

文章编号: 1001-3806(2013)03-0389-05

弹光调制干涉具热动态模型及频率漂移的研究

魏海潮¹, 王志斌^{1,2}, 李晓^{1,2}, 赵冬娥^{1,2*}, 王艳超¹, 陈友华¹, 陈媛媛¹, 张瑞¹

(1. 中北大学 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 太原 030051; 2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: 为了解决弹光调制干涉具中因高频振动产生的热量引起的谐振频率漂移问题, 根据相似与模化理论, 建立了弹光调制干涉具热动态模型, 得到了弹光调制干涉具中干涉具谐振频率、干涉具温度和外界驱动信号之间的非线性函数关系, 并最终推导出了反馈电流和反馈电压相对于驱动电压的相位的关系、干涉具中温度随时间的变化率和谐振频率随时间的变化率方程, 以及得出了干涉具热动态模型的频率稳定状态方程。结果表明, 根据热反馈机制, 必须采用锁相跟踪原理, 时刻保持驱动频率与干涉具谐振频率一致, 才能保证干涉具工作的稳定性。

关键词: 光电子学; 热动态模型; 温度漂移; 热反馈; 锁相跟踪; 弹光调制干涉具

中图分类号: TH744.3 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.03.027

Study on thermal regime model and frequency drift of a photoelastic modulator interferometer

WEI Hai-chao¹, WANG Zhi-bin^{1,2}, LI Xiao^{1,2}, ZHAO Dong-e^{1,2}, WANG Yan-chao¹, CHEN You-hua¹, CHEN Yuan-yuan¹, ZHANG Rui¹

(1. Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Opto-Electronic Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to solve the problem of the resonant frequency drift caused by the heat produced by high-frequency vibration in a photoelastic modulator interferometer, its thermal regime model was built based on similarity and modeling theory. The nonlinear function relationship among resonant frequency, temperature of the interferometer and outside drive signal was obtained. Finally, the thermal feedback current, the phase relationship between the feedback current and driving voltage, the change rates of the temperature and resonant frequency with time were deduced and the state equation of frequency stability of the interferometer thermal regime model was obtained. Analysis shows that according to thermal feedback mechanism, phase locked tracking theory must be used to maintain drive frequency consistent with resonant frequency of the interferometer all the time so that the interferometer can work stably.

Key words: optoelectronics; thermal regime model; temperature drift; thermal feedback; phase-locked tracking; photoelastic modulator interferometer

引言

弹光调制器(photoelastic modulator, PEM)是一

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61127015); 国家国际科技合作专项计划资助项目(2012DFA10680; 2010***); 山西省国际科技合作计划资助项目(2012081029)

作者简介: 魏海潮(1986-), 男, 硕士研究生, 现从事光电驱动控制器及弹光调制器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhaodong@nuc.edu.cn

收稿日期: 2012-09-25; 收到修改稿日期: 2012-10-18

种基于高性能红外透明光学材料(如熔融石英、氟化锂、氟化钙晶体等)光弹效应的偏振调制器件^[1], 利用压电材料(如压电石英晶体、压电陶瓷)的逆压电效应在红外透明光学材料上加以周期性变化的机械力, 从而对晶体施加相应的应力, 使光学材料产生共振^[2-3]。其驱动电路是实现弹光调制器性能的关键装置, 驱动器的好坏对弹光调制器产生的光程差有很大的影响^[4]。若使弹光调制器产生最大的光程差, 就要使弹光调制器工作在谐振状态, 驱动器的输出频率必须与之相符。但是弹光调制器的谐振频

率在工作的过程中会发生漂移,从而导致弹光调制器的振动性能降低^[5-6]。本文中首先分析了温度对弹光干涉具的谐振频率的影响,其次为了使弹光调制器始终工作在最佳的频率下,设计了能够自动跟踪变化的谐振频率的驱动控制器,并介绍了频率自动跟踪的原理。

