



·脉冲功率技术·

## 4 MV 感应电压叠加器的电压测量<sup>\*</sup>

卫 兵, 郭 帆, 康 军 军, 耿 力 东, 李 勇, 夏 明 鹤

(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 4 MV 感应电压叠加器的电压, 设计和标定了多个 D-dot 电压探头。频响测试结果表明探头频率上限大于 270 MHz, 满足待测电压信号频率响应需求。标定中, 由于分压器与探头的安装位置不同, 为了避免传输线阻抗失配导致快前沿电压信号在不同测量点的电压波形差异, 采用前沿数百纳秒的脉冲信号开展标定。由于探头的低频特性同时满足标定与实测的需求, 因而标定的准确性得以保证。考虑装配结构及精度对探头灵敏度的直接影响, 次级电压探头采取了在感应腔逐级安装过程中的在线标定方法。由于靠近二极管的电压探头受到电子等影响导致波形畸变, 因此直接测量负载电压存在困难。4 MV 装置的多发实验结果表明, 输出端传输线上电压波形与其下游位置电压波形之差, 与用两者之间电感计算的电压波形相吻合, 说明采用二极管上游电压探头的测量结果来计算二极管电压是行之有效的。

**关键词:** 感应电压叠加器; 脉冲电压; D-dot 探头; 频率响应; 标定

中图分类号: TM835.4

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.230168

## Voltage measurement for 4 MV induction voltage adder

Wei Bing, Guo Fan, Kang Junjun, Geng Lidong, Li Yong, Xia Minghe

(Key Laboratory of Pulsed Power, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** Multiple D-dot voltage probes were designed and calibrated to measure the voltage of a 4 MV induction voltage adder. The frequency response test results indicate that the upper limit of the probe frequency is greater than 270 MHz, which meets the frequency response requirements of the voltage signal to be tested. In calibration, due to the different installation positions of the voltage divider and probe, in order to avoid the mismatch of transmission line impedance causing voltage waveform differences in the fast rising voltage signal at different measurement points, a pulse signal with a front edge of about hundreds of nanoseconds is used for calibration. Due to the low-frequency characteristics of the probe meeting both calibration and actual measurement requirements, the accuracy of calibration can be guaranteed. Considering the direct impact of assembly structure and accuracy on the sensitivity of the probe, the output transmission line probe adopts an online calibration method during the step-by-step installation process of the induction cavity. Due to the influence of electrons and other factors on the voltage probe near the diode, waveform distortion occurs, making it difficult to directly measure the load voltage. The results of multiple experiments on a 4 MV device indicate that the difference between the voltage waveform on the output transmission line and its downstream position is consistent with the voltage waveform calculated using the inductance between the two position, indicating that using the measurement results of the upstream voltage probe of the diode to calculate the diode voltage is effective.

**Key words:** induction voltage adder, voltage pulse, D-dot sensor, frequency response, calibration

感应电压叠加器(IVA)是采用电磁感应原理将多路脉冲功率驱动源产生的电脉冲串联叠加获得数 MV 级电压输出的脉冲功率驱动器<sup>[1-5]</sup>。为测量输出电压达到 4 MV 的大型 IVA 驱动器<sup>[1-3]</sup>的电压, 设计了相应的微分型电容分压器(D-dot)。电容分压器或微分型电容分压器(D-dot)利用探头与高压电极间形成的结构电容, 获得脉冲电压的测量信号, 是脉冲功率装置高压测量的常用方法<sup>[6-11]</sup>。由于 D-dot 的灵敏度取决于探头与高压电极间的结构

\* 收稿日期: 2023-06-04; 修订日期: 2023-07-25  
基金项目: 国家自然科学基金项目 (51907181)  
联系方式: 卫 兵, 73wb@163.com。

电容,因此需要在线标定。对于一般的传输线和形成线,使用经线下标定的电阻分压器(或标准高压探头)获取标定 D-dot 的电压灵敏度<sup>[7-11]</sup>,但是对于本文所涉及的 IVA 驱动器,角向传输线电压与次级输出电压探头的安装位置难以安装标定的比对分压器,因此需要设计适当的比对分压器安装位置。此外,由于靠近二极管的电压探头受到电子等影响导致波形畸变,直接测量负载电压也存在一定困难。本文针对 4 MV 装置,研制了角向传输线电压探头与输出电压探头,根据探头的响应能力设计了相应的标定方法,并采用上游探头测量电压减去传输线电感电压的方法计算得到负载电压,获取了合理的测量结果。

