

## 空腔中 B-dot 低频特性的硬件补偿\*

卫 兵, 康军军, 王 杰, 付佳斌, 傅 贞, 丰树平

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 中物院脉冲功率科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

**摘 要:** 针对在空腔中的微分环(B-dot)探头输出信号存在低频增益的问题, 分析了目前使用的“磁通穿透特征时间常数”一阶修正方法, 提出了使用适当积分常数的积分器进行补偿的方法。对安装在同轴线及径向线电极孔中的 B-dot 进行实验, 结果表明: 当积分器的积分时间常数等于磁通穿透特征时间常数时, B-dot 的测量结果与标准电流信号吻合。因此这也是空腔中的 B-dot 探头选取积分器的原则。该方法使用硬件直接获取了补偿后的测试结果, 与软件修正方法比较操作较为简便。

**关键词:** 脉冲电流; 标定; 频率响应; 补偿

中图分类号: TM835.4

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190309

## Hardware compensation of B-dot low frequency characteristics in cavity

Wei Bing, Kang Junjun, Wang Jie, Fu Jiabin, Fu Zhen, Feng Shuping

(Key Laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-108, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** The output signal of B-dot probe in the cavity increases at low frequency. The first-order correction method of “a characteristic flux-penetration time” is analyzed. According to the analysis, the method of compensation with integrator is proposed. Frequency response experiments were carried out for B-dot installed in the electrodes of coaxial and radial lines. The results show that when the RC time constant of the integrator is equal to the characteristic flux-penetration time, the measurements of B-dot coincide with the standard current signal. Therefore, for the B-dot probe in the cavity, this is the principle of selecting the RC constant of the integrator. The compensated test results are obtained directly by hardware, thus it is more convenient to operate than the software correction method.

**Key words:** current pulse; measurement; frequency response; compensation

B-dot(微分环)是脉冲强电流测量的常用测量手段<sup>[1-6]</sup>。在真空磁绝缘传输线(MITL)等器件的脉冲电流测量中,为了减小空间电子流对探头的干扰,同时也减小探头对主回路的扰动,常常将 B-dot 安装在传输线阳极的空腔(孔)中<sup>[2-6]</sup>。但是安装在空腔中的 B-dot 存在低频响应问题,最显著的表现是波形后沿的偏差,主要原因是被测电流产生的空间磁场需要穿透空腔周围导体导致<sup>[3]</sup>。目前通过引入一个“磁通穿透特征时间常数” $\tau_f$ ,对 B-dot 测量结果进行修正<sup>[3-5]</sup>,以获得正确的电流波形。该方法需要将测量数据导出后计算,因此无法在示波器上直接得到测量结果。如果能够采用硬件方式实现 B-dot 的低频补偿,对于测量的方便性具有较大的意义。本文对修正方法进行了分析,讨论了积分电路的频率响应特性,提出了基于积分器的硬件补偿方法,并通过相关实验验证了补偿效果。

### 1 探头低频响应特性与补偿

根据 B-dot 的原理<sup>[1-2]</sup>,其高频特性主要受探头杂散参数的影响,最主要由感应环的电感  $L$  与负载电阻  $R$ (或等效传输电缆的波阻抗)的比值决定。安装在空腔(孔)中的 B-dot 还存在低频响应问题<sup>[3]</sup>,典型现象是 B-dot 输出得到的电流波形脉宽增加<sup>[5]</sup>。目前较为简便的处理方法是使用“磁通穿透特征时间常数  $\tau_f$ ”概念对 B-dot 测量结果进行修正。即假设被测电流信号为  $I$ , B-dot 输出信号为  $V_B$ , B-dot 与主回路的互感系数为  $M$ ,当 B-dot 满足微分条件时,计算被测电流的修正公式为<sup>[3-5]</sup>

$$I = \frac{\exp(-t/\tau_f)}{M} \int_0^t V_B \exp\left(\frac{t}{\tau_f}\right) dt \quad (1)$$

