

甘蔗机械化收获技术与装备研究综述

刘庆庭¹ 黄瑶¹ 蒋姣丽² 武涛¹

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 广东省农业技术推广中心, 广州 510515)

摘要: 收获机械化率低是影响我国甘蔗产业可持续发展的关键因素之一, 适用的机收技术与装备是推进机收发展的必要条件。本文从收获窗口期甘蔗的理化特性, 糖厂与农艺对机收的技术要求, 机械化收获的技术路线, 机收分行与扶起、切梢、推倒、根部切割、输送、切段、除杂、集料等关键技术与部件以及收获系统等方面进行文献梳理。分析了这些技术存在的问题和国内外收获机在我国的适用性。我国已形成了完备的科研与制造体系, 生产出大、中、小型系列甘蔗收获机。我国甘蔗收获机械的研制具有自上而下的研发任务和政策引导, 以及在引进、消化吸收国外先进技术基础上进行研发的特点, 甘蔗收获机技术路线创新不够, 关键技术原创性不足。国内外现有机型在我国的适用性较差, 糖厂和蔗农对机收含杂率、损失率、根茬破头率和蔗田碾压的接受程度较低。结合我国蔗糖产业实际情况、甘蔗立地和农艺技术条件, 创制适用机收技术与装备: 针对云南甘蔗倒伏较轻和蔗茎较脆的特点, 研制扶起-立式输送-剥叶与打捆联合收获技术; 针对广西、广东榨季多雨和甘蔗倒伏较严重的特点, 研制以推倒-伏卧输送割堆(捆)技术为核心的分步协同机收技术; 针对农村田块小和窄行距的特点, 研制双行机收技术与机具; 针对大型农场适合大、中机具作业的特点, 完善宽行距固定轨迹作业农机农艺融合技术。

关键词: 甘蔗; 收获技术与装备; 综述

中图分类号: S225.5⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)12-0001-21

OSID:



Technology and Equipment of Sugarcane Harvesting Mechanization Review

LIU Qingting¹ HUANG Yao¹ JIANG Jiaoli² WU Tao¹

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Guangdong Agricultural Technology Extension Center, Guangzhou 510515, China)

Abstract: The lower rate of mechanized harvest of sugarcane was one of the key factors which affected the sustainable development of sugarcane industry in China. Suitable harvesting technology and equipment were the necessary conditions of promoting the development of sugarcane harvesting. The physical and chemical properties of sugarcane during the harvest window, the technical requirements of sugar mills and agronomy for mechanized harvesting, the technical route of machined harvesting, the key technologies and its device of sugarcane harvester, such as dividing and lifting, topping, knocking down, base cutting, conveying, chopping, removing impurities, material collected, and harvesting systems were reviewed. The existing problems of those key technologies and the applicability of domestic and imported harvesters in China were analyzed. China had formed a complete research and manufacturing system, and large, medium and small size sugarcane harvesters have been made. The research and development of sugarcane harvesting machinery in China had two obvious characteristics, one was the top-down research and development tasks and policy guidance, the other was that it was based on the foreign advanced technology. Its technology route of sugarcane harvester and its key technologies were both not innovative enough. The existing harvesters of home made and imported had poor adaptability in China. Their impurity content, field loss rate, stubble damage rate and soil compaction of fields were less acceptable to sugar mills and sugarcane farmers. The suitable harvesting technology and equipment should be developed based on the actual situation of sugarcane industry, sugarcane site and agronomic technology situation. In Yunnan Province, sugarcane was less lodged and its variety stem was brittle, the combined harvesting technology of sugarcane vertical conveying, leaf stripping and baling should be developed. In

收稿日期: 2024-10-08 修回日期: 2024-10-30

基金项目: 国家重大农业攻关项目和财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-14)

作者简介: 刘庆庭(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事甘蔗机械化和作物力学研究, E-mail: qingting@scau.edu.cn

Guangxi and Guangdong Provinces, it is rainy weather in sugarcane harvest window, and its sugarcane was usually lodged badly. A multi-steps cooperative harvesting technology with knock-down and lying conveying whole stalk harvesting and centralized impurity removal technology should be developed. According to the characteristics of small size and narrow row space in rural sugarcane field, the technology of double-row harvesting should be developed. According to the characteristics of large farm suitable for large and medium machine operation, the agronomic integration technology of wide row spacing and fixed track operation should be developed.

Key words: sugarcane; technology and device of harvesting; review

0 引言

糖料甘蔗(简称为甘蔗)是我国南方重要的经济作物之一,甘蔗产业的可持续发展关系到我国食糖的战略安全^[1]。受劳动力成本快速攀升和机收率较低的影响,甘蔗总成本居高不下、蔗农比较收益较低,影响蔗农持续生产^[2]。与人工砍收甘蔗相比,机械化收获(简称机收)具有效率高、成本低等优势^[3]。推进甘蔗机收、提高机收率是提高甘蔗产业竞争力的重要途径;但我国甘蔗机收推进缓慢,2023年我国甘蔗联合机收率仅3.4%^[4],与设定的2025年全国甘蔗机收率达到30%的目标^[5-6]相差较大。

甘蔗收获机性能与适用性影响机收技术推广应用^[7]。本文梳理甘蔗机收关键技术与装备研究现状,分析应用中存在的问题并提出相关建议,以期为我国甘蔗机收技术发展提供参考。

1 甘蔗收获技术要求与技术路线

甘蔗收获技术与装备研究应满足以下要求:①甘蔗产业链的终端是糖厂,收获的甘蔗应满足糖厂对原料蔗的要求并在一定时间内入厂压榨^[8]。②甘蔗是宿根作物,收获作业质量应满足宿根蔗生产的农艺要求^[9]。③机收技术和装备应适应我国甘蔗生产的立地条件^[10]。基于上述认识,本文从甘蔗收获技术要求出发,依次对甘蔗收获技术路线、收获机关键技术与部件和收获系统等方面研究成果加以梳理总结,最后结合我国实际情况提出有机收技术与装备存在的问题和发展方向,路线图如图1所示。

1.1 收获窗口期甘蔗理化特性

设计农业机械时,需要了解机器与作物互作规律^[11],以减少机具能量消耗并提高作业质量。在制定甘蔗机收技术路线和研发甘蔗机收关键技术时,需要充分了解收获窗口期甘蔗的理化特性。

1.1.1 收获窗口期甘蔗茎、叶和梢

甘蔗主要有茎、叶、根、花和颖果等器官^[12]。蔗梢是甘蔗尾部2~3个嫩节和叶的统称^[13]。蔗梢含有少量蔗糖,但淀粉和还原糖含量很高,榨糖过程中,蔗梢残渣吸收的蔗糖远大于从蔗梢榨出的蔗

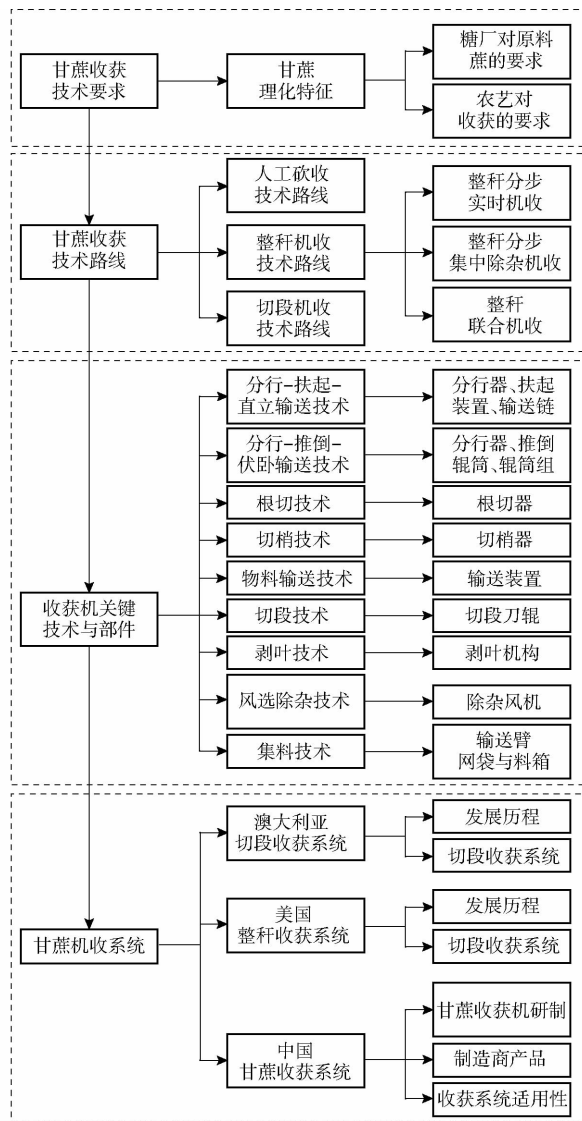


图1 技术路线图

Fig.1 Technical route

糖^[14]。我国甘蔗主栽品种的梢/茎质量比约为10%,叶/茎质量比约为6%^[15]。对糖厂而言,除蔗茎之外,其它任何物料如梢、叶甚至泥土等统称为杂质^[16]。机收应尽量降低含杂率^[4]。

1.1.2 收获窗口期甘蔗倒伏

受台风和强季风影响,甘蔗会发生倒伏^[17]。研究者大多以直秆为甘蔗模型,以倒伏角描述倒伏程度,以倒伏姿态角和侧偏角描述倒伏姿态^[18]。但是,倒伏严重的甘蔗是弯曲的,需要从空间形态、倒

伏姿态和倒伏程度 3 方面描述倒伏甘蔗的空间姿态,建立符合田间实际情况的倒伏甘蔗三维模型^[19]。倒伏增加了机收难度和机收损失率^[20],机收技术需要考虑当地甘蔗倒伏情况。

1.1.3 收获窗口期甘蔗力学特性

甘蔗机收需要完成甘蔗的分行与扶起、根部砍切、切梢、切段、输送、剥叶、除杂和集料等作业^[21-22],设计这些作业部件需要了解甘蔗茎、叶、梢等的力学特性。

在材料力学试验机上可以测得甘蔗茎^[23]、尾^[24]和叶^[25]在各种荷载下的强度、弹性模量和泊松比。试验的难点在于夹紧而不破坏试件,机械夹紧和胶粘结组合是有效的方法^[26]。

分析机收过程中茎秆的破坏机理需要建立其材料模型,单向复合材料可以作为甘蔗茎秆的材料模型^[27]。

1.2 糖厂对原料蔗的要求

1.2.1 原料蔗中夹杂物与含杂率

进厂原料蔗中夹杂物所占质量比以含杂率来描述^[28]。人工砍收甘蔗的含杂率一般情况下小于 3%,机收蔗的含杂率一般在 7% 左右,过多的叶、梢和泥土等杂质会导致制糖设备磨损和成本增加,进厂的原料蔗应尽量减少杂质^[4]。甘蔗品种、农艺条件和土壤类型等因素影响机收蔗含杂率^[29]。

1.2.2 蔗茎(蔗段)破损与蔗茎(蔗段)合格率

整秆机收的蔗茎和切段机收的蔗段破损均导致蔗汁流失^[30]。机收蔗茎(茎段)的组织破损,加快了组织内蔗糖向还原糖的转换,导致糖分含量降低、还原糖含量升高^[31]。切口和破损之处由于微生物感染而变质,增加了葡聚糖的形成,造成糖分损失增加^[32]。实践中要求切段机收蔗在收割后 24 h 内入厂压榨^[31]。相关标准以蔗茎和蔗段合格率作为评价机收作业质量的指标之一^[33]。

1.3 农艺对收获作业质量的要求

1.3.1 收获后根茬

砍收后破损的根茬暴露在空气中容易感染病菌,影响来年宿根蔗的产量^[34]。基部蔗茎含糖量较高,砍收后高出地面的根茬造成收获损失(即根茬损失)^[35]。机收时,根切器刀片应尽量贴近地表或入土切割。试验表明,根茬高度 $\pm 2\text{ cm}$ 可大幅减少根茬破损^[36]。

1.3.2 蔗田土壤压实

车轮对土壤的碾压会造成土壤结构破坏,土壤含水率不同,其承载能力也不同^[37]。车轮距离蔗垄越近根系活力受影响越重^[38]。所以,甘蔗行距与收获机轮距应匹配。

1.3.3 田间损失

收获作业应尽量将田间甘蔗茎秆收起。减少遗留在田间的蔗茎、高出标准的根茬、蔗茎碎块、蔗汁等。以田间损失率来描述收获作业损失程度。

1.4 甘蔗收获技术路线

1.4.1 人工砍收类型技术路线

人工砍蔗一般由 3 个环节组成^[39]。①砍蔗:用砍刀(或小锄头)将甘蔗在贴近地面处(即甘蔗基部)砍倒。②去除蔗叶和蔗梢:用镰刀从上至下将蔗叶去除,然后砍掉蔗梢。③打捆:将甘蔗放在一个支架上,用麻绳或竹篾将 10 ~ 15 根的甘蔗捆在一起。

1.4.2 机收技术路线

(1)扶起-直立输送和推倒-伏卧输送

甘蔗在收获机输送装置内的姿态有直立和伏卧 2 种^[40]。

“扶起-直立输送”技术路线是甘蔗在分行和扶起后,被归拢链进一步扶起和归拢,随之被根部切割器(简称根切器)在基部砍断,然后在输送链内呈直立姿态被输送至一侧铺放或集堆^[41]。由于倒伏严重的甘蔗很难被扶起至直立状态,该技术仅适用于直立和倒伏不严重甘蔗的收获^[42]。

“推倒-伏卧输送”技术路线是甘蔗在分行后,被推倒辊筒向前推至茎秆与地面呈一定角度的姿态,然后由根切器将其在基部砍断并输送至喂入辊筒(基部先进入),在辊筒组内甘蔗呈伏卧姿态^[43]。该技术可以收获严重倒伏的甘蔗。

(2)蔗叶去除方式。蔗叶去除方式有整秆剥叶和切段-风选除杂 2 种^[39]。收获倒伏或缠绕甘蔗的最好办法就是将甘蔗茎秆切成段,并将蔗叶等杂质通过风选的方法分离出来^[40]。

