究少的现状,设计了一种由中空正十棱柱状转筒与其主轴上安装的桨叶组合而成的日粮混合机,实现日粮各组分的混合加工。为探究其混合性能,利用转筒与桨叶组合式日粮混合试验装置,以混合时间、填充率、转筒转速、桨叶回转半径为试验因素,以混合均匀度、净功耗为评价指标,采用二次回归正交旋转组合试验设计方法进行试验研究。运用 Design-Expert 软件建立并优化分析了试验因素与评价指标之间的回归数学模型,对优化结果进行了试验验证。结果表明:各试验因素对混合均匀度的影响由大到小依次为填充率、转筒转速、混合时间、桨叶回转半径;各试验因素对净功耗的影响由大到小依次为混合时间、转筒转速、填充率、桨叶回转半径;最佳参数组合方案为混合时间 3.5 min、填充率 66%、转筒转速 29 r/min 和桨叶回转半径 236 mm,对应的混合均匀度为 92.98%、净功耗为 32.618 kJ,比优化前分别降低了 5.04%、3.31%。

**关键词:** 日粮混合机; 转筒与桨叶组合式; 试验; 优化

中图分类号: S816.34; S817.12 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)10-0067-09

## Design and Experimental Optimization of Combined-type Ration Mixer of Drum and Blade

LI Liqiao<sup>1,2</sup> WANG Defu<sup>1,2</sup> LI Chao<sup>1,2</sup> LI Donghong<sup>1,2</sup> JIANG Zhiguo<sup>1,2</sup> PING Zhongyuan<sup>1,2</sup>

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

2. Key Laboratory of Pig-breeding Facilities Engineering, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China)

**Abstract:** The key of utilization of the ration feeding technique in ruminant-breeding industry is the research and application of ration mixers. In view of the practical application and popularization of the ration feeding technique in recent years in China, and in order to promote the development of animal husbandry, combining with the current situation of few self-dependent innovation of ration mixers in China, a combined-type ration mixer of drum and blade was designed. To explore the mixing performance and obtain the optimum parameters of the combined-type ration mixer of drum and blade, the method of quadratic regression orthogonal rotational combination design was adopted to conduct the experiment by the self-developed combined-type ration mixing experimental device of drum and blade. The experimental diet was composed of cornmeal, soybean meal, salt, corn silage and hay. Mixing time, filling rate, rotational speed of drum and gyrating radius of blade were chosen as experimental factors, and mixing uniformity and net power consumption were determined as evaluation indexes. The regression mathematical models between the experimental factor and the evaluation index were established and analyzed by Design-Expert software, then the optimization result was verified by experiment. The results showed that the descending order of effects of various factors on mixing uniformity was filling rate, rotational speed of drum, mixing time and gyrating radius of blade; the descending order of effects of various factors on net power consumption was mixing time, rotational speed of drum, filling rate and gyrating radius of blade; and the mixing uniformity was 92.98% and net power consumption was 32.618 kJ under the condition that mixing time was 3.5 min, filling rate was 66%, rotational speed of drum was 29 r/min and gyrating radius of blade was 236 mm. The research results could provide reference for the research and development, optimization design and parameter selection of ration mixers.

**Key words:** ration mixer; combined-type of drum and blade; experiment; optimization

收稿日期: 2017-05-31 修回日期: 2017-07-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701300)和国家自然科学基金项目(51405076)

作者简介: 李利桥(1988—),女,博士生,主要从事畜牧机械研究,E-mail: liliqiao1108@163.com

通信作者: 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

## 引言

日粮是根据反刍动物的营养需要,将各种原料通过混合设备制成的均匀一致的混合饲料<sup>[1-2]</sup>。近年来,随着我国畜牧业的迅速发展,日粮饲养技术受到青睐,而研制适用的日粮混合机是实施该技术的关键<sup>[2]</sup>。

养殖业发达的国家对日粮混合机的研究已有几十年历史,目前国外20多家生产日粮混合机的主要企业已研制出了拨轮式、转筒式、立式螺旋和卧式螺旋日粮混合机等多种机型<sup>[2]</sup>,同时国外学者对已研制的日粮混合机进行了应用研究<sup>[2-5]</sup>。国内推广日粮饲养技术的时间较短,对日粮混合机的研究始于对进口设备的消化吸收<sup>[2,6-8]</sup>,国内研究主要偏重于对已有日粮混合机进行改进设计与试验研究<sup>[2,6-8]</sup>,基于日粮混合新机理而自主创新设计的日粮混合机较少。综上所述,国内日粮混合机的研究总体上还处于跟踪设计阶段,考虑到国外日粮混合机存在的价格高、配套动力大等问题<sup>[2]</sup>,以及国内现阶段畜牧场日粮混合机的配套需要,我国亟需开展日粮混合机的创新性研究,以期研制出配套成本低、结构简单和混合性能优的适用型日粮混合机。

为此,综合分析国内外日粮混合机的特点,同时结合我国畜牧场的配套需要,本文在前期研究工作的基础上,为减轻整机结构重量及清理残留物料的工作量,设计一种转筒与桨叶组合式日粮混合机,并对其混合性能试验与参数优化研究。

## 1 总体方案与工作原理

### 1.1 总体方案

转筒式日粮混合机工作时通常是通过转筒(内壁配置扬料板)的旋转将物料提升至一定高度后抛落,以剪切混合为主实现物料的均匀混合。其中,扬料板的作用是提升物料并促进其进行剪切混合,但扬料板增加了转筒的整体结构重量及清理转筒内残留物料的工作量。为此,结合桨叶式混合机的结构特点,设计转筒与桨叶组合式日粮混合机,将转筒设计为中空的正多棱柱结构,在转筒内壁不配置扬料板,但在主轴上安装桨叶,通过转筒的旋转拖带、转筒与桨叶的组合托送作用实现物料的均匀混合。

