



物理与工程

一种新型的电容式角度位移测量仪

杨振清¹ 丁凯洋² 林春丹¹ 宋志妍² 付玉卓²

(中国石油大学(北京)¹理学院;²信息学院,北京 102249)

摘要 本文设计了一种新型的可以测量角度以及位移的变极板正对面积式的差动电容测量仪。其中电容部分是由四块内极板以及一块外极板按照一定的方式安装形成的。当测量仪进行角度位移测量时,待测物体带动外极板旋转平移,外极板与四块内极板所形成电容的电容值发生变化;之后利用差动电容测量电路对这一变化进行测量,进而得出测量电路输出与电容值变化的关系,从而得到角度和位移的变化量,实现角度和位移的测量。

关键词 角度;位移;电容式传感器;差动电容

A NEW CAPACITIVE DISPLACEMENT AND ANGLE MEASURING INSTRUMENT

YANG Zhenqing¹ DING Kaiyang² LIN Chundan¹ SONG Zhiyan² FU Yuzhuo²

(¹ School of Science, China University of Petroleum, Beijing 102249;

² School of Information, China University of Petroleum, Beijing 102249)

Abstract This article presents a novel differential capacitance measurement instrument based on the area formula for opposing variable capacitive plates, which is capable of measuring both angle and displacement. The capacitance part is composed of four inner plates and one outer plate installed in a certain way. When measuring angle displacement, the object to be measured drives the outer plate to rotate and translate, causing the capacitance value of the capacitor formed by the outer plate and the four inner plates to change. Then, the differential capacitance measurement circuit is used to measure this change, and the relationship between the measurement circuit output and the capacitance value change is obtained, thereby obtaining the changes in angle and displacement and achieving the measurement of angle and displacement.

Key words angle; displacement; capacitive sensor; differential capacitance

电容式测量仪是将被测量(如尺寸、压力等)的变化转换成电容量变化的一种仪器。把被测的机械量,如位移、压力等转换为电容量变化。它的结构简单、分辨率高、动态特性好,而且能在高温、强烈振动等条件下工作。电容式测量仪的输出电容值一般十分微小,因此测量仪选择借助差动脉

宽电路,对于电容值进行测量,将微小角度位移变化引起的电容值成比例地转换成电压信号^[1-5]。电容传感器是一种将物理量变化转换为电容值变化的传感器,由于其具有分辨率高,可以非接触式测量,抗干扰能力强等优点被广泛应用于各种集成电路中^[6]。

收稿日期: 2022-07-07

通讯作者: 林春丹,女,副教授,主要从事物理教学及科研工作,研究方向为水声通信及信号处理, hphysics@cup.edu.cn。

引文格式: 杨振清,丁凯洋,林春丹,等. 一种新型的电容式角度位移测量仪[J]. 物理与工程, 2023, 33(2): 152-154.

Cite this article: YANG Z Q, DING K Y, LIN C D, et al. A new capacitive displacement and angle measuring instrument[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2): 152-154. (in Chinese)

1 工作原理

如图 1 所示为所设计测量仪的实物结构图；图 2 所示为测量仪内部电容部分极板的示意图，其中①②③④分别表示 4 个内极板外径为 r 高度为 H ；⑤表示外极板内径为 R 高度为 H 。外极板分别与 4 个内极板同心安装，同时形成 4 个正对面积可变的电容器。测量仪进行工作时，被测物体带动外极板旋转平移，所形成的 4 个电容器的电容值发生变化。

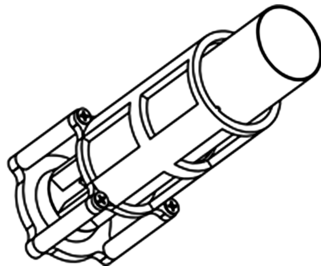


图 1 测量仪实物结构图

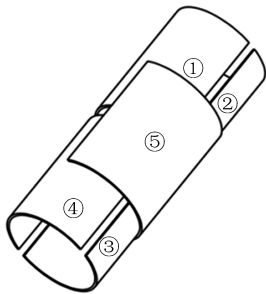


图 2 测量仪内部电容部分示意图①~④内极板、⑤外极板

如图 3 所示为一种差动脉冲宽度调制电路。差动电容 C_1 和 C_2 为被测的差动电容，即为四个内极板与外极板焊接导线接入电路两两进行差动所形成的电容。比较器 A_1 的同相输入端连接参考电压 U_r ，比较器 A_2 的反相输入端与差动电容 C_1 的一端连接，电容的另一端接地，比较器 A_1 的

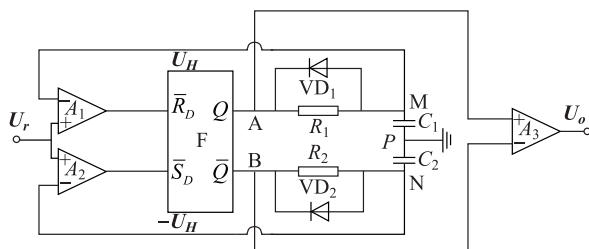


图 3 差动脉宽调制电路图

输出端与一个双稳态触发器 FF 的第一输入端连接。比较器 A_2 的同相输入端连接参考电压 U_r ，反相输入端与差动电容 C_2 的一端连接，电容另一端接地，比较器 A_2 的输出端与触发器的第二输入端连接。双稳态触发器的输出端各连接一个电阻 R_1 、 R_2 ，同时在电阻两端各并联一个二极管 D_1 、 D_2 ，电阻的另外一端连接差动电容的一端（非接地端）。最后从双稳态触发器的两个输出端各引出一根导线通过低通滤波器，即可得到输出电压 U_o 。

