

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.010

甘蔗收获机切段装置设计与试验

刘芳建¹ 杨学军¹ 方宪法¹ 刘赞东¹ 吴俭敏² 赵金辉²
(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对甘蔗收获机切段装置存在的切段机理理论缺乏、切段损失大、对切段装置要求多样化等现状,对比分析了切段装置前置式、中置式、后置式3种形式的收获流程,并基于对前置切段式结构的理论分析,推导前置切段式切段长度的经验公式,设计了切段装置试验台和切段装置前置式收获机割台。进行了切段过程高速摄影试验,获知蔗段在切段过程中的运动规律、蔗叶与蔗茎的分离形式、断口糖分损失的主要形式及原因,通过田间正交试验确定了影响蔗段合格率因素主次顺序为:交错深度、行驶速度、切段辊转速,当交错深度为4 mm,行驶速度为2 km/h,切段辊转速为300 r/min时,割台蔗茎合格率达到93%。通过统计学分析计算,得出了长度系数为0.7,其长度分布近似符合正态分布规律。

关键词: 甘蔗收获机; 切段装置; 高速摄像; 参数优化; 机理分析

中图分类号: S225.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)09-0090-06

Design and Experiment of Chopper Device in Sugarcane Harvester

LIU Fangjian¹ YANG Xuejun¹ FANG Xianfa¹ LIU Yundong¹ WU Jianmin² ZHAO Jinhui²
(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China
2. Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the status that the mechanism study of the chopper device in sugarcane harvester is insufficient, chopping loss is high, and the requirements to the chopper device present the character of diversification, three different harvest processes varied in the mounting position of the chopper device were compared and analyzed, including front-mounted, central-mounted and rear-mounted. Based on the analysis result of the merit and demerit between different harvest processes, the viewpoint that the harvest process which adopted front-mounted structure of chopper device was more suitable for the bending and lodging sugarcane in China was proposed. Further theoretical analysis of the front-mounted structure was conducted and empirical formula of billet length produced under this structure was deduced. Based on this, a chopper testing unit was designed, as well as a new type header of sugarcane harvester characterized by front-mounter chopper. A high-speed photography test was conducted on the testing unit and law of motion of billets and cane-stalk was observed, as well as the separation process between stalk and leaf, furthermore, sugar loss during chopping process was analyzed through the procedure of fracture formation. Taking the billet acceptability as index, and through orthogonal field test conducted on the header, the factors impacted on billet quality were optimized, and the billet acceptability reached up to 93% under the condition that intersect depth was 4 mm, ground speed was 2 km/h, and rotational speed of rollers was 300 r/min. By means of billet length test and statistical analysis, a conclusion was drawn that billet length was approximately in normal distribution, and the length coefficient in aforesaid formula was deduced as 0.7.

Key words: sugarcane harvester; chopper device; high-speed video; parameter optimization; mechanism analysis

收稿日期: 2018-03-12 修回日期: 2018-05-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701200)
作者简介: 刘芳建(1987—),男,博士生,主要从事农业机械装备关键技术研究,E-mail: liufangjian3219@163.com
通信作者: 杨学军(1961—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械装备关键技术研究,E-mail: camms@263.net

0 引言

甘蔗收获机切段装置主要有滚切式和砍切式两种结构^[1],由于滚切式切割破头率低,对不同形式茎秆适应性好,加之结构简单可靠、便于维护保养,被主流机型普遍采用。但在切段过程中会造成一定的糖分损失,包括蔗段损失、断口损失和糖液损失,若切段装置设计不合理或装配误差较大,损失会急剧增加。有研究表明,澳大利亚每年因切段过程而造成的糖分损失高达3 500 万美元^[2]。此外,滚切式切段装置功耗较高、对整机振动较大。国外相关研究机构早期开发的切段结构,往往只改善某项性能,综合作业性能不及滚切式结构^[3-4]。随着蔗段运输成本逐步提高,国外对切段装置的研究方向是在保证切段质量的前提下,能有效调节控制切段长度,以提高物料的容积密度,降低运输成本^[5-9]。国内还未见对切段装置的研究文献,主要甘蔗机生产企业立足于提高切段质量、切段稳定性,不断对滚切式结构进行完善^[10],随着我国切段式甘蔗收获机的规模化应用,对滚切式切段装置的切段机理、切段损失等方面加以研究很有必要。因此本文对此加以研究。

