

# 茹科夫斯基线圈特性的研究

丁爱臻 楼祺洪 魏运荣 郑承恩

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 本文研究了采用国产磁芯的茹科夫斯基线圈的特性, 这种线圈适用于脉冲气体放电的电性能测量。

## Study on the characteristics of Rogowski coils

Ding Aizheng, Lou Qihong, Wei Yunrong, Zheng Chengen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

**Abstract.** This paper studies the characteristics of ferrite-core Rogowski coil which can be used for the measurement of electrical properties of pulsed gas discharge.

### 一、引言

在脉冲电流的测量技术中, 茹科夫斯基线圈已获得广泛的应用<sup>[1]</sup>。但受多因素的限制, 测量的波形往往被失真。这些因素包括磁芯的频率响应、线圈的分布电感和分布电容以及积分电阻大小等。我们研究了这些因素对茹科夫斯基线圈响应率和波形畸变的影响, 对国产磁芯采用结构上的处理, 获得宽带(30千赫~100兆赫)内的良好脉冲变换, 使它适合于脉冲放电二氧化碳和准分子激光放电的电流测量。此外, 由于激光器的阻抗为欧姆量级, 如果在激光器阴极和阳极之间并联1千欧姆左右的无感电阻, 用茹科夫斯基线圈测量流过该电阻的电流  $I(t)$ , 则茹科夫斯基线圈还可用于脉冲激光放电的电压测量。

### 二、实验装置及方法

实验所用的线圈是绕在磁芯上的环形线圈, 整个线圈置于金属屏蔽盒中, 线圈圈数为50匝, 采用电阻积分线路。茹科夫斯基线圈是一种脉冲变压器, 根据脉冲变压器基本特性分析, 它对脉冲方波的畸变分为平顶区下降(低频特性)和上升、下降部分的失真(高频特性)。对于一般导磁率  $\mu$  值较大的软磁铁氧体, 低频响应一般很差。为了改善线圈的低频响应, 我们曾试用低频响应好的磁芯, 但它的高频响应很差, 使脉冲方波的上升前沿变得平坦。同时, 我们了解到目前要生产高频及低频响应均好的磁芯在技术上有一定困难。为了克服上述困难, 我们对磁芯进行了特殊的结构处理, 将一个高频性能好的磁芯

收稿日期: 1983年10月12日。

和一个低频性能好的磁芯组合在一起,可以使下降率减小到0.2%微秒而不影响方波的上升前沿(我们定义每微秒脉冲幅度的相对下降值为顶部下降率)。对于实际实验测量的波形,如果我们允许的相对下降为1%,对于我们研制的线圈,当信号脉冲宽度为5微秒时可以求得信号平顶部分畸变小于1%,这对于放电持续时间为微秒量级的横向放电气体激光器的电学性能测量已能满足要求。

### 三、结果与讨论

#### 1. 积分电阻 $R_L$ 对线圈特性的影响

顶部下降与  $R_L$  有关,根据线圈的低频等效线路分析<sup>[2]</sup>,顶部下降率  $f$  为:

$$f = \frac{\Delta V}{V \cdot t_k} = \frac{R'_i}{L_m}$$

这里  $t_k$  为测试脉冲信号的宽度,  $L_m$  为初级信号的激磁电感,  $R'_i = R_i \cdot R_L / (R_i + R_L)$  为等效信号源内阻,  $R_i$  为信号源内阻。在我们实验条件下  $R_i = R_L = 50$  欧姆,  $R'_i = 25$  欧姆。  $L_m$  在一般实验中较难测量,我们通过  $f$  值的实验值可求得  $L_m \approx 12.5$  毫亨,反之,当我们确定了  $L_m$  以后就可以求得不同  $R_L$  值下的  $f$  值。表1给出不同  $R_L$  下的  $f$  的实验值和计算值,表明二者能很好地符合。

表1 不同积分电阻下的响应率和顶部下降率

$R_L$ (欧姆)	线圈响应率(伏/安)	顶部下降率 $f$ (%/微秒)	
		实验	计算
5	0.17	0.04	0.03
50	1.7	0.2	0.2
800	17.5	4.0	3.8

表1中我们同时列出了线圈的响应率,它同样与  $R_L$  有关,一般而言,它随着  $R_L$  的增大而增大。图1给出实验测量得到的响应率随  $R_L$  的变化。在满足  $R_L \ll \omega L$  的前提下,根据待测信号电流大小,放电脉冲宽度及检

测示波器的灵敏度可以选择恰当的  $R_L$ 。例如,对于放电时间为50~200毫微秒的准分子激光放电,当放电电流为千安培量级时,可选取  $R_L = 50$  欧姆左右。因为200毫微秒范围内顶部下降为0.04%,而响应电压为1700伏左右,正好适用于OK-19示波器灵敏度(300伏/厘米)。对于放电时间为微秒量级的TEA  $CO_2$  激光放电,从顶部下降率要求  $R_L$  要小于几欧姆,对于千安培量级电流,最好用灵敏度为每厘米几十伏的宽带示波器。

