

叶片 NC 轨迹规划及测量技术研究

赵利虎 杨海成 莫蓉 杨建新

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室,西安 710072)

摘要 针对裁剪叶片曲面参数和实际边界不匹配的问题,提出了一种参数映射方法。通过对叶片曲面进行重新参数化,使一个规范化参数域与裁剪叶片实际边界相匹配,并在规范化参数域上规划刀具轨迹。同时利用规范化参数域生成等参数线,并按照弦公差方法在等参数线上规划测量点。最后经三坐标测量机测量实物,返回实际测量点与理论点进行比对,得出测量结果。

关键词 叶片 刀具轨迹 测量点规划 参数映射 弦公差

中图分类号 TP391.72; **文献标志码** A

叶片类零件在航空航天、水电、船舶行业中有广泛的用途。在航空发动机制造中各类叶片所占比重约 30%^[1],是航空发动机中的核心零件。因此,发动机叶片的设计、制造技术水平对提高航空发动机性能、缩短研制周期和降低制造费用起着重要的作用。

叶片类零件主要加工方法是数控加工。目前国外已经实现了采用五坐标数控机床螺旋铣削加工叶片,并取得了良好的加工效果。然而由于价格、技术等壁垒因素,国内对其掌握不多^[2]。西北工业大学白瑛等提出了叶片类零件四坐标高效数控加工的螺旋刀轨生成算法^[3]。吴宝海,王尚锦研究了任意曲面叶片四坐标联动平底刀端铣加工的刀位轨迹生成方法^[4]。上述文献从不同角度研究了叶片的数控加工刀位轨迹生成方法,但均未涉及裁剪叶片的高效刀轨生成方法。

在叶片形状和尺寸检测方面,三坐标测量机因其多功能、精度高和适应范围广等优点,成为目前国内国外研究的焦点^[5]。席平,孙肖霞研究了涡轮叶

片型面误差检测关键技术,采用了在叶片截面线上密集采点的方式分布测量点,虽然保证了检测精度,但是测量点太多,测量效率不高^[6]。李斌,孙忠林等人研究了螺旋桨叶片等半径测量点规划方法,但是对叶尖和叶根的测量没有给出具体方法^[7]。Koster M 依据质心定理推导出基于形状的采样算法,能按照曲率大小分布测量点,但是对于闭合曲线采用该方法效果较差^[8]。

本文通过对叶片曲面进行重新参数化,使一个规范化参数域与裁剪叶片实际边界相匹配,并在规范化参数域上规划刀具轨迹;同时利用规范化参数域生成等参数线,并按照弦公差方法在等参数线上规划测量点,输出测量点信息文件及测量机控制点信息文件;控制三坐标测量机按照给定的控制点信息测量实物,返回实际测量点与理论点进行比对,得出测量结果。

1 基于参数映射的刀具轨迹生成方法

1.1 叶片造型方法及刀具轨迹规划存在的问题

无论是整体叶轮上的叶片还是分体式叶片零件,其曲面在建模过程中一般通过蒙皮法生成。首先给出一组截面线,然后通过截面线生成初始叶片曲面。这个模型一般不是最终的模型。其叶根部分通常要以轮毂为边界进行裁剪或与榫头做布尔

2011年1月26日收到 西北工业大学研究生创业种子基金
(Z2011082)、工信部“民用飞机维修数字化辅助工具
及其应用技术研究”课题资助

第一作者简介:赵利虎(1986—),男,陕西省榆林人,硕士研究生,
研究方向:CAD、计算机集成制造技术。E-mail: zhaolihufox@163.
com。

交,并且一般会有倒角,而叶尖部分一般也要进行裁剪,从而得到设计的形状。如图 1 所示某型号叶盘上的叶片模型。

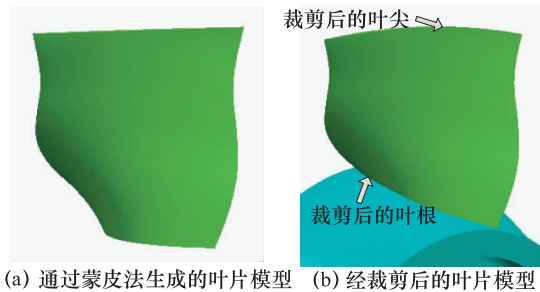


图 1 叶片模型

目前自由曲面叶片多通过多坐标数控铣的方式进行加工。传统的刀轨生成方法一般基于曲面参数,按照等参数法生成刀轨。其优点是使得刀轨与曲面边界相匹配,然而当叶片曲面经过一系列裁剪或布尔操作后,刀轨将不再与实际叶片曲面边界相匹配。这造成的问题如下:(1) 刀具有空行程,影响加工效率。(2) 刀轨深入到轮毂中,从而发生干涉,造成清根的困难。从图 2 所示在 UG 中生成的叶片刀轨,可以看出叶片顶端的刀轨不连续,影响加工效率,而叶片下端的刀轨不连续且会过切到轮毂中。

