

Variable Frequency Differential Capacitance Sensor Digital Detection Circuit

Ming'an Hu, Mingzhuo Wang, Yan Wang, Xiaojuan Wang, Hui Chen

Sichuan University of Science & Engineering, Zigong Sichuan
Email: susewmz@163.com

Received: Dec. 30th, 2016; accepted: Jan. 15th, 2017; published: Jan. 18th, 2017

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on the analysis of the differential symmetric frequency detection circuit (DFCT), two kinds of digital symmetric differential frequency detection integrated circuit are designed, and the characteristics of the circuit are discussed. The discrete component design digital symmetric differential of the resonance oscillation frequency detection circuit was tested. The results showed that for variable gap capacitive sensor, whether its output frequency of vibration or its subtraction of frequency is completely linear output. The output sensitivity reaches 0.084 $\mu\text{m}/\text{Hz}$.

Keywords

Variable Frequency Detection Circuit, The Sensor, Differential Circuit, Frequency Stabilization

电容传感器变频差动数字检测电路研究

胡明安, 王明灼, 汪寅, 王小娟, 陈辉

四川理工学院, 四川 自贡
Email: susewmz@163.com

收稿日期: 2016年12月30日; 录用日期: 2017年1月15日; 发布日期: 2017年1月18日

摘要

在差动对称式变频检测电路(DFCT)的分析基础上,设计了两种数字式对称差动变频检测集成电路,讨论了设计电路的特点。对设计出的分立元件多谐振荡数字式对称差动变频检测电路进行了试验,试验结果表明:对变间隙式电容传感器,不论是振荡的输出频率,还是两者的差频都是完全成线性输出的,输出的灵敏度达到 $0.084 \mu\text{m}/\text{Hz}$ 。

关键词

变频检测电路, 传感器, 差动电路, 稳频

1. 引言

检测技术作为信息科学的一个重要分支,与计算机技术、自动控制技术和通信技术等一起构成了信息技术的完整学科。在人类进入信息时代的今天,人们的一切社会活动都是以信息获取与信息转换为中心,传感器作为信息获取与信息转换的重要手段,是信息科学最前端的一个阵地,是实现信息化的基础技术之一。

国内外学者对传感器的研究时间较早,各种各样的传感器器件非常多,在这些传感器件中,电容传感器由于具有非常多的优点与独特的特点得到了广泛的应用,电容传感器的检测电路有较多的类型[1] [2] [3] [4] [5],其中调频检测电路具有许多独特的优点,如:

- (1) 灵敏度高,可测至 $0.01 \mu\text{m}$ 级位移变化量。
- (2) 频率输出易于得到数字输出,而不需用 A/D 转换器。
- (3) 能获得高电平(伏特级)直流信号,抗干扰能力强。
- (4) 可以发送,接收实现遥测遥控。

但原调频检测电路,电路复杂,须采取稳频措施,要求频率稳定很高;电路输出非线性较大;尤其是稳频措施很难解决,采用频率稳定性很高的晶振或锁相环技术,随着被测量的变化,输出的频率也应进行相应的变化;但晶振或锁相环技术输出的频率基本不变,即不能进行检测,大大限制了该检测方法的应用。数年前研究出差动对称式变频检测电路(DFCT) [1] [2]。该方法虽然能解决稳频问题,但电路复杂,对低通滤波器的要求也很高,也没解决输出的线性差的问题。本文对差动对称式变频检测电路(DFCT)的深入研究分析,提出数字式对称差动变频检测电路,获得较满意结果。

2. 数字式对称差动变频检测电路设计

2.1. 普通的 LC 正弦波振荡器的检测电路

基于差动放大电路零漂抑制基本原理,设计出两套相同的振荡电路将两路振荡经过模数变换,将正弦波变换成方波,经门控电路和计数器变成数字信号,再经减法器输出。适用于一般 LC 正弦波振荡器的数字式对称差动变频检测电路设计的集成块图如图 1,该电路外接的电容 C_x 为电容传感器, C 为结构与 C_x 完全一样的固定电容, L 为外接的完全一样的固定电感。若采用电感传感器,则 C 与 C_x 为固定电容,第一振荡电路外接电感为固定电感,第二振荡电路外接电感为电感传感器。当然采用 C 、 C_x 构成的差动电容传感器或差动电感传感器还可以使检测灵敏度再提高一倍,同时还可使输出线性得到改善。

