

DOI: 10.7652/xjtuxb201312012

条纹相机扫描速度调节电路

何徽, 温伟峰, 张登洪, 刘寿先

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 621900, 四川绵阳)

摘要: 针对超快瞬态物理现象的光学诊断中固定扫速条纹相机不能用于探测不同时间尺度光学过程的问题,提出一种条纹相机扫描速度调节电路。该扫描电路由一个高压快脉冲发生单元和一个速度调节单元组成,使用串联型 RLC 二阶电路将脉冲发生单元产生的高压阶跃电压变换为欠阻尼振荡电压,取振荡信号前沿线性度最好的一段作为扫描电压,通过调整振荡信号频率来调整扫描信号斜率,从而调节扫描速度。用多组 RLC 二阶电路实现多个扫速档位,用电磁继电器在多个档位之间切换。理论分析和实验结果均表明,多组 RLC 电路结合电磁开关可实现扫速多档可调,从而使同一台条纹相机既能用于诊断持续时间仅为数百皮秒的超快瞬态物理现象,亦能用于记录持续时间为数十纳秒的光学过程。

关键词: 条纹相机;变像管扫描相机; RLC 二阶电路;扫速调节电路

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)12-0066-05

A Sweep Rate Accommodation Circuit for Streak Camera

HE Hui, WEN Weifeng, ZHANG Denghong, LIU Shouxian

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract: A sweep rate accommodation circuit for streak camera is proposed to address the problem that streak cameras with a fixed sweep rate can not be used to diagnose ultrafast transient physical experiments in different time scale. The sweep circuit consists of a high voltage pulse generator and a speed regulator. The step voltage pulse from the pulse generator is converted into an underdamped oscillation voltage through a two-order RLC circuit with a series topology, and the part in the front-edge of the oscillation signal, which has the best linearity, is used as the sweep voltage. The slope of the front-edge of the oscillation signal is adjusted through adjusting the frequency of the oscillation, as a result, the sweep rate of the streak camera can be regulated. Several RLC circuits are used to realize multiple sweep speed gears, and electromagnetic relay switches are used to switch between gears. Theoretical analysis and experimental results show that several RLC circuits in combination with electromagnetic switches can make the sweep rate of the streak camera adjustable with multiple gears, so that a streak camera can be used not only to perform the diagnosis of a physical phenomenon lasting for only hundreds of picoseconds, but also to record an optical phenomenon with a duration of tens of nanoseconds.

Keywords: streak camera; image-converter streak camera; RLC circuit; sweep rate accommodation circuit

在武器物理研究(如惯性约束聚变、Z 箍缩、爆轰物理、加速器以及高能激光等)中,常常需要对物质运动和相互作用过程进行诊断,而这些物理过程往往持续时间很短,甚至达到亚纳秒级。在这个时间量级上普通的高速摄影设备已经不能满足要求,条纹相机是唯一能诊断亚纳秒级物理过程的光学诊断设备^[1]。

条纹相机又称为变相管扫描相机,能将输入光的一维信息随时间变化的过程映射到平面并成像在荧光屏上,其时间分辨率可达几个皮秒乃至亚皮秒,空间分辨率可达数十微米,至今还没有任何一种其他设备在直接检测超快光学现象方面能够达到与条纹相机相当的时间分辨率^[1-2]。因其时空分辨率高,光谱响应宽,输入动态范围大,以及对单次事件的捕获能力强的特点,条纹相机已成为武器物理研究不可或缺的诊断设备。此外,条纹相机还被用于半导体物理、光化学、激光雷达和光通信研究领域^[2-4]。由于条纹相机的特殊地位,长期以来欧美国家对我国实施严格禁运和技术封锁,因此深入研究并自主掌握该项技术具有重大意义。

条纹相机的性能除了取决于其核心器件条纹管以外,在很大程度上取决于扫描电路^[5]。一套完整的扫描电路由脉冲发生器和扫速调节电路组成^[6-7]。脉冲发生器的作用是产生一个边沿陡峭的高压脉冲信号,该信号边沿的斜率决定了条纹相机的最快扫速。档位调节电路根据需要将高压脉冲的边沿斜率降低至不同的等级,以满足对不同扫描速度的需求。