2 工作特性分析

根据差动脉宽调制电路的工作特性可知：其输入输出的关系为

$$U_o = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_H$$

其中， U_H ——双稳态触发器高电平。同时，圆筒形电容器的电容值为

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

其中， L ——极板长度； R ——外极板内径； r ——内极板外径； ϵ_0 ——极板间介质介电常数。

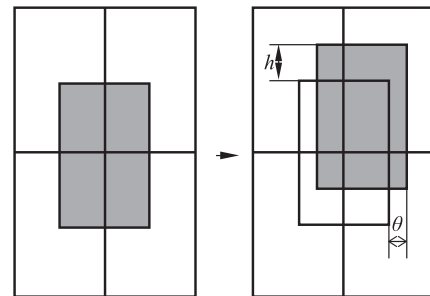


图 4 测量仪工作示意图

规定外极板处于中间位置时为初始位置，此刻角度值和位移值都为零，开始进行测量时，被测物体带动外极板向右旋转了 θ ，向上移动了 h ，故电容值发生变化，经变换后，得到以下公式为

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \left(\frac{H}{2} + h \right)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) \left(\frac{H}{2} + h \right)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

$$C_3 = \frac{\epsilon_0 \left(\frac{\pi}{2} + \theta \right) \left(\frac{H}{2} - h \right)}{\ln \left(\frac{R}{r} \right)}$$

$$C_4 = \frac{\epsilon_0 \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) \left(\frac{H}{2} - h \right)}{\ln \left(\frac{R}{r} \right)}$$

内极板 3 和内极板 4 分别接入脉宽调制电路的电容测量端 C_1 和 C_2 , 进行差动分析, 得到以下结果

$$U_{34} = \frac{C_3 - C_4}{C_3 + C_4} U_H = \frac{2\theta}{\pi} U_H$$

同理: 将外极板 1 和外极板 4, 外极板 2 和外极板 3 分别接入脉宽调制电路的电容测量端, 进行差动分析, 得

$$U_{14} = \frac{C_1 - C_4}{C_1 + C_4} U_H = \frac{2h}{H} U_H$$

因此, 通过以上两式可以求出被测物体所运动的角度和位移值

$$U_\theta = \frac{2\theta}{\pi} U_H$$

$$U_h = \frac{2h}{H} U_H$$

3 测试实验

实验选择的 4 个内极板外径为 $r=10.0\text{mm}$, 高度 $H=50.0\text{mm}$; 外极板内径为 $R=12.0\text{mm}$; 双稳态触发器高电平为 5V , 进行实验同时测量角度值和位移值, 并分别做出以下表格。如表 1、表 2。

表 1 角度数据记录表

输出电压	角度/(°)				
	5	10	45	90	150
理论计算	15.9	31.8	143.2	286.5	477.5
实际测量	17.7	33.9	151.2	298.7	493.6
相对误差	0.10%	0.06%	0.05%	0.04%	0.03%

表 2 位移数据记录表

输出电压	位移/mm				
	5	15	25	35	45
理论计算	1.0	3.0	5.0	7.0	9.0
实际测量	1.1	3.5	5.4	7.8	9.8
相对误差	0.09%	0.08%	0.07%	0.10%	0.09%

通过分析数据, 角度测量数据的相对误差在

0.03%~0.10% 之间, 位移测量数据的相对误差在 0.07%~0.10% 之间。因此, 所设计的角度位移测量仪测量具有很高的准确性。

4 误差分析

电容式传感器的误差来自多方面, 比如温度、边缘效应、寄生电容及分布电容等等, 对于本文所设计的测量仪所产生的误差进行以下分析:

(1) 连接传感器和电路的引线电缆电容、电子线路的杂散电容和传感器内的寄生电容却很大, 并且这些干扰量常常是随机变化的, 对于测量的稳定性和精度影响很大。

(2) 电容传感器的边缘效应也会带来误差, 容易降低电容传感器的灵敏度并且增加测量的非线性。

5 结语

本文介绍了一种可以测量角度位移的电容式测量仪, 利用变面积型电容器来进行设计, 外极板分别与 4 个内极板形成电容。当发生旋转和平移时, 4 个电容器的电容值会按照一定的规律变化, 将这四个电容器两两分别接入脉宽调制电路中, 进行差动分析。通过电压信号将电容值的变化表示出来, 进而推出其与角度位移的关系。

参 考 文 献

- [1] 叶湘滨, 刘正春. 一种可同时测量位移和角度的电容式传感器设计[J]. 传感器技术, 2004, 3(3): 34-37.
YE X B, LIU Z C. Design of capacitive sensor for both displacement and angle measurement. Journal of Transducer Technology, 2004, 3(3): 34-37. (in Chinese)
- [2] 黄贤武, 郑筱霞. 传感器原理与应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [3] 卢翠珍. 差动脉宽调制电路的研究[J]. 中国科技信息, 2010(4): 120-121.
LU C Z. Research on differential arterial width modulation circuit[J]. China Science and Technology Information, 2010(4): 120-121. (in Chinese)
- [4] 刘迎春, 叶湘滨. 传感器原理设计与应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.
- [5] 单成祥. 传感器的理论与设计基础及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [6] 史水娥, 张迎港, 胥帅帅. 基于 PCAP04 的电容式折射率测量仪[J]. 探测与控制学报, 2022, 44(3): 118-122.
SHI S E, ZHANG Y G, XU S S. Capacitive Refraction Index Measuring Instrument Based on PCAP04. Journal of Detection & Control, 2022, 44(3): 118-122. (in Chinese)