



差动电容式传感器的—— 高精度测量技术研究

摘要: 针对差动电容式传感器的电容值变化过于微弱难于实现直接测量的特点, 引入了电容比测量方法间接地实现了对电容值变化规律的测量。通过智能差动电容式测量模块的研制, 把多种实用化技术手段应用到测量电路设计中, 确保测值结果的高精度和高可靠性。测量模块的实际测量效果经相关实验得到了有效的验证。

关键词: 电容式传感器; 安全监测仪器; 数据采集; 测量技术

中图分类号: TP 212.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-883X (2012) 07-0006-05

收稿日期: 2012-04-20

►► 毛良明 江修 单建国

一、引言

差动电容式传感器是一种比较独特的传感器类型, 具有灵敏度高、非线性误差小、防静电干扰等优点, 在某些自动化测量控制领域中有较为广泛的应用^[1]。在岩土工程的安全监测领域中, 差动电容式传感器一般用于实现静力水准系统的沉降测量、垂线位移测量、引张线位移测量、双金属标变形监测等物理量的监测。

受几何尺度的限制, 差动电容式传感器的电容值一般很小 (小于 1000pF), 在精度许可范围内的电容变化量更是微小, 以分辨力指标来衡量的话, 电容的变化量一般要求在 pF 数量级^[2]。采用直接测量电容值的方法在测量原理上无法克服寄生电容和环境变化的影响^{[3][4]}, 因此不太可能实现差动电容式传感器的高精度测量。

由欧姆定律得到启发, 把将微小电容的变化转换成与之成线性关系的电压变化是比较可行的解决方案。为减少测量导线分布电容对测值结果的影响, 测量电路与被测传感器间的引线距离应尽可能地缩短, 智能差动电容式测量模块^[5]就是基于这样的设计考虑而研制的。实际使用时, 智能测量模块与被测传感器形成一体化, 就近实现数据采集功能, 测值结果形成数字量以数据通信方式实现远程测量功能。

二、工作原理

电容式传感器一般基于平板式电容工作原理, 平板电容的电气模型可等效如图1所示, 则平板电容的电容值为:

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \quad (1)$$

其中, ε_r —相对介电常数为; S —平板电容极板的有效面积;

ε_0 —相对介电常数, $\varepsilon_0=8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$

d —极板距离。

对式 (1) 进行 Taylor 级数展开, 得:

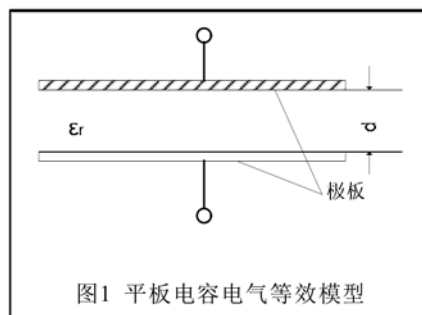


图1 平板电容电气等效模型

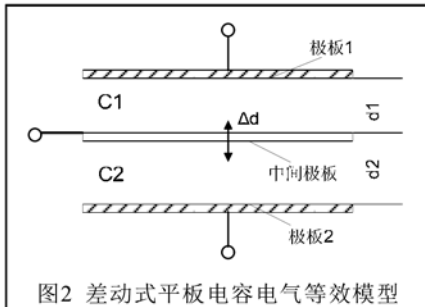


图2 差动式平板电容电气等效模型

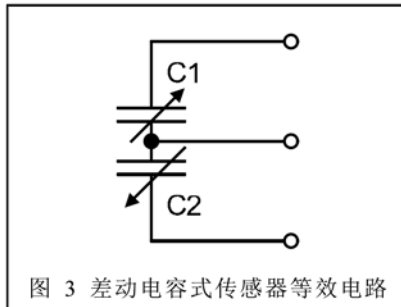


图3 差动电容式传感器等效电路

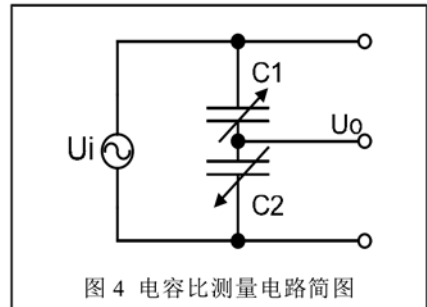


图4 电容比测量电路简图

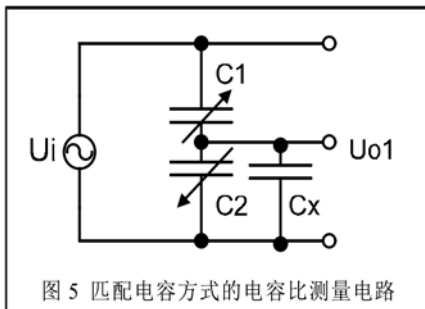


图5 匹配电容方式的电容比测量电路

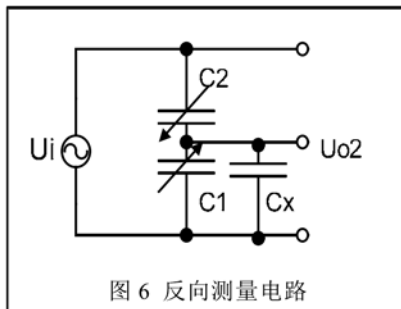


图6 反向测量电路

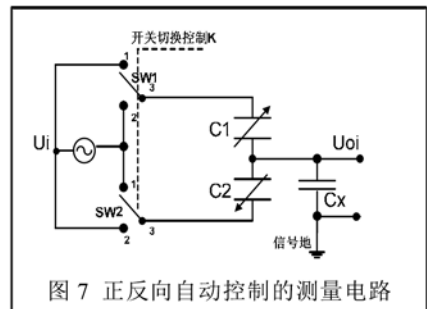


图7 正反向自动控制的测量电路

$$\frac{\Delta C}{C} = -\frac{\Delta d}{d} + \left[\frac{\Delta \varepsilon_r}{\varepsilon_r} - \frac{\Delta d}{d} \times \frac{\Delta \varepsilon_r}{\varepsilon_r} - \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$\text{当 } \frac{\Delta d}{d} \ll 1 \text{ 时, 有: } \frac{\Delta C}{C} \approx -\frac{\Delta d}{d} \quad (3)$$

差动电容式传感器的电气等效模型如图2所示, 可以看作是一对关联的电容 (C_1 和 C_2) 组合, 设中间极板向上移动了 Δd , 则 C_1 和 C_2 均将发生变化, 引入电容比参数 $r = C_1/C_2$, 则:

$$r = \frac{C_1}{C_2} = \frac{d_2}{d_1} \quad (4)$$

对式(4)进行 Taylor 级数展开并整理后得:

$$\Delta d \approx -\frac{d_1^2}{d_1 + d_2} \times \Delta r \quad (5)$$

因此, 中间极的位置变化与电容比的变化量存在线性关系, 通过测量电容比就可以获得中间极板的位移变化, 差动电容式传感器的工作原理基本如此。

三、测量技术

差动电容式传感器的等效电路如图3所示, 由公式(5), 差动电容式仪器输出结果的测量可以通过电容比 r 的测量来实现。

图4为一个可实现电容比测量的简易电路图, 由固定频率、固定幅值的交流正弦信号作为差动电容式传感器的激励信号源, 从中间极提取输出电压信号 U_o , 则 U_o 中包含了电容比 r 的信息。由交流电路的欧姆定律, 得:

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{r}{1 + r} \quad (6)$$

由式(6), 当 U_i 已知, U_o 可测量获得, 因此 r 可以通过 U_o 并计算获知。

实际应用中的差动电容式传感器不可避免地需要考虑分布电容、寄生电容的影响, 为消除这些不良因素的影响, 在设计测量电路的时候, 可以考虑引入一个容值固定的匹配电容 C_x (如图5)。匹配电容增加了测量电路的复杂程度, 但对于提高测量精度具有现实意义。图5电路的输入输出关系如式(7):

$$\frac{U_{o1}}{U_i} = \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_x} \quad (7)$$

与公式(6)相比公式(7)要相对复杂些, 为了消除 C_x 对测量结果的影响, 可以设计另外一种电路, 如图6所示。对照图5, 图6仅仅是调整了 C_1 和 C_2 的位置关系, 相对图5而言, 图6电路可以称之为反向测量电路, 图5电路相应地称之为正向测量电路。图6电路的输入输出关系如式(8):

$$\frac{U_{o2}}{U_i} = \frac{C_2}{C_1 + C_2 + C_x} \quad (8)$$

由式(7)和式(8), 很容易获得式(9):

$$\frac{U_{o1}}{U_{o2}} = \frac{C_1}{C_2} = r \quad (9)$$

由式(9)可以看出, 电容比 r 的测量实际上转变为对电压 U_{o1} 和 U_{o2} 的测量, 这是相当容易实现的。



为确保测量结果的高精度,应严格保证交变激励信号源 U_i 的稳定性,为实现这一目的,可引入 D/A 转换器用以产生交变激励信号源。为实现正向测量与反向测量电路的自动控制,在电路实现的时候可引入双刀双掷的电子开关,具有正反向自动控制功能的测量电路如图 7 所示。

