(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109863393 A
(43)申请公布日 2019.06.07

(21)申请号 201780063269.6

(22)申请日 2017.08.15

(30)优先权数据
2016903232 2016.08.15 AU
2017902304 2017.06.16 AU

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2019.04.12

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/AU2017/050862 2017.08.15

(87)PCT国际申请的公布数据
WO2018/032044 EN 2018.02.22

(71)申请人 格雷斯坎私人有限公司
地址 澳大利亚维多利亚州

(72)发明人 格雷厄姆·威廉·莱福德
迈克尔·史密斯
阿里斯代尔·斯图亚特·韦伯
亚当·约翰·卡西克 利·瑞安
伊恩·埃米尔·索恩

(74)专利代理机构 北京安信方达知识产权代理有限公司 11262
代理人 齐加文 杨明钊

(51)Int.Cl.
*G01N 27/447*(2006.01)
*G01N 27/26*(2006.01)
*B01D 57/02*(2006.01)
*G01N 33/487*(2006.01)

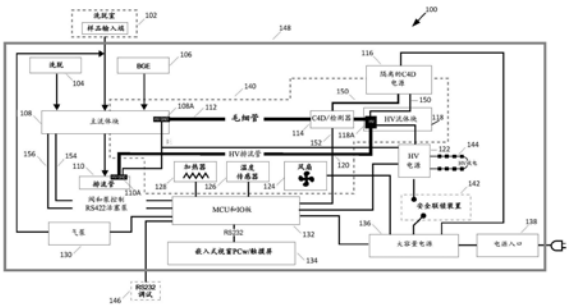
权利要求书2页 说明书19页 附图9页

(54)发明名称

洗脱和检测

(57)摘要

描述了洗脱装置和检测装置。洗脱装置包括:用于捕获样品的样品捕获器;以及用于移动液体洗脱液和液体洗出物的一个或更多个泵和/或阀,其中洗出物包括样品的通过洗脱液提取的提取部分。检测装置包括:毛细管,其具有用于接收样品的低电压(LV)端部;以及电导率检测器,其耦合到毛细管的高电压(HV)端部,以基于HV端部中毛细管的被监测的部分的电导率产生信号,其中电导率检测器与LV端部电隔离。



CN 109863393 A

1.一种洗脱装置,包括:

样品捕获器,其用于捕获样品;和

一个或更多个泵和/或阀,其用于移动液体洗脱液和液体洗出物,其中所述洗出物包括所述样品的通过所述洗脱液提取的提取部分。

2.根据权利要求1所述的洗脱装置,其中所述样品捕获器包括具有用于捕获或吸附所述样品的表面特征的捕获材料。

3.根据权利要求2所述的洗脱装置,其中,所述捕获材料是用于粘附所述样品的粘结材料。

4.根据权利要求3所述的洗脱装置,其中所述粘结材料是粘结带。

5.根据权利要求1至4中任一项所述的洗脱装置,其中所述样品捕获器具有用于吸附所述样品的表面结构。

6.根据权利要求1至5中任一项所述的洗脱装置,其中所述样品捕获器包括用于吸附所述样品的材料的部分,并且过滤器包括用于过滤出所述洗出物的所述材料的所述部分。

7.根据权利要求1至5中任一项所述的洗脱装置,包括用于过滤出所述洗脱装置中的所述洗出物的过滤器。

8.一种洗脱方法,包括:

将样品捕获在样品捕获器中;和

移动液体洗脱液和液体洗出物,其中所述洗出物包括所述样品的通过所述洗脱液提取的提取部分。

9.根据权利要求8所述的洗脱方法,包括:

用所述样品捕获器擦拭以将所述样品捕获在材料的部分中;

洗脱夹具接收所擦拭过的样品捕获器;

通过手或通过致动器闭合所述洗脱夹具;和/或

启动由电子控制器控制的样品处理方法。

10.根据权利要求9所述的洗脱方法,其中所述样品处理方法包括:

使第一体积的第一试剂形式的所述洗脱液流通到所述洗脱夹具中;

迫使所述第一试剂通过或经过所述材料的所述部分,以形成洗出物,所述材料的所述部分包括所述样品捕获器的部分;

使所述洗出物移动通过脱气和过滤系统;

将脱气后的洗出物移动到接地歧管,使得所述脱气后的洗出物位于毛细管的低电压(LV)端;

将所述脱气后的洗出物注入到所述毛细管中;

用电解质冲洗接地歧管,以将电解质溶液置于所述毛细管的所述LV端;和/或

给高电压(HV)电源通电以分离所述样品。

11.根据权利要求8至10中任一项所述的洗脱方法,包括使用所述材料的所述部分过滤出所述洗脱装置中的所述洗出物。

12.一种检测装置,包括:

毛细管,其具有用于接收样品的低电压(LV)端部;和

电导率检测器,其耦合到所述毛细管的高电压(HV)端部,以基于所述HV端部中的所述

毛细管的被监测部分的电导率产生信号，

其中所述电导率检测器与所述LV端部电隔离。

13.根据权利要求12所述的检测装置，其中所述电导率是复电导率。

14.根据权利要求12或13所述的检测装置，包括用于给所述电导率检测器供电的无线电连接。

15.根据权利要求14所述的检测装置，其中所述无线电连接包括无线电发送器和无线电接收器。

16.根据权利要求12至15中任一项所述的检测装置，包括用于从所述电导率检测器和/或向所述电导率检测器传输通信信号的光通信链路。

17.根据权利要求12至16中任一项所述的检测装置，其中所述电导率检测器是电容性电导率检测器、和/或非接触式电导率检测器、和/或电容性耦合非接触式电导率检测器(C4D)、和/或具有与毛细管流体相接触的电极的接触式电导率检测器。

18.根据权利要求12至17中任一项所述的检测装置，包括以下项中的一项或更多项：

相敏检测器，其用于确定来自所述电导率检测器的电导率信号的同相信号分量和正交信号分量；

用于来自所述电导率检测器的所述电导率信号的信号通道、以及用于针对所述电导率检测器产生的调制信号中的噪声信号的噪声通道，其中所述噪声通道与所述信号通道分离；和

用于将被监测的样品部分从所述电导率检测器带离的排流导管、或海绵、吸液芯或干燥表面，来自所述毛细管的所述被监测的样品部分通过经过气流在所述干燥表面上被干燥。

19.根据权利要求12至18中任一项所述的检测装置，包括发送电极和接收电极。

20.根据权利要求12至19中任一项所述的检测装置，其中所述发送电极和所述接收电极是印刷电路板(PCB)组件。

21.一种检测方法，包括：

具有低电压(LV)端部的毛细管接收样品；

耦合到所述毛细管的高电压(HV)端部并与所述LV端部电隔离的电导率检测器，基于所述HV端部中的所述毛细管的被监测的部分的电导率产生信号。

# 洗脱和检测

[0001] 相关申请

[0002] 以下相关专利申请的最初提交的说明书据此通过引用以其整体并入本文:澳大利亚临时专利申请2016903232(2016年8月15日提交)和2017902304(2017年6月16日提交)。

## 技术领域

[0003] 本发明总体上涉及用于洗脱和检测化合物和离子(例如分析物和/或无机化合物及其组成离子)的装置、系统和方法,包括例如用于洗脱和检测无机爆炸物痕量以筛选无机爆炸物的洗脱装置、洗脱方法、检测装置和检测方法。

[0004] 背景

[0005] 加强安全措施已成为全球的优先事项,例如在大众运输领域;政府、大使馆和领事馆建筑;警察和军事基础设施和安装;以及关键和高风险基础设施。目前全世界有超过400,000条安检通道以用于检测各种材料和物质,包括武器、毒品和违禁品。

[0006] 然而,现有的检测器技术存在重大缺陷。例如,使用离子迁移谱(IMS)的爆炸物痕量检测器(ETD)可能无法以足够的速度和/或精度或以合理的成本识别无机盐基爆炸物(例如,氯酸盐、硝酸盐和/或高氯酸盐)。IMS检测有机过氧化物的能力有限,并且可能无法检测无机化合物。质谱可能无法检测无机化合物。离子色谱法可能需要长的分析时间,例如超过25分钟。

[0007] 尽管毛细管电泳或毛细管区带电泳(“CZE”)可能已经被提出用于液相检测,例如在国际专利公开号WO/2014/026224中,但是现有的毛细管电泳检测器对于某些应用仍然不够灵敏和/或太慢。

[0008] 期望解决或改善与现有技术相关联的一个或更多个缺点或限制,或者至少提供有用的替代方案。

[0009] 概述

[0010] 根据本发明,提供了一种洗脱装置,包括:

[0011] 用于捕获样品的样品捕获器;和

[0012] 用于移动液体洗脱液(洗脱流体)和液体洗出物(eluate)的一个或更多个泵和/或阀,其中洗出物包括样品的通过洗脱液提取的提取部分。

[0013] 样品捕获器可以具有用于吸附样品的表面特性。捕获材料可以是用于粘结样品的粘结材料。粘结材料可以是粘结带。样品捕获器可以具有用于吸附样品的表面结构。样品捕获器可以包括用于吸附样品的材料的部分,并且过滤器包括过滤出洗出物的材料的部分。

[0014] 洗脱装置可以包括用于过滤出洗脱装置中的洗出物的过滤器。

[0015] 本发明还提供了一种洗脱方法,包括:

[0016] 将样品捕获在样品捕获器中;和

[0017] 移动液体洗脱液和液体洗出物,其中洗出物包括样品的通过洗脱液提取的提取部分。

[0018] 洗脱方法可以包括:

[0019] 用样品捕获器擦拭(swabbing)以将样品捕获在材料的部分中；

[0020] 洗脱夹具接收擦拭过的样品捕获器；

[0021] 通过手或通过致动器闭合洗脱夹具；和/或

[0022] 启动由电子控制器控制的样品处理方法。

[0023] 样品处理方法可以包括：

[0024] 使第一体积的第一试剂形式的洗脱液流通到洗脱夹具中；

[0025] 迫使第一试剂通过或经过包括样品捕获器的部分的材料的部分以形成洗出物；

[0026] 使洗出物移动通过脱气和过滤系统

[0027] 将脱气后的洗出物移动到接地歧管，使得脱气后的洗出物位于毛细管的低电压(LV)端；

[0028] 将脱气后的洗出物注入毛细管；

[0029] 用电解质冲洗接地歧管以将电解质溶液置于毛细管的LV端；和/或

[0030] 给高电压(HV)电源通电以分离样品。

[0031] 洗脱方法可以包括使用材料的部分过滤出洗脱装置中的洗出液。

[0032] 根据本发明，提供了一种检测装置，包括：

[0033] 毛细管，其具有接收样品的低电压(LV)端部；和

[0034] 电导率检测器，其耦合到毛细管的高电压(HV)端部以基于HV端部中毛细管的被监测部分的电导率产生信号(“电导率信号”)，

[0035] 其中(针对供电和数据通信)电导率检测器与LV端部电隔离。

[0036] 电导率是复电导率(还称为“导纳率”)，其是称为电导率的实部和称为电纳(还称为“灵敏度”)的虚部的总和。

[0037] 检测装置包括用于为电导率检测器供电的无线电连接。无线电连接包括无线电发送器和无线电接收器。

[0038] 检测装置包括用于从电导率检测器和/或向电导率检测器传输通信信号的光通信链路。

[0039] 电导率检测器可以是电容性电导率检测器、和/或非接触电导率检测器、和/或电容性耦合非接触电导率检测器(C4D)、和/或具有与毛细管流体接触的电极的接触电导率检测器。

[0040] 检测装置包括以下项中的一项或更多项：

[0041] 相敏检测器，其用于确定来自电导率检测器的电导率信号的同相信号分量和正交信号分量；

[0042] 用于来自电导率检测器的电导率信号的信号通道、以及用于针对电导率检测器产生的调制信号中的噪声信号的噪声通道，其中噪声通道与信号通道分离；和

[0043] 用于将被监测样品部分从电导率检测器带走的排流导管、或者海绵、吸液芯(wick)或干燥表面，来自毛细管的(在溶液中的)被监测样品部分(一旦经过检测器)通过经过(加热的)气流在该干燥表面上被(主动)干燥(以形成固体)。

