基于 Fabry-Perot 干涉仪的闭环微光机电加速度计

冯丽爽 刘惠兰 林 恒 张春熹

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 设计了一种闭环反馈差动式双 FP 腔的微光机电(MOEMS)加速度计,介绍了其工作原理及系统构成. 利用惯性敏感单元将对载体加速度的测量转变为对载体位移的测量,利用光纤自聚焦透镜的端面与质量块组成的FP腔测量载体位移. 为了提高系统的测量灵敏度和抑制温度等环境因素的影响,设计了一种差动式双 FP 腔测量机构. 为提高微加速度计的输出线性度和动态测量范围,提出了采用静电力平衡技术构成闭环加速度计. 建立了其数学模型,对所设计的加速度计重要参数指标——灵敏度、敏感头受载、固有频率等一一进行了详细计算和分析. 在此基础上完成了设计背景要求下加速度计参数的优化设计,结果表明: 该系统精度可以达到 $5\times10^{-6}g$ 以上.

关 键 词: 微光机电系统; 加速度计; 法布里-珀罗干涉仪; 闭环

中图分类号: TH 7

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2006)06-0691-04

MOEMS accelerometer based on double Fabry-Perot interferometers and closed loop

Feng Lishuang Liu Huilan Lin Heng Zhang Chunxi

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A micro-opto-electro-mechanical accelerometer based on differential double Fabry-Perot interferometers(DFPI) and closed loop was designed. The principle and the structure of the accelerometer were introduced. Inertial sensitive module was used to translate carrier's acceleration measurement to its displacement measurement. The displacement was measured by Fabry-Perot interferometers composed of the mass and the end surface of fiber self-focusing lens. The structure of differential DFPI was designed to improve the sensitivity and restrain the influence of environment factors such as temperature. The closed loop accelerometer using electrostatic servo technology was put forward to improve the output linearity and dynamic range. The mathematic model of the accelerometer was founded, and particular calculation and analysis was made for important parameters, such as sensitivity, carrying capacity of the sensitivity head, natural frequency, etc. The parameters were designed under the requirement of some background. The results show that the system precision can be better than $5\times10^{-6}g$.

Key words: micro-opto-electro-mechanical system; accelerometer; Fabry-Perot interferometers; closed loop

加速度计是惯性导航系统和惯性制导系统的重要器件,用来测量运动物体的加速度和线性位移. 已有的加速度计种类繁多,而且能够满足现有的绝大多数应用领域的要求,但随着应用需求的变化,要求惯性器件同时具备精度高、体积小、重量轻、耗能低、经济以及易于批量生产等特点,已有的加速度计却很难同时满足这些变化.

微型光机电加速度计 MOEMS(或 Optic MEMS)加速度计,是一种基于微光学技术和基于 MEMS 制造技术的新型加速度[1]. 与传统加速度计相比,MOEMS 加速度计除了具有抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀、在恶劣环境下使用的无与伦比的独特优点外,还具有体小质轻、动态范围宽、响应快、精度高等优点,因此,引起国内外研究者极大

收稿日期: 2005-06-27

作者简介: 冯丽爽(1968-),女,河北辛集市人,副教授, fenglishuang@buaa.edu.cn.

的研究兴趣. 根据工作原理, MOEMS 加速度计主要有 3 大类: 光强调制型[2,3]、相位调制型和波长调制型. 其中, 相位调制型MOEMS 加速度计研究得最多, 利用了 Michlson 干涉法[4]、M-Z 干涉法[5]或 Fabry-Perot 干涉法[6], 以干涉光的相位变化来感知加速度.

本文提出一种闭环反馈差动式双 FP 腔的 MOEMS 加速度计——DFPI (双路 Fabry-Perot 干涉) 静电伺服硅微加速度计. 结合某使用背景优化了设计参数, 并对所设计的加速度计重要参数指标——灵敏度、敏感头受载、固有频率等进行了详细计算和分析.

