铣削机器人加工系统开发与应用

周俊锋[1]，李盛良[1,2]，茅卫东[1,2]，温强龙[3]，黄在荣[1]，崔强[4]

1.奇瑞新能源汽车股份有限公司　安徽芜湖　241000
2.新能源汽车轻量化技术安徽省重点实验室　安徽芜湖　241000
3.安徽必达新能源汽车产业研究院有限公司　安徽芜湖　241000
4.安徽机电职业技术学院　安徽芜湖　241000

摘要：目前汽车车身铝合金型材零部件机加工依赖于数控机床设备，但数控机床在大规模铝型材零件加工上存在成本高、柔性差、效率低的问题。针对铣削机器人的集成应用展开研究，介绍了铣削机器人加工工艺的集成方案。重点介绍了国内外发展现状和未来发展趋势、加工流程、装置的构成和机器人加工轨迹及工艺参数设置，完成了铣削机器人工作站的集成应用，并进行实物测试验证。验证结果表明，铣削机器人能够满足现场的加工应用。

关键词：铣削；铝合金机加工；机器人集成

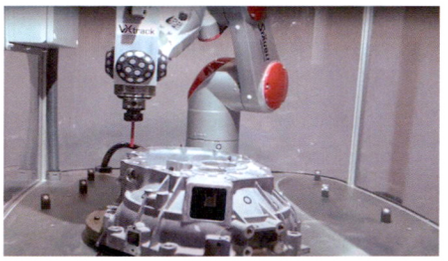
我国《“十四五”机器人产业发展规划》提出，当前新一轮科技创新与产业深度融合，以智能制造为牵引，不断夯实工业基础能力，优化资源动态配置，促进制造业重大技术与装备的创新发展，把握我国由“制造业大国”向“制造业强国”历史性超越发展的窗口期[1]。相对柔性化差、尺寸大、投资成本高的数控机床，铣削机器人具有成本低、工作效率高及重复定位性好等特点，可快速实现产品制造工艺变更需求。机器人技术与搬运、铣削、磨削及焊接等应用场景的深度融合，将驱动传统制造向先进制造的快速迭代，给企业发展带来新的增长极。

国内外发展现状

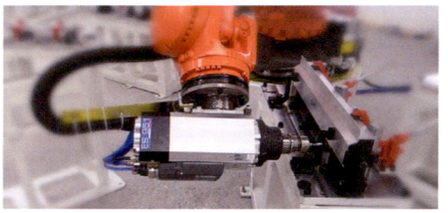
在国外，机器人已经较为广泛地集成应用于航空航天、船舶、汽车等领域的生产制造过程中。美国EI公司与波音公司联合研制了用于波音飞机的副翼和后缘襟翼的铣削机器人加工系统，加工精度达到±0.5mm[2]。德国伯爵公司研制了通过两台机器人协同运动，实现了钻孔、预拧与紧固的机器人自动装配装置，大幅提高了装配效率[3]。德国Fraunhofer Gesellschaft发明了在机械臂上安装力位移传感器和视觉装置，应用于空客公司飞机机身面部修配的铣削机器人加工系统，加工尺寸精度可达0.35mm[4]。

据统计，我国有72%的工业机器人应用于焊接、喷涂、搬运及码垛等场合，而铣削机器人系统多在实验室研究阶段。浙江大学研制了通过采用激光跟踪仪全闭环控制方法，对机器人末端作业位姿在线测量与修正，使铣削机器人加工精度提高到±0.2mm[5]。南京航空航天大学在铣削机器人离线轨迹编程、钻铣工艺机理与集成控制等开展研究，对铝合金制件孔位精度达到±0.3mm[6]。我国在基于工业机器人的高端制造装备领域的研究起步较晚，加之国外企业的技术封锁，在

