

# 飞机数字化装配柔性工装技术 体系研究

## Flexible Tooling Technology System for Aircraft Digital Assembly

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 王 亮 李东升



王 亮

北京航空航天大学航空宇航制造工程专业博士毕业,主要研究方向为飞机数字化装配工艺及装备技术,现为北京航空航天大学机械工程及自动化学院机械工程专业博士后。

飞机产品结构复杂,零部件数量多,且多数零件为尺寸大、刚性小的钣金件,在装配过程中易发生变形。为了满足飞机产品最终的装配准确

在当前国内航空制造业大力提倡飞机装配数字化、柔性化的背景下,亟需深入研究飞机数字化装配柔性工装技术,通过建立柔性工装技术体系,以规范和指导国内柔性装配工装的设计制造及应用,从而提高国内飞机装配工装的数字化、柔性化技术水平以及柔性工装的应用规模。

度要求,在飞机装配过程中采用了大量装配工装。这不但可保证进入装配的飞机零件、组合件、板件或段件精确定位<sup>[1]</sup>,而且应用工装还可以限制装配过程中的连接变形,使产品满足准确度及互换协调性要求。此外,应用工装可以改善劳动条件,提高装配效率。因此,工装在飞机装配过程中占有非常重要的地位。

当前飞机装配中应用的工装主要有两种结构形式:刚性工装和柔性工装<sup>[2]</sup>。刚性工装刚性专用,设计制造周期长、存储占地面积大,而且

结构开敞性差,不利于先进自动化连接设备和连接技术的应用。而柔性工装克服了刚性工装的上述缺点,具有数字化、柔性可重复利用的特点,同时结构开敞性好,在产品装配时便于应用各种自动化连接设备。

国外通过广泛应用各种数字化柔性工装,不仅提高了飞机装配效率,同时降低了飞机生产制造成本,实现了现代飞机产品的精确装配、精益制造,大幅度提高了飞机装配水平。当前,国外在飞机产品的各个装配阶段(组件级、段(部)件级、部件

对接级)中<sup>[3-10]</sup>,均已经发展应用了相应的柔性工装。

而国内在飞机装配中应用的工装结构仍主要以传统的刚性、专用形式为主。虽然近年来也研制了一些数字化柔性工装设备,如北航和沈飞合作研制的用于壁板类组件装配的数控柔性多点工装<sup>[11]</sup>,北京航空制造工程研究所<sup>[12-13]</sup>、浙江大学<sup>[14-15]</sup>等研制的飞机大部件对接柔性工装系统等。但从整体上看,国内在飞机装配柔性工装的研究应用上仍处于起步阶段,柔性工装的研制和应用缺乏规范和指导,能够成功应用的柔性工装数量较少,不能形成规模,特别是在飞机组件级、段(部)件级装配中,更是缺乏深入的研究应用。

因此,在当前国内航空制造业大力提倡飞机装配数字化、柔性化的背景下,亟需深入研究飞机数字化装配柔性工装技术,通过建立柔性工装技术体系,以规范和指导国内柔性装配工装的设计制造及应用,从而提高国内飞机装配工装的数字化、柔性化技术水平以及柔性工装的应用规模。这对促进国内飞机数字化装配技术的发展,进而提高国内飞机产品的核心竞争力具有重要意义。

## 飞机装配模式及装配工装

### 1 两种典型装配模式

飞机装配技术在发展中,由于飞机制造互换协调方式的不同,形成了两种典型的装配模式:一是基于模拟量传递的传统装配模式,这是传统的飞机装配方法;二是基于数字量传递的数字化装配模式,这是现代飞机装配的主要方式<sup>[2]</sup>。

传统装配模式下,互换协调基于模拟量传递,零件基于相互联系原则制造,即从模线到样板样件一直到飞机零件的制造和装配,各个环节之间是依次利用和依靠的关系,环环相扣、缺一不可,整个装配过程主要采用串行模式,飞机产品制造周期长<sup>[16]</sup>。

