

文章编号:1671-8879(2015)05-0007-06

基于三轴加速度传感器的路面坡度测量仪

王会峰^{1,3}, 柴彩萍², 汪贵平^{1,3}, 王晓艳^{1,3}, 赵雪丹^{1,3}, 胡敏芳^{1,3}, 曹 静^{1,3}

(1. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西交通职业技术学院 公路工程系, 陕西 西安 710082; 3. 长安大学 陕西省道路交通智能检测与装备工程技术研究中心, 陕西 西安 710064)

摘 要:为了实现施工中路面坡度的快速便携式检测,提出了一种基于加速度传感器的便携式坡度快速检测仪方案,该方案利用安装在测试设备上的高精度三轴加速度传感器,分别测量 x 、 y 、 z 这 3 个方向上的加速度值,在只受重力的静态条件下,利用重力矢量在加速度三轴的矢量投影建立数学模型,解算出坡度倾角测量解算模型,并进一步探究了基于加速度传感器技术的重力模型解析,对相关的误差分析、传感器失调及传感器灵敏度进行了简要分析,并基于以上原理设计了以 Cortex-M3 的 ARM 为核心的坡度便携式检测仪硬件系统,给出了设计中相关硬件框图及数据核心处理算法。研究结果表明:该系统测角精度优于 $30'$,检测时间不大于 0.3 s,并且可以进行数据的自动存储和人机交互,能够满足工程实际中对高速公路与城市道路横坡、挡土墙坡度等几何参数进行高精度、自动化检测的需求。

关键词:道路工程;坡度测量;加速度;误差;矢量;投影

中图分类号:U416.216

文献标志码:A

Portable slope measuring instrument based on three axis accelerometer

WANG Hui-feng^{1,3}, CHAI Cai-ping², WANG Gui-ping^{1,3}, WANG Xiao-yan^{1,3},
ZHAO Xue-dan^{1,3}, HU Min-fang^{1,3}, CAO Jing^{1,3}

(1. School of Electronic & Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
2. Department of Highway Engineering, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710082, Shaanxi, China; 3. Road Traffic Intelligent Detection and Equipment Engineering Technology Research Center of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to detect the slope portably and rapidly in road construction, a new kind of portable measuring instrument scheme was designed based on three-axis accelerometer. The acceleration magnitudes at x , y , or z direction were measured respectively by use of the high precise three-axis acceleration sensor which was mounted on the test equipment. Under the static condition only with gravity, the mathematical model was established to derive angle of slope by using the vector projection of gravity vectors in the three acceleration coordinate axis. Furthermore, the gravity analytical model based on the acceleration sensor technique was explored, and the measurement error, sensor maladjustment and sensitivity were also analyzed briefly. Based on the theory presented above, the hardware system of

收稿日期:2015-04-09

基金项目:国家自然科学基金项目(61265006);陕西省科学技术研究发展计划项目(工业攻关计划)(2013K09-17);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G1321046);陕西省教育厅科研计划项目(12JK0806)

作者简介:王会峰(1976-),男,山西运城人,副教授,工学博士,E-mail:conquest8888@126.com。

portable gradient detector was designed, in which an ARM (advance RISC machine) of CortexTM-M3 was taken as the core. The hardware block diagrams in this design and the core data processing arithmetic were also presented. The results show that the precision of measurement angle in this system is superior to $30'$ and the detection time is less than 0.3 s. In addition, the instrument can store data automatically and realize man-machine interaction. The instrument designed based on the method presented in this paper can meet the requirements of high-precision and automated detection of geometric parameters in engineering practice, such as the gradient of cross slope and retaining wall of expressway and urban road. 1 tab, 7 figs, 16 refs.

