

机翼数字化对接数控定位器的有限元分析*

FEA of NC Positioner for Aircraft Part Assembly

中航工业北京航空制造工程研究所 荆道艳 杜兆才 薛贵军 姚艳彬

[摘要] 以某型机翼数字化对接系统的数控定位器为分析对象,在 CATIA 软件中建立有限元模型。在确定材料属性、极限载荷工况的基础上,通过有限元分析软件 ANSYS 对其进行结构静强度和模态分析,得到数控定位器的应力、位移和固有频率,以此分析结果校核数控定位器的设计合理性,并指导数控定位器的结构优化设计。

关键词: 数控定位器 有限元分析 模态分析

[ABSTRACT] The FEA (finite element analysis) of NC positioner for the certain wing of aircraft assembly is studied, and CATIA is used to build the finite element model. ANSYS, a finite element analysis software, can analyze configuration static intensity and normal mode of the model on the condition of material attribute and limit load, which gains NC positioner's stress, displacement and natural frequency. Then it can analyze the rational of NC positioner's design through analysis results and instruct the structural optimal design of NC positioner.

Keywords: NC positioner FEA Mode analysis

飞机部件数字化自动对接系统用于实现飞机部件姿态位置的实时控制、调整,完成调姿与对接,其主要由数控定位器、测量系统、控制系统和调姿集成软件系统组成^[1-2]。

某型机翼数字化对接系统由 4 个三坐标数控定位器支撑大型外翼而组成的调姿系统,通过协同控制数控定位器的各向运动,实现外翼的空间 6 自由度位姿调整,由此构成一个冗余驱动的并联机构。三坐标数控定位器相当于并联机构的支链,其动态特性的好坏,直接影响着系统位姿调整的工作特性^[3]。

本文以某型机翼数字化对接系统的数控定位器为分析对象,在 CATIA 软件中建立有限元模型。在确定材料属性、极限载荷工况的基础上,通过有限元分析软件 ANSYS 对其进行结构静强度和模态分析,得到数控定位器的应力、位移和固有频率,以此分析结果校核数控定位器的设计合理性,并指导数控定位器的结构优化设计。

1 数控定位器的模型建立和简化

1.1 几何模型

4 个数控定位器结构形式基本一致,本文选取 3 号数控定位器进行分析,结构如图 1 所示。主要由床身底座、展向系统、航向系统、垂向系统、浮动平台和接头组件等构成。其中,展向系统及以上结构可以沿底座导轨展向滑动;航向系统及以上结构可以沿展向系统导轨航向滑动;垂向系统与航向系统导轨用螺钉连接;垂向系统箱体及以上结构可以沿垂向系统导轨垂向滑动;工作平台和转载箱体通过螺栓连接在一起,工作平台上设计两层浮动平台,浮动平台及接头组件可以一起沿浮动导轨滑动。

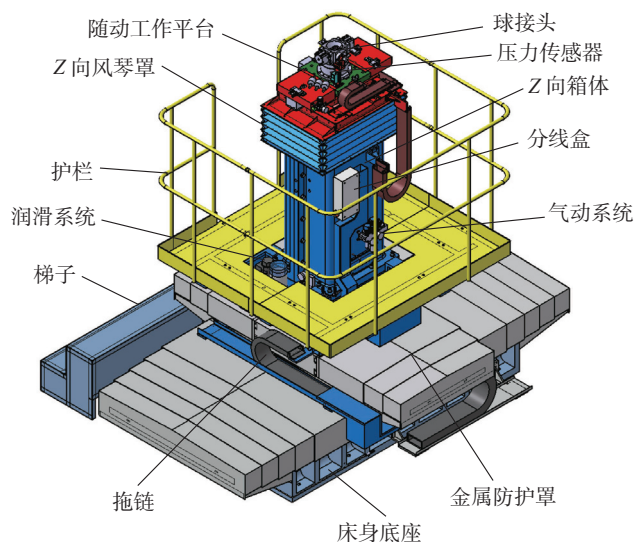


图1 数控定位器结构

Fig.1 Structure of NC positioner

1.2 简化模型

数控定位器的不必要的零部件以及多余的螺栓孔,将限制有限元分析网格的大小,影响整个结构的网格分布,增加网格的数量,使模型过于复杂。因此,将数控定位器导入到 ANSYS 前,必须对数控定位器进行修改和简化处理,使其能符合 ANSYS 的要求,节省大量的分析时间,避免资源的浪费。简化后模型如图 2 所示。

