

国产民用飞机机头研发低成本精确装配 技术应用研究

王焰¹, 邓伯孟¹, 周鼎赫², 晋江伟¹, 杨启兵¹, 邬瓴¹

(1. 中航成飞民用飞机有限责任公司, 成都 610091)

(2. 中国人民解放军 93147 部队, 成都 610091)

摘要: 机头作为飞机结构的核心功能部件,其装配质量直接影响飞机的气动性能、飞行安全性及舒适性。国产民用飞机研发在主制造商—供应商协同模式下,成本控制与精度控制是贯穿制造全过程的核心前提,基于飞机数字化装配、测量等关键技术,对新型涡桨支线飞机机头研发在成本控制下的关键技术难题进行分析,指出机头结构装配的关键技术难题,研究模块划分、定位方案、部件测量及产品保型4大关键技术,开展装配关键技术的实践应用。结果表明:模块精细划分后显著降低了工艺文件编制难度,定位方案设计、部件调姿系统优化后可节约总体研发成本,产品保型技术避免大开口区域变形,为提升民用飞机机头装配精度、质量控制及经济性提供技术参考。

关键词: 民用飞机;机头;低成本;精确装配

中图分类号: V262.4

文献标识码: A

Study on low-cost precision assembly technology in domestic civil aircraft nose development

WANG Yan¹, DENG Bomeng¹, ZHOU Dingcheng², JIN Jiangwei¹, YANG Qibing¹, WU Ling¹

(1. AVIC Chengfei Commercial Aircraft Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

(2. Unit 93147 of the Chinese People's Liberation Army, Chengdu 610091, China)

Abstract: As a core functional component of the aircraft structure, the nose directly affects the aerodynamic performance, flight safety and ride comfort of an aircraft through its assembly quality. For the research and development of domestic civil aircraft under the main manufacturer-supplier collaboration mode, cost control and precision control are the core prerequisites throughout the entire manufacturing process. Based on key aircraft technologies such as digital assembly and measurement, this paper analyzes the key technical challenges in the research and development of the nose for a new type of turboprop regional aircraft under cost constraints, especially the critical technical problems in the structural assembly of the aircraft nose, and investigates elaborating the core contents of four key technologies: module division, positioning solution, component measurement and product shape retention. Practical applications of the key assembly technologies are carried out. Results show that refined module division significantly reduces the difficulty of process document preparation; optimized positioning solution design and component posture adjustment system optimization save overall research and development costs; and product shape retention technology prevents deformation in large opening areas. The study provides technical references for improving the assembly precision, quality control and economic efficiency of civil aircraft noses.

Key words: civil aircraft; nose; low cost; precision assembly

收稿日期: 2026-03-03; 修回日期: 2026-07-01

基金项目: 四川省科技厅计划项目(2024ZDZX0048)

通信作者: 晋江伟(1989—), 男, 学士, 工程师。E-mail: 75415397@qq.com

引用格式: 王焰, 邓伯孟, 周鼎赫, 等. 国产民用飞机机头研发低成本精确装配技术应用研究[J]. 航空工程进展.

WANG Yan, DENG Bomeng, ZHOU Dingcheng, et al. Study on low-cost precision assembly technology in domestic civil aircraft nose development[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering. (in Chinese)

0 引言

航空工业市场发展需求迫切,国家部署国产民用飞机“两干两支”战略目标,以“两干两支”为核心,推动航空工业整体升级,打造自主可控的民用飞机产业体系,支撑民航强国建设^[1]。为进一步巩固和扩大国产涡桨支线飞机市场份额,国家立项研制新型涡桨支线飞机(下文简称“该型机”)。该型机聚焦优良气动外形、低成本目标,对飞机装配精度要求极高。机头为典型薄壁硬壳结构,整体为双曲面外形并首次采用整体窗框结构,对制造提出了极高的要求;该型机作为市场化的研发产品,对项目研发成本控制非常苛刻。

