

数字化自动钻铆技术在飞机制造中的应用

Application of Digital Automatic Drill-Riveting Technology in Aircraft Manufacture

西北工业大学机电学院 王黎明
西安飞机工业(集团)有限责任公司 冯潼能



王黎明

1987年毕业于西北工业大学计算机应用专业,1997年获西北工业大学软件专业硕士学位。现为西安飞机工业(集团)有限责任公司信息技术室经理,西北工业大学机电学院在读博士研究生。先后主持过国家科技支撑计划课题制造业信息化工程重大项目《飞机数字化集成技术开发与应用》、某公司ERP管理系统、某公司医疗报销系统、工时定额系统等软件项目的开发实施工作。

随着CAD/CAM、计算机信息和网络技术的发展,飞机产品数字化设计制造技术以全面采用数字化产

随着CAD/CAM、计算机信息和网络技术的发展,飞机产品数字化设计制造技术以全面采用数字化产品定义、数字化预装配、产品数据管理、并行工程和虚拟制造技术为主要标志,从根本上改变了传统的飞机设计与制造方式,大大地提高了飞机设计制造技术水平。自动数控钻铆技术是其重要的组成部分。

品定义、数字化预装配、产品数据管理、并行工程和虚拟制造技术为主要标志,从根本上改变了传统的飞机设计与制造方式,大大地提高了飞机设计制造技术水平。自动数控钻铆技术是其重要的组成部分。

在飞机制造中,装配连接质量直接影响飞机结构抗疲劳性能与可靠性,高性能航空器连接结构必须采用先进的连接技术,如先进的机械连接技术、先进焊接技术、胶接技术等。目前,国外在装配连接技术上使用了激光辅助定位、计算机辅助光学经纬仪、计算机辅助钻削系统以及机器人化的装配单元,大大提高了飞机结构抗疲劳性能,减少了操作人员数目,延长了飞机的使用寿命。自动钻铆技术是先进连接技术的发展方向。

现代飞机的安全使用寿命要求日益提高,军机寿命、干线飞机寿命分别要求达到8000、50000飞行小时以上,而飞机结构所承载荷通过连接部位传递,形成连接处应力集中。据统计,而飞机机体疲劳失效事故的70%是源于结构连接部位,其中80%的疲劳裂纹产生于连接孔处,因此连接质量极大地影响着飞机的寿命,而手工铆接难以保证寿命要求。西飞公司承制的按现代设计标准设计的ARJ21新支线以及未来大中型飞机壁板、机身的抗疲劳与可靠性要求更高,必须应用自动钻铆技术实现稳定的高质量连接。

西飞承担的ARJ21新支线和未来的大中型飞机研制中,机翼研制是难度最大的项目,其中大型机翼壁板

的自动钻铆是决定机翼研制成败的关键。

大型机翼壁板全自动钻铆系统的研制是中国新型飞机研制的急需,也是中国一航重点突破的关键技术之一,同时也是赶超国际先进航空制造技术的一次挑战。

国内外研究应用现状

自动钻铆技术从 70 年代起就在国外普遍采用,其发展一直未曾间断。国外目前生产中的军、民用飞机的自动钻铆率分别达到了 17% 和 75% 以上,大量采用无头铆钉干涉配合技术,新型紧固件包括无头和冠头铆钉、钛环槽钉、高锁螺栓、锥形螺栓以及各种单面抽钉等,80% 的铆接和 100% 的不可卸转剪螺栓连接均采用干涉配合,而且孔壁还要进行强化。波音民机的壁板机铆系统已达 60% ~ 75%,麦道军机也已达 17.5%,但是真正的全自动钻铆还需要解决工件定位和校平问题。近年来,铆接正向着机器人和包含机器人视觉系统、大型龙门式机器人、专用柔性工艺装备、全自动钻铆机和坐标测量机组成的柔性自动化装配系统发展。如 B767、B777 采用了翼梁自动装配系统,提高效率 14 倍,费用降低 90%,废品率降低 50%。进一步的改进可使钻铆工具能够到达以前难以达到的部位。

