

韩杰, 文晟, 刘庆庭, 等. 预切种式甘蔗种植机的设计与试验 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 109-118.
HAN Jie, WEN Sheng, LIU Qingting, et al. Design and test of pre-cutting type sugarcane planter[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 109-118.

预切种式甘蔗种植机的设计与试验

韩 杰¹, 文 晟², 刘庆庭¹, 吴金泳¹, 徐景承¹, 伍俊柔¹, 欧昌航¹, 闫文豪¹

(1 华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642; 2 华南农业大学 工程基础教学与训练中心, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】研制一种预切种式甘蔗种植一体机, 以便连续完成开沟、施肥、排放种苗、覆土、盖膜等一次性作业。【方法】利用有限元分析软件 ANSYS 对甘蔗种植机的机架进行模态分析, 通过田间试验获取 3 种开沟犁的犁沟土壤扰动指数; 设计液压传动系统、播种机构、开沟覆土装置、施肥机构和覆膜机构, 并通过田间试验获得甘蔗种植机的种植深度合格率、覆土厚度合格率、种植密度、伤芽率、漏株率、施肥量稳定性变异系数、地膜破损率等。【结果】模拟结果表明当激励频率为 134.47~514.35 Hz 时, 机架容易发生共振, 且最大位移可达 19.67 mm。田间试验表明凸线型开沟犁的土壤扰动指数为 17.05, 最大沟深可达 19.13 cm, 符合甘蔗种植沟深的标准。甘蔗种植深度合格率为 83%, 覆土厚度合格率为 91%, 种植密度为 135 331 hm⁻², 伤芽率为 4.7%, 漏株率为 4.5%, 施肥量稳定性变异系数为 6.1%, 地膜破损率为 51%, 均符合甘蔗种植机的设计标准。【结论】该小型预切种式甘蔗种植一体机符合设计要求, 能够显著提高甘蔗种植的效率。

关键词: 预切种式; 甘蔗种植一体机; 有限元; 模态分析
中图分类号: S223.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2019)04-0109-10

Design and test of pre-cutting type sugarcane planter

HAN Jie¹, WEN Sheng², LIU Qingting¹, WU Jinyong¹, XU Jingcheng¹, WU Junrou¹, OU Changhang¹, YAN Wenhao¹
(1 College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Engineering Fundamental Teaching and Training Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To design a pre-cutting type and all-in-one sugarcane planter, so as to open furrows, fertilize, discharge seedlings, cover soil and cover film during a single operation. 【Method】The finite element analysis software ANSYS was used for modal analysis of the sugarcane planter. The soil disturbance indexes of three furrow ploughs were obtained through field experiments. The hydraulic transmission system, seeding mechanism, furrow covering device, fertilization mechanism and film covering mechanism were designed. We used field experiments to measure the qualified rates of planting depth and covering soil thickness, planting density, bud injury rate, missing rate, coefficient of variation in stability of fertilization amount and rate of plastic film damage of the sugarcane planter. 【Result】The simulation results showed that the frame was prone to resonance when the excitation frequency was from 134.47 to 514.35 Hz, and the maximum displacement could reach 19.67 mm. The results of field experiment showed that the soil disturbance index of convex furrow plough was 17.05, and the maximum furrow depth was 19.13 cm, which met the standard of sugarcane planting furrow depth. The qualified rate of planting depth was 83%, the qualified rate of covering soil thickness was 91%, the planting density was 135 331 hm⁻², the bud injury rate was 4.7%, the missing rate was 4.5%, the coefficient of variation in stability of fertilization amount was 6.1%, and the rate of plastic film damage was

收稿日期:2018-11-17 网络首发时间:2019-06-25 15:53:04
网络首发地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20190625.0931.008.html>
作者简介:韩 杰(1993—), 男, 硕士研究生, E-mail: 2048570351@qq.com; 通信作者: 文 晟(1974—), 男, 副教授, 博士, E-mail: vincen@scau.edu.cn
基金项目:广东省科技计划项目(2016A020210100); 广州市科技计划项目(201707010047)

51%, which all met the design criteria of sugarcane planter. 【Conclusion】 This small pre-cutting type and all-in-one sugarcane planting machine meets the design requirements and can significantly improve sugarcane planting efficiency.

Key words: pre-cutting type; all-in-one sugarcane planter; finite element analysis; modal analysis

甘蔗作为经济作物,是糖的主要来源和各种以农业为基础的工业基本原料,在世界农业经济中占有非常重要的地位^[1]。中国是世界上甘蔗种植面积最大的国家之一,仅次于巴西和印度^[2-4]。云南、广西、福建、广东、海南等热带亚热带地区是我国甘蔗的主要产地^[5-7]。我国甘蔗种植机械化水平不高,在人工成本不断上涨的背景下,提高机械化水平对发展我国蔗糖行业具有十分重要的意义^[8-9]。目前我国生产的甘蔗种植机大多数是实时切种式与整杆式。实时切种式型甘蔗种植机需要人工喂入,劳动力耗费较大;整杆式甘蔗种植机体积较大,适合大规模平原种植,售价较高,蔗种出芽率低,均不适用于我国南方多山地多丘陵地区^[10]。蔗糖行业发达的国家较多地采用预切种式甘蔗种植机,机械化程度高,无需人工喂入甘蔗种苗,基本没有漏播和播种不均匀的问题。但是,我国南方地区主要以山地丘陵为主,且甘蔗种植的地块面积较小,国外的甘蔗种植机并不能完全适应我国粗放的种植环境^[11],所以研究出适应我国国情的预切种式甘蔗种植机就显得尤为迫切。

预切种式甘蔗种植机的工作原理是在种箱中放入预先切好的甘蔗种段,然后由动力装置驱动播种机构将蔗种播散在犁沟中。由于甘蔗种植机的机械结构是甘蔗种植过程中主要的影响因素,为了提高甘蔗种植的机械化水平,王美美等^[12]设计了一种实时切种式甘蔗种植机的漏播监测与标记系统,并进行了田间试验,利用 SPSS 软件分析出系统监测到的蔗种种距与人工测量种距回归分析的决定系数为 0.991,表明系统标记的漏播位置可以为人工补种提供可靠依据。刘存瑞等^[13]设计了一种由拖拉机地轮驱动的实时切种式甘蔗种植机,可以一次性完成开沟、切种、施肥、覆膜及培土等作业,解决了地轮驱动式甘蔗种植机在山地、斜坡地工作时出现的地轮悬空或打滑等问题。Saengprachatanarug 等^[14]研究了一种改进型播种箱甘蔗种植机,田间产能提高了 7.1%,种植效率比改进前的机器明显地提升了。