Key words: road engineering; slope measurement; accelerated velocity; measurement error; vector; projection

0 引言

公路建设中质量工程是关键,任何一个环节、部位出现问题,都会给工程的整体质量带来严重后果,直接影响到其使用效益^[1]。工程检测作为工程质量控制的途径和手段,越来越受到各级施工单位和管理部门的高度重视。随着中国道路建设及交通运输业的发展,精确、快速、全面地检测高速道路的几何参数,对高速路面的行车安全性能以及工程施工质量评价和养护管理都具有重要意义^[2]。公路坡度包括路肩横坡、路堤边坡、路堑边坡、路面纵坡等。目前存在的坡度测量方法有多种^[3]。《公路路基路面现场测试规程》(JTJ E60—2008)给出利用精密水准仪和塔尺进行路面横坡的测量^[4];杨顺洪采用车载水准仪连续测量路面的横坡参数^[5];文献[6]给出了机械坡度表测量方法;文献[7]基于线结构光成像法进行测量;文献[8]提出利用激光指向和成像法进行坡度测量;文献[9]则利用全站仪进行公路几何参数的检测。这些测量方法直观、简单,但费时、费力、效率一般较低、自动化程度低,无法满足现代高速公路几何参数测量的要求。鉴于此,本文基于加速度矢量原理研究公路坡度检测装置,该装置在测量中不受放置方式的限制,精度高,对坡度的工程检测具有现实意义^[9]。

1 加速度矢量与坡度测量原理

根据道路和岩土工程坡度的定义,如能精确测量出斜坡平面的倾角,就可计算出其坡度值。

引入三轴加速度矢量,可在全球范围确定传感器的方向。设测得的唯一加速度为重力所致(静止状态下),可通过传统的直角坐标 (x, y, z) -球面坐标 (ρ, θ, Φ) 转换法来表征 xy 平面倾斜角与各轴测得加速度之间的关系^[10]。通过基本三角函数证明

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{A_{xout}}{\sqrt{A_{yout}^2 + A_{zout}^2}} \right) \quad (1)$$

$$\Psi = \tan^{-1} \left(\frac{A_{yout}}{\sqrt{A_{xout}^2 + A_{zout}^2}} \right) \quad (2)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{A_{xout}^2 + A_{yout}^2}}{A_{zout}} \right) \quad (3)$$

式中: A_{xout} 、 A_{yout} 、 A_{zout} 分别为所测得各轴的加速度值,所得角度如图1所示; θ 为水平线与加速度计 x 轴的夹角; Ψ 为水平线与加速度计 y 轴的夹角; φ 为重力矢量与 z 轴的夹角。

三轴方案中检测倾角的方法是基于一个参照点分别确定加速度计各个轴的角度,参照点为器件的典型取向。其中, x 和 y 轴位于水平面内(0 g场), z 轴与水平面垂直(1 g场),图1(a)。

在 x 轴和 y 轴的起点0 g处以及 z 轴上的1 g处,计算得到的所有角度均为 0° 。如果将水平线作

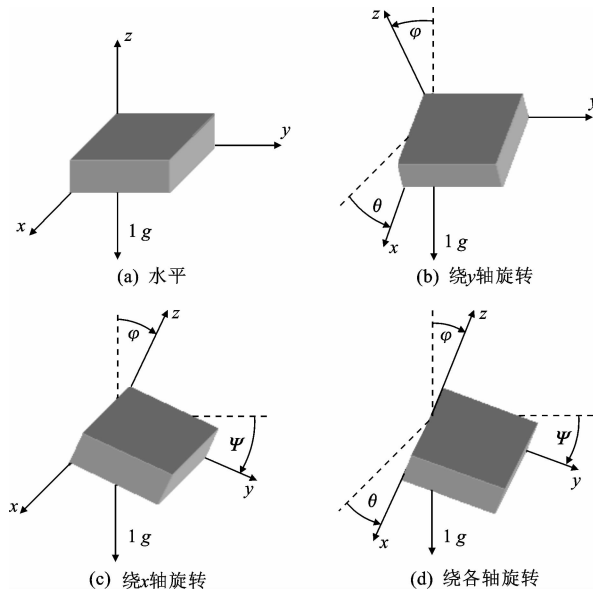


图1 独立倾斜检测角度模型

Fig. 1 Model of acceleration vector

为 z 轴的参照,则正角表示加速度计对应的正轴指向水平面上方,负角则表示该轴指向水平面下方。由于采用了反正切函数和加速度比,因此,有效增加灵敏度可精确测量单位球面周围所有点的角度。

