

# 用半导体激光器实现高精度动态定位

韩劲松 赵 洋 李达成 曹 芒 王 佳

(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

**摘 要** 提出了一种新的半导体激光定位技术。把半导体激光器的线性调频特性和双波长细分技术结合起来, 用两个半导体激光器完成了零点的高精度动态定位, 突破了传统白光定位的局限, 简化了干涉仪的设计, 实现了大范围的零点捕捉。定位精度达到  $0.01 \mu\text{m}$ 。

**关键词** 半导体激光器, 动态定位, 线性调频, 双波长细分。

长期以来, 在精密测量中比较成熟的定位技术是白光干涉定位技术。由中国计量院研制成功的 JGL-1 型激光量块干涉仪, 就是用一个白光干涉系统实现量块两端的精确定位的<sup>[1]</sup>。其动态定位精度在  $0.02 \sim 0.01 \mu\text{m}$ <sup>[2]</sup>。由于白光的光谱很宽, 利用干涉条纹零级的幅值最大可以判定零光程差点<sup>[1, 3]</sup>; 也可以选取白光中的两种波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ , 以它们极大值点的符合判别出零光程差点<sup>[1]</sup>。80 年代以来, 半导体激光器的性能有了极大的提高, 从而使它的一些特殊性质在精密测量中也有了日见广泛的应用。如利用它的线性调频特性可以进行大尺寸绝对距离测量<sup>[4, 5]</sup>。本文提出一种新的定位技术, 它利用两个半导体激光器(波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ , 相差几到几十纳米)构成一级合成波长。先利用半导体激光器的调频特性<sup>[4, 6]</sup>捕捉合成波长的零级; 在零级合成波长内用  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  干涉条纹的空间相位关系来找出零光程差点。定位精度可达  $0.01 \mu\text{m}$ 。它融合了白光定位和半导体激光定位的优点而避免了各自的不足, 是一种实用的高精度干涉定位方法。

## 1 定位原理

用两个半导体激光器定位包括两个步骤: 首先调制其中一个半导体激光器的光频, 利用其线性调频特性实现粗定位, 设定位精度为  $\delta$ , 然后用两个半导体激光器(波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ , 合成波长  $\lambda_s < 2\delta$ ) 在  $\delta$  范围内完成零点的精定位。

图 1 是用线性调频半导体激光进行零点定位的迈克尔逊干涉仪。用锯齿波调制激光器的注入电流, 以调制半导体激光器的光频使其随时间而线性变化。设干涉仪两臂的光程差为  $2d$ , 则角锥棱镜 1 和角锥棱镜 2 反射回来的光波有一个相对时延  $\tau_s$ , 因而形成光拍。在锯齿波的上升沿范围内, 线性调频激光的频率可以表示为:

$$f(t) = f_0 + \beta t, \quad (-1/4f_m \leq t \leq 1/4f_m) \quad (1)$$

其中  $f_0$  为调频激光中心频率， $\beta = 2af_m\Delta f$  为激光频率调制系数，表示单位时间的激光频移，其中  $a$  为半导体激光的调制率， $\Delta f$  为调制电流幅度， $f_m$  为调制频率。可以推出干涉信号的光强为：

$$\begin{aligned}
 I(t) &= \{E_0(t) \exp[-j\varphi(t)]\} \{E_0(t - \tau d) \\
 &\quad \times \exp[-j\varphi(t - \tau\alpha)]\}^* \\
 &= I_1(t) + I_2(t) + 2\sqrt{I_1(t)I_2(t)} \\
 &\quad \times \cos[2\pi(\beta\tau d + f_0\tau d)].
 \end{aligned} \tag{2}$$

其中  $\tau d = 2d/c$ ， $d$  为被测距离， $c$  为真空中光速。显然，(2)式是光拍的表达式，其拍频为：

$$f_b = \beta\tau d = 4f_m\Delta f d/c \tag{3}$$

式中  $f_m$ 、 $\Delta f$  和  $d$  均为与光程差无关的定值，拍频正比于光程差，而  $f_b = 0$  的点正好对应的是零光程差点，故可通过检测拍频的零点来实现零点定位。设定位精度为  $\delta$ ，上式可改写为：

$$\delta = \pm (c/4\Delta f)(f_b/f_m). \tag{4}$$

受半导体激光器本身调制率的限制，在零点附近的拍频已经相当低。对于普通的半导体激光器，在距离零点  $\pm 10 \mu\text{m}$  时的拍频仅为调制频率的  $1/100$  左右。由于调制信号是周期信号，所以实际接收到的信号只是拍波信号的  $f_b/f_m$  个周期波形在每个调制周期内的重复，无法得到完整的拍波波形。在这样的条件下已经无法用一般意义的鉴频方法来获得拍波频率。这限制了半导体激光调制定位精度的提高，定位精度在  $10 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$  量级。