图 7 中,当开关切换控制 K 为低电平时,电子开关 $SW1$ 、 $SW2$ 的引脚 1 与引脚 3 连接,实现正向测量电路功能。当 K 为高电平时,电子开关 $SW1$ 、 $SW2$ 的引脚 2 与引脚 3 连接,实现反向测量电路功能。输出信号 U_{o1} 和 U_{o2} ,需要进行信号放大和低通滤波处理以确保信号不失真、按比例放大。由于输出信号 U_{o1} 和 U_{o2} 是正弦波形式的交变信号,不方便直接实现 A/D 转换,因此还需要经过全波整流和低通滤波,实现交流转直流功能。经交流转直流转换之后,由 A/D 转换器实现对 U_{o1} 和 U_{o2} 信号幅值的数字化采样,最终由式(9)计算获得电容比 r 测量结果。

为进一步提高测量精度,用于产生交变信号源的 D/A 转换器和用于实现输出结果数据采集的 A/D 转换器采用了同一个参考电压,确保测量结果不受交变激励信号幅值变化的影响。在全波整流环节,采用了比较特殊的处理方法,以电子开关的切换控制实现全部整流功能,具体电路如图 8 所示。当正弦交流信号处于正半周的时候,过零检测电路输出高电平,控制电子开关 $SW3$,使引脚 3 与引脚 2 连通,当正弦交流信号处于负半周的时候,过零检测电路输出低电平,控制电子开关 $SW3$,使引脚 3 与引脚 1 连通,确保实现全波整流输出。

四、智能测量模块

差动电容式传感器以电容值的变化传递被测物理量信息,因此凡是造成电容值发生变化的所有不利因素都应该严格控制。

由理论分析和实践研究,电缆的分布电容对差动电容式仪器的输出特性有很大的影响^[2],因此尽可能地缩短电缆长度是提高测量精度的最为直接有效的办法,智能测量模块与被测传感器充分靠近,可以就近实现对电容比的数字化测量,因此可以确保引线电缆长度控制在 1m 长度以内,这样就很好地解决了电缆分布电容这一技术

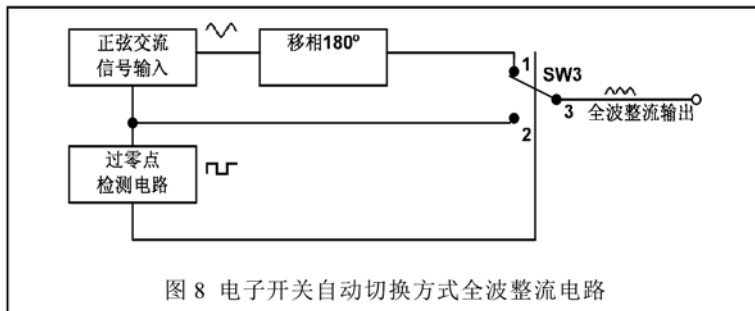


图 8 电子开关自动切换方式全波整流电路

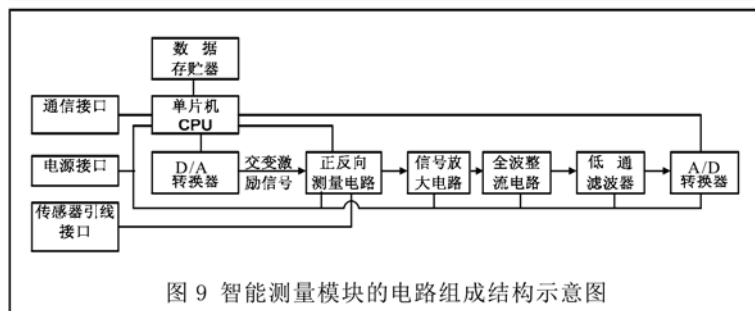


图 9 智能测量模块的电路组成结构示意图

难题。

智能测量模块的结构组成如图 9 所示,以单片机为控制器,主要包含测量电路、数据存储器 and 接口电路,其中测量电路部分是核心组件,由 D/A 转换器、正反向测量电路、信号放大电路、全波整流电路、低通滤波器、A/D 转换器等组成,确保实现对电容比参数 r 的高精度测量。

智能测量模块基本工作过程如下:

由上级主设备通过通信接口下发测量命令,单片机收到测量命令之后,启动测量工作,先由 D/A 转换器产生固定频率、固定幅值的交变激励信号,然后控制正反向测量电路先实现正向测量,传感器的输出信号经信号放大电路再进行全波整流、低通滤波,由 A/D 转换器实现正向测量结果数据 N_1 ,CPU 控制正反向测量电路实现反向测量,传感器的输出信号经信号放大电路再进行全波整流、低通滤波,由 A/D 转换器实现反向测量结果数据 N_2 ,单片机通过计算最终获得电容比 r 形成输出结果数据,输出结果数据通过通信接口反馈给上级主设备,完成一次测量过程。

智能测量模块具有良好的性能和广泛的工程适用性,主要体现在:

①采用 RS485 工业标准接口和 MODBUS 标准协议以体现普遍适用性特点;

②采用宽电压(9V~18VDC)供电,方便工程应用;

③测量精度优于 0.1mm,测量分辨力达到 0.01 mm,

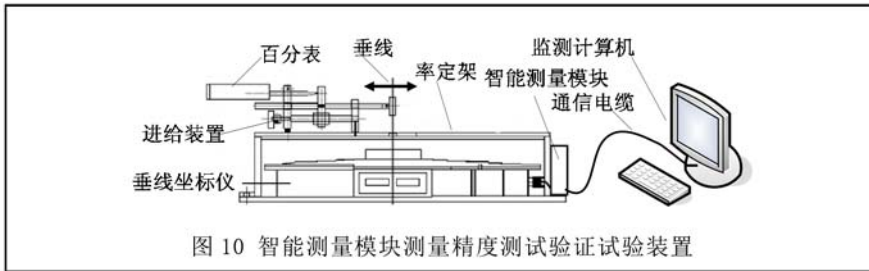


图 10 智能测量模块测量精度测试验证试验装置

表 1 智能测量模块精度试验数据列表

垂线位置 (mm)	第 1 次		第 2 次		第 3 次		第 4 次		第 5 次		极差 (mm)
	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程	
-25	-25.03	-24.98		-25.04		-25.03		-25.02		-24.98	0.06
-15	-15.01	-14.98	-15.03	-15.02	-15.03	-15.02	-15.03	-15.01	-15.00	-15.02	0.05
-5	-4.98	-5.01	-5.02	-4.98	-5.02	-4.98	-4.99	-4.96	-5.02	-5.01	0.06
5	5.01	5.02	4.97	5.01	4.97	5.01	4.98	5.02	4.99	5.03	0.06
15	14.99	14.97	15.01	14.98	15.01	14.98	15.03	14.97	15.02	15.03	0.06
25	24.98		24.99		25.02		25.03		24.96		0.07

严格符合行业规范要求；。

④环境适应性好：工作温度-20℃~70℃，相对湿度达到 100%RH。

五、试验验证

为测试检验智能测量模块的工作性能和测量精度，设计了如图 10 所示试验装置。图 10 中，某型差动电容式垂线坐标仪（双向 50mm×50mm 量程）固定在率定架上，由进给装置带动垂线沿箭头方向在垂线坐标仪的测量区域内运动，进给装置的位移数据由百分表指示。垂线坐标仪通过测量电缆与智能测量模块建立电气连接，智能测量模块与测量计算机通过通信电缆相连。

尽管被测试的垂线坐标仪是双向垂线坐标仪，但考虑到本试验的主要目的是测试检验智能测量模块的测量精度，所以仅需要进行其中一个方向的测试检验即可，具体试验方法如下：

调整垂线位置，使垂线的初始位置处于垂线坐标仪的-25mm 位置（左侧方向），由监测计算机发送测量命令，智能测量模块完成一次测量过程，结果返送给监测计算机，监测计算机显示并记录该次测量结果，作为首次测量结果 x_{01} ，然后向右每增加 10mm，启动一次测量并记录测量结果 x_{m1} ($m=1,2,\dots,5$)，至垂线坐标仪的+25mm 位置为止，完成一次正行程测量，从垂线坐标仪的+25mm 位置开始反行程操作，进给量也为 10mm/次，测量结果

记录为 $x_{n2}(n=4,3,\dots,1,0)$ ，至垂线坐标仪的-25mm 位置为止，实现一次完整的正反行程测量操作。为排除偶然性因素，本试验共进行了 5 次正反行程测量操作，测量结果如表 1。以极差法进行衡量，测量结果的最大误差为 0.07mm，满足 0.1mm 精度指标要求。

