

微型集成化低功耗电光调 Q 电路的设计

唐伟, 郑杰, 白扬, 胡远航, 张志坚, 毛一江, 赵才曲, 唐中和, 李慧娟

(西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 研制了一种能在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下, 适用于超小型无人测距照射平台的微型集成化低功耗脉冲激光器电光调 Q 电路, 集成了高压电源与高压开关, 克服了传统电光调 Q 电路驱动复杂、功耗高、边沿抖动、可靠性低、体积大不利于小型化集成的缺点; 进行了实验验证, 取得了实验数据: 该型电光调 Q 电路功耗小于 2W, 调 Q 高压在 1~5 kV 范围内可调, 脉冲上升沿或下降沿小于 25 ns, 可直接采用 TTL 控制信号触发, 触发频率可达 1 kHz, 适用于多种电光调 Q 晶体, 易于集成使用, 为高重复、高功率脉冲激光器提供可靠的电光调 Q 电路, 已在多个型号项目上应用。

关键词: 电光调 Q; 脉冲激光器; 高压; 测距机; 电路设计; 脉冲激光

Design of Micro Intergrated Low Power Electro-optic Q Circuit

Tang Wei, Zheng Jie, Bai Yang, Hu Yuanhang, Zhang Zhijian, Mao Yijiang,

Zhao Caiqu, Tang Zhonghe, Li Huijun

(South-west Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: A micro integrated low-power pulse laser electro-optic Q-switching circuit is developed in this paper, which can be used in the environment of $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, and is suitable for the ultra-small unmanned ranging and irradiation platform. The circuit integrates high voltage power supply and high voltage switch, which overcomes the disadvantages of the traditional electro-optic Q-switching circuit, such as complex driving, high power consumption, edge jitter, low reliability and large volume. The experimental results show that the power consumption of the designed electro-optic Q-switch circuit is less than 2 W, the high voltage of Q-switch is adjustable in the range of 1~5 kV, and the rising or falling edge of pulse is less than 25 ns. It can be triggered by TTL control signal directly, and the trigger frequency can reach 1 kHz. It is suitable for many electro-optic Q-switch crystals, easy to integrate and use, and can provide reliable electro-optic Q-switch circuit for high repetition rate and high peak power pulse laser. In addition, our designed circuit has been applied in many military projects.

Keywords: electro-optic Q-switch; pulse laser; high voltage; range finder; circuit design; pulse laser

0 引言

电光调 Q 具有激光脉冲腔内损耗低, 输出能量稳定, 控制精度较高等特点, 还可以获得稳定可控的、高功率、高重复频率、窄脉冲宽度的激光, 是目前使用最广泛的一种调 Q 方式^[1]。

不同的调 Q 晶体所需的电压各不相同, 为了能广泛适应多种调 Q 晶体, 需要调 Q 电路的输出电压范围宽且可调。影响激光器峰值功率的主要因素是激光器的电光效率, 而电光调 Q 的开关速度会严重影响电光效率。在激光形成过程中, 如果电光调 Q 速度太慢, 激光器的 Q 值达不到最大, 损耗不是最小的状态, 将会严重影响腔内光子提取效率, 最终降低电光效率。另一方面, 对于退压式调 Q, 如果电光调 Q 速度太慢, 当在激光形成时, 晶体上电压还未退到零电压, 线偏振光会多次往返经过晶体, 最后变成椭圆的偏振光, 在偏振片时将被部分反射还会产生漏光现象, 也会降低电光效率。

高功率激光器的激光脉宽一般需求在 10 ns 以上, 对调 Q 速度的追求并不严格, 一般要求在 20~30 ns 即可。

传统产生电光调 Q 脉冲常用的方法有: 冷阴极触发管调 Q 电路、脉冲变压器法、雪崩三极管法、串联式 MOS-FET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor 金属-氧化物半导体场效应晶体管) 开关法^[2]等。