\* 收稿日期:2019-08-12; 修订日期:2019-12-03

基金项目:国家自然科学基金项目(11605181, 11605188)

作者简介:卫 兵(1973—),男,高工,从事脉冲功率装置电参数测试技术研究;73wb@163.com。

式中:  $\tau_f$  为“磁通穿透特征时间常数”;  $M$  和  $\tau_f$  的数值均通过标定实验获得<sup>[3]</sup>。与传统的积分计算相比, 该计算方法有效解决了空腔中的 B-dot 的低频增益问题, 在标定实验中获得了与实际电流一致的波形。

但是使用式(1)获得电流需要对测量数据开展软件运算, 因此无法在示波器上得到直接的测量结果。如果能够采用硬件方式直接实现 B-dot 的低频补偿, 对于测量的方便性具有较大的意义。当使用 RC 积分器配合微分探头测量脉冲电压电流信号时, RC 常数不足会导致测量信号的后沿衰减较快。因此, 直观想象使用 RC 积分器可以抵消 B-dot 的低频增益。事实上, 对积分电路的回路方程进行分析可以看出其输出与补偿计算式(1)是相同的。

图 1 为 RC 积分的等效电路, 得到回路方程如下

$$V_{in} = iR + V_{out} \quad (2)$$

$$i = C \frac{dV_{out}}{dt} \quad (3)$$

联立式(2), (3), 可得

$$V_{in} = RC \frac{dV_{out}}{dt} + V_{out} \quad (4)$$

$$\frac{V_{in}}{RC} = \frac{dV_{out}}{dt} + \frac{V_{out}}{RC} \quad (5)$$

RC 即为积分器的时间常数, 记为  $\tau_i$ 。解等式(5)可得

$$V_{out} = \frac{\exp(-t/\tau_i)}{\tau_i} \int_0^t V_{in} \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) dt = \frac{M \exp(-t/\tau_i)}{\tau_i M} \int_0^t V_{in} \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) dt \quad (6)$$

当  $\tau_i = \tau_f$  时, 式(6)与公式(1)的结果仅仅相差常数  $M/\tau_i$ 。因此, 在标定并计算了 B-dot 探头的  $M$  和  $\tau_f$  值后, 使用 RC 时间常数与  $\tau_f$  相同的积分器可以等效对 B-dot 进行了低频补偿。

此外, 如果对公式(1)进行频率响应分析, 即假设  $V_B$  是以单一角频率  $\omega$  简谐振动的信号, 以此得出输出与输入的比值关系为

$$\left| \frac{I_{out}}{V_B} \right| = \frac{\tau_f}{M \sqrt{1 + \omega^2 \tau_f^2}} \quad (7)$$

根据式(7)可画出公式(1)的幅频特性, 参见图 2。对比 RC 积分电路的频率特性<sup>[7]</sup>, 也可以发现两者是完全相同的, 公式(1)的转折频率  $\omega = 1/\tau_f$ , 积分电路的转折频率  $\omega = 1/\tau_i$ 。

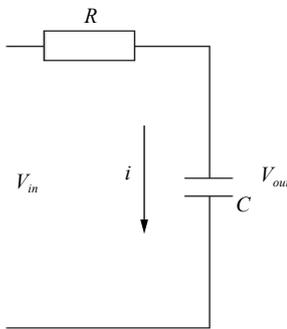


Fig. 1 Equivalent circuit of integrator

图 1 积分器等效电路

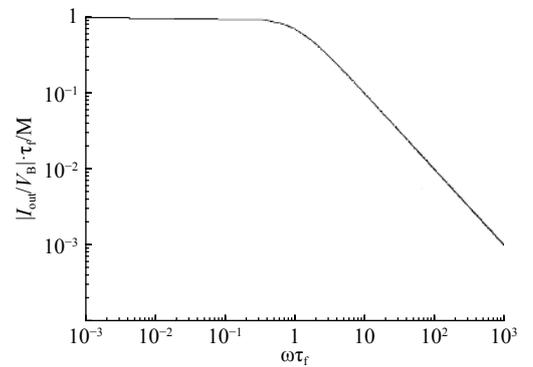


Fig. 2 Amplitude-frequency response of equation (1)

