

整体叶盘叶片型面 CMM 测量 路径规划技术*

CMM Measurement Path Planning Technology for Blade Surface of Blisk

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 蔺小军 李宜明 李政辉 高春



蔺小军

西北工业大学高级工程师, 硕士生导师, 航空宇航制造工程学博士。主要研究方向为精密几何量测量技术、难加工材料高速高效切削技术以及 CAD/CAM。有丰富的复杂零件多坐标 NC 编程经验, 长期从事精密测量、逆向制造以及航空发动机复杂零部件的多坐标数控加工机理、工艺技术和复杂类零件的关键工装设计及制造系统开发与应用。承担多项科研任务, 发表学术论文 40 余篇, 申报专利 10 余项, 获国防科技进步一等奖 1 项。

整体叶盘是将叶片和轮毂做成一个整体, 具有重量轻、推重比大、零

由于整体叶盘结构复杂, 叶片型面为复杂自由曲面, 扭曲度大, 加工精度要求高, 相邻叶片之间的通道深而窄、开敞性差, 因此造成整体叶盘制造相对单叶片困难, 相应也为其测量增加了难度。测量机对叶盘型面进行测量, 首先要进行路径规划, 路径规划的好坏决定 CMM 测量的效率和有效性。

件数量少等一系列优点, 因此在先进航空发动机中的应用越来越广泛。整体叶盘分为开式和闭式两类, 如图 1 和图 2 所示。由于整体叶盘结构复杂, 叶片型面为复杂自由曲面, 扭曲度大, 加工精度要求高, 相邻叶片之间的通道深而窄、开敞性差, 因此造成整体叶盘制造相对单叶片困难, 相应也为其测量增加了难度。采用三坐标测量机 (Coordinate Measuring Machine, CMM) 测量是目前测量整体叶盘最有效的方法。

使用测量机对叶盘型面进行测量, 首先要进行路径规划, 路径规划的好坏决定 CMM 测量的效率和有效性。文献^[1-12]分别对自由曲面 CMM 测量路径规划进行了研究。虽然叶盘型面属于自由曲面, 但由于结构的限制, 其测量路径规划具有其自身的特点, 本文对整体叶盘型面测量路径

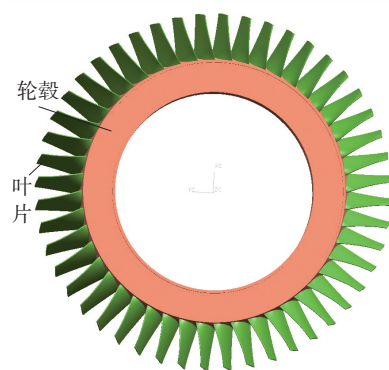


图1 开式整体叶盘

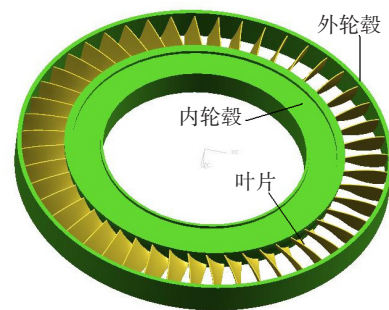


图2 闭式整体叶盘

* 国家科技支撑计划 (2008BAF32B10) 项目资助。

规划中的相关关键技术进行了研究。

整体叶盘测量路径规划

在整体叶盘的测量中,对测量叶片数、测量截面数和测量点数的确定非常重要。测量数过多会增大检测成本,降低测量效率;测量数过少又会降低对总体的代表性,增大测量误差。

1 测量叶片数的确定

整体叶盘的叶片按周向均匀分布,在加工过程中,所有叶片都是由相同的加工工艺、相同的加工程序通过旋转工件坐标系加工完成,叶片具有一定的一致性,所以整体叶盘的叶片可以采取抽样方式检测。因为整体叶盘叶片随机抽样时样本容量计算属于比例型不重复随机抽样,那么叶片数的确定就变成了样本容量的确定问题。

叶片数的确定过程本质上是费用与精度的权衡过程。既要考虑检测的目的、检测的性质和精度的要求等,又要考虑实际操作的可操作性,非抽样误差的控制等。进行综合权衡后,达到一个最优的样本容量选择。