冷阴极触发管调 Q 电路体积较大, 器件易老化, 调 Q 边沿大于 70 ns, 会产生严重的电磁干扰。脉冲变压器法电路不仅结构简单而且调 Q 电压范围宽且可调, 因而在民用产品上被广泛使用^[3]。但其调 Q 边沿一般大于 40 ns, 且磁饱和和材料容易受到高、低温的影响而导致调 Q 边沿抖动严重, 另外其重复频率也较低; 基于多级串联雪崩管驱动的调 Q 电路边沿一般小于 10 ns, 但电压的可调范围较窄, 且对雪崩管的一致性要且较高, 可靠性较低; 串联式场效应管法通过串联多支 MOS 管^[4]来适应各种电压, 调 Q 边沿一般小于 30 ns, 重复频率也可以较高。

传统的串联式场效应管法电光调 Q 电路的高压电源、高压开关两部分一般分别独立, 多采用分立元器件搭建, 结构复杂, 体积较大, 常用的调 Q 电路尺寸可达 120 mm×75 mm×35 mm; 功耗一般功率超过 20 W, 其驱动信号同步性难以保证, 造成 MOS 开关不同步问题, 严重可能会导致

收稿日期:2020-01-07; 修回日期:2020-04-21。

基金项目:装备预研兵器工业联合基金项目(6141B012858)。

作者简介:唐伟(1983-),男,四川成都人,高级工程师,硕士,主要从事信号分析,集成电路设计与分析方向的研究。

单只 MOS 管过压击穿^[5]。由于器件多, 线路长, 造成高压区域分布较大, 容易形成高压击穿, 加大了绝缘处理的难度, 对装配人员安全造成威胁; 传统的调 Q 电路需要外部提供一个驱动能力较强的超快沿 (一般小于 $1 \mu\text{s}$) 来驱动高压开关电路, 造成外部电路复杂, 不能直接与系统控制电路的 TTL 电平简单适配^[6]。

随着以无人机、无人战车、无人船为代表的无人作战平台的大规模应用, 对激光测距、照射类设备的体积、功耗、集成化、小型化都提出了更高的要求, 本文目的是针对上述现有技术存在的问题, 设计一种集成化高, 体积尺寸小、功耗低、便于驱动与调压的电光调 Q 电路。

1 微型电光调 Q 电路组成

本文所述的调 Q 电路是一种用于高峰值功率激光器的微型低功耗集成化电光调 Q 电路, 包括开关电源电路、倍压整流电路、高压开关、触发电路等, 其原理框图如图 1 所示。

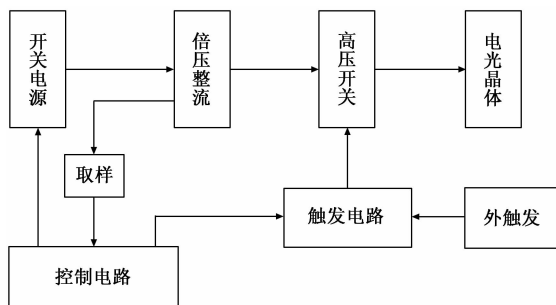


图 1 微型电光调 Q 电路原理框图

外部供电后, 脉宽调制器启动输出 PWM 脉冲信号^[7], 经驱动电路后驱动开关管, 高频脉冲变压器进行升压。经倍压整流电路整流后通过反馈网络进行反馈, 与基准进行比较后调整 PWM 脉冲信号的脉宽, 直到得到稳定预设的高压值。当外部 TTL 触发信号上升沿来临, 将触发驱动电路产生快速的驱动信号, 经过多路触发脉冲变压器隔离后产生 4 路快速驱动信号, 使高压 MOSFET 开关网络快速同步打开, 最终形成纳秒级高压上升/下降沿。

