

# 航空发动机叶片型面轮廓光学 测量技术现状及发展趋势\*

黄智,李凯,赵燎,李超,王洪艳

(电子科技大学机械与电气工程学院,成都 611731)

**[摘要]** 航空发动机叶片型面轮廓精度是对其加工质量进行评价的重要指标,测量手段是验证航空发动机叶片合格性的关键技术保证。面临航发制造业的高效测量要求,普通三坐标测量技术较难满足航空发动机叶片测量效率要求,光学测量技术是解决这一技术难题的重要发展方向。因此对国内外的航空发动机叶片不同光学测量技术研究现状整理总结。首先概述航空发动机叶片测量要求,然后从标准模板法、轮廓投影法、三角测量法、干涉法、激光扫描法以及面结构光法等方面概述了国内外航空发动机叶片光学测量技术与设备的技术现状,阐明其应用特点并分析了存在问题。最后结合目前我国智能制造与工业 4.0 趋势方向指出了航空发动机叶片光学测量技术发展趋势。

**关键词:** 航空发动机;叶片;光学测量;标准模板法;三角测量法;光学投影法;干涉法;激光扫描法;面结构光法

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.22.028



黄智

博士、副教授,研究方向为高效精密制造技术、面向制造过程精密测控技术、数控装备等。

\* 基金项目:国家自然科学基金项目(51275078);四川省科技计划项目(2016GZ0004);中央高校业务基本科研业务费项目(ZYGX2015J086)。

航空工业被比作现代工业的“皇冠”,航空发动机更被称为现代工业“皇冠上的明珠”,是飞机的心脏。叶片制造质量的优劣直接影响到航空发动机的性能。叶片的加工过程繁复,加工精度要求极高,需要通过测量验证以分析其加工精度是否达到要求,其主要测评依据为 HB 20126—2012。叶片评价参数包括积叠点、叶型弦线、弦角、叶型厚度、叶型最大厚度、前缘点、后缘点、前后缘半径、中弧线等轮廓特征参数,还包括叶身扭转角、倾斜度、叶型波幅度等位置参数。叶片测量与其他零件测量相比主要特点在于:(1)叶片表面轮廓度复杂,具有较高的扭曲度,前后缘曲率变化特别大;(2)叶片的叶身、前后缘与叶盆、叶背测量精度要求不一致。叶盆、叶背曲率变化相对较小,测量精度基本满足

0.01mm 左右即可,但对于曲率变化较大且半径较小的前后缘位置,一般要求测量精度在 0.01~0.001mm 之间<sup>[1]</sup>;(3)叶片评价参数复杂,需要大量的测量数据;(4)叶片测量效率及精度需要高;(5)测量结果的重复性差异要尽量小,测量结果的稳定性要高。目前主要的叶片轮廓测量方式包括专用测具、电感量仪、光学投影检测和三坐标测量机等,各种方式测量精度与效率不同,其中应用范围较广的是主流测量方法三坐标测量机(Coordinating Measurement Machine, CMM)和标准样板法。CMM 接触式测量方式大多采点效率较低,在测量叶片边缘易失真,易发生干涉效应且存在测端半径补偿误差等问题<sup>[2]</sup>。标准样板法利用标准轮廓样板卡紧叶片对应的截面,借助辅助灯光照明,根据二者漏光间隙

大小直接观测轮廓差异。但一块样板对应一条截面型线,完成整体检测需要匹配大量样板,所以只能用于工序间对叶片型面的检测。

随着测量技术的进步,越来越多的非接触式测量技术被引入到航空航天等领域中,极大地弥补了接触式测量设备的局限。目前,国外对于叶片等复杂曲面零件的测量已经形成了较为完善的方法,并且开发出了成熟的产品和设备,从而在叶片的加工、测量等方面实现了自动化、智能化。目前国内在高精度光学扫描测量技术和设备方面还处于起步阶段,尚未达到工程实用的要求,而国外的高性能叶片测量装备对我国军工制造企业封锁和禁运。因此国内更多的学者陆续将研究方向转向了以光学测量为主的叶片测量技术的研究。下面将主要以光学非接触式测量叶片型面相关技术分析进行展开。

## 主要叶片光学测量技术及装置

### 1 轮廓投影法

该技术是早期叶片尺寸误差检测至关重要的手段,如图1所示,上下光源向叶片投射光面,在叶片表面发生漫反射,镜头组捕捉到反射光信号并在投影屏上将结果显示出来<sup>[3]</sup>。

传统轮廓投影法表现最直观的轮廓形状差异,但投影与理论轮廓存

在配准问题。虽通过最小二乘法保证整体配准度,却使得局部误差被放大或者缩小<sup>[4]</sup>,很难将结果从视觉层面上细化到数据分析层面上。同时掺杂投影仪背景白噪声影响其测量精度,文献[5]提出以多次测量的方式降低背景白噪声的影响,但引入了更多的系统误差与测量随机误差。综上,提高图像分辨率和数据分析能力是叶片轮廓投影技术重要的发展方向。