## 1 探头设计

图 1 为 IVA 驱动器的横截面结构示意图。图中,  $V_1 \sim V_6$  分别为每个 IVA 角向传输线探头沿轴向的示意位置。由于需要获取不同角度位置的电压,图示  $V_1 \sim V_6$  的每个位置均沿圆周方向布置了 2 个电压探头。定义馈入点为  $0^\circ$ , 2 个角向传输线电压探头分别安装在  $90^\circ$  与  $180^\circ$  位置(图 1 中只能看到位于馈入点对面的  $180^\circ$  探头位置)。此外,在每个 IVA 馈入位置也安装了电压探头,由于感应腔的同轴馈入段长度仅为 26 cm,位于同轴馈入段中间位置的 D-dot 探头距离角向传输线  $0^\circ$  位置很近,该位置电压波形也可以被认为是角向传输线  $0^\circ$  位置的馈入电压波形。图 1 中 A~F 表示 IVA 输出电压探头的位置, H 为临近杆箍缩二极管(RPD)的探头位置,距离二极管约 45 cm,距离 F 位置约 66 cm。对于 IVA 输出电压探头,虽然 IVA 次级设计为真空传输线,但也可能存在极少的空间电子,为了尽量减小可能的影响,将输出电压探头布置在阳极。

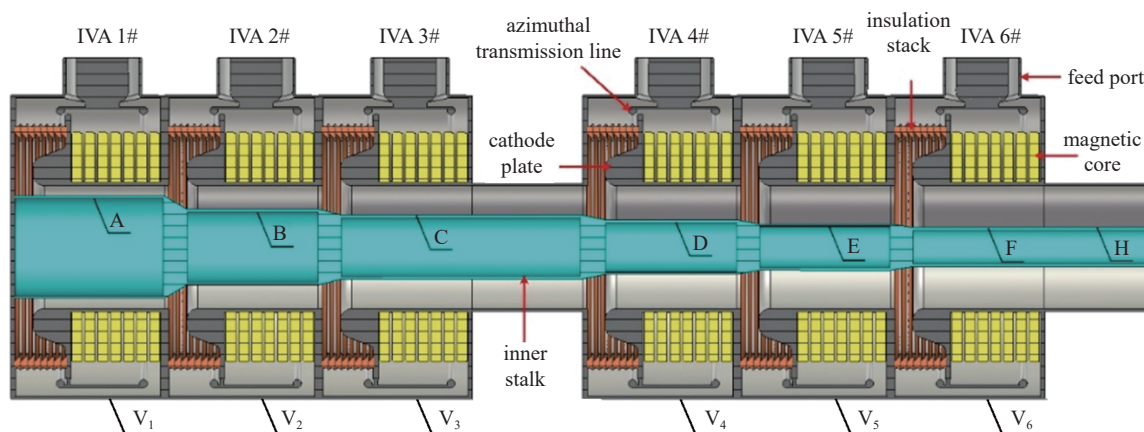


Fig. 1 Schematic cross-section view of the voltage adder system

图 1 IVA 驱动器的横截面结构与探头位置示意图

D-dot 探头结构参见图 2。(a)是入口电压探头以及安装在 IVA 外筒上的角向传输线探头,(b)是安装在 IVA 内筒上的输出电压探头。角向传输线探头安装在 IVA 外筒上,设计探头的直径为  $\phi 24$  mm,估算 D-dot 与角向传输线阴极之间的电容  $C$  约为  $0.15$  pF,探头输出电压  $V_{out}$  约  $500$  V,当使用积分常数  $\tau_i=4$   $\mu$ s 的积分器时,计算探头灵敏度为  $520$  kV/V,输入到示波器的测量值约  $2$  V。估算该探头对地电容  $C_g < 6$  pF,核算  $\tau_{cg} < 0.3$  ns,响应时间约为  $1$  ns,满足测量要求。输出电压探头安装在 IVA 内筒上,设计探头的直径为  $\phi 22$  mm,估算  $C$  为  $0.03 \sim 0.02$  pF,图 1 中 A~F 位置的被测电压为  $1 \sim 4$  MV,核算探头输出电压  $V_{out}$  在  $100 \sim 200$  V 之间,当使用积分常数  $\tau_i=2$   $\mu$ s 的积分器时,计算探头灵敏度为  $1 \sim 1.5$  MV/V,输入到示波器的测量值为  $1 \sim 3$  V。估算  $C_g$  小于  $5$  pF,核算  $\tau_{cg} < 0.25$  ns,响应时间约为  $1$  ns,满足测量要求。

