



高等学校教材

# 脉冲功率技术

华中理工大学 李正瀛 编



高等学校教材  
脉冲功率技术

水利电力

8178

高等学校教材

---

# 脉冲功率技术

华中理工大学 李正瀛 编

水利电力出版社

(京)新登字115号

### 内 容 提 要

本书共五章。第一章介绍产生高电压大功率脉冲的各种方法及基本原理。第二章介绍脉冲高电压、脉冲强电流和脉冲强磁场的各种测量方法。第三章介绍脉冲功率技术中常用的开关元件。第四章介绍高电压快速脉冲作用下的电介质放电过程和特性。最后一章介绍脉冲功率技术在不同领域的应用。

本书是高等学校“高电压技术及设备”专业的选修课教材，也可供有关专业的研究生和工程技术人员参考。

高等学校教材

脉冲功率技术

华中理工大学 李正瀛 编

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市京东印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 7.75印张 175千字

1992年11月第一版 1992年11月北京第一次印刷

印数 0001—1290 册

ISBN 7-120-01547-8/TM·425

定价 2.10 元

# 前 言

本书是根据1988年全国高等学校电力工程专业教学委员会会议和1989年过电压、绝缘和测试教学组教材编写规划会议审定的“高电压技术及设备”专业选修课教材大纲编写的。原稿曾在华中理工大学讲授过三年，在此次出版前，根据教学实践中的经验和近年来脉冲功率技术的发展，对原稿进行了修改和补充。

本书是按选修课教材的要求，兼顾了本科生的基本要求和研究生参考的需要而编写的。本书着重阐明物理概念和基本原理，与“高电压技术及设备”专业的必修课教材重复的内容不予赘述。考虑到本书的内容不仅与“高电压技术及设备”专业有关，也与其他专业有关，本着促进学科交叉和渗透的精神，本书介绍了脉冲功率技术在七个不同领域中的应用。

除了绪论概括介绍了脉冲功率技术的发展和现状外，全书共五章。第一、二章分别讨论高电压大功率脉冲的各种产生和测量方法，介绍了多种回路的基本原理、特性等。第三章较详细地讨论了脉冲功率技术中的各种开关元件，包括电脉冲触发开关和激光触发火花放电开关以及其他形式的开关。第四章介绍气体、液体（主要是水和变压器油）和固体电介质在高电压快速脉冲作用下的放电过程和特性。最后一章，介绍了脉冲功率技术在电子束、激光、医疗、电磁脉冲发射（即电磁炮）、电除尘、船舶冲击波试验模拟和金属的电磁脉冲成形加工等领域的应用。

本书由华中理工大学李正瀛编写，中国科学院电工所周绮帆同志审稿。在资料搜集、编写及审稿过程中，曾得到彭大慧、褚宗兰等同志的许多帮助，在此表示衷心感谢。

恳切希望读者对本书中的错误和不当之处给予批评指正。

编 者

1990年10月

# 目 录

前言	
绪论	1
第一章 高电压大功率脉冲的产生	6
第一节 马克斯-吉尔曼发生器	6
第二节 电容器储能的脉冲发生器	9
第三节 利用传输线原理的脉冲发生器	13
第四节 电感储能的脉冲发生器	21
第五节 脉冲变压器	28
第二章 高电压大功率脉冲的测量	32
第一节 两级分压系统	32
第二节 传输线分压器	35
第三节 脉冲磁场的测量	37
第四节 脉冲电流的测量	45
第三章 脉冲功率系统的开关	49
第一节 电脉冲触发放电间隙开关	49
第二节 激光触发放电间隙开关	56
第三节 金属等离子体电弧开关	66
第四节 光电导通脉冲功率开关	68
第五节 表面放电开关	70
第六节 电子束控制开关	73
第七节 开关电极的烧损	76
第四章 电介质的放电特性	81
第一节 气体电介质的放电特性	81
第二节 液体电介质的放电特性	91
第三节 固体电介质的放电特性	97
第五章 脉冲功率技术的应用	99
第一节 大功率脉冲电子束的产生	99
第二节 在激光器中的应用	101
第三节 物体的电磁脉冲发射	104
第四节 人体内结石的电磁脉冲粉碎方法	106
第五节 在电除尘技术中的应用	108
第六节 船舶的电磁冲击波试验模拟	112
第七节 金属成形加工	114
主要参考文献	117

