

航空发动机叶片加工质量检测 技术发展现状与趋势

Development Tendency of Inspecting Technology for Aeroengine Blade

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 史小强 吴宝海 张定华



史小强

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博士研究生,西安航空动力股份有限公司研高级工程师,主要从事航空发动机数字化制造技术研究。

作为发动机的相关重要部件之一,叶片在航空发动机制造中所占比重约为30%。由于叶片形状复杂、尺寸跨度大(长度从20~800mm)、受力恶劣、承载最大,且在高温、高压和高转速的工况下运转,使得发动机的性能很大程度上取决于叶片型面的设计制造水平。为了满足发动机高性能、可靠性及长寿命的要求,叶片通

常选用合金化程度很高的钛合金、高温合金等材料制成。同时由于叶片空气动力学特性的要求,叶型必须具有精确的尺寸、准确的形状和严格的表面完整性^[1]。随着航空发动机性能要求越来越高,各大主机生产厂对叶片加工精度要求也越来越高。目前,航空发动机的叶片制造方法主要有电解加工、铣削加工、精密锻造、精密铸造等^[2]。其中,数控铣削加工因加工精度高、切削稳定、工艺成熟度高等优点而被广泛应用。然而由于叶片零件壁薄、叶身扭曲大、型面复杂,容易产生变形,严重影响了叶片的加工精度和表面质量。如何严格控制叶片的加工误差,保证良好的型

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.12.080

面精度,成为检测工作关注的重点。叶片型面是基于叶型按照一定积累叠加规律形成的空间曲面,因为叶片形状复杂特殊、尺寸众多、公差要求严格,所以叶片型线的参数没有固定的规律,叶片型面的复杂性和多样性使叶片的测量变得较为困难。传统的检测方法无法科学地指导叶片的生产加工,而汽轮机、燃气机等制造业的发展,要求发动机不断更新换代,提高发动机的安全性和可靠性。先进技术体现在叶片的改进与创新,从而必须提高叶片制造技术水平,同时要求叶片加工测量实现数字化,体现其精准度,精确给出叶片各点实际数值与叶片理论设计的误差。随着

面精度,成为检测工作关注的重点。叶片型面是基于叶型按照一定积累叠加规律形成的空间曲面,因为叶片形状复杂特殊、尺寸众多、公差要求严格,所以叶片型线的参数没有固定的规律,叶片型面的复杂性和多样性使叶片的测量变得较为困难。传统的检测方法无法科学地指导叶片的生产加工,而汽轮机、燃气机等制造业的发展,要求发动机不断更新换代,提高发动机的安全性和可靠性。先进技术体现在叶片的改进与创新,从而必须提高叶片制造技术水平,同时要求叶片加工测量实现数字化,体现其精准度,精确给出叶片各点实际数值与叶片理论设计的误差。随着

我国航空发动机制造企业的迅猛发展,发动机叶片数量大、种类多,检测技术面临着前所未有的机遇和挑战。

目前,在国内的叶片检测过程中,传统的标准样板测量手段仍占主导地位,效率低下、发展缓慢,严重制约着设计、制造和检测的一体化进程。为了适应快速高效检测要求,西方发达国家已普遍采用三坐标测量机对叶片进行检测。由于航空发动机叶片的数量大、检测项目多,三坐标检测技术的引入很大程度上改善了叶片制造过程中检测周期长、检测结果不准确以及由于和外方检测方式不一致所导致的检测结果差异过大的问题。三坐标检测所特有的适用性强、适用面广、检测快速、结果准确等优点,使三坐标测量机在叶片生产企业得到广泛应用。近年来,随着我国航空工业的发展,三坐标测量机在叶片生产主机厂家逐渐得到普及。但由于叶片型面复杂、精度要求高,不同厂家的测量方式、测量流程和数据处理方式不同,导致叶片的测量结果不一致,测量工作反复,严重制约着叶型检测效率的提高。

叶型检测难点具体表现为^[3-4]:

(1)测量精度和效率要求高。叶片型面的测量精度直接反映制造精度,通常要求测量精度达到 $10\mu\text{m}$,甚至 $1\mu\text{m}$ 。因此对测量环境要求严格苛刻,通常需要专门的测量室。叶片是批量生产零件,数量成千上万,应尽可能提高测量速度和效率。但生产车间和测量室之间的反复运输和等待使检测效率低下。

(2)测量可靠性要求高。叶片测量和数据处理结果应反映叶片的实际加工状态,这样才能保证叶片的制造质量。

(3)数据处理过程复杂。叶片图纸上不仅有叶型、弦长、前缘后缘半径等尺寸误差要求,还有叶片的形状轮廓、弯曲、扭转、偏移等形位误差要求。利用三坐标测量机获取的测

量数据存在噪点,通常需要对原始的测量点集进一步简化,提取不同的尺寸和特征参数;同时需进行复杂的配准运算,迭代求解叶片的形位误差。算法选用不同得到的误差评定结果各有差异,导致整个处理过程复杂。

叶片加工误差检测技术发展现状

目前,在数字化检测领域大多数的研究集中在对自由曲面的数据采集、模型配准方面,对误差评定方法的研究还不完善。而叶片作为典型自由曲面,其加工误差评定结果的准确性和可靠性与测量数据获取方式、模型配准方法和误差评定模型密切相关。首先,通过不同的测量手段获取原始型面测量数据;然后进行数据处理,核心是测量数据的匹配定位;最终,选用合适的评定模型进行误差评定,其中评定结果又受到匹配定位方法的影响。

1 数据采集方法

目前,叶片生产面临着更短的生产周期、准时的交付、更低的成本等新要求,传统的检测方法显得缓慢,无法满足要求。为了克服这些挑战,叶片制造公司开始转向自动数字检测,使数字化数据采集手段得到广泛应用。数据采集是指通过相应的测量设备,按照设计和检测意图,以一

定的测量方法将物体的表面形状转换成离散的几何点坐标数据,在此基础上,就可以进行复杂曲面的建模、评价、改进和制造。因此,高效高精度地实现产品表面的数据采集,是叶片质量检测的前提,测得数据的质量直接影响加工误差评定的准确性和可靠性。

(1)采集方式分类。

针对叶片型面数据的采集有多种方法,根据数据采集中测量头是否与被测物体表面接触,分成接触式和非接触式,如图1所示。

接触式测量方法是通过传感测量头与产品的接触而记录产品表面点的坐标位置,可以细分为点触发式和连续扫描式。接触式测量有电感量仪、三坐标测量机(CMM),其中以CMM为主,它对刚性物体的表面数据采集精度高,主要用于机械加工工件的测量和几何尺寸及公差(GD&T)的检测。随着模拟测头的出现,使CMM可以沿着叶身型面进行连续扫描测量,目前CMM在叶片实际检测中的应用越来越广泛。接触式采集方法优点包括:精度高,能快速测量基本几何体,不受测量环境、实体的材质、颜色的影响;可量测光学仪器无法量测的死角,如深沟、小凹槽、倒勾等区域。其缺点包括:速度较慢;必须使用特殊的夹具,提高了测量成本;需要经常校正

