

4GDZ-132 型切段式甘蔗联合收割机研制

武 涛, 任甲辉, 刘庆庭*, 邹小平, 张增学, 周绍鹏, 冯加模, 何 霖

(华南农业大学工程学院, 南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘 要: 针对现有切段式甘蔗联合收割机输送通道易堵塞、含杂率与损失率高等问题, 该研究设计了一种切段刀辊中置式两级通道甘蔗联合收割机。该机采用短路径整秆输送通道和刮板筛网式蔗段输送通道, 采用中置+后置风机组成的双风机除杂系统, 实现甘蔗根切、喂入、输送、切段、风选除杂和卸料等联合作业。通过计算确定了整秆输送通道安装角度与宽度、喂入与输送辊筒直径、切段刀辊外圆直径、蔗段输送通道刮板高度、风机位置等关键结构参数, 以及喂入与输送辊筒转速、切段刀辊转速、除杂风机转速等关键作业参数, 并研制了 4GDZ-132 型切段式甘蔗联合收割机样机。样机田间试验结果表明: 在作业速度 2 km/h、风机转速 1 100 r/min 时, 含杂率为 4.42%、总损失率为 3.08%、蔗段合格率为 92.10%、切割高度合格率为 96.20%、宿根破头率为 9.60%, 整机作业性能指标满足切段式甘蔗联合收割机技术标准要求。

关键词: 农业机械; 收获; 甘蔗收割机; 切段式; 输送通道; 除杂系统; 双风机

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.004

中图分类号: S225.5⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-10-0030-09

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.004 <http://www.tcsae.org>

Wu Tao, Ren Jiahui, Liu Qingting, et al. Development of the 4GDZ-132 sugarcane chopper combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 30-38. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.10.004 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

甘蔗是重要的糖料作物, 但国内甘蔗生产机械化水平低, 收获以人工砍收为主, 2019—2020 年榨季, 国内甘蔗机收率为 3.28%^[1-3]。甘蔗收割机有整秆式和切段式两种, 切段式甘蔗收割机作业效率高、对倒伏甘蔗适应性好, 是主流机型^[4-5]。受台风影响, 广东、广西蔗区的甘蔗往往倒伏较严重。市场现有机型在倒伏较严重蔗田作业时存在输送甘蔗易折断, 进而造成通道易堵塞、含杂率和损失率高等问题。

国内外主流切段式甘蔗收割机输送通道结构根据切段刀辊与输送通道的位置分为切段刀辊前置式和后置式^[6-7]。切段刀辊前置式输送通道的切段刀辊位于根切器与蔗段输送通道之间, 除杂风机位于蔗段输送通道之后。该类通道对倒伏弯曲甘蔗适应性好, 不易堵塞, 但刀片入土切割时容易将泥土带入蔗段输送通道, 蔗段也容易被切段刀辊带回造成田间损失。切段刀辊后置式输送通道的切段刀辊位于整秆输送通道的末端, 除杂风机位于切段刀辊之后, 目前市场在用的切段式甘蔗收割机主要为该类型通道。该类型通道的根切器与切段刀辊之

间布置有多对辊筒, 蔗秆在通道内通过的路径较长, 当甘蔗弯曲严重时在通道内易被折断并造成通道堵塞。

国内切段式甘蔗收割机主要沿用国外成熟通道结构, 或在其基础上进行改进。近年来, 国内研究人员在甘蔗收割机通道结构创新与优化方面进行了一些尝试: 李尚平等^[8]对小型甘蔗收割机喂入系统齿轮箱结构进行优化, 解决了切割器处易堵塞的问题; 沈中华等^[9]设计了一种新型甘蔗收割机喂入分流系统。上述研究聚焦在局部结构及作业参数的优化, 仍无法解决通道堵塞问题。刘芳建等^[6]对切段刀辊前置式甘蔗收割机作业机理进行研究, 并研制了一种切段刀辊前置式甘蔗收割机, 解决了输送通道易堵塞的问题, 但蔗秆在无夹持情况下切段容易造成蔗段长短差距大、断面破裂。

综上, 本文采用短路径整秆输送通道和刮板筛网式蔗段输送通道, 采用中置+后置风机组成的双风机除杂系统设计方案, 实现甘蔗根切、喂入、输送、切段、风选除杂和卸料等联合作业。计算确定关键部件的结构与运行参数, 研制 4GDZ-132 型切段式甘蔗联合收割机, 并进行田间作业性能试验。

1 物流通道方案设计

本研究团队提出了一种切段刀辊中置式两级输送通道技术^[10], 前期试验发现整秆输送通道抛送甘蔗物料的散开程度较好, 在此处设置风机有利于除杂。基于此, 本文将切段刀辊中置式两级输送通道与双风机除杂系统结合, 如图 1 所示。切段刀辊位于整秆输送通道与蔗段输送通道之间, 根切器和切段刀辊之间布置 1 对喂入辊

收稿日期: 2021-11-01 修订日期: 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175227); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2022A1515010680); 国家糖料产业技术体系项目(CARS-170402)

作者简介: 武涛, 博士, 副教授, 研究方向为甘蔗生产机械化技术。

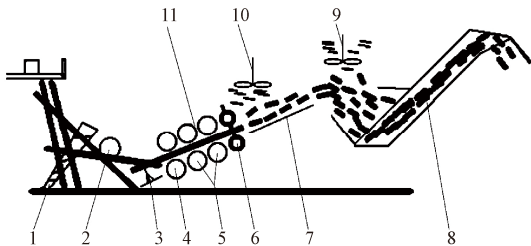
Email: wt55pub@scau.edu.cn

*通信作者: 刘庆庭, 博士, 教授, 研究方向为甘蔗生产机械化技术。

Email: qingting@scau.edu.cn

筒与 2 对输送辊筒，在整秆输送通道末端上方设置中置除杂风机，在蔗段输送通道末端上方设置后置除杂风机。收获时，蔗秆在喂入辊筒的夹持下进入输送通道，经过整秆输送通道后被切成蔗段，并抛向中置风机进行初次除杂，蔗段再经由蔗段输送通道抛向后置风机进行二次除杂。

该方案中，整秆输送通道较短，经有夹持的短路径输送切段，可防止倒伏弯曲甘蔗在输送通道内堵塞，有利于排出杂土；蔗段输送通道采用刮板筛网结构，可避免输送通道堵塞，提高泥土去除效果；中置+后置风机组成的双风机除杂系统，可降低含杂率，提高除杂效率；中置风机位于整秆输送通道与蔗段输送通道衔接处的上方，降低和前移了收割机重心。



