

盒式连接可重构柔性工装技术 及应用展望*

Development and Application Prospect of Boxjoint-Based Reconfigurable and Flexible Tooling Technology

北京航空航天大学 郑联语
上海飞机制造有限公司 王建华



郑联语

北京航空航天大学机械工程及自动化学院教授、博士生导师、工学博士。先后在香港城市大学、英国巴斯大学和克兰菲尔德大学留学研修。主要研究方向：数字化设计与制造、先进测量与产品验证、可重构柔性工装。主持和承担国家自然科学基金、国防基金、总装预研、国防基础科研和 863 等项目 10 余项。发表论文 60 余篇。曾获国防和中航工业科技进步二等奖、原航空工业总公司科技进步三等奖。

盒式连接工装技术的成功应用,需要研究突破快速设计与重用、稳定性分析、可视性分析、安装优化、稳定性验证与监控等关键技术,特别是稳定性理论与试验研究,从而实现盒式连接工装设计“快”、制造“准”、使用“稳”。盒式连接工装技术在大批量的产品族装配、小批量产品装配、应急产品装配、产品维修等几种典型场合将会有应用前景和空间。

传统的飞机装配工装(型架)的框架大多采用焊接方法进行连接,存在诸多缺点^[1]:(1)拆卸重用困难,通常为型号“一对一”专用,工装成本高;(2)所用零组件多数是定制的,制造过程(包括原料采购、加工、焊接、时效、验证等)较复杂,特别是焊接后时效时间长,导致准备周期长;(3)传统工艺装备的标准化程度低,设计周期长;(4)大量暂时不用的焊接工装的储存需要占用巨大的厂房空间。为了克服以上缺点,使飞机装配工装具有低成本、可重构、柔性和

重用能力,以便工装能够更好地适应产品设计变化要求,瑞典林雪萍大学与萨博公司合作,将模块化和可重构技术融合起来,提出了基于盒式连接(Boxjoint)的低成本可重构工装(Affordable Reconfigurable Tooling, ART)的概念^[2],本文作者称之为“盒式连接可重构柔性工装”^[3-4](简称盒式连接工装)。如图 1 所示,这种工装借助并不精确的盒式连接框架实现,各种定位夹持器安装于框架梁上,对工件(装配件或零件)进行定位和夹持,而定位夹持器的位置则通

