

文章编号: 0253-2239(2010)11-3227-06

# 一种新型的高精度激光加速度计

龙兴武 肖光宗\* 张斌

(国防科学技术大学光电学院光电工程系, 湖南长沙 410073)

**摘要** 提出一种新型的气体膜盒式双 Y 型腔双频激光加速度计,介绍了系统结构及静态下的工作原理,分析了分辨率的影响因素及影响机理。该加速度计利用新型气体膜盒作为加速度的第一级敏感元件,将输入的加速度信号转化为膜盒内气体的折射率变化,进而转化为双频激光器的拍频输出。此种结构设计使得加速度计的光学模块结构和物理性能更加稳定,也为进一步优化弹性敏感元件的结构提供了便利。同时,由于加速度信号和外界干扰对加速度计输出频率的影响途径不同,信号与干扰的分离成为可能。设计了独特的双 Y 型腔结构,使得 sp 光共用增益区并同时起振,利用 sp 光的一次差动和对称的双 Y 型腔激光器的二次差动,很大程度地抑制了温度噪声,提高了系统分辨率。理论分析表明,对典型的结构参数和测试条件,这种新型加速度计的比例因子为  $1.19 \times 10^8 \text{ Hz}/(\text{m}/\text{s}^2)$ ,分辨率可达  $1.15 \times 10^{-6} \text{ g}$ 。

**关键词** 激光技术;加速度计;气体膜盒;双频激光器

**中图分类号** TN249; TH744.5; TH824.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103011.3227

## A Novel High-Precision Laser Accelerometer

Long Xingwu Xiao Guangzong Zhang Bin

(Department of Optoelectronic Engineering, College of Optoelectronic Science and Engineering,  
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Based on gas sylphon, a novel dual-frequency laser accelerometer with double Y-shaped cavity is proposed. The static principle and the structure of the accelerometer are introduced. The influence of different factors on its resolution and their influencing mechanism are analyzed. As the first step sensing unit, the gas sylphon is used to translate the acceleration signal to the refractivity variation of the gas in it. The acceleration was measured in the form of the beat frequency of the dual-frequency laser in the end. The structure of optical module and physical property of the accelerometer are more stable due to this kind of ingenious design which also affords facilities for optimizing the parameters of the elastic sensing element. It becomes feasible to separate the signal from the noise because they affect the beat frequency through different ways. The original double Y-shaped cavity structure restrain the influence of the temperature noise to a great extent because of the first differential s and p light and the second differential of the symmetric double Y-shaped lasers. Theoretical analysis shows that the scale factor of the accelerometer is  $1.19 \times 10^8 \text{ Hz}/(\text{m}/\text{s}^2)$  and its resolution is  $1.15 \times 10^{-6} \text{ g}$ .

**Key words** laser technique; accelerometer; gas sylphon; dual frequency laser

## 1 引言

加速度计是惯性导航与制导系统中的重要元件,它将受控或被测载体沿其输入轴方向的运动加速度转化为电信号或其它形式信号。加速度计的发展已经经历了几十年的历史,种类繁多。近代激光

技术、光纤传感技术和微制造技术的发展给光学加速度计的研究提供了有利条件,光学加速度计以其高灵敏度和强抗电磁干扰能力等优点逐渐成为国内外加速度计研究的热点<sup>[1]</sup>。

