

## 面向航天薄壁复杂结构件的高效柔性装夹技术与方法

高性能、轻量化、精密化、高效化、可靠性、经济性和环保性是21世纪新一代航天产品的发展趋势。当前，我国航天产业已进入高速发展期，航天技术的应用范围也越来越广，市场需求呈高速增长趋势，快速低成本发射、长期在轨飞行、机动能力突出、高有效载荷等已成为当前航天事业发展的迫切需求。面对这一需求，航天产品零件材料需要往高强、低密度方向发展，结构需要往整体化、薄壁化方向发展，加工方式需要往高效率、低成本、节能环保方向发展。

难加工材料的大量应用，其加工性能差与结构整体化带来的结构复杂化和高材料去除率，给航天薄壁复杂结构件加工带来了巨大挑战，对制造装备、工艺技术等也提出了更高要求。针对航天薄壁复杂结构件，特别是大型弱刚性曲面结构件、薄壁回转体类零件、薄型多面体类零件开展柔性工装系统设计，通过科学分布夹紧位置，合理确定夹紧力，能够实现航天精密复杂结构件高效精密加工提供稳定的工装系统。

### 一、柔性工装设计要求

机械加工工艺系统由机床、刀具、工件和夹具等组成，提高零件加工效率的途径有两条，即降低切削加工时间和降低辅助准备时间。高速切削技术的应用可以大幅度降低切削加工时间；而先进工装的应用则可以大幅度降低辅助准备时间，提高工件定位夹紧和调整装卸的效率。

航天薄壁复杂结构件具有弱刚性、形状结构相似等共性特征，同时型号种类呈现系列化发展特点，如舱体和端框类，舵面和翼面类等，这些零件的定位和夹紧规律性强。薄壁整体结构在切削加工中零件刚性随大量毛坯材料的去除而变化，结构刚性低且复杂，因而客观上要求加工中工件夹紧力要实时调整以适应零件整体动态刚度的变化；需要进行多点辅助支撑，以提高加工部位的局部刚度，减少薄壁变形。

综合体现机电液一体化技术和多传感器信息融合技术的柔性工装是近年来出现的先进装备技术，柔性工装的技术特点是定位和夹紧元件为通用元件，可互换性好；定位夹紧位置可自适应调整；夹紧力大小、方向和夹紧顺序可自动控制；驱动执行机构为机电液一体化部件；应用位移、力和压电传感器元件。

柔性工装技术可以使一套夹具满足系列化多种尺寸规格的零件安装要求，既具有机械式可调夹具和组合夹具的柔性，又具有特种专用夹具的高效性，适用于数控加工设备，可以使高速数控加工机床的性能得到更加充分的发挥，大幅度降低辅助准备时间。

### 二、大型弱刚性曲面结构件

运载火箭推进剂贮箱是由大尺寸、薄壁、蜂窝网格化的高强铝合金壁板零件经铣削加工后焊接而成，是箭体结构中最大的结构部件和影响运载火箭安全性与可靠性的关键部件，占火箭总质量的60%、全箭长度的2/3。

大型复杂铝合金贮箱网格壁板是焊接成为贮箱的基础零件，壁板按结构不同，又可分为壳段壁板和筒段壁板，不同型号的壳段壁板或筒段壁板结构又各不相同，如图1所示。根据设计要求，壁板在保持足够刚度和强度的前提下需尽量轻量化，所以其模型存在独特的结构特征。壁板制造采用整块铝制板材辊弯后进行五轴铣削加工，整个加工工艺系统和加工过程具有区别于其他常规结构件加工的特点，这些特点主要包括：非规则蜂窝网格结构、凸台和口框等特征交错、整体相似与局部差异并存；宏观大尺寸与局部变刚性特征相结合；多应力耦合条件下的复杂转变规律，使得壁板发生宏观的翘曲变形以及不同网格位置的局部变形加大了不同网格壁厚的不均匀性。

针对贮箱壁板高效高精加工需求，采用了真空吸附装夹技术，通过真空吸附夹具吸附装夹零件，使其受到均匀分布载荷的夹紧力，从而减少零件因夹紧力造成的变形，提高零件的加工精度。真空吸附柔性装夹装置的主要组成包括：壁板内型面机铣加工大型真空吸附装置、外型面机铣加工大型真空吸附装置、真空发生系统、平台一体化控制系统。其中，真空吸附装置的主要组成包括铸造形胎、转臂气缸和真空吸盘、阀块模组、压力传感器、真空管路、快速接头、手动截止阀、密封条等组成，如图2所示。

