

pF级电容式变换器性能检测系统的设计

云子¹ 骆玉霞² 崔晶²

(1. 呼和浩特职业学院高职研究所 呼和浩特 010051; 2. 北京工业大学机电学院 北京 100124)

摘要: 针对电容式变换器性能检测系统中, 由于寄生电容和磁屏蔽等影响, 降低了变换器容值输入精度的问题, 设计了一款带 pF 级开关电容阵列的电容式变换器性能检测系统。首先, 搭建 pF 级开关电容网络, 通过超低寄生电容器件的选取、开关电容网络电路和多层 PCB 板的设计, 降低了电路中的寄生电容并增强了系统的磁屏蔽能力。其次, 搭建变换器 6 选 1 模块, 用于变换器输出数据的采集与处理。再次, 基于 STM32 搭建核心处理模块, 用于系统的控制、数据的分析与存储。最后, 在电容式变换器上进行不同容值输入的测试。测试结果表明, pF 级开关电容网络输出容值精度达到 ± 0.04 pF, 且系统采集变换器输出电压精度达到 4 mV。实验结果验证了本检测系统的可靠性和精度, 为后续相应系统的开发提供了重要的参考和设计依据。

关键词: 电容式变换器; pF 级; 性能检测

中图分类号: TN402 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

System design for performance test of pF capacitive transducer

Yun Zi¹ Luo Yuxia² Cui Jing²

(1. Higher Vocational Institute, Hohhot Vocational College, Hohhot 010051, China;

2. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In the performance test of capacitive transducer, due to parasitic capacitance and electromagnetic shielding problems, it's difficult to ensure the precision of capacitance value, so design a switched capacitor network to solve this problem. First, building the switched capacitor network module, through choosing low parasitic capacitance components and designing multiple layers PCB boards, can reduce the parasitic capacitance and improve the capability of electromagnetic shielding. Then, building 6 choose 1 module for data acquisition and processing. Furthermore, building processing central module based on STM32 for system control, data analysis and storage. Finally, carrying out different capacity value tests on capacitive transducer. The test results showed that the accuracy of capacity value reached ± 0.04 pF in switched capacitor network module, and acquisition accuracy reached 4 mV. The experimental results verify the reliability and accuracy of this test system, and it provides an important reference for further development.

Keywords: capacitive transducer; pF; performance test

1 引言

电容式传感器作为常规传感器之一, 被广泛应用于航空航天、精密机械加工及精密仪器等生产领域^[1-2], 与之配套的变换器可以实现电容到电压的变换, 方便上位机对采集数值的处理。但由于分布电容、引线电容和电磁干扰等影响^[3], 带来很大的不确定性, 因此要求电容式变换器具有动态范围大、抗杂散性好、灵敏度高等特点^[4]。所以对电容式变换器进行出厂性能测试变得尤为重要。

该系统主要针对 pF 级电容式变换器进行性能检测, 设计一款可实现 6 组电容式变换器性能轮训测试系统。要

求包含 pF 级开关电容网络, 用于模拟传感器的输出, 作为可调容值源作为变换器的输入, 并设计相应的采集和控制电路, 可实现变换器数据的采集、分析和存储。

目前国内外研究的课题主要是针对微小电容测量提出一些测量方法、测量电路, 然后对电容式变换器性能的检测却没有可参考的方案。在一些特殊的应用场合, 如纳米级高精度电容位移传感器、电容层析成像中, 其电容量在 0.1~1 pF 量级, 但由于分布电容、电磁干扰等因素, 使得寄生电容往往比被测容值高出几个数量级^[5-6], 所以对于本系统中搭建 pF 级电容网络一个复杂而棘手的问题。且系统如何进行功能划分, 以及电气配线工艺的设计, 实现 6 组变

换器的轮训检测,也是需要解决的难点问题。

2 系统总体设计

如图1所示,系统设计为3大模块:pF级开关电容网络模块、变换器6选1输出模块、核心处理模块。pF级开

关电容网络模块用于模拟电容式传感器容值的输出,作为电容式变换器的输入;变换器6选1输出模块,用于信号的选通与处理;核心处理模块,实现对系统的控制、数据的处理与实时显示、数据存储以及实验结果实时打印等功能。