(3)整秆分步机收。由 2 台或 2 台以上机器分别完成砍蔗和去除叶与梢多道工序^[42]。

(4)整秆联合机收。由 1 台机器完成至少包括砍蔗和去除蔗叶与梢 2 道以上工序^[42]。

(5)分步协同机收。整秆收获后运输至固定场所,由固定装备完成杂质去除作业。目前有整秆剥叶和切段除杂 2 种技术与装备^[44]。

(6)切段联合机收。由 1 台机器完成分行、推倒、砍蔗、切梢、切段和除杂等工序^[39]。

2 甘蔗收获机关键技术与部件

2.1 倒伏甘蔗分行与扶起技术及装置

2.1.1 倒伏甘蔗分行与聚拢技术

甘蔗机收是对行收获,需要将交错在一起的倒伏甘蔗分开,并归拢到各自所在的行(即分行)^[45]。

甘蔗收获机采用的分行技术有滑靴与聚拢杆、聚拢链和螺旋辊筒 3 类^[40]。

(1)滑靴与聚拢杆技术

1948 年 JACK 发明了整秆式收获机,前部左、右两侧采用与地面倾斜并且具有圆滑曲线条的杆,将倒伏甘蔗分行并聚拢在根切器喂入口。

(2)聚拢链技术

1929 年 FALKINER 在其整秆式收获机上采用拨指链聚拢和输送甘蔗。该技术普遍应用在整秆甘蔗收获机上。

(3)螺旋辊筒分蔗技术

1962 年,CRICHTON 制造的整秆式收获机采用了螺旋辊筒代替链式拾检器。1968 年 CH200、MF81、MF201 和 MF - Crichton 切段式收获机前部左、右两侧各布置 1 个螺旋辊筒。1992 年 Austoft 7700 履带切段式甘蔗收获机左、右两侧各布置 2 个螺旋辊筒,内、外辊筒螺旋叶片的旋向不同。

现代切段式甘蔗收获机均采用螺旋辊筒分行器^[46-47]。机收作业时,分行器依靠浮动靴紧贴地面,并随地形变化而浮动。浮动靴前端的靴头有三角形和尖圆锥形 2 种结构形式。靴头能够插到倒伏甘蔗底部将其抬起^[47-48]。较小的螺旋辊筒与水平面之间的夹角,有利于将严重倒伏甘蔗扶起和分行。为减少分行过程中甘蔗搭在内外辊筒上难以分开和强行分开造成拔莞等问题,在内外辊筒之间的切割刀可以将其切断^[49]。图 2 是 CASE A8000 型甘蔗收获机的分行器和切断刀结构示意图^[48]。螺旋辊筒分行器在分行的同时,也将倒伏甘蔗扶起^[50]。在切段式收获机上,“分行”是其核心功能,“扶起”的目的也是为了“分行”。

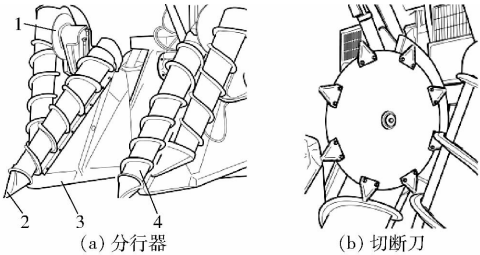


图 2 CASE A8000 型甘蔗收获机分行器结构示意图
Fig.2 Divider of CASE A8000 sugarcane harvester
1. 切断刀 2. 靴头 3. 浮动靴 4. 螺旋辊筒

2.1.2 倒伏甘蔗扶起技术

一些整秆式收获机采用“扶起-直立输送”技术路线,其倒伏甘蔗扶起装置有螺旋辊筒、拨指链和柔性夹持链^[51-52]。图 3、4 为螺旋辊筒 + 拨指链^[53]和螺旋辊筒 + 柔性夹持链^[54]的组合扶起装置。也有学者设计了螺旋辊筒 + 拨指链(图 5a)^[55]和高、低

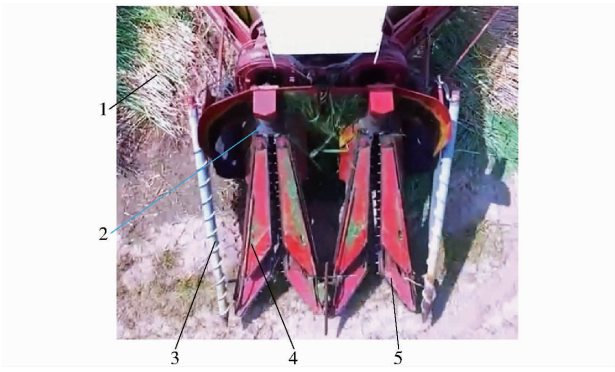


图 3 CAMECO S-32 型双行整秆甘蔗收获机甘蔗扶起装置
Fig.3 Sugarcane lifter of CAMECO S-32 double rows whole stalk sugarcane harvester
1. 甘蔗条铺 2. 切梢器 3. 螺旋辊筒 4. 上层拨指链 5. 下层拨指链

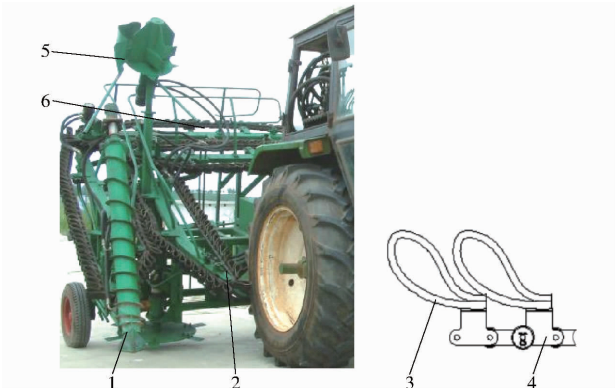


图 4 4ZZX-48 型侧悬挂式整秆甘蔗收获机
Fig.4 4ZZX-48 side mounted whole stalk sugarcane harvester
1. 螺旋辊筒 2. 纵向夹持输送链 3. 柔性元件 4. 链条 5. 切梢器 6. 横向夹持输送链

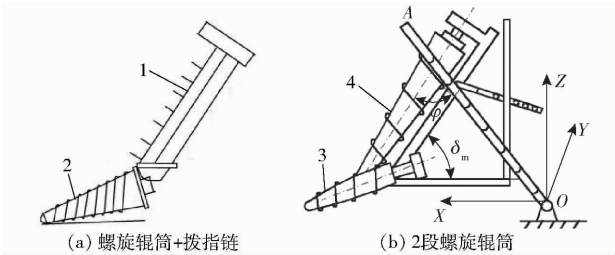


图 5 组合式扶起装置结构示意图
Fig.5 Combined lifter
1. 螺旋辊筒 2. 拨指链 3. 小辊筒 4. 大辊筒

螺旋辊筒(图 5b)^[56]的 2 段式扶起机构。众多学者研究了螺旋辊筒分行器^[20, 56-57]、拨指链扶蔗器^[58]和组合式扶蔗器^[59]的结构尺寸和运动参数对倒伏甘蔗扶起效果的影响机理。结果表明,现有扶蔗机构对侧倒伏甘蔗的扶起效果较好,对顺倒伏甘蔗效果较差,对逆倒伏效果很差。这也是“扶起-直立输送”技术路线难以收获严重倒伏甘蔗的主要原因。

2.2 蔗梢去除技术与装置

机收去除蔗梢的方法有切梢^[49]、断尾^[60]和切段-风选^[61]3 类。

2.2.1 切梢技术与切梢器

整秆式收获机切梢工序可以在根部砍切前、砍切后输送过程中和集堆打捆后。例如,1920 年 HURREY 和 FALKINER 发明的整秆式甘蔗收获机,砍下的甘蔗通过输送链提升到平台处,在平台上两个工人用圆盘锯去除蔗梢。1956 年 VENTON 的收获机,根切后的甘蔗以直立状态被链条输送至切梢器和打捆槽内。1944 年 MOLONEY 研制了安装于拖拉机上的甘蔗割铺机,在甘蔗根部砍切前切梢^[40]。2006 年生产的 4ZZX-48 型整秆式甘蔗收获机切梢器位于柔性夹持输送通道上^[54]。

现有商用切段式甘蔗收获机的切梢器均安装在收获机分行器前方,切掉的蔗梢抛撒在已砍收过甘蔗的一侧^[46-47,62-64]。主要有 2 种型式:鼓式切梢器(图 6)和粉碎切梢器(图 7)^[48]。



图 6 鼓式切梢器

Fig. 6 Drum topper

1. 叶片 2. 动刀盘 3. 刀片 4. 拢梢鼓

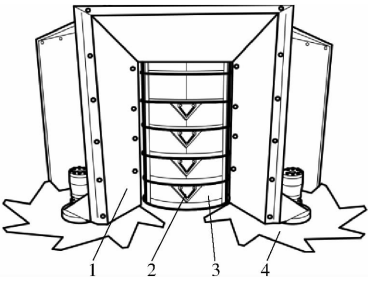


图 7 粉碎切梢器

Fig. 7 Shredder topper

1. 碎叶室 2. 动刀片 3. 碎梢辊 4. 拢梢盘

鼓式切梢器仅有一套刀片,蔗梢从茎秆上切掉后,完整的蔗梢抛撒到地上;粉碎切梢器有多套刀片,蔗梢从茎秆上切掉后随即被粉碎,然后被抛撒在地上^[49]。

切梢器有动刀片和定刀片(图 6、7),属于有支撑切割。因茎秆有支撑切割的性能远优于无支撑切割^[65],切梢质量容易满足农艺要求,有关其切割质量研究文献很少。

也有学者采用往复运动的直锯条来切断蔗梢^[66],从收集蔗梢用于青贮饲料的角度设计了一种

悬挂在拖拉机后方的碎梢器,将物料喷入收集车内^[67-68]。

现有商用甘蔗收获机切梢器只能由驾驶员根据甘蔗生长情况进行上下高度调整,左右位置不可调,对甘蔗高度不一致和因倒伏蔗梢偏离蔗垄的甘蔗难以切梢^[49]。利用计算机视觉技术可以确定蔗梢位置,实现切梢器高度自动调整^[67,69-70]。

我国甘蔗主产区广西、广东和海南甘蔗倒伏情况普遍比较严重^[17],需要重点攻关切梢器上下高度和左右位置自动调整技术。

2.2.2 断尾(梢)技术与装置

针对切梢技术对倒伏甘蔗适应性差的问题,一些整秆收获机在其伏卧输送通道中设置断尾装置,利用蔗尾(梢)与茎秆其它部位的力学特性存在明显差异的特点,在甘蔗通过断尾装置时将蔗尾折断,达到去除蔗梢的目的^[71-72]。甘蔗通过断尾辊筒时受到上、下辊筒弹性条作用的弯曲力(图 8),弯曲力应大于折断蔗梢力而小于压破蔗茎的力^[72]。文献^[71-72]研究断尾辊筒转速、弹性齿材料与几何结构参数,以及上下弹性齿交错角度与间隙等参数对断尾效果的影响。

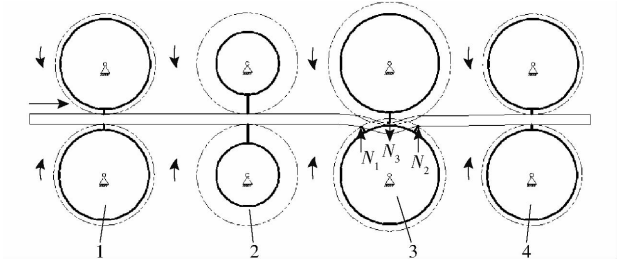


图 8 断尾原理图

Fig. 8 Mechanism diagram of breaking top

1. 输入滚筒 2. 剥叶滚筒 3. 断尾滚筒 4. 输出滚筒

上述研究中,均以 1~2 根甘蔗喂入断尾装置试验其断尾效果。该机理适合于上、下辊筒之间只有 1 层甘蔗时的断尾。但是,如果上、下辊筒之间有 2 层甘蔗,由于多根甘蔗是由基部依次喂入,大多情况是不同层间的梢部与茎秆其它部位重叠在一起。这种情况下,上述断尾机理将不再适用,这也是采用该项技术的收获机作业效率难以提高的主要原因之一。

2.2.3 切段-风选去除蔗梢技术与装置

甘蔗分步协同机收技术在收获甘蔗时将甘蔗在基部砍断后运输到除杂站,采用切段机收的“切段-风选”除杂技术去除较轻的蔗梢和蔗叶^[61]。

2.3 推倒技术与推倒辊筒

由于倒伏严重甘蔗很难实现扶起-直立输送,1929 年 FALKINER 在其世界首台切段式甘蔗收获

机上采用了推倒收获技术^[40],即:推倒辊筒将甘蔗向前推,使甘蔗上部远离收获机,以便甘蔗被砍断后顺着蔗茎倒下并由基部喂入辊筒组^[49]。之后的切段式甘蔗收获机均采用该技术^[40]。

在被根切器砍断前,甘蔗被推倒程度可以用推倒角 θ 度量,推倒角取决于推倒辊筒与根切器之间的相对位置(图9)^[48,73]。推倒辊筒距离地面的高度应可调,以适应甘蔗不同倒伏情况和不同的甘蔗品种^[49,73]。收获直立甘蔗和较脆的甘蔗时,应尽量加大推倒辊筒距离地面的高度,以降低甘蔗被推倒程度,减少甘蔗被根切前茎秆劈裂或折断^[49]。根切器砍断甘蔗时,推倒辊筒与甘蔗的相互作用形成了一定程度的有支撑切割,有利于提高根茬切割质量^[73-74]。收获逆倒伏甘蔗时,推倒辊筒将逆倒伏甘蔗向直立方向推动,有利于降低逆倒伏甘蔗收获损失^[73]。在推倒辊筒后布置动力辊筒(即鳍辊筒,图9),其作用是配合根切器将甘蔗喂入辊筒组件^[48]。

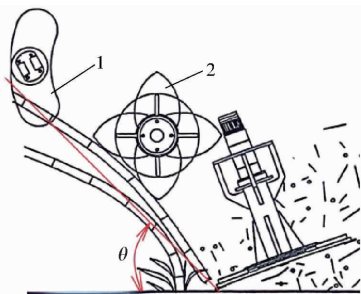


图9 推倒滚筒与刀盘相对位置和推倒角示意图

Fig.9 Relationship of position between knock down roller and base cutter and angle between stalk and ground

