

doi: 10.7690/bgzdh.2023.07.006

# 弹载存储装置内触发电路的设计与实现

申晓敏, 钱礼华, 党峰, 杜剑英, 陈亚奇

(中国兵器工业试验测试研究院技术中心, 陕西 华阴 714200)

**摘要:** 针对弹载存储测试装置特殊的应用环境特点和内部触发的需求, 提出一种以含零频的加速度计 ADXL78 和高速电压比较器 LM311 为核心的内触发电路设计方法。设计实现了触发电路模块, 经过实验室静态检测和动态检测等相关验证及试验应用。结果表明: 该触发电路设计各项指标符合要求, 触发阈值灵活可调, 能稳定、可靠地触发弹载存储测试装置, 可为弹载存储测试装置的工程化应用提供必要的触发保证。

**关键词:** 内触发; ADXL78; LM311

**中图分类号:** TJ06 **文献标志码:** A

## Design and Implementation of Trigger Circuit in Missile Borne Storage Device

Shen Xiaomin, Qian Lihua, Dang Feng, Du Jianying, Chen Yaqi

(Technology Center, China Ordnance Industry Test and Inspection Institute, Huayin 714200, China)

**Abstract:** According to the special application environment characteristics of missile borne storage test device and the requirements of internal trigger, a design method of internal trigger circuit is proposed, which takes the accelerometer ADXL78 with zero frequency and the high-speed voltage comparator LM311 as the core. The trigger circuit module is designed and implemented, which has been verified and applied by static detection and dynamic detection in the laboratory. The results show that the trigger circuit meets the requirements, the trigger threshold is flexible and adjustable, it can trigger the missile borne storage test device stably and reliably, and it can provide the necessary trigger guarantee for the engineering application of the missile borne storage test device.

**Keywords:** internal trigger; ADXL78; LM311

## 0 引言

弹载存储测试是获取弹丸在发射、飞行或撞击硬物过程中工作状态及工况信息的重要手段。弹载存储装置是获取发射、碰撞过程中动态参数的重要工具。根据高过载环境下测试的特点, 安装空间狭小、过载大、一次性使用<sup>[1-7]</sup>, 其触发的可靠性是关系数据能否有效获取, 影响试验成败的关键因素, 进一步关系到测试数据的准确性以及后期的设计研发<sup>[8]</sup>。其触发电路的设计准确性、冗余性、可靠性、环境适应性尤为重要, 要求具有体积小、功耗低、抗干扰性强等特点<sup>[9]</sup>。触发电路触发方式主要有内触发和外触发 2 种, 根据触发对象和用途的不同可进一步细分为: 断(通)靶触发、TTL 电平触发、负延时触发等。负延时触发方式因其主要为软件触发, 在高过载的动态情况下存在稳定性不高、所测数据单一、测试电路集成度不高和数据易丢失等问题<sup>[10]</sup>。断(通)靶触发方式易受外界复杂电磁信号的干扰<sup>[11-13]</sup>, 容易产生误触发信号, 导致提前、推后触发或连续多次触发, 造成测试数据不完整、缺失

或产生无效数据。弹载存储测试装置安装于试验弹内部, 无法通过外部接口提供 TTL 触发电平触发, 也不能通过连接断靶线的方式实现触发, 只能通过其内部电路进行触发。针对以上问题, 笔者提出一种基于加速度计 ADXL78 和高速电压比较器 LM311 为核心的触发电路设计方法, 设计弹载存储测试装置的内触发电路, 根据试验相关技术要求, 通过预置触发电平的方式设计实现, 触发阈值灵活可选, 保证稳定、可靠的触发弹载存储测试装置。

## 1 电路设计

### 1.1 设计原理

弹载存储测试装置安装在试验弹内部, 其触发须采用内触发方式且应具有较高的触发可靠性。针对其特殊的应用要求, 结合实际炮弹发射的条件, 设计以加速度计和高速电压比较器为核心的可预置触发电平的内触发电路。

该内触发电路设计的核心是通过预置触发电平, 在炮弹发射、撞击或加速运动时加速度计感应

收稿日期: 2023-03-18; 修回日期: 2023-04-20

作者简介: 申晓敏(1983—), 女, 陕西人, 副研究员, 从事武器系统靶场试验与测试技术研究。E-mail: 523203638@qq.com。

到发射、撞击或运动过载，其输出的电压量与预置触发电平相比较，经比较器比较判断、整形输出触发所需信号<sup>[14-16]</sup>。当加速度计未受扰动，输出电平低于预置触发电平时，比较器输出低电平；当炮弹发射、撞击或运动时，加速度计受振动输出的电压量高于预置触发电平，经比较器判断、整形，滤除杂波信号，实现输出高电平信号。最后，根据触发所需的电平要求，还可选择反相器，以满足触发条件。触发电路输出的触发电平信号将启动弹载存储测试装置工作。

