

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.045

打结器支架精铸毛坯误差分析与五轴数控加工方法

周脉乐¹ 尹建军¹ 朱浩¹ 张建明²

(1. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013; 2. 江苏省泰州技师学院机械工程系, 泰州 225300)

摘要: 针对打结器支架铸造毛坯存在误差、支架结构复杂、难以加工成型等问题, 为了减小支架毛坯铸造误差对加工质量的影响, 基于三维扫描技术对打结器支架毛坯进行逆向检测与分析, 得到同一批次铸造支架毛坯的误差分布规律。通过推导不同空间坐标系下的轴孔中心坐标变换规律, 提出一种支架轴孔加工位置偏离理想位置的调整方法。针对打结器支架的 5 个空间交错轴孔和 1 个凸轮曲面, 设计了打结器支架的专用夹具, 制定了五轴数控加工工序, 通过一次装夹可完成 5 个空间交错的轴孔和凸轮曲面的加工。将加工成型的支架和其他零部件组装成打结器, 进行了方草捆打结试验, 结果表明, 打结器支架上各轴孔的相对位置与角度关系准确, 打结动作精准、可靠, 支架加工成品率为 99%, 方草捆成结率为 100%。

关键词: 方捆打捆机; 打结器; 支架; 数控加工; 成结试验

中图分类号: S817.11 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)12-0417-08 **OSID:** 

Error Analysis and Five Axis NC Machining Method of Precision Casting Blank of Knotter Bracket

ZHOU Maile¹ YIN Jianjun¹ ZHU Hao¹ ZHANG Jianming²

(1. School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Taizhou Technician College, Taizhou 225300, China)

Abstract: The knotter bracket supports a series of executive parts of the knotter, and its quality directly affects the knotter's knot rate. In order to eliminate the influence of casting deviation of bracket blank on machining quality, based on three-dimensional scanning technology, the deviation distribution rule and deviation size of the same batch of casting bracket blank were obtained. A method of adjusting the machining position of bracket axle hole deviated from the ideal position was put forward by deducing the coordinate transformation rule of axle hole center under different space coordinate system. Aiming at the five different space axle holes and one cam surface, the five axis NC machining technology and special fixture of the bracket were designed. The machining method of five shaft holes with different spatial surfaces and one cam surface by one-time installation and clamping was designed. The processed bracket was assembled by this method and other parts into knotter, a series of executive parts cooperated accurately, and the square bale tying test was completed. The test result showed that based on the five axis NC machining method, the proposed deviation compensation method and the designed special fixture, the machining of the five different space axle holes and one cam surface can be realized by one-time installation. The relative position and angle of each axle hole on the knotter bracket were accurate, and the knotting action was accurate and reliable, the finished rate of the bracket processing was 99%, and the square bale knotting rate was 100%.

Key words: rectangular baler; knotter; bracket; numerical control machining; knot test

0 引言

打结器是方草捆打捆机的核心工作部件, 支架

是其关键零件之一^[1-2]。支架结构复杂, 用于支撑打结器的各个执行机构, 主要包括 5 个空间交错的轴孔和 1 个凸轮曲面。各空间交错的轴孔之间具有

收稿日期: 2020-04-21 修回日期: 2020-05-18
基金项目: 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: 周脉乐(1989—), 男, 讲师, 博士, 主要从事农业机械优化设计及应用研究, E-mail: zhoumaile@126.com
通信作者: 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

严格的空间位置关系,轴孔的加工精度(形位公差、尺寸公差与粗糙度)决定了打结器各执行机构的零件能否准确装配、各执行机构能否按预定时序准确地完成耦合的打结动作。国内外研究以打结器结构优化设计为主,主要集中在打结器的动作原理、结构重建、尺度优化和打捆密度等方面^[3-10]。KLAUS等^[11]发明了一种同时打两个结的打结器。MARC等^[12]针对打结器产生不规则绳端的问题,对夹绳器进行了改进设计。万其号等^[13-14]阐述了D型打结器的主要零件及结构,并分析了打结器自动打结的动作过程。尹建军等^[15-17]分析了打结器夹绳-绕扣-钳咬等动作参数,揭示了双齿盘打结器的成结原理,并完成了各构件耦合运动仿真与时序分析。李慧等^[18]建立了打结器的参数化模型。张安琪等^[19]分析了D型打结器夹绳盘-打结嘴的空间角度参数。陈龙健等^[20-21]基于逆向工程技术完成了D型打结器的重构与运动仿真。马赛等^[22]基于TRIZ理论设计了一种D型打结器。熊亚等^[23]分析了打结器割绳脱扣机构的运动规律,给出了凸轮的设计依据。李海涛等^[24]对打结器割绳脱扣机构进行磨损分析,并完成了改进设计。目前,国内外关于打结器零部件加工制造方法的相关研究尚未见报道。