1. 推倒辊筒 2. 鳍辊筒

2.4 砍蔗和根切器

2.4.1 蔗茎基部切割机理

将甘蔗在基部砍断是收获机的基本功能^[49]。切割力和切割能量影响根切器的能量消耗^[75]。通过理论分析、有限元分析和试验研究建立了蔗茎单位切割力的理论和经验计算公式,分析了单位切割力和能量消耗与刀片本身结构参数、刀片切割方向和切割速度等因素之间的关系^[75-77]。利用高速摄像技术分析人工砍蔗过程和根切器刀片对甘蔗的切割过程,分析了多刀切割的破坏模式^[78-79]。对根茬破坏程度进行了分级^[80-81],分析了茎秆破坏机理并建立了根茬破坏准则^[82-83]。刀片入土切割时因土壤对切割部位的支撑作用,甘蔗茎秆的内力与变形明显小于不入土切割时,使得入土切割的根茬破头率明显小于不入土切割^[84]。根茬越高,破损越严重^[85]。人工砍蔗方式的切割力和根茬破损情况明显优于根切器切割,可以为设计新型根切器提供参考^[86]。

2.4.2 根切器与根茬切割质量

1907年HOWCROFT发明的整秆式甘蔗收获机专利中,提出了刀片可以入土切割甘蔗。1920年HURREY和FALKINER发明的整秆式甘蔗收获机采用圆盘锯根切器。1925年FALKINER设计的整秆收获机,采用一对旋转切割刀片。1932年HOWARD和VICHIE制造了澳大利亚第一台切段式甘蔗收获机,采用双刀盘切割器。1944年澳大利亚LARRY研制的甘蔗割铺机,采用长900 mm的光刃刀片,其一端固定,一端装有弹簧。刀片与前进方向呈45°,可以在地表下切割。1948年KINNEAR设计的整秆式甘蔗收获机,两把割刀互呈一定角度,也就是后来在夏威夷得到广泛应用的V形切割器。1970年之后,圆盘刀片根切器逐步占据主导地位^[40]。

目前立式输送收获机大多采用单刀盘根切器,便于甘蔗被砍断后以直立姿态向后输送^[87]。伏卧输送收获机采用双刀盘根切器,便于将推倒后的甘蔗从基部喂入辊筒组^[49]。

根茬的切割质量受圆盘刀片根切器结构参数和运动参数(刀盘转速、刀盘倾角和甘蔗收获机行走速度等)^[88-89],以及根切器刀盘轴向振动等因素影响^[90]。试验表明,当矩形光刃刀片切割速度达到26.4 m/s时,可以实现根茬无严重破损^[81]。收获机刀盘转速应与其作业前进速度相匹配,例如,CASE A7000型甘蔗收获机根切器刀盘转速通常固定为640 r/min,与其配套收获机作业速度为7 km/h。当低于这个速度时,甘蔗将被刀片多刀切割;当刀盘转速远低于收获机作业速度应匹配的刀盘转速时,茎秆将被撕裂、根茬严重破损;随着刀片磨损增加,其对应的最佳收获机作业速度将降低^[49]。锯齿刀片^[91]、滑切刀片^[92]可以降低单位切割力和减少根茬破损程度。

滑剪式切割器^[92]、上下反转刀盘切割器^[93]和往复式切割器(采用Ⅱ型锯齿刀片)^[94]的有支撑切割性能明显优于无支撑切割。尽管其室内试验可以获得完美的切口质量,但是,对于需要刀片入土切割的甘蔗收获机而言,如何消除或减轻沙土进入上下刀片之间,是该类型切割器能否应用在甘蔗收获机上的关键。

有学者认为,切段式收获机分行器对甘蔗的扶起会对根切器切割甘蔗形成一定程度的有支撑切割,进而可以提高切割质量^[95]。但是,对市场上现有的切段式甘蔗收获机而言,根切器切割甘蔗时被切割甘蔗早已脱离分行器,不存在因分行器对甘蔗扶起而产生的有支撑切割。

2.4.3 根茬高度控制技术

我国蔗区大多在丘陵山区,蔗田地形高低起伏变化较大,甘蔗收获机在田间作业时,地形起伏变化影响根切器刀片切割高度,造成甘蔗根茬高度变化,进而影响根茬破头率和根茬损失^[96]。刀盘与蔗垄在高度方向上的相对位置关系受到蔗田地形和蔗垄高度 2 个因素的影响^[97]。控制根切器切割高度的技术路线主要有 3 类:

(1)通过检测行间沟底地形或蔗垄高度来调整根切器切割高度。

采用超声波测距雷达传感器^[96-97]或者利用仿形轮与角度传感器^[98]来测量行间地形高低变化,根据行间沟底地形变化情况来调整根切器高度。利用微波频段的 LFMCW 雷达能够穿透植被等覆盖物的遮挡到达土壤表面的特点,可以检测蔗垄高度变化,根据蔗垄高度变化调整根切器高度^[97]。

(2)通过根切器液压马达进口压力来判断入土深度,进而对根切器高度作出调整^[48,99]。CASE A8000 型甘蔗收获机采用了该技术。

(3)根据入土刀片甩出的泥土情况来判断入土深度,进而对刀盘高度加以调整。

刀盘向外甩出的泥土量与刀片入土深度有关,利用激光雷达穿透刀盘甩出泥土时接收信号的变化,可以判断刀片入土深度,根据信号变化情况调整根切器高度^[100]。

2.4.4 圆盘根切器向后输送甘蔗技术

采用“推倒-伏卧输送”技术的收获机,根切器将甘蔗砍倒后,将甘蔗向后输送至喂入辊筒。甘蔗到达喂入辊筒时,甘蔗基部应高于下辊筒中心线^[49]。

图 10 为广州科利亚 4GZ-56 型甘蔗收获机的根切器^[101]。其特点是刀片将甘蔗在基部砍断后,茎秆基部被根切器上的螺旋轨抬起,然后由齿板向后送至喂入辊筒。

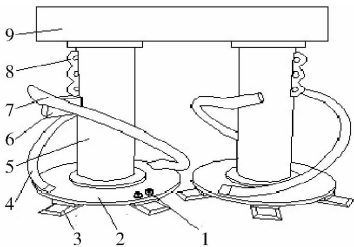
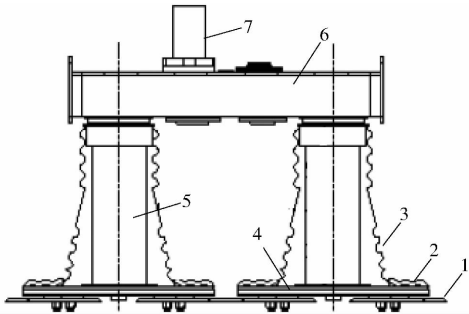


图 10 4GZ-56 型甘蔗收获机根切器结构示意图
Fig. 10 Basecutter of 4GZ-56 sugarcane harvester
1. 紧固件 2. 刀盘 3. 割刀 4、7. 螺旋轨 5. 旋转轴套 6. 支撑杆 8. 齿板 9. 齿轮箱

刀盘上平面焊接的拨蔗齿板、轴套筒上焊接的拨条都起到向后输送甘蔗的作用,图 11 为 4GDLS-132 型甘蔗收获机根切器结构图^[102]。



板上有长短齿,压紧弹簧提供压紧力,甘蔗在该力作用下随链条一起运动,可以实现对甘蔗在高度方向上的提升,以实现集堆^[104]。

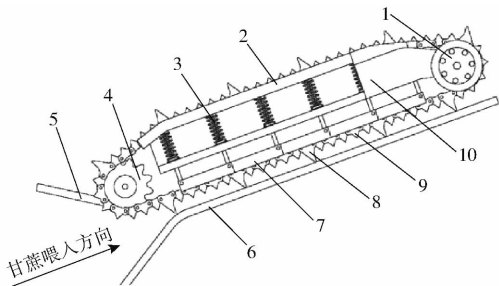


图 12 多齿链夹持输送装置结构简图

Fig. 12 Structure diagram of sticker multi teeth chain conveyor

1. 液压马达 2. 链条导轨 3. 压紧弹簧 4. 链轮 5. 分蔗杆
6. 压紧杆 7. 调整板 8. 长夹齿 9. 短夹齿 10. 张紧装置

1951 年澳大利亚 TRUSCOTT 研制的整秆收获机采用圆弧轨道夹持输送链,可以实现夹紧链带着甘蔗沿弧线运动^[40]。

澳大利亚 P&H 公司 B80-130 整秆式甘蔗收获机采用柔性夹持输送装置,该机只有纵向输送链,收获机后面挂有集蔗小车^[105]。

图 13 为在纵向输送链的基础上增加了横向输送链,可以将甘蔗垂直蔗茎方向铺放。柔性夹持元件材料为带帆布层的橡胶板,橡胶板弯成的夹持元件,夹持元件对甘蔗的夹持力来自其受挤压变形而产生的弹性力。橡胶板厚度、帆布层层数、夹持元件展开后橡胶板的长度,以及配对夹持链之间的距离等影响夹持力的大小^[54]。该装置需要较大链条张紧力来保持链条夹紧边的直线度,维持配对链条对甘蔗的加紧。将链条滚轮约束在 C 形轨道内(图 13),可以减小对张紧力的要求,降低功率消耗^[106]。

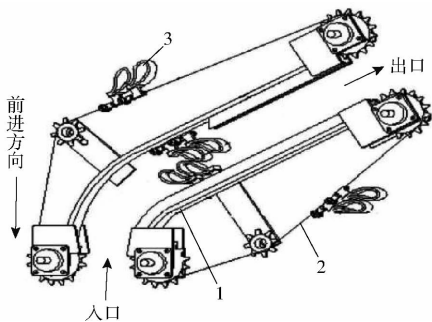


图 13 圆弧轨道柔性夹持输送装置原理图

Fig. 13 Flexible sticker chain conveyor

1. 链条轨道 2. 链条 3. 柔性夹持元件

2.5.2 卧式输送技术与装置

(1)切段式甘蔗收获机辊筒输送装置
甘蔗在基部被砍断后,根切器将甘蔗由基部喂

入辊筒组,辊筒组将甘蔗输送至切段刀辊^[49]。根据切段刀辊在整机物流通道中的位置,可以将切段式收获机物流通道划分为切段刀辊前置式、切段刀辊中置式和切段刀辊后置式 3 种类型^[40]。

德国 CLASS 公司 1970 年生产的 CLASS 1400 型切段式甘蔗收获机采用切段刀辊前置式物流通道技术^[40],即:甘蔗在基部被砍断后,刀盘将其送至切段刀辊,切段刀辊后面是蔗段输送装置。2016 年中国农业机械化科学研究院在其研制的甘蔗收获机上采用该技术,图 14 为其物流通道示意图。由于没有输送辊筒限制甘蔗的运动速度,蔗段长度均匀性较差^[40,107-108]。

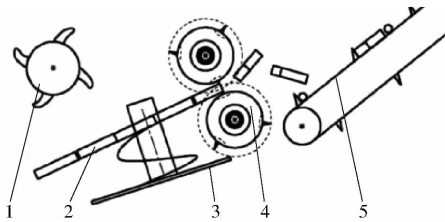


图 14 切段刀辊前置式物流通道示意图

Fig. 14 Schematic of logistic channel of sugarcane harvester with front mounted chopper

1. 推倒辊筒 2. 甘蔗 3. 根切器 4. 切段刀辊 5. 蔗段输送带

华南农业大学研制的 4GDZ-132 型切段式甘蔗联合收获机应用其发明的切段刀辊中置式物流通道技术^[23]。辊筒组由 1 对喂入辊筒和 2 对输送辊筒组成,切段辊筒后的蔗段输送装置将蔗段送至除杂风机,如图 15 所示。

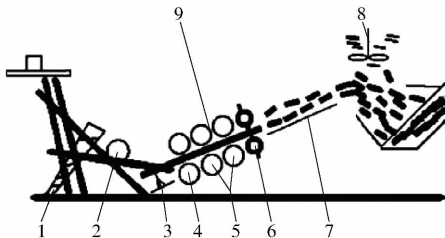


图 15 切段刀辊中置式物流通道示意图

Fig. 15 Schematic of logistic channel of sugarcane harvester with centrally mounted chopper

1. 分行器 2. 推倒辊筒 3. 根切器 4. 喂入辊筒 5. 输送辊筒
6. 切段刀辊 7. 蔗段输送装置 8. 除杂风机 9. 辊筒组

图 16 为切段刀辊后置式物流通道,切段刀辊后面是主排杂风机。图中辊筒①②为喂入辊筒,其它辊筒为输送辊筒。辊筒①的作用是提升甘蔗基部并将其导入辊筒通道,辊筒①叶片顶端的线速度应是其它输送辊筒叶片的 2/3。上层辊筒浮动,以适应大喂入量收获^[49]。现代商用切段式甘蔗收获机几乎都采用了这类通道技术。

对比图 14~16 中的 3 种通道可知,切段刀辊后置式通道的辊筒对数量最大,前置式通道的最少

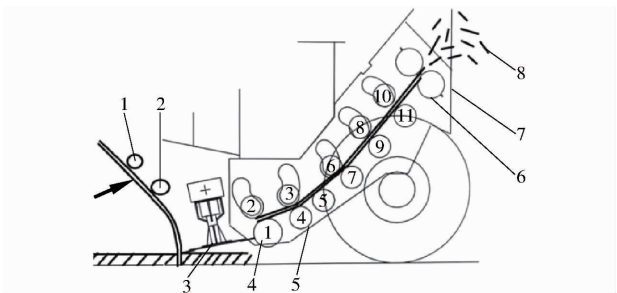


图 16 切段刀辊后置式物流通道示意图

Fig. 16 Schematic of logistic channel of sugarcane harvester with rear mounted chopper

1. 推倒辊筒 2. 动力辊筒 3. 根切器 4. 喂入辊筒 5. 辊筒组件 6. 甘蔗 7. 切段刀辊 8. 蔗段

(0 对辊筒),中置式的居中。辊筒数量越少,甘蔗(特别是因倒伏而弯曲的甘蔗)在辊筒内损伤的概率越小^[108]。

根切器刀盘与辊筒组之间相对位置关系影响甘蔗从刀盘喂入辊筒,辊筒宽度、直径、辊筒转速等因素影响辊筒组的输送效率^[23]。

(2)整秆式甘蔗收获机辊筒输送装置

1969 年 OVENDEN 将整秆式收获机与切段式收获机优点结合在一起,整秆式收获机采用了“推倒-伏卧输送”技术^[40]。整秆和切段收获机的输送辊筒^[109]齿表面覆盖橡胶或使用橡胶齿圈,可以减少辊筒对茎秆的损伤^[49]。

