

发动机叶片加工过程检测方法研究

蔡井洲

(中国航发南京轻型航空动力有限公司 江苏 南京 211100)

摘要: 随着航空发动机技术的不断发展,对叶片的制造精度要求越来越高,传统的检测方法已经无法满足其检测要求。本文从发动机叶片的结构特点出发,通过分析其加工过程中的常见问题,提出了基于三坐标测量机和激光干涉仪的检测方法。该方法不仅可以提高叶片加工过程中的精度,同时可以提高叶片加工效率。

关键词: 发动机叶片; 加工过程; 检测方法

0 引言

在现代航空发动机和燃气轮机中,叶片的制造质量直接影响其性能和使用寿命。叶片的加工质量不仅与其本身的结构、材料和尺寸有关,还与其加工过程中的工艺参数和质量控制有关。因此,叶片加工质量检测技术的研究对提高叶片产品的性能和提高生产效率具有重要意义。

1 叶片结构特点

由于叶片形状复杂,受力情况非常复杂,在加工过程中,叶片容易发生变形、断裂等现象。目前,航空发动机使用的叶片一般为整体叶盘。由于叶盘具有形状复杂、工作应力大、质量大、刚性差等特点,所以叶盘一般采用整体铸造工艺制造。根据叶盘的结构特点,可以将叶片分为三种类型:一类叶片为整体叶盘,二类叶片为型芯或型面叶盘,三类叶片为局部叶盘。为了满足发动机对叶片精度的要求,可以通过对材料进行热处理来提高其硬度。在材料热处理过程中,如果温度不合适,则会导致材料性能发生改变,进而影响后续的加工质量。因此,在进行材料热处理之前需要对其进行质量检测^[1]。

2 叶片测量目的和精度

2.1 叶片测量目的

由于发动机的工作环境比较恶劣,因此需要保证其在工作过程中具有良好的性能。叶片作为发动机的核心部件,在设计阶段需要考虑其工作环境的影响,并且选用具有优良性能的材料。通过对叶片

的加工优化,可以有效地提高发动机的性能。因此,需要对叶片进行测量,以保证叶片能够满足使用要求。叶片测量的主要目的是:

(1) 验证叶片设计是否合理。由于叶片属于精密零件,在加工过程中会受到多种因素的影响,导致加工后出现变形或尺寸偏差等现象。因此需要对叶片进行测量来验证其设计是否合理,以保证在后续生产中能够顺利进行。

(2) 保证叶片加工质量。对叶片进行测量,可以保证加工后的尺寸满足使用要求,避免出现尺寸偏差等现象。

(3) 优化叶盘结构。对叶片进行测量,可以发现其结构上存在的一些缺陷和不足之处,为了提高其加工质量,需要对其进行优化。同时,对叶片进行测量,可以发现一些结构上的问题,以避免后续加工过程中出现问题。

(4) 为后续叶盘设计提供数据。对叶片进行测量,可以得到相应的数据和信息,从而为后续叶盘设计提供重要依据。同时,对叶片进行测量,可以获取叶片加工过程中所需要的信息和数据,以便设计人员根据这些信息和数据来改进叶盘结构,为后续叶盘的设计提供参考^[2]。

2.2 叶片测量精度

叶片测量精度包括测量位置精度、测量形状精度和测量尺寸精度等。其中,测量尺寸精度包括叶片的端面、叶型表面、叶根表面和叶尖表面的尺寸精度。目前,叶片检测通常采用接触式测量,其原理是将带有检测头的三维坐标测量仪与被测叶片接触,通过计算机软件将测量仪输出的坐标位置转换为叶

片表面的坐标值, 从而对叶片进行准确测量。接触式测量存在一些缺点, 例如会对被测零件产生磨损、易受外界因素影响等。为了保证叶片的检测精度, 需要使用非接触式测量仪进行检测。非接触式测量仪具有测量速度快、精度高、环境适应性强等优点。非接触式测量仪能够满足航空发动机对叶片的各种测量要求, 如: 尺寸测量、形状误差测量、叶根表面粗糙度测量等。

2.3 叶片的测量方法

在实际加工过程中, 一般使用三坐标测量仪对叶片进行测量。通过对测量结果的分析, 可以及时发现叶片是否存在问题。由于叶片在加工过程中受力比较复杂, 因此在加工前需要进行模拟计算, 以保证其在加工过程中不会受到其他因素的影响。在进行三坐标测量之前, 首先需要进行叶片的装夹。在装夹完成后需要将叶片放置到检测工作台上, 并将其固定住。然后利用三坐标测量机进行测量, 并记录好每个测量点的数据。之后利用软件进行数据处理和分析, 从而得出叶片的检测结果。当检测结果超过工艺标准时, 则需要重新进行装夹和检测。

除了三坐标测量机外, 还可以采用其他的测量方法对叶片进行检测, 如激光干涉仪、激光三维测量仪等。在实际检测过程中, 如果使用激光干涉仪对叶片进行测量, 则需要选择合适的测量时间和合适的测量角度。另外, 由于叶片属于三维空间曲面结构, 所以在进行三维测量时需要采用不同的坐标系。

3 叶片加工存在的问题

3.1 加工效率低

钛合金材料本身的特性决定了其具有较高的切削温度, 在加工过程中会产生大量的热, 影响加工效率。此外, 在切削过程中, 叶片受到切削力及切削热的影响, 会产生大量的热应力, 导致叶片变形。

3.2 刀具磨损

钛合金材料本身强度较低, 容易受切削力等因素的影响发生变形。此外, 钛合金材料易产生磨损, 这就导致了刀具很难保持在一个稳定的状态。如果刀具磨损严重, 会导致叶片的精度受到影响, 影响叶片的质量。

3.3 叶片位置度

在叶片加工过程中, 叶片的位置度是指叶片与压气机内壁之间的距离。由于钛合金材料比较脆、硬

度较低, 因此在加工过程中很容易产生变形。此外, 钛合金材料具有一定的韧性和塑性。在加工过程中, 如果刀具不能够很好地切透钛合金材料, 会导致叶片与压气机内壁之间距离发生变化。

4 常用检测方法

4.1 超声波检测

超声波检测技术是利用超声换能器产生的振动声波, 在叶片表面或其他物体表面上传播时, 使物体的某个部位或某些部位的声能被激发出来, 并通过与其他物体产生的声波能量进行比较, 从而判断被测物体表面上是否存在缺陷以及缺陷的位置、形状和大小等。超声波检测技术具有良好的检测效果, 能够精确、快速地判断叶片是否存在缺陷, 并且不会对工件和模具造成损伤。在进行叶片加工时利用超声波检测技术, 能够有效地减少刀具磨损^[3]。

4.2 激光检测

激光检测技术是利用激光作为光源来进行测量的一种技术。在进行叶片加工时, 利用激光检测技术能够快速、准确地对叶片的尺寸、位置度进行测量。但是, 利用激光进行检测存在以下问题:

(1) 在进行叶片加工时, 叶片与压气机内壁之间的距离较大, 采用激光检测技术可能会出现测量误差;

(2) 在进行叶片加工时, 由于受到多种因素的影响, 很难保证叶片与压气机内壁之间的距离在规定范围内。

4.3 超声 CT

超声 CT 是利用超声波对物质产生衍射时产生的干涉现象来进行成像, 从而对物体内部结构进行检测。在进行超声 CT 检测时, 需要先对叶片进行超声扫描, 因此这种方法需要使用专门的设备。

5 检测仪器

在大型压缩机叶片的坯料生产中, 通常采用锻造成型技术, 在叶片轮廓、榫头、安装板、阻尼台等部分留下了大量的加工余量。这些余量和容差都相当大, 所以对测量的精度提出了很高的要求, 例如, 一个锻造叶片的坯料, 其型面余量是 2 ~ 3mm, 公差是 1 ~ 2.5mm。与精锻叶片坯料不同, 精铸叶片的进排气边缘均可加工成成品形状, 而涡轮叶片进排气边缘的圆弧半径都很大, 大部分叶片的进口圆弧都在 2mm 以上, 排气边缘也在 0.5mm 以上, 这给

精密叶片的加工带来了很大的困难。精铸叶片的榫头、座板等部分存在机械加工的余隙，通常在 1mm 以上，容差在 0.4 ~ 0.6mm 之间。针对不同规格的工件，选择合适的坐标测量机、结构光三维扫描仪或者激光叶片快速检测专机，一次完成整个叶片的尺寸测量，并对其间隙的分布进行分析。从上述讨论中可以看到：锻压叶片坯料和铸件叶片坯料的加工技术特征和测定方式既有共性又有差异，具体分析见表 1。

表 1 叶片毛坯不同工艺特点分析

加工工艺	锻造叶片		铸造叶片
	模锻叶片	精锻叶片	精铸叶片
叶片类型	风扇大叶片	压气机等小叶片	涡轮叶片
加工余量分析	余量大（多数在 2 ~ 3mm 范围内）	叶身型面无余量，其余部分余量超过 0.5mm	叶身型面、叶片进排气边无余量，其余部分余量超过 0.5mm
测量内容	叶型、弦长、榫头、安装板、阻尼台等	叶型、弦长、榫头、安装板等	蜡模、陶芯、叶型、进排气边、榫头、安装板等
推荐测量方法	便携式光学测量仪等	坐标测量机、结构光三维扫描仪等	激光叶片快速检测专机、坐标测量机、结构光三维扫描仪等

目前，针对叶片的加工，已经开发了多种检测仪器，例如测量夹具、测量头、测头等。为获得真实的叶片切削余量尺寸及分布情况，可选择具有较高测量精度的便携式光学仪器，例如：关节臂扫描仪、手持 3D 激光扫描器等。便携式光学仪器设备体积小，重量轻，便于携带，可以在加工场地内对大尺寸的叶片进行直接测量，从而缩短工件的周转时间，提升检验效率^[4]。关节臂检测装置模拟人类的关节，集成了激光扫描探头，提高了工作效率，是一种可携带的移动测量装置。该设备发射出一条或多条激光束，光束穿过被测试对象，扫描器上的 CCD 相机对光束进行标识，采用光线与三角形相交的方法进行光线追踪，获取目标的立体图像。便携式 3D 激光扫描器利用激光直线扫描和角点扫描的方法，实现对扫描图像的自动连接，并对其进行测量。通过与实验数据的比较，获得叶片的曲面色散分布情况，并结合特定的分析工具，获得叶片剖面的轮廓特征。对于高 300mm 的叶片类零件，其检测时间约为 6min，与传统的结构光扫描器和接触型三坐标测量器相比较，

具有较高的准确度和较高的检测效率。便携式光学三维扫描示意图如图 1 所示。

在叶片加工过程中，需要对叶片的位置度进行检测。对于叶身位置度的检测，常用的方法是使用三坐标测量机进行检测。此外，还有一些其他的检测方法，例如利用激光跟踪仪对叶片进行检测等。由于在发动机叶片加工过程中使用的是数控加工技术，因此在加工过程中无法对工件进行人工操作。在使用三坐标测量机时，需要注意以下几点：一是选择合

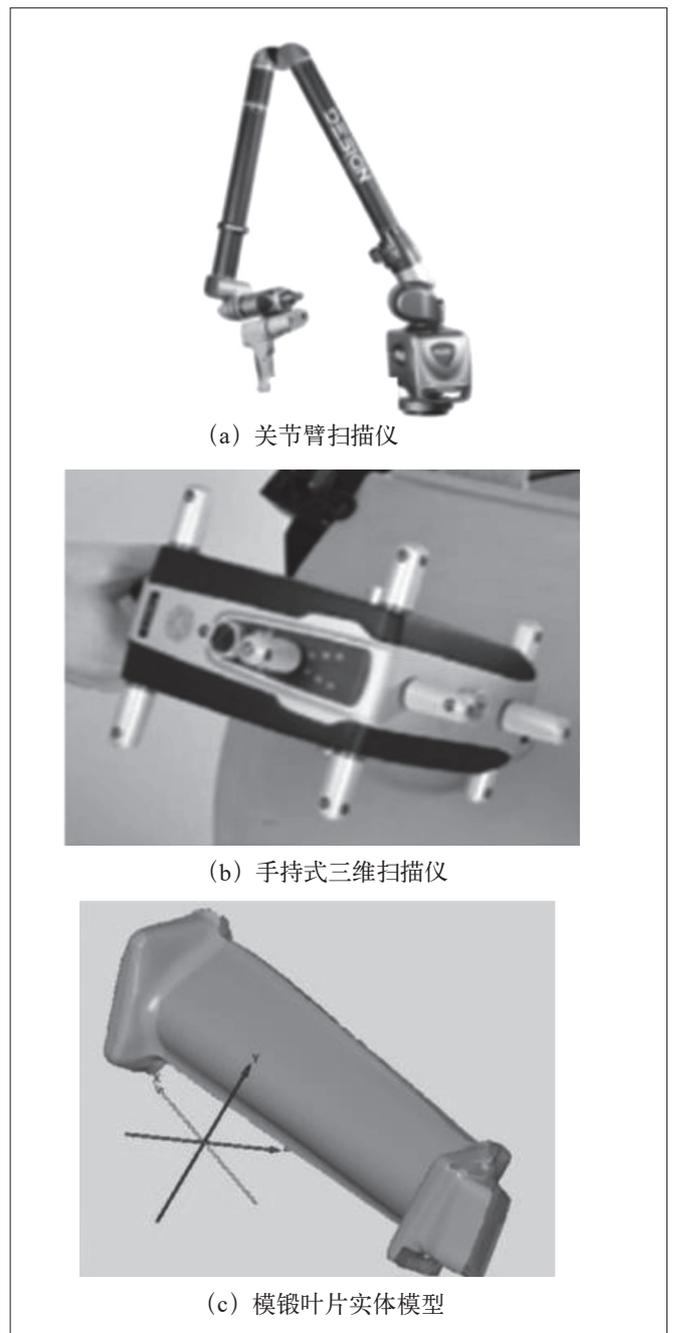


图 1 便携式光学三维扫描示意图

适的坐标系；二是需要保证测量系统的精度；三是需要选择合适的夹具；四是需要对测量系统进行校准；五是需要选择合适的切削参数。在使用激光跟踪仪进行叶片加工时，需要注意以下几点：一是需要对测量系统进行校准；二是需要使用标准基准对测量系统进行校准。

6 检测步骤

(1) 装夹定位。对于叶片的定位，应首先使用夹具对叶片进行夹紧，然后再对叶片的下端面和上端面进行装夹。当夹紧时，应保证夹紧力大于刀具切削力。在叶片装夹过程中，应保证刀具能够完全地切入到叶片的叶身内。

(2) 刀具的选择。刀具的选择也是影响叶片加工精度的关键因素之一。在使用不同类型的刀具进行加工时，其切削效果也不相同。因此，在加工过程中，应根据不同的加工工艺选择不同类型的刀具，并根据不同类型的刀具选择相应的切削参数。

(3) 检测数据处理与分析。在对叶片位置度进行检测时，应对检测数据进行处理。首先，应将检测数据进行过滤，将不需要的数据剔除；其次，使用相关软件对检测结果进行分析；最后，可以根据检测结果确定叶片是否符合要求。

(4) 叶片测量与检验。对于加工完成后的叶片，应对其进行测量与检验。在测量时，应使用激光测距系统对叶片进行测量，并使用相关软件对叶片坐标系进行设置。在检验时，应保证被测叶片与基准面之间的距离为零。如果测得的值小于设定值则表明被测叶片在基准面上位置正确；否则表示存在问题。

7 检测方法改进

本文设计了一种检测方法，即将三坐标测量机和激光干涉仪相结合，通过该方法可以及时发现叶片加工过程中存在的问题，并且及时调整刀具、减少工件变形，从而保证叶片质量。该方法主要是通过计算机视觉技术来实现叶片位置度检测，通过拍摄照片的方式，判断叶片是否存在偏移、变形等问题。该方法主要包括以下几个步骤：

(1) 搭建相机采集系统。由于在实际检测过程中需要拍摄大量的照片，因此需要搭建一套相机采集系统。该系统主要包括三个部分：相机、计算机及软件。其中，计算机负责对图像进行处理，而软件则

负责对图像进行分析。

(2) 构建叶片轮廓图像。通过测量叶片轮廓的方法，来获取叶片的实际轮廓尺寸信息。在测量过程中，需要将相机置于叶片的正上方，通过图像采集软件将采集到的图像传输到计算机中。利用该方法对叶片进行检测后，可以判断出叶片是否存在偏移、变形等问题。在实际应用过程中，需要对检测结果进行分析，以确定是否需要调整刀具或进行优化处理。

(3) 利用计算机进行辅助分析和决策。在软件系统中，对采集到的数据进行处理分析，判断出叶片是否存在偏移、变形等问题；同时还需要根据实际情况选择相应的调整方案。

8 测量方法比较及优点

在使用测头进行测量时，为了提高检测精度以及减少误差影响因素，可以将叶片放置在工作台上并选择合适的位置对其进行测量，否则会影响检测精度，甚至出现较大误差。为了提高叶片加工精度，可以采取以下措施：①对测头与工件之间的间隙进行调整；②在使用测头进行测量时需要选择合适的位置；③采用合适的测量顺序；④利用适当的补偿方法可以提高检测精度。

航空发动机叶片是一种复杂的三维曲面结构，叶片上存在着大量的测量点，因此，在进行叶片的测量时，需要进行大量的数据采集，才能获得准确的测量数据。目前，常见的叶片测量方法有三坐标测量机、激光干涉仪等。三坐标测量机是一种先进的测量仪器，具有操作方便、测量精度高、测量范围广等优点^[5]。激光干涉仪是一种精密仪器，可以实时测量微小物体，具有非接触性、高精度、高效率等优点。在实际应用中，采用激光干涉仪检测发动机叶片的加工精度，其精度可以达到0.03mm；采用三坐标测量机检测发动机叶片的加工精度，其精度可以达到0.005mm。

三坐标测量机+激光干涉仪是一种新型的测量方法，可以对叶片进行在线测量。两者相结合使用，不仅可以提高发动机叶片加工过程中的精度，而且可以提高叶片加工效率和加工质量。该方法与传统测量方法相比具有以下优点：

(1) 测量效率高。传统的检测方法需要将叶片放在专用工作台上，然后使用仪器进行测量，这需要一定的时间；而三坐标测量机+激光干涉仪只需要将

叶片放在工作台上即可完成检测。利用该方法检测时,可以在不影响生产进度的情况下完成。

(2) 精度高。通过三坐标测量机+激光干涉仪对叶片进行检测时,可以精确地找到每一个测量点,从而保证每个测量点的精度都符合要求。测头与工件之间存在一定的间隙,在进行测量时会产生一定的误差,而三坐标测量机+激光干涉仪可以很好地消除这种误差。

(3) 操作简单。三坐标测量机+激光干涉仪操作简单、方便、快捷。测量时只需要将叶片放置在工作台上,然后使用三坐标测量机+激光干涉仪对叶片进行测量即可。在实际检测中,由于设备较为简单,操作人员可以快速掌握设备的使用、操作方法。

(4) 设备成本低。由于三坐标测量机+激光干涉仪测量方法不需要购买昂贵的设备,因此设备成本较低。

(5) 适用范围广。在进行叶片测量时,三坐标测量机+激光干涉仪不受空间位置限制,可以进行任意方向、任意深度的检测。

9 结语

在对发动机叶片进行检测的过程中,对叶片的表面缺陷进行检测是一项十分重要的工作。本文根据

发动机叶片的特点,首先介绍了目前在发动机叶片加工过程中使用的几种检测方法,通过对这些检测方法比较分析,提出了一些叶片表面缺陷检测方法。这些方法具有一定的可行性,在发动机叶片加工过程中将会得到广泛应用。

参考文献:

- [1] 王辉, 郑洋, 吴动波. 航空发动机叶片精密加工工艺及装备 [J]. 金属加工 (冷加工), 2023(10):1-9.
- [2] 袁明. 航空发动机叶片数控智能磨削加工技术研究 [J]. 机械与电子, 2022, 40(09):41-45.
- [3] 王辉, 梁嘉炜, 吴动波, 等. 航空发动机叶片加工过程动态检测实验平台研制 [J]. 实验技术与管理, 2021, 38(11):183-189.
- [4] 程伟华. 航空发动机叶片在机检测与几何自适应磨削加工方法 [D]. 重庆:重庆理工大学, 2021.
- [5] 李婷婷, 高晓斐, 刘晓晨. 航空发动机叶片加工过程检测方法研究 [J]. 航空精密制造技术, 2020, 56(04):37-41.

作者简介: 蔡井洲 (1986.12-), 男, 汉族, 江苏盐城人, 本科, 工程师, 研究方向: 制造工艺。

