

飞机装配自动制孔系统及关键技术研究

许军亮 白艳洁 陈旭涛

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

【摘要】：自动制孔技术是飞机数字化装配的一个重要发展去向，国内航空企业近几年大量配备了自动制孔设备，但是在工程应用中存在设备利用率低、制孔精度难以满足等问题。本文结合自动制孔技术国内外研究现状，介绍了各类自动制孔设备的适用情况及优缺点，并且分析了自动制孔设备在使用和研制过程中的关键技术。

【关键词】：飞机装配；自动制孔；制孔设备

Research on Atomization Drilling System and Key Technologies for Aircraft Assembly

Junliang Xu, Yanjie Bai, Xutao Chen

Avic Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd. Shaanxi Xi'an 710089

Abstract: Automatic drilling technology is an important development direction for digital assembly. China domestic aerospace companies have purchased automatic drilling equipment, but there are several problems need to be solved, such as the equipment utilization rate is low, and the accuracy is difficult to meet. Based on the research status, this paper introduces the applicability, advantages and disadvantages of various automatic drilling equipment, key technologies for using and developing automatic drilling equipment are also represented.

Keywords: Aircraft assembly; Atomization drilling; Drilling equipment

现代飞机大量采用先进复合材料、钛合金等材料，传统的人工制孔方式已难以满足新材料的工艺要求及飞机装配自动化、数字化的发展趋势^[1]。因此，自动制孔技术在飞机装配中得到了越来越广泛的应用。

1 国内外应用现状

1.1 国外应用现状

最早发展自动制孔技术的是美国的 GEMCOR 公司，该公司生产的基于数控托架的自动钻铆系统技术成熟，质量可靠、功能齐全，销量已达几千台之多^[2]。GEMCOR 公司将自动钻铆机与数控托架分离，这样就可以根据需求，将相应的钻铆机与相适应的托架组合，形成柔性自动钻铆系统，以最大程度适合于所要求。

美国 ELECTROIMPACT (EI) 公司是一家迅速发展的研制自动化铆接装配系统的公司。公司生产的 E4000 型系列自动钻铆系统用于空客公司的 A320、A340、A380 机翼的铆接^[3]。国内西飞公司在 C919 机翼生产线中引进了 EI 公司的成套数字化制孔设备，包括用于翼盒的单立柱式机床制孔系统和用于襟副翼的机器人式制孔设备。

德国宝捷公司自动制孔技术虽然起步较晚，但是借助于雄厚的制造业基础，已经处于国际先进水平。宝捷公司的自动钻铆机自动化程度高，设计先进，是目前波音、空客的主要自动钻铆设备提供商^[4]。其生产的 MPAC 卧式龙门自动钻铆系统在 A 轴上可以进行 180°壁板的加工，而且可以适应不同类型的壁板。

1.2 国外应用现状

在国内，西飞、成飞各大主机厂在 80 年代在一些外协项目中引入自动钻铆技术，但是发展缓慢。近几年随着新舟 700、ARJ21、C919 等客机研制以及国际化交流的深入，以西飞、成飞、商飞等公司为代表的航空企业开始全面引进国外的自动制孔设备，获得了很好的效果。另一方面，浙江大学、西北工业大学、南京航空航天大学、清华大学、上海拓朴公司等高校和企业也开始自动制孔设备的研制，虽然与国外存在一定差距，但是发展迅速，在国内军用飞机型号的数字化制孔设备研发中发挥着重要作用。

2 自动制孔设备介绍

自动制孔是指在飞机装配过程中利用自动化设备完成装配制孔的过程，自动制孔设备可以分为 6 种典型结构：自动托架式制孔系统、龙门式自动制孔系统、立柱式机床自动钻铆系统、机器人自动制孔系统、柔性导轨自动制孔系统、自主爬行机器人制孔系统^[5]。

2.1 托架式自动制孔系统

托架式自动制孔系统设备由机床本体、托架、末端执行器、控制系统四大部分组成。机床本体与托架构成五坐标定位系统，包括 X、Y、Z1、Z2 和 A、B 轴的运动。其中 A 轴绕 X 轴旋转，当 Z1、Z2 差值运动时，实现 B 轴绕 Y 轴的旋转，如图 1 所示。托架载着壁板在空间运动，保证制孔主轴始终处于待钻孔点的法向。

