

间距自适应差速玉米摘穗辊设计与试验^{*}

贾洪雷^{1,2} 王刚² 赵佳乐² 李常营² 王玉² 郭慧²

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025)

摘要: 分析了影响卧辊式玉米收获机摘穗过程中作业质量的主要因素。通过改变摘穗辊间距以适应不同直径的玉米秸秆,有效解决了玉米收获机工作时堵塞的问题。通过两摘穗辊转速不同步的办法减少了玉米果穗的掉粒损失。通过 CATIA 软件对间距自适应差速摘穗辊进行了建模,并通过 ADAMS 软件与间距固定摘穗辊进行了仿真对比分析,通过 ADAMS 仿真试验,确定了内外摘穗辊的最佳转速,即内侧摘穗辊转速为 900 r/min,外侧摘穗辊转速为 860 r/min。田间试验中无秸秆堵塞摘穗辊现象发生,且籽粒破损率和损失率之和为 0.11%,远小于国家标准的 5%。

关键词: 玉米收获机 摘穗辊 设计 仿真 田间试验

中图分类号: S225.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0097-06

Design and Experiment of Spacing-adaptive Differential Snapping Rollers for Corn Harvester

Jia Honglei^{1,2} Wang Gang² Zhao Jiale² Li Changying² Wang Yu² Guo Hui²

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Main factors affecting the working quality of horizontal snapping roller of corn harvester when it snaps the corn ear were analyzed. By adjusting the spacing between two snapping rollers, the snapping rollers can adapt to corn stalks of different diameters, so the snapping rollers can hold the corn stalks tightly all the time. Finally, the blocks occur during corn harvester working were solved effectively. The grain losses of corn ears were reduced by adjusting the rotational speeds of snapping rollers differentially. Model of spacing-adaptive differential snapping roller was built by using CATIA, and its simulation analysis was conducted compared to the snapping rollers with fixed spacing by using ADAMS software. The optimal speeds of inner and outer snapping rollers were 900 r/min and 860 r/min which were determined by simulation test of ADAMS. At last, in order to certificate the analyses and design, the field test was conducted. There was no jam occurred during the field test, and the grain losses and damages were both far lower than the national standard which is 5%.

Key words: Corn harvester Snapping roller Design Simulation Field test

引言

摘穗辊是玉米收获机的核心部件^[1-2]。卧式摘穗辊玉米收获机为目前主要研究类型之一。摘穗辊的工作性能由摘穗辊的辊形、工作长度、直径、螺旋

凸棱高度、螺距、与水平面的夹角、转速、两摘穗辊之间的间距等主要参数决定^[3-5]。卧式摘穗辊的传动较复杂,单体质量较大,但是果穗清洁率高^[6-7];在结构安排上,通常两摘穗辊轴线与水平面呈 35°~40°的倾角,两摘穗辊轴线平行且具有大约 35 mm 的高

收稿日期: 2014-05-20 修回日期: 2014-06-20
^{*}“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD06B03)和吉林省科技发展计划资助项目(20116026)
作者简介: 贾洪雷,教授,博士生导师,主要从事全程机械化与保护性耕作理论与技术研究,E-mail: jiah@vip.163.com

虽然卧式摘穗辊外侧高于内侧,有利于玉米果穗顺利掉入升运器之中,但是当玉米果穗的直径较小时,果穗就容易陷入两摘穗辊之间的间隙,而不容易落入升运器内。而且,如图 2 所示,当果穗与内侧摘穗辊相接触时,果穗受到内侧摘穗辊摩擦力 f_2 的作用,果穗有逆时针旋转的趋势 v_2 ,果穗同时也与外侧摘穗辊相接触,受到外侧摘穗辊摩擦力 f_1 的作用,果穗也有顺时针旋转的趋势 $v_1^{[13]}$ 。但是,当果穗具有如图 2 中 x 轴负方向的加速度时,果穗可顺利落入升运器内。

$$a_{x-} = \frac{dV}{dt} \cos\beta =$$

$$\frac{d \sqrt{(\omega r)^2 + [(g \sin\alpha - \mu g \cos\alpha) t]^2}}{dt} \cos\beta \quad (2)$$

$$a_{x+} = \frac{dV}{dt} \cos\beta =$$

$$\frac{d \sqrt{(-\omega r)^2 + [(g \sin\alpha - \mu g \cos\alpha) t]^2}}{dt} \cos\beta \quad (3)$$

