

位相板在大型几何量形位误差测量中的应用

郝 群 赵 洋 李达成 曹 芒

(清华大学精仪系, 精密测试技术与仪器国家重点实验室 北京 100084)

摘要 介绍了利用位相板技术进行准直的工作原理和特点, 以及如何利用该项技术有效地确定激光准直光束的几何基准, 并介绍了以此技术为基础的光学基准在大型几何量形位误差测量中的应用。

关键词 位相板 形位误差 大尺寸测量

1 引 言

利用光束直线性进行准直是个历史悠久的课题, 长期以来人们先后研究了各种用光束来准直的方法。激光准直法利用激光光束的方向性好、亮度高等优点, 以稳定的准直激光束作为测量基准, 通过光电测头将被测点与此基准进行比较, 直接得到被测点的高度变化量, 获得被测信息。利用激光光束作为基线, 通过光学机械扫描机构扫描出的光束平面可以作为平面度的测量基准, 原则上它是“无限大的”, 因此特别适合于大型工件的测量。

从理论上讲, 激光准直方法具有精度高, 易实现自动测量等优点, 但是因为激光准直仪一般采用全内腔氦-氖激光器为光源, 由于器件本身的结构、材料等受热变形以致于组成激光腔的两个镜片的几何位置发生微小变化等原因, 造成激光束不可避免地存在方向漂移(角漂)和平行漂移的问题。在激光准直技术中, 主要有两种方法来抑制激光束的漂移: 一种是利用对称双光束法^[1]; 另一种则是利用光纤准直技术^[2]。对称双光束法是利用光学系统将一束激光变成对称的两束, 利用这两条光束光轴的角平分线作为准直的中心。另一种则是利用光纤准直技术。光纤准直技术利用单模光纤模式稳定特点, 有效地抑制激光束的角漂和平漂, 获得一个准直的光束, 该光束的光轴是准直中心。但是, 如果直接以该激光束的轴线作为基准, 用测量该光束的能量中心则其准直精度只可达到 10^{-5} 量级; 如果利用位相板技术产生的衍射条纹形成的黑线作为基准, 测量准直精度可达 10^{-6} 。

2 位相板准直工作原理

图1表示用一维非对称 π 相位阶跃位相板作准直测量的原理图。在透明平板 G 的一半面上镀以一定厚度的膜厚,使其通过上下两部分的光产生位相差 π ,这样非对称位相板的两部分相当于两块直边衍射屏,但位相差 π 。当用同一平行光照明时,合成衍射场分布为

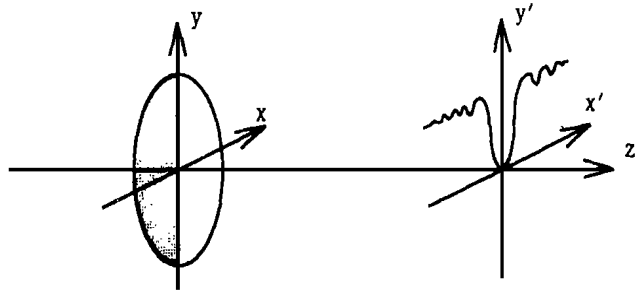


Fig. 1 The diffraction pattern of a one-dimension asymmetrical phase plate

$$E_0(x, y, z) = E_1(x, y, z) + E_2(x, y, z) \quad (1)$$

根据直边衍射公式^[2]:

$$E(x, y, z) = \frac{(1+i)e^{ikz}}{2i} \left[F\left(\frac{2}{\lambda z}x\right) - F(-) \right] \quad (2)$$

其中 $F(x)$ 是菲涅尔积分,两直边衍射的衍射场为:

$$E_1(x, y, z) = \frac{(1+i)e^{ikz}}{2i} \left[F\left(\frac{2}{\lambda z}x\right) - F(-) \right] \quad (3)$$

$$E_2(x, y, z) = \frac{(1+i)e^{ikz}}{2i} \left[F\left(-\frac{2}{\lambda z}x\right) - F(-) \right] e^{i\pi} \quad (4)$$

合成衍射场分布为(略去常数):

$$E_0(x, y, z) = \left\{ F\left(\frac{2}{\lambda z}x\right) - F(-) \right\} - \left\{ F\left(-\frac{2}{\lambda z}x\right) - F(-) \right\} \quad (5)$$

可见,对于轴上点($x = 0$), $E_1(x, y, z) = E_2(-x, y, z)$,则

$$E_0(x, y, z) = 0 \quad (6)$$

因此在接收屏上得到对称于暗中心线的光强分布,这样就可把这条中心暗线作为中心,在空间组成准直基准。经过该位相板后的衍射光束有如下特点。

1 光束是一个具有中心黑线的对称衍射图样,该衍射图样是以通过此黑线中心的光轴为轴的轴对称图样。利用衍射图样的对称性,可以高精度确定出黑线的位置。

2 当入射光波是平行平面波,且方向确定时,如果入射光波平移时,黑线和衍射图样在空间上不变。

3 该衍射黑线只能在一个方向上提供测量基准,即其一维性。

同样道理,若采用二维非对称 π 相位阶跃位相板:在位相板上四个象限的相邻象限之间的位相差 π ,这时将有二个相互垂直的基准。在垂直于此基准的屏上可观察到由中心零光强形成的暗十字线。因此可运用它作二维准直测量基准。

3 位相板准直技术在大型几何量形位误差测量中的应用

3.1 采用一维位相板和线阵 CCD 测量直线度

根据前面所述原理, 准直激光束通过一维非对称位相板后, 激光在其分界线发生直边衍射后, 沿分界线处始终有零光强, 形成一条中暗(黑)线, 以该黑线为基准, 用线阵 CCD 组成的光电测头直接测出黑线的位置。测量时 CCD 测头在被测工件表面上移动, 随着测点高度不同, CCD 接收黑线位置也不同, 测得各测点的高度变化值。CCD 测头输出的高度变化值经过数据处理后获得被测直线度。此测量系统的精度为 $\delta = \pm (1.5 + 2.3 \times 10^{-6}L) \mu\text{m}$ 。

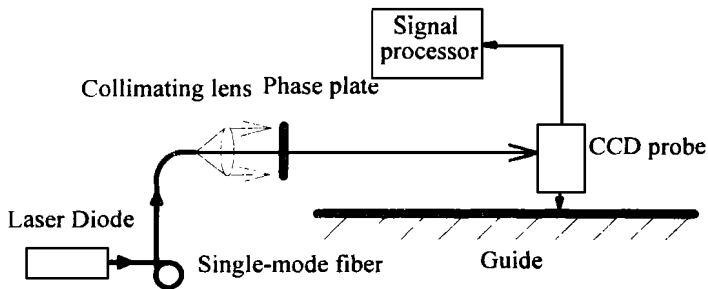


Fig. 2 Principle diagram of measuring straightness using one-dimension phase plate and linear CCD

3.2 采用一维位相板与线阵 CCD 测量平面度以及面间平行度和垂直度^[4]

如图3所示是利用位相板准直原理进行平面度、平行度和垂直度测量的原理图。从激光光纤准直系统发出的准直激光束经过一个由五角棱镜构成的光学机械扫描机构1, 照射在位相板上, 当旋转五角棱镜扫描头时, 则位相板的衍射图样形成了一个扫描平面。利用 CCD 测头测量出该光学基准面与被测面间的偏离量。经过数据处理, 获得平面度。旋转五角棱镜扫描头2, 则位相板的衍射图样形成一个与扫描头1扫出的平面平行的平面, 形成平行度测量基准, 可进行平行度测量。旋转五角棱镜扫描头3, 则位相板的衍射图样形成了与扫描头1扫出的平面垂直的平面, 形成垂直度测量基准, 可进行垂直度测量。此套测量系统的精度为 $\delta = \pm (2 + 2.3 \times 10^{-6}L) \mu\text{m}$ 。

