

# MiniLed 测试系统 (SLED100) 需求

**武汉普赛斯仪表技术有限公司**

**声明：**本文件所有权和解释权归武汉普赛斯仪表技术有限公司所有，未经武汉普赛斯仪表技术有限公司书面许可，不得复制或向第三方公开。

## 修订历史记录

版次	发布日期	AMD	修订者	说明
v1.0	2021.05.31	首次发行	彭鹏	
v1.1	2021.06.07	M	彭鹏	补充 低成本方案

(A-添加, M-修改, D-删除)

## 目录

1. 概述.....	4
2. 测试项.....	4
3. 原型验证.....	5
4. 整机结构.....	5
5. 子板.....	6
5.1 电路模型.....	6
5.2 量程.....	6
5.3 时序模型.....	7
5.3.1 采样率与 NPLC.....	8
5.4 触发.....	8
5.4.1 触发输入.....	8
5.4.2 触发输出.....	9
5.5 子板框图.....	9
5.6 职责划分.....	9
6. 控制板.....	11
6.1 控制板框图.....	11
6.2 数据通信口.....	11
6.2.1 整机通信.....	11
6.2.2 内部通信.....	11
6.3 共阴/阳配置矩阵.....	12
6.4 采样.....	13
6.4.1 前光电流.....	13
6.4.2 高速电压采样.....	13
6.4.3 触发.....	13
6.5 触发矩阵模块.....	14
6.6 职责划分.....	14
7. 配套功能.....	15
7.1 职责划分.....	错误!未定义书签。
8. 上位机.....	16
8.1 职责划分.....	错误!未定义书签。

## 1. 概述

为明确 MiniLed 测试系统 (SLED100) 产品<sup>1</sup>需求, 帮助研发同事明确工作重点, 特制定本文档。

SLED100 的规格, 请参考《MiniLed 测试系统 (SLED100) 规格书》;

从 SCPI 指令集的角度介绍 SLED100, 请参考《MiniLed 测试系统 (SLED100) 编程手册》;

SLED100 无触屏;

从 PC 上位机的角度介绍 SLED100, 请参考《普赛斯仪表上位机工具手册》。

MiniLed 测试系统 (MiniLedx00) 的测试项有 7 个, 1-4 项测试需基于我司 S300 修改软件做原型样机测试, 评估测试速度。下面从测试项开始介绍需求。

## 2. 测试项

MiniLed 测试系统需要的测试项有 7 个:

1.  $V_F$ : 正向电压, 两个给定正向电流  $I_{F1}$ 、 $I_{F2}$  测量对应的正向电压  $V_{F1}$ 、 $V_{F2}$
2.  $V_Z$ : 反向击穿电压, 给定反向电流  $I_Z$  测量对应的反向电压  $V_Z$
3.  $I_R$ : 反向泄漏电流, 给定反向电压  $V_R$  测量对应的反向电流  $I_R$ , 反向电压一般为 5V
4. 光功率及光谱: 给定正向电流, 测量 光功率、峰值波长、中心波长、半波长
5. DVF: 材料热缩效应。给定正向电流  $I_{DVF1}$  测电压  $V_{DVF1}$ ; 给定较大正向电流  $I_{DVF2}$  并维持一定时间  $T_{DVF}$ ; 给定正向电流  $I_{DVF1}$  测电压  $V_{DVF2}$ , 计算电压差  $V_{DVF}$
6. VFD: 正向电压暂态峰值电压。给定正向电流  $I_{VFD}$ , 至少 2M/s 采用率采样正向电压, 计算尖峰电压与正常电压的差值, 即为  $V_{VFD}$ 。
7. VI 扫描: 给定扫描起点/终点电压, 执行 1000 点内线性扫描, 输出 VI 特性曲线。

