

民用飞机装配自动制孔设备探讨

Discussion of Automatic Drilling Equipment in Civil Aircraft Assembly

上海交通大学机械与动力工程学院 林琳
上海飞机制造有限公司飞机部装车间 夏雨丰

[摘要] 考虑飞机装配的特点,结合当前国内外飞机装配水平的现状,介绍了半自动以及自动钻孔的几项设备,并简要分析了设备的特点以及不同设备之间的区别。

关键词: 飞机装配 半自动化 自动化 制孔设备

[ABSTRACT] Considering the characteristics of aircraft assembly and combining with the current domestic and foreign level and status of civil aircraft assembly, some several semi-automatic and automatic drilling equipment is introduced and equipment characteristics are analyzed as well as the difference between different equipment.

Keywords: Aircraft assembly Semi-automization Automization Drilling equipment

飞机装配技术是一项难度较大的综合性集成技术^[1],是整个产品研制的龙头环节。装配是飞机制造过程的关键环节,装配连接质量将直接影响整机结构抗疲劳性能与可靠性。据统计,飞机机体疲劳失效事故的70%是源于结构连接部位,其中80%的疲劳裂纹产生于连接孔处。目前飞机结构件采用的主要连接方法仍是机械连接,一架大型飞机上大约有150~200万个连接件^[2]。

伴随航空结构件向着薄壁化、整体化和复杂化方向发展,机体结构长寿命、高质量、高效率、气动等方面的要求,使装配制孔比以往要求更高、更精;民用飞机要想达到高质量、高安全性、高效率等指标,也必须大量采用先进的自动化装配技术,使主要机体结构的装配以自动制孔和自动铆接为主,取代手工作业方式。为了满足现代飞机高寿命的要求,可通过各种技术途径改善各连接点的技术状态(表面质量、配合性质、结构形式等),其中一个很重要的途径是通过自动化设备进行自动精密制孔,提高制孔质量^[3]。

1 半自动制孔设备

1.1 自动进给钻

自动进给钻是一种先进的制孔工具,能采用不同的转速,以一定的进给率钻出高质量的孔,且孔边很少

出现毛刺^[4]。由于没有停止和减压现象,刀具能够长时间保持锋利,而且穿透时没有颤动,能减少刀具断裂的可能性,能用于钻孔、镗孔、铣切、铰孔、镗端面等,可有效地提高制孔效率和孔的质量,减轻操作者的劳动强度,在飞机装配中具有很高的使用价值。图1是型号为158QGDBV-S400的自动进给钻,在国产民用飞机ARJ-700的平尾等部位装配使用较多,从一定程度上减轻了劳动强度,提高了工作效率,但是由于设备较为沉重,且需要手工定位后才能制孔。



图1 158QGDBV-S400自动进给钻
Fig.1 158QGDBV-S400 automatic feed drilling

1.2 螺旋铣孔设备(手持)

面对现代大型飞行器装配孔要实现高效、高精度、高质量的加工,国外航空制造公司与相关研究机构在新型技术、新工艺等方面展开大量研究,并取得了丰硕成果。目前,国外航空制造领域正在研究一种新型孔加工方式——螺旋铣孔,它具有以下优势。

首先,刀具中心的轨迹是螺旋线而非直线,即刀具中心不再与所加工孔的中心重合,属偏心加工过程。刀具的直径与孔的直径不一样,这突破了传统钻孔技术中一把刀具加工同一直径孔的限制,实现了单一直径刀具加工一系列直径孔。这不仅提高了加工效率,同时也大大减少了存刀数量和种类,降低了加工成本。

其次,螺旋铣孔过程是断续铣削过程,有利于刀具的散热,从而降低了因温度累积而造成刀具磨损失效的风险。更重要的是,与传统钻孔相比,螺旋铣孔过程在冷却液的使用上有了很大的改进,整个铣孔过程可以采用微量润滑甚至空冷方式来实现冷却,是一个绿色环保的过程。

