doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.017

基于逆向工程的 D 型打结器重构与运动仿真*

陈龙健　李　诚　张安琪　李海涛　韩鲁佳

（中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要： 打结器是方草压捆机的关键核心部件之一，直接影响打捆机的成结效率和捆形质量。以 D 型打结器为研究对象，基于逆向工程技术对其进行三维重构，进而对重构零件的关键工作曲面进行了偏差分析，发现所有关键工作面 90% 以上的区域达到了精确等级以上。基于 Solidworks 软件实现了重构部件装配，并进行了运动仿真研究，获取了卡线轮、打结嘴、脱绳杆角速度和驱动齿盘角位移数据，分析了卡线轮、打结嘴、脱绳杆与捆绳打结运动关系，为优化 D 型打结器提供了基础数据。

关键词： 方草打捆机　打结器　逆向工程　三维重构　仿真

中图分类号： S817.11+5　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000-1298(2014)12-0104-05

引言

我国拥有丰富的农作物秸秆资源。《“十二五”农作物秸秆综合利用实施方案》的调查统计显示，2010 年全国秸秆理论资源量为 8.4 亿 t，可收集资源量约为 7 亿 t。由于农作物秸秆存在分散、结构疏松等特点，秸秆收集已成为制约其高效利用的关键因素。为提高秸秆收集效率，常采用压捆机将秸秆压制成高密度、整齐的捆式结构，以便于运输、贮存和综合利用[1-2]。打结器是压捆机的关键核心部件之一，直接影响压捆机的成结效率和捆形质量，成为国内外学者的研究热点。Minke 等发明了一种无张力下打活结方式[3]，Homberg 发明了采用 Deering 型高压系统的 D 型打结器[4]。万其号等对 D 型打结器的结构和运动过程进行了分析[5]，黄伟等和尹建军等通过运动仿真分析了打结过程，揭示了 D 型打结器的成结原理[6-7]。

由于打结器曲面复杂，空间位置关系难以测量，传统的测绘建模方式不适合于打结器结构的研究[8]。逆向工程作为一种对复杂曲面有良好适应性的工程反求手段，为打结器研究提供了新方法。苏刚等逆向重构了机架[9]，分析了 5 个轴孔的角度关系[10]。李双通过提取零件图像和测量建立了打结器模型[11]。李慧等使用白光扫描仪，优化设计打结器驱动齿盘凸轮曲面[12]，进而结合凸轮机构、间歇机构运动仿真分析，证明了所优化设计的曲面质量较好[13]。

以上研究多集中于打结器单个或几个部件进行逆向工程方面，无法获取打结器各部件运动关系分析数据；其次，对所重构部件关键工作面精度分析研究较少。本文以 D 型打结器为研究对象，基于逆向工程技术对其进行三维重构并进行关键工作面精度分析和运动仿真研究。

1　基于逆向工程的打结器重构

1.1　数据获取

考虑到打结器存在复杂的曲面，采用非接触方法获取打结器三维数据。本文以 D 型打结器为研究对象，采用 EXA Scan 型手持式三维激光扫描仪，分辨度为 0.05 mm，测量精度为 0.04 mm，测量速率为25 000 次/s。

1.2　数据处理

逆向工程处理点云数据的一般过程是：导入云图—云图预处理（过滤、删除）—校正云图（对齐、合并）—网格化处理—编辑网格面（修剪、分割）—绘制曲线、曲面—输出三维 CAD 模型[14]。

由于手持式三维激光扫描仪 EXA Scan 在测量三维数据自动生成 STL 三角网格面，且扫描出图时采用 Geomagic Studio 软件对齐点云，因此将云图导入逆向软件直接进行曲线、曲面的绘制和三维 CAD

收稿日期：2014-08-20　修回日期：2014-09-10

* 教育部长江学者和创新团队发展计划资助项目（IRT1293）、新世纪优秀人才支持计划资助项目（NCET-11-0477）和北京高校青年英才计划资助项目（YETP0317）