倾角解算是根据三轴加速度值建立模型,以确定测量仪与水平面夹角,即测得坡度倾角。根据上述建模分析可得,在三轴检测倾斜角的情况下,假设加速度模块正常安装(z 轴垂直向上, x 、 y 轴与水平面平行),将加速度模块与斜坡平行放置,那么加速度模块与水平面夹角即为斜坡与水平面的夹角,即所需要测量的坡度。又由图 1 可知,加速度模块与水平面的夹角正好等于加速度模块 z 轴与重力矢量垂线的夹角。所以,只要测得 z 轴与重力矢量夹角,即可测得坡度值。

在只受重力作用的静态力场中,3 个轴所产生的加速度都为重力矢量在该轴上的投影,由于 3 个轴相互垂直放置,故可得 3 个轴的加速度矢量和等于重力加速度,即有式(4)、式(5)

$$1 g = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \quad (4)$$

$$\cos(\varphi) = A_z / (1 g) \quad (5)$$

式中: A_x 、 A_y 、 A_z 分别为三轴加速度; g 为重力加速度。

$1 g$ 为常量,而实际测量中三轴加速度存在偏移,且不同纬度的重力加速度值不同,并非一个确定的数;再者由于现实中纯粹静态重力场很难实现,例如在震动或移动过程中存在 $A_z > 1 g$ 。所以结合式(4)、式(5)可得

$$\cos(\varphi) = \frac{A_z}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}} \quad (6)$$

对式(6)进行反余弦运算可得

$$\varphi = \arccos\left(\frac{A_z}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}}\right) \quad (7)$$

由此即可得倾斜度,单位为弧度,要转换为角度还需乘以系数 57.29。

2 传感器失调和灵敏度失配误差校准

上述原理是基于理想加速度计的。这相当于一种无 $0 g$ 失调且具有完美灵敏度的器件(模拟传感器表示为 mV/g ,数字传感器为 LSB/g)。尽管传感器已经过调整,但在系统组装后,器件上的任何静态应力都可能影响灵敏度和导致失调。这种因素以及厂家校准的局限性,可能导致误差过大,因此需要综合考虑各项误差。

2.1 失调误差的影响

假设存在一种双轴解决方案,具有完美灵敏度,

但 x 轴读数为 $50 mg$, y 轴读数为 $1 g$ 。计算出的角度为 2.9° ,误差达 2.9° 。 $\pm 18^\circ$ 下, x 轴读数为 $50 mg$, y 轴读数为 $-1 g$,计算出一个角度值,误差为 -2.9° 。可得到计算角度与实际角度间的误差如图 2 所示。与系统的目标精确度相比,失调误差不但可能过大,而且可能发生变化^[11-13],因而增加了通过简单校准消除误差的难度。

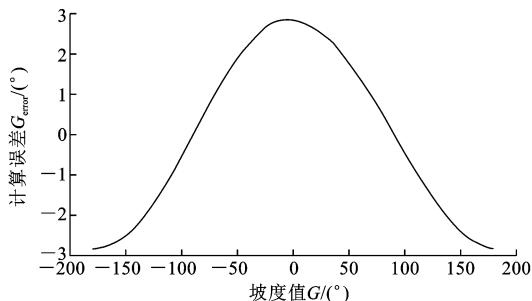


图 2 加速度失调引起的计算角误差

Fig. 2 Error aroused by acceleration sensor output offset

2.2 灵敏度失配误差的影响

在双轴倾斜检测应用中,加速度计灵敏度引起的主要误差表现在目标轴之间存在灵敏度差(单轴与此不同,实际灵敏度与预期灵敏度之间的任何偏差都会导致误差)^[14-16]。由于采用的是 x 轴和 y 轴之比,因此在灵敏度相同的情况下,多数误差都是可以消除的。

