

隔离型交流差动信号变换设备的设计

张亚维¹ 史强强²

(1. 西安航空职业技术学院 西安 710089; 2. 中国飞行试验研究院 西安 710089)

摘要:为满足国产某型飞机操纵系统传感器输出参数测量的需要,对LVDT/RVDT原理传感器输出进行实时监测,由于其阻抗较大导致后端设备负载效应大,同时要保证抽引测试设备不对原操纵系统造成安全隐患的问题,因此本文设计了一种隔离型差动交流信号变换设备。该设备可将LVDT/RVDT传感器输出的两路差分交流信号变换成直流量输出,与其实际物理量呈线性关系;同时抽引输出端采用高阻抗无源变压器隔离方式,保证不对原系统造成干扰,并满足较小的负载效应。经过仿真与试验验证,该设计简单可靠,具有一定可行性。

关键词:抽引测试;LVDT/RVDT传感器;差动信号;负载效应

中图分类号: TN707 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Design of isolated AC differential signal conversion equipment

Zhang Yawei¹ Shi Qiangqiang²

(1. Xi'an Aeronautical Polytechnic, Xi'an 710089, China; 2. China Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: In order to meet the needs of the sensor output parameter measurement of a domestic aircraft operating system, do a real-time monitoring of an LVDT/RVDT principle of sensor output, because its impedance causes the backend equipment load effect to be bigger, at the same time to ensure that the test equipment does not cause a security problems for the original operating system, therefore, an isolated differential AC signal conversion equipment is designed in this paper. The device can be LVDT/RVDT sensor output of the two differential AC signal into its linear relationship with the actual physical quantity of DC output; at the same time, the output terminal adopts high-impedance passive transformer isolation mode to ensure that the original system does not cause interference, and to meet the smaller load effect. After simulation and test, it shows that the design is simple and reliable, with certain feasibility.

Keywords: pumping test; LVDT/LVDT sensor; differential signal; load effect

1 引言

在新型号飞机试飞测试任务需要中,某些飞行参数需要直接从飞机控制系统前端传感器抽引直接获取,保证机上原始数据能够实时测量、记录^[1-2]。对于某型飞机的驾驶员操纵系统中,原机上的各项操纵传感器的激励与输出均由原机飞行控制计算机提供与测量控制,在飞控系统设计阶段并未给飞行试飞测试留有数据获取端口。而且在试飞测试时,驾驶员的操纵参数主要包括操纵力传感器、操纵杆位移传感器、操纵面角位移传感器,这些参数的获取对飞机性能分析具有至关重要意义。

根据对飞机驾驶员操纵控制系统分析,原飞控系统

与传感器采集前端形成闭环控制,传感器激励源与输出均由机上飞控系统提供与解算,不能直接获取。在本系统中通过抽引方式获取传感器输出数据,而传感器激励信号出于安全设计未被提供,因此不能采用通用LVDT信号调理器芯片^[3-4],直接将原始LVDT输出转换为直流。根据LVDT/RVDT传感器原理分析可知,此类传感器其输出阻抗一般都较大。直接从输出端测量的设备就需要足够大的输入阻抗来减少后端测量设备的负载效应^[5];并且测试设备通过抽引方式电气连接到原机上的传感器输出,安全性首先要被考虑,这两个问题需要同时解决。

本文提出了一种采用无源的变压器隔离式交流差动信号变换设计方法。差动信号变换设备在信号输入前端

首先采取电气隔离措施,不会对原系统造成干扰;其次,将传感器输出的两路交流信号变换成相应的直流信号,并求和、滤波、放大和偏置调整后输出,其输出直流电压与传感器采集的实际物理量成线性关系,最终将变换设备输出的直流信号传输给后端采集设备,供机载测试数据采集器采集、记录。

2 差动信号变换设备采集系统

在新型飞机进行出场定型前期,都要通过严苛的试飞测试阶段。然而大多数飞机在设计时并未给试飞测试设备预留测试接口,从而给测试设备的安装与接口匹配等带来困难。测试设备的使用过程中,更不能对原机上设备造成干扰,影响飞机正常工作。在一些测试数据的获取上需要设计专用的转换设备对飞机的各种操纵、姿态参数进行测量。在电信号的测量过程中,常采用抽引并线方式获取电信号之后再经过转换后就可获知前端设备的具体参数。本文介绍的差动信号变换设备就是为某些采用 LVDT/RVDT 传感器测量的驾驶员操纵参数而设计。差动信号变换设备采集系统组成示意如图 1 所示。

