

玉米穗茎兼收割台切碎装置参数优化

张宗玲¹ 韩增德² 李晓栋³ 郝付平³ 韩科立³ 韩鲁佳¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;

3. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对玉米穗茎兼收割台的需求,设计了一种横置滚筒式茎秆切碎装置,并对其切碎性能及割台摘穗性能进行了试验研究。通过对切碎装置工作原理的分析,确定在拉茎速度与切碎滚筒转速比值一定的条件下,以机器作业速度、动刀切割前角、切碎滚筒转速为自变量,以玉米果穗损失率、籽粒破碎率、籽粒损失率、茎秆平均切段长度和几何标准差为试验指标,利用 Box - Benhnken Design 中心组合试验设计原理,进行了 3 因素 3 水平正交旋转组合田间试验,利用 Design-Expert 软件对试验结果进行了响应面分析和回归分析,得到试验指标与试验因素间的数学模型。试验结果表明:机器作业速度和切碎滚筒转速与 5 个试验指标有二次非线性关系,动刀切割前角仅与茎秆平均切段长度、几何标准差有二次非线性关系,因素的交互项中仅机器作业速度与切碎滚筒转速的交互项对籽粒破碎率、茎秆平均切段长度有显著影响。对切碎滚筒转速进行圆整,得到最优参数组合为:机器作业速度为 1.35 m/s,动刀切割前角为 52°,切碎滚筒转速为 1 350 r/min,此时果穗损失率为 1.1%,籽粒破碎率为 0.23%、籽粒损失率为 0.74%、茎秆平均切段长度为 30.73 mm、几何标准差为 1.28。与田间试验结果对比可知,回归模型有很好的可靠性。将最优组合试验结果与优化前的参数组合(机器作业速度为 1.11 m/s,动刀切割前角为 53°,切碎滚筒转速为 1 657 r/min)得到的结果进行比较可知:优化后较优化前果穗损失率降低 0.4%,籽粒破碎率降低 0.784%,籽粒损失率降低 1.318%,茎秆平均切段长度缩短 12.20 mm,几何标准差减少 0.34。优化后试验指标低于标准规定的指标值,满足设计要求。

关键词: 玉米收获机; 穗茎兼收; 切碎装置; 参数优化; 田间试验

中图分类号: S225.5⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0266-09

Optimization of Parameters for Stalk Chopper of Corn Harvester for Reaping both Corn Stalk and Spike

ZHANG Zongling¹ HAN Zengde² LI Xiaodong³ HAO Fuping³ HAN Keli³ HAN Lujia¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

3. Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: As a corn harvester for reaping both corn stalk and spike needs high efficiency and performance to harvest corn cob and corn stalk, a stalk chopper (SC) in horizontal roller type was designed. Aiming at studying the effect of parameters of chopper on picking and smashing performance, the working principle of SC was analyzed. Box - Benhnken Design (BBD) response surface method was used to design the field experience. An orthogonal rotary combination experiment was conducted with the working speed of corn harvester, the fixed angle of cutting knives and rotating speed of SC as three independent factors, as well as broken rate and loss rate of corn kernels, average length and geometric standard deviation of smashed corn stalk as four dependent indices, while using corn named Zhengdan as the test materials. Corn cobs, kernels and stalks were collected manually and calculated to get the results after every experiment. Design-Expert software was employed to analyze the test data, and mathematical equations between independent and dependent factors were gained. The results indicated that the

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701904)

作者简介: 张宗玲(1989—),女,博士生,主要从事收获机械技术研究,E-mail: jdzl@163.com

通信作者: 韩增德(1963—),男,研究员,主要从事农业机械关键技术及装备研究,E-mail: jszx000@sina.com

independent factors had a second nonlinear relationship with dependent indices, while only working speed of corn harvester and rotating speed of SC had significant effects on loss rate of corn kernels. Three factors all had significant effects on other dependent indices. The interaction between working speed of corn harvester and rotating speed of SC had a significant effect on broken rate of corn kernels and average length of corn stalk. Parameters optimization showed that when working speed of corn harvester was 1.35 m/s, the fixed angle of cutting knives was 52°, rotating speed of SC was 1 350 r/min, the device had optimal performance with loss rate of corn ear of 1.1%, broken rate of corn kernels of 0.23%, loss rate of corn kernels of 0.74%, average length of broken stem of 30.73 mm, and geometric deviation of 1.28. Compared with field test results, it was showed that the regression equation had a good prediction. In contract to the test with working speed of 1.11 m/s, fixed angle of 53°, rotating speed of 1 657 r/min, the results showed that under optimal conditions loss rate of corn ear, broken rate of corn kernels, loss rate of corn kernels, average length of broken stem and geometric deviation were reduced by 0.4%, 0.784%, 1.318%, 12.20 mm and 0.34, respectively. The research result provided a basis for the stalk chopper of corn harvester for reaping both corn stalk and spike.

Key words: corn harvester; reaping stalk and spike; chopping device; parameter optimization; field test

0 引言

目前我国大多数自走式玉米联合收获机主要是收获果穗,茎秆还田,少量的玉米收获机配置有茎秆回收装置,主要由配置在机体中部或后部的茎秆粉碎回收装置,对摘穗后留在地上的玉米茎秆进行粉碎抛送回收,切碎质量差,留茬低时容易带起泥土影响饲用价值^[1-8];也有少数机型配置横置滚刀式切碎回收装置,切碎质量好于茎秆粉碎回收装置,国外最典型的玉米穗茎联合收获机——KCKY-6型玉米联合收获机的切碎装置就是采用该种型式,但也存在留茬高、切断长度差异大等缺点,在我国应用较少^[9-11];也有少数机型配置纵置式茎秆切碎装置,安装于摘穗辊下方,每行必须配置一个,质量大,价格高,影响了在玉米收获机上的应用;在立式玉米穗茎摘穗台上采用立式滚筒轴^[12]和横置式切碎滚筒^[13]对玉米茎秆进行切碎,结构复杂,果穗损失大,故在我国应用较少。总之,国内现有的玉米穗茎联合收获机无论产品性能还是作业质量都有待发展。

