

一种注塑机螺杆端部螺孔加工专用车铣复合 生产线设计及应用

潘晓敏, 金杨杨, 谢瑞木
(海天塑机集团有限公司, 浙江 宁波 315821)

摘要: 螺杆是注塑机的核心零件, 主要作用为送料、压实、塑化和传压, 其工艺繁杂且要求精度高, 传统工艺需经过钻、车、铣、攻等多道工序。现针对某企业螺杆端部加工, 设计了一种螺杆端部加工专用车铣复合加工生产线, 主要包含车铣复合机床的移动式动力夹持、可快速拆卸更换中心架和碎屑隔挡机构、批量递进式自动上下料推料流线架及摆渡式空中传输桁架。该工作站可快速、高效、高精、安全地实现螺杆端部“一刀下”加工, 为中心型企业从单一功能设备向复合自动化设备升级转型提供宝贵经验。

关键词: 加工生产线; 螺杆端部; 复合加工; 自动接驳; 二次装夹

中图分类号: TG65

文献标识码: A

DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.02.017



全文在线

A design and application of a special turn-milling production line for thread processing at the end of injection-screw

PAN Xiaomin, JIN Yangyang, XIE Ruimu

(Haitian Plastics Machinery Group Co., Ltd., Ningbo 315821, CHN)

Abstract: The screw is the core part of the Injection Molding Machine, its main role is feeding, compaction, plasticizing and pressure transfer, its process is complex and high-precision, and the traditional process needs to go through multiple processes such as drilling, turning, milling, tapping, etc. Now for the screw end processing of an enterprise, a special turning-milling production line for screw end processing is designed, which mainly includes, Rack the mobile spindle with power, the quick detachable center frame, the debris blocking mechanism, the automatic Load-Unload Flow and the Automatic Truss. The workstation can quickly, efficiently, accurately, and safely realize the "one-time processing" of the screw end, providing valuable experience for the upgrading and transformation of central enterprises from single-function equipment to composite automation equipment.

Keywords: processing lines; screw ends; composite processing; automatic connection; secondary

螺杆是螺杆式注塑机的重要零部件之一, 安装在机筒内, 通过旋转与轴向移动将物料输送、压实并完成塑化注射动作^[1], 具有数量多、工艺复杂、精度要求高和规格(双金属、变距、双棱等)多等特点, 其结构和加工质量直接影响整机的性能^[2]。螺杆通过端部螺孔与螺杆头配合实现高压注射, 因此其端部的内孔和螺纹精度十分重要。而不同规格端部螺孔的螺杆有不同的加工工艺: 端部螺孔 M16 以下规格螺杆的是利用车床进行车削加工; 端部螺孔 M16 以上规格的螺杆除车床车削加工外,

还需利用国外某品牌加工中心进行铣削。

目前国产数控铣床虽各项性能得到明显提升, 但与国外高端数控铣床相比, 仍处于低水平重复状态^[3]。而螺杆是典型的复杂回转体类零件, 具有较大回转直径, 不适用于国产普通数控铣床加工^[4]。再结合螺杆端部螺孔的加工工艺——多道工序不同机床往往需要多次运输、接驳、装夹和定位, 这不仅造成空间浪费、效率低下, 还会因二次装夹形成误差影响精度^[5]。因此, 螺杆端部加工需采用复合加工设备, 但一方面国内暂无满足加工要求的复合



设备，另一方面复合设备大多未配备自动化上下料装置，难以实现效率最大化。因此，本文提出一种基于螺杆端部专用车铣复合设备的自动线设计应用方案，以此来实现螺杆端部的“一刀下”和“16+8”黑灯生产模式加工，为中小微企业自动化升级提供改造思路和宝贵经验。

1 工艺及现状分析

在注塑机中，螺杆头的作用为预塑时将塑化好的熔体放流到储料室中和高压注射时有效封锁螺杆头前部熔体防止倒流。而螺杆端部的螺孔是与螺杆头配合的，其内孔和螺纹精度相当重要，但加工工艺却十分繁琐（按照传统加工工艺需经3次加工）。此外，由于M16以下规格螺孔（表1）也和M16以上规格螺孔（表2）的加工工艺不同，一定程度上影响了加工效率和精度。若按照多道工序由不同机床进行加工，不可避免地会产生二次装夹的重复定位误差，无形中提高调试难度和降低效率^[6-7]。而车铣复合加工技术具备高效率、高精度的特点^[8]，能够实现车削和铣削的功能互补和运动合成，可在保证一次装夹的“一刀下”原则下，实现螺杆端部螺孔的高效和高精化加工。

