

# 激光回馈测量技术在航空精密制造中的应用\*

谈宜东,李继扬,朱开毅,卢悦越

(清华大学精密仪器系,精密测试技术及仪器国家重点实验室,北京 100084)

**[摘要]** 航空精密制造技术的发展水平已经成为衡量国家综合实力和科技发展水平的重要标志之一。随着机械加工技术、电子电气技术、自动控制技术以及信息技术的高速发展,在此之上集成的航空精密制造技术得到了空前的飞跃,不断涌现出新技术、新工艺和新产品。与此同时,随着技术和产品的精度性能逐渐提高,对关键参数的精密测量的需求逐步增大。但是对于航空制造中的器件而言,很多测量需求无法由传统的测量方案满足。激光回馈效应是指激光器出射的激光被外部待测物体表面反射或者散射回到激光器内对激光器输出光强、偏振态和相位进行调制的一种现象。激光回馈效应进行精密测量具有高灵敏度,可实现非配合目标,如黑色、粗糙、柱面、微小型或液体目标的测量;结构紧凑,易于调节;测量结果分辨率高,可溯源到激光波长等优点。利用激光回馈效应,可以对航空制造中的零件进行精密测量,实现加工过程中的精密定位和部件实时工况的精密监测,对于提高航空制造精度,促进行业发展具有不可替代的作用。

**关键词:** 激光回馈;航空制造;精密测量;非配合目标;原位检测

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.05.024



谈宜东

博士,副教授,精密仪器系副主任。研究方向为激光技术和精密测量。发表SCI论文75篇,授权发明专利20余项。获2017年国家基金委优秀青年基金。获省部级科技奖励一等奖1项、二等奖2项。

航空技术是国家新兴技术中一个重要组成部分,也是近年来发展最为迅速。国家投入最多的一个方向,在国防建设和国民经济领域中具有极度重要的地位和影响<sup>[1-3]</sup>。经过60余年的不懈努力,我国的航空制造技术已经形成了包括制造过程自动化技术、超精密加工技术、特种加工技术、成形技术、连接技术、表面改性技术、无损检测、表面安装技术、复合材料构件制造在内的较为全面的专业技术体系<sup>[4-5]</sup>。虽然我国航空制造技术在近年来得到了充分的发展,但是与之配套的精密检测技术却成了制约航空制造技术产品整体制造水平的提高、阻碍产品生产能力提高

的关键技术。因此,为了解决航空制造技术中的问题,必须从精密测量技术入手,促进器件整体制造能力的提高。目前航空部件面临的检测问题主要包含以下3条:(1)对部件的可能性缺陷检测方式不足,无法在系统工作前预先测试特殊的区域或部位;(2)航空部件多数具有复杂的结构和测试对象,系统中可达对象有限;(3)航空部件中设计较宽的材料范围,包含复合材料、高强度钢、钛合金和铝合金等,每种材料使用的测试方式不同<sup>[6-7]</sup>。

传统的精密检测技术主要分为接触式和非接触式两种。接触式的检测技术主要包含电感传感器、电容

\* 基金项目:国家基金委优秀青年基金项目(51722506);国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ04013603);精密测试技术及仪器国家重点实验室自主研究课题。

传感器、扫描式三坐标测量仪等,这种检测技术需要保持传感器与被测元件的实时接触,通过电容、电感等参量敏感元件的位移、形变或者形貌进行检测<sup>[8-10]</sup>。其优点是结构简单且动态特性好。但其缺点也很明显,线性度和精度取决于传感量测量精度,测量结果无法溯源到自然基准,测量范围有限;并且需要保持传感器与待测元件的接触,对于航空制造工艺中一些特殊封装或者形状不容易固定传感头的元件无法进行测量;当航空元件工作时,由于电磁环境的复杂性,势必会对电容、电感传感器产生干扰,造成测量误差。非接触式测量主要是光学方法,利用激光的高方向性、高能量和高相干性可以实现精密测量。常用的方法包含激光飞行时间法、激光三角法、激光散斑法和激光干涉法。飞行时间法是通过直接测量脉冲激光出射之后,到达目标再返回的时间间隔,进而直接计算出被测目标距离的一种方法。尽管量程较大,但脉冲式激光测距精度较低,受限于电子器件的带宽,最高只能达到厘米级<sup>[11]</sup>。激光三角法采用几何方法,由光源发出的一束激光照射到待测物体表面上,其散射光经透镜收集并聚焦在一个线阵 CCD 上,当物体产生位移时,散射光在 CCD 上也会产生相应的位移<sup>[12]</sup>。激光三角法具有结构简单、体积小、成本低的优点,可实现非配合目标的测量,分辨率在微米量级,量程在厘米量级,需要进行标定。激光散斑法首先将结构光投射至物体表面,再使用摄像机接收该物体表面反射的结构光图案,由于接收图案必会因物体的立体形状而发生变形,故可以试图通过该图案在摄像机上的位置和形变程度来计算物体表面的空间信息,当传统激光器被用于成像时,由于高空间相干性,会产生大量随机的斑点或颗粒状的图案,严重影响成像效果。激光干涉测量最主要的仪器是双频激

光干涉仪,测量精度高,测量范围大,常用于超精密机床中的位置测量,但是双频干涉仪需要形成两个正交偏振分量稳定的干涉信号,需要保证测量臂和参考臂的光强<sup>[13]</sup>,因此在双频干涉仪的测量中,被测物体往往需要是配合目标,如折返棱镜或者高反射镜,而这在航空制造检测中是难以保证和实现的。综上所述,需要研究一种非接触、可实现非配合目标的测量,测量结果可溯源到激光波长的高精度测量方案。

激光回馈效应,即为激光自混合干涉效应,是指当激光出射的光经过传输投射到被测物体表面上,在被测物体表面发生反射或者散射,而被物体表面反射或者散射的那部分光称为回馈光,会重新进入激光谐振腔内,从而对激光器的输出产生调制的一种效应<sup>[14-18]</sup>。当这部分光重新进入激光谐振腔中时,会与激光器之前输出的稳定光场产生相互作用,进入一种非稳态情况。激光回馈效应普遍存在于各种类型的激光器中。被发现初期,被认为是一种噪声源,在激光回馈效应的作用下,原本稳定的激光输出频率和光强都会进入不稳定状态,激光输出频谱中也会相应产生噪声,对测量结果产生影响<sup>[19]</sup>。因此在初期,对于激光回馈效应的研究主要集中在如何消除影响。直到1963年,King和Steward首次利用激光回馈效应实现了位移测量应用,激光回馈效应才成为一种被广泛关注和研究的物理效应<sup>[20]</sup>。在之后的激光回馈理论研究中,Lang等<sup>[21]</sup>基于激光器的速率方程,建立了激光回馈情况下的激光器输出模型,Groot等<sup>[22]</sup>基于谐振腔和回馈镜的腔型,建立了三镜腔模型,这两个模型可以很好地解释激光回馈作用下激光器输出的波动。根据两个模型的理论分析可知,在激光回馈效应的作用下,激光器输出的参量均会受到调制,包括光强、相位、频率和偏振态

等。传统的激光干涉如迈克尔逊干涉或者马赫-曾德干涉,均需要搭建稳定可靠的参考光路,用于和测量光路中携带被测物体信息的测量光产生干涉。而在激光回馈干涉中,只需要使激光器出射照射到物体表面,被反射或者散射的光回到激光谐振腔内部即可,激光器内部就是参考光路,结构简单,易于调节。激光回馈效应由于激光的自相干效应,对于外界干扰不敏感,激光谐振腔内部的光场仅和返回的自身激光发生干涉,而对外部进入谐振腔内的杂散光不敏感。激光回馈效应具有极高的灵敏度,可以实现非配合目标的测量,而无需在目标附近设立靶镜。基于上述的优点,激光回馈技术被广泛应用于位移测量<sup>[23-30]</sup>、振动测量<sup>[31-33]</sup>、速度测量<sup>[34-35]</sup>、加速度测量<sup>[36]</sup>、角度测量<sup>[37-39]</sup>、折射率测量<sup>[40-42]</sup>、双折射元件光轴的确定<sup>[43]</sup>、热膨胀系数测量<sup>[44]</sup>、液体蒸发率测量<sup>[45]</sup>以及成像<sup>[46-48]</sup>等。本文针对激光回馈技术在航空制造中精密测量的应用,从部件检测、加工测试和实时工况监测3个方面进行论述,最后讨论了激光回馈技术应用于航空制造精密检测的潜力和发展方向。

## 激光回馈技术在航空部件检测中的应用

在航空装置和系统中,包含大量精密制造元件。这些元件的面型、孔径、形貌等参数以及配合后的关键尺寸,如孔的位置、直径、各种角度、长度等,均需要精密测量,以保证航空器的正常运行和工作。传统的测量方式均难以实现,而利用激光回馈效应中的高灵敏度和高精度,可以有效满足特种部件和系统的在线测量。下面分两个方面介绍激光回馈技术在航空部件检测方面的应用。

