

新工科背景下高校光电类专业综合实践课程建设实践与探索

——以高压Marx发生器设计和制作为例

张慧博, 张轶博

国防科技大学, 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年4月3日; 录用日期: 2022年4月30日; 发布日期: 2022年5月7日

摘要

综合实践课程有助于培养学生由被动适应性学习向主动探索性学习转变, 推进教学由知识传授向能力塑造转变。以高压Marx发生器设计和制作为例, 开展了光电类本科生综合实践课程建设实践与探索。结果表明, 通过理论分析、电路仿真模拟、实物制作和高压测试, 让学生参与高压Marx发生器设计和高压实验的全流程, 对学生动手能力的提高以及实践能力和创新能力的提升具有重要的促进作用, 对综合实践课程建设实践与探索有重要的借鉴意义。

关键词

综合实践, 高压脉冲, Marx发生器

Construction and Exploration of Comprehensive Practice for Optoelectronic Majors in Universities under the Background of New Engineering

—Taking the Design and Fabrication of High Voltage Marx Generator as an Example

Huibo Zhang, Yibo Zhang

College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha Hunan

Received: Apr. 3rd, 2022; accepted: Apr. 30th, 2022; published: May 7th, 2022

Abstract

Comprehensive practice courses are helpful in promoting students' transition from passive, adaptive learning to active, inquiry learning by proactively reconstructing individuals' skills rather than one-way teaching. For example, the structured course of design and fabrication of Marx's high-voltage generators, along with the exploration of comprehensive practice courses, were conducted for undergraduate students majoring in optoelectronics. The results show that students can participate in the whole design process of high-voltage Marx generator and high-voltage experiments through theoretical analysis, circuit simulation, physical production and high-voltage testing, which is important for improving students' practical ability and creativity. Eventually, it has significant implications for further practice and exploration of integrated practice course construction.

Keywords

Comprehensive Practice, High Voltage Pulse, Marx Generator

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,我国高等工程教育面临新的机遇和挑战,工科优势高校被赋予更大的使命责任,要对工程科技创新发挥主体作用。相对于传统的工科人才,未来社会需要实践能力强、创新能力强、具备国际竞争力的高素质复合型新工科人才,新工科在此背景下应运而生。高校光电类专业涉及光学、光电子、微电子等多学科,要求掌握相关的专业技能,具有从事光电等方面的实际工作能力和科学研究初步能力。其中光电类综合实践课程有助于培养学生由被动适应性学习向主动探索性学习转变,推进教学由知识传授向能力塑造转变。在此背景下,以高压 Marx 发生器设计和制作为例,开展了光电类本科生综合实践课程建设实践与探索。课程目标是利用电子技术知识建立多级 Marx 发生器电路模型,设计并制作一台高压 Marx 发生器,并开展高压放电测试,以此提高学生的实践能力和创新能力。

2. Marx 发生器工作原理

Marx 发生器是一种典型的电容储能型脉冲功率源,通过脉冲成形和压缩技术,获得 MW 乃至 GW 量级的脉冲功率并传输给负载。

Marx 发生器电路原理为“并联充电,串联放电”,结构相对简单,最高输出电压可达到数十 MV [1]。在军事领域上,Marx 发生器可用于核爆炸模拟、高功率微波武器、电磁脉冲辐射、高功率激光产生等;在民用领域上,可应用于食品杀菌、处理工业废水废气、除尘灭菌、癌症治疗等方面[2] [3]。典型的基于气体开关的电阻隔离型 Marx 发生器电路示意如图 1 所示,主要包括高压气体开关、隔离电阻、高压电容、直流充电电源以及负载等。