表1 螺杆端部螺孔M16以下(M12)规格加工工艺

Tab. 1 Processing technology for end threaded holes with specifications smaller than M16(M12) of injection-screw

工序号	工序名称	工序内容	工艺参数 转速S/ (r/min)	工艺参数 进给量F/ (mm/r)
01	钻	φ21 mm U钻钻凸出尺寸至平	500	0.08
02	钻	φ15.5 mm U钻钻引导孔，深度7 mm	500	0.05
03	钻	φ10.25 mm U钻钻M12螺纹底径，深度47 mm	800	0.08
04	车	粗镗止口孔φ11.8 mm，深度11 mm，两头倒角	600	0.1
05	车	精镗止口孔φ12 mm，两头倒角	1 300	0.05
06	攻	攻螺纹M12×1.75，深度34 mm	150	262.5

目前现有设备的集成化程度低，无法满足最优生产策略，工艺流转周期长，生产效率低，占地面积大^[3]，虽然利用车铣复合技术可有效解决上述问题，但国内车铣复合设备暂无法实现“一刀下”集成化加工，需引进进口设备。同时，为最大程度提升效率满足“8+16”黑灯生产模式，需以车铣复合

设备为基础，另配自动化装置，这会使整体造价高昂，无法广泛应用于中小微企业。因此，为满足螺杆端部螺孔高精、高效的加工要求和低成本、高产出的企业生产需要，本文以车铣复合专用设备移动动力头、新型中心架、挡屑机构的结构创新为基础，以自动化批量递进式堆料流线架为前提，摆渡式空中传输桁架为链接，设计螺杆端部螺孔加工专用的车铣复合生产线，如图1所示。该车铣复合生产线可实现上述不同规格螺孔的螺杆加工，利用自动化装置有效提升整体加工效率的同时，避免“二次装夹”造成的重复定位误差进一步提升了产品质量，如图2所示。

表2 螺杆端部螺孔M16以上(M36)加工工艺

Tab. 2 Processing technology for end threaded holes with specifications larger than M16(M36) of injection-screw

工序号	工序名称	工序内容	工艺参数 转速S/ (r/min)	工艺参数 进给量F/ (mm/r)
01	钻	φ32mm U钻钻螺纹底径，深度80 mm	500	0.08
02	车	粗镗止口孔φ33.6 mm，深度15 mm	500	0.05
03	车	粗镗止口孔φ34.6 mm，两头倒角	800	0.08
04	车	精镗止口孔φ36.8 mm，两头倒角	1 300	0.05
05	铣	铣螺纹M36×4，深度57 mm	150	262.5

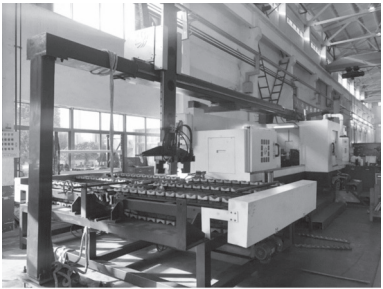


图1 螺杆端部螺孔加工专用车铣复合生产线实物图

Fig. 1 Practicality picture of the turn-milling production line for thread processing at the end of injection-screw

2 设计思路与基本结构

为解决螺杆端部螺孔实际加工过程中的诸多问题，实现具有高度协同性和超强续航能力的高精、高效生产，拟设计一种螺杆端部螺孔加工专用车铣复合生产线，如图3所示。该生产线主要由车铣复合机床、批量递进式自动化上下堆料流线架、摆渡