### 1 导弹引信结构测量

一个具有良好性能的导弹引信,不仅能保证战斗部以至全弹的安全

性,而且能使战斗部充分发挥毁伤目标的威力<sup>[49-50]</sup>。常见的导弹引信装置如图1所示。导弹引信元件内部结构的精密测量对于提升导弹性能有着重要的意义。

在导弹引信部件的测量要求中,需要将部件中孔的位置、孔径的大小以及孔的深度进行精密测量,而部件的大部分表面是粗糙的,无法形成配合目标。传统的测量方式多为接触式,精度较低,对样品有损伤。光学显微镜可以实现样品的非接触测量,但对于普通的光学显微镜而言<sup>[51-52]</sup>,其分辨率受到衍射极限的限制,与照明波长是一个数量级;另一方面,由于它的有限焦深,所获得的图像是焦点前后一定厚度内所有截面图像的叠加结果,这必然造成对比度和分辨率的下降。为了实现高灵敏度、高探测深度、高精度的测量,搭建了微片掺钕钒酸钇(Nd:YVO<sub>4</sub>, ML)激光

器回馈共焦系统。在光学显微镜的研究中,系统的光源一般是场光源,由于光斑在样品上的衍射和散射,测量结果中包含大量随机噪声;而激光共焦技术的光源为激光束经针孔而形成的点光源,利用点光源对样品内焦平面进行逐点扫描,焦平面以外的点不会成像,提高了分辨率,减小噪声<sup>[53-54]</sup>。其光路结构如图2(a)所示。系统中采用恒流源激发泵浦源半导体激光器,以保证泵浦光输出的稳定性;LD发出的光经柱透镜整形后泵浦Nd:YVO<sub>4</sub>晶体,同时对LD和Nd:YVO<sub>4</sub>采用一体化的结构设计,并对其进行整体温控,采用半导体制冷片作为温控加热和制冷的执行元件;激光器输出的光(频率为 $\omega$ )经透镜组和针孔准直后,透过分光镜(透射率:反射率=8:2)并进入声光移频器进行移频,这里采用的是两声光移频器的差动移频(差频

为 $\Omega$ ),移频后激光的频率为 $(\omega+\Omega)$ ;频移后的激光经扩束镜扩束准直,并通过全反镜反射后进入物镜,最终聚焦于待测样品上<sup>[55]</sup>。

会聚光被待测样品反射或散射后,部分反射光或后向散射光沿原光路返回至激光器谐振腔内部,形成回馈测量光,同时在回程的光路中,回馈光被再次移频,获得 $2\Omega$ 的移频频率;激光器的束腰会阻止物镜焦点外区域的光线返回至激光器内部,使系统具有纵向分辨的能力,进一步结合扫描机构可实现样品的内部层析测量;回馈光在激光器谐振腔内与腔内光场发生自混合干涉,使得激光器的输出功率被调制。因为回馈光中包含待测样品的信息,所以被回馈光调制的激光输出可反映样品的特性,通过对激光输出的探测,可以得到待测样品信息。为了实现样品内部结构的扫描探测,物镜被固定于纵向的位移平台上,可实现z轴方向的扫描,同时样品被固定于二维水平位移平台上,可实现水平方向上的横向扫描。

微片Nd:YVO<sub>4</sub>激光器回馈共焦系统在样品内部结构和表面形貌测量时,其基本原理是通过探测携带样品结构信息的回馈光幅度来确定待测面结构。具体测量过程是首先通过物镜沿光轴方向进行大范围的纵向扫描,利用得到的离焦曲线的峰



图1 某导弹引信装置  
Fig.1 Some missile fuze devices

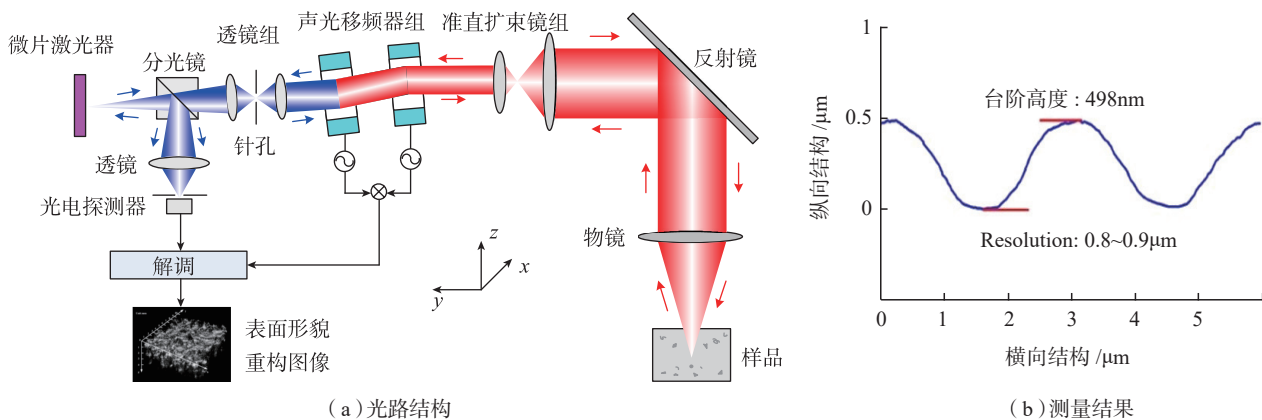


图2 微片Nd:YVO<sub>4</sub>激光器回馈共焦系统光路结构简图及其性能测试

Fig.2 Schematic diagram of microchip Nd:YVO<sub>4</sub> laser feedback confocal system and its performance test

值定位样品内部的待测面；之后对待测面进行精确的纵向扫描，得到待测面对应的离焦曲线，并通过试验标定出待测面离焦曲线的线性段，获得回馈光幅度与位置的线性关系；最后，将样品置于线性段范围之内，对样品进行横向扫描，记录横向扫描过程中对应的回馈光幅度的变化，与标定得到的离焦曲线的线性段进行对照，将回馈光幅度的变化转化为离焦量的变化，即可得到待测表面结构的变化。在测量的过程中，利用共焦系统的层析能力对样品待测表面进行定位。同时，由于微片激光器回馈系统具有较高的回馈灵敏度，可降低系统对回馈光强度的要求，因此使得系统可对多种材料的样品进行较大深度的定位，避免了由于探测深度增加引起光强减弱而无法被探测的情况出现。下面对微片 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器回馈共焦系统的性能进行分析和测试。

在对样品进行轴向扫描来定位待测面的过程中，轴向扫描的范围主要取决于系统中物镜的工作距离和样品对激光( $\lambda=1064\text{nm}$ )的反射率，需要保证待测表面可反射足够强的回馈光以被探测，得益于其极高的回馈灵敏度，在实际测量的过程中，理论上只需待测面有少许反射光(回馈系统可测量反射率低至  $10^{-6}$  的表面)回馈至激光器内部即可被探测，因此相较于其他技术而言，系统可实现更大范围的轴向扫描，定位深度更大。通过试验标定出常用的3种数值孔径(NA)的物镜的线性段，对应的范围分别为：NA=0.65时，轴向测量范围为  $5\mu\text{m}$ ；NA=0.42时，轴向测量范围为  $8\mu\text{m}$ ；NA=0.3时，轴向测量范围为  $20\mu\text{m}$ 。因此在实际应用中，可根据待测样品结构的需求，选择合适的物镜进行测量。为了测试系统实际的横向分辨率，对一个标准光栅的台阶结构进行测量。光栅由 MikroMasch 公司提供，它的周期

为  $3\mu\text{m}$ ，台阶高度为  $493\text{nm}$ ，系统对光栅进行测量时选用物镜的数值孔径为 NA=0.42，对应的横向分辨率为  $1.1\mu\text{m}$ 。测量中首先对光栅表面进行轴向扫描，得到光栅表面的离焦曲线，并标定其线性段；之后将光栅置于线性工作范围内，横向扫描样品，并将测量得到的回馈光幅度变化根据线性段转化为光栅表面结构变化，得到的测量结果如图 2(b) 所示。可知，系统可明显分辨台阶的上下表面，通过对阶跃边的测量结果分析可得到此时系统的横向分辨率约为  $0.8\sim 0.9\mu\text{m}$ ，与计算值的量级相当。此外，系统测量得到的标准光栅的台阶高度为  $498\text{nm}$ ，证明了系统具有 nm 级的纵向分辨率。通过试验证明，系统在轴向可实现 nm 级的分辨率，在横向可实现  $\mu\text{m}$  级的分辨率，此参数可满足绝大多数微结构的测量需求<sup>[56]</sup>。