另一方面,就具体项目而言,项目的总预算费用又构成了检测叶片数有一个上限。测量数过大就会突破预算约束,导致超支。设经费总额为 C ,费用函数可以表示为:

$$C = C_0 + nC_1, \quad (1)$$

其中, C_0 为固定费用,与样本容量无关; C_1 为平均每一叶片单元需要的测量费用,由此解出的测量叶片数 n ,可以作为经费约束的一个基本条件。

(1) 基本原理。

对于估算比例型变量,确定样本容量公式为:

$$n_1 = \frac{Z^2 \cdot P \cdot (1 - P)}{e^2}, \quad (2)$$

其中, n_1 代表样本容量; Z 表示置信

水平下的统计量; P 表示目标总体的比例期望值; e 表示置信区间的半宽,即调查误差。

根据样品总量对样本容量大小进行修正:

$$n_2 = n_1 \frac{N}{N + n_1}, \quad (3)$$

其中, N 为叶片总数。

因为样本抽样不是采用简单的随机抽样,那么可以用抽样设计效果对样本容量进行修正:

$$n = B \cdot n_2, \quad (4)$$

其中, B 为设计效果比例参数; n 为测量叶片数。

公式(2)、(3)、(4)参数取值可参照表1。

(2) 实例应用。

某型一级整体叶盘叶片总数为48个,由于事先没有关于真实比例 P 可利用的信息,因此,假定方差取最大的情况,即假设 $P=0.5$;根据抽检叶片的实际情况可取 $e=0.2$;在置信水平为90%, B 取0.65的情况下,根据公式(2)、(3)、(4)计算得到需要测量的叶片数 $n=8.09 \approx 8$,即需要测量的叶片数为8个。

表1 参数取值参考值

参数	取值
Z	对于90%的置信度,对应的 Z 值为1.64 对于95%的置信度,对应的 Z 值为1.96 对于99%的置信度,对应的 Z 值为2.56
P	由于事先没有关于真实比例 P 的可利用的信息,因此我们假定方差取最大的情况,即假设 $P=0.5$
e	根据抽检叶片的实际情况可取0.1~0.3
B	为设计效果,因为对叶片采取抽检方式检测,被检叶片按周向均匀分布。所以 $B \leq 1$ (可取为0.5~0.8)

2 叶片测量截面数的确定

为了保证测量的可靠性,叶片测量截面数 m 应不小于3。

(1) 根据被检测叶片的长度来确定检测截面数。可以采用以下经验公式:

$$m = c \cdot L, \quad (5)$$

其中, m 为应测截面数; L 为叶片长度; c 为比例系数(一般为

1/10~1/20)。

(2) 根据叶片理论截面线数确定检测截面数。根据经验一般取 $m_1/3 \geq m \geq m_1/5$ 。其中, m_1 为理论截面线数; m 为应测截面数。

3 截面线测量点数的确定

对自由曲面进行测量时,采用等间距测量是最简单易行的测量方法,但为了保证测量准确度就必须缩小测量间距,这使得测量效率显著降低,并增加了后续误差评定等工作的难度。文献^[13-14]根据加工设备的工艺能力给出了测量点数的计算公式,与被测零件的形状没有关系。一种理想的方法就是使测点分布的疏密随曲面曲率变化,曲率越大,测点越密;反之则越疏,从而较好地反映待测曲面的几何形状信息。

根据叶片型面的特点和测点分布疏密随曲面曲率变化的要求,结合实际测量情况,总结的叶片截面线测量点数计算公式如下:

$$N = \frac{L}{A} + \frac{\rho \cdot L \cdot D}{3}, \quad (6)$$

式中, L 为测量路径长度, A 为小曲率情况下希望的相邻测点距离, ρ 为

圆弧曲率, D 为大曲率情况下希望的半圆圆弧上测量点数。 A 与 D 的取值从经济性和设备工艺能力方面进行考虑,一般取 $A=5 \sim 15 \text{ mm}$, $D=5 \sim 15$ 个。

图3是根据公式(6)计算的大曲率情况下半圆圆弧测量点的数量,取 $A=10 \text{ mm}$, $D=10$ 个,圆弧半径从 $r=0.2 \text{ mm}$ 到 $r=3.5 \text{ mm}$ 。可以看到, $r=3 \text{ mm}$ 以下,半圆圆弧测量点数是10个,曲率越小,测量点越密集,测量点数主要因素是圆弧的曲率; $r=3 \text{ mm}$ 以上,由于测量路径长度的增加,测量点数增加,测量点数的主要影响因素是测量长度。

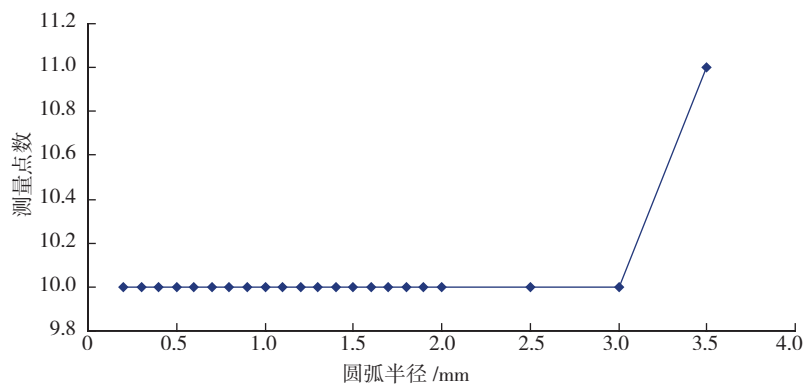


图3 圆弧半径与测量点数关系

4 路径规划

测量路径规划就是确定测量点的位置和测量次序。测量机根据测量点坐标和触测方向进行测量^[15]。由于一般的测量机软件系统有转台扫描功能,所以叶盘测量路径规划最常用的方法是等半径路径规划。等半径法,即叶片上每个截面的测量数据点在围绕叶盘轴心线的回转圆柱面上。