[0044] 检测装置包括发送电极和接收电极，其中发送电极和接收电极是印刷电路板(PCB)组件。

[0045] 本发明还提供了一种检测方法，包括：

[0046] 具有低电压(LV)端部的毛细管接收样品；

[0047] 耦合到毛细管的高电压(HV)端部并(针对供电和通信)与LV端部电隔离的电导率检测器，基于HV端部中的毛细管的被监测部分的电导率产生信号。

[0048] 根据本发明，提供了一种洗脱装置，包括：

[0049] 用于捕获样品的样品捕获器；和

[0050] 一个或更多个泵和/或阀，其用于移动洗脱液(洗脱液)和洗出物，其中洗出物包括样品的通过洗脱液提取的提取部分。

[0051] 本发明还提供了一种洗脱方法，包括：

[0052] 将样品捕获在样品捕获器中；和

[0053] 移动洗脱液和洗出物，其中洗出物包括样品的通过洗脱液提取的提取部分。

## 附图说明

[0054] 下文仅以非限制性的示例的方式参照附图描述本发明的实施例，在附图中：

[0055] 图1是用于检测化合物的包括检测器的系统的框图；

[0056] 图2是系统的控制器板的框图；

[0057] 图3是控制器板的电源的框图；

[0058] 图4是系统的检测器的框图；

[0059] 图5是检测器中的数字信号处理模块的框图；

[0060] 图6是检测器的发送滤波器电路的电路图；

[0061] 图7是检测器的跨阻抗放大器的电路图；

[0062] 图8是用于检测器的电源的示意图；以及

[0063] 图9是系统的固件架构的框图。

[0064] 详细描述

[0065] 概述

[0066] 本文描述了一种利用毛细管电泳(CE)过程来分析样品和检测痕量无机爆炸物的系统。CE是一种用于分离不同尺寸的离子的方法。HV电场施加于溶液中的离子。离子在根据电场的极性和离子的极性的方向上移动。样品中的离子在流体静力作用(即压力)和静电作用(即电渗流)的驱动下流经毛细管。毛细管是管子，并且它的毛细作用(还称为“芯吸”)对于它在系统中的功能不是必要的。每种离子的速度由电场的强度和穿过毛细管内的背景电解质、并由电渗流驱动的离子的电泳迁移率决定。电泳迁移率与离子的电荷、离子的有效横截面积和离子移动通过的背景电解质(BGE)的粘度有关。电渗流量由毛细管的内表面积与体积比、BGE的pH值和施加的电场强度决定。使用不同离子类型的不同移动速率，CE通过测量离子从它们的起始位置到达处于已知距离处的电导率检测器所花费的时间来区分离子类型。检测到的电导率是复电导率(也称为“导纳率”)，其是称为电导率的实部和称为电纳(也称为“灵敏度”)的虚部之和。因此，该系统可用于检测爆炸装置中存在的无机分子。检测到的分析物可以是负离子或正离子。检测到的分析物可以包括阴离子：硝酸盐、氯酸盐和高氯酸盐，以及阳离子：钠、钾、铵和尿素。

[0067] 所描述的系统使用所施加的高电压(HV)来加速分析过程并提高灵敏度，以及使用快速信号处理来快速提供测量结果(例如，小于1分钟)。

[0068] 系统100

[0069] 如图1中所示，系统100包括：

[0070] a.样品输入端102(其包括洗脱夹具)；

[0071] b.洗脱试剂容器104；

[0072] c.电解质试剂容器106；

[0073] d.主流体块(main fluidics block)108(其称为“接地歧管”)；

[0074] e.排流容器110；

[0075] f.毛细管112，其还被称为“检测毛细管”、“分析毛细管”、“分离毛细管”和/或“毛细管道”；

[0076] g.电容性耦合的非接触式电导率检测器114(其称为“C4D”)或具有与毛细管流体接触的电极的接触式电导率检测器、和/或光学透射率/吸光度检测器；

[0077] h.隔离的C4D电源116；

[0078] i.高电压(HV)流体块118(其称为“HV歧管”)；

[0079] j.HV排流管120形式的可选的排流导管；或者(代替排流导管)，干燥器(例如空气加热器和风扇)和干燥区域(其可以是海绵、吸液芯或干燥表面)，通过以下方式在干燥区域上(主动)干燥从毛细管(一旦经过检测器114)喷出的被监测的溶液：使(来自空气加热器和风扇的)气流经过干燥区域以使喷出的被监测的溶液变干以形成固体或沉淀物；

[0080] k.提供HV功率的HV电源122；

[0081] l.风扇124；

[0082] m.至少一个温度传感器126；

[0083] n.加热器128；

[0084] o.可选的气泵130，如果洗脱夹具和接地歧管分离和/或洗脱体积不足以填充互连管，则该可选的气泵130可用于使洗脱液流通；

[0085] p.微控制器单元(MCU)和输入输出(I/O)板132，其包括具有MCU(也称为“微控制器”或“电子控制器”)的电路板；

[0086] q.嵌入式计算机134；

[0087] r.大容量电源136，也称为“低电压(LV)电源”，其提供比来自HV电源122的HV功率更低的电压功率；

[0088] s.电源和/或电池和/或电源入口138形式的DC电源入口；

[0089] t.热区140；

[0090] u.安全联锁装置142；

[0091] v.可选的HV放电组件144；

[0092] w.调试端口146，其用于与板132进行电子通信；

[0093] x.围绕系统100的其它组件的底盘(chassis)148(还称为“箱”或“壳体”)；

[0094] y.一条或更多条HV线路150；

[0095] z.光链路152形式的光通信链路(还称为“光通信连接”)，其是包括至少一根光纤的光纤链路；

[0096] aa.从MCU板132到主流体块108的阀与泵控制线154；以及

[0097] bb.从MCU板132到主流体块108的容积泵控制线(positive displacement pump

control line)156。

[0098] 下文描述的由系统100执行的操作方法——其中MCU 132控制和协调系统100的其他组件以执行自动处理步骤(其是下文除了收集步骤、插入步骤和激活步骤之外的步骤)——包括：

[0099] a.容积泵(positive displacement pump)迫使BGE进入HV毛细管112,以用BGE冲洗接地歧管,从而将BGE溶液置于毛细管112的LV端(在灌注步骤中)；

[0100] b.样品捕获器收集样品(在收集步骤中),即,将样品捕获在样品捕获器(包括非粘性捕获器,例如IONSCAN 600捕获器,以及包括粘结材料的粘结捕获器)内或上,所述样品捕获器在具有用于捕获或吸附样品的表面特征或者具有用于将样品捕获或吸附在捕获材料内(包括用样品捕获器擦拭以捕获样品)的表面结构的捕获材料的一部分内或上；

[0101] c.将样品捕获器插入样品输入端102的洗脱夹具中,并启动洗脱夹具,例如,手动通过用手机械地闭合夹具,或者通过请求(通过插入或按钮按压)机器以通过驱动电机或伺服装置自动地闭合夹具(在插入步骤中),以及激活(或“启动”)MCU板132控制的剩余的自动处理步骤(在激活步骤中)；

[0102] d.容积泵迫使(或“调动”)第一试剂形式的受控测量物(称为“第一体积”,其小于或等于(<=)500微升(ul),例如200ul)的洗脱液(其可称为洗脱流体)从洗脱试剂容器104进入洗脱夹具,并迫使第一试剂穿过和/或越过和/或经过包括样品捕获器的部分的擦拭区域以洗脱样品,从而形成洗出物(即,洗脱的样品流体或洗脱的样品溶液)；

[0103] e.过滤器(其可以是可替换的样品过滤器)过滤洗出物(在过滤步骤中),可选地包括使用捕获材料的部分过滤洗脱装置中的洗出物；

[0104] f.移动洗出物通过脱气系统,并且脱气系统对洗出物进行脱气(在脱气步骤中)——并且可替换的样品过滤器在一个步骤中执行过滤步骤和脱气步骤两者；

[0105] g.将脱气的洗出物(即脱气的样品溶液)移动到接地歧管,使得脱气的洗出物位于毛细管的LV端,即,将脱气的过滤洗出物对准HV毛细管112的LV端前面(在对准步骤中)；

[0106] h.主流体块108通过流体静力(流体压力)注射将一小部分的离子或者通过电动力学(低HV持续几秒)注射将一小部分的离子从对准的脱气的过滤洗出物注入毛细管112(在注射步骤中)；

[0107] i.主流体块108将HV毛细管112的LV端周围的任何剩余的洗出物(或样品流体)冲洗至可选的排流容器110,并将新鲜的BGE 106引入到毛细管112的LV端以替换冲洗的样品流体(在预分离冲洗步骤中)；

[0108] j.HV流体块118激励HV电源(持续固定时间,或者直到检测到输出)以通过施加全HV电压来分离样品以允许离子分离发生,同时MCU 132监测并记录C4D 114的输出(在分离步骤中)；

[0109] k.在分离步骤结束时,由MCU 132基于时间或由C4D数据分析确定,MCU 132关断HV;以及

[0110] l.主流体块108用新鲜的BGE冲洗HV毛细管112以清除剩余的分离产物,为下一次分离做好准备(在毛细管冲洗步骤中)。

[0111] UI 134执行操作方法中的处理方法,包括：

[0112] a.去除基线以便于以后的处理；

[0113] b.识别参考离子(即洗脱试剂104中的离子标记物)；

[0114] c.相对于内部标准参考离子振幅归一化数据振幅；

[0115] d.识别数据中所有离子峰的种类；

[0116] e.使用每个目标离子种类的特定校准系数计算检测到的每种目标离子的数量；

[0117] f.将每种目标的数量与其种类触发阈值进行比较;和

[0118] g.如果所有种类都低于它们的触发阈值,则在用户界面上指示:即,“无威胁(NO THREAT)”,即没有找到目标,否则在用户界面上指示:即,“有威胁(THREAT)”。

[0119] 在操作中,系统100接收样品。样品可以通过包括样品捕获器的采样装置从目标表面获取。操作系统100的人(可被称为“操作者”或“用户”)通过样品输入端102将样品或包括样品的样品捕获器插入系统100。操作者通过插入样品和/或通过将用户输入(例如,手动输入)应用到用户界面(UI)来启动由系统100执行的自动处理步骤(还称为“自动洗脱过程”)。样品输入端102洗脱样品,并将样品提供给主流体块108。在自动洗脱过程中,样品输入端102将样品转移到液体中供系统100摄取。气泵130可以提供短的低电压脉冲,以使洗出物和/或洗脱液流过样品基底并到达主流体块108。

[0120] 系统100包括洗脱装置,该洗脱装置包括用于捕获样品的样品捕获器;以及用于过滤洗脱装置中的洗脱液(还称为“初始洗脱液”)的初始过滤器。洗脱液由系统100引导通过初始过滤器。样品捕获器可以包括通过吸附捕获样品的一部分材料(其可以称为“样品捕获材料”)。样品捕获材料可以包括通过粘结捕获样品的粘结材料或由其组成。初始过滤器可包括样品捕获材料的部分。捕获样品的样品捕获材料的部分可以被称为“擦拭区域”,因为它可以用于擦拭感兴趣的物体(例如,人的衣服)。因此,样品捕获材料在洗脱装置中可以具有两种功能:作为捕获器和作为初始过滤器。样品捕获材料可以包括粘结带,其可以是商业上可获得的微孔带(还称为“粘性带”),和/或可以包括来自基于离子迁移谱的爆炸物痕量检测器的样品捕获器(例如,非织造材料、织造材料、海绵材料和/或聚合物材料的现成样品捕获器),和/或可以包括具有捕获样品的表面结构的材料。

[0121] 洗脱装置包括用以移动洗脱液和洗出物的主流体块108中的多个泵和阀,其中洗出物包括样品的通过洗脱液提取的提取部分。

[0122] 流体可以包括液体和气体。本文描述的洗脱液、洗出物和电解质流体可以是液体,即它们是液体形式或液相,并且使用液相可能比使用气相更好。通过一个或更多个过滤器,过滤处理过的样品中的大颗粒和碎屑。

[0123] 洗脱装置提供了一种方法,通过该方法,感兴趣的颗粒被来自采样装置的洗脱液迁移到洗出物中。在洗出物流体(即脱气的洗出物,还称为洗脱的脱气样品)被输送到毛细管主流体块108之前,过滤的处理样品还通过脱气系统以去除气态组分。脱气系统可以由将空气排放到大气中的疏水膜(简单的脱气机构)、或者具有压力控制以便从洗出物(其是溶液)中去除气泡的密闭室(脱气歧管)组成。

[0124] 洗脱试剂容器104包含洗脱液(还称为“试剂1”),电解质试剂容器106包含电解质流体(还称为“试剂2”)。

[0125] 洗出物、洗脱液和电解质流体可以针对主流体块108被称为“输入流体”。

[0126] 洗脱试剂容器104和电解质试剂容器106以各自的密封容器的形式提供没有空气(特别是没有氧气和二氧化碳)的存储。密封容器可以是可折叠的袋子。密封容器各自通过

流体连接器(例如,一个软管或管道或多个软管或管道)独立地连接到主流体块108。此外,在流体进入接地歧管之前,可以使用多个可替换的10微米过滤器来去除大颗粒。

[0127] 主流体块108(或“接地歧管”)接收来自样品输入端102的洗出物。接地歧管108分别从容器104和106接收试剂1和试剂2。主流体块108向毛细管112提供各自流量的流体的序列以用于分离。接地歧管108包括用于流体切换的多个阀和用于引起流体运动的多个容积泵,以便在接地歧管中执行流体处理。接地歧管108包括流体通道和流体控制装置,以用冲洗方法对接地歧管108和毛细管执行冲洗。

[0128] 主流体块108的阀和泵的顺序和电子控制由MCU板132控制并由MCU板132执行,这将在下文中进一步描述。

[0129] 排流容器110与主流体块108流体连通,以接收来自流体处理方法的废液(即:未输送到毛细管112的部分输入流体,以及可选地已经穿过毛细管112、HV流体块118和HV排流管120的流体)。排流容器110可以包括排流瓶和/或柔性袋。例如,当补充和/或替换电解质和洗脱试剂时,排流容器110可以在常规服务期间被人清空或换出。

[0130] 毛细管112提供流体承载内部以用于接收和保持处理过的样品,用于承载处理过的样品,并作为柱状物,用于通过C4D 114的电导率测试电极从主流体块108到HV流体块118的处理过的样品的分离。

[0131] 在下文描述的操作方法期间,HV电势被施加到HV电极和接地电极之间的毛细管112(沿其长度)。通过将HV电极118A压力装配或共同模制到HV流体块118中,HV电极118A被嵌入HV流体块118(或“HV歧管”)。通过将接地电极108A压力装配或共同模制到接地歧管108中,接地电极108A被嵌入接地歧管108中。电压电势迫使样品中的离子通过毛细管112朝向HV电极。

