

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.05.08

F-P干涉仪差分锁频系统研究

杜含笑, 李乐言

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 为解决法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)干涉仪锁频方法响应速度、抗干扰能力、长期稳定性方面存在不足的问题, 提出了F-P干涉仪差分锁频方案, 将存在频差的双频激光耦合入F-P谐振腔, 当激光频差足够小时, 两光强信号曲线存在交叉, 以两光强信号的差值作为被控量, 在交叉点附近构建单调过零函数, 作为闭环控制系统的反馈量, 实现动态差分锁频控制。基于该方案, 搭建了一套F-P干涉仪微位移测量装置并开展实验验证, 结果表明该装置能够实现0~300 nm范围内的微位移测量, 位移测量分辨率达到23 pm, 验证了F-P干涉仪差分锁频方案的有效性, 为推动微位移测量领域的发展提供了重要借鉴。

关键词: 法布里-珀罗干涉仪; 差分锁频; 动态差分; 微位移测量; 分辨率

中图分类号: TB921; TH744.3

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)05-0056-06

Study on F-P interferometer differential frequency locking system

DU Hanxiao, LI Leyan

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In order to solve the shortcomings of Fabry-Perot (F-P) interferometer frequency-locking method in terms of response speed, anti-interference ability and long-term stability, a differential frequency-locking scheme of F-P interferometer is proposed. Dual-frequency laser with frequency difference is coupled into F-P resonator. When the laser frequency difference is small enough, the signal curves of two light intensities will cross. Taking the difference between two light intensity signals as the controlled variable, a monotone zero crossing function is constructed near the crossing point, which is used as the feedback of the closed-loop control system to realize dynamic differential frequency locking control. Based on the scheme, a set of F-P interferometer micro-displacement measurement device was built and experimental verification was performed. The results show that the device could realize micro-displacement measurement in the range of 0 ~ 300 nm, and the displacement measurement resolution reached 23 pm, which verified the effectiveness of the F-P interferometer differential frequency-locking scheme, and provided an important reference for the development of micro-displacement measurement.

Key words: Fabry-Perot interferometer; differential frequency-locking; dynamic difference; micro-displacement measurement; resolution

0 引言

近年来, 纳米级超精密加工、芯片制造等高

新技术领域迅速发展, 对微位移测量的要求日益提高^[1-2]。在诸多微位移测量技术中, 激光干涉微位移测量技术因其非接触测量、测量分辨率高、

收稿日期: 2023-07-10; 修回日期: 2023-08-10

基金项目: 航空科学基金项目(201956044004)

引用格式: 杜含笑, 李乐言. F-P干涉仪差分锁频系统研究[J]. 计测技术, 2023, 43(5): 56-61.

Citation: DU H X, LI L Y. Study on F-P interferometer differential frequency locking system [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(5): 56-61.



测量速度快等优点获得了广泛应用。激光干涉微位移测量技术可分为双光束干涉测量技术和多光束干涉测量技术两大类^[3-7]。传统的双光束干涉测量方案,受元件精度、噪声、非线性误差的限制,很难满足亚纳米测量分辨力需求。基于多光束干涉原理的F-P干涉仪具有极高的条纹精细度和对比度,在小范围内具有极高位移分辨力,利用F-P干涉仪实现高精度微位移测量具有重要发展前景^[8]。

F-P干涉仪应用于微位移测量领域,需要使外部输入的工作光频率满足F-P谐振腔的谐振条件,即将外部光源的光频率锁定在F-P谐振腔的谐振频率上,再通过拍频等方法获得激光频率数据,从而计算出F-P干涉仪谐振腔的腔长变化,即被测量位移信息^[9]。F-P干涉仪锁频控制的本质是通过控制光源频率使F-P干涉仪持续处于谐振状态,达到谐振状态的依据是F-P谐振腔的输出光强最大。目前常用的F-P干涉仪锁频方法包括定幅跟踪锁频法和调制跟踪锁频法^[10-12]。定幅跟踪锁频法的原理为:以靠近光强极大值的某固定光强值作为参考工作点,透射光强与固定光强值的差值在该点附近为单调过零曲线,可利用该差值曲线作为控制系统的反馈量,实现闭环运动控制。定幅跟踪锁频法的优点是实现较为简单,缺点是参考工作点会偏离极大值点,且偏移量会随着波形曲线的幅度的变化而飘移。调制跟踪锁频法的原理为:在输入光的频率参数中增加一个微小的调制,输出光强信号中将出现扰动信号,对该扰动信号进行鉴相解调,实现对原曲线的求导,利用导数曲线在极大值处的单调过零特性构建反馈控制系统。调制跟踪锁频法的优点是控制参考点为透射光强极大值点,该点为F-P干涉仪的最佳工作点,缺点是受调制频率的影响,响应速度较低。