# 绪 论

## 一、脉冲功率技术的发展

脉冲技术就其输出电压和功率而言,可以分为两类:低电压小功率脉冲技术和高电压大功率脉冲技术。前者通常称为脉冲技术,而后者称为脉冲功率技术。脉冲技术随着无线电、通讯、计算机技术等的发展,已有了相当长的发展和应用历史,现已成为一门十分完整的先进科学技术。脉冲功率技术则是一门新兴的技术。在本世纪70年代后期,随着核物理技术、电子束、加速器、激光、放电理论和等离子体技术等研究和日益广泛的应用,脉冲功率技术才得到重视和迅速的发展。可以说,上述各个领域中的技术和工程问题,都在不同程度上与脉冲功率技术有着密切的关系,它的作用是不容忽视的,如利用脉冲功率技术能在很短的时间(例如微秒到纳秒)内,使脉冲功率发生装置释放出数百乃至数兆焦耳的能量。就是说,脉冲功率装置是能量密度很高的脉冲能源。

现在,各个先进工业国家的许多军用和民用研究部门、高等学校等都在积极开展脉冲功率技术及其应用的研究。例如美国的圣地亚(Sandia)国家实验室、马克斯韦尔(Maxwell)实验室、罗斯阿拉莫斯(Los Alamos)科学实验室、海面武器研究中心、得克萨斯(Texas)技术大学等;日本的东京大学、熊本大学等,都在从事脉冲功率技术的研究。

为了适应脉冲功率技术的发展,1976年在美国举行了第一届电气与电子工程师协会(IEEE)脉冲功率技术国际会议,交流了研究工作的进展和成果。在1979年举行了第二届国际会议。之后,这类国际会议每两年举行一次,直至现在。同时,随着研究成果和参考文献的日益增多和丰富,美国在1981年就成立了脉冲功率技术文献中心,向有关研究人员和部门提供技术资料。由于脉冲功率技术在军事应用领域得到更为广泛的使用,北大西洋公约组织的研究和发展机构,在1983年及以后,多次举办了关于脉冲功率技术的高级研究讲座,并出版了研究论文专集。

脉冲功率技术的研究和应用的迅速发展也给高等教育提出了要求。在美国、日本、德国等国家的一些研究部门和高等学校均已开设了脉冲功率技术专题系列课程、实验和设计。同时,还不定期地举办国际性的有关脉冲功率技术的讲习班,编写了讲义和参考资料。有些大学不仅为研究生,而且还为本科生开设了脉冲功率技术课程。

在我国,脉冲功率技术及其应用的研究是从本世纪70年代末,80年代初开始的。例如,将脉冲功率技术应用于勘探(如石油)、加速器、粒子束、电子束、准分子激光器、医疗技术(如肾结石粉碎)等的研究已取得了不少成果。一些研究机构 and 高等学校在脉冲功率技术的研究中,做了许多工作。

总之,作为一门新发展起来的科学技术,脉冲功率技术的发展十分迅速,正在引起很多科学领域,特别是一些高技术领域的重视。它的发展和应用前景无疑是十分广阔的。

## 二、脉冲功率技术的特点

脉冲功率技术与低电压小功率的脉冲技术比较，其主要不同点是：

(1) 电压高低的不同：前者，输出电压甚至高达若干兆伏；而后者，一般只有几百伏，甚至更低。

(2) 输出功率大小不同：前者可达若干兆瓦，甚至千兆瓦；而后者，一般为若干瓦，甚至更小。

(3) 频率高低不同：前者频率低，一般在数百赫芝以下；而后者较高，达到若干兆赫芝，甚至千兆赫芝。

从一定意义上讲，脉冲功率技术的发展与高电压技术是分不开的。可以说，高电压技术是脉冲功率技术的基础之一。然而，比起高电压技术来，脉冲功率技术又具有以下特点：

(1) 在许多情况下，脉冲的幅值更高；

(2) 输出脉冲功率大；

(3) 脉冲上升时间更短，脉宽更小；

(4) 在许多情况下，需要输出重复脉冲；

(5) 回路元件多，加工工艺要求高，总体结构复杂。

## 三、脉冲功率系统的构成

脉冲功率系统一般包括下列几部分：初始能源、功率调整系统、能量储存单元、脉冲形成回路、开关和负载，如图0-1所示。

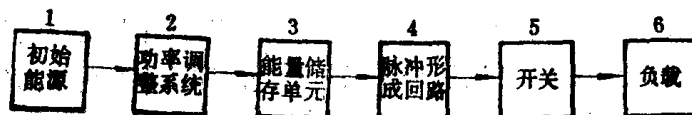


图 0-1 脉冲功率系统示意框图

初始能源可以是化学能、电能或其他形式的能源。功率调整系统是用来将初始功率转换成能量储存单元要求的具有特定形式的功率。能量储存单元在一定时间内储存能量，然后，很快将能量释放到脉冲形成回路，脉宽一般在微秒数量级。脉冲形成回路将脉冲整形（使其变得更陡，其脉冲的上升时间在纳秒数量级），并使其达到一定幅值后，输送给负载。