[0132] 使用歧管配件(例如使用螺纹配件和/或其它商业上可获得的低电压配件,例如IDEX Health&Science有限责任公司的Upchurch配件)将毛细管112连接到每个歧管108、118。毛细管包括:连接到LV歧管108的低电压(LV)端部,以及连接到HV歧管118的HV端部。沿着毛细管112的长度存在大约133V/mm的大致线性的电压梯度。

[0133] 毛细管112的选定尺寸使得毛细管112容易堵塞,并且提供给毛细管的流体必须被很好地过滤(例如,用1.2微米过滤器)。毛细管112可以具有大约25-50微米(微米)的内径(ID)——例如,25微米、30微米或50微米的标称ID,以及大约365微米(例如,标称370微米)的外径(OD),其匹配歧管配件和C4D 114的内部通孔。

[0134] 毛细管112的长度是基于以最快的速度实现足够的离子峰分离(选择性)所需的距离来选择的,例如,总长度可以是约300mm,这允许C4D 114安装在离接地端约270mm处,并进入毛细管112两端的任一端的配件中。该长度可允许1mm段塞(slug)长度在HV电势下充分分离,以在流体体积中分离的离子之间提供足够的分辨率,以允许算法处理(段塞长度是毛细管中样品部分的长度,其可称为“段塞”)。标称样品体积为0.49纳升(nl),对于1mm长度具有25um毛细管。2微米的直径变化意味着对于0.491nl(-14.3%/+18.2%),段塞长度可以从0.857mm变化到1.182mm。可以改变该体积以优化灵敏度、特异性和动态范围。

[0135] 检测毛细管112具有在下文描述的制造方法中选择的从一端到另一端的电阻。

[0136] 毛细管112由熔融石英管形成。

[0137] 毛细管112可以内部涂覆有多个衬里层,以建立正确的电渗流并减少3个层中的信

号损失:HDMB层、PSS层和HDMB层,这3个层使用流体冲洗顺序被依次施加,作为后制造步骤中对毛细管的预处理。检测毛细管112内的BGE从一端到另一端具有受BGE的性质和温度影响的流体阻力(或"阻力")。

[0138] 毛细管112可以具有外部聚酰亚胺涂层。

[0139] 毛细管112可以作为具有自然曲率的盘管提供。

[0140] 毛细管122可以是商业上可获得的管,例如来自Polymicro(Molex)的TSP025375或来自SGE的062710。

[0141] 底盘148包括热区140,热区140是由下文描述的温度控制系统控制温度的热控体积(或空间)。底盘148还包括位于热区140外部的单独区域(还称为"主设备空间"):即,底盘148内部位于热区140外部的空间。热区边界提供热区140的周界并将热区140与主设备空间分开。热区边界位于HV外壳内,并使用HV外壳内的部分空气再循环来维持。

[0142] 热区140是绝缘外壳内的概念性区,其中温度保持在标称恒定温度(例如,35摄氏度或55摄氏度)。热区140包括以下组件:

[0143] a.毛细管112;

[0144] b.加热器128;

[0145] c.至少一个温度传感器126;

[0146] d.风扇124;

[0147] e.HV流体块118;

[0148] f.C4D 114

[0149] g.HV功率模块600,其在下文中参考图8被更详细地描述,位于隔离的C4D电源116的HV侧(其穿过热边界);

[0150] h.可选地,HV排流管120的HV侧(其也穿过热边界);和

[0151] i.主流体块108的毛细管装配螺钉所在的部分。

[0152] 底盘148包括包括下文描述的一个或更多个手动可打开的盖(还称为"设备盖")。底盘148包括带有导电涂层的绝缘壁以减轻静电积聚。如果设备盖之一打开(这可以包括被移除),则安全联锁装置142将功率从HV电源的输入端移除(即,解耦)。

[0153] HV放电组件144(其可以容纳在HV电源内,该HV放电组件144可以实现为电阻链(例如,串联的六个1-G-ohm 7-kV电阻器)和/或包括导电填充物的一般绝缘材料以便提供放电电阻器,提供放电路径,使得HV电源122可以在输入功率被移除时(例如通过安全联锁装置142)放电。

[0154] HV放电组件可以是借以控制管中的电压梯度以减少电晕放电、控制边缘电流和减少电弧放电机会的机构的一部分。

[0155] 当检测器是C4D类型时,C4D 114测量由C4D 114监测的毛细管112的一部分中的流体的复电导率:毛细管112的该被监测的部分通过C4D 114。被监测的部分可以被称为"被监测的片段"。C4D 114至少在两侧包围毛细管114的被监测部分,使得C4D 114可以通过测量被监测部分中流体的复电导率变化来测量在被监测部分沿着毛细管112前行和通过毛细管112的离子。C4D 114包括两个电极,AC信号通过这两个电极,在这两个电极内测量复电导率。被监测的部分由与毛细管112的流体承载内部符合(即,在位置上对应)的C4D 114的两个电极之间的AC电场限定。当样品到达毛细管114的被监测部分时,样品被监测的部分被称

为“被监测的样品部分”。C4D传感器宽度决定分子集团之间所需的间隔，例如1mm。

[0156] C4D 114尽可能靠近毛细管的HV端(通常距离HV端10至40mm)。

[0157] C4D 114参考HV电势(即，在等于HV流体块118的高电压的高电压下充电)，以避免或最小化毛细管壁112的介电击穿，如果在毛细管中的流体和毛细管112外部的C4D电极之间在“被监测的样品部分”上施加高电压降，这可能会发生。因此，毛细管壁上的电压降可以等于或小于为毛细管112指定的预定介电击穿值。因为C4D 114参考HV电势，所以C4D 114由隔离的电源116供电，并且C4D 114通过从C4D 114内延伸到MCU板132的光链路152形式的电隔离通信连接进行通信(即，发送和接收用于数据传输的电子信号)。

[0158] 隔离的C4D电源116提供直流(DC)隔离电源以给C4D 114供电。隔离的C4D电源116包括连接到HV电源122和C4D 114的HV部分(接收器)。隔离的C4D电源116桥接系统100的HV侧(连接到隔离的C4D电源116的HV部分)和系统100的LV侧之间的完全HV电势隔离。隔离的C4D电源116电连接到LV侧的大容量电源136，以向C4D 114传输功率。隔离的C4D电源116和C4D 114在HV电极处电结合。

[0159] HV流体块118为检测毛细管112的HV端部提供流体连接，为可选排流管120的HV端部提供流体连接，并且为检测毛细管112提供HV电极。HV流体块118安装在热区118内。

[0160] 在安装时，排流管120和HV流体块118提供了从检测毛细管112的HV端部到排流容器110的导电流体路径。HV接地(“GND”)电极连接在排流管120的LV端部，即“排流端部”，其电压与排流容器110的电压大致相同，该电压被称为“低电压”或“接地电压”。排流容器110电连接到HV GND电极110A形式的低电压点，使得排流容器110和排流容器110中(以及排流管120的排流端部中)的所有流体保持在LV或接地电势。排流管120具有大约2米长的长度。排流管120具有大约65um的ID。排流管120从一端到另一端具有大约等于检测毛细管112的电阻的电阻。排流管120从一端到另一端具有流体阻力，该流体阻力基于检测毛细管112的流体阻力来选择，例如检测毛细管112的流体阻力的大约0.2倍(或五分之一)。

[0161] HV电源122在其HV侧包括HV输出端，该HV输出端经由HV流体块118向HV歧管118和隔离的C4D电源116提供高电压功率。HV电源122为系统100提供高电压，并且通过平衡HV管理和离子速度的要求来选择高电压，例如为36-40千伏(kV)。

[0162] HV电源122通常提供低于100微安(uA)的低电流。

[0163] HV电源122安装在热区140的外部以减小热区的体积。

[0164] HV电源122由来自MCU板132的控制信号控制，如下文所述。HV电源122向MCU板132发送电压反馈信号和电流反馈信号以用于监测HV电源操作的目的。来自HV电源122的HV输出预期是限流的，以提供电弧保护。HV输出端连接到HV流体块118中的HV电极118A，使得在毛细管112的长度上施加高电压。HV GND输出端分别连接到排流容器110(其连接到可选的排流管120的LV端部)中和主流体块118中的两个HV GND电极110A。HV GND输出端连接到金属底盘148和多个GND电极108A、110A。

[0165] HV电源122可以具有以下参数值：

[0166] a.40kV DC的DC输出电压，其从0至40kV DC可调；

[0167] b.小于50伏峰峰值(V pk-pk)的输出纹波和噪声；

[0168] c.符合EN55022(CISPR22)类B、FCC类B、EN61000-4-2、3、4、5、6、8、11的EMC；和

[0169] d.-40℃至+65℃的工作温度。

[0170] HV电源122可以是商业上可获得的电源，例如来自美国UltraVolt公司的40A12-P4或来自Spellman公司的UM40P4。

[0171] 风扇124引导空气通过加热器128，然后围绕毛细管112，以减轻毛细管112温度变化引起的分离变化。

[0172] 所述至少一个温度传感器126是商业上可获得的组件(例如，来自德州仪器的TMP100或来自TE Connectivity的MS8607)，其连接到MCU板132以提供关于管理热区中的温度的控制回路的温度信息，如下文所述。温度可以被控制到标称温度(例如，35摄氏度或55摄氏度)，该标称温度可以高于室温。

[0173] 加热器128是由MCU板132例如使用利用脉宽调制(PWM)产生的电信号来控制的电阻加热元件。该组件的实际功率和形状因数被选择为具有20瓦的最大热输出，其与在设备的整个工作温度范围内保持稳定温度所需的最大功率相一致。

[0174] 嵌入式计算机134可以是具有可用操作系统(例如微软Windows或Linux，或者可以是稳健的强化专用操作系统)的PC的形式。嵌入式计算机134与MCU板132通信，并提供运行(或执行)用户界面(UI)进程以提供UI的平台。嵌入式计算机134为操作者提供UI，而正在开发、测试或调试系统100的人(称为“开发者”或“调试者”)可以使用调试端口146访问MCU板132。

[0175] 大容量电源136可以是开关模式电源(还称为“开关式电源”)，其通过电源入口138接收AC主电源作为输入，并提供DC电压(例如，12V)作为适合于给MCU板132、风扇124、HV电源122和隔离的C4D电源116供电的输出。电源入口138可以经由标准国际电工委员会(IEC)电源电缆和插头连接到标准电源插座(例如墙壁插座)并从标准电源插座接收功率。大容量电源136可以具有以下参数值：

[0176] a.指定为12VDC的DC输出电压；

[0177] b.指定为120mV pk-pk的输出纹波和噪声；

[0178] c.在230VAC输入下测量的89％的典型效率；

[0179] d.85—264VAC的AC输入电压；

[0180] e.47—63Hz的AC频率范围；

[0181] f.UL 60950-1认可的安全标准；

[0182] g.符合EN55022(CISPR22)类B、FCC类B、EN61000-3-2，-3的电磁兼容性(EMC)；

[0183] h.-40℃至+70℃的工作温度，在高温下遭受降额；和

[0184] i.159×97×38mm的尺寸(长×宽×高——LxWxH)。

[0185] 大容量电源136还可以是指定的低电压DC-DC转换器，使得合适的电池组可以向设备提供电源。输出DC电压(例如，12V)将适合于给MCU板132、风扇124、HV电源122和隔离的C4D电源116供电。加热器128可以由电池组直接供电以避免转换损耗。

[0186] 大容量电源136可以是或至少包含商业上可获得的电源的元件，例如来自台湾MEAN WELL的“HRP-150-12”。

[0187] 系统100中的敏感HV组件——包括C4D 114——可以电气封装在法拉第笼中，并容纳在HV子组件中。

[0188] MCU和IO板132提供电子接口和计算资源来控制系统100的其他电子和流体组件。MCU和IO板132通过控制系统100中的相关阀、泵和电机来控制本文描述的洗脱方法。MCU和

IO板132从系统100中的传感器接收表示测量结果的信号，并且它与嵌入式计算机134的UI通信。

[0189] 系统100中的传感器包括：温度传感器126；C4D 114；压力传感器，所述压力传感器用于监测HV毛细管的LV端处的压力、在接地歧管的中间点处的压力、和气泵(如果安装)处的空气压力。

[0190] MCU和IO板132包括多个UART、ADC通道、DAC和PWM通道、I2C(内部集成电路)控制器、SPI(串行外围接口)接口、计时器和计数器，以与嵌入式计算机134、C4D 114、一个或更多个容积泵156、加热器128、在端口146连接的调试计算机、传感器和电源(例如HV电源122)进行通信。

