

基于 PCI-76C2 多功能卡的 RVDT 信号分配器的设计与实现

段宝利, 葛 玥, 李鹏刚

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: 数字式电传飞控一般采用四余度或六余度 RVDT, 即每个操纵面由 4 个或 6 个独立的、相互隔离的 RVDT 组成, 一个共用的工作杆与驾驶杆、脚蹬或舵面作动器相连; 基于 PC 机和 PCI-76C2 多功能卡组成 RVDT 采集与仿真系统, 实现 RVDT 信号分配器功能; 在不破坏机载 ACE 系统连接完整性及不影响其测量信号质量的前提下, 要将多余度 RVDT 中的每个输出电信号复制两份然后以两路模拟输出, 一路仍继续接入 ACE 系统, 另一路则需引入地面驾驶杆模拟操纵试验系统中; 这样, 试验进行时, 同一个 RVDT 信号源能被两个系统同时采集; 试验结束后, ACE 系统又能够快速恢复原状。

关键词: LVDT; RVDT; 2 线系统; 3 线/4 线系统; 信号调理器; 信号模拟器; 信号分配器

Design and Realization of RVDT Signal Distributor Based on PCI-76C2 Multifunctional Card

Duan Baoli, Ge Yue, Li Penggang

(China Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Digital telex flight control generally uses four _ redundant or six _ redundant RVDT, which means every control surface is made up of four or six independent and isolated RVDTs. And a shared working rod is connected with driving rod, pedal and rudder actuator. The function of RVDT signal distributor is realized based on the RVDT acquisition and simulation system consisting of PC and PCI-76C2 multifunctional card. Without destroying the integrality of the ACE system connection and affecting the quality of measurement signal, two more duplicates of every electric output of redundant RVDT are created and changed into two analog outputs, one is still connected to the ACE system and the other one is connected to ground driving rod simulation operation test system. Therefore, one RVDT signal resource can be collected simultaneously when the test is running and the ACE system can return to the original position quickly after the test finishes.

Keywords: LVDT; RVDT; 2-Wire system; 3-Wire/4-Wire system; signal conditioner; signal simulator; signal distributor

0 引言

RVDT 是一种采用差动变压器原理实现的非接触式传感器, 用于将机械位移转换成电压信号, 具有灵敏度高、线性度好、分辨率高、寿命长及可靠性高等特点, 在航空领域有着广泛的应用。出于提高飞控系统安全性, 数字式电传飞控^[1]一般采用四余度或六余度 RVDT, 即每个操纵面由四个或六个独立的、相互隔离的 RVDT 组成, 一个共用的工作杆与驾驶杆、脚蹬或舵面作动器相连。

由于 ACE 系统属机载设备, 想要在不破坏连接完整性及不影响测量信号质量的前提下, 实现将四余度 RVDT 电信号一分为二, 一路仍继续接入 ACE 系统, 另一路则引入地面驾驶杆模拟操纵试验系统 (MOOG 多通道协调加载控制系统) 中。显然, 采用简单的并线方式, 考虑到电信号的驱动能力, 势必会对原 ACE 系统造成影响; 其次, 由于是交流 RVDT, 也需要适配不同测量系统 RVDT 信号解调器接口的兼容性问题。

为此, 利用 PC 机和美国北大西洋工业公司 (North Atlantic Industries, Inc) PCI-76C2 单槽半高多功能 I/O 卡组成 RVDT 采集与仿真系统, 采集卡 RVDT 测量通道完成 RVDT 信号采集, 同时, 将采集到的每路 RVDT 位置值复制两份, 通过仿真卡 RVDT 仿真通道将模拟真实 RVDT 信号输出, 从而实现 RVDT 信号分配器功能。

1 基本思路

1.1 LVDT 传感器

L/RVDT (Linear/Rotary Variable Differential Transformer) 线性/旋转可变差动变压器式直线位移/旋转角度传感器^[2]。其典型的实现原理如图 1 所示。

