

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.04.06

# 一种基于法布里-珀罗干涉仪的位移测量方法

任冬梅, 朱振宇, 段小艳, 李华丰, 万宇

(航空工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095)

**摘要:**介绍了一种基于法布里-珀罗干涉仪的位移测量方法,为了克服通常的法布里-珀罗干涉仪在位移测量范围方面的局限,采用两束可调激光分别对法布里-珀罗腔的两个相邻谐振峰的光频率进行追踪测量,能够得到任意时刻法布里-珀罗腔的长度,从而实现对测量镜位移的测量,测量范围可以达到毫米量级。对影响测量精度的主要因素进行了简要分析,结果表明采用本方法能够实现纳米级精度位移测量。

**关键词:**法布里-珀罗干涉仪;多光束干涉;位移测量;测量不确定度

**中图分类号:**TB921

**文献标识码:**A

**文章编号:**1674-5795(2018)04-0026-04

## A Displacement Measurement Method Based on Fabry-Perot Interferometry

REN Dongmei, ZHU Zhenyu, DUAN Xiaoyan, LI Huafeng, WAN Yu

(National Key Laboratory of Science and Technology on Metrology & Calibration,  
Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

**Abstract:** A displacement measurement method based on Fabry-Perot interferometer is introduced. In order to overcome the limit in displacement measurement range of usual Fabry-Perot interferometer, the length of the Fabry-Perot cavity is measured by tracing the frequencies of two adjacent resonance peaks using two frequency-tunable lasers to obtain the displacement of the measurement mirror. The measurement range can be expanded to millimeter level by using this method. The main factors that affect the measurement accuracy are analyzed briefly and the result shows that the displacement measurement accuracy at nanometer level can be achieved by using this method.

**Key words:** fabry-Perot Interferometer; multi-beam interferometry; displacement measurement; measurement uncertainty

## 0 引言

法布里-珀罗干涉仪以其特有的分辨力优势在高精度微位移测量中受到关注,国内外有不少关于用法布里-珀罗干涉仪测量微位移的文献报道<sup>[1-9]</sup>,测量精度可以达到纳米级。Howard等人研制了一种通过相位调制外差锁定技术将可调外腔式半导体激光器锁定到法布里-珀罗腔的系统,用于原子力显微镜和纳米分辨力位移传感器的可溯源测量<sup>[2]</sup>。然而,这种位移测量方法在实际应用中有一定的局限性,由于受到组成干涉系统的激光器的波长调节范围、光电接收器的频率响应范围和频率计数器的测量范围等限制,其测量范围一般只能达到微米量级。因此,如何扩大法布里-珀罗干涉仪的测量范围是这种干涉仪在精密位移测量中推广应用的关键。Lawall研制了一个用法布里-珀罗干涉仪测量25 mm位移的系统,对法布里-珀罗腔的两个相邻模式进行探测,利用它们的绝对光学频率和频率差来计算位移<sup>[3]</sup>。余载泉等人研究了使用换模锁定法消除激光器模间隔的限制,扩展法布里-珀罗干涉仪的测量

范围的方法<sup>[4]</sup>。飞秒光梳技术的出现为干涉测量提供了良好的参考频率, Bitou等人用Fabry-Perot干涉仪和光梳技术相结合,研制了具有皮米分辨力的位移计量装置<sup>[5-6]</sup>。一些研究者还研制了多光程法布里-珀罗干涉仪和将光纤应用于其中的法布里-珀罗干涉仪<sup>[7-8]</sup>。由于可以突破双光束干涉仪在非线形误差和测量分辨力方面的限制,法布里-珀罗干涉仪在纳米测量仪器校准方面受到重视,研究高精度位移测量方法对提高纳米测量仪器溯源能力有重要意义。本文作者之前也开展过基于法布里-珀罗干涉仪的微位移测量方法研究<sup>[9]</sup>,在此基础上本文讨论了用法布里-珀罗干涉仪进行较大范围位移测量的方法。

