

# 高功率水介质开关加载脉冲电压 波头的数值分析

刘车波 李享生

(应用物理系)

**摘要** 文中对02号实验装置——高功率脉冲水介质开关上加载的脉冲电压的波头作了数值分析,理论上讨论了各参数对水开关工作性能的影响,得出了 $C_M/C$ 对水击穿特性影响很大的重要结论,从而给高功率亚微秒水开关的设计提供了理论依据。本装置的大量实验数据验证了计算的正确性。[4]

**关键词** 水开关、亚微秒区、电容比

## 1. 引言

水具有高的介电常数( $\epsilon_r=80$ ),自恢复能力强,成本低,易处理,来源充足,无毒无腐蚀等优点,使得水开关具有比气开关、油开关优越的许多特点,在高功率强流相对论电子束加速器中水开关作为主开关被不断加以推广。主开关的工作状态将直接影响加速器二极管的工作好坏,从而影响束的品质因素。水开关上加载的脉冲电压的上升时间、波头的振荡、电压的幅值等直接影响水开关的工作状态。本文对水开关加载脉冲电压的波头进行数值分析,讨论影响这些因素的一些条件。

## 2. 水开关工作原理及电路分析

在图1所示的系统,首先由直流高压电源向MARX产生器中的两台电容器并联充电,然后,由触发器触发MARX产生器中的火花隙开关,使电容器串联向主开关放电。并由OK-19示波器通过电阻分压器记录放电波形。水处理系统使水介质达到要求的电阻率。装置的等效电路见图2。

由于只讨论水开关波形的波

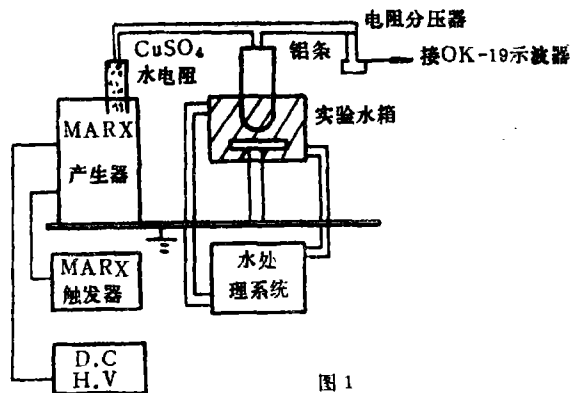


图1

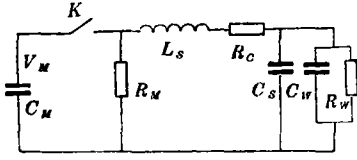


图 2

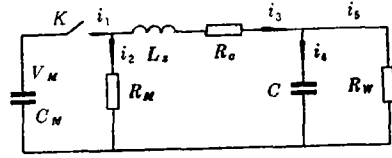


图 3

头部分，故在水开关被充电至导通前的一段时间内（微秒量级）认为  $C_W$ 、 $R_W$  为恒值。因而，图 2 可简化为图 3，其中  $C = C_W + C_S$ 。

对图 3 的电路列出微分方程：

$$\begin{cases} i_1 = i_2 + i_3, & i_3 = i_4 + i_5 \\ i_2 R_M = V_M - \frac{1}{C_M} \int i_1 dt, & \frac{1}{C} \int i_4 dt = i_5 R_W \\ i_2 R_M = L_S \frac{d i_3}{dt} + R_C i_3 + \frac{1}{C} \int i_4 dt \end{cases} \quad (2.1)$$

初始条件： $i_1(0) = i_2(0) = i_3(0) = i_4(0) = i_5(0) = 0$ 。

对上面 5 个方程分别进行拉普拉斯变换，得

$$\begin{cases} I_1 = I_2 + I_3, & I_3 = I_4 + I_5 \\ R_M I_2 = \frac{V_M}{P} - \frac{1}{C_M P} I_1, & \frac{1}{C P} I_4 = R_W I_5 \\ R_M I_2 = L_S P I_3 + R_C I_3 + \frac{1}{C P} I_4 \end{cases} \quad (2.2)$$

求得：

$$I_5 = R_M C_M V_M / \{ [(L_S P + R_C)(R_M C_M P + 1) + R_M] \cdot (C P R_W + 1) + R_W (R_M C_M P + 1) \} \quad (2.3)$$

