

RVDT 传感器仿真电路的设计与研究

李 稷

(上海飞机设计研究院 ARJ21 飞机项目管理部, 上海 200436)

Design and Research of the Simulator of the RVDT Sensor

Li Ji

(ARJ21 Management Department, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 200436, China)

摘要: RVDT(Rotary Variable Differential Transformer)传感器是一种差动式变压器,用于将机械位移信号转换成电信号,具有灵敏度高、线性度好、分辨率高、寿命长及可靠性高等优点,在航空领域有着广泛的应用。由于 RVDT 传感器的输出信号为差分信号,传统的仪器仪表不能直接模拟 RVDT 传感器的信号,所以研制 RVDT 传感器仿真器替代真实的 RVDT 传感器,用于飞机机载系统的地面调试和试验。

关键词: RVDT;仿真器;差分信号;飞行控制系统

[Abstract] The RVDT(Rotary Variable Differential Transformer) sensor is actually a kind of differential Transformer. It is used to transfer the mechanical displacement signal to the electrical signal. It has the feature of high sensitivity, good linearity, high resolution, long life and high reliability, so it is widely used in the field of avionics. The RVDT sensor outputs the differential signal, so traditional instruments can't simulate the RVDT sensor's signal, so the simulator of the RVDT sensor plays an important role in researching and testing the function of the flight control system instead of the real RVDT sensor.

[Key words] RVDT; Simulator; Differential signal; Flight control system

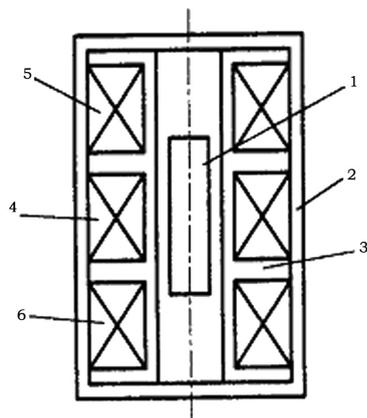
0 引言

RVDT 传感器是现代电传飞行控制系统的核心器件,用于将驾驶舱飞行员操纵位移信号和舵面运动信号转换成电信号。本文主要论述了 RVDT 传感器仿真电路的设计原理, RVDT 传感器输出的两路差动电压信号为位移信号和激励信号的乘积的函数,当铁芯偏离中心位置时,两路输出信号的增量相位相反,因此采用乘法的方法模拟传感器输出的两路信号。RVDT 传感器仿真器在大型飞机机载系统的地面调试和试验中的成功运用,表明其具有较强的先进性和应用价值。

1 RVDT 传感器的结构分析及工作原理

RVDT 传感器的工作原理类似于差动式变压器的工作原理。这种类型的传感器主要由衔铁芯、初级线圈和两个次级线圈组成,初级线圈和次级线圈之间的衔铁能随传感器的伸缩而运动,即初级线圈和次级线圈间的互感量随被测位移的改变而变化。RVDT 传感器的两个次级线圈采用反向串接的方式,以差动方式输出电压信号。典型的 RVDT 传感器结构如图 1 所示。

在理想情况下(忽略涡流损耗、磁滞损耗和分布电容等影响),RVDT 传感器的等效电路如图 2 所示。



1-衔铁芯;2-外壳;3-骨架

4-初级线圈;5-次级线圈1;6-次级线圈2

图1 RVDT 传感器结构示意图

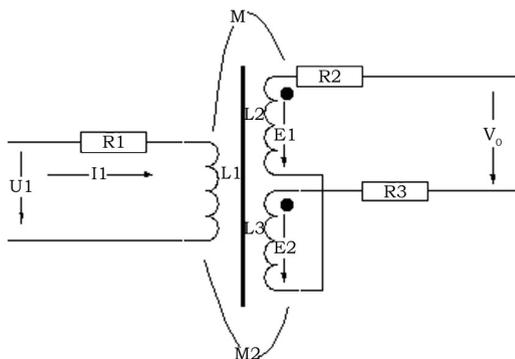


图2 RVDT 传感器的等效电路图

M_1 、 M_2 分别为初级线圈 L_1 与两个次级线圈 L_2 、 L_3 之间的互感系数; L_1 、 R_1 分别为初级线圈的

电感和等效电阻; L_2 、 L_3 分别为两个次级线圈的电感; R_2 、 R_3 分别为两个次级线圈的等效电阻。当初级线圈 L_1 加上某一频率的正弦交流电压 U_1 后,次级线圈产生感应电动势为 E_1 和 E_2 ,它们的大小与铁芯在线圈内的位置有关。 E_1 和 E_2 反极性连接便得到输出电压 V_0 。为便于分析,忽略电阻的影响。

设施加在初级线圈上的激励电流为 $i(t) = I \sin \omega t$,根据互感原理,初级线圈 L_1 对次级线圈 L_2 和 L_3 的互感磁链 ψ_1 和 ψ_2 分别为:

$$\psi_1 = i(t)M_1, \psi_2 = i(t)M_2 \quad (1)$$

感应电势为:

$$E_1 = d\psi_1/dt, E_2 = d\psi_2/dt \quad (2)$$

将(1)代入(2)得:

$$E_1 = M_1 di(t)/dt, E_2 = M_2 di(t)/dt \quad (3)$$

当铁芯处于中心位置时,初级线圈 L_1 对两个次级线圈 L_2 和 L_3 的互感相等,即有 $M_1 = M_2 = M$,此时 $E_1 = E_2$,输出电压 $V_0 = E_1 - E_2 = 0$ 。

由于两个次级线圈属于均匀密绕,当铁芯位移变化 X 时,引起初级线圈对次级线圈互感的变化,则有:

$$\Delta M = KX \quad (4)$$

其中 K 为耦合系数

$$M_1 = M + \Delta M, M_2 = M - \Delta M \quad (5)$$

若 X 按照正弦规律变化(设 $X = A \sin \Omega t$, A 为机械运动的最大位移),

此时

$$E_1 = di(t)(M + \Delta M)/dt =$$

$$MI \cos \omega t + IK A \sin \Omega t \cos \omega t + IK A \sin \omega t \cos \Omega t$$

$$E_2 = di(t)(M - \Delta M)/dt =$$

$$MI \cos \omega t - IK A \sin \Omega t \cos \omega t - IK A \sin \omega t \cos \Omega t$$

$$V_0 = E_1 - E_2 = 2IK A (\cos \omega t \sin \Omega t + \sin \omega t \cos \Omega t)$$

两个次级线圈输出电压和 $E_1 + E_2 = 2MI \cos \omega t$,其有效值为常数,该值也经常用作传感器故障监测信号。

根据以上分析可以看出,RVDT 传感器的输出电压 V_0 幅值的大小和极性可以检测机械运动的位移和方向。

2 RVDT 仿真电路的设计和实现

通过对 RVDT 传感器工作原理的分析可见,RVDT 输出的两路差动电压信号为位移信号和激励信号的乘积的函数,当铁芯偏离中心位置时,两路输出信号的增量相位相反,因此采用乘法的方法模拟传感器输出的两路信号,其中利用 DA 模拟传感器的位移信号。RVDT 仿真电路的原理框图如图 3 所示。

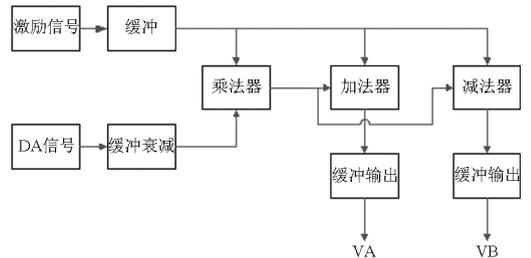


图3 RVDT 仿真电路原理框图

激励信号经过缓冲衰减后模拟传感器铁芯处于中心位置时的状态,DA 信号经过缓冲衰减后通过乘法运算模拟传感器铁芯的位移状态,通过加法电路模拟 E_1 ,通过减法电路模拟 E_2 。 E_1 和 E_2 的经过缓冲后可输出模拟 RVDT 传感器的输出信号。根据以上原理,设计了 RVDT 传感器仿真电路,如图 4 所示。

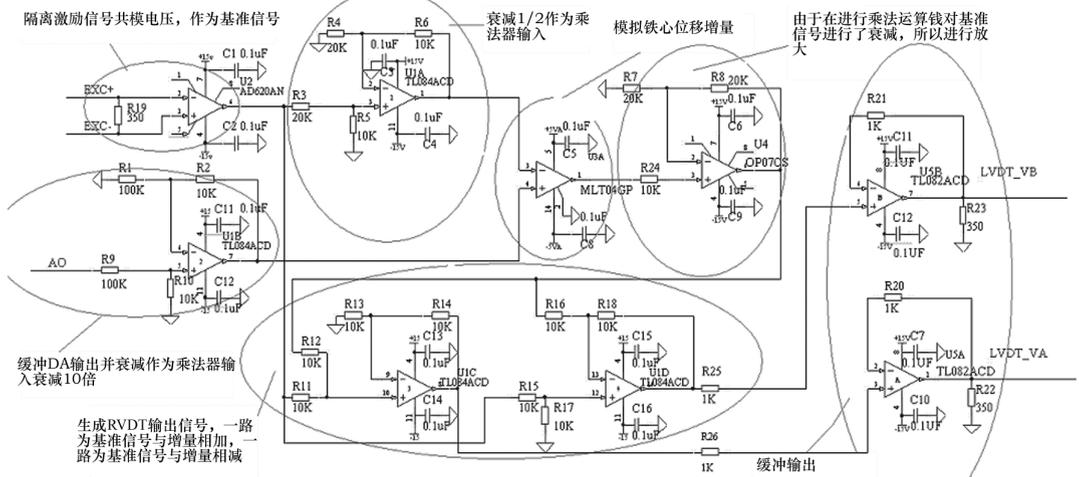


图4 RVDT 仿真电路原理图

(1)激励信号接口电路原理图

激励信号接口电路的原理如图5所示。由于RVDT解调电路提供两路相位差为180°的激励正弦信号,因此在和仿真电路连接时存在共地的问题,所以设计缓冲电路用于对激励信号进行缓冲并隔离其共模电压,电路中的电阻R7用于模拟传感器初级线圈的交流有效电阻。缓冲器采用AD公司的仪表放大器AD620,为提高其共模输入范围,采用±15V电源对其供电。

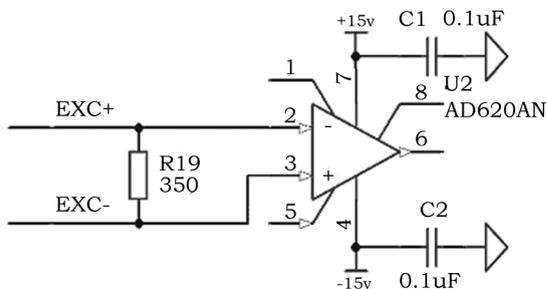


图5 激励信号接口电路原理图

(2)DA 接口电路

本设计中DA采用NI公司的成熟多功能模拟信号输出模块PXI-6713,其数据更新率为740KS/s,输出范围±10V,可完全满足RVDT传感器仿真器对数据更新速率的要求。

考虑到DA输出要模拟不同的传感器量程及与模拟乘法器的连接,本电路中设计的DA接口电路

对DA信号进行了缓冲和衰减以满足不同量程的仿真需求。DA接口电路如图6所示。

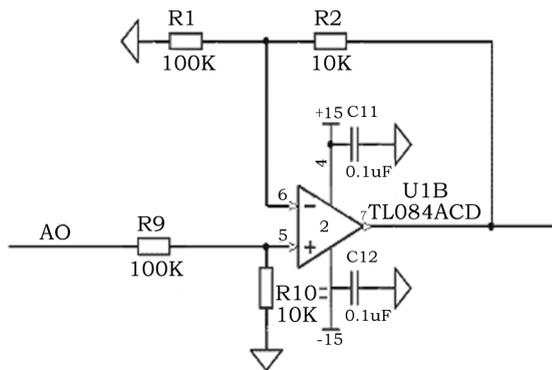


图6 DA接口电路原理图

缓冲器采用高速运放TL081,电路中的电阻R1、R2、R9、R10同运放构成了衰减电路,考虑到乘法器的输入电压范围,将衰减比例调整为10:1。

(3)乘法器

乘法器采用AD公司的成熟模拟乘法器MLT04G,该乘法器具有4个通道,其工作电压为±5V,两个乘法因子的范围为±2.5V,具有8MHz的带宽。其输出 $W = XY/2.5$,广泛地应用于调制和解调电路设计,因此可满足本设计的需求。

(4)输出电路

输出电路包括放大电路、加法电路、减法电路以及输出缓冲电路,如图7所示。

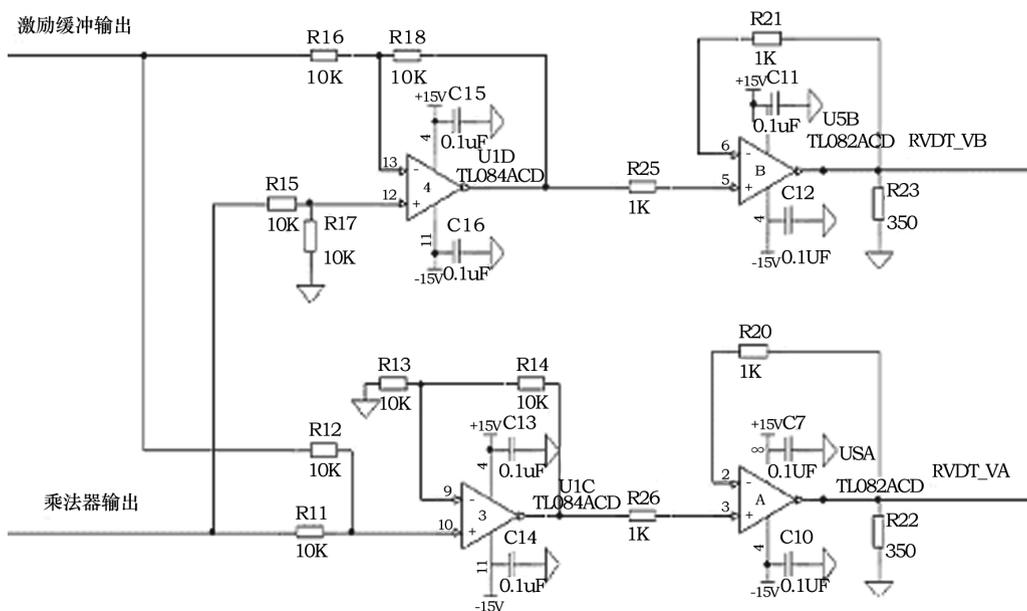


图7 输出电路原理图

由于乘法器的输出 $V_0 = WY/2.5$, 故在乘法器的输出对其进行放大处理, 根据先前的分析, RVDT 传感器的两路输出在铁芯处于中立位置时大小相等, 相位相同(但不为 0), 而本电路设计中当 DA 输出为 0 时模拟铁芯处于中立位置时的状态, 故在电路设计过程中设计加法器和减法器使得电路在 DA 输出 0V 时, 电路输出的 $V_B = V_A \neq 0$, 而当 DA 输出不为 0 时, 电路模拟的两路输出一路增大, 一路减小, 但是相位相同。考虑到运算速度对相位造成的影响, 设计中将加/减法电路采用一片双通道运算放大器来实现以尽可能的减少由于器件造成的相位误差。同时为了便于调整解调电路之间的阻抗匹配及对次级线圈有效电阻的模拟, 电路在输出时设计了匹配电阻。

3 RVDT 仿真电路的测试

为检验电路设计的正确性, 对 RVDT 仿真电路进行测试。运用信号发生器在电路中添加频率为 3KHz 的正弦信号模拟传感器的激励信号, 如图 8 所示, 添加 20Hz 的正弦信号模拟传感器的铁芯位移如图 9 所示。 V_a 和 V_b 分别为传感器的两路输出信号如图 10、图 11 所示。通过示波器可以看出, V_a 和 V_b 两路信号相位相同, 但是随着 DA 信号变化其增量相位相反, 符合 RVDT 传感器的工作原理。

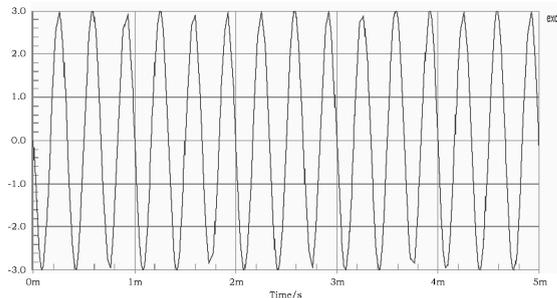


图 8 传感器的激励信号

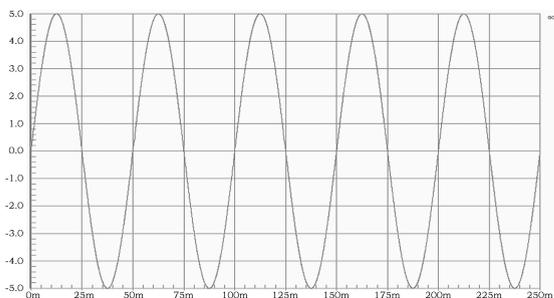


图 9 铁芯位移输入波形

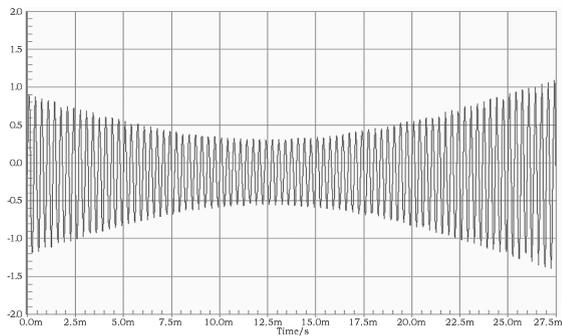


图 10 VA 输出波形

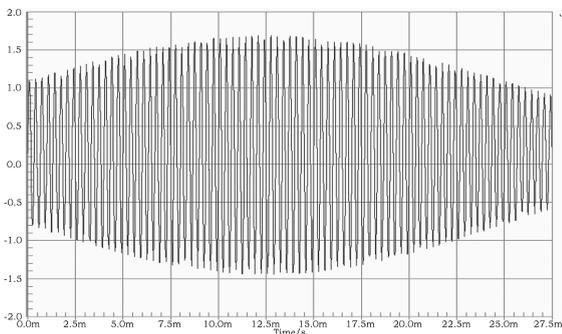


图 11 VB 输出波形

4 结论

RVDT 传感器类似于差动式变压器, 用于将机械位移信号转换成电信号, 主要由衔铁芯、初级线圈和两个次级线圈组成, 初级线圈和次级线圈之间的衔铁能随传感器的旋转而运动。RVDT 输出的两路差动电压信号为位移信号和激励信号的乘积的函数, 具有灵敏度高、线性度好、分辨率高、寿命长及可靠性高等优点。本文研究的 RVDT 传感器仿真技术将激励信号作为载波, 位移信号作为调制信号, 利用乘法器调制的方式模拟出 RVDT 传感器的输出信号, 其中缓冲器采用 AD 公司的仪表放大器 AD620, D/A 接口采用 NI 公司的成熟多功能模拟信号输出模块 PXI-6713, 乘法器采用 AD 公司的成熟模拟乘法器 MLT04G。该方法研制的 RVDT 仿真电路环境适应能力强, 可作为辅助调试设备, 能替代真实的 RVDT 传感器参与机载系统的调试和检测。该技术已经在某型飞机的地面模拟试验中得以应用, 具有较大的实用价值。

参考文献:

- [1] 飞机设计手册第 12 册[M]. 航空工业出版社, 2003.
- [2] 龚余才. 电路理论基础[M]. 航空工业出版社, 2000.
- [3] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 科学出版社, 2002.