



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104204792 B

(45)授权公告日 2017.07.25

(21)申请号 201280071933.9

G01N 29/036(2006.01)

(22)申请日 2012.01.27

G01N 29/44(2006.01)

G01N 9/00(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 104204792 A

(43)申请公布日 2014.12.10

(85)PCT国际申请进入国家阶段日  
2014.09.26

(86)PCT国际申请的申请数据  
PCT/EP2012/051322 2012.01.27

(87)PCT国际申请的公布数据  
W02013/110343 EN 2013.08.01

(73)专利权人 ABB 技术有限公司  
地址 瑞士苏黎世

(72)发明人 A.克拉梅 H.布雷恩德勒  
T.A.保罗

(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公  
司 72001  
代理人 李强 严志军

(51)Int.Cl.  
G01N 29/02(2006.01)

(56)对比文件

US 4734609 A,1988.03.29,  
EP 0582045 A1,1994.02.09,  
WO 2010043268 A1,2010.04.22,  
WO 2005103674 A2,2005.11.03,  
GB 2350426 A,2000.11.29,  
CN 101842687 A,2010.09.22,  
CN 101351696 A,2009.01.21,  
Dieter Zeisel et cl..A precise and  
robust quartz sensor based on tuning fork  
technology for (SF6)-gas density control.  
《Sensors and Actuators A》.2000,第80卷(第3  
期),233-236.

Johannes K. Sell et al..Real-time  
monitoring of a high pressure reactor  
using a gas density sensor.《Sensors and  
Actuators A》.2010,第162卷(第2期),215-219.

审查员 张若剑

权利要求书6页 说明书11页 附图4页

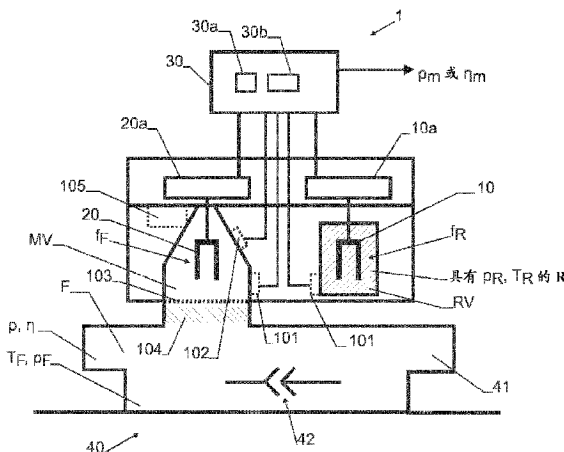
(54)发明名称

用于测量流体密度或流体粘度的声学方法和装置

(57)摘要

公开了一种用于估算表示真实密度  $\rho$  的密度值  $\rho_m$  或用于估算表示流体(F)的真实粘度  $\eta$  的粘度值  $\eta_m$  的方法和装置(1)。为此,测量位于基准空间(RV)中的第一机械振荡器(10)的第一谐振频率  $f_R$  以及与流体(F)接触的第二机械振荡器(20)的第二谐振频率  $f_F$ 。然后使用这些谐振频率  $f_R$  和  $f_F$  推导出估算值  $\rho_m$  或  $\eta_m$ 。在这个推导期间,使用了流体(F)的至少一个依赖于流体温度的或依赖于流体压力的参数。另外或作为备选,第一(即基准)机械振荡器设置成与基准流体(R)相接触。因而,减少推导估算值  $\rho_m$  或  $\eta_m$  中的基

本误差,并使估算值变得更为可靠。



CN 104204792 B

1. 一种用于推导至少一个估算值 $\rho_m$ 的方法,所述估算值 $\rho_m$ 表示具有流体温度 $T_F$ 和流体压力 $p_F$ 的流体F的密度 $\rho$ ,所述方法包括如下步骤

a) 测量第一机械振荡器(10)的谐振的第一谐振频率 $f_R$ ,其中所述第一机械振荡器(10)设置在基准空间RV中,并且所述第一机械振荡器(10)相对于所述流体F被隔离,

b) 测量第二机械振荡器(20)的谐振的第二谐振频率 $f_F$ ,其中所述第二机械振荡器(20)设置在测量空间MV中,其中所述测量空间MV包括所述流体F,并且所述流体F与所述第二机械振荡器(20)相接触,

c) 使用所述第一谐振频率 $f_R$ 和所述第二谐振频率 $f_F$ 推导所述估算值 $\rho_m$ ,

其中,在所述步骤c)中,使用所述流体温度 $T_F$ 和/或所述流体压力 $p_F$ 和/或至少一个依赖于所述流体温度 $T_F$ 和/或所述流体压力 $p_F$ 的参数来推导所述估算值 $\rho_m$ ,

其特征在于,在所述步骤c)中,使用依赖于流体温度的粘度函数 $\eta(T_F)$ 来推导所述估算值 $\rho_m$ ,其中所述依赖于流体温度的粘度函数 $\eta(T_F)$ 是已知的,预先测量的,或预先建模的,

推导出表示所述流体F的所述密度 $\rho$ 的所述估算值 $\rho_m$ ,

在所述步骤c)中,使用依赖于流体温度的偏差参数 $C(T_F)$ 来推导所述估算值 $\rho_m$ ,其中,所述依赖于流体温度的偏差参数 $C(T_F)$ 表示在所述第一机械振荡器(10)和所述第二机械振荡器(20)之间和/或在第一振荡器电路(10a)和第二振荡器电路(20a)之间的依赖于温度的频率偏差,所述第一振荡器电路(10a)连接在所述第一机械振荡器(10)上并且用于操作所述第一机械振荡器(10),并且所述第二振荡器电路(20a)连接在所述第二机械振荡器(20)上并且用于操作所述第二机械振荡器(20),

其中,所述偏差参数 $C$ 的温度依赖性 $\delta C/\delta T$ 预先测量或预先建模并用于所述方法的校准。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,不同流体温度 $T_F$ 的多个 $\eta$ 值预先储存在查询表中或尤其是通过拟合和/或内插或外插算法进行在线计算。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,在所述步骤c)中,使用依赖于流体压力的粘度函数 $\eta(p_F)$ 来推导所述估算值 $\rho_m$ 。

4. 根据权利要求3所述的方法,其特征在于,不同流体压力 $p_F$ 的多个 $\eta$ 值预先储存在查询表中或尤其是通过拟合和/或内插或外插算法进行在线计算。

5. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,还考虑所述偏差参数 $C(T_F)$ 的流体压力依赖性。

6. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,至少对于在170K至400K之间范围内的流体温度 $T_F$ 和基准流体温度 $T_R$ 而言,基准流体R的粘度函数 $\eta_R(T_R)$ 的基准流体温度依赖性 $\delta\eta_R/\delta T_R$ 与所述流体F的粘度函数 $\eta(T_F)$ 的流体温度依赖性 $\delta\eta/\delta T_F$ 是相等的,或者与之相差不到 $\pm 30\%$ 。

7. 根据权利要求6所述的方法,其特征在于,基准流体R的粘度函数 $\eta_R(T_R)$ 的基准流体温度依赖性 $\delta\eta_R/\delta T_R$ 与所述流体F的粘度函数 $\eta(T_F)$ 的流体温度依赖性 $\delta\eta/\delta T_F$ 相差不到 $\pm 10\%$ 。

8. 根据权利要求6所述的方法,其特征在于,至少对于在220K至380K之间范围内流体温度 $T_F$ 和基准流体温度 $T_R$ 而言,基准流体R的粘度函数 $\eta_R(T_R)$ 的基准流体温度依赖性 $\delta\eta_R/\delta T_R$ 与所述流体F的粘度函数 $\eta(T_F)$ 的流体温度依赖性 $\delta\eta/\delta T_F$ 是相等的,或者与之相差不到 $\pm 30\%$ 。

9. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述估算值 $\rho_m$ 根据以下方程进行推导

$$|f_R - f_F| = \left| A\rho_m + \tilde{B}\sqrt{\rho_m}\sqrt{\eta(p_F, T_F)} + C(p_F, T_F) \right|$$

其中

$$A = \frac{c_1 t}{2\rho_q w} f_d \text{ 且}$$

$$\tilde{B} = \frac{c_2}{2\rho_q w} \sqrt{\frac{f_d}{\pi}}$$

并且其中 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $t$ 和 $w$ 是依赖于振荡器几何结构的常数,其中 $\rho_q$ 是所述机械振荡器(10, 20)的材料的有效密度, $\eta(p_F, T_F)$ 是所述流体F的依赖于流体压力的和/或依赖于流体温度的粘度函数, $f_d$ 是所述第一机械振荡器(10)和所述第二机械振荡器(20)的公共设计谐振频率,并且 $C(p_F, T_F)$ 是依赖于流体压力的和/或依赖于流体温度的偏差参数,其表示在所述第一机械振荡器(10)和所述第二机械振荡器(20)之间和/或在第一振荡器电路(10a)和第二振荡器电路(20a)之间的频率偏差,所述第一振荡器电路(10a)连接在所述第一机械振荡器(10)上,并且所述第二振荡器电路(20a)连接在所述第二机械振荡器(20)上,

其中以开氏温度表达的所述基准流体温度 $T_R$ 与所述流体温度 $T_F$ 是相等的,或者与之相差不到 $\pm 5\%$ ,且

其中在 $T_R > 200\text{K}$ 且 $T_R < 400\text{K}$ 的基准流体温度范围内,基准流体R的基准流体压力 $p_R$ 为至多0.1毫巴。

10. 根据权利要求9所述的方法,其特征在于,以开氏温度表达的所述基准流体温度 $T_R$ 与所述流体温度 $T_F$ 相差不到 $\pm 2\%$ 。

11. 根据权利要求9所述的方法,其特征在于,在 $T_R > 200\text{K}$ 且 $T_R < 400\text{K}$ 的基准流体温度范围内,基准流体R的基准流体压力 $p_R$ 为至多 $10^{-2}$ 毫巴。

12. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述第一机械振荡器(10)与基准流体R相接触,所述基准流体R在 $T_R > 200\text{K}$ 且 $T_R < 400\text{K}$ 的基准流体温度范围内具有至少10毫巴的基准流体压力 $p_R$ ,且