文献[5-6]中均提到使用 RLC 二阶电路来调节高压脉冲边沿的斜率,但未就此作更深入的分析。本文分析了 RLC 二阶电路的特点,为其用作扫描档位调节电路提供理论依据,并以理论分析为指导,在实验中成功应用 RLC 二阶电路实现了多个扫描档位可调,各档位扫描电压线性度均优于 3%。

1 RLC 二阶电路理论分析

扫速调节电路的任务是将前端脉冲发生单元输出的高压阶跃跳变信号转换为线性渐变的斜坡扫描电压。工作在欠阻尼状态下的串联型 RLC 电路可将输入的高压阶跃信号转换为幅度随时间衰减的正弦振荡型号。若振荡信号幅值足够高,取其线性度最好的一段作为扫描电压,通过调整振荡频率来调整扫速,则有可能在保证扫描电压线性度的情况下实现扫速调节。

有必要先对串联型 RLC 电路进行理论分析,得

到其阶跃响应曲线。典型的输入信号为 u_{in} 、输出信号为 u_{out} 的串联型 RLC 二阶电路如图 1 所示。

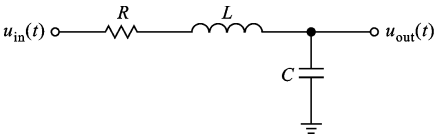


图 1 串联型 RLC 二阶电路

为了得到上述二阶电路对阶跃信号的响应曲线,根据基尔霍夫定律,列出关于输出电压的方程

$$\frac{d^2 u_{out}}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_{out}}{dt} + \frac{1}{LC} u_{out} = u_{in}(t) \tag{1}$$

设输入电压 u_{in} 为单位阶跃信号

$$u_{in}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \tag{2}$$

并设电路的初始状态为 0 状态

$$\left. \begin{aligned} V_C(0) &= 0 \\ I_L(0) &= 0 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式中: $V_C(0)$ 为电容初始电压; $I_L(0)$ 为电感初始电流。

令 $\alpha = \frac{R}{2L}, \beta = \left(\left| \frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} \right| \right)^{1/2}$, 根据 R 取值的不同方程(1)的解可分为以下 3 种情况。

(1) 当 $R > 2(L/C)^{1/2}$ 时, 有

$$u_{out} = \frac{1 + \alpha + \beta}{-2\beta} \exp[(\beta - \alpha)t] + \frac{1 + \alpha - \beta}{2\beta} \exp[-(\alpha + \beta)t] + 1 \tag{4}$$

(2) 当 $R = 2(L/C)^{1/2}$ 时, 有

$$u_{out} = 1 - \exp(-\alpha t) - (\alpha + 1)t \exp(-\alpha t) \tag{5}$$

(3) 当 $R < 2(L/C)^{1/2}$ 时, 有

$$u_{out} = 1 - \left(\frac{\alpha^2 + \beta^2}{\beta^2} \right)^{1/2} \exp(-\alpha t) \sin(\beta t + \phi) \tag{6}$$

式中: $\phi = \arctan \frac{\beta}{\alpha}$ 。

令 $\zeta = \frac{0.5R}{(L/C)^{1/2}}$, 电容、电感值分别为 $L = 1 \text{ H}$ 、 $C = \frac{1}{4\pi^2} \text{ F}$, 根据式(4)~式(6)可绘出当 ζ 取不同值时的输出电压波形, 如图 2 所示。

由图 2 可知, 当 $\zeta < 1$ 时 RLC 二阶电路的阶跃响应呈衰减振荡放电波形, ζ 值越小, 振荡幅度越大。幅值在 0.4~0.6 V (如图 2 中水平虚线所示) 之间的一段波形可近似为直线, 并且线性度非常好, 可作为条纹管的扫描斜坡。当 $\zeta = 0.1$ 时, 由于振荡幅度太大, 振荡的负峰值进入到 2 条水平虚线之间

