DOI: 10.13382/j.jemi.B2205810

振荡电路式 LVDT 测量系统设计*

李佰明 袁 杰 王坤东 雷华明
(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

摘 要:针对传统 LVDT 测量电路中高成本模块较多且性能不足的问题,提出并设计了一种基于振荡电路的 LVDT 测量系统。测量系统将 LVDT 线圈作为谐振电感接入高性能 LC 振荡器,利用其谐振信号的频移获得待测位移,借助谐振器数学模型及理论分析改善测量系统线性度。样机实验结果显示,在满位移状态下频率范围可达到 73~122 kHz,采样速率和分辨率可根据实际需求进行调整,其最高分辨率可达到 16.7 bits,实现亚微米级测量,此时采样速率为 200 Sps,非线性误差为 0.14%FS。与传统电桥方法相比,该测量系统综合性能更优,且无需低失真激励及高精度解调模块,在电路成本和尺寸方面具有显著优势。

关键词: 线性可变差变压器;LC 振荡电路;位移测量;电感传感器
中图分类号: TH822;TN752 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.40

Design of LVDT measurement system based on oscillator circuit

Li Baiming Yuan Jie Wang Kundong Lei Huaming
(School of Electronics Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Focusing on the problem that traditional LVDT measurement circuit requires many high-cost modules and that the performance is relatively low, a LVDT measurement system based on oscillation circuit is proposed and designed. LVDT coil is connected to a high-performance LC oscillator as a resonant inductance. Displacement is obtained by using the frequency shift of the resonance signal. System linearity is improved with the help of the resonator mathematical model and theoretical analysis. The experimental results of the prototype show that under the full displacement state, the frequency range span can reach 73~122 kHz. The sampling rate and resolution can be adjusted according to the actual needs. A submicronic measuring resolution of 16.7 bits is achieved when the sampling rate is 200 Sps and the nonlinearity error is 0.14% FS. The measurement system outperforms the traditional bridge circuit in most aspects, and does not need low distortion excitation and high-precision demodulation module. Besides, it has significant advantages in circuit cost and size.

Keywords: linear variable differential transformer; LC oscillation circuit; displacement measurement; inductive sensor

0 引 言

微位移测量[1-3]对高精度测量、精密加工、集成电路生产等领域有着重要意义[4-6]。线性差动变压器(linear variable differential transformer,LVDT)位移传感器是一种实用的位移检测装置,该传感器主要由线圈和铁芯组成调制单元[7-9],将铁芯移动距离转换为线圈阻抗变化信号,其结构简单、灵敏度高、使用寿命长,被广泛应用在精密要求较高的机械加工领域,并能在极其复杂和苛刻的环境下正常工作[10]。由于 LVDT 传感器无法单独使用,故测量电路的设计对测量结果具有非常关键的作用。同步解调方法[11-13]原理简单且精度良好,是目前应用最广泛的方法。基于高速采样和数字信号处理的方法[14]也可实现非常高的分辨率和数据采样频率。但上述方法对电路有较高要求,需要正弦波激励、数模转换、乘法器或数字信号处理器等模块。为减少电路面积,已有集成了激励模块和解调模块的商用集成芯片可供使用,例如 ADI 公司的 AD598[15]和 AD698[16],但其价格昂贵、设计自由度较低。

基于振荡电路的 LVDT 测量电路[17-18]将 LVDT 线圈作为谐振电感接入 LC 谐振电路,使用谐振电路输出正弦

收稿日期: 2022-09-12 Received Date: 2022-09-12
*基金项目:国家重点研发计划(2021YFB3203100)资助项目

信号的频移获得待测位移信息[19]，其在电路成本和面积方面具有显著优势，但该测量电路缺乏理论推导，各项性能指标较其他高精度方法差，工程实用价值低。本文针对该电路中目前存在的问题，搭建高性能谐振电路并建立其数学模型，提高谐振信号频率稳定性，改进测频方法提升测量系统的分辨率和采样速率，实现动态亚微米级测量。此外，针对 LVDT 本身的非线性因素，设计能够自适应改变参数的线性补偿模型，有效的减小了测量系统的线性度误差，增强了该测量系统对不同 LVDT 的普适性。