### 2 三角测量法及其装置

三角测量法结构简单、测试速度快、实时处理能力强、使用灵活方便,在工业中的长度、距离以及三维形貌等检测中都有着广泛的应用<sup>[6]</sup>。图2所示为三角测量法原理,光源、物点和像点之间存在三角关系,已知光源和传感器上像点的位置,可计算出物点的位置<sup>[7]</sup>。

20世纪80年代末, Tsabourakis等<sup>[8]</sup>开发了基于激光三角测量法的叶片测量系统,于系统Z向布置激光器,叶片装夹在另一可做X/Y方向移动的平台上,通过两台CCD相机接收位置信息。其精度等级一般,采点效率较低,仅5点/s。日本DMG Mori Seiki的Nishikawa等<sup>[9]</sup>研发了一种基于激光位移传感器的在机测量叶片系统(图3),以实现叶片的加工测量一体化,测量精度可达 $1\mu\text{m}$ ,测量速度平均8ms/点。

传统三角测量装置一般采用红

色的可见激光作为光源,波长范围窄,易受叶片表面光学特性、反射率、粗糙度等影响,导致测量结果不准确。鉴于其存在的上述缺陷,诸如德国WENZEL等公司开发的白光测量机,采用白光光源,波长比激光更长,光源体积更小,减小了测量数据受被测叶片表面特性的影响<sup>[10]</sup>;日本KEYENCE公司开发的蓝光测量仪,采用能耗低的蓝光光源,故寿命较白光更长,且蓝光性能更稳定,受环境光源影响小的特点使得其测量精度更高。

国内三角测量技术应用虽然起步较晚,但也取得过不少研究成果。清华大学陈凯云等<sup>[11]</sup>提出了基于激光三角法的叶片型面在线测量方案,在原三轴测量的基础上添置转台,采用四轴联动方式实现叶片整体测量,测量精度达 $0.01\text{mm}$ ,测量效率可达 $4\text{min/叶}$ 。西安交通大学的机械制造系统工程国家重点实验室<sup>[12]</sup>设计了专门的叶片测量系统,如图4所示。激光位移传感器沿Z方向移动,由转台带动叶片的叶盆、叶背测量的转换,调整传感器在Z向的位置以实现按高度测量,测量数据经过坐标转换实现数据还原。由于其利用等高法

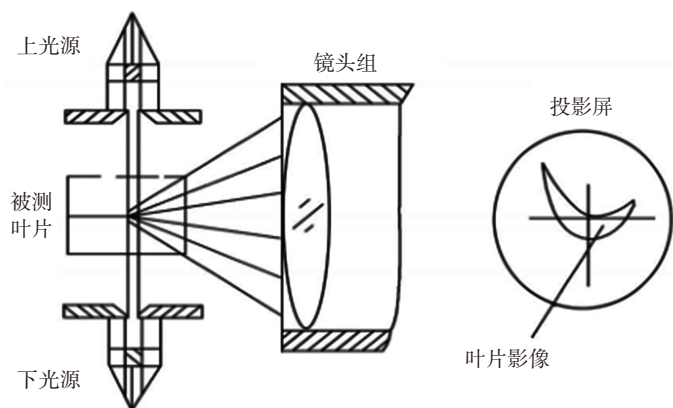


图1 轮廓投影法  
Fig.1 Contour projection

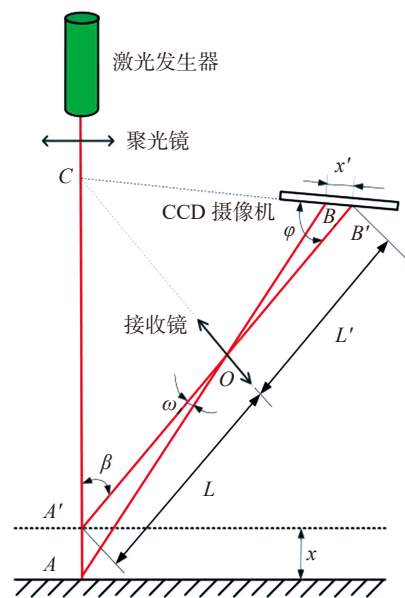


图2 三角测量法  
Fig.2 Laser triangulation measurement

作为其测量依据,与转台夹具安装,坐标配准就联系紧密,需要严格控制试验设备安装精度。

迄今为止,三角测量法已经发展相对成熟,但即便已经出现用于实际生产的产品,测量效率依然受限于相机曝光时间、机械移动速度以及距离计算;同时精度等级受电子噪声、表面形状、表面反射率、光源指向稳定性、表面粗糙度影响<sup>[13]</sup>。此外综合上述文献中提及内容发现,国内目前研究主要停留在等高度距离截面测量规划上,对数据的分析依靠叶片截面特征参数,无法完全表征叶片曲面特征,面特征点测量增大了测量规划的难度,且测量后数据处理繁复,解决这一问题有助于提高三角法叶片测量实时性以及叶片数据还原精度。

