

打结器运动图像与捆绳张力信息同步获取系统研究*

张安琪 陈龙健 李 诚 张绍英 李海涛 韩鲁佳

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 在已有方捆机上搭建了一套可实时同步获取打结器运动图像和捆绳张力信息的试验系统。开发了用于同步触发高速摄影与张力传感器的同步模块,通过在 1 000 Hz 频率参数环境下进行试验,分析高速摄影捕捉到的目标图片数与张力传感器捕捉到的目标数据点数,发现二者数目相同,且不同组打结过程打结器运动特征点与捆绳张力部分峰值点对应齿盘度数的变异系数均小于 3%。基于所得运动图像信息与张力信息得出了打结器各机构的运动时序范围,确定了揽绳器、钩钳、脱绳杆等机构的详细运动时序。

关键词: 打结器 捆绳 运动图像 张力 同步

中图分类号: S817.11*5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0031-07

Synchronous Acquiring System about Information of Bale Knotter Movement and Cord Tension

Zhang Anqi Chen Longjian Li Cheng Zhang Shaoying Li Haitao Han Lujia

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The bale knotter is the core components of the baler. To understand the working principle of the bale knotter more deeply, more and more researchers have built varieties of the knotter test bench. But this bale knotter test bench could not get the motion state of D-bale knotter and the tension of cord synchronous in the process of straw baling, a set of D-bale knotter movement and cord tension information synchronous acquiring system in real time was set up in the existing square baler. In order to achieve the goal of synchronous acquiring information, a synchronization module was designed for synchronous trigger high-speed photography and tension sensor. In order to verify performance of the system, a test was carried out under the condition of 1 000 Hz. The object of this test was wheat straw. Four groups of tests were carried out. From the tests it can be found that the number of target images captured by the high-speed photography and the number of target data captured by tension sensor were the same, and the feature points of D-bale knotter movement and variation coefficient of peaks of cord tension corresponding to the tooth plate degree was less than 3% in different sets of the tests. From the tests it could be known that the system can get the information of D-bale knotter movement and cord tension at the same time. The motion sequence range of D-bale knotter was obtained based on the information of knotter movement and cord tension. The motion sequence was more accurate than the existed motion sequence got by other researchers. The accurate motion sequence chart of the rope disc, bill hook and knife lever were got from the motion sequence. It could help to understand the working principle of D-bale knotter more clearly. The synchronous acquiring system built the foundation of the geometrical conditions for D-bale knotter. It was very useful for the research of D-bale knotter.

Key words: Knotter Cord Moving image Tension Synchronous

收稿日期: 2015-07-22 修回日期: 2015-08-17

* 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (IRT1293)

作者简介: 张安琪, 博士生, 主要从事生物质资源开发与利用研究, E-mail: zhanganqi07@126.com

通讯作者: 韩鲁佳, 教授, 博士生导师, 主要从事生物质资源开发与利用研究, E-mail: hanlj@cau.edu.cn

引言

我国是农作物生产大国,秸秆年产出量 7 亿 t 左右,除一部分秸秆用于能源化、饲料化、肥料化外,仍有 1/3 秸秆尚未得到合理利用^[1-2]。秸秆产出量大,分布广泛,季节性强,秸秆的收储运是其高效利用的关键环节^[3],打捆机作为秸秆收储运的重要工具,需求十分迫切。打结器是秸秆打捆机的核心技术部件,主要应用的有 C 型、D 型两种结构形式,其中 D 型打结器因故障率低、成结动作快、结构紧凑而得到广泛应用,一直是国内外学者的研究热点^[4-15]。

为打破技术垄断,深入了解 D 型打结器的工作原理,不断优化工作效能,许多学者构建了各式各样的打结器试验台或检测单元^[16-18]。但这些研究均是针对打捆机成捆过程中打结器运动状态或者捆绳张力变化分别开展研究,且部分试验台建立在无压缩草捆环境下。而实际生产中打捆机成结性能取决于打结器运动和捆绳张力变化耦合作用,且压缩物料的种类及特征参数对打捆机成结性能也有影响,而捆绳及压缩物料的运动状态及力学变化难以通过传统仿真分析方法获得。鉴于此,本文研究可实时同步获取秸秆捆扎过程中打结器运动图像和捆绳张力信息的试验系统,以此为后续建立打结器几何尺寸参数边界条件及创造高可靠打结器奠定重要基础。