1 测量系统设计

本文所提出的基于谐振电路方法的 LVDT 测量系统如图 1 所示。LVDT 中铁芯位置发生变化时，LVDT 中线圈的电感随之改变；测量系统通过控制高速模拟开关 SW，将 LVDT 的两个副边线圈分别作为电感 L_1、L_2 交替接入谐振电路，由数字频率计对输出信号频率进行测量并精确反映 LVDT 线圈的电感，进而确定传感器待测位移。该测量系统使用 LVDT 的两个差动副边线圈，对三线式 LVDT 和四线式 LVDT 均适用。

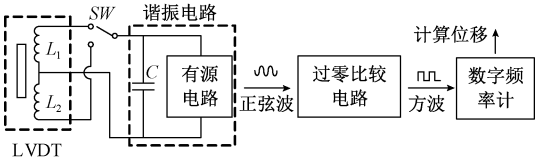


图 1 测量系统功能框图

Fig. 1 Functional block diagram of measuring system

1.1 谐振电路设计

考虑将 LVDT 中单个线圈作为电感 L 接入谐振器时，谐振电路模型如图 2(a)所示，其中，R_L 为电感 L 的等效串联电阻，包括模拟开关导通电阻和线圈内阻；C 为谐振电容，R_C 为谐振电容的等效串联电阻；MOS 管 T_1、T_2、T_3 和 T_4 组成了互补交叉耦合电路[20]，Q_1、Q_2 与限流电阻 R_1 组成镜像电流源，其共同构成了互补交叉耦合谐振电路，具有输出信号频率范围大，波形质量好等优点。将电路模型转化为图 2(b)中的并联等效电模型，U 为电路的输出谐振信号，其谐振频率为 f；L_P、R_P 和 C_P 分别为原电路的等效并联电感、电阻和电容，负值电阻 R_T 为有源电路的等效模型，其值分别为：

$$L_P = L\left(1 + \frac{1}{Q_L^2}\right) \tag{1}$$

$$C_P = \frac{C}{1 + \dfrac{1}{Q_C^2}} + C_{mos} \approx C + C_{mos} \tag{2}$$

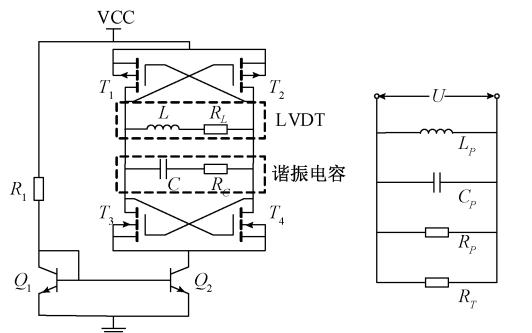
$$R_P = [R_L(1 + Q_L^2)]//[R_C(1 + Q_C^2)] \tag{3}$$

$$R_T = \frac{-4}{g_{m1} + g_{m2} + g_{m3} + g_{m4}} \tag{4}$$

式中：Q_L 为 LVDT 线圈的品质因数，其值为 $(2\pi fL)/R_L$；Q_C 为谐振电容的品质因数，其值为 $1/(2\pi fR_CC)$，由于电容的品质因数非常大，故 C_P 可化简为 $C + C_{mos}$；C_{mos} 为 MOS 管的寄生电容；$g_{m1} \sim g_{m4}$ 分别为 $T_1 \sim T_4$ 的互导；$|R_T| > R_P$ 为该谐振电路的谐振条件，谐振条件满足时，实际谐振频率为 $f = 1/(2\pi\sqrt{L_pC_p})$，代入式(1)、(2)后可得：

$$f^2 = \frac{1}{4\pi^2L(C + C_{mos})} - \frac{R_L^2}{4\pi^2L^2} \approx \frac{1}{4\pi^2L(C + C_{mos})} \tag{5}$$

由式(5)可知，R_L 的存在会为谐振频率引入一定的偏移；为消除 R_L 的影响，选择元器件时需考虑减小谐振电容 C、寄生电容 C_{mos} 和模拟开关通路电阻，使得 $1/(4\pi^2L(C + C_{mos})) \gg R_L^2/(4\pi^2L^2)$。此外，$C_{mos}$ 取决于 MOS 管两端电压大小，故需要增大限流电阻 R_1 抑制谐振信号幅值，避免 C_{mos} 有较大波动影响谐振频率稳定性。



