

打结嘴缠绳故障分析与曲面形态改进设计

尹建军 汲 峥 王新新 朱 浩

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 针对打结嘴绕扣过程出现的缠绳故障问题,应用虚拟打结方法,分析夹绳盘搭绳点位置与打结嘴凸台倾角对绕扣与钳咬动作的影响,得出夹绳盘搭绳点偏差是打结嘴发生缠绳故障的主要因素,减小打结嘴凸台倾角有利于避免打结嘴缠绳故障。通过受力分析建立捆绳不沿打结嘴凸台曲面向上滑动的临界条件,获得改进的打结嘴凸台倾角。基于边界相似与B样条曲面造型方法重构打结嘴凸台曲面,获得改进的打结嘴模型。600次打结试验表明,凸台倾角50°的打结嘴模型具有更好限制捆绳沿打结嘴凸台曲面上滑的效果,能有效防止打结嘴缠绳故障发生,提高打结器的打结可靠性,可为打结嘴的改进设计提供参考。60°凸台倾角的打结嘴绕扣,夹绳盘搭绳点偏差应控制在 $\pm 3^\circ$ 之内,而50°凸台倾角的打结嘴允许夹绳盘搭绳点偏差范围在 $[-4.5^\circ, 3^\circ]$,可为夹绳盘搭绳点位置控制提供参考。

关键词: 打捆机; 打结器; 打结嘴; 故障分析; 改进设计

中图分类号: S817.11⁺5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)07-0082-08

Analysis of Rope-twining Failure of Knotter Hook and Its Improved Design of Curved Surface Shape

YIN Jianjun JI Zheng WANG Xinxin ZHU Hao

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Aiming at the problems of rope-twining failure occurred in the process of ring-twining of the knotter hook, virtual knotting method was applied to analyze the influence of rope-lapping point position on the rope-gripping plate and inclination angle of the boss on the knotter hook on ring-twining and rope-biting motion, which drew the conclusions that rope-lapping point position deviation was a main factor resulted in rope-twining failure of the knotter hook and decreasing inclination angle of the boss on the knotter hook was beneficial to avoid rope-twining failure of the knotter hook. The critical condition for the rope non-sliding upward along the boss curved surface on the knotter hook was established by force analysis, and inclination angle of the boss of the improved knotter hook was obtained. Based on boundary similarity and B-spline surface modeling method, the boss curved surface of knotter hook was reconstructed under CATIA software and the improved knotter hook model was obtained. Totally 600 knotting tests showed that the knotter hook model with 50° inclination angle of the boss had a better effect of restricting the rope to slide upward along the boss curved surface on the knotter hook, which can effectively prevent the rope-twining failure of the knotter hook. The knotter hook model with 50° inclination angle of the boss may improve the knotting reliability of the knotter, and provide a reference for the improved design of the knotter hook. To the ring-twining of the knotter hook with 60° inclination angle of the boss, rope-lapping point position deviation on the rope-gripping plate should be controlled within $\pm 3^\circ$. The knotter hook with 50° inclination angle of the boss allowed the rope-lapping point position deviation to range from -4.5° to 3° . They may provide a reference for the position control of rope-lapping point on the rope-gripping plate.

Key words: baler; knotter; knotter hook; failure analysis; improved design

收稿日期: 2018-01-26 修回日期: 2018-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51375215)、国家重点研发计划项目(2016YFD0701700)和江苏高校优势学科建设工程项目(苏政办发[2014]37号)

作者简介: 尹建军(1973—),男,研究员,博士,主要从事特种收获机械集成设计和采收机器人技术研究,E-mail: yinjianjun@ujs.edu.cn

0 引言

打结嘴作为 D 型打结器绕扣机构的关键零件之一,执行绕扣动作,缠绕的环扣形状受夹绳盘上的搭绳点与捆绳在打结嘴上的搭接点形成的捆绳姿态影响,环扣的形成还受打结嘴曲面形态影响。打结嘴在绕扣过程中会出现缠绳故障,导致成结失败。因此,研究夹绳盘搭绳点位置变化及打结嘴表面形态参数对打结的影响,对打结器的改进设计具有重要的研究意义。

国内研究较多集中在 D 型打结器成结过程的动作仿真和解析分析^[1-3],打结器空间参数与动作参数分析^[4-6],打结器虚拟打结研究^[7-9],打结器齿盘、绕扣机构、脱扣机构的改进设计与试验研究^[10-15],打结器钳嘴的载荷分析与测试^[16-17],打结器结构创新设计与打结试验^[18-19],以及打结器疲劳试验台设计^[20-21]。上述研究未涉及夹绳盘搭绳点位置变化及打结嘴表面形态参数对打结的影响研究。

