

文章编号: 0253-2239(2003)09-1133-5

激光加速度传感器的理论研究^{*}

房晓勇

(燕山大学物理系, 秦皇岛 066004)

曹茂盛

(清华大学材料科学与工程研究院, 北京 100084)

摘要: 提出了一种新型加速度传感器的设计理论。该传感器设计以角锥棱镜作为惯性摆, 利用光学干涉原理, 可以实现对运动物体的二维加速度测量。对该传感器进行了系统的理论研究, 给出了二维加速度激光传感器设计参量选取的一般规律, 并给出了实验的初步结果。

关键词: 应用光学; 激光传感器; 二维加速度测量; 传感器设计; 设计参量选取原则

中图分类号: O439 文献标识码: A

1 引 言

火箭、导弹、潜艇、远程飞机、太空飞行器等运载器能够准确地抵达目的地, 或精确地打击目标, 主要依靠导航系统。运载器可以依靠外界条件, 如天文、无线电、卫星等进行导航, 也可以在完全与外界条件以及电磁波隔绝的“封闭”空间中, 利用自身的惯性制导系统实现精确的导航。惯性制导技术除了在军事科学领域具有重要应用外, 在民用领域及科学试验方面也具有广阔的应用前景, 如在人造地球卫星中, 以及无人驾驶飞机、车辆等。

在目前的惯性制导系统中, 普遍采用弹簧-滑块-指针结构式加速度传感器对三维加速度进行测量, 并进而给出任意瞬间运载器的俯仰、滚动和航偏等运动状态的数据。此外, 经常使用的加速度传感器还有电容式、压阻式、应变式、光纤式等类型^[1,2]。但是, 这些传感器的共同特点是只能测量物体一维运动方向的加速度数值, 因此, 若想对运动物体的加速度进行测量, 必须增加传感器的数目。

文献[3]中提出了一种光学式加速度传感器的设计思路, 即以角锥棱镜作为惯性摆^[5~9], 利用角锥棱镜具有定向反射特性^[4]和光栅的分谱特性实现相干光束。利用光学干涉原理, 通过对惯性摆的二维角度测量^[5~9], 实现对运动物体的二维加速度测量。

这种二维加速度激光传感器具有功能全、性能稳定、精度高, 且易于实时测量等优点, 可以广泛地应用于航空、航海、陆地交通等领域。特别适合安装在无人驾驶的飞机、车辆等运载工具中, 使系统的传感器数目减少, 从而简化系统的结构。本文通过对这种激光传感器的系统分析, 给出了传感器设计参量的选取原则, 以及初步的实验结果。

2 二维加速度激光传感器的结构

二维加速度激光传感器由光学测量系统和电子数据处理系统两个部分组成, 其中光学系统全部放置在运动物体(运载器)内部, 传感器的结构和光学系统如图 1 所示。

2.1 传感器的光学系统

二维加速度激光传感器的核心部分是惯性摆, 它是一个底面覆盖正交光栅的角锥棱镜, 并通过挠性联结件固定在运载器内的顶部, 如图 1 所示。从激光器发射的激光束在透镜焦平面处时, 被光学调制盘调制形成脉冲信号光。脉冲激光束被惯性摆下方的分束器分成两束: 一束穿过分束器后被信号光脉冲计时器接收, 进入电子数据处理系统; 另一束被分束器反射后, 射向底面覆盖有正交光栅的角锥棱镜, 被棱镜反射后形成平行的相干光束, 通过分束器并形成干涉条纹被二维 CCD 阵列接收。

当运载器以加速度 $\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j}$ 在地球表面作平面运动时, 惯性摆将沿相反方向摆动, 其摆角可以写成 $\theta = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}$, 这里 α 和 β 分别是角锥棱镜沿 x 、

