

# 基于可重构柔性工装夹持的飞机蒙皮数控切边关键技术及发展\*

Key Technology and Development of Aircraft Skin  
CNC Trimming Based on Reconfigurable and Flexible Tooling

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 李东升 胡福文 李小强 肖军杰  
上海飞机制造有限公司 朱明华 桑阳 徐应强



李东升

工学博士,博士生导师,主要从事飞机钣金 CAD/CAE/CAM 一体化成形制造技术、飞机装配数控工艺装备技术等方面的教学和研究工作。主持完成国家自然科学基金、国防预研基金、国家 863 计划及工程项目等 20 余项。获国家科技进步二等奖 1 项、国防科学技术一等奖 1 项、国家发明专利 3 项。

飞机蒙皮作为构成飞机气动外形

可重构柔性工装除用于蒙皮零件的数控切边外,还广泛用于飞机蒙皮化铣刻线、空间异型薄板零件加工、复合材料零件钻孔和修整、激光切割和焊接、飞机柔性装配等,应用前景十分广阔。

小<sup>[1]</sup>。传统制造方法是,蒙皮固定在切边模上,工人手工操作切割设备根据样板进行切边,工作劳动强度大,切边精度低。近年来,为了实现蒙皮的精确高效切边,大幅度减少蒙皮切边工装数量,提高制造质量,国外飞机制造厂商逐渐采用了基于柔性工装的数控切边工艺。自 20 世纪 90 年代初期开始,国外企业开发的柔性工装已被波音、空客、麦道等飞机制造商用于蒙皮、壁板、舱门、机翼等零件的加工制造过程以及飞机的数字化柔性装配<sup>[2-3]</sup>,极大地提高了生产效率和加工质量。相比而言,我国在蒙皮数控切边及柔性工装的研发应用方面较为落后。在国家 863 计划的重点支持下,北京航空航天大学、

上海飞机制造有限公司和北京航空制造工程研究所进行合作,在成功研发蒙皮拉形可重构柔性模具的基础上<sup>[4-5]</sup>,开展了可重构柔性夹持工艺装备及配套工艺支撑软件系统的研究和开发,已经取得了阶段性成果,为该技术的实际生产应用提供了技术保障。

## 飞机蒙皮切边工装的进化模式

切边作为蒙皮零件制造的关键工序,其加工精度直接影响到后续的装配生产。从实际生产应用来看,蒙皮切边工装技术的发展主要经历了三代。

第一代工装是实体模胎+切边样板。目前在我国飞机生产中仍然主要采用该工艺。

\* 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA041905)资助。



图1 美国沃特公司加工蒙皮时应用的柔性工装

第二代工装是真空吸附卡板支撑式工装。蒙皮依靠卡板支撑和定位,依靠真空气囊进行约束,在数控机床上进行数控切边。该代工装采用了真空吸附技术和数控切边技术,柔性程度和加工精度得到了提高。但为了精确支撑和定位,卡板型面仍需要反复修形。而且不同蒙皮零件需要制作不同的卡板,这大大降低了该类工装的柔性和敏捷性。

第三代工装是可重构柔性工装。可重构柔性工装的执行机构是一组带真空吸盘的立柱阵列,模块化的立柱由数控系统控制可三维移动到空间任何位置,生成与蒙皮曲面贴合的吸附点阵。该类工装的真空吸盘能够在一定角度范围内万向自由回转以自动适应蒙皮曲率的变化,实现快速精确自适应调形,与龙门式五坐标数控机床配套使用,实现蒙皮的高效精确切边,避免了二次修边,柔性化和敏捷化程度非常高<sup>[1]</sup>。

结合蒙皮切边工装技术的发展历程,根据 TRIZ<sup>[6]</sup> 技术进化理论,绘制出了图 2 所示的蒙皮切边工装进化放射图。

图 2 的外圆表示技术进化的理想化目标,最大的内接 8 边形表示技术进化的极限。从图 2 中可以看出每代工装的技术进化边界,可以明显看出第 3 代可重构柔性工装向技术

发展极限和理想化目标迈进了一大步,是前两代工装发展的必然趋势,是工装技术发展的新里程碑。通过图 2,还可以看出柔性工装的技术发展趋势。未来工装的集成性和动态特性必将更高,比如工装系统与机床的融合<sup>[3]</sup>。

