

飞机数字化自动钻铆系统 及其关键技术

Aircraft Automatic Drilling and Riveting System and Its Key Technology

南京航空航天大学机电学院 王珉 陈文亮 郝鹏飞
上海飞机制造有限公司航空制造技术研究所 姜丽萍 王宇波 蒋红宇



王珉

南京航空航天大学机电学院航空宇航制造工程系教师。主要从事飞机自动化装配工艺、飞机自动化装配系统等方向的研究。

飞机装配技术面临着自动化、数字化、集成化和柔性化的发展趋势,面对日益激烈的竞争,在研制飞机自动化装配系统时需要综合考虑装配效率、系统柔性和设备成本等因素。作为最早实现的领域,壁板自动钻铆成为飞机自动化装配最成熟、应用最广泛的领域。随着自动化程度的提

飞机装配技术面临着自动化、数字化和柔性化的发展趋势,面对日益激烈的竞争,在研制飞机自动化装配系统时需要综合考虑装配效率、系统柔性和设备成本等因素。作为最早实现的领域,壁板自动钻铆成为飞机自动化装配最成熟、应用最广泛的领域。随着自动化程度的提高,超级壁板拼接、甚至机身筒段装配也开始应用自动钻铆系统。

高,超级壁板拼接、甚至机身筒段装配也开始应用自动钻铆系统^[1-4]。自动钻铆系统的发展和应用,体现了飞机装配的自动化、数字化、柔性化和集成化趋势。其中主要体现在当前主流自动钻铆系统均采用数字量传递的数控技术,除了本身适应一定尺寸范围的产品装配以外,还可以配套柔性工装来提升整个系统的柔性,而工装本身也可以是数控的自动化工装,配合检测设备(激光跟踪仪等)与钻铆机集成为有机整体。本文将在论述当前典型的自动钻铆系统的

基础上,总结其研制所需的主要关键技术。

飞机自动钻铆系统及应用

当前飞机自动钻铆系统主要由3种典型形式:基于全自动托架的自动钻铆系统(包括C型和D型钻铆系统),龙门式自动钻铆系统(包括龙门卧式、龙门立式钻铆系统、机身半筒段环铆系统)和内外双机器人筒段钻铆系统。

1 基于全自动托架的自动钻铆系统
基于全自动托架的自动钻铆系



图1 基于全自动托架的自动钻铆系统

统,包括 C 框和 D 框 2 种形式,一般有基于全自动托架的五坐标定位系统和自动钻铆机组成,结构形式如图 1 所示。

典型的五坐标全自动托架由 X、Y、两个 Z 轴和一个 A 轴组合实现 X、Y、Z、A (绕 X 轴旋转)、B (绕 Y 轴旋转) 五坐标定位功能。

典型的自动钻铆机由设备本体 (C 框或 D 框)、上下钻铆功能执行器 (末端执行器) 组成,实现钻孔、镗窝、送钉、插钉、顶紧、连接 (铆接或螺接) 和端头铣平等功能。

基于全自动托架的自动钻铆系统主要系统供应商有美国的捷姆科公司 (C 型自动钻铆系统)、德国的宝捷公司 (C 型和 D 型自动钻铆系统) 等。国外已经形成了比较成熟的产品,大量应用于波音、空客等飞机制造商。

国内近年来各主机厂、研究所和高校合作也开展基于全自动托架的自动钻铆系统的研究,成都飞机工业 (集团) 有限责任公司、西安飞机工业 (集团) 有限责任公司、沈阳飞机工业 (集团) 有限公司、西北工业大学、南京航空航天大学等开展了相应的研究。但国内目前没有成熟的产品出

现。

基于全自动托架自动钻铆系统的优势为技术成熟,成本相对低,易于实现较大铆接力。

弱点为能加工壁板的弧度相对较小 (一般小于 60°); 产品上下架时间设备闲置,不利于自动化设备效率的发挥。

全自动托架自动钻铆系统适用于壁板装配,尤其是机翼壁板的装配。

2 龙门式自动钻铆系统

龙门式自动钻铆系统,包括龙门式五坐标定位系统、末端执行器和柔性工装组成。根据工件摆放位置 (也决定末端执行器的位置) 可以分为卧式和立式 2 种。

龙门式自动钻铆系统的末端执行器和基于全自动托架的自动钻铆系统类似,其柔性工装在钻铆的过程中保持固定,主要是龙门式五坐标定位系统实现 X、Y、Z、A (绕 X 轴旋转)、B (绕 Y 轴旋转) 五坐标定位。