1 滚切式切段装置结构理论分析

滚切式切段装置主要由上切段辊、下切段辊、切段刀片、惯性轮、传动机构、对刀机构等部件组成,其结构如图1所示。

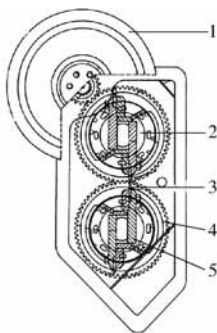


图1 滚切式切段装置示意图

Fig.1 Sketch of rolling-cut type chopper

1. 惯性轮 2. 上切段辊 3. 切段刀片 4. 传动机构 5. 下切段辊

上、下切段辊依靠传动机构实现转速相同、转向相反,两切段辊圆周方向通过夹持机构安装有2~4排切段刀片,为保持工况的稳定性,切段装置往往安装有飞轮装置,以提高系统转动惯量。随着切段辊高速旋转,上下配合的切段刀片一起完成对蔗茎的挤压、切入、抛送。根据切段工序在整机工作流程的位置,可分为前置切段式、中置切段式、后置切段式,其中中置式与后置式结构为有夹持切段(图2),前

置式结构为无夹持切段(图3)。后置切段式其切段工序前具有输送工序,输送工序由多对开放式的输送辊完成,输送辊转速可调,蔗茎在输送辊夹持下被喂入切段装置,这种结构能有效降低含杂率,并能调节蔗段长度,蔗段长度较为均匀,该种结构被国外主流机型普遍采用;前置切段式的切段工序紧跟根切工序,将根切后蔗茎直接切段^[11-12],切段装置起着喂入、切段、抛送的功能,这种结构对弯曲甘蔗适应性较好,不易堵塞,但杂土喂入量较大,含杂率偏高,其结构如图3所示;中置式切段装置综合了前两者的优点,在蔗茎完成根切后设有一个行程较短的输送过程,利于排出杂土且不显著影响其对弯曲甘蔗适应性,但该种布局也增加了结构复杂度。上、下切段刀片应有严格的配合关系,刀尖轨迹应有一定的交错深度,且运动过程中不发生干涉碰撞,其关系是决定切段质量的关键因素。

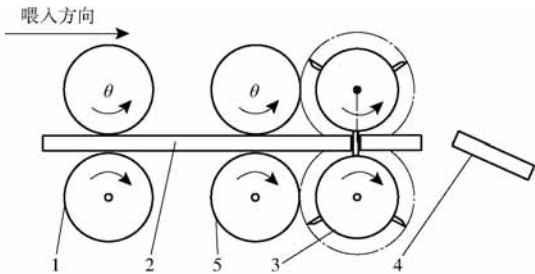


图2 有夹持切段示意图

Fig.2 Diagram of gripping chopper

1、5. 输送辊 2. 甘蔗 3. 切段辊 4. 已切蔗段

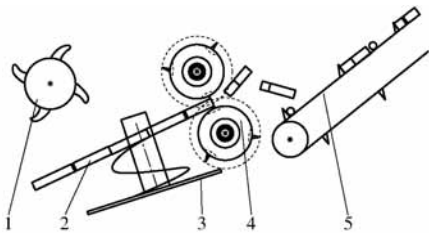


图3 前置切段式收获流程示意图

Fig.3 Diagram of chopper without gripping

1. 压倒辊 2. 甘蔗 3. 根切刀盘 4. 切段装置 5. 输送刮板

刀辊直径、喂入辊直径及圆周方向刀片排数是影响切段长度的重要参数^[13],对于切段装置后置式收获机,相关关系可近似用公式表达为^[1]

$$L = \frac{\pi d n_2}{Z n_1 K} \tag{1}$$

式中 L ——蔗段长度, m
 d ——输送辊直径, m
 Z ——切段辊周向刀的排数
 n_2 ——喂入辊转速, r/min
 n_1 ——切段辊转速, r/min
 K ——直径修正系数,取1.1~1.2

