

甘蔗收获机喂入系统结构改进与仿真试验

李尚平^{1,2} 邓 雄¹ 钟家勤¹ 宋俊敏² 王海波¹

(1. 广西大学机械工程学院, 南宁 530004; 2. 广西民族大学化学化工学院, 南宁 530008)

摘要: 通过试验研究和虚拟仿真分析发现, 现有的小型甘蔗收获机喂入系统齿轮箱设计存在缺陷, 易导致喂入系统的甘蔗堵塞。通过分析, 对喂入系统结构进行了改进设计, 将齿轮箱换成梯形齿型喂入辊, 同时两个切割器的刀轴由一对反向同步旋转的液压同步马达驱动; 通过 SolidWorks 软件建立喂入系统的三维模型, 再通过 ADAMS 软件进行仿真分析, 结果表明: 改进后的喂入系统不仅扩大了切割传动机构的物流通道, 而且将齿轮箱对甘蔗产生的被动的滑动摩擦阻力转化为改进后喂入辊对甘蔗产生的主动作用的滚动摩擦驱动力; 改进后的喂入辊使甘蔗在螺旋提升输送装置上的滞留时间较原来缩短了 35.9%, 对甘蔗的最大径向作用力比齿轮箱降低了 86%, 甘蔗更易进入物流通道, 其输送性能得到明显改善, 解决了喂入系统易于堵塞的问题, 对试验部分切割器马达压力测量结果起到了反证作用; 仿真试验也表明适当提高喂入辊转速有利于降低甘蔗收获机的堵塞率, 为喂入系统结构参数和位置参数的改进设计提供了参考依据。

关键词: 甘蔗收获机; 喂入系统; 齿轮箱; 设计; 仿真

中图分类号: S225.5⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0091-08

Structure Improvement and Simulation Test of Sugarcane Harvester Feeding System

Li Shangping^{1,2} Deng Xiong¹ Zhong Jiaqin¹ Song Junmin² Wang Haibo¹

(1. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University for Nationalities, Nanning 530008, China)

Abstract: On the basis of analyzing the defects and shortcomings of the existing sugarcane harvester feeding system, simulation analysis and experimental research has shown that the improvement of gearbox of feeding system is helpful to ameliorate the knife dish plugging problem in the sugarcane harvester. The structure improvement of feeding system was mainly carried out with respect to the functional characteristics of the gearbox. The gearbox was changed by feeding roller, and the shafts of two cutters were driven by a pair of reverse synchronous rotating hydraulic synchronous motor. The improved feeding system can expand the logistics channel of cutting transmission mechanism. Meanwhile, the negative sliding frictional resistance the gearbox has on sugarcane was converted into positive rolling frictional driving force produced by the feeding roller. The trapezoidal tooth on feeding roller can not only play the role of clamping and conveying sugarcane, but also envelope sugarcane and increase the contact surface between the sugarcane and feeding roller, which increases the dynamic friction of sugarcane. 3D graphics software SolidWorks was used to modeling, then the improved model was imported into simulation software ADAMS for motion and force analysis. The results show that the improved feeding roller can shorten the retention time on screw conveyor by 35.9%, as well as reduce the force exerted to the sugarcane by 86% compared to gearbox. That is to say, the sugarcane was more easily to skid into the logistics channel, and the conveying speed is faster with backward transport distance farther. The

收稿日期: 2015-09-21 修回日期: 2015-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51465006)

作者简介: 李尚平(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事先进制造技术、CAD/CAE 及制造技术信息化研究, E-mail: spli501@vip.sina.com

transmission performance is significantly improved, which can effectively suppress the feeding system plugging problem and play a disproof role of the test about cutter motor pressure measurement. The simulation experiment also shows that the retention time of the sugarcane on the screw was reduced relative to the speed of the feeding roller, and the amount of time of 150 r/min speed was shortened by 20% compared to that of 250 r/min speed. And the times that the feeding roller applied to the sugarcane was reduced relatively and the radial force exerted to the sugarcane was reduced significantly. Therefore, an appropriate increase in the feeding roller speed can improve the transportation quality of sugarcane and reduce the blocking rate of sugarcane harvester, which can provide a reference for improvement of cutter structure and position parameters.