[0191] 特别地，如图2中所示，MCU和IO板132包括以下接口：

[0192] a.多个电磁阀控制接口202(具有各自的接口电路)，其产生信号以通过阀与泵控制线154发送，以在流体处理方法中控制主流体块108；

[0193] b.泵控制接口，其产生信号以经由容积泵线路156发送，以控制流体处理方法中的一个或更多个容积泵(包括容积泵控制接口206)；

[0194] c.多个泵控制接口，其产生信号以经由IO板132发送，以控制到容积泵的接口204(以PWM接口和数字接口的形式)；

[0195] d.用于与嵌入式计算机134通信的接口208，其包括被配置为使用串行通信标准(例如异步串行)进行通信的UART；

[0196] e.用于加热器控制的接口232(“开关12V输出”)，其提供缓冲的PWM信号；

[0197] f.用于根据I2C标准操作的至少一个温度传感器126的接口234(“板外传感器”)；

[0198] g.用于主流体块上的一个压力传感器以测量例如HV毛细管的压力的接口234(“板外传感器”)，其根据内部集成电路(I2C)标准工作；

[0199] h.用于通过光链路152与C4D 114通信的接口216，其包括被配置为通过光链路152通信的通用异步接收器/发送器(UART)；

[0200] i.用于向HV电源122发送控制信号以控制HV电源的接口218，例如输出电压在与HV电源的输入范围相对应的选定范围内(例如0至5V)的DAC；

[0201] j.用于从HV电源122接收电压反馈信号的接口218，例如输入电压在与MCU上的ADC输入范围相对应的选定范围内(例如0至3V)的ADC；

[0202] k.用于从HV电源122接收电流反馈信号的接口218，例如输入电压在与MCU上的ADC输入范围相对应的选定范围内(例如0至3V)的ADC；和

[0203] l.接口236(“开关5V输出”)，其用于向隔离的C4D电源116发送功率。

[0204] MCU(或“微控制器”)可以包括ARM Cortex-M4，其具有1MB的嵌入式闪存、192KB的SRAM和64KB的数据RAM。MCU中包括的存储器可以以最大时钟速度(例如168MHz)向MCU提供对RAM中指令和数据的零等待状态访问。MCU可以具有足够的RAM来执行数据收集、处理以及与嵌入式计算机134的数据通信。该MCU具有输入-输出接口和外围设备，用于与系统100的其他组件通信。MCU可以是商业上可获得的微控制器，例如来自瑞士的STMicroelectronics N.V.(“ST”)的STM32F405VGT6。

[0205] 例如螺线管驱动器IC的集成电路(IC)可以用于将低电流微控制器输出端连接到高电流外围设备，并且可以具有以下参数值和特征：

[0206] a.在0.9和2.5A之间的输出电流限制,并且通常为1.2A;

[0207] b.通常为0.55欧姆的导通电阻,并且最高为1.1欧姆;以及

[0208] c.通常为0.075A的螺线管电流;

[0209] d.容错特征,包括过压保护和过流保护、以及用于承受短路的电磁线圈而不会损坏的配置;

[0210] e.热关断特征,即,在过电流故障的情况下,IC在其内部温度上升过高时关断,并在过电流故障去除时自动重启;

[0211] f.提供诊断信号,其表示关于每个输出端的状态的信息,并表示开路负载和过电压状况;

[0212] g.负载切换期间的受控转换速率,其用以减轻来自IC的辐射电磁发射,减轻来自电磁线圈的感应瞬变,并减少螺线管驱动器IC上的电应力;以及

[0213] h.接口,用于直接连接到MCU,以及每个IC的相应外围设备的多个控制输出端(例如16个),其允许比基于MOSFETS和过电流缓解电路的等效电路更少的组件。

[0214] 螺线管驱动器IC可以是商业上可获得的IC,例如来自荷兰的NXP Semiconductors的"Freescale"MC33996。

[0215] IC(例如高侧开关IC)可用于将多个MCU输出端连接到需要高电流12V负载的接口232("开关12V输出")外围设备。高电流负载包括:HV电源122;气泵130;和加热器128。该IC可以具有以下参数值和特征:

[0216] a.高达9A的输出电流限制(每个通道);

[0217] b.通常为0.05欧姆的导通电阻,并且最高为0.1欧姆;

[0218] c.容错特征,包括过压保护和过流保护、以及限制短路负载的输出电流的配置;

[0219] d.热关断特征,即,在过电流故障的情况下,IC在其内部温度上升过高时关断,并在过电流故障去除时自动重启;

[0220] e.提供诊断信号,其表示关于每个输出端的输出电流的信息,并表示故障状况;和

[0221] f.负载切换期间的受控转换速率(或"斜率控制"),其用以减轻来自IC的辐射电磁发射,减轻来自高电流负载的感应瞬变,并减少IC上的电应力和对车载电源的干扰。

[0222] 高电流12V接口可以是商业上可获得的IC,例如来自瑞士ST的VNQ7050。

[0223] IC(例如高侧开关IC)可用于将MCU的控制信号连接到需要5V电源的外围设备(例如隔离的C4D电源116)。高侧开关可以具有以下参数值和特性:

[0224] a.限制在0.5和5A之间的输出电流;

[0225] b.通常为0.022欧姆的导通电阻,最大值为0.035欧姆;

[0226] c.容错特征,包括过温和过流保护、以及承受短路的输出而不损坏的配置;

[0227] d.诊断特征,包括向MCU提供诊断输出;和

[0228] e.电流输出设置,其使得输出上的故障不会干扰其他输出或以其他方式损害IO板。

[0229] 高侧开关IC可以是商业上可获得的IC,例如来自德州仪器的TPS2557。

[0230] 至MCU的通用输入238("通用输入x 12")包括开关检测接口,其可以能够读取多达22个输入的状态,并通过SPI接口(在接口238中,"输入接收器")将表示读取状态的信息传送给MCU。集成特征可以包括:

[0231] a.润湿电流:IC在每个开关输入端提供上拉至12V或下拉至GND的恒定电流,并且这提供了通过开关触点的已知润湿电流,其可以延长开关触点的使用寿命并提高可靠性;

[0232] b.模拟测量:IC可以将任何输入通道切换到模拟输入引脚,允许MCU测量任何输入通道上的电压,并且这可以用于扩展MCU板132中的模拟输入的数量;和

[0233] c.容错:IC免受静电放电(ESD)和所有输入端的过压。

[0234] 开关检测接口可以包括商业上可获得的IC,例如来自Freescale Semiconductor的MC33978。

[0235] 如图3中所示,MCU板132包括多个板载电源300,其用以将来自大容量12V电源136的输入功率转换成多个较低电压,以在MCU板132上使用。电源300包括线性(LDO)和开关型电源。包括低噪声线性稳压器以为模拟电路提供净化电源,并且开关电源为各种负载提供高电流5V电源,其可以包括:

[0236] a.5V电源302;

[0237] b.两个独立的3.3V数字电源304A、304B,每个高达300mA;

[0238] c.3.3V模拟电源306;和

[0239] d.7V电源308。

[0240] 5V电源302包括一个或更多个同步降压稳压器IC(例如,商业上可获得的LT8610)以提供5V或3.3V(高达3.5A),其被选择来提供以下特征:

[0241] a.当将12V转换为5V或3.3V时,超过90%的效率;

[0242] b.“电源良好”输出,其控制由5V供电的其他稳压器的上电顺序,因此在5V电源掉电的情况下,微控制器将被干脆地复位;和

[0243] c.时钟输入,例如用以根据微控制器提供的外部时钟接收信号,使得微控制器可以设置开关频率,从而使得开关噪声不干扰其他敏感测量。

[0244] 两个独立的3.3V电源是低噪声电源,例如双线性稳压器(例如,商业上可获得的ISL9012),其被选择以提供以下特征:

[0245] a.低输出噪声,因为3.3V电源之一为模拟电路供电;和

[0246] b.微控制器复位,因为其他3.3V电源控制MCU的复位输入。

[0247] 7V电源(其可能是低噪声类型)可以为控制器板PCB上的模拟电路供电。线性稳压器(例如,商业上可获得的TPS7A4101)或开关+/-7V电源可用于向DAC和其他模拟组件中的运算放大器(运算放大器)提供高达50mA的电流。

[0248] 如上所述,MCU和IO板132从系统100中的传感器接收表示测量结果的信号,并且系统100中的传感器包括:温度传感器126;C4D 114;模拟压力传感器(例如惠斯通(Wheatstone)桥型);和数字压力传感器(内部集成电路型)。

[0249] 传感器桥接口(或“桥传感器接口”)可用于测量惠斯通桥型传感器,例如压力传感器或负荷传感器。传感器桥接口具有集成在芯片上的以下特征(与典型的多芯片实现相比,减少组件数量并提高性能):

[0250] a.高分辨率ADC:集成的24位ADC直接数字化从传感器桥到MCU的输出,而不需要具有缩放和线性误差的前端放大器;

[0251] b.集成自校准,其用以提供非常低的漂移和偏移;

[0252] c.集成数字滤波器,其用于抑制50Hz、60Hz和带外噪声;和

[0253] d.集成I2C接口,因此多个桥式传感器可以连接到MCU板132的单个I2C总线,从而减少PCB复杂性和外部布线。

[0254] 传感器桥接口可以包括商业上可获得的IC,例如来Linear Technology的LT2485。

[0255] 如前所述,如果使用脱气歧管代替简单的脱气过滤器,则需要压力传感器来保持真空蓄能器中的绝对压力。压力传感器可以安装在MCU板132上,以最小化电气布线和对电噪声的敏感性。压力传感器包括压阻传感元件。压力传感器经过校准和温度补偿。压力传感器提供与压力和电源电压成正比的输出。压力传感器容纳在直接焊接到MCU板132的PCB的双列直插式封装(DIP)中。压力传感器具有从其壳体一侧突出的带倒钩的端口,以连接到连接到空气/真空泵130的输出端的挠性管。压力传感器可以是商业上可获得的IC,例如来自Honeywell的HSCDRNN030PAAA3。

[0256] 如图2中所示,MCU板132包括三轴加速度计电路230(包括在3个正交维度上排列的三个线性加速度计或换能器),系统100使用其来确定底盘148是否在水平面上(即,横向于重力的表面上)。可能希望在选定的方向上(即,不倾斜)操作系统100以保持样品输入块102的正确操作和正常的流体静力操作条件。加速度计电路230向MCU提供表示X、Y和Z轴加速度信息的电信号,MCU通过分析重力方向来确定倾斜程度。加速度计电路230可以安装在MCU板132上,包括I2C接口以用于通过I2C总线与MCU通信。加速度计电路230包括商业上可获得的加速度计,例如来自Freescale的MMA8451Q。

[0257] C4D 114测量被监测的部分内流体的电复合电导率,如上文所述。被监测的部分是毛细管112的一部分。C4D 114测量通过电容性耦合电极施加到被监测的部分的可变频率正弦AC激励的幅度和相位。

[0258] 如图4中所示,电容性耦合电极是形成之前描述的电容器的一对电极:发送(Tx)电极402和接收(Rx)电极404。Tx电极402和Rx电极404可以制造为印刷电路板(PCB)组件。电容性耦合电极可以是印刷电路板上的电镀通孔,毛细管112穿过这些电镀通孔,并通过夹在PCB之间的非导电间隔材料隔开一小段距离(例如1mm)。C4D 114包括安装在Tx电极402和Rx电极404之间的电屏蔽物418(还称为“主动屏蔽”),以减少两个电极402、404之间不希望的串扰。电屏蔽物418是Tx和Rx PCB两者上的接地平面。

[0259] AC激励包括发送到Tx电极402的正弦激励波形(称为“Tx信号”),并且在Rx电极404处测量所得到的AC电流。得到的AC电流代表被监测的部分中的流体复电导率并与其成比例。

[0260] Tx信号具有频率,并且该频率是基于Tx电极402和Rx电极404的几何形状来选择的,以提供最佳的区分和灵敏度以及抗噪声能力(例如标称1.001MHz)。

[0261] 来自Rx电极404的Rx信号是感测电流的形式,其非常小,<2uA,因此,如图4中所示,C4D 114包括低噪声跨阻抗放大器形式的Rx放大器406,以放大来自Rx电极404的Rx信号并将其转换为Rx电压信号。

[0262] C4D 114包括Rx ADC电路408(包括抗混叠滤波器、缓冲器和ADC),其接收来自Rx放大器406的Rx电压信号,数字化(或“采样”)Rx电压信号,并将得到的数字化Rx信号发送到C4D处理器410。Rx ADC电路408是每秒100兆样本(MSps)的高速转换器。

[0263] C4D处理器410连续读取(或接收)来自ADC电路408、412的信号,并连续执行C4D信号处理方法(下文描述),以对这些接收的数字信号进行滤波和转换,并提取被监测的部分

的复电导率信息(即,复电导率值)。C4D处理器410产生表示提取的复电导率信息的信号,并通过光链路152将其发送给MCU板132。C4D处理器410包括现场可编程门阵列(FPGA),其被配置为执行C4D信号处理方法,包括:对数字化的Rx信号进行滤波,并将得到的滤波后的数字Rx信号转换为幅度和相位信息(由电子幅度和相位信号表示)。

[0264] C4D 114包括连接到C4D处理器410的Tx DAC 414。C4D处理器410驱动Tx DAC 414以针对Tx电极402产生激励信号(例如,1.001MHz正弦波)。激励信号具有高振幅(例如,25V pk-pk),以改善Rx电极404处的信噪比。来自DAC 414的激励信号通过Tx滤波器电路416,以针对Tx电极402和Tx ADC电路412产生Tx信号。

[0265] C4D 114包括Tx ADC电路412(包括抗混叠滤波器、缓冲器和ADC,其类似于Rx ADC电路408的抗混叠滤波器、缓冲器和ADC),其也接收Tx信号,即发送到Tx电极402的相同Tx信号。Tx ADC电路412数字化Tx信号,并将得到的数字化的Tx信号发送到C4D处理器410,C4D处理器410使用数字化的Tx信号来补偿C4D信号处理方法中C4D 114的Tx DAC和Rx ADC之间的模拟部分内的增益误差和温度漂移。

[0266] 图4中未示出的辅助低速ADC测量C4D 114内的C4D电源电压,并且所得的测量的电源电压可用于在C4D处理方法中通过信号相关来校正电源波动的影响。辅助ADC可以通过SPI接口与C4D控制器410通信,并且可以是商业上可获得的ADC IC,例如Linear TechnologyLTC1408。

[0267] DAC 414以与ADC电路408、412相同的采样率运行,以减轻杂散谐波或图像产物的产生。DAC可以具有差分电流输出。为了将电流转换为电压,DAC输出端通过电阻端接到地。DAC可以是商业上可获得的DAC,例如Analog Devices的AD9704。