(a) 振荡电路设计 (a) Oscillation circuit design

(b) 等效电路模型 (b) Equivalent circuit model

图 2 互补交叉耦合振荡电路模型

Fig. 2 Schematic diagram of complementary cross-coupling oscillator circuit

1.2 数字频率计设计

为精准测得谐振信号的频率，数字频率计使用等精度测频方法[21]，该方法主要依靠在闸门时间 T_g 内同时对系统时钟信号和待测信号的脉冲进行计数，当系统时钟频率为 f_{clk} 时，满足如下关系：

$$T_g = \frac{f}{N_{sig}} = \frac{f_{clk}}{N_{clk}} \tag{6}$$

其中，N_{sig} 和 N_{clk} 分别为闸门时间内系统时钟信号和待测信号的脉冲计数值。在使用上述公式计算待测频率 f 时，其测量误差如下所示：

$$\Delta f = \frac{N_{sig}}{N_{clk}}\Delta f_{clk} + \frac{f_{clk}}{N_{clk}}\Delta N_{sig} - \frac{f_{clk}N_{sig}}{N_{clk}^2}\Delta N_{clk} \approx \frac{f}{f_{clk}T_{gate}} \tag{7}$$

其中,测量过程中 $f \ll f_{clk}$,故有 $N_{sig}/N_{clk} \approx 0$;由于闸门时间 T_g 在系统时钟域内,测量过程中可在设定值上适当延长以确保对待测方波的准确计数,故有 $\Delta N_{clk} \approx 0$, $\Delta N_{clk} \approx \pm 1$;化简后得到测频的相对误差将稳定为 $\Delta f/f = 1/(f_{clk}T_{gate})$,测量分辨率为 $\log2(f_{clk}T_g)$。测量位移时两个线圈将被交替接入电路,切换线圈时需要考虑等待延迟时间 T_d 以保证谐振信号在闸门时间 T_g 内已经稳定。此外,由于任意两次连续的频率测量都能计算一次位移数据,故系统采样速率为 $1/(T_d + T_g)$ 。

由上所述,提高 T_g 可以增加数字频率计的分辨率,同时也会减少系统采样速率。系统整体的测量分辨率与多种因素有关,单一提高数字频率计的分辨率超过一定程度后将无法继续改善系统的整体分辨率。故 T_g 需要根据实际情况进行权衡,确保在不影响系统整体分辨率的情况下具有最快采样速率。而 T_d 可由实验获得,保证测频时信号稳定即可。

1.3　数学模型与线性补偿

如前所述,切换模拟开关将两个线圈交替接入谐振电路,数字频率计得到的信号频率 f_1 和 f_2 能够表示相应线圈的电感 L_1 和 L_2。L_1 和 L_2 在理想情况下与待测位移满足线性关系,即:

$$L_1 = L_0 + S\Delta x \tag{8}$$

$$L_2 = L_0 - S\Delta x \tag{9}$$

其中,Δx 为铁芯向某个方向移动的距离; S 为两个线圈电感关于铁芯位移 Δx 的灵敏度; L_0 为两个线圈电感在 $\Delta x = 0$ 时的零位电感。为消除温度漂移产生的影响[22],一般使用比例方法计算位移,即:

$$\Delta x \sim \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2} = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_1^2 + f_2^2} \tag{10}$$

而实际测量过程中 LVDT 自身及测量电路的非线性无可避免,生产过程中需要结合测量电路对线圈结构进行调整与优化,保证测量系统输出线性度最优。由于本方法与传统电桥方法区别较大,故线圈结构上的优化调整对本文中测量系统无效甚至产生负面效果。为提高该测量电路的线性度以及对不同 LVDT 的泛用性,可在式(10)基础上引入修正因子设定线性补偿模型。主要考虑以下两点:1)传统测量电路中两个副边线圈同时被激励,故使用式(8)计算位移时需要考虑互感影响;2)LVDT 的两个副边线圈参数不完全对称,即式(8)、(9)中各自的灵敏度 S 及零位电感 L_0 不完全相同。综上,设计线性补偿模型为:

$$\Delta x \sim \frac{L_1 - \lambda L_2}{L_1 + \lambda L_2 + k\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{\lambda f_2^2 - f_1^2}{f_1^2 + \lambda f_2^2 + k f_1 f_2} \tag{11}$$