现代飞机制造中,通过充分应用各种数字化技术实现了飞机从设计制造到装配检验的全数字量传递,形成了基于计算机辅助工艺设计、数字化柔性工装定位、数控自动钻铆设备连接以及数字化测量设备检验的数字化装配模式。

### 2 传统装配模式下的工装结构

工装结构一般具有一个刚性骨架,用刚性的内型或外型卡板作为主要的定位夹紧件,通过快干水泥将其与骨架刚性连接。定位夹紧件的位置准确度主要由其安装方法和加工精度决定,早期定位夹紧件的安装主要依靠模拟量形式的标准样件,其加工精度主要靠加工完成后的手工修整保证,因此工装的定位精度相对较低,从而限制了飞机的装配精度,使得早期飞机的寿命和安全可靠性能都相对较低。

当前国内的飞机装配模式基本上还是传统的装配模式,近年来数字化技术的发展应用虽然提高了工装的制造精度和安装准确度,但其仍然具有传统刚性工装的弊端,这也制约了国内飞机装配技术的发展。

### 3 数字化装配模式下的工装结构

#### 3.1 柔性工装的特点和组成

柔性工装一般具有柔性化、数字化、模块化和自动化的特点。柔性化表现在工装具有快速重构调整的能力,从而一套工装可以用于多个产品的装配,这也是柔性工装的最根本特点;数字化特点体现在其从设计、制造、安装到应用均广泛采用数字量传递方式,是一种数字化的工装;模块化体现在柔性工装在硬件上主要由具有模块化结构特点的单元组成,模块化结构单元的重构实现了工装的柔性;各模块化单元可自动调整重构,体现了柔性工装自动化的特点。

柔性工装的组成可以分为软件和硬件两部分,软件主要包括控制软件、测量软件、装配仿真软件和优化计算软件等;硬件主要包括组合在

一起的多个模块化结构单元、数控系统、数字化测量设备等。

#### 3.2 柔性工装的定位精度保证方式

柔性工装是一种数字化工装,其在应用中主要依靠各个模块化单元来定位零件,因此模块化单元的位置准确度决定了柔性工装的定位精度。

模块化单元的位置准确度主要通过以下3条途径保证:

(1)模块化单元的运动调整数据以数字量的形式传递给数控系统;

(2)控制系统精确的控制模块化单元运动;

(3)模块化单元运动到位后由专门的锁紧机构锁紧。在上述3条途径的保证下,柔性工装的定位精度一般都能保证在0.1mm以内。

模块化定位单元的驱动数据从生成到传递给数控系统到最终定位,整个过程实现了全数字量传递,是数字化柔性工装具有高定位精度的重要原因。而数字量形式的驱动数据则是所有数字量传递的源头和基础,是柔性工装高定位精度的保证。

柔性工装的数字量驱动数据主要有3种类型:理论驱动数据、实测驱动数据和优化驱动数据。理论驱动数据是通过对零件数模和工装数模进行装配仿真,根据装配仿真结果计算得到的工装驱动数据;理论驱动数据由于没有考虑零件及工装的制造误差,因此,应用理论驱动数据工装往往不能到达最佳位置,但其生成迅速,简便易用,适用于刚性相对较弱的零件的装配上。实测驱动数据是通过利用数字化测量设备获得装配件上定位关键点实际位置数据,然后经过坐标变换以及各种补偿计算转化得到;实测驱动数据准确,精度高,但其生成需要借助数字化测量设备,周期较长;利用实测数据驱动工装,适用于一些机加承力件的装配。优化驱动数据是通过对理论数据和实测数据进行比较分析并优化计算得到的工装驱动数据,其生成需

要借助专门的优化算法,而且要利用理论数据和实测数据,因此生成周期较长,应用复杂,但其精度高;主要用于装配过程复杂、对装配精度要求高的飞机部件装配或大部件对接装配中<sup>[17]</sup>。柔性工装的3种驱动数据的生成过程及其在应用中的传递方式如图1所示。

