

电感储能和爆炸导体转换大功率 毫微秒脉冲发生器

王 莹 *

一、引言

众所周知,较早的脉冲放电功率技术,一般都采用单级并联电容器组、或者用麻克斯(Marx)发生器、或用带有脉冲变压器的电容器组作储能电源。这类电容电源的储能电容 C 和电路固有电感 L 构成的特征时间 $\sqrt{L/C}$ 较长,往往限制了能量的传递时间和速率,因而也限制了功率的提高,特别当建造高能大型设备而带来 C 、 L 的增大时,情况更为严重。我们称这类电容电源为“慢”电容储能器。后来,由于科学技术、国防和工业生产等领域强烈需求大功率毫微秒脉冲发生器,于是人们就在这初级慢储能器和负载之间加上称之为“快”电容储能器的同轴或带状线,以此把较宽的脉冲时间“压缩”变短,从而得到较强大的功率。这便是具有“慢”——“快”两级电容储能器的高压毫微秒脉冲发生器。

然而,这种快脉冲形成线电路也有弱点。其一,它的特性阻抗限制了更大功率的传递^{〔1〕};其二,它的储能密度较电感储能器低得多。电容储能密度是 $\frac{1}{2} \epsilon E^2$ (为介质电强度所限制),电感储能密度是 $\frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}$ (为承受磁压的机械强度所限制);我们取慢电容器上限值(介电常数 $\epsilon = 80 \epsilon_0$ 、电场强度 $E = 10^8 \text{V/m}$ 、磁感应 $B = 20 \text{T}$)^{〔2〕},则得到电容储能密度为 $3.5 \times 10^6 \text{J/m}^3$,电感储能密度为 $1.6 \times 10^8 \text{J/m}^3$ 。而在实际工作条件下,快电容储能器的电绝缘强度要比慢电容储能器低许多,因此实际上电感储能密度是快电容储能器的 $10^2 \sim 10^3$ 倍^{〔3,4〕}。

由此可见,若用快电容储能器建造储能 10^6J 以上的发生器时,其体积界限将达数十米且造价相对昂贵^{〔3-5〕}。所以人们努力设法改善快储能器。近二十年来所采用的电感储能爆炸导体转换的方法,就是其中之一。

二、工作原理

发生器的非线性电路(图1)很简单。当初级储能电容 C 建立起电压 U 以后,开关 K 闭合,储于 C 中的电场能量通过 R_e-L-C 回路向电感储能器 L 传输并转换成磁场能量。当回路电流 i 达到某一数值时,爆炸导体 R_e 爆炸。所谓“爆炸”是指导体吸收足够能量被加热到一定程度,在极短时间($10^{-7} \sim 10^{-8} \text{s}$)内气化,形成内部高压力的蒸气柱,电导率迅速降