该型机的研制采用主制造商—供应商模式,由各供应商分工完成各部件、系统,主制造商进行总装集成。我国民用飞机产业发展实现了巨大突破,C909与C919相继交付运营^[2],中国商用飞机有限责任公司采用主制造商—供应商模式,经历十多年研发及市场化运作实现各大部件模块化交付,但未对设计模块精细划分提出具体要求。邹冀华等^[3]奠定了部件数字化对接装配技术的基础;王伟等^[4]在机头数字化装配关键技术方面做了介绍;杨锋等^[5]、Miah等^[6]分别从飞机总装脉动生产线、柔性工装设计方面开展了研究,但在机头研发阶段及成本控制下的装配工艺设计方面未开展相关研究;Estler等^[7]、王巍等^[8]、赵建国等^[9]分别为大型构件、大尺寸组件外形、数字化检测明确了技术方向,但在大部件低成本调姿工装及方法方面无相关技术验证;王焰等^[10]完成了机头保型技术策划实施,在前起落架舱等大开口区域保型技术方面缺乏技术要求。

对于新型涡桨飞机的研发,各供应商的分工界面及交付要求仍为需重点关注的问题,如何开展各大部件的精确装配和外形验证是飞机结构装配的核心,如何控制各供应商的研发成本是项目市场化的考核要点。

为补充机头装配相关技术及方法的缺失,本文以该型民用飞机机头为研究对象,对研发成本控制下机头装配关键技术进行研究,通过策划设计模块精细划分、定位方案设计、部件调姿测量系统、产品保型技术等方面,验证精确装配技术在机头装配中对精度控制和质量保障的可靠性。

1 机头结构装配面临的关键难题

航空制造业是典型的“技术密集+资本密集+全球协同”型产业。航空制造业的供应链本质是“主制造商主导的分工网络”。飞机安全性问题既是涉及制造商生存、发展的根本性问题,又是决定型号设计成败的关键技术指标之一^[11]。为了确保该型机的研发顺利开展,主制造商明确供应商分工,并协同设计、制造单位成立设计总师系统、制造总师系统。对于新型号研发,机体结构是机载系统协调布置的前提,为了推进机头结构的顺利研发,结构设计与制造工艺需高度并行协同。机头结构装配过程中除了典型的制孔、密封、铆接等装配技术外,在飞机研发阶段及市场化发展对成本严格控制的情况下,仍然面临多项关键技术难题。

1.1 模块划分不精细导致装配执行问题多

由于飞机产品零部件数量众多,几何形状和尺寸较为复杂,因此飞机产品装配过程中对协调准确度要求较高,同时装配协调设计也是飞机装配过程中的难点之一^[12]。机头外形为双曲面结构,蒙皮波纹度要求为 $\pm 1.5\text{ mm}$,关键框、梁定位精度 $\pm 0.5\text{ mm}$,涉及零组件2 000多件、标准件30 000多颗,装配精度要求高、协调关系复杂。该型机采用了全数字化设计技术,结构模块由设计独立划分时,在实际的工艺设计及装配施工过程中,每个模块中存在部分零组件、标准件在对应模块状态无法定位、安装,存在较多零组件、标准件转移至次级组件甚至总装阶段,模块划分精细度不够。实际装配执行过程中零组件、标准件的转移关系复杂,导致产品装配及返工问题多。

1.2 装配流程复杂导致工艺设计难度大

机头外廓尺寸约为 $3\,500\text{ mm}$ (长) $\times 3\,000\text{ mm}$ (宽) $\times 2\,900\text{ mm}$ (高),参与装配的零组件数量多,为了控制装配精度,基准设计与传递环环相扣,而且各组件在机头上部、下部及总装阶段时协调关系复杂,工艺设计难度大。参考传统机头结构装配经验开展统工艺设计时,组件策划的装配工装数量冗余,尤其在机头下部组件装配、机头上部组件补铆等涉及专用工装多,导致装配工装设计、制造及维护成本攀升。

1.3 调姿测量系统成本高导致研发成本高

型号研制阶段,为验证机头装配精度以及机头与前机身对合时的协调性,主制造商要求机头交付前需模拟机头与前机身预对合的姿态并开展测量,调姿基准的公差范围要求为 $\pm 0.5\text{ mm}$ 以内。若采用机头与前机身装配使用的数字化位姿定位系统^[13],该系统的成本高昂,但实际用于机头调姿测量的工装使用周期较短,整体成本和使用周期的性价比极低,研发费用远远无法承担。