利用微片 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器回馈共焦系统对导弹引信结构件中盲孔的深度和形貌进行测试，测试的样品示意图和盲孔的编号如图 3 所示。

对图 3 中不同的位置分别进行

扫描，得到孔深度的测试结果如表 1 中所示。对于盲孔编号为 7、8、9 的 3 个盲孔，由于结构比较复杂，所以在扫描单个盲孔的同时也对周边的结构进行扫描，反映到结果为台阶的高度。

利用微片 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器回馈共焦系统对导弹引信结构件中盲孔扫描的结构曲线如图 4 所示。

图 4 为编号 1、7、8、9 的 4 个孔测试的结果。通过搭建微片 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器回馈共焦系统对导弹引信结构件中盲孔的位置、深度和形貌进行测试，可以有效对关键部件进行精密检测，并且不用预先对部件进行处理即可实现测量，测量精度高、范围广，可测量深度大。

## 2 飞机舱盖玻璃应力分布测量

航空有机玻璃的主要成分是聚甲基丙烯酸甲酯，另含有增塑剂，是在引发剂的作用下，经本体聚合制成的透明材料。飞机舱盖玻璃破碎不仅影响着民航安全，更对军事安全有着重要的影响，对于舱盖玻璃内部应力的测试可以提前避免事故发生，有力保障军用民用的航空安全。传统的

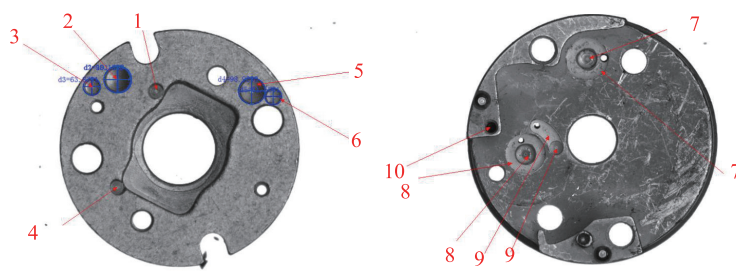


图3 测试样品和盲孔编号

Fig.3 Photos of tested samples with numbered blind holes

表1 导弹引信盲孔深度测试结果

Table 1 Blind holes depth test result

盲孔编号	深度/mm	台阶高度/mm	盲孔编号	深度/mm	台阶高度/mm
1	2.628	—	6	2.061	—
2	2.115	—	7	3.645	1.060
3	2.123	—	8	3.658	0.837
4	2.647	—	9	1.885	1.126
5	2.047	—	10	3.962	—

应力测量方法主要为机械的钻孔法,无法实现舱盖玻璃的在线无损检测。

在光学中,材料的内应力表现为双折射。为了对飞机舱盖玻璃内部的应力分布进行精确测定,必须在系统测量误差较小的情况下进行实时性好的连续测量。传统的测量方法中,钻孔法<sup>[57]</sup>具有破坏性,并且只适合测量应力分布平缓的材料,对应力变化剧烈的区域具有较大误差;偏光仪法<sup>[58]</sup>,具有结构复杂、实时性不好以及测量结果误差较大的缺点;巴比涅补偿器法<sup>[59]</sup>,涉及到高精度、高成本的光学元件制造;1/4波片法<sup>[60]</sup>,测量精度主要取决于角度测量精度和波片制造精度,系统复杂性高;以上的方法并不满足测量要求。当激光回馈外腔中插入双折射元件时,回馈光的偏振态会发生变化,从线偏振变化为正交偏振。当正交偏振的回馈光与激光腔内的光场进行相互作用的时候,在两个正交的偏振方向上激光的增益将发生变化,此时出现模式竞争。随着激光回馈外腔长度的变化,激光的两个本征偏振态将会交替出现,而两个偏振态的占空比与双折射量的大小呈线性关系。因此,以激光回馈原理为基础,搭建了各向异性外腔回馈系统<sup>[61-62]</sup>。激光外腔各向异性回馈系统的装置图和实物图如图5所示。

系统中的光源为半外腔 He-Ne 激光器,出射波长为 632.8nm,为了有效消除兰姆凹陷对于测量的影响,采用充气比为 He:Ne=9:1 以及 Ne20:Ne22=1:1。如图6中所示,  $M_1$  和  $M_2$  是激光谐振腔镜,反射系数  $r_1$  及  $r_2$  分别为 0.999 及 0.994,反射率记为  $R_1$  和  $R_2$ 。  $M_1$ 、 $M_2$  与增透窗片 WP 构成腔长为 130mm 的半外腔激光器。  $M_e$  为回馈镜,反射系数  $r_e$  为 0.316,反射率记为  $R_e$ 。  $M_e$  和  $M_2$  构成回馈腔长为 150mm 的回馈外腔, PZT1 与 PZT2 为压电陶瓷。计算机输出信号经 D/A 转换后放大为

压电陶瓷的驱动电压,对 PZT1 施加三角波信号,改变  $M_e$  的位置用于改变回馈腔长,调制光强信号;对 PZT2 施加直流电压,改变  $M_1$  的位置以保证激光的出光频率位于增益曲线的中心频率处。 P 为偏振片,其偏振方向与激光器初始线偏振光的方向垂直,与探测器  $D_2$  一起探测激光器的偏振态信号,探测器  $D_1$  用于采集激光输出的光强信号,信号经放大、A/D 转换后输入计算机 PC 进行处理计算。 S 为待测的内部具有应力的舱盖玻璃样品<sup>[63]</sup>。

当三角波信号驱动压电陶瓷时,回馈镜将会发生周期性往复运动,从

而实现激光回馈外腔长度的周期性调制。根据激光回馈原理可知,激光回馈外腔长度每变化 1/2 波长,激光输出强度受到一个周期的余弦调制。当激光外腔中加入双折射元件时,基于双折射作用,激光回馈外腔具有两个腔长,对应激光器的两个本征偏振态,由于两个偏振态对应的等效反射率不同,因此损耗不同,随着回馈镜的调制,使得两个偏振态交替起振,呈现出偏振态的跳变。采集偏振跳变的波形图如图6所示。

