

用于智能蒙皮的集成化动静态测试系统设计*

徐志伟, 陈杰, 张磊, 肖国焘

(南京航空航天大学机械结构力学与控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 研制了一种用于机翼智能蒙皮结构的多路动静态信号测试系统, 完成了该系统的软、硬件设计, 深入研究了系统设计中的关键技术及电路的抗干扰问题。该系统可采集多路静态应变和动态振动响应信号, 且集成了电荷放大器、应变测试仪、示波器、FFT 分析仪及数据存储器等功能, 可用于航空航天、机械工程、医疗卫生等领域。系统精度高, 抗干扰能力强, 稳定可靠且长时间运行状态良好。

关键词 智能蒙皮; 应变测试; 振动测试; 虚拟仪器; 抗干扰设计

中图分类号 TP274; TH82

1 问题的引出

当前, 民用和军事领域都对飞行器的性能提出了更高的要求, 而变体飞行器作为一种新型航空器, 自 20 世纪 70 年代以来迅速成为国内外研究的重点。

在变体飞行器的研究中, 智能蒙皮^[1]是关键技术之一。智能蒙皮是指将传感元件、驱动元件以及控制芯片与飞行器蒙皮集成为一体, 使其具有智能特性的结构, 如图 1 所示。1985 年, 美国空军提出了智能蒙皮的概念, 并于 1994 年对 F-15 的智能化前缘进行了飞行试验。美军正在研制的第六代战斗机也将大面积使用智能蒙皮结构。

智能蒙皮的研究, 需要将各类传感器、驱动器及调理电路集成到一起, 对智能蒙皮的各项性能参数(应力、应变、振动、温度等)进行全面测试。这样的

测试系统要求小型化、集成化、低功耗、多变量及多通道等, 传统测试系统显然无法满足这些要求^[2]。

笔者研究的对象是具有大变形能力的梯形结构智能蒙皮, 针对其动、静态参数的测试要求, 设计了一种小型化、多功能的多路测试系统。系统具有多功能模块、多输入通道, 可实现结构参数的分布式测试, 并能满足实验数据实时监测、准确处理和完整记录的要求。笔者完成了系统的软、硬件设计, 并将硬件设备与市场上的产品进行了对比分析。该系统不仅能满足智能蒙皮的测试需求, 还能依据不同的场合, 对系统进行个性化设置, 扩展系统的应用范围。

2 智能蒙皮集成测试系统的方案设计

2.1 测试系统总体方案设计

智能蒙皮测试系统的总体结构如图 2 所示, 主要由传感器、集成调理电路和计算机三部分组成^[3]。应变测试电路是静态参数测试的核心部分, 要求测量的最小分辨率能够达到 $8\mu\epsilon$ 。该电路主要包括非线性校正、射频干扰 (radio frequency interference, 简称 RFI) 滤波、放大和低通滤波电路。振动测试电路则由电荷放大器、归一化电路、低通滤波电路和保护电路构成, 测量的低频下限为 0.001 Hz, 为准静态测量, 最高测试信号频率为 2 000 Hz。为了实现信号的分布式测试及整体系统的小型化、集成化, 笔者将多个通道及模块集成于单个 PCB 中, 并对电路采取相应的多项抗干扰措施, 提高系统的可靠性, 并利用美国 National Instrument 公司的 PXI (PCI eXtensions for instrumen-