由式(1)可以看出,当装置的结构参数确定后,

切段长度取决于喂入辊与切段辊的转速比。后置式切段装置可以通过调节喂入辊的转速,方便地调节蔗段长度,且由于切段过程中输送辊的夹持作用,蔗茎在此过程中运动状态相对稳定,切段长度较为均匀。

对于前置式切段装置,由于切段工序紧跟根切工序,可依靠根切刀盘的螺旋提升作用和整机前进速度将蔗茎喂入至切段刀作用区域。在切段过程中,蔗茎没有前方输送辊的夹持喂入作用,仅靠上下切段刀的咬合作用进行自行喂入,据此推导出表达式为

$$L = \delta \frac{2\pi R}{Z} \quad (2)$$

式中 R ——切段刀辊半径(刀尖至轴心距离)

δ ——长度系数

由式(2)可看出,切段长度主要受切段刀辊结构参数影响,与刀辊圆周方向相邻两刀尖落在其轨迹圆弧上的长度呈正相关关系,受工作参数影响并不显著。但要保证切段质量及切段过程的连续性,工作参数应有一个最优化范围。长度系数 δ 受茎秆喂入状态、喂入量、甘蔗茎秆间拖滞作用等因素交互影响,其具体机理还有待于深入研究。

切段过程与根切过程原理不同,根切刀片依靠惯性将蔗段切断,属于无支撑切割,切割质量受转速、切割角等因素影响较大,其切断机理、切根质量控制研究已较为成熟^[14-17],而切段过程中刀片对蔗段产生滚切作用,上下刀片互为支撑,其切段机理研究较少。切段过程中发生的损失形式多样,有研究按其断口形式将其分类^[18],在此基础上进行指标加权量化,可以方便进行结构与工作参数的优化。由于切段辊转速较高,单次切段过程往往只需要几毫秒至十几毫秒,因此,运用高速摄像机对切段过程进行观察,分析上下刀片对蔗茎的滚切过程,在此过程中分析蔗段的断口成型、成因,以及蔗段的运动规律。

2 切段装置试验台与整机割台设计

2.1 试验台

综合以上分析并结合前期研究,试验台切段刀辊采用圆周方向3排刀片布置,刀片轨迹半径最大167 mm的结构参数。前期研究表明,上下配合刀辊刀尖应有一定的交错深度,可保证蔗段与蔗叶的有效切段,若无交错深度或者交错深度过小,当刀片发生一定的磨损后,切段质量将严重下滑,蔗段含杂率也随之上升,因此两辊中心距设为318 mm,刀尖交错深度最大为12 mm。相互作用的上、下刀片有较