### 3.3 柔性装配工装的优势

柔性工装的柔性可重构功能,实现了飞机装配中工装与零件“一对多”的模式;而且柔性工装基于数字量传递,实现了工装的数字化定位,具有传统工装不可比拟的优势。

首先,柔性工装的快速重构功能使飞机装配工装的设计制造等准备周期大大缩短,提高了工装快速响应产品变化能力;同时柔性工装的“一架多用”功能大幅度减少了工装数量及工装存储占地面积和工装设计制造成本。因此,柔性工装既适应了现代飞机小批量多批次的生产要求,

又顺应了精益制造理念的潮流,代表了飞机装配工装的发展方向。

其次,柔性工装通过采用数字化工装驱动数据,结合先进数字控制技术,实现了飞机装配工装的数字化定位,改变了传统工装模拟量定位方式,提高了工装的定位准确度。同时柔性工装的数字控制调形重构功能使工装重构前后具有基本相同的定位精度,保证了装配工装的协调性。

第三,柔性工装结构开敞,更适合各种自动化数控钻铆设备的应用。数控钻铆设备通过集成数字化的柔性工装,形成各种形式的自动化装配单元<sup>[18]</sup>,是飞机数字化装配模式下的一个鲜明特征。

### 典型柔性装配工装

概括当前国外飞机装配中应用的柔性工装,按其结构特征划分,一共存在4类典型柔性工装:多点阵真空吸盘式柔性装配工装、行列式柔性

装配工装、分散式部件装配柔性工装及各种形式大部件自动对接平台。

#### 1 多点阵真空吸盘式柔性工装

多点阵真空吸盘式柔性工装的模块化单元为带真空吸盘的立柱式单元,其在空间具有3个方向的运动自由度,通过控制立柱式单元生成与壁板组件曲面外形一致并均匀分布的吸附点阵,利用真空吸盘的吸附力,可精确定位并夹持零件(图2)。

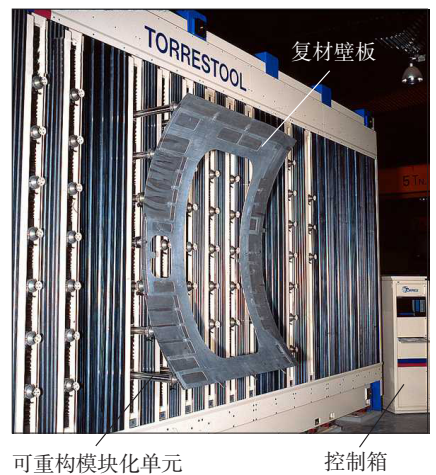


图2 数字化柔性装配工装

多点阵真空吸盘式柔性工装中各模块化单元的运动调整主要通过伺服电机驱动,其控制系统一般采用标准数控系统的形式,通过现场总线控制多个模块化单元的自动调形。

多点阵真空吸盘式柔性工装可分为立式、卧式和环式3种结构形式,在机身壁板类组件的装配中,主要应用立式和环式结构的工装;卧式结构工装则在一些复材结构的水平尾翼和垂直尾翼的装配中有应用。图2是在波音公司在机身壁板装配中应用的立式结构柔性工装。

多点阵真空吸盘式柔性工装在应用时,驱动数据采用理论数据。工装工作流程如下:首先根据装配件数模及工装数模计算得到工装理论驱动数据,然后将理论驱动数据传给控制系统,控制各模块化单元迅速调形重构,生成与壁板曲面符合并均匀分布的点阵;模块化单元调整到位