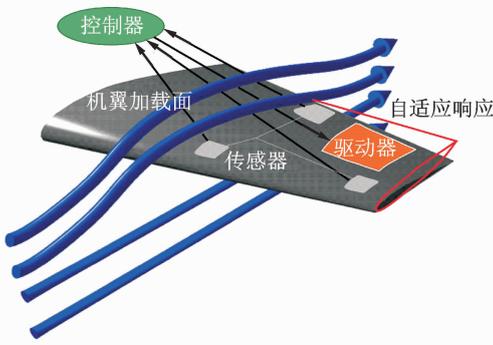


图 1 智能蒙皮结构

Fig. 1 Smart skin of aircraft

* 国家自然科学基金重点资助项目(50830201)
收稿日期: 2012-06-04; 修回日期: 2012-12-26

tation)实时测控平台将测试系统的软、硬件连成一体,形成完整的集成化测试系统。

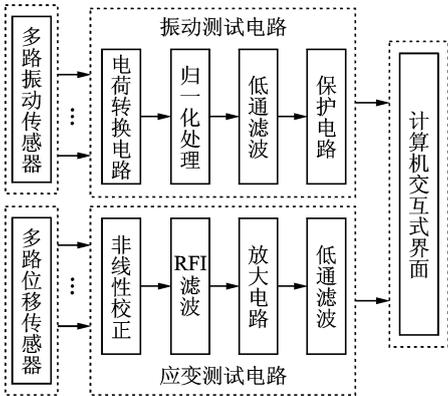


图 2 智能蒙皮多功能多路测试系统方案

Fig. 2 Multi-function measurement system of smart

2.2 蒙皮结构静态应变测试电路设计

笔者选用中航电测仪器的温度自补偿应变片 BE120-3AA(11),利用电桥电路实现应变与电量的转换。考虑到桥臂的电流不恒定,将导致输出电压与待测量之间呈非线性关系,笔者采用可变电压源对电路进行非线性校正,消除了非线性误差。

放大电路输入端的信号为毫伏级,因此需设计相应的 RFI 滤波电路,用来抑制现实环境中的干扰信号。放大芯片采用 TI 的 TLC2652,该芯片失真小,分辨率高,稳定性好。为了消除传感器输出信号中的共模电压,采用三块 TLC2652 组成三运放高共模抑制比电路结构^[3]。放大电路后布置截止频率为 1 Hz 四阶低通滤波器,用于滤除交流信号和放大电路中的尖峰噪声。电路原理如图 3 所示。

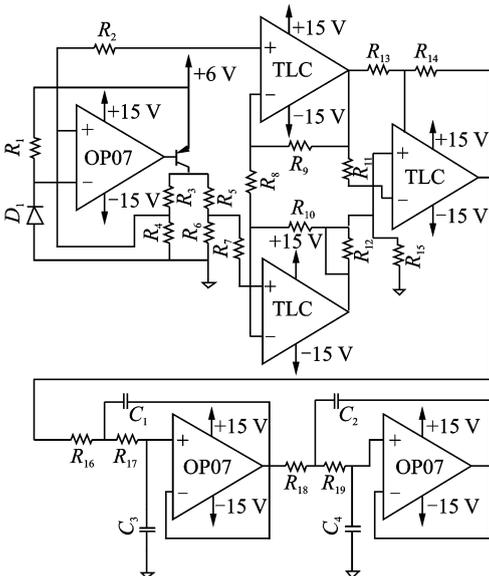


图 3 静态应变测试电路原理图

Fig. 3 Schematic of static strain measurement circuit

2.3 蒙皮结构振动响应测试电路设计

电荷转换电路是振动响应测试电路的核心部分,其输出电压与输入电荷的数学关系近似为 $U_o = -Q/C_F$,可通过改变反馈电容值 C_F 改变输出电压。为了使不同灵敏度下输出电压保持一致,设计了基于同相比例放大器的归一化电路^[4]。滤波器采用二阶有源滤波,实现 4 种截止频率可调。电路的输出端,利用两个稳压管将输出电压钳位在 $\pm 10V$,保护后续电路。电路原理如图 4 所示。

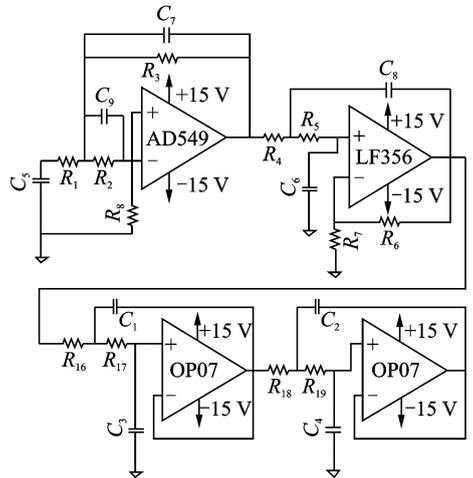


图 4 结构振动响应测试电路原理图

Fig. 4 Schematic of vibration measurement circuit

2.4 PXI 测试系统设计

为实现数据的可视化与实时性,笔者利用 NI 的硬件设备和软件模块构建了多功能的虚拟仪器系统。硬件部分采用 PXI 实时操作系统平台和高速数据采集卡;软件则使用 LabVIEW 编程,采用基于共享变量的网络引擎,以实现应变、振动参数的实时和准确,并实现了多个通道的快速切换^[5]。

