

# 大部件对接的数控定位器技术研究

## Technical Research of NC Positioner for Major Part Butt

北京航空制造工程研究所 荆道艳 许国康 王 姮 杜兆才

**[摘要]** 对飞机数字化装配技术中的数控定位器进行技术研究,介绍数控定位器的工作原理,综合考虑制造、装配、维护和保养等工艺,进行方案和结构设计,并总结设计、制造和装配过程中遇到的技术难点,针对技术难点提出解决方法。

**关键词:** 数字化装配技术 数控定位器 大部件

**[ABSTRACT]** The technology of NC positioner of aircraft digital assembly technology is researched. The working principle of NC positioner is introduced, synthetically considering the technics of manufacture, assembly, maintenance and support. The project and frame is designed, and the technical difficulties are summarized and resolved in the process of design, manufacture and assembly.

**Keywords:** Digital assembly technology NC positioner Major part

飞机数字化装配技术是基于数字化标准工装的协调、数字化模拟仿真、激光测量、数字化定位、协同控制等多种先进技术的综合。近年来,空客、波音等公司逐步采用了飞机数字化、移动式装配线技术。2002年空客公司在德国组建了1条用于装配A320的移动生产线。2006年11月,波音公司开始启用1条移动装配线来制造波音777飞机。目前,我国飞机总装和装配采用了一些先进的技术,如利用激光跟踪测量技术安装型架,简化了装配型架结构。但“传统意义的”装配和对接过程依然使用大型的固定对接平台以保证每一部件(机身、机翼等)能准确地定位在装配站位上,依靠人工进行装配,但与发达国家相比还存在很大差距。

本课题就“大部件数字化对接系统”项目中的数控定位器进行技术研究,研究数控定位器的工作原理后,在满足技术要求前提下,充分考虑制造、装配、维护和保养等工艺性,对数控定位器进行方案设计;就方案设计、制造和装配过程中遇到的技术难点进行总结;以及针对技术难点提出解决方法。

### 1 工作原理

“大部件数字化对接系统”项目主要通过4台数控定位器之间的协同运动调整大部件姿态,然后与另1大

部件对接。充分考虑大部件入位、调姿、对接过程的便捷性和安全性。数控定位器可实现3个坐标方向的协同运动,可自动化控制和人工单轴操作。

数控定位器的Z向系统用于支撑大部件,X、Y向系统用于移动、定位大部件。数控定位器工作原理(如图1、2所示):采用伺服电机、减速器、联轴器、轴承工

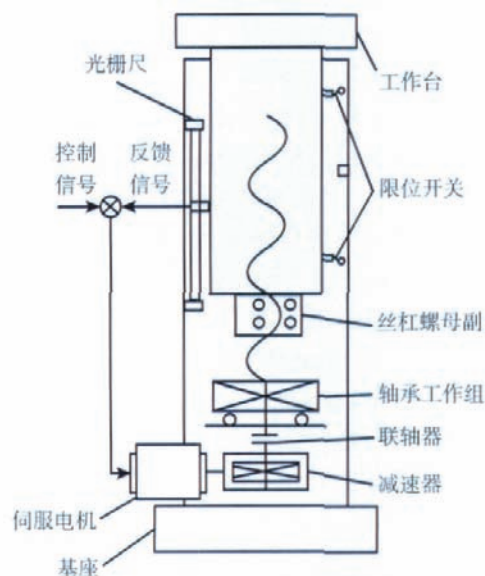


图1 Z向系统工作原理图

Fig.1 Working principle of Z-direction system

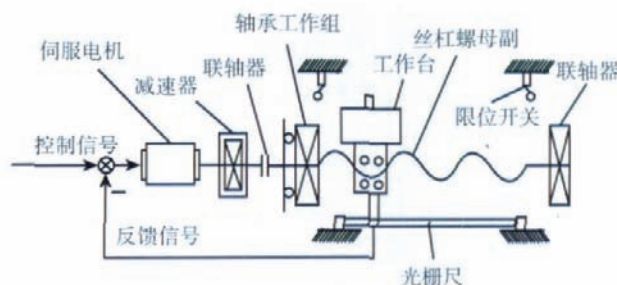


图2 X和Y向系统工作原理图

Fig.2 Working principle of X and Y-direction system

作组和丝杠螺母副传动,并由光栅尺反馈控制,使大部件能够沿Z、X、Y 3个坐标方向移动。其中,使用带旋转编码器的伺服电机、带预载的高精度滚珠丝杠以及高精度直线滚动导轨是为了保证系统的传动精度。

