



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106415547 B

(45)授权公告日 2020.03.20

(21)申请号 201480079430.5

(22)申请日 2014.12.01

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 106415547 A

(43)申请公布日 2017.02.15

(30)优先权数据

PCT/EP2014/056436 2014.03.31 EP

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2016.11.30

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/EP2014/076092 2014.12.01

(87)PCT国际申请的公布数据

W02015/149887 EN 2015.10.08

(73)专利权人 瑞典爱立信有限公司

地址 瑞典斯德哥尔摩

(72)发明人 M.梅尔泰格 M.卡尔逊 D.尼尔森

(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001

代理人 徐予红 付曼

(51)Int.Cl.

G06F 30/39(2020.01)

H02M 1/14(2006.01)

(56)对比文件

CN 101877683 A,2010.11.03,

US 7966588 B1,2011.06.21,

CN 103150420 A,2013.06.12,

CN 1404207 A,2003.03.19,

US 2010325599 A1,2010.12.23,

审查员 李红晔

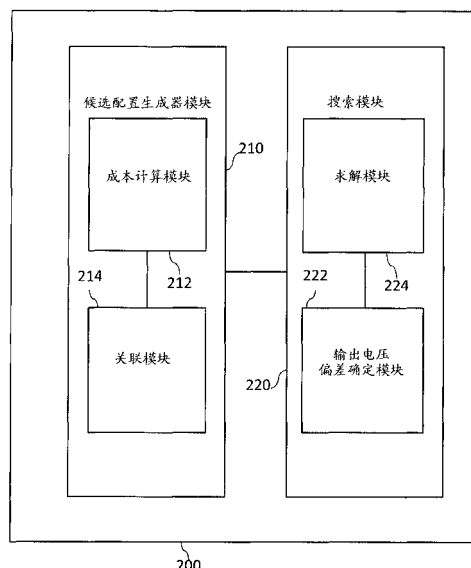
权利要求书10页 说明书19页 附图27页

(54)发明名称

开关模式电源输出滤波器配置

(57)摘要

提供一种确定开关模式电源SMPS(100)的输出滤波器(120)中的电容器的配置的方法。该方法包括生成定义输出滤波器(120)中不同种类的电容器的相应布置的电容器的候选配置,每个候选配置与基于候选配置中每个种类的电容器的数量和指配给每个种类电容器的成本计算的成本函数的相应值关联,候选配置按成本函数的递增值或递减值的次序排序。该方法进一步包括:对电容器的有序候选配置执行二分搜索以从在二分搜索期间确定的电容器的候选配置之间确定与成本函数的最低值关联的电容器配置以允许满足SMPS的负载瞬态响应要求。使用具有输出滤波器的候选配置的SMPS模型来确定候选配置是否允许满足SMPS的负载瞬态响应要求以模拟响应于SMPS负载电流的改变的SMPS的输出电压的偏差,并基于输出电压的模拟偏差确定是否满足负载瞬态响应要求。



1. 一种确定开关模式电源SMPS (100) 的输出滤波器 (120) 中的电容器的配置的方法, 所述方法包括:

生成 (S100) 定义所述输出滤波器 (120) 中不同种类的电容器的相应布置的电容器的候选配置, 每个候选配置与基于所述候选配置中每个种类的电容器的数量和指配给每个种类电容器的成本计算的成本函数的相应值关联, 所述候选配置按所述成本函数的递增值或递减值的次序排序; 以及

对电容器的有序候选配置执行二分搜索 (S200) 以从在所述二分搜索期间确定的电容器的候选配置之间确定与所述成本函数的最低值关联的电容器配置以允许满足所述SMPS的负载瞬态响应要求,

其中使用具有所述输出滤波器的所述候选配置的SMPS模型来确定候选配置是否允许满足所述SMPS的所述负载瞬态响应要求以模拟响应于所述SMPS的负载电流的改变的所述SMPS的输出电压的偏差, 并基于所述输出电压的模拟偏差确定是否满足所述负载瞬态响应要求。

2. 如权利要求1所述的方法, 其中指配给每个种类电容器的所述成本指示所述种类电容器的物理大小和价格中的至少一项。

3. 如权利要求2所述的方法, 其中指配给每个种类电容器的所述成本指示所述种类电容器的所述物理大小和所述价格的加权和。

4. 如权利要求2或3所述的方法, 其中:

所述候选配置中的至少一个候选配置包括所述输出滤波器中的不同种类电容器的多个不同布置, 所有所述不同布置都与所述成本函数的相同值关联; 以及

生成 (S100) 电容器的候选配置进一步包括: 对于具有所述输出滤波器中的不同种类电容器的多个不同布置的所述至少一个候选配置中的每个配置, 从对于所述二分搜索要保留的所述多个不同布置中选择 (S150) 电容器布置, 所述选择通过如下操作执行:

基于所述多个不同布置中的每个布置中的所述电容器的总价格和总物理大小中的一个选择 (S152-2) 所述多个不同布置的子集; 以及

基于所述子集中的每个所述布置中的所述电容器的所述总价格和所述总物理大小中的另一个从所述子集中选择 (S154-2) 布置。

5. 如权利要求2或3所述的方法, 其中:

所述候选配置中的至少一个候选配置包括所述输出滤波器中的不同种类电容器的多个不同布置, 所有所述不同布置都与所述成本函数的相同值关联; 以及

生成 (S100) 电容器的候选配置进一步包括: 对于具有所述输出滤波器中的不同种类电容器的多个不同布置的所述至少一个候选配置中的每个配置, 从对于所述二分搜索要保留的所述多个不同布置中选择 (S150) 电容器布置, 所述选择通过如下操作执行:

将所述多个不同布置中的每个布置中的所述不同种类电容器之间的电容器分布与目标分布比较 (S152); 以及

选择 (S154) 在所述不同种类电容器之间与所述目标分布具有最类似电容器分布的电容器布置。

6. 如权利要求2或3所述的方法, 其中:

所述候选配置中的至少一个候选配置包括所述输出滤波器中的不同种类电容器的多

个不同布置,所有所述不同布置都与所述成本函数的相同值关联;以及

生成 (S100) 电容器的候选配置进一步包括:对于具有所述输出滤波器中的不同种类电容器的多个不同布置的所述至少一个候选配置中的每个配置,从对于所述二分搜索要保留的所述多个不同布置中选择 (S150) 电容器布置,所述选择通过如下操作执行:

基于所述多个不同布置中的每个布置中的所述电容器的总价格和总物理大小中的一个选择 (S152-3) 所述多个不同布置的子集;

将所述子集中的每个所述布置中的所述不同种类电容器之间的电容器分布与目标分布比较 (S154-3);以及

选择 (S156-3) 在所述不同种类电容器之间与所述目标分布具有最类似电容器分布的电容器布置。

7. 如权利要求3所述的方法,其中:

所述候选配置中的至少一个候选配置包括所述输出滤波器中的不同种类电容器的多个不同布置,所有所述不同布置都与所述成本函数的相同值关联;以及

生成 (S100) 电容器的候选配置进一步包括:对于具有所述输出滤波器中的不同种类电容器的多个不同布置的所述至少一个候选配置中的每个配置,从对于所述二分搜索要保留的所述多个不同布置中选择 (S150) 电容器布置,所述选择通过如下操作执行:

基于指配给所述多个不同布置中的每个布置中的所述电容器的所述成本的总数选择 (S152-4) 所述多个不同布置的子集;

将所述子集中的每个所述布置中的所述不同种类电容器之间的电容器分布与目标分布比较 (S154-4);以及

选择 (S156-4) 在所述不同种类电容器之间与所述目标分布具有最类似电容器分布的电容器布置。

8. 如权利要求1-3中任一项所述的方法,其中执行所述二分搜索 (S200) 包括:按照由控制律参数定义的控制律确定用于调谐布置成调节所述SMPS的所述输出电压的反馈环的所述控制律参数的值,所述控制律参数的值通过如下操作确定:

通过如下操作确定 (S300) 对应于所述反馈环的模型的传送函数中的两个零点中的每个的自然频率的相应估计:

对于搜索空间中的多个点中的每个确定响应于所述SMPS的所述负载电流中的变化而发生的所述SMPS的所述输出电压的偏差,其中每个所述点的坐标都对应于所述零点的所述自然频率的候选值;

使用在所述多个点中每个点的所述SMPS的所述输出电压的确定的偏差来求解目标函数以获得所述输出电压的相应偏差的物理大小和恢复时间中的至少一项的测量;以及

基于所述测量来估计所述搜索空间中所述目标函数的最小值的位置,所述目标函数的所述最小值的所述位置对应于所述零点的所述自然频率;以及

基于所述零点的所述自然频率的确定的估计来计算 (S400) 用于调谐所述反馈环的所述控制律参数的值。

9. 如权利要求8所述的方法,其中所述目标函数提供了在所述SMPS (100) 的负载电流的所述变化期间的最大SMPS输出电压偏差和恢复时间中的至少一项的测量,其中在所述恢复时间期间在所述SMPS的所述负载电流的所述变化之后所述SMPS的所述输出电压 V_{out} 返回到

输出电压值的容限带内。

10. 如权利要求9所述的方法,其中所述目标函数由下式给出:

$$w_{V_{Dev}} \left[\frac{V_{Dev}}{V_{Dev_Req}} \right]^N + w_R \left[\frac{T_R}{T_{R_Req}} \right]^M,$$

其中 V_{Dev} 指代所述最大SMPS输出电压偏差, T_R 指代所述恢复时间, V_{Dev_Req} 和 T_{R_Req} 是归一化因子, $w_{V_{Dev}}$ 和 w_R 是加权因子,并且 N 和 M 是整数,其中 $N \geq 1$ 并且 $M \geq 1$ 。

11. 如权利要求9所述的方法,其中所述目标函数由下式给出:

$$\left[\frac{V_{Dev}}{V_{Dev_Req}} \right]^K \left[\frac{T_R}{T_{R_Req}} \right]^L,$$

其中 V_{Dev} 指代所述最大SMPS输出电压偏差, T_R 指代所述恢复时间, V_{Dev_Req} 和 T_{R_Req} 是归一化因子,并且 K 和 L 是整数,其中 $K \geq 1$ 并且 $L \geq 1$ 。

12. 如权利要求9所述的方法,其中所述目标函数由下式给出:

$$\left[\int_0^{T_{trans}} |V_{out}(t) - V_{DC}|^N dt \right]^{1/N}$$

其中 $V_{out}(t)$ 指代响应于所述SMPS的所述负载电流的所述变化而发生的所述SMPS的所述输出电压的所述偏差, T_{trans} 指代所述SMPS的所述负载电流的所述变化的持续时间, V_{DC} 指代DC电压,其中所述SMPS的所述输出电压响应于所述SMPS的所述负载电流的所述变化而从DC电压偏离,并且 N 是大于或等于1的整数。

13. 如权利要求8所述的方法,其中所述零点的所述自然频率的所述估计通过如下操作确定:

确定(S310)对应于所述SMPS(100)的所述模型的传递函数中的两个主导极点中的每个极点的相应自然频率,所述主导极点的所述自然频率是 NF_{pole1} 和 NF_{pole2} ,其中 $NF_{pole1} \leq NF_{pole2}$;

定义(S320)所述搜索空间中的所述零点的三角形搜索区域,所述三角形搜索区域具有在点 $(NF_{zeromin}, NF_{zeromin})$ 、 $(NF_{zeromax}, NF_{zeromax})$ 以及 $(NF_{zeromin}, NF_{zeromax})$ 和 $(NF_{zeromax}, NF_{zeromin})$ 之一的顶点,其中 $NF_{zeromin} = NF_{pole1}/r_{min}$, $NF_{zeromax} = NF_{pole2} \cdot r_{max}$,并且 r_{min} 和 r_{max} 是各在1.5与3之间的范围因子;

使用所述SMPS的所述模型和所述反馈环的所述模型对于所述三角形搜索区域中的多个点中的每个点,模拟(S330)响应于所述SMPS的所述负载电流中的所述变化而发生的所述SMPS的所述输出电压的偏差;

使用在所述三角形搜索区域内的所述多个点中每个点的所述SMPS(100)的所述输出电压 V_{out} 的模拟偏差来求解(S340)所述目标函数以获得所述输出电压的所述相应偏差的所述物理大小和所述恢复时间中的至少一项的测量;以及

基于所述测量估计(S350)所述三角形搜索区域内所述目标函数的所述最小值的所述位置。

14. 如权利要求13所述的方法,其中所述零点的所述自然频率通过如下操作来估计:

(i) 计算(S410)所述三角形搜索区域的每个所述顶点的所述目标函数的值;

(ii) 用得出所述目标函数的较小值的所述搜索区域内的顶点替换 (S420) 得出所述目标函数的最大值的所述三角形搜索区域的所述顶点以生成由所述搜索区域内的所述顶点和所述三角形搜索区域的剩余顶点定义的所述搜索区域内的三角形;

(iii) 求解 (S440) 在新顶点的所述目标函数;

(iv) 用得出所述目标函数的较小值的所述搜索区域内的新顶点替换 (S450) 得出所述目标函数的最大值的所述三角形的所述顶点以生成所述搜索区域内的新三角形;

(v) 重复步骤 (iii) 和 (iv) 以生成所述搜索区域内的一系列三角形, 直到满足停止判据; 以及

(vi) 当满足所述停止判据时, 基于所述测量估计 (S470) 所述搜索区域内的所述目标函数的所述最小值的所述位置以获得所述零点的所述自然频率的估计。

15. 如权利要求14所述的方法, 其中步骤 (vi) 包括选择在最后执行步骤 (iv) 中生成的所述三角形中或上的点, 所述选择的点的所述坐标提供所述零点的所述自然频率的所述估计。

16. 如权利要求8所述的方法, 其中确定所述传送函数中的两个零点中每个零点的所述自然频率的相应估计进一步包括:

响应于所述SMPS (100) 的所述负载电流的所述变化而使用在所述搜索空间中的所述多个点中每个点的所述SMPS (100) 的所述输出电压 V_{out} 的所确定偏差和所述SMPS (100) 的所述输出电压 V_{out} 的规定偏差来求解第二目标函数以获得所述输出电压 V_{out} 的所述所确定偏差超过所述输出电压 V_{out} 的所述规定偏差多少的第二测量,

其中基于所述测量和所述第二测量估计所述目标函数的所述最小值的所述位置。

17. 如权利要求13所述的方法, 进一步包括:

响应于所述SMPS (100) 的所述负载电流的所述变化而使用在所述三角形搜索区域中的所述多个点中每个点的所述SMPS (100) 的所述输出电压 V_{out} 的所确定偏差和所述SMPS (100) 的所述输出电压 V_{out} 的规定偏差来求解第二目标函数以获得所述输出电压 V_{out} 的所述所确定偏差超过所述输出电压 V_{out} 的所述规定偏差多少的第二测量,

其中所述零点的所述自然频率通过如下操作来估计:

(i) 计算所述三角形搜索区域的每个所述顶点的所述第二目标函数的值;

(ii) 用得出所述第二目标函数的较小值的所述搜索区域内的新顶点替换得出所述第二目标函数的最大值的所述三角形搜索区域的所述顶点以生成由所述搜索区域内的新顶点和所述三角形搜索区域的剩余顶点定义的所述搜索区域内的三角形;

(iii) 求解在所述新顶点的所述第二目标函数;

(iv) 用得出所述第二目标函数的较小值的所述搜索区域内的新顶点替换得出所述第二目标函数的最大值的所述三角形的所述顶点以生成所述搜索区域内的新三角形;

(v) 重复步骤 (iii) 和 (iv) 以生成所述搜索区域内的一系列三角形, 直到所述第二目标函数在步骤 (iii) 中的所述新顶点被求解为0, 并且在最后执行步骤 (iv) 中生成的所述三角形的所述剩余顶点已经被求解为0, 在最后执行步骤 (iv) 中生成的所述三角形定义受限三角形搜索区域;

(vi) 计算所述受限三角形搜索区域的每个所述顶点的所述目标函数的值;

(vii) 用得出所述目标函数的较小值的所述受限三角形搜索区域内的新顶点替换得出

所述目标函数的最大值的所述受限三角形搜索区域的所述顶点以生成由所述受限三角形搜索区域的剩余顶点和所述新顶点定义的所述受限三角形搜索区域内的三角形;

(viii) 求解来自步骤(vii)的在所述新顶点的所述目标函数;

(ix) 用得出所述目标函数的较小值的所述受限三角形搜索区域内的新顶点替换得出所述目标函数的最大值的所述三角形的顶点以生成所述受限三角形搜索区域内的新三角形;

(x) 重复步骤(viii)和(ix)以生成所述受限三角形搜索区域内的一系列三角形,直到满足停止判据;以及

(xi) 当满足所述停止判据时,基于所述测量估计所述受限三角形搜索区域内的所述目标函数的所述最小值的所述位置以获得所述零点的所述自然频率的估计。

18. 如权利要求17所述的方法,其中步骤(xi)包括选择在最后执行步骤(ix)中生成的所述三角形中或上的点,选择的点的所述坐标提供所述零点的所述自然频率的所述估计。

19. 如权利要求17所述的方法,其中步骤(viii)进一步包括:求解在来自步骤(vii)的所述新顶点的所述第二目标函数,并且当所述第二目标函数在来自步骤(vii)的所述新顶点被求解为大于0时,所述方法包括重复步骤(iv)到(viii),否则继续步骤(ix)。

20. 如权利要求16所述的方法,其中所述SMPS (100)的所述输出电压的所述规定偏差遵循时间上的规定的变化。

21. 如权利要求8所述的方法,其中所述反馈环包括PID调节器(150),并且所述反馈环的模型将所述反馈环建模为PID调节器,所述控制律参数包括所述PID调节器的P、I和D控制参数。

22. 一种计算机可读存储介质(350),存储计算机程序指令,所述指令当由处理器(320)执行时使所述处理器(320)执行如权利要求1至21中至少一项中所阐述的方法。

23. 如权利要求22所述的计算机可读存储介质(350),包括CD-ROM。

24. 一种用于确定开关模式电源SMPS(100)的输出滤波器(120)中的电容器的配置的设备(200),所述设备包括:

候选配置生成器模块(210),布置成生成定义所述输出滤波器(120)中的不同种类电容器的相应布置的电容器的候选配置,所述候选配置生成器模块(210)包括:

成本计算模块(212),布置成对于每个候选配置,基于所述候选配置中的每个种类电容器的数量和指配给每个种类电容器的成本求解成本函数;以及

关联模块(214),布置成将每个候选配置与由所述成本计算模块(212)计算的所述成本函数的相应值关联,

其中所述候选配置生成器模块(210)布置成按所述成本函数的递增值或递减值的次序对所述候选配置排序;以及

搜索模块(220),布置成对电容器的有序候选配置执行二分搜索以从在所述二分搜索期间确定的电容器的候选配置之间确定与所述成本函数的最低值关联的电容器配置以允许满足所述SMPS(100)的负载瞬态响应要求,所述搜索模块(220)包括:

输出电压偏差确定模块(222),布置成使用具有所述输出滤波器的候选配置的SMPS模型模拟响应于所述SMPS的负载电流的改变的所述SMPS的输出电压的偏差;以及

求解模块(224),布置成基于所述输出电压的模拟偏差确定电容器的所述候选配置是

否允许满足所述负载瞬态响应要求。

25. 如权利要求24所述的设备(200), 其中指配给每个种类电容器的所述成本指示所述种类电容器的物理大小和价格中的至少一项。

26. 如权利要求25所述的设备(200), 其中指配给每个种类电容器的所述成本指示所述种类电容器的所述物理大小和所述价格的加权和。

27. 如权利要求25或26所述的设备(200), 其中:

所述候选配置中的至少一个候选配置包括所述输出滤波器(120)中的不同种类电容器的多个不同布置, 所有所述不同布置都与所述成本函数的相同值关联; 以及

所述候选配置生成器模块(210)布置成: 对于具有所述输出滤波器(120)中的不同种类电容器的多个不同布置的所述至少一个候选配置中的每个配置, 从对于所述二分搜索要保留的所述多个不同布置中选择电容器布置, 所述选择通过如下操作执行:

基于所述多个不同布置中的每个布置中的所述电容器的总价格和总物理大小中的一个选择所述多个不同布置的子集; 以及

基于所述子集中的每个所述布置中的所述电容器的所述总价格和所述总物理大小中的另一个从所述子集中选择布置。

28. 如权利要求25或26所述的设备(200), 其中:

所述候选配置中的至少一个候选配置包括所述输出滤波器(120)中的不同种类电容器的多个不同布置, 所有所述不同布置都与所述成本函数的相同值关联; 以及

所述候选配置生成器模块(210)布置成: 对于具有所述输出滤波器(120)中的不同种类电容器的多个不同布置的所述至少一个候选配置中的每个配置, 从对于所述二分搜索要保留的所述多个不同布置中选择电容器布置, 所述选择通过如下操作执行:

将所述多个不同布置中的每个布置中的所述不同种类电容器之间的电容器分布与目标分布比较; 以及

选择在所述不同种类电容器之间与所述目标分布具有最类似电容器分布的电容器布置。

29. 如权利要求27所述的设备(200), 其中:

所述候选配置中的至少一个候选配置包括所述输出滤波器(120)中的不同种类电容器的多个不同布置, 所有所述不同布置都与所述成本函数的相同值关联; 以及

所述候选配置生成器模块(210)布置成: 对于具有所述输出滤波器(120)中的不同种类电容器的多个不同布置的所述至少一个候选配置中的每个配置, 从对于所述二分搜索要保留的所述多个不同布置中选择电容器布置, 所述选择通过如下操作执行:

基于所述多个不同布置中的每个布置中的所述电容器的所述总价格和所述总物理大小中的一个选择所述多个不同布置的子集;

将所述子集中的每个所述布置中的所述不同种类电容器之间的电容器分布与目标分布比较; 以及

选择在所述不同种类电容器之间与所述目标分布具有最类似电容器分布的电容器布置。

30. 如权利要求26所述的设备(200), 其中:

所述候选配置中的至少一个候选配置包括所述输出滤波器(120)中的不同种类电容器

的多个不同布置,所有所述不同布置都与所述成本函数的相同值关联;以及

所述候选配置生成器模块(210)布置成:对于具有所述输出滤波器(120)中的不同种类电容器的多个不同布置的所述至少一个候选配置中的每个配置,从对于所述二分搜索要保留的所述多个不同布置中选择电容器布置,所述选择通过如下操作执行:

基于指配给所述多个不同布置中的每个布置中的所述电容器的所述成本的总数选择所述多个不同布置的子集;

将所述子集中的每个所述布置中的所述不同种类电容器之间的电容器分布与目标分布比较;以及

选择在所述不同种类电容器之间与所述目标分布具有最类似电容器分布的电容器布置。

31.如权利要求24至26中任一项所述的设备(200),其中所述搜索模块(220)进一步布置成按照由控制律参数定义的控制律确定用于调谐布置成调节所述SMPS(100)的所述输出电压 V_{out} 的反馈环(130到160)的所述控制律参数的值,所述搜索模块(220)进一步包括:

自然频率估计器(226),布置成确定与所述反馈环的模型对应的传递函数中的两个零点中每个的自然频率的相应估计,所述自然频率估计器(226)包括所述输出电压偏差确定模块(222)和所述求解模块(224),其中:

所述输出电压偏差确定模块(222)布置成:对于搜索空间中的多个点中的每个点,使用所述SMPS的所述模型和所述反馈环的所述模型来模拟响应于所述SMPS的所述负载电流的变化而发生的所述SMPS(100)的所述输出电压 V_{out} 的偏差,其中每个所述点的坐标都对应于所述零点的所述自然频率的候选值;

所述求解模块(224)布置成使用在所述多个点中每个点的所述SMPS的所述输出电压的所述模拟偏差来求解目标函数以获得所述输出电压的相应偏差的物理大小和恢复时间中的至少一项的测量;以及

所述自然频率估计器(226)布置成基于所述测量来估计所述搜索空间中所述目标函数的最小值的位置,所述目标函数的所述最小值的所述位置对应于所述零点的所述自然频率;以及

控制律参数计算器(228)布置成基于所述零点的所述自然频率的所述确定的估计来计算用于调谐所述反馈环(130至160)的所述控制律参数的值。

32.如权利要求31所述的设备(200),其中所述目标函数提供了在所述SMPS(100)的负载电流的所述变化期间的最大SMPS输出电压偏差和恢复时间中的至少一项的测量,其中在所述恢复时间期间在所述SMPS的所述负载电流的所述变化之后所述SMPS(100)的所述输出电压 V_{out} 返回到输出电压值的容限带内。

33.如权利要求32所述的设备(200),其中所述目标函数由下式给出:

$$w_{V_{dev}} \left[\frac{V_{Dev}}{V_{Dev_Req}} \right]^N + w_R \left[\frac{T_R}{T_{R_Req}} \right]^M,$$

其中 V_{Dev} 指代所述最大SMPS输出电压偏差, T_R 指代所述恢复时间, V_{Dev_Req} 和 T_{R_Req} 是归一化因子, $w_{V_{dev}}$ 和 w_R 是加权因子,并且 N 和 M 是整数,其中 $N \geq 1$ 并且 $M \geq 1$ 。

34.如权利要求32所述的设备(200),其中所述目标函数由下式给出:

$$\left[\frac{V_{Dev}}{V_{Dev_Req}} \right]^K \left[\frac{T_R}{T_{R_Req}} \right]^L,$$

其中 V_{Dev} 指代所述最大SMPS输出电压偏差, T_R 指代所述恢复时间, V_{Dev_Req} 和 T_{R_Req} 是归一化因子,并且K和L是整数,其中 $K \geq 1$ 并且 $L \geq 1$ 。

35. 如权利要求32所述的设备(200),其中所述目标函数由下式给出:

$$\left[\int_0^{T_{trans}} |V_{out}(t) - V_{DC}|^N dt \right]^{1/N},$$

其中 $V_{out}(t)$ 指代响应于所述SMPS的所述负载电流的所述变化而发生的所述SMPS的所述输出电压的所述变化, T_{trans} 指代所述SMPS(100)的所述负载电流的所述变化的持续时间, V_{DC} 指代DC电压,所述SMPS的所述输出电压 V_{out} 响应于所述SMPS的所述负载电流的所述变化而从所述DC电压偏离,并且N是大于或等于1的整数。

36. 如权利要求31所述的设备(200),其中:

所述自然频率估计器(226)进一步布置成:

确定对应于所述SMPS的所述模型的传递函数中的两个主导极点中的每个极点的相应自然频率,所述主导极点的所述自然频率是 NF_{pole1} 和 NF_{pole2} ,其中 $NF_{pole1} \leq NF_{pole2}$;以及

定义所述搜索空间中的所述零点的三角形搜索区域,所述三角形搜索区域具有在点 $(NF_{zeromin}, NF_{zeromin})$ 、 $(NF_{zeromax}, NF_{zeromax})$ 以及 $(NF_{zeromin}, NF_{zeromax})$ 和 $(NF_{zeromax}, NF_{zeromin})$ 之一的顶点,其中 $NF_{zeromin} = NF_{pole1}/r_{min}$, $NF_{zeromax} = NF_{pole2} \cdot r_{max}$,并且 r_{min} 和 r_{max} 是各在1.5与3之间的范围因子;

所述输出电压偏差确定模块(222)布置成使用所述SMPS的所述模型和所述反馈环的所述模型对于所述三角形搜索区域中的多个点中的每个点,模拟响应于所述SMPS的所述负载电流中的所述变化而发生的所述SMPS(100)的所述输出电压 V_{out} 的偏差;

所述求解模块(224)布置成使用在所述三角形搜索区域内的所述多个点中每个点的所述SMPS(100)的所述输出电压 V_{out} 的所确定偏差来求解所述目标函数以获得所述输出电压的所述相应偏差的所述物理大小和所述恢复时间中的至少一项的所述测量;以及

所述自然频率估计器(226)布置成基于所述测量估计所述三角形搜索区域中所述目标函数的所述最小值的位置。

37. 如权利要求36所述的设备,其中所述自然频率估计器(226)布置成通过如下操作计算所述零点的相应自然频率的估计:

(i) 计算所述三角形搜索区域的每个所述顶点的所述目标函数的值;

(ii) 用得出所述目标函数的较小值的所述搜索区域内的顶点替换得出所述目标函数的最大值的所述三角形搜索区域的所述顶点以生成由所述搜索区域内的所述顶点和所述三角形搜索区域的剩余顶点定义的所述搜索区域内的三角形;

(iii) 求解在新顶点的所述目标函数;

(iv) 用得出所述目标函数的较小值的所述搜索区域内的新顶点替换得出所述目标函数的最大值的所述三角形的所述顶点以生成所述搜索区域内的新三角形;

(v) 重复步骤(iii)和(iv)以生成所述搜索区域内的一系列三角形,直到满足停止判据;以及

(vi) 当满足所述停止判据时,基于所述测量估计所述搜索区域中的所述目标函数的所述最小值的所述位置以获得所述零点的所述自然频率的估计。

38. 如权利要求37所述的设备(200),其中所述自然频率估计器(226)布置成在步骤(vi)选择在最后执行步骤(iv)中生成的所述三角形中或上的点,所述选择的点的所述坐标提供所述零点的所述自然频率的所述估计。

39. 如权利要求31所述的设备,其中:

所述求解模块(224-2)进一步布置成响应于所述SMPS(100)的所述负载电流的变化而使用在已经确定所述SMPS的所述输出电压的所述偏差的所述搜索空间中的所述多个点中每个点的所述SMPS(100)的所述输出电压 V_{out} 的所确定偏差和所述SMPS(100)的所述输出电压 V_{out} 的规定的偏差来求解第二目标函数以获得所述输出电压 V_{out} 的所述所确定偏差超过所述输出电压 V_{out} 的所述规定偏差多少的第二测量;以及

所述自然频率估计器(226-2)布置成基于所述测量和所述第二测量估计所述搜索空间中所述目标函数的所述最小值的所述位置。

40. 如权利要求36所述的设备,其中:

所述求解模块(224-2)进一步布置成响应于所述SMPS(100)的所述负载电流的所述变化而使用在所述三角形搜索区域中的所述多个点中每个点的所述SMPS(100)的所述输出电压 V_{out} 的所确定偏差和所述SMPS(100)的所述输出电压 V_{out} 的规定的偏差来求解第二目标函数以获得所述输出电压 V_{out} 的所述所确定偏差超过所述输出电压 V_{out} 的所述规定偏差多少的测量,

所述自然频率估计器(226-2)布置成通过如下操作计算所述零点的相应自然频率的估计:

(i) 计算所述三角形搜索区域的每个所述顶点的所述第二目标函数的值;

(ii) 用得出所述第二目标函数的较小值的所述搜索区域内的新顶点替换得出所述第二目标函数的最大值的所述三角形搜索区域的所述顶点以生成由所述搜索区域内的新顶点和所述三角形搜索区域的剩余顶点定义的所述搜索区域内的三角形;

(iii) 求解在所述新顶点的所述第二目标函数;

(iv) 用得出所述第二目标函数的较小值的所述搜索区域内的新顶点替换得出所述第二目标函数的最大值的所述三角形的所述顶点以生成所述搜索区域内的新三角形;

(v) 重复步骤(iii)和(iv)以生成所述搜索区域内的一系列三角形,直到所述第二目标函数在步骤(iii)中的所述新顶点被求解为0,并且在最后执行步骤(iv)中生成的所述三角形的所述剩余顶点已经被求解为0,在最后执行步骤(iv)中生成的所述三角形定义受限三角形搜索区域;

(vi) 计算所述受限三角形搜索区域的每个所述顶点的所述目标函数的值;

(vii) 用得出所述目标函数的较小值的所述受限三角形搜索区域内的新顶点替换得出所述目标函数的最大值的所述受限三角形搜索区域的所述顶点以生成由所述受限三角形搜索区域的所述剩余顶点和所述新顶点定义的所述受限三角形搜索区域内的三角形;

(viii) 求解来自步骤(vii)的在所述新顶点的所述目标函数;

(ix) 用得出所述目标函数的较小值的所述受限三角形搜索区域内的新顶点替换得出所述目标函数的最大值的所述三角形的所述顶点以生成所述受限三角形搜索区域内的新

三角形;

(x) 重复步骤(viii)和(ix)以生成所述受限三角形搜索区域内的一系列三角形,直到满足停止判据;以及

(xi) 当满足所述停止判据时,基于所述测量估计所述受限三角形搜索区域内的所述目标函数的所述最小值的所述位置以获得所述零点的所述自然频率的估计。

41. 如权利要求40所述的设备,其中所述自然频率估计器(226-2)布置成在步骤(xi)选择在最后执行步骤(ix)中生成的所述三角形中或上的点,所述选择的点的所述坐标提供所述零点的所述自然频率的所述估计。

42. 如权利要求40所述的设备,其中所述自然频率估计器(226-2)进一步布置成:在步骤(viii)求解在来自步骤(vii)的所述新顶点的所述第二目标函数,并且当所述第二目标函数在来自步骤(vii)的所述新顶点被求解为大于0时,重复步骤(iv)到(viii),并且否则执行步骤(ix)到(xi)。

43. 如权利要求39所述的设备,其中所述SMPS(100)的所述输出电压 V_{out} 的所述规定的偏差遵循时间上的规定的变化。

44. 如权利要求31所述的设备(200),其中所述反馈环包括PID调节器(150),并且所述反馈环的模型将所述反馈环建模为PID调节器,所述控制律参数包括所述PID调节器(150)的P、I和D控制参数。

开关模式电源输出滤波器配置

技术领域

[0001] 本发明一般涉及开关模式电源(有时称为开关模式电源或开关模式电源)领域,并且更具体地说,涉及开关模式电源的输出滤波器中电容器配置的确

背景技术

[0002] 开关模式电源(SMPS)是众所周知的功率转换器类型,由于其小的大小和重量以及高效率而具有多样的应用范围,例如在个人计算机和便携式电子装置(诸如蜂窝电话)中。SMPS通过如下操作实现这些优点:以高频率(通常是数十到数百kHz)开关一个或多个开关元件(诸如功率MOSFET),其中开关的频率或占空比通过反馈环(也广泛地称为“补偿环”或“反馈电路”)调整以将输入电压转换成期望的输出电压。SMPS可采取整流器(AC/DC转换器)、DC/DC转换器、变频器(AC/AC)或反相器(DC/AC)的形式。

[0003] 开关模式电源通常在其输出具有布置在低通滤波器配置中以对包含一个或多个开关元件的SMPS的开关电路的输出信号进行低通滤波的不同种类的电容组。而且,不同种类电容器一般在它们在电路板上占用的它们的价格和/或区域(其通常需要尽可能小)方面具有不同成本或者其它设计约束。

[0004] 因为电子系统变得越来越成本和空间有限,因此存在对优化给这些系统供电的开关模式电源的解耦滤波器的不断增长的需要,特别是当SMPS的解耦滤波器倾向于占据大比例的板空间时。解耦滤波器的配置优化(在不同种类电容的数量以及遍布滤波器结构如何布置这些电容器方面)从而可节省宝贵的板空间以及成本。然而,对于稳定DC电压的要求(这对许多现代电子系统是普遍的)对解耦滤波器的配置施加了严格限定,这使选择其中电容器的最优配置的任务复杂化了。

[0005] 设计解耦滤波器的常规方法已经倾向于采用迭代过程,通过该过程,借助于检查它形成一部分的SMPS的负载瞬态响应并修改滤波器的配置(实质上是通过试错)以便在过程的下一代中进行评估,来评估滤波器设计。然而,这种方法是费时的,并且通常导致解耦滤波器的次优配置。

发明内容

[0006] 鉴于确定SMPS的解耦滤波器中的电容器配置的常规方法的缺点,本发明人已经设计了一种以系统方式通过搜遍一组候选电容器配置来确定允许有效地找到最优或接近最优的电容器配置的解耦滤波器电容器的配置的方案,其中搜索由满足SMPS的负载瞬态响应要求并最小化成本函数的值的要求引导。如将在下面说明的,发明人已经设计了一种最小化成本函数同时确保满足负载瞬态要求并且允许对于所定义的输出滤波器结构选择适当数量的每个种类电容器的技术。

[0007] 更具体地说,本发明人已经设计出一种确定SMPS的输出滤波器中的电容器配置的方法。该方法包括生成定义输出滤波器中不同种类的电容器的相应布置的电容器的候选配置,每个候选配置与基于候选配置中每个种类的电容器的数量和指配给每个种类电容器的

成本计算的函数值的相应值关联,其中候选配置按成本函数的递增(increasing)值或递减值的次序排序。该方法进一步包括:对电容器的有序候选配置执行二分搜索以从在二分搜索期间确定的电容器的候选配置之间确定与成本函数的最低值关联的电容器配置以允许满足SMPS的负载瞬态响应要求。使用具有输出滤波器的候选配置的SMPS模型来确定候选配置是否允许满足SMPS的负载瞬态响应要求以模拟响应于SMPS负载电流的变化的SMPS的输出电压的偏差,并基于输出电压的模拟偏差确定是否满足负载瞬态响应要求。

[0008] 发明人已经进一步设计出一种计算机程序产品,其包括携带计算机程序指令的信号或非暂时性计算机可读存储介质,所述指令当由处理器执行时使处理器执行如上所阐述的方法。

[0009] 本发明人进一步设计出一种用于确定SMPS的输出滤波器中的电容器配置的设备。所述设备包括布置成生成定义输出滤波器中的不同种类电容器的相应布置的电容器的候选配置的候选配置生成器模块。候选配置生成器模块包括布置成对于每个候选配置基于候选配置中的每个种类电容器的数量和指配给每个种类电容器的成本求解(evaluate)成本函数的成本计算模块,并且还包含布置成将每个候选配置与由成本计算模块计算的函数值的相应值关联的关联模块。候选配置生成器模块布置成按成本函数的递增值或递减值的次序对候选配置排序。所述设备进一步包括:搜索模块,布置成对电容器的有序候选配置执行二分搜索以从在二分搜索期间确定的电容器的候选配置之间确定与成本函数的最低值关联的电容器配置以允许满足SMPS的负载瞬态响应要求。搜索模块包括:输出电压偏差确定模块,布置成使用具有输出滤波器的候选配置的SMPS模型模拟响应于SMPS的负载电流的变化的SMPS的输出电压的偏差;以及求解模块,布置成基于输出电压的模拟偏差确定电容器的候选配置是否允许满足负载瞬态响应要求。

附图说明

[0010] 现在将参考附图仅作为示例来详细说明本发明的实施例,附图中:

[0011] 图1图示了对于理解本发明有帮助的开关模式电源的功能组件;

[0012] 图2图示了根据本发明实施例的用于确定SMPS的输出滤波器中的电容器配置的设备的功能组件;

[0013] 图3图示了在图2中示出的搜索模块的功能组件;

[0014] 图4示出了在图2和图3中示出的设备的示范硬件实现;

[0015] 图5是图示根据本发明实施例确定SMPS的输出滤波器中的电容器配置的方法的流程图;

[0016] 图6是示出生成在图5中图示的电容器的候选配置的过程的另外细节的流程图;

[0017] 图7是示出在该实施例中如何从全都具有成本函数的相同值的多个候选配置中选择候选电容器配置的流程图;

[0018] 图8示意性图示了在本文描述的SMPS的响应模拟中使用的负载电流瞬态的形式;

[0019] 图9图示了响应于负载电流瞬态的SMPS的输出电压的变化,其中峰值电压和恢复时间取用户规定的最大值;

[0020] 图10图示了在减去DC电压电平之后的图9中输出电压的变化;

[0021] 图11是图示确定用于调谐SMPS的反馈环的控制律参数的方法的流程图,其中对于

SMPS的输出滤波器中电容器的候选配置确定目标函数G的值；

[0022] 图12是示出图11的步骤S300中的过程的另外细节的流程图；

[0023] 图13是图示用于估计目标函数G的最小值的位置的过程的流程图；

[0024] 图14A至14C示出了对于理解在图13中图示的过程有帮助的实验结果；

[0025] 图15图示了根据本发明第二实施例的修改的搜索模块的功能组件；

[0026] 图16A示出了在第二实施例中用于求解第二目标函数G2的规定输出电压偏差 $v_r(t)$ 的示例；

[0027] 图16B到16F图示了在第二实施例中可如何求解第二目标函数G2；

[0028] 图17是图示在第二实施例中调谐SMPS的反馈环的方法的流程图；

[0029] 图18A和18B是图示在第二实施例中用于估计在调谐反馈环中使用的目标函数的最小值的位置的过程的流程图；以及

[0030] 图19至21是图示在图7中示出的过程的备选的流程图。

具体实施方式

[0031] 在描述本发明的实施例之前，首先将参考图1描述对于说明本发明有帮助的开关模式电源的组件。

[0032] SMPS 100包括开关电路110，其包括至少一个开关元件（例如MOSFET），其布置在开关电路110中并控制成以高频率（例如数十或数百kHz）并以一占空比进行开关以便将SMPS 100的输入DC电压 V_{in} 转换成输出电压，其由SMPS的低通滤波器120（例如包括电感器和一个或多个电容器的第一阶LC滤波器）进行滤波以生成输出（SMPS 100的DC电压 V_{out} ）。开关电路110可包含隔离变换器，其具有由初级侧电路驱动的初级绕组和电耦合到初级绕组并布置成驱动通常包括整流网络的次级侧电路的次级绕组，一个或多个开关元件被提供在初级侧电路和次级侧电路之一或二者中。开关电路110的适合电路拓扑和其它细节以及输出滤波器120的细节对本领域技术人员是众所周知的，并且因此这里将不再描述。