托架式自动制孔设备的末端执行器可以集成各项功能，在

一个制孔循环内可以完成壁板的制孔/镗窝、涂胶、送钉、插钉、铆接/螺接等工艺操作，对于无头铆钉还可以进行钉头铣平。托架式自动钻铆系统可以实现飞机机身壁板、机翼壁板的快速、高效、精确装配。图1为GEMOCR公司研制的B7X7机身壁板自动钻铆系统。

优点：技术成熟，成本相对较低。

缺点：应用范围有限，仅适用于壁板类零件的制孔铆接，且可加工壁板弧度较小（小于 60° ）。

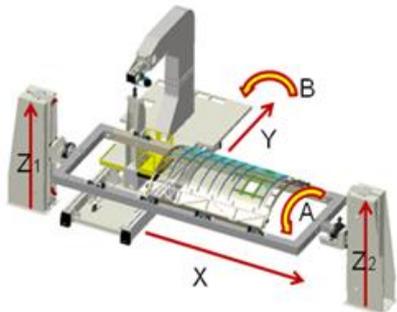


图1 托架式自动制孔系统

2.2 龙门式制孔系统

龙门式自动制孔系统，主要结构包括龙门式五坐标定位系统、末端执行器和控制系统3部分。根据工件摆放姿态，龙门式制孔系统可以分为卧式、立式两种。工作时工件固定不动或者只相对机床本体平动，通过龙门式五坐标定位系统和上下铆头的运动找正孔位和法向。龙门式设备刚度强，稳定性好，除了适用于机身壁板、机翼壁板的自动钻铆，还可以用于翼盒等大部件的自动制孔。图2为A380机身壁板龙门式自动钻铆系统。



图2 A380机身壁板自动制孔系统

优点：可加工壁板弧度较大（ 180° 、 360° 机身环铆系统），产品上下架比托架形式方便。

缺点：相对于托架式制孔系统，设备较为复杂，成本较高。

2.3 立柱式机床制孔系统

立柱式机床制孔系统与立式龙门制孔系统结构形式近似，由支撑立柱、末端执行器、导轨、控制系统组成。工件产品立式摆放，末端执行器在立柱式机床上进行X、Y、Z和A、B的五坐标运动，实现精确的空间定位和姿态调整，完成自动制孔。

立柱式机床制孔系统为单面压紧，开敞性较好，但不具备铆接、螺接的功能。翼盒部件的自动制孔设备多采用立柱式机床制孔系统。图3为国产C919飞机翼盒自动制孔系统。

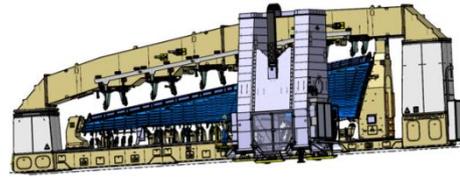


图3 立柱式机床制孔系统

2.4 机器人自动制孔系统

机器人自动制孔系统以市场通用的工业6轴机器人为设备本体，配合相应的末端执行器和控制系统，通过系统集成和二次开发组成自动化制孔系统，因为成本低、灵活性好，在航空制造企业中应用广泛。

机器人本身的工作行程范围有限，因此配有专门的导轨或AGV运输车，工件在装配站位固定不动，机器人沿着导轨或在AGV车上自主运动，一般导轨的运动作为第七轴集成在机器人自动制孔系统中。机器人制孔系统柔性较好，可以适应多种产品的制孔，最典型的应用为襟翼、副翼等活动翼面制孔。

优点：设备结构简单、研发周期短、占地面积小、成本低、柔性好、一台设备可适应多种产品。

缺点：设备刚性较差，负载能力有限，钻孔时受反作用力导致变形，因此制孔精度、制孔效率不如五坐标机床式制孔设备。机器人制孔设备在设计时，为了补偿精度不足，会对机器人加以改造，在各轴上加圆光栅对误差进行反馈、修正补偿。