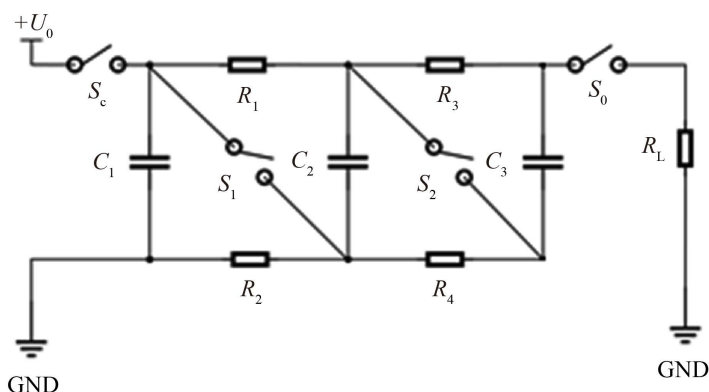


Figure 1. Diagram of three stages resistance isolation Marx generator

图 1. 三级电阻隔离型 Marx 发生器电路示意

Marx 工作过程如下: 充电时将 S_c 闭合, 其余开关断开, 此时电源将给各电容充电, 经过一段时间后, 每个电容器都将充上 U_0 的电压。电容器并联充电过程结束后, 断开 S_c , 其余开关闭合, 则电容器间将以串联的形式相连。由于隔离电阻($R_1 \sim R_4$)阻值远大于负载电阻, 理想情况下, 在开关闭合的瞬间, 隔离电阻上没有电流流过, 所有电容以串联形式连接, 在负载 R_L 两端形成高输出电压, 输出电压值等于各电容器上的电压之和。通过更改 Marx 发生器中电容值等参数, 输出脉冲的参数可以得到调节, 且易于模块化拓展。

3. 理论与仿真设计

3.1. 理论分析

在实际放电过程中, 电路中除了接入的电容和负载电阻元器件, 还会存在导线、电阻引入的电感, 可以将放电电路简化为如图 2 所示模型。其中 R 、 L 和 C 分别为电路中的电阻、电感、电容值总和。

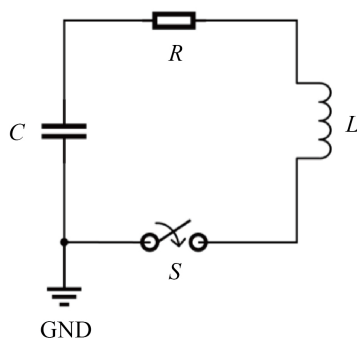


Figure 2. Diagram of the discharge of Marx generator to resistor load

图 2. Marx 发生器放电简化电路示意

假设图 2 中所示电容 C 在开关闭合前已经储存有 U_0 的电压, 且电流为 0。在开关闭合后, 电路中的电流与时间的函数可以由二阶电路零输入响应模型求解。同时, 输出到负载电阻上的电压满足欧姆定律:

$$u(t) = Ri(t) \quad (1)$$

求出电流函数即可由公式(1)得到电压函数, 下面重点讨论电流函数的求解和特性。由基尔霍夫电压

定律以及各元器件的伏安特性可以得到如下方程:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U_0 - \frac{\int idt}{C} \quad (2)$$

这是一个二阶微分方程, 在时域内可用特征方程法, 在频域内可用拉氏变换法求解, 解的形式与电路参数 R 、 L 和 C 有关。定义电路阻尼系数 α :

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (3)$$

则根据 α 的取值不同, 方程的解一共有三种形式:

1) 欠阻尼状态, 此时 $\alpha < 1$, 电流随时间变化函数为:

$$i(t) = \frac{U_0}{\sqrt{1-\alpha^2}} \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\frac{\alpha t}{\sqrt{LC}}} \sin\left(\sqrt{1-\alpha^2} \frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \quad (4)$$

此时电路中的电流将围绕 0 值震荡, 且振荡峰值逐渐趋近于 0。

2) 临界阻尼状态, 此时 $\alpha = 1$, 电流随时间变化函数为:

$$i(t) = \frac{U_0}{L} t e^{-\frac{t}{\sqrt{LC}}} \quad (5)$$

此时电流将迅速减小到 0, 且后续不再震荡。

3) 过阻尼状态, 此时 $\alpha > 1$, 电流随时间变化函数为:

$$i(t) = \frac{U_0}{\sqrt{1-\alpha^2}} \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\frac{\alpha t}{\sqrt{LC}}} \sinh\left(\sqrt{\alpha^2-1} \frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \quad (6)$$

此时电流同样会减小到 0 并不再震荡, 但电流减小持续的时间更长。

3.2. 电路仿真

本次综合实验课程设定的目标是制作一台输出电压超过 50 kV 的电阻隔离型 Marx 发生器。考虑到各个电容的耐压值、开关特性等因素, 制作五级 Marx 发生器, PSpice 电路仿真如图 3 所示。