其中, λ 为比例修正系数,主要用以修正两个线圈的对称性; k 为互感修正系数,主要用以引入互感量;为确定 λ 和 k 的值,可在一定范围内对多个数值进行遍历,以线性度最优为目的选定修正因子。

2　测试结果及分析

本文的测量系统使用了和伍智造营生产的 LVDT 传感器 HSS10P,以及自行设计含有谐振电路及测频模块的 PCB 电路板,如图 3 所示。LVDT 量程为 10 mm,线圈串联等效电阻为 21 Ω,其测量电路为 ADI 公司的 AD698 方案。电源电压为 12 V;谐振器主要由 NCE4953、NCE9926、BC847BS 构成,其中谐振电容 C 为 1 nF,限流电阻 R_1 为 56 kΩ;模拟开关芯片为 ADG1423;比较器为 LM311。为减少高速数字信号及外界电磁干扰对谐振信号的影响,使用高速光耦 6N137 隔离数字电路与模拟电路,同时使用屏蔽线缆对 LVDT 进行了电磁屏蔽[23]。数字频率计模块使用 ALTERA 的 FPGA 芯片 EP4CE6E22C8,其时钟频率最高可达 400 MHz。测量中所使用的 LCR 阻抗分析仪型号为 R&S 公司的 HM8118 LCR,测量分辨率为 0.05%;精密位移平台的电机型号为 Akribis 公司的 XRV97,分辨力可达 50 nm,总位移量程可达 20 mm。

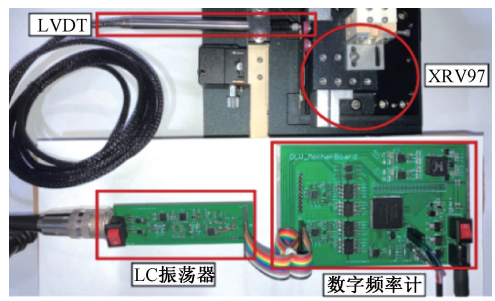


图 3　样机实验装置

Fig. 3　Prototype experimental device

2.1　系统分辨率评定

设置谐振电容 C 为 1 nF,限流电阻 R_1 为 56 kΩ,时钟频率 f_{clk} 为 400 MHz,计数时间 T_g 为 4 ms,延迟时间 T_d 在观测后设置为 1 ms,将两个线圈接入谐振电路的频率测量值 f_1 、f_2 随位移变化的关系如图 4 所示,对两个线圈的测量频率随位移增大而变化,且具有明显的差分性质,频率变化范围为 73~122 kHz。

此外,将待测位移保持 $\Delta x = 5$ mm,使用测量系统对 LVDT 进行连续的 1 000 次频率采样,图 5 为 LVDT 其中一个线圈频率测量样本的频数分布直方图。

由图 5 可见,其分布接近正态分布,选择置信水平为 66.7%,则该频率样本的置信区间宽度为 0.45 Hz,故其测量分辨率为 $\log2(122\ \text{kHz} - 73\ \text{kHz})/0.45\ \text{Hz}) = 16.7$ bits。