[0033] SMPS 100进一步包括布置成按照由一个或多个控制律参数特征化的控制律调节SMPS 100的输出电压 V_{out} 的反馈环。反馈环通常包括控制器，控制器按照由一个或多个控制律参数定义的控制律，基于SMPS的输出电压或输出电流调节SMPS的一个或多个开关元件的开关频率或开关占空比，以将SMPS的输出电压保持在预定值附近。

[0034] 反馈环可以数字方式实现，并且从而包含：采样和保持电路130，其布置成对 V_{out} 或指示其的信号进行采样（例如以1至10微秒的间隔）并将采样值暂时存储在缓冲器中；以及模数转换器（ADC）140，其布置成对存储的样本值进行数字化。当然，反馈环的模拟实现也是可能的。

[0035] 如图1中所示，反馈环还包含以PID调节器（在本文中也称为PID控制器）150形式的反馈控制器，其在接收的 V_{out} 指示（即在本示例中是来自ADC 140的样本值）的基础上并按照由在PID调节器150中设置的P、I和D控制参数的值特征化的PID控制律调节一个或多个开关元件的占空比（或开关频率，视情况而定）以保持SMPS 100的输出电压恒定。然而，代替PID调节器150，可使用另一种类的调节器，其按照使用不同组一个或多个控制律参数定义的不同控制律调节 V_{out} 。PID调节器150布置成生成控制信号以控制也包含在反馈环中的脉宽调制器（PWM）160，以适当地控制开关电路110中的一个或多个开关元件的开关。在图1中

图示的反馈环的组件的功能性以及实现这些组件并将其分布在SMPS 100的隔离屏障的初级侧与次级侧之间的备选方式(在此提供一个,与在本示例中一样)将是本领域技术人员熟悉的,使得没有必要在此提供另外细节。

[0036] [实施例1]

[0037] 现在将参考图2描述根据本发明第一实施例的用于确定SMPS的输出滤波器中电容器配置的设备。

[0038] 图2示出了本实施例的设备200的功能组件。设备200包括包含成本计算模块212和关联模块214的候选配置生成器模块210以及包括输出电压偏差确定模块222和求解模块224的搜索模块220,它们在功能上如所示互连。

[0039] 简言之,候选配置生成器模块210布置成生成定义SMPS 100的输出滤波器120中的不同种类电容器的相应布置的电容器的候选配置。在SMPS的输出滤波器(也称为解耦滤波器)中使用的电容器种类通常在如下至少一项方面彼此不同:它们电容器的电容、物理大小、结构、材料成分、电气性能特性(例如电容的等效串联电阻(ESR)、漏电流和/或温度相关性)、环境特性(例如电容随湿度或暴露于热冲击或湿气等的变化)以及机械性能特性(例如电容随施加的应力的变化),其中相同种类的电容器额定具有这些性质的相同值(经常规定成在容限(tolerance)内)。

[0040] 成本计算模块212布置成对于每个候选配置,基于所述候选配置中的每个种类电容器的数量和指配给每个种类电容器的成本求解成本函数,而关联模块214布置成将每个候选配置与由成本计算模块计算的成本函数的相应值关联。候选配置生成器模块210布置成按成本函数的递增值或递减值的次序对候选配置排序。

[0041] 搜索模块220布置成对电容器的有序候选配置执行二分搜索以从在二分搜索期间确定的电容器的候选配置之间确定与成本函数的最低值关联的电容器配置以允许满足SMPS的负载瞬态响应要求。输出电压偏差确定模块222布置成使用具有输出滤波器的候选配置的SMPS模型模拟响应于SMPS 100的负载电流的改变会发生的 V_{out} 的偏差,并且求解模块224布置成基于输出电压的模拟偏差确定电容器的候选配置是否允许满足负载瞬态响应要求。

[0042] 搜索模块220与本实施例中一样也可包含包括输出电压偏差确定模块222和求解模块224的自然频率估计器226以及控制律参数计算器228,如在图3中的搜索模块220的更详细说明中所示出的。

[0043] 下面将更详细说明本实施例的设备200的这些和其它组件的功能性。

[0044] 图4示出了在可编程信号处理硬件中的设备200的示范实现。在图4中示出的信号处理设备300包括输入/输出(I/O)区段310,其起设备200的接口模块的作用,用于在设备200确定所要求的电容器配置(包含输出滤波器类型的规范、电容器类型及关联成本的定义、定义在算法中使用的负载瞬态形式和负载瞬态要求的参数等)的基础上接收数据,并向用户输出所确定的电容器配置的指示,以及可选地一个或多个计算的控制参数值(例如经由视觉显示单元(VDU)诸如LTED监视器)。

[0045] 信号处理设备300进一步包括处理器320、工作存储器330以及存储计算机可读指令的指令存储340,所述指令当由处理器320执行时使处理器320执行本文后文描述的处理操作以确定SMPS 100的输出滤波器120中电容器的配置。指令存储340可包括预先加载有计

计算机可读指令的ROM。备选地,指令存储340可包括RAM或类似类型存储器,并且计算机可读指令可从计算机程序产品(诸如计算机可读存储介质350(诸如CD-ROM)等或携带计算机可读指令的计算机可读信号360)输入到此。

[0046] 在本实施例中,在图3中示出的硬件组件的组合370,包括处理器320、工作存储器330和指令存储340,配置成实现上面参考图2和图3已经描述的设备200的组件的功能性。现在将参考剩余附图更详细地描述候选配置生成器模块210和搜索模块220的功能性。

[0047] 图5是提供过程的顶层(top-level)说明的流程图,通过其确定SMPS 100的输出滤波器120中电容器配置。

[0048] 在步骤S100,候选配置生成器模块210生成定义输出滤波器120中的不同种类电容器的相应布置的电容器的候选配置。并且关联模块214将每个候选配置与由成本计算模块212在候选配置中每个种类电容器的数量和指配给每个种类电容器的成本的基础上计算的成本函数的相应值关联。在本实施例中,候选配置生成器模块210按成本函数的递增值的次序对候选配置排序。然而,在备选实施例中,候选配置替代地可按成本函数的递减值的次序排序。将参考图6描述这些过程的另外细节。

[0049] 在图5的步骤S200,搜索模块对电容器的有序候选配置执行二分搜索以从在二分搜索期间确定的电容器的候选配置之间确定与成本函数的最低值关联的电容器配置以允许满足SMPS 100的负载瞬态响应要求。通过输出电压偏差确定模块222使用具有输出滤波器120的候选配置的SMPS模型来模拟响应于SMPS 100的负载电流的改变而发生的 V_{out} 偏差,并且通过求解模块224基于 V_{out} 的模拟偏差来确定是否满足负载瞬态响应要求,来确定是否期望候选配置允许满足SMPS 100的负载瞬态响应要求。

[0050] 图6是作为示例可如何执行步骤S100中的过程的流程图。

[0051] 首先,在图6的步骤S110,候选配置生成器模块210定义在随后计算中在输出滤波器的滤波器类型方面假定的输出滤波器的形式以及在输出滤波器的候选配置中可出现的电容器的不同种类。例如,在本实施例中,滤波器类型是C-L-C低通滤波器。更具体地说,在此实施例中,两个种类的电容器并行连接在图1中所示的开关电路110的输出与地之间(给出C-L-C滤波器中的第一电容C),其中开关电路110的输出然后经由电感器L连接到类似地连接到地(并且提供C-L-C滤波器中的第二电容C)的两个种类电容器的另一并行组合。从而,在输出滤波器的电感器L与开关电路110之间, N_{MC1} (包含0)数量的第一种类电容器(下文称为“模块电容器1”(MC1)) 和 N_{MC2} (再次包含0)数量的第二种类电容器(下文称为“模块电容器2”(MC2)) 连接在SMPS 100的输出轨与地之间。类似地,在输出滤波器的电感器L与SMPS 100的输出端子(在 V_{out})之间, N_{LC1} (包含0)数量的第三种类电容器(下文称为“负载电容器1”(LC1)) 和 N_{LC2} (包含0)数量的第四种类电容器(下文称为“负载电容器2”(LC2)) 连接在SMPS 100的输出轨与地之间。

[0052] 下面的表1示出了这些电容器的示例组件值,连同关联的寄生电阻R和容限值,它们可用于计算使用本文描述的算法所找到的解决方案的鲁棒性。

[0053]

名称	大小	R (mΩ)	容限 (%)
模块电容器1	1000 μ F	10	20
模块电容器 2	100 μ F	5	20
电感器	10 nH	5	20

负载电容器1	470 μ F	5	20
负载电容器2	47 μ F	5	20

[0054] 表1

[0055] 在步骤S110,候选配置生成器模块210例如在经由设备200的接口模块接收的用户输入的基础上从滤波器的一组可能形式中进行对应选择,可用这种方式定义输出滤波器的形式。

[0056] 在步骤S120,候选配置生成器模块210向每个种类电容器指配成本。成本可以是假若保持电容器种类之间关系的任何单位(unit)。例如,如果模块电容器1是模块电容器2的两倍一样昂贵,并且模块电容器1被指配了成本100,则模块电容器2应该被指配成本50。在下面表2中示出了在步骤S120中由候选配置生成器模块210进行的成本指配的示例。

名称	每电容器成本
模块电容器1	100
模块电容器2	20
负载电容器1	45
负载电容器2	10

[0058] 表2

[0059] 指配给每个种类电容器的成本可指示该种类电容器的价格或物理大小,或者在设计中重要的任何其它数字。成本备选地可指示两个或更多此类数字的加权和,例如该种类电容器的价格和物理大小的加权和。从而,成本可定义如下:

$$[0060] \quad Cost = \frac{price}{scale1} + \frac{area}{scale2}$$

[0061] 在上面成本的表达式中,缩放因子“scale 1”和“scale 2”对确保电容器价格和面积(即电路板上的足迹(footprint))尽可能同等地影响总成本是必要的。

[0062] 在步骤S130,候选配置生成器模块210生成定义输出滤波器中的上面提到的不同种类电容器的相应布置的电容器的候选配置。更具体地说,候选配置生成器模块210生成多组电容器的排列,其中不同种类电容器的数量在多组之间变化,以生成电容器的每个可能总成本的排列,从最低可能成本开始继续到最大准许的总成本,其是由用户规定的。如将从下文认识到的,由用户规定的最大总成本可提供下文描述的负载瞬态要求太严格或者规定的最大总成本太小而不允许令人满意的负载瞬态性能的指示。在本实施例中,电容器的最大总成本被设置在1000个单位。

[0063] 候选配置生成器模块210从而生成候选电容器配置,经受在步骤S110定义的由输出滤波器类型施加的进一步限定,也就是,电感器L的每侧上的电容器的最小数量都是1。由此可见,在本实施例中,总成本可以低到30(在电感器L的一侧使用单个“模块电容器1”,而在电感器L的另一侧使用单个“负载电容器2”)。由候选配置生成器模块210生成的候选配置可用表格形式表示,如在下面表3中所示出的。

[0064]

	数量				
排列	MC1	MC2	LC1	LC2	总成本
1	0	1	0	1	30
2	0	1	0	2	40
3.1	0	1	0	3	50
3.2	0	2	0	1	
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
192.1	0	1	0	98	1000
192.2	0	1	2	89	
.	.	.	.	.	
192.957	4	5	10	5	
.	.	.	.	.	
192.1240	9	4	0	2	

[0065] 表3

[0066] 成本计算模块212使用给出配置成本的成本函数作为候选配置中每个种类电容器的数量和指配给每个种类电容器的成本的函数来计算电容器的每个候选配置的成本。从而,在表3中标识为“排列2”的候选配置的情况下,本实施例的成本函数(其对排列中的电容器成本求和)得出 $(1 \times 20) + (2 \times 10) = 40$ 个单位的成本。

[0067] 对于所有排列,给出192个不同成本,重复这个过程。如在表3中所示出的,候选配置生成器模块210按成本函数的递增值的次序,从30个单位到1000个单位,对候选配置排序。其中一些候选配置具有输出滤波器120中的不同种类的电容器的单个布置,而其它候选配置具有不同种类电容器的多个布置,全都具有成本函数的相同值。例如,在表3中示出的候选配置192的情况下,存在不同种类的电容器的1240个不同布置,全都得出成本函数的相同值,即最大值1000个单位。

[0068] 其中候选配置包括输出滤波器120中的不同种类电容器的多个不同布置,其中所有不同布置都与成本函数的相同值关联,候选配置生成器模块210优选地选择这些布置中的一个。此选择可按若干不同方式中的一个执行。

[0069] 在本实施例中,在图6的步骤S150,候选配置生成器模块210通过在图7的流程图中图示的过程,对于具有多个电容器布置的每个此类候选配置选择并保留单个电容器布置。

[0070] 在图7的步骤S152,候选配置生成器模块210将多个不同布置中的每个布置中的不同种类电容器之间的电容器分布与目标分布比较。

[0071] 目标分布指示在不同电容器类型之间分布电容器的优选方式,并且可被视为给出输出滤波器120中不同种类电容器的优选比例(例如表示为百分比)的直方图。从而,在优选分布中出现的最常见的电容器种类将具有最高百分比值。类似地,如果在输出滤波器中优选存在相等数量的不同种类电容器,则目标分布将是平的,其中不同种类电容器具有相同百分比值。使用此类布置可在输出滤波器中在所有频率都获得低阻抗。作为示例,在本实施

例中,在下表4中图示了目标分布。

[0072]

名称	目标比例 [%]
模块电容器1	20
模块电容器2	20
负载电容器1	40
负载电容器2	20

[0073] 表4

[0074] 在图7的步骤S154,候选配置生成器模块210选择在不同种类电容器之间与目标分布具有最类似电容器分布的电容器布置。选择的布置被保留用于进一步处理,而剩余布置被丢弃。为了此比较,候选分布应该被归一化(或者目标分布应该具有与在正考虑的排列中存在的相同数量的电容器)。

[0075] 例如,在表3中示出的候选配置192的情况下,候选配置生成器模块210通过将1240个排列中每个排列中的不同种类电容器之间的电容器分布与在表4中图示的目标分布比较来选择单个电容器布置,并且选择在不同种类电容器之间与目标分布具有最类似分布的排列,即布置957。对于具有不同种类电容器的多个不同布置的每个候选配置(全都具与成本函数的相同值关联),执行这个选择过程。布置中的电容器分布与目标分布之间的类似性可以以本领域技术人员已知的任何适合的方式确定,例如通过计算两个分布之间的相关性的测量(例如相关性的皮尔森积矩系数),并选择其分布与目标分布具有最高相关性的布置。

[0076] 在下面表5中示出了在图5的步骤S100中执行的上述过程的结果。

[0077]

排列	数量				成本
	MC1	MC2	LC1	LC2	
1	0	1	0	1	30
2	0	1	0	2	40
3.2	0	2	0	1	50
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
192.957	4	5	10	5	1000

[0078] 表5

[0079] 再次参考图5,现在将描述在步骤S200中执行的过程的另外细节。

[0080] 如上面所说明的,搜索模块220搜索电容器的有序的那组候选配置(如在表5中所示图的)以从在搜索期间确定的电容器的候选配置之间确定与成本函数的最低值关联的电容器配置以允许满足SMPS 100的负载瞬态响应要求。

[0081] 负载瞬态是SMPS 100的负载电流的变化,并且可采取在图8中图示的形式,其在本文下面描述的过程中假定了。如图8中所示,负载电流在一段时间 t_r 上从低电平L增大到高电平H,给出 $(H-L)/t_r$ 的转换速率(slew rate)(通常是1-30A/微秒)。L和H输出电流电平通常分别对应于25%和75%的SMPS的电流输出能力。开关周期 T_{trans} 被选取成使得输出电压在一

瞬态(L-H或H-L转变)之后在下一瞬态之前具有足够的时间完全恢复。 T_{trans} 的适合值在2-3ms的范围内。

[0082] 在此类负载瞬态之后, V_{out} 可在朝其初始值往回衰变之前从初始值(在此发生了负载瞬态)偏离到最大值或最小值,如图9中所图示的。恢复时间是在SMPS 100的负载电流的变化之后 V_{out} 返回到输出电压值(例如在负载瞬态发生前以 V_{out} 的初始值为中心)的容限带(或“恢复极限”)内所要求的时间。容限带的边界通常位于在初始输出电压值以上和以下的几个百分比(正常是1-3百分比),并且恢复时间对应于输出电压在发生负载瞬态之后到达这些边界中任一边界所花费的时间。

[0083] 负载瞬态响应要求取决于最大输出电压偏差和最大恢复时间,它们在发生负载瞬态之后是准许的。一旦已经规定了这些极限,就可使用提供在负载电流变化期间的最大SMPS输出电压偏差(例如观测的电压过冲(overshoot))和恢复时间中至少一项的测量的目标函数G来量化负载瞬态响应要求。更确切地说,通过对于规定的最大输出电压偏差和最大恢复时间求解目标函数G来获得负载瞬态响应要求(LTRR)。下面进一步论述的目标函数G的一个可能形式如下:

$$[0084] \quad \left[\int_0^{T_{max}} |V_{out}(t) - V_{DC}|^N dt \right]^{1/N}$$

[0085] 其中 V_{DC} 指代DC电压, V_{out} 响应于SMPS的负载电流的变化而从其偏离,并且N是大于或等于1的整数。

[0086] 搜索模块220通过移除信号的DC电平 V_{DC} (在此示例中大约1V)并基于结果信号即 $V_{out}(t) - V_{DC}$ 求解目标函数G(如图10所图示的)以确定SMPS的负载瞬态响应要求来处理 $V_{out}(t)$ (如图9所图示的),其对应于用户已经规定的“最坏情况”变化。

[0087] 使用由如下伪代码简要描述的二分法搜索过程以高度有效的方式找到具有成本函数最低值同时满足负载瞬态响应要求的电容器配置,其中“permutations[i]”表示在图5的步骤S100中生成的有序的那组电容器配置中的第i个电容器配置,并且“Permutations.Length”表示在结束步骤S100已经生成的候选配置的数量(即在本实施例中是192)。

```
[0088]  LTRR <- Calculate the LTRR
[0089]  i_min <- 0
[0090]  i_max <- Permutations.Length - 1
[0091]  while(i_max <= i_min)
[0092]    i <- i_min + (i_max - i_min)/2
[0093]    r <- Sim(permutations[i])
[0094]    if (r <= LTRR)
[0095]      i_max <- i - 1
[0096]    else
[0097]      i_min <- i + 1
[0098]    end
[0099]  end
[0100]  return permutations[i]
```

[0101] 在上面的伪代码中, Sim() 指代过程, 通过所述过程对于输出滤波器电容器的候选配置求解目标函数G以确定候选配置是否允许满足SMPS的负载瞬态响应要求。Sim() 可以是使用具有输出滤波器的候选配置的SMPS模型模拟响应于SMPS 的负载电流的改变而发生的 V_{out} 的偏差的任何过程。然而, 下面描述了此过程的特别有利的实现, 其此外确定用于调谐SMPS 100反馈环的控制律参数的最优(或接近最优) 值。

[0102] 当设计SMPS的数字补偿环时, 常规上已经使用了考虑频域中设计的设计标准设计工具, 其可提供建模错误和设备改变的鲁棒性或系统稳定性的有用指示。在此情况下, 环补偿通常使用用于正常情况下在极点的自然频率和以下的一个倍频程处放置PID补偿零点的拇指规则进行设计。然而, 这种方法通常要求设计人员对手边的系统具有良好的理解, 并且在许多情况下得出次最优解决方案。其它常规方法实质上基于试错法, 其可能非常费时。