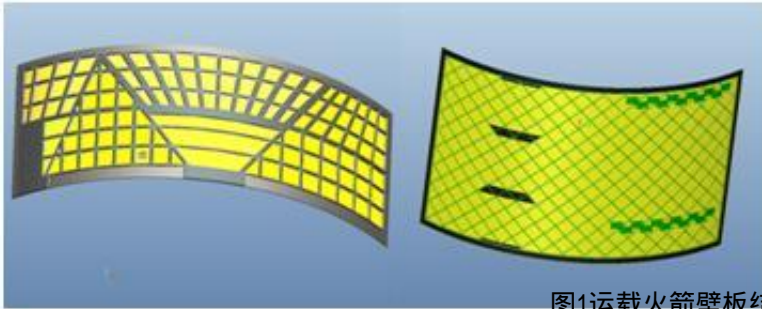


图1运载火箭壁板结构  
(a) 壳段壁板 (b) 舱段壁板

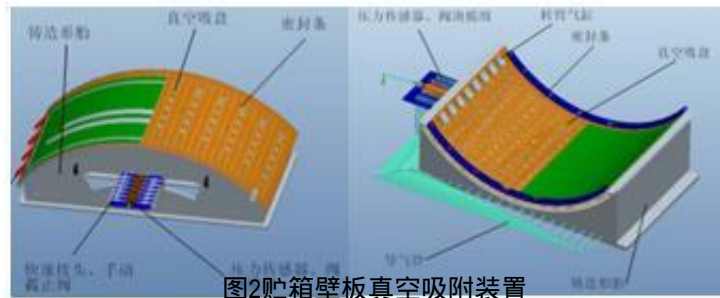


图2贮箱壁板真空吸附装置  
(a) 壳段壁板真空吸附装置 (b) 舱段壁板真空吸附装置

真空发生系统的主要功能是提供持续、稳定的气压差，确保吸盘能够牢靠的吸住工件。真空发生系统的组成包括：真空泵、消音器、电磁压差真空阀、高真空隔膜阀、真空阱、高真空手动蝶阀、真空表、控制系统等，真空发生系统中重要的性能参数是其所能获得的极限真空度和对容器的有效抽速。

### 三、薄壁回转体类零件

舱体、端框等结构件属于典型薄壁回转体类零件，这类结构件的数控铣削加工柔性工装可用于零件周向孔、槽、口框、型腔的铣削、钻削与镗削加工，而长度方向和直径方向的夹持范围均可在一定范围内调整，工装系统夹紧力范围也可调，从而适应多品种相似结构产品的装夹需求，其外圆车削夹具、内腔与端面车削夹具均具备软爪卡盘装夹功能，以适应薄壁结构的小变形装夹需求。

传统装夹条件下，薄壁回转体类零件多采用机械压板、闷盖的组合装夹方式，装夹时间长，装夹可靠性完全依靠工人态度和工作规范性，夹紧力大小和一致性无法保证。根据薄壁回转体类零件特征设计液压柔性工装系统，形成轴向夹紧位置可调，夹紧与浮动支撑结合，多点自动定心的柔性夹紧技术，从而满足不同直径和不同长度的回转体类零件夹紧需求，柔性夹具示意图如图3所示。

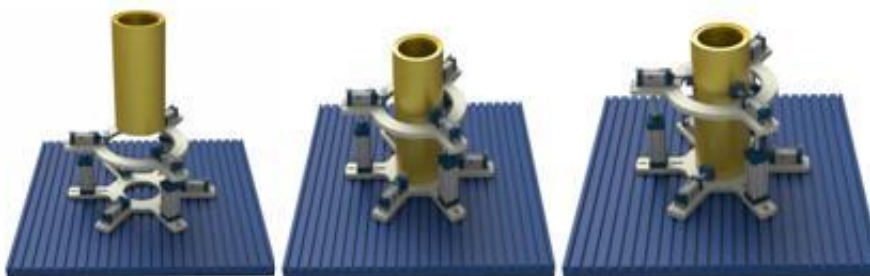


图3薄壁回转体类零件数控铣削加工柔性工装示意图

多型号舱体、端框等薄壁回转体类结构件均可采用图3所示的同一套夹具装夹，柔性夹具的轴向行程径向行程均可以调整，轴向夹紧位置可以随舱体外形加工的位置而改变，解决加工干涉问题。通过液压站控制系统压力和夹紧力大小，采用有限元仿真分析不同夹紧力条件下，零件装夹变形情况，从而确定最优夹紧力。夹具底部采用360度转台，能够实现舱体等回转体类结构件不同位置的旋转和加工。

在舱体类零件的外圆与内腔加工中，六爪或八爪卡盘特别设计适于薄壁件和易变形工件的多点夹持，如图4所示。多爪卡盘基爪两两相连可浮动向心夹紧，这样使多个夹紧点的力方向皆指向中心，保证工件不易变形。同时，此种设计使得在卡盘上直接使用传统卡爪成为可能，并兼具离心力补偿。