^{*} 河北省教育厅基金(2002107)资助课题。

E-mail: fang@ysu.edu.cn

收稿日期: 2002-10-15; 收到修改稿日期: 2003-03-03

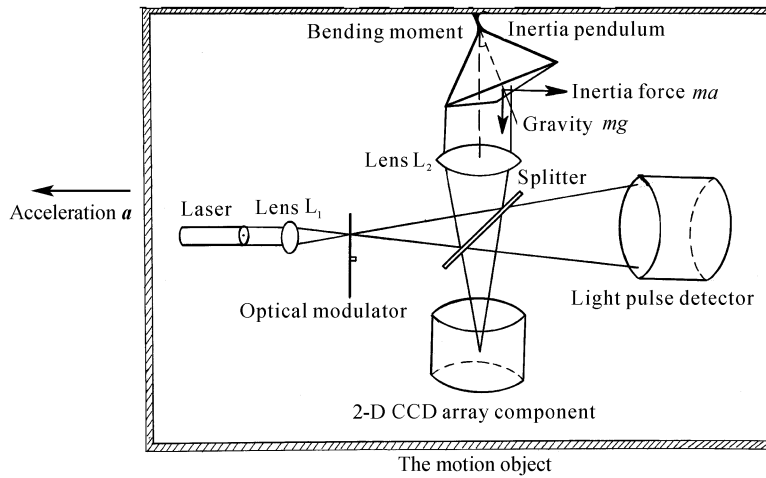


Fig. 1 The structure of 2-D acceleration laser sensor and its optical system

y 相应方向的转角。此时，激光束对角锥棱镜底面的入射角恰好可以分解为 α 和 β ，该激光束两次经过角锥棱镜底面的正交光栅后形成平行的相干光束，其光程差与激光束的入射角有关，并在二维 CCD 阵列上出现一系列干涉条纹^[5~9]。根据二维 CCD 阵列上干涉条纹移动的数目 N_α 和 N_β ，可以计算出入射角，即惯性摆的二维转角^[6]：

$$\alpha = A_\alpha N_\alpha, \tag{1}$$

$$\beta = A_\beta N_\beta, \tag{2}$$

这里 A_α 、 A_β 分别是干涉条纹的角宽度。

2.2 传感器的电子数据处理系统

二维加速度激光传感器的的光学信号经过光电转换器进入电子数据处理系统。在电子处理系统中，经过对干涉条纹位移计数、存储及条纹角宽度计算后，可以获得惯性摆的二维转动角度，并进而获得惯性摆的二维角加速度数值。最后，利用惯性摆的角度和角加速度可以计算出运动物体的二维加速度，并显示结果。

二维加速度激光传感器的电子数据处理系统原理如图 2 所示。

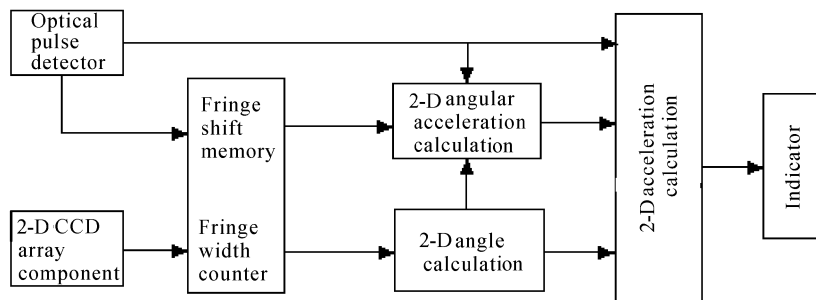


Fig. 2 Electronic treatment system of 2-D acceleration laser sensor

3 二维加速度激光传感器的设计理论

3.1 二维加速度测量原理

假设一个运载器在地球表面作平面运动，其加速度为 $\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j}$ ；此时，与运载器通过挠性材料连接的角锥棱镜受到三个力矩作用：重力矩、弯矩和惯性力矩，其作用关系如图 1 所示。

设角锥棱镜在 x 、 y 相应方向的转角和角加速度分别是 α 、 $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ 和 β 、 $\frac{d^2\beta}{dt^2}$ ；由力学分析可知，挠性材料提供的弯矩与转角 α 、 β 的正弦成正比，则根据转动

定律有

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = ma_x l_c \cos \alpha - mgl_c \sin \alpha - \frac{K}{l_c} \sin \alpha, \tag{3}$$

$$J \frac{d^2\beta}{dt^2} = ma_x l_c \cos \beta - mgl_c \sin \beta - \frac{K}{l_c} \sin \beta, \tag{4}$$

式中 J 是惯性摆的转动惯量， l_c 是惯性摆的等效摆长， K 是与挠性材料有关的比例系数。

由(3)式和(4)式，可以获得计算二维加速度的公式：

$$a_x = \frac{mgl_c \sin \alpha + (K/l) \sin \alpha + J(d^2\alpha/dt^2)}{ml_c \cos \alpha}, \tag{5}$$

$$a_y = \frac{mgl_c \sin \beta + (K/l) \sin \beta + J(d^2 \beta / dt^2)}{ml_c \cos \beta}, \quad (6)$$