1 系统构建

1.1 D 型打结器平台

本研究选择在中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院设计制造的 9YFQ-1.5 型秸秆捡拾压捆机基础上搭建了一套 D 型打结器运动图像及捆绳张力信息实时同步获取系统。该方捆机压缩室横截面尺寸 355 mm×440 mm,草捆可调长度 30~132 cm,打结器主轴额定转速 100 r/min。该打捆机所使用的 RS3770 型打结器为德国原装进口的 D 型打结器,打结器三维模型如图 1 所示。

1.2 打结器运动图像信息实时获取

为确保可以全面捕捉打结过程捆绳的运动轨迹,设置了 2 台高速摄影机分别安装于方捆机顶部和打结器侧面用于从 2 个角度进行拍摄。研究使用的为美国 Fastec Imaging 公司生产的 TS3-100SC4 型高速摄影机。该高速摄影机的最大支持分辨率为 1 280 像素×1 024 像素,最大支持帧频 5 600 帧/s,镜头焦距为 25 mm。高速摄影机 1 通过三脚架安装在打结器观察口侧面,拍摄视角如图 2a 所示,该高

速摄影机由人工操作 Arm 键、Trigger 键来控制。高速摄影机 2 通过机架安装在打捆机顶部,拍摄视角如图 2b 所示,该高速摄影机通过千兆以太网将其以太网端口与电脑以太网端口连接,由人工操作电脑来控制。考虑到试验现场光线不足,检测平台引入了 4 盏 LED 灯用于补光。

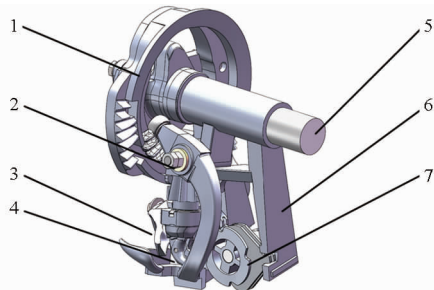


图 1 D 型打结器三维模型

Fig. 1 Three-dimensional diagram of D-bale knotter

1. 齿盘 2. 脱绳杆组件 3. 滚子压板 4. 打结嘴组件 5. 主轴
6. 机架 7. 夹绳盘组件

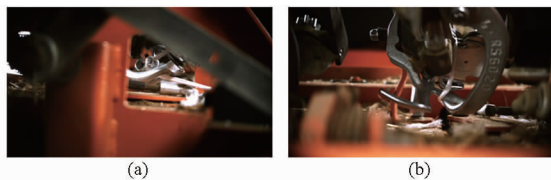


图 2 高速摄影机拍摄视角

Fig. 2 Photo shot by high speed camera

(a) 高速摄影机 1 视角 (b) 高速摄影机 2 视角

1.3 捆绳张力信息实时获取

由于打结器结构非常紧凑,张力传感器安装在打结器支撑支架与压缩捆室之间位置(图 3)。研究使用的为德国霍尼希曼公司生产的 SK122FM-3-17-3-O 型张力传感器。该传感器测量范围为 0~3 kN,输出信号为 0~10 V 标准电压信号,采集精度为 0.01 N,采样频率可选 100、200、1 000、2 000 Hz 4 种,并配套张力分析软件 HCC-EASY,具有测量数据实时显示、在线分析等功能。



图 3 张力传感器安装位置

Fig. 3 Installation location of tension sensor

1. 打结器支撑支架 2. 张力传感器 3. 压缩捆室 4. 捆绳

1.4 打结器运动图像与捆绳张力信息的同步控制

高速摄影捕捉光信号,张力传感器输出电信号,研究通过同时控制光信号与电信号的通、断来实现

运动图像与张力数据的同步。同步方案如图 4 所示。开发了同步电路板用于同步控制,同步控制电路图如图 5 所示,该电路图中包含电源管理模块和信号控制模块。

(1)电源管理模块

输入端子 VBAT 接锂电池“+”,VBAT_GND 接锂电池“-”。电源管理模块中的升压电路首先将锂电池 3.7 VDC 电压转换成 12 VDC,再通过DC/DC 隔离电源模块将 12 VDC 隔离并转换成12 VDC、0、-12 VDC 3 路电源输出,用于给信号控制模块中的LM358D 双运算放大器其他芯片供电。

