

基于开关矩阵的多通道信号切换设备研制

龚靖傑, 邓 哲, 王家乐, 张永亮, 张梦妍

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要: 为提高多通道信号系统的硬件资源利用率和信道切换效率, 使用 AD75019 型宽信号范围模拟开关矩阵为核心设计了一款信号切换设备; 设备支持外接电源和内置电池的双电源供电模式, 并可通过触摸式液晶屏完成通道间连接状态的配置, 确保了设备使用的便利性和灵活性; 同时接口采用了高密度接插件进一步减小了设备的体积和重量, 提高了产品的便携性; 测试试验证明, 信号切换设备实现了 32 输入至 32 输出通道之间任意组合的连接和切换, 且配置完成后的通道切换响应时间小于 100 ms, 使用该设备避免了多通道信号系统中整理线缆和插拔接口的工作, 能够显著的提高系统的信道切换效率和配对可靠性, 可广泛应用于大型测量、控制和试验系统中。

关键词: 开关矩阵; 多通道信号系统; 便携式; AD75019 芯片; 信号切换; 双电源模式

Development of Multi-channel Signal Switching Device Based on Switch Array

GONG Jingjie, DENG Zhe, WANG Jiale, ZHANG Yongliang, ZHANG Mengyan

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

Abstract: To improve hardware resource utilization and channel switching efficiency of multi-channel signal system, a signal switching device using wide signal range analog switch array AD75019 as core component has been designed. This device supports dual power supply mode of external power source and built-in rechargeable battery, and can configure connection state between channels through touch liquid crystal display screen, which ensure convenience and flexibility of the device. Meanwhile, a high density connector is used to further reduce device's volume and weight, which also improve portability of the product. Test result shows that any connection and switch between 32 input channels to 32 output channels can be made by this signal switching device, and channel switching response time is less than 100 ms after completing the channels connection configuration. This device can avoid works of sorting out cables and plug/unplug interfaces in multi-channel signal system, which significantly improve channel switching efficiency and pairing reliability of the system. This device can be widely used in large-scale measurement, control and test systems.

Keywords: switch array; multi-channel signal system; portable; AD75019 chip; signal switching; dual power supply mode

0 引言

随着我国工业和军事技术的快速发展, 各领域所用测试和信号传输系统的复杂度越来越高、规模越来越大、信号通道数也越来越多。这些系统在使用过程中, 往往会面临着要将有限的资源(如频道、稀有测试设备等)进行充分利用的问题。因此需要在多通道信号系统中增加切换设备, 以实现资源的灵活调配、完成信号流的通道间切换^[1-2]。

传统的多通道信号切换设备是由多个继电器开关矩阵级联组成, 由于采用了大量的继电器, 使得整个设备体积庞大、控制电路复杂、响应时间长、功耗大、触点寿命短^[3-4]。且因为设备内元件繁多, 在生产过程中, 易受操作者技能、焊接和器件质量等因素的影响, 难以保证整套设备的可靠性^[5]。针对上述问题, 本文采用高度集成的 AD75019 型模拟开关矩阵芯片, 设计了一款 32 输入×32 输

出的多通道差分信号切换设备。该设备支持内部可充电电池和外部 220 V 交流输入的双电源供电, 且可通过触摸式液晶屏完成通道间连接状态的配置, 实现任意输入与输出通道之间的连通和切换, 具有体积小、重量轻、操作简单、携带方便等特点。

1 设备硬件设计

多通道信号切换设备由电源管理模块(含可充电锂电池)、交叉开关矩阵阵列、触摸式液晶屏、嵌入式微控制器和高密度输入/出接口等部件构成, 整体硬件构架如图 1 所示。

电源管理模块负责将外部输入交流电源或内置锂电池电压调理至后端模块所需电压; 交叉开关矩阵阵列负责根据程序控制时序, 对各输入、输出通道间开关的状态进行设置; 触摸式液晶屏用于显示当前设备状态, 并能对用户输入的设置信息进行采集和下发; 嵌入式微控制器是整个

收稿日期: 2021-03-04; 修回日期: 2021-05-06。

作者简介: 龚靖傑(1987-), 男, 湖北钟祥人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事测试类设备的硬件开发和软件算法方向的研究。

引用格式: 龚靖傑, 邓 哲, 王家乐, 等. 基于开关矩阵的多通道信号切换设备研制[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(7): 264-268.