2. 6 杂质去除技术与装置

2. 6. 1 整秆剥叶技术与装置

(1)剥叶技术与机理

1923 年 HAORGT 试制了世界上第 1 款带有剥叶功能的甘蔗收获机。1926—1931 年, HOWARD 试制了几款利用钢丝刷去除杂质的整秆式甘蔗收获机,利用风机分离杂质和蔗梢^[40]。

甘蔗进入剥叶机方式有尾部喂入(图 17a)和基部喂入(图 17b)2 种^[39],其不同之处在于^[39,110]:尾部喂入方式主要采用尼龙刷作为剥叶元件,剥叶辊筒与输送辊筒旋向相反,有利于逆着蔗叶在茎秆上的生长方向将蔗叶从茎秆上撕扯下来。基部喂入方式,输送辊筒和剥叶辊筒旋向相同,剥叶元件外端最大线速度必须大于输送辊筒齿的线速度,剥叶元件与蔗叶之间才有相对运动;剥叶元件作用于蔗叶时输送辊筒还压着蔗叶,不利于将蔗叶从茎秆上撕扯下来。

剥叶机所用剥叶元件主要有尼龙丝^[111]、尼龙刷^[112]、橡胶拨指^[113]、钢丝绳^[114]和弹簧钢丝^[115]等。通过高速摄像技术分析蔗叶在剥叶元件打击下的破坏过程^[116],试验测试^[113]和仿真分析^[117]剥叶元件对茎秆的打击力,结合叶鞘与叶片力学性能^[25],可

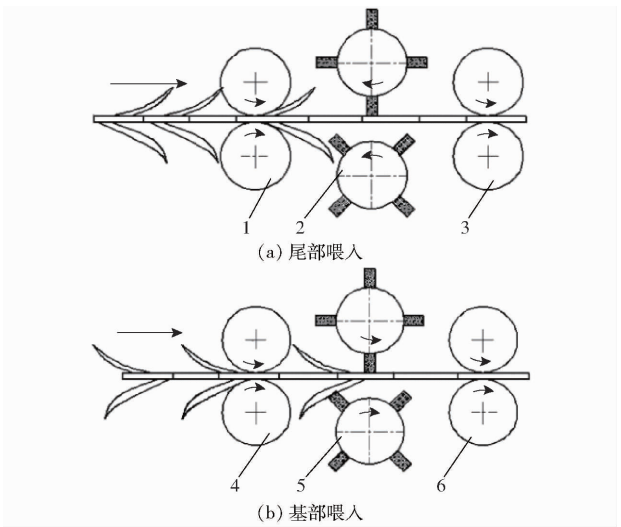


图 17 甘蔗喂入辊筒方式

Fig. 17 Mode of feeding stalk to rollers

1, 4. 喂入滚筒 2, 5. 剥叶滚筒 3, 6. 输出滚筒

以分析蔗叶破坏和剥离机理。

刚性剥叶元件容易导致蔗茎破损,钢丝绳和橡胶剥叶元件磨损严重,橡胶管剥指效果比较好^[50]。

(2)剥叶装置

甘蔗剥叶机多为辊筒式,主要由喂入辊筒、剥叶辊筒和输出辊筒等组成^[118]。

1969—1978 年湛江农业机械研究所研制的 4GZ-35 型整秆式甘蔗联合收获机和 1971—1973 年广西农业机械研究所研制的 4GZ-1 型整秆式甘蔗联合收获机均采用“推倒-伏卧”输送技术^[119]。采用伏卧输送技术的整秆式甘蔗收获机与独立的剥叶机剥叶装置基本相同,图 18 为一款甘蔗收获机各辊筒的布置方案^[120]。喂入辊筒、剥叶辊筒和输出辊筒的结构尺寸、相对位置关系和转速,以及剥叶元件的材料、形状、尺寸、排列方式与密度等因素,对剥叶效果、效率和能耗均有较大的影响^[120-124]。

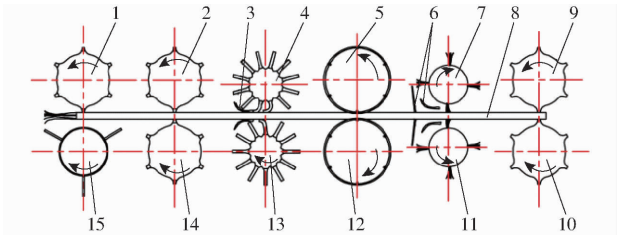


图 18 整秆式甘蔗联合收获机辊筒装置布置原理图

Fig. 18 Schematic of roller train of sugarcane whole stalk harvester

1, 15. 喂入滚筒 2, 14. 输送滚筒 3. 甘蔗叶 4, 13. 剥叶滚筒 5, 12. 风机外圈滚筒 6. 杂质与蔗叶 7, 11. 杂质分离滚筒 8. 甘蔗 9, 10. 输出滚筒

图 18 中的除尘风机和杂质分离辊筒的功能是将剥离后的蔗叶与茎秆分离,以便输出干净的茎秆^[119,125]。

剥叶和断尾装置作业效率制约了整秆式甘蔗联合收获机的作业效率^[42]。如何使通道内的甘蔗在剥叶辊筒宽度方向上均匀摊开,是提高其剥叶效率的关键技术。布置在喂入辊筒后的橡胶齿螺旋匀铺辊筒(图 19)可以实现将从喂入辊筒送来的、集中在辊筒中部的甘蔗在沿着辊筒宽度方向上均匀摊开^[126]。

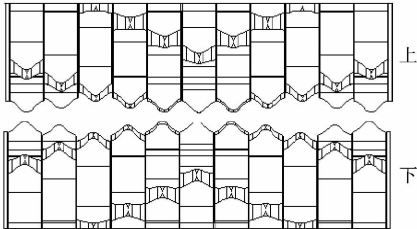


图 19 橡胶齿螺旋匀铺辊筒

Fig. 19 Evenly spreading rollers with spiral rubber teeth

甘蔗分步协同机收的集中整秆剥叶除杂技术与上述相同^[61,127],目前面临的问题是如何均匀高效地喂入甘蔗。

2. 6. 2 切段-风选除杂技术与装置

蔗段、蔗叶、蔗梢和泥土等具有不同悬浮速度,为通过风力分离蔗段和杂质提供了可能^[128]。切段风选排杂概念 1929 年由澳大利亚 FALKINER 提出,甘蔗收获机风选除杂的方法有吹风、抽风和吹抽结合 3 种^[40]。

(1) 吹风除杂技术

德国 CLASS 1400 型甘蔗收获机采用吹风除杂技术,其结构如图 20 所示^[40, 107]。切段后的物料被刮板链向后上方输送并抛入除杂室内,风机将气流吹向物料,较轻的杂质从杂质出口排出。

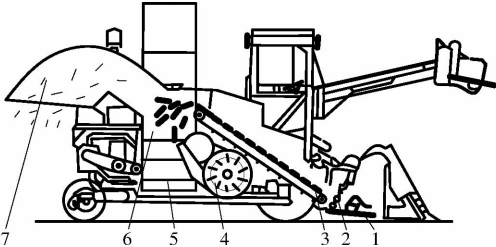


图 20 CLASS 1400 型甘蔗收获机吹风除杂装置结构简图

Fig. 20 Sturcture diagram of blowing air extractor of CLASS 1400 sugarcane harvester

1. 根切器 2. 切段刀辊 3. 蔗段输送装置 4. 主风机 5. 输送臂 6. 除杂室 7. 杂质出口

(2) 抽风除杂技术

1929 年,FALKINER 在世界首台切段式甘蔗收获机上利用一个大直径、风扇轴水平布置的抽风机来分离杂质。19 世纪 60 年代 MF 系列切段式收获机采用风机轴垂直布置的抽风机。之后,抽风机均采用了垂直布置方案^[40]。

图 21 为一款国产甘蔗收获机除杂风机结构示意图^[129]。杂质分离室内导流板的作用是引导蔗段接近并平行于风扇叶片,但不能进入风扇叶片区域,导流板的高度取决于蔗段的流量;风机叶片端部与风扇旋转区内壁之间应有一定的间隙,以便蔗叶能顺利通过该间隙而不会卡死扇叶^[49]。

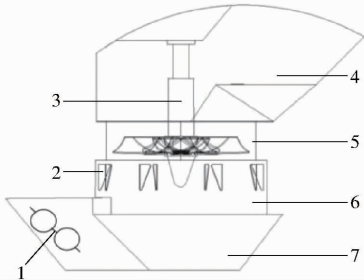


图 21 4GZQ180B 型甘蔗收获机除杂风机结构示意图

Fig. 21 Extractor of 4GZQ180B sugarcane harvester

1. 切段刀辊 2. 导流板 3. 轴流风机 4. 风扇上罩与杂质出口 5. 风扇旋转区 6. 杂质分离室 7. 集蔗斗

目前商用收获机的除杂风机均为垂直轴驱动,早期收获机有的采用水平轴驱动风机,水平轴对气流和蔗段有阻碍作用^[49]。也有学者尝试将除杂风机安装在与杂质分离室相垂直的通道内,风机轴水平安装,如图 22 所示^[130]。横置风机叶轮安装位置更靠近出口,叶轮与蔗段之间有较长的距离,降低了和蔗段碰撞的概率。

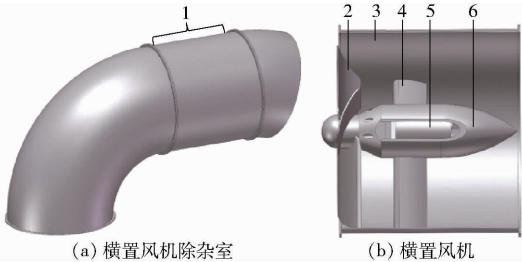


图 22 横置排杂风机结构简图

Fig. 22 Structure diagrams of transverse extractor

1. 横置风机安装位置 2. 叶轮 3. 外壳 4. 支撑架 5. 液压马达 6. 整流罩

杂质分离室、扇叶、风扇毂、导流板、风扇上罩等的形状与结构尺寸和风扇转速等因素,影响气流方向、速度和压力在风机室内的分布和杂质分离效果^[131-132]。

除杂系统应尽量多地去除杂质并减少损失^[49]: 增加风机转速有利于去除尽量多的杂质,但也会增加损失(小的蔗段碎片等)。合适的风机转速与物料流量、甘蔗品种、倒伏情况、天气情况等有关。宽的风机叶片可以在相同风机转速下增加气流速度。

CASE A8000 型甘蔗收获机主排杂风机轮毂处安装有塑料导流椭圆,如图 23 所示^[48]。导流椭

球具有减少气旋眼、使除杂室内空气均匀的作用^[49]。

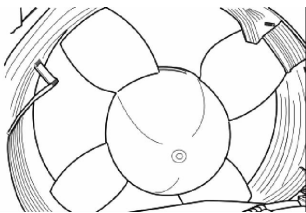


图 23 风机轮毂导流椭球
Fig. 23 Guiding ellipsoid of fan hub

单个轴流风机除杂室内空气的旋转,降低了气流动能利用效率。除杂室内理想的气流是从下到上的平行气流。2 个同轴旋向相反的轴流风机(图 24),可以相互消除各自产生的气流旋转,使除杂室内空气变成平行气流^[49]。

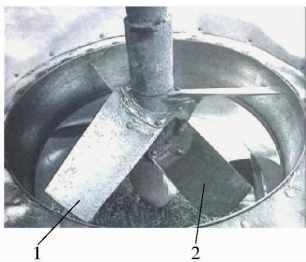


图 24 同轴反向双风机
Fig. 24 Coaxial double reverse fan
1. 上风机 2. 下风机

(3) 吹风与抽风组合除杂系统

4GZ-56 型和 HC-50NN 型甘蔗收获机采用了吹风和抽风组合除杂系统,如图 25 所示^[101]。其主除杂风机为轴流式抽风机,辅助除杂风机为贯流式吹风机。

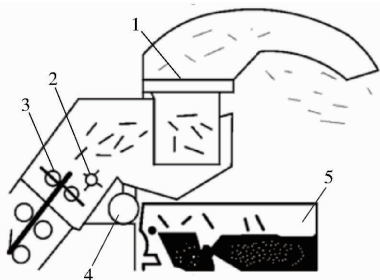


图 25 4GZ-56 型甘蔗收获机除杂风机原理图
Fig. 25 Schematic of extractor of 4GZ-56 sugarcane harvester

1. 主除杂风机 2. 尼龙刷辊 3. 切段刀辊 4. 辅助除杂风机
5. 集料箱

我国甘蔗分步协同机收的集中切段风选除杂与上述技术相同^[61]。

蔗叶、泥土、茎秆碎片等从抽风机扇叶旋转区穿过,为了避免杂质和叶片间撞击损坏叶片,叶片钢板较厚,导致除杂风机功率消耗较大。吹风除杂不存在这样的问题。

除杂室内物料均匀分布有利于提高除杂效果,如何使从切段刀辊来的物料尽量均匀地抛入除杂空间各处,应成为研究的重点。

2.7 甘蔗切段技术与装置

自 20 世纪 80 年代以来,旋转切段已成为切段式收获机的首选概念,并出现了过中切割和差动切割 2 种切段刀辊(图 26)^[49]。过中切割是刀刃切割,切割质量对刀刃磨损比较敏感。差动切割是刃口斜面切割,对刀刃磨损不敏感。

