

# 飞行器大型薄壁件制造的 柔性工装技术\*

## Flexible Tooling and Fixture Technology of Large Thin-Wall Part Manufacturing for Aircraft

清华大学精仪系 周 凯



周 凯

清华大学精仪系教授、博士生导师、工学博士。研究方向: 数控技术、运动控制、机电系统自动化、制造装备与制造系统。取得科研成果 30 余项; 以第一作者发表论文 100 余篇; 以第一发明人获发明专利 7 项; 所发表论文被 SCI 和 EI 收录 45 篇; 出版专著和教材 5 部。

航空、航天工业涉及众多学科和专业的深入交叉, 是高新技术最为富集领域。目前, 发达国家为提高先进航空航天产品的综合性能, 广泛采

我们针对飞机蒙皮数字化精确制造和绿色制造的需求, 正在研究开发可替代传统化铣工艺的新一代高质高效绿色制造系统(已申请发明专利)。在新系统上, 成形后的蒙皮经过一次装夹即可完成传统化铣工艺中的粗修、铣凹、切边、开孔等工序, 消除了多次装夹带来的误差, 既提高加工精度又提高生产效率。另一方面, 新系统加工时无污染物排放, 加工废屑可回收, 电能消耗减少, 环保节能效果显著, 可实现绿色制造。

用整体结构和大尺度的薄壁件, 如飞机的骨架和蒙皮等。但整体结构和大尺度薄壁件不仅尺寸大, 非常容易变形, 而且结构复杂, 形状精度要求很高, 制造难度相当大。此外, 大型薄壁件的外形多数与飞行器的气动性能有关, 周边轮廓与其他零部件还有复杂的装配协调关系, 装配难度也非常大。因此多年来, 大型航空薄壁件制造技术作为飞机机体制造的六大关键技术之一, 一直困扰着航空工业<sup>[1]</sup>。

另一方面, 飞行器制造, 特别是大型飞机的制造, 属于典型的多品种小批量制造, 因此对制造过程的柔性有特别突出的要求。传统数控机床

和柔性制造系统(FMS)虽然可实现常规刚性零件的柔性制造, 但却难以实现飞行器大型薄壁件的柔性制造。主要原因是, 传统工艺装备无法实现易变形薄壁件的柔性定位、柔性装夹、柔性输送和柔性存储, 因此仅靠数控机床本身的柔性和常规自动化物流系统无法实现对这类特殊零件实施高柔性制造, 更无法实现系统化的柔性制造(从柔性成型、柔性加工到柔性装配的全过程柔性制造)。

以上两方面问题的叠加和交错影响, 使得飞行器大型薄壁件的柔性制造变得非常复杂, 已成为航空、航天制造中的重大难题。业界认为, 解决此问题的关键是大型易变形薄壁

\* 高等学校博士学科点专项科研基金(200800030005, 20110002110079)、国家自然科学基金(50775126)、国家863计划(2006AA04Z145)资助。

件的柔性工艺装备技术。只有高柔性抗变形的新型工艺装备与先进数控机床相配合,才能真正有效解决这一难题。因此,对柔性工艺装备的理论、方法和实现技术进行深入系统研究,在此基础上加速发展柔性工装产品并加强在实际中推广应用,对解决飞行器制造中的上述关键问题,对促进我国航空、航天工业的发展,具有重要意义。

### 国外研究和应用现状

通过新的工艺技术和柔性工艺装备解决大型薄壁件加工中的变形问题,美、法、德、日等工业发达国家都非常重视,均投入相当人力物力进行研究<sup>[2-4]</sup>。但所取得的成果,均作为涉及国防的关键技术,对外秘而不宣<sup>[5]</sup>。目前,国外公开发表的文献多以常规零件为研究对象,主要进行切削力模型、变形分析、误差预测等方面的理论研究<sup>[6-12]</sup>。