Key words: sugarcane harvester; feeding system; gearbox; design; simulation

引言

甘蔗收获机喂入系统不仅影响甘蔗宿根的破头率和砍蔗质量,而且对甘蔗物流通畅性也产生显著性影响。针对物流系统,国内外很多文献做了大量研究^[1-9]。NORRIS 等^[10]指出现有甘蔗收获机的喂入系统存在巨大问题;解福祥等^[11]通过 Pro/E 和 ADAMS 虚拟样机技术对甘蔗收获机进行了动力学仿真,研究了各部件收获甘蔗时的物流过程;周勇等^[12]为了提高甘蔗收获机的作业质量,设计了一种斜置式甘蔗切割喂入装置,并进行了装置性能试验和对不同生长状态甘蔗的适应性试验。这些研究成果对甘蔗收获机物流系统的发展起了重要作用,为收获机的完善奠定了理论基础。

甘蔗经过切割器螺旋提升输送装置时,螺旋的向上提升与齿轮箱的位置限制会对甘蔗产生滞留的影响,易使甘蔗在喂入系统前端处堵塞,因此需要对喂入系统进行进一步的分析研究和改进。

针对该问题,以自主研究的甘蔗收获机为研究对象,通过理论分析、虚拟仿真和试验研究,分析喂入系统齿轮箱对甘蔗物流输送机理的影响,继而对喂入系统提出改进思路,最后通过仿真分析,研究喂入系统齿轮箱改进前后对甘蔗物流堵塞的影响。

1 喂入系统结构与工作原理

喂入系统主要结构如图 1 所示,包括:切割器、液压提升缸、喂入辊上辊、喂入辊下辊、输送辊上辊、输送辊下辊、输送辊安装板、提升架等。其中切割器采用双刀盘的切割器结构,由一个液压马达提供动力,通过齿轮箱驱动两刀盘同步转动。

喂入系统的工作原理是:收获机工作时,切割器的双刀盘切断甘蔗,在螺旋提升输送装置的作用下,切断的甘蔗被迅速向上提升和向后输送,接着甘蔗被喂入辊和输送辊夹持输送到后续的剥叶系统。

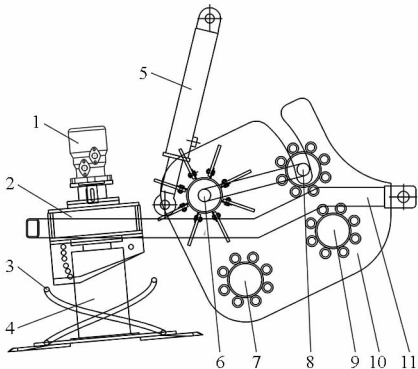


图 1 喂入系统结构简图

Fig. 1 Structure diagram of feeding system

1. 液压马达 2. 齿轮箱 3. 螺旋提升输送装置 4. 切割器
5. 液压提升缸 6. 喂入辊上辊 7. 喂入辊下辊 8. 输送辊上辊
9. 输送辊下辊 10. 输送辊安装板 11. 提升架

2 喂入系统物流分析与改进

2.1 现有喂入系统结构存在的问题

喂入系统齿轮箱结构与切割器的切割和输送性能密切相关,因此有必要对齿轮箱结构进行设计研究。刘智彪^[13]采用有限元思想、参数化优化设计方法,对切割器齿轮箱进行了结构优化设计,在保证齿轮箱结构强度和刚度都满足要求的情况下,使齿轮箱体的优化设计达到了轻量化的目的。

目前传统的喂入系统通常采用齿轮箱的结构来连接左右两刀轴系统,以此控制切割器两刀盘的转速同步,以避免刀片的相互干涉。通过前期试验研究发现,螺旋提升装置与齿轮箱之间形成了一个封闭空间,在收获机工作时,螺旋提升装置将甘蔗向上提升,给予甘蔗一个向上的力,而固定的齿轮箱对甘蔗产生向下的阻力,易于造成甘蔗物流的积压和滞留,影响对甘蔗物流向后的输送。随着收获机进给量的再增加或甘蔗密度的增大,单位时间进入切割喂入系统的甘蔗增加,当前期切断后的甘蔗不能迅速向后输送时,后续进入喂入系统的甘蔗就不断地在前期输入的甘蔗下方堆积重叠,形成楔形,此时

极易造成甘蔗物流的堵塞,如图 2 所示。图 3 所示为切割器喂入量过多时导致的切割器堵塞实物图。

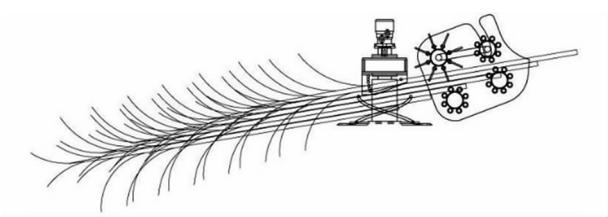


图 2 甘蔗形成堵塞示意图
Fig.2 Sugarcane forming block diagram



图 3 切割器堵塞图
Fig.3 Cutter jam real photo

2.2 喂入系统仿真分析

对甘蔗收获机喂入系统进行仿真分析(如图 4 所示)发现:当甘蔗被螺旋提升时,齿轮箱对甘蔗产生一个向下的阻力,如图 5 所示,横坐标表示甘蔗蔗头经过喂入系统的仿真时间,纵坐标表示齿轮箱对甘蔗的径向作用力。