针对打结嘴绕扣过程出现的缠绳故障问题,本文应用虚拟打结方法分析夹绳盘搭绳点位置与打结嘴凸台倾角对绕扣与钳咬动作的影响。通过受力分析建立捆绳不沿打结嘴凸台曲面向上滑动的临界条件,获得改进的打结嘴凸台曲面倾角,重构打结嘴模型。通过打结试验,检验夹绳盘搭绳点偏差对打结动作的影响,验证打结嘴曲面形态改进的有效性与可靠性,为打结嘴的改进设计与夹绳盘搭绳点位置控制提供参考。

1 绕扣缠绳故障与成因分析

如图 1a 所示,打结嘴从初始位置转过 90°的绕扣过程中,会出现捆绳沿着打结嘴凸台表面上滑而卡入打结嘴凸台顶部与打结器支架上的圆柱凸轮之间的缝隙,发生缠绳故障,导致成结失败。打结嘴正常绕扣的情况如图 1b 所示。

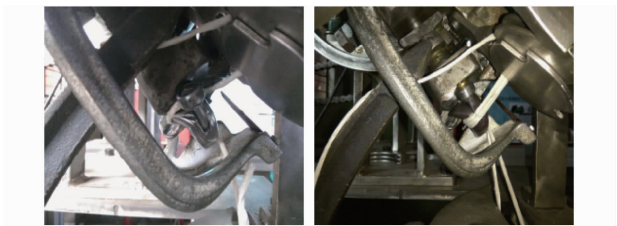


图 1 缠绳故障与正常绕扣的对比

Fig. 1 Comparison of rope-twining failure and normal ring-twining

1.1 搭绳点位置变化对绕扣与钳咬动作的影响

根据打结嘴与夹绳盘的时序关系^[13],三槽口夹

绳盘的理想搭绳点为 B_0 ,夹绳盘轴心连线 B_0O 与过夹绳盘轴心垂线之间的夹角为 5° ,如图 2 所示。由于打结器支架上蜗杆轴孔端面、斜齿轮上销孔的加工误差和安装误差,导致实际搭绳点与理想搭绳点 B_0 不重合。

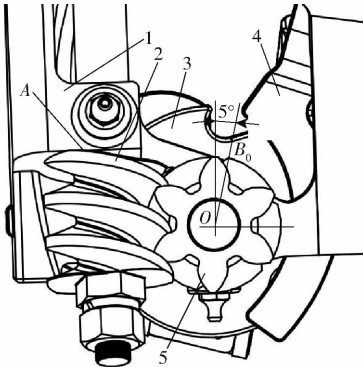


图 2 夹绳盘理想搭绳点示意图

Fig. 2 Desired rope-lapping point diagram on rope-gripping plate

1. 打结器支架 2. 蜗杆 3. 夹绳盘 4. 夹绳片 5. 斜齿轮

为了分析实际搭绳点位置变化对打结的影响,夹绳盘槽口位置调整如图 3 所示。 B_1 、 B_2 、 B_3 分别为夹绳盘逆时针偏于 B_0 点 1.5° 、 3° 、 4.5° 时的实际搭绳点位置, B'_1 、 B'_2 、 B'_3 分别为夹绳盘顺时针偏于 B_0 点 -1.5° 、 -3° 、 -4.5° 时的实际搭绳点位置, D 点为捆绳搭接在打结嘴上的接触点。实际搭绳点与搭接点 D 形成的捆绳姿态如图 3 所示。

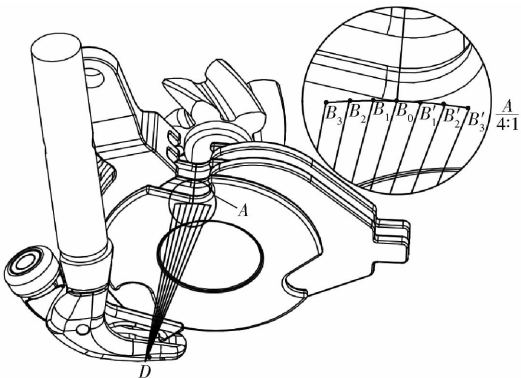


图 3 搭绳点位置变化与捆绳姿态示意图

Fig. 3 Schematic diagram of rope-lapping point position variance and rope posture

利用打结器虚拟打结方法^[12],在 ADAMS 仿真模型中,模拟如图 3 所示的夹绳盘的搭绳点偏差,仿真结果给出改进前的打结嘴转到 90° 时的绕扣状态与捆绳姿态,如图 4 所示。

由图 4 可见,搭绳点偏差从 4.5° 变化到 -4.5° ,捆绳从打结嘴的侧凸曲面下方逐渐向上方移动。当搭绳点偏差为 -4.5° 时,捆绳完全滑到打结嘴的凸台上方,缠死在打结嘴上。当搭绳点偏差为 4.5° 时,打结嘴转到 90° 时未发生捆绳滑到打结嘴凸台