为实现玉米穗茎同时收获,本文设计一种以夹持切割输送-摘穗板拉茎辊组合式摘穗-横置滚刀式切碎为工作原理的玉米穗茎割台。为分析该种割台切碎装置参数对割台摘穗性能和切碎性能的影响,对切碎原理进行理论分析,并开展玉米穗茎收获性能田间试验,确定主要因素对摘穗性能和切碎性能的影响规律及最优参数组合,为玉米穗茎割台的切碎装置设计提供参考。

1 结构与工作原理

1.1 割台结构与工作原理

玉米穗茎兼收割台主要由分禾器、往复式切割器、夹持输送装置、齐根装置、摘穗装置、输送装置、

切碎装置、传动装置、机架等组成,结构如图1所示。其中,摘穗装置采用摘穗板拉茎辊组合式摘穗方法,切碎装置采用横置式切碎滚筒进行切碎。割台挂接在玉米穗茎联合收获机机架的前部,通过割台油缸实现上下摆动调整割茬高度,完成玉米果穗与茎秆的同时收获。

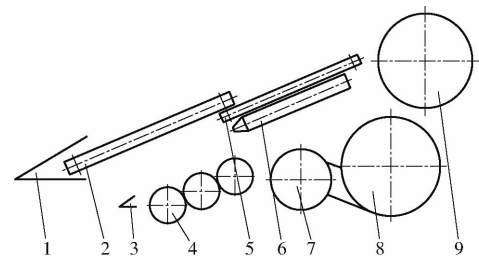


图1 玉米穗茎兼收割台结构示意图
Fig.1 Structural diagram of header in corn combine reaping both corn stalk and spike

- 1. 分禾器 2. 夹持输送装置 3. 往复式切割器 4. 齐根装置
- 5. 果穗输送装置 6. 摘穗装置 7. 切碎装置 8. 茎秆输送器
- 9. 果穗输送器

割台的工作流程:随着收获机的前进,玉米植株被分禾器引向夹持输送链拨禾段,并在夹持输送链的作用下,继续向后输送到夹持位置,在夹持状态下,由往复式切割器切割;切断后的玉米植株在夹持输送链的作用下继续向后输送到摘穗装置的导锥处,进入拉茎辊;玉米植株在拉茎辊向下拉引的同时,果穗被摘穗板摘下,并由果穗输送链输送至果穗输送装置中,再由果穗输送装置向中间聚集进入果穗升运器。同时,玉米植株在夹持输送过程中,根部被齐根辊向上拍打实现齐根(夹持输送链对玉米植株的夹持实为扶持),第3齐根辊辅助玉米植株的交接并将其喂入到横置式切碎滚筒,茎秆则在横置切碎滚筒切刀和定刀的共同作用下完成切碎,被抛送至碎茎秆输送装置中,再由碎茎秆输送装置输送

至抛送器,经抛送筒抛送至集草箱中。

1.2 横置切碎滚筒结构

茎秆切碎装置由切碎滚筒、定刀装置和滚筒壳体组成,位于拉茎辊的下方。切碎滚筒包括刀轴、辐盘、动刀、动刀座、压条等。定刀装置由定刀、垫铁、定刀座和偏心螺栓组成,调节偏心螺栓可以调节动刀与定刀的间隙。滚筒壳体满足碎茎秆能顺利进入茎秆输送抛送装置,通过螺栓与割台机架相连。茎秆切碎滚筒结构如图 2 所示。

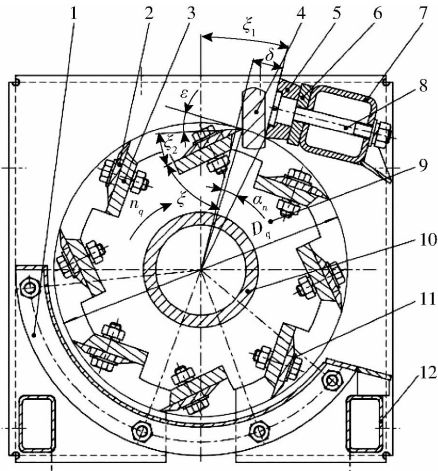


图 2 切碎滚筒结构图

Fig. 2 Structural diagram of shredding drum

1. 滚筒壳体 2. 动刀 3. 动刀座 4. 玉米茎秆 5. 定刀 6. 垫铁
7. 定刀座 8. 偏心螺栓 9. 辐盘 10. 刀轴 11. 压条 12. 机架

图中 D_q ——切碎滚筒直径,mm

ζ ——切割前角, (°)

ζ_2 ——动刀片的磨刃角, (°)

ε ——动刀片的安装角, $\varepsilon + \zeta + \zeta_2 = 90^\circ$

动刀刀的运动轨迹为圆柱面,动刀均匀分布在切碎滚筒上,与定刀配合切碎茎秆。整个割台有两个茎秆切碎装置,左右两端分别驱动,增强了刀轴的强度和切碎滚筒的耐用性。

1.3 切碎原理

对单根茎秆切碎过程进行分析,如图 3 所示,图

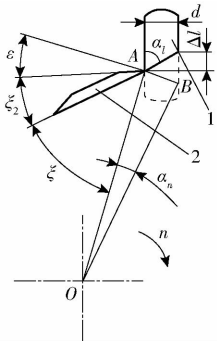


图 3 茎秆切碎分析图

Fig. 3 Analysis diagram of stalk cutting

1. 茎秆 2. 动刀

中 A 点为动刀对茎秆的切割起始点, B 点为切割结束点, O 点为切碎滚筒旋转中心, 设拉茎辊转速为 n_l , 茎秆直径为 d , 切碎滚筒半径为 R , 忽略动刀片安装角和动刀片的磨刃角对茎秆切割的影响时, 则碎茎秆的切口夹角为 α_l , 表示为

$$\cot \alpha_l = \frac{\Delta l}{d} = \frac{\pi \alpha_n R n_l}{180 n_q d} \tag{1}$$