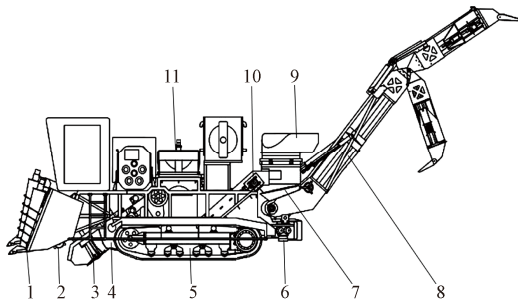
1. 分行者 2. 推倒辊筒 3. 根切器 4. 喂入辊筒 5. 输送辊筒 6. 切段刀辊 7. 蔗段输送通道 8. 输送臂 9. 后置除杂风机 10. 中置除杂风机 11. 整秆输送通道

1.Divider 2.Knockdown roller 3.Base cutter 4.Feeding roller 5.Conveying roller 6.Chopper drum 7.Billet delivery channel 8.Elevator 9.Rear extractor fan 10.Middle extractor fan 11.Whole stalk delivery channel

图 1 切段刀辊中置式两级输送通道与双风机除杂系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of chopper drum centrally-mounted of two-stage delivery channel and double extractor system

2 整机结构与工作原理

基于上述结构方案研制 4GDZ-132 型切段式甘蔗联合收割机，如图 2 所示。该机主要由分行者、推倒辊筒、根切器、整秆输送通道、中置除杂风机、蔗段输送通道、后置除杂风机和输送臂等组成，主要技术参数如表 1 所示。



1. 分行者 2. 推倒辊筒 3. 根切器 4. 整秆输送通道 5. 履带轮 6. 旋转平台 7. 接蔗斗 8. 输送臂 9. 后置除杂风机 10. 蔗段输送通道 11. 中置除杂风机
1.Divider 2.Knockdown roller 3.Base cutter 4.Whole stalk delivery channel 5.Track wheel 6.Rotary platform 7.Sugarcane receiving hopper 8.Elevator 9.Rear extractor fan 10.Billet delivery channel 11.Middle extractor fan

图 2 4GDZ-132 型切段式甘蔗联合收割机结构示意图
Fig.2 Structure diagram of 4GDZ-132 type sugarcane chopper harvester

工作时，分行者相向转动，将蔗秆向收割机前进方向的中部聚集，推倒辊筒将蔗秆向前推倒，根切器将蔗秆从根部

切断，同时将切断后的蔗秆向整秆输送通道输送，整秆输送通道的喂入辊筒将蔗秆向收割机后上方输送，切段刀辊将整秆甘蔗切成小段并抛入中置风机的负压风场进行初次除杂，除杂后的甘蔗物料落到蔗段输送通道，通过刮板输送并抛入后置风机的负压风场进行二次除杂，经二次除杂后的蔗段落到输送臂上，提升输送至田间运输车。

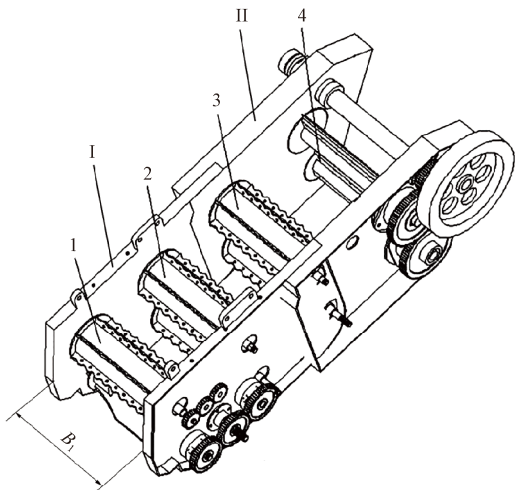
表 1 4GDZ-132 型切段式甘蔗联合收割机主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of 4GDZ-132 sugarcane chopper harvester

| 参数 Parameters | 数值 Values |
|--|--------------------|
| 结构形式 Structural form | 履带切段式 |
| 额定功率 Rated power/kW | 132 |
| 整机质量 Total mass/kg | 8 400 |
| 整机尺寸（长×宽×高） Overall dimensions (length×width×height)/ (mm×mm×mm) | 11 920×2 250×5 460 |
| 履带轮（长×宽×高） Track wheel (length×width×height)/(mm×mm×mm) | 3 458×775×320 |
| 适应行距 Adapted row space/mm | ≥1 200 |
| 适应垄高 Adapted ridge height/mm | 100~180 |
| 作业行数 Number of working rows | 1 |
| 作业速度 Working speed/(km·h ⁻¹) | ≤3 |
| 生产率 Production efficiency/(kg·h ⁻¹) | ≥2×10 ⁴ |

3 关键部件设计

3.1 整秆输送通道

本文设计的短路径整秆输送通道，如图 3 所示。该通道采用分段式布局，由活动段和固定段组成，活动段前端与根切器固定连接，主要由喂入辊筒和输送辊筒 1 组成；固定段后端与中置风机固定连接，主要由输送辊筒 2 和切段刀辊组成。活动段可根据田间地形的变化随根切器自由浮动；固定段与中置风机相对位置固定，可保障蔗段抛向风机时有固定的抛送轨迹范围。



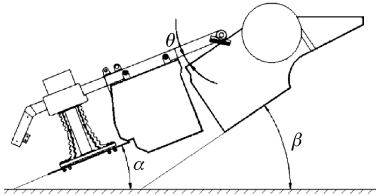
I. 活动段 II. 固定段 1. 喂入辊筒 2. 输送辊筒 3. 输送辊筒 2 4. 切段刀辊
I.Movable section II.Fixed section 1.Feeding roller 2.Conveying roller 1
3.Conveying roller 2 4.Chopper drum
注：B₁ 为整秆输送通道宽度，mm。
Note: B₁ is the width of the whole stalk delivery channel, mm.

图 3 整秆输送通道结构示意图
Fig.3 Structure diagram of whole stalk delivery channel

3.1.1 整秆输送通道安装角度确定

整秆输送通道活动段与地面夹角为 α ，活动段与固

定段夹角为 θ , 固定段安装角度为 β , 如图 4 所示。 θ 过大易导致蔗秆在折弯处折断堵塞, 应小于 30° [11], α 在 $10^\circ \sim 15^\circ$ 为宜 [12], $\beta = \alpha + \theta$, 则 β 取值范围为 $10^\circ \sim 45^\circ$ 。固定段安装角度决定了物料的抛散程度和抛送轨迹, 对中置风机除杂效果有重要影响。前期试验表明, 蔗段抛送角度为 34° 时能均匀散开, 呈现较好的斜抛运动轨迹 [13], 因此固定段安装角度 β 取 34° 。



注: α 为活动段与地面的夹角, ($^\circ$); θ 为活动段与固定段夹角, ($^\circ$); β 为固定段安装角度, ($^\circ$)。
Note: α is the included angle between the movable section and the ground, ($^\circ$); θ is the included angle between the movable section and the fixed section, ($^\circ$); β is install angle for the fixed section, ($^\circ$).