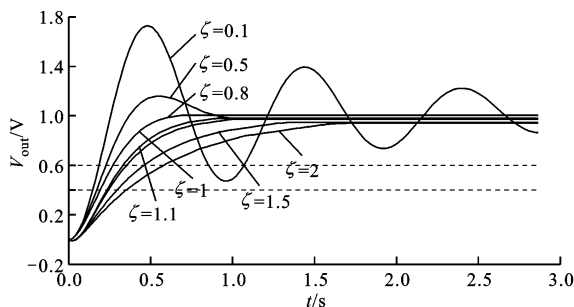


图2 RLC电路的阶跃响应曲线

的区域,这将会造成条纹相机的回扫现象。

当 $\zeta=1$ 时,振荡刚好消除,电路为临界阻尼状态。若 ζ 继续增加,则信号的上升时间逐渐变长,电路为过阻尼状态。由图2可知,当 $\zeta=1$ 时,阶跃响应在电压为 $0.4\sim 0.6\text{ V}$ 区间的线性度已不太理想,并且随着 ζ 的增加,该区间内波形的线性度进一步恶化。所以,作为条纹相机的扫描档位调节电路,不应让 RLC 电路工作在临界阻尼和过阻尼状态。

以上分析表明,当 RLC 二阶电路工作在欠阻尼状态,其阶跃响应为衰减振荡放电波形。在2个稳态电平(这里指 $t<0$ 时的电平 0 V 和 t 趋于无穷大时的电平 1 V)正中间足够小的区域内(如图2中 $0.4\sim 0.6\text{ V}$ 区间内)的一段响应曲线可视为直线,可用作扫描斜坡电压。需要注意的是, ζ 值不能太小,否则可能引起回扫现象和高压振荡对外辐射。通过改变 L 、 C 的值,可调节衰减振荡的振荡频率,改变扫描电压斜坡的斜率,进而达到调整扫描速度的目的。另外,从图2中不难看出,通过改变 R 的值也可以对扫描速度进行微调,尽管调节的范围有限。

2 扫速档位调节电路

条纹管的满屏扫描电压较高,通常在 $240\sim 400\text{ V}$ 之间,假设为 320 V ,即2个偏转板电压差从 -160 V 变化到 160 V 时,条纹像从荧光屏的一个边缘移动到另一个边缘。条纹相机在工作时要求扫描电压随时间变化是线性的,因此电压斜坡的线性度是扫描电路的一个重要指标^[8-9]。

从前面的分析可知,由 RLC 二阶电路得到的阶跃响应曲线仅在很小的一个电压区间内线性度较好。如果用一路扫描电压加在一个偏转板,另一个偏转板接地,则需要产生一个从 $-160\text{ V}\sim 160\text{ V}$ 线性变化的扫描电压斜坡,而若将2路对称的扫描电压分别加在2个偏转板上,其中一路从 $-80\text{ V}\sim 80\text{ V}$ 变化,另一路从 $80\text{ V}\sim -80\text{ V}$ 变化,则2个偏

转板上电压差仍然是从 $-160\text{ V}\sim 160\text{ V}$ 变化。但在电路设计方面则只需产生一路从 $-80\text{ V}\sim 80\text{ V}$ 线性变化的电压和一路从 $80\text{ V}\sim -80\text{ V}$ 线性变化的电压,缩小了对斜坡线性度要求较高的电压区间,降低了设计难度^[10]。

在图1电路中,可以通过改变阶跃信号的性质和电容上的初始电压,得到需要的扫描电压斜坡。例如,若将初始条件设为

$$\left. \begin{aligned} V_C(0) &= -400\text{ V} \\ I_L(0) &= 0\text{ A} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

设输入正跳变阶跃信号为:

$$u_{in}(t) = \begin{cases} -400\text{ V}, & t < 0 \\ 400\text{ V}, & t \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

