

飞机装配自动钻铆技术研究现状与展望

杨亚鹏^{1,2},赵安安^{1,2},刘宇驰¹,毕运波¹

(1. 浙江大学 机械工程学院,浙江 杭州 310027; 2. 西安飞机工业(集团)有限责任公司,陕西 西安 710089)

摘要:飞机装配中壁板铆接质量直接影响结构强度和疲劳寿命,而自动钻铆技术与装备是保障飞机壁板装配质量和连接可靠性的最主要技术途径。从自动化钻铆系统的组成出发,介绍自动化钻铆技术的最新进展,对比分析国内外代表性自动钻铆设备的现状,详细论述自动化钻铆的关键技术,为国内自动钻铆技术的发展提供参考,最后总结了自动化钻铆技术的发展趋势。

关键词:飞机装配;自动钻铆;多功能末端执行器;自动压铆控制;数字化;柔性化

中图分类号:V262.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)05-0001-05

Review and Prospect of Automatic Drilling and Riveting Technology for Aircraft Assembly

YANG Yapeng^{1,2}, ZHAO Anan^{1,2}, LIU Yuchi¹, BI Yunbo¹

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Xi'an Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Xi'an 710089, China)

Abstract: In aircraft manufacturing, the assembly connection quality directly affects the anti-fatigue performance of aircraft structure, and automatic drilling and riveting technology is the most important technical way to ensure the assembly quality and connection reliability of aircraft. Starting from the composition of automatic drilling and riveting system, this paper introduces the latest progress in automatic drilling and riveting technology, compares and analyzes the present status of representative automatic drilling and riveting equipment home and abroad, elaborates the key technical points of automatic drilling and riveting, and summarizes the development trend of automatic drilling and riveting technology.

Keywords: aircraft assembly; automatic riveting; multi-functional terminals; riveting control; digitization; flexibility

0 引言

飞机装配铆接具有强度高、质量低、连接稳定可靠、质量容易检测的特点,迄今为止仍然是飞机零部件最主要的连接方式。相关数据表明,制孔和铆接约占飞机装配工作总量的30%。制孔、铆接装配质量直接影响飞机的结构强度及疲劳寿命^[1]。相关数据统计表明,飞机疲劳事故中70%源于结构连接部位,其中出现疲劳裂纹概率占80%以上。因此保证壁板叠层材料之间可靠连接的质量是飞机装配领域关注的重点和难点。

传统手工钻、铆工艺方法已不能满足现代飞机长寿命、高可靠性的需求,自动化和高可靠性钻铆系统研究应用需求尤为迫切。自动钻铆主要方式有机器人铆接、电磁铆接和数控自动钻铆等,机器人铆接设备刚度较差,无法提供较大铆接力^[2]。电磁铆接过程属于动态加载,研究尚不成熟,未得到广泛应用。自动钻铆机由于自身刚度特性优势,可以提高飞机壁板装配制孔精确性和铆接可靠性。目前国外现役军用、民用飞机的自动钻铆率已分别达到20%和75%^[3],数据表明自动钻铆机相对于传统人工钻铆可使飞机钻铆效率提高5倍,钻铆精度提高10倍,同时钻铆成本降低20%~30%^[4]。

本文将从自动化钻铆系统组成出发,对比国内外具有代

表性的自动钻铆系统的结构形式、驱动类型和应用状况,论述自动化钻铆关键技术要点,最后总结其未来的发展趋势。

1 自动化钻铆系统

自动化钻铆系统主要由钻铆机床、末端执行器、数字化定位系统、数字化检测系统、物流传送系统、离线编程与仿真系统、集成控制系统等组成,如图1所示。自动化钻铆设备按结构形式可划分为C型钻铆机、D型钻铆机、龙门卧式、立式钻铆机。C型钻铆机发展较早,结构形式简单,需依靠大型塔架和旋转工作框进行作业,而且C型结构的喉深限制了飞机壁板的尺寸。龙门钻铆机使得飞机壁板固定不动,鉴于其定位系统运动高效的优点,龙门钻铆机已逐步成为主流的自动钻铆设备之一。

