

用于飞机部件自动制孔的 机器人制孔系统*

Robot Drilling System for Automatic Drilling of Aircraft Component

沈阳飞机工业(集团)有限公司 杜宝瑞 冯子明
北京航空航天大学机器人研究所 姚艳彬 毕树生



杜宝瑞

沈阳飞机工业(集团)有限公司制造工程部副部长,研究员级高级工程师,硕士研究生导师。1992年毕业于北京航空航天大学飞行器制造工程专业。长期从事数字化制造技术研究与应用工作。主持、参与多项国家 863 计划、国家科技支撑计划和国防基础科研项目。发表论文 10 余篇。

进入 20 世纪 90 年代后,飞机制造行业对飞机装配技术提出了高质量、高速度、低成本的生产要求,飞

* 国家科技支撑计划项目(2007BAF27B03)。

进入 20 世纪 90 年代后,飞机制造行业对飞机装配技术提出了高质量、高速度、低成本的生产要求,飞机柔性装配技术得到了极大的发展。机器人制孔技术是飞机柔性装配技术的一个重要应用和研究方向。

机柔性装配技术得到了极大的发展。机器人制孔技术是飞机柔性装配技术的一个重要应用和研究方向。由于机器人制孔系统一般采用工件不动机器人移动的方式,灵活性较好,且对工件的适应性较好,同时能够极大地提高制孔效率和精度,因此在国外已得到广泛的研究和应用。美国 Electroimpact 公司与英国空客公司联合设计了一套机器人自动钻削系统(O.N.C.E),该系统主要用于波音 F/A-18E/F 的机翼后缘襟翼的钻孔和铤孔^[1];美国 EOA 公司与波音公司也联合生产研制了一种机器人多功能钻削系统(EOA),该系统可以完成对钛合金、铝合金、复合材料以及叠层等飞机蒙皮的钻孔、铤孔和铰孔工作;瑞典 Novator 公司根据 Orbital 钻头专利技术开发了一套机器人多功能钻削系统(Orbital

E-D100)。但这些机器人制孔系统结构复杂,且成本较高。而国内对于飞机部件机器人制孔系统的设计和研究尚处于起步阶段。基于国内外研究概况,针对飞机部件自动化制孔,本课题开发了一套飞机部件级机