(2)信号控制模块

信号控制模块是同步电路板中的核心组件,主要用于同时控制光信号与电信号的通、断。光信号控制单元有两个输入端,其中一个输入端 VDD 为 12 V 电压恒定值,另一端 SPST_SWITCHES_CTL 处电压与接近开关和小磁铁的距离有关,当接近开关与小磁铁距离小于 2 mm 时,三极管基极电压小于集

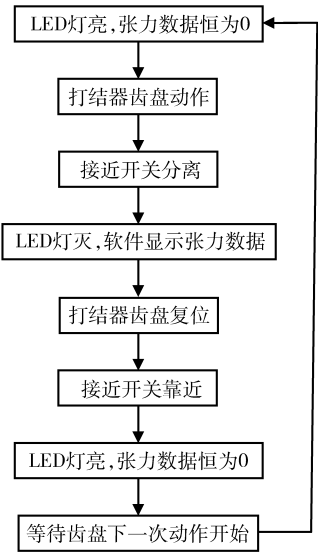


图 4 同步方案流程

Fig. 4 Flow diagram of synchronous scheme

电极电压,基极电压大于发射极电压,三极管导通,LED 灯点亮并保持;当接近开关与小磁铁距离大于

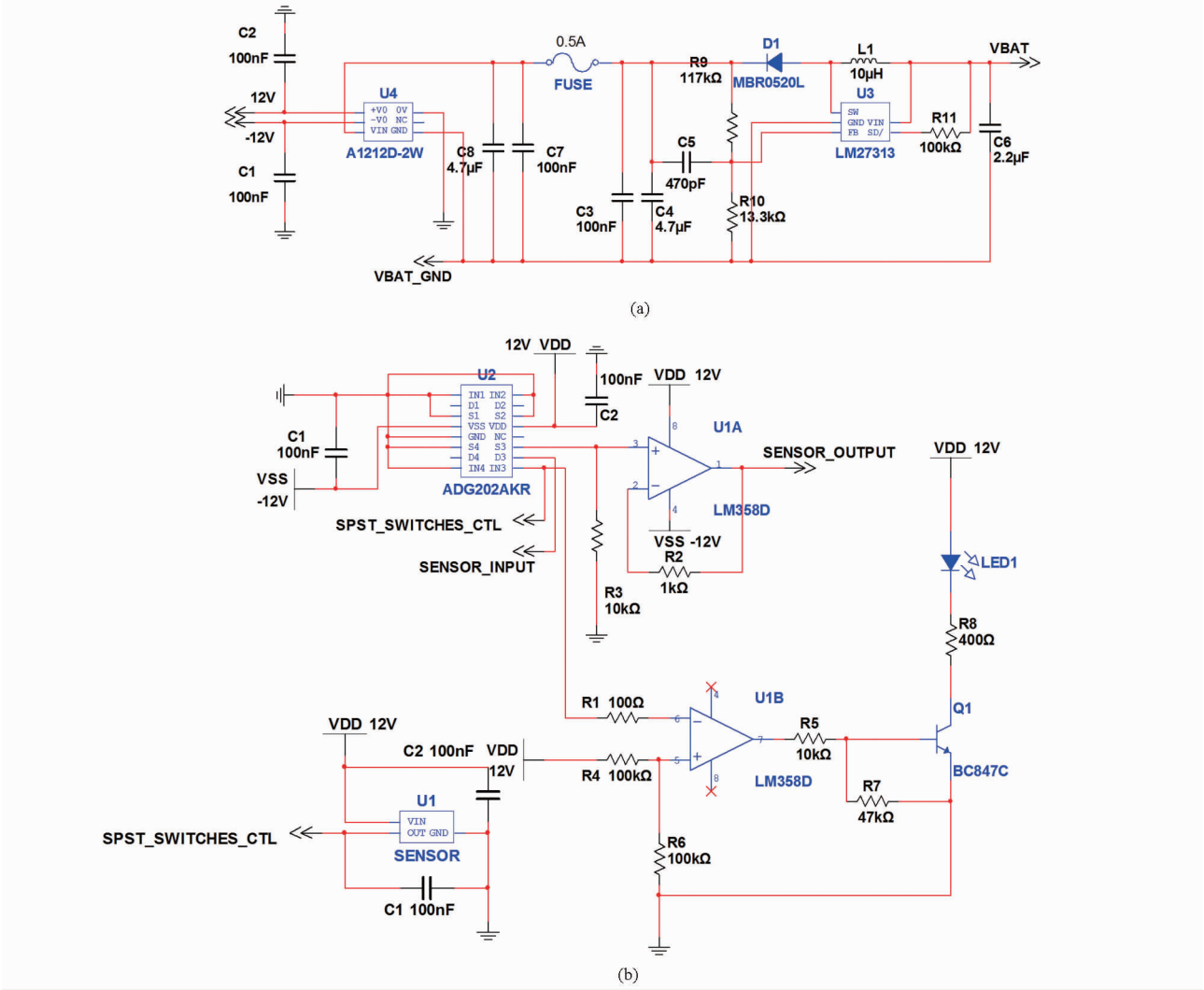


图 5 同步控制电路图

Fig. 5 Circuit diagram of synchronous

(a) 电源管理模块 (b) 信号控制模块

2 mm 时,基极电压小于发射极电压,三极管截止,LED 灯熄灭并保持。电信号控制单元中 ADG202AKR 开关的接通条件为高电平,当接近开关与小磁铁距离小于 2 mm 时,引脚 S3 和 D3 不导通,此时张力信号被阻断,张力传感器软件显示数据为 0;当接近开关与小磁铁距离大于 2 mm 时,引脚 S3 和 D3 导通,张力信号传输到 PC 机,张力传感器软件读出张力数据。

1.5 同步系统集成

