

4线制 LVDT 传感器双余度调理电路设计与验证

王浩^{1,2}, 冯健朋², 杨恒辉²

(1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072;

2. 中国航空工业集团公司西安航空计算技术研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: LVDT (Linear Variable Differential Transformer) 传感器广泛应用于航空领域。为了满足机载设备的高安全性要求, 提高电子设备的可靠性, 提出了一种四线制 LVDT 传感器双余度调理电路结构框图, 主要包括两套完全相同的 LVDT 调理电路、激励幅值检测电路和通道切换电路。该电路实现了 LVDT 传感器信号调理电路的双余度设计及激励故障检测功能, 其中一套 LVDT 调理电路作为主调理通道, 另外一套电路作为热备份通道; 并设计了对应的通道切换逻辑, 当主调理通道激励信号故障时, 可快速平稳切换至另一通道。为平衡两通道元器件使用寿命, 提出了主调理通道轮值的方法, 有效地提高了系统可靠性。并使用 LVDT 仿真板卡搭建了试验平台完成了对双通道切换功能和 LVDT 调理功能的验证, 结果表明该双余度调理电路工作正常, 适用于可靠性要求高的机载设备。

关键词: 线性可调差动变压器; 调理电路; 双余度设计; 位移测量; 通道切换

中图分类号: TP399

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2023)03-0009-06

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2023.03.002

Design and Verification of Dual Redundancy Conditioning Circuit for 4-Wire LVDT Sensor

WANG Hao^{1,2}, FENG Jian-peng², YANG Heng-hui²

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Xi'an Aeronautics Computing Technique Research Institute, AVIC, Xi'an 710065, China)

Abstract: The LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sensor is widely used in the aviation field. In order to satisfy the high security requirements of airborne equipment and improve the reliability of electronic equipment, a 4-wire LVDT sensor dual redundancy conditioning circuit block diagram is presented, which mainly includes two sets of LVDT conditioning circuit, excitation amplitude detection circuit and channel switching circuit. The circuit realizes the dual redundancy design of the LVDT sensor signal conditioning circuit and excitation fault detection function, one of which is used as the main conditioning channel, and the other circuit is used as the hot backup channel. The corresponding channel switching logic is designed, when the excitation signal of the main conditioning channel fails, it can quickly and smoothly switch to another channel. The reliability of the system is improved effectively by the method of main conditioning channel rotation. The LVDT simulation board is used to build a test platform to verify the dual-channel switching function and LVDT conditioning function. The results show that the dual-redundancy conditioning circuit works well and is suitable for high reliability airborne equipment.

Key words: linear variable differential transformer; rectifier circuit; redundancy design; displacement measurement; channel switching

0 引言

随着航空技术的不断发展, 机载设备功能越来越复杂, 如何提高机载设备的可靠性, 成为了机载设备设计的重要问题^[1]。线性可调差动变压器 (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) 是一种用来测量位移的电感传感器, 与其他位移传感器相比, 具有无接触测量、无限分辨率、坚固耐用、零位可重复性、精

度高、可靠性高、耐高温等优点, 在航空领域有着广泛的应用^[2], 因此, 对 LVDT 传感器调理电路的可靠性提出了更高的要求, 使用高质量等级的元器件是提高可靠性的最直接办法, 但受制于元器件设计、制造工艺的限制, 元器件级别的可靠性提升潜力有限。多余度设计是机载设备提高可靠性的有效方法, 当电路出现故障时, 能自动检测与诊断, 并对故障通道进行隔离,

收稿日期: 2022-03-27

修回日期: 2022-07-28

基金项目: 航空科学基金 (2018ZC31003)

作者简介: 王浩 (1987-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 研究方向为机载计算机硬件设计。

使用备份通道恢复设备的功能,因此冗余度设计可以克服元器件可靠性提升的限制^[3]。综合考虑设备体积、功耗及成本等因素,本研究四线制的LVDT传感器调理电路采用双冗余架构实现。

