



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102171783 B

(45) 授权公告日 2014. 04. 02

(21) 申请号 200980129341. 6

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2009. 05. 27

H01J 49/02 (2006. 01)

(30) 优先权数据

(56) 对比文件

61/056, 362 2008. 05. 27 US

GB 676238 A, 1952. 07. 23,

12/329, 787 2008. 12. 08 US

CN 2589978 Y, 2003. 12. 03,

12/472, 111 2009. 05. 26 US

US 4703190 A, 1987. 10. 27,

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

审查员 李晓明

2011. 01. 27

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2009/045283 2009. 05. 27

(87) PCT国际申请的公布数据

W02009/154979 EN 2009. 12. 23

(73) 专利权人 第一探测公司

地址 美国得克萨斯州

(72) 发明人 戴维·拉弗蒂

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 邵亚丽

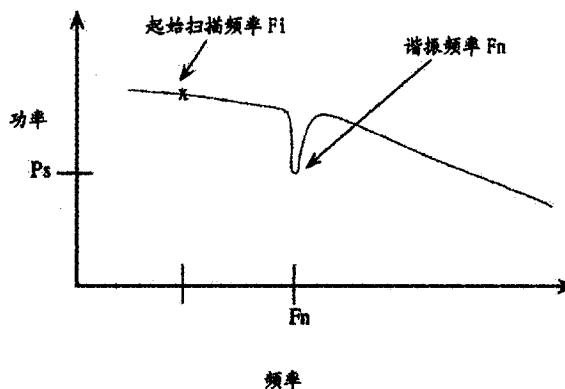
权利要求书2页 说明书6页 附图8页

(54) 发明名称

驱动质谱仪离子阱或滤质器

(57) 摘要

用于驱动质谱仪的离子阱或滤质器的射频 (RF) 驱动系统及方法, 具有耦接到 RF 增益级的可编程 RF 频率源。RF 增益级是变压器, 其耦接到由离子阱或滤质器形成的储能电路。使用感测电路和电源电路测量驱动离子阱或滤质器的 RF 增益级的功率。通过用于调整 RF 频率源的电源电路生成反馈值。RF 频率源的频率被调整直到 RF 增益级的功率处于最低水平。



1. 一种用于驱动质谱仪离子阱或滤质器的系统,包括:  
频率和振幅可编程射频发生器,其生成射频信号;  
射频增益级,接收射频信号及生成经放大的射频信号;  
感测电路,其生成与传递给射频增益级的电源电流成正比的感测信号;  
变压器,其具有耦接到射频增益级的输出的初级绕组以及被耦接以与质谱仪离子阱或滤质器的电容一起形成谐振电路的次级绕组;以及  
功率控制电路,其接收所述感测信号以及生成反馈控制信号到所述射频发生器,该反馈控制信号调整所述射频发生器的频率以降低所述射频增益级所需的电源电流。
2. 如权利要求 1 所述的系统,其中,所述感测电路包括:  
电流感测电阻器,其将电源输入串联到所述射频增益级;以及  
差分放大器,其具有耦接到所述电阻器的一个端子的正输入以及耦接到所述电阻器的第二端子的负输入,其中,所述差分放大器生成与提供给所述射频增益级的功率成正比的输出信号。
3. 如权利要求 2 所述的系统,其中,所述可编程射频发生器包括具有可编程分频器电路的锁相环 PLL 电路。
4. 如权利要求 3 所述的系统,其中,所述可编程分频器电路是数字可编程的。
5. 如权利要求 4 所述的系统,所述功率控制电路还包括模数转换器,用于将所述差分放大器的输出电压转换为数字反馈信号。
6. 如权利要求 1 所述的系统,其中,变压器是具有次级电感的升压变压器,该次级电感与所述质谱仪离子阱或滤质器的电容一起形成谐振电路。
7. 如权利要求 1 所述的系统,其中,所述射频发生器耦接到具有滤波电路的射频增益级。
8. 如权利要求 1 所述的系统,其中,所述射频增益级的输出包括滤波电路。
9. 如权利要求 8 所述的系统,其中,所述滤波电路包括串联电容。
10. 如权利要求 8 所述的系统,其中所述滤波电路包括串联电阻器。
11. 如权利要求 1 所述的系统,其中所述射频增益级的增益通过阻抗之比进行设置。
12. 如权利要求 1 所述的系统,还包括与所述质谱仪离子阱或滤质器并联的可变电容器,被配置为调节所述质谱仪离子阱或滤质器到特定工作频率范围。
13. 如权利要求 1 所述的系统,其中所述射频增益级还包括运算放大器,其具有双极电源输入并且被配置为生成放大的射频信号。
14. 一种操作质谱仪离子阱或滤质器的方法,该方法包括:  
通过信号驱动所述质谱仪离子阱或滤质器,其中驱动电路包括经由变压器耦接到所述质谱仪离子阱或滤质器的射频增益级,并且其中,射频发生器被耦接到所述射频增益级的输入;  
监视在驱动所述质谱仪离子阱或滤质器的同时提供给所述射频增益级的功率电平,并且生成与所述功率电平成正比的反馈信号;以及  
耦接所述反馈信号以调整输出的所述射频发生器的频率,以便当驱动所述质谱仪离子阱或滤质器时降低所述射频增益级所需的功率电平。
15. 如权利要求 14 所述的方法,其中所述射频增益级还包括运算放大器,其具有耦接

到电流旁路电阻器的双极电源输入,并且其中监视提供给所述射频增益级的功率电平包括监视所述电流旁路电阻器两端的电压。

## 驱动质谱仪离子阱或滤质器

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求 2008 年 5 月 27 日提交的、序号为 61/056,362 的美国临时申请的优先权,通过引用的方式将其结合于此。本申请是 2008 年 12 月 8 日提交的、序号为的美国专利申请的部分继续。

### 技术领域

[0003] 本发明涉及离子阱 (ion trap)、离子阱质谱仪 (ion trap massspectrometers), 并且更加具体来说, 涉及用于驱动诸如线型四极 (linearquadrupole) 的质谱仪离子阱或滤质器 (mass filter) 的射频系统。

### 发明内容

[0004] 用于驱动质谱仪离子阱的射频 (RF) 系统具有产生 RF 信号的频率可编程 RF 发生器。RF 增益级接收 RF 信号并生成经放大的 RF 信号。感测电路生成与传递给 RF 增益级的供电电流成比例的感测信号。变压器具有耦接到 RF 增益级的输出的初级绕组 (primary) 和被耦接以与质谱仪离子阱的电容一起形成储能电路 (tank circuit) 的次级绕组 (secondary)。电源电路 (powercircuitry) 使用感测信号以确定 RF 增益级的功耗, 以便调整 RF 发生器的频率, 以使得提供给 RF 增益级的功率 (power) 被降低。

[0005] 一旦设置了 RF 发生器的频率, 当可变条件使得变压器次级绕组和离子阱的谐振频率漂移 (drift) 时, 可以利用功率监视来连续地调整频率, 该频率作为。因为需要低得多的功率来驱动质谱仪离子阱或滤质器 (诸如线型四极), 所以质谱仪可以在大小和成本上降低, 由此增加潜在应用的数目。