针对现有F-P干涉仪锁频方案响应速度、抗干扰能力、长期稳定性方面存在不足的问题,本文提出F-P干涉仪的差分锁频方案,利用F-P谐振频率与激光频率的对应关系,将两个频差较小且固定的激光输入到F-P谐振腔,之后对两激光同时进行扫描,两激光先后达到谐振状态,其波形存在一定相差,通过动态差分方法判断并调整F-P干涉仪的锁频状态。搭建微位移测量装置并开展实际测量实验,对该方案的准确性进行验证。

1 差分锁频方案基本原理

F-P干涉仪是一种基于多光束干涉的干涉测量设备,具有极高的光频分辨力。F-P谐振腔由两块垂直于光轴的高反射镜面对面组成。光在谐振腔中沿光轴传播,遇到反射镜后大部分光被反射,小部分光透过反射镜输出。光在谐振腔中持续反射,光强逐渐变弱,每次输出的透射光由于光程不同会产生相移;每次输出的透射光有不同的相位,相互间会发生干涉,干涉状况受谐振腔长的影响,满足谐振条件时光强会彼此叠加,输出光强达到极大值^[13-15]。

利用F-P干涉仪实现微位移测量,其核心是将光源频率锁定在F-P谐振腔的谐振频率上。光源频率随着谐振腔长的变化而变化,当一束光沿光轴进入F-P干涉仪谐振腔时,在不考虑损耗的条件下,透射输出光强 I_T 可表示为^[16]

$$I_T = I_0 \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(\Phi/2)} \quad (1)$$

式中: I_0 为输入光强度, R 为F-P干涉仪谐振腔的反射率, Φ 为输出光的相位差。

不同 R 条件下,F-P干涉仪的 I_T 与 I_0 之比随 Φ 的变化曲线如图1所示。由图1可知:输出光强信号周期性地出现峰值,在不考虑损耗的情况下峰值不变;波形的锐度随着反射率的增加而增加。

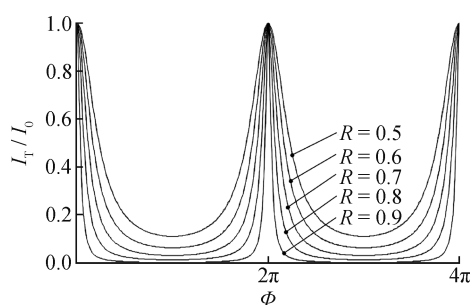


图1 I_T 与 I_0 之比随 Φ 的变化曲线图

Fig.1 Graph of variation of the ratio of I_T to I_0 with Φ

F-P干涉仪的差分锁频方案中,差频差分信号形成方案如图2所示。取图1中波形曲线的一个周期,用输入光频率 f 代替相位差 Φ ,获得如图2(a)所示的波形曲线,该曲线为光源频率变化时F-P谐振腔透射光强的变化曲线,其谐振频率为 f_m , m 为模数。假设光源中含有两个频率成分: f_{scan} 和 $f_{scan}+$