采用封闭式光栅尺,在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3 个坐标方向实现全闭环控制,提高系统的运动控制精度。 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3 个坐标方向设计限位开关,提高数控定位器的工作安全性。

## 2 方案设计

在满足技术要求的前提下,首先确定数控定位器的整体结构形式,然后通过公式计算,确定数控定位器的伺服电机、丝杠、导轨、轴承等外购件,最后针对所选外购件对数控定位器进行结构设计。

数控定位器主要由基座、运动组件、连接接头和机床防护罩等组成,运动组件具有  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  向移动系统或  $X$ 、 $Y$  向随动系统。数控定位器带有锁紧机构,用于完成调姿和对接后,对大部件姿态进行锁紧。数控定位器基座通过地脚螺栓分别固定在飞机装配车间的地基和  $Y$  向系统安装基座上,使数控定位器沿整体坐标系的  $Y$  向移动。 $X$  向系统安装在  $Y$  向移动系统上,使数控定位器沿整体坐标系的  $X$  向移动。 $Z$  向系统安装在  $X$  向移动系统上,使数控定位器沿整体坐标系的  $Z$  向上下移动。

$X$ 、 $Y$  向系统的电机带抱闸,锁紧数控定位器在  $X$ 、 $Y$  向的工作位置, $Z$  向系统靠伺服电机的抱闸和蜗轮蜗杆的自锁特性来锁紧  $Z$  向工作位置。 $Z$  方向设计力传感器,通过 3 个方向力的反馈来控制、调整数控定位器的运动,如运动协同性、承载均匀性等;配有随动系统,以适应大部件上架和调姿过程所产生的变形; $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  3 个方向分别设置了机械式限位开关,提高数控定位器的工作安全性。滚珠丝杆、直线导轨上设置金属防护罩和风琴罩,以改善传动系统的环境,提高使用寿命。

## 3 技术难点及解决方法

在参考国内外相关资料基础上,针对项目本身特点,在设计适合项目的数控定位器过程中,尤其在方案设计和结构设计初期,遇到不少技术难点,针对技术难点提出各种解决方法并选择最佳解决方法。

### 3.1 数控定位器的结构形式

定位器主要有 2 种结构形式:柱式定位器和塔式定位器。柱式定位器的  $Z$  向移动系统主要采用圆筒式立柱结构。AIT 公司采用柱式定位器(如图 3 所示),为波音、空客和庞巴迪等公司研制的移动式装配系统。中国商飞上海飞机制造厂也采用柱式定位器研制手动对接系统(如图 4 所示)。

塔式定位器又分侧面支撑式定位器和中间支撑式定位器,一般结合整体托架使用。单独使用时,侧面支撑式定位器一般在机身段对接中使用(如图 5 所示)。中间支撑式定位器一般在机翼段对接中使用(如图 6 所示)。

结合项目中的大部件采用 4 点支撑方式的特点;柱



图3 AIT公司设计的柱式定位器

Fig.3 Cylindrical positioner designed by AIT



图4 上飞厂设计的柱式定位器

Fig.4 Cylindrical positioner designed by SAMF

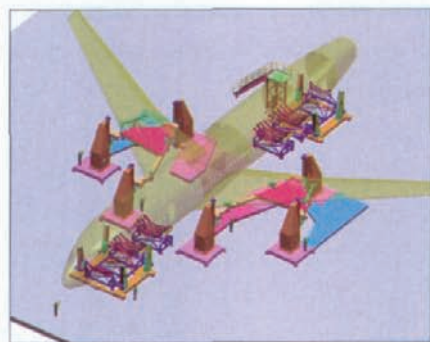


图5 侧面支撑式定位器

Fig.5 Positioner with lateral support



图6 中间支撑式定位器

Fig.6 Positioner with middle support

式定位器  $Z$  向系统无法设计工作平台,无法安装连接接头、测力传感器等设备;侧面支撑式定位器容易产生倾覆力矩;在充分借鉴国外定位器的成熟技术基础上,采用中间支撑式定位器结构形式。