在第一步粗定位的基础上，同时利用两个半导体激光器作干涉仪的光源可以实现高精度的定位。设两个激光器的波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ，则合成波长为：

$$\lambda_s = \lambda_1\lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1) = \lambda_1\lambda_2/\Delta\lambda \tag{5}$$

当干涉仪两臂的光程差为  $2d$  时，两种波长的干涉信号的光强和空间相位分别为：

$$I_1 = I_{01} + I_{01} \cos(2\pi 2d/\lambda_1), \quad I_2 = I_{02} + I_{02} \cos(2\pi 2d/\lambda_2), \tag{6}$$

$$\varphi_1 = 2\pi 2d/\lambda_1, \quad \varphi_2 = 2\pi 2d/\lambda_2. \tag{7}$$

可以看出，只有在  $d = 0$  时，两种波长的空间相位是相同的，但在  $\varphi_1 - \varphi_2 = \pm 2n\pi$  的各点上， $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  干涉条纹的强度都达到极大值。由  $\varphi_1 - \varphi_2 = \pm 2n\pi$  可得： $d = \pm n\lambda_s/2$ ，即在  $d = \pm n\lambda_s/2$  的各点上， $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  干涉信号极大值是重合的。要利用  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  干涉信号极大值的符合来提取零点，必须将定位的范围限制在  $d < \pm \lambda_s/2$  内。如果第一步定位的精度满足  $\delta < \pm \lambda_s/2$ ，则在  $\delta$  范围内，当且仅当  $d = 0$  时有  $\varphi_1 = \varphi_2$ ，如图 2(a) 所示。因此，在第一步粗定位的基础上，通过鉴别  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  两路干涉条纹的空间相位关系可以实现零点的高精度定位。事实上，一般并不逐点鉴别  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  干涉信号的强度，以它们极大值点的符合来判定零光程差点。这种静态测量的方法效率低，劳动强度大，精度也不很高。使干涉仪的参考镜相对于测量镜匀速运动，将干涉条纹的空间分布转化为时域信号，并整形为方波，如图 2(b) 所示。在零光程差点之前，

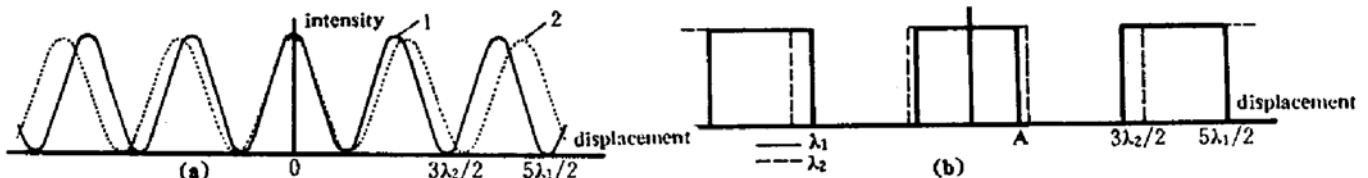


Fig. 2 Schematic diagram of two diode lasers (wavelength 1 and 2) refinement

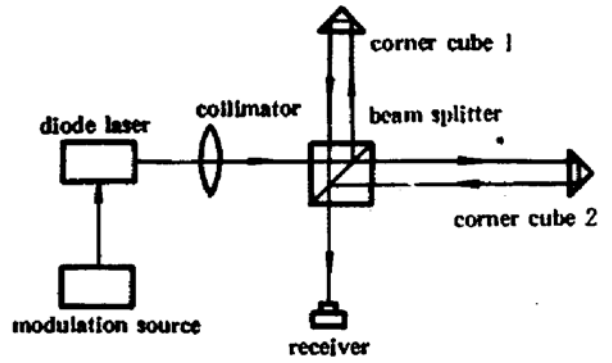


Fig. 1 Michelson interferometer for positioning with linearly frequency-modulated diode laser