图7(a)中所示为从航空飞机座舱玻璃样品切割的样品,测量面为 16mm × 16mm 的正方形,玻璃厚度

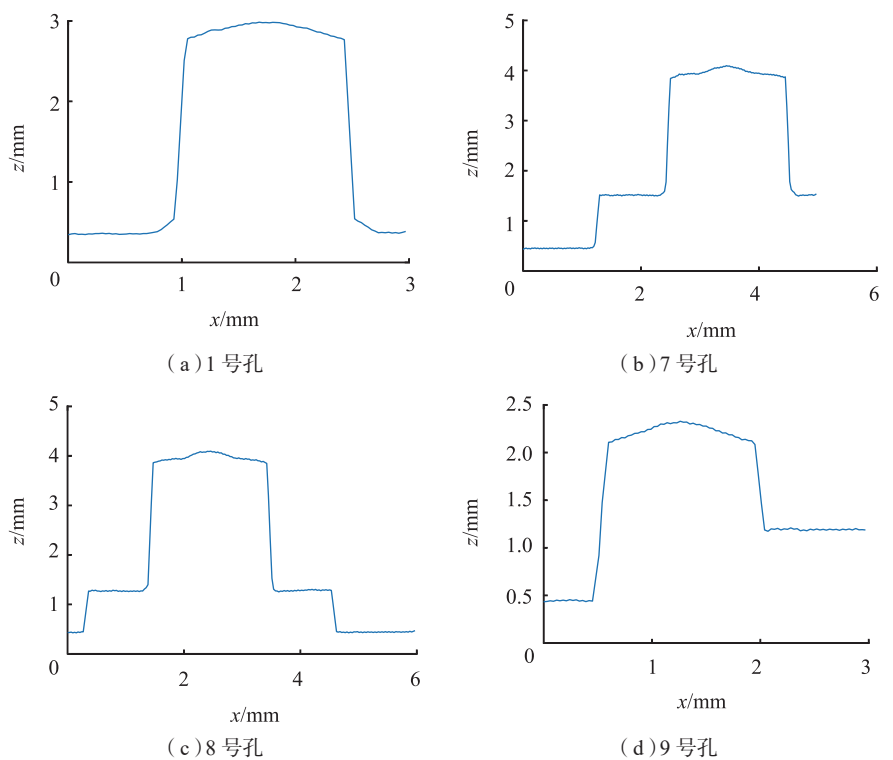


图4 测试样品盲孔扫描结构曲线

Fig.4 Scanning curves of blind hole structures in tested samples

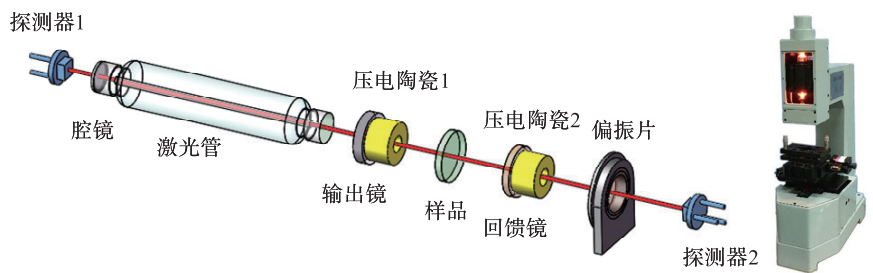


图5 激光回馈系统装置图和实物图

Fig.5 Schematic diagram and photo of laser feedback system

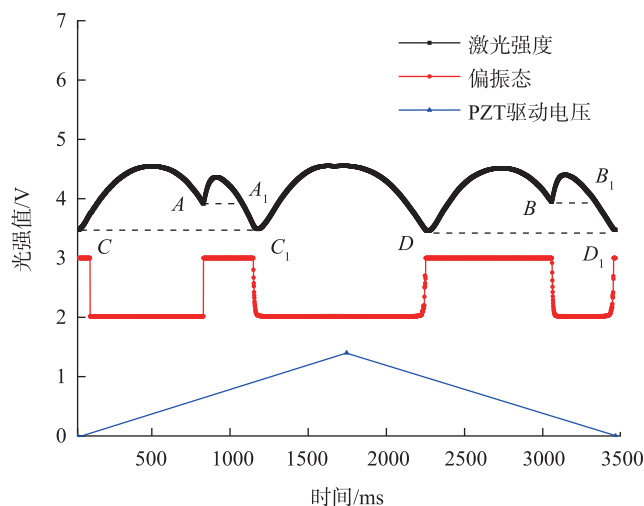
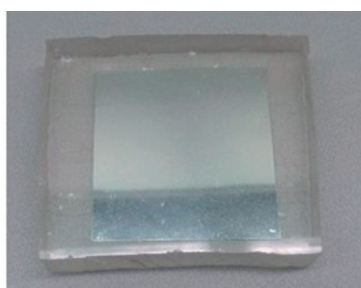
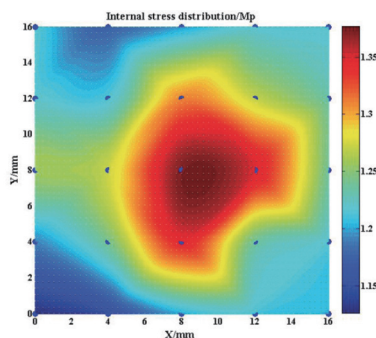


图6 偏振跳变波形

Fig.6 Polarization flipping waveform



(a) 飞机座舱玻璃样品



(b) 应力分布图

图7 待测航空玻璃样品以及应力分布测试结果

Fig.7 Tested aeronautic glass sample and measured internal stress distribution

为 8.56mm, 条纹值为  $f_{\sigma}=230\text{N/mm}$ 。测量的应力分布图如图 7 (b) 所示。

为了验证激光回馈系统对于应力测量的精度, 通过力学原理的钻孔法得到的结果分布在 1~1.5MPa 之间, 与光学方法的结果一致, 而光学方法无损且更加精确, 在航空测量领域更具应用前景。

通过上述的两个典型应用, 可知激光回馈技术具有高灵敏度, 可以直接对非配合元件, 如对具有粗糙表面或者结构复杂的元件进行测量, 精度高, 结构简单, 在航空元件结构、参数等测量上具有广泛的应用前景。

### 激光回馈技术在精密加工校准中的应用

随着航空发动机性能的不断提

高, 复杂结构零件愈来愈多, 对高端设备的使用逐渐增多, 而航空设备中的大量结构部件也需要高精密加工的支撑。目前这些航空产品的主要特点可以概括为以下几点: 高性能, 目前部件中广泛应用新型材料, 尽管这些材料在刚度、韧性、温度性能上面有着大量提高, 但是具有难以加工或加工技术尚未成熟的缺点; 轻量化, 为了减轻飞机重量, 航空元件中大量采用整体薄壁结构, 需要进一步提高可靠性; 精密化, 加工精度不断提高, 加工设备不断升级, 需要与之配套的精密测量技术支撑; 高效化, 需要提高加工速度与效率, 使我国的航空技术处于世界领先水平; 可靠性和经济性, 对于航空部件加工的工艺、质量和成本要求提高。为了满足

逐渐增长的航空部件加工需求, 目前大部分航空部件的加工使用数控机床完成。数控机床是现代制造业的关键设备, 一个国家数控机床的产量和技术水平在某种程度上就代表着这个国家制造业水平和竞争力, 对国民生活各个领域的发展具有举足轻重的影响。从数控机床出现开始, 国内外科研工作者就对数控机床的误差进行研究和测量, 目的在于不断提高机床的加工精度, 改进机床加工件的质量。经过多年的研究取得了一些成果, 各种高尖端、高精密的加工设备相继出现, 与之相配合的机床精密检定技术也得到了充足的发展。而我国对数控机床校准和降低误差的研究相对于国外起步较晚。当前, 世界上先进的数控机床主要来源于德、美、日等国。机床行业未来发展的趋势是高精密、高速度、高自由度的精密智能数控机床, 就目前现有的技术中还是有许多方面需要提升完善, 尤其是机床校准和检定方面。目前在数控机床校准方面, 双频激光干涉仪仍然占据着大部分的市场份额<sup>[64-65]</sup>, 但是双频激光干涉仪使用的氦氖激光器输出功率较低, 寿命短, 功耗较大, 并且测量需要目标靶镜的配合。针对这一问题, 对具有准共路补偿的激光回馈干涉仪进行研究, 系统原理图如图 8 所示<sup>[66-67]</sup>。

该系统在原有光路的基础上, 加入了参考镜(补偿镜)。激光器输出的光一部分被被测物体散射回激光器, 作为测量回馈光, 用粗箭头表示; 另一部分被参考镜散射回激光器, 作为参考回馈光, 用细箭头表示。参考回馈光和测量回馈光准共路, 移频频率不同, 因此对激光光强的调制频率不同。通过解调不同频率信号的相位便可得到两光各自的相位变化。当被测物体 T 运动时, 参考镜保持静止, 因此参考光的相位变化来源于空气扰动、移频器件热效应、激光波长漂移等因素。而测量光的相位变化

除了来源于此,还包括被测物体的运动,二者相减即排除了外界因素的影响,消除了死程误差。对具有准共路补偿的激光回馈干涉仪环境鲁棒性进行测试,测试结果如图9所示。

图9中红色为测量光的相位变化,蓝色为参考光的相位变化,黑色为两者测量结果相减的真值,在40min中测量光相位漂移1.3rad,但是通过准共路补偿后,测量结果中的漂移仅为0.12rad,提高了一个量级,即在40min测试中,激光回馈干涉仪零漂小于10nm。基于以上原理,结合光机电设计,构建了激光回馈干涉仪,仪器实物图如图10所示。

对仪器的性能指标进行测试,激光回馈干涉仪量程可至10m,分辨率为1nm,测速最高可至200mm/s,测试目标反射率可以低至 $10^{-7}$ ,可实现微、轻、薄、黑、透,以及柱、微斜等元件和新材料表面的位移、形变、伸缩、膨胀等参数测量。基于激光回馈干涉仪的上述优点,已经实现若干应用,对于推进航空制造技术发展具有重要的意义。下面对几个典型应用进行介绍。

金刚石车床是高精度加工大型机床中的一种,加工元件表面粗糙度可以到达纳米级,加工口径较大,可以对各种平面和曲面元件进行高

精度加工,适用于多种金属和有机材料,可以满足大部分高精度航空元件的加工需求。金刚石车床校准的传统方式为双频激光干涉仪(图11),需要在目标处设置反射镜,此时由于反射镜的调节,难以避免在测量中引入余弦误差,并且反射镜的重量会导致关键刀具变形。利用

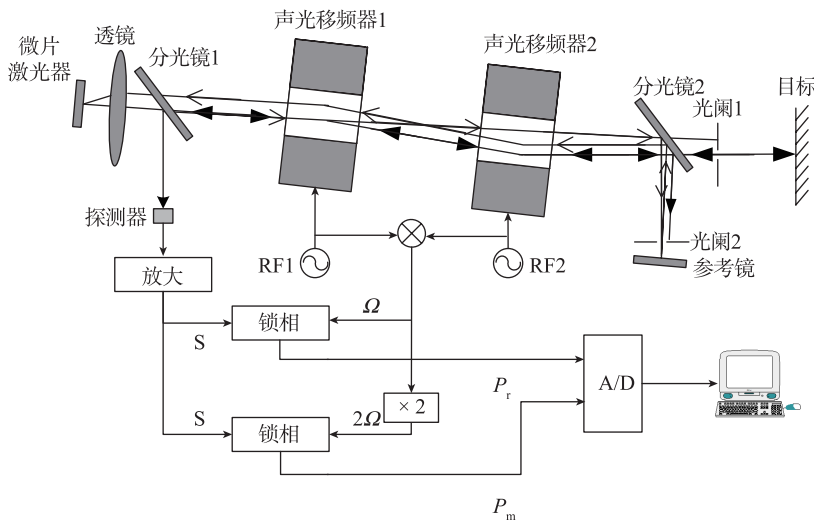


图8 准共路补偿激光回馈干涉仪原理图

Fig.8 Schematic diagram of laser feedback interferometer with quasi common-path compensation