## 1 法布里-珀罗干涉仪和频率追踪测量方法

法布里-珀罗干涉仪由两块高反射率反射镜组成,其工作原理是多光束干涉。与迈克尔逊干涉仪等双光束干涉仪产生的正弦信号不同,法布里-珀罗干涉仪输出信号的典型特征为狭窄的谐振峰,法布里-珀罗腔的

长度每变化二分之一波长，峰值光强出现一次，谐振峰的宽度可小至光波长的千分之一。

通常情况下，用法布里-珀罗干涉仪测量微位移时采用频率追踪方法，即通过将波长可调激光器的频率锁定于法布里-珀罗干涉仪的谐振频率上，将法布里-珀罗干涉仪测量镜位移的测量转化为可调激光器频率变化的测量，测量系统的组成如图 1 所示。

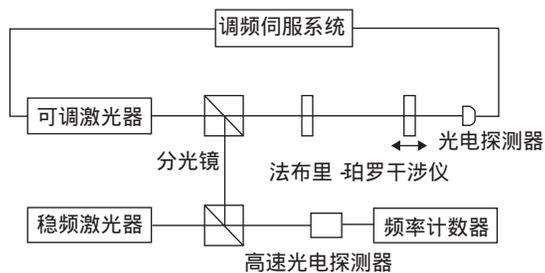


图 1 微位移测量系统示意图

当法布里-珀罗腔的长度发生变化时，其谐振峰频率也会发生变化。如果将可调激光器的波长锁定于法布里-珀罗干涉仪的某一谐振模式  $N$  上，则法布里-珀罗腔的长度  $L$  与谐振频率  $f$  和模数  $N$  满足

$$L = N \cdot \frac{\lambda}{2} = N \cdot \frac{c}{2nf} \quad (1)$$

式中： $c$  为真空光速； $\lambda$  为激光波长； $n$  为腔内介质的折射率。当测量镜发生微小移动时，频率  $f$  会随着腔长的变化而发生变化。在测量过程中，如果将可调激光器的频率始终锁定在法布里-珀罗腔的同一谐振模式  $N$  上，则由式(1)可得，腔长变化量  $dL$  与频率变化量  $df$  之间关系为

$$dL = -\frac{Nc}{2f^2}df = -\frac{L}{f}df \quad (2)$$

由式(2)可见，测量镜位移可通过测量初始腔长、法布里-珀罗腔的初始谐振频率和可调激光器的频率变化来确定。

可调谐激光器的频率变化通过与一个稳频激光器进行拍频来测量，如图 1 下部分所示，即通过跟踪测量法布里-珀罗干涉仪谐振频率变化，实现了测量镜位移的测量。

这种方法通过将位移量转化为频率变化量来进行测量，避免了干涉仪非线性误差对测量结果的影响，可以提高测量分辨力。但在实际应用中，由于受到激光器波长调节范围、光电接收器的频率响应范围和频率计数器测量范围等限制，其测量范围一般只能达到微米量级。

## 2 扩大法布里-珀罗干涉仪测量范围的方法

扩大法布里-珀罗干涉仪的位移测量范围的一个直接方法就是进行换模锁定激光频率，即：当前文中所述方法的激光频率随着法布里-珀罗长度的变化即将超出测量范围时，将激光频率锁在下一个谐振模上，继续上述测量过程，重复此过程，直到完成全范围的位移测量。但这种方法测量速度比较慢，一般不适用于较大范围位移测量。下面介绍一种通过测量不同时刻法布里-珀罗腔的长度来确定测量镜位移的方法，可将法布里-珀罗干涉仪应用于较大位移的测量。

### 2.1 测量原理

法布里-珀罗干涉仪的谐振频率随法布里-珀罗腔长的变化如图 2 所示，图中横轴为谐振频率，纵轴为输出光强。随着腔长的变化，模数为  $N$  和  $N-1$  的两个谐振峰由虚线所示位置移动到实线所示位置。可以看出，不仅谐振峰频率发生变化，两个谐振峰的间距也会发生变化。