取 $\zeta=0.5$,可得到一路上升沿电压,同理,可用负跳变阶跃信号和另一路扫速调节电路得到与之对称的下降沿电压,如图3中虚线曲线所示。将这2路对称扫描电压分别加在扫描管2个偏转板上,即得到所需的对称扫描斜坡电压。实际利用的只是曲线在 $-80\text{ V}\sim 80\text{ V}$ 之间(即图中2条水平虚线之间)的部分,其线性度是非常好的。

由式(4)可知,调节 L 、 C 的值可改变欠阻尼振荡的频率,进而调节扫描速度。例如,将 L 和 C 的值各减小50%,则振荡频率增加约1倍,扫描速度加快,满屏扫描时间由原来的 Δt_2 减小至 Δt_1 ,达到了调节扫描速度的目的,如图3中实线所示。

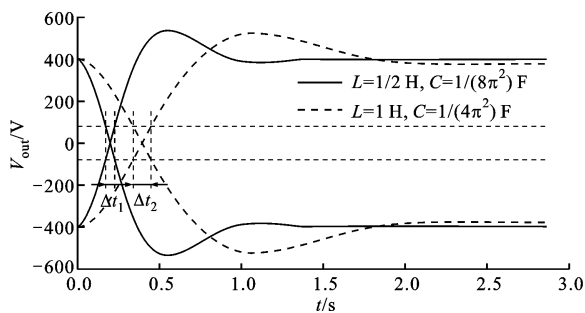


图3 对称扫描电压曲线

用多组 RLC 电路结合电磁继电器构成条纹相机档位调节电路,如图4所示。图中共有6个档位,每个档位包含2个 RLC 网络,其中一个用于产生正扫描电压斜坡,另一个用于产生负扫描电压斜坡。控制信号 $S_1\sim S_6$ 控制电磁开关将某个档位对应的2个 RLC 网络接入,并断开其他 RLC 网络。各档位通过选择不同的 L 、 C 值,获得不同的扫描速度。对应于每档的 L 、 C ,选择合适的 R 值,在满足线性度要求的同时,避免振荡幅度过大引起的回扫和电磁干扰。

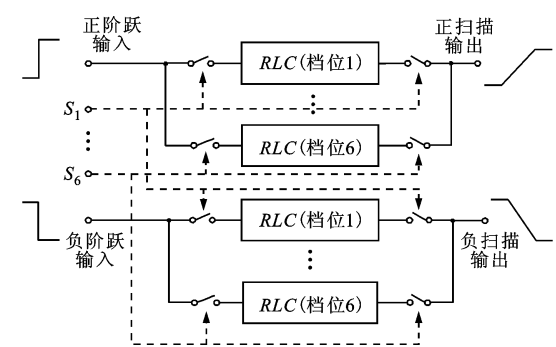


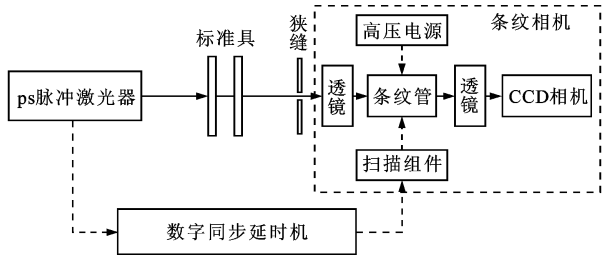
图 4 条纹相机扫速档位调节电路示意图

3 实验结果及分析

档位调节电路共有 6 个扫速档位,以前级脉冲发生器产生的快脉冲为输入,可输出不同扫速的扫描信号。各档的满屏扫描时间分别为 800 ps、2 ns、5 ns、10 ns、20 ns 和 50 ns。用示波器的 2 个通道测量对称扫描电压,在示波器内作差分运算可得到对称扫描电压的差分波形。图 5 中给出了 800 ps 档和 5 ns 档的扫描电压差分波形截屏,图中用光标标出了差分电压为-160 V 和 160 V 的位置,测量了电压从-160 V 上升到 160 V 的时间(对应于条纹管的满屏扫描时间)。由图 5 可知,扫描斜坡电压的扫速基本满足要求。取各档扫描电压波形数据在-160 V~160 V 区间内的部分进行计算,获得了扫描电压非线性度参数,如表 1 所示。结果表明,各档位扫描电压波形的非线性度优于 3%。