* 上海飞机制造有限公司创新基金项目(821306-15)资助。

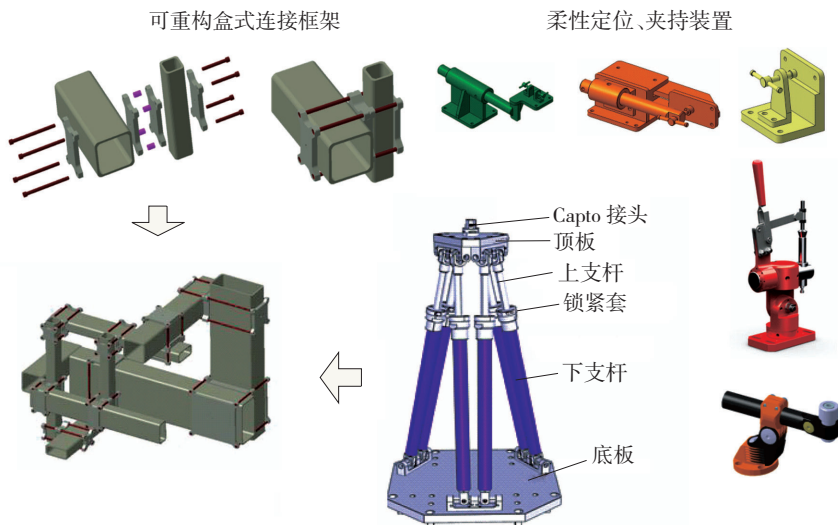


图1 盒式连接工装的概念及安装原理

过外部的测量仪器进行精密调整和监控。

盒式连接可重构柔性工装技术起源于欧盟的 ADFAST (Automation for Drilling, Fastening, Assembly Systems Integration, and Tooling, 自动钻铆与装配系统及工装) 研究项目 (2001 年~2004 年)。该项目将研究目标定位于经济实用的可重构工装系统和集成测量系统上,并取得重大突破,在萨博公司承担的欧盟“神经元”无人机前机身段装配中实现了 ART 技术的首个示范应用。在开始阶段,ART 技术研发主要面向飞机产品的装配。为了将 ART 技术推广应用于其他行业,瑞典政府于 2006 年又出资启动了 CooFix 项目,该项目由瑞典林雪萍大学牵头,几家汽车、重型运输设备企业参与,目标是开发数控化的可重构工装。在此期间,英国空客、英宇航 (BAE)、莱卡、DELFOi 等公司合作也对 ART 技术进行了进一步的研究开发。经过近十年的发展,基于盒式连接的可重构工装技术正得到逐步认同并走向产业化。

对飞机装配而言,考虑到工装的稳定性,盒式连接工装可应用于重量较轻的中小部件(如机翼前后缘、机身壁板、机翼壁板、机身地板梁和龙

骨等)的装配和检测中。

盒式连接工装的基本结构、典型模块及特点

1 可重构柔性工装的基本结构

典型的可重构柔性工装的基本结构主要由四大部分组成,由内到外分别为: 装配件、定位夹持器、支撑装置(动态模块)和外围框架。

飞机装配型架(工装)的设计是从研究被装配件开始的。通常情况下,在新工装的概念设计阶段,工装设计师主要研究装配件的结构及公

差要求,找出工件上精度要求较高的关键特征,特别是定位基准。

装配件关键特征及定位基准一旦被确定下来,设计师便开始选择或设计定位夹持器。定位夹持器将工件定位并夹紧在设计所要求的公差范围内,并且在整个装配过程中予以维持。对于定位基准位于复杂结构内部、质量很大或装配过程中动态载荷较大的装配件,合理设计其结构无疑是一项挑战。定位夹持器通常是一个标准化装置并带有调整螺栓的定位面。

支撑装置(动态模块)使定位夹持器定位在工装设计给定参数范围内的大致位置,再通过定位夹持器的微调来准确定位或夹持待装配件。动态模块可以设计为多种形式的机构,但通常它的尺寸变化控制在 0.5m 左右。支撑装置和定位夹持器的组合使各种复杂飞机装配件都能被装夹定位到型架上。

外围框架用来固定与定位夹持器相连的支撑装置。飞机装配工装往往采用框架式结构,主框架是由多根梁组成的结构来保证定位夹持器的刚性定位。特殊情况下,工程师也会直接利用特殊处理的地面或者墙

表1 典型盒式接头类型及应用案例

代号	类型	示意图	所用到的接头	连接板数量	螺栓数量	用途说明
a	基本类型			2	4	用于构成其他复杂类型的盒式连接接头
b	双盒类型			4	4	连接空间异面正交的两个方形梁,用于较大载荷
c	单盒类型			2	4	连接空间异面正交的两个方形梁,用于较小载荷
d	正交类型			12	8	连接空间异面正交的三个方形梁,用于较大载荷
e	斜交类型			8	8	连接空间异面斜交的两个方形梁,用于构成加强肋
f	角度类型			4	4	连接空间异面斜交的两个方形梁,用于构成加强肋
g	共面类型			4	4	连接空间共面正交的两个方形梁,用于较大载荷

体来替代外围框架,只要它们的刚度能保证定位、支撑装置在整个装配过程中满足精度要求。

2 盒式连接工装的典型模块

盒式连接工装主要由盒式连接框架、动态模块(支撑装置)、定位器和夹持器组成。经过近年来的研究和开发,已经初步形成了系列化的典型模块结构。

盒式连接工装主要利用各种盒式接头来进行框架搭建,组合形成各种构型的工装型架。典型的盒式接头类型及应用场合如表 1 所示。

盒式连接工装可用的动态模块有多种类型,根据动力驱动原理分为气动、液压和人工操作等动态模块;根据其支撑方式分为串联模块和并联模块。动态模块上安装固定各种形式的定位器或夹持器。盒式连接工装中通常需要综合应用串联模块和并联模块,如图 2 所示。

定位夹持器根据装配件来设计,它有多种类型。根据定位面法线与对应梁的中心线的关系,可将定位器分为两种安装类型: H 型(定位面法线与对应梁的中心线平行)和 V 型(定位面法线与对应梁的中心线垂直)定位件。