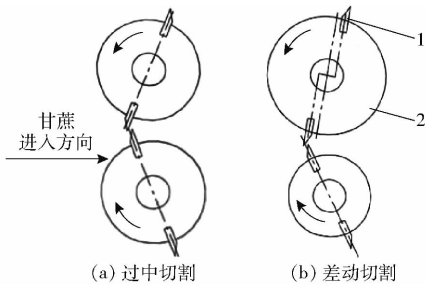


图 26 2 种切段方式
Fig. 26 Two kinds of chopping methods
1. 刀片 2. 刀辊

差动切割过程中上、下配对刀片分别从茎秆上、下方切入甘蔗,形成了不平整切口,并有碎屑产生,刀刃对茎秆的挤压会产生蔗汁流失^[133]。

蔗段切口不平整程度和碎屑大小与上、下配对刀片相对安装位置(图 27 中 p 和 q)以及切段刀辊转速有关^[133-134]。图 27b 为某切段刀辊试验台刀片调整后的相对位置数据^[135]。输送辊筒和切段辊筒转速之间的关系、甘蔗喂入量、刀片锋利情况和甘蔗品种与作物条件 4 个因素影响切段损失^[49]。所有输送辊筒转速应一致,并且输送辊筒叶片线速度是切段刀片刃口线速度的 60% ~ 70% 时,可以得到最好的切割质量和最小的切段损失。蔗段长度越小,蔗汁损失越多。澳大利亚蔗汁损失达到 2 ~ 5 t/hm²^[49]。

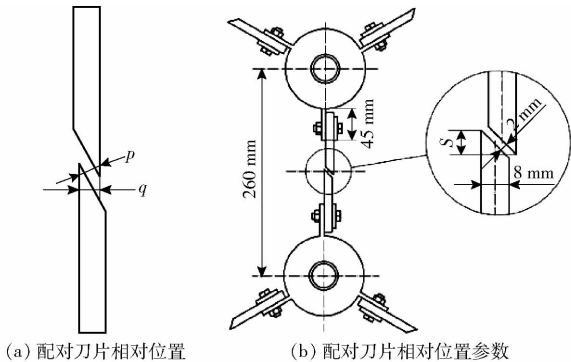


图 27 上、下刀辊配对刀片相对安装位置
Fig. 27 Relative position of paired blades of chopper

“动刀辊 + 定刀”的切段装置在试验中获得与差动切割刀辊相似的效率,其优势是更有利于切

成较短的蔗段^[136]。

研究蔗段被切段刀辊抛出后的运动轨迹可以为确定刀辊与除杂室相对位置提供依据^[137]。

2.8 物料收集技术与装置

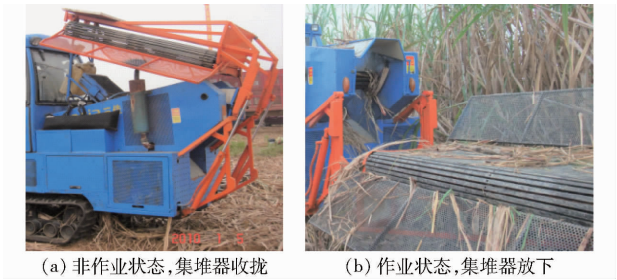
2.8.1 整秆蔗收集技术与装置

(1) 条铺甘蔗收集

1920 年澳大利亚将抓臂安装在拖拉机的前端,配合 FALKINER 整秆割堆机进行作业;1956 年 Austoft 公司开发出一台带液压驱动抓斗的装蔗机。20 世纪 50 年代,前端抓臂装载机在澳大利亚得到广泛使用^[40]。条铺的整秆蔗需要将其归拢到一定厚度再抓起装车。我国目前在用的甘蔗收集装车机仅有抓装功能^[138],容易将泥土一并抓起装到车上。

(2) 甘蔗集堆技术与装置

澳大利亚 20 世纪 20 年代生产的甘蔗收获机配备有集堆装置^[40]。集堆装置位于输送通道末端,有固定式、悬挂式、牵引式和配对小车等形式^[39]。图 28 为悬挂在收获机上的集堆装置,该装置可以在非作业状态时收拢。集堆装置卸料有依靠甘蔗自身重力^[139]、液压驱动倾翻料箱^[140]、链板和输送带驱动^[141]等多种方式。在田间卸料时,应尽量使甘蔗长度方向上垂直于蔗垄。



(a) 非作业状态,集堆器收拢 (b) 作业状态,集堆器放下

图 28 集堆器可收拢的整秆甘蔗收获机

Fig. 28 Retractable pile collector of sugarcane harvester

(3) 整秆打捆机构

1929 年 FALKINER 的整秆式收获机将甘蔗集堆后由收获机上配备的工人进行打捆。1956 年生产的 BMI 整秆收获机,将切梢后的甘蔗收集打捆^[40]。2023 年,国内学者研发了一款甘蔗立式打捆机构,并装机进行了试验,其结构如图 29 所示^[142]。

2.8.2 蔗段收集技术与装置

(1) 输送臂提升输送物料技术

1929 年 FALKINER 研制的切段式甘蔗收获机和 1932 年 HOWARD 生产的澳大利亚第 1 台切段式甘蔗收获机的两侧均配置有固定的输送臂,用于将

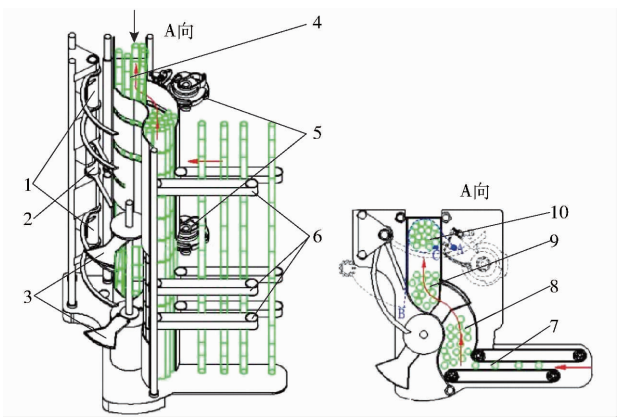


图 29 甘蔗整秆立式打捆机构结构简图

Fig. 29 Structure diagram of vertical bundling mechanism for whole cane stalks

1. 集捆部件 2. 排料部件 3. 集转部件 4. 喂入部件 5. 打捆部件 6. 甘蔗 7. 喂入区 8. 集转区 9. 待捆区 10. 打捆区

蔗段卸到田间运输车内。1956 年 MF 515 样机采用单输送臂。之后,商用甘蔗收获机大多采用单输送臂。

为了将蔗段送入运输车内,输送臂需要有足够的长度^[39]。作业时,输送臂摆到收获机一侧,引起收获机重心向一侧偏移,对收获机横向稳定性产生影响^[143]。输送臂的悬臂结构,使其结构强度和轻量化设计^[144-145]至关重要。输送臂相对水平面的倾角影响其物料输送性能^[146]。可折叠的输送臂和双侧可向内缩进的输送臂能够减小转场时收获机总体尺寸^[143,147]。

(2) 网袋和料厢集料技术

1992—1994 年 GEOFF 和 MOLLER 针对日本 Okinawa 岛的小块田地设计了网袋集料的履带式甘蔗收获机,网袋可装 1 000 kg 蔗段,装满后卸到田间,然后由吊车将其卸到公路运输车内。该技术在 日本甘蔗收获机上得到广泛应用^[40]。我国 2008 年和 2015 年引进的 HC-50NN 型收获机和 MCH-15 型甘蔗收获机均为网袋集料。在此基础上,国内小型收获机采用网袋和料箱集料技术^[39,101],如图 30 所示。



(a) 网袋集蔗 (b) 料箱集蔗

图 30 收获机网袋与料箱

Fig. 30 Net bag and box collector of sugarcane harvester

3 甘蔗机收系统

3.1 典型国家甘蔗机收系统

3.1.1 澳大利亚切段收获系统

澳大利亚是世界上甘蔗收获机研发最早及收获机械化发展最具代表性的国家。1880—1980 年,经历了从人工砍蔗、整秆机收到切段机收的发展历程。1920 年,HURREY 和 FALKINER 发明了第 1 台整秆式甘蔗收获机。切段风选排杂概念最早由澳大利亚 FALKINER 提出。1929 年在古巴将整秆式甘蔗收获机改造成世界上首台商业成功和批量生产的切段式甘蔗收获机,并设计制造了配套的田间运输系统。1979 年澳大利亚甘蔗实现 100% 的机械化收获^[40,148]。

澳大利甘蔗机收系统由甘蔗收获机、田间转运车和公路运输车或铁路运输列车等组成,铁路列车一次装载量 600 t,公路大吨位卡车装载量 24 t。收获的甘蔗在 12 h 内入榨。

3.1.2 美国整秆收获系统

20 世纪八九十年代,美国甘蔗收获经历了从人工砍收向机收的过渡,佛罗里达和德克萨斯等州采用切段式机收技术,路易斯安那州主要使用 CAMECO 整秆收获机(图 3)。在不同产量和倒伏情况的蔗田,其单行收获机作业效率为 30~60 t/h,双行收获机作业效率为 90~140 t/h。整秆收获的灵活性适合该州收获期短且多雨的情况^[149]。20 世纪 90 年代末,切段式收获机才成为路易斯安那州的主要机型。

美国夏威夷的甘蔗生长期为 2 年,产量达到 300 t/hm²,甘蔗倒伏严重,采用推集收获系统(Push rake and “V” cutter)。因推集收获系统会将甘蔗连根拔起和带来大量杂质(包括石头),糖厂配置了甘蔗清洗系统。推集收获方式和甘蔗清洗系统成为夏威夷甘蔗机收的主导方式^[40,150]。

3.1.3 甘蔗收获机主流机型与先进技术

国际上占主导地位甘蔗收获机制造商是凯斯纽荷兰和约翰迪尔。凯斯历代的甘蔗收获机代表性机型有 CASE A9000、A8000、A8800、A7000、A4000 等切段式甘蔗收获机^[39,151]。约翰迪尔历代甘蔗收获机代表性机型有 JohnDeer CH960、CH950、CH570、CH560、3520、3522 等切段式甘蔗收获机^[39,152]。

最新机型采用自动导航和大量监控系统。以 JohnDeer CH960 型为例,该机型为双行、履带式,适应行距 1.4~1.5 m,发动机功率 360 kW。配备分行器浮动自动控制、产量检测、输送臂杂质检测、主除杂风机甘蔗损失检测、主除杂风机杂质排放检测、每

吨甘蔗油耗检测、喂入量检测、运输载荷计数等系统^[152]。

3.2 我国甘蔗机收系统

3.2.1 甘蔗收获机技术^[39]

广西农业机械研究院^[153]于 1959 年 4 月开始探讨甘蔗收获机方案,试制了往复砍伐式、圆盘式和长条锯片斜滑切式切割部件,并进行了田间试验。1965 年承担八机部畜力甘蔗收获机项目,1967 年试制成功牛拉甘蔗收获机。1974 年,一机部布置甘蔗联合收获机项目,1978 年试制成功腹挂式整秆甘蔗联合收获机,配挂在加高离地间隙后的丰收-37 型拖拉机腹部。1979 年按机械部科研项目计划,试制成功第 1 代自走式甘蔗联合收获机。1985 年根据外援需要,在参照 MF-105 型切段式收获机的基础上,试制成功 4Z-90 型自走切段式甘蔗联合收获机。2001 年 6 月,广西科技厅安排甘蔗割铺机研究项目,广西农业机械研究院联合南宁手扶拖拉机厂从日本引进了甘蔗割铺机,消化吸收其先进技术,2002 年研制成功 4GZ-9 型甘蔗割铺机。

进入 21 世纪,国家开始加大甘蔗机械的研究投入。从“十五”到“十四五”均有甘蔗收获机械装备方面的攻关项目,研发的机型有:华南农业大学 4ZZX-48 型侧悬挂式甘蔗割铺机、4GZX-45 型前悬挂式甘蔗割堆机、HN4GZL-132 型整秆式甘蔗联合收获机和 4GDL-132 型切段式甘蔗联合收获机,中国农业机械化科学研究院集团有限公司 4GZ-1 型整秆式甘蔗联合收获机和 4GL-120 型切段式甘蔗联合收获机,广西农业机械研究院 4GZ-180、4GZQ-260 型切段式甘蔗收获机。

3.2.2 收获机产品^[39]

2000 年后,我国出现了甘蔗收获机研发热潮,一些民营企业加入了甘蔗机械的研制。2000—2010 年期间,以整秆式收获机为主,主要产品有柳州市汉森机械制造有限公司 HSM1000 型、HS1800 型和 HS260 型,浙江三佳农机装备有限公司 SJ-1400 型,河南省坤达农业机械设备有限公司 4GD-36 型和 4GZD-75 型,湖北国拓重工科技有限责任公司 4GL-1-Z92A 型和湖北神誉重股份有限公司 4GL-1 型等整秆式甘蔗联合收获机。这些机型均采用推倒-伏卧输送技术。

2011 年广西壮族自治区农业机械化管理局出台政策主推切段机收技术,制造商开始转向切段式甘蔗收获机生产。主要产品有广州市科利亚农业机械有限公司 4GZ-56 型、广西云马泰缘机械制造股份有限公司 4GQ-260 型、柳州市汉森机械制造有限公司 4GQ-350 型、广西柳工农业机械股份有限

公司4GQ-35型和4GQ-180型、中首信(贵州)现代农业装备有限公司4GQ-GZ260S型、洛阳辰汉农业装备科技股份有限公司4GQ-130型、中联农业机械股份有限公司AS60(4GQV-1A)型和潍柴雷沃智慧农业科技股份有限公司4GQ-1B型等切段式甘蔗联合收获机。

2014—2020年,在甘蔗收获机单机购机补贴国补和省补(广西)政策的鼓励下,国产切段式甘蔗收获机得到快速发展。国内甘蔗收获机保有量从2018年的722台增加到2023年的3315台,国产收获机作业性能基本达到进口收获机水平^[4,39]。

3.2.3 甘蔗机收系统适用性

除了国产甘蔗收获机外,我国还进口了国际主流切段式甘蔗收获机,大型机有CASE A7000型、CASE A8000型和约翰迪尔CH570型,中型机有CASE A4000型、约翰迪尔CH530型,小型机有日本HC-50NN型和MCH-15型等^[39]。

由于我国蔗农和糖厂习惯了人工砍收的作业质量,对进口的国际主流机型和国产机型,机收作业的含杂率、田间损失率、破头率和蔗田碾压,均难以接受^[9],进而造成大量切段式收获机闲置^[4]。主产区多丘陵山地、田块零碎、种植行距较小(0.7~0.9 m)、未按机收要求培土、多台风造成倒伏严重等立地条件,是机收作业质量差的主要原因^[3-4,9]。