由于  $V_5(P) = R_W I_5(P)$ ，所以水开关上的加载电压  $V_5(t) = \mathcal{L}^{-1} \{ R_W I_5(P) \}$ 。  $\mathcal{L}^{-1}$  表示拉普拉斯反变换。

$$\text{求得： } V_5(P) / V_M = F_1(P) / F_2(P) \quad (2.4)$$

其中： $F_1(P) = R_W R_M C_M$ ， $F_2(P) = A P^3 + B P^2 + C_1 P + D$

$$A = L_S R_M C_M C R_W, \quad B = L_S R_M C_M + (R_C R_M C_M + L_S) R_W C$$

$$C_1 = (L_S + R_C R_M C_M) + (R_M + R_C) R_W C + R_W R_M C_M$$

$$D = R_M + R_C + R_W$$

令  $F_2(P) = 0$ ，求得三个根  $P_1, P_2, P_3$ 。

又  $F_2'(P) = 3A P^2 + 2B P + C_1$ ，则

$$V_5(t) / V_M = \sum_{i=1}^3 F_1(P_i) e^{P_i t} / F_2'(P_i) \quad (2.5)$$

## 3. 数值分析及结果

02号装置的参数为  $C_M=0.18\mu\text{F}$ ,  $R_M=20\text{k}\Omega$ ,  $R_C=50\Omega$ ,  $L_S=2.3\mu\text{h}$ ,  $C_S=0.1\mu\text{F}$ ; 电极间距  $d=2.5\sim 5\text{mm}$ ; 水阻率  $\rho=4.0\sim 7.3\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ ; 一对圆柱形平板电极

表 1

$d(\text{mm})$	$C_M/C$		
$R$ 半径(mm)	3	5	7
30	231	/	/
55	80	124	170
70	48	/	/

$$C_M=0.18\mu\text{F}, R_M=20\text{k}\Omega, R_C=50\Omega, L_S=2.3\mu\text{h}$$

$$C_S=0.1\text{nF}, \rho=5\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$$