铣削机器人系统研究绝大部分集中在技术论证与样机研制测试阶段，与国外还存在一定的差距。本文尝试利用通用机器集成电主轴的技术方案，并选取铝框架车身零部件为应用场景。机器人应用于汽车铣削加工对比如图1所示。



a）国外加工变速器壳体



b）国内铝型材制孔应用

图1　机器人应用国内外对比

铣削机器人加工工艺流程

首先将待加工零件装配至工装夹具中，再将夹具夹紧，且保证被加工工件夹紧牢固、位置准确，以免在加工过程中发生移动导致加工品质下降或加工失败。然后启动机器人自动调用加工程序，根据程序指令是否切换刀具，在加工过程中采用压缩空气对加工产生的铝削进行吹扫（产生的铝削采用负压收集并定期集中处理）以及对加工刀具进行冷却，并按程序事先设定的轨迹完成铝型材加工。最后，取出加工完成的零件，采用压缩空气对型材内部遗留的铝削清理，合格零件装箱入库。

铣削机器人系统集成设计

铣削机器人加工系统主要由机器人本体、高速电主轴、工装夹具、加工刀具库和离线编程软件等组成，铣削机器人系统生产线布置如图2所示。

1.机器人的选择

1）机器人本体具备以下四项功能：一是有六关节机械手装置，并按照预先编排的程序运行；二是机器人控制I/O模块输入＞32点，输出＞16点，且具有信号指示灯和接线端子，输出负载能力≥500mA；三是具有工具坐标系、用户坐标系数据、远程工具坐标系数据设定、负载检测、碰撞检测及安全ProfiSafe等功能；四是机器人现场总线通信可采用ProfiNet、EntherNet、CC-Link IE及DeviceNet通信方式。

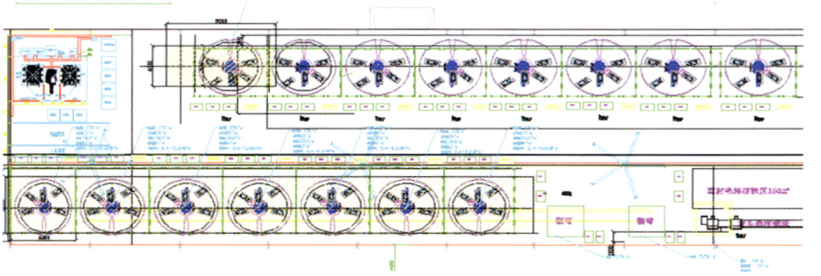


图2　铣削机器人生产线布置

2）机器人底座采用Q235A制作的圆筒结构，底座外圆尺寸要略大于机器人底座安装板且底座平面要水平零度，需要做防腐处理，安装调试后需要将圆筒内注入混泥土加固。

3）机器人管线包和电缆。管线包是保护机器人电缆的必备附件，需要结构紧凑、重量轻、体积和长度小，机器人运行时干涉范围小；阻燃等级符合美国UL94V2，耐磨耐焊屑，防止内部管线的划伤及烧伤，管线包的最小静弯曲半径为直径的2倍，最小动弯曲半径为直径的4.5倍。机器人电缆是机器人的神经和血管，如何保证其稳定性必须通过德国TUV标准2PFG2577快速地加速和减速、拉伸、压缩和扭转，以及500万次以上的周期性弯曲，经受高温、铝屑飞溅、油类、磨损及其他化学品腐蚀，始终保持高灵活性和稳定性的严苛测试。

2.电主轴的选择

高速电主轴包括主轴、电动机、轴承、变频器和

工具快换接口等。通过在实验室对铝型材进行铣削加工测试，获得零件加工表面质量较好的电主轴工艺参数：主轴转速n=12 000r/min，切削深度＜1mm，切削刀具直径D=12mm，铣削力F_{max}=50N，安全系数k取2，计算出输出扭矩T和功率P如下。

$$T=kF_{max}D/2=6N\cdot m$$

$$P=nT/9550=7.54kW$$

通过以上计算，选取了意大利HSD品牌的ES 951型号电主轴，主要参数为输出功率8.5kW，最大转速24 000r/min，输出扭矩8N·m，产品质量25kg，可满足该类铝型材产品铣削机器人加工。