式空中传输桁架3部分组成,各部分在辅助控制系统下配合紧密,有序运行。

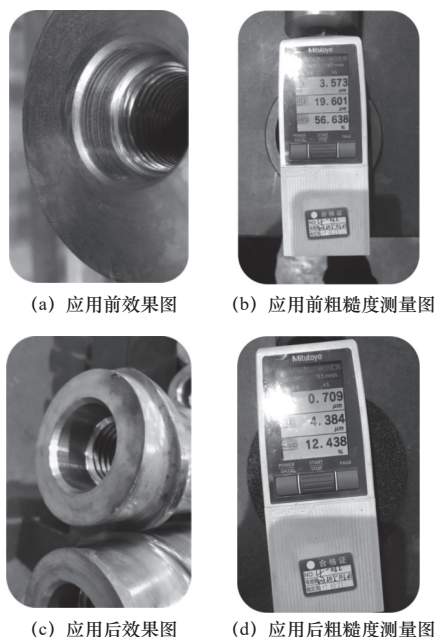


图2 应用前后粗糙度对比效果图

Fig. 2 Comparison of the smooth finish before and after application

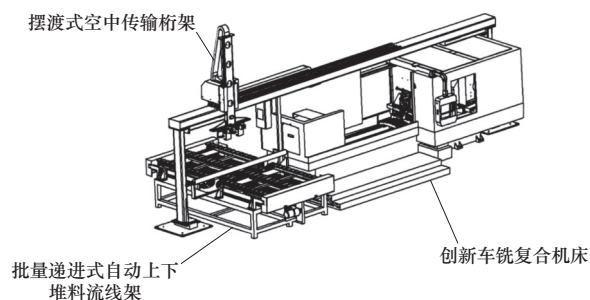


图3 螺杆端部螺孔加工专用车铣复合生产线设计图

Fig. 3 Design drawing of turn-milling production line for thread processing at the end of injection-screw

2.1 车铣复合机床

螺杆作为细长杆零件,加工过程中极易出现工件颤振、加工变形等问题^[9]。而传统螺杆加工基本遵循“一夹一架”的装夹方式,该方式“一夹一架”两端分别保证定位、动力和刚性、辅助定位。为适应不同长度规格的加工,传统加工机床多采用固定动力头、可移动式中心架结构,但该结构难以提供螺杆端部加工所需的精度和刚性保障。此外,从加工原理角度来看,中心架越靠近加工位置所对应的加工刚性就越好;从精度角度来看,除解决加工中出现的工件发振变形问题外,还需关注加工过程中的铁屑飞溅影响加工质量。因此,该复合设备基本设计思路为在传统设计思路基础

上进行结构创新,即以车床为主体采取主轴箱移动、中心架固定的方式保证减少工件颤振,并另设碎屑格挡机构阻挡铁屑飞溅。车铣复合机床俯视示意图如图4所示。

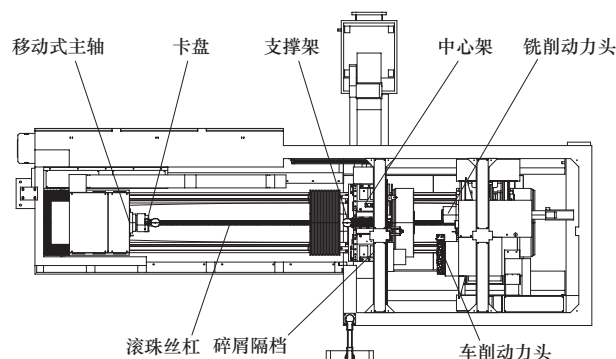


图4 车铣复合机床俯视示意图

Fig. 4 Top view of the turn-milling machine

2.1.1 可快速拆卸更换的中心架

为保证螺杆端部加工过程的刚性和强度,拟设计一固定式中心架来防止颤振、变形。该中心架主要由基座、支撑架、夹持转轴、滑台等组成,如图5所示。基座上布局水平线轨组和两组镜像滑台,并在滑台之间设计一套一半左旋、一半右旋的滚珠丝杠组,通过液压马达驱动正反丝杠来实现中心架的松紧。由于螺杆零件的径面上分布螺棱,如图6所示,因此在基座上设计两对带有轴承的高精度转轴(两对转轴可通过4条线定位进行辅助夹持)以保证夹持所需强度、刚性和稳定性。考虑螺杆直径和螺距分别要与夹持点布局位置和夹持转轴长度对应,中心架夹持螺棱过多、过少均会造成旋转跳动,需将固定中心架变为可快速拆卸更换结构。因此设计快压单燕尾结构,一送、一取、一放、一紧即可实现拆卸和安装全过程。

