

# 大型双曲率高筋整体壁板 展开关键问题分析

## Analysis of Key Problems During Spread-Modeling on Large Dual-Curvature Integral Panel With High Ribs

中航飞机西安飞机分公司 陈金平 党建卫



陈金平

高级工程师, 现任中航飞机西安飞机分公司技装 61 厂技术副厂长, 主要从事飞机工艺数据、模线样板的设计及管理等方面工作, 先后发表论文 8 篇, 申请国家发明专利 5 项。

将壁板蒙皮与加强筋条融为一体的整体壁板, 具有重量轻、刚性好、气密性好的优点。为了达到满足气动外形的要求、减少零件数量、减轻重量和提高疲劳强度的工程效果, 整体壁板不仅外形曲面曲率变化复杂, 还具有包括加强筋条在内的复杂内

合理的壁板展开板坯不但可以节省材料、减少甚至免去后续的修边工艺, 大大降低生产成本, 而且能改善成形条件, 提高成形质量。然而, 喷丸成形过程中塑性变形的不可逆性, 导致整体壁板展开计算在理论上无精确解。同时, 由于塑性变形与路径相关, 且壁板局部特征存在差异, 喷丸成形过程中整体壁板变形不均匀、随机性大。因此, 整体壁板板坯展开工艺, 无论在理论方法上还是在技术应用上, 均成为了整体壁板制造的难点。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.01/02.064

壁结构。作为飞机的关键构件, 整体壁板因其尺寸大、外形和结构特征复杂, 制造难度大、工期长、成本高而成为型号研制的主要攻关任务之一<sup>[1]</sup>。因此, 深入研究整体壁板的成形工艺方法成为目前航空制造领域的重要方向<sup>[2]</sup>。

随着整体壁板在飞机结构中的广泛应用, 国内众多航空技术人员针对整体壁板的展开建模开展了广泛的基础理论研究和工程实际应用。康小明等<sup>[3]</sup>提出了通过四边形网格等面积法确定待定网格点的展开策略, 同时给出了定义外形曲面上零件

结构信息展开位置的方法, 完成了某型号飞机整体壁板的展开计算。孙新申<sup>[4]</sup>提出了采用混合四边形-三角形网格等面积展开的几何模拟法, 可快速确定零件毛坯外形, 并运用映射求交反求壁板零件的内部几何结构展开信息。张贤杰等<sup>[5]</sup>基于整体壁板外形曲面和内形面筋条、孔等结构特征的展开要求, 提出了在厚度不变假设条件下不可展曲面的最小差量协调展开算法, 建立了壁板类零件的数字化展开系统。

国内目前最常用的整体壁板制造工艺主要涉及如下环节: 先将壁

板设计数模在三维 CAD 软件中进行展开计算,建立展开板坯工艺数模;然后在三坐标数控机床上加工出壁板板坯;最后采用喷丸成形工艺将壁板板坯成形为最终形状。其中,壁板展开建模是从壁板零件的设计数模出发,逆向求取成形其板坯工艺数模的过程。合理的壁板展开板坯不但可以节省材料、减少甚至免去后续的修边工艺,大大降低生产成本,而且能改善成形条件、提高成形质量。然而,喷丸成形过程中塑性变形的不可逆性,导致整体壁板展开计算在理论上无精确解。同时,由于塑性变形与路径相关,且壁板局部特征存在差异,喷丸成形过程中整体壁板变形不均匀、随机性大。因此,整体壁板板坯展开工艺,无论在理论方法上还是在技术应用上,均成为了整体壁板制造的难点。

### 整体壁板结构特点

随着飞机综合性能指标的不断提高和结构设计的逐步改进,整体壁板无论从外形曲面,还是结构特征上都日趋复杂。现代大型飞机双曲率高筋整体壁板普遍具有如下特点:

(1)整体尺寸大:作为现代大型飞机的典型结构件,整体壁板的尺寸越来越大。目前国内正在研究中的大型飞机的机翼整体壁板展向长度多在 15~20m 之间。

(2)外形曲面复杂:因涉及气动性能,整体壁板外形曲面一般设计为几何上不可精确展开的双曲率空间曲面,曲率变化复杂。

(3)内壁结构特征复杂:为提高结构效率,整体壁板内壁构造比较复杂,除了加强筋条外,通常还包括凸台、口盖孔、减轻槽等局部特征。此外,为合理分布气动载荷和结构受力,壁板蒙皮多采用变厚度结构

### 整体壁板展开建模流程

作为连接壁板设计和制造的组

带工艺,整体壁板展开建模主要涉及展开外形曲面、映射结构特征和重构板坯数模 3 个步骤<sup>[6]</sup>,如图 1 所示。

(1)展开外形曲面。整体壁板一般是以外形曲面为基准构造的,可见展开外形曲面是壁板展开建模的基础。壁板外形曲面多为几何上不可精确展开的双曲率曲面,强制展开需要进行合理的工程近似,并产生一定的展开误差。双曲率曲面展开方法根据展开原理的不同大致分为几何方法和力学方法两类:几何方法是从曲面的几何特性出发,按一定的规则,如保持面积不变,将整张曲面展开为平面;力学方法则是从分析模拟曲面变形的应力与应变出发,计算曲面的展开形状和尺寸。

(2)映射结构特征。整体壁板上的结构一般可根据形状特点分为加强筋条、凸台、口盖孔及减轻槽等。这些结构在几何造型上都可归结为某类特征<sup>[5]</sup>。将壁板外形曲面展开

为平面后,需要进一步确定壁板结构特征在展开平面的对应位置,这一过程称为结构特征的映射。事实上,壁板展开可以理解为壁板设计数模从外形曲面向其展开面的映射过程。结构特征的映射精度,直接影响整体壁板的展开质量。这一环节的难点体现在两方面:一是壁板结构特征信息的准确完整辨识,二是精确的映射算法。

(3)构建板坯数模。板坯建模是在外形曲面展开和结构特征映射的基础上,将整体壁板的结构以外形展开面为基准重现出来的过程。一般情况下,板坯建模过程与壁板零件的设计建模过程类似,建模顺序和布尔运算类型基本一致。不同之处主要体现在两方面:一是构建结构所依据的特征信息,设计建模时位于理论外形曲面上,板坯建模时位于外形展开面上;二是由于基准曲面的不同,部分特征的构造方法需要适当调

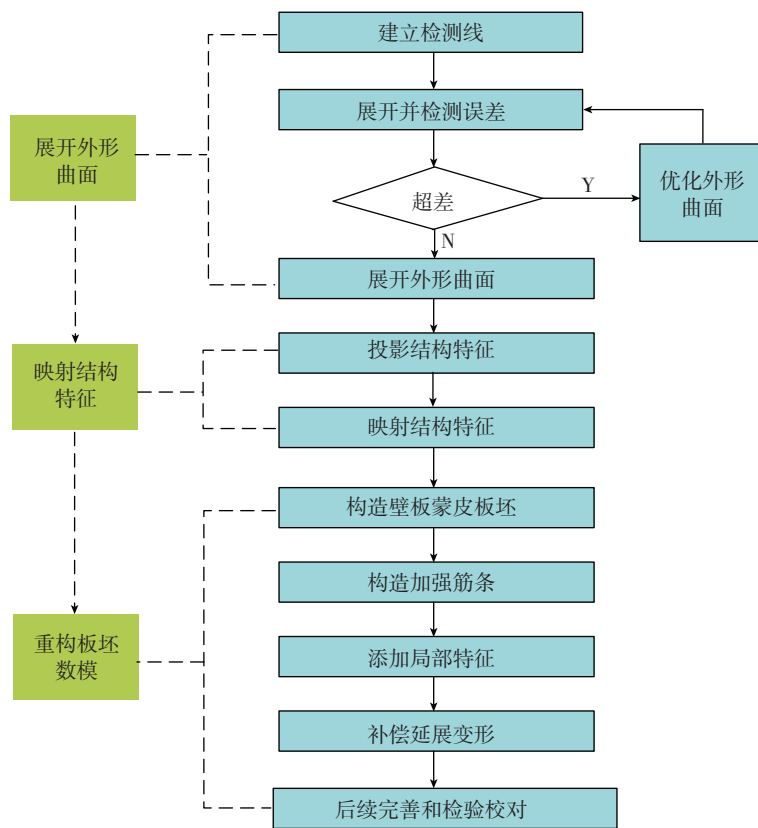


图1 整体壁板展开建模流程

整,否则无法保证其形位精度。

## 展开建模关键问题及解决方案

由于尺寸结构和加工工艺的特殊性,大型双曲率高筋整体壁板展开建模过程复杂繁琐,影响建模质量的因素多。本文将详细分析展开建模过程中常出现的几个关键技术问题,并给出基于 CATIA\_V5 软件的解决方案。

### 1 关键问题

#### 1.1 大尺寸、曲率变化复杂外形曲面展开问题

整体壁板的制造精度要求高,展向长度 20m 左右的整体壁板,制造允许误差通常只有 2~3mm。尽管整体壁板外形曲面曲率不大,但其尺寸大、曲率变化复杂的特点,导致无论采用何种曲面展开方法,都容易出现展开误差过大的情况,导致最终建立的壁板板坯数模超差。

#### 1.2 变厚度壁板蒙皮板坯构造问题

在壁板板坯数模中,厚度无规则变化的壁板蒙皮,蒙皮内形展开面相对于外形展开面仍然为空间曲面。构造变厚度壁板蒙皮板坯的传统方法是手工在内形面上取有限个点,逐个测量各点处壁板蒙皮的厚度值;然后基于这些厚度值在外形展开面上重构点位,进而拟合出内形展开面;最后以外形展开面和内形展开面为基准,结合映射在外形展开面上的蒙皮结构特征信息,构造出蒙皮板坯。上述过程操作繁琐,工作强度大,且容易出错。此外,由于手工选取点位的密度低,构造的内形展开面精度有限。

#### 1.3 加强筋条的展开问题

和壁板蒙皮融为一体的加强筋条,不但截面特征复杂,而且端面距壁板外形曲面的距离大。例如,国内在研某型机整体壁板加强筋条端面距其外形曲面的距离超过 100mm。按照通用方法对加强筋条进行展开

建模时,应提取筋条的特征信息并映射到壁板外形展开面上,然后构造筋条板坯。然而,较大的突出高度往往给筋条特征映射和板坯构造过程带来较大的误差,导致板坯构造精度难以保证。例如在母壁板中,加强筋条突出壁板外形曲面 103mm,直接按照外形曲面与其展开面的几何映射关系展开该加强筋条,会产生超过 2mm 的误差。因此,需要探索适用于壁板高筋结构的展开建模方法。

#### 1.4 壁板喷丸成形过程的延展问题

以往的壁板展开建模只是将壁板设计数模简单地展开为板坯,而不考虑成形过程中的塑性变形。实际上,在喷丸成形过程中,弹丸喷击壁板表面,迫使其产生蠕变,因而壁板成形后有不同程度的延展变形。随着整体壁板尺寸的不断加大,在累积效应的影响下,喷丸延展问题已成为制约整体壁板无余量装配的最大障碍<sup>[1]</sup>。此外,由于环境温度、成形工艺参数、弹丸打击速度以及材料本身应力状态等因素的交错影响,壁板延展变形的随机性大,变形量难以精确计算。合理的喷丸延展计算和补偿方法,对于提高壁板成形精度、实现无余量装配具有重要工程意义。

## 2 解决方案

#### 2.1 大尺寸、曲率变化复杂曲面展开误差的控制

为有效控制外形曲面的展开精度,展开之前,应对其进行展开误差检测和必要的优化处理,行之有效的

方法如下:

(1)检测展开误差。如图 2 所示,提取外形曲面的边线和对角线作为检测线,选用合适的几何方法或力学方法展开外形曲面,将检测线映射到外形展开面上得到展开检测线。外形曲面展开的具体方法可参考文献[4-5]。然后,对比检测线展开前后的长度,如果长度差在误差允许范围内,可直接基于该展开面进行壁板板坯建模;否则,需要对外形曲面进行优化处理。

(2)优化外形曲面。CATIA 软件提供的多种曲面处理功能,包括多截面曲面、网格曲面以及通过点云构造曲面等,都可以用于外形曲面的优化。这里以多截面曲面方式为例,介绍优化外形曲面的具体方法。首先,在外形曲面上沿某一方向提取一组平行曲线并光顺;然后,以外形曲面上垂直于上述方向的两条边线为引导线,用光顺后的曲线通过多截面曲面操作拟合出新的曲面;最后,展开该曲面并检测展开误差,如果不超差,用该曲面代替原外形曲面。否则,继续对该曲面进行优化处理,直到其展开误差满足工艺要求。

#### 2.2 变厚度壁板蒙皮板坯构造过程优化

采用编程手段实现繁琐工艺过程的自动化,是现代工艺技术发展的必然趋势。利用 CATIA\_V5 宏进行二次开发,以指定的密度提取壁板蒙皮内形面上的点位,形成内形面点

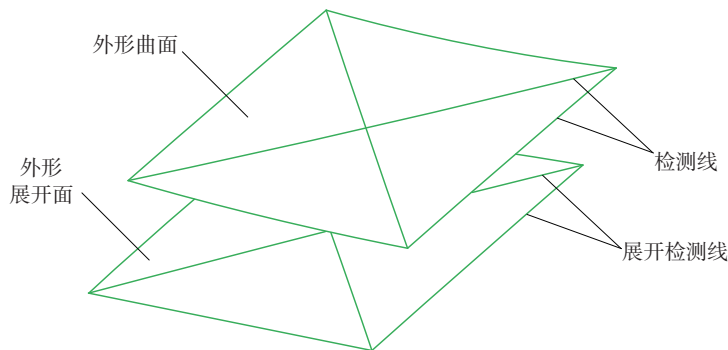


图2 外形曲面展开误差的检测

云;然后自动测量各点位处壁板本体的厚度并将其映射到外形展开面上,基于映射厚度构造展开点云,进而拟合出内形展开面;最后手工构造壁板蒙皮板坯。编程过程中,可根据内形面的展开精度要求设定点位的提取密度。

上述过程操作简单,通用性好,适用于任意结构壁板蒙皮板坯的建立;效率高、准确性好,能够有效避免手工建模强度大和容易出错的缺陷。

### 2.3 加强筋条的展开

加强筋条的展开实际上是筋条结构沿外形展开面的铺开过程。这一过程中,筋条之间的距离会产生变化,但其尺寸以及和基准面的位置关系应保持不变。基于这一原则,下面介绍一种基于坐标系转换的加强筋条展开方法。

(1)将加强筋条的基准线映射到外形展开面上,形成展开基准线。

(2)提取加强筋条截面草图与基准线的交点并映射到展开基准线

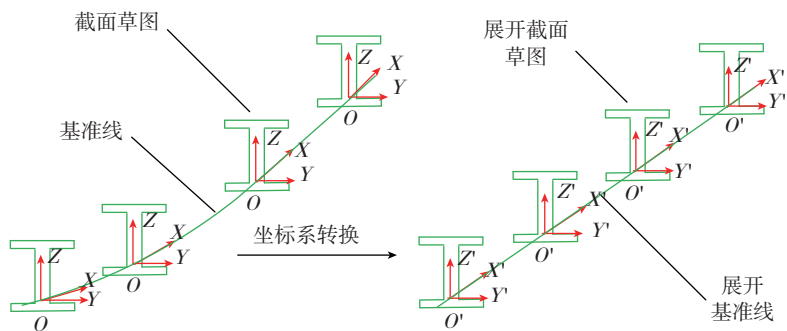


图3 高筋结构截面草图的坐标系转换

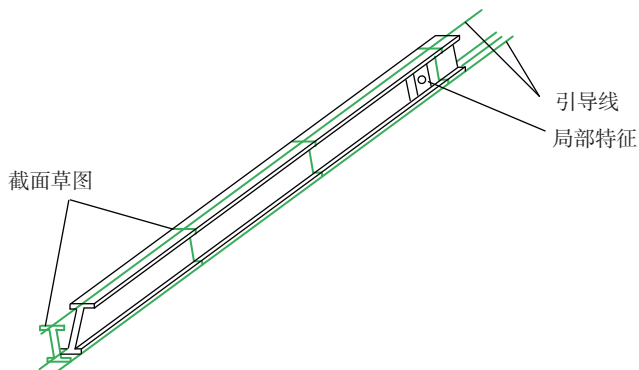


图4 高筋展开板坯拉伸示意图

上,分别在基准线和展开基准线的各交点处建立局部笛卡尔坐标系,对应坐标系的坐标轴方向协调一致。

(3)将所有截面草图通过各自的局部笛卡尔坐标系转换展开基准线的对应位置,得到展开截面草图,如图3所示。

(4)以展开基准线为引导线,通过展开截面草图拉伸出加强筋条的基础特征,然后添加孔位、凸台和斜边等局部特征,得到加强筋条的展开板坯,如图4所示。

### 2.4 壁板延展变形的补偿修正

由于影响壁板喷丸延展变形的因素交错复杂,需要综合考虑才能建立较为准确的延展变形计算方法。计算喷丸延展变形主要有解析计算、有限元分析和试验测量3类方法<sup>[1]</sup>。解析计算和有限元分析两种方法还不够成熟,试验测量是目前相对可行的方法。针对壁板延展变形随机性大,影响因素复杂交错的特点,应对测量得到的离散数据进行合理的数值处理,保证其连续性。

获得壁板喷丸的延展变形值后,就可以在CATIA\_V5软件中对壁板展开板坯进行补偿修正。基于延展变形值构造边界条件域,进而采用形状渐变操作,将壁板展开板坯由原始边界条件域转换到补偿边界条件域中,即可得到补偿板坯。需要强调的是,测量和补偿壁板延展时,应充分考虑装配工艺过程,优先保证壁板各基准面和关键特征处的精度。

## 结束语

(1)快速准确的整体壁板展开建模方法对于缩短飞机研制周期,保证飞机气动性能以及促进现代飞机制造技术的发展具有重要意义。

(2)目前的展开建模过程工艺性差,导致了建模质量差、加工周期长和成本高等问题。探究展开建模过程的工艺优化方法,是完善整体壁板展开技术的一个重要途径。

(3)整体壁板展开建模过程存在大量的重复性手工操作,不但展开周期长,而且容易出错。开发整体壁板展开建模专用软件,是进一步提高整体壁板展开效率的工作重点。

## 参考文献

- [1] 王永军,陈龙辉,乔明杰,等. 大型客机机翼壁板喷丸成形延展问题研究与分析. 航空制造技术,2012(17):32-35.
- [2] 曾元松,黄遐. 大型整体壁板成形技术. 航空学报,2008,29(3):721-727.
- [3] 康小明,马泽恩,林兰芬. 不可展曲面近似展开的四边形网格等面积法. 西北工业大学学报,1998(16):155-158.
- [4] 孙申新. 不可展曲面近似展开和内部结构映射方法的研究[D]. 西安:西北工业大学,2004.
- [5] 张贤杰,王关峰,王俊彪. 基于特征映射的超临界机翼整体壁板板坯快速建模技术研究. 机械科学与技术,2006,25(10):1209-1211.
- [6] Wang T, Platts M J. A computer-aided blank design method for the peen forming process. Journal of Materials Processing Technology, 2002(122):374-380.

(责编 叶枫)