2 单元电路

2.1 高压电源控制电路

高压电源控制电路如图 2 所示, 主要由脉宽调制电路、驱动电路、反馈环路组成。选用芯片 TL494 作为 PWM 型开关电源集成控制器来提供矩形脉冲^[8], 驱动电路主要是将控制信号放大来驱动开关管, 反馈环路对输出高压采样反馈来实现高压的稳定输出。采用推挽式电路来驱动后级的开关管, 开关管选用金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET)^[9], 由于功耗较低, 封装采用 TO-252; 电路拓扑采用单端反激结构方式。反馈环路采用高压电阻分压方式采样, 反馈回路通过磁耦进行隔离反馈, 使输入、输出不共地, 隔离前后级电路。TL494 可向外部提供 V_{ref} 基准电压, 外部可以通过电位器分压取得设定电压, 与反馈

回路的电压一起送入 TL494 的反向误差放大器, 调制输出 PWM 信号的脉宽, 最终达到预设的输出电压。

TL494 构成的控制电路, TL494 在正常工作时, 14 脚提供 5 V 的 V_{ref} 基准电压; 4 脚为死区时间控制端; 3 脚是反馈输入端 (BH), 当该引脚接收到故障信号时, 迅速封锁输出脉冲, 关断 MOSFET; 6 脚的电阻 R_T 和 5 脚的电容 C_T 决定输出脉冲频率, 频计算等式如等式 1 所示。

$$f = 1.1 / (R_T \times C_T) \quad (1)$$

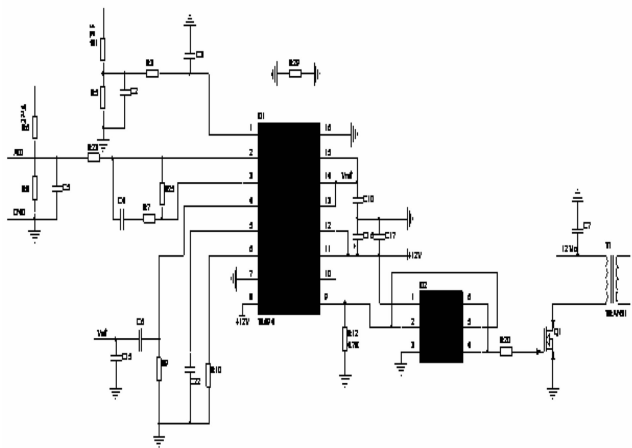


图 2 高压电源控制电路

2.2 高频变压器设计

高频变压器是高压开关电源的最重要部分, 在电路中作用为磁能转换, 电压变换和绝缘隔离。当高压电源控制电路使功率开关管高频通断时, 恒定的直流电压将被转换为方波电压, 并施加在高频变压器初级侧, 高频变压器进行电磁能量转换, 再通过整流滤波电路可将变压器二次侧电压转换成所需的电压。

由于整体尺寸限制高频变压器设计为扁平小型化, 开关频率设计为 110 kHz 附近。脉冲变压器的磁芯材料选用铁氧体^[9]。由于输出电压较高, 选用平面型多槽高频变压器, 其多槽设计可以灵活绕制多圈绕组, 可以有效防止升压过高导致的匝间击穿, 骨架如图 3 所示。初级电压为 12 V, 次级电压设计为 600~800 V, 初级绕组 N1 设计为 15 匝, 次级绕组 N2 设计为 600 匝。

选用 E 型 R2KB 型铁氧体磁芯磁性材料, 采用聚矾材料作为骨架^[10], 绝缘材料采用聚四氟乙烯, 变压器加工完成后应整体抽真空, 并采用低挥发性绝缘漆加热灌封, 保证其绝缘性, 避免高压击穿现象。

2.3 倍压整流电路设计

经高压电源控制电路、高频变压器后, 在变压器次级绕组得到高压脉冲输出, 还需要经整流滤波电路才能得到高压直流电平。

整流器件、滤波器件是决定高压开关电源体积尺寸的主要因素^[11]。电光晶体比如 RTP (RbTiOPO_4, 磷酸铷氧铷)、LN (LiNbO3, 铌酸锂) 等其电特性均表现为一个皮法级的小电容, 负载很小。倍压整流是利用二极管的整