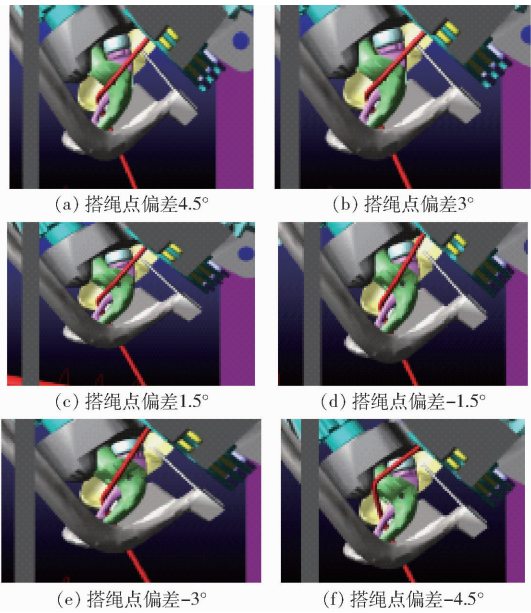


图 4 搭绳点偏差对绕扣的影响

Fig.4 Influence of rope-lapping point deviation on ring-twining motion

上方的现象,但勾钳无法钳咬捆绳,捆绳沿打结嘴滑到打结嘴底部下方,导致钳咬捆绳失败,如图 5 所示。

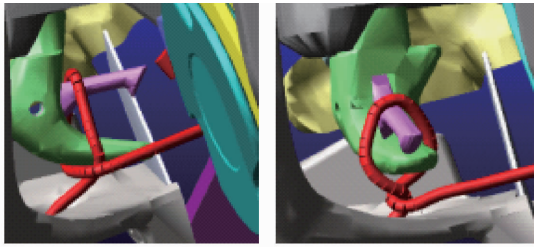


图 5 搭绳点偏差 4.5°时钳咬捆绳仿真结果
Fig.5 Simulation results of rope-biting motion when rope-lapping point deviation was 4.5°

综上所述,打结嘴缠绕的环扣形状受夹绳盘上的搭绳点 B 与捆绳在打结嘴上的搭接点 D 形成的捆绳姿态影响,夹绳盘上的搭绳点偏差应在 $\pm 3^\circ$ 以内。夹绳盘的理想搭绳点位置 B_0 可通过控制蜗杆与打结器支架上蜗杆轴孔端面之间 A 处的间隙来获得,如图 2 所示。

1.2 打结嘴凸台倾角变化对绕扣的影响

如图 6 所示,打结嘴曲面由前曲面、侧曲面、凸台曲面、后曲面和底曲面构成,取勾钳销轴的轴线为 x 轴、打结嘴轴的轴线为 y 轴, x 轴与 y 轴的交点为原点 O ,按右手规则建立空间坐标系 $S(Oxyz)$,在 xOy 平面内打结嘴凸台与 x 轴正方向的夹角为打结嘴凸台倾角 γ 。

为分析打结嘴凸台倾角 γ 变化对绕扣过程的影响,设计 γ 为 60° 和 45° 的打结嘴,分别装配到打结器仿真模型,设置夹绳盘搭绳点位置为 B_0 。利用

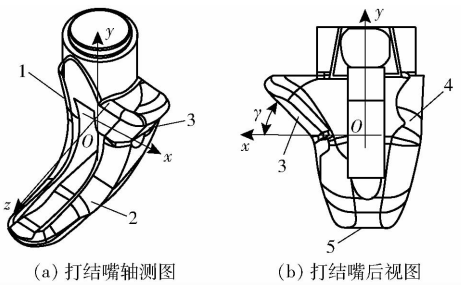


图 6 打结嘴曲面构成

Fig.6 Composition of curved surface of knotter hook

1.前曲面 2.侧曲面 3.凸台曲面 4.后曲面 5.底曲面

ADAMS 求解器对打结器成结装置虚拟样机模型进行仿真^[12],打结嘴从初始位置转到 90° 时,捆绳在打结嘴上的缠绕形状与捆绳姿态如图 7 所示。

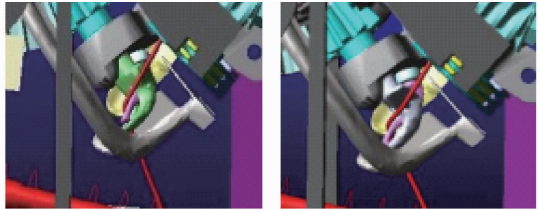


图 7 打结嘴转到 90° 时捆绳的缠绕形状与捆绳姿态
Fig.7 Twining shape and posture of rope when rotation angle of knotter hook was 90°

由图 7 可见,打结嘴从初始位置转到 90° 时,当凸台倾角 γ 为 60° ,捆绳在打结嘴凸台曲面上的位置趋于凸台顶部,捆绳与 x 轴的夹角较大。当凸台倾角 γ 为 45° ,捆绳在打结嘴凸台曲面上的位置远于凸台顶部,捆绳与 x 轴的夹角较小。从绕扣动作的可靠性角度考虑,减小凸台倾角可限制捆绳沿打结嘴凸台曲面上滑到打结嘴凸台顶部,避免发生打结嘴缠绳故障。因此,在夹绳盘的理想搭绳点位置 B_0 可保证的情况下,有必要调整打结嘴凸台倾角 γ 。