3 盒式连接工装的特点

与传统焊接工装相比,盒式连接工装在工装的设计、制造、安装和验证方面都具有不少优势(表 2)。

盒式连接工装具有不少的设计优势,可显著减少设计周期。专用的配置设计软件能够集成到 CAD 软件环境中,可以直接从资源库中选择标准件,并依据软件提供的模块之间连接规则和约束,自动生成材料清单。采用参数化设计方法更加容易适应产品后期设计的改动。

盒式连接工装具有明显的制造优势,可大幅降低产品的制造时间和成本。由于使用现有标准零件,无需再重新设计,可以直接通过批量购买或生产来实现降低制造成本;利用

螺栓连接可消除焊接接头,无需焊接应力消除的时效工序,可明显缩短工装制造时间;对于工程设计构型改变的装配件,工装的可重构性使工装变更时间和成本最小;由于装配耗时少,工装设计和材料采购可等待工艺的最后要求,使工装材料需求数据更加精确,避免材料浪费。

盒式连接工装还具有其安装优势。因为精度可以通过调整定位、夹持器来实现,所以盒式连接框架并不需要那么高的精度;又因为是柔性的,所以它不需要使用销和垫片进行

连接。可以通过调整柔性的动态支撑装置来适应不同的环境和装配件不同的几何形状,来提高工装的适应性。

在工装验证和定检方面,盒式连接工装也有一定的优势。可以通过对各个标准元组件的重构配置为整个重新认证的过程带来便捷。由于要借助激光跟踪仪等测量仪器进行精度和稳定性验证,当来自温度变化、地面下沉、未知的冲击载荷以及焊缝内部应力的释放引起的变形发生时,盒式连接工装是一个平衡定位、夹持位置的好方法。如果发现任何和工装设计参数不符的地方,可以立即对工装进行调整,以保证它对装配件的准确定位。

值得指出,尽管与传统焊接工装相比,盒式连接工装具有较大的优势,但它也存在一些局限或问题。其中最关键的一个问题是如何保证这种工装的稳定性,

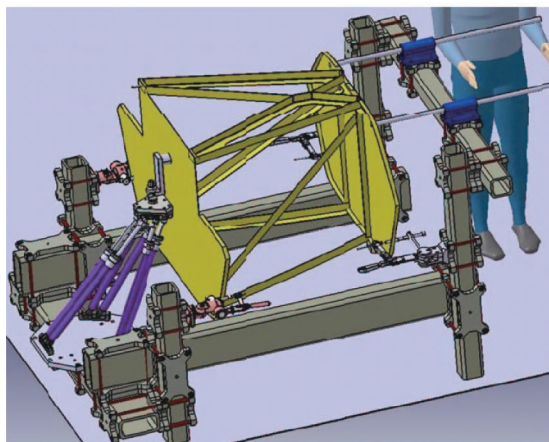


图2 串联与并联模块的综合应用示意图

表2 盒式连接工装与传统焊接工装的特点对比

对比项	传统焊接结构工装	盒式连接结构工装
工装设计	很少采用标准件,多数配套件需重新设计,设计耗时较长。	采用标准件,部分可以从零件库中直接调用; CAD 参数化设计,便于对工装设计修改。
制造安装	永久连接,不能修改; 需要焊接应力(时效),耗时较长。	批量采购或加工标准件; 可进行可重构装配, 便于重新配置改动,安装周期较短。
验证定检	焊接型架结构较稳定,再验证周期长、频率低。	盒式连接型架结构稳定性相对差些,重复验证或定检的周期短、频率高。
应用范围	一套工装只能用于某特定产品, 某些情况下经过特殊改装也可用于结构形状和尺寸类似同类产品。	对同一类产品,经过对工装重构后可以再用; 甚至对不同类型的产品,也可重构再利用。
成本消耗	焊接后的工装型材拆卸后大多不可重用,成本消耗大。	盒式可重构工装的型材附件拆装后仍可循环利用,降低了工装的成本。
环境适应性	焊接工装的再调节能力差,对外部环境(冲击、变形等)的适应性差。	利用盒式框架的可重构性和动态模块的可调性,环境适应性大大增强。
存储保养	大量暂时不用的焊接工装需要储存在车间现场或库房,占用很大空间,保养耗费人力、财力。	需提前采购大量标准件并储存在仓库中; 暂时不用的盒式连接工装,拆卸后可储存在仓库中,也可以拆卸后重构成其他工装,大大避免了材料浪费。