设备的控制中心, 它能够通过触摸式液晶屏获取用户下发的设置指令, 并将指令转换为符合协议的控制时序后发送给交叉开关矩阵阵列; 高密度输入/出接口用于引入外部输入信号通路和引出配置后的信号输出通路。

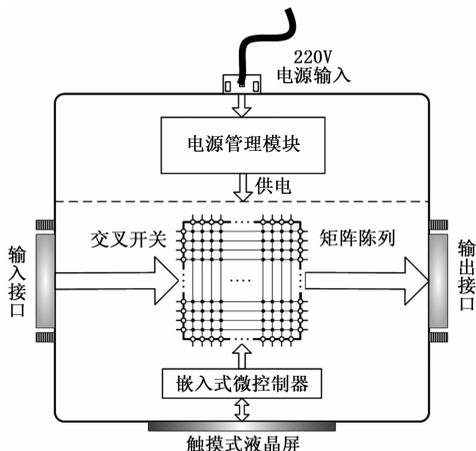


图 1 多通道信号切换设备硬件构架框图

1.1 电源管理模块

为提高信号切换设备的适应性和可靠性, 在电源管理模块设计过程中一方面采用了外部交流输入和内置充电电池的双电源供电模式; 另一方面在电压调理单元中为开关矩阵阵列提供了 $\pm 12\text{ V}$ 的输入信号范围, 大大提高了设备对不同信号类型的兼容能力。电源管理模块内部结构和功能示意图如图 2 所示。

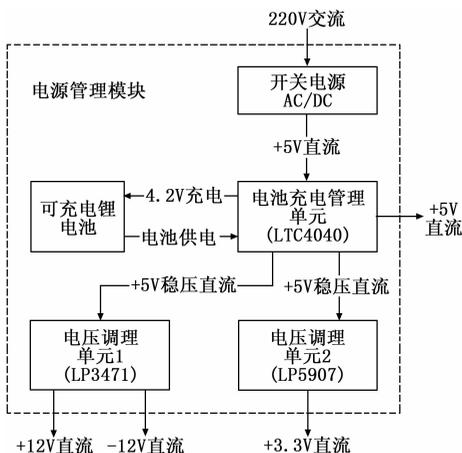


图 2 电源管理模块内部结构和功能示意图

各功能单元中, 首先由开关电源 (AC/DC) 将外部输入的 220 V 交流电转换成 +5 V 直流电为整个后端电路供电。然后通过 LTC4040 型电池充电管理单元对可充电锂电池进行充放电管理, 单元内部集成了动态电源路径管理和电池充电功能, 能够根据电池或直流电源电压的大小动态选择供电通路和充放电方案, 同时 LTC4040 还可对前端输入的 +5 V 直流电源进行整流, 进一步降低电源噪声^[6]。最后由 LT3471 和 LP5907 两种型号的电压调理单元对 +5 V 稳压直流电源进行电压转换, 分别输出 $\pm 12\text{ V}$ 和 +3.3 V 的直

流电压供其他功能模块使用。

1.2 交叉开关矩阵阵列

本设备选用 AD75019 型交叉开关矩阵作为信号通路切换的基本单元, 每片开关矩阵内部集成有 256 个模拟开关, 各开关接通电阻约为 $200\ \Omega$, 在用户指令的控制下可实现 16 路输入至 16 路输出的任意切换、连接。芯片最高支持正负极性差在 24 V 以内 (如 $0\sim 24\text{ V}$ 或 $\pm 12\text{ V}$) 的各种类型信号连接, 且内置有数据锁存器, 能够保证各通道配置状态掉电不丢失^[7]。