图4 B787襟副翼自动制孔

2.5 柔性导轨自动制孔系统

柔性导轨自动制孔设备适用于机身对接、机身、机翼壁板拼接的自动制孔，设备由制孔系统（末端执行器）、真空吸盘柔性导轨两大部分组成。导轨通过真空吸盘吸附在飞机壁板表面，制孔系统沿着导轨运动，根据需要完成制孔、镗窝、照相定位、法向检测等操作。

波音公司最早开发了柔性导轨自动制孔设备的原型机，后授权EI公司进行工程化的改造，图5为某型机机身壁板对接导轨自动制孔系统。



图5 柔性导轨自动制孔系统

2.6 自主爬行人制孔系统

自主爬行人制孔系统与柔性轨道制孔系统类似，利用真空吸盘将自身吸附在工件上制孔。自主移动式轻型自动制孔系统的机械系统可以分为多足式爬行机构（行走单元）与末端执行器（制孔单元）两部分。出于行走过程中的安全性考虑，能至少需要4个吸盘足为系统提供足够的吸附力。通过由丝杠驱动实现系统在工件上的爬行。如图5所示。

优点：成本低、重量轻、安装简单，符合轻型化、柔性化、模块化的发展方向。

缺点：偏心制孔能力差，适用范围有限，应用较少。

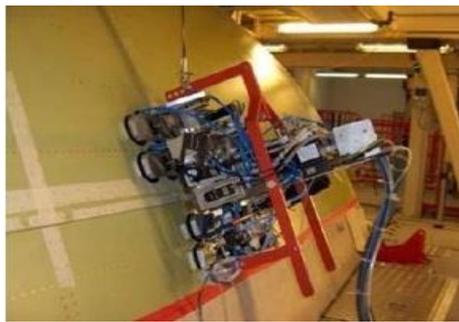


图6 爬行人制孔系统

3 自动制孔关键技术

对于飞机装配制孔而言，制孔质量需要满足位置度、垂直度、镗窝深度，制孔表面质量等要求，因此自动制孔设备最基本的功能包括孔位找正、孔垂直度检测、制孔镗窝进给等。以上各种制孔设备，不论机床式的、机器人式的，或者便携式的，其末端执行器的功能原理是基本相同的。本文对自动制孔涉及的关键技术进行梳理介绍。

3.1 孔位误差补偿技术

自动设备制孔时误差来源主要有两个方面：一是产品的制造和定位误差。二是制孔设备运行时的误差，设备在制孔时按照离线编程时输入的孔的理论坐标运行，因为机床、机器人的机械运动误差，孔位误差沿机床运动方向逐渐累积，造成孔边距或间距超差。孔位超差会影响紧固件之间的载荷分布，进一

步影响结构的疲劳寿命。因此所有的制孔设备都有孔位偏差修正功能。



图7 基准孔位置示意图

孔位误差补偿的原理是在自动制孔的路径上按一定间隔设置基准孔，利用基准孔坐标相对于自身理论位置坐标偏差，去补偿基准孔外的其他待制孔的位置坐标。基准孔将产品划分为若干个补偿区域，基准孔间隔要根据产品特点和要求合理设置，间隔较大时，补偿精度降低，间隔较小时，制孔效率降低。基准孔与待制孔如图7所示。

孔位补偿首先要在产品工件上预先手工钻制一系列基准孔（一般为初孔，利用钻模板保证基准孔的位置精度），制孔前用视觉测量系统测量基准孔的位置坐标，将测量坐标与理论坐标进行比较获得基准孔的偏差值。基准孔外的其他待制孔，利用补偿算法计算其孔位补偿量，从而保证制孔精度。孔位误差补偿算法一般有两种，即建双线性误差平面法和构建误差曲面法^[6]开讨论。孔位补偿方法如图8所示。

