

三坐标测量机在整体叶盘叶片型面检测中的应用

Blisk Blade Profile Inspection Using CMM

中航工业沈阳发动机设计研究所 高继昆 闫峰 李季



高继昆

高级工程师,毕业于哈尔滨工业大学机密仪器专业。主要从事航空发动机设计、装配过程中几何量计量及检测技术研究。

整体叶盘是航空发动机的关键部件之一,直接决定了发动机的性能、安全和寿命^[1-2]。随着技术水平的提高,越来越多的国内外航空发动机采用整体叶盘代替传统多个叶片组装的设计模式。它的显著特点在于整体性好,有效地提高了发动机性能。但加工和检测的成本和难度也随之增大。由于整体叶盘的加工质量至关重要,因此在发动机零部件检

测中,整体叶盘叶片型面的检测具有十分重要的意义。整体叶盘叶片型面检测方法主要有坐标测量法、检具测量法、在线检测法、光学非接触测量法等^[3-18],目前在整体叶盘叶片型面检测中,最常用的方法是三坐标测量机曲线扫描。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.22.094

测中,整体叶盘叶片型面的检测具有十分重要的意义。整体叶盘叶片型面检测方法主要有坐标测量法、检具测量法、在线检测法、光学非接触测量法等^[3-18],目前在整体叶盘叶片型面检测中,最常用的方法是三坐标测量机曲线扫描。

测量方法

本文采用Zeiss公司生产的PRISMO三坐标测量机,其示值误差为 $(1.5+L/350)\mu\text{m}$,并通过四轴联动转台的配置对某型发动机整体叶盘进行检测。

该整体叶盘尺寸大、扭转大,其叶片型面的扭转角最大可达 35° 。下面以该整体叶盘为例,谈谈三坐标

测量机对整体叶盘叶片型面的检测和计算方法^[19-22]。

1 整体叶盘叶片型面测量

(1) 建立测量坐标系。

首先,将整体叶盘的数学模型导入测量软件中,然后根据设计要求,选择对应的几何元素作为测量基准,对测量基准进行平移和旋转得到基本坐标系和整体叶盘叶片型面坐标系。基本坐标系用于测量,叶型坐标系用于之后的计算和评价。

(2) 定义名义叶型曲线。

首先在叶型坐标系下,通过每个叶片型面的高度值在数学模型上进行截取,得到所需测量的三维曲线,并按曲率确定每个三维曲线的名义点位置和法线方向,如图1所示。然

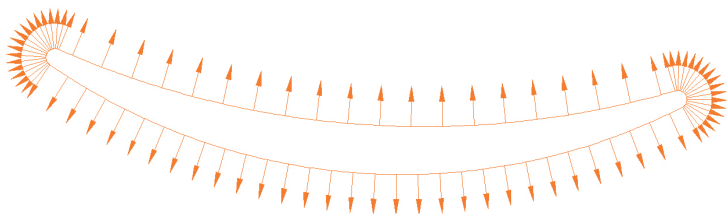


图1 名义点位置和法线分布图

后通过旋转阵列得到每个整体叶盘叶片所要测量叶型的三维曲线。

(3) 编辑每个元素的测量程序。

编辑测量基准和被测叶型三维曲线的测量程序,其中靠近根部的叶型曲线分3段进行扫描测量,靠近尖部的叶型曲线分2段进行扫描测量。通过转台角度和扫描速度的设定,使得叶盆和叶背扫描速度较快,前缘和后缘扫描速度较慢。

2 测量结果的计算和处理

叶片型面曲线扫描完成后,将第一片叶片所有截面的名义数据和每一片叶片所有叶型的实测未补偿的数据在相应叶型坐标系下分别导入叶型处理软件进行计算,通过计算得出整体叶盘叶片实测叶型的弦长、位置度、扭转角度、轮廓度以及前后缘形状等特征参数,进而判断叶片型面是否合格。

