



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107976155 B

(45)授权公告日 2019.10.25

(21)申请号 201711183603.X

(22)申请日 2017.11.23

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 107976155 A

(43)申请公布日 2018.05.01

(73)专利权人 中国科学技术大学  
地址 230026 安徽省合肥市包河区金寨路  
96号

(72)发明人 汪连坡 朱烨 翟超 顾永刚

(74)专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责  
任公司 11251

代理人 杨学明 贾玉忠

(51)Int.Cl.  
G01B 11/24(2006.01)

(56)对比文件

CN 103674963 A,2014.03.26,  
DE 10150437 A1,2003.04.17,  
CN 102768410 A,2012.11.07,  
CN 101023319 A,2007.08.22,  
CN 101023319 A,2007.08.22,  
CN 1789906 A,2006.06.21,  
US 2006061774 A1,2006.03.23,  
CN 101701922 A,2010.05.05,  
CN 103615972 A,2014.03.05,  
何兴道.用锥面镜制作环形全息光栅.《南昌  
航空工业学院学报》.2002,第16卷(第3期),  
李玺等.深孔表面三维形貌测量与控制装置  
的研制.《Instrument Technique and Sensor》  
.2006,(第9期),

审查员 张雪松

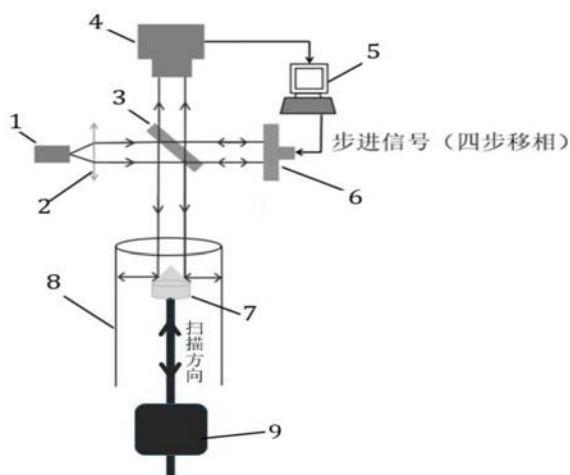
权利要求书1页 说明书5页 附图1页

## (54)发明名称

一种基于数字全息干涉的发动机气缸内壁  
检测装置及方法

## (57)摘要

本发明公开了一种基于数字全息干涉的发动  
机气缸内壁检测装置及方法,该装置包括双频  
激光器、扩束/准直光路、分光板、移相器、锥  
面反射镜及扫描运动装置、CCD相机以及上位  
机,其光学原理、器件、光路布置与泰曼-格  
林干涉仪类似,不过引入了90°圆锥反射镜,  
将直线射入的光束变成辐向光束。该辐向测  
量光束照射在待测发动机内壁,形成环形光  
带,该光带即是参与干涉的待测面。通过引  
入扫描运动装置带动圆锥反射镜直线运动,  
从而完成整个内壁的检测。本发明测量精度  
高、实时性好,满足在线检测高效率的要求。  
本发明属于非接触测量,避免触头对内壁造  
成的刮擦划痕;面型测量,测量范围大、测  
量信息多等优点。



1. 一种基于数字全息干涉的发动机气缸内壁检测方法,该方法利用基于数字全息干涉的发动机气缸内壁检测装置,包括双频激光器、扩束/准直光路、分光板、移相器、锥面反射镜及扫描运动装置、CCD相机以及上位机,将双频激光器、扩束/准直光路、分光板、移相器、CCD相机按照泰曼-格林干涉仪的光学位置关系安装在光学平台上,使用透镜固定架将锥面反射镜安装在扫描运动装置上,保证锥面反射镜的轴线方向与扫描运动装置进给方向平行,且使由分光板反射的测量光束方向与锥面反射镜的轴线方向重合,双频激光器的作用是提供干涉光源;扩束/准直光路的作用是将光源扩束准直使光束直径足够大;分光板将光束分为测量光束和参考光束形成干涉;移相器的作用是完成四步移相,便于相位差的求取;CCD相机拍下干涉的全息图,便于数字处理;锥面反射镜的作用是将测量光束反射成辐向光束,已达到测量内壁的目的;扫描运动装置的作用是使角锥反射镜轴向步进,完成整个内壁的扫描测量,其特征在于:该方法步骤为:

步骤1. 在波长 $\lambda_1$ 下,一束激光被分光镜分为两路互相垂直的光束;

步骤2. 其中一路光束为参考光,其光程由压电陶瓷驱动的反射镜在一个波长范围内进行精密调整,以实现 $2\pi$ 范围内的四步相移;

步骤3. 另一路光束为测量光束即物光,经锥面反射镜和待测内壁反射后回到分光器上;

步骤4. 参考光和物光在分光器上发生干涉,在参考光的四个相位下分别形成包含相位信息的全息图,被CCD相机拍摄并存储;

步骤5. 改变激光器波长 $\lambda_2$ ,重复步骤1-4;

步骤6. 从全息图得到内壁上的点对应的光程差,并重建出三维形貌;

步骤7. 锥面反射镜做进深运动实现扫描,重复步骤1-6。

## 一种基于数字全息干涉的发动机气缸内壁检测装置及方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于数字全息干涉测量领域,特别涉及一种基于数字全息干涉的发动机气缸内壁检测装置及方法。

### 背景技术

[0002] 目前,乘用车发动机大多由铝合金缸体和铸铁缸套装配而成,以兼顾发动机重量和汽缸内壁耐磨性。为了进一步降低发动机总重以及降低气缸与活塞的摩擦损耗,研究者们提出了一种新的气缸加工工艺:内壁喷涂技术【1-4】。即将融化的铸铁喷涂在铝合金缸体的内表面,并将涂层镗削为最终的气缸内壁。采用内壁喷涂技术得到的铸铁涂层厚度大致为100微米~200微米,并且密布尺度在10微米左右的孔洞【4】。涂层厚度分布以及多孔性是两项十分重要的指标,需要进行精确的检测以判断工件是否合格以及为进一步镗削提供参数。由于气缸涂层的特性,对其厚度和多孔性的检测要求测量系统达到1微米或更高的分辨率,并且拥有全场非接触测量等特性。但目前工业界并无能够满足需求的适用于气缸内表面的高精度全场三维测量系统,这也是制约内壁喷涂技术大规模工业应用的重要因素之一。

[0003] 在深孔内表面三维测量领域,国内外研究者们已经进行了多年的研究,并研发了多种实用的检测技术。日本岛根大学的Wakayama【5】、东南大学张广军院士【6】、美国密西根大学的Hong【7】均研发了基于激光三角法的内壁测量系统,巴西圣卡塔琳大学的Albertazz【8】研究了将条纹投影技术应用用于内壁三维检测。但由于原理限制,这些系统只能达到20微米左右的测量精度,无法满足气缸内壁测量和气缸喷涂过程检测的精度要求。

[0004] 激光全息干涉技术可以做到最高的分辨率和最高的测量精度(远优于激光波长)【9~12】,满足内壁喷涂过程检测的需求。但气缸内表面有着封闭和空间狭小(直径小于120mm)等特点,无法将结构复杂的激光干涉系统放入其中。而传统的激光全息干涉系统生成的检测光束为近似平行光,如果系统放置在气缸外则无法照射到气缸内壁,因此并不适用于环形内三维表面的检测。为了解决这个矛盾,本发明设计一种新的激光全息干涉系统,使其结构能够适应内表面的检测。

[0005] 参考文献:

[0006] 1.Barbezat,Gérard."Advanced thermal spray technology and coating for lightweight engine blocks for the automotive industry."Surface and Coatings Technology 200.5(2005):1990-1993.

[0007] 2.Gérard,Barbezat."Application of thermal spraying in the automobile industry."Surface and Coatings Technology 201.5(2006):2028-2031.

[0008] 3.Bobzin,K.,et al."Thermal spraying of cylinder bores with the Plasma Transferred Wire Arc process."Surface and Coatings Technology 202.18(2008):4438-4443.

[0009] 4.Darut,Geoffrey,et al."Steel coating application for engine block

bores by Plasma Transferred Wire Arc spraying process."Surface and Coatings Technology 268(2015):115-122.