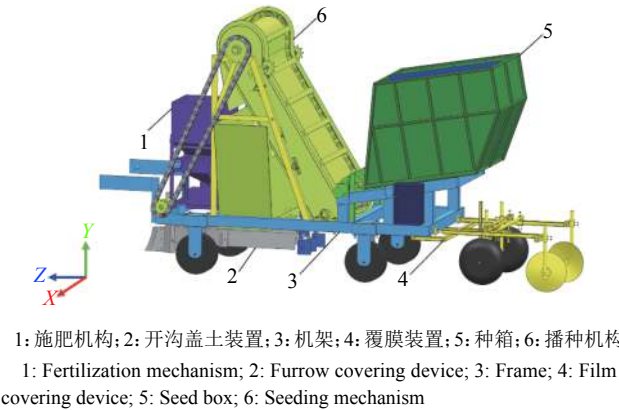
本研究拟设计一种适应于我国国情的预切种式甘蔗种植一体机,以期在保证正常播种的同时,

实现种植密度可调,降低伤芽率与漏播率;且相比于实时切种式、整杆式甘蔗种植机具有更高的工作效率。本研究使用有限元软件 ANSYS 对机架进行模态分析,得到容易发生共振的频率与最大形变位移;通过理论分析与计算设计开沟犁、液压驱动、施肥、播种、盖土、覆膜等机构,并在此基础上进行大田试验,得到开沟扰动量、种植深度合格率、覆土厚度合格率、种植密度、伤芽率、漏芽率、施肥量稳定性变异系数、地膜破损率等参数。

1 机构工作原理及设计

1.1 物理模型

设计制作的预切种式甘蔗种植机如图 1 所示,其主要参数如下:长×宽×高为 2 900 mm×1 000 mm×1 800 mm,载质量为 277 kg。该型甘蔗种植一体机主要由机架、液压系统、开沟覆土装置、施肥机构、覆膜机构、播种机构以及载种箱等构成(图 1)。



1: 施肥机构; 2: 开沟盖土装置; 3: 机架; 4: 覆膜装置; 5: 种箱; 6: 播种机构
1: Fertilization mechanism; 2: Furrow covering device; 3: Frame; 4: Film covering device; 5: Seed box; 6: Seeding mechanism

图 1 预切种式甘蔗种植一体机

Fig. 1 Pre-cutting type and all-in-one sugarcane planting machine

1.2 工作原理

甘蔗种植一体机通过牵引机构挂于拖拉机后部,在拖拉机的牵引下,开沟犁开出犁沟,同时施肥机构将肥料通过输肥管排入施肥沟,种箱内的甘蔗种经过播种机构带到一定的高度,在重力与挡板的作用下蔗种进入犁沟,最后盖土器与覆膜器依次完成盖土覆膜工艺。甘蔗种植机采用拖拉机作为牵引动力,播种机构与施肥器的动力输入均采用液压马达驱动形式,并由拖拉机的液压系统提供液压动力。

1.3 机架的设计

甘蔗种植机的机架主要是由方钢焊接而成, 整个机架长 1 420 mm、宽 847 mm。由于甘蔗种植机的机架是最重要的承载基体, 当各机构的激振频率接近于甘蔗种植机机架的某一阶固有频率时, 就会产生共振, 共振对机器的结构和性能有损害作用, 同时也会造成播种不均匀^[15], 所以在机架的设计过程中要尽量避免液压动力系统与链轮链条的啮合激振频率以及外界频率与机架的某一固有频率一致。为明确机架的各阶固有频率及对应的振型, 在机架的设计时使用有限元分析软件 ANSYS 对机架进行模态分析。

由于机架是承载各部分机构的安装行走部件和连接牵引部件, 所以要保证机架的强度, 采用材料为 Q235[材料密度为 $7.25\times10^3\text{ kg/m}^3$, 泊松比 (μ) 为 0.31, 弹性模量 (E) 为 $2.0\times10^{11}\text{ Pa}$] 的 80 mm×60 mm×3 mm 的方钢焊接机架。将机架三维模型导入 ANSYS workbench 中的 Modal 模块进行模态分析。定义机架的材料为 Q235, 然后使用自由网格划分的方法进行网格划分^[16-17]。网格划分后的机架模型如图 2 所示, 网格单元的数目为 207 129, 节点数目为 667 596。机架的网格划分完成后, 对机架开始施加边界条件与载荷。机架的求解频率设置为 10 阶, 设置完成后对机架的模态分析进行求解。

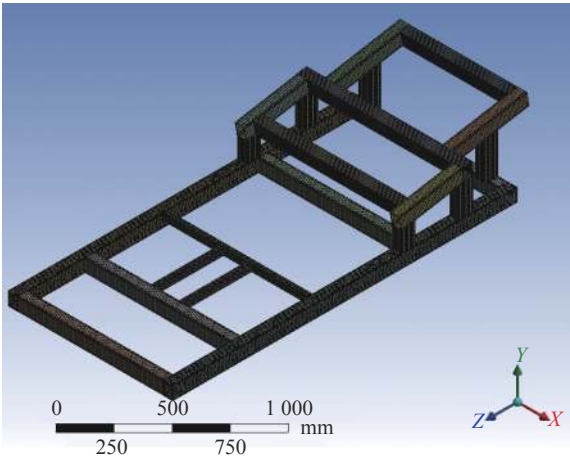
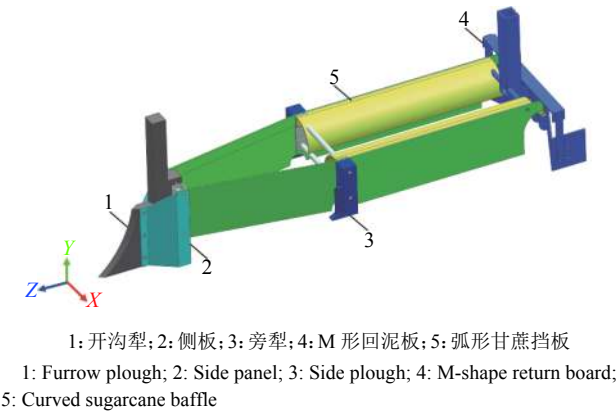


图 2 机架网格模型
Fig. 2 Mesh model of frame

1.4 开沟覆土装置的设计

作为机器与土壤之间直接接触的部分, 开沟犁不仅对播种的质量有较大的影响, 而且与机器的使用效率以及拖拉机的燃油耗损有着直接的关系^[18]。为了探究开沟犁的性能, 设计的开沟覆土装置如图 3 所示, 该开沟覆土装置为对称结构, 主要由开沟犁、侧板、旁犁、弧形甘蔗挡板、M 形回泥板等组成。其

