

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005379

基于恒流源向电感充放电的 LVDT 设计*

周文娟¹ 欧阳斌林² 孙璇¹

(1. 黑龙江职业学院 电气工程学院 哈尔滨 150080; 2. 东北农业大学 电气与信息学院 哈尔滨 150030)

摘要: 针对目前工业测试场合中所用到线性可变差动变压器(LVDT)系统结构与电路组成较复杂,且线性度与灵敏度不高等因素;设计出了一款空心 LVDT,用直流恒流源作为其激励信号,由 ARM 单片机控制开关桥向原线圈充放电,在稳定放电期间,利用单片机的控制逻辑去捕获两个副线圈上的脉冲高度差来进行位移量的测量;最终试验数据表明,该方法所设计的空心 LVDT 在满量程为 3 mm 时,相对百分比精度可达 0.3%,灵敏度为 0.284 字/ μm ,且有较高的频率响应特性,能满足一般的工业自动控制与测量需求。

关键词: LVDT;电感充放电;ARM 单片机;恒流源

中图分类号: TM932 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.99

Design of LVDT based on constant current source charging or discharging to inductor

Zhou Wenjuan¹ Ouyang Binlin² Sun Xuan¹

(1. College of Electrical Engineering, Heilongjiang Polytechnic, Harbin 150080, China;

2. College of Electrical and Information, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Be aimed at the complex of the system structure and the circuit composition, and the low linearity and sensitivity of LVDT used in industrial testing, design a hollow LVDT, use the DC constant current as its excitation signal, and the ARM microcontroller controls the switch bridge to charge or discharge the original coil. During the stable discharge period, the microcontroller control logic is used to capture the pulse height difference between the two secondary coils to measure the displacement. The final test data show that the full scale of the hollow LVDT designed by this method is 3 mm. The relative percentage accuracy is 0.3%, the sensitivity is 0.284 words/ μm , and the high frequency response characteristic, which can meet the general industrial automatic control and measurement requirements.

Keywords: linear variable differential transformer; charging or discharging to inductor; ARM micro-controller; constant current

0 引言

为线性可变差动变压器(linear variable differential transformer, LVDT),作为测量位移的传感器,在工业智能控制与检测领域已得到广泛的应用。目前国内外其应用研究多采用专用芯片、FPGA、DSP 作为数字解调来获取数据^[1-8],如王宽等^[9]提出的基于 AD698 芯片的调理电路,采用比例输出,可实现隔离度达 1 500 V 有效值电压的隔离,也有用仿真软件来研究 LVDT 的性能及电磁原理,如曾涛等^[10]提出采用电磁阻尼器稳定细丝电极的实验结果其传感器的合成扩展不确定度约为 2.81 μm ;如郁明辉等^[11]、

郭莎等^[12]和何春舅等^[13]提出基于双冗余 LVDT 位移传感器则运用 Maxwell 电磁仿真软件进行输出电压线性度仿真验证。就位移传感器的激励源而言,有赵楠楠^[14]提出采用使用外围电路的体积得以简化的恒压恒流反激式 AC-DC 控制器芯片;也有徐泽华等^[15]基于 STM32 的便携式恒流源的设计。上述研究的侧重点对于一般的工业化应用,开发周期均偏长且研发成本较高,性价比偏低,普适性与推广性不强,只针对特定工控应用的场合。

本文介绍的基于直流恒流源向电感充放电的空心差动变压器测量位移的设计,其核心思想是在原线圈上加电流脉冲方波激励信号,在两个副线圈上测量脉冲高度的差分

收稿日期:2020-11-18

* 基金项目:黑龙江哲学社会科学规划项目(18JYH760)资助

信号来测量 LVDT 的差动位移量,电路构成简单且无电容元件,采用空心 LVDT 进行差动位移量测量的方式,其特点与优势在于可用数量级较小的电感量和互感量(μH),因而充放电的周期较短,从而会有较高的数据采样频率。

该线性可变差动位移传感器的线性度与灵敏度较高,开发成本低,研发周期较短,可应用在一般的工控领域。

1 系统结构原理

1.1 系统原理

系统工作原理如图 1 所示,采用空心 LVDT,通过恒流源电路向电感充放电来测量电感值进而来分析 LVDT 的互感特性。其工作过程为恒流源 I_s 通过开关桥路 $S_1 \sim S_4$ 周期地向 LVDT 的激励线圈 L_1 充放电,充电到 L_1 中的电流为 I_s 后切换到放电状态,放电时 L_1 中储存的磁通链通过二极管进行释放,放电同时会在两个副线圈 L_{21} 和 L_{22} 上感应出脉冲电压,其高度差 U_2 (放电后期的振荡信号被滤除,仅保留稳定信号),此信号与 LVDT 的位移量成正比。由于结构中没有了磁芯,故差动位移的是激励线圈 L_1 。