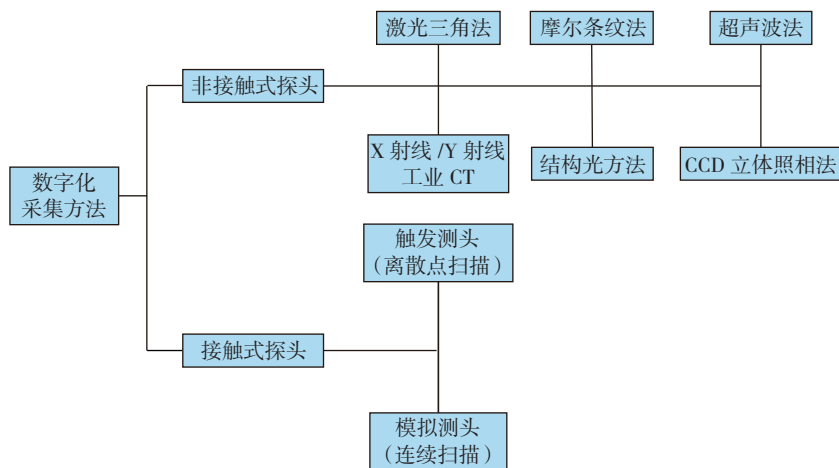


图1 数据采集方式分类

测头等。

非接触式测量方法主要是基于光学、声学、磁学等领域中的基本原理,将一定的物理模拟量通过适当的算法转换为产品表面的坐标点。目前主要有光学扫描、CT扫描(X射线、射线)、超声波方法。光学扫描分为激光点状测量、线状测量、面状测量及白炽灯面状光栅测量。光学扫描按所使用光源的不同分为激光光学扫描和白炽灯光栅光学扫描。激光单点扫描一般与CMM测量方法基本相同,只是测头不同;光学线状或面状扫描是基于光学三角原理,即利用具有规则几何形状的测量光源投影到被测表面上,形成漫反射光带,并利用CCD成像于空间某位置的图像传感器,根据三角原理测出被测表面某位置的空间坐标,如图2所示。工业CT(Industrial Computerized Tomography,计算机断层摄影术),不受样件的材料种类、形状结构等因素的限制,成像直观、分辨率高,在复杂构件的无损检测方面具有独特优势,但由于价格昂贵等原因,目前实际应

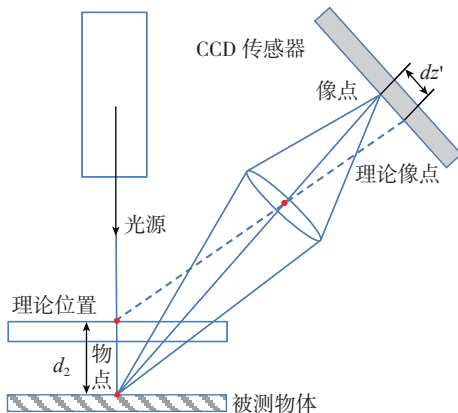


图2 光学测量原理示意图

用较少。

非接触式测量的优点包括:测量速度快;高分辨率;可以测量物件上大部分的特征;无需测头半径补偿;可测量接触式无法测量的物体,如软质物件、塑料薄件等。目前,它主要用于产品数字化和逆向工程中。其缺点包括:测量精度较差;测量点

质量受外部环境因素影响较大;较难对几何形状做完整的测量,如细长深孔等。接触式测量与非接触式测量相比虽然效率较低,但由于其测量精度和智能化程度高、设备价格低,因此被广泛应用于制造业的CAD/CAM、产品检测和质量控制。

(2)三坐标测量。

近20年来三坐标测量机快速发展,逐渐从计量室走向车间,实现了零件的自动化测量和在线测量。同时,三坐标测量机配备的软件具有强大的功能和柔性,使它日益成为企业质量控制系统的核心环节,在制造业内取得了广泛的应用。坐标测量技术的不断发展,为实现叶片型面几何尺寸和形状误差的综合测量提供了新的手段。三坐标测量机,作为坐标测量技术的典型代表,是集机械、电子、光学、计算机、数字控制等先进技术于一体的大型高精度智能化测量仪器。通过坐标测量机测量叶片轮廓上各被测点的坐标值,采用数据建模等分析手段,可得到被测叶片几何尺寸和形状误差等参数。三坐标测量机作为高精度的三维空间检测设备,具有检测精度高、检测重复性好、自动化程度高等优点,适合叶片类复杂曲面的精密测量,是目前现有的叶片检测手段中精度最高的一种^[5-6],不但应用于叶片加工过程的测量以指导和修正叶片的数控加工程序,保证叶片的加工质量,而且更多的用于加工完成后的最终检测,如图3所