2 打结嘴曲面形态设计

2.1 基于力学解析的打结嘴凸台倾角设计

打结嘴绕扣过程的任一瞬时,打结嘴与微段捆绳之间的相对运动可简化为物体在斜面上的运动。如图 8 所示,捆绳受拉力 F 、沿凸台曲面接触点法向的正压力 F_N 、打结嘴凸台曲面对捆绳的摩擦力 f 的作用。当打结嘴转到 90° 时,分析捆绳与打结嘴之间的受力。利用空间正交法将捆绳拉力 F 正交分解为 F_1 、 F_2 和 F_3 , F 的方向沿着捆绳指向夹绳盘, F_1 平行于平面 xOy ,且与 y 轴垂直,指向 x 轴负方向; F_2 平行于平面 yOz ,且与 z 轴垂直,指向 y 轴正方向。

$$F_1 = F \cos \theta_1 \tag{1}$$

$$F_2 = F \cos \theta_2 \tag{2}$$

式中 θ_1 、 θ_2 —— F 与 F_1 、 F_2 的夹角

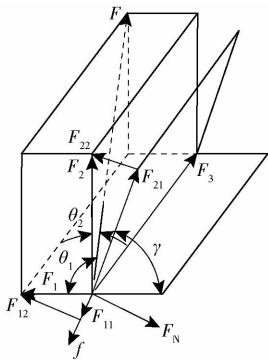


图 8 捆绳受力分析与拉力 F 的空间分解

Fig. 8 Force analysis sketch of rope and space decomposition of rope tension F

沿凸台曲面接触点法向的正压力 F_N 为

$$F_N = F_{22} + F_{12} \tag{3}$$

将式(3)改写为

$$F_N = F_2 \cos \gamma + F_1 \sin \gamma \tag{4}$$

由式(1)、(2)、(4)得

$$F \cos \theta_2 \cos \gamma + F \cos \theta_1 \sin \gamma = F_N \tag{5}$$

捆绳不沿打结嘴凸台曲面向上滑动的临界条件为

$$F_{21} < F_{11} + f \tag{6}$$

其中 $f = \mu F_N$ (7)

式中 μ ——打结嘴与捆绳之间的摩擦因数,取 0.18

式(6)可改写为

$$F \cos \theta_2 \sin \gamma - F \cos \theta_1 \cos \gamma - f < 0 \tag{8}$$

由式(8)得

$$\gamma < \arctan \frac{\mu \cos \theta_2 + \cos \theta_1}{\cos \theta_2 - \mu \cos \theta_1} \tag{9}$$

由式(9)可见,凸台倾角 γ 与捆绳姿态角及摩擦因数有关。其中,在捆绳与平面 xOy 的交点位置,由图 9 量得 $\theta_1 = 78.5^\circ$, $\theta_2 = 81^\circ$,由式(9)计算可得 $\gamma < 62.084^\circ$ 。

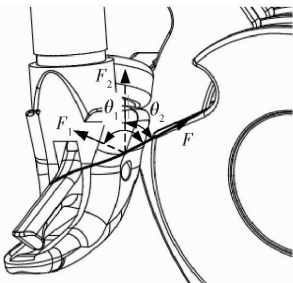


图 9 θ_1 与 θ_2 的图示与测量

Fig. 9 Graphical representation and measurement of θ_1 and θ_2

考虑到打结嘴旋转到 270° 时,打结嘴凸台外缘不与勾钳压板发生运动干涉,对应的打结嘴凸台倾角 γ 为 48° 。因此,打结嘴凸台倾角的取值范围为 $48^\circ < \gamma < 62.084^\circ$ 。由式(9)可知, γ 角越小越有利

于防止捆绳沿着打结嘴凸台上滑。为此,本文将打结嘴凸台倾角 γ 取值为 50° ,打结嘴凸台边缘与勾钳压板的最小垂直距离为 2 mm,此时,既能限制捆绳沿打结嘴凸台曲面上滑到打结嘴凸台顶部,又能保证打结嘴凸台外缘不与勾钳压板发生运动干涉,如图 10 所示。