图 4 整秆输送通道安装示意图

Fig.4 Installation diagram of whole stalk delivery channel

3.1.2 整秆输送通道宽度确定

假设甘蔗进入通道后沿通道宽度方向均匀排列, 为使多株甘蔗同时通过输送通道而不堵塞, 则 B_1 应满足:

$$B_1 > nD_z \quad (1)$$

式中 n 为输送通道宽度方向可容纳甘蔗的数量; D_z 为甘蔗平均直径, mm。

以广东湛江甘蔗试验田为例, 甘蔗种植密度为 11 根/m, 每根甘蔗平均直径 $D_z = 30$ mm, 平均长度 $L_z = 2\,500$ mm, 平均质量 $m_z = 1.09$ kg。该机整秆输送通道长度设计为 1 200 mm, 按照样机正常作业速度 $V = 2.0$ km/h (0.56 m/s), 可得样机行驶 1 200 mm 收获 13 根甘蔗, 故通道宽度应满足 13 根甘蔗并排通过, 考虑到甘蔗种植密度的变化, 取极限情况为 $n = 15$ [14]。

相关数据代入式 (1) 可得 $B_1 > 450$ mm, 考虑整机尺寸限制, 通道宽度设计为 500 mm。

3.1.3 喂入辊筒与输送辊筒

喂入辊筒与输送辊筒结构相同, 主要由辊筒轴、辊筒架和辊筒拨齿组成。输送辊筒包括上下辊, 每个辊筒上均匀分布 6 个拨齿, 上辊筒拨齿的峰与下辊筒拨齿的槽之间的最小距离 L_{min} 与蔗茎平均直径相同, 如图 5 所示。

为保证辊筒输送甘蔗时不会被蔗叶缠绕, 辊筒周长应不小于 1.5 倍蔗叶长度 [12], 因此, 蔗叶不缠绕辊筒的条件为

$$C \leq 2\pi R_1 \quad (2)$$

式中 C 为蔗叶平均长度, mm, 试验测得 $C = 1\,000$ mm; R_1 为辊筒半径, mm。

由式 (2) 可得 $R_1 \geq 106$ mm, 考虑到辊筒质量和整机尺寸, 设计辊筒直径 $d_1 = 230$ mm。

为避免通道发生堵塞, 辊筒转速需与喂入率相匹配。假设甘蔗在通道内均铺开, 不发生重叠打滑, 此时甘蔗的输送速度应等于辊筒顶端的线速度。实际输送过程中甘蔗间、甘蔗与辊筒间存在碰撞打滑等速度损失, 前期

试验测得甘蔗的实际输送速度约为 0.5~0.6 倍辊筒顶端的线速度, 即

$$V_z = (0.5 \sim 0.6) V_1 \quad (3)$$

式中 V_z 为甘蔗实际输送速度, m/s; V_1 为辊筒顶端的线速度, m/s。

辊筒顶端的线速度由辊筒转速和半径确定, 即

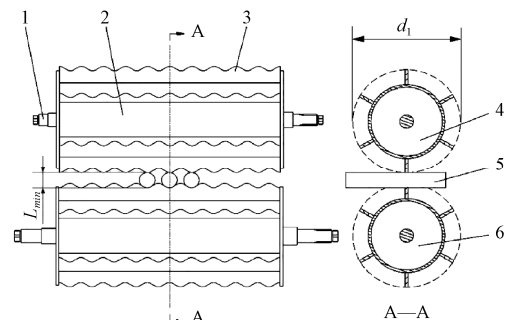
$$V_1 = \frac{\pi d_1 n_1}{60} \quad (4)$$

式中 n_1 为辊筒的转速, r/min。

由式 (3)~(4) 可得:

$$n_1 = \frac{60 V_z}{(0.5 \sim 0.6) \pi d_1} \quad (5)$$

由 3.1.2 节可知, 输送通道横向最多能容纳 15 根甘蔗。前期试验测得连续作业情况下通道实际输送甘蔗的量一般为极限容量的 0.5~0.6 倍, 即 7~9 根。机具设计喂入量为 6 根/s, 则喂入 7~9 根甘蔗大约需要 1.3 s。喂入甘蔗需由输送辊筒在 1.3 s 内完成输送, 试验测得甘蔗长度 $L_z = 1\,800 \sim 3\,200$ mm, 则甘蔗的实际输送速度 $V_z = L_z / 1.3 = 1.38 \sim 2.46$ m/s。由公式 (5) 计算可得辊筒转速 $n_1 = 191 \sim 410$ r/min, 根据前期试验, 设计正常作业状态下辊筒转速 $n_1 = 380$ r/min。



1. 辊筒轴 2. 辊筒架 3. 辊筒拨齿 4. 上辊筒 5. 甘蔗 6. 下辊筒
1. Roller shaft 2. Roller frame 3. Roller sawtooth 4. Upper roller 5. Sugarcane 6. Lower roller

注: L_{min} 为上辊筒拨齿的峰与下辊筒拨齿的槽之间的最小距离, mm; d_1 为辊筒直径, mm。

Note: L_{min} is the minimum distance between the ridge of the upper roller sawtooth and the groove of the lower roller sawtooth, mm; d_1 is the roller diameter, mm.

图 5 输送辊筒结构示意图

Fig.5 Structural diagram of conveying roller

3.1.4 切段装置

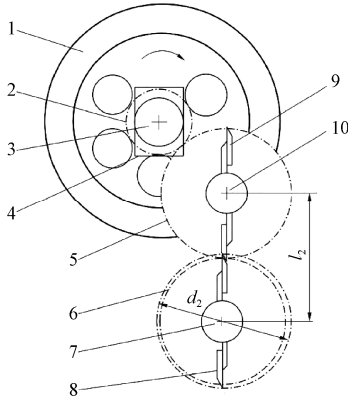
切段装置由上下切段刀辊、切段刀、惯性轮及液压马达等组成, 如图 6 所示。

切段刀辊的作用是将蔗秆切成一定长度的蔗段, 并将蔗段抛送至除杂风机。上下切段刀辊上均匀布置 2 组切段刀片。参考前期设计经验 [14-15], 采用刀刃间隙配对形式安装, 安装间隙为 2.0 mm, 上下刀辊中心距 $l_2 = 216$ mm, 刀辊外圆直径 $d_2 = 233$ mm。

蔗秆在输送辊筒夹持下进行切段, 甘蔗的切段长度主要由输送辊筒和切段刀辊的结构和工作参数决定, 计算公式 [11] 为

$$l_z = \frac{\pi d_1 n_1}{z n_2 k} \quad (6)$$

式中 l_z 为蔗段长度, mm; z 为切段刀辊周向切段刀的排数, $z=2$; n_2 为切段刀辊转速, r/min; k 为直径修正系数, 一般取 $k=1.1\sim 1.2$ ^[12]。