示。

对于GE燃机叶片的检测,目前主要采用手工测具和三坐标测量机相结合的方式,即在生产工序中的检测一般以手工测具为主,同时辅以三坐标测量机的抽检;最终的检验以三坐标测量机为主,三坐标测量机无法检测的一些尺寸用手工测具来检测。而国内发动机主机厂使用三坐标测量机主要用于关键加工工序的质量控制,部分企业开始用于终检;大部分叶型检验还是采用样板测具和专用样板来进行。

三坐标测量机具有 x 、 y 、 z 3个相互垂直移动的导轨,它以空间直角坐标为参考,检测叶型轮廓上各被测点的坐标值,并对其数据群进行处理,求得各几何元素形位尺寸。通常三坐标测量机配备完善的测量机软件和专用的叶片参数计算软件,不仅可以进行测量路径的规划,测量宏程序的生成,还可以对测量数据进行快速的处理分析,输出测量结果报告。常用软件叶片测量路径为等高法测量路径,也叫等 Z 法或等截面法,即将一个测量路径线控制在叶片的一个截平面内,此外还有等流道线法测量路径等。

2 模型匹配方法

在获取测量数据之后,关键的一个环节是测量数据与设计模型的准确匹配。因为曲面的设计坐标系和测量坐标系往往不一致,只有消除了由于基准不统一而导致的测量误差,



图3 叶片的三坐标检测

才能进行误差评定。模型匹配是尽可能的寻找测量点与 CAD 模型的最佳姿态,使测量点的坐标系与模型坐标系对齐。对于工业领域的产品形状检测而言,大多数情况下都把产品当作刚体考虑,在模型配准定位过程中使用刚性变换。通常配准定位分为两个步骤:第一步是寻找测量模型与设计模型之间的点与点的对应关系;第二步是求解这两个模型之间的 3D 刚性变换,把它们统一到共同的坐标系中。

目前,针对模型匹配中的两个核心问题,国内外学者在数控加工及检测领域对其进行了大量研究。已有的匹配算法分为 3 类:迭代匹配、基于曲面描述的匹配及基于特征的匹配。在各种迭代匹配算法中,以 Besl 和 McKay 提出的迭代最近点 (Iterative Closest Point, ICP) 算法最为流行^[7]。在此基础之上,人们对它进行了许多有益的改进以提高它的运行速度和收敛性。然而,迭代匹配的精度却在很大程度上依赖于初始变换估计以及迭代过程中对初始估计的迭代改进。同时,在无法预知测量数据与曲面模型之间任何联系的情况下,基于曲面描述的匹配方法显示出明显的优势。但是,当处理由许多相似曲面片构成的复杂曲面时,将不可避免地产生多重对应联系,导致匹配失败。目前的匹配算法在曲面的内在曲率和几何特性方面研究较多,并针对某些工程应用问题,提出了带约束的匹配方法,大多都是基于单一约束条件的匹配求解。然而对于数控加工叶片多项公差相互关联的情况,目前采用的是分项逐一计算,还没有完善的匹配算法去求解各项误差值。需要结合叶片类零件的样板检测原则,开展针对性的研究,以适应叶片类零件的误差评定需求。

3 误差评定方法

对于形位误差评定模型的研究,在直线度、圆度、平面度等指标方面,

已取得了一些可观成果,如圆柱度、圆锥度、球度等项目的研究也得到广泛开展,同时对评定问题的优化求解、统一评判等较难的理论研究也取得了进展,但主要集中于简单的二次曲线和曲面的测量评定,空间自由曲面的研究相对较少。对于具有几何复杂性和功能特殊性的叶片曲面的形位误差评定,目前还没有国际通用的标准或技术来测量和评价其形位误差。