这些测试项中, 1-4 为必测项, 5-7 为可选测试项。

<sup>1</sup> 简称 SLED100

### 3. 原型验证

原型验证需完成 1-4 项测试，可使用 S300 作硬件平台。图 1 是 MiniLed 原型验证框图。

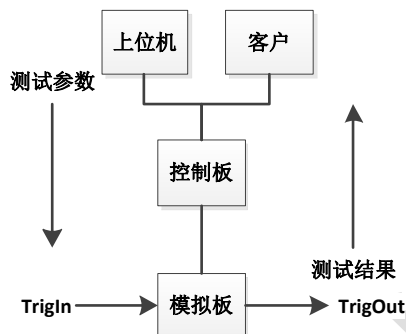


图 1 原型样机测试流程

S300 的速率瓶颈为内部总线，为了减小通信带宽对测试速度的影响，MiniLed 的测试项数据一次性传输。模拟板内部实现 1-4 的测试项，验证速度。

软件模拟板配合硬件同事实现：

- 给出单轮 1-4 项测试的时间；
- 重复 50 次测试，给出一致性数据。

### 4. 整机结构

SLED100 的整机结构如图 2：

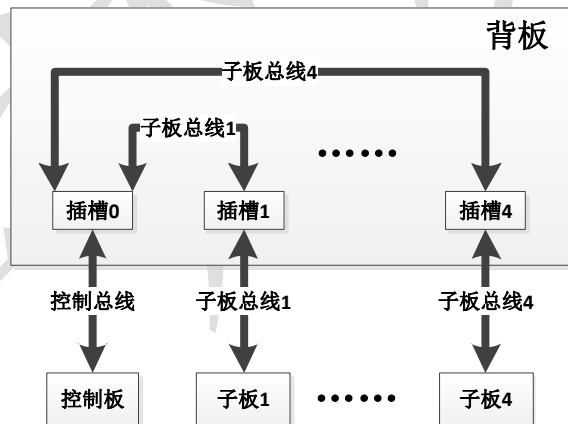


图 2 整机结构

SLED100 由三部分组成，分别为：

- 背板  
连接器和布线
- 子板  
实现单通道 SMU，采用插卡式的 STM32F407 方案
- 控制板

实现整机指令解析转发、实现与机械部分的交互、高速电压采样、前光电流采样、8\*8 开关矩阵。

背板仅有连接器和布线用于控制板和子板互联，不做进一步分析。子板采用 STM32F407 方案，现描述子板的需求。

## 5. 子板

SLED100 中的每个子板为单通道 SMU, 现从 SMU 电路模型着手描述子板需求。

### 5.1 电路模型

电路模型是源表模拟电路的简化, 可描述电路对固件<sup>2</sup>提供的接口。直流源表的控制模型如图 3:

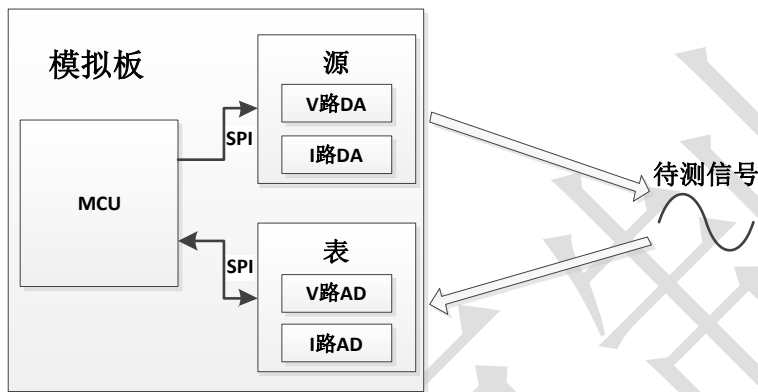


图 3 直流模型

图 1 是直流源表的控制模型。固件通过控制 V/I 路的 DA 实现源(输出)功能, 通过控制 V/I 路的 AD 实现表(测量)功能。因为直流源表 DA 和 AD 速度不高, 所以 DA/AD 芯片的接口使用 SPI 足够。

### 5.2 量程

因为 AD 芯片有位数限制<sup>3</sup>, 所以源表的相对精度<sup>4</sup>固定。而绝对精度等于量程与相对精度之积, 所以大量程的绝对精度低, 小量程的测量范围小。为解决测量范围与绝对精度的矛盾, 源表设计多个量程, 小量程提供高精度, 大量程提供大测量范围。量程的功能模型如图 4:

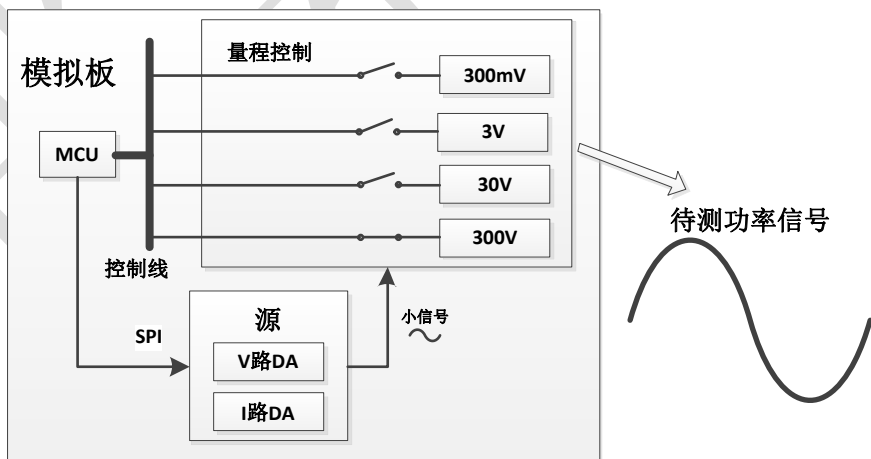


图 4 量程模型

如图 4, MCU 使用控制线控制量程电路, DA 输出的小信号通过量程电路后变

<sup>2</sup> 固件为设备内的控制逻辑, 包括设备软件和 FPGA 实现的控制逻辑

<sup>3</sup> 当前 AD/DA 为 16bit 或以下

<sup>4</sup> 分辨率与精度类似, 精度由 AD 位数决定, 分辨率由 DA 位数决定

换为功率信号，给待测设备供电。量程的控制逻辑很简单，实现的要点有两个：

- 数据转换

DA/AD 处理的模拟信号固定为 2.5V 以内。不同量程的源、表数值有不同的转换关系，目前固件中使用 C 语言数组表示这种转换关系，输出和采样时，通过软件计算完成数据转换。

- 过/欠冲

如图 4，因为量程控制电路中有继电器的存在，所以量程切换时输出的信号会有过/欠冲，这类过/欠冲会损毁敏感器件，为消除这些过欠冲，量程切换的固件需要控制 DA、缓升缓降(AD5318)、继电器的时序，抵消过/欠冲。

### 5.3 时序模型

时序模型决定了源表的速度(采样率)和精度，所以固件研发同事要深刻理解时序模型，从而具备优化源表的性能的能力。除此以外，源表功能围绕时序模型展开，扩充或删减时序模型结构能实现功能扩展。下面从直流时序开始分析源表的时序模型。源表时序模型包括以下 3 个步骤, 简称 SDM<sup>5</sup>: S(Source 源)、D(Delay 延迟)、M(Measure 测量)：

- 源：

给测试电路供电；

- 延迟：

等待测试电路稳定，保证测量电压/电流的精度

- 表：

测量电压/电流值。

源表时序模型如图 5：

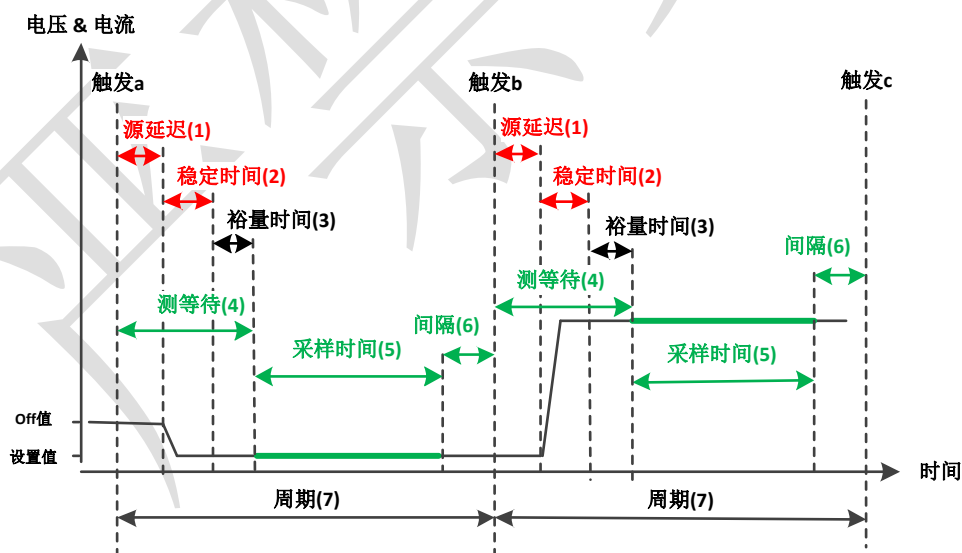


图 5 直流时序模型

图 5 中参数含义：

1. 源延迟：触发时刻至模拟电路启动动作时刻间的间隔；
2. 稳定时间：表示模拟电路开始动作时刻至测试电路稳定时刻间的间隔；
3. 裕量时间：测试电路电气参数稳定时刻至开始测量采样时刻间的间隔；

