

# 飞机柔性装配技术研究现状与发展趋势\*

张永亮<sup>①②</sup>, 张辉<sup>②</sup>, 李智<sup>①</sup>, 汪海晋<sup>①</sup>, 毕运波<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>浙江大学机械工程学院, 浙江 杭州 310030;

<sup>②</sup>航空工业沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110034)

**摘要:** 飞机柔性装配技术因其较高的装配效率、精度和灵活性, 已成为航空制造业数字化转型的关键组成部分。文章首先从国内外航空企业、科研机构的角度, 重点从数字化测量、柔性对接装配及自动化钻铆3个方面, 评述了飞机柔性装配技术的研究与应用现状。其次, 总结了飞机柔性装配的三大关键技术, 即大空间高精度测量、柔性工装调姿定位与自动钻铆离线编程, 并深入探讨了相关理论技术研究现状。最后, 结合人工智能与大数据、数字孪生、物联网等新技术, 对飞机柔性装配的发展趋势进行了展望。未来, 柔性装配技术在提升飞机装配质量和效率方面将发挥更大的作用。

**关键词:** 飞机柔性装配; 数字化测量; 柔性对接装配; 自动化钻铆; 柔性工装

**中图分类号:** V262.4 **文献标识码:** A

**DOI:** [10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.06.009](https://doi.org/10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.06.009)



全文在线

## Research status and developing trend of aircraft flexible assembly technology

ZHANG Yongliang<sup>①②</sup>, ZHANG Hui<sup>②</sup>, LI Zhi<sup>①</sup>, WANG Haijin<sup>①</sup>, BI Yunbo<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310030, CHN;

<sup>②</sup>AVIC Shenyang Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Shenyang 110034, CHN)

**Abstract:** Aircraft flexible assembly technology, due to its high assembly efficiency, precision, and flexibility, has become an essential component of the digital transformation in aviation manufacturing industry. Firstly, from the perspectives of domestic and international aviation manufacturing enterprises and universities, the research and application status of aircraft flexible assembly especially on the technologies of digital measurement, flexible docking assembly, and automatic drilling and riveting are reviewed. Secondly, three key technologies of aircraft flexible assembly are summarized, which are high-precision measurement in large space, flexible tooling and pose adjustment control, and off-line programming of automatic drilling and riveting, and the relevant theories and techniques are discussed. Finally, combining artificial intelligence with big data, digital twin, internet of things and other new technologies, the developing trend of aircraft flexible assembly are prospected. In the future, flexible assembly technology will play a greater role in improving the quality and efficiency of aircraft assembly.

**Keywords:** aircraft flexible assembly; digital measurement; flexible docking assembly; automated drilling and riveting; flexible tooling

现代飞机主要包括机翼、机身、发动机、起落架等子系统, 结构复杂, 整架飞机由数百万个零部件装配而成。飞机装配作为人力密集型环节, 其劳动量占比超飞机制造总劳动量的 50%<sup>[1]</sup>。传统的飞机装配方式采用工装型架支撑或夹持零件, 使用辅助测量工具确保零件的位置尺寸符合要求。这种装

配方式仍依赖人工操作, 劳动强度大、装配效率低、装配周期长、装配质量和精度难以保证, 无法满足现代飞机高精度、高效率、高质量的装配要求。

随着计算机、自动控制、光学测量等先进技术的发展, 数字化装配技术开始应用于飞机制造领域。该技术将传统的手工装配方式转变为基于计算机辅

助的高度自动化过程,同时,综合运用数字化测量、数控自动定位和自动化连接等技术,实现了对装配过程的精确控制和高效管理<sup>[2]</sup>。这种技术能够提供装配过程的可视化、仿真和优化,减少错误,降低风险和成本,提高装配质量和效率;同时数字化装配技术的应用还可以减少人工调整,简化装配过程,从而缩短飞机部件和整机的生产周期。

航空航天制造业的进一步发展,对飞机制造的可适应性要求越来越高,柔性装配技术逐渐兴起。在满足装配过程数字化、自动化的同时,柔性装配技术更具智能化。它可以适应不同的产品变体和生产需求,提供更大的灵活性和适应性<sup>[3]</sup>。它利用柔性工装、自适应夹具以及工业机器人等先进技术,实现装配过程的自动化、灵活调整 and 智能决策。并通过信息化管理和集成控制平台,实现装配过程的全面管理和监控,提高生产线的可控性和可靠性。

飞机柔性装配对于缩短装配时间、提高装配效率、降低生产成本、提高装配过程的灵活性和可靠性,以及适应未来生产制造的需求具有重要意义。它是航空航天行业数字化转型的重要组成部分,推动了飞机制造业的自动化和智能化进程。随着人工智能大数据、数字孪生技术、物联网技术等新技术的发展和应用,飞机柔性装配技术也将进一步升级,推动航空工业向更高水平迈进。

## 1 研究与应用现状

柔性装配的内涵丰富<sup>[4]</sup>,包括面向装配的设计、数字化装配工艺与仿真、柔性装配工装和系统平台、数字化测量与检测等诸多研究方面的内容。这里侧重从装配自动化的角度出发,在数字化测量、柔性对接装配、自动钻铆与连接等3个方面对飞机柔性装配技术的国内外研究和应用现状进行评述。

### 1.1 国外研究与应用现状

#### 1.1.1 数字化测量

从20世纪开始,国外学者就开始广泛研究飞机柔性装配技术。20世纪80年代,美国麦克唐纳道格拉斯公司率先采用电子经纬仪技术,辅助MD-9010客机的总装过程。1998年,波音公司开始研究iGPS(室内GPS)。该技术利用全球定位系统的三角测量原理,采用红外激光,实现对大尺寸构件的高精度定位和装配。波音公司在波音747、F/A-18、波音777等飞机的装配对接中,都应用了iGPS技术<sup>[5]</sup>。在图1所示的最新的波音787-9客机装配

中,波音公司也采用了室内GPS技术,实现了波音787-9的精准对接装配<sup>[6]</sup>。



图1 波音787-9客机机身对接装配

Fig. 1 Boeing 787-9 aircraft fuselage docking assembly

2000年,欧洲空客公司采用4台激光跟踪仪构建激光测量网络,并结合自动化调姿设备和控制软件,完成了A380客机的装配<sup>[7]</sup>。2004年,美国洛克希德马丁公司利用iGPS检测技术来辅助装配了联合攻击战斗机(joint strike fighter, JSF)。iGPS、激光跟踪仪等先进设备应用于波音、空客等客机和洛马战斗机的装配测量,为柔性对接装配提供了数字化支撑。

#### 1.1.2 柔性对接装配

随着装配工装设备自动化水平提升,飞机对接装配从手工装配发展为数字化对接装配<sup>[7]</sup>。20世纪50年代以来,以欧美为代表的发达国家开始研究飞机数字化柔性装配技术。美国麦克唐纳道格拉斯公司率先采用三坐标定位器作为飞机大型部件的支撑和定位工具,取代了传统的调节千斤顶等支撑装备。

20世纪80年代,美国AIT公司和波音等飞机制造商合作,开发了一种依靠自动定位控制的方案,能够协调多个定位器的协同运动,实现大型飞机部件的精准对接。此外,美国EI公司为Global 7000公务机总装线设计了高度集成的脉动生产线,不仅配备了精密的数控定位器,还提供了先进的物料搬运装备。德国宝捷公司设计了一套自动化调姿对接系统,如图2所示,包括数控定位器和半圆形托架,该系统能够实现飞机舱段的自动定位和模块化对接装配<sup>[8]</sup>。