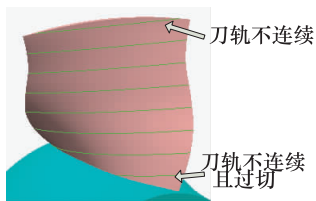


图 2 UG 生成的叶片刀轨

1.2 参数映射实现及刀轨生成方法

设沿叶片曲面径向为 v 参数方向,截面线方向为 u 参数方向。如图 3(a) 为初始叶片曲面的参数域,图 3(b) 为经过裁剪后的参数域, C_0 、 C_1 为 v 参数方向的两个边界。本文通过建立一种映射关系,使得图 3(b) 中经过裁剪后的参数域与图 3(c) 所示的规范化参数域相对应。在图 3(c) 所示的参数域上规划刀轨,这样所生成的刀具轨迹便与实际的叶片曲面相匹配。图中所示参数域均为示意图,并非真实叶片曲面参数域。

在图 3(c) 参数域中任选一点 (m, n) ,要求在图 3(b) 所示实际参数域中找到其对应点 (u, v) ,且该对应点唯一。此时 (m, n) 便与 (u, v) 之间形成了某种映射。本文给出映射关系如下:

(1) 在叶片 u 向上,由于没有经过任何操作,则 $u = (U_{\max} - U_{\min})m + U_{\min}$;

(2) 在叶片 v 向上,做线性插值,计算可得: $v = (v_1 - v_0)n + v_0$,其中 v_0 由 $C_0(m, 0)$ 计算得到, v_1 由 $C_1(m, 1)$ 计算得到。对于裁剪曲面,其边界参数关系一般是已知的。

这样便将规范化参数域(图 3(c))中每一点与经过裁剪后的参数域(图 3(b))中的每一点对应起来。完成参数映射后可以利用规范化参数域来规划等参数刀轨,效果如图 4 所示。

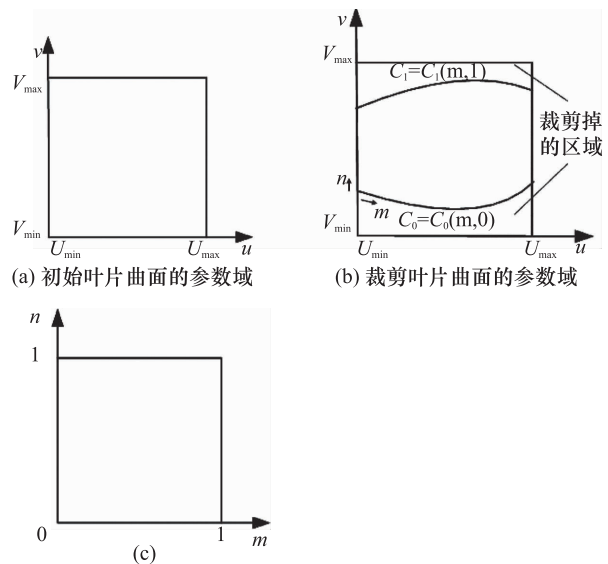


图 3 参数映射示意图

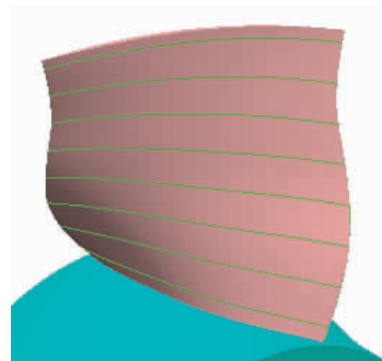


图 4 规范化参数域上生成的叶片刀轨

2 测量点规划

2.1 叶片测量点规划方法

现阶段叶片测量普遍采用截平面法在截面线上规划测量点。但是在叶根和叶尖处,得不到完整的截面线,可能造成叶片检测结果不准确。因此本文利用上文中的规范化参数域生成等参数线(如图4),在这些等参数线上规划测量点,使得测量点与叶片曲面边界相匹配。

