

飞机轻型自动化制孔系统及关键技术

Light-Weight Automatic Drilling System and Key Technology for Aircraft

南京航空航天大学机电学院 王珉 陈文亮 张得礼
上海飞机制造有限责任公司航空制造技术研究所 屠晓伟 蒋红宇



王珉

博士,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、设备成本等因素。与壁板自动化装配常用自动钻铆系统不同,自动化制孔系统更常用于部段总装和部件对接,这些位置由于开敞性问题往往只适合采用自动化制孔的方法。轻型

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、设备成本等因素。与壁板自动化装配常用自动钻铆系统不同,自动化制孔系统更常用于部段总装和部件对接,这些位置由于开敞性问题往往只适合采用自动化制孔的方法。轻型自动化制孔系统是在装配效率、系统柔性和设备成本之间折衷的一种方案,受到国内外业界的普遍重视。

自动化制孔系统是在装配效率、系统柔性和设备成本之间折衷的一种方案,受到国内外业界的普遍重视。

轻型自动化制孔系统

当前飞机轻型自动化装配系统主要由3种典型形式:基于工业机器人臂的自动化制孔系统、基于柔性轨道的自动化制孔系统、自主移动式自动化制孔系统。

1 基于工业机器人臂的自动化制孔系统

基于工业机器人臂自动制孔系统(以下简称工业机器人臂制孔系统)是利用市场上通用的工业机器人臂为设备本体,配合相应的末端执行器组成的自动化装配系统,是当前最多的一种轻型自动化装配系统解决方案。

工业机器人臂制孔系统主要供应商有宝捷公司、EI公司等。国外已经形成了比较成熟的产品,被波音、空客等飞机制造商大量应用。

近年来,国内各主机厂和高校合作也大量开展工业机器人臂制孔系统的研究,成都飞机工业(集团)有限责任公司、沈阳飞机工业(集团)有限公司、南京航空航天大学、北京航空航天大学、浙江大学等都对这种轻型自动化制孔系统投入巨大人力物力,开发出多种系统^[1-7]。

优势:(1)采用通用机器人臂,开发和部署较快,成本相对低;(2)柔性较好,适应各种工况。

弱点:(1)刚性较差,须特殊精度补偿机制才能较好地用于飞机装配;

(2)工作范围相对较小,且一般需要特定第6轴轨道系统。

应用建议:适用于部件如机翼、尾翼等翼面类部件装配,以及机身部段壁板拼接、框角片连接等装配。

2 基于柔性轨道的自动化制孔系统

基于柔性轨道的自动制孔系统(以下简称柔性轨道制孔系统)是由波音公司提出的轻型自动化装配系统解决方案^[8],在产品表面吸附的柔性轨道上有小车沿轨道滑动到相应位置,进行自动化制孔,如图1所示。



图1 柔性轨道自动制孔系统

EI、AIT、宝捷公司都有成熟的系统,大量应用于波音、空客等飞机的装配制孔。国内北京航空制造工程研究所较早开展该系统的研究,也已经研发出原型系统^[9]。北京航空航天大学、上海交通大学、沈阳航空航天大学 and 南京航空航天大学等也开展了相应的研究工作^[10]。

优势:(1)工作范围较大,结构相对简单;(2)负载大,刚性较好。

弱点:(1)需专用轨道铺放工装,工作装备时间相对较长;(2)只适合在飞机表面工作,对飞机表面开敞性要求高,工装不能与轨道干涉。

应用建议:适用于大部件表面拼接和对接,如机身筒段对接、机翼表面制孔、壁板拼接等。

3 自主移动式自动化制孔系统

自主移动式自动制孔系统(以下简称自主移动制孔系统)是一种最新

的轻型自动化装配系统解决方案。自主移动制孔系统与柔性轨道制孔系统同属于轻型、柔性自动化装配系统,二者都利用真空吸盘将自身吸附在工件上制孔,这也是与一般的大型数控自动化装配系统最大的不同。但与柔轨系统相比具有一些重要的优点,比如设备安装简单,简化了安装工作及安装系统所用的工装,因此投入生产前的准备时间大大缩短,应用的灵活性也更高。自主移动式自动制孔系统符合轻型化、柔性化、模块化的发展方向。