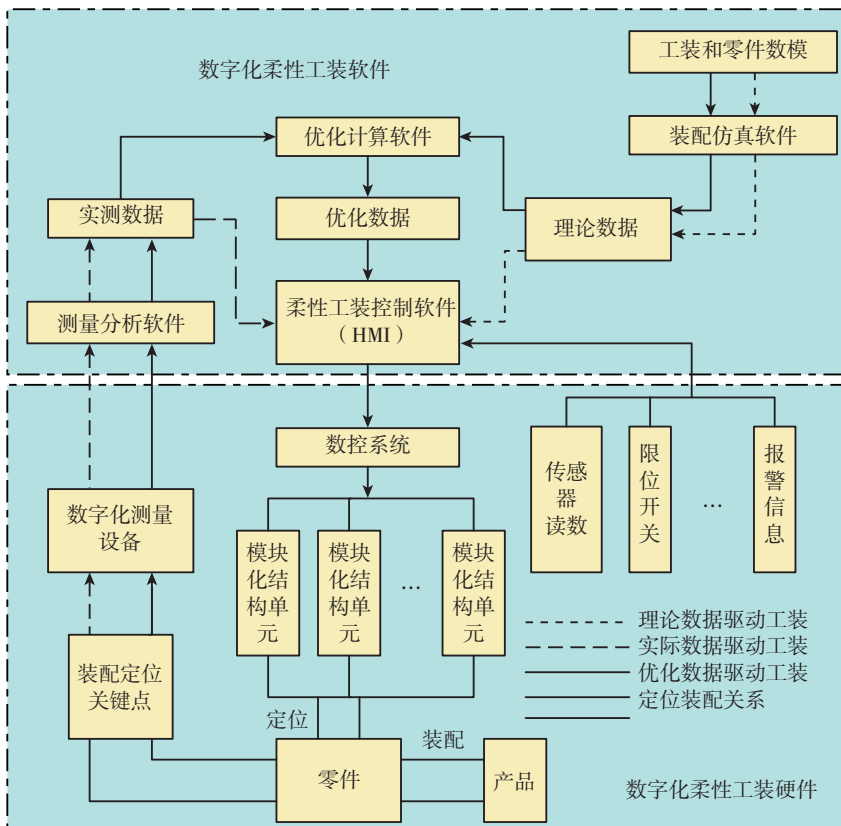


图1 柔性工装运动驱动数据生成及传递方式

后,根据零件上的定位特征和工装的定位特征使零件上架;真空系统启动,可靠的吸附夹紧零件,完成装配。

## 2 行列式结构柔性装配工装

行列式结构柔性工装是一种由多个行列式排列的立柱单元构成的工装,各立柱单元为模块化结构,独立分散排列,每个立柱单元上装有夹持单元,夹持单元一般具有3自由度的运动调整能力,从而可通过调整各立柱单元上多个夹持单元排列分布,来实现对不同飞机零件的装配。行列式柔性工装结构原理如图3所示。

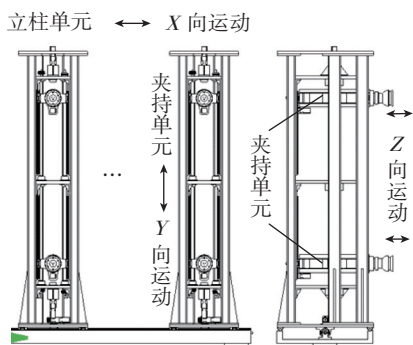


图3 行列式柔性工装结构

行列式结构柔性工装主要用于大型飞机的机翼壁板和翼梁装配。行列式工装结构开放性好,多与自动钻铆机配合使用。行列式柔性工装在应用时与多点阵真空吸盘式工装类似,也是采用理论驱动数据,理论数据可根据零件数模得到,所有零件对应的工装理论驱动数据都可以存储在一个数据库里,当需要装配某个零件时,可直接调用。行列式工装的调整可通过工装系统的数控系统主动调整,也可借助集成在一起的自动化的数控设备来被动调整<sup>[5-6]</sup>。

