



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103403902 B

(45) 授权公告日 2016. 05. 11

(21) 申请号 201180056493. 5

(74) 专利代理机构 深圳中一专利商标事务所  
44237

(22) 申请日 2011. 10. 18

代理人 张全文

(30) 优先权数据

588641 2010. 10. 18 NZ

592131 2011. 04. 07 NZ

(51) Int. Cl.

H01L 41/04(2006. 01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2013. 05. 23

(56) 对比文件

CN 101461114 A, 2009. 06. 17,

US 5949177 A, 1999. 09. 07,

WO 2010/095960 A1, 2010. 08. 26,

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/NZ2011/000214 2011. 10. 18

审查员 叶常茂

(87) PCT国际申请的公布数据

W02012/053906 EN 2012. 04. 26

(73) 专利权人 奥克兰联合服务有限公司

地址 新西兰奥克兰

专利权人 托德·艾伦·吉斯比

本杰明·马克·欧布莱恩

伊恩·亚历山大·安德森

(72) 发明人 托德·艾伦·吉斯比

本杰明·马克·欧布莱恩

伊恩·亚历山大·安德森

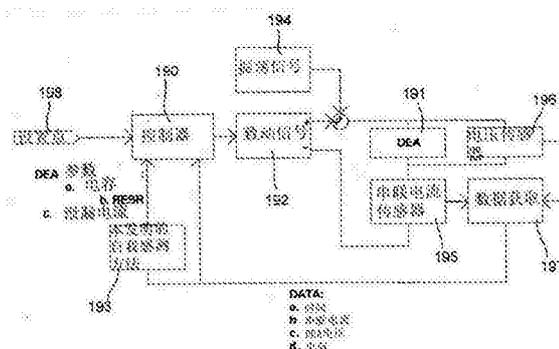
权利要求书2页 说明书17页 附图11页

(54) 发明名称

介电弹性体系统及估算介电弹性体状态的反馈参数的方法

(57) 摘要

本发明涉及一种提供获得与介电弹性体(DE)的状态相关的反馈参数的方法。该方法包括将小规模振荡引入到DE的电极之间的电压差中,监测或重复测量DE的几个可测量电气特性,从测量结果推导其他相关的数据,当被定义为正交轴时,通过该相关数据推导最佳拟合平面的方程,以及从该平面方程的系数推导反馈参数。因此,本方法提供关于DE的电容、泄漏电流和/或电极电阻的重要反馈。还公开了适于执行本方法的计算机程序和系统。



CN 103403902 B

1. 一种估算介电弹性体 (DE) 的状态的反馈参数的方法, 所述方法包括下列步骤:  
将小规模振荡引入到在所述 DE 的电极之间的电压差中;  
测量时间段内所述 DE 的电势差和流过所述 DE 的串联电流; 以及  
当被定义为正交轴时, 通过从所述测量结果推导的数据, 从最佳拟合平面的方程的系数估算一个或多个反馈参数。
2. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中所述反馈参数包括所述 DE 的电容, 并且所述电容由所述最佳拟合平面的第一系数被近似。
3. 根据权利要求 2 所述的方法, 所述方法进一步包括使所述 DE 的电容与 DE 的物理状态相关的步骤。
4. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中所述反馈参数包括流过所述 DE 的泄漏电流, 并且所述泄漏电流从所述最佳拟合平面的第二系数估算。
5. 根据权利要求 4 所述的方法, 所述方法进一步包括监控所述泄漏电流和控制对所述 DE 的输入, 以便限制所述泄漏电流的步骤。
6. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中相对于所述 DE 的机械和电气时间常数, 测量所述 DE 之间的电势差和流过所述 DE 的串联电流的时间段是短的。
7. 根据权利要求 1-6 中任意一个所述的方法, 其中从所述最佳拟合平面的系数估算一个或多个反馈参数的步骤包括执行从所述测量结果推导的数据的回归分析。
8. 根据权利要求 1-6 中任意一个所述的方法, 其中从测量结果推导的所述数据包括所述 DE 之间的电势差, 流过所述 DE 的串联电流, 供应给 DE 的电荷以及时间, 其中所述最佳拟合平面包括超平面。
9. 根据权利要求 8 所述的方法, 其中所述反馈参数包括所述 DE 的等效串联电阻, 并且所述等效串联电阻从所述最佳拟合平面的第三系数估算。
10. 根据权利要求 9 所述的方法, 其中所述等效串联电阻通过所述最佳拟合平面的第三系数除以所述 DE 的电容被近似。
11. 根据权利要求 4 所述的方法, 其中所述泄漏电流通过从所述第二系数减去所述 DE 的电容的变化率和 DE 等效串联电阻的变化率的标称合并效应, 从所述平面方程的第二系数被估算。
12. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中所述从测量结果推导的所述数据包括在所述 DE 的电容分量之间的电势差和在所述时间段内供应给 DE 的电荷。
13. 根据权利要求 12 所述的方法, 其中所述 DE 电容分量之间的电势差通过从所述 DE 之间的电势差减去所述 DE 等效串联电阻 (ESR) 之间的电势差被推导。
14. 根据权利要求 13 所述的方法, 其中所述 DE 的 ESR 通过下列步骤估算:  
向所述 DE 供应脉冲宽度调制 (PWM) 周期性致动信号;  
在所述 PWM 致动信号转变时, 测量所述 DE 之间电压步进改变以及流过所述 DE 的电流的步进改变的幅值;  
所述 DE 之间电压的步进改变除以流过所述 DE 的电流的步进改变;  
记录被估算 ESR 的时间关系曲线图; 以及  
从记录的被估算 ESR 的时间关系曲线图, 推导 ESR 的近似值, 其中所述近似值被用于估算所述 PWM 致动信号的转变之间的 ESR。

15. 根据权利要求 12 到 14 中任意一个所述的方法,其中所述时间、所述 DE 的电容分量之间的电势差以及供应给所述 DE 的电荷分别被限定为正交的  $x$ -、 $y$ - 和  $z$ - 轴。

16. 根据权利要求 4 所述的方法,其中所述泄漏电流通过从所述第二系数减去所述 DE 的电容的变化率与所述 DE 电容分量之间电势差的乘积,从所述平面方程的第二系数估算。

17. 根据权利要求 8 所述的方法,其中所述供应给所述 DE 的电荷通过流过所述 DE 的串联电流对时间的积分推导。

18. 根据权利要求 1-6 中任意一个所述的方法,其中所述 DE 包括介电弹性体致动器 (DEA),以及所述方法进一步包括基于所述反馈参数控制 DEA 的致动,从而形成闭环反馈控制系统的步骤。

19. 根据权利要求 18 所述的方法,其进一步包括步骤:

接收指示所述 DEA 所需要的状态的输入信号;以及

调整一个或多个系统输入,作为对所述输入信号和所述 DEA 状态的响应,使得所述状态匹配于所需要的状态。

20. 根据权利要求 1 所述的方法,其中估算一个或多个反馈参数的步骤包括通过所述数据推导所述最佳拟合平面的方程。

21. 一种介电弹性体 (DE) 系统,其包括:

介电弹性体 (DE),其包括由弹性体膜分隔的一对电极;

电源装置,其适于向所述 DE 供应小规模电压振荡;

测量装置,其用于测量所述 DE 之间的电势差和流过所述 DE 的串联电流;以及

通信连接到所述测量装置的计算装置,所述计算装置适于当被定义为正交轴时,通过从所述测量结果推导的数据,从最佳拟合平面的方程的系数估算一个或多个反馈参数。

22. 根据权利要求 21 所述的系统,其中所述测量装置具有比预先确定的时间段的频率更高的采样频率。

23. 根据权利要求 21 所述的系统,其中所述计算装置进一步适于接收指示所述 DE 所需要的状态的输入信号,以及控制一个或多个系统输入,以便基于所述反馈参数,提供所述 DE 的闭环的反馈控制。

24. 根据权利要求 21 到 23 中任意一个所述的系统,其中所述计算装置适于执行回归分析以估算所述系数。

25. 根据权利要求 21 到 23 中任意一个所述的系统,所述反馈参数包括所述 DE 的电容,等效串联电阻和 / 或泄漏电流中的一个或多个。

26. 根据权利要求 21 所述的系统,其中所述计算装置适于通过推导最佳拟合数据的平面的方程,以及从所述平面方程的系数推导一个或多个反馈参数来估算一个或多个反馈参数。

## 介电弹性体系统及估算介电弹性体状态的反馈参数的方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及用于感测介电弹性体 (DE) 的电气参数的方法和装置。尤其是,本发明涉及,通过动态估算 DE 的电气参数自我感测并从这些参数获得 DE 状态的估算值。

### 背景技术

[0002] 介电弹性体 (DE) 可以被用于将电能转换为机械能,或反之亦然。DE 可以被用作致动器,发生器,和 / 或传感器。参考图 1(a) 和 1(b), DE (一般情况下,参考编号是 10) 通常包括在适用电极 12 之间提供的体积不可压缩的介电弹性体膜 11。

[0003] 当电极 12 之间施加电压差时,介电弹性体致动器 (DEA) 变形,如同在例如“Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation”(Pelrine R. E., Kornbluh R. D., & Joseph J. P., Sensors and Actuators, A: Physical 64(1), pp77-85(1998)) 中公开的一样。电荷以电容器的方式聚集在电极 12 上,生成静电压力,导致该膜穿过厚度的压缩和平面内的膨胀,从例子图 1(a) 所示的静止或压缩状态到在图 1(b) 所示的致动或膨胀状态。

[0004] 如果 DEA 的平面尺寸远大于其厚度,则压力的幅值由下面的方程限定,其中 P 是压力,  $\epsilon_r$  是介质材料的相对介电常数,  $\epsilon_0$  是自由空间的介电常数 ( $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ), V 是电压,以及 d 是介质膜的厚度。

[0005] 
$$P = \epsilon_r \epsilon_0 \left( \frac{V}{d} \right)^2$$

[0006] 另一方面,介电弹性体发生器 (DEG) 将机械能转换为电能。实际上,DEG 是可变的电容器,并且其电容随着机械张力而改变 (即,膜的变形)。

[0007] DEG 通过增加存储在所述 DEG 中的电势能生成电能。实现这个的步骤在图 2 中简要示出。从图 2 的顶部开始,通过拉伸 DEG21,机械能 20 被初始施加到 DEG21 上。这导致膜电极 22 的平面膨胀,以及膜 23 的正交压缩,从而导致增加的电容。接着,通过电源 (未示出) 的充电 (或灌注),电能 24 被输入给 DEG,以便反向的电极 22 变成反向充电。放松 DEG,由于所述膜的平面收缩,通过迫使在相反电极 22 上相反电荷 (+ 和 -) 的离开,以及迫使类似的电荷在每个电极 22 上更加靠近在一起,将机械能转换为电能。电能 24 被提取,并重复该循环。

[0008] 可供选择地或附加地,介电弹性体可以被用作传感器。介电弹性体传感器的电气性能,例如电容、电极电阻以及介质膜的等效并联电阻改变,作为对外部刺激,例如像在 DE 的操作环境中的机械变形或变化的响应。因此,DE 的电气参数的改变可以被用于获取反馈信息。

[0009] 对于 DEA、DEG 和 DE 传感器的许多实际应用,获得用于感测和控制目的的关于 DEA 瞬时状态的反馈通常是必要的或至少是优选的。对于被直接连接到离散的刚性应变、位移、速度或加速度传感器的 DEA 和 DEG 来说,不可避免地增加设备的质量,并且这样的策略是运动受约束结构一部分的传统、刚性设备是有效的,这不必要地限制 DEA/DEG 的运动。类似

地,传感器对连接 DE 的刚性主体的连接可以提供关于机械输出的有用反馈,但是提供关于 DE 自身的机电状态的有限信息。因此,关键是使用 DE 自身作为传感器,并且结合感测致动和 / 或发电,在下文中,被称为“自我感测”能力。

[0010] 使 DE 的电容的变化与 DE 物理形状的变化关联是可能的。在现有技术中,自我感测的努力集中在将感测和致动结合。“An adaptive control method for dielectric elastomer devices”(Todd A. Gisby, Emilio P. Calius, Shane Xie, 以及 Iain A. Anderson, Proc. SPIE, 2008) 公开了基于电极之间的电容,自我感测的使用,以便确定 DEA 的状态,从而提供某些反馈。类似的方法在,例如“Control system design for a dielectric elastomer actuator: The sensory subsystem”(Toth, I.A. 以及 A.A. Goldenberg, Proceedings of SPIE, 2002), “Capacitive extensometry for transient strain analysis of dielectric elastomer actuators”(Keplinger, C, Kaltenbrunner, M., Arnold, N., and Bauer, S., Applied Physics Letters, 2008) 以及“A self-sensing dielectric elastomer actuator”(Jung, K., K. J. Kim, and H. R. Choi, Sensors and Actuators A: Physical, 2008) 中公开。

[0011] 标题为“System and Method for Dynamic Self-Sensing of Dielectric Elastomer Actuators”的国际专利公开号 No. W02010/095960 公开了用于自我感测的改善的方法和系统,其从 DEA 的电容的电位差、电位差改变的速率以及流过 DEA 的电流推导 DEA 电容的估算。从电容可以推导 DEA 的充电和物理状态的估算。通过介质膜推导泄漏电流的估算值也是可能的。

[0012] 不过,现有技术的这个和其他自我感测方法具有一个或多个缺点。这些可以包括仅仅在特定环境下是精确的估算,例如当 DE 是静止的(即,对外力没有任何扰动),泄漏电流是可以忽略不计的,或在低的致动速度。可供选择或附加地,现有技术的方法和 / 或装置基于并不总是有效的其他假设获得估算,所述假设不适于设计用于便携使用、对噪音敏感 / 或不必要地需要执行大量复杂或对处理器密集计算的系统的实际实施。

## 发明内容

[0013] 本发明的目标是提供用于介电弹性体致动器或发生器自我感测的方法和装置,或克服或至少改善现有技术的一个或多个缺点的介电弹性体传感器,或可供选择地,向公众提供有用的选择。

[0014] 进一步地,通过下列描述,本发明的替代目标将变得显而易见。

[0015] 在一个方面,本发明大致可以说由用于估算介电弹性体 (DE) 的状态的方法组成,所述方法包括步骤:

[0016] 将小规模振荡引入到在 DE 的电极之间的电压差中;

[0017] 测量时间段内 DE 的电势差和流过 DE 的串联电流;