我国的甘蔗收获系统有收获机(输送臂)+田间转运车+公路运输车和收获机(网袋/网箱集料)+网袋吊车(或网箱铲车)+公路运输车2类。收获作业时,甘蔗行距与收获机、田间转运车或铲车的轮距不匹配,造成对蔗垄碾压严重^[1,3-4]。整秆联合收获机因其作业效率较低,未得到有效推广^[52]。

国产的甘蔗割铺(堆)机只能单边收割,对倒伏甘蔗适应性差。集中除杂装备存在物料喂入均匀性

较差、效率较低等问题,整秆分步协同收获技术仍处于熟化阶段^[4]。

4 结论与发展展望

(1)我国已形成了完备的甘蔗收获机科研与制造体系。甘蔗收获机的研制与发展已有65年历史,针对甘蔗收获机械关键技术进行了大量研究,形成了完备的科研与制造体系,取得了一大批关键技术与装备的科研成果,生产出大、中、小型系列甘蔗收获机。

(2)我国甘蔗收获机械的研制具有明显的特点:自上而下的研发任务和政策导向;在引进、消化吸收国外先进技术基础上的研发,收获机技术路线和关键技术原创性不足。

(3)国内外现有机型与我国甘蔗立地条件和农艺技术结合不够,在我国的适用性较差,糖厂和蔗农对其含杂率、损失率、根茬破头率和对蔗田碾压接受程度较低。

(4)结合我国蔗糖产业的实际情况、甘蔗立地条件和农艺技术,创制适用机收技术与装备:针对云南甘蔗倒伏较轻和蔗茎较脆的特点,研制扶起-立式输送-剥叶与打捆联合收获技术;针对广西、广东榨季多雨和甘蔗倒伏较严重的特点,研制以推倒-俯卧输送割堆(捆)技术为核心的分步协同机收技术(集中除杂);针对农村田块小和窄行距的特点,研制双行机收技术与机具;针对农场(农垦)适合大、中机具作业的特点,完善宽行距规定轨迹作业农机农艺融合技术。

(5)机收蔗含杂率快速检测技术可以实现入厂车辆一车一检。机收蔗入榨前除杂系统可以去除混入原料蔗中的泥土和蔗叶,减轻杂质的危害。这些技术的应用有利于推广机收甘蔗技术。

参 考 文 献

[1] 刘庆庭,刘晓雪,武涛,等.我国甘蔗机械化“十四五”规划与甘蔗产业可持续发展[J].现代农业装备,2020,41(6):2-9. LIU Qingting, LIU Xiaoxue, WU Tao, et al. The 14th five-year plan of sugarcane mechanization and the sustainable development of sugarcane industry in China[J]. Modern Agricultural Equipment, 2020, 41(6):2-9. (in Chinese)

[2] 刘晓雪,王京,周靖昀.2001—2020年我国甘蔗成本收益动态演变与原因探究[J].甘蔗糖业,2023,52(3):55-70. LIU Xiaoxue, WANG Jing, ZHOU Jingyun. Research on the dynamic evolution and reasons of sugarcane cost benefit in China from 2001 to 2020[J]. Sugarcane and Canesugar, 2023, 52(3):55-70. (in Chinese)

[3] 蒋姣丽,杨瑶,吴传云,等.我国甘蔗机收发展缓慢原因分析[J].甘蔗糖业,2022,51(1):1-5. JIANG Jiaoli, YANG Yao, WU Chuanyun, et al. Analysis on reasons for the slow advance of sugarcane harvesting mechanization in China[J]. Sugarcane and Canesugar, 2022, 51(1):1-5. (in Chinese)

[4] 刘庆庭,蒋姣丽,夏明,等.以糖厂为主体的甘蔗机收推进模式[J].甘蔗糖业,2024,53(3):41-51. LIU Qingting, JIANG Jiaoli, XIA Ming, et al. Sugar mill as the main body of sugarcane machine harvest promotion model[J]. Sugarcane and Canesugar, 2024, 53(3):41-51. (in Chinese)

[5] 国务院.国务院关于印发加快推进农业机械化和农机装备产业转型升级的指导意见[EB/OL].(2018-12-21)[2024-05-20].https://www.gov.cn/zhengce/content/2018-12/29/content_5353308.htm?ivk_sa=1024320u.

- [6] 农业农村部. 农业农村部关于印发“十四五”全国农业机械化发展规划的通知[EB/OL]. (2021-12-27) [2024-05-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/06/content_5666677.htm.
- [7] 李丹阳. 2023/2024 榨季广西甘蔗机械化收获情况调研[J]. 农机质量与监督, 2024(2): 13-15.
LI Danyang. Modern agricultural equipment investigation on mechanized sugarcane harvest in 2023/2024 season in Guangxi[J]. Agricultural Machinery Quality & Supervision, 2024(2): 13-15. (in Chinese)
- [8] 周志滔, 曹树威, 朱敏, 等. 广西地区甘蔗机械化收割现状及分析[J]. 广西农学报, 2024, 39(1): 88-95.
ZHOU Zhitao, CAO Shuwei, ZHU Min, et al. Current situation and analysis of sugarcane mechanization harvesting in Guangxi region[J]. Journal of Guangxi Agriculture, 2024, 39(1): 88-95. (in Chinese)
- [9] 鲁华, 武涛. 对广西甘蔗机械化收获发展现状的思考[J]. 甘蔗糖业, 2023, 52(4): 53-59.
LU Hua, WU Tao. Reflection on development status of mechanized sugarcane harvesting in Guangxi[J]. Sugarcane and Canesugar, 2023, 52(4): 53-59. (in Chinese)
- [10] 庞承妮, 黎向新, 农宏亮, 等. 浅谈甘蔗机械化收获与发展前景[J]. 农业开发与装备, 2023(11): 85-87.
PANG Chengni, LI Xiangxin, NONG Hongliang, et al. A brief discussion on mechanized harvesting and development prospects of sugarcane[J]. Agricultural Development & Equipments, 2023(11): 85-87. (in Chinese)
- [11] JIA H, LI C, ZHANG Z, et al. Design of bionic saw blade for corn stalk cutting[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(4): 497-505.
- [12] 张木清, 姚伟. 现代甘蔗栽培育种学[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [13] 肖祎, 吕达, 陈政, 等. 甘蔗梢研究进展[J]. 中国糖料, 2013, 35(1): 65-67.
XIAO Yi, LÜ Da, CHEN Zheng, et al. Research progress of sugarcane tip[J]. Sugar Crops of China, 2013, 35(1): 65-67. (in Chinese)
- [14] CHEN Meade. Cane sugar handbook[M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [15] 王贵华. 甘蔗的饲料价值及其产业化发展前景[J]. 中国糖料, 2004, 26(3): 54-56.
WANG Guihua. Value of sugarcane as feed and its developmental prospect of industrialization[J]. Sugar Crops of China, 2004, 26(3): 54-56. (in Chinese)
- [16] REIN P W. The effect of green cane harvesting on a sugar mill[J]. International Sugar Journal, 2005, 107(1281): 498-504.
- [17] 宋春华, 区颖刚. 两段圆锥式螺旋扶蔗机构的设计与仿真分析[J]. 农机化研究, 2019, 41(5): 137-141, 147.
SONG Chunhua, OU Yinggang. Design and simulation analysis of two-stage conical helical sugarcane support mechanism[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(5): 137-141, 147. (in Chinese)
- [18] GB/T 5262—2008 农业机械 试验条件测定方法的一般规定[S]. 2008.
- [19] LIU Qingting, CHEN Jinkan, OU Yinggang. Spatial attitude of lodged sugarcane stalk in field[C] // ASABE's Annual International Meeting, 2012.
- [20] WANG Qingqing, ZHANG Qianwei, ZHANG Yin, et al. Lodged sugarcane/crop dividers interaction: analysis of robotic sugarcane harvester in agriculture via a rigid-flexible coupled simulation method[J]. Actuators, 2022, 11(1): 23.
- [21] 武涛, 任甲辉, 刘庆庭, 等. 4GDZ-132 型切段式甘蔗联合收割机研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 30-38.
WU Tao, REN Jiahui, LIU Qingting, et al. Development of the 4GDZ-132 sugarcane chopper combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(10): 30-38. (in Chinese)
- [22] 谢卢鑫, 王俊, 程绍明, 等. 整秆式甘蔗收割机剥叶过程仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 56-65.
XIE Luxin, WANG Jun, CHENG Shaoming, et al. Simulation analysis and experiments of leaf stripping process for whole-stalk sugarcane harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(18): 56-65. (in Chinese)
- [23] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 甘蔗茎秆在扭转、压缩、拉伸荷载下的破坏试验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 201-204.
LIU Qingting, OU Yinggang, QING Shangle, et al. Failure tests of sugarcane stalks under torsion, compression and tension load[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(6): 201-204. (in Chinese)
- [24] 罗菊川, 文晟, 李涵光, 等. 甘蔗尾茎泊松比的试验分析[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(6): 118-124.
LUO Juchuan, WEN Sheng, LI Hanguang, et al. Experimental study on poisson's ratio of sugarcane tail stalk[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(6): 118-124. (in Chinese)
- [25] MOU Xiangwei, LIU Qingting, OU Yinggang, et al. Mechanical properties of the leaf sheath of sugarcane[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(3): 801-812.
- [26] LIU Qingting, MATHANKER S K, ZHANG Qin, et al. Biomechanical properties of miscanthus stems[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(4): 1125-1131.
- [27] LIU Qingting, OU Yinggang, WANG Wanzhang, et al. The mechanical properties and constitutive equations of sugarcane stalk[C] // ASABE Annual International Meeting, 2007.
- [28] GB/T 10498—2010 糖料甘蔗[S]. 2010.
- [29] KOSUML K, BUN-ART S. Factors affecting the amount of impurities when harvesting produced sugarcane with sugarcane harvester[C] // The 12th TSAE International Conference, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019: 30.012017.
- [30] 刘芳建, 杨学军, 方宪法, 等. 甘蔗收获机切段装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 90-95.

- LIU Fangjian, YANG Xuejun, FANG Xianfa, et al. Design and experiment of chopper device in sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 90–95. (in Chinese)
- [31] 苏俊波, 孔冉, 罗炼芳, 等. 两个甘蔗品种机械收获后糖分转化损失分析[J]. 热带作物学报, 2015, 36(8): 1415–1418.
- SU Junbo, KONG Ran, LUO Lianfang, et al. Comparative analysis of the sugar content between two sugarcane cultivars after mechanized harvesting[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, 36(8): 1415–1418. (in Chinese)
- [32] 胡玉玫, 蚁细苗, 曾练强, 等. 糖料甘蔗品质评定新指标——甘蔗葡聚糖的形成、危害及检测方法[J]. 甘蔗糖业, 2012, 41(2): 45–53.
- HU Yumei, YI Ximiao, ZENG Lianqiang, et al. New indicator of sugarcane quality—the formation, damage and detection methods of sugarcane dextran[J]. Sugarcane and Cane sugar, 2012, 41(2): 45–53. (in Chinese)
- [33] JB/T 6275—2007 甘蔗收获机械 试验方法[S]. 2007.
- [34] ROBERTO D C M, HARRY H. Cane damage and mass losses for conventional and serrated basecutter blades[C] // Proceedings of the 2000 Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, 2000: 84–91.
- [35] MA S, KARKEE M, SCHARF P A, et al. A study on the effects of harvester off-track errors on sugarcane stubble losses[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2017, 33(6): 771–779.
- [36] 刘文秀, 陈世凡, 庞少欢, 等. 甘蔗机械收获切割质量对宿根蔗产量的影响试验分析[J]. 广西农业机械化, 2010(1): 12–13.
- [37] ANTONIO H F P, ANTONIO C T V, EBER A F D P, et al. Least limiting water range and load bearing capacity of soil under types of tractor-trailers for mechanical harvesting of green sugarcane[J]. R. Bras. Ci. Solo., 2015, 39: 1603–1610.
- [38] 梁启新, 罗艺, 米超, 等. 甘蔗机械收获中农机与农艺结合的系列问题探讨——2. 甘蔗种植行距[J]. 广西职业技术学院学报, 2012, 5(4): 12–16, 20.
- LIANG Qixin, LUO Yi, MI Chao, et al. Study on the series problems of mechanical harvesting of sugarcane—2. planting row width[J]. Journal of Guangxi Vocational and Technical College, 2012, 5(4): 12–16, 20. (in Chinese)
- [39] 区颖刚, 刘庆庭, 杨丹彤, 等. 甘蔗生产机械化研究[M]. 镇江: 江苏大学出版社, 2018.
- [40] KERR B, BLYTH K. They're all half crazy: 100 years of mechanical cane harvesting[M]. Brisbane: Canegrowers, 1993.
- [41] 解福祥, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 整秆式甘蔗收割机组合式扶起装置运动学分析[J]. 农机化研究, 2009, 31(5): 27–30.
- XIE Fuxiang, OU Yinggang, LIU Qingting, et al. The whole stalk of sugarcane harvesters combined device kinematics of lifting[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(5): 27–30. (in Chinese)
- [42] 刘庆庭, 莫建霖, 区颖刚, 等. 我国整秆与切段2种甘蔗收获方式发展历程与前景分析[J]. 甘蔗糖业, 2013, 42(6): 45–55.
- LIU Qingting, MO Jianlin, OU Yinggang, et al. Analysis on the development course and prospect of sugarcane whole stalk harvesting and billet harvesting technology in China[J]. Sugarcane and Cane sugar, 2013, 42(6): 45–55. (in Chinese)
- [43] 宋春华, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 推倒式甘蔗收获机扶蔗质量影响因素的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 35–40.
- SONG Chunhua, OU Yinggang, LIU Qingting, et al. Experimental study on influencing factors of lifting quality for push-over-type sugarcane harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 35–40. (in Chinese)
- [44] 胡朝晖, 尹以龙, 张天富, 等. 甘蔗分步式机收的可行性与经济效益分析[J]. 中国糖料, 2023, 45(4): 70–80.
- HU Zhaohui, YIN Yilong, ZHANG Tianfu, et al. Feasibility and economic benefit analysis of step by step machine harvesting of sugarcane[J]. Sugar Crops of China, 2023, 45(4): 70–80. (in Chinese)
- [45] BAI Jing, MA Shaochun, LIU Binchang, et al. Key technologies of crop dividers of sugarcane harvesters: a review[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2021, 37(5): 839–849.
- [46] 凯斯纽荷兰(中国)管理有限公司. 国外甘蔗收获机(凯斯纽荷兰)发展简史[A]. 莫荣旭. 广西农业机械化[C]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2015: 187–199.
- [47] 约翰迪尔(中国)投资有限公司. 国外甘蔗收获机(约翰迪尔)发展简史[A]. 莫荣旭. 广西农业机械化[C]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2015: 200–210.
- [48] CASE A8000 and A8800 cane harvesters operator's manual[Z]. 84158982–01, 2009.
- [49] SANDELL G, AGNEW J. The harvesting best practice manual for chopper-extractor harvester[M]. Bureau of Sugar Experiment Station, 2002.
- [50] BAI Jing, MA Shaochun, WANG Fenglei, et al. Field test and evaluation on crop dividers of sugarcane chopper harvester[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2021, 14(1): 118–122.
- [51] 牟向伟, 区颖刚, 张杨. 拨指链式扶蔗器试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 49–53.
- MOU Xiangwei, OU Yinggang, ZHANG Yang. Experiment of the finger-chain type sugarcane-lifter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 49–53. (in Chinese)
- [52] 郑丁科, 区颖刚. 甘蔗收割机柔性夹持输送装置驱动马达负载的分析[J]. 农机化研究, 2014, 36(9): 47–51, 56.
- ZHENG Dingke, OU Yinggang. Analysis of driving load for trackless flexible holding and conveying mechanism of sugarcane harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(9): 47–51, 56. (in Chinese)
- [53] 国外智能机械化农业——路易斯安那州甘蔗种植[EB/OL]. (2019–10–16) [2024–08–06]. https://www.bilibili.com/video/BV1CE411C7wJ/?spm_id_from=333.337.search-card.all.click.

