

大型飞机整体壁板展开关键技术研究

彭艳敏, 杨亮, 王思蕾, 罗泉

(航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安 710089)

摘要: 本文通过对整体壁板展开进行误差分析, 介绍了影响曲面展开尺寸精度的主要因素。同时研究展开过程对展开精度的影响, 分析曲面离散度、展开基点对展开精度的影响。

关键词: 整体壁板; 展开精度; 展开误差; 误差评价

1 引言

一体式壁板结构采用了外蒙皮与长桁骨架相结合的形式, 具有重量轻、刚性好和气密性好的优点, 可满足现代飞机轻量化、长寿命和高可靠性等技术要求。同时, 整体壁板的外形结构更多地考虑了飞机的气动特点, 为飞机相关技术攻关提供了新的思路 and 方向, 对比传统的铆接壁板承力结构, 一体式壁板结构的优势非常明显。一体式壁板结构正逐步成为现代大型飞机的主流承力结构, 满足其复杂外形和结构的成形技术也成为现代先进飞机的关键制造技术之一。

整体壁板目前最常用的加工方法是先在三维建模软件(如 NX、CATIA 等)中对壁板数模进行展开计算, 建立满足加工要求的板坯工艺模型。然后用三坐标数控机床加工出展开数模, 最后采用喷丸工艺完成飞机气动所需的最终外形。

与直接采用五坐标数控机床加工的传统方法相比, 这种方法具有很多优点。首先, 其使用的预拉伸板毛坯较薄, 切削量较小, 铣削加工设备只需要三坐标机床即可。其次, 喷丸成型加工工艺附带强化结构的功能, 可以优化机械加工剥离金属后微观上的组织缺陷, 并预留残余压应力, 从而极大地提高零件的抗疲劳特性。因其具有成本低、零件表面质量优异等优点, 在实际生产中普遍采用这种方法, 以节省数控机床资源, 并避免材料浪费。图 1 为大型飞机机翼壁板的制造流程示意图。



图 1 大型飞机机翼壁板的制造流程示意图

2 展开误差分析

现代飞机多数采用超临界翼型, 其机翼曲面一般为不可展曲面。展开方法通常基于面积不变机理, 即保证展开前后其质量均不发生变化, 针对工程所提出的相关要求, 通过几何映射的方法对机翼进行近似展开, 而近似展开法存在一定的误差。对展开误差进行分析评估, 以获得相对更可靠的展开平面尺寸, 在航空航天领域尤为重要^[1-2]。

2.1 影响壁板曲面展开尺寸精度的主要因素

(1) 曲面优化所引起的误差。为了提高待展曲面的展开质量, 需要对曲面进行降阶、降次和光顺处理, 但这些优化处理会产生一定程度的曲面展开误差。

(2) “以平代曲”。曲面离散化引起的误差与离散网格的大小有关, 离散网格越大, 曲面的展开误差越大, 离散网格越小, 曲面的展开误差越小。

(3) 不同基点造成的累积误差, 在壁板展开过程中由于选择的基点有差异, 导致累计误差大大增加。

2.2 壁板曲面展开误差分析

不可展曲面近似展开成平面封闭区域 D。要确定图形 D 展开的准确性, 仅有“面积不变”条件是不够的, 在面积和实形两个条件中, 后者是充分的, 前者是必要的。因此, 仅以相对面积误差来评价近似展开的精度是不全面的, 有时甚至会得出错误的结论, 如图 2 所示。

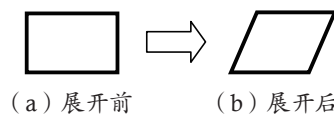


图 2 曲面展开前后的形状变化

当进行曲面展开误差分析时,通常采用曲面 u 、 v 向参数网格法,该方法基于曲面参数线进行网格划分,通过测量展开后网格的变化情况进行分析。一般来说机翼壁板的曲率变化较小,可不考虑塑性变形误差,为对展开前后结果进行准确误差分析,可从参数曲线长度、面积和形状三个方面进行误差分析。

(1) 相对长度误差。

对曲面所有参数曲线相对长度误差的均值进行衡量。设划分参数曲线的条数为: u 向 m 条, v 向 n 条。相对长度误差定义公式如公式(1)~(3)所示。

$$\delta L_u = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|\bar{L}_u - L_u|}{L_u} \quad (1)$$

$$\delta L_v = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{|\bar{L}_v - L_v|}{L_v} \quad (2)$$

$$V_L = \frac{\delta L_u + \delta L_v}{2} \quad (3)$$

式中: L_u 为被展曲面上 u 向第 i 条参数曲线长度; $\bar{L}_u$ 为展开平面上 u 向第 i 条参数曲线长度; L_v 为被展曲面上 v 向第 j 条参数曲线长度; $\bar{L}_v$ 为展开平面上 v 向第 j 条参数曲线长度; V_L 为平均相对长度误差。

(2) 相对面积误差。

相对面积误差反映曲面展开前后面积的变化情况,其定义如公式(4)所示。

$$V_S = \frac{|\bar{S} - S|}{S} \quad (4)$$

式中: S 为被展曲面面积; $\bar{S}$ 为展开面面积; V_S 为相对面积误差。

(3) 形状误差。

形状误差反映了曲面展开后的对角线与展开前对应曲线上的曲线在长度上的差异。若选择不同的展开基点,则展开后的对角线长度也会发生相应的改变,而在曲面上与之对应的曲线长度是固定的,二者可通过映射关系转换得到。形状误差定义如公式(5)所示。

$$\Delta D = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \frac{|\bar{D}_i - D_i|}{D_i} \quad (5)$$

式中: t 为对角线数量; $\bar{D}_i$ 为展开平面图第 i 条对角线长度; D_i 为被展曲面上对应第 i 条对角线长度; ΔD 为形状误差。

(4) 综合误差。

$$\varepsilon = \gamma_1 \Delta L + \gamma_2 \Delta S + \gamma_3 \Delta D \quad (6)$$

依照工程实际经验,式中: ε 为综合误差; γ_i 为各单项误差的加权($\sum_{i=1}^3 \gamma_i = 1$); $\gamma_1 = 0.3$, $\gamma_2 = 0.3$, $\gamma_3 = 0.4$ 。

3 展开过程对展开精度的影响研究

3.1 壁板曲面离散度对展开精度的影响

在进行曲面展开时,应先对其进行网格划分,通过离散参数化网格对曲面作相应处理。其中,网格尺寸对展开精度影响较大。现以某型机翼下壁板为研究对象,深入探究曲面离散度与展开误差之间的关系(见表1)。

表 曲面网格化展开基准线长度尺寸变化(单位: mm)

基准名称	展开前尺寸	展开后尺寸(网格: $u \times v$)		
		20×20	30×30	40×40
1号长桁	8 434.575	8 433.853	8 434.091	8 434.221
2号长桁	8 013.280	8 012.998	8 013.051	8 013.097
3号长桁	7 585.043	7 585.010	7 085.029	7 085.035
4号长桁	7 020.107	7 019.991	7 020.051	7 020.087
5号长桁	6 554.932	6 553.543	6 553.752	6 553.905
6号长桁	4 926.325	4 925.758	4 925.963	4 925.002
7号长桁	2 994.447	2 994.032	2 994.102	2 994.250
1号肋	1 432.074	1 431.761	1 431.914	1 431.952
2号肋	1 444.219	1 443.761	1 443.812	1 444.058
3号肋	1 332.865	1 332.775	1 332.825	1 332.953
4号肋	1 333.745	1 333.668	1 333.690	1 333.925
5号肋	1 331.774	1 331.713	1 331.715	1 331.721
6号肋	1 328.343	1 328.298	1 328.302	1 328.319
7号肋	1 328.565	1 328.529	1 328.543	1 328.546
8号肋	1 327.683	1 327.633	1 327.635	1 327.655
9号肋	1 325.372	1 325.271	1 325.297	1 325.309
1号对角线	8 556.722	8 556.058	8 556.203	8 556.331
2号对角线	8 562.024	8 561.089	8 561.251	8 561.352

通过曲面网格化展开基准线长度尺寸变化表可知,展开误差随着曲面离散程度减小而增大;反之,展开误差减小如

图 3a 所示。若离散程度增加,则会占用大量的系统资源并且增加相应的时间成本;反之,资源占用率及时间成本将会降低,如图 3b 所示。

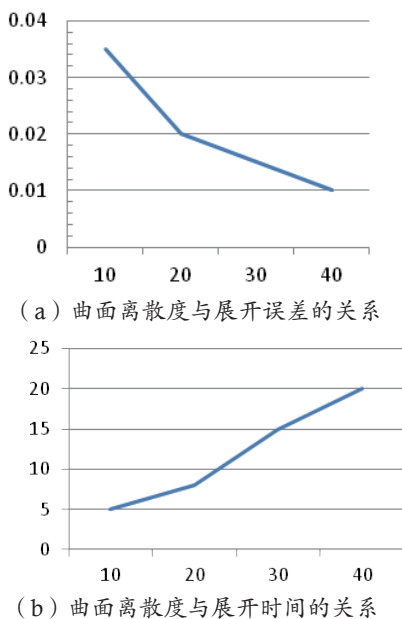


图 3 曲面离散度与展开误差、展开时间的关系

3.2 展开基点对展开精度的影响

进行曲面展开时首先应该确定基点位置,该点作为展开过程的起始点,不同的起始点将会在曲面展开后产生不同的尺寸及形状误差。其与展开曲面的网格划分数量等因素无关^[3]。因此,研究基点位置对展开误差的影响意义重大。基于单一变量原则改变基点位置,来分析其对展开精度的影响并确定出最优基点位置^[4]。

首先对被展曲面作网格划分处理,网格数量($u \times v$)共计: 12×12 , 分别在基点(1, 1), (2, 2), (3, 3), ..., (11, 11)展开的结果,如图 4 所示。

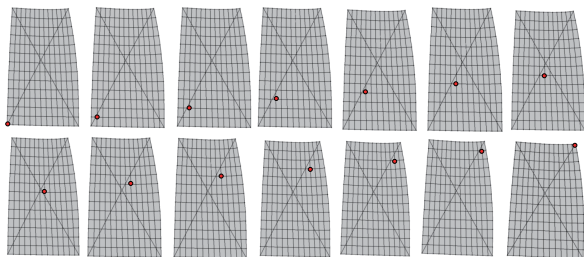


图 4 不同基点对展开形状的影响

经分析可知,基点位置的选择不同对展开图的形状误差影响最大,对面积误差的影响较小,受影响最小的是网线长度。图 5 所示为 11 个基点展开的形状误差曲线。

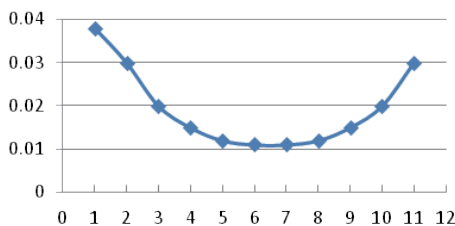


图 5 不同基点展开形状误差曲线

由图 4、图 5 可得以下结论,展开基点选择在展开曲面几何中心处时,形状误差最小。展开基点选择在展开曲面四个端点处时,形状误差较大。

综上所述,在进行曲面展开时应优先选择基点位于几何中心位置;如果该曲面是对称结构,应优先将基点设置在对称面上;如果曲面中部分区域曲率变化明显,基点的确定原则应保证该区域首先进行展开。

4 结语

本研究深入分析了不同因素对曲面展开尺寸精度的影响,分别从相对长度、相对面积以及形状误差变化三个方面进行对比分析,开展了整体壁板曲面展开误差相关研究工作。其中,曲面离散度影响展开精度的研究表明:离散程度越高,则消耗的时间成本越大,且会占用大量的系统资源,尤其是展开误差也将大大增加。通过对基准点位置与展开精度相互关系进行研究,可以得到基准点的优先位置,为保证形状误差最小,应优先将基准点位置确定在几何中心处。此外,基准点位置布置在端点处时,会带来较大的形状误差。

壁板展开是整个壁板制造流程的关键,也是喷丸成型的基础。针对飞机整体壁板展开问题的研究,可相应简化为曲面展开的问题,展开过程所涉及的精度问题将直接决定壁板展开的准确度。合理的控制曲面离散度,并确定最优的基点位置,将大大提高曲面展开的精度。

参考文献

- [1] 毛昕, 梵文莹. 不可展曲面近似展开精度的研究 [J]. 工程图学学报, 1988(09): 65-66.
- [2] 毛昕, 毛普元等. 自由曲面近似展开及误差分析系统 [J]. 机械设计与制造, 2007(12): 201-202.
- [3] 毛昕. 曲面片的可展度及其最佳展开基点 [J]. 工程图学学报, 1998(11): 71-72.
- [4] 张冬娟, 李明哲等. 多点成形板类件自由曲面展开尺寸误差分析 [J]. 塑性工程学报, 2005(12): 25-26.