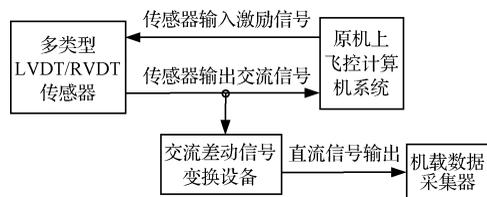


图 1 差动信号变换设备采集系统组成示意

机上多种类型传感器分别对驾驶员操纵力、驾驶员操纵位移及操纵面角位移进行测量,原系统中传感器输入激励信号由机上采集系统提供,在抽引测试时不允许在传感器激励输入端进行改造抽引,因此只能在原机上传感器输出端将 LVDT 或 RVDT 副边输出 3 根信号端子上改造,实际改造系统中通过对原设备上传感器输出连接器进行并线抽引处理,再使用设计的差动信号变换设备从输出端对传感器输出数据进行采集。

该差动信号变换设备由 5 部分组成,分别为隔离变压器、精密整流电路、求差电路、输出调理电路(滤波、放大、偏置电路)及电源电路。差动信号变换设备组成原理如图 2 所示。

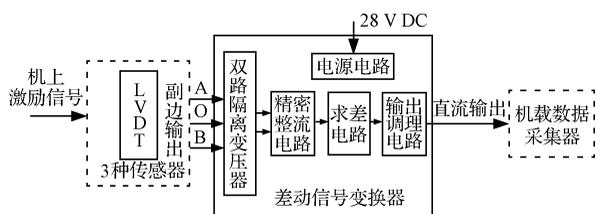


图 2 差动信号变换设备组成原理

3 差动信号变换设备模块化设计实现

3.1 信号抽引设计

通过直接并线或转接等方式抽引飞机系统的各类电信号,由于某些产品设计中保护隔离措施设计不到位,常易造成对飞机原系统正常功能的干扰,并且会影响机上发生故障时的定位判断。因此在进行抽引测试系统中,保护措施一定要做到位^[6]。

根据本次需要抽引的信号特性而言,原机上数据采集系统中的 LVDT 型传感器激励源由原始设备提供,为保障原系统工作可靠性,只是在传感器输出端通过改造输出连接器进行并线处理,原机上传感器输出信号送入后端采集设备,输出端与多个负载相关。因此,首先需要做好必要的电气安全隔离措施。本方案中在交流变换器信号输入端采用变压器进行电气隔离,保障变换器接入系统中不会对原系统造成干扰^[7]。

3.2 差动信号变换设备设计

通过对抽引测试信号的分析及 LVDT/RVDT 工作原理分析,设计了后端抽引测试设备,变换设备主要包含 5 个模块电路:隔离变压器模块、精密整流模块^[8]、求差电路模块、输出信号处理模块及电源电路模块组成。差动信号变换设备内部组成如图 3 所示。

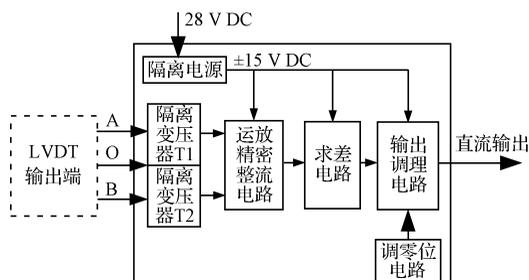


图 3 差动信号变换设备内部组成

1) 隔离变压器设计

由于本次测量信号通过并线抽引方式获取,为了减小测试设备对原始系统的电气干扰,在输入信号端与原设备输出端之间必须进行电气隔离,本方案中采用变压器电气隔离设计。

根据 LVDT 传感器原理可知,抽引入的后端设备需要足够大的输入阻抗,否则会对原系统中传感器正常输出值造成较大负载效应,致使原系统采集到的传感器数据误差较大,因此设计中需结合负载效应精度,将隔离变压器的输入阻抗值尽量提高,减小对 LVDT 传感器造成的负载效应。但是提高输入阻抗必将导致变压器尺寸变大,在设计中需要综合考虑。

