



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103558531 B

(45) 授权公告日 2016. 08. 24

(21) 申请号 201310585205. 6

(22) 申请日 2013. 11. 20

(73) 专利权人 广东电网公司佛山供电局
地址 528000 广东省佛山市汾江南路 1 号

(72) 发明人 朱文滔 罗向源

(74) 专利代理机构 上海申汇专利代理有限公司
31001

代理人 吴宝根

(51) Int. Cl.
G01R 31/12(2006. 01)

审查员 陈维维

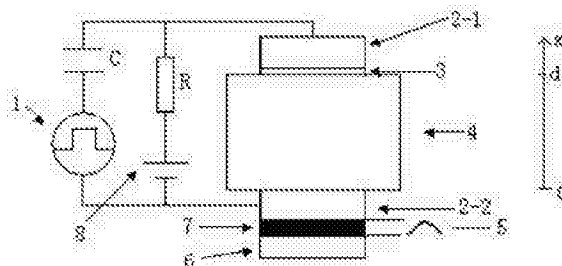
权利要求书2页 说明书6页 附图1页

(54) 发明名称

基于 PEA 空间电荷测量判断绝缘老化的方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于 PEA 空间电荷测量判断绝缘老化的方法, 建立电声脉冲法空间电荷测量系统, 电力电缆的绝缘层进行空间电荷测试, 对空间电荷的绝对电荷量进行统计将当前测量的量和阈值、历史数据进行对比, 利用总量的大小、电荷增加的速度分析参数实现对绝缘的评估; 根据外施高压电源电场和绝缘内部空间电荷分布曲线, 利用电场强度的方法对电力电缆绝缘进行分析, 当计算的场强高于设计值时, 则认为会对绝缘造成损坏, 还可以利用电场强度的增加速度判断绝缘的老化程度。本发明实现对电力电缆绝缘内部空间电荷的在线监测, 根据数据对电力电缆绝缘进行老化评估。



1. 一种基于 PEA 空间电荷测量判断绝缘老化的方法,其特征在于,具体包括如下步骤:

1) 建立电声脉冲法空间电荷测量系统:高压脉冲源与高压电容串联后接电力电缆两端的上下铝电极,同时直流高压电源通过限流电阻也接电力电缆上下两端的上下铝电极,压电传感器紧贴在下铝电极下表面,压电传感器下采用有机玻璃声波吸收层对压电传感器上压力波反射进行吸收,压电传感器输出电压信号,此电压信号经过放大后送计算机;

2) 进行空间电荷测试:首先高压电源在电力电缆的绝缘层中形成空间电荷,假设试样为均匀介质,绝缘层其内部空间电荷分布为 $\rho(x)$, $E(x)$ 为未叠加外施高压脉冲时试样内部的电场强度,它由两部分电场强度贡献,即外施高压电源电场强度 E_{dc} 与空间电荷产生的电场强度 $E_q(x)$,电力电缆与下铝电极界面上的面电荷密度为 σ_1 ,电力电缆下表面的电场强度为 E_1 ;电力电缆上铝电极界面上的面电荷密度为 σ_2 ,电力电缆上表面电场强度为 E_2 ,根据高斯通量定理,有

$$\sigma_1 = \epsilon_0 \epsilon_r E_1$$

$$\sigma_2 = \epsilon_0 \epsilon_r E_2$$

式中 ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为相对介电常数;

对电力电缆加高压脉冲,在电力电缆上形成总的压力波 $P(t)$, $P(t)$ 由三部分组成: $P_0(t)$ 为上铝电极电荷形成的压力波; $P_1(t)$ 为下铝电极电荷形成的压力波; $P_2(t)$ 为电力电缆绝缘层中空间电荷形成的压力波,通过压电传感器检测可得电压信号 V_s :

$$V_s = \frac{q(t)}{C_s} = \frac{d_{ss} d_s}{\epsilon_0 \epsilon_r} p(t) = g_{ss} d_s p(t)$$

式中: $q(t)$ 为压电传感器的压电薄膜形成的电荷, C_s 为压电传感器的等值电容, d_{ss} 为压电传感器的压电薄膜厚度方向的压电应变常数,代表了在压电薄膜厚度方向上施加 1Pa 压强单位面积产生的电荷; g_{ss} 为压电薄膜厚度方向的压电应力常数,代表了在压电薄膜厚度方向上施加 1Pa 压强所产生的电场强度; d_s 为压电薄膜的厚度, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为相对介电常数;