[0103] 本发明人已经想到了用于有效地确定用于调谐可优化任何给定输出滤波器配置的负载瞬态性能的SMPS的反馈环的控制律参数的值的方案。如将在下面说明的, 发明人设计的参数确定算法采用可配置成强调优化中的不同目标的新目标函数。这与常规方法形成对照, 其中当设计控制环仅到使用众所周知的结果(60度的相位裕度得出性能良好的负载瞬态)的程度时, 通常考虑负载瞬态行为。

[0104] 图11和12是图示过程的流程图, 通过所述过程在本实施例中反馈环调谐设备200对于电容器的候选配置求解目标函数G并且确定用于调谐SMPS 100的反馈环的控制律参数的值。

[0105] 图11提供了此过程的顶层说明。在图11的步骤S300中, 自然频率估计器226确定与SMPS 100的反馈环的数学模型关联的传送函数中的两个零点中每个零点的自然频率的相应估计。在本实施例中, 对反馈环建模以实现PID控制律, 其在工业上广泛使用。然而, 将认识到, 本文描述的技术适用于其它种类控制律。

[0106] PID控制的数字实现可采用第二阶直接形式I (DF-I) 区段, 其实现了如下传送函数:

$$[0107] \quad PID(z) = G \frac{(z - z_{zero1})(z - z_{zero2})}{z - 1}$$

[0108] 其中两个零点实现D部分, 并且积分器I用z平面中+1处的极点实现。增益级由因子G设置。在本实施例中, 传送函数从而具有两个补偿零点, 这些零点应该恰当放置, 因为它们影响负载瞬态行为, 而增益因子G使得开环系统在相位和增益裕度方面达到设计鲁棒性目标。

[0109] 应该指出, 如果SMPS的模型是高于2的阶数, 则使用Hankel奇异值的模型降阶技术(诸如平衡模型降阶)优选用于将阶数减小到2。然而, 备选地可使用任何其它适合的模型降阶技术。

[0110] 简言之, 在步骤S300, 自然频率估计器226对于搜索空间中的多个点中的每个点确定响应于SMPS 100的负载电流的变化而发生的SMPS 100的输出电压 V_{out} 与初始值的偏差, 其中每个点的坐标都对应于零点的自然频率的候选值。自然频率估计器226然后使用 V_{out} 的确定偏差在多个点中每个点求解由本发明人设计的新颖目标函数G, 其中求解的目标函数G提供了相应输出电压变化的恢复时间和大小中至少一项的测量。基于目标函数G的求解值, 自然频率估计器226然后使用对本领域技术人员已知的任何适合的算法(例如最速下降法、

使用梯度的Jacobean矩阵的牛顿的方法、共轭梯度法、Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shannon (BFGD) 方法等) 估计搜索空间中目标函数G的最小值的位置。目标函数最小值的位置对应于零点的自然频率。下面将描述上面概述的过程的适合的目标函数和另外细节的示例以及本发明人已经设计出的特别有效的搜索算法。

[0111] 在步骤S400, 控制律参数计算器228基于由自然频率估计器226确定的零点的自然频率的估计来计算用于调谐反馈环的控制律参数。

[0112] 现在将参考图12更详细地描述过程, 通过所述过程自然频率估计器226对于电容器的每个候选配置确定反馈环的传送函数中的两个零点中每个零点的自然频率的估计和目标函数G的值(指配给伪代码中的变量“r”)。

[0113] 零点的相位超前补偿来自从SMPS模型导出的传送函数的极点的相位滞后(下面进一步描述)。因此, 本文描述的优化过程的重要输入数据是SMPS极点的自然频率, 因为这些限制了零点的自然频率的搜索范围, 如将在下面进一步描述的。为了良好的近似, 零点的相位超前开始其自然频率以下的一个十倍频程(decade), 并且得出那之上一个十倍频程的其最大值。从而, 比那个更大的范围正常情况下没必要研究。发明人进行的实验已经显示出, 搜索范围可被进一步局限于SMPS中极点的自然频率周围的 ± 1 个倍频程。

[0114] 从而, 在步骤S310, 自然频率估计器226优选确定对应于包含候选电容器配置的SMPS 的模型的传送函数中的两个主导极点中的每个极点的相应自然频率, 主导极点的自然频率是 NF_{pole1} 和 NF_{pole2} , 其中 $NF_{pole1} \leq NF_{pole2}$ 。这可通过使用本领域技术人员众所周知的技术和软件工具构建包含解耦滤波器120的SMPS 100的数学模型来实现。优选使用分段线性模型, 其包括用于SMPS操作的每个开关阶段的一个线性模型。作为示例, 对于工作在连续导通模式(CCM)的降压转换器, 两个不同模型足够了, 一个对应于开关元件导通时的情况, 而另一个对应于同步/整流开关元件导通时的情况。分段线性模型是时间平均的, 以便获得可被变换到频域的线性模型, 使得可从该模型获得主导极点频率。

[0115] 在已经执行了步骤S310的情况下, 自然频率估计器226优选在步骤S320中定义如上所述可被视为二维空间的搜索空间中的零点的三角形搜索区域, 其中每个点的坐标(NF_{zero1}, NF_{zero2}) 对应于零点的自然频率可采取的一对坐标值, 即 NF_{zero1} 和 NF_{zero2} 。三角形搜索区域具有在点($NF_{zeromin}, NF_{zeromin}$)、($NF_{zeromax}, NF_{zeromax}$) 以及($NF_{zeromin}, NF_{zeromax}$) 或($NF_{zeromax}, NF_{zeromin}$) 的顶点, 其中 $NF_{zeromin} = NF_{pole1}/r_{min}$ 并且 $NF_{zeromax} = NF_{pole2} \cdot r_{max}$ 。在这些表达式中, r_{min} 和 r_{max} 是范围因子, 并且各优选在1.5 与3之间。而且, 发明人已经找到, 设置 $r_{min}=r_{max}=2$, 以便搜索在极点的自然频率以下的一个倍频程和以上的一个倍频程, 允许有效地找到零点的自然频率的良好估计。发明人执行的许多公共和极端SMPS系统的模拟已经确认, 对于位于上面标识其顶点的任一三角形内的零点的自然频率的值, 获得最优负载瞬态响应。在此连接中, 要指出, 由于补偿不取决于零点的次序, 因此需要搜索以找到零点的自然频率的估计的搜索空间可被局限于这些三角形中的任一个。

[0116] 在步骤S330, 输出电压偏差确定模块222对于搜索空间中多个点中的每个点确定响应于SMPS 100的负载电流的变化而发生的 V_{out} 的偏差。在已经执行了可选的步骤S310和S320的情况下, 输出电压偏差确定模块222在步骤S330对于在步骤S320中定义的三角形搜索区域中的多个点中的每个点, 模拟 V_{out} 如何响应于SMPS 100的负载电流从初始负载电流值的变化而偏离其初始值(对应于SMPS负载电流的初始值)。此模拟使用SMPS 100的模型和

SMPS 100的反馈环的模型执行。

[0117] 使用分段线性差分方程(DE)模型,执行负载瞬态响应的模拟。也就是,在SMPS的每个工作区域中都使用一个DE模型,并且当进入另一工作区域时切换模型。状态变量的最终状态变成新模型的初始状态。可用任何适合的建模软件,诸如MATLAB™或Modellica™,实现模拟。

[0118] 再次参考图12,在步骤S340,目标函数求解模块224使用在三角形搜索区域内的多个点中的每个点的 V_{out} 的确定偏差求解目标函数G,以获得相应输出电压偏差的恢复时间和大小中至少一项的测量。如上面所指出的,在负载瞬态之后, V_{out} 在朝其初始值衰变回之前可从初始值向最大值或最小值偏离。目标函数G提供了在SMPS 100的负载电流的变化期间的最大SMPS输出电压偏差(例如观测的电压过冲)和在SMPS 100的负载电流的变化之后 V_{out} 返回到输出电压值的容限带内的恢复时间中的至少一项的测量。容限带的边界通常位于在初始输出电压值以上和以下的几个百分比(正常是1-3百分比),并且恢复时间对应于输出电压在发生负载瞬态之后到达这些边界中任一边界所花费的时间。目标函数G可被定义为恢复时间和电压偏差的加权平均,例如以如下一般形式:

$$[0119] \quad w_{V_{dev}} \left[\frac{V_{Dev}}{V_{Dev_Req}} \right]^N + w_R \left[\frac{T_R}{T_{R_Req}} \right]^M$$

[0120] 其中 V_{Dev} 指代最大SMPS输出电压偏差, T_R 指代恢复时间, V_{Dev_Req} 和 T_{R_Req} 是允许恰当地加权电压偏差和恢复时间所需的归一化因子(换言之,用户选择的电压偏差和恢复时间要求), $w_{V_{dev}}$ 和 w_R 是加权因子,并且N和M是整数,其中 $N \geq 1$ 并且 $M \geq 1$ 。 V_{Dev_Req} 和 T_{R_Req} 可分别对应于用户选择的最大准许电压偏差和最长允许恢复时间。

[0121] 然而,计算恢复时间 T_R 可能是费时的,并且选取恢复电平、容限带可能是困难的,并且大大影响结果。因此可能优选使用信号的标准范式,等于在瞬态期间与DC电平的电压偏差。从而优选使用上面提到的一般形式的目标函数G,即:

$$[0122] \quad \left[\int_0^{T_{trans}} |V_{out}(t) - V_{DC}|^N dt \right]^{1/N},$$

[0123] 从而,N=1得出偏差的绝对值的积分,N=2对应于能量范式,而N的高值得出 $\|V_{out}(t) - V_{DC}\|_{\infty} = \sup_t |V_{out}(t) - V_{DC}|$,即最大电压偏差。因此,通过改变因子N,恢复时间和电压偏差的相对加权可变化。

[0124] 积分必须使用数值近似算法(诸如如下面所示的第一阶近似或梯形的第二阶近似)计算:

$$[0125] \quad \int_0^{T_{trans}} |V_{out}(t) - V_{DC}|^N dt \approx \sum_{k=1}^{T_{trans}/\Delta t} |V_{out}(k\Delta t) - V_{DC}|^N \Delta t$$

[0126] 在步骤S350,自然频率估计器226例如使用上面描述其中一个技术,基于目标函数G的求解值来估计三角形搜索区域中目标函数G的最小值的位置。

[0127] 尽管可对定义要在目标函数最小值的估计中考虑的零点的自然频率的所有候选值的搜索区域(其例如可布置成网格)中的一组点顺序执行步骤S330和S340,但优选地对迭代搜索过程期间的一个时间点顺序执行步骤S330和S340,其中在搜索过程的每个迭代中生

成提供目标函数最小值的更好估计的新候选点。

[0128] 现在将参考图13描述本发明人已经设计出并且提供了步骤S330到S350的特别有效实现的此类搜索过程的示例。

[0129] 在步骤S410,自然频率估计器226计算三角形搜索区域的每个顶点的目标函数G的关联值和 V_{out} 的偏差。

[0130] 在步骤S420,自然频率估计器226用得出目标函数G的较小值的搜索区域内的顶点替换得出目标函数G的最大值的三角形搜索区域的顶点以生成由搜索区域内的顶点和三角形搜索区域的剩余顶点定义的搜索区域内的三角形。

[0131] 在步骤S430,自然频率估计器226将程序循环计数器j的值设置成初始值1。

[0132] 在步骤S440,自然频率估计器226计算新顶点的 V_{out} 偏差,并且对于新顶点求解目标函数G。

[0133] 在步骤S450,自然频率估计器226用得出目标函数G的较小值的搜索区域内的新顶点替换得出目标函数G的最大值的三角形的顶点以生成搜索区域内的新三角形。

[0134] 在步骤S460,自然频率估计器226通过使它增加1来更新循环计数器j的值,并且确定循环计数器j的更新值是否等于阈值J。从而,用于停止步骤S440和S450的重复执行的停止判据是,已经执行了确定数量J的循环迭代。在此搜索方法的一些实际实现中,发明人已经找到J=15到25足够了。然而,应该指出,备选地可使用可与搜索的收敛程度相关的其它停止判据。例如,当三角形变得比预定大小小时,算法可被修改成冲破由步骤S440到S460定义的循环,例如使得由其顶点的坐标定义的自然频率相差小于预定量,例如10Hz到20Hz。

[0135] 当停止判据已经满足时(在此示例中当循环计数器j达到J的阈值时),过程前往步骤S470,其中自然频率估计器226基于目标函数G的求解值估计搜索区域内目标函数G的最小值的位置以获得零点的自然频率的估计。例如,自然频率估计器226可选择在最终执行步骤S450中生成的三角形中或上的点,例如三角形的其中一个顶点,优选是给出目标函数G的最低值的顶点。自然频率估计器226备选地可选择在倒数第二(或甚至更早)执行步骤S450中生成的三角形中或上的点,不过不太优选。在这些情况的每个情况下,选择的点的坐标都提供零点的自然频率的估计。使用目标函数G的对应值指导上面描述的二分搜索。

[0136] 从而,上面描述的数值优化算法(其基于Nelder-Mead方法)可被视为比较在三角形的三个顶点处的函数值的模式搜索。其中目标函数G最大的最坏顶点被拒绝,并且用新顶点替换。形成新三角形,并继续搜索。该过程生成三角形序列(它们可能具有不同的形状),在顶点处的函数值变得越来越小。三角形的大小被减小,并且最终找到近似于目标函数G最小值的搜索空间中的点的坐标。然而,相比Nelder-Mead方法(其允许搜索延伸到在搜索中考虑的初始三角形外部),本文描述的搜索方法包含在方法过程期间生成的较小三角形必须全都位于起始三角形内(即在三角形搜索区域内)的限定。换言之,不允许在搜索期间生成的新顶点被放置在初始三角形搜索区域界限的外部。Nelder-Mead方法及其变形的另外细节可在J.A.Nelder和R. Mead的“A simplex method for function minimization”(Computer Journal, Vol.7, Issue 4, pages 308-313 (Oxford Journals,1965))中找到,以及有关数值方法的许多教科书中找到。这些方法可按直接了当的方式修改以结合上面论述的另外限定,以便获得上面参考图11-13描述的更一般形式的算法。这个算法具有它不需要计算任何导数(其可能在计算上是花销大的)的优点,并且聚焦搜索到搜索区域相关

部分,从而使它更有效。

[0137] 图14A至14C示出了对于理解在图13中图示的过程有帮助的实验结果。在这些实验中,已经执行了SMPS对负载瞬态响应的大量模拟,以便能够将目标函数G计算为搜索空间上的详细表面,其使用高性能计算机花了30-48小时。图14A至14C示出了目标函数G到搜索空间上的二维“等值”等距投影。在此示例中,目标函数G采取在上面描述的第一实施例中指示的形式,其中 $N=1$ 。在图14A中,示出了第一三角形,并且其角被标记为“最好”、“良好”和“最差”,这些在对应目标函数值方面进行分等级(ranked)(即,其中标记为“最好”的角得出目标函数G的最低值,并且标记为“最差”的角得出最大值)。这个三角形对应于上面提到的搜索区域。

[0138] 在图14B中示出了执行步骤S440和S450的第一迭代的结果。中间点变成新的“最好”角,前“最好”角变成“良好”角,并且“最差”角用较好的替换,但仍是“最差”角。

[0139] 在图14C中示出了下一迭代之后的结果。在第一迭代之后在“最好”角与“良好”角之间的中间点变成新的“良好”角,并且“最好”角保持不变。第三角变成“最差”。

[0140] [实施例2]

[0141] 在上面描述的第一实施例中,执行二分搜索以确定满足负载瞬态响应要求的最低成本电容器配置,确切地说通过对于有序的那组电容器配置中的每个候选电容器配置找到SMPS的各种组控制律参数值的最小目标函数值,并将这个最小目标函数值与对应于可容忍的“最坏情况”输出电压偏差的另一目标函数值比较。

[0142] 本实施例提供了用于找到具有成本函数的最低值同时满足负载瞬态响应要求的电容器配置的备选方式,其有利地还允许以高度有效的方式找到满足负载瞬态响应要求的控制律参数的最优(接近最优)值。在本实施例中,负载瞬态响应要求(下文也称为“规定输出电压偏差”)在搜索最优(或接近最优)控制律参数值期间被考虑,并且形成此搜索过程的积分部分,其由上面描述的过程“Sim()”的变形表示。虽然在本实施例中采用的这个过程变形优选导致用于控制SMPS反馈环的控制律参数值的良好估计的确定,但该过程替代地可简单地返回在搜索过程中考虑的候选电容器配置是否能够允许将控制律参数值调谐成使得满足负载瞬态响应要求的指示(例如简单的“是/否”指示符)。

[0143] 本实施例的设备与第一实施例的设备在许多方面都相同,并且因此,在这里将不再重复相同组件(以及上面提到的也适用于第二实施例的对第一实施例的修改和改变)的描述。然而,现在将参考图15至图18描述第一实施例与第二实施例之间的差别,具体地说是第二实施例的搜索模块220-2的功能性。在这些附图中,相同组件用相同附图标记标识。

[0144] 第二实施例的设备包括候选配置生成器模块210(其与第一实施例中的相同)和搜索模块220-2,搜索模块220-2的功能组件在图15中图示了。搜索模块220-2包括具有输出电压偏差确定模块222和求解模块224-2(它们在功能性如所示互连)的自然频率估计器226-2以及控制律参数计算器228。虽然输出电压偏差确定模块222和控制律参数计算器228与在第一实施例中的相同,但自然频率估计器226-2和求解模块224-2不同,如将在下面说明的。应该指出,本实施例的设备也可用上面参考图4描述的种类的可编程信号处理硬件实现。

[0145] 在顶层,本实施例的搜索模块220-2与第一实施例类似地调谐候选电容器配置的SMPS的反馈环,如上面参考图5所描述的。然而,本实施例的求解模块224-2在图12中的步骤S340的变形中执行响应于SMPS的负载电流的变化而使用在搜索空间中的多个点中每个点

的SMPS的输出电压 V_{out} 的确定偏差和SMPS的输出电压 V_r 的规定偏差来求解第二目标函数 $G2$ 的以获得输出电压的确定偏差超过输出电压的规定偏差多少的测量的附加过程。自然频率估计器226-2然后不仅基于目标函数 G 的求解值而且基于第二目标函数 $G2$ 的求解值来估计(第一)目标函数 G 的最小值的位置。

[0146] SMPS的输出电压的规定偏差可以是在SMPS反馈控制环操作期间不应该被超过的时变输出电压偏差,例如 $\pm V_{max}$ 伏特,其中 V_{max} 表示最大期望电压偏差的大小。备选地,规定输出电压偏差在电压范围例如 $[-V_{max1}, V_{max2}]$ 方面进行规定,其中 V_{max1} 和 V_{max2} 是正实数。然而,与本实施例中一样,可能优选的是,输出电压的规定偏差遵循随时间的规定变化。例如,规定输出电压偏差可在负最大电压偏差、第一恢复时间、负恢复电平、正最大电压偏差、第二恢复时间和正恢复电平方面规定,如在图16A中所图示的。如图16A中所示的,规定输出电压偏差遵循随时间的阶梯状变化。一般而言,负最大电压偏差和负恢复电平不需要与正最大电压偏差和正恢复电平在大小上相同,并且第一和第二恢复时间可以不同。然而,在图16A的示例中,正和负最大电压偏差以及正和负恢复电平在幅度上相等,并且第一和第二恢复时间相同。

[0147] 当然,将认识到,在图16A中示出的规定输出电压偏差的时间变化仅是一个示例,并且规定输出电压偏差可采取许多其它不同形式中的一个,其可由用户按照它们的要求规定。一般而言,规定的时间相关输出电压偏差由任何适合的要求函数 $v_r(t)$ 规定。

[0148] 现在将参考图16B至16F描述本示例中的第二目标函数 $G2$ 的求解。图16B示出了模拟输出电压偏差 $V_{out}(t)$ (实线)和匹配用户要求的规定输出电压偏差 $V_r(t)$ (虚线)。求解开始于从在图16B中示出的每个迹线中移除DC电平,并且取结果信号的模。然后,从DC电平调整的电压 $V_{out}(t)$ 的模中减去DC电平调整的要求函数 $v_r(t)$ 的模,导致在图16D中示出的结果。接下来,仅保持图16D中的迹线的正部分,导致如图16E中所示的迹线。最后,在图16E中示出的迹线被积分,如图16F中的阴影区域所图示的。在此示例中,第二目标函数 $G2$ 从而被求解以给出 $5.18 \cdot 10^{-4}V_s$ 的值。