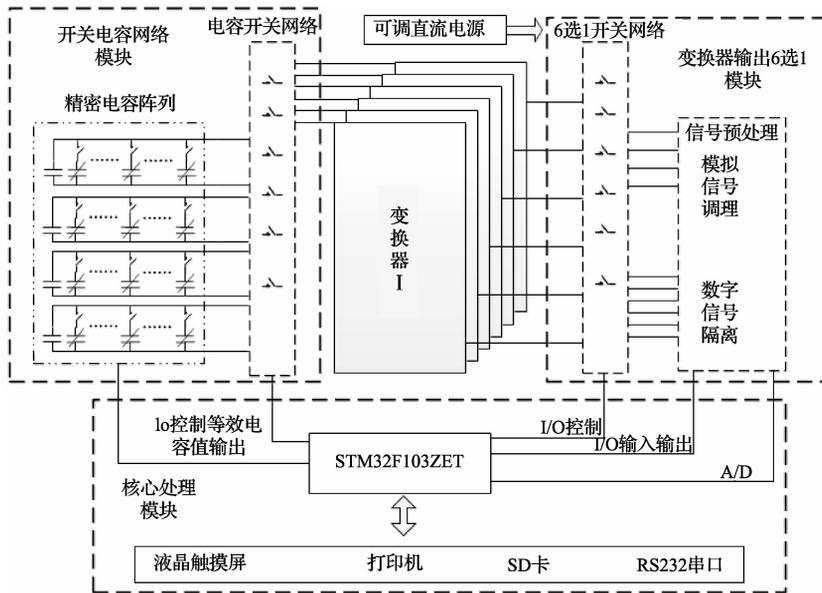


图1 系统设计

3 各功能模块设计

3.1 pF级开关电容网络的设计

3.1.1 测试容值要求

所测的电容式变换器分为3种类型,分别为变换器I、II、III;每种类型所输入的容值有一定的区别,其对应关系如表1所示。

表1 容值与变换器类型对应

电容编号	变换器 I	变换器 II	变换器 III
Cap1	28.80 pF	28.80 pF	28.80 pF
Cap2	30.45 pF	31.45 pF	35.45 pF
Cap3	32.35 pF	36.45 pF	45.55 pF

从表中可以看出,3种变换器对应的总共有7种容值:28.8 pF、30.45 pF、31.45 pF、32.35 pF、35.45 pF、36.45 pF、45.55 pF,且要求精度达到 ± 0.1 pF。

具体精密容值的实现是:一个固定的容值26 pF和可调电容1.4~3 pF组合成固定的28.8 pF容值,其他容值在此基础上并联累加,所有电容均采用高精密宽温贴片电容,使容值本身的误差降到最低。

30.45 pF为固定28.8 pF与1.4~3 pF的组合;

31.45 pF为固定28.8 pF与1.4~3 pF的组合;

32.35 pF为固定28.8 pF、2pF与1.4~3 pF的组合;

35.45 pF为固定28.8 pF、5pF与1.4~3 pF的组合;

36.45 pF为固定28.8 pF、5pF与1.4~3 pF的组合;
45.55 pF为固定28.8 pF、10 pF、5 pF与1.4~3 pF的组合。

3.1.2 功能实现方法

每组电容式变换器需要同时4路电容的输入,每一路容值从上述7种容值选择其一输出,因此开关电容网络模块设计成由4块相同的单元板实现。不仅方便设计安装,并且便于将来的维护和更换。

如图2所示为一块单元板实现1个精密电容(7选1)的选择及输出通道(6选1)的确定。干簧管继电器r分为4组:左边2组进行电容值的选择和电容值稳定输出的接地组,右边2组进行输出通道的选择。

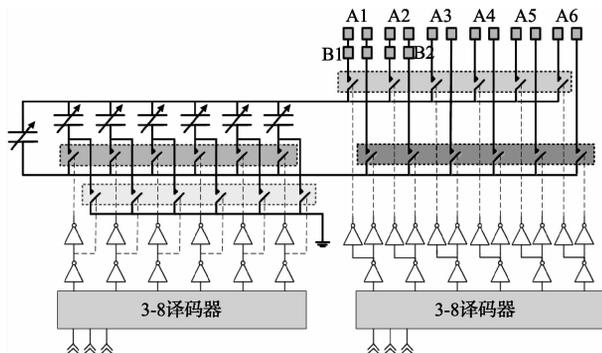


图2 精密输出电容阵列单元板设计

2 组干簧管继电器的控制是由 6 个 I/O 输出控制 2 个 74LS138 译码器,后接两级反向驱动 74HC04 实现。电容选择部分,由于测试中要求输出的 4 个精密电容相互独立,需要 CPU 提供 4 组独立的选通控制信号,因此需要 I/O 的数量为 $3 \times 4 = 12$ 个。输出变换器选择部分,由于测试中要求输出的 4 电容同时加载到 6 个变换器中的一个,CPU 提供 1 组选通控制信号即可,因此需要 I/O 数量为 3 个。因此精密电容阵列输出模块共需要的 CPU 提供 15 个 I/O 口作为选通控制。

