

柔性装配中的数字标工协调*

Coordination of Digital Master Tooling in Flexible Assembly

西北工业大学机电学院 王仲奇 郭飞燕 康永刚
中航工业江西洪都航空工业集团有限责任公司 陈文红 俞群



王仲奇

教授,博士生导师,现任先进近净成形与模具制造共性技术产学研联盟专家委员会成员、中国航空学会工艺专业委员会会员、数控制造技术航空科技重点实验室客座教授。主要从事飞机制造工艺与装备数字化技术、集成制造技术、塑性成形过程模拟与控制技术以及飞机装配数字化技术的研究。先后承担国家自然科学基金、863基金、国家科技支撑计划、航空基金、国防基础科研、总装预研以及型号研制项目30余项,获国防科学技术二等奖两项、陕西省科学技术二等奖1项、陕西省教学成果一等奖1项。陕西省精品课程《金属塑性成形原理》负责人。

面向柔性装配的数字标工作为数字量装配协调的唯一依据,在统一基准下协调零件加工、柔性工装设计与安装及柔性装配,基于数字化控制与测量系统,将理论模型转化为面向柔性装配的实际可操作过程。相对以刚性模拟量形式存在的实物标工模型以数字量的形式存在,不需要任何存放场地,且易于保存和修改,其应用结果实现了前缘襟翼产品数字标工中的关键协调特征在柔性装配工装中的准确传递,提高了制造与协调准确度。

飞机制造中的关键是保证零部件结构外形和交点的互换协调,为此需采用大量的体现产品形状与尺寸的标准工艺装备来保证飞机的结构形状和尺寸符合设计准确度和互换协调要求^[1-2]。目前国外航空企业已广泛采用先进数字化互换协调方法,产品协调部位之间、产品与工艺装备之间以及工艺装备之间的协调关系以数字量的形式存在,使得各类工装制造精度明显提高,尺寸传递协调路线缩短,产品协调准确度有明显提高^[3-4]。国内飞机制造中产品设计已全采用全数字化产品定义,但仍广

泛采用以实物标工模型来传递产品形状与尺寸的模拟量协调方法,对如何实现以数字标工为核心的全数字量协调传递等关键问题并未见其详^[5-7]。为发挥产品设计数字化优势,需对飞机制造过程中的数字化协调方法作一研究。

在适用于某型飞机前缘襟翼柔性装配试验件的数字量传递协调系统中,以实物形式存在的标准工艺装备载体已不再应用,文中以某机型4个前缘襟翼柔性装配中的互换协调问题为研究对象,参照柔性装配的技术特点,构建面向柔性装配的数字标

* 重大项目国防基础科研项目(B0620060343)、国家科技支撑计划项目(2011BAF13B03, 2011BAF13B05)资助。

工模型,作为唯一协调依据,在柔性工装设计、制造、安装到柔性装配的全过程中实现零件关键协调特征的尺寸与容差的协调传递,同时依靠数字化控制与测量系统实现数字标工中关键协调特征在柔性装配工装中的准确传递,完成对多产品对象的装配工作。

柔性装配分析

某型飞机前缘襟翼采用单梁式、多肋、金属铆接结构,分为内前襟左右件和外前襟左右件。在一套柔性工装上实现前缘襟翼4个产品的装配过程中,采用内定位的装配方式,以骨架外形作为装配基准,以梁、肋的坐标孔为定位基准,用一个可移动的翼肋挡板定位器实现4个产品所有翼肋的柔性定位,其他零件按可更换的专用定位器定位,借助两端带定位孔的延长工艺长桁构建产品骨架,在骨架上覆盖蒙皮壁板形成部件外形。需保证的交点有斜梁上的多组铰链接头与机加肋上的操纵接头,蒙皮外形、尾缘条外形和斜梁外形及其与交点之间的协调也需保证。