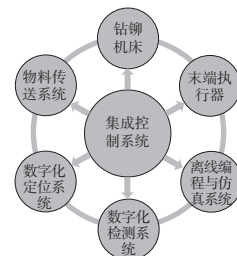


图1 自动化钻铆系统组成

第一作者简介:杨亚鹏(1988—),男,陕西宝鸡人,高级工程师,硕士,研究方向为复合材料结构高精度装配协调、大型飞机数字化装配、高精度测量等技术,共发表论文6篇,授权发明专利3项,主编集团标准1项,547240903@qq.com。

2 国外自动钻铆设备发展

国外自动钻铆设备的发展已有几十年历史,其中主要设备如表 1 所示。1948 年美国通用电气机械公司(GEMCOR)研发出自动化钻铆紧固工艺并应用于飞机壁板铆接,显著提升了飞机壁板装配的精度和效率^[5]。目前,美国 GEMCOR 生产的自动钻铆机主要采用压铆方式和 C 型结构,并配备单独的数控托架,飞机壁板通过数控

托架实现空间姿态调整,配合铆接头进行制孔和铆接。该形式的钻铆机结构简单、铆接稳定可靠,但是 C 型结构存在喉深的限制^[6],其代表性的自动钻铆机如图 2 所示,被广泛应用于波音 787、空客 A380 等机型机身和机翼的自动钻铆装配^[7]。此外 GEMCOR 公司还开发了用于特殊材料零部件装配专用的自动钻铆系统如发动机短舱钻铆系统^[8],能够实现对发动机短舱异性材料的铆接。

表 1 国外自动钻铆设备主要供应商

公司/国别	产品型号	结构形式	驱动形式	铆接方式	适用范围	应用状况
GEMCOR/ 美国	G12、G14、G86、 G2000、WRS 等系列	C 型结构	液压力 电力	压铆	机身壁板 机翼壁板 垂/平尾	空客 A380、波音 787 等的机翼、机身装配与发动机短舱装配
EI/美国	E3000—E7000 等系列	D 型结构 龙门卧式 C 型结构	电磁力 电力	电磁铆 压铆	机身壁板 机翼壁板 机翼翼梁	波音 777/787/737NG/C17、空客 A320/A340/A380、商飞 ARJ21 等翼梁、机身和机翼装配
BROETJE/ 德国	ISAC、CPAC、 IPAC、MPAC 等系列	D 型结构 龙门卧式 龙门立式	液压力 电力	压铆	机身壁板 垂/平尾	波音 777/787、商飞 C919 的机身、机翼壁板装配及空客 A319/321 总装线
RECOULES/ 法国	PRECA300、 PRECA600 等系列	C 型结构	液压力	压铆	平面骨架 构件	空客 A300 系列的机翼、机身装配,未进入国际市场,现已停产

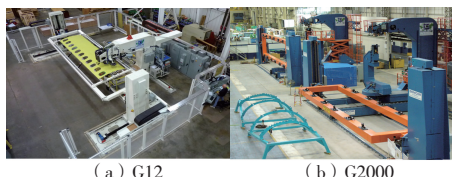


图 2 美国 GEMCOR 公司的部分自动钻铆机

1986 年美国 EI (Electroimpact) 公司以低压电磁技术为核心研制了一系列以龙门卧式结构为主自动钻铆设备^[9],其工作特点为飞机壁板固定不动,具有后坐力小、铆接干涉量均匀的特点,因此适合复合材料壁板的铆接且可以铆接无头铆钉,代表性型号如图 3 所示。空客 A380、波音 787、空客 A320、C130J 运输机等机型均采用了 EI 公司的自动钻铆机^[10]。其中 E5000 用于波音 787 机身装配,采用内外分离式的布局并增加偏心式的铆头设计,解决了传统框架式结构无法进入封闭空间的问题。E6000 是专为中国西飞公司 ARJ 机翼铆接装配开发的龙门式自动钻铆机,相对 E5000 系列质量减轻了 70% 以上以获得高速运动和快速加工性能,更适合尺寸较小的 ARJ 壁板^[11]。E7000 是为满足土耳其航空对大曲率壁板的快速安装而研发,其无头铆钉自动钻铆效率达到 20 个/min^[12],该钻铆机可实现高精度铆接,并优化了插钉防倾斜机制、送钉卡钉处理、铆头防撞和换刀等功能。

