

文章编号 :1001 - 2486(2004)02 - 0075 - 04

## 微硅加速度计在定向钻进角度测量中的应用\*

徐 涛,罗武胜,吕海宝,董文娟

(国防科技大学机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

**摘 要** 针对地下定向钻进角度测量的特殊要求,提出了用一个单轴和双轴微硅加速度计测量地下钻头倾角和面向角的方法,组建了角度测量系统,给出温度补偿措施及相应的实验结果。结果表明,系统不仅具有体积小、成本低等优点,而且系统精度优于  $1^\circ\text{C}$ ,非常适合地下钻进测量。

**关键词** 加速度计,定向钻,倾角,面向角,温度补偿

中图分类号:TH824+.4 文献标识码:A

## Application in Angles Measurement for Directional Drilling with Micromachined Polysilicon Accelerometers

XU Tao, LUO Wu-sheng, LU Hai-bao, DONG Wen-juan

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** Aiming at the special demands for angles measurement while drilling underground, the paper describes a new approach of determining the pitch and the roll with a single-axis accelerometer and a dual-axis accelerometer. A feasible temperature compensation method is adopted in our established system. Corresponding experimental results are described. Results show that the system has the advantages of small size, low cost, and its accuracy is better than  $1^\circ\text{C}$ . It is especially suitable for directional drilling to obtain the desired angles.

**Key words** accelerometer, directional drilling, pitch, roll, temperature compensation

定向钻进技术是利用定向钻机以可控钻孔轨迹的方式,在不同地层和深度进行钻进并通过定位仪导向抵达设计位置而铺设地下管线的施工方法<sup>[1]</sup>。施工时,首先利用专门的定向钻机钻出小口径的导向孔,在钻进过程中通过监测和控制手段使钻孔按设计轨迹延伸,并从另一端钻出地表。然后用扩孔钻头将钻孔扩大至所需的口径,最后将待铺设的管线回拖入孔内,如图 1 所示。

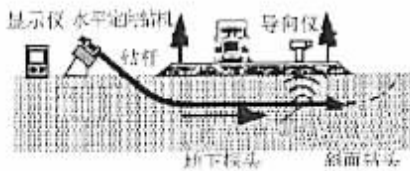


图 1 定向钻进中的导向孔施工

Fig. 1 HDD's drilling the pilot hole

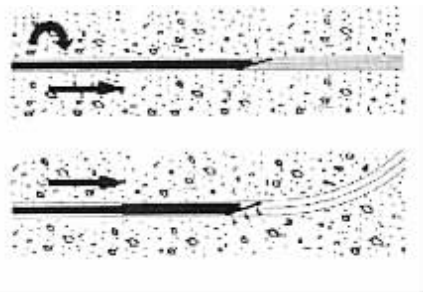


图 2 钻具的导向机理

Fig. 2 Steering mechanism of the drill bit

定向钻进的一个显著特点是钻孔轨迹不要求是直的,可实现弯曲钻进。正因为如此,使得它可以根据实际要求绕过各种障碍物,如铁路、房屋、河流等,实现智能可控向钻进。它的导向功能是通过斜面钻头来完成的,其导向机理如图 2 所示。当钻头一边回转一边进给时,则钻出一个直孔,实现保直钻进;当钻

\* 收稿日期:2003-09-14

基金项目:国家 863 基金资助项目(2003AA430120)

作者简介:徐涛(1977-)男,博士生。

头只进给而不回转时,由于斜面钻头受到阻力,钻孔将向斜面方向弯曲。这样,如果事先调整好斜面方向,就可根据要求实现可控向钻进。

由于定向钻进技术日益成熟并具有突出的优点,其应用范围不断拓宽,如今不仅应用在非开挖管线铺设领域,而且可用于地矿、冶金、石油等领域,用来实现地下的地质勘探及资源开采。在军事领域,定向钻进也可实现地下危险区域的勘探、信息采集等工作,如地下核试验后的坑道区域的土壤数据的自动采集。目前,定向钻进是实现上述意图最优的方法。

## 1 定向钻进中的角度测量

在定向钻进中,为了准确地实现导向,必须实时获取钻具的当前姿态,完成多个角度的测量,其中,倾角和面向角是两个最重要的参数。倾角是钻孔当前点的切线与水平面之间的夹角,它反映了钻头前进方向相对水平面的倾斜程度。为了表示方便,也常用倾角的正切值——坡度百分比来表示。工具面向角是指在与钻具轴线垂直平面内,造斜钻具的造斜方向与钻孔的终点方向(在钻孔弯曲平面内)间的夹角,它反映了下一步钻进的造斜方向。工程上为了直观起见,通常采用时钟盘面上的刻度来表示面向角,如12点表示向上方向,6点表示向下方向。