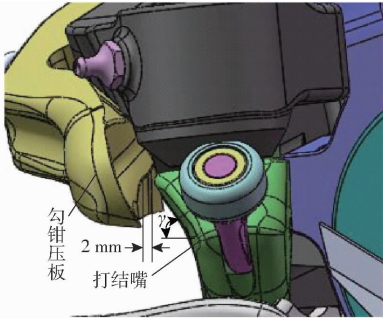


图 10 打结嘴与勾钳压板的位置关系

Fig. 10 Position relationship between knotter hook and pressure plate of hook

2.2 基于边界相似与 B 样条曲面造型方法的打结嘴凸台曲面设计

打结嘴曲面难以用解析函数表征,本文采用边界相似与 B 样条曲面构造技术来重构打结嘴凸台曲面。根据离散造型法^[22],打结嘴曲面网格线分别为横截面线和纵截面线,如图 11 所示,将横向定义为 v 线,纵向定义为 u 线。由于打结嘴凸台曲面模型为 v 、 u 线构成的网格细分模型,打结嘴凸台曲面模型的重构过程就是一系列 v 线、 u 线的构建过程。

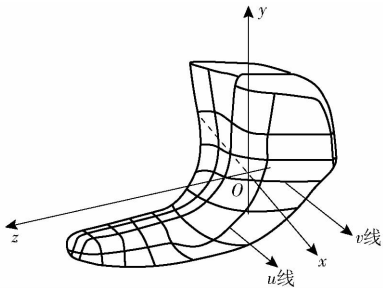


图 11 打结嘴离散模型

Fig. 11 Discrete model of knotting hook

打结嘴重构部分为如图 6 所示的打结嘴凸台曲面,即打结嘴销轴孔以上至打结嘴凸台顶部的曲面,其余曲面保持不变。如图 11 所示,将 xOz 平面与打结嘴凸台顶面之间等分若干个切面,每个切面的边界均为 1 个封闭曲线,如图 12 所示。

为使 u 向在 xOy 面截面曲线的切矢量满足打结嘴凸台倾角 50° 约束,过凸台曲面与 x 轴交点作与 yOz 夹角为 50° 的平面, v 向各切面与该面的交线 $\tau_i - \tau_i$ 与 x 轴交点即为待求边界点 p'_5 ,对应原边界点 p_5 。将原边界曲线在点 $p_1, p_2, \dots, p_7$ 处向外法向等距 $|p_5 p'_5|$,获得由 $p'_1, p'_2, \dots, p'_7$ 决定的中端曲线

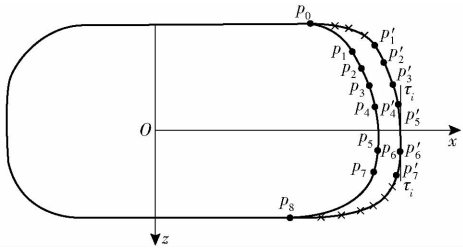


图 12 打结嘴 v 向切面曲线边界点

Fig. 12 Curve boundary points of tangent plane of knotted hook along v direction

$\widehat{p'_1 p'_7}$ 。新边界的首末端点与原边界端点 p_0 、 p_8 重合，在 p_0 与 p'_1 、 p'_7 与 p_8 之间按端点相切条件进行 B 样条曲线插值，获得首端曲线 $\widehat{p_0 p'_1}$ 和末端曲线 $\widehat{p'_7 p_8}$ 。

按照上述方法获得逐层的 v 向截面边界点，图 13 给出打结嘴凸台曲面 v 向截面拟合曲线，图 14 给出打结嘴凸台曲面 u 向截面拟合曲线。

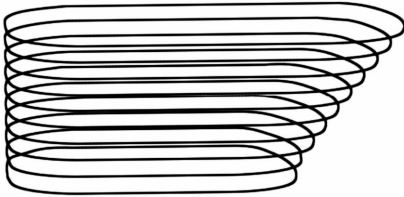


图 13 打结嘴凸台曲面 v 向曲线重构

Fig. 13 v -direction curve reconstruction of boss surface of knotted hook

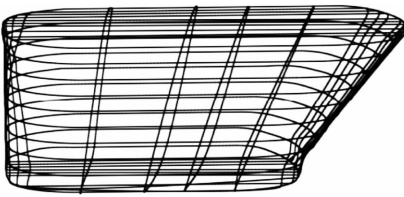
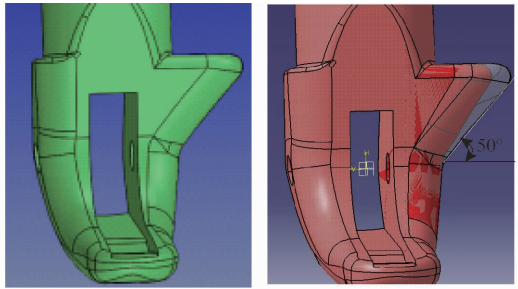