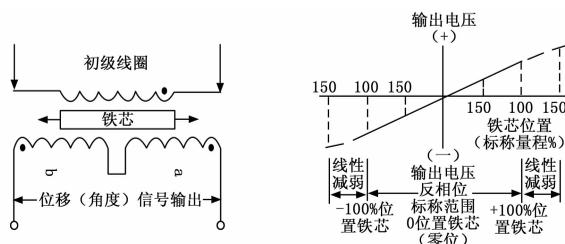


图 1 LVDT 电原理图及工作原理图

收稿日期: 2017-12-11; 修回日期: 2017-12-29。

作者简介: 段宝利 (1968-), 男, 高级工程师, 主要从事计算机测试与控制系统的工程设计方向的研究。

当在初级线圈供给一定频率的交变电压 (激励电压) 时, 铁芯在线圈内移动改变了空间的磁场分布, 从而改变了初/次级线圈之间的互感量, 次级线圈之间就产生感应电动势, 随着铁心的位置不同, 互感量也不同, 次级产生的感应电动势也不同, 这样就将铁芯的位移量 (实际上铁心通过测杆与被测物体保持接触) 变成了电压信号输出。为提高传感器的灵敏度, 改善其线性度、增大其线性范围, 设计时将两个线圈反串相接、两个次级线圈的电压极性相反, LVDT 输出电压是两个次级线圈的电压差, 这个输出的电压值与铁心的位移量成线性关系。

当铁芯处于中间位置时, 两个次级线圈产生的感应电动势相等但极性相反, 输出电压差值为 0; 当铁芯往右移动时, 次级线圈 a 感应的电压大于次级线圈 b, 两线圈输出电压差值大小随铁芯位移成线性变化 (第一象限实线部分) 这是 LVDT 的有效测量范围 (一半), 当铁芯继续右移动, 两线圈输出电压差值大小不再与铁芯位移成线性关系, 此为缓冲区即非测量区 (虚线段); 反之, 当铁芯自线圈中间位置往左移动亦然。零点两边的实线一般是对称的的测量范围, 只不过两者都是交流信号且相位相差 180°。LVDT 工作过程中, 铁心的运动不能超出线圈的线性范围, 否则将产生非线性值, 因此所有的 LVDT 均有一个线性范围。

1.2 L/RVDT 与信号调理器接口

交流 L/RVDT 属交流模拟量传感器, 需要适配专用信号调理模块^[3], 经过调理后才能产生代表真实位置信息的电压值, 最后进入测量系统。通常根据 LVDT 与调理器接口形式不同, 作为信号处理参考点的选择亦不同。

L/RVDT 输出接口形式如图 2 所示, 与调理器匹配可以组成最常见的 2 种系统^[3]。以初级 (激励电压) 作为参考点的 2 线系统; 以导出 (次级信号输出电压和) 参考点为准的 3/4 线系统。

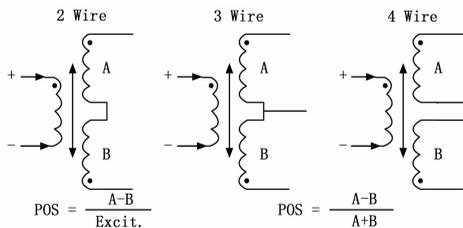


图 2 L/RVDT 传感器输出接口

1.2.1 2 线系统

此种系统适用于 L/RVDT 传感器距离较远及对激励电压变化、温漂和相移影响等高度敏感的应用场合。2 线输出最简单用法四线制 (一对激励输入, 一对信号输出)。考虑到激励电压可能发生变化 (线损、振荡器不稳定等), 调节器参考点取自初级线圈, 亦即激励反馈必须要, 采用六线制 (一对激励电压, 一对信号电压, 一对激励电压反馈) 组成系统, 此时位移计算式: $(A-B) / Excit$, 即 $(A-B) / V_{Exc}$ 。

1.2.2 3 线/4 系统

此种系统适于对温漂、相移和振荡器不稳定等不太敏感的应用场合。调节器参考点取自两个次级线圈输出不随铁芯零位改变仍能保持恒定幅值的 A+B 之和。3 线输出采用五线制

(一对激励电压, 一对 A-B 信号电压, 一根次级线圈参考地), 4 线输出采用六线制 (一对激励电压, 一对次级线圈 A 信号电压, 一对次级线圈 B 信号电压)。此种系统位移计算式为 $(A-B) / (A+B)$, 即 $(V_a - V_b) / (V_a + V_b)$, 其中 $(V_a + V_b)$ 因 LVDT 结构特点为一常数。

