

文章编号: 1001-4322(2012)04-0885-04

# 自同步多开关纳秒脉冲发生器\*

邓官垒<sup>1,2</sup>, 刘 振<sup>1,2</sup>, 王秉哲<sup>1,2</sup>, 闫克平<sup>1,2</sup>

(1. 浙江大学 生物质化工教育部重点实验室, 杭州 310027; 2. 浙江大学 工业生态与环境研究所, 杭州 310028)

摘 要: 介绍了一种基于传输线变压器(TLT)的多开关脉冲功率技术。该技术可以像 Marx 发生器一样实现多个开关的自动同步,而且在输出上更具灵活性:不仅可以通过电压叠加获得高电压输出,而且可以通过电流叠加实现大电流输出,或者用于同时驱动多个独立的负载。基于该技术已成功开发了 10 火花开关的短脉冲系统。理论设计了带有 20 开关和 20 级 TLT 的脉冲发生器,单脉冲能量 140 J,预计峰值功率可达 5 GW,可实现多种不同输出方式以满足不同应用需求。

关键词: 多开关; 传输线变压器; 火花开关; 自动同步; 脉冲功率

中图分类号: TM836 文献标志码: A doi:10.3788/HPLPB20122404.0885

在实现大功率脉冲输出时,通常需要多开关联用,如串联以获取高电压,或并联来获取大电流。Marx 发生器和直线型脉冲变压器(LTD)是多开关电路的两个典型代表<sup>[1]</sup>。Marx 发生器开关串联,所有开关由于过压可自动同步。LTD 电路因多个开关并联使用,不能实现开关自动同步,需要外置同步触发脉冲。鉴于 LTD 自身的上升时间为数十 ns,因此对于触发系统的前沿和电压要求都较为苛刻<sup>[2]</sup>。2001 年,闫克平提出了一种新型的多开关脉冲功率电路,该电路通过传输线变压器(TLT)将多开关耦合在一起,各开关因导通过程中的过压可自动同步<sup>[3]</sup>。与 Marx 发生器相比,输出方式更灵活,不仅可以通过电压叠加获得高电压输出,而且可以通过电流叠加实现大电流输出,或者用于同时驱动多个独立的负载。同单个开关的脉冲发生器相比,多开关的使用可使系统寿命延长至  $n^2$  倍以上( $n$  为开关数量)<sup>[4]</sup>,易于实现功率放大。基于该技术,刘振等人于 2007 年成功研发出一套 10 火花开关、10 级 TLT 的重复频率脉冲功率系统<sup>[5-7]</sup>,实现了峰值功率 1 GW、平均功率 30 kW 的短脉冲输出。目前,本课题组正研制一套 20 火花开关、20 级 TLT 的脉冲功率源。本文将介绍该电路的基本原理和采用该技术开发的快速高功率纳秒脉冲发生器。

## 1 基本原理

图 1 是 3 火花开关、3 级 TLT 脉冲系统的典型拓扑电路图。各电路左端为 TLT 输入端,由 3 个电容和 3 个火花开关串联组成;右端为输出端。传输线外套磁环以增加传输线级间及对地的二次阻抗<sup>[3,8]</sup>。