* 中国人民解放军军械技术学院

低,使其呈现高阻值,将电路陡然“切”断,在 L 上感应电压

$$U_L = L \frac{di}{dt}$$

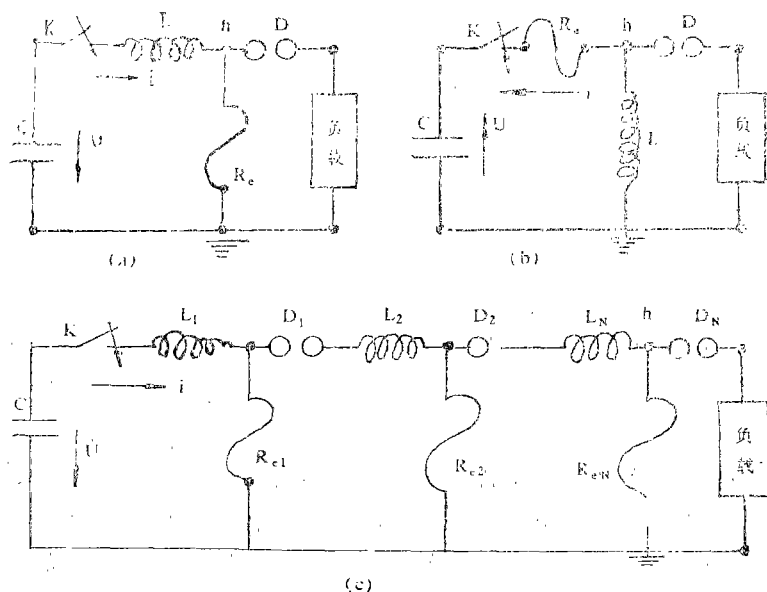


图 1 两种单级发生器 (a和b) 以及N级发生器电路

在 h 点输出高电压脉冲 u_h , 其半宽度为不计 R_e 常态电阻时的 $L-C$ 回路振荡周期的几十分之一^[6], 改变 L 、 C 的值和导体的几何参量, 可使其半宽度在几百到几十毫微秒内变化。脉冲幅值 U_h 的增益(或过压倍数) $K_x = U_h/U$, 可高达18^[7]。 U_h 击穿锐化开关 D , 向负载传输能量。 D 不仅能陡化负载脉冲前沿, 而且能在开始阶段隔离负载, 使 $Fe-L-C$ 回路正常工作。视不同要求, 有时可在负载上并联一截波开关。对电路 (b), $U_h = U_L$; 对 (a), $U_h > U_L$ 。

无论从欲得较大 K_x 值, 还是从转换更多能量的角度, (a) 电路总优于 (b)。不论哪种, 减小爆炸导体电感均可使 $Re-L-C$ 回路峰值电流增大, 有利于电感 L 储能。

导体爆炸, 电流停止之后, 高阻值的爆炸导体蒸气柱的压力开始降低, 蒸气通道的电导率回升, 当回升到某值时, C 上的剩余电压通过蒸气通道的等离子体二次(电弧)放电。我们把电流为零的这段时间叫作“暂停时间” t_s 。图 2 中上面的电流波形是用 (b) 种电路获得的, 具有 $t_s \approx 7.5 \mu s$; 下面的波形是对应的感应电压。

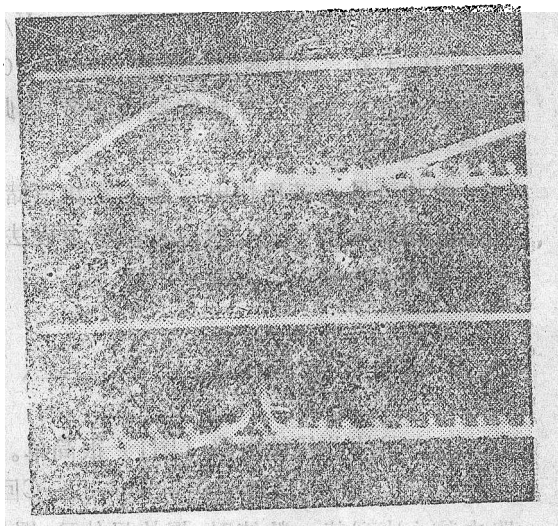


图 2 回路电流(上)和电感电压(下)

时标: $2 \mu s$ /格; 获得的条件: $U=45 kV, L=4 \mu H, C=4.27 \mu F, l=945 mm, d=0.17 mm, n=2$

三、物理设计要点

不同性质负载的发生器,其设计考虑不尽相同;这里只涉及开路的一般情况。关于对不同负载的考虑,笔者将另文论及。貌似简单的爆炸导体,实是此类发生器最关键的元件,它被用来充当大电流转换开关。早在五十年代开始,人们研究并利用它电爆炸时产生的高温(10^5-10^6K)、强光(10^8cd)、等离子体和软X射线(10^2eV 左右)做各种模拟源用。只是在近些年来,才利用它爆炸时能迅速断开大电流和能承受住较大场强的性质于电感储能发生器中。

显然爆炸导体的材料和几何尺寸直接影响发生器的性能,比较多种材料之后,可得出结论^[4,5,7]:由于铜的普遍和经济,用铜材最合适,故以下均按铜材讨论。用多根裸铜线并联运行,比用相同总截面的单根圆线或矩形截面薄片,更有利于切断电流^[4,5]。因为许多研究爆炸导体特性的数学尝试得不到实用的结果,人们就用试验结果和相似理论。经验地总结出描述导体参数和电路参数关系的方程组^[7]:

$$\varepsilon = CU^2 / (n^2 d^4 z) \quad (1)$$

$$\lambda = l / (nd^2 z) \quad (2)$$

$$\nu = \sqrt{LC} / d \quad (3)$$

式中:电压 U 的单位 kV ,电容 C 的单位 μF ,电感 L 单位 μH ,特性阻抗 $z = \sqrt{L/C}$ 的单位 Ω ,导体直径 d 单位 mm ,导体长度 l 单位 mm , n 为导体根数; ε 是表征与输入导体能相关的量,单位 $\text{J} \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{mm}^{-4}$; λ 是表征与导体长度相关的量,单位 $\Omega^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$; ν 是表征与爆炸时间相关的量,单位 $\mu\text{s} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。

