

冲击大电流技术

清华大学电力系
高电压技术专业 编著

科学出版社

内 容 简 介

本书介绍冲击大电流的试验技术,首先叙述产生冲击大电流的原理、方法、使用的器件,以及提高冲击大电流参数的措施。然后讨论了冲击电流和冲击电压的测量方法。最后提及了冲击大电流试验室的总体布置、安全和接地问题。

本书可供从事等离子体物理和受控热核反应、大功率激光器、电磁激波管、强流电子束以及雷电流研究等方面的工人、技术人员和有关专业的师生参考。

冲击大电流技术

清华大学电力系

高电压技术专业 编著

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

石家庄地区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978年9月第一版 开本:787×1092 1/32

1978年9月第一次印刷 印张:6 1/3

印数:0001—21,230 字数:138,000

统一书号:15031·190

本社书号:1117·15—5

定价: 0.65 元

目 录

第一章 概述	(1)
§ 1-1 引言	(1)
§ 1-2 冲击大电流试验的组成部分	(2)
第二章 充电回路	(5)
§ 2-1 充电回路的基本原理	(5)
§ 2-2 充电方式	(8)
§ 2-3 充电回路中各元件的选择	(10)
§ 2-4 储能电容器的保护问题	(18)
第三章 主放电回路	(21)
§ 3-1 主放电回路的构成	(21)
§ 3-2 主放电回路的分析	(22)
§ 3-3 冲击大电流的参数	(24)
§ 3-4 计算举例	(27)
§ 3-5 主放电回路的结构考虑	(31)
第四章 隔离间隙	(33)
§ 4-1 隔离间隙在冲击大电流装置中的作用	(33)
§ 4-2 隔离间隙的结构及工作原理	(35)
§ 4-3 隔离间隙的并联运行	(53)
第五章 传输线	(60)
§ 5-1 对传输线的要求	(60)
§ 5-2 传输线的种类	(64)
§ 5-3 传输线的电感和电动力的估算	(65)
第六章 导线与回路中的波过程	(71)
§ 6-1 为什么要讨论波过程	(71)
§ 6-2 电磁波沿传输线的传播	(72)

§ 6-3	传输线的基本参数	(75)
§ 6-4	前行波与反行波	(80)
§ 6-5	分析波过程的基本方法	(83)
§ 6-6	一些具体问题的分析	(97)
§ 6-7	波的多次反射	(105)
第七章	控制回路与触发回路	(113)
§ 7-1	控制回路与触发回路的功用	(113)
§ 7-2	控制回路	(114)
§ 7-3	触发回路	(124)
第八章	电流和电压的测量	(136)
§ 8-1	引言	(136)
§ 8-2	冲击电流的测量方法	(137)
§ 8-3	电流测量线圈	(138)
§ 8-4	分流器	(145)
§ 8-5	利用“磁光效应”测电流简介	(150)
§ 8-6	冲击电压的测量方法	(152)
§ 8-7	常用的几种分压器	(154)
§ 8-8	电阻分压器的原理和误差分析	(157)
§ 8-9	电阻分压器测量回路的匹配问题	(163)
§ 8-10	电阻分压器的设计	(168)
§ 8-11	分压器的校订	(173)
§ 8-12	冲击电压测量中的“补偿”问题	(176)
§ 8-13	利用光学方法测量冲击电压	(179)
第九章	冲击大电流试验室	(185)
§ 9-1	总体布置	(185)
§ 9-2	接地问题	(186)
§ 9-3	安全与保护	(187)

第一章 概 述

§1-1 引 言

本书将着重讨论冲击大电流试验技术，即冲击大电流的产生和测量。

产生冲击大电流的装置称为冲击大电流装置或冲击电流发生器。典型的冲击大电流装置如图 1-1 所示。它包括两部分：一是由变压器，调压器，整流器，限流电阻和储能电容组成的充电回路；一是由储能电容，隔离间隙，传输线和负载组成的放电回路。