在变压器设计时,通过增加瓷罐尺寸,用来增加绕线匝数,从而提高变压器输入阻抗。在绕制隔离变压器时,根据输入信号幅度和频率,将变压器匝数比设计为 1,采用 36×22 mm 瓷罐尺寸,漆包线采用 0.13mm² 的铜线。为

了保证变压器原副边平衡,线圈采用双线并绕方式,并且保证变压器未饱和。

LVDT 原边激励信号频率 1.8 kHz,线圈阻抗计算:

$$Z=R_s+jX_L \quad (1)$$

绕制的变压器经过实际测量原、副边内阻 R_s 均为

170 Ω ,相对于感抗 X_L 来说内阻可以忽略不计。则有:

$$Z\approx jX_L=2\pi fL \quad (2)$$

需要特别说明的是,必须在变压器输出端首先接入运放搭建的电压跟随器,保证后端电路基本不从变压器端获取电流,从而降低整个变换设备的负载效应。

2)精密整流及其滤波电路设计

由于二极管的伏安特性在小信号时处于截止或特性曲线的弯曲部分,在小信号检波时输出端将得不到原信号(或失真很大),特别是当信号幅度小于二极管的死区电压时,问题尤其严重。因此把二极管置于运算放大器组成的负反馈环路中,利用集成运放的放大作用和深度负反馈克服二极管非线性造成的误差,就能大大削弱这种影响,提高电路精度^[9-10]。这种电路可对 1 mV 左右的小信号进行检测,其误差小于 0.05%。如图 4 所示为经典的全波精密整流电路。

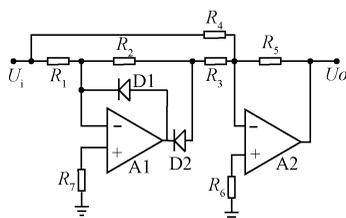


图 4 经典的高线性全波精密整流电路

图 4 所示为最经典的精密全波整流电路,其优点是在电阻 R_5 上并联滤波电容 C ,使输出电压波形由脉动直流波形变为平滑的直流电压信号。

输入信号正半周时,D2 导通,D1 截止,这时 A2 的输入信号有两个:

① A1 的输出电压: $U_{A1}=-U_i\times R_2/R_1=-U_i(R_1=R_2)$;

② 输入端直接传到 R_4 的电压: $UR_4=+U_i$ 。

这时运算放大器 A2 与外围电阻形成一个加法器,利用叠加原理将这两个输入电压叠加后其输出电压为: $U_o=-U_i\times R_5/R_4+[-(-U_i)\times R_5/R_3]=U_i(R_4=R_5=2R_3)$

输入信号负半周时,二极管 D1 导通,D2 截止,这时 A1 的输出为 0,A2 作为一个反相器,其输出电压为: $U_o=-U_i\times R_5/R_4=-U_i(R_4=R_5)$

在使用上述电路时必须注意以下几点:1)为消除输入偏置电流对输出电压的影响,A1、A2 运放输入正端分别需接平衡电阻 R_6 与 R_7 , R_6 取值应等于 $R_1\parallel R_2$; R_7 取值等于 $R_3\parallel R_4\parallel R_5$;2)输入电压 $U_i\leq\pm 15/\sqrt{2}$ V,以防止输出电压失真,影响测试结果;3)根据二极管导通关系,实现单位增益电阻匹配关系为 $R_1=R_2$, $R_4=R_5=2R_3$;可以通过更改 R_5 来调节增益。

根据全波整流电路各部分的电压和电流的输出波形关系可知,输出电压平均值 $U_{o(AV)}$:

$$U_{o(AV)}=\frac{1}{\pi}\int_0^\pi\sqrt{2}U_i\sin(\omega t)d(\omega t) \quad (3)$$

可得:

$$U_{o(AV)}=\frac{2\sqrt{2}}{\pi}U_i\approx 0.9U_i \quad (4)$$

上述精密全波整流电流实际输出电压为 $U_o=|U_i|$,形成脉动直流电输出,然而实际检测应用中需将交流信号转换成直流信号后才能进入下一阶段处理。

脉动直流电是指方向(正负极)不变,但大小随时间变化,它们只有经过滤波(用电感或电容)以后才变成平直的直流电,当然其中仍存在脉动成分(称纹波系数),大小取决于滤波电路的滤波效果。经精密全桥整流后的交流电,是脉动直流电,必须加滤波电容,才会变成平滑的直流电。且交流电经整流、滤波后的直流电压幅值为输入交流电压峰值的 0.9 倍。