1 弹光调制干涉具的基本工作原理

弹光调制干涉系统如图1所示,本干涉具主要由起偏器、弹光调制晶体、驱动电路、检偏器组成。选用的弹光调制器的光轴方向与偏振片 P_1 和 P_2 分别成 45° 和 -45° 。当光入射到偏振片 P_1 时,被偏振化处理得到两束干涉光,这两束光通过弹光调制晶体后由于晶体的双折射被分成 o 光和 e 光,成为两束相互垂直的干涉光,经过振动的晶体后该光幅度和相位延迟量都被调制了,然后出射的干涉光经检偏器 P_2 输出,最终输出光进入探测器,得到光谱数据。

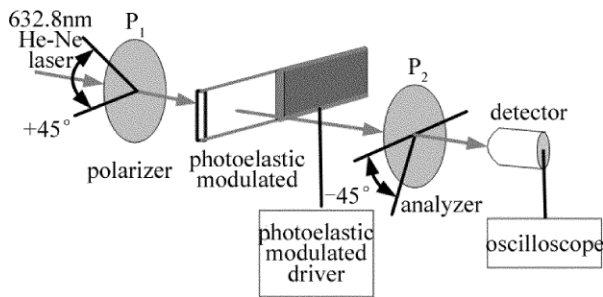


Fig. 1 Photoelastic modulation interference system

2 温度对弹光干涉具的影响

2.1 温度对谐振频率的影响

光学晶体在高频振荡时容易产生热量,这将改变晶体自身的温度,温度的改变将影响到其谐振振动频率的漂移以及压电晶体的驱动效率的降低,导致弹光调制器调制光程差的不稳定。所以,构建热反馈模型并建立弹光晶体中谐振频率、温度和驱动信号之间的关系是非常有必要的,该模型不仅可以详细地解释干涉具中热反馈机理,还能为实现干涉具的温度频率控制提供理论依据。

2.2 热动态模型

PEM驱动器工作时会产生热量,因此它的温度会改变,同样它的谐振频率和驱动效率也会改变,这就引起了热耗散率的改变,从而导致了热反馈机制的不稳定性^[7-9]。对于这种热反馈机制,作者创建了一种非常简单的模型,不仅能解释观察到的驱动器的不稳定性,而且为设计出一种稳定可调的数控的

高压驱动器提供了理论依据。

创建的弹光调制器振动模型如图2所示,包括一个晶体振动单元动态模型,这个模型主要是表征内部热量产生速率;另外一个热元件串联谐振等效模型,这个模型主要表征由内部温度速率的改变进而引起这个温度的演变^[10]。

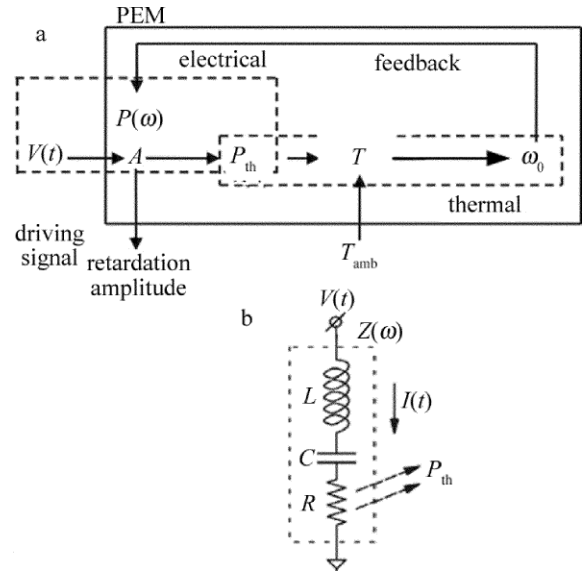


Fig. 2 Vibration dynamic of PEM

a—vibration unit dynamic of the PEM b—series resonance model

图2a为振动单元动态模型,图2b为其串联谐振等效模型。 P_{th} 为等效热耗散功率; R 为等效电阻; C 为等效电容; L 为等效电感; T 为干涉具中的等效温度; T_{amb} 为环境温度; $V(t)$ 为驱动电压; $I(t)$ 为驱动电流; $Z(\omega)$ 为弹光调制干涉具等效阻抗; ω 和 ω_0 分别是驱动频率和干涉具谐振频率。该模型中,弹光晶体等效为压电驱动器的负载,其热效应反映在压电驱动器的电压、电流关系上。