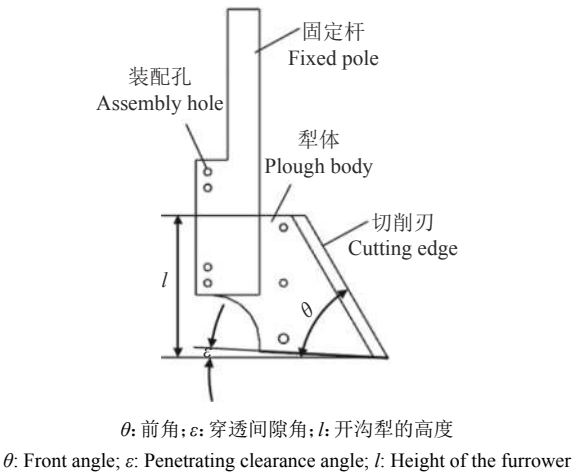
中开沟犁与旁犁均为尖角式开沟犁, 开沟犁的作用是开出种植沟, 旁犁主要用于开肥料沟, 可以使甘蔗种段与肥料隔开, 避免了蔗段因接触肥料造成的腐烂。弧形挡板的作用主要是用于引导从排种箱中掉落的甘蔗种段顺利地进入种植沟。M 形回泥板的设计目的是对种植沟以及肥料沟的填土封沟。此开沟覆土装置具有结构简单、开沟动土量小、开沟深度可调、可自动回土等优点。



1: 开沟犁; 2: 侧板; 3: 旁犁; 4: M 形回泥板; 5: 弧形甘蔗挡板
1: Furrow plough; 2: Side panel; 3: Side plough; 4: M-shape return board; 5: Curved sugarcane baffle

图 3 开沟覆土装置
Fig. 3 Model of trenching and covering device

图 4 为开沟犁的结构示意图, 其中固定杆的作用是将开沟犁固定在机架上, 犁体通过侧板连接开沟覆土装置。犁体的主要参数为切削刃曲线、前角、穿透间隙角。由于控制切削刃的表面线对种植沟有较大的影响^[19], 为了消除其他因素的干扰, 3 个参数 (包括前角, 穿透间隙角和切削刃曲线) 中仅考虑切削曲线对种植沟的影响, 其中前角和穿透间隙角分别设置为 60° 和 6° 。



θ : 前角; ϵ : 穿透间隙角; l : 开沟犁的高度
 θ : Front angle; ϵ : Penetrating clearance angle; l : Height of the furrower

图 4 开沟犁原理图
Fig. 4 Schematic diagram of furrow plough

犁沟开沟犁的高度 (l) 由沟槽的深度决定。甘蔗的生长会受到播种深度的影响, 研究表明 4~7 cm 的播种深度有利于甘蔗的出苗^[20]。所以较浅的播种

深度有利于作物的出苗,但是会降低作物的抗旱性。随着播种深度的增加,甘蔗的保水和保温效果得到加强,但播种深度越深,甘蔗出苗率越低。因此有必要设计出适用于该甘蔗种植机的开沟犁。

为了探究不同类型的开沟犁对甘蔗种植的影响,设计了 3 种类型的开沟犁,切削刃分别为直线型、凹线性和凸线型,开沟犁的尺寸是一致的。犁沟 l 设计为 15 cm。使用 65 Mn 钢板经过调质处理制造开沟犁。开沟犁的不同形状和参数如图 5 所示。将开沟犁底部的 O 点设定为坐标系的原点,然后切削刃曲线的 2 个端点为点 $O(0, 0)$ 和点 $Z(x_z, l)$ 。

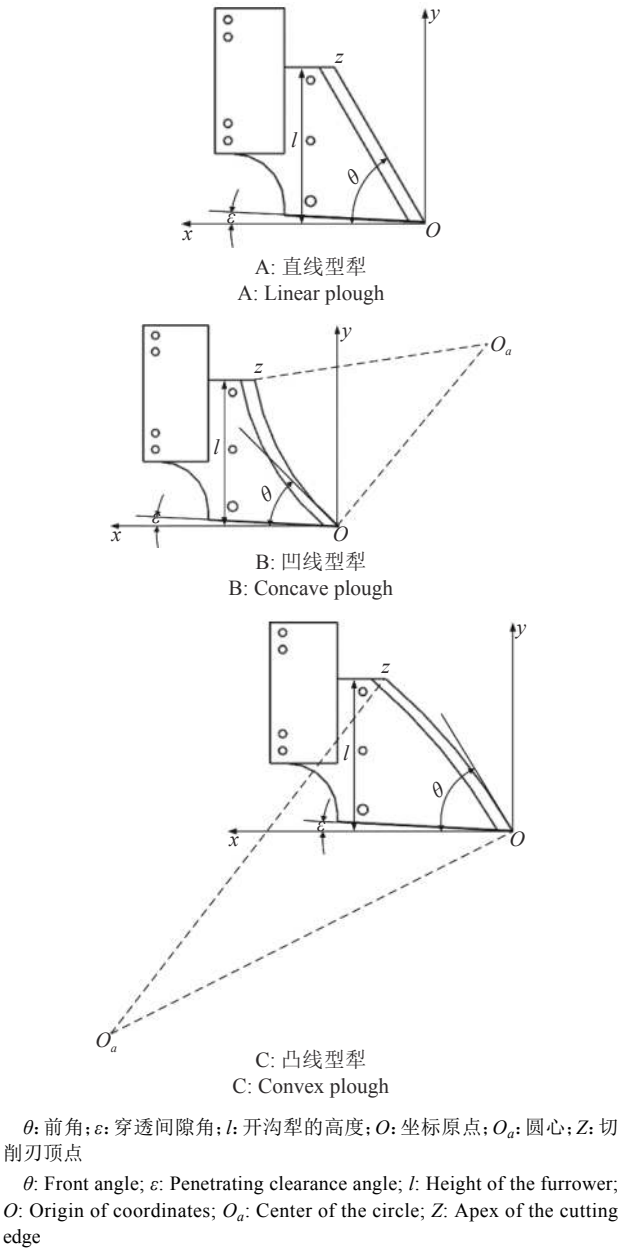


图 5 开沟器结构示意图

Fig. 5 Structural diagram of tine furrow opener

当切边曲线为直线型 (图 5A) 时,前角 (θ)、 l 与 Z 点的 x 坐标值间的关系为:

$$\tan \theta = \frac{l}{x_z}, \tag{1}$$

当切削刃曲线为凹型或凸型 (图 5B、图 5C) 时,切削刃曲线所在的圆通过纵坐标原点 $O(0, 0)$, 点 $O_a(x_a, y_a)$ 和 r 分别是圆心和圆弧半径。假设圆的方程为:

$$(x - x_a)^2 + (y - y_a)^2 = r^2, \tag{2}$$

如果切削刃曲线为凹型 (图 5B), 则在以下方程中给出中心点 $O_a(x_a, y_a)$ 的 x 和 y 值。

$$x_a = -r \cos[\pi - (\pi/2 + \theta)] = -r \sin \theta, \tag{3}$$

$$y_a = r \sin[\pi - (\pi/2 + \theta)] = r \cos \theta, \tag{4}$$

所以圆的方程式是:

$$(x + r \sin \theta)^2 + (y - r \cos \theta)^2 = r^2, \tag{5}$$

用 Y 坐标 ($y_z = l$) 计算 Z 点的 X 坐标值 (x_z):