## 3 分散式部件装配柔性工装系统

分散式部件装配柔性工装是一个集成了工装(一般称为定位器)、定位计算软件(或者为图像操作界面GUI)、控制系统(包括人机操作界面HMI)和数字化测量系统的综合集成系统,如图4所示。

分散式部件装配柔性工装系统

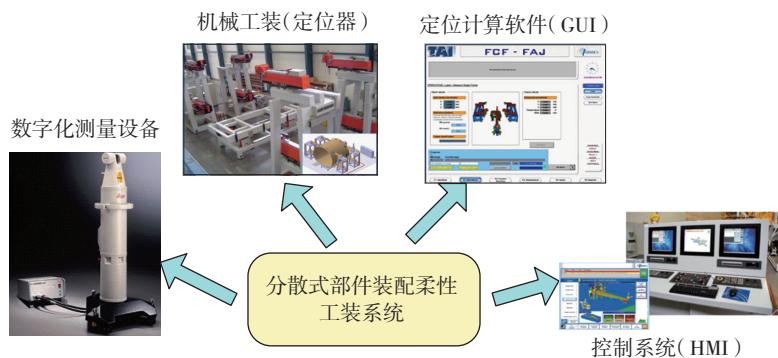


图4 分散式部件装配柔性工装系统

主要用于机身部件或机翼部件的装配,在应用过程中,采用的是优化的工装驱动数据,工装首先根据待装配部件的数模计算出工装的理论驱动数据,构成部件的各组件安装到定位器上,然后定位器在控制系统驱动下,到达理论位置,此时利用激光跟踪仪测量各组件的实际位置数据,将其值与理论位置数据进行比较,如果符合公差要求,将进行装配,如果不符合,则需要重新计算定位位置,重新调整定位器,直到满足装配误差要求。整个装配流程如图5所示。

当前应用广泛的两个分散式柔性工装系统是M.Torres公司的MTPS系统<sup>[7-8]</sup>和AIT公司的自动定位准直系统APAS。前者在空客系列飞机的机身部件装配及运输机A400M的机翼部件装配中得到了应用,后者则在波音747的机身部件装配中得到了应用。

## 4 大部件自动化对接平台

与分散式部件结构柔性工装类似,大部件自动化对接平台也是一个集成了工装、测量系统、控制系统和计算机软件的综合系统。工装驱动采用优化的驱动数据,在控制系统的控制下工装完成定位位置的调整、固定。根据工装的结构特点可把当前的大部件对接平台分为3种形式:柱式结构工装平台、塔式结构工装平台和塔柱混联式结构的工装平台。

柱式结构平台结构简单、开放性好,但其承载重量相对较小,多用于支线客机或军机等中小型飞机的装配中。在F35的部件对接中,采用的AIT公司的EMAS系统<sup>[9]</sup>,就是一个典型的柱式结构平台。塔式结构平台形体较大,具有像伸缩臂一样的运动调整部分,可从侧面支撑和驱动部件,承载重量大,但结构复杂,多用于大型客机如空客A380的对接。