1. 惯性轮 2. 输入轴齿轮 3. 动力输入轴 4. 液压马达 5. 上刀辊齿轮 6. 下刀辊齿轮 7. 下切段刀辊 8. 下切段刀 9. 上切段刀 10. 上切段刀辊
1. Inertia wheel 2. Input shaft gear 3. Power input shaft 4. Hydraulic motor 5. Upper cutter roller gear 6. Lower cutter roller gear 7. Lower chopper drum 8. Lower chopper blade 9. Upper chopper blade 10. Upper chopper drum
注: l_2 为上下刀辊中心距, mm; d_2 为刀辊的外圆直径, mm。
Note: l_2 is the center distance between the upper and lower chopper drum, mm; d_2 is the outside diameter of chopper drum, mm。

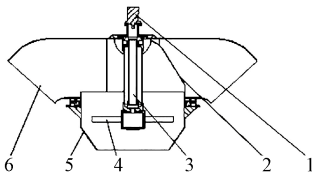
图 6 切段装置结构示意图

Fig.6 Structural diagram of chopper device

蔗秆切段长度过长, 未剥净的蔗叶长度也会增长, 导致含杂率上升; 蔗秆切段长度过短, 切段刀口数量变多, 蔗糖损失增大。根据作业技术要求, 蔗段长度 l_z 取 250~400 mm 为宜, 由式(6)得出切段刀辊转速 $n_2=286\sim 499$ r/min。机器正常作业速度下, 蔗秆切段长度为 300 mm, 则切段刀辊转速 $n_2=374$ r/min。

3.2 中置风机

中置风机由风机外壳、扇叶、选风罩、负压组件等组成(图 7)。中置除杂风机为双向出风口, 通过旋转风向调节罩选择出风口, 以满足整机不同方向作业下的出风口方向切换。风机扇叶为外购件。



1. 液压马达 2. 风向调节罩 3. 转轴 4. 扇叶 5. 负压组件 6. 风机外壳
1. Hydraulic motor 2. Wind direction adjusting hood 3. Rotary axis 4. Fan blade 5. Negative pressure components 6. Fan housing

图 7 中置除杂风机结构示意图

Fig.7 Structure diagram of middle-mounted extractor fan

3.2.1 中置风机转速

为保证蔗段中的杂质被吹出风机外, 中置风机的风速应高于蔗叶、蔗梢的悬浮速度, 并低于蔗段的悬浮速度, 即

$$V_2 < V_3 < V_4 \quad (7)$$

式中 V_2 为杂质的悬浮速度, m/s, 取 9.5 m/s^[16]; V_3 为中置风机进风口的平均风速, m/s; V_4 为蔗段的悬浮速度, m/s, 取 14~27 m/s^[17]。

由式(7)计算得出

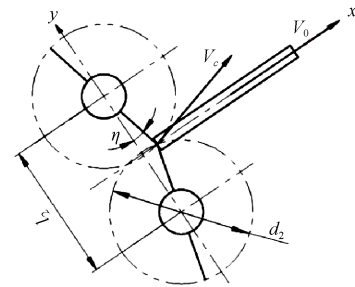
$$9.5 < V_3 < 14 \quad (8)$$

试验测得风机转速为 950~1 250 r/min 时风机进风口平均风速为 9.5~14 m/s。正常收获速度下, 风机转速设为 1 100 r/min, 此时风机进风口平均风速为 11 m/s, 由此设置风机工作转速范围为 950~1 250 r/min。

3.2.2 中置风机位置确定

切段刀辊位于整秆输送通道末端, 蔗段以一定轨迹抛入中置风机。蔗段的抛送轨迹以及风机的工作参数与安装位置直接影响除杂效果。对抛入风机的蔗段运动状态进行分析, 以确定切段刀辊与中置风机的相对位置。

以上下切段刀辊中心连线为 y 轴, 通过上下切段刀辊中心垂直于 y 轴为 x 轴, 甘蔗喂入方向为 x 轴正方向, 建立空间笛卡尔坐标系, 如图 8 所示。



注: η 为切段刀与竖直方向的夹角, ($^\circ$); V_0 为蔗段抛送的初始速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; V_c 为切段刀的线速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。
Note: η is the included angle between the chopper blade and the vertical direction, ($^\circ$); V_0 is the initial throwing speed of the billet, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; V_c is the linear speed of the chopper blade, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

图 8 蔗段脱离切段刀辊的运动和速度示意图

Fig.8 Schematic diagram of the motion and speed of the billets fly away from the chopper drum

假设蔗段脱离切段刀辊的瞬时运动方向与通道一致, 则蔗段的抛送角度等于固定段安装 34° , 蔗段初始速度 V_0 为

$$\begin{cases} V_0 = V_c \cos \eta \\ V_c = \frac{n_2 \pi d_2}{60} \\ d_2 = \frac{l_2}{\cos \eta} \end{cases} \quad (9)$$

化简得

$$V_0 = \frac{n_2 l_2 \pi}{60} \quad (10)$$

代入相关参数得蔗段初始速度 $V_0=4.3$ m/s。

忽略蔗段自身旋转和蔗段间的碰撞, 抛出后的蔗段只受自身重力和空气阻力作用, 则蔗段脱离切段刀辊后做类斜抛运动。空气阻力与相对速度的平方成正比, 气流对蔗段的作用力为^[18]

$$P = 0.5 C_{\rho_1} A V_r^2 \quad (11)$$

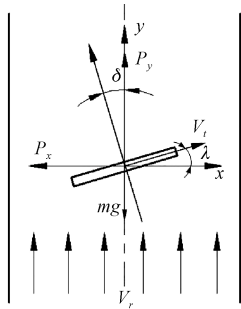
式中 P 为蔗段所受的气流阻力, N; A 为蔗段的迎风投影面积, 试验测得 $A \approx 9 \times 10^{-3} \text{ m}^2$; ρ_1 为空气密度,

$\rho_1=1.2 \text{ kg/m}^3$ ^[19]; V_r 为蔗段与气流的相对速度, 由于蔗段上抛的竖直分速度为 $0\sim 3.4 \text{ m/s}$ (蔗段初速度 $V_0=4.3 \text{ m/s}$, 抛送角度为 34°), 风机进风口气流上升的平均速度为 11 m/s , 因此 $V_r=8.6\sim 11.0 \text{ m/s}$, 本文取 10 m/s ; C 为阻力系数。

气流对蔗段的阻力 P 与气流相对速度 V_r 方向不一致时, 可以将其分解为与 V_r 方向相同的升力 P_y 和与 V_r 方向垂直的气动力 (或阻力) P_x , 气流作用力简图如图 9 所示。气流阻力 P 的计算公式为

$$\begin{cases} P_y = 0.5C_y\rho_1A_1V_r^2 \\ P_x = 0.5C_x\rho_1A_2V_r^2 \\ A_1 = \int_0^{34^\circ} A\cos\delta d\delta \\ A_2 = \int_0^{34^\circ} A\sin\delta d\delta \end{cases} \quad (12)$$