$$x_z = \sqrt{r^2 - (l - r \cos \theta)^2} - r \sin \theta. \tag{6}$$

类似地如果切削刃曲线是凸型 (图 5C), 则通过式 (7) 和 (8) 计算点 Z 的圆和 X 坐标值的等式作为图 5B 中的凹型曲线边缘:

$$(x - r \sin \theta)^2 + (y + r \cos \theta)^2 = r^2, \tag{7}$$

$$x_z = \sqrt{r^2 - (l + r \cos \theta)^2} + r \sin \theta, \tag{8}$$

其中, 式 (7) 表示凸型切削刃曲线所在圆的等式, 式 (8) 表示点 Z 的 X 坐标值。

图 6 为犁沟横截面示意图, 其中沟槽剖面的沟槽底部的最大垂直距离对应于其最大深度 (H), 最大宽度 (W) 为地表平面与剖面的交线。动土面积 (A) 是沟槽的深度值与槽宽的积分。动土面积与沟槽最大深度之比构成扰动指数 (A_f), 该指数反映了开沟深度的增加对土壤扰动效率的影响。如果 A_f 值保持恒定, 犁头在更大的深度作业时, 土壤扰动是有意义的。相反, A_f 值急剧下降表明土壤扰动效率的损失。

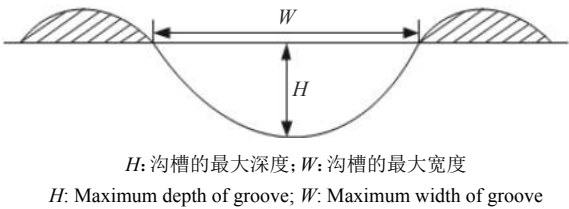


图 6 沟槽剖面示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the groove section

1.5 动力系统的设计

该甘蔗种植机体积较小, 为了尽可能地减轻整机质量, 提高机器的利用效率, 减小机器成本, 针对

性地设计了一套液压驱动系统, 如图 7 所示, 其工作过程为: 拖拉机发动机正常工作通过齿轮传动带动液压泵转动, 将油箱中液压油经过滤油器吸入, 从而产生带有一定压力的压力油, 液压油经 2 位四通电磁换向阀进入油通道后流入单向阀, 然后分别经 2 个调速阀驱动 2 个液压马达, 液压马达 (9) 通过链传动驱动播种机构, 液压马达 (11) 通过驱动施肥机构, 最后经过单向阀、2 位四通电磁换向阀的回油通道流回油箱。为保护液压泵与液压回路, 在拖拉机液压回路与驱动回路各接 1 个溢流阀用于调节系统压力。

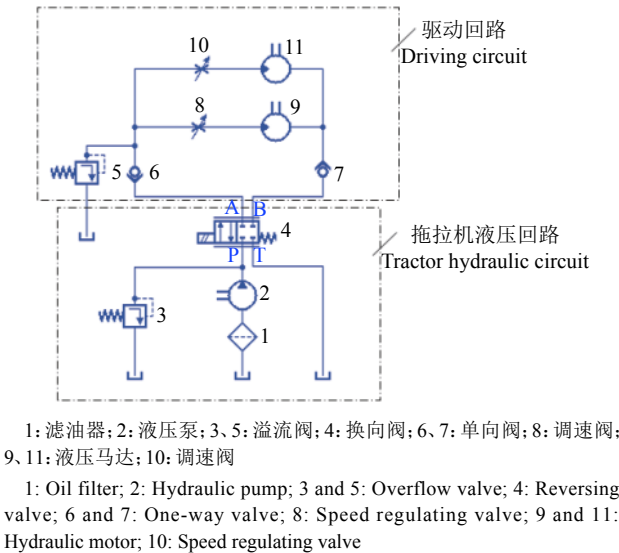


图 7 液压回路

Fig. 7 Hydraulic circuit

驱动播种机构与施肥机构工作部件运转的功率全部集中在 2 台液压马达, 其中播种机构液压马达的负载功率最大, 为了保证播种与施肥的连续性, 应该对 2 种液压马达进行正确选型。液压马达带动链轮, 根据《机械设计手册》中的公式 (9) 计算液压马达的功率 (P)^[21]:

$$P = K \frac{Fv}{60\eta}, \tag{9}$$

式中, K 为功率备用系数, 一般取 1.1~1.2; v 为传送链运行速度, 一般取 0.6~3 m/s; η 为驱动装置传动效率, 为 0.92; F 为传送链的负载。

在此基础上计算得出播种马达的转速为 0~180 r/min, 最大负载 0.46 MPa, 施肥马达转速的转速范围为 0~120 r/min, 最大负载 0.25 MPa。因此 2 台液压马达均选择 BMP50 型液压马达, 该液压马达最大负载 124 MPa, 排量为 7.14 mL/r, 转速可调范围为 0~698 r/min, 液压马达的验算公式为:

$$T = \frac{PV}{2\pi}, \tag{10}$$

式中, T 为液压马达扭矩; P 为液压马达进出口压力差; V 为液压马达排量。

经过验算选择的液压马达符合甘蔗种植机的设计要求。由于拖拉机的液压系统压力为 19.1 MPa, 远大于驱动回路所需的压力, 所以在驱动回路安装 1 个量程为 1 MPa 的溢流阀用于调节液压回路的压力, 并与调速阀配合使用起到调节液压马达转速的作用。

1.6 播种机构的设计

为了提高甘蔗种植机的播种间隔均匀性, 研制了一种由电动机和液压马达驱动的播种机构。如图 8 所示, 设计的播种机构由电机驱动 U 型槽轮抓种机构、液压马达驱动链式甘蔗输送装置和播种箱组成。在抓种装置的左右侧各安装 3 个方向一致的 U 型槽轮, 且左右 U 型槽轮开口方向的夹角为 180°, 在步进电机的驱动下, 可以实现左右交替抓取蔗种, 播种精度相比于传统的传送装置有大幅提高。输送装置的主体部分与水平面呈 60°, 不但降低了工作机的整体高度, 而且为刮板上的甘蔗起到支撑作用, 使其不易滑落, 对播种的精度有进一步的提高作用。链条链轮组都设计有张紧轮, 可调节链条的张紧度, 此外链条链轮的设计和选用是在标准件的基础上进行再加工, 既满足了设计的强度要求, 也降低了实际加工成本。