这个内部的热源被等效成一个有损耗的串联谐振模型(见图2),这个模型的电品质因数描述为 Q ,共振时电阻为 R ,在一定温度下共振角频率为 ω_0 。然而,作者发现图2中的串联谐振模型可以有效地描述PEM器件的特性。电学头的特性可以由PEM的阻抗 $Z(\omega)$ 描述,把压电晶体的电学特性和压电晶体与弹光晶体之间的机械特性结合起来,由电路的知识可知,弹光调制器的阻抗 $Z(\omega)$ 可以很容易地由下列表达式表示:

$$Z(\omega) = R[1 + iQ(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)] \quad (1)$$

从这个阻抗的定义式(1)式可知,通过谐振电路电流的傅里叶变换是 $\tilde{I}(\omega) = \tilde{V}(\omega) / Z(\omega)$,这里 $\tilde{V}(\omega)$ 是驱动信号 $V(t)$ 的傅里叶变换。如果驱动信号是

振幅为 V 、角频率为 ω 的谐波信号,这时电阻上产生的热耗散功率是:

$$P_{th}(\omega) = \frac{V^2}{2R[1 + Q^2(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)^2]} \quad (2)$$

从(2)式可以知道,热耗散功率的峰值在谐振频率 ω_0 处,其谐振半峰全宽为 $\delta_w = \omega_0/Q$,当热耗散功率降低到 0 时,谐振频率会偏离到谐振半峰全宽之外。对于所制作的 PEM,熔融石英和 ZnSe 的有效 Q 值大约分别为 10^4 和 10^3 ,因此,光学头的谐振半峰全宽非常的窄,对于谐振频率在数十千赫兹的 PEM,典型带宽为几个赫兹。为了使 PEM 工作在谐振半峰全宽之内,必须通过锁相环跟踪 PEM 的谐振频率。可以知道,通过 PEM 的反馈电流和反馈电压相对于驱动电压的相位关系为:

$$\begin{cases} I = \frac{V}{R} \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)^2}} \\ \Phi(I) = -\Phi(Z(\omega)) = -\arctan[Q(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)] \end{cases} \quad (3)$$

可以看出,在谐振时,驱动电压和反馈电流在同一相位上,当电流相位超前电压相位直至到 90° 时,低于谐振频率,当电流相位滞后电压相位直至 90° 时,此时频率会高于谐振频率。更有趣的是,通过一个带有反馈回路的锁相环控制电流-电压的相位的关系,可以控制 ω/ω_0 的比值,进而有效地调节 PEM 的工作效率和谐振频率。

在热动力学模型中,PEM 的内部热能可以看成是一个简单的类似电容充电的一级动态模型,弹光调制器所充的热是内部所消耗的热 P_{th} 以及环境交换热量的总和。干涉具中温度随时间的变化率为:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{(T - T_{amb})}{\tau_{th}} + \frac{V^2}{2cR[1 + Q^2(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})^2]} \quad (4)$$

式中 c 是 PEM 的等效电容, $\tau_{th} = R_{th}c$ 是热时间常数, R_{th} 是 PEM 和它周围环境之间的一个热等效电阻。

可以先假定一个频率和温度之间的简单函数关系 $\omega_0(T) = \omega_{00} + \beta T$, 这里 β 是自然谐振频率的热导系数, ω_{00} 是一个常数偏移量。由这个模型可以得出一个谐振频率随时间的变化率方程:

$$\frac{d\omega_0}{dt} = -\frac{1}{\tau_{th}}(\omega_0 - \omega_{0,amb}) + \frac{\beta}{2cR} \frac{V^2}{1 + Q^2(\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega)^2} \quad (5)$$

