

一种新型 GRIN 透镜光纤加速度计的研究

陶 发 王惠南

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘 要 研究了一种新颖的光纤加速度计, 阐述了三光纤 GRIN 透镜加速度敏感元件的工作原理及其结构设计. 该传感器包括三根光纤、一个 GRIN 透镜和一个质量块. 根据光功率耦合原理, 对透镜倾斜时的误差进行了定量分析. 该加速度计具有结构新颖、体积小和灵敏度高等优点, 是一种具有多用途的加速度传感器.

关键词 自聚焦透镜; 光功率耦合; 光线方程; 微位移

中图分类号 TN212.14 **文献标识码** A

0 引言

光纤传感器是最近几年出现的新技术, 可以用来测量多种物理量, 比如声场、电场、压力、温度、角速度、加速度等^[1~3]. 对于光纤加速度计的研究, 主要集中在研究光纤加速度计在对于微物理量的测量上, 如物体的振动^[4~7]、变形、加速度等. 而对于加速度的测量在航空航天领域的应用尤为广泛, 如光纤加速度计陀螺等.

本文在 GRIN 透镜理论的基础上, 提出了一种新型的光纤加速度计, 该加速度计体积小, 灵敏度高, 是一种多用途的加速度传感器.

1 GRIN 透镜中光线的传播分析

为了能测量正负两个方向上的加速度, 本文改进了两根光纤的 GRIN 透镜光纤加速度计的结构设计^[4], 采用了三根平行的光纤结构(见图 1), 使该加速度计在测量加速度大小的同时, 能判断加速度的方向, 使其更符合实际应用中的要求.

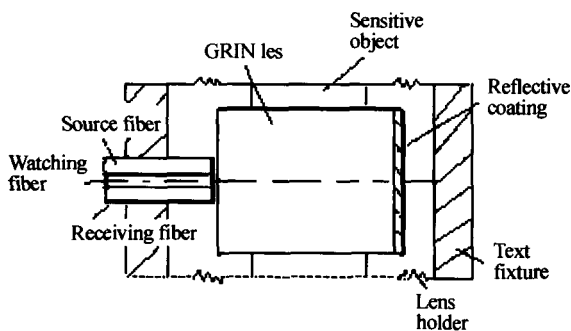


图 1 三光纤 GRIN 透镜结构示意图
Fig. 1 The structure of the three fiber accelerometer using a GRIN lens

根据光线在渐变折射率光纤中传播的理论, 利用矩阵分析法得出近轴子午光线在径向的折射矩阵

和过渡矩阵^[6]为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n'(r)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n'(r) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \cos al & \frac{\sin al}{a} \\ -a \sin al & \cos al \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $n'(r)$ 为半径长为 r 处的折射率与光纤折射率的比值, l 为透镜中始末两面的轴向距离.

本加速度计中采用了 1/4 周期的 GRIN 透镜, 该透镜右端溅射反射膜, 因而光线在 GRIN 透镜内部总共传播了 1/2 周期, h_3, θ_3 是反射光线在始端面出射后的位置和斜率角, h_2, θ_2 是反射光线在始端面出射前的位置和斜率角. 由光的反射原理可得: $h_2 = h_3, \theta_2 = -\theta_3$, h_2', θ_2' 分别为 1/2 周期时的位置和斜率角(图 2), 因而可得

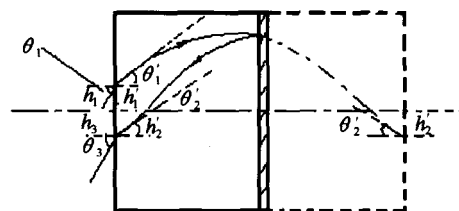


图 2 GRIN 透镜中光线传播轨迹图
Fig. 2 Ray path inside GRIN lens

$$\begin{bmatrix} h_2' \\ \theta_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos a \frac{L}{2} & \frac{\sin a \frac{L}{2}}{a} \\ -a \sin a \frac{L}{2} & \cos a \frac{L}{2} \end{bmatrix} R_1 \begin{bmatrix} h_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} h_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_2' \\ \theta_2' \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可得

$$\begin{bmatrix} h_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = R_2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos a \frac{L}{2} & \frac{\sin a \frac{L}{2}}{a} \\ -a \sin a \frac{L}{2} & \cos a \frac{L}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -(h+x) \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R_1 \begin{bmatrix} h_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -h_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}$$

由此可知入射光线与反射光线关于 GRIN 透镜的光轴线对称,该加速度计正是利用了这一对称性原理,使光功率耦合成为一个关于 GRIN 透镜微位移的函数.