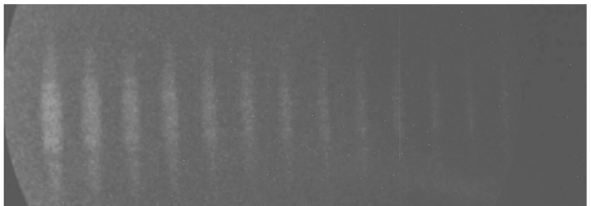
表 1 各档位的扫描电压非线性度						
档位/ns	0.8	2	5	10	20	50
非线性度/%	1.08	2.53	1.93	2.42	2.34	2.75

用本扫描组件作为扫描单元搭建条纹相机扫描实验平台,如图 6 所示^[11]。图 7 给出了 800 ps 档和 5 ns 档的条纹图像。从得到的图像看,相机每一档的满屏扫描时间均略低于单独测试扫描组件时用示波器测得的值。这有 2 个原因:①在调整各档扫速时,设定满屏扫描电压-160 V~160 V,而所使用的条纹管其实际满屏扫描电压可能是一个更小的电压范围,这将导致相机的满屏扫描时间小于设定值;②在单独测试扫描组件时,所用的示波器探头有 10 pF 的寄生电容,而用扫描组件驱动扫描管时,扫描管的 2 个偏转板间的电容小于 10 pF,即扫描输出的容性负载减小了,这也会导致相机的实际扫速略高于设定值。在相机定型之前,要以实际测得的扫描图像为准对各档位的扫描速度进行标定和校准^[12-14]。

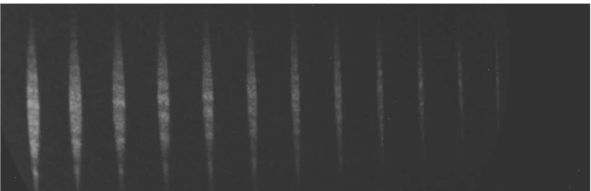


实线箭头为光信号流向;虚线箭头为电信号流向

图 6 条纹相机扫描实验平台示意图

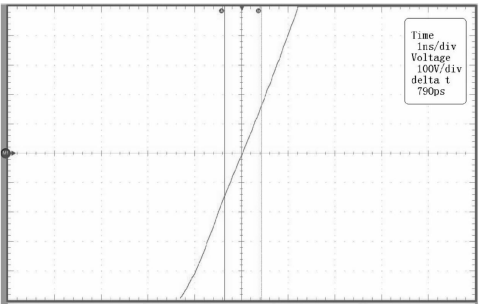


(a)800 ps 档,50 ps 标准具

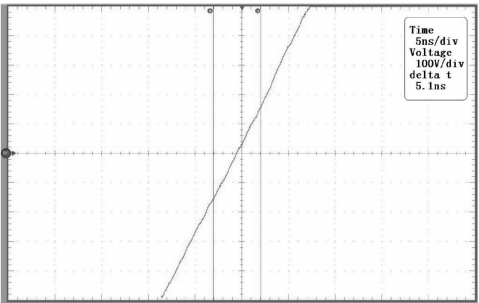


(b)5 ns 档,250 ps 标准具

图 7 实验条纹图像



(a)满屏扫描时间 800 ps



(b)满屏扫描时间 5 ns

图 5 对称扫描电压差分波形截屏

4 结 论

本文分析了将 RLC 二阶电路用作条纹相机扫速调节电路的原理。以理论分析为指导,用多路 RLC 电路和电磁开关设计了条纹相机扫速档位调节电路,在保证扫描电压线性度的同时实现了条纹相机扫速 6 档可调。获得了各档的对称扫描电压差分波形和非线性度参数。结果表明,各档扫描电压的非线性度均优于 3%。将该电路用于扫描组件,搭建条纹相机实验平台,获得了各扫速档对应的条纹图像。