### 3 干涉测量法及其装置

在航空发动机叶片的加工过程中,通常利用干涉技术探测叶片表面粗糙度<sup>[14]</sup>,其基本原理如图5所示。其测量精度很高,但受限于波长,所以测量范围一般都不大。该技术还



图3 叶片在机三角测量系统

Fig.3 Blade measurement system on machine

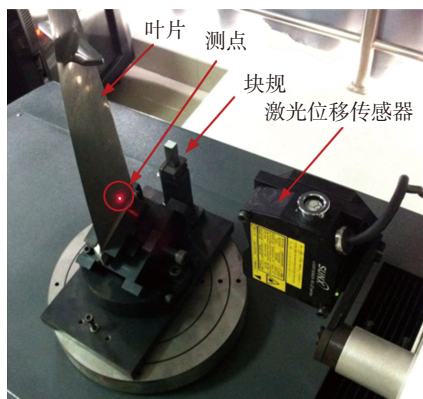


图4 激光位移传感器叶片测量系统

Fig.4 Blade measuring system with LDS

可结合高精度坐标测量机,通过分别对三轴位移进行测量以获取探针与叶片触点坐标信息,实现叶片轮廓的干涉测量。

合肥工业大学的纳米测量实验室王伟丽<sup>[15]</sup>利用干涉仪作为标尺系统成功研制的坐标测量机精度可达纳米级,远远高于普通坐标测量机。而海克斯康公司开发出基于光纤干涉测量的高精度光学测量技术(High-Precision Optical, HP-O),直接用于测量头,接收角度重复性小于 $0.3\mu\text{m}$ ,整体叶盘检测效率提升95%<sup>[16]</sup>。此外低相干光测量(Low-Coherence Interferometer, LCI)与白光干涉测量技术类似,如图6所示,LCI将低相干光作为光源,可直接用于叶片表面粗糙度的测量<sup>[17]</sup>。因其获取表面信息精度等级非常高,所以对数据处理有着较高的运算要求。

干涉测量技术能精确表征叶片表面粗糙度变化,在叶片尺寸测量的基础上反映了细致的表面加工误差,将测量结果直接深入到微观层面,为叶片加工评价提供更全面和直接的证据。虽其精度等级较高,却不能适应大型叶片整体测量,存在测量范围局限性。再者,叶片表面粗糙度、反射率等将影响实际测量效果。加

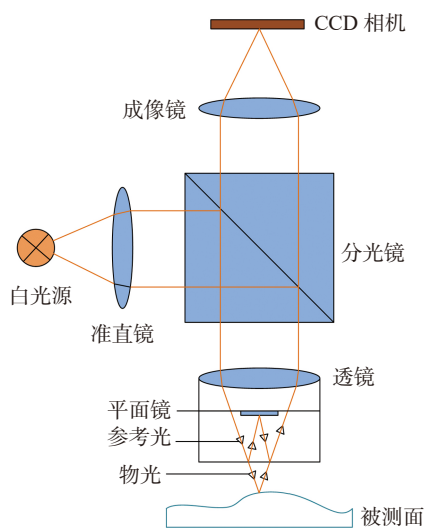


图5 干涉测量原理

Fig.5 Principle of interference measurement

之其成本较高,基本只被应用于有高精度测量要求的场合。

### 4 激光扫描技术

在三角测量法的基础上采用线光源代替点光源,光源可采用红外激光也可采用白光<sup>[18]</sup>,只需要进行一维扫描就可以获得物体的深度图,图像获取和图像处理的时间将大大减少<sup>[19]</sup>。如图7所示,激光测头发光束与被测物体相交产生光线条纹,利用CCD摄像机采集数字图像,经图像处理获取其二维信息。

该技术的缺陷在于测量过程中存在盲区,无法测量到被测物体的背面<sup>[20]</sup>。可通过被测物两侧架设两台型号规格相同的测量装置同步测量,但测量前需提前完成校准,否则将导致截面测量数据无法配准。也可通过将叶片安装固定在转台上的方式实现对叶片轮廓的完整测量。

图8为加拿大ShapeGrabber公司开发的3D激光扫描仪装置Ai 210,其具有扫描速度快、采点密度大等特点,每秒采点约35万个,扫描一个叶片只需几分钟。通过对激光测距计算的距离和扫描偏转角度换算叶片空间点云三维坐标。测量中间过程基本自动化,不论是在实际工业生产还是航空航天零部件检测都具备广泛适用性。

