



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115541654 A

(43) 申请公布日 2022. 12. 30

(21) 申请号 202211517687.7

(22) 申请日 2022.11.30

(71) 申请人 武汉大学

地址 430072 湖北省武汉市武昌区珞珈山  
武汉大学

(72) 发明人 李祎 肖淞 吴豪颖 唐炬  
张晓星

(74) 专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务  
所(特殊普通合伙) 42222  
专利代理师 杨震

(51) Int. Cl.

G01N 27/00 (2006.01)

G01N 33/28 (2006.01)

H02N 1/04 (2006.01)

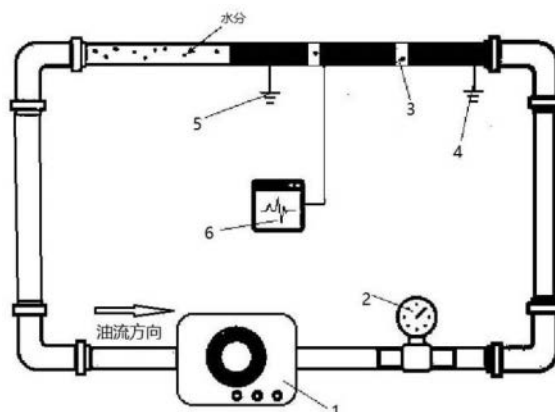
权利要求书1页 说明书6页 附图4页

(54) 发明名称

带油-固摩擦纳米发电机的绝缘油含水量检测装置、方法

(57) 摘要

本申请公开了带油-固摩擦纳米发电机的绝缘油含水量检测装置、方法。该检测装置包括油-固摩擦纳米发电机、循环泵、导油管、流量计、第一接地装置、第二接地装置以及数据分析单元；循环泵出油端与流量计入油端相连，流量计出油端通过导油管与第一接地装置一端相连；第一接地装置另一端与油-固摩擦纳米发电机入油端相连，油-固摩擦纳米发电机出油端与第二接地装置一端相连，第二接地装置另一端经导油管与循环泵入油端相连，油-固摩擦纳米发电机与数据分析单元输入端相连，数据分析单元用以分析出绝缘油含水量。本技术方案中，利用绝缘油杂质的引入将影响油-固摩擦纳米发电机的输出响应特性，通过两者间的对应关系检测绝缘油中含水量。



1. 一种带油-固摩擦纳米发电机的绝缘油含水量检测装置,其特征在于,包括油-固摩擦纳米发电机、循环泵、导油管、流量计、第一接地装置、第二接地装置以及数据分析单元;

所述循环泵出油端与流量计入油端相连,所述流量计出油端通过导油管与所述第一接地装置的一端相连;所述第一接地装置的另一端与所述油-固摩擦纳米发电机入油端相连,所述油-固摩擦纳米发电机出油端与第二接地装置的一端相连,所述第二接地装置的另一端经导油管与循环泵入油端相连,所述油-固摩擦纳米发电机与所述数据分析单元输入端相连,所述数据分析单元用以对油-固摩擦纳米发电机的输出波形进行分析以得出绝缘油含水量。

2. 根据权利要求1所述绝缘油含水量检测装置,其特征在于,所述油-固摩擦纳米发电机包括依次叠置的传感层、镀金电极和支撑层,所述传感层用以同绝缘油摩擦起电产生摩擦电荷,所述镀金电极用以通过静电感应效应收集油-固摩擦电荷,所述支撑层用以为传感层、镀金电极提供支撑。

3. 根据权利要求2所述绝缘油含水量检测装置,其特征在于,所述传感层为含全氟癸基三甲氧基硅烷疏油纳米涂层的FEP薄膜;所述支撑层为固体聚合物。

4. 根据权利要求3所述绝缘油含水量检测装置,其特征在于,所述传感层的加工方式为:使用氮气、氦气或SF<sub>6</sub>作为载气,在FEP薄膜正面涂覆全氟癸基三甲氧基硅烷疏油纳米涂料,随后在室温下静置至表面固化。

5. 根据权利要求2所述绝缘油含水量检测装置,其特征在于,所述镀金电极的制备方式为:使用磁控溅射仪将金纳米颗粒在传感层背面沉积大于90s所形成。

6. 根据权利要求1所述绝缘油含水量检测装置,其特征在于,所述循环泵为流速可调的液体循环泵,其调速范围优选为0.1-610 ml/min。

7. 根据权利要求1所述绝缘油含水量检测装置,其特征在于,所述导油管材料为固体聚合物或导体管道。

8. 根据权利要求1所述绝缘油含水量检测装置,其特征在于,所述流量计为圆齿轮流量计,用以检测导油管中油流速度;