[0018] 当被定义为正交轴时,通过从所述测量结果推导的数据,推导最佳拟合平面的方程;以及

[0019] 从所述平面方程的系数,推导一个或多个反馈参数。

[0020] 优选地,所述反馈参数包括 DE 的电容,其中所述电容由所述平面方程的第一系数被近似 / 估计 (approximated)。

[0021] 优选地,所述第一系数是所述平面方程的电压变量的系数。

[0022] 优选地,所述反馈参数进一步包括流过 DE 的泄漏电流,其中所述泄漏电流由所述

平面方程的第二系数推导。

[0023] 优选地,所述第二系数是所述平面方程的时间变量的系数。

[0024] 优选地,相对于 DE 系统的机械和电气时间常数,测量 DE 之间 /DE 两端的电势差和流过 DE 的串联电流的时间段是短的。

[0025] 优选地,所述时间段等于或大于小规模振荡的周期。

[0026] 优选地,推导最佳拟合平面的方程的步骤包括对从所述测量结果推导的数据执行回归分析。

[0027] 优选地,推导最佳拟合平面的方程的步骤包括解答一组线性方程。

[0028] 优选地,从所述测量结果推导的数据包括 DE 之间的电势差,流过 DE 的串联电流,供应给 DE 的电荷以及时间,其中最佳拟合的平面包括超平面。

[0029] 优选地,所述反馈参数进一步包括 DE 的等效串联电阻,其中所述等效串联电阻从所述超平面方程的第三系数推导。

[0030] 优选地,所述第三系数是所述超平面方程的电流变量的系数。

[0031] 优选地,所述被 DE 的电容除的串联电阻由所述超平面方程的第三系数近似。

[0032] 优选地,泄漏电流从所述平面方程的第二系数推导,其通过从所述第二系数减去 DE 的电容的变化率和 DE 等效串联电阻的变化率的标称综合效应。

[0033] 优选地,利用 DE 的电容和等效串联电阻的时间关系曲线图,推导泄漏电流。

[0034] 优选地,利用根据本发明的方法获得的电容和等效串联电阻的近似,推导 DE 泄漏电流的近似值。

[0035] 优选地,所述平面方程的第一系数与供应给 DE 的电荷对于 DE 之间电势差的偏导数相对应。

[0036] 优选地,第二系数和与供应给 DE 的电荷对于时间的偏导数相对应。

[0037] 优选地,第三系数与供应给 DE 的电荷对于流过 DE 的串联电流的偏导数相对应。

[0038] 可供选择地,从所述测量结果推导的数据包括在 DE 的电容分量之间的电势差,供应给 DE 的电荷,以及时间。

[0039] 优选地,所述时间、DE 的电容分量之间的电势差以及供应给 DE 的电荷分别被定义为正交的  $x$ -、 $y$ -、以及  $z$ - 轴。

[0040] 优选地,泄漏电流从所述平面方程的第二系数减去 DE 的电容的变化率与 DE 电容分量之间电势差的乘积推导。

[0041] 优选地,利用根据本发明的方法获得的电容的时间关系曲线图,推导 DE 电容的变化率。

[0042] 优选地,所述方法进一步包括通过下列方式估算 DE 的串联电阻 (ESR) :

[0043] 向 DE 供应脉冲宽度调制 (PWM) 周期致动信号 ;

[0044] 在 PWM 致动信号的转变期间,测量 DE 之间电压步进改变以及流过 DE 的电流的步进改变的幅值 ;以及

[0045] DE 之间电压的步进改变除以流过 DE 的电流的步进改变。

[0046] 优选地,估算 DE 的 ESR 进一步包括下列步骤 :

[0047] 记录被估算 ESR 的时间关系曲线图 ;以及

[0048] 从记录的被估算 ESR 的时间关系曲线图,推导 ESR 的近似值,其中所述近似值可以

被用于估算 PWM 致动信号的转变之间的 ESR。

[0049] 优选地,通过确定在 DE 的正极端子与负极端子之间的电压差,测量 DE 之间的电势差。

[0050] 优选地,通过流过 DE 的串联电流对时间的积分,推导供应给 DE 的电荷。

[0051] 优选地,所述方法进一步包括使 DE 的电容与 DE 的物理状态相关的步骤。这可以包括,例如 DE 的一个或多于一个平面面积、厚度和 / 或尺寸的估算。

[0052] 优选地,所述方法进一步包括监控泄漏电流和控制对 DE 系统的输入,以便限制泄漏电流的步骤。

[0053] 优选地,所述方法进一步包括使 DE 的等效串联电阻与 DE 中的应变相关的步骤。

[0054] 优选地,所述方法进一步包括基于所述反馈参数控制 DEA 的致动,从而形成闭环反馈控制系统的步骤。

[0055] 在进一步的方面,本发明大致可以说由用于控制介电弹性体 (DE) 的方法组成,所述方法包括步骤:

[0056] 接收指示 DE 所需要状态的输入信号;

[0057] 根据前述陈述中任意一个所述的方法,获得 DE 状态的估算;以及

[0058] 调整一个或多于一个系统输入,作为对所述输入信号和估算的响应,使得所估算的状态匹配于所需要的状态。

[0059] 在进一步方面,本发明大致可以说由适于执行前述陈述中任意一个所述方法的系统组成。

[0060] 仍在进一步方面,本发明大致可以说由系统组成,所述系统包括:

[0061] 介电弹性体 (DE),其包括由弹性体膜分隔的一对电极;

[0062] 电源装置,其适于向 DE 供应小规模电压振荡;

[0063] 测量装置,其用于测量 DE 之间的电势差和流过 DE 的串联电流;以及

[0064] 通信连接到所述测量装置的计算装置,所述计算装置适于在预先确定的时间段内,从与 DE 的电气性能相关的测量数据推导最佳拟合所述数据、用于平面的方程,以及从所述平面方程的系数推导一个或多于一个反馈参数。

[0065] 优选地,所述测量装置具有比预先确定的时间段的频率更高的采样频率。

[0066] 优选地,所述计算装置进一步适于接收指示 DE 所需要状态的输入信号,以及控制一个或多于一个系统输入,以便基于所述反馈参数,提供 DE 的闭环的反馈控制。

[0067] 优选地,所述计算装置适于对存储的数据执行回归分析,从而在被限定为正交轴时,推导最佳拟合存储数据、用于超平面的方程。

[0068] 优选地,所述反馈参数包括 DE 的电容,等效串联电阻和 / 或泄漏电流中的一个或多于一个。

[0069] 优选地,所述计算装置进一步包适于记录所述反馈参数。

[0070] 通过下列描述,本发明的被认为是新颖的所有进一步方面将变得显而易见。

#### 附图说明

[0071] 本发明的若干实施例将通过例子的方式结合绘图来描述,其中在所述绘图中:

[0072] 图 1 示出根据现有技术的介电弹性体 (DE) 在 (a) 中处于静止,在 (b) 中处于膨胀

状态的示意图；

[0073] 图 2 示出利用根据现有技术的介电弹性体发生器,生成电能的过程示意图；

[0074] 图 3 示出超平面在四维空间的三维表示法；

[0075] 图 4 示出 DE 的电能集中电路模型；以及

[0076] 图 5 示出根据本发明的 DEA 作为简单自我感测电路的示意表示；

[0077] 图 6 示出在 DEA 之间电压 ( $V_{dea}$ ) 上的 ESR 效果；以及

[0078] 图 7 示出流过 DEA 的串联电流 ( $i_S$ )；

[0079] 图 8 示出电容对根据本发明的第二实施例推导的拟合平面的影响,所述电容分别模拟电容 (a) 500pF ;(b) 1000pF ;以及 (c) 1500pF ;

[0080] 图 9 示出非零  $dC/dt$  对根据本发明的第二实施例推导的拟合平面的影响,其中  $dC/dt$  值是 (a)  $-500\%/s$  ;(b)  $0\%/s$  ;以及 (c)  $500\%/s$  ;

[0081] 图 10 示出泄漏电流对根据本发明的第二实施例推导的拟合平面的影响,其中 (a) 零泄漏电流 (即,无限 EPR) ;以及 (b) 250MQ 的等效串联电阻 (EPR) ;

[0082] 图 11 示出泄漏电流和负值  $dC/dt$  对根据本发明第二实施例推导的拟合平面的综合影响,其中 (a)  $dC/dt$  为负值和泄漏电流为零 ;以及 (b) 相同的负值  $dC/dt$ ,结合并联于 DEA 的电容的 250MQ 的 EPR ;

[0083] 图 12 示出泄漏电流和正值  $dC/dt$  对根据本发明第二实施例推导的拟合平面的综合影响,其中 (a)  $dC/dt$  为负值和泄漏电流为零 ;以及 (b) 相同的负值  $dC/dt$ ,结合并联于 DEA 的电容的 250MQ 的 EPR ;

[0084] 图 13 简要示出用于实验验证本发明方法第二实施例的膨胀点 DEA ;

[0085] 图 14 示出估算的等效串联电阻和实际的等效串联电阻 (ESR) 与电压相对在 ESR 和 EPR 的值范围的曲线图,其中所述估算值根据本发明第二实施例推导 ;

[0086] 图 15 示出利用本发明的第二实施例估算的泄漏电流与电压相对,在 ESR 和 EPR 的值范围的曲线图 ;

[0087] 图 16 示出由本发明自我感测方法的第二例子实施例估算的试验 DEA 的电容与关于由视频应变测定计测量的电容的比较 ;

[0088] 图 17 示出由自我感测方法的第二实施例估算的 DEA 的电容与由视频应变测定计估算的电容相对的曲线 ;

[0089] 图 18 示出在 DEA 的估算电容已经根据图 17 所示的关系按比例缩放后,由自我感测方法的第二实施例估算的 DEA 电容与由视频应变测定计估算的电容相对的曲线 ;

[0090] 图 19 示出用于实施本发明的自我感测方法的例子系统的示意性框图。

## 具体实施方式

[0091] 电容、流过介质膜的泄漏电流以及电极的电阻中的每个对于介电弹性体 (DE) 的反馈参数可能都是重要的,其中所述 DE 被用作致动器 (DEA),发生器 (DEG),或传感器。

[0092] 电容可以与电极的瞬时面积以及介质膜的厚度相关。它还允许评估介质内的电场,并且在任何时间点,测量存储在 DE 上的电荷是必要的。泄漏电流是 DE 整体效率的指示器,并且可以被用作健康监测系统的一部分。电极的电阻 (等效串联电阻 -ESR) 在 DE 变形的时候改变,因此,电极以与应变仪相似的方式动作。

[0093] 因此,上述反馈参数的一个或多个于一个知识对于确定或估算 DEA 的状态是有利的。DEA 的“状态”可以被称为例如,DEA 的大小,形状,面积,厚度,尺寸,变形,电场,电荷,效率和 / 或健康。

[0094] 上述反馈参数中的每个(电容,泄漏电流,等效串联电阻)由其他直接或间接影响,因此,在 DE 经受电气和机械刺激的时候,会动态改变。例如,应变与电阻的关系随着时间以及随着应变周期的数量而改变,这是不常见的。不过,很不幸,感兴趣的参数不可以轻易直接测量。

[0095] 根据现有技术,自我感测通常局限于估算 DEA 的电容和电极的等效串联电阻(ESR)。这种自我感测通常通过将高频、低幅值 AC 信号叠加到致动信号的顶部实现。一旦高频信号穿过 DEA,则该高频信号的增益与电容成正比,并且相位延迟与 ESR 相关。不过,对于便携式设备,用于为 DEA 生成致动信号的低功率 DC-DC 转换器通常具有整流输出,并且在再现高频信号时有困难。而且,这样的途径防止电源被用于单独控制多个 DEA;因此,每个自由度会需要自己的电源。如果致动是间歇的,或者,如果普通的操作不需要所有自由度被同时致动,专用电源在体积和重量方面是低效的使用。

[0096] 本发明提供能够实时估算这些关键反馈参数(电容,泄漏电流,以及 ESR)中的任意一个或全部的方法和装置,从而降低假设他们特性的需求,并且通过改善的控制和 / 或检测宽范围的条件,改善 DE 状态反馈的精度。

#### [0097] 第一例子实施例

[0098] 在下面通过例子的方式描述的本发明第一实施例中,本发明的方法包括推导有关四个变量的数据,所述四个变量包括介电弹性体(DE)的三个电气特性以及时间。这四个变量被定义为正交轴,形成一个抽象的四维空间,因此,通过前述数据最佳拟合的平面包括三维超平面。

[0099] DE 的反馈参数可以从用于超平面的方程的系数推导。超平面是  $n$  维空间的  $(n-1)$  维子空间。鉴于  $n$  维空间的坐标系统,其可以由简单的线性方程描述。例如,在三维空间中,具有格式  $z = ax+by+c$  的特性方程的二维平面是超平面(其中  $x, y$ , 以及  $z$  是三维空间中的正交轴,以及  $a, b$  和  $c$  是常数)。在描述本发明优选实施例的描述中使用的术语“超平面”,指的是在四维空间中的三维子空间。“超平面”的特性方程具有格式  $z = ax+by+cw+d$  (其中  $x, y, z$ , 和  $w$  是四维空间中的正交轴,而  $a, b, c$ , 和  $d$  是常数)。

[0100] 虽然在四维空间中的三维超平面不可以轻易示出,但是图 3 提供描述超平面这个概念在四维空间中的三维表示法。在三维曲线图中,超平面的  $X, Y$  和  $Z$  维度被示为正交轴并且该超平面在四个维度 ( $W$ ) 中离散。同样,在二维度中利用二维轮廓曲线表示三维表面(其中  $X, Y$  和  $Z$  是正交轴),例如  $X$  和  $Z$  在正交轴上示出,以及在轮廓曲线图上的各个线条表示离散的  $Y$  值。

[0101] DE 的电集中电路模型在图 4 中示出。DE 可以被表示为或建模为与可变电阻 ( $R_{EPR}$ , 表示 DE 的等效并联电阻) 并联的可变电容 ( $C$ ), 这两个分别与另一个可变电阻 ( $R_{ESR}$ , 表示 DE 的等效串联电阻) 串联。

[0102] 可以被轻易测量的 DE 的电气性能是作为整体的 DE 之间的电压  $V_{DE}$  (即, DE 的端子之间, 与由电容  $C$  表示的电极 12 之间的电势差相反), 以及流过 DE 的串联电流 ( $i_s$ )。

[0103] 电容之间的电压 ( $V_C$ ) 是 DE ( $V_{DE}$ ) 之间的电压减去流过 DE 的串联电流 ( $i_s$ ) 与电极

( $R_{EPR}$ ) 的 ESR 的乘积, 如方程 1 所示。

$$[0104] \quad V_c = V_{DE} - i_s R_{ESR} \quad (1)$$

[0105] 流过 DE 的电流 ( $i_s$ ) 等于流过电容元件的电流 ( $i_c$ ) 与流过 EPR 的泄漏电流 ( $i_{EPR}$ ) 的总和 (方程 2)。

$$[0106] \quad i_s = i_c + i_{EPR} \quad (2)$$

[0107] 本发明通过重复测量和推导 DE 的特定电气性能的数据, 推导电容 (C)、泄漏电流 ( $i_{EPR}$ , 在 DE 的模型中, 流过等效并联电阻  $R_{EPR}$  的电流), 以及等效串联电阻 ESR ( $R_{ESR}$ ), 通过所述数据推导用于最佳拟合超平面的方程, 以及从所述超平面的系数推导 DE 的反馈参数。

[0108] 当小规模、高频振荡信号被用于引导在 DE 之间电压中的振荡时, 横跨大于或等于该信号振荡成分的周期的时间段内的反馈数据的窗口可以被用于确定 DE 反馈参数。本发明不限于振荡信号的任何特定波形。合适的波形包括但不限于, 例如, 方波, 正弦波, 三角波, 或锯齿波。

[0109] 该方法的第一步是获得和记录电势差或 DE 之间的电压 ( $V_{DE}$ ), 以及在短时间窗口流过 DE 的串联电流 ( $i_s$ )。该时间窗口相对于 DE 的机械和电气时间常数来说应当是短的。设置对应于叠加在 DE 之间电压的小规模振荡周期的窗口长度是便利的。