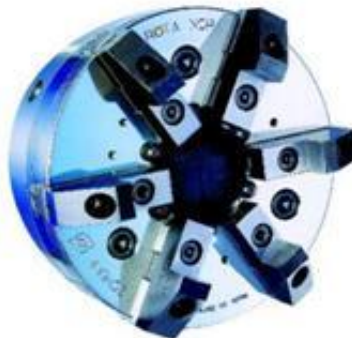


图4典型六爪卡盘

#### 四、薄型多面体类零件

作为保持飞行姿态和控制飞行方向的重要零件，薄型多面体类零件有较高的空气动力学要求，因此结构设计复杂，表面加工质量要求较高。这类结构件以多斜面为主，结构复杂，刃口部位局部最薄壁厚不足0.5mm，零件材料去除率达70%以上，典型零件对象包括舵面、翼面、罩板等。

传统装夹模式下，针对薄型多面体类零件采用机械压板夹紧，装夹时间长，装夹可靠性完全依靠工人经验和工作规范性，夹紧力大小和一致性无法保证。根据薄型多面体类零件特征设计液压柔性工装系统，通过合理分布夹紧点，结合自动压紧和压紧力控制，形成适用于多种型号舵面、翼面类零件的柔性工装系统。

舵翼类在加工过程中需要进行两面加工，因此需要设计两套柔性工装系统来分别完成正面和反面的加工，结构示意图如图5所示。以翼面零件为翼面零件毛坯正面夹紧采用六个液压转角下压油缸完成六个位置压紧，毛坯放置底座采用挖空设计，防止在零件加工时底座干涉。通过液压站控制系统压力控制六个夹紧点夹紧力大小，采用有限元仿真分析不同夹紧力条件下，零件装夹变形情况，确定最优夹紧力。

在完成正面加工后，利用正面夹紧工艺搭子，反面夹紧采用六个液压转角下压油缸完成与正面相同的六个位置压紧，毛坯放置底座采用挖空设计，防止在零件加工时底座干涉。

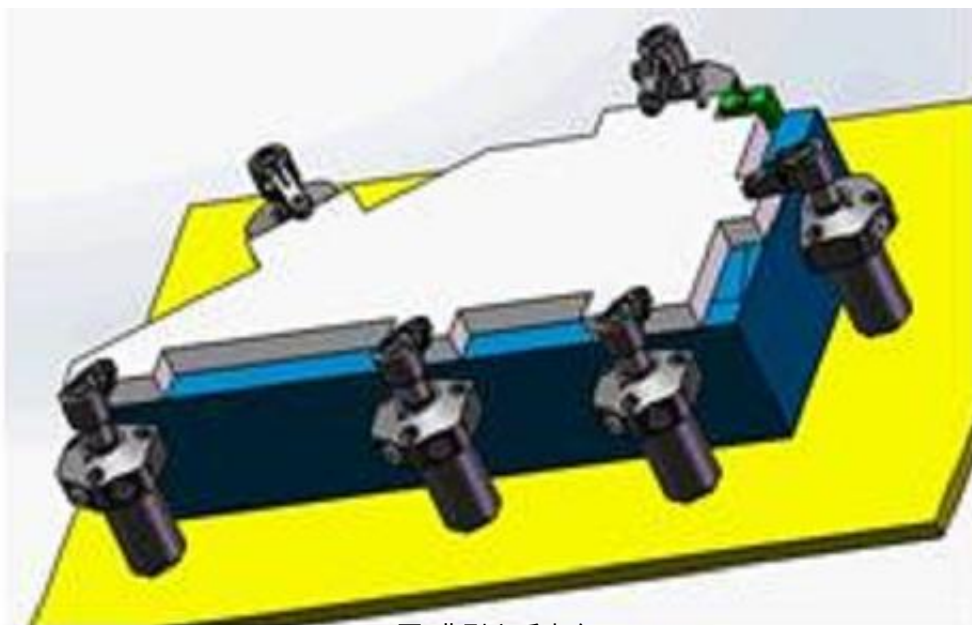


图5典型六爪卡盘

针对航天薄壁复杂结构件数控加工柔性工装的研制需求，需要综合研究薄壁复杂结构件切削力 - 热耦合规律、零件刚性的动态变化以及加工路径的影响规律，从而优化夹紧位置和夹紧力的分布，通过夹紧力的柔性可调来平衡切削力，减小局部切削变形。基于航天薄壁复杂结构件几何结构特征相似性，研制自动化定位和夹紧的柔性工装，用于大型弱刚性曲面结构件、薄壁回转体类结构件和薄型多面体类结构件舱的定位装夹，实现同类结构件共用一套柔性夹具，快速自动装夹和拆卸，能够大幅减少加工辅助准备时间，有效提升加工质量和生产效率。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/155102.html>