1.2.3 位置值 (Position)

以一个 10 Vrms 信号输出 LVDT 为例, 来说明传感器信号输出电压和位置值间关系, 如图 3 所示。

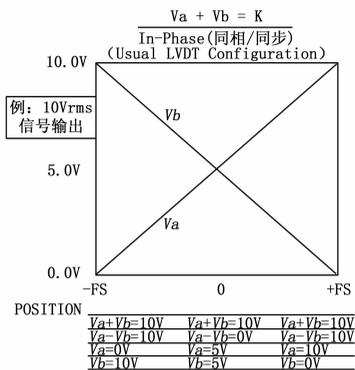


图 3 LVDT 输出电压和位置值关系

1.3 PCI-76C2 板卡

母版结构图^[4]如图 4 所示。

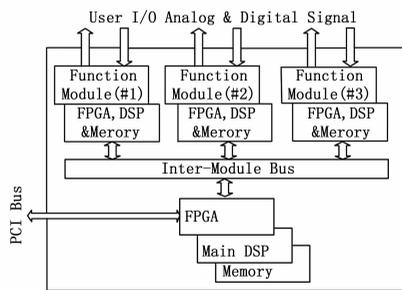


图 4 PCI-76C2 多功能 I/O 卡

- 1) 应用于多功能 I/O 和串行通信;
- 2) 母版上提供 3 个独立的模块插槽, 用户按应用选用多功能或串行通信模块;
- 3) 自动后台 BIT 诊断持续地检测和报告每通道运行状况;
- 4) 78 管脚孔型 D-Sub 连接器;
- 5) 软件开发包 Software Support Kit (SSK) 和驱动支持。

NAI 灵活、领先、全程可编程和后台 Built-In-Test (BIT) 诊断持续地检测和报告每通道运行状况。一旦某个出错被检测到, 立即报告和标明具体通道并解决故障。所有这些对用户完全透明, 无需额外编程, 不对卡的正常操作产生影响。

1.4 LVDT 测量模块 (MODULE L)

LVDT 测量模块^[6] (Measurement MODULE L) 结构如图 5 所示。4 个相互独立的 LVDT 测量通道, 可编程为 2 线或 3 线/4 线 LVDT 传感器接入方式。所有信号输入电压 (Input Voltages) 和参考电压 (Reference Voltages) 自适应。

分辨率: 16 位;

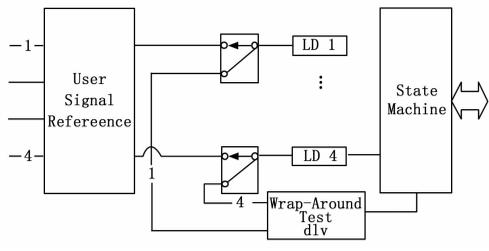


图 5 LVDT 测量模块结构图

输入格式: LVDT 或 RVDT;

信号输入电压 V_{L-L} : 2~28 Vrms 自适应;

激励电压: 2~28 Vrms 自适应, 2 线时数字测量输出计算需要用到, 3/4 线不同相信号/噪声抑制和激励丢失状态的需要;

输入阻抗: 60 kΩ;

精度: 0.025%FS;

带宽 (Bandwidth): 缺省设置激励频率的 10% 到 100 Hz。BW 基于每通道上可编程, 用户不得不每次热启预置所有参数, 或者按缺省值设置;

激励频率: 1~3 kHz 自适应 (参见模块型号);

相位偏移: 自动补偿传感器激励与输出相位偏移 ±60° max. 3/4 线方式忽略相位偏移);

环绕式自检测: 利用编程指令实现 3 类强大检测方法;

地 (Ground): 信号输出与激励隔离, 通道间及系统地相互隔离。

1.4.1 LVDT 接入方式

与 LVDT 组成 2 线系统如图 6 所示。将 LVDT 信号输出 A-B 接入测量通道信号输入 A 端, 将来自传感器侧的激励反馈既接入测量通道信号输入 B 端, 又接入激励参考端。这样, 激励信号既参与位置值计算, 也能让板卡实现对激励信号断线侦测作用。

