

基于 C8051F040 的高精度气压 控制模态测试悬挂系统

洪小其,戴尚昆,王时杰

(浙江工业大学 机械制造及自动化教育部重点实验室,浙江 杭州 310014)

摘要:为解决在设计航天器的过程中对设备的物理参数进行精确测试等问题,将气动技术应用到模态测试装置设计中。针对模态装置中气动子系统性能的优劣直接影响其稳定性与超低频指标等情况,以提高气动控制系统性能为出发点,介绍了气动供气系统,设计了以 C8051F040 处理器为核心进行高精度气压控制的硬件接口电路和软件设计。实际实验结果表明,该气动控制系统运行可靠,具有操作方便、精度高和实时性好等特点,且具有较高的推广应用价值。

关键词:气压控制;C8051F040;模态装置

中图分类号:TH138;TP36

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)01-0106-05

High precision pneumatic control based on C8051F040 in modal testing suspension system

HONG Xiao-qi, DAI Shang-kun, WANG Shi-jie

(The MOE Key Laboratory of Mechanical Manufacture and Automation,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to solve the problems that it is required to carry out an accurate analysis of parameters in the process of the spacecraft design, the pneumatic technology was applied to design of modal testing suspension device. Aiming at the problems involved in the performance of pneumatic subsystem which directly affects the stability and ultralow frequency index of modal device, in order to improve the quality of the pneumatic control, pneumatic supply system was described, based on C8051F040 microprocessor as the key part in high precision pneumatic control, the hardware interface circuits and software design were designed and testified of the system. Experimental results show that the pneumatic system runs controller reliably, and features easy operation, high precision, excellent real-time, etc.. It is wealth to be promoted into practical applications.

Key words: pneumatic control; C8051F040; modal device

0 引 言

随着航天航空技术的飞速发展,对航天器设计要求也越来越高,为了在设计航天器的过程中对结构体的物理参数进行准确分析,必须进行模态测试^[1]。模态测试的目的是测试航天器的动态特性,包括结构的固有频率、模态振型和阻尼、广义质量、广义刚度等。测试结果用于获得或验证航天器的动力学模型,验证

结构的动态设计、进行力学环境预示、控制分系统设计及评定和故障诊断等,是结构动态模型修正及结构优化设计必不可少的环节,亦是新型号研制的重要保障。

目前,美国 CSA 工程公司已经定型的模态测试悬挂系统,型号为 60350-DA,该系统最大悬挂重量 621 磅,垂直悬吊频率为 0.1 Hz,该系统已为美国 NASA 兰利等研究中心所用。由于国内还没有这样的设备,缺少了必要的测试手段,对于新航天器的研制已经产生

一定的影响,因此,尽快配置一套超低频悬挂装置系统^[2-3],深入了解航天器结构系统的动态特性,尤为迫切。

气动技术^[4]是以空气压缩机为动力源,以压缩的空气为工作介质进行能量传递和信号传递的工程技术,是实现各种生产过程、自动控制过程的重要手段之一。具有结构简单、可靠性高、工作速度快、可贮存能量、远距离输送和工作介质取之不尽等优点。通过分析美国 CSA 工程公司的气动磁悬浮悬挂装置的工作原理和现有的资料,总结研制模态测试悬挂系统的关键之一是设计一种高精度的气压控制系统。

该悬挂装置垂直方向上的固有频率最低要达到 0.03 Hz,这在国内外都是首例,在分析计算中发现,要达到这个要求,气压波动必须小于 20 Pa。采用特制的压力控制装置,气压波动也只能抑制在 50 ~ 100 Pa。无法满足要求,成为核心难点。为此笔者研发了一种以单片机 C8051F040^[5] 处理器为核心进行气压控制的硬件系统和软件系统。

