

引文格式: 胡建华, 张天杨, 汪冠宇, 等. 基于 CATIA 的飞机壁板展开软件开发 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(11): 98-103.

HU Jianhua, ZHANG Tianyang, WANG Guanyu, et al. Development of deployment software for aircraft panels based on CATIA[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(11): 98-103.

基于 CATIA 的飞机壁板展开软件开发

胡建华¹, 张天杨², 汪冠宇¹, 江剑成², 胡永祥², 何雪婷¹

(1. 中国商飞上海飞机制造有限公司, 上海 200436;

2. 上海交通大学机械与动力工程学院机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

[摘要] 针对航空领域整体壁板的高效展开需求, 首先建立了一套复杂特征的重建方法, 完善了复杂壁板展开的理论基础, 进而基于曲面展开方法和本文提出的特征重建方法, 使用 MATALB 软件对 CATIA 进行二次开发, 搭建了一套飞机壁板展开软件。以某机翼壁板典型验证件为例, 对软件的展开精度进行了验证, 结果表明, 展开毛坯数模的形状与尺寸准确。

关键词: 壁板展开; 特征映射; 特征重建; CATIA; 二次开发

Development of Deployment Software for Aircraft Panels Based on CATIA

HU Jianhua¹, ZHANG Tianyang², WANG Guanyu¹, JIANG Jiancheng², HU Yongxiang², HE Xueting¹

(1. COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

[ABSTRACT] Aiming at the requirements of efficient deployment of integral panel in aviation field, this paper first establishes a set of complex feature reconstruction method and improves the theoretical basis of complex panel deployment, and then uses MATALB software to redevelop CATIA and build a set of integral panel deployment software based on surface deployment method and feature reconstruction method proposed in this paper. Taking a typical verification part of a wing panel as an example, the deployment accuracy of the software is verified. The results show that the shape and size of the digital simulation of the deployment blank are accurate.

Keywords: Deployment of panel; Feature mapping; Feature reconstruction; CATIA; Secondary development

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.11.098

整体壁板具有结构效率高、气动外形先进与气密性好等突出优点, 广泛应用于飞行器的结构设计中, 其几何尺寸大、型面曲率小、结构复杂, 此类大型整体构件的制造是一个难点。

整体壁板通过壁板展开获取初始毛坯, 再将毛坯成型至目标形状。因此, 高效、准确地获取初始毛坯是壁板高效精确成型的前提。整体壁板外蒙皮基面多为空间曲面, 决定了壁板的整体尺寸和基本形状, 其他具有厚度的结构要素附着在基面上, 构成整体壁板的空间实体。因而, 初始毛坯的获取包括基面展开和特征重建两个部分, 需要先应用曲面展开方法展开基面, 再基于展

开基面重构出包含厚度的凸台、加强筋、孔洞等结构特征。主流 CAD 软件具备曲面展开功能, 但无法实现复杂特征在展开基面上的高效重建, 西北工业大学、南京航空航天大学等高校基于 CATIA 平台开展了一些壁板展开的工作, 可以实现简单结构特征的映射, 但展开复杂整体壁板仍存在困难^[1-2]。

本文针对航空领域整体壁板的高效展开需求, 建立了一套复杂特征的重建方法, 完善了复杂壁板展开的理论基础, 进而基于曲面展开方法和本文提出的特征重建方法, 使用 MATALB 软件对 CATIA 进行二次开发, 搭建了一套飞机壁板展开软件。经过验证, 本文搭建的壁

板展开软件实现了复杂壁板的自动化展开,并且具备较高的展开精度。

1 壁板展开方法

1.1 基面展开

整体壁板初始毛坯获取需要先展开基面,再基于基面的展开结果重建出壁板特征。基面展开为空间曲面的展开问题,包括几何展开法^[3-5]和力学展开法^[6-8]。王俊彪等^[9]提出的以等面积为原则的几何展开方法,以及用于修正几何展开毛坯的弹簧质子模型^[10],实现整体壁板外蒙皮基面的展开。其算法原理如下。