其中 α_n 可表示为

$$\alpha_n = \zeta_1 + \arcsin \frac{\delta}{R} - \arcsin \left(\sin \left(\zeta_1 + \arcsin \frac{\delta}{R} \right) - \frac{d}{R} \right) \tag{2}$$

式中 ζ_1 ——定刀与竖直平面的夹角(简称定刀安装角), (°)

δ ——定刀上表面与切碎旋转中心线所在平面的距离(简称定刀安装距离), mm

n_q ——切碎滚筒转速, r/min

α_n ——动刀切割茎秆需要旋转的角度, (°)

由式(1)可知茎秆切口夹角与切碎滚筒半径、切碎滚筒与拉茎辊转速比、茎秆直径、定刀安装角、定刀安装距离等有关。实际切割中动刀片的安装角和磨刃角对茎秆切段长度、切口夹角有很大影响^[14]。

茎秆理论切段长度可表示为

$$l_l = \frac{2 \pi n_l R}{n_q z} \tag{3}$$

式中 z ——圆周方向切刀个数

当切碎茎秆有切口时, 茎秆长度为

$$l_{ls} = l_l + d \cot \alpha_l \tag{4}$$

由式(3)、(4)可知, 茎秆切段长度与切碎滚筒半径、切碎滚筒与拉茎辊转速比、茎秆直径、茎秆切口夹角有关。

上述分析为单根茎秆的切碎, 实际作业过程中, 通常会有多根茎同时切段的情况。这是因为当机器行走速度快时, 喂入量大, 此时上一根茎秆切碎还未结束, 下一根茎秆已经开始喂入切碎装置中, 此时一把切刀同时切割两根茎秆; 当喂入量继续增大时, 存在同时切割多根茎秆的情况, 此时公式(1)~(4)中的茎秆直径 d 为多根茎秆的直径之和, 因此喂入量对茎秆切段长度也有影响, 即机器前进速度对茎秆切段长度有影响^[15-16]。

1.4 切碎滚筒设计

1.4.1 切碎滚筒直径 D_q

切碎滚筒直径和转速决定茎秆的切段长度, 当切碎滚筒较小时, 茎秆切段长度要求只能通过提高切碎滚筒转速来满足, 提高转速对切碎滚筒的刚性、强度和动平衡要求较高。在割台空间允许的情况下, 应尽量放大切碎滚筒直径。因此, 将茎秆切碎滚

筒直径设计为 260 mm。

1.4.2 动刀排数 k

由于切碎滚筒直径的限制,在圆周方向内,最多只能安装 8 把动刀。

1.4.3 切割前角 ζ

从图 2 可知

$$\varepsilon + \zeta + \zeta_2 = 90^\circ \tag{5}$$

为避免在送进过程中茎秆摩擦动刀片前平面,则安装角 ε 应满足^[14]

$$\varepsilon \geq \arctan \frac{k l_{\max}}{2 \pi R_{\min}} \tag{6}$$

式中 $l_{\max}$ ——茎秆最大理论切段长度,mm

$R_{\min}$ ——动刀刃线的最小回转半径,130 mm

对于黄贮玉米秸秆,切段长度 l_a 应为 15 ~ 30 mm,取 $l_{\max} = 30$ mm。可得动刀片安装角 $\varepsilon \geq 16.4^\circ$,设计动刀片的磨刃角 $\zeta_2 = 22.5^\circ$,由式(5)可得,切割前角 $\zeta \leq 51.1^\circ$,考虑到割台整体的结构分布、切碎滚筒安装位置及动刀片对切碎段茎秆的抛送作用,设计切割前角 $\zeta = 48^\circ$ 。

1.4.4 切碎滚筒转速 n_q

切碎滚筒转速 n_q 、拉茎辊转速 n_l 和切碎滚筒上动刀排数 k 共同决定了茎秆的切段长度 l_a ,有

$$n_q = \frac{\pi D n_l}{l_a z} \tag{7}$$

得 n_q 为 1 172.3 ~ 2 344.5 r/min,设计切碎滚筒转速为 $n_q = 1\,350$ r/min。

1.4.5 动刀片的设计

设计了两侧对称的光刃动刀片,结构如图 4 所示。用螺栓与动刀座相连,开长孔使得动刀片位置可调,当刀片有少量磨损时,可以调节动刀片位置,仍能保证动定刀切割间隙,增加动刀使用时间;同时使用对称结构,当一侧磨损严重时,仍可使用另一面,方便快捷,节约成本。

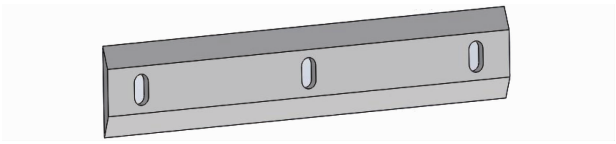


图 4 动刀片三维图
Fig.4 3D model of cutting knife

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验于 2016 年 9 月 27 日—10 月 12 日,在河北省保定市涿水县涿水镇庄町村进行。试验玉米品种为郑单 958,播种时间为 2016 年 6 月 15 日,在田间随机测取 20 组玉米植株行距,得到行距平均值为 607.1 mm;随机测取 2 m 内植株 20 组,计算得株距

平均值为 290.9 mm;随机测量 30 株玉米植株,得到平均根部茎秆直径为 28.02 mm,顶部茎秆直径为 5.68 mm。

试验仪器为:4YJ-4 型穗茎兼收玉米试验样机,游标卡尺(量程 300 mm,精度 0.02 mm),盒尺(量程 3 m,精度 1 mm),样品接取装置(麻袋、绳子),封口袋,记号笔,电子秤,秒表。