[0149] 根据上文将认识到,此示例的第二目标函数可被表述如下:

$$[0150] \quad G2 = \int_0^{T_{Dyna}} dt \begin{cases} |V_{out}(t) - V_{DC}| - |V_r(t) - V_{DC}| & , \quad |V_{out}(t) - V_{DC}| - |V_r(t) - V_{DC}| > 0 \\ 0 & , \quad |V_{out}(t) - V_{DC}| - |V_r(t) - V_{DC}| \leq 0 \end{cases}$$

[0151] 通过求解上面描述的种类型的第二目标函数,自然频率估计器226-2能够估计零点的自然频率,同时考虑自然频率的候选值(它们在目标函数最小值估计期间被考虑)是否满足由用户设置的要求,即,候选值是否导致不超过规定输出电压偏差的输出电压偏差。用这种方式,导致令人满意电压瞬态的候选自然频率可优先于未导致令人满意电压瞬态的候选自然频率被选择,由此避免需要用户使用结果电容器配置检查在具有输出滤波器的SMPS手边(at hand of)的应用的适用性。

[0152] 现在将参考图17描述过程,通过所述过程自然频率估计器226-2确定本实施例中反馈环的传送函数中的两个零点中每个零点的自然频率估计。

[0153] 如可从图17中认识到的,本实施例的自然频率估计过程采用与图12中的过程相同的一些过程,并且共同过程(它们用相同的附图标记进行标记)的细节在此将不再重复。图17的过程与图12中的过程不同之处在于步骤S340-2和S150-2,如现在将说明的。

[0154] 在步骤S340-2,求解模块224-2不仅使用在三角形搜索区域内的多个点中的每个

点的 V_{out} 的确定偏差求解上面描述的其中一个种类第一目标函数 G (与第一实施例中一样) 而且使用在搜索空间中的多个点中的每个点的SMPS输出电压的确定偏差 $V_{out}(t)$ 和SMPS输出电压的规定偏差 $V_r(t)$ 求解第二目标函数 G_2 。在步骤S350-2, 自然频率估计器226-2基于第一目标函数 G 的求解值和第二目标函数 G_2 的求解值来估计第一目标函数 G 的最小值的位置。

[0155] 与在第一实施例的情况中一样, 尽管图17中的步骤S330和S340-2可对定义要在目标函数最小值的估计中考虑的零点的自然频率的所有候选值的搜索区域 (其例如可布置成网格) 中的一组点顺序执行步骤S330和S340-2, 但优选对迭代搜索过程期间的一个时间点顺序执行步骤S330和S340, 其中在搜索过程的每个迭代中生成提供目标函数最小值的更好估计同时满足用户要求的新候选点。

[0156] 现在将参考图18A和18B描述本发明人已经设计出并且提供了步骤S330、S340-2和S350-2的特别有效实现的此类搜索过程的示例。

[0157] 首先参考图18A, 在步骤S505, 自然频率估计器226-2计算三角形搜索区域的每个顶点的第二目标函数 G_2 的关联值和 V_{out} 的偏差。

[0158] 在步骤S510, 自然频率估计器226-2用得出 G 的较小值的搜索区域内的顶点替换得出 G 的最大值的三角形搜索区域的顶点以生成由搜索区域内的顶点和三角形搜索区域的剩余顶点定义的搜索区域内的三角形。

[0159] 在步骤S512, 自然频率估计器226-2将程序循环计数器 j_2 的值设置成初始值1。

[0160] 在步骤S515, 自然频率估计器226-2计算新顶点的 V_{out} 的偏差, 并且对于新顶点求解 G_2 。

[0161] 在步骤S520, 自然频率估计器226-2确定在步骤S515中 G_2 是否已经在新顶点被求解为0, 并且是否已经在步骤S510 (或者如下详述的步骤S525) 中生成的三角形的剩余顶点被求解为0。如果在步骤S515中 G_2 已经在新顶点被求解为0, 并且已经在步骤S510 (或步骤S525, 可视情况而定) 中生成的三角形的剩余顶点被求解为0, 则过程前往步骤S522, 其中自然频率估计器将程序循环计数器 j_2 的值设置成值0, 并且过程继续到图18B中的A。另一方面, 如果已经确定 G_2 在新顶点和在步骤S510中生成的三角形的剩余顶点不是0, 则过程前往步骤S525, 其中自然频率估计器226-2用得出 G_2 较小值的搜索区域内的新顶点替换得出 G_2 最大值的三角形的顶点, 以生成搜索区域内的新三角形。

[0162] 在步骤S527, 自然频率估计器226-2通过使它增加1来更新循环计数器 j_2 的值, 并且确定循环计数器 j_2 的更新值是否等于阈值 J_2 。如果循环计数器 j_2 达到了 J_2 的阈值, 则该过程前往步骤S528, 其中自然频率估计器226-2生成尚没有可能使用预先定义数量的迭代 J_2 找到得出满足用户要求的输出电压偏差的自然频率的指示。这个指示可如在本实施例中一样以错误消息的形式提供给用户。另一方面, 如果循环计数器 j_2 尚未达到 J_2 , 则该过程循环回到步骤S515, 如图18A中所示出的。

[0163] 用这种方式, 可重复步骤S515和S525以生成搜索区域内的一系列三角形, 直到 G_2 在搜索区域中生成的最终三角形的所有三个顶点都被求解为0, 最终三角形定义可能含有符合用户要求的目标函数 G 的最小值的受限搜索区域。

[0164] 现在将参考图18B描述由受限搜索区域中的自然频率估计器226-2执行的搜索过程。

[0165] 在步骤S530,自然频率估计器226-2计算受限三角形搜索区域的每个顶点的目标函数G的关联值和 V_{out} 的偏差。

[0166] 在步骤S535,自然频率估计器226-2用得出G的较小值的受限搜索区域内的顶点替换得出G的最大值的受限三角形搜索区域的顶点以生成由受限搜索区域的剩余顶点和新顶点定义的受限搜索区域内的三角形。

[0167] 在步骤S540,自然频率估计器226-2将程序循环计数器j的值设置成初始值1。

[0168] 在步骤S545,自然频率估计器226-2计算新顶点的 V_{out} 的偏差,并且求解模块224-2求解目标函数G,并且优选地还对于新顶点求解第二目标函数G2。

[0169] 在步骤S545已经求解了G2的情况下,自然频率估计器226-2在步骤S550确定G2是否大于0。如果 $G2 > 0$,则过程循环回到图18A中的步骤S525,否则过程继续到图18B中的步骤S555。用这种方式,自然频率估计器226-2可执行检查以确保在受限搜索区域中的搜索未导致不符合用户要求的解决方案。

[0170] 在步骤S555,自然频率估计器226-2用得出G的较小值的受限搜索区域内的新顶点替换得出G的最大值的三角形的顶点以生成受限搜索区域内的新三角形。

[0171] 在步骤S560,自然频率估计器226通过使循环计数器j增加1来更新其值,并且确定循环计数器j的更新值是否等于阈值J。从而,用于停止步骤S545、S550和S555的重复执行的停止判据是,已经执行了确定数量J的循环迭代。在此搜索方法的一些实际实现中,发明人已经找到J=15到25足够了。然而,应该指出,备选地可使用(可与搜索的收敛程度相关)其它停止判据。例如,当三角形变得比预定大小小时,算法可被修改成冲破由步骤S545到S555定义的循环,例如使得由其顶点的坐标定义的自然频率相差小于预定量,例如10Hz到20Hz。

[0172] 当停止判据已经满足时(在此示例中当循环计数器j达到J的阈值时),过程前往步骤S565,其中自然频率估计器226-2基于目标函数G的求解值估计受限搜索区域内G的最小值的位置以获得零点的自然频率的估计。例如,自然频率估计器226-2可选择在最终执行步骤S555中生成的三角形中或上的点,例如三角形的其中一个顶点,优选是给出G的最低值的顶点。自然频率估计器226-2备选地可选择在倒数第二(或甚至更早)执行步骤S555中生成的三角形中或上的点,不过不太优选。在这些情况的每个情况下,选择的点的坐标都提供零点的自然频率的估计。

[0173] 通过上面描述的过程,搜索模块220-2对电容器的有序候选配置执行二分搜索以从在二分搜索期间确定的电容器的候选配置之间确定与成本函数的最低值关联的电容器配置以允许满足SMPS的负载瞬态响应要求。当考虑电容器的每个候选配置时,搜索模块220-2(更确切地说在本实施例中是自然频率估计器226-2)执行上面参考图18A和18B所描述的过程,以生成候选电容器配置是否允许调谐SMPS控制环的控制参数以便允许满足SMPS的负载瞬态响应要求的指示。在本实施例中,以零点的自然频率的估计形式提供这个指示;换言之,零点的自然频率的估计的生成向搜索模块220-2提供了候选电容器配置允许调谐SMPS控制环的控制参数以便允许满足SMPS的负载瞬态响应要求的指示,而在图18A和18B的过程中生成此类估计的故障可被视为相反的指示。不需要以此形式提供指示,并且替代地可使用另一种类的指示(例如简单的“是”或“否”)。

[0174] 修改和变形

[0175] 可以对上面描述的实施例进行许多修改和变化。

[0176] 例如,上面描述的动力系的建模可由系统标识替换。这可通过在正常信号上叠加扰动并分析输出上发生了什么来进行,例如在由L.Ljung的“System Identification - Theory for the User”(Prentice-Hall, Englewood Cliffs, ISBN 0-13-881640, 1987)中所描述的。这个扰动可以以许多不同的方式注入。一种方式是使用继电器反馈,如在由K.J. Åström和T. Hagglund的“Automatic tuning of PID controllers”(Instrument Society of America, ISBN 1-55617-081-5, 1988)中描述的。备选地,可通过引起极限循环或注入噪声信号来注入扰动,如在Zhao Zhenyu的题为“Design and Practical Implementation of Digital Auto-tuning and Fast-response Controllers for Low-power Switch-mode Power Supplies”(University of Toronto, Canada, 2008)的博士论文中所描述的。

[0177] 更进一步说,可使用与上面描述的那些不同的目标函数。例如,作为另外的备选,如下目标函数可用作第一目标函数G:

$$[0178] \quad \left[\frac{V_{Dev}}{V_{Dev_Req}} \right]^K \left[\frac{T_D}{T_{D_Req}} \right]^L$$

[0179] 其中K和L是整数,其中K≥1并且L≥1。

[0180] 附加地或备选地,候选配置生成器模块210可配置成使用与上面参考图7描述的过程不同的过程选择共享成本函数相同值的其中一个布置。图15中图示了一个此类备选。

[0181] 在此备选中,候选配置生成器模块210布置成在步骤S152-2基于多个不同布置中的每个布置中的电容器的总价格和总物理大小中的一个选择并保留多个不同布置的子集。例如,会占用不同于允许量板空间的一些的布置可能被丢弃。然后,在步骤S154-2,基于子集中的每个布置中的电容器的总价格和总物理大小中的另一个从子集中选择并保留布置。继续该示例,可从在步骤S152-2中尚未丢弃的布置中选择具有最低价格的布置,并且保持以便进一步处理。

[0182] 在图16中图示了图7中过程的另外备选,其基于在实施例中使用的选择过程和上面阐述的备选的过程的组合。在此变形中,候选配置生成器模块210在步骤S152-3基于多个不同布置中的每个布置中的电容器的总价格和总物理大小中的一项选择并保留多个不同布置的子集。在步骤S154-3,候选配置生成器模块210以与在上面实施例中描述的方式类似的方式将子集中每个布置中的不同种类电容器之间的电容器分布与目标分布比较。在步骤S156-3,候选配置生成器模块210选择在不同种类电容器之间与目标分布具有最类似电容器分布的电容器布置,并保持选择的布置进行进一步处理,丢弃其它的。

[0183] 作为图7中过程的又一备选,候选配置生成器模块210可用图17中图示的方式执行选择。这个变形可用在指配给每个种类电容器的成本指示该种类电容器的物理大小和价格的加权和时。在步骤S152-4,候选配置生成器模块210基于指配给多个不同布置中每个布置中的电容器的成本的总数(total)选择并保留多个不同布置的子集。从而,例如,在选择过程的这个阶段可仅保留具有价格和足迹的期望组合的那些布置。然后,在步骤S154-4,候选配置生成器模块210将子集中每个布置中的不同种类电容器之间的电容器分布与目标分布比较。在步骤S156-4,候选配置生成器模块210选择在不同种类电容器之间与目标分布具有最类似电容器分布的电容器布置,并保留它们进行进一步处理,并且丢弃其它布置。

[0184] 在第二实施例中,求解 G_2 和 G 以确定存在允许满足SMPS的负载瞬态响应要求的控制律参数值的电容器配置的最优(或接近最优)控制律参数值。然而,因为在一些情况下可能仅仅确定是否存在所确定的电压偏差满足负载瞬态要求的一组控制律参数就足够了,所以搜索模块备选地配置成仅执行在图18A中图示的过程(从而求解 G_2 但不求解 G),以便找到满足SMPS的负载瞬态响应要求的最低成本电容器配置。 G 的计算在此情况下可能仅对于所确定的电容器配置执行以确定最优(或者接近最优)控制律参数值,进一步改进二分搜索的效率。

[0185] 将认识到,上面描述的过程中的许多步骤的排序都可以改变,并且其中一些步骤可同时执行。例如,在图6中,步骤A110和S120可互换,步骤S120和步骤S130也可以。

[0186] 为了说明和描述目的,已经呈现了本发明实施例的前述描述。它并不意图是穷举的,或将本发明局限于所公开的存在形式。可在不脱离本发明的精神和范围的情况下进行更改、修改和改变。

