

# 飞机自动钻铆仿真技术

Simulation Technology for Automatic Dilling/Riveting of Aircraft

西北工业大学 王仲奇 殷俊清 康永刚



王仲奇

西北工业大学教授,毕业于西北工业大学航空宇航制造工程专业,主要从事飞机制造工艺与装备数字化技术、集成制造技术以及飞机装配数字化技术方面的研究。先后承担国家自然科学基金、863计划、国防基础科研等科研项目20余项,获省部级科学技术奖4项。

大型飞机结构尺寸大,装配准确度要求高,研制周期短,在飞机的装配过程中,必须运用各种数字化的手段,保证产品质量,提高生产效率,降低废品率。自动钻铆技术是提高装配质量和效率的重要手段。由于自动钻铆机运动机构复杂,数控加工过程中易发生干涉和碰撞,程序员难以预先发现,需反复试验调整程序,且调整策略仅依靠编程员的工程经验,

自动钻铆仿真技术作为数字化装配中的重要组成部分,在大飞机的数字化装配中,必能凸显其重要作用,推动大飞机装配方法的研究。

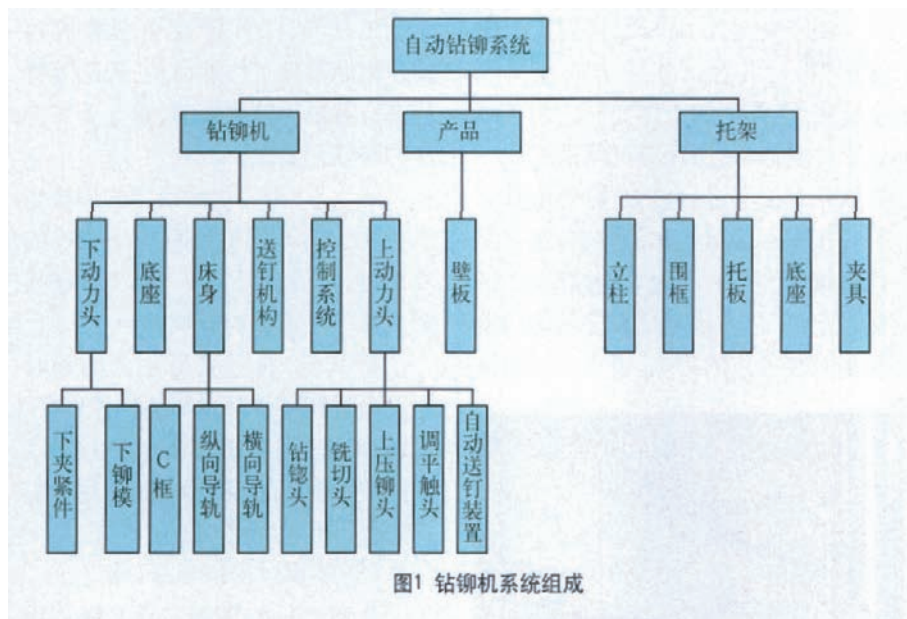
不直观、效率低、差错大;同时,程序的反复试调大大降低了设备的使用效率;此外,由于托架及工件的自重,易出现工作过程中的重心偏移,如果需要真正的全自动钻铆,需要预先解决变形和补偿问题。仿真技术在自动钻铆中的运用,可预先发现工艺及产品装配加工中可能存在的问题,减少试验量,提高成品率。

在国外,波音和空客公司目前已基本上实现了数字化装配,取得了显著的效益。空客系列飞机壁板装配采用了以数控钻铆机为中心的柔性装配系统,从铆接过程到装配管理均实现了数字化控制。装配过程仿真与优化技术的使用使波音、空客取得了显著的效益,如空客典型部件装配周期缩短了60%,装配工艺设计周期缩短了30%~50%,装配成本减少了20%~30%。在铆接变形仿真方面,Hsing-Ling Wang<sup>[1]</sup>对铆钉钉头处的变形进行有限元分析与试验验证,施加不同大小的压力,研究压力变化对铆钉钉头变形直径的影响,并对一组铆钉的疲劳载荷的传递进行了研究。Billy Kelly<sup>[2]</sup>等仿真了

一个铆钉的安装过程,研究了轴对称模型下铆钉安装仿真的FE模型,精确地预测了铆接成形过程中的力。V Blanchot<sup>[3]</sup>等人以不同途径建立可调整数值模型来仿真铆钉连接,并建立了部分、轴对称和3D三种模型。

国内在仿真技术方面相对起步较晚,但发展迅猛。刘斌<sup>[4]</sup>运用CATIA中的DMU(数字样机模块)调用建模参数进行优化分析,实现了汽车总体设计中相关部件运动机构仿真分析。西安飞机设计研究所所在飞机研制中采用并行工程和无纸设计技术,应用CATIA V 5进行三维外形建模、三维结构设计、数字化结构件和主要飞机系统件的预装配,首次在中国设计了飞机全机规模数字样机。陈国华<sup>[5]</sup>等人先在CATIA的零件模块中构造各个零件的三维实体模型,然后在CATIA的装配模块中建立零件之间的链接关系,同时介绍了基于CATIA的三维实体装配的基本方法以及装配模型的干涉检验等全过程。

随着大飞机项目的实施,为了保证飞机装配铆接的质量,迫切需要应



用自动钻铆技术。自动钻铆仿真技术在数字化的环境下,可以有效地模拟真实环境,减少试验次数,在节约成本的同时,能对装配作业给出更为合理的建议和修改方案,从而缩短研发周期,并保证产品质量,有利于推动大飞机数字化装配技术的发展。

### 自动钻铆系统

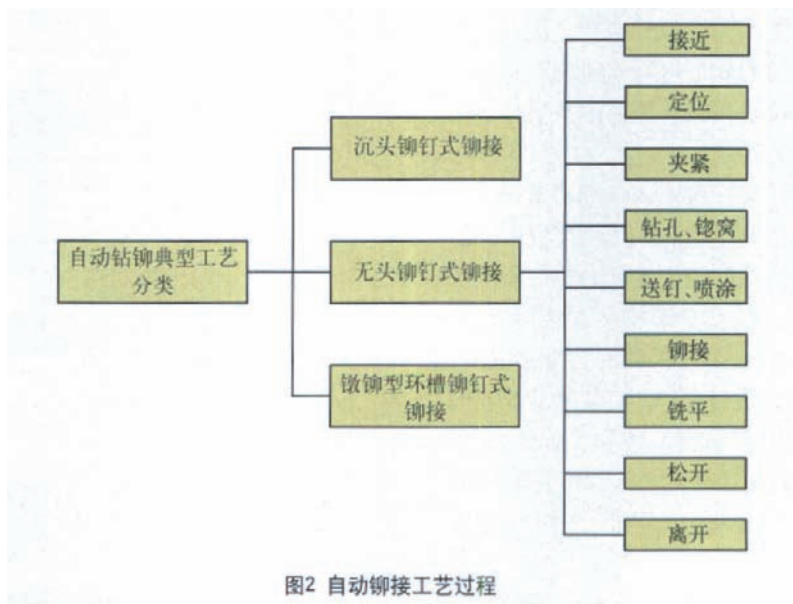
自动钻铆是航空制造领域应自动化装配需要而发展起来的一项先进制造技术。自动钻铆是在一台设备上一次性地连续完成定位、夹紧、钻孔、镗窝、注胶、放铆、铣平等工序。自动钻铆技术从上世纪70年代起就在国外普遍采用,如波音民机的壁板机铆系统已达60%~75%。由于外协项目以及自身发展的需要,国内多家航空制造企业先后从国外引进了多台自动钻铆设备,如西飞公司引进的GEMCOR的G400、G900、G4026SXX-120<sup>[6]</sup>,成飞公司引进的G4026、RMS335钻铆机。

自动钻铆系统主要包括自动钻铆机和数控托架两部分。自动钻铆机用于完成一系列的钻铆过程;数控托架主要包括数控围框、托板、立柱以及各种附件等,用于工件的定位和夹持。以西飞公司引进的G4026SXX-120为例,说明自动钻

铆系统的组成。其组成如图1所示。

自动钻铆的铆接工艺过程根据铆接时铆钉类型(沉头铆钉式、无头铆钉式、铆墩型环槽铆钉式等)以及所采用的铆接方式(压铆、电磁铆等)进行工艺过程分解,包括夹紧、钻孔、镗窝、放钉、喷涂、密封、铆接、松开夹紧件等,如图2所示。当工件移动到工作位置,自动钻铆机开始工作,上下压力脚衬套夹紧工件、钻孔和镗窝(钻头润滑)、涂胶、送钉、铆接(或安装)、松开等工序。其中影响紧固件质量的主要参数是:钻轴转速、钻轴进给量、夹紧力、压铆力、钻头润滑等。

现代飞机制造由于对飞机性能



和使用寿命的要求,在壁板铆接方面有着严格的工艺规范。以图3所示某机型的机身壁板为例,要求相关的钻铆工艺技术:(1)铆钉间距的极限偏差为: $\pm 1\text{mm}$ ; (2)铆钉排距的极限偏差为: $\pm 1\text{mm}$ ; (3)铆钉孔的垂直度: $90^\circ \pm 0.5^\circ$ ; (4)铆钉头齐平度偏差范围: $0 \sim 0.05\text{mm}$ ; (5)铆钉孔的表面粗糙度不大于 $3.2\mu\text{m}$ ; (6)铆钉孔、窝的极限偏差应符合ZS5076260-23的要求。

### 自动钻铆仿真的关键技术及实现

#### 1 自动钻铆系统设计、制造过程中的仿真计算

由于飞机结构尺寸的要求,自动钻铆设备一般都体积较大,且自身质量很大。为了保证加工产品的质量,需要满足一定的刚度和强度要求。在自动钻铆系统设计、制造过程中,借由仿真技术对钻铆机机身、移动平台、托架系统进行静态和动态的仿真计算,得到机身、移动平台、托架系统的静态和动态特性,并对设计过程中涉及到的材料、结构布局、结构尺寸进行优化。图4所示为通过CATIA建立钻铆机的CAD简化模型,导入到有限元分析软件进行静态和动态仿真计算,用以支持钻铆系统的设计

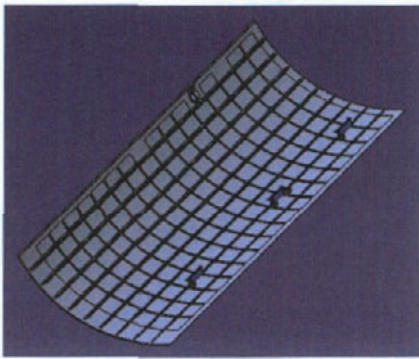


图3 某机型壁板3D模型

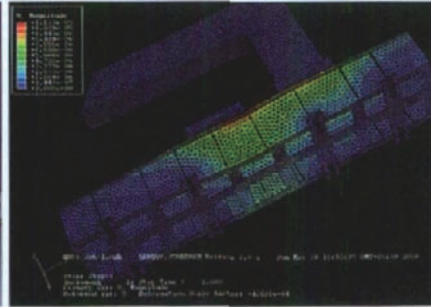
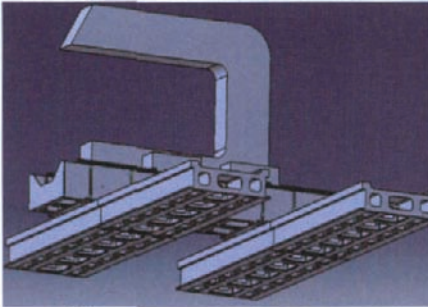


图4 自动钻铆系统及其变形分析

由于受到外力作用,铆钉发生塑性形变,对孔径产生压力而使得孔径扩张,从而引起工件变形。为了减少工件变形,使用计算机辅助工程分析软件对工件进行应力、应变仿真分析。根据铆接路径和铆接力,建立工件铆接变形的有限元分析模型,在铆接当前点时,考虑当前点之前的铆接变形对当前点的影响,研究不同的施

第一步,工件铆接变形数值建模。根据铆接工件的材料、外形等特征进行有限元前置处理,建立工件铆接的有限元模型。

第二步,不同施铆顺序的铆接变形分析。对不同施铆顺序下工件的变形进行比较,探寻前一个工件铆接对后续工件铆接的影响。

第三步,基于变形预测的预补偿。通过铆接变形过程的理论研究,探索铆接过程变形规律,对铆接时产生的变形误差进行预补偿,应用于钻铆过程,指导实际生产。

(3) 钻铆过程仿真与分析。

合理可行的铆接方案是保证铆接效率和铆接质量的关键,铆接顺序和运动时序是铆接方案的两个主要组成部分。

首先,进行基于时序的铆接过程可视化仿真。建立产品三维模型和工装、夹具、钻铆机等资源模型,根据离

与制造。

2 自动钻铆过程仿真、变形控制与工艺优化(图5)

(1) 托架变形分析与精度控制。

首先,由于托架的跨度较大,以及工件的尺寸较大,尤其在大飞机的设计中,其尺寸更大,质量也相对增大,在自身重力及工件重力的作用下,托架因刚性不足会发生变形;其次,由于托架姿态变化引起的重心偏移,会导致托架变形的动态改变;此外,托架的变形会进一步导致理论钻铆孔位置法向轴线的变化。因此,需要对托架的变形进行实时修正补偿,保证铆接结果和理论值的一致性,保证产品的质量。

在托架三维CAD模型基础上,利用有限元方法对托架受自身重量载荷而产生的变形进行分析,得出变形结果。利用变形模型对实际模型进行修正补偿。托架的自变形量可引入工装设计,保证工装装载精度。考虑托架在加载工装和工件的条件下,分析托架的受力变形的主要因素和次要因素,建立可用于工程应用的变形模型。

(2) 铆接变形仿真与分析。

铆顺序对工件变形的影响。其步骤如下:

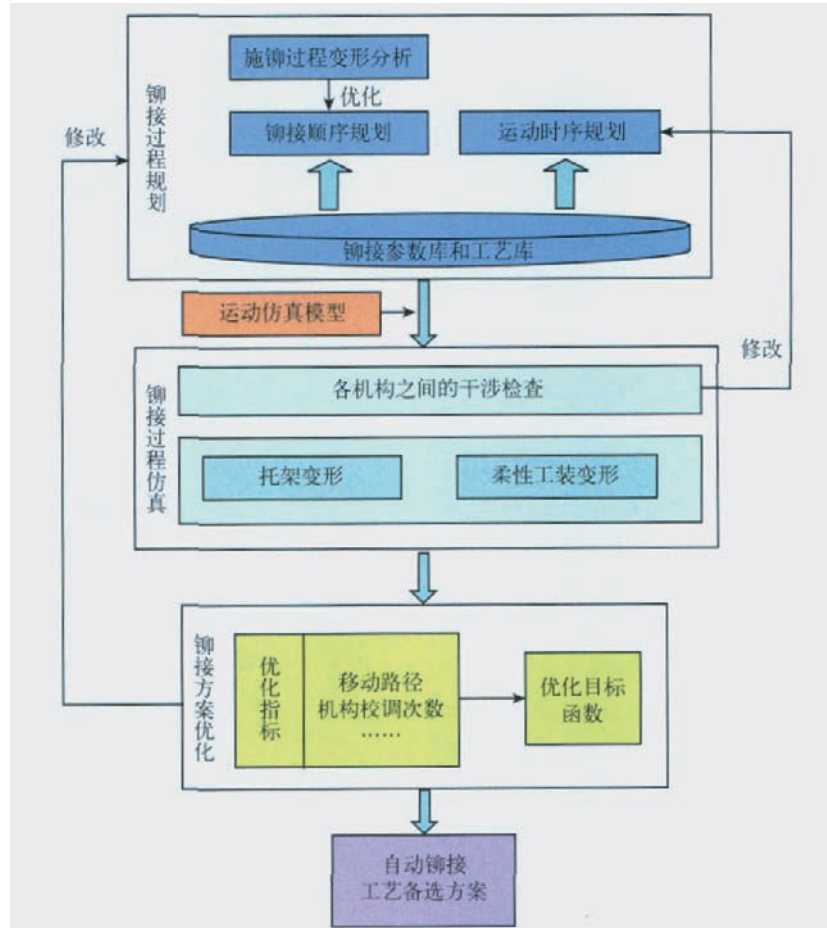


图5 自动钻铆执行过程仿真和误差分析

线编程生成的自动钻铆程序,对工作台在工件上移动和制孔过程实现可视化仿真。避免干涉、碰撞情况,保证装配过程中的可操作性。对铆接装配操作过程进行三维可视化动态仿真,检验铆接过程并且形成反馈。

能分析的移动工作台变形分析及补偿方法,针对移动工作台不同阶段工作状态,建立并简化其物理模型,对移动工作台静态、动态各阶段进行受力分析,建立移动工作台各状态的力学模型。

后的 $X$ 、 $Y$ 向导轨变形分析结果。通过计算,最大变形在 $15\mu\text{m}$ 以下,完全可以满足设计需要。

(2) 壁板自动钻铆过程仿真。

通过自动钻铆关键技术的研究,在CATIA V5的DMU(数字样机模块)中通过设定装配约束、编辑命令和机制的方法,设置参数控制自动钻铆系统的运动,实现自动钻铆系统的运动仿真,检查干涉。基本实现了减少编程工作人员工作量、提高加工效率、节约时间的要求,并应用于壁板自动钻铆过程的仿真。

## 结束语

飞机大型壁板自动钻铆技术的应用在国内还没有成功的先例,数字化装配环境下,迫切需要自动钻铆仿真技术的突破。本文对自动钻铆仿真的关键技术进行了详细的研究,给出了解决方法,并结合实例对钻铆仿真技术在钻铆系统设计与壁板钻铆过程中的应用进行了讨论。

数字化装配是未来飞机制造业的发展趋势,在这样的背景下,仿真软件及其相关技术的不断发展,无疑将会对飞机制造业产生重大的推动作用,并缩短研制周期。自动钻铆仿

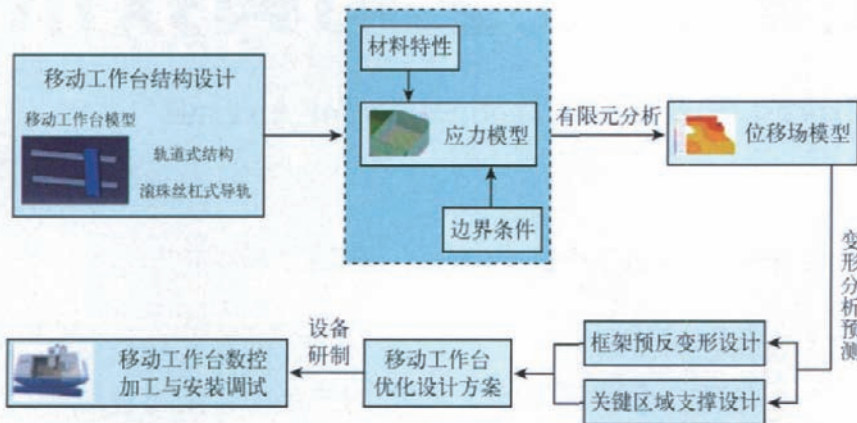


图6 大型移动工作台设计制造方案

然后,在铆接操作过程中进行干涉检查。在自动钻铆的可视化仿真过程中,检查各机构在运动过程中的干涉、碰撞且形成反馈,在离线编程界面提示用户修改程序,重新进行仿真。在反复迭代的过程中,保证自动钻铆程序的可操作性。

在可视化仿真和干涉检查的基础上,进行自动钻铆工艺方案的多目标综合优化。以移动路径最优、机构的校调次数等作为指标,构造综合优化目标函数,对自动钻铆程序进行多目标优化,输出备选的钻铆工艺方案。

## 自动钻铆仿真应用

(1) 移动工作台建模与分析。

采用CATIA设计满足支撑自动钻铆机 $X$ 、 $Y$ 两自由度运动的移动工作台结构。为确保运动定位精度,移动工作台设计采用滚珠丝杠轨道式, $Y$ 坐标运动平台在 $X$ 向运动框架上,初步设计运动框架长、宽及其承重,采用钢板焊接成大型框架,使其具有很高的刚性和强度; $Y$ 坐标运动平台在 $X$ 向运动框架上可以前后移动;面向材料特性及力学性

根据设计,建立移动工作台的有限元模型,设定适当的边界条件,分析移动工作台应力场,结合移动工作台材料特性,基于位移场分别分析在自动钻铆机重量载荷下和自动钻铆机运动过程中移动工作台的力学性能和机构变形,以定位精度为依据,对大型移动工作台结构进行优化。第一,对 $Y$ 向运动在框架进行预防

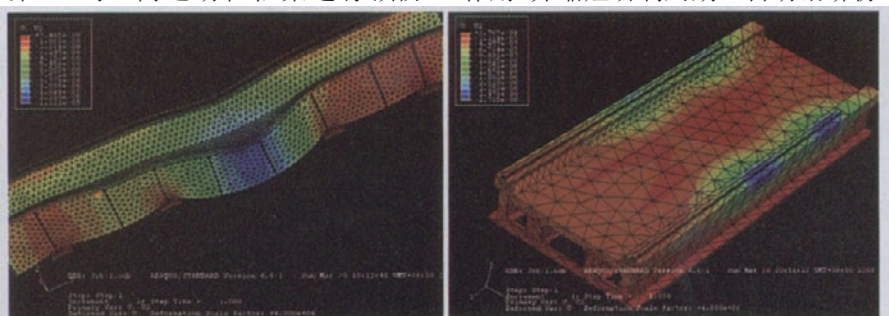


图7  $X$ 、 $Y$ 向导轨变形分析结果

变形设计;第二,增加 $Y$ 向关键部位的支撑机构,从而实现移动工作台的优化设计;最后,以移动工作台理论模型分析数据为依据,实现移动工作台零件的数控加工、装配以及工作台与自动钻铆机的安装与调试。移动工作台的设计制造方案如图6所示。图7为经由ABAQUS有限元分析

真技术作为数字化装配中的重要组成部分,在大飞机的数字化装配中,必能凸显其重要作用,推动大飞机装配方法的研究。

本文有参考文献6篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 晓霏)