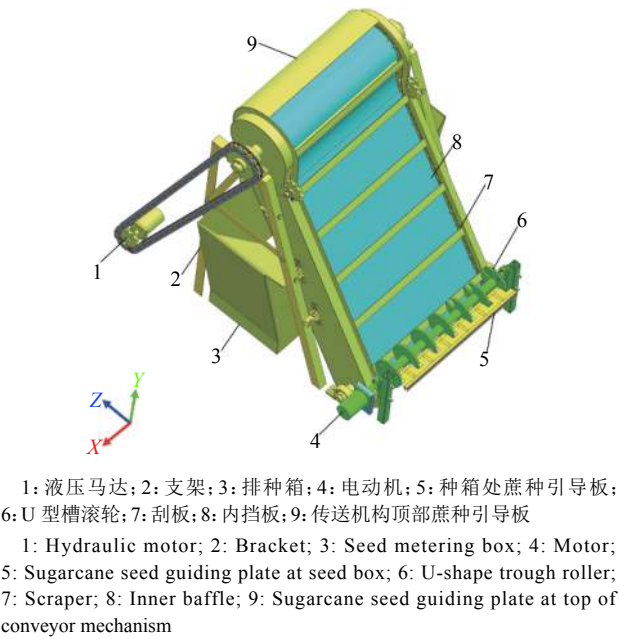


图 8 播种机构

Fig. 8 Sowing mechanism

播种机构的工作原理是: 液压系统与电机开关接通后, 由于种箱底面与水平面的夹角为 10°, 种箱中的甘蔗种段会因重力与机器的振动往种箱开口处滚落。U 型槽滚轮将种箱开口处的单根甘蔗种段

卡在 U 型槽上,随着滚轮的转动,甘蔗种段被输送到排种机构的刮板上。然后液压马达通过链条带动刮板移动,当刮板运动到输送装置的顶部,甘蔗种段在蔗种引导板的引导下掉入排种箱内,经过排种箱进入机身下方的弧形甘蔗挡板落入犁沟,完成播种工艺。

链式排种机构是目前中小型甘蔗播种机采用的一种排播种装置,其性能直接影响着播种的效率^[22]。播种器的运输链条采用 20A 型链条,在播种机的双侧每 5 节安装 1 个带有连接板的外链板,用来链接刮板,相邻刮板之间的距离为 252 mm。如图 9 所示,刮板的尺寸与结构影响着播种的效率,设计的刮板长 726 mm,宽 50 mm,高 40 mm,为了使掉入刮板中的甘蔗种段不易滑脱,将刮板设计呈 90°的角钢形状。甘蔗种段一般为 20 cm,直径为 4~5 cm,甘蔗种不会在传送的过程中滑落,设计的刮板符合要求。

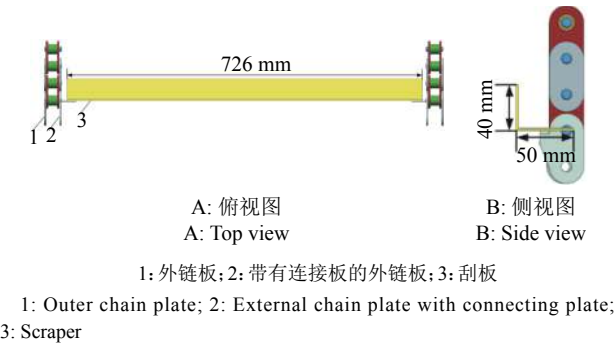


图 9 链式排种器示意图

Fig. 9 Schematic diagram of chain seed metering device

1.7 施肥机构的设计

设计的排肥机构如图 10 所示,排肥机构主要由肥料箱、支架、锥体、导管、圆盘、刮板、法兰盘、液压马达及输肥管等构成。排肥机构的工作过程为液压马达通过法兰盘驱动圆盘以及锥体转动,肥料在重力的作用下从肥料箱流入圆盘,圆盘转动带动肥料,然后肥料在刮板的阻挡作用下溢出圆盘进入导管中,进而流入犁沟,完成施肥工艺。并且设计的排肥机构转盘两边出肥处采用刮板,通过改变刮板入肥深度来改变与肥料的接触面积,从而调节施肥量,方便针对不同的需求进行快速调节。

1.8 覆膜机构的设计

覆膜技术在改善土壤蓄水、田间蒸发蒸腾、土壤热平衡等方面起着关键作用,并且使甘蔗单位面积产量和水分利用效率大幅度提高。更重要的是,可以产生更高的经济投入产出比^[23-27]。图 11 为设计的覆膜机构,该机构通过固定绞链连接在甘蔗种植

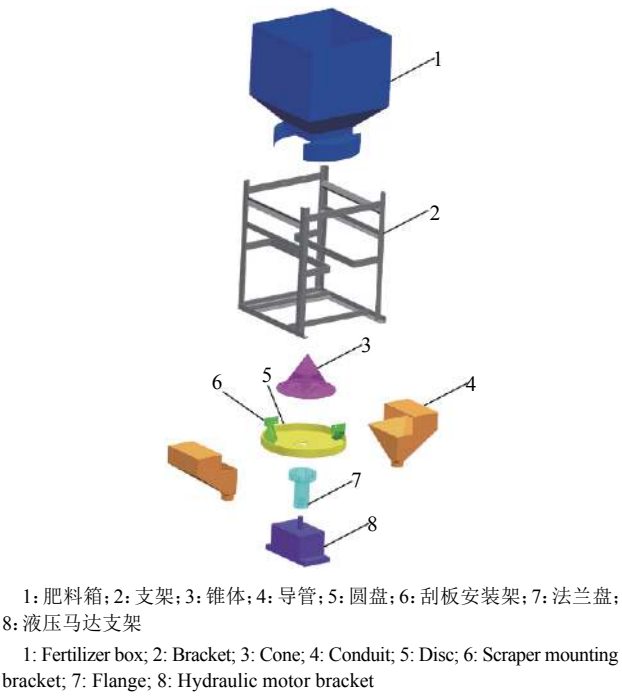


图 10 施肥装置的 3D 模型

Fig. 10 3D model of fertilizing device

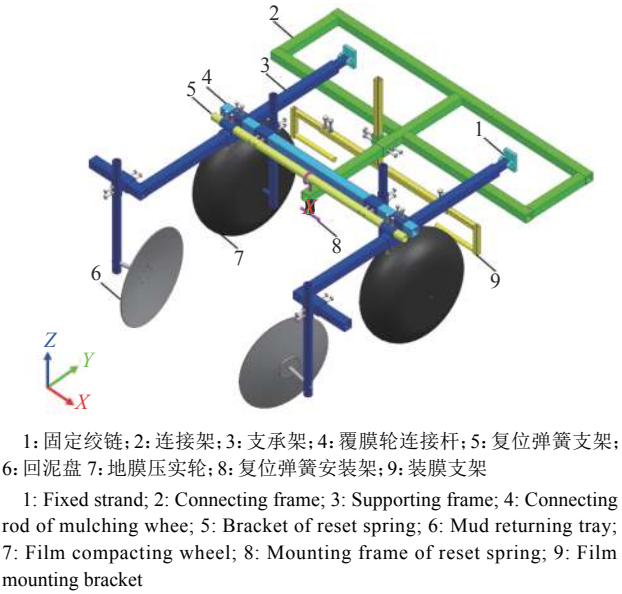


图 11 覆膜机构示意图

Fig. 11 Schematic diagram of mulching mechanism

机后方。在甘蔗种植机的覆土机构完成覆土工艺后,将一段覆膜拉至地膜压实轮后方用土压实,在拖拉机的拉动下,装膜支架上的膜辊绕轴旋转放膜,然后压膜轮将覆膜压在垄沟的一侧,最后在后面 2 个互成角度的回泥圆盘的作用下完成覆土工艺。