### 1.2 器件选型

根据触发电路应具有体积小、功耗低、抗干扰性强等特点，本触发电路以含零频的加速度计 ADXL78 和比较器 LM311 为核心进行设计。

#### 1.2.1 加速度计的选型

根据加速度计在电路中的作用，选择电压型加速度计更方便于电路的设计，无需信号调理电路设计，外围电路少，体积小，功耗低；因此，选择单片集成加速度计 ADXL78。

##### 1) ADXL78 介绍。

单片集成加速度计 ADXL78 主要特点是体积小、方向性好、精度高、时漂与温漂小；在+5 V 单电源下工作，使用方便，所需外围元器件少；可靠性很高，在通电时可以承受 250 g 的加速度冲击，不加电时可以承受 4 000 g 的加速度冲击而不致损坏。因此，它特别适于在恶劣的工业环境和测试系统中工作。ADXL78 是一个完整的加速度测量系统，它将一个传感器部件和完成加速度测量有关的电路，包括振荡器、解调器、前置放大器、缓冲放大器、参考电源及温度补偿电路等，全部集成在一片硅晶片上，无需外部调理电路，芯片体积小，功耗低。

##### 2) ADXL78 主要技术指标。

非线性测试误差:0.2%；安装谐振频率:24 KHz；测试带宽: 400 Hz；灵敏度: 8 mv/g；抗冲击能力: 可达到 4 000 g；温度适用范围: -65~150 ℃；封装形式: E8(微型 LCC8)。

#### 1.2.2 比较器

根据触发电路应具有体积小、功耗低、抗干扰性强、响应快等特点，内触发电路中的比较器选用高速电压比较器 LM311。

##### 1) LM311 介绍。

LM311 能工作于 5 V 到 30 V 单个电源或者士 15 V 分离电源，如通常的运算放大器运用一样；因而，LM311 是一种真正通用的比较器。该设备的输入可与系统地隔离，输出则可驱动以地为参考或以 V<sub>CC</sub> 为参考，或以 V<sub>EE</sub> 电源为参考的负载。其单电源典型的设计配置如图 1 所示。

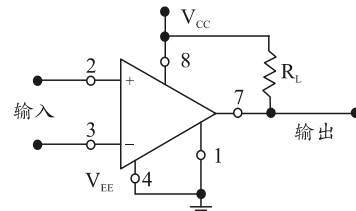


图 1 单电源典型的设计配置

##### 2) LM311 封装及管脚说明。

LM311 有 DIP8 和 SO-8 封装，考虑到弹内空间较小，笔者选用 SO-8 封装。其管脚定义说明如表 1 所示。

表 1 LM311 管脚定义

管脚编号	名称	功能
1	GND	地
2	IN(+)	输入
3	IN(-)	输入
4	V <sub>EE</sub>	负电源
5	BALANCE	平衡
6	BALANCE/STROBE	平衡/选能
7	OUTPUT	输出
8	V <sub>CC</sub>	电源

为了系统电源匹配和降低功耗，选用 5 V 供电。

### 1.3 内触发电路的设计

根据设计原理选择相应的器件，同时考虑为适应不同应用环境，设计触发阈值灵活可调，选用高精度电位计进行触发阈值的灵活选择，且 ADXL 系列加速度计具有相同的接口，体积小、功耗低，便于芯片更换升级，提高设计电路的通用性和适用范围，根据需要可灵活选用加速度计芯片。设计的内触发电路原理如图 2 所示。

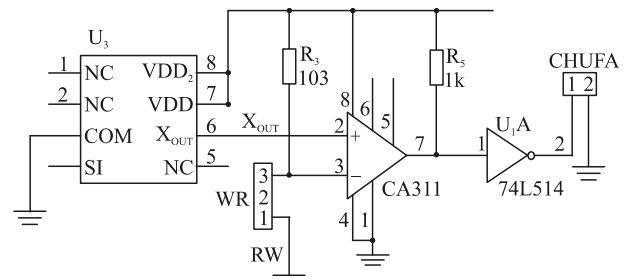


图 2 内触发电路原理

上图中，由于加速度计为 0 时对应的输出电压为 2.5 V；因此，通过高精度电位计调节比较器参考

端电压，使其高于 2.5 V，具体设定值由式(1)确定。当加速度计受到振动，输出电压值大于该参考端电压时，比较器输出端输出高电平，再通过后部反相器输出低电平，进一步滤除杂波，提高信号抗干扰能力，就能可靠触发内部存储测试装置。

