

# 机械工程基础实验

## 实验报告



姓名: 徐屹寒

学院: 机械工程学院

专业: 机械工程

学号: 3230103743

分组: 3

浙江大学机械工程实验教学中心

2025 年 9 月

## 实验名称：飞机机头数字化装配虚拟仿真实验

### 一、实验目的

1. 认知飞机结构与装配层次：了解飞机机体的高度层次化（零件-组件-部件-大部件-整机）和模块化结构特征，认知数字化装配这一涉及机械、控制、测量等多学科集成的技术领域。
2. 掌握装配工艺流程：学习飞机组件装配、部件对接的工艺流程，理解装配基准、定位方法及数字化尺寸传递方式。
3. 学习核心装备与运动控制。
4. 掌握数字化测量与数据处理：学习激光跟踪仪在装配中的应用，理解坐标系转换（现场、设备、产品坐标系）、位姿计算、孔位修正及法向调整等关键算法原理。

### 二、实验原理

1. 数字化柔性定位原理：利用三坐标数控定位器（可视为 PPPS 型串联机构）作为基础单元，通过多台定位器协同运动构成 nPPPS 型并联机构，实现飞机组件在空间内的六自由度姿态调整。自适应入位：定位器顶部采用球铰结构（球头与球托）连接飞机组件，通过集成的位移传感器拟合球心坐标，作为运动控制的目标点，保证调姿过程中组件不受拉扯或挤压。

2. 数字化测量与位姿解算：利用激光跟踪仪建立装配空间的大尺寸测量场。

坐标转换：通过测量特征点集，利用最佳拟合算法求解实际测量点集与名义点集之间的变换矩阵  $T$ ，从而计算出组件由当前位姿调整至理论位姿所需的运动量。

3. 自动化制孔与补偿技术

环形轨道制孔系统：采用双层轨道结构（内层环形导轨支撑，外层弧形轨道携带制孔执行器），提高系统刚度。

孔位修正：利用视觉测量单元捕捉基准孔实际坐标，计算偏差矢量，修正理论制孔位置。

法向修正：利用激光位移传感器测量表面距离，拟合局部平面法向量，调整刀具姿态以保证垂直制孔。

锪窝深度补偿：通过压脚光栅实时反馈工件表面位置，构建进给位置全闭环控制，自动补偿因工件受压变形或设备让刀导致的深度误差。

### 三、实验步骤

实验在虚拟仿真平台上进行，主要流程如下：

#### 1. 登录与准备

注册并登录实验平台，进入课程。完成软件简介与设备系统认知模块，熟悉定位器、

制孔执行器等硬件结构及控制软件界面。

## 2. 装配案例操作

系统初始化：启动虚拟系统，进行各轴自检与回零。

组件吊装与调姿对接（循环操作）

前段与下壁板：点击“吊装”将机头前段、下壁板上线；点击“调姿”由定位器协同调整姿态；安装端框；点击“对接”完成连接。

侧壁板与上壁板：依次对左侧壁板、右侧壁板、上壁板重复执行“吊装（入位）—调姿（多轴协同）—对接（锁紧）”流程。

## 3. 飞机部件制孔

设备就位：吊装环形轨道制孔设备，配置参数并完成各轴自检。

测量与计算：控制设备运动至站位，载入孔位文件。利用相机测量基准孔坐标，执行对中操作，点击“计算”并保存修正后的孔位文件。

制孔加工：

孔位与法向修正：系统根据测量数据自动进行多孔修正和法向调整。

加工循环：依次执行“空走”（轨迹验证）、“描点”（标记）、“加工”（实际钻孔/锪窝）。

换站：完成当前区域后，移动至下一站位，重复测量与加工步骤。

人工制孔：对自动化设备无法覆盖的区域进行人工制孔模拟。

## 4. 后处理与下架

清理：模拟清除切屑过程。

铆接：进行自动或人工铆接操作，完成紧固件安装。

机头下架：操作定位器复位（依次复位上、左、右、下壁板定位器），将组装完成的机头移出工位。

## 5. 考核与报告

进入考核模块，按上述流程独立完成操作，并在关键节点回答理论与工艺问题（如吊装、调姿、对接的原理）。

操作结束后，点击“生成报告”，保存实验数据与成绩截图，最终提交至实验平台。

# 四、实验结果

实验名称	姓名	学号	实验结果	实验成绩	实验开始时间	实验结束时间	实验用时	操作
飞机机头数字化装配虚拟仿真实验	徐屹寒	3230103743	完成	100	2025-11-02 16:00:48	2025-11-02 16:46:57	47	<a href="#">步骤详情</a>

## 五、思考题

该项目中所用的环形轨到制孔系统具有自动识别孔的位置、自动找正孔的法向、自动补偿锪窝深度的功能，请论述这些功能所采用的传感器，及其所用到的实现方法。

### 1. 自动识别孔的位置（孔位修正）

采用传感器： 工业摄像机（属于末端执行器上的视觉测量单元）。

实现方法：

测量基准孔： 利用标定好的工业摄像机测量制孔区域内基准孔（通常为 4 个）的实际位置坐标。

计算偏差： 通过图像采集及处理软件，将基准孔的实际位置与理论位置进行对比，计算出基准孔的偏差矢量（修正矢量）。

修正坐标： 应用孔位修正算法，根据基准孔的修正矢量合理确定待加工孔位的修正矢量（靠近孔位的基准孔影响更大），并将该误差值加到制孔程序中，从而获得实际的制孔位置坐标。

### 2. 自动找正孔的法向（法向修正）

采用传感器： 4 个激光位移传感器（属于末端执行器上的法向检测单元）。

实现方法：

提取位移数据： 在制孔前，位于压脚前端的四个激光位移传感器测量其到工件表面的距离。

拟合平面与法向： 根据传感器在末端执行器上的安装位置、方向及实际测量距离，计算出飞机壁板上 4 个光斑点的空间坐标。利用这些坐标点拟合出一个局部平面，并计算该平面的实际法向值。

姿态调整： 系统计算出法向修正指令，驱动制孔执行器调整末端执行器的姿态，直至刀具轴向与孔位法向之间的夹角满足精度要求。

### 3. 自动补偿锪窝深度

采用传感器： 绝对光栅 / 光栅尺（安装在压紧单元的压脚和执行器底座之间）。

实现方法：

实时测量变形量： 在制孔过程中，压脚在气动压力下紧贴工件表面。当刀具接触工件时，工件受力变形（或设备让刀）会产生“后退”，光栅尺实时测量压脚相对于执行器底座的位移量，该位移量即代表工件受压的变形量。

闭环反馈补偿： 将测得的变形量作为位置补偿值，实时反馈给进给控制系统。系统将该变形量补偿到预设的进给量中，使进给轴的运动是以相对于压脚（即相对于工件实际表面）的距离来控制的，从而消除变形对深度的影响，精确控制锪窝深度。