这需从工装结构优化设计和使用的精密测控和及时调整等方面采取措施予以解决。另外一个问题是,其安装过程还比较麻烦,安全性也有待提高。这需要通过优化安装过程以及借助便捷的辅助工具(如连接板与方梁对中定位工具、方梁吊装滑轮装置等)和测控软件予以解决。

盒式连接工装在国外的 发展现状

2004年,对盒式连接工装系统的可行性研究在瑞典林雪平大学的机器人实验室进行,该研究工作由林雪萍大学和萨博飞机公司合作完成,最终成功地将ART系统在“神经元”无人机前机身段的装配中完成了示范应用(图3)^[2]。

后来经过几年的发展,尤其是在空客、沃尔沃等工业企业的大力支持下,低成本盒式连接工装技术已在飞机的机身壁板、机翼前缘、翼肋组件以及汽车车身等部件装配中得到验证和应用,开始从飞机装配工装逐渐走向飞机维修工装中,甚至在其它装备(如航空发动机、核能设备)制造领域展示其应用前景。不同尺寸、体积和重量级别的装配件盒式连接工装系统也正在不断研究与开发,所用的各种类型的定位夹持器及辅助工具也正逐渐丰富起来,很有可能最终走向产业化。

1 在航空工业中的应用

在民用飞机制造中,最早引入研究盒式连接工装系统的是空客公司。2008年英国空客启动一个可重构柔性装配工装项目(Reconfigurable Flexible Assembly Tooling Project, ReFlex)^[6],目标是将激光跟踪等先进测量技术更好地与这种低成本可重构工装相结合,开发面向机翼装配的可重构柔性夹具原型,并验证评价这种工装技术对机翼装配的带来效果。该工装原型首先在机翼壁板装配和翼肋检测中得到验证^[7],取得了

较好效果。

空客目前正在开展的研究工作是开发、验证针对翼盒装配的可重构柔性工装,用以验证这种工装的以下效果:(1)对翼盒设计改变的适应性。即当翼盒模型在工装设计定型后又出现改变,可以通过对工装的一些轻微重新设计和调整,以适应翼盒产品的设计变更。(2)对同一类型不同翼盒产品的适用性,即采用此工装夹紧多种形状不同的翼盒组件以进行检测。验证结果表明,夹持不同工件时,只需要很少的重新配置和增加少数额外的构件就能实现。

空客参与的COALESCE2项目



图3 盒式连接工装系统在“神经元”无人机机身段装配中的应用示范

(欧盟为开发下一代短程商务飞机固定式前缘的投资项目)也实践了该技术。该计划历时3年,主要由来自7个不同国家的航空领域专家组成的9个参与方合作,目标是通过在飞机制造中应用新技术和新材料使飞机的制造成本降低30%以上。该项目应用盒式连接工装技术作为降低工装成本的一个途径。图4给出了对空客A320固定前缘进行装配仿真的效果。

2 在汽车工业中的应用

在汽车装配中也开展了盒式连接工装技术的应用实践。2002年沃尔沃(VOLVO)汽车的市场总监

OlleAxelsson保守地估计:类似于沃尔沃这样的汽车公司每条生产线每年至少会推出一款新车型,如果生产的辅助设施足够柔性化的话,我们就能够在48h之内启动这款新车的生产,并且在8周内实现对该款产品的满负荷生产。

