

F-P 干涉仪在长度测量领域的应用

程晓辉 赵 洋 李达成

(清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室,北京,100084)

摘要: F-P 标准具和干涉仪利用多光束干涉的原理,产生极锐的干涉条纹并且谐振频率对 F-P 腔长的变化非常敏感,根据这些特点,从利用 F-P 干涉仪进行激光器的频率锁定、稳频,光学倍程精密定位和纳米测量三个角度综述了在长度测量领域 F-P 干涉仪的发展情况;在分析主要存在的问题和解决方法的基础上,讨论了 F-P 干涉仪的发展方向,并指出在纳米测量中 F-P 干涉仪将起到越来越重要的作用。

关键词: F-P 干涉仪 稳频 光学倍程 纳米测量 多光束干涉

Applications of Fabry-Perot interferometer in length measurement

Cheng Xiaohui, Zhao Yang, Li Dacheng

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

Abstract: Etalon or Fabry-Perot interferometer (FPI) based on multi-beam interference principle can generate very narrow fringe and is sensitive to cavity length change. In this paper, three kinds of applications in length measurement of Etalon and FPI are reviewed: frequency locking and stabilization of lasers, precision positioning using optical multiplier and applications in nanometrology. The obstacle and the solutions in using FPI are also presented and the trend of FPI is given next. At last the possibility and importance of FPI in nanometrology is specially emphasized.

Key words: Fabry-Perot interferometry frequency stabilization optical multiplier nanometrology multi-beam interference

引 言

随着光学技术的发展,人们对光波的干涉、衍射等现象有了越来越深刻的了解和认识。当光束通过两块镀以高反射率、并以固定的间隔放置的玻璃板时,就会发生多光束干涉的现象。早在 1862 年,法国科学家 Fabry 和 Perot 等人就对这个装置进行了大量而又细致的研究工作,后人把这种装置称作 F-P 标准具(Etalon),由它构成的干涉仪称作 Fabry-Perot 干涉仪。

F-P 标准具具有平面或球面反射镜的形式,是一种重要的精密光学仪器,在现代有着重要的应用,被广泛应用于干涉光谱学,干涉计量学以及激光器、激光原理等方面的研究。利用 F-P 干涉仪,我们可以研究光源谱线的超精细结构,利用大口径等厚条纹型还可以进行流场的温度和密度的测量^[1,2];F-P 干涉仪的另一个重要的应用是在长度的干涉测量方面,应用它我们可以实现高精度的长度测量和相关领域的测量。

我们将重点综述 F-P 干涉仪在以长度为基础的测量方面的测量原理和应用,并分析了可能遇到的一些困难和相应的解决方案。最后,指出在今后的发展中,纳米测量是 F-P 干涉仪的一个趋势。

1 应用于激光器的频率锁定和稳频

在几乎所有的光学长度测量中都是用光波的波长来作为“尺子”,那么,光波长的精度,也即“尺子”的精度将直接影响到最终的测量精度。众所周知,长度的定义与光波在真空中的速度有关。在 1992 年,CCDM 第 8 次会议上推荐了复现米定义的 8 种标准辐射(激光)的谱线值,这 8 种标准辐射光波有着严格的工作条件限制,不适合作为长度测量时的光源直接应用。与标准波长非常接近的工作波长,我们可直接使用拍频的方法进行标定,但当工作激光波长与标准波长相差较远时,则必须通过 F-P 频率锁定干涉仪的方法进行实时地、在线地标定,进而给出它的波长。在稳频的方案中,通过反馈控制系统和 F-P 限制腔共同稳定工作激光器的频率。

图 1 是频率锁定干涉仪的原理框图。在图中 F-P 放置在真空中保持在 10^{-8} Pa 的不锈钢容器中,用自动控制系统使其温度保持恒定。经过扩束装置(collimator)扩束后的平行激光束通过光学系统在接收器上会形成干涉条纹,以此系统采用旋转漫射屏作为新的光源,破坏激光的空间相干性而使干涉仪的入射和出射孔径都有均匀的照明,这将减小观点接收器上灵敏度不均匀带来的误差。标准具平板的平面度优于 $\lambda/100$ 。