为研究转筒与桨叶组合式日粮混合机的混合性能,设计了转筒与桨叶组合式日粮混合试验装置,该装置主要由转筒、桨叶、机架、传动系统等部分组成,如图1所示。其中转筒是该机的主要工作部件,是由周向壁板通过侧向壁板、连接圆环和支撑臂等部件与主轴相连而成的一个整体,主轴通过传动系统

驱动。桨叶呈一定角度安装在主轴上,且每个桨叶通过支撑杆、连接板等与主轴固连。传动系统由电动机、链传动机构组成。为便于观察转筒内物料的运动情况,转筒两端侧向壁板材料选用透明有机玻璃板。

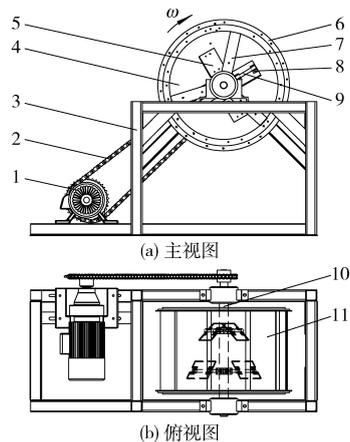


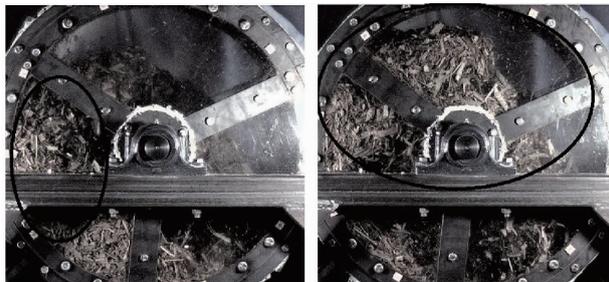
图1 转筒与桨叶组合式日粮混合试验装置结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of combined-type ration mixing experimental device of drum and blade

1. 电动机 2. 链传动机构 3. 机架 4. 侧向壁板 5. 桨叶
6. 连接圆环 7. 支撑臂 8. 连接板 9. 支撑杆 10. 主轴
11. 周向壁板

### 1.2 工作原理

工作时,将按一定比例配制的各种物料放入转筒内,然后启动转筒顺时针方向旋转。利用Phantom V5.1型数字式高速摄像机(美国Vision Research公司生产)对转筒内物料的混合过程进行逐帧观察和分析,拍摄条件为填充率30%、转筒转速25 r/min、桨叶回转半径220 mm。物料因受转筒的拖带作用而随转筒惯性上行,一部分物料(位于转筒前侧或后侧、非桨叶所在区域内的物料)被转筒提升至主轴左侧中部后因受自身重力的作用而下落,形成局部的、以剪切混合为特征的小循环混合(见图2a中椭圆形标记的转筒前侧区域),一部分物料(位于转筒前侧或后侧、桨叶所在区域内的物料)在转筒与桨叶的组合托送作用下继续上行至主轴左侧上部后下落,形成大范围的、以剪切与扩散混



(a) 小循环混合 (b) 大循环混合

图2 转筒内物料的运动状态

Fig. 2 Movement states of material in drum

合为特征的大循环混合(见图 2b 中椭圆形标记的转筒前侧区域),且呈一定角度安装在主轴上的桨叶将使图 2a 中椭圆形标记右后上方的物料(在转筒后侧,由于正面拍摄而使其颜色较暗)形成大循环混合,同时桨叶推送物料沿轴向运动,形成对流与剪切混合。因此,物料在转筒的旋转拖带、转筒与桨叶的组合托送作用下沿转筒的周向和轴向进行三维空间运动,形成以剪切混合为主、辅以对流与扩散混合的物料混合过程,如此反复而实现物料的均匀混合。

## 2 关键部件设计与参数分析

转筒与桨叶组合式日粮混合试验装置的关键部件主要包括转筒与桨叶。

### 2.1 转筒

将转筒设计为中空的正多棱柱结构,并通过理论分析结合对比研究的方法来确定转筒的参数。

由于相邻周向壁板交界处物料单元在上下部周向壁板(根据转筒转向进行定义)的组合作用下托送上部周向壁板处物料单元随转筒转动,这有利于提升转筒抛落物料的高度,进而影响整个混合过程,因此选择该相邻周向壁板交界处的物料单元为研究对象。假定转筒内所有的物料为多个物料单元的集合,同时由于物料单元的尺寸与转筒直径相比很小,故可将所研究物料单元的线速度与筒壁的线速度视为相同<sup>[9]</sup>。对相邻周向壁板交界处的物料单元进行受力分析,并参考文献[10]中的方法,建立以物料单元的质心  $O_2$  为坐标原点、平行于下部周向壁板并与转筒转向相反的方向为  $X$  轴正向、垂直于  $X$  轴并指向转筒内侧方向为  $Y$  轴正向的  $XO_2Y$  直角坐标系,结果如图 3 所示。其中,由于摩擦的影响,使得下部、上部周向壁板对物料单元作用力的合力  $F_1$ 、 $F_2$  分别与下部、上部周向壁板简化线的法线方向偏离了  $\beta$  角,该角由物料对周向壁板的摩擦角  $\varphi$  ( $24^\circ \sim 29^\circ$ ) 及周向壁板的表面粗糙程度决定,忽略周向壁板的表面粗糙程度对  $\beta$  角的影响,则可认为  $\beta =$

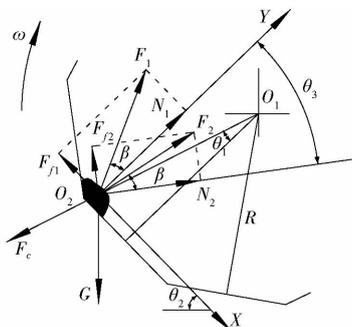


图 3 相邻周向壁板交界处物料单元的受力分析  
Fig. 3 Force analysis of material unit at junction of adjacent circumferential plate