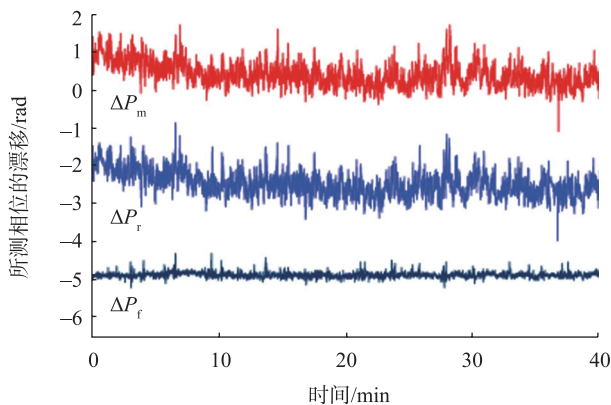


图9 准共路补偿激光回馈干涉仪环境鲁棒性测试结果

Fig.9 Environmental robustness test of laser feedback interferometer with quasi common-path compensation

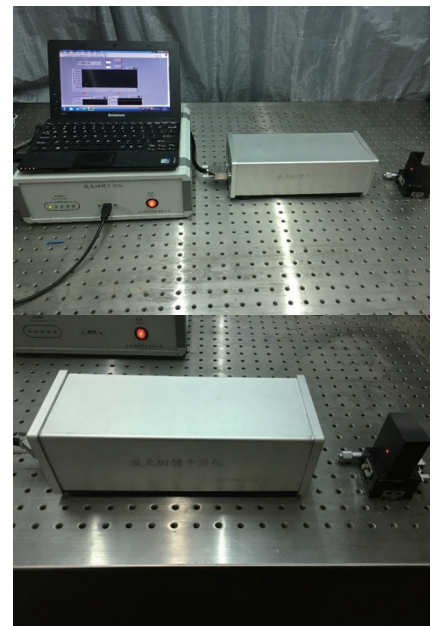


图10 激光回馈干涉仪实物图

Fig.10 Pictures of laser feedback interferometer

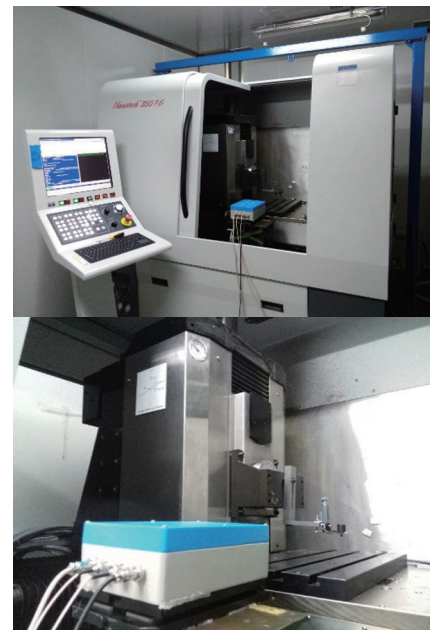


图11 激光回馈干涉仪用于金刚石车床校准

Fig.11 Diamond lathe calibration based on laser feedback interferometer

激光回馈干涉仪,可以对金刚石车床进行校准,校准前定位精度约为500nm,校准后优于100nm。激光回馈干涉仪的测量中避免了余弦误差,大大提高了校准精度。

目前飞机上应用大量新材料,如波音787采用了大量的碳纤维复合材料,中国也生产了全碳纤维复合材料结构的无人机“雷鸟”。随着我国军用飞机、支线飞机ARJ21及大型商用客机C919项目的开展和我国航天事业的发展,碳纤维复合材料的用量将会不断增长,但是其热膨胀系数的标定却一直是个难题。该材料表面粗糙不规则,反射率极低,并且在高温场合,辅助的测量镜会产生变形,增加误差。利用激光回馈干涉仪可以实现新型碳纤维复合材料的热膨胀系数标定,将碳纤维材料置入保温箱中,保证激光照射到物体表面即可实现探测。图12中为利用激光回馈干涉仪对航天一院102所新型碳纤维复合材料测试结果。

在空间技术领域,元件的工作环境往往较为复杂,一般处于真空、低温、宇宙射线中,而在这种环境中安置目标靶镜是极难以实现的。利用其高精度和高灵敏度,激光回馈干涉仪还可以应用于空间相机的真空低温变形测试和微推进器真空舱模拟标定测试,如图13所示。

微片激光回馈干涉仪相对于传统的双光束干涉,具有高灵敏度的优

点,这是由它移频光回馈的原理所决定的。但缺点是,从激光器到被测目标的整个回馈光路都属于死程,回馈光的相位很容易受到环境扰动的影响。要想获得理想的测量精度,需要引入参考光,共路补偿环境因素所致的相位误差。因此,对具有高测速、全程准共路补偿的激光回馈干涉仪进行了研究。该系统由于参考光和测量光穿过声光移频器的路径相同、移频量相同,因此热效应所致的相位漂移量也相同,通过相减可被完全消除。此外,两路激光由同一块激光晶体发出,因此具有相近的输出功率和波长漂移。其次,在光路设计上,参考光和参考面垂直设置,即使测量远距离物体,通过调节参考光的角度也可轻易找到回馈信号。最具实用价值的一点是,参考物体可采用被测目标附近的静止物体,而无需特意安置,因此全程准共路式激光回馈干涉仪能够完整补偿远距离的空程,且普适性广,易于调节。为评估仪器的灵敏度特性,对放置在5m和10m处,表面粗糙度参数从0.025到6.3的标准样块及玻璃、铜箔、发黑物体进行了测试,仪器可正常工作的回馈水平范围为 $1.85 \times 10^{-7} \sim 3.98 \times 10^{-4}$ 。在普通实验室环境下,仪器测量10m远物体的短期(100s)测量稳定性优于 $\pm 12\text{nm}$ ,长期(5000s)测量稳定性优于180nm;短期位移分辨率为5nm;150mm量程线性度为 $1.42 \times 10^{-5}$ ,

100 $\mu\text{m}$ 量程线性度优于 $2.5 \times 10^{-4}$ ,上述指标与没有补偿时相比有了显著的提高。除此之外,分析了移频频率小于及大于弛豫振荡频率时激光回馈干涉仪可达到的最大测量速度,试验和理论比较了两种方案的灵敏度和可行性,采用后者。针对新的移频频率和移频范围,重新设计了带通滤波器和放大电路,保证了物体运动过程中信号幅值的稳定。将改进后的高测速激光回馈干涉仪与Agilent 5529A双频激光回馈干涉仪比对,结果表明高测速激光回馈干涉仪的短期(100s)测量稳定性为36nm,长期(5000s)测量稳定性为676nm;最大测量速度1m/s;300mm量程线性度为 $5.7 \times 10^{-6}$ ,其中稳定性和最大测量速度都优于Agilent 5529A双频激光干涉仪,激光回馈干涉仪正向和反向测量的残差重复性均比较好,最大非线性残差的绝对值小于 $1.7\mu\text{m}$ 。

激光回馈干涉仪具有可溯源性和纳米量级的分辨率,能满足高测量精度需求,又具有高灵敏度,可以实现非配合目标的测量,当目标表面发黑、粗糙,形状不规则或者体积微小,或者目标为液体时,激光回馈干涉仪仍然能够实现测量,无需在目标附近架设靶镜。同时,激光回馈干涉仪还具备等同于甚至优于传统迈克尔逊干涉仪的量程和测速等性能指标,所用的激光光源为固体微片激光器,具有体积小、寿命长、功耗低、输出功率高