2 机架模态分析

经过模态分析后,得到机架的前 10 阶的机架固有频率与振型。图 12 为机架 1~10 阶的固有频率

位移云图, 由图 12 可知, 机架的 1、6、7、10 阶模态数的主振动方向为 Y 轴方向, 3、4、5、8、9 阶模态数的主振动方向为 Z 轴方向, 2 阶模态数的主振动方

向为 X 轴方向, 且各阶振型都表现为机架的某个部分弯曲或者弯曲扭转。由于机架的主要支撑点受到固定约束的影响, 所以其振动不明显, 而支撑载种

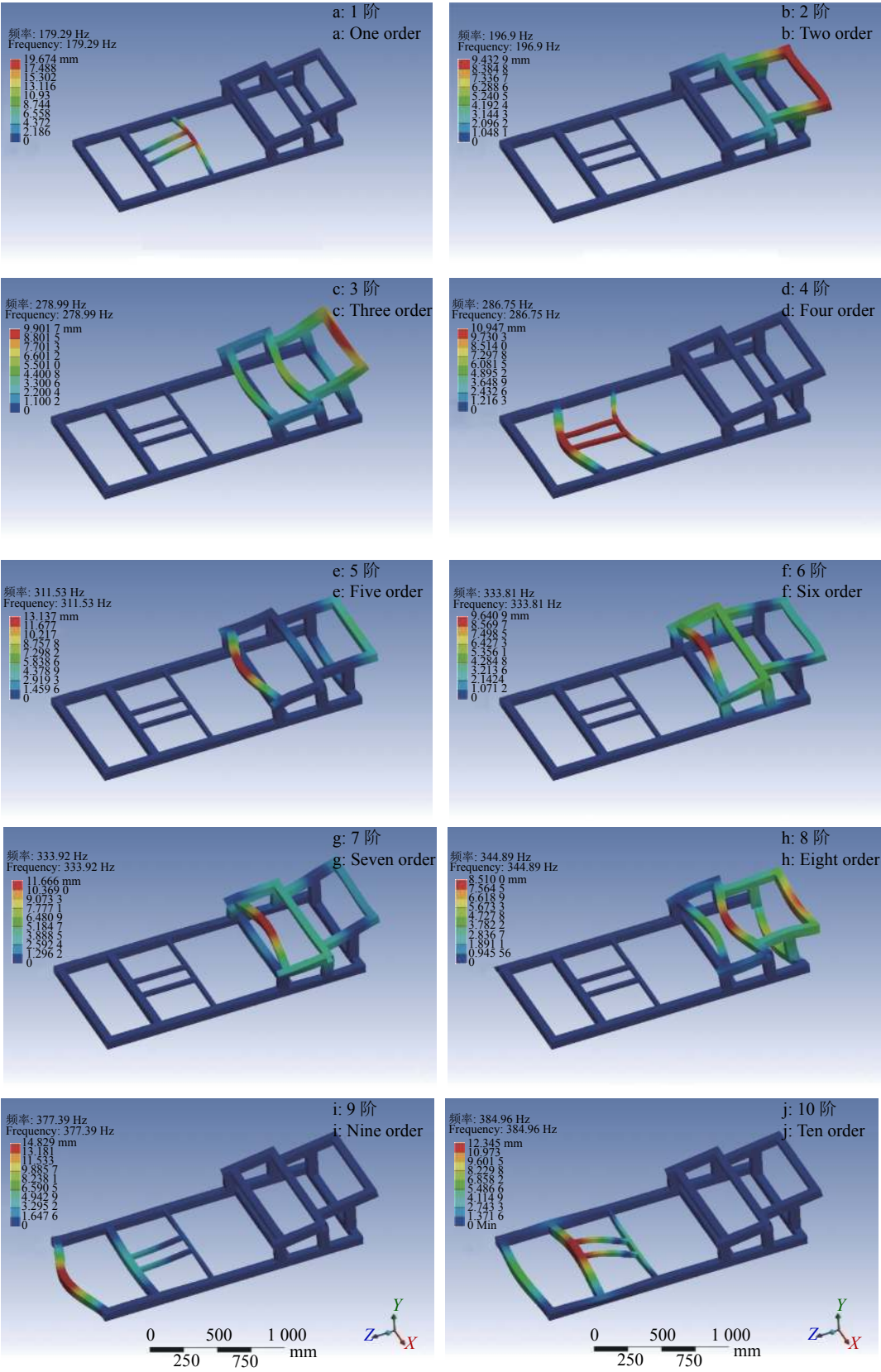


图 12 机架各阶固有频率位移云图

Fig. 12 Cloud chart of natural frequency displacement of frame

箱的横梁与中部的横梁受到的振动较大。因此,在振动较大的结构区域应该优化结构与改进材料以减小振动对机架结构的影响。

由图 13 可知机架的各阶固有频率与总振幅的大小,通过分析可知,机架的模式固有频率主要分布在 170~390 Hz,该区间是影响机架振动的主要频率分布范围,且在该区域范围内的振幅较大,最大位移发生在 1 阶模态时,可达 19.674 mm。为避免机架发生共振,激励频率与机架的固有频率之间有如下关系时,机构不容易发生共振。

$$0.75f_j \leq f_i \leq f_{j+1},$$

(11)

式中, f_i 为机架的固有频率; $f_j \sim f_{j+1}$ 为激励频率。

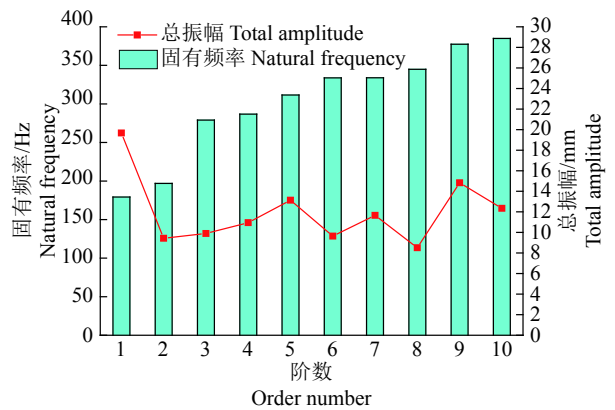


图 13 机架各阶固有频率与总振幅

Fig. 13 Natural frequencies and total amplitudes of frames with different order number

经过计算当激励频率为 134.47~514.35 Hz 时,机架容易发生共振,所以在设计液压马达与链条传动时应该注意尽量避免激励频率在该区间以免产生共振造成机架的损坏。

3 田间试验与结果

在广东增城试验田 (23°24'N, 113°23'24'E) 进行田间试验。该地区的土壤类型为砂质壤土或砂质黏壤土。土壤 pH 5.3, 土壤有机质质量分数平均为 9.07 g/kg, 适宜甘蔗生长。

3.1 开沟犁试验

使用设计的 3 种开沟犁完成开沟作业后,立即通过使用手仔细挖出扰动的土壤,对土壤沟槽的扰动进行测量。对于每个被测量的沟槽,移除 1 m 长沟槽中的土壤作为测量对象,并且在 3 个随机的位置进行轮廓测量。这 3 个测量组成 1 个样本,测量棒的定位反映了沟槽的几何形状,并将其描绘至白纸上。图 14 为 3 种开沟犁的剖面形状,并且直线型开沟犁、凹线型开沟犁和凸线型开沟犁的平均

A_f 分别为 18.26、20.09 和 17.05。说明凸线型的开沟犁在土壤扰动值较低的情况下开沟的深度好,因此更适用于甘蔗种植。图 14 中的直线型与曲线型开沟犁的耕深为 10~12 cm,但在实际的试验中 12 cm 以下的耕深不利于甘蔗覆土机构的工作,40% 的甘蔗种会因过早回土和种植沟的深度较浅,而裸露在地面上。然而,凸型开沟器的开沟深度较大,最大值可达 19.13 cm,在回土机构回土作业后表面土壤可达 4~7 cm,符合甘蔗种植的要求。

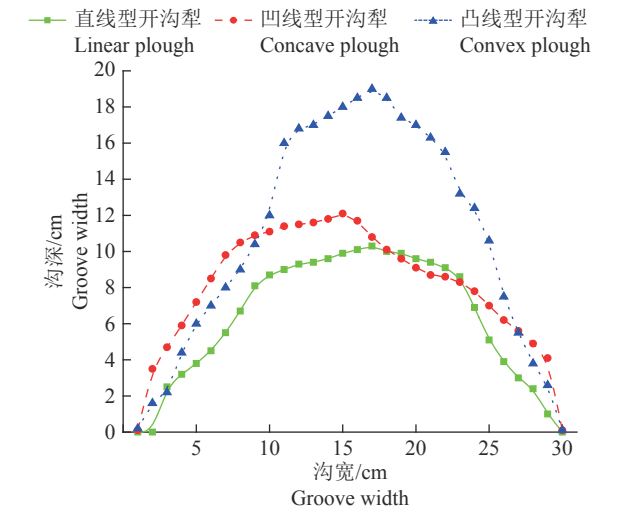


图 14 3 种开沟犁开沟作业的剖面指标

Fig. 14 Profile indexes of three plough trench

3.2 甘蔗种植机参数

根据甘蔗种植机的试验要求,针对甘蔗作物生长的环境选取试验田。试验时拖拉机以 1 m/s 的速度牵引甘蔗种植机作业,其中播种速度通过调节液压回路中的调速阀调节,抓种速度通过控制器调节步进电机调节。该机器工作面积达 1 hm² 地后,作业完成后参照标准 [28-29] 对甘蔗种植机作业性能进行测定。

该甘蔗种植机使用凸型开沟犁进行开沟,在 30 m 的种植区随机测 10 个点,测量 3 个行程,测出各点种植深度。使用钢直尺测出土层表面与甘蔗种的距离,然后测量出甘蔗的直径,两者相加即为种植深度。按公式 (12) 计算出种植深度合格率:

$$P_s = \frac{P_{sh}}{30} \times 100\%,$$

(12)

式中, P_s 为种植深度的合格率; P_{sh} 为种植深度的合格点数。

在测量种植深度的同时,测量覆土厚度合格率,每个点上测定种植覆土厚度,取平均值,按公式 (13) 计算出覆土厚度合格率:

$$T_g = \frac{P_g}{30} \times 100\%, \tag{13}$$

式中, T_g 为种植厚度合格率; P_g 为种植厚度合格点数。

该甘蔗种植机连续工作, 累积播种面积达 1 hm^2 后。选取长 30 m 的种植沟, 测出总有效芽数, 测 3 个行程, 取平均值, 按公式 (14) 计算出种植密度:

$$d_m = \frac{1\ 000E_n}{hAL}, \tag{14}$$

式中, d_m 为种植密度, hm^{-2} ; E_n 为总有效芽数, h 为行数, 行; A 为行距, m ; L 为测区长度, m 。

该甘蔗种植机作业结束后, 测出总芽数和伤芽数, 并按公式 (15) 计算出伤芽率:

$$H_b = \frac{M_b}{T_b} \times 100\%, \tag{15}$$

式中, H_b 为伤芽率, %; M_b 为机械伤芽数; T_b 为总芽数。

漏株率的测定, 计算出总蔗种数和漏种数, 测量 3 个 30 m 种植沟, 取平均值, 按公式 (16) 计算出漏株率:

$$L_r = \frac{N_1}{N + N_1} \times 100\%, \tag{16}$$

式中, L_r 为漏株率, %; N 为测区内总段数; N_1 为测区内漏株段数。

每次测量 6 行排肥量, 每行进行 5 次试验, 得出甘蔗种植机的排肥量稳定性变异系数。

$$CV = \frac{S}{\delta} \times 100\%, \tag{17}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum \lambda_i^2 - (\sum \lambda_i)^2 / h}{h - 1}}, \tag{18}$$

式中, CV 为变异系数, %; S 为样本标准偏差; δ 为每行排肥量的平均值, kg ; λ_i 为每行排肥量, kg 。

随机抽取 20 m 的作业地膜, 展平后测量其破损的缝隙长度, 随机测试 5 个垄沟, 取平均值作为测试结果, 地膜破损率 (λ) 公式为:

$$\lambda = \frac{\sum l_\alpha}{lw} \times 100\%, \tag{19}$$

式中, l_α 为测试地膜第 α 处破损边长, m ; l 为测试地膜的长度, m ; w 为测试地膜的展平宽度平均值, m 。

采集试验数据后经过计算, 该甘蔗种植机的甘蔗深度合格率为 $83\% > 80\%$, 满足标准要求, 种植深度合格率反映了开沟器的性能, 说明设计的开沟器基本符合标准要求, 但还需要进一步的改善。覆土厚度合格率为 $91\% > 90\%$, 满足标准要求, 表明设计的覆土装置符合设计标准。该甘蔗种植机的种植密