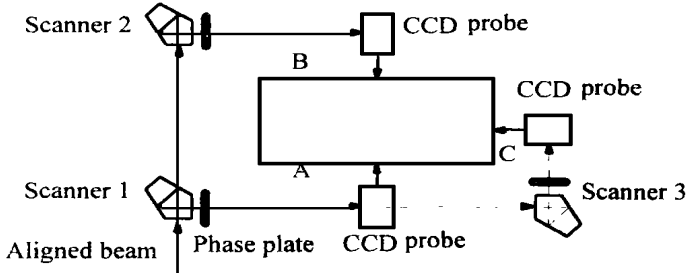


Fig. 3 Principle diagram of measuring flatness, parallelism and perpendicularity

3.3 采用二维位相板与面阵 CCD 测量轴线直线度、端面对轴孔的垂直度

根据前面所述原理, 采用二维非对称位相板, 以十字黑线的中心线作为测量基准, 可进行两个方向上(二维)的直线性的测量。图4所示是测量大型工件的轴线直线和端面对孔轴的垂直度测量原理。放置在轴内径上的自动定心靶上的面阵 CCD 测头测量出轴线与测量基准的偏离, 就可以完成轴端面平面度以及端面对孔轴的垂直度测量。此测量系统的精度为 $\delta = \pm (2.3 + 2.5 \times 10^{-6}L) \mu\text{m}$ 。

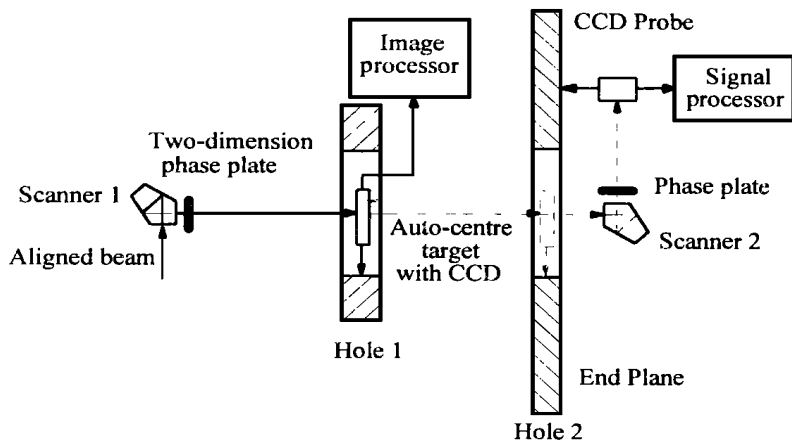


Fig. 4 Principle diagram of measuring axle straightness and the perpendicularity refer to its end

4 结 束 语

利用位相板技术有效地抑制了激光束的漂移, 建立了一个稳定高精度的测量基线。以该基线为基准通过光学机械结构, 有效地建立起了几何量形位误差的测量基准, 平面度平面基准、平行度基准、同轴度和直线度基准, 并取得了良好的结果。因此, 位相板和相应的衍射光学元件在精密计量中的应用, 有着广泛的前景和研究价值。

参 考 文 献

- 1 郭志义. 激光光纤准直装置的实验研究. 硕士学位论文, 清华大学精仪系, 1989
- 2 严瑛白. 应用物理光学. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 3 Hao Qun, Zhao Yang, Li Dacheng, Cao Mang. Measuring coaxiality and perpendicularity of the axis to end plane using optical method. SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering and Instrumentation '97, 1997, 3174: 317 ~ 320
- 4 Hao Qun, Cao Mang, Li Dacheng. Instrument for measuring flatness by using laser and CCD. SPIE's International Symposium on Optical Science Engineering, and Instrumentation, 1996, 2862: 183 ~ 186

Application of Phase Plate in Measuring Large Scale Form and Position Errors

HAO Qun, ZHAO Yang, LI Da-Cheng, CA O Mang

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

Abstract

In this paper, principle and characteristics of the alignment technique with phase plate are described. By using the technique, the geometric datum of the alligned beam is dertermined effectively. Also in the paper, some applications of the technique in measuring large scale form and position errors are introduced.

Key words: Phase plate, Form and position error, Large scale measurement

郝群 29岁, 1998年3月于清华大学精密仪器与机械学系、光学仪器专业获工学博士学位, 现于北京理工大学光电工程系任教。主要从事光学计量、精密测试技术及仪器等专业方向的研究工作, 现已发表术论文近二十篇。