[0006] 在附图以及下面的说明中阐述了本发明的一个或多个实施例的细节。本发明的其他特征、目标和优点将从描述和附图以及从权利要求中变得清楚。

### 附图说明

[0007] 图 1 示出质谱仪系统的系统方框图;

[0008] 图 2 示出用于质谱仪系统的 RF 捕获和喷射电路 (trapping and ejectingcircuitry);

[0009] 图 3 示出离子阱;

[0010] 图 4 示出用于改变离子阱的性能的电路;

[0011] 图 5A 示出用于生成反馈信号以控制 RF 信号源的电路;

[0012] 图 5B 示出配置频率控制的 RF 信号源的电路;

[0013] 图 6 示出用于图 2 的 RF 系统的频率跟踪的流程图;

[0014] 图 7 示出用于确定图 2 的 RF 系统的谐振频率的流程图;

[0015] 图 8 示出根据本发明的实施例的流程图;和

[0016] 图 9 示出提供给离子阱的频率对功率的示范曲线图 (plot)。

## 具体实施方式

[0017] 在本发明的实施例中,离子阱执行质谱化学分析。离子阱使用由一个驱动信号或多个驱动信号生成的动态电场从测量样本中动态地捕获离子。通过改变捕获离子的射频(RF)电场的特征(例如,振幅、频率等等),相应于离子的质量-电荷比(质量(m)/电荷(z))选择性地喷射出它们。

[0018] 在本发明的实施例中,离子阱动态地捕获离子阱内的四极场(quadrupole field)中的离子。这个场是通过相对于端盖电压(end cap voltage)(或信号)的、从RF源施加到中心电极的电信号创建的(created)。在最简单的形式中,具有恒定RF频率的信号被施加到中心电极,而两个端盖电极被维持在静态零伏特。中心电极信号的振幅线性地倾斜向上,以便选择性地使离子阱内保留的不同质量的离子不稳定(destabilize)。这种振幅喷射(amplitude ejection)结构可能不会得到最佳性能或解决方案,并且在实际中可能导致输出能谱中的双峰。这种振幅喷射方法可以通过在端盖之间区别地施加第二信号得以改进。该第二信号导致偶极轴向激发(dipole axial excitation),其导致当阱内离子的振荡的长期频率与端盖激发频率匹配时,离子从离子阱中谐振喷射。

[0019] 离子阱或滤质器具有看起来像几乎是纯电容的等效电路。驱动离子阱所需的电压的振幅可以很高(例如,1500伏特),并且通常要求使用耦合以产生高电压的变压器。变压器次级绕组的电感和离子阱的电容形成并联储能电路(parallel tank circuit)。在谐振之外的频率驱动该电路可能产生不必要的损失,并且可能增加电路的成本和大小。特别是,这将妨碍使质谱仪小型化以提高其使用和市场性的努力。

[0020] 此外,在谐振处驱动电路具有其它好处:诸如产生可能的最清洁、最低失真以及最低噪声的信号。储能电路(tank circuit)使除了谐振频率之外的所有频率的信号衰减;以这种方法,储能电路作为它自己的窄带通滤波器,其中仅仅使特定频率谐振。频偏噪声(off frequency noise)和谐频(harmonics)被滤出。而且,在谐振处,来自信号驱动放大器的功率量非常低。需要的功率仅仅是在变压器无效率(inefficiency)中损失的功率或电阻的损失的功率。电路功率在较小物理面积的储能电路中、在电感元件和电容元件之间来回传递。因为几乎没有功率是从外部放大器驱动的,所以作为电磁干扰(EMI)被放射出(radiated)功率会更少。

[0021] 因此,对于RF系统来说,保证离子阱是通过最小化组件大小、降低成本和功率、提供超高质量的信号并且导致减少的放射EMI的电路来驱动可能是有利的。这在便携式质谱仪应用中会是非常重要的。

[0022] 图1示出在质谱仪系统100中的元件的框图。样本101可以通过渗透膜管道102被引入具有低压105(例如真空)的腔112。结果,浓缩的样本气体103被容许通过薄膜管道102并且使其前进到离子阱104。电子113以公知方式由源111生成,并且由加速电势110导向离子阱104。电子113在离子阱104中将样本气体103离子化。RF捕获和喷射电路109被耦接到离子阱104,以便在离子阱104内建立交流电场,以便首先捕获、然后以与离子质量成比例的方式喷射离子。附加的修改电路108可以用于增强离子阱104的操作。离子探测器106寄存以相应于特定离子质量的不同时间间隔发射的离子的数目。这些离子数目被数字化以供分析并在显示器107上显示为光谱。

[0023] 渗透膜 102 可以包括嵌入式加热装置 (未示出), 用以保证气体样本处于均匀温度。另外, 提供电子 113 的装置 111 可以包括静电透镜, 其可操作于聚焦进入离子阱 104 的电子 113。静电透镜的焦点可以在端盖的孔 (aperture) 的前面 (例如, 参见图 3)。静电透镜操作于提供离子阱 104 中更好的电子分布而且用于提高进入阱 104 的电子的百分比。电子 113 的源 111 可以被配置为以碳纳米管作为使电子能够以比传统方法更低的功率生成的电子发射器。还应当注意, 本领域技术人员将认识到, 存在包括离子阱 (ion trap) 的质谱仪 100 的许多配置, 所述配置可以具有改变的 (1) 将样本 101 引入到质谱仪 100 的方法, (2) 离子化方法 111, 以及 (3) 探测器 106, 它们均在本发明的实施例的范围之内。

[0024] 在本发明的实施例中, 离子阱 104 被配置为具有这样的设计: 其生成对电路 109 的最低电容负载。离子阱 104 可以将其内表面粗糙度最小化以改善其特性。

[0025] 图 2 示出驱动离子阱 104 的 RF 捕获和喷射电路 109 的电路和框图。示范性离子阱 104 包括中心电极 219 以及端盖 218 和 220。离子阱 104 可以像在这里描述的那样, 或者任何其他可以以像在这里描述的方式操作的等效离子阱设计。寄生电容 213 和 214 以虚线示出。端盖 218 和 220 可以耦接到地电势并且电容 213 和 214 代表对电路 109 的电容负载。

[0026] RF 源 201 生成正弦曲线的 RF 信号并且被示为具有耦接到 (多条) 控制线 221 的输入。控制线 221 的值可操作为向上或者向下调整 RF 信号的频率。在实施例中, 可以响应于最优化参数, 人工地调整 RF 源 201 的频率。差动放大器 204 (例如, 运算放大器) 具有正输入和负输入以及输出。使用电阻器 205 和 206 的负反馈可以用于将放大级的闭环增益设置为电阻器值之比。RF 信号用滤波器 203 进行滤波 (例如, 低通或带通) 并且被施加到放大器 204 的正输入。放大器 204 使用电容器 209 以阻挡放大器输出偏移电压, 并且使用电阻器 210 来改善放大器稳定性。经滤波的放大器 204 的输出被施加到变压器 211 的输入。因为可能需要高电压 (例如, 1500 伏特) 来驱动离子阱 104, 所以变压器 211 可以是升压 (step up) 变压器。这允许放大级的初级侧组件具有相对较低的电压。