作者简介： 陈龙健，副教授，博士生导师，主要从事农业生物质研究，E-mail：clj1020@cau.edu.cn

通讯作者： 韩鲁佳，教授，博士生导师，主要从事农业生物质研究，E-mail：hanlj@cau.edu.cn

模型的输出。考虑到打结器曲面复杂，本研究采用 CATIA 处理点云。

1.3　三维几何模型重构

打结器几何模型重构过程如下：点云—曲面—实体零件。点云到曲面是重构过程的关键，本研究采用 CATIA 软件所提供的多种曲面拟合方法，如直接由点云生成曲面、由特征线生成曲面、由分割面拼接成曲面、曲面延伸后生成拼接曲面以及由曲线相连再生成曲面等方法。

1.3.1　机架模型重构

机架（图 1a）是联系驱动齿盘、卡线轮、打结嘴、割绳杆的中枢[5]，机架 5 个轴孔以及与打结嘴凸轮滚子挡板配合曲面是关键工作曲面。

通过 CATIA 软件 Quick Surface Reconstruction 模块的 Basic Surface Recognition 完成 5 个轴孔圆柱面、平面的拟合，在轴孔平面上以圆柱面轴线和平面交点为圆心绘制同心圆，以轴孔 2 个面的距离为拉伸长度创建 5 个轴孔实体；通过 Power Fit 完成打结嘴凸轮滚子挡板曲面拟合（图 1b），利用 Planar Sections 提取挡板横截面的轮廓线，对轮廓线拉伸至上述创建的曲面完成挡板实体的创建。通过上述重建方法可得到的机架重构图（图 1c）。

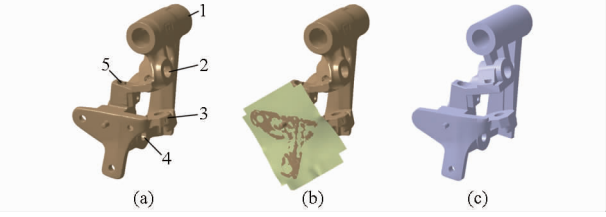

图 1　机架重构

Fig. 1　Reconstruction of rack

（a）机架点云　（b）机架曲面的创建　（c）机架三维几何模型

1.3.2　驱动齿盘模型重构

驱动齿盘是打结器的动力来源，夹绳、旋转成结、切绳脱扣 3 个动作分别依靠驱动齿盘内齿、驱动齿盘外齿、驱动齿盘凸轮的驱动，驱动齿盘结构决定着夹绳、旋转成结、切绳脱扣运动，从而影响打结器系统的成结率。

从驱动齿盘点云数据分析可知，其外齿是以驱动齿盘轴为中心的面齿轮（图 2a）。通过 Planar Sections 提取其中间齿 4 条特征线，应用 Multi-sections Surface 创建中间齿面，以圆周阵列方式形成整个外齿曲面，而外齿其余平面则通过 Basic Surface Recognition 创建，对上述曲面利用 Generative Shape Design 模块的 Trimming Geometry、Joining Surfaces or Curves 分别完成裁剪、缝合，然后利用 Part Design 模块的 Creating Close Surface Features 创建外齿实体。

由于驱动齿盘内齿中心无法确定，因此通过 Power Fit 生成内齿曲面（图 2b）。驱动齿盘凸轮与割绳杆滚子接触，带动割绳杆周期性往复运动实现切绳脱扣。为了保证凸轮的连续性，在垂直于驱动齿盘轴孔方向上通过 Planar Sections 提取曲线，利用 Multi-sections Surface 完成凸轮曲面创建（图 2c）。按照外齿实体创建方法分别创建内齿、凸轮，其余部分按照机架轴孔创建方法创建。通过上述重构技术，可获得驱动齿盘重构图（图 2d）。