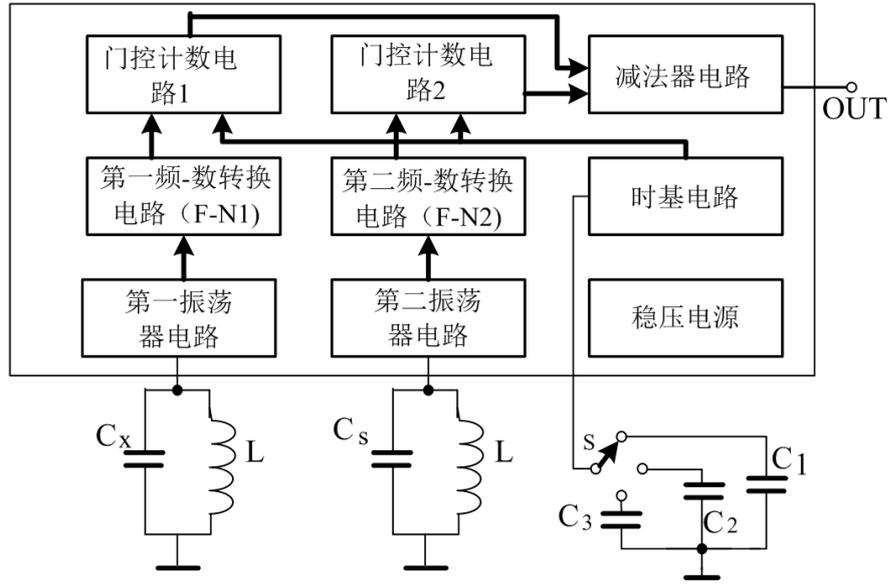


Figure 1. Is suitable for the sinusoidal oscillator
图 1. 适用于正弦波振荡器

电路外接的开关 S 及电容 C₁、C₂、C₃ 构成时基选择电路，当开关 S 接 C₁ 时基信号为 1 S，输出信号可达到 1 Hz 的精度，当开关 S 接 C₂ 时基信号为 10 S，输出信号可达到 0.1 Hz 的精度，当开关 S 接 C₃ 时基信号为 100 S，输出信号可达到 0.01 Hz 的精度。

2.2. 适用于一般多谐振荡器的检测电路

该电路与图 1 比较更简洁，少了频 - 数(F-N)转换电路，其集成电路设计图见图 2，因为振荡器产生的就是脉冲波；不必用频 - 数(F-N)转换电路进行转换；其他结构与图 1 完全一样。外接的电容 C_x 为电容传感器，C_s 为结构与 C_x 完全一样的固定电容，当然采用 C_s、C_x 构成的差动电容传感器还可以使检测灵敏度再高一倍，同时还可使输出线性得到改善。

2.3. 分立元件设计的数字式对称差动变频检测电路

该数字式对称差动变频检测电路利用分立元件组成的上述电路获得。如图 3 所示，这是由双 555 时基电路 SE556 和一块四与非门电路 74LS00 所构成的检测电路，SE556 内的两个 555 时基电路构成两个多谐振荡器，充放电电容 C_s 是基准电容，C_x 是电容传感器。74LS00 内的两个与非门为控制门，时基信号 T_s 由 1、2 与非门的 1、4 脚输入，输出信号为数字信号 N₁、N₂。N₁、N₂ 送到减法器电路直接相减(减法器电路没画出)，得到输出的数字信号。

该电路的电容传感器用变间隙式，则从理论上完全改变成线性输出特性，推导如下：

时基电路 555 组成多谐振荡器谐振频率可表示为[6]：

$$N = f = \frac{1}{T} = \frac{1}{(R1 + 2R2)C \ln 2} = \frac{k}{C} \quad \text{其中：} k = \frac{1}{(R1 + 2R2) \ln 2} \quad (1-1)$$