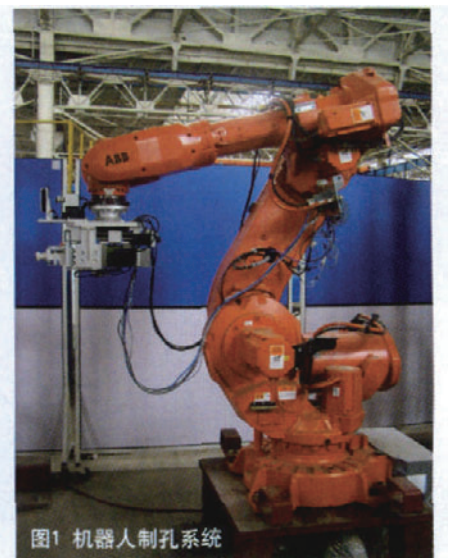


图1 机器人制孔系统

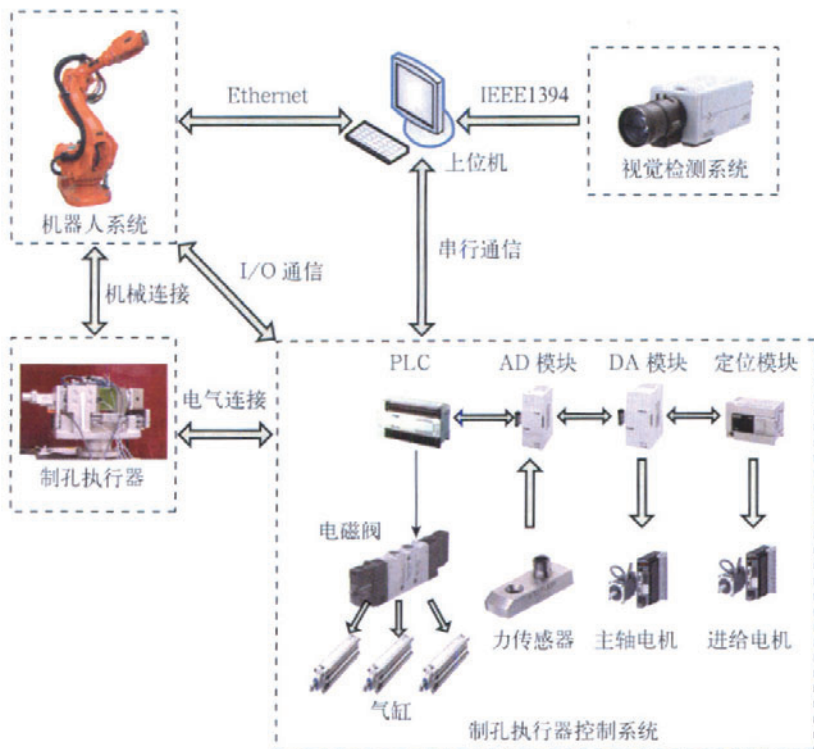


图2 机器人制孔系统结构

机器人制孔系统,系统涉及到机器人技术、先进制造技术以及手眼视觉技术等先进科学技术。

系统功能和结构

飞机部件级机器人制孔系统能够完成大型钛合金、铝合金以及叠层飞机零部件的自动化制孔,图1为机器人制孔系统。该系统主要由机器人系统模块、制孔执行器模块、视觉检测系统模块和上位机模块4部分组成,图2为机器人制孔系统结构图。其中机器人模块的主要作用是根据制孔任务移动制孔执行器到目标位置,主要由机器人本体及机器人控制器组成;制孔执行器模块直接与工件接触完成制孔任务,主要由制孔执行器本体及PLC控制系统组成;视觉检测模块主要向上位机和机器人控制器提供制孔位置信息和焊缝信息;上位机模块主要用于在软件层控制系统的启/停、制孔参数设置以

及各个设备运行状态的监控。下文分别从机械系统、视觉检测系统和控制系统3方面对机器人制孔系统进行论述和分析。

机械系统设计

机器人制孔系统机械系统的设计主要包括制孔执行器的设计和机器人的选型。

制孔执行器主要由主轴单元、进给单元、压紧单元、支承单元和传感单元组成,如图3所示。主轴单元和进给单元主要完成制孔过程中的主

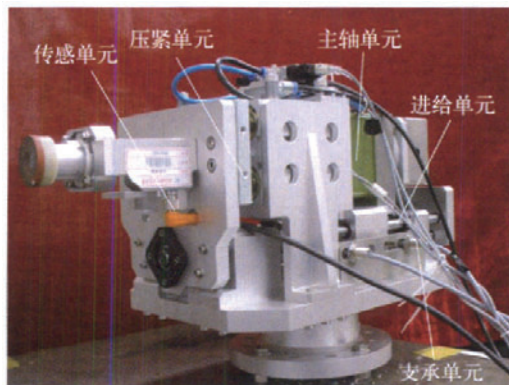


图3 制孔执行器

轴运动和进给运动;支承单元一方面为制孔执行器上的其他组件提供必要的机械连接接口和支承,另一方面提供制孔执行器与工业机器人连接的机械结构;压紧单元采用气动压紧,主要作用是通过压紧工件减小制孔过程中的系统振动,同时也可以消除叠层材料之间的间隙,防止切屑和层间毛刺进入叠层引起应力集中;传感单元主要用于制孔过程中的状态信息采集,包括压力传感器、气缸行程开关和进给行程开关。制孔执行器性能参数如下:

(1) 外形尺寸长×宽×高约为580mm×274mm×350mm,重量约为45kg;

(2) 可加工孔的直径范围为 $\phi 5\text{mm} \sim \phi 8\text{mm}$,制孔材料为铝合金、钛合金或叠层材料;

(3) 采用气动压紧,压紧力范围为0~180kg,压紧行程为0~20mm;

(4) 主轴的最高转速为6000r/min,额定转速为3000r/min,连续扭矩2N·m,峰值扭矩8N·m;



图4 ABB公司的工业机器人

(5) 可实时反馈压紧力,用于监测刀具的磨损或断裂情况,并绘制压紧力随时间的变化图;