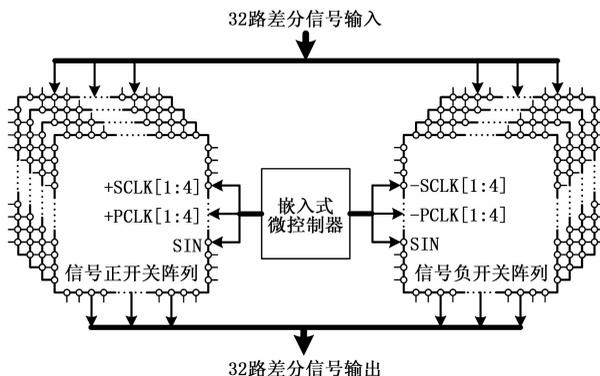


图 3 32 路差分信号开关矩阵级联方案示意图

为实现 $32\text{ 输入} \times 32\text{ 输出}$ 的多通道差分信号切换, 需要使用多片 AD75019 进行级联。首先将 32 路差分信号拆分为信号正极和信号负极各自独立配置, 然后使用 4 片 AD75019 进行级联以实现 32×32 的信号正极开关阵列, 同理可级联实现信号负极开关阵列, 最后由微控制器根据用户指令分别对 8 片 AD75019 的开关状态进行控制, 再将差分信号正负极对应合并后完成 32 路信号的切换, 交叉开关矩阵阵列的级联方案示意图如图 3 所示。可以看到, 在硬件设计过程中为减少微控制器输出引脚的消耗, 对 SIN 控制线进行了复用。

1.3 触摸式液晶屏

本设备在操作面板上嵌入了一块 3.5 寸的触摸式液晶屏作为与用户交互的窗口, 该屏幕提前将各显示控件封装在底层驱动中, 微控制器通过串口即可与之进行通讯。控制器通过发送相应指令可切换触摸屏显示页面或者改变某个组件的属性, 同时触摸屏也可通过串口通知控制器用户当前对显示界面执行了什么操作。这种交互方式既减少了实体按键所占的面板尺寸, 同时也使得设备的操作方式更简单、直观, 可大幅提升用户体验^[8]。

1.4 嵌入式微控制器

作为整台设备的控制调度中心, 微控制器选用了 TI 公司基于铁电存储器 (FRAM) 的 MSP430FR5969。该产品包含 5 个 16 位计时器和 3 个增强型串行通信接口 (eUSI), 且通用输入/出引脚最多为 40 个, 十分适用于本设备控制时序繁杂、外接芯片连接端口较多的情况。

同时, 由于使用了更为先进的存储单元, FR5969 相较于传统的闪存器件, 它具有更快的写入速度和更低的功耗。

搭配经优化的超低功率模式，微控制器在工作状态下电流消耗仅为 100 μ A/MHz，这有力提升了切换设备的续航能力。

1.5 高密度输入/出接口

若各信号输入/出均使用传统的 BNC 接头进行单通路连接，则 32 通道接头所占的操作面板尺寸不小于 200 mm \times 200 mm，且设备内部走线繁琐、复杂，需要留有充足的线缆空间，不利于产品的小型化设计。因此，本设备选用了 Amphenol 公司生产的 INFINITY 系列高密度接插件作为信号输入/出接口，该接插件在 12 mm \times 30 mm 的截面尺寸下即能够容纳 8 通道差分信号，4 个 INFINITY 接插件占据的面板尺寸不超过 15 mm \times 140 mm，同时该部件使用板载焊接的方式直接接入控制电路，这进一步减小了设备尺寸，也降低了电路装配的复杂度。

经过关键元器件选型、PCB 设计布线、电路装配和外壳加工等工序后，完成了多通道信号切换设备的硬件研制。该设备具有以下特点：

1) 通过选用高度集成的开关矩阵芯片和高密度输入/出接口，一方面大幅减少了设备体积和重量（最终产品的外形尺寸为 255 mm \times 235 mm \times 130 mm，含充电电池整机重量约为 2.68 kg），提高了产品的便携性；另一方面也减少了内部元器件数量和电路布线的工作量，增加了产品的可靠性和可维护性。