3 电路的抗干扰设计

3.1 PCB 的抗干扰措施

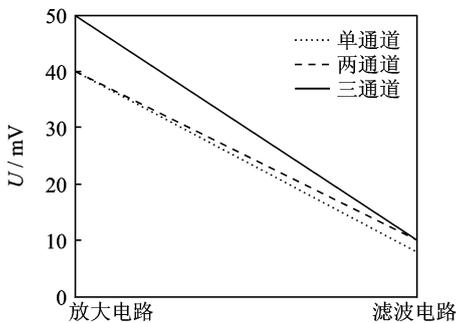
PCB 电路设计时采用一点接地法,保证地线有统一的地电位,同时消除电路中的公共阻抗耦合。电源线和地线尽可能靠近,避免环状、直角走线。制作 PCB 时,为了预防通道间的串音干扰,利用地线将各通道隔离开来^[6]。

3.2 单通道、多通道电路的噪声对比

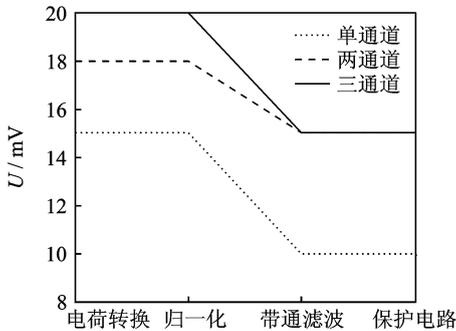
设计中包含多通道集成电路,必须考虑各个通

道之间产生的串扰。笔者对各级电路信号的噪声做了对比分析,发现滤波电路对噪声的抑制起到了很大作用。

笔者分别测量了单通道、多通道电路在各级电路中所包含的噪声。实验时,选择一个外界电磁干扰较少、环境参数变化较小的测试环境,并做好相应的屏蔽和保护措施。利用泰克示波器,依次测出单通道、双通道以及三通道电路中各级电路输出端的噪声大小,结果如图 5 所示。根据测得的数据可知,静态应变测试实验中,单通道、双通道和三通道放大电路后的噪声幅值约为 40,40 和 50 mV,经过滤波,电路的噪声明显下降,分别降低至 32,28 和 40 mV。对电荷放大电路进行分析,单通道、双通道、三通道的电荷转换电路之后的噪声分别为 8,10 和 10 mV。同样,经过滤波后电路中的噪声略有降低,约为 10,15 和 15 mV。



(a) 静态应变测试电路各级电路噪声
(a) Noise of strain measurement circuit



(b) 电荷放大器各级电路噪声
(b) Noise of charge amplifier circuit

图 5 多通道测试电路噪声对比

Fig. 5 Noise analysis of multi-channel measurement circuit

进一步分析可知,单通道电路由于电路规模较小,PCB 走线长度较短,所以电路本身引起的干扰较小^[7];当电路为两通道时,增加了干扰因素,比如通道之间的相互串扰、电磁辐射等;当电路为三通道时,通道数的增加对测试电路的影响降低,信号噪声

相对两通道电路,并没有明显增加。

振动测试电路中包含放大电路模块,前级的噪声会随之放大。四阶低通滤波器的加入去除了 1 Hz 以上的高频噪声,对噪声有一定的抑制作用。

3.3 仪器封装及通风设计

测试系统工作过程中,不可避免地会受到外界干扰和内部电子器件之间的串扰。为了提高系统的抗干扰能力,设计了能够屏蔽外界干扰信号的外壳,该外壳还要具有高强度、散热佳、易于加工等特性。应变测试电路和电荷放大电路分别装配在上下面板,侧板安装直流稳压电源模块。在屏蔽盒的一端接出引线与电源地相连,起到屏蔽保护的作用。仪器封装后的结构如图 6 所示。



图 6 仪器整体封装

Fig. 6 Encapsulated strain measurement and charge amplifier instrument

4 测试系统实验及结果分析

4.1 蒙皮应变测量实验

笔者以梯形蒙皮作为被测对象,使用环氧树脂将应变片粘贴在蒙皮一侧的凸面。被测蒙皮一端固定,另一端处于自由状态。实验时,对蒙皮的自由端施加静态载荷,每次 50g,并测出每次施加载荷所对应的应变。数据处理后可知,被测蒙皮凸面的应变与自由端的载荷大小呈良好的线性关系。与 Vishay 的 P-3500 系列应变仪进行对比后证明,自制应变仪效果良好,应变最大偏差在 $8\mu\epsilon$ 之内。标定后各通道与 P-3500 的对比如表 1 所示。

4.2 蒙皮动态参数测量实验

梯形蒙皮的一端固定在夹具上,另一端连接激振器,同时将压电传感器粘贴在蒙皮的一侧,如图 7 所示。实验时,利用激振器对蒙皮的自由端施加激励,压电传感器产生的电荷输入至自制电荷放大器