所述数据分析单元包括高阻表和示波器,所述高阻表用以测量油-固摩擦纳米发电机所产生的微安甚至纳安级电流或电压,并将所测量的数据输入示波器记录和显示输出。

9. 一种绝缘油含水量的检测方法,其特征在于,采用如权利要求1所述绝缘油含水量检测装置实施。

10. 根据权利要求9所述检测方法,其特征在于,包括以下步骤:

A、获得纯净的绝缘油在一系列流量下的油-固摩擦纳米发电机的输出信号,并基于该输出信号进行初始校准;

B、当经过初始校准后,获得已知含水量的绝缘油标准样的输出响应信号,并基于该输出响应信号建立绝缘油中含水量与油-固摩擦纳米发电机输出响应之间的定量关系曲线;

C、根据所述定量关系曲线,获得待测绝缘油的含水量。

## 带油-固摩擦纳米发电机的绝缘油含水量检测装置、方法

### 技术领域

[0001] 本申请涉及设备绝缘油品质检测的技术领域,尤其涉及带油-固摩擦纳米发电机的绝缘油含水量检测装置、方法。

### 背景技术

[0002] 以油浸式变压器为代表的油纸绝缘设备是各电压等级交直流输变电系统的核心设备,其运行状态与绝缘油品质息息相关,因此绝缘油品质检测对保障设备可靠运行和电网供电安全十分重要。然而在设备制造、运输和检修等正常环节中以及长期运行下油纸绝缘系统老化和缺陷诱发的局部放电、过热故障下,绝缘油中将不可避免引入水分等杂质,这些杂质不仅会减低绝缘油的绝缘性能,也会加速油品质劣化设置诱发局部放电甚至闪络,严重威胁油浸式变压器的安全可靠运行。目前,存在部分检测油中杂质含量的相关方法,如中国专利公开号为CN113552329A的发明专利提出了一种油纸绝缘系统油中甲醇含量的校准方法,适用于所有采用油纸绝缘系统的电气设备状态评估;中国专利公开号为CN215677963U的发明专利发明了一种柴油机润滑油中含水量测试仪,该设备具有操作简单,检测速度快的优点。尽管目前存在多种检测油中杂质的装置与方法,但这些方法往往存在检测系统复杂、无法构建微型传感器用于分布式监测等问题,需要研发新的检测方法与技术满足新型电力系统下油浸式装备内绝缘油品质快速、分布式监测与分析需求。

### 发明内容

[0003] 有鉴于此,本申请提供带油-固摩擦纳米发电机的绝缘油含水量检测装置、方法,能够准确、简单地检测绝缘油的含水量。

[0004] 第一方面,本申请提供一种基于油-固摩擦纳米发电机的绝缘油含水量检测装置,包括油-固摩擦纳米发电机、循环泵、导油管、流量计、第一接地装置、第二接地装置以及数据分析单元;

所述循环泵出油端与流量计入油端相连,所述流量计出油端通过导油管与所述第一接地装置的一端相连;所述第一接地装置的另一端与所述油-固摩擦纳米发电机入油端相连,所述油-固摩擦纳米发电机出油端与第二接地装置的一端相连,所述第二接地装置的另一端经导油管与循环泵入油端相连,所述油-固摩擦纳米发电机与所述数据分析单元输入端相连,所述数据分析单元用以对油-固摩擦纳米发电机的输出波形进行分析以得出绝缘油含水量。

[0005] 可选地,所述油-固摩擦纳米发电机包括依次叠置的传感层、镀金电极和支撑层,所述传感层用以同绝缘油摩擦起电产生摩擦电荷,所述镀金电极用以通过静电感应效应收集油-固摩擦电荷,所述支撑层用以为传感层、镀金电极提供支撑。