严格的配合关系,图4为装配后上、下刀片实物图。因此上、下刀辊依靠支架外侧第二级减速箱体齿轮传动,可实现转向相反、转速相同、传动比准确。

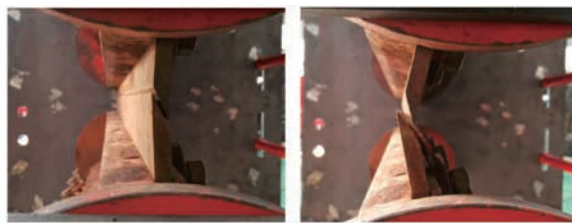


图4 上下刀片配合示意图

Fig. 4 Photograph of blades in assembly

试验台由一台额定功率15 kW的变频电动机提供动力,电动机由变频器调节转速,进而实现不同的刀辊转速。电动机与切段装置支架一侧第一级减速箱体实现动力对接。第一级减速箱体通过支架中间箱体内传动轴与支架另一端第二级减速箱体连接。中间箱体既起到对整个装置的支撑作用,还能防止蔗段飞离预定抛送轨迹,避免对试验人员造成伤害。为使高速摄像机观察切段过程,应在支架另一侧上下刀辊交错区域开设有探视口,为防止蔗段等异物飞出伤人,应在探视口固定有机玻璃。试验台如图5所示。



图5 切段装置试验台

Fig. 5 Photograph of chopper experimental device

2.2 整机割台

由中国农业机械化科学研究院研制的切段式甘蔗联合收获机,采用了切段装置前置式结构,收获流程为切梢—压倒—根切—切段—输送—排杂—升运。其中位于整机前部的割台(图6)一次完成压倒、根切、切段,将蔗段抛送至整机腹部输送通道,割台由液压油缸控制切割高度。输送通道将蔗段和切碎蔗叶混合物输送至整机后部并抛送至排杂舱。割台切段装置基本结构参数与试验台相同。根切刀盘与切段辊均由液压马达提供动力,可通过电磁比例阀调节液压马达转速,二者转速信息由传感器采集,并通过数字显示器在驾驶室实时显示。

上、下刀片的交错深度可通过改变刀片与安装座相对位置来调节。在切段装置传动部件上,设有调刀机构,可通过改变齿轮与刀轴安装角度对上、下

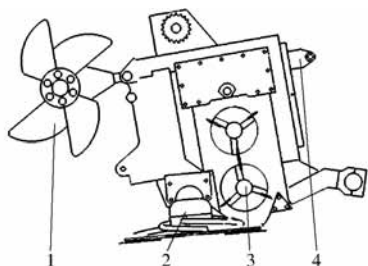


图6 切段装置前置式割台纵向剖视图
Fig. 6 Cutaway view of header charactered by front-load chopper

1. 压倒辊 2. 根切圆盘 3. 切段装置 4. 伸缩油缸挂耳

刀的相位配合关系进行微调,可在刀片出现一定磨损后进行调节以继续保证最佳工况。

3 试验

3.1 高速摄像试验

3.1.1 试验条件

试验设备及材料包括:FASTEC IMAGING 公司生产的 TS3 型高速摄像机一台,日本精工 AVENIR LENS2. 5mm - F1. 4 型镜头一个、切段装置试验台、新闻灯 2 台、相机支架、盒尺等。试验用甘蔗为 3 年生宿根蔗,人工收割,均带有叶梢。

3.1.2 试验与结果分析

用支架将高速摄像机固定于探视口处,为防止机架振动影响摄像机的拍摄,应注意使支架、摄像机避免与机架接触。试验前应根据光源强度和甘蔗喂入位置预调节好摄像机光圈和焦距,使成像尽可能清晰。成像视野应能观察到切段前后整个过程,在此基础上应尽量使快门速度提高。录像完毕后可同时保存成视频与照片两种格式。

由高速摄像可观察到:蔗茎喂入至切段装置工作区域内时,首先会受到上刀片或者下刀片的打击,这取决于蔗茎的喂入位置,对于前置式切段装置而言,该位置具有很大的随机性。当蔗茎受到打击后,运动至上下辊中性面附近,在该位置上、下刀片一起接触蔗茎,开始对蔗茎形成滚切作用。蔗茎由两刀片夹持后,在轴向方向会发生较大转动,但其蔗茎方向基本与辊间中性面重合。随着辊的旋转,上、下刀片迅速挤压、切入蔗茎内部,同时上、下刀片带动蔗茎运动,保证了甘蔗的持续喂入。当喂入带梢部甘蔗时,可观察到包裹在蔗茎上的蔗叶在刀片的滚切作用下随蔗段一起被切断,并在随后刀片抛送作用下与蔗段分散,但当梢部末端叶片喂入时,由于叶片自身物理性质,加之缺少有效支撑,叶片会有一定量通过上下刀片交错间隙(图7)。