如图1所示,点 A 、 B 、 C 、 D 和点 A' 、 B' 、 C' 的坐标已知,求出 $\triangle BCD$ 、 $\triangle ACD$ 、 $\triangle ABD$ 、 $\triangle ABC$ 的面积,令 $S_A = S_{\triangle BCD}$, $S_B = S_{\triangle ACD}$, $S_C = S_{\triangle ABD}$, $S_D = S_{\triangle ABC}$, $F_A = S_{\triangle B'C'D'}$, $F_B = S_{\triangle A'C'D'}$, $F_C = S_{\triangle A'B'D'}$ 。由于单元在展平前后面积不变,因此

$$S_i = F_i, i = A, B, C \quad (1)$$

对于不可展曲面,式(1)为一组矛盾方程,定义偏差 ρ 如式(2)所示。

$$\rho = (x_D, y_D) = (S_A - F_A)^2 + (S_B - F_B)^2 + (S_C - F_C)^2 \quad (2)$$

$\rho(x_D, y_D)$ 为节点 D' 坐标 $(x_{D'}, y_{D'})$ 的函数, $\rho(x_D, y_D)$ 的最小值点可由式(3)求得。

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho(x_D, y_D)}{\partial x_D} = 0 \\ \frac{\partial \rho(x_D, y_D)}{\partial y_D} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

经过代数运算,可以得到使 $\rho(x_D, y_D)$ 取得最小值的 D' 坐标公式为

$$\begin{pmatrix} x_{D'} \\ y_{D'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_A & x_B & z_C \\ y_A & y_B & z_C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{S} - \bar{S}_A \\ \bar{S} - \bar{S}_B \\ \bar{S} - \bar{S}_C \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{3}(1 + \bar{S}_A - \bar{S}_B - \bar{S}_C)$$

$$\bar{S}_i = \frac{S_i}{S_D}, i = A, B, C$$

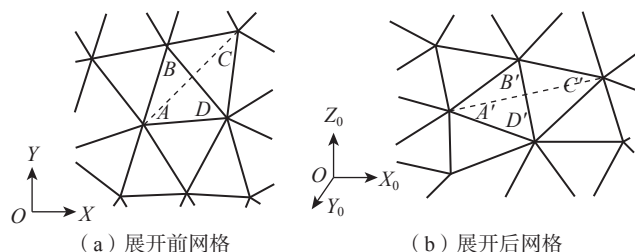


图1 局部网格展开示意图

Fig.1 Schematic diagram of partial grid expansion

与等应变展平相同,当前单元展平后,通过单元搜索方法获得下一待展平单元,构件新的空间四边形 $ABCD$,计算下一待展平的 D' 的坐标,重复这一步骤直至节点全部被展平到平面上。

由于非约束单元的存在,展平中无法控制所有单元保持等面积。非约束单元在展平后未保持等面积,认为这部分单元存在残余弹性应变,应用弹簧质子模型释放平面网格中的弹性应变,如式(5)所示,经过弹性释放后,可以获得优化后的等面积展平网格。

$$\begin{aligned} \text{Object Function} \quad \min \Delta &= \sum_{j=1}^m (s_j - S_j)^2 \\ \text{s.t.} \quad 0 &\leq |s_j - S_j| \leq \frac{S_j}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, S_j 为展开前第 j 条边在空间曲面网格中的长度; s_j 为展开后第 j 条边在空间曲面网格中的长度; m 为网格中边线总数。优化模型采用MATLAB的 $fmincon$ 函数求解。

1.2 特征重建

整体壁板通常包含多个形状复杂且不等厚的特征,需要以展开基面为基准进行重建。本文提出的特征重建方法不考虑工艺造成的材料流动,依据几何原则重建特征,展开前后特征的厚度和与基面的相对位置均保持不变。

特征重建主要包括特征识别、特征映射、特征重建3个过程。特征识别需要识别出壁板模型上的各类特征,并对特征信息进行分解;特征映射需要以基面展开的网格信息为基准,将特征底面边线映射到展开基面上,是特征重建的关键步骤;特征重建根据原特征的厚度信息以及映射后的特征底面边线,在基面上重建出完整特征。下文详细介绍特征重建的3个过程。

