

探测器前放组合件测试系统设计

丁万成¹, 野超², 赵剡²

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009; 2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 利用虚拟仪器技术可以实现对探测器前放组合件测试系统等高精度测试系统的开发; 系统以工控机为主控平台, 结合自研的图像采集与处理单元、切换控制单元, 利用虚拟仪器开发软件 LabVIEW2011, 实现对单个前放模块常温测试, 对两发探测器前放组合件同时进行高低温、常温测试; 对探测器盲元的检测做了详细的说明和分析; 通过现场实际使用, 证明了该系统测试精度高, 完全满足了微弱小信号的测试, 自动化程度高, 测试速度快, 实现了对测试数据、图表、图像的采集、保存和回放。

关键词: 红外探测器; 前置放大器; 盲元; LabVIEW; 测试系统

Design of Detector Preamplifier assembly Test System

Ding Wancheng¹, Ye Chao², Zhao Yan²

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China; 2. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A detector preamplifier assembly test system is introduced by using virtual instrument technology. The system takes IPC as the hosting platform, jointly with image acquisition and processing unit, switching control unit and virtual instrument software Labview2011. Therefore temperature test of single preamplifier module as well as high-low temperature test and temperature test of two detector preamplifier assemblies simultaneously can be realized. Detection to blind detector element has been given a detailed description and analysis. Through actual application on site, we can demonstrate that the system has a high precision, which satisfy the weak small signal testing adequately. In addition, the system with a high degree of automation and fast test speed can implement capture and save test data, charts and images.

Keywords: Infrared detector; preamplifier; blind unit; LabVIEW; test system

0 引言

红外探测器是实现导弹红外制导的核心组件, 前置放大电路是红外探测器处理电路的重要组成部分, 它把从读出电路中获取的微弱电信号放大后传输给后面的处理电路^[1], 其性能能直接影响到整个系统的探测精度。

对探测器前放组合件的检测, 以往由于缺乏合适的通用设备, 通常采用外连线、分路测试、人工插拔的方式进行, 这种测量方法存在反复插拔, 易引起连接不可靠, 在非屏蔽状态下测试易受外界电磁波干扰及操作复杂工作效率低三大弊端。而且, 这种测试方法, 经常出现测试不准确、不稳定的情况, 需要花费大量精力来查找探测器前放组合件和测试系统的问题。鉴于上述情况, 研制探测器前放组合件测试系统, 对提高检测的准确性、可靠性、快速性意义重大。

1 系统方案介绍

探测器前放组合件测试系统主要由主控计算机、图像数据采集与处理单元、切换单元、面源黑体等部分构成。相互之间的关系如图 1 所示。

电源通过切换单元给被测探测器组合件供电, 温箱为测试

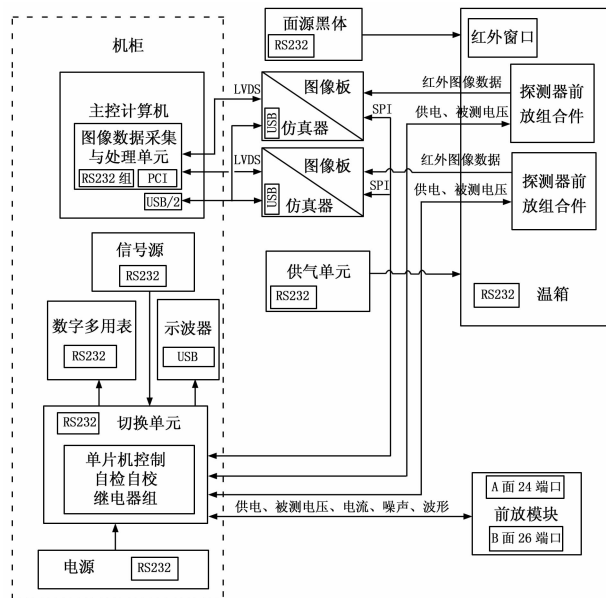


图 1 探测器前放组合件测试系统整体示意图

提供高低温测试环境, 供气单元给探测器供气制冷, 面源黑体提供面源目标, 完成等效噪声温差、盲元率等测试。

探测器将目标红外图像传递给图像板, 经过初步处理后以 LVDS 形式输出, 图像数据采集与处理单元将 LVDS 图像采集并存储, 通过 PCI 总线传给上位机, 上位机对这些图像数据处理, 利用仿真器可以对图像板的工作点进行烧写。