$\varphi$ <sup>[8,11]</sup>。

由图 3 可知,当所研究物料单元达到相对运动的临界状态时,平衡方程为:

$X$  轴方向

$$G \sin \theta_2 + F_2 \sin(\theta_3 - \beta) = F_1 \sin \beta + F_c \sin \theta_1 \quad (1)$$

$Y$  轴方向

$$G \cos \theta_2 + F_c \cos \theta_1 = F_1 \cos \beta + F_2 \cos(\theta_3 - \beta) \quad (2)$$

其中

$$\theta_3 = 2\theta_1 \quad (3)$$

$$G = mg \quad (4)$$

$$F_c = \frac{m\omega^2 R}{\cos \theta_1} \quad (5)$$

式中  $G$ ——物料单元所受的重力, N

$F_1$ ——下部周向壁板对物料单元作用力的合力, N

$F_2$ ——上部周向壁板对物料单元作用力的合力, N

$F_c$ ——物料单元在等效圆周上所受的惯性力, N

$\theta_1$ ——物料单元质心和转筒中心的连线与下部周向壁板简化线的中垂线间的夹角, ( $^\circ$ )

$\theta_2$ ——下部周向壁板与水平面的夹角, ( $^\circ$ )

$\theta_3$ ——相邻两块周向壁板法线的夹角, ( $^\circ$ )

$\beta$ ——合力  $F_1$ 、 $F_2$  与其对应支持力  $N_1$ 、 $N_2$  的夹角, ( $^\circ$ )

$m$ ——物料单元的质量, kg

$g$ ——重力加速度,  $m/s^2$

$\omega$ ——转筒角速度,  $rad/s$

$R$ ——转筒中心到筒壁的最短距离,其大小等于转筒的内切圆半径, m

由于相邻周向壁板交界处的物料单元主要受合力  $F_1$  和  $F_2$  的作用,为使转筒在旋转过程中更容易带动相邻周向壁板交界处的物料单元,进而提升转筒抛落物料的高度,对合力  $F_1$  和  $F_2$  进行分析。由式(1)~(5)并利用代入消元法可得出  $F_1$  和  $F_2$  的计算公式分别为

$$F_1 = \frac{m [g \sin(2\theta_1 + \theta_2 - \beta) \cos \theta_1 - \omega^2 R \sin(\beta - \theta_1)]}{2 \sin \theta_1 \cos^2 \theta_1} \quad (6)$$

$$F_2 = \frac{m [\omega^2 R \sin(\theta_1 + \beta) - g \sin(\theta_2 - \beta) \cos \theta_1]}{2 \sin \theta_1 \cos^2 \theta_1} \quad (7)$$

由式(6)、(7)可知,合力  $F_1$  和  $F_2$  均与参数  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\beta$ 、 $\omega$ 、 $R$ 、 $m$  有关,其中  $\theta_1$  由转筒结构参数中的棱数确定。

综上所述,本文在中空正多棱柱的内切圆直径

相同、运行条件相同的前提下,对不同棱数的转筒进行对比分析研究,确定转筒为中空的正十棱柱,并根据试验需求将转筒的内切圆直径、宽度、周向壁板厚度分别设计为 806、584.4 mm,则此时转筒中心到筒壁的最短距离  $R$  为 403 mm。

当相邻周向壁板交界处的物料单元开始下落时(物料单元脱离上部周向壁板,此时  $F_2 = 0$ ),其上方物料单元均已进入抛落状态,由式(7)可得出此时转筒转速  $n$ (r/min)的计算公式为

$$n = \frac{30}{\pi} \omega = 47.11 \sqrt{\frac{\sin(\theta_2 - \beta) \cos \theta_1}{\sin(\theta_1 + \beta)}} \quad (8)$$

由于正十边形的每个内角为  $144^\circ$ ,则  $\theta_1 = 18^\circ$ 。鉴于小循环混合主要发生在主轴左侧中部(转筒按顺时针方向旋转),则可确定物料单元开始下落时  $\theta_2$  的最大值为  $90^\circ$ 。运用 Matlab 软件调用 fmincon 函数对式(8)相应的约束非线性规划问题进行求解,得出极限转速为 53.7 r/min。因此,当转筒转速小于 53.7 r/min 时,紧贴于转筒内壁的物料在随转筒旋转过程中能及时下落,进而形成混合运动。

## 2.2 桨叶

根据转筒尺寸,在主轴上采用轴向两列交错布置的方式安装两对桨叶,每对桨叶支撑杆的中心线重合且与主轴轴线垂直相交,且两对桨叶支撑杆的中心线相互垂直。为实现物料在三维空间上的渗透和变位,需使桨叶对物料的周向和轴向运动均起到促进作用,且进行混合作业时桨叶向转筒轴向中间位置推送物料,参考相关资料<sup>[12-14]</sup>,将每对桨叶相对安装,即桨叶在过主轴轴线且与桨叶作用面垂直的平面上的投影与主轴轴线之间的夹角  $\theta$  等值且相反,并将  $\theta$  设置为  $45^\circ$ 。桨叶与主轴的连接方式如图 4 所示。

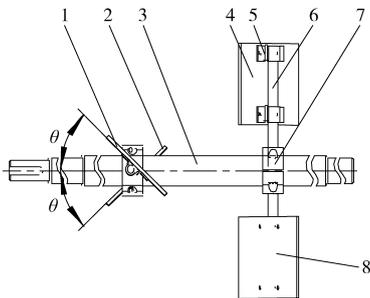


图 4 桨叶与主轴的连接方式

Fig. 4 Connection method of blade and principal axis

1. 1号桨叶 2. 2号桨叶 3. 主轴 4. 3号桨叶 5. 连接板  
6. 支撑杆 7. 轴套 8. 4号桨叶

当其中一对桨叶支撑杆的中心线垂直于周向壁板时,另一对桨叶支撑杆的中心线与转筒的棱线相交,此时各对桨叶的顶端与转筒内壁的间隙大小不同。因此,为保证上述间隙均匀一致,根据正十边形