四线制LVDT传感器包括一个初级线圈、两个次级线圈和铁磁芯体,线圈轴向放置并且缠绕到圆柱形腔体上,铁磁芯体无接触装在圆柱腔体内并且用来恒量被测物体的位移^[4-6]。铁磁芯体为初级线圈和次级线圈磁通量提供了一个低磁阻路径,铁磁芯体位置变化会引起磁阻的变化,进而影响次级线圈输出电压的变化。四线制LVDT传感器中两个次级线圈反向串联到一起,共引出四根线,传感器的具体形式如图1所示。

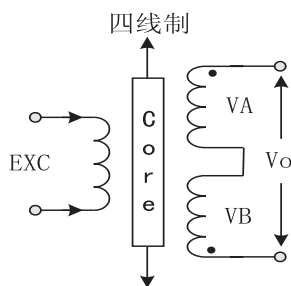


图1 四线制LVDT传感器结构

四线制LVDT传感器激励一般为正弦信号,次级端感应的信号也为正弦信号,处理器无法对其直接处理,需要专门的电路将其调理成直流电压信号。国内外学者对LVDT传感器调理电路及方法进行了大量研究,文献[7]提出了一种五点估算正弦信号幅值的方法,不需将LVDT传感器次级端的交流信号转换为直流信号,实现了使用中速器件完成LVDT传感器信号调理;而文献[8]提出了一种根据模拟开关实现正弦信号全波整流的方案,再通过低通滤波可实现将LVDT传感器次级端的交流信号转换为直流电压信号;而文献[9]利用精准相位匹配的方式实现了LVDT

传感器次级端交流信号幅值信息的提取。以上LVDT调理电路均采用单通道实现,未考虑故障系统的影响,无法满足机载电子设备高安全性要求。该文提出了一种LVDT传感器信号双冗余调理电路,并且经过实际的工程验证,具有较广的应用价值。

1 调理电路说明

1.1 LVDT传感器工作原理

图2为四线制LVDT传感器的双冗余调理电路原理框图,其中LVDT传感器包括一个初级线圈 L_p 和两个次级线圈 L_{s1} 和 L_{s2} ,交流激励 $V_{ex} = A * \sin(\omega t)$ 施加到初级线圈 L_p 上,当铁磁芯体向上移动 L 时^[10],则次级线圈 L_{s1} 和 L_{s2} 产生的感应电动势 V_A 和 V_B 分别表示为:

$$V_A = K * A * \sin(\omega t) * (L_{zero} - L) \quad (1)$$

$$V_B = K * A * \sin(\omega t) * (L_{zero} + L) \quad (2)$$

式中:

K ——LVDT传感器初级线圈与次级感应系数;

L_{zero} ——LVDT传感器铁磁芯体的参考零位;

L ——铁磁芯体相对于参考零位的位移。

对于四线制LVDT传感器来说,LVDT传感器次级输出电压 V_0 可表示为:

$$V_0 = V_B - V_A = 2 * K * A * \sin(\omega t) * L \quad (3)$$

四线制LVDT传感器输出电压 V_0 和激励电压 V_{ex} 的比值可表示为:

$$V_0 / V_{ex} = 2 * K * L \quad (4)$$

由公式(4)可看出,LVDT传感器相对于参考零位的位移 L 大小正比于次级输出信号 V_0 幅值和激励 V_{ex} 幅值的比值,当 L 为正向位移时,LVDT传感器次级输出信号 V_0 与初级激励 V_{ex} 同相位;当 L 为负向位移时,LVDT传感器次级输出信号 V_0 与初级激励 V_{ex} 相位差 180° 。