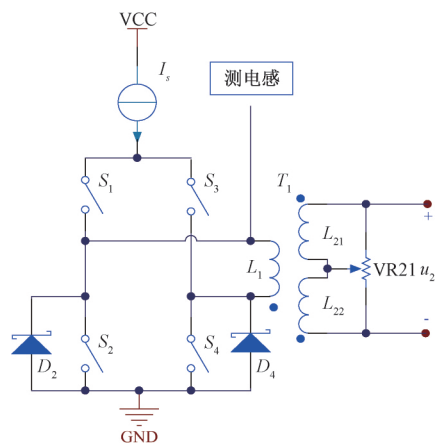


图 1 工作原理

以正向充放电为例,当 S_1 与 S_4 合上时, I_s 向 L_1 正向充电直到 L_1 的电流为 I_s 后断开 S_1 开始放电,放电回路为 L_1 同名端— S_4 — D_2 — L_1 的异名端,在稳定放电期间,肖特基二极管 D_2 上的电压为 0.3 V,(测量期间可测量电感值,但 LVDT 的位移可不采用电感值变量)。放电同时,在副线圈 L_{21} 和 L_{22} 的同名端会感应出正脉冲,这两个脉冲的高度差 U_2 与 LVDT 的差动成正比。因 LVDT 结构制造以及线圈非完全对称性,故采用电位器 VR21 来进行 LVDT 的中点平衡调试。

1.2 空心 LVDT 的构造

空心 LVDT 的构造如图 2 所示,两个固定不动直径为 20 mm 副线圈 L_{21} 和 L_{22} 连同骨架套于 PVC 管之上,后将 PVC 管固定于支架上。线圈长度 4 mm,相互间隔 5 mm,用 0.1 mm 直径的漆包线绕制 130 匝。因其无磁芯,故原

线圈 L_1 是可进行位移,为安装方便起见, L_1 的直径为 10 mm,长度和匝数都与副线圈相同,固定在一个木质的移动杆上,移动杆可以左右滑动,最后找到定位后与固定支架的千分尺联动,便于对位移量进行标定。

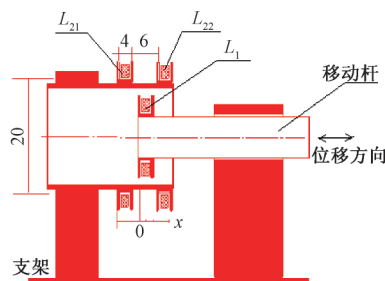


图 2 空心 LVDT 的构造

位移变量 x 的刻度确定是通过试验所得,先用两个副线圈的间距的中点确定 x 刻度的中点,然后试验测量各自副线圈的信号的最大值所对应的位移位置,来最终确定中点的位置,最后从线性度来确定 x 的线性量程范围,进而确定 x 的刻度起点零。其中,从左到右的刻度划分为起点零、中点、满量程,这样设计刻度的目的是使 $x > 0$ 。

位移 x 在滑动的全程任意位置,得出的结果为 L_1 电感量的 Δt 的定时计数值始终为 $N_{\Delta t} = 1594$,证明位移 x 与 L_1 的电感值无关,若每微秒为 50 个计数值,故 Δt 约为 $32 \mu\text{s}$,电感值为 $102 \mu\text{H}$ 。副线圈 L_{21} 的 $N_{\Delta t} = 2850$,对应的电感量为 $182.4 \mu\text{H}$;副线圈 L_{22} 的 $N_{\Delta t} = 2838$,对应的电感量为 $181.6 \mu\text{H}$,二者差 $0.8 \mu\text{H}$ 接近一致。

1.3 调中点平衡原理及过程

采用空心 LVDT 的测量差动位移量的方式,副线圈上的信号是复杂的周期信号,在本文中只用了其中稳定放电期间的一小段信号,故需设计专门的测试电路和控制装置才能测量出副线圈上的有用信号,进行副线圈的信号数据的获取,最终才能调中点平衡。