第三,偏心加工的方式使得切屑有足够的空间从孔槽排出,排屑方式不再是影响孔质量的主要因素。该项技术有着广阔的发展空间和良好的市场前景,已成为国内外材料加工研究的热点和难点之一。

空客公司已经在飞机的研制中应用螺旋铣孔技术。为了缩短研制周期、降低生产成本,几年前空客公司与 Novator 公司合作启动了一项关于发展轻型便携式螺旋铣孔装置的项目,现已应用于法国、德国的空客飞机装配生产车间中。最近 Novator 公司又推出了 Twin spin PX3 轻型便携式螺旋铣孔装置,空客已经将该项技术应用到了装配生产线上,并且验证了其生产能力。图 2 为 Novator 公司的螺旋铣孔设备。



图2 Novator公司螺旋铣孔设备
Fig.2 Spiral milling equipment of Novator company

2 自动制孔设备

2.1 五坐标制孔设备

由中航工业北京航空制造工程研究所研制的飞机翼面类部件柔性装配五坐标自动制孔设备由立式五坐标机构和自动制孔用的末端执行器组成,以适应带有 2 个曲度的飞机翼面类部件的加工要求。

该设备是国内第一台飞机翼面类部件柔性装配设备,末端执行器的开发技术为同类型设备研发提供了可借鉴的经验。该设备投产后,预期平尾制孔装配周期可缩短近 50%。双摆角结构及驱动精度难题的解决和双电机消除技术的应用成功为今后五坐标机床的设计开发提供了新思路。

五坐标机构可进行 X、Y、Z 方向的直角坐标运动和 A、B 两个摆角运动,可实现精确的空间定位和姿态调整,用于将多功能末端执行器移动到装配部件上的指定位置,以实现自动制孔。

X 轴通过齿轮、齿条啮合进行运动,通过光栅尺反馈实现伺服电机的闭环控制,完成 X 向的高精度进给驱动。

Y 轴立柱的内腔是空的,内部靠筋板间的连接保证其刚性。立柱的两个侧立板具有一定的斜度,目的是实现等强度设计。在 Y 轴的外部悬挂有 Z 轴、平衡横滑板、双摆头和末端执行器,它们具有较大重量,如果不采用平衡装置,丝杠的寿命将达不到预期设计要求。本系统采用机械重锤式配重机构。在立柱内腔,放置一个配重,配重的质量取外部质量的 80% 左右。移动平台与 Y 轴立柱相连接,平台上放置电气柜和控制台。

Z 轴用丝杠螺母副传动,选用额定转速为 1500r/min 的伺服电机直接驱动,不需要减速器。Z 轴的导向和承载通过直线导轨完成,每个导轨上都有滑块,并固定到滑板上。横滑板两面都装有滑块,分别与 Y、Z 轴连接,沿着 Y 向导轨,Z 轴与横滑板可进行上下移动,实现在 Y 向的进给。Z 轴相对于横滑板可进行往复运动,以实现 Z 向的进给。

双摆头用来实现 A、B 2 个摆角的运动。多功能末端执行器用于实现孔定位、压紧力检测、自动制孔、铤窝、粉尘抽吸、孔径和位置检测的功能。

在国产民用飞机 ARJ-700 以及大型客机 C919 的平尾、垂尾等类似部位装配可以根据实际情况采用此类设备以提高装配效率。

2.2 柔性自动钻孔设备

飞机的制造中,机身的对接、机翼的装配等往往需要钻制大量的孔,传统的制孔设备多为大型落地式设备。这种设备不仅体积和重量庞大,造价也高,而且多为专机专用,缺少柔性,大大增加了制造成本。为此,现代飞机制造业的发展对轻型、柔性设备的需求日益迫切。柔性轨道制孔设备就是波音公司为满足这种需要而发明的。图 3 是一般使用的大型制孔设备。