图 2 等式(1)的幅频特性

## 2 探头的硬件补偿实验

使用 RLC 放电回路对 B-dot 探头进行低频响应的实验研究。B-dot 安装在一个阻抗为  $50 \Omega$  标定室中<sup>[8]</sup>, 标定室的输出端连接短路负载, 输入端连接电容器放电回路<sup>[5]</sup>。使用型号为 6600 的 Pearson 线圈(带宽为 25 Hz~120 MHz)的测量结果作为电流比对信号。该线圈的频率下限为 25 Hz, 上限为 120 MHz, 完全覆盖本实验电流波形的频率范围, 因此可以作为标准电流信号。

图 3 给出了 B-dot 的数值积分以及使用积分器的测量结果。为方便比较, 对波形电流的第一峰进行了归一

化。图 3(a) 表明 B-dot 积分计算结果与电流线圈获取的电流信号存在偏差；图 3(b) 给出了本实验中使用的 B-dot 连接  $\tau_i=2.4 \mu\text{s}$  的积分器获得的电流波形，与标准线圈测量电流波形吻合，并且与使用相同的  $\tau_i$  对 B-dot 输出进行修正的波形一致<sup>[5]</sup>。

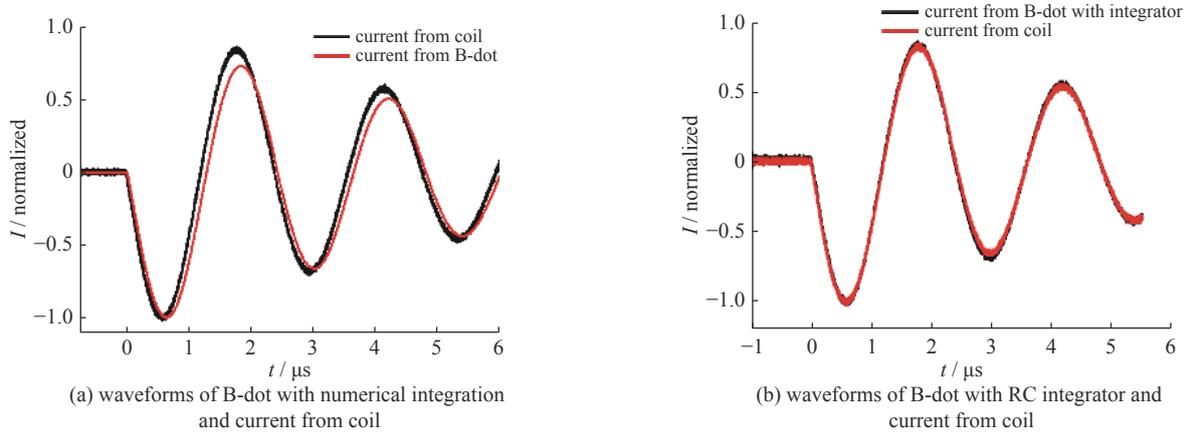


Fig. 3 Waveforms of B-dot with numerical integration and RC integrator

图 3 B-dot 数值积分以及使用积分器的测量结果

对于径向线快脉冲电流信号，B-dot 配合适当的积分器也可以实现很好的补偿。图 4 给出了使用不同积分常数的积分器得到的电流信号。为方便波形对比，图中波形均进行了归一化处理。选择  $\tau_i=5 \mu\text{s}$  的积分器（按照通常的积分器选择方法，应使  $\tau_i$  远大于信号脉宽）得到的波形与数值积分的结果近似；而采用  $\tau_i=1 \mu\text{s}$  的积分器，所得波形的后沿与小电阻测流器 (CVR) 测量电流波形基本重合，表明对该 B-dot，使用  $\tau_i=1 \mu\text{s}$  积分器低频补偿效果良好。