为避免加工时产生打滑、振动等现象,中心架需提供足够的夹持力,此夹持力由液压马达配合丝杠产生,设计时需按照最大载荷取计算。最大规格零件S1000PA0SD螺杆(螺杆总长3 060 mm,质量118 kg,直径80 mm)端部进行钻削加工时产生最大载荷,加工所用U钻及加工参数:刀具主偏角 $\varphi=45^\circ$,刀刃半径 $r=2$ mm,加工时转速 $n=300$ r/min, U钻直径 $d=50$ mm,进给量 $f=0.16$ mm/r。由于目前车床U钻加工没有成熟计算公式,因此参考相同直径麻花钻计算公式^[10]。为实现4根转轴夹持可靠,需保证转轴提供的静摩擦力大于钻削轴向力,以及摩擦力矩大于刀具对工件的切削力矩^[11]。

$$\begin{aligned} F_s &> N \\ F_s &= \mu_1 F_a \\ N &= 299df^{0.7} \\ T_{a1} &> M \\ T_{a1} &= \mu_2 F_a D \\ M &= 0.304df^{0.8} \end{aligned} \quad (1)$$

式中： F_s 为转轴提供的静摩擦力； N 为钻削加工时产生的轴向力； T_{a1} 为转轴提供的静摩擦力矩； M 为工件加工时产生的切削力矩； μ_1 为轴向静摩擦系数； μ_2 为转动时滚动摩擦系数； D 为螺杆直径； F_a 为转轴夹持螺杆时提供的径向载荷。

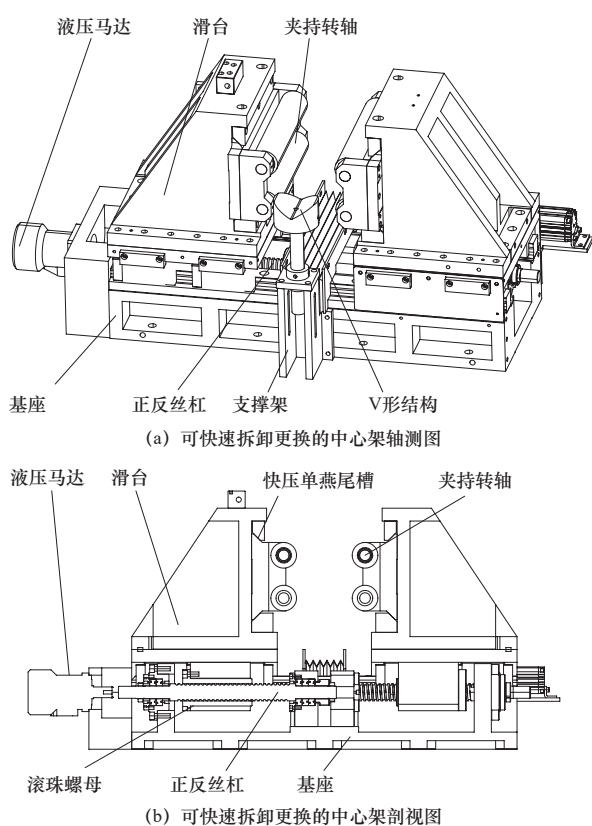


图5 可快速拆卸更换的中心架示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of the quick detachable center frame



图6 螺杆螺棱分布图

Fig. 6 Distribution diagram of screw edge

而转轴提供的力矩由液压马达经滚珠丝杠提供，同时需保证驱动扭矩大于摩擦力矩。液压马达经滚珠丝杠提供的驱动扭矩 T_{a2} 的公式为

$$\begin{aligned} T_{a2} &> T_{a1} \\ T_{a2} &= (F_a I) / (2 \times 3.14 \times n_1) \end{aligned} \quad (2)$$

式中： n_1 为丝杠正效率； I 为丝杠导程。

2.1.2 移动式动力夹持主轴

设计移动式动力夹持主轴的主要目的是与固定中心架配合从而将关键夹持力转移至中心架以减少颤振、变形。与传统固定式主轴箱相比，其主轴箱与床身之间加设了滑轨模组，该模组由一组水平线轨与两组滑块单元组成，可使主轴箱在伺服电机和滚珠丝螺母副的配合下沿线轨进行水平移动，如图7所示。为考虑后续自动接驳动作不与卡盘夹持动作相互干涉，在主轴箱与中心架两端另设一组等高、可升降V形结构过渡放置支撑架。