主要的钻铆机生产厂商有:

美国 GEMCOR 公司(通用电气机械公司)是自动钻铆机的最早制造厂商,也是向世界各国飞机制造业提供自动钻铆机的主要厂商之一。公司生产的自动钻铆机主要型号有 G200、G300、G400、G900、G666、G39A、G4013、G4026 和 G5013 等。

Electroimpact (EI) 公司是一家 1986 年成立的迅速发展的研制开发高自动化龙门卧式铆接装配系统的有潜力的公司。EI 公司生产的自动钻铆系统有 E4000、E4100、E4380、E5000 等型号,均为龙门卧式结构,根据铆接对象的不同组建不同的自动装配单元。

另外,德国、法国、俄罗斯(前苏联)等国家也对自动钻铆技术进行了研究和应用。

装配是飞机研制过程的关键环节,目前我国飞机装配工作量约占整个飞机制造工作量的 30% ~ 45%,其装配连接方式以铆接为主。我国飞机装配目前还主要依赖于手工装配,质量稳定性较差,大量采用成套的专用装配型架,成本高,装配效率低。装配已经成为我国飞机研制生产的瓶颈。因此,迫切需要研制自动化的钻铆系统。

近 20 年来,国内引进了近 10 台自动钻铆设备,如西飞、成飞、625 所均引进了自动钻铆机,并在转包生产

中局部应用,在生产应用中出现了一些技术问题:如托架及铆接过程变形,工件定位精度和铆接质量难以保证;工件定位夹紧装置与钻铆机铆接过程干涉;自动钻铆系统运动精度稳定性差,重复定位精

度难以保证等。

数字化自动钻铆应用的关键技术

自动钻铆系统的核心技术主要包括:变形分析与误差补偿技术、自动钻铆系统工艺模拟、大尺寸高精度控制与保证技术、柔性工装技术、自动钻铆工艺及装备等。

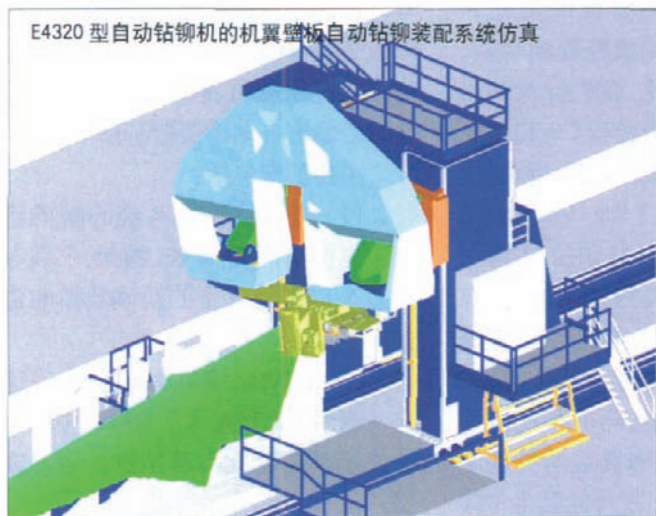
2003 年,中航商用飞机有限公司 ARJ21 飞机机翼壁板采用了国际上先进的无头铆钉连接技术,此项技术在国内航空制造业中为首次应用。无头铆钉的连接形式必须采用自动钻铆设备,才能符合设计技术要求,实现壁板稳定的、高质量的连接。西飞公司在资料匮乏,国外技术封锁的条件下重新启动自动钻铆技术研究,经过几年研究,目前已能完成 ARJ21 飞机机翼壁板的自动铆接工作,正在进行机身和其他大型部件自动铆接的研制。