在实际工装系统开发方面,企业进行了大量工作,推出许多实用产品,并在行业得到应用。

例如,美国的 Rohr Industries 公司开发了柔性机器人工作单元,用于机身部件的装配<sup>[13]</sup>。德国 Horst Witte Geratebau 公司制作了基于框架结构的模块工装系统<sup>[14]</sup>。美国 CAN 制造系统公司研发了基于 POGO 单元的柔性工装系统<sup>[15]</sup>。美国 Wisconsin-Madison 大学开发了快速可组装装配工装。Northrop Grumman 公司开发出龙门式可重组工装<sup>[16]</sup>。英国 Electroimpact 公司为空客飞机机翼的制造开发了大型柔性工装系统<sup>[17]</sup>。西班牙 MTorres 公司开发了飞机板类零部件制造的柔性工装 TORRESTOOL<sup>[18]</sup>。法国 Dufieux Industrie 公司开发了新型镜像铣系统(Mirror Milling System, MMS),主要用于蒙皮类零件的铣切加工<sup>[19]</sup>。

综上所述,用于飞行器制造的柔性工装系统大体分为 3 类,第一类基

于框架及机器人技术,第二类基于柔性多点支撑技术<sup>[20]</sup>,第三类为新发展起来的镜像铣技术。其中,基于前两类技术的柔性工装系统,已经在戴姆勒-奔驰、波音、麦道、格鲁门、英宇航、CASA、EADS、空客、庞巴迪宇航等飞行器制造企业中得到了广泛应用<sup>[3]</sup>。基于第三类技术的柔性工装和加工系统也开始在空客等公司进行应用,有望取得良好效益。

下面以 TORRESTOOL 系统和 MMS 系统为例,对柔性工装系统的技术特点作简要介绍。



图1 TORRESTOOL 柔性工装系统

表1 TORRESTOOL 系统主要性能参数

方向	排架 / 鞍座数目	行程 / mm	定位速度 / ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )
X	15	14000	3000
Y	每个排架上有 6 个鞍座	3000	1000
Z		750	750

TORRESTOOL 柔性工装系统是一种用于支承板类零部件的柔性多点固定装置。它采用模块化结构,包括一定数量的可以沿 X 坐标运动的排架,排架上装配有一定数量的可沿 Y 坐标和 Z 坐标运动的支承杆,每个支承杆上装配有真空吸盘,用以固定工件。这样,每一个支承杆都可以在计算机的控制下,沿 X、Y、Z 坐标移动(同一排架上支承杆的 X 坐标相同),并可被锁定,如图 1 所示。系统的主要性能参数如表 1 所示。

TORRESTOOL 系统在 X 方向上,两个相邻排架之间的最小距离是 500mm,在 Y 方向上,两个相邻鞍座

之间的最小距离是 228mm; 独立轴总数为 195, 支承单元总数为 90。整个系统从一种工件的配置到完全不同的另外一种工件的配置,最多耗时不超过 2min<sup>[21]</sup>。

TORRESTOOL 柔性工装系统可与 TORRESMILL 五坐标钻铣床配套使用,对飞机整流罩、平尾和垂尾的前缘、壁板、梁等工件进行铣削、切割、钻孔、忽窝等加工。该系统不但可适用于板类零件的加工,还可用于大部件的装配,已经被应用在波音、空客系列民用飞机以及军用飞机的

生产组装中。

镜像铣系统(MMS)是一种用于蒙皮铣切加工的新型柔性加工系统。该系统与传统多点系统不同,它采用立式夹持框架从周边对被加工蒙皮进行固定,并通过随动支承头对工件被加工部位进行支承。支承头和刀具位于被加工工件两侧,成镜像布局。支承头采用无划痕设计,可在计算机控制下保持与工件曲面接触并随刀具运动,其位置和姿态与刀具位置姿态时刻成镜像关系,从而实现工件加工部位的高刚度支承,有效抑制颤振,保证加工顺利进行。