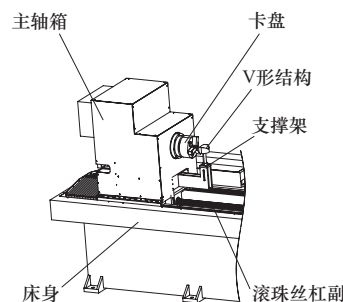
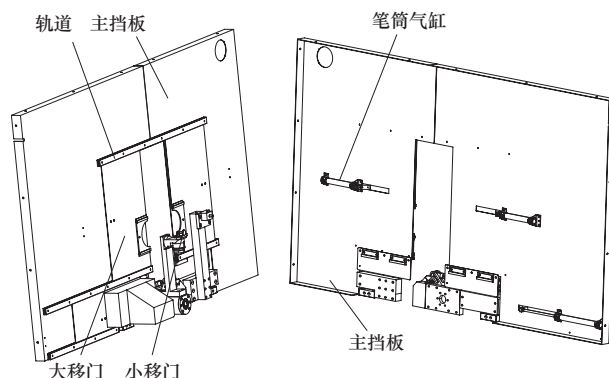


图7 移动式动力夹持主轴示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the mobile spindle with power

2.1.3 碎屑格挡机构

碎屑隔挡机构示意图如图8所示，碎屑格挡机构包括大移门、小移门、笔筒气缸及对应的自动化程序，其主要作用为不影响自动上下料接驳的同时阻挡铁屑飞溅影响加工。因此，先在固定主挡板基础上开缺增设对开大移门，再在其上增设一小半圆开缺的小移门，利用自动化程序和中心架转轴底座另设的中心出水装置，即可实现“水流+阻挡”双保险从而阻挡铁屑飞溅。



(a) 碎屑隔挡机构外侧示意图 (b) 碎屑隔挡机构内侧示意图

图8 碎屑隔挡机构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the debris blocking mechanism

2.2 批量递进式自动上下料堆料流线架

批量递进式自动上下料堆料流线架是实现自动

接驳的前提,主要由上下料V形组列和中转升顶结构组成,如图9所示。中转升顶结构在上下料两架中间,利用平移气缸和升顶气缸来保证与主机接驳的稳定性,如图10所示。待加工件放置在上料V形组列上,随每次取料前进一格;而成品放在下料V形组列上,随每次放料后退一格。

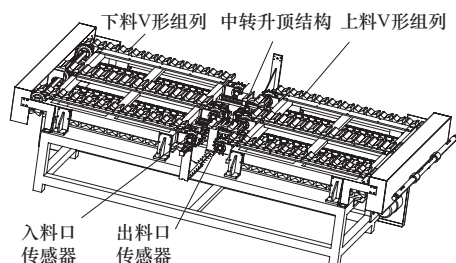


图9 批量递进式自动上下料堆料流线架示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the automatic load-unload flow rack

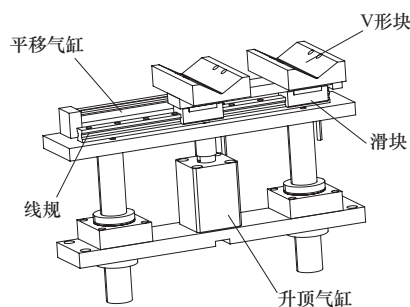


图10 中转升顶结构轴示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the ejection mechanism for change trains

中转升顶结构由平移气缸实现X轴的移动,升顶气缸实现Y轴的移动,位于出料和入料共用工位上。当零件完成加工经传输桁架送至此工位下料时,X轴移动至出料端并配合Y轴进行出料,经出料端口传感器检测到零件到位后,中转升顶结构X轴移动至入料口并配合Y轴进行上料,当入料端口传感器检测到无零件时,复位至原点利用传输桁架进行上料。

2.3 摆渡式空中传输桁架

自动上下料堆料流线架的中转升顶结构使得出料口与进料口均为同一工位,因此桁架接驳结构(图11)设计为刚性强、稳定性高、成本低的两轴运动结构,以配合中转升顶装置实现自动上下料,其上设有的2组夹爪通过伺服电机分别沿Z轴直线导轨和Y轴升降导轨运动,如图12所示。同时将夹爪设计为“凹凸”字结构以保证通用性托底,并在动力端通过扇形齿轮组传动和正反丝杠来实现同步夹持,如图13所示。当机床夹具松开后,机床

