

# 基于 AD698 的线性差动式位移传感器 解码电路设计

王 宽, 宫海波

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

**摘要:** 线性差动式位移传感器 (LVDT) 由于其灵敏度高、线性度好、分辨率高、寿命长、可靠性高等优点, 已广泛应用于机载测试系统中; 为了设计出精度高, 稳定性好, 能够满足机载测试需求的 LVDT 传感器解码电路, 分析了 LVDT 传感器磁芯位移与输出电压信号的关系, 研究了 AD698 的内部解调原理, 设计出了基于 AD698 的信号解码电路; 该电路通过外围元器件产生传感器所需的激励信号, 并对激励信号和传感器输出信号进行解调得到与传感器磁芯位移成正比的直流电压; 最后通过实验验证该电路具有结构简单、稳定性高、精度高的优点, 能够满足机载测试的要求, 且该电路已经过高低温和振动试验, 并成功应用于机载测试采集系统中。

**关键词:** 线性差动; LVDT; AD698; 解码电路

## Decoding Circuit Design of Linear Variable Differential Transformer Based on AD698

Wang Kuan, Gong Haibo

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** The Linear differential displacement sensor (LVDT) has been widely used in airborne testing system, due to its high sensitivity, good linearity, high resolution, long service life and high reliability. In order to design an LVDT decoding circuit that have a high accuracy, good stability and can meet the demand of airborne testing, the relationship between core displacement and the output voltage signal of an LVDT sensor has been analyzed, the internal AD698 demodulation principle has been studied, then an signal decoding circuit based on AD698 has been designed. The circuit produces the excitation signal by peripheral components, and gets the DC voltage that is proportional to the magnetic core displacement by demodulating the excitation signal and the output signal. Then, the precision and stability of the decoding circuit has been verified, it's show that the circuit can meet the requirements of airborne test, now the circuit has been completed gentle vibration test and successfully used in airborne testing system.

**Keywords:** linear differential; LVDT; AD698; decoding circuit

### 0 引言

线性差动式位移传感器 (LVDT) 能够将机械位移转换成电信号, 具有灵敏度高、线性度好、分辨率高等诸多优点<sup>[1-3]</sup>, 已广泛应用于机载测试中, 其作用是采集驾驶杆、方向舵、脚蹬、舱门变形等位移信号<sup>[4-5]</sup>。传统的 LVDT 输出信号解调方法是采用差动输入整流电路和相敏电路, 这两种方法电路复杂, 容易受干扰且不易调试<sup>[6]</sup>。

针对以上两种解调电路复杂, 精度差的不足, 本文设计了一种基于 AD698 的 LVDT 信号解调电路。该电路通过简单的外围元器件产生 LVDT 传感器所需的激励信号, 并对激励信号和传感器输出信号进行解调, 得到与传感器磁芯位移成正比的直流电压信号。该电路具有结构简单, 应用元器件较少, 可靠性好等优点。最后通过实验验证该解码电路精度高, 能够满足机载测试的精度要求; 同时该电路经过高低温和振动试验, 能够满足机载测试的稳定性要求。

### 1 LVDT 传感器工作原理

LVDT 是一种直线位移传感器<sup>[7]</sup>, 它由一个初级线圈、两个反向串联的次级线圈及铁芯组成, 铁芯可在一定线性范围内自由移动, 铁芯的移动可改变初级线圈对次级线圈的耦合磁通, 进而改变传感器的输出电压<sup>[8-9]</sup>, 其等效电路图如图 1 所示。

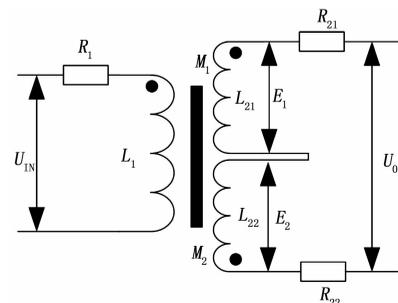


图 1 LVDT 等效电路图

图 1 中,  $L_1$  和  $R_1$  为初级线圈的等效电感和等效电阻;  $L_{21}$ ,  $L_{22}$  和  $R_{21}$ ,  $R_{22}$  分别为两个次级线圈的等效电感和等效电阻,  $M_1$ ,  $M_2$  分别为初级线圈  $L_1$  对两个次级线圈  $L_{21}$  和  $L_{22}$  的互感系数。