虽然国外的柔性工装系统技术

上已经比较成熟,但市场售价仍然很高,一般一套系统的价格高达数千万元人民币。因此,国外系统并不完全符合我国国情,难以在我国的飞行器制造企业中广泛推广应用。

### 国内研究和应用现状

在通过新工艺技术和新工艺装备解决薄壁件柔性加工方面,国内许多单位也进行了大量的探索,提出了一些实用的方法<sup>[22-25]</sup>。特别是一些高校和研究单位针对生产实际问题,对柔性工装系统进行了系统研究,并开发出多种应用系统。下面从成形和切削加工2个方面进行简要介绍。

在成形方面,吉林大学对板材多点成形的柔性工装技术开展了大量研究工作<sup>[26]</sup>,开发出多种规格的多点成形设备<sup>[27-30]</sup>。在算法方面,提出了一种在多点成形CAD中计算各冲头与板材接触点的快速算法<sup>[31-32]</sup>,并研究了三维板类件的多点闭环成形方法<sup>[33]</sup>。

北京航空航天大学开展了基于可重构柔性多点模具的蒙皮数字化拉形工艺技术研究<sup>[34]</sup>,突破了飞机蒙皮CAD数模工艺补充面的自动生成技术,实现了调形数据的自动生成,解决了大量密集冲头的实时、并行控制等关键技术,并开展了基于弹性垫层、复合垫层的蒙皮拉形工艺研究,建立了基于可重构柔性多点模具的飞机蒙皮数字化拉形试验系统<sup>[35]</sup>。

在大型薄壁件切削加工方面,北京航空制造工程研究所、成都飞机公司、清华大学等单位开展了较深入的研究和开发工作,取得较多成果。

北京航空制造工程研究所针对飞机薄壁件制造的需求,对柔性工装的关键技术进行了研究<sup>[36]</sup>,并开发出用于飞机蒙皮和壁板切割加工的柔性工装系统。

清华大学对用于飞行器大型薄壁件切削加工和装配的智能柔性工装系统进行了研究,并与成都飞机公

司合作,深入研究了以柔性途径实现“先成型后加工”工艺的有关方法和实现技术,开发出用于飞行器大型薄壁件切削加工的智能柔性工装系统(见图2)。通过多年结合生产实际的研究工作,攻克了柔性工装系统涉及的关键技术,取得系列研究成果<sup>[37-51]</sup>。



图2 用于大型薄壁件切削加工的智能柔性工装系统

### 柔性工装技术的发展趋势

根据对有关信息的分析可以看到,在飞行器柔性工装技术的研究和应用方面,其发展呈以下趋势:

#### 1 机床工装集成与机床工装互动技术

通过网络和信息技术实现机床与工装集成可形成新的集成加工系统,其意义如同机床与刀库集成构成加工中心一样,将使制造装备和制造系统产生新的变革。此新体系带来的好处之一是,机床与工装可进行互动和互操作,从而提高薄壁件制造的综合效益。典型案例:(1)机床与工装进行信息交流,实现刀具运动轨迹校正。具体方法是,通过多点柔性工装中的传感器阵列感知工件受力和受热分布情况,计算机根据传感信息

和数学模型求解工件变形量,然后发出控制信息对刀具运动轨迹进行校正,从而提高加工精度。(2)机床与工装进行操作交互,实现对工装定位/支撑阵列布局的自动调整,从而抑制工件变形。实现方案是,在五轴数控机床主轴上装上操作手,通过计算机对操作手进行五自由度控制,实现

仿机器人运动,从而完成对柔性工艺装备的自动调整,将定位/支撑单元阵列的布局调整到使加工变形最小的最佳状态。

#### 2 基于智能预测的闭环成形技术

回弹是大型薄壁件成形工艺中一大难题。基于智能预测的闭环成形技术是解决此问题的一个有效途径。该技术基于闭环控制原理,采用数学模型与人工智能相结合的方法,对回弹量进行精确预测,并基于预测信息对成形过程进行闭环精确控制,从而有效抑制回弹的影响,提高成形精度,保证制造质量。