其中所述估算值 $\rho_m$ 根据以下方程进行推导

$$|f_R - f_F| = \left| \frac{A_F \rho_m + (\tilde{B}_F \sqrt{\rho} - \tilde{B}_R \sqrt{\rho_R}) \sqrt{\eta(p_F, T_F)} + D(p_F, T_F)}{+ D(p_F, T_F)} \right|$$

其中 $D(p_F, T_F) = C(p_F, T_F) - A_R \rho_R$

其中 $A_F$ 、 $A_R$ 、 $\tilde{B}_F$ 和 $\tilde{B}_R$ 是依赖于振荡器几何结构的常数,其中下标R、F分别与所述第一机械振荡器(10)和第二机械振荡器(20)相关,

其中 $\rho_R$ 是所述基准流体R的密度,其中所述流体F的所述密度 $\rho$ 等于所述基准流体R的所述密度 $\rho_R$ 或者与之相差不到 $\pm 50\%$ ,

其中 $\eta(p_F, T_F)$ 是所述流体F的依赖于流体压力的和/或依赖于流体温度的粘度函数,其与所述基准流体R的依赖于基准流体压力的和/或依赖于基准流体温度的粘度函数 $\eta_R(p_R, T_R)$ 相等或与之相差不到 $\pm 50\%$ ,

并且 $C(p_F, T_F)$ 是依赖于流体压力的和/或依赖于流体温度的偏差参数,其表示在所述第

一机械振荡器(10)和所述第二机械振荡器(20)之间和/或在第一振荡器电路(10a)和第二振荡器电路(20a)之间的频率偏差,所述第一振荡器电路(10a)连接在所述第一机械振荡器(10)上,并且所述第二振荡器电路(20a)连接在所述第二机械振荡器(20)上,

其中所述第一机械振荡器(10)和所述第二机械振荡器(20)选择成使得所述依赖于振荡器几何结构的常数 $\tilde{B}_F$ 和 $\tilde{B}_R$ 彼此相等,或相差不到 $\pm 50\%$ ,且

其中以开氏温度表达的所述基准流体温度 $T_R$ 与所述流体温度 $T_F$ 是相等的,或者与之相差不到 $\pm 5\%$ 。

13. 根据权利要求12所述的方法,其特征在于,所述基准流体R在 $T_R > 200K$ 且 $T_R < 400K$ 的基准流体温度范围内具有至少100毫巴的基准流体压力 $p_R$ 。

14. 根据权利要求12所述的方法,其特征在于,所述流体F的所述密度 $\rho$ 与所述基准流体R的所述密度 $\rho_R$ 相差不到 $\pm 10\%$ 。

15. 根据权利要求12所述的方法,其特征在于, $\eta(p_F, T_F)$ 与所述基准流体R的依赖于基准流体压力的和/或依赖于基准流体温度的粘度函数 $\eta_R(p_R, T_R)$ 相差不到 $\pm 10\%$ 。

16. 根据权利要求12所述的方法,其特征在于,所述第一机械振荡器(10)和所述第二机械振荡器(20)选择成使得所述依赖于振荡器几何结构的常数 $\tilde{B}_F$ 和 $\tilde{B}_R$ 相差不到 $\pm 10\%$ 。

17. 根据权利要求12所述的方法,其特征在于,以开氏温度表达的所述基准流体温度 $T_R$ 与所述流体温度 $T_F$ 相差不到 $\pm 2\%$ 。

18. 根据权利要求1-17中的任一权项所述的方法,其特征在于,所述流体温度 $T_F$ 和/或基准流体温度 $T_R$ /或所述第一机械振荡器(10)的温度和/或所述第二机械振荡器(20)的温度通过至少一个温度调节器(105)进行控制。

19. 根据权利要求1-17中的任一权项所述的方法,其特征在于,所述第一机械振荡器(10)、所述第二机械振荡器(20)、所述流体F和所述基准流体R具有相同的温度。

20. 根据权利要求1-17中的任一权项所述的方法,其特征在于,所述第一机械振荡器(10)与具有所述基准流体温度 $T_R$ 和基准流体压力 $p_R$ 的基准流体R相接触,所述基准空间RV包括所述基准流体R。

21. 根据权利要求1-17中的任一权项所述的方法,其特征在于,温度依赖性 $\delta C / \delta T < 0.1 \text{ Hz/K}$ 。

22. 根据权利要求1-17中的任一权项所述的方法,其特征在于,还包括用于推导表示具有流体温度 $T_F$ 和流体压力 $p_F$ 的流体F的粘度 $\eta$ 的至少一个估算值 $\eta_m$ 的方法,所述方法包括如下步骤:

a) 测量第一机械振荡器(10)的谐振的第一谐振频率 $f_R$ ,其中所述第一机械振荡器(10)设置在基准空间RV中,并且所述第一机械振荡器(10)相对于所述流体F被隔离,

b) 测量第二机械振荡器(20)的谐振的第二谐振频率 $f_F$ ,其中所述第二机械振荡器(20)设置在测量空间MV中,其中所述测量空间MV包括所述流体F,并且所述流体F与所述第二机械振荡器(20)相接触,

c) 使用所述第一谐振频率 $f_R$ 和所述第二谐振频率 $f_F$ 推导所述估算值 $\eta_m$ ,

其特征在于,在所述步骤c)中,使用所述流体温度 $T_F$ 和/或所述流体压力 $p_F$ 和/或至少一个依赖于所述流体温度 $T_F$ 和/或所述流体压力 $p_F$ 的参数来推导所述估算值 $\eta_m$ ,

所述第一机械振荡器(10)与具有所述基准流体温度 $T_R$ 和基准流体压力 $p_R$ 的基准流体R相接触,所述基准空间RV包括所述基准流体R,并且以开氏温度表达的所述基准流体温度 $T_R$ 等于所述流体温度 $T_F$ 或与之相差不到 $\pm 5\%$ ,且

推导出表示所述流体F的所述粘度 $\eta$ 的所述估算值 $\eta_m$ 。

23. 根据权利要求20所述的方法,其特征在于,在 $T_R > 200K$ 且 $T_R < 400K$ 的基准流体温度范围内,所述基准流体压力 $p_R$ 为至多0.1毫巴。

24. 根据权利要求23所述的方法,其特征在于,所述基准流体压力 $p_R$ 为至多 $10^{-2}$ 毫巴。

25. 根据权利要求22所述的方法,其特征在于,在 $T_R > 200K$ 且 $T_R < 400K$ 的基准流体温度范围内,所述基准流体压力 $p_R$ 为至多0.1毫巴。

26. 根据权利要求20所述的方法,其特征在于,在 $T_R > 200K$ 且 $T_R < 400K$ 的基准流体温度范围内,所述基准流体压力 $p_R$ 为至少1毫巴。

27. 根据权利要求26所述的方法,其特征在于,所述基准流体压力 $p_R$ 为至少100毫巴。

28. 根据权利要求22所述的方法,其特征在于,在 $T_R > 200K$ 且 $T_R < 400K$ 的基准流体温度范围内,所述基准流体压力 $p_R$ 为至少1毫巴。

29. 根据权利要求22所述的方法,其特征在于,还包括如下步骤:

-通过所述第一机械振荡器(10)和/或所述第二机械振荡器(20)推导所述流体温度 $T_F$ ,和/或

-通过至少一个温度传感器(101)来推导所述流体温度 $T_F$ 和/或基准流体温度 $T_R$ 。

30. 根据权利要求29所述的方法,其特征在于,所述温度传感器(101)为热敏电阻、电阻式温度检测器、热电偶、集成电路温度传感器和/或光学温度传感器。

31. 根据权利要求22所述的方法,其特征在于,通过求解以下方程来推导表示所述流体的粘度 $\eta$ 的所述估算值 $\eta_m$ ,

$$|\eta_m(T_F)| = \left( \frac{|f_F - f_R| - (Ap + C(T_F))}{B\sqrt{\rho}} \right)^2$$

其中, $\eta_m(T_F)$ 为依赖于流体温度的粘度估算值, $f_R$ 是所述依赖于基准流体温度的第一谐振频率, $f_F$ 是所述依赖于流体温度的第二谐振频率, $\rho$ 是已知的、预先测量的或预先建模的流体的密度函数, $A$ 和 $B$ 是振荡器特定的常数,并且 $C(T_F)$ 是在第一和第二机械振荡器和/或振荡器电路之间的依赖于流体温度的频率偏差参数。

32. 一种用于执行前述权利要求中的任一权项所述的方法的传感器装置(1),所述传感器装置(1)包括

-所述第一机械振荡器(10),

-第一振荡器电路(10a),其连接在所述第一机械振荡器(10)上,用于操作所述第一机械振荡器(10),

-所述第二机械振荡器(20),

-第二振荡器电路(20a),其连接在所述第二机械振荡器(20)上,用于操作所述第二机械振荡器(10),和

-分析和控制单元(30),其连接在所述第一振荡器电路(10a)和所述第二振荡器电路(20a)上,并且适合于执行前述权利要求中的任一权项所述的方法的步骤。

33. 根据权利要求32所述的传感器装置(1), 其特征在于, 所述分析和控制单元(30)包括处理单元(30a)和存储器(30b), 其中所述分析和控制单元(30)适合于针对至少两个不同的流体温度 $T_F$ 和/或针对至少两个不同的流体压力 $p_F$ 推导出至少一个依赖于流体温度的和/或依赖于流体压力的参数的至少两个值。

34. 根据权利要求32或33所述的传感器装置(1), 其特征在于, 还包括密封的基准空间RV和连接器单元(103), 所述连接器单元(103)用于将所述传感器装置(1)连接到包含所述流体F的流体舱(41)上, 其中所述第一机械振荡器(10)设置在所述密封的基准空间RV中。

35. 一种流体绝缘的电气设备(40), 包括

- 权利要求32至34中的任一权项所述的传感器装置(1), 其用于推导表示所述流体F的所述密度 $\rho$ 的所述估算值 $\rho_m$ ,

- 位于流体舱(41)中的所述流体F, 其用于使所述流体绝缘的电气设备(40)的带电部分(42)隔离开。

36. 根据权利要求35所述的流体绝缘的电气设备(40), 其特征在于, 所述电气设备(40)是气体绝缘的中等电压或高电压开关装置。

37. 根据权利要求35或36所述的流体绝缘的电气设备(40), 其特征在于, 所述流体F包括由以下成分组成的组中的至少一种成分:

- 氮,

- 氧,

- 二氧化碳,

- 一氧化氮,

- 二氧化氮,

- 一氧化二氮,

- 氩,

- 甲烷, 尤其是部分地或完全卤化的甲烷, 尤其是四氟甲烷或三氟碘甲烷,

- 空气, 尤其是工艺空气或合成空气, 和

- 六氟化硫,

- 部分或完全氟化的醚, 尤其是氢氟醚、氢氟单醚、包含至少3个碳原子的氢氟单醚、全氟单醚或包含至少4个碳原子的全氟单醚,

- 部分或完全氟化的酮, 特别氢氟单酮、全氟单酮、包括至少5个碳原子的全氟单酮、或者刚好包括5或6或7或8个碳原子的全氟单酮, 和

- 其混合物。

38. 根据权利要求2至8中任一项所述的方法, 其特征在于, 所述估算值 $\rho_m$ 根据以下方程进行推导

$$|f_R - f_F| = \left| A \rho_m + \tilde{B} \sqrt{\rho_m} \sqrt{\eta(p_F, T_F)} + C(p_F, T_F) \right|$$

其中

$$A = \frac{c_F^2}{2 \rho_q w} f_d \quad \text{且}$$

$$\tilde{B} = \frac{c_2}{2\rho_q w} \sqrt{\frac{f_d}{\pi}}$$

并且其中 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $t$ 和 $w$ 是依赖于振荡器几何结构的常数,其中 $\rho_q$ 是所述机械振荡器(10, 20)的材料的有效密度, $\eta(p_F, T_F)$ 是所述流体F的依赖于流体压力的和/或依赖于流体温度的粘度函数, $f_d$ 是所述第一机械振荡器(10)和所述第二机械振荡器(20)的公共设计谐振频率,并且 $C(p_F, T_F)$ 是依赖于流体压力的和/或依赖于流体温度的偏差参数,其表示在所述第一机械振荡器(10)和所述第二机械振荡器(20)之间和/或在第一振荡器电路(10a)和第二振荡器电路(20a)之间的频率偏差,所述第一振荡器电路(10a)连接在所述第一机械振荡器(10)上,并且所述第二振荡器电路(20a)连接在所述第二机械振荡器(20)上,

其中以开氏温度表达的所述基准流体温度 $T_R$ 与所述流体温度 $T_F$ 是相等的,或者与之相差不到 $\pm 5\%$ ,且

其中在 $T_R > 200K$ 且 $T_R < 400K$ 的基准流体温度范围内,基准流体R的基准流体压力 $p_R$ 为至多0.1毫巴。

39. 根据权利要求2至11中任一项所述的方法,其特征在于,所述第一机械振荡器(10)与基准流体R相接触,所述基准流体R在 $T_R > 200K$ 且 $T_R < 400K$ 的基准流体温度范围内具有至少10毫巴的基准流体压力 $p_R$ ,且

其中所述估算值 $\rho_m$ 根据以下方程进行推导

$$|f_R - f_F| = \left| \frac{A_F \rho_m + (\tilde{B}_F \sqrt{\rho} - \tilde{B}_R \sqrt{\rho_R}) \sqrt{\eta(p_F, T_F)} + D(p_F, T_F)}{+D(p_F, T_F)} \right|$$

其中 $D(p_F, T_F) = C(p_F, T_F) - A_R \rho_R$

其中 $A_F$ 、 $A_R$ 、 $\tilde{B}_F$ 和 $\tilde{B}_R$ 是依赖于振荡器几何结构的常数,其中下标R、F分别与所述第一机械振荡器(10)和第二机械振荡器(20)相关,

其中 $\rho_R$ 是所述基准流体R的密度,其中所述流体F的所述密度 $\rho$ 等于所述基准流体R的所述密度 $\rho_R$ 或者与之相差不到 $\pm 50\%$ ,

其中 $\eta(p_F, T_F)$ 是所述流体F的依赖于流体压力的和/或依赖于流体温度的粘度函数,其与所述基准流体R的依赖于基准流体压力的和/或依赖于基准流体温度的粘度函数 $\eta_R(p_R, T_R)$ 相等或与之相差不到 $\pm 50\%$ ,

并且 $C(p_F, T_F)$ 是依赖于流体压力的和/或依赖于流体温度的偏差参数,其表示在所述第一机械振荡器(10)和所述第二机械振荡器(20)之间和/或在第一振荡器电路(10a)和第二振荡器电路(20a)之间的频率偏差,所述第一振荡器电路(10a)连接在所述第一机械振荡器(10)上,并且所述第二振荡器电路(20a)连接在所述第二机械振荡器(20)上,

其中所述第一机械振荡器(10)和所述第二机械振荡器(20)选择成使得所述依赖于振荡器几何结构的常数 $\tilde{B}_F$ 和 $\tilde{B}_R$ 彼此相等,或相差不到 $\pm 50\%$ ,且

其中以开氏温度表达的所述基准流体温度 $T_R$ 与所述流体温度 $T_F$ 是相等的,或者与之相差不到 $\pm 5\%$ 。

## 用于测量流体密度或流体粘度的声学方法和装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种用于推导估算值的方法,估算值表示流体密度 $\rho$ 或流体粘度 $\eta$ 。此外,本发明还涉及执行这种方法的装置。

### 背景技术

[0002] 机械谐振器可用于测量流体的密度或粘度。

[0003] 这种测量系统的一种可能的应用是监测气体绝缘的电气设备(例如中等电压或高压开关装置)中的SF<sub>6</sub>绝缘气体。然而,因为SF<sub>6</sub>是潜在的温室气体,所以政府法规变得更为严格。这导致对工厂主更为收紧的许可和运营要求。结果,需要更精密的监测技术,以便能够更精密地检测例如SF<sub>6</sub>气体泄漏。

[0004] 在其它可能的应用中,确定气体混合物中的单个成分的浓度是关键目的。这个问题可通过测量总的气体混合物压力 $p$ 、总的气体混合物温度 $T$ 以及总的气体混合物密度 $\rho$ ,并根据这些测量参数推导成分浓度来解决。然而,如果气体混合物中的一个或多个成分的浓度较低,或者如果必须以较高的精度测量成分的浓度,那么需要一种更精确的密度测量系统。

[0005] 用于密度测量系统的其它可能的应用是例如化学和药物工艺的监测、气体计量中的能量含量的确定、或例如用于航空的更高精度的纬度测量。

[0006] EP 0 582 045 B1和WO 2010/043268 A1描述了用于测量气体密度的方法和装置。这些实现基于两个谐振石英音叉,其是微电子器件中的低成本部件。这些石英音叉的其中一个设置在排空的基准室中,而另一个与有待测量的气体或气体混合物相接触。由于在气体或气体混合物与相应的音叉之间的相互作用,这个音叉的谐振频率发生了改变。这个频率改变的量然后用于推导气体或气体混合物的密度读出值。

[0007] 然而,所公开的方法和装置具有缺点,即从它们获得的气体密度读数容易频繁地出现基本误差。因而,密度读出值不如所需那么精确。

### 发明内容

[0008] 因此本发明的一个总体目标是提供一种改进的的方法来推导估算值,估算值表示流体密度或流体粘度。本发明的又一目的是提供一种实施这种方法的传感器。本发明的另一目的是提供包括这种传感器的电气设备。本发明的还一目的是提供一种计算机程序元件,其实施用于推导这种估算值的这种方法。

[0009] 这些目的通过独立权利要求的方法和装置来实现。

[0010] 因此,用于推导至少一个表示流体的密度 $\rho$ 的估算值或确定值 $\rho_m$ ,或者用于推导至少一个表示流体的粘度 $\eta$ 的估算值或确定值 $\eta_m$ 的方法,其包括如下步骤:

[0011] - 测量第一机械振荡器的谐振的第一谐振频率 $f_R$ ;

[0012] - 测量第二机械振荡器的谐振的第二谐振频率 $f_F$ 。

[0013] 额外的谐振频率和/或其它参数的测量是可行的。所提到的步骤可一个接一个地

无特殊顺序地执行,或者它们可同时执行。第一机械振荡器设置在基准空间中,并且它与流体是隔开的,流体的密度或粘度有待进行定量分析。词语“与流体是隔开的”在这方面意味着第一机械振荡器不与有待测量的流体接触。第二机械振荡器设置在包括有待测量的流体的测量空间中,并且流体与第二机械振荡器直接或间接地(例如通过半透膜)接触。测量空间中的流体具有流体温度 $T_F$ 和液体压力 $p_F$ 。第二机械振荡器和流体有利地处于热平衡中,即,机械振荡器具有与流体温度 $T_F$ 相等的温度。更有利的是,第一机械振荡器与第二机械振荡器处于热平衡中,即,两个振荡器具有相同的温度。

[0014] 该方法还包括如下步骤:

[0015] - 使用第一谐振频率 $f_R$ 和第二谐振频率 $f_F$ 和/或根据这些谐振频率值推导出的任何数量(例如它们的差的绝对值),来推导出估算值或确定值 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ (例如流体 $\rho$ 或 $\eta$ 的测量值)。为了所述估算值 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 的所述推导,使用了流体温度 $T_F$ 和/或液体压力 $p_F$ 和/或至少一个依赖于流体温度 $T_F$ 和/或液体压力 $p_F$ 的参数。因而,在推导 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 期间可避免或减少在推导估算值 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 中由于依赖于流体温度和/或依赖于流体压力的影响(例如粘度)而造成的基本误差。

[0016] 作为使用流体温度 $T_F$ 和/或流体压力 $p_F$ 和/或至少一个依赖于 $T_F$ 的参数和/或依赖于 $p_F$ 的参数来推导 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 的备选或补充方案,第一机械振荡器(即不与有待测量的流体接触的机械振荡器)与基准流体相接触。换句话说,第一机械振荡器并不设置在排空的基准室中,而是与基准流体相接触。这个基准流体可以是与有待测量的流体相同或不同的复合物或混合物。基准流体具有基准流体温度 $T_R$ 和基准流体压力 $p_R$ 。通过在第一机械振荡器和基准流体之间建立这种接触,还可内在地避免或减少在推导 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 期间的基本误差。这是因为第一机械振荡器和因而第一谐振频率 $f_R$ 受到与基准流体的相互作用。