[0110] 在时间段内的各个时间, 提取 DE 的电压  $V_{DE}$  和串联电流  $i_s$  的测量结果。从稍后的测量结果, 也可以推导并记录在时间段上输入到 DE 的电荷 ( $Q_{input}$ ) (即, 串联电流  $i_s$  在时间段上的积分)。

[0111] 优选地, 该测量结果以比时间窗口的频率更高的采样率提取, 以便给出在每个时间窗口期间的多个数据点。

[0112] 可以看出, 在相对 DE 的电气和机械时间常数是短的时间段上, 输入到 DE 的电荷 ( $Q_{input}$ ) 等于电流在  $t = 0$  与  $t = t_a$  (等效于  $Q_c(t_a)$ , 在  $t = t_a$  时, 电容上的电荷减去  $Q_c(0)$ , 在  $t = 0$  时的电荷) 与  $Q_{leakage}(t_a)$  之间流过 DE 容性元件的积分总和, 泄漏电流  $i_{EPR}$  在时间  $t = 0$  与  $t = t_a$  之间关于时间的积分 (方程 3)。

$$[0113] \quad Q_{input}(t_a) = Q_c(t_a) - Q_c(0) + Q_{leakage}(t_a) \quad (3)$$

[0114] 由于短的时间段, C 可以使用第一阶近似建模, 即, 可以假设  $dC/dt$  是常数。如果窗口周期的  $V_c$  峰-峰电压幅值足够小, 泄漏电流 ( $i_{EPR}$ , 等效于  $dQ_{leakage}/dt$ ) 可以被假设为常数。将这些假设应用到方程 3 中, 鉴于 C 和  $V_c$  表示的电荷, 产生方程 4。

$$[0115] \quad Q_{input}(t_a) = C(t_a)V_c(t_a) - C(0)V_c(0) + \left(\frac{dQ_{leakage}}{dt}\right)t_a \quad (4)$$

[0116] 在方程 4 右侧的第一项中的术语  $V_c$  可以由合并 ESR 依赖项的等效术语替代, 即  $V_c$  变成  $V_{DE} - i_s R_{ESR}$ , 产生方程 5。

$$[0117] \quad Q_{input}(t_a) = C(t_a)V_{DE}(t_a) - C(t_a)i_s(t_a)R_{ESR}(t_a) - C(0)V_c(0) + \left(\frac{dQ_{leakage}}{dt}\right)t_a \quad (5)$$

[0118] 因此, 不需要 DE 的电容分量之间的电压 ( $V_c$ ), 可以使用 DE 自身之间的电压 ( $V_{DE}$ )。  $V_{DE}$  是电路的电气特性, 可以被轻易测量, 不像  $V_c$ 。

[0119] 方程 5 描述在  $t = t_a$  的时间点, DE 的电气参数之间的关系。

[0120] 如果  $t$ 、 $V_{DE}$ 、 $i_s$ , 以及  $Q_{input}$  被定义为 4D 空间的正交轴, 当相对这些轴绘制曲线时, 可以发现多个被记录的数据点都落在三维超平面上, 或毗邻于三维超平面。优选地, 大量数据点被记录, 以便有充分条件确保平面拟合。不过, 在特定应用中, 相对小的数据点数量 (最

少是四)是可接受的。对于特定应用,数据点的适当数量(以及由此产生的测量结果的采样率)对于本领域的技术人员来说是显而易见的。

[0121] 利用可用数据点连续拟合超平面的重要部分是被引入到 DE 之间电压中的振荡。没有充电/放电振荡,  $Q_{input}$ 、 $V_{DE}$  以及数据会在 4D 空间中崩溃成直线或 2D 平面。该系统会变得欠定的,因此,发现通过所有数据点的唯一超平面是不可能的。这会导致平面拟合过程失效,并且阻止精确确定 DE 的电气特性。

[0122] 超平面的系数可以被估算,并且与 DE 的所有三个主要反馈参数相关。例如,回归可以被用于发现最佳表示  $t$ 、 $V_{DE}$ 、 $i_s$  和  $Q_{input}$  的被记录数据点(即,最佳拟合超平面)。而且可供选择地,在没有偏离本发明范围的情况下,可以使用用于估算超平面系数的其他方法。在本文中使用的术语“最佳拟合超平面”仅仅指的是电势差、电流、电荷和时间的 4D 曲线中的至少大多数的数据点位于或毗邻于超平面,通过无论采用什么方法推导的平面提供的沿每个轴的平面梯度或斜率与沿相同轴的数据点的“斜率”相对应。

[0123] 通过记录的数据点形成的超平面的系数等效于  $Q_{input}$ (方程 5) 对于  $t$ 、 $i_s$  和  $V_{DE}$  的偏导数。就是说,与超平面方程的每个变量 ( $t$ ,  $V_{DE}$ ,  $i_s$ , 以及  $Q_{input}$ ) 关联的系数表示超平面沿相应的轴的斜率。假设每个数据点落在超平面上,这些斜率等效于前述方程 5 的偏导数,并且 DE 的反馈参数可以如下所述从超平面系数推导。

[0124] 参考方程 5,可以假设  $dR_{ESR}/dt$  是常数,以及  $dC/dt$  和  $dQ_{leakage}/dt$  在短时间段或窗口内的相关测量结果。项  $C(0)V_c(0)$  是常数,因此,没有出现在偏导数上。

[0125]  $Q_{input}$  关于  $V_{DE}$ (等效于超平面方程的第一系数)的偏导数是 DE 在反馈窗口周期上的标称电容 ( $C$ , 方程 6,为了清晰起见,省略了时间指数);  $Q_{input}$  关于  $i_s$  的偏导数(等效于被称为超平面方程的第三系数)被  $C$  除,是电极在反馈窗口周期的标称 ESR ( $R_{ESR}$ , 方程 7,为了清晰起见,省略了时间指数);以及  $Q_{input}$  关于  $t$  的偏导数(等效于被称为超平面方程的第二系数)是电容变化率、电极 ESR 的变化率以及泄漏电流的标称总和效果(方程 8,为了清晰起见,省略了时间指数)。

$$[0126] \quad \frac{\partial Q_{input}}{\partial V_{DE}} = C \quad (6)$$

$$[0127] \quad \frac{\left( \frac{\partial Q_{input}}{\partial i_s} \right)}{C} = -R_{ESR} \quad (7)$$

$$[0128] \quad \frac{\partial Q_{input}}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial t} V_{DE} - \left( \frac{\partial C}{\partial t} R_{ESR} + C \frac{\partial R_{ESR}}{\partial t} \right) i_s + \frac{\partial Q_{leakage}}{\partial t} \quad (8)$$

[0129] 因此,DE 的电容  $C$  的近似值或估算值可以直接从最佳拟合超平面沿电压轴  $V_{DE}$ (关于  $Q_{input}$  轴)的斜率推导,即,在定义最佳拟合超平面的方程中的电压变量的系数。

[0130] 类似地,DE 的等效串联电阻  $R_{ESR}$  的近似值可以从超平面沿串联电流  $i_s$  轴的斜率(关于  $Q_{input}$  轴)除以之前的电容  $C$  近似值推导。

[0131] 利用方程 6 和 7 计算的  $C$  和  $R_{ESR}$  的时间关系曲线图可以被分别用于计算  $dC/dt$  和  $dR_{ESR}/dt$ (假设两者是常数),其可以被用于识别方程 8 的各项,尤其是泄漏电流  $i_{EPR}$ ,其等效于最后项  $dQ_{leakage}/dt$ 。

[0132] 相对于下面描述的第二实施例和 / 或现有技术, 本发明的这个实施例具有几个优势, 其包括下列所述的一个或多个:

[0133] 1. 超平面拟合过程利用单级数学过程实现;

[0134] 2. 对用于在 DE 之间的电压中生成小规模振荡的波形的要求没有那么迫切。就是说, 该方法不是必然地需要 PWM 电源, 从而提供在硬件设计方面的更大灵活性;

[0135] 3. 电容直接从拟合超平面的可用数据获得; 以及

[0136] 4. 所述过程对于噪音具有低灵敏度, 这是因为:

[0137] a. 串流电流的积分 (获得  $Q_{input}$ ) 用作低通过滤串流电流反馈数据的手段。其中所述噪音具有零平均值, 积分起衰减信号的噪音分量的作用; 以及

[0138] b. 利用回归, 以便使用所有可用的数据将平面拟合到可用的数据。其不依赖在时间上稍纵即逝的任何一个数据点, 因此, 杂散的数据点对被估算参数的影响被最小化。

[0139] 利用最少的二乘回归过程也提供了用于评估常数  $dR_{ESR}/dt$ 、 $dC/dt$  和  $dQ_{leakage}/dt$  假设的有效性的机制。如果假设是有效的, 那么回归过程的残留将是很小的。大的残留指示一个或多个假设不满足。

[0140] 第二例子实施例

[0141] 根据下面通过进一步例子的方式描述本发明方法的第二实施例, 该方法包括推导关于三个变量的数据, 所述三个变量包括介电弹性体 (DE) 的两个电气特性和时间。这三个变量被定义为正交的 x 轴、y 轴和 z 轴, 形成三维空间, 因此, 通过包括平面的数据最佳拟合平面。

[0142] 本发明的第二例子将在下面描述有关介电弹性体致动器 (DEA) 系统的方法的应用。不过, 该方法可以被类似应用为介电弹性体发生器或传感器。

[0143] DEA 系统使用输入电流 (致动信号) 的脉冲宽度调制 (PWM) 控制同时致动 DEA, 并向 DE 电极之间的电压差引入小规模振荡。这使得在 DEA 被致动的时候, DEA 的电容、通过介质膜的等效并联电阻 (EPR) 的泄漏电流以及电极的等效串联电阻 (ESR) 被动态估算。PWM 任意兼容于数字计算机, 并使得单电源被设置为固定的电压, 并用于同时向多个独立的 DEA 供电。

[0144] 通过使 PWM 信号的周期相对于 DEA 的机械和电气常数足够小, 控制该信号的占空比, 则控制 DEA 之间的平均电压, 其支配致动的程度。同时, PWM 信号的快速切换这个电压引入小规模振荡。因此, 这个方法明确说明电极电阻的动态变化, 在高电场时介质膜的传导变化, 以及在 DEA 被致动和 / 或松弛的时候, 由于 DEA 的电容的变化率, 电流被感应。

[0145] 虽然公开的第二例子实施例的方法和装置 / 系统包括了 PWM 电源, PWM 不是本发明的必要特征。可供选择地, 可以使用任何其他时间改变信号, 例如叠加高频振荡信号的振幅调制致动信号允许 DEA 的电容和泄漏电流的感测。应当明白, 本发明的平面拟合方法可以被用于加强许多现有的或未来的自我感测方法, 例如至少由 Keplinger 等人所公开的那样。不过, PWM 电源至少在本发明的第二例子实施例中提供若干优势。

[0146] 正如之前第一例子实施例所描述的, 测量流过 DEA 的串联电流  $i_s$  以及在 DEA 的正极端子与负极端子之间的电压或电势差  $V_{DEA}$  是必要的。再次参考图 4, DEA 可以被建模为并联连接可变电阻 ( $R_{EPR}$ ) 的可变电容 (C), 这两者串联连接另一个可变电阻 ( $R_{ESR}$ )。

[0147] DEA 系统的示意图在图 5 中示出, DEA50 由图 4 的虚线框中的模型组件表示。

[0148] 优选地,DEA 系统的电源是经由高压、高速光耦合器连接到 DEA 的高压 DC-DC 转换器。从 DC-DC 转换器经由 PWM 开关到 DEA 的电流与光耦合器的输入电力流成正比。因此,DC-DC 转换器和光耦合器一起相当于电流源 ( $I_{source}$ )。PWM 信号用于控制光耦合器的输入电流。30k $\Omega$  固定电阻 ( $R_s$ ) 被用于测量流过 DEA 的串联电流 (通过测量电压  $V_1$  和施加欧姆定律),以及 100M $\Omega$ :120k $\Omega$  { 分别是  $R_{p1}$  和  $R_{p2}$  } 的梯形电阻 (分压器) 被用于测量在 DEA50 正极端子的电压  $V_2$ ,并为 DEA 提供被动的放电路径。

[0149] 不像上述的本发明第一例子,这个第二例子的方法需要有关 DEA 电容成分之间电势差  $V_C$  的数据,供应给 DEA 的电荷 ( $Q_{input}$ ) 以及从上述测量结果推导的时间 ( $t$ )。

[0150] 通过在正交轴上标绘供应给 DE 的电荷 ( $Q_{input}$ )、DE 电容成分之间的电压 ( $V_C$ ),以及时间  $t$ ,将第一例子实施例的超平面降低到拟合在 3D 空间中标绘的数据的 2D 平面是可能的。

[0151] 在 ESR 是明显的时候,从 DEA 之间的电势差 ( $V_{DEA}$ ) 减去 ESR 之间的电势差 ( $V_{ESR}$ ),以便确定 DEA 的电容成分之间的电势差 ( $V_C$ ) 是必要的如方程 9 所示。

$$[0152] \quad V_C = V_{DEA} - V_{ESR} \quad (9)$$

[0153] 例如,如果传递给 DE 的电源使用脉冲宽度调制 (PWM) 控制,则等效串联电阻 RESR 可以在 PWM 信号在高于低状态之间转变的时间点被估算。流过 DE 的串联电流的步进改变像 PWM 信号的转变一样,从而导致 DE 之间电压的步进改变。因为 DE 之间电容成分的电压  $V_C$  不可以立即改变,RESR 等于 DE 之间电压  $V_{DE}$  步进改变的幅值除以在 PWM 信号转变时流过 DE 串联电流  $i_s$  的步进改变的幅值。通过记录被计算的电阻值的时间关系曲线图,RESR 关于时间的第  $n$  阶近似值可以被用于估算在 PWM 转变的时间点时的电极电阻。

[0154] 可供选择地,在没有偏离本发明范围的情况下,可以使用用于感测 DEA 的 ESR 的其他方法。例如,如果 PWM 输入信号的回转速度受到限制,通过考虑 PWM 信号转变的两个短时间段 (图 6 和 7 中的片段 1 和片段 2),ESR 可以被感测。片段 1 仅在 PWM 输入信号周期的启动之前开始,并且在 PWM 周期的启动结束。片段 2 从片段 1 的终点继续,在 PWM 周期的启动开始,并且在 PWM 输入信号一旦达到其峰值时结束。片段 1 开始的时间是  $t_i$ ,片段 1 结束 / 片段 2 开始的时间是  $t_{ref}$ ,以及片段 2 结束的时间是  $t_f$ 。当 ESR 是可忽略不计时, $V_{DEA} \approx V_C$ ,并且  $V_{DEA}$  展示出在片段 2 期间,从放电到充电的平滑转变,如图 6 所示 (虚线)。不过,所有其他的是常数,在  $t = t_{ref}$  时,明显的 ESR 将间断或尖角引入到电压波形,也如图 6 所示 (实线)。在 ESR 增加的时候,这种间断变得更加明显,即尖角变得尖锐。