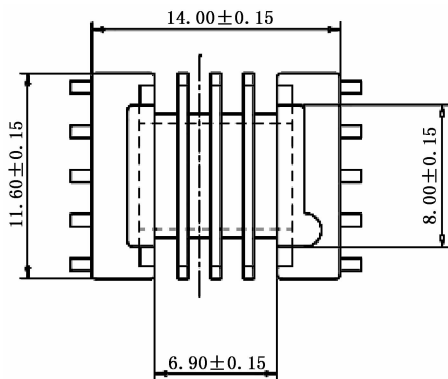


图 3 高频变压器

流和导引作用，将电压分别贮存到与二极管并联的电容器上，然后把它们按极性相加的原理串接起来，得到较高的电压，虽然其电流较小，但非常适合高压小电流的应用。因此可以通过倍压整流电路来实现更高的电压输出。

通过对高频脉冲变压器、整流滤波电路、负载电压电流的设计分析，采用 8 倍压整流电路能将高频变压器输出的 600~800V 交流电压整流到最高 5 000 V 的直流电压。同时能有效压缩高频脉冲变压器的体积，减小整流滤波电路元器件的耐压压力，使其尺寸可以有效减小。

整流滤波电路如图 4 所示，其中用于倍压整流电路的二极管，最高反向电压为 2 kV，整流电流平均值为 5 mA，反向恢复时间小于 100 ns，封装为 SMA/DO-214AC。高压陶瓷电容具有耐直流高压的特点，其中的低耗损高压圆片具有较低的介质损耗。倍压整流电路使用的电容器容值为 1 nF，耐压值为 2 kV。

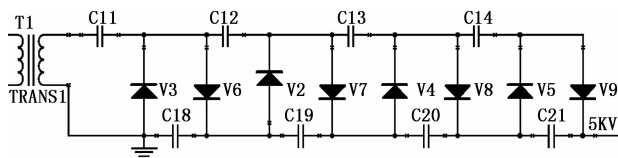


图 4 倍压整流电路

2.4 触发电路设计

为了降低调 Q 电路的设计复杂度，驱动电路应能适应 TTL 调 Q 信号直接触发，这样才有利于与整机控制系统配套使用。驱动电路与控制电路之间用光耦进行信号隔离传递。采用推挽驱动电路作为脉冲变压器单输入初级的开关管驱动，多输出的变压器次级侧和负载相连，通过对变压器初级侧的开关器件控制，在负载上就能获得理想的脉冲波形。

触发电路设计必须保证串联 MOSFET 的同步驱动^[12]。单输入多输出的脉冲变压器可以很好地解决 MOSFET 驱动不同步问题，既保证了各个 MOSFET 的同步驱动又实现了电路之间的电气隔离。脉冲变压器设计如图 5 所示。脉冲变压器选用铁氧体作为脉冲变压器的磁芯材料，原边电压 12 V，变压器的副边设计为 4 组绕组输出形式，输出端 U1、U2、U3、U4 分别用来驱动 4 个 MOSFET 功率开关

管。每组电压 15 V，原、副边变比为 12:60。原边采用隔直电容，提供重启电压，防止变压器磁性饱和。采用推挽驱动电路作为脉冲变压器原边的驱动，能适应 TTL 调 Q 信号直接触发^[13]。副边选用多路信号同时触发的方式，能够稳定可靠的使串联的高压 MOSFET 开关网络达到开通状态。脉冲变压器隔离了整个电路的高压区和信号区，提高了电路的抗干扰能力和安全性。

