



·脉冲功率技术·

LTD 单路验证装置电流测量*

卫 兵, 王 杰, 李 远, 李 逢, 陈 林, 周良骥, 郭 帆, 袁建强

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

摘 要: 为测量 LTD 单路验证装置的过渡段与出口电流, 设计和标定了 B-dot 电流探头。采用径向传输线对电流探头进行了线下标定, 并开展相应验证实验证实了标定的有效性。实验表明: 探头安装深度和角度误差导致的探头灵敏度偏差约为 1%; 当阴阳极间距大于探头孔直径时, B-dot 标定结果基本不受阴阳极间距的影响; 对于本装置涉及的直径较大的同轴线, 用径向线模拟标定结果是有效的。从 LTD 单路验证装置的实验结果可知, 4 个过渡段至出口的阳极电流有轻微的损失, 而阴极电流逐步减小。

关键词: 脉冲电流; 测量; 标定; 真空磁绝缘传输线

中图分类号: TM835.4

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210519

Current measurement for LTD single branch verification device

Wei Bing, Wang Jie, Li Yuan, Li Feng, Chen Lin, Zhou Liangji, Guo Fan, Yuan Jianqiang

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

Abstract: To measure the transition section and outlet current of LTD single branch verification device, a B-dot current probe is designed and calibrated. The radial transmission line is used to calibrate the current probe offline, and the corresponding verification experiments are carried out to verify the effectiveness of the calibration. The experimental results show that the sensitivity deviation of the probe is about 1% due to the errors of probe installation depth and angle. When the distance between the cathode and the anode is greater than the diameter of the probe hole, the B-dot calibration result is independent of the distance. For the coaxial transmission line with large diameter involved in the device, the simulation and calibration results of radial transmission line are effective. According to the experimental results of the LTD single channel verification device, the difference of anode current from the four transition sections to the outlet is very small, while the cathode current decreases gradually.

Key words: current pulse, measurement, calibration, magnetically insulated transmission line

快脉冲直线变压器驱动源(LTD)技术是近年来快速发展起来的一种新型脉冲功率技术, 采用了类似感应电压叠加器(IVA)感应腔的结构, 通过多个子块并联实现大电流输出, 然后通过多模块串联实现高电压输出^[1-3]。B-dot 电流探头通过测量变化的电流建立的变化磁场间接测量脉冲电流, 广泛应用于脉冲功率装置^[4-14]。B-dot 便于采取抗空间电子的措施, 因此很适合真空磁绝缘传输线使用^[5-10]。B-dot 电流探头的灵敏度与主回路的互感系数相关, 通常不能脱离被测系统单独标定^[4], 因此目前的绝大多数电流探头均采用在线标定(原位标定)^[7-14]。针对 ZR 装置大尺寸磁绝缘传输线的 B-dot 电流测量探头, Wagoner 等人提出了一种利用较小尺寸的径向线开展线下标定的实用方法^[5]。通常情况下, 当实测状态不具备标定条件而在模拟装置上进行标定时, 应有证据说明模拟装置的逼真性和标定结果的可用性^[15], 但文献 [5] 并未给出相应内容。

对于本文所述的 B-dot, 在线标定存在困难。LTD 装置具有一定的电长度, 且存在磁芯, 过渡段电流探头安装在单路验证装置的中部, 难以使用外部信号源馈入的方法得到幅值、前沿合适的标定电流信号, 且无法在过渡段位置安装比对标准信号线圈, 因此难以采用在线标定。如果将探头安装在一个与实际传输线直径相同的过渡段装置上进行标定(即加工与实际装置相同尺寸的内外筒, 从一端馈入信号, 另一端连接匹配负载或短路负载), 则装

* 收稿日期: 2021-11-25; 修订日期: 2022-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51907181, 51977201); 中国工程物理研究院创新基金创新项目(CX2019005)

联系方式: 卫 兵, 73wb@163.com。

置尺寸较大,制作较为麻烦且成本高,并可能存在由放电电流不均匀等导致标定误差的因素,因此希望寻求更为可靠且简便的标定方法。本文针对 50 模块的 LTD 单路验证装置过渡段位置电流测量的需求,设计了 B-dot 电流探头,重点开展了线下标定研究,对利用径向线标定的方法进行了相应实验测试与分析,确认了标定的有效性。