1.4 产品运输距离远导致开口变形控制难

机头结构通常包含飞控舱维护口框、前起落架舱、RAT舱、机头端框、电源口盖等开口,其中前起落架舱、机头端框位置的开口相对大,而且涉及厂际之间的协调关系,部件完工后需要经过高速公路长途运输到达交付地点,对于刚性不足的较大开口区域,在运输过程中存在变形控制的难题,容易引起产品故障。

2 机头结构精确装配技术

基于国产民用飞机机头“低成本、高质量”的研发策略,从设计源头到工艺设计确定最优的制造工艺方案,以实现成本可控、质量优异的交付目标。通过该型机机头结构装配存在的四方面问题进行分析,并结合机头装配积累的经验教训,需要突破的关键技术包括:模块划分技术、定位方案设计、部件测量技术、产品保型技术。

2.1 模块划分技术

机头结构设计通常会按机体结构总体要求对机头数模模块进行初步划分,总体考虑的原则是结构完整性、分工协同性等方面。对于制造工艺来说,通过机头装配流程确定结构中各组件的工艺分离面,机头分离面如图1所示,根据组件分离面确定模块划分,在模块中明确零组件、标准件的细分要求,最后模块中明确具体装配要求。

1) 模块初步划分:结合机头上下部对合流程,将上部组件、下部组件分别分解为多个组件形成工艺分离面,通常包括:壁板组件、框组件、地板组件、前起落架舱组件等,各组件之间存在一些协调安装关系,同步设置各级总装的对合组件,这里的

每个组件即为模块。

2) 零标件确定:每个组件中包含多项零组件、标准件等装配物料,为了减少组件之间零组件、标准件的转移,理想状态为每个组件能够完成所有装配,此阶段工艺需充分识别装配细节,确保各组件装配的完整性和协调性。

3) 装配要求完善:目前在大型飞机新型号研制中,装配工艺设计采用MBD技术,即通过三维模型表达设计意图,在三维模型上标注尺寸、定义公差、注释加工信息等^[14]。数模中需开出零件的导孔、定位孔等实体孔,装配信息中明确连接件制孔、安装及密封等规范要求,便于制造识别。

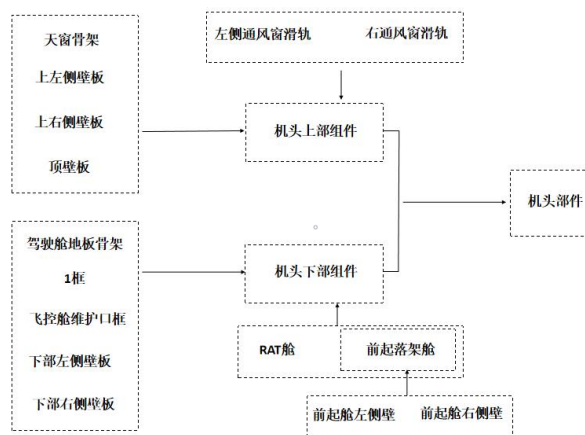


图1 机头工艺分离面划分

Fig. 1 Division of process separation planes for nose fuselage

2.2 定位方案设计

部件装配是制造的重点环节,机头装配普遍采用传统的固定站式装配模式^[15],其装配方案制定是核心要素,装配工装是装配精度保障和效率提升的必要条件。结合型号研发成本控制及研制阶段的生产需求,装配工装一般结构复杂、成本高,精确装配需从工装方案确定、技术实施等方面开展策划,以达到精确装配与成本控制的平衡。

1) 装配工装方案确定:结合装配流程、脉动节拍、占架周期等情况,全面梳理分析机头所需的装配工装,针对机头结构的典型组件按装配方案开展工装方案策划,基于研发阶段成本控制要求,充分识别传统装配工装策划的不足,针对性确定优化方向,经识别零组件孔系定位、机头上部组件补铆拖架、下部组件装配型架为研发阶段机头结构装配技术为成本控制关键,识别过程如表1所示。