式中 C_y 为升力系数, 取 0.45 ^[17]; C_x 为气动力系数; A_1 为蔗段在气流相对速度方向上的迎风投影面积, m^2 ; A_2 为蔗段在垂直气流相对速度方向上的迎风投影面积, m^2 。



注: P_x 为气动力 (或阻力), N; P_y 为升力, N; V_r 为蔗段与气流的相对速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; δ 为 V_r 与蔗段垂直方向间的夹角, $(^\circ)$; V_t 为 t 时刻蔗段在气流场的速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; λ 为 V_t 与 x 轴的夹角, $(^\circ)$; m 为蔗段质量, g; g 为重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

Note: P_x is aerodynamic force (or resistance), N; P_y is lifting force, N; V_r is the relative velocity between billet and air flow, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; δ is the included angle between V_r and the perpendicular to billet direction, $(^\circ)$; V_t is the velocity of billet in the airflow field at time t , $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; λ is the included angle between V_t and x axis, $(^\circ)$; m is the mass of billet, g; g is the acceleration of gravity, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

图 9 蔗段在气流作用下的受力简图

Fig.9 Stress diagram of billet under the action of air flow

当 δ 取 0° 时, P_y 值最大, 气流作用力 P 等于 P_y ; 当 δ 取 90° 时, P_y 值最小, 空气升力 P_y 等于 0。蔗段在中置风机的气流场中上升到最大高度时, δ 取 0° ; 蔗段从脱离切段刀辊到上升至最大高度时, δ 值为 $0\sim 34^\circ$ 。假设蔗段在抛送过程中不产生旋转, 气流速度的大小和方向保持不变, 将 A 、 C_y 、 ρ_1 、 V_r 的值代入式 (12), 计算得 $P_y=0.136 \text{ N}$ 。

根据运动学公式和牛顿第二定律有

$$\begin{cases} L_{x1} = tV_0 \cos \lambda \\ L_{y1} = tV_0 \sin \lambda - 0.5a_y t^2 \\ ma_y = P_y - mg \\ 0 = V_0 \sin \lambda - a_y t \end{cases} \quad (13)$$

式中 L_{x1} 为蔗段上升到最高点时在 x 方向上运动的距离,

mm; L_{y1} 为蔗段上升到最高点时在 y 方向上运动的距离, mm; a_y 为 y 轴方向加速度, m/s^2 。

将相关数据代入公式 (13) 中, 得到蔗段可上升的最大高度约为 337 mm , 此时在 x 方向位移为 $1\,000 \text{ mm}$ 。从整机的空间布局考虑, 切段刀辊中心线与中置风机中心线在 x 轴方向的距离最大为 740 mm , 此时, 蔗段上升高度约为 314 mm 。考虑到多层甘蔗在被切段瞬间部分上抛和蔗段撞到中置风机内壁后反弹的现象, 因此, 设计中置风机中心线与切段刀辊中心线在水平方向的距离 $L_{x1}=624 \text{ mm}$, 中置风机扇叶下平面到切段刀辊中心在竖直方向的距离 $L_{y1}=716 \text{ mm}$ 。

3.3 蔗段输送通道

蔗段输送通道主要由液压马达、链轮、刮板和筛网等组成, 如图 10 所示。其主要作用是将一次除杂后的甘蔗物料输送至通道末端, 并抛向后置风机的负压区进行二次除杂。在输送过程中, 刮板推着物料在筛网上运动, 泥土、碎叶等部分杂质通过筛网中的筛孔排出, 也达到一定除杂效果。

甘蔗物料经过一次除杂后散乱下落, 因此蔗段输送通道内壁间的距离不宜过小, 根据整机正常工作时的喂入量 (6.54 kg/s)、蔗段几何尺寸 (长 $L=300 \text{ mm}$, 直径 $\Phi=30 \text{ mm}$) 和整秆输送通道宽度 (500 mm), 结合前期样机设计经验, 设计蔗段输送通道内壁间的距离 $B_2=425 \text{ mm}$, 相邻刮板之间的距离 $l_3=550 \text{ mm}$ 。刮板高度影响蔗段输送效率。单位时间送到刮板上的甘蔗物料总量 W_g 为

$$W_g = \mu w \quad (14)$$

式中 μ 为一次除杂杂质去除系数, 试验测得 $\mu=0.75\sim 0.85$, 本文取 0.8 ; w 为机器正常工作下的喂入量, $w=6.54 \text{ kg/s}$ 。

则刮板的高度^[18]为

$$h = \sqrt{\frac{W_g}{0.5 \times 0.5 \times B_2 N \gamma g \cot \sigma}} \quad (15)$$

式中 h 为刮板高度, mm; γ 为甘蔗物料容重, N/m^3 , 试验测得 $\gamma=5.77 \text{ N/m}^3$; N 为输送链上的刮板数, $N=12$; σ 为蔗段输送通道的安装倾斜角, $\sigma=50^\circ$ 。

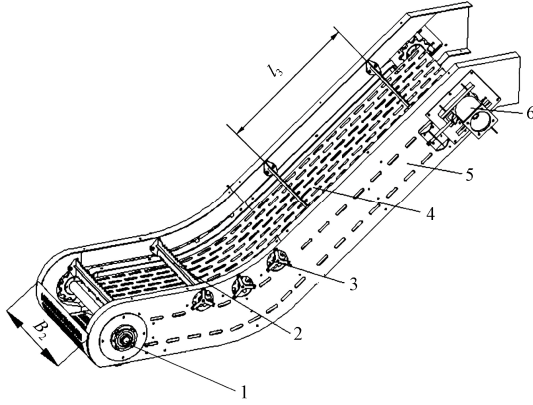
代入相关数据, 计算得 $h=120 \text{ mm}$ 。

为了快速输送下落甘蔗, 减少蔗段堆积对二次除杂的影响, 参考团队前期研究, 刮板输送速度应大于 2.17 m/s ^[16], 考虑蔗段的抛送范围, 设计链轮直径为 180 mm , 链轮转速为 480 r/min , 则刮板的直线速度为 4.52 m/s 。

3.4 后置风机转速与位置确定

后置除杂风机由风机外壳、扇叶和负压组件等组成, 安装在蔗段输送通道末端, 通过蔗段输送通道将蔗段抛送至后置风机负压圈的气流场中进行二次除杂。蔗段抛送轨迹及风机工作参数与安装位置直接影响除杂效果^[20-21]。后置风机采用单轴流除杂风机, 风机进风口圆筒直径 $\phi_2=900 \text{ mm}$, 扇叶为外购件, 作业参数参考中置风机, 工作转速范围为 $950\sim 1\,250 \text{ r/min}$, 正常收获状态下为