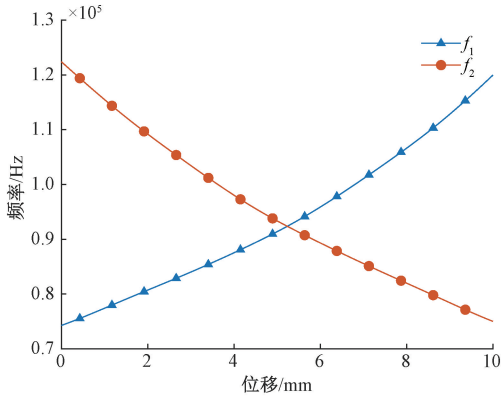


图 4 测量频率随位移变化曲线

Fig. 4 Measured frequency of oscillator with displacement

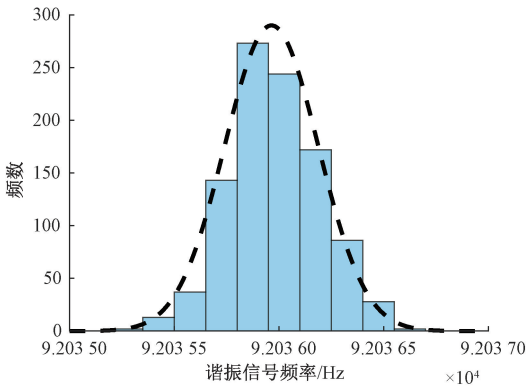


图 5 谐振频率分布直方图

Fig. 5 Histogram of resonant frequency distribution

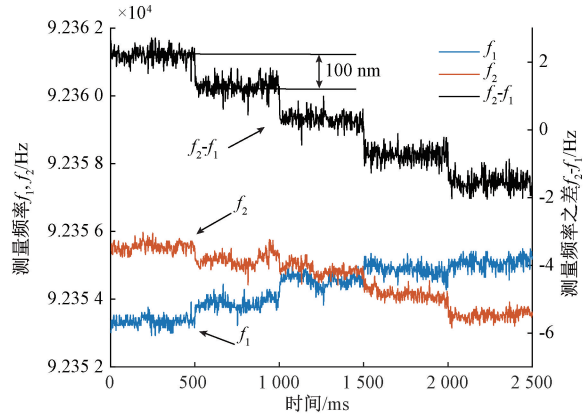


图 6 微小位移测量曲线(每次变化 100 nm)

Fig. 6 Micro-displacement measurement (100 nm per step)

表 1 测量系统在不同谐振电容及限流电阻下的分辨率

Table 1 Resolution improvement under different resonant capacitance and current limiting resistance

谐振电容/nF	限流电阻/kΩ	频率变化范围/kHz	置信区间宽度/Hz	分辨率/bits
0	5.6	[77,132]	9.56	12.5
0	20	[94,150]	2.70	14.3
0	56	[91,147]	1.69	15.0
1	5.6	[63,112]	4.91	13.3
1	20	[74,124]	1.09	15.5
1	56	[73,122]	0.45	16.7
15	5.6	[20,39]	1.27	13.8
15	20	[28,49]	0.30	15.8
15	39	[27,48]	0.22	16.5

在两个线圈谐振频率随位移变化曲线交点附近控制位移平台每隔 0.5 s 沿同一方向数次移动 100 nm,其结果如图 6 所示。从图中可以看出,由于噪声的存在,单个线圈的测量频率仅仅能够模糊反映微小位移的变化。但两个线圈的差分结果能够有效去除噪声,并能明显测量出施加微小位移的整个过程,充分验证了该测量系统的卓越分辨率。

使用相同标准对该 LVDT 原有的 AD698 方案进行分析,该方案下采样速率主要取决于 ADC 采样设置且同样与分辨率相互制约,其最大分辨率为 11.3 bits,此时 ADC 采样速率设定为 100 Hz。由此可见,本文测量系统在分辨率和采样速率方面均显著优于 AD698 方案。

2.2 系统参数对测量性能的影响分析

如 1.1 节所述,谐振电容 C 和限流电阻 R_1 的选择会影响谐振电路的性能,在其他条件不变情况下,选择不同谐振电容及限流电阻进行实验,结果如表 1 所示。

其中,谐振电容 C 选为 0 nF 时,表示其仅依靠 MOS 管和线圈的寄生电容作为谐振电容。由上表可知,谐振电容 C 过大会使得系统的频率变化范围整体变小,过小则会导致 C_{MOS} 对谐振频率的影响增大,信号频率波动加剧,均会限制测量分辨率。实验中增大限流电阻 R_1 能够有效减小谐振信号幅值,抑制 C_{MOS} 的大幅波动,有效提高分辨率。但 R_1 增大到一定程度后会导致谐振信号幅值过小甚至电路停振。故经过多次实验,测量系统中设置谐振电容 C 选为 1 nF,限流电阻 R_1 为 56 kΩ。