采用该路径会造成因叶片前缘长度和后缘长度的差异而造成的测量路径线断裂,如图4所示。本文提出流道线测量路径,流道线指叶片工作时气流流经叶片型面的近似路线,其区别与截面线的最大特点是曲线封闭。

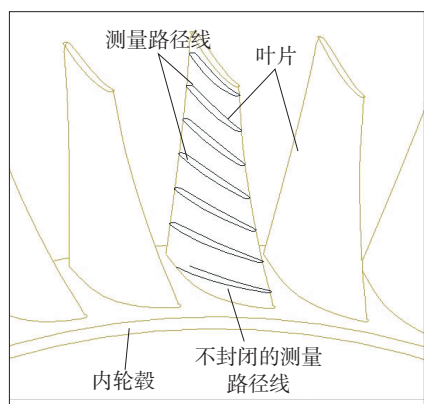


图4 等半径法测量路径

(1) 叶片型面测量路径规划原则。

- 测量路径线呈均匀态势且尽可能覆盖整个叶片型面。

- 在一条测量路径线上,测量点之间的距离由曲线曲率确定,在叶背

型面、叶盆型面上,测量点的数目相比叶片前缘和后缘要稀疏。

(2) 流道线法测量路径规划步骤。

- 根据叶片理论截面数据对叶片型面进行参数化造型;

- 将参数化后的叶片型面沿其法向向外偏置出一个等距的叶片型面偏置面,等距面之间的距离为测头半径;

- 将内轮毂曲面沿其法向方向向外偏置出一个等距的内轮毂曲面偏置面,等距面之间的距离为内轮毂曲面与叶片型面过渡半径加测头半径;对于闭式整体叶盘,还要求取外轮毂向内的等距偏置面,等距面之间的距离为外轮毂曲面与叶片型面过渡半径加测头半径;

- 以内轮毂曲面偏置面对叶片型面偏置面进行裁剪;对于闭式叶盘还要以外轮毂偏置面对叶片型面进行裁剪;

- 对裁剪过的叶片型面偏置面重新进行参数化造型;

- 重新参数化的叶片型面偏置面表示为 S_0 ,沿叶片型面偏置面的截面线方向定义为 u 参数方向,沿叶片型面偏置面的径向方向定义为 v 参数方向,参数 u, v 在 S_0 内的取值范围规范化为 $[0,1]$; 在 S_0 上构造沿 v 方向的等参数线组 $T_i = \{ T_1, T_2, \dots, T_n \}$;

- 将每一条参数线 T_i 分别离散为4条曲线:叶背流道线、叶盆流道线、前缘流道线和后缘流道线;

- 根据公式(6)将曲线离散成测量点,求取测量点的坐标和法矢。

(3) 实例。

图5是根据(2)规划方法求取的开式叶盘测量路径,图6是闭式叶盘测量路径。

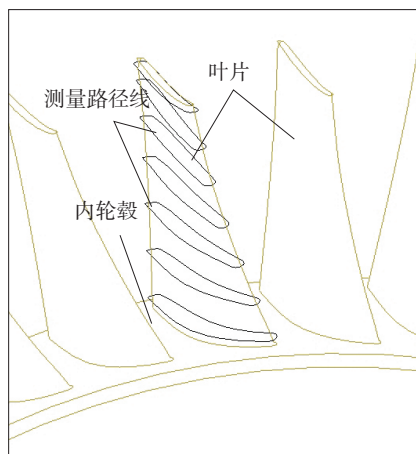


图5 开式叶盘测量路径

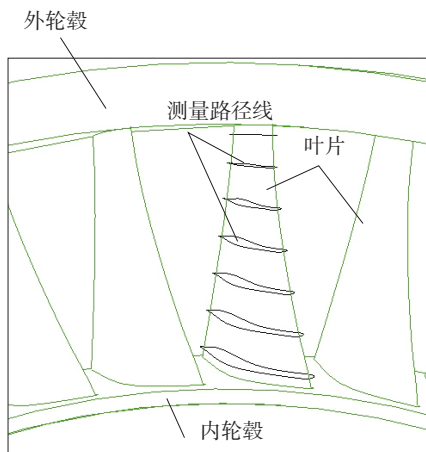


图6 闭式叶盘测量路径

结束语

文中提出了整体叶盘测量中抽检叶片数、测量截面数、测量点数的确定方法和流道线测量路径方法。所述方法提高了测量效率,保证了测量有效性,为整体叶盘上机测量做好了准备工作。

本文共有参考文献15篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 深蓝)