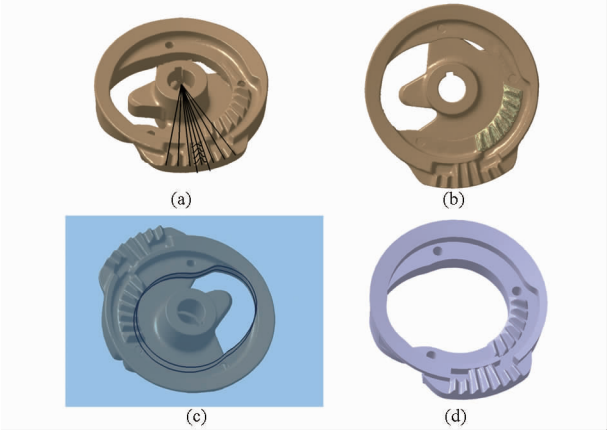

图 2　驱动齿盘重构

Fig. 2　Reconstruction of driving fluted disc

（a）外齿特征线提取　（b）内齿曲面创建

（c）凸轮特征线提取　（d）齿盘三维几何模型

1.3.3　打结嘴模型重构

打结过程中，捆绳在弧针作用下搭在打结嘴上，打结嘴绞扭成环和绳头穿越，在割绳杆作用下脱离打结嘴。打结嘴下颚的光滑程度和形状直接影响捆绳脱扣和成结质量[15]。

通过 Planar Sections 提取下颚扫掠中心线及其法向方向的曲线（图 3a），利用 Multi-sections Surface 生成下颚曲面，对该曲面应用 Generative Shape Design 模块的 Creating Fill Surfaces、Joining Surfaces or Curves 分别完成曲面封闭、缝合，然后利用 Part Design 模块的 Creating Close Surface Features 完成下颚实体创建。其余部分按照机架轴孔创建方法创建。通过上述重构技术，可获得打结嘴重构图（图 3b）。

1.3.4　脱绳杆模型重构

脱绳杆导绳缺口在拨绳板拨绳时起支撑作用，在切绳脱扣时支撑捆绳便于切断捆绳。导绳缺口是由凸台和两段弯曲部分构成的，通过 3D Curve、Planar Sections 提取弯曲部分的特征线（图 4a），利用 Multi-sections Surface 功能创建曲面，按照打结嘴下颚构建方法创建脱绳杆模型（图 4b）。

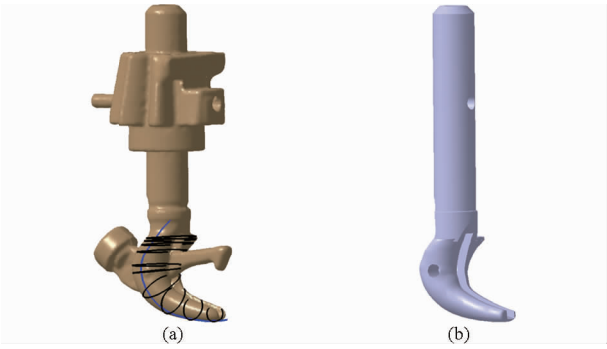

图 3 打结嘴重构

Fig. 3 Reconstruction of knotter jaw

(a) 打结嘴特征线提取 (b) 打结嘴三维几何模型

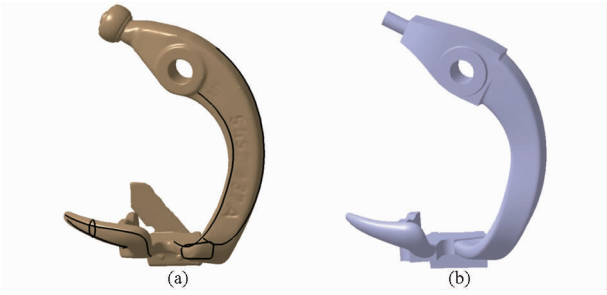

图 4 脱绳杆重构

Fig. 4 Reconstruction of blade adapter

(a) 脱绳杆特征线提取 (b) 脱绳杆三维几何模型

2 关键工作重构曲面偏差分析

为了获取重构模型精度情况,需要对重构模型和点云数据进行偏差分析研究[16]。运用 CATIA 的 Deviation Analysis 工具可以实现偏差分析,其原理为过点云上的点 i 做重构曲面法线,法线与重构曲面相交于点 i',点 i 与点 i'距离 d 为点 i 偏差分析结果,其计算公式为