进入20世纪90年代,美国波音公司率先采用CAD等图形软件完成了波音777的无纸化设计和制造,并在波音787总装过程中采用了数字化协同阵列装配方法。类似的协同阵列装配方法也在空客A340装配过程中得到了应用<sup>[7]</sup>,欧洲空客公司的阵列装配如图3所示。

此外,波音公司采用激光跟踪系统和数控自动化工装等先进技术,成功辅助了F/A-18“大黄蜂”战斗机的对接工作,具体如图4所示。这些技术的应用提高了对接的精度和效率,为战斗机装配工艺

带来了显著的提升。在 F-22 战斗机的生产中，洛克希德马丁公司采用了数字化测量、精密工装和数控定位技术，实现了中机身与后机身的精密对接<sup>[9]</sup>。在 F-35 战斗机的生产中，首次使用了柔性对接工作站，使得 3 种型号的 F-35 战斗机可以在同一条生产线上完成装配<sup>[10]</sup>，具体如图 5 所示<sup>[11]</sup>。



图 2 飞机机身自动对准和拼接系统

Fig. 2 Aircraft fuselage automatic alignment and splicing system

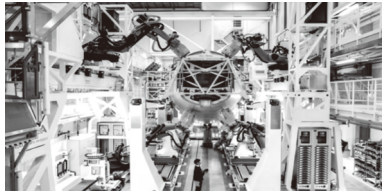


图 3 欧洲空客公司的阵列装配

Fig. 3 Array assembly by Airbus Europe



图 4 先进装配技术辅助 F/A-18 战斗机机身对接

Fig. 4 Advanced assembly technology assists F/A-18 fuselage docking



图 5 洛克希德马丁公司的 F-35 战斗机生产线

Fig. 5 Lockheed Martin's F-35 fighter production line

21 世纪以来，更多的柔性装配工装系统被应用于飞机对接装配。俄罗斯苏霍伊公司采用基于数控定位的柔性系统对苏霍伊-100 飞机进行装配。空客公司采用大部件柔性对接平台对 A350 飞机中机身和前机身段进行了对接<sup>[7]</sup>，具体如图 6 所示。此外，空客公司在实现无夹具装配、改进快速装配方法和自动化定位系统方面进行了探索，以解决大型机身最

终装配过程中存在的一些问题<sup>[12]</sup>。在 FITFLEX 项目的支持下，空客公司针对 A350 XWB 后机身非刚性部件壁板实施了一项柔性装配技术。基于测量组件和优化软件系统，通过柔性定位器施加优化力，使壁板在应力极限内轻微变形，从而消除壁板几何结构的重力影响。该技术提升了空客的定位技术水平。



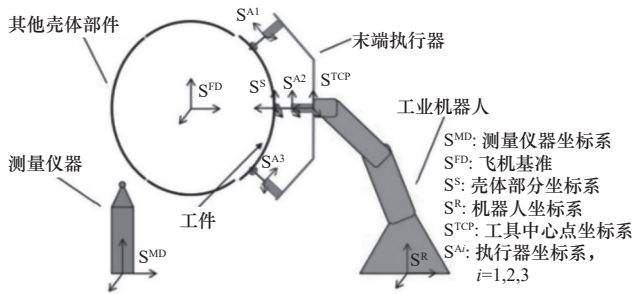
图 6 空客 A350 飞机中机身和前机身段的柔性对接

Fig. 6 Flexible docking between the fuselage and the front body of the Airbus A350 aircraft

为了进一步提升常规三坐标数控定位器等装配工装的适应性，近几年一些基于机器人的定位装配工装系统被设计研发。德国汉堡联邦国防军大学<sup>[13]</sup>通过在工业机器人末端安装柔性末端执行器提高装配工装适应性，并组建了多个机器人的柔性装配系统，具体如图 7 所示。德国亚琛工业大学 MÜLLER R 等<sup>[14]</sup>设计了可重构的夹持机构系统，利用 4 个球关节机构组成定位调姿平台，具体如图 8 所示。BERTELSMEIER F 等<sup>[15]</sup>则利用关节型机器人和激光跟踪仪搭建了柔性装配平台，具体如图 9 所示。此外，德国弗劳恩霍夫制造技术和先进材料研究所<sup>[16]</sup>利用六组并联机构搭建了柔性定位单元，并借助激光跟踪仪和六自由度工业机器人，搭建了复合材料壁板柔性装配单元，具体如图 10 所示，其中带有末端吸盘的并联机构可通过柔性施加拉力微量纠正壁板变形。这些基于机器人的定位工装及试验平台为飞机柔性对接装配提供了新方案、新方法，指引着飞机装配向更具柔性的方向发展。

### 1.1.3 自动化钻铆

飞机装配中，大量应用高可靠性的铆接和螺栓连接等机械连接方式。在装配自动化背景下，先进的制孔和铆接技术在飞机装配中具有至关重要的作用。自动钻铆技术最早由航空工业铆接专家 William Plein 于 1938 年在其文章中提出，随后欧美的公司开始着手研发半自动和全自动铆接机<sup>[17]</sup>。经过数年的发展，国外的自动钻铆设备现已能够自动完成定位、调姿、制孔、送钉、铆接和检测等一系列钻铆及辅助功能<sup>[18]</sup>。美国捷姆科（GEMCOR）公司研制的自动钻铆系统如图 11 所示，已广泛应用于空客 A380 和波音 787 大型客机的机翼和机身壁板制孔和铆接作业<sup>[17]</sup>。



