

文章编号:1002-2082(2007)04-0435-04

基于菲涅耳微透镜的光学加速度传感器原理研究

孔维军, 贾书海, 杨佳

(西安交通大学 理学院 光信息科学与技术系, 陕西 西安 710049)

摘要: 目前航空业惯性导航系统中广泛采用的加速度传感器存在抗电磁干扰(EMI)和电磁冲击(EMP)能力差等缺陷, 针对此提出了一种基于菲涅耳衍射微透镜的光学加速度传感器, 它能够有效地解决上述问题。该传感器的传感原理是把一个反光膜平行地置于微透镜的后方, 根据微透镜前方汇聚点处光强的变化来敏感加速度的大小。通过Fresnel-Kirchhoff衍射公式详细推导了传感器的光学原理, 并且对光纤的偏移对光强的影响进行了计算机模拟分析。结果表明: 光纤接收的光强对反光膜的位置具有纳米级的灵敏度, 并且对光纤沿微透镜焦平面方向的偏移极其敏感, 当此偏移超过 $2 \mu\text{m}$, 光强就会下降至不足理想情况下的50%。验证性实验结果表明这种传感器的原理是正确的。

关键词: 光纤光学; 菲涅耳衍射微透镜; 光学加速度传感器; 微机电系统

中图分类号: TN25; TP212.14-34

文献标志码: A

Principle of an optical acceleration sensor based on Fresnel microlens

KONG Wei-jun, JIA Shu-hai, YANG Jia

(Department of Optical Information Science and Technology, School of Science,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: At present, the acceleration sensor widely used in inertial navigation system of aviation industry can't offer effective immunity towards the electro magnetic interference (EMI) and electro magnetic pulse (EMP), so a novel optical acceleration sensor based on a Fresnel diffractive microlens is proposed, which can solve the problems mentioned above effectively. The sensing principle of the sensor is that a reflecting membrane is put behind the microlens in parallel, and the acceleration is calculated by measuring the variation of the light intensity at the converging point in front of the microlens. The optical principle of the sensor is discussed in details by using Fresnel-Kirchhoff diffractive formula. The effect of the optical fiber deviation on the light intensity is analyzed with the computer simulation. The results prove that the light intensity received by the optical fiber has visible changes even for the nanometer level changes of the position of the reflecting membrane and is highly sensitive to the deviation of optical fiber in the direction of the focal plane. The light intensity will drop off to less than 50% of ideal light intensity when the deviation exceeds 2 microns. Moreover, the principle of this sensor was proved to be correct by a demonstration experiment.

Key words: fiber optics; Fresnel diffractive microlens; optical acceleration sensor; MEMS

收稿日期:2006-11-02; 修回日期:2006-11-21

基金项目:国家自然科学基金(10477015);教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-05-0843);陕西省科技攻关计划(2004K05-G14);西安市科技攻关计划(GG05042)

作者简介:孔维军(1982—),男,山东曲阜人,硕士研究生,主要从事光纤通信和光纤传感的研究。E-mail:weijunkong@gmail.com

引言

随着人类航空技术的不断进步,航空业不仅成为国家经济发展的重要支柱,而且是国家安全的重要保证。新一代高性能军用、民用飞机的飞行控制系统广泛采用电传操纵系统(fly-by-wire, FBW),但电传操纵系统存在不能有效地防御雷击、抗电磁干扰(EMI)和电磁冲击(EMP)能力差等缺陷。解决上述问题的最根本办法是把光纤技术应用于飞控系统^[1],即发展光传操纵系统(fly-by-light, FBL)。目前,激光陀螺和光纤陀螺已取得了巨大进展^[2-4],可以应用于光传操纵系统,但针对光传操纵系统发展要求的光学加速度传感器的研究还不多,难以适应光传操纵系统发展的需要。

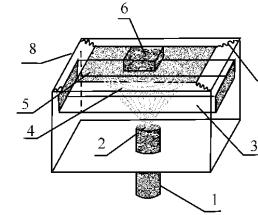
目前国内外研制的光学加速度传感器主要有以下几种类型:光弹效应型^[5-6]、M-Z干涉型^[7]、光波导型^[8]、光纤光栅型^[9]等。光弹效应型加速度传感器结构相对比较复杂^[5],环境温度变化对传感器的性能影响较大^[6];M-Z干涉型虽然有较高的灵敏度,但同样容易受温度等外界环境的影响;光波导型有利于一体化加工,但存在光纤和波导耦合效率低的困难;光纤光栅型具有较高的灵敏度,但是信号解调却非常复杂,不宜用在加速度传感器中。