特别是,当运载器作匀加速度运动时,惯性摆处于平衡状态,此时(5)式和(6)式可以写成

$$a_x = \left(g + \frac{K}{ml_c^2}\right) \tan \alpha, \quad (7)$$

$$a_y = \left(g + \frac{K}{ml_c^2}\right) \tan \beta, \quad (8)$$

(3)式~(8)式表明,当与运载器连接的惯性摆转角可以被精确测量时,运载器的二维加速度测量就能够实现。

3.2 设计参量对传感器性能的影响

3.2.1 设计参量对传感器量程的影响

(5)式和(6)式表明,加速度传感器的量程由比例系数 K 、惯性摆的质量 m 和质心 l_c 及最大测量角度 α 和 β 等参量确定。其中, K 与挠性材料及几何尺

寸有关, m 和 l_c 与角锥棱镜的高 H 有关,而最大测量角度与角锥棱镜折射率 n 和空间频率 V 有关。图 3 给出了最大测量角度随角锥棱镜折射率 n 和空间频率 V 变化的关系,显然最大测量角度主要取决于角锥棱镜的折射率 n 。因此,影响加速度传感器量程的设计参量主要有比例系数 K 、角锥棱镜的折射率 n 和高 H ,它们对传感器量程的影响如图 4 所示^[5]。

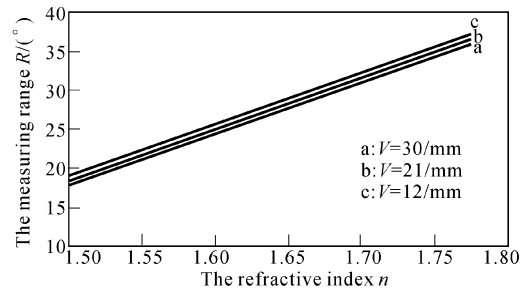


Fig. 3 The curves whose measuring range relies on n and V

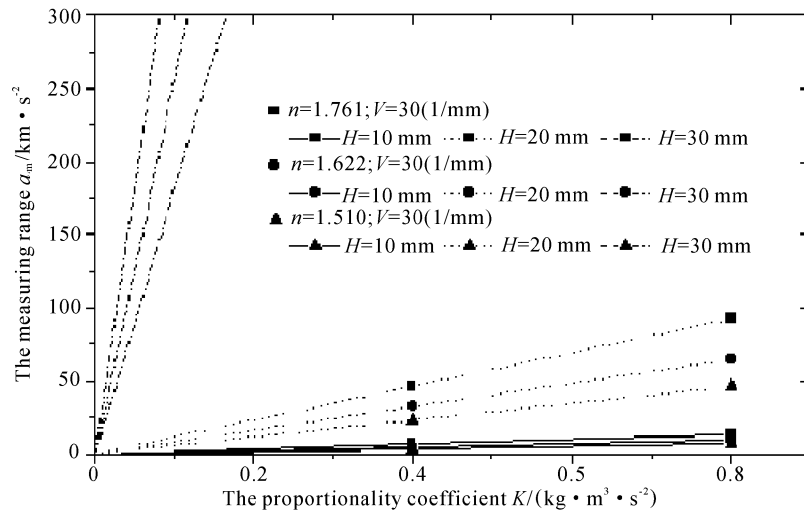


Fig. 4 The theoretical curve wherein the measuring range a_m relies on K , n and H

图 4 表明,传感器的量程随着比例系数 K 和角锥棱镜折射率 n 增大而扩大,随着角锥棱镜高 H 增大而减小,其中角锥棱镜高 H 对传感器量程的影响尤为显著。

3.2.2 设计参量对传感器分辨率的影响

二维加速度传感器的分辨率主要取决于惯性摆的测角分辨率、惯性摆的结构参量、以及挠性材料的弹性参量。由(5)式和(6)式可知,在传感器量程确定后,决定传感器最大分辨率的参量是二维 CCD 阵列像素尺寸和干涉条纹的成像焦距。像素尺寸越小,CCD 阵列的分辨率越大,则传感器的最大分辨率也越大;而干涉条纹的成像焦距越大,传感器的最大分辨率也越大。

加速度激光传感器的分辨率与设计参量的关系曲线如图 5。这里 $V=30 \text{ mm}^{-1}$, $K=0.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^3 / \text{s}^2$, 二维 CCD 阵列像素尺寸为 $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$ 。显然,棱镜的高 H 越大,挠性材料弯矩的比例系数 K 越小,则加