[0006] 可选地,所述传感层为含全氟癸基三甲氧基硅烷疏油纳米涂层的全氟乙丙烯(FEP)薄膜;所述支撑层为固体聚合物。

[0007] 可选地,所述传感层的加工方式为:使用氮气作为载气,在FEP薄膜正面涂覆全氟

癸基三甲氧基硅烷疏油纳米涂料,随后在室温下静置至表面固化。

[0008] 可选地,所述镀金电极的制备方式为:使用磁控溅射仪将金在传感层背面沉积大于90s所形成。

[0009] 可选地,所述循环泵为流速可调的液体循环泵,其调速范围为0.1-610 ml/min。

[0010] 可选地,所述导油管材料为固体聚合物或导体管道。

[0011] 可选地,所述流量计为圆齿轮流量计,用以检测导油管中油流速度;

所述数据分析单元包括高阻表和示波器,所述高阻表用以测量油-固摩擦纳米发电机所产生的微安甚至纳安级电流或电压,并将所测量的数据输入示波器记录和显示输出;

所述高阻表为吉利时 Keithley 6517B,所述示波器为吉利时Keithley DAQ6510。

[0012] 第二方面,本申请提供一种绝缘油含水量的检测方法,采用如上述绝缘油含水量检测装置实施。

[0013] 可选地,包括以下步骤:

A、获得纯净的绝缘油在一系列流量下的油-固摩擦纳米发电机的输出信号,并基于该输出信号进行初始校准;

B、当经过初始校准后,获得已知含水量的绝缘油标准样的输出响应信号,并基于该输出响应信号建立绝缘油中含水量与油-固摩擦纳米发电机输出响应之间的定量关系曲线;

C、根据所述定量关系曲线,获得待测绝缘油的含水量。

[0014] 与现有技术相比,本申请具有以下有益的技术效果:

(1)实际装置测量过程中,只需要取部分实际绝缘油样品,注入装置,启动装置即可得到微水含量,具有操作简单、检测速度快的优点。

[0015] (2)利用油-固摩擦起电响应与油中含水量间的关联关系可反演未知油样中微量水分的含量,检测结果具有较高精度与可靠性。

[0016] (3)利用油-固摩擦纳米发电机实现了绝缘油中微量水份检测,为研发检测绝缘油中微水含量的微型自取能传感器和在线监测装置提供了理论依据和技术支持。

## 附图说明

[0017] 下面结合附图,通过对本申请的具体实施方式详细描述,将使本申请的技术方案及其它有益效果显而易见。

[0018] 图1为本申请实施例提供的绝缘油含水量检测装置的结构示意图;

图2为本申请实施例提供的油-固摩擦纳米发电机的结构示意图;

图3为本申请实施例提供的油-固摩擦纳米发电机电荷转移原理图。

[0019] 图4为本申请实施例提供的含微量水的绝缘油的摩擦起电响应特性图。

[0020] 其中,图中元件标识如下:

1-循环泵;2-流量计;3-油-固摩擦纳米发电机;4-第一接地装置;5-第二接地装置;6-数据分析单元;7-传感层;8-镀金电极;9-支撑层。

## 具体实施方式

[0021] 下面将结合本申请实施例中的附图,对本申请实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述。显然,所描述的实施例仅仅是本申请一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例,本领域技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本申请保护的范围。

[0022] 在本申请的描述中,需要理解的是,术语“第一”、“第二”仅用于描述目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此,限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括一个或者更多个所述特征。在本申请的描述中,“多个”的含义是两个或两个以上,除非另有明确具体的限定。

[0023] 在本申请的描述中,需要说明的是,除非另有明确的规定和限定,术语“安装”、“相连”、“连接”应做广义理解,例如,可以是固定连接,也可以是可拆卸连接,或一体地连接;可以是机械连接,也可以是电连接或可以相互通讯;可以是直接相连,也可以通过中间媒介间接相连,可以是两个元件内部的连通或两个元件的相互作用关系。对于本领域的普通技术人员而言,可以根据具体情况理解上述术语在本申请中的具体含义。

[0024] 下文的公开提供了许多不同的实施方式或例子用来实现本申请的不同结构。为了简化本申请的公开,下文中对特定例子的部件和设置进行描述。当然,它们仅仅为示例,并且目的不在于限制本申请。此外,本申请可以在不同例子中重复参考数字和/或参考字母,这种重复是为了简化和清楚的目的,其本身不指示所讨论各种实施方式和/或设置之间的关系。此外,本申请提供了的各种特定的工艺和材料的例子,但是本领域普通技术人员可以意识到其他工艺的应用和/或其他材料的使用。