2 光线轨迹实时分析

运用上述理论,可清晰地了解光线在该加速度计中的传播轨迹.抛物线型折射率分布的自聚焦透镜近轴子午线光线呈余弦曲线传播,其曲线方程为

$$r = R \cos az \quad (7)$$

设源光纤 f_s 、感应光纤 f_i 和接收光纤 f_r 的芯径都为 d ,三芯径共线,且和敏感质量的运动方向平行,感应光纤的光轴与自聚焦透镜光轴重合.设入射光的位置到对称光轴距离为 h ($d/2 < h < 3d/2$),其入射斜率角为 θ .

当无加速度产生时,感应光纤光轴与 GRIN 透镜光轴在同一直线上.由式(6)可知:当光线经过 GRIN 透镜传播反射后,返回初始位置时子午线的位置和斜率角将发生改变,即

$$\begin{bmatrix} h' \\ \theta' \end{bmatrix} = R_2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} R_1 \begin{bmatrix} h \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -h \\ \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)和光的折射、反射原理,此时光线的传播轨迹及其光功率耦合的实现如图 3.

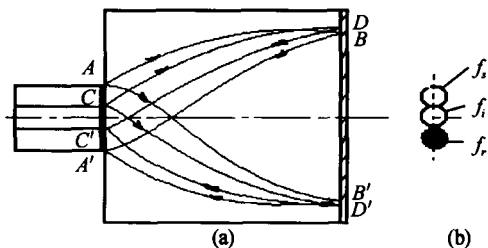


图 3 (a)无加速度时光线传播轨迹,(b)光耦合示意图
Fig. 3 (a)The ray traces inside GRIN lens without acceleration;(b)Scheme of coupled power

当壳体有方向向上的加速度 a 时,则 GRIN 透镜上的质量块在惯性力 ma 的作用下将产生向下的微位移 x ,则感应光纤的轴线偏离了 GRIN 透镜的光轴 x ,可知从源光纤 f_s 发出的光线位置变为: $h+x$,设其入射斜率角为 θ_m , θ_m 具有正负值,通过自聚焦透镜传播和反射后的光线位置和斜率角的变换满足

$$\begin{bmatrix} h_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = R_2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} R_1 \begin{bmatrix} h+x \\ \theta_m \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -(h+x) \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据式(9)可知当壳体在加速度的作用下产生微位移后,从源光纤发出的光线落在 GRIN 透镜的 $(d/2+x, 3d/2+x)$ 范围内,而反射光线落在 $(-(3d/2+x), -(d/2+x))$ 范围内,而此时接收光纤所能接收光的范围变为 $(-(3d/2-x), -(d/2-x))$,由此可知微位移 x 的变化范围为 $x < d/2$,此时感应光纤中无光线射入.而此时的光线传播轨迹及其光功率耦合的实现,如图 4.

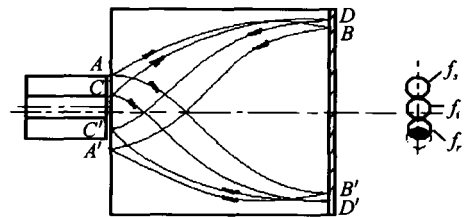


图 4 加速度方向向上时的光线轨迹
Fig. 4 The ray traces in inside GRIN lens when the direction of acceleration is up

当壳体产生向下的加速度 a 时,通过透镜的传播和反射后有如下规律

$$\begin{bmatrix} h_3 \\ \theta_3 \end{bmatrix} = R_2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot R_1 \begin{bmatrix} h-x \\ \theta_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(h-x) \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad (10)$$

由于微位移的存在,此时感应光纤中有光线射入,从而达到用感应光纤来判断加速度方向的目的.此时光线的传播轨迹及其光功率耦合的实现,如图 5.