表1 工装优化识别清单
Table 1 Identification list of tooling optimization

序号	典型结构	优化方向说明
1	壁板组件	采用孔系定位技术,零组件通过协调孔定位,工装可简化定位器。
2	框梁组件	采用孔系定位技术,零组件通过协调孔定位,工装可简化定位器;窗框组件与机头上部组件考虑共用补铆托架。
3	前起落架舱	设置前起舱交点夹具,作为前起落架舱组件定位装配基准,同时在夹具上设置接口用于前起落架舱在机头下部组件、机头部件的装配基准,以实现机头下部组件正位装配。
4	机头上部组件	采用孔系定位技术,零组件通过协调孔定位,工装可简化定位器;机头上部组件与窗框组件考虑共用补铆托架。
5	机头下部组件	装配型架采用正位卧式装配结构,取消翻转工装,通过机头总装型架进行补铆工作;采用孔系定位技术,零组件通过协调孔定位,工装可简化定位器。
6	机头部件	装配型架优先选用常规工装形式;采用孔系定位技术,零组件通过协调孔定位,工装可简化定位器。
7	部件测量	考虑通过人工调姿方案进行机头调姿,机头部件通过整体托架支撑,四处调姿结构能够完成三个方向自由度调整。

2) 孔系定位技术:通过梳理机头中组件装配的零件结构类型及装配关系,制定各类典型结构的协调孔选用方法,形成协调孔选用原则,明确协调孔的孔径、精度、位置、数量、表述等要求,典型机加壁板与加强件的孔系定位如图2所示,对每个组件进行逐一识别,最大化实现结构的积木式装配。

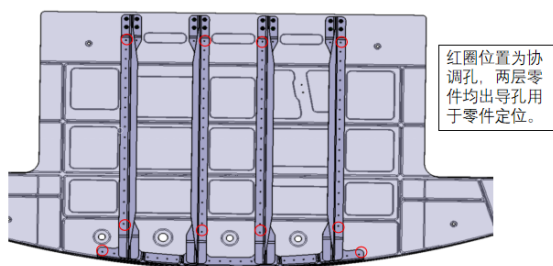


图2 孔系定位示意图

Fig. 2 Schematic diagram of hole pattern positioning

3) 下部组件正位装配技术:梳理机头下部组件装配时各组件的装配流程,下部组件正位装配的难点是前起落架舱、维护口框、地板骨架难以设置定位器以及产品下架,针对具体问题,通过前起交点夹具设置接口定位前起落架舱,通过吊装集成装置定位维护口框、地板骨架,装配完成后将吊装集成装置移位实现机头下部组件的移位,下部组件正位装配工装如图3所示。

4) 多组件共用工装设计技术:结合天窗骨架组件与机头上部组件的共用结构,选择天窗骨架上的部分定位基准,实现两个组件共用补铆托架设计,同时考虑天窗骨架补铆工作需求,将其设置为可翻转结构以完成两个姿态补铆,为实现组件

运输功能,将其设置为可移动结构,研发的驾驶舱组件一体化补铆托架如图4所示。

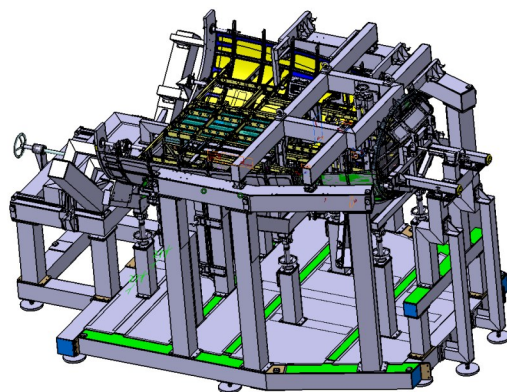


图3 下部组件正位装配工装

Fig. 3 Positioning assembly tooling for lower components

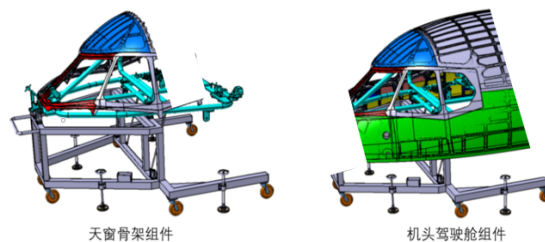


图4 驾驶舱组件一体化补铆托架

Fig. 4 Integrated completion riveting bracket for cockpit components

2.3 部件调姿测量技术

由于飞机大尺寸组件具有空间尺寸大、形状复杂、测量精度要求高等特点,严重影响整体测量效果。为达到机头部件模拟与前机身预对合状态,测量工装需实现调姿功能,同时能够实施监控