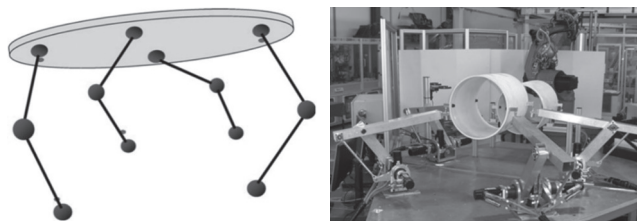
(a) 装配概念的图解可视化



(b) 装配仿真研究

图 7 工业机器人机身柔性工装系统平台

Fig. 7 Industrial robot fuselage flexible tooling system platform

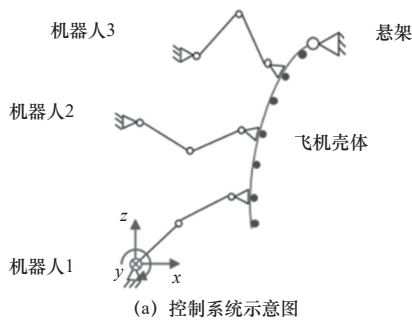


(a) 处理系统的多级可重构性

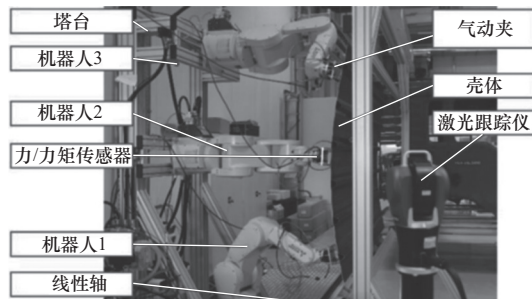
(b) 机身截面模型处理

图 8 可重构机器人机身柔性装配平台

Fig. 8 Reconfigurable robot body flexible assembly platform



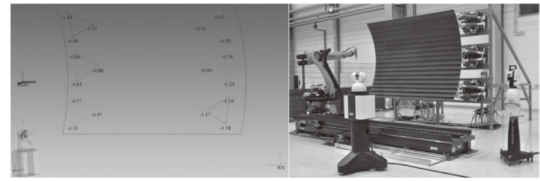
(a) 控制系统示意图



(b) 协同机器人操作系统

图 9 工业机器人侧壁板柔性定位系统

Fig. 9 Flexible positioning system for industrial robot sidewall panel



(a) 控制系统GUI

(b) 柔性定位系统前视图

图 10 并联机构侧壁板柔性定位系统

Fig. 10 Flexible positioning systems of parallel mechanism sidewall panel



(a) C型数控托架自动钻铆系统

(b) WRS型机翼自动钻铆系统



(c) G86型机身自动钻铆系统

(d) G12型机身自动钻铆系统

图 11 美国捷姆科公司研制的自动钻铆系统

Fig. 11 Automatic drilling and riveting systems developed by GEMCOR company

美国 EI 公司以低压电磁铆接技术为核心，开发了 E3000~E7000 系列自动钻铆系统，广泛应用于波音和空客公司飞机部件的自动化装配。随着柔性化装配需求的增大，EI 推出新型机器人自动钻铆系统，用于实现飞机机翼、机身部段、襟翼等飞机部件的高精度制孔、检测与铆接。德国宝捷公司作为最早从事飞机自动化制造设备研发的生产商之一，其研发的 RACe 机器人自动钻铆系统成功应用于单通道飞机货舱门的钻铆装配作业<sup>[19]</sup>，具体如图 12 所示。



图 12 德国宝捷公司研发的 RACe 自动钻铆系统

Fig. 12 RACe automatic drilling and riveting system developed by Broetje-Automation GmbH

此外，意大利 BC 公司研发了一款满足航空制造业高要求的 TJKPSpace 龙门机器人自动钻铆系统，并已于阿莱尼亚、波音、巴西航空等公司开发

了多个龙门式机器人自动钻铆系统。以上钻铆机公司开发的自动化钻铆技术和钻铆系统为飞机柔性装配中的加工和连接环节提供了技术支持和设备支撑,成为柔性装配过程中不可或缺的重要一环。

## 1.2 国内研究与应用现状

我国飞机制造在很长一段时间内,普遍采用人工装配的生产方法<sup>[20]</sup>。在许多飞机制造企业中,仍然使用大型固定对接工装,并依赖人工操作进行大部件的准确定位和位姿调整。这种方式存在劳动强度大、调姿效率低等问题。随着经济的发展,国内的航空制造企业在学习和引进国外先进的航空制造技术的同时,也注重飞机柔性装配技术领域的自主研究<sup>[11]</sup>。在国内高校和科研机构中逐渐形成了一些数字化柔性装配研发团队,同主机厂合作,在数字化测量、柔性对接和自动化钻铆方面开展了大量研发工作。

### 1.2.1 数字化测量

在数字化测量方面,北京航空航天大学的杜福洲等<sup>[21-23]</sup>的研究工作涉及多个方面。首先,针对iGPS辅助测量系统研究了测量精度的分布规律,探讨了误差来源及其对测量精度的影响;其次,对比分析了不同的位姿测量方法,评估了它们的准确性、适用性和优劣;最后,提出了测量数据结合的基本结构,实现了多个测量系统的集成应用,以提高整体测量系统的性能和可靠性。

南京航空航天大学的陈磊等<sup>[24-26]</sup>为满足飞机装配大尺寸、高精度、测量点分散的测量要求,提出了飞机装配高精度测量控制网的构建方法和装配坐标系公共基准点粗差检测与校正方法,并设计了一种新型的冗余驱动中机身自动调姿机构,为飞机高精度对接装配奠定了基础。

浙江大学航空制造工程研究团队提出了一种基于分布求解策略的机翼姿态评价和调整方法,开发出相关的软件功能模块并成功应用于某飞机机翼姿态的评估和调整<sup>[27]</sup>;设计了一种精密三坐标POGO柱,在此基础上提出了以三点支撑三坐标POGO柱为基础的姿态调整方法<sup>[28]</sup>;提出了一种以最小二乘法为基础、基于公共点测量精度的加权点匹配方法<sup>[29]</sup>;评估了检测点在数字化装配中的重要性,并提出检测点优化布置方法<sup>[30]</sup>,具体如图13所示。

西北工业大学的XUE D等<sup>[31]</sup>提出了一种先进的刚柔混合装配偏差分析方法,用于气动结构形状偏差的分析。该方法将装配偏差分解为刚性偏差传

递和柔性变形,并将其统一在一个框架中,能够在小样本条件下保证预测性能,并减少计算负担,同时在快速响应和精确计算方面保持了一定优势。

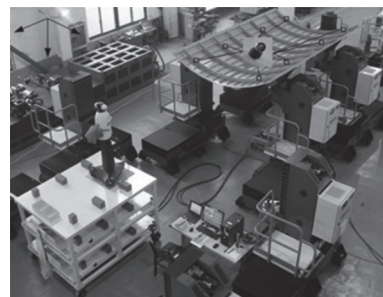
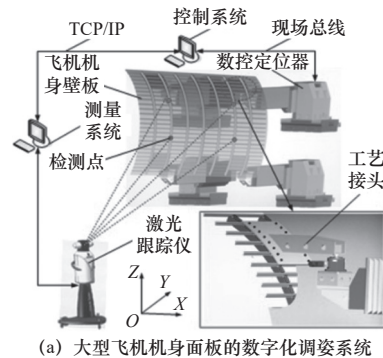


图 13 基于数字化测量的调姿系统与试验验证

Fig. 13 Attitude adjustment system based on digital measurement and experimental verification

此外,哈尔滨工业大学的尹寿宝<sup>[32]</sup>针对移动激光跟踪仪在测量过程中转站精度的问题,提出了一种新方法,即通过使用现场可溯源的转站标准器来替代传统的测量公共点,从而提升激光跟踪仪的转站精度。南昌航空大学的白增柱<sup>[33]</sup>研究了激光跟踪测量网络中激光跟踪仪遮挡的问题,提出了一种基于虚拟力场方法的可测性判定与站位规划方案。此外,为了对现有测量系统中公共点的分布进行优化,天津大学研发了室内GPS测量系统<sup>[8]</sup>。以上科研单位在数字化测量相关理论方法、试验研究和系统开发方面的研究工作,为国内开展柔性装配应用工作奠定了坚实的基础。

### 1.2.2 柔性对接装配

北京航空航天大学的梅中义等<sup>[34-36]</sup>研究了基于激光跟踪测量定位的数字化柔性对接技术和原理化问题,并针对装配序列优化问题提出了面向装配序列优化的约束蚁群算法,获得了相对较优的装配序列。文科等<sup>[37]</sup>根据与测量辅助设备相关的研究内容,构建了一种数字化智能对接框架,用以解决大飞机产品对接过程中无法精确调整位姿产生的问题。李