会发送M指令申请换料,此时夹爪的气动马达工作,夹爪凹、凸两端打开,随后桁架沿Z轴和Y轴运动。当Y轴达到指定位置后,凹、凸闭合,随后运动至中转升顶装置工位处,打开夹爪完成下料。待中转升顶装置出入料完成后,夹爪闭合,桁架在运动至指定位置进行上料。

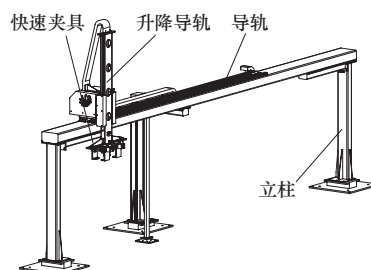


图11 自动桁架总体示意图

Fig. 11 Schematic diagram of automatic truss

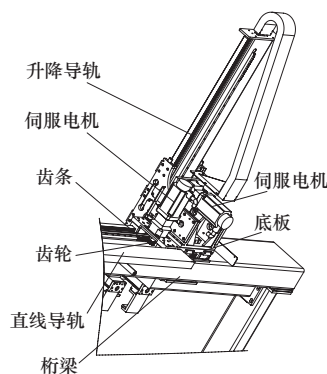


图12 自动桁架2轴运动示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the two-axis motion automatic truss

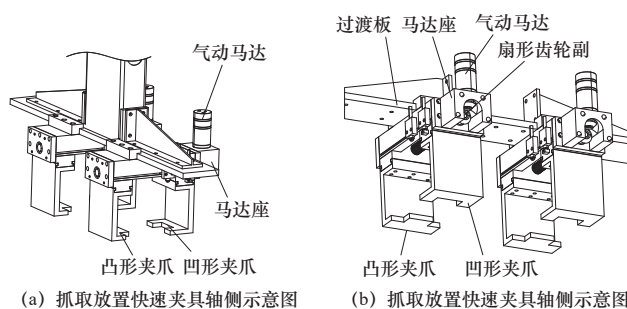


图13 抓取放置快速夹具示意图

Fig. 13 Schematic diagrams of quick clamp

3 工作流程和控制系统

车铣复合机床与桁架、自动上下料机构和对应的控制系统构成了一整个智能化单机生产线,可实现自动上下料、自动装夹和自动车铣,从而节约用人成本、提升精度和提高产品附加值^[12]。这就要求控制系统足够严密以及各单元在控制系统下配合紧

密有序。该生产线的基本流程如图 14 所示：①自动料架的输送带待桁架到位后将工件运至入工位；②中转升顶装置将工件从入工位运输至上下料口（上下料口共用一个）；③传输桁架利用夹爪将工件夹持至车铣复合机床进行装夹；④运行程序加工开始；⑤加工完成后大小移门打开，再经传输桁架→中转升顶装置→自动料架进行反向下料。

车铣复合智能单机生产线通过各部件位置开关来确认到位情况，并根据机床指令判断加工状态，其控制过程如图 15 所示。当机床联机启动时，传输桁架开始联机；当工件在流线架上料端达到指定入料口时，中转升顶装置运作，复合机床利用 M 指令发送换料请求，传输桁架联机运作将工件运输至指定装夹位置，检测到工件到位信号后，机床开始装夹工件完成上料，随后发送完成信号至机床开

始调用加工程序；加工完成后机床停机，利用 M 指令发送换料请求，联机的传输桁架运作夹持工件输送至流线架，再经中转升顶装置送至下料端出料口；若联机程序未直接结束，则重启后利用位置开关、程序指令判断流程，周而复始，循环往复以此实现智能化单机生产。

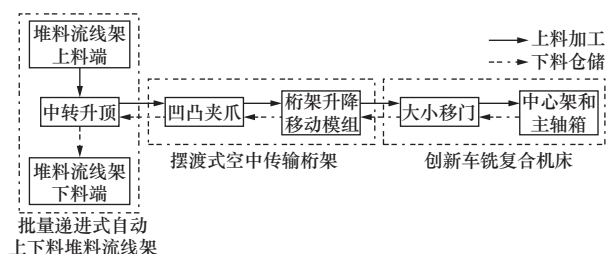


图 14 车铣复合智能单机生产线上料基本流程图

Fig. 14 Flow chart of the intelligent turn-milling production line with load-unload work piece