通过在精密整流电路的后级运算放大器中给反馈电阻 R_5 上并联一个积分电容 C ,就得到反向输入一阶低通滤波电路,通带放大倍数不受影响。在电路中形成一阶低通滤波环节,其电路传递函数为:

$$G(s)=\frac{1}{1+RCs} \quad (5)$$

低通滤波器截止频率为(C 取 22 μF):

$$f_c=\frac{1}{2\pi RC}=0.4\text{ Hz} \quad (6)$$

在形成的一阶低通滤波环节中, C 越大形成的滤波网络效果越好,但响应时间越长; C 越小形成的滤波效果较差,但是响应时间短,因此要结合实际电路参数设计 C 容值大小。

差动信号变换设备原理如图 5 所示。

3)求差电路及滤波电路设计

前级电路将 LVDT 传感器副边输出的交流信号通过变压器隔离以及精密整流变为直流信号后,根据传感器最终需要测量的电压值为两副边线圈电压之差,因此在整流滤波之后设计求差电路,计算 LVDT 传感器两副边输出电压差,即为 LVDT 输出电压,且包含极性关系。求差电路采用双路输入差分比例运算电路实现,电路输入两端参数对称,输出即为二者差值。需要强调的是,求差电路的 4 个电阻精度和温度误差都要选择高精度才能减小误差。

在求和电路后端进行滤波处理,提高输出信号质量,设计中采用二阶巴特沃斯低通滤波器,其截至频率设计在 2 Hz 处。

4)输出增益及零位调整电路设计

根据后端采集设备要求,输出直流信号幅度为: -5 VDC~+5 VDC,需要对输出的直流信号幅值进行调整,同时对精密整流电路中直流输出的电压幅值与输入交流信号峰值之间进行补偿。采用反向比例放大电路将增益范围设置为 1~6 倍。

在电路最末级设置偏置调零电路,将电位器两头通过

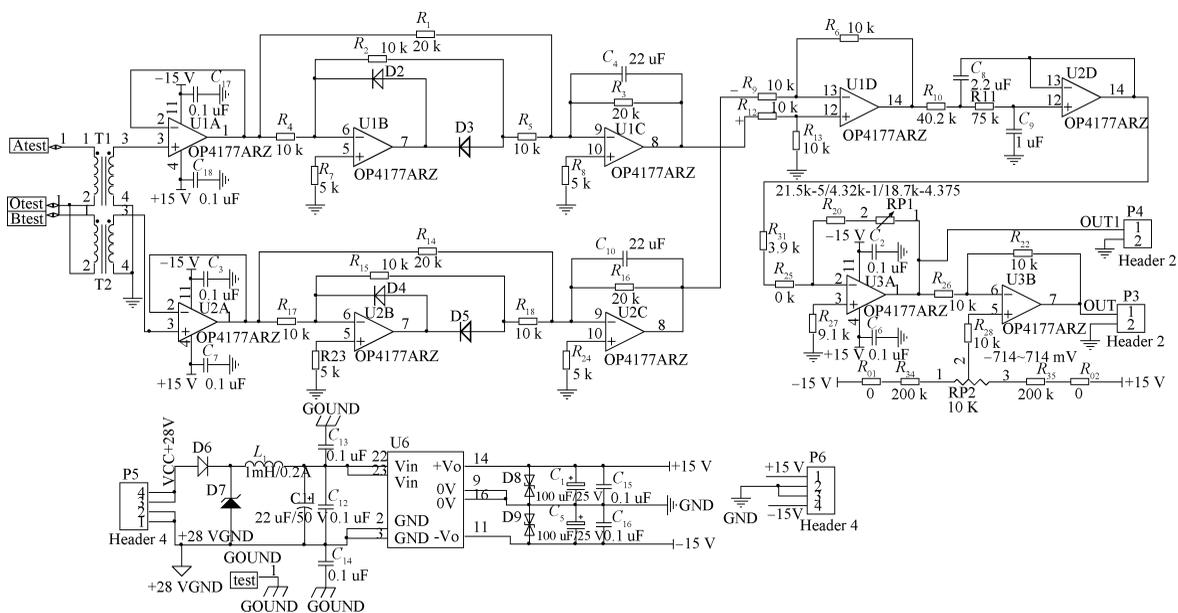


图5 差动信号变换设备原理

电阻接入给运放供电的正负电源,电位器可变输出端接入运放正向输入端,形成同向比例放大电路,即可通过调整电位器而调整最终输出的零位电压点。防止LVDT在实际工作中,机械零位误差,也将变换电路中的偏置电压消除。

4 仿真与试验测试

4.1 仿真验证及结果分析

根据上述设计的电路进行仿真验证,在Multisim中搭

建的仿真模型如图6所示。精密整流电路中滤波电容选择22 μF;二阶LPF截止频率设计在2 Hz;增益、偏置可调。

如图7所示为精密整流电路输入与输出仿真波形,图中电压单位1 V/格。输入信号为交流信号2 Vrms/1 800 Hz(Channel_A),其峰值为2.828 Vp,经过精密整流滤波电路之后输出直流电压幅值为1.8 VDC(Channel_B),即为输入交流信号有效值的0.9倍。与理论分析结果一致。

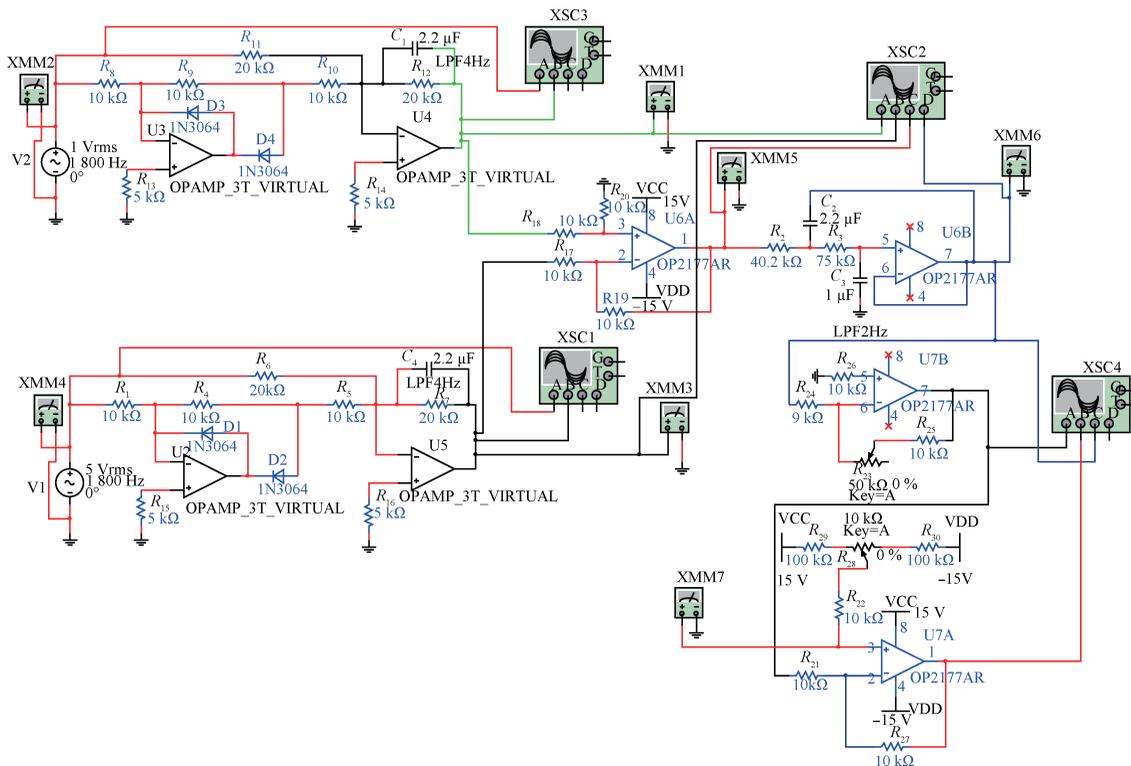


图6 电路仿真原理

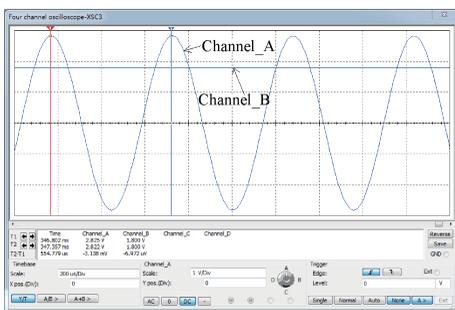


图7 精密整流电路 XSC3 仿真结果

如图8所示为图中 Channel_A 代表通道1精密整流加滤波后输出的直流电压 1.8 VDC(1 V/格), Channel_B 代表另外一路整流输出直流电压 4.5 VDC(2 V/格), Channel_C 为求差电路输出 -2.7 VDC(1 V/格), Channel_D 代表二阶滤波之后的输出,在 0.7 s 之后与 Channel_C 曲线幅值基本一致。

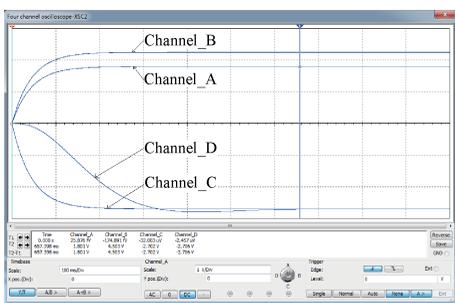


图8 求差电路、滤波电路 XSC2 仿真结果

4.2 样机试验测试

1) 变换器负载效应测试

采用交流型 LVDT 对设计的差动信号变换设备进行试验测试,交流 LVDT 型号为 GCA-121-250,原边输入激励为 3 Vrms/2.5 kHz,精度 0.25%,量程 ±0.25 英寸(±6.35 mm)。经过测量交流 LVDT 副边输出阻抗最大为 1 kΩ 左右,自制的变压器输入阻抗在 300 kΩ 左右,负载阻抗为 LVDT 输出阻抗的 300 倍,理论计算产生的负载效应为 0.33%。

交流 LVDT 激励源为 3 Vrms/2.5 kHz(空载与带载均保证激励源不变)时,接入差动信号变换设备前后传感器输出变化情况,如表1所示。

表1 负载效应测试

副边端子	LVDT 副边输出			
	空载/ mV _{rms}	带载通电 /mV _{rms}	误差 /mV _{rms}	负载效应 (%)
伸张 V _{AO} (max)	2 385	2 378	-7	2.9
伸张 V _{BO} (max)	913	910	-3	3.3
收缩 V _{AO} (min)	576	575	-1	1.7
收缩 V _{BO} (min)	2 821	2 812	-9	3.2
电气零 V _{AO} =V _{BO}	1 608	1 603	-5	2.5

样机负载效应测试与理论计算结果基本保持一致,可以达到设计要求。

差动信号变换设备样机调试流程:

①将 LVDT 工作行程调整到 0 位,即中立位置,调整偏置电压电位器 RP2,使输出端 OUT 输出为 0 V。

②调整 LVDT 工作行程到测量范围最大或者最小处,调整增益电阻 RP1 使输出为 +5 V 或者 -5 V。

偏置电位器 RP2 将 LVDT 及变换器中的偏置电压统一进行校正。增益电位器 RP1 在电路设计中增益范围为 1~6 倍。

2) 样机电路功能测试

实验室环境下对样机进行联试测试,输入端由信号发生器为交流 LVDT 提供恒定激励,交流 LVDT 副边两路输出分别作为变换器两路输入信号 V_{AO}、V_{BO},直接使用数字表监测,并在样机最终输出端监测输出直流电压,将输出直流电压与变换器输入端差值电压 V_{AB}(V_{AO}-V_{BO})进行比对,并计算精度。测试平台原理如图9所示,样机联试测试如图10所示。