此外,为探究本测量系统采样速率与分辨率的关系,在其他条件不变情况下,选择不同时钟频率、采样时间进行实验,结果如表 2 所示。

由表 2 可知,提高时钟频率 f_{clk} 和计数时间 T_g 均能提高数字频率计的理论分辨率,但当理论分辨力高于 20 bits 时,其变化基本不再对测量结果的分辨率产生影响。故在将频率计数器理论分辨率保持在一定程度时,可对时钟频率和计数时间进行权衡。即使数字频率计受成本影响时钟频率较低,参数设置合理时也能获得理想

表 2　测量系统在不同计数时间及时钟频率下的分辨率

Table 2　Resolution improvement under different reference clock frequencies and counting time

计数时间/ ms	时钟频率/ MHz	理论分辨率/ bits	采样速率/ Sps	实际分辨率/ bits
1.5	50	16.2	400	14.1
1.5	200	18.2	400	15.7
1.5	400	19.2	400	16.3
4	50	17.6	200	15.7
4	200	19.6	200	16.6
4	400	20.6	200	16.7
9	50	18.8	100	16.4
9	200	21.8	100	16.7
9	400	22.8	100	16.7

的分辨率和采样速率,这使得本测量系统对高性能硬件的需求进一步降低。故经过多次实验,测量系统中设置时钟频率 f_{clk} 为 400 MHz,采样时间 T_g 为 4 ms,延迟时间 T_d 为 1 ms。

2.3　线性度测试结果及分析

为验证线圈电感与铁芯位移的变化关系,使用 LCR 测试仪在全量程范围内对 LVDT 传感器两个线圈的电感 L_1 和 L_2 进行测量,并使用 MATLAB 对 L_1、L_2 进行多项式拟合,可得到其关于位移 Δx 的多项表达式(单位为 μH)如下所示:

$$L_1 = 1\,095.29 - 97.93(\Delta x) + 4.08(\Delta x)^2 + \cdots \tag{12}$$

$$L_2 = 1\,140.08 + 104.69(\Delta x) + 4.68(\Delta x)^2 + \cdots \tag{13}$$

式(12)、(13)的对比说明实际 LVDT 中两个线圈的不对称性非常明显,也表明式(11)中引入比例修正系数 λ 的必要性。

实验中多种情况下测得的非线性误差随位移变化曲线如图 7 所示,其中曲线(A)是使用本文测量系统所测的频率数据和式(10)计算位移得到的误差曲线,非线性误差为 0.88%,其主要来自于以下两个误差项:1) LVDT 自身的非线性,2)使用测量频率替代线圈电感时的非线性;曲线(B)是使用 LCR 测量仪所测的电感数据和式(10)计算位移得到的误差曲线,其只包含误差项 1),非线性误差为 0.70%;曲线(A)与曲线(B)相比,其整体走势基本一致,曲线(C)是两者误差曲线之差,最差情况下两者仅相差 0.19%;曲线(D)是使用 LVDT 原有的 AD698 测量电路得到的误差曲线,其非线性误差为 0.16%,远优于曲线(A)和曲线(B)。

上述结果表明,本测量系统使用测得频率估计线圈电感非常准确,曲线(A)中的非线性主要来自于误差项 1);此外,该 LVDT 产品线圈结构显然与 AD698 方案适配性更高,不利于直接使用线圈电感直接计算位移。

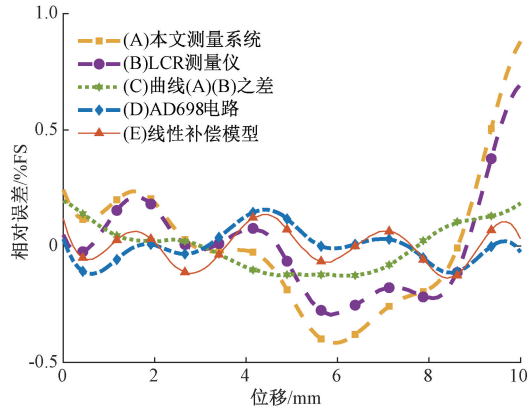


图 7　非线性误差曲线比较

Fig. 7　Nonlinearity versus displacement of different conditions

使用式(11)改良系统线性度时,设定 $\lambda \in [0.9, 1.1]$,$k \in [0,2]$,在参数范围内遍历寻找最佳线性度情况。在线性度最优情况下,非线性误差为 0.14%,$\lambda = 1.07$,$k = 0.72$。图 7 中曲线(E)为此时的误差曲线。式(11)在补偿系数合理时对线性度的补偿能力非常明显,其结果甚至略优于 AD698 的测量结果。而且通过遍历得到的补偿系数 λ 的最佳取值与式(12)、(13)中的一次项系数比例 104.69/97.93 = 1.069 非常接近,说明使用遍历法得到的最优结果符合实际情况。