图 4 齿轮箱对甘蔗产生作用简图
Fig.4 Diagram of force acting on sugarcane from gearbox

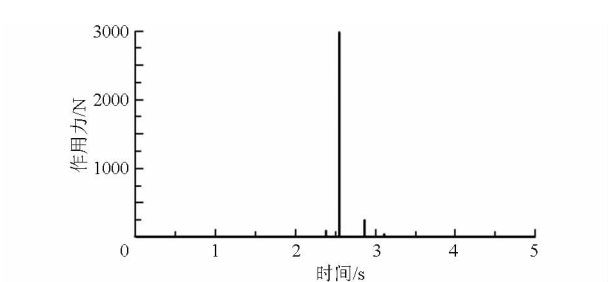


图 5 齿轮箱对甘蔗作用力变化曲线
Fig.5 Changing curve of force acting on sugarcane from gearbox

由图 5 可知,齿轮箱对甘蔗产生若干次作用力,且作用力较大,阻碍了甘蔗的向后输送。

2.3 喂入系统堵塞的试验分析

以自主研制的小型整杆式甘蔗收获机为研究对象,对其进行试验测试,通过改变螺旋提升输送装置到变速箱的距离 S ,考察其对喂入系统物流通畅性

的影响。

2.3.1 试验设备及条件

主要试验设备有:小型甘蔗收获机样机(如图 6 所示)、HM20 型通用型压力传感器、uT3004S 型采集卡、uTekOrb 数据采集处理与分析软件、便携式计算机、转速表等。



图 6 整杆式收获机
Fig.6 Whole stalk harvester

试验条件:甘蔗品种为粤糖-159;甘蔗的平均长度在 2.5 m 左右;甘蔗基部、中部、尾部的平均直径分别约为 22 mm、28 mm、24 mm;甘蔗收获机各部分运转正常。

2.3.2 试验方法

在甘蔗收获机行走速度为零的情况下,仅靠螺旋提升输送装置为甘蔗输送提供输入动力。试验时,人工将甘蔗送入切割器,由切割器的螺旋提升输送装置将甘蔗带入甘蔗收获机的物流通道。

在切割器的驱动马达处加接一个压力传感器,做好标记后接到采集卡和计算机上。由于切割器的驱动马达位于收获机的中部,接线拆卸很不容易,因此利用一个三通转接头安装在切割器驱动马达的一个油管和阀的连接处,将拆卸点转换到收获机的侧面,以便于拆卸(如图 7 所示)。



图 7 测压接口
Fig.7 Manometry interface

采用单因素对比试验,变量为螺旋提升输送装置到变速箱的距离 S 。将距离 S 分别设为 150、170、200 mm(可在变速箱底板下安装一块可调挡板,挡板可通过螺栓调整上下移动,以此控制螺旋与变速箱的距离),如图 8 所示;试验时记录切割器刀盘驱

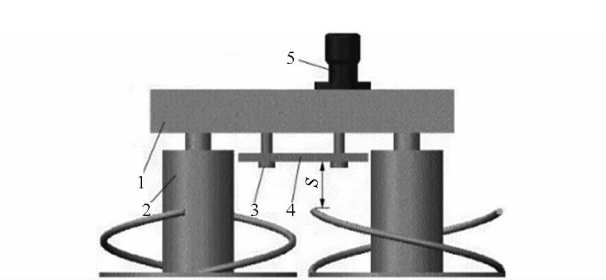


图8 切割器二维简图

Fig.8 Two-dimensional diagram of cutter

1. 齿轮箱 2. 切割器 3. 螺栓 4. 挡板 5. 液压马达

动马达液压压力的变化。

每组试验采用5次重复性试验,每次人工将5根甘蔗一起送入切割器。试验工况为:刀盘转速780 r/min,剥叶机转速660 r/min,输送辊转速200 r/min。

数据采集原理是:通过压力传感器测量驱动刀盘旋转的液压马达压力,由采集卡将采集到的压力信号传输给计算机,最后由计算机读出压力^[14]。

2.3.3 试验结果

螺旋提升输送装置到变速箱距离S对切割器马达压力的影响如表1所示。

将上述试验数据进行处理,得到不同试验序号下距离S对切割器马达压力影响的曲线图(如图9所示)。

由图9可明显看出,随着螺旋提升输送装置到

表 1 距离 S 对马达压力影响的单因素试验结果

Tab.1 Single factor test results of influence of distance

	S on motor pressure					MPa
S/mm	试验序号					
	1	2	3	4	5	
200	8.13	7.81	7.79	7.74	7.75	
170	8.42	8.60	8.53	8.67	8.49	
150	9.10	9.32	9.12	9.13	8.90	

