

# 面向数字化装配的大型蒙皮 精确成形技术\*

## Precise Forming Technology of Large Skin in Aircraft Digital Assembly

西北工业大学现代设计与集成制造教育部重点实验室 李西宁 仝梦佳 郭飞燕 王仲奇 李玉华  
中航工业陕西飞机工业(集团)有限公司工艺处 马运辉



李西宁

副教授,博士,研究方向为装配与连接技术、板料成形技术,主持和参加“863”计划、国防基础科研、科技支撑计划等项目 10 余项。

飞机蒙皮类零件广泛用于机翼和机身部件中,其外形复杂多样,结构尺寸大,单机零件数量占整个钣金零件的 30% 左右<sup>[1]</sup>。蒙皮是构成飞机气动力外形的重要部件,其制造不

大型蒙皮精确成形技术研究可为我国飞机蒙皮装配实现精确装配、无余量装配提供参考,为实现大型蒙皮的数字化生产提供依据。随着对蒙皮精确成形技术的不断深入研究,我国将会大力推进国内飞机蒙皮制造的数字化、精准化、柔性化水平,促进当代飞机新型制造模式的变革。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.01/02.081

仅有外形准确度和机械性能指标的要求,也有表面质量的严格要求。

在现阶段的蒙皮拉形生产过程中,蒙皮零件通常留有较大的加工余量,生产效率低;拉形工装质量大、工作型面表面质量较差,大部分蒙皮拉形工装都超重无法采用三坐标测量机检测,只能采用外形样板测量,测量精度与效率较低;在蒙皮拉形过程中,缺乏必要的过程模拟与参数设置,回弹变形较大,且拉形过程中蒙皮零件表面质量的保护缺乏必要措施;传统的实体模具进行蒙皮拉形后,在实体模具上对蒙皮进行切边处理,工作效率、蒙皮精度已经不能满足先进飞机的制造需求。

飞机蒙皮数字化制造技术是集 CAD 工艺设计、CAE 仿真优化、可重

构柔性工装、CAM 切边和化铣刻线为一体的综合集成技术,是一种典型的基于数字量传递的飞机钣金制造工艺,是工艺数字化和工装数字化紧密结合的蒙皮数字化生产模式<sup>[2]</sup>。该技术的不断深入研究将大力推进国内飞机蒙皮制造的数字化、精准化、柔性化水平。

### 蒙皮精确成形技术

蒙皮精确成形是以零件数学模型为基础,通过拉形模具的数字化设计与制造、型面补偿,对拉形、切边过程的基础工艺参数的研究,完成蒙皮零件拉形过程的数值模拟分析和工艺设计;通过先进的检测技术完成蒙皮的数控拉伸精确成形;借助数控切割指令完成蒙皮零件的数字化

\* 国家科技支撑计划课题(2011BAF13B01和2011BAF13B07)资助。

立体切割和交付使用。

无余量装配是通过充分协调零件之间关系和合理分配容差来实现装配前不留余量的装配方法,以满足包括几何形状准确度、尺寸精度和互换性要求等装配准确度要求。

借助上述技术,从蒙皮下料、拉形、钻孔切边到数字化测量,蒙皮精确成形过程如图 1 所示。

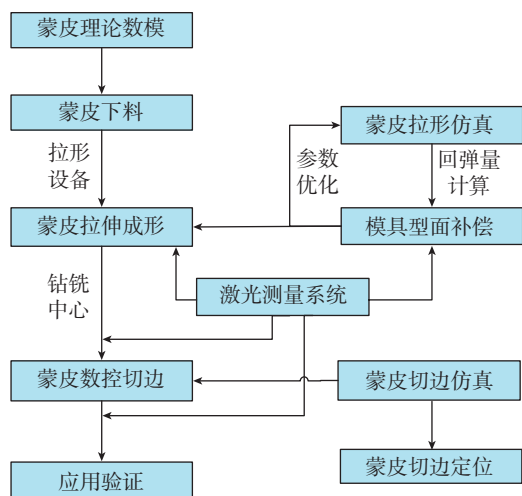


图1 蒙皮精确成形流程

## 国内外发展状况

### 1 国外发展状况

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数字化柔性装配<sup>[3]</sup>,极大地提高了生产效率和加工质量。

