



一种 LVDT 调理电路中的积分滤波的应用和分析

查 汀¹, 丁永鑫²

(1. 南京科远智慧科技集团股份有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 江苏省热工过程智能控制重点实验室, 江苏 南京 211102)

摘 要: LVDT 传感器是在工程中经常使用的一种无损检测位移参数的传感器。本文介绍了一种应用六线制 LVDT 传感器的调理电路的设计方案并分析各调理环节的参数性能, 揭示了位移线性变化到最后的电压线性变化之间的系数关系。通过实际电路的验证及测量展示了该方案设计的可行性及实用性。

关键词: LVDT 电路调理; 全波整流电路; 有源积分滤波; 傅立叶变换

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1671-931X (2019) 04-0094-05

94

武汉职业技术学院学报二〇一九年第十八卷第四期(总第一百零二期)

一、LVDT 概述

线性可调差动变压器 LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 是一种机械-电子传感器, 其输入是磁芯的机械移动, 输出是与磁芯位置成正比的交流电压信号。在一定的相对应用范围内, LVDT 的输出电压与磁芯的机械位置成线性关系。LVDT 中的磁芯和线圈之间的相对运动是没有实体接触, 因此 LVDT 传感器的机械寿命比较长, 使得这类型传感器可以广泛地应用于发电行业, 精密测控, 飞机、导弹、航空等需要高可靠性领域中。

LVDT 由一个初级线圈和两个次级线圈组成, 初级线圈接收外部给定某一固定频率、幅值的正弦波激励信号, 而两个次级线圈以反向串联的方式连接在一起。中间有一个活动的磁芯。磁芯的移动可改变初级线圈之间的耦合磁通, 从而产生两个幅值不同的交流电压信号。串联次级线圈的输出电压随着磁芯移离中心位置升高, 通过测量输出电压的相位可

以判断磁芯移动的方向^[1]。

在工业应用领域中, 常见的 LVDT 传感器有三线制, 五线制和六线制等形式, 根据初级线圈和次级线圈耦合方式或者是次级线圈的出线方式不同衍生而出。目前比较常见的方式是用专用的 LVDT 解调芯片, 比如 AD698 实施^{[2][3]}。但是该芯片功能专一, 成本较高。本文以模拟电路知识理论为基础, 通过不同环节电路功能结合六线制传感器的信号输出调理为例, 分析关键调理电路环节的信号原理。

二、传感器原理介绍

LVDT 传感器可用于如位移、距离、伸长、移动、厚度、膨胀、液位、应变、压缩、重量等物理参数测量。根据不同现场可选择有三线制传感器, 五线制或六线制等方式。三线制传感器只有一个次级线圈, 次级线圈的中心抽头可以选择抽出或者不出; 五线制传感器有两个同明端相反放置的次级线圈, 将两个次级线圈的背靠背一端直接相连至参考电压上; 六线

收稿日期: 2019-07-15

作者简介: 查汀(1987-), 男, 江苏淮安人, 硕士, 南京科远智慧科技集团股份有限公司工程师, 研究方向: 嵌入式应用及仪表开发; 丁永鑫(1994-), 男, 江苏常州人, 本科, 江苏省热工过程智能控制重点实验室助理工程师, 研究方向: 自动化及仪表开发。