与一般的大型落地式制孔设备相比,柔性轨道制孔系统这种设计理念的最大特征是设备自身经由真空吸盘吸附在工件上,柔性轨道贴合工件的外形,完全附着

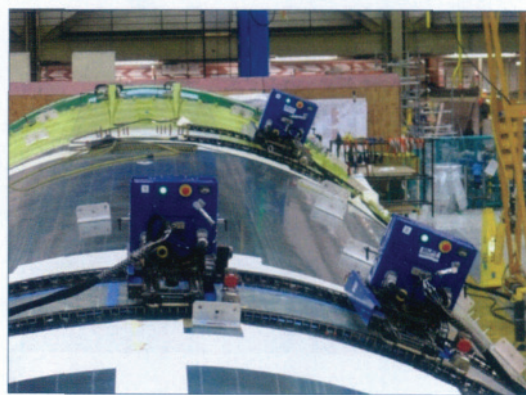


图3 大型制孔设备
Fig.3 Large drilling equipment

在工件上制孔。这样做的优点是：首先，柔轨系统的加工精度不需要工件在工装型架上精确定位就能保证。由于设备在工件上，设备对工件的相对位置与工装没有关联，这样可以大大降低工装的刚度和精度要求并减少工件的安装时间，当然对于机身对接来说，其本身有精度要求。其次，轨道具有适应不同曲率型面的柔性，可以用同一设备加工不同形式和外形的零件(如机身和机翼)。

柔性轨道制孔系统可用于机身对接部位的自动钻孔，也可用于机翼蒙皮与肋或长桁以及机翼与前后梁的连接、翼身对接、机身壁板拼接、机身筒段框装配、门框装配等部位的自动制孔。柔性的轨道经由真空吸盘吸附在工件上，一般能实现 4~5 轴的钻孔功能，成本低于大型专用制孔机。目前应用比较成熟的厂商有美国的 Electroimpact 公司(EI)和美国的 Advanced Integration Technology 公司(AIT)，如图 4 所示。

柔性轨道自动制孔系统适合机身间对接的自动制孔，并且其装配工艺较手工装配简单，可以实现高效、高质量、低成本自动钻孔^[5]。

在国国民用飞机 ARJ-700 以及大型客机 C919 的机身对接的过程中可采用柔性轨道进行自动制孔，可以

提高装配效率和生产质量。

2.3 爬行(自行车)机器人自动制孔系统

目前，在飞机装配行业，飞机装配工艺和装配设备大多是针对每个特定对象的特定任务而言的，专用的设备大多只适用于某一个工(站)位。因此要实现高精度的钻铆方案，需要大型、昂贵的设备，并且每个装配任务的设备都是专用的。从工艺和成本的角度考虑，装配设备的柔性化一直是飞机制造厂商梦寐以求的目标，这促进了世界各大飞机装备制造企业的柔性化设备开发，西班牙 M.Torres 公司的爬行制孔机器人就是近年来开发的一个成果，这一成果实现了几大目标：

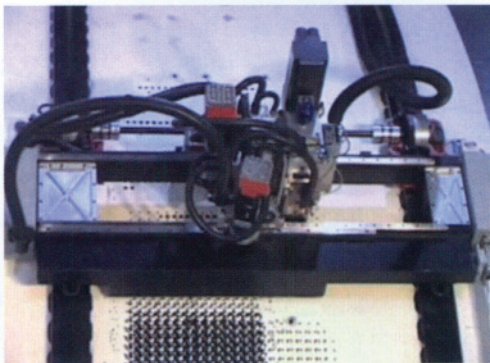
- (1)重量轻；
- (2)可在现有的装配型架上使用，不需要特别的工装，对型架的影响和改动最小化；
- (3)最少的安装和调整时间(2min 内)；
- (4)柔性化，可适应多种工件，用于多个项目；
- (5)采购成本和运行成本低。