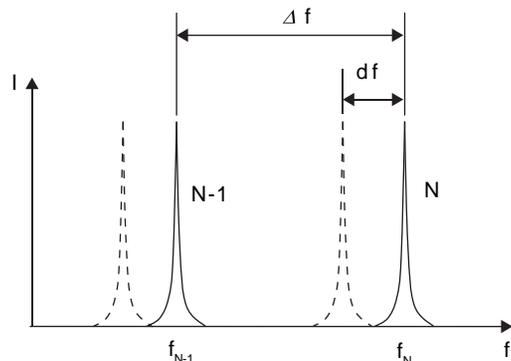


图 2 法布里-珀罗腔谐振频率随腔长变化示意图

由式(1)可以看出，法布里-珀罗腔的长度可以通过测量其一个谐振频率  $f$  和其所对应的模数  $N$  来获得，模数  $N$  可以通过下式来计算

$$N = \frac{f}{\Delta f} \quad (3)$$

式中： $\Delta f$  为模数为  $N$  和  $N-1$  的两个谐振峰的频率差。于是，通过测量某一频率  $f$  和其相邻谐振峰的频率差  $\Delta f$ ，根据式(3)和式(1)，即可计算出此时法布里-珀罗腔的长度。

本文所述的位移测量方法就是通过分别测量位移开始和结束时法布里-珀罗腔的长度，并计算其差值来确定法布里-珀罗干涉仪测量镜的位移

$$\Delta L = L_2 - L_1 = \frac{c}{2n} \left( \frac{N_2}{f_2} - \frac{N_1}{f_1} \right) \quad (4)$$

式中： $L_1$ 、 $L_2$  分别为测量开始和结束时法布里-珀罗腔

的长度;  $f_1, f_2$  分别为测量开始和结束时某一谐振峰的频率;  $N_1, N_2$  分别为测量开始和结束时被测谐振峰的模数。

## 2.2 测量过程的实现

2.1 所述测量方法可以通过将两束可调激光的频率分别锁定在法布里-珀罗腔的两个相邻谐振峰上, 并利用拍频方法测量谐振频率来实现, 测量系统的组成如图3所示。两束偏振方向互相垂直、频率有一定差异且可调的激光束同时射入法布里-珀罗腔, 在测量过程中, 两束光的频率分别锁定在法布里-珀罗腔的两个相邻谐振峰上。这两束可调激光即可来自于两台可调激光器, 如图3所示, 也可以采用可调声光调制器来产生。在位移起始位置, 同时测量法布里-珀罗干涉仪某一谐振峰的光学频率  $f$  和相邻谐振峰的频率差  $\Delta f$ , 根据式(3)和式(1)得到此时法布里-珀罗腔的长度。然后测量镜发生移动, 在位移结束位置, 用同样的方法测量出法布里-珀罗腔的长度, 根据式(4)即可计算出测量镜的位移。这种方法并不要求在位移过程中对干涉信号进行连续监测, 因此, 适于较大范围的位移测量。

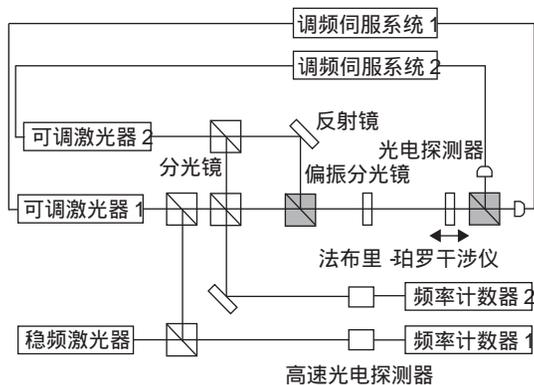


图3 位移测量系统示意图

## 3 测量不确定度的主要来源

用上述方法进行位移测量时, 测量不确定度的主要来源包括位移起始时法布里-珀罗腔长度的测量不确定度、位移结束时法布里-珀罗腔长度的测量不确定度和位移过程中产生的不确定度。这里以标准不确定度形式对各不确定度来源进行简单分析。

