

基于高压技术的脉冲发生器设计及其调制特性研究

朱志忠

中国科学院微电子研究所 北京 100029

摘要: 高压脉冲发生器输出电压的稳定性与调制精度是衡量系统性能的关键指标。本文围绕脉冲信号的精细调控目标,设计构建具备高压驱动能力与调制路径整合特性的脉冲发生器系统,设计了渥尔曼放大电路,研究了误差放大与峰值检测机制以及 DA 输出转换策略,研制了完整的调制控制链路。通过搭建多参数测试平台开展调制性能实验,验证系统在多维参数动态调节中的稳定输出特性与结构响应机制,为高性能脉冲信号源的开发应用提供技术支撑。

关键词: 高压技术; 脉冲发生器; 调制特性; 波形控制; 电路设计

引言

高压脉冲信号作为半导体器件动态特性测试的重要激励源,在波形保真性、幅度稳定性、调制速度等方面提出更高要求^[1]。传统脉冲发生架构在输出电压范围、脉冲宽度压缩能力及任意波形产生精度方面难以满足高端仪器设计指标,制约国产高性能测试平台研发进程。高压分立器件驱动、多模信号融合合成、高速控制策略构建已成为提升脉冲系统性能的关键方向^[2]。本文面向高压脉冲信号产生需求,从系统架构集成、模块控制逻辑、关键电路设计及调制特性测量等角度开展研究,提出可行性工程实现策略,为后续高精度测量设备提供模块化基础支撑。

1 高压脉冲发生器总体架构设计

面向高性能电子测量需求,系统架构围绕激励信号生成、同步控制与参数采集构建模块化联动结构,形成覆盖输出、调制、反馈的闭环控制路径。图 1 展示各功能模块之间的关系,PCIe 接口作为通信枢纽连接上位指令与下层执行单元,FPGA 模块主要用于数字信号逻辑计算与时序控制。激励路径由任意波形发生器与高压脉冲产生模块并列部署,分别对应多形态波形输出与高幅值脉冲驱动,信号类型根据配置指令按需调用。测量路径中设置独立采样控制链路与 ADC 转换单元,结合信号调理电路完成被测信号的采集与预处理,形成输入输出双通道联动结构。

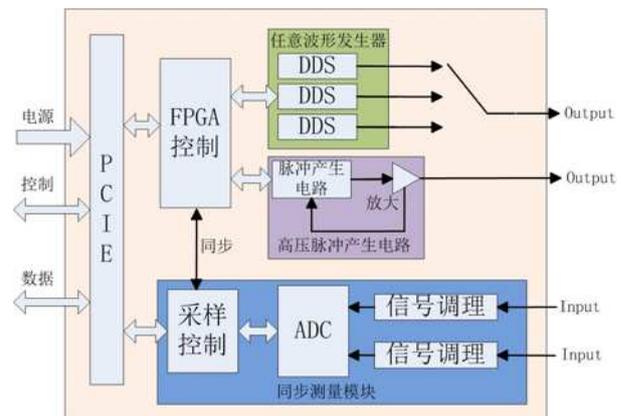


图 1 高压脉冲发生器系统总体结构框图

2 高压脉冲发生器关键技术实现

2.1 高压渥尔曼放大电路设计

信号调制模块输出的偏置信号引入放大电路,驱动结构采用分级电压控制与电流输出分离配置。前置放大器基于宽带放大器件,调节环节插入高频限幅电路结构,搭配快速压摆速率器件削减延迟影响。反馈支路设置对称钳位电位窗,控制双极性偏移后的信号波形边缘^[3]。图 2 电路图中,左侧为输入差分单元,运放前级固定偏置点,提升静态精度,双向输出通道连接后端限压模块,后级输出直接接入负载,旁路通道并联阻容抑制振荡。负载与放大级之间插入低阻抗阻尼器件维持输出状态的动态均衡,结构右端末级接入压敏片构成非线性过压响应,满足短时高压拉升条件下稳定切换要求。器件选型考虑击穿容差及驱动余量,板级部署以单侧走线抑制电压抖动干扰,地电位平面层构造避免瞬时电压叠加失控。