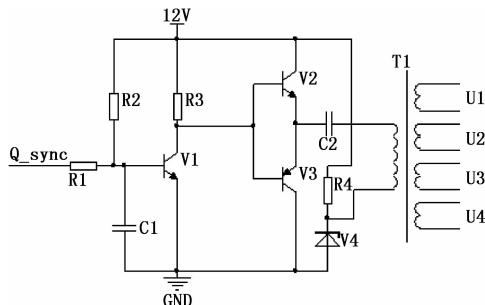


图 5 多路高速脉冲触发电路

2.5 高压 MOSFET 开关网络

功率 MOSFET 是单极型电压控制器件，具有开关速度快（纳秒级）、开关损耗低、高频特性好、热稳定性优良、驱动电路简单、驱动损耗低、安全工作区宽、无二次击穿问题等显著优点。高压 MOSFET 开关网络要求工作电压高，开关速度快才能达到 5 kV 级电压的快速开关。选择 IXYS 公司的 Polar3™ 系列具有专有的高压封装、高阻断电压、正温度系数 RDS(on)。选取 1.5 kV 耐压的高压 MOSFET 管作为主开关管，其 RDS(on)、栅极容值和输出电荷以及管芯尺寸都得到了有效降低。高压 MOSFET 开关网络如图 6 所示，4 支 MOSFET 串联后可满足 5 kV 以内的耐压。

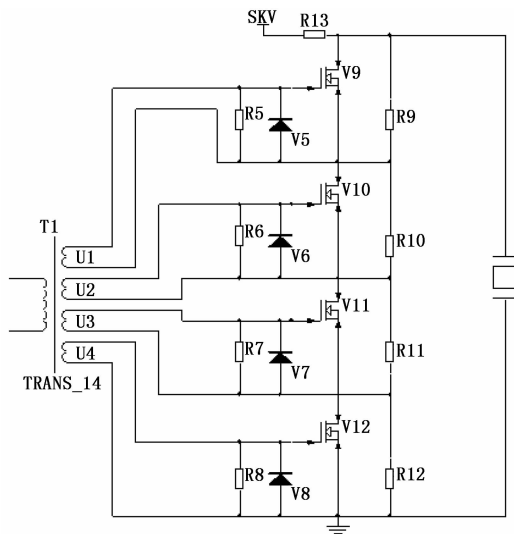


图 6 高压 MOSFET 开关网络

高压 MOSFET 开关网络快速导通才能有效保证 Q 开关速度达到纳秒级，因此在驱动电路的设计上应保证触发脉冲具有足够快的上升与下降速度；为了使高压 MOSFET 可

表 1 微型电光调 Q 电路主要性能参数

类别	尺寸/mm	调 Q 高压/V	脉冲边沿时间/ns	供电电压	功耗/W	频率/kHz	触发信号	关门恢复时间/ μ s	绝缘强度/Vdc	工作温度/ $^{\circ}$ C
参数	45 * 34 * 15	1 000~5 000	≤ 25 ns	10~15 V	1.6	≤ 1 kHz	TTL 电平	800	6000	-40~+85 $^{\circ}$ C

靠触发导通, 应选择较高触发脉冲电压, 为了防止误触发, 在其截止时应该快速泄放栅源电压; 在高压 MOSFET 开关网络的 4 支 MOSFET 各自的栅极与源极之间接一个齐纳二极管, 将栅极与源极之间的电压钳为到安全电压来保护高压 MOSFET 的栅极。另外, 在高压 MOSFET 的栅极与源极之间还应并联一只 1 k 的电阻, 该电阻可为高压 MOSFET 提供一个固定偏置, 防止 MOSFET 误触发。为了均衡各只 MOSFET 上所承受的电压, 在每只 MOSFET 的源漏极级并联 10 M Ω 高压电阻进行均压。

3 实验结果及分析

微型电光调 Q 电路采用 FR-4 3 mm 厚度 PCB 板材, 有效提高绝缘性。电路测试完成后, 将其装入金属壳体中并采用具有低挥发性的导热灌封胶对微型电光调 Q 电路进行整体灌封, 保证其绝缘性, 提高在高低温、冲击振动、低气压下电气可靠性, 还可以有效降低其产生的电磁干扰。