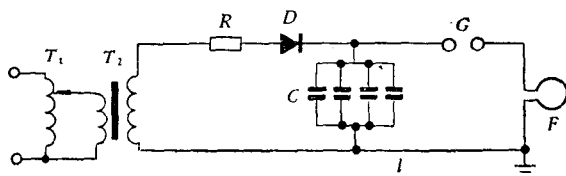


图 1-1 典型的冲击大电流装置

T_1 ——调压器 T_2 ——高压变压器 R ——限流电阻 D ——整流器
 C ——储能电容 G ——隔离间隙 F ——负载 l ——传输线

冲击大电流装置的基本原理是“电容器长时间充电，把电能储存在电容器中，然后使电容器短时间放电，使负载得到很大的功率。”应用简单的充电装置，充电时间一般需要几秒到几分钟，而放电时间仅为微秒的数量级。这样，在负载上可以得到非常大的瞬时功率，例如在 10^9 瓦以上。一般的发电厂，要发出这样大的功率，其规模和投资将非常之大，而冲击大电

流装置则比较小,投资也便宜得多,所以在短时间内需要大功率的场合,常常用它作为能源。例如一个工作电压为 50 千伏,电容量为 120 微法,储能为 150 千焦耳的冲击电流发生装置,可以产生 1 兆安以上的电流, 10^{10} 瓦以上的瞬时功率。

在现代的冲击大电流发生装置中,为了获得最大的冲击电流,要求放电回路中的电感尽可能的小。除了减小传输线的电感和采用低电感的电容器之外,常常采用多隔离间隙的并联运行以减小电感(即每台电容器上装一个隔离间隙或几台电容器上装一个隔离间隙,然后并联地接到共同的负载上去)。为了可靠地并联运行,要求各隔离间隙能够准确地同时击穿(简称为同步),使各电容器均能同时对负载放电,以获得最大的冲击电流。隔离间隙的同步运行往往是建造冲击大电流装置的一个关键问题。隔离间隙的击穿是靠触发回路发出的高压脉冲。这个高压脉冲的幅值越高,电压上升陡度越大,则越有利于并联间隙的同步运行。隔离间隙的同步运行的好坏,除了取决于触发装置的好坏,当然最终还是取决于隔离间隙本身的好坏,所以隔离间隙是冲击大电流装置中关键的一个部件。

冲击大电流的测量主要是指电信号的测量,借此以了解负载中所发生的情况,并可对冲击大电流装置本身的质量作一判断。为了使示波器能够把所需要的电信号拍摄下来,采用控制回路使示波器与主放电回路按预定的瞬间,顺序地启动。

§1-2 冲击大电流试验的组成部分

冲击大电流试验通常由五部分组成,其方框图如图 1-2 所示,其原理图如图 1-3 所示。

1. 直流充电装置

即充电回路。它由高压变压器 T_2 ，高压整流硅堆 D ，充电电阻 R_0 ，直流高压指示仪表（可用直流分压器或静电电压表）等组成。它的作用是把电网中的电能经过整流装置变成直流电，送到电容器中储存起来。

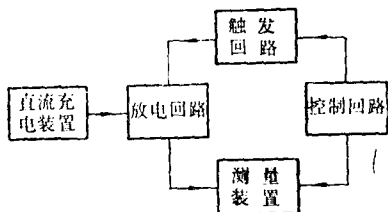


图 1-2 冲击大电流试验的组成方框图

它的作用是把电网中的电能经过整流装置变成直流电，送到电容器中储存起来。

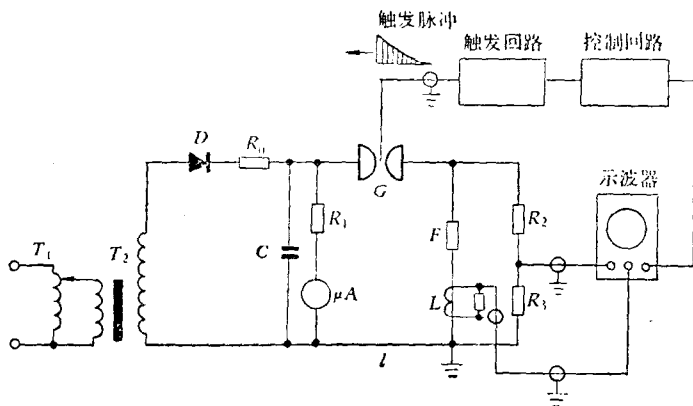


图 1-3 冲击大电流试验的原理图

T_1 ——调压器 T_2 ——高压变压器 D ——高压整流硅堆
 R_0 ——充电电阻 R_1 加 μA 表——直流分压器 R_2, R_3 ——电阻分压器 C ——储能电容器 G ——隔离间隙 F ——负载
 L ——电流测量线圈 l ——传输线