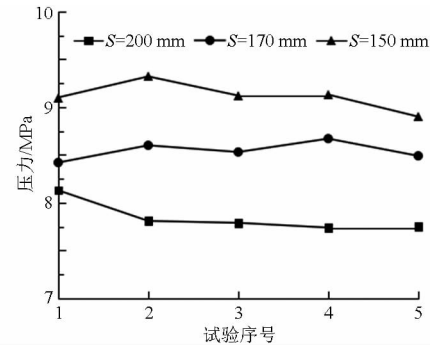


图9 距离S对马达压力影响的曲线

Fig.9 Curves of influence of distance S on motor pressure

变速箱距离的减小,切割器马达的压力随之增大。为进一步研究切割器马达压力的变化情况,以切割器马达压力为指标进行单因素方差分析,如表2所示。方差分析取 $\alpha=0.05$,由F大于 F_{crit} 可知,螺旋提升输送装置到变速箱的距离S对切割器马达压力具有显著的影响。

表2 切割器马达压力方差分析

Tab.2 Variance analysis for cutter motor pressure

差异源	SS	df	MS	F	P	F_{crit}	显著性
组间	4.045 48	2	2.022 74	104.750 9	2.53×10^{-8}	3.885 294	*
组内	0.231 72	12	0.019 31				
总计	4.277 20	14					

2.4 喂入系统结构的改进

图10所示为甘蔗在通过原有喂入系统时,齿轮箱对甘蔗作用的力学模型,甘蔗自身受重力G作用,螺旋系统对甘蔗的支持力为 N_0 ,齿轮箱对甘蔗不仅产生一个斜向下的压力 N_1 ,而且还产生一个与甘蔗向后输送速度 V_1 反向的滑动摩擦阻力 F_1 ,这对甘蔗的输送是不利的。

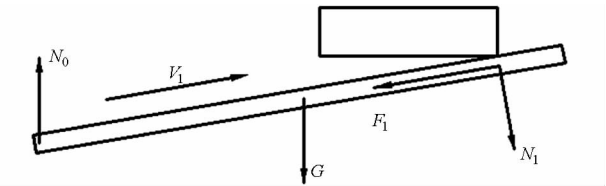


图10 甘蔗受齿轮箱影响的力学模型

Fig.10 Mechanical model of sugarcane affected by gearbox

通过上述分析可知,齿轮箱结构的改进有助于改善甘蔗收获机刀盘处堵塞的问题。将现有的喂入

系统齿轮箱用梯形齿型的喂入辊代替,如图11所示,喂入辊位于刀盘的后上方,其两端分别通过滚动轴承与2个基座连接(基座通过外伸梁与固定部分套筒连接),同时两端还有驱动喂入辊旋转的传动机构,传动机构可为液压马达驱动或链条链轮驱动。2个切割器均安装有驱动刀轴反向同步旋转的液压同步马达,为了控制同步马达的同步精度,在系统设计时要考虑液压执行器动作的控制方式,如对液压控制阀进行延时控制,同时考虑每个马达的排量精度,安装时要正确调整并考虑排气的可靠性^[15]。

改进后喂入系统喂入辊对甘蔗作用的力学模型如图12所示,甘蔗自身受重力G作用,螺旋系统对甘蔗的支持力为 N_3 ,主动旋转的喂入辊对甘蔗不仅产生一个向下的压力 N_2 ,而且还产生一个与甘蔗输送速度 V_2 同向的滚动摩擦驱动力 F_2 ,这样可以克服相互接触的甘蔗之间的摩擦阻力,加快甘蔗的输送