采用炸药、电池、磁流体发电机等做初始能源的缺点是体积大、重量大、投资也大。采用炸药做初始能源时，还有安全问题。现在，常用的初始能源主要是储能电容器和冲击发电机。

表0-1给出了几种常见的初始能源的能量密度、可储存能量及其所产生的电功率等几个参数。

一般来说，所有各种初始能源都不能直接将能量以很陡的脉冲形式输送给负载，另外，负载一般要求高电压脉冲初始能源不能输出很高电压的脉冲。

功率调整系统的作用主要是：第一，将由初始能源输入的功率进行调整，使其达到较

表 0-1

常见初始能源的能量密度、可储能量和电功率

初始能源	能量密度 ( $J \cdot cm^{-3}$ )	可储能量 (MJ)	电 功 率		
			能 量 (MJ)	脉 宽 (ms)	系统效率 (%)
炸 药	10000	100	2	0.1	2
电 容 器	5~6	16	3	0.01	80
旋转电机	100	100	2	100	30
电 感	10	100	—	—	—
铅 电 池	500	100	0.5	1000	0.5

高的电压；第二，将输入给功率调整系统的功率变成脉冲形式，使能量易于输送给能量储存单元。

能量储存单元的作用主要是两个：一是为功率调整系统提供恒定的负载，起隔离功率调整系统和脉冲形成回路的作用；二是在输出一个脉冲到脉冲形成回路之后，为产生下一个脉冲储存能量。

脉冲形成回路的作用是将能量储存单元输送来的能量转换成陡的脉冲，以便经过开关输送给负载。开关是脉冲功率系统中的关键元件，开关性能的好坏，最直接影响输出脉冲的技术参数，尤其是输出脉冲的上升时间。

在脉冲功率系统中，从脉冲形成的过程看，可以分为两个阶段：产生慢脉冲阶段和产生快脉冲阶段。前者，由能量储存单元来实现，后者由脉冲形成回路来实现。在产生慢脉冲的能量储存单元中，常采用马克斯发生器（高电压试验和测量技术的参考书中均有详细讨论）和脉冲变压器等。在脉冲形成回路中，常用布鲁姆莱恩（Blumlein）脉冲发生器、叠积式传输线等。

当某些负载要求加更陡的脉冲时，从脉冲形成回路经开关输送给负载的脉冲，往往达不到要求。这时，可以再加上一级脉冲形成回路，如图0-2所示。应指出的是，第二级脉冲形成回路与负载之间的第二级开关应比第一、第二级脉冲形成回路之间的第一级开关，具有更好的放电特性，击穿时延要小，而且击穿时延的分散性要小。

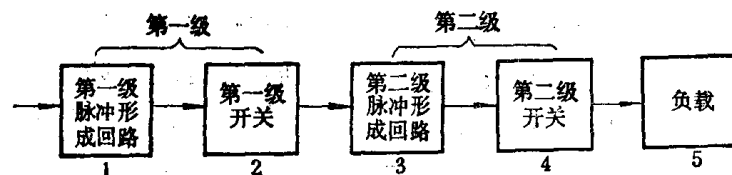


图 0-2 陡脉冲形成框图

#### 四、脉冲功率技术研究的对象和当前主要的研究课题

脉冲功率技术是一门研究高电压、强电流、大功率脉冲的产生、传输和应用的技术。它研究不同形式的能量储存方法，将所储存的能量转换为大功率脉冲的方法、脉冲的传输及测量方法，以及适用于不同工作条件的开关等。



脉冲功率技术作为当代高技术的重要技术之一，它的发展和应用与其他学科的发展有着密切的关系。在当前，为了进一步促进脉冲功率技术的发展，提高脉冲功率的性能和扩大其应用领域，其主要研究课题大体应包括以下几个方面：

(一) 关于高储能密度的脉冲发生器的研究

从表0-1可见，有些初始能源在单位体积中储存的能量固然很高，但在脉冲功率系统中，转换为电脉冲功率的效率却很低，而且初始能源的选择要受脉冲功率系统体积和重量的限制，初始能源过于庞大，会使脉冲功率系统的造价增加。在某些应用情况下，脉冲功率系统的体积和重量的大小是决定性因素，为了减小系统的重量和体积，就必须研究储能密度高的脉冲功率系统。例如，近年来十分受到重视的用飞机探测水下（如深海）物体（如潜艇）技术，要采用蓝绿激光作为探测手段，因为这种激光具有良好的穿透海水的特性，为了在飞机上产生蓝绿激光，就要在飞机上安装能产生蓝绿激光的激光器，而这种激光器的关键技术之一，就是电压高、功率大的脉冲的产生，显然产生电压高、功率大的脉冲的系统过于笨重是不便于机载的。又如舰艇载电磁炮，同样要求产生很大的脉冲功率，这种系统过于庞大和笨重，显然也不便于运载。因此，各种形式的储能密度高的脉冲功率发生器的研制是当前主要的研究课题之一。