激光加速度计是将沿输入轴方向的加速度转化

收稿日期: 2010-02-25; 收到修改稿日期: 2010-04-09

作者简介: 龙兴武(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事激光与光电子技术等方面的研究。

E-mail: xwlong110@sina.com

\* 通信联系人。E-mail: xiaoguangzong@163.com

为激光器的输出频率变化,通过测量拍频来敏感加速度。国内外激光加速度计的专利较多,基本上可分为两大类,1)在激光器腔内置入晶体,加速度产生的应力引起晶体折射率的变化。进而引起输出频率的变化,该方案的专利较多,清华大学精密仪器国家重点实验室正在利用此方案进行研究<sup>[2]</sup>。2)利用加速度产生的惯性力,引起弹性敏感元件的形变,进而引起输出频率的变化。Ficalora等<sup>[3]</sup>提出了利用激光器高反端镜形变引起的横模间差频变化来测量加速度的方案。Litton公司的Martin等<sup>[4,5]</sup>提出了L型腔的结构,加速度引起激光器一臂的形变进而产生左右旋偏振光的差频。总之,以上方案各有特色,但由于原理和技术上均存在着各自固有的缺点,目前世界上尚未有高精度激光加速度计研制成功的相关报道。

本文提出一种新型的高精度激光加速度计系统方案——双Y型腔双频激光加速度计(专利申请号200910227028.8),介绍了这种加速度计的系统结构,建立了静态下的理论模型,详细分析了影响其分辨率的因素及影响机理,指出了方案设计中的巧妙之处对提高系统分辨率的作用,估算了系统的比例因子和分辨率。

## 2 系统结构与原理

### 2.1 系统结构

双Y型腔双频激光加速度计的系统结构如图1所示,它由光学模块、工作点选择与控制模块和信号采集与处理模块等部分组成。

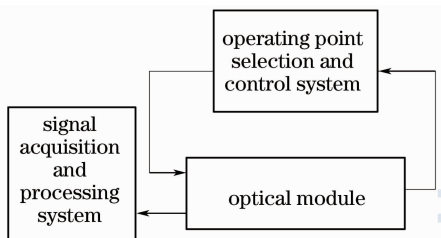


图1 双Y型腔双频激光加速度计的系统结构示意图

Fig.1 Structure of double Y-shaped cavity dual-frequency laser accelerometer

光学模块是整个加速度计的核心,如图2所示。它由两支对称的Y型腔双频激光器(图3)和新型气体膜盒(图4,以下简称“膜盒”)组成。每支双频激光器均用微晶玻璃材料一体化设计、加工完成。信号光(s光)和干扰光(p光)共用增益区即AB段,不妨称之为共用腔。s光和p光被一偏振分光镜分

开,分别构成两个非增益区分支,即BD段和BC段,不妨称之为非共用腔。 $M_i (i=1,2,3)$ 为高反片或输出片。膜盒也由微晶玻璃材料做成,它被一超薄石英膜片(以下简称“膜片”)分成对称的两部分,其中均充有相同压强的传感气体,这两部分通过小通气管与非共用腔BD段相通。此处的膜片即为敏感加速度的弹性元件。为提高系统的灵敏度,在膜片中心以光胶的方式加入一圆柱形质量块。