式中 $\omega_{0,amb}$ 是在周围环境温度下的温度谐振频率。

应该强调的是,电子元件和热量部分应该在不同的时间标尺下进行操作,因为在外部控制系统中电子元件反应的有效时间常数约为 10^{-2} 到 10^{-1} , 或者更短,但是这个热量时间常数一般典型的为数十秒。因此,在温度和谐振频率改变的时间尺度上,这个模型的电子元件的响应是瞬间的。

由(5)式可以很容易地推导出这个模型的频率稳定状态:

$$\omega_{0,st} = \omega_{0,amb} \pm aQ^2V^2 / \{2[1 + Q^2(\omega/\omega_{0,st} - \omega_{0,st}/\omega)^2]\} \quad (6)$$

式中 $\omega_{0,st}$ 是稳态谐振频率(对于给定的周围环境温度和给定的驱动电压和频率) $a = R_{th}|\beta|/RQ^2$ 在给定的周围环境温度下,这个方程式描述了在空间表面驱动参量 V/ω 和谐振频率 ω_0 之间的关系。

假设量化后的驱动频率 $\hat{\omega} = \omega/\omega_{0,amb}$, 量化后的谐振频率 $\hat{\omega}_0 = \omega_{0,st}/\omega_{0,amb}$, 量化后的驱动电压 $\hat{V} = V/\sqrt{2\omega_{0,amb}/a}$, $\hat{\omega}$ 和 $\hat{\omega}_0$ 是被归一化的无单位的变量。将上述变量带入(6)式化简得:

$$\hat{V}^2 = (\hat{\omega}_0 - 1) \left[\frac{1}{Q^2} \left(\frac{\hat{\omega}}{\hat{\omega}_0} - \frac{\hat{\omega}_0}{\hat{\omega}} \right)^2 \right] \quad (7)$$

由(7)式可以得出 PEM 量化谐振频率 $\hat{\omega}_0$ 、量化驱动角频率 $\hat{\omega}$ 和量化驱动电压 \hat{V} 的稳态曲线关系,如图 3a 所示。取 PEM 量化谐振频率和量化驱动电压面的交线,可以得出二者之间的关系曲线,如图 3b 所示。

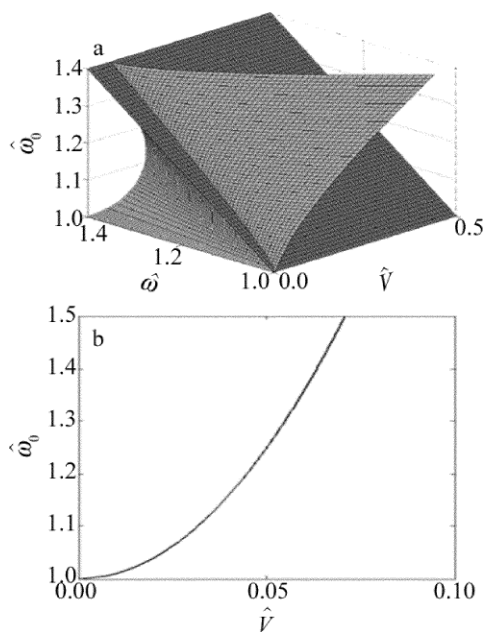


Fig. 3 Relation of $\hat{\omega}_0$, $\hat{\omega}$ and \hat{V}

3 PEM 驱动控制器的设计

3.1 基于特定相位差的跟踪方法

当驱动频率与谐振频率相等时 ($\omega = \omega_0$) , 振动状态是稳定的, 但是由于环境温度或者振动幅度的改变, 其振荡频率也将随着改变。为跟踪弹光干涉具的谐振频率, 可以通过以上推导出模型的频率稳定状态和通过 PEM 的反馈电流和驱动电压的相位关系来调节弹光干涉具的频率漂移。