<sup>5</sup> 后文统一使用 SDM 术语

4. 测等待：触发时刻至开始测量采样的时刻，必须大于源延迟与稳定时间之和(保证裕量时间大于 0)；
5. 采样时间：AD 芯片的采样保持时间，即 NPLC；
6. 测试间隔：上一次测量采样结束至下一触发到达间的间隔，必须大于等于 0；
7. 周期：相邻触发信号间的间隔，SDM 的周期；

源延迟和稳定时间，固件不能控制，正常情况下较小。源延迟与触发方式相关，稳定时间由模拟电路和待测电路共同决定。固件需实现测试方案，能够测出源延迟和稳定时间的最大、最小、典型值。单卡可以设置测等待、采样时间、间隔三个参数。测等待用于等待电路进入稳定状态、采样时间(即 NPLC)用于 AD 芯片采样待测数据、间隔控制 SDM 周期。

SDM 配置信息可来源与生产调试时录入，也可以使用固件提供的默认值。默认值方便新手用户快速使用。固件提供 SDM 配置接口，让我司有平衡源表的精度和速度的手段。设置 SDM 配置时，信息的传递流程为：上位机(或 SCPI 指令集)将 SDM 的参数信息传递给固件、固件将参数信息传递到模拟电路实现配置，完成 SDM 配置后，触发信号启动 SDM。图 5 绘制了连续两次 SDM 的时序图。图 5 是标准的时序模型，为优化性能 SDM 周期可以不执行源(输出)或表(测量)的过程，固件需提供设置接口。

### 5.3.1 采样率与 NPLC

采样时间(即 NPLC)越高，精度越高，但速度(采样率)越低。

NPLC 近似等于 SDM 周期，SDM 周期与采样率互为倒数，故 NPLC 和采样率近似互为倒数。

大 NPLC 可让 AD 做多次采样并执行滤波去噪，优化精度。为了提高精度，SDM 中 NPLC 取值为毫秒级，SDM 中其他时间为微秒级。

## 5.4 触发

触发功能的结构如图 6，包括触发输入和触发输出两类：

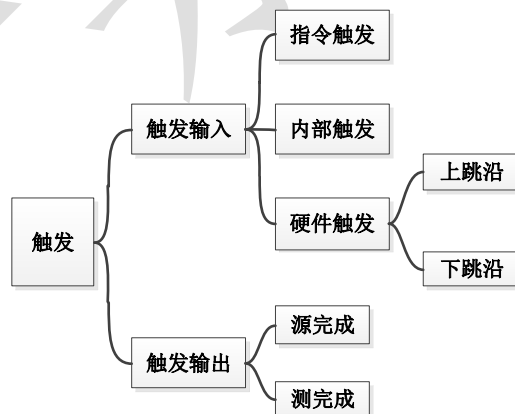


图 6 触发

下面结合图 6 分析触发功能。

### 5.4.1 触发输入

图 3 和图 5 中的触发是触发输入，用于启动 SDM。触发输入按照触发源分为三种：指令触发、内部触发、硬件触发。



指令触发通过 SCPI 指令启动 SDM，由于指令需经过通信链路(串口、GPIB、网口)传递,所以其源延迟较大且与通信链路相关(不稳定)。但指令触发可编程，灵活性强。

内部触发由设备内部自己生成，通常由模拟板 MCU 软件或 FPGA 逻辑生成。一般当源表工作在 VI 扫描或时域扫描时使用。完成前一个 SDM 后，设备自动生成触发信号，启动下一个 SDM。

硬件触发由引入模拟板 MCU 或 FPGA 逻辑的物理线实现。硬件触发可以使源延迟最小(纳秒以内)，通常用于多台设备间的同步。其他厂家仪表的硬件触发信号不固定。为了扩大源表应用场景，能与更多仪表相互触发，固件需要实现触发方式的设置并提供接口，主要包括上跳沿和下跳沿两种方式可设置。