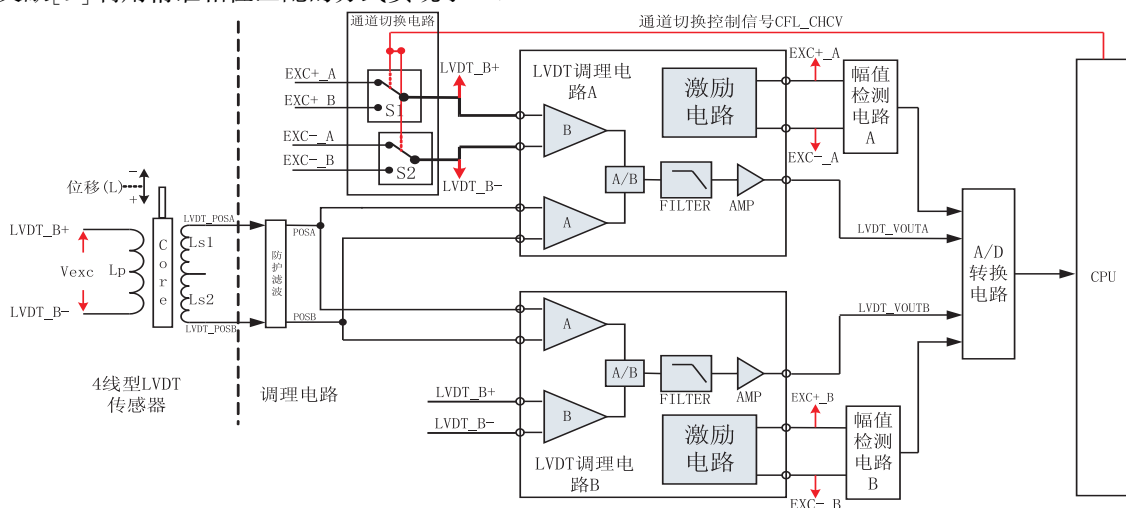


图2 LVDT传感器双冗余调理电路结构框图

1.2 某集成LVDT调理芯片工作原理

某集成LVDT调理芯片是完整的四线制LVDT传感器调理模块,可以较高精度和可重复性将LVDT传感器位移信息转换为直流电压信号,可通过配置偏移将输出的直流电压设置为单极性和双极性电压,直流电压正比于LVDT传感器位移^[11]。某集成LVDT调理芯片内部原理框图如图3所示,A通道输入端接入的正弦交流信号与A通道同步输入端接入的信号完全同步和反相时,该集成芯片内部的全波整流电路才能正常工作,通过低通滤波才能得到与A通道输入端正弦交流信号的幅值成正比的直流电压,进而才能得到A通道输入端正弦交流信号与B通道输入端的交流信号幅值的比值信息。因此A通道输入端信号与A通道同步输入端接入的信号是否同步是该集成芯片能否正常工作的前提。

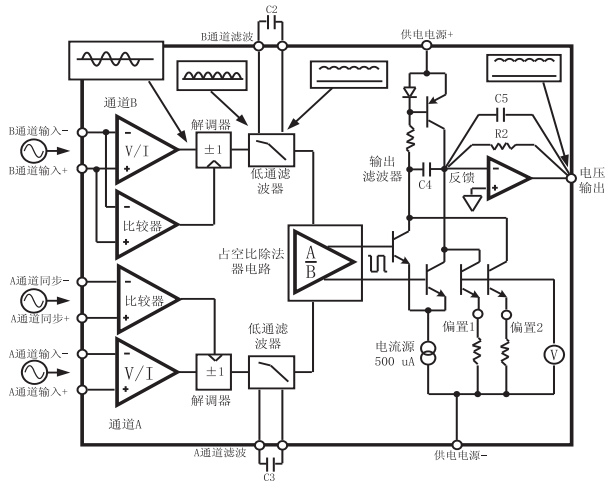


图3 某集成LVDT调理芯片内部结构框图

1.3 LVDT传感器双余度调理电路设计

图2为提出的LVDT传感器双余度调理电路的原理框图,主要包括防护滤波电路、通道切换电路、两通道LVDT调理电路、激励幅值检测电路和A/D转换电路。由于两通道LVDT调理电路需对同一个LVDT传感器信号进行调理,为保证可靠性,两片LVDT调

理电路输出的激励之间不能短路,故需通过通道切换电路对两通道LVDT调理电路输出的激励信号进行选择。当LVDT调理电路A为主调理通道时,CPU输出的通道切换控制信号CFL_CHCV令单刀双掷开关S1、S2上端与输出端短接,则施加到LVDT传感器的初级线圈激励来自于LVDT调理电路A;同理,当LVDT调理电路B为主调理通道时,CPU输出的通道切换控制信号CFL_CHCV令单刀双掷开关S1、S2下端与输出端短接,则施加到LVDT传感器的初级线圈激励来自于LVDT调理电路B。

为保证两通道LVDT调理电路能够正常工作及消除两片LVDT调理电路激励不同带来的调理误差,单刀双掷开关S1、S2输出端同时与两通道LVDT调理电路的BIN端与ACOMP端相连,LVDT传感器的次级输出信号经过防护滤波电路后直接与LVDT调理电路的AIN端相连,此时两通道LVDT调理电路输出电压与LVDT传感器的位移 L 成正比,CPU经A/D转换电路得到LVDT传感器位移信息。同时CPU还监控两通道LVDT调理电路输出的交流激励幅值,当检测到主调理通道的LVDT调理电路输出的激励幅值异常时,CPU通过输出通道切换控制信号实现主控/备份通道切换控制,并忽略故障LVDT调理电路输出电压,实现了故障屏蔽及电路恢复功能设计。

1.3.1 通道切换电路设计

通道切换电路由2个单刀双掷模拟开关构成,单刀双掷开关选择某型集成芯片实现,该芯片内部集成了4路单刀双掷开关,导通电阻最大为 35Ω ,导通时间不超过 175ns ,断开时间不超过 145ns ,单路开关持续通过电流不超过 25mA 。通道切换电路原理如图4所示。为保证电路系统可靠性,提高通过模拟开关电流的上限,该文采用将两个单刀双掷开关并联的方案,将两个开关的输入端与输出端分别短接,且都由通道切换控制信号CFL_CHCV控制。并联后,驱动电流可达到 50mA ,满足LVDT传感器激励驱动电流的要求。

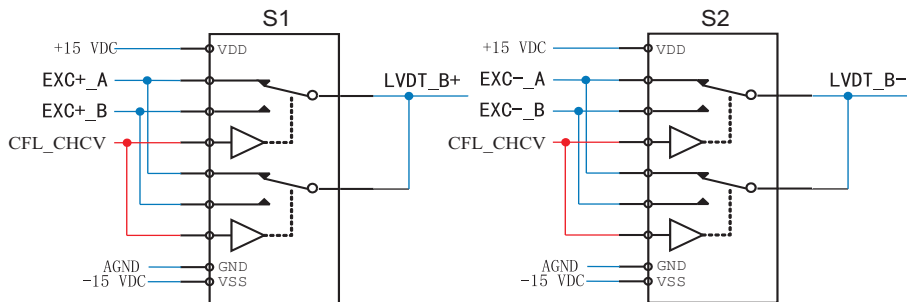


图4 通道切换电路原理

1.3.2 LVDT调理电路设计

LVDT调理电路A和LVDT调理电路B设计完全相同,以LVDT调理电路A为例对该电路设计进行

说明。LVDT调理电路A基于某集成LVDT调理芯片实现^[12],ACOMP与BIN均与LVDT_B+及LVDT_B-相连,而LVDT传感器输出信号POSA及POSB与

AIN 端相连。根据该 LVDT 调理集成芯片手册可知, 可通过外围电阻配置正弦激励信号 EXC+_A 及 EXC-_A 的幅值, 通过电容设置正弦激励信号 EXC+_A 及 EXC-_A 的频率, LVDT 测量系统的带宽也可通过电容配置。该研究配置的激励信号幅值有效值 4.1 Vrms, 激励信号频率为 3 kHz, 测量系统的带宽为 1.062 kHz。

1.3.3 幅值检测电路设计

在对 LVDT 传感器信号进行调理的过程中, LVDT 调理电路需要为 LVDT 传感器提供激励, 功耗较大, LVDT 调理电路输出激励异常是最常见的故障, 因此检测激励信号幅值是否正常, 并且切换到备份通道来保证调理电路的稳定运行。

激励电压幅值检测电路^[13]原理如图 5 所示。主要包括差分比例放大电路、精密全波整流电路和低通滤波电路。首先激励差分信号 EXC+_A 和 EXC-_A 经差分比例放大电路转换为单端信号 U_i , 再接入精密全波整流电路。精密全波整流电路利用运算放大器“虚断”“虚短”和二极管单向导通特性实现全波整流功能, 精密全波整流电路能够正常工作的前提是电阻

需满足如下关系: $R_8 = R_9, R_{10} = 2R_{11}$ 。具体的工作过程如下: 当输入信号 U_i 电压由 0- 向 0+ 增大的过程中, 运算放大器 D_3 输出电压会逐渐变小, 当电压等于 $-U_T$ (U_T 为 V_1 、 V_2 的开启电压) 时, 二极管 V_2 处于导通状态, V_1 处于截止状态, 则 D_3 、 R_8 、 R_9 和 V_2 构成了反相比例放大电路, U_{o1} 电压为: $U_{o1} = -(R_9/R_8) * U_i = -U_i$ 。当输入信号 U_i 电压由 0+ 向 0- 减小的过程中, 运算放大器 D_3 输出电压会逐渐变大, 当电压等于 U_T 时, 二极管 V_1 导通, 二极管 V_2 截止, D_3 、 V_1 构成负反馈电路, D_3 的反向输入端与 D_4 的反向输入端电压都是 0 V, R_9 、 R_{11} 流通电流为 0, 则 $U_{o1} = 0$ 。若不考虑 C_{10} , 运算放大器 D_4 输出电压 $EXC_A_DC = -(R_{12}/R_{10}) * U_i - (R_{12}/R_{11}) * U_{o1} = -(R_{12}/R_{10}) * (U_i - 2 * U_{o1})$ 。综上可得, 当 $U_i > 0$ 时, $EXC_A_DC = (R_{12}/R_{10}) * U_i$; 当 $U_i < 0$ 时, $EXC_A_DC = -(R_{12}/R_{10}) * U_i$; 故 U_o 为 U_i 的全波整流输出信号, 放大倍数由 R_{12} 和 R_{10} 的阻值决定。

电容 C_{10} 的主要作用是滤波, 与电阻 R_{12} 构成了低通滤波器, 其截止频率为 $f = \frac{1}{2\pi * R_{12} * C_{10}}$ 。

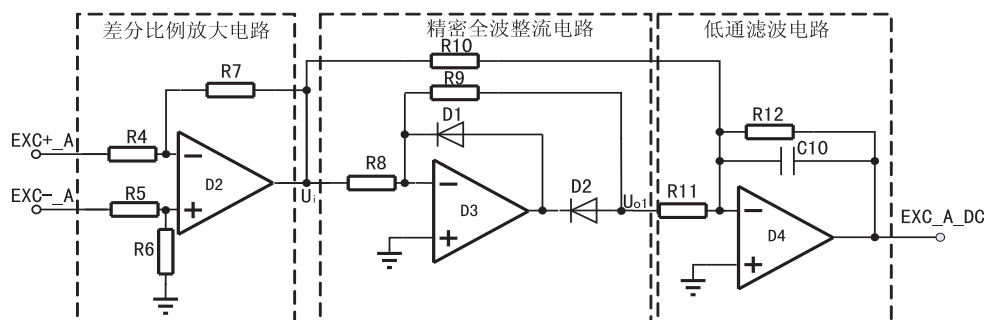


图 5 幅值检测电路原理

2 电路通道切换逻辑设计

四线制 LVDT 传感器调理电路具有两个完全相同的通道, 同时采集 LVDT 传感器位置信息, 其中主

控通道能够为 LVDT 传感器提供激励信号, 备份通道处于热备份状态, 当 CPU 检测到主控通道发生故障且备份通道正常时, 可以切换到备份通道输出激励信号^[14]。通道切换逻辑如表 1 所示。

表 1 通道切换逻辑

| 通道状态 | | 是否切换通道 |
|----------|----------|--------|
| 主控通道激励状态 | 备份通道激励状态 | |
| 正常 | 正常 | 不切换 |
| 正常 | 异常 | 不切换 |
| 异常 | 正常 | 切换 |
| 异常 | 异常 | 不切换 |

此外, 当两通道均未发生故障时, 为平衡两通道间主控次数, 保证两个通道调理电路的元器件寿命保持一致, 采用通道轮值的方式进行通道切换。若上一次产品上电为有效上电 (可通过判断上电持续时间是否大于某一固定阈值), 并且备份通道激励没有故障, 则