1 100 r/min, 进风口平均风速为 11 m/s。



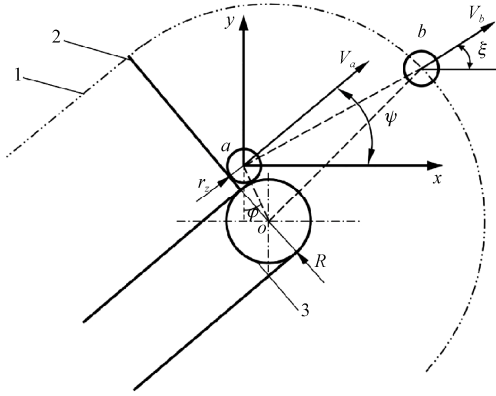
1.链轮 2.刮板 3.过渡轮 4.筛网 5.侧挡板 6.液压马达
1.Sprocket 2.Scraper 3.Transitional wheel 4.Screen 5.Side baffle 6.Hydraulic motor

注: B_2 为蔗段输送通道内壁间的距离, mm; l_3 为相邻刮板之间的距离, mm。
Note: B_2 is the distance of the billet delivery channel inner-wall, mm; l_3 is the distance between adjacent scraper, mm.

图 10 刮板筛网式蔗段输送通道结构示意图

Fig.10 Structure diagram of scraper screen type billet delivery channel

蔗段经中置风机除杂后落在蔗段输送通道的筛网上, 受刮板作用, 多数蔗段处于水平状态。当刮板推着蔗段到达图 11 的 a 点位置时, 蔗段在刮板作用下抛送到 b 点位置, 进入后置风机, 在气流场内做类斜抛运动。



1.刮板顶端运动轨迹 2.刮板 3.链轮
1.The trajectory of the scraper top 2.Scraper 3.Sprocket

注: o 为动力轴中心; a 为蔗段即将脱离刮板时的中心点位置; b 为蔗段离开刮板顶端运动范围的中心点位置; V_a 为蔗段在 a 点的速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; V_b 为蔗段在 b 点的速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; φ 为蔗段与动力轴中心点连线与 y 轴的夹角, $\varphi=9.6^\circ$; ψ 为 a 点速度方向与 x 轴的夹角, $\psi=50^\circ$; ξ 为 b 点速度方向与 x 轴的夹角, $(^\circ)$; r_2 为蔗段平均半径, $r_2=15\text{ mm}$; R 为链轮半径, $R=90\text{ mm}$ 。

Note: o is the center of the power shaft; a is the center point position of the billet is about to leave the scraper; b is the central point of the billet away from the moving range of the top of the scraper; V_a is the speed of billet at point a , $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; V_b is the speed of billet at point b , $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; φ is the included angle between the connecting line between the billet and the center point of the power shaft and the y axis, $\varphi=9.6^\circ$; ψ is the included angle between the velocity direction of point a and the x -axis, $\psi=50^\circ$; ξ is the included angle between the velocity direction of point b and the x -axis, $(^\circ)$; r_2 is the mean radius of billet, $r_2=15\text{ mm}$; R is the radius of sprocket, $R=90\text{ mm}$.

图 11 蔗段离开刮板时的运动学分析

Fig.11 Kinematic analysis of billet leaving scraper

由图 11 几何关系可知:

$$\left\{ \begin{aligned} V_a &= (R+r)\omega \\ L_x &= tV_a \cos \psi \\ L_y &= tV_a \sin \psi - 0.5gt^2 \\ A &= (R+r) \sin \phi \\ B &= (R+r) \cos \phi \\ l_{ob} &= \sqrt{(x_1 - A)^2 + (y_1 + B)^2} \\ l_{ob} &= R + h \\ V_{bx} &= V_a \cos \psi \\ V_{by} &= V_a \sin \psi - gt \\ V_b &= \sqrt{V_{bx}^2 + V_{by}^2} \\ \xi &= \arctan \frac{V_{by}}{V_{bx}} \end{aligned} \right. \quad (16)$$

式中 ω 为链轮角速度, $\omega=50.24\text{ rad/s}$; L_x 为蔗段从 a 运动到 b 点在 x 轴方向的位移, mm; t 为蔗段从 a 点运动到 b 点的时间, s; L_y 为蔗段从 a 运动到 b 点在 y 轴方向的位移, mm; A 为 a 点到动力轴中心在 x 轴方向的距离, mm; B 为 a 点到动力轴中心在 y 轴方向的距离, mm; l_{ob} 为蔗段在 b 点到链轮中心点 o 的距离, mm; V_{bx} 为蔗段在 b 点的速度在 x 轴方向的分量, m/s ; V_{by} 为蔗段在 b 点的速度在 y 轴方向的分量, m/s 。

计算可得 $V_b=4.8\text{ m/s}$, $\xi=45^\circ$ 。

当蔗段进入后置风机风场时, 其运动规律与中置风机风场相似, 因此后置风机与蔗段输送通道的动力轴的安装位置可以按照公式 (13) 计算。

蔗段在后置风机的风场中最大上升高度为 696 mm, 此时在 x 轴方向的位移为 1 370 mm, 为防止蔗段被扇叶打到, 需保持较大的安全距离。因此设计后置风机扇叶的下平面到蔗段输送动力轴中心在 y 轴方向的距离 $L_{y2}=740\text{ mm}$, 后置风机中心到蔗段输送动力轴中心在 x 轴方向的距离 $L_{x2}=630\text{ mm}$ 。

4 样机试验

为进一步验证切段刀辊中置式两级输送通道甘蔗收割机设计的可行性, 根据总体结构设计方案, 研制 4GDZ-132 型切段式甘蔗联合收割机, 并进行样机试验。

4.1 试验条件

试验于 2020 年 1 月在广东省湛江市遂溪县广丰农垦基地进行。试验地土壤类型为砖红壤, 土壤含水率 17.0%, 壤坚实度 2.4 MPa, 地块面积 0.7 hm^2 , 垄高 133 mm, 垄向为南北向, 地表平整, 无石块、树桩等, 甘蔗品种为粤糖 94128, 平均高度 2 457 mm, 行距 1 250 mm, 生长密度 11 株/m, 叶茎比 18%, 倒伏率 26%。

4.2 试验方法

根据 JB/T 6275—2019《甘蔗联合收割机》^[22]进行试验测试。以含杂率、损失率、切割高度合格率、蔗段合格率、宿根破头率为试验指标, 综合评价样机工作性能。

试验区由稳定区、测定区和停车区组成, 测定区为 10 m, 作业速度 2 km/h, 风机转速 1 100 r/min。作业时, 使用网兜收集中置风机和后置风机排出的杂质, 使用彩

棚布收集蔗段, 试验重复 8 次, 结果取平均值。试验现场如图 12 所示。主要性能指标计算方法如下:

含杂率:

$$J_h = \frac{W_z}{W_{jz}} \times 100\% \quad (17)$$

式中 J_h 为含杂率, %; W_z 为杂质总质量, kg; W_{jz} 为测定区内收取样品的总质量, kg。

总损失率:

$$\begin{cases} S_z = S_i + S_e \\ S_i = \frac{W_i}{W_q} \times 100\% \\ S_e = \frac{W_e}{W_q} \times 100\% \end{cases} \quad (18)$$

式中 S_i 为落地损失率, %; W_i 为漏割、落地损失蔗茎质量, kg; W_q 为测定区内蔗茎总质量, kg; S_e 为割茬损失率, %; W_e 为割茬损失蔗茎质量, kg; S_z 为总损失率, %。

蔗段合格率:

$$C_{dh} = \frac{W_{dh}}{W_q} \times 100\% \quad (19)$$

式中 C_{dh} 为蔗段合格率; W_{dh} 为合格蔗段质量, kg。

切割高度合格率:

$$G_q = \frac{N_h}{N_a} \times 100\% \quad (20)$$

式中 G_q 为切割高度合格率, %; N_h 为割茬高度合格株数; N_a 为测定区内总蔗株数。

宿根破头率:

$$C_p = \frac{N_p}{N_a} \times 100\% \quad (21)$$

式中 C_p 为宿根破头率, %; N_p 为测试区内宿根破头株数。



图 12 田间试验
Fig.12 Field test

4.3 试验结果与分析

田间试验结果如表 2 所示, 本文设计机型的平均含杂率为 4.42%, 总损失率为 3.08%, 相比于 4GZ-91 型甘蔗收割机^[16], 分别降低了 5.58 和 3.92 个百分点; 相比于凯斯 Austoft 8000 型甘蔗收割机^[20], 分别降低了 1.78 和 5.12 个百分点; 相比于 4GZQ-180 型甘蔗收割机^[21], 分别降低了 2.08 和 1.92 个百分点。

表 2 含杂率和总损失率田间试验结果

| 试验区编号 No. of test area | 含杂率 Trash content/% | 总损失率 Total loss rate/% |
|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| 1 | 4.30 | 2.03 |
| 2 | 4.03 | 2.14 |
| 3 | 4.83 | 2.07 |
| 4 | 4.63 | 2.95 |
| 5 | 4.67 | 3.47 |
| 6 | 4.50 | 4.28 |
| 7 | 4.40 | 3.28 |
| 8 | 4.03 | 4.45 |
| 平均值 Mean value | 4.42 | 3.08 |

整机性能测试结果如表 3 所示。试验过程中机具工作平稳, 各运动部件配合良好, 整秆输送通道无堵塞现象; 中置风机排出了部分泥土、蔗叶、蔗梢等杂质, 消除了蔗段输送通道刮板被杂质卡死的现象。试验结果表明, 该样机在收获严重倒伏甘蔗时无通道堵塞情况发生; 试验指标均优于 JB/T 6275—2019《甘蔗联合收割机》标准, 满足切段式甘蔗联合收获机性能要求。

表 3 整机性能测试结果

| 项目 Items | 含杂率 Trash content /% | 总损失率 Total loss rate/% | 蔗段合格率 Qualified rate of sugarcane segment/% | 切割高度合格率 Qualified rate of cutting height/% | 宿根破头率 Broken rate of ratoons/% |
|------------------------|----------------------------|---------------------------|--|---|-----------------------------------|
| 标准值 Standard values | ≤8 | ≤7 | ≥80 | ≥92 | ≤18 |
| 试验结果 Test results | 4.42 | 3.08 | 92.10 | 96.20 | 9.60 |

5 结 论

本文针对现有切段式甘蔗联合收割机输送通道易堵塞、含杂率和损失率高等问题, 设计了一种切段刀辊中置式两级物流通道甘蔗联合收割机, 采用短路径整秆输送通道, 刮板筛网式蔗段输送装置, 中置+后置风机组成的双风机除杂系统, 实现了甘蔗的根切、喂入、输送、切段、风选除杂和卸料等联合作业, 并进行了田间性能试验验证, 主要结论如下:

1) 对该机关键部件的结构及工作参数进行了理论分析和计算, 在 2 km/h 的正常作业状态下, 整秆输送通道安装角度为 34°、宽度为 500 mm, 喂入和输送辊筒直径为 230 mm, 切段刀辊外圆直径为 233 mm, 蔗段输送刮板高度为 120 mm, 中置风机中心线与下切段刀辊中心线在水平方向的距离为 624 mm、中置风机扇叶下平面到下切段刀辊中心在垂直方向的距离为 716 mm, 后置风机中心线到蔗段输送动力轴中心线在水平方向的距离为 630 mm, 后置风机扇叶的下平面到蔗段输送动力轴中心线在垂直方向的距离为 740 mm。喂入和输送辊筒转速为 380 r/min、切段刀辊转速为 374 r/min、除杂风机转速为 1 100 r/min。

2) 样机田间试验结果: 含杂率为 4.42%, 总损失率

为 3.08%, 蔗段合格率为 92.10%, 切割高度合格率为 96.20%, 宿根破头率为 9.60%, 各项性能指标均优于相关标准。相比于 4GZ-91 型甘蔗收割机, 含杂率与总损失率分别降低了 5.58 和 3.92 个百分点; 相比于凯斯 Austoft 8000 型甘蔗收割机, 含杂率与总损失率分别降低了 1.78 和 5.12 个百分点; 相比于 4GZQ-180 型甘蔗收割机, 含杂率与总损失率分别降低了 2.08 和 1.92 个百分点。该机工作平稳, 在收获严重倒伏甘蔗时无通道堵塞情况发生, 满足切段式甘蔗联合收获机性能要求。

参 考 文 献

- [1] 区颖刚. 我国甘蔗生产全程机械化现状与对策[J]. 现代农业装备, 2019, 40(2): 3-8, 42.
Ou Yinggang. Present situation and countermeasure of whole-process mechanization of sugarcane product in china[J]. Modern Agricultural Equipment, 2019, 40(2): 3-8, 42. (in Chinese with English abstract)
- [2] 樊秋菊, 黄清玲, 吴合槟, 等. 国内外甘蔗收割机械化发展概况与前景[J]. 甘蔗糖业, 2020, 49(6): 1-11.
Fan Qiuju, Huang Qingling, Wu Hebin, et al. Prospect and development of sugarcane mechanized harvest at home and abroad[J]. Sugarcane and Canesugar, 2020, 49(6): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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.
- [4] 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(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 Canesugar, 2013(6): 45-55. (in Chinese with English abstract)
- [5] 莫建霖, 刘庆庭. 我国甘蔗收割机械化技术探讨[J]. 农机化研究, 2013, 35(3): 12-18.
Mo Jianlin, Liu Qingting. Discussion on the mechanization technology of sugarcane harvesting in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(3): 12-18. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘芳建, 杨学军, 方宪法, 等. 甘蔗收割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 with English abstract)
- [7] 欧颖刚, 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.
- [8] 李尚平, 邓雄, 钟家勤, 等. 甘蔗收割机喂入系统结构改进与仿真试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 91-98.
Li Shangping, Deng Xiong, Zhong Jiaqin, et al. Structure improvement and simulation test of sugarcane harvester feeding system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 91-98. (in Chinese with English abstract)
- [9] 沈中华, 黄博. 甘蔗收割机喂入分流系统的设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(3): 171-175, 182.
Shen Zhonghua, Huang Bo. Experimental research on parameter optimization of portable vibrating and harvesting device of chinese wolfberry[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(3): 171-175, 182. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘庆庭, 杨丹彤, 区颖刚, 等. 一种新型物流输送方式的甘蔗联合收割机: CN103098615B[P]. 2015-05-20.
- [11] 王春政. 整秆式甘蔗收割机辊筒输送装置的设计与试验[D]. 广州: 华南农业大学, 2011.
Wang Chunzheng. Design and Test of Roller Conveying Device of Whole-Rod Sugarcane Harvester[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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.
- [13] Xu H, Wu T, Liu Q T, et al. Investigation of the trajectory of expelled billets from the chopping rollers of a sugarcane harvester[J]. Sugar Tech, 2020, 22: 896-910.
- [14] 冯加模. HN4GDL-91 甘蔗收割机喂入输送装置的设计与试验[D]. 广州: 华南农业大学, 2013.
Feng Jiamo. Design and Test on the Feeding and Conveyer Device of Sugarcane Harvester for HN4GDL-91[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [15] 周金伟. 甘蔗收割机切段刀辊配对刀片间相对位置对切割质量的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
Zhou Jinwei. The Influence of the Relative Position Between Paired Blades on the Cutting Quality of Billet Combine Harvester[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李跃金. 切段式甘蔗收割机输送排杂装置的设计与试验[D]. 广州: 华南农业大学, 2013.
Li Yuejin. Design and Test of Conveying Device of Cutting Sugarcane Harvester[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [17] 袁成宇. 切段刀辊中置式甘蔗收割机风选排杂系统研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
Yuan Chengyu. Study on the Wind Extractor System of Middle Cut-Segment-Roll Sugarcane Combine Harvester[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [18] Cool S, Pieters J, Mertens K C, et al. A simulation of the influence of spinning on the ballistic flight of spherical fertiliser grains[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2014, 105: 121-131.
- [19] 史瑞杰, 戴飞, 刘小龙, 等. 履带式丘陵山地胡麻联合收割机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 59-67.
Shi Ruijie, Dai Fei, Liu Xiaolong, et al. Design and experiments of crawler-type hilly and mountainous flax combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(5): 59-67. (in Chinese with English abstract)
- [20] 朱鸿运. 切段式甘蔗收割机排杂风机气流场研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
Zhu Hongyun. Study on Airflow Field of the Exhaust Fan of Sugarcane Billet Harvester[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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 Shaohun, Wang Fenglei, et al. Structure optimization and experiment of sugarcane chopper harvester extractor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020,

36(20): 67-75. (in Chinese with English abstract)
[22] 中国国家标准化管理委员会. NY/T 6275—2019《甘蔗收

获机 质量评价技术规范》[S]. 北京: 中国农业出版社, 2019.

Development of the 4GDZ-132 sugarcane chopper combine harvester

Wu Tao, Ren Jiahui, Liu Qingting^{*}, Zou Xiaoping, Zhang Zengxue, Zhou Shaopeng, Feng Jiamo, He Lin

(College of Engineering, South China Agricultural University, Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Sugarcane is one of the most important crops for sugar products in China. But the manual cutting and harvesting cannot fully meet the modern mechanization level of sugarcane production in recent years. For instance, the availability of sugarcane machines was only 3.28% over the pressing season in 2019-2020. Two types of sugarcane harvesters are commonly used: the whole stalk and chopper. The mainstream mode can be the sugarcane chopper harvester with a high operation efficiency suitable for the lodging sugarcane. The reason is that the sugarcane bending and collapse often occurred after the typhoons in the planting areas of Guangdong and Guangxi Province in south China. The broken and serious lodging sugarcane can easily induce the blockage of the delivery channel, high trash content, and loss rate during operation in the sugarcane field. Therefore, it is necessary to develop a sugarcane chopper combine harvester with a new delivery channel structure for serious lodging of sugarcane in the field during operation. In this study, a new type of sugarcane harvester was designed with a chopper drum centrally-mounted to a two-stage delivery channel. The delivery channel of the machine was also adopted for the short path straw and scraper screen billet. A double extractor system was composed of the middle and rear extractor fan, in order to realize the joint operations of sugarcane rooting, feeding, conveying, cutting, air separation trash removal, conveying, and unloading. The structural parameters were then calculated to determine, such as the installation angle and width of the whole stalk delivery channel, the diameter of the feeding and conveying roller, the outside diameter of the chopper drum, the height of the scraper in the billet delivery channel, and the position of the extractor fan. The operation parameters were also optimized, such as the speed of the feeding roller, conveying roller, chopper drum, and extractor fan. Finally, the prototype was developed for the 4GDZ-132 sugarcane chopper harvester. The field test showed that all performance indexes were better than before when the operation speed and extractor fan speed were 2 km/h and 1 100 r/min, respectively. Specifically, an optimal combination was achieved, where the trash content, the total loss rate, the qualified rate of the stalk, the qualified rate of cutting height, and the broken rate of ratoons were 4.42%, 3.08%, 92.10%, 96.20%, and 9.60%, respectively. More importantly, the trash content and the total loss rate of the new sugarcane harvester were reduced by 5.58 and 3.92, 1.78 and 5.12, 2.08 and 1.92 percentage points, respectively, compared with the previous 4GZ-91, the Austoft 8000 and the 4GZQ-180 types sugarcane harvester. There was no blockage in the whole stalk delivery channel during the test, indicating the better performance of the machine and the moving parts. Since the central extractor fan slightly discharged some trash, such as soil, cane leaves, and cane top, there were no stuck trash in the scraper plate of the billet delivery channel. Furthermore, there was no channel blockage in the prototype, when harvesting the seriously lodging sugarcane. The better indexes fully met the performance requirements in the standard of a sugarcane combine harvester (JB/T 6275-2019). The finding can provide a strong reference to the development of sugarcane harvesting equipment in modern agriculture.

Keywords: agricultural machinery; harvest; sugarcane harvester; chopper; delivery channel; trash removal system; double extractor fan