各边对应  $36^\circ$  中心角的几何性质推算出 4 个桨叶支撑杆的布置方式,结果如图 5 所示。

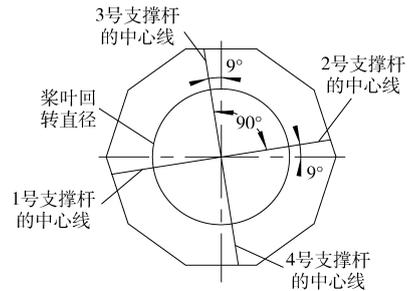


图 5 桨叶支撑杆的布置方式

Fig. 5 Arrangement method of blade-supporting bar

为减小阻力、改善桨叶对物料的剪切能力,在板厚相同的前提条件下,应尽量缩短切割边长度,因此将桨叶的作用面设计为正方形<sup>[15]</sup>。根据转筒尺寸及桨叶支撑杆的布置方式,将桨叶尺寸设计为  $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ,并将每对桨叶支撑杆的中心线与邻近侧向壁板之间的距离设计为 145 mm。

由预试验可知,当桨叶回转半径过小时,桨叶上物料的周向和轴向运动强度均较弱;当桨叶回转半径在一定范围内增大时,转筒与桨叶的组合托送作用有助于周向托送提升、轴向推送物料,进而加快物料的混合过程;当桨叶回转半径过大时,由于桨叶顶端与筒壁的距离较小而易出现夹带物料的现象。因此,为探索桨叶回转半径对该机混合性能的影响规律,本文将桨叶回转半径设计为可变量,并通过混合性能试验来确定其较优值。

## 3 混合性能试验与结果分析

为研究转筒与桨叶组合式日粮混合机的混合性能,并寻求较优参数组合,利用转筒与桨叶组合式日粮混合试验装置进行了试验研究。

### 3.1 仪器设备与试验材料

试验仪器设备包括转筒与桨叶组合式日粮混合试验装置、FRN37G11S-4CX 型变频器(富士电机株式会社)、功率测控系统(东北农业大学工程学院研制)、电子秤、电子天平、秒表等。

参考相关资料<sup>[2,4,8]</sup>,根据 35:65 的精粗比(以干物质质量比为基础)确定试验日粮的组成原料,如表 1 所示,其中后两者为粗饲料。

表 1 试验日粮组成

Tab. 1 Composition of experimental diet

参数	成分				
	玉米面	豆粕	盐	青贮玉米	干草
干物质质量分数/%	24.5	10.0	0.5	55.0	10.0
湿基含水率/%	12.4	11.1	0.5	70.0	11.4

### 3.2 试验方法

#### 3.2.1 试验因素与评价指标

由预试验及相关资料<sup>[2,16]</sup>可知,影响该机混合性能的主要因素有混合时间、填充率、转筒转速、桨叶回转半径,故本文选择上述 4 个因素进行试验研究。结合理论分析、单因素预试验结果、转筒结构参数与生产实际,确定各试验因素的取值范围为:混合时间 3 ~ 17 min、填充率 30% ~ 70%、转筒转速 16 ~ 40 r/min、桨叶回转半径 200 ~ 260 mm。

参考文献[2],选用混合均匀度作为衡量该机混合性能的主要评价指标,以试验日粮中的盐为示踪物,并先采用四分法取样、再采用摩尔法对样品中的氯离子含量进行测定,由此得出混合均匀度的计算公式为

$$M = \left( 1 - \frac{S}{\bar{X}} \right) \times 100\% \quad (9)$$

式中  $M$ ——混合均匀度, %

$S$ ——样品中氯离子质量浓度标准差,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$\bar{X}$ ——样品中氯离子质量浓度平均值,  $\text{kg}/\text{m}^3$

同时,利用功率测控系统对该机在不同工况下所需的功耗进行测定,为使测定结果更具有可比性,选用该机进行混合作业时所需的净功耗作为相应的评价指标<sup>[17]</sup>,其计算公式为

$$W_N = W_T - W_I \quad (10)$$

式中  $W_N$ ——净功耗, kJ

$W_T$ ——混合作业时机组总功耗, kJ

$W_I$ ——机组空载功耗, kJ

#### 3.2.2 试验设计方案

通过分析各试验设计方法的特点,确定采用四因素五水平的二次回归正交旋转组合试验方法来定量分析混合时间  $x_1$ 、填充率  $x_2$ 、转筒转速  $x_3$  和桨叶回转半径  $x_4$  对混合均匀度  $Y_1$ 、净功耗  $Y_2$  的影响。试验因素编码如表 2 所示。试验设计方案如表 3 所示,表中  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  分别表示混合时间、填充率、转筒转速、桨叶回转半径的编码值。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Codes of experimental factors

编码	$x_1/\text{min}$	$x_2/\%$	$x_3/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$x_4/\text{mm}$
-2	3.0	30	16	200
-1	6.5	40	22	215
0	10.0	50	28	230
1	13.5	60	34	245
2	17.0	70	40	260