只要保持通过 PEM 的反馈电流和驱动电压在同一相位上, 就可以实现频率跟踪, 达到维持 PEM 稳定工作状态的目的。图 4 是一种基于特定相位差不变来实现频率跟踪的控制示意图。首先采样压电晶体中的反馈电流信号, 经转换电路整形后由鉴相器 (phase detector, PD) 获得对应于两电压间相位差大小的占空比不同的方波信号, 经由环路滤波器 (loop filter, LF) 获取一直流电压, 最后由压控振荡器 (voltage control oscillator, VCO) 电路将该直流电压转换为一脉冲信号, 该脉冲信号的频率即正比于相位差。控制器计算脉冲信号频率, 通过与存储在控制器里的值相比较, 利用 PID 控制方法控制, 通过改变电源控制器的驱动频率来跟踪弹光调制器的谐振频率。

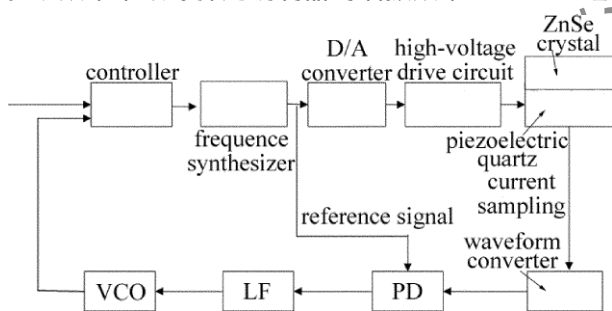


Fig. 4 Schematic diagram of the drive controller

该控制技术是压电驱动控制器的的重要组成部分, 其作用是保证弹光晶体工作频率始终处于谐振半峰宽之内。其控制过程是, 由控制器给驱动器预置一个驱动信号, 并同时将其作为鉴相器的参考信号, 随着工作时间的延长, 弹光干涉具的温度产生漂移, 其反馈回鉴相器中的电流信号的相位会与参考信号出现偏差, 根据相位差变化与频率变化的函数关系, 通过改变频率控制字, 可以实时地调节驱动信号。

晶体的 Q 值非常高 (大于 10^3) , 在 50kHz 附近的工作频率下, 为保证控制的精度, 必须设计出高性能的锁相环。

3.2 锁相原理

锁相的意义是相位同步的自动控制, 能够完成

两个电信号相位同步的自动控制闭环系统叫做锁相环路 (phase-lock loops, PLL)。锁相环主要由相位比较器 (phase comparator, PC)、压控振荡器、低通滤波器 (low pass filter, LPF) 三部分组成, 如图 5 所示。

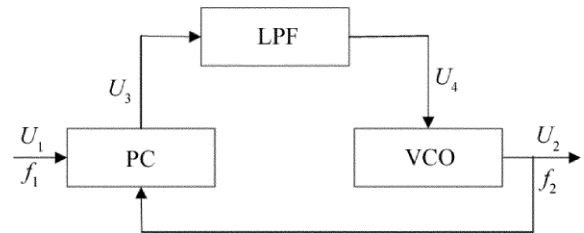


Fig. 5 Basic components of PLL

压控振荡器的输出 U_2 接至相位比较器的一个输入端, 其输出频率的高低由低通滤波器上建立起来的平均电压 U_4 的大小决定。施加于相位比较器的另一个输入端的外部输入信号 U_1 与来自压控振荡器的输出信号 U_2 相比较, 比较结果产生的误差输出电压 U_3 正比于 U_1 和 U_2 两个信号的相位差, 经过低通滤波器滤除高频分量后, 得到一个平均值电压 U_4 。这个平均电压 U_4 朝着减小 VCO 输出频率和输入频率之差的方向变化, 直至 VCO 输出频率和输入信号频率获得一致。这时两个信号的频率相同, 两相位差保持恒定, 从而达到频率跟踪的要求。

可见应用锁相环电路能够使驱动控制器驱动电压和弹光调制器反馈电流间的相位差保持恒定, 从而实现频率的跟踪。

3.3 实验数据分析

以 Hinds 公司生产的 II / ZS50 Zinc Selenide 型弹光调制系统为例, 当弹光调制系统谐振频率为 50kHz 时, 受温度变化的影响, 由参考文献 [11] 可知, 温度每漂移 1°C , 频率变化 $\pm 3\text{Hz}$ 。图 6 是由 LV-S01 激光多普勒测振仪测试弹光调制系统谐振峰, 其谐振半峰全宽为 15Hz, 随着工作时间和外界环境温度的变化, 如果温度漂移超过 2.5°C , 谐振频率将改变 7.5Hz, 这将超出弹光调制系统的谐振半峰全宽。温度的改变