$$V_{ref}=2.5V+xs. \tag{1}$$

式中： $x$  为预置的加速度数； $s$  为加速度计的灵敏度系数。

例如设定触发值为 100 g 时，触发电路电平设定为 3.3 V。

### 1.4 高精度双路冗余电源设计

为提高电路在冲击过载环境下的可靠性和触发的灵敏性，电源部分采取高精度双路冗余设计。每路利用线性高精度稳压电源 LM2940 将电池电压稳在 5 V，且纹波小于 5 mV。两路电源为防止电流倒灌，每路反串一只二极管。且在电路设计中为防止冲击过载等大过冲存在，导致瞬间掉电上电，引起电路供电不稳，造成系统触发失效，在每路电源部分并联大电容，利用电容充放电原理，当电源掉电瞬间，通过电容放电电流供电，提高了系统的供电可靠性，保证了系统工作的连续性和触发灵敏性。

### 1.5 电路板绝缘安装及抗干扰设计

为提高触发电路的响应速度和抗干扰能力，降低因安装结构带来的响应滞后问题，通过将电路板粘贴在设计金属壳体内部实现。且电路板设计为单面板，通过胶粘剂粘贴在设计金属壳体内部，一方面使加速度计不直接与金属壳体接触，通过绝缘电路板降低了因金属壳体导入的噪声，防止误触发；另一方面在金属壳体内做标记线，使绝缘安装时加速度计的敏感方向与过载感应方向一致，且通过金属壳体传递，提高触发电路的响应速度。在试验前根据环境条件调试好触发电路的触发阈值，然后将安装在金属壳体内的触发电路做一定的封装，且将带有金属壳体的触发电路通过螺栓或螺纹的方式安装在存储测试装置或弹体预留的接口处，进一步提高触发电路的工作可靠性。

## 2 电路验证

### 2.1 静态检测

将设计电路静置于实验台，接通供电回路，通过调节高精度电位计调整参考端电压。利用万用表测量参考端电压  $V_{ref}$ 、加速度计输出电压  $X_{out1}$ 、

通过比较器比较整形后的输出电压  $V_{out2}$ ，测量值如表 2 所示。

表 2 触发电路静态检测测量值 V

序号	$V_{ref}$	$X_{out1}$	$V_{out2}$
1	1.356	2.492	4.985
2	2.048	2.492	4.984
3	2.459	2.492	4.982
4	2.502	2.492	0.001
5	2.511	2.492	0.001
6	2.498	2.492	0.001

由上表可见，当参考端预置电压值低于加速度计静态输出电压值时，比较器输出端为高电平；当参考端预置电压值高于加速度计静态输出电压值时，比较器输出端为低电平。根据实际应用，需将参考端预置电压值调节到高于加速度计静态电压值，具体调节的参考电压值根据实际需要触发的情况，通过式(1)计算确定。

### 2.2 动态检测

将设计的内触发电路输出信号用采样频率为 28.75 Ksps 的数据记录仪进行采集，待数据记录仪开始采集后，摇动几次内触发电路，使其加速度计受到振动，利用数据记录仪存储记录该信号。数据记录仪采集完毕后，读取存储的数据，对数据进行分析，验证内触发电路输出信号的电特性。动态检测测试如图 3 所示。