1) 副线圈稳定放电期间脉冲高度的获取原理

如图 3 所示,采用 ARM 单片机控制 LVDT 的充放电,按时序找到脉冲出现的时刻。第 1 状态是单片机控制 $Q_1 \sim Q_4$ 处于正向放电状态(只有 S_4 合);第 2 状态是单片机中断捕获 L_1 放电时负脉冲的前沿,按互感的原理,副线圈 L_{21} 和 L_{22} 上也会出现感应脉冲,脉冲的高度与互感大小有关;第 3 状态是延迟一定时间找到副线圈的脉冲高度采样的时刻(可取该脉冲的前后沿之间的中部),启动 CPU 触发 AD 转换;第 4 状态是在 AD 转换的中断中获取 AD 值,该值 N 就反映了被测副线圈上的该脉冲高度,若取图 1 中的 u_2 则测量的是两个副线圈的脉冲高度差;且当 L_{21} 互感强时为正脉冲,当 L_{22} 强时为负脉冲。

2) 平衡调试过程

在能够读出副线圈上的脉冲高度的 AD 值 N 的条件下(设计试验程序让该值 N 在液晶屏上显示出来),如图 2

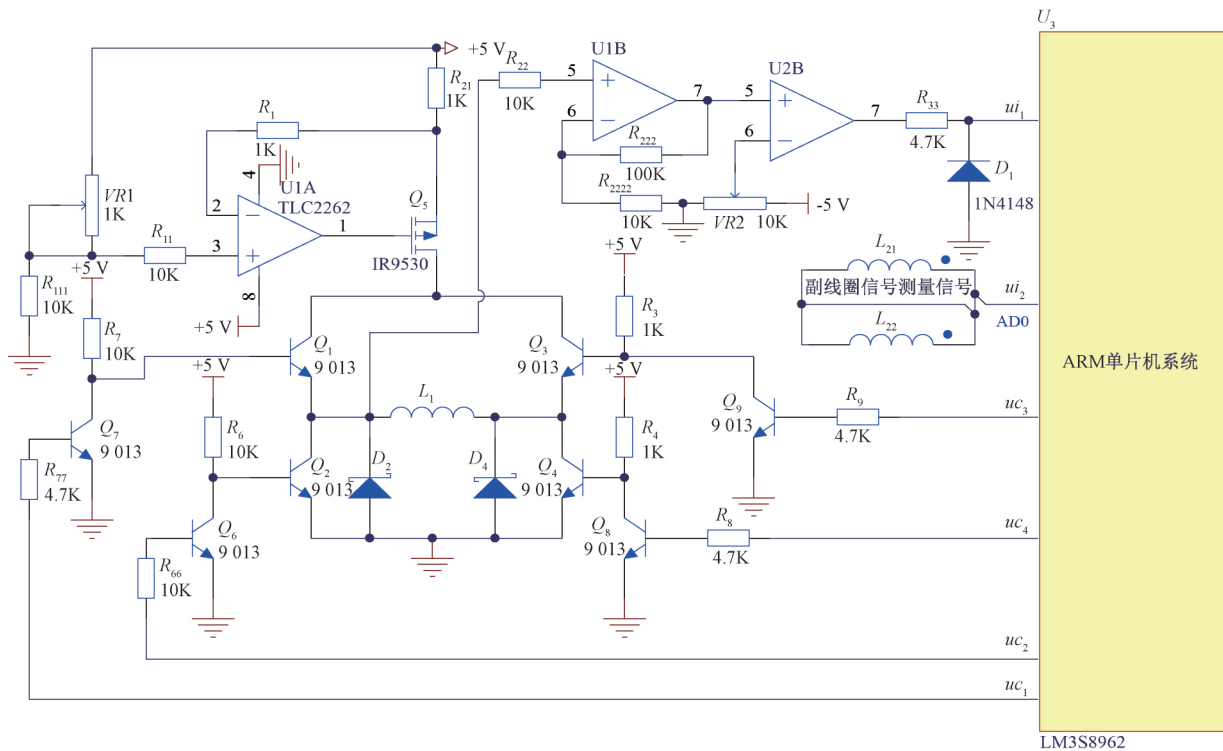


图3 试验电路原理

所示,向左滑动移动杆,使 L_1 接近 L_{21} ,找到 N 最大值 $N_{1\max}$,然后向右滑动移动杆,使 L_1 接近 L_{22} ,此时 u_2 是副脉冲;交换 u_2 的接线方式,使脉冲为正,找到 N 最大值 $N_{2\max}$ 。如果 $N_{1\max} \approx N_{2\max}$,则调图1中的电位器 VR21 使二者尽可能接近相等。

重复上述过程直至最后两个最大值相等为止,此时,电位器 VR21 不再变动,在 N 接近 0 处确定中点,该中点也在几何上的中点附近(与线圈绕制的一致性和对称性有关,理想情况下,两点应重合)。