[0025] 本申请提出一种带油-固摩擦纳米发电机的绝缘油中微水检测装置及方法,其核心思想在于绝缘油中杂质的引入将影响油-固摩擦纳米发电机3的输出响应特性,可通过两者间的对应关系检测绝缘油中含水量。

### [0026] <绝缘油含量水的检测装置>

参考图1,本申请提供一种带油-固摩擦纳米发电机3的绝缘油含量水的检测装置,包括油-固摩擦纳米发电机3、循环泵1、导油管、流量计2,第一接地装置4、第二接地装置5以及数据分析单元6构成。

[0027] 上述循环泵1出油端与流量计2入油端相连,上述流量计2出油端通过导油管与上述第一接地装置4的一端相连;上述第一接地装置4的另一端与上述油-固摩擦纳米发电机3入油端相连,上述油-固摩擦纳米发电机3出油端与第二接地装置5的一端相连,上述第二接地装置5的另一端经导油管与循环泵1入油端相连。上述油-固摩擦纳米发电机3的镀金电极8与上述数据分析单元6输入端相连,上述数据分析单元6用以对油-固摩擦纳米发电机3输出波形进行分析以得到含水量。

[0028] 带油-固摩擦纳米发电机3的绝缘油中微水检测装置运行方式:绝缘油油流在上述循环泵的驱动下,流经用于记录并控制流量大小的流量计2,随后经导油管流入上述接地装置以平衡流入油-固摩擦纳米发电机3前的摩擦电荷,避免油中固有电荷干扰油-固摩擦纳米发电机3的输出响应。上述油-固摩擦纳米发电机3在油流流过时因摩擦起电和静电感应耦合效应产生电信号,该信号通过上述数据分析单元6测量并记录,得到油-固摩擦纳米发电机3的输出信号。油流流出上述油-固摩擦纳米发电机3后,流经另一接地装置返回循环泵

1进入一个新的循环,上述另一接地装置用于平衡油-固摩擦过程中产生的电荷,避免循环油流带有不平衡电荷。

[0029] 上述的循环泵1为流速可调的液体循环泵,用于模拟油浸式设备油流场景;

上述的导油管材料可为常见固体聚合物(如尼龙等),用于模拟油浸式设备油道;

上述第一接地装置4和第二接地装置2结构相同,均为接地金属管道,用于绝缘油中固有平衡电荷,仅由于位于不同位置而导致的所平衡电荷来源不同。

[0030] 上述的流量计2为圆齿轮流量计,用于与循环泵1联合控制装置的油流速度。

[0031] 上述数据分析单元6用于记录油-固摩擦纳米发电机3的输出。

[0032] 优选的,上述循环泵1的一种优选为三同轴步进电机,可调速范围为0.1ml/min-610 ml/min,误差小于10%。

[0033] 优选的,上述导油管的一种优选为尼龙管(内径4mm,外径6mm,长200mm)。

[0034] 优选的,上述接地金属管道的一种优选为铜管(内径4mm,外径6mm,长50mm)。

[0035] 优选的,上述流量计2的一种优选为GF04圆齿轮流量计2,材质为304不锈钢材质,精度为0.5%。

[0036] 优选的,实验室用数据分析单元6可由高阻表及示波器组成,其中高阻表可测量油-固摩擦纳米发电机3所产生的微安甚至纳安级电流/电压,并将所测量的数据输入示波器记录和显示输出。

[0037] 优选的,上述高阻表的一种优选为吉利时6517B(Keithley 6517B)。

[0038] 优选的,上述示波器的一种优选为吉利时6510(Keithley DAQ6510)。

[0039] <油-固摩擦纳米发电机>

参考图2,作为本申请的油-固摩擦纳米发电机3,其为绝缘油中微水检测装置的核心传感器件。其由传感层7(含全氟癸基三甲氧基硅烷疏油纳米涂层的氟化乙烯丙烯共聚物(FEP)薄膜),镀金电极8以及支撑层9(例如尼龙管)组成。上述油-固摩擦纳米发电机3为三层结构,传感层7可为含全氟癸基三甲氧基硅烷疏油纳米涂层的FEP薄膜,用于与绝缘油摩擦起电产生摩擦电荷;上述镀金电极8为中间层,覆盖于传感层7的背面,作为集流体用于通过静电感应效应收集油-固摩擦电荷;最外层为支撑层9,起到支撑作用,用于模拟变压器等油纸绝缘设备的油道(可更换为其他材料)。