同步获取系统布局图如图 6 所示。该系统可选择的采集频率有 100、200、1 000、2 000 Hz 4 种,可支持的图像最大分辨率为 1 280 像素×1 024 像素,快门速度最快为 0.1 ms,接近开关的最大感应距离为 2 mm。该同步系统的工作原理为:首先设置高速摄影机的帧数与张力传感器的采集频率一致,选取合适的分辨率及快门速度。小磁铁安装于齿盘外沿,与接近开关距离小于 2 mm,LED 灯亮并保持,张力分析软件显示张力数据恒为 0 N;齿盘开始动作,接近开关与小磁铁的距离大于 2 mm,LED 灯熄灭并保持,张力分析软件记录张力信息;齿盘转完一周,小磁铁与接近开关距离大于 2 mm,LED 灯亮并保持,张力分析软件显示张力数据恒为 0 N。将张力分析软件记录的张力示数为 0 首尾点之间的数据与高速摄影机捕捉到的电路板指示灯亮的首尾图像之间的照片进行一一对应,以此实现同步。

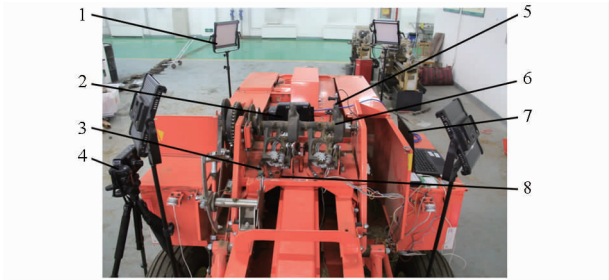


图 6 同步获取系统布局图

Fig. 6 Layout of synchronous acquiring system

- 1.LED 灯 2.高速摄影机 3.同步电路板 4.高速摄影机 1
5.接近开关 6.打结器 7.个人计算机 8.张力传感器

2 系统性能验证

2.1 麦秸打捆试验

打捆对象为小麦秸秆;打结器工作转速 80 ~ 100 r/min;喂料方式为人工喂料;捆绳选择直径 4 mm 的聚丙烯捆扎绳;考虑到打结器工作周期约为 0.67 s,打结嘴旋转一周的时间不足 0.14 s,为采集到打结嘴等关键部件微小的动作变化,且综合张力传感器的张力传感器采集频率单一及高速摄影机拍摄效果等因素,张力传感器的采集频率选择