[0027] 放大器 204 可以由双极电源 (bipolar power supply, PS) 电压 216 和 217 供电。电流感测电路 208 可以用于监视来自 PS 电压 216 的电流。功率控制电路 207 可以配置为监视驱动离子阱 104 所耗散的功率, 以便经由控制线 221 控制 RF 源 201。根据 RF 源 201 的特性, 控制电路 207 可以是模拟的或者数字的。在任一情况下, 电路 109 操作为在将由 PS 电压 216 和 217 提供的功率最小化的频率处驱动离子阱 104。

[0028] 可以调整 RF 源 201 的频率以最小化驱动离子阱 104 所需的功率。最小化驱动功率的 RF 源 201 的最终频率是使包括变压器 211 的次级绕组处的电感以及离子阱 104 的电容的电路谐振的频率。RF 源 201 的频率可以设置在期望值处, 并且可变组件 (例如, 可变电容器 212) 用于改变次级绕组电路 (secondary circuitry) 以使其与所设置的 RF 源 201 的期望频率谐振。可以设置 RF 源 201 的中心频率, 并且次级绕组电路被调整以调谐 (tune) 变压器 211 的次级绕组。然后具有控制 221 的反馈可以用于调整谐振频率, 以动态地最小化驱动离子阱 104 所需的功率。

[0029] 电路 207 可以采用这样的可编程处理器: 其首先设置 RF 源 201 的频率以最小化到离子阱 104 的功率。然后, 在离子被捕获的时间段之后, 来自变压器 211 的次级绕组的振幅反馈可以用于调整 RF 源 201 的振幅或放大级的增益, 从而使得驱动离子阱 104 的次级信号

的振幅为以操作来喷射离子的方式而调幅的振幅。

[0030] 电路 207 可以采用这样的可编程处理器：其首先设置 RF 源 201 的频率以最小化到离子阱 104 的功率。然后，在离子被捕获的时间段之后，RF 源 201 的频率的被改变，使得驱动离子阱 104 的次级信号的频率为以操作来喷射离子的方式而调频的频率。

[0031] 在一个实施例中，电路 109 可以采用电容分压器用于将变压器 211 的输出电压的样本反馈到放大器 204 的负输入。该负反馈可以用于在驱动离子阱 104 时稳定电压输出变压器 211。

[0032] 图 3 示出根据本发明的实施例的离子阱 104 的电极的横截面和细节。第一端盖 218 具有入口孔 (inlet aperture) 304，中心电极 219 具有孔 306 并且第二端盖 220 具有出口孔 305。端盖 218 和 219 以及电极 219 可以具有环形配置或者根据本发明的实施例足以捕获和喷射离子的其他等效形状。典型地，第一离子阱端盖 218 可以耦接到地或零伏特，然而，其他实施例可以使用零伏特之外的电压。例如，第一端盖 218 可以连接到可变 DC 电压或者其他信号。离子阱中心电极 219 由电路 109 驱动（参见图 1 和 2）。第二离子阱端盖 220 可以直接连接到零伏特或通过电路元件 108 连接到零伏特（参见图 1），或者连接到另外的信号源。薄型绝缘体 (Thin insulators)（未示出）可以位于间隔 (spaces) 309 中以隔离第一端盖 218、第二端盖 220 和中心电极 219，从而形成电容 213 和 214（以虚线示出）。在美国专利 No. 3, 065, 640 中描述了典型离子阱的操作和配置，并且典型离子阱的操作和配置后来为本领域的许多作者所涉及，包括 March (March, R. E. 和 Todd, J. F. J., “Practical Aspects of Ion Trap Mass Spectrometry”, 1995, CRC Press) 提供的说明，以上二者均通过引用的方式结合于此。

[0033] 图 4 示出由电路 109（参见图 1 和图 2）有源驱动的离子阱 104 的示意框图 400。端盖 218 具有用于收集样本气体的入口孔 304，中心电极 219 具有用于保留所生成的离子的孔 306，并且第二端盖 220 具有出口孔 305。端盖 218 可以耦接到地或零伏特，然而，其他实施例可以使用除了零伏特或者另外的信号源之外的配置。中心电极 219 由电路 109 驱动。端盖 220 可以通过修改电路 108（在本实施例中，包括电容器 402 和电阻器 403 的并联组合）连接到零伏特。薄型绝缘体（未示出）可以位于间隔 309 中以隔离第一端盖 218、第二端盖 220 和中心电极 219。

[0034] 图 4 中示出的实施例 400 具有自然存在于中心电极 219 和端盖 220 之间的本征电容 214（以虚线标出）。电容 214 与电容器 402 的电容串联，从而形成电容分压器，由此在端盖 220 处施加 (impress) 从来自电路 109 的信号得出的电势。当电路 109 在中心电极 219 上施加变化的电压时，具有较小振幅的、变化的电压通过电容分压器的动作被施加在端盖 220 上。自然地，在中心电极 219 和端盖 218 之间存在相应的本征电容 213（以虚线标出）。分立的电阻器 403 可以添加在端盖 220 和零伏特之间。电阻器 403 提供电通路 (path)，其用于防止端盖 220 发展出能够引起电压漂移或者过充电堆积 (excess charge build-up) 的浮动 DC 电势。电阻器 403 的值在 1 到 10 兆欧姆 (M $\Omega$ ) 的范围内调整大小，以保证在电路 109 的工作频率处电阻器 403 的阻抗比添加的电容器 402 的阻抗大得多。如果电阻器 403 的电阻值没有比 CA 402 的阻抗大得多，那么在中心电极 219 处的信号与通过电容分压器施加在第二端盖 220 上的信号之间将存在相移。而且，如果电阻器 403 的值太低，那么施加在端盖 220 上的信号的振幅将根据感兴趣的频率范围中频率的函数而变化。没有电阻器 403，

电容分压器 (CS214 和 CA402) 基本上与频率无关。添加的电容器 402 的值可以是可变的, 因此针对给定系统特性, 其可以被调整以具有最优化的值。

[0035] 图 5A 示出用于在控制线 221 (参见图 2) 上产生适合于控制可编程 RF 信号源 201 的反馈信号的示范性电路。请注意, 控制线 221 上的信号可以是模拟电压或多个模拟电压, 或者是由一条或多条线形成的数字通信方法。放大器 204 由电源电压 216 和 217 供电。在本实施例中, 电流感测电阻器 501 与电压 216 串联耦接, 并且其电压降耦接到差动放大器 502。通过在放大器的双极电源 (bipolar supplies) 中的仅仅一个上监视流向 (draw to) 放大器 204 的电流, 能够监视功率而无需高速整流或者类似的手段, 如果取而代之是监视放大器 204 的输出电流, 则需要这样的高速整流或者类似的手段。差分放大器 502 生成与电源电流成比例的输出电压到离子阱 104, 该电源电流为电路 109 供电。模数 (A/D) 转换器 503 将该电压转换为数字值。数字控制器 504 接收数字值并且响应于用于电路 109 的总功率在控制线 221 上输出数字控制信号到离子阱 104。数字控制器 504 可以从输入 505 接收编程的存储的程序控制器。然后, 可以存储程序步骤, 其响应于接收到的相应于电路 109 的功率的数字值, 指导 (direct) 针对数字控制信号而输出的值。以这样的方式, 程序可以被写入并存储, 其指导用于离子阱 104 的电路 109 怎样被初始化以及自动地调整以便以最低可能功率电平 (power level) 驱动离子阱 104。