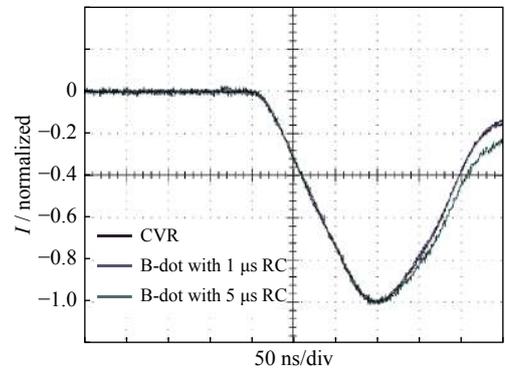


Fig. 4 Waveforms of B-dot

图 4 测量短脉冲 B-dot 输出波形

对于测量超高功率电脉冲装置负载电流的 B-dot，由于标定实验电流为 kA 量级，B-dot 连接积分器后输出信号只有 10 mV 量级，如果再使用积分器，则信号过小，无法测量<sup>[6]</sup>。所以在标定实验中，使用公式 (1) 确定补偿时间常数  $\tau$  值。然后选取积分常数  $\tau_i$  与之接近的积分器，将  $\tau_i$  值代入公式 (1) 进行补偿计算  $M$  值，并确定最终的灵敏度。针对基于分时放电技术的超高速飞片发射实验<sup>[9]</sup>，负载电流从起始到顶的上升时间 (0~100%) 最大可达 600 ns (参见图 5)，相应负载电流 B-dot 标定波形参见图 6，尽管电流前沿 (10%~90%) 大于 400 ns，但根据标定实验可知选择积分常数  $\tau_i \approx 2.2 \mu\text{s}$  积分器，电流波形的峰值以及后沿与修正波形一致；而如果按照以往通常要求的  $\tau_i$  远大于信号脉宽，得到的电流波形峰值略迟且脉宽增大。

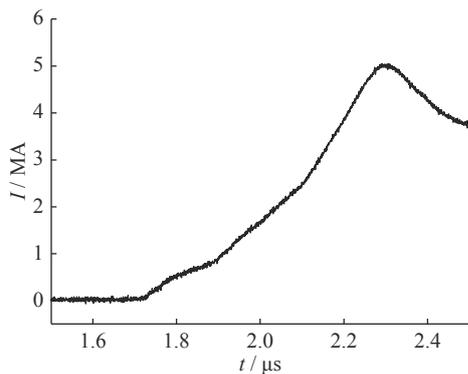


Fig. 5 Current waveform of load

图 5 磁加载实验负载电流波形

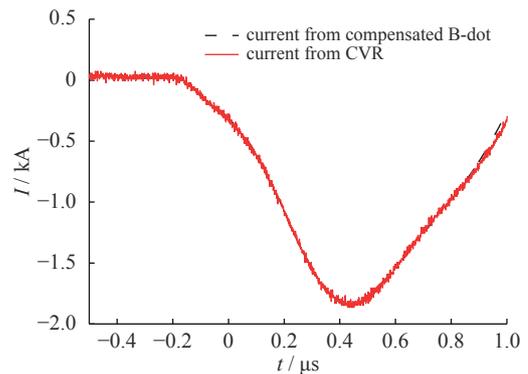


Fig. 6 Waveforms of B-dot and CVR in calibration

图 6 磁加载实验 B-dot 的标定波形

上述实验表明:选择  $RC$  时间常数适当的积分器能够实现 B-dot 探头的低频补偿,可以直接获得正确的测量结果。需要指出的是:使用积分器补偿可能会遇到积分器高频响应特性不足导致的问题。受分布参数的影响,积分器在较高频带通常表现的为增益<sup>[10]</sup>。因此,即使被测信号并不是很快(前沿可能是几十 ns),但由于包含一定的高频干扰分量,有高频增益问题的积分器等效放大了这些高频分量,使信号的高频干扰加剧,信噪比变差。宽频带积分器高频响应可以达到 1 GHz<sup>[11]</sup>,适用于本文所述的 B-dot 进行低频补偿。