1 000 Hz,高速摄影帧数选择 1 000 帧/s,快门速度选择 0.5 ms,分辨率选择 800 像素×600 像素;分别进行了 4 组打捆试验。

2.2 结果与讨论

2.2.1 打结器实时运动图像信息

通过将高速摄影捕捉到的同步电路板指示灯亮的首尾图像之间的照片按拍摄顺序排列。考虑到齿盘旋转 360°,将获取的第一张图片对应齿盘旋转 0°,获取的最后一张图片对应齿盘旋转 360°,中间的图片按比例进行分配,分别对应相应的齿盘旋转角度,得出不同试验组下打结过程各机构动作特征点对应的齿盘旋转角度(表 1)。由表 1 可以看出,不同组试验中各机构动作特征点对应齿盘旋转角度的变异系数均小于 1%,由此可以说明各机构动作对应的齿盘旋转角度分布一致性较好,高速摄影机安装位置合理,获取运动图像性能稳定可靠。

2.2.2 捆绳实时张力信息

基于张力传感器得出捆绳张力在打结过程的变化如图 7 所示。由图 7 可得,捆绳张力在送绳阶段存在一个明显波峰,分析原因是活塞运动到前止点导致的。捆绳张力在绕环成结阶段存在一个较大波峰,分析原因是打结嘴钩钳张开闭合所致。捆绳张力在割绳脱扣阶段存在两处比较明显的波峰,分析原因是割绳和脱扣动作共同导致的。不同试验组下捆绳张力变化趋势基本一致,不同组试验捆绳张力有差异主要原因是由于打捆作业时采用人工喂料的方式,每次的喂入量不均导致草捆密度不一致,由此造成捆绳张力存在差异。将张力分析软件获取的示数为 0 的首尾数据点之间的张力数据按顺序排列。考虑到齿盘旋转 360°,将获取的第 1 个张力数据对应齿盘旋转 0°,最后 1 个张力数据对应齿盘旋转 360°,中间的张力数据按比例进行分配,分别对应相应的齿盘旋转角度,得出打结过程捆绳张力峰值点对应的齿盘旋转角度(表 2)。由表 2 可得不同试验组捆绳张力部分峰值点对应齿盘旋转角度的变异系数均小于 3%。综上,传感器安装位置合理,获取张力信息性能稳定。送绳时捆绳张力峰值点是由活塞运动到前止点导致的,因此当齿盘转到大约 60°时,活塞恰好运动到前止点。割绳脱扣阶段第 1 次峰值点是割绳动作开始导致的,因此当齿盘转到大约 241°时割刀开始割绳。割绳脱扣阶段第 2 次峰值点是脱扣动作结束导致的,因此当齿盘转到大约 261°时完成脱扣动作。

2.2.3 打结器图像信息与捆绳张力信息同步结果及分析

分析每组打结过程获取到的指示灯显亮首尾图

表 1 打结器运动特征点对应齿盘旋转角度分布

动作	齿盘旋转角度/(°)				平均值/	标准差/	变异系数/
	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	(°)	(°)	%
揽绳器动作	115.00	114.88	115.96	113.96	114.95	0.82	0.71
夹绳盘转动	158.64	157.24	158.81	158.17	158.21	0.71	0.45
揽绳器停止	169.09	167.29	168.12	166.69	167.80	1.04	0.62
打结嘴转	178.18	176.82	177.44	176.27	177.18	0.82	0.46
揽绳器回位	199.55	196.41	197.46	197.57	197.75	1.31	0.66
钩钳渐开	201.82	200.12	202.12	201.83	201.47	0.91	0.45
钩钳全开	214.09	212.82	213.76	214.08	213.69	0.60	0.28
脱绳杆动作	215.91	217.06	213.30	213.02	214.82	1.98	0.92
钩钳闭合	228.18	226.06	226.80	226.33	226.84	0.94	0.42
夹绳盘停止	230.91	229.76	230.53	231.12	230.50	0.50	0.21
打结嘴停止(钩钳闭合)	237.73	237.71	237.52	238.05	237.75	0.22	0.09
揽绳器停止	241.82	240.35	241.24	241.24	241.16	0.60	0.25
割绳结束	249.55	250.41	248.23	251.89	250.02	1.54	0.62
脱绳杆回位	273.18	272.12	271.51	273.73	272.64	1.00	0.37
脱绳杆停止	334.55	332.47	333.45	333.91	333.59	0.87	0.26