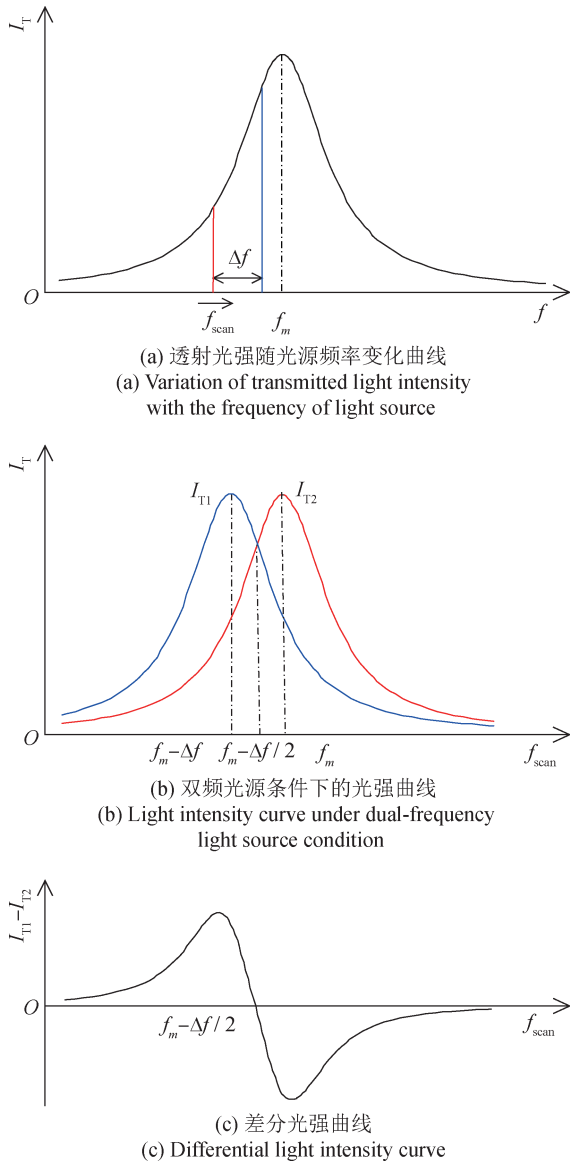


图2 差频差分信号形成方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of the differential signal formation scheme

Δf , 两者的频差 Δf 固定, 当两频率成分同步扫描时, 如图 2(a) 所示, 输出光强曲线存在相位差, 形成两个光强曲线, 当 Δf 足够小时, 两曲线存在交叉点, 交叉点频率为 $f_m - \Delta f/2$, 如图 2(b) 所示。两个光强曲线的差值在交叉点附近为单调过零曲线, 如图 2(c) 所示。以该差值作为反馈量, 以 $f_m - \Delta f/2$ 作为参考工作点, 在工作点附近构建反馈控制系统, 判别和控制 F-P 干涉仪的锁频状态。

F-P 干涉仪差频锁频方案的优点: ① 具有较高的响应速度; ② 参考工作点虽偏离极大值点, 但偏移量 $-\Delta f/2$ 为已知固定量, 具有可控性, 不会引

入额外的测量误差; ③ 两束光工作环境、传播路径、光学传播特性相同, 光源功率、谐振腔反射率、环境参数等因素导致的输出光强幅度变化不会影响控制系统的工作, 具有较强的适应性和抗干扰能力。

2 差频锁频系统设计

差频锁频系统设计如图 3 所示, 双频光源由声光调制器 (Acousto-optic Modulator, AOM) 产生, 通过切换其驱动频率产生分时的双频激光, 任一时刻只包含一个频率成分; 该光束进入 F-P 干涉仪, 输出光信号中分时包含了两个频率成分各自的透射光信号, 由电子系统同步分离该信号, 可以获得两频率成分各自的透射光强信号。