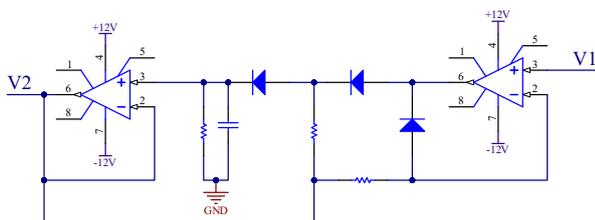


图2 渥尔曼高压放大电路原理图

2.2 误差放大峰值检测机制

控制回路采用多层反馈结构构建电压闭环调节路径，误差补偿环节由 FPGA 发出调制指令生成 DA 参考电平，与脉冲输出节点的反馈电压经差分比较器形成误差信号，交由误差放大器驱动功率放大级进行幅值修正。峰值检测电路采用并联支路配置，采样电压引出后经峰值检测电路进行信号整形，由高速 AD 模块完成量化处理并返回 FPGA 进行逻辑运算^[4]。图3为误差补偿与检测通道的结构布置关系，其中 DA 输出通道与比较器构成参考对照电路，检测支路信号经缓冲器进入峰值整形模块后完成 AD 转换。系统配置多种检测触发窗口，通过参数配置实现输出电压动态更新，采样定点与反馈修正边沿严格时序对齐，逻辑中引入伪锁存机制防止数据竞争，保障每周周期控制量传输逻辑一致。反馈路径中信号不经过积分或平均处理，直接进行单周期误差放大响应，构建高精度幅值修正能力。

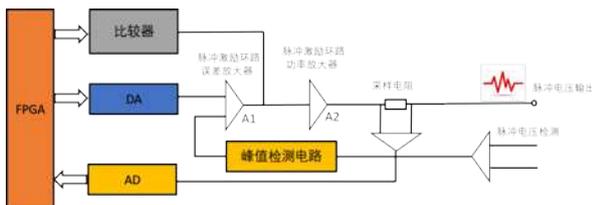


图3 误差放大与峰值检测控制结构图

2.3 任意波形发生幅频校正方法

波形生成模块采用 DDS 结构进行数字波形合成，输出信号经 DAC 驱动生成模拟信号。数字域中构建幅频校正网络，基于 FPGA 结构内并行 FIR 滤波器阵列完成动态补偿，实现波形在幅度与频率维度上的平坦输出。原始波形数据经 ROM 查表输出后输入 FIR 滤波器处理，每路数据根据频率响应特性进行系数调整处理，滤波器阶数与系数随频段变化动态加载。图4所示结构展示乘累加型 FIR 滤波器基本框图，输入数据延迟链与加权系数构成线性组合路径，输出结果以逐点更新方式输入至 DAC 模块，避免数据阻塞与串扰。在时序驱动上，滤波器模块采用独立时钟，与主控逻辑进行握

手同步，形成非阻塞异步更新架构，提升波形生成效率^[5]。校正网络参数通过频率扫描方式预配置，系统初始化时读取频响模型配置文件并加载到 FPGA 模块中，动态运行中可实现周期校正。

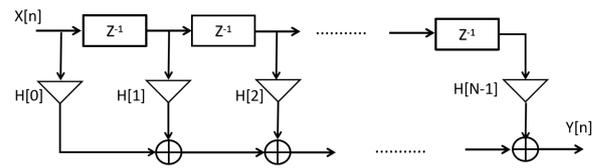


图4 基于 FIR 结构的幅频校正滤波器模型

2.4 DA 输出电路电流电压转换策略

模拟输出接口基于电流驱动模型构建电压响应路径，DA 芯片工作于恒流模式，电路结构构建低阻转换通道。前级为跨阻放大器，以高增益低噪声运放构成电压反馈环路，输入侧由 DA 输出端驱动，反馈路径中置入静态电阻完成转换映射。图5结构图所示，回路构成完整闭环电压驱动，输出端连接负载模块，滤波支路串联反馈电容 C3，用于高频信号截止。供电采用双极电源，模拟地隔离设置与逻辑地脱耦^[6]。输入逻辑侧配置 SPI 时序传输协议，数据交互以片选信号为起始帧，配置参数在数据口顺序写入。模拟路径不设置隔直电容，直接部署 RC 耦合滤波阵列以抑制基频低幅纹波。板级设计引入对称走线技术，反向反馈支路构建镜像等长路径以避免电位抖动。输出段结构保持恒压负载匹配，以防止后端加载变化引起波形削幅或脉冲偏移。