本文对打结器支架的铸件加工问题进行研究,基于支架的结构特点,分析打结器支架铸造毛坯的误差,提出一种支架的五轴数控加工方法,并设计专用夹具,给出不同空间坐标系下的轴孔中心坐标变化规律,提出补偿铸造误差的支架加工方法。

1 支架铸造误差分析

打结器支架结构如图1所示,蜗杆轴孔、夹绳盘轴孔、打结嘴轴孔、刀臂轴孔和主轴轴孔空间交错,凸轮曲面在打结嘴轴孔外侧。考虑加工制造的经济性,采用熔模铸造方式获得打结器支架的毛坯。由于打结器支架结构复杂,将注蜡模具分开设计,合并后形成完整的打结器支架蜡模,模具如图2所示。

熔模铸造虽精度较高,但铸造误差始终存在,且影响后期加工。本文随机对同一批次铸造的20个打结器支架精铸毛坯进行检测,检测发现:同一模具、

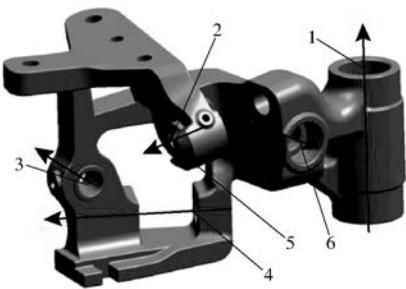


图1 打结器支架结构

Fig.1 Structure of knotter bracket

1. 主轴轴孔 2. 打结嘴轴孔 3. 夹绳盘轴孔 4. 蜗杆轴孔 5. 凸轮曲面 6. 刀臂轴孔

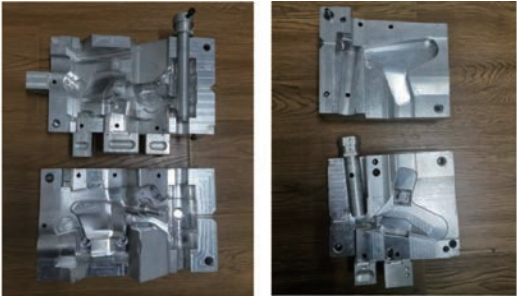


图2 打结器支架的模具

Fig.2 Mold for knotter bracket

同一批次铸造的支架毛坯,铸造误差的分布位置和大小具有较高的一致性(表1),可通过对铸造误差分析和改进加工方法补偿铸造误差。基于三维扫描与分析技术,将扫描得到的支架点云图以最佳拟合对齐方式与设计的数字模型对齐,分析支架铸件的铸造误差。分析结果表明,支架毛坯的各个轴孔位置和凸轮轮廓均存在铸造误差,最大误差主要位于打结嘴外轮廓处及主轴孔外轮廓处,最大误差小于1 mm,误差分析如图3所示。针对打结器支架的各个轴孔创建与加工坐标一致的轴孔特征进行比较