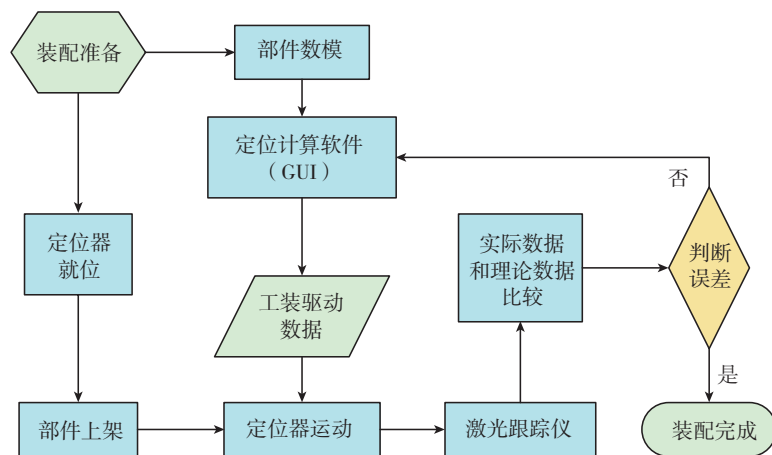


图5 分散式部件装配柔性工装系统装配流程

混联式结构平台吸收了上述两种平台结构的优点,将柱式结构的定位工装通过连接托架两两相连,用连接托架支撑部件,通过调整托架来调整部件的空间位置;这种结构形式的对接平台开敞性好,承载重量大,而且部件在调整时,受力条件好、调整灵活,代表了飞机大部件自动化对接平台的发展方向。在波音公司最新的波音 787 和空客公司最新的 A350 的部件对接中都采用了这种混联式结构的对接平台<sup>[10]</sup>。

## 柔性工装关键技术

### 1 柔性工装结构优化设计技术

柔性工装虽然是一种柔性可重复利用的工装,但其本质决定了必须有足够的结构强度和结构刚度来保证其定位准确度;同时,柔性工装要实现其柔性功能,使得其结构较一般刚性工装复杂。因此,针对柔性工装特点的结构优化设计技术是柔性工装设计的一项重要技术。

柔性工装的结构优化设计技术主要包括:工装结构(特别是骨架结构)轻量化设计优化以及静刚度变形分析,针对工装应用工况的结构模态分析,柔性工装的柔性功能特性对其结构的影响分析,模块化单元的结构设计等。

### 2 先进的控制技术

柔性工装的自动重构主要依靠控制技术,由于工装的机械结构相对复杂,为适应工装的结构,柔性工装数控系统在满足通用 CNC 数控系统功能基础上,又具有自己的特点。

(1) 柔性工装控制系统要具备控制大量执行元件的能力,特别是需要具备精确控制超多(多于 6)轴的能力。同时要求工装控制系统具有开放性,伺服轴(电机)数量增减方便,而且数量增减不影响控制精度。

(2) 柔性工装控制系统通过控制伺服电机实现柔性工装中大量定位点的运动控制,柔性工装的功用决

定了在应用中一般只关心其各定位点最终的位置精度,而不关心运动轨迹精度,因此,柔性工装数控系统一般不需具备多轴同步和插补功能。

(3) 为适应工装设备一体化的发展趋势,柔性工装控制系统要能适应多种总线拓扑结构,以便能与其他数控设备的数控系统集成。

当前绝大多数柔性工装的控制系统都是根据柔性工装的特点自主开发的专门系统,虽然也有部分柔性工装采用通用的商业 CNC 数控系统(如 Siemens 等),但商业数控系统集成许多复杂功能(如插补)往往得不到应用,从而会使工装在一定程度上存在成本浪费。因此,适应柔性工装需求和特点的先进控制技术是数字化柔性装配工装的一个关键技术。

### 3 工装驱动数据生成技术

数字量驱动数据生成技术是柔性工装的重要关键技术之一。当前柔性工装的驱动数据主要有 3 种形式:理论驱动数据、实测驱动数据以及优化驱动数据等 3 种形式,因此,相应的数据生成技术也有 3 种。

(1) 理论驱动数据主要在装配仿真环境中生成,在工装应用前,通过利用装配仿真技术,综合考虑装配件的几何信息、作业路线、工作指令等,可提前发现工装应用中的问题,以优化装配工艺和路径,同时根据优化的装配路径,生成工装理论驱动数据。因此,工装的理论驱动数据生成涉及到装配仿真软件的二次开发技术。当前在飞机设计领域和装配仿真中广泛应用的软件环境是达索公司的 CATIA 和 DELMIA,因此基于 CATIA/DELMIA 的二次开发技术是生成工装理论驱动数据的关键技术。