机头整体姿态,实施步骤包括:调姿系统制定、机头调姿测量。机头调姿测量如图5所示。

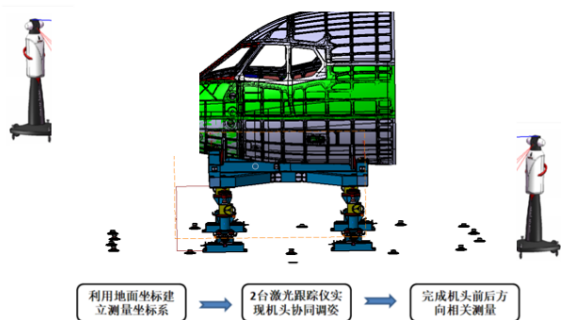


图5 机头调姿测量

Fig. 5 Posture adjustment and measurement of nose fuselage

1) 调姿系统制定:设置一套低成本机头架外调姿测量结构及地面测量坐标点,整体托架支撑机头部件,托架与四处调姿机构通过球头支撑连接,人工调整调姿机构控制XYZ三个方向自由度实现托架整体调姿,激光跟踪仪实时测量机头上基准点并反馈测量结果,实现机头部件姿态调整。

2) 机头调姿测量:机头调姿需同时监控机头前后位置的基准点,航向前后分别布置一台激光跟踪仪,基于地面测量基座建立坐标系,调姿机构调整时通过激光跟踪仪实时反馈,基准点调到公差范围后机头调姿完成,再使用激光跟踪仪就近开展一号框、端框相关的测量。

2.4 产品保型技术

为了有效控制厂际之间长途运输过程中产品开口区域的变形,对于刚性不足的较大开口区域的协调接口位置设计保型装置。起落架作为支撑飞机重量、吸收撞击能量的重要部件^[16],对其安装接口前起落架舱装配精度有极高要求;大部件对接是飞机装配的最终环节,也是飞机装配质量保证的关键环节^[17],机头端框是机头与前机身之间为复杂的周围协调,因此机头结构中前起落架舱、机头端框位置的开口区域变形控制是核心,需对这两个区域设计保型装置。

1) 前起落架舱保型:基于前起落架舱的结构特点及功能要求,对前起舱左右壁板上安装起落架主要接口的4处交点进行限位,前起落架舱保型如图6所示,通过一个整体夹具保证4处关键交点的相对位置关系,为了确保保型夹具的安装,定位

器需设计为活动式结构,并在单侧壁板的2处交点连线方向设计一处长圆孔,便于保型夹具的安装和拆卸。

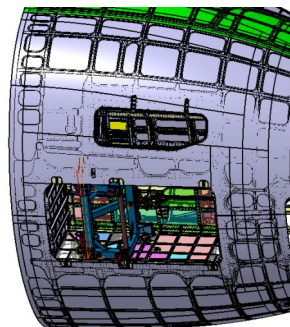


图6 前起落架舱保型

Fig. 6 Shape retention of nose landing gear bay

2) 端框保型:机头端框是机头与前机身的主要协调接口,包含整圈的蒙皮端面、蒙皮外形、长桁轴线等位置,为了保证机头端框大开口的蒙皮外形控制,机头端框保型如图7所示,通过选取刚性框上的TH孔作为连接位置,利用三角形稳定性原理设计保型夹具的骨架,同时部分区域定位销选用小销子的方式,便于保型夹具的安装和拆卸,为了防止定位销在运输过程中的脱落,对螺母进行防松设计。