表1 打结器支架精铸毛坯检测结果

Tab.1 Inspection results of knotter bracket precision casting blank

最大误差位置	比例/%	最大误差/mm
打结嘴外轮廓	60	0.89
主轴孔外轮廓	25	0.76
刀臂轴孔下部	10	0.83
合模位置	5	0.97

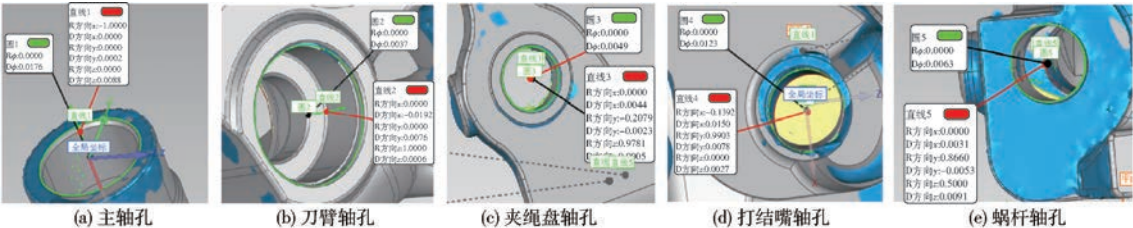


图3 打结器支架误差分析图

Fig.3 Knotter bracket error analysis charts

分析,同一批次支架铸件轴孔位置平均误差如表 2 所示。

表 2 轴孔位置平均误差

Tab. 2 Average deviation of shaft hole position

轴孔	误差/mm		
	x 方向	y 方向	z 方向
主轴轴孔	0	0.032	0.088
刀臂轴孔	-0.196	0.076	-0.028
夹绳盘轴孔	0.044	-0.024	0.026
打结嘴轴孔	0.152	0.078	0.028
蜗杆轴孔	0.032	-0.054	0.092

2 专用夹具设计与加工工序制定

2.1 专用夹具设计

根据支架结构特点和加工要求设计了可拆卸的专用夹具,主要包括夹具体、定位装置和夹紧装置,如图 4 所示。

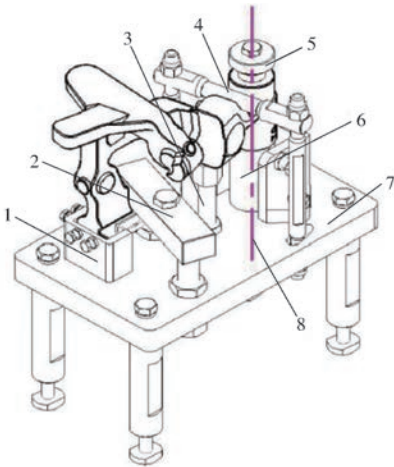


图 4 专用夹具

Fig. 4 Special fixture for bracket

1. 底面定位块 2. 蜗杆轴槽口压板 3. 调节螺栓 4. 横梁压杆
5. 主轴孔辅助定位块 6. 心轴 7. 夹具底板 8. 基准轴

设计定位装置时,选择支架的主轴孔和支架底面为定位基准。根据主轴孔的结构特征,选择心轴作为定位元件,心轴设计成凸台式,支架下端面置于心轴台阶上,凸台上半部分与支架铸件预制孔内壁紧贴,限定了支架 4 个自由度。主轴孔辅助定位压块圆柱面从支架主轴孔上端面嵌入,用螺栓将主轴孔辅助定位压块压紧,约束了打结器支架在主轴轴线方向的移动。打结器支架的底面贴合在底面定位块上,底面定位块的其余两面用螺栓固定支架的两侧,约束打结器支架的水平偏转。支架的 6 个自由度均被约束,实现了完全定位。

夹紧装置设计主要考虑夹紧作用点、夹紧方向和夹紧力。由于支架结构复杂,夹紧装置不能影响各个轴孔的加工,同时避免刀具移动时发生干涉,用

蜗杆轴槽口压板压紧蜗杆轴孔的空缺处。将横梁压杆横置于主轴孔与刀臂轴孔之间的凹面处,横梁压杆通过双头螺柱与底板连接。

定位装置和夹紧装置都置于夹具底板上,夹具底板通过 4 个圆形立柱与机床工作台固定。

2.2 机床选择与工序制定

打结器支架结构复杂,5 个轴孔具有严格的空 间位置和角度关系,加工精度要求高。若采用三轴 机床加工打结器支架,需要装夹 5 次才能实现 5 个 轴孔和 1 个凸轮曲面的加工。若采用四轴机床加工 至少需要装夹 3 次(第 1 次装夹加工主轴孔;第 2 次 装夹加工打结嘴轴孔、夹绳盘轴孔和凸轮曲面;第 3 次装夹加工夹绳盘轴孔和刀臂轴孔),如图 5 所示。 多次装夹不仅费时费力,而且不同装夹位置使得加 工基准改变,造成加工质量差,甚至导致轴孔破边等 问题,废品率高。选用哈斯 UMC-750 型五轴数控 机床加工打结器支架,机床配置可实现 360°旋转的 双轴有耳转台,刀具可实现 X、Y、Z 轴 3 个方向的移 动,同时转台可实现 B、C 轴 2 个方向的转动。哈斯 UMC-750 型五轴数控机床转台尺寸为 630 mm × 500 mm,主轴最大扭矩为 122 N·m,最大功率为 22.4 kW。采用哈斯 UMC-750 型五轴数控机床,同 时配合设计的支架专用夹具,一次装夹就可以完成 5 个空间交错轴孔及凸轮曲面的加工,减少基准转 换,提高加工精度和效率。