[0155] 在  $t_1 < t < t_2$  时,通过假设 ESR 是常数,通过变换  $V_{DEA}$  以消除该间断,ESR 可以被估算。这需要执行四个曲线拟合操作。通过使 PWM 信号的周期比系统的电气时间常数短,在片段 1 期间流过 DEA 的串联电流 ( $i_s$ ) 和 DEA 之间的电势差 ( $V_{DEA}$ ),以及片段 2 期间流过 DEA 的串联电流 ( $i_s$ ) 被线性近似,如图 6 和 7 所示 (方程 10-12)。假设  $R_{EPR}$  和电容关于时间的导数在特定的时间点都是常数,施加斜坡输入电流 (即,在 PWM 输入中受限的回转率),导致  $V_{DEA}$  画出沿时间维度的抛物线。因此,在片段 2 期间, $V_{DEA}$  需要第二阶拟合 (方程 13)。

$$[0156] \quad i_{s(Part1)} = m_{i1}t + c_{i1} \quad (10)$$

$$[0157] \quad V_{DEA(Part1)} = m_{v1}t + c_{v1} \quad (11)$$

$$[0158] \quad i_{s(Part2)} = m_{i2}t + c_{i2} \quad (12)$$

$$[0159] \quad V_{DEA(Part2)} = a_2t^2 + a_1t + a_0 \quad (13)$$

[0160] 将拟合曲线代入方程 9 (产生方程 14 和 15), 在片段 1 期间  $V_c$  关于时间的导数必须等于在片段 2 期间在  $t = t_{ref}$  时,  $V_c$  关于时间的导数, 以便消除间断。因此, 通过使在片段 1 和在  $t = t_{ref}$  时的片段 2 期间,  $V_c$  对于时间的导数相等, 可以推导出如在方程 16 中示出  $R_{ESR}$  的方程。

$$[0161] \quad V_{c(Part1)} = (m_{v1}t + c_{v1}) - (m_{i1}t + c_{i1})R_{ESR} \quad (14)$$

$$[0162] \quad V_{c(Part2)} = (a_2t^2 + a_1t + a_0) - (m_{i2}t + c_{i2})R_{ESR} \quad (15)$$

$$[0163] \quad R_{ESR} = \frac{m_{v1} - 2a_2t_{ref} - a_1}{m_{i1} - m_{i2}} \quad (16)$$

[0164] PWM 信号的有限回转率提供从放电到充电和反之亦然平滑转变。这消除了开关噪音, 并且确保  $V_c$  对于时间是连续的函数, 从而能够估算  $R_{ESR}$ 。通过求解联立方程, 将原始数据拟合到最小二乘的方程 13 的系数可以被发现, 这可以通过简单的方式, 例如使用克莱姆法则实现。这个过程在实际应用中也是很方便的, 这是因为可以预先计算许多必要的总数, 并且在每个数据点不可以被更新的那些总数变得可用。

[0165] 一旦等效串联电阻是已知的或估算的, 通过上述方法中的任意一个或任何其他备选方法, 可以根据本发明第二例子实施例的方法计算 DEA 的电容。

[0166] 参考表示 DEA50、在图 5 中的子电路, 电容之间的电压 ( $V_c$ ) 是 DEA50 之间的电压 ( $V_{DEA}$ ) 减去流过 DEA 的串联电流 ( $i_s$ ) 与电极的 ESR ( $R_{ESR}$ ) 的乘积, 如方程 17 所示 (从方程 9 推导)。

$$[0167] \quad V_c = V_{DEA} - i_s R_{ESR} \quad (17)$$

[0168] 流过 DE 子电路的串联电流 ( $i_s$ ) 等于流过电容元件的电流 ( $i_c$ ) 与流过 EPR 的泄漏电流 ( $i_{EPR}$ ) 的总和 (方程 18)。

$$[0169] \quad i_s = i_c + i_{EPR} \quad (18)$$

[0170] 当小规模、高频振荡信号被叠加在供应给 DEA 的致动信号上时, 横跨该信号振荡成分一个或多个周期的反馈数据的窗口可以被用于确定 DEA 的电容 ( $C$ ) 和泄漏电流 ( $i_{EPR}$ )。PWM 用于生成致动信号的振荡成分, 不过如果  $V_c$  是已知的, 在没有偏离本发明范围的情况下, 生成周期性振荡的其他方法可以被用于确定  $C$  和泄漏电流。

[0171] 设置与 PWM 信号的周期相对应的反馈数据的窗口的宽度是方便的。在窗口的开始, 我们定义时间 ( $t$ ) 和存储在 DEA 上的电荷 ( $Q$ ) 是零。如同在第一例子中一样, 在时间  $t_a$  输入给 DEA 的电荷  $Q_{input}(t_a)$  由方程 3 和 4 限定。

[0172]  $t$ 、 $V_c$ 、和  $Q_{input}$  数据形成的 2D 平面的系数等于方程 4 中  $Q_{input}$  对于  $t$  和  $V_c$  的偏导数。就是说,  $Q_{input}$  关于  $V_c$  的偏导数 (第一系数) 是电容 ( $C$ ) (方程 19, 为了清晰起见, 省略时间指数)。  $Q_{input}$  关于时间的偏导数 (第二系数) 是电容改变率 ( $V_c \cdot \partial C / \partial t$ ) 与流过介质的泄漏电流 ( $\partial Q_{leakage} / \partial t$ ) 的综合效应 (方程 20, 为了清晰起见, 省略时间指数)。

$$[0173] \quad \frac{\partial Q_{input}}{\partial V_c} = C \quad (19)$$

$$[0174] \quad \frac{\partial Q_{input}}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial t} V_c + \frac{\partial Q_{leakage}}{\partial t} \quad (20)$$

[0175] 因此, DEA 的电容  $C$  的近似值或估算值可以从最佳拟合 2D 超平面沿电压轴 (关于

$Q_{\text{input}}$  轴)的斜率推导,即  $Q_{\text{input}}$  关于  $V_c$  的偏导数(方程 19)。

[0176] 有限差可以被用于评估  $\partial C/\partial t$  即,通过确定  $C$  在短时间段  $t$  的两个计算的斜率,近似  $\partial C/\partial t$ , 并且这个可以被代入方程 20, 由于代入电容以及串联电流  $i_s$  流过 DEA 的泄漏电流  $i_{\text{EPR}}$ , 以分隔出感应的电流  $i_c$ 。因此,可以从沿最佳拟合平面的时间轴的斜率推导泄漏电流  $i_{\text{EPR}}$  (等效于流过介质膜的斜率电荷  $Q_{\text{leakage}}$  对于时间的导数), 即, 定义最佳拟合平面的方程的第二系数(方程 20)。

[0177] 利用回归,可以发现以最小二乘法最佳拟合可用数据的 2D 平面,不过可供选择地,在没有偏离本发明范围的情况下,可以使用其他的方法,并且用于上下文中的术语“最佳拟合平面”指的是 3D 空间中的 2D 平面,其通过定义在电势差和电荷关于时间的曲线中的至少大多数测量点位于或毗邻的平面确定,通过无论采用什么方法推导的平面提供的沿两个轴的平面梯度或斜率与数据点的斜率相对应,正如下面在图 8-12 中描述的一样。

[0178] 平面方程可以被生成格式  $f(x, y) = a_1x + a_2y + a_3$ , 其中  $t$ ,  $V_c$  和  $Q_{\text{input}}$  分别表示  $x$ 、 $y$  和  $f(x, y)$ 。因此,在一般情况下,通过求解在方程 21 中的该组线性方程,可以发现定义最小二乘解的  $a_1$ 、 $a_2$  和  $a_3$  的值。

$$[0179] \quad Ma = b \quad (21)$$

$$M = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n t_j^2 & \sum_{j=1}^n t_j V_{c,j} & \sum_{j=1}^n t_j \\ \sum_{j=1}^n t_j V_{c,j} & \sum_{j=1}^n V_{c,j}^2 & \sum_{j=1}^n V_{c,j} \\ \sum_{j=1}^n t_j & \sum_{j=1}^n V_{c,j} & \sum_{j=1}^n 1 \end{bmatrix}, a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n t_j Q_{\text{input},j} \\ \sum_{j=1}^n V_{c,j} Q_{\text{input},j} \\ \sum_{j=1}^n Q_{\text{input},j} \end{bmatrix}$$

[0180] 对于一组三个未知数三个方程,这个线性方程组可以通过应用克莱姆法则以简单的方式来解决。其中  $i = \{1, 2, 3\}$ , 未知变量  $a_i$ , 可以利用方程 22 发现,其中  $M_i$  是通过将  $M$  的第  $i$  列以列向量  $b$  代入组成的矩阵。

$$[0181] \quad a_i = \frac{\det(M_i)}{\det(M)} \quad (22)$$

[0182] 正如第一例子所述,在 DEA 之间电压中的振荡对于避免  $Q_{\text{input}}$ 、 $V_c$  和  $t$  数据在 3D 空间中崩溃成直线是很重要的,因此,难以发现精确的最佳拟合平面。利用该振荡,产生两个非共线数据线,因此,唯一的平面可以被拟合到可用的数据点。

[0183] 为了进一步描述本发明的这个第二实施例,利用 3D 图形描述 DEA 的电气参数的影响是方便的。利用 MathWorks 公司的 MATLAB 软件产生图 5 的简单驱动电路的数值仿真,以便说明 DEA 的电气参数对拟合平面的特征方程的影响。

[0184] 利用该仿真,在操作条件的范围内,生成在该电路的  $V_1$  和  $V_2$  节点的电压时间关系曲线图。利用这个数据,再产生 DEA 之间的电压  $V_{\text{DEA}}$  和流过 DEA 的电流  $i_s$ 。接着,电极电阻  $R_{\text{ESR}}$  之间的电压降被估算,并从 DEA 之间的总电压  $V_{\text{DEA}}$  减去所述电压降,以便发现 DEA 电容分量的电压  $V_c$ 。接着,时间  $t$ 、电容之间的电压  $V_c$ 、以及串流电流  $i_s$  的积分  $Q_{\text{input}}$  被标绘在 3D 空间中,并且最佳拟合的 2D 平面覆盖在数据点上。使用克莱姆法则的回归被用来估算各种条件下用于拟合平面的方程。

[0185] 图 8 示出电容改变对拟合平面的影响。泄漏电流和  $dC/dt$  被设置为零,以及分别仿真了 500pF、1000pF 和 1500pF (图 8(a)-(c))。增加的电容用以增加拟合平面沿电压轴方向的斜率。这是直观的,为了实现电压给定的变化,电容越大,在电容上的电荷变化必须越

大。下面的每个图形是数值仿真的结果： $(\partial Q/\partial V)_{\text{plane}}$  是拟合平面在电压轴方向的斜率， $C_{\text{nom}}$  是 DEA 在示出的 5ms 时间段的实际标称电容； $(\partial Q/\partial V)_{\text{plane}}$  是拟合平面在时间轴方向的斜率； $(VdC/dt)_{\text{nom}}$  是 DEA 的电容分量之间标称电压与 DEA 在示出的 5ms 时间段的标称电容变化率的乘积；以及  $(dQ_{\text{leakage}}/dt)_{\text{nom}}$  是在示出的 5ms 时间段的标称泄漏电流。

[0186] 在图 9 中，示出非零  $dC/dt$  的效果。泄漏电流  $i_{\text{EPR}}$  被设置为零。初始电容  $C$  被固定在 1000pF，并且在施加不变的  $dC/dt$  之前，允许电路达到稳定状态。在干扰被施加后，绘图所用的数据来自第一 PWM 周期。示出的  $dC/dt$  的值分别是 (a)  $-500\%/s$ ；(b)  $0\%/s$ ；以及 (c)  $500\%/s$ 。因为泄漏电流是零，在电容  $C$  上沿相等电压线的总电荷  $Q$  的任何变化必须是由于电容的变化。就是说，当电容已经改变，由于电容之间的电压保持相同，电荷必须流到电容或从电容离开。因此，这个影响拟合平面沿时间轴的方向的斜率。当电容  $C$  降低时，斜率降低，并且当电容  $C$  增加时，该斜率增加。通过拟合曲线的斜率预测的电容与示出时间段的实际标称值之间的小误差是对  $C$  和  $Q_{\text{leakage}}$  做出的第一阶近似的人工产物。不过，即使  $dC/dt$  的非常高绝对值 ( $\pm 500\%/s$ )，这个误差小于 0.5%。而且，由于电容改变而感应的标称电流仍然被精确估算。

[0187] 在图 10 中，说明泄漏电流  $i_{\text{EPR}}$  的效果。初始电容  $C$  被固定在 1000pF，并且在 250MQ 的 EPR 被连接在电容之间之前，允许电路达到稳定状态。用于电路的数据 (a) 零泄漏电流（即，无限 EPR）；以及 (b) 具有示出的 250MQ EPR，逐个比较。考虑到等压线，当给系统的干扰仅仅是泄漏电流时，为了使电容电压保持不变，电荷必须继续在电容上流动。这是显而易见的；在 DEA 的端子之间存在电阻路径，因此，当 DEA 的端子之间存在电势差时，持续电流将流过 DEA。如方程 20 所示，泄漏电流也起改变拟合平面沿时间轴的方向的斜率的作用。由于 DEA 的线性化，估算的与实际的电容之间存在小误差，但是通过平面拟合过程，泄漏电流被精确估算。

[0188] 如图 9 和 10 所述，泄漏电流  $i_{\text{EPR}}$  和  $dC/dt$  两者体现拟合平面沿时间轴的方向的斜率的变化。在图 11 (b) 中，示出泄漏电流和负值  $dC/dt$  的综合影响用于与下一个图 11 (a) 中没有泄漏电流的相同  $dC/dt$  值的曲线作比较。在图 12 (b) 中，示出泄漏电流  $i_{\text{EPR}}$  和正值  $dC/dt$  的综合影响用于与下一个图 12 (a) 中没有泄漏电流的相同  $dC/dt$  值的曲线作比较。两种现象以相同的方式体现最佳拟合平面。不过，由于电容  $C$  可以从平面沿电压轴的方向的斜率计算， $dC/dt$  可以利用  $C$  的时间关系曲线图和有限差估算。因此，这可以被用于将泄漏电流和电容改变的效果分开。在高  $dC/dt$  值和泄漏电流两者的综合影响下，被估算电容的误差轻微增加，但是仍然是小的，并且拟合平面沿时间轴方向的斜率仍然精确估算由于电容改变感应的电流和泄漏电流的综合影响。

[0189] 上述方法的实验验证的结果也在图形中示出，以便进一步说明本发明。利用标称固定值组件构建几个试验 DEA 电路，以便验证自我感测系统的 ESR 和泄漏电流估算方面。该电路由高电压电容和表示 DEA 的 ESR 以及 EPR 的一系列电阻组成。这使得该电路能够被分解为它的构成部件，以便他们可以被单独试验。高电压陶瓷电容的未知电压相关性妨碍了它在验证电容估算中的使用。相反，膨胀点 DEA 被用于评估电容感测的性能。基于利用视频反馈测量的电极面积的变化，被估算的电容与期望的电容作比较。