[0036] 图 5B 示出用于配置可编程 RF 源 201 (参见图 2) 的示范性电路的框图。使用相位 / 频率电路 510 将参考频率 514 与可编程分频器 513 的输出相比较。通过可编程因子 N, 分频器 513 对从源 201 产生输出 515 的压控振荡器 (VCO) 512 的输出进行分频。在该结构中, RF 源频率将是参考频率 514 的 N 倍。因为数字 N 是可编程的, 所以在控制线 221 上的数字值可以用于控制输出 515 的频率。存在可以用于电路 109 的实施例中的、能够用于针对 RF 源 201 示出的示范性电路的许多变形。也可以在单个集成电路中获得 RF 源 201 的功能。

[0037] 图 6 示出在功率控制电路 207 中执行以及用于图 2 的电路 109 的可选的频率跟踪步骤 804 的步骤的流程图。在步骤 601 中, 从功率控制电路 207 输出值, 以便根据图 7 中的步骤将 RF 源 201 设置到确定的谐振频率  $F_n$ 。在步骤 602 中, 加号用来指示振荡器 201 频率的增大, 减号用来指示振荡器 201 频率的降低。初始的符号值是任意选择的或者基于谐振频率漂移的预期方向。在步骤 603 中, 振荡器 201 的频率在当前符号所指示的方向增加预定量, 同时功率控制电路 207 监视到离子阱 104 的功率  $P_s$ 。在步骤 604 中, 进行测试以确定功率  $P_s$  是否是增加的。如果测试的结果是“是”, 则表示频率变化方向的符号切换到交替的 (alternate) 符号。然后, 由分支返回到步骤 603。如果在步骤 604 中测试的结果是“否”, 则当前符号保持现状并且由分支返回到步骤 603。以这样的方式, 振荡器 201 的频率来回振动 (dither back and forth), 以便将到离子阱 104 的功率保持在最小值。

[0038] 图 7 示出在搜索谐振工作频率时在功率控制电路 207 中执行以及在步骤 802 中使用的步骤的流程图。在步骤 701 中, RF 源 201 被设置为可编程频率范围内的低可编程频率。频率范围基于离子阱或者滤质器的成功的工作频率范围确定, 并且被最小化以减少搜索时间。该信号的振幅保持恒定并且被设置得足够低以免引起在显著远离谐振频率的频率处的过度的功率抽取 (power draw) 或者发热。在步骤 702 中, 粗略 (coarse) 值被输出以便以增量渐增地扫描振荡器的频率。该值被赋予可变指示符  $F_i$ 。在步骤 703 中, 监视到电路 109 的电流以确定驱动离子阱 104 的功率  $P_s$ 。在步骤 704 中, 执行测试以便确定到离子阱



104 的功率是否被提高了大于预定量。如果在步骤 704 中测试的结果是“否”，则由分支返回到步骤 702。如果在步骤 704 中测试的结果是“是”，则由分支到步骤 705，其中当前  $F_i$  被保存，并且频率在频率范围  $F_i$  到  $F_{i-2}$  内以精细 (fine) 增量降低。在步骤 705 中，调整振荡器的频率的精细值被输出，以便在范围  $F_i$  (最后的粗略频率步骤) 到  $F_{i-2}$  内降低振荡器的频率，该范围包含了 (encompass) 最后三个输出的粗略频率步骤。在步骤 706 中，谐振频率  $F_n$  被选为与在频率范围  $F_i$  到  $F_{i-2}$  内扫描时发现的最小功率相应的谐振频率。然后由分支返回步骤 803 (参见图 8)。

[0039] 放大器 204 具有提供功率到放大器 204 的两个电源输入，一个用于正电压 216，一个用于负电压 217。小电阻器 (分流电阻器 (current shunt resistor)) 可以沿着 (in line with) 正电源管脚 216 (见图 2 中的电路 208) 放置。流入该电源输入的任何电流都将流经该电阻器。因为以欧姆为单位的该电阻器的电阻是已知的，所以通过测量该电阻器两端的电压降可以知道流经该电阻器的电流 ( $V = I * R$ )。当该电阻器两端的电压降最低时，流经电源管脚的电流也处于最低，因此放大器 204 使用的功率处于最低。在电路的谐振频率处，输入到放大器 204 的电流显著下降。系统在操作之前扫过 (sweep through) 系统的整个频率范围，以便找出该谐振频率 (通过随着频率被扫描来监视分流电阻器两端的电压)。分流电阻器两端的电压可以通过分流放大器组件放大并且馈送到模数转换器。模数转换器的数字输出可以馈送到微处理元件，诸如在功率控制电路 207 之内。系统监视流入双极电源中的一个的电流，而非直接测量输出电压。这提供了真正谐振频率的更准确的值，并且消除了整流信号、使用峰值检波器的需要，或者执行 RMS 变换以确定振幅的需要。

[0040] 图 8 示出在操作图 2 的电路 109 时在功率控制电路 207 中执行的一般步骤的流程图。在步骤 801 中，质谱仪 100 通过重启 (reset) 被通电。在步骤 802 中，开始搜索模式，其中 RF 源 201 的频率被调整以确定具有用于驱动示范性离子阱 104 的最小功率的谐振频率 (例如，见图 7)。在步骤 803 中，质谱仪系统 100 用所确定的谐振频率操作。在步骤 804 中，在系统操作期间开始可选的频率跟踪，以便响应于离子阱的谐振点以及关联电路中的变化，将工作频率保持在用于驱动离子阱 104 的最小功率 (例如，见图 6)。

[0041] 图 9 示出根据本发明的实施例的用于驱动离子阱 104 的频率对功率的示范曲线图。与谐振频率  $F_n$  一起示出起始扫描频率  $F_i$ 。 $F_n$  与放大器 204 的最小功耗点一致。当频率持续升高到超过  $F_n$  后、连续的功率下降是由于放大器 204 的带宽限制造成的。

[0042] 这里所描述的实施例操作为降低质谱仪的功率和大小，以使得质谱仪系统可以变为其他系统中的组件，这些系统先前因为传统单元的成本和大小而无法使用这样的单元。例如，小质谱仪 (mini-mass spectrometer) 100 可以放置在危险地点用于分析气体，并远程地向人员发回呈现危险的状况报告。使用这里的实施例的小质谱仪 100 可以放置在航空运输中的战略位置处，用于测试环境中的危险气体，这可能表示故障或者甚至是恐怖威胁。本发明已经预期了缩减实现功能性质谱仪的大小以及所需的功率的价值，以使得其操作可以用于通常不会考虑使用此种设备的地方和应用中。