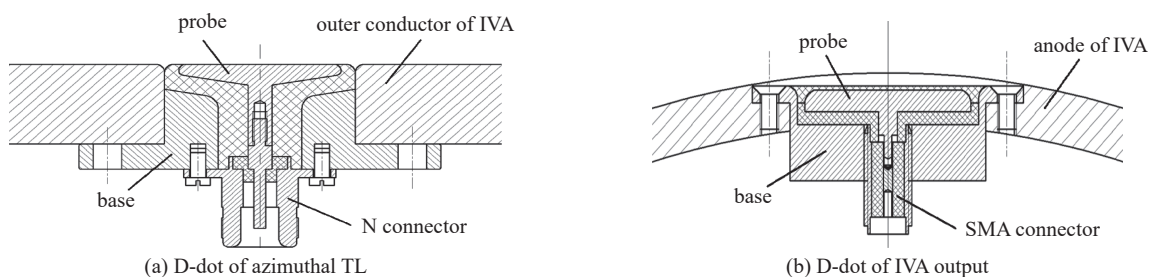


Fig. 2 Structural diagram of D-dot

图 2 D-dot 结构图

测试回路由探头与积分器构成, 因此测试回路的频率特性需要综合这两方面分析。探头的高频特性主要受探头的杂散参数影响, 其中最重要的参数是对地等效电容。将 D-dot 安装在标定室上, 使用矢量网络分析仪可以对 D-dot 探头开展频响测试<sup>[12-13]</sup>。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 50 Ω 作为负载连接在标定室的另一端; 将 D-dot 输出连接矢量网络分析仪的端口 2; 测量  $S_{21}$  参数得到探头的频响特性曲线。D-dot 探头的  $S_{21}$  参数测量结果参见图 3 (即横轴为频率  $f$ , 纵轴为左侧的  $20\lg(V_{out}/V_{in})$ ,  $V_{out}$  即为探头输出信号,  $V_{in}$  为标定室的输入信号)。将幅频特性的纵轴转变为  $20\lg(V_{out}/CZ\omega V_{in})$ , 能够定量确定探头的频率上限 ( $C$  为 D-dot 探头与被测电极之间的等效电容,  $Z$  为信号电缆的波阻抗,  $\omega$  为信号角频率)<sup>[12]</sup>。实测角向传输线探头的频率上限约为 500 MHz, 输出电压探头频率上限约为 270 MHz, 均能够满足前沿为 30 ns 信号的测试需求 (实测频率上限低于理论分析, 主要原因是理论分析忽略了部分结构分布参数)。

IVA 驱动器的初级绝缘介质为变压器油, 次级为真空。变压器油的电阻率大于  $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ , 因此, 探头与高压电极之间的绝缘介质泄漏电阻  $R$  较大 (计算该电阻与高压臂电容  $C_1$  的时间常数  $\tau_R$  大于秒量级), 所以探头自身的低频响应通常可以忽略<sup>[14]</sup>, 当 D-dot 输出连接积分器获得信号时, 测试回路的低频特性由积分器的低频特性决定。本文采用积分常数为 4 μs 的积分器, 可以计算该积分器的低频约为 40 kHz。积分器的频率上限由杂散参数决定, 本测试项目使用的积分器采用优化设计的结构和器件, 频率上限约为 800 MHz<sup>[15]</sup>。因此对于本测试系统, 输出电压探头工作频率范围为 40 kHz~270 MHz。

## 2 标 定

根据感应腔的等效电路模型, 理论分析以及仿真计算均表明, 感应腔的同轴馈入段电压与角向传输线的波形有差异, 且电压幅值也存在偏差<sup>[2]</sup>。因此, 如果标定时馈入与感应腔实际信号时间特征基本相同的信号 (前沿约 30 ns), 将标准分压器 (或标准电压探头) 放置在感应腔的入口, 角向传输线电压探头处的波形与分压器信号不一致, 从而影响标定的准确性。