1 探头设计

LTD 单路验证装置以 10 个模块为一个组件,相邻的组件之间设置了过渡段^[1]。电流探头安装在每个 LTD 组件的过渡段以及出口位置,参见图 1。第 1~4 组件过渡段电流分别为 $I_1 \sim I_4$, 出口位置电流为 I_5 。每个位置的阴极电流 B-dot 探头和阳极电流 B-dot 探头分别安装在相应位置的内筒(阴极)与外筒(阳极)上。每个位置的阴极和阳极各安装 4 个探头(沿圆周方向均布),计算平均值得到相应位置的阴极和阳极电流。以出口为例,以 I_5 处的 4 个阳极探头平均值作为出口阳极电流 I_{a5} ,以 I_5 处的 4 个阴极探头平均值作为出口阴极电流 I_{c5} 。

B-dot 安装在探头底座的孔中,参见图 2。内筒和外筒探头采用印制电路板制作的 B-dot 环(尺寸相同),面积约为 $3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,每层 2 匝,4 层板共 8 匝。由于 LTD 装置的次级为真空,电流探头的设计也遵循真空磁绝缘线电流探头的设计方法^[5-10]。根据防空间电子干扰的需求,在探头孔的表面贴合 $5 \mu\text{m}$ 厚的镍铬合金箔^[5,9]。另外,根据真空密封需求,外筒探头设计了密封结构。

使用矢量网络分析仪可以对安装在标定室上的 B-dot 电流探头开展频响测试^[9-10,13]。实验中,将矢量网络分析仪的端口 1 作为输入连接在标定室的一端;将矢量网络分析仪配备的标准 50Ω 作为负载连接在标定室的另一端;将探测器输出连接矢量网络分析仪的端口 2;测量 S_{21} 参数得到探测器的频响特性曲线。连线示意图参见图 3。

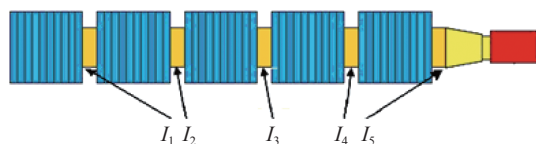


Fig. 1 Position of LTD current monitors
图 1 电流探头布局

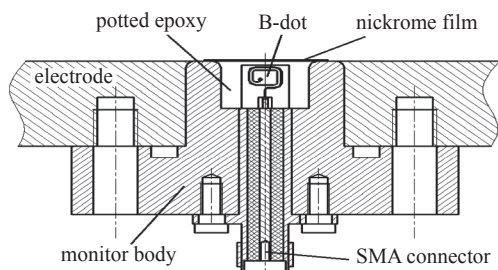


Fig. 2 Structure of monitor
图 2 探头结构

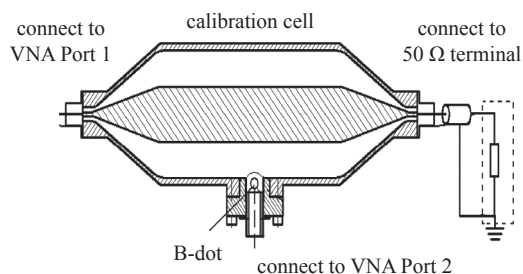


Fig. 3 Diagram of B-dot frequency response test
图 3 B-dot 频响测试连线示意图

B-dot 电流探头扫频结果参见图 4(频率特性以频率 f 为横轴, $20\lg(V_{\text{out}}/V_{\text{in}})$ 为纵轴, V_{out} 即为探头输出信号, V_{in} 为标定室的输入信号)。为定量分析确定探头的频率特性,将幅频特性的纵轴转变为 $20\lg(\frac{1}{M\omega} V_{\text{out}}/V_{\text{in}})$ ^[9], M 即探头与主回路电流的互感系数, ω 为信号角频率。转换后的频响特性参见图 5。测量转换后频响特性的 -3 dB 对应频率上限 $f_H = 45 \text{ MHz}$,由此估算探头响应时间远远小于 120 ns ,能够满足被测信号的响应要求。