我们的目的是在给定电参量 U 、 C 、 L 后,求出满足需要的导体参数(d 、 l 、 n),为此必须找到 ε 、 λ 、 ν 之间的直接关系。我们把能使图2电流暂停时间 $t_s = 0$ 的导体长度,定义为“临界长度” l_k 。显然,只有当 $l \geq l_k$ 时,才能保证在连接导体的两电极间有足够电强度,而不分路放电。由式(2)可知, $l = l_k$ 的条件是 $\lambda = \lambda_k$,而^[7]:

$$\lambda_k = 1.35 \times 10^3 (10^{-6} \varepsilon \cdot \nu)^{0.36} \quad (4)$$

对六个未知量(l 、 d 、 n 、 ε 、 λ_k 、 ν),上述四个方程还不够。但能试验总结出过压倍数 K_x 与 ε 、 ν 的函数关系,用图3表示^[7]。把每条曲线最大 K_x 值对应的 ν 记作 ν_m 。由于对输入到导体的能量有一定要求,在使用图3时,应取 $\nu \leq \nu_m$ (即最大值左边)的数据,因为这样有利于缩短爆炸时间^[7]。设计者根据所需要的 K_x 值在图3选取 ε 和 ν ,然后由方程(1)

—(4)求出导体的一组参数(l_k 、 d 、 n),得到导体总截面 $S_1 = n\pi d^2 / 4$ 。

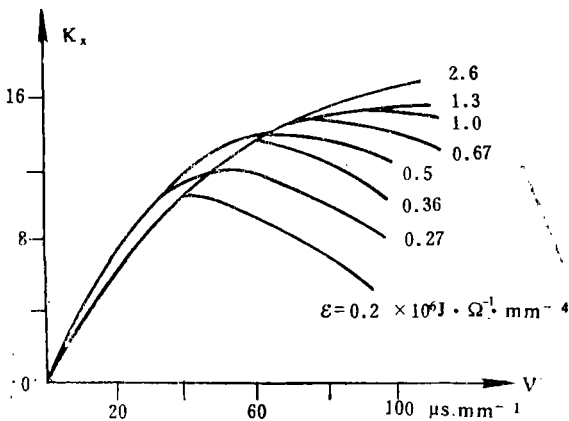


图3 K_x 与 ν 、 ε 的关系

这样做的结果,只能保证感应电压 U_h (或 K_x)值;若想同时使电感储存器获得尽可能大的能量($-\frac{1}{2}Li^2$),就应控

制导体在 $L-C$ 回路振荡电流第一峰值爆炸。用我们的实验结果并参考[6]、[7]的经验公式,得出满足最大储能条件的导体总截面积应为:

$$S \approx 1.5 \times 10^{-7} \sqrt{CU^2 / Z} \quad (5)$$

由上述可知,在图3的多条曲线范围内,选取不同的 ε 和 ν 可得到多组能满足 K_x 值的导体参数,并可由此计出多个 S_i ;在

一般情况下, 其中 $S_i \approx S$ 的那一组参数, 即能满足 K_x 值又能满足最大储能这两个条件。则这一组导体参数, 就是设计者最后欲求之值。

至此, 值得特别指出, 方程(1) — (5) 和图3, 已被图2所示的实验结果初步证实, 其误差在15%左右。这些重要关系不仅能正确地指导设计, 而且也避免了大量的盲目性试验。

四、主要优缺点

近年来, 有许多文章和专著^[4]涉及到获得毫微秒脉冲的方法。综观国内外, 现在仍然是以电容储能的传统电路居于统治地位。它们是: 麻克斯发生器——形成系统; 麻克斯发生器——脉冲变压器——形成系统; 范德格拉夫(Van de Graaff)发电机——形成系统。而电感储能、爆炸导体转换的发生器较之这些熟知的传统电路, 具有如下的主要优点和缺点:

(1) 正如前面已指出的, 它的储能密度要比传统电路高 10^2 — 10^3 倍, 这就给制造大功率机器打开了有希望的方便之门; (2) 由于使用电感线圈和一般金属线作形成网络, 因此形成系统远比传统形成线及其附属设备简单、方便; (3) 按重量计储能, 电感为6600J/kg, 电容为44—220J/kg, 这样一来就使形成网络体积大大减小, 整个机器体积和造价都将降低许多, 并使建造周期缩短; (4) 初级慢储能器工作电压比输出电压低很多, 这不但简化了设备结构, 而且由于高压工作面积减小, 从而也减少了发生器静态击穿的可能性; (5) 因为回路的固有电感对升压和储能也有贡献, 如图1(a), 因此无需在减小回路固有电感上花力气, 也可使用“有感”电容器, 甚至也可不加集中电感线圈、仅用回路固有电感来获得所需的过压^[3]; (6) 发生器具有较高的传输效率, 对有功负载的效率为30%—40%^[6], 对电容负载在35%左右, 对电感负载最大是25%^[4]; (7) 在不改变主要元件的条件下, 只改变爆炸导体直径、根数和长度等有关参量, 就可在一定范围内调节输出电压的幅值、脉宽和上升前沿^[6]。

这种发生器的主要缺点在于: 每一次脉冲放电均需连接一次爆炸导体, 因此只适用单次脉冲工作; 此外, 若导体在大气中爆炸时, 伴有较大的响声; 倘将其置于充有猝灭介质(如石英沙等)的绝缘容器内爆炸, 不仅可消掉音响, 且能在爆炸时增大导体的电阻率, 但带来了相对不方便。

五、应用与展望

这类发生器除具有上述优点外, 它还具备较好的工作稳定性^[4], 因此可以用它“驱动”电容、电感和有功负载工作。

1. 电容负载

(1) 模拟雷击: 工业电器等常遭雷击; 由于军用飞机不能随意改变航向, 遭雷击的几率更大。国外近来测得雷电波的波头快达100—200ns, 发现用原来1.2/50(或1.5/40) μ s的“标准”波研究雷击似乎已不精确; 有的国家正在改编新的防雷规范, 要求用毫微秒研究雷击问题。从事这方面研究时, 可试用类似本文介绍的方法^[9]建造机器。

(2) 电介质毫微秒绝缘试验: 近年来工程技术界迫切需要电介质在毫微秒脉冲高压下

的电气数据,然而国内却少有用于这方面试验的装置。设想,将爆炸导体和电感线圈(或仅用回路固有电感)引入单级电容器或小级数的冲击电压发生器电路中,就能较容易地获得前沿可调的高压毫微秒脉冲;同时实现一机在微秒和毫微秒两种范围内的应用,既方便又经济。

(3) 模拟雷电电磁脉冲的性质:灵敏的电子设备和日益普遍的计算机,时而被雷电电磁脉冲干扰,抹掉信息或造成错误输出。用类似本文的方法^[9],同样可建造雷电电磁脉冲模拟设备。

(4) 模拟核电磁脉冲:作为核爆炸效应之一的核电磁脉冲,能在导体中感生过载电流,直接毁坏电子设备或使其误动作。这种“杀伤”范围很大,高空核爆炸时可达数千公里。特别是导弹上、卫星上和其他军用的电子设备,在核爆炸环境中,其失灵误动作的后果不堪设想。人们一方面利用核电磁脉冲对敌方电子系统工作进行干扰、破坏;另一方面对己方的电子设备进行屏蔽和加固。有时还用探测核电磁脉冲方法对敌方进行核侦察。所有这一切,均表明了研究核电磁脉冲的重要性,因此各国(以美、苏最早)相继建造核电磁脉冲模拟器。用本文介绍的发生器,经锐化开关产生的高压指数波脉冲,很近似核电磁脉冲波形,并能在负载(电磁照射器)的大工作间造成足够大的场强,以便进行导弹或飞机的全尺寸模拟。

(5) 作小电容形成线的电源:当负载电容量较小时,可不使用锐化开关而直接向负载充电。用它给小电容形成线充电就是其例之一。

2. 电感负载

有许多研究和应用场合,要求大电流和大电流增长率。由于这类发生器能产生兆安级以上的电流脉冲和 10^{11} — 10^{12} A/S的速率^[4,3],因此它常被用于受控热核反应和其他等离子体试验中。

(1) 爆聚等离子体:例如美国空军武器实验室(AFWL)^[1],用储能2MJ的这类发生器向一个6nH的电感放电,来爆聚等离子体,以研究热核聚变。爆炸导体截断16MA电流,将7.5MA转换到负载,上升时间190ns,脉宽500ns,负载功率超过1.8TW,近似800kJ的能量传递等离子体。

(2) 箍缩等离子体:加利福尼亚的洛斯阿拉莫斯科学实验室(LASL)^[8],用这类机器向40nH电感负载放电,进行Z箍缩(Z-Pinch)等离子体试验。所采用的折叠式爆炸导体断掉800kA电流,过压系数 $K_x=6.4$,负载电流增长率 $dI/dt=2\times 10^{12}$ A/S;当负载为19nH时, $dI/dt=10^{13}$ A/S。目前国外一些单位也常用此类发生器作 θ 箍缩(θ -pinch)的功率源。