针对目前航空工业的发展需求和当前加速度传感器的发展现状,作者提出了一种基于菲涅耳衍射微透镜的新型光学加速度传感器。它综合利用了光纤传感技术与MEMS^[10]技术的特点,具有抗干扰能力强、灵敏度高、体积小、结构简单、成本低等优点。本文从理论上分析了传感器的可行性,并进行了误差分析计算。

1 基于菲涅耳微透镜的加速度传感器原理

图1是本文所提出的新型光学加速度传感器的简化模型。反光膜通过4个微弹簧固定在外框架上,与菲涅耳衍射微透镜平行放置,反面加工出一个微质量。菲涅耳衍射微透镜是在玻璃基片与反光膜相邻的侧面上加工出来的,把光纤放在微透镜的光轴上,光纤端部置于微透镜的汇聚点处。光的发射和接收由同一根光纤来完成。光纤端部可以近似看作是一个点光源,光经过微透镜和反光膜这一系统。照射于衍射透镜镀金属膜部分的光直接被反射

回来,另一部分光则透过透镜后被反光膜反射回来,两部分光在光纤端部发生干涉。光强大小取决于两部分光的光程差,即光纤接收的光强随着反光膜位置的变化而变化,而反光膜上的微质量在外界加速度的作用下,会改变反光膜的位置,所以通过测量光纤中光强的变化就可以实现加速度的测量。



1—optical fiber; 2—end of optical fiber; 3—glass substrate; 4—Fresnel diffractive microlens; 5—reflecting membrane; 6—micro small mass; 7—micro silicon spring; 8—outer frame

图1 光学加速度传感器的简化立体模型

Fig. 1 Simplified stereomodel of the optical acceleration sensor

菲涅耳衍射微透镜是通过金属膜蒸镀、光刻和刻蚀等方法在玻璃基片上加工出来的,图2所示是

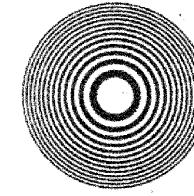


图2 加工的菲涅耳衍射微透镜

Fig. 2 Fresnel diffractive microlens fabricated for optical acceleration sensor

加工好的微透镜照片。透镜偶数(奇数)的半波带上镀有一层金属反射膜,奇数(偶数)的半波带是透明的。如图3所示,从光轴上汇聚点p到第n个半波带外沿与从p到透镜的中心o的光程差应该为n(λ/4)。于是菲涅耳衍射微透镜的第n个半波带的外沿半径r_n可由下面的方程组给出:

$$\begin{cases} s_1 + n_g s_2 - d_1 - n_g d_2 = n\lambda/4 \\ \frac{\sqrt{s_1^2 - d_1^2}}{s_1} = n_g \frac{\sqrt{s_2^2 - d_2^2}}{s_2} \\ r_n = \sqrt{s_1^2 - d_1^2} + \sqrt{s_2^2 - d_2^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中n_g指玻璃的折射率,其他参数如图3所示。

从 p 点发出的波长为 λ 的光, 经过微透镜和反光膜这一衍射系统, 会在 p 点处形成不同的复振幅分布。 p 点的光的复振幅分布由 Fresnel-Kirchhoff 衍射公式可得:

$$U = -\frac{i}{\lambda} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{\text{Fre}}} A(r, d) \frac{\exp(2iks)}{s^2} \cos(\alpha) r dr d\theta \quad (2)$$

式中: $A(r, d) = a(r, d) \exp[i\varphi(r, d)]$, 表示菲涅耳衍射微透镜和反光膜这一系统的复孔径函数; r_{Fre} 是离中心最远的半波带外沿半径, 即微透镜的半径; d 是微透镜和反光膜之间的距离; $s = s_1/n_g + s_2 = s(r)$; $k = \frac{2n_g\pi}{\lambda}$, 表示光在玻璃中的波矢; $\cos(\alpha)$ 仅与 r 有关。

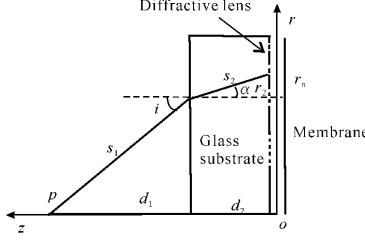


图 3 在柱坐标系中表示的传感器系统的光路图

Fig. 3 Beam path diagram of the sensor shown in cylindrical coordinates

设微透镜有 $2N$ 个半波带, 则:

$$U = -\frac{i}{\lambda} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{2N}} A(r, d) \frac{\exp(2iks)}{s^2} \cos(\alpha) r dr d\theta = -\frac{2\pi i}{\lambda} \int_0^{r_{2N}} A(r, d) \frac{\exp(2iks)}{s^2} \cos(\alpha) r dr = -\frac{2\pi i}{\lambda} [A_1 B_1 + A_2(d) B_2] \quad (3)$$