电路元件确定后，k 就是不变的常量。

平板电容的容量可表示为：

$$C = \frac{\epsilon S}{\delta} \quad (1-2)$$

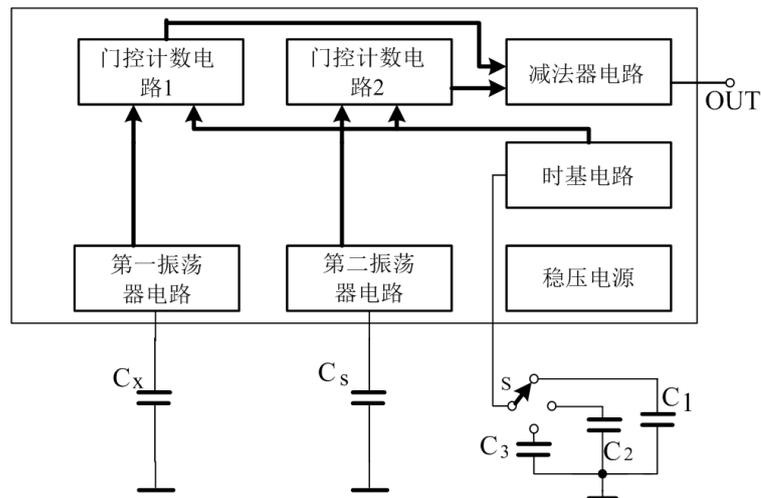


Figure 2. Is suitable for the multivibrator
图 2. 适用于多谐振荡器

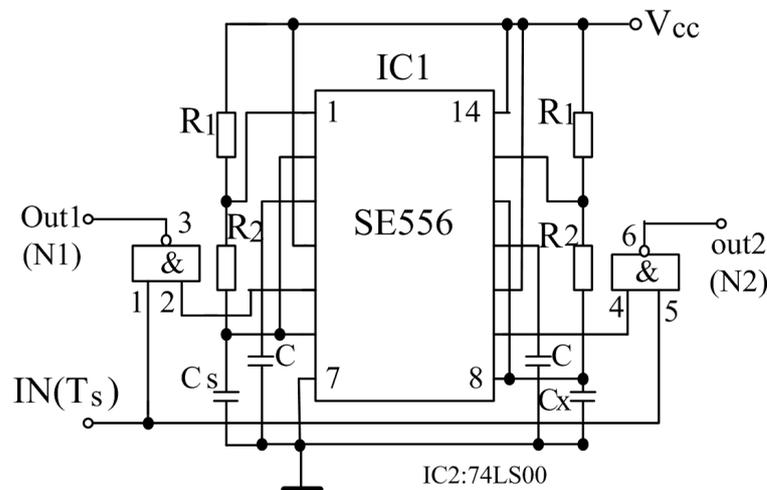


Figure 3. Applicable circuit composed of the discrete component
图 3. 适用分立元件所构成的电路

差动电容 C_1 、 C_2 可表示为:

$$C_1 = C_0 - \Delta C, \tag{1-3}$$

$$C_2 = C_0 + \Delta C \tag{1-4}$$

将(1-2)、(1-3)、(1-4)式带入(1-1)式整理后可得差频的结果为:

$$F = N_1 - N_2 = f_1 - f_2 = 2k\Delta\delta \tag{1-5}$$

式中, C_0 为差动电容平衡位置的电容, ΔC 为差动电容动片移动 $\Delta\delta$ 位移所对应的容量的增量; 由(1-5)式可见 $F \propto \Delta\delta$, 由此可以得到变间隙式电容传感器的输出频率 F 与间隙位移 $\Delta\delta$ 在理论上也完全成线性关系。

3. 数字差动变频检测电路对变间隙式电容传感器的检测试验

3.1. 实验仪器设备

- (1) 数字差动传感器检测电路(自制)