Bursi 等<sup>[4]</sup>对飞机机身和机翼蒙皮工件板材拉形过程中的安装、夹紧、拉伸和回弹的整个过程进行了数值模拟预测成形过程中出现的拉裂缺陷、表面缺陷和成形后的回弹量,为确定和优化成形参数提供了参考。Chou 等<sup>[5]</sup>分析了几种应用在 U 形槽弯曲工艺中减小回弹的技术,对成形结果进行优化分析,得到工艺过程中的最优成形参数。美国 CAN 制造公司生产了 POGO 柔性工装,对波音 747 机身壁板进行了切边钻孔和测

量<sup>[6]</sup>。英国巴斯大学 LIMA 试验室对激光跟踪仪与 iGPS 测量系统的测量精度和误差源进行了研究,并对它在飞机装配过程中的应用方法和形式进行了深入探讨<sup>[7]</sup>。

### 2 国内发展状况

相比而言,国内在飞机大部件蒙皮精确成形与无余量装配方面的技术尚处于起步阶段。吉林大学通过对支承柔性夹具的研究和试验,成功研制出蒙皮展型专用多点支撑柔性装置<sup>[8]</sup>,如图 2 所示。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,并开发出用于飞机蒙皮和壁板切割加工的柔性工装系统。清华大学深入研究了以柔性途径实现“先成形后加工”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割加工的智能柔性工装系统<sup>[9]</sup>,如图 3 所示。

伍惠<sup>[10]</sup>围绕飞机蒙皮零件制造过程中如何确保表面质量和外形准确度,分析了大型双曲面蒙皮零件数

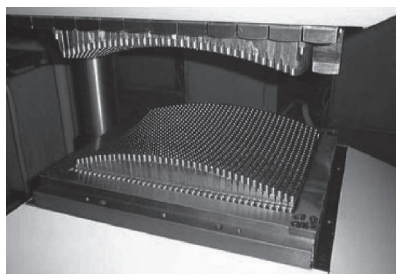


图2 多点浮动式柔性支撑装置

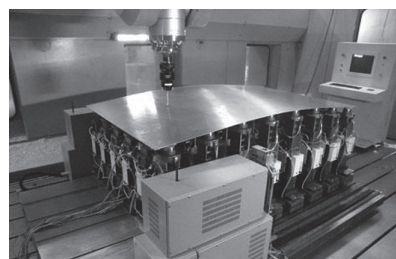


图3 智能柔性工装系统

字化精确成形的技术解决途径和需要突破的关键技术。刘垒等<sup>[11]</sup>利用有限元分析对飞机前缘蒙皮拉形工艺参数优化,利用 ASSFCAE FET600 软件生成数控代码,进行生产性试验及测量分析,获得了合格的零件。胡福文等<sup>[12]</sup>基于几何约束关系实现了柔性工装对曲面零件的虚拟装夹,精确计算出柔性工装的调形参数,通过协调单元生死顺序和铣削力加载,实现了切边过程有限元仿真分析。陈哲涵等<sup>[13]</sup>针对数字化测量场的构建展开研究,讨论了数字化测量场 5 个维度参数选取的关键技术,重点研究了基于关键测量特性的面向测量设计方法、iGPS 测量系统的测量场构建和仿真。

## 蒙皮精确成形实现的关键技术

精确成形技术的一个重要发展趋势是工艺设计由经验判断走向定量分析,应用数值模拟、专家系统以及试验验证来确定工艺参数,优化工艺方案,预测加工过程中可能产生的缺陷及采取有效防止措施控制和保证加工质量。飞机蒙皮精确成形技术实现过程主要涉及以下 4 项关键技术,如图 4 所示。

### 1 面向蒙皮精确成形的拉形模 型面修正技术

针对蒙皮拉形模胎,模具补偿法是矫正型面、减少拉形件回弹的一种有效方法。它是基于数值模拟技术,对回弹进行快速预测和补偿,从而使随后的成形件即使产生回弹也能满足设计精度要求的方法。在实际生产中,用模具补偿法处理回弹问题时,需要获取回弹后的冲压件和目标冲压件的差异值进一步分析,获取其回弹评价作为补偿的依据。对拉形模具回弹补偿的过程如图 5 所示。