图 5 四轴机床加工工序

Fig. 5 Four axis machine processing procedure

五轴数控机床加工支架时,依次加工蜗杆轴孔、 夹绳盘轴孔、打结嘴轴孔、凸轮曲面、刀臂轴孔和主 轴轴孔。蜗杆轴孔、夹绳盘轴孔、打结嘴轴孔直径均 为 15 mm,加工精度均为 IT7 级。为了保证加工精 度,采取先钻孔后扩孔再铰孔的工序。加工完支架 打结嘴轴孔后铣制凸轮曲面,以保证凸轮中心与打 结嘴轴孔的同轴度。刀臂轴孔为台阶孔,先对内孔加 工,采用先钻孔后扩孔再铰孔的工序,然后采用先铣 孔后镗孔的工序加工外孔。最后,采用先铣孔后镗 孔的工序加工主轴孔。打结器支架加工工序如图 6 所示。

3 坐标变换与补偿铸造误差加工方法

3.1 基准设定及坐标变换

以打结器支架底面为基准平面,以主轴孔的轴

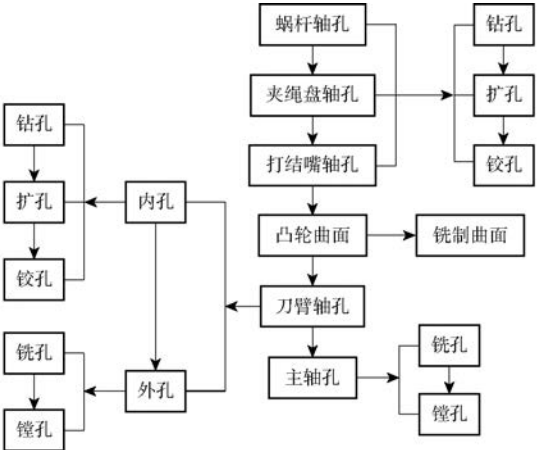


图6 打结器支架的加工工序

Fig. 6 Processing procedure of knotter bracket

线为基准轴。将基准平面向上平移一定距离(107.5 mm)作为工件坐标系的水平面,与基准轴的交点设定为支架的坐标系原点。取主轴孔加工中心坐标为(0, 0, 0),由打结器支架的结构尺寸知:刀臂轴孔的加工中心坐标为(-58, -19, -30) mm,打结嘴轴孔加工中心坐标为(-137.45, 0, -14.82) mm,夹绳盘轴孔加工中心坐标为(-153.4, 79.13, -51) mm,蜗杆轴孔加工中心坐标为(-135.1, -78, -81) mm。工件坐标系的坐标轴方向与机床坐标系的坐标轴方向一致。支架除主轴孔外的其余4个轴孔分布在空间异面上,需要将支架随转台分别绕C轴和B轴旋转一定角度后,将待加工轴孔端面与刀具轴(Z轴)保持垂直,刀具沿着Z轴上下进给完成对各个轴孔的加工。

加工刀臂轴孔时,将工件坐标系通过旋转和平移变换与刀臂轴孔重合,工件坐标系与刀臂轴孔的加工坐标系间的位置关系如图7所示。

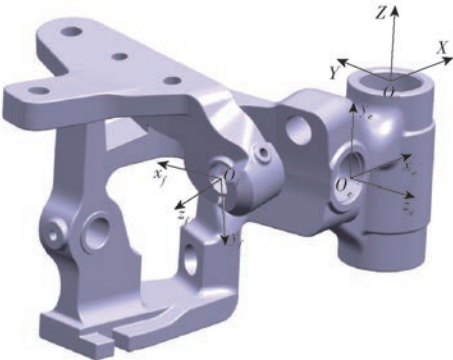


图7 工件坐标系与刀臂轴孔的加工坐标系

Fig. 7 Workpiece coordinate system and machining coordinate system of tool arm shaft hole