龙门卧式钻铆系统有一种特殊的形式机身半筒段环铆系统,该系统龙门结构采用圆弧状环形龙门结构,适合壁板钻铆后组成机身半筒段的环铆。

龙门式自动钻铆系统主要系统供应商有美国 EI 公司的龙门立式自动钻铆系统、德国宝捷公司龙门卧式自动钻铆系统 (MPAC)^[2]、德国宝捷公司机身环铆系统等。

国内目前研制龙门式自动钻铆系统未见报道,目前南京航空航天大学在建的龙门式自动钻铆系统如图 2 所示。该系统由于场地高度的限制,龙门系统只实现了 X、Y、Z、A 四坐标定位, B 角由 Pogo 柱托架来实现。该系统主要用于教学和科研试验,从技术的角度可以增加一个 B 角摆动实现龙门系统本身的五坐标定位,但尺寸和成本均会有明显的增加。

优势为通过合理布置生产线,可以解决产品上下架时间设备闲置问题; 龙门卧式钻铆系统能加工壁板的弧度较大 (MPAC 可达 180°), 可以实现超级壁板的钻铆; 机身半筒段环铆系统可以实现超过 180° 半筒段环铆。

弱点为产品复杂、控制难度大、成本相对较高,龙门系统的 A、B 角运动不利于实现较大的铆接力。机身半筒段环铆系统钻铆效率相对较低。

龙门自动钻铆系统适用于壁板装配,龙门立式钻铆系统适合机翼壁板装配,龙门卧式钻铆系统适合机身壁板、超级壁板的装配,机身半筒段环铆系统适合机身半筒段环铆。

3 内外双机器人筒段钻铆系统

内外双机器人筒段钻铆系统包括两套平行的刚性支撑轨道,一套在产品蒙皮外侧、一套伸入到产品内部。上面各布置一套钻铆机器人 (可以实现螺接功能)。每套轨道系统和钻铆机器人一起均能实现 X、Y、Z、A (绕 X 轴旋转)、B (绕 Y 轴旋转) 五坐标定位,从而配合实现制孔连接功能。

从结构上,内外双机器人筒段钻铆系统与龙门立式钻铆系统更像,只

是由于用于筒段装配的原因,无法将内外机器人通过龙门架连成一体,内外双机器人 X 方向同步控制更加复杂而已。

内外双机器人筒段钻铆系统主要系统供应商有美国 EI 公司、意大利 B&C 公司等。该系统较为复杂,市场需求相对不够旺盛,因此应用相对较少。国内目前未见相应系统的研发。

优势为自动化程度高,往往还可以实现角片等部件自动定位功能。

弱点为产品复杂,控制难度大,成本相对较高,龙门系统的 A、B 角运动不利于实现较大的铆接力。钻铆效率相对较低。

内外双机器人筒段钻铆系统适用于机身筒段装配,特别是如波音 787 一类的整体复材机身,往往不需要半筒段装配后上下对接的情况。

飞机自动钻铆系统的关键技术

飞机自动钻铆系统是飞机自动

化装配所需关键高新技术装备。

1 高负载高刚性大运动场定位机构结构设计技术

与轻型自动化制孔系统相比,飞机自动钻铆系统的控制轴数并不多,定位系统的结构也并不特别复杂,然而考虑到其工作负载(压铆的工作载荷大概 15~30kN),而其大型的结构重量对结构设计带来了极大挑战。

以龙门式钻铆系统为例,特殊性主要表现在:

(1) A、B 角运动一般由旋转轴来实现,而巨大的铆接力也将传递到该旋转轴上,因此该轴静态承载能力、传动间隙处理、动态运动精度都成为关键难点。

(2) 大型龙门架的运动,产生巨大的惯量,考虑到钻铆效率要求较高,这种大惯量大运动场对 X 轴运动精度影响巨大。

(3) 大型定位系统的高刚性要求和大惯量大运动场运动期望减重的要求之间折中,需要对结构刚度和强度进行优化。

因此高负载高刚性大运动场定位机构结构设计技术成为一项关键技术。该项关键技术的解决,需要通过:

(1) 进行力学分析,设计合理的机构受力形式;

(2) 进行传动机构消除处理和静态自锁设计,保证其精度和稳定性;

(3) 采用有限元分析优化的手段,设计出合理的结构尺寸。

2 复杂运动多轴同步运动控制技术

龙门钻铆系统、内外双机器人筒段钻铆系统对此技术要求更高,基于全自动托架的自动钻铆系统次之。为实现五坐标定位,不同的钻铆系统采用不同的控制轴来实现,但由于上下末端执行器制孔连接的同轴度要求很高,这就需要多运动轴进行同步运动控制,使该项技术成为一项关键技术。