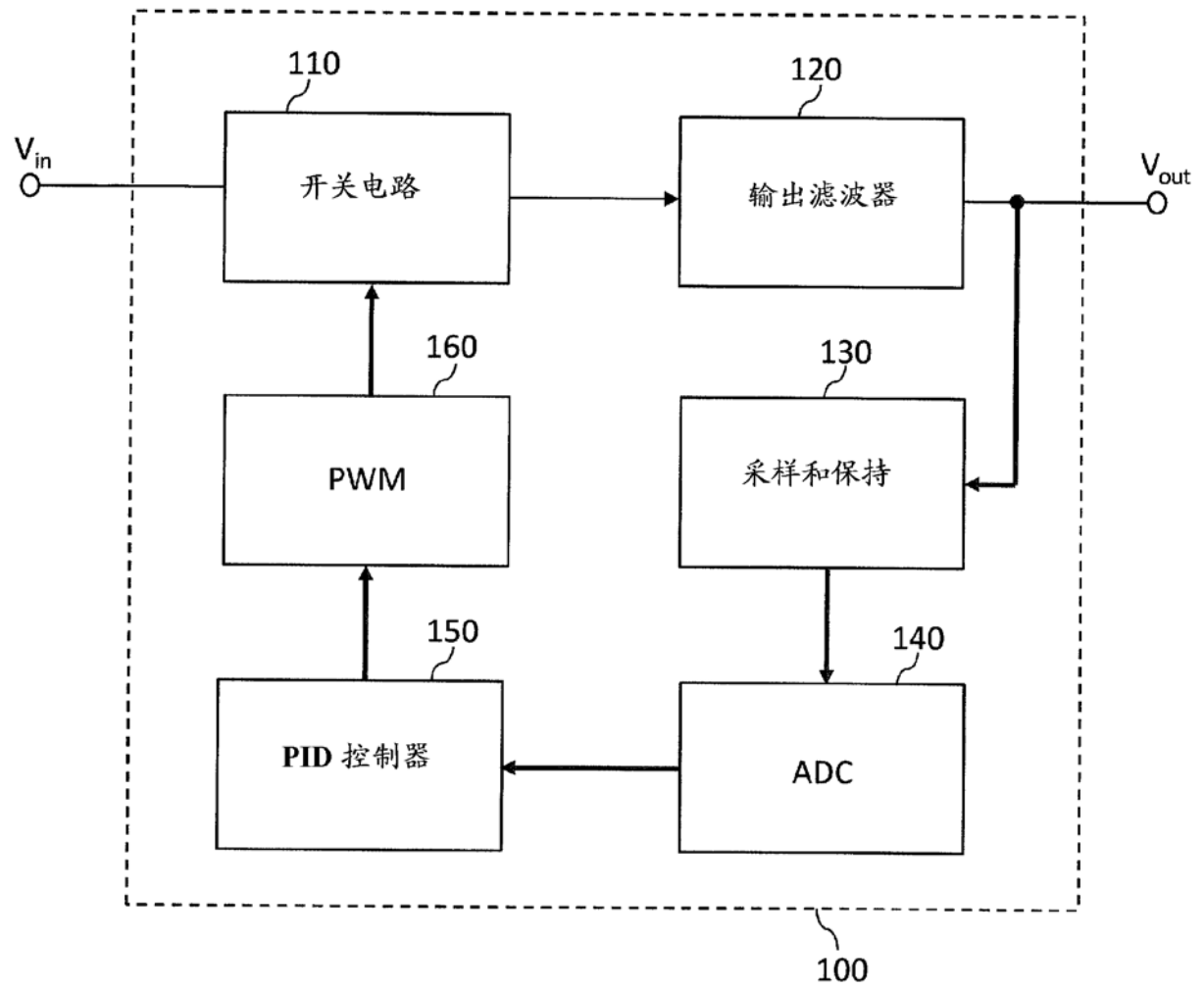


图 1

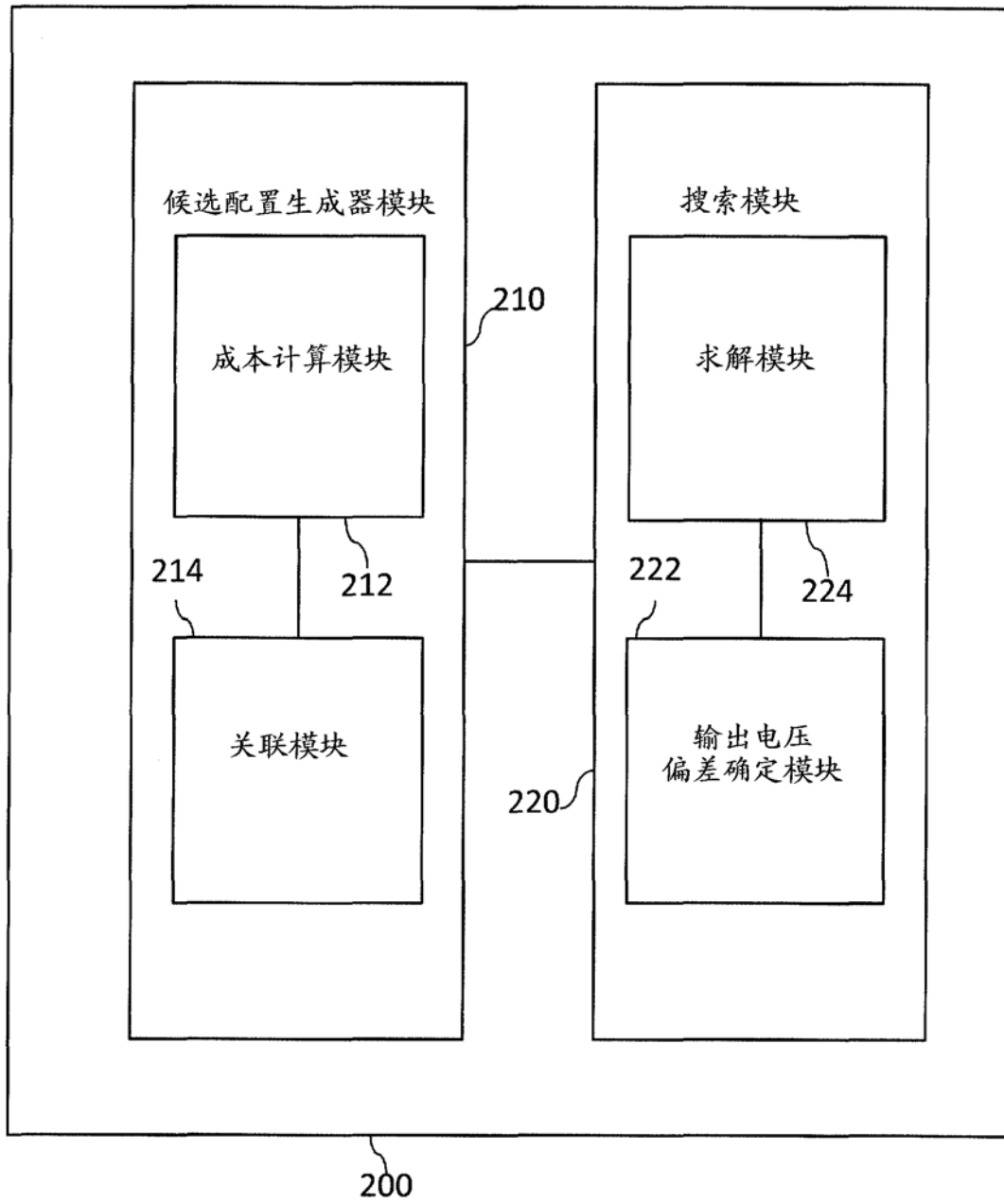


图 2

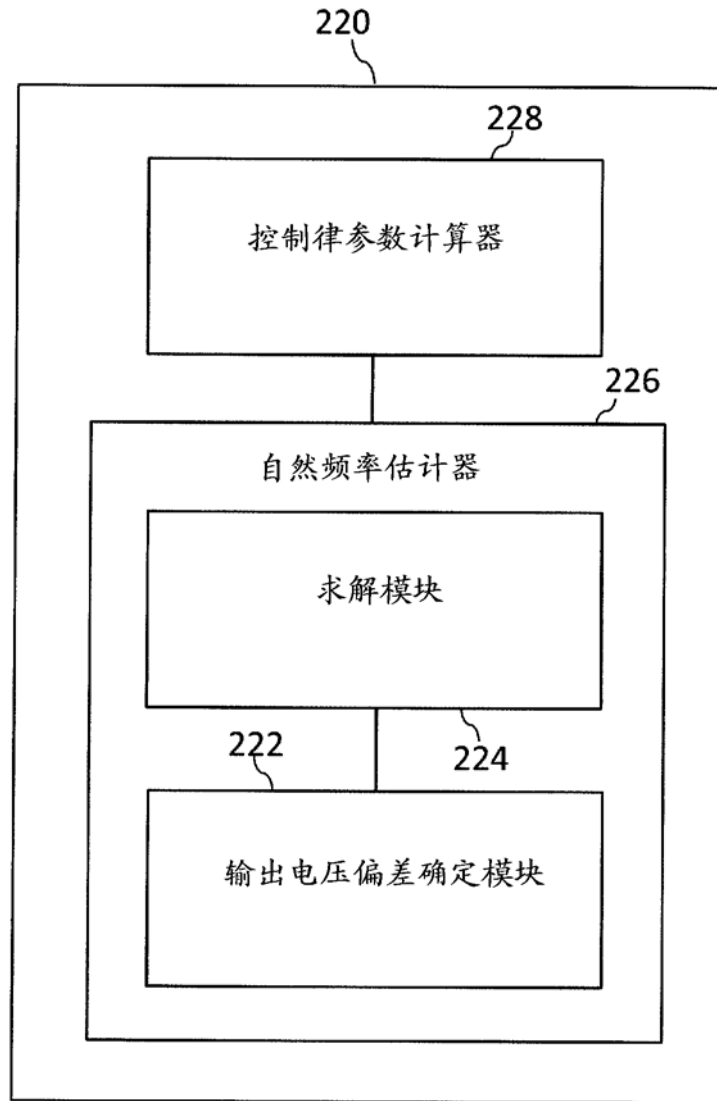


图 3

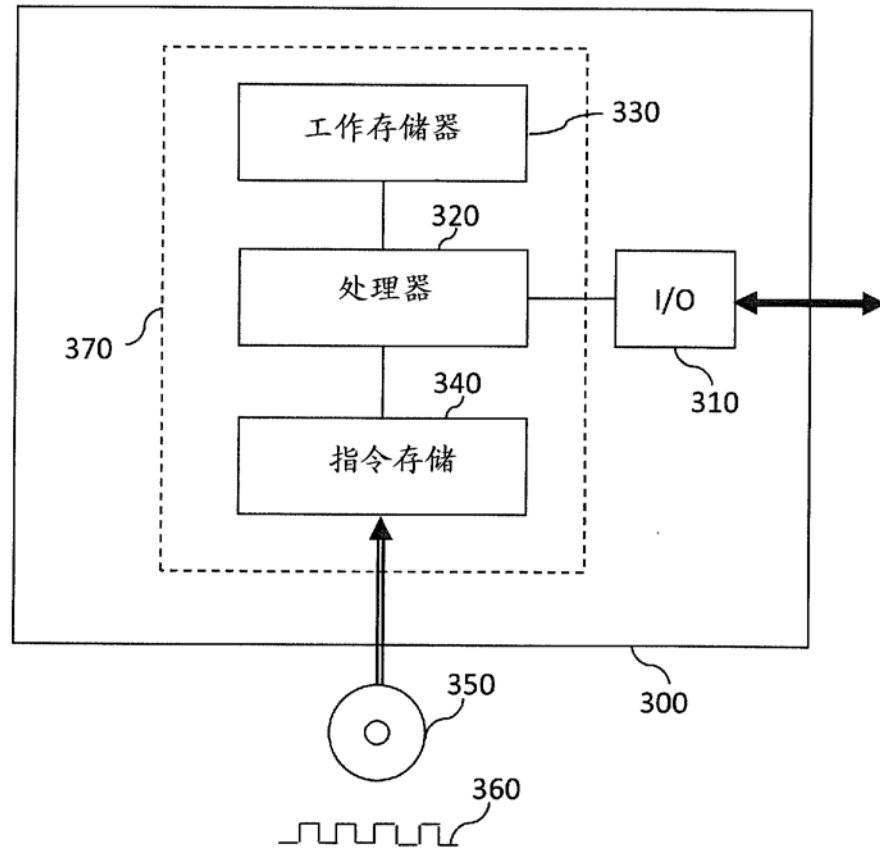


图 4

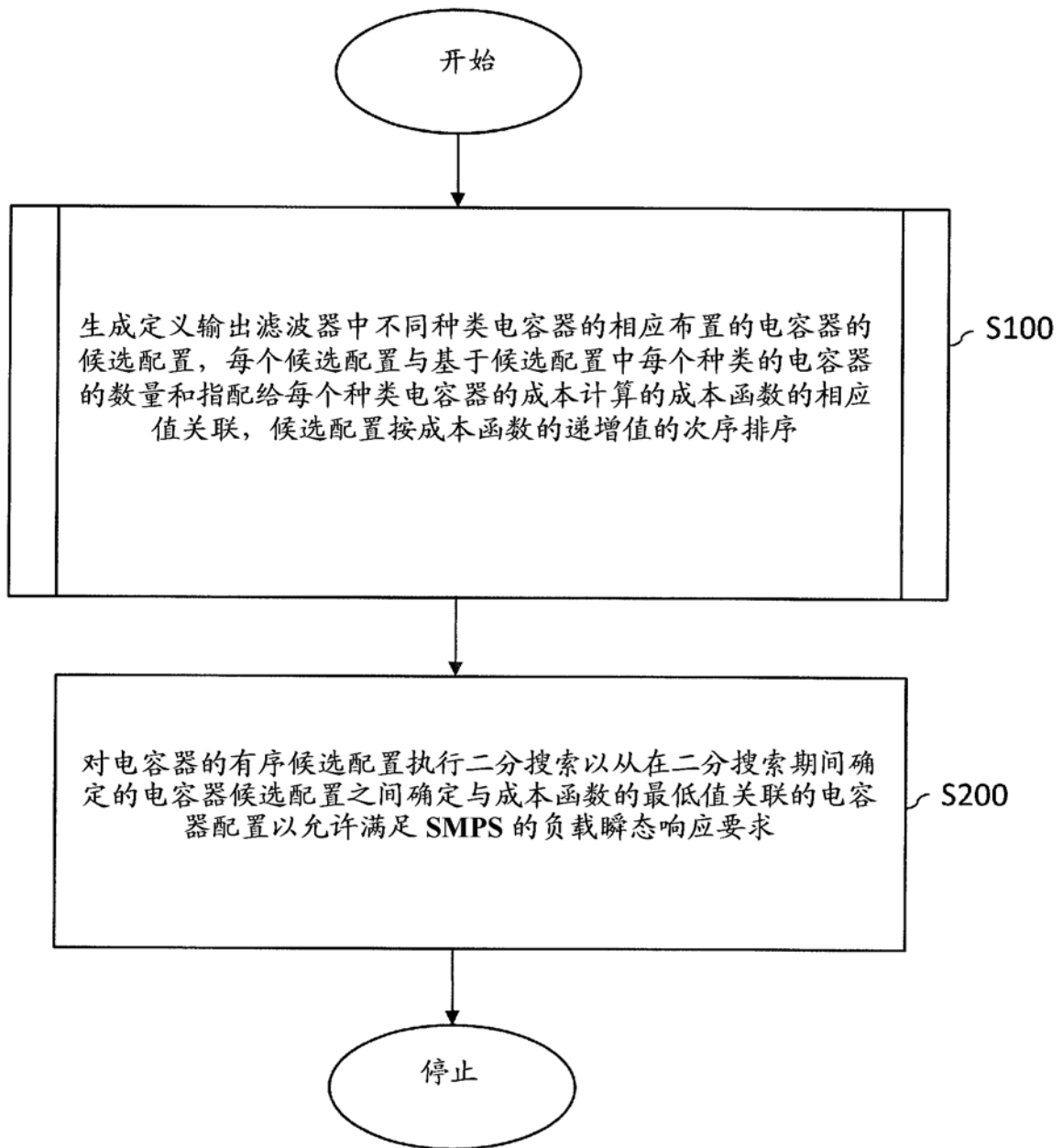


图 5

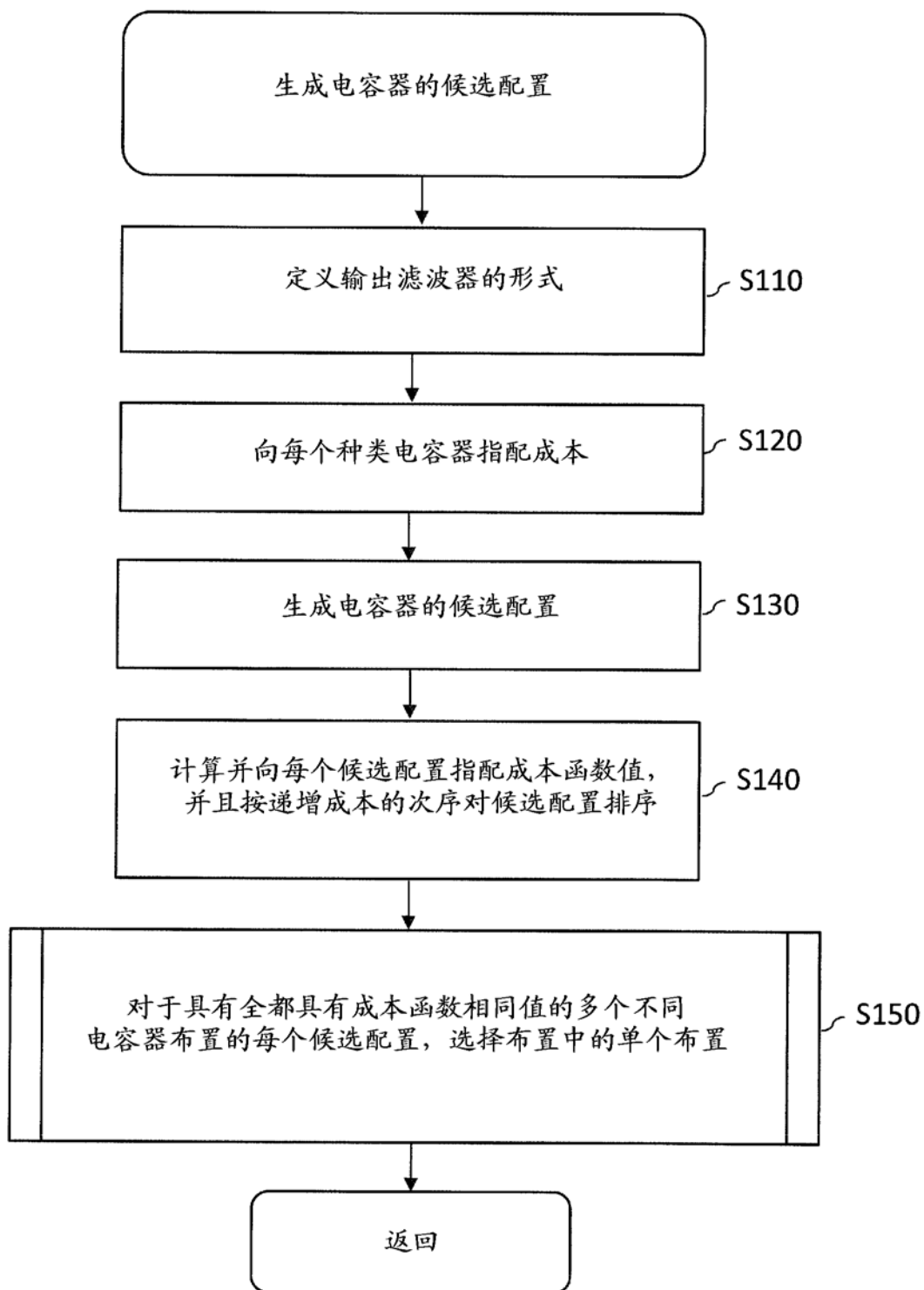


图 6

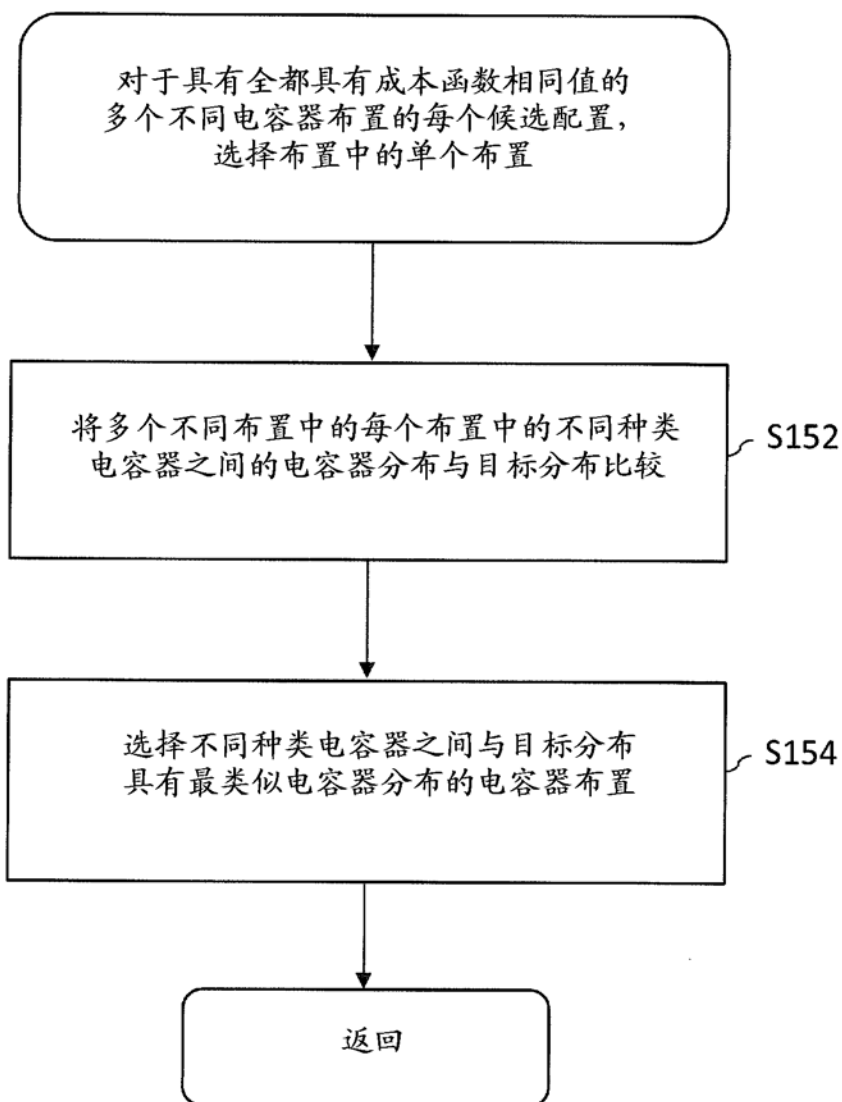


图 7