假设采用的是多轴方案,其具有理想的 y 轴灵敏度, x 轴灵敏度为 $\pm 5\%$ 。这就意味着在 $1 g$ 场中, y 轴读数为 $1 g$, x 轴为 $1.05 g$ 。图 3 显示了该灵敏度失配导致的角误差。与失调误差相似,灵敏度失配误差在整个旋转范围内变化,增加了在计算出倾斜角后补偿误差的难度。

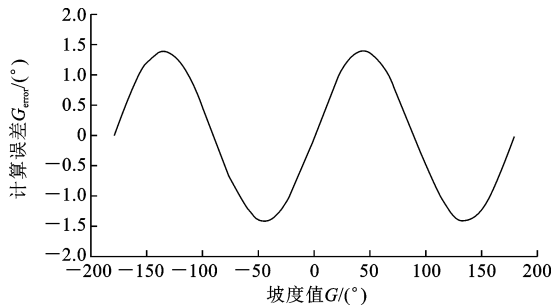


图 3 加速度计灵敏度失配引起的计算角误差

Fig. 3 Error aroused by sensor sensitivity mismatch

2.3 误差校准

当失调和灵敏度失配二者引起的误差相加时,结果误差可能非常大。为了减少这种误差,应对其校准,并通过校准后的加速度来计算倾角。在考虑失调和灵敏度的影响时,加速度计输出 A_{out} 为

$$A_{\text{out}} = A_{\text{off}} + G_{\text{gain}} A_{\text{actual}} \quad (8)$$

式中: A_{off} 为失调误差(g); G_{gain} 为加速度计的增益, 理想值为 1; A_{actual} 为作用于加速度计的实际加速度值(g)。

简单的校准法是: 假定增益为 1, 在此基础上测量失调。这种校准方法会将系统精度限制为未校准前灵敏度的误差。这种简单校准法可通过将目标轴置于 $0\text{ }g$ 场并测量输出来实现。然后, 从加速度计的输出中减去该值, 再对信号进行处理。这种方法通常称为无转向或单点校准法, 因为器件的典型取向将 x 轴和 y 轴置于 $0\text{ }g$ 场中。若采用三轴器件, 则至少应在 z 轴中考虑 1 个转向或第 2 个点。

本文采用的精确校准法是在每个目标轴上使用 2 个点(双轴设计最多为 6 个点)。当将轴置于 $1\text{ }g$ 和 $-1\text{ }g$ 场时, 其测得的输出为

$$A_{1\text{ }g} = A_{\text{off}} + 1\text{ }g G_{\text{gain}} \quad (9)$$

$$A_{-1\text{ }g} = A_{\text{off}} - 1\text{ }g G_{\text{gain}} \quad (10)$$

这 2 个点可用于确定失调和增益, 即

$$A_{\text{off}} = 0.5(A_{1\text{ }g} + A_{-1\text{ }g}) \quad (11)$$

$$G_{\text{gain}} = 0.5 \frac{A_{1\text{ }g} - A_{-1\text{ }g}}{1\text{ }g} \quad (12)$$

式中: $1\text{ }g$ 、 $-1\text{ }g$ 为 2 个测量值, 即 $A_{1\text{ }g}$ 和 $A_{-1\text{ }g}$ 的单位为 g 。

这种校准方法还有助于减少跨轴灵敏度影响, 因为在测量时, 垂直轴处于 $0\text{ }g$ 场。应用时先从加速度计测量值中减去失调, 然后用得到的结果乘以增益。

$$A_{\text{actual}} = \frac{A_{\text{out}} - A_{\text{off}}}{G_{\text{gain}}} \quad (13)$$

采用式(8)~式(13)计算 A_{off} 和 G_{gain} 时, 均假定加速度值 $A_{1\text{ }g}$ 和 $A_{-1\text{ }g}$ 的单位为 g 。如果采用单位为 mg 的加速度值, 则式(11)中 A_{off} 的计算保持不变, 但式(12)中 G_{gain} 的计算结果须除以 1 000, 以考虑单位的变化。