综上所述,激光扫描技术在一定程度上解决了传统测量机测量效率低下的缺点,更注重表现叶片曲面整体加工误差,可视化能力更强。

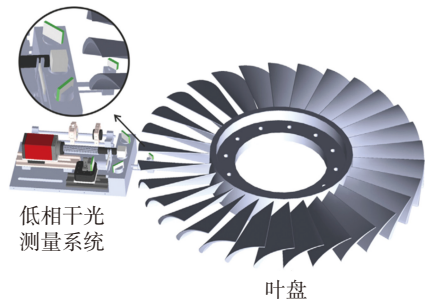


图6 低相干光叶片测量系统

Fig.6 Blade measuring system with low coherent light

但其测量精度很难得以保证,采点效率高的同时也伴随着数据冗余量大的问题<sup>[21]</sup>,巨大的数据量需要更加有效的数据提取手段才能保证测量数据的有效性,从而提高测量结果的可靠性。

## 5 双目结构光测量法

双目结构光测量法是目前应用较为广泛的一种非接触式三维测量方法,其主要将双目视觉技术和面结构光技术相结合,即通过两个不同角度的 CCD 相机捕捉到被可控结构光照射的物体照片,经过一定数学计算得到物体的空间点云信息。

其中双目视觉技术属于图像分

析法,为被动式三维测量方法,基于不同视觉角度观测同一物体上的测量点,根据视差原理由已知空间几何信息计算被测位置空间坐标信息,从而恢复待测物面的三维信息,如图 9 所示。

由于单纯使用双目视觉技术即只依靠自然光不添加任何光源时,受本身测量能力限制,测量数据失真的情况较为严重,显然该技术并不能满足叶片的测量精度要求。故引入属主动式三维测量方式的结构光技术作为双目视觉技术的光源:一是为了提高测量的稳定性;二是以提高测量精度为目的,实现双目视觉技术

的升级。

面结构光技术又被称作全场式结构光法,一般采用条纹投影或者光栅投影实现测量。1982 年,条纹投影法由 Takeda 等<sup>[22]</sup>首次提出,随后被应用到三维面型的检测上。可通过对物体表面多处待测位置标志点不同角度投影,根据标志点的多个二维坐标重建出对应点位的三维坐标,实现对被测对象的数字化建模和测量<sup>[23]</sup>。如图 10<sup>[24]</sup>所示,相位条纹投影至被测物体表面,受到测量位置到基于参考面的高度调制,所以返回到相机的图像会出现变形。此外,也可采用经过调制变形的相位条纹投影获取未调制相位条纹图像结果的方式,测量叶片的表面轮廓,能够非常直观地反映叶片轮廓形状。

图 11 所示为德国 GOM 公司开发的 Atos Core 已实现利用双目结构光技术对叶片实时测量,并针对测量数据评价叶型特征参数,生成数据文件直接反映叶片表面误差。

图 12 所示为 GOM 公司开发的 ATOS II Triple Scan Blue Light 测量系统<sup>[25]</sup>则是利用蓝光投影进行叶片测量,并利用配套的软件系统实现测量数据模型重构、误差比对,测量精度 0.02~0.62mm。采用蓝光光源受环境光影响更小,但测量精度的起伏依然受摄像机分辨率、稳定性、图像处理速度、被扫描叶片表面特性等因素影响。

国内光学测量厂家先临三维科技研发的 Shining 3D-Scanner OpticScan-D 双目三维扫描仪基于白光的双目视觉技术测量方式原理,结合 smart 自动转台以及叶片数据处理软件 Geomagic Qualify 对已经实现涡轮叶片整体测量,精度能达到 10 $\mu$ m,表明国内该领域开始出现拥有较为成熟研发能力的企业与实用化产品。

这种主、被动测量结合运用的方式已经成为当前光学三维测量技术

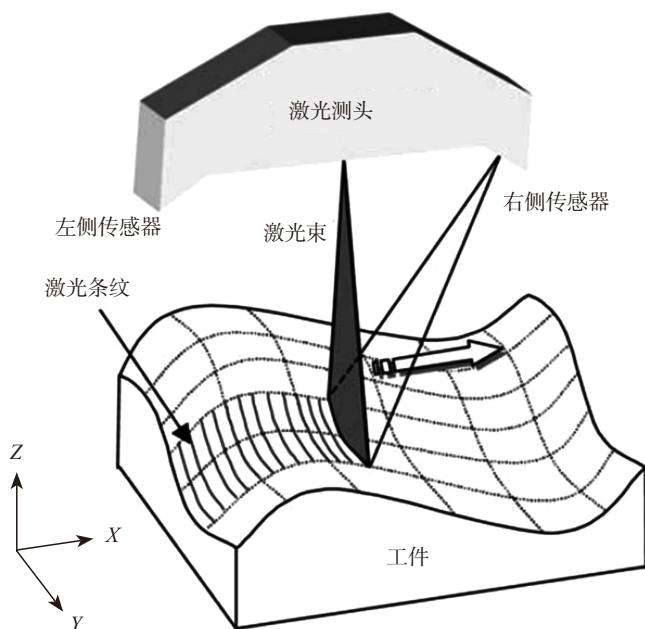
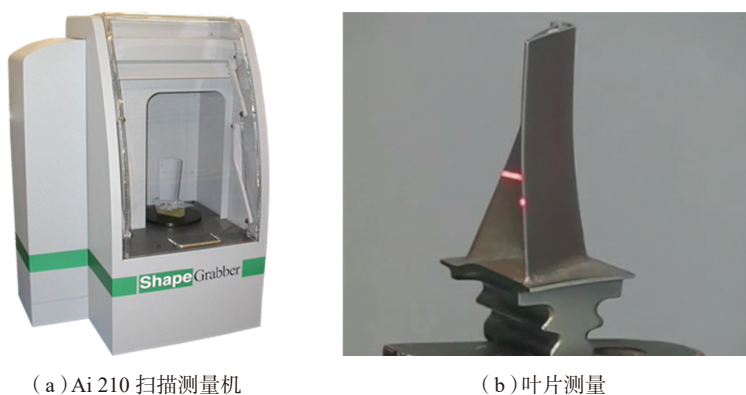