#### 3 成形、加工一体化技术

目前,大型曲面薄壁件制造采用成形与加工相分离的工艺方案,由此产生一严重问题:由于成形固有的

回弹特性,无法在成型产生的半成品工件上建立后续加工所需的精确基准(即使打上定位孔,误差也较大),使得后续加工时难以进行准确定位,由此造成较大的加工误差,影响飞行器总体制造质量。

成形加工一体化为解决上述问题提供了新的技术途径。其思想是基于同一基准进行成形与加工作业,从而消除由于基准不重合而产生的多次定位误差,有效提高大型薄壁件的制造质量和效率。

#### 4 可替代化铣的绿色制造技术与工艺装备技术

长期以来,飞机蒙皮加工中一直普遍采用化铣工艺。这种工艺虽然可以较好解决复杂凹腔、凹面、凸台等的加工问题,但其存在的化学污染、生产周期长、消耗铝材无法回收等固有弊端,却一直困扰着航空工业,成为世界性难题。行业内一直在寻求可替代化铣的新工艺和新装备。

尤其在当前环保和可持续发展要求日益迫切的国际环境下,取代化铣实现蒙皮类零件的高质高效绿色制造,已成为全球航空工业都在追求的目标。波音、空客等航空巨头已计划在数年内取消化铣。在我国,取代化铣的要求也越来越迫切。因此,以新的绿色制造技术取代污染严重的化铣技术已成为不可逆转的大趋势。

面对这一趋势,我国一些单位也积极开展了可替代化铣的新工艺技术和新装备技术的研究开发,这些具有广泛应用范围和巨大实用价值的前沿新技术,对推动我国航空制造技术的发展具有重要的实际意义。

#### 5 与柔性工装融为一体的原位检测与质量控制技术

飞行器大型薄壁件由于刚度极差,当加工完从机床上卸下送往测量机室时将产生很大的变形,而重新安装到检测工装上后又难以精确定位,由此造成再好的测量机也无法检测出实际的加工误差。这一问题给大

型薄壁件制造的质量控制带来极大困难。

与柔性工艺装备融为一体的原位检测与质量控制技术为解决上述问题提供了有效途径。其技术特点是,通过柔性定位-支承-固定一体化技术,将大型薄壁工件与柔性工装融为一体,从而实现弹性工件刚性化,由此实现在工件不脱离柔性工装的条件下,对工件加工误差进行原位检测。这样,可彻底消除工件从工装上卸下再送往测量机室而产生的变形,从而真正检测出工件的加工误差,保证大型薄壁件制造质量控制的可靠实施。

#### 6 全数字化柔性自动装配技术

大型薄壁件的装配是飞行器制造中的薄弱环节,目前多数企业仍采用人工装配。由此产生生产效率低、质量不稳定、工人劳动强度大等一系列问题。

数字化柔性自动装配为突破此瓶颈开辟了有效途径。基于机器人的柔性自动装配系统不仅可提高大型薄壁件装配的自动化和柔性化水平,更重要的是可保证装配质量,提高飞行器制造的综合效益,因此是飞行器成品制造的必然发展趋势。

#### 7 数字化柔性物流技术

柔性物流是实现柔性生产的关键环节。在飞行器制造中,大型薄壁件由于轮廓形状复杂且易变形,传统的柔性输送和存储装备(如自动导引车、随行夹具、自动存储装置等)无法实现这类零部件的可靠输送和存储。

为解决上述问题,研究开发可保持工件几何形状不变的新型柔性输送和存储设备将成为飞行器柔性装备技术发展的新增长点。其关键技术涉及弹性曲面定位、阵列式可调柔性支承、多点可调柔性限位等若干方面。

#### 8 全过程数字化柔性制造技术

在实现大型薄壁件柔性加工和

柔性装配的基础上,进一步通过数字化柔性物流系统和网络化信息流系统将两者连接起来,实现全方位集成,从而构成新一代“全过程数字化柔性生产系统”,将使飞行器制造实现新的飞跃。因此,积极应对这一趋势,加快对全过程数字化柔性制造技术的研究和应用,抢占技术制高点,我们才能在未来的发展和竞争中掌握主动。