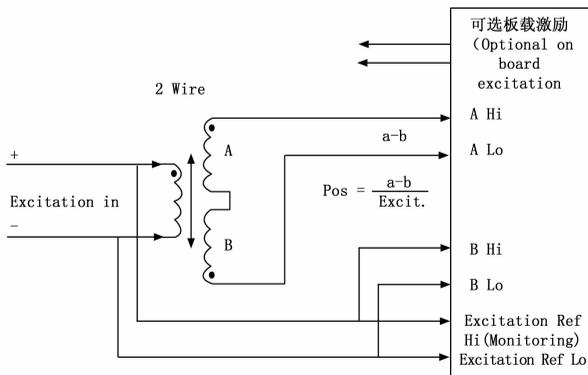


图 6 2 线 LVDT 接入法

而 3 线/4 线系统如图 7 所示。将 LVDT 信号输出 A 和 B 分别接入测量通道信号输入 A 和 B 上, 来自传感器侧的激励反馈虽接入激励参考端, 但并不参与位置值计算, 仅起让板卡实现激励信号掉线侦测作用。

1.4.2 读取位置值

随着 LVDT 和测量通道的接入方式的不同组成相应的系

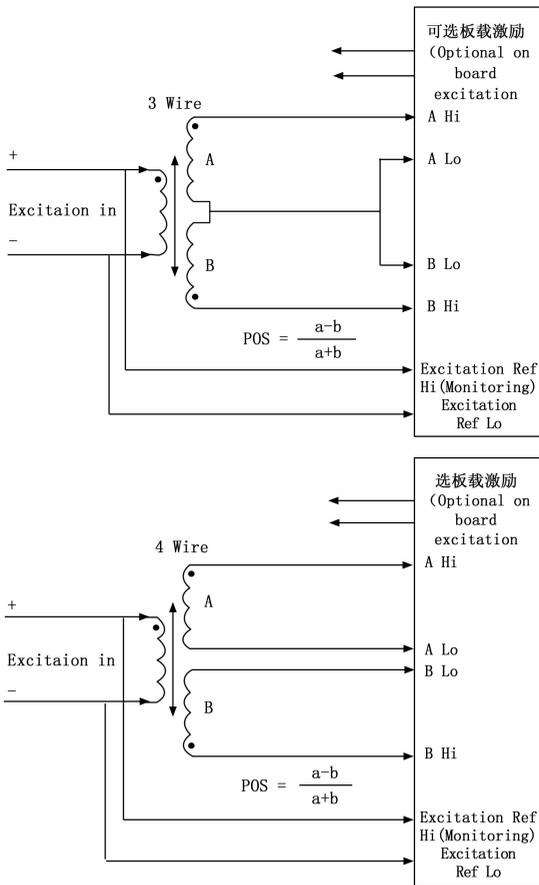


图 7 3 线/4 线 LVDT 接入法

统, 在全标称量程范围内, 调理输出信号值亦不同。

2 线系统, 输出信号表达式 A/B , 最后进入测量系统位移信号电压值为 $(V_a - V_b) / V_{Exc}$;

3 线/4 线系统, 输出信号表达式 $(A - B) / (A + B)$, 亦即最后进入测量系统位移信号电压值为 $(V_a - V_b) / (V_a + V_b)$;

表达式中 A 和 B 分别代表接入测量通道信号输入 A 和 B 信号属性。

从对应通道位置数据寄存器 (Position Data Register) 读取位置值, 数据格式为二补数, 最大正偏移 7FFF, 零位为 0, 最大负偏移 8000。

1.5 DLV 仿真模块

DLV (Digital to LVDT/RVDT) 仿真模块^[6]结构 (Simulation Module 5) 如图 8 所示。3 个相互独立 L/RVDT 输出通道, 每输出通道可编程为 2 线或 3 线/4 线模式, 环绕式自检测功能。激励电压和信号电压在 2.0~28 V 范围内可任意编程, 激励频率在 47 Hz~10 kHz 间可选 (参见模块型号)。提供一路激励输入公用给每路输出。用于模拟真实 L/RVDT 传感器 2 线或 3 线/4 线输出模式。