(1) 删除模型中不受力或者受力很小的部件,如,护栏、梯子、拖链、防护罩、航向和展向传动电机、减速器

* 国家科技支撑计划资助项目(2011BAF13B06)资助。

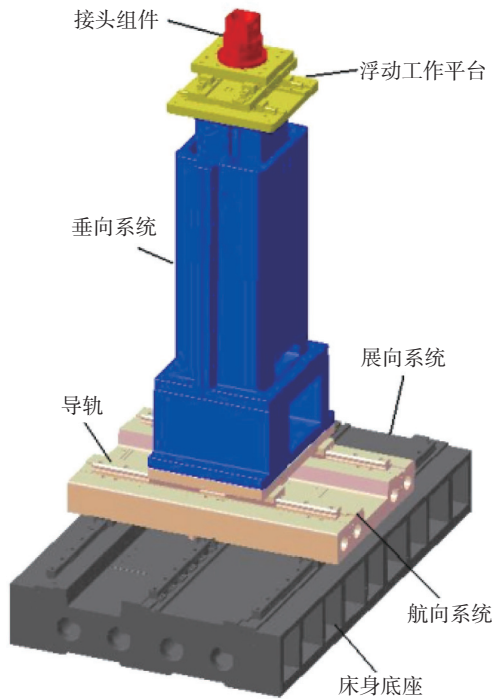


图2 数控定位器简化分析结构
Fig.2 Simple structure of NC positioner

等零件。这些零部件在受力分析中对定位器的影响可以忽略不计。

(2)删除零件中的微小的特征,如,床身底座、滑枕、箱体、工作平台和接头组件的螺钉连接孔,轴上的定位销、键槽。这些微小的特征不影响结果的准确性,但在划分网格时微小的特征却对网格的精度要求很高,增加了网格的密度,使计算量成倍的增加,普通的计算机难以胜任,并未提高计算的准确性。

2 数控定位器的有限元分析

2.1 数控定位器载荷和约束

按设计的额定载荷计算,数控定位器接头组件的球窝施加垂直向下的载荷 50000N,本身承受自重,数控定位器通过底座与地脚连接,在床身底座与垫铁连接的表面施加固定约束。由于数控定位器运动速度慢,忽略数控定位器的运动副,处理为刚性连接,如图 3 所示。

2.2 数控定位器有限元模型

将简化后的数控定位器模型倒入 ANSYS 软件中,利用 ANSYS 软件中自适应网格划分工具,网格数量增加,计算精度会有所提高,但计算规模也会增加。网格数量增加到一定程度后对计算精度影响不大,所以,对数控定位器进行自适应网格划分即可,共划分为 619154 个单元,共有 1073563 节点,有限元模型如图 4 所示。