[0010] 5.Wakayama T,Machi K,Yoshizawa T.Small size probe for inner profile measurement of pipes using optical fiber ring beam device[C]//Photonics Asia.International Society for Optics and Photonics,2012:85630L-85630L-7

[0011] 6.Zhang G,He J,Li X.3D vision inspection for internal surface based on circle structured light[J].Sensors and Actuators A:Physical,2005,122(1):68-75

[0012] 7.Hong E,Katz R,Hufnagel B,et al.Optical method for inspecting surface defects inside a small bore[J].Measurement science and technology,2010,21(1):015704

[0013] 8.Albertazzi Jr A G,Hofmann A C,Fantin A V,et al.Photogrammetric endoscope for measurement of inner cylindrical surfaces using fringe projection[J].Applied optics,2008,47(21):3868-3876.

[0014] 9.Zhang,Yimo,et al."Digital holography and its application."Photonics Asia 2004.International Society for Optics and Photonics,2005.

[0015] 10.Yamaguchi,Ichirou,Jun-ichi Kato,and Hirokazu Matsuzaki."Measurement of surface shape and deformation by phase-shifting image digital holography."Optical Engineering 42.5(2003):1267-1271.

[0016] 11.Jacquot,Maxime,Patrick Sandoz,and Gilbert Tribillon."High resolution digital holography."Optics communications 190.1(2001):87-94.

[0017] 12.Parshall,Daniel,and Myung K.Kim."Digital holographic microscopy with dual-wavelength phase unwrapping."Applied Optics 45.3(2006):451-459.

## 发明内容

[0018] 本发明设计了一种基于数字全息干涉基本原理的一种新结构干涉仪装置,实现一套适用于发动机气缸内壁喷涂过程在线检测和多种深孔类零件内表面高精度三维测量的系统。

[0019] 本发明采用的技术方案为:一种基于数字全息干涉的发动机气缸内壁检测装置,该装置包括双频激光器、扩束/准直光路、分光板、移相器、锥面反射镜及扫描运动装置、CCD相机以及上位机,将双频激光器、扩束/准直光路、分光板、移相器、CCD相机按照泰曼-格林干涉仪的光学位置关系安装在光学平台上,使用透镜固定架将锥面反射镜安装在扫描运动装置上,保证锥面反射镜的轴线方向与扫描运动装置进给方向平行,且使由分光板反射的测量光束方向与锥面反射镜的轴线方向重合,双频激光器的作用是提供干涉光源;扩束/准直光路的作用是将光源扩束准直使光束直径足够大;分光板将光束分为测量光束和参考光束形成干涉;移相器的作用是完成四步移相,便于相位差的求取;CCD相机拍下干涉的全息图,便于数字处理;锥面反射镜的作用是将测量光束反射成辐向光束,已达到测量内壁的目的;扫描运动装置的作用是使角锥反射镜轴向步进,完成整个内壁的扫描测量。

[0020] 其中,选用波长分别为 $\lambda_1=629.4\text{nm}$ 和 $\lambda_2=632.8\text{nm}$ 的双波长He-Ne激光器,能够达

到117微米的等效合成波长,覆盖内壁表面能够达到的起伏尺寸,避免相位包裹,激光器频率稳定性的要求高于 $10^{-7}$ ,即 $S_v(\tau) = \frac{\Delta v(\tau)}{\bar{v}} < 10^{-7}$ 。

[0021] 其中,锥面反射镜采用金属进行高精度车削和磨削得到的 $90^\circ$ 锥面并在表面镀Ag膜制成,以保证加工精度和表面对所选激光的反射率,反射镜底面半径为10mm,在一个位置可以测量的内壁长度为10mm。

[0022] 其中,锥面反射镜的扫描运动驱动采用伺服电机驱动结合精密滚珠丝杠传动的方案,可以做到微米级的定位精度,且伺服电机的传感器反馈信号可以提供高精度的反射镜位置信息。

[0023] 其中,选购4K\*4K分辨率,12位以上位深度的灰度CCD相机,并配备高素质的定焦工业镜头,配合10mm半径的锥面反射镜,可以达到 $2.5\mu\text{m}/\text{px}$ 的Z轴方向和周向分辨率。