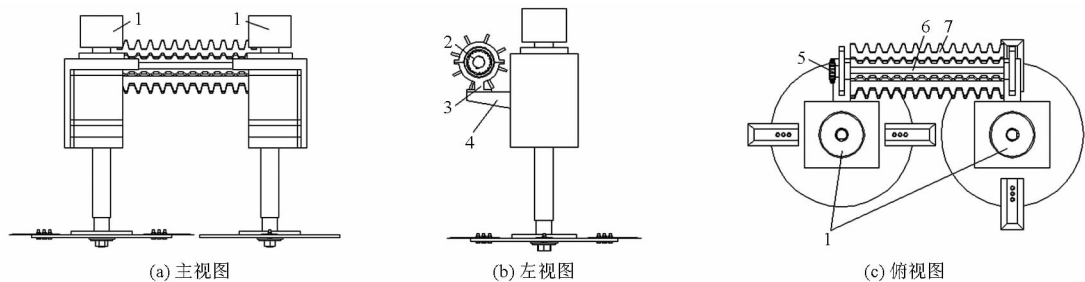


图 11 改进后喂入系统的三视图

Fig. 11 Three views of improved feeding system

1. 同步液压马达 2. 滚动轴承 3. 基座 4. 外伸梁 5. 动力机构 6. 喂入辊 7. 梯形齿

速度,降低甘蔗堆积形成楔形的可能性,减少甘蔗在喂入系统的堵塞。

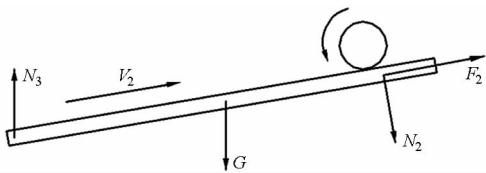


图 12 改进后的喂入辊对甘蔗产生影响的力学模型

Fig. 12 Mechanical model of sugarcane affected by improved feeding roller

改进后的喂入系统可以充分利用齿轮箱上方的冗余空间,扩大了甘蔗传输的物流通道;同时,由于改进前喂入系统齿轮箱对甘蔗产生的是被动作用的滑动摩擦阻力,变为改进后喂入系统的喂入辊对甘蔗产生主动作用的滚动摩擦驱动力,使得甘蔗在沿速度方向产生的合力更大,加速度也更大;因此,甘蔗物流的传输特性大为改善。并且喂入辊上的梯形齿型不仅可以起到夹持甘蔗输送的作用,而且可以将甘蔗包络,使甘蔗与喂入辊的接触面增大,因此甘蔗受到喂入辊的滚动摩擦的作用力也增大,有助于甘蔗向后输送,并且有利于甘蔗的分流传输,改善甘蔗收获机喂入系统容易堵塞的问题。

3 改进后喂入系统仿真试验

3.1 仿真目的

通过虚拟样机进行仿真分析,研究改进前、后不同喂入系统对甘蔗物流输送能力的影响,并对上述试验结论进行反证,为后续喂入系统的改进设计提供理论分析依据。

3.2 试验设计与安排

本试验采用 2 组单因素仿真试验,第 1 组试验的试验变量为:改进前后的不同喂入系统结构影响的对比(即改进前的齿轮箱与改进后的转速为 250 r/min 的喂入辊对比);第 2 组试验的试验变量为:改进后的喂入辊不同转速影响的对比。两组试验的指标均为甘蔗物流在前端喂入系统的滞留时间和对甘蔗的作用力。

3.3 虚拟样机模型的建立

用三维建模软件 SolidWorks 建模,进行适当简化后导出 parasolid 文件,再导入到 ADAMS 软件中^[16],并施加载荷和约束,生成运动学仿真模型。然后对甘蔗进行柔性化处理^[17-19]。甘蔗柔性化主要有 3 种方法:离散梁法、Flex 法和 AutoFlex 法。本文选用 Flex 法将甘蔗用有限元软件 ANSYS 进行网格划分等处理后以 mnf 格式文件导入到 ADAMS 中,因为使用 Flex 法虽然仿真耗时较多,但是能够较好地模拟真实甘蔗的结构且最能反映甘蔗的力学特性。定义甘蔗的仿真参数如表 3 所示^[20-21]。

表 3 甘蔗属性

Tab. 3 Attribute of sugarcane

参数	数值
高度/mm	2 500 ~ 2 700
直径/mm	26.5
泊松比	0.33
弹性模量/Pa	1.1×10^{10}
分布密度/($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3}$)	1.1×10^{-6}

仿真过程如图 13 所示。仿真参数的设定:压蔗辊转速为 165 r/min,压蔗角度为 60°,刀盘转速为 650 r/min,中间喂入辊转速为 250 r/min,喂入系统的平移速度为 0.5 m/s。