2) 使用正负极双轨电源对开关矩阵芯片进行供电，有效提高了设备对不同输入信号的兼容性。同时内外部双电源的供电模式也增强了设备的工作可靠性和场景适应性。

3) 通过液晶屏交互、微控制器控制开关矩阵阵列的方式实现了最多 32 路输入至 32 路输出通道之间任意组合的连接和切换，且每次用户配置完成后的通道切换响应时间小于 100 ms，具有操作便捷、切换响应快速的特点。

产品实物如图 4 所示。

2 设备软件设计

2.1 嵌入式软件设计

嵌入式软件用于指导微控制器完成与各硬件模块之间的数据交换和 workflow 切换。它主要是由系统初始化及引导程序和指令接收中断服务程序两部分组成。各部分程序流程图如图 5 所示。

系统初始化和引导程序在多通道信号切换设备上电后，首先对嵌入式微控制器进行系统时钟



图 4 多通道信号切换设备实物照片

选择、芯片引脚分配、通讯接口和 ADC 外设功能配置。然后对交叉开关矩阵进行初始化，使芯片内所有开关均处于断开状态，这样能避免因为上电后各通道连接状态不确定，导致外接设备损坏的现象。接着通过与触摸式液晶屏进行握手通讯，以验证该组件连接是否正常。若连接失败，则控制设备故障灯闪烁对用户进行提示；若连接成功则按照默认设置对触摸屏进行参数配置以完成设备初始化。最后，开启微控制器通讯中断并使能触摸式液晶屏通讯端口后，进入低功耗待机模式，等待外部中断的唤醒。

当触摸式液晶屏检测到有用户指令下发时，会产生中断信号触发微控制器进入指令接收中断服务程序。程序首先会唤醒微控制器从待机模式进入工作模式。然后计算指令段中的校验位以判断指令接收是否正确，若未正确接收到指令，则向触摸屏回复“设置失败”信息；若正确接收到指令，则按照编码协议将指令解析成设备各通道连接状