上、下刀片从开始切入蔗茎到运动至两刀片最大交错深度位置过程中,随着刀辊旋转,刀片切入蔗

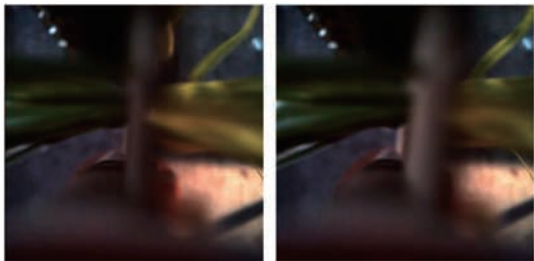


图7 梢末端蔗叶未被切断
Fig. 7 Tail end of cane tip

茎深度加大,照片显示刀片被前后蔗段紧紧夹裹,当刀片运动接近最大交错深度时,蔗茎已完成切段,上、下刀片在喂入方向的位差是产生台阶断口的主要原因。当刀片继续旋转越过最大交错位置,被切下的蔗段由于受刀片挤压释放,往往会发生上翘,并在刀片的推动下被抛出切段装置,后续未切段蔗茎依靠惯性继续喂入至切段装置,但运动方向表现出随机性,若撞击到刀座则造成速度迅速降低(图8),进而使后续蔗茎切段大大减短。



图8 切段过程中蔗段撞击刀辊
Fig. 8 Impact between cane and chopper drum during chopping process

自刀片接触蔗茎到刀片将蔗段抛出的整个过程,都可观察到大量茎秆纤维碎屑飞出(图9),碎屑直径从不到一毫米到十几毫米不等,经分析认为,较小的碎屑为高速旋转刀片切入蔗茎后,断口附近维管束组织受挤压发生破坏并在冲击下飞出,而直径较大的碎屑则是由于蔗茎内部组织的不均匀性,当其受到冲击时发生断裂破损;当甘蔗以簇喂入时,蔗茎间会在刀片的作用下发生挤压,挤压区域易发生劈裂,糖液损失较大。以上两种情况为切断过程糖分损失的主要原因。



图9 切段过程产生的碎屑
Fig. 9 Chippings produced during chopping process

3.2 田间性能试验

考虑到试验台的局限性,进行了割台性能田间试验(图 10),考核前置切段式结构的切段质量与切段长度。试验于 2017 – 2018 年榨季在广西金光农场青年分场进行,所用甘蔗为 3 年生宿根蔗。



图 10 田间试验及切段质量评估

Fig. 10 Field experiment and quality evaluation

3.2.1 切段质量试验

基于前述理论分析,试验以刀片交错深度、切段辊转速、整机行驶速度为影响因素,以蔗段合格率为指标进行考核,通过正交试验^[19]研究三因素对切段质量的影响规律。表 1 为试验因素与水平。

表 1 试验因素与水平

Tab. 1 Test factors and levels

水平	因素		
	交错深度/mm	切段辊转速/(r·min ⁻¹)	行驶速度/(km·h ⁻¹)
1	0	200	2.0
2	4	300	3.5
3	8	400	5.0

试验时,每个工况下,选取同一地块单行 100 m 长度蔗地进行整机收获,试验设置与结果见表 2,A、B、C 列分别表示交错深度、切段辊转速、行驶速度的水平值。蔗段合格率 C_{dh} ^[20] 计算公式为

$$C_{dh} = \frac{W_{dh}}{W_{dz}} \times 100\%$$
 (3)