1 模态测试悬挂装置

1.1 模态测试悬挂装置原理

如图 1 所示为模态装置原理图,其由两个并行的子系统构成:一个是气动子系统;另一个是电磁子系统。气动子系统由无摩擦气缸-活塞、外部储气罐、比例阀等构成。电磁子系统由长行程动圈作动器和配套的功率放大器、位移传感器、加速度传感器、高精度压力传感器、力传感器、微处理器构成的控制器等构成。试件的全部重力由仅在垂直方向随动的无摩擦气缸-活塞装置的活塞承受。把气缸通过大口径气管连接到储气罐,使得储气罐的容积成为气缸容积,从而气缸的有效容积大大增加。这样空气弹簧^[6]的刚度变得很小,同时保持承受大载荷试件的能力。比例阀使得气缸的平均压力稳定在设定值,间接的使得无摩擦气缸-活塞的悬挂力稳定。小容积变化时,气缸-活塞性能像线性弹簧串联阻尼装置。由于采用无摩擦气缸-活塞装置,使得活塞在气缸的垂直方向的任何位置,空气弹簧力总是和试件重力平衡。由于无摩擦和力的平衡使得试件浮动在行程范围内,并会逐渐运动到极限位置。这破坏了模态振动试验,必须引入电磁子系统。电磁子系统引入主要为了解决以下 4 个问题:垂直方向中心位置保持、调节悬挂高度、补偿压力波动和抑制附加质量影响。

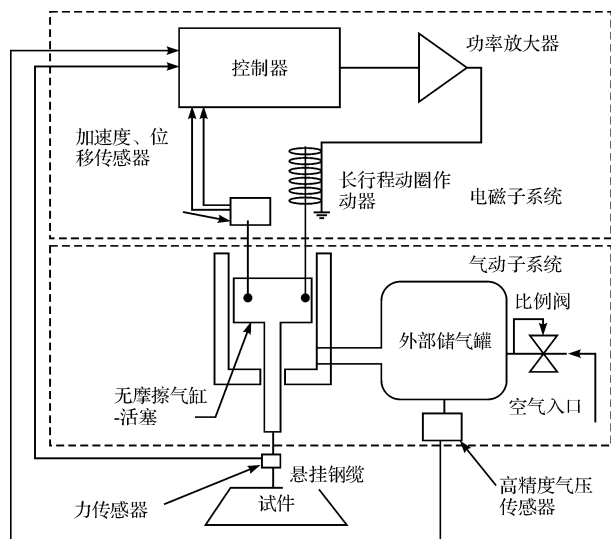


图 1 模态装置原理图

1.2 气动系统的回路

如图 2 所示为模态装置供气系统,外部大气通过过滤器、空气压缩机、制冷干燥净化装置、自动排水和储气罐等后形成气源。模态装置对空气质量的要求很高,再采用过滤器进行过滤。为了防止气压过大和基于安全方面的考虑,利用减压阀对压缩空气减压。比例阀输出稳定的气压后,能保证气罐内的平均气压稳定在设定值。气缸-活塞装置通过大口径气管连接到外部储气罐,使得储气罐的容积和气缸容积相通,那么气缸的有效容积大大增加,气压波动产生的影响相对就小了很多。两只单作用气缸-活塞作为气动执行元件,活塞与活动机架组成随动部件,随动部件下端通过钢丝绳悬挂测试件。

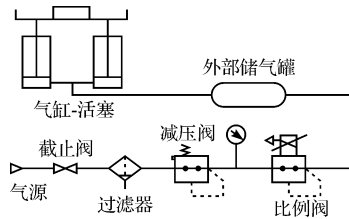


图 2 气动系统回路

2 气压控制装置的硬件结构

气压控制的硬件结构如图 3 所示。主要包括气压信号采集部分、数据处理器以及气压控制部分。整个系统是一个复杂的串级控制系统。单片机 D/A 输出控制比例阀^[7-10],比例阀通过 A/D 输入到单片机反馈阀门状态形成控制内环。气压传感器采集气压信号送入到单片机,处理器经过 PID^[11-12]运算后由 D/A 输出到比例阀控制气压形成了外环。