东升等<sup>[38]</sup>提出全主动驱动的柔性装配协调方法,开发了六自由度并联机构定位器,如图14所示。其末端平台安装有真空吸盘,利用六套并联定位器和激光跟踪仪构建了柔性装配定位支撑系统,可调整复合材料壁板位姿状态,同时均衡装配变形。MENG S等<sup>[39]</sup>提出了一种基于智能复合夹具模型和知识图谱的飞机面板可重构灵活装配夹具的智能设计方法,帮助设计人员实现了飞机面板可重构装配夹具的灵活设计。此外,针对可重构柔性夹具的布局优化问题,MENG S等<sup>[40]</sup>提出了一种智能夹具布局优化方法,该方法结合了卷积神经网络和遗传算法,用于求解作为定位器的轮廓板的最佳布局。北京科技大学的GUO F Y等<sup>[41]</sup>研究了柔性装配夹具系统的最优设计,即不同定位单元的柔性定位方法和运动行程。结合实际设计和装配过程,运动行程与柔性装配需求高度契合,展示了优异的定位/装配性能;同时,提出了一种基于两阶段策略的精确有效的误差补偿方法,实现了柔性装配夹具的精确定位<sup>[42]</sup>。乔康壮等<sup>[43-44]</sup>针对柔性装配模式下飞机薄壁件的装配特点,综合考虑了薄壁件的制造偏差、柔性工装的定位误差以及装配力作用下柔性件的变形误差,提出了一种基于柔性装配的薄壁件装配偏差模型,通过对关键测点装配偏差计算结果和仿真结果的对比,验证了该模型在实际应用中的可行性。金加奇等<sup>[45]</sup>为解决飞机舱门装配过程中的夹具专用性问题,以某型号飞机的6种舱门为研究对象,设计了一套柔性工装夹具系统。工程应用实践表明,该柔性工装技术能够满足舱门装配要求,研究结果为大型薄壁件的柔性工装设计提供了宝贵的参考,具有重要的工程应用价值。郝龙等<sup>[46]</sup>针对装配精度提升的需求,提出了一种结合装配关键特征实测模型的虚拟预装配技术。该技术通过在装配过程中精准表达零件的制造误差与装配累积误差,实现了对精度要求极高的装配关键部位进行质量精准控制和溯源调整。靳江艳等<sup>[47]</sup>以某型号飞机部件装配型架为研究对象,针对装配工艺装备精确安装的需求,应用数字孪生技术,构建了基于数字孪生的装配过程模型。王佐旭等<sup>[48]</sup>针对航空制造业装配工装研发周期长、成本高,且缺乏有效工装设计知识支持和传承的问题,提出了一种基于知识图谱和用户行为的飞机装配工装设计知识推送方法,并以飞机壁板工装设计为例,验证了所提的基于用户行为的知识推荐参数修正机制的有效性。何晓煦等<sup>[49]</sup>针对传统奇异值分解法无法保证满足所有基准点精度要求的

问题,提出了一种基于粒子群优化结合加权奇异值分解的位姿计算方法,通过粒子群优化算法搜索调姿基准点的权重值,确保每个基准点的转换残差满足精度要求。

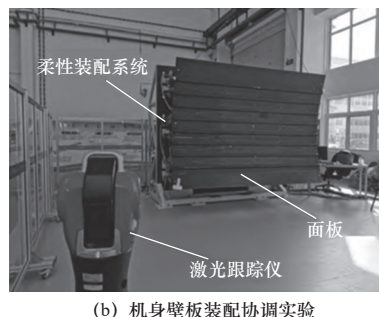
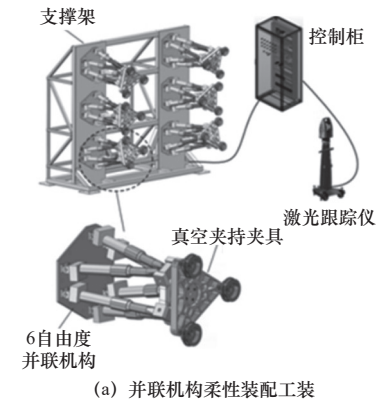


图14 柔性装配协调系统

Fig. 14 Flexible assembly coordination system

在基于机器人的定位装配工装系统研究方面,南京航空航天大学 LI Z H等<sup>[50]</sup>提出了一种基于响应面法的精度补偿方法,显著提高了应用于飞机灵活自动装配的柔性轨道混合机器人的定位精度。此外,提出了一种等效刚度模型,用于预测柔性轨道钻孔机器人整个工艺站位的增量误差,并提出了因传动系统耦合面弹性变形引起的增量误差假设,作为全局定位精度补偿的优化算法,对总误差的优化具有显著作用<sup>[51]</sup>。

在应用方面,国内航空制造主机厂已开展应用推广。浙江大学研发了飞机大部件柔性化对接系统,该系统具备精加工部件的能力,实现了国内在柔性对接系统领域的首次突破。此外,浙江大学还开发了移动式三坐标数控定位器,实现ARJ21型飞机三段机身大部件的自动化对接装配,如图15所示。

大连四达公司研制了飞机大部件自动对接柔性装配平台,其结构如图16所示。该装配平台通过闭环控制实现飞机的六自由度精确调姿,其闭环控制系统能够实时监测飞机大部件的位置和姿态,并

根据预设的装配要求进行调整。通过精确的控制和调节,平台能够使飞机大部件在6个自由度上实现精确对齐和调姿,确保装配的准确性和质量。相较于传统的装配工装结构,该柔性装配平台具有更高的灵活性和适应性,可以适应不同型号和尺寸的飞机大部件的装配需求。



图 15 ARJ21 型飞机大部件对接装配

Fig. 15 Docking assembly of large parts of ARJ21 aircraft



图 16 大部件自动对接柔性装配平台

Fig. 16 Flexible assembly platform for automatic docking of large parts

此外,以北京卫星环境工程研究所<sup>[52-56]</sup>、上海航天技术研究院<sup>[57-58]</sup>等科研院所为代表的研发团队,也在数字化测量、位姿估计、对接装配方法等方面进行了大量研究。目前,国内飞机制造主机厂还大量依靠技术人员手工装配的装配方式,数字化、自动化装配仍需进一步提升,以缩小与欧美发达国家的差距,所以仍需对数字化柔性装配进行技术创新。

### 1.2.3 自动化钻铆

相较于欧美等发达国家,我国的自动钻铆技术起步较晚。1995年,西北工业大学开展G4026SXX-120型自动钻铆机托架装置的研发工作,并于2004年完成。尽管由于当时国内制造水平的制约,托架的刚度不足,但该研制过程中的技术积累在一定程度上填补了国内自动钻铆技术的空白<sup>[18]</sup>。

目前,国内自动钻铆系统的研发主要集中在南京航空航天大学、西北工业大学、北京航空航天大学、浙江大学等部分高校。南京航空航天大学与西北工业大学联合研发的机器人自动制孔系统具备完善的全自动化功能,实现了飞机装配部件的高精度制孔<sup>[17]</sup>。北京航空航天大学研发了一款机器人自动制孔系统,相较于传统人工制孔,其效率提高了50%<sup>[59]</sup>。

浙江大学开发了机器人自动制孔系统,采用激

光跟踪仪和相机相结合的全闭环反馈技术,能够高精度地完成制孔任务<sup>[60]</sup>;开发环形轨自动化制孔设备,可根据机身外形铺设环形轨道,用于末端制孔设备的移动,实现柔性装配制孔。此外,浙江大学还创新性地研发了卧式双机双五轴联动钻铆系统,如图17所示<sup>[61]</sup>,产品进出通道开敞,适应性强,已应用于某飞机壁板自动化钻孔和连接,大幅提升了装配效率和装配质量<sup>[61-63]</sup>。