收稿日期: 2016-10-09; 修回日期: 2016-11-21。

作者简介: 王 宽 (1989-), 男, 陕西省渭南人, 助理工程师, 硕士, 主要从事机载测试方向的研究。

若忽略电阻, 当在初级线圈上施加一个激励电压为  $u(t) = U\sin(\omega t)$  的信号, 则线圈上产生的电流为  $i(t) = -I\cos(\omega t)$  [10-11], 根据互感原理, 两个次级线圈上产生的电动势分别为:

$$E_1 = M_1 \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

$$E_2 = M_2 \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

此时输出电压  $U_0 = E_1 - E_2$ , 当铁芯处于中心位置时, 初级线圈对两个次级线圈的互感系数相等即  $M_1 = M_2 = M$ , 则输出电压  $U_0 = 0$  [12]。

当铁芯位移变化  $x$  时, 初级线圈对次级线圈的互感变化为:

$$\Delta M = Kx \quad (3)$$

$K$  为耦合系数。

则  $M_1 = M + \Delta M, M_2 = M - \Delta M$

此时两个次级线圈上产生的电动势分别为:

$$E_1 = M_1 \frac{di(t)}{dt} = (M + Kx)I\omega\sin(\omega t) \quad (4)$$

$$E_2 = M_2 \frac{di(t)}{dt} = (M - Kx)I\omega\sin(\omega t) \quad (5)$$

则传感器输出电压为:

$$U_0(t) = E_1 - E_2 = 2KxI\omega\sin(\omega t) \quad (6)$$

由式 (6) 可知 LVDT 传感器磁芯运动的位移和方向可以通过输出电压  $U_0$  的幅值大小和极性来表示。

## 2 AD698 芯片解调原理

AD698 芯片内部结构框图如图 2 所示, 可见 AD698 内部包含一个固定输入通道 B 和一个同步解调输入通道 A。LVDT 传感器输出信号进入通道 A, 激励信号进入与通道 A 相连的比较器, 比较器输出的方波信号与 A 通道信号相乘, 获得全正或者全负的整流信号, 再经过低通滤波器, 获得直流信号。LVDT 传感器的激励信号进入通道 B, 与通道 B 相连的比较器对自身信号进行比较获得方波信号, 与激励信号相乘获得全正值的整流信号, 再经过低通滤波器, 获得直流信号。A、B 通道输出的直流信号进入除法器, 再经过调幅电路即可获得输出电压  $V_{out}$ 。

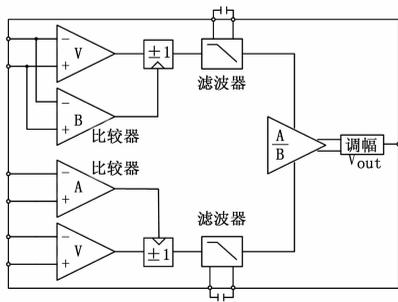


图 2 AD698 芯片内部结构框图

励磁信号  $u(t) = U\sin(\omega t)$  经过比较器后获得方波信号  $f(t)$ :

$$f(t) = \begin{cases} 1 & t \in [2k\pi, 2k\pi + \frac{T}{2}] \\ -1 & t \in (2k\pi + \frac{T}{2}, 2k\pi + T] \end{cases} \quad (7)$$

将该方波信号进行傅立叶分解可得:

$$f(t) = \frac{4}{\pi} [\sin(\omega t) + \frac{1}{3}\sin(3\omega t) + \frac{1}{5}\sin(5\omega t) \dots] = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (\frac{1}{2n-1}) \sin[(2n-1)\omega t] \quad (8)$$