爬行制孔机器人 FDH (Flexible Automated Drilling Head, 柔性钻孔头)已得到了工程化应用的验证。该制孔设备形式上看是一种非关节式多足机器人，行走运动不是靠关节实现，而是由丝杠驱动。足上吸盘将设备吸附在工件表面进行制孔作业。这是一个专门为飞机零部件钻孔和铆接而设计的 5 轴平台的高性能柔性制孔设备。由于遵循模块化设计的理念，FDH 在不对其结构作较大改动的情况下，可方便地选配紧固件注胶和插入功能，甚至可以增加临时性紧固件安装功能，方便地扩展到 FDRH (Flexible Automated Drilling & Riveting Head, 柔性钻孔-铆接头)，如图 5 所示。

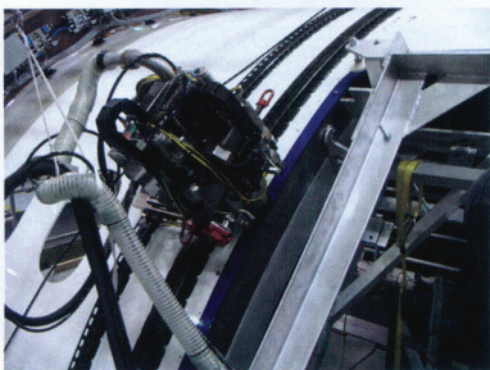
FDH 可用于绝大多数航空航天所用材料(铝合金、碳纤维、玻璃纤维、Kevlar 纤维等)，特别适于机身桶段蒙皮和机身段，同时还适用于其他各种几何形状飞机部件的装配。该系统具有便携、重量轻、速度快，且可靠性高的特点，能够满足飞机制造工业的特定需求。该系统包括一个制孔机器人和一个带操作台(笔记本电脑)的可移动式电气柜。电气柜和机器人都易于搬动。包括 1 台摄像机的摄像系统、1 个激光传感器和 M.Torres 开发的控制软件，确保了 FDH 在飞机零部件上的准确位置；8 个带有真空管线的多位置真空吸盘能保证 FDH 在零部件上牢固定位。

FDH 已在飞机纵向和环向部件的连接钻孔以及机翼部件的装配钻孔应用方面得到了很好的验证。

相比柔性轨道制孔系统，爬行制孔机器人也有其不足，主要体现在没有偏心制孔能力。柔性轨道制孔系统的偏心形式(仅限于偏心式，不是所有的柔轨系统都有偏心制孔能力)，这种设备能在轨道之外区域制孔，故能