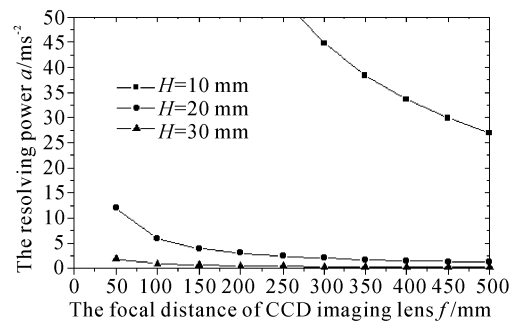


Fig. 5 The curve wherein the resolving power relies on f and H

速度传感器的量程分辨率就越大。

3.2.3 设计参量对测量精度的影响

根据公式(6),传感器测量误差可以写成

$$\sigma = \left(g + \frac{K}{ml_c^2} \right) \frac{\sigma_R}{\cos^2 R}, \quad (9)$$

式中, R 为角锥棱镜的最大测量角度,由图 3 确定; σ_R 为角度测量误差,由零角度校准仪器精度和最小分辨角决定。其中,零度角由精度 0.003° 的经纬仪校准,最小分辨角同图像传感器成像焦距有关。设计参量对测量精度的影响如图 6 所示,这里 $H = 20 \text{ mm}$, $V = 30 \text{ mm}^{-1}$, $K = 0.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^3/\text{s}^2$ 。

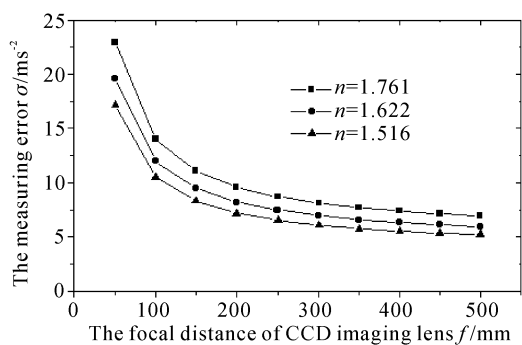


Fig. 6 The curve wherein the maximum error relies on f and n

4 传感器设计参量的选取

4.1 传感器设计参量的选取原则

上述分析表明,二维加速度激光传感器的性能指标主要取决于以下设计参量:1)角锥棱镜的高 H ;2)挠性材料的比例系数 K ;3)角锥棱镜的折射率;4)CCD图像传感器的成像焦距 f 等。其中,设计参量对传感器量程、分辨率及精度等性能指标的影响一般是矛盾的。

本文根据上述分析,给出以下设计参量选取原则:

1)先确定对传感器性能指标影响较小的设计参量

由于角锥棱镜底面正交光栅的空间频率 V 对传感器量程和灵敏度、分辨率及精度等性能指标影响很小,因此应首先确定该设计参量。

确定空间频率 V 时,应该同时考虑 CCD 成像物镜的孔径 D 以及角锥棱镜到 CCD 成像物镜的距离 L 。为了排除正交光栅高级衍射条纹的干扰,需要满足下式

$$2L[\arcsin(V\lambda)] < D < 4L[\arcsin(V\lambda)]. \quad (10)$$

2)先确定材料参量后确定结构参量

由于惯性摆可供选择的材料范围较窄,因此,在考虑传感器性能指标时应该首先选取挠性材料的比例系数 K 和角锥棱镜的折射率。

折射率对传感器量程影响较小,因此,应根据传感器分辨率、精度指标及其棱镜的透光率确定该设计参量。

3)根据传感器量程要求确定结构参量

在确定挠性材料的比例系数 K 后,根据传感器测量范围确定惯性摆的等效摆长和质量,并进而确定角锥棱镜的高 H 。

4)根据传感器的精度要求确定 CCD 成像物镜焦距

在惯性摆的材料和结构参量确定以后,选择 CCD 成像物镜的焦距 f ,以满足传感器精度和分辨率的要求。

4.2 设计参量选取

按照上述原则,我们给出一组实验模型的设计参量:

- 1)角锥棱镜的高 $H = 20 \text{ mm}$;
- 2)光栅的空间频率 $V = 30 \text{ mm}^{-1}$;
- 3)激光波长 $\lambda = 650 \text{ nm}$;
- 4)脉冲光宽度 $T = 0.3 \text{ ms}$,间隔时间 $T = 0.3 \text{ ms}$;
- 5)挠性材料的比例系数 $K = 0.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^3/\text{s}^2$;
- 6)惯性摆的等效质量 $m = 16.77 \text{ g}$;等效摆长 $l_c = 0.0198 \text{ m}$ 。