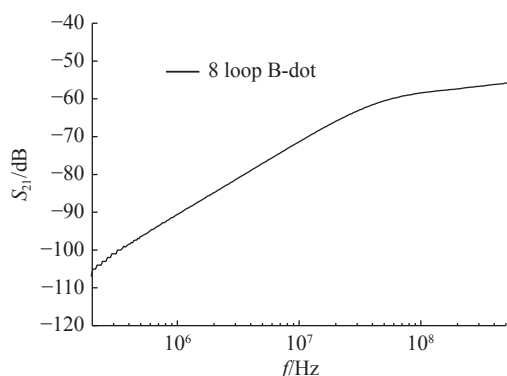


Fig. 4 Amplitude-frequency response of B-dot
图 4 电流探头的幅频响应特性

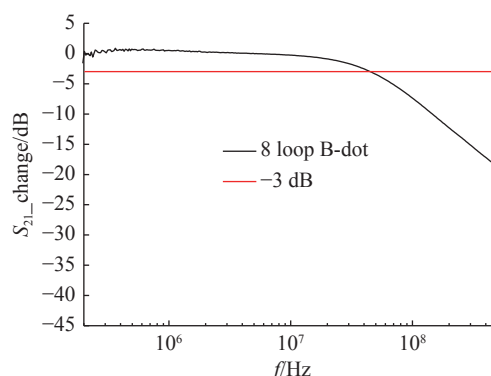


Fig. 5 Response of B-dot after y-axis is transformed
图 5 转换纵坐标后的响应特性

2 探头灵敏度标定

2.1 线下标定方法

通常情况下, B-dot 电流探头采用在线标定^[7-14], 主要原因是由于 B-dot 探头的灵敏度取决于探头与主回路的互感系数。如果采用线下标定, 必须对标定结果的有效性和可用性进行分析^[15]。由于 $I_1 \sim I_4$ 探头安装在单路验证装置的中部, 难以使用外部信号源馈入的方法得到幅值、前沿合适的标定电流信号, 且无法安装比标准信号线圈, 因此无法采用在线标定, 需要开展线下标定的研究, 确定合适的标定方法。起初的考虑是将探头安装在一个与实际传输线直径相同的过渡段装置上进行标定(即加工与实际装置相同尺寸的内外筒, 从一端馈入信号, 另一端连接匹配负载)。但考虑到该装置尺寸较大, 制作较为麻烦且成本高, 并且可能存在放电电流不均匀等导致标定误差的因素, 因此希望寻求可靠且简便实用的标定方法。

Sandia 实验室 ZR 装置的磁绝缘传输线 B-dot 探头用径向传输线开展线下标定^[5]。方法是: 将 B-dot 安装在一个径向传输线上, 从径向线的入口(外侧)馈入信号, 中心位置安装小电阻测流器(CVR), 得到标准电流测试信号, 以此进行标定。假设测量 B-dot 与标定回路的互感系数为 M_{cal} , B-dot 到标定系统径向线的中心的距离为 r_{cal} , 而 B-dot 到磁绝缘线电流中心线的距离为 r , 则 B-dot 与主回路的互感系数 M 按距离比例计算, 即

$$M = M_{cal} \frac{r_{cal}}{r} \quad (1)$$

参照这一方法, 借用多路并联超高功率电脉冲装置的负载区电流探头标定平台^[10]开展 LTD 验证样机的 B-dot 探头线下标定。标定平台由信号源、传输电缆以及径向传输线组成。信号源由电容器及自击穿开关构成, 使用 48 根 50Ω 电缆并联传输信号至径向线入口(角向均布)。径向线的中心位置安装 CVR, 用来提供标准电流测试信号。径向线以及被标定探头的结构参见图 6。

安装在电极孔中的 B-dot 存在低频增益^[16], 直接积分计算电流信号产生轻微的后沿畸变, 可以使用适当积分常数的积分器进行补偿^[17]。本文所述的 B-dot 使用积分常数约为 $4 \mu s$ 的积分器, 得到的标定波形参见图 7。由于 B-dot 得到的电流波形与 CVR 波形基本重合, 图 7 中 B-dot 波形水平向前移动了 $5 ns$, 便于观察。标定波形的前沿约 $110 ns$ (与实测波形接近), 并且前后沿以及反峰均与 CVR 测量波形吻合较好。

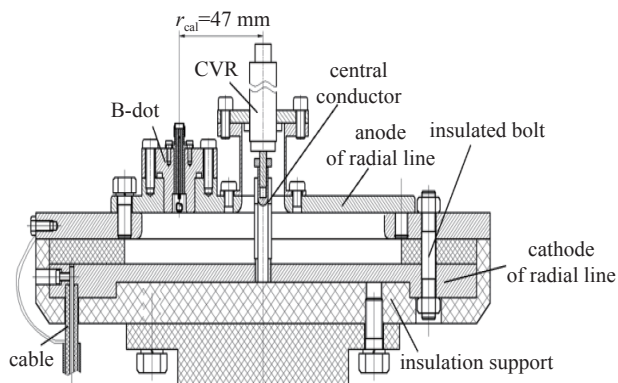


Fig. 6 Structure diagram of radial line for calibration

图 6 标定径向线结构示意图

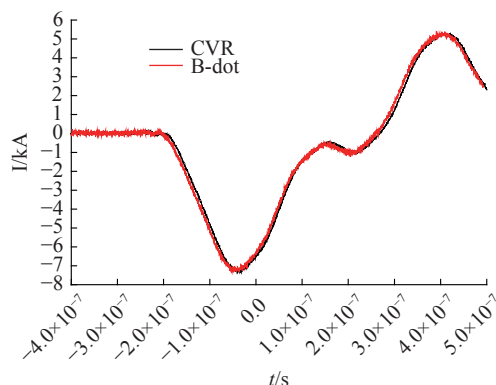


Fig. 7 Calibration waveform of B-dot

图 7 B-dot 标定波形

2.2 线下标定方法有效性分析

对于线下标定, 由于探头(底座)标定后需要重新安装, 因此首先需要分析重新安装的 B-dot 深度和角度可能的改变对标定结果的影响。定性分析可知, 探头孔内的磁场强弱与深度有关, 且 B-dot 的角度决定有效面积。因此, B-dot 探头安装在标定装置和实测位置的深度、角度一致性是决定线下标定有效性的重要因素。

试图通过仿真计算的方法定量计算磁场与深度的关系存在一定困难。因为磁场的衰减与趋肤效应相关, 但是通常的商用软件将金属作为无限电导率材料处理, 且受到网格划分精度的影响, 仿真分析得到的数据存在一定的误差。因此通过实验方法分析探头深度与 B-dot 灵敏度的关系。即在标定平台上, 为探头设计一系列不同厚度的垫片, 测量不同深度的 B-dot 输出计算探头灵敏度。定义灵敏度 S 为 CVR 测量的电流值与 B-dot 输出信号电压的比值计算(单位为 A/V)。即, B-dot 输出值越小时, 灵敏度 S 越大。

实验结果参见图 8。为方便表示, 对灵敏度进行了归一化处理(将 B-dot 探头顶部分与电极表面相平的位置, 即

深度为 0 的位置测量的灵敏度作为基准)。图中,位置 0 的左侧为探头沉入电极,而右侧为探头突出电极表面。从测量结果可知:当探头突出电极表面时,在 0.6 mm 的测量范围内可以发现较为明显的非线性。分析是 B-dot 安装在底座的孔中,当底座整体突出电极表面时,孔中磁场的增加量受底座影响不会线性增大。而探头沉入电极中,在 0.8 mm 范围内近似线性。对 $-0.6 \sim 0.15$ mm 范围内的数据进行线性拟合计算,得到的直线斜率为 -0.107 (即探头深度改变 0.1 mm 时,探头灵敏度的变化约为 1%)。探头底座高度的机械加工与安装精度可以控制在 ± 0.1 mm 以内,所以对于重新安装 B-dot,高度偏差导致的灵敏度变化最大为 $\pm 1\%$ 。