式中 W_{dh} ——合格蔗段的质量,kg

W_{dz} ——测定区内接取的蔗段总质量,kg

统计蔗段时,每个工况随机抽取 100 根蔗段。试验结果分析见表 3。

表 2 试验设计与结果

Tab. 2 Experiment design and result

试验序号	A	B	C	蔗段合格率/%
1	1	1	1	85
2	1	2	2	84
3	1	3	3	76
4	2	1	2	90
5	2	2	3	87
6	2	3	1	92
7	3	1	3	79
8	3	2	1	85
9	3	3	2	82

表 3 方差分析

Tab. 3 Variance analysis

来源	平方和	自由度	均方和	F
A	0.012 3	2	0.006 1	42.538 5
B	0.000 6	2	0.000 3	2.153 8
C	0.007 0	2	0.003 5	24.307 7
D	0.000 3	2	0.000 1	
误差	0.000 3	2	0.000 1	

由极差分析结果 ($R_A = 0.08, R_B = 0.02, R_C = 0.06$) 可看出,三因素对蔗段合格率的影响由大到小为 A、C、B,由方差分析结果: $F_A > F_C > F_{0.95}(2, 2)$, $F_B < F_{0.90}(2, 2)$, 得知三因素对蔗段合格率影响的主次顺序为:交错深度、行驶速度、切段辊转速,其中交错深度、行驶速度影响显著,切段辊转速不显著。最佳水平组合是 $A_2C_1B_2$ 。

将割台参数设置成交错深度 4 mm,行驶速度 2 km/h,切段辊转速 300 r/min 时进行验证试验,蔗段合格率为 93%。由此可见通过正交试验优化了影响蔗段合格率的影响因数,取得了最佳工作参数。

3.2.2 切段长度试验

经试验验证,切段辊转速对前置式切段装置的切段长度影响并不显著,当转速达到一定范围后,即可实现蔗段的连续喂入,切段长度稳定在一定区间,转速继续升高,装置工作效率提升,可适应较大的喂入量,但切段长度变化不明显。现将切段辊转速稳定在 300 r/min,对切段长度进行统计,求证式(2)中的长度系数 δ 。

根据蔗段长度,以 20 mm 为一区间,将长度分级,随机抽取 500 根蔗段作为样本,对蔗段长度总体进行估计。统计落在每级的蔗段数量。

将数据导入 SPSS 软件进行 K – S 单样本检验,并绘制直方图(图 11)。由直方图可知切段长度近似符合正态分布,将其样本均值代入式(2),得长度系数 $\delta = 0.7$ 。