图 15 车铣复合智能单机生产线过程控制图

Fig. 15 Process control diagram of the intelligent turn-milling production line

4 应用分析

该车铣复合智能生产线是以车铣复合加工专机为基础的，因此应用分析的首要前提就是分析车铣复合专机在夹紧螺杆的同时，让螺杆形变远小于直线度等要求，如图 16 所示。图 17 所示为本文实际设计产物，为进一步验证设计和结构能满足实际生产需要，先对 S100PAOSD 规格螺杆进行加工测试，测试结果见表 3，中心架夹紧螺杆三齿时效果最佳。

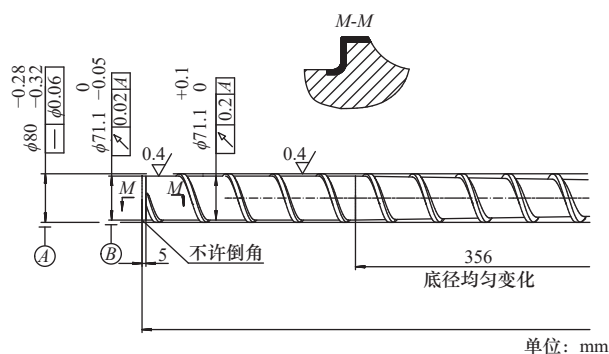


图 16 螺杆加工精度要求图

Fig. 16 Processing accuracy requirement diagram of injection-screw

为进一步验证夹持三齿时加工效果，还需进一步分析。螺杆受到的力远不能破坏其强度，且加工需要着重考虑变形带来的影响，故而利用 Ansys 对

夹持三齿时螺杆加工过程的形变进行分析。螺杆材料为 TGS2，屈服强度 235 MPa。转轴夹持时，最大夹持力为 3 982 N（由下方两根转轴提供），产生轴向摩擦力为 5 236.5 N，最大转动摩擦扭矩为 83.78 N。视轴端三爪卡盘夹持端面为约束面，滚轮与钻头接触区域设置相应阻力扭矩，并设置进给力与摩擦阻力，其结果如图 18 所示，满足精度要求。

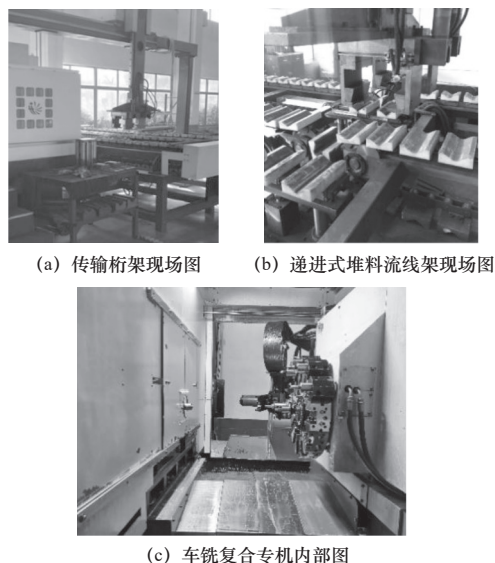


图 17 车铣复合专机工作站现场图

Fig. 17 Graphics for the scene of turn-milling production station

表3 不同接触齿数精度检测数据表
Tab.3 Accuracy testing of number of contact teeth

转轴与螺杆 接触齿数	测试组号	直线度0.06 mm 检测	圆跳动0.02 mm 检测	圆跳动0.2 mm 检测
2	1	0.061	0.019	0.185
	2	0.064	0.018	0.188
	3	0.058	0.019	0.192
3	1	0.055	0.018	0.181
	2	0.052	0.019	0.179
	3	0.055	0.017	0.183
4	1	0.052	0.020	0.185
	2	0.050	0.021	0.186
	3	0.054	0.019	0.183