制传感器与五线制类似放置两个同明端相反放置的次级线圈,但是六线制传感器将两个次级线圈的两端均引出,在用户侧可以选择中间是否相连。如图1为六线制传感器的示意。

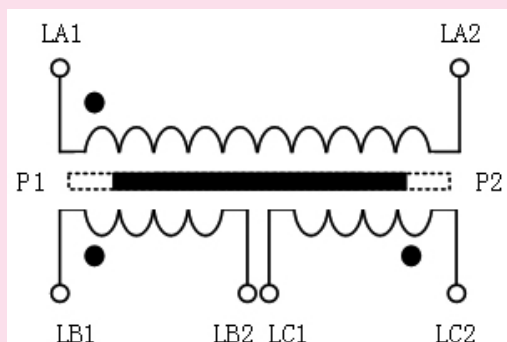


图1 六线制LVDT原理示意

图1中,LA1和LA2为初级线圈的激励输入两个信号输入端子,LB1和LB2为与初级线圈同明放置的次级线圈的两个信号输出端子,LC1和LC2为与初级线圈异名放置的次级线圈的两个信号输出端子,其中,次级放置的两个线圈匝数相同。当初级线圈的两端给如交流的激励电源后:

第一,当中间铁芯的位置处于中心位置时,在次级线圈上产生了两组相同幅值,相位相反的信号;

第二,当中间铁芯的位置处于P1位置时,LB1和LB2互感出的电压幅值高于LC1和LC2之间的

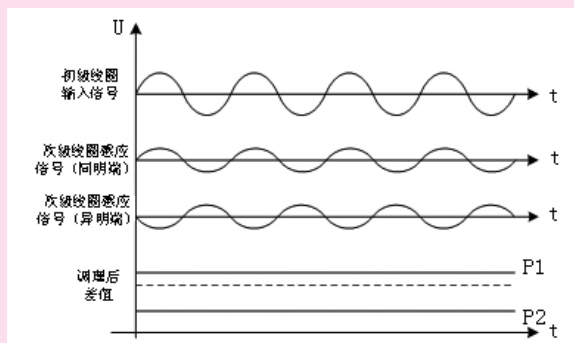


图2 传感器信号理论分析

电压幅值;

第三,当中间铁芯的位置处于P2位置时,LC1和LC2互感出的电压幅值高于LB1和LB2之间的电压幅值;

综上所述,次级线圈的互感电压值与铁芯的运动后所处位置相关,在实际调理电路中,一般会将会两个次级线圈的参考地平面选择同一个地,因此次级线圈幅值有效值遵循着下述公式^[4]:

$$U_o = \frac{\omega U_i (M_a - M_b)}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

式中, U_o 为次级输出电压, ω 为输入信号 U_i 的角频率, R 为线圈内阻, L 为线圈电感, M 为互感。从公式中也可以看出,随着铁芯的位置变动,次级线圈的输出电压与 M_a 和 M_b 的差值成线性正比关系,输入输出及最终电压关系如图2示意。调理后的差值在P1和P2之呈线性变化。根据该特性进行电路部分的设计。

三、调理电路分析

根据上述分析的信号特征,设计如图3所示的调理电路框图:

如图3所示,基本的LVDT传感器调理的电路的框架包括激励信号源,传感器输出的信号接口,低通滤波电路,全波整流电路,有源积分滤波调理和输出采集功能。其中激励信号是施加在初级线圈两端的正弦信号,次级线圈B和C根据铁芯的位置感生的电压输出给低通滤波电路,低通滤波处理之后两个相位相反的信号分别送至全波整流调理电路处理,之后由有源积分滤波调理电路将交流部分滤除,得出直流信号,最后获取的直流用于采集的电路处理。下面针对这些电路设计做进一步的说明。

(一) 激励源

LVDT传感器的初级线圈需要正弦激励信号驱动,幅值大小没有特别的要求,考虑到后级仍会存在滤波及调理等,因此选择 $2V_{pp}$ 大小即可。频率选择时,需要考虑后级积分滤波的截止频率等参数,一般在调理电路中积分部分截至频率设置在 $100Hz$ 以内,故而在激励源选择时,选择十倍以上频率,在本设计中选用 $1KHz$ 的频率。

正弦振荡电路有集成的IC芯片解决方案或者使用运放搭建,比如文氏振荡电路。为了消除分立元件的温漂、本身的阻值、容值误差等因素,本设计中采用了ADI公司的可编程信号发生器AD9837来作为激励源。

