

高压大容量脉冲电容器保压过程中电压跌落的定量分析*

朱博峰, 鲁军勇, 张 晓, 王 鑫, 戴宇峰, 马 涛, 王 杰
(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘要:针对金属化膜脉冲电容器在实际使用中由于充电结束以后较长的保压时间而产生电压跌落和能量损失,并最终导致脉冲功率电源系统的实际有效储能和储能密度下降这一实际问题,基于一种高压大容量脉冲电容器电压跌落的实验数据,分别从电导特性、自愈特性、极化特性及其与能量损失的相关性出发,推导了介质薄膜电导率与电压跌落的定量关系并进行了电导率测量实验,推导了自愈能量与电压跌落的定量关系并进行了寿命实验,阐述了松弛极化与电压跌落的定量关系并进行了仿真。结果表明,介质泄漏、自愈以及松弛极化在电压跌落中所占比例分别为 29.64%、11.75% 及 58.35%,导致所研究电容器电压跌落的主要因素是松弛极化。

关键词:脉冲电容器;电压跌落;电导率;自愈;松弛极化

中图分类号:TP743 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)04-033-06

Quantitative analysis of voltage drop of high voltage and large capacity pulse capacitor during voltage holding process

ZHU Bofeng, LU Junyong, ZHANG Xiao, WANG Xin, DAI Yufeng, MA Tao, WANG Jie

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Focused on the voltage drop and energy loss of metallized film pulse capacitor in actual use, which leads to the decreases of stored energy and energy density of pulsed power supply during the long voltage holding process after charging, based on the experimental data of a high voltage and high capacity pulse capacitor and the relationship between conductivity characteristics, self-healing characteristics, polarization characteristics and energy loss, the quantitative relationship between conductivity and voltage drop was derived and the conductivity measurement was carried out, the quantitative relationship between self-healing and voltage drop was derived and the life test was conducted, the quantitative relationship between relaxation polarization and voltage drop was described and the simulation was completed. The results show that the proportions of dielectric leakage, self-healing and relaxation polarization in voltage drop are 29.6%, 11.75% and 58.35%, respectively. The main factor which leads to voltage drop is relaxation polarization.

Keywords: pulse capacitor; voltage drop; conductivity; self-healing; relaxation polarization

脉冲功率电源系统一般具有电压高、电流大等特点,并且往往对瞬时功率、储能密度以及储能规模的要求较高^[1],目前国内外较为成功的脉冲功率电源系统主要以基于双向拉伸聚丙烯(Biaxially Oriented PolyPropylene, BOPP)薄膜的金属化膜脉冲电容器作为储能元件^[2-3]。为了尽可能地提高储能密度以改善对多种平台的适装性,脉冲电容器的设计工作电压一般较高,而BOPP膜自身的耐压特性决定了当其工作在高场强时,将不可避免地产生能量的损失,但安全起见,脉冲电容器在放电前的保压过程中一般处于

和充电电源脱开的状态,因此能量损失无法从充电电源处获得源源不断的支持,进而造成电压跌落^[4-7]。

电压跌落会造成实际有效储能密度的减小,因此,针对保压过程中的电压跌落现象展开研究具有一定的现实意义。文献[4]从制造工艺的角度分析了不同浸渍材料对保压性能的影响。文献[5-6]分析了不同工作场强、温度及充电历程对保压性能的影响,并研究了相关影响机理。文献[7]定性地指出电压跌落与松弛极化和介质泄漏的关系,但未见充分的测试和分析。综上,国内

* 收稿日期:2018-04-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51522706,51407191,51607187);国家部委基金资助项目(613262);国防科技重点实验室基金资助项目(9140C840409140C84026,9140C840409150C84358)

作者简介:朱博峰(1990—),男,陕西咸阳人,博士研究生,E-mail:zhubofeng1990@163.com;
鲁军勇(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:jylu@xinhuanet.com

外对电压跌落问题的研究多集中于影响因素及其影响规律的分析,缺少对各个因素的定量研究,提出的补偿方法也多囿于固定的保压时间。

本文基于已有的实验现象和金属化膜脉冲电容器的特性,分析并得出了影响电压跌落的三大因素,完成了相关实验和仿真,得到了各大因素在电压跌落中的定量关系。相关研究成果对于实际工程应用中的定量补偿和后续产品优化具有重要指导意义。