[0043] 已经描述了本发明许多实施例。然而，应当理解，可以进行各种修改而不脱离本发明的精神和范围。

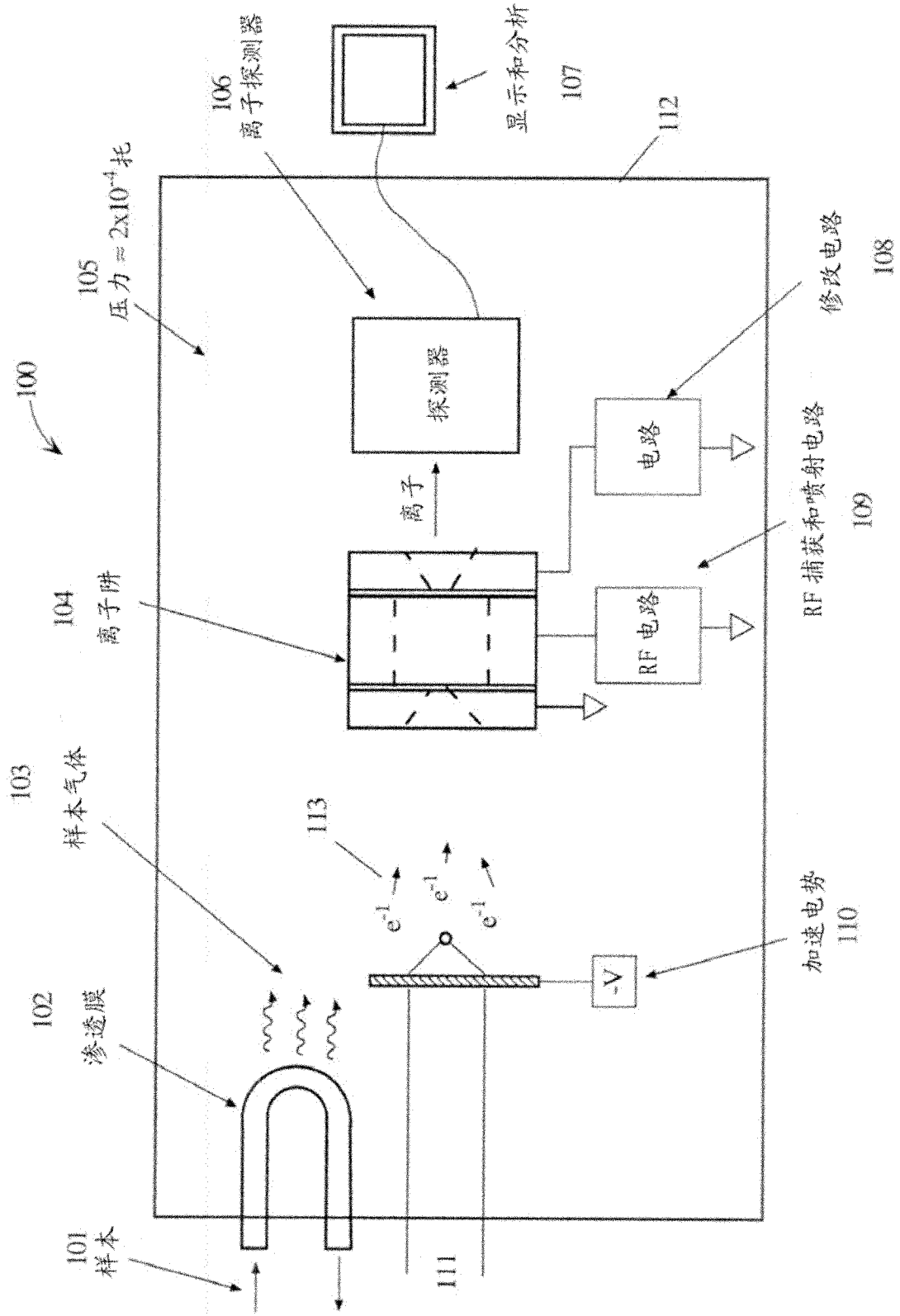


图 1

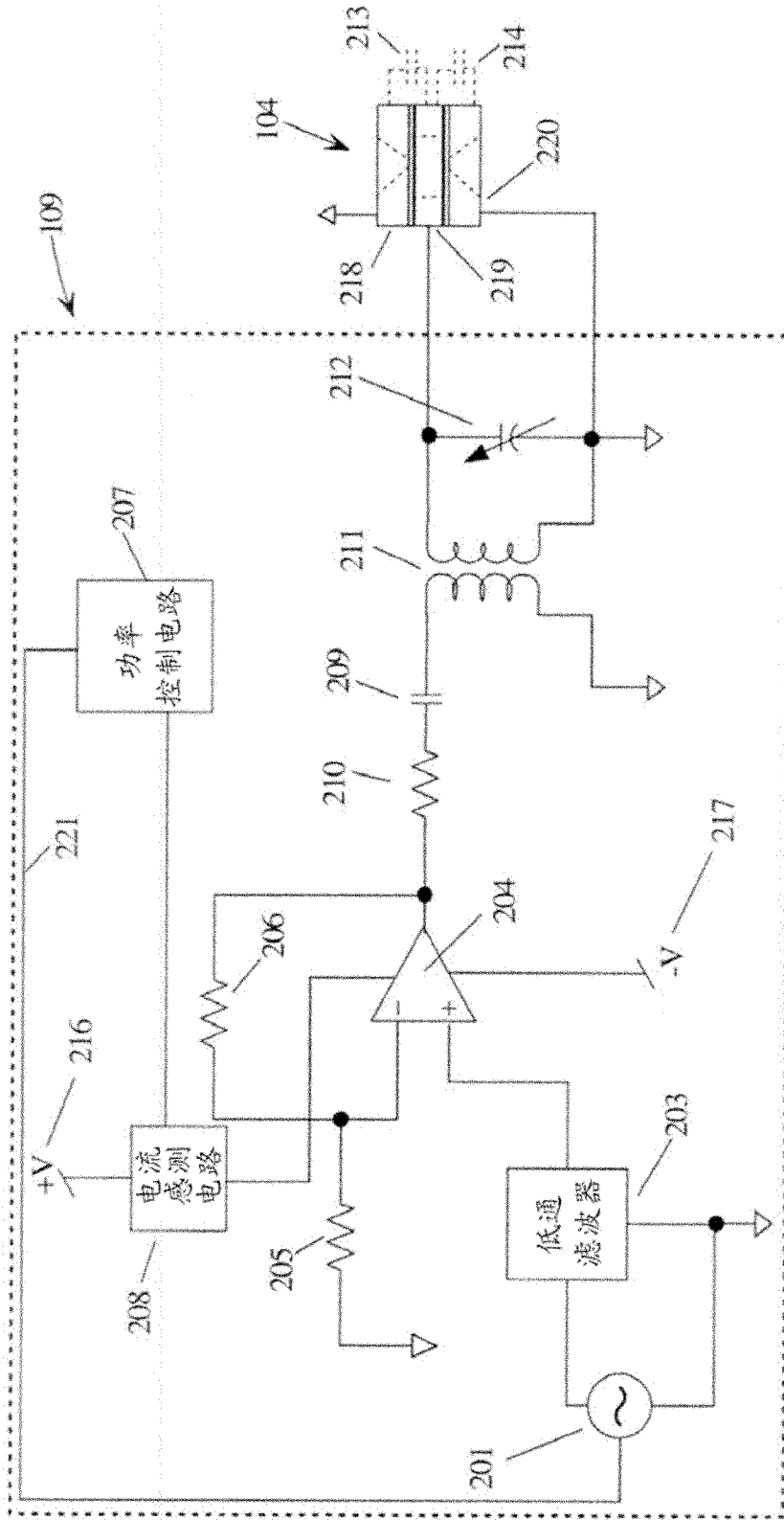