[0190] 一般被指示为 80、在图 13 中简要示出的膨胀点 DEA（不按比例）由 VHB4905 构造，

所述 VHB4905 是 3M 公司的普通 DEA 膜材料,其被预拉伸 16 次,并被键合到刚性支撑结构 81。该结构具有 130mm 的直径,以及内圆孔。在被拉伸的膜的中心,可以利用 Nye 润滑油公司的 Nyogel 756 导电碳装油脂、直径为 50mm 的圆形电极 82 被施加到膜的反面。Nyogel 756 导电轨 83 也被从电极区域向外径向施加到可以被连接到外部线路的支撑结构的边缘点。

[0191] 在施加致动电压后,电极 82 的面积快速膨胀。为了施加干扰的目的,第二独立 DEA84 在 VHB 膜的周长的周围形成图案。激活松弛的第二 DEA 在膨胀点周长周围膜的径向张力,导致其收缩,直到发现静电与机械力之间的新平衡。

[0192] ESR 的四个值(无电阻,225kQ,447kQ,以及 675kQ)和 EPR 的三个值(无电阻,300MQ,以及 150MQ)的每个组合被试验,以便估算该系统的 ESR 和泄漏电流估算能力。每个试验电路经受与平均电压为 500-2500V、以 500V 步进相对应的占空比。

[0193] 该膨胀点 DEA 被用于评估电容的估算值。为了测量其剩余电容(C0),10MQ 电阻被连接在 DEA 的负极端子与地线之间,并且低压三角波(在 0.8Hz,峰峰值为 20V)被施加到 DEA 的正极端子。利用流过 10MQ 电阻的电流的幅值对输入电压变化率的比率,计算电容(方程 23)。照相机用于测量当没有电压施加到 DEA 时的电极的面积。这个测量结果与方程 24 的瞬时电容相关,所述用作参考面积的测量结果使得 DEA 的面积拉伸( $\lambda$ )能够被估算。

$$C = \frac{I}{\left(\frac{dV}{dt}\right)} \quad (23)$$

$$C = C_0 \lambda^2 \quad (24)$$

[0196] 对于高电压试验,DEA 被连接到图 5 的自我感测电路。当光耦合器接通时,电流源经配置供应 95uA,以及当光耦合器关断时,电流源供应 0uA。200Hz PWM 信号用于控制光耦合器的输入电流。DEA 最初经受 PWM10%的占空比,直到达到稳定状态。接着,每 10 秒增加 1%。正弦波干扰信号(在 0.1Hz,0-2000V)被同时施加到被拉伸膜的周长周围形成图案的第二 DEA。在以 30%的占空比对 DEA 施加 10 秒后,该实验完成。电极的拉伸面积使用视频应变测定仪测量,并且所述电极的拉伸面积被用于估算电容。这与利用自我感测估算的电容作比较。

[0197] 图 14 示出 ESR 估算的实验验证。线条指示 ESR 的真实值,以及数据点指示 ESR 的估算值。每个 ESR 值有三组数据:每一个用于三个 EPR 值中的每个。

[0198] 自我感测方法使用未知电压的陶瓷电容估算 ESR 和泄漏电流估算能力的试验 DEA 电路取决于电容。尽管这个,实现 ESR 和泄漏电流两者的精确估算。如图 14 所示,ESR 的估算展示出对那些可能被施加到 DEA 的电压范围的可以忽略不计的电压依赖性。而且,被估算的 ESR 展示出对泄漏电流的幅值的不明显依赖性。

[0199] 图 15 示出泄漏电流估算的实验验证。所示线条指示预测的泄漏电流,其基于试验 DEA 电路的电容元件之间的电压和并联的 EPR 值。数据点指示用于泄漏电流的估算值。每个 ESR 值有四组数据:每一个用于四个 EPR 值中的每个。

[0200] 从图 15 可以看出,在施加电压的范围上, $R_{EPR}$ 值范围的泄漏电流被精确估算。而且,ESR 对于泄漏电流的精确估算具有可以忽略不计的影响。这加强了 ESR 的精确估算;泄漏电流的估算需要  $R_{EPR}$ 之间电压的精确估算。

[0201] 图 16 示出通过自我感测过程估算的电容与测量的电容的形状具有非常好的一致性。在两个电容之间存在很小比例的偏移（或增益误差），不过图 17 示出估算值与测量结果之间存在线性关系，即，简单的验证例程合并所述两个线条，如图 18 所示。这是特别重要的，这是因为即使当 DEA 经受外部干扰时，仍然实现这个线性关系，因此，观察到的偏移不是自我感测电路固有特性的产物。

#### [0202] 本方法的实际应用

[0203] 因此，本发明提供 DE 的三个关键参数中任意一个或多个的精确反馈，其依次提供 DE 状态的改善的反馈。

[0204] 泄漏电流可以至少提供关于 DE 效率的措施，并且可以提供预测和保护介质击穿（DE 的主要失效模式）的机制。当 DEA 经受介质击穿时，高度集中的泄漏电流是对 DEA 不可逆转损坏的最终原因。

[0205] 考虑到当 DE 变形时，其电气参数可以明显改变，故应当明白本发明对于现场表征基于 DE 的装置是特别有用的，即，在 DE 执行其设计的任务，无论是致动器，发生器或简单的传感器的时候，可以提供关于 DE 状态的反馈。

[0206] 对于在 DE 的典型操作范围内体积不可压缩以及介电常数不随着 DE 的致动程度或应变状态明显变化的普通 DE 膜材料，电容是电极面积的优秀预测器，因此，提供使致动或发电的改善控制可行的闭环反馈系统的基础。

[0207] 考虑到 DE 的电容与其电极面积的关系，应当明白本发明在提供介电弹性体致动器（DEA）的致动反馈方面是特别有用的，并且特别地，可以使用自我感测形成闭环的反馈系统，以便允许 DEA 的改善控制。这样的系统的实施，通常包括计算装置或计算设备的几种形式，例如微控制器，FPGA，或可编程逻辑控制器（PLC），以及控制算法，例如像比例 - 积分 - 微分（PID）控制，被认为在嵌入和控制系统领域内经验丰富的技术人员的能力范围内，因此，未在本文中详细描述。

[0208] DE 的电容的估算也使得能够估算存储在 DE 上的瞬态电荷。控制 DE 的电荷（相对于电压）可以极大改善 DE 的整体稳定性。将压力 P 表示为 Q 的函数以方程 25 重新排列，其中 Q 是 DE 上的电荷，d 是介质膜的厚度，以及体积是电极的面积和介质膜厚度 d 的乘积。

$$[0209] \quad P = \frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0} \left( \frac{Qd}{\text{volume}} \right)^2 \quad (25)$$

[0210] 如果不变电荷 Q 被保持在 DE 电极上，并且介质膜的厚度保持均匀，用于减少 d 的机械干扰也减少静电压力，反之亦然。因此，静电压力起抵制干扰的作用，从而防止 DE 承受机电不稳定性。相反，当不变电压被保持，静电压力将起承受任何机械干扰的作用。而且最重要的是能够控制电荷和电压，使得控制 DE 的有效刚度是可能的。

[0211] 控制 DE 的刚度，产生若干潜在的机会，尤其是对于基于 DEA 的人工肌肉动力装置。适用的致动器是可后驱动的。他们具有吸收撞击和抑制振动以及机械干扰的固有能力和握力可以被控制并且适用的抓手自然适应被抓物体形状的机械手中，使得它们非常适合操纵不规则形状或柔软物体，或在机械手穿越空间的时候，相对于机械手位移的物体。对于行走机器人，适用的关节防止脚弹跳着陆，并确保在机器人的脚与地面之间保持良好的接触，尤其是在地面不均匀的地方，其改善了机器人的稳定性。而且，控制腿关节的可塑性，并让动量和动能支配腿的每个区段的轨迹，以及鉴于所需要的输入能量，利用高增益位置控制

提供的明显节约保持关节角度的密切控制。

[0212] 因此,从广义上说,本发明方法涉及获得指示 DE 电气特性的测量信号,以及这些测量结果的变换,以便推导表示 DE 物理状态和 / 或反馈参数的信号或数据。

[0213] 因此也可以说,本发明由适于利用本发明的方法执行本文所述自我感测的系统组成。这样的系统通过非限制性例子的方式在图 19 中简要示出,所述用于 DEA 闭环反馈控制的系统适于执行本发明的第一实施例的方法。

[0214] 优选地,该系统包括控制器 190,其适于控制 DEA191 的致动(即,通过控制致动信号 192)。该系统还包括用于实施本发明自我感测方法的计算装置或计算设备 193,以便推导 DEA191 的一个或多个电容、等效串联电阻以及泄漏电流的估算值。为了能够做到这点,该系统还包括振荡电压源或用于将小规模振荡信号引入到关于给 DEA 的致动信号 192 中的其他装置 194,以及测量装置或传感器,优选地以串联电流传感器 195 和电压传感器 196 的形式。利用测量装置,数据获取装置或单元 197 推导表示 DEA 之间电势差(或对于本方法的第二实施例,是其电容成分)、流过 DEA 的串联电流以及向 DEA 供应的电荷的关于时间的数据。这些测量结果被传送到计算装置 193,用于如上所述本发明方法推导 DEA 反馈参数的应用。

[0215] 其中,该系统适于执行 DEA 致动的闭环反馈控制,控制器 190 适于接收以设置点 198 形式的 DEA 的状态所需要的指示。这可以从,例如人机接口设备传送到控制器 190。

[0216] 通常,本发明方法至少部分可以在计算机程序中实施,所述计算机程序由可编程计算装置或数字或混合信号计算装置,一般是嵌入式计算装置,例如微控制器执行。一旦依据程序软件的指令被程序化执行特定功能,那么这样的数字计算装置或系统在效果上变成专用的机器,尤其是专用于本发明方法。这方面的技术对于嵌入式计算机系统领域的技术人员来说是必要的。

[0217] 可供选择地。本发明方法至少部分可以由一个或多个专用集成电路(ASIC)执行。

[0218] 应当明白,上述控制器 190、计算装置 193 以及数据获取装置 197 的功能可以集中地由单个这样的计算设备(例如,微控制器或 ASIC)执行,或可供选择地,由多个这样的设备分布式执行。

[0219] 优选地,计算装置 193 和 / 或数据获取装置 197 包括存储或记录执行本发明方法所需要的数据存储装置或存储器设备。数据存储装置可以是易失性或非易失性的,并且可以被集成到单个集成电路(IC)的计算装置 193 内,或可以是以已知方式通信连接到计算装置的分立 IC 组件。

[0220] 实施本发明方法的计算机程序可以在分发介质,例如软盘,CD-ROM,USB 闪存存储器,或其他计算机可读介质上被分发给用户。从这里,他们可以被复制到嵌入式固态存储器或计算装置的类似中间存储介质中。当运行程序时,他们将从任意中间存储介质被加载到计算装置的执行存储器中,配置该计算装置根据本发明的方法实施。所有这些操作对于嵌入式和 / 或计算机系统领域的技术人员来说是众所周知的。

[0221] 术语“计算机可读介质”包括分发介质,中间存储介质,计算机的执行存储器,以及能够存储由计算机稍后读取本发明方法的计算机程序的任何其他介质或设备。

[0222] 因此,可以说本发明由实施本发明方法的计算机程序、存储计算机程序的计算机

可读介质,和 / 或适于执行本方法和 / 或执行本发明软件的系统组成。

[0223] 如上所述,计算装置被通信连接到测量装置或测量设备,所述测量装置或测量设备用于测量特定时间点的 DE 之间电势差和流过 DE 的串联电流。利用串联电流测量结果,可以推导输入到 DE 的电荷。

[0224] 合适的测量装置 / 设备对于本领域的技术人员来说是众所周知的,并且可以包括电路,所述电路包括以已知方式布置的分立或集成电阻、电容器和作为单位增益缓冲放大器的运算放大器 (op-amps)。

[0225] 优选地,数据获取装置 197 和 / 或计算装置 193 包括至少一个模拟 - 数字转换器 (ADC),其将测量结果转换为适于由数字计算装置进一步处理的数字格式。

[0226] 应当指出,在本文使用的术语“测量”或“被测量的”,它绝不是必须直接测量的特定参数或特性的要求。而是在没有偏离本发明范围的情况下,该参数可以从其他测量结果测量、推导、估算或近似。

[0227] 在本规范中的术语“瞬时”指的是本发明的组件或整体在任何特定时间点的一般状态。不过,不意味着排除从多个测量结果推导的状态的测量结果或近似值,例如像在很短的时间段内 (相对于机械或电气时间常数) 被平均或过滤的测量结果。实际上,可以建议这样的最小化噪音或量化误差效果的平均。因此,根据上下文的术语“瞬时”指的是至少指示在或毗邻特定时间点,组件的状态随时间变化的任何测量结果、推导或近似值。

[0228] 从前面所述可以看出,本发明提供动态估算 DE 的电极等效串联电阻的状态反馈参数、DE 的电容以及流过介质膜的泄漏电流的方法,其中所述 DE 被致动或用于生成电能,或仅仅用作传感器。这通过自我感测实现,意味着不需要分立应变、位移、速度或加速度传感器。

[0229] 虽然通过参考可能的实施例以及例子的方式描述了本发明,但是应当理解在没有偏离本发明范围的情况下,可以对所述实施例做出修改或改善。广义上来说,本发明由本应用中规范中单独或集体被称为或指示为部件、元件和功能组成,或两个或更多所述部件、元件或功能中的任意一个或全部组合组成。而且,虽然本发明参考了具有已知等效体的特定组件或整体,那么如果单独阐述的话,这点等效体在本文中会被合并。

[0230] 除非上下文清楚地另有所指外,在整个说明书中,词语“包括”,“包含”及其类似词语可被解释为包含的意义,而不是排他或彻底的意义,也就是说,可以被解释为“包括,但不限于”的意义。