3 便携式坡度检测仪样机设计

根据上述原理和误差分析校准, 开发了坡度测量的原理样机, 并以此样机在固定坡度上进行了测试。

3.1 系统总体原理

坡度测量系统主要由三轴加速度传感器、微处理器、信号调理电路和人机交互电路组成, 如图 4(a) 所示。微处理器采用了基于 CortexTM-M3 核心的 ARM, 将加速度传感器 ADXL345 在 x 、 y 、 z 三轴的加速度值数据采集回来, 加速度传感器的数据通信采用 I²C 串口通信模式。系统的软件设计框架如图 4(b) 所示。

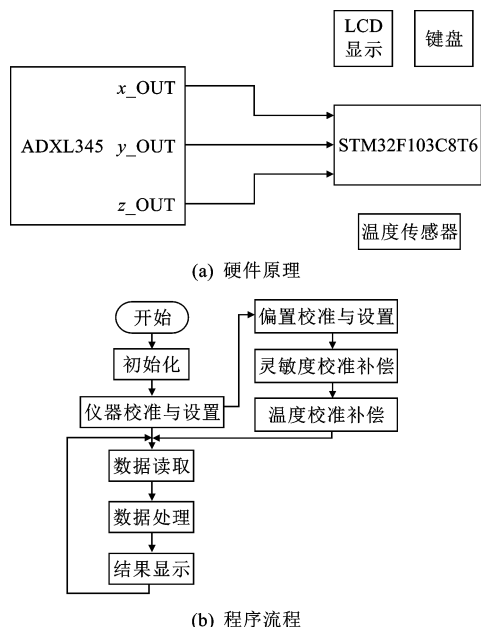


图 4 坡度测量仪原理样机软硬件

Fig. 4 Prototype frame of slope measuring apparatus

3.2 数据采集

数据采集为采集重力加速度传感器的原始数据。传感器操作大体分为: 加速度模块的初始化, 数据读取, 参数修改 3 部分。

3.2.1 初始化设置

初始化设置包括: 传感器检测、设定测量范围、设定器件带宽和输出数据速率、选择电源模式、中断使能设置。

传感器检测: ①单片机读取 ADXL345 寄存器^[17]0x00 的数据, 正常情况下读取的数据应为 0xE5, 若读出其他数据, 则初始化不通过; ②设定测量范围, 在此将测量范围设定为 $2\text{ }g$; ③设定器件带宽和输出数据速率, 器件带宽和输出数据速率通过 BW_RATE 寄存器进行设置, ADXL345 的默认值为 0x0A, 转换为 100 Hz 的输出数据速率, 考虑到本设计中坡度检测仪的要求, 设定值为 0x08, 数据转换值为 12.5 Hz; ④选择电源模式, ADXL345 提供了正常、待机、休眠等模式, 可以通过设定寄存器 0x2D 进行选择; ⑤中断使能设置, 通过设定 0x2E-INT_ENABLE 寄存器可以设定中断模式, 这里设定值为 0x80, 使能 DATA_READY 位。

3.2.2 数据读取

数据读取即是将加速度传感器中地址范围为 0x32~0x37 的寄存器中的内部加速度数据读出。寄存器 0x32 和 0x33 保存 x 轴输出数据, 寄存器 0x34 和 0x35 保存 y 轴输出数据, 寄存器 0x36 和 0x37 保存 z 轴输出数据。输出数据为二进制补码,

0x32 保存 x 轴低有效位,0x33 保存 x 轴高有效位,依次类推。

3.2.3 参数修改

ADXL345 加速度传感器的可修改参数有很多。由于加速度传感器存在静偏移,以及加装传感器硬件难以保证绝对水平,所以 ADXL345 提供了静态偏置设定功能,通过 0x1E、0xF、0x20 这 3 个连续寄存器可以设置 x 、 y 、 z 轴的静态偏置。也可以通过这 3 个寄存器设定值对传感器进行校正。

