

# 基于 MSP430 的全箭模态试验信号 通路控制器的研制

邓 哲, 龚靖傑, 张玉玺, 王家乐, 张梦妍

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

**摘要:** 在全箭模态等试验控制系统中, 为解决模态试验系统激励器通道数目与激励测量模块通道数量不一致, 而导致在实验过程中, 出现连接、更换通道连接线时, 不仅耗时而且经常出错等问题, 设计并实现了一种多路信号通道控制器, 该信号通道控制器可以实现多达 32 路通道与 32 路通道的信号的任意连接和智能在线切换; 配置连接的通道信号线间导通, 未配置连接的通道之间成高阻抗状态; 试验人员仅需将测量通道连接在输出端, 将模态试验系统测量模块通道连接在输入端, 就可以通过控制器液晶屏进行通道配置, 实现输入、输出通道的任意连接和在线通道切换, 切换时长不大于 1 s, 输出和输入通道相位误差小于 1 ms, 临近未使用的通道串扰幅值少于 0.02 V。

**关键词:** 模态试验; MSP430 控制器; 多路信号; 在线切换

## Signal— Channels Controller for Modal Test of Launch Vehicle Based on MSP430 MCU

Deng Zhe, Gong Jingjie, Zhang Yuxi, Wang Jiale, Zhang Mengyan

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of inconsistency between the number of channels of vibration exciter used in modal test system and the number of channels of excitation measurement module in modal test system, such as when people connecting and replacing channels between exciter and excitation measurement module, often need more time and got wrong connection, a signal channels controller is designed and implemented, which can achieve the arbitrary connection and online switching of channels up to 32 channels. The signal channels can be configured connected or unconnected. The unconnected channels are in high-impedance state. The tester only needs to connect the measuring channel to the output end and the measurement module channels of the modal test system to the input end. And then the tester can configured the channels through the LCD screen to realize the arbitrary connection of the input and output channels and online switching and the switching time is less than 1s, the phase error between output and input channels is less than 1 ms, and the crosstalk amplitude of adjacent unused channels is less than 0.02 V.

**Keywords:** model test; MSP430 controller; multi-channel; online switching

### 0 引言

在火箭的研制过程中, 建立准确的数据分析模型来进行全箭的结构动力学分析是非常重要的一个环节<sup>[1]</sup>。这个数学模型的正确与否, 需要通过进行模态试验测量模态参数来进行充分验证。在进行模态试验时, 获取被测结构激励和响应的时域信号是模态试验的重要一步, 其测量主要包括传感器的选取及配置, 激励器的选取和布置等环节<sup>[2-5]</sup>。在实际测量中尽管通过优化结构以使模态试验测量时尽可能减少传感器的数量, 在进行全箭模态试验时, 仍需要安装大量测点, 安装多台激励器来获取火箭结构准确的模态参数。如在一次火箭模态试验时, 需要安装多达 20 个激励器, 测点数量达到 260 个左右同步测量水平, 同时被测结构的响应信号需要通过采集设备将数据传输到上位机进行显示<sup>[6-9]</sup>。一般应用于模块实验的激励测量模块最多支持 8

通道输出, 即一台激励测量模块最多连接 8 个激励器, 仅用 1 台激励测量模块不能满足试验的要求, 如增加 2 台或多台激励模块和相应设备虽然能满足试验需求, 但是存在以下两大问题: 1) 与激励器、传感器配套使用的数据采集和控制设备的造价都较昂贵, 增加激励测量模块和采集设备将造成试验成本成倍增加; 2) 在试验过程中, 需要在激励模块、传感器和数据采集控制设备之间连接大量的信号线, 并明确对映关系。激励器、传感器分布在火箭的各个部位, 这就对明确他们之间的通道对应关系造成了很大的困难。不仅如此在经过多次操作后, 多根信号线相互缠绕, 这就导致在连接通道线路时对应关系出错的问题时有发生, 甚至导致设备故障。为解决上述问题, 设计并实现了一种信号通道控制器, 该控制器具有 32 路输入通道和 32 路输出通道, 用户可以通过触摸式液晶屏进行 32 \* 32 通道的任意连接配置和在线通道切换, 如图 1 所示, 在进行模态试验时, 仅需在试验开始前将试验系统控制设备的输出端连接到信号通路控制器的输入端, 将传感器和激励器信号线连接到信号通道控制器的输出端, 试验人员通过信号通道控制器

收稿日期: 2019-12-27; 修回日期: 2020-01-17。

作者简介: 邓 哲(1986-), 女, 北京人, 硕士, 工程师, 主要从事测控技术方向的研究。

的触摸式液晶屏对输入、输出信号通道进行配置, 就可以实现实验系统多路信号和传感器信号线通道的任意连接和在线切换, 无需再次调整连接线路, 并且可以实现多条通路的在线同步控制。在节约试验成本和时间的同时, 提高了试验过程的可靠性。

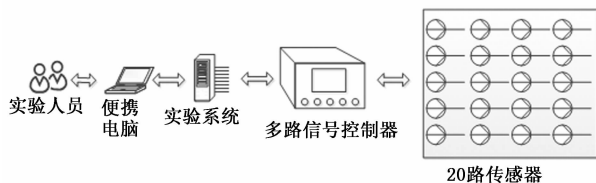


图 1 模态试验系统图

### 1 信号通道控制器结构

信号通道控制器控制系统由以下几个部分构成: 1) 采用触摸式液晶屏作为用户输入接口, 用户通过触摸式液晶屏对通道进行配置和查看配置结果; 2) 采用超低功耗嵌入式微控制器 MSP430FR5969 作为控制器对整个系统进行控制<sup>[10]</sup>, 该控制器时钟频率高达 16 MHz, 工作模式下功耗仅有约 100  $\mu$ A/MHz<sup>[11]</sup>; 3) 采用 8 片 AD75019 16 \* 16 阵列模拟开关来实现 32 \* 32 路通道差分信号的任意切换, 每一片 AD75019 的输出信号, 在时钟有效的情况下, 可以根据控制器 GPIO 输出的 256 位比特流配置实现 16 \* 16 路的任意导通; 4) 触摸式液晶屏和嵌入式微控制器之间采用串口进行通信, 通信速率 115 200 b/s, 其结构如图 2 所示。

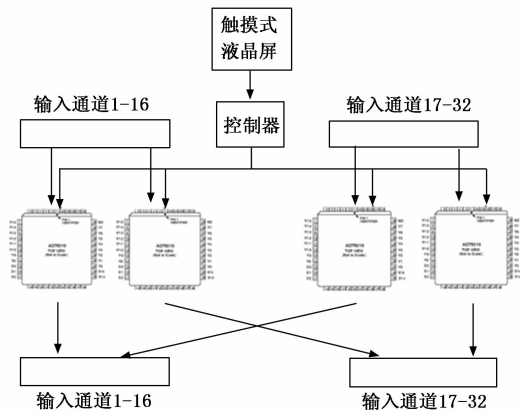


图 2 控制系统结构图

#### 1.1 用户输入液晶屏界面设计

采用触摸式液晶屏作为用户的信息输入接口, 同时作为系统的上位机控制设备。用户可以在液晶屏的输入通路选项框中, 将试验系统输出端连接到信号通道控制器中的通道号进行输入配置, 输入通道可以为输出通路 1~32 连接任意通路, 不需要的通路可不进行输入配置, 输入完成后点击确定按钮, 配置数据将通过串口下发到控制器中, 控制器对串口命令进行组包解析和响应, 实现信号输入输出通道的在线配置和切换。由于对于任意一个输出通道不允许多条输入通道同时输出, 允许同一输入通道从多条输出通道输出, 因此在液晶屏显示时, 固定输出通道, 用户仅能对输入通道进行配置。

液晶屏和微控制处理器之间采用命令应答通信方式, 通过串口传递数据包进行通信, 通道号由用户手动收入, 用户输入的通道号采用 ASII 码形式保存, 通道号小于 10 的通道采用 1 个字节 ASII 码表示, 通道号大于 10 的通道采用 2 个字节的 ASII 码表示, 每个通道号前用通道开始字 0 \* 20 标识, 控制器通过查询通道开始字 0 \* 20 来识别一个通道号, 数据按照字节格式存储, 高字节在前, 低字节在后。上位机用户输入的 32 路通道数据通过数据包的方式下发到控制器端, 整个数据包以 0 \* 4D 作为数据包的结束字。

#### 1.2 控制系统软件设计

嵌入式微控制器根据用户在液晶屏输入的配置信息对通道进行配置, 通道配置过程如图 3 所示, 系统上电后首先初始化时钟为 16 Mhz。将未使用到的 GPIO 初始化为输入状态, 降低系统功耗。关闭串口中断, 配置串口并使能串口接收中断。上述初始化完成后, 将所有通道配置信息清空, 将指示指针等清空, 进入等待串口接收中断到来状态。用户在触摸式液晶屏上进行通道配置, 点击完成后, 液晶屏软件将用户的配置信息生成通道配置信息数据包, 通过串口下发的嵌入式微控制器, 此时嵌入式微控制器将收到串口接收中断, 收到串口数据接收中断后, 进入串口数据接收状态。每收到次串口中断, 进行一次数据接收操作, 微控制器在接收串口数据同时, 对串口数据进行存储并检查是否为结束字, 若不是结束字则继续等待串口接收中断的到来并进行数据接收操作。如果判断当前数据为结束字, 表明接收到了一包完整的通道配置信息数据包, 随后停止串口数据接收操作, 将接收到的数据存储在数组 DATA 中并生成数据接收完毕标志, 通知主控程序数据接收完成, 系统进入 DATA 数据解析状态。系统对 DATA 数组进行逐个检查去掉通道开始字, 并将收到的 ASII 码数据进行解析合成通道配置信息, 根据配置信息生成控制矩阵, 根据通道矩阵控制算法将矩阵数据生成比特流逐行下发对阵列模拟开关进行控制, 从而完成通道配置, 实现通道的在线切换配置。进行多条通道的数据传输时, 通道间会有信号间的串扰出现, 频率越快, 串扰越严重, 为了减弱相邻通道间在传输信号时发生串扰, 增加一路信号为地, 并将该路连接到金属壳体, 在进行通道配置时, 将未使用到的通道通过配置, 和这条通道连接, 使得未使用的通道连接到地线, 降低了通道间传输的串扰, 提高了信号传输的可靠性。

### 2 通道矩阵控制算法

信号通道控制器核心控制算法能够根据液晶屏的用户输入信息计算出输出 32 对应用户设置的输入 32 通道对应关系。每个输出通道用户可随机配置 32 个任意输入通道, 因此 32 个输出通道和 32 条输入通道的配置组合为 32 \* 32 = 1 024 种。这就需要通道矩阵控制算法能够在用户设置完成后, 快速地对配置关系进行计算并控制矩阵芯片开关进行相应的操作来实现用户配置通道的连通。在一次试验过程中, 试验人员可能需要多次对输入输出连接通道进行调整, 这就需要设备能够进行在线, 实时的通道配置, 因此设计

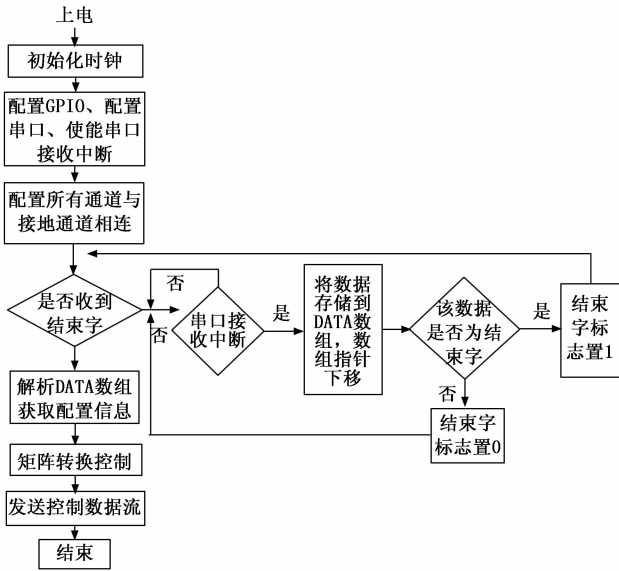


图 3 配置过程流程图

了矩阵转换配置方法，将 32 条输出通道作为转换矩阵的列，32 条输入通道作为转换矩阵的行，行列交叉的点为通道矩阵控制开关，交叉点值为 1 时，表示通道连通，交叉点为 0 时，表示通道不连通。

输入输出通道配置包括以下几个步骤：1) 通道关系配置信息解析；2) 配置信息矩阵转换控制；3) 控制矩阵数值输出。通道关系配置信息解析过程如下：用户在液晶屏将输入输出通道对应关系设置完成后，配置数据通过串口下发到控制器串口，控制器收到串口中断后，进行数据接收操作，将数据存储 DATA 数组中，接收完成后对收到的数据包进行解析，计算出相应的通道序号并按照输出通道顺序排列出用户配置的输入通道的序列。

对 DATA 数组进行解析获取配置信息过程如图 4 所示，首先将 DATA 数组、DATA 数组指针 pickdata、DATA 数组、data\_rec 数组、data\_rec 数组指针 getdata 和数据位数计数器 CNT 清零，随后检查指针 pickdata 对应的 DATA 数组中的数据是否为开始字或者包尾结束字，每查询一个数据后指针 pickdata 执行一次加 1 操作。如果是开始字  $0 \times 20$  则去掉通道头，与  $0 \times 20$  相邻的非开始字数据为通道配置信息 ASII 数据，检测 DATA [pickdata+1] 以及 DATA [pickdata+2] 数据是否为  $0 \times 20$ ，如果不是则将通道配置信息 ASII 数据转换成整型数据存储到 DATAC [CNT] 中，CNT 加 1。如果 CNT 的值为 2，说明通道号大于 10，需要 DATAC [CNT] 数组中的数据进行合成，得到最终的通道配置数据 datamath， $datamath = datat [0] * 10 + datat [1]$ 。如果 CNT 值为 1，则  $datamath = datat [0]$ ，将 datamath 的值存储到 data\_rec 数组中。data\_rec 数组即为输出和输入通道的对应关系数组，data\_rec 数组对应的指针 getdata 加 1。如果数据 DATA [pickdata+1] 值为  $0 \times 20$ ，则表明第 1 输出通道没有配置输入通道，则将该通道连接到第 32 通道从而使未连接的通道连接到地上，此时

data\_rec 数组值为 32，data\_rec 数组指针 getdata 加 1。依次类推，直到 DATA [pickdata] 的值为结束字  $0 \times 4d$ ，停止查询操作，得到输入输出数组对应关系数组 data\_rec。如果 DATA [0] 不是  $0 \times 20$  则说明接收到的数据有错误，控制器将错误信息通过串口回传到液晶屏，同时使得液晶屏上的灯进行闪烁提示系统故障，此时用户需要进行故障排查并将液晶屏数据进行重新下发。

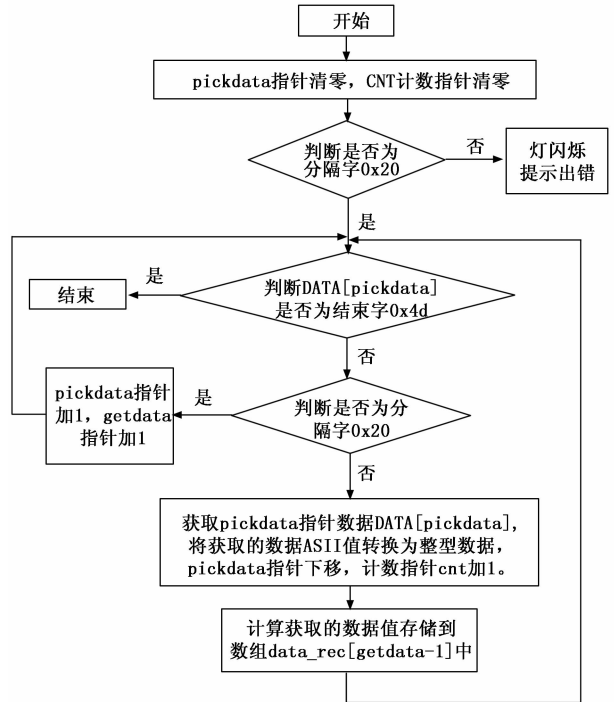


图 4 配置信息解析流程图

配置信息矩阵转换控制过程即根据 data\_rec 数组的数值生成对 AD75019 的控制矩阵，每一片 AD75019 的控制比特流为  $16 \times 16$  矩阵，4 片 AD75019 对应 4 个控制矩阵，4 片 AD75019 控制  $32 \times 32$  的输入通道和输出通道之间的导通和通道切换，行列交叉的点为通道矩阵控制开关，交叉点值为 1 时，表示通道连通，交叉点为 0 时，表示通道不连通，如图 5 所示。

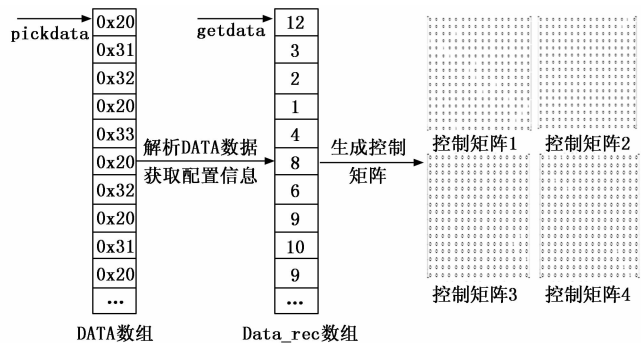


图 5 配置信息矩阵转换控制过程图

矩阵行列数值计算公式如下所示，用  $X [n, m]$  表示  $16 \times 16$  控制矩阵， $n$  为控制矩阵的行， $m$  为控制矩阵的列，

矩阵行列的初始值为 0。获得  $data\_rec$  数组后, 通过对  $data\_rec$  数组进行查询来获得控制矩阵的数值, 首先初始化  $X$  矩阵为 0, 设置  $data\_rec$  查询指针  $i=0$ , 并根据  $data\_rec$  计算结果在矩阵的相应位置填写 1, 未填写的位置值为 0, 当查询指针  $i$  值为 31 时, 即完成了对  $data\_rec$  数组的全部遍历, 停止查询, 随后将矩阵  $X[n, m]$  数值的在每一个时钟周期逐行下发到控制器的 GPIO 上, 对开关矩阵进行控制, 使得连通的输入输出通道对应的开关矩阵打开, 相反则闭合, 从而实现对输出输入通道的在线配置和切换。

控制矩阵 1 计算公式:

$$X[16-i, 17-data\_rec(i)] = 1, \\ 0 < data\_rec(i) \leq 16, 0 \leq i < 16,$$

控制矩阵 2 计算公式:

$$X[32-i, 17-data\_rec(i)] = 1, \\ 0 < data\_rec(i) \leq 16, i \geq 16,$$

控制矩阵 3 计算公式:

$$X[16-i, 32-data\_rec(i)] = 1, \\ data\_rec(i) > 16, 0 \leq i < 16,$$

控制矩阵 4 计算公式:

$$X[32-i, 32-data\_rec(i)] = 1, \\ data\_rec(i) > 16, i \geq 16$$

其中  $i$  为通道号,  $data\_rec(i)$  为对应的通道号。

假设用户对 32 输出通道都进行了配置, 且配置为 2 位字节通道号, 每个通道号前均设置的开始字  $0 \times 20$ , 则用户配置信息包的长度为  $(1+2) \times 32=96$  字节, 液晶屏和微控制器间通信速率为 38 400 bps, 传输 96 字节数据的耗时为 20 ms。微控制器采用 16 Mhz 时钟频率, 微控制器在收到并存储完串口数据后, 对串口数据解析, 对数据进行遍历查找并合并数据过程需要 96 个时钟周期将数据存储到  $data\_rec$  数组中, 对控制矩阵  $X$  进行初始化需要 32 个时钟周期, 对  $data\_rec$  数组进行遍历并将计算结果存储到  $X$  矩阵中, 需要 32 个时钟周期。将矩阵  $X$  数据下发需要  $256 \times 4$  个时钟周期, 微控制器执行完成输出和输入通道的配置需要时长约为 1 184 个时钟周期, 约为  $75 \mu s$ , 考虑到开关矩阵开合到稳定的过程大约为 3 ms, 因此用户配置完成输入输出通道到微控制器计算并执行完成需要约 24 ms 时间, 满足试验在线快速响应切换的需求。