探测器组合件进行电压测试, 被测结果通过切换单元, 传

收稿日期:2015-06-24; 修回日期:2015-12-15。

基金项目:航空科学基金项目(20110112007)。

作者简介:丁万成(1973-),男,河南洛阳人,高工,主要从事系统测试与控制技术方向研究。

赵剡(1956-),男,山西临汾人,教授,博士研究生导师,主要从事导航与制导方向研究。

递给万用表,万用表将测得电压通过 RS232 发送给上位机。探测器组合件的被测波形,通过切换单元,传递给示波器,示波器将采集到的波形通过 USB 发送给上位机,上位机将对波形数据保存、处理、分析。

2 系统硬件设计

2.1 图像采集与处理单元

图像数据采集与处理单元板卡采用 FPGA 加 DSP 结构,选用 PCI 总线通讯,其功能框图见图 2。主要分为供电模块、FPGA 模块、DSP 模块及接口电平转换与阻抗变换模块。

供电部分主要为图像数据采集与处理单元的各个模块供电,DSP 芯片大部分采用低电压供电方式,并且采用内核电压和 I/O 电压分开的方式。DM642 芯片的工作电压为 3.3 V 和 1.4 V。其中,1.4 V 是为该器件的内核供电的电压,包括 CPU 和所有的外设逻辑。外部 I/O 仍然采用 3.3 V 电压,这样可以直接与外部低压器件连接。

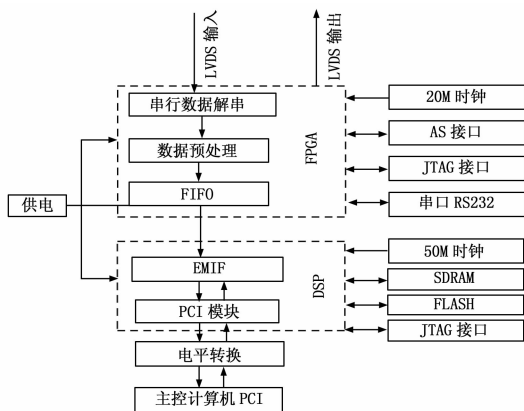


图2 图像采集与处理单元功能框图

FPGA 部分主要实现对 LVDS 图像信号的采集和预处理还有自检中 LVDS 模拟信号的生成。LVDS 信号接收部分主要接收外部的 LVDS 图像数据帧,检出帧头,并将帧数据传送给 FIFO 以便 DSP 进行处理,一个数据帧包含 16 bit 的帧头和 128×128 bit 的帧数据。解串后的数据送入 FIFO 实现数据的存储,用于与 DSP 的交互^[2]。

DSP 的 DM642 部分主要实现图像预处理算法、图像的缓存和通过 PCI 接口实现与主机的交互。DSP 通过 EMIF 接口与 FPGA 的 FIFO 部分相连,实现图像数据的读取,并进行图像预处理算法。另外选用了一款 64 MB 的 SDRAM 做为缓冲区。DSP 通过内部的 EDMA 控制器实现集成的 PCI 接口控制器与 DSP 的接口。

除此之外,图像数据采集与处理单元还包括时钟电路,JTAG 接口和扩展的外部 FLASH 存储器。在 DSP 加 FPGA 系统中,时钟电路是处理数字信息的基础,同时它也是产生电磁辐射的主要来源,其性能好坏直接影响到系统是否正常运行,所以时钟电路在数字系统设计中占有至关重要的地位。设计中,需要多个时钟输入,而且对时钟质量要求很高,所以从时钟质量和成本两方面折中考虑,也为了将来系统稳定运行后可以方便的提高频率,本设计选取了晶振电路的方式来设计时钟电路^[3]。其中 FPGA 采用 20 MHz 晶振,DSP 采用 50 MHz 晶振,通过 DSP 内部 PLL 实现高达 600 MHz 的主频。设计中扩

