



·脉冲功率技术·

## 电磁脉冲模拟装置用 3 MV 中储电容器的研制\*

陈志强, 谢霖焱, 贾伟, 何小平, 汤俊萍, 陈维青

(西北核技术研究所强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

**摘要:** 介绍了一台大型垂直极化有界波模拟装置所用中间储能电容器(简称中储电容器)的设计过程和实验结果。电容器采用基于元件和组件的模块化设计,呈锥台状结构,支撑壳体为真空工艺玻璃钢材料。电容器容值由模拟装置等效的二级脉冲压缩回路决定,取值为 1.8 nF。电容器内部绝缘介质为十二烷基苯,外部绝缘介质为 45#变压器油,设计耐压 3 MV,其绝缘长度主要由元件的体绝缘特性决定。采用三维电磁仿真软件估算中储电容器与中储开关构成回路的电感为 659 nH,接近于实测数据 623 nH。电容器上脉冲电压的测量通过对电容器电流进行积分来获取,而电流的采集采用封装在 SF<sub>6</sub> 气体中的 3 个膜电阻并联后所构成测量模块实现。实际运行数据表明,中储电容器容值达到设计值,测量探头标定系数稳定,在工作电压 3.1 MV 条件下未发生绝缘问题。

**关键词:** 电磁脉冲模拟装置; 中储电容器; 脉冲压缩; 绝缘设计; 脉冲电压测量

中图分类号: TM83

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210195

## Development of a 3 MV transfer capacitor used in an electromagnetic pulse simulator

Chen Zhiqiang, Xie Linshen, Jia Wei, He Xiaoping, Tang Junping, Chen Weiqing

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** The design process and experimental results of a transfer capacitor used in a large vertical polarization bounded wave simulator are introduced. The capacitor adopts modular design based on capacitor elements and components, and forms a cone shape. The shell is made of vacuum process glass fiber reinforced plastic material. The capacitance value of capacitor is determined by the equivalent two-stage pulse compression circuit of the simulator, which is calculated to be 1.8 nF. The internal insulation medium of capacitor is dodecyl benzene, while the external insulation environment is 45# transformer oil. The designing working voltage is 3 MV, and the capacitor's insulation length is mainly determined by the body insulation characteristics of capacitor elements. Three-dimensional electromagnetic simulation is used to estimate the inductance of the circuit composed of capacitor and switch, and the result is close to the measured data 623 nH. The measurement for the pulse voltage of capacitor is achieved by integrating the current of the capacitor, and the acquisition of the current is realized by a measurement module which consists of three oxidation film resistors in parallel and encapsulated in SF<sub>6</sub> gas. The actual operation data show that the designed capacity of the transfer capacitor is achieved and the calibration coefficient of the measuring device is stable and the working voltage can reach up to 3.1 MV.

**Key words:** electromagnetic pulse simulation device; transfer capacitor; pulse compression; insulation design; pulse voltage measurement

大型强电磁脉冲模拟装置是开展整系统强电磁脉冲试验不可或缺的设备,其驱动源一般采用两级脉冲压缩的技术方案,初级脉冲源产生的脉冲电压经过两个脉冲压缩环节后,馈送至辐射天线,在辐射空间形成满足标准的脉冲电场波形<sup>[1-5]</sup>。中间储能电容器和中间储能开关(后面简称中储电容器和中储开关)共同组成了第一级脉冲压缩环节,作为装置关键器件之一的中储电容器,配合低击穿电压分散性的中储开关<sup>[6]</sup>,可以在将初级脉冲源所产生、前沿数百纳秒的脉冲电压压缩至前沿数十纳秒脉冲电压的同时,将初级脉冲源输出电压的幅值分散性进一步降

\* 收稿日期:2021-05-24; 修订日期:2021-07-13  
联系方式:陈志强, chen-holy@163.com。

低,为后一级脉冲压缩环节提供幅值稳定的馈入脉冲电压。

目前已经建成的大部分大型水平极化辐射波模拟装置中,因为装置需要架设一定高度,从轻量化的角度考虑,一般采用高气压  $\text{SF}_6$  气体作为绝缘介质,如美国的 FEMP2000 装置<sup>[7]</sup>、HFREMP 装置<sup>[8]</sup> 和我国的 NEMP 模拟装置<sup>[9]</sup>,均是采用  $\text{SF}_6$  作为绝缘环境,Marx 发生器和中储回路处于同一个  $\text{SF}_6$  腔体中。其中的中储电容器采用模块化设计,由多条电容臂并联,构成一锥台状结构,每条电容臂又由多组电容元件和组件串联而成。

在一台大型垂直极化有界波模拟装置中,考虑到初级脉冲驱动源放置于地面,对轻量化要求不高,同时,对于作为初级脉冲源的 Marx 发生器来说,采用变压器油作为绝缘介质能够增大 Marx 发生器中开关的对地杂散参数,有利于 Marx 发生器的建立<sup>[10]</sup>,因此 Marx 发生器和中储回路均采用变压器油作为绝缘介质。采用变压器油作为中储电容器的绝缘环境时,需要考虑油中灰尘、金属微粒、碳粒等杂质对器件的影响,以及强电场作用下变压器油的老化等问题。因此,需要在气绝缘中储电容器的基础上进行重新设计。本文总结了电磁脉冲模拟装置中储电容器设计和研制的主要思路 and 过程,并介绍了采用变压器油作为绝缘介质带来的问题。

## 1 中储电容器的设计

### 1.1 结构和材料

与气绝缘中储电容器结构类似,油绝缘中储电容器仍采用模块化设计,整体呈锥台状,中储开关位于锥台中心,与电容器构成一同轴结构,如图 1 所示。整个中储电容器由模块化设计的多条电容臂并联而成,每条电容臂由多个低感电容器组件串联组成,每个组件由多个采用塑料薄膜作为介质、采用金属箔作为电极的元件串联压制组成。该电容器结构的优点是在设计过程中可以通过改变中储电容器组件和电容臂数量灵活调节电容器的容值和耐压,在调试过程中可以通过增减电容臂的数量对中储电容器容值进行一定范围内的调整。同时,中储开关位于图 1 所示锥台结构的中心,与中储电容器构成同轴结构,具有较小的电感。

电容臂的结构设计主要考虑到组件形状、端部密封和油绝缘介质的容积补偿,组件绕制完成后呈长方体形状,电容器外壳的内部形状必须适应组件,因此,电容臂外壳采用方形筒结构,两侧引出电极固定在法兰上。在电容器内部增加了一膨胀器,以确保电容器内部绝缘介质体积的变化不会对密封产生影响。

电容器内部由电容器组件和膨胀器串联而成,两端与引出电极相连,内部采用合成油十二烷基苯作为绝缘介质,该绝缘介质是一种弱极性材料,直流下电击穿场强比 45# 变压器油稍高<sup>[11-12]</sup>,常用的金属电极材料对其没有催化老化作用,但十二烷基苯与聚丙烯薄膜的相容性欠佳。因此,在元件设计过程中需要采用纸膜复合绝缘结构,让变压器油充分浸润介质,单个元件采用双面粗化聚丙烯和浸渍纸交替排列的方法卷绕而成。

电容器外壳除了用作电容器的支撑结构,还起着密封和绝缘的作用。考虑到中储电容器自重较大,为了满足结构强度的要求,壳体材料选择了高强度环氧树脂玻璃钢材料。玻璃钢材料制作过程中,容易在材料本体(特别是拐角处)形成气泡。在强电场作用下,气泡处易发生局部放电,形成碳化区域,使材料局部绝缘强度下降,严重时发生体击穿<sup>[13]</sup>。因此,在玻璃钢壳体的制作过程中采用了真空导入工艺,基本解决了树脂导入过程中引起的气泡问题。

### 1.2 容值的确定

一般地,在二级脉冲压缩的电路中,当陡化电容器容值  $C_p$  远小于中储电容器容值  $C_T$  时,负载上波形的半宽  $t_H$  主要由第一级脉冲压缩环节中电容的容值  $C_T$  决定,它们之间的关系为<sup>[1,14]</sup>

$$t_H \approx 0.69R_L C_T \quad (1)$$

式中:  $R_L$  为负载的阻抗。

实际上,在电磁脉冲模拟装置中,  $C_p$  与  $C_T$  往往在同一个量级,中储电容器容值不仅取决于负载上波形的半宽,还和脉冲压缩电路器件参数和开关的导通时间有关,  $C_T$  的确定需要基于对整个脉冲压缩电路的分析。根据装置的总体方案,对脉冲压缩电路进行数值求解,选取一组满足要求的电路参数,取中储电容器的设计容值为 1.8 nF。

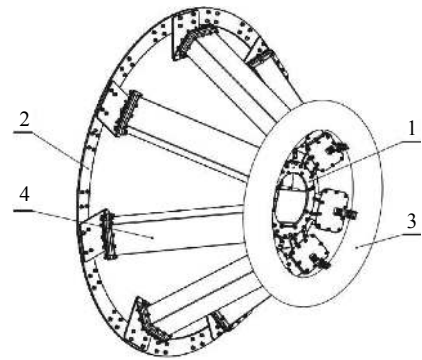


Fig. 1 Schematic diagram of transfer capacitor (1-high voltage ring, 2-ground ring, 3-shield ring, 4-branch of transfer capacitor)

图 1 中储电容器结构示意图

中储电容容值主要包括两个部分：中储电容器自身的集总电容和与周围环境形成的杂散电容。杂散电容主要由中储电容高压端屏蔽环和 Marx 油箱构成，通过绝缘设计确定屏蔽环尺寸和位置后，取变压器油相对介电常数 2.2，计算得到中储电容器杂散电容约为 191 pF，则中储电容器集总电容需要达到 1609 pF。考虑到电容臂数量的布局 and 单条臂的体积和重量，中储电容器设计成 7 条臂并联结构，每条臂的容值设计为 230 pF。

单条臂容值确定后，结合电容臂总绝缘长度、元件制作工艺水平和元件的绝缘能力等方面的要求，确定元件和组件参数如下：每条电容臂由 8 个电容器组件串联而成，每个组件由 50 个元件串联而成，元件的设计容值为 92 nF。

### 1.3 绝缘设计

中储电容器的绝缘主要包括壳体内外沿面和元件的绝缘。电容器外绝缘环境为变压器油，长脉冲下变压器油中沿面放电电压比间隙放电电压要低。根据“闪光二号”论证报告，有效作用时间 1.6  $\mu\text{s}$  的脉冲电压（远大于本文所介绍中储电容器上电压的脉宽）下沿面滑闪场强为 132 kV/cm，以该数据作为设计依据，则 3 MV 条件下电容臂发生沿面闪络的阈值为 22.7 cm，采用 1.5 倍的安全余量，得到中储电容臂的外绝缘长度应大于 34.1 cm。

元件是中储电容的基本单元，其绝缘水平直接影响中储电容的耐压。在元件中，作为电极的两层铝箔之间包括 3 层 15  $\mu\text{m}$  聚丙烯薄膜，和 2 层 10  $\mu\text{m}$  电容器纸。为了考核元件的耐压能力，随机抽取了 40 个元件，开展了直流下的耐压实验。实验结果如图 2 所示，元件加载直流电压 15 kV 时，40 个元件全部通过测试；对 9 个元件进行了 18 kV 的 1 min 耐压实验，元件全部通过测试；对其中 2 个元件进行了破坏性实验，逐渐提高元件上加载电压，元件分别在 21 kV 和 20 kV 时发生击穿。以 15 kV 作为元件的耐压水平，则 400 个元件可以承受 6 MV 的电压，相对设计电压 3 MV，具有较高的安全余量。

一个电容组件由 50 个电容元件串联而成，总厚度约为 10.1 cm，8 个组件串联后总厚度约为 90 cm（包含连接结构），远大于 34.1 cm，所以电容器沿面绝缘应满足要求。因此，中储电容器的长度主要由电容器元件的体击穿性能决定。

中储电容器壳体的沿面电场受到串接元件均匀分压的影响，其沿面电场应是均匀分布的，不会在高压电极和地电极附近形成电场集中区域，有利于提高绝缘性能，当中储电容器加载电压 3 MV 时，中储电容的平均沿面电场约为 33.33 kV/cm，远低于 132 kV/cm。实际上，在内部不含电容器元件的玻璃钢壳体的绝缘性能测试中，便出现了壳体内部击穿的现象，但是内部含电容元件的中储电容臂则没有出现绝缘问题。

中储电容器壳体法兰与引出电极的连接也是一个需要注意的问题，由于玻璃钢材料成型过程中，极易在法兰处形成连续气泡，如果此处电场过大，则可能会形成局部放电。因此，壳体与引出电极板的紧固采用真空引拔工艺玻璃钢螺栓替代金属螺栓，该方法可以大幅降低螺栓附近局部电场。

### 1.4 电感估算

二级脉冲压缩回路中，陡化电容器的容值  $C_p$  主要由中储电容  $C_T$ 、中储回路电感  $L_{TC}$  以及负载阻抗  $R$  决定，它们之间满足以下关系<sup>[1, 14-15]</sup>

$$C_p = -\frac{C_T}{2} + \sqrt{\left(\frac{C_T}{2}\right)^2 + \frac{L_{TC}C_T}{R^2}} \quad (2)$$

陡化电容  $C_p$  随着中储回路电感的增大而增大，准确预估整个中储回路的电感对陡化电容的设计非常重要。中储电容与中储开关构成回路的电感仅是中储回路电感的一部分，中储回路电感还包括中储环节向陡化回路高压引入导体的电感。

中储开关位于中储电容的中心，两者构成一外径渐变的同轴结构，但同轴结构外导体由分立集总元件中储电容构成，无法直接采用同轴电感计算公式计算其电感。因此，中储开关和中储电容所构成回路电感的计算采用了三维电磁仿真软件。对于不规则结构的电感可以采用求解  $S$  参数的方法获得，求解对象等效为电阻和电感串联的单端口或者双端口网络，采用仿真软件计算出等效  $S$  参数后，再根据  $S$  参数和等效网络的关系，求得等效电感  $L_{eq}$  随

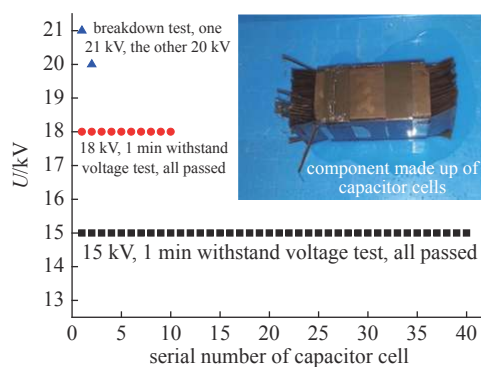


Fig. 2 DC withstand test results of capacitor elements

图 2 元件耐压实验结果



频率 $f$ 变化的关系为

$$L_{eq} = \frac{\text{Im}\left(-\frac{2}{Y(1,2)+Y(2,1)}\right)}{2\pi f} \quad (3)$$

其中: $Y(1,2)$ 和 $Y(2,1)$ 为端口网络参数。

仿真计算结果如图3所示,由图3可知中储电容和中储开关构成回路的电感在659 nH左右。

### 1.5 电压测量探头设计

中储电容器上电压 $U_T$ 的测定通过测量流经中储电容臂电流 $i_T$ 的方法实现。中储电容臂可以等效为一RLC串联电路。中储电容上电压可以表示为

$$U_T = \frac{1}{C_T} \int i_T dt + L_T \frac{di_T}{dt} + R_T i_T \quad (4)$$

当 $\omega L_T \ll \frac{1}{\omega C_T}$ 和 $R_T \ll \frac{1}{\omega C_T}$ 同时成立时,式(4)可以近似等效为

$$U_T = \frac{1}{C_T} \int i_T dt \quad (5)$$

中储电容臂容值 $C_T$ 为230 pF,电感 $L_T$ 按长直导线估算约为0.5  $\mu\text{H}$ ,等效电阻 $R_T$ 主要为连接导体电阻,为m $\Omega$ 量级,加载脉冲前沿约为600 ns,经估算,基本上满足近似条件。所以只需获得回路电流,就可以求得中储电容上电压。

在中储电容接地端串联一小阻值低电感金属氧化膜电阻,用来采集流经中储电容臂上电流。采用小阻值膜电阻进行测量时,需要考虑膜电阻的温升、阻值稳定性和沿面绝缘问题。根据总体方案,模拟装置工作在最高电压条件下时,中储电容先缓慢充电再快速放电,放电电流最高约为24 kA,平均每条臂上电流约3.43 kA。假设单次放电过程很快,阻性发热产生的能量均积累在金属氧化膜电阻的表层氧化膜上,则膜电阻上积聚的能量

$$W = \int i^2 R dt \quad (6)$$

综合考虑采集信号信噪比、对回路的影响和同轴电缆的绝缘水平,膜电阻取0.3  $\Omega$ ,按照上式估算单次放电时沉积的热量约为4.7 J。模拟膜电阻的实际工作情况,对膜电阻开展了不同电流峰值条件下放电对膜电阻温度和阻值的影响,加载脉冲前沿920 ns,半宽3.68  $\mu\text{s}$ ,峰值3.5 kA,单次放电沉积能量为10.1 J,比实际情况恶劣,结果如图4所示。从图4可知,无论是单个电阻还是3个电阻并联,放电沉积的能量均没有使得电阻表面温度有明显提升。膜电阻阻值发生了变化,3个电阻并联的情况下,阻值最大变化为0.011  $\Omega$ ,此处可能与LCR电桥夹具与电阻的连接方式等测量误差有关,而对于单个电阻,阻值从0.294  $\Omega$ 最大减小至0.203  $\Omega$ ,减小幅度31%,应非测量误差所致,而是金属氧化膜电阻通流能力不足所致,一般膜电阻的出厂报告里均包含最大功率这一项,但是该功率是一个稳态平均功率,脉冲电流条件下膜电阻的通流能力一般需要通过实测确定。因此中储电容的测量电阻选择3只金属氧化膜电阻并联。

膜电阻阻值为0.3  $\Omega$ ,电流峰值3.43 kA时,膜电阻两端电压将达到1.029 kV。膜电阻两电极银粉层之间的距离为12 mm,表面平均电场为85.7 V/mm,远低于绝缘介质在油中的沿面闪络电场阈值。因此膜电阻的沿面绝缘应是满足要求的。

## 2 中储电容器的实验

模拟装置各部件安装就位后,对中储电容器的容值、耐压、测量探头进行了测量或测试,对中储电容和中储开

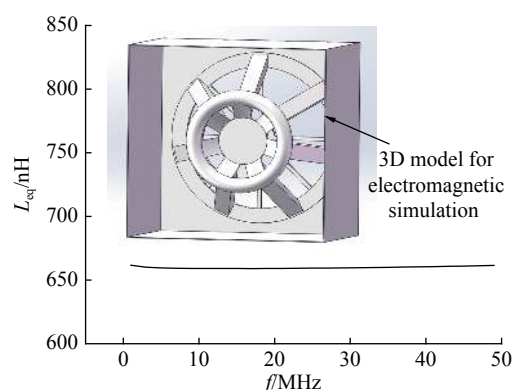


Fig. 3 Simulation model and result of the equivalent inductance of the transfer capacitor and transfer switch

图3 中储电容和中储开关构成回路电感计算模型和结果

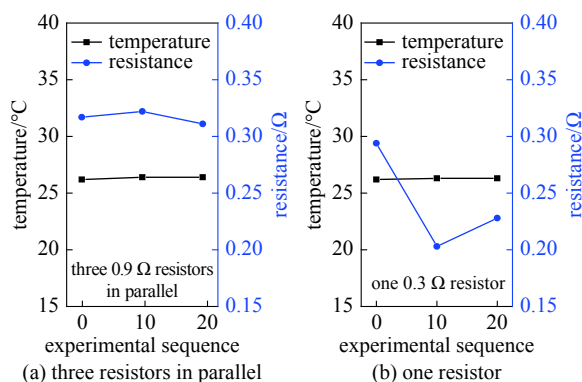


Fig. 4 Pulsed current experimental results for small-resistance metallized film resistors

图4 小阻值金属氧化膜电阻耐受脉冲电流实验结果

关构成回路的电感进行了实测。

## 2.1 容值的测量

由于 Marx 油箱灌油后需要长引线才能测量中储电容器容值,引入的误差较大。因此在油箱未灌油状态下,使用电桥对中储电容器容值进行了多次测量,取测量结果的平均值,为 1.70 nF。因为油箱未灌油,所以测量值比设计值偏小。根据分布电容计算结果,估算 Marx 油箱灌油后中储电容容值约为 1.81 nF,基本与设计预期相符。

## 2.2 等效电感的测试

将中储电容器接地端与中储开关尾部采用金属导线短接,在低压下对中储电容和中储开关构成回路的电流进行了测试,测试信号由中储电容器上的 0.3 Ω 膜电阻获取,测到的典型波形如图 5 所示,为一衰减振荡波形,振荡周期约为 211 ns。根据二阶回路振荡周期和电路参数之间的关系

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (7)$$

并结合中储电容的容值,计算得到回路等效电感约为 623 nH,接近于估算值 659 nH。

## 2.3 电压测量探头的实验

采用外接回路对中储电容器进行标定,外接回路波形上升沿与 Marx 向中储电容充电波形上升沿一致。中储电容器上电压由一电压探头采集,作为标准波形,中储电容小阻值膜电阻测得波形进行积分后,与电压探头测得波形进行对比,计算获取其标定系数,多次重复实验后取平均值。

装置运行过程中多次对中储电容测量探头进行标定,结果分散性较大,偏差在 10% 以上,分析认为,可能是油中碳粒等杂质附着在膜电阻表面,对膜电阻的阻值造成了影响,因此将膜电阻封装在 0.1 MPa 的 SF<sub>6</sub> 气体中,与变压器油进行隔离,改进前后的标定结果如图 6 所示,从图 6 可知,改进后的中储电容器测量探头标定系数比较稳定,未发生随着浸油时间增长而发生较大变化的现象,满足中储电容电压测量要求。

中储电容器上电压通过中储电容器电流积分获得,典型的中储电容器电流如图 7(a)所示,Marx 发生器建立后对中储电容器充电,中储开关击穿后,中储电容器通过中储开关向陡化电容放电,因此电流方向出现反转。积分后的电压如图 7(b)所示,为一单峰脉冲波形。

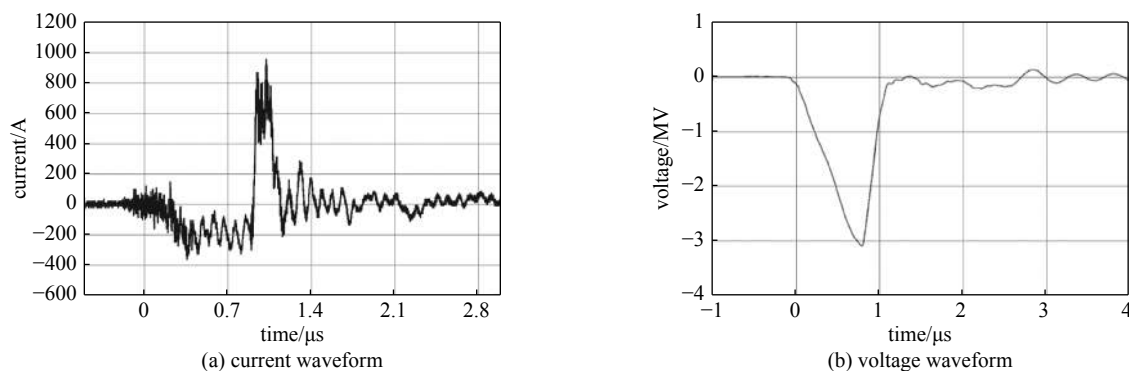


Fig. 7 Typical current and voltage waveforms of the transfer capacitor

图 7 中储电容器典型电流和电压波形

## 2.4 绝缘测试

装置状态调整确定后,正常运行时中储电容上电压如图 7(b)所示,前沿约 600 ns,半宽约 547 ns。采用逐级升

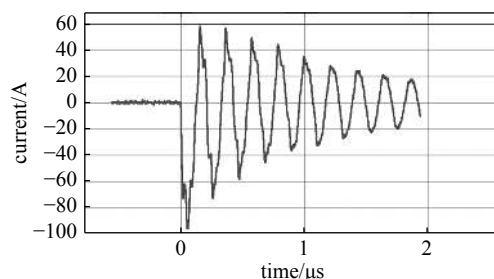


Fig. 5 Measured current waveform of the circuit made up of the transfer capacitor and the transfer switch

图 5 中储电容与中储开关构成回路实测电流波形

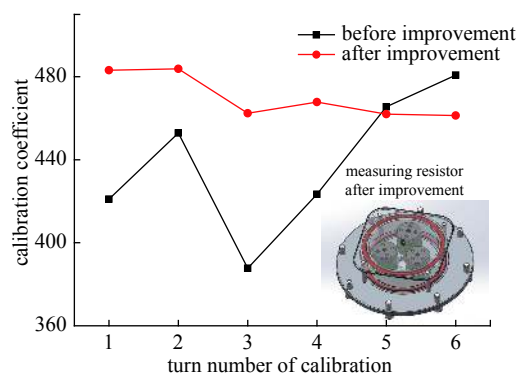


Fig. 6 Calibration results of the transfer capacitor's measuring probe before and after the improvement

图 6 改进前后中储电容测量探头标定结果

压法,对包括中储电容器在内的有界波模拟装置所有部件进行了绝缘考核。Marx 充电 $\pm 40$  kV 时,中储电容器上电压约为 3.1 MV。在该条件下进行了 20 发次的实验,实验时中储电容上电压波形均未出现异常,绝缘考核完成后,打开 Marx 油箱检查中储电容器,中储电容器屏蔽环、两端金属电极和壳体上均未发现放电痕迹,说明中储电容器在 3.1 MV 的工作电压条件下未出现绝缘问题。

### 3 结 论

本文研制了一台电磁脉冲模拟装置用中间储能电容器,电容器采用基于纸膜复合绝缘电容器元件的模块化设计思路,整体呈锥台状,和位于其中心的中储开关构成模拟装置的第一级脉冲压缩环节。电容器实测容值 1.81 nF,在 3.1 MV 工作电压条件下运行正常,容值和耐压均满足设计要求;电容器与中储开关构成回路电感约为 623 nH,接近预估值 659 nH,说明不规则结构的等效电感可以采用三维电磁仿真软件进行估算;电容器电压测量探头标定系数稳定,满足测量要求,在设计时需考虑测量电阻通流能力和油中杂质等影响因素。目前,该电容器已经应用在一台大型垂直极化有界波模拟装置中。

**致 谢** 中储电容器研制过程中得到了项目组张国伟、王海洋、李俊娜、郭帆、孙楚昱、程永平以及无锡锡脉电容器厂周立新等人的大力支持,在此向他们表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

- [1] 邱爱慈. 脉冲功率技术应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2016. (Qiu Aici. Application of the pulse power technology. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2016)
- [2] 毛从光, 程引会, 谢彦召. 高空电磁脉冲技术基础[M]. 北京: 科学出版社, 2018. (Mao Congguang, Cheng Yinhui, Xie Yanzhao. Technological base of HEMP. Beijing: Science Press, 2018)
- [3] Ianoz M. A review of HEMP activities in Europe (1970-1995)[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(3): 412-421.
- [4] Prather W, Giri D, Gardner R, et al. Early developments in sensors and simulators at the air force weapons laboratory[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(3): 431-439.
- [5] 陈炜峰, 陆静霞, 蒋全兴. 电磁脉冲模拟器技术回顾[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 149-152. (Chen Weifeng, Lu Jingxia, Jiang Quanxing. Review of electromagnetic pulses simulator technology[J]. *High Voltage Apparatus*, 2008, 44(2): 149-152)
- [6] Junna L, Wei J, Junping T, et al. A 3-MV low-jitter UV-illumination switch[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(2): 360-364.
- [7] Gilman C, Lam S K, Naff J T, et al. Design and performance of the FEMP-2000: A fast risetime, 2 MV EMP pulser[C]//IEEE 12th International Pulse Power Conference. 1999: 1437-1440.
- [8] Bailey V, Carboni V, Eichenberger C, et al. A 6-MV pulser to drive horizontally polarized EMP simulators[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(10): 2554-2558.
- [9] 陈维青, 何小平, 贾伟, 等. 2.5 MV快沿电磁脉冲模拟器脉冲功率源的研制[C]//第十四届全国核电子学与核探测技术学术年会. 2008: 689-693. (Chen Weiqing, He Xiaoping, Jia Wei, et al. Development of a 2.5 MV fast pulse generator for EMP simulation//14th National Conference on Nuclear Electronics & Detection Technology. 2008: 689-693)
- [10] 丰树平, 李洪涛, 曹文彬, 等. Z箍缩实验装置高压低抖动Marx发生器[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(1): 152-156. (Feng Shuping, Li Hongtao, Cao Wenbin, et al. High voltage low jitter Marx generator of prototype module of primary test stand[J]. *High Power and Particle Beams*, 2009, 21(1): 152-156)
- [11] 张晋琪, 蒋兴良, 陈志刚. 液体介质快脉冲电压下击穿特性研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(6): 1053-1056. (Zhang Jinqi, Jiang Xingliang, Chen Zhigang. Characteristics study of short pulsed dielectric breakdown in liquids[J]. *High Power and Particle Beams*, 2006, 18(6): 1053-1056)
- [12] 李名加, 马宁, 王朋, 等. 十二烷基苯中有机玻璃和尼龙的纳秒脉冲沿面闪络特性[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 045002. (Li Mingjia, Ma Ning, Wang Peng, et al. Surface flashover of insulating material under nanosecond pulse in dodecylbenzene[J]. *High Power and Particle Beams*, 2015, 27: 045002)
- [13] Chengcheng W, Zhiqiang C, Yiyang L, et al. Study on the insulation property of fiber reinforced plastics under nanosecond voltage pulses[C]//8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). 2020: 314-317.
- [14] 贾伟, 陈志强, 郭帆, 等. 基于Marx发生器的中小型电磁脉冲模拟器驱动源[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 073203. (Jia Wei, Chen Zhiqiang, Guo Fan, et al. Drivers of small and medium scale electromagnetic pulse simulator based on Marx generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 073203)
- [15] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. (Liu Xisan. High power impulse technique. Beijing: National Defense Industry Press, 2005)