#### 5.4.2 触发输出

触发输出配合下级仪表的硬件触发(触发输入)，可以实现多台仪表(或多通道)之间的精确(纳秒内延迟)同步。触发输出的关键是输出触发信号时刻的定义，目前源表使用 2 个触发输出时刻：

源(输出)完成：测试电路供电稳定时刻，通常是 DA 输出后延迟一段时间的时刻；

表(测量)完成：测量采样完成时刻，通常在本次 SDM 的测量完成时刻。

### 5.5 子板框图

前文以 SMU 模型角度描述了子板 SMU 的功能需求。除了实现 SMU 需求外，子板还需要实现一些辅助功能，现结合子板框图图 8 描述。

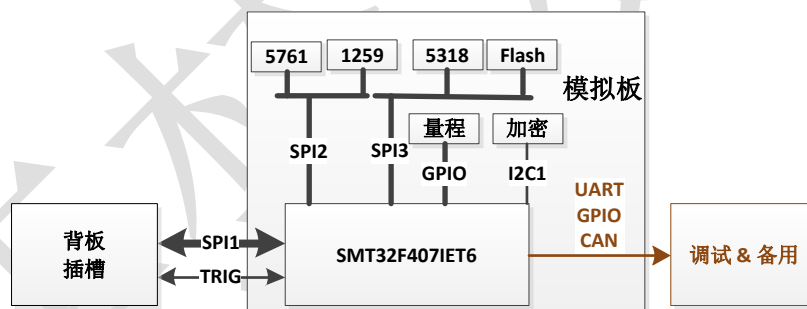


图 8 子板框图

子板总线包括三部分：SPI 用于数据通信、TRIG 使用 6 根 IO 口用于触发、CH\_PN 为 SMU 通道的两个测试端口，用于支持共阴和共阳。

子板内部 AD 使用 ADS1259, DA 使用 AD5761, 他们接到 SPI2。AD5318 用于量程切换时的缓升缓降、Flash 预留，他们接到 SPI3。量程切换电路通过一组 GPIO 控制。加密芯片接入 I2C1，已经实现为 Keil 的 lib 库。

子板 STM32F407 预留 UART/GPIO/CAN 接口用于调试。

### 5.6 职责划分

子板软件(Mcu 固件)：

1. 设计并实现 SDM
2. 设计并实现量程切换
3. 设计并实现与控制板交互(PssBinV3)
4. 设计 SDM 时间参数的测试方案，为测试组提供测试指导手册