以龙门卧式自动钻铆系统为例,为保证上下末端执行器制孔连接的同轴度,至少要保证上下末端执行器运动 X 坐标、Y 坐标、Z 坐标和 A、B 角保持协调,除了机构本身的精度外,这对控制系统提出了极高的要求。该项关键技术的解决,需要通过两条途径:

(1) 短期内通过采用成熟国外运动控制系统,实现功能精度为主要目标,如 MPAC 采用的西门子 840D;

(2) 长期目标是通过自主研发运动控制系统,降低成本,获取更好的定制性能,同时取得自主知识产权的控制系统。

3 复杂钻铆功能末端执行器设计技术

3 种形式自动钻铆系统都必须用到末端执行器,考虑飞机装配连接的零部件特点和装配精度要求,末端执行器的研制面临很多技术难点从而成为一项关键技术。主要体现在:

(1) 飞机装配的铆窝精度要求很高。这种精度要求体现在从蒙皮

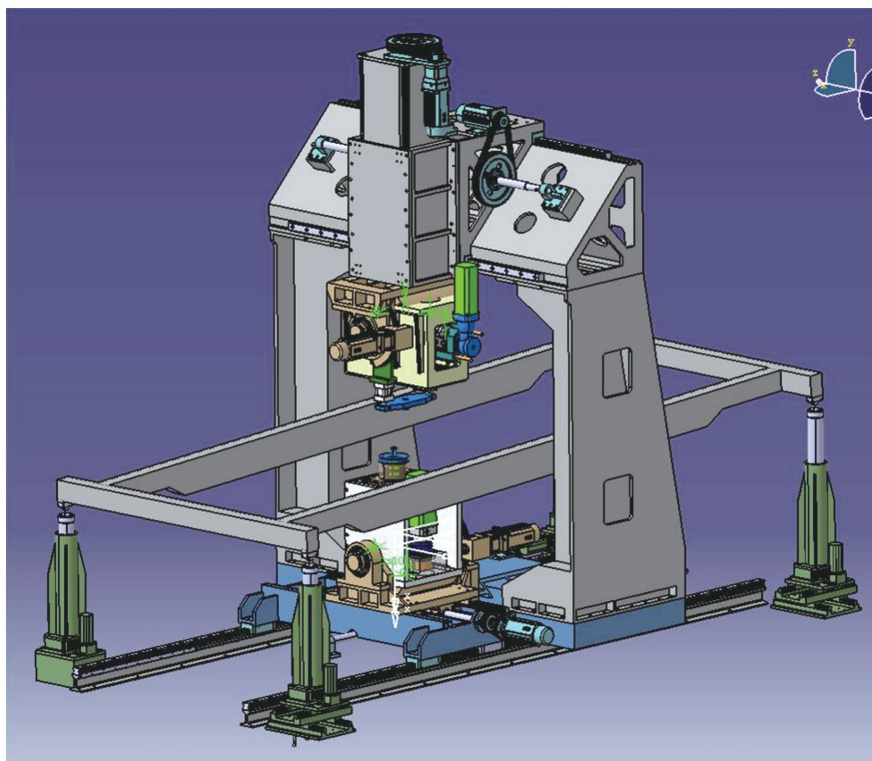


图2 南京航空航天大学研制的龙门钻铆系统

表面开始, 镗窝深度有严格的技术要求。这造成了除对主轴 Z 向进给提出了很高的要求外, 对蒙皮表面的检测精度也同样提出了很高要求, 制孔时蒙皮表面受压变形成为无法忽略的因素。

(2) 孔位检测精度要求。孔位检测精度涉及整个制孔坐标系的确, 也就决定了孔位精度。

(3) 法向检测精度和传感器标定。决定了制孔垂直度, 是制孔最重要的性能指标之一, 要考虑传感器精度、传感器布置和传感器标定等多种因素。

(4) 送钉插钉精度和插入、顶紧力的提供。

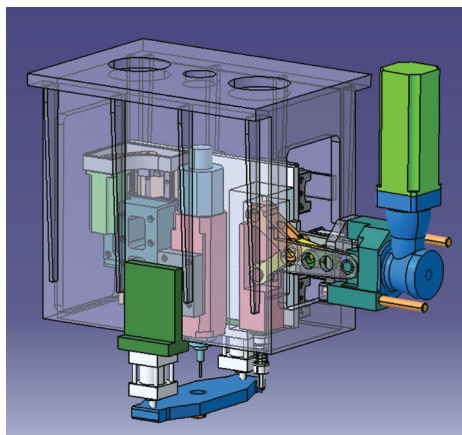
(5) 铆接力和行程的控制。

复杂钻铆功能末端执行器设计是自动钻铆系统最核心的技术之一, 孔位检测、法向检测、制孔、镗窝、送钉、插入紧固件、顶紧、铆接(螺接)、铣平、换刀、换铆模等众多功能集中在一起, 还要保证负载能力和刚度, 使末端执行器的设计需要采用模块化的设计理念、精巧的机构设计和基于有限元的结构优化等方法。图 3 为南京航空航天大学设计的末端执行器。