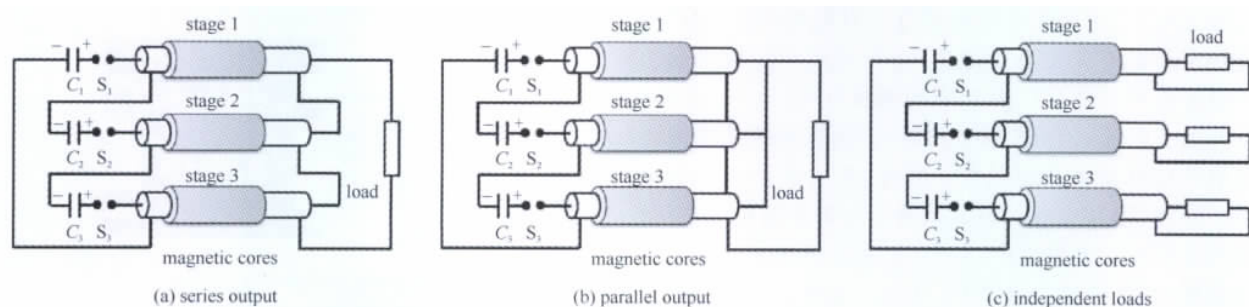


Fig. 1 Circuit topologies with 3-stage TLT and 3 spark gap switches

图 1 带有 3 火花开关和 3 级 TLT 的脉冲电路拓扑

对于 ns 量级的脉冲形成及开关同步过程,参考 TLT 输入端等效电路(图 2)加以说明:图中  $C_i$  为电容,  $S_i$  为火花开关,  $Z_0$  为传输线特征阻抗,  $Z_{12}, Z_{23}, Z_{13}$  分别为第 1, 2, 3 级 TLT 相互之间形成的二次阻抗<sup>[5]</sup>,并假设在对称结构下  $Z_{12}, Z_{23}, Z_{13}$  相等。因传输线外套有磁环,得到的二次阻抗远大于传输线的特征阻抗。假设各个电容器充电电压为  $V_0$ ,  $S_1$  首先导通,由图 2 可知此时  $Z_{13}$  间电压为  $V_0$ ,由此  $Z_{12}, Z_{23}$  分别得到分压  $0.5V_0$ 。对于

\* 收稿日期:2011-10-31; 修订日期:2011-12-13  
基金项目:国家自然科学基金项目(11005091)  
作者简介:邓官垒(1987—),男,博士研究生,从事脉冲功率技术及其应用研究;icespxi@zju.edu.cn。

$S_2$ , 此时两端的电压为起始电压  $V_0$  加上  $Z_{12}$  两端电压  $0.5V_0$ , 即  $1.5V_0$ 。因结构上的对称,  $S_3$  此时亦处于  $1.5V_0$  的过压状态。于是,  $S_2$  和  $S_3$  其中一个会因过压而自动导通。假设  $S_2$  在  $1.5V_0$  电压下首先导通, 那么在  $Z_{23}$  间的电压将达到  $2V_0$ , 而  $S_3$  承受的电压则变为  $3V_0$  从而自动导通。因为电路的对称结构, 3 个开关不论哪一个首先导通, 都会促使剩下的开关自动同步导通。并且可以看到,  $C, S$  和  $Z_0$  组成了脉冲形成的主回路, 只有在所有开关都导通后, 电容器才开始快速脉冲放电。最后一个闭合的开关由于在闭合前承受的过压非常大, 其导通十分迅速, 因而输出脉冲上升时间最终决定于回路的杂散电感, 如何设计紧凑的结构成为了获得快速脉冲的关键。

该电路的可行性由如图 3 所示的小型装置所验证<sup>[8]</sup>, 该装置电路原理图为图 1(a)。系统由 3 个火花开关组成, 每级 TLT 由 2 m 同轴传输线组成, 特性阻抗  $50 \Omega$ 。3 个开关可在 10 ns 以内完成同步, 上升时间在 10 ns 以内。对于拥有 3 个以上开关的系统, 虽然实际机械结构使得各个二次阻抗不尽相同, 但其基本的过压同步过程同三开关系统类似。