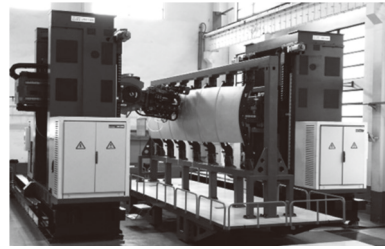


图 17 卧式双机自动钻铆系统

Fig. 17 Horizontal double machine automatic drilling and riveting system

此外,杨阳、邱艳萍论证了将自动钻铆装配技术应用于C919前机身及中后机身壁板的可行性,研究表明该技术显著提升了C919的自动化柔性装配效率,并大幅改善了装配质量<sup>[7]</sup>。

## 2 柔性装配关键技术

飞机柔性装配是利用数字化技术和信息系统,为飞机制造提供灵活性和适应性的能力,以应对不断变化的装配需求和技术要求。柔性装配通过高精度测量、装配工具自动调整过程,确保装配构件的精准定位和对齐;利用自适应控制系统和数字化装配流程,缩短调整时间和装配周期;通过传感器和数据采集技术,及时检测和纠正装配中的偏差和问题。飞机柔性装配所涉及的技术内容广泛,根据以上综述,总结提炼了3项关键技术,即大空间高精度测量、柔性工装调姿定位与自动钻铆离线编程,如图18所示。

### 2.1 大空间高精度测量技术

在飞机装配的初始阶段,装配部件与工装系统位置测量的精确性对于飞机装配的成功至关重要,直接影响着装配过程的质量和效率。因此,在柔性装配中,大空间高精度测量技术起着重要作用,辅助实现高精高效的装配。能够用于大尺寸部件位姿测量的设备主要有iGPS、激光跟踪仪、激光雷达设备、摄影测量设备、激光扫描仪、三坐标测量设备、测量机械臂等。

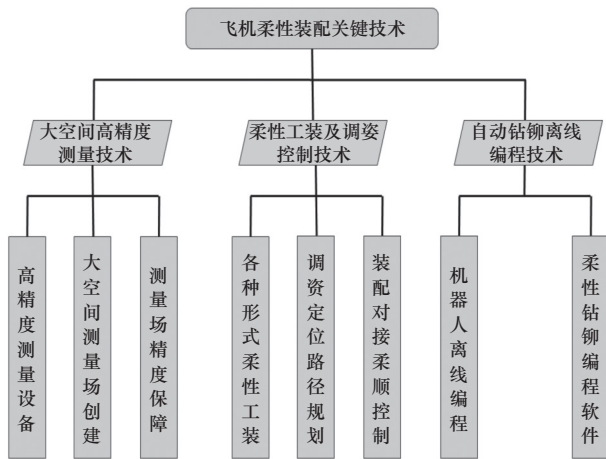


图 18 飞机柔性装配关键技术

Fig. 18 Key technology of aircraft flexible assembly

激光跟踪仪利用光学干涉原理，通过激光器发射激光束，照射到目标物体上的靶球后反射回来，被跟踪头接收，激光跟踪仪测量从跟踪头到靶球的距离以及水平和垂直方向的偏转角，通过这些测量数据，可以得到靶球的球坐标。激光跟踪仪具有高精度的测量能力，将大空间测量带入一个新时代。欧洲空客公司的 A380 客机装配采用了 4 台激光跟踪仪构建激光测量网络，相比传统测量技术具有明显优势，能够实现高精度的大空间测量，灵活性和适应性强，无需固定平台，实现了实时反馈和在线监控，减少了人工误差和劳动强度。然而，其高成本、对环境敏感性以及对操作人员的要求等局限性也需要在实际应用中予以考虑。iGPS 是一种高精度、高可靠性和高效率的室内定位系统，也被广泛用于大空间测量场测量，它是利用三角测量原理来确定接收器的三维坐标，通过测量 2 台以上发射器发射的红外激光信号，解算得到接收传感器的空间三维坐标。iGPS 测量精度略低于激光跟踪仪，但它不需要进行转站操作，支持并行测量。iGPS 广泛应用于波音（波音 747、F/A-18、波音 777、波音 787）、空客等客机和洛马战斗机的装配测量，为柔性对接装配提供了数字化支撑。iGPS 在飞机装配中的优势主要体现在高精度、高效率、实时数据反馈以及无需直接接触等方面，这使得它在大规模复杂装配任务中表现优异。然而，它也有一定的局限性，特别是在环境条件不理想、设备投资成本较高以及适用场景较为特定等方面，传统测量技术仍然在某些情况下具有竞争力。传统装配定位测量场多使用单种测量设备进行构建，为满足大部件高精度装配测量不断提高的要求，组合式测量系统应

运而生。例如激光跟踪仪与关节臂测量机组合、激光跟踪仪与扫描仪组合、激光跟踪仪与摄影测量相结合，通过测量设备组合，远距测量和近距测量优势互补，测量结果精度提升，测量效果更佳。

飞机大部件的（对接）装配测量需要用到多台或多种测量设备，还涉及利用测量设备在多站位进行测量，通常利用测量设备构建测量场来实现<sup>[64]</sup>。测量场中的坐标系可分为各个站位的测量坐标系和部件的装配坐标系，同一部件的不同位置也可构建不同的局部坐标系。测量场中的坐标转换关系主要为不同测量坐标系之间、测量坐标系和装配坐标系（全局坐标系）之间的关系。如果已知 3 个点在 2 个坐标系下的位置，就可完成坐标系的转换。坐标变换和坐标配准，主要目的是将测量点坐标转换到全局坐标系下，并将测量数据进行融合。

大空间测量场的精度直接影响了测量精度，并影响装配精度，所以需要测量场进行精度评估和误差补偿<sup>[65]</sup>。虽然测量设备（如激光跟踪仪、iGPS）具有较高的检测精度，但是依然受到设备自身、环境、坐标变换等因素影响。如不进行有效评估，可能会出现测量误差超出实际要求的情况。测量场的精度受仪器测量的不确定度影响，同时也受测量场配置的影响。大空间测量过程中，有很多因素会产生误差和不确定度，如人为操作因素、环境温度、环境振动、物体自身重力等。不确定度可通过构造测量点的协方差矩阵来进行估计，根据评估结果进行相应补偿有利于提高测量精度。测量场配置主要涉及测量点布设、测量策略及算法，优化测量场配置，可以获得高精度测量场，进而实现大尺寸部件高精度测量。

## 2.2 柔性工装及调姿控制技术

飞机柔性装配工装技术是指在飞机制造过程中使用灵活、可调节和自适应的工装系统，以便适应不同构件、装配阶段和要求的装配过程，可以提高装配的准确性、效率和灵活性，同时降低装配过程中的人力工作负担。柔性工装的柔性可重构功能，实现了飞机装配时工装和零部件之间“一对多”的方式，同时柔性工装还通过数字量传递功能，完成了对工装的数字化定位，有着传统工装方式无法比拟的优越性<sup>[66]</sup>。柔性装配工装是飞机柔性装配体系的重要组成部分，“壁板-部件-大部件对接”装配过程中的柔性工装结合形式多种多样，根据飞机装配各个阶段重点不同柔性工装系统可分类为几种形