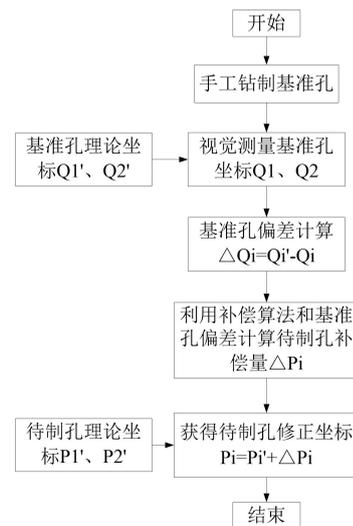


图8 孔位补偿流程图

3.2 法向找正技术

自动设备制孔时，设备根据蒙皮的理论数模获得制孔点位的法向信息。压力角沿法向进给压紧蒙皮，消除工件之间存在间隙，刀具沿着法向进给，保证孔的垂直度。由于部件安装误差、变形等原因，蒙皮的实际外形与理论外形存在偏差，因此需要实时监测孔的法向偏差并进行补偿，保证制孔的垂直度。

制孔法向测量原理如图8所示，在压力角周围布置安装4个位移传感器，测量传感器到蒙皮表面之间的距离。在制孔的小范围内，将蒙皮视为平面，简化分析计算过程。压力角沿理论法向接近蒙皮时，如果4个位移传感器读数相同，说明制孔

刀具与蒙皮表面垂直；如果4个位移传感器读数不相同，说明蒙皮制孔点实际法向与理论法向存在偏差，此时根据传感器测量值调整制孔设备或者产品的姿态，保证制孔设备主轴与蒙皮垂直。

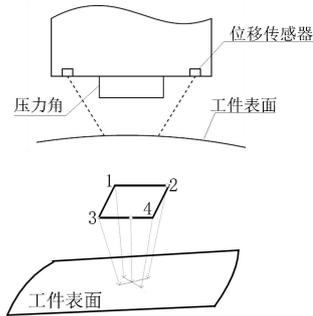


图9 自动制孔法向测量原理

在工程应用中，多使用激光位移传感器，测量精度高、传感器尺寸小易于集成。为了使激光在蒙皮表面的测量区域尽可能小（接近平面），激光传感器四个位移传感器等布局在以刀具轴线为中心轴的圆柱面上，与刀具轴线成一定夹角安装。

当蒙皮表面存在油污遮挡物或者激光射入已制好的孔中时，法向找正无法完成，影响制孔效率的提升。EI公司提出了一种间接测量法向的方法，在传统压力角上增加了一个压力角后端面和球头关节，压力角通过球头关节与主轴相连，位移传感器布置在压力角后端面之后。法向调整时，压力角先压紧蒙皮，球头关节受力迫使压力角轴线与蒙皮表面垂直，然后位移传感器以压力角端面作为法向找正的基准，从而找正制孔法向。

3.3 镗窝深度控制技术

镗窝深度主要影响紧固件的连接质量和连接后的钉头平齐度，因此飞机装配对镗窝深度有着严格的要求。设备制孔的镗窝深度由制孔主轴的进给量来控制，因为机械运动误差和产品受压变形，镗窝深度难以精确控制，国产制孔设备往往在镗窝深度控制方面技术不够成熟，导致应用受阻。

制孔过程中工件、压力角、刀具三者之间的关系如图10所示，可知镗窝深度误差主要来源于两个方面，一是主轴进给运动的误差，二是制孔时蒙皮受压力角和刀尖的压力产生变形，刀具和工件相互位置变化带来的误差。

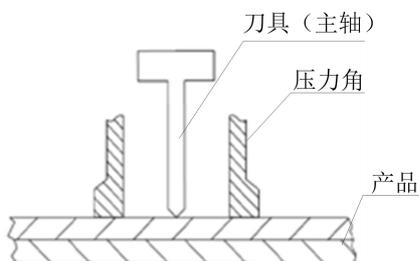


图10 压紧及制孔示意图

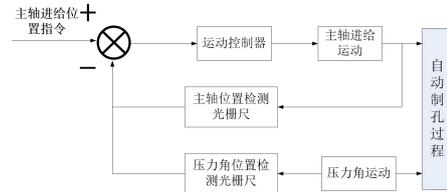


图11 镗窝深度闭环控制系统

分别从两个方面对镗窝精度进行补偿：制孔主轴量的进给由控制系统的按预先输入数字信号驱动，利用光栅尺实时监测主轴的实际进给量并反馈给控制系统形成闭环控制系统，提高主轴进给的精度。对于工件变形引起的误差，利用光栅尺检测压力角的位置变化（压力角始终与蒙皮制孔表面始终处于贴紧状态）来反映，将工件的变形量同样反馈给主轴进给系统并加以补偿，从而保证镗窝精度。可以看到，镗窝深度的补偿来自主轴进给偏差和工件变形两个方面，如图11所示。