探头角度对灵敏度的影响可以通过计算确定。探头设计的 B-dot 截面与磁场正交,实际装配时可能存在安装误差,导致 B-dot 截面与设计位置有夹角,造成 B-dot 等效面积改变。机械加工的螺钉孔角度最大偏差为 1° ;此外,探头底座的螺钉孔直径为 $\Phi 6$ mm,大于 M5 安装螺钉的外径,因此由安装导致的 B-dot 角度偏差最大约为 1.7° 。考虑这两个因素得到最大累计偏差 $\alpha=2.7^\circ$,计算 B-dot 有效面积的改变为 $\sin(90^\circ-\alpha)=99.9\%$,即偏差小于 0.1%。如果将角度与深度的误差按均方根合成,则总误差仍约为 1%。

根据上述分析可知:本文所设计探头的深度与角度公差对探头灵敏度的影响基本可以忽略。如果需要对测量结果做不确定度评定时,上述深度与角度对探头灵敏度的影响可作为相应的测量不确定度分量。

其次,需要分析阴阳极间距对 B-dot 灵敏度的影响。理论分析表明,对于安装在电极孔中的 B-dot,当阴阳极间距较为接近时,探头孔的边缘效应会影响孔中的磁场分布,因此也会对 B-dot 的灵敏度造成影响。如果不加以注意,有可能导致标定结果失效。

将径向线的阳极盘设计为图 9 所示构型,通过相应的小公差止口配合,减小阳极盘安装时的同心度偏差,并加工一定厚度的垫片逐步抬高阳极,可以在确保阳极盘同心度的情况下实现阴阳极间距改变。使用同一个 B-dot 测量阴阳极间距改变时探头灵敏度 S 的变化。分别对安装在直径为 $\Phi 8$ mm 和 $\Phi 18$ mm 孔中的探头进行了实验。实验结果表明:当阴阳极距离较大时, S 基本不改变。因此,以阴阳极间距为 15~20 mm 的几个数据的平均值作为基准,对灵敏度进行归一化,可以得到结果参见图 10。

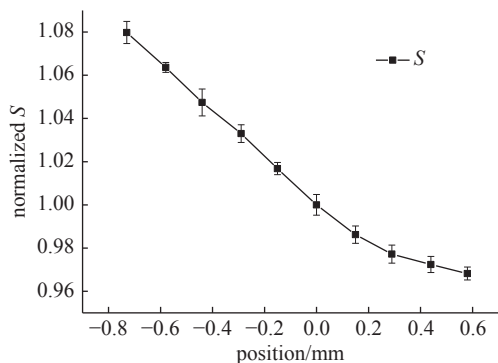


Fig. 8 Relation diagram between B-dot sensitivity and depth

图 8 B-dot 灵敏度与深度的关系

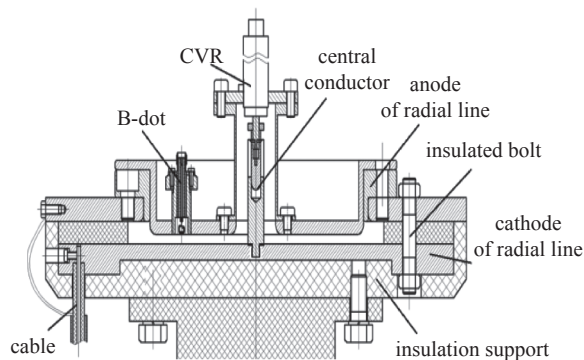


Fig. 9 Structure diagram of radial line for changing the gap between the anode and the cathode

