

# 光学测头在飞机发动机叶片检测中的应用

Application of Optical Probe in Aircraft Engine Blade Inspection

温泽测量仪器(上海)有限公司 王淼安



王淼安

毕业于同济大学汽车工程专业,后赴德国留学,就读于德国慕尼黑工业大学机械制造专业,获硕士学位。曾在德国某光学测量仪器公司进行相关产品的测试研发工作,现在温泽测量仪器(上海)有限公司任产品经理。

在航空制造领域中,飞机发动机技术占据了至关重要的位置,其中发动机叶片的加工与检测尤为困难。虽然如此,由于叶片的加工质量对飞行安全的重要性尤甚,因此对其品质的检测较其他机械零部件要严格复杂得多。叶片在工作状态下有很高的空气动力学要求,因此叶片的形状有几个显著特点:第一,叶片的型面

MAXOS/CORE 在硬件方面以独特的白光点光源测头,克服了传统触发式测头采点速度慢、测量微小物体时容易产生测头半径补偿方向错误的不足,同时也规避了其他光学测头具有的散斑效应以及反射光信号强度等问题,适用于任何表面的叶片测量而无须喷涂。

是空间自由曲面,每个截面高度的型线轮廓形状不尽相同,并且同时呈扭转上升状;第二,叶片的后缘部分相对厚度较薄,尤其是出气边半径非常微小。这2个特点给叶片测量造成了一定的困难。

目前的叶片检测主要依赖于传统的接触式三坐标测量机。接触式三坐标测量机自1956年问世以来,已经经过了50多年的发展,广泛应用于生产车间及科研部门。随着工业技术的不断进步,对测量设备的各方面要求也不断提高,三坐标测量机在此过程中也经历了无数次的技术创新以适应更高的测量要求。尽管如此,当今三坐标测量机依然在某些方面遇到了一定的技术瓶颈。这些瓶颈的产生不能简单地归结于技术创新的不足,其主要原因在于接触式

三坐标测量机的硬件结构和测量原理上的限制。

## 传统测头应用中出现的问题

传统三坐标测量机配备最多的是触发式测头,用触发式测头测量物体时,测针以一定速度接触物体表面,从而使测针的位置产生偏离,产生的电信号触发测头记录一个物体表面测点的空间坐标。由此带来的第一个问题就是测量速度较慢。其原因在于,触发式测头的采点方式是非连续的,测头在一次采点完成后需退回一段距离,让测针归位后才能进行第二次采点;而且采点时接触物体表面的速度不能太快,若测针接触物体速度过快使得测针的位置偏离过大,则信号会被认为是发生了碰撞而采点失败。基于此,可以用扫描式

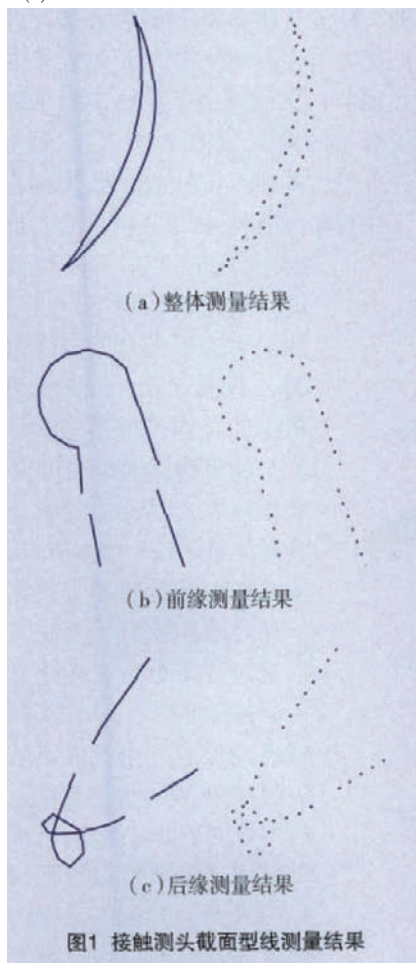
测头代替触发式测头,扫描式测头采用的是连续采点方式,因此采点速度得到较大提升。限制测量速度的第二个原因在于,如果被测物体具有比较复杂的几何形状,那么测针需要变换若干次指向才能完成整个测量,并且测针的每个指向都需进行校准。如果要克服这一不足,从而进一步提高测量速度的话,需要给三坐标测量机配备高端的多轴旋转扫描测头,该项新技术能够以连续方式高速扫描物体进行采点。

接触式测量所用的测针尖端一般为红宝石球,测头采点所得的空间坐标为红宝石球的球心位置。而测针与物体表面的实际接触位置并非球心,所以物点的坐标必须根据红宝石球的半径进行补偿。由此带来了接触式测量的第二个问题,即红宝石球的半径补偿方向错误。