(6) 可附加外冷却设备和真空吸屑装置。

工业中较常用的机器人主要有

ABB、KUKA、Fanuc 和 Motoman 等品牌。对于机器人制孔系统,机器人选型需要根据工件尺寸、制孔执行器重量、制孔精度、钻削力以及成本等因素综合考虑。本系统选用 ABB 公司的 IRB6640-235/2.25 型工业机器人,其外形结构如图 4 所示,它是由 6 个转动副组成的空间六杆开链机构。

视觉检测系统设计

1 手眼视觉标定算法

视觉检测系统采用基于机器人的手眼视觉,其主要作用有:(1)通过视觉定位向上位机和机器人控制器提供所需的制孔位置信息;(2)通过检测焊缝并测量它与所需制孔位置的相互关系,为上位机和机器人控制器提供焊缝信息。手眼视觉系统的关键问题是手眼关系标定,一般的手眼视觉系统均是将摄像机安装在机器人上,手眼视觉标定即标定出摄像机坐标系与机器人坐标系的相对位姿关系,文献 [2-5] 均对手眼标定算法进行了深入研究。

本系统的摄像机固定在制孔执行器上,且工件是规则的平面。基于以上原因,本课题采用了一种基于二维平面工作的手眼标定算法,标定出图像像素坐标系 $o-uv$ 的 u 、 v 轴与全局坐标系(机器人坐标系) $O_w-X_wY_wZ_w$ 的 X_w 、 Y_w 轴的夹角以及工具中心点(即钻头中心点)在视场坐标系 X_1 和 Y_1 方向的坐标。该算法不需要标定摄像机工作的深度信息,且计算简便、可操作性强。视场坐标系 $O_1-X_1Y_1$ 是根据摄像机拍摄图像时所能拍摄到的一个实际平面区域建立的,各个坐标轴分别与图像像素坐标系各个轴平行。工件坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 一般建立在工件上。全局坐标系、图像像素坐标系、视场坐标系以及工件坐标系如图 5、6 所示。

执行制孔任务过程中,机器人在工件坐标系下工作,工件坐标系与全局坐标系(机器人坐标系)的位姿关

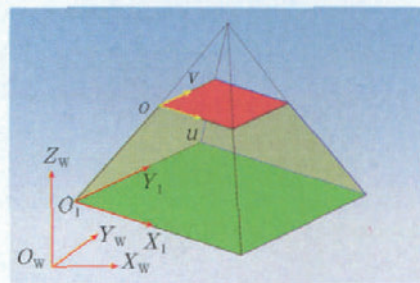


图5 图像与视场坐标系示意图

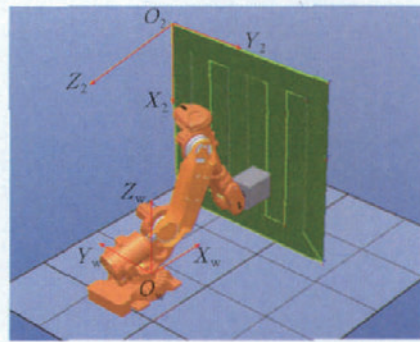


图6 全局与工件坐标系示意图

系可以通过 ABB 机器人的工件标定功能求得。摄像机的工作距离与手眼标定时摄像机的工作距离相同,可由 TCP 到工件平面的距离保证。工件平面上制孔目标点在工件坐标系中 X_2 和 Y_2 方向的坐标值可根据手眼标定所得的 4 个标定量求得。

2 硬件和软件设计

视觉检测系统硬件主要包括摄像机和镜头,摄像机和镜头主要根据识别的视场大小以及识别精度来选型。本系统最终选用了 PointGrey 公司 GRAS-20S4M-C 型号的黑白工业数字摄像机和 Myutron 公司 FV2520 型号的固定 25mm 焦距镜头。

视觉检测系统分为标定模块、定位模块和焊缝检测模块。其中,标定模块的功能是进行手眼标定计算,定位模块的功能是识别和计算定位孔位置,焊缝检测模块用于焊缝检测,程序流程如图 7 所示。