$\lambda_1$  超前于  $\lambda_2$ ; 在零光程差点之后则正好相反。通过一个简单的鉴相器就可以进行零光程差点定位。通常是用零点之后  $\lambda_1$  的第一极小值点  $A$  来进行定位的。它较以极大值重合来决定零点更准确, 处理方法也更简单, 而对实际应用并无妨碍。

## 2 定位装置

图 3 是两个半导体激光器定位的装置框图。整个装置包括三部分: 干涉仪, 粗定位部分和精定位部分。在干涉仪中, 用激光器 1 和激光 2 作光源。由于半导体激光器发出的光都是线偏振光, 偏振度可达几十至几百, 所以用偏振分光棱镜 1 可以使两个激光器的光能全部耦合到干涉仪中。同理偏振分光棱镜 2 再把  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  干涉信号分开, 由接收器 1 和接收器 2 接收。两块偏振分光棱镜的使用, 可以使两束光实现共光路以减少外界环境的干扰, 同时使光能得到最大限度的利用, 有利于改善信噪比, 提高定位精度。

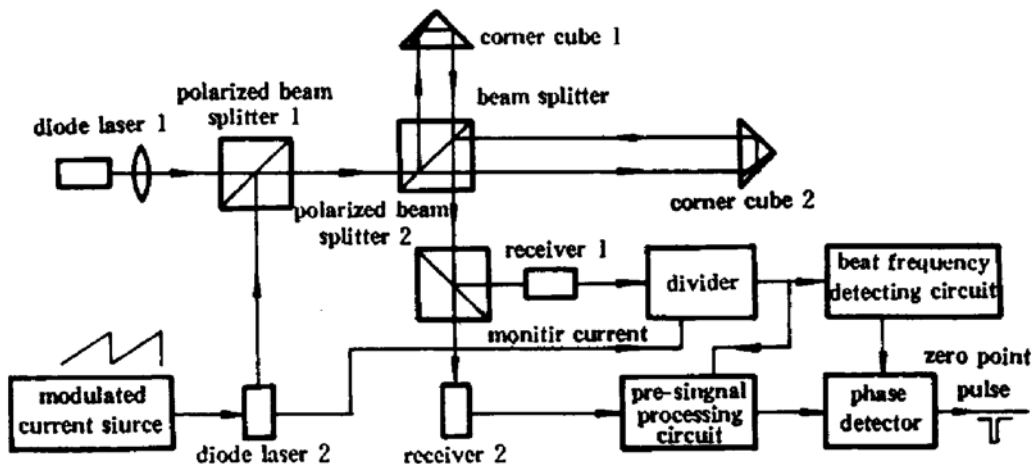


Fig. 3 Block diagram of the arrangement for positioning with two diode lasers

在粗定位部分中, 调制信号源对激光器 1 进行线性调制, 通过拍频检测电路检测干涉信号的拍频零点。由于半导体激光器在光频调制的同时会引起光强调制, 即(5)式中的干涉直流项  $I_1(t) + I_2(t)$  和交流振幅项  $2\sqrt{I_1(t)I_2(t)}$ 。这是在拍频成份中混杂的调频成份, 在拍频检测中必须去除。由于半导体激光器的监测电流与它的光功率成正比, 在电路中引入了除法器, 以去除光强调制的影响。设半导体激光器的调制率为  $\alpha = 2.5 \text{ GHz/mA}^{[6]}$ ,  $\Delta f = 300 \text{ mA}$ ,  $f_m = 200 \text{ Hz}$ 。拍频检测电路的分辨率为调制频率的  $1/200$ , 则拍波检测的下限为  $f_b = 1 \text{ Hz}$ 。根据(4)式可以计算出调制半导体激光粗定位的精度为  $\delta = \pm 10 \mu\text{m}$ 。粗定位电路在  $\delta = \pm 10 \mu\text{m}$  范围内给出零点信号, 作为精定位鉴相器的使能信号。

在精定位部分中, 选取  $\lambda_1 = 650 \text{ nm}$  和  $\lambda_2 = 670 \text{ nm}$ , 则合成波长  $\lambda_s \approx 22 \mu\text{m}$ 。前置信号电路将  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的干涉信号分别整成各自的条纹极大值触发的 TTL 信号, 供鉴相器判别两路干涉信号的相位差。由于鉴相器是粗定位的使能信号控制下工作, 满足  $\delta < \lambda_s/2$ , 所以可以唯一精确地捕捉零点。