1 系统原理及构成设计

加速度计惯性敏感单元的基本力学模型是一个质量-弹簧-阻尼系统, 加速度通过敏感质量形成惯性力作用于系统. 加速度计是一个典型的二阶连续时间系统. 根据牛顿第二定律, 对于该力学模型, 可写出二阶微分方程:

$$m\frac{d^2x(t)}{dt^2}+\upsilon\frac{dx(t)}{dt}+kx(t)=ma(t) \quad (1)$$

式中, m, υ, k 分别为质量、粘性阻尼系数及弹性刚度; $x(t)$ 为质量相对壳体的位移; $a(t)$ 为输入加速度.

如果将加速度计的壳体固定在载体上, 只要能把敏感质量在敏感轴方向相对壳体的位移 x 测出来, 便可以把它作为加速度 a 的间接度量. 本文设计的加速度计利用 Fabry-Perot 干涉法测量敏感质量的位移, 利用差动式双FP 腔方案是为了提高加速度计的温度环境下的稳定性, 闭环反馈目的是提高加速度计的动态范围.

1.1 系统设计

图1 和图 2 分别是所设计 DFPI 静电伺服硅微加速度计的结构简图和系统框图. 整个系统由惯性敏感单元、干涉测量单元、信号处理单元和静电伺服单元4 个部分构成.

惯性敏感单元质量块感受到图示方向的加速度, 产生位移. 这一位移被检测单元的 Fabry-Perot 干涉仪感知并转变成光强信号, 再经探测器转变成电流信号. 信号处理单元对该信号进行滤波、放大等处理, 得到与输入加速度成线性关系的电压信号. 该电压即为输出信号, 该输出信号同时被反馈到静电伺服单元的差动电容的动极板上, 形成一个与惯性力矩相平衡的反馈力矩, 使质量块回到零位, 实现闭环反馈控制.

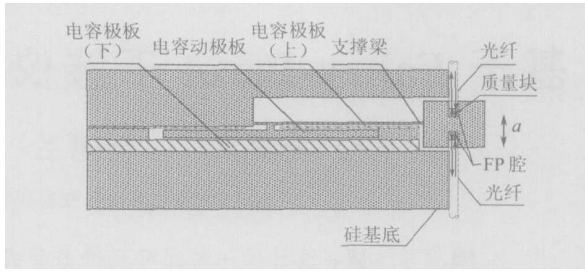


图 1 DFPI 静电伺服硅微加速度计的结构简图

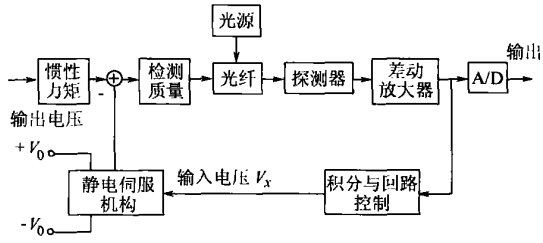


图 2 DFPI 静电伺服硅微加速度计的系统框图

1.2 惯性敏感单元

惯性敏感单元由质量块和支撑梁构成, 采用微机械结构, 体积约 6mm × 1.5mm × 1.5mm. 图 3 所示为加速度传感器模型的立体图. 悬臂梁一端连接质量块, 另一端为固定端. 质量块、悬臂梁、极板三者是一个整体.