从工件坐标系到刀臂轴孔加工坐标系需通过分别绕C轴和B轴旋转及沿X、Y、Z轴平移的变换,变换矩阵为^[25]

$$T_e = T_1 T_2 T_3 \tag{1}$$

式中 T_1 ——绕C轴旋转的变换矩阵

T_2 ——绕B轴旋转的变换矩阵

T_3 ——平移变换矩阵

由刀臂轴孔与主轴孔的空间角度位置关系可知,工件坐标系到刀臂轴孔加工坐标系的转换需绕C轴转动0°,绕B轴转动90°,再结合支架的结构尺寸求得变换矩阵为

$$T_e = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -58 & -19 & -30 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

加工打结嘴轴孔时,工件坐标系到打结嘴轴孔加工坐标系的变换需绕C轴转动90°,再绕B轴转动98°,如图7所示。结合支架的结构尺寸求得变换矩阵为

$$T_f = \begin{bmatrix} 0 & 0.14 & -0.99 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.99 & -0.14 & 0 \\ -137.45 & 0 & -14.82 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

加工夹绳盘轴孔时,工件坐标系到夹绳盘轴孔加工坐标系的变换需绕C轴转动-18°,再绕B轴转动-90°,如图8所示。结合支架的结构尺寸求得变换矩阵为

$$T_g = \begin{bmatrix} 0.95 & 0 & -0.31 & 0 \\ 0.31 & 0 & 0.95 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -153.40 & 79.13 & -51 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

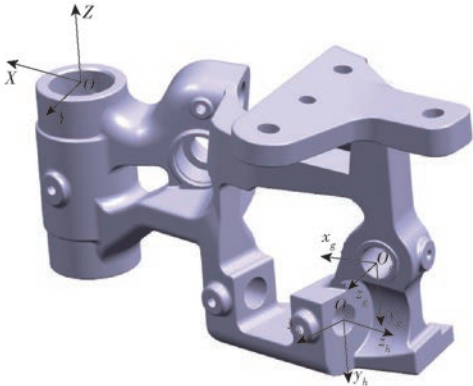


图8 工件坐标系与夹绳盘轴孔的加工坐标系

Fig. 8 Workpiece coordinate system and machining coordinate system of twine disc shaft hole

加工蜗杆轴孔时,工件坐标系到蜗杆轴孔加工坐标系的变换需绕C轴转动60°,再绕B轴转动-90°,如图8所示。结合支架结构尺寸求得变换矩阵为

$$T_h = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & -0.86 & 0 \\ 0.86 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -135.10 & 78 & -81 & 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

3.2 补偿铸件误差的加工方法

支架加工时,首先铣制支架底平面,形成装夹和加工基准面,经所设计的专用夹具装夹后,将专用夹具连同支架铸件一起置于哈斯 UMC-750 型五轴数控机床的双轴转台上。通过专用夹具底部的调整螺栓将主轴孔辅助定位块的上端面调整至与刀具主轴垂直,利用寻边器基于主轴孔外轮廓测定加工基准点,如图 9 所示。由于打结器支架铸件存在铸造误差,主轴孔外轮廓并不是理想的圆形,通过寻边器测得的基准点位置与理想基准点位置也发生了偏差,导致工件坐标系设置错误从而造成其余轴孔中心位置与理想位置发生偏差。通过调节支架各个轴孔的加工坐标,补偿打结器支架铸造误差,使实际加工中心位置尽可能地靠近理想位置,保证打结器支架 5 个轴孔和凸轮曲面的空间位置关系和精准度。在同一批次铸造的支架毛坯中随机选 A1、A2、A3 和 A4 4 件支架铸件,寻边器测得支架毛坯基准点与理论基准点误差为 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$,测得 4 组样本 A1、A2、A3、A4 的误差分别为 $(0.1, 0.12, 0.08)$ mm、 $(0.07, 0.09, 0.10)$ mm、 $(0.08, 0.11, 0.07)$ mm、 $(0.11, 0.10, 0.09)$ mm。

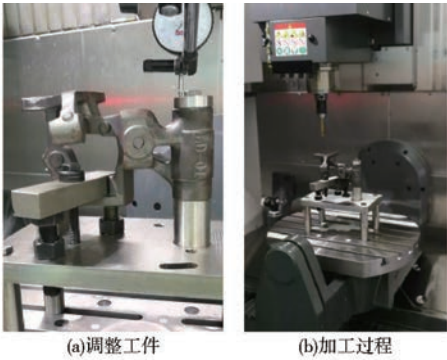


图 9 基于寻边器对加工基准点的测定
Fig.9 Determination of machining reference point based on edge finder