为每一对输出设置相同的最大输出电压与激励电压间变压比 TR (Transformation Ratio), 即 $TR = \text{Max Output Voltage} / \text{Excitation Voltage}$, 采用此法有助于消除激励电压发生了变化而可编程绝对输出电压值并未随激励发生变化引起的误差。

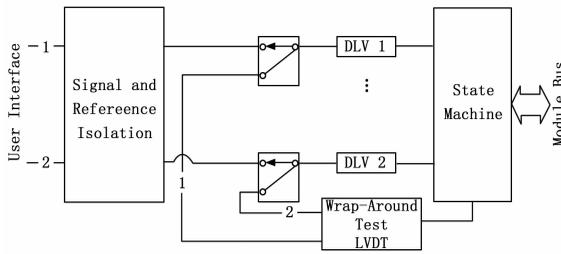


图 8 DLV 仿真模块结构图

压和角度关系如图 9 所示。性能指标:

初级线圈励磁电压: $7.07 \pm 0.1 \text{ Vrms}$;

励磁频率: $1800 \pm 120 \text{ Hz}$;

次级线圈电压和: $6.1 \text{ Vrms} \pm 10\%$;

灵敏度系数 ($(V_a - V_b) / (V_a + V_b)$): $0.0159 \text{ Vrms/Vrms}/^\circ$;

精度 ($\pm 36^\circ$): $\pm 0.18^\circ$;

输入阻抗: $353 \Omega \text{ Min.}$

输出通道: 3 个相互独立 LVDT 或 RVDT 输出通道;
分辨率: 16 位 ($0.001526\% \text{ FS}$);
线性度: $\pm 0.1\% \text{ FS}$ ($0.2 \leq TR \leq 2.0$);
输出增益: $\pm 0.1\%$;
输出模式: 可配置为 2 线或 3 线/4 线, 电位隔离, 输出电压可编程为定值或变压比 (ratio-metric) TR ;
输出信号电压 V_{L-L} : $2 \sim 11.8 \text{ Vrms}$ 可编程;
输出负载: $0.1 \text{ VA max. @ } 11.8 \text{ Vrms}$ 或 28 Vrms (随电压降低线性比率下降);

规程 (V_{L-L}): $\pm 5\% \text{ max.}$ (空载到满负荷);
输入激励电压: $2 \sim 28 \text{ Vrms}$ 自适应 (参见模块型号);
输入激励频率: $1 \sim 3 \text{ kHz}$ 自适应 (参见模块型号);
相位偏移 (A/B): 可编程相位自动补偿 0.5° max. (信号输出与参考点间);
输出建立时间: $< 100 \mu\text{s}$;
地 (Ground): 信号输出与激励隔离, 通道间及系统地相互隔离。

LVDT 仿真输出

3 个相互独立 LVDT/RVDT 输出通道, 可编程为 2 线或 3 线/4 线仿真输出模式。

DLV 写入位置值 (Position)

将代表某个 POSITION 的二补数写入对应通道数据寄存器 (Data Register), 寄存器值范围: $-1.00 < \text{Position} < (+1.00 - \text{LSB})$, 注意出厂缺省 $\text{POSITION} = 0$ 。

计算式: $\text{Register Value (Position)} = \text{POSITION} * 32768$ 。

例: 想要写入 $\text{POSITION} = -0.5$, $\text{Position} = -0.5 * 32768 = -16384$ ($0x\text{C000}$)

想要写入 $\text{POSITION} = 0.75$, $\text{Position} = 0.75 * 32768 = 24576$ ($0x\text{6000}$)

3/4 线方式输出电压 (Output Voltages):

$$V_a = \text{Excitation_Voltage} * TR * [\text{Position}/2 + 0.5]$$

$$V_b = \text{Excitation_Voltage} * TR * [1 - (\text{Position}/2 + 0.5)]$$

2 线方式输出电压 (Output Voltages):

$$V = \text{Excitation_Input} * TR * \text{Position}$$

注意 3/4 线与 2 线方式下输出电压计算式的些许区别。

2 应用实现

2.1 RVDT-2391

多摩川 2391 型民用航空专用 RVDT 传感器^[9], 其输出电

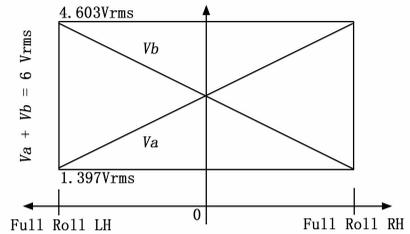


图 9 RVDT-2391 输出电压和角度关系

2.2 ACE 系统

四余度 RVDT 利用各自线缆集中在一个圆形针式连接器底座上, 再通过孔式连接器插头通过线缆接入 ACE 系统, RVDT 电气连接如图 10 所示, 支持 4 线 RVDT 接入方式。