控制系统设计

1 控制系统整体方案

PLC 具有可靠性高、安装灵活、编程和扩展方便、性价比高等优点,而且 PLC 总线与网络能力越来越

强,可以方便地与上位机组成控制系统。因此本系统采用基于上位机和 PLC 的控制方式。如图 8 所示,控制系统主要由上位机、机器人控制系统、制孔执行器控制系统和视觉检测系统组成。

2 硬件设计

制孔执行器采用 PLC 控制,需要控制的元件主要包括电磁阀、进给电机、主轴电机、继电器和指示灯等,PLC 控制结构如图 9 所示。制孔执行器控制系统配备有一个电气控制柜,PLC、变压器、各种继电器、主轴和进给电机伺服放大器等均安装在控制柜中。

机器人采用 IRB6640 本身的 IRC5 M2004 控制系统,该控制系统为多处理器系统,含有 PCI 总线。机器人控制系统通过 I/O 板控制响应外围设备的输入信号,含有 2 个模拟量通道、2 个数字量(16 位)通道,工作电压为 24V。机器人制孔系统的启/停控制、制孔参数设置、制孔状态监

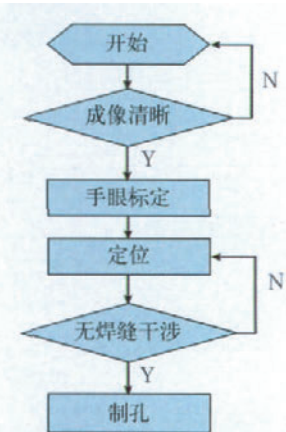


图7 视觉检测系统程序流程

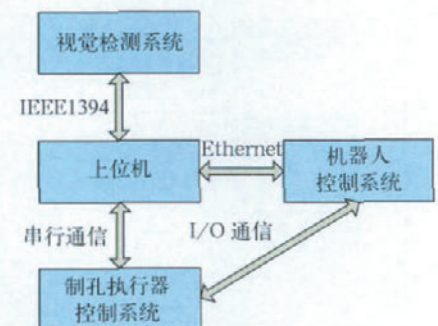


图8 控制系统结构

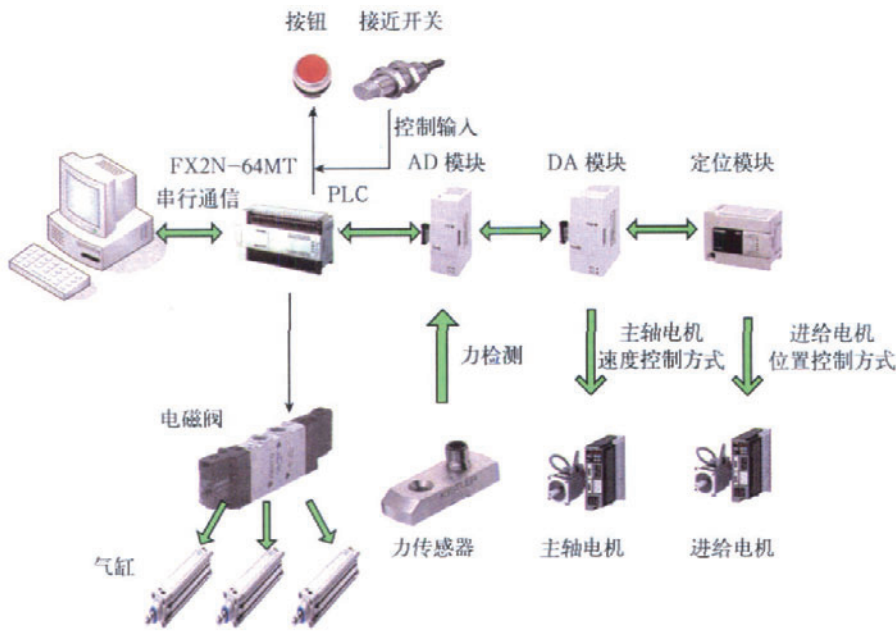


图9 制孔执行器的控制结构

控等任务主要由工业 PC 机完成。

3 软件设计

控制系统的软件设计是整个系统最核心的部分,本控制系统的软件部分主要包括下位机程序和上位机程序。其中下位机程序包括 PLC 程

序和机器人运动程序,上位机程序包括系统启/停控制程序、制孔参数设置程序、系统状态监控程序、视觉检测数据计算程序以及人机界面程序等 5 部分。

制孔执行器采用 PLC 控制,根

据功能和控制对象的不同,PLC 控制系统可分为手动操作模块,回零操作模块和自动操作模块,其程序流程如图 10 所示。

机器人运动程序采用 IRB6640 机器人的 RAPID 语言在机器人示教盒中进行编写,或者在其他计算机中编写完成后通过 USB 接口下载到控制器中。在执行任务过程中,机器人控制系统与上位机采用以太网的方式通信,而与制孔执行器控制系统则采用 I/O 方式进行通信。