图 2

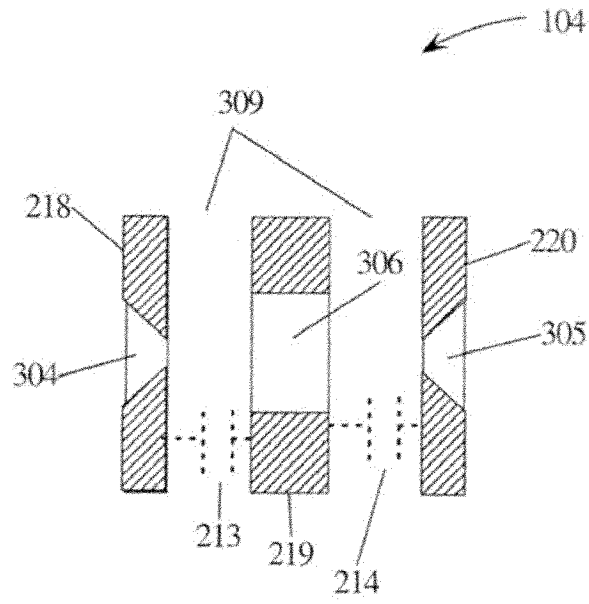


图 3

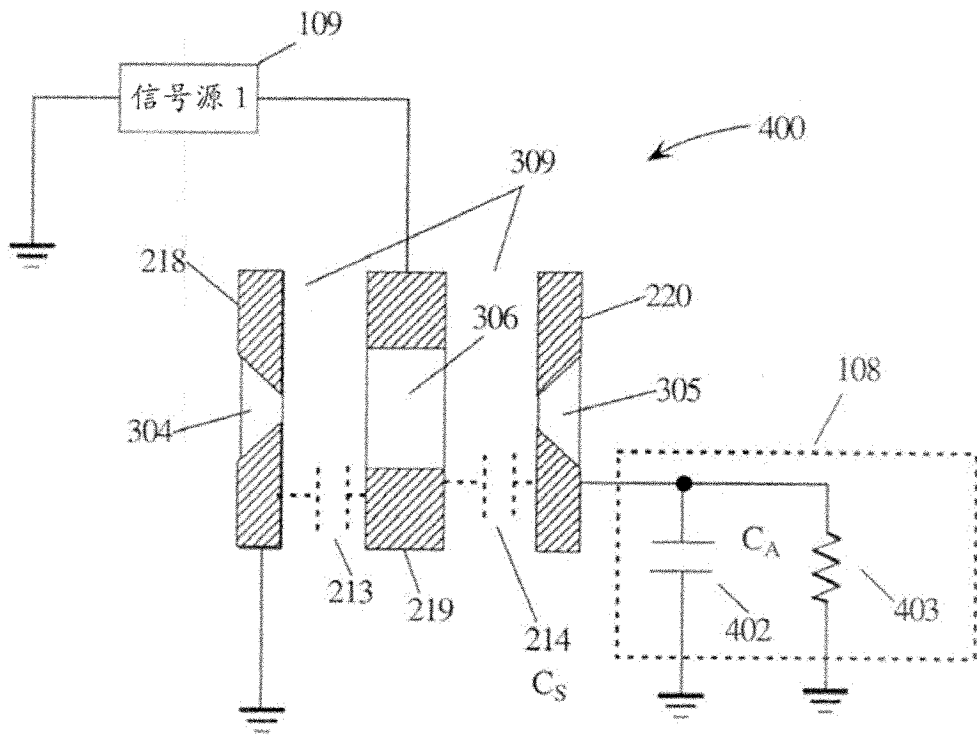


图 4

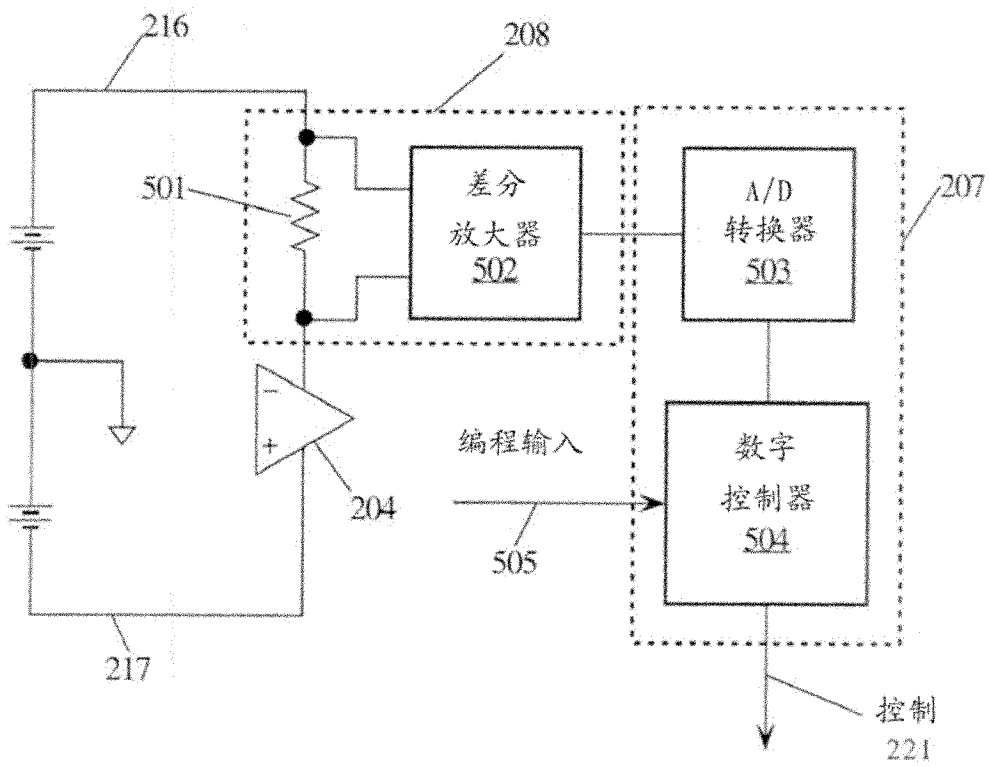