2.3 材料属性赋值

数控定位器的床身底座、航向和展向滑枕以及垂

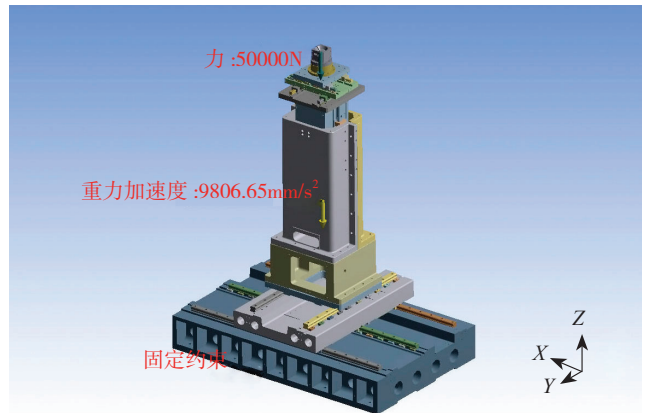


图3 数控定位器的载荷和约束
Fig.3 Load and restriction of NC positioner

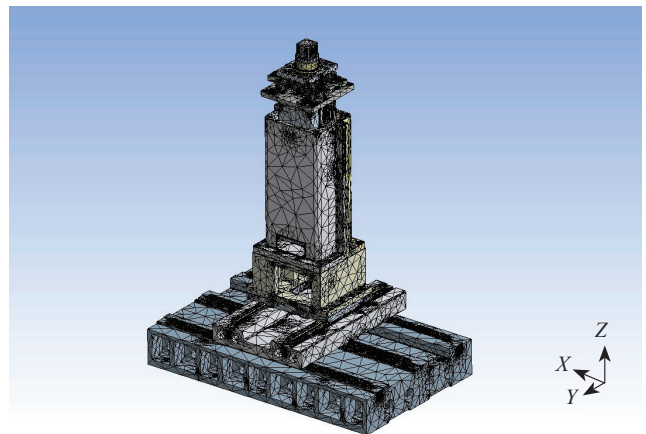


图4 数控定位器有限元模型
Fig.4 FAE model of NC positioner

向立柱、箱体采用铸铁材料 HT250,浮动工作平台和导轨采用高强度结构钢 45,接头组件采用高强度结构钢 40Cr,具体材料属性如表 1 所示。

表1 材料属性

材料牌号	抗拉强度 σ_t /MPa	弹性模量 E /MPa	密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^3)$	泊松比 μ
HT250	200	1.1×10^5	7200	0.28
40Cr	590	2.1×10^5	7800	0.3
45	590	2×10^5	7890	0.3

2.4 等效应力分析

数控定位器的最大等效应力为 136.5MPa,发生在数控定位器接头组件的球窝里面,接头组件的材料 40Cr。其他如床身底座、滑枕、箱体等蓝色区域等效应力小于 20MPa,采用材料为 HT250。计算结果表明,最大等效应力远小于屈服强度,因此,数控定位器的结构尺寸和材料可以满足使用要求,数控定位器的设计是合理的。

数控定位器的等效应力分布情况如图 5 所示。

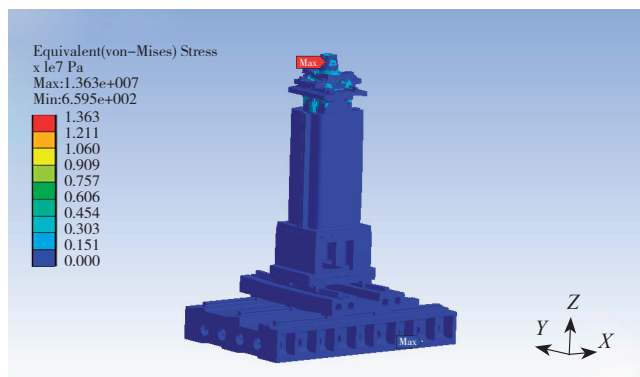


图5 数控定位器等效力图
Fig5 Equivalent stress of NC positioner

2.5 位移分析

综合位移能真实反映数控定位器在 X、Y、Z 3 个方向的变形情况,所以选择数控定位器的综合位移作为分析对象,最大位移为 0.016mm,发生在接头组件的球窝上,最小位移发生在工床身底座的边缘处。由于工艺接头承受的主要是 Z 向载荷,因此,工艺接头产生的位移主要取决于 Z 向载荷,位移规律符合通常的变形规律。

数控定位器的综合位移分布情况如图 6 所示。

2.6 模态分析

数控定位器必须具有足够的刚度和强度,才能满足数字化装配系统的装配、疲劳寿命及其使用要求,同时还应考虑数控定位器的动态性能。数字化装配系统在使用过程中,必须综合考虑制孔设备、厂房天车等设备的固有频率,避免共振。

在模态分析过程中,模态的提取和扩展选项时,选取 Block Lanczos 法提取模态,该方法计算速度快,精度高。数控定位器前 6 阶模态结果表 2。数控定位器前 6 阶模态振型图如图 7 所示。

2.7 分析结论

在承受额定载荷的情况下,数控定位器的最大等效应力为 136.5MPa。其他如,床身底座、滑枕、箱体等蓝色区域等效应力小于 20MPa,远小于材料的许用应力,表明数控定位器的材料和结构尺寸合理,满足使用要求。