结束语

本文论述了一种用于飞机铝合金、钛合金以及叠层部件自动制孔的机器人制孔系统。该系统设计完成后,经过安装和调试,系统运行良好,各项功能均达到了预先设计指标。机器人制孔系统的最大工作范围可达 5000mm × 3000mm × 500mm,孔定位精度为 ± 0.3mm,重复定位精度为 ± 0.2mm,制孔效率可达 4 个 / min,极大地提高了飞机部件制孔的效率和装配质量。

参考文献

- [1] Russell Devlieg, Kevin Sitton, Ed Feikert, et al. ONCE(One sided Cell End effector) robotic drilling system. SAE, 2002-01-2626.
- [2] Hirsh R L, DeSouza G N, Kak A C. An iterative approach to the hand-eye and base-world calibration problem. IEEE Int Conf on Robotics & Automation, Seoul, Korea, 2001:2171-2176.
- [3] Muis A, Ohnishi K. Eye to hand approach on eye-in-hand configuration within real-time visual servoing. IEEE/ASME Trans on Mechatronics, 2005,10(4): 404-410.
- [4] 熊春山,黄心汉,王敏. 手眼立体视觉的算法与实现. 机器人,2001,23(2):113-117.
- [5] 焦圣喜,韩立强. 一种新的机器人手-眼视觉目标定位方法. 武汉理工大学学报, 2008,1(30):130-133.

(责编 小颖)

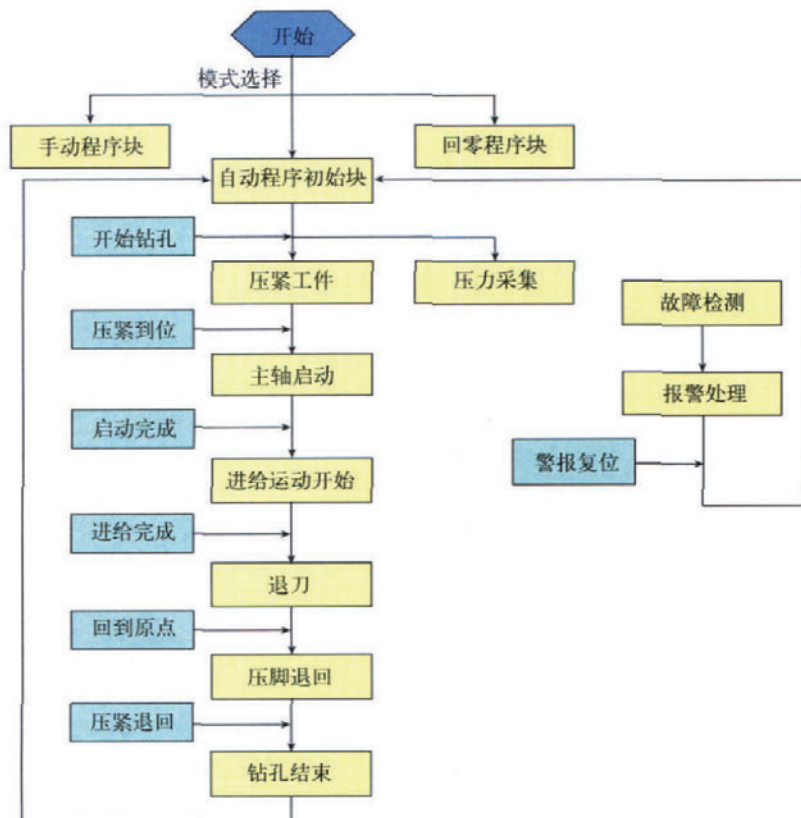


图10 制孔执行器控制系统程序流程