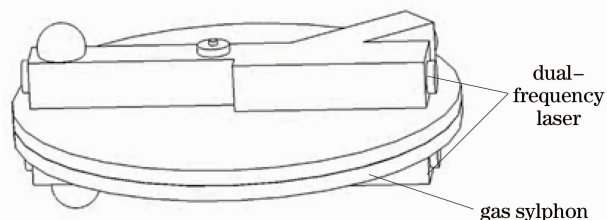


图2 光学模块的结构示意图

Fig.2 Structure of optical module

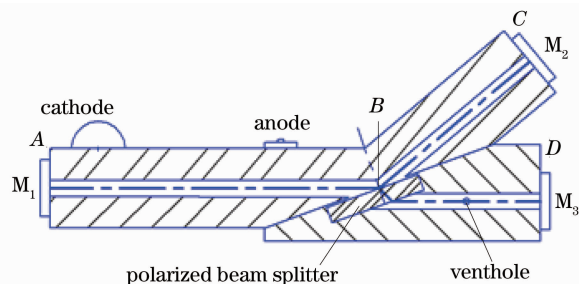


图3 Y型腔双频激光器的结构

Fig.3 Structure of Y-shaped cavity dual-frequency laser

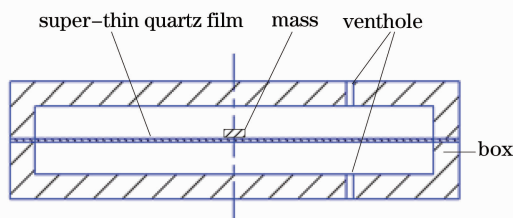


图4 气体膜盒的结构示意图

Fig.4 Structure of gas siphon

工作点选择与控制模块用来选择和控制加速度计的工作点,采用光强差的方法对双频激光器稳频,保证s偏振光和p偏振光的光强相等,以避免某一偏振光因移出激光器的出光带宽范围而熄灭。信号采集与处理模块用来接收两支Y型腔双频激光器的输出拍频信号,计算出的两拍频之差即为加速度计系统的最终输出信号。

这种新型加速度计系统的基本工作过程如下:当垂直于石英膜片方向有加速度输入时(假设加速度方向沿图5中箭头方向向上),石英膜片产生弹性形变,膜盒的上半部分体积增大,下半部分体积减

小,则与膜盒上半部分相连的  $BD$  段内气体密度减小,折射率也相应减小,光学长度也随之减小,从而引起  $BC$  段和  $BD$  段光学长度差的改变,这样该支双频激光器的输出拍频,亦即  $s$  光和  $p$  光的频率差也将发生变化。 $BD$  段部分不妨称为“传感气体管”。同理,图 2 中下面的双频激光器的输出拍频将发生与之相反的变化。下面将详细分析加速度计静态下的工作原理。

## 2.2 基本原理

### 2.2.1 气体膜盒的静态力学分析

当垂直于膜片方向有加速度输入时,膜片将受到自身和质量块质量产生的惯性力作用而发生弹性形变,膜片上下部分的体积将会改变,进而引起膜片上下部分的气体流动,从而达到新的密度分布。在这个过程中,气体流动时受到的粘滞力将影响系统的响应时间,形成系统的压膜阻尼;而气体状态转换时的热交换也会为系统带来误差,这些都会影响系统的动态性能,限于篇幅,将另文讨论。本文着重分析系统的静态性能,即假定系统处于平衡状态,且无热量交换。

当垂直于膜片方向输入的加速度为  $a$  时,膜片形变和受力分析如图 5 所示,膜片的自身质量产生的惯性力载荷为  $q_0$ ,质量块对膜片产生的惯性力载荷为  $q_m$ ,膜片上下两部分气体的压强对膜片产生的载荷分别为  $p_1$  和  $p_2$ 。根据力学知识<sup>[6,7]</sup>和气体状态方程,可得加速度  $a$  引起的膜盒上(下)部分的体积变化为

$$\Delta V = \frac{5}{128} \frac{R^4(m+m_0)}{D(1+\eta)} a, \quad (1)$$

式中  $\eta = \frac{5}{64D} \cdot \frac{p_0 R^6}{V_0}$ ,  $p_0$  分别为无加速度输入时膜盒上(下)部分气体的压强,  $R = d/2$  为膜片半径,  $V_0 = \pi R^2 \cdot \epsilon_1 + \pi(\phi/2)^2 \cdot L_1$ , 为膜盒和传感气体管初始总体积,  $L_1$  为传感气体管长,  $\phi$  为传感气体管直径,  $\epsilon_1$  为膜盒的上半部分高度,  $m_0$  为膜片质量,  $m$  为质量块的质量,  $D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)}$  为石英膜片的弯曲刚度,  $\mu$  为