面向柔性装配的数字标工模型

标准工艺装备是模拟量协调方法中引申的一个概念,随着CAD/CAM协调方法的不断深入,数字化的设计制造模式对传统的协调方法产生了巨大的影响,标准工装的内涵发生了变化^[5-7]。数字标工是一个以产品三维模型为核心的尺寸和外形的约束集,针对产品装配精度控制,在统一基准下,将产品重要协调部位的协调关系以数字量的方式直接传递给生产工艺装备,依靠数字化控制与测量系统实现工装检验、协调、复制过程,并完成关键协调特征在柔性装配工装中的准确传递。数字标工是反映产品协调部位之间、工艺装备之间、以及产品与工艺装备之间形状

与尺寸协调互换的数字量标准,并以此作为数字化装配协调唯一依据的数字模型。通过数字标工的协调约束,将虚拟的零件空间基准信息转化为实际可操作的定位系统,如图1所示,包括零件之间的装配约束及零件与装配型架之间的定位约束,装配约

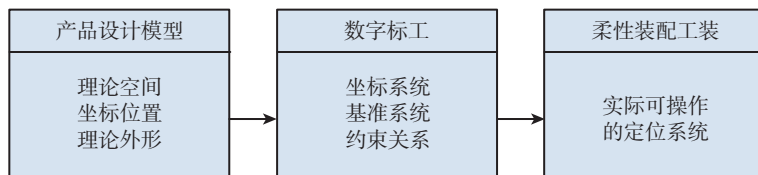


图1 数字标工作用过程

束由装配基准实现,定位约束由定位基准完成。

1 面向柔性装配的数字标工核心内容

在适用于某机型4个前缘襟翼产品柔性装配的数字量传递协调系统中,数字标工作为装配协调的依据,贯穿零件制造与产品装配的整个过程。其核心内容应包括坐标系统、基准系统、约束关系等要素,且各种约束都含有容差信息。

(1) 坐标系统。

在基于数字标工协调的柔性装配过程中,坐标系统作为4个前缘襟翼产品所有零件定位和尺寸量度的依据,是实现数字化协调方法的必要前提和基础。为了描述工装内各零组件的空间位置和误差,需建立柔性工装坐标系以定义工装各零部件与产品零件的空间位置,作为柔性装配关键协调特征分析的统一基准。为保证柔性装配协调性,工装坐标系与飞机全局坐标系之间需存在严格的转换关系。

(2) 基准系统。

数字标工中的基准系统指在产品设计和制造装配过程中体现零件空间相对位置关系的几何信息的集合,以点、线、面的形式存在,是在设计和制造装配过程中构造各级坐标系的依据。在前缘襟翼4个产品的

设计阶段,几何基准系统表现为设计基准,如产品交点的轴线与起始端面、上下翼面外形等。随着设计工作的深入,从包含前缘襟翼部件的蒙皮外形面、斜梁平面、长桁平面等基准信息的模型最终细化为包含蒙皮、斜梁、翼肋、长桁基准线、铰链接头与操

纵接头交点信息的数字标工模型。在产品的制造装配阶段,根据零件间的配合关系与相关尺寸信息,将设计基准进行适当转化构建适应多装配状态的协调基准,数字标工中的基准系统则具体表现为工艺基准,如加工基准、定位基准、装配基准和测量基准等,一般存在于定位器的定位孔轴线与定位面处。

(3) 约束关系。

在前缘襟翼4个产品的柔性装配协调过程中,约束关系是数字标工最重要的信息组成部分,它体现了数字标工的核心功能,根据产品的协调要求,其包括几何约束和关联尺寸两大类。通过对协调部位进行分析,确定产品关键协调特征在装配中的实际空间位置后,在统一基准下对产品协调部位的尺寸形状信息与容差信息在数字标工中合理设计,以保证柔性装配协调。

·几何约束。

几何约束通过前缘襟翼产品三维实体几何模型实现其约束功能,主要指产品的外形约束,在数字标工模型表现为主尺寸表面,作为后续设计生产工作中传递飞机外形几何形状和结构尺寸的原始依据,用来保证产品外形协调要求。