3　结　论

本文研究并改进了基于谐振电路的 LVDT 位移传感器测量电路,对该测量系统进行了精确建模,并对采样速度、分辨率、线性度等指标进行了分析和测试,提出了可行的精确测频方案和位移计算模型。测量系统的分辨率与采样速率可根据实际需求进行权衡,例如在数据更新速度 200 Sps 时,其分辨率可达 16.7 bits,而当采样速率加快到数据更新速度 400 Sps 时,其分辨率仍能达到 16.3 bits,能够实现动态亚微米级测量。在对测量系统的非线性来源进行研究后,建立了自适应的补偿模型对非线性误差进行优化,使其非线性误差由 0.88%FS 改善为 0.14%FS,基本与传统测量电路持平。本测量系统的适用性比较广泛,实验证明其综合性能优于传统方法,且具有成本和功耗优势,在高速动态测量、高精度测量等领域具有很高的应用价值。下一步研究考虑将卡尔曼滤波算法融入到采样环节,并加入温度补偿,降低采样过程中的温漂和时漂,进一步提高测量性能。

参考文献

[1]　FLEMING A J. A review of nanometer resolution position sensors: Operation and performance [J]. Sensors and

Actuators A: Physical, 2013, 190:106-126.

[2] 高国旺,董磊,陈凯莉,等. 基于电涡流位移传感器的微间隙测量系统研究[J]. 国外电子测量技术,2019,38(8):141-144.
GAO G W, DONG L, CHEN K L, et al. Research on micro-gap measurement system based on eddy current displacement sensor[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019,38 (8):141-144.

[3] 邓永乐,王荣彪,唐健,等. 基于脉冲磁化的阵列磁桥式位移传感器[J]. 仪器仪表学报,2021,42(5):110-120.
DENG Y L, WANG R B, TANG J, et al. Magnetic bridge type displacement sensor array in square pulse magnetization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5):110-120.

[4] 许鑫,姚竹贤,王允,等. 球型惯性元件配合间隙差动共焦精密测量方法[J]. 仪器仪表学报,2019,40(4):1-8.
XU X, YAO ZH X, WANG Y, et al. Laser differential confocal-based high-precision measurement method for the matching clearance of spherical inertial elements[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40 (4):1-8.

[5] MAA K, KAM D. Generating electricity from mechanical vibrations: Optimization of linear a generator [J]. Instrumentation, 2021, 8(2):34-39.

[6] SILVA C W. Concepts for sensor matching in mechatronic systems[J]. Instrumentation, 2020, 7(3):1-14.

[7] 白晨朝,张洪朋,曾霖,等. 双螺线圈式液压油微污染物检测传感器[J]. 仪器仪表学报,2019,40(6):16-22.
BAI CH ZH, ZHANG H P, ZENG L, et al. Hydraulic oil micro contaminant detection sensor based on double solenoid[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40 (6):16-22.

[8] 陆招兰,王坤东,马有为,等. 悬浮式磁性液体球差动变压器式位移传感器[J]. 仪表技术与传感器,2020(10):4-7.
LU ZH L, WANG K D, MA Y W, et al. Differential transformer displacement sensor using suspending magnetic fluid ball [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(10):4-7.

[9] 陈浩,王立勇,陈涛. 电感式磨粒传感器线圈参数对磁场均匀性影响研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(1):10-16.
CHEN H, WANG L Y, CHEN T. Influence of coil parameters on magnetic field uniformity of inductance abrasive sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020,34 (1):10-16.

[10] 李满宏,周文林,吴玉,等. 核燃料组件自适应柔性检测装置及其误差补偿方法[J]. 仪器仪表学报,2019,40(8):91-101.
LI M H, ZHOU W L, WU Y, et al. Adaptive flexible detection device for nuclear fuel assembly and its error compensation method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(8):91-101.