(2) 实测驱动数据主要由数字化测量设备提供,因此,基于数字化测量设备的数字化测量技术是生成柔性工装实测驱动数据的关键。

(3) 优化驱动数据的生成需要集成理论数据和实测数据,同时要针

对飞机不同结构的装配特点具体计算。当前主要在飞机部件装配以及大部件对接中应用优化的工装驱动数据,因此,研究针对飞机部件装配及大部件对接等的装配优化算法是生成优化驱动数据的核心关键技术。

### 4 精密传感检测技术

随着对飞机疲劳寿命和安全可靠性要求逐步提高,对飞机装配质量提出了更高的要求。现代飞机的装配质量要求除了严格的气动外形准确度要求以外,装配过程中主承力构件的应力水平高低也正逐渐成为评价飞机装配质量的一个重要指标。尤其是随着飞机结构刚度的增强,主承力构件的应力水平高低将直接影响飞机的结构强度和疲劳寿命。因此,检测飞机主承力结构件所承受的应力水平具有重要意义。

飞机装配中应力检测的需求使精密传感技术成为柔性工装的核心关键技术之一。当前在飞机装配中直接检测零件的应力水平还很困难,而通过在工装中集成传感检测元件,通过测量检测装配过程中工装的应力变化和位移变化来反求零件应力应变水平则相对容易实现。同时工装中集成传感检测元件,通过与控制系统集成,可根据传感检测元件的读数来调整装配过程中的工装运动,使柔性工装成为一种被动式的“自适应”工装,从而可减少或消除装配中的强迫装配及其形成的装配应力。

因此,针对柔性工装结构及应用特点的传感检测技术也是柔性工装的一些重要技术。当前在用于飞机关键结构部位的装配工装(如机身部件装配、大部件对接等)上,已经大量安装应用了传感检测元件,如用于机身部件装配的 APAS<sup>[8]</sup> 系统用于大部件对接的 EMAS<sup>[9]</sup> 系统等。

### 5 系统集成技术

随着对工装性能要求越来越高,现代的柔性工装已经不再像传统的刚性工装那样是一个单纯的机械装

置,而发展演变成为一个集成了数字化测量设备,配备专门控制系统和各种软件的综合系统。工装系统化、集成化是现代柔性工装的一个显著特点。而作为一个系统化的柔性工装,要能正常应用,则必须能将其各项关键技术有机集成起来,并能够一同高效工作。因此,柔性工装的系统集成技术是柔性工装实施应用的关键,是柔性工装的核心关键技术。

柔性工装的系统集成技术主要包括柔性工装技术集成的各种条件分析、研究各技术间的相关性和联系、技术集成中的数据组织和流动分析以及工装系统的应用调试技术等。

### 柔性装配工装发展趋势

现代飞机精益制造的理念和航空行业竞争日益激烈的现状,要求飞机制造中必须最大限度的降低成本,柔性工装的出现已经降低了飞机的制造成本,但出于进一步控制成本的

需要,柔性工装自身也在向低成本化发展。因此,柔性工装的一个重要发展趋势是工装的低成本化。

柔性工装低成本化的一个表现是工装的调整重构由主动式调整向被动式调整发展。主动式调整的柔性工装由于需要多个电机和一个专用的超多轴的控制系統,造成工装成本增高。而采用被动式的调整方式可减少电机数量及专用多轴数控系统,降低成本。国外有学者提出了“可负担得起的柔性工装”概念<sup>[19-20]</sup>,通过利用低成本的商品化工业机器人来调整配置工装,使柔性工装的调整方式由主动式变为被动式,降低了工装成本;而机器人通过集成激光跟踪测量系统,也可以具有很高的位置精度,保证了定位的精确性。

另外,从当前飞机装配技术的发展趋势来看,根据零件关键特征直接装配,从而减少或消除工装,也是出于降低工装成本的目的。欧美发达

国家在飞机装配中应用的无型架装配方法<sup>[21-22]</sup>和决定性装配方法<sup>[23]</sup>等正是降低工装成本的体现。

### 柔性工装技术体系建立及应用

通过对飞机装配模式、典型柔性工装的系统研究,可初步建立一个如图6所示的柔性工装技术体系。柔性工装技术体系中包括当前应用的4类典型柔性工装、飞机数字化装配技术涉及的各种相关理论和方法、飞机柔性装配工装涉及的各项关键技术、柔性工装的发展趋势及柔性工装的推广应用等。