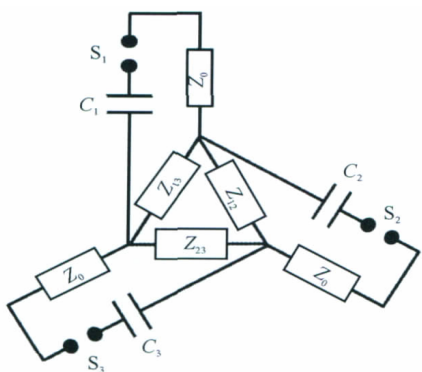


Fig. 2 Equivalent circuit at input side of TLT

图 2 TLT 输入端等效电路

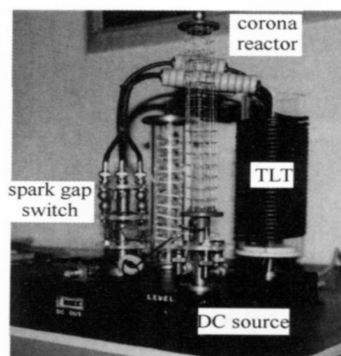


Fig. 3 Demo with 3-stage TLT

图 3 3 级 TLT 验证装置

## 2 10 级 TLT 系统

在带有 10 个火花开关和 10 级 TLT 的重复率脉冲功率系统中, 每级由电容器 (1 nF)、高电压火花开关和单根传输线组成的单级 TLT 构成<sup>[7]</sup>。传输线为 RG218 同轴电缆, 特征阻抗  $50 \Omega$ , 电缆外套 Metglas 磁环以增加二次阻抗。高压电容经由初级谐振电源充电<sup>[3, 5, 9]</sup>。每个电容通过一对电感 ( $605 \mu\text{H}$ ) 连接至谐振电源变压器副边, 在开关同步过程中起到隔离电容的作用。由于采用谐振充电, 在其中一个开关上配置了 LCR 触发回路, 以确保系统在每次充电后均可保证稳定触发。此外, 为了获得更好的脉冲特性, TLT 的输入端集成在一个紧凑的单元中, 如图 4 所示。该单元中, 10 个开关全部置于一个充气容器中, 可提供  $0.4 \text{ MPa}$  气压。此外, 10 个开关的间隙位于同一个平面, 在同步过程中火花放电产生的紫外线及其他活性粒子可以促进开关的同步过程。TLT 外面使用的 Metglas 磁环相对磁导率为 245, 使得各级间阻抗在  $2 \text{ k}\Omega$  以上, 远大于电缆的特性阻抗。TLT 输出端采用并联方式连接至匹配负载电阻上, 输出阻抗  $5 \Omega$ 。

系统脉冲输出特性如下: 10 个开关在 10 ns 之内完成同步, 输出脉冲上升沿 10 ns, 脉冲宽度 55 ns。输出电压可达 70 kV 以上, 输出电流  $6 \sim 11 \text{ kA}$ , 峰值功率至 1 GW, 能量转换效率  $93\% \sim 98\%$ 。系统可在 300 Hz 重复频率下稳定运行, 平均功率达到 30 kW。

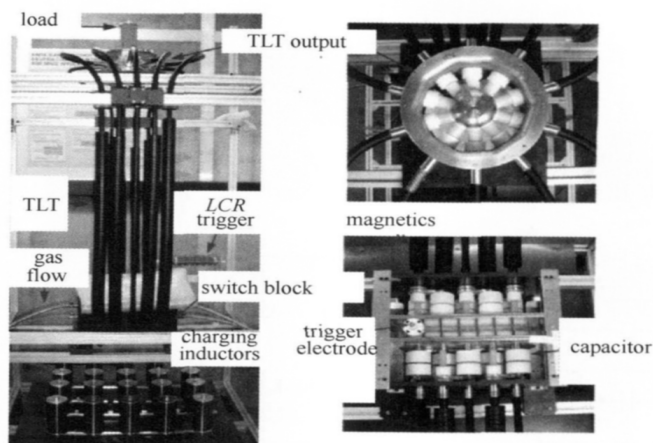


Fig. 4 Overview of 10-switch system

图 4 10 开关脉冲功率装置

### 3 20 级 TLT 系统

目前我们正在研发带有 20 个火花开关和 20 级 TLT 的高功率脉冲电源,以满足多路(20~100)独立高压脉冲输出和其他不同应用需求,电路图如图 5 所示。该电源中,每级由电容器(5.6 nF)、充气双间隙火花开关和一级 TLT 构成。每级 TLT 由 5 根 RG218 同轴电缆组成,输入端并联,输入阻抗 10 Ω,外套开隙铁氧体磁环。所有的电容器、火花开关和 TLT 输入端都集成到一个紧凑单元中,如图 6 所示。所有的开关间隙都置于加压容器中,设计压力 0.2 MPa,工作电压可通过充气压力控制,总计 4 排开关间隙由独立的气流通过以满足重复频率操作。开关采用双间隙设计可提高输出性能<sup>[6]</sup>,同时也便于 LCR 触发信号的引入。