2.2 试验设计

2.2.1 试验因素确定

由 1.3 节中的分析可知,茎秆切段长度与喂入量、切碎滚筒半径、切碎滚筒与拉茎辊转速比、茎秆直径、定刀安装角、定刀安装距离、动刀片的安装角与磨刃角有关。因前期已对动定刀间隙做了大量研究^[4,17],已确定动定刀间隙应保持在 1 mm 范围内,故本文对动定刀间隙不做研究,设定动刀间隙为 1 mm,定刀安装角为 14° ,定刀安装距离为 27 mm。为保证试验中理论茎秆切段长度一致,试验时切碎滚筒与拉茎辊转速比保持恒定。本文选取动刀切割前角、切碎滚筒转速和机器作业速度为自变量。

因动刀切割前角的大小影响动刀转动时的迎风面积,会影响切碎滚筒的功耗,同时切碎滚筒切碎后的茎秆由动刀及动刀座抛送进茎秆输送机中,故动刀片对切碎茎秆段有抛送作用^[14]。同时,因现有切碎滚筒的结构限制,动刀切割前角的调节只能增加角度,因此确定动刀切割前角的取值范围为 $48^\circ \sim 58^\circ$,取水平分别为 48° 、 53° 、 58° ,调节方式:在动刀座上分别增加 5° 和 10° 的垫片。

由于拉茎辊、切碎滚筒等动力输入为同一个链轮,在改变输入轴链轮齿数时,夹持输送链转速、拉茎辊转速和果穗输送链转速同时改变,考虑到拉茎辊拉茎能力及果穗损失,经分析确定输入轴链轮齿数取值范围为 17 ~ 27。输入链轮齿数分别为 17、22、27 齿时,对应的切碎滚筒转速分别为:1 043、1 350、1 657 r/min。

结合玉米收获机的工作能力,确定机器作业速度范围为 4 ~ 6 km/h(即 1.11 ~ 1.67 m/s),取水平分别为 1.11、1.39、1.67 m/s,调节方式:液压无级变速。

各因素编码如表 1 所示。

表 1 因素编码
Tab.1 Coding of levels

编码	因素		
	机器作业速度	动刀切割前角	切碎滚筒转速
	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\zeta/(^\circ)$	$n_q/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
-1	1.11	48	1 043
0	1.39	53	1 350
1	1.67	58	1 657

玉米穗茎割台必须同时完成茎秆切碎与果穗摘穗,由于拉茎辊同时也是切碎装置的喂入辊,因此在设计切碎装置时,必须同时考虑切碎性能和摘穗性能。摘穗性能取决于拉茎过程中对果穗的冲击、从摘穗护罩上滚落造成的果穗损失及玉米籽粒的破碎和损失,切碎装置的衡量指标包括茎秆平均切段长度、茎秆切段的几何标准差,故选取果穗损失率 y_1 、籽粒破碎率 y_2 、籽粒损失率 y_3 为衡量摘穗质量的目标函数,选取茎秆平均切段长度 y_4 、几何标准差 y_5 为衡量切碎装置性能的目标函数。

2.2.2 试验指标计算方法

(1) 果穗损失率 y_1

在测定区内,收集漏摘和落地的果穗(包括 5 cm 以上的果穗段),脱净后称量,计算公式为

$$y_1 = \frac{m_u}{m_z} \times 100\%$$

其中

$$m_z = m_q + m_l + m_u$$

式中 m_u ——漏摘和落地果穗籽粒质量,g

m_z ——测定区内籽粒总质量,g

m_l ——落地籽粒质量,g

m_q ——从果穗升运器接取果穗籽粒和果穗夹带籽粒质量,g

(2) 籽粒破碎率 y_2

在测定区,从果穗升运器排出口接取不少于 2 000 g 的样品,脱净清净后,检出机器损伤、有明显裂纹及破皮的籽粒,分别称出破损籽粒质量及样品籽粒总质量,计算公式为

$$y_2 = \frac{m_s}{m_i} \times 100\%$$

式中 m_s ——破碎籽粒质量,g

m_i ——第 i 次试验样品籽粒总质量,g

(3) 籽粒损失率 y_3

在测定区(包括清理区)内,捡起全部落地籽粒(包括茎秆中夹带籽粒)和小于 5 cm 长的碎果穗,脱净后称量,计算公式为

$$y_3 = \frac{m_l}{m_z} \times 100\%$$

(4) 茎秆平均切段长度 y_4 和几何标准差 y_5

用取样网从碎茎秆抛送筒出口接取不少于 2 kg 的碎茎秆,从所取碎茎秆中随机取出 500 g 样品进行处理,按长度 0 ~ 10 mm、10 ~ 20 mm、20 ~ 30 mm、30 ~ 40 mm、40 ~ 50 mm、50 ~ 60 mm、60 ~ 80 mm 和 80 mm 以上进行分级,用游标卡尺分别测出样品中每个长度分段内碎茎秆的平均长度 $\bar{y}_i$ 以及物料质量 m_{li} 。根据文献[18]规定的方法计算平均切段长度和几何标准差,公式为

$$\ln y_4 = \frac{\sum_{i=1}^n m_{li} \ln \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^n m_{li}} \tag{11}$$

$$\ln y_5 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n m_{li} (\ln \bar{y}_i - \ln \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n m_{li}}} \tag{12}$$

式中 $\bar{y}_i$ ——第 i 长度分段的碎茎秆平均长度,mm
 m_{li} ——第 i 长度分段的碎茎秆质量,g

2.2.3 试验方法

按照 GB/T 21961—2008《玉米收获机械试验方法》的规定,试验区由 20 m 稳定区、20 m 测定区、15 m 停车区组成,稳定区和停车区的玉米在试验前清理干净。试验时将割台悬挂在收获机上进行田间试验,除去生长状态差的玉米植株,驾驶员在操作时保持直行收获。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

采用 Box - Benhnken 响应面法进行拉茎切碎性能试验设计,设计了 15 个试验点的响应面分析试验,其中 12 个析因点,3 个为零点试验用以误差估计,试验方案和结果如表 2 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