展了 2 M 字节的外部程序 FLASH,以此实现对 DSP 程序的存储。

2.2 切换控制单元

切换控制单元由单片机 STM32 控制继电器的通断,完成整个测试逻辑控制,配合数字多用表和示波器完成电流、电压、噪声的测量及相关波形的分析。另外,切换控制单元通过 SPI 接口对图像参数板进行程序烧写;通过控制气源电磁阀的关闭,对产品进行供气或者断气。

所有开关采用欧姆龙继电器,并且继电器和切换单元所有元器件单独供电,与被测信号绝缘无电的联系,尽量减少对被测信号的干扰,确保弱信号在数字万用表中实现高精度的测量。测试信号线采用屏蔽线,以免电磁干扰,来达到系统的测试精度要求^[4]。电压取样由万用表探头直接实现,而电流取样将根据对象的具体接口功能与性能接入电阻实现。切换控制单元设计示意图见图 3。

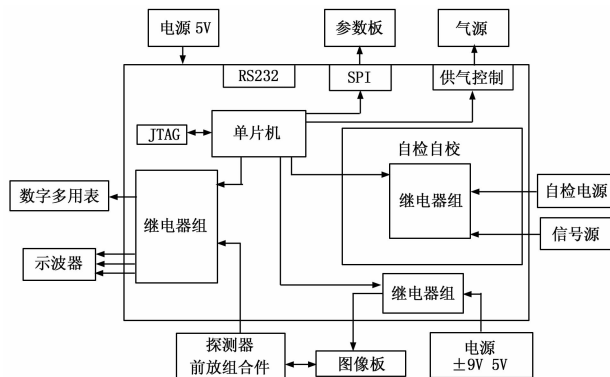


图3 切换控制单元卡示意图

自检自校模块是模拟和仿真探测器前放组合件和前放模块的输出信号和控制信号,将这些信号接到测试端口,进行无产品在回路中程序调试、设备状态检测和校核,使设备处于一种仿真工作状态,按照正常产品测试流程实现测试的全过程,检测设备各种测试控制程序的运行是否正确。

3 系统软件设计

系统软件是基于 Windows 平台,采用图像化编程软件 LabVIEW 作为开发工具,以图表的形式完成测试所需的全部功能。

上位机软件总体界面分为六个部分:自检,组合件测试,前放模块测试,参数板的程序烧写,生成测试报告,图像波形数据回读,远程通讯,参数设置(管理员)。自检程序可以完成仪器设备的自检和图像的自检;组合件测试完成对组合件常温、高低温下的测试;前放模块测试完成对前放模块常温下的测试;参数板的程序烧写,完成对参数板 Flash 芯片的程序烧写;生成测试报告完成 Excel 表格的生成;远程通讯接受测试任务,完成向远程数据库传输测试结果;参数设置(管理员)完成对限制电压电流上限,测试结果合格范围,波形显示时间等参数的修改。总体界面功能图如图 4 所示。

4 盲元检测

4.1 滑动窗口检测法

传统的滑动窗口检测法是以待检像元为中心取一个 $(2n+1) \times (2n+1)$ 的窗口,以窗口内所有像元均值作为阈值,以此判断中心像元是否为盲元。滑动窗口具体检测时,采用中心