度为 $135\ 331\text{ hm}^{-2} > 120\ 000\text{ hm}^{-2}$, 满足标准要求, 种植密度反映了抓种装置与播种机构的配合作业效果, 说明该机构的抓种装置与播种机构的设计符合标准要求, 并且该型甘蔗种植机的播种速度可以通过调速阀进行调节, 可以显著提高播种效率。该甘蔗种植机的伤芽率为 $4.7\% < 5.0\%$, 满足标准要求, 反映了抓种装置与播种机构对蔗种芽的伤害较高, 可以将抓种装置和播种机构与蔗种接触部分的材料改为橡胶等柔性材料加以改进。该型甘蔗种植机的漏株率较低为 $4.5\% < 5.0\%$, 满足标准要求, 漏株率反映了播种机构的抓种装置、传送刮板、播种箱以及弧形蔗种引导板的设计均符合要求。排肥量稳定性变异系数为 $6.1\% < 7.8\%$, 满足标准要求, 反映了施肥装置的作业效果符合标准要求。设计的甘蔗种植机的地膜破损率为 $51\% < 55\%$, 满足标准要求, 地膜破损率反映了设计的覆膜机构的性能, 该机器的破损率较高但仍在设计要求范围内, 基本符合设计标准, 可以在压膜轮的前方设计 1 个导膜装置用于降低地膜破损率。

4 结论

经过对甘蔗种植机机架的模态分析, 当激励频率为 $134.47\sim 514.35\text{ Hz}$ 时, 机架容易发生共振。经过试验, 该预切种式甘蔗种植机各项性能指标基本达到设计要求, 甘蔗种植深度合格率达到 83% , 设计的凸型开沟犁符合甘蔗种植标准, 覆土厚度合格率为 91% , 覆土装置设计合理, 种植密度达到 $135\ 331\text{ hm}^{-2}$, 且漏株率仅为 4.5% , 抓种装置与播种机构的设计符合种植标准, 伤芽率达到 4.7% , 设计的播种机构需要进一步改进, 排肥量稳定性变异系数达到 6.1% , 排肥机构的设计合理。地膜破损率为 51% , 设计基本符合行业要求与国家标准。该机器能够通过开沟、施肥、排种、覆土、盖膜等几个工序, 一次性完成甘蔗的种植, 避免了二次作业, 可以显著提高甘蔗的种植效率。

致谢: 感谢华南农业大学周志艳、曾山、王在满、曾文老师以及华南农业大学教学科研基地给予的支持和帮助!

参考文献:

[1] GOPI K, SRINIVAS J, MANIKYAM N, et al. Performance evaluation of mechanical and manual harvesting of sugarcane[J]. *Int J Curr Microbiol App Sci*, 2018, 7(2): 3779-3788.

[2] ALENCASTRE-MIRANDA M, DAVIDSON J R, JOHNSONR M, et al. Robotics for sugarcane cultivation: Analysis of billet quality using computer vision[J]. *IEEE RA-L*, 2018, 3(4): 3828-3835.

[3] 赵莹. 我国甘蔗收获机械化推广应用现状与发展建议 [J]. 中国农机化学报, 2016, 37(9): 236-244.

[4] USABORISUT P. Progress in mechanization of sugarcane farms in Thailand[J]. *Sugar Tech*, 2018, 20(2): 116-121.

[5] 李明, 田洪春, 黄智刚. 我国甘蔗产业发展现状研究 [J]. 中国糖料, 2017, 39(1): 67-70.

[6] 吴多广, 吴建涛, 谢静, 等. 中国甘蔗生产发展趋势分析 [J]. 广东农业科学, 2017, 44(7): 154-160.

[7] 周敬辉, 李尚平, 杨代云, 等. 甘蔗收获机刀盘轴向振动对甘蔗宿根切割质量的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 16-24.

[8] 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.

[9] 莫建霖, 刘庆庭. 我国甘蔗收获机械化技术探讨 [J]. *农机化研究*, 2013, 35(3): 12-18.

[10] 刘庆庭, 莫建霖, 李廷化, 等. 我国甘蔗种植机技术现状及存在的关键技术问题 [J]. *甘蔗糖业*, 2011(5): 52-58.

[11] 沈中华, 李尚平, 麻芳兰, 等. 小型甘蔗收获机喂入能力仿真与试验 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(11): 117-123.

[12] 王美美, 陈联诚, 刘庆庭, 等. 甘蔗种植机漏播监测与标记系统 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 50-55.

[13] 刘存瑞, 程浩然, 周乔, 等. 一种新型地轮驱动式甘蔗种植机关键部件设计 [J]. *农机化研究*, 2018, 40(1): 120-123.

[14] SAENGPRACHATANARUG K, WONGPICHET S, UENO M, et al. Comparative discharge and precision index of a sugarcane billet planter[J]. *Appl Eng Agric*, 2016, 32(5): 561-567.

[15] 孙伟, 闫宪飞, 王茁. 频率依赖性对黏弹性复合结构振动特性的影响分析 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(5): 121-128.

[16] SHEN X, HU W, FAN J. Automatic blade blend modeling and hexahedral mesh regeneration for aircraft engine optimization[J]. *Struct Multidiscip O*, 2018, 57(3): 1345-1355.

[17] 金鑫, 陈凯康, 姬江涛, 等. 基于模态置信度准则的插秧机支撑臂模态分析与结构优化 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(18): 93-101.

[18] BERTONHA R S, FURLANI C E A, VICENTE FILHO A S, et al. Fuel demand as a function of furrow opener and soil conditions in no-tillage system[J]. *Afr J Agric Res*, 2015, 10(11): 1266-1272.

[19] ZHANG X C, LI H W, DU R C, et al. Effects of key design parameters of tine furrow opener on soil seedbed properties[J]. *Int J Agr Biol Eng*, 2016, 9(3): 67-80.

[20] 裴铁雄, 陈永, 黄培强, 等. 甘蔗新品种的不同种植密度试验研究 [J]. 中国糖料, 2014(4): 6-10.

[21] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.

[22] 王关平, 孙伟. 一种马铃薯漏播检测及补偿装置的研发 [J]. 农业现代化研究, 2016, 37(5): 1008-1014.

[23] MO F, WANG J Y, REN H X, et al. Environmental and economic benefits of micro-field rain-harvesting farming system at maize (*Zea mays* L.) field scale in semiarid east African Plateau[J]. *Agric Water Manage*, 2018, 206: 102-112.

[24] MO F, LI X Y, NIU F J, et al. Alternating small and large ridges with full film mulching increase linseed (*Linum usitatissimum* L.) productivity and economic benefit in a rainfed semiarid environment[J]. *Field Crop Res*, 2018, 219: 120-130.

[25] RAMAKRISHNA A, TAM H M, WANI S P, et al. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam[J]. *Field Crop Res*, 2006, 95(2/3): 115-125.

[26] ZHOU L M, LI F M, JIN S L, et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China[J]. *Field Crop Res*, 2009, 113(1): 41-47.

[27] KHAZIMOV Z M, BORA G C, KHAZIMOV K M, et al. Development of a dual action planting and mulching machine for vegetable seedlings[J]. *EAEF*, 2018, 11(2): 74-78.

[28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 农业机械试验条件测定方法的一般规定: GB/T 5262—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[29] 农业部旱田作农机具质量监督检验测试中心. 中华人民共和国农业行业标准: 铺膜穴播机作业质量: NY/T 987—2006[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2006: 1-10.

【责任编辑 霍 欢】