表 2 Box - Benhnken 试验设计方案与结果
Tab.2 Results and design of experiments using Box - Benhnken

序号	X_1	X_2	X_3	$y_1/\%$	$y_2/\%$	$y_3/\%$	y_4/mm	y_5
1	-1	-1	0	0.5	0.413	1.104	40.49	1.52
2	-1	0	-1	2.3	0.226	1.308	33.61	1.79
3	-1	0	1	1.5	1.024	2.052	43.66	1.64
4	-1	1	0	2.7	0.436	1.374	41.24	1.87
5	0	-1	-1	1.4	0.354	0.672	38.96	1.71
6	0	-1	1	2.9	0.752	1.922	44.92	1.54
7	0	0	0	2.6	0.189	0.588	31.94	1.28
8	0	0	0	0.9	0.113	0.730	30.01	1.30
9	0	0	0	1.2	0.082	0.468	29.42	1.33
10	0	1	-1	2.8	0.295	1.218	39.3	1.92
11	0	1	1	1.0	0.584	2.736	45.92	2.11
12	1	-1	0	1.8	0.432	2.472	44.40	1.52
13	1	0	-1	1.6	0.552	1.672	38.53	1.99
14	1	0	1	1.1	0.381	3.060	36.30	1.65
15	1	1	0	0.6	0.652	1.404	46.34	2.00

3.2 响应面模型及显著性检验

针对表 2 中的样本数据,运用 Design-Expert 数据分析软件进行多元回归拟合分析和方差分析,并对试验因素和回归模型进行 F 检验,结果如表 3 所示。

表 3 试验结果统计分析 P 值

Tab.3 Statistical analysis for P results of experiment

来源	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
X_1	0.048 3 *	0.819 0	0.043 8 *	0.327 5	0.209 7
X_2	0.273 1	0.964 3	0.609 8	0.535 2	0.001 0 **
X_3	0.000 2 **	0.011 8 *	0.005 1 **	0.019 9 *	0.103 4
X_1X_2	0.474 1	0.449 7	0.126 5	0.792 2	0.471 7
X_1X_3	0.586 9	0.010 0 **	0.418 4	0.035 1 *	0.307 0
X_2X_3	0.854 3	0.669 2	0.728 8	0.883 5	0.083 7
X_1^2	0.007 5 **	0.023 1 *	0.015 1 *	0.013 0 *	0.007 9 *
X_2^2	0.367 2	0.058 3	0.171 2	0.000 6 **	0.002 8 **
X_3^2	0.019 1 *	0.018 4 *	0.011 6 *	0.029 5 *	0.001 4 **
模型	0.004 1 **	0.028 2 *	0.023 7 *	0.009 4 **	0.004 0 **
失拟	0.202 0	0.123 2	0.076 3	0.218 5	0.054 0
R^2	0.964 2	0.919 1	0.924 9	0.949 5	0.964 8

注：* 表示在 95% 的置信区间内有显著影响，** 表示在 99% 的置信区间内有极显著影响。

分析表明在置信区间 99% 范围内,对果穗损失率 y_1 影响极显著的因素有: X_3 、 X_1^2 ,在置信区间 95% 范围内,影响显著的因素为 X_1 、 X_3^2 ,模型的 P 值为 0.004 1,表明回归模型极显著,决定系数 R^2 为 0.964 2,表明回归模型的理论值和实际值相关性好,失拟项的 P 值为 0.202 0,表明试验误差对试验结果影响很小。同理,对籽粒破碎率 y_2 影响极显著的因素是 X_1X_3 ,影响显著的因素为 X_3 、 X_1^2 、 X_3^2 ,回归模型显著;对籽粒损失率 y_3 影响极显著的因素为 X_3 ,影响显著的因素为 X_1 、 X_1^2 、 X_3^2 ,回归模型显著;对茎秆平均切段长度 y_4 影响极显著的因素为 X_2^2 ,影响显著的因素为 X_3 、 X_1X_3 、 X_1^2 、 X_3^2 ,回归模型极显著;对几何标准差 y_5 影响极显著的因素为 X_2 、 X_2^2 、 X_3^2 ,影响显著的因素为 X_1^2 ,回归模型极显著。剔除不显著项,简化后的

回归方程为

$$\begin{aligned} y_1 &= 1.12 + 0.24X_1 + 0.9X_3 + 0.57X_1^2 + 0.45X_3^2 \\ y_2 &= 0.222 + 0.164X_3 - 0.242X_1X_3 + 0.191X_1^2 + 0.204X_3^2 \\ y_3 &= 0.782 + 0.346X_1 + 0.613X_3 + 0.666X_1^2 + 0.715X_3^2 \\ y_4 &= 30.46 + 2.55X_3 - 3.07X_1X_3 + 4.21X_1^2 + 8.46X_2^2 + 3.36X_3^2 \\ y_5 &= 1.3 + 0.2X_2 + 0.19X_1^2 + 0.24X_2^2 + 0.28X_3^2 \end{aligned}$$

3.3 各因素对各项性能指标的影响规律

为进一步探讨各因素的单独作用对目标函数的影响效应,对数学模型进行降维分析,分别将 3 因素中的 2 个因素固定在零水平,即可得到单因素为自变量时的回归模型。单因素对各项性能指标的影响规律如图 5 所示。由图 5 可知,在 $-1 \leq X_i \leq 1$ ($i = 1, 2, 3$) 范围内,除果穗损失率外,自变量对因变量的影响曲线均为开口向上的抛物线,即当另两个因素水平为 0 时,随着机器作业速度 X_1 、动刀切割前角 X_2 及切碎滚筒转速 X_3 的增加,籽粒破碎率、籽粒损失率、茎秆平均切段长度、几何标准差先减小后增大。