式<sup>[67]</sup>：多点阵真空吸盘式柔性装配工装、行列式柔性装配工装、分散式部件柔性装配工装及大部件自动对接平台。

多点阵真空吸盘式柔性装配工装由多个排列成立柱模块单元阵列的真空吸盘组成，具体如图 19 所示，每个真空吸盘都可以独立控制，根据构件形状、尺寸和表面特征的不同，通过调整真空吸盘的排列和布局，实现灵活的夹持和固定。多点阵真空吸盘式柔性装配工装具有高精度、高稳定性和自适应功能，可以实现对构件的微调 and 精确定位，提高装配的准确性和效率。行列式柔性装配工装是一种基于行列式结构独立排列的立柱组成的柔性定位夹持装置，主要用于大型飞机的机翼壁板和翼梁装配。立柱单元上装有夹持单元，每个夹持单元可以独立调整和控制，以适应不同形状和尺寸的构件。行列式柔性装配工装具有灵活性和可调性，可以根据构件的需要进行精确定位和夹持。

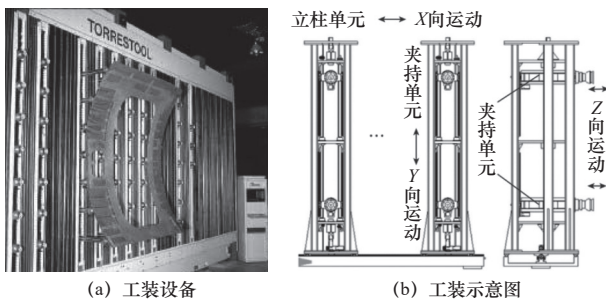


图 19 多点阵真空吸盘式和行列式柔性工装

Fig. 19 Multi-lattice vacuum and determinant structure flexible tooling

分散式柔性装配工装集成了数控定位器、定位计算软件、控制系统和辅助测量系统，能够在机身部件或机翼部件的装配中实现自动化。分散式柔性装配工装通过激光跟踪测量、定位计算软件计算、定位器运动等过程，实现高精度的构件定位和装配，并确保装配过程的准确性和质量。大部件自动化对接平台集成了工装、测量系统、控制系统和计算机软件等组成部分，旨在实现自动化的部件对接操作。这些平台采用优化的驱动数据，通过控制系统的指令，驱动工装完成部件的定位和调姿。根据具体要求，可以进行设计和选择工装的结构和驱动方式，以满足对接任务的要求。

飞机装配中构件的定位调姿工作是在数字化测量基础上通过柔性工装运动控制实现的。调姿运动主要涉及柔性工装（如定位器）的轨迹规划和控制问题。轨迹规划是指给定装配构件的初始位姿和目

标位姿，在满足运动学和动力学约束条件下，规划出执行机构的运动轨迹，即各个时刻的位置、速度等信息。合理规划执行机构的运动轨迹，可使运动更加平滑，减少执行机构可能的冲击，并保障最终的定位精度。轨迹规划在机器人领域已被广泛研究和应用，例如将运动轨迹表示为三次/五次多项式、正弦/余弦函数式，保证运动的平滑性。将轨迹规划引入飞机装配柔性工装调姿定位中，取得良好效果。例如，在国产飞机 ARJ21 的翼-身对接装配系统中，引入五次多项式的机翼调姿运动规划算法，根据数字化测量位姿，并利用工装机构运动学逆运算，求解柔性工装伺服电机的调姿运动位置、速度等信息，获得良好的动态运动性能<sup>[68]</sup>。此外，轨迹规划中常设计某些最优准则，如最小执行时间、最小能量等，以获取最优轨迹。对于最小执行时间，给定柔性工装执行机构的初始和目标位姿，在约束条件下优化出一条用时最小的运动轨迹。浙江大学张斌等<sup>[69]</sup>在飞机机身段装配定位调姿中，提出一种最优时间轨迹规划方法，以柔性工装（数控定位器）的驱动速度和驱动力为约束条件，以机身位姿作为决策变量，优化出一条时间最优的运动轨迹。

飞机装配大部件对接中，设计合适的柔顺控制策略，能够保证调姿定位机构在装配过程中具有柔顺性，进而补偿柔性工装调姿定位或数字化测量不准确形成的误差。柔顺控制可分为被动柔顺和主动柔顺 2 种。广为熟知的远程柔顺装置就是被动柔顺。常用的主动柔顺控制包括力/位混合控制、阻抗控制、智能控制等。近年来，力/位混合控制被用于大型构件的对接装配中<sup>[70-71]</sup>，利用力/位混合控制来补偿数控定位器调姿误差产生的飞机大部件内力，浙江大学方强等<sup>[72]</sup>针对数控定位器多点支撑机身所导致的机身变形问题，利用力/位混合控制减小机翼-机身对接装配应力，保证飞机的装配性能要求。阻抗控制策略被广泛应用于各种接触任务中，如机器人轴孔装配。智能控制是基于机器学习的控制策略，在机器人领域被广泛研究，如将其与力/位混合控制、阻抗控制相结合，对于处理不确定的多变量装配问题，具有更广阔的应用前景。

### 2.3 面向自动钻铆的离线编程技术

离线编程技术（offline programming, OLP）是一种用于机器人控制系统的编程方法，允许在机器人实际工作之前，在计算机上预先编写和模拟程序。与传统的在线编程不同，离线编程不需要机器人在

生产线上执行任务，而是通过计算机仿真机器人运动、加工过程和作业环境，从而生成机器人控制程序。这种方法在自动化生产、数控加工、机器人装配等领域得到了广泛应用，尤其是在实现机器人自动化生产线和复杂操作中具有显著优势。离线编程技术是“基于机器人制造”高效、高质量加工的关键前提。近年来，许多数控加工企业已将“基于机器人制造”作为其发展方向<sup>[17]</sup>。在机器人自动钻铆、喷涂、打磨等精密制造过程中，离线编程技术能够为机器人提供准确的运动轨迹，并模拟加工过程中的每一步。它不仅能提高生产效率，还能确保高精度和一致性。因此，离线编程技术是当前机器人自动钻铆领域的研究热点。

自1986年美国 Tecnomatrix 公司发布机器人仿真软件 RobCAD 以来<sup>[73]</sup>，各工业强国针对机器人离线编程软件开展了大量研究工作，例如 RobotMaster（加拿大 Jabez）、RobotWorks（以色列 Compu-craft）、RoboMove（意大利 Qdesign）、Delmia（法国达索）、RobotArt（中国华航唯实）等。通用型离线编程软件主要聚焦于系统流程的仿真与验证，任务规划功能相对单一，难以满足飞机装配中复杂且庞大的任务规划需求。因此，专用型离线编程软件已成为面向飞机装配自动钻铆系统的关键核心技术，为飞机柔性装配提供了数字化的软件支撑。

### 3 结语

飞机柔性装配技术作为一种先进的制造手段，借助自动化设备和系统，实现了飞机部件的精准定位与高效装配。该技术能够应对不同型号和规格飞机的生产需求，在缩短装配周期、提升装配效率、降低生产成本的同时，还能增强装配过程的灵活性与可靠性，满足未来制造需求的挑战。本文从数字化测量、柔性对接装配、自动化钻铆与连接等几个方面综述了飞机柔性装配技术的发展历程，介绍了国内外相关企业与科研机构在该领域的研究进展。通过对现有研究和应用的梳理，发现以下几个方面仍有广泛的提升空间。