Kihlman等人研究用盒式连接型架代替VOLVO XC90车门(侧

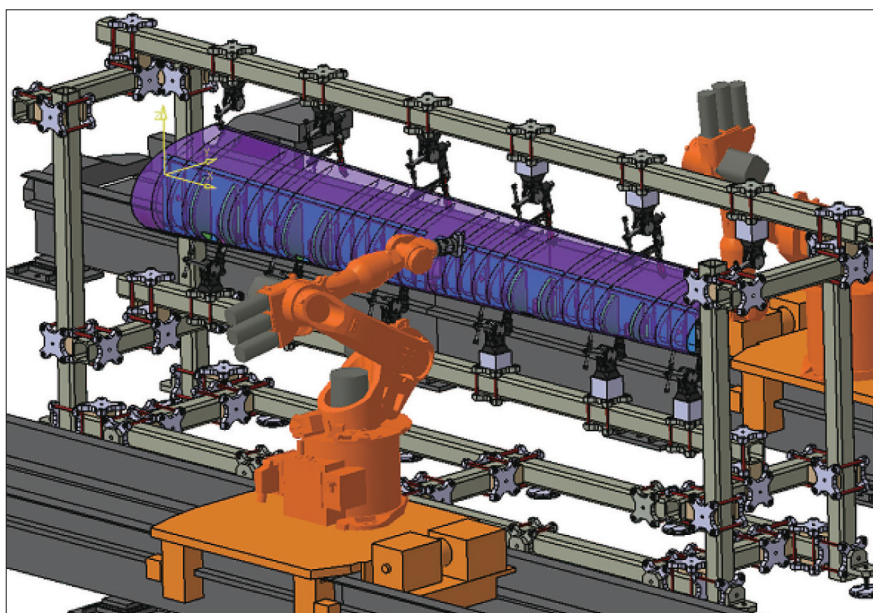


图4 应用盒式连接工装的空客A320的固定前缘装配仿真效果

围)焊接的传统型架,验证了其可行性,同时还显示盒式连接工装技术能够被应用于自动化生产中。

3 在工程机械中的应用

Henrik Kihlman 和他的团队利用盒式连接构建的工装在挖掘机的原型机装配中进行了验证。通过运用盒式连接技术快速搭建挖掘机三大段的装配工装,即前部、后部和起重臂组件的装配工装(图5),从而降低挖掘机的制造成本,并使交货时间提前了42%。

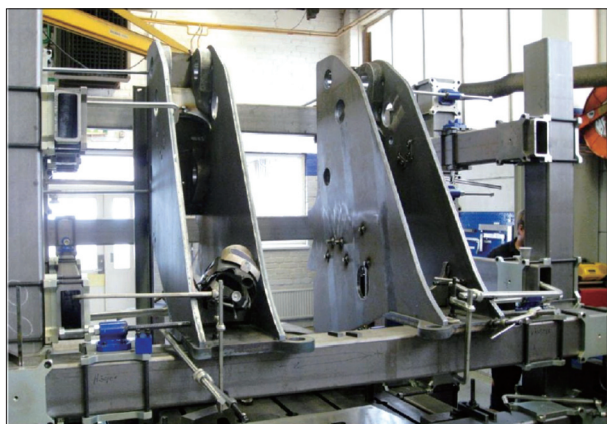


图5 采用盒式连接工装的挖掘机装配

而在我们的工程机械产品的制造装配中,还主要采用传统的焊接工装。无论从经济性还是从提高效率来说,盒式连接工装技术在工程机械制造都有很大的应用空间。

盒式连接工装的关键技术

1 快速设计与重用技术

为实现盒式连接工装的快速设计与重用,首先需要按“产品族工装”理念实行盒式连接工装资源及知识的规范化建模、分类、管理,并建立工装资源及知识库及管理工具。其次需要开发基于知识的面向盒式连接可重构工装的高效配置设计方法,即研究如何将配置原理与工装设计原理相结合的基于资源和知识重用的盒式连接工装快速配置技术及系统,提高工装设计的自动化程度,由此解决产品频繁变型、改型情形下带来的

工装多样性、工装准备工作量大、效率低和周期长等诸多问题。

2 稳定性分析技术

盒式连接骨架与传统焊接骨架的最大区别就是,用一系列的标准梁和连接件构造装配型架的骨架,其连接部分没有焊接或其他永久性的连接,而是采用了螺栓摩擦接合,导致整个型架的稳定性相比传统焊接型架要差。而保证稳定性是工装型架的前提条件,因此,很有必要对盒式连接型架的稳定性进行系统的分析与验证,它直接关系到盒式连接型架的性能和可靠性。