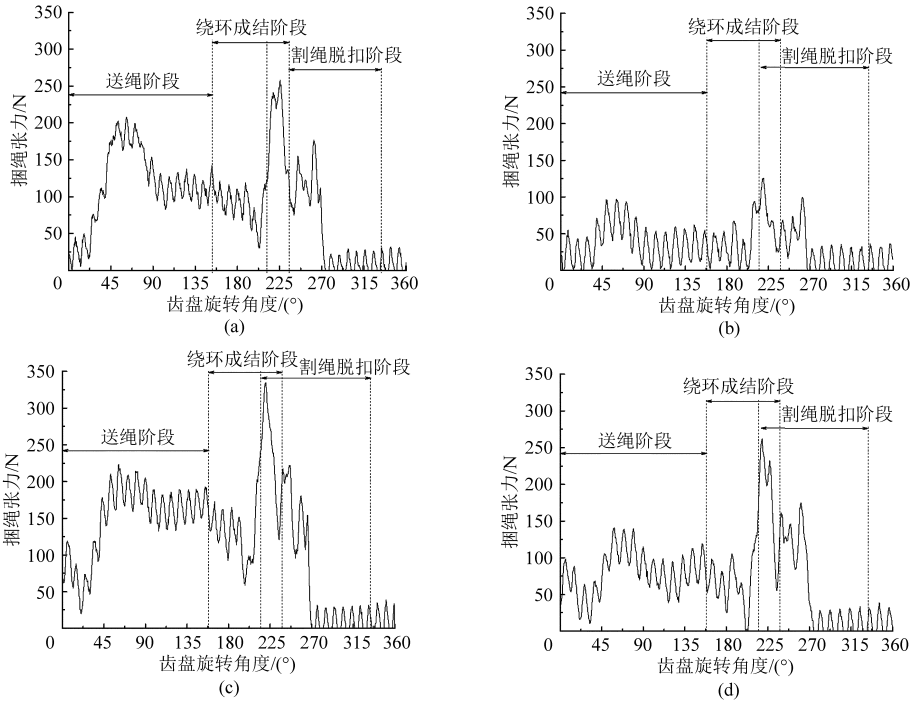


图 7 捆绳张力变化曲线

Fig. 7 Variation diagram of cord tension

(a) 试验 1 (b) 试验 2 (c) 试验 3 (d) 试验 4

表 2 捆绳张力峰值点对应齿盘旋转角度分布

动作	齿盘旋转角度/(°)				平均值/	标准差/	变异系数/
	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	(°)	(°)	%
送绳时捆绳张力峰值点	61.82	60.35	61.01	58.58	60.44	1.38	2.28
绕环成结捆绳张力峰值点	225.45	219.71	219.35	218.88	220.85	3.09	1.40
割绳脱扣捆绳张力第 1 次峰值点	244.55	240.35	238.91	240.86	240.86	2.52	1.05
割绳脱扣捆绳张力第 2 次峰值点	261.36	262.06	258.47	260.95	260.71	1.56	0.60

像之间的图片数和张力分析软件示数为 0 首尾数据点之间的张力数据点数,得出目标图片数与目标数据点数如表 3 所示。由表 3 可以得出高速摄影机获取到的目标图片数与张力传感器获取到的目标数据点数相同,且一一对应,因此该系统可实现打结器运动图像与捆绳张力信息的同步获取,且同步性能好。

表 3 试验过程目标图片数与数据点数分布
Tab.3 Distribution of number of target image and data points in testing

组别	高速摄影拍摄图片数	张力传感器获取数据点数
1 组	792	792
2 组	680	680
3 组	773	773
4 组	676	676

图 8 所示为基于打结器运动图像信息与捆绳张力信息得到的打结器运动时序图。通过对比尹建军等^[4]建立的打结器运动时序图发现其时序关系基本一致,并且本研究还建立了各机构的运动时序范围,增加了活塞的运动时序,确定了揽绳器、钩钳及脱绳杆的详细运动时序。