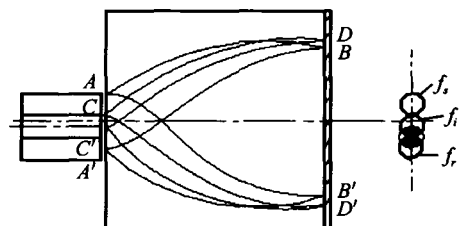


图 5 加速度方向向下时的光线轨迹
Fig. 5 The ray traces inside Grin lens when the direction of acceleration is down

图 3、4、5 中均画出了四条特殊光线的轨迹: $\theta_m > 0$ 时,A 点和 C 点的发射光分别为 AB、CD,反射光分别为 BA'、DC'; $\theta_m < 0$ 时,A 点和 C 点的发射光分别为 AB'、CD',反射光分别为 B'A'、D'C'.

3 光功率耦合

假设所选用的为阶跃型光纤,且出射光线的光强均匀分布.可得耦合功率正比与耦合面积^[5].

当加速度向上时,接收光纤与光斑耦合关系如图 6(a)

$$\cos \theta = \frac{2x}{d} \quad (11)$$

$$S_2 = \frac{1}{2}x\left(\frac{d^2}{4} - x^2\right)^{1/2} \quad (12)$$

$$S_1 = \frac{\arccos \frac{2x}{d}}{2\pi} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 - S_2 \quad (13)$$

由式(11)~(13)可求得阴影部分面积为

$$S = 4S_1 = \frac{d^2}{2} \arccos \frac{2x}{d} - 2x\left(\frac{d^2}{4} - x^2\right)^{1/2} \quad (14)$$

当加速度向下时,接收光纤、感应光纤与光斑耦合关系如图 6(b).

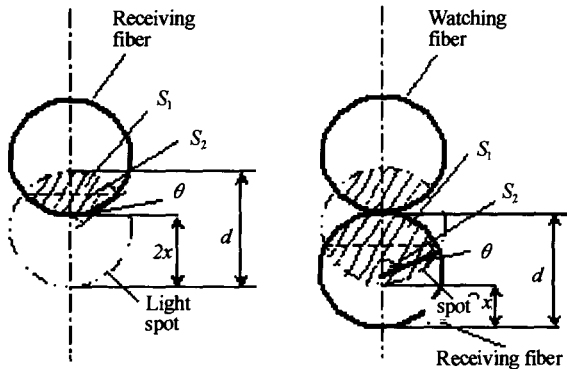


图 6 接收光纤、感应光纤与光斑的耦合关系

Fig. 6 The scheme of coupling of receiving fiber and watching fiber with spot

由图 6(b)和图 6(a)比较可得出,接收光纤与光斑的耦合面积的计算依然使用式(11)~(13). 此时接收光纤处的阴影面积为

$$S = \frac{d^2}{2} \arccos \frac{2x}{d} - 2x\left(\frac{d^2}{4} - x^2\right)^{1/2} \quad (15)$$

由此可求得加速度向上和向下时的光功率耦合效率 $T(x)$

$$T(x) = \frac{S}{\pi(d/2)^2} = \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos \frac{2x}{d} - \frac{2x}{d} \left[1 - \left(\frac{2x}{d}\right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (16)$$

由图 7 仿真曲线可看出自变量 $2x/d$ 在(0~0.7)的范围内,表现出良好的线性关系, $2x/d$ 是加速度 a 的函数,故由接收光纤中的光功率输出可测得加速度. 由此证明这种结构新颖得光纤加速度计得实现

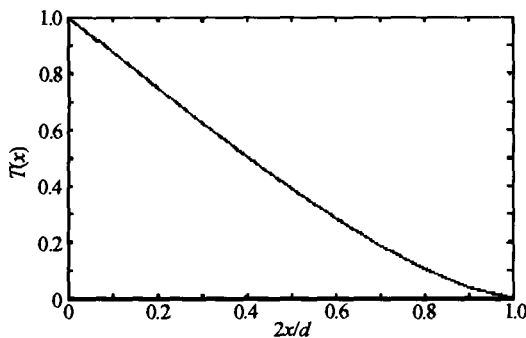


图 7 光纤与 GRIN 透镜的曲线图
Fig. 7 The graph of coupling power's change as a function of the relative lens/fibers displacement

是完全切实可行的.