- (2) 双输入计数器
- (3) 水银温度计(0°C~100°C)
- (4) 读数显微镜
- (5) 自制差动电容传感器
- (6) 物理支架
- (7) 稳压电源

3.2. 实验电路

实验电原理图见 图 3 所示，试验印刷电路板见 图 4 所示。
由上述仪器设备进行了实验得到了满意的结果。

4. 数据及结果处理

4.1. 实验数据

表中数据的第一行，差频应调到零，但读数显微镜的精度为 0.01 毫米，根本不可能刚好调到两输出频率刚好相等。这说明这种位移检测方法的精度远高于读数显微镜的精度。

4.2. 实验结果图

将表中数据结果制成图，如图 5 所示。

图中的三条曲线都是直线，表明该实验的检测方法与理论推导的结果很相符，CH₁、CH₂ 的起点没在位移的零处，说明仪器调节的精度不能使 CH₁、CH₂ 的频率调到相等。横坐标的测试点只有 18 点，即将其上的数依次减 1，对应为 0~18。

4.2. 实验结果及分析

对表 1 结果数据，当读数显微镜调到该处时，两输出的差频最小为 20 Hz，当再调一小格(0.01 mm)则增大到 560 Hz，当朝相反方向调一小格(-0.01 mm)则又减小为-520 Hz，表明读数显微镜的精度远小于该检测方法的精度。用表中差频输出的数据相邻相减，计算的前五组和后四组数据的算术平均值为 1183，即是说位移 0.1 mm 对应差频输出 1183 Hz，每变化 1 Hz 对应变化 0.084 μm，可见其精度比读数显微镜高两个多数量级。