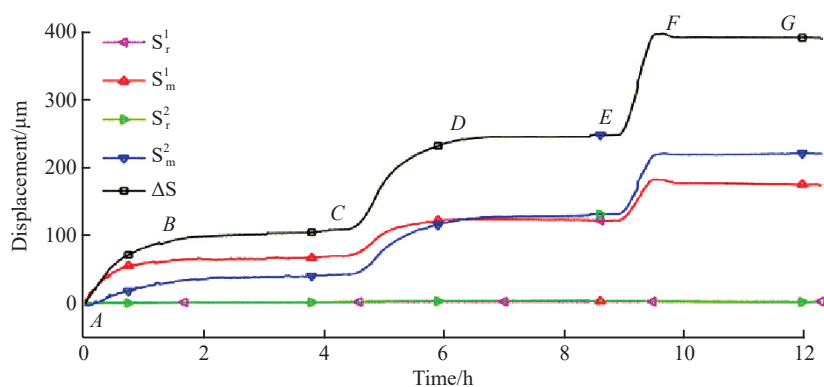
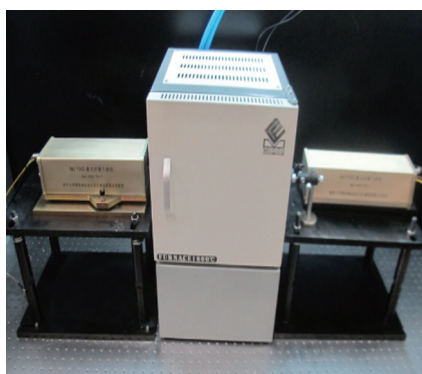


图12 激光回馈干涉仪用于新型碳纤维复合材料的热膨胀系数标定

Fig.12 Thermal expansion coefficient calibration of new carbon fiber composites based on the laser feedback interferometer



(a)空间相机低温变形测试



(b)微推进器真空舱模拟标定测试

图13 激光回馈干涉仪用于航天领域

Fig.13 Applications of laser feedback interferometer in aerospace field

等优点,更加适用于长时间与测试环境无法保证的工业应用。因此,激光回馈干涉仪的研究对于航空制造工程中的精密加工校准具有重要的指导意义。

### 激光回馈技术在实时工况监测中的应用

在航空领域中,不仅要考虑元件的加工精度和质量,更重要的是在实时的工作情况下对航空部件工况进行监测,以避免重大事故的发生,保证飞机和导弹的正常工作。目前的研究中,实时工况的监测主要分为两种,一种需要靠人为排查,以在使用中的飞机发动机为例,通常执行在役检查,包括孔探检查和其他无损检查等,孔探检查即通过孔探仪,也就是视频内窥镜设备,由发动机上的孔探口进入到发动机内部,对叶片、燃烧室、燃油喷嘴等部位进行目视检测,其他无损检查主要包含风扇叶片的超声波裂纹检测、真空度检查等,这种方式需要大量人力资源才能实现,并且很难保持一致性。另一种检测方式主要靠光学方法实现,包含以下几种:绝对距离测量仪,具有较高的量程和实时性,但是分辨率不高,无法实现微小问题的及时发现;视频测量方法需要投入的时间和人力成本较高,算法需要实时性好,实现困

难。以上的检测方法针对不同的部件,需要利用不同的测试系统,操作复杂成本高,精度难以保证。激光回馈干涉仪体积小,功耗低,可以测量非配合目标,由于测量分辨率高,测速快,也适用于实时工况的测试。下面对激光回馈干涉技术在机械振动测试方面的研究进行介绍。

在航空仪器和设备运行的时候,由于转件的不平衡、负载的不均匀、结构刚度的各向异性、润滑状况不良以及装配存在间隙的原因都会引起振动,对这些振动的监测对于航空设备稳定运行和安全具有重要意义。目前对于振动测量的方式主要分为3种<sup>[68]</sup>,一为电路式<sup>[69]</sup>,包括电容传感器和电感传感器等,可以将被测对象的振动量转化为电容或电感参量,用相关测试仪器进行测量,其特点是灵敏度高,频率范围高,动态响应好,线性范围宽,便于分析和测试,但是测量振幅范围有限,容易受到电磁场干扰;二为机械式<sup>[70]</sup>,利用杠杆原理将振动量放大后直接记录,抗干扰能力较强,但频率范围窄,动态响应差,测试时会给被测对象加上载荷,影响测试的准确度,故机械法只适用于低频大振幅的振动测量;最后一种方法为光学法,包含干涉法<sup>[71-72]</sup>、激光多普勒测振<sup>[73]</sup>等,这类方法不容易受到电磁场干扰,测量精度较高,可

以实现非接触测量。在光学方法中,激光回馈干涉仪是一种具有极高的灵敏度,无需目标配合,测量分辨率高,抗干扰能力强的方法。利用激光回馈干涉仪,对不同驱动频率下振动源的振动进行测试,振动源表面粗糙,驱动信号为60dB。在不同驱动电压下对振动源的振动进行监测,得到的结果如图14所示。

图14中上部为测试振动在时域中的结果,下部为对振动进行傅里叶变换得到的频谱波形,从14(a)到(f)驱动振动源的信号分别为200Hz、300Hz、400Hz、500Hz、1kHz和2kHz。振动源对于不同频率的驱动信号,响应的幅值也不同。振动源工作在自然环境中,当幅值过低时,很容易受到外界环境的扰动,如外界空气的扰动、实验台以及其他仪器的振动等,此时激光回馈干涉仪测量的整体振动的幅值呈现出漂移的情况,但是通过傅里叶变换后的频谱分析可以看到,外部干扰的噪声尽管幅值很大,在时域上占据了大部分的波形,导致时域信号的信噪比降低,但是在频域上主要集中在低频区域,通过频谱变换很好地分隔了振动源的振动信号和外界干扰。激光回馈干涉仪的高灵敏度和高精度都决定了其在实时工况监测的应用上具有广泛的应用前景。

### 结论

随着航空精密制造技术的进一步发展,与之配套的精密测量技术将越来越成为研究中的核心内容,不仅为提高航空器件性能做坚实的技术后盾,更为航空安全保驾护航。随着技术和产品的精度性能逐渐提高,对关键参数的精密测量的需求逐步增大,对于航空制造中的器件而言,很多测量需求无法被传统的测量方案满足。利用激光回馈技术进行测量具有灵敏度高,可实现非配合目标,如黑色、粗糙、柱面、微小型固体或液

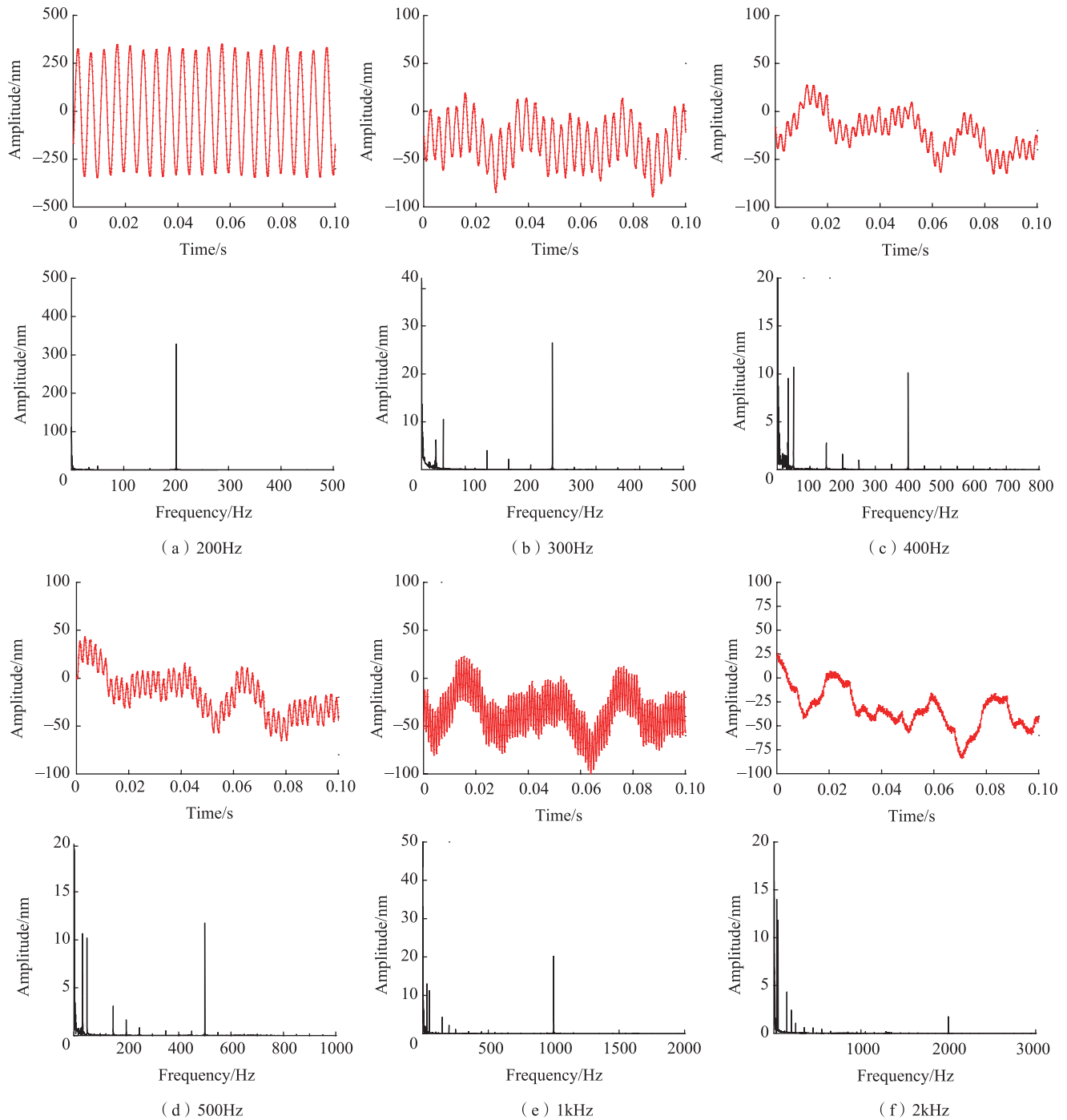


图14 激光回馈干涉仪对不同频率振动测量结果

Fig.14 Measurement results of different frequencies by laser feedback interferometer

体目标的测量;结构紧凑,易于调节;测量结果分辨率高,可溯源到激光波长等优点。目前激光回馈技术已经在航空部件的检测如导弹引信的结构测量和飞机舱盖玻璃应力分布的测量,精密加工的校准如数控机床的校准和定位以及实时工况的监测方

面如振动测量等方面实现应用,可进行非配合目标的精密测量。

除了本文中介绍的几种典型应用之外,激光回馈效应目前也被应用于面内位移的测量,折射率的测量、液体浓度与蒸发率测量以及热膨胀系数的测量。随着对激光回馈技术

的深入研究,激光回馈精密测量系统的性能指标将进一步提高,从而更广泛地应用于航空制造。

#### 参考文献

[1] 郭恩明. 我国航空制造技术的现状及发展趋势 [J]. 航空制造技术, 2002, 45(1):

27–29.

GUO Enming. Present status and development trends of aeronautical manufacturing technology in China[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002, 45(1): 27–29.

[2] 杨炳渊. 航天技术导论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.

YANG Bingyuan. Introduction to space technology[M]. Beijing: China Astronautic Publishing Co., Ltd., 2009.

[3] 谢础. 航空航天技术概论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.

XIE Chu. Introduction to aerospace technology[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005.

[4] 樊振中, 熊艳才. 航空先进制造技术的应用及发展趋势[J]. 装备制造技术, 2011(11): 86–88.

FAN Zhenzhong XIONG Yancai. Aviation advanced manufacturing technology application and development trend[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2011(11): 86–88.

[5] 姚福生. 先进制造技术进展[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(4): 290–295.

YAO Fusheng. Development of advanced manufacturing technology[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(4): 290–295.

[6] 耿荣生, 郑勇. 航空无损检测技术发展动态及面临的挑战[J]. 无损检测, 2002, 24(1): 1–5.

GENG Rongsheng, ZHENG Yong. Prospective view on the application of nondestructive testing in air industry and possible challenges[J]. Nondestructive Testing, 2002, 24(1): 1–5.

[7] 张斌. 航空装备无损检测技术现状分析及未来趋势探讨[J]. 中国新技术新产品, 2017(5): 40.

ZHANG Bin. Current situation and future trend of nondestructive testing technology for aviation equipment[J]. China New Technologies and New Products, 2017(5): 40.

[8] 孙传友, 翁惠辉. 现代检测技术及仪表[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

SUN Chuanyou, WENG Huihui. Modern testing technology and instruments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[9] 周继明, 江世明. 传感技术与应用

[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.

ZHOU Jiming, JIANG Shiming. Sensing technology and application[M]. Changsha: Central South University Press, 2005.

[10] 昌学年, 姚毅, 闫玲. 位移传感器的发展及研究[J]. 计量与测试技术, 2009, 36(9): 42–44.

CHANG Xuenian, YAO Yi, YAN Ling. The development and investigation of displacement sensor[J]. Metrology & Measurement Technique, 2009, 36(9): 42–44.

[11] 金国藩, 李景镇. 激光测量学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

JIN Guofan, LI Jingzhen. Laser surveying[M]. Beijing: Science Press, 1998.

[12] 王晓嘉, 高隽, 王磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报, 2004(Z3): 601–604.

WANG Xiaojia, GAO Jun, WANG Lei. Survey on the laser triangulation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004(Z3): 601–604.

[13] 所睿, 范志军, 李岩, 等. 双频激光干涉仪技术现状与发展[J]. 激光与红外, 2004, 34(4): 251–253.

SUO Rui, FAN Zhijun, LI Yan, et al. Dualfrequency laser interferometer present state and development[J]. Laser & Infrared, 2004, 34(4): 251–253.

[14] 张书练. 正交偏振激光原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

ZHANG Shulian. Principle of orthogonal polarization laser[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

[15] TAIMRE T, NIKOLIĆ M, BERTLING K, et al. Laser feedback interferometry: a tutorial on the self-mixing effect for coherent sensing[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(3): 570–631.

[16] DONATI S. Developing selfmixing interferometry for instrumentation and measurements[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(3): 393–417.

[17] MITSUHASHI Y, MORIKAWA T, SAKURAI K, et al. Self-coupled optical pickup[J]. Optics Communications, 1976, 17(1): 95–97.

[18] OTSUKA K. Highly sensitive measurement of Doppler-shift with a microchip solid-state laser[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1992, 31(11): 1546–1548.

[19] ZHANG S, HOLZAPFEL W.

Orthogonal polarization in lasers: physical phenomena and engineering applications[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

[20] KING P G R, STEWARD G J. Metrology with an optical maser[J]. New Scientist, 1963, 17(3): 180–182.

[21] LANG R, KOBAYASHI K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980, 16(3): 347–355.

[22] GROOT DE P J, GALLATIN G M, MACOMBER S H. Ranging and velocimetry signal generation in a backscatter-modulated laser diode[J]. Applied Optics, 1988, 27(21): 4475–4480.

[23] LI J, TAN Y, ZHANG S. Generation of phase difference between self-mixing signals in a-cut Nd: YVO<sub>4</sub> laser with a waveplate in the external cavity[J]. Optics Letters, 2015, 40(15): 3615–3618.

[24] NORCIA M, DONATI S. A displacement-measuring instrument utilizing self-mixing interferometry[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003, 52(6): 1765–1770.

[25] ZENG Z, QU X, TAN Y, et al. High-accuracy self-mixing interferometer based on single high-order orthogonally polarized feedback effects[J]. Optics Express, 2015, 23(13): 16977–16983.

[26] WU Y, TAN Y, ZENG Z, et al. Note: high-performance HeNe laser feedback interferometer with birefringence feedback cavity scanned by piezoelectric transducer[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(5): 056103.

[27] REN Z, TAN Y, WAN X, et al. Microchip laser feedback interferometer with an optical path multiplier[J]. Chinese Physics Letters, 2008, 25(11): 3995.

[28] GUO D, SHI L, YU Y, et al. Microdisplacement reconstruction using a laser selfmixing grating interferometer with multiplediffraction[J]. Optics Express, 2017, 25(25): 31394–31406.

[29] TAN Y, ZHANG S. External anisotropic feedback effects on the phase difference behavior of output intensities in microchip Nd: YAG lasers[J]. Applied Physics B, 2007, 89(2–3): 339–343.