#### 3.1 智能化与自动化深度融合

随着人工智能、大数据和机器学习等技术的不断发展，飞机柔性装配将进一步实现智能化与自动化的深度融合。未来，智能化系统将能够根据装配任务的复杂度、零部件的特性及生产环境的变化，

自动调整装配策略和工艺，从而提高生产过程的适应性与灵活性。例如，通过智能感知技术，装配系统可以实时监测工件位置、姿态等信息，自动修正偏差，确保精度和效率。人工智能和大数据技术将推动飞机柔性装配的生产过程优化，通过分析大量的历史数据，实时预测装配过程中的瓶颈，提出优化建议，进一步提升装配过程的效率和可靠性。

#### 3.2 数字孪生与虚拟仿真

数字孪生技术的核心是创建一个与物理实体相对应的数字化虚拟模型。在飞机柔性装配中，数字孪生技术可以帮助创建飞机装配的虚拟模型，其中包括几何形状、材料属性、结构等多种信息。在柔性装配工艺中，虚拟模型仿真可用于规划装配流程，优化装配顺序、工具使用与人员分配，提高装配效率。同时，数字孪生技术还可用于检测装配过程中的零部件装配误差，有助于避免装配错误，减少后续的修复成本。虚拟模型的建立甚至有助于飞机使用后的修理和维护。波音和空客公司在飞机的机身装配过程中，使用数字孪生对各个部件进行虚拟装配，确保它们的配合度达到设计要求。通过模拟不同装配环节，优化工艺流程，减少试装配和调整的次数，缩短了生产周期。

#### 3.3 模块化与标准化装配单元

为了提高生产装配的柔性和可扩展性，飞机柔性装配工装系统作为装配单元将朝着模块化和标准化方向发展。不同型号的飞机可以通过统一的模块化装配单元进行生产，通过快速更换或调整装配单元的某些模块来适应不同飞机类型的装配需求。标准化的装配单元能够减少定制化生产的复杂性，降低生产成本，并提高装配产线的通用性和适应性。

#### 3.4 基于云边端架构的工业物联网系统

基于云边端一体化的工业物联网系统是一个前瞻性的领域，它将云计算、物联网和边缘计算等先进技术相结合，通过网络化和智能化的方式，实现生产过程的全面优化管理。在飞机柔性装配中，传感器和设备可以实时检测飞机零部件的状态、位置和性能，基于边缘计算在装配现场进行数据处理，云端服务器可以存储大量装配数据，进行数据分析、模型训练和预测，有助于优化装配过程、预测维护需求以及改进设计。物联网和云边端技术的结合将推动飞机装配的智能化、高效化和可视化，为航空制造业带来更广阔的前景。例如，欧洲空客公司在其飞机装配工厂中使用物联网技术对各个装配环节

进行监控。每个生产环节都有传感器来实时检测并记录工件位置等数据。这些数据传输到中央控制系统，并进行大数据分析。

综上所述，为了提高大型构件的智能化装配水平，还需要在智能化与自动化融合、数字孪生技术、装配单元模块化以及云边端和物联网等领域进行深入研究，并与飞机装配工艺流程深度融合，进一步提升柔性装配技术的水平，推动航空制造业向更加高效更加智能的方向发展。

### 参 考 文 献

- [1] 邹冀华, 刘志存, 范玉青. 大型飞机部件数字化对接装配技术研究 [J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(7): 1367-1373.
- [2] 朱永国. 飞机大部件自动对接若干关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [3] 孔繁霖, 乔兴华, 王富强, 等. 飞机先进数字化装配关键技术及发展趋势 [J]. *机械工程与自动化*, 2023(2): 222-224.
- [4] 王军强, 高智勇, 王明微. 柔性装配理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [5] 邹爱丽, 王亮, 李东升, 等. 数字化测量技术及系统在飞机装配中的应用 [J]. *航空制造技术*, 2011(21): 72-75.
- [6] 于勇, 陶剑, 范玉青. 波音 787 飞机装配技术及其装配过程 [J]. *航空制造技术*, 2009(14): 44-47.
- [7] 郗唯杰. 基于数字化测量的飞机大部件自动对接关键技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2024.
- [8] 赵欢, 葛东升, 罗来臻, 等. 大型构件自动化柔性对接装配技术综述 [J]. *机械工程学报*, 2023, 59(14): 277-297.
- [9] 任晓华. 洛克希德·马丁公司的 F-22 战斗机装配生产线 [J]. *航空制造技术*, 2006(8): 36-38.
- [10] 范玉青. 飞机数字化装配技术综述: 飞机制造的一次革命性变革 [J]. *航空制造技术*, 2006(10): 42-48.
- [11] 李昂. 机身对接装配技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
- [12] MARGUET B, RIBERE B. Measurement-assisted assembly applications on airbus final assembly lines [J]. *SAE Technical Paper*, 2003: 1-6.
- [13] SCHWAKE K, WULFSBERG J. Robot-based system for handling of aircraft shell parts [J]. *Procedia Cirp*, 2014, 23: 104-109.
- [14] MÜLLER R, ESSER M, VETTE M. Reconfigurable handling systems as an enabler for large components in mass customized production [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2013, 24(5): 977-990.
- [15] BERTELSMEIER F, T D, T U, et al. Cooperating robot force control for positioning and untwisting of thin walled components [J]. *Advances in Robotics and Automation*, 2017, 6(3): 1-7.
- [16] RAMIREZ J, WOLLNACK J. Flexible automated assembly systems for large CFRP-structures [J]. *Procedia Technology*, 2014, 15: 447-455.
- [17] 冯昌源. 机器人自动钻铆系统离线轨迹与姿态优化方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [18] 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.
- [19] 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 [J]. *航空制造技术*, 2010(19): 32-35.
- [20] 范玉青. 现代飞机制造技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [21] 杜福洲, 文科. 大尺寸精密测量技术及其应用 [J]. *航空制造技术*, 2016(11): 16-24.
- [22] 杜福洲, 陈哲涵, 唐晓青. iGPS 测量场精度分析及其应用研究 [J]. *航空学报*, 2012, 33(9): 1737-1745.
- [23] 杜福洲, 吴典. 面向大尺度产品对接的位姿测量模式研究与应用 [J]. *航空制造技术*, 2019, 62(15): 32-41.
- [24] 陈磊, 黄翔, 赵乐乐, 等. 飞机装配坐标系公共基准点粗差检测与修正方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40(11): 1589-1594.
- [25] 朱永国, 黄翔, 宋利康, 等. 基于理想驱动力中的中机身调姿多项式轨迹规划 [J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(7): 1790-1796.
- [26] 朱永国, 黄翔, 李沈泉, 等. 飞机装配高精度测量控制网精度分析与构建准则 [J]. *中国机械工程*, 2014(20): 2699-2704.
- [27] 王青, 梁琴, 李江雄, 等. 飞机数字化装配机翼姿态评价及调整方法 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(7): 1287-1294.
- [28] 郭志敏, 蒋君侠, 柯映林. 基于 POGO 柱三点支撑的飞机大部件调姿方法 [J]. *航空学报*, 2009, 30(7): 1319-1324.
- [29] 黄鹏, 王青, 李江雄, 等. 激光跟踪仪三维坐标转换综合优化方法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(11): 2912-2920.
- [30] BI Y B, YAN W M, KE Y L. Optimal placement of measurement points on large aircraft fuselage panels in digital assembly [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2017, 231(1): 73-84.
- [31] XUE D, YU J F, LI Y, et al. An advanced rigid-flexible hybrid assembly deviation analysis method for aerostructures [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2023(58): 102173.
- [32] 尹寿宝. 总装精测提高激光跟踪仪转站精度的方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [33] 白增柱. 面向飞机大部件装配的激光跟踪仪可测性判定与站位规划 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2021.
- [34] 梅中义, 范玉青. 基于激光跟踪定位的部件对接柔性装配技术 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(1): 65-69.
- [35] 梅中义, 王运巧, 范玉青. 飞机结构件数控加工变形控制研究与仿真 [J]. *航空学报*, 2005, 26(2): 234-239.
- [36] 赵卫, 梅中义. 基于约束蚁群算法的装配序列优化 [J]. *机械工程与自动化*, 2019(5): 73-76, 80.
- [37] 文科, 杜福洲. 大尺度产品数字化智能对接关键技术研究 [J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(3): 686-694.
- [38] 李东升, 杨应科, 翟雨农, 等. 民用飞机复合材料机身壁板装配协调形性调控技术研究 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(9): 4310-4318.
- [39] MENG S, FAN W, WANG X, et al. Intelligent design of reconfigurable flexible assembly fixture for aircraft panels based on smart composite jig model and knowledge graph [J]. *Journal of Engineering Design*, 2024: 1-35.
- [40] MENG S, ZHENG L, FAN W, et al. Intelligent layout optimization of reconfigurable flexible fixture for assembling multiple aircraft panels [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 126(3): 1261-1278.
- [41] GUO F Y, WANG Z Q, LIU J H, et al. Locating method and motion stroke design of flexible assembly tooling for multiple aircraft components [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107(1/2): 549-571.