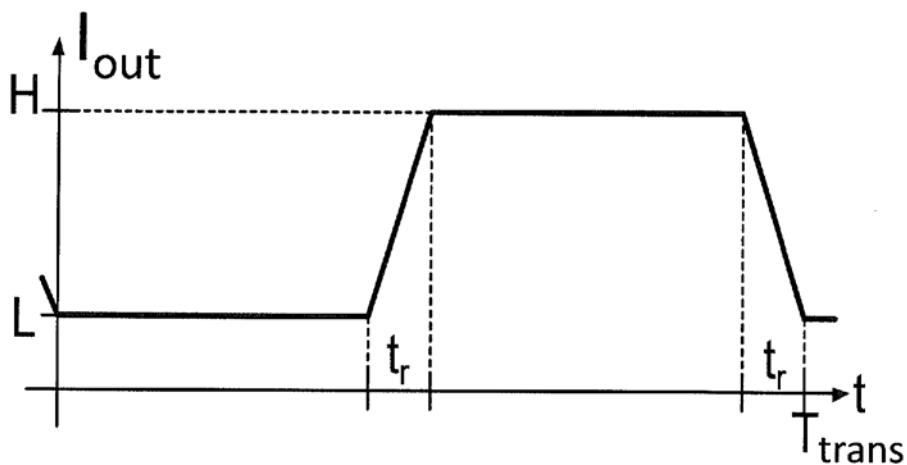


图 8

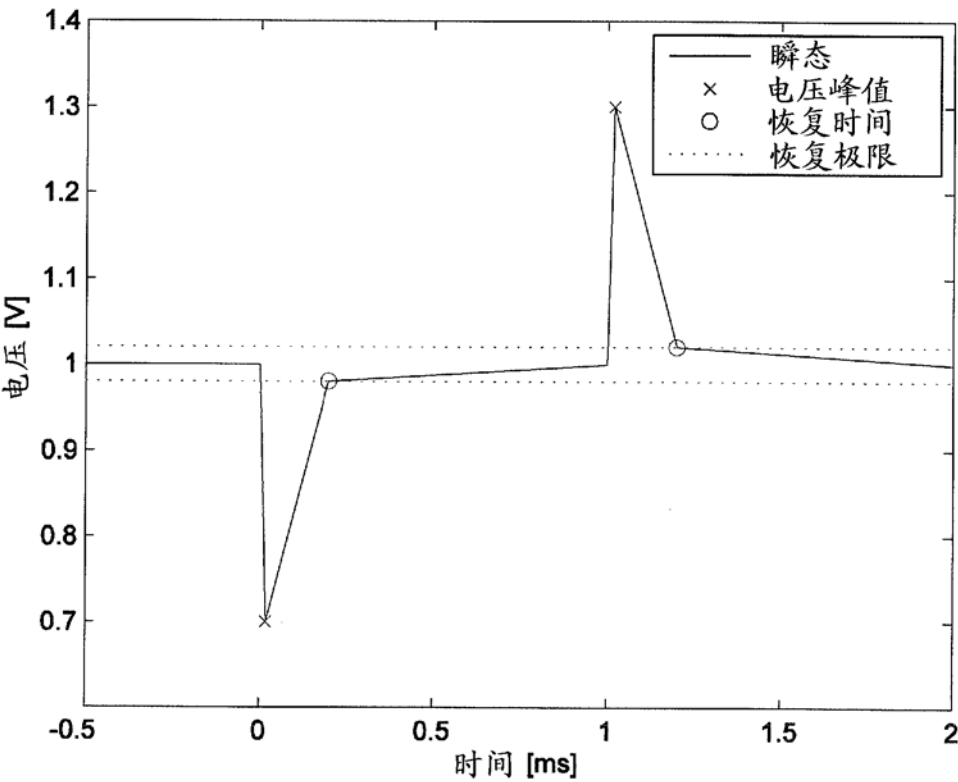


图 9

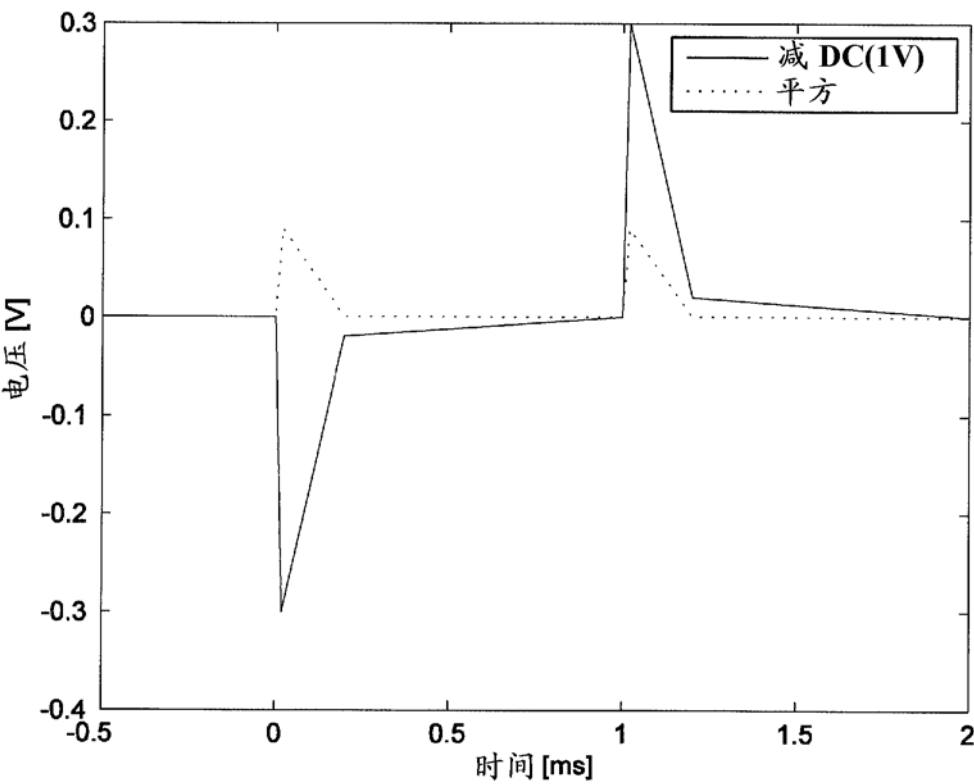


图 10

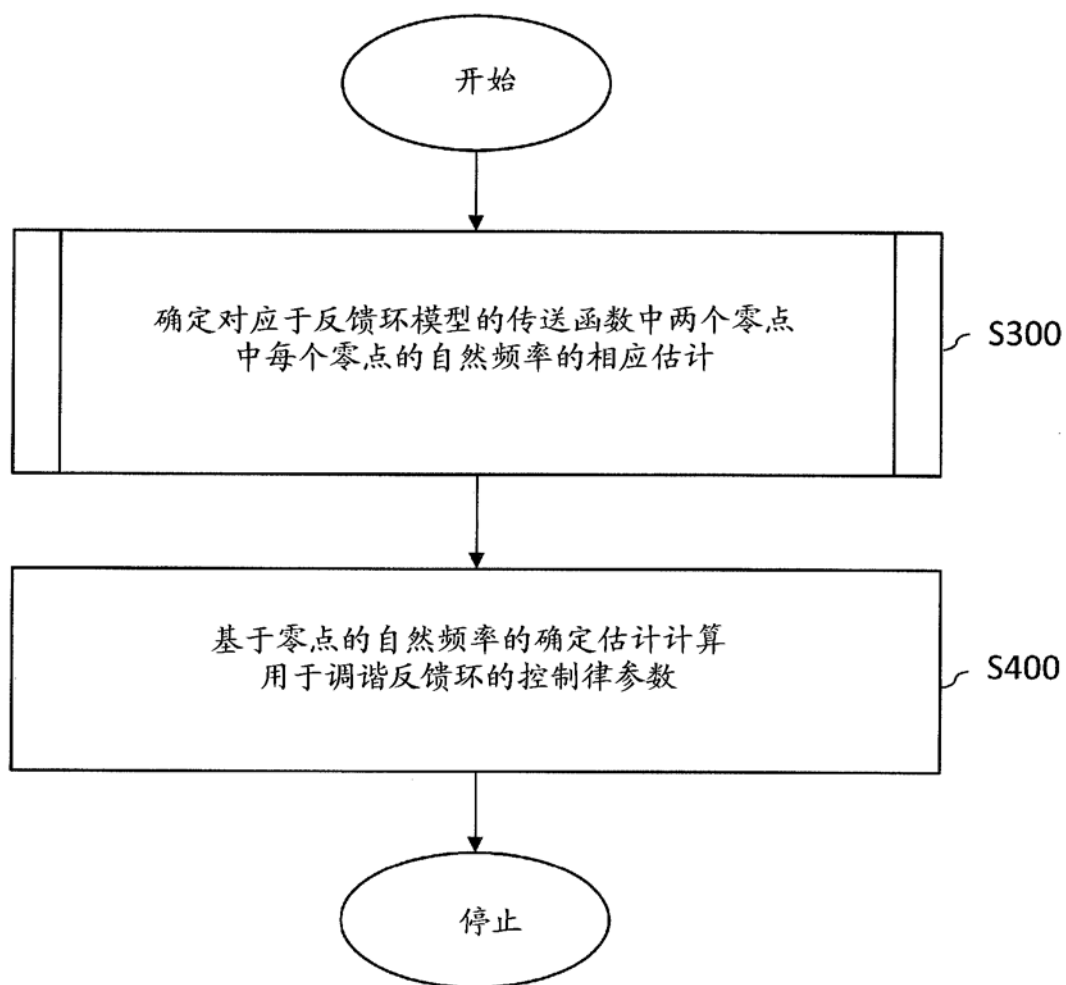


图 11

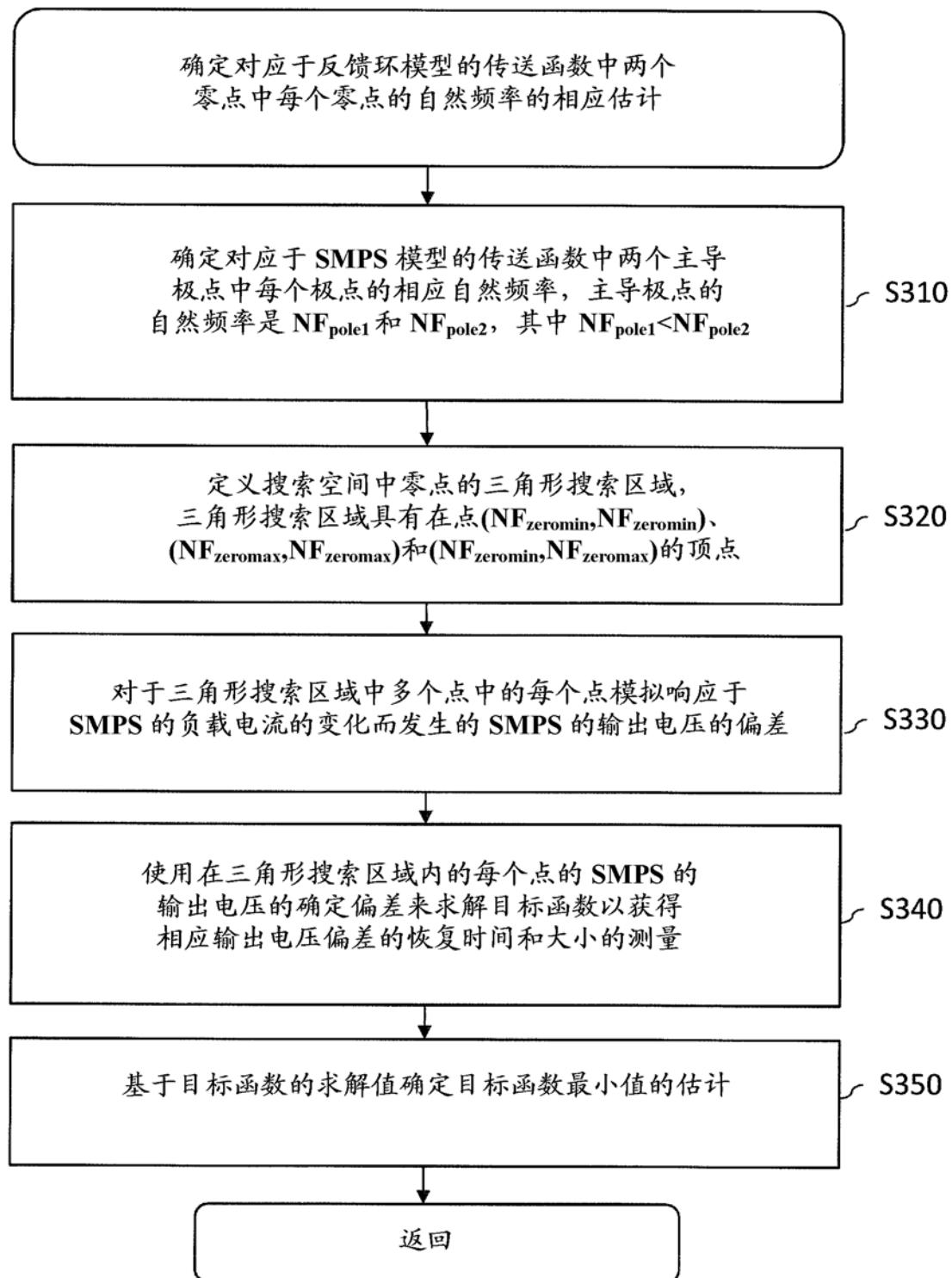


图 12

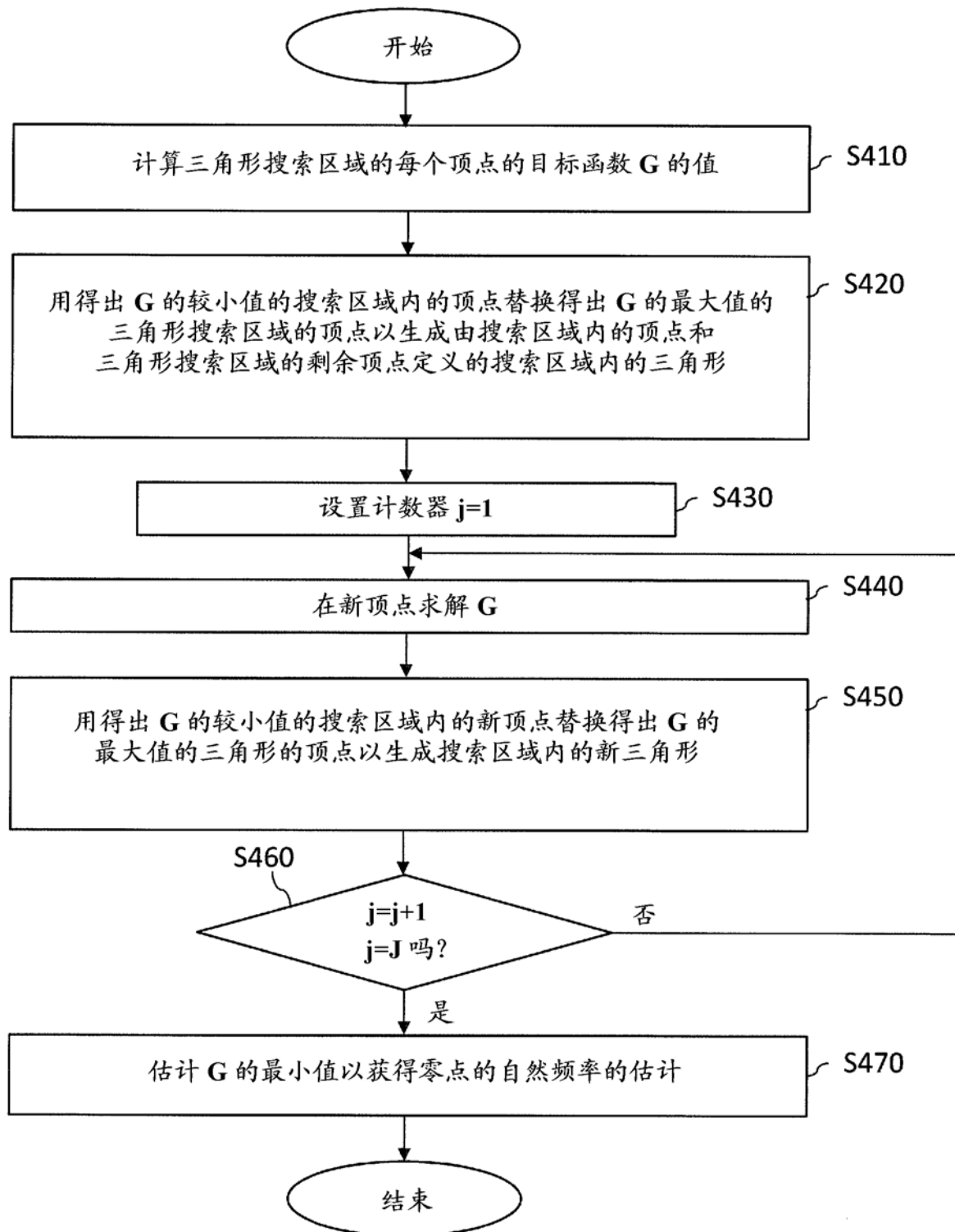


图 13

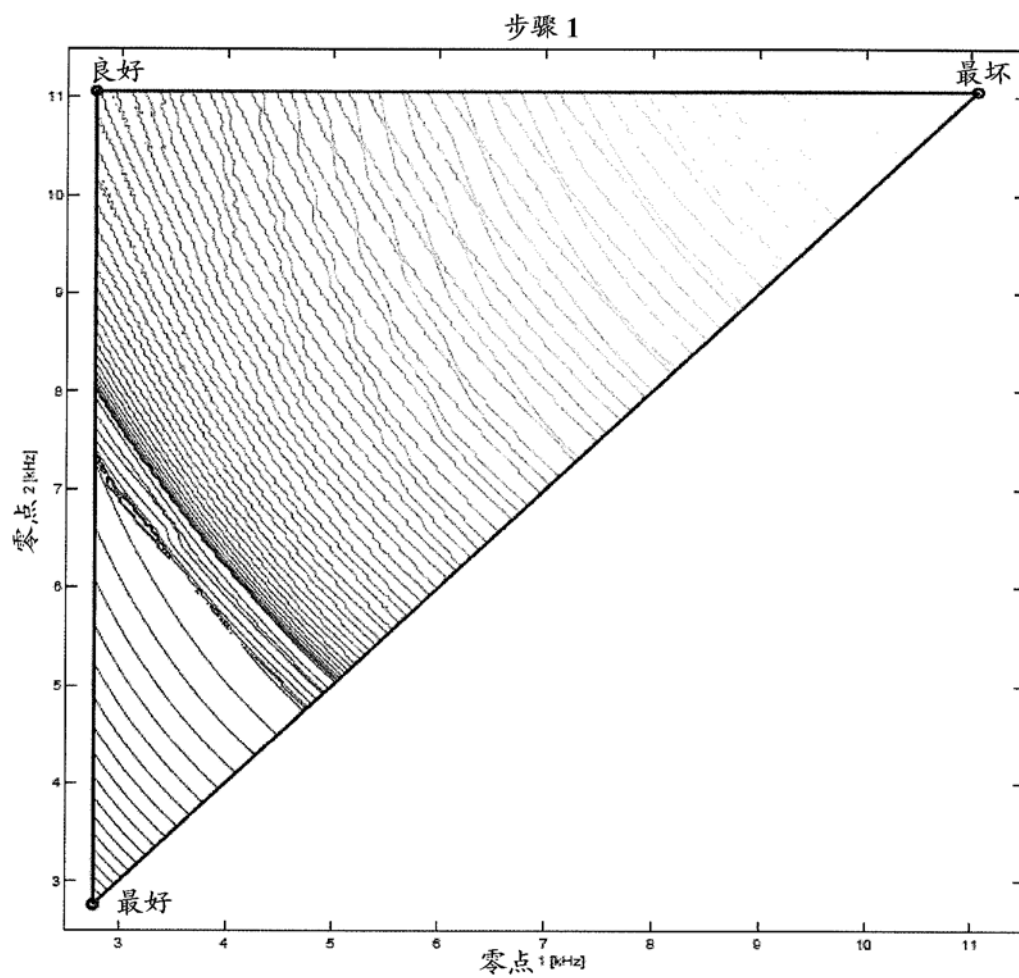


图 14A