(a)AIT 公司柔性轨道系统



(b)EI 公司柔性轨道系统

图4 柔性轨道系统

Fig.4 Flexible track system

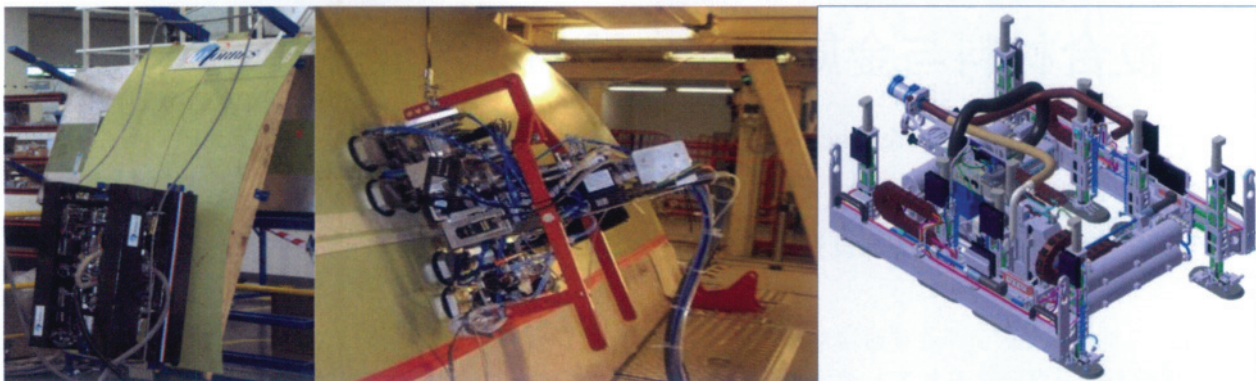


图5 爬行机器人自动制孔系统
Fig.5 FDH system

用于一些特定的场合,比如舱门、机翼前后梁的装配等,但爬行机器人由于其结构所限,目前开发的产品还不具备这种能力。

2.4 基于工业机器人的自动制孔系统

经对国外制孔技术及其装备的广泛调研,西方国家采用的柔性自动化制孔系统除了较为普及的自动钻铆系统外,还有机器人制孔系统、机舱地板制孔系统、机翼壁板制孔系统、长桁柔性制孔系统、便携式自动制孔系统等。

当前,机器人制孔技术应用得比较成熟,如F-16复合材料垂尾壁板、C-130飞机梁腹板、波音F/A-18E/F超级大黄蜂后沿襟翼等装配连接均采用了机器人制孔技术。其中,洛克希德·马丁公司用于F-35飞机碳纤维环氧复合材料机翼上壁板制孔用的大型龙门式钻孔系统是机器人制孔的最前沿应用。该系统基于便携的、灵活、低成本且重量轻的机器人平台,采用激光定位系统、电磁马达和“压脚”等装置实现了精密钻孔,满足了F-35飞机气动和耐久性的要求。由于具有上述优势,F-16、F-22和T-50等项目都对该系统进行评估并计划用于部分的装配作业。

工业机器人一般由主构架(手臂)、手腕、驱动系统、测量系统、控制器及传感器等组成。一般来说,机器人通常含有6个自由度(7自由度的是在标准机器人底部增加了线性滑轨单元),在结构上6个自由度全部为旋转自由度,其中机器人手臂具有3个自由度(运动坐标轴),机器人作业空间由手臂运动范围决定;手腕也具有3个自由度,它是机器人

工具(如机加工刀具、夹爪等末端执行器)与主构架的连接机构;驱动系统为机器人各运动部件提供动力,使之产生相应的运动;测量系统用于机器人运动部件的位姿(如位移、速度和加速度)的测量;控制器(KRC)用于控制机器人各运动部件的位置、速度和加速度,使机器人手爪或机器人工具的中心点以给定的速度沿着给定轨迹到达目标点;通过传感器获得搬运对象和机器人本身的状态信息,如工件及其位置的识别,障碍物的识别,抓举工件的重量是否过载等。

目前能提供基于工业机器人的自动制孔系统解决方案的公司主要有: Brotje、EI、KUKA等,如图6所示。



图6 基于工业机器人的自动制孔系统
Fig.6 Automatic drilling system based on industrial robot

(下转第 115 页)

动 β 角,最后绕 Y 轴转动 γ 角来确定。动坐标系原点的目标位置为(300mm,150mm,1650mm)。

(1) 误差正解模型的验证。

利用误差正解模型求出各误差作用下对接部件实际位姿误差值 ΔD 与利用带有误差源作用的正解模型,求得理论控制指令下的实际位姿与目标位姿之间的误差值 $\Delta D'$ (表3)。

表1 结构误差参数 mm

i	dP_{ix}	dP_{iy}	dP_{iz}	dO_{ix}	dO_{iy}	dO_{iz}	dx_i	dy_i	dz_i
1	-0.05	-0.05	0.05	-0.05	0.05	-0.05	-0.05	-0.05	0.05
2	0.05	-0.05	0.05	0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
3	-0.05	0.05	-0.05	-0.05	-0.05	0.05	0.05	-0.05	0.05

表2 POGO柱各轴的方向参数 (°)

i	$\delta\theta_{ix}$	$\delta\theta_{iy}$	$\delta\theta_{iz}$	$\delta\phi_{ix}$	$\delta\phi_{iy}$	$\delta\phi_{iz}$
1	0.01	0.02	0.02	0.01	-0.02	0.02
2	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01	0.02	-0.02
3	-0.01	-0.02	0.02	0.01	-0.02	0.02