图7 线激光扫描测量原理

Fig.7 Measuring principle of linear laser scanning



(a) Ai 210 扫描测量机

(b) 叶片测量

图8 ShapeGrabber Ai 210叶片测量系统

Fig.8 ShapeGrabber Ai 210 blade measuring system

的一个重要发展方向,同时采用组合双目视觉摄像机的多目视觉技术能够实现叶片轮廓全方位测量,具有更高的灵活性。文献 [26] 中提出一种基于双目视觉结合光栅相移技术的全局测量结构,如图 13 所示,通过在叶片进气边、出气边、叶盆、叶背 4 个方向放置 4 组相同投影测量装置,完成整体测量,得到叶片数据点云。

尽管双目结构光测量方式已得到普遍应用,但实际测量结果依然受光学噪声、投影照明、相机分辨率、可能存在的机械振动,甚至于叶片本身表面粗糙度、表面涂覆均匀程度、后期图像提取算法等因素影响<sup>[17, 27]</sup>,这些因素可能直接导致后期数据提取失败,模型还原不完整,如图 14 所示。

通过上述应用实例分析不难发现,双目结构光测量法可达到整体型面测量评估、控制叶片加工质量的目

的。虽能够提高测量效率,但受被测物体表面特征影响更为严重,同时测量结果精度受制于平面标定与相机标定准确度。针对具体的叶片测量一般通过对表面同一预设特征位置进行多视角采集来共同确定基准参考平面,但每个投影端与接收端都分属独立坐标系,导致其数据处理复杂,文献 [28] 中提出了选取表面 2D 特征位置的方法,类比 3D 特征位置简化了运算,提高了校准效率,但对被测物尺寸的要求太高,仅适用于小型叶片测量。当前双目结构光叶片测量的难点集中在对叶片测量数据的处理部分,需要结合计算机图形学技术还原叶片形貌。国内的数据处理软件开发技术还滞后于国外,使得双目结构光的叶片测量分析功能尚不能比肩国外水平。此外数据处理过程难以规避人为因

素影响,计算误差同样是制约数据还原精度的一大因素,对数据处理算法的优化将是双目结构光测量技术深入研究的重点内容。

本文介绍的关于航空发动机叶片光学测量方式虽然原理结构、测量特点都不尽相同(不同光学测量方法的测量能力比较如表 1 所示),却同时受制于多种因素影响其测量精度,总结分析如下:

(1) 叶片表面轮廓特征测量要求不一致影响测量结果。例如叶片进排气边与叶盆、叶背测量精度要

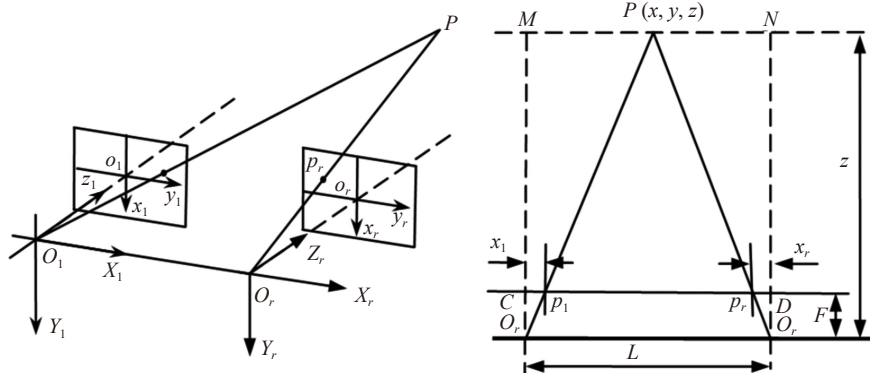


图9 双目视觉原理  
Fig.9 Principle of binocular vision

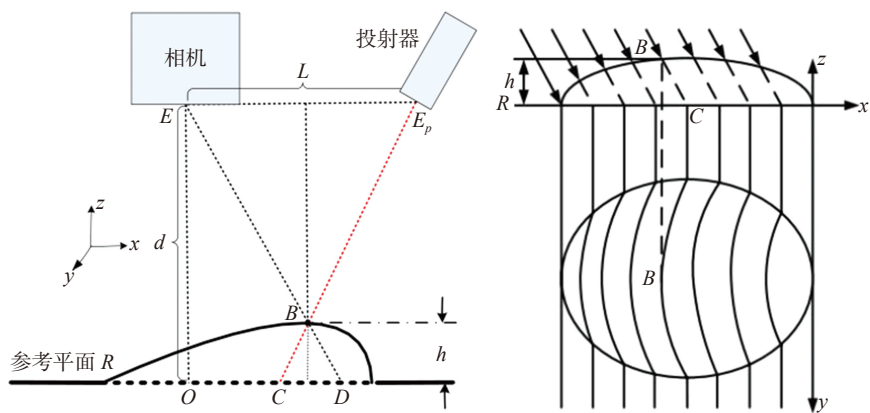


图10 相位法原理  
Fig.10 Measuring principle of phase profilometry



图11 Atos Core 结构光测量系统  
Fig.11 Atos Core structured light measuring system



图12 ATOS II Triple Scan Blue Light 测量系统  
Fig.12 ATOS II Triple Scan Blue Light measuring system

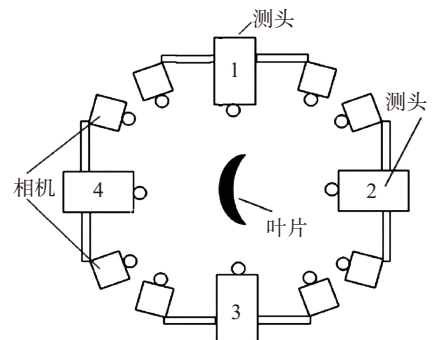


图13 双目全局测量系统  
Fig.13 Binocular global measuring system

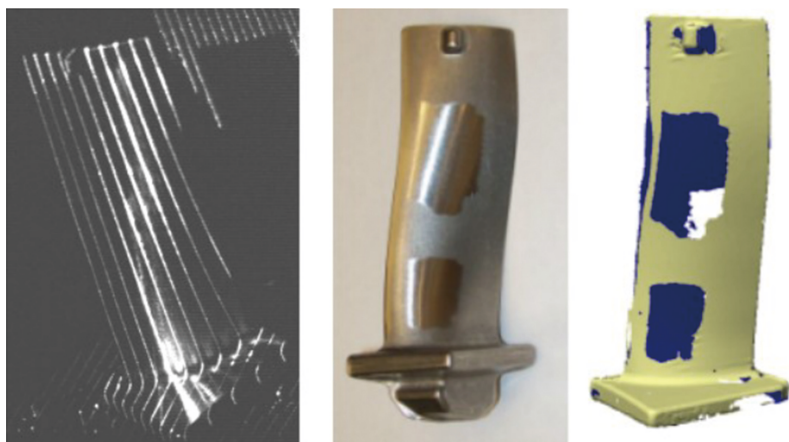


图14 结构光法测量结果

Fig.14 Results of structured light measurement

求不一致,若按照进排气边的精度标准易导致叶盆、叶背数据冗余,提高数据处理难度;若按照叶盆、叶背的精度标准将可能引起进排气边数据失真。

(2) 叶片表面质量影响测量结果;叶片光学测量需要表面质量满足更加苛刻的条件,叶片表面需保证光洁,对光反应灵敏度高。表面纹理不均匀、二次反射、镜面反射、体积散射、颜色过渡或加工余量,也可能会导致严重的系统测量误差<sup>[29]</sup>。

(3) 系统标定精度影响测量结果;叶片测量后数据需要与原始数据文件进行比对才能实现对测量数据的评价,光学测量技术需要提前标定系统坐标系,特别针对多视觉测量系统,系统标定精度高低将直接影响测量结果。

(4) 采点效率高既是其优点同样也是其弱点,与CMM不同的是其

测量数据点与理论数据点的对应关系较弱,数据中通常包含了大量的冗余点与失效点,需要提高数据提取能力又需要尽量减少算法筛选的人为因素,从而保证实时性与防止数据失真。

提升光学测量技术测量叶片效率与精度的关键是既需要提升硬件研发水平,同时也需要扩展软件算法的开发能力,使对叶片测量更具针对性,测量与数据处理实时性更强。

### 叶片光学测量技术发展趋势

随着高端航空发动机研制过程的推进,对于叶片本身制造精度及其相应的测量技术的要求也日益提高。根据目前光学测量在航发叶片测量方面存在的问题,同时结合工业4.0和中国制造2025的发展要求,本文认为航发叶片光学测量技术的发展趋势如下:

## 1 高精密化

首先,由于叶片轮廓表面复杂度较高,必要关键尺寸位置的获取存在一定难度。多数光学测量技术尽管有着较高的测量效率,但测量精度很难与测量速度兼顾。光学测量的测量精度受叶片表面特性及外部环境的影响较大,如何增强光学测量的抗干扰性,是实现航发叶片光学精密测量的一个重点内容。