如果测量在真空中进行, 折射率的影响可以忽略, 则法布里-珀罗腔长度的测量不确定度主要来源于谐振频率的测量不确定度。谐振频率的测量不确定度来源包括可调激光频率锁定的不确定度和可调激光频率测量的不确定度。可调激光频率锁定的不确定度受激光功率变化、法布里-珀罗腔精细度和锁相电路精度等影

响, 如果该项不确定度能够控制在 5 MHz 以内, 按正态分布考虑, 则标准不确定度为  $u_1 = 3.5 \times 10^{-9} f$ 。可调激光的频率通过与稳频激光拍频用频率计数器来测量, 若采用碘饱和吸收稳频激光器作为标准, 其波长相对标准不确定度小于  $5 \times 10^{-10}$ , 则激光频率的测量不确定度主要来源于拍频结果的测量不确定度, 假设此项不确定度也能控制在 5 MHz 以内, 按正态分布考虑, 由此引入的标准不确定度为  $u_2 = 3.5 \times 10^{-9} f$ 。对这两项不确定度分量进行合成, 得到谐振频率测量的标准不确定度为  $u(f) = 5 \times 10^{-9} f$ 。由此引入的腔长测量标准不确定度为  $u(L) = 5 \times 10^{-9} L$ 。

测量过程中产生的不确定度主要来源于测量镜在运动过程中的偏转和环境温度变化引起的腔长变化, 通过采用精密位移台和低膨胀材料法布里-珀罗腔等措施, 能够将测量镜运动过程中产生的标准不确定度控制在 1 nm 以内, 则位移测量的合成标准不确定度为

$$u_c(\Delta L) = \sqrt{(5 \times 10^{-9} L_1)^2 + (5 \times 10^{-9} L_2)^2 + 1^2}$$

假如法布里-珀罗腔的最大长度为 200 mm, 则位移测量的合成标准不确定度为 1.7 nm, 如果取  $k = 2$ , 则扩展不确定度为 3.4 nm。

以上对这种位移测量方法的主要不确定度来源进行了简单估算, 结果表明该位移测量方法有望达到纳米级测量不确定度。针对具体的测量系统, 其测量不确定度还需要进行具体分析。

## 4 结束语

本文介绍了一种基于法布里-珀罗干涉仪的位移测量方法, 并对其测量不确定度进行了简单估算。通过上文描述可以看出该位移测量方法有以下三个特点: ①将可调激光的频率锁定在法布里-珀罗腔的谐振频率上, 通过测量频率来测量腔长, 这种方法保持了法布里-珀罗干涉仪的高分辨力的优势; ②通过对法布里-珀罗干涉仪的两个相邻谐振峰的频率进行测量, 扩大了法布里-珀罗干涉仪的位移测量范围; ③在位移测量过程中, 不要求对干涉信号进行连续测量, 只需对位移起始和结束两个时刻的腔长进行测量。

综上所述, 这种基于法布里-珀罗干涉仪的位移测量方法可以消除传统的双光束干涉测量中非线性误差的影响, 使测量精度达到纳米级, 同时克服了通常的法布里-珀罗干涉仪在测量范围方面的限制, 在位移台运动精度可以保证的情况下能够实现较大范围的位移测量, 在微米至毫米级的高精度位移测量方面有实用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Bobroff N. Recent advances in displacement measuring interferometry[J]. Measurement Science & Technology, 1993, 4(9): 907 - 923.
- [2] Howard L, Stone J, Fu J. Real - time displacement measurements with a Fabry - Perot cavity and a diode laser[J]. Precision Engineering, 2001, 25(4): 321 - 335.
- [3] Lawall J R. Fabry - Perot metrology for displacements up to 50 mm[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2005, 22(12): 2786 - 2798.
- [4] 余载泉, 徐毓娴, 徐毅, 等. 大范围高分辨率法 - 珀干涉仪[J]. 光学技术, 2000, 26(3): 199 - 201.
- [5] Bitou Y, Schibli T R, Minoshima K. Accurate wide - range displacement measurement using tunable diode laser and optical frequency comb generator[J]. Optics Express, 2006, 14(2): 644 - 54.
- [6] Schibli T R, Minoshima K, Bitou Y, et al. Displacement metrology with sub - pm resolution in air based on a fs - comb wavelength synthesizer[J]. Optics Express, 2006, 14(13):

5984 - 5993.