### 发展柔性工装的关键技术

为更好解决飞行器柔性工装发展中的实际问题,下面对柔性工装研究、开发和应用中涉及的一些关键技术进行简要分析。

#### 1 弹性曲面定位原理与薄壁件柔性工装开发技术

飞行器大型薄壁件为大尺度弹性零件,并且其表面为自由曲面,不像一般机械产品那样具有平面、圆柱面等易于进行定位的常规表面,传统的针对刚体的六点定位原理已不能有效解决这类工件的定位问题,也无法按照这一原理来设计弹性曲面工件的柔性工装系统。为解决此问题,需研究针对大型弹性薄壁件的弹性曲面定位原理,并根据新原理来进行飞行器薄壁件柔性工装的开发。

因此,克服六点定位原理的局限性,建立新的针对大型弹性薄壁件的弹性曲面定位原理,是薄壁件柔性工装研究开发中必须解决的理论问题。有了新的理论,方可彻底攻克飞行器薄壁件柔性工装开发的关键技术。

#### 2 通过离散单元面构造可变定位/支承曲面的原理与实现技术

为根据弹性曲面定位原理开发具有柔性的飞行器薄壁件工艺装备,须解决工装定位/支承曲面的柔性生成问题。

解决此问题的基本原理与实现技术是,通过  $M \times N$  个离散小单元面阵列所形成的包络来构成与工件表面相对应的工装定位/支承表面。

由于由此形成的工装定位/支承表面是离散的,每一单元面均是可调的,因此在计算机控制下,可按需形成不同的定位/支承包络曲面,从而可对不同形状的大型薄壁件进行精确定位和支承。这样,一种工装可以用于不同工件的加工,从而实现大型弹性薄壁件的制造柔性。

### 3 定位/支承/固定一体化实现技术

大型薄壁件的定位、支承和固定不能截然分开,需采用一体化实现技术。典型的实现方案是采用具有定位、支承功能的万向真空吸头。图3是作者课题组以前研制的一种真空吸头实物照片。真空吸头上装有可大角度旋转的万向真空吸盘,该吸盘可自适应改变方向与工件接触,从而实现对接薄壁曲面工件的自适应固定。

真空吸头中心安装有精密定位

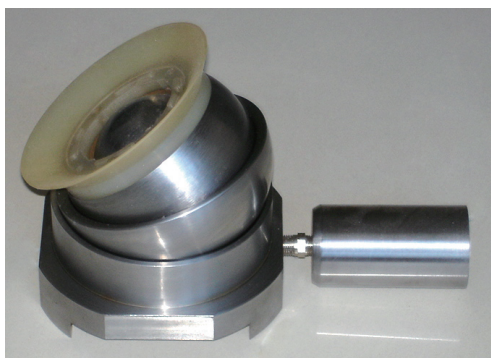


图3 万向定位/支承真空吸头

元件,用于对工件进行定位。真空吸头上部装有万向吸盘,用于固定工件。真空吸头主体为可多向旋转的精密机械结构,内部装有真空管路和传感装置。工件安放在各真空吸头上后,首先通过工件自重或外部压力使真空吸盘进行自适应调整,保证吸盘轴线与工件法线方向一致,以实现吸盘与工件的最佳贴合;然后通过吸头中的定位元件约束工件在加工空间的位置,实现工件整体定位与支撑;最后由计算机控制启动真空吸附系统将工件固定。

应用实践表明,由于真空吸头不

仅需作大角度旋转运动,而且其内部需保持高真空状态,因此在其设计、制造、装配和应用中,必须解决好运动灵活性与真空密封性之间的矛盾。否则,容易产生运动不灵活而影响可靠定位和支承,或者由于漏气而造成真空系统不能正常工作等问题。

### 4 高密度柔性阵列驱动技术

为实现对工件变形的重点防控,柔性工装系统必须能提供足够小的定位/支承单元支承间距,从而保证系统在需要的时候能将更多的定位/支承单元聚集在一个较小的区域内,以提供足够的支承刚度。