其次,针对整体叶盘的测量,其叶片间的相互遮挡导致单次测量无法获取叶片表面的完整数据,需从不同角度进行多次测量,并将测量数据进行配准处理后才能获得完整的测量数据。数据配准处理的精度也将严重影响到光学测量的精度。光学测量技术如何在叶片相互干涉的情况下快速准确地完成对整体叶盘型面的测量,也将是一个研究的重点。

## 2 高效率化

光学测量虽然在获取叶片表面测点数据方面较传统接触式测量有了极大的提高,但也存在冗余信息量比较大和噪声干扰点较多的问题,因此数据处理是一个巨大的挑战。除了研究如何降低光学测量航空发动机叶片的干扰外,如何标定测量点数据和优化提取有效测量点,以高效处理信息来源上的噪音也是提高叶片光学测量效率的一个重要研究内容。

## 3 智能化

在智能制造的大背景下,自动化

表1 测量方法能力比较

Table 1 Comparison of measurement methods

测量方法	测量精度	测量效率	成本	测量特点
轮廓投影法	0.1mm	较低	低	用于叶片型面轮廓检测,属于单型面全型线测量
三角测量法	0.001~0.01mm	高	较高	用于叶片轮廓及几何尺寸检测,精度及效率受外界影响较大
干涉测量法	30~1nm	很高	较高	用于叶片表面粗糙度检测,检测范围小
激光扫描法	0.03~0.08mm	较高	高	用于叶片轮廓及尺寸检测,属于叶身整体型面测量,采点效率高,数据冗余量大
双目结构光技术	0.01~0.03mm	高	高	用于叶片轮廓及尺寸检测,属于整体型面测量,能多组装置同时测量整体型面

工厂越来越普及,智能化生产也将越来越广泛。智能化是指能够结合数据管理分析,针对不同的工作环境、测量对象和测量要求提供适当的测量方案并自动执行,以此来减少测量过程中人为因素的干预,实现叶片零件的在机智能化测量。在叶片加工过程中,实时采集叶片的精度信息并通过云端进行存储及其可视化显示与评估,然后再将这些修正信息通过工业物联网技术直接反馈给数控加工设备,实现高精度低损伤叶片制造,从而提高加工的品质。而研究如何在复杂车间环境下实现叶片在机光学测量并保证其测量的可靠性和智能化测控策略是实现航发智能制造的重要方向。

## 结论

传统普通的三坐标测量叶片的方式测量效率较低。为满足叶片制造日益增长的迫切要求,提高测量效率迫在眉睫,这为测量效率较高的光学测量技术应用领域带来了契机。如何保证测量效率的同时兼顾提高测量精度,是目前以及未来很长一段时间国内光学测量叶片技术需要攻克的难题。通过对国内外叶片光学测量技术的梳理分析发现,国外的研究起步较早,测量技术种类丰富且取得一些成果,大多已经产品化并应用于实际的生产测量中;国内研究以科研试验为主,对激光扫描式测量研究较多,但大多仅仅是用于验证结果有效性,研究内容较为单一,在提高测量精度的研究上尚未取得突破性的进展。虽然如此,在短时间内依然取得了不少成果。国内高校院所开始重视其他光学测量手段在叶片测量中的应用研发,不少测量企业已经着手开发可应用的产品技术。从文献中提到的上述测量技术的更迭换代也可以看出,随着测量设备功能的不断完善和现代测量技术的相互交融互补,正推动叶片的光学测量方式向高精、高效、

智能化的方向发展。光学测量技术必将为当前我国航空发动机制造过程中的叶片等复杂零件的测量提供更有效解决方案。

## 参考文献

- [1] 俞学兰,叶佩青.航空发动机压气机叶片型面检测技术[J].航空制造技术,2007,50(11):48-50.
- [2] 黄智,李超,李凯,等.航空叶片型面三坐标检测技术现状及发展趋势[J].航空制造技术,2017,60(21):73-79.
- [3] 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.
- [4] HARDING K. 3D profilometry: next requests from the industrial viewpoint[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Brussels, 2010.
- [5] XU X, HUANG Q, SHEN Z, et al. Improving the surface metrology accuracy of optical profilers by using multiple measurements[J]. Optical Engineering, 2016, 55(10): 104-105.
- [6] 王晓嘉,高隽,王磊.激光三角法综述[J].仪器仪表学报,2004,25(S2):601-604.
- [7] SUN B, LI B. Laser displacement sensor in the application of aero-engine blade measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 16(5): 1377-1384.
- [8] TSABOURAKIS N, RISTIC M, BESANT C B. Development of a profile

gauging sensor[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1988, 3(2): 51-66.

[9] NISHIKAWA S, OHNO K, MORI M, et al. Non-contact type on-machine measurement system for turbine blade[J]. Procedia Cirp, 2014, 24: 1-6.

[10] 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[J].航空制造技术,2014,57(13):48-51.

WU Zhixin, HAN Wei, HUANG Wei. The research and application of non-contact measuring machine with white light in blade detection[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(13): 48-51.