蒙皮拉形的数值模拟突破了蒙皮零件拉伸成形过程数字化分析及设计技术,使蒙皮零件制造工艺从经

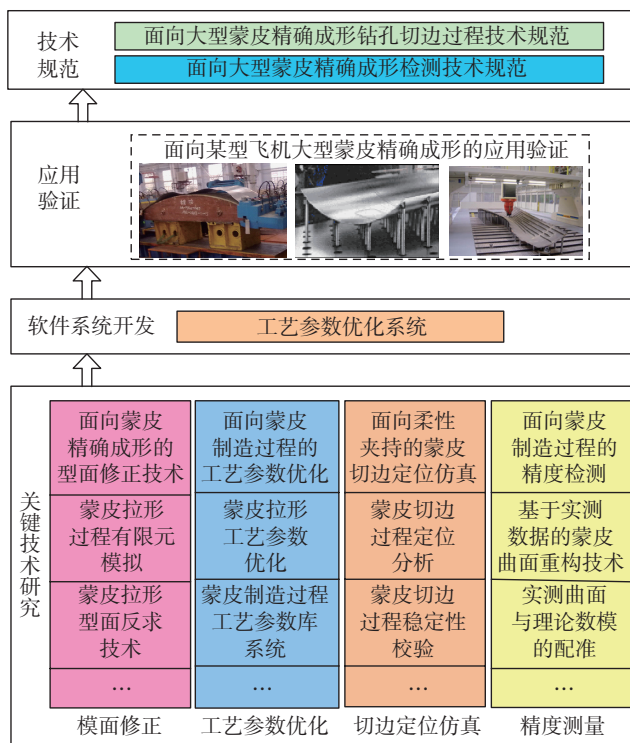


图4 蒙皮精确成形的关键技术

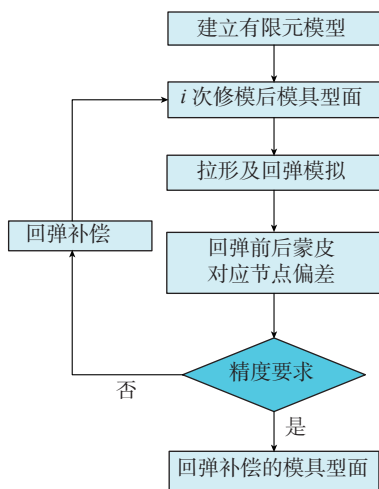


图5 蒙皮拉形模具虚拟修模流程

验型向科学化、标准化转换,实现拉形回弹量的精确预测,为模面修正提供技术保障。

## 2 蒙皮制造过程工艺参数优化技术

在蒙皮拉形过程的有限元模拟中,通过分析蒙皮拉形过程中工艺参数对蒙皮成形质量的影响,运用最优化理论对蒙皮零件生产中容易出现的缺陷进行工艺参数优化设计,确定

相关工艺参数,将缺陷的综合指标降到最低,从而指导蒙皮制造过程;通过建立蒙皮制造过程工艺参数库对蒙皮制造工艺参数进行管理。

### 2.1 蒙皮拉形工艺参数优化

蒙皮拉形过程一般分为预拉、包覆拉伸和补拉3个步骤,影响蒙皮拉形质量的工艺参数有拉伸率、包覆角以及加载模式等<sup>[14]</sup>,包含图6所示的工艺参数。

拉形过程的有限元仿真比较准确地反映了拉形的真实过程,利用最优化理论与有限元数值模拟进行工艺参数优化的过程如图7所示,具体步骤如下。

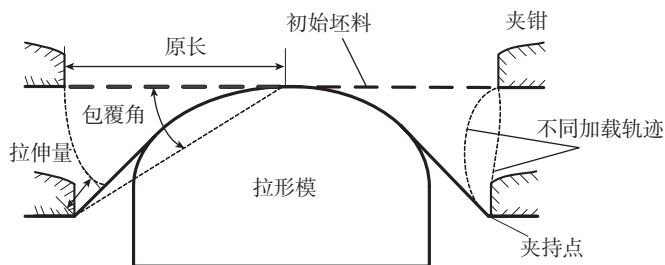


图6 蒙皮拉形工艺参数示意图

(1)分析蒙皮零件的成形性能,判断蒙皮在成形中可能出现的缺陷,如滑移线、粗晶、褶皱等,这些成形缺陷可以通过控制最大变形量等方法克服;分析产生缺陷的机理与影响因素,确定对成形质量起决定性作用的工艺参数,将它们作为设计变量;以可靠的成形性评价指标作为约束条件,建立最优化数学模型。