(二) 高性能开关元件的研制

开关元件在脉冲功率系统中占有特殊的地位，这是因为，开关元件的参数和特性对脉冲的上升时间、幅值等产生最直接、最敏感的影响。一个脉冲功率系统即使各个组成部分都具有良好的性能，而唯独开关元件的性能欠佳，最终还是不能获得符合要求的输出脉冲。另外，开关在高电压、强电流下工作，工作条件十分恶劣，开关中的击穿现象和开关电极上的放电物理过程均十分复杂，开关电极材料在击穿时的烧损将直接影响开关的性能和寿命。因此，具有耐受高电压强电流、击穿时延短而分散性小、电感和电阻小、电极烧损少以及能在重复的脉冲下稳定工作的各种类型开关元件的研制，是当前脉冲功率技术中

又一十分受重视的研究课题。

表 0-2 开关元件的技术参数

工作电压	20kV~3MV
脉冲重复频率	10~500Hz
峰值电流	10kA~5MA
寿命	10 <sup>6</sup> ~10 <sup>8</sup> 次
放电时间	几纳秒~几百微秒

表0-2给出了目前开关元件能达到的技术参数。

最近，外国的一些从事脉冲功率技术研究的单位和高等学校，提出了关于开关的若干研究专题，主要包括：

(1) 开关中放电模型的研究。包括具有高电场强度的绝缘气体及其混合气体的放电过程、放电参数、影响放电的因素、等离子体稳定性、等离子体化学，以及外加磁场对等离子体不稳定性的影响等。

(2) 放电产物的研究。包括在高电压、强电流下，放电的产物对开关特性的影响，对开关性能恢复特性的影响，以及对开关中电弧发展的影响等。

(3) 开关中电极表面的放电物理过程的研究。

(4) 气体和液体中放电流体动力学的研究。

(5) 固体电介质开关的研究。

(6) 各种形式的切断开关的研究。

(7) 磁开关和超导开关材料的研究。

(三) 关于脉冲功率作用下电介质放电特性的研究

气体、液体和固体电介质，在直流、工频交流和冲击电压（脉冲上升时间和脉宽都在微秒数量级）下的击穿特性，多年来已进行了相当充分的研究，而在脉冲功率，即在很陡的脉冲电压下的电介质击穿特性，尚缺少系统的数据。这是脉冲功率技术当前面临的十分迫切的研究课题，因为对电介质放电特性的了解，关系到脉冲功率系统绝缘结构的合理选择，开关元件绝缘的合理采用，同时，电介质的选择也与脉冲幅值、脉冲功率大小、脉宽和脉冲的频率有密切关系。所以，在陡脉冲下，电介质的特性也是十分受到重视的研究领域。

(四) 关于脉冲功率应用的研究

如前所述，脉冲功率技术在加速器、激光、核物理、医疗等领域已得到日益广泛的应用。近年来，在半导体、集成电路、化工、废水和烟雾处理等方面的应用研究，已引起广泛的重视，而且，在某些应用研究中，已取得可喜的进展。例如，用脉冲功率技术产生高能带电粒子束，能使合成材料（如聚乙烯）的热负载和机械负载能力增加许多倍；有些用高能带电粒子束处理后的半导体材料和器件的动作特性和可靠性都明显提高等等。

# 第一章 高电压大功率脉冲的产生

最常用的产生高电压脉冲的回路是40年代问世的马克斯发生器。随着马克斯发生器应用的日益广泛，又出现了许多适用于不同目的要求的改进型马克斯电路，但其基本原理并没有重大的变化。关于马克斯发生器的原理和设计原则已经在高电压试验和测量技术等课程中做了详细讨论，所以本章无需赘述。在本章中主要讨论高电压大功率脉冲，包括单次和重复脉冲产生的原理和方法。

## 第一节 马克斯-吉尔曼发生器

吉尔曼发生器实质上是由电感和电容用不同连接方式所构成的振荡回路，可以串接，也可以并接。在脉冲功率技术中，吉尔曼发生器常用来产生方波脉冲。常见的吉尔曼电路有如图1-1所示的几种。