## 3 精度分析

虽然用双半导体激光器定位包括了两部分, 但粗定位仅仅是精定位的使能信号, 而且  $\delta = \pm 10 \mu\text{m}$  的定位精度对于线性调频方法来说是容易实现的。所以总的定位精度仅取决于第二步精定位的精度。精定位的主要误差来源是鉴相电路和半导体激光器定位干涉仪。对  $\lambda_1 =$

650 nm 和  $\lambda_2 = 670$  nm, 两路干涉条纹  $\pm 1$  级极大值的相位差已达  $11^\circ$ , 大大超过了一般鉴相器的分辨能力, 所以鉴相误差主要决定于干涉信号的信噪比、信号处理电路的零漂和相位延迟等。在实际应用中极少有单点的绝对零点定位, 而往往是和长度测量联系在一起, 所以处理电路的相对延迟对长度测量没有影响。但对于定位而言, 要求两路干涉信号对称, 所以两路信号处理电路的相对相移应足够小。在前置电路中分别加入了移相网络, 很容易使两路电路的相对相移调整到小于  $1^\circ$ , 这已经足以满足鉴相器的分辨要求。实际上白光定位的精度也是基于这个前提的。

由于采用了激光作光源, 干涉信号的信噪比一般都能优于 40 dB。由信号噪声引起的定位误差为:

$$\delta_1 = \pm 10^{-2} \lambda_1 / 2\pi \approx \pm 1 \text{ nm} \quad (8)$$

假设信号处理电路的零漂为  $5 \times 10^{-2}$ , 由此引起的定位误差为:

$$\delta_2 = \pm 5 \times 10^{-2} \lambda_1 / 2\pi \approx \pm 5.5 \text{ nm} \quad (9)$$

干涉仪的误差包括半导体激光器的波长稳定性误差, 偏振分光合光的耦合误差以及角棱镜运动不匀带来的误差等。

半导体激光器的波长稳定性直接影响定位精度。影响半导体激光器波长稳定的最主要因素是它的工作温度。普通半导体激光器的波长随温度变化的系数为  $0.2 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  量级, 通过控温可以使半导体激光器的工作温度变化小于  $1^\circ\text{C}$ 。由于是零光程差点定位, 零点的空间位置本身与波长无关, 与定位相关的作用范围不大于一个波长。因而在上述条件下波长稳定性的影响很小, 可以忽略不计。在干涉仪中引入了两块偏振分光棱镜, 以实现共光路。由于偏振分光棱镜的消光比不会严格等于 1, 所以  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  会相互耦合到对方的光路中形成噪声。设偏振分光棱镜的消光比为  $\beta$ , 可以推出由此引起的定位误差为:

$$\delta_3 = (1 - \beta) \lambda_1 / \beta \quad (10)$$

一般偏振分光棱镜的消光比可以达到 0.99, 所以该项误差为 6.5 nm。

为了准确提取干涉条纹的顶点信号, 在信号处理中对干涉信号进行了滤波和微分。由于滤波和微分都具有一定的时间常数, 因此角棱镜运动速度的变化必然影响动态定位精度。设角棱镜运动速度的变化为  $\Delta V$ , 由此引起的定位误差可表示为:

$$\delta_4 = \Delta V \tau, \quad (11)$$

其中  $\tau$  为时间常数。微分电路中采用尽量小的时间常数, 实验表明, 当角棱镜运动速度的变化小于 2% 时, 该项误差可以忽略不计。

综上所述, 用两个半导体激光器动态定位的综合精度可表示为:

$$\delta = \pm \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} = \pm 8.6 \text{ nm} \quad (12)$$

## 4 实验结果和讨论

按照图 3 的实验装置, 用东芝的 TOLD9211M 和 TOLD9410S 半导体激光器进行了动态定位实验。角棱镜 2 的运动速度为  $200 \mu\text{m}/\text{s}$ 。TOLD9211M 的性能参数<sup>[6]</sup>为: 波长 670 nm, 发光功率 5 mW, 像散  $11 \mu\text{m}$ ; TOLD9410S 的性能参数<sup>[6]</sup>为: 波长 650 nm, 发光功率 3 mW, 像散  $10 \mu\text{m}$ 。二者的合成波长为  $22 \mu\text{m}$ 。实验以德国 Feinpruf GmbH 公司的 1254D 电感测微仪(分辨率  $0.01 \mu\text{m}$  档)为标准, 比对半导体激光器零点定位的重复精度。电感测微仪是位移