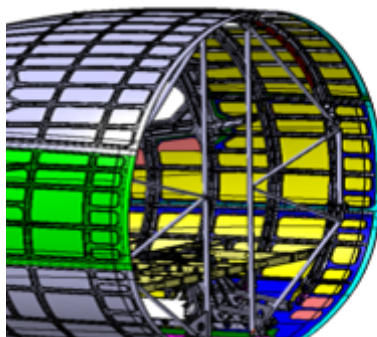


图7 机头端框保型

Fig. 7 Shape retention of nose frame

3 技术应用效果与优化方向

该型机经过全面研制,参研人员开展机头部件工艺设计与策划实施,已完成多架份机头部件交付,主制造商顺利完成飞机机体结构装配及相关验证工作,机头达到设计状态和制造要求。

3.1 技术应用效果

机头研制期间,产品设计和工艺设计存在一

些不协调的问题,但是从总体技术策划及应用方面来说,在研发成本控制的前提下,机头部件满足设计指标的交付要求,各项技术应用情况如下。

1) 结构模块划分达到策划要求的模块数量接近75%,装配工艺文件的编制难度降低达60%;

2) 定方案设计的孔系定位技术应用达到25%,下部组件正位装配技术得到全面验证,多组件共用补铆托架达到预期策划目标,实现装配周期缩短约38%,研发成本在减少的装配工装后节约近百万元;

3) 部件调姿测量方案能够达到预对合验证的目的,预对合阶段机头端框实现一次合格,测量工装相比位姿定位系统节约近四十万元;

4) 产品保型装置可以满足长途运输对产品变形的控制,将产品大开口区域变形超差率降低至0。

3.2 现有技术不足及优化措施

机头装配过程中,下部组件正位装配时壁板组件上架定位困难,下部左侧壁板和下部右侧壁板组件定位时需通过2~3人协同实施上架定位,零件定位孔与定位销配合精度高,多人调整壁板组件协同性差,需进一步引入辅助设备对壁板组件精细调姿实现快速精确定位。机头部件调姿测量时,四名操作者存在调姿状态不稳定及效率低下情况,后续跟踪机头装配状态,在批产后能够满足装配要求的情况下,通过取消机头部件调姿测量来控制装配周期。

4 结 论

1) 本文综合考虑装配精度与成本控制,通过机头结构装配关键技术研究及应用,有效支撑机头顺利研制,形成的“设计制造一体化协同方式”能够在新型号研制及航空大部件装配的成本控制发挥重要作用,推动国产民用飞机研发进程,同时可为民用飞机新型号研发等提供关键装配技术借鉴。

2) 联合设计开展设计制造一体化^[18],模块精细划分方法应用明确了组件的零组件范围及装配要求,便于生产实施。

3) 机头定位方案设计提供了低成本工装设计策略及常见的装配工装方案。

4) 低成本调姿方案的部件调姿测量技术确保了机头部件协调接口的准确性,提前验证机头部件装配精度。

5) 机头大开口区域的保型方法有效控制厂际交付运输过程中的变形情况。

参 考 文 献

- [1] 孙聪,赵群力,孙侠生. 航空工程科技未来20年发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(5): 55-64.
Sun Cong, Zhao Qunli, Sun Xiasheng. Development strategy of aeronautical engineering science and technology in the next 20 years[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(5): 55-64. (in Chinese)
- [2] 赵春玲,刘洋,陆曦,等. 宽体客机关键技术综述[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(6): 1055-1090.
Zhao Chunling, Liu Yang, Lu Xi, et al. Review: key technologies for wide-body aircraft[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2025, 43(6): 1055-1090. (in Chinese)
- [3] 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.
Zou Jihua, Liu Zhicun, Fan Yuqing. Large-size airplane parts digital assembly technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(7): 1367-1373. (in Chinese)
- [4] 王伟,阳春,余敏. 飞机机头数字化装配关键技术[J]. 机械, 2018, 45(5): 5-9, 67.
Wang Wei, Yang Chun, Yu Min. Key techniques of aircraft head digital assembly process[J]. Machinery, 2018, 45(5): 5-9, 67. (in Chinese)
- [5] 杨锋,穆志国,范军华,等. 大型飞机总装集成脉动生产线技术研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(12): 48-55, 62.
Yang Feng, Mu Zhiguo, Fan Junhua, et al. Research on large aircraft final assembly pulsation line technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(12): 48-55, 62. (in Chinese)
- [6] Miah M, Zhang J, Tonk R. A flexible and efficient tooling design technology for aircraft fuselage panel assembly[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2023, 95(2): 265-275.
- [7] Estler W T, Edmundson K L, Peggs G N, et al. Large-scale metrology—an update[J]. CIRP Annals, 2002, 51(2): 587-609.
- [8] 王巍,李锐,林俊盛,等. 飞机大尺寸组件外形数字化组合测量方法研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(21): 106-113.
Wang Wei, Li Rui, Lin Junsheng, et al. Research on digital combined measurement method of aircraft large components outline[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024,