[0268] Tx电极402和Rx电极404之间的耦合具有高电阻;Tx电极402以高振幅被驱动以改善SNR。来自DAC 414的激励信号具有来自采样时钟420的高频噪声,该高频噪声被Tx滤波器电路416滤除。

[0269] 如图6中所示,Tx滤波器电路416是两级滤波器,包括低通滤波器(LPF)417A形式的抗混叠滤波器、和提供带通滤波器和缓冲器的带通滤波器(BPF)417B。DAC 414的差分输出端接在(LPF)417A中Tx滤波器电路416的负载电阻器中,给出每个输出端上的标称满量程电压(例如,400mV)。两级滤波器的标称增益被选择成驱动Tx滤波器电路416的输出运算放大器到满量程而没有限幅(例如,大约25V pk-pk)。BPF 417B中Tx滤波器电路416的输出运算放大器具有电阻串联终端R55(例如,50Ω),以将输出运算放大器与以下项隔离:(i)Tx电极402的电容;以及(ii)PCB迹线(tracking)。Tx滤波器电路416的输出运算放大器可以是双运算放大器,其根据±15V电源运行,其是快速的,具有低噪声(175MHz GBW,230V/us转换速率,10纳伏每平方根赫兹——nV/√Hz),具有高输出驱动。Tx滤波器电路416的输出运算放大器可以是商业上可获得的运算放大器,例如TI THS4082。

[0270] 如图7中所示,Rx放大器406包括作为前端缓冲器的低噪声JFET晶体管,接着是运算放大器级。JFET可以具有比运算放大器级更低的噪声,因此混合电路可以具有比单独的运算放大器级更好的性能。电路Rx放大器406的增益被设置为给出例如每uA输入电流输出100mV。运算放大器可以是快速运算放大器(例如215MHz GBW,70V/us),具有非常低的电压噪声(例如1.1nV/√Hz),例如商业上可获得的运算放大器,例如LT6236IS6。为了减轻输入节点处杂散电容的影响,屏蔽物418(或“主动屏蔽”)被放置在Rx放大器406中的运算放大器

电路上。屏蔽物418由Rx放大器406的输出的DC分量驱动，因此从屏蔽物418到输入节点的任何杂散电容是实际上不带电的。低通滤波器去除输出的高频分量，留下DC电压来驱动屏蔽物418。

[0271] ADC电路408、412包括双通道ADC，其允许发送信号和接收信号被同时采样以用于差分噪声抑制。双通道ADC具有足够的采样率和精度来实现目标SNR。如下文所述，C4D控制器410中的后续滤波和抽取以较低的采样率产生输出，但具有更高的精度，如过采样理论中所述。双通道ADC可以是商业上可获得的ADC，例如Maxim MAX19516。

[0272] ADC电路408、412各自包括抗混叠滤波器和缓冲器，以驱动每个ADC的输入。抗混叠滤波器使ADC的奈奎斯特频率以上的频率滚降，其否则会在采样数据中产生不需要的图像，特别是噪声，其会产生与被测量的信号频率相同的图像频率(例如，100-99＝1MHz)。抗混叠滤波器衰减该噪声，以减少其对C4D测量的影响。运算放大器的正负输入引脚上的输入阻抗匹配以提供共模抑制。运算放大器可以是商业上可获得的运算放大器，例如TI THS4521。

[0273] 如图8中所示，C4D 114从隔离的C4D电源116的HV功率模块600中的多个不同电源接收功率。

[0274] 隔离的C4D电源116包括：安装在绝缘外壳140外部的无线功率发送器模块和安装在C4D 114外部的接收器模块。围绕C4D模块的绝缘外壳提供发送器模块(在LV)和接收器模块(在HV)之间的隔离，其提供LV侧和HV侧之间的至少60千伏(kV)的隔离。绝缘可以具有一绝缘类型(例如，10mm厚的透明PVC，其中爬电距离大于170mm)。接收器模块的接收器线圈602可以与发送模块的发送器线圈具有相同的物理尺寸，以改善不同尺寸线圈上的耦合效率和分离容差。无线功率传输模块可以向C4D模块提供高达1A的+5V电压，并且可以基于商业上可获得的模块，例如Wurth bq500212AEVN-550(发送器)和bq51013BEVM-764(接收器)。

[0275] 如图8中所示，隔离的C4D电源116的HV功率模块600包括无线电源接收器606，其接收来自接收器线圈602的功率，并向输出电源606提供功率(例如，接地和+5V)。

[0276] 如图8中所示，隔离的C4D电源116的输出电源606包括模拟(低噪声)电源(例如，高达100mA的3V)以用于为ADC的前端和C4D中的运算放大器缓冲器供电。模拟(低噪声)电源具有由电压监控器IC控制的使能输入，因此在来自无线功率接收器604的电源欠压的情况下，模拟(低噪声)电源被干净地重启。模拟(低噪声)电源可以包括线性稳压器IC，并且可以是商业上可获得的IC，例如U11、ADP151-3.0V。

[0277] 如图8中所示，隔离的C4D电源116的输出电源606包括Rx放大器406的低噪声电源。该电源包括升压转换器，以提供比来自无线功率接收器604的输入(例如，5V)更高的中间电压(例如6V)，其随后由低噪声线性稳压器向下调节(例如到5V)。升压转换器具有同步输入(因此开关频率可以锁定到来自C4D控制器410的外部参考)，以减轻C4D 114的测量带宽内来自调压器的开关噪声。升压转换器具有由电压监控器IC控制的使能输入，因此在来自无线功率接收器604的电源欠压的情况下，模拟(低噪声)电源被干净地重启。升压转换器可以是商业上可获得的转换器，例如德州仪器(Texas Instruments)TPS55340。线性稳压器可以具有低噪声，因为它为前端放大器供电。线性稳压器可以具有与升压转换器输出相配的输入电压范围(例如，6V)。线性稳压器可以是商业上可获得的稳压器，例如Analog Devices的ADP7142-5.0V。

[0278] 如图8中所示，隔离的C4D电源116的输出电源606包括C4D控制器410的核心电源。

基于C4D控制器410的特定功率需求来选择核心电源。对于Altera Cyclone V FPGA形式的C4D控制器410,其需要1.1V电源用于它的可编程数字核心,核心电源可以是商业上可获得的模块,例如EN6337QI。

[0279] 如图8中所示,隔离的C4D电源116的输出电源606包括C4D处理器410的组件的数字电源,包括内部PLL和与ADC 408、412和DAC 414通信的IO组。该数字电源可提供2.5V电源。电源模块可以是商业上可获得的模块,例如Altera EP53A8HQI。

[0280] 如图8中所示,隔离的C4D电源116的输出电源606包括数字电源,以用于为C4D板上的各种数字电路和组件供电(例如,以3.3V)。这些各种各样的组件包括C4D处理器410的配置闪存、JTAG接口、时钟发生器420和光收发器422(其可以是光纤收发器或自由空间光收发器,例如LED和光电检测器)。

[0281] 如图8中所示,隔离的C4D电源116的输出电源606包括模拟传输缓冲器电源,以用于为传输缓冲器电子设备(例如PCB安装模块(U8,NTA0515MC))供电,以高达33mA提供+/-15V电压。模拟传输缓冲器电源包括为运算放大器提供净化电源的无源L-C网络。

[0282] 数字电源、各种各样的数字电源和模拟传输缓冲器电源都可以由单个电源模块(例如Altera EP53A8HQI)提供。

[0283] 如图4所示,C4D 114包括用于通过光链路152通信的光收发器422。由于C4D电子设备处存在高电压(例如40kV),所以与MCU板132的通信通过电隔离异步串行光链路152进行。光链路152可以包括一对塑料光纤。光链路152可以包括HV外壳的光学透明部分或者是HV外壳的光学透明部分。光收发器422包括光发送器和光接收器。光收发器422可以是C4D PCB上的一个或更多个模块的形式。光发送器/接收器模块具有:

[0284] a.与塑料光缆或透明外壳相配的工作波长(例如,可见红色,例如,650nm);

[0285] b.与光缆或外壳配合的集成光学连接器或定位器;

[0286] c.到C4D处理器410的直接逻辑连接,例如3.3V CMOS逻辑;和

[0287] d.足以传送所有所需数据的数据速率,例如约3Mbps。

[0288] 光收发器422可以包括商业上可获得的模块,例如,Everlight部件号(p/n)PLT133/T10W或SunLED XZM2ACR78W发送器和Everlight p/n PLR135/T10接收器。

[0289] C4D处理器410提供以下特征:

[0290] a.实现下文描述的C4D信号处理方法的足够功能;

[0291] b.低功耗;

[0292] c.用于C4D PCB的适当封装;和

[0293] d.适当的温度范围,例如工业温度范围设备(-40℃至+85℃)。

[0294] 如图5中所示,C4D处理器410包括相敏检测器,以分离检测到的Rx信号和检测到的Tx信号(还称为“噪声”)的同相(“I”)和正交(“Q”)信号分量。

[0295] C4D处理器410连续执行C4D信号处理方法,以对接收到的数字信号进行滤波和转换,并在数学上提取被监测部分的电导率信息(即,电导率值)。

[0296] 在C4D信号处理方法中,C4D处理器410执行以下功能:

[0297] a.产生表示激励信号的数据;

[0298] b.控制ADC电路408、412和DAC 414以进行配置和通信;

[0299] c.从来自ADC电路408、412的数据流中提取复电导率信息(即,复电导率值);和

[0300] d.通过光链路152与MCU通信。

[0301] 如图5中所示，在C4D信号处理方法中，C4D处理器41以高频(例如1.0000MHz和1.0001MHz)产生表示激励正弦波和混合正弦波的信号，在DDS模块502中使用DDS(直接数字合成)，采样率实质上高于正弦波频率，例如100MHz。处理器410使用激励正弦波来产生发送(或“激励”)信号506，其通过DAC输出端口发送到DAC 414。处理器410使用混合正弦波来产生混合信号以在下文描述的接收处理路径中使用。低水平的(例如0.5或1比特)伪随机噪声信号由随机数发生器(RNG)产生，并由RNG加法器模块504通过加法器(“+”)求和到激励信号中。添加的噪声信号可以减少DAC 414中DAC量化的谐波效应。如图4所示，发送信号506从DAC 414传递到Tx滤波器电路416，然后分成两条路径：(1)通过发送电极402到接收电极404和Rx ADC电路408的物理传输路径；以及(2)，通过Tx ADC电路412中的衰减器和滤波器电子元件的模拟传输路径(模拟物理传输路径的至少一部分)。两个得到的接收信号508和510(分别来自Rx ADC电路408和Tx ADC电路412)由处理器410接收并如下文所述进行相同的处理，在光学串行链路530处给出四个输出信号(这四个输出信号表示通过物理传输路径的相位和幅度以及通过模拟传输路径的相位和幅度)，使得在处理期间可以应用差分噪声消除来创建电泳图。

[0302] 使用混频器512将每个接收信号(508和510)与混频信号算术相乘，以将接收信号的激励频率分量降低到IF(中频)，例如从1MHz到100Hz。这使得在以下信号处理步骤中每秒所需的计算次数减少。为了减少辐射电磁干扰，并减少接收到的电磁干扰的影响，通过扩频组件514将频率调制“扩频”添加到激励和混频信号，使得激励频率在小范围内(例如1kHz)快速移位。将扩频频率调制添加到激励信号和混频信号两者导致频率调制的消除，使得混频器512的输出再次具有单个未调制的频率分量。

[0303] 通过抽取滤波器516和518，串行地执行两个抽取和低通滤波器步骤，以将采样率降低到可管理的频率，例如从100MHz到10kHz。然后(由混频器520)对IF信号与具有90度差分相位的正弦波(由DDS模块522产生的同相和正交或I和Q混频信号)进行混频。该混频步骤通过产生接收信号的相位和幅度分量，有效地提高了最终结果的信噪比，所述接收信号的相位和幅度分量可以在降低的采样率下(而不仅仅在IF正弦波的最大值、最小值和过零点处)确定。I和Q信号由滤波器524带通滤波，以混频器520的频率结果为中心，混频器520的频率结果是IF和I/Q混频频率的总和(例如100Hz和100Hz，产生200Hz)。由处理块526执行的处理——包括反正切应用、象限检测和微分——确定相位变化(图5中未示出)。由处理块526执行的处理——包括平方应用、总和与平方根——确定幅度。来自处理块526的幅度信号和微分相位信号在通过光学串行链路530之前被滤波器528进一步低通滤波。传递给用户界面的最终信息变成包含流体通过电极402、404时流体的电导率的电泳图信号，表示洗出物中分析物的量。

[0304] C4D处理器410可以是商业上可获得的FPGA，例如19×19mm BGA封装的AlteraCycloneV p/n 5CEFA5U19I7N。

[0305] 如图9中所示，MCU包括以下内容，包括以下软件层：

[0306] a.应用逻辑层702；

[0307] b.驱动层704；

[0308] c.硬件抽象层(HAL)706；

[0309] d.硬件层708;和

[0310] e.外部设备层710。

[0311] 应用逻辑层702控制和协调系统100的活动,包括:初始化驱动器、处理事件、读取和记录传感器数据。应用逻辑层702中的每个应用被实现为单独的任务,以提供应用层组件之间的隔离。

[0312] 如图9中所示,应用逻辑层702包括系统固件模块712,其管理应用逻辑层702中模块的整体协调,并管理与嵌入式计算机134和/或外部计算机的通信(经由调试端口146)。系统固件模块712接收输入,包括:(i)来自嵌入式计算机134的脚本命令;(ii)来自外部(诊断)计算机的命令;以及(iii)来自固件管理器的输出。系统固件模块712产生输出,包括:(i)对嵌入式计算机134的响应和数据;(ii)对诊断计算机的响应和数据;以及(iii)对固件管理器的命令(脚本输入)。