3) 对空间电荷的绝对电荷量进行统计:首先将压电传感器输出的电压信号转换成电荷信号,以无衰减的外电极上的峰值进行校验,电荷密度和电压幅值成线性关系, $\rho(x) = K_{ca} \times V_s$, 电荷密度和电压幅值的比例系数 K_{ca} 为:

$$K_{ca} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r U_{dc}}{b \ln(b/a) v_{sa} \int_{t_1}^{t_2} U_{\sigma}(t) dt}$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为相对介电常数, U_{dc} 为外施电压的幅值; a 、 b 为被测电力电缆同轴结构的绝缘层内外半径, v_{sa} 为压力波的传播速度, $U_{\sigma}(t)$ 为声波的电压值, t_1 和 t_2 为积分的范围, t_1 和 t_2 表示为外电极表面电荷所形成的声波的开始和结束时间;

对空间电荷分布曲线进行了绝对值积分:

$$Q = \int_0^l |\rho(x)| dx$$

式中: Q 为总电荷量, l 为试样的厚度, $\rho(x)$ 代表在 x 处的的电荷密度,将当前测量的总电荷量和阈值、历史数据进行对比,利用总电荷量的大小、电荷增加的速度分析参数实现对绝缘的评估;

4) 根据外施高压电源电场和绝缘内部空间电荷分布曲线,利用电场计算的方法对电力电缆绝缘进行分析,当计算的场强高于设计值时,则认为会对绝缘造成损坏,同时可以利用电场强度的增加速度判断绝缘的老化程度,

在这里近似认为空间电荷密度只依赖于 r 表示为 $\rho(r)$, r 表示为绝缘层空间位置对应的绝缘层半径, $\rho(r)$ 表示为半径为 r 处的电荷密度,

电缆绝缘层中电场强度表达式为:

$$E(r) = \frac{1}{r} \left[\int_a^r \frac{r' \rho(r')}{\epsilon_0 \epsilon_r} dr' + C \right], \quad C = \frac{U_{dc}}{\ln(b/a)}$$

公式中 E 为某处的电场强度, C 为常数, r' 为某处的半径;

根据电势的定义,电缆绝缘中电势分布表达式为:

$$\phi(r) = -a \int_a^r E(r') dr' + U_{dc}$$

式中: $\phi(r)$ 为某处的电势, U_{dc} 为外施高压电源电压。

基于 PEA 空间电荷测量判断绝缘老化的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种绝缘老化诊断技术,特别涉及一种基于 PEA 空间电荷测量判断绝缘老化的方法。

背景技术

[0002] 随着电缆运行时间的增长,电气设备(如 XLPE 电缆等)的主要绝缘会发生老化。绝缘老化可能会造成绝缘击穿事故,给生产和人民生活带来诸多不便,造成重大的经济损失。从统计数据可以看出,电缆的击穿事故的主要发生在电缆本体和附件,其中本体是电缆设备易出现故障的部位。导致电缆事故的原因除了电缆本体受外力破坏外,另一个重要原因是电缆设备(本体和附件)绝缘材质及制造工艺不良,在电场、水分、高温等环境因素的影响下绝缘性能严重老化。如不能准确掌握这些电缆的老化状态并采取相应措施,就会导致击穿事故,给社会的生产和居民的生活带来损失和不便。

[0003] 无论何种老化原因都会导致电气设备主绝缘的材料结构发生变化,如化学键断裂,介质中微孔增多或长出树枝状结构等。这些缺陷使介质中陷阱数目增多,在电场的作用下会引起空间电荷的聚集。这些空间电荷不仅改变聚合物中的电场分布,而且在聚合物击穿和直流泄漏电流方面也起着重要的作用。空间电荷的产生对电树枝有强烈的影响,电缆中空间电荷的产生和积聚,会畸变绝缘中的电场分布,加速电树枝的生长,使材料的绝缘状态进一步老化。因此,空间电荷的分布和材料的老化程度存在一定的关系,然而这方面的研究报道还很少。

发明内容

[0004] 本发明是针对电气设备中绝缘老化重要性的问题,提出了一种基于 PEA 空间电荷测量判断绝缘老化的方法,实现对电力电缆绝缘内部空间电荷的在线监测,根据测量的空间电荷数据对电力电缆绝缘进行老化评估。

[0005] 本发明的技术方案为:一种基于 PEA 空间电荷测量判断绝缘老化的方法,具体包括如下步骤:

[0006] 1) 建立电声脉冲法空间电荷测量系统:高压脉冲源与高压电容串联后接电力电缆两端的上下铝电极,同时直流高压电源通过采样电阻也接电力电缆上下两端的上下铝电极,压电传感器紧贴在下铝电极下表面,压电传感器下采用有机玻璃声波吸收层对压电传感器上压力波反射进行吸收,压电传感器输出电压信号,此电压信号经过放大后送计算机;

[0007] 2) 进行空间电荷测试:首先高压电源在电力电缆的绝缘层中形成空间电荷,假设试样为均匀介质,绝缘层其内部空间电荷分布为 $\rho(x)$, $E(x)$ 为未叠加外施高压脉冲时试样内部的电场强度,它由两部分电场强度贡献,即外施高压电源电场强度 $E_{\text{外}}$ 与空间电荷产生的电场强度 $E_{\text{q}}(x)$, 电力电缆与下铝电极界面

上的面电荷密度为 σ_1 ，电力电缆下表面的电场强度为 E_1 ；电力电缆上铝电极界面上的面电荷密度为 σ_2 ，电力电缆上表面电场强度为 E_2 ，根据高斯通量定理，有

[0008]

$$\sigma_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_r E_1$$

[0009]

$$\sigma_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_r E_2$$

[0010] 式中 ε_0 为真空介电常数， ε_r 为相对介电常数；

[0011] 对电力电缆加高压脉冲，在电力电缆上形成总的压力波 $P(t)$ ， $P(t)$ 由三部分组成： $P_0(t)$ 为上铝电极电荷形成的压力波； $P_1(t)$ 为下铝电极电荷形成的压力波； $P_2(t)$ 为电力电缆绝缘层中空间电荷形成的压力波，通过压电传感器检测可得电压信号 V_s ；

[0012]

$$V_s = \frac{q(t)}{C_s} = \frac{d_{ss} d_s}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} p(t) = g_{ss} d_s p(t)$$

[0013] 式中： $q(t)$ 为压电传感器的压电薄膜形成的电荷， C_s 为压电传感器的等值电容， d_{ss} 为压电传感器的压电薄膜厚度方向的压电应变常数，代表了在压电薄膜厚度方向上施加 1Pa 压强单位面积产生的电荷； g_{ss} 为压电薄膜厚度方向的压电应力常数，代表了在压电薄膜厚度方向上施加 1Pa 压强所产生的电场强度； d_s 为压电薄膜的厚度， ε_0 为真空介电常数， ε_r 为相对介电常数；

[0014] 3) 对空间电荷的绝对电荷量进行统计：首先将压电传感器输出的电压信号转换成电荷信号，以无衰减的外电极上的峰值进行校验，电荷密度和电压幅值成线性关系， $\rho(x) = K_{ca} \times V_s$ ，电荷密度和电压幅值的比例系数 K_{ca} 为：

[0015]

$$K_{ca} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r U_{dc}}{b \ln(b/a) v_{sa} \int_{t_1}^{t_2} U_{\sigma}(t) dt}$$

[0016] 式中： ε_0 为真空介电常数， ε_r 为相对介电常数， U_{dc} 为外施电压的幅值；a、b 为被测电力电缆同轴结构的绝缘层的内外半径， v_{sa} 为压力波的传播速度， $U_{\sigma}(t)$ 声波的电压值， t_1 和 t_2 为积分的范围；

[0017] 对空间电荷分布曲线进行了绝对值积分：

[0018]

$$Q = \int_0^l |\rho(x)| dx$$

[0019] 式中： Q 为总电荷量， l 为试样的厚度， $\rho(x)$ 代表在 x 处的的电荷密度，将当前测量的量和阈值、历史数据进行对比，利用总量的大小、电荷增加的速度分析参数实现对绝缘的评估；

[0020] 4) 根据外施电场和绝缘内部空间电荷分布曲线，利用电场计算的方法对电力电缆

绝缘进行分析,当计算的场强高于设计值时,则认为会对绝缘造成损坏,同时可以利用电场强度的增加速度判断绝缘的老化程度,

[0021] 在这里近似认为空间电荷密度只依赖于 r 表示为 $\rho(r)$,

[0022] 电缆绝缘层中电场强度表达式为:

$$[0023] \quad E(r) = \frac{1}{r} \left[\int_a^r \frac{r' \rho(r')}{\epsilon_0 \epsilon_r} dr' + C \right], \quad C = \frac{U_{dc}}{\ln(b/a)}$$