表3 误差正解模型验证结果

误差值	$d\alpha/(\text{°})$	$d\beta/(\text{°})$	$d\gamma/(\text{°})$	dx/mm	dy/mm	dz/mm
ΔD	-0.007849	0.001558	-0.000329	0.031077	-0.021640	0.048375
$\Delta D'$	-0.007844	0.001559	-0.000329	0.031078	-0.021638	0.048377

$$\Delta D' \approx \Delta D$$

该结果说明利用全微分所建立的误差正解模型是正确的。

(2) 误差补偿模型的验证。

根据误差正解模型求出的位姿误差 ΔD 来确定为达到目标位姿所需的控制指令, $D' = D - \Delta D$ 。由新的控制位姿参数 D' , 利用位姿反解模型反解出各 POGO 柱所需的驱动向量, 并将该向量带入含有误差源作用的正解模型中, 求出该控制指令下对接部件的实际位姿误差为:

$$\Delta D' = [0.0053^\circ, 0.0017^\circ, -0.0089^\circ, -0.1900\text{mm}, -0.1473\text{mm}, -0.0144\text{mm}]^T \times 10^{-4}$$

$$\Delta D' = \Delta D$$

可见, 补偿后的位姿误差远小于原误差值, 表明补偿效果非常理想。

5 结论

本文在分析了大部件对接相关控制算法的基础上, 利用位置正反解模型对系统的调姿精度进行了分析, 通过实例验证得出以下结论:

(1) 利用微分法所建立的结构误差到末端控制位姿误差之间的误差正解模型是正确的;

(2) 在各结构误差未知的情况下, 采用基于工作空间的位姿补偿方法是有效的。

参考文献

- [1] 李彤. 飞机数字化装配技术. 科技资讯, 2009(30):22.
- [2] 荆道艳, 许国康, 王姮, 等. 大部件对接的数控定位技术研究. 航空制造技术, 2010(23):117-120.
- [3] 李晨, 方强, 李江雄. 基于三坐标定位器的大部件调姿机构误差分析. 机电工程, 2010, 27(3):6-12.
- [4] 郭志敏, 蒋君侠, 柯映林. 一种精密三坐标 POGO 柱设计与精度研究. 浙江大学学报, 2009, 43(9):1649-1654.
- [5] Arun K S, Huang T S, Blostein S D. Least-squares fitting of two 3-D point sets. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1987, 9(5):68-70.

(责编 良辰)

(上接第 89 页)

3 结束语

目前, 国产民用飞机 ARJ-700 项目中, 飞机装配过程中的制孔环节大量采用手工操作, 制孔速度、制孔质量难以满足高性能飞机的要求。本文中介绍到的几种半自动以及自动制孔设备, 根据设备的特点以及适用部位, 并考虑实际装配过程中的具体情况, 应用于支线飞机 ARJ-700 以及大客 C919 等机型的生产过程中, 可以大幅度提高制孔速度、制孔质量, 在一定程度上实现装配技术的自动化、数字化和模块化。

数字化、自动化、柔性化是当前国外飞机制造技术水平的一个重要标志, 也将是国内飞机装配技术发展的方向和目标。自动制孔系统的应用, 不但能使飞机装配周期大大缩短, 而且能够提高装配质量、降低制造成本, 推动和加速我国大型客机的研制工作。

参考文献

- [1] 范玉青. 现代飞机制造技术. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [2] 袁红璇. 飞机结构件连接孔制造技术. 航空制造技术, 2007(1):96-99.
- [3] 卜泳, 许国康, 肖庆东. 飞机结构件的自动化精密制孔技术. 航空制造技术, 2009(14): 61-64.
- [4] 梁青霄. 自动进给钻在飞机装配中的应用. 西飞科技, 2004(2):9-10.
- [5] 林美安, 陈文亮, 王琨, 等. 柔性轨道自动化制孔系统的仿真研究. 机械制造, 2010(548):14-16.

(责编 良辰)