为了给出清晰的定义,在大地坐标系(NED北东地坐标系)中建立钻具自身的坐标系(XYZ坐标系),如图3所示。图中,H为水平面,V为钻孔弯曲平面,与水平面垂直,P代表钻具横截面。一般取Z轴与钻具的轴线方向一致,Y轴与造斜钻具的造斜方向一致,X轴与上述两轴垂直。这样,根据角度的定义,倾角为Z轴与水平面的夹角,图中用 $\beta$ 表示,面向角为Y轴与钻孔终点方向的夹角,如图中 $\theta$ 所示。

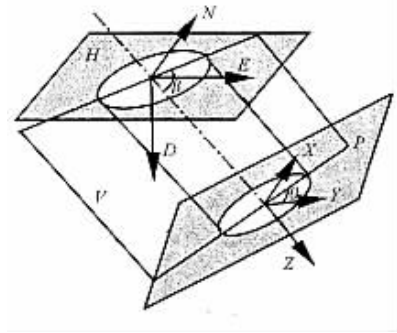


图3 测量角度的定义  
Fig.3 Definition of pitch and roll

在工程领域中,对于反映物体倾斜的角度测量,通常采用以地球重力方向为基准的摆式倾角传感器来进行,如电位器式、电容式、电感式等固体摆式倾角传感器以及电介液式、电解液式、磁性流体式等液体摆式倾角传感器等<sup>[2]</sup>。这些传感器都是通过倾斜角度的改变导致电阻、电容或电感的改变来检测倾斜角度,但现有的传感器都存在以下不足:结构复杂,制作工艺难度大;大多属作坊作业,需要大量的人工调试,不宜批量生产,因而成本偏高;动态范围较窄,且抗冲击、抗振动性能不高。

加速度计是将运动或重力转换为电信号的传感器,也可用来测量倾斜角。但常规的加速度计体积大、成本高、对环境适应性差,并不适合地下定向钻进的测量。随着MEMS技术的发展,从20世纪90年代开始出现了在硅片上集成的加速度传感器,这种加速度计采用MEMS技术,在单片上集成加速度敏感元件及相应的调理电路,具有体积小、重量轻、易于大规模批量生产、成本低等优点,能适应钻进作业环境中体积小、温度变化大、振动大、高速旋转的特点。因此,采用微硅加速度计来完成倾角的测量是较好的一种选择<sup>[3]</sup>。

## 2 微硅加速度计的传感原理

微硅加速度计可以采用不同的设计和工艺来制作,现代微电子机械加工技术允许采用CMOS工艺以低成本、高可靠性制造这些加速度计。例如ADI公司的产品系列采用表面微机械加工的张应力多晶硅结构层,EG&G IC Sensors公司采用体微机械加工多层硅片叠加而成, Motorola公司则采用表面微机械加工多层硅,体微机械加工底座。无论采用何种工艺,目标都是制作体积小、成本低且具有所需功能的器件,加速度计市场也在不断地向微机械加工方法降低成本和减小尺寸的方向发展。

ADXL加速度计的传感原理基于差动电容,主要由质量弹性元件、位移测量系统及信号调理电路等组成。弹性元件是由硅材料制成的横梁,横梁四角与弹性系数相近的活动折叠片连接构成运动部件,当有加速度产生时,横梁移动,将带动连接片一起移动,其基本结构如图4所示。图中,中间极板(即横梁

的伸出部分)与两个固定的外极板组成差动电容  $C_{S1}$  和  $C_{S2}$ 。没有加速度时,  $C_{S1} = C_{S2}$ ; 产生加速度时, 横梁的移动改变了中间极板与固定极板的相对位置, 引起电容变化,  $C_{S1} \neq C_{S2}$ 。通过一定的测量电路将电容量的变化转化为电学量输出, 就能够测得相应的加速度值。

### 3 微硅加速度计在角度测量中的应用

根据前述倾角和面向角的定义, 采用一个双轴及一个单轴加速度计实现角度的测量, 安装时使它们的轴线分别与  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴的方向一致。其中, 单轴加速度计敏感轴平行于钻具的轴线  $Z$  轴, 用来测量倾角, 双轴加速度计安装在垂直钻具轴线的平面( $XOY$  平面)内, 用来测量面向角, 如图 5 所示。