[11] CHEN G, ZHANG B, LIU P, et al. An adaptive analog circuit for LVDT's nanometer measurement without losing sensitivity and range[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(4):2248-2254.

[12] 胡志,夏伟,刘逸卿. 新型 LVDT/RVDT 信号到数字转换器设计[J]. 电子测量技术,2018,41(12):73-76.
HU ZH, XIA W, LIU Y Q. New LVDT/RVDT signal to digital converter design [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(12): 73-76.

[13] 郁明辉,李鹏,刘肖肖. 双余度 LVDT 位移传感器输出电压线性度研究[J]. 电子测量技术,2020,43(2):26-32.
YU M H, LI P, LIU X X. Research on output voltage linearity of dual redundancy LVDT displacement sensor[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43 (2):26-32.

[14] MASI A, DANZECA S, LOSITO R, et al. A high precision radiation-tolerant LVDT conditioning module[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2014, 745:73-81.

[15] 罗星,王少永,张晓诚. 基于 AD598 的 LVDT 电路稳定性分析[J]. 测控技术,2020,39(6):14-17.
LUO X, WANG SH Y, ZHANG X CH. Stability analysis of LVDT circuit based on AD598[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(6):14-17.

[16] 张海飞,雷晓娟. 差动电感式位移传感器调理电路设计[J]. 自动化仪表,2020,41(2):58-62.
ZHANG H F, LEI X J. Design of conditioning circuit for differential inductance displacement transducer [J]. Process Automation Instrumentation, 2020, 41 (2):58-62.

[17] GUNASEKARAN V, ANIRUDDHAN S, GEORGE B, et al. A simple and efficient oscillator based read-out scheme for LVDT [C]. 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE, 2017:1-5.

[18] GUNASEKARAN V, GEORGE B, ANIRUDDHAN S, et al. Performance analysis of oscillator-based read-out

circuit for LVDT [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(4): 1080-1088.

[19] 黄子军,卞雷祥,李辉,等. 高 Q 值超低功耗谐振式磁传感器的设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2021,35(5):1-7.
HUANG Z J, BIAN L X, LI H, et al. Design and fabrication of a resonant magnetic field sensor with high quality factor and low power consumption[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(5):1-7.

[20] ZHANG F, MA C, ZHAO T. An expression for oscillation amplitude of NMOS/PMOS complementary cross-coupled LC-tank oscillator [C]. 2019 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), IEEE, 2019:1-3.

[21] 许可行,刘延飞,羊帆. 基于多周期同步测量的频率计设计[J]. 国外电子测量技术,2016,35(9):76-80.
LIU K X, LIU Y F, YANG F. Design of frequency meter based on multi-periods synchronous measurement [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(9):76-80.

[22] 张聪聪,管雪元,姜博文. 基于磁传感器的温度误差补偿方法[J]. 电子测量技术,2019,42(1):35-39.
ZHANG C C, GUAN X Y, JIANG B W. Compensation method of the thermal error based on magnetic sensor[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(1): 35-39.

[23] 王先华,贾森,郝安庆,等. 用于原子干涉测量的多段圆柱形磁屏蔽装置性能分析及实验研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(5):1-9.
WANG X H, JIA S, HAO AN Q, et al. Performance analysis and experiment study on multi-sectional cylindrical magnetic shield device used for atom interferometric measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5):1-9.

作者简介

李佰明,2020 年于天津大学获得学士学位,现为上海交通大学硕士研究生,主要研究方向为电感位移传感器。
E-mail: bmleee@ sjtu. edu. cn

Li Baiming received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2020. He is now a M. Sc. candidate of Shanghai Jiao Tong University. His main research interest includes inductive displacement sensors.

雷华明(通信作者),2005 年于上海交通大学获博士学位,现为上海交通大学高级工程师,硕士生导师,主要研究方向为电磁传感与探测、微弱信号检测、智能检测系统。
E-mail: hmlei@ sjtu. edu. cn

Lei Huaming (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Shanghai Jiao Tong University in 2005. He is now a senior engineer and master's supervisor of Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include electromagnetic sensing and detection, weak signal detection and intelligent detection systems.