硬件：

1. 电路设计与调试
2. 设计 SDM 中源延迟、稳定时间、量程切换过充/欠冲的测试方案，为测试组提供测试指导手册

测试：

1. 已经测试指导手册，测试 SDM 时间参数
2. 出具 SDM 时间参数测试数据

## 6. 控制板

为实现低成本，SLED100 的控制板使用单 FPGA 作为主控。该控制板的硬件、软件、FPGA 部分都需新设计。下面从控制板框图着手介绍控制板需求。

### 6.1 控制板框图

控制板框图如图 9：

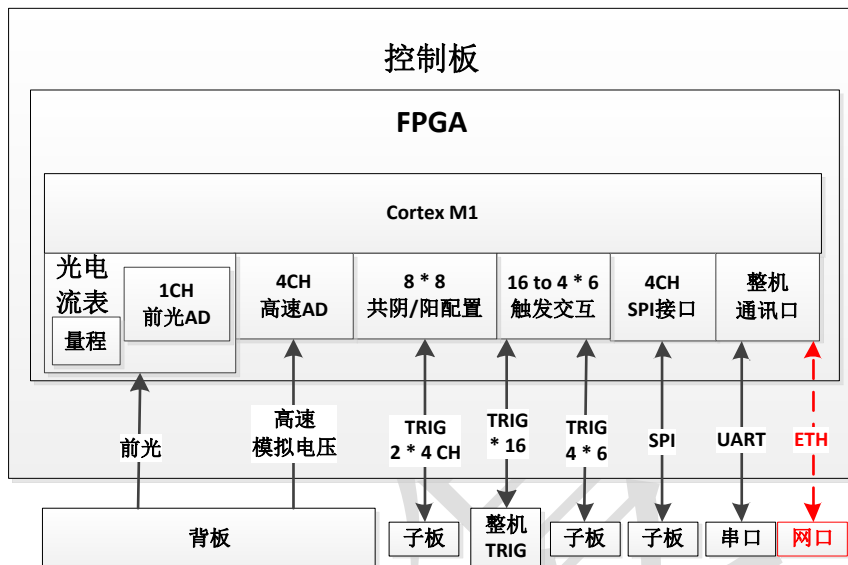


图 9 控制板框图

SLED100 项目的控制板实现的功能包括：整机通信口（串口优先，网口备选）、4 子板的 SPI 接口、4M 高速电压采样、前光电流采样、共阴/阳配置矩阵、触发矩阵模块。

### 6.2 数据通信口

数据通信口包括整机通信口和内部通信口。

#### 6.2.1 整机通信

整机通信口优先考虑串口，随着业务增加需扩展整机通信口带宽时可以设计实现网口。基于 FPGA 的 M1 核实现网口 FPGA 和软件有较大的工作量，故该工作不放在第一阶段。

#### 6.2.2 内部通信

整机内部采用 1 拖 4 的拓扑结构，4 个子板分别引出一路 SPI 接入控制板。子板中的 SPI 使用 STM32F407 的 SPI 外设，控制板中 FPGA 使用 M1 软核的 SPI 外设。SPI 的主从模式由 FPGA 和软件同事协商确定，数据格式可以采用当前的 PssBinV3 协议。

### 6.3 共阴/阳配置矩阵

通常 LED 的接线方式分为共阴或共阳，如图 10：

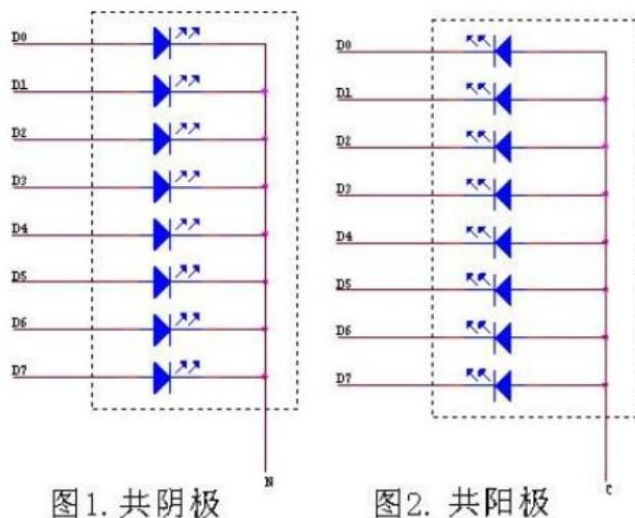


图1. 共阴极

图2. 共阳极

图 10 LED 接线图

SLED100 暂设计有 4 个通道<sup>6</sup>，可同时接入 4 路 LED，每路有正 (P)、负 (N) 两端口。所以使用  $8 \times 8$  的开关矩阵就可以实现任意的共阴/阳接线。图 11 是共阴/阳配置矩阵：