### 3.2 支撑载荷

针对项目中提出的数控定位器的有效载荷为 5t, 有 2 种设计方案: 第一种方案是气缸或液压缸支撑, 第二种方案是丝杠直接支撑载荷。

第一种方案的优点是能提供比较大的支撑力, 减少丝杠承载; 缺点是气缸和液压缸与伺服电机的同步技术不好控制, 气缸和液压缸长期工作条件下, 气体或液压油容易泄露而造成工作不稳定, 影响数控定位器的使用寿命, 液压油的泄漏也容易污染环境。

第二种方案常用的丝杠有滚珠丝杠、梯形丝杠和行星滚柱丝杠。各种丝杠的优缺点: 滚珠丝杠承载力强、精度高、技术成熟, 但制造成本较高, 周期较长, 方案设计初期选用型号 FSW80 的丝杠, 报价 2.2 万, 周期 8 周; 梯形丝杠成本低、承载力强, 但精度低、效率低, 制造成本不足 1 万, 周期只需 4 周, 但传动效率只有 30%, 需要增加控制成本; 行星滚柱丝杠能承受重型载荷, 精度高, 但成本很高, 供货周期长, 方案设计初期选用型号 RV51 的行星滚柱丝杠, 报价 20 多万, 周期 14 周。

因项目周期紧张和成本等因素, 放弃第一大方案, 选择能承受大型载荷的重型滚珠丝杠。除丝杠承受载荷外, 直线导轨也承受着载荷和载荷偏置引起的扭矩。常用的直线导轨有滚珠导轨、滚柱导轨和矩形导轨。滚珠导轨能承受大载荷、大扭矩, 装配简单, 现在的数控机床通常使用滚珠导轨; 滚柱导轨比滚珠丝杠承载能力大, 但装配费工时; 矩形导轨能承受大载荷、大扭矩、成本低, 但装配费工时, 传统机床常使用矩形导轨; 因本项目周期紧张, 故选择能承受大型载荷的滚珠直线导轨。

### 3.3 Z 向系统的锁定技术

数控定位器的 Z 向系统运动到位后, 必须锁定, 数控定位器才能承受和支撑 5t 载荷。Z 向系统设计有 2 种锁定技术方案, 一种是气缸、液压缸锁定技术, 另一种是利用 Z 向系统外购件的自锁特点进行锁定, 如丝杠自锁、蜗轮蜗杆自锁以及电机抱闸。气缸或液压缸锁定技术的优点是能提供比较大的推力, 减小丝杠承载。缺点是气缸和液压缸与伺服电机的同步技术不好控制; 另外气缸和液压缸容易泄露, 推力不稳定, 而且液压油泄漏影响工作环境。所以数控定位器不采用该技术。

Z 向系统外购件的自锁特点主要分 3 种形式: 第一种形式是梯形丝杠的自锁特性。优点是成本低, 制造周期短。缺点是梯形丝杠精度低, 传动效率低, 一般传动效率为 30% 左右, 需提高电机的扭矩和功率, 增加成本。第二种形式是电机抱闸, 电机抱闸锁定减速器和滚珠丝杠转动达到锁定目的。优点是传动效率高, 能达到 90% 以上, 缺点是影响电机使用寿命。第三种形式是电机抱闸和蜗轮蜗杆减速器的自锁。优点是双重锁定, 更安全。

缺点是蜗轮蜗杆减速器的传动效率与电机转速成正比。结合数控定位器的工作速度, 选择合适的丝杠螺距和合适的减速比, 提高电机转速, 提高传动系统效率, 使蜗轮蜗杆减速器满足数控定位器的使用要求。Z 向系统的锁定技术采用电机抱闸和蜗轮蜗杆的自锁形式。

