

文章编号: 1001—4322(2001)02—0199—05

高功率固体激光驱动器能源系统 线路结构优化实验研究*

陈立华, 薛锡钢, 力一峥, 赖贵友, 郑万国, 张小民
许建军, 栾永平, 郭良福, 陈德怀, 彭翰生

(中国工程物理研究院 高温高密度等离子体物理国家重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 高功率固体激光驱动器能源系统主要为闪光灯提供脉冲能量。在对能源系统的研究中, 通过采用具有预电离技术的电容器一端接地的电路结构, 选用新品低损耗电缆及其它措施, 有效地抑制了电磁干扰和地电位抬高, 提高了电路的能量转换效率, 从而满足了惯性约束聚变驱动器对能源系统的要求。尤其加预电离后, 闪光灯放电电流波形发生变形有利于提高放大器效率的变化。

关键词: 惯性约束聚变; 电容器接地; 预电离技术; 能量转换效率

中图分类号: TN 24 **文献标识码:** A

能源系统是惯性约束聚变强激光驱动器的重要组成部分, 它为闪光灯提供脉冲能量。以前的强激光驱动器装置(如 Nova、神光 II、星光)的能源系统均采用开关一端接地的电路结构^[1]。美国在国家点火装置(NIF)的原型单元(Beamlet)能源系统上首次采用了电容器一端接地的电路结构, 这种电路结构简单, 容易模块化, 并能有效的抑制电磁干扰和地电位的抬高。同时在 NIF 能源系统中应用预电离技术来延长闪光灯的寿命和提高放大器的效率。

4 × 2 片状放大器能源系统将在国内首次采用电容器一端接地电路结构的模块化设计。为了验证其电路结构的特点并进行优化设计, 我们在有两路放电回路的能源实验平台上进行了线路优化原理性实验研究, 并取得了一些进展。

1 线路结构的优化

1.1 两种电路结构

如图 1 所示, 开关一端接地, 电容器悬浮的电路结构, 为叙述方便简称为 A 型电路结构。如图 2 所示, 所有的电容器并联在一起, 电容器一端接地的电路结构, 简称为 B 型电路结构。

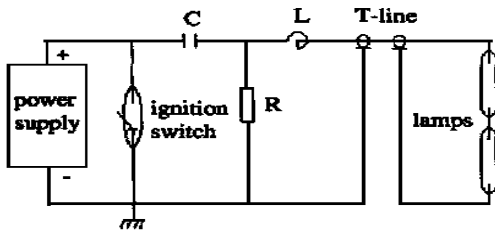


Fig 1 A type simplified experimental schematic
图 1 A 型电路结构简图

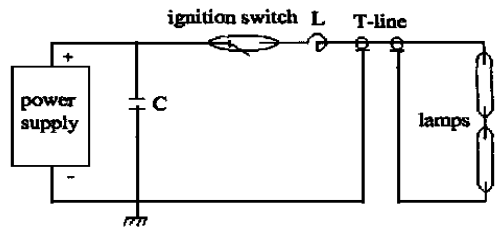


Fig 2 B type simplified experimental schematic
图 2 B 型电路结构简图

在两种电路结构中: C 为储能电容器, 193 2μF; L 为放电平波电感, 147. 1μH; R 为充电电阻; 电缆为一般常用电缆, 50m; 闪光灯为 32mm × 1400mm, p = 26. 7kPa, 两灯串联。工作时, 充电机对储能电容器充电, 达到预定充电电压时, 停止充电, 触发开关对闪光灯放电。测试电流采用 920 1 罗氏线圈作为

* 收稿日期: 2000-11-10; 修订日期: 2000-12-16
基金项目: 国家 863 惯性约束聚变领域资助课题(863-416-7. 3)
作者简介: 陈立华(1973-), 女, 研究实习员, 从事强激光能源系统相关技术研究工作, 绵阳 919-988 信箱。

