

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.02.06

采用 CMM 测量发动机叶片模具方法研究

宋宇

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为解决传统测量设备难以对组合型块进行准确测量的问题, 提出了基于 CMM 的叶片模具数字化测量方法。利用 PC-DIMS 测量软件自动获取点的理论值及矢量方向, 采用迭代法建立坐标系, 选取对应的扫描轨迹生成方式, 设置合适的扫描密度对叶片模具进行测量, 并对结果进行三维补偿。利用此方法开展了轮廓度测量实验, 绘制出叶片模具轮廓偏差图, 并对测量不确定度进行评定。实验证明此方法测量准确性好、自动化程度高, 可准确反映叶片模具在试制阶段及使用阶段的磨损情况, 为模具的返修及保养提供了重要参考。

关键词: 三坐标测量机; 叶片模具; 测量方法; 不确定度分析

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2019) 02-0026-04

Research on CMM Method for Measuring Die of Engine Blade

SONG Yu

(Changcheng Insitute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to solve the problem that it is difficult for traditional measuring equipment to accurately measure the combined blocks, a digital measuring method of blade die based on CMM is proposed. The theoretical values and vector directions of the points are automatically acquired by PC-DIMS measurement software. The coordinate system is established by iteration method. The corresponding scanning trajectory generation mode is selected, and the appropriate scanning density is set to measure the blade die, and the results are compensated in three dimensions. Using this method, the profile measurement experiment is carried out, the profile deviation diagram of blade die is drawn, and the uncertainty of measurement is evaluated. Experiments show that this method has good accuracy and high automation. It can accurately reflect the wear situation of blade die in the trial production and use stage. It provides an important reference for the repairing and maintenance of the dies.

Key words: CMM; blade mould; method of measurement; uncertainty analysis

0 引言

叶片是航空发动机的重要组成部分, 具有结构复杂、加工制造难度大的特点。叶片质量直接影响发动机的可靠性及安全性。现阶段发动机叶片主要采用精密铸造技术生产, 利用精密模具完成叶片的成型加工。这种方法生产出的发动机叶片余量小、型面流线平滑, 能够提高叶片承载能力、提升发动机整体性能、延长飞行服役时间。叶片精密铸造的前提是制备高准确度的叶片模具, 这就对叶片模具的检测提出了更高的要求。

叶片模具的主要结构包括型腔、定位及锁紧机构、起模机构三部分。其中, 型腔的准确度及表面光洁度直接影响叶片的加工质量, 在叶片模具中起重要作用。为了便于加工制造, 型腔部分大多不选用整体结构设计, 而是分解成若干个型块。多型块结构具有节省材料、便于独立返修等优点。但是增加了组合结构的检测难度, 对检测的准确性也提出了更高的要求。为解决传统测量

设备难以对组合型块进行准确测量的问题, 本文提出了一种基于 CMM 的叶片模具数字化测量方法。

1 叶片模具分类

叶片精铸的制造流程: 首先使用型芯模压制内腔陶瓷湿态型芯, 烧结硬化合格后, 将其置于叶片外型模具中, 压制获取含有内嵌陶芯的精铸蜡型, 再经过制壳、脱蜡、烧结、浇注、脱芯等工序, 即可得到精铸叶片。叶片模具按用途可分为陶芯模、外型模、蜡模三大类; 按分型面类型可分为上下分型模和四面脱芯型模两大类, 如图 1 所示。

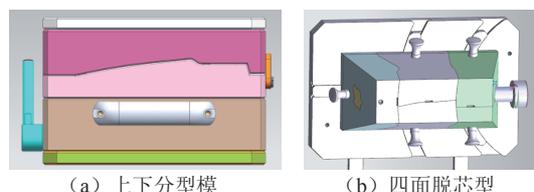


图 1 叶片模具的分型面种类

2 叶片模具的准确度要求

叶片模具的型块很多,通过各型块相互贴合后构成叶片的型腔。叶片模具的检测要求通常包括:控制型面的指定点位测量、装配和定位孔的直径和位置测量、型腔型面的轮廓度测量等。本文主要研究叶片模具的型面轮廓度测量方法。通常情况下,叶片模具的型面轮廓度准确度要求为 $0.03 \sim 0.05 \text{ mm}$,叶片榫头位置的公差可以根据使用要求适当放大。

3 叶片模具的测量方法

本文采用的叶片模具测量设备为 ADVANTAGE 系列三坐标测量机,其长度测量最大允许示值误差为 $(1.5 + 3L/1000) \mu\text{m}$,具有通用性强、准确度高、可靠性好等优点,满足叶片模具的测量准确度要求。实验采用的测量分析软件为 PC - DMIS,具有功能全面、效率高的特点。