许多柔性工装系统采用逐点自驱动可变阵列式构型,由于每一单元均需要进行X、Y向驱动,因而单元体积较大,难以达到较小的支承间距。例如,著名的TORRESTOOL柔性工装系统,其X轴最小支承间距为500mm,不能满足高密度支承要求。

为解决此问题,清华大学提出一种基于机器人集中驱动的高柔性、高密度定位/支承阵列驱动方法,并研究开发出机器人化阵列驱动系统如图4所示。其核心思想是通过机器人以外部集中驱动的方式取代内部独立驱动方式。

这样,各单元只需实现Z向驱动,无需X、Y向驱动电机和传动装置,X、Y向运动由机器人统一驱动实现,因此可大幅度减小定位/支承单元的尺寸,使最小支承间距可小于150mm,从而有效满足生产厂家的需

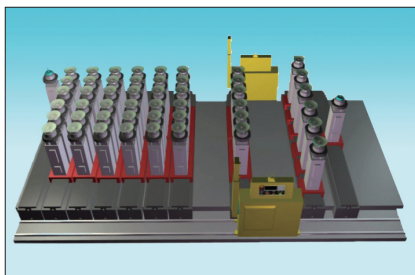


图4 双机器人协调作业的柔性阵列驱动系统

求。

### 5 定位/支承阵列布局的最优规划与动态调度

为最佳利用系统资源(定位/支承单元总数),最大限度抑制工件变形,需研究如何通过最优规划,对定位/支承曲面包络点的分布进行合理布局的有效方法。这一方法的核心思想是:基于理论模型和工艺人员的知识,对加工状态下工件受力变形、受热变形等因素的预测和分析,求解出定位/支承单元的最优布局。

在运行过程中,进一步通过动态变形控制方法,根据工件和工装的实际状态(受力情况、温度变化情况),对柔性定位/支承曲面包络点的布局进行动态调度,即根据工件变形的实际情况,对定位/支承点的位置进行动态调整,从而使变形产生的加工误差达到最小。

### 6 无基准自动定位技术

许多情况下,经拉形工艺产生的薄壁件半成品,其上没有精确定位基准(定位孔等),给后续切削加工(开窗、切边等)带来较大困难。为解决此问题,可采用无基准自动定位系统进行自动定位,其实现方案如下:

无基准自动定位系统由传感器阵列、信息处理单元、定位引导软件、控制计算机、执行装置等组成。传感器阵列由 $M \times N$ 个特制的定位传感球组成。传感球位于真空吸头内,用于检测工件与其接触的情况。由众多传感球组成的传感球阵列可获得工件接触点的分布信息和状态信息。定位引导软件的作用是对传感信息进行分析,并根据弹性曲面定位原理求解调整信息。控制计算机根据调整信息对工件或工装进行调整,即可实现工件在定位/支承阵列上的精确定位。

### 7 智能寻位与位姿自适应控制技术<sup>[52-53]</sup>

智能寻位与位姿自适应控制是

实现飞行器复杂零部件柔性自动加工和装配的一项重要关键技术。主要用于解决难以精确定位的复杂零部件的制造和装配问题。

例如,要通过机器人实现飞机蒙皮的柔性自动装配,就必须知道飞机骨架在机器人作业坐标系中的准确位置与姿态,传统基于数模定位的方法难以解决此问题。又如,许多复杂曲面零件由于外形复杂,按照常规的“定位-加工”模式加工,难以在机床上进行精确定位,无法进行高精度加工,为此需通过“寻位-加工”技术实现无定位加工。

智能寻位与位姿自适应控制技术为解决上述问题提供了新的有效途径。这一技术基于“寻位-作业”模式进行,与传统“定位-作业”模式的重要差别是:它以主动寻位代替被动定位,以顺应现实灵活作业(加工、装配等)代替按既定关系强制作业。因此,即使在工件结构和外形复杂,难以对其进行精确定位的情况下,也可通过智能寻位手段主动获取工件信息、自动计算工件实际状态,并根据实际状态生成控制指令进行位姿自适应作业,从而实现复杂产品的高质、高效生产。