1.2.1 特征识别

整体壁板表面的常见特征包括凸台、加强筋等,在设计中,特征侧壁通常垂直于模型外蒙皮基面,存在极少数侧壁不垂直的特征,需要提前标记并进行手动重建。对于侧壁垂直的特征,其特征信息可以分解为底面轮廓控制点信息、底面轮廓几何类型、特征厚度信息以及特征布尔运算类型。通过读取IGES文件相应字段,获取底面轮廓控制点信息与底面轮廓几何类型;通过调用CATIA测量命令,获取特征厚度信息;由于CATIA现有测量命令只能获取复杂特征的厚度信息,无法直接判断特征相较于基面是添加还是移除,本研究提出根据特征表面法向与基面法向的夹角大小,判断特征布尔运算类型,如果特征法线方向与基面法线同向或夹角为锐角,则布尔运算类型为生成,若反向或为钝角,则布尔运算类型为切除。存储所有特征信息至MATLAB中用于后续调用。

1.2.2 特征映射

基于特征识别的信息,需要在展开基面上重构出特征底面轮廓。包括将底面轮廓投影至待展开基面、求解基面上控制点位置以及基于几何类型重构轮廓线。

特征底面轮廓投影是由于蒙皮存在一定厚度,特征底面轮廓不在待展开的基面上,因此需要将识别出的底面轮廓沿法向投影到外蒙皮所在的空间曲面上。图2所示为加强筋底面轮廓线投影到待展开蒙皮基面的示意图,这一过程基于CATIA自带的投影功能实现。

将外蒙皮所在的空间曲面定义为待展开基面,离散后基于曲面展开方法对其进行展开,根据展开前后的网格信息求解底面轮廓控制点在基面上的位置。控制点为IGES文件固有信息,其数量和相对位置关系决定特征的几何拓扑结构。控制点的展开基于几何方法,边线的控制点如果落在基面的网格节点上可以由基面展开的信息直接获取射后的边线控制点位置;如果没有落在基面网格节点上,则寻找包含该控制点的单元,以控制点与单元各节点连接成的各三角形面积比例在映射前后保持不变为原则,求解映射后的控制点位置,如图3所示。

由于直接对控制点进行拟合重构通常会使得轮廓线的几何类型发生变化,如原模型上的圆弧特征在基面上直接重构会变为普通样条曲线,如图4所示,因此需要根据特征识别获得的轮廓线几何类型拟合映射后的控制点。

1.2.3 特征重建

基于原特征厚度和映射后的底面轮廓线可以重建出壁板表面特征。根据原模型中特征上表面与外蒙皮基面的相对位置关系,将特征分为等厚特征与不等厚特

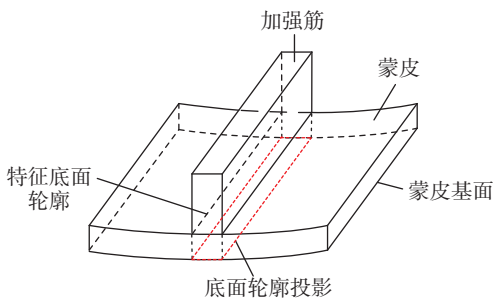


图2 特征底面轮廓线投影
Fig.2 Projection of feature bottom contour

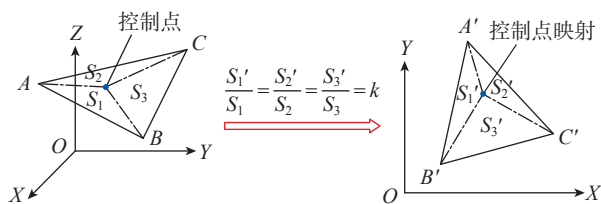


图3 控制点映射规则
Fig.3 Control point mapping rule

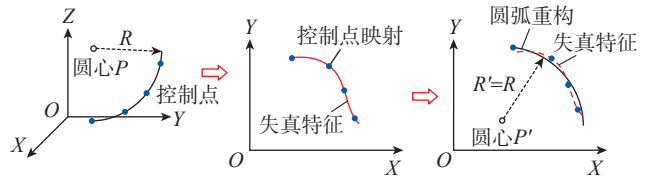


图4 轮廓线重建
Fig.4 Contour reconstruction

征,分别采用两种不同的方法进行重建。

(1) 等厚特征重建。

考虑到设计公差和加工误差,等厚特征并不要求厚度完全不变,允许一定范围内的厚度波动。当特征上表面各控制点与基面的距离偏差不高于允许的设计公差时,认为此特征为等厚特征,根据底面轮廓线进行拉伸实现重建。