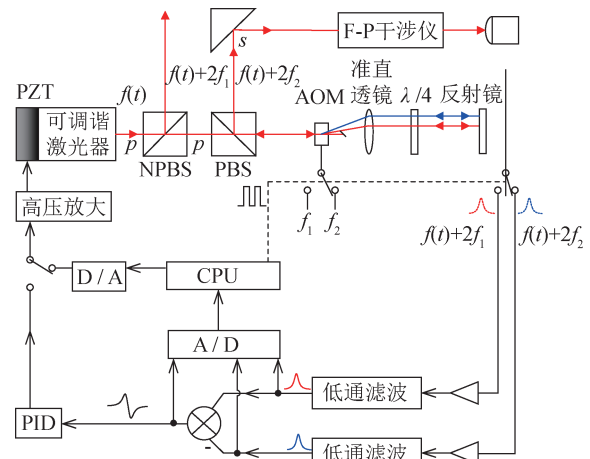


图3 差频锁频系统组成框图

Fig.3 Block diagram of differential frequency locking system

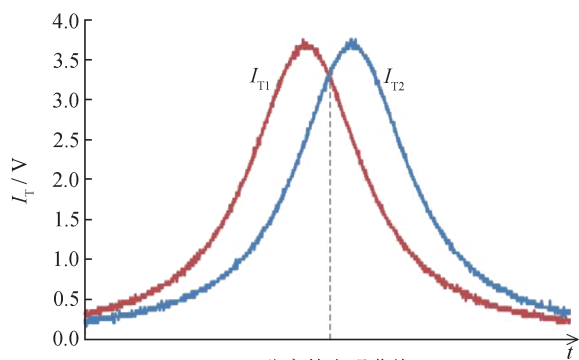
以可调谐激光器为外部可调光源, 通过控制其中的压电陶瓷 (Piezoelectric Ceramics, PZT) 实现光源频率的调节, 输出光频率为 $f(t)$, t 为时间。控制系统的作用是将光源频率锁定在 F-P 干涉仪工作点频率上。消偏振分光镜 (Non-polarizing Beam-splitter Cube, NPBS) 的作用是分出一部分激光进行光频测量, 其余部分激光进入一个典型的 Double-Pass AOM 系统。偏振分光棱镜 (Polarizing Beam-splitter Cube, PBS) 和 $\lambda/4$ 波片的作用是将入射光与反射光分离。声光调制器的驱动信号频率在 f_1 和 f_2 间快速跳频, 获得的输出光频率在 $f(t) + 2f_1$ 和 $f(t) + 2f_2$ 间切换。光束射入 F-P 干涉仪后, 透射光强信号同步变化, 电子系统将光强电信号同步分配到

两个通道，滤除高频噪声，得到两个频率激光各自的透射光强信号。

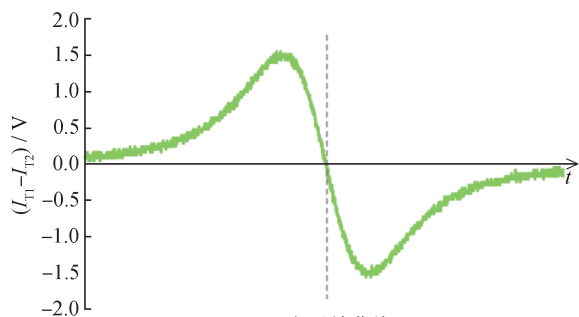
使用AOM实现双频激光光源，可以通过改变AOM的驱动频率灵活且精细地控制双频频差。对激光频率进行分时切换，可以降低光路调整难度，并减小透射光信号分离的复杂度。

缓慢改变可调谐激光器的激光频率，利用示波器观察F-P干涉仪的透射光强信号曲线。分离出的两条曲线如图4(a)所示，将波形数据进行分离处理，得到差分曲线如图4(b)所示。由图4可知，差分曲线局部存在单调过零点，该点即为F-P干涉仪差分锁频系统的参考工作点，在差分曲线过零点处斜率约为1 MHz/V。

开启比例-积分-微分(Proportion Integration Differentiation, PID)锁频控制系统，CPU通过控制可调谐激光器的输出频率实现对F-P干涉仪谐振频率的搜索，在进入差分信号曲线的单调区间后切换至模拟PID控制模式，实现锁频。搜索及控制过程中F-P腔透射光强曲线变化如图5所示。



(a) 分离的光强曲线
(a) Separated light intensity curve



(b) 光强差曲线
(b) Light intensity difference curve

图4 分离出的光强曲线和光强差曲线

Fig.4 Separated light intensity curve and light intensity difference curve

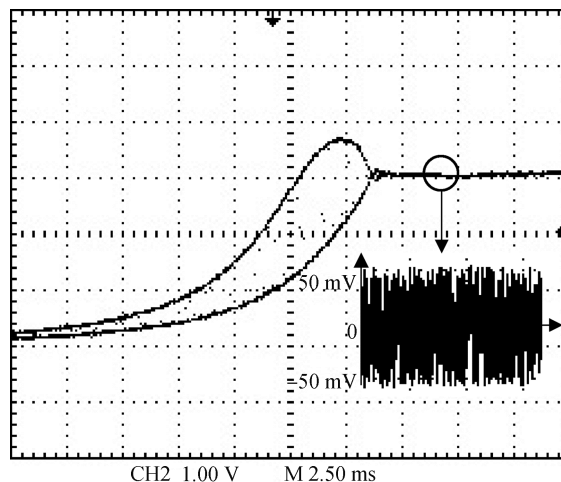


图5 差分锁频系统锁频过程中光强变化曲线

Fig.5 Light intensity change curve during the frequency locking process of differential frequency locking system

