垂直安定面调姿平台的系统设计

范红[1]，姚小强[1]，仲秋[2]，许兴旺[2]
1．江苏省盐城技师学院智能制造学院　江苏盐城　224002
2．江苏恒力组合机床有限公司　江苏盐城　224055

摘要：针对垂直安定面为大型曲面零件且薄壁易变形的特征，采用激光测量技术，在全机坐标系下建立垂直安定面“321”六自由度全智能伺服调姿系统，彻底解决了垂直安定面复杂外形的定位难题，减少了垂直安定面加工安装定位误差。

关键词：垂直安定面；调姿系统；定位精度

1　序言

近年来，我国航空业发展迅速，航空零部件制造体量较大，且种类繁多、工序复杂以及专业性强，各环节零部件加工具有极高的工艺要求与技术壁垒[1]。针对垂直安定面结构复杂、壁薄、体积大、刚性差、易变形以及表面大部分为曲面等特点，设计了垂直安定面自动控制调姿系统，提高了零件的加工精度，解决了产品合格率低的难题。

2　垂直安定面精加工工艺分析

垂直安定面材料为钛合金Ti6Al4V-α+β锻造，普通退火。垂直安定面对接面精加工区域为2200mm×620mm；对接孔的加工要求为6个$\phi19.3^{+0.05}_{-0.05}$mm孔、10个$\phi16.1^{+0.05}_{-0.05}$孔，表面粗糙度值Ra=1.6μm；左壁板接头前大螺栓孔轴线和对接平面之间的交点相对全机坐标的位置度公差为ϕ0.5mm，其余7个大螺栓孔轴线和对接平面之间的交点相对于垂直安定面左壁板接头前大螺栓孔轴线和对接平面之间的交点的位置度公差为ϕ0.2mm；8个钛合金接头大螺栓孔轴线与对接平面的垂直度为ϕ0.05mm；钛合金接头上132个导孔的加工要求为ϕ3.26H8，导孔的表面粗糙度值Ra=3.2μm，相对全机坐标的位置度公差为ϕ0.5mm，导孔轴线与对接平面的垂直度为（1/2）°。针对垂直安定面的曲面结构特征，设计了垂直安定面智能化调姿系统，在全机坐标系内调整垂直安定面姿态，解决了大型复杂结构零件调姿找正难题，使工件相对于刀具和机床处在正确的位置，从而提高零件的定位精度和生产效率[2-4]。

3　垂直安定面调姿平台的机械设计

垂直安定面调姿平台主要由调整模块1、调整模块2、调整模块3、重心支撑装置和推送大滑台等组成，如图1所示。垂直安定面采用3个千斤顶支撑的方式安放。

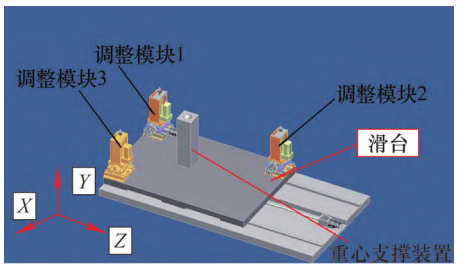


图1　垂直安定面调姿平台的组成

（1）调整模块　调整模块由十字滑台和Z向垂直支撑组成。以调整模块1为例，如图2所示，包括十字滑台和Z向垂直支撑，其中十字滑台采用双伺服电动机驱动，垂直支撑采用伺服电动缸驱动。