[0017] 两种误差减少的方法——一方面使用流体温度 $T_F$ 和/或液体压力 $p_F$ 和/或至少一个依赖于流体温度 $T_F$ 和/或流体压力 $p_F$ 的参数来推导 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ ,以及另一方面在第一机械振荡器和基准流体之间建立接触——都基于相同的原理,即推导 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 的基本误差可通过考虑温度和/或压力来避免或减少,温度和/或压力要么在 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 自身的推导步骤中以计算方式进行考虑,或者内在地通过在第一机械振荡器和基准流体之间的接触来考虑。

[0018] 两种误差减少方法的组合也是可行的。

[0019] 当第一机械振荡器与基准流体接触时,这个基准流体有利地包含在所述基准空间中,并且其温度 $T_R$ (以开氏温度表达)与所述流体温度 $T_F$ 相等或相差不到 $\pm 5\%$ ,优选不到 $\pm 2\%$ ,更优选不到 $1\%$ 。这具有优点,即流体和基准流体具有相同温度或至少相似的温度 $T_R$ 和 $T_F$ ,这使得避免或减少在推导估算值 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 期间的基本误差更为容易。更为有利的是,两个机械振荡器和流体及基准流体处于热平衡。

[0020] 更有利的是,当第一机械振荡器与基准流体接触时,在 $T_R > 200K$ 且 $T_R < 400K$ 的基准流体温度范围内测量时,基准流体压力 $p_R$ 被设为(例如在基准空间的填充时间)最多 $0.1$ 毫巴,优选最多 $10^{-2}$ 毫巴,更优选最多 $10^{-4}$ 毫巴。在第一机械振荡器和基准流体之间的相互作用随着基准流体压力 $p_R$ 减少至 $0.1$ 毫巴以下时而变得越来越弱,直至不再有效地存在“基准流体”。因而,例如低成本的商业上可得到的封装并排空的现货石英音叉可用作第一机械振荡器,其减少了成本。这样就可以通过使用流体温度 $T_F$ 和/或流体压力 $p_F$ 和/或至少一个依赖于流体温度 $T_F$ 和/或流体压力 $p_F$ 的参数来推导 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ ,从而避免或减少在推导 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 时的基本

误差。

[0021] 在一个不同的有利的实施例中,当第一机械振荡器与基准流体接触时,在 $T_R > 200K$ 且 $T_R < 400K$ 的基准流体温度范围内测量时,基准流体压力 $p_R$ 被设为(例如在基准空间的填充时间)至少1毫巴,优选至少10毫巴,更优选至少100毫巴,甚至更优选1巴。因而可使用较高的基准流体压力 $p_R$ ,这进一步减少了在推导 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 期间的基本误差(由于例如流体粘度的压力依赖性)。

[0022] 在另一有利的实施例中,当第一机械振荡器与基准流体接触时,流体压力 $p_F$ 和基准流体压力 $p_R$ 是相等的,或者相差不到10倍,优选不到5倍,更优选不到2倍。因而,减少了在推导 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 期间的基本误差,因为在这种基准流体压力下,第一机械振荡器与基准流体存在更强的相互作用。因而,内在地考虑了例如对于流体粘度的流体温度和流体压力依赖性的校正(参见下面)。然而,这依赖于所需的精度,并且较低的基准流体压力 $p_R$ 可能是足够的(因此如上面论述的相对广泛的各种倍数是足够的),这减少了用于更昂贵的基准流体的成本。通过例如柔韧的、但流体可渗透的隔膜还可以在流体和基准流体之间建立压力平衡,隔膜将测量空间与基准空间分隔开。因而更有效地减少了在推导 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 期间的基本误差。

[0023] 在另一有利的实施例中,该方法还包括如下步骤:

[0024] -通过所述第一和/或所述第二机械振荡器推导流体温度 $T_F$ 。这可通过例如测量谐振频率 $f_R$ 和 $f_F$ 之间的差异相对于所述第一和第二机械振荡器的设计频率 $f_{d,R}$ 和 $f_{d,F}$ 之间的差异的偏差来实现,而流体和基准流体的密度被假定为是恒定的(参见下面)。有利的是,假定在流体和第二机械振荡器之间达成热平衡以及在基准流体和第一机械振荡器之间达成热平衡(如果适用的话)。在流体、基准流体、第一和第二机械振荡器的热平衡甚至是更有利的。这可通过例如使用具有高热导率的材料来促进。因而,流体温度 $T_F$ 和基准流体温度 $T_R$ 相差较少,并且可以更容易进行推导。

[0025] 作为通过机械振荡器推导流体温度 $T_F$ 的补充或作为其备选,流体温度 $T_F$ 和/或基准流体温度 $T_R$ (如果适用的话)还可通过至少一个温度传感器有利地推导出来,该传感器与相应的流体和/或包含流体的空间直接或间接接触。优选的温度传感器包括热敏电阻、电阻式温度检测器、热电偶、集成电路(IC)温度传感器和/或光学温度传感器。因而,可以更容易地在例如测量空间和/或基准空间中的多个位置推导出流体温度 $T_F$ 和/或基准流体温度 $T_R$ (如果适用的话)。这样,单个温度读数的可选的求平均数也变得可行了,例如用以解决不平衡状态和获得代表性的流体平均温度。

[0026] 在另一有利的实施例中,该方法还包括通过一个或多个压力传感器或通过温度与压力关联起来的方程而推导出流体压力 $p_F$ 和/或基准流体压力 $p_R$ (如果适用的话)的步骤。这种方程例如可以是理想气体定律,(即, $p_F V = n R T_F$ 其中 $V$ 是测量空间的已知容积值, $n$ 是测量空间中的气体分子数目(通常以摩尔来表达),并且 $R$ 是通用气体常数)。相似的方程适用于基准空间。因而,简化了流体压力 $p_F$ 和/或基准流体压力 $p_R$ (如果适用的话)的推导。其它将温度和压力关联起来的方程也可使用,例如范德瓦耳斯方程、维里方程、贝蒂-布里奇曼方程或Peng-Robinson方程。当使用理想气体定律以外的方程时,可以比理想气体定律更精确地预测气体的行为。

[0027] 在本方法的另一有利的实施例中,流体温度 $T_F$ 和/或基准流体温度 $T_R$ (如果适用的话)和/或所述第一机械振荡器的温度和/或所述第二机械振荡器的温度通过至少一个温度

控制器进行控制。这种温度控制器可包括例如(基准)流体和/或振荡器加热器,(基准)流体和/或振荡器冷却器,和/或操作加热器和/或冷却器的反馈电路。因而,可主动地影响温度,例如温度可保持恒定。

[0028] 在本方法的另一有利的实施例中,第一谐振频率 $f_R$ 和第二谐振频率 $f_F$ 至少为1kHz,优选至少30kHz,更优选至少100kHz。因而,可使用更高的谐振频率,这有助于减少在推导 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 期间的基本误差(参见下文)。

[0029] 更有利的是,所述第一机械振荡器的第一设计谐振频率 $f_{d,R}$ 与所述第二机械振荡器的第二设计谐振频率 $f_{d,F}$ 是相等的,或者相差不到 $\pm 5\%$ ,优选不到 $\pm 1\%$ 。这具有促进推导估算值 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 的优点。在这方面,术语“设计谐振频率”涉及相应的机械振荡器的谐振频率,其是在机械振荡器的设计和制造期间确定的。由于振荡器与流体和基准流体的相互作用(如果适用的话)以及由于例如温度等其它影响,所测量的第一和第二谐振频率 $f_R$ 和 $f_F$ 相对于这些设计谐振频率发生了轻微的变化。

[0030] 可有利地用于推导表示 $\rho$ 或 $\eta$ 的 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 的一个方程是:

$$[0031] \quad |f_R - f_F| = |A\rho + \tilde{B}\sqrt{\rho}\sqrt{\eta} + C|$$

[0032] 其中A、B和C是常数。在这个方程中,所需的变量 $\rho$ 或 $\eta$ 然后分别被 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 替代。

[0033] 在本方法的一个有利的实施例中,依赖于流体温度的偏差参数 $C(T_F)$ 用于推导所述估算值 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 。依赖于流体温度的偏差参数 $C(T_F)$ 表示在所述第一机械振荡器和所述第二机械振荡器之间的依赖于温度的频率偏差。这种依赖于温度的频率偏差可能是由于例如在两个机械振荡器之间的机械差异而引起的。额外地或备选地,依赖于流体温度的偏差参数 $C(T_F)$ 可表示在第一振荡器电路和第二振荡器电路之间的依赖于温度的频率偏差,第一振荡器电路连接在所述第一机械振荡器上,第二振荡器电路连接在所述第二机械振荡器上。振荡器电路用于操作相应的机械振荡器(例如引起谐振,测量相应的谐振频率等等)。依赖于温度的频率偏差则可能是由于例如振荡器电路本身的温度依赖性引起的,例如依赖于温度的电容量或电感率。通过使用依赖于流体温度的偏差参数 $C(T_F)$ ,在推导 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 期间可以更容易地考虑机械振荡器和/或其相应的振荡器电路的依赖于温度的频率偏差。也可对依赖于流体压力的偏差参数 $C(T_F, p_F)$ 加以考虑。

[0034] 在本方法的另一有利的实施例中,推导出表示流体粘度 $\eta$ 的估算值 $\eta_m$ 。这通过例如求解如下方程来实现:

$$[0035] \quad |\eta_m(T_F)| = \left( \frac{|f_F - f_R| - (A\rho + C(T_F))}{\tilde{B}\sqrt{\rho}} \right)^2$$

[0036] 其中 $f_R$ 是所述(依赖于基准流体温度的)第一谐振频率, $f_F$ 是所述(依赖于流体温度的)第二谐振频率, $\rho$ 是流体的(已知的、预先测量的或预先建模的)密度函数,A和 $\tilde{B}$ 是振荡器特定的常数,并且 $C(T_F)$ 是在第一和第二机械振荡器和/或振荡器电路之间的依赖于流体温度的频率偏差参数。因而,当密度 $\rho$ 已知时,可以更容易地估算依赖于流体温度的粘度 $\eta(T_F)$ 。在这个估算期间的基本误差得以避免或减少。

[0037] 在本方法的另一有利的实施例中,推导出表示流体密度 $\rho$ 的估算值 $\rho_m$ 。因而,可估算流体的密度 $\rho$ ,并且避免或至少减少了在这个估算期间的基本误差,流体密度在例如高电