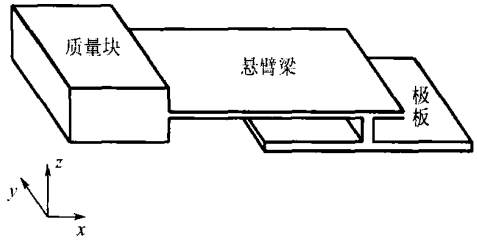


图 3 加速度传感器结构的立体图

1.3 干涉测量单元

Fabry-Perot 干涉仪由 2 个平行的高反射率的镜子组成. 对于特定的谐振波长 λ, 当 FP 腔的腔长 d 等于二分之一波长的整数倍时, 腔内一个完整的光程 $\Delta L_{op}=2nd$ (n 是折射率) 引起的相位差 $\Delta\Phi=2\pi\Delta L_{op}/\lambda$ 为 2π 的整数倍, 光被完全透射, 这就是所谓的谐振效应. 发生谐振效应时, 反射光在相位差 $\Delta\Phi$ 等于 2π 的整数倍的地方出现陷波, 见图4. 显然, 归一化反射光强对于相移的斜率 $d(I_r/I_{in})/d(\Delta\Phi)$ 在陷波的斜坡处取得最大值. 在陷波的最佳线性区当腔长 d 变化一个很小的量时, 反射光强就会有一个很大的变化量. 用这一特性可得到一个高灵敏的 Fabry-Perot 干涉式位移传感器.

图5 为本设计的 DFPI 差动检测结构示意图.

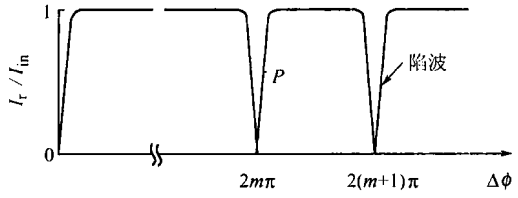


图 4　Fabry-Perot 干涉仪的反射响应度

光源 *LD* 发出的单色光经2×2耦合器后, 变成 2 束强度和相位相等的光, 这 2 束光再分别经过 2×2 耦合器注入 2 个 Fabry-Perot 干涉仪, 其反射光经耦合器分别投射在 2 个探测器上, 进而得到 2 个电流信号 I_1 和 I_2, 2 个电流信号经前置放大器后变成 2 路电压信号 V_1 和 V_2, 其差值 $V_1 - V_2$ 恰好与所测位移成线性关系. DFPI 详细设计见图 6.

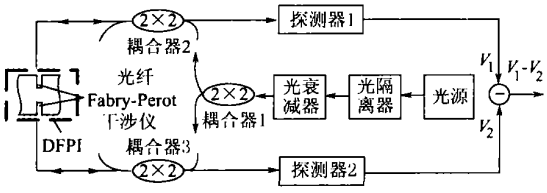


图 5　DFPI 差动检测结构示意图

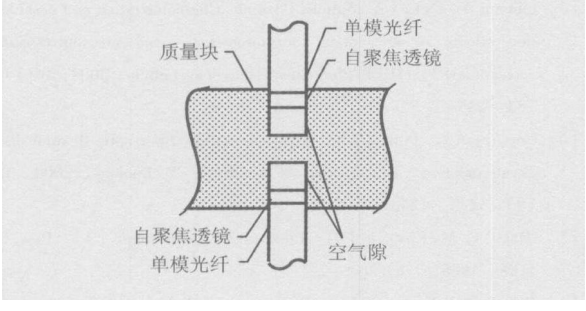


图 6　DFPI 剖面图

在质量块沿加速度敏感轴方向的中轴 2 端分别刻出一个圆柱槽, 槽的内径等于光纤的外径, 槽的底端镀高反射率的反射膜. 圆柱槽可利用微加工技术中的腐蚀或刻蚀工艺得到, 底面只需中心部分满足位置和表面质量要求即可. 截取 2 根长度相等的单模光纤, 在它们的一端带有自聚焦透镜, 使光纤的出射光经过自聚焦透镜后成为平行光, 并在透镜的端面镀反射膜. 将两光纤镀有反射膜的一端分别插入质量块上的 2 个圆柱槽[7], 严格控制插入尺寸, 使 2 个 FP 腔偏置在图 4 所示的 *P* 点, 最后将两光纤固定在硅基底上. 当质量块受加速度作用发生位移时, 光纤在圆柱槽内产生相对移动, 两端 FP 腔的腔长一个加长, 另一个等量缩短, 从而使 2 个 Fabry-Perot 干涉仪反射光强的变化量大小相等, 符号相反. 由探测器转换的电流一个增大, 一个等量减小, 其差值为单个探测器输出电流变化量的 2 倍. 因此, 这种差动结构可以将测量灵敏度提高一倍; 同时, 可以抵消温度以及其他因素对质量块的影响.