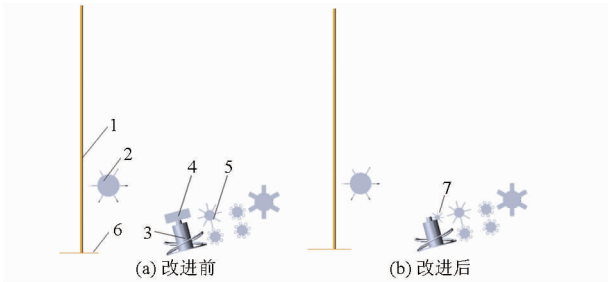


图 13 仿真过程

Fig. 13 Simulation process

1. 甘蔗 2. 压蔗辊 3. 切割器 4. 齿轮箱 5 中间喂入辊 6. 地面 7. 前端喂入辊

3.4 仿真试验结果与分析

取甘蔗头部为 mark 点作为标记记录仿真结果

的输出,当 $t = 2.1\text{ s}$ 时,甘蔗与地面的 bushing 连接失效(即甘蔗与地面脱离),改进前的齿轮箱与改进后转速分别为 150、200、250 r/min 的前端喂入辊的甘蔗位移仿真曲线图如图 14 所示;仿真数据的正负值与选取的基准有关,此处参照基准为喂入辊中轴线。甘蔗 mark 点的初始位置为地面,地面的位置低于喂入辊中轴线,所以会出现负值,甘蔗在螺旋提升输送装置上纵向跳动时就会出现位移曲线的波动情况。改进后前端喂入辊 3 种转速条件下喂入辊对甘蔗的作用力仿真结果如图 15 所示。

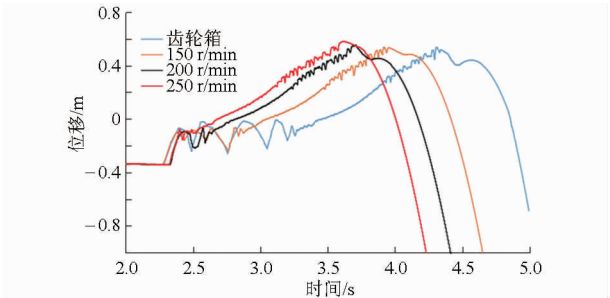


图 14 甘蔗位移仿真曲线

Fig. 14 Simulation curves of sugarcane displacement

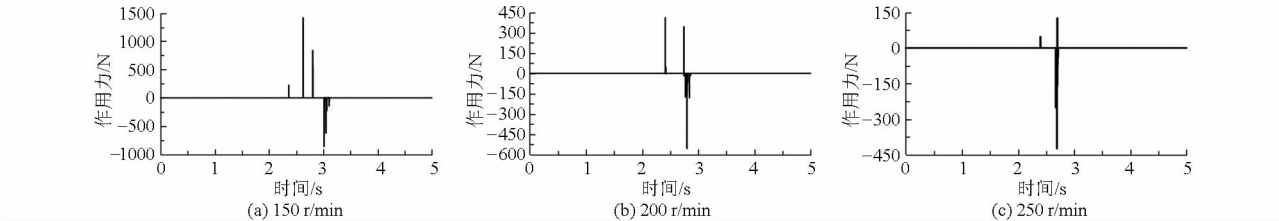


图 15 喂入辊对甘蔗的作用力仿真结果

Fig. 15 Simulation results of force acting on sugarcane from feeding roller

由图 15 结合仿真过程可知,改进前、后甘蔗蔗头开始被螺旋提升输送装置提升的时间、蔗头进入喂入辊时间、蔗头与喂入辊中轴线处于同一水平时间(即位移为零时的时刻)、甘蔗蔗尾刚好离开螺旋

提升输送装置的时间、甘蔗在螺旋提升输送装置上的滞留时间以及改进后喂入辊在 250 r/min 时与改进前齿轮箱结构相比甘蔗输送滞留时间的对比,结果如表 4 所示。

表 4 输送时间比较

Tab. 4 Comparison of feed time

装置		蔗头开始被螺旋提升时间/s	蔗头进入喂入辊时间/s	蔗头与喂入辊中轴线同一水平时间/s	蔗尾离开螺旋时间/s	滞留时间/s
改进前	齿轮箱	2.25	3.28	3.46	4.34	2.09
	150 r/min	2.25	2.84	3.04	3.92	1.67
改进后的喂入辊	200 r/min	2.25	2.65	2.82	3.69	1.44
	250 r/min	2.25	2.53	2.68	3.59	1.34
甘蔗输送滞留时间缩短率/%		0	22.9	22.5	17.3	35.9

其中滞留时间是指甘蔗蔗尾刚好离开螺旋提升输送装置的时间与甘蔗头部开始被螺旋提升输送装置提升时间的差值。由表 4 分析可知,当转速为 250 r/min 时,与改进前的喂入系统相比,改进后的喂入辊使甘蔗在螺旋提升输送装置上的滞留时间缩短了 35.9%,甘蔗更易进入物流通道,同时甘蔗提升输送速度更快、向后输送更远,甘蔗的输送性能得到显著提高,可有效抑制喂入系统易于堵塞的问题;而对于改进后喂入系统在不同转速的影响下,随着转速提高,滞留时间相对减少,与转速为 150 r/min 的喂入辊相比,当喂入辊转速为 250 r/min 时,甘蔗滞留时间缩短了 20%。因此,对于改进后的喂入系统,适当提高喂入辊的转速可提高甘蔗的输送速度。