3. 有功负载

(1) 获得大功率电子和离子束:从二极管引出的电子或离子束,用于激光泵浦、粒子束惯性约束核聚变、大功率微波技术等,并可作为其他更高能量加速器的注入器。

(2) 建立强韧致辐射场:使电子束轰击重金属靶而产生的 γ (或x)射线,有许多用途。①在实验室标定测量核爆炸时使用的辐射探测器。②模拟核爆炸时产生的瞬发 γ 射线,用以研究核爆炸对电子学系统的瞬时辐照效应,从而加固自己的运载工具以突防,破坏敌方电子学系统以反导。③模拟核爆炸时出现的脉冲x射线。这种射线在高空大范围内通过导弹和卫星表面时,在其内部把能量积累起来,使其内部材料和部件气化,造成它们失灵。人们用模拟数据来加固自己的导弹和卫星,使其在受到敌方反导弹弹头爆炸产生x射线时可以突

防, 以及研究如何用核弹爆炸产生x射线进行反导。④作高速辐射摄影的光源。在爆炸力学、弹道学、电爆炸导体、轻武器以及其他许多高速现象领域, 采用闪光x射线照相研究物体内部的瞬变规律。

从六十年代末至今, 苏联已建成十余台以这类发生器作电源的电子束加速器。最近公布的ИГУР—П^[6,10], 储能300kJ, 冲击电压2MV, 管电压3.7MV, 管电流70kA, γ 射线脉宽100—500ns可调, 靶前一米处剂量700R, 电子束能量密度300J/cm²。

(3) 修正负载的高压波形。借回路固有电感和爆炸导体, 可以修正麻克斯发生器高压脉冲的波前^[9]和波顶^[11], 从而实现在微秒级时间内给负载以更多的能量, 以满足某些用户的特殊要求。

最近公布的资料^[11,12]表明, 国外对这类发生器的研究和应用的兴趣尚浓。在国内, 毫微秒脉冲功率技术工作只有十余年的历史, 目前仍以麻克斯发生器-布卢姆莱因(Blumlein)线类型机为多见, 而对其他类型却涉猎较少。作为我国已壮大起来的脉冲功率技术队伍, 定然要求开拓新的领域, 从事多种机的研制, 在脉冲功率技术领域中竟放百花, 从而开阔自己的知识视野和提高技术水平。我们相信, 随着人们对大功率欲望的增长, 尽管电感储能、爆炸导体转换的发生器还有一些技术问题和缺点, 但它一定能在这个“花园”中成为早植的一枝; 由于它那些得天独厚的优点, 势必将为更多人认识、崇爱和移植。

本文所引用的图2, 系笔者与赵子元、孙盘甫、徐贵林、高敏共同试验获得的, 借此谨向四同志致以谢意。

参 考 文 献

- [1] Stuerke C., et al., IEEE Inter.Pulsed Power Conf. 3nd, Lubbock, Texas, 1981, pp.328—333.
- [2] Trost T.F., et al., AD—A03989, May 1977, p.1.
- [3] Ковальчук Б.М., и др., ЖТФ, Т.44 в.1, с.215—217, 1974.
- [4] Г.А.米夏兹著、邵贵荣译, 《大功率毫微秒脉冲的产生》, 原子能出版社, 1982年6月, 第161—175、271—272页。
- [5] Месяц Г.А., Мощные наносекундные импульсные источники ускоренных Электронов, 1974, с.83—96.
- [6] Bakulin Yu.D., et al., Instrum.and Exp.Tech., Vol.22, No 2, Part I, 1979, pp.323—327.
- [7] Месяц Г.А., Разработка и применение источников инжесивных электронных Пуцков. «Наука», 1976, с.56—75.
- [8] DiMarco J.N., et al., Jour.of Appl.Phys., Vol.41, No 9, 1970, pp. 3894—3899.
- [9] Azarpkevich E.I., et al., Instrum.and Exp.Tech., Vol.22, No 1, Part I, 1979, p.105.
- [10] Диянков, В.С., и др., ЖТФ, Т.52, в.1, 1982, с.43—47.
- [11] Азаркевич Е.И., и др., ПТЭ, No.6, 1982, с.79—81.
- [12] Кривццкий Е.В., и др., Техническая электродинамика, No.4, 1982, с.22—28.