在蒙皮拉形中,需要确定的工艺参数比较多,因此利用正交试验选取对成形质量影响较大的几个参数作为优化设计变量,确定优化变量空间 $X$ ;蒙皮拉形中卸载回弹引起的不贴模问题是制约零件精度的主要问题,因此需要以回弹量最小为目标函数,且以整个型面上各点在法向的位移 $U$ 来标记回弹量的大小<sup>[15]</sup>;为了避免蒙皮拉伸造成的过度减薄,根据生产要求,以零件成形区最大减薄量不超过30%为约束条件<sup>[16]</sup>。根据以上分析建立蒙皮拉形工艺参数的优化模型:

$$\begin{cases} \text{OBJ} = \min U \\ X \in E \\ t_0 - \min(t)/t_0 \leq 30\% \end{cases}$$

其中, $E$ 为设计变量的边界条件, $t_0$ 为毛坯初始厚度, $t$ 为变形后板料厚度。

(2)选择合适的试验设计方法指导有限元仿真,进行 $n$ 次数值模拟获得设计变量与目标函数之间的响应数据,然后利用响应面法对试验数据进行拟合,分别建立二次、三次等多次的多项式函数,并通过随机生成参数进行有限元模拟验证的方法

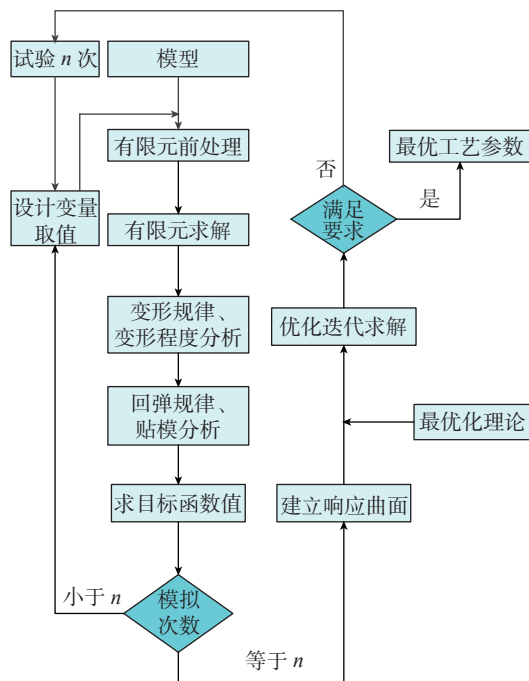


图7 有限元模拟与最优化理论结合的优化流程

对各个函数表达式的精确程度进行验证以确定最终的响应面函数。

(3) 采用合理的最优化理论算法,在所建立的响应面上对设计参数进行优化,实现成形工艺参数的自动寻优。

(4) 利用优化后的工艺参数进行有限元模拟验证,比较优化前后蒙皮数值模拟回弹云图。为了定量分析回弹的大小,以零件对称中心为坐标原点,以长度方向上对称切面上的点为测量点,分析测量点的回弹,比较优化前后最大回弹量的改变量。

蒙皮工艺参数优化技术是成形高精度、无表面缺陷飞机蒙皮的重要手段,避免了单纯数字模型方法过于依靠工艺师经验的弊端。

## 2.2 蒙皮制造过程工艺参数库系统

面向数字化装配的大型蒙皮的精确成形过程中传递量均是数字量,且在设计过程中需要查阅大量的工艺手册。为提高工艺参数设计效率,开发了基于 CATIA、CAA 平台的工艺参数库系统,总体结构如图 8 所示。

工艺参数库系统集成在 CATIA

平台中,通过工艺参数库系统能够查询飞机蒙皮制造全过程所必需的静态工艺数据,存储工艺设计及仿真全过程所产生的动态工艺数据;能够提供蒙皮制造全过程所需要的知识;能够从工艺设计所产生的 NC 文档、FEM 分析文档中提取出规则化的知识和实例。

### (1) 工艺参数的获取。

为了提升数据库的实用性,以及尽可能减少用户的工作强度和时,数据获取采用了多方面的渠道:试验、搜集资料(试验记录)、预测等。同时,系统还可以随时增加新的记录

和删除不正确或不需要的记录,也可以对数据进行修改。

### (2) 工艺参数的规则化。

对来源不同的工艺参数,需要先进行解释和整理再进行使用,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参数,最后存储在工艺参数库中。