压开关装置中是一个重要参数。

[0038] 在另一有利的实施例中,当推导估算值 $\rho_m$ 时,至少对于在170K至400K之间范围内的流体温度 $T_F$ 和基准流体温度 $T_R$ 而言,优选至少对于在220K至380K之间范围内流体温度 $T_F$ 和基准流体温度 $T_R$ 而言,基准流体的粘度函数 $\eta_R(T_R)$ 的基准流体温度依赖性 $\delta\eta_R/\delta T_R$ 与流体的粘度函数 $\eta(T_F)$ 的流体温度依赖性 $\delta\eta/\delta T_F$ 是相等的,或者相差不到 $\pm 30\%$ ,优选不到 $\pm 10\%$ 。因而,流体和基准流体的粘度函数 $\eta(T_F)$ 和 $\eta_R(T_R)$ 的温度依赖性 $\delta\eta/\delta T$ (或换句话说它们的斜度)是相同的,或至少是相似的。因而,可以更容易地避免或减少在推导 $\rho_m$ 期间的基本误差。

[0039] 在本方法的另一有利的实施例中,当推导估算值 $\rho_m$ 时,在推导估算值 $\rho_m$ 期间使用了(已知的、预先测量的或预先建模的)依赖于流体温度的粘度函数 $\eta(T_F)$ 。不同流体温度 $T_F$ 的多个 $\eta$ 值例如可预先储存在查询表中,或例如借助拟合和/或内插算法或外插算法在线进行计算。因而,可以更容易地避免或减少在推导 $\rho_m$ 期间的基本误差。

[0040] 在本方法的另一有利的实施例中,当推导估算值 $\rho_m$ 时,在推导估算值 $\rho_m$ 期间使用了(已知的、预先测量的或预先建模的)依赖于流体压力的粘度函数 $\eta(p_F)$ 。不同流体压力 $p_F$ 的多个 $\eta$ 值例如可预先储存在查询表中,或例如借助拟合和/或内插算法或外插算法在线进行计算。因而,可以更容易地避免或至少减少在推导 $\rho_m$ 期间的基本误差。

[0041] 在本方法的另一有利的实施例中,根据如下方程推导出表示流体密度 $\rho$ 的估算值 $\rho_m$ 。

$$[0042] \quad |f_d - f_F| = \left| A \rho_m + \tilde{B} \sqrt{\rho_m} \sqrt{\eta(p_F, T_F)} + C(p_F, T_F) \right|$$

$$[0043] \quad \text{其中 } A = \frac{c_1 t}{2 \rho_q w} f_d \text{ 且}$$

$$[0044] \quad \tilde{B} = \frac{c_2}{2 \rho_q w} \sqrt{\frac{f_d}{\pi}}$$

[0045] 并且其中 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $t$ 和 $w$ 是依赖于振荡器几何结构的常数,其中 $\rho_q$ 是所述机械振荡器的材料的有效密度, $\eta(p_F, T_F)$ 是所述流体的依赖于流体压力的和/或依赖于流体温度的粘度函数, $f_d$ 是所述第一机械振荡器和所述第二机械振荡器的公共设计谐振频率(其对于这两个振荡器是相等的,在 $\pm 5\%$ 内,优选在 $\pm 1\%$ 内),并且 $C(p_F, T_F)$ 是依赖于流体压力的和/或依赖于流体温度的偏差参数,其表示在所述第一机械振荡器和所述第二机械振荡器之间和/或在第一振荡器电路和第二振荡器电路之间的频率偏差,第一振荡器电路连接在所述第一机械振荡器上并用于操作所述第一机械振荡器,并且第二振荡器电路连接在所述第二机械振荡器上并用于操作所述第二机械振荡器。在这方面,术语“设计谐振频率”涉及相应的机械振荡器的谐振频率,其是在机械振荡器的设计和制造期间设定的。应该注意,偏差参数 $C$ 的温度依赖性 $\delta C/\delta T$ 和/或压力依赖性 $\delta C/\delta p$ 要么可被忽略,或者可有利地预先测量或预先建模,并用于本方法的校准,或者-备选地-可选择机械振荡器,使得温度依赖性 $\delta C/\delta T$ 很小,即, $\delta C/\delta T < 0.1 \text{ Hz/K}$ 。

[0046] 这里,以开氏温度表达的基准流体温度 $T_R$ 与所述流体温度 $T_F$ 是相等的,或者相差不到 $\pm 5\%$ ,优选不到 $\pm 2\%$ ,更优选不到 $1\%$ 。对于流体、基准流体和两个机械振荡器更有利地假定达成热平衡(相等的温度)。

[0047] 此外,在 $T_R > 200 \text{ K}$ 且 $T_R < 400 \text{ K}$ 的基准流体温度范围内,基准流体的基准流体压力 $p_R$ 至

多0.1毫巴,优选至多 $10^{-2}$ 毫巴,更优选至多 $10^{-4}$ 毫巴。

[0048] 作为一个优点,可以更容易地避免或减少在推导 $\rho_m$ 期间的基本误差,并且简化了 $\rho_m$ 的推导。

[0049] 在本方法的一个不同的有利的实施例中,第一机械振荡器与基准流体相接触,基准流体在 $T_R > 200K$ 且 $T_R < 400K$ 的基准流体温度范围内具有至少10毫巴,更优选至少100毫巴,甚至更优选至少1巴的基准流体压力 $p_R$ 。然后,根据以下方程推导出表示流体密度 $\rho$ 的估算值 $\rho_m$

$$[0050] \quad |f_R - f_F| = \left| \frac{A_F \rho_m + (\tilde{B}_F \sqrt{\rho} - \tilde{B}_R \sqrt{\rho_R}) \sqrt{\eta(p_F, T_F)} + D(p_F, T_F)}{+D(p_F, T_F)} \right|$$

[0051] 其中  $D(p_F, T_F) = C(p_F, T_F) - A_R \rho_R$

[0052]  $A_F$ 、 $A_R$ 、 $\tilde{B}_F$  和  $\tilde{B}_R$  是依赖于振荡器几何结构的常数(其中索引R用于第一机械振荡器,并且索引F用于第二机械振荡器)。 $\rho_R$ 是基准流体的(已知的)密度。流体密度 $\rho$ 等于基准流体的密度 $\rho_R$ 或与之相差不到 $\pm 50\%$ ,优选不到 $\pm 10\%$ ,更优选不到 $\pm 1\%$ 。 $\eta(p_F, T_F)$ 是依赖于流体压力的和/或依赖于流体温度的流体粘度函数,其等于依赖于基准流体压力的和/或依赖于基准流体温度的基准流体粘度函数 $\eta_R(p_R, T_R)$ 或与之相差不到 $\pm 50\%$ ,优选不到 $\pm 10\%$ ,更优选不到 $\pm 1\%$ 。如上所述, $C(p_F, T_F)$ 是依赖于流体压力和/或依赖于流体温度的偏差参数,其表示在所述第一机械振荡器和所述第二机械振荡器之间和/或在第一振荡器电路和第二振荡器电路之间的频率偏差,第一振荡器电路连接在所述第一机械振荡器上并用于操作所述第一机械振荡器,并且第二振荡器电路连接在所述第二机械振荡器上并用于操作所述第二机械振荡器。第一机械振荡器和第二机械振荡器(10, 20)选择成使得所述依赖于振荡器几何结构的常数 $\tilde{B}_F$ 和 $\tilde{B}_R$ 彼此相等,或相差不到 $\pm 50\%$ ,优选不到 $\pm 10\%$ ,更优选不到 $\pm 1\%$ 。此外,以开氏温度表达的基准流体温度 $T_R$ 与所述流体温度 $T_F$ 是相等的,或者相差不到 $\pm 5\%$ ,优选不到 $\pm 2\%$ ,更优选不到 $1\%$ 。对于流体、基准流体和两个机械振荡器更有利地假定达成热平衡(相等的温度)。

[0053] 作为一个优点,可以更容易地避免或减少在推导 $\rho_m$ 期间的基本误差,并且简化了 $\rho_m$ 的推导。

[0054] 在本方法的另一有利的实施例中,所述第一机械振荡器、所述第二机械振荡器、所述流体和所述基准流体具有相同的温度,即,它们的温度不会相差超过1K。作为一个优点,这个温度可用于推导所述估算值 $\rho_m$ 和/或 $\eta_m$ 。

[0055] 作为本发明的另一方面,公开了一种用于执行上述方法的传感器。这种传感器包括

[0056] - 第一机械振荡器,

[0057] - 第一振荡器电路,其连接在第一机械振荡器上,用于操作(例如用于引起谐振,用于测量第一谐振频率 $f_R$ 等等)第一机械振荡器,

[0058] - 第二机械振荡器,

[0059] - 第二振荡器电路,其连接在第二机械振荡器上,用于操作(例如用于引起谐振,用于测量第二谐振频率 $f_F$ 等等)第二机械振荡器,和

[0060] - 分析和控制单元,其连接在所述第一振荡器电路和所述第二振荡器电路上,并适合于执行所述方法的步骤。

[0061] 因而,可实施更高精度的传感器,其较少倾向出现基本误差,尤其是由于依赖于流体温度的粘度 $\eta$ 出现基本误差。

[0062] 有利的是,传感器的分析和控制单元包括处理单元和存储器,其中所述分析和控制单元适合于针对至少两个不同的流体温度 $T_F$ 和/或针对至少两个不同的流体压力 $p_F$ 推导出至少一个依赖于流体温度的和/或依赖于流体压力的参数的至少两个值。这例如可通过查询表和/或通过例如包括外插或内插算法和拟合技术的在线计算来实现。因而,依赖于流体温度的和/或依赖于流体压力的参数可以更容易地用于推导 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 。

[0063] 在另一有利的实施例中,传感器还包括密封的基准空间和连接器单元,连接器单元用于将传感器装置连接到包含有待测量的流体的流体隔室(例如有待监测的设备的流体隔室)。第一机械振荡器设置在所述密封的基准空间中,所述密封的基准空间可选地包括基准流体。因而,传感器可相对于流体隔室独立地进行制造、试验和校准。

[0064] 作为本发明的另一方面,公开了一种流体绝缘的电气设备,尤其是气体绝缘的中等电压或高电压开关装置。这种流体绝缘的电气设备包括

[0065] - 上述传感器装置,其用于推导表示有待量化的流体的密度 $\rho$ 的估算值 $\rho_m$ ,和

[0066] - 在电气设备的流体隔室中的有待量化的流体,其中流体适合于使流体绝缘的电气设备的带电部分隔离开。因而,流体绝缘的电气设备可装备更高精度的密度传感器。