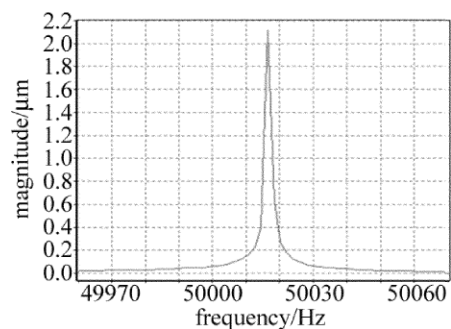


Fig. 6 Resonance peak of the PEM

导致驱动控制器的驱动频率与弹光调制系统的谐振频率不一致,最终致使弹光调制系统紊乱,性能降低。所以,设计弹光调制系统时,应使用频率-温度跟踪技术使其温度漂移应控制在 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ 之内。

4 结 论

介绍了弹光干涉具的工作原理,分析了温度对干涉具谐振频率的影响,推导了反馈电流和反馈电流相对于驱动电压的相位关系、干涉具中温度随时间的变化率和谐振频率随时间的变化率方程,并得出了干涉具热动态模型的频率稳定状态方程,最终利用上述关系方程式做出了量化驱动电压与量化谐振频率之间的曲线关系图。由于光学头的谐振半峰全宽非常的窄,当弹光调制器谐振频率为50kHz时,PEM典型的带宽只有十几个赫兹。为了使PEM工作在谐振半峰全宽之内,提出了通过高性能的锁相环跟踪PEM的谐振频率。即在设计研究弹光调制系统时,可以根据推导出的谐振频率、温度和驱动电压之间的关系,通过改变电源控制器的驱动频率来跟踪弹光调制器的谐振频率,进而减小温度对弹光调制干涉具稳定性的影响。本研究为弹光调制系统温度控制和频率跟踪提供了重要的理论依据。

参 考 文 献

[1] HU M, WANG T Y, QIAO Z F, *et al.* Research on VOC concen-

tration detection by photoelastic modulation infrared spectrum absorption method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(12): 3232-3234(in Chinese).

- [2] HU J M, ZENG A J, WANG X C. Method to measure phase retardation of wave plate based on photoelastic modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11): 1681-1686(in Chinese).
- [3] ZHOU J. Mueller matrix analysis of photoelastic modulator[J]. *Journal of Changshu College*, 2011, 15(4): 19-22(in Chinese).
- [4] SHIGEO H. A versatile photoelastic-modulator driver/controller[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1989, 28(4): 720-722.
- [5] MA T F, ZHANG Ch, ZHANG Zh T, *et al.* Frequency-temperature characteristics of quartz lateral-field-excitation piezoelectric sensors[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2009, 25(3): 25-27(in Chinese).
- [6] MA J, WANG Zh B, CHEN Y H. Influences of frequency-temperature coefficient of elastic-optic crystal on elastic-optic modulation system[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(3): 390-392(in Chinese).
- [7] DINEL D J, DAVIS A, HANCOCK B, *et al.* Dual-photoelastic-modulator-based polarimetric imaging concept for aerosol remote sensing[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(35): 8428-8445.
- [8] BUICAN T N. High retardation-amplitude photoelastic modulator: US 7764415 B2[P]. 2010-07-27.
- [9] MAEDA S, NAKAE K, SHINDO Y J. Evaluation of the performance of photoelastic modulator by admittance parameter measurements[J]. *The Japan Society of Applied Physics*, 2003, 42(7A): 4546-4551.
- [10] BUICAN T N. Birefringence interferometers for ultra-high-speed FT spectrometry and hyperspectral imaging, I. Dynamic model of the resonant photoelastic modulator[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2006, 42(1): 51-58.
- [11] LING W P. Photoelastic modulator system: US 20080304133A1[P]. 2008-12-11.