由图 5a 可知,当自变量编码为负值时,单因子对果穗损失率的影响主次顺序为: X_1 、 X_3 ;当自变量编码为正值时,单因子对果穗损失率的影响主次顺序为: X_3 、 X_1 。当机器作业速度编码值为 -0.21 时,果穗损失率最小,为 1.1%;当切碎滚筒转速编码值为 -1 时,果穗损失率最小,为 0.7%。

由图 5b 可知,当自变量编码为负值时,单因子对籽粒破碎率影响的主次顺序为: X_1 、 X_3 ;当自变量编码为正值时,单因子对籽粒破碎率影响的主次顺序为: X_3 、 X_1 。这是因为在拉茎切碎过程中,籽粒的

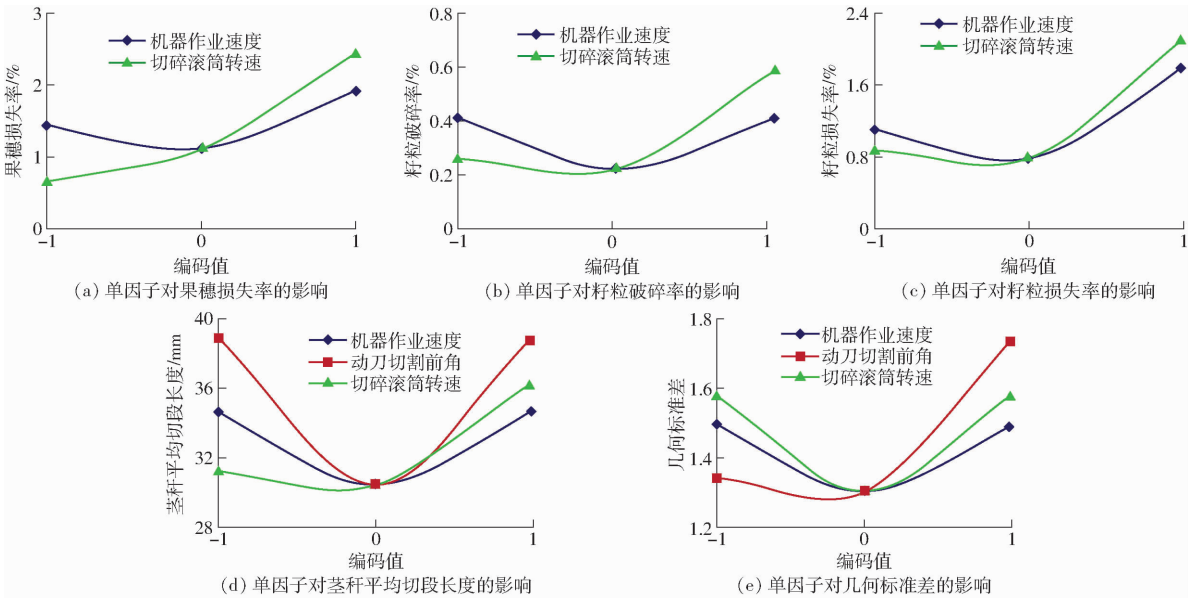


图 5 单因子对各性能指标影响曲线

Fig.5 Effect curves of single factor on four dependent indices

破碎主要发生在摘穗过程中,摘穗板和夹持输送链对果穗的作用力直接影响着玉米籽粒的破碎率,拉茎辊转速对籽粒破碎率影响显著^[16,19-20]。当机器作业速度编码值为-0.40时,籽粒破碎率最小,为0.189%,当切碎滚筒转速编码值为0时,籽粒破碎率最小,为0.222%。

由图5c可知,当自变量编码为负值时,单因子对籽粒损失率的影响主次顺序为: X_3 、 X_1 ,当自变量编码为正值时,单因子对籽粒损失率的影响主次顺序为: X_1 、 X_3 。当机器作业速度编码值为-0.26时,籽粒损失率最小,为0.737%;当切碎滚筒转速编码值为-0.43时,籽粒损失率最小,为0.651%。

由图5d可知,当自变量编码为负值时,单因子对茎秆平均切段长度影响的主次顺序为: X_2 、 X_1 、 X_3 ;当自变量编码为正值时,单因子对茎秆平均切段长度影响的主次顺序为: X_2 、 X_3 、 X_1 。当切碎滚筒转速编码值为-0.38时,茎秆平均切段长度最小,为29.98 mm;当机器作业速度和动刀切割前角的编码值为0时,茎秆平均切段长度最小,均为30.46 mm。

由图5e可知,当自变量编码为负值时,单因子对几何标准差影响的主次顺序为: X_3 、 X_1 、 X_2 ;当自变量编码为正值时,单因子对几何标准差影响的主次顺序为: X_2 、 X_3 、 X_1 。总体上,因素对几何标准差的影响程度都不大,变化的幅值也不大。当动刀切割前角编码值为-0.36,几何标准差最小,为1.26;当机器作业速度和动刀切割前角的编码值为0时,几何标准差最小,为1.30。

3.4 交互作用对各项性能指标的影响规律

由表3的方差分析结果可知,交互作用对试验指标的影响中,仅 X_1X_3 对籽粒破碎率、茎秆平均切段长度的影响达到显著水平,如图6所示。由图6a可知,随着机器作业速度和切碎滚筒转速的增加,籽粒破碎率出现先降低再增加的趋势,这是由于切碎滚筒转速增加时,拉茎辊转速同比增加,当机器作业速度和拉茎速度同时增加时,摘穗板与果穗输送链对果穗的作用强,对籽粒破碎的影响明显。

由图6b可知,随着机器作业速度和切碎滚筒转

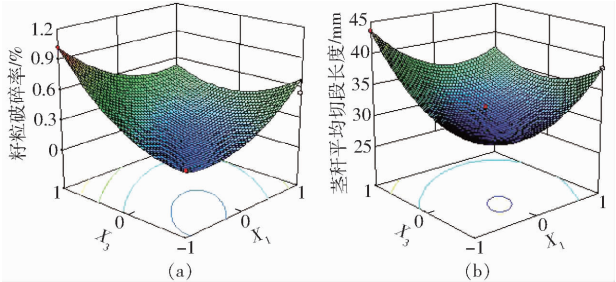


图6 因素交互作用对各性能指标影响曲线
Fig.6 Influence of factors interaction on dependent indices

速的增加,茎秆平均切段长度出现降低趋势,是由于茎秆喂入量增加的同时,切碎装置的切碎效率提高,但随着进一步提高,喂入的茎秆层变厚及滚筒切碎下拉作用明显,茎秆平均切段长度将变长。