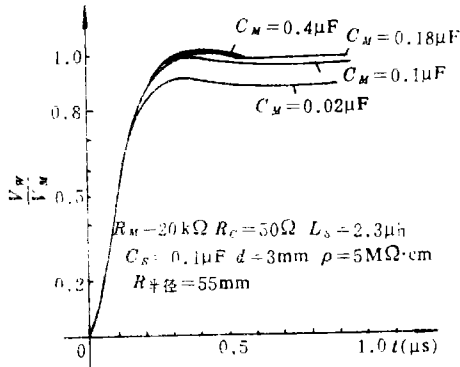


图 4

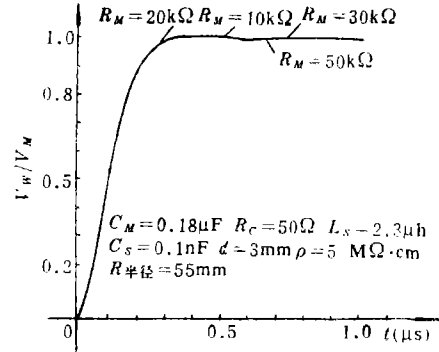


图 5

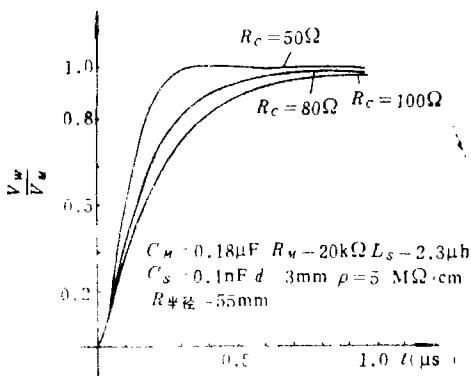


图 6

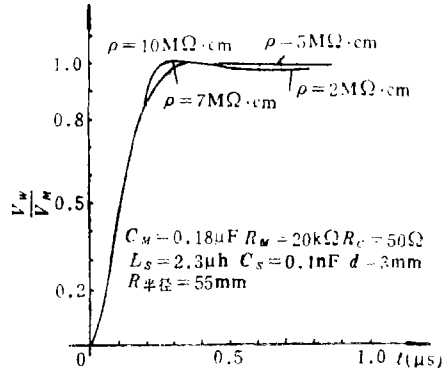


图 7

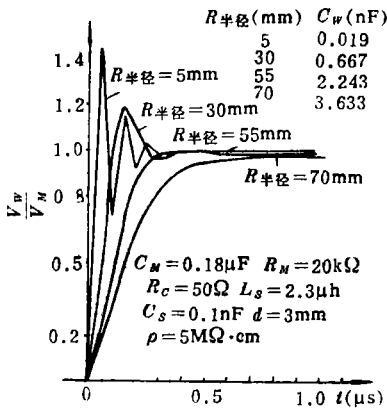


图 8

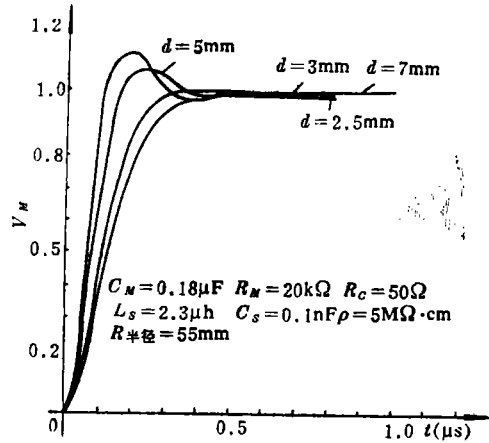


图 9

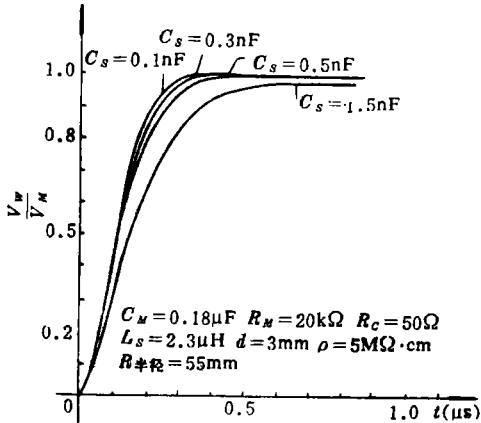


图 10

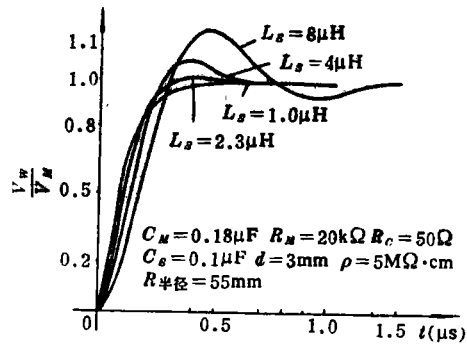


图 11

( $\phi 110\text{mm}$ )。间距试验从半球头( $\phi 52\text{mm}$ )到平板( $\phi 110\text{mm}$ )电极,从多针到平板( $\phi 110\text{mm}$ )电极[4]。电极材料为不锈钢。对于平板电极

$$C_W = \epsilon_r \epsilon_0 S / d; R_W = \rho d / S, \quad (S \text{ 为平板面积})。$$

图4~图11是各种参数对水开关波头的影响的曲线。 $R$ 半径是平板电极的半径。

结论:

(1)由图4、图8、图9、图10可看出,随着 $C_M$ 与 $C$ 的容值比的不断增大,加在水开关上的电压与原充电电压的比(即幅值比)也不断增大。表1中列出5种不同的 $C_M/C$ 值。当 $C_M/C$ 为80左右时,水开关上的波形有较好的幅值、上升前沿和振荡情况。但当 $C_M/C$ 与80差距较大时,这些性能就变差。因而在设计加速器时,须认真考虑 $C_M/C$ 。

(2)如图5, MARX产生器的接地电阻 $R_M$ 对电压波形和幅值影响不大。取值只须考虑接地保护问题,一般为数十 $k\Omega$ 。

(3)如图6, 限流电阻 $R_o$ 越大, 电压的幅值越低、上升时间加长。

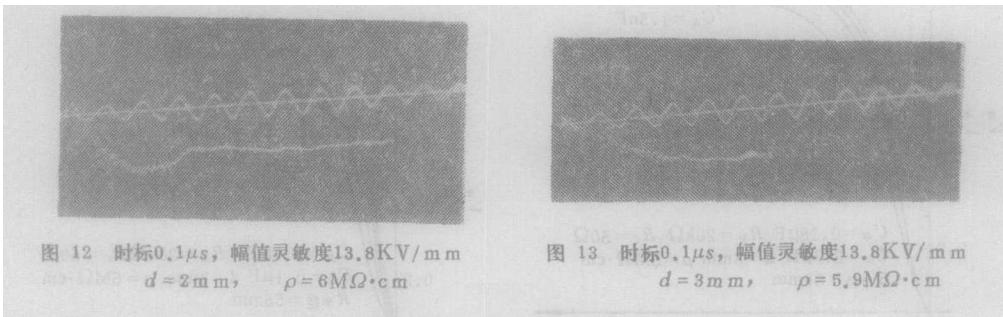
(4)如图7, 水阻率对电压的影响不大, 一般要求在 $1\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上<sup>[2][3]</sup>。

(5)如图11, 杂散电感 $L_s$ 越小, 则水开关上加载电压的上升时间越长, 幅值有小的减少, 但波头振荡有所改善。

#### 4. 与实验结果比较

见图8中的 $R_{\text{半径}}=30\text{mm}$ 的曲线, 发现其波头鼓包的区域在 $0.4\mu\text{s}$ 以内, 其幅值与平稳部分比为1.2。我们就相应电容的电极做了实验, 见图12。发现加载电压的波头部分也有一鼓包, 其区域在 $0.35\mu\text{s}$ 以内, 幅值与平稳部分之比为1.23。对另一电容电极( $R_{\text{半径}}=55\text{mm}$ ), 电压在 $0.4\sim 0.5\mu\text{s}$ 以内达到最大值, 波头的振荡很小,  $V(t)/V_M$ 几乎为100%。实验(参数相同)波形见图13。水开关上的电压在 $0.4\sim 0.6\mu\text{s}$ 以内达到最大值, 幅值比为100%。

以上的实验与数值计算的一致性充分证明了本文计算的可靠性, 同时说明 $C_M/C$ 的大小对水开关波形波头的影响。在实验照片中(图12、图13), 波头部分有一些杂散的振荡, 这是因为触发器触发火花隙开关时, 由触发器感应而来。另外, 线路的分布参数的不均匀性, 电阻分压器频率响应的特性均有影响。



#### 参 考 文 献

- [1] 俞大光著, 电工基础(中册). 人民教育出版社, 1981年2月
- [2] 李享生, 刘车波, 叶增军. 低脉冲高电压作用下水介质击穿特性的实验研究. 第二届全国高功率粒子束学术交流会议论文, 1985年10月
- [3] David B.Fenneman and Ronald J.Gripshover. Experiments on Electrical Break-down in Water in the Microsecond Regime. IEEE, Vol ps-8 No.3, 209(1980)
- [4] 李享生, 刘车波. 亚微秒负脉冲高电压击穿的水介质开关的实验研究. 国防科技大学学报, 1988年第1期

of an optical system, and illustrates simply how to use the variables of the structure data and how to determine their increments.

**Key words** Automatic correction, Objective; Ocular, Refract—reflecting system; Original structure

## The Transfer Characteristic of Faraday Cup

He Yiping Liu Cunhua Li Xiangsheng

### Abstract

The surface-action is considered here and the transfer characteristic of Faraday cup is derived theoretically. The analysis shows that there is an eigen frequency  $\omega_c$ , which is related to the structure of the cup. When  $\omega$  (measured signal's frequency)  $\ll \omega_c$ , the transfer characteristic function is a constant; but when  $\omega \geq \omega_c$ , the function is the sum of a constant and a decreasing oscillation term. On the latter condition, the cup would cause the distortion of the measured signal.

**Key words:** Faraday Cup, transfer characteristic, surface-action, eigen frequency, distortion

## The Numerical Analysis for Wave-head of Pulse Voltage on a Water Switch

Lin chepo Li Xiangsheng

### Abstract

In this paper we present some numerical analysis for wave-head of pulse voltage on a water switch which is used in the High Power Pulse Water Dielectric Switch Research Device, i.e. No. 2 device in Lab. 206. We have theoretically discussed a variety of parameters which can affect characteristics of the water switch. We have drawn an important conclusion that  $c_M/c$  can evidently affect some characteristics of the water switch. Thereby, a theoretic evidence is suggested for the design of a high power submicrosecond water switch. A lot of experiments' data in our device have confirmed our numerical analysis.

**Key words:** Water switch, Submicrosecond regime, Capacitive ratio