盒式连接型架的稳定性分析可从以下3个方面进行:细长梁的稳定性、单个盒式接头的稳定性和包含多个盒式接头的型架整体稳定性。如何综合利用力学公式计算和有限元仿真的方法实

施稳定性分析,以确保盒式连接工装的稳定性,也是亟待解决的关键问题之一。

3 测量可视性分析技术

工装的可视性分析是以测量仪器(通常是激光跟踪仪)向工装上的测量目标(光学工具球)发出的光线为视线,判断视线上是否有物体遮挡的过程。有效的测量可视性分析可以减少测量仪器站位并优化测量仪器位置。与焊接工装相比,一方面,盒式连接工装的盒式接头占用空间更多,需要精确控制的测量目标也会更多,测量过程产生视线遮挡的可能性更高。另一方面,由于对定位、夹持器进行周期性定检的频度更高。因此,对盒式连接工装进行系统的可视性分析是其中的一项关键技术。通过高效的可视性分析算法^[4],进行测量可视性的模拟,可以实现对测量

仪器进行事先站位规划,从而在尽可能少的时间内以最少的测量仪器站位完成工装的验证任务,提高工装安装与定检精度与效率。

4 安装优化技术

飞机装配型架是复杂的结构装置,安装过程比较复杂。由于装配、测量工作通常需要交替进行,元组件装配先后次序、安装可达性、测量可视性、工人操作舒适性等都会影响工装安装的效率和精度。这些都决定了装配工装本身装配的可行方案有很多种,而不同方案下的工装精度、工时都是不同的。盒式连接工装安装有不少区别于传统焊接工装安装的特点和要求。因此,研究总结盒式连接工装的安装顺序原则(包括地基梁先行、接头先行预装、垂直梁优先于水平梁等),自动规划其安装过程,并通过装配过程仿真和人因工程仿真技术予以验证,从而获得优化的工装安装过程,也是值得深入研究的关键技术。

5 稳定性验证与监控技术

产品装配过程中的静动态载荷、温度波动、地基不稳等外界因素会使工装(型架)的整体位置、关键定位点发生变化,从而严重影响装配质量。为了保证装配型架长时间的精度稳定性,在飞机工装实际的使用过程中,需要借助测量仪器对工装进行定期检定甚至准实时监控。对于盒式连接装配工装型架,这样的精度稳定性的定期检定、监控(简称测控)显得更为重要。因此,盒式连接装配工装的精度验证与测量技术也是需要研究的关键技术之一^[8]。首先,需要验证动静态装配载荷作用下的稳定性。拟通过静力加载实验、振动(模拟钻铆工作)加载实验、静力+振动综合加载实验,分别测量工装关键特征点的位置漂移量;其次,需要验证长久稳时间范围内的稳定性。即在相当长的时间周期内(6个月至1年及以上),定期(如每月1次,且保证

夏天、冬天至少检测一次),监测梁、定位器、夹持器及其它重要辅助装置的位置是否漂移或漂移量,并作统计过程分析(SPC),得出工装型架的稳定性控制图。

应用展望

盒式连接可重构柔性工装与传统的焊接工装相比具有很多优势,它在能够保证稳定性和安装便捷性的前提下,可在以下几种生产(包括装配、检测、修边等工艺)场合中获得应用。

1 大批量产品族的生产

在批量生产的商业飞机制造中,不同机型的相同部件通常分配给固定的供应商来制造,即供应商更倾向于只专注于飞机某部件生产,例如水平平尾和升降舵。例如空客飞机的机翼在英国威尔士布劳顿生产装配,前机身段和后机身在德国汉堡装配,而水平尾翼在西班牙格塔费制造。在诸如汽车、工程机械等大批量产品生产而言,更是如此。当产品型号改变时,由于盒式连接工装的动态模块可增加也可减少(拆除),每个动态模块又可以一定的工作空间范围内变化,因此只需对同产品族(如升降舵)的原有可重构工装进行简单配置和重构,就能满足新型号对装配工装的要求,而不需要对每种改型的产品都开发专门的工装,即可重构工装能够被用在一个产品族中不同型号的相似组部件的装配中。