在测量叶片截面型线时,普遍的做法是将CAD模型沿垂直方向做等高切割,得到被测截面的名义轮廓,并在名义轮廓上根据曲线特征构造出疏密不同的测量点。例如叶片的前后缘变化相当大,为了避免在测量中损失这部分的几何特征,需要在这两部分增加测点密度。

如前所述,三坐标测量机记录的坐标为测针红宝石球中心的空间坐标,如果测针接触被测物体表面的方向不是这个面的法线方向,会使接触点与待测点产生偏离。如果以测针中心点坐标进行测针半径补偿,获得的坐标值误差会较大。测针半径补偿通常采用自动整体补偿的方式,其补偿方向是由三坐标测量机或是软件自动完成的。图1中显示了一组截面型线的测量结果,图1(a)为截面型线的整体测量结果,从图中可以看出,在曲率变化不大的叶盆和叶背部分测量结果相当不错,测点的排序整齐无错乱。图1(b)和图1(c)为叶片前后缘的测量结果放大图,图中显示了这部分测点分布错乱的情形。造

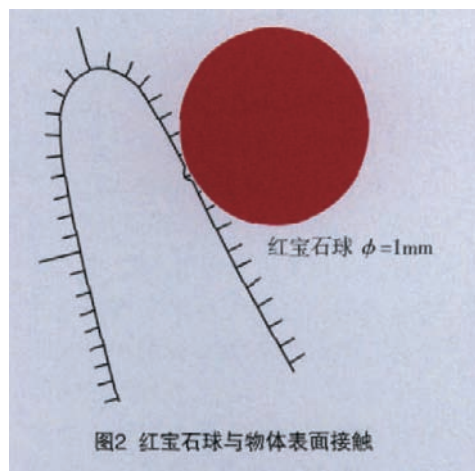
成这种现象的原因在于,相对于叶片前缘和后缘微小的几何尺寸来说,叶片截面型线轮廓的实际值与名义值之间的偏差较大,使得实际测点落在了工件以外较远处,造成测针无法如预期般采点。这样就会出现补偿错误,造成获得的几何特征与实际不符,如图1(b)中形成棒槌状,或如图1(c)中出现交错。



此外,物体表面还存在一定不平整度,形似连续的峰谷。和测针红宝石球的直径相比,峰谷的高度非常微小。当测针扫过物体表面时,红宝石球能够接触到凸起的峰尖部分,但不一定能够接触到物体表面某些微小的凹陷(如图2所示),这样测得的物体实际轮廓就会产生失真。

### 光学测头的原理与应用

出于以上原因,近年来光学测头越来越多地投入到应用当中。光学



测量作为一种非接触式测量方法,在某些方面与接触式三坐标测量相比具有本质上的优势。它不使用接触式测针进行采点,而是利用了光的物理特性来进行测量,这样就能够完全避免测针补偿带来的潜在问题,也使被测物体表面不再受到测针接触带来的影响。而光学测头的测量速度通常也远远高于触发式测头。首先,光学测头的采点方式都是连续的,不需要进行测针归位;而且在采点过程中,光学测头也区别于触发式测头:触发式测头会因为接触物体表面时速度过快而被认为发生了碰撞,而光学测头则完全不会出现这个问题。

光学测头的分类方法有很多,种类更是繁复。从测量原理上通常可以分为共轴测量和三角测量;从光源维度上可以分为点光源、线光源和面光源;从光源色谱上又可以分为单色光源和白光源。共轴测量中常见的方法有2种:其一是干涉法,它利用了光的波长特性,将一束光通过平面分光镜(半透半反)分成两束,一束由镜面反射至参考平面,另一束则透射至被测物体表面,两束光经叠加后产生干涉条纹,干涉条纹的形式取决于物体的距离与物体表面的几何特征;另一种是共焦法,从一个点光源发射的探测光通过透镜聚焦到被测物体上,如果物体恰在焦点上,那么反射光通过原透镜应当汇聚回

到光源,即所谓的共焦。在反射光的光路上加上了一块半反透镜,将反射光折向带有小孔的挡板,小孔位置相当于光源。光度计测量小孔处的反射光强度,强度最大时物体即位于透镜焦点平面,这样即可测得物点的位置。三角测量则利用光源、像点和物点之间的三角关系来求得物点的距离。以点光源为例(见图3):光源向物体发射一个光点,光点到达物体后经过反射在传感器上得到一个像点;光源、物点和像点形成了一定的三角关系,其中光源和传感器上的像点位置是已知的,由此可以计算出物点的位置所在。