#### 2. 影响线圈高频特性的因素

另外一个主要关心的参量是信号的前沿上升时间。影响上升前沿的主要因素是漏感,绕组的分布电容,它们会引起响应信号上升前沿发生振荡。为了扼制这些振荡,我们采用双线缠绕法,见图2(b)。使线圈在构成所要求的线圈外不构成图2(a)所示的大电感线圈,同时每隔五圈用一个阻尼电阻接地来防止产生振荡,图3给出了这些措施对上升前沿的影响。图3(a)中  $I_1$  为源信号,  $I_2$  和  $I_3$  分别表示双线和单线缠绕下的脉冲上升前沿部分,表明  $I_2$  的畸变较小。图3(b)中  $I_0$  及  $I_R$  分别表示没有和接上阻尼电阻时脉冲上升前沿部分的影响,显然阻尼电阻有助于抑制上升前沿部分的高频振荡。对于XC14脉冲信号发生器能达到的最好上升波形(此时上升时间为4毫微秒,有小的振荡),

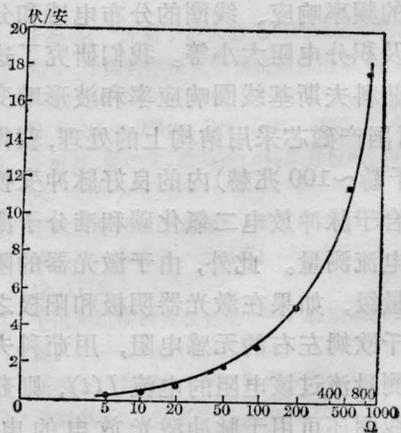


图1 不同  $R_L$  下线圈的响应率

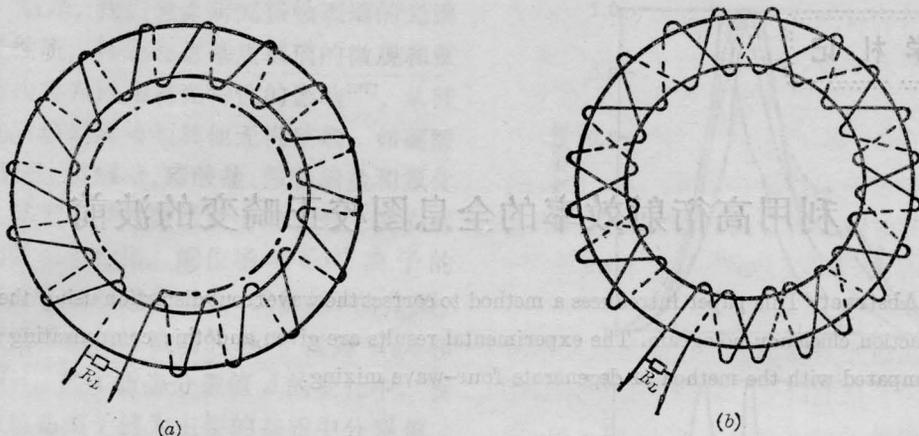


图 2

(a) 单线绕法示意图(点划线表示单线绕法构成的大电感线圈)  
 (b) 双线绕法示意图(来回两个绕组分别构成的大电感线圈由于电流方向相反,互相抵消)

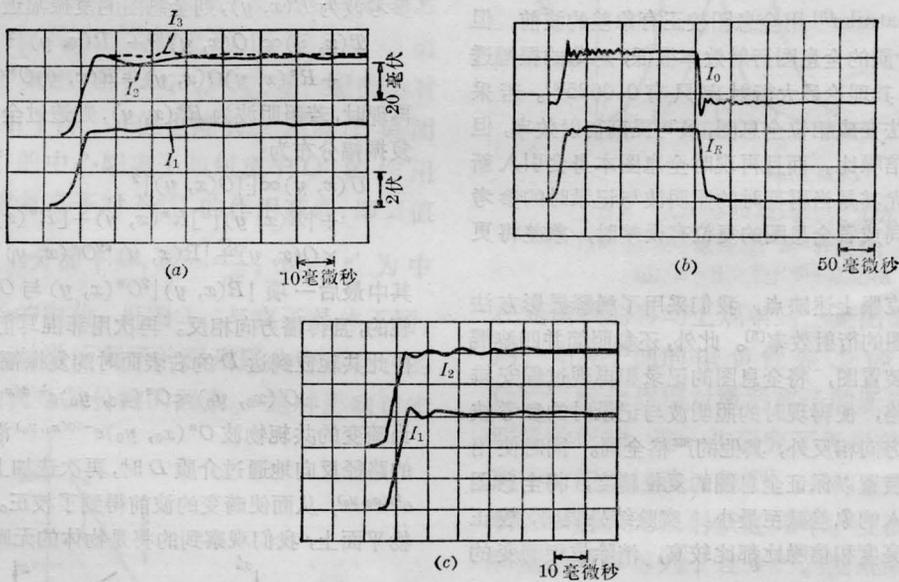


图 3

(a) 双线绕法对脉冲上升前沿的影响; (b) 阻尼电阻对脉冲上升前沿的影响;  
 (c) 源信号和测量信号脉冲上升前沿的比较

我们研制的茹科夫斯基线圈可给出相当好的响应[见图 3(c)], 其上升时间几乎维持不变, 这种响应范围对于上升时间为 100 毫微秒量级, 脉冲宽度为微秒量级的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器和上升时间为 10 毫微秒量级、脉冲宽度为 100 毫微秒量级的准分子激光器的电学特

性测量已能很好地满足。

### 参 考 文 献

- [1] F. Labuhn *et al.*; *Mess Technik*, 1971, **79**, No. 6, 129.
- [2] 刘宝琴, 郑君里编著;《脉冲数字电路及其应用》(上册), 人民邮电出版社, 1982, p 76.