六、结语

本文针对差动电容式传感器的传感特性，绕开直接电容测量方法，以电容比作为被测参数，在采用了：

①以 D/A 转换器产生高稳定性交变激励信号；

②正向、反向测量电路设计；

③电子开关自动切换方式实现全波整流；

④D/A 转换器与 A/D 转换器采用同一参考电压；

⑤智能测量模块就近实现测量并远程数字量输出等多种技术措施之后，可靠实现了对差动电容式传感器的高精度测量，经试验验证，测量精度优于 0.1mm。

值得一提的是，本文所涉及的各种技术措施均为成熟可靠技术，而且成本低廉，具有良好的性价比，因此技术实现非常容易，具有良好的推广前景。

参考文献

- [1]郭俊杰,赵维谦,邱丽荣,陈文华.基于差动电容的高精度倾角测量系统设计[J].传感器与微系统.2009,28(08):96-99.
- [2]吕刚,刘果,刘冠军,郑水华.电容式引张线仪、垂线坐标仪性能特点及改进[J].水电自动化与大坝监测.2011,35(01):44-45.
- [3]刘果.智能型电容式位移传感器的研制及应用[J].水电自动化与大坝监测.2006,30(03):42-44.
- [4]朱伟宾,鲁结根,宫玉强.电容式引张线仪和垂线坐标仪在大坝监测应用中的讨论[J].水电能源科学.2010,28(01):60-63.
- [5]彭文中.差动电容式位移传感器的仿真研究[J].传感器世界.2011,17(05):23-25.

(下接 36 页)



五、小结

基于 ADXL345 三轴加速度传感器和 C8051F040 单片机设计了一种倾角测量系统,硬件方面由于 ADXL345 已经把所有的模拟部分都集成到了片内,因此硬件电路设计较为简单。软件方面较详细地介绍了如何根据时序图编写传感器模块、单片机模块和 LCD 显示模块间通信的程序,具有良好的规范性和可移植性。经试验,此系统能够实时显示倾角,并且具有较好的稳定性和精确度。

参考文献

- [1] 徐涛,罗武胜,吕海宝等.地下定向钻进姿态测量系统的设计[J].中国惯性技术学报,2004,12(2):5-8.
- [2] 袁西,陈栋,田湘等.三轴数字加速度计 ADXL345 及其在捷联惯导中的应用[J].电子设计工程,2010,3:138-139.
- [3] 唐立军,滕召胜,陈良柱等.电子秤倾角自动检测与称量误差补偿方法研究[J].电子测量与仪器学报,2011,1:62.
- [4] 段晓敏,李杰,刘文怡等.基于 MEMS 加速度计的数字倾角测量仪的设计[J].电子设计工程,2009,8:72.

Design of an angle measuring system based on three-axis acceleration sensors

XU Xiao-xiang, CHEN Wen-xiang, YE Jun-jun

(Electronics Laboratory, School of Physics and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Based on the three-axis acceleration sensor ADXL345, a tilt angle measuring and display system is designed with C8051F040 as control core. The design details of hardware and software are introduced. The results show that the system could complete real-time measurements of the tilt angles and display the results on LCD1602. This system has some advantages, such as simple hardware, high accuracy and stability. It is applied well in the practical application.

Keywords: ADXL345; C8051F040; inclination measurement; LCD display

作者简介

徐晓翔,厦门大学 电子学实验室,物理与机电工程学院硕士研究生,主要研究方向为电子技术。

通讯地址:福建省厦门大学科学楼 336 电子学研究室

邮编: 361005 电邮: 442084423@qq.com

陈文芾,厦门大学教授,研究方向为电子技术、计算机技术、传感器技术等。

叶军君,厦门大学副教授,研究方向为机械制造、CAD/CAM 技术及协同设计技术等。

读者服务卡编号 008□

(上接 9 页)

Study on the high performance measurement technology of the differential capacitance sensors

MAO Liang-ming¹, JIANG Xiu¹, SHAN Jian-guo²

(1.Beijing Geokon Technology Co. LTD. Beijing 100080, China, 2.Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A indirect measuring method is introduced to realize the capacitance variation measurement by detecting the capacitance ratio in this paper, which can over the difficulties of differential capacitance sensors due to the weakness outputs. On the basis of application of practical technologies, an intelligent measuring module for differential capacitance sensors is researched to insure high accuracy and stability of capacitance measurement. Some good results of the module have been reached after the relevant experiments and practical application.

Keywords: capacitance sensor; safety monitoring instrument; data acquisition; measurement technology

作者简介

毛良明,北京基康科技有限公司高级工程师,博士,长期从事大坝安全监测自动化系统的研制工作。

通信地址:北京市海淀区彩和坊路 8 号天创科技大厦 1111 室 邮编: 100080 Email: nbmlm@163.com

江修:北京基康科技有限公司 副教授,研究方向:测试计量技术

单建国:北京理工大学研究生,研究方向:自动化控制

读者服务卡编号 001□