3 测量结果的输出

将测得的叶型轮廓及数据处理时得到的弦长、位置度、扭转角度、轮廓度以及前后缘形状等特征参数,输出成报告的形式,提供给设计人员进行分析使用。

三维曲线和二维曲线测量结果对比

1 二维曲线测量引起的余弦误差

三坐标测量机用二维曲线测量叶片型面时,由于测量原理和测量方法本身存在不足,会产生半径补偿误差,即余弦误差。

三坐标测量机探针大多为红宝石球或碳素球,测头采点记录的是球心位置的空间坐标。因球心不是测针与叶型表面的实际接触位置,需通

过半径补偿,得出实测点坐标值。半径补偿的方向由名义点法线方向确定(在XY平面内的二维方向),而叶型本身是自由曲面,法线方向是三维方向,由此会带来半径补偿误差。

下面对叶片叶型测量过程中二维补偿误差的产生以及影响因素进行分析。

在实际测量过程中,受触发测量力的影响,接触测量时测头中心的Z坐标值与名义值存在一定偏差,如图2所示。随着叶片倾斜角度的增大而增大。使用二维曲线扫描的方法对该整体叶盘的最大扭转叶片型面进行测量,其倾斜角 β 为 35° ,通过测量结果得到,Z值偏差最大不超过0.05mm,且均出现在后缘附近。图2中A为名义点,A'为半径补偿得到的实测点,为半径补偿误差,探针半径R为1mm。

此时的半径补偿^[23]:

$$\delta_x = R/\cos\beta - R - H \cdot \text{th}\beta$$

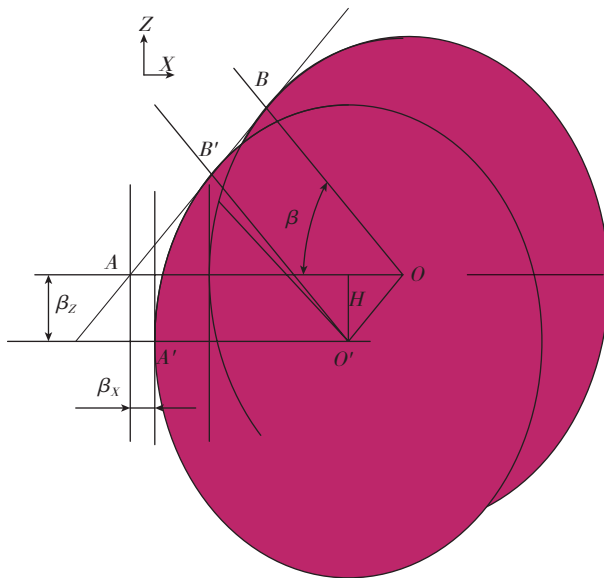


图2 半径补偿误差示意图

该叶片的最大半径补偿误差为:

$$\begin{aligned} \delta &= R/\cos\beta - R - H \cdot \text{th}\beta \\ &= 1/\cos 35^\circ - 1 - 0.05 \cdot \text{th} 35^\circ \\ &= 0.186\text{mm} \end{aligned}$$

由于设计图纸给出的前后缘6mm内轮廓度公差为0.15mm,显然通过二维曲线扫描的方法不能满足测量要求。

2 两种方法的测量结果对比

用三维曲线扫描的方法对叶片型面进行测量,将两次的测量结果点坐标导入三维软件进行对比。如图3所示,其中蓝色曲线为二维曲线扫描的测量结果,红色曲线为三维曲线扫描的测量结果。

通过对比图可以看出,由于二维曲线扫描的测量结果存在余弦误差,所以测量结果较三维曲线扫描的结果实际叶型曲线偏厚。由于接近后缘的位置叶片型面扭转最大,此处的厚度差值也越大。通过计算得到厚度差值接近0.2mm,与计算结果基本一致。证明了三维曲线扫描测量结果的准确性。

不同叶型曲线的计算方法

由于整体叶盘叶片的加工质量不同,实测叶型曲线相对于名义叶型曲线会有不同情况的偏差。有些情

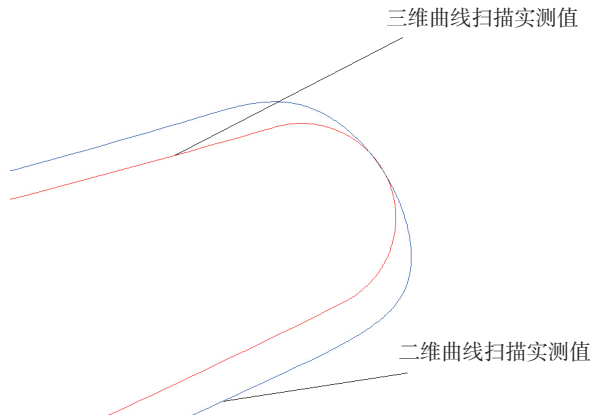


图3 扭转最大截面两种方法测量结果对比图

况的偏差会对计算结果产生不同程度的影响,特别在三维曲线扫描测量的计算结果中更为明显。下面对几种常见的情况所采用的计算方法进行说明。

1 名义法线和实际法线半径补偿计算方法

在叶型计算软件中,有名义法线和实际法线两种半径补偿计算方法。

名义法线半径补偿计算方法原理为,利用名义曲线的法线代替实际未补偿曲线的法线进行半径补偿得到实测曲线,如图4所示。

实际法线半径补偿计算方法原理为,利用实际未补偿曲线本身的法线进行半径补偿得到实测曲线,如图5所示。

2 两种半径补偿计算方法适用的叶型曲线

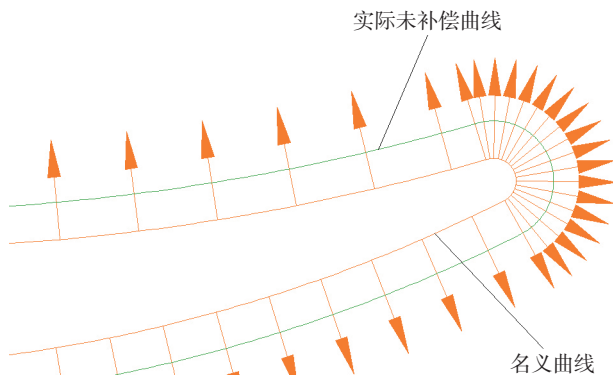


图4 名义法线半径补偿示意图

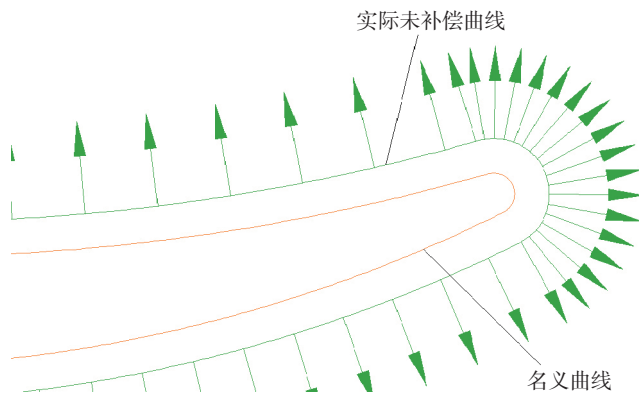


图5 实际法线半径补偿示意图

根据两种计算方法的原理分析得到每种方法的优势和不足,从而确定每种计算方法所适用的情况。

实际法线半径补偿采用本身实际未补偿曲线的曲率确定XY方向法线进行补偿,所以在XY方向上结果更加接近真实值。但由于Z方向法线是在测量过程中通过探头的压力传感器直接得到,在测量叶型扭转较大且曲率变化较大处时Z方向法线会产生较大误差,从而直接影响XY方向的半径补偿结果,使得计算结果不准确,所以实际法线半径补偿适用于扭转较小的叶型曲线。

名义法线半径补偿采用名义点法线延长线与实际未补偿曲线相交得到实际未补偿曲线的点和XY方向的法线,而并非是该点在XY方向的真实法线方向,所以当实际叶型曲线与名义叶型曲线在前后缘处偏差较大时,由该法线在XY方向所引起的半径补偿误差较大,使得实际叶型计算结果偏差较大。所以名义法线半径补偿适用于扭转较大且实际叶型曲线与名义叶型曲线在前后缘处偏差较小的叶型曲线。

3 几种特殊情况的叶型曲线的计算方法

(1) 实测叶型曲线过长或过短时的计算方法。

当实测叶型曲线过长或过短时,由于实测叶型的前后缘与名义叶型的前后缘相距较远,导致前后缘半径补偿的偏差较大,可能出现两种半径补偿计算方法都无法得到实际叶型的准确结果的情况。

以采用实际法线半径补偿为例,当实测叶型弦长过短时,可以明显地看到前后缘处的结果偏差较大。在此计算中除前后缘外其他的叶型曲线计算结果是准确的,所以可在此计算中评价轮廓度、弦长、位置度和扭转角等除前后缘形状的其他叶型参数。

这种情况可以采用评价软件中

的伸长缩短名义曲线的方法对实测叶型曲线进行计算。采用此种方法后前后缘的计算结果更加准确。在此计算中,由于名义值的改变使得无法评价与名义曲线相关的叶型参数,所以只评价前后缘的形状。

通过以上两种方法可最终得到满足设计要求的评价结果。

(2) 实测叶型曲线前后缘偏离名义叶型曲线的计算方法。

当实测叶型曲线前后缘偏离名义叶型曲线时,如果该叶型扭转较小,可采用实际法线半径补偿计算,得到准确的计算结果。如果该叶型扭转较大,采用名义法线和实际法线半径补偿,在扭转较大处叶缘的计算结果都不准确。

此种情况可先采用名义法线半径补偿方法计算评价除前后缘形状的其它叶型参数,然后通过二维曲线重新扫描该叶型曲线,并采用实际法线半径补偿方法重新计算。由于二维曲线扫描的测量结果存在余弦误差,所以测量结果较三维曲线扫描的结果在接近后缘的叶盆叶背处偏厚,但仍可评价前后缘的形状。

通过以上两种方法可最终得到满足设计要求的评价结果。

结论

在测量整体叶盘或其他叶片组合件时,直径小的探针无法完成测量。由于选用的探针直径越大,在计算叶型曲线时的余弦误差越大。传统二维曲线扫描测量已经无法满足设计图纸的公差要求。所以在测量此类叶片型面时应采用三维曲线扫描测量和计算。

对于航空发动机而言,无论整体叶盘还是单个叶片叶身都存在一定的弯曲扭转。在测量叶片型面时,如采用传统二维曲线扫描方法测量,在计算结果中就会存在一定的余弦误差。虽然选择直径小的探针可以减小这个误差,但是由于扫描测量过程

中存在一定的接触测力和摩擦力,过小的探针可能造成叶片型面的划伤,其自身也更易损坏。为了保护被测叶片以及探针,也为了使得测量结果更加准确,应尽量选用三维曲线扫描测量和计算。

如今航空发动机整体叶盘与叶片的设计要求越来越高,加工质量也随之提高,所以需对检测的方法加以改进。在用接触式三坐标对叶片型面进行检测中,三维曲线扫描的方法已经逐渐替代了传统二维曲线扫描的方法。这个方法的测量结果更加准确。但是由于三维曲线扫描的方法在计算和评价时相对复杂,很多情况的计算和评价不能一次性得到。计算和评价软件在这方面还需要进一步完善。另外,非接触式坐标测量机不需要半径补偿可直接得到测量结果,所以采用高精度非接触式坐标测量机检测航空发动机叶片也是未来发展的一个趋势。今后我们专业检测人员应多学习这方面的知识,争取能找到更加准确和简便的测量方法。

参考文献

[1] 黄春峰. 现代航空发动机整体叶盘及其制造技术. 航空制造技术, 2006, 26(4): 94-100.