式中 a_{x-} ——玉米果穗沿 x 轴负方向的加速度
 a_{x+} ——玉米果穗沿 x 轴正方向的加速度
 β ——果穗合速度的方向与 x 轴的夹角
 μ ——果穗与摘穗辊之间的动摩擦因数
 t ——果穗在两摘穗辊之间滚动的时

当两摘穗辊的转速相同时,玉米果穗沿 x 轴正、负方向的加速度分量一致,只有当两摘穗辊的转速不一致时,这种轴线与摘穗辊轴线相平行的玉米果穗被摘落的瞬间才有掉入摘穗辊两侧的趋势。由于摘穗辊表面带有螺旋凸棱,为避免螺旋凸棱之间发生干涉,可以加装限位装置,保证两摘穗辊之间距离最小时,两摘穗辊表面的螺旋凸棱不发生干涉。

2 间距自适应差速摘穗辊部件设计

2.1 间距自适应结构设计

根据玉米收获机摘穗辊的基本组成部件,结合本设计的基本要求,确定摘穗辊部件由可动摘穗辊和固定摘穗辊组成,可动摘穗辊在空气弹簧压力下,可沿着两摘穗辊轴线所形成的平面移动,定辊的轴承座安装在割台的机架上,动辊的轴承座与限位装置相连接。由于现有的摘穗辊都是由 2 个传动比为 1:1 的直齿圆柱齿轮直接传动,无法实现两摘穗辊之间间距变化的要求,所以,在传动部分设置一个啮合齿轮和一个惰齿轮的四轮传动装置。其中啮合齿轮带弹簧,它提供一个垂直于其相邻上方两齿轮中心连线的支持力,当两摘穗辊之间的距离变化时,可以保证 4 个齿轮完好啮合。其结构如图 3 所示。

根据经验,当摘穗辊线速度的水平投影 v_k 为机

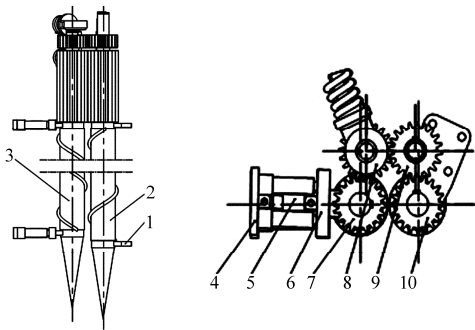


图 3 摘穗辊部件结构图

Fig. 3 Structure of snapping rollers

1. 定辊轴承座 2. 定辊 3. 动辊 4. 动辊轴承座套管 2 5. 空气弹簧 6. 动辊轴承座套管 7. 动辊齿轮 8. 啮合齿轮 9. 惰齿轮 10. 定辊齿轮

具前进速度的 1.5 ~ 2 倍时,有利于实现玉米摘穗^[14],设定此摘穗辊直径为 74 mm,螺旋凸棱的高度为 10 mm,机具的前进速度为 1.67 km/h,摘穗辊与水平地面的夹角为 35°。即: $v_m = 1.67 \text{ km/h} \approx 0.4639 \text{ m/s}$, $v_k = (1.5 \sim 2)v_m = (0.6959 \sim 0.9278) \text{ m/s}$ 。 $r = 94 \text{ mm}$, $\sin\theta = \sin 35^\circ$, $v_k = \omega r \sin\theta$ 。所以 $\omega = (81 \sim 108) \text{ rad/s} = (774 \sim 1032) \text{ r/min}$ 。

当玉米秸秆进入摘穗辊间隙时,两个摘穗辊被动远离,中心距变大。对于某一特定地块同一品种的玉米,其秸秆粗细基本相同,玉米收获机实际工作时,多根玉米秸秆同时进入两摘穗辊之间,但是由于受到空气弹簧的作用,两摘穗辊会与玉米秸秆紧密接触,也就是对这些玉米秸秆提供足够大的压力,致使玉米秸秆与摘穗辊之间不会打滑,最后被顺利拉拽出摘穗辊间隙。