### 3.3 试验结果与分析

将试验设计方案中每组试验均重复 5 次,取其平均值,结果如表 3 所示。

运用 Design-Expert 软件对表 3 中数据进行方差分析,结果如表 4 所示。

由表 4 可知,评价指标的失拟项均不显著、回归模型均极显著,表明试验设计方案正确,对试验结果进行分析具有实际意义<sup>[18-19]</sup>。

经对比表 4 中各回归项对应的  $F$  值可知,各试

表 3 试验设计方案与结果

Tab. 3 Experimental scheme and results

序号	试验因素				评价指标		序号	试验因素				评价指标	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_1/\%$	$Y_2/\text{kJ}$		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_1/\%$	$Y_2/\text{kJ}$
1	-1	-1	-1	-1	85.52	49.131	19	0	-2	0	0	87.96	73.836
2	1	-1	-1	-1	90.41	97.859	20	0	2	0	0	92.11	106.047
3	-1	1	-1	-1	91.35	56.871	21	0	0	-2	0	89.08	61.693
4	1	1	-1	-1	92.69	111.417	22	0	0	2	0	94.19	120.957
5	-1	-1	1	-1	89.71	60.741	23	0	0	0	-2	92.05	88.307
6	1	-1	1	-1	91.91	125.903	24	0	0	0	2	95.04	109.645
7	-1	1	1	-1	93.52	72.995	25	0	0	0	0	94.22	102.464
8	1	1	1	-1	92.51	133.105	26	0	0	0	0	94.20	99.387
9	-1	-1	-1	1	88.68	52.003	27	0	0	0	0	94.37	98.895
10	1	-1	-1	1	91.97	91.113	28	0	0	0	0	94.30	93.418
11	-1	1	-1	1	91.39	62.809	29	0	0	0	0	94.22	95.537
12	1	1	-1	1	93.91	106.708	30	0	0	0	0	94.33	97.232
13	-1	-1	1	1	92.46	65.378	31	0	0	0	0	94.55	99.059
14	1	-1	1	1	94.11	119.865	32	0	0	0	0	94.20	90.653
15	-1	1	1	1	93.43	77.625	33	0	0	0	0	93.16	100.222
16	1	1	1	1	92.99	138.836	34	0	0	0	0	94.45	97.595
17	-2	0	0	0	89.92	30.384	35	0	0	0	0	94.28	90.653
18	2	0	0	0	93.03	139.164	36	0	0	0	0	93.97	100.717

表4 方差分析  
Tab.4 Analysis of variance

变异来源	混合均匀度					净功耗				
	平方和	自由度	均方	F	p	平方和	自由度	均方	F	p
模型	166.44	14	11.89	72.80	<0.000 1	22 846.31	14	1 631.88	71.45	<0.000 1
$X_1$	17.78	1	17.78	108.91	<0.000 1	17 324.33	1	17 324.33	758.54	<0.000 1
$X_2$	26.71	1	26.71	163.58	<0.000 1	1 104.26	1	1 104.26	48.35	<0.000 1
$X_3$	25.92	1	25.92	158.71	<0.000 1	3 385.92	1	3 385.92	148.25	<0.000 1
$X_4$	12.47	1	12.47	76.37	<0.000 1	100.00	1	100.00	4.38	0.048 7
$X_1X_2$	5.78	1	5.78	35.42	<0.000 1	9.42	1	9.42	0.41	0.527 6
$X_1X_3$	5.81	1	5.81	35.57	<0.000 1	186.92	1	186.92	8.18	0.009 4
$X_1X_4$	0.01	1	0.01	0.06	0.807 0	55.65	1	55.65	2.44	0.133 5
$X_2X_3$	4.52	1	4.52	27.65	<0.000 1	0.55	1	0.55	0.02	0.877 8
$X_2X_4$	4.02	1	4.02	24.62	<0.000 1	17.78	1	17.78	0.78	0.387 6
$X_3X_4$	0.03	1	0.03	0.16	0.696 1	8.42	1	8.42	0.37	0.550 3
$X_1^2$	14.81	1	14.81	90.67	<0.000 1	389.19	1	389.19	17.04	0.000 5
$X_2^2$	34.63	1	34.63	212.04	<0.000 1	154.26	1	154.26	6.75	0.016 8
$X_3^2$	13.12	1	13.12	80.32	<0.000 1	109.48	1	109.48	4.79	0.040 0
$X_4^2$	0.85	1	0.85	5.19	0.033 3	0.13	1	0.13	$5.57 \times 10^{-3}$	0.941 2
残差	3.43	21	0.16			479.62	21	22.84		
失拟	2.05	10	0.20	1.63	0.216 7	316.37	10	31.64	2.13	0.115 2
纯误差	1.38	11	0.13			163.25	11	14.84		
总和	169.87	35				23 325.92	35			

注： $p < 0.01$ , 极显著;  $0.01 < p < 0.05$ , 显著;  $0.05 < p < 0.1$ , 较显著;  $p > 0.1$ , 不显著。

验因素对混合均匀度  $Y_1$  的影响显著, 且由大到小依次为填充率  $X_2$ 、转筒转速  $X_3$ 、混合时间  $X_1$ 、桨叶回转半径  $X_4$ , 各显著回归项中的交互项和平方项对  $Y_1$  的影响由大到小依次为  $X_2^2$ 、 $X_1^2$ 、 $X_3^2$ 、 $X_1X_3$ 、 $X_1X_2$ 、 $X_2X_3$ 、 $X_2X_4$ 、 $X_4^2$ , 而其他回归项对  $Y_1$  的影响均不显著; 各试验因素对净功耗  $Y_2$  的影响显著, 且由大到小依次为混合时间  $X_1$ 、转筒转速  $X_3$ 、填充率  $X_2$ 、桨叶回转半径  $X_4$ , 各显著回归项中的交互项和平方项对  $Y_2$  的影响由大到小依次为  $X_1^2$ 、 $X_1X_3$ 、 $X_2^2$ 、 $X_3^2$ , 而其他回归项对  $Y_2$  的影响均不显著。