1.4　静电伺服单元

为了提高微加速度传感器的输出线性度和动态响应范围, 采用静电力平衡技术构成了闭环加速度传感器. 静电力平衡技术包含 2 个环节: ①将反馈电压转变成静电力; ②静电力引起梁的变形, 用于抵消加速度引起的质量块的位移.

静电伺服机构由一对差动电容构成. 理想情况下, 当输入加速度为零时, 输出电压为零, 电容动极板位于电容上、下极板的正中间, 处于零位; 当输入加速度不为零时, 输出电压不为零, 电容动极板 2 侧静电力的合力不为零, 电容动极板向一侧产生一个微小的位移, 并通过连接梁带动悬臂梁产生相同的位移. 由于极板的位置靠近梁的根部, 因此这个微小的位移在梁的端部被放大足够的倍数, 从而使质量块中心的位移与加速度引起的位移相抵消.

2　加速度计特性分析

从本加速度计的结构原理可知: 在一定范围内, 根据设计要求, 通过适当改变结构参数即可获得相应的加速度灵敏度和量程. 例如, 加大质量块质量或减小悬臂梁弹性刚度, 结构的灵敏度提高, 能检测到更小的加速度值, 但结构的固有频率会下降, 系统的工作带宽将变窄, 量程也会变小; 反之, 亦然. 加大预置电压, 可获得更大的量程. 本设计背景是要求高精度(灵敏度优于 $10^{-5}g$)、小量程($\pm 3g$), 故针对这种要求, 进行了结构尺寸的优化, 并进行了相应校验.

2.1　惯性敏感单元的灵敏度分析

利用有限元软件 MSC. Patran 对所设计加速度计敏感头进行变形分析. 依次对结构的有限元模型施加 $10^{-i}g$ (i= 0, 1, 2, 3, 4) 的加速度, 得到不同载荷下质量块中心的位移如表 1 所示.

表 **1**　开环时不同载荷作用下质量块中心的位移

μm

加速度/g	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
位移/10^{-6}μm	542 924	54 340	5 434	543	54	5. 4

可见当加速度为 $1\times 10^{-5}g$ 时, 质量块发生位移 5.4×10^{-6}μm, 而本设计中 Fabry-Perot 干涉仪能感知的最小可测位移 2×10^{-7}μm[8], 故设计满足

实际应用中灵敏度优于 $10^{-5}g$ 的要求. 同时由仿真数据得到结构对加速度的灵敏度为 0.543 μm/g.

2.2 惯性敏感单元的力学强度分析

当系统在闭环状态下达到稳态时, 悬臂梁并非工作在不受力状态, 而是保持在一种稳定的变形状态下. 由于系统工作状态下的常态为闭环状态, 那么悬臂梁将长期保持在某种变形状态下.

以有限元法对惯性敏感单元结构体进行了稳态强度计算. 最大应力发生在梁的根部附近. 当结构体承受 3.5 g 加速度载荷时, 惯性敏感单元梁根部最大应力 12MPa, 即使考虑动载荷影响(如其动载系数为 3~ 5), 惯性敏感单元结构体所承受的载荷仍然安全[9].

2.3 惯性敏感单元的加速度灵敏度分析

以有限元法对惯性敏感单元结构体进行力学计算: 对惯性敏感单元施加 1 g 的纵向(敏感轴)载荷和 50 g 的横向(非敏感轴)载荷(很大的干扰载荷), 并用反馈力平衡掉 1 g 的纵向载荷引起的位移. 这时质量块中心的纵向位移是由 50 g 的横向载荷引起的, 测得该值为 8×10^{-4} μm, 即结构对横向加速度的灵敏度为 1.6×10^{-5} μm/g, 而结构对纵向加速度的灵敏度为 0.534 μm/g. 因此结构对横向加速度的相对灵敏度低于 0.00295%.