2. 主放电回路

这是整个装置的核心部分，它由储能电容器 C ，传输线 l ，隔离间隙 G ，负载 F 等组成。由触发回路接通放电回路，使

已充满电的电容器对负载放电,使负载获得极大的电流。

3. 触 发 回 路

它是一个能产生电压为几十千伏的触发脉冲的电压发生器。在主回路需要放电时,由控制回路送出一个信号去启动触发回路,触发回路再送出一个脉冲电压,使隔离间隙击穿,接通放电回路。

4. 测 量 装 置

主要是进行冲击电流和冲击电压的测量。冲击电流一般采用电流测量线圈或同轴分流器;冲击电压采用分压器来进行测量。

5. 控 制 回 路

它的作用是使试验装置的各部分按顺序动作。控制回路可以同时输出多路控制脉冲,按要求去启动相应的仪器设备。每一路控制脉冲的延迟时间均应该是可调的。在冲击大电流试验中,控制回路本身的启动有人员主控和外加信号主控(例如由高速照相机输出的电脉冲信号进行主控)两种方式。

冲击大电流试验的动顺序如次:储能电容器由直流充电装置充好电。其他的仪器和设备加上电源,处于准备状态。然后,由试验人员发出主控信号,使控制回路输出一个控制脉冲给触发间隙,使间隙击穿而接通放电回路。在一定的时间间隔之后,控制回路再送出一个控制脉冲给示波器,使它启动,记录下被测的电信号波形。

第二章 充电回路

最简单的充电回路如图 2-1 所示。它由调压器 T_1 、高压变压器 T_2 、硅堆（或高压整流管） D 、限流电阻 R 和电容 C 等元件所组成。充电回路的作用是将电网中的交流电通过整流之后，送入电容器 C 中储存起来。下面，我们将对充电回路的基本原理、充电回路各元件的选择原则及保护原理等加以讨论。

§2-1 充电回路的基本原理

1. R - C 电路的充电过程

为了讨论方便，我们将充电回路用图 2-2 所示的简化等效电路代替，作近似分析。

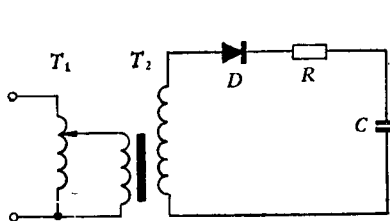


图 2-1 最简单的充电回路

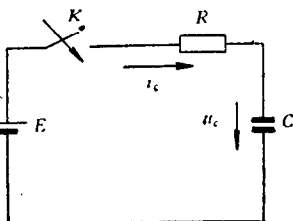


图 2-2 充电回路的等效电路

在 $t = 0$ 的瞬间合上开关 K ，电容器 C 上的电压 u_c 和电流 i_c 将如何变化？

图 2-2 是一个简单的 R - C 充电回路。电容器 C 的电压 u_c ，在合上开关 K 以后，将随着时间而不断地增加，最后电容

电压 u_c 到达电源电压 E ，而对应的电容电流 $i_c = \frac{E - u_c}{R}$ 将从最大值 $\frac{E}{R}$ 逐渐减小，最后到零。

对于图 2-2 的等效电路，其回路方程为：

$$Ri_c + u_c = E \quad (2-1)$$

电容器电流 i_c 的变化规律为：

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (2-2)$$

把 (2-2) 式代入 (2-1) 式，得：

$$RC \frac{du_c}{dt} + u_c = E \quad (2-3)$$

其解答为：

$$u_c = E - Ee^{-\frac{t}{RC}} = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (2-4)$$

而电容电流 i_c 的变化为：

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2-5)$$

(2-4) 式是由两个分量叠加而成的。 E 是电容电压 u_c 的稳态分量，表示时间 $t \rightarrow \infty$ 时，电容电压 u_c 所趋近的数值； $-Ee^{-\frac{t}{RC}}$ 是 u_c 的自由分量，它随时间的增大而逐渐趋于零。 u_c 的变化