图 14 打结嘴凸台曲面 u 向曲线重构

Fig. 14 u -direction curve reconstruction of boss surface of knotted hook

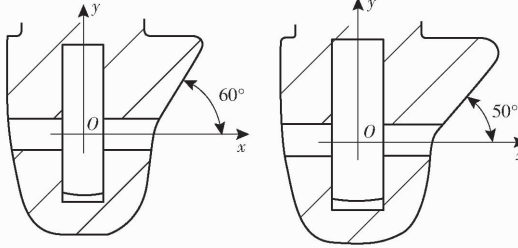
利用 CATIA 软件的拟合造型技术对打结嘴凸台曲面进行模型重构：首先将 IGS 格式的原打结嘴模型导入 CATIA 软件中，再按图 13、14 所示分层构造 v 向切面曲线和 u 向截面曲线，再将其拟合为曲面，最后应用“边界混合”命令，将所有混合曲面进行缝合，形成新的打结嘴模型，如图 15b 所示。改进前、后打结嘴模型 xOy 截面如图 15c、15d 所示。

利用 CATIA 软件对重构的打结嘴凸台曲面 v 向和 u 向截面进行曲率分析，如图 16 所示。对于 v 向切面的圆角过渡处曲线，其曲率半径均值 0.152，样条曲线的曲率半径变化较为平缓，均值 0.024。对于 u 向截面构造的 u 向曲线，其曲率半径由顶到底先由大减小再增大，连续变化且平缓，均值 0.183，表明基于 NURBS 曲面造型方法设计的打结嘴凸台曲面具有较高的重构精度。



(a) 打结嘴原凸台曲面

(b) 打结嘴新凸台曲面



(c) 原打结嘴凸台倾角

(d) 新打结嘴凸台倾角

图 15 打结嘴凸台曲面重构

Fig. 15 Reconstruction of boss surface of knotted hook

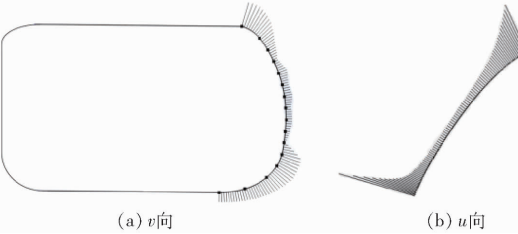


图 16 打结嘴凸台曲面 v 向和 u 向截面曲线的曲率变化

Fig. 16 Curvature variations of v -direction and u -direction section curve of boss surface of knotted hook

3 打结试验

3.1 改进后打结嘴性能试验

按上述重构的打结嘴模型，采用数控铣制方法加工新打结嘴。改进前、后的打结嘴实物如图 17 所示。

将改进后的打结嘴安装在双齿盘驱动打结器^[16]上，利用打结器疲劳测试与可靠性试验台^[17]，对其进行打结试验，并观察绕扣机构打结的各个动作过程。通过控制蜗杆与打结器支架上蜗杆轴孔端面之间的间隙，夹绳盘上的搭绳点位置调整为理想位置。通过调节变频调速电动机的变频器频率，设定打结器主轴转速为 60 r/min；通过调节捆绳张紧力，使捆绳拉力处于 100 ~ 120 N。打结试验过程观察绕扣机构在绕扣开始、绕扣 90°、绕扣 180°、钳咬等关键位置的动作变化，如图 18 所示。

从打结试验可见，当夹绳盘的搭绳点为理想位置，捆绳可靠搭接在打结嘴上，如图 18a 所示。打结嘴绕扣 90°时，捆绳处在打结嘴凸台曲面的靠下位置，如图 18b 所示；继续绕扣直到打结嘴转到 180°，捆绳受打结嘴凸台曲面约束而下滑，如图 18c、18d