基于建立的柔性工装技术体系,可指导国内飞机三级装配(组件级、部件级、部件对接级)的柔性工装的研制及应用,从而提高国内飞机装配技术水平。文献[11]中研制的用于飞机壁板组件装配的数控柔性多点工装,正是基于此技术体系完成的,是本文建立的柔性工装技术体系成功应用的典型案例之一。

### 结论

(1)飞机装配数字化柔性工装主要由硬件系统和软件系统组成,具有柔性化、数字化、模块化和自动化的特点,其应用实现了飞机装配的数字化定位,具有传统工装不可比拟的优势,是国内飞机装配工装的研究发展方向。

(2)通过系统研究多点阵真空吸盘式柔性工装、行列式柔性工装、分散式部件装配柔性工装及大部件自动化对接平台4类典型柔性工装,总结围绕柔性工装设计制造所涉及的各项关键技术,建立了柔性工装技术体系,可为国内开展柔性工装技术研究提供指导。

本刊共有参考文献23篇,因篇幅所限未能一一列出,如有需要请向本刊编辑部索取。

(责编 良辰)

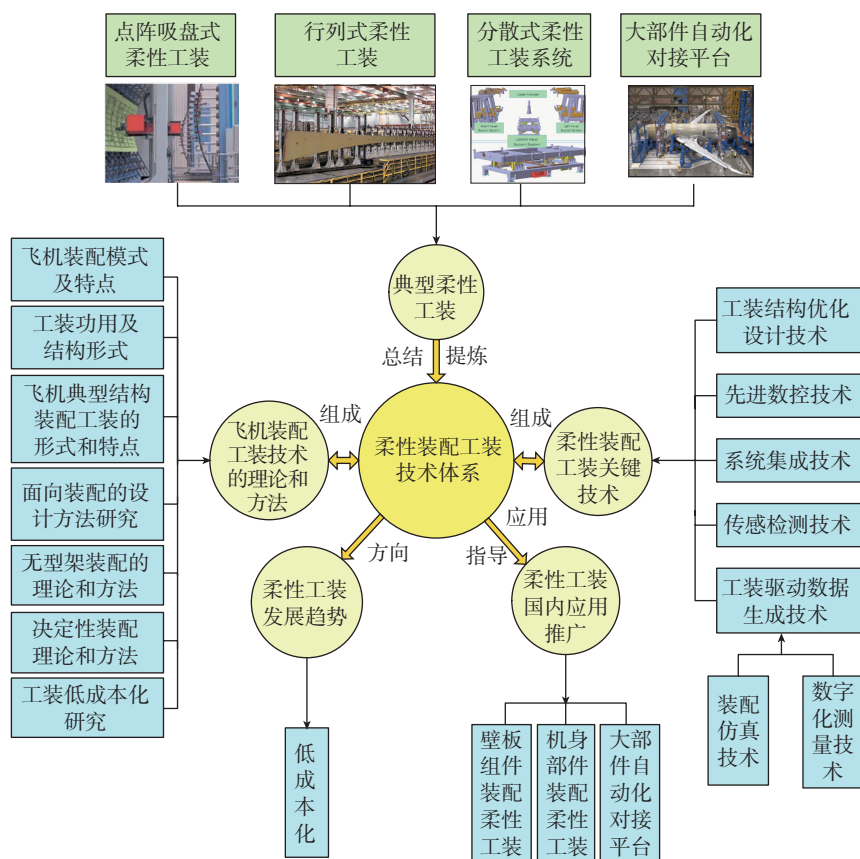


图6 柔性工装技术体系