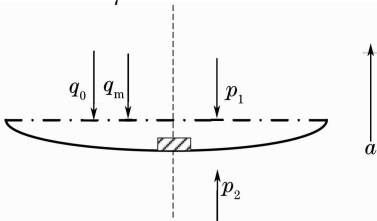


图 5 石英膜片的受力

Fig. 5 Force diagram of super-thin quartz film

膜片材料的泊松比,  $E$  为其杨氏模量。

由(1)式得加速度  $a$  引起的传感气体的密度变化为

$$\Delta \rho = \rho \frac{\Delta V}{V_0}, \quad (2)$$

式中  $\rho$  为无加速度输入时传感气体的密度。由格拉德斯通-戴尔(Gladstone-Dale)公式  $(n-1)/\rho = k$ , 其中  $k$  为格拉德斯通-戴尔常数(G-D 常数), 并利用(1)、(2)式可得加速度  $a$  引起的传感气体的折射率变化为

$$\Delta n_1 = \frac{5}{128} \cdot \frac{k\rho R^4(m+m_0)}{V_0 D(1+\eta)} \cdot a. \quad (3)$$

加速度引起传感气体折射率的变化称为该加速度计系统的第一级敏感, 气体膜盒也称为“第一级敏感元件”。

### 2.2.2 光学模块的传感机理

先分析单支 Y 型腔双频激光器敏感加速度的工作原理。

由激光器的驻波条件, Y 型腔双频激光器中的激光频率须满足谐振条件

$$\nu = \frac{1}{2} \cdot \frac{Nc}{n_1 L_1 + n_0 L_0},$$

式中  $N$  为自然数,  $c$  为光速,  $L_0$  为共用腔长度,  $n_0$  为增益气体的折射率,  $n_1$  为传感气体折射率。由上式可得传感气体的折射率变化引起谐振频率的变化为

$$\Delta \nu = \nu_0 \frac{L_1}{n_1 L_1 + n_0 L_0} \Delta n_1. \quad (4)$$

气体折射率的变化引起双频激光器输出拍频的变化称为该加速度计系统的第二级敏感, 双频激光器称为“第二级敏感元件”。

将(3)式代入(4)式可得, 加速度  $a$  引起的谐振频率变化  $\Delta \nu$  为

$$\Delta \nu = \frac{5}{128} \cdot \frac{\nu_0 L_1}{n_1 L_1 + n_0 L_0} \cdot \frac{k\rho R^4(m+m_0)}{V_0 D(1+\eta)} \cdot a. \quad (5)$$

令

$$S_F = \frac{5}{128} \cdot \frac{\nu_0 L_1}{n_1 L_1 + n_0 L_0} \cdot \frac{k\rho R^4(m+m_0)}{V_0 D(1+\eta)},$$

则(5)式可写为

$$\Delta \nu = S_F a, \quad (6)$$

$S_F$  称为单支 Y 型双频激光器敏感加速度的比例因子。

对加速度计中的两支 Y 型腔双频激光器, 如 2.1 节所述, 当垂直于石英膜片方向输入的加速度为  $a$  时, 它们的拍频输出分别为  $\Delta \nu_1 = S_{F_1} a$  和  $\Delta \nu_2 = -S_{F_2} a$ , 那么加速度计的输出信号为

$$\Delta \nu = (S_{F_1} + S_{F_2}) a. \quad (7)$$

### 3 加速度计性能分析

#### 3.1 加速度计输出信号分析

单支 Y 型腔双频激光器的输出拍频应包括两部分,一部分是非加速度因素引起的 s 光和 p 光的拍频,用  $\Delta\gamma_0$  表示;另一部分是由加速度引起的传感气体管的光学腔长变化产生的拍频,如(6)式所示。所以实际上单支 Y 型激光器的输出拍频应写为

$$\Delta\gamma = \Delta\gamma_0 + \Delta\nu. \quad (8)$$

为下文表述方便,去掉(8)式  $\Delta$  符号,写为

$$\gamma = \gamma_0 + \nu. \quad (9)$$

这样,以下标表示两支不同的激光器,结合(6)式,则两支 Y 型腔双频激光器拍频的频率差可写为

$$\Delta\gamma = (\gamma_{01} - \gamma_{02}) + (S_{F_1} + S_{F_2})a, \quad (10)$$