锁频完成后，测量得到10 s内的幅度波动约为±50 mV，根据差分电压与光频的对应关系可得

$$L = m \frac{c}{2 \cdot f_0} \quad (2)$$

式中： L 为F-P谐振腔长， f_0 为中心频率， c 为光速。

在本实验中 m 为 1.57×10^5 ，可以得到锁频系统的位移测量分辨力约为23 pm。

3 F-P差分锁频系统微位移测量实验

利用微位移校准系统对F-P差分锁频系统进行功能验证实验，如图6所示。F-P锁频控制系统将可调谐激光器的输出光频率锁定在F-P谐振腔中心频率，实现位移-光频转换；输出光与基准激光器拍频，实现光频溯源测量，从而将微位移溯源到频率上。

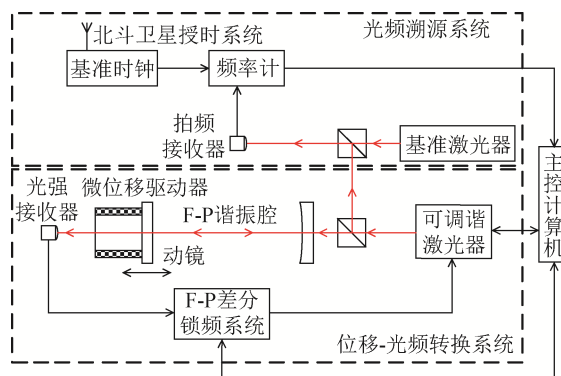


图6 F-P差分锁频系统微位移测量实验系统

Fig.6 Micro-displacement measurement experimental system of F-P differential frequency-locked system

初始状态时, 可调谐激光器锁定在模数为 m 的中心频率 f_{0m} 上, 运动过程中, 位移量为 $\Delta L(t)$, 锁频系统始终跟踪模数 m 的中心频率 $f_m(t)$, 则可以得到

$$\begin{cases} L_0 + \Delta L(t) = m \frac{c}{2 \cdot f_m(t)} \\ f_m(t) = f_{0m} + \Delta f_m(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Delta f_m(t)$ 为光频率相对于初始状态的变化量, L_0 为 F-P 谐振腔初始腔长。

整理得

$$\frac{\Delta L(t)}{L_0} = -\frac{\Delta f_m(t)}{f_{0m} + \Delta f_m(t)} = -\frac{\Delta f_m(t)}{f_m(t)} \quad (4)$$

根据式(4)可知, 只要知道 L_0 、 $f_m(t)$ 、 $\Delta f_m(t)$, 即可计算出 $\Delta L(t)$, 即 F-P 差分锁频系统可通过光频率的变化计算出微位移系统的位移量。

令微位移校准系统中的微位移驱动器工作于闭环运动状态, 在 0 ~ 300 nm 范围内产生间隔为 50 nm 的运动, 以微位移驱动器的位移值为标称值, 使用微位移校准系统测量其真实值, 所得实验数据如表 1 所示。根据表 1 可知, 在所测量的各点中, 最大位移偏差为 2.20 nm。

表 1 微位移测量实验

Tab.1 Micro-displacement measurement experiment

标称位移 /nm	拍频值 /MHz	频率变化量 /MHz	位移测量值/nm	偏差/nm
0.00	203.7	0.0	0.00	0.00
50.01	379.5	175.8	50.11	0.10
100.02	555.9	352.2	100.35	0.33
149.99	734.8	531.1	151.31	1.32
200.01	911.5	707.8	201.67	1.66
250.02	1 089.0	885.3	252.22	2.20
299.98	1 254.4	1 050.7	299.35	-0.63

4 结论

提出了 F-P 干涉仪的差分锁频方法, 为纳米、微米级位移测量提供一种可行的技术方案。根据 F-P 干涉仪的锁频需要锁定在输出光强最大值处的特点, 构建存在一定相差的两个差分信号, 通过动态差分方法判别和控制 F-P 干涉仪的锁频状态。