2.2 差速设计

通过式(2)、(3)可知,为了使玉米果穗被摘落的瞬间能迅速离开摘穗辊间隙上方,两个摘穗辊要使用差速。差速是利用齿轮实现的,原来等速的摘穗辊使用齿数比为 1:1 的直齿圆柱齿轮传动,现通过选用不同齿数的 4 个齿轮来实现差速传动。

2.3 螺旋凸棱干涉的控制

玉米秸秆下端粗,上端细。对于东北地区种植的玉米品种,通常最粗端直径小于 30 mm,最细端直径大于 5 mm。市场上现有的玉米收获机的摘穗辊直径在 65 ~ 85 mm 之间,所以确定两摘穗辊轴线之间的间距在 89 ~ 114 mm 之间变化。整套限位装置安装在可动摘穗辊与割台架之间,其示意图如图 4 所示。动辊轴承座安装可动摘穗辊轴承;当摘穗辊之间的距离变大时,上限位板会向伸缩管顶端靠近,极限位置即上限位板与伸缩管顶端接合;当摘穗辊之间的距离变小时,上限位板与伸缩管顶端的距离变大,其极限位置为伸缩杆限位块与伸缩管顶端里

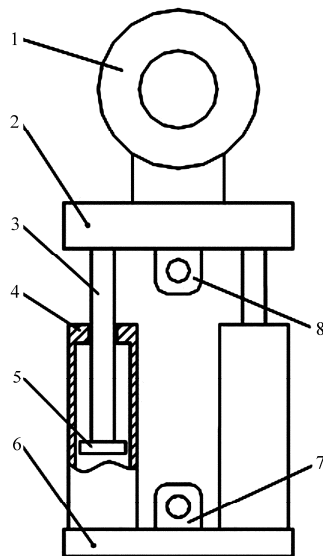


图4 限位装置结构图

Fig.4 Structure of limiting device

1. 动辊轴承座 2. 上限位板 3. 伸缩杆 4. 伸缩管顶端 5. 伸缩杆限位块 6. 割台架连接座 7. 弹簧连接座1 8. 弹簧连接座2

侧接合。凭借以上两个极限位置,实现限位功能。

2.4 间距自适应的控制

当玉米秸秆与摘穗辊之间的压力超过 70 N 时,站立的玉米秸秆与摘穗辊之间基本可以避免打滑^[15],玉米秸秆就会被拉出摘穗辊间隙。因此,在限位装置的弹簧上(图4中的7、8之间)安装压应力传感器,当压应力传感器的数值小于设定值 70 N 时,气泵向空气弹簧提供动力,使空气弹簧的压力在 0.5 s 之内达到 80 ~ 130 N,当传感器压力超过 130 N 时,气泵停止对空气弹簧供气。

3 仿真

3.1 动力学分析

在 CATIA 软件中建立间距自适应玉米摘穗辊的三维模型,通过 SIM DESIGNER 将 CATIA 中的装配图转换成 ADAMS 可以读取的 *.cmd 文件。在 ADAMS 中对玉米摘穗辊的动力学功能进行建模分析。设定摘穗辊的材料为铸铁,玉米秸秆的材料为纤维素,其密度为 438 kg/m³,弹性模量为 11 GPa,泊松比为 0.33。在 ADAMS 中运用 Bushing 连接来模拟秸秆和土壤的连接情况^[16]。设定摘穗辊的转速为 850 r/min,摘穗辊与水平地面的夹角为 35°,摘穗辊的前进速度为 1.67 km/h,玉米种植株距为 214 mm,株高为 2 000 mm,结穗高度为 1 050 mm。在动力学分析中,由于力的作用是相互的,又由于压应力传感器安装在限位装置的空气弹簧上,所以在动力学分析中,检测玉米摘穗辊受到的挤压力即可。得到此摘穗辊所受压力变化曲线如图5所示。