## 8 网络化控制与信息集成技术

薄壁件制造的柔性工装系统一般基于阵列式结构,由数十个甚至上百个定位/支承单元组成。如果每个单元有2~3个运动部件,则所需控制的运动轴数将高达数百个,由此形成的控制系统规模相当庞大。如果采用传统的点到点通信控制模式,则不仅成本高、施工难度大、维护麻烦,而且接线量大、接插件多,容易造成系统运行不可靠。

新发展起来的实时以太网技术为解决柔性工装系统的通信控制和信息集成问题开辟了更有效的新途径<sup>[54-55]</sup>。

实时以太网的物理层基于以太网架构,数据链路层采用与以太网相

同的帧格式,具有独特的技术经济优势。由于经过30多年优胜劣汰的竞争考验和技术市场双重推动的发展历程,以太网目前在全球范围内已经处于绝对优势地位,成为了现代计算机网络的主流和事实上的统一标准。以太网不仅具有百兆、千兆、甚至万兆的高通信速率,而且具有通用性好、可靠性高、成本低等突出优点。因此,基于以太网发展起来的实时以太网,可以有效解决柔性工装系统的信息通信和高效控制问题。在此基础上,还可使飞行器制造企业实现“一网到底”(或称E网到底),即它可以一直延伸到企业现场设备控制层,使企业将管理、技术、生产、控制、监测全面集成起来,实现数据采集、质量控制和物流运行等与企业ERP系统的实时连接,在同一个网络下访问统一的生产和技术数据库,既完成上层管理又完成生产控制,全面提高企业运行效益。

## 我们的工作

笔者所在研究室从20世纪90年代中开始进行曲面零件的智能寻位加工理论与技术研究,为实现飞行器复杂曲面零件的高效柔性制造奠定了基础。

2000年后开始进行弹性曲面定位原理与飞行器柔性工艺装备研究,解决了传统六点定位原理无法解决飞行器弹性薄壁件的定位、支承和固定问题,为大型薄壁曲面工件柔性工艺装备的开发建立了新的理论与技术基础。

2005年后,在国家863计划、自然科学基金、博士点专项科研基金等支持下,与中航工业成都飞机公司合作,开展了飞机薄壁件制造的智能柔性工装研究,并开发出机器人化柔性工装系统。

近年,在以上工作基础上,对制造与装配集成的“全过程数字化柔性制造”技术和面向大型飞行器的

全数字制造装配一体化系统开展了研究。特别是在飞行器外壳(如飞机蒙皮)的全数字化制造方面,通过创新研究,提出一种全数字制造装配一体化系统(已申请发明专利)。

当前,我们针对飞机蒙皮数字化精确制造和绿色制造的需求,正在研究开发可替代传统化铣工艺的新一代高质高效绿色制造系统(已申请发明专利)。在新系统上,成形后的蒙皮经过一次装夹即可完成传统化铣工艺中的粗修、铣凹、切边、开孔等工序,消除了多次装夹带来的误差,既提高加工精度又提高生产效率。另一方面,新系统加工时无污染物排放,加工废屑可回收,电能消耗减少,环保节能效果显著,可实现绿色制造。

## 结束语

在飞行器薄壁件制造中,工艺装备具有非常重要的作用,甚至是决定性的作用。

在大型薄壁件柔性工艺装备方面,目前国外技术相对成熟。国内虽然在研究方面进行了大量工作,但多数停留在样机阶段,成果的推广应用需进一步加强。

目前许多国内企业靠购买国外成套装备进行生产,虽然解决了眼前问题,但关键技术受制于人,不利于长远发展。因此,今后应加强产学研结合,做好自己的研究,取得具有自主知识产权的成果,并加强成果的转化和应用,提高国产柔性工艺装备的市场占有率。

制造与装配集成的“全过程数字化柔性制造”是飞行器制造技术今后的发展趋势,希望业界予以重视,以更大的投入进行研究、开发和应用,尽快抢占这一技术制高点。

本文共有参考文献55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)