调整模块2的垂直支撑与调整模块1一致，十字

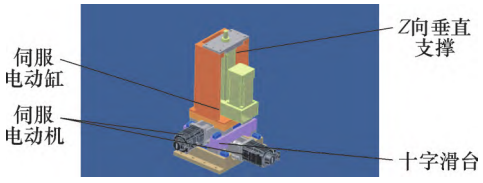


图2　调整模块1

滑台用一只伺服电动机驱动控制单轴，另一轴随动自由，如图3所示。

调整模块3的垂直支撑与调整模块1一致，十字滑台随动自由，如图4所示。

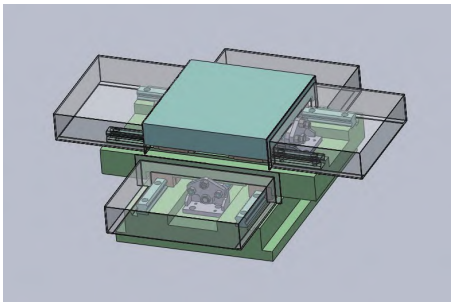


图3　调整模块2的滑台

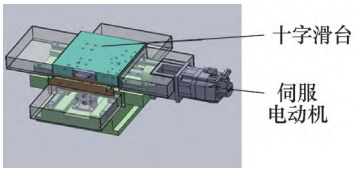


图4　调整模块3的滑台

*Z*向垂直支撑是一种将电动机的旋转运动转变为*Z*向的直线往复运动的伺服结构，由球形铰接接头、防脱套、导向筒和伺服电动缸等组成，如图5所示。驱动采用能够精确定位并且结构紧凑的GSX40-152伺服电动缸，以实现远距离控制和自动控制。伺服电动缸行程长度150mm，线性速度952mm/s，连续推动能力458～51000N。伺服电动缸推杆通过导向筒推动球形铰接接头上下运动以达到定位的目的。支撑承载能力≥1500kg，在支撑上施加1000N力时，支撑位移＜0.05mm。

3个十字滑台与*Z*向垂直支撑组合成“321”调姿装置，如图6所示，可以实现6自由度调姿。

（2）重心支撑装置　垂直安定面需要防止因重力而产生的变形，以免影响零件的加工精度。在

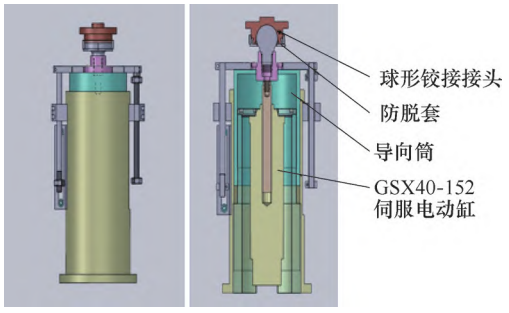


图5　*Z*向垂直支撑

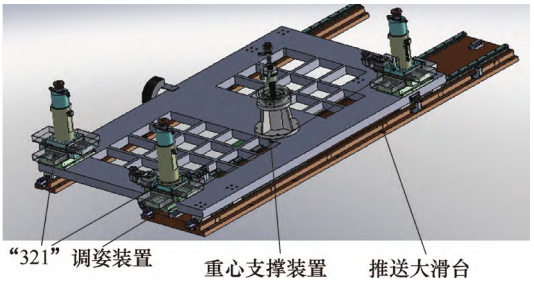


图6　垂直安定面调姿装置

垂直安定面重心位置应采取适当的支撑，但不得影响零件的调姿和零件的形状，因此重心支撑装置采用弹性软体支撑。采用可调节方式，以避免刚性冲击，底面浮动，靠弹簧复位。重心支撑装置可以手动调节支撑力，支撑靠弹簧力提供，$N_{max}=4000N$。

（3）滑台　滑台内部采用田字筋结构支撑，受力状况好，不易变形，有利于保持精度。采用3个线性导轨以避免移动滑台因承重而变形。

4　垂直安定面调姿平台的软件设计

垂直安定面调姿平台软件系统主要包括测量模块、数据处理模块、数据管理模块、运动仿真模块和运动平台控制模块等，如图7所示。

（1）测量模块　测量模块包含激光跟踪仪通信参数管理、测量参数设置及测量数据采集等功能。测量模块用专用测量软件SA来完成，通过开发与SA软件的通信接口，将测量数据集成到调姿平台软件中[5]。激光跟踪仪系统主要由跟踪头、控制箱、用户计算机、靶标和其他测量附件等组成[6]。

（2）数据处理模块　数据处理模块包含测量数据分析、坐标变换算法、位姿最佳拟合、调姿轨迹规划和插补算法等。数据处理模块根据零件调姿的要求，工艺基准点坐标以零件完成精加工测量数据时的位姿设计为基准，在调姿过程中再根据工艺基准点的当前测量数据和基准位姿进行对比，求出零件当前的位姿参数。对于自动姿态调整可以求解出调姿轨迹并后置处理生成数控系统可执行的调姿代码，从而完成调姿；对于手动姿态调整可以求解出各定位器的目标位置及其各自的位移量，从而指导完成人工姿态调整。采用五次多项式的方法来规划零件的调姿轨迹，零件的运行较为平稳，不会造成变形或损坏。

