

# 基于互换性控制需求的飞机舱门快速检测方法研究

刘洪富 蒲煜 杨浩 王超 李万龙 刘香华

中航成飞民用飞机有限责任公司 四川 成都 610091

**摘要：**随着航空制造业对装配精度与效率要求的不断提高，飞机舱门作为关键活动部件，其互换性检查成为保障整机装配质量的重要环节。传统互换性检测方法依赖实物部件之间的直接调试，存在流程繁琐、周期长、风险高等问题。本文提出一种基于专用检测工装飞机舱门互换性快速检测方法，通过CATIA软件构建舱门特性衍生数据模型，提取关键检测特征，设计专用调校工装作为理论基准件替代实物，实现舱门状态的预调校与偏差分析。该方法显著提高了检测的准确性、可重复性与效率，适用于多种互换检查场景，具有良好的工程应用价值。

**关键词：**航空制造；互换性检查；快速检测；装配精度

## 引言：

飞机制造是一项高度复杂的系统工程，其最终产品的装配精度直接决定了飞机是否满足设计性能与安全标准<sup>[1]</sup>。在飞机装配过程中，测量与检测工作贯穿始终，尤其在活动部件如登机门的装配中，其精度控制尤为关键。登机门不仅影响气密性与结构完整性，更直接关系到乘客与机组的安全。因此，登机门的互换性检查成为飞机制造中不可或缺的验证环节<sup>[2]</sup>。

互换性检查是指在飞机制造过程中，选取一架飞机作为基准件，再取另一互换件进行安装调试，验证其是否满足互换技术条件。通过互换性检查检查，可确保部件在装配过程中的准确性与稳定性，进而保障整机质量<sup>[3]</sup>。随着飞机型号多样化与生产节奏加快，传统互换性检测方法已难以满足高效率、高精度的生产需求。因此，研究一种快速、可靠、可重复的互换性检测方法，具有重要的理论意义与工程价值。（见图1）

传统互换性检测方法主要依赖于实物部件之间的直接调试，必须所有门组件与机头组件完工并检验合格后方可进行互换检查，具体流程为：在飞机装配过程中，选取一架飞机作为基准机，将其舱门拆卸后，安装另一架飞机的舱门，通过实际装配状态判断其是否满足互换技术要求<sup>[4]</sup>。该方法在航空制造发展初期具有一定适用性，但随着飞机结构复杂化与生产节奏加快，其局限性日益凸显。

首先门组件与机头组件之间的配合状态具有较大不确定性，检测特性繁多，调试过程繁琐，调整工作量大，周期

## 一、传统互换性检测方法及其局限性



图1 互换与替换检查示意图

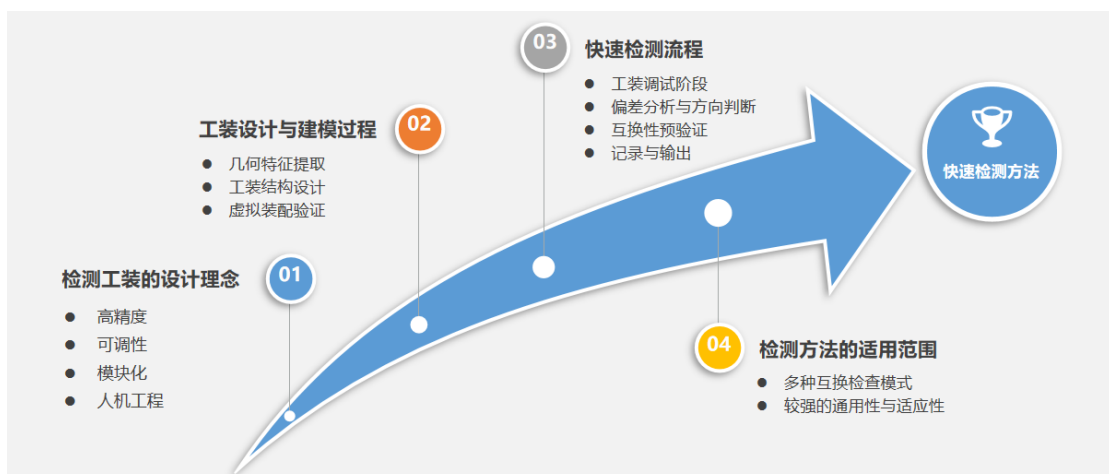


图2 互换性快速检测方法模式

长；其次，由于检测项目多、协调关系复杂，很难在一次调试中满足所有设计要求，常需反复调整，效率低下。最后，在产品上直接进行调整，由于行程控制不精确，易造成部件表面或结构损伤，增加成本与维修负担<sup>[5]</sup>。此外，传统方法对操作人员经验依赖较大，检测结果受人为因素影响显著，一致性差。在批量生产中，这种依赖性进一步放大了生产节奏不匹配的风险，容易导致装配线停滞等待，影响整体生产效率。

因此，传统互换性检查方法在一定历史阶段发挥了作用，但其存在协调性差、调试复杂、一次性合格率低、产品损伤风险高等局限性；并且对生产节奏匹配程度要求高，很容易因为生产节奏不匹配，导致装配线停滞等待现象产生<sup>[6]</sup>。

## 二、构建检测工装与快速检测方法

为解决传统检测方法的不足，本文提出一种基于专用检测工装的快速检测方法。该方法通过数字化建模与实物工装相结合，实现舱门状态的预调校与偏差分析，从根本上提升检测效率与可靠性。（见图2）

### （一）检测工装的设计理念

设计一套专用检测工装，作为理论基准件的实物替代，用于舱门的预调校与偏差分析。该工装基于CATIA软件进行三维建模，通过提取舱门互换性检查中的关键特征点，构建高精度衍生数据模型，确定测量点布局方案，形成标准化、可重复使用的检测基准。工装设计需满足以下原则：

1) 高精度：工装本身应具备较高的制造精度与稳定性，确保测量基准的可靠性。

2) 可调性：工装上设置多组可调支撑与测量传感器，用于模拟机头组件的接口状态，适应不同型号舱门的检测

需求。

3) 模块化：工装结构应模块化设计，便于拆卸、运输与维护，提高使用灵活性。

4) 人机工程：操作界面应简洁明了，减少操作人员的学习成本与误操作风险。

### （二）工装设计与建模过程

利用CATIA软件，首先对舱门的几何特征、装配接口、运动轨迹等进行数字化建模，提取关键检测特性如铰链轴线、密封面轮廓、锁机构位置等。在此基础上，设计工装结构，确保其具备足够的刚性、稳定性与测量基准功能。工装上设置有多组可调支撑与测量传感器，用于模拟机头组件的接口状态，实现对舱门安装位置的精确控制与测量。具体建模过程包括：

1) 几何特征提取：通过CATIA软件对舱门三维模型进行分析，提取关键检测特征点与面，形成检测数据模型。

2) 工装结构设计：根据检测需求，设计工装主体结构、支撑系统与测量系统。主体结构采用高强度铝合金材料，确保刚性与轻量化；支撑系统采用可调式设计，适应不同安装状态；测量系统集成位移传感器与角度传感器，实现多维度数据采集。

3) 虚拟装配验证：在CATIA环境中进行工装与舱门的虚拟装配，验证其干涉情况与测量可达性，优化工装结构。

### （三）快速检测流程

基于专用检测工装的快速检测流程主要包括以下四个阶段：

1) 工装调试阶段：将舱门安装在专用工装上，依据理论模型进行初步调校，获取舱门实际状态与理论模型之间的偏差数据。该阶段无需依赖实物飞机，可在门组件未全部

完工前独立进行,有效利用生产过程中的冗余时间。

2) 偏差分析与方向判断:通过比对实测数据与理论值,分析舱门特征之间的相对关系,确定后续微调的方向与位置。

3) 互换性预验证:在工装上完成初步调试后,舱门已具备接近理想状态的装配基础,大幅降低实际上机调试时的调整量与风险。该阶段可视为实物互换检查的“预演”,有效避免反复拆装。

4) 记录与输出:检测过程中生成详细的调整记录与偏差报告,为后续实物互换检查提供明确指导。报告内容包括偏差分布、调整建议、合格判定等,便于质量追溯与工艺优化。

#### (四) 检测方法的适用范围

该方法适用于多种互换检查模式,具有较强的通用性与适应性。尤其在大型登机门的互换性检查中,其优势更为明显。此外,该方法还可推广至其他飞机活动部件如货舱门、应急出口等的检测中,具有广泛的工程应用前景。

### 三、技术优势与效益分析

通过理论模型与实务工装的结合,检测过程不再依赖人工经验与实物试装,显著提高了检测结果的客观性与一致

性,提高了检测准确性与可重复性<sup>[7]</sup>。同时工装检测可在门组件未全部完工前独立进行,有效利用生产过程中的冗余时间,避免装配线等待,提升整体生产效率。并且,在工装上进行初调与预判,避免了直接在产品上进行大行程调整,从根本上降低了部件损伤的可能性<sup>[8]</sup>。最后,通过前期偏差分析与方向判断,在实际互换检查中可一次性完成调试,减少反复拆装与调整次数。

尽管工装设计制造需要一定投入,但其在缩短周期、降低返工、减少损伤方面的综合效益显著,长期来看具有较高的经济性<sup>[9]</sup>。

### 四、结束语

本文提出了一种基于专用检测工装的飞机舱门互换性快速检测方法,通过数字化建模、工装设计与流程优化,实现了检测精度、效率与安全性的全面提升<sup>[10]</sup>。该方法不仅适用于登机门,还可推广至其他飞机活动部件的检测中,具有广泛的工程应用前景。未来,可进一步结合工业物联网、人工智能与实时传感技术,实现检测过程的智能化与自适应调控,推动飞机制造检测技术向数字化、智能化方向发展。

### 参考文献:

[1]郭飞燕.飞机数字量装配协调技术研究[D].西北工业大学,2015.

[2]薛翔,张彤阳.现代飞机装配工艺及展望[J].现代制造技术与装备,2018,(10):184-185.

[3]唐健钧.基于精度控制的飞机装配工艺设计与优化技术研究[D].西北工业大学,2014.

[4]徐海峰.基于MBD的飞机数字化装配工艺协同设计研究[D].南京航空航天大学,2019.

[5]余泰霆.基于深度学习的复杂涂装飞机舱门检测方法研究[D].电子科技大学,2025.DOI:10.27005/d.cnki.gdz-ku.2025.000144.

[6]王丹,周航.基于大数据分析的飞机舱门运行偏差识别方法[J].现代工业经济和信息化,2025,15(04):83-85.

DOI:10.16525/j.cnki.14-1362/n.2025.04.029.

[7]赵双丰.基于数字孪生的飞机结构件互换性装配验证技术的研究[D].沈阳航空航天大学,2024.DOI:10.27324/d.cnki.gshkc.2024.000749.

[8]李云鹏,姚雄华,高帅.飞机操纵面数字化互换性设计[J].航空工程进展,2024,15(01):169-175.DOI:10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.01.20.

[9]刘向龙,涂洪铭,边毅,等.飞机舱门生产线方案设计与优化研究[J].现代制造技术与装备,2020,(03):8-12. DOI:10.16107/j.cnki.mmte.2020.0218.

[10]宋海靖,吕宝,冯凯.直升机机载设备国产化LRU互换性验证技术[J].航空维修与工程,2016,(11):59-62. DOI:10.19302/j.cnki.1672-0989.2016.11.015.