[0040] 上述含全氟癸基三甲氧基硅烷疏油纳米涂层的FEP薄膜经过疏油改性,具体方法为:首先,使用纯度为99.999%的氮气作为载气在传感层7的正面均匀喷涂全氟癸基三甲氧基硅烷疏油纳米涂料,随后在室温下(25°C)静置24h至表面固化,由于改性FEP薄膜具有疏油性(绝缘油接触角 $>100^\circ$ ),因而FEP薄膜形式的传感层7,可以显著提高油-固摩擦纳米发电机3的输出性能。

[0041] 上述镀金电极8是通过使用磁控溅射仪将金沉积在传感层7的背面制成,沉积时间为90~150s,得到厚度为30~50nm且电阻为100 $\Omega$ 的镀金电极8。

[0042] 支撑层9可以是尼龙管。

[0043] 上述传感层7和镀金电极8经处理后卷曲制成薄管状结构,其尺寸的一种优选如下:厚度0.05mm,直径4mm,长30mm。

[0044] 上述薄管状结构的传感层7粘贴于上述支撑层9,制成上述管状结构的油-固摩擦纳米发电机3。

[0045] 参考图3,上述油-固摩擦纳米发电机3的基本原理在于,当绝缘油以一定速度流过油道(尼龙管)的过程中,油会与传感层的正面摩擦起电,摩擦电荷在薄膜背面镀金电极8处产生感应电压或电流,该感应信号(电压、电流)作为传感信号被数据分析单元6检测,给出含水量检测结果。

[0046] 再次参考图3,上述油-固摩擦纳米发电机3的电荷转移微观机制如下:

流动状态的绝缘油可看作是大量油滴聚集后流动的特殊情景,其电荷转移过程可等效为一滴油滴流过传感层的大量重叠和不断重复的过程,因此可通过一滴油滴流过上述油-固摩擦纳米发电机3来解释上述油-固摩擦纳米发电机3的电荷转移过程。

[0047] 具体而言,现在介绍一滴油滴流过的电荷转移原理,以传感层为FEP薄膜为例。油滴流过传感层7过程中,由于传感层7对电子吸引能力较强,油滴与传感层7发生摩擦起电过程,且电子由油滴向传感层7转移(油滴失去电子传感层7得到电子),导致传感层7带负电而油滴带正电;工业上常用的油均为混合物,其内含有多种烃类化合物,这些化合物分子因为失去电子而成为正离子,这些离子被负电荷吸附在传感层7表面;当油滴滑过镀金电极8上侧时,油滴上多余的电荷导致镀金电极8上感生电荷,输出一个正脉冲波形;油滴在镀金电极8流动过程中由于薄膜与油滴电荷保持平衡,此时不输出电信号;在即将离开镀金电极8时,类似的,也会因为在镀金电极8油滴电荷的不足而在镀金电极8上感应出相反的电荷,并输出一个负脉冲波形。无数油滴的叠加和重复形成了所示油-固摩擦纳米发电机3的所输出的连续脉冲信号波形,取脉冲信号稳态最大峰值作为油-固摩擦纳米发电机3的输出响应结果。

[0048] <绝缘油含水量的检测方法>

本申请基于油-固摩擦纳米发电机3的绝缘油含水量的检测方法,以管状结构的油-固摩擦纳米发电机3作为检测探针,通过循环泵控制油流匀速流过管道,模拟绝缘油道的油流循环过程。油流与管道发生摩擦起电,通过测量其输出电流的响应,获取输出电流响应与绝缘油中含水量的变化规律,建立油-固摩擦纳米发电机3输出响应与油中含水量的关联关系,从而实现油中含水量的实时在线检测。

[0049] 具体包括以下步骤:

S1,装置背景信号校准:配置纯净的绝缘油,注入导油管中直至充满,连接好装置后,启动数据分析单元6随后启动循环泵,根据数据分析单元6中高阻计所显示数值大小调整合适量程;随后调整循环泵1循流速使其符合油浸式变压器运行状态下油流速度范围,获得纯净绝缘油在一系列流量下的油-固摩擦纳米发电机3输出信号,为后续油中微量水分的检测提供初始校准曲线,测量完纯净的绝缘油后,用无水乙醇清洗管状结构的油-固摩擦纳米发电机3,保证无水分以及绝缘油残留避免干扰后续测量;