（3）数据管理模块　能够对调姿过程中涉及到

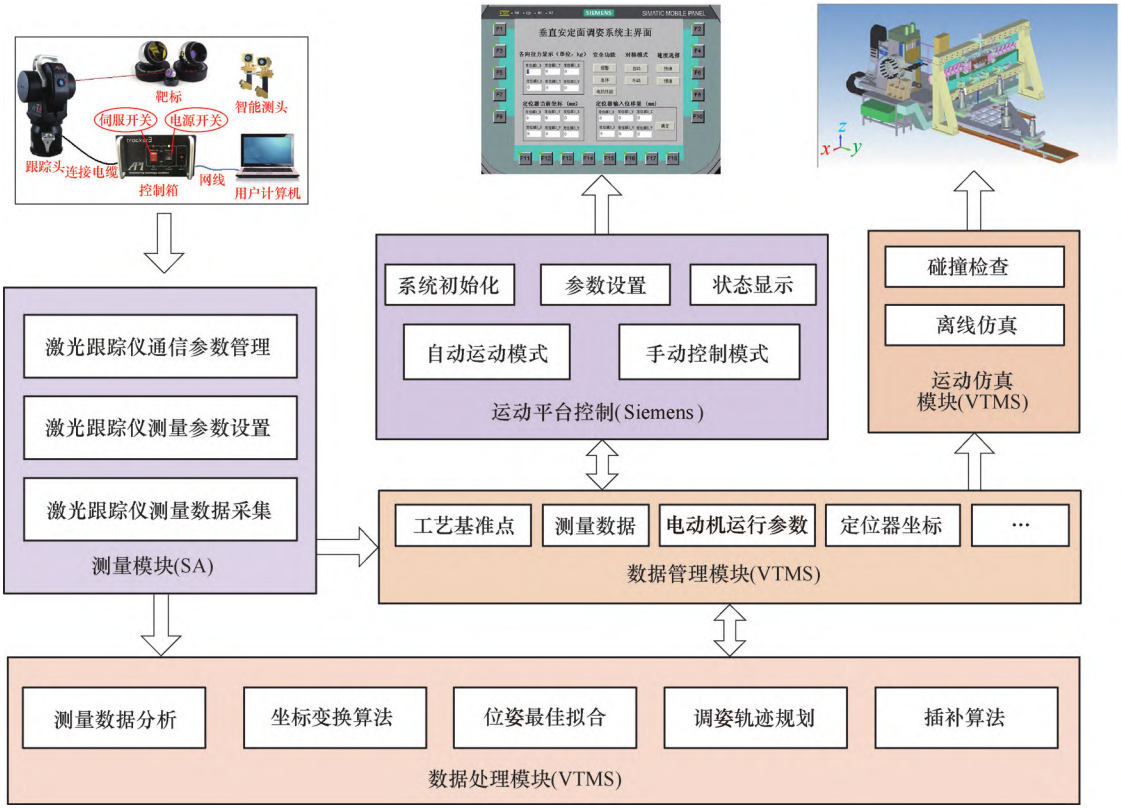


图7　垂直安定面调姿平台软件系统功能模块

的各类数据进行管理，包括激光跟踪仪的工艺基准点、测量数据、定位器的坐标以及电动机的运行参数等。

（4）运动仿真模块　仿真模块包括调姿过程离线仿真和实时仿真。仿真模块能够直接读入设计模型，包括机床的模型、调姿机构的模型和零件的模型。离线仿真主要用于检查调姿轨迹的正确性以避免干涉，同时能够根据调姿机构和零件的动力学模型估算出调姿时间，从而合理安排调姿工序。实时仿真即在线仿真，需要在调姿过程中实时采集零件上的关键点坐标，并计算出其实时的姿态并更新显示，能够使得调姿过程可视化，更容易受控。