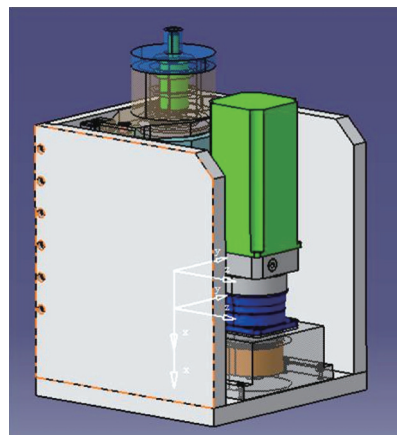
4 离线编程和仿真技术

离线编程是飞机自动化装配区别于其他机械产品数控程序编程的重要特征。由于飞机批量较低、曲面复杂、孔位数量巨大, 汽车等大批量自动化生产线采用的示教编程难以有效应用, 离线编程成为应用所必须的核心软件技术。一般来说包含紧固件信息提取模块, 数控自动编程模块, 刀位文件生成模块, 离线仿真模块^[5], 在线监测模块等部分组成^[6]。与轻型自动化制孔系统比, 自动钻铆系统的离线编程和仿真更为复杂, 干涉检查需要更加细致。

离线编程的一个难点在于, 必须从产品数模中自动提取紧固件位置信息, 而这项工作的前提是产品数模



(a) 上末端执行器



(b) 下末端执行器

图3 南京航空航天大学设计的末端执行器

对紧固件信息的定义必须严格规范。目前国外主流飞机制造商均有规范的定义, 国内近年也重视这项工作, 目前 MBD 技术规范体系已经初步形成。

结束语

自动化装配是飞机装配技术的发展趋势, 飞机自动钻铆系统由于能够高效率、高质量的装配、连接得到广泛的应用。3 种形式的自动钻铆系统有各自的特点和优势, 在应用上可以根据飞机产品的特点和生产条件, 选用不同的系统。

总的来说, 对于需要采用高压铆力的工况, 如机翼无头铆钉的压铆, 基于全自动托架的自动钻铆系统(以捷姆科公司的 G86、G2000 为代表)有一定优势; 对于机翼装配需要电磁铆接的工况, 龙门立式钻铆系统(以 EI 公司的 E 系列钻铆系统为代表)有优势; 对于机身大尺寸大弧度壁板, 特别是可以拼接为超级壁板的情况, 龙门卧式钻铆系统(以德国宝捷公司的 MPAC 为代表)优势明显。目前国内外市场上的应用也验证了这一趋势。飞机自动化装配技术的实施牵涉到从设计、零件制造、工艺装备甚至紧固件的选用等所有环节。可以说自动化装配的实施是对整个领域进行革命性发展, 而不是一个局

部的技术升级。尤其是对于龙门式钻铆系统和内外双机器人钻铆系统, 其合理应用还涉及定位方法和基准选择、生产线规划、部件的装配质量及变形控制、工装开敞性和柔性要求等多项关键问题, 需要整个设计、制造和装配工艺协调发展。

由于成本、保密性等要求, 国内自主研发自动化装配系统是必要的, 这就需要通过研究关键技术, 掌握核心能力, 提升国内飞机装配的自动化水平。相信不久的将来, 国内将采用更多自主研发的自动化装配系统。

参考文献

- [1] 良辰. 飞机自动化装配技术及设备应用调查报告. 航空制造技术, 2011(19): 54-55.
- [2] 邓峰. MPAC 自动钻铆机. 航空制造技术, 2010(6): 26-29.
- [3] 邓峰. VPAC—碳纤维结构件制孔和安装环槽钉的自动化解决方案. 航空制造技术, 2010(14): 94-96.
- [4] 周自敏. BA96 自动钻铆机基本原理探讨及研究. 航空制造技术, 2010(22): 132-133.
- [5] 殷俊清, 王仲奇, 康永刚, 等. 仿真技术在飞机自动钻铆中的应用. 航空制造技术, 2009(24): 84-87.
- [6] 王珉, 陈文亮, 张得礼, 等. 飞机轻型自动化制孔系统及关键技术. 航空制造技术, 2012(19): 40-43.

(责编 三丰)