- [7] Joo K N, Ellis J D, Spronck J W, et al. Design of a folded, multi - pass Fabry - Perot cavity for displacement metrology[J]. Measurement Science & Technology, 2009, 20(10): 1 - 5.
- [8] Durand M, Lawall J, Wang Y. High - accuracy Fabry - Perot displacement interferometry using fiber lasers[J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22(9): 1 - 6.
- [9] 段小艳, 任冬梅, 朱振宇, 等. 基于法布里 - 珀罗干涉仪的微位移测量方法研究[J]. 计测技术, 2013, 33(1): 23 - 25.

收稿日期: 2018 - 05 - 18

## 作者简介

任冬梅(1964 - ), 女, 研究员, 博士, 研究领域包括微纳米测量技术和光学仪器, 承担科研项目 10 余项, 获得省部级科技奖 4 项。



## 2018 计量检测管理行业峰会圆满召开

本刊讯 2018 年 5 月 22 至 25 日, 为追踪行业前沿, 探讨计量管理的发展趋势和热点问题, 推动计量测试行业发展, 促进行业内交流, 由中国计量测试学会指导, 航空工业计量所主办, 计测传媒(《计测技术》杂志社和中国计量测控网)承办的“2018 计量检测管理行业峰会”于江苏扬州顺利召开。来自中国航空工业集团、中国航天科技集团、中国航发集团、中国计量科学研究院、中国电子科技集团、华测检测、上海商飞、一汽大众、第三方检测公司及部分地方计量技术机构等单位的一百余位代表出席了此次会议进行现场交流。航空工业计量所廖理副所长出席并主持了此次峰会。

此次峰会主要内容有专家主题报告环节和主题“圆桌”论坛环节。专家报告环节中, 有幸邀请到中国计量测试学会副理事长兼秘书长马爱文、原国家质检总局计量司副司长刘新民、航空工业计量所专务周宁、深圳光泰产业计量工程研究院院长朱崇全、中国计量科学研究院军民融合推进办公室主任刘欣萌、中国商用飞机有限责任公司 C919 项目高级经理公司计量与检测高级主管程胜、航空工业计量所副总师熊昌友, 及实验室认可专家、耐火材料标准委员会测试分会委员徐梦芳八位计量行业专家就计量检测管理类相关议题作专题报告。八位专家分别以“计量测试历史发展”、“国际·欧盟法制计量法律框架”、“创新推动计量技术发展”、“产业计量与现代产业体系”、“计量军民融合协同创新前景及展望”、“商用飞机全寿命周期计量管理与技术”、“产业计量与产业发展”、“CNAS - CL01: 2018《检测和校准实验室能力认可准则》”为题, 深入浅出地讲解了计量的发展历史、文化、核心价值、法律框架等方面的一系列知识, 内容丰富、理解深刻, 在场的参会人员获益匪浅。与会专家和参会代表开展两场“圆桌”式论坛, 以“产业计量”与“军民融合”为主题, 就行业当前发展热点问题进行充分探讨, 并通过现场和直播平台征集问题, 专家现场解答的方式为参会代表提供更多学习交流的机会。

此次大会突破传统会议模式, 采用线上直播方式进行资源共享, 通过线上直播方式观看会议并实时参与互动的有 2000 余位网友。本次峰会将高品质的内容以多元化的展现形式呈现给大家, 获得现场嘉宾及参会代表一致好评, 在推动计量测试技术发展, 促进行业内技术交流, 共享技术进步最新成果等方面有显著成效。