建立了一套基于 F-P 干涉仪差分锁频方案的微位移测量系统进行实验验证, 结果显示该系统成功完成了 0 ~ 300 nm 范围内的微位移测量, 测量分辨力达到 23 pm, 验证了 F-P 干涉仪差分锁频方案的可行性和准确性。该方案对 F-P 腔的加工精度要求较低, 调整方便, 便于实现较高的透射光细度, 同时搭建了微位移测量和频率测量之间的转化桥梁, 将位移溯源至准确度更高的频率上, 对于促进微位移测量技术发展具有重要参考价值。

参考文献

- [1] 王斌. 差动式迈克尔逊干涉纳米位移测量方法研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015.
WANG B. Research on differential Michelson interference nanodisplacement measurement method [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [2] 王冬. 基于拍频 F-P 干涉法的激光干涉仪非线性误差测量研究 [D]. 天津: 天津大学, 2019.
WANG D. Research on nonlinear error measurement of laser interferometer based on beat frequency F-P interferometry [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [3] 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.
DUAN X Y, REN D M, ZHU Z Y, et al. Research on micro-displacement measurement method based on Fabry-Perot interferometer [J]. Measurement & Measurement Technology, 2013, 33(1): 23-25. (in Chinese)
- [4] 李春成, 王鸣, 夏巍, 等. 基于 F-P 腔强度解调的微位移传感器 [J]. 光学学报, 2014, 34(6): 280-285.
LI C C, WANG M, XIA W, et al. Micro-displacement sensor based on F-P cavity intensity demodulation [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 280-285. (in Chinese)
- [5] SHEN X, ZHOU S, LI D. Micro-displacement measurement based on F-P etalon: processing method and experiments [J]. Sensors, 2021, 21(11).
- [6] CHEN J H, HUANG X G, ZHAO J R, et al. Fabry-Perot interference-based fiber-optic sensor for small displacement measurement [J]. Optics Communications, 2010, 283(17): 3315-3319.

- [7] 王冬, 崔建军, 张福民, 等. 用于微位移测量的迈克尔逊激光干涉仪综述[J]. 计量学报, 2021, 42(1): 1-8.
WANG D, CUI J J, ZHANG F M, et al. Michelson laser interferometers for micro-displacement measurement [J]. Acta Metrologica Sinica, 2019, 42(1): 1-8. (in Chinese)
- [8] 刘士巍. 基于F-P干涉仪的位移测量及信号处理[D]. 黑龙江: 东北石油大学, 2022.
LIU S W. Displacement measurement and signal processing based on F-P interferometer[D]. Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2022. (in Chinese)
- [9] 任冬梅, 兰一兵, 朱振宇, 等. 一种快速调整法布里-珀罗干涉仪的方法及装置: CN108279509B[P]. 2020-04-24.
REN D M, LAN Y B, ZHU Z Y, et al. A method and device for fast adjusting Fabry - Perot Interferometer: CN108279509B[P]. 2020-04-24. (in Chinese)
- [10] 段小艳, 任冬梅. 激光干涉法微位移测量技术综述[J]. 计测技术, 2012, 32(6): 1-5, 13.
DUAN X Y, REN D M. Overview of micro-displacement measurement techniques by laser interferometry [J]. Measurement & Measurement Technology, 2012, 32(6): 1-5, 13. (in Chinese)
- [11] 靳辰飞, 隋新宇, 丹丽智, 等. 可调谐F-P谐振腔的研究进展[J]. 光学与光电技术, 2022, 20(5): 1-16.
JIN C F, SUI X Y, DAN L Z, et al. Research progress of tunable F-P resonators [J]. Optics And Optoelectronics Technology, 2022, 20(5): 1-16. (in Chinese)
- [12] LIANG H, LIU S, CHEN S, et al. Real-time displacement reconstruction by an orthogonal Fabry-Perot interferometer[J]. Applied Optics, 2021, 60(24): 7064-7068.
- [13] DURAND M, LAWALL J, WANG Y. High - accuracy Fabry-Perot displacement interferometry using fiber lasers [J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22(9): 1-6.
- [14] 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.
- [15] CHANG C P, TUNG P C, SHYU L H, et al. Fabry-Perot displacement interferometer for the measuring range up to 100 mm[J]. Measurement, 2013, 46(10): 4094-4099.

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 杜含笑 (1997—), 女, 助理工程师, 主要研究方向为微尺度测量技术。