大电流传感器,测试电压采用 Tekp6015 型 1000 1 高压分压器,波形的采集选用 Tek 644 型示波器。

1.2 性能对比研究

为了研究 A 型 B 型结构电路的性能,对两种结构电路能量传输及地电位特性分别进行实验研究。实验条件分别为:A 型结构电路实验,充电电压 22.07kV,放电时闪光灯两端的电压与电流波形如图 3,地电位电压波形如图 5;B 型结构电路实验,充电电压 22.31kV,放电时闪光灯两端的电压与电流波形如图 4,地电位电压波形如图 6。

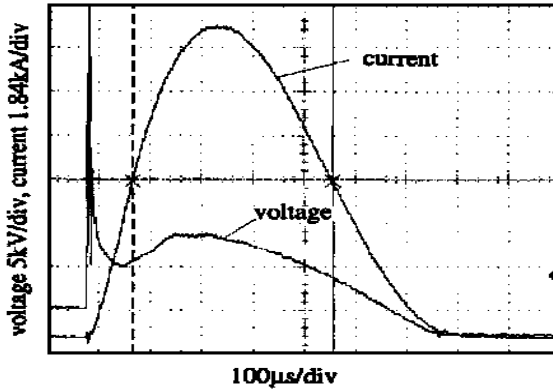


Fig 3 Flash-lamp current and voltage waveforms of A type
图 3 A 型结构电路闪光灯电流电压波形

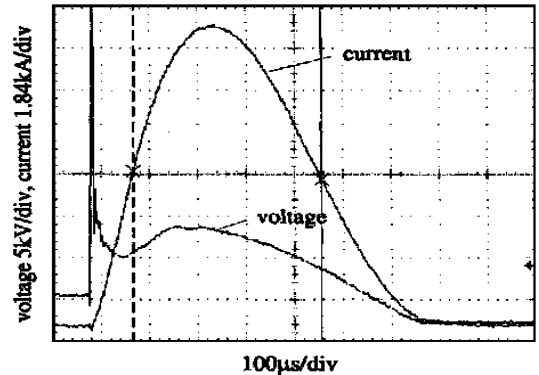


Fig 4 Flash-lamp current and voltage waveforms of B type
图 4 B 型结构电路闪光灯电流电压波形

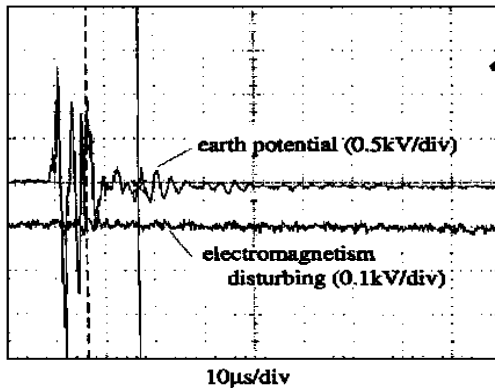


Fig 5 Earth potential of A type circuit
图 5 A 型电路结构地电位电压波形

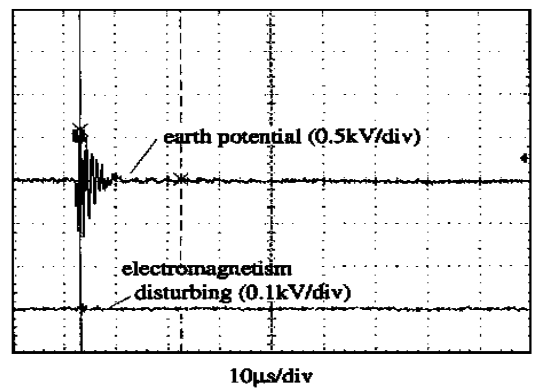


Fig 6 Earth potential of B type circuit
图 6 B 型电路结构地电位电压波形

根据下述关系

$$E = \int_0^T U I dt, \quad T = 500\mu s \quad (1)$$

$$E_0 = CV^2/2 \quad (2)$$

$$\eta = E/E_0 \quad (3)$$

经计算可知,A 型电路的能量转换效率为 76.73%,B 型电路的能量转换效率为 77.5%。两种电路结构在回路参数及连接条件不变的情况下,测得的能量转换效率相差不多,电路结构的改变对能量转换效率影响不大。然而,在 A 型电路结构,电容器瞬间放电其地电位变化峰值达- 2~ 1.5 kV;B 型电路结构,其地电位变化为- 0.5~ 0.5kV。

造成两种电路结构的地电位瞬间变化幅度差异的主要原因是 A 型结构电路中储能电容悬空其分布电容造成的影响。B 型电路结构有效地抑制了电磁干扰情况并大大降低了地电位的抬高。可见在 4 × 2 片状放大器能源模块中采用电容器一端接地,开关放电开关高压悬浮的 B 型电路结构,可大幅度降低电容器悬浮在放电空间中对地电位造成的严重影响。

1.3 预电离技术

目前,国内强激光驱动器正常运行时,其能源系统预电离电路只完成预电离检验功能:即在系统高能量运行前,由预电离电路提供低能量的电脉冲,主要目的是检验闪光灯的完好性,4×2片状放大器能源系统除完成预电离检验功能之外,还用产生高压脉冲实现闪光灯的初始触发并提供一定密度的等离子体,在预电离脉冲50~200μs后,由主脉冲泵浦电路为闪光灯提供脉宽为500μs的主脉冲。美国在国家点火装置(NIF)的原型单元(Beam let)上首次在主放电前加预电离脉冲,该技术不但延长了闪光灯的使用寿命,而且提高了放大器效率。据报道,Beam let由于应用预电离技术,使放大器效率提高了5%。预电离支路可能存在振荡,这对预电离电容器、预电离开关提出较高要求。为了避免发生振荡,采用增加主放电延时,增加预电离电感等方法。如果预电离开关采用可控制关断的开关,保证在主放电开关导通时预电离开关已经关断,完全可以避免预电离支路和主电容器之间的振荡。同时采用预电离技术后,主放电脉冲波形发生变化,这种变化有利于提高放大器效率。典型预电离实验波形如图7。

然而,预电离技术是一项新技术,闪光灯预电离确切的物理条件必须结合放大器增益实验进一步研究优化确定^[2]。

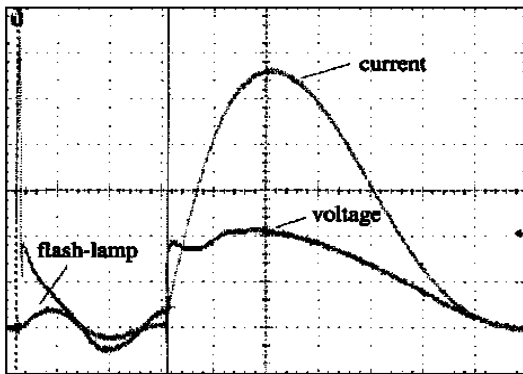


Fig 7 Flash-lamp current and voltage typical waveforms of preionization

图7 典型的预电离闪光灯电压电流波形

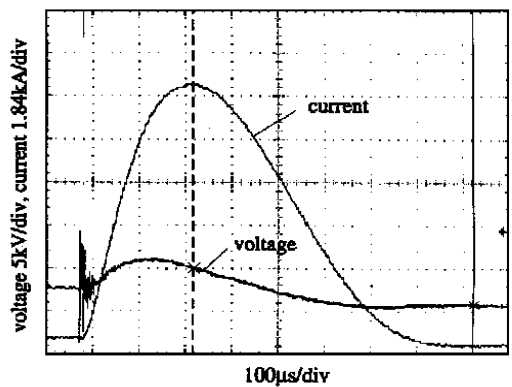


Fig 8 The cable current and voltage waveforms

图8 电缆电压电流波形图

2 电路阻抗特性参数的优化

2.1 转换效率的提高

在4×2片状放大器能源模块装置中要求能量转换效率大于80%,然而,经计算与实验研究改变电路的结构并未使其能量转换效率达到要求,因此,提高能量转换效率最有效的方法就是对电路中主要器件的能量损耗情况观察,有针对性的对电路元件进行优化改造。

应用A型电路结构实验研究了开关、电感、闪光灯、电缆的阻抗情况。当充电电压为22.07kV时,电路元件参数不变,实验条件不变,实验测得的电压电流波形如图8所示。

各元件的平均等效电阻:开关0.0206Ω,闪光灯0.903Ω,电缆(50m)0.062Ω,电路的能量转换效率为76.9%, R_L 是闪光灯在放电过程中的特性阻抗。由公式(4)可知:回路的阻抗 r 为0.1263Ω。

$$\eta = \left(\frac{R_L}{R_L + r} \right)^2, \quad \eta = 76.9\% \quad (4)$$

在实验电路中,回路的能量损耗基本以纯电阻损耗为主,回路的阻抗 r 为0.1263Ω,此时,电路的能量转换效率仍小于80%,因此,则考虑降低回路的阻抗以减少能量损耗来提高能量转换效率。考虑到开关需引进,闪光灯参数与光物理设计参数有关,所以拟采用新型电缆来减低回路阻抗,从而获得所需要的电传输效率。

2.2 新型电缆的设计

要降低电缆损耗,提高能量传输效率,重要方式:一方面是增加电缆截面,另一方面是降低材料的电

阻率。考虑到电缆大量使用及现有条件,选定增加电缆截面的方法。

要使传输效率大于 80%,即在其它元件阻尼参数不变的情况下根据设计要求,选取电缆长度为 50m,其电阻应为 $50\text{m}\Omega$,则传输电缆单位长度电阻为 $1.0\text{m}\Omega/\text{m}$ 。

设定内导体单位长度电阻 $R_i = 0.5\text{m}\Omega/\text{m}$,电流在导体内流过的集肤深度

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f\pi\mu_0\sigma}}, \quad f = \frac{1}{2\tau_m}, \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{H/m} \quad (5)$$

铜的电导率为

$$\rho = 1.84 \times 10^{-6}\Omega \cdot \text{cm}, \quad \sigma = 1/\rho \quad (6)$$

内导体截面积

$$\zeta = \rho \frac{1}{R_i} \quad (7)$$

通过公式(5)、(6)、(7),可推导出内导体直径为 0.758cm ,取 0.75cm 。传输电缆的外导体直径应视电缆耐压而定。同时考虑到工程安装性能,对电缆的设计制造中要考虑其弯曲半径小于 10cm ,针对上面的要求,研制了新型的低阻电缆。

2.3 性能对比研究

在 B 型电路结构中分别对两种电缆进行考察。选用 1# 电缆为一般常用电缆(前面实验应用);2# 电缆为专用低阻电缆,该电缆内导体采用铜绞线,外导体为双层铜线编织,聚乙烯绝缘,弹性体护套直径为 23.5mm ,在测试频率为 1kHz 的条件下电阻为 $0.9\Omega/\text{km}$ 。

B 型电路结构,电路参数 $C = 211\mu\text{F}$, $L = 123\mu\text{H}$,放电电缆采用 2# 电缆, 50m ,充电电压分别为 22.25kV , 22.35kV ,经计算,能量传输效率分别为 83.56% , 83.52% 。实验波形如图 9、图 10。

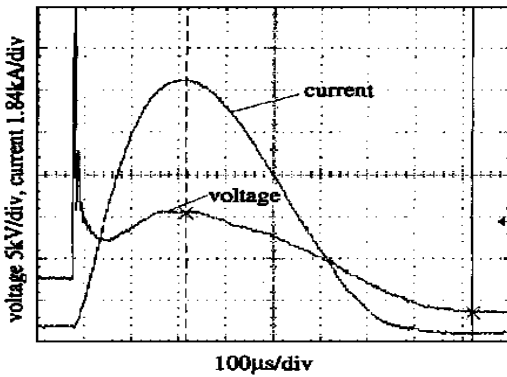


Fig. 9 Flash-lamp current and voltage waveforms with changing voltage 22.25kV

图 9 闪光灯电压电流波形图(充电电压 22.25kV)

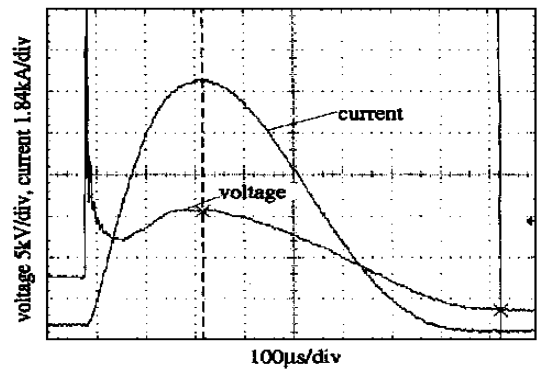


Fig. 10 Flash-lamp current and voltage typical waveforms with charging voltage 22.35kV

图 10 闪光灯电压电流波形图(充电电压 22.35kV)

由于采用了 2# 电缆以降低电缆电阻出发研制的专用低阻电缆,使得电路的能量传输效率有了显著提高(提高了 7%),满足了 4×2 片状放大器的性能指标要求。

3 结 论

通过实验研究,对 4×2 片状放大器能源系统的电路结构和电路器件进行了优化,达到了能源系统的性能指标。应用电容器一端接地电路结构及相应的屏蔽措施有效地抑制了电磁干扰并降低了地电位的抬高,采用预电离技术不仅能检验闪光灯的完好性,还有利于延长闪光灯的寿命和提高放大器的效率。同时,由于采用了低阻损耗电缆提高了能源系统的能量转换效率,为放大器效率的提高奠定了基础。

参考文献:

[1] Larson D. Beam let pulsed power system [R]. UCRL-TR-105821-95-1: 62-67.

- [2] 力一峥, 周丕璋, 薛锡钢, 等. 强激光能源系统预电离实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(2): 178
[Li Y Z, Zhou P Z, Xue X G, et al. High power laser power conditioning system preionization experimental research. High power laser and particle beam s, 2000, 12(2): 178](in Chinese)
- [3] 郑万国, 贺少勃, 薛锡钢, 等. 单口径片状放大器研究[A]. ICF 1998 年年报[C], 绵阳: 1999: 3-9.
[Zheng W G, He S B, Xue X G, et al. Research of single aperture disk amplifier. 1998 ICF Annual Reports. 1999: 1-9](in Chinese)
- [4] 陈立华, 薛锡钢, 力一峥, 等. 激光驱动器能源系统实验平台测检系统的研究. 强激光与粒子束, 2000, 12(s1): 217-220
[Chen L H, Xue X G, Li Y Z, et al. The research of testing and controlling system for experiment bed of the power condition system. High power laser and particle beam s, 2000, 12(s1): 217-220](in Chinese)
- [5] Larson D W. The impact of high energy density capacitors with metallized electrode in large capacitor bank for nuclear fusion application. Digest of technical papers[A]. Ninth IEEE international pulsed power conference[C], Albuquerque, NM, 1993

High power laser drive power system with optimized circuit design

CHEN Li-hua, XUE Xi-gang, LI Yi-zheng, LA I Gui-you, ZHEN G W an-Guo

ZHANG Xiao-M in, LUAN Yong-ping, GUO L iang-fu, CHEN De-huai, PEN G Han-sheng

(National Key Laboratory of Laser Fusion, CA EP, P. O. Box 919-988, M ianyang 621900, China)

Abstract By use of scheme of grounded capacitor terminal with the preionization and a new low resistance cable, electromagnetism disturbing and earth-potential raising has been restrained, meanwhile the higher efficiency of energy conversion has been gotten. Therefore, satisfy and improve the performance of power conditioning system of high power laser driver in inertial confinement fusion, optimizing power conditioning system of 4×2 segment amplifier. With preionization the flash-lamp current waveform becomes favorable for improving the amplifier efficiency.

Key words: inertial confinement fusion; capacitor grounding; preionization; efficiency of energy conversion