在曲线上规划测量点一般采用等参数(等弧长或等间距)法,用等参数法在曲线上采点简单易行,为保证检测精度,通常采用密集的采点方式,但测量点过多会显著地降低测量效率。因此,研究如何在一定测量点数目下尽可能真实地反映曲线原始形状,或在保证测量精度前提下选取最少的测量点,对提高检测效率有重要意义。直观上,应选择曲线上特征突出的点为测量点。测量点的疏密应随曲线曲率变化而变化,也即在曲线曲率大的部分测量点分布应当密集,在曲率小的地方测量点分布应当稀疏。本文采用给定最大弦公差的方法在曲线上分布测量点,能够实现测量点按曲率大小分布。

2.2 按照最大弦公差分布测量点

弦公差:在曲线 $Y(t)$ 上分布若干采样点 $Y(t_i)$,以两个连续采样点 $Y(t_i)$ 和 $Y(t_{i+1})$ 为端点的直线段 L (即弦)到对应曲线弧的最大距离即为弦公差,如图5所示。

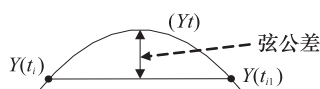


图5 弦公差示意图

按照最大弦公差对规范化参数域上生成的曲线(如图4)进行采样,可实现按曲线曲率特征进行采样,采样点在曲率大处较密集,曲率小处较稀疏。曲线采样方法如下:

设曲线 C 的数学方程为 $Y = Y(t)$, $t \in [0, 1]$, t 为曲线参数。曲线连续、一阶和二阶导数存在。直

线 L 方程由点 $(t, Y(t))$ 和点 $(t + \Delta, Y(t + \Delta))$ 确定。给定弦公差 D , ε 为一 0 到 1 之间的给定值。文中 $\varepsilon = 0.1$, t 初值为 0, 最大值为 1。

曲线采样流程如下:

Step1 取起点为 $(t, Y(t))$, $\Delta = \varepsilon$; 若 $t = 1$, 结束采样; 否则执行下一步。

Step2 若 $t + \Delta > 1$, 则取 $\Delta = 1 - t$ 使 $t + \Delta = 1$; 取下一点为 $(t + \Delta, Y(t + \Delta))$, 由两点确定直线 L 方程, 计算直线 L 与曲线 C 在区间 $[t, t + \Delta]$ 上最大距离 d , 执行下一步。

Step3 若 $d < D$, 则取点 $(t + \Delta, Y(t + \Delta))$ 为一个采样点, $t = t + \Delta$, 转 Step1。若 $d > D$, 则 $\Delta = \varepsilon/2$, 转 Step2。

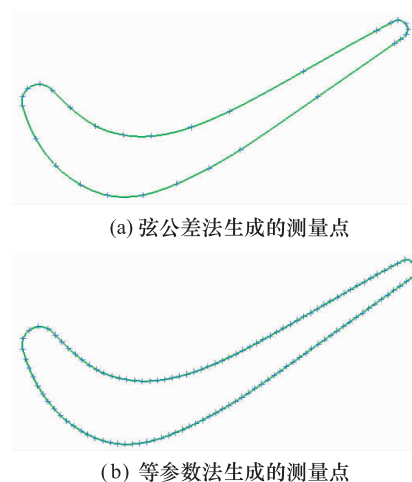


图6 UG 中生成的测量点

图6所示为采用弦公差法和等参数法在叶片等参数线上生成的测量点。利用弦公差方法生成的测量点在叶盆叶背处较稀疏,在前后缘处较密集,共有30个测量点,如图6(a)所示;利用等参数法生成的测量点分布均匀,但能使前后缘处测点分布达到与弦公差法同样的效果时,等参数法需要120个测量点,图6(b),测量点数远大于弦公差法生成的测量点数。可见弦公差法能够实现测量点按照曲率大小来分布,并且测量点数目较少,从而能提高测量机工作效率。

2.3 测量点文件输出

测量点一般需输出为常用的数据文件格式(本

文为 *.dat 文件格式),作为理论与经坐标测量机测量返回的实测点进行对比得出测量结果。要求输出点坐标和该点的法矢量,具体格式如下:

```
X1  Y1  Z1  I1  J1  K1
X2  Y2  Z2  I2  J2  K2
X3  Y3  Z3  I3  J3  K3
:
Xi  Yi  Zi  Ii  Ji  Ki
```