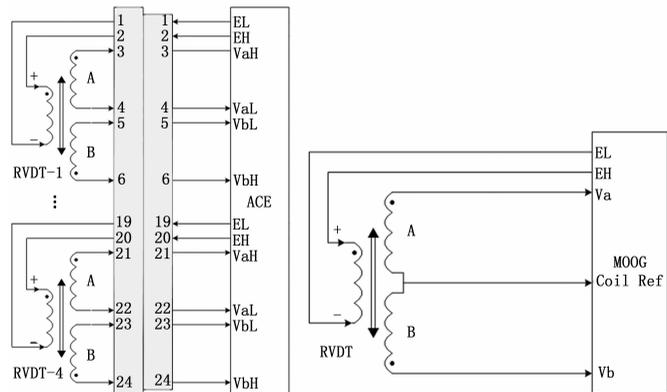


图 10 ACE 系统

2.3 MOOG 控制系统

MOOG 多通道协调加载控制系统^[10], 提供的 RVDT 电气连接如图 11 所示, 显然支持 3 线 RVDT 接入方式。

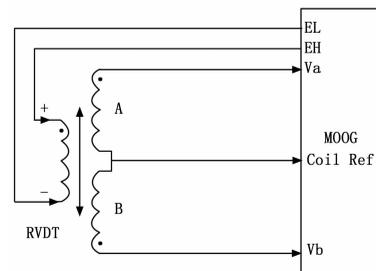


图 11 MOOG 控制系统

2.4 RVDT 采集卡

在 76C2 母版 3 个模块插槽仅需插入一块 LVDT 测量模块 (Measurement MODULE L), 因每块测量模块提供 4 路相互

独立的 RVDT 输入通道，这样，采集卡可为用户提供 4 个 RVDT 接入通道，且每输入通道可编程为 2 线或 3 线/4 线模式。系统中采集卡负责将真实 RVDT 的位置数据采集到系统中。

2.5 RVDT 仿真卡

76C2 母版 3 个模块插槽可以各插入一块 RVDT 仿真模块 (Simulation MODULE 5)。每块 DLV 仿真模块共享一路激励输入且每一对输出通道设置相同变压比 TR。因此，2 块 76C2 板卡统共 6 个模块插槽全插上 DLV 仿真模块，每块 DLV 仿真模块仅使用 1/2 通道，这样最多可得到 12 个 RVDT 模拟输出通道，且每个模拟输出通道可分别编程为 2 线或 3 线/4 线模式。每只真实 RVDT 划定一块 DLV，且使用其 1/2 输出通道，利用系统中仿真卡想要将采集卡得到位置数据以 2 路 RVDT 模拟输出^[7-8]，从而满足将四/六余度 RVDT 电信号一分为二的现实需求。

2.6 RVDT 信号分配器

首先，选取一套和四余度 RVDT 连接器同型号连接器，制作一条转换电缆如图 12 所示。

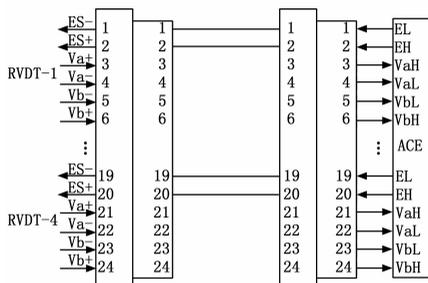


图 12 转换电缆

RVDT 侧孔式插头，ACE 侧针式插头，分别用于匹配原针式底座和孔式插头。然后利用线缆将各个 RVDT 的激励电压对应管脚连接起来，原则上激励电压仍然由 ACE 系统端供给。