图 9 改变阴阳极间距的径向线结构图

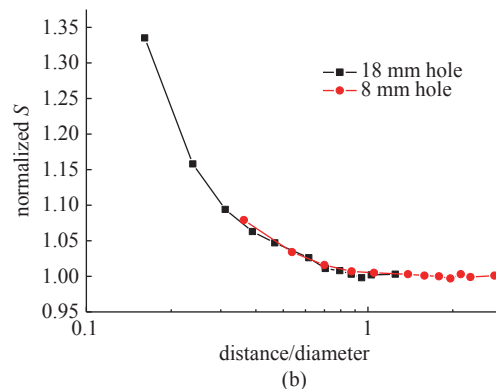
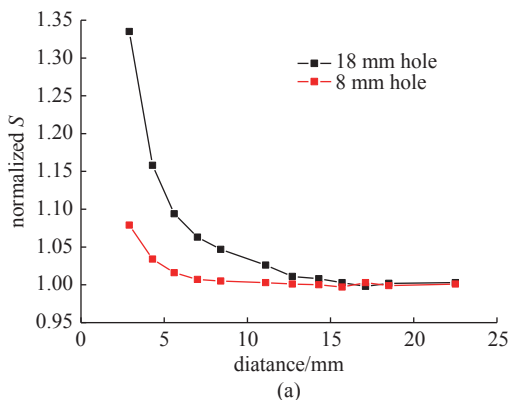


Fig. 10 Relation diagram between anode-cathode spacing and B-dot sensitivity

图 10 阴阳极间距与 B-dot 灵敏度的关系

图 10(a)给出了探头归一化灵敏度与阴阳极间距的关系。由图可知,当阴阳极间距减小到一定程度时, S 开始增大(即 B-dot 输出的信号减小)。孔的直径越大时, S 的变化程度越严重。如果计算阴阳极间距与孔直径的比值,作为坐标横轴,可得图 10(b)。可以看出,当阴阳极间距大于探头孔直径(即比值大于 1)时,B-dot 输出基本不受阴阳极间距的影响;而阴阳极间距小于探头孔直径时,B-dot 的输出受阴阳极间距影响而变小。

LTD 单路验证样机装置的 B-dot 探头的孔为 $\Phi 8$ mm,标定时(图 6)的阴阳极间距为 30 mm,LTD 装置 I_1 位置的阴阳极间距为 32 mm, $I_2 \sim I_5$ 位置的阴阳极间距更大,因此标定结果有效。

此外,标定还需要注意同轴线直径大小对测量结果的影响。由于阴阳极之间的磁场分布近似圆环形,同轴线的磁场弧形朝向探头开孔方向,对于直径较小的同轴线,探头孔中磁场大小受磁场弯曲的影响更大。内外筒的影响效果是相反的:对于外筒,探头孔内磁场更强,导致测量结果偏大;内筒探头磁场更弱,测量结果偏小。对于直径较大的同轴线,阴阳极之间的磁场的弯曲半径大,因此同轴线与径向线的差别小。

LTD 单路验证装置外筒直径为 $\Phi 1200$ mm,且出口 I_5 位置的 B-dot 探头可以开展外部馈入信号的在线标定方法,以此校核线下标定数据,验证线下标定结果的准确程度。 I_{a5} 的在线标定结果表明,4 个 I_{a5} 探头在线标定结果与线下标定的偏差分别为 0.7%、-2.8%、1.5% 和 0.4%。4 个探头偏差的平均值小于 0.5%,且在线标定与线下标定波形的信噪比均较高,标定波形吻合,数据自愈,因此线下标定结果可用。

但是对于一个外径 $\Phi 300$ mm、内径 $\Phi 220$ mm 的传输线^[2],使用径向线标定的 B-dot 灵敏度与在线标定结果存在差异。对于本文定义的 S ,用径向线标定结果按距离比例计算的探头灵敏度,外筒探头平均偏大约 4%,而内筒电流探头偏小约 5%;对于更细外筒($\Phi 90$ mm)的传输线^[18],偏差超过 10%。因此,对于安装在同轴传输线上的 B-dot,当传输线直径较小时,使用径向线标定结果存在偏差,如需线下标定,应采用相应直径的同轴线开展标定;对于直径较大的同轴线,用径向线模拟标定 B-dot 的结果是可用的。而且也正是基于这个原因,对于较大直径的同轴线,可以使用较小直径的径向线标定 B-dot 探头(按距离比例计算灵敏度),但是不能用较小直径的同轴线进行模拟标定。