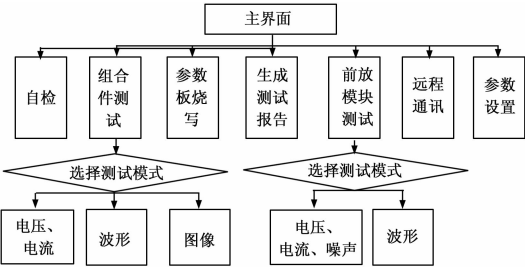


图 4 总体界面功能图

像元周围的像元进行检测，通过求解周围像元灰度值的均值来判断中心像元是否是盲元^[5]，滑动窗口示意图如图 5 所示。

$B_{i-1,j-1}(n)$	$B_{i-1,j}(n)$	$B_{i-1,j+1}(n)$
$B_{i,j-1}(n)$	$B_{i,j}(n)$	$B_{i,j+1}(n)$
$B_{i+1,j-1}(n)$	$B_{i+1,j}(n)$	$B_{i+1,j+1}(n)$

图 5 3×3 的滑动窗口示意图

采用滑动窗口对红外图像进行检测盲元时，窗口的大小的选取对盲元检测结果有一定的影响。最小为 3×3 的窗口^[6]，窗口越小，相对检测到的盲元数量越少，越容易出现检测偏差。当窗口大小选取不同时，检测结果也不同，检测结果如图 6 所示。

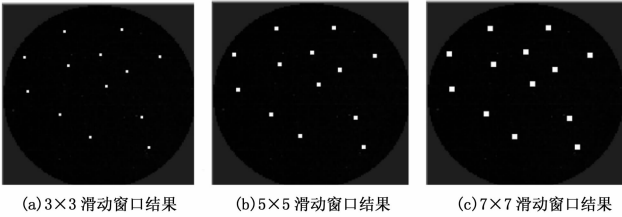


图 6 检测结果图

滑动窗口检测法对于离散的散点盲元具有很好的检测效果，能够分辨离散盲元与周围正常像元。但是对于连续的盲元点，则很难进行判断，会将一部分的连续盲元误判为正常像元，从而导致出现漏检问题。所以 3×3 的窗格适用于成像质量较高的红外图像的盲元检测。

4.2 高低温检测法

滑动窗口检测法对于检测连续盲元效果较差，所以采用一种高低温检测法进行盲元检测，通过实验发现能够得到更好的检测结果。

盲元在不同温度下的响应特性上与正常像元有很大的差异。正常像元在一定动态范围内是呈线性变化，并且随着温度的升高其响应灰度值也增大^[7]。其中正常像元、过热像元和死像元的响应曲线如图 7 所示。

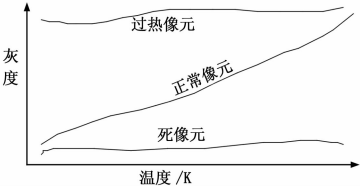


图 7 盲元响应特性曲线

如前所述，盲元响应特性与正常像元响应特性相比，其响应值基本不随温度的升高而增加，过热像元维持在一个较高的灰度值而死像元维持在一个较低的灰度值。因此利用这个特点，分别在低温和高温上测量其响应数据，将这两组数据的每一个像元的灰度值进行处理，差值与一个阈值做比较，如果大于该阈值即为正常像元，小于该阈值则可判为盲元^[8]。其具体步骤如下：

- 1) 将黑体温度调整到低温 T_L ，待黑体温度稳定后，采集并保存探测器输出图像数据 $Y_{i,j}(T_L)$ ，结果如图 8(a) 所示；
- 2) 将黑体温度调整到高温 T_H ，待黑体温度稳定后，采集并保存探测器输出图像数据 $Y_{i,j}(T_H)$ ，结果如图 8(b) 所示；
- 3) 计算测得的高低温响应差值：

$$\Delta Y_{i,j} = Y_{i,j}(T_H) - Y_{i,j}(T_L) \quad (1)$$

- 4) 设定阈值 δ ，判断盲元。如果 $\Delta Y_{i,j} < \delta$ ，表示像元 (i,j) 为盲元；如果 $\Delta Y_{i,j} > \delta$ ，表示像元 (i,j) 为正常像元，结果如图 8(c) 所示。