1 脉冲电容器的电压跌落现象与分析

1.1 保压过程电压跌落的实验现象

实践表明,脉冲电容器在保压时间内,其端电压出现缓慢的线性下降,下降的速度与保压时长、充电电压密切相关。另外,下降的速度还与制造工艺(不同厂商)以及剩余寿命相关。保压过程中电压跌落的实验现象示意如图 1 所示,其中 t_0 是充电时间, t_1 是保压时间, ΔU 是电压跌落幅值。表 1 给出了两台电气指标相同但供货厂家不同(主要是生产工艺不同)的高压大容量脉冲电容器的电压跌落实测数据。

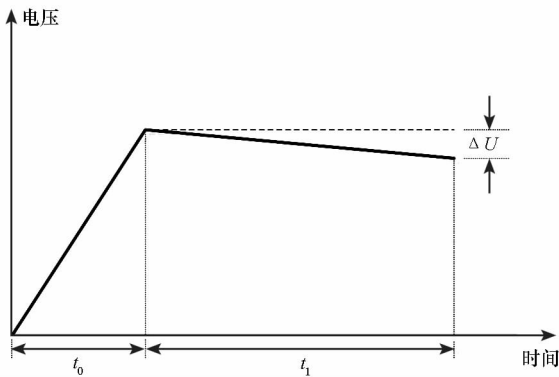


图 1 脉冲电容器保压过程中的电压跌落现象

Fig. 1 Voltage drop during voltage holding process

表 1 高压大容量脉冲电容器电压跌落典型值

Tab. 1 Measured voltage drop value of a high voltage and large capacity pulse capacitor

电压/kV	t_1 (产品 1/ 产品 2)/s	ΔU (产品 1/ 产品 2)/V
1	10.0/10.0	2.56/2.68
2	10.0/10.0	5.19/3.91
3	10.0/10.0	4.18/8.40
4	10.0/10.0	7.51/10.56
5	10.0/10.0	12.99/21.21

不难看出,在同样的保压时间下,随着电压等级的提高,电压跌落的幅值有所增大。另外,当电压较低时(≤ 2 kV),电压跌落幅值和脉冲电容器产品制造工艺与质量关系不大,而随着电压的升高,不同厂家提供的电容器产品保压性能开始出现较大的差别。

1.2 电压跌落的定量分析方法

根据脉冲电容器储能原理以及文献[5]可知,造成脉冲电容器电压跌落的主要原因为介质泄漏、自愈以及松弛极化。其中介质泄漏造成的电压损失可以根据电导率的测量来定量分析;自愈造成的电压损失可以根据充放电前后电容值的减小量(统计)来定量分析;松弛极化造成的电压损失可以等效电路仿真来定量分析。

2 BOPP 介质泄漏对电压跌落的影响

高储能密度脉冲电容器多采用厚度仅为几微米的金属化 BOPP 膜卷绕而成,基膜的绝缘性能在高场强作用下将出现变化,表现为漏电流或电导率的增大,进而造成保压过程中的电压跌落。

2.1 电导率与电压跌落的关系

脉冲电容器在充电结束并断开充电开关后,因介质泄漏引起的电压下降速率与介质薄膜自身的绝缘电阻大小相关。在不考虑外部放电支路时,电压跌落与绝缘电阻的关系为:

$$u(t) = U_0 \exp\left(-\frac{t}{R_p C_0}\right) \quad (1)$$

其中: U_0 为充电设定电压; t 为保压时间; R_p 为绝缘电阻; C_0 为电容值; $R_p C_0$ 则为时间常数,表征了因漏电流而产生的电压下降速率。对于几何参数一定的金属化膜脉冲电容器,时间常数又可以简化为:

$$R_p C_0 = \frac{d}{2\sigma Lb} \cdot \frac{2\varepsilon Lb}{d} = \frac{\varepsilon}{\sigma} \quad (2)$$