2 小批量产品的生产

对于那些比小型支线商务飞机产量还要少的产品(例如特种军用飞机、某种商业飞机的模型机、航模或者原型机等)的生产,类似情况下产品的产量规模通常在1到100架之间,盒式连接工装能够通过重构和调整应用于同型号产品的不同组部件装配中,显著降低小批量产品的生产成本和周期。

3 产品的应急生产

当面对战争等紧急生产情况时,对军机及配套装备短时间内会产生更大的需求,应用盒式连接可重构工装能够快速构建所需的工装,快速响应应急生产的需要。此外,当某些自然灾害(例如地震、飓风等)冲击和损坏工装时,盒式连接工装的快速可重构性可为突发事件下的生产再恢复提供保障。

4 飞机主结构维修

在飞机产品制造期间,飞机的主结构维修MSR(Aircraft Major Structural Repair)是很常见的。一方面,过去飞机主结构维修工装主要由相应的待修产品在装配生产阶段的硬工装复制而来,但它的应用率取决于产品的损坏频率,这就决定了它可能在飞机的整个运营周期中很少甚至不会用到。所以,很多维修工装都是等到维修需要时才设计制造,但传统焊接工装准备周期较长,会大大延迟飞机主结构的维修进度。另一方面,有的维修工装要求修改其中的部分特征,甚至需要重新设计工装。考虑到将来需要,会在应急储备工装上花费较大投资,然而这些应急储备工装也有可能在整个飞机寿命期间不被用到。据统计,对一种机型,军方在用于结构修理的应急储备工装的设计、制造和储存花费大约1亿美元^[9],这种维修应急工装成本都得转嫁到飞机客户身上。盒式连接工装无疑是一种最现实的选择,将会降低产品的维修成本,提高产品的维修效率,为企业节约更多的资源和成本。

结束语

盒式连接可重构柔性工装技术的研究和实践在国外已取得相当大的进展,它具有的低成本、快速响应、可重复利用等技术优势已经得到初步验证,在飞机、汽车、工程机械等制造中表现出较好的应用潜力。盒式连接工装技术的成功应用,需要研究突破快速设计与重用、稳定性分析、

可视性分析、安装优化、稳定性验证与监控等关键技术,特别是稳定性理论与试验研究,从而实现盒式连接工装设计“快”、制造“准”、使用“稳”。盒式连接工装技术在大批量的产品族装配、小批量产品装配、应急产品装配、产品维修等几种典型场合将会有应用前景和空间。在我国,对盒式连接可重构柔性工装技术还处于认识和初步研究阶段,需要结合企业实际需求,特别是在研的大型客机、无人机和歼击机等飞机型号科研生产中,大力加强盒式连接工装技术在航空制造中的研究与实践工作,为未来应用并发展飞机先进工艺装备技术奠定基础。

参考文献

- [1] Hoska D R. Fixtureless assembly manufacturing. *Manufacturing Engineering*, 1998, Vol. 100: 49-54.
- [2] Kihlman H. Affordable Automation for Airframe Assembly-Development of Key Enabling Technologies(C). Dissertation Thesis No. 953, Linkopings university, ISBN 91-85299-59-6, 2005.
- [3] 郑联语,王艺玮,蔡志为. 基于盒式连接和六足机构的翼盒水平装配可重构柔性夹具设计与验证初探. *航空精密制造技术*, 2011, 47(3):44-48.
- [4] 蔡志为,王艺玮,郑联语. 盒式连接可重构柔性工装配置与分析系统. *航空制造技术*, 2013(8):64-67.
- [5] Henrik K, Magnus E. Flexible Fixtures with Low Cost and Short Lead-Times. *AeroTech Congress & Exhibition*, Los Angeles, California, September 17-20, 2007.
- [6] Iain S. Reflex box joint jig configured for wing box section. Airbus Ltd Operations, 2010.
- [7] Millar A, Kihlman H. Reconfigurable Flexible Tooling for Aerospace Wing Assembly. (2009-01-3243) 2009 SAE International, November 2009, Seattle, USA.
- [8] Helgesson P, Ossbahr G, Tomlinson D. Modular and Configurable steel structure for assembly fixtures. A (10AMAF-0027) 2010 SAE International.
- [9] Boyer L P. Digital Tooling For Major Structural Repair. The Boeing Company. 2001.

(责编 亿霖)