图5是对一株玉米进行模拟而绘制出的曲线,

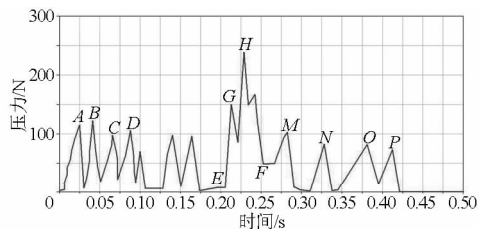


图5 间距自适应摘穗辊所受压力变化曲线

Fig.5 Pressure curve of spacing-adaptive snapping rollers

由于从摘穗辊上检测压力的变化,多根玉米秸秆同时进入摘穗辊之间会导致曲线重合混乱,不便于分析。从图中可知,在玉米秸秆进入摘穗辊间隙之后,摘穗辊上的螺旋凸棱与玉米秸秆相接触,瞬间产生压力,在图中体现为曲线上出现尖端,即图中的A、B、C、D等点。当玉米秸秆运动到摘穗辊螺旋凸棱之间时,压力较小,接近 0 N。在 0.20 ~ 0.25 s 时,即 EF 段,玉米果穗与摘穗辊相接触,此时实现玉米摘穗,曲线上出现最大压力,最大压力接近 250 N (H 点),大约 0.41 s (P 点)之后,玉米秸秆被拉出摘穗辊,压力变为 0 N。对比 A、B、C、D、M、N、O 各点对应的压力,大约都在 100 N 附近微小变化,说明此摘穗辊的间距随着玉米秸秆直径的变化而变化,即摘穗辊一直夹持玉米秸秆,并且对玉米秸秆提供大致恒定的压力。若多根玉米秸秆同时进入摘穗辊间隙,摘穗辊同样会提供足够的压力,将多根玉米秸秆同时夹紧,最后拉拽出摘穗辊。

间距固定摘穗辊与玉米秸秆之间的压力变化曲线如图6所示,对比两图可以看出,在图6中,从 0.01 s (A 点)开始,图像第1个尖端(B点)所对应的压力接近 180 N,第2个尖端(C点)所对应的压力超过 150 N;此后的小尖端(如 F、G 点)压力在一直减小(E、F 点压力突然增大,是因为模拟过程中,设定此玉米秸秆生长情况特殊,E、F 之间对应一个不饱满的小玉米果穗),在 0.21 ~ 0.28 s 之间,即 HI 段,玉米果穗与摘穗辊相接触,实现摘穗,之后的尖端(LP 段)压力递减的趋势非常明显,直至变为 0 N。分析其原因是玉米秸秆下端粗,上端细,下端受摘穗辊挤压力比较大,上端受摘穗辊挤压力比较小。说明普通摘穗辊之间的间距没有变化时,当摘穗辊对玉米秸秆的压力不足以使摘穗辊咬住玉米秸秆或者

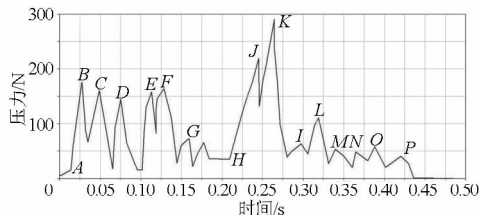


图6 间距固定摘穗辊压力变化曲线

Fig.6 Pressure curve of spacing-fixed snapping rollers

对玉米秸秆没有压力时,玉米秸秆就很有可能堵塞摘穗辊间隙。实际工作时,如若某地块的玉米长势比较细小,当多根玉米同时进入摘穗辊间隙时,发生堵塞的概率会大大增加。

3.2 最佳转速的确定

当玉米果穗的轴线与摘穗辊轴线平行时,玉米果穗会在两摘穗辊的间隙上方摩擦一段时间,图 7 为试验时玉米果穗的轴线与摘穗辊的轴线平行时所得的摩擦力曲线。玉米果穗同时受到内外摘穗辊的摩擦作用,在仿真过程中设定,当玉米果穗所受摩擦合力的方向为顺时针时,设为正值,当摩擦合力的方向为逆时针时,设为负值。从图中可以看出,在 1.2 ~ 1.7 s 之间,即 AB 段,摘穗辊完成了摘穗,1.7 ~ 4.4 s 之间,即 BC 段,曲线上出现了连续的小幅波动,表明此时玉米果穗与两摘穗辊摩擦,4.75 s 后(D 点以后)摩擦力变为零,玉米果穗掉入升运器之中。为了在玉米果穗的轴线与摘穗辊轴线平行时,玉米果穗能尽快落入升运器之中,内侧摘穗辊的转速应该大于外侧摘穗辊。两摘穗辊转速的取值范围在 774 ~ 1 032 r/min;由于此摘穗辊由直齿圆柱齿轮传动,为便于选择和设计齿轮的模数与齿数,所以在仿真试验中,内侧摘穗辊每 50 r/min 取一值,外侧摘穗辊每 30 r/min 取一值。仿真结果如表 1 所示。