其中, d 、 L 、 b 分别为介质薄膜的厚度、长度和宽度, ε 、 σ 分别为介质的介电常数和电导率。所以,电压跌落与电导率的存在关系为:

$$u(t) = U_0 \exp\left(-\frac{t\sigma}{\varepsilon}\right) \quad (3)$$

其中, σ 与材料内部微观上的载流子浓度和迁移率密切相关,而这两者又与外界施加的场强和环境温度等因素密切相关,故 σ 可表示为:

$$\sigma(E, T) = \sigma_0 n(E, T) \mu(E, T) \quad (4)$$

其中: $n(E, T)$ 是材料内部微观意义上载流子浓度的增强函数,表示在特定场强 E 和特定温度 T 下材料内部载流子浓度与初始载流子浓度的比

值; $\mu(E, T)$ 是载流子迁移率的增强函数; σ_0 是指在基准条件下测量得到的初始电导率,其值与高分子材料自身的物理特性和制造缺陷的多少相关。一般利用材料结晶度来表征不同材料之间的电导率关系,即

$$\sigma/\sigma_0 = \exp[-\beta_\sigma(X - X_0)] \quad (5)$$

其中, X_0 表示初始电导率 σ_0 对应的材料结晶度, X 表示电导率为 σ 时材料的结晶度, β_σ 是由实验确定的常数。

本文所研究脉冲电容器的额定电压由应用场强确定,材料属性因已制造完成也确定,所以只需要在同等温度条件下开展研究,便可以认为电导率就是常数,这也是式(3)能够简化表示的前提条件。

2.2 电导率的测量

介质薄膜的电导率可以通过测量脉冲电容器的漏电流或者绝缘电阻来得到,测量电路如图2所示,其中 K0 是回路主开关, K1 是回路选择开关, r 是电压采样电阻, A1 是静电计。

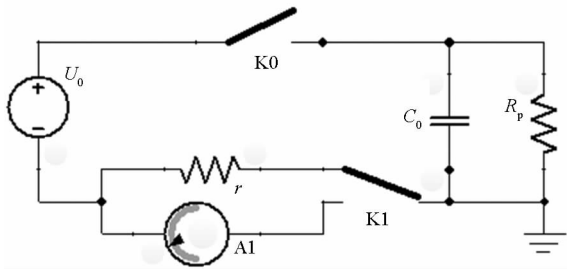


图2 介质电导率测试电路
Fig.2 Conductivity test circuit

当电压较低时,通过静电计测量微安级的漏电流 I_0 来直接确定电导率,此时有:

$$\sigma = \frac{\epsilon}{R_p C_0} = \frac{\epsilon U_0}{I_0 C_0} \quad (6)$$

当电压较高时,通过高压探头测量采样电阻端电压 U_r 来间接确定电导率,此时有:

$$\sigma = \frac{\epsilon}{R_p C_0} = \frac{\epsilon U_r}{C_0 (U_0 - U_r) r'} \quad (7)$$

其中, r' 为采样电阻与电压传感器输入电阻的并联值。

实测得到的表1中脉冲电容器产品1的电导率随工作电压的变化曲线如图3所示。

2.3 介质泄漏致电压跌落的计算

以表1中脉冲电容器产品1在5 kV 条件下的电压跌落实测值为例,首先,由图3可知此时的电导率约为 $1.5E - 15$ S/m,再根据真空介电常数 $8.854E - 12$ F/m 及 BOPP 膜的相对介电常数

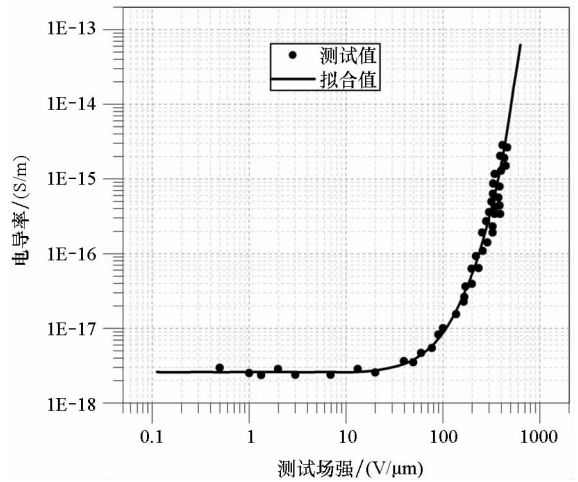


图3 室温下 BOPP 膜实测电导率

Fig.3 Conductivity of BOPP at room temperature

2.2, 可计算得到在保压 6.16 s 的过程中,因介质泄漏导致的电压跌落为 3.85 V, 约占电压跌落总幅值的 29.64%。

3 脉冲电容器自愈对电压跌落的影响

金属化膜脉冲电容器在高压作用下会产生局部击穿和自愈现象,自愈消耗的能量将引起实际储能的下降,表现为电容值的减小和电压的跌落。

3.1 自愈能量与电压跌落的关系

自愈过程所消耗能量大小的影响因素多样,且由于数量级较小而具有一定的随机性,因此直接测量相对复杂,学者多通过大量试验得到统计意义上的经验公式,典型的如式(8)^[5]所示:

$$W_{sh} = \frac{k U_b^{\alpha_1} C_0}{R_{sq}^{\alpha_2} a(P)} \quad (8)$$

其中, W_{sh} 表示自愈消耗的能量, U_b 为击穿电压, C_0 为电容量, R_{sq} 为方阻, $a(P)$ 为层间压强的函数,其余为常数。

由于自愈的上述特点,且对于容量巨大的超大储能规模脉冲电容器组而言,按照文献中的方法直接予以研究难以实现。而根据脉冲电容器的工作原理,自愈和电容量的损失具有天然的联系,且电容量相对容易测量,同时在寿命试验中的容量线性下降阶段能够保证较好的准确性,因此本文基于放电前后电容值的变化研究自愈在电压跌落中的占比。

根据电容器的储能原理,自愈引起的能量损失与保压过程前后电容值的关系为:

$$W_{sh} = \frac{C_0 U_0^2 - C_1 U_1^2}{2} \quad (9)$$

其中: C_0 和 C_1 分别表示保压过程前后的电容值;

U_1 则表示在保压过程中仅由自愈引起的跌落后的电压值,显然,该值大于保压结束时实测的电压值。当忽略充放电过程的自愈时,实验前后的电容值即为保压过程前后的容值,而根据文献[8-9],自愈导致的电容值变化和自愈能量的大小均与自愈发生时金属电极蒸发掉的面积直接相关,即有:

$$\Delta C = C_0 - C_1 = \epsilon S_{sh}/d \tag{10}$$

$$W_{sh} = k_s S_{sh} \tag{11}$$

其中: S_{sh} 表示自愈面积; d 为 BOPP 膜的厚度; k_s 为可以通过实验方法拟合得到的常数,其物理含义为自愈能量和自愈面积的比例系数。

联立式(9)~(11)可以得到仅由自愈导致的电压跌落幅值为:

$$\Delta U = U_0 - \sqrt{\frac{C_0 U_0^2}{C_1} - \frac{2k_s d(C_0 - C_1)}{\epsilon C_1}} \tag{12}$$

可见,根据实验前后的电容值变化可以求得自愈引起的电压跌落值。

3.2 自愈能量的实验统计

根据脉冲电容器的寿命试验数据,可以得到单次充放电的电容值变化统计平均值,表 1 中电容器产品 1 的电容值随试验次数的下降情况如图 4 所示。

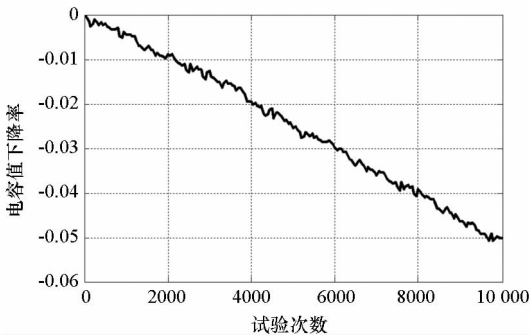


图 4 寿命试验中的电容值变化曲线
Fig. 4 Capacitance change curve in the life test

由图 4 可知,当剩余寿命较大时,电容值下降的斜率基本保持恒定,因此,利用统计平均值估算单次充放电中容量的下降幅度较为准确。

3.3 自愈致电压跌落的计算

同样,以表 1 中产品 1 在 5 kV 充电条件下的电压跌落实测值为例,由图 4 可得单次充放电电容值下降的平均值为 $0.000\ 97\ \mu\text{F}$,而系数 k_s 可取 $2000^{[5]}$,以此计算得到由于自愈导致的电压跌落幅值为 1.526 V,约占总跌落幅值的 11.75%。

4 松弛极化对电压跌落的影响

BOPP 膜在微观结构上不可避免地具有一

些缺陷区域和无定型(非结晶)区域,这些区域在高场强作用下会形成陷阱,捕捉和累积导电带上的自由电荷,最终在介质内部形成空间电荷^[10],此即松弛极化^[5]。松弛极化一方面会造成一定的介质损耗,另一方面会占据一定量的自由电荷,二者共同导致电容器能量损失和电压跌落。