$$d = \sqrt{(x_i - x_{i'})^2 + (y_i - y_{i'})^2 + (z_i - z_{i'})^2} \quad (1)$$

式中 x_i、y_i、z_i——点云 i 点 x 轴、y 轴、z 轴坐标

$x_{i'}$、$y_{i'}$、$z_{i'}$——曲面 i'点 x 轴、y 轴、z 轴坐标

所有点云数据与重构曲面偏差结果构成了曲面偏差分析结果。重构曲面与点云数据之间存在偏差的主要原因有:在强制拟合曲面时,为了保证有较好的光滑性,会使曲面偏离部分点云数据;在基于曲线的曲面创建时,提取的数据仅包含部分点云数据,可能导致所构建曲面与未参与重构点云数据存在偏差。

本文偏差分析阈值采用 0.13 mm 和 0.25 mm,偏差小于 0.13 mm 为非常精确精度,0.13 ~ 0.25 mm为精确精度,大于 0.25 mm 为中等精度,绿、紫、红 3 种颜色分别表示偏差小于 0.13 mm、0.13 ~0.25 mm 和大于 0.25 mm,并计算各个偏差区域所占百分比(图 5)。结果显示:机架的驱动轴孔面、夹绳器轴孔面、夹绳驱动蜗杆轴孔面,驱动齿盘的内齿齿廓面、凸轮外廓面,脱绳杆的轴孔面、切刀安装端面,以及打结嘴凸轮滚子挡板曲面偏差小于 0.13 mm 区域达到 95% 以上;其他所有关键工作面偏差小于 0.25 mm 区域均可达到 90% 以上。上述偏差分析研究表明:基于逆向工程技术可较为准确地重构具有复杂曲面特征的打结器三维几何结构。

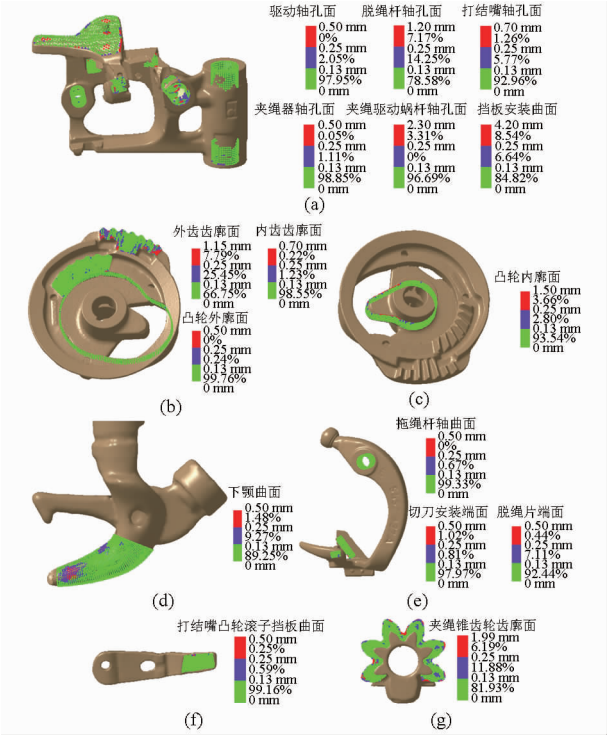

图 5 模型偏差分析

Fig. 5 Analysis of modeled deviation

(a) 机架 5 个轴和挡板安装曲面 (b) 驱动齿盘外齿、内齿、外凸轮 (c) 驱动齿盘内凸轮 (d) 打结嘴下颚 (e) 脱绳杆轴孔、割刀安装面、脱绳片 (f) 打结嘴凸轮滚子挡板曲面 (g) 锥齿轮齿廓