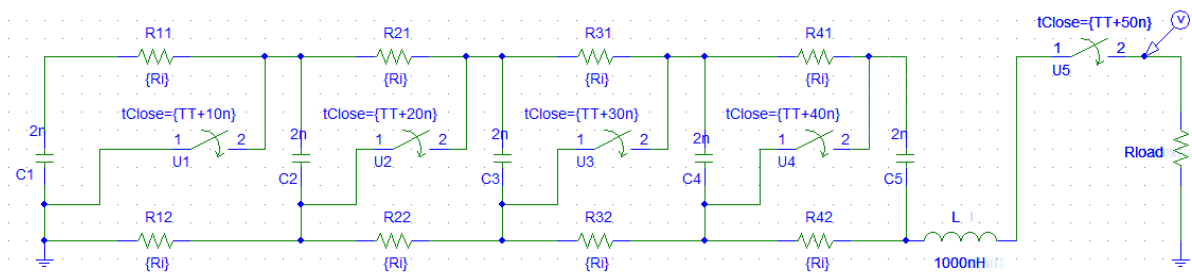


Figure 3. Circuit diagram of five stages resistance isolation Marx generator

图 3. 五级电阻隔离型 Marx 发生器电路图

电路中的主要参数是各隔离电阻 R 和电容 C 的值, 因此针对这两个参数分别进行扫描, 结果如图 4 所示。

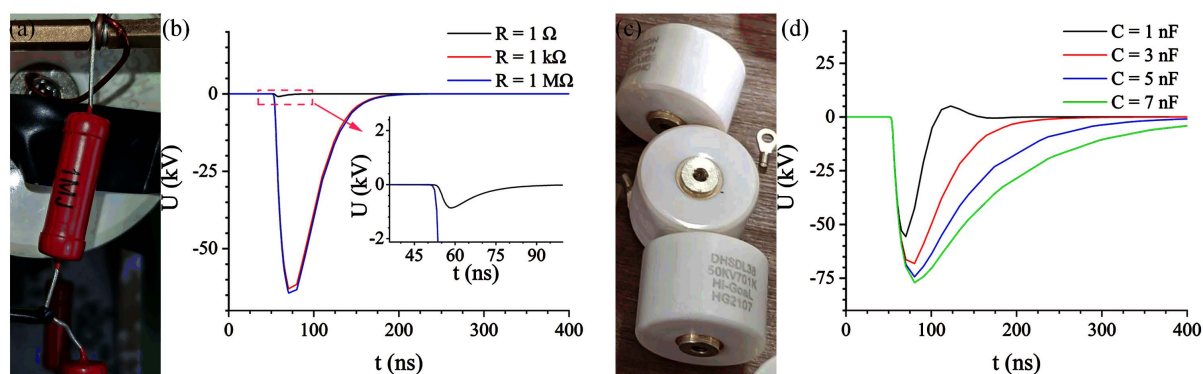


Figure 4. Isolation resistance, capacitor physical map and PSpice simulation results: (a) Isolation resistance with a resistance value of 1 M Ω ; (b) The influence of different isolation resistances (1 Ω , 1 k Ω , 1 M Ω) on the load output voltage; (c) High voltage ceramic capacitors; (d) The influence of different capacitance values (1 nF, 3 nF, 5 nF, 7 nF) on the load output voltage

图 4. 隔离电阻、电容器实物图及 PSpice 仿真结果: (a) 阻值为 1 M Ω 的隔离电阻; (b) 不同隔离电阻(1 Ω 、1 k Ω 、1 M Ω)对负载输出电压的影响; (c) 高压陶瓷电容; (d) 不同电容值(1 nF、3 nF、5 nF、7 nF)对负载输出电压的影响

图 4(b)和图 4(d)分别代表隔离电阻 R 以及电容 C 对 Marx 脉冲电源输出特性的影响。隔离电阻阻值取值分别为 1 Ω 、1 k Ω 以及 1 M Ω 时, 输出电压逐渐由平缓变为陡峭, 输出峰值也愈来愈高; 随着电容值的增加, 输出电压逐渐增大, 且峰值电压出现时间向后推迟, 波形更平缓。考虑到满足峰值电压超过 50 kV 的标准下尽可能使输出波形更窄, 选择阻值为 1 M Ω 的隔离电阻和容值为 2 nF 的电容。

4. 发生器制作与测试

全流程设计并搭建一台简易的 Marx 发生器, 有助于学生对 Marx 发生器的基本工作原理有更好的理解。通过测试搭建的 Marx 发生器的工作特性, 也能够为进一步优化发生器的设计提供指导。

4.1. 结构与制作

在前期模拟仿真电路的基础上, 将 Marx 发生器的制作过程主要分为两大部分, 分别对应于板材的正反面, 其中正面为电容电阻串并联电路, 背面为各级开关连接部分。共采用五级放大, 电容为 2 nF, 隔离电阻为 1 M Ω 。使用 2 nF 陶瓷电容为单级的储能单元(直流耐压可以达到 50 kV), 在充电电压不高于 15 kV 情况下(受隔离电阻耐压限制), 在 100 Ω 负载上输出脉冲电压不低于 50 kV。仿真情况下, 采用五级 Marx 发生器, 在杂散电感为 1000 nH 的情况下, 仿真峰值电压可达到 60 kV, 符合目标要求。