4 加速度与位移的关系推导

图 1 是开环光纤加速度计的示意图. 当基座随被测物体具有向上的加速度时,惯性力形成绕轴心的惯性力矩将平衡作用在摆轴上的全部力矩. 则有下列方程成立

$$M_R + M_a + M_G = 0 \quad (17)$$

式中, M_R 为片簧的平衡力矩, M_a 为惯性力矩, M_G 为引力力矩.

在理想情况下,忽略干扰力矩的影响,平衡力矩可通过测量 Δx 来测得,摆性 ml 也是已知,若令 $A = M_a/ml$ 作为加速度计的输量,则式得

$$\bar{A} = \bar{a} - \bar{G} \quad (18)$$

下面讨论片簧的位移与平衡力矩的关系. 片簧的材料 $E=1.35$ 兆帕,弹性极限兆帕,弯曲力矩,在固定截面处有,则最大弯曲应力

$$\sigma_{\max} = P_a/W_x \quad (19)$$

而端面的挠度就为

$$x = \sum \frac{\Omega_p M_{1c}}{B} \quad (20)$$

从而可求出挠度为

$$x = \frac{Pa^2}{2B} (l - a/3) \quad (21)$$

此时去 $a=l$ 可得挠度为

$$x = \frac{Pl^3}{3B} \quad (22)$$

而此时片簧的弯曲刚度为

$$B = EJ_x = \frac{Ebh^3}{12} \quad (23)$$

加速度与位移的函数关系

$$a = \frac{Ebh^3 x}{4ml^3} \quad (21)$$

式(16)给出了光功率的传递函数 $T(x)$,式(22)给出了加速度与位移 x 的关系,至此,加速度计的数值就通过微位移被测量出来.

5 误差分析

当感应光纤的光轴与 GRIN 透镜的光轴存在一定角度时,即 GRIN 透镜发生倾斜,设倾斜角为 ϕ ,由于倾斜的存在,必影响光斑的移动,造成光功率耦合误差. 考虑小的半孔径角 θ_c ,忽略折射产生的二价小量和源光纤近角边的偏移,可得产生的最大径向偏移为 $\Delta x = 3d(\cos \phi + \sin \phi \cdot \tan(\phi + \theta_c) - 1)$ (如图 8),此时入射光斑实为一椭圆,由于考虑到倾斜角为一小角度角,椭圆的长径和短径十分相近,因而光斑可近似为一圆形,其光功率耦合图近似为图

9, 可推得其光功率损失为

$$L_p = -10 \lg \left(\frac{d}{d + \Delta x} \right)^2 \quad (25)$$

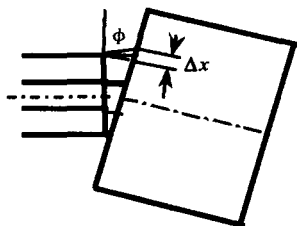


图8 角度偏移示意图
Fig. 8 Scheme of the angular misalignment

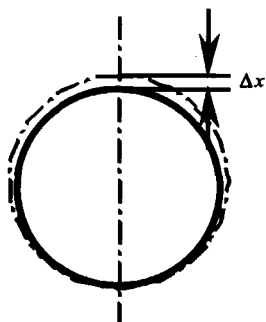


图9 接收光斑产生的位移示意图
Fig. 9 Scheme of the displacement of received light spot

本文选取了 $\theta_c = 0.187$ 的光纤作了功率损耗关于倾斜角误差的仿真, 仿真曲线如图 10. 实际中小角度误差是必然存在的. 从仿真图中可知: 要使光损耗降低在 1 dB 以下是完全能够实现的, 且对安装的要求不会非常高. 要使损失功率降低在 0.1 dB 左右时, 小倾斜角允许在 1° 左右, 这一要求在安装工艺上是易实现的.