·关联尺寸。

关联尺寸以前缘襟翼产品的关

键特性为纽带,通过具有协调关系的特征与其基准之间的尺寸约束实现约束功能,主要包括产品零件间的相对位置关系、零件的设计结构尺寸、关键协调特征及待检验关键特性在其基准坐标系中的空间位置以及尺寸容差信息等控制参数,保证产品的交点协调要求。通过数字标工模型的产品数字化定义^[8],构造完整约束信息的数字标工模型。

2 面向柔性装配的数字标工模型

柔性工装是指可适用于不同形状、不同尺寸组件或部件的装配,且保证装配准确度的可重构功能的模块化、自动化装配工装系统^[9]。在前缘襟翼产品柔性装配中,工装用一个可移动的翼肋挡板定位器通过“一面两孔”的定位方式对内外前襟4个产品的翼肋进行定位,对待装配产品的设计提出了新的要求,在各翼肋产品数模中新建的定位孔平面上的各翼肋定位孔、对主要结构件(斜梁、尾缘条等)建立的装配孔成为新的关键协调特征,同时对孔位协调参数有较高的要求。装配工艺与刚性工装有较大不同,在柔性装配中,更多

的是工装结构形式决定装配工艺,相应的工艺容差、装配顺序等信息应符合柔性装配需求,同时在以内定位的柔性装配方式完成前缘襟翼产品试验件的装配过程中,由于柔性工装各组成立柱定位单元能达到较高的定位精度,采用数字量的传递方式对产品装配准确度的数值实时测量,能较易发现产生装配不协调问题的根源以及装配偏差数值,并通过采取一定的措施,能更好地保证协调准确度。通过检查定位销钉与翼肋挡板定位器的工艺定位孔之间的弹性,能及时发现装配不协调的根源产生装配不协调的原因:如肋与斜梁之间的套合容差信息分配不当,肋的弯边角度、腹板面平面度及肋的坐标定位孔与翼肋的外形之间不协调,相配合的产品零件的漆层厚度占据一大部分产品外形装配精度数值等,因此需在产品设计阶段和工装设计阶段考虑零件制造工艺性。

在柔性装配中,数字标工作为协调产品、工装间关键特征的数字量依据,贯穿产品的整个柔性装配生产过程,与各阶段的工程数据集之间具有

复杂的信息关联集成关系,如图2所示。为方便数字标工在现场的应用,从产品设计数据集提取的信息包括设计坐标系、设计基准、设计尺寸、各几何约束关系以及必要的仅包含零件外形的几何数模等;从工艺数据集中提取的信息包括工艺定位孔、基准孔等工艺特征及其在坐标系中的位置约束关系,工艺容差信息与协调基准等;从检验数据集中提取的信息包括产品和工装的关键特性的坐标信息和容差信息(待检验特征)、检测基准以及关键特性的检验要求等;为使数字标工更好地面向柔性装配,对数字标工实体几何模型信息进行扩充:从柔性工装数据集中提取的信息包括工装定位精度对产品容差信息设计的改进、与柔性工装坐标系的转换关系等信息,此外,根据柔性工装在装配中的变形,完善产品关键协调部位的约束关系信息,构建面向装配过程变形协调的数字化信息,对产品关键协调部位的容差信息及检验要求加以修订,同时以提高工装与产品零部件的制造准确度来保证柔性装配的协调性。

通过对数字标工的内容及与柔性工程数据集间关系的分析,根据产品设计数模,结合零部件的制造工艺信息、检验方法与要求及产品柔性装配工艺要求,将零件关键协调特征处的尺寸、精度要求及协调基准及与工装对应的检索等信息集成定义到柔性装配数字标工中,用集成三维实体模型来表达产品完整定义信息^[8],完成面向柔性装配协调所需的数字量基础,作为零件模具、检验模具、零件的加工,柔性工装设计与安装调试,柔性装配,产品的检测,部件对接协调中的单一数据信息源,为后续的工艺设计与协调规划提供信息支持,实现数字标工多工作场景的同时应用,达到并行的工作模式。建立的面向某机型前缘襟翼柔性装配的数字标工模型如图3所示。

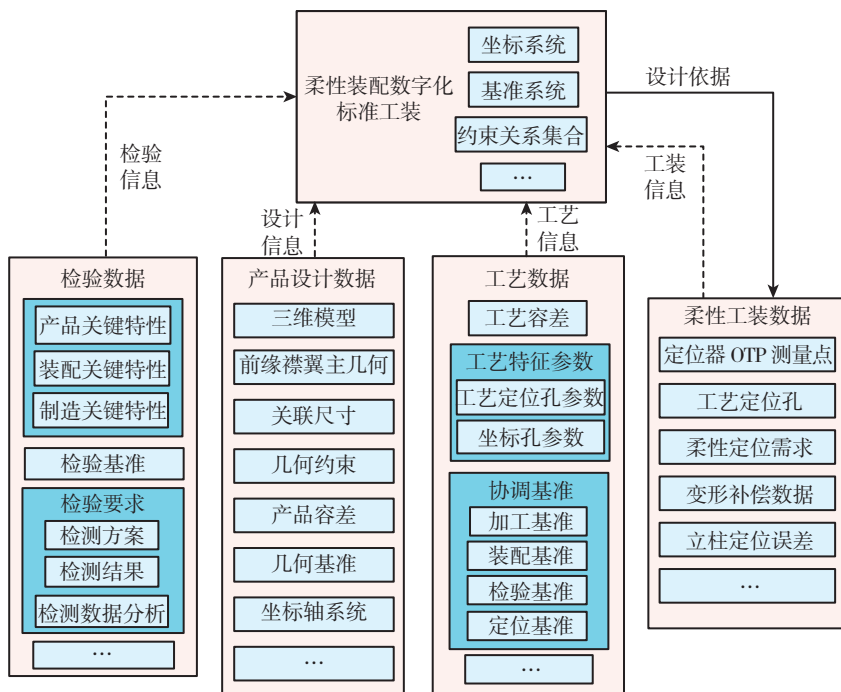


图2 柔性装配数字标工与工程数据集间的信息关联集成

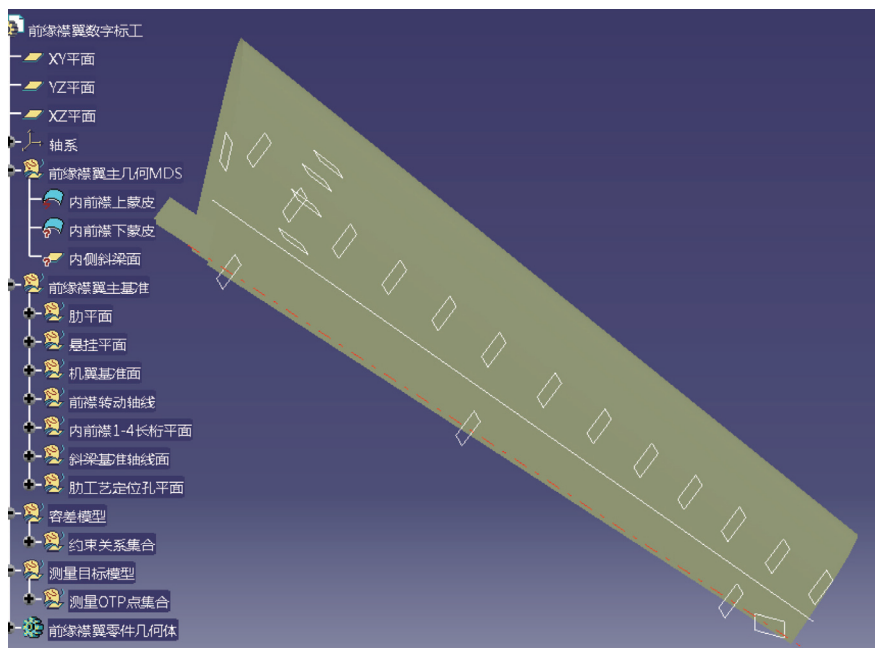


图3 前缘襟翼数字标工模型

基于数字标工的柔性装配协调

在柔性装配协调过程中,数字标工作为数字量装配协调唯一依据,可将其协调过程分为设计协调、加工协调与装配协调3个阶段。在产品三维数学模型和设计基准系统的基础上,针对产品装配精度的控制,以关键协调特征为依据,对重要协调部位的协调关系信息加以分析,通过协调基准的传递,结合柔性工程数据集,构建零件制造装配过程中的工艺基准系统,在统一基准下把产品、加工工装与装配工装的相协调部位的尺寸形状信息与合理的容差信息进行协调设计,用数字量的方式直接将形状与尺寸信息传递到数字化生产工艺装备中,并通过三坐标检测机与激光跟踪仪等测量设备,同时借助柔性工装的各组成立柱控制系统实现所有零件的检测与前缘襟翼产品零组件装配。

1 设计协调

关键特性是在零部件及其制造过程中特征的变化对产品的制造和装配协调准确度影响最大的特性^[10],

根据对要协调的产品零部件的分析,前缘襟翼产品中的关键特性也即柔性装配数字标工中所定义的关键协调特征。在柔性工装设计阶段,依据数字标工中的关键协调特征,工装设计模型通过引用数字标工中规定的协调基准及几何形状与尺寸,并给合理的容差分配值,以达到设计协调。

例如,在各组成立柱式三坐标定位单元的行程确定及布局关系的协调设计中,参照数字标工中的基准系统,以4个产品的铰链接头孔轴线为 X 方向,以垂直于机翼基准面的方向为 Y 方向,机翼基准面所在的方向为 Z 方向设计工装坐标系的各坐标轴方向;参照机翼基准面与翼肋基准面,结合需要定位的4个产品的关键定位特征,确定4个产品的空间摆放位置与各运动方向行程与布局方案,并根据柔性装配数字标工中的各基准面的容差信息设定

各立柱定位精度。

在柔性工装位器设计方面,如图4所示,除端肋外的所有翼肋只设有一个基于工艺定位孔定位的翼肋挡板定位器,则每个翼肋上的关键特性就是该定位器的设计依据和必须保证的目标。根据翼肋的尺寸大小以及位置关系,参考数字标工中的机翼基准面与各翼肋基准面,构造一定定位孔设计平面,工艺定位孔在翼肋上开取的位置即为定位孔平面与各个翼肋平面的交线,将翼肋分为4组,每组翼肋在挡板定位器上都有1组定位孔与之对应,定位器的两端面为翼肋定位面,这4组定位孔在实际柔性装配中同样可作为测量靶标孔。各定位特征满足柔性装配数字标工中的容差要求与检测要求后,即可保证其安装调试、产品装配关键协调特征定位的准确性。

端肋定位器的设计同样通过引用数字标工中的蒙皮内形面、尾缘条内形面、尾缘条托面、长桁轴线、端部翼肋基准面、翼肋定位孔、翼肋内形检测面等需保证的关键特性作为协调依据,在定位器上设有呈三角形分布的3个光学目标测量点,当其容差要求满足后,即可确定其安装调试、定位与检测的准确性。