(2) 不等厚特征重建。

当轮廓线各控制点与基面的距离偏差高于允许的设计公差时,认为当前特征为不等厚特征,根据原模型特征上表面控制点与基面的距离信息填充特征上表面进而重建出不等厚特征。

2 壁板展开软件开发

2.1 软件开发工具

包含多个复杂特征的整体壁板,若手动逐个重建效率较低,有必要开发一套壁板展开软件,实现壁板毛坯的高效获取,缩短加工周期。壁板展开软件基于CATIA进行二次开发^[11],使用MATLAB进行数据处理,基于IGES (Initial graphics exchange specification) 图形交换规范进行数据交互。下面简要介绍相关工具在软件开发中的作用。

2.1.1 CATIA 软件

CATIA 为建模的基本平台,模型的读取、测量,特征识别、重构和模型导出等均由CATIA实现。

2.1.2 MATLAB 软件

通过MATLAB读取模型数据,并实现基面展开、特征映射等数值计算,基于计算结果调用CATIA相关命令实现特征重构等操作。展开软件的交互界面使用MATLAB App Designer 模块开发,并打包成可执行文件。

2.1.3 IGES 图形交互规范

IGES 文件格式丰富,使用广泛,包括CATIA在内的大量CAD软件都提供IGES接口。本研究开发的壁板展开软件,将IGES文件作为CATIA与MATLAB之间信息交互和存储的标准格式,可以实现数据的高效读取、搜索和修改等操作。

2.2 软件运行逻辑

展开软件运行逻辑为:先读取待展开的目标壁板,

选取展开基面进行展开,再读取壁板表面特征,判断当前特征是否为有效特征,若为有效特征,则继续进行重建,通过特征映射算法实现特征底面边线在展开基面上的重构,最后根据厚度信息重建壁板特征;若为特殊特征,如侧边不垂直展开基面的特征、倒角特征等,则进行手动重建,完成当前特征重建后,判断当前特征编号 i 与总特征数量 N 的关系,若编号 i 小于 N ,则返回继续读取特征并进行重建,若特征编号 i 等于 N ,则说明所有特征均已完成重建,可以导出数模。图5(a)所示为软件运行逻辑框图。相应的,展开软件包括模型前处理、基面展开、特征重建3个主要模块,软件交互界面如图5(b)所示。

2.2.1 模型前处理模块

模型前处理主要包括数据清理、模型读取、表面孔洞修复、特征读取等功能。整体壁板通常会包含数个孔洞结构,在当前方法框架下,无法对此类特征进行识别,因此需要先填补相关孔洞再进行后续展开操作。特征读取通过调用CATIA相关功能,在CATIA软件界面中对特征树中的特征进行逐一读取。

2.2.2 基面展开模块

基面展开模块实现基面选取、基面离散、网格数据读取、基面展开等操作。其中,基面选取通过遍历模型特征树中的所有面,识别出面积最大的面作为基面,进行离散并导出相应的网格文件。通过MATLAB读取网格数据,基于已编写好的展开程序对离散的空间基面进