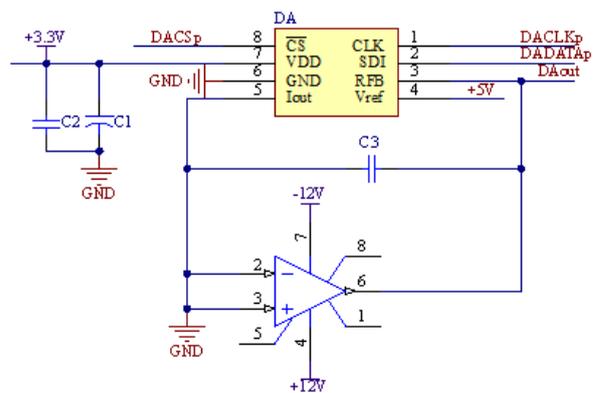


图5 DA 驱动输出与电流电压转换电路

3 调制特性测试分析

3.1 测试场景

调制特性测试围绕激励信号在幅度、频率与占空比三个维度的动态调节能力展开，测试平台采用脉冲输出与任意波形合成通道分别加载调制控制量，在闭环结构下实时分析

输出响应。调制参数设定区间为：频率 1MHz 至 20MHz 步进变换，幅度调节范围 $\pm 40V$ 线性递增，占空比调节幅度从 10% 至 90%。控制信号由 FPGA 内核按预设调制曲线进行周期更新，激励通道输出信号经高速采样实时采集，记录波形变化过程中的关键参数。响应分析以波形边沿稳定性、幅频漂移、谐波抑制能力作为测量指标，判定调制特性对系统性能的影响。

3.2 性能分析

调制性能测试结果表明，系统在频率、幅度与占空比动态调节过程中具备稳定响应能力与较高线性一致性。幅度调制测试中，DA 输出步进设定为 2V，调制范围覆盖 $\pm 40V$ 区间，实际输出幅值偏差控制在 $\pm 0.28V$ 以内，波形稳态偏移不超过 0.6%，调幅过程中未出现压幅漂移或动态过冲，反馈通路收敛时间维持在 $1.7\mu s$ 以内。频率调制中，激励源切换频率从 2MHz 递增至 18MHz，FIR 校正网络保持输出波形频谱主瓣相位稳定，边带抑制指标优于 42dBc，频率切换间隔内相位跳变最大为 1.2° ，无突发失锁或边沿畸变。占空比调制段设定范围从 15% 至 85%，最小脉宽控制在 50ns，动态调整状态下边沿斜率保持恒定，驱动响应时间未因宽度变化产生波形畸变信号，误差放大器输出补偿响应未出现饱和压缩。系统引入指令扰动速率为 200kHz 的切换波，在高负荷连续调制状态下波形失真率上升不超过 1.3%，快速切换点恢复时间低于 $4\mu s$ 。所有调制维度下，信号波形主参量均维持在控制阈值范围，表现出调制链与闭环反馈模块的协同一致性与动态收敛能力。

4 结语

面向高压脉冲激励精度与动态调制性能需求，系统构建完整架构路径与关键电路链路，形成具备可调输出、精细

控制与反馈修正能力的高压信号平台。调制性能测试验证各维度响应指标优良，具备稳定性与工程适配基础。后续研究可拓展至多通道并行驱动与复杂参数建模控制应用，以支撑高性能器件测试场景下的信号产生需求。

参考文献：

- [1] 李春林, 毛晓惠, 李青, 等. HL-3 装置电子回旋长脉冲高压电源及控制系统研制 [J]. 强激光与粒子束, 2025, 37(3): 145-150.
 - [2] 袁琪, 孙国祥, 丁卫东, 等. 基于二极管断路开关的重频高压纳秒脉冲发生器 [J]. 高电压技术, 2025, 51(2): 978-985.
 - [3] 苏州联讯仪器股份有限公司. 一种脉冲信号调节电路及高压脉冲源: CN202311525253.6[P]. 2024-03-15.
 - [4] 梁文科, 魏广芬, 王铭淇. 洛伦兹线型近似引起的甲烷检测误差研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(6): 1683-1689.
 - [5] 王胜华, 赵晨博, 邓宇坤, 徐家宁, 贺鹏超. 基于修正频域滤波器的信号波形畸变校正方法 [J]. 电子测量技术, 2024, 47(9): 191-196.
 - [6] 吴浩, 崔旭彤, 卢超月, 等. 高速 DA 转换器的吉赫兹高频老炼系统设计与实现 [J]. 质量与可靠性, 2024(6): 36-39+47.
- 作者简介：**朱志忠（1986—），高级工程师，现工作于中国科学院微电子研究所，研究方向为光电精密测量、绝对测距及其电子学设计。
- 基金项目：**课题名称：高压高速脉冲产生和任意波信号产生及同步测量模组设计，课题号：2023YFF0717903，课题来源：科技部国家重点研发计划。