[0067] 有利的是,流体绝缘的电气设备的流体包括由以下成分组成的组中的至少一种成分

[0068] - 氮,

[0069] - 氧,

[0070] - 二氧化碳,

[0071] - 一氧化氮,

[0072] - 二氧化氮,

[0073] - 一氧化二氮,

[0074] - 氙,

[0075] - 甲烷,尤其是部分地或完全卤化的甲烷,尤其是四氟甲烷或三氟碘甲烷,

[0076] - 空气,尤其是工艺空气或合成空气,和

[0077] - 六氟化硫,

[0078] - 部分或完全氟化的醚类,尤其氢氟醚、氢氟单醚、包含至少3个碳原子的氢氟单醚、全氟单醚或包含至少4个碳原子的全氟单醚,

[0079] - 部分或完全氟化的酮,特别氢氟单酮(monoketone)、全氟单酮、包括至少5个碳原子的全氟单酮、或者刚好包括5或6或7或8个碳原子的全氟单酮,和

[0080] - 其混合物。

[0081] 因而,可获得更高的绝缘强度。

[0082] 作为本发明的另一方面,公开了一种计算机程序元件,其包括计算机程序代码装置,计算机程序代码装置用于在被处理单元执行时实施上述方法。这可使上述方法在包括处理单元的装置中得以实施。

## 附图说明

[0083] 在结合附图时通过参照以下根据本发明的有利但属说明性的实施例的详细说明，将更完整地理解本发明和其实施例。

[0084] 图1显示了根据本发明的第一实施例的带有传感器1的流体绝缘的电气设备40，其中依赖于流体温度的粘度 $\eta(T_F)$ 用于推导估算值 $\rho_m$ ，

[0085] 图2显示了根据不同气体的流体温度 $T_F$ 而改变的粘度函数 $\eta(T_F)$ ，

[0086] 图3显示了流体温度 $T_F$ 的估算值 $\rho_m$ 的依赖性，其中 $\rho_m$ 是由用于比较的不同的方法推导出的，和

[0087] 图4显示了根据本发明的第二实施例的带传感器1的流体绝缘的电气设备40，其中基准空间RV包括与第一机械振荡器10相接触的基准流体R。

## 具体实施方式

[0088] 附图说明：

[0089] 图1显示了根据本发明的第一实施例的带传感器1的流体绝缘的电气设备40。在这个实施例中，依赖于流体温度的粘度函数 $\eta(T_F)$ 用于推导估算值 $\rho_m$ ，估算值 $\rho_m$ 表示流体F的密度 $\rho$ （参见下文）。电气设备40包括流体隔室41，其包括用于使电气设备40的带电部分42隔离开的绝缘流体F（例如包括SF6的绝缘气体）。绝缘流体具有流体压力 $p_F = 3.5$ 巴，流体温度 $T_F = 20^\circ\text{C}$ ，粘度 $\eta = 14\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ 和密度 $\rho = 4.09\text{ kg/m}^3$ 。气体可渗透的保护性网104可设置在流体隔室41的凸缘附近，用于防止能够损伤所连接的传感器1的颗粒和不需要的化合物的通过。传感器1的连接单元103将传感器1的测量空间MV连接到电气设备40的流体隔室41上。在测量空间MV中设置了具有设计谐振频率 $f_d = 32.768\text{ kHz}$ 的第二机械振荡器20（石英音叉，例如来自Citizen公司的型号CFS206）。这个音叉与流体F相接触。振荡器电路20a引起音叉中的谐振，但由于与流体F的相互作用，第二谐振频率 $f_F = 32.758\text{ kHz}$ 相对于设计谐振频率 $f_d$ 略有变化。此外，第二谐振频率 $f_F$ 由于音叉材料和振荡器电路属性而是依赖于温度的。第二机械振荡器以及第二振荡器电路20a与流体F处于热平衡，即，它们具有相同的温度 $T_F$ 。这可通过例如可选的温度调节器105（虚线）和/或具有高热导率的传感器外壳来促进。可选的温度传感器101（虚线）和/或可选的压力传感器102（虚线）可用于测量流体F的温度 $T_F$ 和/或压力 $p_F$ 以及第一机械振荡器的温度。作为使用温度传感器101的备选，当假定测量空间MV的恒定的流体密度 $\rho$ 时，第二谐振频率 $f_F$ 相对于设计谐振频率 $f_d$ 的偏差可用于量化流体温度 $T_F$ 。

[0090] 在传感器1的密封的基准空间RV中设置了第一机械振荡器10（压力 $p_R$ 至多 $10^{-4}$ 毫巴）。第一机械振荡器也是例如具有与第二机械振荡器20相同类型和相同设计谐振频率 $f_d$ 的石英音叉。振荡器电路10a引起第一机械振荡器10中的谐振，但由于失去与流体F的相互作用，第一谐振频率 $f_R = 32.768\text{ kHz}$ 相对于第二机械振荡器20的第二谐振频率 $f_F$ 略有变化。由于第一机械振荡器10和振荡器电路10a的温度依赖性，第一谐振频率 $f_R$ 还可略微不同于设计谐振频率 $f_d$ 。换句话说，第一谐振频率 $f_R$ 也是依赖于温度的。第一机械振荡器10不与流体F接触，但与流体F和第二机械振荡器20处于热平衡。因此，在谐振频率 $f_R$ 和 $f_F$ 之间的差异相对于设计频率 $f_{d,R}$ 和 $f_{d,F}$ 的偏差的偏差也可用于量化流体温度 $T_F$ ，同时假定流体和基准流

体的密度是恒定的。

[0091]  $f_R$ 和 $f_F$ 的值通过振荡器电路10a和20a读出,并发送至分析和控制单元30,分析和控制单元30包括处理单元30a和存储器30b。

[0092] 使用这些谐振频率 $f_R$ 和 $f_F$ ,处理单元30根据以下方程推导出表示流体F的密度 $\rho$ 的估算值 $\rho_m$

$$[0093] \quad |f_R - f_F| = \left| A\rho_m + \tilde{B}\sqrt{\rho_m}\sqrt{\eta(T_F)} + C(T_F) \right| \quad \text{方程1}$$

$$[0094] \quad \text{其中 } A = \frac{c_1 t}{2\rho_q w} f_d$$

$$[0095] \quad \text{且 } \tilde{B} = \frac{c_2}{2\rho_q w} \sqrt{\frac{f_d}{\pi}}$$

[0096] 并且 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $t$ 和 $w$ 是依赖于音叉几何结构的常数。 $\rho_q$ 是第二机械振荡器20的材料的密度。 $f_d$ 是第二机械振荡器20的设计谐振频率。

[0097] 在这个实施例中,流体F的依赖于流体温度的粘度函数 $\eta(T_F)$ (见图2)用于推导估算值 $\rho_m$ 。或者,还可使用考虑了流体压力 $p_F$ 的粘度函数 $\eta(p_F, T_F)$ (这里未显示)。针对不同流体温度值 $T_F$ ,这个函数预储存在存储器30b中,作为查阅表。而且可使用内插算法。参数 $C(T_F)$ 是依赖于流体温度的频率偏差参数,其是表示在所述第一机械振荡器10与第二机械振荡器20之间和其相应的振荡器电路10a和20a之间的制造公差引起的频率偏差。这个参数还描述了第一和第二谐振频率 $f_R$ 和 $f_F$ 的流体温度依赖性 $\delta f/\delta T$ ,并且针对不同的温度 $T$ ,其也被预先储存在存储器30b中。参数 $C(p_F, T_F)$ 也是可行的(未显示这里),其也依赖于压力。

[0098] 通过使用依赖于流体温度的粘度函数 $\eta(T_F)$ 和依赖于流体温度的频率偏差参数 $C(T_F)$ ,可避免或减少推导估算值 $\rho_m$ (或备选地,在相似的实施例中的 $\eta_m$ )的基本误差(见图3)。如上所述,还可考虑 $\eta(p_F)$ 和 $C(p_F)$ 的压力依赖性。然而,这种校正的效应比温度依赖性小一个数量级。具体地说,在0.1巴至10巴之间的范围内,粘度 $\eta$ 随压力的变化大约为 $\delta\eta/\delta p = 0.5\%/10$ 巴,而在100K至400K之间的范围内,粘度 $\eta$ 随温度的变化大约为 $\delta\eta/\delta T = 5\%/100$ K。

[0099] 应该注意的是,机械振荡器的至少1kHz、优选至少30kHz、更优选至少100kHz的谐振频率 $f_R$ 和 $f_F$ 也会导致推导 $\rho_m$ 时由于粘度引起的基准误差的减少,因为 $\tilde{B}\sqrt{\eta(T_F)} \propto \sqrt{f_d}\sqrt{\eta(T_F)}$ ,而 $A \propto f$ ,因而依赖于粘度的项目的贡献将随着谐振频率 $f_R$ 和 $f_F$ 的增加而变得更小。Zeel等人的“A precise and robust quartz sensor based on tuning fork technology for (SF<sub>6</sub>)-gas density control”(《传感器与促动器(Sensors and Actuators)》80(2000), 233-236)给出了这方面更多的细节。

[0100] 图2显示了不同气体的根据流体温度 $T_F$ 而改变的粘度函数 $\eta(T_F)$ 。在参照图1所述的本发明的第一实施例中使用了这种粘度函数 $\eta(T_F)$ 。这里具体地说,菱形显示了1巴压力下的干空气的粘度 $\eta$ ,圆显示了1巴压力下的氮气的粘度 $\eta$ ,并且矩形显示了SF<sub>6</sub>的粘度 $\eta$ 。所有气体显示了相似的温度依赖性 $\delta\eta/\delta T$ 。线是3阶多项式,其拟合穿过测量的点。通过使用依赖于流体温度的粘度函数 $\eta(T_F)$ ,可避免或减少推导估算值 $\rho_m$ (或 $\eta_m$ )时的基本误差。

[0101] 图3显示了估算值 $\rho_m$ ,其是从参照图1所述的本发明的第一实施例中获得的流体温度 $T_F$ 的函数。此外,比较了不同的校正方法。具体地说,矩形显示了以恒定的(即,不依赖于