当进行波长比对时,需要已知波长的标准稳频激光器(波长为 λ_1)和工作激光器(波长为 λ_2)。首先,调节 F-P 的腔长使之锁定在标准激光器透射的极大值处;其次,调节工作激光器的频率使之位于 F-P 腔的一个透射极大值处,比较二者在 F-P 腔中的干涉级次即可计算出工作激光器的波长值,也即将它的波长与标准波长联系起来。在高精度测量中,特别是在几十米到几百米的大尺寸测量中和纳米测量中,工作激光器的频率都需要稳定或者实时已知其波长值,所以,这种频率锁定干涉仪被广泛应用。

2 光学倍程精密定位

运用激光干涉仪进行几十米到几百米的长距离高精度测量,如果采用一般的迈克尔逊干涉仪或者外差干涉仪的形式,需要对上百万量级的条纹进行计数处

理,同时还要顾及环境扰动的影响、系统稳定性影响等因素,这在实践中是很不经济和难以实现的。而运用光学倍程原理,精确测定一段长度,再通过光学倍程干涉的方法就可以把测量距离扩大到几十到几百米的范围。这种方法简单易行,精度易于保证。利用 F-P 标准具可以非常容易地实现光学倍程方案。法国国际计量局的 24m 标准测长仪就是根据这种原理建立的。它的测量精度为 $\pm 5\mu\text{m}$,是目前长度检定标准中最精确的一种方法^[3]。

图 2 是它的基本原理图。这是一种变形的迈克尔逊干涉仪与 F-P 标准具串联而实现的光学倍程干涉测长光路。白光源用氙灯,经过分束器(BS)分成两束:一路被反射射向 M_1 ,成为测量光;另一路透射射向 M_2 ,成为参考光;它们分别被 M_1 和 M_2 反射后,在分束器上会合,一起射向 F-P 标准具。由于采用相干长度非常短的白光作为光源,当测量光和参考光之间的光程差为 $2nL$ (L 是标准具的长度)时,F-P 标准具的出射光中,只有测量光的直接透射光和参考光在标准具内 n 次反射后出射光具有相等的光程,能够发生干涉。再结合白光定位技术就可

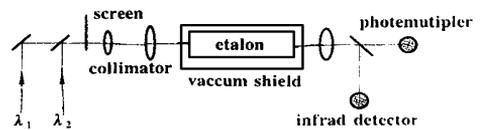


图 1 F-P 频率锁定干涉仪

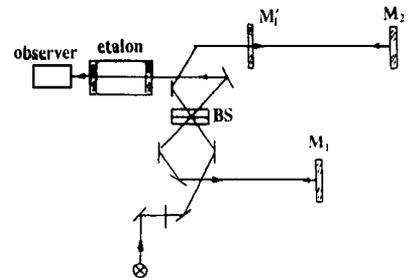


图 2 24m 标准长度的实现方案

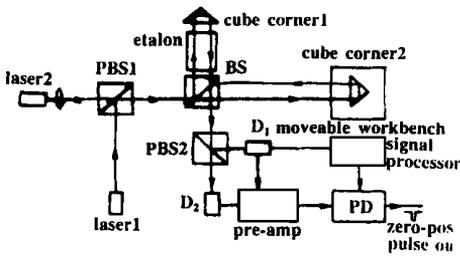


图 3 使用两个 LD 进行高精度定位的 F-P 干涉仪

镜零光程差时,两套条纹在接收器上达到同位相;否则,比较接收器 1、接收器 2 的信号位相差可以进行判向和精密定位。这种方法克服了白光定位时定位精度受到干涉条纹强度变化的影响,极大地提高了定位精度。实验表明,零点动态定位精度达到 $0.05\mu\text{m}$ (3)。