3.4 集成控制技术

控制系统是自动化制孔设备的大脑，负责数控设备沿各轴的坐标运动、机器人的关节运动、末端执行器的制孔运动以及换刀、视频监控等过程的数字控制和逻辑控制。控制系统自上而下分为4层，包括离线编程层、系统管理与监控层、现场控制层以及现场执行层，如图12所示。

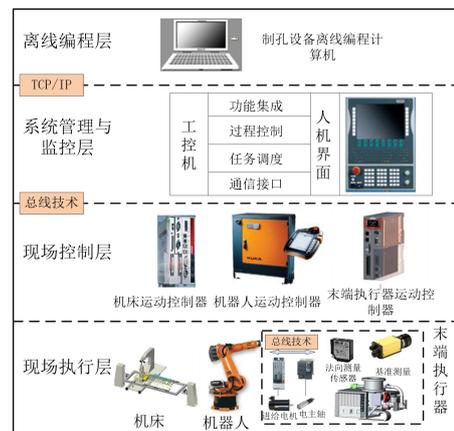


图12 自动制孔设备控制系统结构

自动制孔离线编程主要定义产品的孔位信息、刀具信息、制孔路径信息，通过远程离线编程计算机完成。在设备进行加工前，将离线编程的后置处理文件通过TCP/IP通信协议传输至制孔设备中央控制器。

系统管理与监控层以工业控制计算机为核心，提供人机交互界面，前端接受离线编程的制孔程序，后端利用现场总线控制方式与现场控制系统进行通讯。

现场控制层包括机床的运动控制系统（如西门子840d）、机器人控制器（如KUKA机器人控制器KR C4）和末端执行器控制器（如西门子S7-300PLC）等各类控制器，控制器将上位机的指令解析为电机等执行机构可以接收的信号，完成工业

现场的实时控制。

现场执行层即机床、机器人、末端执行器的动力机械、液压气动机构，各执行机构在控制系统的指令下协同运动，完成设备的制孔功能。

4 结语

自动化装配是飞机装配技术的发展趋势，本文介绍了常见的几种自动化制孔设备，托架式、龙门式、立柱机床式属于大型设备，制孔效率高、精度好，在航空制造企业中应用广泛。但机械臂式、柔性轨道式、爬行机器人制孔设备以其成本低、

灵活性好的特点，同样有着不可取代的优势。在设备选用时，可以根据产品特点和生产条件，选用合适的设备。

孔位找正、法向找正、镗窝深度控制、集成控制是自动制孔设备的共性关键技术，国产制孔设备经过多年的发展解决了有无的问题，但设备精度、稳定性仍存在不小的差距。国产制孔设备的研制多以高校为主，缺少 EI、GEMCOR、宝捷那样成熟的设备供应商。这需要高校、航空制造企业及设备制造商多方的共同努力，使我国的自动化装配技术赶上乃至超越国外先进水平。

参考文献:

- [1] 范玉清.现代飞机制造技术[M].北京航空航天大学出版社,2001.
- [2] 许国康.自动钻铆技术及其在数字化装配中的应用[J].航空制造技术,2005,6.
- [3] 赵辉.基于 UMAC 的自动钻铆机控制系统研究与开发.[硕士学位论文].南京航空航天大学,2014.
- [4] 楼阿莉.国内外自动钻铆技术的发展现状及应用.航空制造技术,2005,48(6):50~54.
- [5] 林琳.民用飞机自动化装配制孔技术研究.[硕士学位论文].上海交通大学,2012.
- [6] 何胜强.环形轨自动化制孔系统孔位修正方法研究.[硕士学位论文].浙江大学,2015.