如果将馈入信号的前沿减慢至数百纳秒, 则感应腔的传输线可以视为集总参数。此时入口电压波形与角向线电压波形以及幅值均相同。在该条件下, 标准分压器的测试波形与 D-dot 测量波形可以进行比对。但是标定是否准确, 还取决于 D-dot 探头的频响特性是否能够覆盖标定的慢信号以及实测的快信号<sup>[11]</sup>。根据频响分析可知探头的低频特性能够响应 μs 甚至更慢的脉冲信号, 但是积分常数为 4 μs 的积分器不能满足测量 μs 量级低频信号的需求。因此, 标定时使用 D-dot 输出的  $dV/dt$  信号数值积分获取电压, 使标定不受积分器频率特性的限制。D-dot 的频率上限超过 270 MHz, 满足前沿为 30 ns 的实测信号要求, 更能满足数百纳秒的标定信号的需求。所以, 确定 IVA 驱动器的角向传输线电压探头的标定方法为: 采用电容器放电得到前沿数百纳秒的脉冲信号, 从 IVA 的输入端馈入, 标准分压器 (高压探头) 安装在 IVA 的输入端。

对于 IVA 次级电压探头的标定, 需要用标准探头测量次级阴阳极之间电压作为比对电压。对于 F 和 H 位置的探头, 可以在 IVA 完成装配后, 在 IVA 出口布置高压探头测量阴阳极之间的电压作为比对标准, 参见图 4。但是对于其他位置, IVA 完成装配后就无法从 IVA 的外侧引入比对分压器。而且, 由于次级外筒的内表面做了阳极化绝缘处理, 因此即使从内筒引入标准分压器 (探头), 也无法获得阴阳极之间的电压。参考 F 和 H 位置的探头的标定方法, 在感应腔逐级安装过程中开展标定。即, 首先开展探头 A 的标定, 仅将 1# 感应腔与次级传输线的内筒连接, 标定回路产生的高压脉冲从

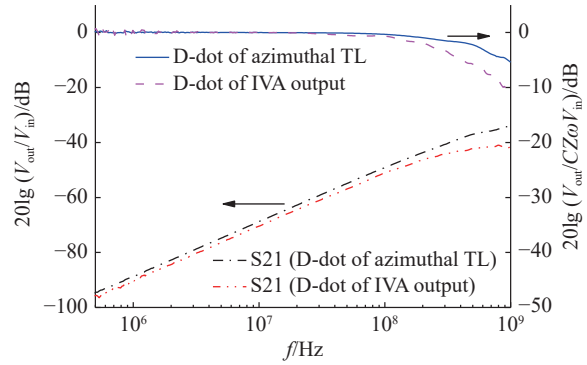


Fig. 3 Amplitude-frequency response of D-dot

图 3 探头的幅频响应特性

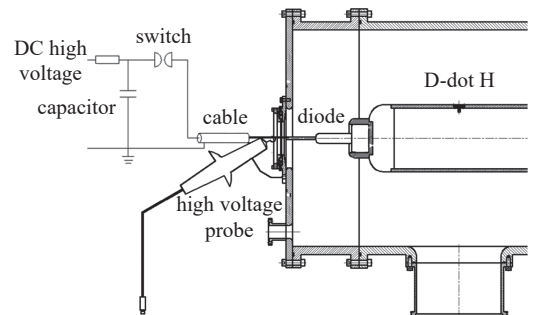


Fig. 4 Calibration circuit of probe H

图 4 探头 H 的标定电路

1#感应腔的同轴馈入段馈入,使用高压探头在1#感应腔次级传输线的输出端口位置测量高压脉冲信号,作为探头A的比对标准。探头A标定完成,再将2#感应腔对接,完成探头B标定后,再依次完成其余感应腔的安装与标定。

当后一级感应腔未连接时,前一级感应腔的出口位置结构与实际工作状态存在差异。但是电场仿真表明:标定时的“敞口”的结构对探头位置电场分布的影响较小,基本不改变探头与高压电极的等效电容。在探头C的标定中,有意在外筒过渡段安装前与安装后分别开展了2次标定,探头C的标定结果偏差小于3%,也证明了本标定方法的可行性。