首先是进行电容电阻串并联电路连接。绝缘板材正面为电容电阻串并联部分, 主要由漆包线、2 nF 电容, 1 M Ω 电阻组成, 共 5 级。根据前期设计电路图, 对电子器件进行合理布局, 在不影响既定电路设计的情况下尽可能保持系统整洁美观, 如图 5(a)和图 5(b)所示。

其次是各级开关的连接。绝缘板材背面为各级开关连接部分, 共有 5 个开关, 通过金属垫片连接接线柱将开关线路引出, 开关连接细节如图 5(c)所示。该设置可通过调节漆包线长度来改变开关间隙距离, 进而控制导通电压。开关间隙间距选取为 5 mm, 在实际操作过程中需进行仔细测量和调整。

4.2. 高压测试

高压测试中选用大连海伏的 50 kV/2 mA 高压直流电源对 Marx 发生器进行充电, 当充电电压大于开关的导通电压值时, 开关导通, Marx 发生器对负载放电。选取阻值为 100 Ω 的固体电阻作为负载电阻, 对 Marx 发生器的放电性能进行测试。测量过程中选用 Pearson 标准电流线圈对 Marx 放电回路中的电流

进行测量。由于开关间隙选取为 5 mm, 估算在空气中开关的击穿电压为 15 kV。手动调节直流电源充电电压至 15 kV 左右, 开关导通。Marx 放电瞬间如图 6 所示, 可以看到所有的火花隙开关均在空气中发生导通, 使得 5 级电容串联进而对负载电阻进行放电。经过测算, 负载上的放电电压值为 60 kV, 达到设计值要求。

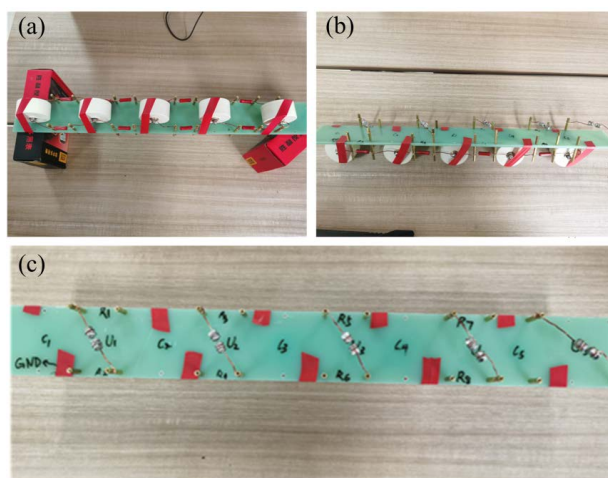


Figure 5. Picture of the five stages resistance isolation type Marx: (a) bottom view; (b) side view; (c) top view

图 5. 五级电阻隔离型 Marx 实物图: (a) 底视图; (b) 侧视图; (c) 俯视图



Figure 6. The discharge moment of Marx generator to a resistor

图 6. Marx 发生器放电瞬间

下面是一些注意事项:

- 1) 设计电路时, 连线应牢固, 同时应尽可能缩短回路长度, 否则回路中的杂散电感和杂散电阻会使输出降低;
- 2) 隔离电阻阻值一定要远大于负载电阻。隔离电阻增加, 可以使放电过程中通过隔离电阻的电流降低, 以保证能量最大程度释放到负载电阻上;
- 3) 开关击穿电压不能大于电路中各元件的击穿电压。

5. 总结

高压 Marx 发生器无论是在民用的医疗、农作物生产、卫生监控和环境监测, 还是国防领域, 都有着

相当重要的作用和地位。其可以用于高能粒子领域的物理原理探索, 用于创造极端物理条件以供研究和相关探索。在产生高能电子上面, 也可以提供基础作用, 既可以用于扩宽电磁领域的研究以便探索人类尚未涉及的空间, 也可以用于国防军事领域。结果表明, 通过理论分析、电路仿真模拟、实物制作和高压测试, 让学生参与高压 Marx 发生器设计和高压实验的全流程, 对学生动手能力的提高以及实践能力和创新能力的提升具有重要的促进作用, 对光电类综合实践课程建设实践与探索有重要的借鉴意义。

参考文献

- [1] 郑万里. MV 级 Marx 发生器结构改进设计[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [2] 徐春柳. Marx 型高压脉冲电源研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [3] 林加金. 基于脉冲变压器和 Marx 发生器的脉冲驱动源[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.