在保证回归模型显著、失拟项不显著的基础上, 逐个剔除最不显著的回归项, 并将其自由度与平方和并入误差项后再重新拟合回归模型<sup>[18-19]</sup>, 得出简化回归模型为

$$Y_1 = 94.19 + 0.86X_1 + 1.06X_2 + 1.04X_3 + 0.72X_4 - 0.60X_1X_2 - 0.60X_1X_3 - 0.53X_2X_3 - 0.50X_2X_4 - 0.68X_1^2 - 1.04X_2^2 - 0.64X_3^2 - 0.16X_4^2 \quad (11)$$

$$Y_2 = 97.19 + 26.87X_1 + 6.78X_2 + 11.88X_3 + 2.04X_4 + 3.42X_1X_3 - 3.49X_1^2 - 2.20X_2^2 - 1.85X_3^2 \quad (12)$$

为直观地分析试验因素与评价指标之间的关系, 根据各回归项对评价指标的影响, 并结合简化回归模型, 用“降维法”将任意 2 个试验因素固定在中心水平, 得到另外 2 个试验因素与评价指标之间的降维回归模型<sup>[19-20]</sup>, 运用 Design-Expert 软件绘制

出相应的响应曲面, 结果如图 6 所示。

在试验范围内, 将转筒转速和桨叶回转半径固定在中心水平上, 得到填充率和混合时间的交互作用对混合均匀度的影响, 如图 6a 所示。由图 6a 可知: 填充率和混合时间的交互作用对混合均匀度的影响为上凸型曲面; 当混合时间一定时, 混合均匀度随填充率的增加呈现出先增大后减小的趋势, 且变化幅度随混合时间的增加呈现出先逐渐减缓、后逐渐加剧的规律; 当填充率一定时, 混合均匀度随混合时间的增加呈现出先增大后减小的趋势, 且变化幅度随填充率的增加呈现出先逐渐减缓、后逐渐加剧的规律。

在试验范围内, 将桨叶回转半径和填充率固定在中心水平上, 得到转筒转速和混合时间的交互作用对混合均匀度的影响, 如图 6b 所示。由图 6b 可知: 转筒转速和混合时间的交互作用对混合均匀度的影响为上凸型曲面; 当混合时间一定时, 混合均匀度随转筒转速的增加呈现出先增大后减小的趋势, 且变化幅度随混合时间的增加呈现出先逐渐减缓、后逐渐加剧的规律; 当转筒转速一定时, 混合均匀度随混合时间的增加呈现出先增大后减小的趋势, 且变化幅度随转筒转速的增加呈现出先逐渐减缓、后逐渐加剧的规律。

在试验范围内, 将混合时间和桨叶回转半径固定在中心水平上, 得到转筒转速和填充率的交互作

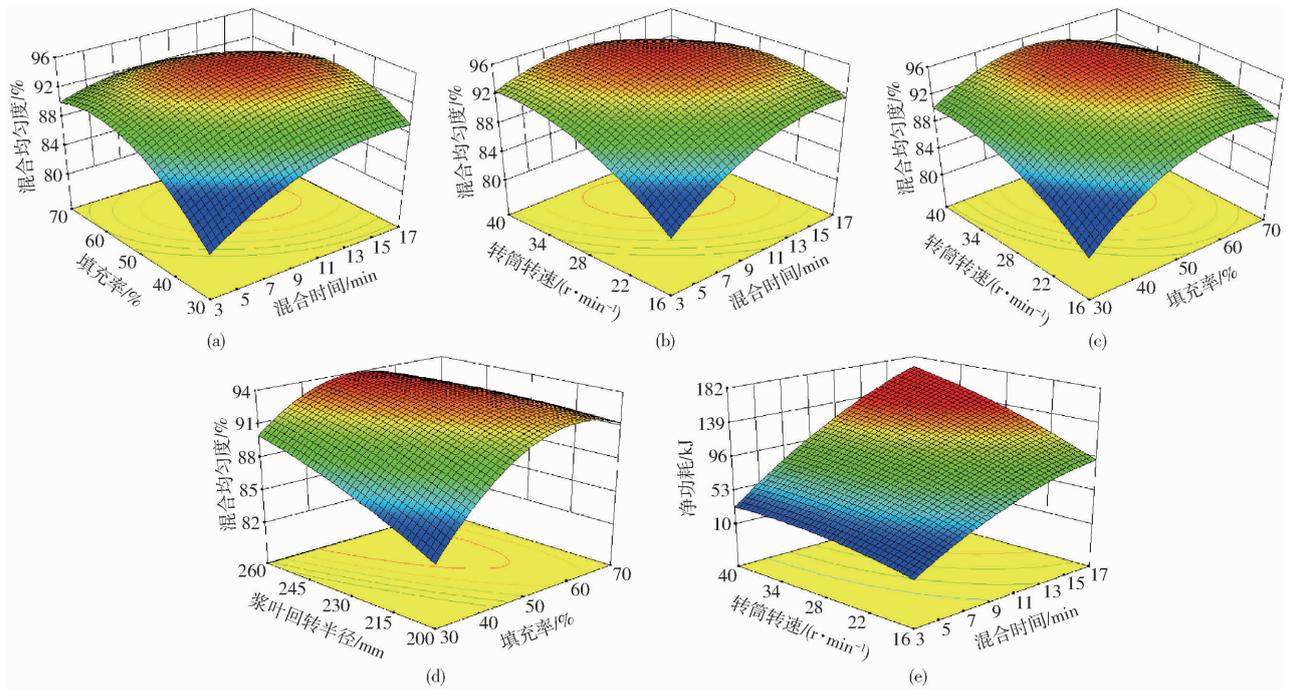


图 6 各交互作用对评价指标的影响

Fig. 6 Effects of interactions on evaluation indexes

用对混合均匀度的影响,如图 6c 所示。由图 6c 可知:转筒转速和填充率的交互作用对混合均匀度的影响为上凸型曲面;当填充率一定时,混合均匀度随转筒转速的增加呈现出先增大后减小的趋势,且变化幅度随填充率的增加呈现出先逐渐减缓、后逐渐加剧的规律;当转筒转速一定时,混合均匀度随填充率的增加呈现出先增大后减小的趋势,且变化幅度随转筒转速的增加而逐渐减缓。

在试验范围内,将转筒转速和混合时间固定在中心水平上,得到桨叶回转半径和填充率的交互作用对混合均匀度的影响,如图 6d 所示。由图 6d 可知:桨叶回转半径和填充率的交互作用对混合均匀度的影响为上凸型曲面;在该交互作用中,填充率对混合均匀度的响应相对于桨叶回转半径对混合均匀度的响应变化更为陡峭,说明混合均匀度受填充率的影响大于桨叶回转半径,这与上文得出的各试验因素对混合均匀度影响的大小顺序相一致;当桨叶回转半径一定时,混合均匀度随填充率的增加呈现出先增大后减小的趋势,且变化幅度随桨叶回转半径的增加而逐渐减缓;当填充率取值较小时,混合均匀度随桨叶回转半径的增加而增大,且变化幅度随填充率的增加而逐渐减缓;当填充率取值较大时,混合均匀度随桨叶回转半径的增加而减小,且变化幅度随填充率的增加而逐渐加剧。

在试验范围内,将桨叶回转半径和填充率固定在中心水平上,得到转筒转速和混合时间的交互作用对净功耗的影响,如图 6e 所示。由图 6e 可知:在

该交互作用中,混合时间对净功耗的响应相对于转筒转速对净功耗的响应变化更为陡峭,说明净功耗受混合时间的影响大于转筒转速,这与上文得出的各试验因素对净功耗影响的大小顺序相一致;当混合时间一定时,净功耗总体上随转筒转速的增加而增大,且变化幅度随混合时间的增加而逐渐加剧;当转筒转速一定时,净功耗总体上随混合时间的增加而增大,且变化幅度随转筒转速的增加而逐渐加剧。

### 3.4 参数优化与试验验证

为寻求该机获得最佳混合性能时的作业参数组合,需要对评价指标的简化回归模型进行有约束多目标优化求解。根据日粮混合要求,取混合均匀度  $Y_1$  较优的界限为  $Y_1 \geq 90\%$ ,同时为获得较好的经济效益,将填充率的变化范围设为  $50\% \sim 70\%$ 。以上述条件为前提,以混合时间  $3 \sim 17 \text{ min}$ 、转筒转速  $16 \sim 40 \text{ r/min}$ 、桨叶回转半径  $200 \sim 260 \text{ mm}$  为约束条件,以混合均匀度最大、净功耗最小为优化目标,以简化回归模型为目标函数,建立非线性规划数学模型,运用 Design-Expert 软件中的优化模块对其进行求解。考虑到试验因素取值的可操作性,则从多个参数优化结果中选取最佳组合的圆整结果为:混合时间  $3.5 \text{ min}$ 、填充率  $66\%$ 、转筒转速  $29 \text{ r/min}$ 、桨叶回转半径  $236 \text{ mm}$ ,此时混合均匀度、净功耗的预测值分别为  $91.20\%$ 、 $31.336 \text{ kJ}$ 。

为检验上述圆整优化结果的可靠性,对其进行试验验证(与表 3 中各组试验的操作条件相同),得

出此时混合均匀度、净功耗的实测值分别为 92.98%、32.618 kJ,对应的物料残留率为 0.067%,这说明该机的混合效果较好<sup>[2,21-22]</sup>。与优化前有抄板机型的最佳参数组合对应的混合均匀度、净功耗相比<sup>[21]</sup>,分别降低了 5.04%、3.31%。通过对比分析可知,混合均匀度、净功耗的实测值与预测值之间的相对误差分别为 1.91%、3.93%,这说明简化回归模型和圆整优化结果均可靠。

## 4 结论

(1)设计了一种转筒与桨叶组合式日粮混合

机,其转筒为中空的正十棱柱,并在主轴上采用轴向两列交错排列的方式设置 4 个桨叶。经试验证实,该机适用于日粮各组分的混合加工。

(2)各试验因素对混合均匀度的影响由大到小依次为填充率、转筒转速、混合时间、桨叶回转半径;各试验因素对净功耗的影响由大到小依次为混合时间、转筒转速、填充率、桨叶回转半径;最佳参数组合方案为混合时间 3.5 min、填充率 66%、转筒转速 29 r/min 和桨叶回转半径 236 mm,对应的混合均匀度、净功耗分别为 92.98%、32.618 kJ,比优化前分别降低了 5.04%、3.31%。