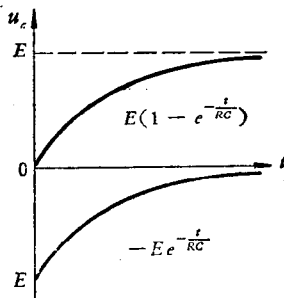


图 2-3 电容电压变化曲线

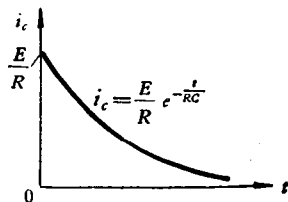


图 2-4 充电电流变化曲线

曲线见图 2-3。

由 (2-5) 式得到的电流 i_c 的波形如图 2-4。由图可知： $t = 0$ 时， $i_c = E/R$ ； $t \rightarrow \infty$ ， $i_c \rightarrow 0$ 。

2. 自由分量和时间常数 τ

由前分析，自由分量 $-Ee^{-\frac{t}{RC}}$ 衰减的快慢确定了 $u_c \rightarrow E$ 的时间的长短。那么，自由分量衰减的快慢和那些因素有关呢？显然和电路的参数 R 、 C 有关。 R 、 C 愈大自由分量 $-Ee^{-\frac{t}{RC}}$ 衰减就愈慢； R 、 C 愈小，自由分量 $-Ee^{-\frac{t}{RC}}$ 衰减就愈快。

从物理概念来说明：如果 R 一定， C 愈大，它需要充的电荷就愈多；因此充电时间就愈长；如果 C 一定， R 愈大，则充电电流就愈小，充电过程就愈慢，同样需要的时间就愈长。

我们把 R 、 C 的乘积称为时间常数 τ 。 τ 的大小决定了自由分量衰减的快慢；即决定了充电时间的长短。

对于 $t = \tau$ 、 2τ 、 $3\tau \cdots$ 时的自由分量 $-Ee^{-t/RC}$ 和电容电压 u_c 进行了计算，结果列于下表。

t	0	τ	2τ	3τ	4τ	5τ	$\cdots \cdots \infty$
$Ee^{-t/\tau}$	E	$0.368E$	$0.135E$	$0.05E$	$0.018E$	$0.007E$	0
u_c	0	$0.632E$	$0.865E$	$0.95E$	$0.982E$	$0.993E$	E

由表中数据可知，在理论上自由分量只有在 $t \rightarrow \infty$ 时才趋于零， u_c 才充电到 E 。但实际上，在 $t = (4-5)\tau$ 时，自由分量已衰减到 2% 以下， u_c 充到 98% 以上，一般认为充电已经结束。

以上分析了充电原理及充电快慢与那些因素有关的问题。

在一般的冲击大电流装置中，如果充电电压 u_c 确定以后，由硅堆或变压器的允许电流选择限流电阻 R 。电容量 C 的大小与装置能量 W 的大小有关， $W = \frac{1}{2} C u_c^2$ 。 C 、 R 确定后， τ 就确定了，因此充电时间就确定了。在充电回路中，我们感兴趣的是充电时间。在某些特殊情况下，要求充电时间是极短的，因此必须研究充电方式。

§2-2 充 电 方 式

下面简单介绍三种充电方式。

1. 并 联 充 电

如图 2-5 与 2-6 所示的回路。在图 2-5 中由三只整流元件 D_1 — D_3 并联， R_1 — R_3 为保护电阻， T 为高压变压器。在充电时，充电电流往往受到整流元件 D 的允许电流的限制。因此变压器最大允许电流较大时，采用图 2-5 并联多只整流元件，可提高充电电流，缩短充电时间。