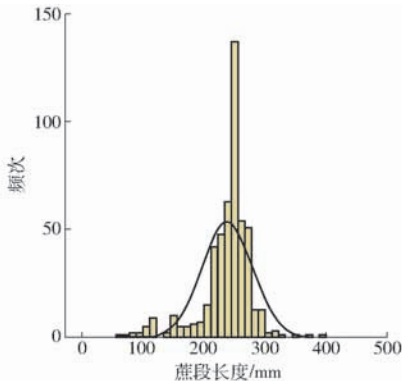


图 11 长度分布直方图

Fig. 11 Histogram of billet length

4 结论

(1) 对比分析了切段装置前置式、中置式、后置

式 3 种收获流程的优点与不足。指出切段装置上、下刀片的配合关系是决定切段质量的重要因素,其交错深度决定段口质量、蔗叶分离等效果。

(2)通过高速摄像试验,观察到切段过程刀片对蔗茎、蔗叶的滚切过程,蔗段运动规律,以及切段损失形成过程,为装置优化提供了依据。

(3)通过田间正交试验,证明了交错深度、行驶速度对蔗段合格率影响显著,并通过试验验证了优化的参数组合下,蔗段合格率达到 93%。

(4)基于前置切段式结构理论分析,推导了前置切段式切段长度公式,并基于统计试验求得长度系数 δ 为 0.7,其长度符合正态分布规律。

参 考 文 献

- 1 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007:1125 – 1126.
- 2 BARNES M G. Laboratory experiments of billeting sugarcane[C] // Proceedings of 2008 Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, 2008:420 – 424.
- 3 JAKWAY L A. Application of cane and forage harvesters for biomass fuel recovery [C] // International Conference on Crop Harvesting and Processing, 2003.
- 4 HOCKINGS P R, DAVIS R J, NORRIS C P. Improving the performance of chopper systems in cane harvesters[R]. BSES Technical Report, Bureau of Sugar Experiment Stations, 1999.
- 5 NORRIS C P, DAVIS R J, QUICK D J, et al. An alternative approach to cane harvester design: an initial review of the Massey Ferguson 405[C] // Proceedings of the 1998 Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, 1998: 10 – 16.
- 6 WHITEING C, NORRIS C P. Extraneous matter versus cane loss: finding a better solution in chopper harvested green cane[C] // Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol. , 2001, 24: 276 – 282.
- 7 BARNES M G, LOUGHRAN J G, WHITEING C. Development and testing of a sugarcane harvester single drum chopper system [C] // Proc. Aust Soc. Sugar Cane Technol. , 2009, 31: 546 – 555.
- 8 GARY A. Variable billet length packs on the weight[J]. Australian Sugarcane, 2005(9): 18 – 19.
- 9 INDERBIZIN M, BEATTIE R, BRUCE R C. Improving the harvesting and transport of whole crop harvested sugarcane[J]. International Sugar Journal, 2012, 115(1372): 250 – 256.
- 10 刘芳建,廖娜,米义,等. 甘蔗收获机切段装置研究现状与发展趋势[J]. 农业工程, 2017, 7(6): 1 – 4.
LIU Fangjian, LIAO Na, MI Yi, et al. Research status and development trend of chopper device for sugarcane harvester[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(6): 1 – 4. (in Chinese)
- 11 刘赞东,狄明利,米义,等. 一种甘蔗收获机及其攫取式甘蔗切段装置: 201420770339. 5[P]. 2015 – 05 – 06.
- 12 刘赞东,狄明利,米义,等. 一种甘蔗收获机及其甘蔗收割切段装置: 105723931A [P]. 2016 – 07 – 06.
- 13 SRIVASTAVA A K, GOERING C E, ROHRBACH P R, et al. Engineering principles of agricultural machine[M]. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1993: 325 – 402.
- 14 向家伟,杨连发,李尚平. 小型甘蔗收获机切割器试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 158 – 163.
XIANG Jiawei, YANG Lianfa, LI Shangping. Experimental investigation of the basecutter for minitype sugarcane harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 158 – 163. (in Chinese)
- 15 卿上乐,区颖刚,刘庆庭. 甘蔗收割机单圆盘切割器运动学分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 51 – 54.
QING Shangle, OU Yinggang, LIU Qingting. Kinematics of single disc basecutter of sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 51 – 54. (in Chinese)
- 16 周敬辉,李尚平,杨代云,等. 甘蔗收获机刀盘轴向振动对甘蔗宿根切割质量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 16 – 24.
ZHOU Jinghui, LI Shangping, YANG Daiyun, et al. Influence of sugarcane harvester cutterhead axial vibration on sugarcane ratoon cutting quality[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(2): 16 – 24. (in Chinese)
- 17 刘庆庭,区颖刚,卿上乐,等. 光刃刀片切割甘蔗茎秆破坏过程高速摄像分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 31 – 35.
LIU Qingting, OU Yinggang, QING Shangle, et al. High-speed photography analysis on the damage process in cutting sugarcane stalk with smooth-edge blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(10): 31 – 35. (in Chinese)
- 18 KROES S, HARRIS H D. Effects of cane harvester basecutter parameters on the quality of cut[C] // Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, 1994: 169 – 177.
- 19 茆诗松,周纪芄,陈颖. 试验设计[M]. 北京:中国统计出版社, 2012: 114 – 122.
- 20 JB/T 6275—2007 甘蔗收获机械 试验方法[S]. 2007.