3.刀具库的开发

刀具库布局于机器人的一侧，刀库主要由刀具槽、集屑槽、翻转盖体、翻转驱动器及传感器安装板等构成。刀具库中存储着直径 6 mm、8mm、10mm和12mm的精加工铝用硬质合金三刃铣刀和钻头等加工刀具，工具由机器人程序根据不同加工需要自动选取更换，如图3所示。

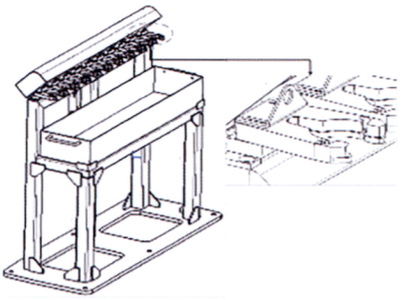


图3　刀具库示意

4.机器人工具坐标系标定方法

机器人工具坐标是原点安装在机器人末端的工具中心点的坐标系[7]。本文采用六点法建立铣削工具坐标系。以发那科机器人示教器为例，通过机器人示教器选择菜单（Menu）→设置（Setup）→类型（Type）→坐标系（Frames）→其他坐标（Othr）→工具坐标（Tool Frame）→选择要设置的坐标系号（Detall）→方法（Method）→选择六点坐标系的设置方法。

记录接近点坐标值（见图4），先定义两个坐标点，一是通过在铣削机器人工作半径内的工装夹具Base板定位孔中安装标定点定位销，此定位销的尖点就定义为标定点；二是定义工具TCP坐标点：铣削机器人电

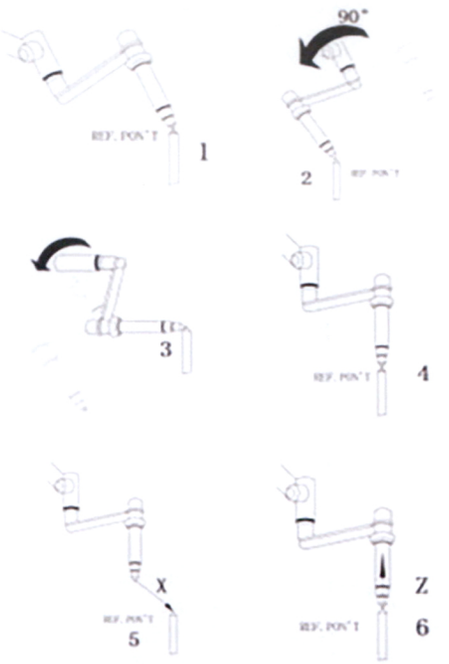


图4　记录六点坐标值位置

主轴钻铣工具头上尖点作为工具中心点TCP。

利用机器人示教器调整机器人各轴位置：1点用移动机器人大于20cm；2点将工具尖端点移开标定点大于20cm，六轴转动角度90°～180°；3点将工具尖端TCP移开标定点大于20cm，4至5轴转动小于90°；4点将工具的TCP与标定点垂直；5点将工具的TCP沿X方向移动＜50cm；6点从机器人世界坐标点向工具坐标方向移动＜50cm。再用示教器手动慢速调整机器人位置，使工具尖端接触标定点并用示教器分别记录六点坐标值，最终使用机器人自带的求解器，可方便计算出准确的工具TCP坐标系。

5.离线加工程序的开发

通过在Tecnomatix软件中安装对应品牌机器人的离线程序插件[8]。先将铣削机器人工艺操作加载至路径编辑器（Path Editor）中，创建离线程序（Robot Program）并将现场测量机器人原点坐标、工装夹具Base坐标、工具TCP坐标在导出系统中进行设置，保证铣削机器人能按照加工路径运行[9]。最后对目标程序进行离线程序输出（Download）。利用该离线程序进行现场验证（见图5），可以实现铣削机器人生产加工，加工的零部件尺寸精度达到±0.3mm。