图 5A

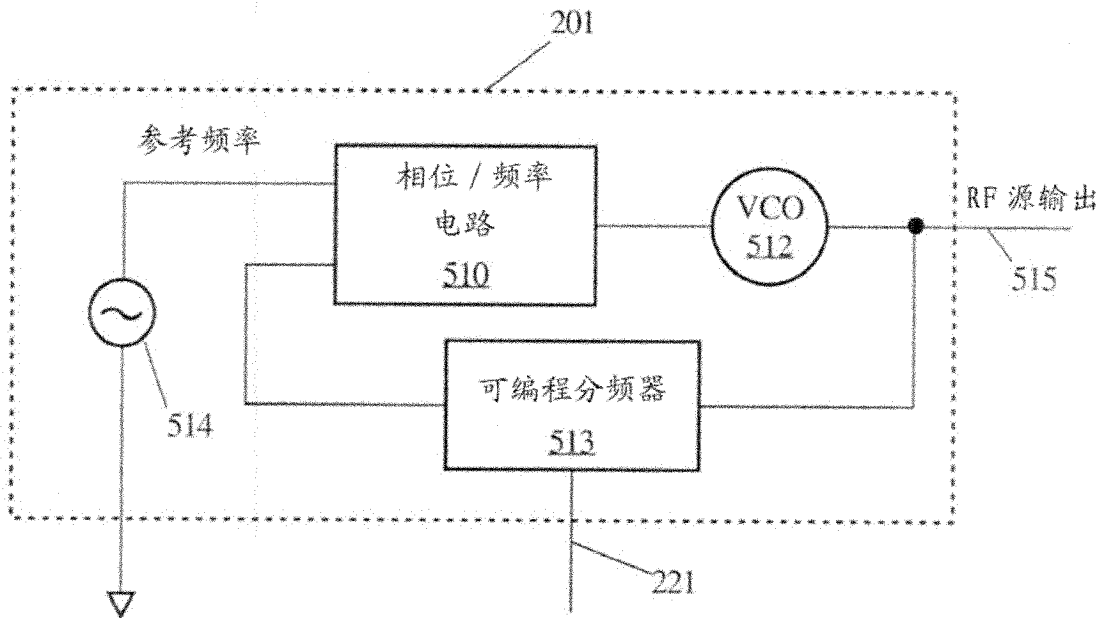


图 5B

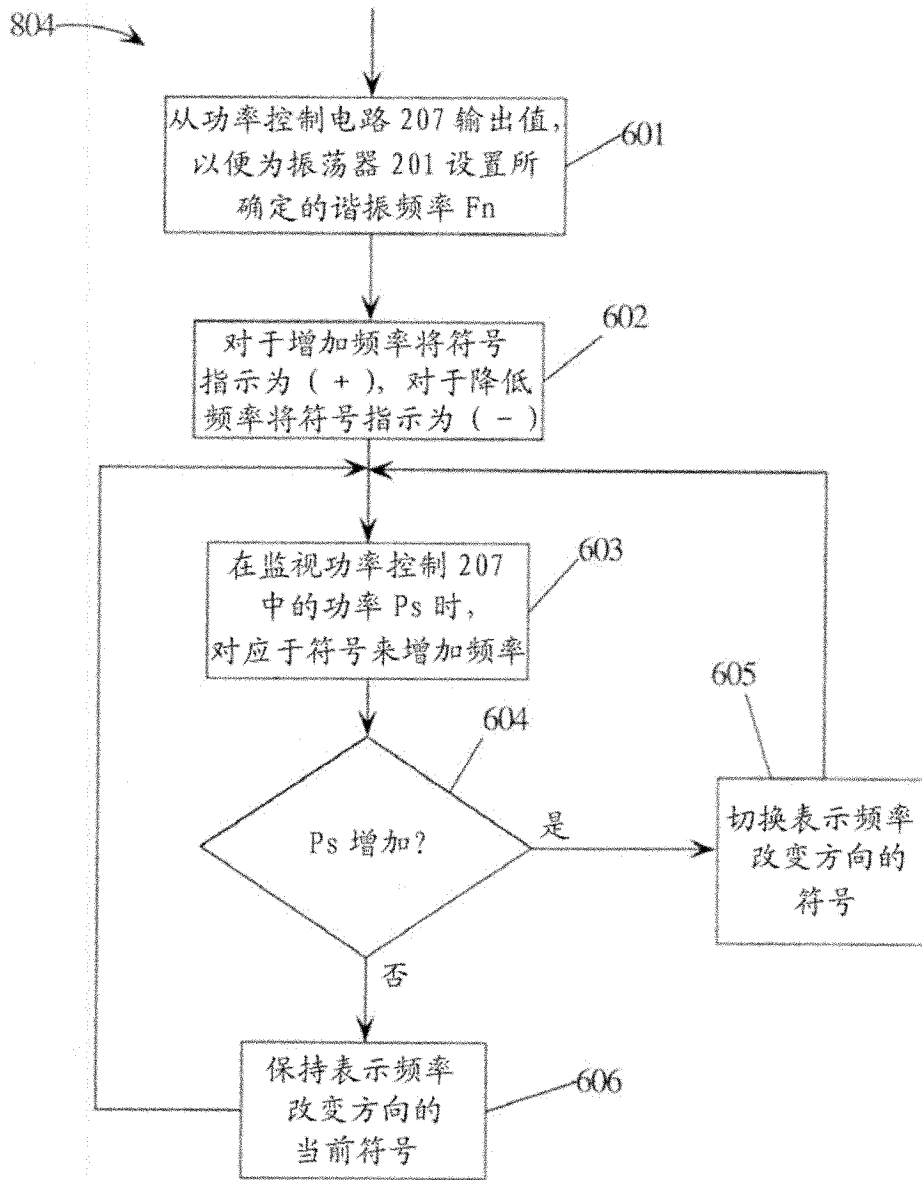


图 6