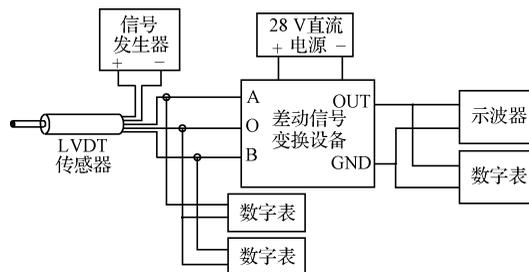


图9 测试平台原理

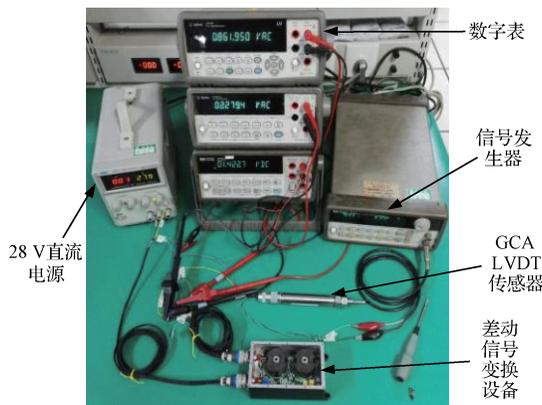


图10 实验室样机联试测试平台

将传感器输入端短路,调节偏置电位器 RP2,使输出为 0;在保持 LVDT 位移传感器输入激励为 9.768 VPP/1.8 kHz 时,将位移传感器固定在万工显台面上,通过水平移动调节旋钮调节万工显,保证 V_{AO} 与 V_{BO} 差值 1 000 mV,调整增益电阻 RP1,使输出增益设置为 5。通过调节万工显,改变 V_{AO} 与 V_{BO} 差值,常温下测试的试验数据如表2所示。

表2 联试试验数据

V_{AB}/mV	实测				
	$V_{AO}/\text{mV}_{\text{rms}}$	$V_{BO}/\text{mV}_{\text{rms}}$	V_{out}/mV	误差/ mV	精度/ (%F.S)
1 000	4 009	3 009	5 000	0	0
500	3 752	3 252	2 503	3	0.05
0	3 500	3 500	-2	-2	0.10
-500	3 253	3 753	-2 503	-3	0.15
-1 000	3 010	4 010	-5 004	-4	0.05

通过联试试验数据可知,变换设备转换最大误差精度为0.04%F.S,变换器对输入交流差分信号转换成直流,并调节增以后,转换误差很小,转换精度较高,可以满足试飞测试要求。

5 结论

1)针对飞机驾驶员操纵系统中LVDT传感器抽引测试中较小的负载效应和安全隔离要求,设计了一款精度较高的隔离型交流差动信号变换设备。特别适用于飞机抽引测试场合。

2)给出了交流差动信号变换设备的设计原理和实现方案。

3)设备转换精度高、安全可靠,灵活性强、参数易配置,可应用在飞机操纵系统闭环控制系统中。

4)基于LVDT传感器测试方案的试验结果表明,本文提出的差动信号变换设备设计方法正确可行,达到了设计要求。

参考文献

[1] 何超,魏飞,蒋荣,等. 轻型水陆两栖飞机水上试飞测试技术研究[C]. 2013首届中国航空科学技术大会论

文集,2013:5.

- [2] 柳阳,张千一,荣莉. 飞机设备抽引发动机滑油压差信号导致数控系统测量异常研究[J]. 飞机设计,2013,33(3):59-61.
- [3] 马春庭,谭业双,李江波,等. 基于LVDT传感器的测径仪研究[J]. 国外电子测量技术,2014,35(10):72-75.
- [4] 李玉霞,张斌,杨晓霞. 基于LabVIEW的大望远镜直线位移传感器测量系统[J]. 国外电子测量技术,2016,35(3):80-84.
- [5] 孙灯亮. 示波器探头技术[J]. 国外电子测量技术,2011,30(7):4-12.
- [6] 张焰,李霞. 改装电气设计中的可靠性研究[J]. 航空标准化与质量,2011(2):24-26+41.
- [7] 徐晨博,王丰华,傅竖,等. 变压器有载分接开关振动测试系统设计与开发[J]. 仪器仪表学报,2013,34(5):987-993.
- [8] 郝丽俊,单纯玉,白宝丹. 基于方波恒流源细胞电阻测量系统的设计实现[J]. 国外电子测量技术,2015,34(3):69-72.
- [9] 陈仁伟,朱长青,岳夕彪. 高准确度有效值转换电路的设计与实现[J]. 电子测量技术,2010,33(6):20-22,26.
- [10] 刘文华,熊晶. 一种精密整流电路的设计及应用[J]. IT时代周刊,2014(增刊2):3.

作者简介

张亚维,1988 出生,硕士研究生,助教。主要研究方向为航空电子、信号与系统等。
E-mail:125556113@qq.com