西飞公司在自动钻铆应用技术研究中主要解决了以下几个关键技术。

1 自动钻铆机托架系统的变形分析与误差补偿技术

若采用数字控制钻铆机进行自动钻铆,必须在计算机理论模型和工装夹具及铆接工件之间建立精确映像。为了建立这种精确映像,必须考虑到托架自重及载荷变形、A 角及 B 角转动对变形的影响、对理论坐标造成的偏移等因素。对变形及坐标偏移,需进行实时修正补偿,使计算机理论模型和工装夹具及铆接工件在机床加工坐标系内保持一致。

为达到工程化应用的目的,必须对模型进行简化,对其主要的影响因素进行分析研究,建立可用于工程应用的变形模型,再利用变形模型对实际模型进行修正补偿。通过对托架的结构分析,以及不同载荷,不同的 A、B 角度状态的测量分析,得出结论,托架长度方向的变形偏移影响不



大,可以忽略;而托架垂直方向变形影响最大,可以作为变形最主要的因素;托架水平横向的变形对加工也有影响,可以作为次要因素;在建立变形模型时需加以考虑。

自动钻铆机的主要数据处理流程都是基于 CATIA V5 平台之上的。变形处理模块的主要功能是结合数模和测试数据,根据算法实时构建托架的变形曲面,再计算出铆点的变形量和法矢变化量,实时修正 NC 程序进行铆接作业,以实现在 CATIA V5 平台上进行数字化铆钉工艺编制部署、加工编程和自动数控铆接。

为此,我们采用 V5 的 CAA 二次开发技术、VBSCRIPT、DEPHI 和 MACRO 等编程开发工具,开发了自动钻铆机托架变形处理程序用于实际生产作业。

自动钻铆机托架变形处理的主要设计思路与工作过程:

(1) 变形曲面的建立。根据实际测量或理论计算数据,在 CATIA V5 下建立变形模型。

(2) 合并变形模型。将“变形曲面模型”拷贝到产品模型中,并重新

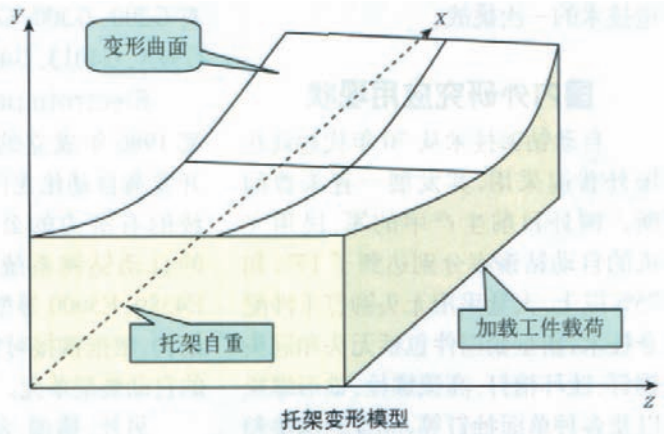
并和预处理。

(3) 变形处理程序的使用。打开变形处理程序,选择要处理的 .APT SOURCE 文件。进行变形处理。

程序是在 CATIA V5 环境下,采用 CATIA V5 的 CAA 二次开发技术、VB、VBSCRIPT、DEPHI 和 MACRO 等编程开发工具,设计了符合托架变形的数学模型需要的数据处理软件。

运用数字化制造技术和 G4026SXX-120 全自动钻铆系统,直接在 CATIA V5 系统上建立工件数模,进行铆钉工艺分布,加工编程,目前已经达到全自动数控铆接的目标,其位置精度及法向精度满足 ARJ 飞机机翼壁板产品(最大产品后壁板长度接近 13m,是双曲率大工件)的精度要求。

和碰撞,程编员在工艺设计过程中很难预先发现,需反复试验调整程序,且调整策略仅依靠程编员的工程经验,不直观,效率低,差错大,设备的使用效率大大降低。随着自动钻铆机应用领域的不断扩大,这个矛盾会



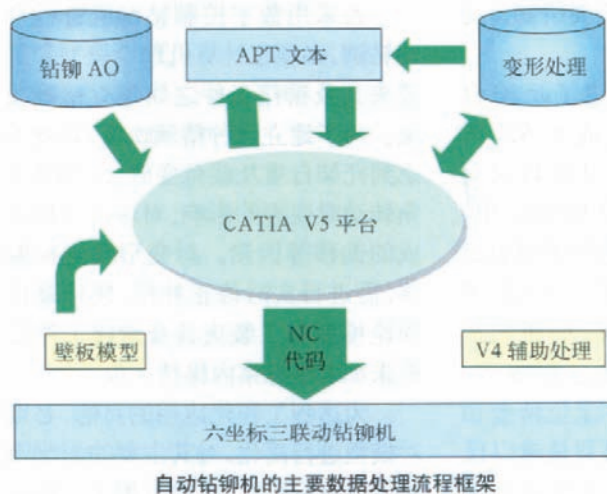
越来越突出。因此,迫切需要利用计算机仿真模拟技术建立自动钻铆机运动仿真模拟系统来解决以上问题。

自动钻铆机运动仿真模拟系统在装配过程中自动完成大型壁板的定位、夹紧、钻孔/铆窝、涂胶、送钉、铆接/安装等工作,并且保证所装壁板的定位精度。孔的定位精度是一个极其复杂的过程。执行过程仿真在建立整个系统的运动仿真模型的基础上,依据铆接工艺方案对系统所有运动执行机构进行模拟,检查铆接头和装夹设备在铆接过程中的干涉以及系统中的碰撞;通过运动仿真的方法综合柔性托架和壁板的变形,分析铆接过程中的随机误差,在此基础上进行铆接质量预测;首先通过仿真保证铆接方案的正确性和可行性然后输出自动铆接控制指令。

主要工作包括:

(1) 自动钻铆机系统的精确建模。包括钻铆机、基座、拖架、工装等在 CATIA V5 下的精确数模的建立。

(2) 自动钻铆机运动模型的建立。利用 CATIA V5 DMU 中的运动模拟功能建立自动钻铆机运动模型。



自动钻铆机的主要数据处理流程框架

命名产品模型名,使它成为当前工作模型,合并到“变形曲面模型/加载变形曲面模型”中,根据负载变形测量表依次将负载变形测量点的 z 值改为负载后的变形值。完成模型合

CATIA 系统平台上实现工艺、程编以及工装数据处理的整个操作流程。

经过试验件和实际的生产应用发现:由于自动钻铆机运动机构复杂,数控加工过程中很可能发生干涉

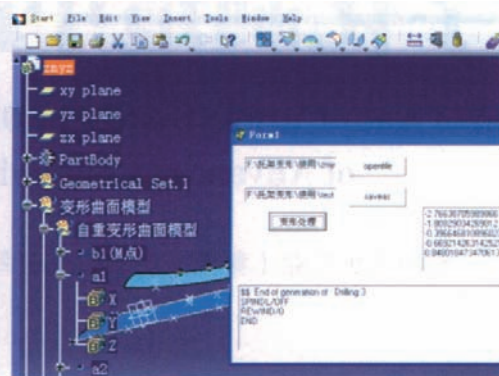
(3) 自动钻铆机运动模拟控制软件的开发。利用 CATIA V5 二次开发技术开发自动钻铆机运动模拟控制软件。自动钻铆机运动模拟控制软件可读取数控程序,自动完成自动钻铆机运动仿真模拟、干涉检查、运动特性分析等功能。程序员可直观地看到程序运行后的效果。



合并的变形模型

多年的努力,自行研制了与自动钻铆机配套的数控托架,并实现了与自动钻铆机控制系统的交联,目前已能按应用需求完成系统集成,正在向多系统耦合控制方向发展。

未来亟待发展的其他关键技术



变形处理程序的使用

(4) 根据仿真结果进行工艺过程与工艺路线优化。

3 自动钻铆系统集成技术

我国航空制造业装配领域拥有自动钻铆机而缺乏大型数控托架系统,需要自主创新研发大型柔性托架系统、大型移动工作台系统,充分利用现有的自动钻铆机,采用系统集成的方法形成自动钻铆系统。在集成的过程中会出现各任务过程中数据和设备上的冲突以及各控制系统间通信上的冲突,所以亟需研究出一套全新的系统集成方法来保证自动钻铆系统的顺利工作。

自动钻铆系统控制体系包括钻铆机控制系统、托架(包括大型移动工作台)控制系统、柔性工装控制系统、测量系统,在钻铆工作过程中各系统之间进行通讯或触发,实现流程控制的准确性,因此,自动钻铆系统的运行依赖于各控制系统之间的协调,为保证钻铆过程控制的自动化、清晰化,对各控制系统进行耦合,在各系统开发的基础上进行集成,对整个钻铆过程进行管理和控制。

西飞公司与其他参研单位经过

我国自动钻铆技术虽然在这几年里有了长足的进步,但由于起步晚,技术力量薄弱,与国外先进国家仍存在很大差距,亟待突破和发展的其他关键技术有:

(1) 柔性工装技术。

工装是自动钻铆系统的重要组成部分,工装柔性大小对于产品的装配质量、生产效率以及工人的劳动强度具有重要影响。柔性工装是基于产品数字量尺寸协调体系的可重组的模块化、自动化工装系统,其目的是免除设计和制造各种产品装配专用的传统装配型架或夹具,从而降低工装制造成本,缩短工装准备周期。柔性工装可快速调整满足不同装配对象的装配要求,节省大量的工装制造周期和费用,并减少生产用地。柔性工装在美国等国家进行了生产应用,但其技术对我国封锁;我国虽然也对柔性工装技术进行了初步研究,但在航空业

可供借鉴的资料很少。因而柔性工装技术是目前亟待解决的难点之一。

(2) 在线测量技术。

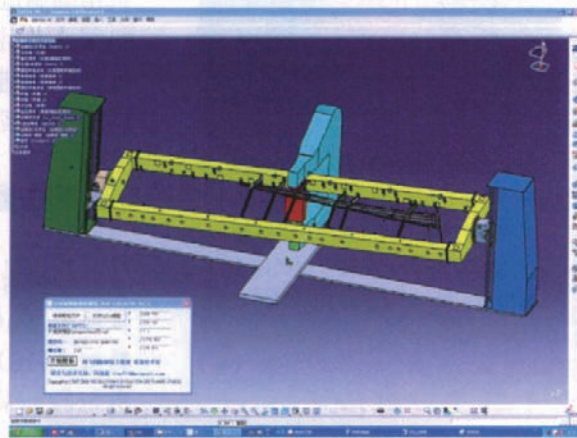
自动钻铆过程中需要测量的内容包括定位夹紧装置的测量、托架位置的测量、钻铆机位置的测量、工件的位置测量,其中主要是对定位位置的测量。采用恰当的测量技术,得到

目标点在基准坐标系的位置信息,测量数据经分析、计算后得到与理论位置的偏差,将偏差反馈到控制系统,进行定位的校正。测量系统包括测量设备、数据处理单元,执行实时测量与数据处理等任务。

目前,先进的自动钻铆系统已能实现在线测量和实时校正,大幅提高了加工的准确性与效率。

结束语

自动钻铆系统的研究成功有效地提升了国内航空制造技术水平,成



自动钻铆系统运动仿真示意图

功填补了我国大型自动铆接设备制造的空白,为我国发展自动铆接技术提供了有力的技术保障。特别是多部门多种技术的协调与融合的经验为研制大型复杂技术产品提供了宝贵的经验。

(责编 金卯)