[0024] 公式中 E 为某处的电场强度, C 为常数, r' 为某处的半径;

[0025] 根据电势的定义,电缆绝缘中电势分布表达式为:

[0026]

$$\phi(r) = -\int_a^r E(r') dr' + U_{dc}$$

[0027] 式中: $\phi(r)$ 为某处的电势, U_{dc} 为外施高压电源电压。

[0028] 本发明的有益效果在于:本发明基于 PEA 空间电荷测量判断绝缘老化的方法,应用于对电力电缆绝缘老化的评估上,实现对电力电缆绝缘内部空间电荷的在线监测,然后利用所测得的电荷信号,实现对电荷的统计,并计算内部电场,实现对电力电缆绝缘的老化评估。

附图说明

[0029] 图 1 为电声脉冲法空间电荷测量原理图;

[0030] 图 2 为本发明空间电荷测量原理框图。

具体实施方式

[0031] 一、带有相位检测的 PEA 空间电荷测量系统:

[0032] 电声脉冲法 (PEA) 的测量原理:在试验的电极上施加脉宽很窄的高压电脉冲,试样中的空间电荷在脉冲的作用下产生相应的压力波脉冲,压力波脉冲的压力剖面和试样中空间电荷的体密度分布相关,由压力传感器测量压力波脉冲,就可以得到相应的试样中空间电荷分布情况。如图 1 所示电声脉冲法空间电荷测量原理图。其工作原理:高压脉冲源 1 与高压电容 C 串联后接试样 4 两端的上下铝电极 2-1 和 2-2,同时直流高压电源 8 通过限流电阻 R 也接试样 4 上下两端的上下铝电极 2-1 和 2-2,压电传感器 7 紧贴在下铝电极 2-2 下表面。采用电声脉冲法测量试样内部空间电荷分布时通常会对试样施加一定的直流电压,同时也达到了研究一定电场强度下介质空间电荷积聚特性的目的。直流高压电源 8 电压一般在数十千伏,主要与研究的电场强度及试样 4 厚度 d 有关。为了消除由于电极与试样 4 之间的接触不良造成对测量的影响,采用半导体层 3 置于上电极 2-1 与试样 4 之间,确保其可靠接触。高压脉冲源 1 电压幅值一般在数千伏,通过高压电容 C 耦合到被测试样 4 两端。为了随着技术的进步,高压脉冲源 1 的脉冲宽度(半峰宽)已经可以达到 10ns 以下。当高压脉冲作用在被测试样 4 内部空间电荷及试样与电极界面上的电荷时,会在相应的部位产生应力脉冲波,这些应力波传播通过被测试样 4 后由压电传感器 7 接收并变送为电压信号 5。此电压信号 5 经过放大后即可用来分析介质内部空间电荷特性。为了消除压力波的反射信号造成对测量信号的干扰,在压电传感器 7 下采用有机玻璃声波吸收层 6 对其进

行吸收。

[0033] 假设试样为均匀介质,其内部空间电荷分布为 $\rho(x)$, $E(x)$ 为未叠加外施高压脉冲时试样内部的电场强度,它由两部分电场强度贡献,即外施直流电场强度 E_{dc} 与空间电荷产生的电场强度 $E_q(x)$ 。设试样4与下铝电极2-2界面上的面电荷密度为 σ_1 ,试样4下表面的电场强度为 E_1 ;试样与上铝电极2-1界面上的面电荷密度为 σ_2 ,试样4上表面电场强度为 E_2 ,根据高斯通量定理,有

[0034]

$$\sigma_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_r E_1$$

[0035]

$$\sigma_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_r E_2$$

[0036] 式中 ε_0 为真空介电常数, ε_r 为相对介电常数。

[0037] $e_p(x)$ 为外施高压脉冲产生的脉冲电场强度,脉宽为 ΔT 的理想脉冲产生的电场强度可以表示为:

[0038]

$$e_p(t) = \frac{U_p}{d} [u(t) - u(t - \Delta T)]$$

[0039] 式中: e_p 为高压脉冲所形成的电场强度; U_p 为高压脉冲的幅值; d 为试样的厚度; ΔT 为脉冲的宽度。

[0040] 由于上下铝电极与试样4的界面上和介质中的电荷在脉冲电场的作用下都会形成相应的应力波,故压电传感器7收到的应力波为上述三项之和:

[0041]

$$P(t) = P_0(t) + P_1(t) + P_2(t)$$

[0042] 其中 $P(t)$ 为总的压力波, $P_0(t)$ 为上电极2-1电荷形成的压力波; $P_1(t)$ 为下电极2-2电荷形成的压力波; $P_2(t)$ 为试样中空间电荷形成的压力波,通过压电传感器7可得:

[0043]

$$V_s = \frac{q(t)}{C_s} = \frac{d_{ss} d_s}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} p(t) = g_{ss} d_s p(t)$$

[0044] 式中: V_s 为压电传感器形成的电压信号, $q(t)$ 为压电传感器7的压电薄膜形成的电荷, C_s 为压电传感器的等值电容, d_{ss} 为压电传感器7的压电薄膜厚度方向的压电应变常数,代表了在压电薄膜厚度方向上施加1Pa压强单位面积产生的电荷; g_{ss} 为压电薄膜厚度方向的压电应力常数,代表了在压电薄膜厚度方向上施加1Pa压强所产生的电场强度; d_s 为压电薄膜的厚度, ε_0 为真空介电常数, ε_r 为相对介电常数,由此,实现了对动态应力波的测量,由于应力波的大小与所处的电荷量成线性关系,得到 $P(t)$,再根据介质中的电荷分布 $\rho(x)$,上下铝电极与试样4的界面上电荷密度 σ_1 、 σ_2 ,可得空间电荷分布情况。

[0045] 根据上述的 PEA 空间电荷测量原理,由于交流状态下测量和直流状态下测量不同,其交流状态下所施加的电压是按正弦规律变化,这会导致不同电压下空间电荷分布不同,为了达到可比性(即相同电压作用下的空间电荷分布),这就要求在相同电压下进行测量。由此可见,整个系统需要一个相位检测单元,利用相位检测单元控制脉冲发生单元,从而实现在相同电压下的测量,如图 2 所示空间电荷测量原理框图。整个测量系统由电极系统、控制系统、测量系统、脉冲电源和高压电源组成,其系统的工作过程为:首先利用高压电源(DC 或 AC),在电力电缆的绝缘层中形成空间电荷,然后利用控制系统通过检测高压电源的相位,确定出脉冲输入的相位值(对于直流高压则无需该控制系统),控制高压脉冲源的相位,随着高压脉冲源的加入,在试样 4 上会产生应力波,然后利用 PVDF 压电薄膜传感器对空间电荷进行测量,将测量信号输入到由计算机构成的测量系统,实现对电力电缆绝缘层中的空间电荷测量。

[0046] 二、基于空间电荷的绝缘老化评估方法:

[0047] 在绝缘老化过程中,其绝缘中的缺陷越来越多,在高电场的作用下所形成的空间电荷越来越多,其所造成的电场畸变越来越严重。由于存在在以下两种情况:1)某些状态下空间电荷分布比较均匀,其电荷的增加对电场的影响较小;2)绝缘体中形成的空间电荷比较集中,在少量电荷增加的状态下,其局部电场迅速上升,甚至超高绝缘的承受能力。因此,提出采用空间电荷绝对量统计的方法和电场分析相结合的方法来实现对绝缘状态的评估。下面对这两部分进行介绍。

[0048] 三、空间电荷的绝对电荷量的统计:

[0049] 在绝缘老化的过程中,其体内的空间电荷越来越多,因此,可通过对绝缘材料内部空间电荷的绝对值统计进行分析。其分析过程为:为了得到试样中实际的空间电荷数量,而由传感器得到的信号为电压信号,因此在首先需将压电传感器 7 输出的电压信号转换成电荷信号,以无衰减的外电极上的峰值进行校验,电荷密度和电压幅值成线性关系,其系数如下:

[0050]

$$K_{ca} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r U_{dc}}{b \ln(b/a) v_{\sigma} \int_{t_1}^{t_2} U_{\sigma}(t) dt}$$

[0051] 式中: K_{ca} 为电荷密度和电压幅值的比例系数; ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为相对介电常数, U_{dc} 为外施电压的幅值;a、b 为被测电力电缆同轴结构的绝缘层的内外半径, v_{σ} 为压力波的传播速度, $U_{\sigma}(t)$ 声波的电压值, t_1 和 t_2 为积分的范围。

[0052] 实现电压信号向电荷密度之间的转换,为了了解老化过程中空间电荷的总量的变化,对空间电荷分布曲线进行了绝对值积分:

[0053]

$$Q = \int_0^l |\rho(x)| dx$$

[0054] 式中: Q 为总电荷量, l 为试样的厚度, $\rho(x)$ 代表在 x 处的的电荷密度。实现对电荷量的绝对值统计。将当前测量的量和阈值、历史数据进行对比,利用总量的大小、电荷增加的速度等分析参数实现对绝缘的评估。

[0055] 四、内部电场的计算：

[0056] 由于随着绝缘的老化，绝缘内部的空间电荷越来越多，其电场的畸变越来越严重，当局部的电场达到一定程度时会导致电缆绝缘的击穿。根据外施电场和绝缘内部空间电荷分布曲线，利用电场计算的方法对其进行分析，当计算的场强高于设计值时，则认为会对绝缘造成损坏，还可以利用电场强度的增加速度判断绝缘的老化程度。

[0057] 在这里近似认为空间电荷密度只依赖于 r 表示为 $\rho(r)$ 。由泊松方程可得：

[0058]

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} = -\frac{\rho(r)}{\epsilon_0\epsilon_r}$$

[0059]

$$\frac{dE(r)}{dr} + \frac{1}{r} E(r) = \frac{\rho(r)}{\epsilon_0\epsilon_r}$$

[0060] 式中 E 为某处的电场强度， ϵ_0 为真空介电常数， ϵ_r 为相对介电常数， ρ 为某处的电荷密度，此一阶线性微分方程的通解为：

[0061]

$$E(r) = \frac{1}{r} \left[\int_a^r \frac{r' \rho(r')}{\epsilon_0\epsilon_r} dr' + C \right]$$

[0062] 式中： C 为常数， r' 为某处的半径， a 为绝缘内层半径，绝缘内电场强度由外施高压电源和空间电荷贡献，因此可以用叠加的方法来确定 $E(r)$ 。根据拉普拉斯方程易知圆筒结构中的电场强度表达式可得空间电荷单独贡献的电场强度 E_n 为：

[0063]

$$E_n = \frac{1}{r\epsilon_0\epsilon_r} \int_a^r r' \rho(r') dr'$$

[0064] 由此可得：

[0065]

$$C = \frac{U_{dc}}{\ln(b/a)}$$

[0066] 因此电缆绝缘层中电场强度表达式为：

$$[0067] \quad E(r) = \frac{1}{r} \left[\int_a^r \frac{r' \rho(r')}{\epsilon_0\epsilon_r} dr' + C \right], \quad C = \frac{U_{dc}}{\ln(b/a)}$$

[0068] 根据电势的定义，电缆绝缘中电势分布表达式为

[0069]

$$\varphi(r) = -a \int_a^r E(r') dr' + U_{dc}$$

[0070] 式中： $\varphi(r)$ 为某处的电势， U_{dc} 为外施电压。

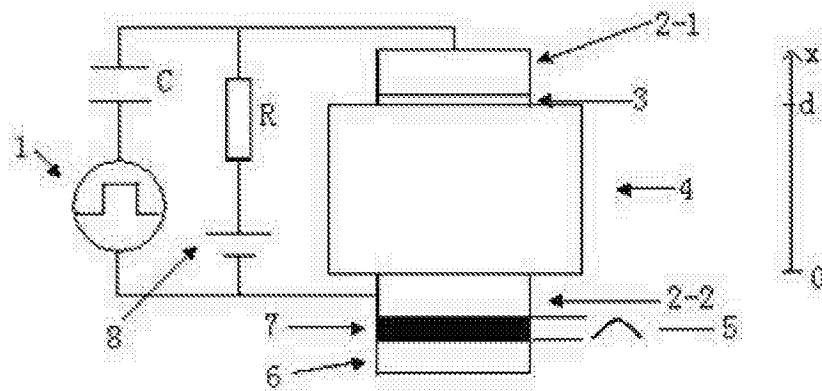


图 1

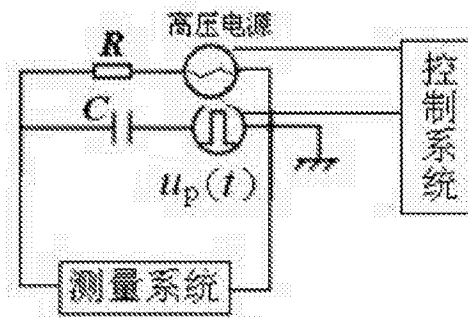


图 2