- [42] GUO F Y, LIU J, WANG Z, et al. Positioning error guarantee method with two-stage compensation strategy for aircraft flexible assembly tooling[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, 55: 285-301.
- [43] 乔康壮, 曲学军. 柔性装配模式下飞机薄壁件装配偏差分析[J]. *机械工程师*, 2025(1): 41-45, 51.
- [44] 乔康壮. 柔性装配模式下飞机典型部件装配偏差分析[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2023.
- [45] 金加奇, 孔祥伟, 赵清洲, 等. 用于飞机舱门装配的柔性工装设计[J]. *机械设计与制造*, 2023, 385(3): 135-140, 145.
- [46] 郝龙, 刘涵予, 黄翔, 等. 基于实测数据的飞机虚拟预装配技术发展综述[J]. *航空制造技术*, 2024, 67(6): 65-77.
- [47] 靳江艳, 庞彩珠, 方亿湘, 等. 基于数字孪生的飞机型架可视化装配工艺设计[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(增刊1): 92-100.
- [48] 王佐旭, 王鑫, 孟爽, 等. 知识-用户行为驱动的飞机工装设计知识推送方法[J/O]. *航空学报*, 1-19[2025-04-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20241216.1317.002.html>. [2025-03-05].
- [49] 何晓煦, 雷沛, 潘登, 等. 基于 PSO 与 WSVD 的飞机部件位姿拟合方法[J]. *航空学报*, 2023, 44(7): 295-304.
- [50] LI Z H, TIAN W, WANG M, et al. Positioning error compensation of a flexible track hybrid robot for aircraft assembly based on response surface methodology and experimental study[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(1/2): 1313-1330.
- [51] LI Z H, TIAN W, HU J, et al. Deformation error compensation by stiffness model of mechanical joint on a flexible track drilling robot for aircraft assembly[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 127(11): 5863-5878.
- [52] 代卫兵, 胡瑞钦, 易旺民. 航天器大型舱段柔性对接技术研究[J]. *航天器环境工程*, 2014(6): 584-588.
- [53] 易旺民, 段碧文, 高峰, 等. 大型舱段装配中的水平对接技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(9): 2354-2360.
- [54] 杨振, 易旺民, 范百兴, 等. iGPS 系统与经纬仪测量系统联合测量方法研究[J]. *宇航计测技术*, 2016, 36(4): 27-31, 50.
- [55] 陈冠宇, 成群林, 张解语, 等. 基于多传感器测量的航天器舱段自动对接位姿调整方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2019, 45(6): 1232-1239.
- [56] 陈冠宇, 成群林, 何军, 等. 基于在线调姿的航天器舱段自动对接系统设计[J]. *导弹与航天运载技术*, 2020(1): 99-106.
- [57] 王杰鹏, 谢永权, 宋涛, 等. 力觉交互控制的机械臂精密位姿控制技术[J]. *机械设计与研究*, 2019, 35(4): 47-52.
- [58] 刘仁伟, 徐晓辉, 谢永权, 等. 基于机械臂辅助的卫星柔顺装配技术研究[J]. *机电工程*, 2020, 37(5): 532-536.
- [59] 姚彬彬, 毕树生, 员俊峰, 等. 飞机部件机器人自动制孔控制系统设计与分析[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(17): 2021-2024.
- [60] 王一军. 基于工业机器人的飞机壁板高速精确制孔系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [61] 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.
- [62] LIU J, ZHU Z, ZHANG Q, et al. Deformation prediction and compensation of a dual-machine riveting system for aircraft assembly[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 236(17): 9543-9557.
- [63] 杨亚鹏, 赵安安, 刘宇驰, 等. 飞机装配自动钻铆技术研究现状与展望[J]. *机械制造与自动化*, 2023, 52(5): 1-5.
- [64] 金涨军. 飞机装配中大尺寸测量场的建立与优化技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [65] 张开富, 史越, 骆彬, 等. 大型飞机装配中的高精度测量技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(3): 43-60.
- [66] 王亮, 李东升. 飞机数字化装配柔性工装技术体系研究[J]. *航空制造技术*, 2012(7): 34-39.
- [67] 梅中义, 黄超, 范玉青. 飞机数字化装配技术发展及展望[J]. *航空制造技术*, 2015(7): 34-39.
- [68] YONGGUO Z, XIANG H, WEI F, et al. Trajectory planning algorithm based on quaternion for 6-DOF aircraft wing automatic position and pose adjustment method[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2010, 23(6): 707-714.
- [69] 张斌, 方强, 柯映林. 大型刚体调姿系统最优时间轨迹规划[J]. *机械工程学报*, 2008(8): 248-252.
- [70] 罗中海, 孟祥磊, 巴晓甫, 等. 飞机大部件调姿平台力位混合控制系统设计[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015(2): 265-274.
- [71] CHU W, HUANG X. Posture adjustment method for large components of aircraft based on hybrid force-position control[J]. *Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application*, 2020, 47(3): 381-393.
- [72] FANG Q, CHEN W, ZHAO A, et al. Control system designing for correcting wing-fuselage assembly deformation of a large aircraft[J]. *Assembly Automation*, 2017, 37(1): 22-33.
- [73] 张继禹, 蔡鹤皋, 王树国, 等. 一个大型机器人仿真系统-ROBCAD[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1993(3): 108-113.
- 第一作者: 张永亮, 男, 1983 年生, 硕士, 高级工程师, 装配总工艺师, 研究方向为航空制造。E-mail: zhangyl009@avic.com
- 通信作者: 毕运波, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为先进材料高性能制造与连接, 复杂机电系统集成。E-mail: zjubyb@zju.edu.cn
- (编辑 张亚然)
- (收修改稿日期: 2025-03-11)