3.3 数据处理

数据处理即是将加速传感器读取的原始数据进行加工处理,包括数据滤波、换算、倾斜角解算等。

考虑到坡度仪检测倾斜角要求速率不高,侧重于精确度,故数据滤波采用均值滤波法,可有效滤除高频波动,利于数据稳定,如式(14)所示

$$D_{data} = (\sum_{i=0}^{10} D_{data}[i])/10 \tag{14}$$

式中: $D_{data}[i]$ 为连续读出的某一轴加速度原始数据; D_{data} 为连续 10 次读取数据的平均值。

数据换算是根据加速度传感器的量程及分辨率设定换算比例系数,本设计中加速度传感器设定了最高精度的 3.9 mg/LSB,故换算公式应为

$$A_{out} = 3.9 D_{data} \tag{15}$$

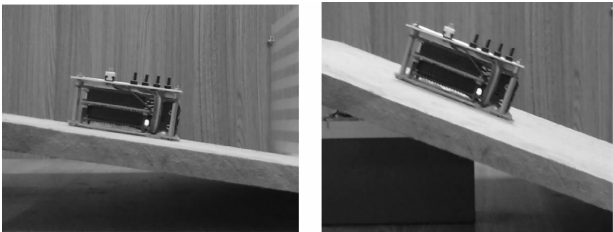
D_{data} 是处理过的任意一轴加速度平均值,为任意一轴的加速度(mg),由于 D_{data} 为整型,为防止数据丢失,需要将计算结果强制转换为 float 型。

4 试 验

利用设计的试验机对标准角度进行了测量,如图 5 所示。选用 1 块平整的木板用水准仪将其调平,然后将其一端垫高,用文献[4]方法计算出其角度值,然后将试验机置于倾斜板面上,在一个固定角度下将试验机和梯度方向呈不同的角度,分别对该角度进行测量,试验过程见图 6 和图 7,测量试验结果见表 1。



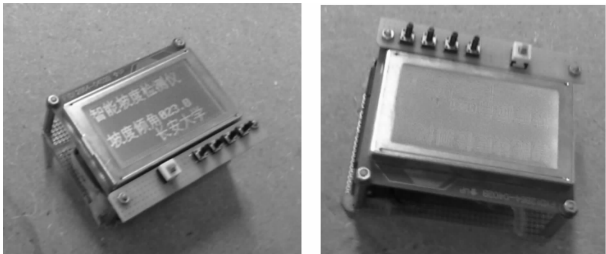
图 5 坡度测量仪试验机
Fig. 5 Slope measurement test apparatus



(a) 小于45° (b) 大于45°

图 6 不同角度测量试验

Fig. 6 Measurement test of various angles



(a) $\theta > 0, \Psi > 0$ (b) $\theta < 0, \Psi < 0$

图 7 相同角度下不同放置方式测量

Fig. 7 Measurement test in the same angle with different lay patterns

表 1 角度测量试验结果

Tab. 1 Angle measurement test results (°)

计算值	测量值 1	测量值 2	测量值 3
10.5	10.4	10.9	11.0
23.3	24.0	24.1	24.5
45.3	46.1	46.6	46.5
64.0	63.1	63.3	63.8
72.5	73.2	73.6	73.8
79.8	80.7	80.2	80.3
85.2	86.0	86.7	86.9

可见试验机能够较准确地检测固定平面的角度,充分验证了测量原理,但是误差还比较大,主要原因是试验机测量平台可能存在系统误差。改进方法可以通过后续高精度标定系统实现,通过传感器的精确定位安装提高测量精度。

5 结 语

(1)通过对加速度矢量和坡度测量原理的分析,提出了利用重力矢量在加速度三轴的矢量投影建立数学模型,并解算出坡度倾角的测量解算模型。

(2)重点分析了基于加速度传感器原理的重力模型解析,相关的误差分析、传感器失调及传感器灵敏度。

(3)设计了基于上述模型的试验机硬件和软件数据处理方法。

(4)通过试验验证了所提出的方法能够满足实

际中对土木工程等几何坡度参数高精度、自动化测量的需求。

(5)加速度传感器属 MEMS 器件,容易受温度的影响,且样机传感器安装和标准倾斜平面可能存在误差,因此如何实现对温度的高精度补偿,消除安装等系统误差是下一步的研究重点。

参考文献:

References:

- [1] 马 磊,毛雪松,刘保健,等.中国道路工程学术研究综述·2013[J].中国公路学报,2013,26(3):1-36.
MA Biao,MAO Xue-song,LIU Bao-jian,et al. Review on China's road engineering research,2013[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 1-36. (in Chinese)
- [2] 李 刚.高速公路路面自动化测试评价方法的研究[D].杭州:浙江大学,2004.
LI Gang. Study on automatic monitoring and assessment methods of highway pavement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- [3] 肖兴强,艾长发,邱延峻.考虑横坡的沥青路面力学响应有限元分析[J].交通运输工程与信息学报,2008,6(1):69-72.
XIAO Xing-qiang, AI Chang-fa, QIU Yan-jun. Influence of transverse gradient on structural response of asphalt pavement[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2008, 6(1): 69-72. (in Chinese)
- [4] JTG E60—2008,公路路基路面现场测试规程[S].
JTG E60—2008, Field test methods of subgrade and pavement for highway engineering[S]. (in Chinese)
- [5] 杨顺洪.车载水准仪在砼路面横坡测量中的应用[J].公路交通科技,1998,15(4):94-95.
YANG Shun-hong. The application of vehicle level gage on concrete pavement cross slope measurement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 1998, 15(4): 94-95. (in Chinese)
- [6] Hua Y Q. Research of asphalt road surface measuring system[C]//IEEE. 2010 International Conference on Remote Sensing. Hangzhou:IEEE, 2010,3(10):530-533.
- [7] Wang P Y. Beam shaping optics deliver high-power beam [J]. Laser Focus World, 2001, 37(12): 115-118.
- [8] 林晓玲.基于 PSD 的激光坡度指向与测量装置[D].福州:福建师范大学,2010.
LIN Xiao-ling. Laser gradient direction and measurement device based on PSD[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2010. (in Chinese)
- [9] 封晓黎.高新技术在高速公路路面检测中的应用[J].公路与汽运,2006(4):62-64.
FENG Xiao-li. The application of high and new technology on expressway road detection[J]. Highways & Automotive Applications, 2006(4): 62-64. (in Chinese)
- [10] 朱玉川,马大为,乐贵高,等.基于坐标变换的球面坐标 Navier-Stokes 方程的建立[J].南京理工大学学报:自然科学版,2005,29(4):437-440.
ZHU Yu-chuan, MA Da-wei, LE Gao-gui, et al. Foundation of Navier-Stokes equations in spherical coordinates system based on coordinate transformation[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Nature Science, 2005, 29(4): 437-440. (in Chinese)
- [11] 吴其松,杨海钢,张 翀,等.一种适用于 MEMS 陀螺仪的高性能电容读出电路[J].仪器仪表学报,2010,31(4):937-943.
WU Qi-song, YANG Hai-gang, ZHANG Chong, et al. High-performance capacitive readout circuit for MEMS gyroscope[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4): 937-943. (in Chinese)
- [12] Luinge H J, Veltink P H. Inclination measurement of human movement using a 3-D accelerometer with autocalibration[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2004, 12(1): 112-121.
- [13] Strohrmann M, Bley P, Fromhein O, et al. Acceleration sensor with integrated compensation of temperature effects fabricate by LIGA process [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1994, 42(1-3): 426-429.
- [14] 景 鹏,马铁华,王 燕.一种压阻式三轴高 g 值加速度传感器的冲击校准[J].传感技术学报,2008,21(6):954-958.
JING Peng, MA Tie-hua, WANG Yan. Shock calibration of a piezoresistive three-axis high-g microaccelerometer[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(6): 954-958. (in Chinese)
- [15] Su W, Fu J Q. The study of variable sensitivity in dual-axis tilt sensor [C]//IWIEEE. 2012 International Workshop on Information and Electronics Engineering. Harbin: Procedia Engineering, 2013: 2605-2609.
- [16] Backoum E G, Cheng M H. MEMS acceleration sensor with large dynamic range and high sensitivity[J]. Journal of Microelectro Mechanical Systems, 2012, 21(5): 1043-1048.