表1 标定后各通道与 Vishay 的应变值对比

Tab. 1 Strain values of measurement system and vishay strain gauge

载荷/ g	通道 1/ $\mu\epsilon$	通道 2/ $\mu\epsilon$	通道 3/ $\mu\epsilon$	Vishay/ $\mu\epsilon$	偏差 值/ $\mu\epsilon$	偏差 率/%
0	0	0	0	0	0	0
50	217.4	221.9	216.7	222.0	5.3	2.3
100	442.9	438.5	441.0	439.5	3.4	0.7
150	650.9	648.8	652.0	644.4	7.6	1.1
200	848.5	841.5	851.4	847.6	6.1	0.7
250	1 022.5	1 023.4	1 025.0	1 020.6	4.4	0.4

和电荷放大器 YE5852A 中进行对比(见图 8),显示自制电荷放大器与 YE5852A 在各个频率的信号下输出电压基本一致。当零输入状态下时, YE5852A 的噪声比较大,且零点漂移严重,约为 80 mV,而自制电荷放大器噪声较小,零点漂移可以忽略。

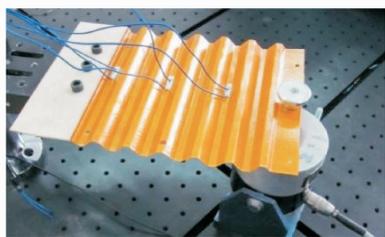


图7 蒙皮动态参数测量实验

Fig. 7 Test system of vibration response of skin

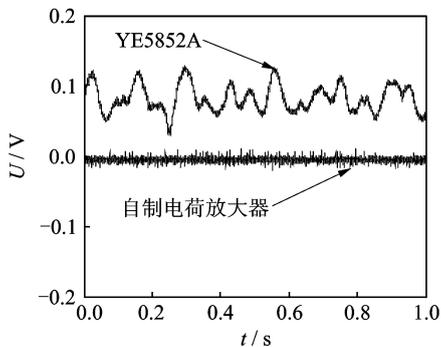


图8 零输入时两种仪器输出波形图

Fig. 8 Output waves of two instruments

5 结束语

笔者研究了用于智能蒙皮的集成化测试系统。针对蒙皮结构的动静态参数,设计并制作了一种多功能、多通道、小型化的测试仪器,并根据课题需要配置了相应的软件系统,可实现对测试数据的实时监测和处理。该系统对于简化蒙皮测试系统、提高结构测试效率具有一定的价值。

参 考 文 献

- [1] 裘进浩,边义祥,季宏丽,等. 智能材料结构在航空领域中研究[J]. 航空制造技术,2009(3):26-29.
Qiu Jinghao, Bian Yixiang, Ji Hongli, et al. Research in aviation field of intelligent material structure[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2009(3): 26-29. (in Chinese)
- [2] Felix T S C, Niraj K. A new heuristic embedded approach for multi-constraint air cargo loading problem [C]//IEEE. International Conference on Industrial Informatics. Singapore: IEEE Publisher, 2006: 1165-1170.
- [3] Ghallab Y H, Badawy W. A new topology for a current-mode wheatstone bridge[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2006, 53(1): 18-22.
- [4] 徐浩,陈怀海,游伟倩. 多输入多输出冲击振动试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(2): 143-148.
Xu Hao, Chen Huaihai, You Weiqian. Research on multiple input multiple output impact vibration test [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(2): 143-148. (in Chinese)
- [5] 张健滔,姚志远,宋小刚,基于虚拟仪器的直线超声电机机械特性测试[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(2): 218-222.
Zhang Jiantao, Yao Zhiyuan, Song Xiaogang. Linear ultrasonic motor mechanical property test based on the virtual instrument [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(2): 218-222. (in Chinese)
- [6] 周恒保,袁慎芳,邱雷,基于 PXI 总线的多通道程控电荷放大器设计[J]. 压电与声光, 2010, 32(4): 664-666.
Zhou Hengbao, Yuan Shenfang, Qiu Lei. Multichannel SPC charge amplifier design based on PXI bus [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2010, 32(4): 664-666. (in Chinese)
- [7] Anton F P, Van P, Electronic measurement systems [M]. [S. l.]: Institute of Physics Published by Taylor & Francis Group, 1996: 179-203.



第一作者简介:徐志伟,男,1970年3月生,教授、博士生导师。主要研究方向为智能材料与结构。曾发表《Particle damping for passive vibration suppression: numerical modeling and experimental investigation》(《Journal of Sound and Vibration》2005, Vol. 279, No. 3-5)等论文。

E-mail: zhwxu@nuaa.edu.cn