

光纤干涉测距中的量程倍增系统*

黄绍梅 段发阶 叶声华

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘 要 利用光纤传感技术, 实现了一种可以测量 1 m 以上的绝对距离的光纤干涉测距的倍增系统。它主要采用两个干涉仪, 分别对靶标进行定位及对光程进行调谐和对距离进行测量。通过引入已精确标定的光纤, 利用短导轨, 实现了高精度、大距离的测量。

关键词 光纤传感器, 量程倍增, 光程调谐, 标定。

1 引 言

距离的绝对测量是干涉测距的难点和重要的发展方向。光纤干涉测距的量程倍增是一项较新的技术^[1~4], 我们利用它成功地实现了无长导轨的高精度大距离测量。该技术不同于以往的光学机械倍程, 它是利用光纤来自由地扩大系统的测量范围, 而无需加大导轨的长度来实现大距离测量的。同时, 我们利用光纤自标定技术, 把光波长作为基准量, 来精确地标定光纤的长度, 建成了一套完整的量程倍增测量系统。

2 系统原理

该系统是由定位干涉仪和扫描干涉仪两部分组成, 如图 1 所示。两部分干涉仪由扫描镜

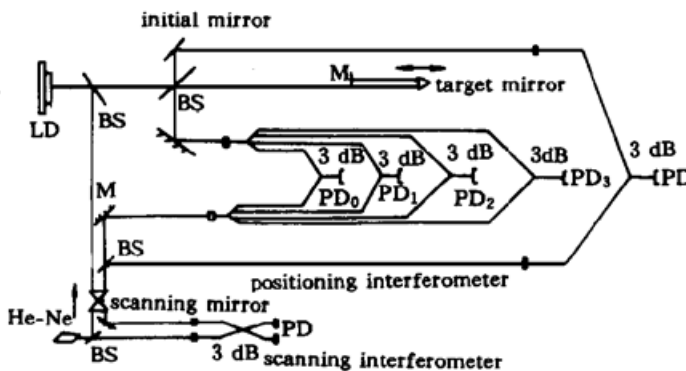


Fig.1 Schematic diagram of the optical fibre interferometer for measuring absolute distance

进行连接。定位干涉仪完成对零光程点的锁定, 扫描干涉仪完成对位移量的测量。定位干涉仪可以求出从定位信号出现到定位信号的峰值点(即零光程点)的距离值, 扫描干涉仪测量从扫描导轨移动到定位信号出现的位移值, 用接口卡和定位信号对其进行控制, 锁存所需要的位移值。因此, 定位干涉仪和扫描干涉仪结合在一起就实现了整个系统的绝对测量。信号处理过程如下: 测量开始, 移动扫描工作台, 扫描测量干涉仪开始记录位移数值。

当定位信号出现时, 启动采集系统, 系统开始 A/D 转换, 同时锁存扫描干涉仪的位移值 S_1 (对应 S_1 点)。当对整个包络采集结束后, 将采集结果及锁存的位移值送往计算机, 经计算

* 国家自然科学基金资助项目(59575088)。

处理后, 求出定位包络信号 A_1 、 S_1 两点间锁存包含的干涉条纹个数 n_1 , 找到包络的极值点 A_1 (即零光程点)。下一个定位采集过程相同, 也可得到锁存的位移值 S_2 (对应 S_2 点), 以及相应定位包络信号在两点间的干涉条纹数 n_2 , 找到包络极值点 A_2 (零光程点)。其测量原理示意图如图 2 所示。这样, 所测得的距离值 L , 就可表示为

$$L = (S_2 - S_1) - n_1 \frac{\lambda}{8} + n_2 \frac{\lambda}{8} + P_m, (1)$$

其中, $\frac{\lambda}{8}$ 是定位干涉条纹的条纹当量, P_m ($m = 1, 2, 3, 4 \dots$) 是用以扩大系统动态范围的插入单模光纤的光程。当精确标定好每一个 P_m 时, 系统就可以实现在其测量范围内的绝对距离测量。

2.1 定位干涉仪

定位干涉仪是用来对系统待测目标镜位置进行调谐和定位的。它在测量过程中捕捉干涉仪参考光路和信号光路光程差为零的点。当两路光光程相等时, 定位干涉仪输出干涉信号, 如图 2 中的定位干涉包络信号。对该干涉信号进行信号处理和数据采集, 从而确定目标的位置即零光程差的位置 A_1 、 A_2 。用开门信号控制扫描干涉仪的测量, 用 IEE488 接口卡锁存扫描干涉仪的位移值 S_1 、 S_2 。