3.5 参数优化与试验验证

3.5.1 参数优化

参数优化的目的是获取最优参数组合,在茎秆切段长度短且均匀的基础上,使得果穗损失率、籽粒破碎率、籽粒损失率最小。

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对回归方程进行参数优化,优化目标为果穗损失率、籽粒破碎率、籽粒损失率、茎秆平均切段长度和几何标准差最小,其中果穗损失率、籽粒破碎率和籽粒损失率的重要性设置为5+,茎秆平均切段长度和几何标准差的重要性设置为1+,得到最优参数组合为:机器作业速度为1.32 m/s、动刀切割前角为52°、切碎滚筒转速为1 176 r/min,此时果穗损失率为0.73%,籽粒破碎率为0.172%、籽粒损失率为0.62%、茎秆平均切段长度为30.14 mm、几何标准差为1.38,因切碎滚筒转速的获得与链轮齿数有关,故对切碎滚筒转速进行圆整,设定为1 350 r/min(对应输入轴链轮齿数为22齿),此时最优参数组合为:机器作业速度为1.35 m/s,动刀切割前角为52°,切碎滚筒转速为1 350 r/min,得果穗损失率为1.1%、籽粒破碎率为0.23%、籽粒损失率为0.74%、茎秆平均切段长度为30.73 mm、几何标准差为1.28。

3.5.2 试验验证

对优化后的参数进行3次重复试验,对其求平均值,得试验结果的实际值如表4,对比综合最优解的理论值和试验值,可知理论值与实际值基本相符,表明回归模型有较好的可靠性。

表4 最优组合验证试验结果
Tab.4 Verification test for optimal performance and corresponding parameters of corn harvester header for both spike and stalk

参数	果穗损	籽粒破	籽粒	茎秆平均	几何
	失率	碎率	损失率	切段长度	标准差
	$y_1/\%$	$y_2/\%$	$y_3/\%$	y_4/mm	y_5
理论值	1.1	0.23	0.74	30.73	1.28
实际值	1.1	0.24	0.73	31.46	1.30
优化前试验值	1.5	1.02	2.05	43.66	1.64

将试验结果与优化前的参数组合(机器作业速度为1.11 m/s,动刀切割前角为53°,切碎滚筒转速为1 657 r/min)得到的结果比较可知:果穗损失率减少0.4%,籽粒破碎率减少0.784%,籽粒损失率减少1.318%,茎秆平均切段长度减少12.20 mm,几何

标准差减少 0.34。

4 结论

(1) 设计了横置式切碎装置, 并对其工作原理进行了分析, 确定了玉米植株摘穗切碎时的影响因素。

(2) 利用 BBD 方法设计了夹持输送性能试验, 通过田间试验获得了玉米果穗损失率、籽粒破碎率、籽粒损失率、茎秆平均切段长度、几何标准差与机器前进速度、动刀切割前角、切碎滚筒转速间的数学模型。

(3) 除果穗损失率外, 3 个自变量对籽粒破碎率、籽粒损失率、茎秆平均切段长度与几何标准差均

有二次非线性关系, 因素的交互项机器前进速度与切碎滚筒转速仅对籽粒破碎率和茎秆平均切段长度有显著影响。

(4) 利用回归模型对切碎滚筒转速进行圆整, 得到最优参数组合为: 机器作业速度为 1.35 m/s, 动刀切割前角为 52°, 切碎滚筒转速为 1 350 r/min (对应动力输入轴链轮齿数 22 齿), 得果穗损失率为 1.1%、籽粒破碎率为 0.23%、籽粒损失率为 0.74%、茎秆平均切段长度为 30.73 mm、几何标准差为 1.28。最优参数组合田间试验结果与理论值相近, 表明回归模型能很好地预测切碎装置性能指标。为玉米穗茎兼收割台切碎装置的优化设计提供了理论参考。

参 考 文 献

- 1 石增武. 玉米收获机茎秆切割铺放装置的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2011.
SHI Zengwu. The study on stalks cutoff and windrowing device of corn harvester[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2011. (in Chinese)
- 2 李永磊, 宋建农, 康小军, 等. 双辊秸秆还田旋耕机试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 45–49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130609&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.009.
LI Yonglei, SONG Jiannong, KANG Xiaojun, et al. Experiment on twin-roller cultivator for straw returning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 45–49. (in Chinese)
- 3 王德福, 王沫, 李利桥. 锤片式粉碎机粉碎玉米秸秆机理分析及参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 165–171. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171120&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.020.
WANG Defu, WANG Mo, LI Liqiao. Mechanism analysis and parameter optimization of hammer mill for corn stalk[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 165–171. (in Chinese)
- 4 肖戟, 李剑飞, 牛云鹏. 玉米联合收获机典型切碎部件的研究[J]. 机械设计与制造, 2011(7): 130–132.
XIAO Ji, LI Jianfei, NIU Yunpeng. Study on typical chopping parts of corn combine harvester[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011(7): 130–132. (in Chinese)
- 5 张军昌, 闫小丽, 薛少平, 等. 秸秆粉碎覆盖玉米免耕施肥播种机设计[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 51–55. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121210&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.12.010.
ZHANG Junchang, YAN Xiaoli, XUE Shaoping, et al. Design of no-tillage maize planter with straw smashing and fertilizing[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 51–55. (in Chinese)
- 6 周德义, 王子佳, 张丹丹, 等. 新型玉米收获机的秸秆处理装置[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(增刊): 113–116.
ZHOU Deyi, WANG Zijia, ZHANG Dandan, et al. The new device of stalk cutting within corn harvester[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(Supp.): 113–116. (in Chinese)
- 7 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170910&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.010.
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. (in Chinese)
- 8 郑智旗, 何进, 李洪文, 等. 固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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s017&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.017.
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. (in Chinese)
- 9 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/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 95–100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20121017&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.017.
CUI Tao, LIU Jia, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of cob-picking and stalk-chopping united mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 95–100. (in Chinese)
- 10 范国昌, 齐新, 张辉辰, 等. 摘穗青贮型玉米复式割台的试验分析[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 85–88.