式中:

$$B_1 = \sum_{n=0}^{N-1} \left[\int_{r_{2n+1}}^{r_{2n+2}} \frac{\exp(2iks)}{s^2} \cos(\alpha) r dr \right] \quad (4)$$

$$B_2 = \sum_{n=0}^{N-1} \left[\int_{r_{2n}}^{r_{2n+1}} \frac{\exp(2iks)}{s^2} \cos(\alpha) r dr \right]$$

A_1 是菲涅耳衍射微透镜上偶数带上镀的金属反光膜的反射系数, 假设完全反光, 故 $A_1 = -1$; $A_2(d)$ 是微透镜/空气隙/反光膜这一系统的反射系数, 可以用介质膜反射系数公式表示为

$$A_2(d) = \frac{\rho_{12} + \rho_{23} \exp(2i\beta)}{1 + \rho_{12} \rho_{23} \exp(2i\beta)} \quad (5)$$

式中: $\beta = (2\pi/\lambda)d$; ρ_{12} 是光从玻璃到空气表面的反射系数; ρ_{23} 是反光膜的反射系数。

这里假设反光膜完全反光, 即 $\rho_{23} = -1$ 。令 $\rho_{12} = \rho$, 于是由(5)式和(3)式可得:

$$U = \frac{2\pi i}{\lambda} \left[-B_1 + \frac{\rho - \exp(2i\beta)}{1 - \rho \exp(2i\beta)} B_2 \right] \quad (6)$$

事实上, 对于固定的 N 值, $B_1 = -B_2$, 为一常数, 则点 p 光强的相对大小可以表示为

$$\frac{I}{I_{\text{MAX}}} = \frac{\left| 1 + \frac{\rho - \exp(2i\beta)}{1 - \rho \exp(2i\beta)} \right|^2}{|1 + 1|^2} = \frac{1}{4} \left| 1 + \frac{\rho - \exp(2i\beta)}{1 - \rho \exp(2i\beta)} \right|^2 = \frac{1/2}{\frac{(1+\rho)^2(1-\cos(2\beta))}{\rho^2+1-2\rho\cos(2\beta)}} \quad (7)$$

式中 I_{MAX} 是光强的最大值, 对应于 $\beta = \pi/2$ 。

取玻璃的振幅反射率为 $\rho = 0.2$, 这时(7)式的计算机模拟结果如图4所示。从图4可以看出, 光强是周期性变化的, 周期为 π , 对于微透镜与反光膜的距离 d 来说周期为 $\lambda/2$ 。线性点在图上用方形小点标出, 是理想的工作点。从图中可以看出, 当反光膜的位置变化 $\lambda/4$ 就可以使光强在最大与最小的范围内变化, 所以传感器的输出对反光膜的位置变化是非常敏感的。而反光膜上的微质量在外界加速度的作用下, 会改变反光膜的位置, 从而使传感器的输出对加速度非常敏感。

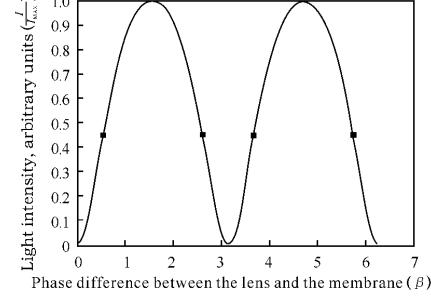


图 4 光强与反光膜位置之间的关系

Fig. 4 The light intensity versus the position of reflecting membrane

2 误差模拟分析

由于光的发射和接收由同一根光纤来完成, 而且透镜很小, 这样就对光纤的安装位置精度有较高的要求, 光纤水平和竖直方向的偏移, 会对光强的大小造成影响。为此, 对光纤偏移对光强的影响进行了计算机模拟研究。模拟时取以下参数: 光波波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$; 菲涅耳衍射微透镜的焦距 $s_0 =$