[0024] 其中,移相器是利用PZT压电陶瓷驱动,其移动精度为0.1nm。

[0025] 还提供一种基于数字全息干涉的发动机气缸内壁检测方法,该方法步骤为:

[0026] 步骤1.在波长 $\lambda_1$ 下,一束激光被分光镜分为两路互相垂直的光束;

[0027] 步骤2.其中一路光束为参考光,其光程由压电陶瓷驱动的反射镜在一个波长范围内进行精密调整,以实现 $2\pi$ 范围内的四步相移;

[0028] 步骤3.另一路光束为测量光束(物光),经锥面反射镜和待测内壁反射后回到分光器上;

[0029] 步骤4.参考光和物光在分光器上发生干涉,在参考光的四个相位下分别形成包含相位信息的全息图,被CCD相机拍摄并存储;

[0030] 步骤5.改变激光器波长 $\lambda_2$ ,重复步骤1-4;

[0031] 步骤6.从全息图得到内壁上的点对应的光程差,并重建出三维形貌;

[0032] 步骤7.锥面反射镜做进深运动实现扫描,重复步骤1-6。

[0033] 本发明的优点和积极效果为:

[0034] (1)本发明在传统的激光全息干涉系统基础上引入锥面反射镜,将平行光束转换呈辐向测量光束,以适应气缸内表面的检测。测量精度高,可以达到0.1微米的精度。

[0035] (2)本发明实时性好,对一个100mm长的气缸检测时间略大于50s满足发动机内壁在线检测高精度、高效率的要求。

[0036] (3)本发明属于非接触测量,避免一般接触式内壁测量装置的触头对发动机内壁造成的刮擦划痕。

[0037] (4)本发明属于面型测量,本装置一次测量是完成约10mm高的内壁光带的测量,比一般高精度内壁测量如三坐标测量仪等有着测量范围大、测量信息多等优点。

[0038] (5)本发明方法通用性好,可将本装置与普通低精度内壁绝对测量装置联合,进行任意深孔类内壁的高精度绝对测量,如炮管内壁测量、环规内壁标定等。

## 附图说明

[0039] 图1为本发明基于数字全息干涉的发动机气缸内壁检测装置结构图。

[0040] 图中附图标记含义为:1为双频激光器,2为扩束/准直光路,3为分光板,4为CCD相机,5为上位机,6为移相器,7为锥面反射镜,8为内壁表面,9为扫描运动装置。

## 具体实施方式

[0041] 本发明的基本思路是基于数字全息干涉的基本原理设计一种新结构干涉仪装置，使用一个锥面反射镜将平行测量光束转变为辐向测量光束以使之到达气缸内壁，实现高精度三维测量。

[0042] 检测装置由双频激光器1、扩束/准直光路2、分光板3、移相器6、锥面反射镜7、扫描运动装置9、CCD相机4以及上位机5组成，装置如图1所示。选用波长分别为 $\lambda_1 = 629.4\text{nm}$ 和 $\lambda_2 = 632.8\text{nm}$ 的双波长He-Ne激光器1，能够达到117微米的等效合成波长，覆盖内壁表面8能够达到的起伏尺寸，避免相位包裹。激光器频率稳定性的要求高于 $10^{-7}$ ，即

$$S_{\nu}(\tau) = \frac{\Delta\nu(\tau)}{\nu} < 10^{-7}$$

锥面反射镜7采用金属进行高精度车削和磨削得到的 $90^\circ$ 锥面并在表面镀Ag膜制成，以保证加工精度和表面对所选激光的反射率，反射镜底面半径为10mm，在一个位置可以测量的内壁长度为10mm。锥面反射镜的扫描运动装置9采用伺服电机驱动结合精密滚珠丝杠传动的方案，可以做到微米级的定位精度，且伺服电机的传感器反馈信号可以提供高精度的反射镜位置信息。选购4K\*4K分辨率，12位以上位深度的灰度CCD相机4，并配备高素质的定焦工业镜头，配合10mm半径的锥面反射镜7，可以达到 $2.5\mu\text{m}/\text{px}$ 的Z轴方向和周向分辨率。移相器6是利用PZT压电陶瓷驱动，其移动精度为0.1nm。使用接杆和必要夹持装置将双频激光器1、扩束/准直光路2、分光板3、移相器6、CCD相机4等按照泰曼-格林干涉仪的光学位置关系安装在光学平台上。使用透镜固定架将锥面反射镜7安装在扫描运动装置9上，保证锥面反射镜7的轴线方向与扫描运动装置9进给方向平行，且使由分光板3反射的测量光束方向与锥面反射镜7的轴线方向重合。双频激光器1的作用是提供干涉光源；扩束/准直光路2的作用是将光源扩束准直使光束直径足够大；分光板3将光束分为测量光束和参考光束形成干涉；移相器6的作用是完成四步移相，便于相位差的求取；CCD相机4拍下干涉的全息图，便于数字处理；锥面反射镜7的作用是将测量光束反射成辐向光束，已达到测量内壁的目的；伺服电机驱动结合精密滚珠丝杠传动的扫描运动装置9的作用是使角锥反射镜轴向步进，完成整个内壁的扫描。

[0043] 工作步骤为：

[0044] 1. 在波长 $\lambda_1$ 下，一束激光被分光镜分为两路互相垂直的光束；

[0045] 2. 其中一路光束为参考光，其光程由压电陶瓷驱动的反射镜在一个波长范围内进行精密调整，以实现 $2\pi$ 范围内的四步相移；

[0046] 3. 另一路光束为测量光束（物光），经锥面反射镜和待测内壁反射后回到分光器上；

[0047] 4. 参考光和物光在分光器上发生干涉，在参考光的四个相位下分别形成包含相位信息的全息图，被CCD相机拍摄并存储；

[0048] 5. 改变激光器波长 $\lambda_2$ ，重复步骤1-4；

[0049] 6. 从全息图得到内壁上的点对应的光程差，并重建出三维形貌；

[0050] 7. 锥面反射镜做进深运动实现扫描，重复步骤1-6。

[0051] 实施例

[0052] 本发明提出并设计了一种基于数字全息干涉的发动机气缸内壁检测方法及装置，一般的该装置也适用于需要高精度三维内壁检测的其他任何深孔类如炮管等军工产品的

内壁检测。下面结合附图详细说明本发明在气缸加工内壁喷涂技术中的应用实施例。

[0053] 将激光器1安装在恒温恒湿的隔振箱中,使得频率稳定性优于 $10^{-7}$ ,如果实验表明被动稳频措施无法使激光器在测量现场的环境中达到 $10^{-7}$ 的频率稳定性,则改用集成了主动稳频技术的激光器;激光器经扩束光路2后照射到分光板3上,由分光板分为两路。一路为测量光路,经锥面反射镜7和待测内壁8反射后回到分光板3上,另一路光束为参考光,其光程由压电陶瓷驱动6的反射镜在一个波长范围内进行精密调整,以实现 $2\pi$ 范围内的四步相移。参考光和物光在分光器上发生干涉,产生包含相位信息的全息图,由相机4拍取四步移相得到的四幅干涉图像,可以由以下公式得到相位。假设四步移相得到干涉图像的光强 $I(x,y)$ 表达式如下(其中 $(x,y)$ 表示拍得干涉图像像素位置):

$$[0054] \quad \begin{cases} I_0(x,y) = a + b \cos[\phi(x,y) + 0] = a + b \cos[\phi(x,y)] \\ I_{\frac{\pi}{2}}(x,y) = a + b \cos[\phi(x,y) + \frac{\pi}{2}] = a - b \sin[\phi(x,y)] \\ I_{\pi}(x,y) = a + b \cos[\phi(x,y) + \pi] = a - b \cos[\phi(x,y)] \\ I_{\frac{3\pi}{2}}(x,y) = a + b \cos[\phi(x,y) + \frac{3\pi}{2}] = a + b \sin[\phi(x,y)] \end{cases}$$

[0055] 式中 $a$ 为背景光强, $b$ 为衬度(也称幅值), $\phi$ 为相位。

[0056] 可得到相差 $\phi(x,y)$ :

$$[0057] \quad \phi(x,y) = \arctan \frac{I_{\frac{3\pi}{2}} - I_{\frac{\pi}{2}}}{I_0 - I_{\pi}}$$