电容稳定输出部分,干簧管继电器的控制信号与精密电容部分的继电器控制信号相反,目的是为了在没有选通某一路电容值时让其与大地相连,避免对当前输出电容值的影响。所以采用一级反向驱动信号作为继电器的控制信号。

3.1.3 降寄生电容和抗电磁干扰方法

在实际实现过程中,在分立元件较多的情况下,寄生电容较多,很难设计出比较实用的高精度电容电路。因此,一般电路主体大多采用芯片实现,集成度高,有利于减小 PCB 板噪声、干扰以及提高采集有效信号的精度^[7]。电

路设计中,为了尽可能减少电路中的分布电容和电磁干扰对小电容输出带来的影响,在设计中主要采取以下措施:

- 1) 切换开关采用磁屏蔽干簧管继电器,减少开关电容对小电容测量带来的影响。
- 2) 设计 4 层 PCB 板图,将传输的信号线置于两层地之间,降低外界对信号线的干扰。
- 3) 所有电缆均采用同轴电缆,以减少外界对小电容测量的影响。线缆端子选用 SMA 射频同轴端子,增强了信号传输的可靠性以及抗干扰性。

3.2 变换器 6 选 1 模块的设计

3.2.1 功能的划分

变换器 6 选 1 模块由 6 块变换器信号调理板和 1 块 6 选 1 底板组合实现。变换器信号调理板主要用于变换器输出信号的处理,6 选 1 底板用于 6 块变换器信号调理板信号传输的选通,也就相当于一个使能的作用。6 选 1 底板有 6 个插槽,分别插入 6 块变换器信号调理板,底板通过 74LS138 的使能选择哪一块变换器的输出信号的与 MCU 板联通,从而实现变换器输出的 6 选 1。具体控制功能如图 3 所示。

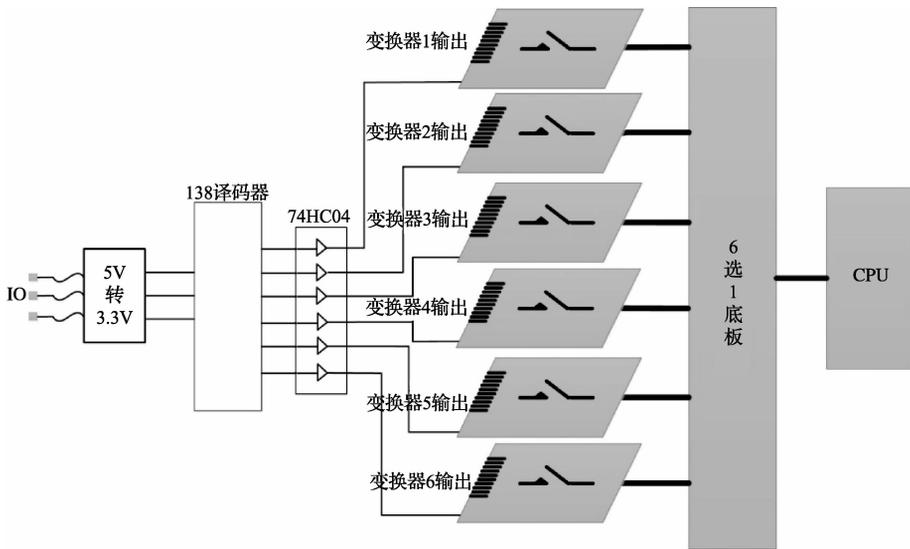


图 3 变换器 6 选 1 模块设计

3.2.2 功能实现方法

变换器在不同容值下,会输出不同电压值和 A、B、C 干接点状态,需要对其进行采集判断,成为变换器性能评

价依据。变换器输出电压信号的调理与传输,如图 4 所示。

变换器输出的电压信号,经 TS12A44514 常开模拟开关,经低通滤波后接 LMC6484 构成的电压跟随器隔离,经电阻分压后进入 STM32F103ZET 的 A/D 口。

A、B、C 干节点信号调理与传输,如图 5 所示,A、B 干节点状态的判定:A、B 干节点输出的两个干节点一端接地,另一端接上拉电阻,常态为高电平,当 A 或者 B 继电器闭合时,输入就变为低电平,所以可以根据信号是否为低电平判断 A、B 继电器是否闭合。