### (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。经过细节修改和工艺审查后,将工艺设计文档存入数据库。

通过不同用户所做的试验获得准确的蒙皮制造参数,建立数据库,然后用户根据自己的需求利用系统设定的优化算法来挑选优化的参数。这样可以大大节约时间和精力,达到大范围的资源共享。

## 3 面向柔性夹持的蒙皮切边定位仿真技术

作为承接蒙皮成形与装配的中间环节,蒙皮切边的加工精度与加工质量会对整个飞机蒙皮制造过程产生重要影响。应用可重构柔性夹持工装配合五坐标钻铣中心,可以实现蒙皮的高效精确切边,为后续的无应力无余量数字化精密装配奠定基础。但在实际生产应用中,保证定位精度和夹持稳定性是关键问题。

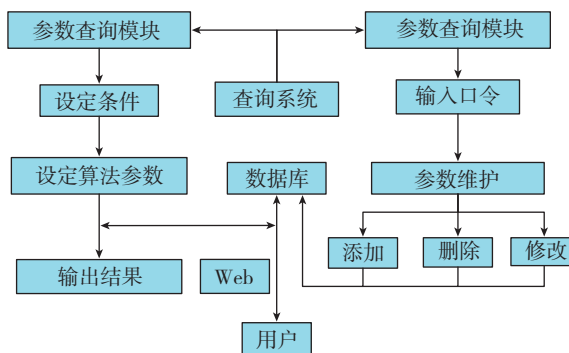


图8 蒙皮制造过程工艺参数库系统总体结构框图

### 3.1 蒙皮切边过程的定位分析

装夹工件时,如果真空吸盘吸附位置不准确,就会非常容易改变弱刚度薄壳件的形状,从而会使实际加工轨迹与理论轨迹之间产生误差。这类静态误差相对于数控机床的加工精度来说,往往是粗大误差,因此需要提高真空吸盘吸附位置的准确性来提高蒙皮的切边精度。

飞机蒙皮件在装夹、加工前,首先要根据蒙皮的数模几何信息在计算机中确定定位/支撑阵列的空间位置坐标 $(X, Y, Z)$ ,通过这些定位/支撑阵列的离散小单元面形成大包络面来构造与工件表面相对应的工装定位/支撑表面。计算出定位/支撑阵列的位置坐标后通过PC与各支杆的控制单元进行通信,从而实现精确控制定位<sup>[17]</sup>。

飞机蒙皮件的外形多为自由曲面,可以选用非均匀有理B样条曲面作为理论指导,对飞机薄壁件的定位问题进行深入研究。

(1)初步计算出蒙皮表面上需要定位/支撑的所有位置坐标 $\{(X, Y, Z)\}$ 。首先计算出零件最多能布置下工装的排数 $M$ 和每排的立柱数 $N$ ,计算公式如下:

$$M = \frac{L}{\delta} + 1, N = \frac{W}{\delta} + 1,$$

式中, $L$ 表示蒙皮的长度, $W$ 表示蒙皮的宽度, $\delta$ 表示排架之间的安全距离。

其次,对定位点的位置进行微调,点的优化分布需要综合考虑蒙皮的重力、强度、变形、待加工部位受力以及整体的振颤等因素,得到定位/支撑的位置坐标。

(2)根据初步求出的位置坐标以及法矢量求出与其相切的各支杆前端球心坐标 $\{(X_1, Y_1, Z_1)\}$ 。

(3)根据 $X$ 排架上所有支杆的 $Y$ 值相同, $Y$ 排架上所有支杆的 $X$ 值相同这一特点,对所求的球心坐标进行最小二乘法直线拟合得到新的

$\{(X'_1, Y'_1)\}$ 坐标。

(4)根据新得到的坐标 $\{(X'_1, Y'_1)\}$ 可反求得到定位/支撑阵列的球心坐标点集 $\{Z'_1\}$ 。

通过离散小单元面阵列所形成的包络来构造与工件表面相对应的工装定位/支撑,完成了对柔性定位/支撑阵列位置的精确控制,实现了蒙皮类零件的高效、高精度加工,提高了总装质量和效率。

### 3.2 蒙皮切边过程稳定性校验

作为大尺寸、弱刚性的薄壁结构件,在多点不连续支撑的柔性工装夹持下进行切边加工必然导致加工过程中工艺系统刚度产生剧烈变化,进而影响加工精度<sup>[18]</sup>。为了能以最小代价预测加工过程中的震颤、应力等物理量,指导实际加工,实现面向柔性夹持的蒙皮数控切边有限元仿真分析就变得十分重要。