2.4 惯性敏感单元的模态分析

仍采用有限元法对惯性敏感单元结构体进行固有频率计算和模态仿真. 为所设计加速度计的振动环境适应性评估提供依据. 计算表明, 所设计加速度计惯性敏感单元的一阶固有频率在 650Hz 以上. 图 7 为对设计结构利用有限元软件 MSC. Patran 进行一阶模态变形分析.

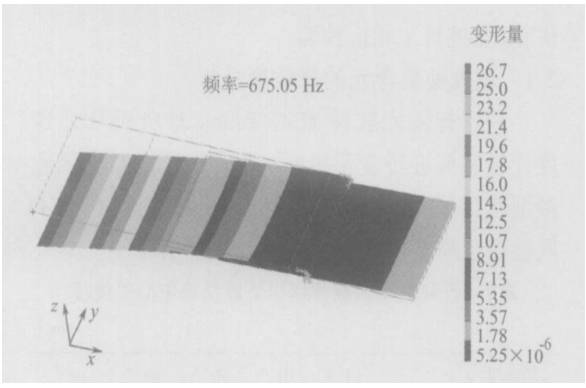


图 7 一阶模态变形分析图——悬臂梁的纵向摆动变形

3 结 论

本文介绍了一种将微机械加速度技术与光学检测技术相结合, 并利用反馈控制技术, 实现综合微光机电的加速度传感器设计. 此 MOEMS 加速度计利用双路 Fabry-Perot 干涉差动检测以及静电伺服反馈. 进行了初期系统设计, 包括机械结构、光路、静电反馈电路等设计, 并且针对设计进行了一系列仿真分析, 包括灵敏度、敏感头受载、系统的稳态及动态特性等. 设计的加速度计精度可达到 $5\times10^{-6}g$ 以上. 该设计结合了微机械技术和光纤传感技术两者的优点, 既可实现体积小、重量轻、易于批量制造, 又可以具备检测的高灵敏度、高精度.

参考文献 (**References**)

[1] 王惠文, 娄英明, 江先进. 光纤加速度传感器研究进展[J]. 光学技术, 1997, (5): 15- 20
Wang Huiwen, Lou Yingming, Jiang Xianjin. Recent progress in fiber optic accelerometers research[J]. Optical Technology, 1997, (5): 15- 20(in Chinese)

[2] Guldimann B, Clerc P A, de Rooij N F. Fiber optic accelerometer with micro optical shutter modulation and integrated damping[C]// IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS. New York: IEEE, 2000: 141- 142

[3] Llobera A, Plaza J A, Salinas I, et al. Characterization and passivation effects of an optical accelerometer based on antiresonant waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(1): 233- 235

[4] Geoffrey A C, Philips J N. High responsivity fiber optic flexural disk accelerometers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18 (9): 1233- 1243

[5] Davis C M, Eustace J G. Fiber optic seismometer [J]. Proc of SPIE, 1986, 718: 204- 211

[6] Gerges A S, Newson T P, Jones J C, et al. High sensitivity fiber optic accelerometers [J]. Opt Lett, 1989, 14(4): 251- 253

[7] Il-Bum Kwon, Marr Yong Choi, Hahngue Moon. Strain measurement using fiber optic total reflected extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor with a digital signal processing algorithm[J]. Sensors and Actuators A, 2004 (112): 10- 17

[8] 李莉. 双路 Fabry-Perot 干涉静电伺服硅微加速度计的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 2005: 41- 43
Li li. Study of a micro opto mechanical electrostatic servo accelerometer based on double fiber Fabry-Perot interferometers [D]. Beijing: School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005: 41- 43 (in Chinese)

[9] 单辉祖. 材料力学教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997
Shan Huizu, Tutorial of material mechanics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997(in Chinese)

(责任编辑: 张 嵘)