近年来，由于脉冲功率技术应用的需要，吉尔曼电路和马克斯电路相结合，构成了能产生高电压大功率脉冲的马克斯-吉尔曼发生器。这种发生器特别适用于产生高电压方波

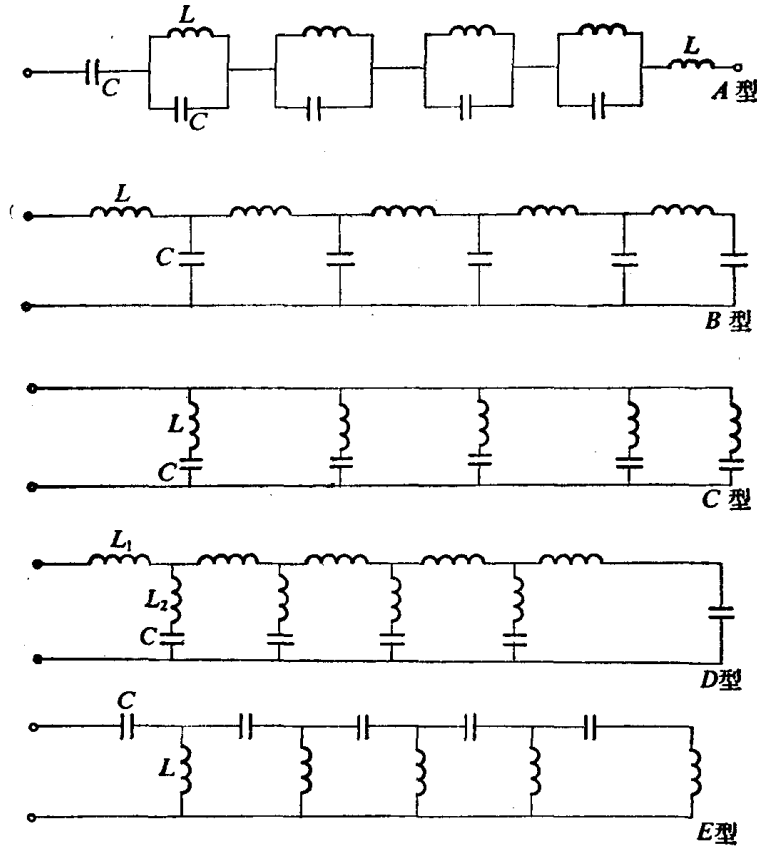


图 1-1 常见的吉尔曼电路

脉冲，图1-2就是这类发生器的两种连接方式。图1-2(a)是10级马克斯电路和1节A型吉尔曼电路的串联接线； $L_0$ 、 $R_0$ 为负载。图1-2(b)是10级马克斯电路和10级5节B型吉尔曼电路的并联接线， $R$ 为负载， $G$ 为放电间隙， $L_1$ 、 $L_2$ 为电源电感线圈。当然还可以将马克斯和吉尔曼两类电路连接成其他形式的电路。实验结果已经表明，并联接线方式可以获得较短的脉冲上升时间，用这种电路产生的脉冲已达到下列指标：电压幅值500kV，电流幅值10kA，脉宽1 $\mu$ s，脉冲重复频率100Hz，脉冲平均功率500kW，平均电流密度10A/cm<sup>2</sup>。

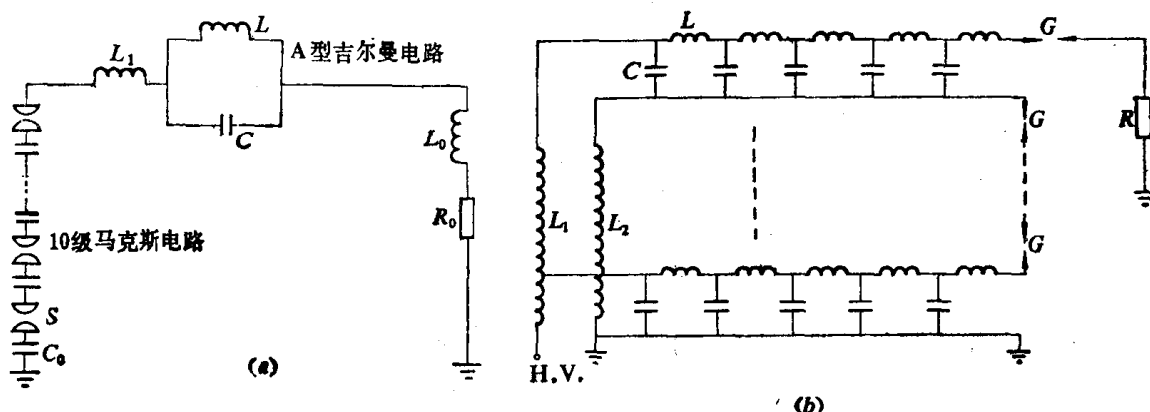


图 1-2 马克斯-吉尔曼发生器的连接方式  
(a)10级马克斯电路和1节A型吉尔曼电路串联；(b)10级马克斯电路和10级5节B型吉尔曼电路并联

吉尔曼电路既可以向具有恒定电阻的负载输送恒定电压脉冲，也可以给电阻随时间变化的负载输送恒定电压脉冲。现在分析如何用吉尔曼A型电路向随时间变化的电阻负载输送电流，以便在负载上获得方波电压的情况。