### 3 结 论

空腔中的 B-dot 探头在频率低于一定值时存在低频分量增益。分析表明:选择  $RC$  时间常数适当的积分器等效目前使用的“磁通穿透特征时间常数”一阶修正方法,能够实现 B-dot 探头的低频补偿,可以直接获得正确的测量结果。实验结果表明:当积分器的积分时间常数等于磁通穿透特征时间常数时,B-dot 的测量结果与标准电流信号吻合。由于采用了积分器,在示波器上直接获取了补偿测试结果,因此与软件修正方法比较,操作较为简便。

#### 参考文献:

- [1] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2003: 157-167. (Zeng Zhengzhong. Introduction to practical high power pulse technology. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 2003: 157-167)
- [2] Rose D V, Welch D R, Miller C L, et al.  $10^7$ -A load-current B-dot monitor: Simulations, design, and performance[J]. *Phys Rev ST Accel Beams*, 2010, 13: 040401.
- [3] Wagoner T C, Stygar W A, Ives H C. Differential-output B-dot and D-dot monitors for current and voltage measurements on a 20-MA, 3-MV pulsed-power accelerator[J]. *Phys Rev ST Accel Beams*, 2008, 11: 100401.
- [4] 呼义翔, 韩娟娟, 郭宁, 等. 磁绝缘线电流测量差模式B-dot探头[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(10): 2511-2515. (Hu Yixiang, Han Juanjuan, Guo Ning, et al. Differential B-dot monitor used for current measure of magnetically insulated transmission lines[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(10): 2511-2515)
- [5] 卫兵, 但加坤, 付佳斌, 等. 空腔中B-dot的低频响应特性[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 015026. (Wei Bing, Dan Jiakun, Fu Jiabin, et al. Low frequency response characteristics of B-dot monitor in cavity[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 015026)
- [6] 卫兵, 卿燕玲, 丰树平, 等. 测量数兆安脉冲电流的探头设计与标定[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 085002. (Wei Bing, Qing Yanling, Feng Shuping, et al. Current measurement for a four level magnetically-insulated transmission line[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 085002)
- [7] 卫兵, 傅贞, 王玉娟, 等. 无源RC积分器频率响应特性分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 53-56. (Wei Bing, Fu Zhen, Wang Yujuan, et al. Frequency response analysis of passive RC integrator[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(1): 53-56)
- [8] 卫兵, 方东凡, 卿燕玲, 等. 亚纳秒脉冲高电压测量探头[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1497-1501. (Wei Bing, Fang Dongfan, Qing Yanling, et al. D-dot monitor for sub-nanosecond high voltage pulse measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(6): 1497-1501)
- [9] 王贵林, 郭帅, 沈兆武, 等. 基于聚龙一号装置的超高速飞片发射实验研究进展[J]. 物理学报, 2014, 63: 196201. (Wang Guilin, Guo Shuai, Shen Zhaowu, et al. Recent advances in hyper-velocity flyer launch experiments on PTS[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 196201)
- [10] 卫兵, 卿燕玲, 付佳斌, 等. 宽频带无源积分器的设计和实验[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4): 1108-1112. (Wei Bing, Qing Yanling, Fu Jiabin, et al. Design and performance of wideband coaxial passive integrator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(4): 1108-1112)
- [11] 卫兵, 傅贞, 卿燕玲, 等. 一种同轴型阻容积分器: CN206420938U[P]. 2017-08-18. (Wei Bing, Fu Zhen, Qing Yanling, et al. A coaxial passive RC integrator: CN206420938U. 2017-08-18)