## 参 考 文 献

- 1 王德福,蒋亦元. 双轴卧式全混合日粮混合机的试验研究[J]. 农业工程学报,2006,22(4):85-88.  
WANG Defu, JIANG Yiyuan. Experimental study on the twin-shaft horizontal total mixed ration mixer[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(4): 85-88. (in Chinese)
- 2 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)
- 3 BUCKMASTER D. Optimizing performance of TMR mixers[J]. Tri-State Dairy Nutrition Conference, 2009, 21(22): 105-117.
- 4 MILLER-CUSHON E K, DEVRIES T J. Effect of dietary dry matter concentration on the sorting behavior of lactating dairy cows fed a total mixed ration[J]. Journal of Dairy Science, 2009, 92(7): 3292-3298.
- 5 ŠÍSTKOVÁ 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.
- 6 刘宏涛,马俊贵. 9TMR-5 型全混合日粮搅拌机的研制[J]. 新疆农机化,2015(1):21-22.
- 7 左黎明,尹成龙,张军鸿. 立式 TMR 搅拌机的搅龙设计及应力分析[J]. 中国农机化学报,2014,35(5):58-63.  
ZUO Liming, YIN Chenglong, ZHANG Junhong. Design and stress analysis of the auger of TMR mixer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(5): 58-63. (in Chinese)
- 8 王德福. 双轴卧式全混合日粮混合机的混合机理分析[J]. 农业机械学报,2006,37(8):178-182.  
WANG Defu. Analysis of mixing principle on twin-shaft horizontal total mixed ration mixer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(8): 178-182. (in Chinese)
- 9 周又和. 理论力学[M]. 北京:高等教育出版社,2015.
- 10 周友超. 玉米在旋转筛内的运动机理[J]. 粮食与食品工业,2012,19(5):24-26.
- 11 张麟. 双轴桨叶式混合机的混合机理及其结构设计探讨[J]. 粮食与饲料工业,1998(4):19-21,27.
- 12 刘梅英,谭鹤群,牛智有,等. 基于 Pro/E 的单轴桨叶式混合机转子的三维建模[J]. 农机化研究,2008,30(6):69-71.  
LIU Meiyong, TAN Hequn, NIU Zhiyou, et al. Three-dimensional modeling of single-shaft paddle mixer's rotor based on Pro/E [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008,30(6): 69-71. (in Chinese)
- 13 任广跃,王红英,于庆龙,等. 双轴桨叶式混合机的混合性能及其发展前景分析[J]. 粮食与饲料工业,2003(7):23-24,31.  
REN Guangyue, WANG Hongying, YU Qinglong, et al. Mixing performance and developing prospects the twin-shaft paddle mixers[J]. Cereal & Feed Industry, 2003(7): 23-24, 31. (in Chinese)
- 14 张飞,高艳强,张加丽. 翻转式双轴桨叶式饲料混合机[J]. 农机化研究,2008,30(2):113-115,118.  
ZHANG Fei, GAO Yanqiang, ZHANG Jiali. The turnover mixer with two-axle paddles[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008,30(2): 113-115, 118. (in Chinese)
- 15 刘梅英,宗力,林新. UG 在单轴桨叶式混合机桨叶设计中的应用[J]. 粮油加工,2009(2):102-104.
- 16 蒋恩臣. 畜牧业机械化(第四版)[M]. 北京:中国农业出版社,2011.
- 17 董欣,刘立意,李文哲,等. 卧辊式玉米秸秆调质装置调质功耗试验[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(增刊):198-201.  
[http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2012s39&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s39&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.039.  
DONG Xin, LIU Liyi, LI Wenzhe, et al. Power consumption experiment of corn straw adjusting material device based on horizontal roller[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 198-201. (in Chinese)
- 18 彭飞,康宏彬,王红英,等. 小型轴向多点进气式饲料制粒调质器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):121-127.  
[http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161116&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161116&journal_id=jcsam). DOI:

10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 11. 016.
- PENG Fei, KANG Hongbin, WANG Hongying, et al. Design and experiment on small-scale axial multi-point gas intake conditioner for pellet mill[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 121 - 127. (in Chinese)
- 19 王志明, 吕彭民, 陈霓, 等. 横置差速轴流脱分选系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 53 - 61. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161208&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161208&journal_id=jcsam). DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 12. 008.
- WANG Zhiming, LÜ Pengmin, CHEN Ni, et al. Design and experiment on axial-flow differential-speed threshing-separating-cleaning unit[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 53 - 61. (in Chinese)
- 20 彭飞, 李腾飞, 康宏彬, 等. 小型制粒机喂料器参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 51 - 58. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160207&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160207&journal_id=jcsam). DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 02. 007.
- PENG Fei, LI Tengfei, KANG Hongbin, et al. Optimization and experiment on feeder for small-scale pellet mill[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 51 - 58. (in Chinese)
- 21 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. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170813&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170813&flag=1). DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 08. 013.
- 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. (in Chinese)
- 22 吴艳泽, 夏吉庆, 康德福. 奶牛全混合日粮混合机卸料机构的研制[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(11): 89 - 92.
- WU Yanze, XIA Jiqing, KANG Defu. Design of discharging mechanism for total mixed ration mixer[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(11): 89 - 92. (in Chinese)

(上接第 31 页)

- 12 BHARATHI A, DONG J. Feedrate optimization for smooth minimum-time trajectory generation with higher order constraints[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(5 - 8): 1029 - 1040.
- 13 QIAN D, TONG S, LI C. Leader-following formation control of multiple robots with uncertainties through sliding mode and nonlinear disturbance observer[J]. ETRI Journal, 2016, 38(5): 1008 - 1018.
- 14 QIAN D, LI C, TONG S, et al. Integral sliding mode-based formation control of multiple uncertain robots via nonlinear disturbance observer[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, 13(6): 1 - 11.
- 15 CHWA D. Robust distance-based tracking control of wheeled mobile robots using vision sensors in the presence of kinematic disturbances[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6172 - 6183.
- 16 LUVIANO-JUREZ A, CORTES-ROMERO J, SIRA-RAMIREZ H. Trajectory tracking control of a mobile robot through a flatness-based exact feedforward linearization scheme[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, 2015, 137(5): 051001.
- 17 YE J. Tracking control of a non-holonomic wheeled mobile robots using improved compound cosine function neural networks[J]. International Journal of Control, 2015, 88(2): 364 - 373.
- 18 LU X, FEI J. Velocity tracking control of wheeled mobile robots by iterative learning control[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2016, DOI: 10.5772/63813.
- 19 孙施浩, 赵林, 贾英民. 空间合作目标运动再现的相似设计方法研究[J]. 宇航学报, 2014, 35(7): 802 - 810.
- SUN Shihao, ZHAO Lin, JIA Yingmin. Similitude design method for motion reconstruction of space cooperative vehicles[J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(7): 802 - 810. (in Chinese)
- 20 余伶俐, 龙子威, 周开军. 基于贝塞尔曲线的机器人非时间轨迹跟踪方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1564 - 1572.
- YU Lingli, LONG Ziwei, ZHOU Kaijun. Non-time trajectory tracking method based on Bezier curve for robot[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1564 - 1572. (in Chinese)
- 21 WALSH G, TILBURY D, SASTRY S, et al. Stabilization of trajectories for systems with nonholonomic constraints[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(1): 216 - 222.