### 3 试验结果分析

将多路信号控制器应用于全箭模态实验中, 微控制器采用 16 Mhz 时钟频率, 液晶屏和微控制器间通信速率为 38 400 bps, 传输的信号为 1 Hz 控制信号, 在实验过程中, 实验人员设置信号传输通道, 系统自动将未使用通道连接到地平面, 同时进行激振器控制通道的在线切换, 并通过采集设备对输入和输出端信号进行采集, 实测切换时长约为 50 ms, 信号能够保持原幅值输出, 相位误差小于 1 ms, 临近未使用的通道串扰幅值少于 0.2 V, 满足实验的需求, 节约了实验时间, 提高了整个实验环节的可靠性, 输入输出信号对比如图 6 所示。

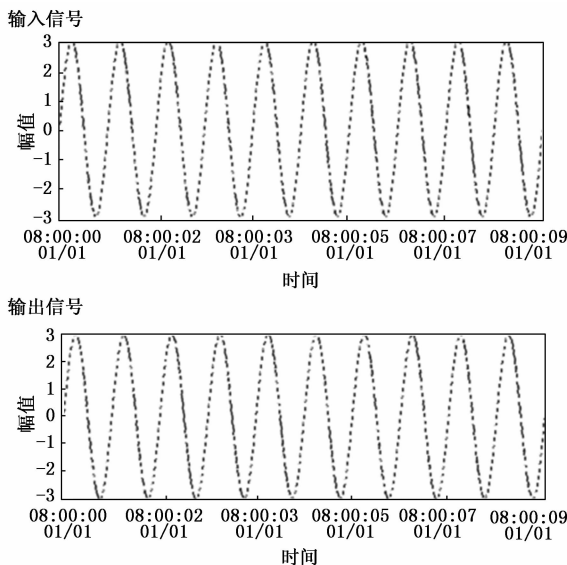


图 6 输入输出信号对比图

### 4 结束语

设计实现了一种信号通道控制器, 并对软、硬件设计以及矩阵控制算法进行了介绍, 该信号通道控制器可以实现多达 32 路通道与 32 路通道的信号的任意连接和智能在线切换。配置连接的通道信号线间导通, 未配置连接的通道之间成高阻抗状态。试验人员仅需将测量通道连接在输出端, 将模态试验系统测量模块通道连接在输入端, 就可以通过控制器液晶屏进行通道配置, 实现输入、输出通道的任意连接和在线通道切换。将该信号通道控制器应用到全箭模态试验中, 试验表明, 该控制器满足实验的需求, 节约了实验时间, 提高了整个实验环节的可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 贾文成, 王鹏辉, 张永亮. 新一代大型火箭全箭模态试验 [J]. 强度与环境, 2017, 44: 1-9.
- [2] 吴素春, 贾文成, 邱吉宝. 载人运载火箭全箭模态试验 [J]. 宇航学报, 2005, 26: 531-570.
- [3] 邱吉宝, 王建民. 运载火箭模态试验仿真技术研究新进展 [J]. 宇航学报, 2007, 28: 515-521.
- [4] 李萌萌彭, 建朝. 基于 FPGA 的多通道控制器的设计与模拟实现 [J]. 微计算机信息, 2009, 25: 168-170.
- [5] 邱吉宝, 王建民, 谭志勇. 航天器结构动态优化设计仿真技术 [J]. 强度与环境, 2003 (6): 7-16.
- [6] 荣克林, 洪洁. 高性能系统-航天飞行器的力学环境试验与评估 [J]. 强度与环境, 2017, 12: 1-7.
- [7] 孙海文, 胥磊. 某火箭模态分析与模态试验 [J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38: 176-179.
- [8] 李学锋. 运载火箭智慧控制系统技术研究 [J]. 宇航总体技术, 2018, 3: 43-48.
- [9] 周虎, 胡海峰, 刘清竹. 基于故障-测试相关模型的运载火箭测试点优化设计方法 [J]. 载人航天, 2018, 24: 34-40.
- [10] 陈中, 沈翠凤. 基于 MSP430 单片机的环境参数检测系统设计 [J]. 电工电气, 2018, 9: 30-33.
- [11] 顾亚军, 周悦, 郭威. 基于 MSP430 的输入输出模块设计与实现 [J]. 测控技术, 2018, 37: 145-149.