设加速度计在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向上的输出分别为  $g_x$ 、 $g_y$  和  $g_z$ , 由图 5 可知:

$$g_x = g \cdot \cos\beta \cdot \sin\theta \quad (1)$$

$$g_y = g \cdot \cos\beta \cdot \cos\theta \quad (2)$$

$$g_z = g \cdot \sin\beta \quad (3)$$

根据上述公式, 可以得到倾角和面向角的测量公式:

$$\beta = \arcsin(g_z/g) \quad \beta \in [-\pi/2, \pi/2] \quad (4)$$

$$\theta = \begin{cases} \arctan(g_x/g_y) & \theta \in [0, \pi/2) \\ \pi + \arctan(g_x/g_y) & \theta \in [\pi/2, 3\pi/2) \\ 2\pi + \arctan(g_x/g_y) & \theta \in [3\pi/2, 2\pi) \end{cases} \quad (5)$$

实际使用中, 由于各加速度计之间的零偏(即加速度为零时的输出)和灵敏度(即输出与加速度的比值)略有不同, 精确的测量必须进行标定。对静态加速度的标定, 重力加速度是最稳定可靠的参考源, 比如当将加速度计平行于地球表面放置时, 此时会得到近似为  $0g$  的输出, 精确的测量则要用一校准结构来严格保证与重力方向成  $90^\circ$ 。

灵敏度的校正也是通过测量重力加速度来完成的, 将加速度计敏感轴平行于重力方向, 分别完成  $+1g$  和  $-1g$  的测量。假设其输出分别用  $V_1$  和  $V_2$  表示, 可通过  $S = (V_1 - V_2)/2g$ ,  $V_0 = (V_1 + V_2)/2$  分别计算灵敏度和零偏。

这种灵敏度和零偏校正方法的主要优点在于其对敏感轴与重力方向间的对准程度要求不高, 因为重力方向的加速度计输出信号和偏离角度的余弦成正比, 如竖直方向上  $5^\circ$  的偏离仅导致  $0.4\%$  的误差。

图 6 给出了室温条件下典型的实验曲线。实验时, 将加速度计固定在专门的三维转台上, 控制其倾角改变。每变  $1^\circ$ , 测量一次加速度计的输出。图中, 上半部分为加速度计输出随倾角变化的曲线, 下半部分为加速度计输出与角度的正弦值的曲线。显然, 实际的结果跟倾角之间满足正弦函数规律。根据实验结果, 室温条件下整个  $\pm 90^\circ$  范围内角度误差小于  $1^\circ$ , 故倾角的测量在室温下也能达到较高的精度。

### 4 温度补偿

如前所述, 虽然在常温下利用加速度计实现倾角和面向角的测量可以达到较高的精度, 但是传感器是放在地下钻具的内部在钻进的同时测量, 要忍受巨大的温度变化, 例如  $0^\circ\text{C}$  到  $50^\circ\text{C}$  的温度变化是常见的。在这种条件下, 零漂和灵敏度随温度的漂移将会很严重, 直接测量时会导致很大的角度误差, 因此, 必须采取某种形式的温度补偿方法来解决。

温度补偿有硬件补偿与软件补偿两种<sup>[4,5]</sup>, 硬件补偿需要外加功率电阻器件, 功耗太大, 我们采用软件补偿的方法。由于每一个加速度计都有一个“与生俱来”的温度特性并且始终不会改变, 可以利用