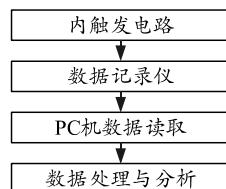


图 3 动态检测测试

对数据记录仪记录存储的内触发信号进行分析处理后，可得到图 4—6。

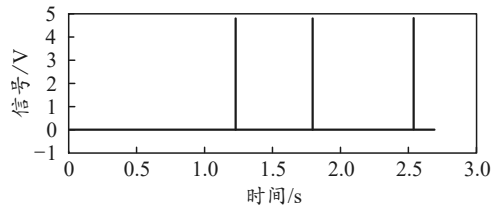


图 4 模拟 3 次内触发

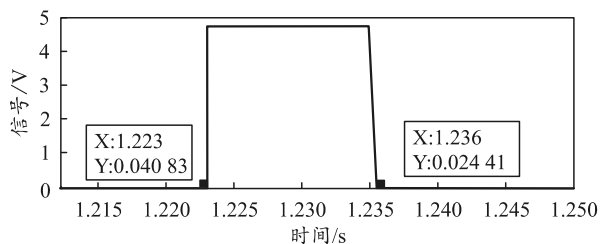


图 5 模拟内触发信号持续时间

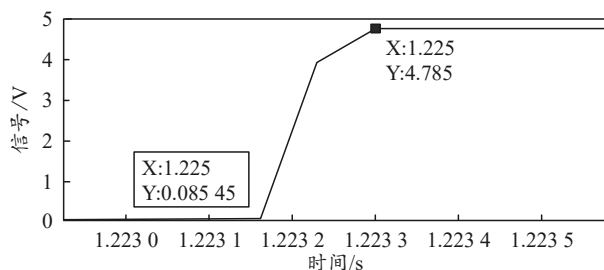


图 6 模拟内触发信号响应时间

由图 4 可见, 摇动内触发电路, 能可靠地输出内触发信号, 且无噪声干扰信号, 信号幅值满足触发要求; 由图 5 可见摇动内触发电路时, 信号持续时间为 13 ms; 由图 6 可见, 信号响应时间为 0.14 ms。

### 2.3 试验应用

将设计的内触发电路应用于某弹载存储测试装置, 该装置经过锤击试验验证, 成功应用于某跌落试验中。在跌落过程中弹体加速运动, 当弹体的加速过载达到其内安装的弹载存储测试装置的触发电路预设的触发电平时, 输出触发信号, 启动弹载存储测试装置开始采集, 获取了完整的跌落冲击信号, 表明弹载存储测试装置的内触发电路工作稳定可靠。具体如图 7 所示。

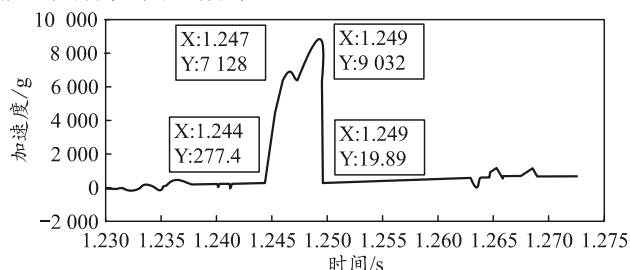


图 7 内触发电路应用于某跌落存储测试装置的实测曲线

## 3 结论

笔者针对弹载存储测试装置的应用环境特点和特殊性对内触发电路的应用需求, 提出一种以含零频的加速度计 ADXL78 和高速电压比较器 LM311 为核心的内触发电路设计方法。通过原理分析和合理的芯片选型, 设计了内触发电路模块, 经过实验室的静态检测和模拟动态检测, 均能可靠触发后续的弹载存储测试装置, 满足弹载存储测试装置内触发的设计要求。试验应用结果表明: 该触发电路设计各项指标符合要求, 触发阈值灵活可调, 能稳定、可靠地触发弹载存储测试装置, 为弹载存储测试装

置的工程化应用提供必要的触发保证。本电路触发阈值可调, 并且可通过更换同类型加速度计 (50 g 或 100 g 量程, 接口一致), 应用于类似的过载触发电路设计中, 推广应用于跌落、强冲击、侵彻类弹载存储测试装置的触发电路设计中, 有效保证弹载存储测试装置的可靠触发, 为产品设计改进提供真实有效的数据保障。

### 参考文献:

- [1] 韦旭. 弹载高速记录仪的关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2022.
- [2] 牛明杰. 战斗部侵彻过载参量存储测试系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [3] 张荣, 聂飞, 黄海莹, 等. 振动冲击混合测试用弹载存储测试系统软件设计[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(4): 161-165.
- [4] 王琦. 某型号制导炮弹弹载数据记录仪的设计与研究[D]. 太原: 中北大学, 2011.
- [5] 吕富勇. 基于精简串行总线的小型模块化测试系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [6] 沈阳. 基于 FPGA 的弹载存储测试系统研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [7] 王悦凯. 抗冲击模块化六自由度运动记录仪设计[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [8] 张瑞. 弹载存储测试系统的可靠性研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [9] 韩学平, 芮筱亭, 杨富锋, 等. 基于嵌入式系统的弹载存储测试系统设计及仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(1): 84-87.
- [10] 张建新, 张合, 张祥金, 等. 分别采用正负延迟触发的存储测试方法[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(2): 47-50.
- [11] 申晓敏, 钱礼华, 刘保炜, 等. 数字量存储测试装置设计[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(8): 109-112.
- [12] 孙帅, 钱礼华, 陈亚奇. 基于 AD976 的撬载记录仪设计与实现[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(4): 116-118.
- [13] 杜剑英, 申晓敏, 白蕾, 等. 微型化存储技术在脉动压力测量中的应用[J]. 兵器装备工程学报, 2019(A01): 213-216.
- [14] 阎石. 数字电子技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 22-25.
- [15] 童诗白. 模拟电子技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 47-49.
- [16] 郁有文, 常健, 程继红. 传感器原理及工程应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003: 16-17.