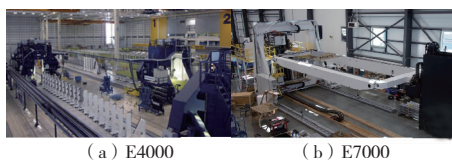


图 3 美国 EI 公司的自动钻铆机

德国以宝捷公司(BRÖTJE Automation)为代表研制出包括 C 型结构、D 型结构、龙门卧式结构等布局形式的自动钻铆设备,如图 4 所示。其代表性产品有 CPAC-C 型架式、

IPAC 集成式、MPAC 等系列壁板装配单元,可实现飞机筒段的 360°钻铆、机翼壁板的自动钻铆,被广泛应用于波音、空客的飞机数字化装配生产线^[13]。其中 MPAC 自动钻铆机采用龙门立式结构和压铆方式,应用在国产大飞机 C919 机身壁板中,设备工作时飞机壁板固定不动,钻铆效率最高可达 17 个/min。此外 BRÖTJE 公司同样开发了 RACe 机器人自动钻铆系统,丰富和拓展了自动钻铆技术的应用范围。

欧洲其他国家也相继引入美国技术并进行创新,法国在引进美国多种型号的自动钻铆系统后研制出 PRECA300 和 PRECA600 等型号自动钻铆机,其性能与美国 G300 型相当。意大利 B&C 公司、西班牙 MTorres 公司也开发出了自己的自动钻铆机或机器人自动钻铆系统,并占有少量的飞机自动钻铆系统市场^[14]。此外,伴随着工业机器人的快速发展,GEMCOR 公司研发的 G1000 机器人钻铆系统可以实现高精度、无毛刺、视觉同步钻铆^[8],法国 ALEMA 公司、诺丁汉大学等研发的双机器人钻铆系统能够实现双侧机器人协同配合工作^[15]。双机器人联合钻铆技术一直是国际研究的热点,因机器人自身刚度较弱,无法承受过大的铆接力,且空间绝对定位精度较低,导致双机器人铆接系统始终没有被工业界广泛接受。



图 4 德国 BROETJE 公司的部分自动钻铆机

3 国内自动钻铆设备发展

我国于 20 世纪 70 年代初期即开始研发自动钻铆系统,但受限于国内数控技术和工业水平,自研的自动钻铆机难以具备稳定高效的铆接性能,存在诸多缺陷未能在航空制造领域推广应用。20 世纪 80 年代后期随着欧美航

空强国对我国技术封锁的放松,国内各大航空制造单位开始引进国外自动钻铆设备,例如西飞公司分别于1985年及1992年引进了二手GEMCOR G400及G900型自动钻铆机,而后又于1993年直接从GEMCOR公司引进了较为先进的G4026SXX-120型自动钻铆机。虽然引进的钻铆机与当时先进型号的性能存在差距,但我国自动钻铆技术得以迈入发展正轨,中航工业集团、各科研院所和机床厂合作开展对自动钻铆系统的相关研究工作^[16]。

随着新支线客机ARJ21和国产C919的研制和生产,国内自动钻铆技术迎来新的发展机遇,高校科研院所通过校企合作或者自主研发的方式对自动钻铆技术进行了大量研究。南航以UMAC控制器为基础研制了龙门式自动钻铆系统并开发相应控制系统,上海拓璞数控与上海交通大学联合开发了中央翼自动钻铆系统,实现了中央翼上壁板的无头铆钉安装^[17],如图5(a)所示。浙江大学原创了一种卧式双机联合自动钻铆机,如图5(b)所示,研制了集视觉标定、法向修正、自动制孔、镗窝、测量、插钉、涂胶等功于一体的钻铆机外侧铆头和集自动顶紧、数控压铆、墩头测量等功于一体的钻铆机内侧铆头^[18]。该自动钻铆机已应用于歼-15、MA700等型号飞机生产线中。