[0231] 在整个说明书中,现有技术的任何讨论不应以任何方式被认为是承认这样的现有技术是众所周知的,或形成该领域的公知常识的一部分。

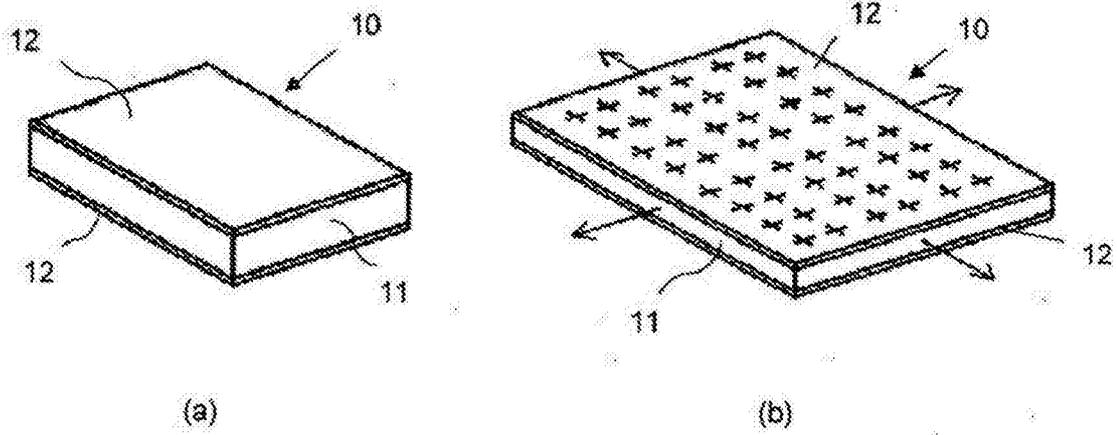
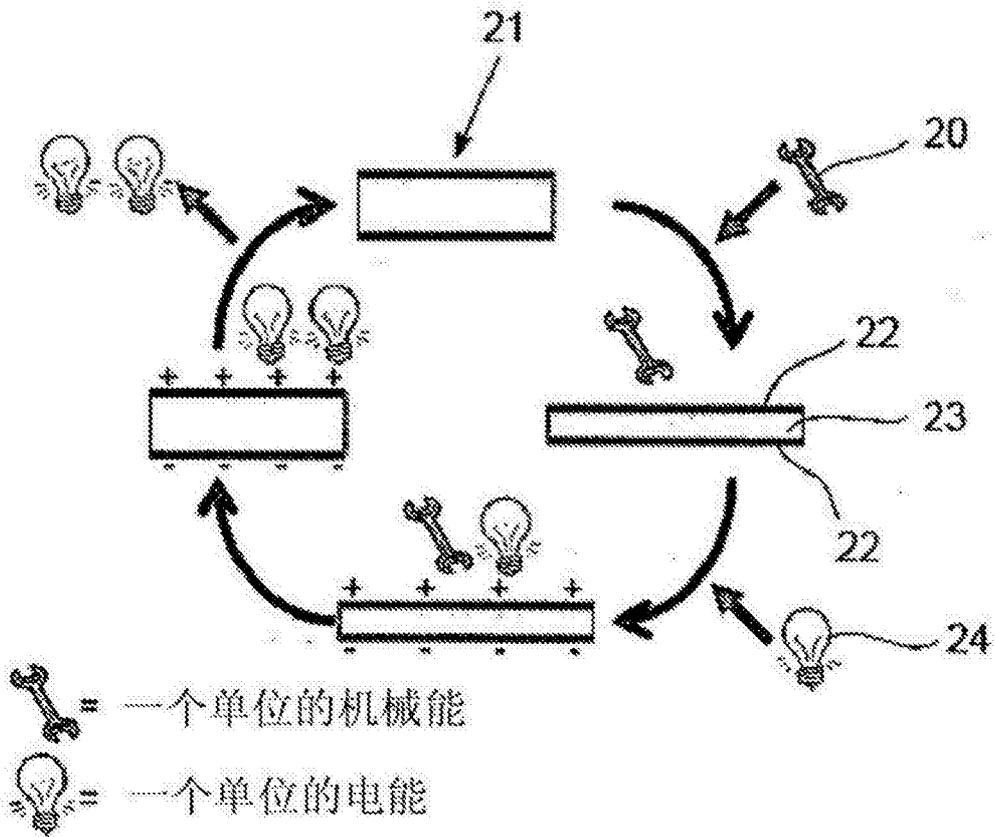


图 1(现有技术)