数控定位器的最大位移为 0.016mm,发生在接头组件的球面上;最小位移发生在工床身底座的边缘处,表明数控定位器的刚性很强,满足使用要求。

模态分析得出数控定位器的自身固有频率,在设计阶段,可通过改变定位器的结构来

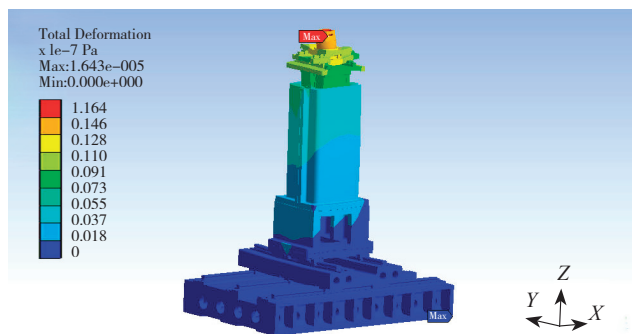


图6 数控定位器综合位移图
Fig.6 Total displacement of NC positioner

表2 数控定位器前6阶振动频率及相应振型

模态阶数	频率值 /Hz	数控定位器模态振型描述
第 1 阶	72.24	数控定位器接头组件 + 垂向箱体 一阶展向弯曲振动
第 2 阶	81.47	数控定位器接头组件 + 垂向箱体 一阶航向弯曲振动
第 3 阶	253.12	数控定位器接头组件 + 垂向箱体 二阶展向弯曲振动
第 4 阶	257.85	数控定位器接头组件 + 垂向箱体 二阶航向弯曲振动
第 5 阶	275.95	数控定位器接头组件 + 垂向箱体 一阶垂向扭转振动
第 6 阶	362.37	数控定位器接头组件 + 垂向箱体 + 展向滑枕一阶垂向扭转振动

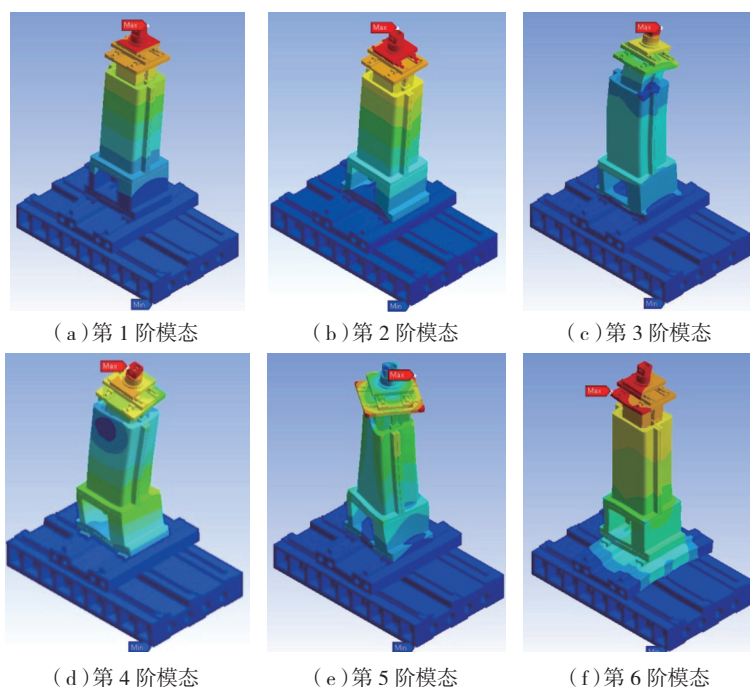


图7 数控定位器无约束状态下前6阶模态振型
Fig.7 Former 6 rank libration frequency of NC positioner without restriction

避免厂房其他设备的固有频率,避免共振。

综上所述,各项计算结果符合通常的规律,计算结果可信。应力计算结果表明数控定位器的材料和结构尺寸合理,满足使用要求。位移计算结果可为定位器的运动控制提供必要的基础数据。