由图 5 和图 15 可知,与改进前喂入系统相比,

当喂入辊在 250 r/min 时,改进后的喂入辊对甘蔗的最大径向作用力降低了 86%;改进后喂入辊在 3 种不同喂入辊转速下,随着转速的提高,对甘蔗的作用次数相对减少且对甘蔗的径向作用力也普遍减小,与 150 r/min 相比,转速为 200 r/min 和 250 r/min 的喂入辊对甘蔗的最大径向作用力分别降低了 61% 和 70%,说明适当提高喂入辊转速有助于甘蔗的向后输送,同时,在一定程度上对 2.3 节试验部分切割器马达压力测量起到了反证作用。

综合上述分析可知,改进后的喂入辊更有利于甘蔗的输送,使甘蔗滞留的时间更短,有利于降低甘蔗收获机的堵塞率,为确定喂入系统结构参数和位置参数提供了参考依据,也为后期试验平台的搭建和物理样机的开发提供了理论指导。

4 结论

- (1)通过理论分析、虚拟仿真和试验研究得出,喂入系统齿轮箱的结构对甘蔗的向后输送产生一定的阻碍作用,使甘蔗在切割器处更易堵塞,需要对其改进。
- (2)将喂入系统的齿轮箱改换成喂入辊,2 个切割器的刀轴由反向同步旋转的液压同步马达驱动,这样不仅扩大了切割传动机构的物流通道,而且将齿轮箱对甘蔗产生的不利滑动摩擦阻力转化为喂入

辊对甘蔗产生的滚动摩擦的驱动力。

(3)通过仿真分析对比改进前、后的喂入系统,改进后甘蔗在螺旋提升输送装置上的滞留时间缩短了 35.9%,相比改进前齿轮箱对甘蔗的作用,改进后的喂入辊对甘蔗的最大径向作用力降低了 86%,甘蔗更易进入物流通道,其输送性能得到明显改善,可有效抑制喂入系统易于堵塞的问题,对试验部分切割器马达压力测量起到了反证作用。同时,仿真分析也说明了适当提高喂入辊的转速可提高甘蔗的输送速度,有利于降低甘蔗收获机的堵塞率。

参 考 文 献

1 RIPOLI T C, RIPOLI L C, GAMERO C A. Effects of two different base cutters in green cane mechanical harvest[C] // 2003 ASAE Annual Meeting, ASAE Paper 031035, 2003.

2 RAZAVI J, KARDANY M, MASOUMI A. Effects of some cutting blades and plant factors on specific cutting energy of sugarcane stalk[C] // Proceeding of CIGR 17th World Congress, 2010: 13 – 17.

3 HURNEY A P, CROFT B J, GRACE D, et al. Influence of harvester base cutters on ratooning of sugarcane[M]. Tully: BSES Limited Publication, 2005.

4 DAVIS R J, NORRIS C P. Improving the feeding ability of sugarcane harvesters[C] // Proceedings of the 2002 Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, 2002: 190 – 198.

5 麻芳兰, 韦荣发, 范志达, 等. 小型整秆式甘蔗收割机切割系统的改进与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 18 – 24. MA Fanglan, WEI Rongfa, FAN Zhida, et al. Improvement and experiment on cutting system of small whole-stalk sugarcane harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15): 18 – 24. (in Chinese)

6 李婉, 李尚平, 刘东美. 小型整秆甘蔗收割机械喂入机构仿真分析与试验研究[J]. 农机化研究, 2010(7): 152 – 155. LI Wan, LI Shangping, LIU Dongmei. Simulation and experimental investigation for the feeding mechanism in small-scale whole stock sugarcane harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(7): 152 – 155. (in Chinese)

7 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)

8 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)

9 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. SHEN Zhonghua, LI Shangping, MA Fanglan, et al. Simulation and experiment on feed ability of small sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 117 – 123. (in Chinese)

10 NORRIS C P, DAVIS R J, POULSEN L S. An investigation into the feeding of lodged green cane by harvesters[C] // Proceedings of the 1998 Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technology, 1998, 20: 224 – 231.

11 解福祥, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 甘蔗收割机物流虚拟试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 90 – 94. XIE Fuxiang, OU Yinggang, LIU Qingting, et al. Virtual experiment on flow simulation of sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 90 – 94. (in Chinese)

12 周勇, 区颖刚, 莫肇福. 斜置式甘蔗切割喂入装置设计及试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 17 – 23. ZHOU Yong, OU Yinggang, MO Zhaofu. Design and experiment of oblique cutting and feeding device for sugarcane[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(14): 17 – 23. (in Chinese)

13 刘智彪. 小型甘蔗收割机切割系统的设计与研究[D]. 南宁: 广西大学, 2011. LIU Zhibiao. The design and research for the cutting system of the small sugarcane harvester[D]. Nanning: Guangxi University, 2011. (in Chinese)