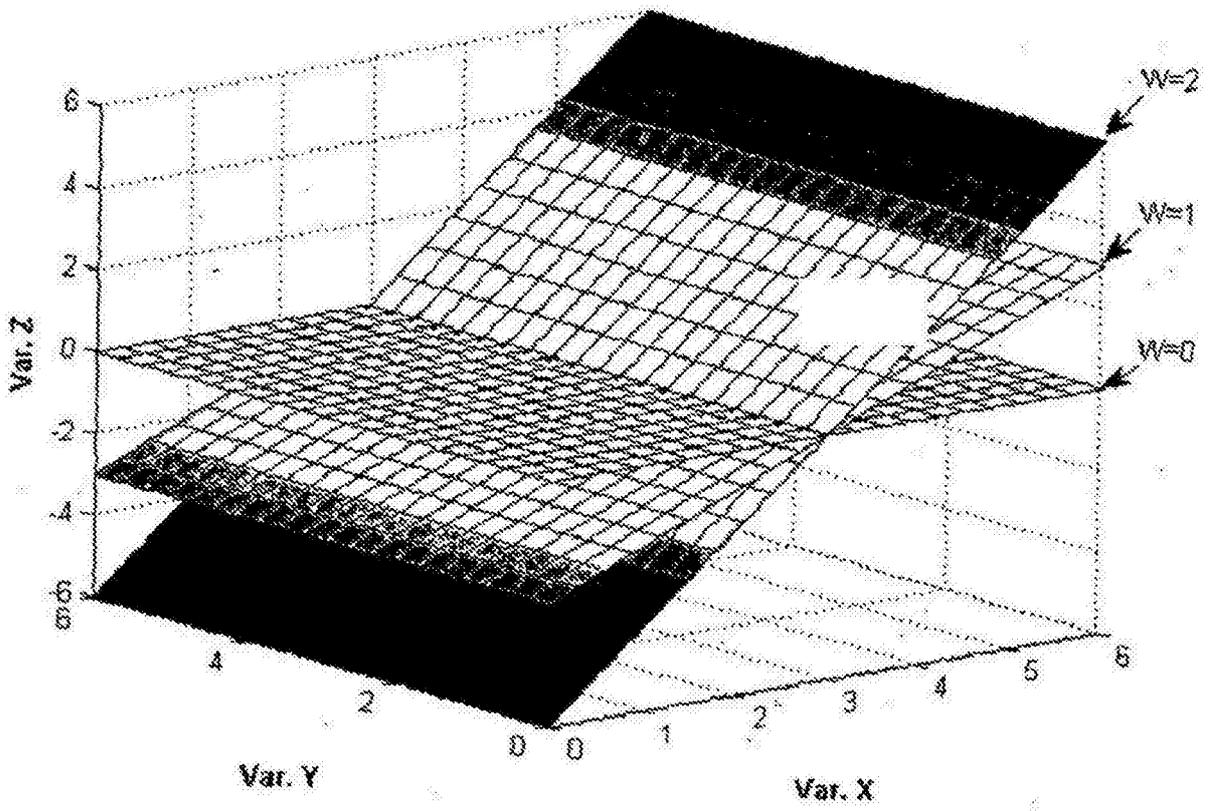


图 3

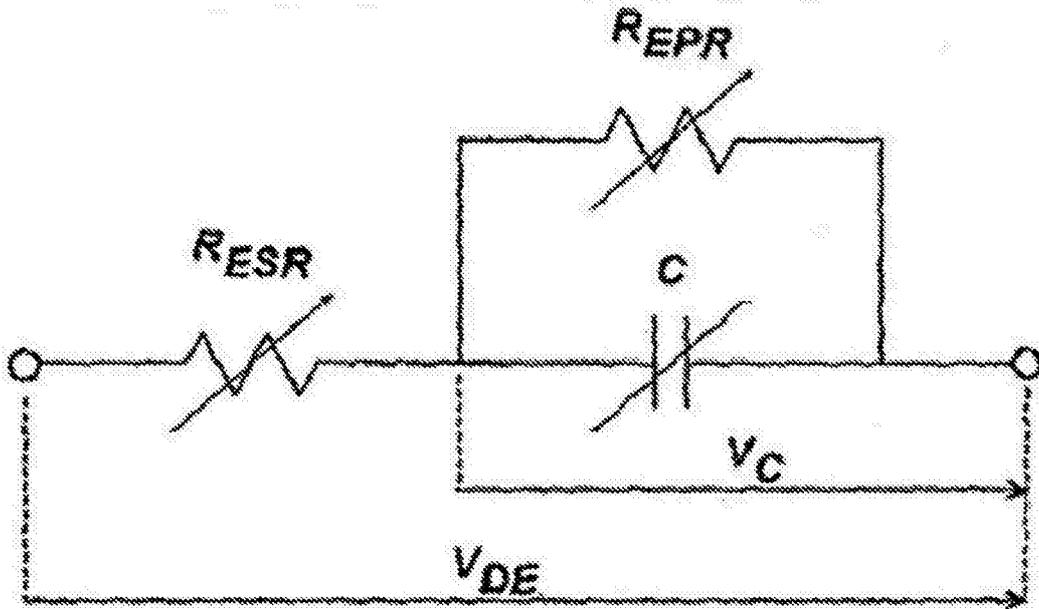


图 4

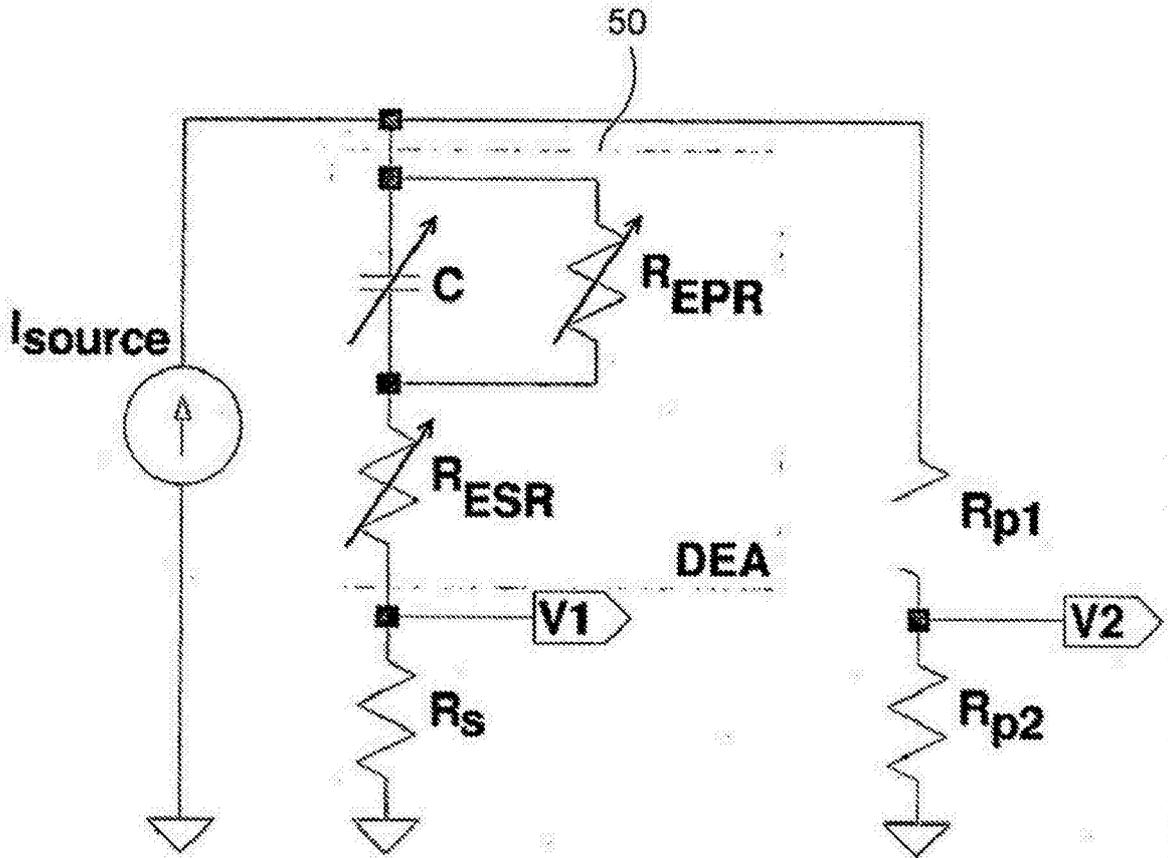


图 5

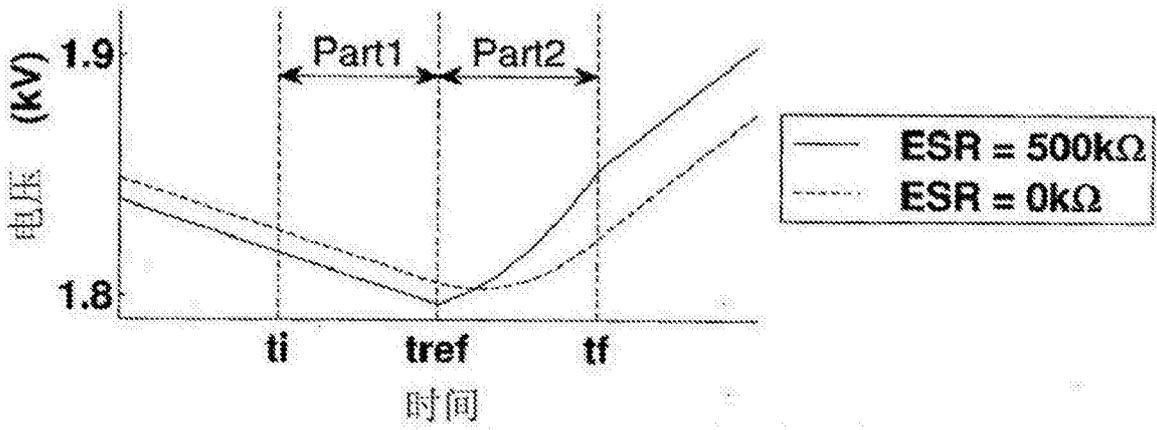


图 6

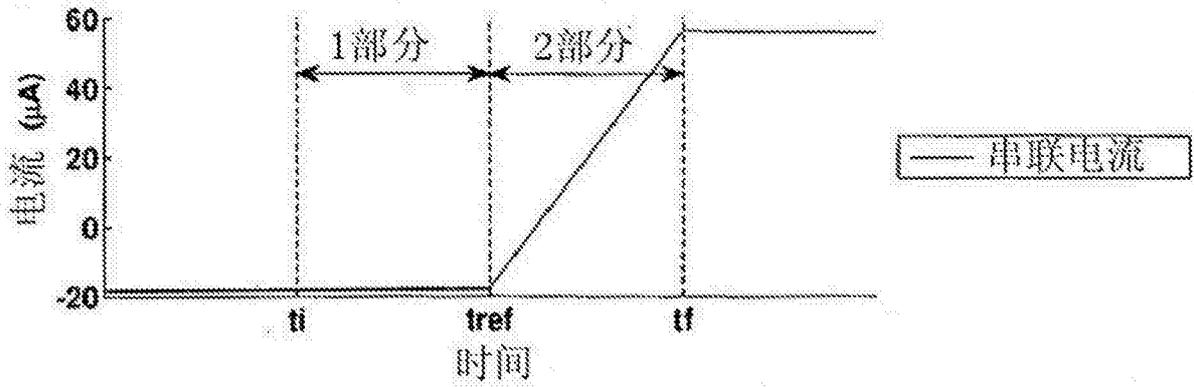


图 7

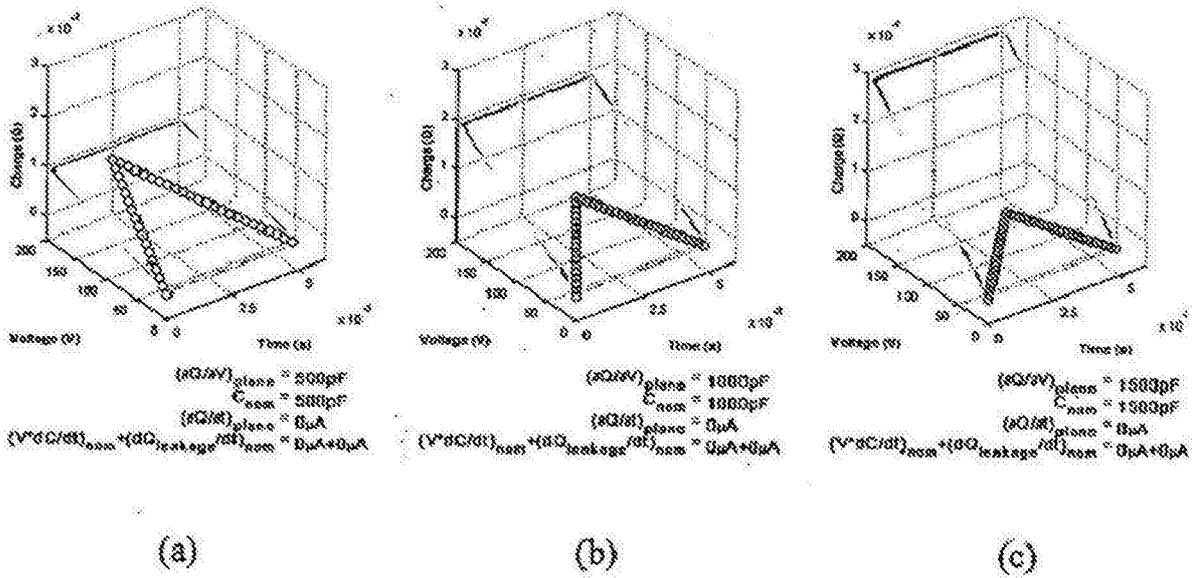


图 8

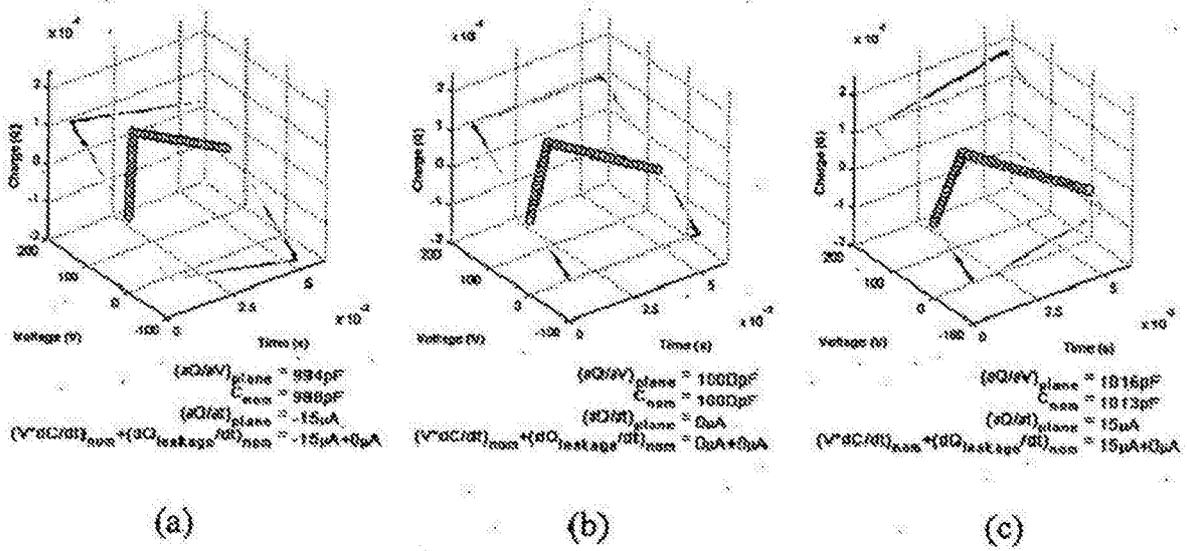


图 9

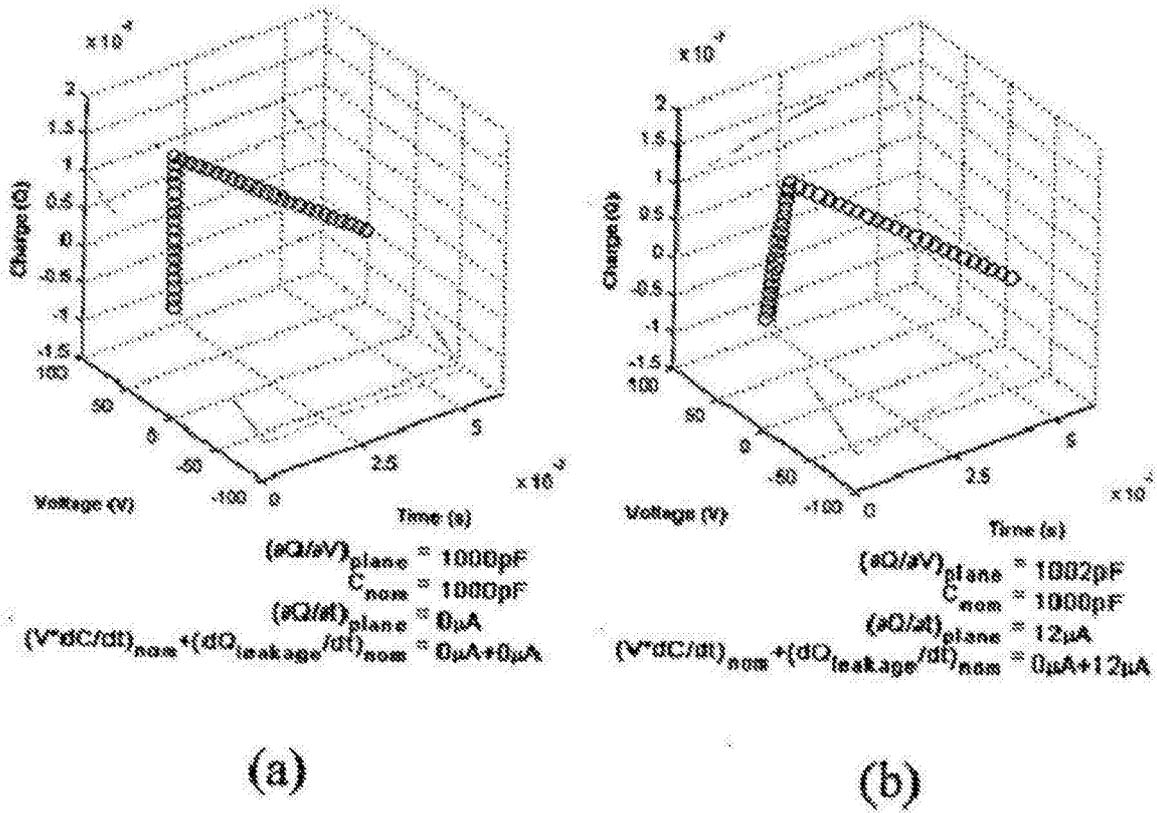


图 10

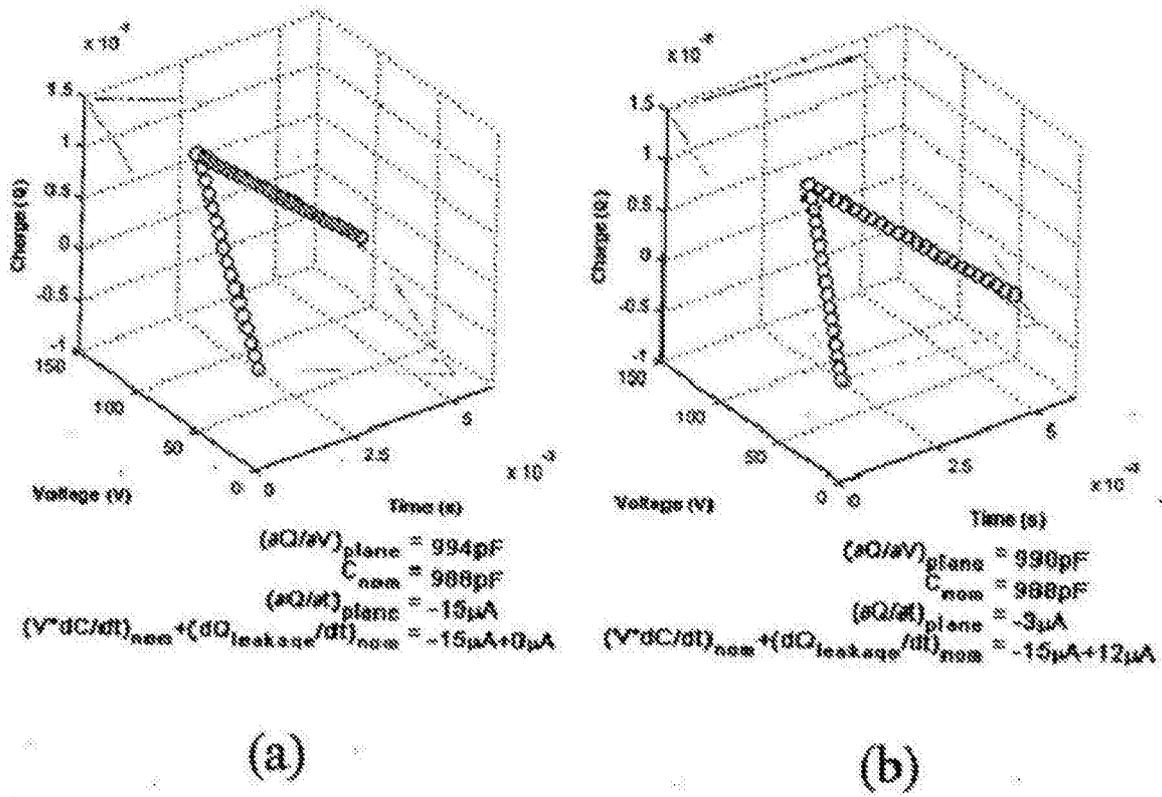