行展开。在当前的展开软件中,基面展开程序采用几何展开方法,后续可以进一步拓展,将工艺展开方法嵌入软件中,提高软件的适用范围。

2.2.3 特征重建模块

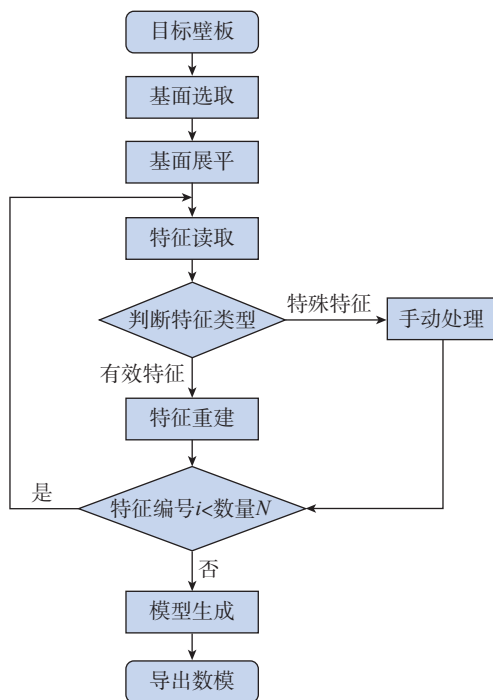
特征重建模块包含特征识别、特征底面边线重构、特征重建等操作。特征识别调用CATIA相关功能,对特征树中的特征进行逐一读取与判断,记录需要重建的特征,基于特征映射方法在展开基面上重构出特征底面边线,再根据厚度信息重建出表面特征,完成所有特征的重建后,通常就可以获得展开的毛坯。在某些特殊情况下,需要手动添加倒角等特殊特征。

此外,软件还包含操作记录界面,方便操作者使用。软件的各个按钮具有互锁功能,必须按软件逻辑顺序操作,可以减少操作失误带来的影响。最后通过MATLAB Compiler功能对软件进行打包,打包成可执行文件后即可脱离CATIA环境独立运作。

3 典型壁板展开实例

整体壁板外形多为曲率平缓的空间曲面,具有大尺寸、变曲率、变厚度等特点,同时包含筋条等多种复杂特征。图6(a)所示为某整体机翼壁板局部验证件。为验证壁板展开软件的有效性,使用展开软件对该整体壁板进行展开。选取的展开基面为壁板外蒙皮,修补基面上的两个孔洞,采用3mm三角形单元离散基面,进行基面展开、特征映射并获得展开数模,展开数模如图6(b)所示。

图7为展开前后壁板数模的厚度云图对比,可以看



(a) 软件逻辑框图



(b) 软件交互界面

图5 软件运行逻辑及交互界面

Fig.5 Logic diagram and interface of software

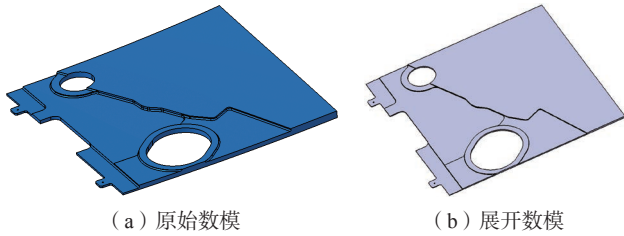


图6 壁板数模

Fig.6 Digital model of integral panel

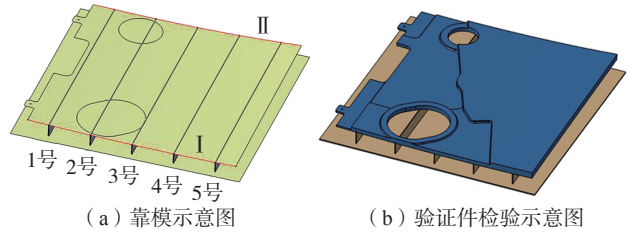
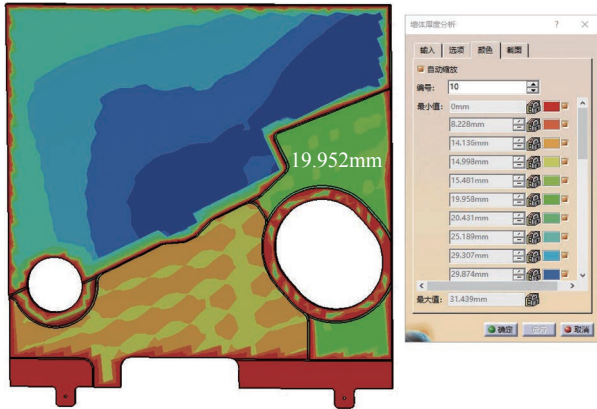
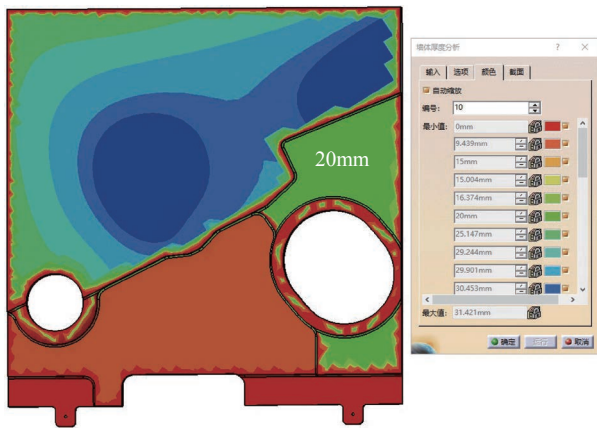