（5）运动平台控制　仿真无误后，能够输出每个定位器的位移量来指导人工调姿；还能够根据调姿轨迹后置处理输出调姿G代码，发送给数控系统完成自动调姿。

垂直安定面姿态调整完成后，由夹紧支撑机构对垂直安定面进行夹紧，如图8所示，随后采用推送装置即大工作台，将零件送至加工区。

经过机构检测，该设备的调姿精度高，完全符合用户使用要求，检测结果见表1。

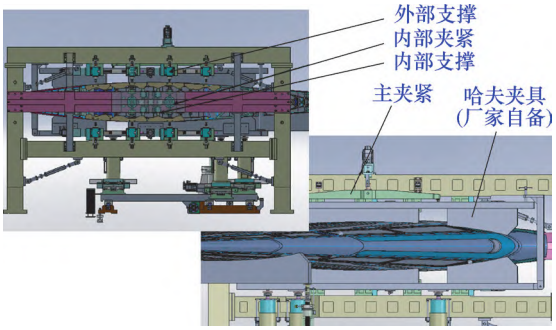


图8　夹紧支撑机构

5　结束语

本文通过对垂直安定面结构特点进行分析，设计了垂直安定面调姿平台，解决了零件定位精度低导致的加工产品合格率低的难题，结论如下。

1）通过3个十字滑台与垂直支撑组合成“321”调姿装置，实现6自由度调姿；多点浮动辅助支撑夹具结构，避免刚性冲击，具有体积小、结构简单和工作可靠的特点。

2）采用伺服电动机和伺服电动缸实现快速精准定位。

3）设计了调姿平台的软件系统，可运动仿真、

表1　垂直安定面调姿平台的精度检测　（单位：mm）

检测内容		公差	实测
三坐标调姿装置1	*X*轴、*Y*轴运动方向的垂直度	0.02	0.011
	*Z*轴运动方向的摆动	0.04	*X*：0.02，*Y*：0.02
	*Y*轴运动与大工作台*Y*轴的平行度	0.02	0.02
	线性轴线的定位精度	*X*、*Y*、*Z*：0.03	*X*：0.03，*Y*：0.015，*Z*：0.02
三坐标调姿装置2	*X*轴、*Y*轴运动方向的垂直度	0.02	0.016
	*Z*轴运动方向的摆动	0.04	*X*：0.02，*Y*：0.01
	*Y*轴运动与大工作台*Y*轴的平行度	0.02	0.013
	线性轴线的定位精度	*X*、*Z*：0.03	*X*：0.02，*Z*：0.02
三坐标调姿装置3	*X*轴、*Y*轴运动方向的垂直度	0.02	0.005
	*Z*轴运动方向的摆动	0.04	*X*：0.03，*Y*：0.015
	*Y*轴运动与大工作台*Y*轴的平行度	0.02	0.002
	线性轴线的定位精度	*Z*：0.03	0.02

监控调姿及控制薄壁件夹紧变形，降低了操作强度，提高了生产效率。

参考文献：

[1] 高航，宋强，刘国，等. 航空发动机整机数控安装多轴调姿方法及其应用[J]. 航空制造技术，2017（11）：19-20.

[2] 程燕，李树军，秦现生，等. 大部件调姿平台的开发与设计[J]. 机械制造，2015（8）：42-44.

[3] 王启申，袁培江，王田苗，等. 航空制孔末端执行器中调姿机构的设计与实验[J]. 北京航空航天大学学报，2014，40（7）：988-993.

[4] 范红，仲秋，许兴旺，等. 垂直安定面专用机床的设计[J]. 2018（9）：129-132.

[5] 范红，姚小强，仲秋，等. 组合机床在线测量系统的设计[J]. 金属加工（冷加工），2023（5）：66-68.

[6] 李辉，刘巍，张洋，等. 激光跟踪仪多基站转站精度模型与误差补偿[J]. 光学精密工程，2019，27（4）：771-783.

MW 20240819

公　示

根据《国家新闻出版署关于开展2024年第七版新闻记者证全国统一换发工作的通知》（国新出发函〔2024〕176号）、《新闻记者证管理办法》的要求，我单位《金属加工（冷加工）》编辑部已对拟换发新闻记者证的人员进行了严格审核，现将我单位拟换发新闻记者证人员的名单进行公示，公示期（10天）2024年11月1日——11月10日。举报电话为88379790。

新闻记者证名单：

姓名：吕建新　记者证号：K11562666000003

姓名：李一帆　记者证号：K11562666000004