[11] 陈凯云,谢晓芹,叶佩青.航空压气机叶片型面在线激光测量系统设计[J].制造技术与机床,2004(8):53-56.

CHEN Kaiyun, XIE Xiaoqin, YE Peiqing. Design on on-line laser measurement system for vane of aero-engine compressor[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2004(8): 53-56.

[12] SUN B, LI B. A rapid method to achieve aero-engine blade form detection[J]. Sensors, 2015, 15(6): 12782-12801.

[13] CREEHAN K D, BIDANDA B. Reverse engineering: a review & evaluation of non-contact based systems[M]. New York: Springer, 2006.

[14] HUANG J, WANG Z, GAO J, et al. Overview on the profile measurement of turbine blade and its development[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Brussels, 2010.

[15] 王伟丽.纳米三坐标测量机机械结构及接触式测头技术研究[D].合肥:合肥工业大学,2008.

WANG Weili. Study on the mechanism and touch trigger probe system of micro/nano coordinate measuring machine[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008.

[16] 孟书广.航空发动机复杂零部件的新型测量技术[J].航空制造技术,2014,57(13):32-35.

MENG Shuguang. New metrology technique for complex components of aero-engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(13): 32-35.

[17] ZOU Y, LI Y, KAESTNER M, et al.

Low-coherence interferometry based roughness measurement on turbine blade surfaces using wavelet analysis[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2016, 82: 113–121.

[18] ROSS J, HARDING K, HOGARTH E. Challenges faced in applying 3D noncontact metrology to turbine engine blade inspection[C]//*Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. San Diego, 2011.

[19] 陈亮辉. 采用结构光方法的三维轮廓测量[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.

CHEN Lianghui. Three-dimensional profile measurement using structured light method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.

[20] FAN K C. Innovative optical scanning technique and device for three-dimensional full-scale measurement of wind-turbine blades[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(12): 122411.

[21] ZHOU L. A case study of blade inspection based on optical scanning method[J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(7): 2165–2178.

[22] TAKEDA M, INA H, KOBAYASHI S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, 72(1): 156–160.

[23] 李华伟, 申作春, 覃银红, 等. 相位测量轮廓术应用于叶片测量[J]. *航空动力学报*, 2012, 27(2): 275–281.

LI Huawei, SHEN Zuochun, QIN Yinong, et al. Application of phase measurement profilometry in blade[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2012, 27(2): 275–281.

[24] 张甫恺. 正弦相位调制光纤干涉条纹投射相位轮廓术关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.

ZHANG Fukai. Key techniques for phase profilometry based on sinusoidal phase modulation fiber-optic interferometry[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

[25] BUDZIK G, KUBIAK K, ROKICKI P, et al. Optical measurement of aircraft engine turbine blades[J]. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 2013, 20(2): 22–26.

[26] YUE L, LIU X. Application of 3D optical measurement system on quality

inspection of turbine blade[C]//*International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management*. New York: IEEE, 2009.

[27] PÖSCH A, SCHLOBOHM J, MATTHIAS S, et al. Rigid and flexible endoscopes for three dimensional measurement of inside machine parts using fringe projection[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2017, 89: 178–183.

[28] LIU X, CAI Z, YIN Y, et al. Calibration of fringe projection profilometry using an inaccurate 2D reference target[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2016, 89: 131–137.

[29] SANSONI G, CARMIGNATO S, SAVIO E. Validation of the measurement performance of a three-dimensional vision sensor by means of a coordinate measuring machine[C]//*IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference*. New York: IEEE, 2004.

通讯作者: 黄智, E-mail: zhihuang@uestc.edu.cn.

## Current Technique and Development Trend of Optical Measurement of Aero-Engine Blade Profile

HAUNG Zhi, LI Kai, ZHAO Liao, LI Chao, WANG Hongyan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**[ABSTRACT]** It is an important indicator of the surface quality evaluation for aero-engine blades contour accuracy. Profile measurement has become the main technical assurance to verify the qualification of the aero-engine blade. Facing efficient measurement requirements of aerospace manufacturing industry, the normal coordinate measurement technology is gradually harder to meet the measurement efficiency requirements. The optical non-contact measurement method is becoming an important developing trend for solving the issue. This paper summarizes the current situation of different optical noncontact measurement methods of the aero-engine blade in China and abroad. Firstly, the measurement requirements of the aero-engine blade were summarized. Secondly, the research status of optical non-contact measurement methods and apparatus of the aero-engine blade were summarized from standard templates, contour projection, triangulation, interference, laser scanning, and structured light to clarify its application characteristics and limitations. Finally, combined with the development of the current intelligent manufacturing in China and industrial 4.0 in Germany, it was pointed out that the developing technology trend of the non-contact measurement of the aero-engine blade.

**Keywords:** Aero-engine; Blade; Optical non-contact measurement; Master templates; Laser triangulation measurement; Contour projection; Interference; Laser scanning; Structured light

(责编 铃兰)