综上,对于本文所述的安装在直径大于 1 m 的同轴传输线电极孔中 B-dot,当实测状态与标定状态下的安装高度与角度偏差均满足设计精度,且保证实际传输线与标定径向线的阴阳极间距均大于探头孔的直径,使用径向线标定方法有效。

3 测量结果

以 2021 年的一发实验为例,电流测量结果参见图 11~13。

图 11 为 I_{a1} 位置 4 个均布的电流探头的测量结果,4 个测量点的电流波形基本相同,表明电流分布近似均匀。

图 12 和图 13 分别为 I_1 和 I_5 位置的阴阳极电流对比波形。从测量结果可知, I_1 位置的阴阳极电流基本一致,这是由于第一级过渡段位置的电压较低,基本无空间电子流。而 I_5 位置的阴阳极电流起始部分波形基本接近,在大约 35 ns 后,阴极电流开始减小。电流测量结果较为清晰地反映

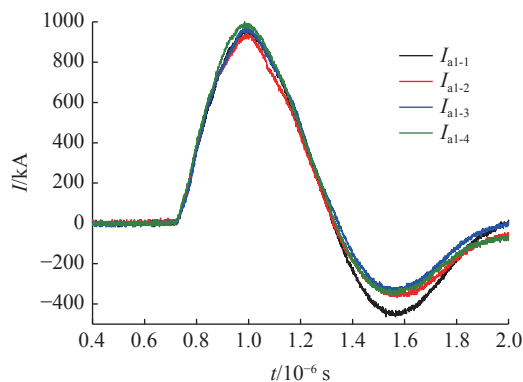


Fig. 11 Current waveforms of 4 probes at I_{a1}

图 11 I_{a1} 位置 4 个电流探头的测量结果

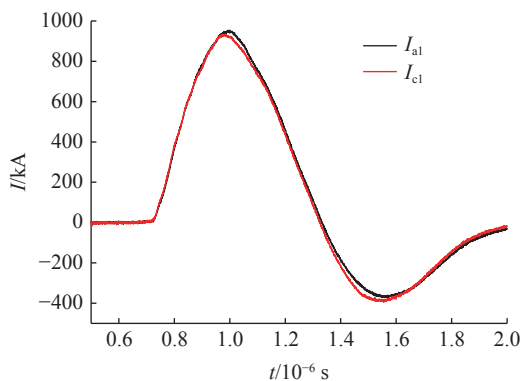


Fig. 12 Current waveform of anode and cathode at I_1

图 12 I_1 位置的阴阳极电流波形

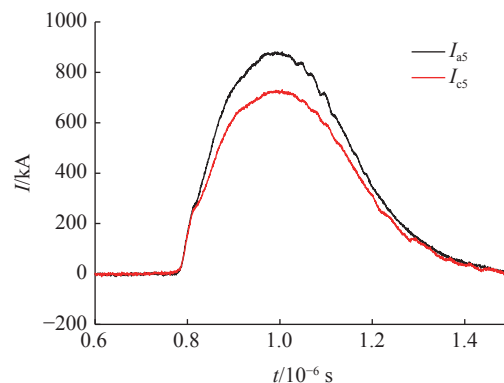


Fig. 13 Current waveform of anode and cathode at I_5

图 13 I_5 位置的阴阳极电流波形

了 I_5 位置磁绝缘的形成。

实测单路验证装置 4 个过渡段至出口的阳极电流基本一致(存在较轻微的损失), 而阴极电流的峰值逐渐降低^[9]。这是由于随着电压逐渐升高, 空间电子流逐渐增强导致。

4 结 论

对于测量 LTD 单路验证装置的过渡段与出口电流的 B-dot 探头, 本文采用径向传输线开展线下标定, B-dot 与主回路的互感系数按距离比例计算。通过 B-dot 灵敏度与深度的关系实验开展一定范围内的数据线性拟合计算, 可得探头深度改变 0.1 mm 时, 探头灵敏度的变化约为 1%。结合 B-dot 装配误差, 估算探头安装深度和角度公差导致的探头灵敏度偏差约为 1%, 能够满足设计与标定的要求。通过改变阴阳极间隙的实验, 可知当阴阳极间距大于探头孔直径, 且同轴传输线直径较大时, 小尺寸径向线标定结果有效。实测 LTD 单路验证装置的 4 个过渡段至出口的阳极电流峰值基本相同, 各段的阴阳极电流数据自治。