- [30] CHEN J, ZHU H, XIA W, et al. Synthetic-wavelength self-mixing interferometry for displacement measurement[J]. Optics Communications, 2016, 368: 73-80.
- [31] HUANG Y, DU Z, DENG J, et al. A study of vibration system characteristics based on laser self-mixing interference effect[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 112(2): 023106.
- [32] JIANG C, LI C, YIN S, et al. Multiple self-mixing interferometry algorithm based on phase modulation for vibration measurement[J]. Optical and Quantum Electronics, 2017, 49(3): 111.
- [33] JIANG C, WEN X, YIN S, et al. Multiple self-mixing interference based on phase modulation and demodulation for vibration measurement[J]. Applied Optics, 2017, 56(4): 1006-1011.
- [34] MIKAMI O, FUJIKAWA C. Laser diode Doppler velocimeter with 3-beams and self-mixing effect enabling 3-dimensional velocity measurement[C]//Optical Sensing and Detection IV. International Society for Optics and Photonics, 2016, 9899: 989922.
- [35] WU S, WANG D, XIANG R, et al. All-fiber configuration laser self-mixing doppler velocimeter based on distributed feedback fiber laser[J]. Sensors, 2016, 16(8): 1179.
- [36] GUO D, JIANG H, SHI L, et al. Laser self-mixing grating interferometer for MEMS accelerometer testing[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1): 6800609.
- [37] YANG B, WANG D, ZHOU L, et al. A ultra-small-angle self-mixing sensor system with high detection resolution and wide measurement range[J]. Optics & Laser Technology, 2017, 91: 92-97.
- [38] TAN Y, ZHANG S. Orthogonally linearly polarized dual frequency Nd: YAG lasers with tunable frequency difference and its application in precision angle measurement[J]. Chinese Physics Letters, 2007, 24(9): 2590-2593.
- [39] REN C, TAN Y, ZHANG S. External-cavity birefringence feedback effects of microchip Nd: YAG laser and its application in angle measurement[J]. Chinese Physics B, 2009, 18(8): 3438.
- [40] ZHANG Y, WEI Y, CHEN C, et al. Self-mixing interferometer based on frequency analysis method for accurate refractive index measurement[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2): 1-6.
- [41] CHEN C, ZHANG Y, WANG X, et al. Refractive index measurement with high precision by a laser diode self-mixing interferometer[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 1-6.
- [42] XU L, ZHANG S, TAN Y, et al. Simultaneous measurement of refractive-index and thickness for optical materials by laser feedback interferometry[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(8): 083111.
- [43] WU Y, ZHANG P, CHEN W X, et al. A sensitive method of determining optic axis azimuth based on laser feedback[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(12): 124205.
- [44] ZHENG F, TAN Y, LIN J, et al. Study of non-contact measurement of the thermal expansion coefficients of materials based on laser feedback interferometry[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(4): 043109.
- [45] TAN Y D, ZHANG S REN Z, et al. Real-time liquid evaporation rate measurement based on a microchip laser feedback interferometer[J]. Chinese Physics Letters, 2013, 30(12): 124202.
- [46] LACOT E, DAY R, STOECKEL F. Laser optical feedback tomography[J]. Optics Letters, 1999, 24(11): 744-746.
- [47] XU C, TAN Y, ZHANG S, et al. The structure measurement of micro-electro-mechanical system devices by the optical feedback tomography technology[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(22): 221902.
- [48] DAY R, LACOT E, STOECKEL F, et al. Three-dimensional sensing based on a dynamically focused laser optical feedback imaging technique[J]. Applied Optics, 2001, 40(12): 1921-1924.
- [49] 袁正, 李元级. 现代空空导弹引信技术[J]. 航空兵器, 2000(2): 11-15.
- YUAN Zheng, LI Yuanji. Modern air-to-air missile fuze technology[J]. Aero Weaponry, 2000(2): 11-15.
- [50] 施荣. 国外导弹引信技术的最新发展[J]. 国防科技, 2007(11): 6-10.
- SHI Rong. The latest development of foreign missile fuze technology[J]. National Defense Science & Technology, 2007(11): 6-10.
- [51] BETZIG E, TRAUTMAN J K, HARRIS T D, et al. Breaking the diffraction barrier: optical microscopy on a nanometric scale[J]. Science, 1991, 251(5000): 1468-1470.
- [52] WITOMSKI A, LACOT E, HUGON O, et al. Synthetic aperture laser optical feedback imaging using galvanometric scanning[J]. Optics Letters, 2006, 31(20): 3031-3033.
- [53] ZHAO W, TAN J, QIU L. Bipolar absolute differential confocal approach to higher spatial resolution[J]. Optics Express, 2004, 12(21): 5013-5021.
- [54] ZHAO W, SUN R, QIU L, et al. Laser differential confocal ultra-long focal length measurement[J]. Optics Express, 2009, 17(22): 20051-20062.
- [55] TAN Y, ZHANG S, XU C, et al. Inspecting and locating foreign body in biological sample by laser confocal feedback technology[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(10): 101909.
- [56] TAN Y, WANG W, XU C, et al. Laser confocal feedback tomography and nano-step height measurement[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2971.
- [57] HUBER A W, BEEDLE L S. Residual stress and the compressive strength of steel[R]. Bethlehem: DTIC Document, 1953.
- [58] ZHANG C, XIANGLI B, ZHAO B, et al. A static polarization imaging spectrometer based on a Savart polariscope[J]. Optics Communications. 2002, 203(1): 21-26.
- [59] MARTINELLI M. A universal compensator for polarization changes induced by birefringence on a retracing beam[J]. Optics Communications. 1989, 72(6): 341-344.
- [60] 侯俊峰, 于佳, 王东光, 等. 自校准法测量波片相位延迟[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 173-179.
- HOU Junfeng, YU Jia, WANG Dongguang, et al. Phase retardation measurement of wave plates based on the self-calibration method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(4): 173-179.
- [61] CHEN W, LI H, ZHANG S, et al. Measurement of phase retardation of waveplate online based on laser feedback[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(1): 013101.
- [62] CHEN W, ZHANG S, LONG X. Internal stress measurement by laser feedback method[J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2433-2435.

- [63] 李继扬, 谈宜东, 吴季, 等. 基于激光回馈效应的液晶双折射特性测量 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(3): 107-112
- LI Jiyang, TAN Yidong, WU Ji, et al. Birefringence measurement of liquid crystals based on laser feedback effect[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(3): 107-112.
- [64] 姜一民, 俞成栋. 双频激光干涉仪在机床检定中的应用 [J]. 制造技术与机床, 1995(5): 8-11.
- XIAN Yimin, YU Chengdong. Application of double frequency laser interferometer in machine tool testing[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 1995(5): 8-11.
- [65] 曹利波. 利用激光干涉仪对机床定位精度的快速检测 [J]. 红外与激光工程, 2008(S1): 204-206.
- CAO Libo. Rapid detection of the accuracy of positioning axes in machine using a laser interferometer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008(S1): 204-206.
- [66] WAN X, LI D, ZHANG S. Quasi-common-path laser feedback interferometry based on frequency shifting and multiplexing[J]. Optics Letters, 2007, 32(4): 367-369.
- [67] 万新军. 微片 Nd:YAG 激光器光回馈及其相位外差测量方法研究 [D]. 北京: 清华大学, 2007.
- WAN Xinjun. Research on optical feedback of microchip Nd:YAG laser and its phase heterodyne measurement method[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [68] 杨学山. 工程振动测量仪器和测试技术 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2001.
- YANG Xueshan. Engineering vibration measurement instruments and testing technology[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2001.
- [69] 蒙文舜, 杨运经, 刘云鹏. 电容传感器的原理及应用 [J]. 现代电子技术, 2003(7): 78-81.
- MENG Wenshun, YANG Yunjing, LIU Yunpeng. Principle and application of capacity sensor[J]. Modern Electronic Technique, 2003(7): 78-81.
- [70] 胡海岩. 机械振动基础 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- HU Haiyan. Mechanical vibration foundation[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005.
- [71] 陈贞. 激光干涉测振及信号处理电路研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2014.
- CHEN Zhen. Research on laser interferometry vibration and signal processing circuit[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014.
- [72] 郭玄标. 单频激光干涉测振关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- GUO Xuanbiao. Research on key technologies of single frequency laser interferometry vibration measurement[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [73] 刘杰坤, 马修水, 马颀. 激光多普勒测振仪研究综述 [J]. 激光杂志, 2014(12): 1-5.
- LIU Jiekun, MA Xiushui, MA Xie. Review of laser doppler vibrometer[J]. Laser Journal, 2014(12): 1-5.

通讯作者: 谈宜东, E-mail: Tanyd@tsinghua.edu.cn.

## Applications of Laser Feedback Measurement Technology in Aviation Precision Manufacturing

TAN Yidong, LI Jiyang, ZHU Kaiyi, LU Yueyue

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**[ABSTRACT]** The development level of aviation precision manufacture technology has already become one of the important signs to weigh the comprehensive strength and the development of science and technology of the country. With the fast development of mechanical processing, electronics and electrics, automatic control and information techniques, the aviation precision manufacture technology, which is on the basis of these techniques, has made an unprecedented leap forward, new technologies, new processes and new products have been emerging. At the same time, with the increase of precision and performance in techniques and products, the demands for precision measurement of key parameters are growing. However, for devices in aviation manufacturing, many requirements cannot be met by the traditional measuring methods. The laser feedback effect is a phenomenon where the laser emitted from the laser is reflected or scattered by the surfaces of the targets and returns back into the laser cavity, modulating the intensity, polarization state, and the phase of the laser. In the precision measurement field, the laser feedback effect has the advantage as high sensitivity, which can measure non-cooperative targets such as black, rough, cylindrical, micro or liquid targets; compact structure and easy alignment; high resolution and traceability to the laser wavelength. By using the laser feedback effect, precision measurement of aviation product can be carried out, realizing the precision locating and monitoring of real time working condition, which plays an irreplaceable role in improving the precision of aviation manufacturing and promoting the development of the industry.

**Keywords:** Laser feedback; Aviation manufacture; Precision measurement; Non-cooperative target; In-suit measurement

(责编 溥山)