图8 验证靠模

Fig.8 Checkout module



(a) 目标壁板



(b) 展开壁板

图7 目标壁板与展开壁板厚度云图对比

Fig.7 Thickness nephogram comparison of target panel and flattened panel

到展开后的毛坯厚度与展开前基本一致,展开毛坯的厚度同样具备较高的精度。

为验证壁板成形后的精度,以目标壁板数模表面轮廓为基准,设计了图8所示的验证靠模。

图9为实际成形件和验证靠模,成形边界误差如表1所示。

按照制造相关规定,可在壁板上施加一定压力使其贴膜,在成形壁板表面的两个对角处各加载25kg承重件后,整体误差大幅降低,最大误差不超过0.5mm,基本与靠模贴合,满足精度要求,如图10所示。经测量,成

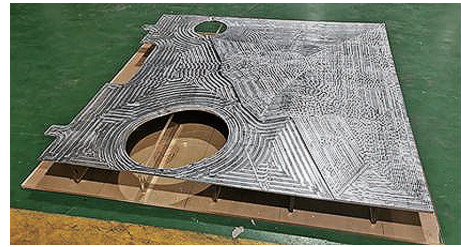


图9 成形壁板

Fig.9 Formed panel

表1 边界误差

Table 1 Boundary error

mm

靠模	I号边界误差	II号边界误差
1号	1.5	4.5
2号	6.5	8
3号	5	8.5
4号	4	7
5号	3.5	4

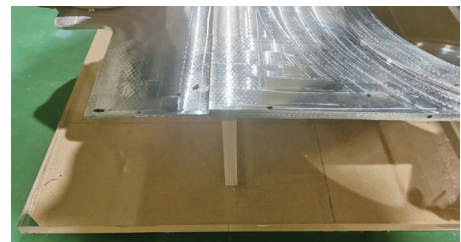


图10 加载后的贴合效果

Fig.10 Effect of fit after loading

形后零件外形尺寸及两圆孔与耳片定位孔的相对位置均满足工程要求。

4 结论

本文在已有的曲面展开方法上,进一步提出特征重建方法,并采用数学软件 MATLAB 对航空领域的主流 CAD 软件 CATIA 进行二次开发,搭建出一套壁板展开软件。该软件可以实现复杂整体壁板的基面展开和特征重构,高效获取初始毛坯并导出 CAD 数模。软件提供良好的人机交互界面,满足实用性、易用性、可拓展性等要求,并被打

包成可执行文件,可以脱离 CATIA 环境独立运作。经过验证,通过软件展开的毛坯与原模型的几何尺寸具有较好的一致性,初步满足实际工程的可靠性和精度要求。

参考文献

[1] 孙新申. 不可展曲面近似展开和内部结构映射方法研究[D]. 西安:西北工业大学, 2004.

SUN Xinshen. Research on approximate expansion and internal structure mapping method of undevelopable surface[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.

[2] 詹雯. 复杂曲面展开技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007.

ZHAN Wen. Research on pattern flattening for parts with complex surfaces[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.

[3] HINDS B K, MCCARTNEY J, WOODS G. Pattern development for 3D surfaces[J]. Computer-Aided Design, 1991, 23(8): 583-592.

[4] BENNIS C, VÉZIEEN J M, IGLÉSIAS G. Piecewise surface flattening for non-distorted texture mapping[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1991, 25(4): 237-246.