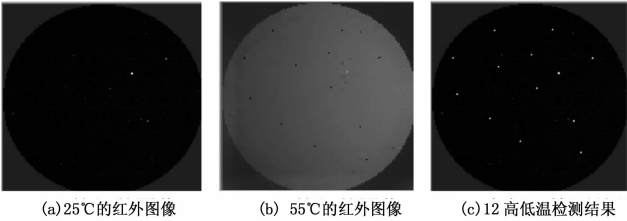


图 8 检测结果图

阈值 δ 的选取将直接影响整个盲元检测的结果。但是红外测试系统的阈值 δ 并不是固定不变的，而是与标定时选取的高低温温差有着直接的关系。因此高低温 T_H, T_L 的选取应尽量覆盖整个响应范围，如果高低温 T_H, T_L 较窄或者同时位于盲元响应特性曲线的低温区或高温区，则会导致响应范围 $\Delta \bar{Y}$ 很窄，不利于盲元的检测^[9]。通常阈值 δ 的取值以探测器的响应范围 $\Delta \bar{Y}$ 为参考：

$$\delta = k \cdot \Delta \bar{Y} = k \cdot \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Y_{i,j} \quad (2)$$

式中， k 为比例因子，通常根据各像元对高低温的实际响应数据及盲元定义的临界值进行多次修正，以获取最佳盲元检测效果^[10]。

5 系统测试精度

测试系统的电压、电流、噪声测试结果见表 1。从表中可以

表 1 系统校准表

项目	标称值	精度要求	标准值	测量值
电压 z1	5.00V	1mV	4.9998 V	4.9998 V
电压 z5	3.80V	1mV	3.8003 V	3.8004 V
电压 z12	1.70V	1mV	1.6993 V	1.6993 V
电流 I_{A3}/mA	80	0.1	80.21	80.21
电流 I_{A17}/mA	60	0.1	59.70	59.69
电流 I_{B6}/mA	1	0.1	1.13	1.13
噪声 $U_{A20}/\mu V$	150	30	162	166
	100	30	116	119
	50	30	74	75
噪声 $U_{A17}/\mu V$	150	30	162	167
	100	30	116	119
	50	30	74	7

表 3 直升机齿轮箱灰色预测 10 组数据结果与实际对比

序号	预测数据	实际监测数据
1	0.724 4	0.698 4
2	0.724 8	0.716 8
3	0.725 3	0.735 9
4	0.725 7	0.741 2
5	0.726 1	0.663 3
6	0.726 6	0.723 3
7	0.727 0	0.730 8
8	0.727 5	0.731 0
9	0.727 9	0.715 8
10	0.728 4	0.731 6

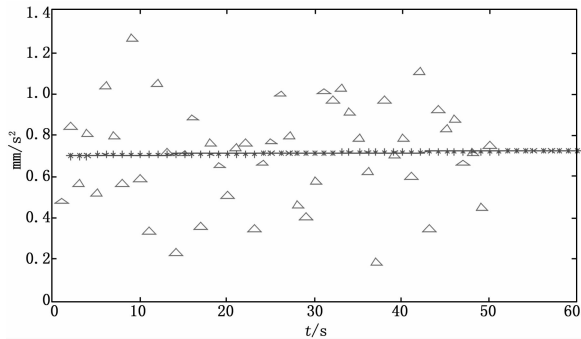


图 1 直升机齿轮箱状态预测结果图

运用灰色预测方法对直升机齿轮箱进行状态预测，最后，通过对灰色系统理论的深入分析与研究，将灰色系统理论中的灰色预测方法运用到直升机齿轮箱状态预测中，从而得到直升机齿轮箱状态预测结果，解决直升机齿轮箱状态难以准确预测的技术难题。

通过本文所提出直升机齿轮箱状态预测方法的研究，得到直升机齿轮箱状态预测结果，且预测结果与实际值进行对比，误差范围在可接受的范围之内，从而表明该方法能够实现对直升机齿轮箱进行状态预测，且对于其他旋转机械的状态预测，具有一定的借鉴意义。

(上接第 20 页)