有限元模拟的关键技术包括Johnson-Cook塑性本构模型、工件与刀具的接触设置、切屑与工件的分离准则等。以上技术的解决是建立有限元切削仿真模拟的关键所在。

对蒙皮切边过程进行仿真模拟时,单元失效的标准采用广泛应用于金属切削数值仿真过程的Johnson-Cook(J-C)失效准则,J-C塑性本构关系模型侧重于考虑应变率效应与温度效应,对于描述大部分金属材料的塑性变形过程是比较合适的。工件与刀具之间的接触采用约束增强算法,该算法可以使ABAQUS/Explicit在面与面之间的接触中默认采用动力学接触公式,接触刚度则由预测/修正的算法获得。为了处理切削仿真中切屑大变形以及切屑分离等问题,网格描述方法采用了任意拉格朗日-欧拉法,该方法继承了Lagrangian方法和Eulerian方法的优点,将它们的缺陷降到最低<sup>[19]</sup>,切屑与工件的分离准则中使用剪切失效准则。

为了校验可重构柔性工装系统

的夹持稳定性,必须模拟切边过程中的材料逐渐去除现象。目前,主要有两种单元删除技术用于三维铣削仿真分析,一是单元生死方法,二是单元物理失效方法<sup>[12]</sup>。本文采用单元物理失效方法,与基于单元生死方法的铣削仿真相比较<sup>[20]</sup>,该方法首先避免了事先的铣削力精确计算,其次无需考虑单元生死顺序与加载过程的协调,另外考虑了刀具与工件的相互作用。这样不仅更接近加工实际,对保障模拟精度也具有现实意义。

蒙皮切边有限元仿真中,求解输出的物理量不但要有应力应变,而且还要输出铣削力和切削路径上关键点的位移,通过观察这些物理量可以分析出仿真的可靠性以及夹持稳定性。

利用有限元模拟技术对蒙皮的切边过程进行计算机仿真,实现了“虚拟试切”的过程,可避免盲目的切边工作,能够高效、准确地对关键点处的应力、振动情况进行预测,校验实际加工过程的稳定性,保证了蒙皮的切边精度,为后续的无应力无余量数字化精密装配奠定基础。

## 4 蒙皮数字化测量技术

针对蒙皮零件面积大、刚性差、形状复杂的特点,寻求提高蒙皮型面测量准确度的技术途径,借助数字化的激光扫描技术,完成拉形、钻孔、切边前后蒙皮形状检测,采用四边域的参数曲面拟合算法对蒙皮曲面的实测数据进行重构,将理论数模三角面片化,将实测结果与理论数模对比、校正,实现蒙皮的精确成形。

### 4.1 基于实测数据的蒙皮曲面重构技术

曲面重构是指从一个离散点出发,恢复点集所在原有曲面的过程。它是后续CAD/CAM/CAE的基础,在逆向工程技术中堪称难度最大、耗时最长的工作,约占整个逆向开发量的50%~60%<sup>[21]</sup>。

在测量得到模型表面空间坐标

数据之后,对原始实测点云数据进行预处理,采用四边域的参数曲面拟合算法建立以特征线为中心的重构曲面模型,即可输出数字模型。蒙皮曲面模型重构过程如图9所示。

#### 4.2 实测曲面与理论数模的配准

在数字化检测领域中,测量数据模型与CAD模型间不可避免地存在误差,这些误差会对后续的检测模型精度造成影响,有可能将合格的零件误判为不合格零件,这使得数字化检测设备的测量精度失去了意义<sup>[22]</sup>,因此需要对测量数据模型与CAD模型实现配准。

点云配准有手动配准、依赖仪器的配准和自动配准。在自动配准中,测量数据模型与CAD模型间的配准一般分为两个阶段<sup>[23]</sup>。第一个阶段是初始配准,初始配准可以使测量数据模型上的数据点移动到比较靠近CAD模型的位置,从而有效地缩小模型间差异,从而为精确配准做准备。第二个阶段是精确配准。精确配准是利用优化理论来求取配准的多个参数,通过目标函数的变化趋势,确定出有利的搜索方向和步长,然后得到优化解,使得测量数据模型与CAD模型处于最佳拟合状态。