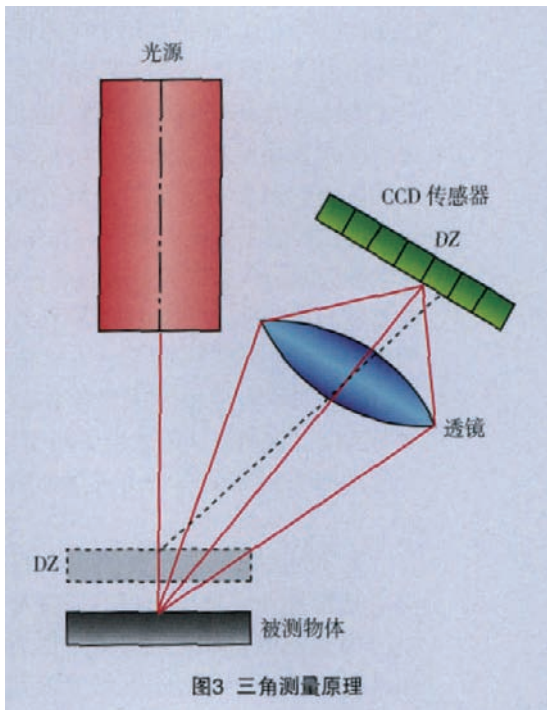


图3 三角测量原理

目前各种光学测头采用的光源种类主要有激光和白光。激光作为一种准直、相干的单色光,广泛地用作测头光源。白光则是由各种波长的光组成的,因此颜色呈白色。激光和白光的最大区别在于,激光是一种单色光,因此拥有高度相干性,有些测头正是利用了激光的相干性来实现其功能;而白光由各种波长的光组成,因此相干性相当微弱。如前所述,利用单色光的高度相干性可以根据某些原理进行测量,但事物的两面

性同时说明,在有些地方相干性也会干扰测量。例如,激光测头利用物体表面的反射光进行三角测量时,照射到物体表面的激光会呈现颗粒状的结构,这种颗粒状的结构称为“散斑”,而这种现象称为“散斑效应”。散斑效应是由于激光照射在粗糙表面经反射造成的。大多数物体的表面与激光的波长相比都是粗糙的,因此当光波从物体表面反射时,表面各点都发出一束高度相干的子波,子波叠加的结果就形成了物体表面呈随机分布的散斑(如图4所示)。而白光由于由各种波长的光组成,因此相干性被大大削弱,所以在物体表面反射时,很难观察到散斑效应。这样的区别对于三角测量来说影响是十分巨大的。原因在于,三角测量依据像点在传感器上的位置来确定物点的空间位置;而像点在传感器上通常不会是一个像素点,反射光照射到传感器上使得一部分像素感光,计算机可以通过像素分析来确定这一群像素的中心,从而得到像点的位置。由于散斑效应的存在,使得要确定像点的位置变得非常困难,且误差较大;而分布均匀且对称的光点会对像点位置的确定非常有利。这就是三角测量当中白光性能要优于激光的根本原因。

### 高速白光叶片测量机

温泽集团新推出的多轴高速白光叶片测量机 MAXOS/CORE(见图5)采用了白光点光源测头,取代了传统三坐标测量机的接触式测头,从根本上解决了接触式测头在叶片测量中面临的难题。首先,MAXOS/CORE的测量速度非常快。MAXOS/CORE白光测头的采点速度可以达

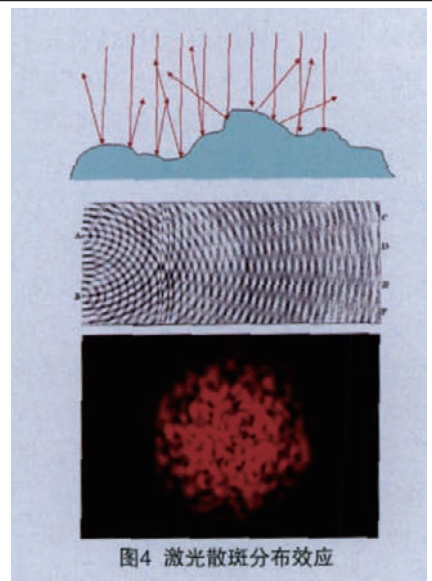


图4 激光散斑分布效应

到 4200 点/min;测头的定位由高精度旋转头来控制,同时叶片装夹于高精度转台上,与旋转头和直线轴进行联动,完成一个中等大小叶片(高度约为 400mm)3 个截面型线的测量只需 1min。其次,白光点测头直接以光点对物体表面进行采点,不存在测头半径补偿问题,因此避免了因测头补偿方向错误而造成的测量失真问题。第三,MAXOS/CORE 的光点直径可小至  $9\mu\text{m}$ ,能够测量到叶片表面非常微小的几何特征,最大限度降低了叶片实测表面的失真度。