令上个周期备份通道为本周期主控通道。

3 电路验证

为充分表明提出的 LVDT 传感器双余度调理电路的功能和性能, 制作了工程样机和测试台对其进行

验证。其中测试台主要基于LVDT仿真卡和工控机实现,LVDT仿真卡型号为PCI-4104,支持16位分辨率、8通道(支持4线制/5线制)输出仿真功能,允许的激励源范围400 Hz~10 kHz,幅值范围为2 Vrms~7 Vrms,输出和激励之间相位差不超过1°,输出信号稳态精度在全量程范围内不超过0.1%。将PCI-4104插入到工控机中,开发上位机软件对该仿真卡进行驱动控制,上位机输入不同的比率 λ 来模拟LVDT传感器的不同位移^[15]。

3.1 通道切换功能验证

在提出的电路工作过程中,令CPU输出切换指令对通道切换功能进行验证。图6所示为通道切换功能的验证结果,自上向下分别为图2中的A通道激励信号EXC_A+、B通道激励信号EXC_B+、通道切换控制信号CFL_CHCV、通道切换电路输出信号LVDT_B+、A通道输出的调理电压信号和B通道输出的电压信号,在开始时,A通道为主控通道,在0.5 s左右对通道进行切换,令B通道为主控通道,在2.1 ms处再次进行通道切换。从图6中可以看出,在CPU输出切换指令后,本电路可快速进行通道切换,主控通道及备份通道的采集结果基本可保持不变,保证了本电路的稳定可靠。