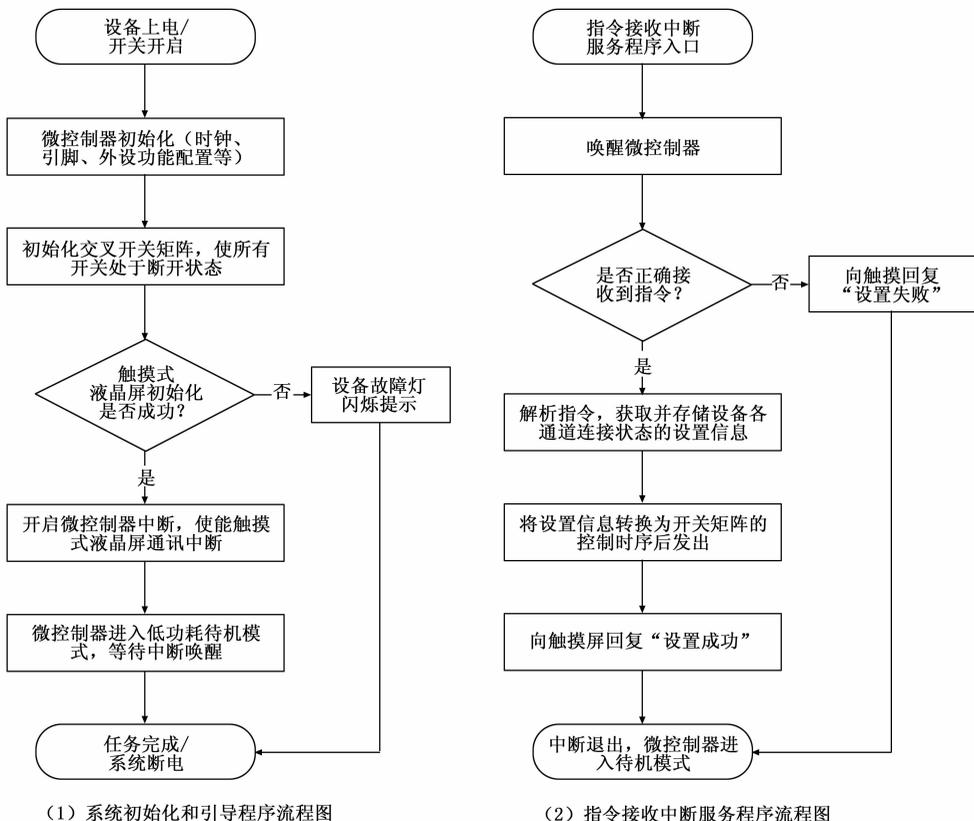


图 5 嵌入式软件流程图

态的设置信息, 再将设置信息转换为交叉开关矩阵的控制时序后发出, 同时向触摸屏回复“设置成功”信息。最后在指令执行完成后, 微控制器会退出中断服务程序进入待机模式, 等待下次指令接收事件的触发^[9]。

2.2 触摸屏软件设计

由于触摸屏上的各显示控件均封装在底层驱动中, 因此需要提前使用电脑主机将设计完成的图标和界面下载至触摸屏驱动中, 信号通道配置主界面如图 6 所示。其中, 列表的输出行为固定数值, 代表输出通道号; 输入行内数值可由用户配置, 代表需要连接的输入通道号; “上/下一页”按钮用于切换设置页面; “确定”按钮负责将用户配置完成的通道连接信息按照规定协议封装后, 下发至微控制器; “清空”按钮则能快速重置配置列表, 方便用户更改设置。



图 6 多路信号切换设备触摸屏显示界面

用户通过写入不同输出通道对应的输入通道号, 并点击“确定”下发配置参数, 即可实现信号通道的在线配置和切换。在使用过程中, 除了不允许存在多路输入连通至同一路输出的情况之外, 输入/输出一一对应、一路输入对应多路输出 (如图中 4 和 19 号输出均连接了 1 号输入) 以及部分输出无连接 (23、29 等输出未配置, 内部断开) 等状态均可实现切换^[10]。

2.3 开关矩阵阵列控制算法设计

AD75019 型开关矩阵的控制时序如图 7 所示, 在 PCLK 控制线为高电平时, 芯片处于开关设置状态, 该状态下每当 SCLK 变更为高电平时, SIN 控制线上的电平代表了一个模拟开关的开断状态, 当前设置的开关序号随着 SCLK 的周期变化依次递减。当芯片内 256 个模拟开关的动作设置完成后, PCLK 控制线会发出一个低脉冲用于锁存所有开关的配置信息, 至此单片开关矩阵的配置工作结束。

对于由多片 AD75019 组成的开关矩阵阵列, 具体的控制流程如图 8 所示。微控制器在接收到用户的配置指令后, 会根据协议将指令解析为输入/出通道的连接关系表, 然后

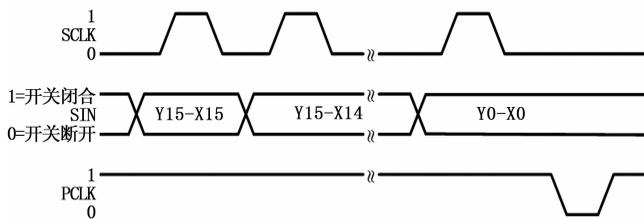


图 7 AD75019 开关矩阵控制时序图

依次检测表中是否有需要打通的连接关系未完成开关切换。若存在未完成的连通工作, 则分别根据输入和输出通道号的大小范围 (按照两两分区的原则, 每 16 个通道为一组) 确定需要切换的模拟开关所在的芯片编号 (括号内编号对应信号负极所在芯片), 再按照具体的通道号检索出需要闭合的模拟开关位置, 并在对应的控制矩阵中置 1。这样就能够将输入/出通道的连接关系映射为各开关矩阵的控制矩阵, 最后再根据 AD75019 的控制时序依次刷新各开关矩阵的配置状态, 从而完成整个阵列的开关状态变更。