对于刀臂轴孔的加工,可以根据工件坐标系原点误差计算出刀臂轴孔加工中心坐标为

$$\begin{bmatrix} x'_e & y'_e & z'_e & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ 1 \end{bmatrix} T_e \quad (6)$$

将 4 组样本数据分别代入式(6)得到刀臂轴孔加工中心变化后坐标如表 3 所示。

根据上述计算结果,对样本 A1 刀臂轴孔进行加工时,刀臂轴孔的加工点位置坐标指令可由 $e(-58, -19, -30)$ mm 调整为 $e'_1(-57.90, -18.80, -30.12)$ mm,依此类推,样本 A2、A3、A4 对应刀臂轴孔加工点位置坐标指令为 $e'_2(-57.93,$

表 3 刀臂轴孔加工中心变化后坐标

Tab.3 Coordinate change of machining center of cutter arm shaft hole

坐标	A1	A2	A3	A4
x'_e	-57.90	-57.93	-57.92	-57.89
y'_e	-18.80	-18.81	-18.82	-18.83
z'_e	-30.12	-30.09	-30.11	-30.1

$-18.81, -30.09)$ mm, $e'_3(-57.92, -18.82, -30.11)$ mm, $e'_4(-57.89, -18.83, -30.10)$ mm。打结嘴轴孔加工中心变化后坐标如表 4 所示。

表 4 打结嘴轴孔加工中心变化后坐标

Tab.4 Coordinate change of machining center of knotting nozzle shaft hole

坐标	A1	A2	A3	A4
x'_f	-137.33	-137.36	-137.34	-137.35
y'_f	-0.07	-0.09	-0.06	-0.07
z'_f	-14.93	-14.90	-14.91	-14.94

夹绳盘轴孔加工中心变化后坐标如表 5 所示。

表 5 夹绳盘轴孔加工中心变化后坐标

Tab.5 Coordinate change of machining center of twine disc shaft hole

坐标	A1	A2	A3	A4
x'_g	-153.27	-153.31	-153.29	-153.26
y'_g	79.05	79.03	79.06	79.04
z'_g	-50.92	-50.94	-50.92	-50.94

蜗杆轴孔加工中心坐标变化后如表 6 所示。

表 6 蜗杆轴孔加工中心变化后坐标

Tab.6 Coordinate change of worm shaft hole machining center

坐标	A1	A2	A3	A4
x'_h	-134.95	-134.99	-134.97	-134.98
y'_h	-78.08	-78.10	-78.07	-78.09
z'_h	-81.03	-81.02	-81.01	-81.04

为了提高支架加工的成品率和加工精度,在加工支架毛坯时,根据上述计算结果在机床上调整刀具点位坐标指令后,加工支架的各个空间交错轴孔和凸轮曲面。通过本文设计的专用夹具装夹后,基于上述补偿铸造误差的加工方法,在五轴机床上对打结器支架的 5 个轴孔和凸轮曲面进行加工,共加工 100 个打结器支架,报废支架 1 个,支架加工成品率为 99%。报废支架的原因:主轴孔实际中心偏离理想中心过大,导致其余轴孔偏离理想中心过大,出现轴孔破壁等问题。加工成型后的各个轴孔和凸轮曲面如图 10 所示。打结器支架成品和装配完成的打结器如图 11 所示。