测试平台为采用铌酸锂 (LN) 晶体调 Q 的 90 mJ 灯泵激光器激光测距机、采用磷酸钛氧铷 (RTP) 晶体调 Q 的 100 mJ 半导体激光器照射器。

测试主要设备为泰克 TDS3052C-500M 示波器、泰克 P6015A 高压探头、P6703B-1 GHz 型光电探头测^[14]。

微型电光调 Q 电路高压电源部分测试图如图 7 所示, 图 7 (a) 为高压电源启动波形, 启动过程平稳, 无过冲; 图 7 (b) 为高压电源纹波测试, 纹波 V_p-p 小于 10 V, 处于较高水平。微型电光调 Q 电路整体测试数据如表 1 所示。

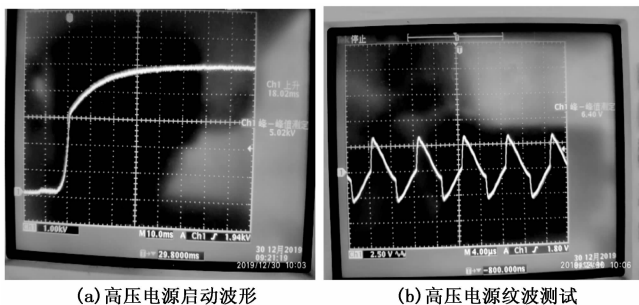
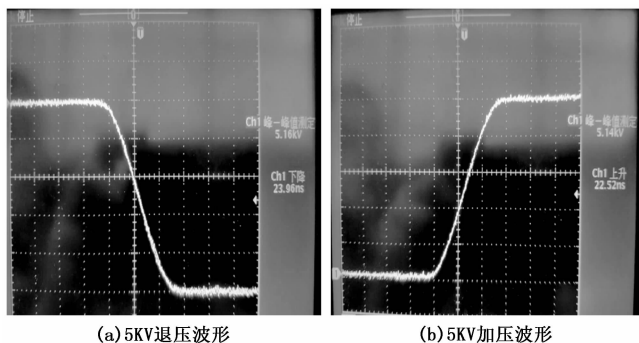


图 7 高压电源部分测试图

该微型电光调 Q 电路用于激光器测试如图 8 所示。图 8 (a) 为 5 kV 加压波形, 图 8 (b) 为 5 kV 退压波形, 图 8 (c) 为采用铌酸锂 (LN) 晶体调 Q, 90 mJ 灯泵激光器激光测距机激光出光波形, 图 8 (d) 为采用磷酸钛氧铷 (RTP) 晶体调 Q, 100 mJ 半导体激光器照射器激光出光波形。

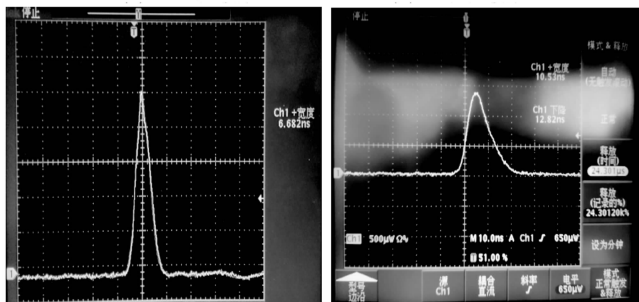
实验结果表明, 该微型电光调 Q 电路, 能在 -40 $^{\circ}$ C ~

+85 $^{\circ}$ C 环境下, 稳定可靠的工作, 激光输出能量稳定, 激光束散小、光束质量高, 能适于多种无人作战平台用激光测距照射器。目前在军用激光测距机/照射器上已广泛应用, 具有体积小、功耗低、集成度高、可靠性高的特点。也可推广到民用高功率激光器领域。