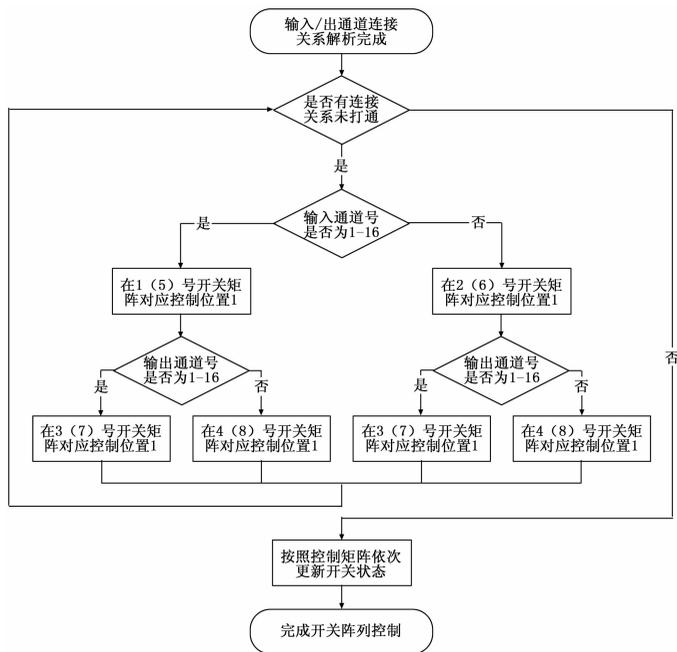


图 8 开关矩阵阵列控制算法流程图

3 试验结果与分析

3.1 试验方法

多点激振试验系统是全尺寸火箭动特性试验系统中重要的子系统, 它主要由信号控制系统、功率放大器、激振器和力传感器等部件组成。在全尺寸动特性试验过程中, 最多需要使用 8 路控制信号与 20 台功率放大器进行连接, 以驱动对应的激振器完成振型控制。由于这个不对等的数量关系, 使得试验在准备过程中, 要先在 20 余根功率放大器的输入信号线中找到本次使用的那部分线缆, 然后再与信号控制系统输出端明确对应连通关系, 最后将输入/出信号线进行连接以完成试验准备^[11-12]。

为验证多通道信号切换设备的功能完整性和工作性能，在多点激振试验系统的信号控制系统与功率放大器之间接入本切换设备，这样通道之间的随机配置关系可直接利用设备内部的开关矩阵阵列实现，无需再进行信号线的插拔工作。试验系统连接示意图如图 9 所示。