[0058] 由四步移相法可以得到待测内壁的相对相位差 $\phi(x,y)$ ,当然一样可以采用三步、五步移相方法,这里不再赘述。同样的方法,两个频率的激光分别获得两个相位差 $\phi_{\lambda_1}(x,y)$ 和 $\phi_{\lambda_2}(x,y)$ 。将两个相位差相减,可以形成等效波长为 $\lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \approx 117 \mu\text{m}$ 的等效相位差 $\Phi$ 。

这样当待测件内壁最高点与最低点相差低于 $117\mu\text{m}$ 时是不会出现相位包裹的。而发动机气缸内壁在喷涂过程中一般孔洞在 $10\mu\text{m}$ 左右,显然小于 $117\mu\text{m}$ 不会造成相位包裹。面型误差

$\delta = \frac{\Phi \times \lambda}{4\pi}$  ( $\Phi$ 为等效相位差, $\lambda$ 为等效波长),这样就可以根据波长的值不用解包裹地重建

气缸内壁三维孔洞情况。当该截面测量完成后,步进电机驱动的扫描运动装置9的精密滚珠丝杠带动角锥镜向前移动 $5\text{mm}$ ,测量下一截面面型情况,保证了两次测量截面有所重叠,不会遗漏。重复以上操作,直到发动机气缸内壁扫描完成。就可以判断工件是否合格以及为下一步的精镗削提供参数。

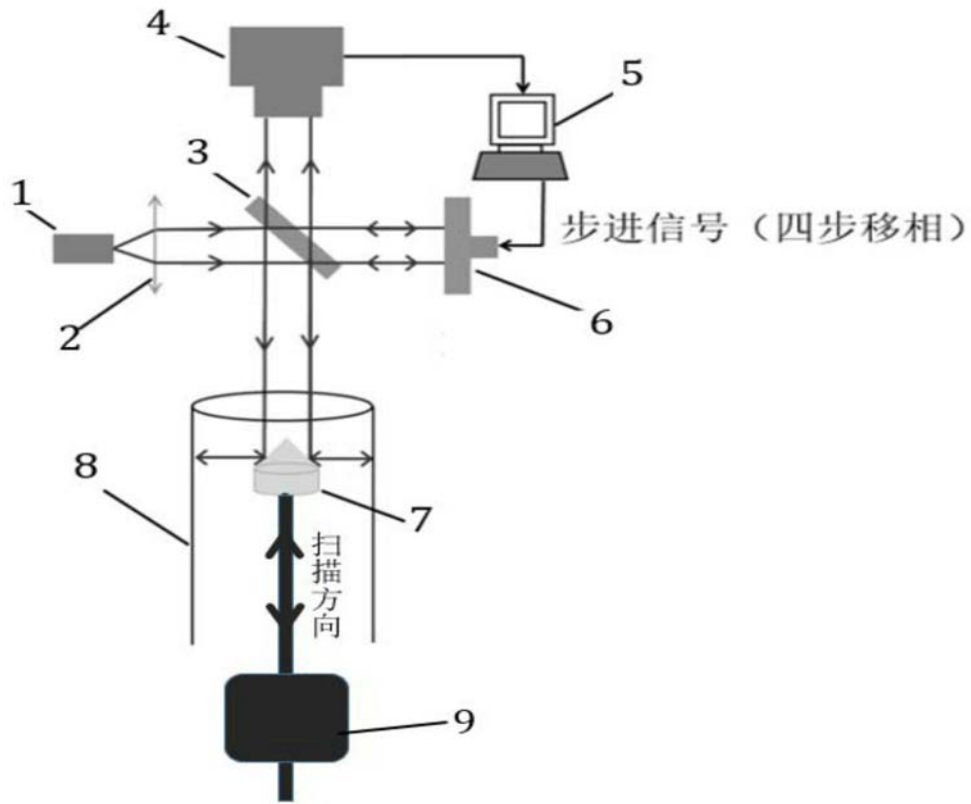


图1