3 CMM 测量控制编程

3.1 测量机移动控制点文件输出

只有测量点还不能控制测量机进行测量,还需要进行测量路径规划,设置一些移动点(虚点)以及测量方向,然后根据测量机的测量移动次序把测量点及虚点编辑成测量机移动控制点数据文件(文本文件 *.dat),其格式可以根据测量机软件系统输入输出的要求进行规定。本文中虚点是通过理论测量点按法向偏置一个特定距离得到,测量方向为理论测量点的法矢量方向。下面是针对 PC-DMIS 规定的一种测量机控制点文件文本格式^[9],具体要求是每行 7 个数据,格式如下:

```
TP1  X1  Y1  Z1  I1  J1  K1
TP 2  X2  Y2  Z2  I2  J2  K2
TP 3  X3  Y3  Z3  I3  J3  K3
:
TP i  Xi  Yi  Zi  Ii  Ji  Ki
```

其中: TP 为标识, $TP = 1$ 时,点为测量点; $TP = 2$ 时,点为移动点(虚点); $TP = 0$ 时,测量结束; TP 为其他值时,该行不起作用。 X_i Y_i Z_i 为测量点的理论坐标; I_i J_i K_i 为测量点的法向矢量,测量机将沿该方向移动对该点进行测量; i 为测量点与虚点总数。

3.2 CMM 测量控制编程

CMM 测量控制编程在测量机软件系统 PC-DMIS 中实现,实现以下功能:1)将 CAD 模型文件导入到测量软件,PC-DMIS 提供了与 UG 系统的直接连接接口,可以不经任何转换导入 CAD 模型;2)工

件坐标系与 CAD 模型坐标系对齐,PC-DMIS 中可以使用 CAD = PART 功能实现工件坐标系与 CAD 模型坐标系对齐;3)读入测量机移动控制文件的数据;4)驱动测量机按照读入的数据进行操作;5)输出测量结果。

主要是利用 PC-DMIS 文件输入输出指令^[9]对测量机移动控制点文件和数据输出文件进行操作。步骤如下:

Step1:利用指令“FILE/OPEN”打开输入输出文件;Step2:利用指令“FILE/READLINE”按行读(输入)控制测量点坐标文件;Step3:如果 $TP = 1$,测量该点;并利用指令“FILE/WRITE LINE”把测量数据按格式写入测量数据输出文件;执行完后转入 step2;如果 $TP = 2$,移动到该点;执行完后转入 step2;如果 $TP = 0$,测量结束。

测量数据输出文件格式可以根据自己的需要确定。本文要求的格式是 CAD/CAM 集成软件系统 UG 可以读入的文本格式,其中文件类型为: *.dat,格式如下:

```
X1  Y1  Z1
X2  Y2  Z2
X3  Y3  Z3
:
```

3.3 误差计算

测量叶片的目的是为了评定被测叶片的误差,并做出是否合格的结论。由于本文采取的测量点规划方法得到的测量点不在同一截面上,不能计算叶片的参数,比如弦长、前缘和后缘半径。所以本文仅对叶型误差进行评定。

叶型误差 $e = \max(d(p_i', p_i) - r)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 其中 p_i' 为实测点, p_i 为理论点, r 为侧头半径, n 为测量点数目。若叶型误差 e 大于允许误差 E 则片不合格,若叶型误差 e 小于允许误差 E 则叶片合格。

本文利用 ActiveX Automation 技术,在 VC6 平台下使用基于 MFC 的 OLE(Object Linking and Embedding 对象链接与嵌入)编程方法对 Excel 进行操作。主要实现理论点数据、实测点数据以及实测点与理论点之间的误差输出至 EXCEL。数据输出至

EXCsEL 格式为:

```

X1 Y1 Z1 X1' Y1' Z1' d1
X2 Y2 Z2 X2' Y2' Z2' d2
X3 Y3 Z3 X3' Y3' Z3' d3
⋮
Xi Yi Zi Xi' Yi' Zi' di