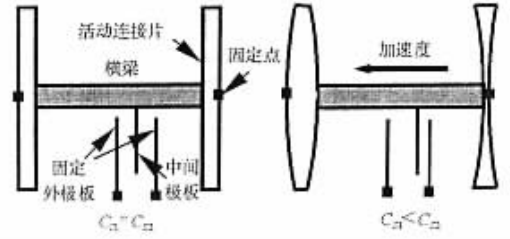


图 4 ADXL 加速度传感原理图

Fig.4 Structure of ADXL series accelerometer

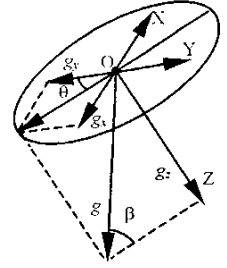


图 5 角度测量示意图

Fig.5 Measurement of pitch and roll

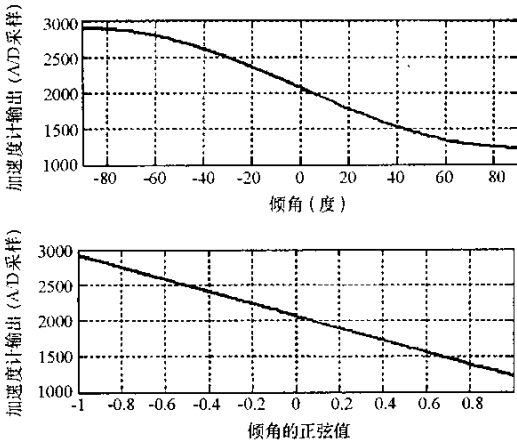


图6 室温下加速度计输出随倾角变化的曲线

Fig.6 Curves between accelerometer out and pitch in room temperature

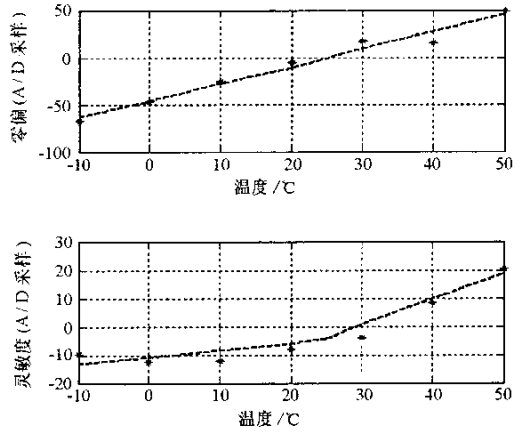


图7 零偏和灵敏度随温度变化的曲线

Fig.7 Alternating curves of the 0 g offset and the sensitivity with temperature

预先标定进行补偿。具体来说,将加速度计放在专门的恒温箱中,通过系统地改变温度,依次得到其在无外界激励下(重力除外)的输出,通过对这些点进行曲线拟合,就可得到零偏和灵敏度随温度变化的规律。在实际的角度测量中,根据温度传感器测得的当前温度值,修正当前的零偏和灵敏度,实现温度补偿。

图7给出了温度标定实验中取得的一组数据及利用最小二乘法拟合的曲线。可见,加速度计零偏的变化近似为线性,用一直线来拟合。灵敏度的变化曲线并非线性,这是由器件本身特性决定的,用以室温 $25^{\circ}\text{C}$ 为界的两段直线来拟合。这样,对离散的数据进行拟合后,就得到具体的补偿公式。将这些公式存入内存中,实际测量时根据温度传感器测得的温度值,利用这些公式得到当前温度下零偏和灵敏度的值,并据此对角度进行计算。如倾角可由 $\beta = \arcsin[(V_{out} - V_0)/S]$ 得出,这里, $V_{out}$ 表示加速度计当前温度下的输出, $V_0$ 和 $S$ 为当前温度下的零偏和灵敏度。

为了衡量补偿的效果,我们模拟地下钻进的环境,使温度在 $0^{\circ}\text{C}$ 到 $50^{\circ}\text{C}$ 范围内剧烈无规则地改变。当不进行补偿,采用统一的零偏和灵敏度解算时,最大误差达到 $8.7^{\circ}$ ,然而经补偿后,最大测量误差小于 $0.7^{\circ}$ 。显然,误差减小了一个数量级以上,角度测量的精度大大提高,这种温度补偿方法十分有效。

## 5 结论

描述微硅加速度计在定向钻进角度测量中的应用,提出了测量地下钻头倾角和面向角的方法,同时给出行之有效的温度补偿方法。从实验和现场使用情况来看,这种方法能够有效克服地下定向钻进时恶劣的环境影响,具有体积小、成本低、精度高等一系列优点,非常适合地下定向钻进测量,我们期待着微硅加速度计在定向钻进角度测量中的广泛应用。

## 参考文献:

- [1] 中国非开挖技术协会. 水平定向钻进管线铺设工程技术规范[S]. 2002.
- [2] Hore, Donald Lionel. Inclination Angle Sensing[P]. European Patent Application, EP 0590830A1, 1993.
- [3] Miroslav Husak. Model of tilt Sensor System[A]. 9th International Conference on Electronics, Circuits and System[C], 2002, 227-230.
- [4] Harvey Weinberg. Temperature Compensation Techniques for Low g iMEMS Accelerometers[R]. AN-598, Analog Devices 2000.
- [5] 高光天. 传感器与信号调理器件应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