流体温度的)粘度 $\eta$ 获得的现有技术的估算值 $\rho_m$ 。可以看出,对于这种方法,由于忽略了粘度 $\eta$ 的流体温度依赖性而引起的基本温度误差,在 $-10^\circ\text{C}$ 至 $+70^\circ\text{C}$ 之间的温度范围中,导致了流体F的密度 $\rho$ 的 $\pm 2\%$ 的错误估算。

[0102] 相反,菱形显示了如图2中所示,即根据本申请考虑了的依赖于流体温度的粘度函数 $\eta(T_F)$ 时所获得的估算值 $\rho_m$ 。明显地,这些估算更接近真实的密度值 $\rho$ ,在相同的温度范围内,密度 $\rho$ 的错误估算被减少至 $\pm 0.1\%$ 。图中用点画线显示了真实密度 $\rho$ 。所有其它的线都是线性拟合。

[0103] 图4显示了根据本发明的第二实施例的具有传感器1的流体绝缘的电气设备40。第二实施例与参照图1所述的第一实施例是非常相似的。因此,使用了相同标号。在第一实施例和第二实施例之间的一个差异是第二实施例中的基准空间RV包括具有基准流体压力 $p_R$ 和基准流体温度 $T_R$ 的基准流体R。基准流体R与第一机械振荡器10相接触。暴露于基准流体R下,第一(基准)机械振荡器还将像第二(流体内置的)机械振荡器那样对相同的效应作出响应,只要流体和基准流体具有相同或至少相似的(参见上文)温度 $T_F$ 和 $T_R$ ,基准流体R是相同或相似的流体(参见上文,即在密度 $\rho$ 和 $\rho_R$ 方面是相似的,在粘度函数 $\eta(p_F, T_F)$ 和 $\eta_R(p_R, T_R)$ 及其温度依赖性 $\delta\eta/\delta T$ 方面是相似的)。这可通过例如可选的温度调节器105(虚线)和/或具有高热导率的传感器外壳来促进。在这个第二实施例中,基准流体压力 $p_R$ 是1巴。因而,对于流体F和基准流体R而言,对于粘度的依赖于压力的影响是相似的。流体温度 $T_F$ 和基准流体温度 $T_R$ 可通过温度传感器101来测量。在这个实施例中,以下方程用于推导估算值 $\rho_m$

$$[0104] \quad |f_R - f_F| = \left| \frac{A_F \rho_m + (\tilde{B}_F \sqrt{\rho} - \tilde{B}_R \sqrt{\rho_R}) \sqrt{\eta(p_F, T_F)} + D(p_F, T_F)}{+ D(p_F, T_F)} \right|$$

[0105] 其中相同的定义就如上面论述的那样。

[0106] 通过将第一机械振荡器10设置成与基准流体相接触,可以内在地避免或减少推导估算值 $\rho_m$ 或 $\eta_m$ 时的基本误差。

[0107] 定义:

[0108] 术语“流体”指一种“物质,例如液体[和/]或气体,其可流动,没有固定的形状,并且对外部应力提供很少的阻力”(2011年9月11日访问的<http://www.thefreedictionary.com/fluid>)。

[0109] 术语“高电压”指大于50kV的电压。

[0110] 术语“中等电压”指大于1kV的电压。

[0111] 注意:

[0112] 虽然已经显示和描述了本发明的当前优选的实施例,但是应该明显懂得本发明并不局限于此,而是可以在所附权利要求的范围内以不同的方式来体现和实践。

[0113] 参考标号

[0114] 1 传感器

[0115] 10 第一机械振荡器

[0116] 101 温度传感器

[0117] 102 压力传感器

[0118] 103 连接器单元

- [0119] 104 保护性网
- [0120] 105 温度调节器
- [0121] 10a 第一振荡器电路
- [0122] 20 第二机械振荡器
- [0123] 20a 第二振荡器电路
- [0124] 30 分析和控制单元
- [0125] 30a 处理单元
- [0126] 30b 存储器
- [0127] 40 流体绝缘的电气设备
- [0128] 41 流体隔室
- [0129] 42 带电部分
- [0130]  $C(T_F, p_F)$  频率偏差参数
- [0131] F 流体
- [0132]  $f_d$  设计谐振频率
- [0133]  $f_R$  第一谐振频率
- [0134]  $f_F$  第二谐振频率
- [0135] MV 测量空间
- [0136] p 压力
- [0137]  $p_F$  流体压力
- [0138]  $p_R$  基准流体压力
- [0139] R 基准流体
- [0140] RV 基准空间
- [0141] T 温度
- [0142]  $T_F$  流体温度
- [0143]  $T_R$  基准流体温度
- [0144]  $\eta(T_F, p_F)$  流体的粘度函数
- [0145]  $\eta_m$  表示流体粘度 $\eta$ 的估算值
- [0146]  $\rho_m$  表示流体密度 $\rho$ 的估算值
- [0147]  $\delta\eta/\delta T_R$  粘度函数 $\eta(T_R)$ 的基准流体温度依赖性
- [0148]  $\delta\eta/\delta T_F$  粘度函数 $\eta(T_F)$ 的流体温度依赖性
- [0149]  $\delta f_R/\delta T_R$  第一谐振频率 $f_R$ 的基准流体温度依赖性
- [0150]  $\delta f_F/\delta T_F$  第二谐振频率 $f_F$ 的流体温度依赖性
- [0151]  $\delta C/\delta T$  C的温度依赖性
- [0152]  $\delta C/\delta p$  C的压力依赖性
- [0153]  $\eta_R(p_R, T_R)$  基准流体的依赖于基准流体压力的和/或依赖于基准流体温度的粘度函数
- [0154]  $\rho_R$  基准流体的密度。