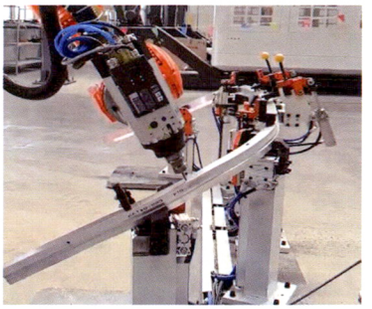


图5　仿真程序现场验证

6.工装夹具的开发

（1）夹具的定位机理　零件在空间有3个旋转和3个移动共计6个自由度。为了保证所加工零件位置的一致性，在加工前必须将工件的6个自由度完全约束[9]，并且实际零件不是严格的刚体，通常需要采用过约束的定位方式。

第一定位点选取通常选择布置在工件最大的面，通过三个以上的定位点，限制2个旋转自由度和1个移动自由度。当工件较小时（最大轮廓尺寸＜60mm），由于实际的定位元件接触面较大，只需要一个定位面就能实现上述三个自由度的约束。

第二定位点选取一般以工件的“圆孔+圆销”的形式进行定位，采用短销限定两个方向的移动自由度。

第三个定位点通常是以工件的侧端面或是在工件上刻划基准线来进行定位，一般采用侧端面来进行限定一个旋转自由度。

（2）批量生产要求　大批量生产辅助设施的限制与单件或小批量生产的生产线不同，大批量生产的铝合金车身零部件生产线除了必要的夹具外，还需要有吸尘装置、吊具及安全防护设施等。因此，在进行铣削机器人夹具的设计时，需要与周边相关设施相适应，避免出现干涉现象。

（3）铣削机器人夹具的特殊要求　一是夹紧机构或其他元件不得影响进给，加工部位要敞开；二是工装夹具的刚性稳定性要好且要与地面刚性连接，避免在切削过程中产生共振，影响加工质量；三是自动夹紧机构采用气压或液压夹紧，以保证加工过程刚性；四是要方便装卸，提升零件加工效率；五是机器人围栏要安装防撞击透明亚克力板，以免发生高速旋转刀具断裂伤人事件。因此，夹具的夹头布置得越紧密，对零件加工刚性越有利。然而，夹具夹头布置得越紧密，铣削机器人的可达性越差。如何平衡这两者的关系则成为了进行铣削机器人加工夹具设计中最为重要的考量。

结语

通过本文研究，使用铣削机器人对汽车铝合金零部件进行加工的制造方案，可针对不同形状的工件，通过将离线程序导入到机器人控制系统中，通过视觉识别待加工工件，可自动调用加工程序，使铣削加工过程更精确、稳定并适应多品种批量产品生产加工。通过验证在保证零件加工精度±0.3mm的基础上，采用铣削机器人工艺加工方法相比传统数控机床，加工成本下降了20%，加工效率提升了60%，有效解决了数控机床加工零件存在成本高、柔性差、效率低的问题，该技术方案可以给同行业提供一些建议和参考。未来汽车零部件产品机加工需求呈现产品精度高、加工效率高、加工稳定性高及加工成本低等，铣削机器人加工工艺需要攻克高刚度、低颤振与较高制迹精度等需求，还需深入研究。

参考文献：

[1] 周济.制造业数字化智能化[J].中国机械工程，2012，23（20）：2395-2400.

[2] RussellD.High-Accuracy Robotic Drilling Milling of 737 Inboard Flaps[J].SAE International Journal of Aerospace，2011，4（2）：1373-1379.

[3] 陈亚丽.机器人自动钻铆系统离线任务规划方法研究[D].南京航空航天大学，2015.

[4] 田威，焦嘉琛，李波，等.航空航天制造机器人高精度作业装备与技术综述[J].南京航空航天大学学报，2020，52（3）：341-352.

[5] 郭英杰.基于工业机器人的飞机交点孔精镗加工关键技术研究[D].浙江大学，2016.

[6] 肖亮.双机器人协同自动钻铆控制方法与应用[D].南京航空航天大学，2019.

[7] 陈奇.太赫兹智能检测系统的机器人离线编程技术及误差分析[D].长春理工大学，2020.

[8] 罗龙健.考虑线缆干涉约束的铣削机器人进刀轨迹规划[D].湘潭大学，2017.

[9] 杨少霞.孔系组合夹具定位方案定位质量评价方法的研究[D].河海大学，2006.