由运动时序图 8 可以得出,各机构的时序范围大约在 2°~4°之间,并且在如图所示的运动时序区间范围内,打结器可以有效成结。

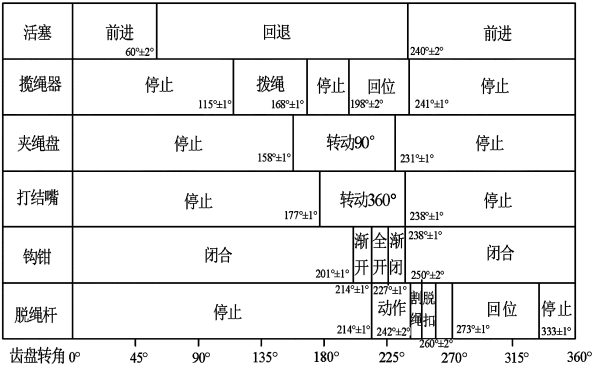


图 8 D 型打结器运动时序图

Fig.8 Motion sequence chart of D-bale knotter

活塞在齿盘转到大约 60°时到达前止点,当齿盘转到大约 240°时运动到后止点。

揽绳器在齿盘转到大约 115°时开始揽绳,在齿盘转到大约 241°时回到初始位置,在齿盘转到大约 168°~198°之间时揽绳器处于停止状态。揽绳器处于停止状态阶段钩钳没有动作,打结嘴钩钳动作时揽绳器开始回位,分析其原因是揽绳器回位释放一部分捆绳长度,避免因钩钳张开导致打结嘴处捆绳张力急剧变大。

钩钳闭合、渐开、全开、渐闭 4 个动作所占的时序比为约 2:1:1:1。

脱绳杆在齿盘转到大约 242°开始割绳,再转到大约 250°时割绳结束,齿盘转到大约 260°时脱扣结束,齿盘转到大约 272°时脱绳杆才开始回位,脱扣结束与脱扣回位有大约有 12°的时序差,这一方面可以确保脱扣完成,另一方面通过减小脱绳杆的减加速度可减小对脱绳杆凸轮的冲击。

本研究研发的同步获取系统在陈龙健等和李诚^[19-20]的研究中得到较好的应用。该系统解决了实时检测打结器某些动作特征点下的捆绳张力,为打结钩嘴的载荷分析奠定了重要基础。

3 结论

(1)搭建了一种可实时同步获取打结器运动图像和捆绳张力信息的试验系统,开发了同步打结器运动图像与捆绳张力信息的同步模块,该系统可实时同步获取秸秆捆扎过程中打结器的运动图像信息及捆绳的张力信息,为打结器时序及几何尺寸等参数的建立及打结器重要部件的载荷受力分析奠定了重要基础。

(2)针对本系统开展了性能验证试验,试验结果表明该系统高速摄影机及张力传感器布局位置合理,获取运动图像与捆绳张力信息性能稳定可靠,试验过程高速摄影获取的目标图片数与张力传感器获取的目标数据点数数目相同,且时间点一一对应,系统同步获取信息性能良好,可以满足试验需求。

(3)基于所得打结器运动图像与捆绳张力信息得出了打结器各机构的运动时序范围,并对揽绳器、钩钳、脱绳杆的详细运动时序分配进行了分析。

参 考 文 献

1 毕于运,高春雨,王亚静,等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报,2009,25(12):211-217.
Bi Yuyun, Gao Chunyu, Wang Yajing, et al. Estimation of straw resources in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12):211-217. (in Chinese)

2 王亚静,毕于运,高春雨. 中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价[J]. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1852-1859.
Wang Yajing, Bi Yuyun, Gao Chunyu. Collectable amounts and suitability evaluation of straw resource in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(9): 1852-1859. (in Chinese)

3 丁翔文,张树阁,李吉,等. 黄淮海地区小麦玉米农作物秸秆能源化利用收加储运模式实验研究[J]. 中国农机化,2010(4): 14-19.