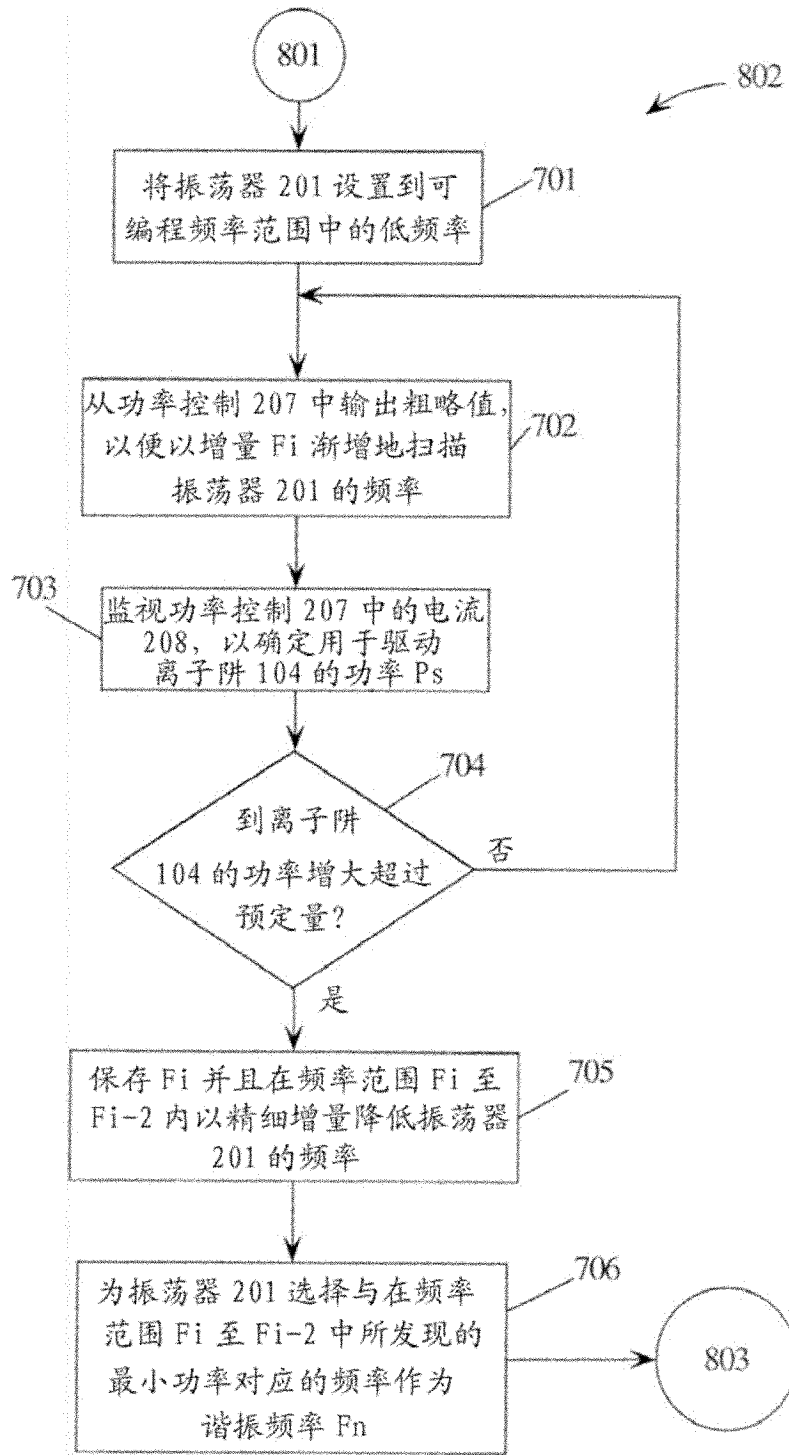


图 7

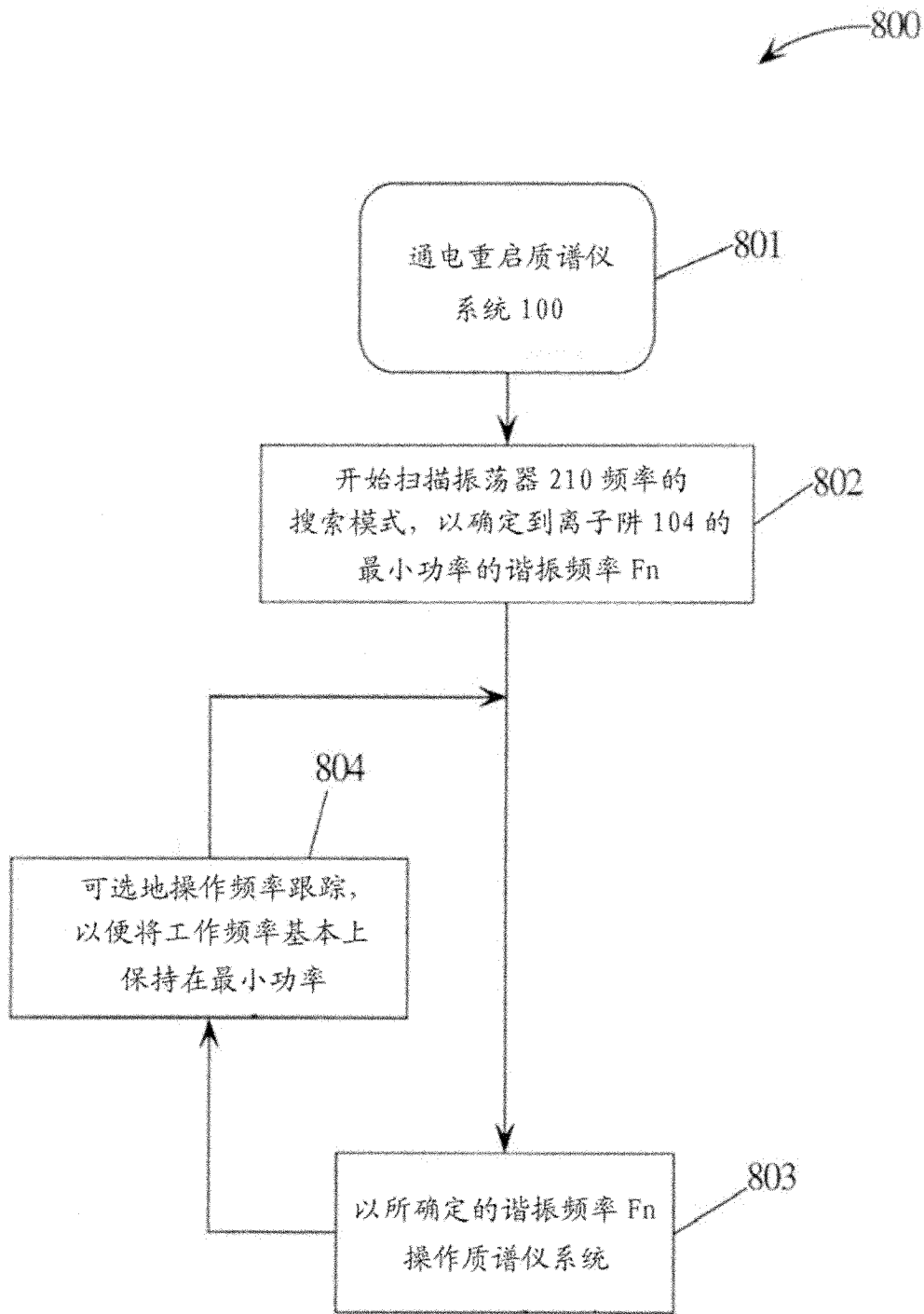


图 8



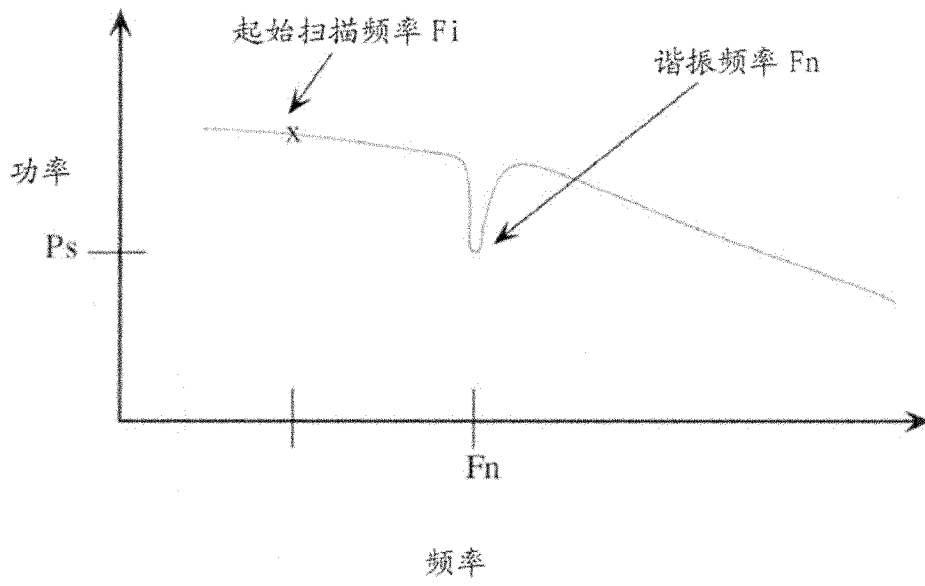


图 9