3 仿真

将重构的模型转换成 STL 格式,导入 Solidworks 进行装配(图 6),分析各个零件是否存在干涉,进而对打结器运动关系进行深入研究。研究发现,各零件装配良好,同时自由拖动驱动齿盘、卡线轮、打结嘴、脱绳杆等部件,均不存在干涉现象。这也意味着本研究中关键工作面有较好的重构精度。关键工作面重构精度对运动仿真产生重要影响,如机架轴孔面重构精度决定着驱动齿盘、打结嘴组件、卡线轮组件、脱绳杆组件等零件配合关系,齿盘面重构精度影响着打结嘴不完全锥齿轮、卡线轮组件夹绳锥齿轮、脱绳杆滚子的运动关系,从而对打结动作的时序规律产生影响。

通过上述所装配的打结器进行运动仿真实验研

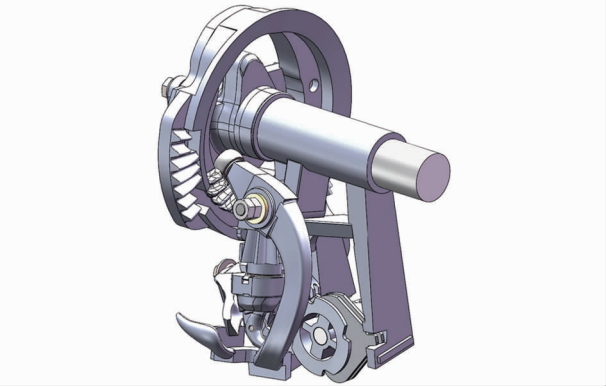

图 6　打结器三维几何模型装配图

Fig. 6　Assembly drawing of D-bale knotter

究。具体设置如下：选择钢作为打结器材料属性，保持给定材料摩擦因数等参数不变，使用接触副定义驱动齿盘与不完全鹰嘴锥齿轮、驱动齿盘与不完全夹绳锥齿轮、驱动齿盘凸轮与割绳杆滚轮和卡线轮蜗轮蜗杆传动，轴和轴孔摩擦力通过定义接触副实现；设置 400 N 的外力垂直作用于打结嘴上颚模拟捆绳对打结嘴的力[17]，用 90 r/min 电动机驱动打结器主轴，从而得到脱绳杆、打结嘴、卡线轮的角速度图（图 7）。如图 7 所示，打结过程中卡线轮、打结嘴、上颚、脱绳杆依次动作；卡线轮和打结嘴平均速度分别为 10.9 rad/s 和 61.7 rad/s，卡线轮在 0.04 s 开始动作，在 0.18 s 结束动作；打结嘴在 0.08 s 开始动作，在 0.18 s 完成动作。截取 0.18 s 的仿真时刻，得到其机构仿真图（图 8a）。图中显示打结嘴完成一周旋转动作，锁止平面与驱动齿盘贴合，上颚完全

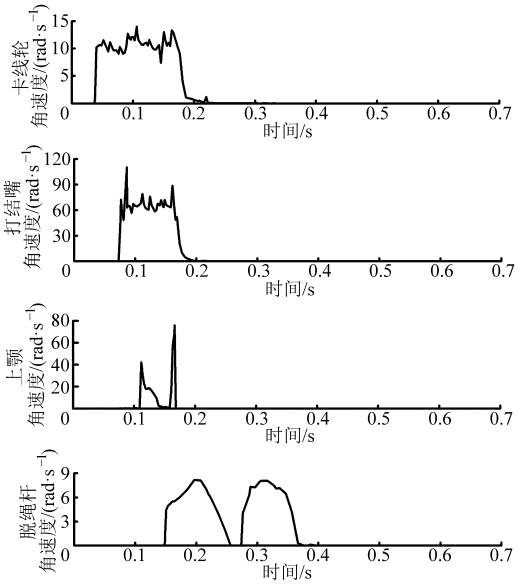

图 7　卡线轮、打结嘴、上颚、脱绳杆构件随驱动齿盘移动的角速度曲线

Fig. 7　Angular velocity curves of twine holder, bill hook, upper jaw and wiping arm components with rotation of driving dentate disc