看出，电压测试达到了 0.1 mV，完全满足 1 mV 的技术要求，电流测试达到了 0.01 mA，完全满足 0.1 mA 的技术要求，噪声的测试精度在 6 μV 之内，也满足 30 μV 的技术要求。通过对系统的校准，充分说明的系统的测试精度高。

6 结语

应用实践证明该测试系统不仅性能稳定、测试精度高、测试速度快，自动化程度高，而且还能够实现对系统内部的噪声，盲元等干扰因素进行补偿和消除，使测试系统得到进一步的完善。

参考文献:

[1] 方 丹. 红外焦平面器件的信息获取电路技术 [J]. 红外, 2003 (3): 1-8.
[2] 摆卫兵. 某型低空导弹红外位标器自动测试仪设计 [J]. 计算机测

参考文献:

[1] 张志禹, 吕延军, 张九龙, 等. 航空发动机转子碰磨故障瞬态率平率诊断方法 [J]. 交通运输工程学报, 2007, 7 (4): 21-23.
[2] Wilkinson C. Prognostic and health management for avionics [A]. 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings [C]. 2004: 3435-3447.
[3] 王莹玉. 航空发电机健康状态预测技术员研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2010.
[4] Azam M, Ghoshal S, et al. Prognostics and health management (PHM) of electromechanical actuation (EMA) systems for next-generation aircraft [J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013.
[5] 侯新国, 等. 基于 D-S 证据理论的感应电动机转子故障诊断方法研究 [J]. 电工技术学报, 2004, 19 (6): 36-38.
[6] 杨存祥, 朱 琛, 全战营. 基于 EMD-神经网络的电动机转子故障诊断方法研究 [J]. 电工文摘, 2011 (4): 36-39.
[7] 石爱东. 基于多源信息融合的机电系统监控方法研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2010.
[8] 相 江. 基于多子波支持向量机航机电设备健康管理关键技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
[9] 吴立军. 基于分层信息融合技术的航空发动机故障诊断方法研究 [D]. 天津: 中国民用航空飞行学院, 2009.
[10] 郭显新, 郭小军, 龙海跃. 直升机传动系统健康管理技术 [J]. 机械传动, 2011, 35 (11): 86-89.
[11] 李军星. 基于信息融合组合算法的复杂装备传动关键部件寿命预测 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
[12] Guillen A J, Gomez J F, Crespo A, et al. Advances in PHM application frameworks: processing methods, prognosis models, decision making [J]. The Italian Association of Chemical Engineering, 2013, 33: 391-396.
[13] Simon D L, et al. Aircraft engine gas path diagnostic methods: public benchmarking results [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136: 1-10.
[14] Nickerson B, Ulv R. Development of a Smart Wireless Networkable Sensor for Aircraft Engine Health Management [J]. IEEE, 2001, 7: 3255-3262.
[15] 汪平平, 张 歆, 刘 琛. 基于线性最小方差和递归最小二乘的融合算法 [J]. 探测与控制学报, 2013, 35 (2): 33-36.
[16] 闫建波. 基于 BP 神经网络的灰色预测模型 [D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
量与控制, 2015, 23 (2): 434-436.
[3] 唐 勋, 赵 刻. LVDS 远程高速红外图像采集卡设计 [J]. 电子测量技术, 2009 (08): 24-27.
[4] 谢燕武. 红外成像寻的导弹半实物仿真系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (2): 394-395.
[5] 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范 [S]. 1998.
[6] 李 航. 红外焦平面阵列非均匀性校正算法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
[7] 吴传玺. 基于 TMS320DM6437 的红外成像系统非均匀性校正算法研究与实现 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2011.
[8] 刘 收. 红外成像系统噪声等效温差参数测试算法及应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (3): 975-978.
[9] 郑可旺. 基于 PCI 总线的红外探测器图像数据采集系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (6): 1915-1917.
[10] 徐良卿. 红外导引系统高低温跟踪性能测试技术 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (4): 1587-1589.