4.3 技术指标的理论值

根据文献[5]可知,在上述参量条件下,角锥棱镜的测量范围是 $\pm 35^\circ$,角分辨率是 0.004° ,而角度测量误差将不超过 0.01° 。将这些参量代入(5)式、(6)式,可以得到二维加速度激光传感器的理论指标,即

- 1)加速度传感器量程: $0 \sim 42 \text{ km/s}^2$;
- 2)最小分辨本领: 12.7 m/s^2 ;
- 3)传感器的测量误差约为 15.6 m/s^2 。

5 实验结果

将实验模型底部加工成气垫导轨滑块形状,当模型上的挡片通过光电门时,根据毫秒计的显示可以计算出加速度的数值 a_1 ;与此同时,模型内部的激光传感器给出相应加速度的两个分量 a_x 和 a_y ,其合成加速度的数值计为 a_2 。表 1 给出一组两种测量方法的对照实验结果。

Table 1 The measuring results of two-dimensional acceleration laser sensor

Order	$a_1/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	$a_2/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
1	49.09	48.71
2	97.20	97.96
3	147.9	147.0
4	119.8	119.9
5	246.0	245.2
6	297.3	296.2
7	344.0	343.1
8	390.3	391.0
9	441.8	441.3
10	492.5	491.9

结论 本文给出的加速度激光传感器设计原理,是以角锥棱镜作为惯性摆,根据 Pond 等人提出激光测角原理,并利用了作者关于激光测角和在加速度测量方面的最新研究结果。

同其它类型的加速度传感器不同,本文提出的加速度传感器可以实现二维加速度测量。另外,该加速度传感器的量程和分辨率等技术指标,可以根据不同的使用范围和要求,通过选取挠性连接材料的尺寸和性能参量而达到。我们根据理论研究,给出了这种类型加速度传感器设计参量选取的一般原则。

在本文中,我们着重从理论上对二维加速度传感器进行了系统分析。所给出的实验结果只是初步的、对比性的数据,并不是关于二维加速度传感器的定标数据。需要指出的是,实验是在匀加速情况下进行

的,而对于变加速度情况,由于实验模型还存在技术问题,目前尚未进行。

参 考 文 献

- 1 Ding Guilan, Liu Zhenfu, Cui Yuming *et al.*. An all fiberoptic accelerometer based on compliant cylinders. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(3): 340~343 (in Chinese)
- 2 Wang Baoguang, He Zhonghui, Chen Lincai *et al.*. Modeland performance analysis of structured light sensor. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(4): 481~484 (in Chinese)
- 3 Fang Xiaoyong *et al.*. Design for 2D acceleration laser sensor. *Applied Laser* (应用激光), 2002, **22**(1): 30~32 (in Chinese)
- 4 Yuan Jinghe, Chen Bo, Zeng Hongjun *et al.*. Retro-reflective properties of a micro-square-prism. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(7): 973~978 (in Chinese)
- 5 Fang Xiaoyong *et al.*. Theoretical analysis of 2D laser angle sensor and several design parameters. *Opt. and Laser Technol.*, 2002, **34**(3): 225~229
- 6 Pond C R, Texeira P D. Holographic angle sensor. *United States Patent* 4, 227, 807
- 7 Pond C R, Texeira P D. Laser Angle Measurement System. N80-32405
- 8 Ruan Shanghong *et al.*. Angle measurement of laser interference. *J. Harbin Inst. Technol.* (哈尔滨工业大学学报), 1988, **20**(2): 10~14 (in Chinese)
- 9 Cao Maosheng *et al.*. Laser angle sensor and its application in wind tunnel. *Chin. J. Sci. Instrum.* (仪器仪表学报), 1996, **17**(2): 210~212, 216 (in Chinese)

Theoretical Study of Laser Acceleration Sensor

Fang Xiaoyong

(Department of Physics, Yanshan University, Qinghuangdao 066004)

Cao Maosheng

(Research Institute of Material Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 15 October 2002; revised 3 March 2003)

Abstract: Design theory of a new acceleration sensor is advanced. The acceleration sensor adopts a cube-corner prism as inertia pendulum, and two-dimensional acceleration measurement can be realized by using laser angle measurement principle. A systematic theoretical study, selection principle of the design parameters and preliminary experimental results are given.

Key words: applied optics; laser sensor; two-dimensional acceleration measurement; sensor design; selection principle of design parameters