在图1-3中， $R(t)$ 是负载电阻，当电流流过该电阻时，其阻值是随时间变化的， $C_1, C_2, \dots, C_k, L_1, L_2, \dots, L_k$ 分别为吉尔曼A型电路第一、第二、...、第k节的电容和电感。 $I_n$ 为每节电感中流过的电流，流过 $R(t)$ 的总电流 $I$ ，保持恒定值。从图1-3可见， $R(t)$ 上的电压为

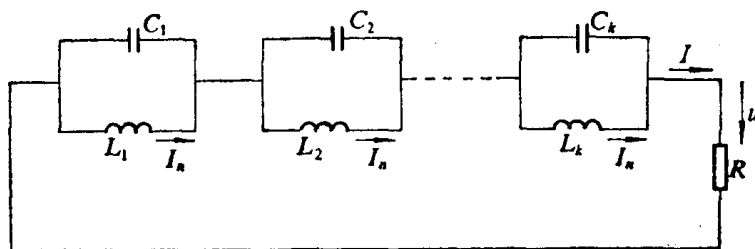
$$u(t) = R(t)I$$


图 1-3 在电阻上获得方波电压的电路

现设 $u(t)$ 是脉宽为 $\tau$ ，周期为 $2\tau$ 的脉冲，并且是时间的奇函数。这样，可以将 $u(t)$ 展开为福里哀（Fourier）级数，即

$$u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin \frac{k\pi t}{\tau}$$

式中

$$b_k = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} u(t) \sin \frac{k\pi t}{\tau} dt$$

$$= \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} IR(t) \sin \frac{k\pi t}{\tau} dt$$

另外，从图1-3可见， $R(t)$ 上的电压 $u(t)$ 应等于吉尔曼电路每一节上的电压之和，即

$$u(t) = \sum_{k=1}^n u_k(t)$$

或者

$$u(t) = Id_k \sin \frac{k\pi t}{\tau}$$

式中 $d_k$ 为吉尔曼电路第 $k$ 节的福里哀系数，并定义

$$d_k = \frac{b_k}{I} = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} R(t) \sin \frac{k\pi t}{\tau} dt$$

这样，便得吉尔曼电路每节的电压为

$$u_k(t) = Id_k \sin \frac{k\pi t}{\tau}$$

这个式子可用图1-4所示电路表示，该电路是吉尔曼电路的一节， $I$ 相当于一个恒流源。

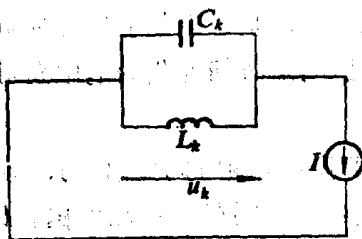


图 1-4 图1-3的等效电路

由初始条件（即吉尔曼电路动作前一瞬间）

$$u_k(0) = 0$$

$$\left. \frac{du_k}{dt} \right|_{t=0} = \frac{I_n - I}{C_k}$$

可得 $u_k(t)$ 的表达式为

$$u_k(t) = (I_n - I) \sqrt{\frac{L_k}{C_k}} \sin \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}} t$$

很明显

$$Id_k = (I_n - I) \sqrt{\frac{L_k}{C_k}}$$

$$\frac{k\pi}{\tau} = \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}}$$

所以，可以求得吉尔曼电路每一节的电容和电感

$$C_k = \frac{(I_n - I)\tau}{k\pi Id_k}$$

$$L_k = \frac{I\tau d_k}{k\pi (I_n - I)}$$

因为福里哀系数 $d_k$ 可以为正值，也可以为负值，但 $C_k$ 和 $L_k$ 只能为正值，所以，必须适当选择吉尔曼电路的 $I_n$ 值，例如，可以选择：

当  $d_k > 0$  时,  $I_k = 2I_1$ ;

当  $d_k < 0$  时,  $I_k = 0$ 。

这时, 吉尔曼电路的  $C_k$  和  $L_k$  分别为

$$C_k = \frac{\tau}{k\pi |d_k|}$$

$$L_k = \frac{|d_k| \tau}{k\pi}$$

例如, 假设吉尔曼电路的负载为

$$R(t) = \frac{1}{1+t} \quad 0 < t < \tau$$

则可得福里哀系数  $d_k$  的表达式为

$$d_k = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} \left( \frac{1}{1+t} \right) \sin \frac{k\pi t}{\tau} dt$$