叶片型面误差主要包括叶型参数误差和形位误差,其中形位误差的评定与计算与所选用的基准和算法密切相关,是误差评定的关键参数。西北工业大学从叶片检测过程中的配准建模角度出发,将精铸空心涡轮叶片型面按设计公差要求分为:前缘区、后缘区及叶盆叶背区等几个区域,系统地提出了区域公差约束的叶片配准方法;尽可能把参与配准运算的配准控制点约束在叶片的公差带以内,减少乃至消除由于模型配准技术本身的有效性而导致成形精度分析的误判,造成不必要的产品报废。

上述的某些评定算法已经应用在目前商用的叶片检测软件中,并取得了较好的误差评定结果。其中,逆向工程软件 Geomagic qualify 可以对叶片测量数据进行各种类型的配准,且可以实现一键式评定叶型尺寸参数。Hexagon 公司开发的 BladeRunner 和 AEH 公司开发的 AC-VANE,以叶片数据库为平台对叶片的理论数据、实测数据、公差编辑、评定原则等进行统一有效的管理,可以选用不同评定基准,分离叶片形状误差和位置误差。

在叶片的数字化检测环节中,最终的加工误差评定结果与数据采集方式、测量数据匹配方法、误差评定模型密切相关。无论是采用样板测具还是三坐标测量机,测量的误差都是存在的。特别是测具所带来的检

测系统误差,其误差的大小对检测结果影响极大,必须通过匹配方法消除。评定算法的不同对最终的误差结果影响也很大,目前并没有统一的叶型误差评定方法。然而实际工程应用中,由于样板法现场使用方便、检测可靠,仍为主导的叶片型面检测方法。CMM 处理方式的不同,导致误差结果与样板检测不一致,甚至出现相互矛盾。因此,有必要通过分析叶型检测要求和公差约束关系,提出叶型误差检测的新方法,以准确评定叶型的三项形位误差。

叶片测量新技术

1 基于数字样板叶型检测方法

标准样板是根据叶片的理论型线设计制造的与叶型截面对应的母模量具,使用叶片固定座(即型面测具)把叶片固定后,用处于理想位置的叶盆标准样板和叶背标准样板检查叶盆、叶背型面间隙,并反复调整叶片空间位置,以型线的吻合度作为衡量其是否合格的依据。叶型设计图多以透光度或相对误差来表示,如 $\pm 0.15\text{mm}$ 。这个比对误差实际上并不是单纯的形状误差,而是形状误差、尺寸误差、位置误差三者的综合体。

针对标准样板法的特点和存在的缺点,西北工业大学研究了基于数字样板的检测方法^[8]。数字样板检测方法是基于标准样板法的原理,利用数字化测量手段获取测量数据,然后利用虚拟的数字样板,与实测的数据进行匹配,在公差约束条件下达到最佳匹配。最后在其最佳姿态下,求解叶型各项形位误差。基于数字样板检测的方法可以归纳为 3 个主要过程:实物样板数字化、匹配过程模型化、误差评定过程自动化。实物样板数字化是将传统的实物样板转换为 CAD 模型,以数字模型的方式进行样板比对和误差评定。由叶片设计模型构造的三维 CAD 模型,它