2 试验电路原理

试验硬件电路模块主要由恒流源电路、开关桥电路、电感测量电路、副线圈信号测量电路和 ARM 单片机系统组成。

2.1 电路原理的分析

恒流源 I_s 由运放 U_1 (TLC2262)、电位器 VR1 和 MOS 管 IR9530 等组成。 R_{21} 是电流负反馈电阻,VR1 用来整定 I_s 使其等于 100 mA。开关桥 $Q_1 \sim Q_4$ 及其控制电路由晶体管 9013 构成,对应的单片机控制信号为 $uc_1 \sim uc_4$,控制开关桥向电感线圈 L_1 正反向充放电,充电时间要足够长且能够使电感电流等于 I_s 。 D_2 和 D_4 用肖特基二极管,正向电压低为 0.3 V,为正或反向放电时的通路,但此试验电路只取正向放电期间的信号。

L_1 的信号由 U1B 放大 11 倍后经比较电路 U2B 选出

L_1 上的负脉冲的信号,VR2 设置阈值电平选出正向稳定放电的脉冲信号,形成 ui_1 信号进入单片机,单片机开启该 IO 引脚信号上下沿中断来定时测量稳定放电时间 Δt ,该时间与 L_1 的电感值成正比,此次试验方案只采用了该信号的上升沿,用来确定在副线圈上感应的脉冲到来。

U1B 和 U2B 为 TLC2262, ± 5 V 电源供电, D_1 防止负信号进入单片机。副线圈 L_{21} 和 L_{22} 的信号由副线圈信号测量电路调理,并由单片机时序控制选出正向稳定放电期间的脉冲高度差信号的 AD 转换值 N 。ARM 单片机选型为 LM3S8962, AD 分辨率为 10 位,带液晶显示屏等基本配置。

2.2 线性区间的确定

中点调平衡后,从中点的零到最大点 $N_{1\max}$ 或 $N_{2\max}$ 对应的位移量均为非线性,目的要找出中点左右的线性区间。

如图4所示电路为图1中 u_2 的后级调理电路,运放 IC21 的输入为差分信号 u_2 , IC22 为信号放大和垫高一个电平使输出信号 ui_2 始终为正。运放 IC21 与 IC22 选用单 5 V 电压供电的 TLV2461,因 IC21 为差分电路,故电源电压设置为 ± 2.5 V, ARM 单片机为 10 位 AD, 转换值为 1 023 对应 3 V 输入,当信号为 0~2.5 V 时,AD 转换的 N 值为 0~853。

寻找线性区时,先将 VR22 调到地信号一侧,不垫高电平,将 L_1 调到 $N_{1\max}$ 的位移位置,调整 R_{26} ,并改变 VR23

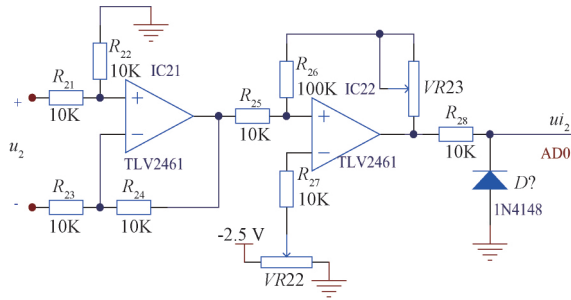


图 4 副线圈信号调理电路

来改变 IC22 的放大倍数使最大值为 AD 的最大值 $N_{max} = 853$, 从中点开始, 位移每步进 1 mm, 记录一个 N 值, 在 N 为负的方向, 交换一下 u_2 的接线进行重复记录, 结果可知线性区间在中点左右 ± 1.5 mm, 超过该范围为非线性, 而 LVDT 的特色即线性, 否则就可用一个副线圈。该线性区与线圈在几何和电磁上的对称性密切关系, 若线圈加工粗糙的, 则线性区间较窄。若按 LVDT 的量程是线圈总长度的 0.1~0.25 倍来计算, 每个线圈长度为 4 mm, 总长度为 12 mm, 量程为 3 mm 也视做合理。

线性区间确定后, 将位移 x 的原点定义在中点左侧 1.5 mm 处, 即中点 $x = 1.5$ mm, 为提高测量效率, 要调放大倍数和零点, 移动 L_1 使 $x = 0$ mm, 调 VR22 使 $N = 0$, 移动 L_1 至 $x = 3$ mm, 调 VR23 使满量程处 $N = 853$; 重复此过程直至将零点和满量程调好为止, 结果信号放大倍数大于 10 倍。

3 测试数据及分析

LVDT 参数调理后测量的位移 x 与输出的互感线圈的脉冲高度差的 AD 转换值 N 的数据如表 1 所示, 从 $x = 0 \sim 3$ mm, 每步进 0.5 mm 获取一个数据。

表 1 位移 x 与读数 N 的数据

$X/\mu\text{m}$	0	500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000
N	0	142	282	427	571	713	852

从表 1 中可以得到位移 x 与 N 的线性关系:

$$x = 3.52N(\mu\text{m}) \quad (1)$$

将该关系式输入单片机, 在另外的测试点再做一组数据, 如表 2 所示, 其中 xd 为在新的位移点按式(1)计算出的位移量读数, x 为千分尺的读数作为标准值, N 为对应的副线圈的脉冲高度差的 AD 值读数, $\Delta = xd - x$ 为绝对误差。

通过表 2 可看出, $\Delta = xd - x$ 最大为 $+9 \mu\text{m}$, 则相对百分误差 $\delta = \Delta_{max}/3 000 \times 100\% = 0.3\%$, 也即该传感器的线性度, 相应的灵敏度为 $S = 825/3 000 = 0.284(\text{字}/\mu\text{m})$ 。

表 2 位移读数 xd 与标准位移量 x

N	0	84	226	370	513	656	796	852
$xd/\mu\text{m}$	0	296	796	1 302	1 806	2 309	2 802	2 999
$x/\mu\text{m}$	0	300	800	1 300	1 800	2 300	2 800	3 000
Δ	0	-4	-4	+2	+6	+9	+2	-1

4 结 论

本文基于恒流源向电感充放电的 LVDT 设计, 采用了 ARM 单片机控制开关桥, 以恒流源向空心 LVDT 的原线圈充放电, 在稳定放电期间, 捕获两个副线圈的脉冲高度差, 可以测量出 LVDT 的位移量, 量程为 $0 \sim 3$ mm, 相对百分误差 $< 0.3\%$,

同时, 本文给出了系统设计与调中点平衡原理, 分析了试验所用的硬件电路, 着重描述了中点调平衡后线性区间的确定过程; 其中, 调中点平衡和寻找线性区与正弦交流信号激励时的区别是采用 ARM 单片机的控制逻辑去捕获副线圈稳定周期信号的一小段, 且电路中无电容元件, 可测量位移变动较快的位移量, 故有比较高的频率响应, 开发周期短且成本可控, 适用于一般的工业控制及测量场合。

参考文献

- [1] 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, 34(6): 23-26.
- [2] 马立, 欧阳航空, 荣伟彬, 等. 基于 LVDT 的光学器件相对位姿检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(10): 2324-2329.
- [3] QIN F X, LUO Y, TANG J, et al. In-situ microwave characterization of ferromagnetic microwires-filled polymer composites: A review [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2015, 383: 126-132.
- [4] 刘君, 李德辉, 高建华, 等. LVDT 差动电感式位移传感器在测井仪器中的应用与设计[J]. 中国石油石化, 2016(S2): 109.
- [5] 杜天军, 黄世超, 刘书国, 等. 某型飞机驾驶杆线性位移差分变压器传感器信号调理校正[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(3): 240-243.
- [6] 于娜, 毕冬云, 柴寿臣, 等. 基于 LVDT 的高精度电感式位移传感器设计[J]. 磁性材料及器件, 2017, 48(3): 46-48.
- [7] 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.
- [8] 武晓栋, 周梁. 基于 LVDT 的传感器在核仪表和控制索系统中的应用及推广[J]. 电子世界, 2020, 59(8): 21-22.
- [9] 王宽, 宫海波. 基于 AD698 的线性差动式位移传感器解码电路设计[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(3):

- 169-171,183.
- [10] 曾涛,王大伟,谭久彬,等. 差分式自阻尼位移传感器传感特性研究[J]. 仪器仪表学报,2020,41(2):18-24.
- [11] 郁明辉,李鹏,刘肖肖. 双冗余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):31-37.
- [12] 郭莎,孟丽因,唐源,等. 功率变换器虚拟测量系统的研究与实现[J]. 国外电子测量技术,2020,39(6):27-31.
- [13] 何春舅,雍珊珊,王新安. AETA电磁扰动传感探头系统集成与测试[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(4):95-100.
- [14] 赵楠楠. 一款恒压恒流反激式AC-DC控制器的研究与设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2020.
- [15] 徐泽华,叶汝夏,王辉,等. 基于STM32的开关电感式位移传感器设计[J]. 数字化用户,2017(11):17.

作者简介

周文娟,工学硕士,中级工程师,主要研究方向为智能检测与控制技术等。

E-mail:wjz_wjz@126.com