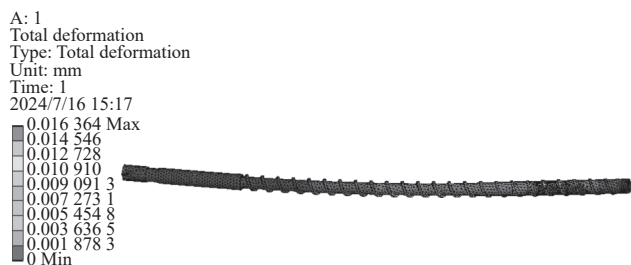


图18 有限元形变分析图

Fig. 18 Finite element deformation analysis

5 结语

该车铣复合智能单机生产线是以车铣复合加工专机为基础、递进式流线架为自动化前提、传输桁架为枢纽的自动化集成设备。目前,车铣复合加工专机已替代原从欧洲引入的专供设备,可实现螺杆端部的“一刀下”加工从而提升产品质量和缩短产品调试和加工周期,从而提升市场竞争力^[13]。再结合配套的自动化装置,可实现“8+16”的24小时不间断加工,以此来最大程度提升效率和机床利用率。除此之外,生产线各部件的电气元件和控制器为标准件,机械结构为自制件,二者都便于维护更换^[14]。

当下,传统制造业在技术推动下快速发展壮大,但对技术产生也存在路径依赖^[15],要想加快推动制造业转型升级必须结合企业自身特性。本文基

于传统制造型企业的特点,融合现代化传输技术、自动化控制、机械设计等相关学科知识,立足生产,结合工艺,设计了一套高效、高精的24h车铣复合智能单机生产线。该生产线顺应了国家对制造业企业转型的号召,以高端设备的自制取代进口,为其余制造业企业升级提供宝贵意见和建议。

参 考 文 献

- [1] 滕秀才. 高效节能注塑机关键技术分析研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
- [2] 李京远. 螺杆的数控仿真加工与误差分析 [J]. 农机使用与维修, 2021(1): 55-56.
- [3] 陈聪, 王贻诚, 郑雪飞, 等. 一种电机轴螺杆加工专用的数控铣床机械结构系统优化设计 [J]. 南方农机, 2023, 54(13): 146-147, 159.
- [4] 孙富建, 罗长庚, 蒋志贤, 等. 车铣复合切削加工技术及其应用研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 2023, 53(3): 1-17.
- [5] 封静敏. 典型零件在车铣复合机床上的加工工艺 [J]. 时代汽车, 2023(6): 143-145.
- [6] 鄢文. 浅谈中托架类零件设计对其可加工性的影响 [J]. 制造技术与机床, 2023(12): 135-139.
- [7] 李阔, 王宪龙, 赵常振, 等. 航天异形紧固件加工多工位专用机床设计 [J]. 制造技术与机床, 2023(7): 83-88.
- [8] 郑世燚, 弓清忠, 吴康艺, 等. 车铣复合加工技术的研究现状与展望 [J]. 机电技术, 2023(2): 51-56, 70.
- [9] 张金刚, 张吉平, 罗均, 等. 细长杆零件加工的研究 [J]. 装备制造技术, 2024(2): 166-168.
- [10] 陈龙, 冯小东, 康凯, 等. 利用普通车床进行深孔加工的研究 [J]. 河北建筑工程学院学报, 2015, 33(3): 92-95.
- [11] 张彦彬, 孙令伊, 徐帅强, 等. 变矩器壳体智能洁净制造生产线设计 [J]. 制造技术与机床, 2024(8): 16-25.
- [12] 赵修祥, 张金. 基于凯恩帝数控系统的桁架式自动上下料系统设计 [J]. 机械管理开发, 2023, 38(11): 190-191.
- [13] 武滢, 李进冬. 集增减材复合功能的机床结构设计 [J]. 制造技术与机床, 2023(2): 109-113.
- [14] 林建兵. 无心磨床自动化上下料系统设计 [J]. 机械研究与应用, 2021, 34(5): 102-104.
- [15] 曹雅丽. 对标新质生产力 激活制造业新引擎 [N]. 中国工业报, 2024-04-16.

第一作者/通信作者: 潘晓敏, 男, 1983年生, 本科, 高级工程师, 研究方向为机械设计与制造、人机工程。E-mail: 44523155@qq.com

(编辑 曲书瑶)

(收修改稿日期: 2024-07-17)