(a) 5KV退压波形

(b) 5KV加压波形



(c) LN调Q-90mJ激光测距机激光波形

(d) RTP调Q-100mJ-激光器照射器激光波形

图 8 微型电光调 Q 电路试验波形

4 结束语

本文研制了一种能在 -40 $^{\circ}$ C ~ +85 $^{\circ}$ C 环境下, 适用于超小型无人测距照射平台的微型集成化低功耗脉冲激光器电光调 Q 电路, 集成了高压电源与高压开关, 克服了传统电光调 Q 电路驱动复杂、功耗高、边沿抖动、可靠性低、体积大不利于小型化集成的缺点。实验结果表明, 该微型电光调 Q 电路, 能在 -40 $^{\circ}$ C ~ +85 $^{\circ}$ C 环境下, 稳定可靠的工作, 激光输出能量稳定, 激光束散小、光束质量高, 能适于多种无人作战平台用激光测距照射器。

参考文献:

- [1] 杨 飞, 李萌萌, 赵上龙, 等. 基于新型 SA 器件被动调 Q 激光器研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 54 (7): 1-16.
- [2] 车萧华, 徐 杰, 李恒达, 等. 主动调 Q 次级拉曼模激光器的研究 [J]. 光学学报, 2020, 12 (8): 1-17.
- [3] 李旭东, 梅 峰, 闫仁鹏, 等. 高速 PLIF 成像诊断应用的脉

冲串激光器研究进展 [J]. 光学精密工程, 2019, 27 (10): 2116 - 2126.

[4] 赵 翔. 温度自适应加压式电光调 Q 的实现 [J]. 光学与光电技术, 2019, 17 (5): 53 - 58.

[5] 史光普, 李明月. 机载光电探测设备对地定位算法及其仿真分析 [J]. 火力与指挥控制, 2019, 44 (7): 178 - 181.

[6] 戴殊韬, 江 涛, 吴丽霞, 等. 单脉冲时间精确可控的单纵模 Nd: YAG 激光器 [J]. 物理学报, 2019, 68 (13): 128 - 132.

[7] 张 鑫, 陈满超, 席文强, 等. 基于射频场效应管的快速电光调 Q 驱动电路设计 [J]. 光学与光电技术, 2014, 12 (3): 58 - 61.

[8] Bishop A I, Barker P F. Subnanosecond Pockels cell switching using avalanche transistors [J]. Rev. Sci. Instrum., 2006, 77: 044701.

[9] Yin X L, Jiang M H, Sun Z, et al. Intrinsic Reduction the Depolarization Loss in Electro-optical Q-switched Laser Using a Rectangular KD * P Crystal [J]. Optics Communications,

2017, 398: 107 - 111.

[10] Liu C, Yang K, Zhao S, et al. 88 ns multi-millijoule LiNbO₃ electro-optically Q-switched Tm: LuAG laser [J]. Optics Communications, 2015, 355: 167 - 171.

[11] Zhang Xin, Chen Manchao, Xi Wenqiang, et al. Design of high speed Q-switch driver circuit based on radio frequency field effect transistor [J]. Optics & Optoelectronics Technology, 2014, 12 (3): 58 - 61.

[12] Eugene V. Raevsky, Vladimir L. Pavlovitch. Stabilizing the output of a Pockels cell Q-switched Nd: YAG laser [J]. Optical Engineering, 1999, 38 (11): 1781 - 1784.

[13] Ulrike Hahn, Matthias Herrmann, Frank Leipold, et al. Nanosecond Kilovolt Pulse Generators [A]. Proc IEEE [C]. 2002: 1575 - 1578.

[14] Andras Kuthi, Peter Gabrielson, Matthew R Behlend, et al. Nanosecond Pulse Generator Using Fast Recovery Diode Cell Electromanipulation [J]. IEEE transaction on plasma science, 33 (4): 1192 - 1197.