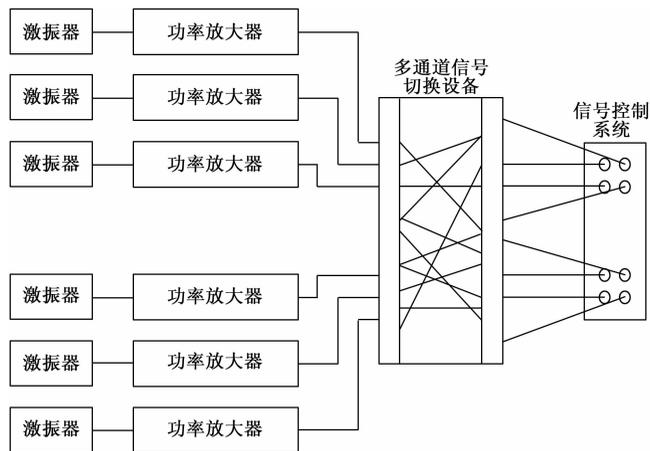


图 9 试验系统连接示意图

然后分别对原有多点激振系统的输入/出通道配置效率，以及增加本设备后的系统通道配置效率进行了测试，试验验证现场照片如图 10 所示。

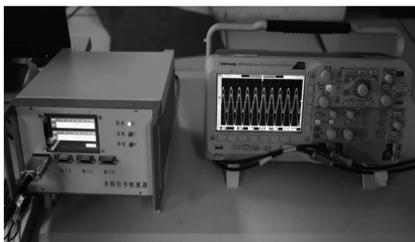


图 10 试验验证现场照片

3.2 试验结果

测试详情见表 1。

表 1 多点激振系统通道配置效率对比测试结果表

项目	原有多点激振系统	增加切换设备的激振系统
控制通道数(通道)	8	8
激振器数量/台	20	20
系统准备时间/分	4	5
第 1 次连通用时/秒	60	40
第 2 次连通用时/秒	75	40
第 3 次连通用时/秒	90	40
第 4 次连通用时/秒	120	40
第 5 次连通用时/秒	150	40
配置正确率/%	99	100

从表 1 中可以看出，原有多点激振系统通道配置所需时间随着通道配置方案调整次数的增加而逐渐增加，其主要原因是寻找目标激振器对应信号线用时较长，同时进行

多次配置操作后各信号线逐渐缠绕在一起，导致信号线的长度逐渐影响到通道配置实施，需停下来进行线缆的整理。两个方案均具有相当的准确率，但是原有多点激振系统通道配置时还是出现了一次配置错误的情况，错误原因是线缆编号近似（如 6 和 9 等）。综上所述，增加了信号切换设备的多点激振系统具有显著的配置效率和可靠性优势。

4 结束语

本设计基于高度集成的模拟开关矩阵芯片，研制出一款 32 输入至 32 输出通道之间可任意连通的信号切换设备。该设备提供了一种经济便捷的信号传输通道随机配置的解决方案，避免了多通道信号系统中整理线缆和插拔接口的工作，相较于传统的信号切换方法，使用本设备后的信道连通效率更高、配对的可靠性也更强。同时，由于在设计过程中引入了高密度接插件、双电源供电以及触摸式液晶屏交互等功能模块，使得该设备体积小、重量轻、操作方便，具有很强的便携性、通用性和灵活性。

参考文献:

- [1] WISNIEWSKI R, BAZYDLO G, SZCZESNIAK P. Low-Cost FPGA Hardware Implementation of Matrix Converter Switch Control [J]. Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2019 (66): 1177 - 1181.
- [2] ORLET J L, MURDOCK G L. NxTest augments legacy military ATE [J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2002 (17): 17 - 20.
- [3] 许文先, 余学才, 吴云峰. 模拟开关矩阵 MT8808 的性能及其应用 [J]. 微处理机, 2007 (1): 13 - 15.
- [4] 刘志远, 祖先锋, 周晓东. 继电器开关矩阵在导弹测试系统中的应用研究 [J]. 电子器件, 2006, 29 (3): 733 - 737.
- [5] 张莉莉, 蔡惠华, 李玉华, 等. 基于多路数据采集系统的继电器开关矩阵检测研究 [J]. 宇航计测技术, 2014, 34 (4): 57 - 61.
- [6] TONY ARMSTRONG. 应急 eCall—召之即来! [J]. 电子产品世界, 2017 (4): 78 - 79.
- [7] ANALOG DEVICE INC. 16 × 16 Crosspoint Switch Array AD75019 Datasheet [Z]. 1999.
- [8] 龙柄全, 王军民. 串口触摸屏在电法测井数值模拟中的应用 [J]. 液晶与显示, 2017, 32 (10): 809 - 814.
- [9] 龚靖傑, 邓 哲, 张玉玺, 等. 基于近场通讯的低功耗运输状态监测仪设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (4): 275 - 278.
- [10] 邓 哲, 龚靖傑, 张玉玺, 等. 基于 MSP430 的全箭模态试验信号通路控制器的研制 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (8): 112 - 115.
- [11] 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 (2): 1 - 9.
- [12] 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 (5): 531 - 570.