S2,装置定量标定:配置一系列含有不同微量水分的绝缘油油样,通过循环泵1模拟变压器油流过程,基于步骤1装置校准过程所确定的输出量级,在选择好合适量程后启动循环泵,测量该含水量下油-固摩擦纳米发电机3输出信号,优选的测量总时长为1分钟;随后通过无水乙醇清洗装置后,重复该步骤,分别测量不同油中含水量下的油-固摩擦纳米发电机3输出,获取含不同微量水分绝缘油油样的输出响应。基于步骤1,步骤2的结果,分析获取含微量水分的绝缘油的摩擦起电输出响应与油中微水含量的反演关系,建立绝缘油中含水量与油-固摩擦纳米发电机3输出响应之间的定量关系曲线,用于未知微水含量的绝缘油

检测。

[0050] S3,未知水分含量绝缘油测量:取待测绝缘油样品,将其注入装置中,启动装置,得到油-固摩擦纳米发电机3的输出响应结果,与步骤2标定的曲线结果相对照,得到绝缘油中含水量大小,从而实现绝缘油中微水检测。

[0051] 实施例

本申请基于GB/T7595-2008所设定的含水量区间(15mg/L-35mg/L),测试了含水量0、10mg/L、20mg/L、100mg/L的绝缘油的响应特性。

[0052] 具体的,由卡尔费休-库仑滴定法对所述变压器中水分含量进行测量标定,随后启动循环泵,分别测量不同含水量条件下的25#绝缘油以100ml/min的流量在管状结构的油-固摩擦纳米发电机3的输出性能。

[0053] 结果如图4所示,随着油中含水量的增加,油-固摩擦纳米发电机3输出电流显著增加。含有10ppm水分的油输出正峰值可达到约0.135nA,相对纯净绝缘油约提高了35%,证明该传感器实现了绝缘油中微量水分的高精度、高响应度检测,具备应用于油浸式变压器绝缘油道并构建自取能的实时在线微水检测系统的潜力。

[0054] 以上所述,仅为本申请较佳的具体实施方式,但本申请的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本申请揭露的技术范围内,可轻易想到的变化或替换,都应涵盖在本申请的保护范围之内。