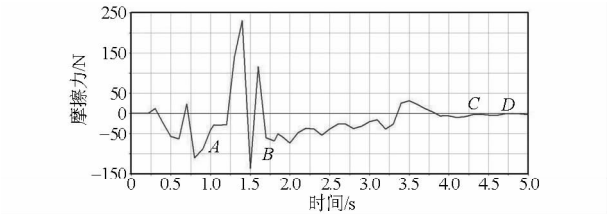


图 7 玉米果穗在摘穗辊之间滚动摩擦时的摩擦力变化曲线

Fig.7 Curve of frictional force when corn ear rolled between snapping rollers

表 1 玉米果穗滚动摩擦时间与内外摘穗辊转速
Tab.1 Corn ear rolling friction time and rotational speeds of inner and outer snapping rollers

玉米果穗滚动 摩擦时间/s	内侧摘穗辊转速 /(r·min ⁻¹)	外侧摘穗辊转速 /(r·min ⁻¹)
2.8	850	770
2.6	850	800
1.9	900	830
1.7	900	860
2.0	950	890
2.3	950	920
2.1	1000	950
2.2	1000	980

从表 1 中看出,内侧摘穗辊转速为 900 r/min、外侧摘穗辊的转速为 860 r/min 时,玉米果穗滚动时间

最短,为 1.7 s。此差速下,两摘穗辊线速度的水平投影恰好在设定摘穗辊前进速度的 1.5 ~ 2 倍之间,有利于实现顺利摘穗。且与转速相差较大的差速相比,减弱了对于玉米果穗的揉搓作用,与差速较小的差速相比,加强了向升运器抛送玉米果穗的作用。所以内侧摘穗辊转速 900 r/min、外侧摘穗辊转速 860 r/min 为最佳差速。

4 田间试验

2013 年 8 月在吉林省农科院农机实验厂完成玉米收获机摘穗辊加工与装配。间距自适应摘穗辊的传感器与空气弹簧为外购件,控制单元为基于 C 语言程序的单片机。在玉米收获机作业速度 1.67 km/h 附近时,通过选用传动比为 43:45 的直齿圆柱齿轮作为内外摘穗辊的传动齿轮,内外摘穗辊的转速可以控制在 900 r/min 和 860 r/min 附近。2013 年 10 月 8 日,在吉林大学农业试验场进行试验。试验场景如图 8 所示。



图 8 田间试验
Fig.8 Field test

试验中,玉米收获机的前进速度与发动机转速有关,为了配合摘穗辊的最佳差速,控制其前进速度约为 1.67 km/h,摘穗辊的倾角约为 35°。所选用的玉米共 5 个品种,分别为吉单 209、高玉 465、福地 201、伟科 702、郝玉 811。其长势各不相同,含水率分别为 20.4%、23.5%、24.0%、22.5%、21.6%;株距均为 210 ~ 240 mm,行距均为 650 mm。该机在每个品种的玉米地里各作业 1 hm²,未发现秸秆堵塞现象。

经检测,籽粒破损率和损失率之和为 0.11%,远小于国家标准的 5%。且发生的破损和损失多为玉米果穗大端与摘穗辊撞击所致。未发现摘穗辊啃噬玉米籽粒现象。

5 结论

(1) 摘穗辊间距合适与否是玉米收获机作业中摘穗辊产生堵塞的原因之一,被摘落的玉米果穗不能立即脱离摘穗辊,与摘穗辊发生摩擦是产生掉粒

损失和籽粒破损的原因之一。

(2) 间距自适应摘穗辊是解决玉米秸秆堵塞摘穗辊的途径。间距自适应摘穗辊是利用压力传感器控制两个摘穗辊之间的距离以适应不同品种、不同长势玉米秸秆直径的变化,始终对玉米秸秆提供足够大的压力。