这就是双 Y 型腔双频激光加速度计的实际输出信号表达式。

(10)式中令

$$\gamma_0 = \gamma_{01} - \gamma_{02}, \quad (11)$$

称为加速度计的零偏。

由(10)式可见,决定双 Y 型腔 sp 双频激光加速度计分辨率的因素主要有两个方面:1)非加速度因素引起 s 光和 p 光的频率差的随机变化,即零偏  $\gamma_0$  的随机变化,可称之为噪声;2)单位加速度引起的 s 光和 p 光的频率差  $(S_{F_1} + S_{F_2})a$ 。后者相对于前者越大则分辨率越高,但拍频过高则给信号处理带来不便,同时也会使加速度计量程减小,因此尽可能减小前者的影响是提高分辨率的有效手段。

由(10)式第二部分可见,通过双 Y 型腔 sp 双

频激光器的拍频差动可以增大比例因子,提高系统灵敏度,但更重要的,由(11)式可看出,通过差动可以在一定程度上抑制非加速度因素(如温度)引起的噪声。系统的噪声在很大程度上限制着系统分辨率的提高,下面主要讨论温度对系统噪声的影响。

#### 3.2 温度引起的噪声

##### 3.2.1 温度噪声的分析与估计

温度引起的加速度计系统零偏的随机漂移,称为温度噪声。下面仅讨论温度对单支 Y 型腔双频激光器拍频的影响。

单支 Y 型腔双频激光器拍频的随机漂移主要是激光器非共腔部分,即图 3 中 BC 段和 BD 段的温度梯度随机变化引起的。引起单支 Y 型腔双频激光器温度变化的热源有两个方面:1)激光器增益介质放电产生的热量,这是自身热源;2)环境温度变化。由于后者是可控的,而自身热源是无法消除的,现主要讨论前者。

设共用腔部分长度为  $L_0$ ,非共用腔部分长度分别为  $L_1$  和  $L_2$ ,激光器材料的热膨胀系数为  $\alpha$ 。由激光器谐振条件,当共用腔部分温度变化  $\Delta T_0$ ,非共用腔部分温度变化分别为  $\Delta T_1$  和  $\Delta T_2$  时, s 光和 p 光的频率变化之差为

$$\Delta\nu' = \nu_0 \frac{\Delta T_0 \alpha L_0 + \Delta T_1 \alpha L_1}{L_0 + L_1} - \nu_0 \frac{\Delta T_0 \alpha L_0 + \Delta T_2 \alpha L_2}{L_0 + L_2}. \quad (12)$$

假设非共用腔部分长度之差为  $2l$ ,则  $L_1$  和  $L_2$  分别可写为  $L_2 = L_0' - l$ ,这样(12)式可写为

$$\Delta\nu' = \nu_0 \alpha \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)(L_0 L_0' + L_0'^2 - l^2) + (\Delta T_1 + \Delta T_2 - 2\Delta T_0)l L_0}{(L_0 + L_0')^2 - l^2}.$$

当  $l \ll L_0$  时忽略  $l^2$  项上式可进一步化简为

$$\Delta\nu' = \nu_0 \alpha \frac{L_0'}{L_0 + L_0'} (\Delta T_1 - \Delta T_2) + \nu_0 \alpha \frac{l L_0}{(L_0 + L_0')^2} (\Delta T_1 + \Delta T_2 - 2\Delta T_0), \quad (13)$$

式中 Y 型腔双频激光器各参量典型值取  $\nu_0 = 4.7 \times 10^{14}$  Hz,  $\alpha = 10^{-8}/^\circ\text{C}$ ,  $L_0 = 85$  mm,  $L_0' = 35$  mm, 则(13)式可写为

$$\Delta\nu' = 1.37 \times 10^6 (\Delta T_1 - \Delta T_2) + 2.77 \times 10^7 l (\Delta T_1 + \Delta T_2 - 2\Delta T_0). \quad (14)$$