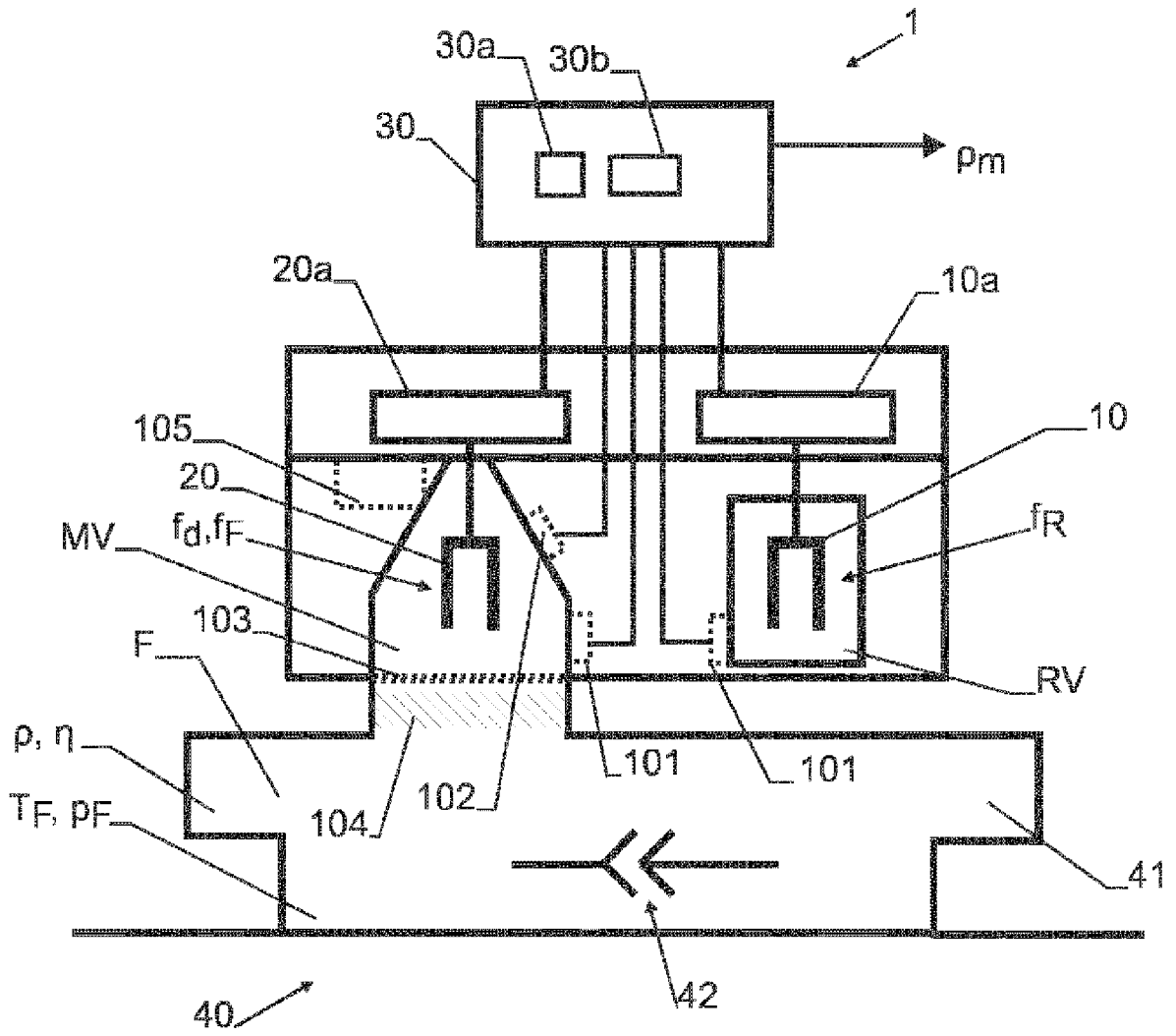


图 1

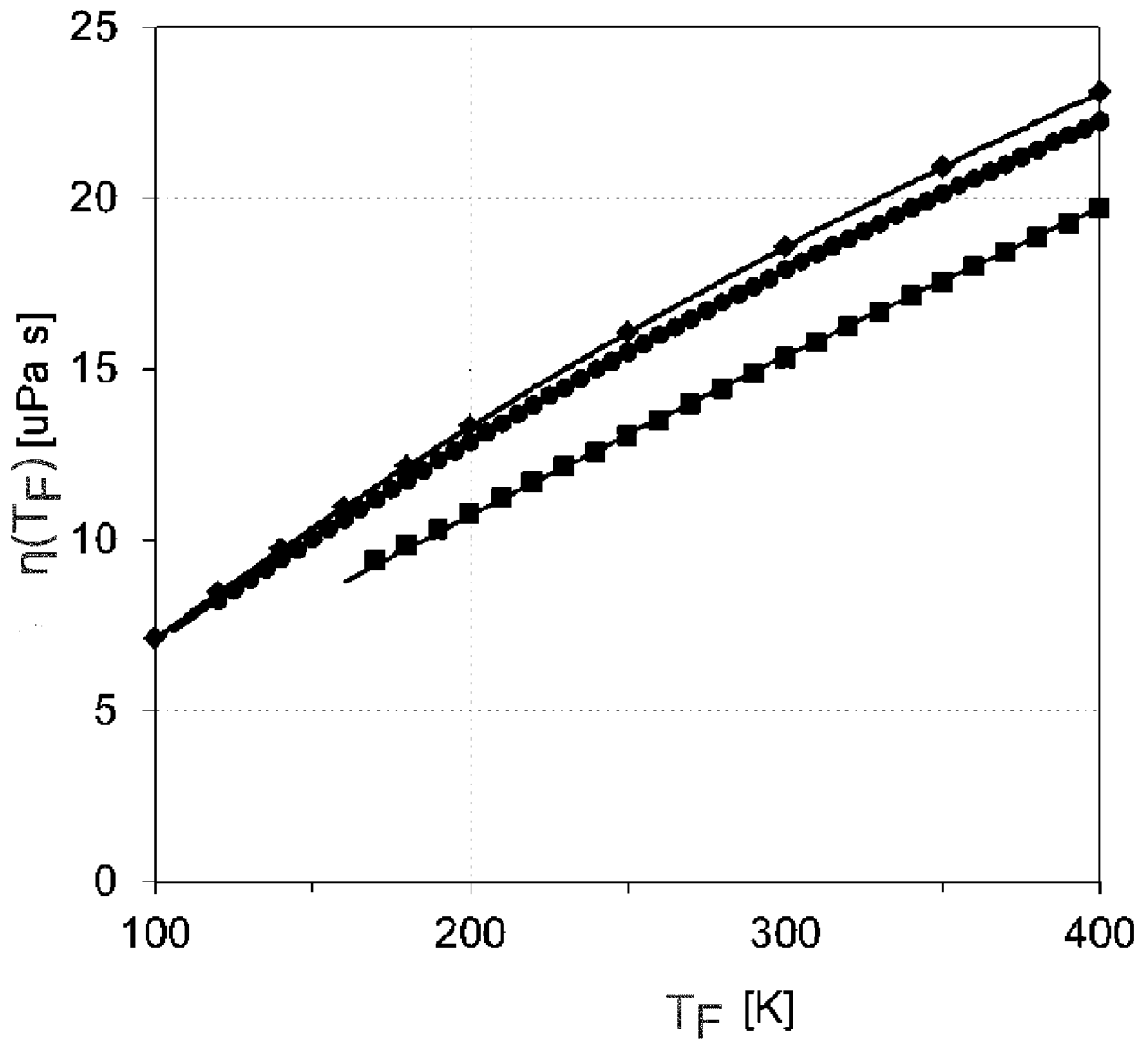


图 2

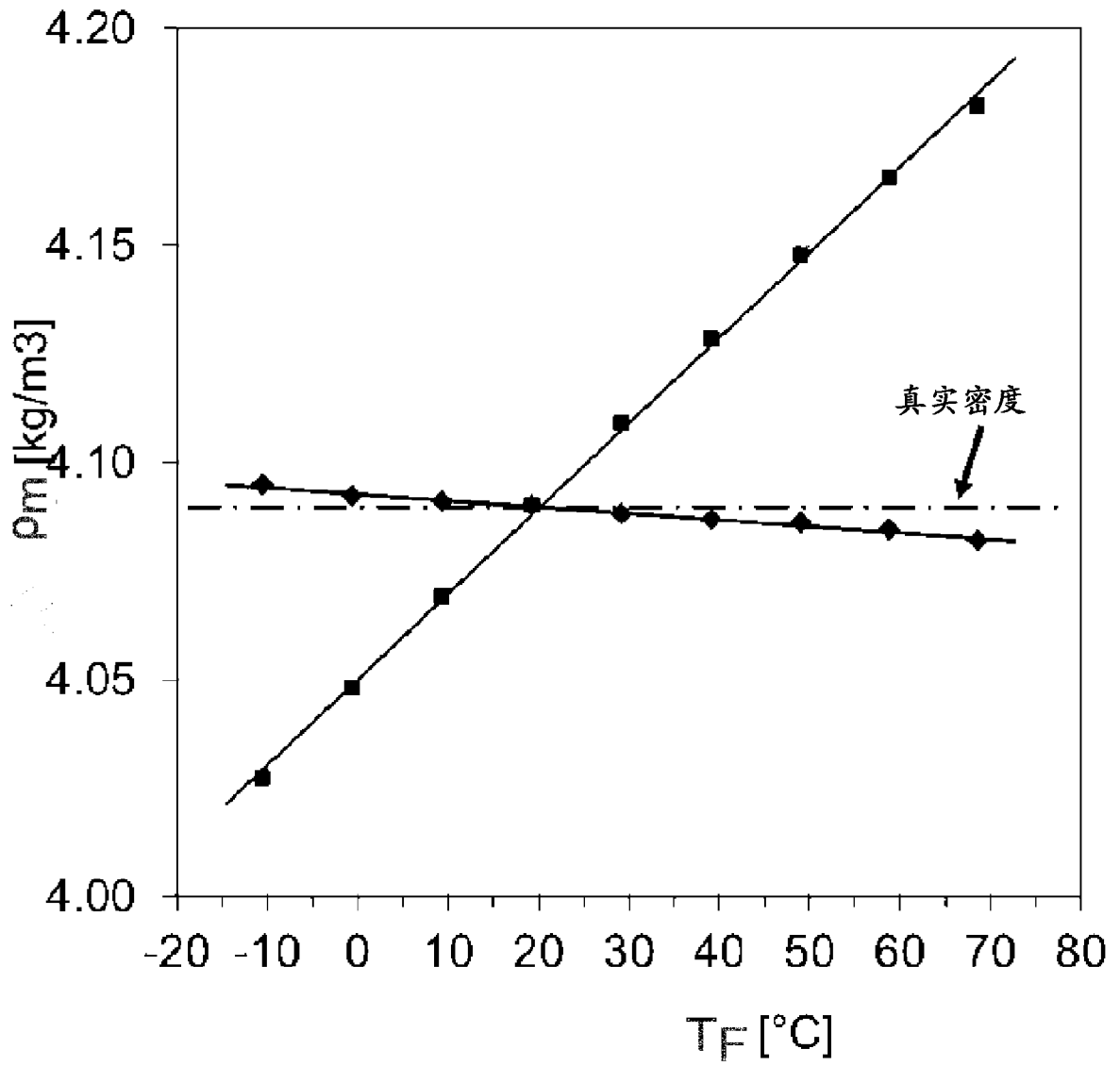


图 3

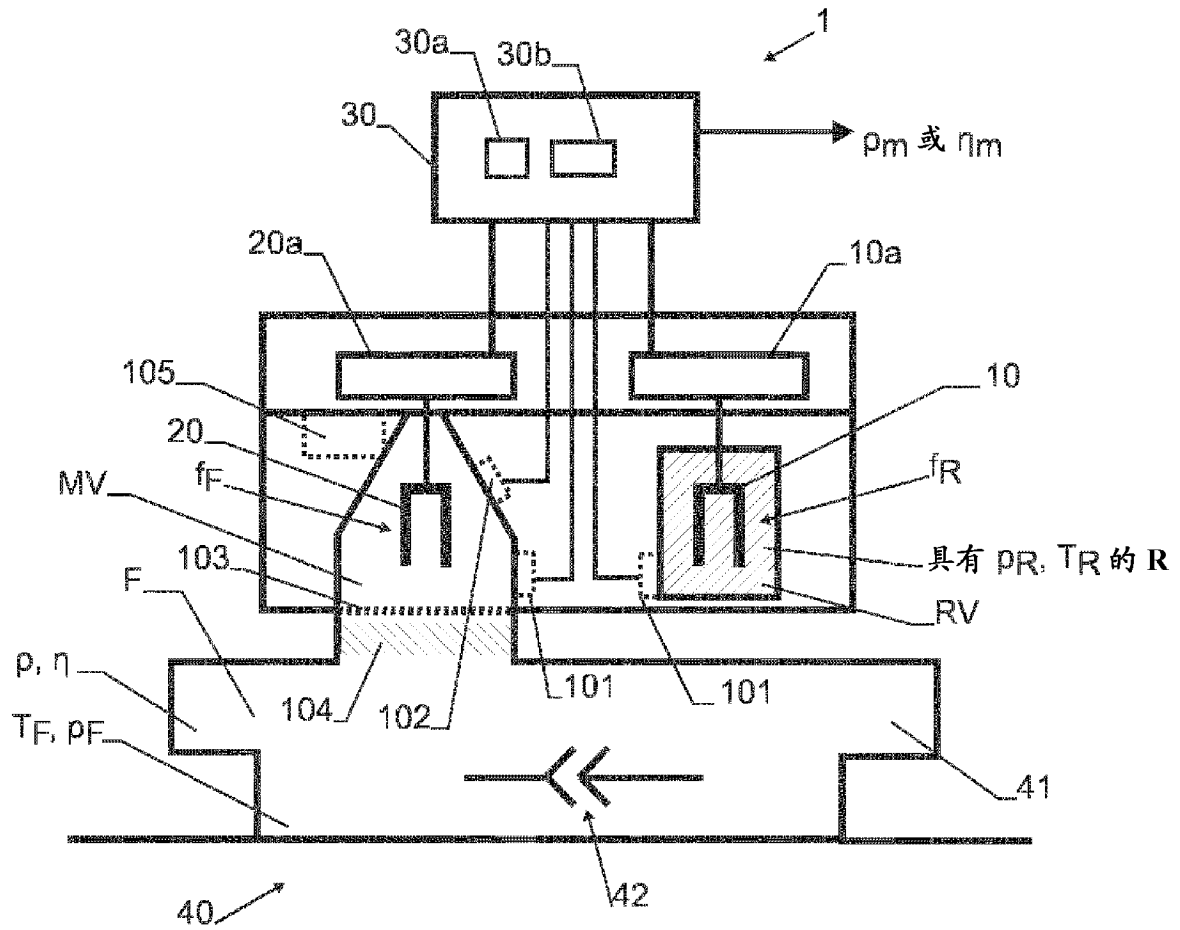


图 4