[0313] 如图9中所示,应用逻辑层702包括HV管理器模块714,其控制HV电源122的闭环控制。HV管理器模块714采取以下输入:来自控制脚本的目标HV电压;来自HV电源122的HV电压反馈(通过ADC驱动器716);来自HV电源122的HV电流反馈(通过ADC驱动器716)。HV管理器模块714可以产生控制信号给HV电源122(例如,通过DAC驱动器718)。

[0314] 如图9中所示,应用逻辑层702包括泵管理器模块720、726、730、734,其处理与容积泵的接口。泵管理器模块使用来自控制脚本的目标流量/体积/扭矩值;来自泵的流量和体积反馈;和来自压力传感器的压力反馈,以通过驱动器724、728、732、736产生信号给泵。

[0315] 如图9中所示,应用逻辑层702包括真空管理器模块738,如果使用脱气歧管,则该真空管理器模块738处理真空电源的闭环控制。真空管理器模块738采取以下(一个或更多个)输入:目标真空范围(预设或来自配置);和来自真空传感器的真空反馈(通过ADC驱动器740)。真空管理器模块738产生以下(一个或更多个)输出:真空泵的开/关控制;和真空阀的开/关控制。

[0316] 如图9中所示,应用逻辑层702包括检测器管理器模块742,其处理与C4D 114的接口(通过UART 744)。检测器管理器模块742从C4D接收电导率信息,并将其传递给UI。检测器管理器模块742还保持C4D中的寄存器设置,因为如果C4D未供电,则这些寄存器设置将丢失。

[0317] 如图9中所示,应用逻辑层702包括热管理器模块746,其处理热区140中温度的闭环控制。热管理器模块746采取以下(一个或更多个)输入:目标温度(预设或来自配置);和来自温度传感器126的温度(通过I2C驱动器748)。热管理器模块746产生以下(一个或更多个)输出:加热器128的控制(通过PWM驱动器750)。

[0318] C4D和可选的HV排流装置与其他元件有显著的空间和电气隔离,以获得适当的电气隔离,并使用高阻抗材料(例如惰性聚合物或陶瓷)安装。安装布置中需要允许隔离的数据信号。

[0319] 解释

[0320] 许多修改对于本领域的技术人员将是明显的,而不脱离本发明的范围。

[0321] 在本说明书中对任何先前出版物(或来源于其的信息)或对已知的任何内容的引用,不被视为并且不应当被视为对先前出版物(或来源于其的信息)或形成本说明书涉及的尝试的领域中的公知常识的一部分的已知内容的承认或允许或任何形式的建议。

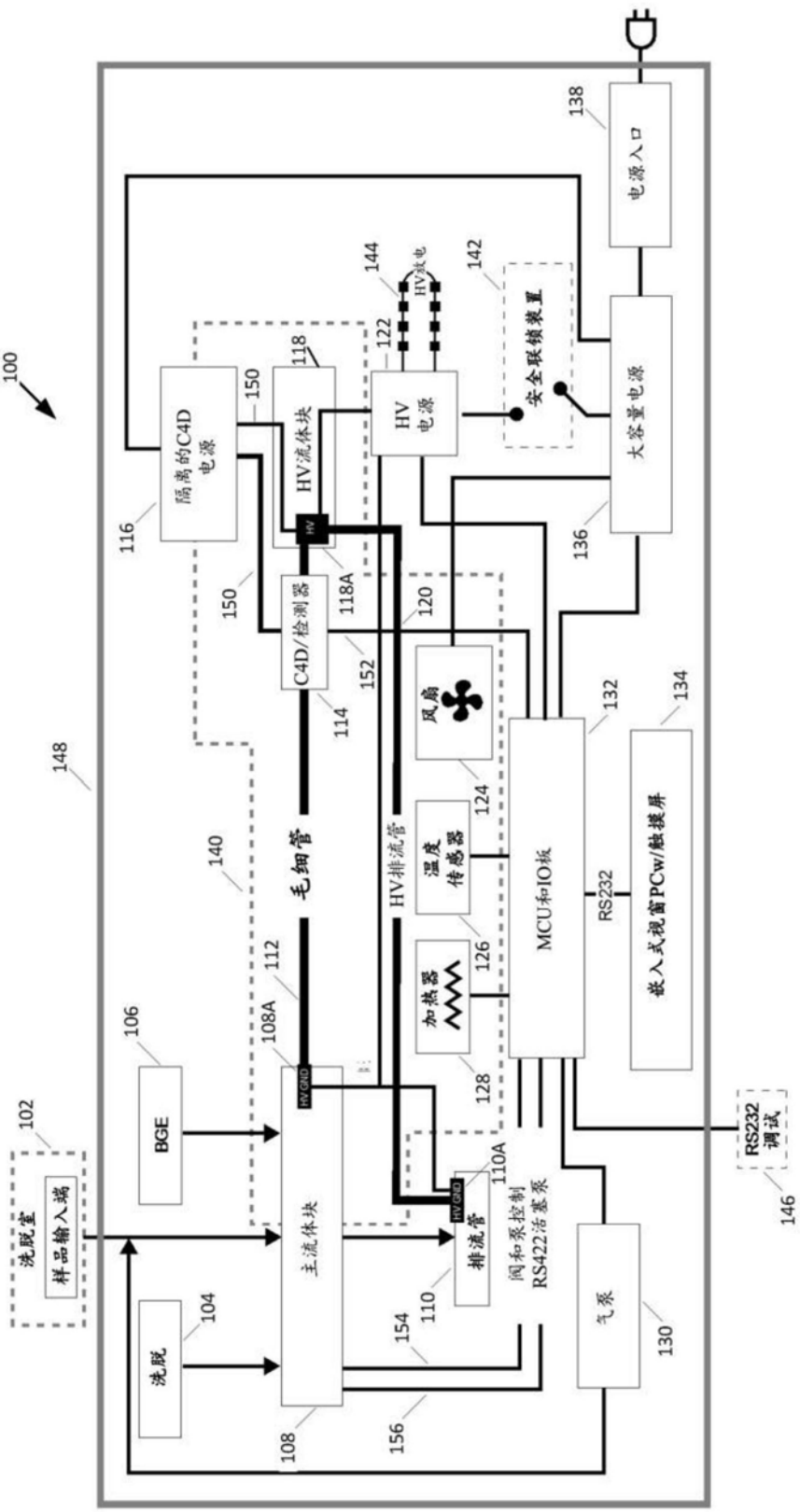

100
148
102
洗脱室
样品输入端
106
BGE
104
洗脱
108
主流体块
108A
HV GND
112
140
毛细管
114
C4D/检测器
150
116
隔离的C4D电源
118
HV流体块
118A
HV
152
120
122
HV电源
144
HV放电
142
安全联锁装置
136
大容量电源
138
电源入口
124
风扇
126
温度传感器
128
加热器
HV排流管
132
MCU和IO板
RS232
134
嵌入式视窗PCw/触摸屏
110
排流管
110A
阀和泵控制
RS422活塞泵
154
156
130
气泵
RS232调试
146

图1

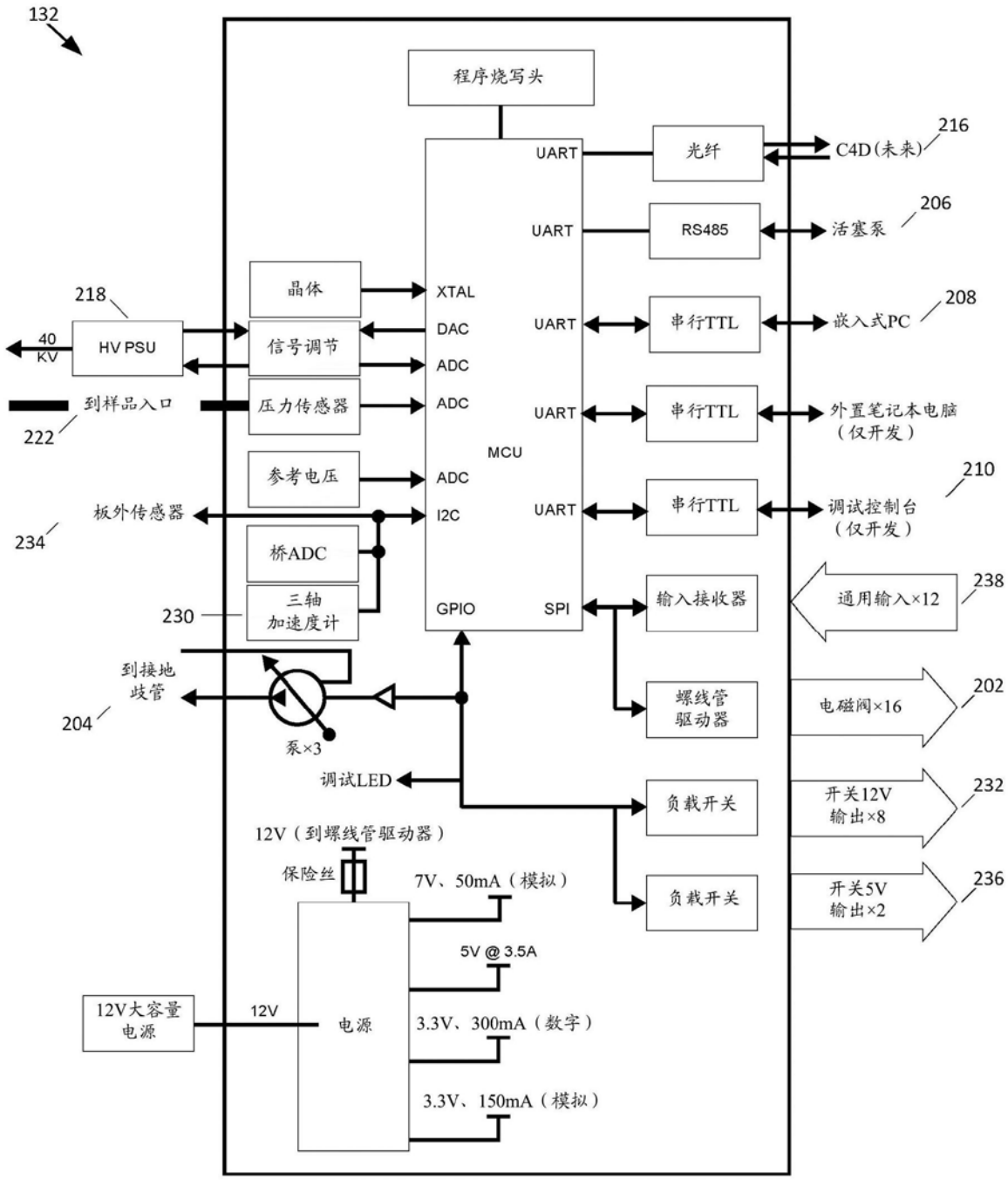

132
程序烧写头
UART
光纤
C4D(未来)
216
UART
RS485
活塞泵
206
晶体
XTAL
218
HV PSU
40 KV
信号调节
DAC
UART
串行TTL
嵌入式PC
208
ADC
到样品入口
222
压力传感器
ADC
UART
串行TTL
外置笔记本电脑（仅开发）
MCU
参考电压
ADC
210
板外传感器
234
I2C
UART
串行TTL
调试控制台（仅开发）
桥ADC
三轴加速度计
230
GPIO
SPI
输入接收器
通用输入×12
238
到接地歧管
204
螺线管驱动器
电磁阀×16
202
泵×3
调试LED
负载开关
开关12V输出×8
232
12V（到螺线管驱动器）
保险丝
7V、50mA（模拟）
负载开关
开关5V输出×2
236
5V @ 3.5A
12V大容量电源
12V
电源
3.3V、300mA（数字）
3.3V、150mA（模拟）