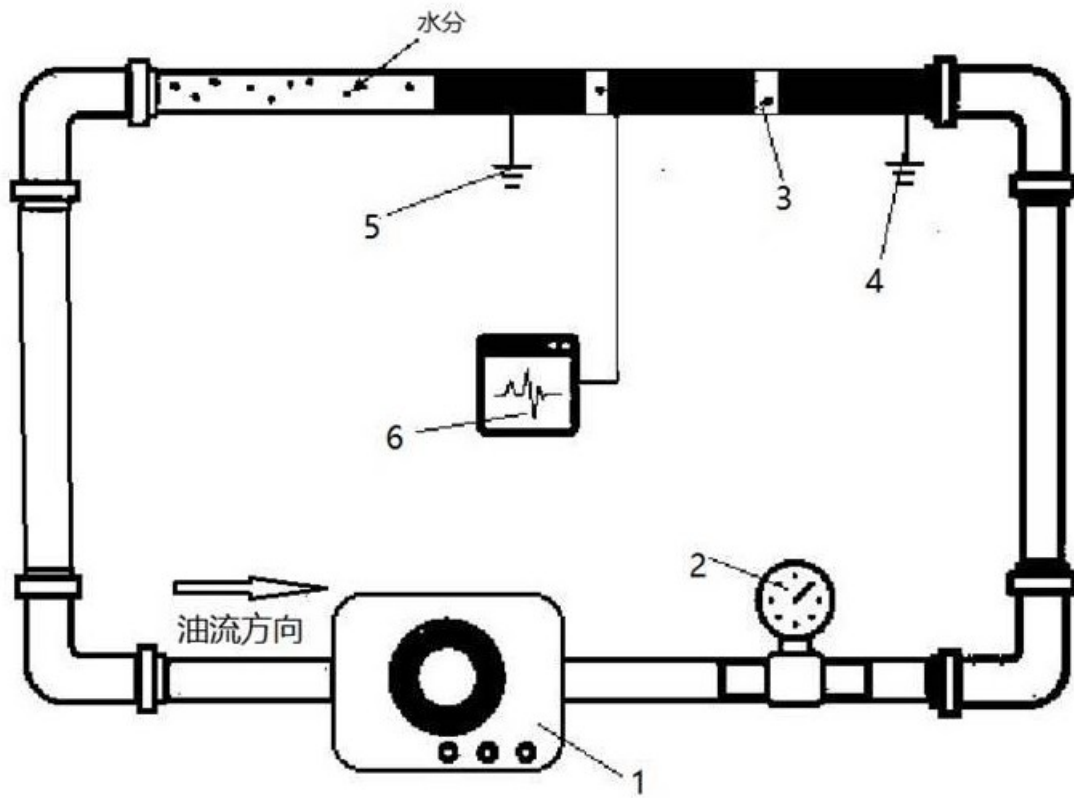


图1

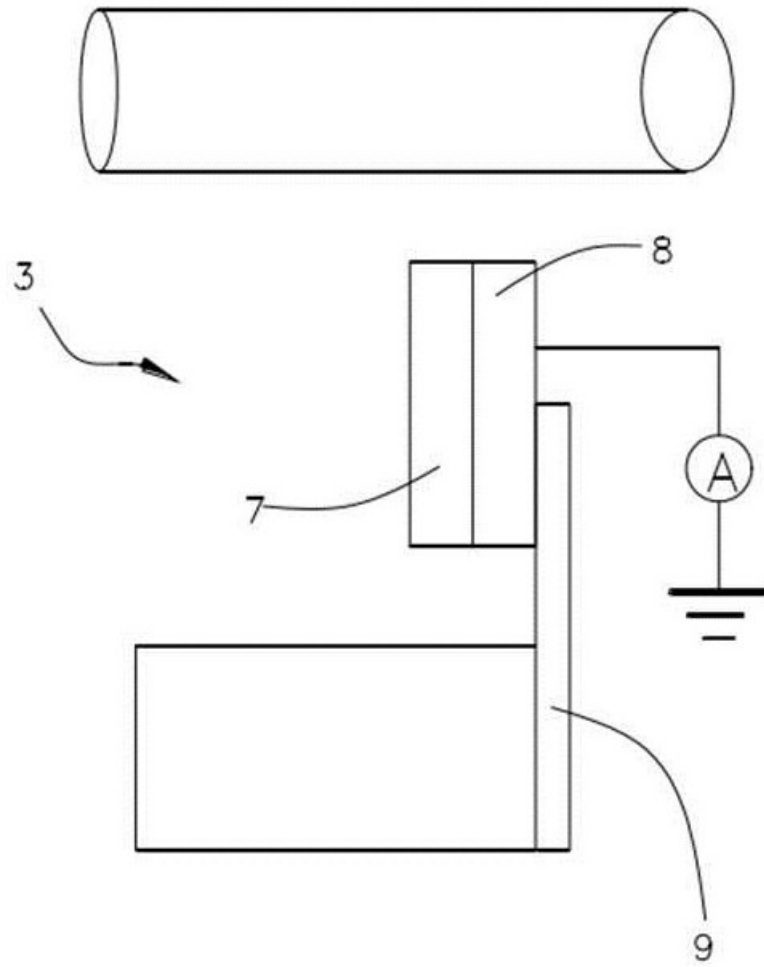


图2