参考文献:

- [1] Stygar W A, Awe T J, Bailey J E, et al. Conceptual designs of two petawatt-class pulsed-power accelerators for high-energy-density-physics experiments[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2015, 18: 110401.
- [2] 陈林, 邹文康, 谢卫平, 等. 1 MV/100 kA 快脉冲直线型变压器驱动源装置设计[J]. *高电压技术*, 2012, 38(4): 935-940. (Chen Lin, Zou Wenkang, Xie Weiping, et al. Design of the 1 MV/100 kA fast linear transformer driver generator[J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(4): 935-940)
- [3] 陈林, 田青, 周良骥, 等. 基于LTD的Z箍缩驱动器单路验证装置研制进展[C]//第七届全国脉冲功率会议. 2021: 256.
- [4] 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: 165. (Zeng Zhengzhong. Introduction to practical high power pulse technology. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 2003: 165)
- [5] Wagoner T C, Stygar W A, Ives H C, et al. Differential-output B-dot and D-dot monitors for current and voltage measurements on a 20-MA, 3-MV pulsed-power accelerator[J]. *Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams*, 2008, 11: 100401.
- [6] Rose D V, Welch D R, Miller C L, et al. 10^7 -A load-current B-dot monitor: Simulations, design, and performance[J]. *Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams*, 2010, 13: 040401.
- [7] Grabovskii E V, Gribov A N, Oleinik G M. Calibration of current and voltage probes in the electromagnetic-pulse transmission path and near the load of the Angara-5-1 facility[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, 51(5): 716-723.
- [8] 呼义翔, 韩娟娟, 郭宁, 等. 磁绝缘传输线电流测量差模式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)
- [9] 卫兵, 卿燕玲, 丰树平, 等. 4层圆盘锥形磁绝缘传输线的电流测量[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 085002. (Wei Bing, Qing Yanling, Feng Shuping, et al. Current measurement for four-level magnetically-insulated transmission line[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 085002)
- [10] 卫兵, 卿燕玲, 丰树平, 等. 测量数MA脉冲电流的探头设计与标定[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 075004. (Wei Bing, Qing Yanling, Feng Shuping, et al. Design and calibration of B-dot monitor for several mega-ampere current measurement[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 075004)
- [11] 来定国, 张永民, 谢霖桑, 等. 快脉冲高电压大电流测量探头标定方法[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(10): 2469-2472. (Lai Dingguo, Zhang Yongmin, Xie Linshen, et al. Calibrating method of high voltage and current probe for fast pulse measurements[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(10): 2469-2472)
- [12] 郭宁, 王亮平, 韩娟娟, 等. 测量1 MA/100 ns脉冲大电流的微分环[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(3): 519-523. (Guo Ning, Wang Liangping, Han Juanjuan, et al. Differential loop for measuring 1 MA/100 ns pulsed high current[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(3): 519-523)
- [13] Huiskamp T, Beckers F J C M, Van Heesch E J M, et al. B-dot and D-dot sensors for (sub)nanosecond high-voltage and high-current pulse measurements[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(10): 3792-3801.
- [14] Weller M E, Esaulov A A, Presura R, et al. Compact differential B-dot monitors for measuring current on a fast pulsed power generator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90: 105102.
- [15] GJB6367-2008, 纳秒级分压器和电流线圈的方波标校方法[S]. (GJB6367-2008, Method of assignation and check by rectangular pulse injection for nanosecond voltage dividers and current measuring coils[S])
- [16] 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)
- [17] 卫兵, 康军军, 王杰等. 空腔中B-dot低频特性的硬件补偿[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 025021. (Wei Bing, Kang Junjun, Wang Jie, et al. Hardware compensation of B-dot low frequency characteristics in cavity[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 025021)
- [18] 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)