4.1 松弛极化与电压跌落的关系

松弛极化过程中产生的空间电荷电场方向与原电场方向相反,如图 5 所示。

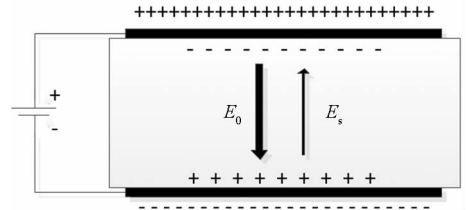


图 5 极化电场示意

Fig. 5 Diagram of the polarized electric field

介质内部实际的电场强度为原电场与极化电场之差,即:

$$E = E_0 - E_s \tag{13}$$

其中, E_0 和 E_s 分别表示由金属电极上的自由电荷建立的电场和松弛极化后介质内部空间电荷建立的电场。松弛极化完成需要的时间较长,因此在充电电源断开之后极化电荷面密度仍然有增加的趋势,最终会导致宏观上电压的跌落。另外,空间电荷积累的过程伴随着自由电荷反复的入陷和脱陷,该过程造成的能量损失也会导致宏观上电压的跌落。

4.2 松弛极化的仿真方法

一般情况下可以通过延长充电结束后开关断开的时间来定量分析松弛极化导致电压跌落的幅值,然而对于应用于电磁发射系统中的高压大容量脉冲电容器而言,延长开关断开时间无疑将大大增加充电系统的安全风险,因此参考文献[5,11],本文利用松弛极化等效电路来仿真分析松弛极化的影响规律。

根据第 4.1 节的分析,松弛极化的存在使得介质储存了更多的电荷,相当于介电常数增大,电容量增大,但是有一部分电荷是无用的,因此常利用复介电常数的概念并以并联的电阻电容来模拟松弛极化,另外考虑到多种松弛极化机理的存在,仿真时需采用多个并联阻容支路来进行等效^[11],此时电容器的等效电路如图 6 所示。

图 6 中, C_n 指快速极化电容,由于快速极化

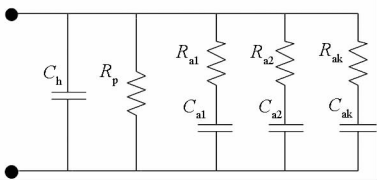


图 6 金属化膜电容器等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of metallized capacitor

以电子位移极化为主,速度很快,发生频率较高,而松弛极化过程中的空间电荷积累速度较慢,发生频率低于 100 Hz,因此 C_h 即为在 100 Hz 测量频率下得到的电容值; C_{ak} 表示第 k 种机制的松弛极化过程引起的等效电容; R_{ak} 决定了第 k 种机制的松弛极化速度,典型的松弛极化时间常数可达数分钟甚至数小时,因此 R_{ak} 的取值一般高达数百至上万兆欧; R_p 表示绝缘电阻,其值决定了介质的电导泄漏。

由于不同机理的松弛极化时间常数不同(如转向极化和界面极化),所以并联阻容参数不同,需要用多个极化函数求和的形式来更加准确地刻画极化过程,定义极化时间函数如下:

$$G(t, \tau_k) = e^{-t/\tau_k}, k=0, 1, 2, 3, 4, \dots \quad (14)$$

其中, $\tau_0 = R_h C_h$ 表示快极化的时间常数, R_h 代表电容充电支路上的等效串联电阻。充电过程总的极化电流由快极化和慢极化电流共同组成,即有:

$$\begin{cases} i_p = U_0 C_h [1 - G(t, \tau_0)] + U_0 C_h \sum_{k=1}^4 f_k [1 - G(t, \tau_k)] \\ \sum_{k=1}^4 f_k = \frac{C_a}{C_h} \end{cases} \quad (15)$$

式中, C_a 表示松弛极化的等效电容。因此,所有极化完成后总的电容值为:

$$C_s = \frac{Q_p}{U_h} = C_h \left[1 + \sum_{k=1}^4 f_k \right] \quad (16)$$

通过实验数据拟合的方式可获得极化支路的电容值 $C_{ai} = f_k C_h$,再根据 $R_{ai} = (\tau_{ai} / C_{ai}) - R_h$,可以得到极化支路的电阻值。