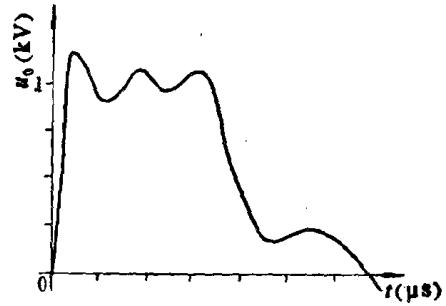


图 1-5 图1-3的负载电阻  $R(t)$  上的电压波形图

这样, 当  $k=1, 2, \dots$  时, 可以分别求出相应的  $d_k, C_k$  和  $L_k$  值, 以这些  $C_k, L_k$  值来构成吉尔曼电路 (图1-4), 便可以在负载  $R(t)$  上获得如图1-5所示的电压脉冲波形。

## 第二节 电容器储能的脉冲发生器

电容器储能的脉冲发生器是脉冲功率系统中常用的脉冲发生器。当要求脉冲功率系统产生很陡的脉冲时, 电容储能的脉冲发生器一般用来做脉冲功率系统中脉冲形成回路前面的能量储存单元。因为, 在一般情况下, 直接由电容储能的脉冲发生器产生很陡的脉冲是十分困难的。所以在电容储能的脉冲发生器的后面要接脉冲形成回路。当要求脉冲功率系统产生的脉冲不必很陡时, 电容储能的脉冲发生器便能满足要求。

电容储能的脉冲发生器基本电路如图1-6所示。图中  $C$  为储能电容, 充电电压为  $U_0$ ,  $S$  为开关,  $Z$  为输出电缆 (其波阻抗值也用  $Z$  表示, 且  $R=Z$ ),  $L$  为电容器、开关和它们之间连接线的电感。

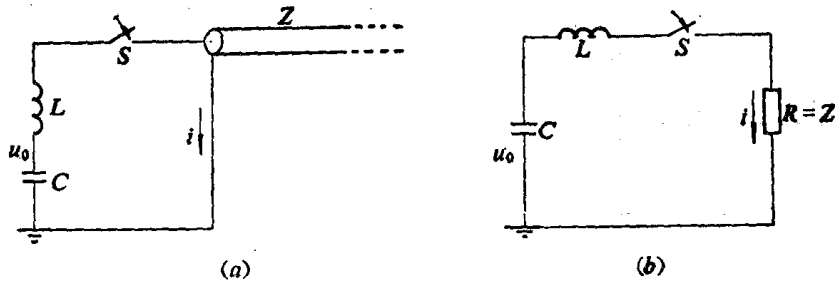


图 1-6 电容器储能的脉冲发生器的基本电路

(a) 电路图; (b) 等效电路

当开关  $S$  合上后, 电路中的电流  $i(t)$  有下列三种情况:

当  $R^2 > 4L/C$  时

$$i(t) = \frac{U_0}{\beta L} e^{-\alpha t} \text{sh} \beta t$$

当  $R^2 < 4L/C$  时

$$i(t) = \frac{U_0}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t$$

当  $R^2 = 4L/C$  时

$$i(t) = \frac{U_0}{L} t e^{-\alpha t}$$

式中

$$\alpha = R/2L$$

$$\beta = \sqrt{\frac{R^2}{4L} - \frac{1}{LC}}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L}}$$

这样，在  $R$  两端的电压，即输出至电缆上的电压为

$$u = iR$$

如果要求电容器经过开关产生多路输出脉冲，可以在开关  $S$  后面并联连接多根（例如  $n$  根）输出电缆，电缆的波阻抗相等，则  $n$  根电缆的等效波阻抗为  $R/n$ 。

以上的分析表明，为了使电容器储能的脉冲发生器输出脉冲的幅值和陡度增加，除了电容器两端的电压  $u_0$  要高外，电感  $L$  要尽可能小，输出电缆的波阻抗要尽可能大。为了减小电感，通常采用按同轴结构设计的电容器和开关。实验结果已表明，当多根输出电缆布置成辐射状时，电缆的数目增加会使输出脉冲的上升时间增大。

在实际应用中，为了增加电容器储能的脉冲发生器的能量，以及减少电感，通常将多台电容器并联，或者多组电容器并联作为储能单元，在每台电容器上安装一个开关，或者在每组电容器上安装一个开关，这时，要求所有开关同时合上，将所有电容器储存的能量传输给共同的负载。但是，这样做往往是比较困难的。

现在，以两组电容器为例，如图 1-7 所示，电容  $C_1$  和  $C_2$  并联连接， $L$  为负载， $S_1$  和  $S_2$  分别为  $C_1$  和  $C_2$  的开关。由于开关击穿时延的差异， $S_1$  和  $S_2$  不能在同一时间完全合上。设  $S_1$  合上之后经过时间  $\tau_0$ ， $S_2$  才合上，若取  $S_1$  合上瞬间  $t=0$ ，并设  $C_1 = C_2 = C$ ， $C$  上电压为  $U_0$ ， $L_c$  为电容器及连接线的电感，则