2 加工协调

在按独立制造原则对工装与工装零件的加工中,对柔性装配数字标工中的基准系统(协调孔轴线、外形面等)转化为物理上的加工基准,将

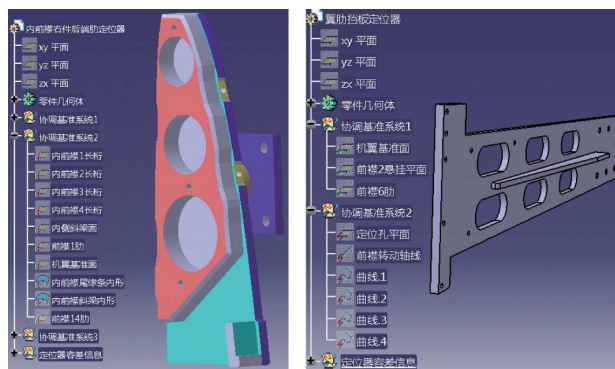


图4 端肋与翼肋挡板定位器

零件三维模型进行工艺设计及后置处理,则产品的几何信息和容差信息就通过数字量形式存在的NC加工指令直接传递给数控加工设备,则形成的产品为物化的数据。在加工过程中,需制定严格的质量控制计划,对关键协调特征加工的工艺参数,如钻头转速、刀具进给量、刀具的润滑等制造关键特性需严格控制,检测零件达到数字标工中检验数据集规定的容差要求后,方可装配使用,以提高零件的制造准确度保证工装与产品之间及产品间的互换协调性。

3 装配协调

在装配协调阶段,根据柔性装配数字标工中的各类基准和协调关系模型,首先在可调支撑底座四角处安装4个基准工具球测量点,利用激光跟踪仪测量软件以底座框架上的TB1、TB2、TB3三点为基准建立工装坐标系。把加工协调阶段完成的柔性工装零件与立柱定位单元线性运动系统外购件借助激光跟踪仪测量系统安装,将工具球放在定位件的OTP点处,通过实时显示与数字标工检验数据集中理论数据的偏差数值,采取相应的措施把工装安装成柔性装配工装三维模型中所规定的结构与形状,并满足安装后各立柱在每个运动方向上对需定位的关键协调特征的运行调试精度要求,则各定位元件在工装坐标系中的空间位置即可保证^[11],实现工装各组成元件在工装坐标系中的协调。

装配关键特性是指在各个装配阶段,对产品的装配协调准确度影响较大,与装配工艺有密切关系的存在于产品与柔性工装上的特征或者某些工艺参数,是必须严格保证的。为保证前缘襟翼3个叉耳间的同轴度,在柔性装配过程中需保证3个定位立柱上的3个定位器的定位精度,则定位器上的定位孔被定义为装配关键特性。同样,交点定位器定位端面的位置度,斜梁定位器定位面的位置



图5 立柱定位单元运动控制程序

度,翼肋挡板定位器的工艺定位孔轴线位置、孔径参数,以及端肋定位器工艺定位孔及其与蒙皮内形定位面、尾缘条定位面、长桁定位孔之间的协调关系,各翼肋工艺定位孔与其外形的关键协调特征也被定义为装配关键特性。在柔性装配中,为了保证所定义的装配关键特性的定位准确度,柔性工装各组成立柱定位单元依据安装调试的控制数据,立柱各运动方向通过飞机柔性装配运动控制系统中的控制程序,如图5所示。从各运动方向设定的原点位置出发,将定位器OTP测量值与控制程序有机结合,按照一定的移动顺序带动各专用定位器移动到柔性装配数字标工中所设定的关键协调特征处,将数字标工中的基准系统转化为工装中可实际操作的定位基准面,用激光跟踪仪检测定位器上装配关键特性在坐标空间的实际位置,根据偏差数值调整定位器在柔性装配数字标工中所规定的关键协调特征容差范围内后停止移动,进行零组件的定位装配。以此类推,直到实现每个零组件在柔性工装上的装配与连接后,通过提取数字

标工中的检测部位要求与检测容差信息,对产品骨架状态与完工状态下的装配测量方案规划,通过对关键协调特征的检测与控制,实现产品数字标工中的关键协调特征在柔性装配工装中的准确传递。

结束语

面向柔性装配的数字标工作为数字量装配协调的唯一依据,在统一基准下协调零件加工、柔性工装设计与安装及柔性装配,基于数字化控制与测量系统,将理论模型转化为面向柔性装配的实际可操作过程。相对以刚性模拟量形式存在的实物标工模型以数字量的形式存在,不需要任何存放场地,且易于保存和修改,其应用结果实现了前缘襟翼产品数字标工中的关键协调特征在柔性装配工装中的准确传递,提高了制造与协调准确度。

本文共有参考文献11篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 夏宛)