闭合钳咬绳索，切刀刀刃中间部位投影卡线轮凹槽处（绳索卡咬处），即切刀在切断绳头时打结嘴和卡线轮之间的捆绳处于静止状态。

脱绳杆在切绳脱扣时存在最大速度 8.7 rad/s，截取此时仿真时刻，获取其机构仿真图（图 8b）。图中显示脱绳片与打结嘴下颚接触，即脱绳片执行脱绳动作，绳头完成穿越收紧。经计算，切绳切刀线速度达到 0.67 m/s，脱绳脱绳片线速度达到 0.96 m/s，保证了足够的切绳脱绳能量。脱绳杆 2 次达到最大速度阶段对应驱动齿盘远休止角附近，因此绳结大约有 0.1 s 时间从打结嘴上脱扣。

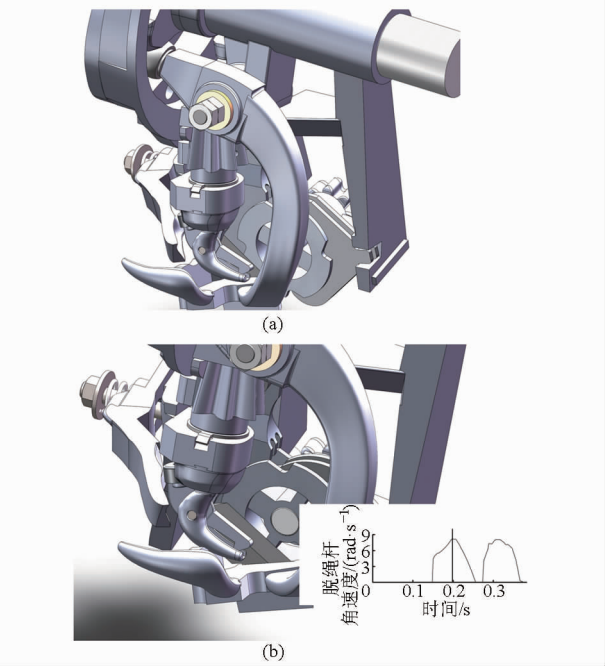

图 8　打结器仿真

Fig. 8　Simulation of D-bale knotter

（a）0.18 s 仿真图　（b）脱绳杆最大速度时刻仿真图

打捆机在 0.7 s 内完成送绳、打结、脱扣、回位等动作，采用仿真实验可对打结过程中各部件运动进行有效表征。图 9 以驱动齿盘旋转一周作为参照，分析卡线轮、打结嘴、上颚、脱绳杆的运动规律。根据图 9，打结器工作过程如下：卡线轮夹住捆绳，同时打结嘴旋转，捆绳纽扣成环，打结舌张开，钳咬绳索，卡线轮、打结嘴、打结舌停止运动，脱绳杆上的切刀将捆绳割断后，脱绳片与打结嘴下颚贴合完成穿越收紧。卡线轮在打结嘴、打结舌动作过程中一直处于旋转状态，带动绳索一端向打结嘴下方运动，与拨绳杆共同作用保证打结处捆绳处于张紧状态。打结嘴的旋转是打结舌张开的动力，因此打结舌运动时间在打结嘴运动时间范围内，保证捆绳旋转成环时打结舌瞬间闭合卡咬绳索。驱动齿盘旋转 97° 时，卡线轮、打结嘴、上颚同时达到极值，与角速度分析结果一致。在打结嘴旋转、上颚张开时，脱绳杆转