当  $0 \leq t < \tau_0$  时

$$(L + L_c) \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = U_0$$

因  $t=0$  时， $i_1=0$ ，故得  $S_1$  合上后，电路中流往  $L$  的电流

$$i_1 = \sqrt{\frac{C}{L + L_c}} U_0 \sin \omega t \quad (1-1)$$

式中  $\omega = 1/\sqrt{(L + L_c)C}$

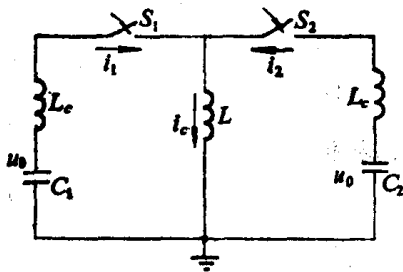


图 1-7 两组电容器并联连接电路

当  $t \geq \tau$  时, 为了计算的方便, 选择  $S_2$  合上的瞬间, 即  $t = \tau$ , 作为新的时间原点, 并设  $t$  为新的时间变量, 则得

$$L_c \frac{di_1}{dt} + L \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_1 dt = U_0 - \frac{1}{C} \int_{-\tau}^0 i_1 dt \quad (1-2)$$

$$L_c \frac{di_2}{dt} + L \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_2 dt = U_0$$

$$i_1 + i_2 = i_c$$

现将式 (1-1) 积分

$$\frac{1}{C} \int_{-\tau}^0 i_1 dt = U_0 (1 - \cos \omega \tau_0) \quad (1-3)$$

由式 (1-2) 和式 (1-3) 得

$$(L_c + 2L) \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt = U_0 (1 - \cos \omega \tau_0)$$

所以, 流过负载的最大电流为

$$i_{c \cdot \max} = 2 \cos \left( \frac{\omega \tau_0}{2} \right) \frac{\sqrt{L \left[ 1 + \sin^2 \left( \frac{\omega \tau_0}{2} \right) \right] + L_c}}{2L + L_c} \cdot \sqrt{\frac{C}{L + L_c}} U_0$$

此式表明, 输出功率的大小主要受到电路电感 (包括负载电感在内) 的影响。还应注意, 在  $S_1$  合上之后, 电容  $C_1$  上的电压将加到  $S_2$  上, 使  $S_2$  的两侧电压接近相等。这样, 开关  $S_2$  将不易被击穿 (即导通), 这种情况是应该避免的。所以, 在电容器并联运行时,  $\tau_0$  应尽可能小, 以保证开关 (在图 1-7 电路中为两个) 能接近同时导通。

由于开关的击穿时延难免有差别, 在电容器储能的脉冲发生器中, 开关的数目应尽可能少。通常将多个电容器并联连接成一个电容器组后, 由一个开关控制。图 1-8 所示电路就是多个电容器并联后, 由一个开关控制的一种接线方式, 图中  $R_0$  为电容器的保护电阻。

电容器储能脉冲发生器输出电压的幅值、波形将受到开关的参数和电路中的杂散电感、电容等的影响。图 1-9 就是考虑这些因素后的脉冲发生器的接线图。图中,  $C_1$  为储能电容,  $Z$  为输出电缆波阻抗,  $R_1$  和  $L_1$  分别为开关的电阻和电感,  $C_2$  和  $C_3$  为杂散电容,  $R$  为

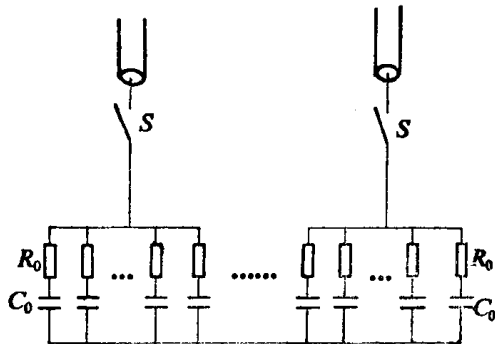


图 1-8 多组电容器组并联的脉冲发生器电路

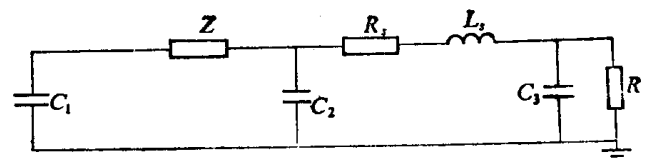


图 1-9 考虑开关参数和杂散电感、电容后的脉冲发生器电路