(3) 改变两摘穗辊之间的转速之比可以缩短部分摘落的玉米果穗在两摘穗辊缝隙上方滚动摩擦的

时间,有效地解决部分掉粒损失和籽粒破损问题。使用限位装置,可解决两摘穗辊表面螺旋凸棱的干涉问题。

(4) 通过仿真试验,从减少玉米果穗在摘穗辊上方滚动摩擦的时间出发,得出最佳内侧摘穗辊转速为 900 r/min,最佳外侧摘穗辊转速为 860 r/min。通过田间试验,验证了理论分析以及仿真试验的正确性。

参 考 文 献

- 1 褚幼晖,李福欣,邸志峰. 背负式玉米收获机摘穗辊的设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2008(9):48-50.
Chu Youhui, Li Fuxin, Di Zhifeng. Design of snapping roll for knapsack corn harvester[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2008(9):48-50. (in Chinese)
- 2 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:下册[M]. 北京:机械工业出版社,2007:1018.
- 3 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2010.
- 4 农业部农业机械化推广司. 全国农业机械化统计年报[M]. 北京:中国农业出版社,2010.
- 5 Ono Ikuya, Nakashima Hiroshi, Shimizu Hiroshi, et al. Investigation of elemental shape for 3D DEM modeling of interaction between soil and a narrow cutting tool[J]. Journal of Terramechanics, 2013, 50(4):265-276.
- 6 Lisowski A, Swiatek K, Klonowski J, et al. Movement of chopped material in the discharge spout of forage harvester with a flywheel chopping unit: measurements using maize and numerical simulation[J]. Biosystems Engineering, 2012, 111(4):381-391.
- 7 杜岳峰,朱忠祥,宋正河,等. 小型玉米收获机分禾与摘穗装置性能仿真[J]. 农业机械学报, 2012,43(增刊):100-105.
Du Yuefeng, Zhu Zhongxiang, Song Zhenghe, et al. Simulation of divider and snapping roll for small-scale corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(Supp.):100-105. (in Chinese)
- 8 Jia Honglei, Li Changying, Zhang Zhihong, et al. Design of bionic saw blade for corn stalk cutting[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(4):497-505.
- 9 田潇瀚,侯振东,徐杨. 玉米秸秆成型块微观结构研究[J]. 农业机械学报,2011,42(3):105-108.
Tian Xiaoyu, Hou Zhendong, Xu Yang. Microstructure of corn stover briquette[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(3):105-108. (in Chinese)
- 10 崔涛,刘佳,张东兴,等. 摘穗与秸秆粉碎复式作业机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(10):95-100.
Cui Tao, Liu Jia, Zhang Dongxing, et al. Design and experiment of cob-picking and stalk-chopping united mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(10):95-100. (in Chinese)
- 11 贺俊林,佟金. 我国玉米收获机械的现状及其发展[J]. 农机化研究, 2006(2):29-31, 36.
- 12 佟金,贺俊林,陈志,等. 玉米摘穗辊试验台的设计和试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(11):48-51.
Tong Jin, He Junlin, Chen Zhi, et al. Research and development of testing device with snapping rolls for corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007, 38(11):48-51. (in Chinese)
- 13 Diao Peisong, Zhang Daolin, Zhang Shixin. Virtual design and kinematic simulation for cutter of corn harvester [C]//Proceedings of 2008 IEEE 9th International Conference on Computer-aided Industrial Design & Conceptual Design, 2008: 313-317.
- 14 殷江璇. 玉米收获机械化影响因素分析[D]. 太谷:山西农业大学, 2013:45-46.
- 15 Zhang Xirui, Dong Youfu, Zhang Daolin. Design and experiment of 4YQZ-3A combine harvester for corn [C]//Proceedings of 2011 International Conference on New Technology of Agricultural Engineering, 2011: 44-49.
- 16 Zhao Na, Diao Huailong. Color research on corn combine harvester [C]//Proceedings of 2011 International Conference on New Technology of Agricultural Engineering, 2011: 232-235.