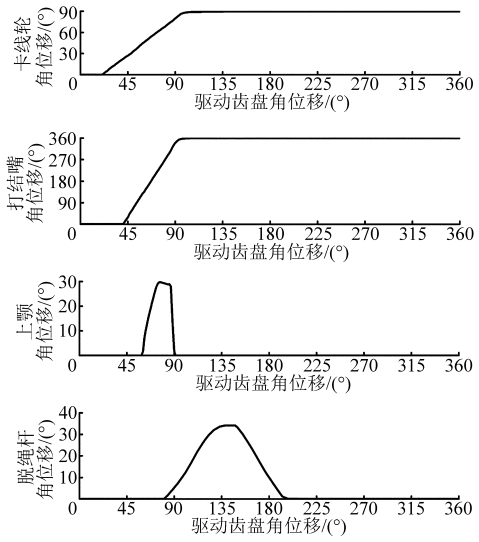

图 9 打结器工作零件运动角位移图

Fig. 9 Angular displacement curves of twine holder, bill hook, upper jaw and wiping arm components

动了 9.6°。脱绳杆动作迟于卡线轮、打结嘴和上颚,一方面是因为打结过程的需要,另一方面是由于防止脱绳杆与打结嘴碰撞。

4 结论

(1) 基于逆向工程原理,借助 CATIA 逆向模块,对打结器进行了三维几何模型重构,并对所重构的关键工作面精度进行了分析,发现所有关键工作面 90% 以上的区域达到了精确等级以上。

(2) 将打结器几何模型在 Solidworks 环境下装配,通过自由拖动驱动齿盘、脱绳杆、打结嘴、卡线轮等,发现不存在干涉现象,证明重构模型达到预期效果。

(3) 对打结器装配图进行仿真实验,得到驱动齿轮、卡线轮、打结嘴、脱绳杆角速度-时间图,并根据卡线轮、打结嘴、脱绳杆角位移分析了打结过程和时序关系。

参 考 文 献

1 Chen Longjian, Xing Li, Han Lujia. Renewable energy from agro-residues in China: solid biofuels and biomass briquetting technology[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(12):2689 - 2695.

2 Chen Longjian, Xing Li, Han Lujia. The development of agro-residue densified fuel in China based on energetics analysis[J]. Waste Management, 2010, 30(5):808 - 813.

3 Gerhardus Minke. Method of and apparatus for arranging twine around a bale: US, 4157063[P]. 1979 - 06 - 05.

4 Hans-Erich Homberg. Twine knotter for baling presses: US, 4735446 [P]. 1988 - 04 - 05.

5 万其号,布库,张志毅,等. D 型打结器的结构及运动分析[J]. 农机化研究, 2009, 31(4): 17 - 19.
Wan Qihao, Bu Ku, Zhang Zhiyi, et al. The analysis of configuration and movement for twine knotter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(4): 17 - 19. (in Chinese)

6 黄伟,张志毅,刘智强,等. D 型打结器 Pro/Engineer 仿真及动作功能分析[J]. 农机化研究, 2009,31(9): 58 - 60.
Huang Wei, Zhang Zhiyi, Liu Zhiqiang, et al. Pro/Engineer imitation and the analysis on movements and functions of twine knott[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009,31(9): 58 - 60. (in Chinese)

7 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)

8 李慧,何进,李洪文,等. 方草捆压捆机打结器空间参数研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8):99 - 105.
Li Hui, He Jin, Li Hongwen, et al. Spatial parameters of knotters of square balers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8):99 - 105. (in Chinese)

9 苏刚,史建新,程新平. 逆向工程在方草捆打捆机打结器设计中的运用[J]. 农机化研究, 2006(7): 177 - 179.
Su Gang, Shi Jianxin, Cheng Xinping. Application of reverse engineering in designing knotter of rectangular baler[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(7): 177 - 179. (in Chinese)

10 苏刚,史建新,葛炬. 基于逆向工程的方捆机打结器空间角度测量[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 81 - 83.
Su Gang, Shi Jianxin, Ge Ju. Measurement the spatial angle of square knotter on the basis of reverse engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 81 - 83. (in Chinese)

11 李双. D 型打结器的捆绳成结原理与优化设计[D]. 镇江:江苏大学,2011.
Li Shuang. Rope-tied theory and optimal design of D-knotter[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011. (in Chinese)