- 67(21): 106-113. (in Chinese)
- [9] 赵建国, 郭洪杰. 飞机装配质量数字化检测技术研究及应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(20): 24-27.
Zhao Jianguo, Guo Hongjie. Study and application of digital measurement technology for aircraft assembly precision[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(20): 24-27. (in Chinese)
- [10] 王焰, 袁泽林, 黄箫, 等. 某型水陆两栖飞机机头保形技术研究[J]. 机械, 2017, 44(7): 15-23.
Wang Yan, Yuan Zelin, Huang Xiao, et al. Research on shape preserving technique of a kind of amphibious aircraft nose[J]. Machinery, 2017, 44(7): 15-23. (in Chinese)
- [11] 冯蕴雯, 姚雄华, 薛小锋, 等. 民机舱门安全性分析方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(5): 803-809.
Feng Yunwen, Yao Xionghua, Xue Xiaofeng, et al. An effective safety analysis method of civil aircraft cabin door[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(5): 803-809. (in Chinese)
- [12] 魏铭, 田锡天, 耿俊浩, 等. 面向飞机装配协调设计的任务-人员均衡匹配方法[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(1): 130-138.
Wei Ming, Tian Xitian, Geng Junhao, et al. A balanced task-personnel matching method for aircraft assembly coordination planning[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(1): 130-138. (in Chinese)
- [13] 柯臻铮, 柯岩, 朱伟东. 飞机大部件对接及精加工系统研究[J]. 航空制造技术, 2022, 65(20): 92-102.
Ke Zhenzheng, Ke Yan, Zhu Weidong. Research on docking and finishing system of large aircraft parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(20): 92-102. (in Chinese)
- [14] 刘雁冰. 基于PDM的一体化三维工艺设计[J]. 航空制造技术, 2014, 57(5): 43-46.
Liu Yanbing. Integrated 3D process design based on PDM[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(5): 43-46. (in Chinese)
- [15] 黄钰琪, 李波, 陈小云, 等. 民机机头系统脉动生产线设计与仿真[J]. 民用飞机设计与研究, 2024(3): 23-30.
Huang Yuqi, Li Bo, Chen Xiaoyun, et al. Design and simulation of pulsating production line for civil aircraft nose system assembly[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(3): 23-30. (in Chinese)
- [16] 许波, 赵超泽, 张玉美, 等. 飞机起落架全方位移动装配机器人设计与研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(5): 60-67.
Xu Bo, Zhao Chaoze, Zhang Yumei, et al. Design and research of aircraft landing gear omni-directional mobile assembly robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(5): 60-67. (in Chinese)
- [17] 陈哲涵, 杜福洲, 唐晓青. 基于关键测量特性的飞机装配检测数据建模研究[J]. 航空学报, 2012, 33(11): 2143-2152.
Chen Zhehan, Du Fuzhou, Tang Xiaoqing. Key measurement characteristics based inspection data modeling for aircraft assembly[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(11): 2143-2152. (in Chinese)
- [18] 邓伯孟, 庄期能, 郭艳兵, 等. 基于设计制造一体化的特性识别研究[C]// 第十届中国航空学会青年科技论坛论文集. 南昌: 中国航空学会, 2022: 330-333.
Deng Bomeng, Zhuang Qineng, Guo Yanbing, et al. Research on feature recognition based on design and manufacturing in-tegration[C]// In Proceedings of the 10th Youth Science and Technology Forum of the Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Nanchang: CSAA, 2022: 330-333. (in Chinese)

(编辑:马文静)