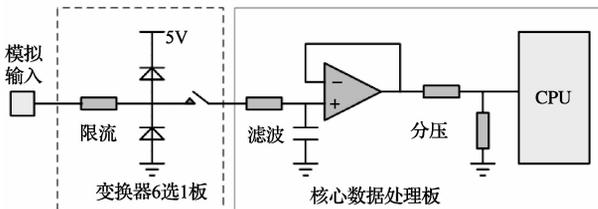


图 4 变换器电压信号调理原理

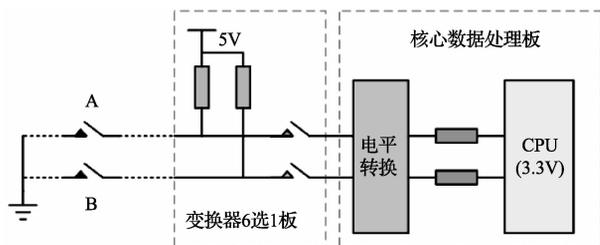


图5 A、B干节点信号判断方法

C干节点状态的判定:在 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 的两端并上常闭模拟开关TS12A44515,通过74LS139(2-4译码电路)的输出分别控制模拟开关TS12A44515的使能端,控制某一路的断开,通过逐次扫描就可判定 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 继电器的状态。如图6所示。

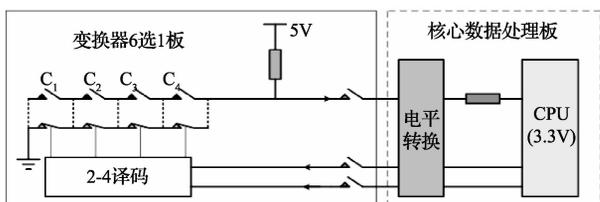


图6 C干节点信号判断方法

以 C_1 测试为例:单片机控制TS12A44515的4个常闭开关中与 C_1 并联的模拟开关断开,若电路导通(接收I/O信号为低电平),则 C_1 处于闭合状态;若电路不导通(接收

I/O信号为高电平),则 C_1 处于断开状态。

A、B、C继电器节点信号的上拉电阻端接TS12A44514常开模拟开关输入口,输出端经SN74LVC4245A实现输入5V到3.3V的电平转换,之后接入CPU的I/O口。

3.3 核心处理模块的设计

核心处理模块CPU选用STM32F103ZET系列基于专为要求高性能、低成本、低功耗的嵌入式应用专门设计的ARM Cortex-M3内核^[8]。单片机自带2个12位 μs 级的A/D(16通道),方便系统采用对多路4路信号的采集方式。单片机最多可配置为112个I/O口可用于继电器的控制、开关量测试及各种数字逻辑的输入输出。具有超多的外设,极高集成度^[9-10]。具体功能包括:

- 1) I/O端口的电平转换;
- 2) 模拟信号的调理;
- 3) 各模块供电的转换;
- 4) 通过USART2与打印机通信;
- 5) 电容网络模块、变换器6选1板、液晶、SD卡、RS232等接口。

4 系统测试

4.1 pF级开关电容网络的测试

开关电容网络模块容值采用Agilent E4980A高速电容测试仪测量,测试仪可精确到小数点后5位。具体容值测试的结果如表2所示,最终测试精度达到 ± 0.04 pF。

表2 开关电容网络容值测试

参考容值	通道1	通道2	通道3	通道4	通道5	通道6	误差/pF
28.80	28.80	28.80	28.80	28.80	28.79	28.77	-0.03
30.45	30.45	30.45	30.45	30.43	30.44	30.42	-0.03
31.45	31.45	31.46	31.47	31.46	31.47	31.47	+0.02
32.35	32.35	32.34	32.33	32.32	32.33	32.32	-0.03
35.45	35.47	35.45	35.46	35.46	35.47	35.49	+0.04
36.45	36.44	36.45	36.43	36.43	36.42	36.41	-0.04
45.55	45.55	45.56	45.55	45.57	45.56	45.59	+0.04