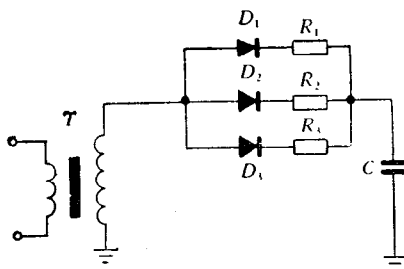


图 2-5 半波并联充电

图 2-6 电路是变压器高压绕组的两端均接上整流元件，使电流在正半波和负半波时间里都有电流给电容器 C 充电，

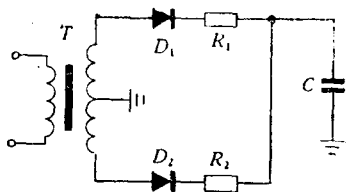


图 2-6 全波并联充电

可缩短充电时间。

它的缺点是,前者需用的整流元件多,后者变压器中的抽头接地,使结构复杂,体积增大。

2. 电流表观察法

这种方法是在电容器 C 的接地端串接一毫安表。充电时,调节调压器 T_1 ,使毫安表电流保持在最大允许值,如图 2-7 所示。

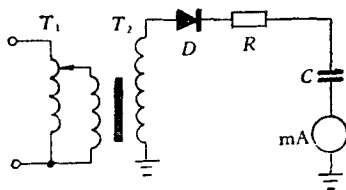


图 2-7 电流表观察法充电

3. 恒流充电

恒流充电就是在充电过程中,始终使电流保持一定,使充电时间大为减小,上面的电流表观察法也是恒流充电的一种方式。图 2-8 是用可控硅进行调节的三相恒流充电原理图。

充电的方式是很多的,了解了充电基本原理之后,可根据需要和具体情况进行选择。

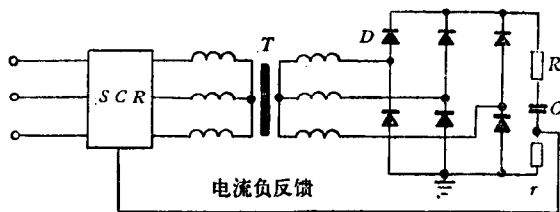


图 2-8 可控硅恒流充电

SCR——可控硅装置 R ——限流电阻 T ——高压变压器
 C ——储能电容器 D ——硅堆 r ——反馈电阻

§2-3 充电回路中各元件的选择

1. 储能电容器

在高电压大电流的试验中,电容器的应用是很广的,像冲击电压发生器、冲击大电流装置、振荡回路装置等等。电容器是这些装置的主体部分。再如高电压大电流试验中采用的测量和控制设备,象电容分压器、隔离间隙的触发回路等等,电容器也是很重要的。下面对电容器作些介绍。

即便不包括一般电力网用的电容器、电讯用的电容器,我们要用的脉冲电容器的形式、结构、性能等也是很不同的。从外形上看,电容器有圆柱形和长方形的;外壳材料有铁制的、磁壳的、胶木的和混合式的。电压从几千伏到几十万伏。电容量从几十微微法到几百微法。表 2-1 是西安电力电容器厂生产的脉冲电容器。

选择电容器首先要从要解决的问题和对设备提出的要求来考虑。如以产生冲击大电流的装置为例,选择电容器时要考虑以下几点:

a. 电容器电压

虽然可以选择电压比较低的电容器,再把它们串联起来,

表 2-1 西安电力电容器厂生产的脉冲电容器

型 号	额定电压 (千伏)	标称电容 (微法)	外形尺寸 (毫米)	重量 (公斤)
MY4-50	4	50	380×110×440	23
MY5-140	5	140	299×135×860	54
MY8-0.1	8	0.1	$\phi 138 \times 172$	3
MY30-18	30	18	640×430×1680	650
MY50-0.6	50	0.6	350×295×1680	230
MY50-3	50	3	530×530×1035	360
MY60-0.03	60	0.03	$\phi 172 \times 440$	16
MY80-0.03	80	0.03	$\phi 220 \times 500$	21
MY60-2.4	60	2.4	760×440×1458	595
MY200-0.0006	200	0.0006	$\phi 172 \times 680$	16
MY250-0.1	250	0.1	$\phi 910 \times 1200$	965
MY220-0.1	220	0.1	$\phi 635 \times 845$	330
MY110-0.2	110	0.2	$\phi 635 \times 495$	230
MY270-0.0024—0.0052	270	0.0024—0.0052	$\phi 360 \times 740$	87
MY500-0.00008 —0.00012	500	0.00008 —0.00012	$\phi 172 \times 970$	22
MY110-0.011	110	0.011	$\phi 220 \times 410$	16
MY110-0.0165	110	0.0165	$\phi 220 \times 500$	21
MY110-0.022	110	0.022	$\phi 220 \times 635$	27
MY40-0.03	40	0.03	$\phi 172 \times 295$	8.5
ML5-270	5	270	290×135×860	60
ML30-18	30	18	610×430×1230	490
ML50-0.6	50	0.6	320×295×1230	182
ML50-4	50	4	630×300×1070	378
ML150-0.6	150	0.6	640×300×1570	358