AD9837^[5]是ADI公司推出的一款低功耗、高精度,可编程波形发生芯片。通过配置驱动及一定的外围电路的设计可产生正弦波、三角波和方波等信号。输出频率的大小、幅值和相位可通过软件进行编程实现。该芯片频率寄存器为28位:时钟速率为 $16MHz$ 时,可以实现 $0.06Hz$ 的分辨率;而时钟速率为 $5MHz$ 时,则可以实现 $0.02Hz$ 的分辨率。

(二) 低通滤波

在调理电路和传感器的接口处增加低通滤波最主要的作用是将传感器信号和后级电路之间增加一个缓冲环节。考虑到传感器的端口是对外接线,因此低通滤波环节还能起到保护作用,也可以根据输入

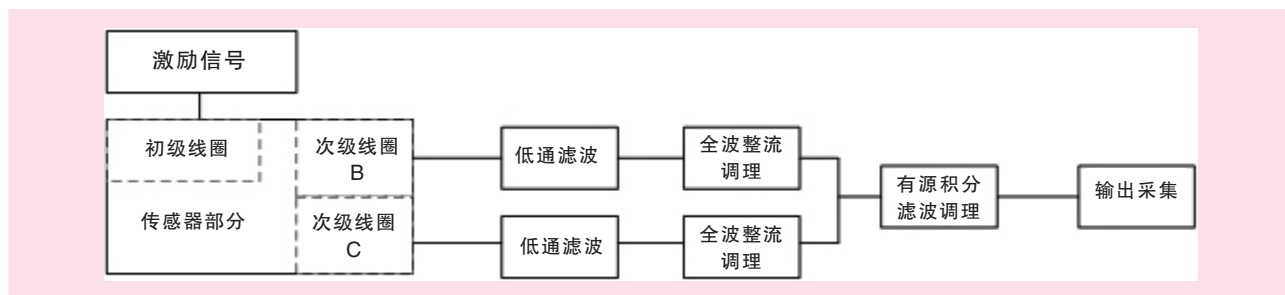


图3 调理电路框架设计

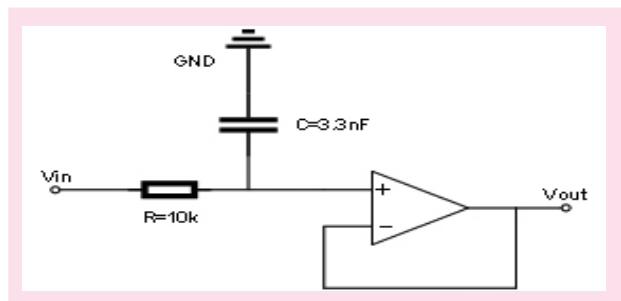


图4 一阶低通滤波

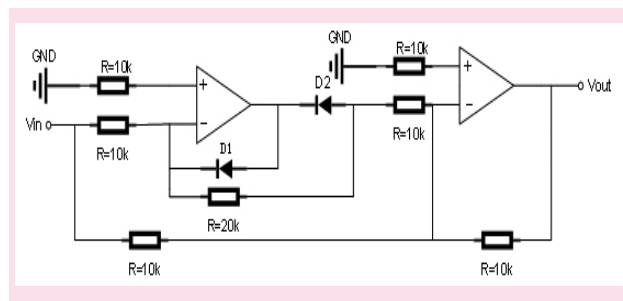


图5 全波整流电路

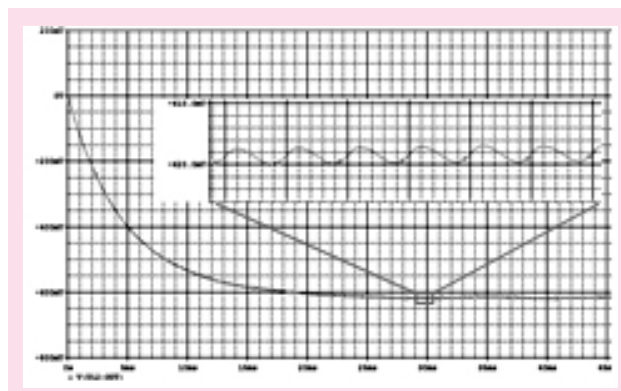


图6 有源滤波的仿真结果

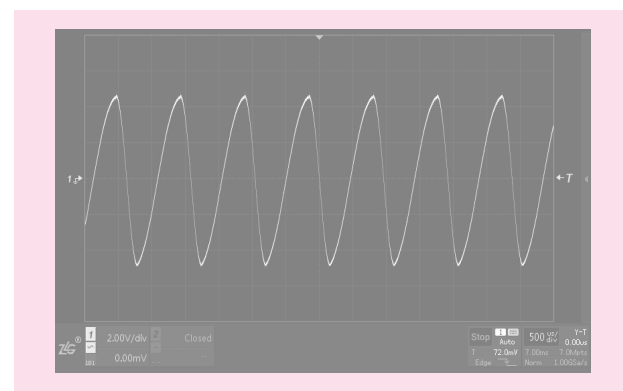


图7 激励源信号

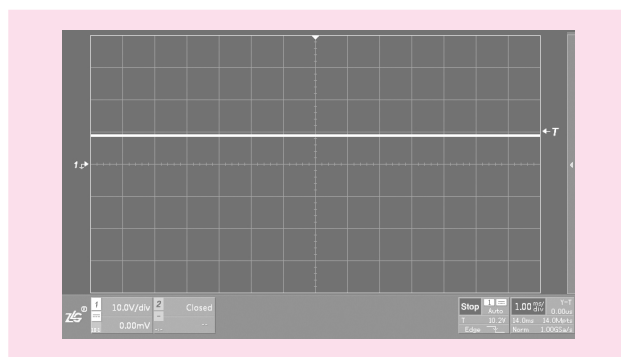


图8 次级线圈两路信号

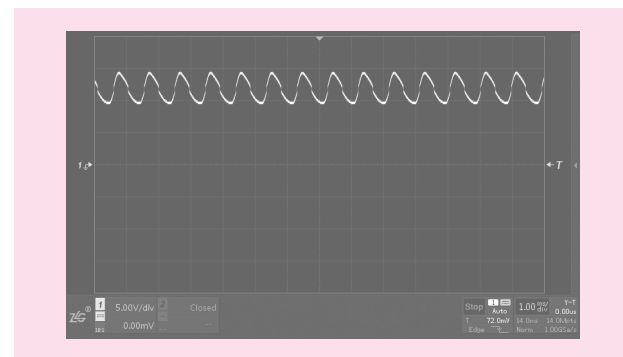


图9 全波整流电路相减后

信号大小和AD的量程进行动态调整第一级增益以获得更好的采样精度。同时为了抑制高次谐波干扰,可在采样开关前加入一个时间常数 $\tau=RC$ 的低通滤波器^[6]。在本设计中,使用一阶有源低通滤波,如图4所示,电阻选为10k,电容3.3nF,截至频率设为4825Hz(-3dB时),通道增益选为1。

(三)全波整流电路

全波整流电路主要实现的是将同名端交流信号调理成全正,将异名端交流信号全部调理成全负^[7]。

如图5为典型的全波整流电路的设计方案。

在本级的输出端,将调理后的信号同时输入到有源积分滤波调理电路中。考虑两个全波整流输出

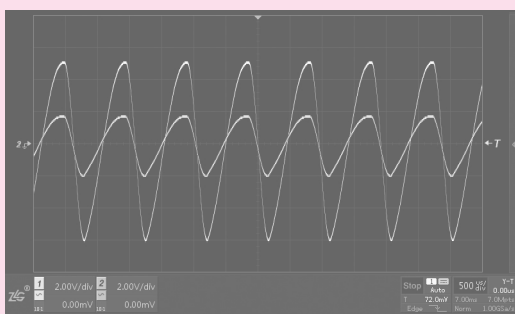


图 10 最终结果

电路的幅值一个全正一个全负,因为在有源积分滤波调理电路的输入端认为是进行信号的相减,满足公式 1 中的位置与输出电压差值成线性关系。其产生的高频谐波信号会被积分电路抑制调。

(四)有源积分滤波调理电路

典型的有源积分电路在其频率拐点以下对于信号幅值没有影响,在拐点频率上到其十倍频程范围内对输入信号幅值以积分方式降低调幅,对于更高的频率信号的幅值将会抑制到接近零。在 LVDT 的调理电路中,正是利用了有源积分在其高于 10 倍频的强抑制效果进行滤波。

在图 3 的全波整流电路之后,若输入的激励信号为:

$$U_i = A \sin \omega t$$

式中 A 为输入信号的幅值, ω 为输入信号的角频率。

经过全波整流后,输出信号为:

$$U_{iz} = A |\sin \omega t|$$

很明显,该函数在一个周期内仍是处处收敛。函数的傅立叶计算结果为^[8]:

$$F(\omega) = \frac{2A}{\pi} + \frac{A}{T} \left(\int_{-\frac{T}{2}}^0 -\sin \omega t \cdot e^{-j\omega t} dt + \int_0^{\frac{T}{2}} \sin \omega t \cdot e^{-j\omega t} dt \right) \quad (n=0,1,2,3,\dots)$$

式中, T 为周期, $T=2\pi/\omega$ 。

如前所述,积分电路在超过 10 倍以上频率信号的幅值抑制很大,因此激励 ω 选择远大于 10 倍积分滤波截止频率时,本式中交流部分可以不用考虑。根据公式,当频率为 0 时,对应的物理意义就是全波整流函数的直流分量值为 $2A/\pi$ 。可以看出这是一个仅与输入信号幅值成正比的,通过设置有源积分滤波的反馈电阻大小将该直流分量调整到适合后级处理的电压水平中。

全波整流的另一路实现的是全部为负值的信号,通过两者线性叠加得出最终与 LVDT 传感器位置成线性的直流信号。在后级处理中可依照不同应用需求将之转化成电流输出,或者使用 ADC 进行采集处理等。

全波整流的另一路实现的是全部为负值的信号,通过两者线性叠加得出最终与 LVDT 传感器位置成线性的直流信号。在后级处理中可依照不同应用需求将之转化成电流输出,或者使用 ADC 进行采集处理等。

表 1 调理电路对 LVDT 传感器的测试结果

位移 /cm	组别 1/ 电压 V	组别 2/ 电压 V	组别 3/ 电压 V	平均值/ 电压 V	理论值	绝对误差	精度
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0.334	0.333	0.334	0.334	0.333	0.000	0.002
2	0.666	0.662	0.664	0.664	0.667	-0.003	-0.018
3	1.012	1.008	1.003	1.008	1.000	0.008	0.051
4	1.345	1.340	1.333	1.339	1.333	0.006	0.040
5	1.657	1.650	1.654	1.654	1.667	-0.013	-0.087
6	1.997	1.998	1.997	1.997	2.000	-0.003	-0.018
7	2.320	2.320	2.318	2.319	2.333	-0.014	-0.093
7.5	2.496	2.490	2.497	2.494	2.500	-0.006	-0.038
8	2.663	2.660	2.662	2.662	2.667	-0.005	-0.033
9	2.988	2.995	3.004	2.996	3.000	-0.004	-0.029
10	3.328	3.327	3.324	3.326	3.333	-0.007	-0.047
11	3.680	3.660	3.670	3.670	3.667	0.003	0.022
12	4.000	4.010	4.000	4.003	4.000	0.003	0.022
13	4.330	4.340	4.310	4.327	4.333	-0.007	-0.044
14	4.660	4.670	4.660	4.663	4.667	-0.003	-0.022
15	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	0.000	0.000

选择输入 5kHz, 1V 幅值, 相位为 0 时正弦信号, 有源积分参数设置为截至频率 33.8Hz (反馈电阻为 10K, 积分电容为 470nF)。由于电路本质上仍是积分的幅值调整, 因此仍存有 2.7mVpp 的纹波大小, 如图 6 所示。此时的误差为在 0.3%, 满足一般测量仪表要求的 1% 要求。一般地, 抑制该纹波的大小, 可选择调整有源积分滤波的反馈电阻和电压, 改变截止频率, 或者是提高激励源的频率。

四、结果验证

根据上节的各个电路配置制作的测试仪表, 给定激励信号 1KHz 时, 幅值为 3.3V 时, 原始信号和全波调理电路以及有源积分及最终的处理图形见图 7~10 所示。

当端口接入六线制的传感器后 (检定日期 2019 年 7 月 3 日, 有效期至 2020 年 7 月 2 日), 所选传感器的线性范围量程 0~15mm, 完成电路的调零和调满之后, 使用万用表测试图 1 中 P1~P2 位置结果如表 1 所示。

如表中数据, 组别 1 是从 0cm 到 15cm 过程中的值, 组别 2 是从 15cm 到 0cm 的值。组别 3 为 6 小时之后测试由 0cm 到 15cm 的值。平均值是统计组别 1~组别 3 的数值。绝对误差和精度统计是针对平均值做的统计。从上述结果中可以看出, 本文所提出的设计及调理电路的最终精度可达到 $\pm 0.5\%$ FS 的要求, 满足一般的工业性应用要求。

本文介绍了一种基于六线制 LVDT 的调理电路方式, 理论上三线制和五线制传感器在接法和调理上稍作调整也可应用。通过对传感器的信号特征以及各个调理电路的关键参数和性能测试, 分析出信号调理的关键性指标及提高测量误差的方式。通过试验结果表明, 该设计方案稳定可靠且易于实现。

参考文献:

- [1] 王敬亭, 廖力清, 凌玉华. AD698 型 LVDT 信号调理电路的原理与应用[J]. 国外电子元器件, 2005, (9): 63-64.
- [2] 张云青, 孙艳明, 张秀娟, 等. 多通道 LVDT 传感器信号调理电路的设计[J]. 工程与试验, 2012, (2): 68-70.
- [3] 胡海涛, 高闻. 高性能 LVDT 位移传感器调理电路设计[J]. 仪表技术, 2012, (8): 39-42.
- [4] 张宪, 宋立军. 传感器与测控电路[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 38-39.
- [5] Analog Devices. technical-documentation [EB/OL]. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9837.PDF>. 2019-07-15.
- [6] 王幸之, 王雷, 翟成, 等. 单片机应用系统抗干扰技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000: 256-258.
- [7] 童诗白, 华成英. 模拟电子技术基础(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 456-457.
- [8] 李红, 谢松法. 复变函数与积分变换(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 183-187.

[责任编辑: 刘 骋]

Application and Analysis of Integral Filtering in LVDT Conditioning Circuit

ZHA ting¹, DING Yong-xin²

(1. Nanjing Keyuan Wisdom Technology Group Co. Ltd., Jiangsu 211102, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Thermal Process Intelligent Control, Jiangsu 211102, China)

Abstract: LVDT sensor is often used in engineering for nondestructive testing of displacement parameters. This paper introduces the design scheme of a conditioning circuit using LVDT sensor made of six wires, analyzes the parameter performance of each conditioning link, and reveals the coefficient relationship between the linear change of displacement and the linear change of voltage. The feasibility of the design is demonstrated through the verification and measurement of the actual circuit.

Key words: LVDT circuit conditioning; full wave rectifier circuit; active integral filtering; Fourier transform