常见的初始配准方法有:(1)中心重合法,简单的把两个点云的重心重合,这种方式只能缩小平移错位而

无法缩小旋转错位;(2)标签法,即在测量时人为地贴上一一些特征点,然后使用这些特征点进行定位,这种方式仍然是依赖于测量和仪器的;(3)提取特征法,有提取平面特征、提取轮廓曲线等,这种方式要求点云有比较明显的特征。迭代最近点算法(ICP算法)是当前应用最广的点云精确配准算法,该方法寻找两片点云之间的对应点对之间的关系,通过迭代方法计算两个点云的刚性变换参数,当满足一定的收敛精度或者设定的迭代次数时,计算出点云之间的旋转矩阵和平移向量两个参数。

点云配准是激光扫描系统应用于三维重建中的一个重要部分,实测曲面与理论数模的配准技术的应用提高了零件检测的精度;数字化检测技术的应用解决了长期以来蒙皮零件型面检测仅依靠检验人员经验判断的问题,实现了蒙皮质量检测的数字化,为实现无余量装配提供了保障。

### 飞机蒙皮精确成形技术应用模式

蒙皮数字化制造应用体系如图10所示,零件设计、蒙皮拉形、柔性数控切边、非接触数字化测量等共同支撑了飞机蒙皮的精确成形制造。零件设计中采用数字化分析及设计技术,为蒙皮成形提供了原始模型;蒙皮拉形中采用蒙皮拉形仿真技术预测蒙皮的成形缺陷,借助模具型面补偿技术以及工艺参数优化技术,完成了拉伸成形过程质量

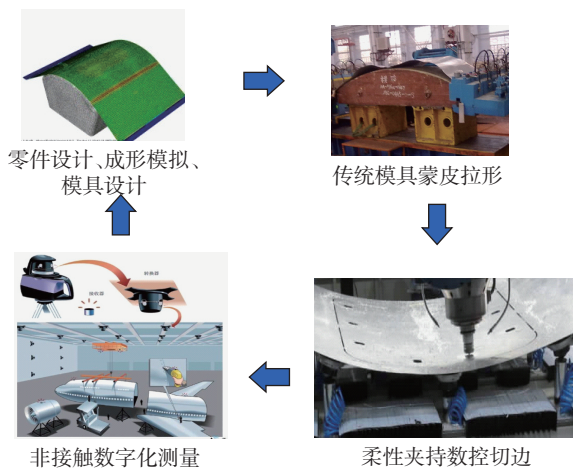


图10 蒙皮数字化制造应用体系

控制;柔性数控切边中利用蒙皮切边有限元仿真技术,为校验切边过程稳定性提供了技术保障;非接触数字化测量可提高蒙皮测量精度以及测量效率,实现飞机零部件快速检测,最终形成飞机数字化设计-制造-检验的闭环控制,实现了蒙皮的净边交付。

### 结束语

实现蒙皮零件精确成形是改变目前生产中存在的蒙皮制造精度不高、质量不稳定、难于形成工业化大生产制造模式的重要途径。目前,国内精确成形技术虽然在近几十年得到了巨大发展,但是与国际航空企业的应用水平还有一定的差距。本文完成的大型蒙皮精确成形技术研究可为我国飞机蒙皮装配实现精确装配、无余量装配提供参考,为实现大型蒙皮的数字化生产提供依据。随着对蒙皮精确成形技术的不断深入研究,我国将会大力推进国内飞机蒙皮制造的数字化、精准化、柔性化水平,促进当代飞机新型制造模式的变革。

本文共有参考文献23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 深蓝)

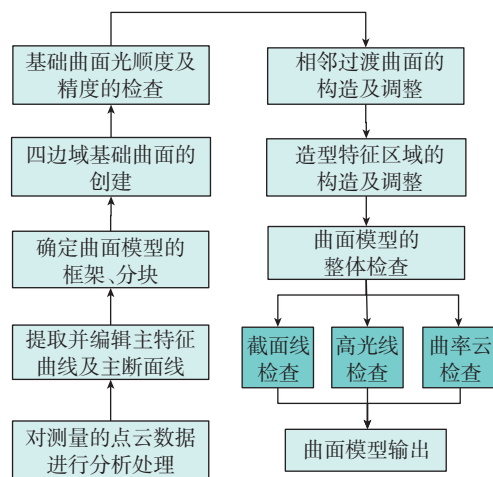


图9 蒙皮曲面模型重构流程