### 柔性工装夹持蒙皮数控切边的关键技术

#### 1 柔性工装

基于真空吸盘的可重构柔性工装是新一代先进敏捷工装,同时又是一个涉及精密机械、真空技术、数字控制、液压控制、电气、数字化检测和软件开发等多个技术领域的复杂耦合系统。其主要由夹持单元、定位单元、传动支撑单元、驱动单元、控制单

元、测量反馈单元和真空单元等部分组成。

#### (1) 夹持单元。

夹持单元是可重构柔性工装的终端执行机构,它通过真空负压实现对蒙皮零件的吸附夹紧,其技术要点有:

- 为了在一定范围内自动适应蒙皮零件的曲率变化,真空吸盘应灵活精确回转。吸盘方向回转的角度一般设计在  $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ;
- 良好的密封性能,保证真空空气室的形成;
- 有过滤功能可防止碎屑等;
- 易于与立柱组装,不同吸盘直径的夹持单元应该具有互换性。

#### (2) 驱动及控制单元。

为了扩大适用范围,实现快速精确定位和调形,柔性工装的支撑立柱一般能够沿 X、Y、Z 的 3 个方向运动,因此整个工装的驱动和控制单元十分复杂,一般采用现场总线技术对各伺服电机(节点)进行统一控制管理。若柔性工装只在 Z 向自由调高,这时整个工装的结构规模小,亦可以采用液压系统控制和驱动。驱动及控制单元设计的技术要点有:

- 要保证支撑立柱的定位精度和重复定位精度;
- Z 向运动到目标位置时能够自动锁紧,从而承受一定的轴向载荷。若采用伺服电机驱动,可以通过电机

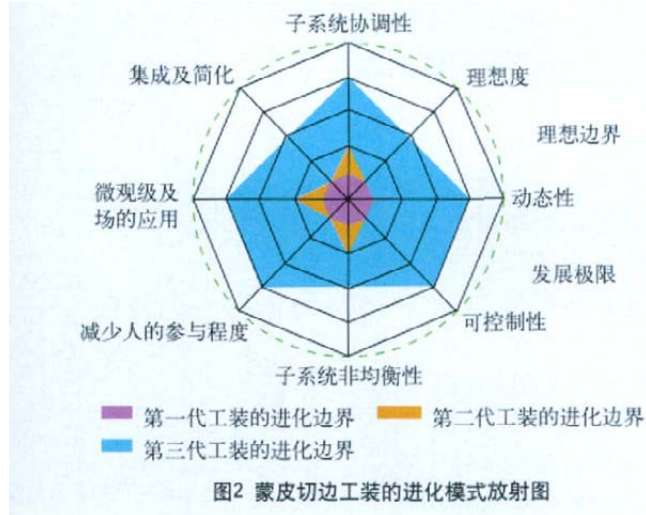


图2 蒙皮切边工装的进化模式放射图



图3 M. TORRES公司开发的柔性工装系统

速刀具+薄板工件+多点柔性工装”三者构成了一个具有动力学特征的加工工艺系统,由于影响工艺系统刚度的因素较多,切削振动现象十分显著,如果立柱布局不当将会导致刀具折断、局部切边质量差等问题,因

此进行装夹稳定分析十分必要。在新工艺中,由于采用多点真空吸附支撑从而导致边界条件复杂,从而难以通过经典板壳稳定性解析方法建立分析模型,所以采用有限元数值解法进行分析,如图5所示。

(3) 调形过程的运动仿真、干涉校验。立柱布局和升程计算结束后,需要对得到的数据进行三维可视化校验,以防止装夹工件时发生干涉或碰撞。如图6所示,根据计算出的装夹数据,驱动已经建立好的可重构柔

抱闸实现,若采用液压驱动,则可以通过液压夹紧套筒实现;

- 运动位置的反馈功能,可以通过磁致伸缩线性位移(液位)传感器来实现;

- 专门的控制软件,将支撑立柱的位置信息转换为相应的驱动控制参数。

## 2 工艺设计仿真系统

基于柔性工装实现飞机蒙皮数控切边是新一代蒙皮切边工艺。蒙皮零件外形复杂,种类繁多,为了确保可重构柔性工装的快速精确定位和调形,需要有配套支撑的工艺设计仿真系统。基于CATIA CAA平台开发的配套工艺设计仿真系统。其应用流程如图4所示。工艺设计仿真系统的核心功能有:

(1) 实现支撑立柱的布局,升程计算。为了适应蒙皮零件局部率的变化,夹持吸盘可绕万向回转中心做 $\pm 35^\circ$ 摆动。但无论吸盘的摆角如何,万向回转中心永远与垂直轴线重合,且每个吸盘的万向回转中心到夹持基准点的距离不变。因此夹持吸盘万向球副的球心分布在蒙皮零件的法向等距曲面上,所以从基准面到包络面的垂直距离即为立柱的升程 $h$ 。

(2) 装夹稳定性FEM分析,在最小最装夹变形情况下的保证工件装夹稳定性。采用可重构柔性工装装夹蒙皮零件进行数控切边时,“高

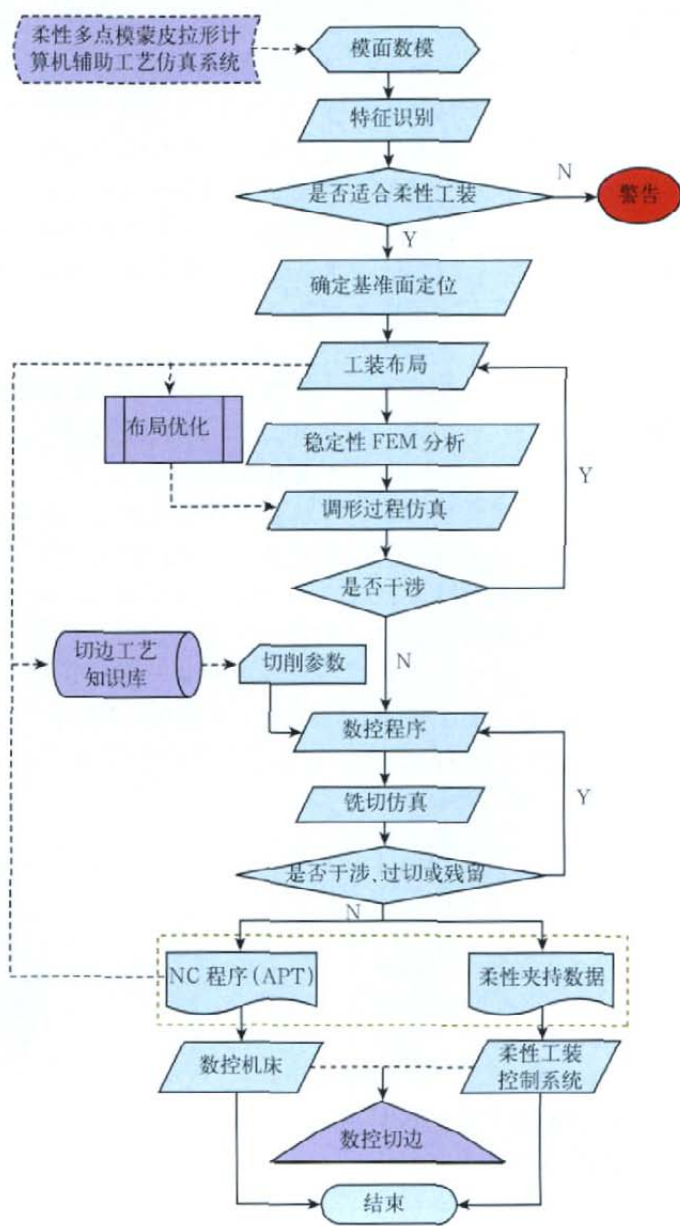


图4 飞机蒙皮数控柔性切边工艺设计仿真系统流程图

性工装数字虚拟样机实现调形过程仿真;调形结束后导入蒙皮毛坯数

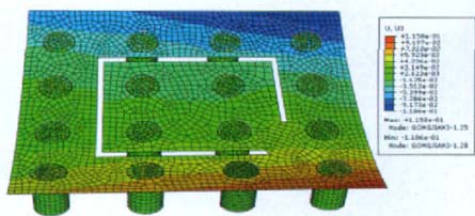


图5 蒙皮多点柔性夹持工艺系统刚度有限元分析

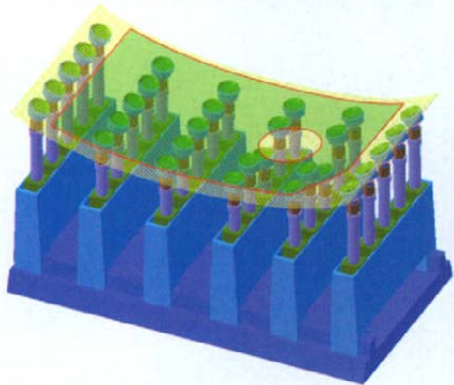


图6 蒙皮多点柔性装夹的可视化仿真

模进行可视化装配,即可以检验数据的准确性。

### 3 切边工艺知识库

由于数字化柔性切边工艺过程传递量均是数字量,工艺设计仿真系统是数字化设计系统,且工艺设计过程中需要查阅大量的工艺手册,生成了大量有价值的分析文档和设计文档,因此建立切边工艺知识库十分必要。鉴于此,我们设计和开发了面向飞机蒙皮“柔性夹持、数控切边、工艺设计数字化”的工艺知识库,知识库与工艺设计仿真系统无缝集成在CATIA平台中。通过工艺知识库能够查询飞机蒙皮切边工艺设计及仿真全过程所必须的静态工艺数据,存储工艺设计及仿真全过程所产生的动态工艺数据;能够提供蒙皮切边工艺仿真全过程所需要的知识;能够提供切削参数的决策规则或决策参考实例;能够从工艺设计及仿真所产生的NC文档、FEM分析文档中提取出规则化的知识和实例。其中切边工艺知识库的知识管理器界

面如图7所示。切边工艺知识库开发的关键技术有:

(1) 知识的获取。不同类型的知识,获取方法也不同,其中如何获取蕴藏在CAE分析报告和工艺设计仿真优化过程中的隐性知识是技术难点。

(2) 知识的规则化。对来源不同的知识,要想重用,必须进一步解释和整理,建立与零件有关特征参数的关系,形成标准化规则,才能转换为可用的工艺知识,最后将其存储在工艺知识库中。

(3) 工艺方案的决策方式。工艺方案的决策和设计主要有2种途径,一种是基于实例的检索式,另一种是基于规则推理的创成式。实际工艺设计中,一般首先进行实例检索,如果找不到相匹配的工艺方案,则进行创成式设计。最后经过细节修改和工艺审查后,将工艺设计文档存入数据库。