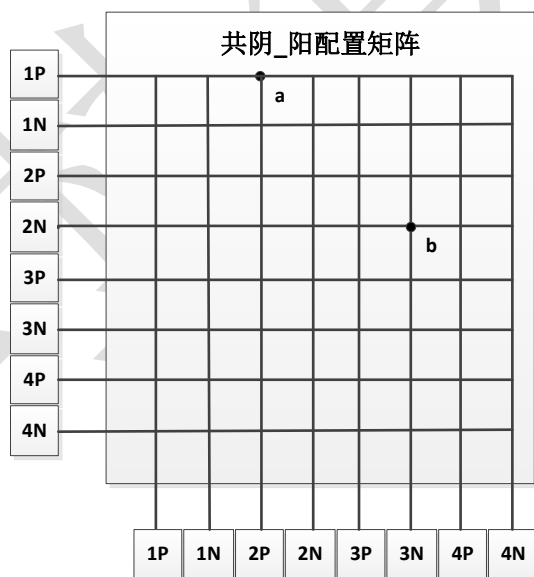


图 11 共阴/阳矩阵

图 11 中的矩阵配置表示：

- a. 1 通道和 2 通道共阳
- b. 2 通道和 3 通道共阴
- c. 4 通道独立

<sup>6</sup> 可能增删通道数，FPGA 和软件设计与通道数解耦

## 6.4 采样

为控制成本，部分采样功能在控制板中实现，子板复用它们，包括：前光电流、高速电压采样。

### 6.4.1 前光电流

用于控制前光电流的采样，可以复用 SDM 模型的代码，精简掉 SD 部分。直接由触发启动 M。

### 6.4.2 高速电压采样

本文第二章的 VFD 测试，需要实现高于 2M 的电压采样。控制板中实现 4 通道的高速采样支持该测试。本项测试需耗费较多的 FPGA 资源，建议 FPGA 同事实现前依据采样率、采样时长、通道数、FPGA 资源合适的 FIFO 容量。当然也可以将 DDR 调试稳定后，采用 DDR 缓存高速数据。

### 6.4.3 触发

控制板中的表(采样功能)需与子板中的源同步，采用触发即可实现同步功能。图 11 以光功率和光谱测试为例描述触发需求，VFD 测试也类似。

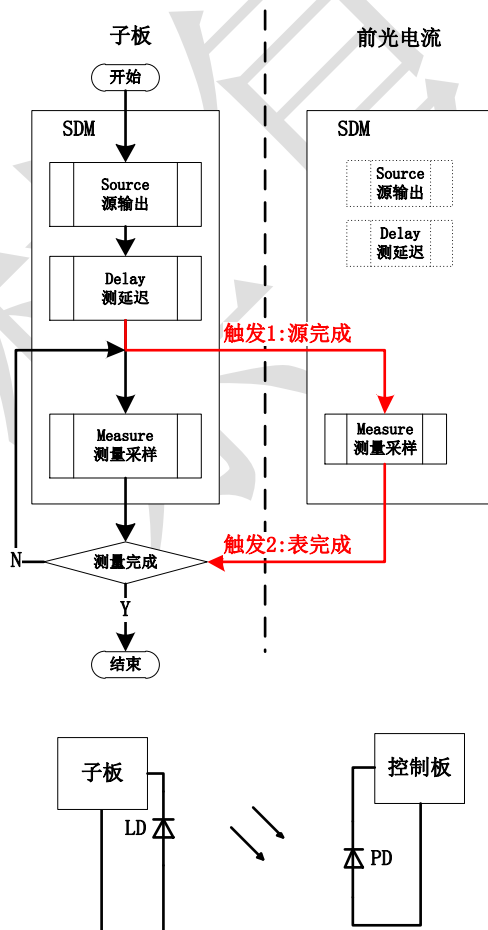


图 12 触发

如图 12，控制板对 LED 提供电流激励，控制板测量前光电流。图 12 用到了两种触发输出，触发 1(源完成)由子板通知控制板电路已稳定，可以开始测量前光电流；触发 2(表完成)由控制板通知子板光电流测量完成，可以启动后续操作。

## 6.5 触发矩阵模块

触发矩阵模块的框图如图 13:



图 13 触发矩阵

触发矩阵模块实现 SLED100 对外与机械部分的交互，机械部分可以通知 SLED100 启动 SDM 测试，SLED100 也可以通知机械部分测试已完成，可以进行后续操作，SLED100 与机械部分的接口为 8 对输入和输出。

触发矩阵模块与每块子板之间通过 6 个双向 GPIO 口实现触发功能，FPGA 和子板 STM32F407 要保证 GPIO 的方向可以动态配置。

第一阶段 FPGA 实现交换时，可以采样硬编码。后续阶段需要提供配置触发交换功能的寄存器接口，最终开放触发交换的配置。

## 6.6 职责划分

控制板软件 (Mcu 固件):

1. 设计并实现控制板业务
2. 移植 SCPI 解析器，并实现整机 SCPI 指令集
3. 移植 PssBinV3 协议
4. 协商 M1 核外设接口，并实现其驱动
5. 提供整机功能、性能测试细则

FPGA:

1. 实现 M1 运行环境
2. 设计并实现 M1 和外设并定义寄存器接口

硬件:

1. 电路设计与调试

测试:

1. 根据测试细则测试整机功能、性能

## 7. 配套功能

配套功能可以提升 SLED100 性能，扩大其应用范围，主要包括 2/4 线、提醒与保护功能。

### 7.1 2/4 线

若待测阻抗小，与引线阻抗在同一量级，使用 2 线测量，引线阻抗的分压将导致测出电压不准，使用 4 线测量可以解决该问题。2/4 线的接线如图 9：

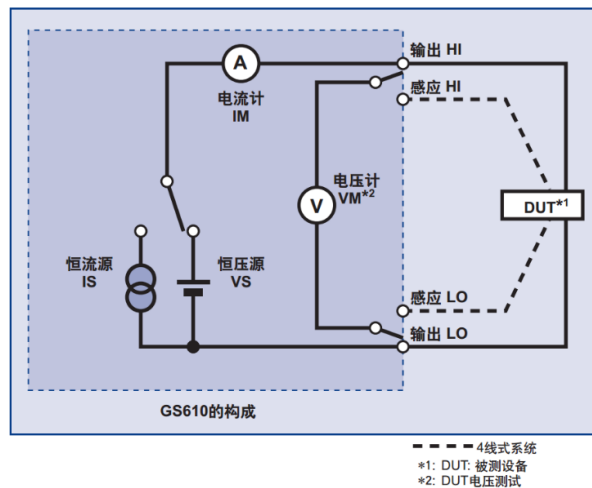


图 9 2/4 线测试接线图

这种情况下如图 9 接线，执行 4 线测量可消除引线误差。4 线测量时，电压表的阻抗无穷大，故流过引线的电流为零，电压表测出的电压值为准确 DUT 电压值，电流测试值不变，故测得阻抗精确值。

### 7.2 提醒与保护

客户在执行有风险的操作时，触屏软件和 SCPI 指令集给出提醒信息，避免客户的错误操作。例如以下场景：

1. 客户行 4 线测量，提醒先备好 4 线测量的接线；
2. 客户欲高压输出时，提醒客户保护好自己，避免触电。

### 7.3 生产配套

生产配套功能包括烧录和校准功能。

#### 7.3.1 烧录

当前 Px00 的版本烧录由软件提供文档，指导测试组同事烧录初始镜像，然后使用在线升级功能将设备内部软件升级到对应出货版本。上位机软件适时切入，争取能实现自动化烧录和数据库记录功能。

#### 7.3.2 校准

生产烧录完成后，软件同事提供校准程序，实现每台机器的生产校准保证精度。上位机软件适时切入，争取能实现校准数据库记录功能。

### 7.4 系统功能

系统功能包括通信接口设置，在线升级，恢复出厂设置，调试诊断功能。

#### 7.4.1 通信设置



Px00 对外提供 SCPI 接口可以使用：串口、GPIB、网口三种物理链路。通信设置功能未用户提供通信链路参数的设计功能，主要包括：串口波特率、GPIB 地址、网口 IP 地址、网关、掩码等。

#### 7.4.2 在线升级

为了减小工程维护开销，Px00 需实现在线升级功能，使出货后的设备(在客户处)有新增功能和修复问题的能力。当前 Px00 已经实现控制板软件和模拟板软件的在线升级功能，下一步需实现 FPGA 比特文件的在线升级。

#### 7.4.3 恢复出厂设置

客户使用 Px00 的过程中，可能回将 Px00 的工作模式配乱，而自己也不记得。恢复出厂功能可以将 Px00 一键设置回出厂模式，保证客户可以将设备恢复到一个已知状态。

#### 7.4.4 调试诊断

客户的应用行业和场景十分丰富，部分使用方式或隐藏缺陷在研发阶段无法完全预知。调试诊断功能用于帮助处理售后问题时，有一个“黑匣子”可以查阅监控。该功能主要包括时间、日志、版本信息记录等三个子功能。

- 日志：显示异常时，Px00 的运行记录
- 版本信息：显示异常的 Px00 软硬件版本

#### 7.4.5 定期锁定

部分客户有先发货，后付款的要求。为了避免此类客户由各种原因，出现发货后不付款的情况，Px00 实现了定期(60 天)自动禁用的功能。

### 7.5 职责划分

硬件负责实现：2/4 线测量、提醒与保护，生产烧录校准功能由上位机同事负责，其他功能都有控制板软件负责实现。

## 8. 上位机

上位机分为两层，下层为 DLL 库，封装通讯口和 SCPI 指令；上层实现测试业务。下层由我司上位机组(C++)实现，上层我司提供一个可供校准和调试(功能、性能、稳定性)的工具即可。SLED100 实际使用时，上层软件由客户编程，我司仅提供 DLL 即可。