```

X_i 、 Y_i 、 Z_i 为理论点坐标, X_i' 、 Y_i' 、 Z_i' 为实测点坐标, d_i 为实测点与理论点误差, i 为测点数。

4 运行实例

本文基于 VC++ 6.0 以 NX6.0 为平台进行二次开发, 利用 MFC 进行了界面设计, 运行实例如下。

首先启动 UG, 打开叶片 CAD 模型文件, 在 UG 菜单中选择“叶片”, 在弹出的用户界面选择相应的操作, 如图 7。

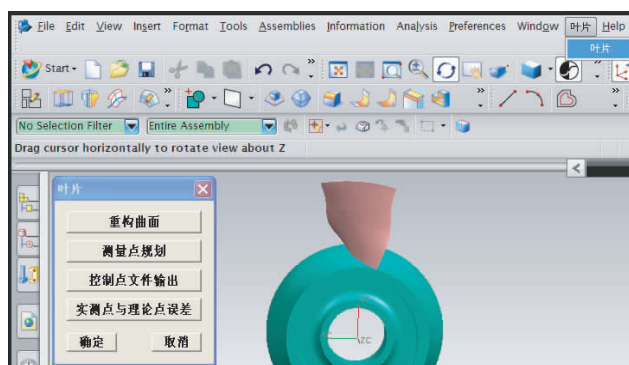


图7 用户界面

在重构曲面对话框, 分别选择叶片叶背、前缘、叶盆、后缘曲面, 实现裁剪曲面重新规范化并在规范化参数域上生成等参数刀轨。如图 8 中第一条刀轨沿着叶片的上边界, 最后一条刀轨沿着与倒角的交线, 中间的刀具轨迹在这两条刀轨中均匀过渡。

在测量点规划对话框(图 9), 可以选择等参数线数量、起始百分比、弦公差等参数来生成测量点, 最后输出测量点信息文件(*.dat), 数据格式要求见 2.3 节。

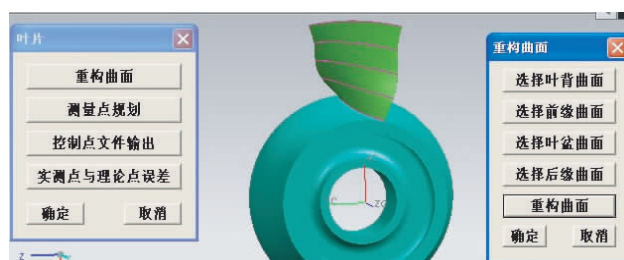


图8 重新规范化参数域生成的等参数刀轨

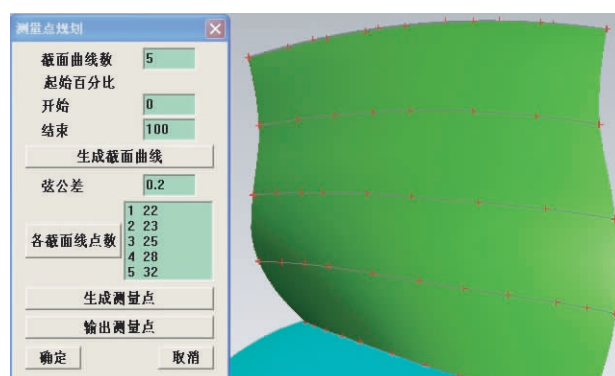


图9 按照弦公差在等参数线上生成测量点

控制点文件生成对话框(图 10)通过读入理论测量点并按理论测量点法向偏置一定距离生成移动点(虚点), 再将测量点和移动点按一定次序输出为测量机移动控制点文件(*.dat), 数据格式要求见 3.1 节。

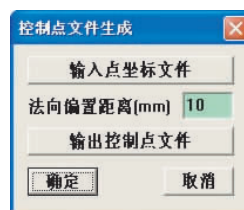


图10 控制点
文件输出

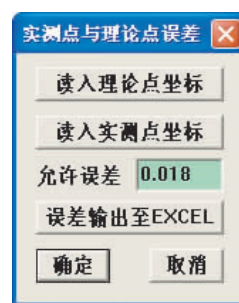
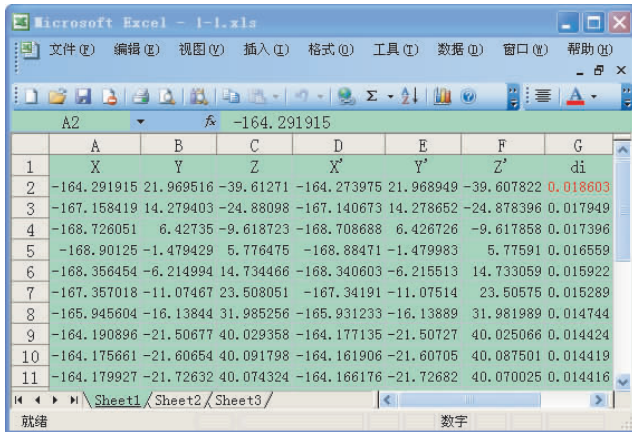