图2

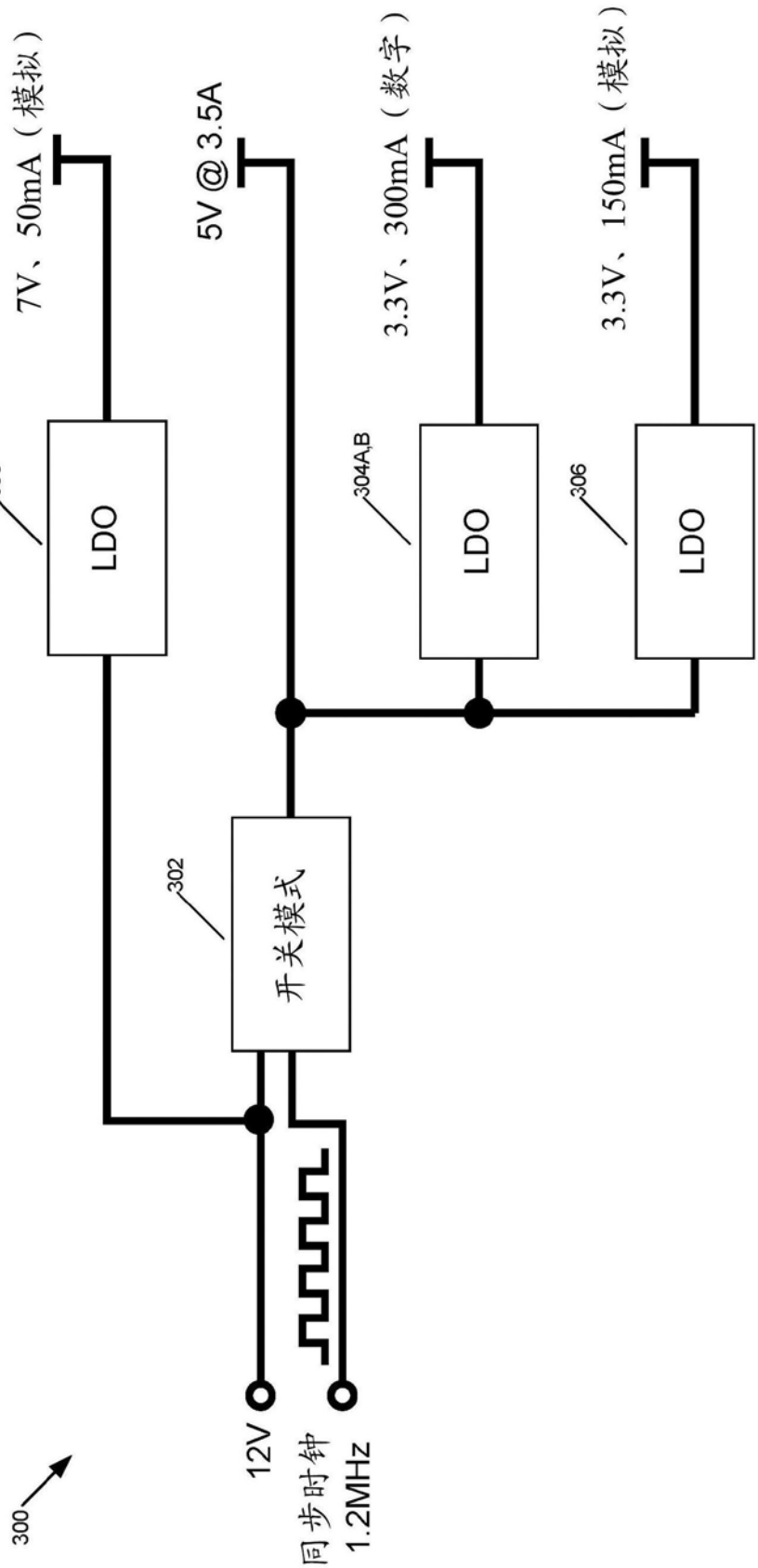

7V、50mA（模拟）
5V @ 3.5A
3.3V、300mA（数字）
3.3V、150mA（模拟）
308
LDO
304A,B
LDO
306
LDO
302
开关模式
12V
同步时钟
1.2MHz
300

图3

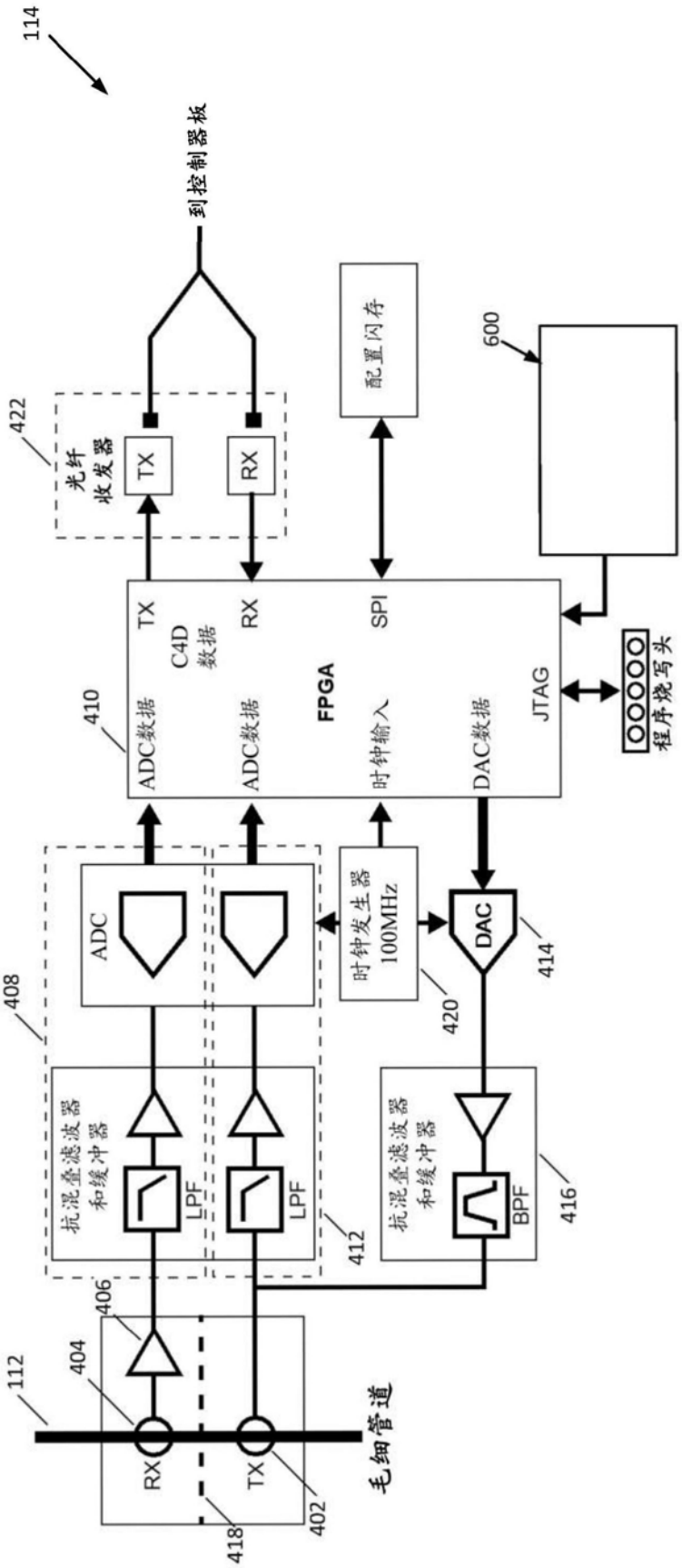

114
到控制器板
422
光纤
收发器
TX
RX
配置闪存
600
410
ADC数据
C4D
数据
FPGA
SPI
JTAG
程序烧写头
时钟输入
DAC数据
408
ADC
时钟发生器
100MHz
DAC
414
420
抗混叠滤波器
和缓冲器
LPF
412
BPF
416
406
404
112
毛细管道
402
418

图4

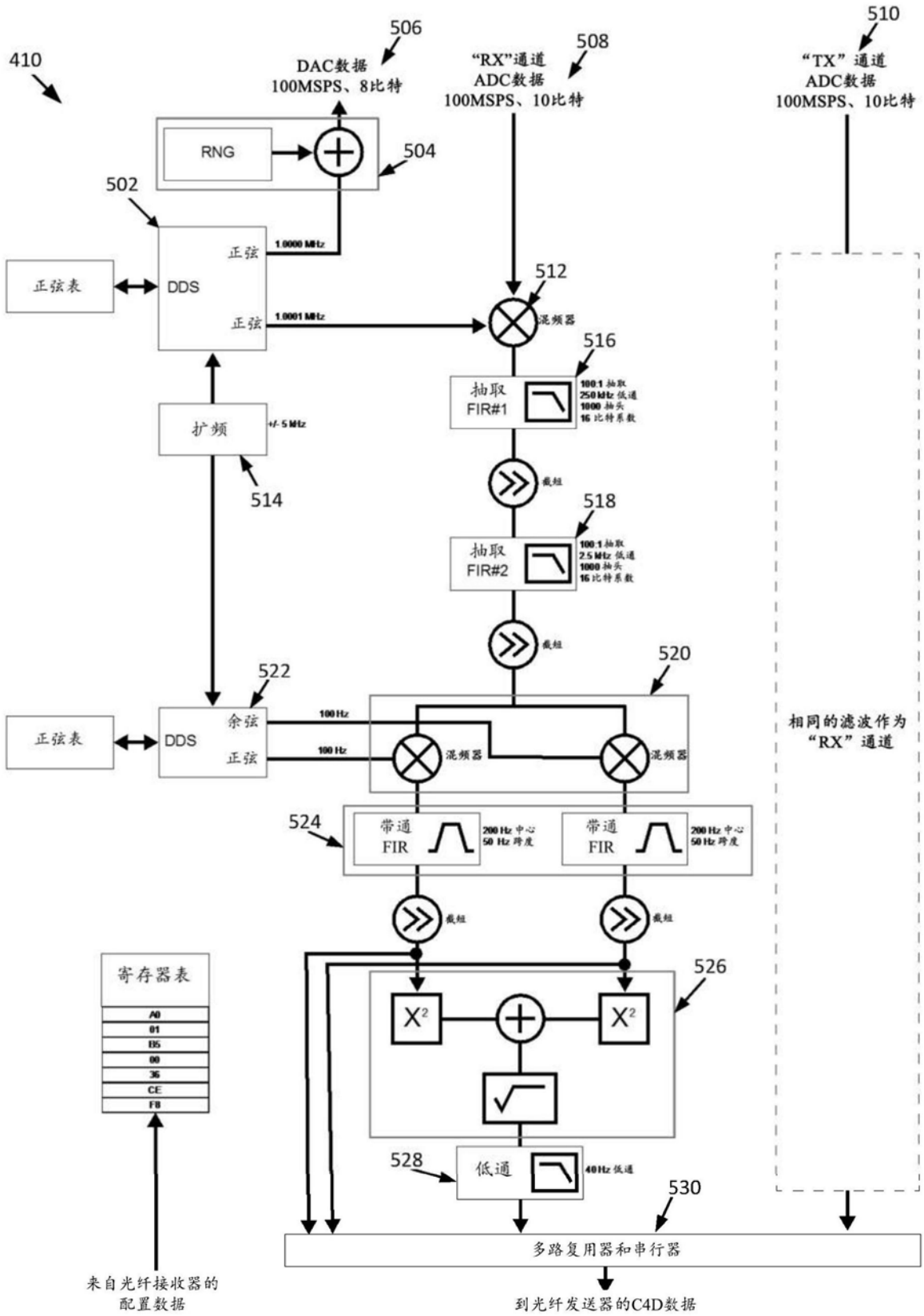

410
506
DAC数据
100MSPS、8比特
508
“RX”通道
ADC数据
100MSPS、10比特
510
“TX”通道
ADC数据
100MSPS、10比特
RNG
504
502
正弦
1.0000 MHz
正弦表
DDS
正弦
1.0001 MHz
512
混频器
516
抽取
FIR#1
100:1 抽取
250 kHz 低通
1000 抽头
16 比特系数
扩频
+/- 5 MHz
514
截短
518
抽取
FIR#2
100:1 抽取
2.5 MHz 低通
1000 抽头
16 比特系数
截短
520
522
余弦
正弦表
DDS
正弦
100 Hz
100 Hz
混频器
混频器
相同的滤波作为
“RX”通道
524
带通
FIR
200 Hz 中心
50 Hz 跨度
带通
FIR
200 Hz 中心
50 Hz 跨度
截短
截短
寄存器表
A0
01
B5
00
36
CE
F8
526
X²
X²
528
低通
40 Hz 低通
530
多路复用器和串行器
来自光纤接收器的
配置数据
到光纤发送器的C4D数据

图5

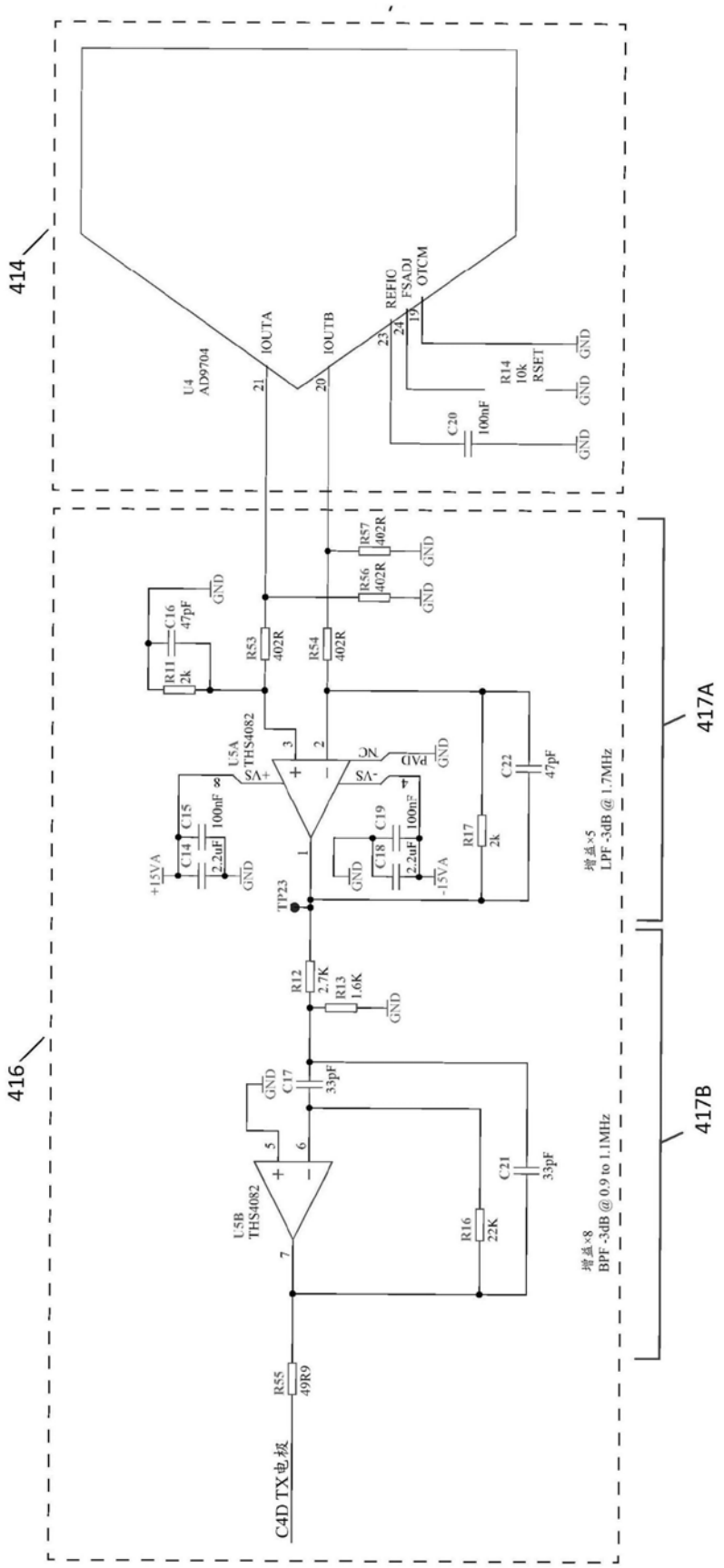

414
416
417A
417B
U4
AD9704
IOUTA
IOUTB
REFIO
FSADJ
OTCM
R14
10k
RSET
C20
100nF
GND
R57
402R
R56
402R
R53
402R
R54
402R
C16
47pF
R11
2k
U5A
THS4082
C22
47pF
C15
100nF
C14
2.2uF
C19
100nF
C18
2.2uF
R17
2k
+15VA
-15VA
TP23
R12
2.7K
R13
1.6K
C17
33pF
C21
33pF
U5B
THS4082
R16
22K
R55
49R9
C4D TX电极
增益×5
LPF -3dB @ 1.7MHz
增益×8
BPF -3dB @ 0.9 to 1.1MHz