8 mm; 共 50 个半波带, 即 $N=25$; 玻璃的振幅反射率 $\rho=0.2$; 玻璃的折射率 $n_g=1.40$ 。

取平行于菲涅耳衍射微透镜焦平面方向为横向, 微透镜光轴的方向为纵向。图 5 和图 6 分别是光强与横向偏移和纵向偏移的关系。如图 5 所示, 光纤沿横向有 $2 \mu\text{m}$ 偏移的时候, 光强下降为理想情况下的 45%, $3 \mu\text{m}$ 的时候下降为 14%。可见, 光强对横向偏移十分敏感, 所以在加工传感器时, 一方面要对光纤的横向位置精确定位, 可采用精密调节平台或压电微位移调整的方法来实现, 另一方面可以采用多模光纤来降低敏感性。如图 6 所示, 当光纤沿纵向分别有 $80 \mu\text{m}$ 和 $-80 \mu\text{m}$ 偏移的时候, 光强仍然有理想情况的 82% 和 80%, 因此, 纵向偏移对光强的影响相对要小很多。所以在加工传感器时, 对光纤纵向位置的精度要求要小得多, 这对加工和安装带来了方便。

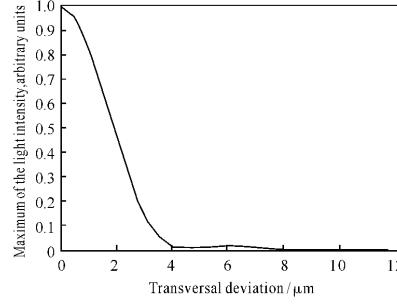


图 5 光强与横向偏移的关系

Fig. 5 Light intensity versus transversal deviation

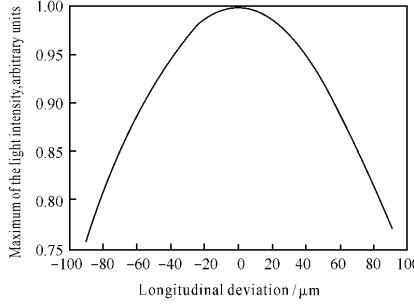


图 6 光强与纵向偏移的关系(设指向透镜的方向为正)

Fig. 6 Light intensity versus longitudinal deviation

(Suppose the direction to lens is positive)

已对这种新型传感器进行了原理验证性的初步加工和实验研究(图 2 是加工好的菲涅耳衍射微透镜的照片)。实验时将激光器、耦合器、菲涅耳衍

射微透镜、反光膜、探测器等固定在光学平台上, 用压电晶体调节反光膜和微透镜间的距离, 在示波器上就可以看到类似于图 4 的探测器的输出。这表明本文所提出的传感器的新方案是正确的、可行的。

3 结论

本文提出了一种基于菲涅耳衍射微透镜的新型光学加速度传感器, 并对其进行了详细的光学理论分析和误差影响分析。计算机数值模拟和初步的实验结果表明: 这种传感器的原理是正确的。这种传感器综合利用了光纤和 MEMS 技术的优势, 适于批量制造, 具有抗干扰能力强、体积小、灵敏度高、结构简单、成本低等优点, 不仅适用于航空业的导航系统, 也适用于许多高电磁干扰环境和要求高精度传感的领域, 如舰艇、发电机组、核电站等。

参考文献:

- [1] MORIO K. Fiber optic sensors for Fly-by-Light aircraft[J]. SPIE, 1999, 3746: 570-575.
- [2] SIMON J. Military application of optical fibregyro [J]. SPIE, 1999, 2866: 101-106.
- [3] NUMAI T. Analysis of signal voltage in a semiconductor ring laser gyro [J]. Quantum Electronics, 2000, 36(10): 1161-1167.
- [4] 万顺平, 毛献辉, 孙利群, 等. 半导体泵浦固体激光陀螺的研究进展[J]. 应用光学, 2002, 23(2): 22-25.
WAN Shun-ping, MAO Xian-hui, SUN Li-qun, et al. The research development of LD pumped solid state laser gyro[J]. Journal of Applied Optics, 2002, 23(2): 22-25. (in Chinese)
- [5] OHKAWA M, IZUTSU M, SUETA T. Integrated optic accelerometer employing a cantilever on silicon substrate[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1989, 28(2): 287-288.
- [6] 黄勇焕. 光弹光纤加速度传感器的研究与设计[J]. 天津工业大学学报, 2004, 23(3): 61-64.
HUANG Yong-huan. Research and design of photoelastic fiber optic accelerometer[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2004, 23(3): 61-64. (in Chinese)
- [7] 吴波, 陈才和, 张晓玲, 等. M-Z 干涉型集成光学微加速度传感器结构设计[J]. 光电子·激光, 2004, 15(11): 1263-1266.

(下转第 444 页)