参考文献:

- [1] 张登洪. 皮秒时间分辨率变像管相机研制及进展 [M] // 中国工程物理研究院科技年报. 绵阳,四川: 中国工程物理研究院, 2011: 99-101.
- [2] Hamamatsu Company. Guide to streak cameras [EB/OL]. [2013-05-13]. http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/sys/e_streakh.pdf.
- [3] 岳梅,郭宝平,胡涛,等. 基于皮秒扫描相机的激光雷达成像系统研究 [J]. 深圳大学学报: 理工版, 2010, 27(2): 181-184.
YUE Mei, GUO Baoping, HU Tao, et al. The research of lidar imaging based on picosecond streak tube camera [J]. Journal of Shenzhen University: Science and Engineering, 2010, 27(2): 181-184.
- [4] 王哲斌,杨冬,张惠鸽,等. 光学条纹相机时间扫描性能应用 [J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(8): 1836-1840.
WANG Zhebin, YANG Dong, ZHANG Huige, et al. Sweep time performance of optic streak camera [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(8): 1836-1840.
- [5] CUNIN B, MIEHE J A, SIPP B. Sweep devices for picosecond image-converter streak cameras [J]. Rev Sci Instrum, 1980, 51(1): 103-110.
- [6] 李炳乾,王永昌,张小秋,等. 条纹相机扫描电路特性研究 [J]. 西安交通大学报, 1998, 32(4): 108-110.
LI Bingqian, WANG Yongchang, ZHANG Xiaoqi, et al. Research on the characteristics of the sweep circuit of streak camera [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(4): 108-110.
- [7] 郭宝平,牛慈笨. 高压功率晶体管在扫描相机中的应

用 [J]. 光子学报, 1996, 25(10): 898-900.

GUO Baoping, NIU Hanben. Application of high voltage non-avalanche transistors to sweep circuit in streak camera [J]. Acta Photonica Sinica, 1996, 25(10): 898-900.

- [8] 夏彦文,刘华,陈波,等. 条纹相机扫速非线性的标定和修正 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(S1): 209-212.
XIA Yanwen, LIU Hua, CHEN Bo, et al. Calibration and correction of sweep rate nonlinearity of the streak camera [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(S1): 209-212.
- [9] 彭晓世,刘永刚,张惠鸽,等. 光学条纹相机扫描速度实验标定 [J]. 核电子学与探测技术, 2008, 28(4): 841-845.
PENG Xiaoshi, LIU Yonggang, ZHANG Huige, et al. Experimental calibration of sweep speed for optic streak camera [J]. Nuclear Electronics and Detection Technology, 2008, 28(4): 841-845.
- [10] 顾礼,胡昕,杨勤劳,等. 多量程 X 射线条纹相机研制 [J]. 深圳大学学报: 理工版, 2011, 28(3): 225-228.
GU Li, HU Xin, YANG Qinlao, et al. Study of multi-range X-ray streak camera [J]. Journal of Shenzhen University: Science and Engineering, 2011, 28(3): 225-228.
- [11] 畅里华,刘宁文,彭其先,等. 变像管扫描相机扫描速度及非线性的标定技术 [J]. 激光技术, 2012, 36(3): 315-317.
CHANG Lihua, LIU Ningwen, PENG Qixian, et al. Sweep speed and its nonlinearity calibration for an image-converter tube streak camera [J]. Laser Technology, 2012, 36(3): 315-317.
- [12] DAVIES T J. Technique for optically calibration streak cameras [J]. Review of Scientific Instruments, 1970, 41(7): 920-922.
- [13] MONTGOMERY D S, LERCHE R A, LAUMANN C W, et al. Evaluating the accuracy of optical-streak-camera sweep rates using uncertain data [J]. Review of Scientific Instruments, 1992, 63(10): 4322-4326.
- [14] BELL P, GRIFFITH R, HAGANG K, et al. Compact optical technique for streak camera calibration [J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(10): 3930-3933.

(编辑 刘杨)