图6

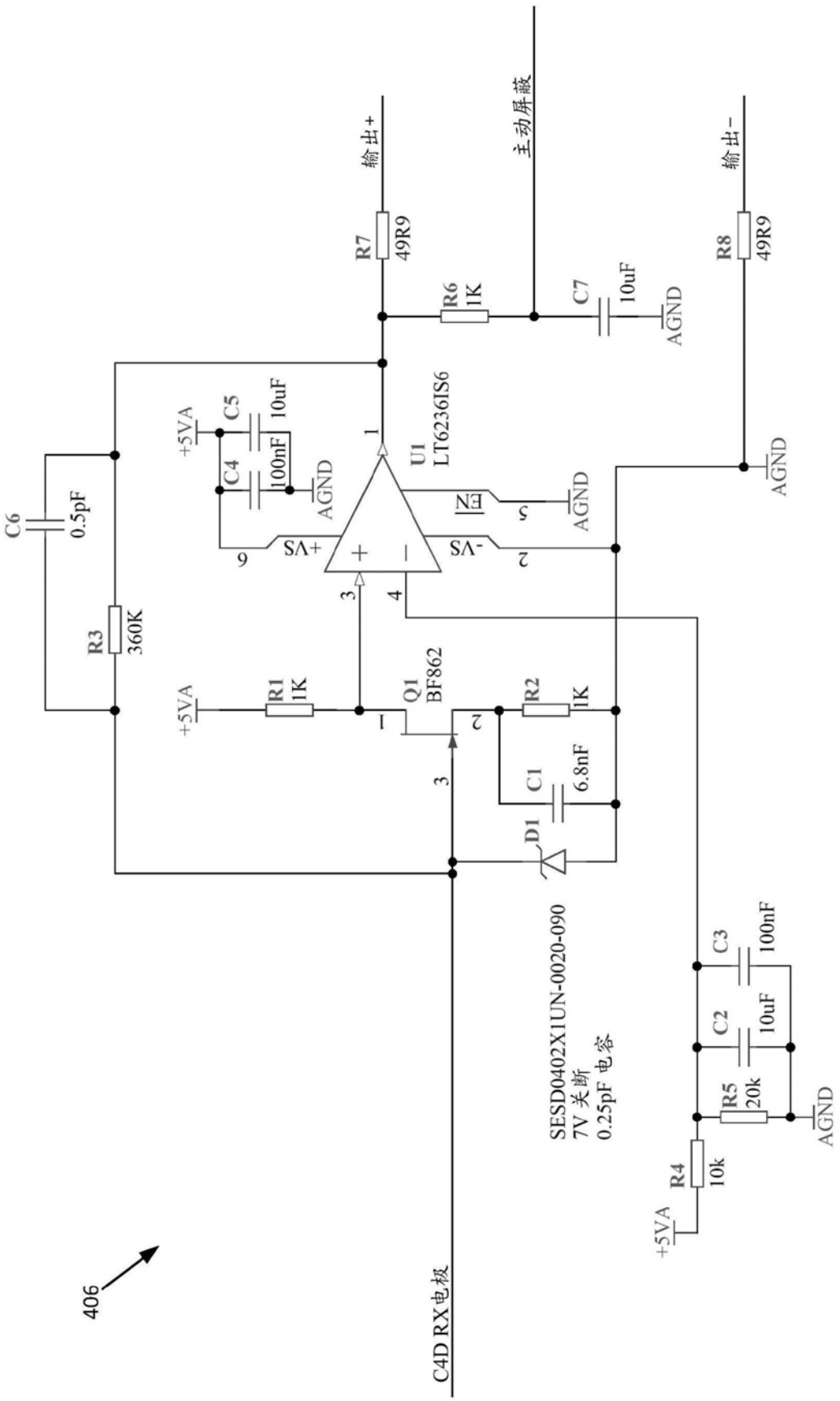

输出+
主动屏蔽
输出-
R7
49R9
R6
1K
C7
10uF
AGND
R8
49R9
AGND
+5VA
C5
10uF
C4
100nF
AGND
U1
LT6236IS6
C6
0.5pF
R3
360K
+5VA
R1
1K
Q1
BF862
R2
1K
C1
6.8nF
D1
SESD0402X1UN-0020-090
7V 关断
0.25pF 电容
C3
100nF
C2
10uF
R5
20k
AGND
R4
10k
+5VA
406
C4D RX电极

图7

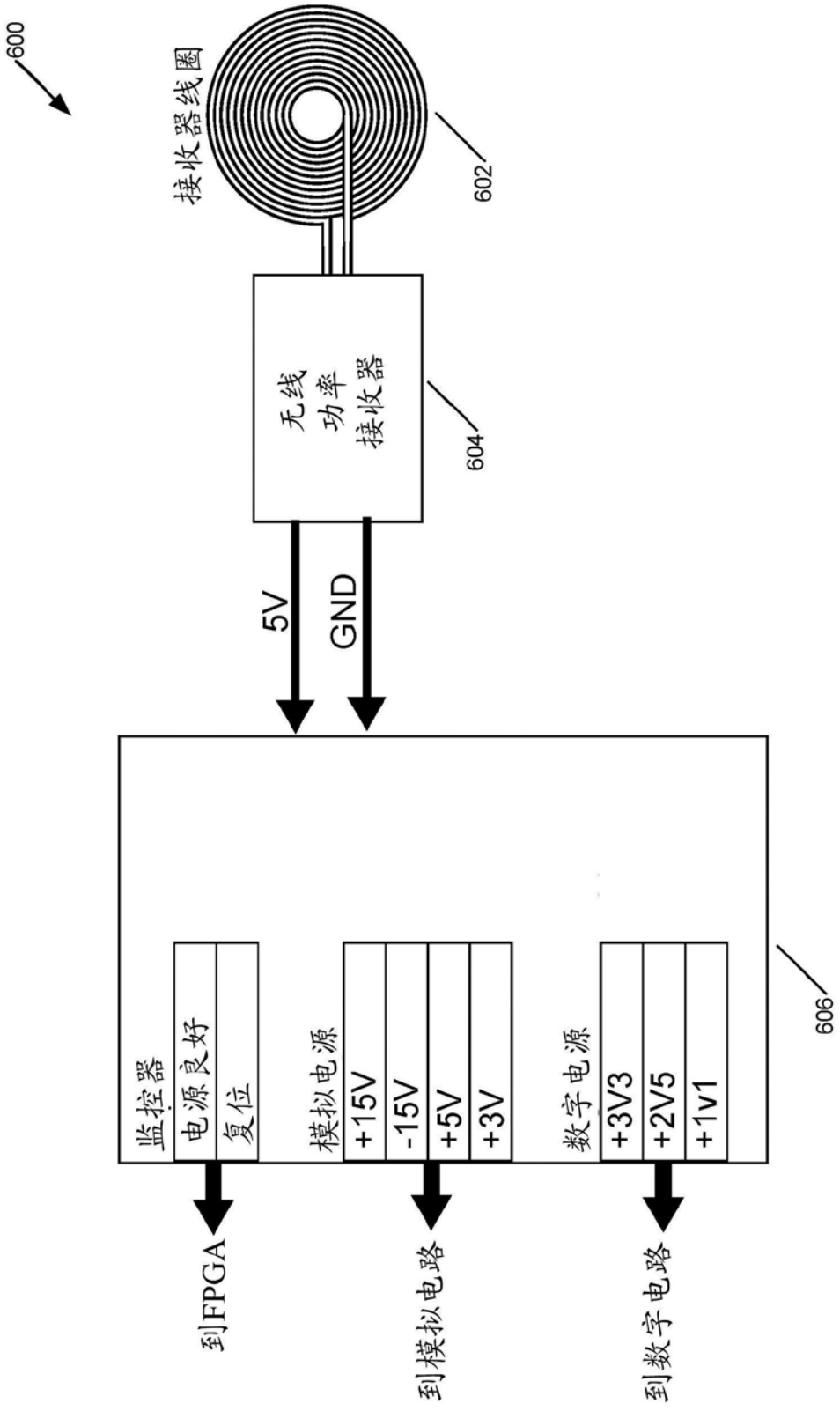

600
接收器线圈
602
无线
功率
接收器
604
5V
GND
606
监控器
电源良好
复位
模拟电源
+15V
-15V
+5V
+3V
数字电源
+3V3
+2V5
+1v1
到FPGA
到模拟电路
到数字电路

图8

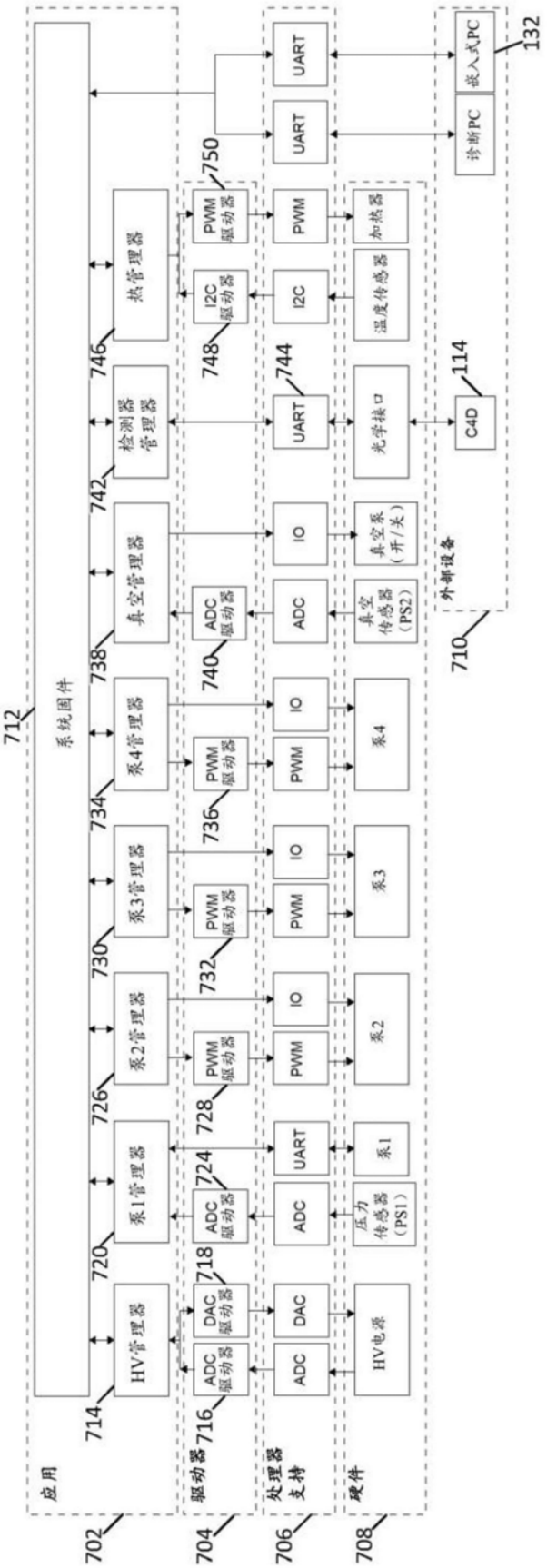

应用
驱动器
处理器支持
硬件
外部设备
系统固件
HV管理器
泵1管理器
泵2管理器
泵3管理器
泵4管理器
真空管理器
检测器管理器
热管理器
ADC驱动器
DAC驱动器
PWM驱动器
I2C驱动器
ADC
DAC
PWM
IO
UART
I2C
HV电源
压力传感器(PS1)
泵1
泵2
泵3
泵4
真空传感器(PS2)
真空泵(开/关)
光学接口
温度传感器
加热器
C4D
诊断PC
嵌入式PC
702
704
706
708
710
712
714
716
718
720
724
726
728
730
732
734
736
738
740
742
744
746
748
750
114
132

图9