图 10 加工成型后的轴孔和凸轮曲面
Fig. 10 Processed shaft hole and cam surface



图 12 田间打捆试验
Fig. 12 Baling test in field

与其余零部件装配在打结器疲劳试验台上,进行打结器疲劳试验,如图 13 所示。

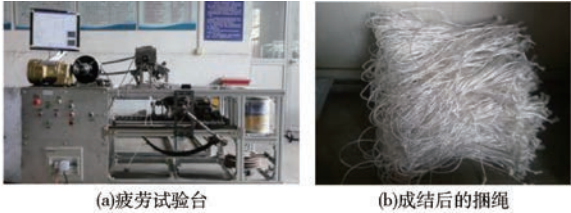


图 13 打结器疲劳试验
Fig. 13 Knotter fatigue test

打结器疲劳试验台可循环实现拉绳、送绳和打结动作,同时测试打结过程中的捆绳张力、主轴转矩和主轴转角^[26]。通过变频器调节打结器疲劳试验台主轴转速,分别设置转速为 60、75、90 r/min,捆绳拉力设置为 100~120 N 和 120~140 N,共完成 6 组试验。每组试验打结 2 000 次。试验表明:采用四轴加工中心 3 次装夹的方法加工打结器支架,5 个轴孔之间的空间角度误差达 $\pm 1^\circ$,轴孔中心位置偏离合适位置达到 ± 1 mm 左右,再复合锥齿轮等传动件的制造误差,导致锥齿轮和蜗杆传动不畅,使打结嘴轴等传动轴弯曲或支架轴孔破裂,上述因素综合导致支架成品率低,打结器工作寿命短;基于五轴数控加工方法和所设计的专用夹具,一次装夹可实现打结器支架 5 个空间交错轴孔和 1 个凸轮曲面的加工,加工精度高,满足打结器中各个执行机构的装配和工作要求。但打结器支架铸造毛坯存在铸造误差,通过寻边器测得的基准点位置偏离理想基准点位置,导致所加工打结器支架的轴孔壁太薄或破壁等问题(图 14),成品率仅为 60% 左右;采用五轴加工中心一次性装夹,应用本文的误差补偿方法,不仅打结器支架的轴孔加工精度高,而且成品率高达 99%,各执行机构配合准确,在各组参数下均成结可靠,成结率为 100%。

5 结论

(1)基于三维扫描技术对打结器支架熔模铸件进行逆向检测与分析,支架毛坯在各轴孔位置和凸轮轮廓处存在铸造误差,最大误差位于打结嘴外轮廓处及主轴孔外轮廓处,误差在 ± 1 mm 范围内。



图 11 支架成品及打结器总成
Fig. 11 Bracket products and knotters

4 打捆成结试验

为了验证打结器支架数控加工工艺以及补偿铸造误差加工方法的正确性,将加工成型的支架及其他零部件组装成打结器进行田间打捆试验,如图 12 所示。试验用捆绳选用直径为 2.5 mm 的聚丙烯绳,对收获后的小麦秸秆进行压缩打捆试验。试验时,打结器驱动齿盘的工作转速为 80 r/min,方捆尺寸为 320 mm × 420 mm × 500 mm,秸秆长度为 30~50 cm,含水率约为 20%,成捆密度 120~140 kg/m³,共捆草 10 000 捆,成结率为 100%。打结器支架可满足各个执行部件的装配精度,打结器成结精准、可靠,支架加工质量达到技术要求。

为进一步验证打结器支架的加工质量,将支架

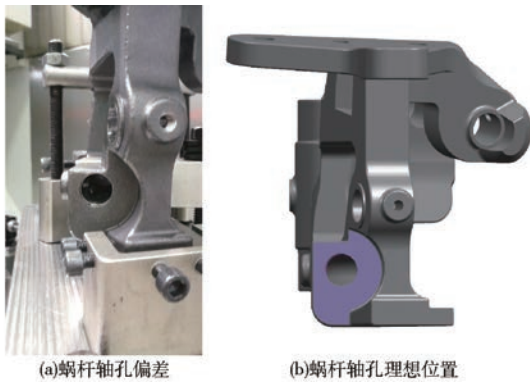


图 14 蜗杆轴孔

Fig. 14 Worm shaft hole

(2) 推导出打结器工件坐标系与各轴孔加工坐标系的变换矩阵, 提出通过调整工件加工坐标对铸造误差进行补偿的五轴数控加工方法, 设计了打结器支架的专用夹具, 制定了五轴数控加工工序, 一次装夹可完成支架 5 个空间交错轴孔和 1 个凸轮曲面的加工, 提高了支架加工成品率和质量, 适合批量生产, 成品率达 99%。