3.1 数学模型的导入

导入叶片模具的数学模型,可在测量软件中自动获取点的理论值及矢量方向,从而控制 CMM 测头进行自动测量。PCDIMIS 测量软件支持的数模格式为 IGES,由厂家提供的数模通常为 x_t 格式,在导入前需要进行格式转换。在转换过程中,设计复杂的模具数模容易发生部分片体的丢失或错位,此时可以先将该文件转换成 Parasolid 格式,再通过 UG 的 IGES 转换器将 Parasolid 转换成 IGES 格式。

3.2 手动建立坐标系

手动建立零件坐标系实际上就是建立被测零件和测量机之间的坐标系矩阵关系。在导入 CAD 模型进行测量时,同时也建立了被测零件、CAD 模型、测量机三者之间的坐标系矩阵关系。手动建立坐标系所选择的测量元素多为模具的底板或固定块,实现对叶片模具的粗定位。

3.3 迭代法建立坐标系

叶片模具的制造工艺十分复杂,主要关注内腔叶片的成型面轮廓准确度,但是内腔多为不规则曲面,无法找到相应基准(如面、线、孔),因此采用迭代法建立坐标系。

迭代法是一种不断利用变量的旧值递推新值的过程。采用迭代法建立坐标系时,必须要有数模或理论值,测量软件将实测值“最佳拟合”到标称数据,同时,在每个矢量点的理论位置周围设置一个柱形公差区,并计算每个测量点与标称位置之间的距离,如果距离大于设置的定位公差,则重新执行该元素的测量,直

至所有测量点都处于定位公差范围内为止。

利用迭代法建立坐标系的过程中,合理选择测量元素是至关重要的,通常应符合以下原则:

1) 用于建系的元素不应全部集中在同一模块上,建系的测量元素应关联叶片模具的多个型块;

2) 第一组(找平)特征应至少包含有三个元素,且三个元素的矢量方向应近似一致;

3) 第二组(旋转)特征应至少包含有两个元素,要求两个点的矢量方向近似一致,并且此两点的连线与找平特征组的方向矢量近似垂直;

4) 最后一组(设置原点)特征要求方向与前两组矢量方向应垂直;

5) 建系测量的元素应为精加工表面,不宜选择有划痕、磕碰的位置。

利用迭代法建立坐标系,将三组实际测量元素与 CAD 数模进行最佳拟合,之后进行模具型腔的扫描测量。

3.4 扫描路径规划

叶片模具的型面轮廓度可通过测量若干组曲线轮廓度来进行评定,采用扫描测头对型腔进行测量,扫描轨迹的生成通常采用以下几种方式。

1) 开线扫描

开线扫描适用于曲率变化不大的叶片型腔测量。如图 2 所示,设定起始点、方向点、终止点,并设置适当的扫描密度,即可生成扫描线轨迹。

2) 周边扫描

周边扫描适用于曲面边界不规则的叶片模具型腔测量。在数模上选择对应的边界,如图 3 所示,通过设置增量和偏置距离,即可得到相应的扫描曲线。

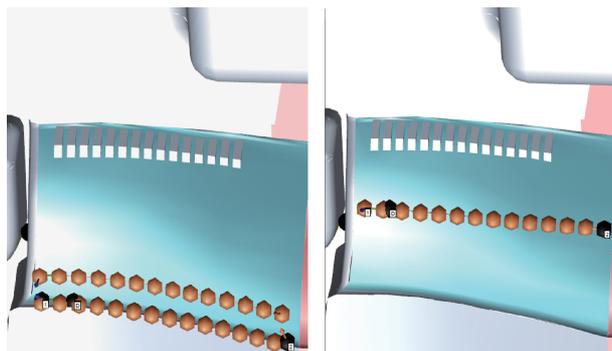


图2 开线扫描测量叶片模具型腔 图3 周边扫描测量叶片模具型腔

3) 自由扫描

叶片模具的型腔出现加强肋或凸台时,可采用自由模式进行测量。在数模上选择测点位置,可绕过障碍进行连续测量。值得注意的是,此时必须将测量模

式设置为单点测量。逼近回退的设置高度必须大于型腔表面障碍物的高度，否则容易发生撞针。

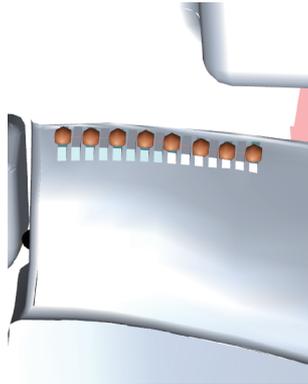


图4 自由扫描测量叶片模具型腔

3.5 扫描密度设置

扫描密度的设置是叶片模具检测的关键。通常情况下，外型模、蜡模的型腔扫描密度约为 1~2 点/mm，而型芯模由于内部结构复杂，扫描密度一般设置为 5~6 点/mm。除此之外，曲率较大的叶片模具型腔需要进行加密采集，防止由于采样间隔过大导致数据丢失。加工准确度要求高及设计复杂的工作表面亦需要多采点。

4 测头半径补偿及结果分析

执行型腔的扫描程序，测头沿着型腔的自由曲面进行运动。此时扫描速度不宜过快，否则易出现数据信息丢失或产生粗大误差等问题。测头半径补偿是 CMM 测量叶片模具的难点，由于其工作面上各点的矢量方向不同，采用二维补偿方法会引入余弦误差，需要使用准确度更高的三维补偿方法。实际叶片模具测量中，可以采用曲面拟合法进行半径补偿。测头扫描时，关闭机器的自动半径补偿功能，此时测头球心的拟合曲面即是被测曲面的等距面，将球心拟合曲面按照测头半径进行偏置，进而得到补偿之后的被测曲面，与理论曲面进行比较即可得到曲面的轮廓度。扫描线的轮廓度测量数据如表 1 所示。

为了更加直观的判断叶片模具的型面加工质量，利用测量得到的扫描线绘制出轮廓偏差图，如图 5 所示。

图 5 中蓝色线条代表模具型腔的理论值，绿色部分表示该区域的轮廓度偏差小于设计公差，符合设计准确度要求；黄色部分代表该区域的轮廓度偏差为负值且超出公差范围，对于模具型腔来说即为“缺肉”；红色部分代表该区域的轮廓度偏差为正值且超出公差范围，对于型腔表面来说即为“多肉”。叶片模具的轮

廓偏差图对于模具的返修具有重要的指导意义，同时也可据此定期监测模具在使用过程中的磨损情况。

表 1 叶片模具型腔测量结果

扫描位置	实测值/mm
SCAN1	0.009
SCAN2	0.014
SCAN3	0.033
SCAN4	0.022
SCAN5	0.019
SCAN6	0.015
SCAN7	0.015
SCAN8	0.010

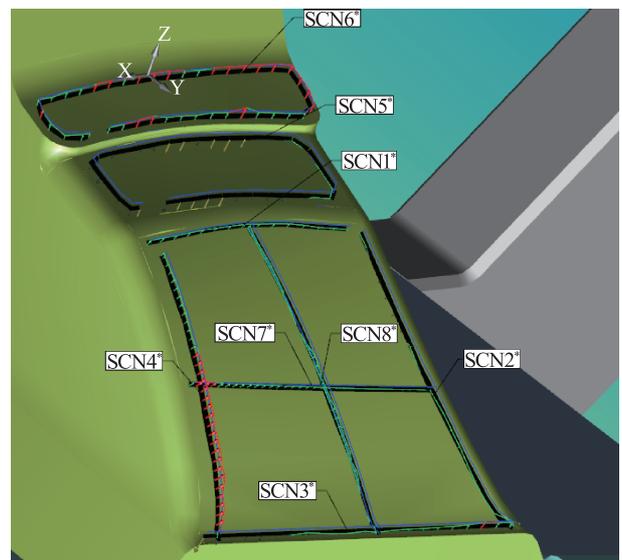


图5 轮廓偏差测量结果

5 测量不确定度分析

为验证本文提出的采用 CMM 测量航空发动机叶片模具方法的准确性，展开实验验证，并对测量结果进行不确定度分析。不确定度反映叶片模具测量结果的可信程度，是验证测量方法科学性的重要依据。

1) 示值误差引入的不确定度分量 u_1

三坐标测量机的最大允许示值误差 MPE_E 为 $(1.5 + 3L/1000) \mu\text{m}$ ，其中 L 单位为 m 。按照均匀分布，取包含因子 $k_1 = \sqrt{3}$ ， L 按照最大尺寸 200 mm 计算，则由示值误差引起的不确定度分量为

$$u_1 = \frac{MPE_E}{\sqrt{3}} = \frac{1.5 + 0.6}{\sqrt{3}} = 1.2 (\mu\text{m})$$

2) 测量重复性引入的不确定度分量 u_2

在重复性条件下进行了 10 次测量，得到的测量数据如表 2 所示。

表2 叶片模具曲线轮廓度测量结果

测量次数	实测值/mm
1	0.019
2	0.022
3	0.020
4	0.021
5	0.019
6	0.019
7	0.018
8	0.021
9	0.023
10	0.020

按照算术平均值和实验标准差的计算公式，可计算出测量重复性引入的不确定度分量

$$u_2 = s(\bar{x}) = 1.5 \mu\text{m}$$

3) 温度影响引入的测量不确定度分量 u_3

为保证三坐标测量机达到最佳状态，在进行测量前必须对被测工件进行恒温，按照极限状态下，坐标测量机和工件的温度差 $\theta = 1^\circ\text{C}$ ，模具的热膨胀系数 $\alpha = 11.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，服从均匀分布，取包含因子 k_1 为 $\sqrt{3}$ 。叶片模具的型腔尺寸 L 一般不大于200 mm，故温度影响引起的不确定度分量为

$$u(\delta_\theta) = \frac{\theta}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577$$

$$\begin{aligned} u_3 &= L \cdot \alpha \cdot u(\delta_\theta) \\ &= 200 \times 11.5 \times 10^{-6} \times 0.577 \\ &= 1.3 (\mu\text{m}) \end{aligned}$$

4) 稳定性引入的不确定度分量 u_4

在10组测量数据中，选择数据变化范围最大的一组。稳定性标定实验为等准确度测量，考虑服从高斯分布（分布因子 $b = 0.5$ ），计算稳定性的不确定度分量为 $u_4 = 0.5 \times 0.005 = 2.5 (\mu\text{m})$

将不确定度分量的结果汇总列出，如表3所示。

表3 测量不确定度结果汇总

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	灵敏系数	分量计算结果/ μm
u_1	示值误差	B类	1	1.2
u_2	重复性	A类	1	1.5
u_3	温度影响	B类	1	1.3
u_4	稳定性	B类	1	2.5

则合成标准不确定度 u_c 为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 3 \mu\text{m}$$

扩展不确定度 U 为

$$U = k \cdot u_c = 2 \times 3 = 6 (\mu\text{m})$$

(k 为包含因子，取 $k=2$)

6 总结

为解决传统测量方法难以对组合型块进行准确测量的问题，提出了基于CMM测量航空发动机叶片模具的方法。导入叶片模具的数学模型，利用PC-DIMS测量软件自动获取点的理论值及矢量方向，采用迭代法建立坐标系，选取对应的扫描轨迹生成方式，设置合适的扫描密度对叶片模具进行测量，并对结果进行补偿。开展了航空发动机叶片模具轮廓度测量实验，并对测量不确定度进行了详细计算分析，证明此方法具有良好的准确性、可靠性、稳定性，为叶片模具的研制及周期检定提供了借鉴。

参考文献

- [1] 张国雄. 三坐标测量机 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1999.
- [2] 葛建中, 黄松清, 葛丛. 关于三坐标测量策略的探讨 [J]. 安徽工程科技学院学报 (自然科学版), 2010, 25 (4): 50-53.
- [3] 佟克伟. 三坐标测量仪在零件检测中的应用研究 [J]. 科技风, 2015 (17): 36.
- [4] 崔立柱. 柔性三坐标测量机的理论及误差分析 [D]. 吉林: 长春理工大学, 2010.
- [5] 卫作之, 黄敏哈. 运用合理测量技术提高模具测量精度 [J]. 计量与测试技术, 2010, 37 (10): 56-57.
- [6] 蔺小军, 单晨伟, 王增强, 等. 航空发动机叶片型面三坐标测量机测量技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18 (1): 125-131.
- [7] 陆佳艳, 熊昌友, 何小妹, 等. 航空发动机叶片型面测量方法评述 [J]. 计测技术, 2009, 29 (3): 1-3.
- [8] 张宏伟, 张国雄, 李真, 等. 飞机发动机叶片的非接触测量 [J]. 航空精密制造技术, 2004, 40 (4): 34-36.
- [9] 基于ICT图像的航空发动机涡轮叶片壁厚尺寸精密测量方法 [J]. 航空学报, 2006, 27 (2): 325-330.
- [10] 万美婷. 基于面结构光的航空发动机叶片三维测量研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.

收稿日期: 2019-03-21

作者简介

宋宇 (1988-), 女, 助理工程师, 主要从事几何量精密测量研究, 涉及航空、航天、制造业等领域。