使用一种基于马赫-曾德尔结构组合形式的光纤干涉仪作为定位干涉仪。因为, 从结构上看, 它可以保证几乎没有影响光源稳定性的反馈光进入激光器, 同时, 其光波是单相开环式传播的, 可以进行量程倍增。

对于定位干涉仪的光源选取, 因为它是锁定两路光程差相等的零光程点, 所以, 为使定位精度高, 需要它有较短的相干长度, 但同时因这套系统是光纤传感器, 光源出来的光需要与光纤进行耦合, 并在光纤中传播干涉。基于此, 我们采用脉冲电流调制下的半导体激光器作为光源。它具有较宽的谱宽; 较短的相干长度, 现可达到 $45 \mu\text{m}$; 而且还有与光纤相匹配的很好的特性。利用它, 可以得到精度较高、现象明显的定位干涉信号, 从而得到所需要的零光程点。

2.2 扫描干涉仪

扫描干涉仪是用来进行高精度的位移测量。它可以测量扫描导轨的位移值。当定位信号出现时, 用 IEE488 接口卡锁存如图 2 中的位移值 S_1 、 S_2 , 根据该位移值, 再与定位干涉仪测得的定位信号极值点 A_1 、 A_2 合成, 就可以知道零位和目标位之间距离的相对值。通过这两次距离值的差, 就可以求得目标镜两次放置位置之间的差值, 即绝对距离值。

考虑到数据处理方便和设计简单, 采用了迈克尔逊干涉仪的传统形式作为扫描干涉仪。因为此套干涉仪是以它的光波长作为基准量, 所以需要光源有较大的相干长度, 同时, 光波长要有很好的稳定性。采用 He-Ne 激光器作为光源, 同时, 给它加稳频措施, 其频率稳定性可达 10^{-8} 以上。这样, 其相干长度为 40 km , 完全可以满足干涉测量系统的要求。

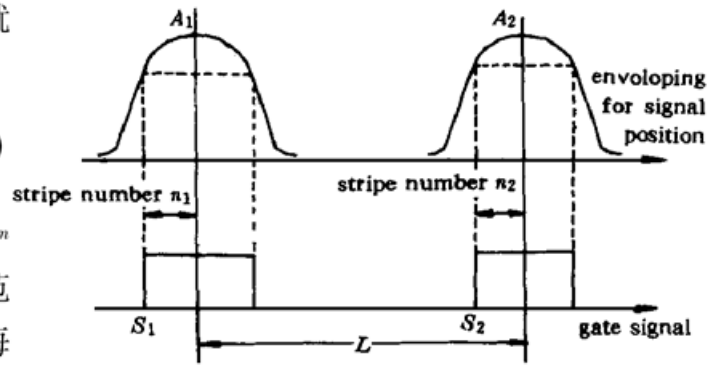


Fig. 2 Schematic diagram of measurement

3 量程倍增

3.1 倍增原理

光纤干涉倍增系统的结构如图 1 所示。如果单纯的扫描导轨可测的距离值为 L ，通过倍增系统就可以在 L 的基础上，成倍地提高它的测量范围。现以四倍程为例进行说明。将目标待测范围划分成四个区间，每个区间有两个定位点，如图 3 所示。每个定位点之间的距离在单纯的扫描测量系统的可测范围之内，其具体值由扫描测量给出，而超出单个区间的就由标定光纤光程差给出。在定位干涉仪中作为扩程部分的系统，根据不同输出的定位干涉信号，可以确定这个待测目标镜处在 $[P_0, P_1]$ 、 $[P_1, P_2]$ 、 $[P_2, P_3]$ 、 $[P_3, P_4]$ 中的某一个区间内。我们设计了一套信号处理系统，对它进行了处理。 P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 的位置在系统确定以后，就是固定的，由插入单模光纤的光程所决定。所以，要精确地标定好这些光纤的光程差，才能将其引入系统作为标准量。用自标定技术对这些相耦合干涉的一对对光程差都作了精确标定。由于光程差是已知量，可作为测量结果的一部分。这个量值再与扫描测量得到的小于区间范围的测得值相叠加，就可得到目标镜在这之间的任意数值。两次位置之间的差值就是距离值。

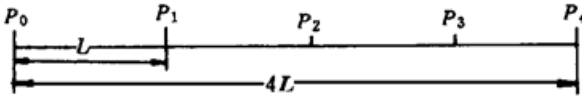


Fig. 3 Divided scope for measurement

在定位干涉仪中，用具有不同光程差的光纤相耦合干涉来测量。目标光路的不同位置如图 3 所示。四个干涉传感器的信号臂具有不同的光程长度，即干涉仪信号臂有四个不同长度的预置值。当目标镜放在第一区间的位置时，扫描导轨移动扫描，使信号臂 1 与测量臂相调谐， PD_0 输出目标定位信号。若目标镜移到下一个区间，移动扫描导轨在 PD_0 中不会再有定位信号输出，但它会与第二个信号臂相调谐， PD_1 产生定位信号输出。依次类推，目标镜移到第三个区间， PD_2 有定位信号输出，目标镜移到第四个区间， PD_3 有定位信号输出。这样，即使扫描镜扫描范围有限，由于有不同光程差的信号臂与测量臂相调谐，目标镜的移动范围即使超出了扫描镜的测量范围，它仍然会被具有不同长度的信号臂的定位干涉仪捕捉到，给出目标镜当前的位置信息。

通过以上分析可以看出，只要改变插入单模光纤的光程差，不用增加扫描范围就可以测出其在标定完光纤可测量程内的任意值。当然，如果光源功率许可，可以一直往下增大系统的量程，这就是利用光纤实现的量程倍增。由于目前光源的功率有限，只做了量程的四倍增。

3.2 测量实验

3.2 测量实验

利用这套系统进行了距离测量实验和重复性实验，此系统共有四个连续测量区间。表 1 给出了三个位置的测量结果，每个位置取十组数，求得其定位重复性精度优于 $2 \mu\text{m}$ 。

Table 1. Experiment results

group	first /mm	second /mm	third /mm	fourth /mm	fifth /mm	sixth /mm	seventh /mm	eighth /mm	ninth /mm	tenth /mm	average /mm	square error /mm
A	52.4574	52.4579	52.4573	52.4576	52.4574	52.4573	52.4578	52.4575	52.4579	52.4573	52.4576	0.2775
B	246.3949	246.3941	246.3944	246.3943	246.3947	246.3945	246.3943	246.3949	246.3947	246.3943	246.3945	0.2819
C	579.7653	579.7649	579.7654	579.7652	579.7648	579.7651	579.7655	579.7654	579.7652	579.7655	579.7653	0.3724

另外，还将这套系统与 Renishaw 干涉仪的测量结果进行了比对。对 Renishaw 干涉仪，

加上了各种补偿措施后,其精度可达到 $0.1 \mu\text{m}$ 。经过多次的测量比对实验,得到本系统的测量相对误差可优于 10^{-4} 。

结束语 研制了一套完整的光纤干涉测量中的量程倍增系统,从测量原理到实现方案都严密而成功地解决了高精度、大距离测量的这一测距难题。利用现有的仪器和条件,可测量程达 1 m 以上。同时,实验结果表明,其定位精度优于 $2 \mu\text{m}$,测量相对精度可达 10^{-4} 以上。这样的测距范围和精度可以满足很多的应用场合。由于采用了光纤进行量程倍增,克服了目前在此测量范围内现有测量方法的一些不足之处,具有许多传统方法所不能替代的优点,因此它必将有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Jackson D A. Extrinsic fibre-optic sensors for remote measurement: Part one. *Optical Fibre Sensors*, 1986, **18**(5) : 243~ 252
- [2] Bucholtz F, Kersey A D, Danndkidge A. Multiplexing of nonlinear fiber optic interferometric sensors. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(3) : 514~ 519
- [3] Burnett J G, Greenaway A H, McBride R *et al.*. Balancing optical path lengths in broadband fiber interferometers. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(13) : 2194~ 2201
- [4] de Groot P. Use of a multimode short-external-cavity laser diode for absolute-distance interferometry. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(22) : 4193~ 4198

System Of Measuring Range Multiplication in the Distance Measurement

Huang Shaomei Duan Fajie Ye Shenghua

(Department of Precision Instrument Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 4 November 1998; revised 1 February 1999)

Abstract The optical fiber transducing technique is used to realize a measuring range multiplication system in distance measurement. It consists of two interferometers, one is used for tuning to optical path and positioning target, the other is used for measuring distance. Long distance and high accuracy measurement up to 1 meter can be realized by inserting an accurately calibrated optical fiber without long track.

Key words fiber sensor, measuring range multiplication, optical path tune, calibration.