从(14)式可见,为减小温度引起的噪声,首先必须保证非共用腔部分几何长度差  $2l$  尽量小。目前

的光学加工水平可保证  $2l \leq 10^{-6}$  m,而加速度计稳定工作时温度变化  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  和  $\Delta T_0$  一般较小,应该小于  $10^\circ\text{C}$ ,这样(14)式中第二项明显小于第一项。因此温度对噪声的影响主要体现在温度梯度的随机变化上,即非共用腔部分 BC 段和 BD 段的温度差的随机变化。

##### 3.2.2 温度噪声的抑制方法

光学模块主要通过以下几个方面的优化设计,从物理结构上抑制温度噪声:

1) 在双 Y 型腔 sp 双频激光加速度计中增益区作为自身热源无法消除,这将成为加速度计腔体产生温度梯度变化的根源,而增益区部分的热形变也

是最大的。单支 Y 型腔 sp 双频激光器共用增益区,通过 sp 差动基本消除了共用腔部分温度变化对输出拍频的影响;

2) 由(10)式中第二部分可见,保证单支 Y 型腔 sp 双频激光器非共用腔长度差尽可能小,可以减小大温度变化时对输出拍频的影响,目前的光学加工水平可以大大降低非共用腔部分自身热形变引起的噪声,而非共用腔部分 BC 段和 BD 段的温度差成为温度噪声的主要因素;

3) 由(10)式可见,两支 Y 型腔 sp 双频激光器输出拍频的第二次差动,进一步减小了温度梯度变化引起的加速度计零偏的随机变化。

#### 4 加速度计的比例因子和分辨率

由于光学模块的分辨率是制约系统分辨率的根本因素,因此这里仅分析光学模块的分辨率<sup>[8]</sup>。以下为典型的加速度计参数:膜盒的结构和材料参数为  $t=0.07\text{ mm}$ ,  $R=40\text{ mm}$ ,  $\epsilon_1=0.5\text{ mm}$ ,  $\rho_0=2530\text{ kg/m}^3$ ,  $\mu=0.17$ ,  $E=72\text{ GPa}$ ,  $\alpha=10^{-8}/\text{ }^\circ\text{C}$ ;膜片上质量块的质量选为膜片质量的 100 倍;如果将膜盒内传感气体选择为 SF<sub>6</sub> 气,其物理参数分别为  $\rho=6.52\text{ kg/m}^3$  (0 °C, 101.325 kPa),  $n=1.000783$ ,  $k=0.1201\text{ cm}^3/\text{g}$ ;激光器结构参数可选为  $L_0=85\text{ mm}$ ,  $L'_0=35\text{ mm}$ ,  $2l=10^{-6}\text{ m}$ ;激光器增益气体压强一般很小,其折射率可取为  $n_0=1$ ;传感气体管 BD 段直径  $\phi=2\text{ mm}$ 。将以上参数代入(5)式可得双 Y 型腔双频激光加速度计的比例因子

$$S_F = 1.19 \times 10^8 \text{ Hz}/(\text{m/s}^2). \quad (15)$$

Y 型腔双频激光器中非共用腔 BC 和 BD 段距离可控制在 1 cm 左右,距离较近,而且上下两个 Y 型腔双频激光器输出拍频的再次差动也可以一定程度地减小温度梯度随机变化对系统输出差频的影响。通过某些技术手段,假设温度梯度的随机变化 ( $\Delta T_1 - \Delta T_2$ ) 可控制在  $0.001\text{ }^\circ\text{C}/\text{cm}$ ,则由(14)式可计算得温度变化引入的噪声为

$$\gamma_0 = 1.37 \times 10^3 \text{ Hz}. \quad (16)$$

由(15)和(16)式可计算出该噪声引起的系统输入可达  $1.15 \times 10^{-5}\text{ m/s}^2$  即  $1.15 \times 10^{-6}\text{ g}$ ,这就是光学模块的分辨率。