图 11

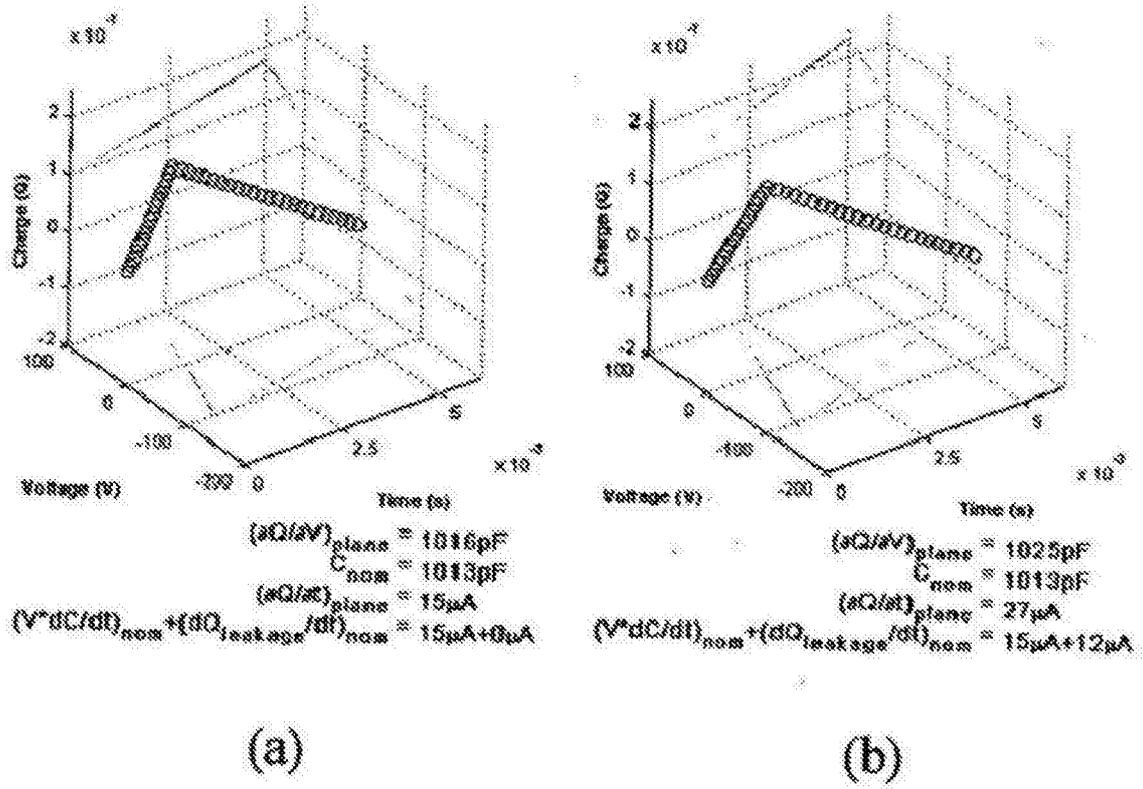


图 12

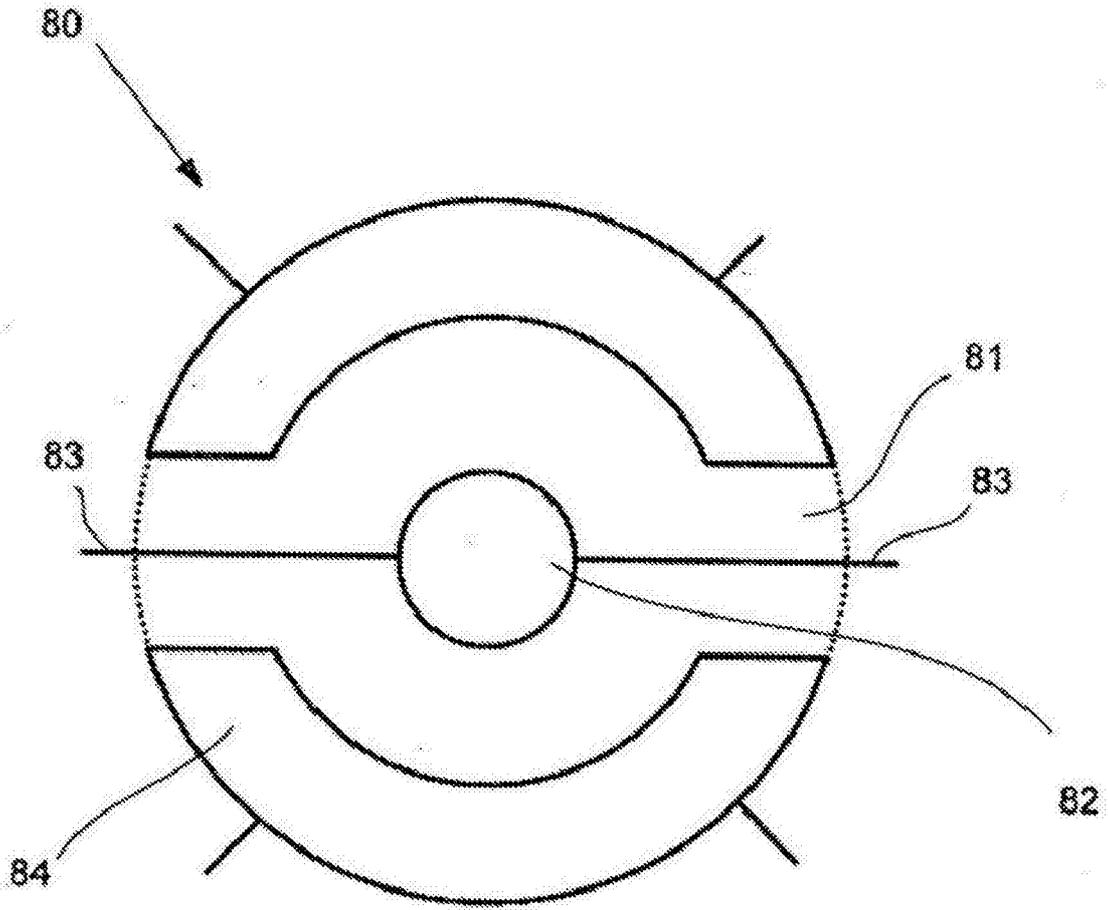


图 13

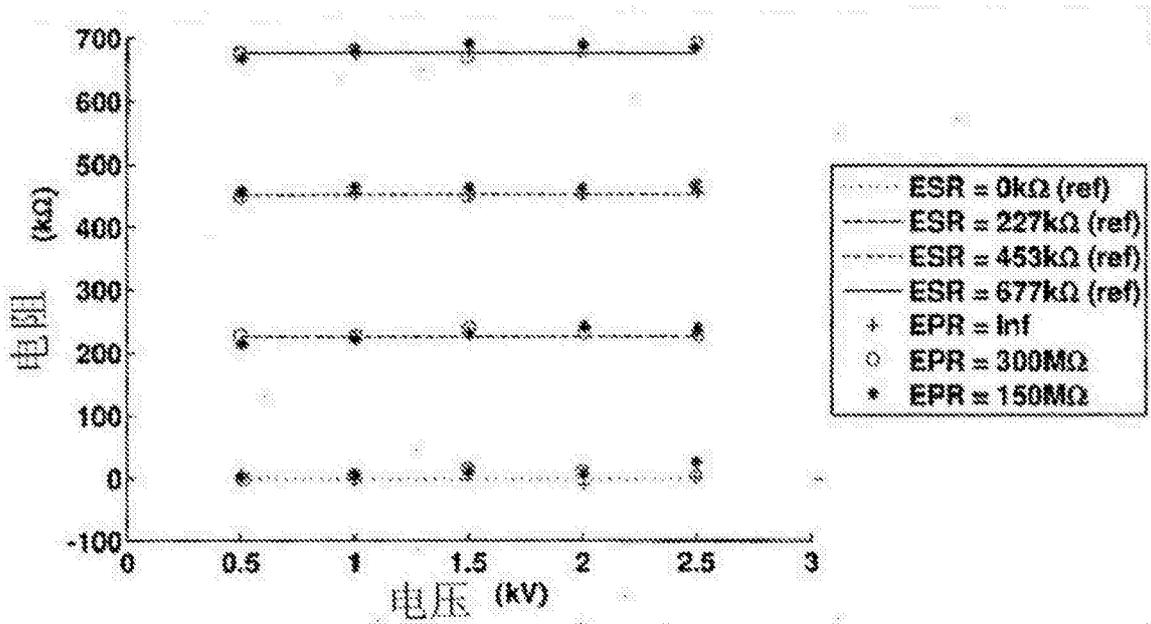


图 14

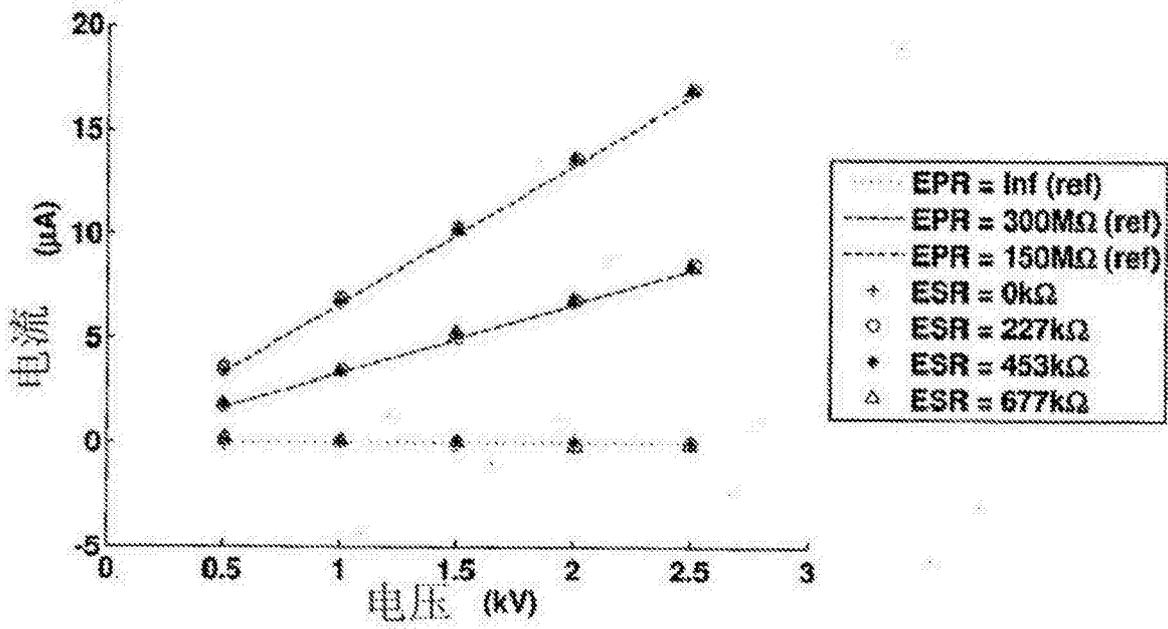


图 15

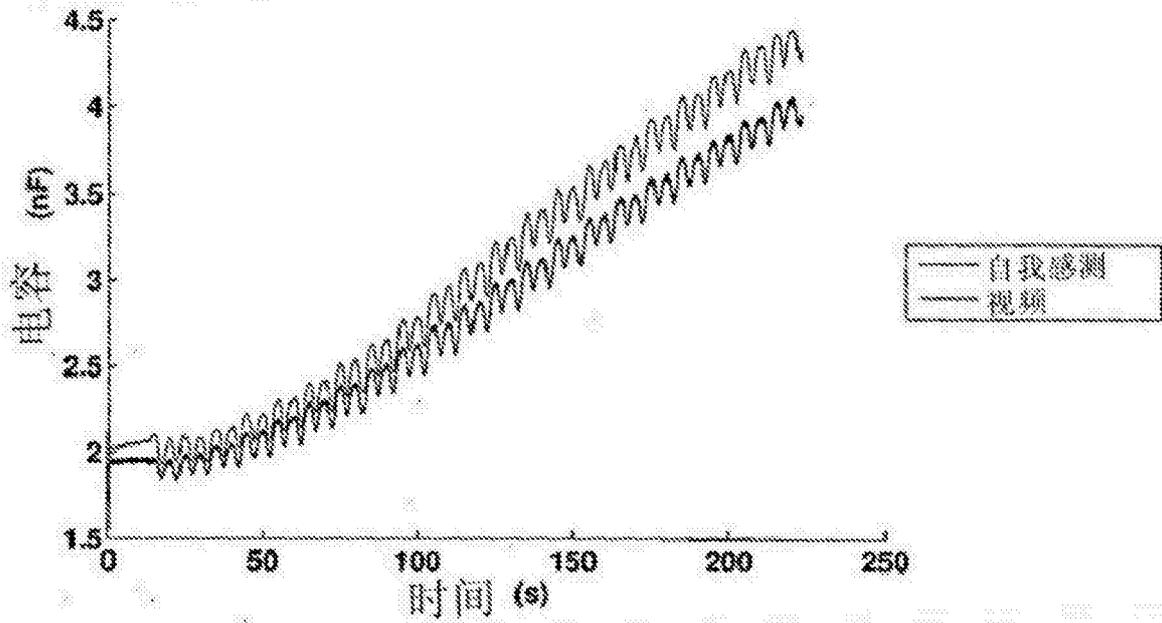


图 16

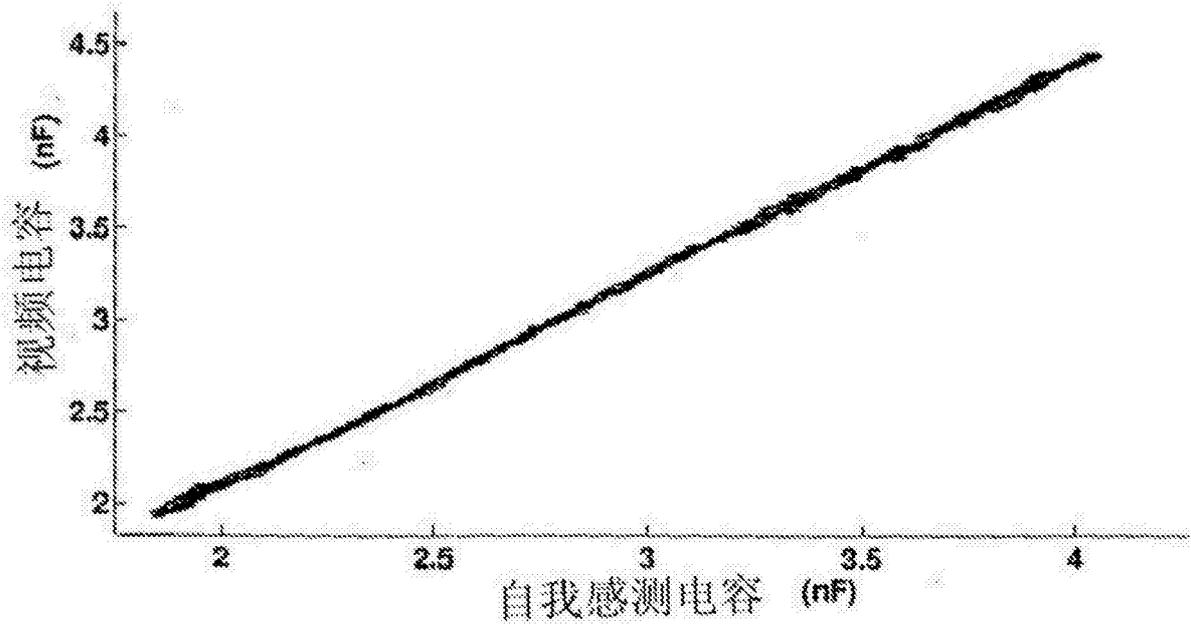


图 17

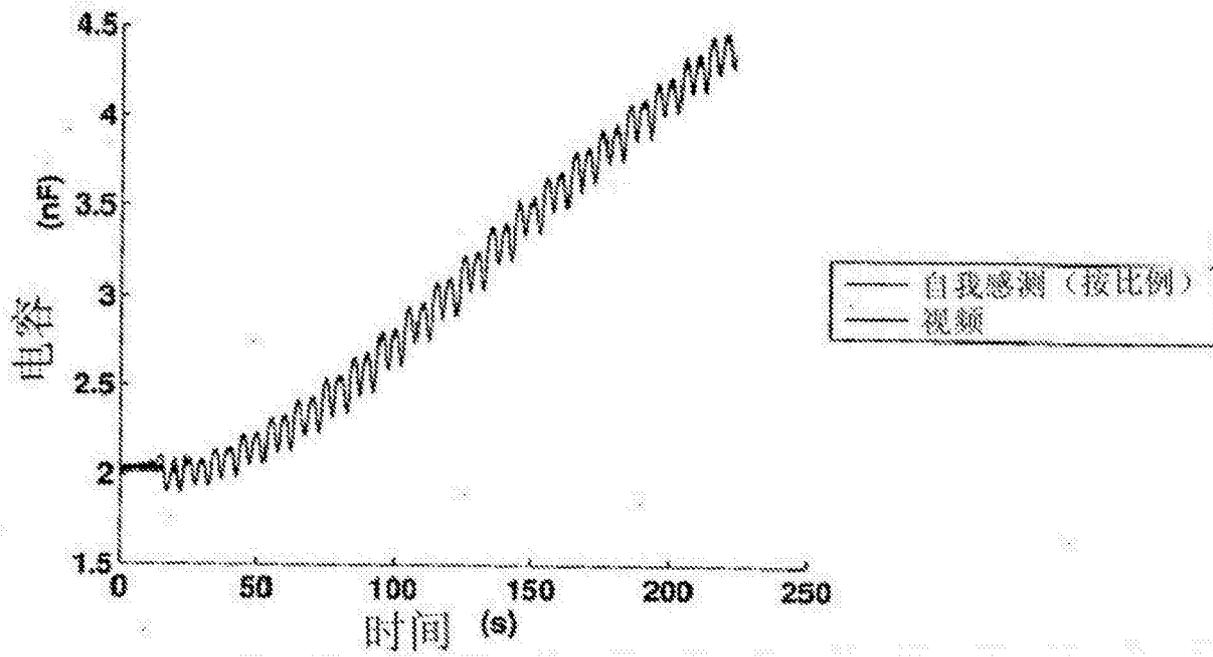


图 18

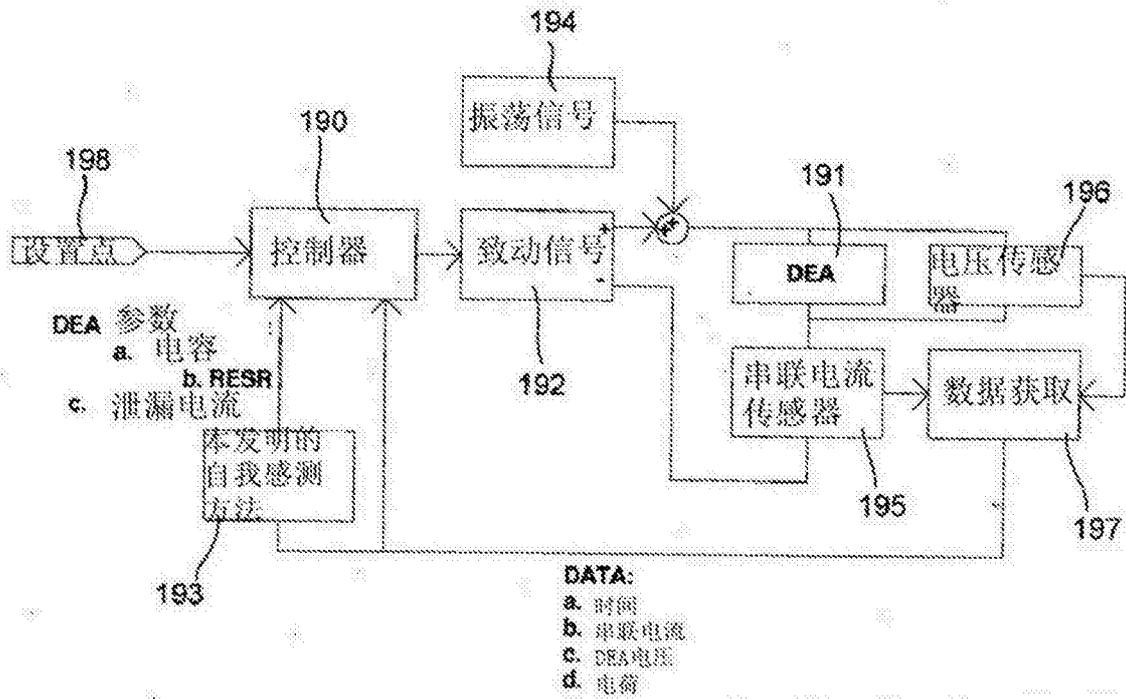


图 19