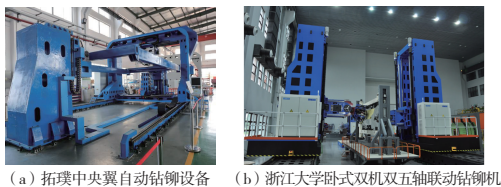


图5 国产部分自动钻铆机

综合来看,国内外自动钻铆机的结构形式主要包括C型自动钻铆机、D型自动钻铆机和龙门式自动钻铆机三大类,龙门式钻铆机避免了C型和D型自动钻铆机所采用的大型塔架和旋转工作框结构,提高了整个定位系统的效率,但龙门系统的控制难度大、成本相对较高。而机器人自动钻铆设备更加灵活、成本更低,一般适用于敞开性差、钻铆位置不易达到的壁板自动钻铆,但自身刚度和变形问题限制了其发展。我国对自动钻铆技术的研究仍不够系统和完善,自行研制的自动钻铆系统在生产应用中处于起步阶段,随着我国新一代飞机陆续投入研制和生产,国内自动钻铆技术的发展任重而道远。

4 自动钻铆关键技术

自动钻铆过程是基于确定自动钻铆系统与待加工壁板之间相对位姿,按照既定程序完成制孔、送钉、插钉、涂胶和铆接等过程。自动钻铆系统配置专用末端执行器的数控机床或机器人,涉及结构布局优化、多功能末端执行器设计、数字化辅助测量、自动压铆控制、离线编程与仿真等多种关键技术。

4.1 自动钻铆系统结构布局优化

当前国内外自动钻铆系统不同结构布局各有特点,C型和D型结构的自动钻铆系统通过数控托架调平钻铆区域姿态角度后进行制孔和铆接,该型结构由于数控托架跨

度大而需要足够的刚度来保证钻铆质量,且在工件调平过程中易引起颤振^[19]。龙门结构主要由龙门式自动钻铆系统通过多轴联动钻铆机的调整将钻铆末端执行器定位到待加工点进行自动钻铆,因此其效率比C型和D型结构自动钻铆系统更高,但龙门式自动钻铆系统并没有摆脱固定工装的限制,壁板工件仍需经历吊装上下架过程才能开始装配,其结构却更加复杂。

可见现有三大类结构布局的自动钻铆系统均需要配备数控托架或专用柔性工装,产品需要吊装上下架,限制了飞机壁板的尺寸,无法发挥自动钻铆系统的最大生产效率。针对上述问题,浙江大学采用内/外侧铆头分离式对称布局结构,原创了一种卧式双机双五轴联动钻铆机^[20],如图5(b)所示,提供开放的产品地面进出通道,可与AGV系统集成,实现产品自动化配送,推动了飞机壁板自动钻铆装配由孤岛式装配向流水线式装配的变革。

4.2 多功能末端执行器设计

多功能末端执行器设计是自动钻铆系统工作的核心,直接决定了系统的工作效率和钻铆质量。根据自动钻铆系统的结构形式不同,每套系统配置上/下或内/外两个工作头,分别集成各种功能模块,其中上/外工作头主要用于完成夹紧、制孔、插钉、孔径测量、涂胶、顶钉、铣平等功能,下/内工作头主要用于完成夹紧、铆接等功能,两侧工作头相互协同作业完成整个钻铆过程。

多功能末端执行器设计须采用模块化设计理念,并进行力学性能研究和合理的结构设计优化。MERLUZZI J等^[21]研制用于C型或D型自动钻铆系统的自动换刀具/插钉头系统,优化了空间配置,使得该系统能在更小的刀库中固定和操作12个刀具或插钉头,降低了刀具重新校准所需的频率。美国GEMCOR公司设计的自动钻铆系统采用高速线性电动机切换头实现紧固件19个/min的转换,保证了自动钻铆系统的柔性化。浙江大学研制了多功能一体化集成外侧铆头和内侧铆头末端执行器^[22],如图6所示,采用多传感器信息融合,实现自动钻铆过程质量的在线监控,且设备的自动钻铆故障率低于1/1000,自动钻铆速率最高达到15个/min的国际先进水平。

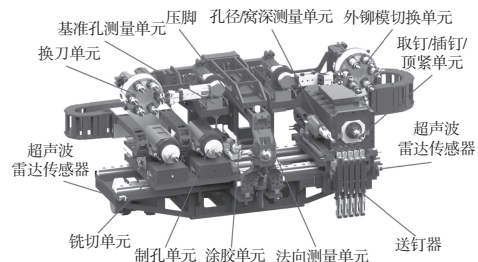


图6 多功能一体化末端执行器

4.3 数字化辅助测量技术

基于产品数据的多场合数字量协调控制是自动钻铆技术的基本要求,以数字量协调方法为基础特征的数字化辅助测量技术为实现高质量、高效率的自动化钻铆提供了重要技术支撑。自动钻铆系统中普遍采用的数字化辅助