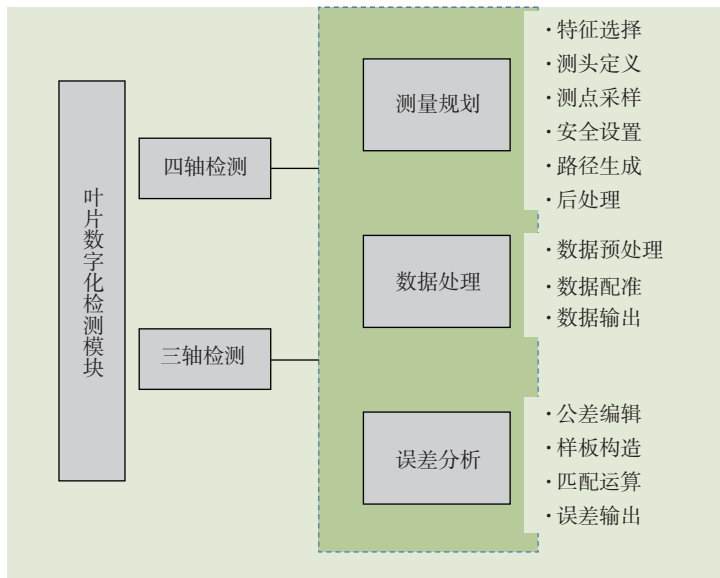


图4 基于数字样板的叶片检测模块功能结构



图5 整体叶盘叶片测量

包括了加工叶片完整的截面几何信息、基准信息,是数字样板法误差评定的模型基础,可以进行表面轮廓度分析、叶型特征参数和形位误差的分析和评定。对于数字样板法的原始测量点集,主要通过CMM测量获得。在数字样板构造的基础上,通过匹配过程的模型化对测量数据和数字样板自动进行调整。针对数字样板法中的原始测量数据,通常需要进行数据预处理,获取真实有效的型面测量数据参与数字样板检测。其中,数据预处理包括测量点去噪、测头半径补偿、坐标变换、测量点与曲面的配准、测量点排序等。首先,数据处理的第一步就是对得到的型面测量点进行去噪,筛选有效的测量数据。其次,CMM测量得到的数据是测头球心数据,必须进行测头半径补偿。对于叶片测量时的装夹引起的系统误差,在样板匹配前必须进行坐标系对齐来消除。基于数字样板的叶片检测模块功能结构如图4所示。

2 叶片高速连续扫描技术

为了提高整体叶盘叶片的检测效率,雷尼绍公司近年来开发了SPRINT高速扫描系统(见图5)。与传统的机内测量技术相比,SPRINT叶片测量系统可以显著缩

短测量循环时间,对叶片前边缘也能提供精确出色的测量结果,可以为叶片自适应加工、工序间检测等提供很好的检测数据。叶片测量分析软件可通过数控机床控制器上的Productivity+™ CNC plug-in直接运行,因此测量数据可通过宏变量自动提供给数控机床,也可以自动提供给连接的计算机进行下游数据处理。SPRINT系统配备的OSP60 SPRINT测头每秒可以采集1000个3D数据点,从而可以满足叶片在机快速检测的要求。

利用SPRINT系统进行测量时,在CNC机床上分别从4个方向对叶片进行测量,从而避免在测量过程中发生测头与工件之间的碰撞干涉。在测量之后,4部分的测量数据将被拼合成一个完整的叶片测量数据集。SPRINT系统可以用于加工过程中工序间的检测,以确保产品的加工过程正确。同时,还可以作为加工完之后的质量检测使用。

结束语

加工过程中以及加工后的型面误差检测是确保叶片加工质量符合公差要求的必要手段。随着测量技术的不断发展,不断涌现出快速、简

易、高效的叶片测量与数据处理技术。同时,随着智能加工技术的发展,在机快速检测技术将推动叶片加工质量与成品率的提升。在这一发展过程中,需要重视和建立叶片在机测量和加工质量的评估标准,从而为这类技术的推广使用奠定基础。

参考文献

- [1] 透平机械现代制造技术丛书编委会. 叶片制造技术. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 郭文有. 航空发动机叶片机械加工. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- [3] 《航空制造工程手册》总编委会. 航空制造工程手册—发动机叶片工艺. 北京: 航空工业出版社, 1997.
- [4] 刘艳. 叶片制造技术. 北京: 科学出版社, 2002.
- [5] 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): 3-41.
- [6] 俞学兰, 叶佩青. 航空发动机压气机叶片型面检测技术. 航空制造技术, 2007(11): 46-481.
- [7] Besl P J, Mckay N D. A method for registration of 3D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [8] 胡树龙. 基于数字样板的叶片加工误差评定方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2013.

(责编 叶枫)