14 王增. 甘蔗收割机入土切割控制的机理研究与设计仿真[D]. 南宁: 广西大学, 2014. WANG Zeng. Research and simulation design on the mechanism controller system based on the cut depth of sugarcane harvester base cutter[D]. Nanning: Guangxi University, 2014. (in Chinese)

15 曹阳勇, 李巧梅, 吴国庆, 等. 液压同步系统的研究进展[J]. 现代制造工程, 2014(11): 136 – 140. CAO Yangyong, LI Qiaomei, WU Guoqing, et al. The research progress of hydraulic synchronization system[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2014(11): 136 – 140. (in Chinese)

16 葛正浩. ADAMS 2007 虚拟样机技术[M]. 北京:化学工业出版社,2010.

17 赵希芳. ADAMS 中的柔性体分析研究[J]. 电子机械工程,2006(3):62-64.
ZHAO Xifang. A study on flexible body using ADAMS[J]. Electro-Mechanical Engineering,2006(3):62-64. (in Chinese)

18 栾锡富. ADAMS 柔性体建模方法的研究[J]. 佳木斯大学学报:自然科学版,2007,3(5):370-371.
LUAN Xifu. Research on modeling method of flexible bodies using ADAMS[J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition,2007,3(5):370-371. (in Chinese)

19 蒲明辉,吴江. 基于 ADAMS 的甘蔗柔性体模型建模研究[J]. 系统仿真学报,2009,7(4):1930-1932.
PU Minghui, WU Jiang. Study on flexible sugarcane modeling based on ADAMS software[J]. Journal of System Simulation, 2009,7(4):1930-1932. (in Chinese)

20 蒲明辉. 小型甘蔗收割机虚拟设计及仿真[D]. 南宁:广西大学,2005.
PU Minghui. The virtual design and simulation for small-scale type sugarcane harvester[D]. Nanning:Guangxi University, 2005. (in Chinese)

21 宋融融. 小型甘蔗收割机台架物流仿真及动态分析与设计[D]. 南宁:广西大学,2006.
SONG Rongrong. The kinematics simulation and dynamic analysis and design of the mini-type sugarcane harvester's uplift[D]. Nanning:Guangxi University, 2006. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 114 页)

23 刘宝,宗力,张东兴. 锤片式粉碎机空载运行中锤片的受力及运动状态[J]. 农业工程学报,2011,27(7):123-128.  
LIU Bao, ZONG Li, ZHANG Dongxing. Force and motion states of hammer mill at unloaded running[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 123-128. (in Chinese)

24 周勇,余水生,夏俊芳. 水田高茬秸秆还田耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(8):46-49,77.  
ZHOU Yong, YU Shuisheng, XIA Junfang. Design and experiment of cultivator for high straw returning in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 46-49, 77. (in Chinese)

25 高凤. 双螺旋变螺旋距旋耕起垄机的研究与设计[D]. 南昌:江西农业大学,2013.  
GAO Feng. Research and design of the double helix pitch rotary tilling ridger[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2013. (in Chinese)

26 张秀梅,张居敏,夏俊芳,等. 水旱两用秸秆还田耕整机关键部件设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(11):10-16.  
ZHANG Xiumei, ZHANG Jumin, XIA Junfang, et al. Design and experiment on critical component of cultivator for straw returning in paddy field and dry land[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 10-16. (in Chinese)

27 贾洪雷,黄东岩,刘晓亮,等. 耕作刀片在刀辊上的多头螺旋线对称排列法[J]. 农业工程学报,2011,27(4):111-116.  
JIA Honglei, HUANG Dongyan, LIU Xiaoliang, et al. Symmetrical multi-spiral arrangement of tillage blades on rotor[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 111-116. (in Chinese)

28 徐红光,朱茂桃,耿松. 1GF-170 型灭茬旋耕机刀具排列方法设计[J]. 安徽农业科学,2011(34):21495-21496.  
XU Hongguang, ZHU Maotao, GENG Song. The arrangement design of 1GF-170 type stubble-breaking and rotary-tiller blade [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011(34): 21495-21496. (in Chinese)

29 谢洪昌,赵世宏,高勇. 评价马铃薯打秧机作业质量的指标及检测方法[J]. 现代化农业,2011(11):44-46.  
XIE Hongchang, ZHAO Shihong, GAO Yong. The evaluation index and detection method for working quality of potato haulm cutter[J]. Modernizing Agriculture, 2011(11): 44-46. (in Chinese)

30 袁志发,周静萍. 试验设计与数据分析[M]. 北京:高等教育出版社,2000.

31 何为,薛卫东,唐斌. 优化试验设计方法与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2012.