对图进行研究分析，由图可见，CH₁、CH₂ 及两者的差频 CH 都是直线，说明理论推导的变间隙式电

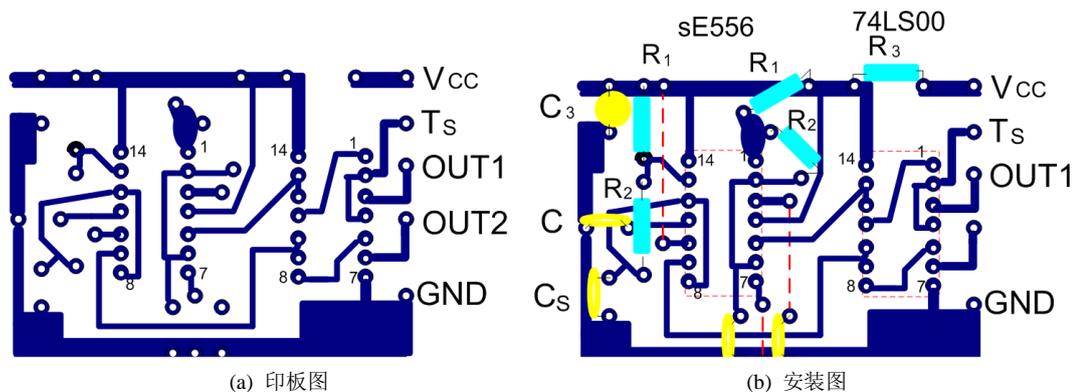


Figure 4. Printed and installation drawing
图 4. 印图及安装图

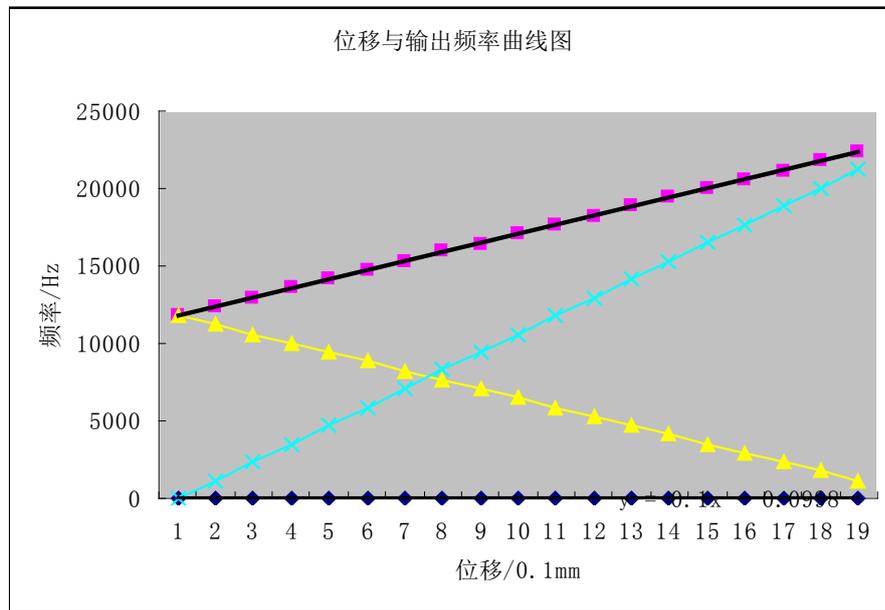


Figure 5. Curve of relationship between displacement and output frequency; purple line shows the curve of figure CH₁ outputted frequency f_1 ; yellow line shows the curve of figure CH₂ outputted frequency f_2 ; pale blue line shows the curve of frequency f of output frequency's subtraction CH

图 5. 位移与输出频率关系曲线图；图中紫线表示输出 CH₁ 口输出的频率 f_1 曲线，黄线表示输出 CH₂ 口输出的频率 f_2 曲线，浅蓝线表示输出差频 CH 频率 f 曲线

Table 1. Results data tables

表 1. 结果数据表

试验条件		温度 18 度，电压 5 V		
移(mm)	CH ₁ (Hz)	CH ₂ (Hz)	CH (Hz)	
0.001	11,800	11,780	20	
0.1	12,349	11,191	1158	
0.2	12,970	10,620	2350	
0.3	13,547	10,013	3534	
0.4	14,120	9410	4710	
0.5	14,725	8835	5891	
0.6	15,300	8236	7064	
0.7	15,943	7670	8273	
0.8	16,452	7028	9424	
0.9	17,090	6480	10,610	
1	17,680	5895	11,785	
1.1	18,250	5290	12,960	
1.2	18,850	4710	14,140	
1.3	19,400	4110	15,290	
1.4	20,030	3540	16,490	
1.5	20,580	2975	17,605	
1.6	21,180	2320	18,860	
1.7	21,753	1767	19,986	
1.8	22,360	1158	21,202	

容传感器的输出特性完全是线性的。由表中的第一栏数据 CH_1 、 CH_2 的平均值得得：当 CH_1 为其平均值频率 11,790 Hz 时， $CH_1 = CH_2$ ， $CH = 0$ ，说明差动电容器的动片刚好位于两定片的正中，对应的电容为 C_0 ，对应的频率 $f_0 = 11,790$ Hz。

5. 小结

利用差动原理消除共模信号对电路影响，设计出了两种数字式对称差动变频检测集成电路。该电路的实验表明：消除传感器调频检测中频率不稳定的瓶颈问题，提高检测灵敏度，不必经 A/D 转换器直接变成数字输出信号，具有远程无线发射功能。还具有变间隙式电容传感器的输出为完全线性结果。输出的灵敏度达到 $0.084 \mu\text{m}/\text{Hz}$ 。

基金项目

国家级大学生创新项目基金 201410622002。

参考文献 (References)

- [1] 王明灼, 陈立峰. 基于 CST 检测技术及 DFCT 电路实现[J]. 现代电子技术, 2012(21): 151-155.
- [2] 王明灼. 一种传感器检测电路[P]. 中国专利, ZL201420644529.2. 2015-02-04.
- [3] Kwok, H.K. and Jones, D.L. (2000) Improved Instantaneous Frequency Estimation Using an Adaptive Short-Time Fourier Transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **48**, 2964-2972. <https://doi.org/10.1109/78.869059>
- [4] 阎石. 数字电子技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [5] 付进, 梁国龙. 基于瞬时频率估计的双曲调频检测技术[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2007, 4(21): 61-65.
- [6] 华成英, 童诗白. 模拟电子技术基础[M]. 第 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org