(3) 进行了打结器田间打捆试验和台架疲劳试验, 田间捆草 10 000 捆, 试验台打结 12 000 次, 成结率为 100%。

参 考 文 献

- [1] 周莹. 方草捆打捆机发展现状分析[J]. 南方农机, 2016, 47(5): 11-13.
- [2] 尹玲玉, 杨军太, 董世平, 等. 中型方捆打捆机打结系统研究[J]. 农业工程, 2015, 5(4): 114-116.
YIN Lingyu, YANG Juntao, DONG Shiping, et al. Study on knoter system of middle rectangular baler[J]. Agricultural Engineering, 2015, 5(4): 114-116. (in Chinese)
- [3] 张安琪, 陈龙健, 韩鲁佳, 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.
ZHANG Anqi, CHEN Longjian, HAN Lujia, et al. Synchronous acquiring system about information of bale knoter movement and cord tension[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 31-37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151005&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.005. (in Chinese)
- [4] 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): 224-231.
YIN Jianjun, CHEN Yaming, ZHANG Wanqing. Line-contact cam design and load analysis of rope-biting mechanism of knoter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 224-231. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160731&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.031. (in Chinese)
- [5] 魏瑞涛, 岑海堂, 李沛文, 等. D 型打结器失效分析及研究进展[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(3): 14-18.
WEI Ruitao, CEN Haitang, LI Peiwen, et al. Failure analysis and research progress of D type knoter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(3): 14-18. (in Chinese)
- [6] 张泽璞, 段宝成, 陶桂香, 等. 打捆试验台设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(9): 152-156.
ZHANG Zepu, DUAN Baocheng, TAO Guixiang, et al. Design and test of bale rig[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(9): 152-156. (in Chinese)
- [7] 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.
WANG Lei, LÜ Huangzhen, WEI Wenjun, et al. Analytical conditions and visualized verification of knoter hook's rope-biting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 96-100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120220&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.020. (in Chinese)
- [8] 张绍英, 李海涛, 曹庆和, 等. 双 α 打结器关键传动机构设计[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 74-79.
ZHANG Shaoying, LI Haitao, CAO Qinghe, et al. Design of key transmission mechanism of double- α -knot knoter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 74-79. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131213&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.013. (in Chinese)
- [9] AFZALINIA S, ROBERGE M. Modeling of pressure distribution inside the compression chamber of a large square baler[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(4): 1143-1152.
- [10] SHINNERS K J, SCHLESSER W M. Reducing baler losses in arid climates by steam re-hydration[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2014, 30(1): 11-16.
- [11] KLAUS W, JURGEN V, CARMEN H, et al. Knotting device to form two knots at the same time: Germany, EP2057891B1[P]. 2010-09-15.
- [12] MARC G, VANSTEELAN T. Knotter apparatus with shearplate for rotary knife: United States, 4309051[P]. 1982-01-05.
- [13] 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 knoter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(4): 17-19. (in Chinese)
- [14] 万其号, 布库, 李岩, 等. 打结嘴的材质及疲劳寿命分析[J]. 农机化研究, 2011, 33(4): 126-129.

- WAN Qihao, BU Ku, LI Yan, et al. The analysis of material and fatigue life for knotting hooker[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(4): 126 – 129. (in Chinese)
- [15] 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. 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160314&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2016. 03. 014. (in Chinese)
- [16] 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. 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150920&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 09. 020. (in Chinese)
- [17] 尹建军, 汲峥, 王新新, 等. 打结嘴缠绳故障分析与曲面形态改进设计[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 82 – 89. YIN Jianjun, JI Zheng, WANG Xinxin, et al. Analysis of rope-twining failure of knotter hook and its improved design of curved surface shape [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 82 – 89. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180710&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 07. 010. (in Chinese)
- [18] 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. 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130818&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2013. 08. 018. (in Chinese)
- [19] 张安琪, 冯洋洋, 董浩, 等. D型打结器夹绳盘-打结嘴空间角度参数分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 101 – 109. ZHANG Anqi, FENG Yangyang, DONG Hao, et al. Parameter analysis of spatial angle about rope-clipping and hook of D-knotter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 101 – 109. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180812&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 08. 012. (in Chinese)
- [20] 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. 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141217&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2014. 12. 017. (in Chinese)
- [21] 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. CHEN Longjian, LI Cheng, ZHANG Anqi, et al. Load experimental analysis of bill hook during straw baling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 128 – 134. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150919&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 09. 019. (in Chinese)
- [22] 马赛, 李凤鸣, 钱旺. 基于TRIZ理论的D型打结器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 327 – 333. MA Sai, LI Fengming, QIAN Wang. Design of D-type knotter based on TRIZ theory [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 327 – 333. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s043&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. S0. 043. (in Chinese)
- [23] 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)
- [24] 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/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 118 – 124. LI Haitao, XIONG Ya, CHEN Longjian, et al. Wear research and improved design of D-knotter wiper mechanism [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 118 – 124. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150317&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 03. 017. (in Chinese)
- [25] 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [26] 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. 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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171010&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017. 10. 010. (in Chinese)