传感器,本身不能提供零点标准。之所以只比对半导体激光零点定位的重复精度,是因为实用中的零点定位往往是和长度测量联系在一起的,绝对的零点定位在测量中的意义并不重大,但定位的重复精度则直接影响长度测量的精度。

实验表明,半导体激光器动态定位的零点捕捉范围可达 $\pm 150\text{ mm}$ ,远远超过白光的捕捉范( $2\sim 3\text{ }\mu\text{m}$ )。准直距离超过 $10\text{ m}$ ,可以在 $0$ 到 $10\text{ m}$ 远的距离上进行零点定位,这也是白光定位难以做到的。粗定位精度优于 $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$ ,小于合成波长的一半,可以作为精定位的使能信号;与电感测微仪的比对结果表明,精定位一次开机的一次定位精度( $\sigma$ )为 $\pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$ ,长时间测量的定位精度( $\sigma$ )为 $\pm 0.013\text{ }\mu\text{m}$ ;多次开机的重复精度( $\sigma$ )为 $\pm 0.012\text{ }\mu\text{m}$ 。

在实测过程中,由于温度的变化,气流湍动,使干涉条纹发生倾斜等因素所珉来的误差,都直接反映在定位精度上,使实测结果比理论分析的结果稍大一些,这是可以理解的。从前面的精度分析可以看岫,要提高定位精度,必须进一步提高信噪比,降低相互间的耦合。提高信噪比的方法是在信号处理中采用更合适的低通滤波器来抑制噪声。随着低通滤波器的时间常数变大,要求角锥棱镜的运动更加平稳,通常传动速度的变化率应减小到 $1\%$ 以下。降低相互间的耦合却不可能通过进一步提高偏振分光棱镜的消光比来实现。事实上,如此高的精度在空气中已经很难稳定地实现,一般都需要真空条件。在真空中,共光路的要求并不严格,所以可以将两个半导体激光器的光路分开,省去两块偏振分光棱镜,消除相互间的耦合带来的误差,提高定位精度。

**结 论** 半导体激光动态定位技术将半导体激光器的线性调频特性双波长细分技术应用于零点定位。在保留了白光定位高精度的同时,简化了干涉仪设计,实现了大范围的自动零位捕捉。从而大大地拓宽了白光定位的应用范围,为精密测量提供了一种方便实用的高精度动态定位方法。

### 参 考 文 献

- [1] 罗镇伟, 白光干涉条纹动态定位的一些文体及其方法的探讨. 计量测试, 1980, (3): 1~8
- [2] 罗镇伟, 白光干涉条纹动态定位误差及其与信噪比的关系. 计量研究, 1981, (2): 6~9
- [3] 李茂山, 双光束白光干涉条纹光强随光程差变化的动态分布. 计量研究, 1980, (4): 15~24
- [4] 武勇军, 线性调频半导体激光器绝对测长技术. 航空计测技术, 1993, (4): 2~4
- [5] 小林乔郎, 半导体しへザへにゐ干涉测长技术. 光学, 1988, 17(6): 279~284
- [6] Toshiba, *Laser Diode Guide Book*, 1992

## Research on High Accuracy Dynamic Positioning Using Diode Lasers

Han Jinsong      Zhao Yang      Li Dacheng      Cao Mang      Wang Jia

(Department of Precision Instrument and Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 26 October 1994; revised 19 January 1995)

**Abstract** A new zero optical path difference (OPD) point positioning technique using diode lasers is proposed in this paper. With the linear frequency modeuln property of a diode laser and the technique of dual-wavelength refinemr, the zero OPD point of a interferometer is dynamically searched with a very high accuracy of  $0.01\text{ }\mu\text{m}$ . Compared to that of the traditional white light positioning, the interferometer of diode laser positioning is simplified, and the searching range of the zero OPD point has been increased greatly.

**Key words** diode laser, dynamic positioning, linear frequency modulation, dual-wavelength refinement.