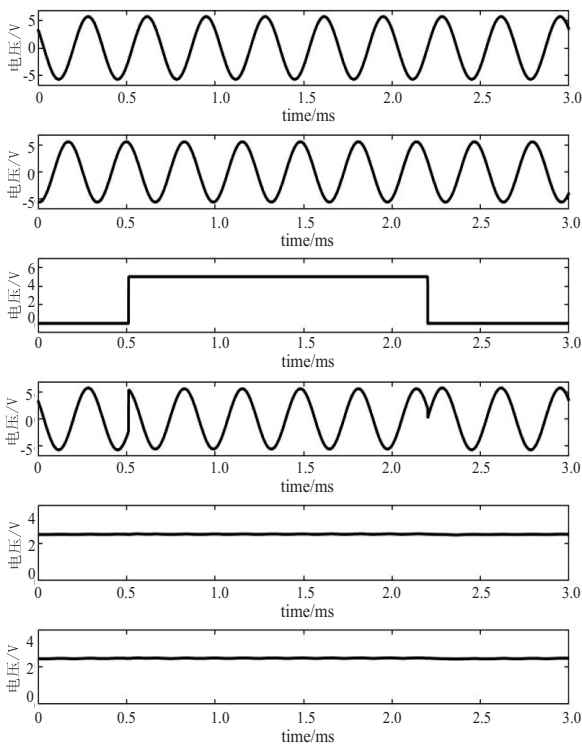


图6 通道切换功能验证

3.2 LVDT传感器调理功能验证

将图2中的通道切换信号CFL_CHCV输出高电平,A通道处于主控通道,通过上位机设置PCI-4104不同的比率 λ 来模拟LVDT传感器的位移,工程样机

A通道、B通道采集调理电路输出电压与上位机设置比率 λ ,此时采集的最大误差如图7所示。

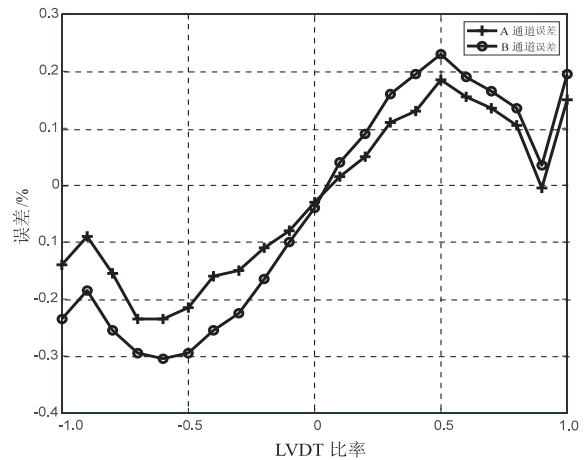


图7 A通道主控采集误差

设置通道切换信号CFL_CHCV输出低电平,B通道处于主控通道,此时采集的最大误差如图8所示。

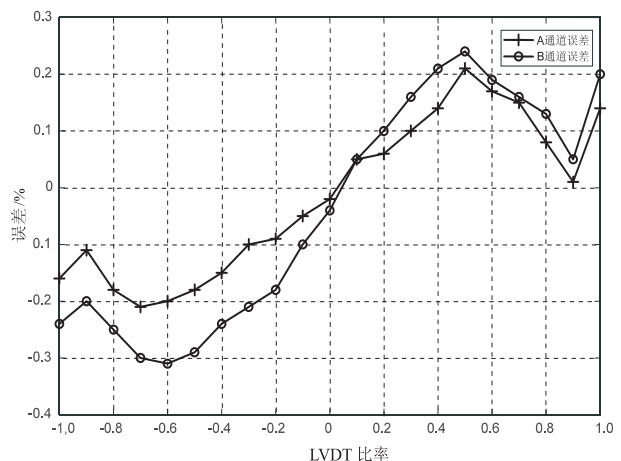


图8 B通道主控采集误差

3.3 电路测试结果

由以上验证结果可知,本研究设计的LVDT传感器双余度调理电路可实现快速通道切换功能,在切换过程中对采集结果基本无影响,可保证调理电路的正常工作,大大提高了系统可靠性。当A通道主控时,A通道误差最大为-0.24%,B通道误差最大为-0.3%;而B通道主控时,A通道误差最大为0.35%,B通道误差最大为-0.5%。

由此可知,不同通道主控对电路输出精度影响不大,调理精度至少可达到-0.5%,满足了精密位移测试系统要求。

4 结束语

该文提出了一种LVDT传感器双余度调理电路,并基于激励信号幅值检测结果实现通道切换逻辑设计,为平衡两通道的元器件寿命,提出了轮值的切换策略,大大提高了调理电路的可靠性。搭建了验证平台

对该电路进行了验证,验证结果表明可实现通道快速切换功能,并且切换过程对采集结果基本无影响,双通道信号调理精度高,适合可靠性要求高的机载设备使用要求。后续可对故障检测内容继续完善,比如可通过检测两通道输出结果的变化率及范围来判断电路是否存在故障。

参考文献:

- [1] 王余伟. 双余度飞行控制计算机系统余度管理和容错技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
- [2] 张立娟,程 相,左哲清,等. 采用LVDT位移传感器的高温阀位置伺服系统设计[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版,2022,36(4):313-318.
- [3] 张雅妮. 基于热备份的双余度嵌入式系统的容错设计[J]. 西北工业大学学报,2017,35(S1):120-123.
- [4] 柏受军,王 鸣,郎 朗,等. LVDT位移传感器电压电流转换电路的设计[J]. 传感器与微系统,2012,31(4):113-115.
- [5] RERKRATN A, LUANGPOL A, RIEWRUJA V, et al. Simple LVDT demodulator[C]//2020 20th international conference on control, automation and systems (ICCAS). Hokkaido: IEEE, 2020: 480-483.
- [6] GANESAN H, GEORGE B, ANIRUDDHAN S, et al. Design and analysis of a relaxation oscillator-based interface circuit for LVDT[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(5): 1261-1270.
- [7] WU S, HONG J. Five-point amplitude estimation of sinusoidal signals: with application to LVDT signal conditioning[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(3): 623-630.
- [8] 王 浩,赵 刚,卢玉芳. 基于无损全波整流电路的LVDT信号调理电路设计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(1): 155-158.
- [9] PETCHMANEELUMKA W, MANO P, RIEWRUJA V. LVDT demodulator based on amplitude detector[C]//International conference on control and robotics engineering (ICCRE). Hongkong: IEEE, 2018: 218-221.
- [10] 汪首坤,彭建敏,刘 洋. 基于切比雪夫最佳逼近的LVDT位移传感器信号处理[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(3): 271-275.
- [11] 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.
- [12] 佟为明,徐会明,杨士彦. 由单运放构成的精密全波整流电路[J]. 电测与仪表, 1993(5): 40-43.
- [13] 胡肖璐,樊 丁,彭 凯. 航空发动机位移信号测量系统设计与实现[J]. 测控技术, 2013, 32(2): 122-125.
- [14] 叶红兵. 双余度无刷直流电动机舵机控制关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2011.
- [15] 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.