测量技术主要有激光跟踪仪测量技术和视觉测量技术。

激光跟踪仪是以角度编码器、续光再续和激光技术为基础,可以实时跟踪测量空间运动目标的非接触式精密球坐标测量系统。瑞士 Leica 公司的激光跟踪仪在航空装配制造领域得到了广泛应用。浙江大学利用激光跟踪仪测量卧式双机联合钻铆系统两侧主机的实际相对位姿误差,构建空间相对位姿误差网格,实现了钻铆系统相对位姿误差补偿。

视觉测量技术是一种将视觉技术与坐标测量相结合的新型测量方法,被广泛应用于基准孔测量、底座标定、自动运输车(AGV)和移动工装定位等。FROMMKNECHT J^[23]提出了一种用于机器人制孔系统的多传感器测量系统,可获得 0.334 mm 的平均位置偏差和 0.29° 的平均垂直偏差。西北工业大学设计了一种用于机器人制孔的视觉测量系统,可实现基准孔的位置检测与校正^[24]。浙江大学采用了一种基于高精度工业相机的视觉测量系统,如图 7 所示,可实现对环形轨制孔系统的底座位姿标定^[25]。

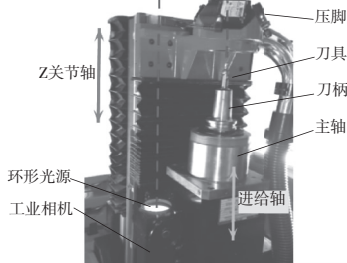


图 7 基于高精度工业相机的视觉测量系统

4.4 离线编程与仿真技术

离线编程与仿真技术是指在非在线加工状态下,根据产品的数学模型提取出制孔位置和紧固件类型信息,利用计算机软件对产品的在线加工状态进行仿真和模拟,从而生成在线加工所需的设备运动控制程序,提高加工安全性和效率。离线编程与仿真过程主要包括 3 个部分:首先建立加工系统三维模型并对产品信息进行提取和分类;其次综合考虑加工设备安全、稳定、准确运动的约束条件,对加工设备的运动路径优化和姿态规划,生成针对特定待加工产品和加工设备相对应的运动控制程序;最后对加工设备进行运动仿真和干涉检查,检验加工程序的合理性。

针对飞机壁板的铆接装配,可利用离线编程和仿真技

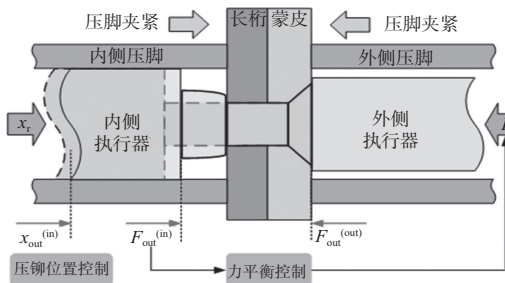


图 9 自动钻铆机伺服机构压铆示意图

5 结语

1) 经过对国内外自动钻铆技术的调研发现,以美国

术提前规划好自动钻铆系统的加工路径,提高加工安全性并减少准备工作时间。美国 GEMCOR 公司为用于组装 C-17 运输机身壁板的钻铆机器人开发了专用的离线编程和仿真程序,提升了机器人的工作效率^[26]。LIU L S 等^[27]通过 CATIA 的 DMU 模块实现了自动钻铆机运动仿真的需求,验证表明其能够有效识别出运动路径上的干涉部位并通过施加途经点的形式进行避让。ZHU W D 等^[28]在基于 CATIA 和 DELMIA 平台开发了一套用于飞机活动翼面自动钻孔的离线编程与仿真软件,其原理如图 8 所示。该软件可以在 CATIA 环境中生成制孔程序,并在 DELMIA 环境中进行基于 KUKA 机器人的活动翼面自动化制孔路径规划和运动仿真。