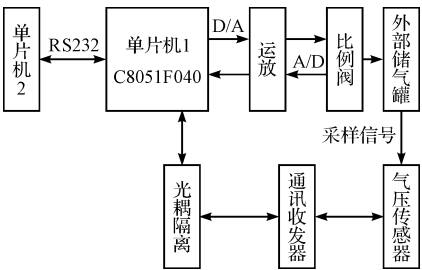


图 3 气压控制硬件结构示意图

2.1 气压信号采集部分

气压信号采集部分主要包括气压传感器、MAX485 收发器以及光耦隔离电路。其电路如图 4 所示。由气压传感器将受力时产生的电压信号经 MAX485 收发器转换,再由 6N137 进行隔离和电平转换,最后送入单片机。

气压传感器选用的是 KELLER 公司的 Serie35X 系列气压传感器。该传感器能精确到 8 Pa,稳定性好,

内部温度补偿范围广,最主要的是它属于数字气压传感器,直接以数字信号的形式反映当前所测的气压值,对模拟电路的设计非常有利。

为了提高系统的数据传输速率和长距离通讯性能,本研究采用了线路设计简单、控制方便的 RS485 串行总线传输标准。串口通讯芯片选用 MAXIM 公司生产的 MAX485,为半双工通讯方式。MAX485 芯片的接收使能信号/RE 和驱动器使能信号 DE 通过光耦隔离器连接到单片机的 P0.4 管脚,该引脚置低使 MAX485 处于接收状态,该引脚置高使其处于发送状态。配置单片机端口 I/O 交叉开关寄存器 XBR2.2 位 UART1E 为 1,将单片机数字外设 UART1 的发送和接收端口配置到 P0.2 和 P0.3 引脚。同时,MAX485 的驱动器输入 DI 和接收器输出 RO 通过光耦隔离器分别连接到单片机的 P0.2 和 P0.3 引脚,构成一个简单的集散型控制系统,使得处理器可方便的与气压传感器进行通讯。

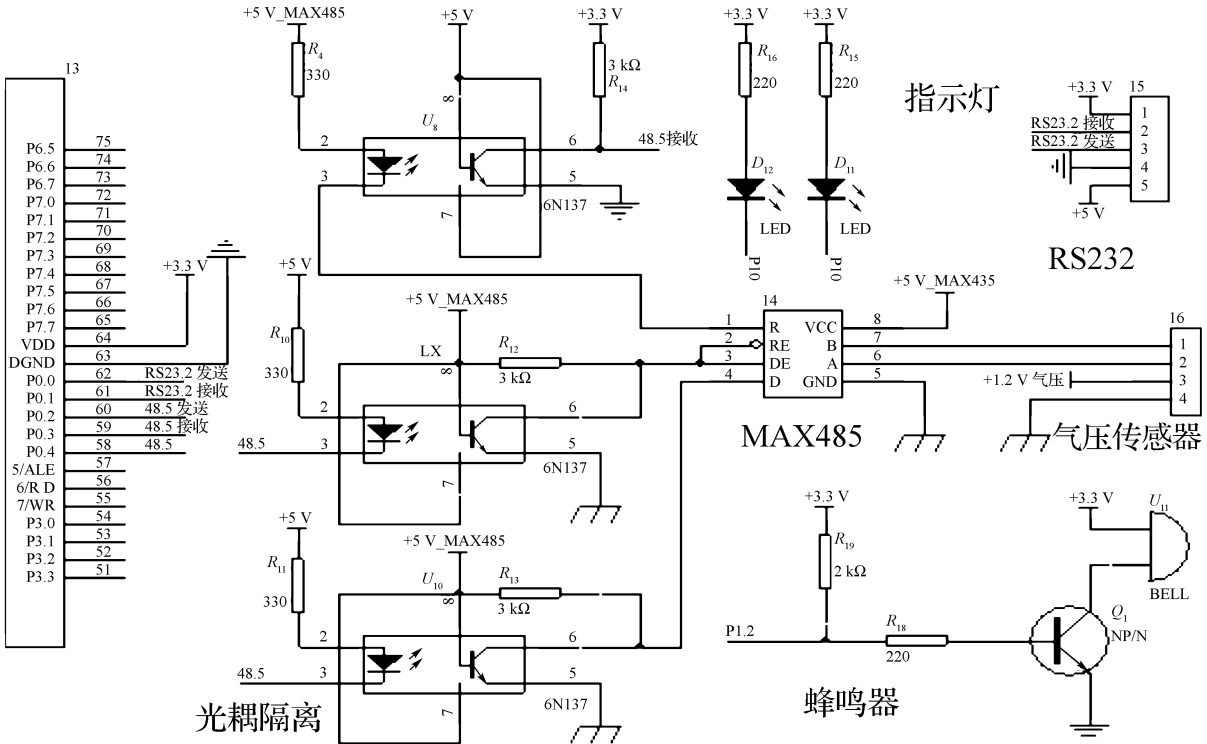


图 4 数据采样电路图

为了防止外部信号对单片机的干扰,在外部信号输送到单片机之前,本研究采用高速光耦隔离器 6N137 进行隔离。

2.2 数据处理

Cygnal 公司的单片机 C8051F040 具有与 8051 指令集完全兼容的 CIP-51 内核。它的最高频率可达 25 MHz,内置 64 KB FLASH RAM 和 4 KB 的数据存储

器。C8051F040 在一个芯片内集成了构成单片机数据采集或控制系统所需要的几乎所有模拟和数字外设及其它功能部件,包括 ADC、可编程增益放大器、DAC、电压比较器、温度传感器、SMBus/I2C、UART、SPI、定时器、内部振荡器、看门狗电路以及 CAN 控制器等,这种高度集成成为设计小体积、低功耗、高可靠和高性能的测控系统提供了方便,同时也使测控设备整体成本能够降低。

模态测试悬挂系统电路设计较为复杂,涉及到2块单片机之间的通讯。为了方便单片机之间相互通讯,本研究采用了线路设计简单、控制方便的 RS232 串行总线传输标准。配置交叉开关 XBR0.2 位 UART0EN 为 1,将数字外设 UART0 发送和接收配置到 P0.1 和 P0.2 端口,同时引出 232 通讯接口(电路如图 4 所示)。

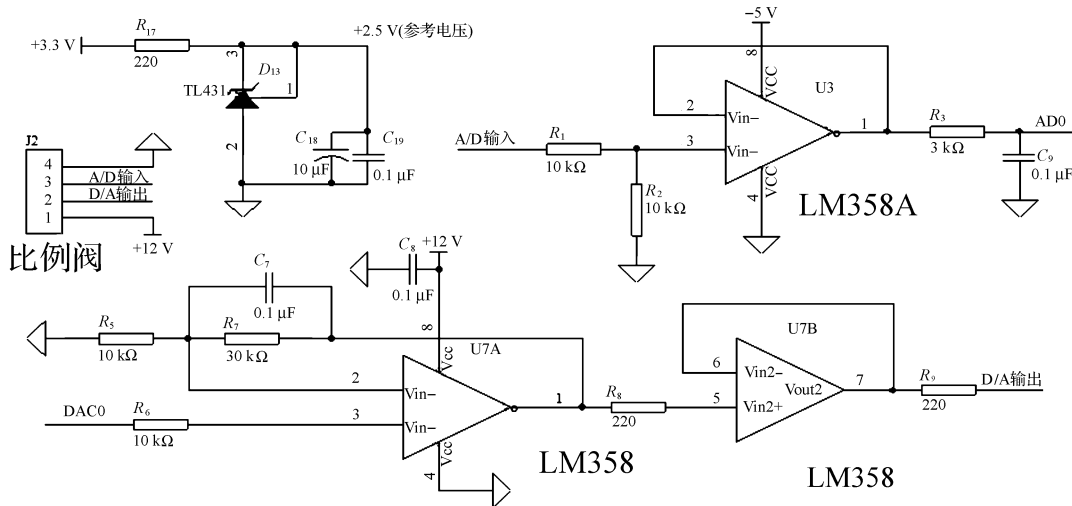


图5 A/D输入与D/A输出电路图

比例阀选取的是日本 SMC 公司的 ITV2031-312BS 系列比例阀,该阀控制电压为 0 ~ 10 V 电压信号,气压出口范围 0 ~ 5 Bar,流量达到 1 920 L/min,完全满足气压控制要求。且具有开启速度快、动态响应时间短、操作方便和价格低廉等优点。

ADC 模块是控制器硬件设计中一个重要部分。单片机 C8051F040 器件带有两个片内 12 位电压方式数/模转换器(DAC)。每个 DAC 输出摆幅均为 0 V 到 ($V_{REF}-1LSB$),对应的输入码范围是 0x000 ~ 0xFFFF。经 TL431 稳压后的电压 +2.5 V 连接到单片机引脚 VREF0,作为 DAC0 工作电压基准。选用一片 8 引脚贴片式封装的 LM358X 运算放大器对 DAC0 输出信号进行放大,如图 5 所示,电路中 R_6 为 10 k Ω , R_5 为 10 k Ω , R_7 为 30 k Ω ,DAC0 输出电压信号被放大 4 倍,输出电压宽度为 0 ~ 10 V,与比例阀控制电压(0 ~ 10 V)恰好对应,再采用 LM358 进行跟随,构成一个简单有效的放大电路。

比例阀将阀门状态转化为电压信号经 AD0 输入,并通过 LM358 运算放大器放大,连接到单片机第 18 模拟量引脚(AIN0.0)送进单片机,与 D/A 输出共形成一个反馈系统。指示灯 D_{11} 、 D_{12} 以及蜂鸣器 Q_1 分别由单片机引脚 P1.0、P1.1 与 P1.2 控制,用来报警和显示单片机当前的工作状态(如图 4 所示)。

2.3 气压控制部分

气压控制部分主要包括模拟信号 A/D 输入和 D/A 输出,其电路如图 5 所示。单片机输出电压信号经过运放放大送到比例阀,控制比例阀的开度,从而控制气罐内的气压。同时,比例阀将阀门状态转换为电压信号经运放送到单片机,形成一个闭环控制。

3 气压控制系统软件设计

如图 6 所示为气压控制软件流程图。系统初始化包括看门狗初始化、I/O 口初始化及交叉开关配置、晶振初始化、ADC 初始化、UART 初始化、定时器初始化等,气压值发送和 PID 参数设置给系统一个初始的状态。气压值传输出错由 CRC 校验判定,PID 运算采用增量型控制算法。A/D 采样的速率由定时器 2 的溢出设置波特率时钟,这里设置的波特率为 9 600 Hz。整个软件的设置是一个闭环控制,一方面,经 PID 运算 D/A 输出控制比例阀来控制气罐内的气压;另一方面,利用气压传感器,控制器采集气罐内的气压值以便比较和循环控制。

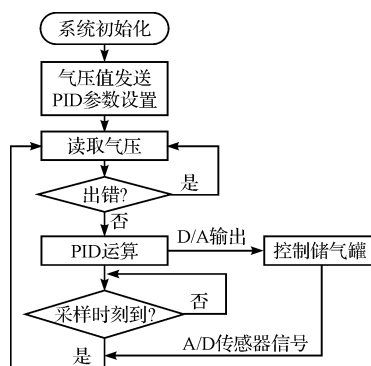


图6 气压控制软件流程图

模拟 PID 调节器的公式为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

将模拟 PID 离散得到数字 PID 增量式控制算法为:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) = u(k-1) + K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (2)$$