Ding Xiangwen, Zhang Shuge, Li Ji, et al. Experimental study on energy utilization and collection storage and transportation models of main crop straw resources in Huang - huai - hai region[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2010(4):14 - 19. (in Chinese)

4 尹建军,李双,李耀明.D 型打结器及其辅助机构运动仿真与时序分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 103 - 107. Yin Jianjun, Li Shuang, Li Yaoming. Kinematic simulation and time series analysis of D-knotter and its ancillary mechanisms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 103 - 107. (in Chinese)

5 王磊,吕黄珍,魏文军,等. 打结嘴钳咬绳索解析条件分析与直观验证[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 96 - 100. Wang Lei, Lü Huangzhen, Wei Wenjun, et al. Analytical conditions and visualized verification of knotter hook's rope-biting [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 96 - 100. (in Chinese)

6 尹建军,张万庆,陈亚明,等. 打结器夹绳-绕扣-钳咬动作参数分析与打结试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9):135 - 143. Yin Jianjun, Zhang Wanqing, Chen Yaming, et al. Parameters analysis of rope-holding motion, knot-winding motion, rope-biting motion of knotter and knotting tests[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 135 - 143. (in Chinese)

7 李慧,李洪文,何进,等. 方草压捆机 D 型打结器驱动齿盘重建与优化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 96 - 102. Li Hui, Li Hongwen, He Jin, et al. Reconstruction and optimal design of driving dentate disc of D-bale knotter based on reverse engineering [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 96 - 102. (in Chinese)

8 陈龙健,李诚,张安琪,等. 基于逆向工程的 D 型打结器重构与运动仿真[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 104 - 108. Chen Longjian, Li Cheng, Zhang Anqi, et al. Reconstitution and motion simulation of D-bale knotter based on reverse engineering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 104 - 108. (in Chinese)

9 刘智强. D 型打结器钳嘴结构性能分析研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009. Liu Zhiqiang. Research on structure and performance of eagle nose pliers for deering-knotter[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009. (in Chinese)

10 李海涛,熊亚,陈龙健,等. 打结器割绳脱扣机构磨损分析与改进设计[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 118 - 124. Li Haitao, Xiong Ya, Chen Longjian, et al. Wear resarch and improved design of D-knotter wiper mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 118 - 124. (in Chinese)

11 熊亚,李海涛,张绍英,等. 打结器割绳脱扣机构的运动规律与设计依据研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(7): 113 - 118. Xiong Ya, Li Haitao, Zhang Shaoying, et al. Motion laws and design basis of the knotter wiper mechanism[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(7): 113 - 118. (in Chinese)

12 Verhulst M J. Bale twine knotter with adjustable wiper: US, 4351551[P]. 1982 - 09 - 28.

13 Hubert Prellwitz. Knotter for baling apparatus: US, 6164197[P]. 2000 - 12 - 26.

14 Wright J D. Twine cutting knife for square baler apparatus: US, 7398727[P]. 2008 - 07 - 15.

15 Thorsten Scharf, Ulrich Hesselmann, Cyrille Arnould, et al. Baler and method for operating a baler: US, EP20110005707[P]. 2013 - 01 - 17.

16 Marc G Vansteelant, Marnix J Schoomheere. Twine force sensing apparatus for use on a rectangular baler: US, 5347920[P]. 1994 - 09 - 20.

17 黄伟. D 型打结器动作功能分析研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2009. Huang Wei. Research on action and efficiency of deering-knotter[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009. (in Chinese)

18 李慧. 方草捆压捆机成结系统研究[D] 北京:中国农业大学, 2013. Li Hui. Study on knotting system for the rectangular balers[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese)

19 陈龙健,李诚,张安琪,等. 秸秆捆扎过程中打结钳嘴载荷试验分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 128 - 134. Chen Longjian, Li Cheng, Zhang Anqi, et al. Bill hook mechanical analysis during straw baling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 128 - 134. (in Chinese)

20 李诚. 逆向重构 D 型打结器运动仿真分析与打结钳嘴受力分析研究[D]. 北京:中国农业大学, 2015. Li Cheng. Motion simulation of reverse reconstructed D-bale knotter and bill hook mechanical analysis during straw baling[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)