目前所知较为成熟的自主移动制孔系统是M.Torres公司的产品,该系统被空客A350用于机身尾段环铆。

M.Torres公司的产品如图2所示,主要由行走单元、制孔单元、控制系统和软件系统组成。

其中行走单元大体上分为内外2个框架,每个框架均配备4个真空吸盘足。

出于行走过程中的安全性考虑,内外框架的足配备两套独立的真空系统,使得任何时候,都能至少有一个框架的4个吸盘足为系统提供足够的吸附力。通过由丝杠驱动的内、外两个框架的轮流移动实现系统在工件上的爬行。框架内部提供X、Y向精确运动以实现一个区域内制孔。控制系统由带操作台的可移动式电气柜(包括相应电源、气源等控制系统)和主控制单元(上位机)组成。软件系统主要是将APT文件或XML文件转化为加工程序的后置处理软件以及系统的图形化控制界面。

国内由南京航空航天大学、上海飞机制造有限责任公司和北京航空航天大学合作研制成功自主移动式自动化制孔系统^[11],如图3所示。

该系统也是由自主移动机构、末端执行器(制孔单元)、运动控制系统和集成控制软件组成。其中自主移动机构采用双框八腿真空吸附式的结构,配合特殊的运动补偿机构,实现X、Y、Z和A、B五坐标运动。

优势:(1)工作范围较大,结构刚性好,重量轻;(2)工作准备时间短,实施周期短;(3)柔性好;(4)采购成本和运行成本低,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。

弱点:(1)开发难度大;(2)只适合在飞机表面工作。

应用建议:适用于大部件表面拼接和对接,如机身筒段对接、机翼表面制孔、壁板拼接等。

轻型自动化制孔系统的关键技术

轻型飞机自动化装配系统目前在国内已经得到业界的普遍重视,多个主机厂和相关企事业单位合作进行开发。根据笔者研制所遇到的技术难点所知,关键技术主要有以下方面。

1 高负载高刚性运动机构结构设计技术

自主移动式自动化制孔系统对此技术要求最高,柔性轨道制孔系统次之,工业机器人制孔系统由于采用成熟通用的工业机器人臂,一般不太关注本体设计而更关注精度补偿技术。

以自主移动式自动化制孔系统为例,实际上其运动需求并不复杂,仅仅



图2 M.Torres公司自主移动式自动制孔系统

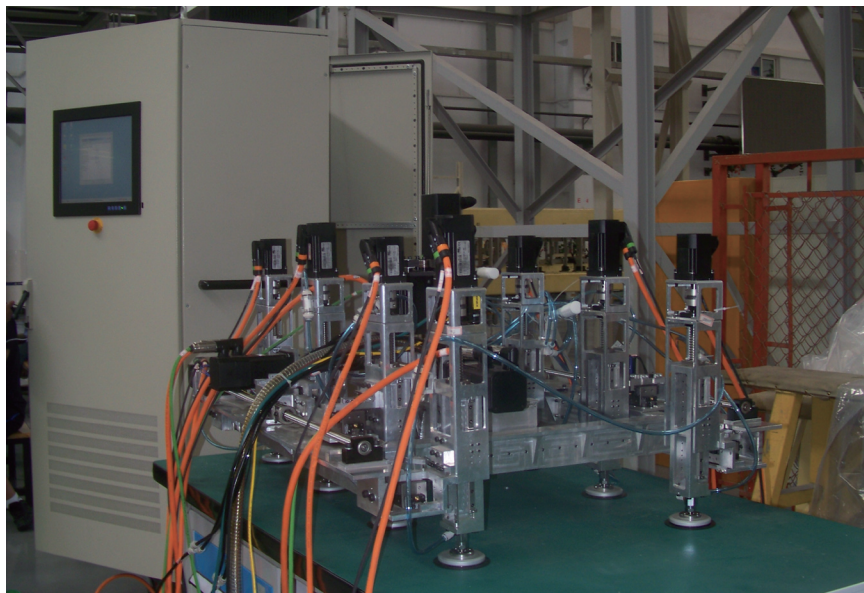


图3 由南航等合作研发的自主移动制孔系统

从运动角度来说,比较常见的思路是机器人领域中常用的仿生式机器人结构,然而其刚性难以保证,负载能力较小,且调整复杂,不易保证精度。

与一般的自主移动机构比,飞机装配自主移动机构的特殊性主要表现在:

(1)需要在曲面上甚至是倒吊或垂直的位置上工作,这决定了无法采用常见的轮式结构。

(2)需沿法向制孔,机构将承受120kg左右的压紧力和制孔力,且不能偏离法向。这决定了常见的仿生式结构难以胜任这种高承载和高刚性的工作环境

(3)由于工作空间和飞机表面承载的限制,自主移动机构必须重量轻,否则吸盘难以提供足够的吸附力。

因此针对飞机装配的需求,设计合理的高负载高刚性运动机构结构成为一项关键技术。

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)进行严谨的空间自由度分析,设计合理的运动机构,南京航空航天大学在研制过程中就曾采用虚位移法、反螺旋理论等多种方法进行运动可行性分析^[1];(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

自主移动式自动化制孔系统对此技术要求最高,柔性轨道制孔系统次之,工业机器臂制孔系统由于串联机构对同步控制的要求最低,而且工业机器臂一般有成熟的控制系统,对集成商来说不太关注同步控制技术。

以自主移动式自动化制孔系统为例,运动控制轴多达13~14个。实际上难度最大的是,八条腿需要同步控制以进行法向调姿。而多轴同步控制系统是目前国内薄弱环节,受到元器件供应商性能、国外限制、价格、技术支持等多方面约束。

该项关键技术的解决,需要通过两条途径:(1)短期内通过采用开放性较好的成熟国外运动控制系统,实现功能精度为主要目标,图4是南京航空航天大学 and 上飞公司联合研制的自主移动制孔系统所采用的控制系统,该系统采用基于PC的软数控系统的方案,具有结构紧凑、连线简单、可靠性高、易于维护和升级、响应快、计算精度高的特点;(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 精密制孔末端执行器设计技术

3种形式自动制孔系统都必须用到末端执行器,相对而言,工业机械臂由于刚性相对较弱,自主移动式制孔系统对整体重量要求更高,所以对末端执行器结构重要优化的需求更大。

仅仅从制孔的功能而言,轻型自动化制孔系统的末端执行器研制似乎并不困难,然而考虑飞机装配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)飞机装配的铰窝精度要求很高。这种精度要求体现在从蒙皮表面开始,铰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定,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、传感器标定等多种因素。(5)不同设备本体需要配备的末端执行器有不同要求。用于工业机器臂的末端执行器Z轴进给是保证制孔的重要功能,而自主移动机构如设计合理所用末端执行器Z轴进给可通过腿部进给实现,末端执行器可以不需要Z轴进给。另外压力脚设计也有差异。

4 精度补偿和离线编程技术

飞机产品具有零件多、尺寸大、刚性差、曲面复杂、精度要求高等特点,且批量相对小。因此自动化装配对设备精度要求高,因此精度补偿和离线编程技术成为飞机自动化装配有效实施所需要的关键技术。其中工业机器臂制孔系统由于其串联结构刚性差,对精度补偿技术需求最为明显,自主移动制孔系统次之。

精度补偿技术目前主要有两种方

案:一种通过网络补偿、压力补偿、温度补偿等方法,采用离线精度补偿算法,预置在控制算法中,从而明显提高自动化制孔系统的精度。该种方案具有响应速度快、控制系统简单等特点,得到德国宝捷自动化公司等国外集成商,以及南京航空航天大学 and 成都飞机公司等国内研究应用单位重点研究和采用。另一种时通过激光跟踪仪等实时检测设备,在线监测刀具点的位置,闭环控制提高精度。这种方案具有通用性好,部署时间短,标定简单等特点,得到 KUKA 等国外集成商,以及浙江大学^[12]等国内研究应用单位重点研究和采用。

孔系统都面临着与传统大型自动化钻铆设备双向压紧不同的、单向压紧的应用环境。这使单向压紧的无毛刺制孔工艺成为轻型自动化装配系统能够发挥效率所必须解决的问题,也是其工程应用所要解决的技术难点。与前面几项关键技术不同,单向压紧无毛刺制孔技术是属于系统应用所面临的关键技术。