3 强度分析

数控定位器主要承受压缩载荷,因此,所有的螺栓连接不会存在问题。

对 Z 向滚珠丝杠和接头组件进行强度分析,选取载荷最大的情况 50000N 进行工程分析。滚珠丝杠最弱处剖面为 $R=22.5$ 的实心圆,因此,此剖面的应力为:

$$\sigma = \frac{F_z}{\pi \times 22.5^2} = 31.5\text{MPa} \quad (1)$$

由于滚珠丝杠沿轴向在两侧位置有侧向支持,不存在稳定性问题。而其应力远小于材料的压缩屈服应力,因此,滚珠丝杠满足设计要求。

接头组件的中心轴剖面为 $R=20$ 的圆形,其最大应力为:

$$\sigma = \frac{F_z}{\pi \times 20^2} = 39.8\text{MPa} \quad (2)$$

同样,由于接头组件自由部分较短,不会失稳,而其应力远小于材料的压缩屈服应力,因此,其设计满足要求。

综合有限元分析结果及工程分析结果可知:定位器所有部位的应力远小于材料的屈服应力,因此结构的强度满足要求。

4 结论

(1)由计算结果可知,各项计算结果符合通常的规律,表明计算结果可信。数控定位器的最大等效应力均小于屈服强度,表明选用的材料和结构尺寸合理,可以满足使用要求。

(2)数控定位器的位移结果,表明数控定位器的刚性很强,可为数控定位器的运动控制提供必要的基础数据。

(3)有限元计算结果,指导数控定位器结构设计。可根据有限元分析结果,在满足使用强度和刚度的前提下,改变数控定位器的床身底座、滑枕、箱体等零件的材料或壁厚,或优化设计零件的结构形式,达到节省材料,节约成本,快速制造等目的。

(4)模态分析得出数控定位器的自身固有频率,在设计阶段,可通过改变定位器的结构来避免厂房其他设备的固有频率,避免共振。

(5)根据材料力学分析数控定位器的 Z 向滚珠丝

杠和结构组件的结果,表明定位器所有部位的应力远小于材料的屈服应力,因此结构的强度满足要求。

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):42-45.
- [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):34-36.
- [3] 蒋君侠,陈琪,方强,等. 三坐标定位器系统动态特性分析和实验. 计算机集成制造系统, 2012(11):2471.

(责编 日午 亿霖)

(上接第 90 页)

协议。集成控制软件解析离线编程程序,向两台机器人发送控制指令,机器人控制程序解析接收到的指令,控制双机器人协同运动。图 10 所示为用于机器人协同控制的软件界面。

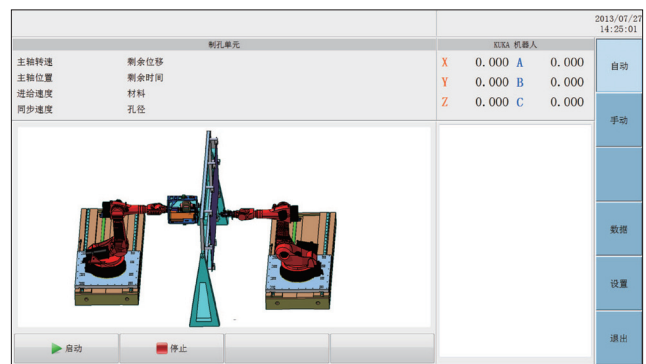


图10 机器人协同控制软件界面

Fig.10 Interface of robot cooperative control

6 结束语

本文针对机器人自动钻铆系统特点,研究了工业机器人协同控制技术,论述了机器人协同运动方式、协同耦合方式、协同坐标系和协同控制要点,其中的控制方法也可适用于多种飞机装配设备中的工业机器人控制。在实际应用过程中,机器人的控制还要考虑末端执行器控制系统的配合、机器人定位精度补偿和离线编程与仿真软件规划等问题,突破这些关键技术后,机器人技术在飞机装配上将会有更多更好的应用。

参考文献

- [1] 王珉,陈文亮,郝鹏飞. 飞机数字化自动钻铆系统及其关键技术. 航空制造技术, 2013(Z1):80-83.
- [2] 楼阿莉. 国内外自动钻铆技术的发展现状及应用. 航空制造技术, 2005(6):50-52.
- [3] 李菡,余德忠. 一种基于双机器人的自动钻铆终端器设计. 机械科学与技术, 2010(10):1297-1301.

(责编 日午 亦非)