[5] CHO W, PATRIKALAKIS N M, PERAIRE J. Approximate development of trimmed patches for surface tessellation[J]. Computer-Aided Design, 1998, 30(14): 1077-1087.

[6] 詹雯, 周来水, 陈功. 一种复杂曲面展开的通用算法[J]. 机械制造与自动化, 2007, 36(1): 83-85, 87.

ZHAN Wen, ZHOU Laishui, CHEN Gong. A general algorithm of complex surface development[J]. Machine Building & Automation, 2007, 36(1): 83-85, 87.

[7] SHIMADA T, TADA Y. Approximate transformation of an arbitrary curved surface into a plane using dynamic programming[J]. Computer-Aided Design, 1991, 23(2): 153-159.

[8] YU G X, PATRIKALAKIS N M, MAEKAWA T. Optimal development of doubly curved surfaces[J]. Computer Aided Geometric Design, 2000, 17(6): 545-577.

[9] 王俊彪, 张贤杰. 基于单元等变形的复杂曲面展开算法研究[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(4): 447-449.

WANG Junbiao, ZHANG Xianjie. Research on the development algorithm of cruded surfaces[J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(4): 447-449.

[10] 王弘, 王昌凌. 基于能量模型的曲面展开通用算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(6): 556-560.

WANG Hong, WANG Changling. A general surface development algorithm based on energy model[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2001, 13(6): 556-560.

[11] 周桂生, 陆文龙. CATIA 二次开发技术研究与应用[J]. 机械设计与制造, 2010(1): 81-83.

ZHOU Guisheng, LU Wenlong. Research and application of CATIA secondary development technology[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(1): 81-83.

(上接第 97 页)

REN Yongqiang, YANG Jianguo, LUO Lei, et al. Real-time thermal error compensation based on shift of external machine coordinate system[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(14): 1243-1245.

[71] 刘明敏. 基于机械原点偏移原理的数控机床热误差补偿技术应用[J]. 电子技术与软件工程, 2019(23): 115-116.

LIU Mingmin. Application of thermal error compensation technology for CNC machine tools based on mechanical origin migration principle[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(23): 115-116.

[72] 童文利. 基于 FANUC 31i 的主轴热变形补偿方法[J]. 制造技术与机床, 2020(2): 191-194.

TONG Wenli. Based on FANUC 31i spindle thermal deformation compensation method[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2020(2): 191-194.

[73] 林志杭, 李殿新, 冯平法, 等. 一种龙门铣床误差实时补偿方法[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(7): 1035-1039.

LIN Zhihang, LI Dianxin, FENG Pingfa, et al. Real-time error compensation method for gantry milling machine[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(7): 1035-1039.

[74] 高玉平. 数控机床热误差的反馈截断式补偿研究[M]. 大连:大连理工大学, 2009.

GAO Yuping. Research on feedback truncated compensation for thermal error of CNC machine tools[M]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.

[75] 计昌柱. 数控机床热误差补偿系统研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2014.

Ji Changzhu. The research of CNC thermal error compensation system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.

[76] 柏衡. 面向机身大部件复合加工机床的误差补偿技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.

BAI Heng. Research on error compensation technology of fuselage components compound machine tool[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[77] 吕洪杰. TH6926B 落地铣镗加工中心几何误差补偿技术及实现[D]. 长沙:湖南大学, 2016.

LÜ Hongjie. The technology and realize of geometric error compensation for the TH6926B floor boring and milling machine center[D]. Changsha: Hunan University, 2016.

[78] 胡建民. 嵌入式数控机床热误差实时补偿控制器的设计与实现[D]. 武汉:武汉理工大学, 2014.

HU Jianmin. Design and implementation of real-time thermal error compensation controller on CNC tools based on embedded[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.

[79] 崔岗卫. 重型数控落地铣镗床误差建模及补偿技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.

CUI Gangwei. Research on error modeling and compensation for heavy-duty CNC floor-typed boring and milling machine tool[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

通讯作者: 胡永祥, 副教授, 博士, 研究方向为激光加工、激光喷丸/激光冲击强化、航空自动制孔工艺与装备。

(责编 阳光)

通讯作者: 戴野, 副教授, 博士, 研究方向为电主轴技术。

(责编 阳光 晓月)