### 3.4 Z 向立柱箱体和 Y 向床身箱体形式

Z 向立柱箱体采用左右箱体对合的装配工艺, 当导轨滑块与丝杠调整平行后, 再把光栅尺和限位开关安装在滑枕和右箱体上, 最后把左箱体与右箱体对合后用螺栓拧紧, 装配定位销。维护时, 只需打开右箱体, 即可对导轨滑块、光栅尺、限位开关进行检修。

Y 向传动系统的床身初始设计时采用实体形式, 比较重, 把实体结构中间掏空, 在内部添加加强筋, 最后优化为箱体形式(如图 7 所示), 优化前床身重量为

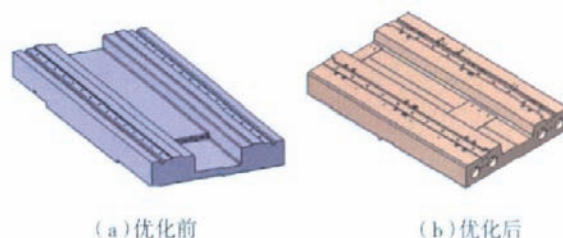


图7 Y向床身优化前后

Fig.7 Optimization of Y-direction lathe bed

1011kg, 优化后床身为 676kg。实体形式床身在浇注成形时, 散热性不好导致床身成形过程中容易产生裂纹、变形等缺陷。优化后的箱体式床身, 一方面浇注成形时散热性好, 成形稳定; 另一方面箱体内部的加强筋增加箱体的强度和刚度。

### 3.5 减速器座与轴承座一体化技术

一般传动系统把减速器座和轴承座做成 2 个零件, 装配时, 通过轴承座调整丝杠与导轨的平行度, 然后调整减速器座的位置, 使减速器输出轴与丝杠同轴, 耗费装配工时。

把减速器座和轴承座做成一个零件(如图 8 所示), 在零件的加工中保证减速器输出轴与丝杠同轴。X、Y

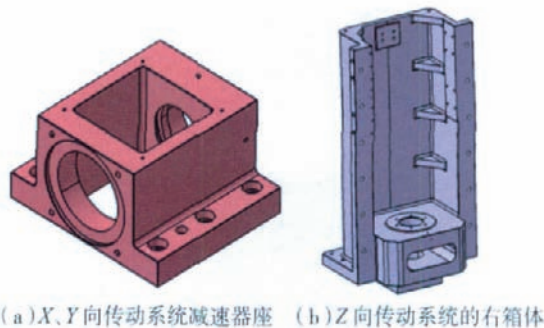


图8 减速器与轴承座一体化

Fig.8 Integrated technology of reducer and bearing seat

向传动系统把减速器和轴承座做成一体, Z 向减速器座和轴承座则与右箱体做成一体, 既减少零件数量, 又保证加工精度, 还减少加工和装配工时, 节约成本。

### 3.6 基座系统 3 条导轨方案

一般的传动系统采用 2 条导轨、4 个滑块的组合形式, 有时为增加机床的强度和刚度, 采用 2 条导轨、6 个滑块甚至 8 个滑块等组合方式。

数控定位器的基座系统方案, 设计初期采用 2 条导轨、6 个滑块的组合方式, 经过优化后采用了 3 条导轨、6 个滑块的组合方式, 虽然增加了装配时调整 3 条导轨平行度的工作量, 但加强了数控定位器基座系统的强度和刚度, 加强了数控定位器的基础。结构形式如图 9 所示。

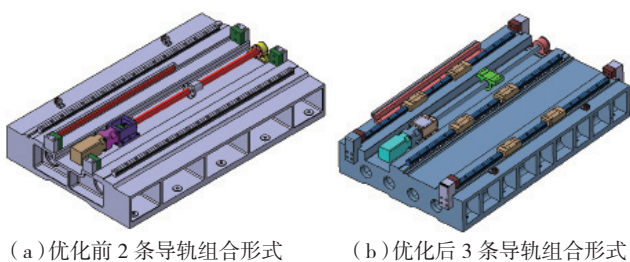


图9 基座系统导轨布置优化前后  
Fig.9 Optimization of guideway layout of basic seat system

## 4 结论

对数控定位器的技术难点研究总结如下:

(1) 结合项目特点, 选择中间支撑方式的塔式数控定位器结构形式。

(2) 选择带预载的高精度滚珠丝杠以及高精度直线滚珠导轨, 不仅满足载荷和使用寿命等技术要求, 还保证系统的运动(传动)精度。

(3) 在尽量提高 Z 向系统的传动效率的前提下, 选择电机抱闸和蜗轮蜗杆的自锁特点, 双重锁定 Z 向系统的工作位置。

(4) 零部件一体化的制造趋势下, 将减速器座和轴承座做成一体, 减少零件数量和加工、装配等工时, 节约成本。

(5) 为提高数控定位器的整体强度和刚度, 优化数控定位器的设计和零部件结构形式, Y 向床身优化成箱体形式, 基座系统采用 3 条导轨的组装方式。

### 参考文献

[1] 许国康. 飞机大部件数字化对接技术. 航空制造技术, 2009(24):346.  
 [2] 邹方, 张书生. 飞机总装自动化校准对接系统. 航空制造技术, 2008(7):34.  
 [3] 邹翼华, 刘志存, 范玉青. 大型飞机部件数字化对接装配技术研究. 计算机集成制造系统, 2007(7):1368. (责编 飞翔)

(上接第 96 页)

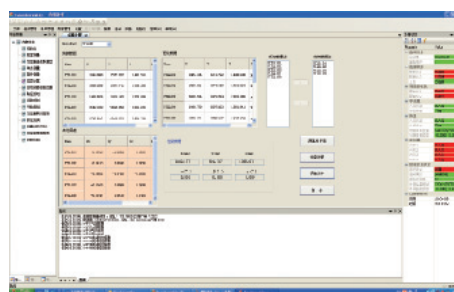


图7 用户界面  
Fig.7 Software interface of user

护和安全处理。如:(1)定位器机械故障可能导致系统运动阻力增加或出现卡死现象, 系统通过对各运动轴电流的监控来发现问题并及时报警和中断对接过程;(2)通过对压力传感器、限位开关等各类控制系统传感器反馈信息实时监控, 对电器系统的异常情况及时报警并中断运动过程;(3)针对网络通讯故障也采取即时报警处理的方案, 对运动数据的正确性以及数据传输的正确性进行验证和校验;(4)在用户交互操作时, 对用户的误操作和错误的输入数据的正确性进行事先评估, 发现错误时及时提示。

## 3 结束语

采用自动化对接技术可以有效地提高飞机对接装配的精度和效率(以文中提到的机翼对接系统为例, 部件对接定位误差能控制在 0.2mm 以内, 重复定位误差控制在 0.1mm), 能适应快速研制生产和低成本制造的要求, 是现代飞机对接装配的必由之路。为了将该技术更好地应用到我国飞机装配生产过程中, 需要开展基于仿真技术的部件产品的变形分析、在允许变形范围内装配对接路线的优化以及动力学仿真分析等问题。自动化对接装配是自动化、柔性化装配的关键环节之一, 为了避免信息化孤岛的局面应将其纳入整个企业信息管理, 实现对接装配信息管理系统与企业 PDM、ERP 等信息系统的集成, 并实现与车间生产管理系统的集成, 为后期建立柔性装配生产线, 从根本上改变我国装配技术落后的局面打好技术基础。

### 参考文献

[1] 许国康. 飞机大部件数字化对接技术. 航空制造技术, 2009(24):42-44.  
 [2] 王建华. 飞机总装对接技术. 航空制造技术, 2010(2):32-35.  
 [3] 杜兆才, 邹方. 多机器人协调操作系统实现飞机大型部件对接的轨迹规划. 航空制造技术, 2009(24):88-91.  
 [4] 余锋杰, 王青. 飞机自动化装配过程数据集成与实现. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(2):207-212. (责编 良辰)