(上接第 121 页)

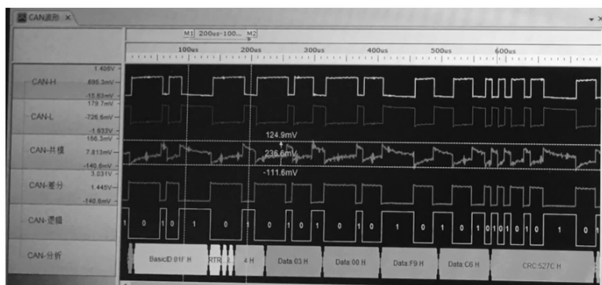


图 12 CAN 波形分析

测试。各电动升降立柱和电动推杆的运动逻辑正确；各个预设动作能够准确执行、动作到位。执行部件响应无明显延迟、运动无过冲。保护机制有效执行，避免了运动状态混乱、机械卡位和电机堵转风险。位置传感器反馈灵敏。显示屏功能正常、时序正确，显示信息同步。各个控制板按键输入响应灵敏。由运动综合测试的结果可知，系统整体设计较为完善，符合功能性和稳定性要求。

5 结束语

本设计基于分布式控制理念，采用多个基于 STM32 的控制单元，分别实现床体的运动、检测、控制和显示功能。控制单元之间采用 CAN 总线通信。设计将 STM32 强大的处理能力和 CAN 总线安全稳定的特点相结合，是电动护理床的一种新的技术应用形式。系统具有可靠性高、响应快、功能扩展性强等特点，同时也是一种技术平台，为后续新功能的拓展和延伸打下了基础，应用前景广阔。基于多 STM32 和 CAN 总线的电动护理床后续还可以进一步改进和完善，比如在易用性方面，增加可记忆的用户自定义姿态；在智能化方面，增加语音控制、语音或遥控助行；在物联方面，增加远程操控和数据传输等功能，以上均可基

于此平台开发。

参考文献：

[1] 徐 慧, 李重根, 郭 琼, 等. 老年人护理床的功能需求调研与分析 [J]. 包装工程, 2015 (20): 74 - 78.

[2] 廖 翼. 智能护理床的发展现状与趋势 [J]. 医疗装备, 2013 (10): 5 - 7.

[3] 冯亚文, 李林钊, 周-锐, 等. 新型多功能护理床的设计研究 [J]. 科技展望, 2017 (3): 110.

[4] 刘 杰, 朱凌云, 苟向峰. 多功能护理床发展现状与趋势 [J]. 医疗卫生装备, 2019, 40 (7): 94 - 98.

[5] 底 涛, 赵 旭, 连翠玲, 等. 基于嵌入式系统的医疗护理床设计与实现 [J]. 河北省科学院学报, 2014, 31 (3): 29 - 31.

[6] 饶运涛, 邹继军. 现场总线 CAN 原理与应用技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.

[7] 许毅毅, 刘国民, 莎日娜, 等. 基于 CAN 总线的分布式仓储系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (12): 177 - 181.

[8] 任克强, 王传强. 基于 STM32F4 的多通道串口驱动 TFT 液晶显示屏系统设计 [J]. 液晶与显示, 2020, 35 (5): 449 - 454.

[9] 刘振海, 骆冬根, 王 改. 基于 FSMC 接口的 CF 卡数据存储系统设计 [J]. 现代电子技术, 2019, 42 (10): 15 - 18.

[10] 李 良, 王德生, 王小康, 等. 基于 STM32 单片机 FSMC 接口驱动 LCD 的配置与分析 [J]. 机电产品开发与创新, 2018 (7): 72 - 74.

[11] 陈良勇, 郭 兵. CAN 总线分布式嵌入式系统的升级设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2012, 12 (3): 68 - 69.

[12] 张培仁, 杜洪亮, 等. CAN 现场总线监控系统原理和应用设计 [M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2011.