12 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)

13 李慧,何进,李洪文,等. 基于逆向数据的强制脱扣型方草压捆机打结器[J]. 吉林大学学报:工学版, 2011, 41(6): 1652 - 1658.
Li Hui, He Jin, Li Hongwen, et al. Mandatory strip type knotter for square baler based on reversed data[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(6): 1652 - 1658. (in Chinese)

14 沈海宁,杨亚平. 基于 CATIA V5 的逆向造型设计[J]. 机械设计, 2010, 27(11): 76 - 78.
Shen Haining, Yang Yaping. Reverse modeling design based on CATIA V5[J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(11): 76 - 78. (in Chinese)

(下转第 125 页)

seedling, and direct-seeding mechanical-transplanting, to determine the diversity of seedling quality, growth duration, photosynthetic production, accumulated temperature and illumination hours, yield components, and grain quality. Results showed that the seedling quality of bowl-seedling of the mechanical transplanting rice was significantly better than that of blanket-seedling mechanical transplanting rice. Compared with bowl-seedling of the mechanical transplanting rice, each growth period were postponed in blanket-seedling mechanical transplanting rice and direct-seedling mechanical transplanting rice, and whole growth period was shorted about 8 ~ 10 d and 20 ~ 22 d, respectively. Accumulated temperature and illumination hours of whole growth period and different growth stages were lower, and then led significantly lower crop growth rate and net assimilation rate in mid-to-late growth period. The yield of bowl-seedling mechanical transplanted rice was the highest and the yield of direct-seeding mechanical transplanted rice was the lowest. Yield components of bowl-seedling mechanical transplanted rice had the characteristics of significantly less number of panicle per unit area, significantly higher spikelets per panicle and kilo-grains weigh, and bowl-seedling mechanical transplanted method significantly increased grain yield by 10.2% and 23.4% than blanket-seedling and direct-seeding mechanical-transplanting method in hybrid rice, respectively, and by 5.6% and 19.3% in conventional rice, respectively. Moreover, grain quality of bowl-seedling mechanical transplanted rice was the best. Studies indicate that bowl-seedling mechanical transplanted method is a priority selection in Huaibei area.

Key words: Rice following wheat　Mechanical transplanting　Yield formation　Utilization of temperature and illumination

(上接第 108 页)

15　杨诗军,姚文席. 凯斯 8545 与 Welger AP－530 牧草方捆机打结器结构及效能比较[J]. 机械研究与应用, 2006, 19(1): 93, 103.
Yang Shijun, Yao Wenxi. Comparing about structure and efficiency between CASE 8545 and Welger AP－530 of baler[J]. Mechanical Research & Application, 2006, 19(1): 93, 103. (in Chinese)

16　张海波,常影,范红媛,等. 基于 CATIA 的汽车悬架控制臂逆向造型研究[J]. 制造业自动化, 2013, 35(11): 100－101.
Zhang Haibo, Chang Ying, Fan Hongyuan, et al. Reverse modeling of automobile suspension control arm based on CATIA[J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(11): 100－101. (in Chinese)

17　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)

Reconstitution and Motion Simulation of D-bale Knotter Based on Reverse Engineering

Chen Longjian　Li Cheng　Zhang Anqi　Li Haitao　Han Lujia
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: D-bale knotter is one of the key parts of square baler, which influences the efficiency and quality of baler. Based on reverse engineering, D-bale knotter was reconstituted and the accuracy of working surfaces was analyzed. The results showed that more than 90% domain for all the working surfaces can achieve the precise level above. Reconstruction parts of D-bale knotter were assembled and then simulated by using the software Solidworks. The angular velocity and displacement data of twine holder, bill hook, wiping arm, and driving dentate disc were obtained and the movement relationships of these parts were further analyzed. This study will provide basic data for the optimization of D-bale knotter.

Key words: Square baler　Knotter　Reverse engineering　3D-reconstruction　Simulation