标定信号的产生与馈入参见图4。采用1台0.1 μF电容器,充电使用直流高压电源和水电阻限流电阻,放电回路是自制的隔离间隙和馈入电缆。图5为H位置的探头标定时的高压探头测量波形与D-dot数值积分结果的比较(由于图中波形基本重合,为便于观察,将D-dot信号平移了50 ns)。为了给出2个波形符合程度的定量数据,按公式(1)计算标定时两个波形之间的标准方差<sup>[6]</sup>。

$$\sigma_n = \frac{1}{U_{R,peak}} \left( \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [U_D(t_i) - U_R(t_i)]^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中:  $U_D(t_i)$  为  $t_i$  时刻的 D-dot 波形的电压值,  $U_R(t_i)$  为  $t_i$  时刻高压探头的电压值,  $U_{R,peak}$  为高压探头的峰值电压,  $N$  为计算样点数。将图5中的 D-dot 输出波形水平移动与高压探头输出波形对正后,分别选取第1个峰(即时间为-700~970 ns,共16 956个点)的数据以及全部的数据(即时间为-700~3 940 ns,共46 986个点)进行计算,  $\sigma_n$  均小于1.0%。实验结果表明:该标定方法波形吻合度高,并且干扰小,数据可靠。其它位置的次级电压探头以及角向传输线电压探头的标定结果也基本类似。

### 3 测试系统实验

以2020年的一发实验为例,6个感应腔的输入电压和输出电压的测量结果参见图6~图7。从图可以看出,感应腔的输入电压为0.8~1.1 MV,输出的A~F位置的电压分别为1.0、2.1、3.1、3.6、3.8 MV和4.4 MV。由于输出传输线的阻抗逐级升高,后3个感应腔的感应电压降也随之增大;此外,由于该发次后3个腔的馈入电压比设计值延迟了约7 ns,因此后3个腔的电压叠加效率也略低。负载电压脉冲的前沿约为38 ns,比输入电压前沿略长,主要是由感应腔和输出传输线的等效电感引起<sup>[1]</sup>。角向传输线的测试结果参见图8。从实测结果可以看出3个角向电压的差异,即角向传输线工作电压波形的上升时间沿着电磁波传输方向不断减小。二维等效电路模型仿真计算参见图9<sup>[2]</sup>,测量结果与理论结果基本吻合。从该结果可以看出,假设标定信号的前沿与实测信号一致,则如果以入口测量的电压为标准信号标定其他位置的探头,会导致标定结果出现一定的偏差。