### 展望与建议

可重构柔性工装除用于蒙皮零件的数控切边外,还广泛用于飞机蒙皮化铣刻线、空间异型薄板零件加工、复合材料零件钻孔和修整、激光切割和焊接、飞机柔性装配等,应用前景十分广阔。鉴于我国飞机制造对柔性工装的迫切需求,北京航空航天大学与相关的合作单位正在加紧研发,相继攻克了一系列的技术难点,将进入工程样机的验证阶段。为



图7 飞机蒙皮数控柔性切边工艺知识库—知识管理器界面

了保证新装备新工艺的快速推广和有效使用,未来需要进一步的工作还有:

(1) 数控切边时,蒙皮切边的数控程序是按照理论轨迹编写的,但由于采用多点柔性支撑,夹持吸盘的真空负压会引起蒙皮的局部变形和整体变形,从而会导致实际切边轨迹与理论切边轨迹之间产生误差。因此需进一步研究误差的大小、影响程度及补偿方法。

(2) 可重构柔性夹持工装蒙皮数控切边时,“刀具+薄壁工件+柔性工装”三者构成了一个具有动力学特征的加工工艺系统。薄壁工件的变形和振动、柔性工装的振动、切削力的变化等因素相互耦合作用,将会直接影响到高速加工的质量。因此需要对切边过程进行动力学仿真,获得最优的切削参数和装夹状态。

(3) 柔性工装、配套工艺设计仿真系统和工艺知识库的开发应用,必将带来工艺设计模式的变革。面向新装备、新工艺和新方法,应尽快研究和建立工艺设计的新规范。

### 参考文献

- [1] 李东升,罗红宇,王丽丽,等.飞机蒙皮的数字化成形制造技术.塑性工程学报,2009,16(1):82-86.
- [2] 郭恩明.国外飞机柔性装配技术.航空制造技术,2005(9):28-32.
- [3] 邹方.柔性工装关键技术与发展前景.航空制造技术,2009(10):34-38.
- [4] 黄丽丰,李东升,罗红宇.可重构柔性模具蒙皮拉形闭环形状控制系统设计.塑性工程学报,2008,15(6):38-42.
- [5] 罗红宇,李东升,曾元松,等.蒙皮拉形可重构柔性模具模面生成系统开发及应用研究.塑性工程学报,2006,13(6):61-65.
- [6] Mazur G.Theory of inventive problem solving (TRIZ).<http://www.mazur.net/triz/>.
- [7] 丁韬.TORRESMILL和TORRESTOOL系统蒙皮切边钻铣床及柔性夹具装置.航空制造技术,2007(2):108-109.

(责编 侧卫)