将激励信号和式 (6) 所示的传感器输出信号分别与式 (8) 所示的方波信号相乘 [13-14], 可得:

$$u(t) * f(t) = \frac{2U}{\pi} - \frac{2U}{\pi} \cos(2\omega t) - \frac{2U}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} (\frac{1}{2n-1}) [\cos(2m\omega t) - \cos(2m\omega t - 2\omega t)] \quad (9)$$

$$U_0(t) * f(t) = \frac{4KI\omega x}{\pi} - \frac{4KI\omega x}{\pi} \cos(2\omega t) - \frac{4KI\omega x}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} (\frac{1}{2n-1}) [\cos(2m\omega t) - \cos(2m\omega t - 2\omega t)] \quad (10)$$

式 (9) 为 AD698 B 通道乘法器输出信号, 式 (10) 为 A 通道乘法器输出信号, 乘法器的输出信号中都含有直流分量, 因此将该信号通过低通滤波器, 只让直流分量通过, 再经过除法器即可得输出信号为:

$$V_{out} = \frac{2KI\omega x}{U} \quad (11)$$

可见输出直流信号只与磁芯的位移量  $x$  有关, 再经过调幅电路可将该输出电压调节到设定的幅值范围 [15]。

## 3 解码电路设计与实验

### 3.1 解码电路设计

本文中解码电路如图 3 所示。由于飞机上所使用的 LVDT 传感器限制, 需提供有效值小于 3V, 频率为 10KHz 的激励信号, 因此该解码电路按此要求设计。

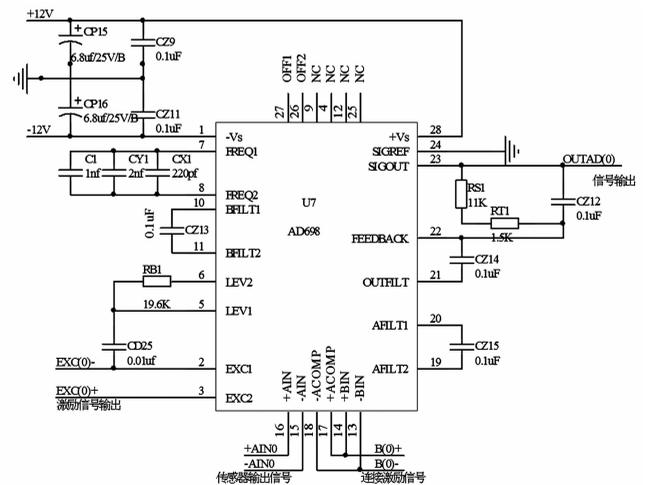


图 3 解码电路图

AD698 输出激励信号的电压值由图 3 中电阻  $RB1$  决定。输出电压与电阻  $RB1$  之间的关系如图 4 所示, 采用滑线变阻器代替  $RB1$ , 最终确定  $RB1$  为 19.5K。

激励信号频率由芯片 7、8 引脚之间的电容  $C1$  决定,  $C1$  的值可由下式确定。

$$C1 = \frac{35 \text{ uF} * \text{Hz}}{f_{EXCITATION}} \quad (12)$$

式中,  $f_{EXCITATION}$  为激励频率, 因此  $C1$  取值 3.5 nF。

A、B 通道的低通滤波电容可由下式确定。

$$CZ13 = CZ14 = CZ15 = \frac{10^{-4} \text{ F} * \text{Hz}}{f_{SUBSYSTEM}} \quad (13)$$

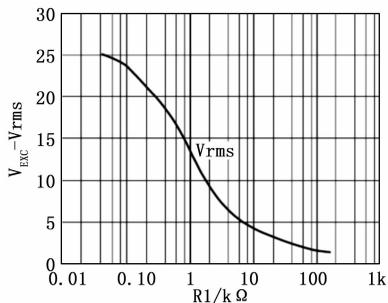


图4 AD698 激励信号电压与电阻关系图

式中,  $f_{\text{SUBSYSTEM}}$  为系统所需频带宽度, 本文所选频带宽度为 250 Hz, 因此  $CZ13=CZ14=CZ15=0.4 \mu\text{F}$ 。

AD698 输出电压范围由  $RB1$  决定,  $RB1$  的值可由式 (14) 确定:

$$V_{\text{out}} = S * d * 500 \mu\text{A} * RB1 \quad (14)$$

式中,  $S$  为传感器的灵敏度,  $d$  为传感器量程, 本文设置输出电压范围为  $\pm 5 \text{ V}$ 。

AD698 最终输出电压传递函数也可表示为

$$V_{\text{out}} = \frac{A}{B} * 500 \mu\text{A} * RB1 \quad (15)$$

式中,  $\frac{A}{B}$  为 LVDT 传感器输出信号与激励信号的幅值比, 实际中规定该比值最大为  $\pm 0.8$ , 对应解调电路的最大输出电压为  $\pm 5 \text{ V}$ , 因此选择  $RB1$  为  $12.5 \text{ k}\Omega$ 。

### 3.2 实验验证

为了验证该 AD698 解调电路的性能, 按照图 3 所示的解调电路制作了相应的电路板, 并通过实验对解调电路输出的激励信号特性和解码精度进行验证。实验采用差动变压器信号源来模拟 LVDT 传感器, 并通过改变比值  $\frac{A}{B}$  来模拟传感器的位移变化。

实验中调节  $\frac{A}{B}$  为 0.3, 用示波器采集激励信号和传感器输出正弦信号如图 5 所示。

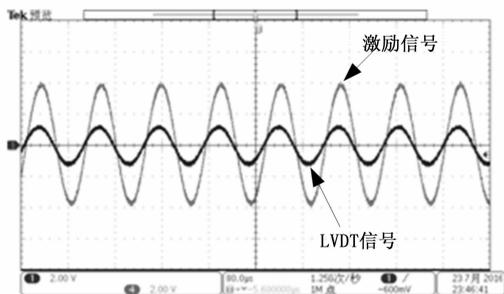


图5 LVDT 信号源输出波形

由图 5 可看出, 激励信号的有效值为 2.828 V, 频率为 10 kHz, 满足飞机上传感器的激励信号电压和频率要求。且该激励信号幅值为 4 V, 对应的 LVDT 信号幅值为 1.2 V, 满足  $\frac{A}{B} = 0.3$  的条件。调节传感器的磁芯位移, 对应输出 LVDT 信号的幅值不同。

将 LVDT 信号和激励信号分别接入解调电路的 A、B 通道进行解调, 解调电路的输出电压波形如图 6 所示。结合信号源

给定的  $\frac{A}{B}$  和公式 (15) 可计算出解调电路的理论输出值, 将该理论输出值与解调电路的实际输出进行比较, 即可确定出该解码电路的精度。

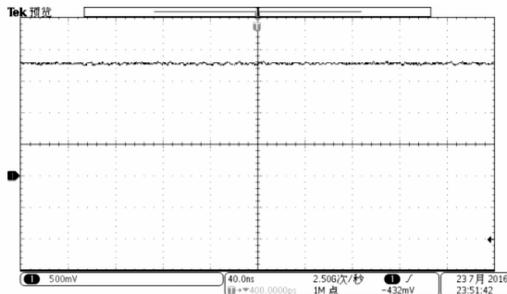


图6 解码电路输出波形

由图 6 可知解调电路实际输出电压为 1.86 V, 且波形平稳, 脉动小。按照公式 (15) 计算出解调电路的理论输出电压为 1.875 V, 相对误差为 0.8%, 满足机载测试的精度要求。

为了全面验证解调电路性能, 在  $\frac{A}{B}$  为  $\pm 0.8$  的范围内取多个值进行试验, 试验结果如表 1 所示。

表1 解码电路试验结果

| $\frac{A}{B}$ 比值 | 理论值/V | 实际值/V  | 相对误差 |
|------------------|-------|--------|------|
| 0.8              | 5     | 4.975  | 0.5% |
| 0.6              | 3.75  | 3.72   | 0.8% |
| 0.4              | 2.5   | 2.49   | 0.4% |
| 0.2              | 1.25  | 1.253  | 0.6% |
| -0.2             | -1.25 | -1.24  | 0.8% |
| -0.4             | -2.5  | -2.488 | 0.5% |
| -0.6             | -3.75 | -3.73  | 0.6% |
| -0.8             | -5    | -4.985 | 0.3% |

由表 1 可知在以上各个  $\frac{A}{B}$  输入范围内该解码电路的精度都在 0.8% 以内, 满足机载测试的精度需求。

可见, 本文设计的基于 AD698 的 LVDT 信号解码电路, 电路简单便于调试, 激励信号的幅值和频率满足飞机上 LVDT 传感器激励信号的要求; 解码电路精度高, 能够满足机载测试的精度需求; 同时完成了高低温试验和振动试验, 表明该电路能够满足机载测试的稳定性要求。

### 4 结论

通过深入分析线性差动式位移传感器 (LVDT) 的等效电路, 可知传感器输出电压的幅值和极性可以反映磁芯位移及移动方向; 研究 AD698 的内部解调原理, 可知 AD698 能够对 LVDT 传感器信号进行解调, 且 AD698 输出电压大小和极性可以反映传感器磁芯的位移变化量。基于此设计出了一种结构简单、高精度的基于 AD698 的 LVDT 信号解调电路, 实验表明该电路精度高, 能够准确的对 LVDT 信号进行解调, 且该电路已完成高低温和振动试验, 能够满足机载测试的要求。本文设计的解码电路, 结构简单、稳定性高、精度高已成功应用于机载测试系统中。

(下转第 183 页)

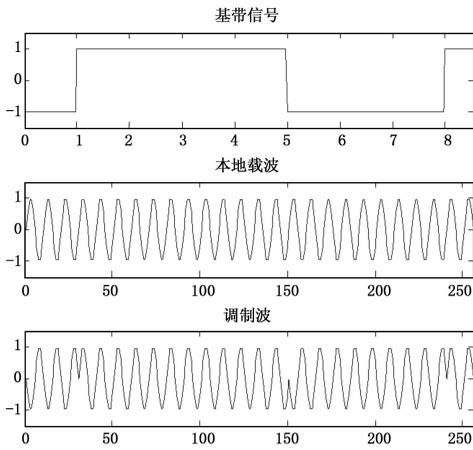


图 6 Sybil 入侵检测的信号分离结果

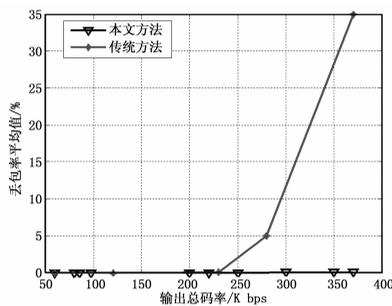


图 7 性能对比

入侵信息, 提高了网络安全性能, 降低了数据传输的丢包率。通过测试得知, 本文设计系统具有较强的兼容性。

### 4 结束语

本文研究物联网中的 Sybil 入侵下的入侵防御检测问题, 提高物联网安全防范能力, 提出一种基于网络入侵信号检测和 16 位定点 DSP 内核设计的物联网的 Sybil 入侵防御系统设计方法。首先进行 Sybil 入侵防御系统总体设计描述和功能分析, 进行了 Sybil 入侵信号检测算法设计, 采用 C5409A XDS510 Emulator 仿真器进行硬件在线编程, 在 CCS 2.20 开

..... (上接第 171 页)

### 参考文献:

[1] 赵红梅, 章卫国, 刘小雄, 等. 飞控系统传感器故障诊断的在线方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (5): 1097-1099.

[2] 刘 华, 唐永哲, 郝 涛, 等. 飞控系统传感器故障诊断研究 [J]. 计算机仿真, 2010, 27 (2): 30-33.

[3] 李家群, 候孝宗, 毛俊隽. 浅析差动变压器传感器的几种测量方法 [J]. 水利水电自动化, 2008 (3): 40-43.

[4] 孟武胜, 苗溢文, 董 蓉. 一种新型差动变压器式角位移传感器 [J]. 微特电机, 2010 (8): 32-34.

[5] 冯广丽, 卢朝东. 红外瓦斯无线传感检测系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (1): 80-81.

[6] 冯 强, 耿爱辉. 基于 LabVIEW 的四象限光电探测器数据采集系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (5): 1397-1399.

[7] 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.

发平台下进行面向物联网的 Sybil 入侵防御系统的软件开发, 实现系统的集成设计。测试结果表明, 本文系统进行网络防御性能较好, 可靠稳定。

### 参考文献:

[1] 陆兴华, 张晓军. 人员图像跟踪过程中多人交叉区域防丢失方法 [J]. 计算机仿真, 2014, 31 (9): 243-246.

[2] 于 涛, 胡炳樑, 高晓惠, 等. 高光谱干涉图像动态追踪补偿方法研究 [J]. 光子学报, 2016, 45 (7): 716-723.

[3] 陆兴华, 吴恩燊, 黄冠华. 基于 Android 的智能家居控制系统软件设计研究 [J]. 物联网技术, 2015, 35 (5): 692-695.

[4] 张军强, 王汝传, 黄海平. 基于分簇的无线多媒体传感器网络数据聚合方案研究 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36 (1): 8-14.

[5] 章武媚, 陈庆章. 引入偏移量递阶控制的网络入侵 HHT 检测算法 [J]. 计算机科学, 2014, 41 (12): 107-111.

[6] 周小娟. 一种轻量级大数据分析系统的实现 [J]. 电子设计工程, 2016, 23 (8): 40-43.

[7] 夏光辉, 秦建军, 王大成. 基于 FPGA 的双 CF 卡数据采集系统设计 [J]. 电子设计工程, 2016, 21 (4): 19-21.

[8] 冯 颖, 张 合, 张祥金, 等. 激光探测系统雪崩管实时补偿研究 [J]. 南京理工大学学报 (自然科学版), 2010, 34 (6): 787-791.

[9] Choi J, Yu K, Kim Y. A New Adaptive Component—Substitution—based Satellite Image Fusion by Using Partial Replacement [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49 (1): 295-309.

[10] 王跃飞, 于 炯, 鲁 亮. 面向内存云的数据块索引方法 [J]. 计算机应用, 2016, 36 (5): 1222-1227.

[11] 葛文杰, 赵春江. 农业物联网研究与应用现状及发展对策研究 [J]. 农业机械学报, 2014, 45 (7): 222-230.

[12] 杨 楠, 李世国. 物联网环境下的智能产品原型设计研究 [J]. 包装工程, 2014, 21 (6): 55-58.

[13] 秦怀斌, 李道亮, 郭 理. 农业物联网的发展及关键技术应用进展 [J]. 农机化研究, 2014, 18 (4): 246-248.

[14] 荆孟春, 王继业, 程志华, 等. 电力物联网传感器信息模型研究与应用 [J]. 电网技术, 2014, 38 (2): 532-537.

[15] 肖守伟, 姚凯学, 何 勇. 基于物联网的新型视频监控系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (10): 3354-3356.

[8] 魏 婷, 夏德天. 基于 LVDT/RVDT 的交流模拟量解调方法研究 [J]. 航空计算技术, 2013 (1): 116-118.

[9] 王 龙, 史丽晨, 王海涛. 基于 LVDT 的新型信号调理电路的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (3): 953-955.

[10] 樊泽明, 郭 月, 袁朝辉. 基于 AD698 的旋转变压器驱动及解码电路设计 [J]. 测控技术, 2013, 2 (32): 110-113.

[11] 罗德荣, 周 成, 黄科元, 等. 基于 AD2S1200 的旋转接口电路设计及信号处理 [J]. 电力电子技术, 2008, 42 (8): 68-70.

[12] 李耀海, 胡广艳, 郝瑞祥, 等. 基于 AU6802NI 的旋转变压器信号接口电路的设计和应用 [J]. 电子设计应用, 2006, 40 (2): 110-114.

[13] 冯广丽, 卢朝东. 红外瓦斯无线传感检测系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (1): 80-81, 88.

[14] 李 稷, 李 玲, 张 辉, 等. LVDT 传感器仿真电路的设计与研究 [J]. 仪表技术, 2011 (9): 67-70.

[15] 尹成竹, 柏受军, 黄 平, 等. 一种基于 AD598 的精密位移传感器的研制 [J]. 传感器与微系统, 2007, 26 (2): 68-70.