需要指出的是,尽管H位置临近二极管的探头位置(距离二极管约45 cm),但由于传输线等效电感的影响,该

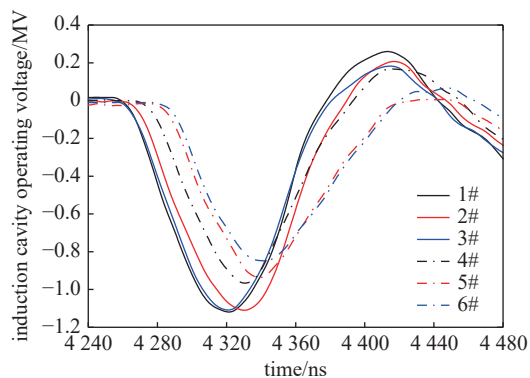


Fig. 6 Input voltage waveform of IVA

图6 感应腔的输入电压波形

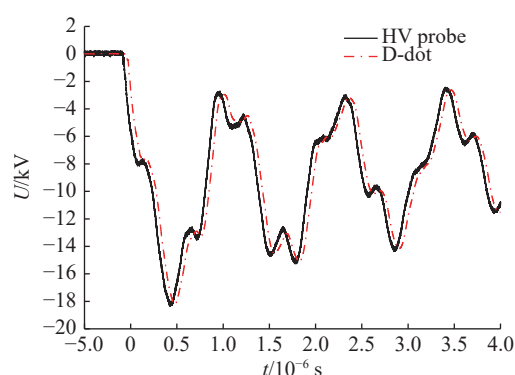


Fig. 5 Calibration waveform of probe H

图5 探头H标定波形

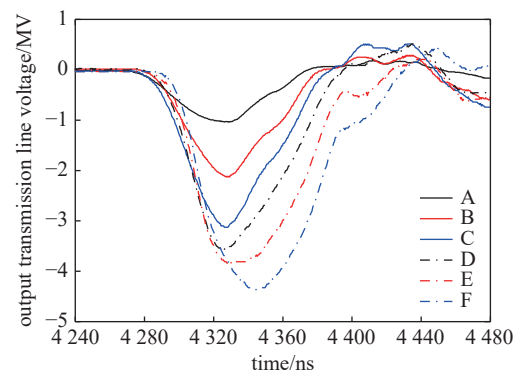


Fig. 7 Output voltage waveform of IVA

图7 感应腔的输出电压波形

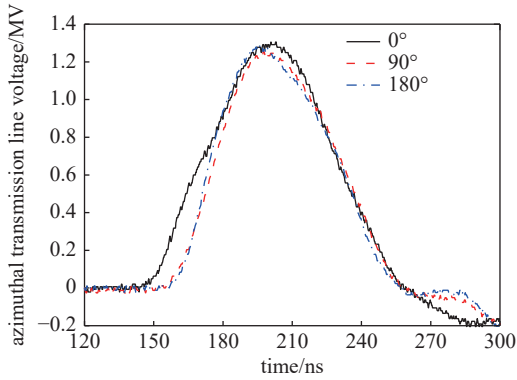


Fig. 8 Voltage waveform of azimuthal transmission lines

图 8 感应腔的角向线电压波形

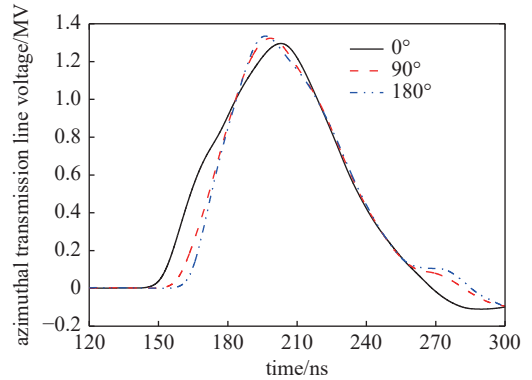


Fig. 9 Simulated voltage waveform of azimuthal transmission lines

图 9 角向线电压仿真波形

位置的电压与实际二极管电压仍然存在差别。由于二极管位置强烈的电子以及其他干扰,更靠近二极管的电压探头未能获取正确的信号。为解决这个问题,采用上游探头测量电压减去传输线电感电压的方法计算下游探头位置的电压<sup>[6]</sup>,即

$$V_2 = V_1 - LdI/dt \quad (2)$$

式中:  $V_2$  为下游电压,  $V_1$  为上游电压,  $L$  为传输线等效电感,  $dI/dt$  为传输线电流对时间的微分信号。为了验证该计算方法的正确性,对 F 和 H 位置的信号进行了计算与比对。F 与 H 位置的距离为 66 cm, 根据内外筒直径, 计算可得该同轴结构的电感为 155 nH;  $dI/dt$  波形由标定的 B-dot 探头获得, 本发次的计算结果参见图 10。多发实验结果均表明, H 位置的电压与电感压降之和的波形与 F 位置的电压波形始终吻合较好, 因此该计算二极管电压的方法可行。核算 H 位置与二极管之间的电感为 270 nH, 仍以本发次为例, 由 H 位置电压  $V_H$  计算的二极管电压  $V_D$  参见图 11。 $V_D$  与  $V_H$  的峰值差异较小(例如本发的峰值偏差小于 2%, 在保留 1 位小数的情况下均约为 4.2 MV), 但是前沿有明显的差异。

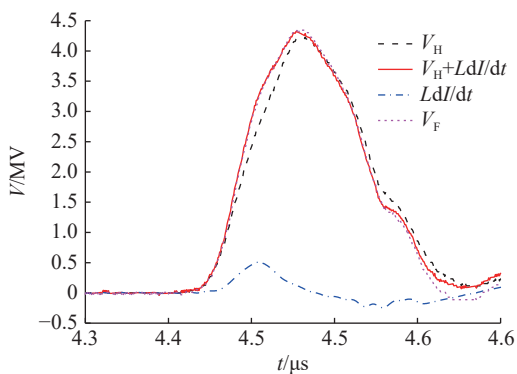


Fig. 10 Comparison of voltage waveforms at positions F and H

图 10 F 和 H 位置的电压波形比较

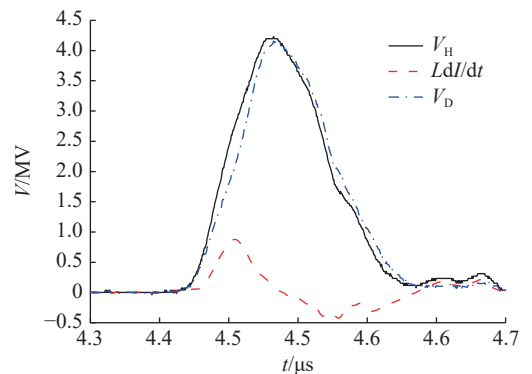


Fig. 11 Diode voltage calculation waveform

图 11 二极管电压计算波形

## 4 结 论

在 4 MV 感应电压叠加器电压探头的设计与标定中, 为避免快前沿电压信号在传输线上不同测量点的差异, 获取准确的标定结果, 采用前沿约数百纳秒的脉冲信号进行标定。频响测试结果表明探头频率上限约为 270 MHz, 且低频特性同时满足标定与实测的需求, 因此保证了标定结果的可信程度。由于二极管位置强烈的电子以及其他干扰, 靠近二极管的电压探头无法获取准确的信号, 实验中用传输线上游位置电压探头信号计算二极管电压, 4 MV 装置的多发实验表明这种关于二极管电压的间接测量方法有效。

### 参考文献:

- [1] Xie Weiping, Xia Minghe, Guo Fan, et al. Design and performance of a pulsed power-driven X-ray source for flash radiography[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2021, 24: 110401.
- [2] 郭帆. 感应电压叠加器中感应腔系统研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019: 108-120. (Guo Fan. Design and performance of the induction cavities system)

- for an induction voltage adder[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019: 108-120)
- [3] Guo Fan, Zou Wenkang, Gong Boyi, et al. Modeling power flow in the induction cavity with a two dimensional circuit simulation[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2017, 20: 020401.
- [4] Smith I D. Induction voltage adders and the induction accelerator family[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2004, 7: 064801.
- [5] Ormond E C, Cordova S R, Molina I, et al. Cygnus diverter switch analysis[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(5): 2554-2559.
- [6] 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 Accelerators and Beams*, 2008, 11: 100401.
- [7] 卫兵, 傅贞, 王玉娟, 等. 脉冲功率装置中电容分压器的设计 and 应用[J]. *高电压技术*, 2007, 33(12): 39-43. (Wei Bing, Fu Zhen, Wang Yujuan, et al. Design and performance of capacitive divider for high-voltage pulse measurement[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(12): 39-43)
- [8] 王亮平, 郭宁, 李岩, 等. 测量强光一号负载电压的电容分压器[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(3): 696-700. (Wang Liangping, Guo Ning, Li Yan, et al. Capacitive divider for voltage measurement of diode load on Qiangguang-I accelerator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(3): 696-700)
- [9] 丁卫东, 李峰, 张乔根, 等. 特高压气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压测量用电容传感器的标定[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(5): 56-65. (Ding Weidong, Li Feng, Zhang Qiaogen, et al. Calibration of the capacitive sensor used in the very fast transient overvoltage measurement of ultra high voltage gas insulated switchgear[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(5): 56-65)
- [10] 呼义翔, 郭宁, 韩娟娟. 磁绝缘传输线电压测量用自积分式电容分压器研制[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(7): 1839-1844. (Hu Yixiang, Guo Ning, Han Juanjuan. Self-integral capacitance divider used for voltage measurement along magnetically insulated transmission lines[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(7): 1839-1844)
- [11] 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)
- [12] 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 a four level magnetically-insulated transmission line[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 085002)
- [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] Wei Bing, Guo Fan, Li Yong, et al. Characteristics of the D-dot sensor for measurement of high voltage pulse of a water-insulated transmission line[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(3): 2385-2392.
- [15] 上海华湘计算机通讯工程有限公司. 积分器[J/OL]. <http://www.shx-sh.com/upfiles/2019628134336192.pdf>. (Shanghai Huaxiang Computer Communication Engineering Co. Ltd Integrator[J/OL]. <http://www.shx-sh.com/upfiles/2019628134336192.pdf>.)
- [16] Oliver B V, Berninger M, Cooperstein G, et al. Characterization of the rod-pinch diode X-ray source on Cygnus[C]//2009 IEEE Pulsed Power Conference. 2009: 11-16.