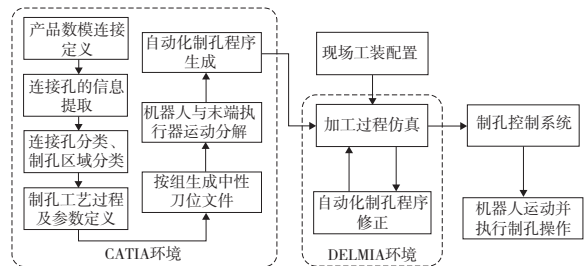
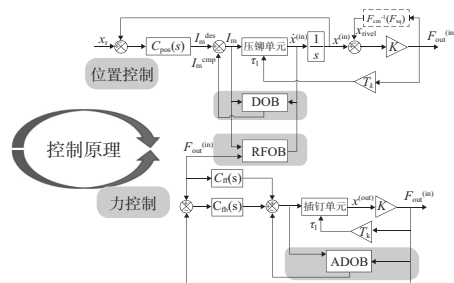


图 8 机器人自动制孔离线编程与仿真系统

4.5 自动压铆控制

自动钻铆机最重要的性能是满足铆接过程制孔精度和合适的铆接力、铆钉镦头尺寸等质量要求。目前自动钻铆机主流铆接方式为压铆,压铆力是影响铆接质量的主要工艺参数之一,高质量铆接依靠精确的压铆力控制,自动钻铆机力控制性能的高低是力控制模式压铆能否有效实施的关键。

自动钻铆机双机分离式布局的结构刚度相比传统 C 型、D 型或龙门型布局较弱,双机需要协同配合实现压铆力和压铆位置快速协同控制,以抑制钻铆机变形误差导致的系统扰动,采用主从同步控制伺服系统可以提升自动钻铆机的双驱同步性能。针对压铆过程中压铆力平衡难控制和新型钻铆机末端位置相容性差难题,ZHAO D 等^[29]建立了内侧铆头气动压脚的动力学模型,如图 9 所示,通过电-气动复合系统的非线性最优控制,实现内侧铆头压脚的快、准、稳定位控制,使得压脚定位时间小于 0.4 s、冲击力小于 100 N,控制钉头齐平度不大于 0.02 mm,镦头高度误差 ±0.03 mm,保障了飞机壁板压铆过程稳定、质量可控。



GEMCOR 公司和 EI 公司为代表的航空制造企业已经针对不同产品结构形成了完备的自动钻铆设备系统产业链;我国对自动钻铆技术的研制起步较晚,浙大、南航、上海拓

璞数控等单位突破了若干关键技术,完成了各具特色的自动钻铆设备,已成功应用于多项国家重点型号工程,大幅提高了我国飞机壁板装配的质量和效率。

2) 总结自动钻铆技术中的五大共性关键技术,包括自动钻铆系统结构布局优化、多功能末端执行器设计、数字化辅助测量技术、离线编程与仿真技术、自动压铆控制。自动钻铆技术作为飞机数字化装配技术中的重要组成部分,高度依赖 CAD/CAM、计算机信息和网络技术,尤其是对于龙门式钻铆系统和双机器人钻铆系统,其技术还涉及定位方法和基准选择、零部件质量及变形控制、工装敞开性和柔性要求等多项关键问题,需要设计、制造和装配工艺融合协调发展。

3) 未来飞机装配自动钻铆技术必将向着更加模块化、柔性化、智能化的方向发展,应结合 5G、人工智能、大数据、云计算等新技术,深入开展钻铆设备智能控制、物料智能配送、生产智能管控等方面研究工作,打造高度智能化、柔性化的飞机壁板智能装配工厂。

参考文献:

- [1] 郭佳,郑伟.装配仿真技术在飞机研制阶段的应用[J]. 航空制造技术,2014,57(23):74-77.
- [2] BORDES A, DANILOV D L, DESPREZ P, et al. A holistic contribution to fast innovation in electric vehicles: an overview of the DEMOBASE research project[J]. eTransportation, 2022, 11: 100144.
- [3] LUM N, LUO Q. E7000 ARJ—manual flexible tooling for horizontal riveting system [J]. SAE International Journal of Aerospace, 2014, 7(2): 241-245.
- [4] 喻龙,章易镰,王宇晗,等.飞机自动钻铆技术研究现状及其关键技术[J]. 航空制造技术,2017,60(9):16-25.
- [5] AMAN F, CHERAGHI S H, KRISHNAN K K, et al. Study of the impact of riveting sequence, rivet pitch, and gap between sheets on the quality of riveted lap joints using finite element method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(1): 545-562.
- [6] ZIEVE P, RUDBERG T, VOGELI P, et al. A two tower riveting machine with a true z axis [C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2004.
- [7] WEBB P, EASTWOOD S, JAYWEERA N, et al. An automated fuselage panel assembly and riveting cell - validation and testing [C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2006.
- [8] HUAN H L, CHENG L, KE Y L. Dynamic modeling and sensitivity analysis of dual-robot pneumatic riveting system for fuselage panel assembly [J]. Industrial Robot, 2016, 43(2): 221-230.
- [9] JAYAWEERA N, WEBB P. Adaptive robotic assembly of compliant aero-structure components [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, 23(2): 180-194.
- [10] ZHOU X D, JIANG Z X, SONG B, et al. A compensation method for the geometric errors of five-axis machine tools based on the topology relation between axes [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(5): 1993-2007.
- [11] DEVLIEG R, FEIKERT E. One-up assembly with robots [C]// Aerospace Manufacturing & Automated Fastening Conference & Exhibition. [S.l.]: s.n., 2008.
- [12] STANSBURY E C, BIGONEY B, ALLEN R. E7000 high-speed CNC fuselage riveting cell [J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing, 2013, 7(1): 37-44.
- [13] ERTURK A, OZGUVEN H N, BUDAK E. Analytical modeling of spindle-tool dynamics on machine tools using Timoshenko beam model and receptance coupling for the prediction of tool point FRF [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(15): 1901-1912.
- [14] SALGADO M A, LÓPEZ DE LACALLE L N, LAMIKIZ A, et al. Evaluation of the stiffness chain on the deflection of end-Mills under cutting forces [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(6): 727-739.
- [15] 陈文亮,姜丽萍,王珉,等.大型客机铝锂合金壁板自动钻铆技术[J]. 航空制造技术,2015(4):47-50.
- [16] 陈修强,田卫军,薛红前.飞机数字化装配自动钻铆技术及其发展[J]. 航空制造技术,2016(5):52-56.
- [17] HUANG D T, LEE J. On obtaining machine tool stiffness by CAE techniques [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(8): 1149-1163.
- [18] 赵丹.卧式双机联合自动钻铆系统空间定位精度保障技术研究[D].杭州:浙江大学,2018.
- [19] JIANG J X, DONG C, BIAN C, et al. Investigation on general stiffness of automatic horizontal dual-machine cooperative drilling and riveting system [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(6): 1110-1118.
- [20] WANG Q, HOU R L, LI J X, et al. Analytical and experimental study on deformation of thin-walled panel with non-ideal boundary conditions [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 149: 298-310.
- [21] MERLUZZI J, BAHR I. Automatic tool change system for stringer side rivet and bolt anvils on a D-frame or C-frame fuselage fastening machine [C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2017.
- [22] BI Y B, XU C, FAN X T, et al. Method of countersink perpendicularity detection using vision measurement [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(2): 312-318.
- [23] FROMMKNECHT J. Mitsubishi heavy industries and PMT italia nehmen bei hamburger spremerg neue dreilagige testliniermaschine in betrieb [J]. Wochenblatt fuer Papierfabrikation, 2005, 133(13): 804-806.
- [24] 费军.自动钻铆技术发展现状与应用分析[J]. 航空制造技术,2005(6):42-44.
- [25] YU C J, SONG K, LI J X, et al. Optimization of linear thermal deformation compensation coefficient matrix based on Levenberg-marquardt algorithm [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(6): 1056-1064.
- [26] BAHA S, HESEBECK O. Simulation of the solid rivet installation process [J]. SAE International Journal of Aerospace, 2010, 3(1): 187-197.
- [27] LIU L S, WANG M, SUN J P, et al. Motion simulation technology for automatic drilling and riveting off-line programming systems [J]. Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering, 2019, 30(4): 461-466.
- [28] ZHU W D, QU W W, CAO L H, et al. An off-line programming system for robotic drilling in aerospace manufacturing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(9): 2535-2545.
- [29] ZHAO D, BI Y B, KE Y L. An efficient error compensation method for coordinated CNC five-axis machine tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 123: 105-115.

收稿日期:2023-02-15