- [54] 陈连飞, 区颖刚, 李志红, 等. 整秆式甘蔗收割机柔性夹持输送装置[J]. 农机化研究, 2009, 31(1): 71–75.
CHEN Lianfei, OU Yinggang, LI Zhihong, et al. Study on flexible gripping and transportation device for whole stalk sugarcane harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(1): 71–75. (in Chinese)
- [55] 解福祥, 区颖刚, 刘庆庭. 甘蔗收获机组式扶起装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 94–98.
XIE Fuxiang, OU Yinggang, LIU Qingting. Experiment of combined-lifter device for sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 94–98. (in Chinese)
- [56] 宋春华, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 两段式螺旋扶起机构理论的研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(11): 34–37.
SONG Chunhua, OU Yinggang, LIU Qingting, et al. Study on second stage spiral sugarcane-lifting mechanism[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(11): 34–37. (in Chinese)
- [57] BAI Jing, MA Shaochun, WANG Fenglei, et al. Lifting performance of crop dividers with variable pitch spiral scrolls[J]. Sugar Tech., 2022, 24(6): 1877–1886.
- [58] 张杨, 区颖刚, 牟向伟. 基于 ADAMS 的拨指链式扶蔗装置的虚拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 88–93.
ZHANG Yang, OU Yinggang, MOU Xiangwei. Virtual test on the finger-chain type sugarcane-lifter based on ADAMS[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 88–93. (in Chinese)
- [59] 宋春华, 区颖刚, 刘庆庭. 甘蔗收获机两段螺旋式扶起机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 89–93.
SONG Chunhua, OU Yinggang, LIU Qingting. Design and experiment of two sections spiral sugarcane lifter for sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 89–93. (in Chinese)
- [60] 麻芳兰, 蒋红梅, 李尚平, 等. 整秆式甘蔗收获机剥叶断尾机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 73–78, 7.
MA Fanglan, JIANG Hongmei, LI Shangping, et al. Design and experiment on cleaning leaves and breaking tails mechanism of whole-stalk sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 73–78, 7. (in Chinese)
- [61] 广西壮族自治区农机中心试验鉴定部. 甘蔗机收机具研发情况综述[J]. 广西农业机械化, 2023(1): 38–40.
Guangxi Zhuang Autonomous Region Agricultural Machinery Center Test and Appraisal Department. Overview of research and development of sugarcane harvester[J]. Guangxi Agricultural Mechanization, 2023(1): 38–40. (in Chinese)
- [62] 甘蔗收获机[EB/OL]. [2024–08–08]. <http://www.liugongam.com/gzshj>.
- [63] 甘蔗收获机[EB/OL]. [2024–08–08]. <https://www.zoomlion-ag.com/product/42/>.
- [64] 洛阳晨汉农业机械科技有限公司[EB/OL]. [2024–08–08]. <http://chenhankeji.cn/col.jsp?id=124>.
- [65] 钱君, 马少春, 徐杨, 等. 滑剪组合式甘蔗根切装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 37–47.
QIAN Jun, MA Shaochun, XU Yang, et al. Design and test of sliding shear combined sugarcane basecutter[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(10): 37–47. (in Chinese)
- [66] 侯昭武, 韦相贵, 马家孟. 智能化甘蔗收获机断头断尾控制系统研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(1): 235–239, 244.
HOU Zhaowu, WEI Xianggui, MA Jiameng. Research on intelligent sugarcane harvester head tail control system[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(1): 235–239, 244. (in Chinese)
- [67] HU Jiwei, MA Shaochun, WANG Fenglei, et al. Design and development of sugarcane top chopper and its field performance[J]. Sugar Tech., 2021, 23(5): 1192–1198.
- [68] HU Jiwei, MA Shaochun, GAO Shili, et al. Experimental study on sugarcane top chopper[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2021, 37(2): 243–250.
- [69] WEN Chunming, HOU Bingxu, LI Jianheng, et al. Height estimation of sugarcane tip cutting position based on multi-modal alignment and depth image fusion[J]. Biosystems Engineering, 2024, 243: 93–105.
- [70] 王志琛. 甘蔗收获机切稍高度自适应调整装置设计与试验[D]. 广州: 华南农业大学, 2024.
WANG Zhichen. Design and experiment of adaptive adjustment device for cutting height of sugarcane harvester[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2024. (in Chinese)
- [71] 任晓智, 李尚平. 小型甘蔗收获机械断尾机构的设计[J]. 农业机械学报, 2004, 35(3): 172–174.
REN Xiaozhi, LI Shangping. Design of tail breaking mechanism of small sugarcane harvesting machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(3): 172–174. (in Chinese)
- [72] 罗菊川, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 整秆式甘蔗联合收获机断蔗尾机构[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 89–94, 107.
LUO Juchuan, OU Yinggang, LIU Qingting, et al. Tail-breaking mechanism of whole stalk sugarcane combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 89–94, 107. (in Chinese)
- [73] 周勇. 用于甘蔗分段收获的前悬挂推倒式割台研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2011.
ZHOU Yong. Research on the front-hanging push-over cutting table for sugarcane segment harvesting[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [74] 唐永治, 潘荣春, 周益善, 等. 基于 LS–DYNA 的甘蔗收获机压蔗辊影响研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2023, 50(4): 71–77.
TANG Yongzhi, PAN Xingchun, ZHOU Yishan, et al. Study on impact of sugar cane harvester cane roller press based on LS–DYNA[J]. Tractor & Farm Transporter, 2023, 50(4): 71–77. (in Chinese)
- [75] KROES S, HARRIS H D. Cutting forces and energy during an impact cut of sugarcane stalks[C]//EurAgEng’96, Madrid,

1996.

- [76] 刘庆庭,区颖刚,卿上乐,等.甘蔗茎秆切割力的计算[J].农业机械学报,2006,37(9):89-92.
LIU Qingting, OU Yinggang, QING Shangle, et al. Cutting force calculation of sugarcane stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(9):89-92. (in Chinese)
- [77] QIU Minmin, MENG Yanmei, LI Yizhe, et al. Sugarcane stem cut quality investigated by finite element simulation and experiment[J]. Biosystems Engineering, 2021, 206: 135-149.
- [78] 贺亮.人体砍切甘蔗上肢动作捕捉及模拟实验研究[D]. 南宁:广西大学,2020.
HE Liang. Motion capture and simulation experiment of human upper limb chopping sugarcane[D]. Nanning: Guangxi University, 2020. (in Chinese)
- [79] 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)
- [80] KROES S, HARRIS H D. Splitting of stool during an impactcut of sugarcane stalks[C]//EurAgEng'96, Madrid,1996.
- [81] 刘庆庭,区颖刚,卿上乐,等.甘蔗茎秆在光刃刀片切割下根茬破坏试验[J].农业工程学报,2007,23(3):103-107.
LIU Qingting, OU Yinggang, QING Shangle, et al. Stubble damage of sugarcane stalks in cutting test by smooth-edge blade [J]. Transactions of the CSAE,2007,23(3):103-107. (in Chinese)
- [82] 钱君,马少春,徐杨,等.基于断裂力学的甘蔗切割裂纹应力强度因子分析[J].农业机械学报,2023,54(增刊2):101-109.
QIAN Jun, MA Shaochun, XU Yang, et al. Analysis of crack stress intensity factor of sugarcane cutting based on fracture mechanics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Supp. 2):101-109. (in Chinese)
- [83] 刘庆庭,区颖刚,卿上乐,等.光刃刀片切割甘蔗茎秆时根茬破坏力学分析[J].农业机械学报,2007,38(9):51-54,62.
LIU Qingting, OU Yinggang, QING Shangle, et al. Mechanics analysis on stubble damage of sugarcane stalk during cutting by smooth-edge blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(9):51-54,62. (in Chinese)
- [84] 卿上乐,区颖刚,刘庆庭.土壤支撑下甘蔗茎秆的内力和变形[J].华中农业大学学报,2005(增刊1):109-113.
QING Shangle, OU Yinggang, LIU Qingting. Internal forces and distortions of sugarcane stalks in the condition of soil support [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2005(Supp. 1): 109-113. (in Chinese)
- [85] MA Shaochun, SCHARF P A, ZHANG Qin, et al. Effect of cane stool density and stubble height on sugarcane stubble damage in Hawaii field[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(3): 813-820.
- [86] 陈天波.人工砍蔗过程动态力的测量与试验[D].广州:华南农业大学,2009.
CHEN Tianbo. Measurement and experiment of dynamic force during manual cane cutting[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [87] 周绍鹏,刘庆庭,杨丹彤,等.甘蔗立式夹持输送通道剥叶装置设计与试验[J].华南农业大学学报,2019,40(3):117-124.
ZHOU Shaopeng, LIU Qingting, YANG Dantong, et al. Design and test on leaf-stripping device of sugarcane harvester by a vertical clamping-conveying channel[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019,40(3):117-124. (in Chinese)
- [88] CARLA S S P, MURILO A V, ADÃO F D S, et al. Sugarcane base cutting quality using rectangular and circular blades[J]. Engenharia Agrícola, 2021, 41(1): 56-61.
- [89] WANG Fenglei, MA Shaochun, KE Wenli, et al. Optimization of basecutter structural parameters for under-the-ground sugarcane basecutting[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2021, 37(2): 233-242.
- [90] MO Hanning, MA Shaochun, HUANG Zhimin, et al. Experimental research on effects of influence factors on the axial cutter vibration, cutting forces and the sugarcane cutting quality under complicated excitation [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2024, 16(2): 1-43.
- [91] DA C M R, HARRIS H. Cane damage and mass losses for conventional and serrated basecutter blades[C]//Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol., 2000: 84-91.
- [92] QIAN Jun, XU Yang, MA Shaochun, et al. The effect of sliding shear combined sugarcane base cutter on the cutting quality of sugarcane stubbler[J]. Food Process Eng., 2023, 46: e14451.
- [93] WANG F, DI M, ZHANG W, et al. Sugarcane cutting quality using contra-rotating basecutter[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(3): 737-747.
- [94] 刘丽敏,任萍,陈建能,等.基于作物力学特性的甘蔗收割机参数优化与田间试验[J].浙江农业学报,2023,35(5):1187-1194.
LIU Limin, REN Ping, CHEN Jianneng, et al. Parameter optimization and field experiment of sugarcane harvester based on crop mechanical properties[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2023, 35(5): 1187-1194. (in Chinese)
- [95] WANG Qingqing, ZHOU Guoan, HUANG Xin, et al. Experimental research on the effect of sugarcane stalk lifting height on the cutting breakage mechanism based on the sugarcane lifting-cutting system (SLS)[J]. Agriculture, 2022, 12(12): 2078.
- [96] 邹展曦,武涛,高泽锋,等.甘蔗收割机切割刀盘浮动控制系统的设计与试验[J].河南农业大学学报,2018,52(1): 73-79.
ZOU Zhanxi, WU Tao, GAO Zefeng, et al. Design and test of cut-off auto control system for sugarcane billet harvester[J].

- Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(1): 73–79. (in Chinese)
- [97] 黄敏, 李光林, 张信, 等. 基于线性调频连续波雷达的甘蔗茎高检测[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(2): 31–39.
HUANG Min, LI Guanglin, ZHANG Xin, et al. Detection of ridge height in sugarcane fields based on linear frequency modulation continuous wave radar[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2021, 43(2): 31–39. (in Chinese)
- [98] DING Zhengliang, MA Shaochun, WANG Fenglei, et al. Development and testing of an electro-hydraulic system for height control of sugarcane harvester basecutter[J]. Journal of the ASABE, 2022, 65(1): 1–8.
- [99] 白秋薇, 简真, 吴永峰, 等. 基于切割压力的甘蔗收割机刀盘高度自动调节装置[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 19–26.
BAI Qiwei, JIAN Zhen, WU Yongfeng, et al. Automatic height-adjustment for a cutter disk on a sugarcane harvester using cutting pressure[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(3): 19–26. (in Chinese)
- [100] 张心盎. 基于激光雷达的甘蔗收获机刀盘浮动控制系统设计与试验[D]. 广州: 华南农业大学, 2024.
ZHANG Xin'ang. Design and experiment of floating control system for cutter head of sugarcane harvester based on LiDAR [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2024. (in Chinese)
- [101] 周勇, 区颖刚, 彭康益, 等. 4GZ-56 型履带式甘蔗联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 75–78.
ZHOU Yong, OU Yinggang, PENG Kangyi, et al. Design and experiment of 4GZ-56 caterpillar sugarcane combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 75–78. (in Chinese)
- [102] 陈晓光, 武涛, 张增学, 等. 基于 EDEM 甘蔗切割器入土切割仿真试验分析[J]. 农机化研究, 2021, 43(11): 7–13.
CHEN Xiaoguang, WU Tao, ZHANG Zengxue, et al. Simulation test analysis of cutting into the soil based on EDEM sugarcane cutter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(11): 7–13. (in Chinese)
- [103] 张国强, 林茂. 小型整秆式甘蔗收割机直立铺放机构的运动学分析[J]. 机械设计与制造, 2016(7): 77–80.
ZHANG Guoqiang, LIN Mao. Kinematics analysis of erect windrowing mechanism of small whole-stalk sugarcane harvester [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(7): 77–80. (in Chinese)
- [104] 高巧明, 罗悦洋, 向浩, 等. 丘陵山地模块化甘蔗割铺机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 71–80, 90.
GAO Qiaoming, LUO Yueyang, XIANG Hao, et al. Design and test of modular sugarcane cutting and paving machine in hilly and mountainous area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Suppl. 2): 71–80, 90. (in Chinese)
- [105] 陈华金, 张增学, 黄世醒, 等. 几种中小型甘蔗收获系统的试验研究[J]. 现代农业装备, 2014(4): 18–22, 36.
CHEN Huajin, ZHANG Zengxue, HUANG Shixing, et al. Experimental study on several small and medium-sized sugarcane harvesting systems[J]. Modern Agricultural Equipment, 2014(4): 18–22, 36. (in Chinese)
- [106] 李志红, 区颖刚. 甘蔗收获机圆弧轨道式柔性夹持输送装置的功率模型[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 111–116.
LI Zhihong, OU Yinggang. Power model of arc-track-type flexible holding and conveying device of sugarcane harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 111–116. (in Chinese)
- [107] PARI L, GRASSI G, SÉNÉCHAL S, et al. State of the art: harvesting, storage and logistic of the sweet sorghum[C]//16th European Biomass Conference & Exhibition, 2008.
- [108] JIANG Jiaoli, LIU Qingting, XU Hai, et al. Analysis and design of a chopper centrally-mounted channel for sugarcane harvester[J]. arXiv Preprints, arXiv: 2023060817, 2023.
- [109] 解福祥, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 侧悬挂推倒式整秆甘蔗收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 26–29, 34.
XIE Fuxiang, OU Yinggang, LIU Qingting, et al. Design and experiment of suspension sugarcane harvester with pushed whole stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Suppl.): 26–29, 34. (in Chinese)
- [110] 牟向伟, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 弹性齿滚筒式甘蔗剥叶装置[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 60–65.
MOU Xiangwei, OU Yinggang, LIU Qingting, et al. Elastic dentation roller type sugarcane leaf-stripping device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 60–65. (in Chinese)
- [111] 徐鹏. 甘蔗整秆立式联合收获机割前剥叶装置设计与试验[D]. 广州: 华南农业大学, 2024.
XU Peng. Design and experiment of leaf stripping device for sugarcane whole stalk vertical combine before cutting [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2024. (in Chinese)
- [112] 张增学. 梳刷式甘蔗剥叶机剥叶机理的试验研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2002.
ZHANG Zengxue. Experimental study on the mechanism of sugarcane leaf peeling machine with comb brush [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2002. (in Chinese)
- [113] 牟向伟. 弹性齿对甘蔗茎秆的动态打击力与叶鞘剥离机理研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 103–109.
MOU Xiangwei. Study on dynamic hitting force of elastic dentation for sugarcane stalk and mechanism of leaf sheath stripping [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 103–109. (in Chinese)
- [114] 姚炜. 甘蔗剥叶机械化技术浅析[J]. 农机科技推广, 2007(8): 34.
- [115] 唐献全. 剥叶元件排列密度调整对采用弹簧剥叶元件的甘蔗剥叶机的影响[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(1): 183–187.
TANG Xianquan. Influence of adjustment of arrangement density of leaf stripping elements on sugarcane leaf stripping machine using spring leaf stripping elements[J]. Machine Design and Research, 2018, 34(1): 183–187. (in Chinese)
- [116] 牟向伟, 区颖刚, 吴昊, 等. 甘蔗叶鞘在弹性剥叶元件作用下破坏高速摄影分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 85–89.

- MOU Xiangwei, OU Yinggang, WU Hao, et al. Damage of sugarcane leaf sheath under action of elastic leaf-stripping elements based on high-speed photography[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 85–89. (in Chinese)
- [117] 谢卢鑫, 王俊, 程绍明, 等. 整秆式甘蔗收割机剥叶过程仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 56–65.
XIE Luxin, WANG Jun, CHENG Shaoming, et al. Simulation analysis and experiments of leaf stripping process for whole-stalk sugarcane harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(18): 56–65. (in Chinese)
- [118] 刘芳建, 杨学军, 刘赞东, 等. 我国整秆式甘蔗剥叶机械研究现状及思考[J]. 农机化研究, 2013, 35(10): 238–241.
LIU Fangjian, YANG Xuejun, LIU Yundong, et al. The current situation and deliberation of whole stalk sugarcane leaf-stripping machine in our country[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(10): 238–241. (in Chinese)
- [119] 孙宝庄. 介绍几种甘蔗收获机械[J]. 农业机械, 1979(11): 13–14, 27, 41.
- [120] 解福祥, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 基于 ADAMS 的甘蔗物流排杂装置虚拟试验研究[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(11): 109–113, 120.
XIE Fuxiang, OU Yinggang, LIU Qingting, et al. Virtual experiment on logistics removing impurity of sugarcane based on ADAMS[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2018, 37(11): 109–113, 120. (in Chinese)
- [121] 牟向伟, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 甘蔗叶鞘剥离过程弹性齿运动分析与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 122–129.
MOU Xiangwei, OU Yinggang, LIU Qingting, et al. Kinematic analysis and experiments of elastic dentations in process of sugarcane leaf sheath stripping[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 122–129. (in Chinese)
- [122] 唐献全. 剥叶滚筒之间垂直距离的调整对甘蔗剥叶机的影响[J]. 机械研究与应用, 2018, 31(2): 6–8.
TANG Xianquan. Effects of adjusting the vertical distance between peeling rollers on the sugarcane husking machine[J]. Mechanical Research & Application, 2018, 31(2): 6–8. (in Chinese)
- [123] MENG Yanmei, CHEN Yuanling, LI Shangping, et al. Research on the orthogonal experiment of numeric simulation of macromolecule-cleaning element for sugarcane harvester[J]. Materials and Design, 2009, 30: 2250–2258.
- [124] LI S P, MENG Y M, MA F L, et al. Research on the working mechanism and virtual design for a brush shape cleaning element of a sugarcane harvester[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129: 418–422.
- [125] 解福祥, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 甘蔗收获机排杂风机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊1): 8–14.
XIE Fuxiang, OU Yinggang, LIU Qingting, et al. Design and experiment of impurity discharging fan of sugarcane harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Sup. 1): 8–14. (in Chinese)
- [126] 常浩涛, 梁宇达, 黄峥, 等. 推倒喂入式甘蔗收割机中间输送均匀性试验研究[J]. 现代农业装备, 2014(5): 37–40.
CHANG Haotao, LIANG Yuda, HUANG Zheng, et al. Experimental study on intermediate conveying uniformity of push-feed sugarcane harvester[J]. Modern Agricultural Equipment, 2014(5): 37–40. (in Chinese)
- [127] 杨明东. 甘蔗分步式机收除杂模式的可行性与经济效益探究[J]. 农业灾害研究, 2024, 14(3): 52–54.
YANG Mingdong. Study on feasibility and economic benefit of sugarcane step by step machine to collect and remove impurity[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2024, 14(3): 52–54. (in Chinese)
- [128] 袁成宇, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 切段甘蔗混合物的悬浮特性[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(3): 166–168.
YUAN Chengyu, OU Yinggang, LIU Qingting, et al. Suspension characteristics of segment sugarcane mixture[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(3): 166–168. (in Chinese)
- [129] 温翔. 切段式甘蔗收割机排杂装置仿真研究及优化设计[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
WEN Xiang. Simulation research and optimization design of the waste disposal device of segment-type sugarcane harvester[D]. Nanning: Guangxi University, 2020. (in Chinese)
- [130] 邢浩男, 马少春, 王凤磊, 等. 切段式甘蔗收割机排杂风机结构优化与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 67–75.
XING Haonan, MA Shaochun, WANG Fenglei, et al. Structure optimization and experiment of sugarcane chopper harvester extractor[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 67–75. (in Chinese)
- [131] XING Haonan, MA Shaochun, LI Weiqing, et al. Improving the performance of a sugarcane harvester extractor using design changes validated by computational fluid dynamic modelling and experiment[J]. Biosystems Engineering, 2022, 218: 124–138.
- [132] PELLOSO M F, PELLOSO B F, DE LIM A A, et al. Influence of harvester and rotation of the primary extractor speed in the agroindustrial performance of sugarcane[J]. Sugar Tech., 2021, 23(3): 692–696.
- [133] 周金伟, 刘庆庭, 武涛, 等. 甘蔗收割机配对刀片相对位置对切口的影响[J]. 农机化研究, 2018, 40(8): 111–117.
ZHOU Jinwei, LIU Qingting, WU Tao, et al. The influence of the relative position between paired blades on the cutting quality of sugarcane harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(8): 111–117. (in Chinese)
- [134] ZHOU Baocheng, MA Shaochun, LI Wenzhi, et al. Study on sugarcane chopping and damage mechanism during harvesting of sugarcane chopper harvester[J]. Biosystems Engineering, 2024, 243: 1–12.
- [135] XIE Luxin, WANG Jun, CHENG Shaoming, et al. Performance evaluation of a chopper system for sugarcane harvester[J]. Sugar Tech., 2019, 21(5): 825–837.
- [136] BARNES M G, LOUGHRAN J G, WHITEING C, et al. Development and testing of a sugarcane harvester single drum

- chopper system[J]. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol., 2009, 31: 546–555.
- [137] XU Hai, WU Tao, LIU Qingting, et al. Investigation of the trajectory of expelled billets from the chopping rollers of a sugarcane harvester[J]. Sugar Tech., 2020, 22(5): 896–910.
- [138] 阳康春, 梁如, 陈桂兰, 等. 甘蔗砍装工艺改革的探讨[J]. 中国糖料, 2013, 35(2): 74–79.
YANG Kangchun, LIANG Ru, CHEN Guilan, et al. Discussion on the reform of sugarcane cutting and packing technology [J]. Sugar Crops of China, 2013, 35(2): 74–79. (in Chinese)
- [139] 何霖, 黄峥, 黄世醒, 等. 整秆式甘蔗收割机集堆装置重力自卸机构设计与仿真[J]. 农机化研究, 2016, 38(5): 32–35, 42.
HE Lin, HUANG Zheng, HUANG Shixing, et al. The gravity dump mechanism design and simulation for the whole stalk sugarcane harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(5): 32–35, 42. (in Chinese)
- [140] 刘先杰. 小型甘蔗联合收割机流程虚拟仿真分析及集蔗机构的改进[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
LIU Xianjie. Process virtual simulation analysis of small sugarcane combine harvester and improvement of sugarcane collecting mechanism[D]. Nanning: Guangxi University, 2006. (in Chinese)
- [141] 陈连飞, 梁宇达, 邹小平, 等. 连续回转式甘蔗收割机集堆机构设计与试验[J]. 现代农业装备, 2014(3): 30–35.
CHEN Lianfei, LIANG Yuda, ZOU Xiaoping, et al. Design and test of continuous-rotary stalk collector on sugarcane harvester[J]. Modern Agricultural Equipment, 2014(3): 30–35. (in Chinese)
- [142] 夏腾飞. 甘蔗整秆立式集堆打捆装置的研制与试验研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2023.
XIA Tengfei. Development and experimental study of vertical bundling device for whole cane stalks[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [143] 李锦新, 武涛, 刘庆庭, 等. 履带式甘蔗收割机坡道行驶稳定性分析与仿真[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(6): 127–134, 154.
LI Jinxin, WU Tao, LIU Qingting, et al. Running stability analysis and simulation of tracktype sugarcane harvester on slopes [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(6): 127–134, 154. (in Chinese)
- [144] 马道锋. 切段式甘蔗收割机输送臂改进设计与仿真研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
Ma Daofeng. Research on improved design and simulation of conveyor arm of sugarcane cutting harvester[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [145] 赵峯. 某型号切断式甘蔗联合收割机刮板输送臂的轻量化设计[D]. 柳州: 广西科技大学, 2019.
ZHAO Feng. Lightweight design of scraper conveying arm of a type of cut sugarcane combine harvester[D]. Liuzhou: Guangxi University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [146] 武涛, 吴合槟, 刘庆庭, 等. 基于 EDEM 的甘蔗田间运输车输送装置性能研究[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(7): 107–114.
WU Tao, WU Hebin, LIU Qingting, et al. Study on the delivery device performance of sugarcane filed transporter based on EDEM[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(7): 107–114. (in Chinese)
- [147] 刘峰春, 刘庆庭, 邹小平, 等. 切段式甘蔗收割机折叠式输送臂的机构分析及田间试验[J]. 甘蔗糖业, 2015, 44(3): 50–58.
LIU Haochun, LIU Qingting, ZOU Xiaoping, et al. Mechanism analysis and field experiment of folding conveyer arm of segment sugarcane harvester[J]. Sugarcane and Canesugar, 2015, 44(3): 50–58. (in Chinese)
- [148] 澳大利亚甘蔗机械化[J]. 甘蔗糖业, 1974, 3(5): 60–62.
- [149] MICHAEL E S, LONNIE P C. Estimated costs of soldier and combine sugarcane harvesting systems in Louisiana[Z]. 1906–08.
- [150] 轻工业部甘蔗糖业研究所夏威夷糖业考察组. 夏威夷甘蔗糖业考察报告[J]. 甘蔗糖业, 1983, 12(3): 29–69.
Sugar Industry Research Institute. Hawaii sugarcane sugar industry investigation report[J]. Sugarcane and Canesugar, 1983, 12(3): 29–69. (in Chinese)
- [151] CASEIH. Austoft cane harvesters[EB/OL]. <https://www.caseih.com/en-us/unitedstates>.
- [152] John Deere. Sugar cane harvesting[EB/OL]. <https://www.deere.com/en/search/?term=Sugar+Cane+Harvester>.
- [153] 广西农业机械研究院院志(1956—2006)[R]. 南宁: 广西农业机械研究院, 2006.