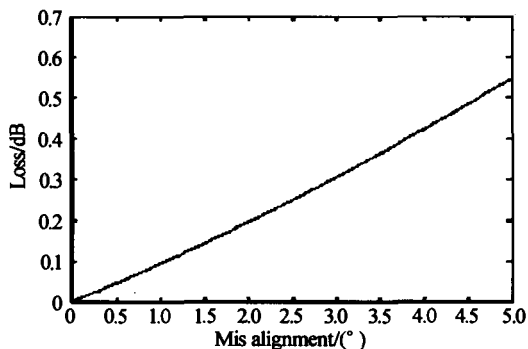


图10 角度失准产生的耦合损耗仿真图
Fig. 10 The figure of emulation coupling loss due to angular misalignment

由于在实际安装中光纤与 GRIN 透镜之间存在微小气隙, 因而需考虑气隙对于测量加速度的影

响. 假设气隙轴向长度为 Δl , 则产生的偏移为 $\Delta l \cdot \tan \theta_c$. 由式(23)变换可知当 $\Delta l < 1/5d$ 时, 损失的功率都低于 1 dB, 因此对于安装并不难实现. 而通过对光纤轴向传递函数和径向传递函数的分析可知, 径向位移灵敏度要比轴向位移灵敏度高得多, 所以在实际运用时也可忽略由温度等引起的轴向位移.

6 结论

通过对 GRIN 透镜中光线的传播状况分析, 提出了一种新型加速度计设计方法, 使其更符合实际应用, 而且为三分量的 GRIN 透镜加速度计的实现提供必要的理论基础. 该理论不仅可用于加速度测量上, 而且可用于压力测量、微位移测量和振动测量.

参考文献

- 1 丁桂兰, 刘振富, 陈才和, 等. 顺变柱体型全光纤加速度检波器敏感元件. 光子学报, 2000, 29(Z1): 171~174
Ding G L, Liu Z F, Chen C H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(Z1): 171~174
- 2 王体辉, 贺正权, 王忠厚, 等. 一种高精度光学位移传感器的设计分析. 光子学报, 2003, 32(7): 840~843
Wang T H, He Z Q, Wang Z H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(7): 840~843
- 3 周灿林, 亢一澜. 数字全息干涉法用于变形测量. 光子学报, 2004, 33(2): 171~173
Zhou C L, Kang Y L. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(2): 171~173
- 4 王惠南. 采用 GRIN 透镜之光纤加速度计原理设计. 光子学报, 1995, 24(1): 18~24
Wang H N. *Acta Photonica Sinica*, 1995, 24(1): 18~24
- 5 丁桂兰, 刘振富, 崔宇明, 等. 顺变柱体型全光纤加速度检波器. 光学学报, 2002, 22(3): 340~343
Ding G L, Liu Z F, Cui Y M, et al. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(3): 340~343
- 6 徐大雄. 纤维光学的物理基础. 北京: 高等教育出版社, 1985. 3
Xu D X. *Basic physic of fiber optic*. Beijing: Higher Education Press, 1985. 3
- 7 杨宝清, 刘英明. 光纤测振加速度传感器的研究. 大连铁道学院学报, 2001, 22(4): 21~24
Yan B Q, Liu Y M. *Dalian Railway College Sinica*, 2001, 22(4): 21~24

A Study on a Novel Fiber-Optic Accelerometer Using a GRIN Lens

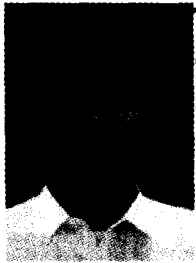
Tao Fa, Wang Huinan

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

Received date: 2004-05-19

Abstract In this paper, a novel Fiber-Optic Accelerometer was studied. It demonstrates the operational principle and structure design of the three-fiber accelerometer using a GRIN lens. This sensor consists of three fibers, one GRIN lens and a block. In addition, the effects of angular misalignment are calculated based on the analysis of the coupled power. It's reasonable in theory and easy to fabricate in practice. This sensor is novel and small-scale in physical structure, and it also offers potential precision. Altogether, it is a multi-purpose fiber-optic accelerometer.

Keywords GRIN lens; Coupling power; Paraxial ray equation; Micro-displacement



Tao Fa was born in Zhejiang, Jiangsu Province, in 1980. He received the B. S. and M. S. degrees in College of Automation Engineering from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. During Studying Perial, his major is precision instunent and mechanism.