4.2 电压采集精度的测试

测试方法采用输入不同容值下,采集变换器输出电

压,与参考电压比较,得出系统电压采集精度。具体容值测试的结果如表3所示,最终测试精度达到0.004 V。

表3 电压采集测试

参考电压	通道1	通道2	通道3	通道4	通道5	通道6	误差/V
0.046	0.046	0.048	0.046	0.047	0.046	0.047	0.002
1.490	1.490	1.492	1.491	1.490	1.491	1.490	0.002
1.704	1.704	1.705	1.704	1.708	1.705	1.704	0.004
2.586	2.586	2.587	2.586	2.586	2.588	2.586	0.002
3.104	3.104	3.105	3.107	3.106	3.104	3.106	0.003
3.545	3.546	3.547	3.546	3.545	3.548	3.545	0.003
4.455	4.455	4.455	4.456	4.457	4.456	4.457	0.002

4.3 系统功能的测试

在系统连接变换器的条件下进行整体功能的测试,如图7所示为变换器性能测试结果 SD 卡存储图,包含测试时间 2014/11/6/17:36、测试通道 1、变换器类型 2、当前工作电压 27.43 V、电流 342 mA、输入 4 路容值 28.80 pF、变换器输出 4 路电压分别为 0.046 V、0.046 V、0.046 V、0.046 V、A、B、C₁~C₄ 继电器状态均为闭合状态,测试状态为 OK,表示变换器此状态工作正常。

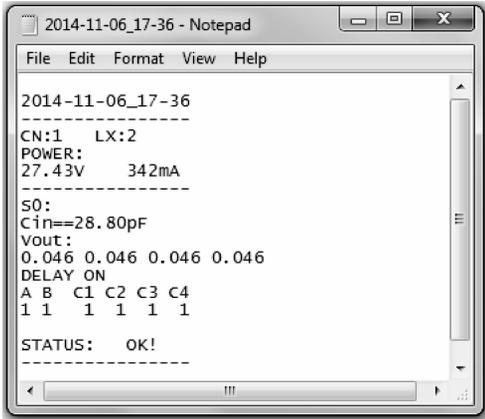


图7 测试结果 SD 卡存储

5 结 论

构建 pF 级电容式变换器性能检测系统,有效解决了微小精密电容变换器性能测试问题。搭建 pF 级开关电容网络,并提出了一系列解决寄生电容和电磁干扰等措施,使得容值输出误差降低到 ± 0.04 pF。搭建变换器 6 选 1 模块,通过 6 块信号处理板与传输底板的组合,实现了 6 组变换器的轮训测试。搭建 STM32 核心处理模块,实现了系统的控制、数据的分析与存储。并通过测试结果验证了本系统的可靠性和精度,为后续相应系统的开发提供了重要的参考和设计依据,并可作为电容变换器出厂前的性能检测和定级,为高精密微小电容变换器的测试和自检提供一个便捷的平台。

参考文献

- [1] 尹志生,冯佳,李佩明. 单极板微位移电容传感器结构设计及优化[J]. 传感器与微系统,2014,33(7): 63-66.
- [2] 朱霄,波苑伟,政任森. 一种电容式传感器数字化通用检测接口设计[J]. 国外电子测量技术,2013,32(1): 62-65.
- [3] 邓芳明,何怡刚,张朝龙. 低功耗全数字电容式传感器接口电路设计[J]. 仪器仪表学报,2014,35(5): 994-997.
- [4] 郑志霞,冯勇建. MEMS 接触电容式高温压力传感器的温度效应[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(12): 1141-1147.
- [5] 刘秉安. 电容式传感器寄生电容的抑制[J]. 国外电子测量技术,2011,30(3): 46-49.
- [6] 戴宇晟,王国辉,关永. 功率 MOSFET 寄生电容劣化对开关瞬态响应的影响[J]. 电源技术,2014,38(4): 661-664.
- [7] 潘湖迪,陈大果,李梦,等. 高精度微弱电容检测系统的设计与实现[J]. 仪表技术,2013(8): 44-47.
- [8] 崔文婷,王银玲. 基于 STM32 的风机测速仪的设计[J]. 电子测量技术,2014,37(8): 107-110.
- [9] 李进科,邓文怡,黄庭梁. 基于 STM32 的便携式信息采集系统的设计[J]. 微型机与应用,2012,31(20): 17-18.
- [10] 董昊,石九龙,刘锦高. 基于 STM32F103 的贴片机控制系统的设计与实现[J]. 电子设计工程,2014,22(4): 158-161.

作者简介

云子,1965 年出生,高级工程师。主要研究方向为机电一体化。

E-mail: yunzi200606@sina.com

骆玉霞,1990 年出生,硕士研究生。主要研究方向为机电系统控制及自动化。

E-mail: 461912437@qq.com