在光学测量当中经常会对物体做一些表面处理,例如对物体表面喷涂白堊涂层以改善特性。这样做的目的之一就是减轻散斑效应。在喷涂白堊涂层之后,对激光而言,散斑效应会得到相当大的改善,而白光的光斑品质可以得到进一步的提高。无论如何,覆盖物体表面的白堊涂层都有一定厚度,使得物点的位置增加了一定的误差,这是测量过程中所不希望见到的。但有时,不对物体表面进行喷涂处理带来的问题不仅仅是散斑效应,还有光的反射问题。

例如,在飞机发动机中,低温段(包括风扇、低压压气机及高压压气机部分段)的叶片因尺寸较大,且在工作过程中要尽量避免形变,因此广泛采用超高强度的钛合金。钛合金

材料的叶片加工一般以五轴铣削加工为主,经过加工后叶片表面会变得十分光亮,这就给特定类型的测头带来了反射光强弱的问题。当入射光与物体表面成一定夹角时,物体表面的反射光恰巧以最大强度投射在传感器上,此时传感器上接收到的反射光强度太大导致传感器过曝;而当入射光与物体间的夹角稍微发生变化时,反射光又几乎全部偏移出传感器范围,造成传感器上信号强度过于微弱或根本没有信号。一般来说,测头的光源强度和传感器灵敏度都可以进行调节,以使反射光信号的强弱达到一个最适合的水平。但这样的调节方法局限性在于,它不是对所有测头都是行之有效的。对于线光源和面光源来说,它们实际上都是由若干方向不同的光束组成,每束光线与物体形成的夹角都不相同,因此调节光源和传感器的方法不可能使得所有反射光在传感器上都达到最佳的信号强度。因此对线光源和面光源

来说,物体表面的反射光太强或太弱的根本原因是不可调和的,这也是需要对物体进行表面处理的第2个重要原因。

同理,对于黑色表面来说,由于入射光绝大部分被吸收,反射光的强度也非常微弱,所以喷涂涂层的做法也常见于黑色物体表面。与线光源和面光源不同,点光源测头不存在这样的问题,因为光源强度和传感器灵敏度只需对一束光进行匹配,就能找到合适的光源强度和传感器灵敏度,让传感器上的像点达到信号处理的要求。例如,对于光亮的镜面,可以采用如下做法:避免将反射光直射入传感器内,同时调大入射光强度和传感器灵敏度,利用镜面上微弱的漫反射来获得传感器信号,因为实际上并不存在完美的镜面,因此总有一部分光线能通过漫反射进入传感器中。

光学测量中经常会遇到的另一个问题就是光线和物体表面成的夹角范围。一般来说,在测量过程中应尽量保持入射光和反射光与物体表面垂直,根据测头类型的不同,允许的光线与物体表面夹角也不尽相同。但可以肯定的是,相比线光源和面光源测头,点光源测头允许的夹角范围要大得多。原因如前所述,对于点光源来说,调节光源强度和传感器灵敏度仍旧是一个有效的方法。因此MAXOS/CORE白光点光源测头可以做到与物体表面成 $5^\circ$ 夹角而不失精度,如图6所示。

此外,MAXOS/CORE采用的软件WIN3DS集成了硬件控制、数据采集和测量评价的功能,在测量叶片完成后自动生成测量报告,进一步提高整个质量控制过程的效率。该软件基于



图6 高速白光叶片测量机CORE

Visual Basic 的开放式编程语言和函数库,提供了极大的自由度和二次开发能力,可对软件功能进行扩充,对报告形式进行定制。

## 结束语

综上所述,温泽集团新推出的多轴高速白光叶片测量机MAXOS/CORE针对叶片测量的特点,将白光点光源用作非接触式光学测头进行叶片测量,解决了传统三坐标测量机在叶片测量中遇到的诸多难题。MAXOS/CORE在硬件方面以独特的白光点光源测头,克服了传统触发式测头采点速度慢、测量微小物体时容易产生测头半径补偿方向错误的不足,同时也规避了其他光学测头具有的散斑效应以及反射光信号强度等问题,适用于任何表面的叶片测量而无须喷涂;在软件方面,MAXOS/CORE针对叶片测量进行了优化,包含了叶片所有特征的评价,并且可根据使用者要求进行二次开发和定制。

目前,运用温泽集团MAXOS/CORE白光测量系统的客户包括Alstom、Siemens、Toshiba-GE等大型透平机叶片制造企业。最近,温泽集团又和Delta航空进行合作,应用MAXOS对Delta航空的飞机发动机叶片进行维护检测工作,以期获得更高的检测效率和满意度。

(责编 淡蓝)



图5 高速白光叶片测量机MAXOS