图 17 改进前、后的打结嘴实物图

Fig. 17 Pictures of original and improved knotter hook real products

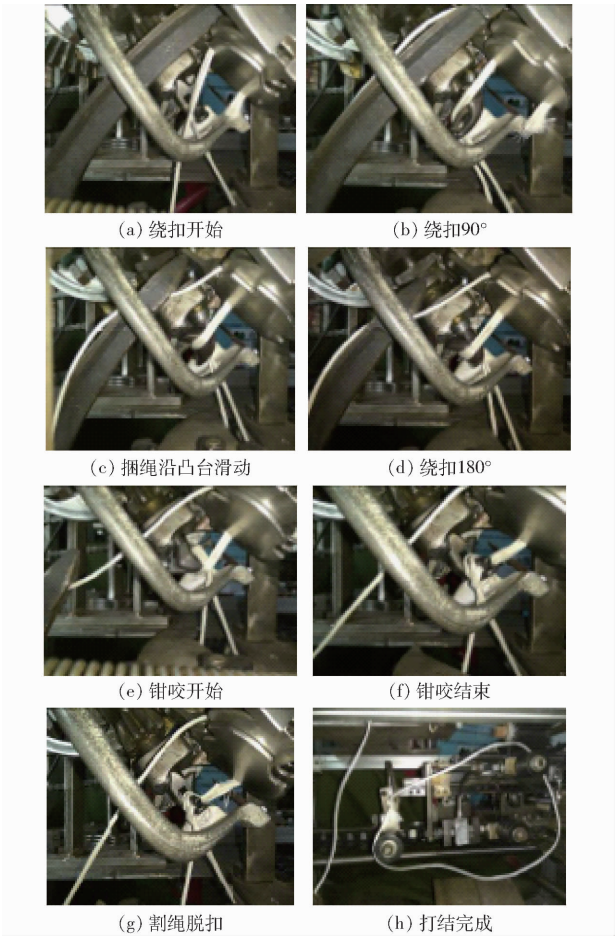


图 18 安装有改进打结嘴的打结器试验结果

Fig. 18 Knotting test results of knotter with improved knotter hook

所示;当打结嘴转到 270°时,钩钳开始钳咬捆绳,捆绳的位置处于钩钳最高点与打结嘴末端点连线的中间位置,捆绳姿态使钩钳具有钳咬最佳点,如图 18e、18f 所示;刀臂上的刀片割绳时,捆绳位于刀片中间偏刀尖侧,具有足够的滑切长度,脱扣顺利,表明打结嘴底曲面与侧曲面重构准确,如图 18g 所示;打结完成的绳环和绳结如图 18h 所示。

3.2 性能对比试验

为了检验夹绳盘搭绳点偏差与打结嘴凸台倾角对打结的影响,验证打结嘴改进设计的可靠性,以夹绳盘搭绳点偏差为试验因素,考察打结嘴凸台倾角为 50°和 60°时绕扣机构的缠绳故障率、钳咬失败率。利用打结器性能检测与可靠性试验台分别对两种不同凸台倾角的打结嘴进行测试,夹绳盘搭绳点偏差设置为 -4.5°、-3°、-1.5°、1.5°、3°、4.5°,共 6 组打结试验,每组打结 100 次,如图 19 所示。1 200 次打结试验结果表明:当夹绳盘搭绳点偏差 -4.5°时,60°凸台倾角的打结嘴一定会发生缠绳故障,而 50°凸台倾角的打结嘴未发生缠绳故障,钩钳仍可钳咬捆绳;当夹绳盘搭绳点偏差为 -3°、-1.5°、1.5°、3°时,两种打结嘴均未发生缠绳故障,钩钳能钳咬捆绳,打结均成功;当夹绳盘搭绳点偏差 4.5°时,两种打结嘴均未发生缠绳故障,但钩钳钳咬捆绳失败,这是由于决定钩钳能否钳咬捆绳仅与夹绳盘搭绳点位置有关,而与打结嘴凸台倾角无关。

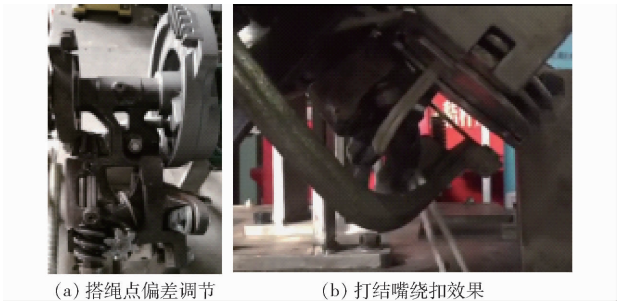


图 19 夹绳盘搭绳点偏差对打结影响的验证试验

Fig. 19 Validation test of influence of rope-lapping point deviation on knotting of knotter

实际应用中,60°凸台倾角的打结嘴绕扣,夹绳盘搭绳点偏差应控制在 $\pm 3^\circ$ 之内,可确保打结成功。而 50°凸台倾角的打结嘴可允许夹绳盘搭绳点偏差增大到 -4.5°,偏差范围为 $[-4.5^\circ, 3^\circ]$,仍可打结成功,表明凸台倾角 50°的打结嘴具有更好限制捆绳上滑的效果,能有效防止打结嘴缠绳故障发生,提高打结器的打结可靠性。

4 结论

(1)通过虚拟打结与成结对比试验,夹绳盘搭绳点偏差是打结嘴发生缠绳故障的主要因素。60°

凸台倾角的打结嘴绕扣,夹绳盘搭绳点偏差应控制在 $\pm 3^\circ$ 之内,而 50° 凸台倾角的打结嘴允许夹绳盘搭绳点偏差范围为 $[-4.5^\circ, 3^\circ]$,为夹绳盘搭绳点位置控制提供参考。

(2)通过受力分析建立捆绳不沿打结嘴凸台曲

面向上滑动的临界条件,基于边界相似与B样条曲面造型方法设计出凸台倾角 50° 的打结嘴模型,具有更好限制捆绳上滑的效果,能有效防止打结嘴缠绳故障发生,提高打结器的打结可靠性,从而为打结嘴的改进设计提供了参考。

参 考 文 献

- 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)
- 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/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 104-108, 125. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141217&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.12.017.
CHEN Longjian, LI Cheng, ZHANG Anqi, et al. Reconstitution and motion simulation of D-bale knotter based on reverse engineering[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 104-108, 125. (in Chinese)
- 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/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 96-100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120220&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.020.
WANG Lei, LÜ Huangzhen, WEI Wenjun, et al. Analytical conditions and visualized verification of knotter hook's rope-biting [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 96-100. (in Chinese)
- 张安琪,陈龙健,董浩,等. D型打结器割绳脱扣机构空间结构参数分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 73-80. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170110&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.010.
ZHANG Anqi, CHEN Longjian, DONG Hao, et al. Spatial structure parameter analysis of rope cutting and releasing mechanism of D-knotter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 73-80. (in Chinese)
- 李慧,何进,李洪文,等. 方草捆压捆机打结器空间参数研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 99-105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130818&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.018.
LI Hui, HE Jin, LI Hongwen, et al. Spatial parameters of knotters of square balers[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 99-105. (in Chinese)
- 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/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 135-143. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150920&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.020.
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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 135-143. (in Chinese)
- 尹建军,高强,陈亚明,等. 基于刚柔接触动力学的打结器虚拟打结方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 85-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160913&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.013.
YIN Jianjun, GAO Qiang, CHEN Yaming, et al. Virtual knotting method of knotter based on rigid-flexible contact dynamics [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 85-92. (in Chinese)
- 高强. 基于刚柔接触动力学的打结器设计方法与打结试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2016.
GAO Qiang. Research on design method of knotter based on rigid-flexible contact dynamics and knotting test [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- YU Xiaoyu, CHEN Liqing, WU Mengran, et al. Simulation and experiment of D-bale knotter based on multi-body dynamics [J]. International Agricultural Engineering Journal, 2016, 25(4): 155-162.
- 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)
- 李慧,王庆杰,何进,等. 打结器驱动齿盘打结性能对比试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 27-33.
LI Hui, WANG Qingjie, HE Jin, et al. Experimental research on performance of different knotter driving pulleys [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7): 27-33. (in Chinese)
- 尹建军,陈亚明,张万庆. 打结器咬绳机构线接触凸轮设计与载荷分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 224-230.

- http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160731&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.031.
- YIN Jianjun, CHEN Yaming, ZHANG Wanqing. Line-contact cam design and load analysis of rope-biting mechanism of knotter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7):224–230. (in Chinese)
- 13 熊亚, 李海涛, 陈龙健, 等. 打结器割绳脱扣机构与绕绳机构作用分析与改进设计[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 44–50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161006&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.006.
- XIONG Ya, LI Haitao, CHEN Longjian, et al. Analysis and modification of interaction between wiper mechanism and billhook mechanism for knotter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10):44–50. (in Chinese)
- 14 LI Hui, HE Jin, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of ϕ -type-knots knotters on Chinese small square balers[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(1): 154–164.
- 15 王新新. 打结器绕扣机构可靠性设计与打结试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2017.
- WANG Xinxin. Design and knotting experiment research on cordlock-winding mechanism of knotter [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)
- 16 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/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 128–134. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150919&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.019.
- CHEN Longjian, LI Cheng, ZHANG Anqi, et al. Load experimental analysis of billhook during straw baling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 128–134. (in Chinese)
- 17 张安琪, 陈龙健, 李诚, 等. 打结器运动图像与捆绳张力信息同步获取系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10):31–37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151005&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.005.
- ZHANG Anqi, CHEN Longjian, LI Cheng, et al. Synchronous acquiring system about information of bale knotter movement and cord tension [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10):31–37. (in Chinese)
- 18 尹建军, 张万庆, 陈亚明, 等. 双齿盘驱动打结器设计与成结试验分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 98–105. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160314&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.014.
- YIN Jianjun, ZHANG Wanqing, CHEN Yaming, et al. Design and knotting test analysis of knotter driven by double gear-discs [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 98–105. (in Chinese)
- 19 张万庆. 基于 D 型打结器原理的双齿盘驱动打结器设计与试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2015.
- ZHANG Wanqing. Design and experimental research of knotter driven by double gear plate based on D-knotter principle [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015. (in Chinese)
- 20 尹建军, 王新新, 高强. 打结器连续打结试验方法与疲劳试验台设计[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 84–91. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171010&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.010.
- YIN Jianjun, WANG Xinxin, GAO Qiang. Continuous knot-tying test method of knotter and knotter fatigue test bench design [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 84–91. (in Chinese)
- 21 布库, 万其号, 李岩, 等. 打结器试验台的设计[J]. 机械设计与制造, 2010, 8(8): 37–39.
- BU Ku, WAN Qihao, LI Yan, et al. Design of D-knotter test-bench[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010, 8(8): 37–39. (in Chinese)
- 22 刘岩, 陈建良, 童水光, 等. 采用三次 NURBS 曲面构造鞋楦模型及刻楦仿真[J]. 浙江大学学报:工学版, 2008, 42(5): 875–879.
- LIU Y, CHEN J L, TONG S G, et al. Construction of shoe last model based on three-order NURBS surface and last machining simulation[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science, 2008, 42(5):875–879. (in Chinese)