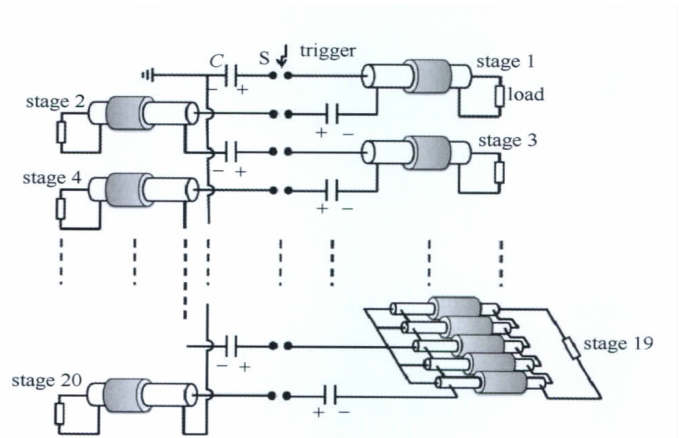


Fig. 5 Schematic of 20-switch, 20-stage TLT system

图 5 20 火花开关、20 级 TLT 脉冲系统电路图

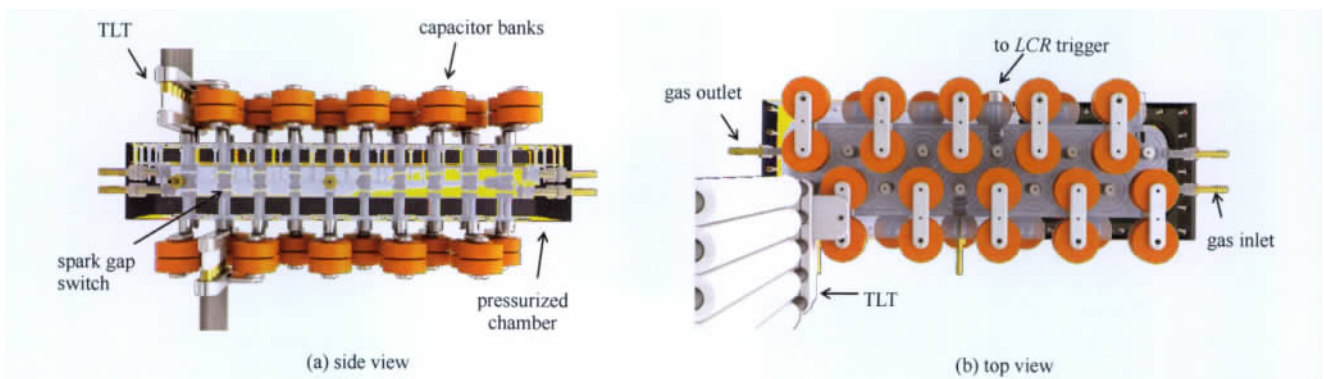


Fig. 6 Structure of switch unit

图 6 开关单元结构图

图 7 为最终设计图,开关单元垂直置于中央,两侧分别排列对应的充电电感。TLT 分置开关单元两边,各 10 级 50 根传输线。电容充电至 50 kV,单脉冲能量 140 J,预计脉宽 60 ns,峰值功率达 5 GW。由于 TLT 系统的脉宽和峰值功率是由电容和 TLT 输入阻抗决定,因此在开关单元保持不变的情况下,改变输出端连接方式后得到的脉宽和峰值功率都是不变的。基于在输出端有多达 100 个输出端口,根据不同的串并联形式可获得各种不同电压、电流和输出阻抗的脉冲。例如:100 根传输线独立连接至负载,由此得到 100 个同步的脉冲,峰值电压电流分别为 50 kV,1 kA,输出阻抗 50 Ω,单脉冲能量 1.4 J;每级 TLT 的 5 根传输线串联至独立负载,得到 20 个 250 kV,1 kA,7 J 的同步脉冲,输出阻抗 250 Ω;同一侧的每级 TLT 首先串联连接,之后 10 级串联的 TLT 再并联连接至负载,得到 2 个 250 kV,10 kA,70 J 的同步脉冲,输出阻抗 25 Ω。从同步原理讨论中知道,主放电回路电容在所有开关导通后才开始放电。鉴于各级 TLT 同电容之间为串联的关系,主回路放电时流经各级 TLT 的电流是相同的,而各级 TLT 的电压亦是相等的,即意味着各级 TLT 独立连接负载时,获得的脉冲是同步且独立的。