象冲击电压发生器那样。但是结构、运行都比较复杂,并且增加回路的电感,影响电流的输出。所以一般选择额定电压合适的电容器而不用串联的方法。在电压比较高的情况下(大于 50—60 千伏),用几台电容器串联起来,或者用更高额定电压的电容器,要看需要的电容量进行技术经济比较。

b. 电容量

一般选择一台电容器来满足要求。不能达到时，选择多台并联。用电容量大的电容器，在结构、电感、运行等方面比较简单有利些。但是用一台电容器如果损坏了，影响也比较大。例如建立一个 50 千伏、100 千焦耳的装置，需要的总电容是

$$W = \frac{1}{2} CU^2$$

$$C = \frac{2W}{U^2} = \frac{2 \times 100000}{50^2}$$

$$= 80 \text{ 微法}$$

可以选用 27 台 MY-50-3 型脉冲电容器。上式中 C 是电容器电容量(微法)， U 是电容器电压(千伏)， W 是电容器总能量(焦耳)。

c. 电容器的电感

为了得到尽可能大的电流或陡的脉冲电流，要求放电回路中各元件的电感小。因此也要求电容器的电感小。特别是中、小的装置，因为这时的并联电容器数目少。一般电容器有胶木筒和铁壳两种(图 2-9)。胶木筒外壳的电容器引线极在两端，不采取其他措施的话，电感比较大。铁壳电容器接线钮都在顶上，电感比较小。

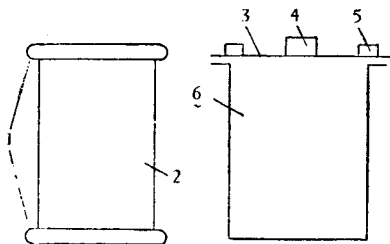


图 2-9 两种不同电容器外形

1——电极 2——胶木筒 3——胶木板 4——高压极 5——接地极 6——铁壳

d. 电容器直接短路

一般电容器是没有考虑短路运行的方式,常常要经过一定数值的电阻或电感放电,不能直接短路,否则电容器内部将发生损坏。但是在冲击大电流装置中,要求回路电感和电阻都很小。放电时相当电容器两端直接短路。生产这种电容器的工厂需要进行短路试验。如某振荡回路装置用的 MY30-19 型电容器就不允许直接短路使用,要串接 1 欧的电阻,对于一般高压冲击电压发生器,并不要求直接短路。

e. 电容器体积和重量

电容器制造的一个指标是单位容积的电容量,这个指标越高,同样容量的电容器体积就越小,占地也小,安置、运输也方便。例如 MY50-3 型的体积是 0.291 米^3 ,重 360 公斤,单位容积的电容量是 10.65 微法/米^3 ,ML50-4 型的体积是 0.202 米^3 ,重 378 公斤,单位容积的电容量是 19.8 微法/米^3 ,它比 MY50-3 型大 1.86 倍。从这指标看,ML 型比较先进,但是 ML 系列电容器是用有毒的三氯联苯制造的。

f. 寿命

当电容器放电产生冲击大电流时,其中绝缘材料会受到某些局部放电的影响,如果积累久了,可能引起绝缘材料的损坏,而使电容器不能使用。所以这种电容器应进行寿命试验,规定允许直接短路放电的次数,一般是一万次。

总之,不同装置中的电容器有不同的要求。例如对振荡回路装置,电容器电感就不用考虑,在它的回路内还要外接电感线圈才能达到 50 周的频率要求。所以,电容器的选择要按装置的要求来定。

2. 高压整流管或硅堆的选择

高压整流管或硅堆的主要参数为: