

标准电容器内电极形变差异对电容影响研究

黄河¹, 王家福², 许素安¹, 张煌辉³, 李国宾⁴

(1. 中国计量大学机电工程学院, 杭州 310018; 2. 中国计量科学研究院, 北京 100029;
3. 福建省计量科学研究院, 福州 350001; 4. 山东泰开检测有限公司, 山东 泰安 271000)

摘要: 电极位移法是一种关注内电极位移量的高压标准电容器电压系数测量方法。该方法认为内电极顶面在水平方向上的位移量与电容量存在函数关系, 却未考虑引起内电极形变的作用力类型。由于不同作用力下内电极挠度分布并不相同, 故不同力产生相同的内电极顶面位移量时, 实际电容量却存在差异, 这就有可能影响电压系数测量的准确度。为研究这种差异, 文章对一台悬臂梁式 400 kV 高压标准电容器进行了仿真和实验。结果表明, 在 20 kV~350 kV 电压变化范围内, 电容器内电极顶面最大位移量为 52 μm , 电压系数最大为 13.8×10^{-6} 。其中, 不同力作用下, 内电极挠度分布存在差异, 但导致的电压系数不确定度仅为 0.098×10^{-6} 。因此在考虑高压标准电容器的电压系数最大允许误差为 10^{-6} 量级时, 内电极形变差异对电压系数测量实验的影响可以忽略, 从而验证了电极位移法的可靠性。

关键词: 高电压计量; 高压标准电容器; 电压系数; 电极位移法; 不确定度

Study on Influence of Internal Electrode Deformation Difference on Capacitance of Standard Capacitor

HUANG He¹, WANG Jiafu², XU Suan¹, ZHANG Huanghui³, LI Guobin⁴

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 3. Fujian Metrology Institute, Fuzhou 350001, China; 4. Shandong Taikai Testing Co., Ltd., Shangdong Taian 271000, China)

Abstract: Electrode displacement method is a voltage coefficient measurement method of high voltage standard capacitor concerning internal electrode displacement. This methods assumes that the displacement and capacitance on top of electrode along the horizontal direction exist function relation, but the type of action force causing the deformation of the internal electrode is not considered. Since the deflection distribution of internal electrode is different under different action forces, the actual capacitance is different when the same internal electrode top surface displacement is generated by different forces, which may affect the accuracy of voltage coefficient measurement. For studying this difference, a set of cantilever beam type 400 kV high voltage standard capacitor is simulated and tested. The results show that the maximum displacement on top surface of the capacitor is 52 μm and the maximum voltage coefficient is 13.8×10^{-6} when the voltage varies from 20 kV to 350 kV. Under the action of different forces, the deflection distribution of the internal electrode is different, but the resulting voltage coefficient uncertainty is only 0.098×10^{-6} . Therefore, in case of considering the maximum allowable error of voltage coefficient of high voltage standard capacitor at 10^{-6} magnitude, the influence of internal electrode deformation difference on voltage coefficient measurement experiment can be ignored, thus verifying reliability of electrode displacement method.

Keywords: high voltage measurement; high voltage standard capacitor; voltage coefficient; electrode displacement method; uncertainty

0 引言

作为高压计量中关键设备之一的高压标准电容器,被广泛作为参考标准或测量分压器的高压臂^[1-2]。高压标准电容器容量容易受到一次电压、内部气体压力、环境温湿度等影响变得不稳定,对应特性分别用电压系数、压力系数、温度系数来描述^[3-5]。其中电压系数的测量方法有算法法、直接比较法、倍压法、简易倾斜法等。

算法法是通过简化的偏心圆柱电容器的理论模型,带入参数进行电压系数的计算,该方法对高压电容器前期设计研制起到重要参考作用^[6]。直接比较法因为缺乏绝对的零电压系数高压标准电容器,所以不适用于对电压系数的绝对测量,目前该方法被使用于高压标准电容器计量检定规程中^[7]。倍压法,是利用两个高压电容器串联产生倍压工作点,然后使用电流比较器桥,分别将等电压和双电压下的参考电容器与被测电容器进行比较,得出电压系数^[8]。简易倾斜法是一种简单可行的方法,通过将高压标准电容器倾斜不同角度,得到电容器在不同角度下电压与容量、角度与电容的数据,从而实现对电容电压系数的绝对测量^[9-10]。但其实验步骤较为繁琐,辅助设备较多,不利于普通高压实验室开展实验。

电极位移法是对简易倾斜法的一种改进。该方法关注内电极的位移量,利用一套视觉测量系统对内电极位移量进行测量,从而大大减少了实验的复杂程度^[11]。利用该方法,普通高压实验室也可以轻松建立高压电容器容量电压系数测量标准。

然而,视觉测量系统得到的位移仅仅是内电极顶面的位移,而内电极的形变是一个整体效应,对于相同的顶面形变位移,不同力作用下,内电极的挠度分布并不相同。这也导致容量也有所差异,这种差异可能影响电压系数测量的准确度。因此,本文将通过仿真和实验探究这种差异对电极位移法测量电压系数产生的影响。

1 电极位移法简述

1.1 高压电容器电压系数产生原理

悬臂梁结构压缩气体高压标准电容器结构示意图和电容器的坐标系见图1。 y 轴为电容器直立时竖直方向,坐标原点位于接地电极的底部, x 轴垂直于 y 轴。

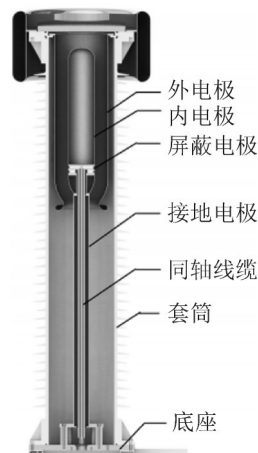


图1 电容器结构图

Fig. 1 Structural diagram of capacitor

内电极受力示意图见图2。

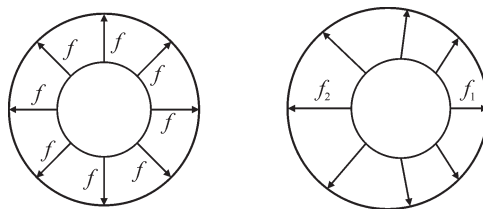


图2 内电极受力示意图

Fig. 2 Schematic diagram of internal electrode stress

理想状况下,内外电极完全同轴,电场力在各个方向上均衡,此时容量不会随着电压的变化而变化,即零电压系数。当不完全同轴时,平衡被打破,内电极会在电场力的作用下出现偏移,从而引起容量的改变。这种电容器容量随两端电压变化而变化的特性,称为电容电压特性,用电压系数来描述。已有研究表明,电压系数产生的主要原因是内电极在受力作用下发生了形变位移^[12-13]。

1.2 电极位移法原理

由文献[11]中可得,内电极的总偏移量 e_s 与电压成二次关系 $e_s(U)$,电容器的容量与内电极偏移量成二次关系 $\beta(e)$ 。二者的计算公式为

$$e_s(U) = U^2 C_e e_0 b k \quad (1)$$

$$\beta(e) = \frac{\Delta C}{C} \approx e_s(U) (2e_0 + e_s(U)) b = a_1 e + a_2 e^2 \quad (2)$$

式中: e_0 为初始偏心量; U 为电容器两端电压; k 为容量比。 b 、 C_e 公式为

$$\begin{cases} b = [(r_1^2 - r_2^2) \ln \frac{r_1}{r_2}]^{-1} \\ C_e = \frac{2\pi \epsilon l}{\ln(r_1 r_2^{-1})} \end{cases} \quad (3)$$

式中: r_1 、 r_2 分别为外电极内半径与内电极外半径; l 为低压电极有效长度; ϵ 为介电常数。

在电极位移法中,内电极位移量 e 可以通过微

位移测量系统得到。因此,整个电压系数测量实验步骤可以简单分为两步,示意图见图3。

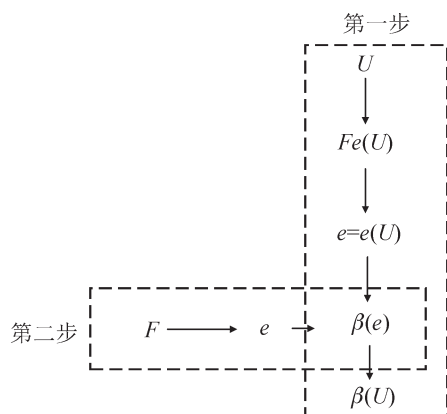


图3 实验步骤图
Fig. 3 Experimental procedure diagram

第一步:单独给高压标准电容器施加电压。在电容器仅受电场力作用下,测量位移量与电压的数据,拟合出二者关系 $e(U)$ 。

第二步:利用旋转倾斜平台将电容器沿着偏心方向倾斜,使重力单独作用于电容器,得到内电极位移量与电容量之间的数据,拟合出二者关系 $\beta(e)$ 。

由以上两步可以很轻易的得出电容量与电压之间的关系 $\beta(U)$ 。

在上述步骤中,电容器分别受重力和电场力作用,且该方法认为二者产生相同的顶面位移能够对应相同的电容量。然而实际上,即使顶面位移相同,不同力仍然会导致内电极其他位置的形变差异,使产生的电容量并不相等。考虑到这种差异无法用实验的方法进行观测,本文将通过仿真的方法确定其引入的不确定度大小。

1.3 电极位移法测量装置

1.3.1 微位移测量系统

内电极位移量是电极位移法实现电压系数测量的基础。微位移测量系统安装方式示意图见图4。

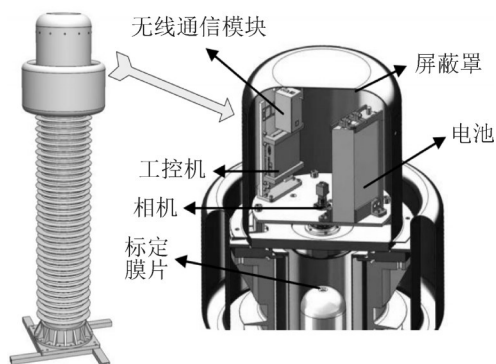


图4 微位移测量系统安装位置
Fig. 4 Installation position of micro-displacement measurement system

测量系统固定在电容器法兰内,透过绝缘玻璃拍摄固定在内电极上的标定膜片。通过边缘检测等算法算出膜片上圆孔圆心所在位置,与基准照片进行对比计算,从而得出内电极的偏移量以及方向^[14]。

1.3.2 旋转倾斜平台

旋转倾斜实验平台可以在带电工作环境下实现电容器的倾斜、旋转等功能。其实物图见图5。该实验平台可在 $\pm 45^\circ$ 范围内倾斜电容器,倾斜角度的分辨力可以达到 0.1° ,并通过蓝牙连接远程操纵^[15]。利用该平台,实验可以得到在重力作用下,内电极位移量与电容量之间的关系,完成电极位移法实验中的关键步骤。



图5 倾斜平台实物图
Fig. 5 Physical picture of tilted platform

2 内电极形变差异仿真研究

2.1 高压标准电容器参数

仿真中的电容器为一台悬臂梁结构 400 kV 压缩气体高压标准电容器,外电极内半径为 300 mm,内电极外半径为 150 mm,低压电极有限长度 587 mm。

2.2 建模与仿真设定

仿真研究的目的是求解内电极受力变形对电容量的影响,其中所受到的力包括重力、电场力。两种力在研究中的区别体现在作用于内电极的位置和受力面积的不同,这也是实际情况中导致形变差异的原因。

仿真涉及固体力学和静电场等多物理场耦合,故选用对多物理场耦合较好的 COMSOL Multiphysics 仿真软件。软件中“机电”多物理场接口将“固体力学”和“静电”相结合,用以模拟静电驱动结构的变形,同时可与“静电”进行由边界形变引起的反向耦合。

模型主要考虑内电极的位移量和电容器的电容量两大参数。故在固体力学物理场,只考虑内电极的形变,而对于高压电极,仅参与电容量的计算。所以研究将较薄的高压电极屏蔽加厚,以降低网格划分的难度。同时,对套管和底座等刚性较大部件的形变予以忽略,研究仅将地电位屏蔽以上的

结构包含于计算模型之内。其示意图与电容器坐标轴见图 6。除此之外,还需要按照套筒大小制作非固体域用以电容量计算。

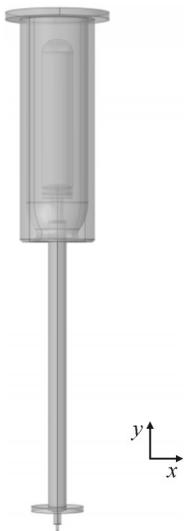


图6 仿真模型图
Fig. 6 Simulation model diagram

在材料选择方面,材质选取 6 系铝合金材质。压缩气体选用 SF₆ 气体,其仅参与电容量的计算。低压电极、地电位屏蔽、屏蔽电极 3 者之间的绝缘部分选用聚四氟乙烯。

在边界条件设定方面:电容器底端、顶端法兰分别施加固定约束,其余均为自由状态。因实际中屏蔽电极与低压电极在电容器底部是通过螺栓与地电位屏蔽相连接,故给二者施加一定大小的螺栓预紧力。在静电场设置中,将 SF₆ 气体域设置成电荷计算区域。高压电极设置为 1 V,低压电极设置为另一终端,计算电容量。

研究通过体载荷重力与倾斜角度的乘积来模拟电容器倾斜时内电极所受重力情况,通过对内电极表面施加边界载荷来模拟内电极受电场力的情况。

3 仿真结果

3.1 内电极形变差异分析

显然,电容器倾斜 90° 时,内电极的形变最大,不同作用力导致的形变差异也最大。因此,本文将对比这种状态下电场力和重力的作用效果差异。仿真的步骤为:1)将电容器倾斜 90°,获得在重力作用下,电容器沿 y 轴方向上各位置的形变位移量;2)将电容器摆正,对电场力进行参数扫描,直到内电极顶面位移与 1)中相同。获得此时电容器沿 y 轴方向上各位置的形变位移量。最后分析二者数据。

重力和电场力作用下内电极的形变示意图见图 7,其中图例所示是内电极等结构沿 y 轴方向各位置的形变位移量大小。

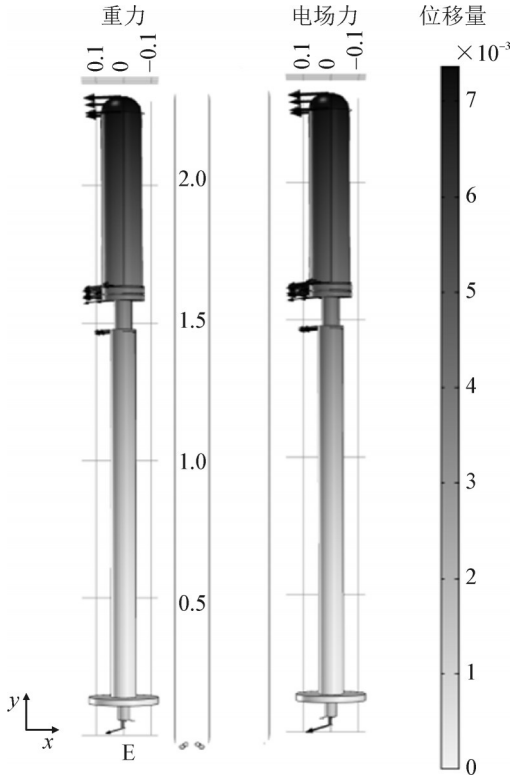


图7 内电极形变示意图
Fig. 7 Schematic diagram of internal electrode deformation

图 8 是内电极顶面产生相同最大位移时,内电极等结构沿 y 轴方向各位置的位移量。

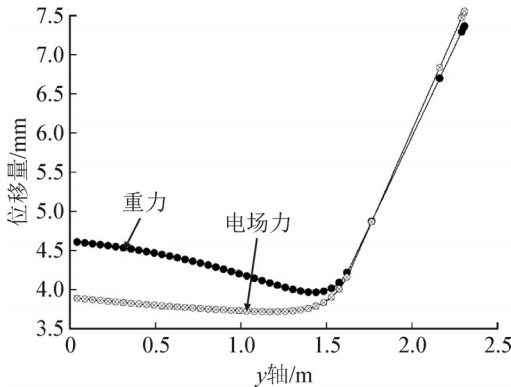


图8 y轴方向内电极形变位移曲线图
Fig. 8 Curve of internal electrode deformation and displacement along y axis

由图 7 可以看出,当内电极顶面位移量相同时,内电极整体的形变在外观上基本一致。但根据图 8 中的曲线可以得知,当电容器分别在重力和电场力的作用下,且内电极顶面位移量相同时,内电极等结构中部偏上部分水平位移最大相差 0.2 mm;在结构中部偏下部位,水平位移相差最大为 0.72 mm。

根据电容器沿 y 轴方向结构可知:中部偏上主要为内电极所在位置;中部偏下位移相差主要由屏蔽电极贡献。因为屏蔽电极跟底座通过螺栓预紧力进行约束,所以重力作用时,其重心离约束点更近,导致水平位移比电场力作用下的要大。

上述水平位移存在相差的现象,证明当考虑内电极整体形变时,不同作用力下内电极内电极的挠度分布不同,即形变存在差异。

3.2 内电极形变差异对电压系数的影响

为了对比内电极形变差异对电压系数的影响,将电容器从竖直以 5° 的步长逐渐倾斜至水平,获得 19 组角度下重力作用的顶面位移和对应的电容量。电场力从 0 到最大电场力进行参数扫描,获得 39 组顶面位移和电容量。为了直观对比两种力测量时的电压系数,以顶面位移为自变量,对两种情况下的电压系数进行拟合,二者的拟合曲线及其差异引入的不确定度数值曲线见图 9。

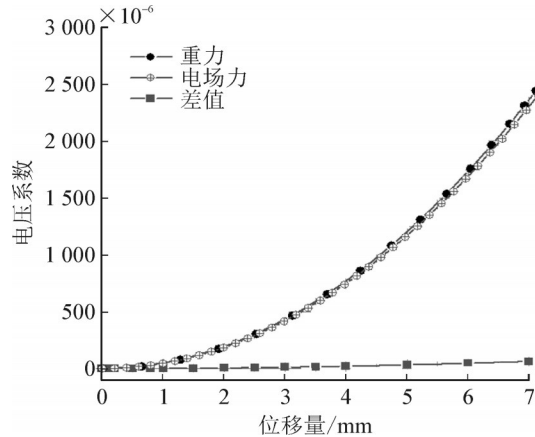


图9 位移量与电压系数关系曲线图
Fig. 9 Relationship graph between displacement and voltage coefficient

由图可知,两种情况下电容的电压系数都随着内电极顶面位移量的增大而增大。位移量小于 4 mm 时,两种作用力的差异并不明显,当大于 4 mm 时,随着位移量的增加,两种作用力差异所引入的电压系数不确定度也逐渐扩大。其引入的电压系数不确定度数值曲线的拟合公式如式(4)所示,通过拟合公式,可以计算出两种实验情况下内电极顶部具体位移量所引入的不确定度公式为

$$E(e)=9.5\times10^{-6}e^2+0.001\,44e-0.001\,01\quad (4)$$

式中: e 为内电极的形变位移量,单位为 μm ; $E(e)$ 为位移量对应的电压系数不确定度,单位为 10^{-6} 。事实上,在电压系数测量实验中,标准电容器的内电极顶面位移量很小,最大往往为几十微米。根据拟合公式(4)计算可得,在内电极顶部位移量小于

250 μm 时,重力和电场力分别作用下内电极形变差异引入的电压系数不确定度小于 1×10^{-6} 。

4 形变差异引入的不确定度分量

为进一步分析两种力的作用对电压系数测量造成的不确定度,进行了高压标准电容器的电压系数测量实验。

在 20 kV~350 kV 电压变化范围内,采用电极位移法测量内电极位移量和电压系数,并用式(4)计算内电极形变差异引入的不确定度,见表 1。

表1 实验数据
Table 1 Experimental data

位移量/ μm	电场力电压系数 (10^{-6})	重力电压系数 (10^{-6})	不确定度 (10^{-6})
0	0	0	0.001
4	1.05	1.04	0.005
7	1.84	1.83	0.010
12	3.16	3.14	0.018
17	4.49	4.45	0.026
23	6.08	6.03	0.037
32	8.47	8.41	0.054
39	10.34	10.26	0.069
47	12.48	12.39	0.087
52	13.82	13.72	0.098

分析表 1 中数据可知,高压标准电容器两端电压在 350 kV 时,内电极的顶部位移量达到最大的 52 μm ,此时测得的电压系数为 13.82×10^{-6} 。根据式(4)计算该位移量时内电极差异引入的不确定度为 0.098×10^{-6} 。

因此在考虑电压系数在 10^{-6} 量级变化时,由内电极形变差异引入的不确定大小在 52 μm 位移量时仅为 0.098×10^{-6} 。这充分说明在与重力结合的电极位移法中,由内电极形变差异所引入的不确定度可以被忽略。进一步验证了电极位移法的可靠性。

5 结语

本文简要介绍了电极位移法这一简便实用的高压标准电容器电压系数测量方法。并对电容量与内电极位移量存在内在函数联系,与何种类型力导致的位移无关这一原理进行了研究。结果如下:

1) 高压标准电容器在重力和电场力分别作用时,内电极顶面位移量的越大,内电极整体形变差异所引起的不确定度越大。其中,内电极顶面从 0 到 250 μm 的位移变化中,内电极形变差异所引起的不确定度小于 1×10^{-6} ;

2)高压标准电容器在 20 kV~350 kV 电压变化范围内,内电极的顶面位移最大仅为 52 μm ,电压系数最大为 13.82×10^{-6} ,内电极形变差异引入的不确定度大小仅为 0.098×10^{-6} 。

因此对于本研究的标准电容器而言,内电极位移量小于 250 μm 时,内电极形变差异引起的电容变化可以忽略,充分验证了电极位移法的可靠性。

参考文献

- [1] 李文婷,龙兆芝,乔培武,等.一种新型的电容分压器电场优化结构[J].高压电器,2018,54(10):76-79.
LI Wenting, LONG Zhaozhi, QIAO Peiwu, et al. New structure of potential optimization in capacitive voltage divider[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 76-79.
- [2] 雷民,姜春阳,李登云,等.高电压比例标准装置技术综述[J].高电压技术,2021,47(6):1893-1904.
LEI Min, JIANG Chunyang, LI Dengyun, et al. Review of high voltage ratio standard devices technology[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1893-1904.
- [3] 周文,梁纪峰,焦亚东,等.电容式电压互感器电压暂降测量误差分析及校正[J].中国电力,2022,55(7):49-58.
ZHOU Wen, LIANG Jifeng, JIAO Yadong, et al. Error analysis and correction of voltage sag measurement for capacitor voltage transformer[J]. Electric Power, 2022, 55(7): 49-58.
- [4] 张建军,孙红华,肖寒,等.环境温度对运行中高压并联电容器影响的分析[J].电力电容器与无功补偿,2016,37(1):6-10.
ZHANG Jianjun, SUN Honghua, XIAO Han, et al. Analysis of the influence of ambient temperature on high voltage shunt capacitor in operation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(1): 6-10.
- [5] 李璿,吴士普,王晓琪,等.1 000 kV 罐式电容式电压互感器附加误差特性研究[J].高压电器,2015,51(9):17-21.
LI Xuan, WU Shipu, WANG Xiaoqi, et al. Additional error characteristics study of 1 000 kV tank-type capacitor voltage transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 17-21.
- [6] SLOMOVITZ D, BREHM M, IZQUIERDO D, et al. Determination of voltage dependence in high-voltage standard capacitors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(6): 2136-2143.
- [7] 高压标准电容器检定规程:JJG 1075—2012[S]. 2012. High voltage standard capacitors: JJG 1075—2012[S]. 2012.
- [8] PAN Yang, ZHOU Liren, FENG Jian, et al. Investigation on the voltage dependence of compressed-gas-insulated capacitors up to 400 kV by improved voltage-doubling method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-7.
- [9] ZHANG Angnghui, SHAO Haiming, WANG Jiafu, et al. Measurement uncertainty in voltage coefficients for compressed-gas capacitor based on a simplified tilting method[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 8-19.
- [10] 张煌辉,张钟华,邵海明,等.压缩气体高压电容器电压系数测量方法[J].仪器仪表学报,2015,36(3):530-536.
ZHANG Huanghui, ZHANG Zhonghua, SHAO Haiming, et al. Voltage coefficient measurement method of the high voltage compressed-gas capacitor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 530-536.
- [11] 张煌辉.工频高压比例标准及溯源方法研究[D].北京:北京航空航天大学,2021.
- [12] 王福谦.偏轴圆柱形电容器的电场及其耐压能力[J].大学物理,2012,31(12):4-7.
WANG Fuqian. Electric field and voltage resistance of off-axis cylindrical capacitors[J]. College Physics, 2012, 31(12): 4-7.
- [13] 高广淦,徐达明.高精度压缩气体电容器电容电压系数的试验研究[J].高电压技术,1986(1):76-81.
GAO Guanggan, XU Daming. Experimental study on the voltage coefficient of precise compressed-gas capacitors[J]. High Voltage Engineering, 1986(1): 76-81.
- [14] 邵海明,张煌辉,王家福,等.一种基于电极位移量的高压电容电压系数测量装置:CN210639232U[P]. 2020-05-29.
- [15] 张煌辉.一种实现高压电容器带电倾斜旋转实验平台的研制[J].电测与仪表,2019,56(19):136-140.
ZHANG Huanghui. Development of a tilted and rotary experimental platform for high voltage capacitor[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(19): 136-140.

作者简介:

黄河(1998—),男,硕士研究生,研究方向为高压标准电容器相关特性。E-mail:946281204@qq.com。

王家福(1983—),男,博士,研究方向为高压大电流计量技术。

许素安(1975—),女,教授,研究方向为计量检测、新型传感器技术。

张煌辉(1985—),男,博士,研究方向为高电压大电流计量技术研究与运用。

李国宾(1985—),男,主要从事高压电气设计、精密互感器研发、工频电压比例标准设计制造及试验等工作。