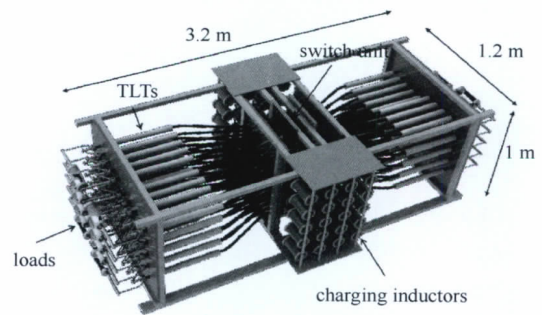


Fig. 7 Layout of 20-switch system

图 7 20 开关的脉冲功率装置设计图

### 4 结 论

本文介绍了基于 TLT 的自同步多开关脉冲功率技术的基本原理和开发的重复频率高功率纳秒脉冲装置。该电路中多开关可自动同步触发,无需外置同步装置。同时可实现电压叠加、电流叠加或独立驱动多个负

载。由于多开关共同分担负荷,开关寿命得到大幅增加。应用该技术已成功开发出 10 火花开关的重复频率纳秒脉冲功率系统,开关同步可靠,峰值功率和平均功率分别达到 1 GW 和 30 kW,能量转换效率 93%~98%。设计了 20 开关、20 级 TLT、共 100 根传输线的大功率重复频率脉冲源,其单脉冲能量 140 J,预计脉宽 60 ns,峰值功率可达 5 GW。其灵活的输出端配置可满足不同应用的特殊要求:基于各路输出独立同步的特性,可利用该电源作为大型 LTD 的多开关同步触发装置;多路独立同步开关可用于大面积低温等离子体的产生(如 100 路输出),应用于环境领域;多路并联作为高功率重复频率真空等离子体源(如 2 路输出),应用于金属纳米材料制备等。

#### 参考文献:

- [1] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2003:10-47. (Zeng Zhengzhong. Introduction to practical high power pulse technology. Xi'an; Shaanxi Science and Technology Press, 2003:10-47)
- [2] 周良骥, 邓建军, 陈林, 等. 国际快脉冲直线变压器驱动源技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(12): 1947-1953. (Zhou Liangji, Deng Jianjun, Chen Lin, et al. Status of linear transformer driver research. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(12):1947-1953)
- [3] Yan Keping. Corona plasma generation[D]. Eindhoven; Technische Universiteit Eindhoven, 2001.
- [4] Lehr F M, Kristiansen M. Electrode erosion from high current moving arcs[J]. *IEEE Trans on Plasma Sci*, 1989, 17(5): 811-817.
- [5] Liu Zhen. Multiple-switch pulsed power generation based on a transmission line transformer[D]. Eindhoven; Technische Universiteit Eindhoven, 2008.
- [6] Liu Zhen, Pemen A J M, van Hoppe R T W J, et al. An efficient, repetitive nanosecond pulsed power generator with ten synchronized spark gap switches[J]. *IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2009, 16(4):918-925.
- [7] Liu Zhen, Pemen A J M, Winands G J J, et al. Development of a heavy duty pulsed power generator with ten spark gap switches[C]//16th IEEE Int Pulsed Power Conf. 2007.
- [8] Yan Keping, Smulders H W M, Wouters P A A F, et al. A novel circuit topology for pulsed power generation[J]. *Journal of Electrostatics*, 2003, 58(3/4): 221-228.
- [9] Yan Keping, van Heesch E, Pemen A, et al. A 10 kW high-voltage pulse generator for corona plasma generation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(5): 2443-2447.

## Nanosecond pulsed power generators with auto-synchronized multiple switches

Deng Guanlei<sup>1,2</sup>, Liu Zhen<sup>1,2</sup>, Wang Bingzhe<sup>1,2</sup>, Yan Keping<sup>1,2</sup>

(1. Key-Laboratory of Biomass Chemical Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Industrial Ecology and Environment Research Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China)

**Abstract:** The paper introduces a multiple-switch pulsed power technique based on transmission-line-transformer(TLT). In the circuit, all the switches can synchronize themselves automatically like in a Marx generator. At the output side, a variety of output options are possible, i. e. high voltage, large current or independent pulse generation. A 10-switch, 10-stage TLT system has been successfully developed. At the moment, a repetitive large power generator with 20 switches and a 20-stage TLT is being developed. The peak power is estimated to be 5 GW with a total energy of 140 J per shot. Up to 100 independent simultaneous outputs can be realized with the same peak power.

**Key words:** multiple switches; transmission-line-transformer; spark gap switch; auto-synchronization; pulsed power