RVDT 采集与仿真系统由一台 PC 机和 3 块 PCI-76C2 多功能卡组成，在软/硬件系统共同作用下实现 RVDT 信号分配器功能，其系统体系架构如图 13 所示，采集卡的 RVDT 输入通道与仿真卡的 DLV 仿真模块编号统一，分别用来对应四余度 RVDT。

将 RVDT 侧孔式插头上对应于各 RVDT 信号输出管脚利用线缆按 3 线/4 线方式分别接入采集卡 RVDT 输入通道中；通过在插头管脚上并线形式将各 RVDT 激励电压反馈分别接入仿真卡各仿真模块的激励输入端，目的为仿真模块引入动态变压比 TR。将仿真卡上每块仿真模块的模拟输出通道 1 以 4 线方式接入 ACE 侧针式插头相应管脚上，模拟输出通道 2 以 3 线方式接入 MOOG 系统控制通道^[11]中。最后通过软件编程实现想要的 RVDT 信号分配器的各项功能，当然想要得到真实的工程值需对 MOOG 系统标定一下。

3 结束语

在机载设备地面模拟试验装置的研制中，由于空间及不可破坏性等诸多因素限制，特设计与实现了该 RVDT 信号分配

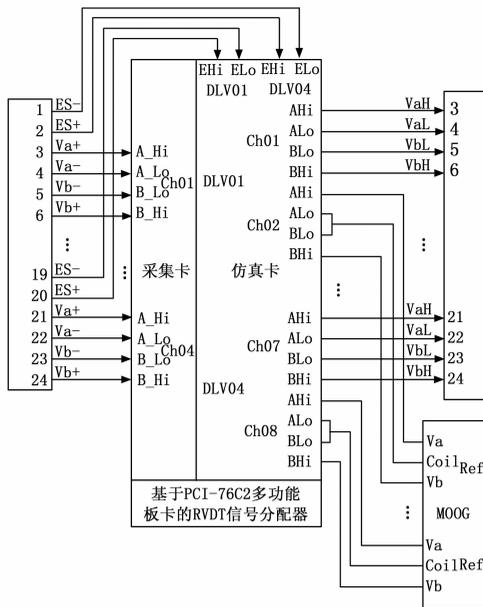


图 13 RVDT 信号分配器

器。这样，试验进行时，同一个 RVDT 信号源能为两个系统同时采集；试验结束后，ACE 系统又能够快速恢复原状。设计时基于 RVDT 属变压器式，其励磁输入（初级）和信号输出（次级）是完全隔离的。同时，PCI 多功能板卡同样做到激励与信号输出、通道间及系统地相互隔离。充分考虑了与 RVDT、测控系统的兼容性^[12]。该系统经过调试、验证，目前已经投入使用，工作稳定、可靠，完全满足试验方对于测控系统的技术要求。

参考文献:

- [1] 薛 瀛. 论电子调整在飞控系统 RVDT 精度控制的应用 [M]. 机械设计与研究, 2015, 31 (4): 102-105.
- [2] 李 飞, 张 勇, 陈惠琴. 交流差动变压器式位移传感器数字调理方法 [J]. 仪表技术与传感器, 2011 (1): 84-86.
- [3] 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, 43 (1): 116-119.
- [4] 美国北大西洋工业公司. PCI-76C2 Multi-Function I/O Card Operation Manual (多功能 I/O 卡操作手册) [Z]. 2016.
- [5] 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.
- [7] 刘 涛, 张大鹏. 一种用于发动机仿真平台的线性可变差动变压器模拟器的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (3): 956-958.
- [8] 何宴辉, 汪理虎, 刘 涛. 基于幅频自校准的高精度 LVDT 模拟器设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (7): 268-271.
- [9] 日本 TAMAGAWA/多摩川. RVDT-2391 Operations Manual (操作手册) [Z]. 2006.
- [10] 荷兰 MOOG. Test Controller Unit User Manual (测试控制器用户手册) [Z]. 2010.
- [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] 美国精量 (MEAS). LDM-1000 LVDT/RVDT Signal Conditioning Module (LVDT/RVDT 信号调节器模块) [Z]. 2016.