

# 大型 CNC 机床柔性随行夹具的开发与实现

王新乡<sup>1</sup>, 胡国清<sup>2</sup>, 周海峰<sup>1</sup>

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

**[摘要]** 为了解决大型结构件数控加工时, 传统加工固持技术工装数量多、工艺准备时间长、加工连续性差等问题, 设计了一种柔性随行夹具。该夹具采用旋摆气缸代替传统压板, 根据机床刀具运行轨迹自动控制夹具避让主轴刀头, 同时可通过调节压板长度以适应不同形状的工件, 具备一定的柔性扩展能力, 可应用在三坐标双主轴数控龙门铣床——V2 2500B 或性能参数类似的数控机床床上。

**[关键词]** 随行夹具; 柔性控制; CNC (computer numerical control) 机床

**[中图分类号]** V 261.99

## Development and Application of Flexible Fixture for Large CNC Machine Tool

WANG Xinxiang<sup>1</sup>, HU Guoqing<sup>2</sup>, ZHOU Haifeng<sup>1</sup>

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. School of Automotive and Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of the traditional processing technology, which includes large quantity of tooling, long process preparation time and poor continuity of processing, a kind of new flexible accompanying fixture was designed. The fixture adopts the rotary cylinder instead of the traditional pressing plate, which can be automatically controlled for avoiding the spindle head according to the running track of the machine tool. Meanwhile, the flexible expansion ability of the accompanying fixture can be realized by adjusting the length of the pressing plate to adapt to the structural parts of different shapes. The flexible fixture can be applied to the three coordinate double spindle CNC milling machine—V2 2500B or similar performance parameters of CNC machine tools.

**Keywords:** accompanying fixture; flexible control; CNC machine tools

## 0 引言

工装夹具是机械装备制造业中不可缺少的基础工艺元素<sup>[1]</sup>, 而柔性夹具又是数控加工质量和效率的保障<sup>[2]</sup>, 目前针对小型结构件的柔性加工固持方案较多, 例如三指或多指柔性夹具, 自牺牲式柔性夹具等等, 但由于这类夹具的夹持特点, 并不适用于大型梁、肋构件的加工<sup>[3-6]</sup>。国内大型梁、肋的数控加工一直延用的加工固持技术主要是: 在产品加工过程中留出工艺凸台, 通过压板、螺钉与支撑, 采用手工压紧或压紧螺钉直接压紧。该技术存在工装数量多、装夹与机床、刀具干涉点多, 材

[收稿日期] 2020-11-12

[基金项目] 福建省自然科学基金项目 (B19046)

[作者简介] 王新乡 (1974—), 女, 硕士, 讲师, 从事电气控制及自动化方面的研究。

料浪费严重, 工艺准备时间长, 加工连续性差等诸多弊端<sup>[7-8]</sup>。针对梁架零件的加工, Te Li 等<sup>[9]</sup>提出一种独立于数控系统的多点夹具方案, 该方案用三个激光传感器和专用检测平面, 检测刀具位置, 利用虚拟网格法找出可能与刀具发生碰撞的夹具并进行避让, 从而实现柔性加工固持的要求。本文提出了一种新型柔性随行夹具方案, 取消了传统工艺凸台, 改用夹具随机床主轴随动的固持工艺, 利用原机床数控系统读取主轴刀头坐标, 从而精确定位刀具位置, 实现压紧件随行主轴避让的功能。

### 1 系统整体结构方案设计

随行夹具系统采用一体式结构, 如图 1 所示。底座两端设置定位销, 中部摆放工件。执行元件为 Festo CLR 旋摆气缸<sup>[10]</sup>, 沿底座四周均匀分布。气缸外部用波纹管密封保护, 以防切屑液进入缸体。加工过程中, 随着主轴刀头运动, 气缸摆臂带动压板完成“打开避让”和“闭合按压”两个动作。为防止压板动作时带起切削损伤工件<sup>[11]</sup>, 压板的压头底部钻有小孔, 夹具打开和按压时, 释放高压气体吹开下方切屑, 如图 2 所示。为了适应不同形状工件的加工需求, 系统有多种长度压板可供更换, 以实现柔性扩展能力。

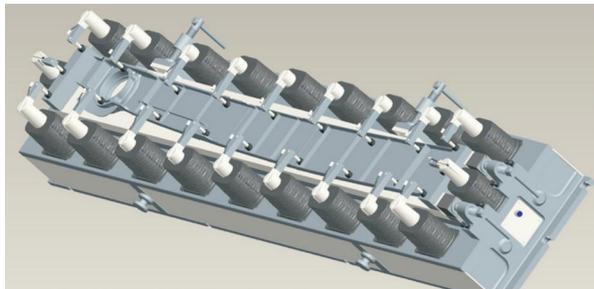


图 1 随行夹具系统整体结构

Fig.1 Overall structure of a flexible fixture

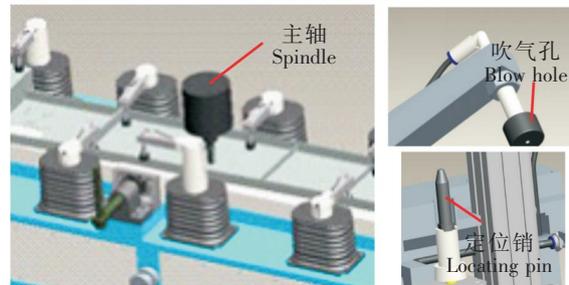


图 2 压板旋转及吹气

Fig.2 Rotatiing and blowing of a pressing plate

### 2 控制系统总体方案设计

对系统的整体要求主要包括: 1) 实时读取 CNC (computer numerical control) 机床主轴坐标数据; 2) 自动判断主轴位置并避让; 3) 具备一定的柔性扩展能力, 可适应不同外形结构件加工; 4) 全方位监控, 确保主轴安全。

#### 2.1 CNC 机床主轴实时坐标数据的读取

数控系统加工前, 将以夹具座的对刀原点为坐标原点进行对刀, 因此, 数控系统与随动夹具系统使用相同的坐标系, CNC 机床的主轴刀头坐标就是随动夹具系统的主轴位置。控制系统结构框图如图 3 所示。CNC 系统数据处理器与随行夹具控制端软件采用 C/S 结构。上位 PC 机获得主轴实时坐标数据的同时, 通过机床以太网接口, 根据 TCP/IP 协议将数据送给随行夹具控制端的下位 PC 机。相比独立于数控系统的夹具方案<sup>[9]</sup>, 本方案主轴坐标参数直接从数控机床获得, 故坐标数据获取时间更短且更为精确。

#### 2.2 坐标数据的分析与处理

由于随行夹具压板的按压区域亦为工件的加工区域, 故主轴运行至压板干涉区域时, 该区域压板应及时上提并顺时针旋转 90°到安全位置, 以避让主轴。本系统中, 主

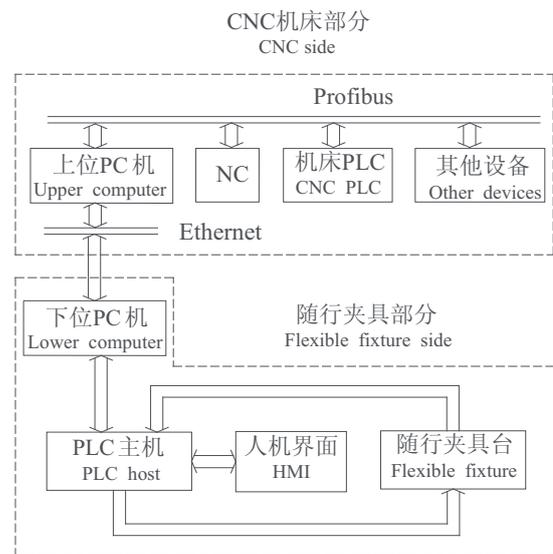


图 3 控制系统结构框图

Fig.3 Control system structure

料浪费严重, 工艺准备时间长, 加工连续性差等诸多弊端<sup>[7-8]</sup>。针对梁架零件的加工, Te Li 等<sup>[9]</sup>提出一种独立于数控系统的多点夹具方案, 该方案用三个激光传感器和专用检测平面, 检测刀具位置, 利用虚拟网格法找出可能与刀具发生碰撞的夹具并进行避让, 从而实现柔性加工固持的要求。本文提出了一种新型柔性随行夹具方案, 取消了传统工艺凸台, 改用夹具随机床主轴随动的固持工艺, 利用原机床数控系统读取主轴刀头坐标, 从而精确定位刀具位置, 实现压紧件随行主轴避让的功能。

### 1 系统整体结构方案设计

随行夹具系统采用一体式结构, 如图 1 所示。底座两端设置定位销, 中部摆放工件。执行元件为 Festo CLR 旋摆气缸<sup>[10]</sup>, 沿底座四周均匀分布。气缸外部用波纹管密封保护, 以防切屑液进入缸体。加工过程中, 随着主轴刀头运动, 气缸摆臂带动压板完成“打开避让”和“闭合按压”两个动作。为防止压板动作时带起切削损伤工件<sup>[11]</sup>, 压板的压头底部钻有小孔, 夹具打开和按压时, 释放高压气体吹开下方切屑, 如图 2 所示。为了适应不同形状工件的加工需求, 系统有多种长度压板可供更换, 以实现柔性扩展能力。

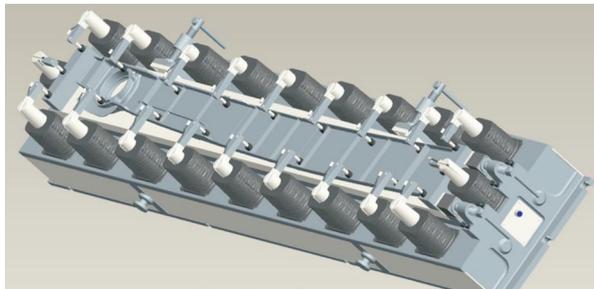


图 1 随行夹具系统整体结构

Fig.1 Overall structure of a flexible fixture

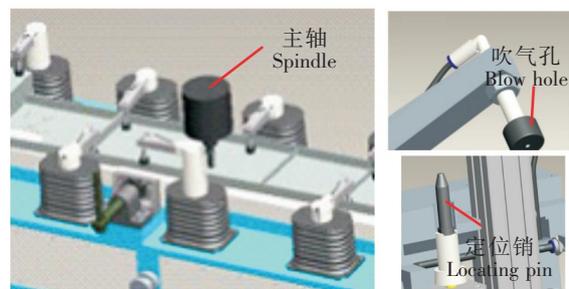


图 2 压板旋转及吹气

Fig.2 Rotating and blowing of a pressing plate

### 2 控制系统总体方案设计

对系统的整体要求主要包括: 1) 实时读取 CNC (computer numerical control) 机床主轴坐标数据; 2) 自动判断主轴位置并避让; 3) 具备一定的柔性扩展能力, 可适应不同外形结构件加工; 4) 全方位监控, 确保主轴安全。

#### 2.1 CNC 机床主轴实时坐标数据的读取

数控系统加工前, 将以夹具座的对刀原点为坐标原点进行对刀, 因此, 数控系统与随动夹具系统使用相同的坐标系, CNC 机床的主轴刀头坐标就是随动夹具系统的主轴位置。控制系统结构框图如图 3 所示。CNC 系统数据处理器与随行夹具控制端软件采用 C/S 结构。上位 PC 机获得主轴实时坐标数据的同时, 通过机床以太网接口, 根据 TCP/IP 协议将数据送给随行夹具控制端的下位 PC 机。相比独立于数控系统的夹具方案<sup>[9]</sup>, 本方案主轴坐标参数直接从数控机床获得, 故坐标数据获取时间更短且更为精确。

#### 2.2 坐标数据的分析与处理

由于随行夹具压板的按压区域亦为工件的加工区域, 故主轴运行至压板干涉区域时, 该区域压板应及时上提并顺时针旋转 90°到安全位置, 以避让主轴。本系统中, 主

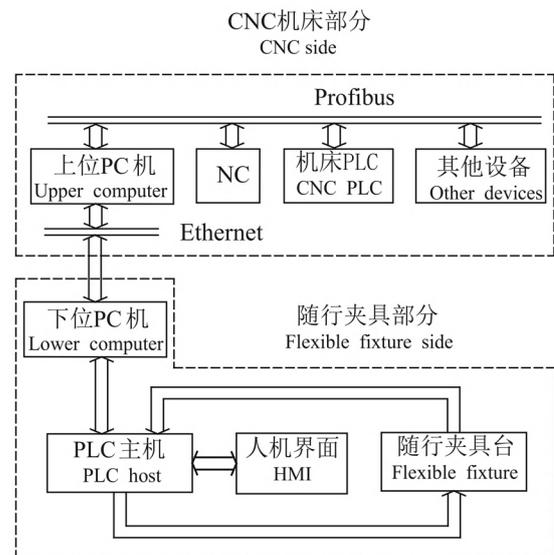


图 3 控制系统结构框图

Fig.3 Control system structure

控制夹具随主轴运行,保障工人有充分的时间按照触摸屏操作提示,手动控制 CNC 机床主轴抬高,停止随行夹具系统运行。

### 2.4.2 系统运行状态监控

随行夹具系统中设置了专门的通讯监控定时器,一旦数据多次出错或监控定时器迟迟未接收到数据,系统即启动应急响应,并在组态界面及人机界面 HMI 中同时提示网络故障。

同时对执行回路也进行监控。一旦反馈回路与执行回路数据不一致即触发应急响应。

考虑到工作环境恶劣,反馈元件选择 FESTO 的 SME-8-K-LED-24 位置传感器,该传感器可直接安放在旋摆气缸上,通过监控气缸伸缩,得到压板的实际工作状态。压板执行回路的监控包括整体监控和独立监控两个部分,其程序片段分别如图 7、图 8 所示。

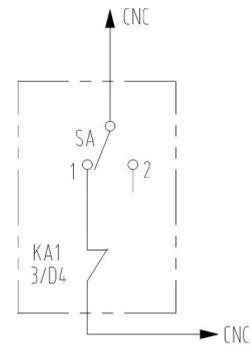


图 6 暂停主轴电路

Fig.6 Realize of pause function

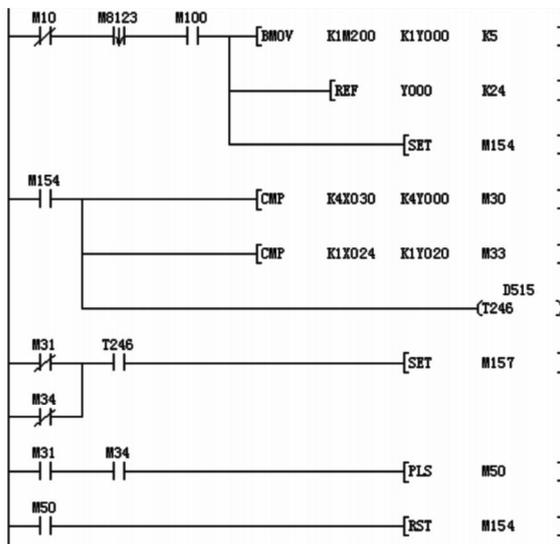


图 7 整体监控程序片段

Fig.7 Global monitor segment

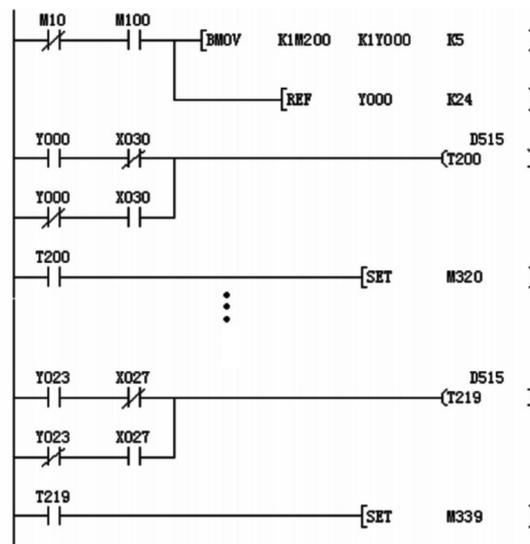


图 8 独立监控程序片段

Fig.8 Local monitor segment

整体监控程序将所有压板状态作为完整数据从 PLC 送到输出端口,即开始比较传感器反馈回来的压板信号,判断两者是否一致,同时监控定时器开始计时,若监控时间到,两数据仍未一致,则判定输出或反馈回路故障,启动应急响应。通过对比输入输出数据,PLC 可以判断出故障发生位置,在人机界面中显示故障检修建议。

独立监控程序对每个压板回路设置单独的监控程序,监控输出信号与反馈信号不一致的时间,如果该时间超过允许值,则判定该压板回路故障,系统启动应急响应。考虑到本系统中执行元件的响应时间约为 190 ms,程序中使用高速输入输出指令 REF 将最新的压板动作指令刷新到输出端口,以提高系统整体响应速度。

人机界面 HMI 为 PLC 与操作人员交互的窗口,在系统工作前,由 HMI 提示并引导安装操作;系统工作时,显示各压板工作状态,如图 9 所示。为了在系统故障时,立即显示故障位置,并提供检修建议,图 9 中每个压板均采用两层叠压设计(图中每一个矩形框表示一个夹具压板),下层框作为状态显示框,与 PLC 程序中 I/O 点数据比对结果对应,正常显示蓝

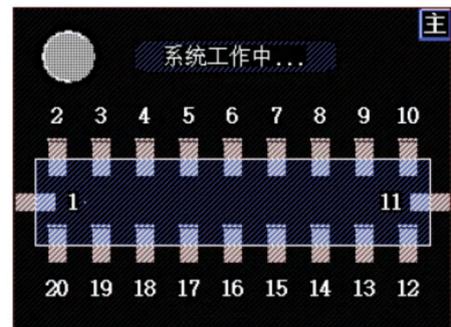


图 9 HMI 压板状态监控

Fig.9 Monitoring of pressing plate in HMI

色, 故障显示红色。上层框作为触摸切换框, 当状态显示框为红色 (故障) 时, 触摸该压板, 可触发上层框的“页面跳转”操作, 跳转到检修建议页面。

### 2.5 总体控制流程

根据以上设计得到系统总体控制流程如图 10 所示。

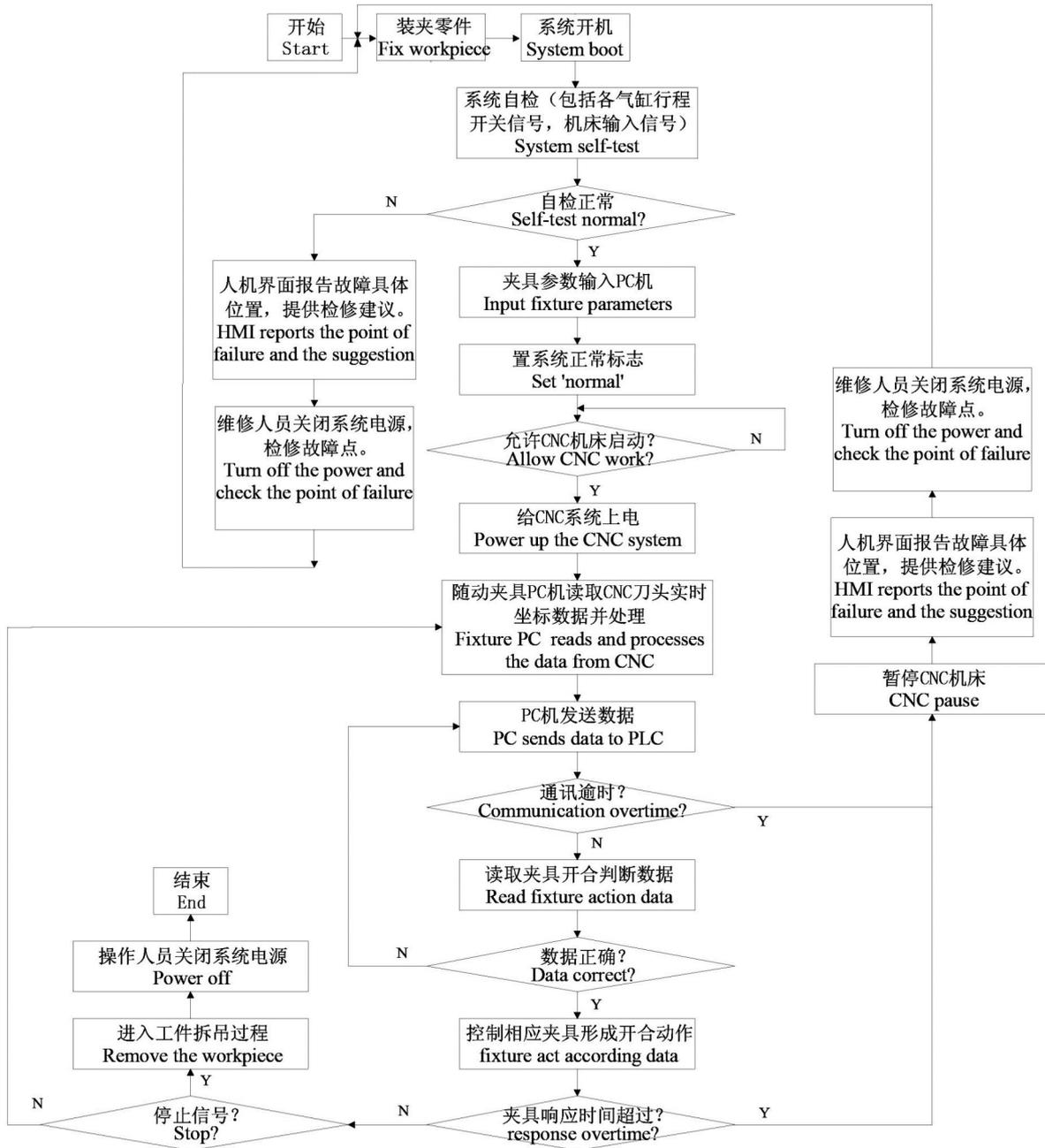


图 10 控制系统的流程图

Fig.10 Flow chart of the control system

图 10 中各运行准备工作均由夹具随动系统的 PLC 通过 HMI 的操作引导页面引导完成, 允许 CNC 机床“起动”后, PLC 自动解除 CNC 机床锁定, 图 6 中的 KA1 常闭触点断开, 允许 CNC 机床运行。CNC 机床运行期间, PLC 与下位 PC 机配合, 下位 PC 机读取主轴刀头当前坐标, PLC 对整个系统的运行状态进行监控, 同时控制相应的夹具进行避让, 一旦出现异常, 立即启动应急响应。CNC 机床加工完毕, HMI 界面显示“加工完毕”, PLC 再次通过 HMI 引导完成零件拆吊工作直至结束。

### 3 控制方案的实现和验证

根据以上设计方案制造的样机实物如图 11 所示。其设计加工范围为  $2\ 800\ \text{mm} \times 250\ \text{mm} \times 70\ \text{mm}$ ; 加工件选用某长梁, 其尺寸为  $2\ 000\ \text{mm} \times 210\ \text{mm} \times 50\ \text{mm}$ ; 配套机床为 V2 2500B 三坐标双主轴数控龙门铣床, 该铣床主轴功率  $50\ \text{kW}$ , 转速  $50 \sim 10\ 000\ \text{r/min}$ , 当转速为  $2\ 000\ \text{r/min}$  时, 最大扭矩为  $240\ \text{N} \cdot \text{m}$ , 三坐标方向上的进给参数见表 1。实际加工结果证明, 本文所设计的柔性随行夹具系统在与 CNC 机床配合时, 各夹具运行平稳正常, 实现了设计构想。当加工零件宽度为  $210\ \text{mm}$  时, 可节约  $60\ \text{mm}$  ( $2 \times 30\ \text{mm}$ ) 宽度的工艺凸台材料, 缩短加工准备时间约  $309\ \text{min}$ 。



图 11 样机  
Fig.11 Prototype

### 4 总结

本文以大型梁、肋零件为研究对象, 采用夹具随机床主轴随动的固持工艺, 设计了一种柔性随行夹具。该夹具取消了传统的工艺凸台, 利用原机床数控系统读取主轴刀头坐标, 实现压紧件随主轴避让功能。经实际生产验证, 系统

运行平稳, 新工艺与传统加工固持工艺相比, 大大减小了材料浪费和加工准备时间。目前, 该夹具可针对飞机、船舶、汽车等的大型梁、肋零件实行自动化随行工装, 用于 V2 2500B 龙门铣床或性能参数类似的数控机床上, 实现被加工产品的快速定位、无凸台装夹以及加工过程压紧件随行的功能。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 余建军, 任治军, 王辉. 先进焊接工装夹具及其在机械装备制造业中的应用 [J]. 机床与液压, 2011, 39(12): 115-121.
- [2] 王细洋. 飞机结构件机械加工柔性夹具系统 [J]. 航空制造技术, 2012, 20(17): 45-49.
- [3] CHAN K C, LIN C S. Development of a computer numerical control (CNC) modular fixture-machine design of a standard multifinger module [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1996, 11(1): 18-26.
- [4] DU, H, LIN, GCI. Development of an automated flexible fixture for planar objects [J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 1998, 14(3): 173-183.
- [5] 陈思涛, 温良, 李国华. 柔性高效装夹技术的研究与应用 [J]. 制造技术与机床, 2017(4): 138-141.
- [6] BOONSUK W, FRANK M C. Automated fixture design for a rapid machining process [J] Rapid Prototyping Journal, 2009, 15(2): 111-125. DOI:10.1108/13552540910443414.
- [7] 卢坚, 常彦, 刘宏灯. 框架类零件工艺凸台方案设计 [J]. 机械, 2017, 44(5): 66-69.
- [8] 凌平, 张文光, 刘晓蓉. TC21 复杂回转构件车铣复合柔性快速装夹技术研究 [J]. 制造技术与机床, 2020(3): 21-27.
- [9] LI T, WANG Y Q, LIU K, et al. Virtual grid and BPNN based collision avoidance control of automatic fixture system [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(5): 2843-2853. DOI:10.1007/s00170-017-1432-5.
- [10] 吴灿云, 胡国清, 王新乡, 等. Festo CLR 气缸工作性能实验分析 [J]. 机械设计与制造, 2010(5): 102-104.
- [11] 李爽. 数控铣床工装夹具的设计及改进 [J]. 黑龙江科学, 2019, 10(8): 84-85.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)

表 1 V2 2500B 铣床主轴三坐标方向进给参数  
Tab.1 Feeding parameters V2 2500B milling machine spindles

坐标 Coordinate	行程 Trip/mm	快移速度 Fast moving speed /(mm · min <sup>-1</sup> )	进给速度 Feed speed /(mm · min <sup>-1</sup> )	定位精度 Positioning accuracy/mm
X	20 000	15 000	0 ~ 15 000	0.040
Y	2 500	15 000	0 ~ 15 000	0.025
Z	650	15 000	0 ~ 15 000	0.008