4.3 松弛极化致电压跌落的计算

仍然以表 1 中电容器产品 1 为例,充电电压 5 kV 时的实测泄漏电阻为 184.74 MΩ,仿真时采用的松弛极化支路参照文献[5]的拟合方法,并结合泄漏电阻实测值,具体见表 2。

松弛极化现象的仿真结果如图 7 所示,可以看出,在 6.16 s 的保压过程中,当介质泄漏和松弛极化共同作用时,电压跌落为 11.42 V;当只有

松弛极化作用时电压跌落 7.58 V,约占总电压跌落幅值的 58.35%。

表 2 松弛极化仿真参数

Tab. 1 Relaxation polarization simulation parameters

极化支路	$C_{ak}/\mu\text{F}$	$R_{ak}/\text{M}\Omega$	τ_{ak}/s
1	2.46	3655	8991
2	3.515	669	2351
3	3.515	111	390

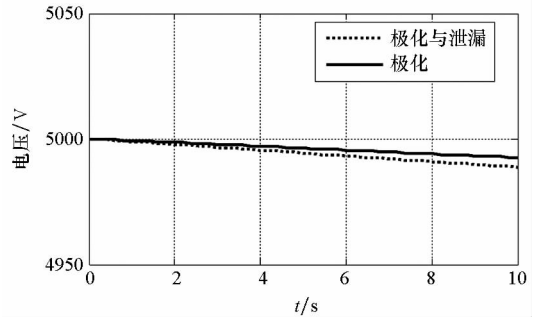


图 7 松弛极化仿真结果

Fig. 7 Relaxation polarization simulation results

5 结论

针对脉冲电容器保压过程中电压跌落这一实际问题,理论分析并定量研究了介质泄漏、自愈以及松弛极化三大因素在电压跌落总幅值中的占比。结果表明,介质泄漏可由电导率计算,占比约 29.64%;自愈可由电容值变化计算,占比约 11.75%;松弛极化可由仿真估算,占比约 58.35%。三者之和非常接近于 1,即计算及仿真过程可信,由此可见,导致所研究脉冲电容器保压过程中电压跌落的主要原因是松弛极化。

参考文献 (References)

- [1] 马伟明,鲁军勇. 电磁发射技术[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6): 1-5.
MA Weiming, LU Junyong. Electromagnetic launch technology [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(6): 1-5. (in Chinese)
- [2] McNab I R. Large-scale pulsed power opportunities and challenges [J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 2014, 42(5): 1118-1126.
- [3] 李军,严萍,袁伟群. 电磁轨道炮发射技术的发展与现状[J]. 高电压技术, 2014, 40(4): 1052-1064.
LI Jun, YAN Ping, YUAN Weiqun. Electromagnetic gun technology and its development [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1052-1064. (in Chinese)

- [4] Li H, Lin F C, Zhong H Q, et al. Study on metallized film capacitor and its voltage maintaining performance [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 327–330.
- [5] 陈耀红. 高储能密度金属化膜电容器应用性能及其影响因素研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
CHEN Yaohong. Study on application performance and its influencing factors of high energy density metallized film capacitor [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [6] Chen Y H, Lin F C, Li H, et al. Study on self-healing and lifetime characteristics of metallized film capacitor under high electric field [C]//Proceedings of IEEE Pulsed Power Conference, 2001: 711–716.
- [7] Li H, Chen Y H, Lin F C, et al. Study on voltage maintaining performance of metallized film capacitors under high electric fields [C]. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Mexico, 2011: 16–19.
- [8] Tortai J H, Denat A, Bonifaci N. Self-healing of capacitors with metallized film technology: experimental observations and theoretical model [J]. Journal of Electrostatics, 2001, 53(2): 159–169.
- [9] Kammermaier J, Rittmayer G, Birkle S. Modeling of plasma-induced self-healing in organic dielectrics [J]. Journal of Applied Physics, 1989, 66(4): 1594–1609.
- [10] 杨百屯. 测量固体介质中陷阱参数的等温电流测量理论及其应用[D]. 西安: 西安交通大学, 1989.
YANG Baitun. The theory of isothermal current measurement and its application [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1989. (in Chinese)
- [11] Cole K S, Cole R H. Dispersion and absorption in dielectrics I. alternating current characteristics [J]. Journal of Chemical Physics, 1941, 9(4): 341–352.