图11 实测点与
理论点误差

实际测量点与理论点误差对话框(图 11)通过读取理论点数据文件和实际测量点数据文件, 计算实测点和理论点的误差, 并按照 3.3 节的输出格式将结果输出至 EXCEL 文件, 同时用红色显示超过允许误差的数据, 图 12。



	A	B	C	D	E	F	G
	X	Y	Z	X'	Y'	Z'	di
1	-164.291915	21.969516	-39.61271	-164.273975	21.968949	-39.607822	0.018603
2	-167.158419	14.279403	-24.88098	-167.140673	14.278652	-24.878396	0.017949
3	-168.726051	6.42735	-9.618723	-168.708688	6.426726	-9.617858	0.017396
4	-168.90125	-1.479429	5.776475	-168.88471	-1.479983	5.77591	0.016559
5	-168.356454	-6.214994	14.734466	-168.340603	-6.215513	14.733059	0.015922
6	-167.357018	-11.07467	23.508051	-167.34191	-11.07514	23.50575	0.015289
7	-165.945604	-16.13844	31.985256	-165.931233	-16.13889	31.981989	0.014744
8	-164.190896	-21.50677	40.029358	-164.177135	-21.50727	40.025066	0.014424
9	-164.175661	-21.60654	40.091798	-164.161906	-21.60705	40.087501	0.014419
10	-164.179927	-21.72632	40.074324	-164.166176	-21.72682	40.070025	0.014416
11							

图 12 实测点与理论点误差 EXCEL 输出

5 结论

本文针对裁剪叶片曲面参数和实际边界不匹配的问题,提出了一种参数映射方法,通过对裁剪叶片曲面进行重新参数化,使重新规范化的参数域与裁剪叶片实际边界相匹配,并在规范化参数域上规划刀具轨迹,该方法能够使刀轨与叶片曲面边界相匹配,减少了冗余刀轨,提高了加工效率。同时利

用规范化参数域生成等参数线,并按照弦公差在等参数线上规划测量点,使得测量点按照曲线的曲率特征分布,能很大程度地减少测量点数目,提高测量机效率。最后经三坐标测量机按照给定的控制点文件信息测量实物,返回实际测量点与理论点进行比对,并实现了在 EXCEL 中输出比对结果。

参 考 文 献

- 1 刘维伟,张定华,史耀耀,等. 航空发动机薄壁叶片精密数控加工技术研究. 机械科学与技术,2004;23(3):329—331
- 2 件高升,卜 昆,单晨伟,等. 叶片螺旋铣加工刀位计算研究. 机床与液压,2006;(4):67—69
- 3 白 璐,张定华,刘维伟,等. 叶片类零件四坐标高效螺旋数控编程方法研究. 机械科学与技术,2003;22(2):177—180
- 4 吴宝海,王尚锦. 任意曲面叶片四坐标数控加工刀位轨迹的生成方法. 西安交通大学学报,2004;38(1):64—67
- 5 李 明,陈其伟,顾 煜. 三坐标测量参数化脱机编程技术的应用. 汽车工艺与材料,2002;(03):20—21
- 6 席 平,孙肖霞. 基于 CAD 模型的涡轮叶片误差检测系统. 北京航空航天大学学报,2008;(10):1159—1162
- 7 李 斌,孙忠林,彭芳瑜,等. 叶片零件在线检测测点规划问题研究. 中国机械工程,2008;(05):540—542
- 8 Koster M. Curvature-dependent parameterization of curves and surface. Computer-Aided Design,1991;23(8):569—579
- 9 HEXAGON. PC-DMIS 参考手册. 海克斯康公司(青岛),2009

Research on Tool Path Planning for NC Machining and Measurement Technology of a Blade Surface

ZHAO Li-hu, YANG Hai-cheng, MO Rong, YANG Jian-xin

(Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China)

[Abstract] For the problem that the parameter of trimmed blade surface does not match the actual boundary, a parameter mapping method is proposed. The parameter field is mapped on to a new normalized one, so that the normalized parameter field matches the actual boundary, meanwhile planning the tool path in the normalized parameter field. Parametric curves in the normalized parameter field and planned the measure-points on parametric curves according to the chordal tolerance is generated. Finally, the result measured by the CMM and compare it with the theoretical points is obtain.

[Key words] blade tool path measure-point planning parameter mapping chordal tolerance