3 纳米测量

在诸如磁致伸缩、压电材料的变形特性,材料膨胀、变形或振动仪器的测量工作中,在微小尺寸的基准建立过程中,特别是近年来兴起的微纳米技术的研究中,都需要测量仪器有很高的灵敏度和精度。往往要达到几个纳米甚至零点几个纳米的测量精度。中国计量院建立的微位移拍干涉仪是作为微小尺寸段的长度基准而投入使用的^[5]。图 4 是该方案的原理框图。 I_1 为碘饱和吸收 633nm 的 He-Ne 标准激光器, I_2 为 633nm 的 He-Ne 工作激光器,由 I_2 发出的激光被析光棱镜 M_1 分为二路,一路向上反射,与标准激光会合产生拍频,由探测器 D_2 接收,经前置放大器 PA_2 、频率计数器 FC 进入计算机;另一路透过 M_1 ,经隔离器和准直,被反射镜 M_4, M_5 送入由 M_6, M_7 组成的 F-P 干涉系统。对于任意 F-P 干涉仪,有:

$$L = (n + \epsilon) / 2 \tag{1}$$

式中, L 为光学 F-P 腔长, λ 为光波长, n, ϵ 分别为干涉整数与小数级次。经过理论推导:在保持 F-P 干涉仪输出光强为极大值的情况下 $\epsilon = 0$,有:

$$\Delta L = \lambda / (2L) \tag{2}$$

式中, ΔL 为工作激光器的频率变化, ν 为工作激光器的输出频率, L 为 F-P 腔长的变化。这个公式就是 F-P 干涉仪测量微位移的理论依据。由光频在 10^{14}Hz 量级和 ΔL 的测量精度共同决定了该方案理论上能够实现皮米的测量精度。实践中的精度虽然有所下降,但是,仍然能够实现亚微米的测量精度,这在目前的各种纳米测量方法中是最高的。荷兰、美国的科学家也在进行这方面的研究^[6,7]。

随着光纤技术的发展,出现了光纤 F-P 干涉仪,可以应用于位移、振动等参量的测量,此外在温度、压力和应力等领域也有很好的应用前景。中国国家计量院利用将光纤的端面镀膜的方法构成双光纤外腔 F-P 干涉仪(EFPI)进行微小距离、机械振动的测量。如图 5 所示,图中, GWS 为波长选择器; C_1, C_2, C_3 为耦合器; D_1, D_2 为探测器; P 为移动工作台;EFPI₁ 为一个长度固定的参考外腔式光纤 F-P 干涉仪,作为参考臂;EFPI₂ 为测量外腔光纤干涉仪。它的一端与工作台固定在一起,其腔长是可以改变的,作为测量臂。数学推导表明, D_1, D_2 接收到信号的位相差为

以实现高精度的定位。

清华大学博士生韩劲松在“大型精密离心机静态臂长测量系统”的研究中采用半导体激光二极管和 F-P 干涉仪系统配合进行高精度定位的研究取得了很好的成果,如图 3 所示^[4]。其中,最主要的新思想是对白光定位技术进行扩展:两个单纵模半导体激光二极管作为光源,在干涉仪中形成两套干涉条纹;当两个角隅棱镜相对于分光棱镜

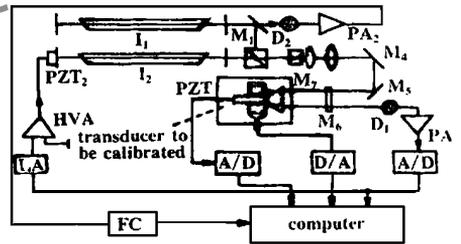


图 4 测量纳米位移的 F-P 干涉仪方案

$$= \frac{2}{1} d_s = \frac{2}{1} 4 L (-n/2) d = 4 L (n) / (1/2) = 4 L n / (1/2) \quad (3)$$