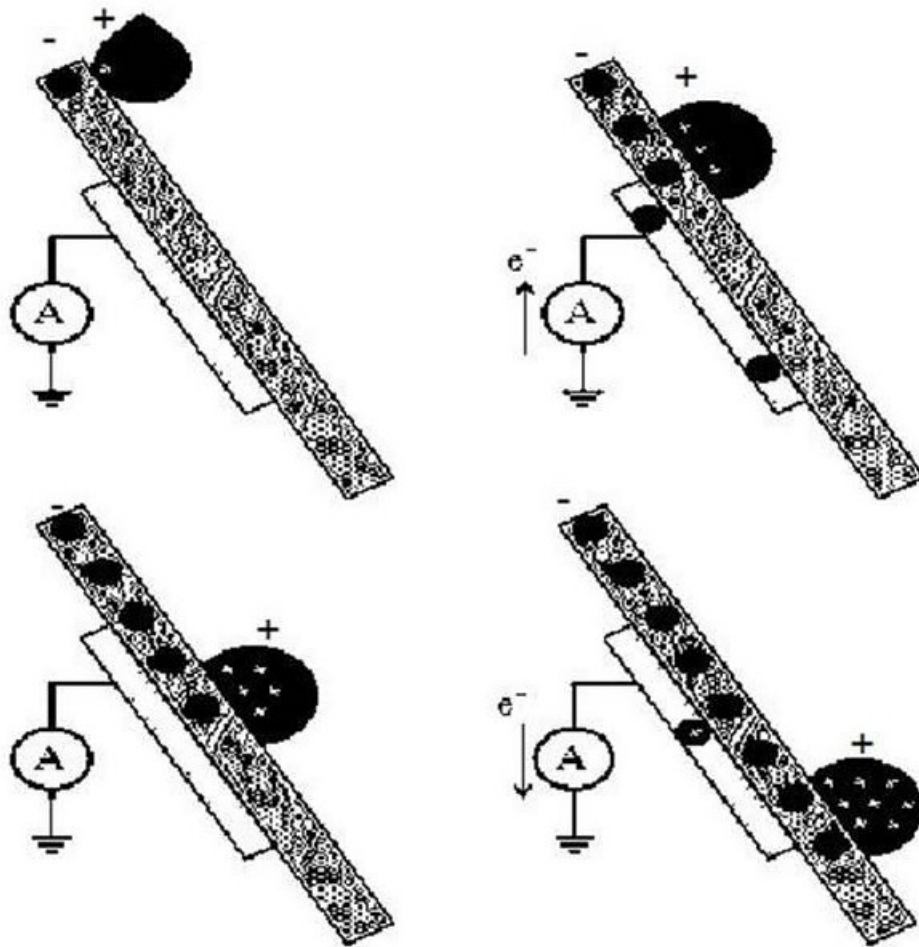


图3

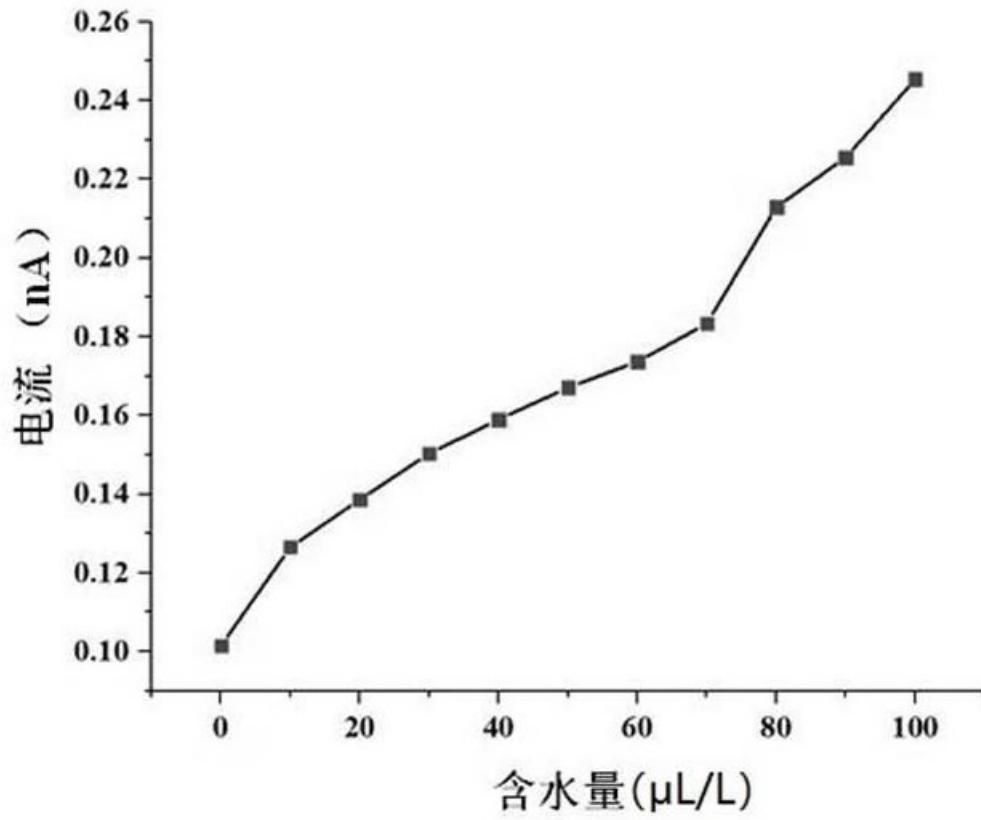


图4