式(2)是 PID 控制算法软件设计的基础。

4 实验结果

如图 7 所示,当给定一阶跃信号(气压值设为 150 000 Pa)后,可以看到气压的变化。其上升平稳,响应速度快,而且无超调现象。

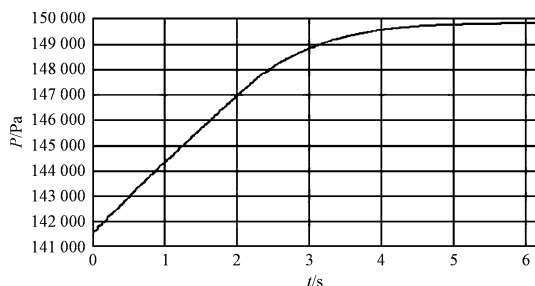


图 7 气压控制过程图

如图 8 所示为重载下的气压控制。气压设定值为 357 250 Pa,从实验曲线可以看出小范围的气压波动在 20 Pa 以内,完全达到了系统的设计要求^[13]。

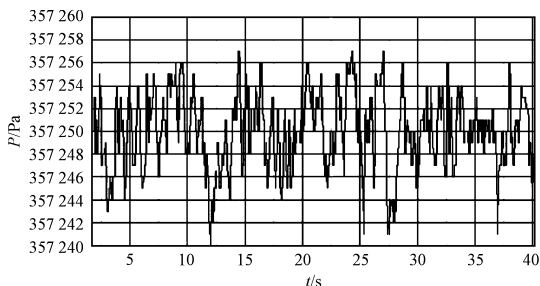


图 8 精密气压波动控制图

5 结束语

本研究介绍了一种高精度的气压控制系统,分析了模态测试悬挂装置的原理,介绍了气动系统回路,设计了以 C8051F040 处理器为核心进行高精度气压控制的控制系统。目前模态装置已经生产并投入使用。

从实验的结果和现场运行的情况来看,经过不断地调试和完善该控制器能够高精度、实时的提供稳定的气压控制,满足了用户的要求,并且具有很好的可操作性。

在该控制器进行相关的软硬件改造升级后,可以推广到相关领域的其它行业。

参考文献(References):

- [1] 海 伦,拉门兹,萨 斯. 模态分析理论与实验[M]. 白氏同,郭继忠,译. 北京:北京理工大学出版社,2001.
- [2] SUN J H, GAO Z S, SHAN X H, et al. On pneumatic installation technology of modal testing suspension system[J]. *Advanced Materials Research*, 2009(69-70): 690-694.
- [3] 赵燕伟,汪庆武,孙建辉,等. 基于 CAN 总线的模态测试悬挂控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(11): 2187-2190.
- [4] 郑洪生. 气压传动及控制[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,1994.
- [5] 童长飞. C8051F 系列单片机开发与 C 语言编程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004.
- [6] YANG Bo, CHEN Si-zhong, WU Zhi-cheng, et al. Development of a composite suspension with a coil and hydro-pneumatic spring [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2008, 17(3): 280-284.
- [7] 孔祥臻,刘延俊,李永斌,等. 气动比例系统定位特性研究[J]. 机床与液压, 2007(11): 96-97.
- [8] 吴流发. 比例方向阀气动位置力控制研究[J]. 液压与气动, 2007(9): 24-25.
- [9] 周树云,陈冰冰. 比例控制气动伺服系统的建模与仿真研究[J]. 机械, 2007, 34(1): 38-40.
- [10] 单俊锋,许明恒,郑 俊. 比例控制放大器在钢管测长系统中的应用[J]. 机械, 2008, 35(2): 67-68, 78.
- [11] 赵 瞻,郭淑娟. 基于电液比例位置系统的模糊自整定 PID 控制器[J]. 机电工程, 2006, 23(11): 59-62.
- [12] XUE Yang, PENG Guang-zheng, FAN Meng, et al. New asymmetric fuzzy PID control for pneumatic position control system[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2004, 13(1): 29-33.
- [13] 杨艳春. 汽车用双缸空气压缩机由轴箱加工工艺确定[J]. 现代制造技术与装备, 2010(2): 28.

[编辑:张 翔]