当然,这里只是针对典型参数进行了系统比例因子和分辨率的初步估算。显然,可以通过选择高密度高折射率传感气体、增加质量块质量和优化结构参数等方法进一步提高系统的比例因子和分辨率,还可以通过其它隔热手段减小非共用腔部分温

度梯度的随机变化。

#### 5 结 论

提出了一种新型的双 Y 型腔双频激光加速度计,详细地分析了系统的基本工作原理,研究了影响系统分辨率的因素及其影响机理。这种加速度计主要有以下几个方面优势:

首先利用气体膜盒作为加速度的第一级敏感元件,将加速度转化为膜盒内气体的折射率变化,这种设计有三大优点:

1) 由于系统是通过气体折射率将加速度信号传递到激光器的光路上,进而改变激光器的光学腔长的,而不改变激光器谐振腔的几何长度,与已有的其它方案相比,这种方案中加速度的输入并不影响激光器的光路结构,因此加速度计的光学模块结构和物理性能更加稳定;

2) 由于气体膜盒和激光器完全分离,气体膜盒结构完全不受激光器限制,这种设计为进一步优化弹性敏感元件的结构提供了便利,可以通过改变气体膜盒(包括质量块)的各种参数来提高系统的分辨率和其它性能指标;

3) 加速度信号是通过气体折射率传递到加速度计上的,而外界噪声(主要指温度)是通过改变激光器的几何腔长传递到加速度计上的,它们对加速度计输出频率的影响途径不同,因此信号与噪声的分离成为可能,可以通过数字信号处理的方法进一步提高系统的分辨率。

其次设计了独特的双 Y 型腔结构,使得 sp 光共用增益区并同时起振,利用 sp 光的一次差动和对称的双 Y 型腔激光器的二次差动,很大程度的抑制了温度变化引起的噪声。单支双频激光器输出频率的一次差动基本消除了共用腔部分的温度影响,而两支双频激光器输出拍频的第二次差动则主要抑制由非共用腔部分温度梯度带来的零偏随机变化。当然,第二次差动对温度噪声的抑制程度则取决于加速度结构的对称性、加速度计上温度分布情况等。

#### 参 考 文 献

- 1 Liu Huilan, Lin Heng, Li li *et al.*. Researches and development of optical accelerometer [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(s): 140~143  
刘惠兰,林恒,李莉等. 光学加速度计的技术研究与发展 [J]. *光学技术*, 2005, **31**(s): 140~143
- 2 Zhang Shulian. The Theory of Orthogonal Polarized Laser[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. 224~228  
张书练. 正交偏振激光原理[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

- 224~228
- 3 Joseph P. Ficalora, Oak Ridge, N. J. High Accuracy Laser Accelerometer[P]. United States Patent, 5456112 Oct. 10, 1995
  - 4 Graham J. Martin, Canoga Park, Calif. Non-planar Ring Laser Accelerometer[P]. United States Patent, 4637255 Jan. 20, 1987
  - 5 Frederick Vescial, Frederick Aronowitz. Laser Accelerometer [P]. United States Patent, 4918987 Apr. 24, 1990
  - 6 Xu Zhiguan. A Concise Course in Elasticity [M]. Beijing: High Education Press, 2002. 200~203  
徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京:高等教育出版社, 2002. 200~203
  - 7 Liu Guangyu, Zhuang Zhaokang. Instrument Elastic Element [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1981. 123~127  
刘广玉, 庄肇康. 仪表弹性元件[M]. 北京:国防工业出版社, 1981. 123~127
  - 8 General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of P. R. C. Guidance for the Assessment Characteristics of Measuring Instruments [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2003. 68~69  
国家质量监督检验检疫总局计量司. 测量仪器特性评定指南 [M]. 北京:中国计量出版社, 2003. 68~69