- FAN Guochang, QI Xin, ZHANG Huichen, et al. Experimental analysis of a double head of corn picker and straw forage cutter [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(3): 85–88. (in Chinese)
- 11 赵学林. 穗茎兼收型玉米收获机茎秆切碎回收装置设计与研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2014.
ZHAO Xuelin. Design and research for the stalk chopping and recovery device of corn combine reaping both stalk and spike[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2014. (in Chinese)
 - 12 张道林, 孙永进, 赵洪光, 等. 立辊式玉米摘穗与茎秆切碎装置的设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 50–52, 76.
ZHANG Daolin, SUN Yongjin, ZHAO Hongguang, et al. Design of a vertical-roll type of corn picker and stalk chopper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 50–52, 76. (in Chinese)
 - 13 宋芳. 玉米收获机秸秆切碎刀的试验研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2011.
SONG Fang. The experimental investigation of the straw chopping knife of the corn harvester[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2011. (in Chinese)
 - 14 庞声海, 王乃信. 直刀刀滚刀式切碎器的分析与设计[J]. 农业机械学报, 1983, 14(2): 46–54.
 - 15 薛志成. 9SQ-10型青饲料收获机常见故障及排除[J]. 农业装备技术, 2003, 29(5): 19.
 - 16 范国昌, 王惠新, 籍俊杰, 等. 影响玉米摘穗过程中籽粒破碎和籽粒损失率的因素分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 72–74.
FAN Guochang, WANG Huixin, JI Junjie, et al. Analysis of influence factor on seed damage rate and loss rate during picking corn-cob[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(4): 72–74. (in Chinese)
 - 17 王宏立, 王文春, 杨天维, 等. 青饲机平板刀式滚筒切碎器的设计研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2004, 16(3): 49–52.
WANG Hongli, WANG Wenchun, YANG Tianwei, et al. Design on plane table-knife drum cutter of the verdant forage harvester[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2004, 16(3): 49–52. (in Chinese)
 - 18 GB/T 10394.3—2002 饲料收获机 第3部分: 试验方法[S]. 2002.
 - 19 贺俊林. 低损伤玉米摘穗部件表面仿生技术和不分行喂入机构仿真[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
HE Junlin. Biomimetic surfaces of snapping rolls with lower damage action and simulation of no-row feed-in mechanism of maize harvesters[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
 - 20 范国昌, 王惠新, 张辉辰, 等. 影响板式玉米摘穗机籽粒破碎和损失的因素分析[J]. 河北农业科学, 2003, 7(增刊1): 10–14.
FAN Guochang, WANG Huixin, ZHANG Huichen, et al. Analysis of influence factor on seed damage rate and loss rate in harvesting corn[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2003, 7(Sup. 1): 10–14. (in Chinese)

(上接第 346 页)

- 11 王朝阳, 达飞鹏. 基于多尺度哈尔小波变换的三维人脸识别方法[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(7): 1442–1445.
WANG Zhaoyang, DA Feipeng. 3D face recognition based on multi-scale haar transform[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(7): 1442–1445. (in Chinese)
- 12 JAKOVLJEVIC Z, PUZOVIC R, PAJIC M. Recognition of planar segments in point cloud based on wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(2): 342–352.
- 13 LIAN Z, GODIL A, SUN X, et al. CM-BOF: visual similarity-based 3D shape retrieval using clock matching and bag-of-features[J]. Machine Vision and Applications, 2013, 24(8): 1685–1704.
- 14 NOVOTNI M, KLEIN R. Shape retrieval using 3D Zernike descriptors[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(11): 1047–1062.
- 15 LAGA H, NAKAJIMA M, CHIHARA K. Discriminative spherical wavelet features for content-based 3D model retrieval[J]. International Journal of Shape Modeling, 2007, 13(1): 51–72.
- 16 PAPADAKIS P, PRATIKAKIS I, PERANTONIS S, et al. Efficient 3D shape matching and retrieval using a concrete radialized spherical projection representation[J]. Pattern Recognition, 2007, 40(9): 2437–2452.
- 17 YIN Z W. Direct generation of extended STL file from unorganized point data[J]. Computer-Aided Design, 2011, 43(6): 699–706.
- 18 SANG Y F, WANG D, WU J C, et al. Wavelet-based analysis on the complexity of hydrologic series data under multi-temporal scales[J]. Entropy, 2011, 13(1): 195–210.
- 19 WANG Y, CHE X, MA S. Nonlinear filtering based on 3D wavelet transform for MRI denoising[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2012(1): 40.
- 20 PROCHAZKA A, GRAFOVA L, VYSATA O. Three-Dimensional wavelet transform in multi-dimensional biomedical volume processing[C]//IASTD International Conference Graphics and Virtual Reality, 2011.
- 21 霍星, 史海滨, 杨松益, 等. 基于层次分析-蚁群算法的内蒙古大型灌区节水改造综合评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 132–140.
HUO Xing, SHI Haibin, YANG Songyi, et al. Comprehensive assessment on water-saving renovation of large-scale irrigation districts in Inner Mongolia based on hierarchical analysis ant colony algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 132–140. (in Chinese)
- 22 JAYANTI S, KALYANARAMAN Y, RAMANI K. Shape-based clustering for 3D CAD objects: a comparative study of effectiveness[J]. Computer-Aided Design, 2009, 41(12): 999–1007.