当通过波长选择器(GWS)连续选择从 λ_1 到 λ_2 的不同波长入射到光纤干涉仪系统中,通过比较 D_1 和 D_2 的信号相位差,就可以得到 EFPI₂ 腔长 L 的无偏值^[8]。这种干涉仪的优点是体积小、受环境影响小和适用于工业现场应用。

4 发展方向、困难及解决方法

F-P 干涉仪的发展已经有 100 多年的历史了。由于它利用了多波长干涉原理,条纹具有很高的锐度;而且干涉条纹对腔长的变化非常敏感,因此,在测量中能够达到很高的测量精度。但是,它的应用受到以下三方面的限制,在长度测量中,特别是精密测量中必须予以解决:(1)标准具和腔镜的加工精度。通常,谐振腔的腔镜平面度加工的要求就可能达到 $1/100$,否则将极大地降低干涉条纹的锐度,最终影响测量精度;(2)在腔镜需要移动的应用中,对直线性和偏摆等指标也有很高的要求;(3)由于 F-P 腔对腔长的变化非常敏感,任何影响腔长变化的非测量因素都将是影响最终测量结果的误差源。

针对以上的问题,许多研究工作者做了大量的工作并取得了丰富的成果。实践表明,通过精心设计和加工 F-P 标准具、腔镜和干涉仪结构,采用折叠式 F-P 腔、共焦 F-P 腔等形式,可以降低对腔镜移动精度的要求;控制环境,诸如采用真空室,设计和使用主动或被动隔振器,采用控温系统和补偿技术等方法能够建立起稳定可靠的高精度测量系统。

最后,我们可以总结 F-P 干涉仪的发展方向是:(1)用于多种物理量的测量。从理论上讲,任何能够引起 F-P 腔腔长变化的物理量,都可以通过 F-P 干涉仪来测量,例如温度、气压、应力等等。在长度测量方面则向着纳米精度发展。(2)采用各种谐振腔的形式。除了两个光学反射镜的形式之外,利用光纤两端镀以高反射膜,形成光纤 F-P 谐振腔;在半导体技术发展中,可以在硅片上直接刻蚀出反射镜,形成硅谐振腔^[9]。(3)多种技术综合应用。与半导体激光二极管、波长选择技术,光栅光纤等结合在一起,能够形成小型高效的测量系统,从而有许多更广泛的应用。总之,未来的 F-P 干涉仪长度测量系统在采用多种技术的基础上,必将在纳米测量中占据越来越重要的地位。

参 考 文 献

- 1 陆宏,姜铃珍,耿完桢 *et al.* 激光技术,1996;20(3):143~146
- 2 贺安之,阎大鹏. 光学学报,1986;3(6):3~6
- 3 Barid K M. Metrologia,1968;4(3):135~143
- 4 韩劲松. 大型精密离心机静态臂长测量系统的研究. 清华大学博士论文,1995:44~58,30~32
- 5 徐毅,叶孝佑,李成阳 *et al.* 计量学报,1990;11(1):32~35
- 6 Brand U, Herrmann K. Measurement Science Technology, 1996;7:911~917
- 7 Lertzels F C, Sxhellakens P H J. Annals of the CIRP, 1997;46:481~484
- 8 Li T Ch. SPIE,1996;2895:58~63
- 9 Cocorullo G, Della Corte F G, Iodice M *et al.* Sensors and Actuators A: Physics, 1997;61(1~3):267~272

作者简介:程晓辉,男,1972年11月出生。博士生。目前主要从事激光干涉仪和纳米长度测量方面的研究。

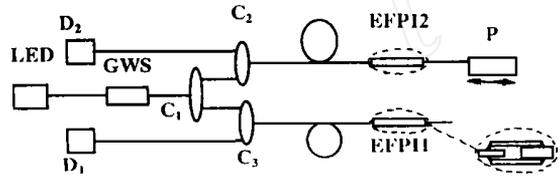


图 5 双外腔光纤式 F-P 干涉仪测量振动