单向压紧无毛刺制孔需解决的最重要问题是,合理施加单向压紧力,保证零件贴合面无毛刺的前提下,尽量减少产品表面的变形和制孔设备的负载。参照国外业界的经验,有限元分析是解决单向压紧自动化制孔工艺

发展趋势,而轻型自动化装配系统由于其良好的综合性能得到更广泛的重视,3种形式的轻型自动化制孔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,对于工作范围较小的部件装配,工业机器人优势较大。对工作量较小、柔性要求高、飞机大范围表面制孔(特别是机身环铆)且表面有工装等易干涉的场合,自主移动式制孔系统优势较大。在工作效率要求高、飞机表面开敞性较好、批量较高的情况下,柔性轨道制孔系统有一定优势。

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,这就需要通过关键技术的研究,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。

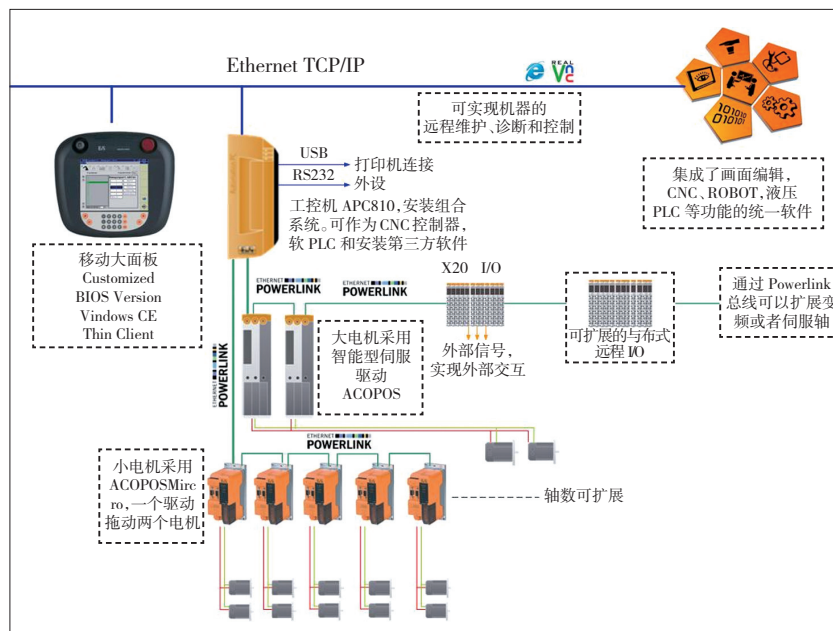


图4 自主移动式制孔系统的控制系统

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、在线监测模块等部分。

5 单向压紧无毛刺制孔技术

无论是哪种形式的轻型自动化制

的重要手段。针对具体的产品结构,抽象出制孔部位的有限元模型,深入地分析压紧力对制孔部位贴合面的影响,有助于大量减少试验数量,甚至对常用的结构最终可以完全取代试验。目前南京航空航天大学与上海飞机制造有限公司合作开展了单向压紧无毛刺制孔技术的研究,取得了阶段性的成果^[13-14]。

结束语

自动化装配是飞机装配技术的

参考文献

- [1] 林琳,夏雨丰.民用飞机装配自动制孔设备探讨.航空制造技术,2011(22):86-89.
- [2] 邓锋.采用标准关节机器人系统对飞机货舱门结构的自动钻铆.航空制造技术,2010(19):32-35.
- [3] 邓锋.VPAC——碳纤维结构件制孔和安装槽钉的自动化解决方案.航空制造技术,2010(14):94-96.
- [4] 周万勇,邹方,薛贵军,等.飞机翼面类部件柔性装配五坐标自动制孔设备的研制.航空制造技术,2010(2):44-46.
- [5] 张平,李少波,杨启兵.壁板类部件/组件/零件数字化柔性装配,智能制孔系统.航空制造技术,2010(23):73-78.
- [6] 杜宝瑞,冯子明,姚艳彬,等.用于飞机部件自动制孔的机器人制孔系统.航空制造技术,2010(2):47-50.
- [7] 王建,刘浩,田威.面向飞机自动化装配的制孔末端执行器的设计.南京航空航天大学学报,2012,44(S):19-22.

本文共有参考文献14篇,因篇幅所限未能一一列出,如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)