[2] 任军学, 张定华, 王增强, 等. 整体叶盘数控加工技术研究. 航空学报, 2004, 25(2): 205-208.

[3] 蔺小军, 刘相柱, 王志伟, 等. 闭式整体叶盘三坐标测量机检测规划技术研究. 仪器仪表学报, 2013, 34(12): 2666-2674.

[4] 蔺小军, 李宜明, 李政辉, 等. 整体叶盘叶片型面 CMM 测量路径规划技术. 航空制造技术, 2012(11): 50-52.

[5] 康敏, 徐家文. 用三坐标测量机检测整体叶轮叶片型面误差. 工具技术, 2002, 36(8): 55-57.

[6] 康敏, 严德荣, 徐家文. 整体叶盘叶片型面检测用检具设计. 工具技术, 2003, 37(12): 55-57.

[7] 黄进, 汪洋, 马孜, 等. 一种航空发动机整体叶盘在线检测新技术. 东南大学学

报(自然科学版), 2009(S1): 91-94.

[8] 李大力, 石竖颀, 马艳玲, 等. MAXOS 白光测量机在压气机叶片检测中的应用. 航空精密制造技术, 2012(5): 56-57.

[9] 王玉, 胡荣辉, 丁轶奇, 等. 三坐标测量整体叶盘技术方法. 航空精密制造技术, 2014, 50(4): 27-28, 37.

[10] 陈凯云, 叶佩青, 俞学兰, 等. 航空压气机叶片型面激光测量系统研究. 仪器仪表学报, 2003, 24(S1): 609-612.

[11] 印玉明, 李明, 卓军, 等. 基于三坐标测量机对涡轮叶片测量的研究与实践. 现代机械, 2004(1): 63-64, 71.

[12] 张宏伟, 张国雄, 李真, 等. 飞机发动机叶片的非接触测量. 航空精密制造技术, 2004, 40(4): 34-36, 46.

[13] 陈非凡, 强锡富. 汽轮机叶片叶型测量综述. 航空计测技术, 1995, 15(3): 3-4.

[14] 陈凯云, 叶佩青, 俞学兰, 等. 航空压气机叶片型面在线测量新型装备研制. 航空制造技术, 2005(3): 92-95.

[15] 于浩, 张建明, 庞长涛, 等. 基于点云配准算法的叶片进排气边测量技术研究. 航空精密制造技术, 2014, 50(1): 23-26.

[16] 王森安. 光学测头在飞机发动机叶片检测中的应用. 航空制造技术, 2010(13): 1-2.

[17] 吴志新, 韩巍, 黄伟. 非接触式白光测量机在叶片检测中的研究与应用. 航空制造技术, 2014(13): 48-51.

[18] 何雪明, 李成刚, 胡于进, 等. 三坐标测量机测量路径的曲率连续自适应规划. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(S2): 1835-1839.

[19] 朱正辉. 几何量计量. 北京: 原子能出版社, 2002.

[20] 张露, 单纯利, 王东, 等. 基于三坐标测量叶型的评价方法. 工业计量, 2012(S1): 77-78.

[21] 吕彦明, 滕树新. 汽轮机叶片叶身截面测量数据自动分析. 汽轮机技术, 2007, 49(3): 239-240.

[22] 郑学著, 陶守慷, 黄袖清. 叶片型面测量的数据分析及误差评定方法. 航空精密制造技术, 2014, 50(4): 24-26.

[23] 闫峰. 三坐标测量机在航空发动机叶片型面检测中的应用. 科技与企业, 2015(2): 210-211.

(责编 宇军)