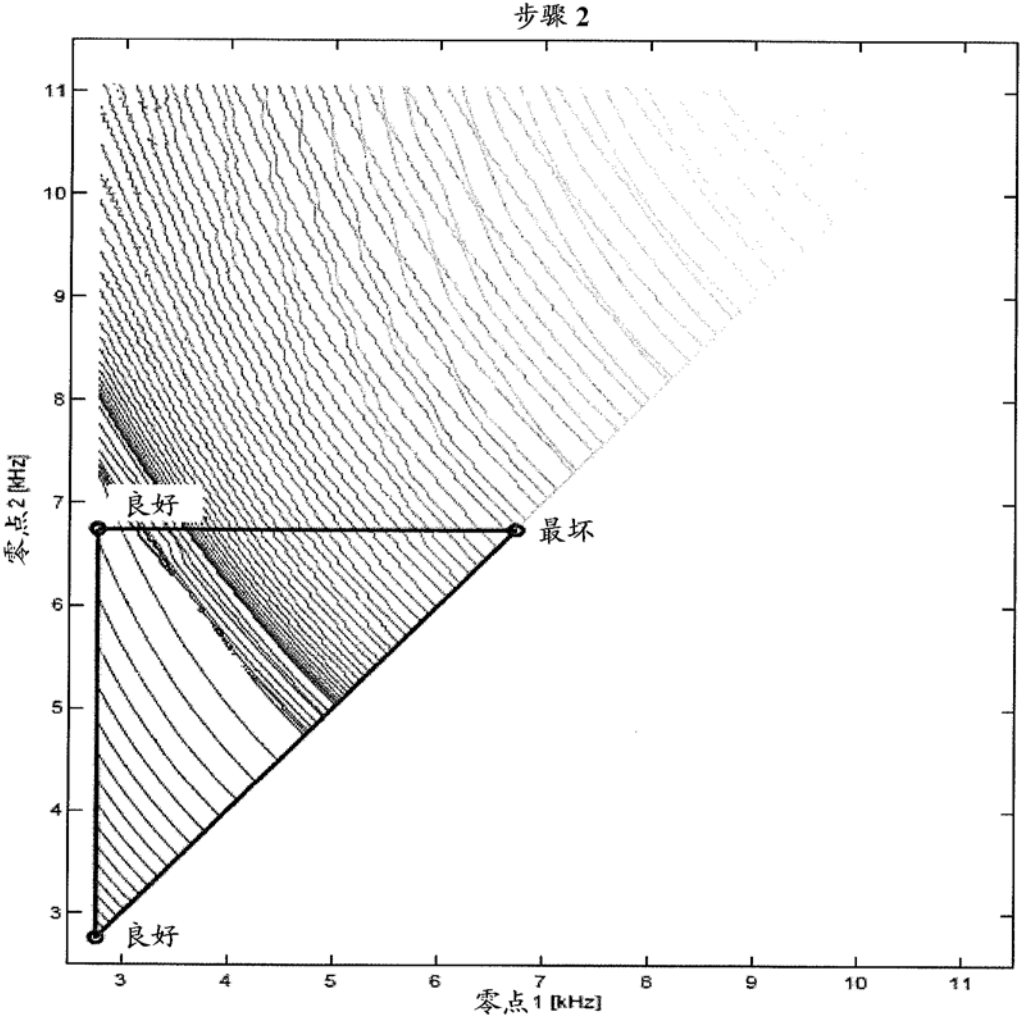


图 14B

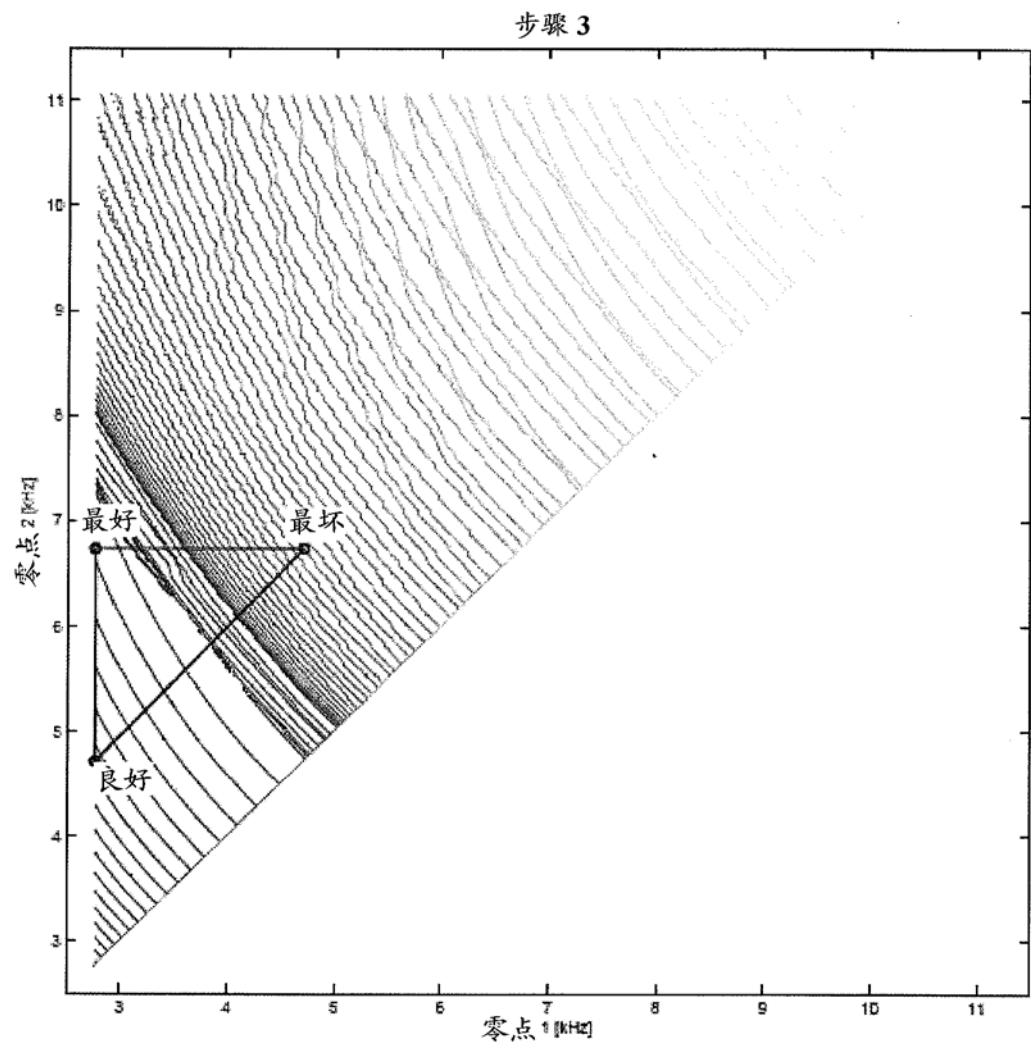


图 14C

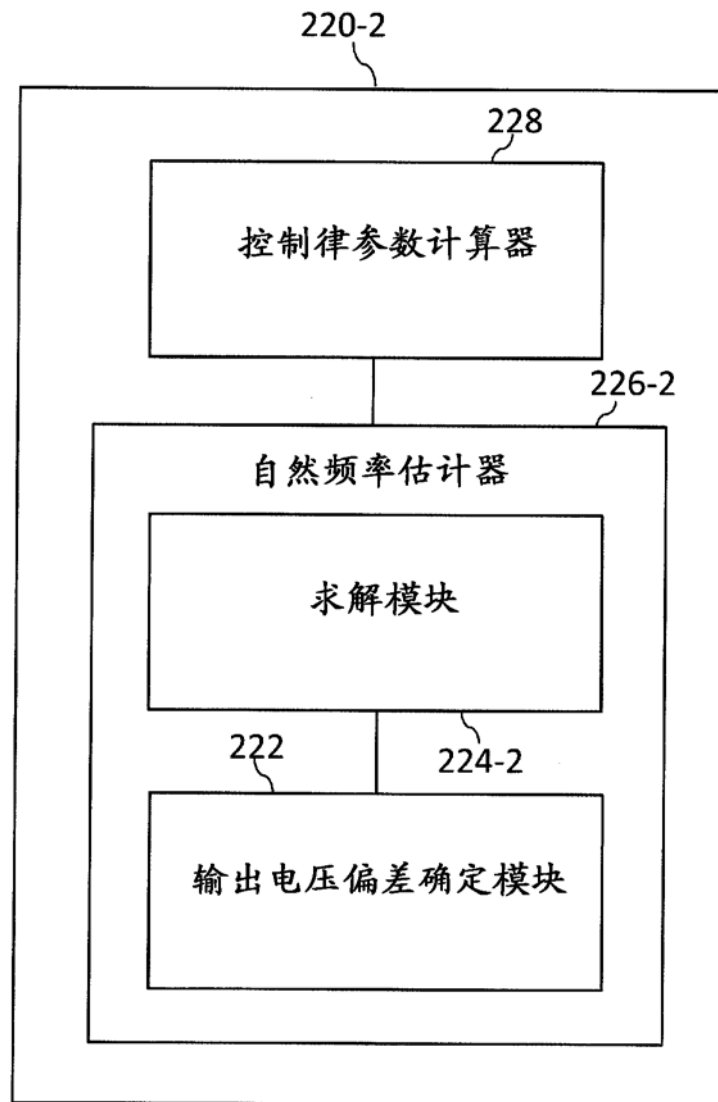


图 15

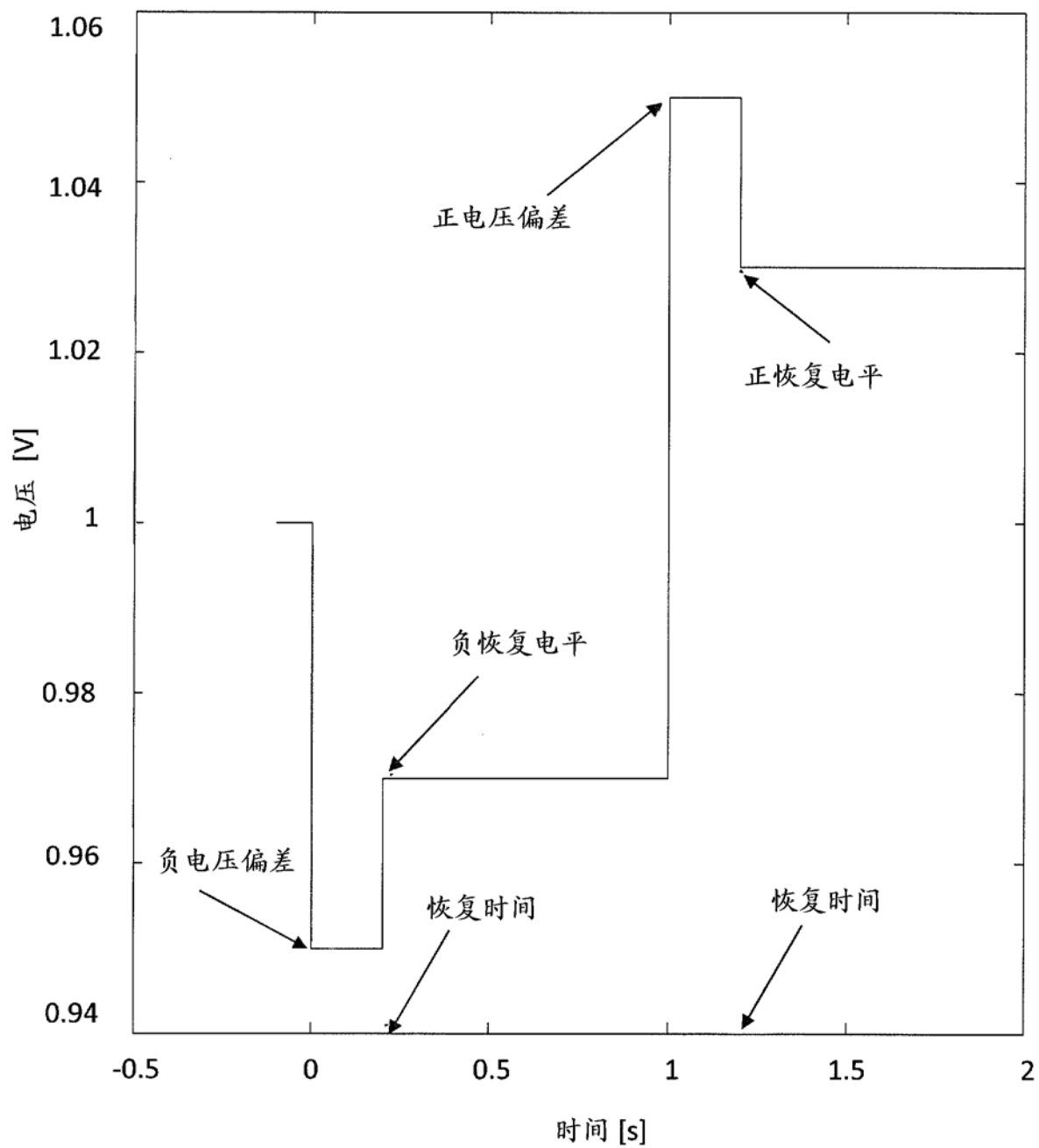


图 16A

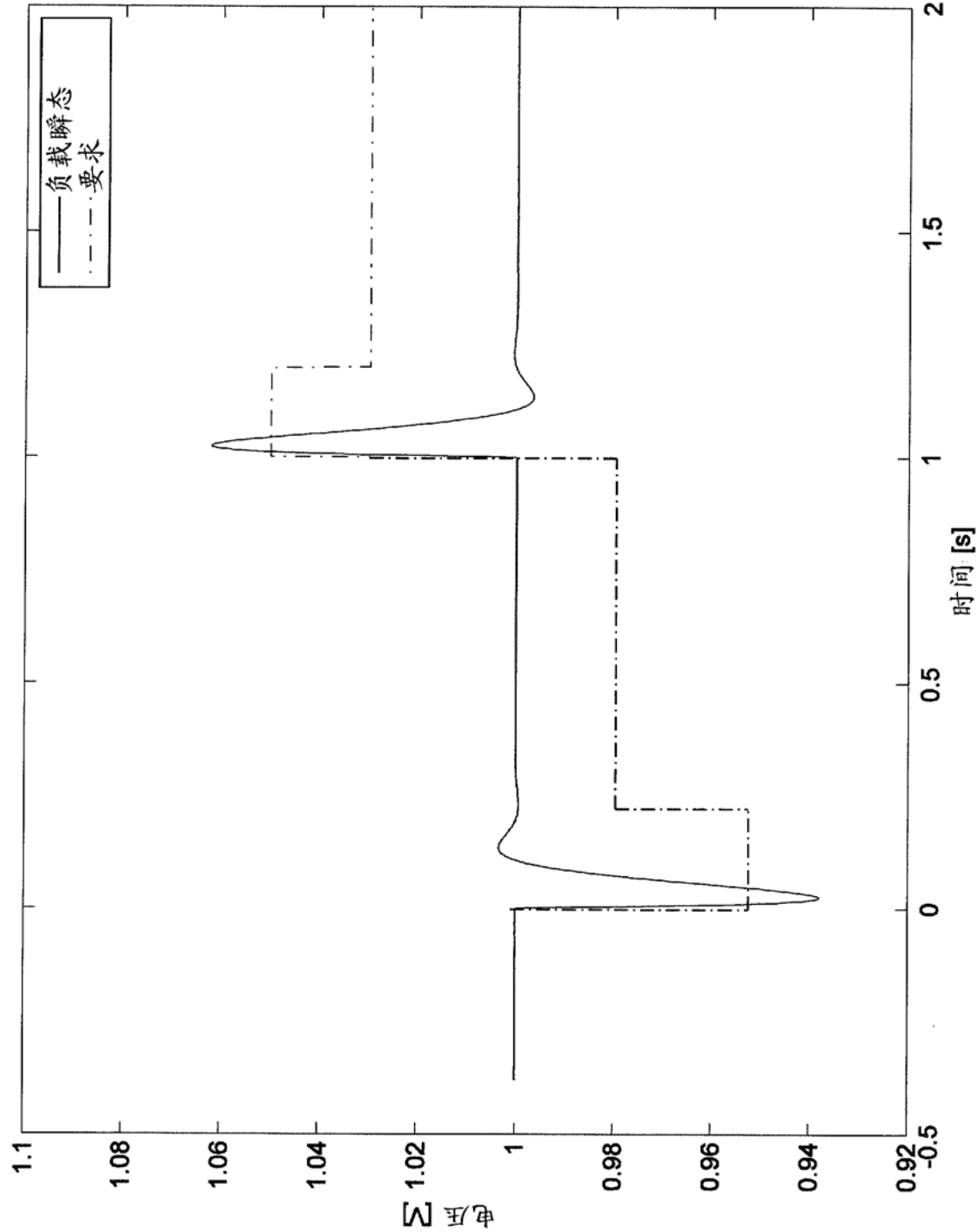


图 16B

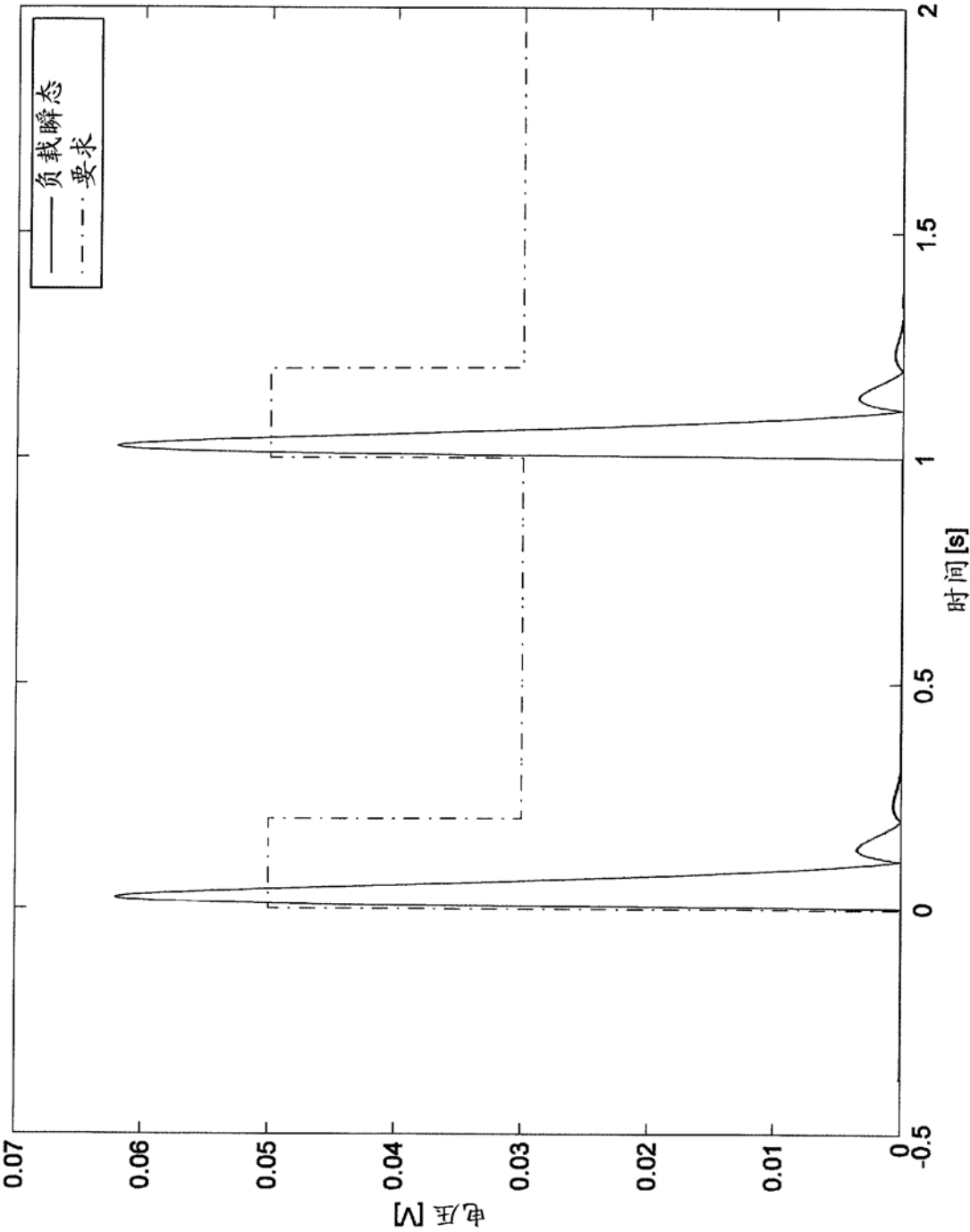


图 16C

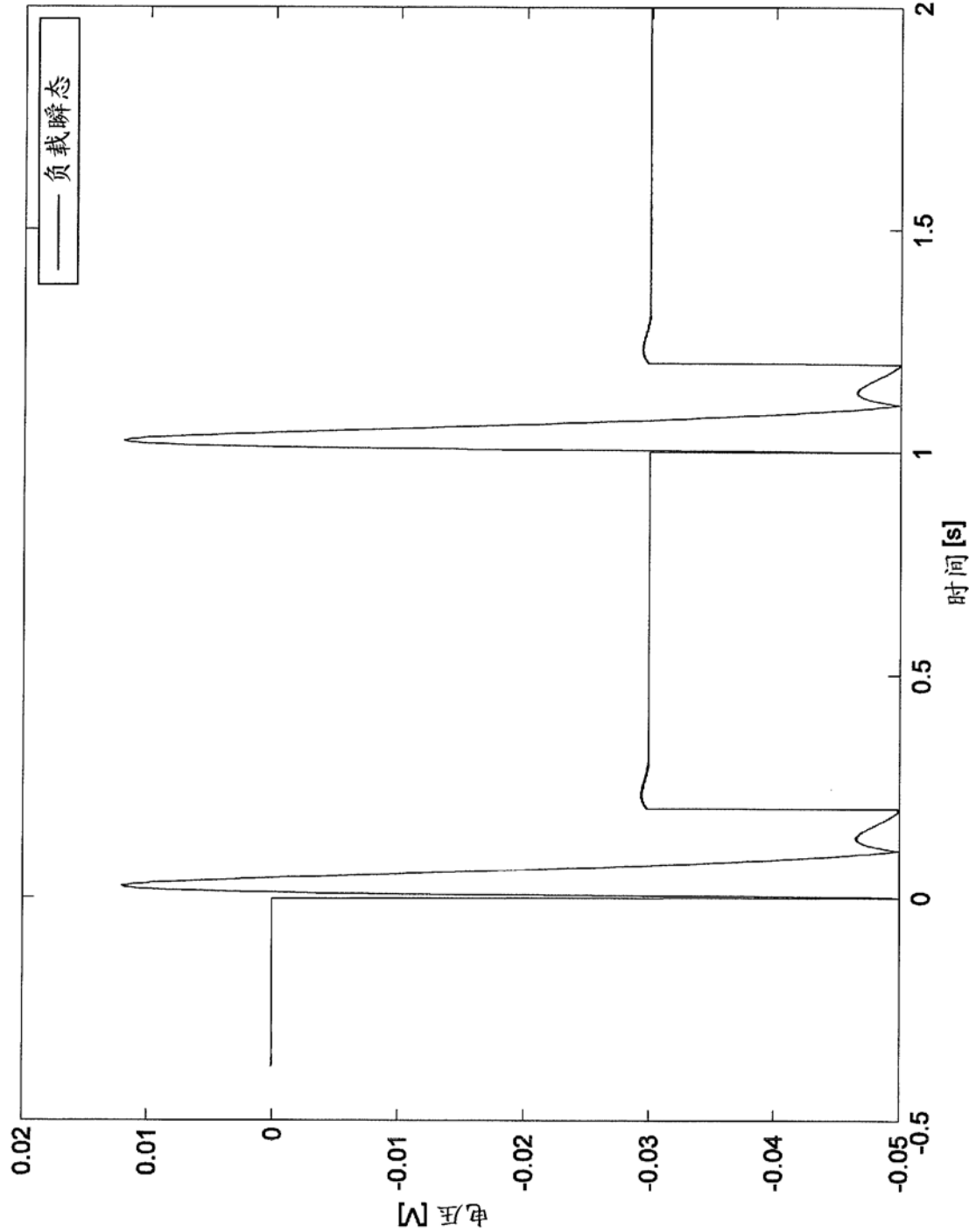


图 16D

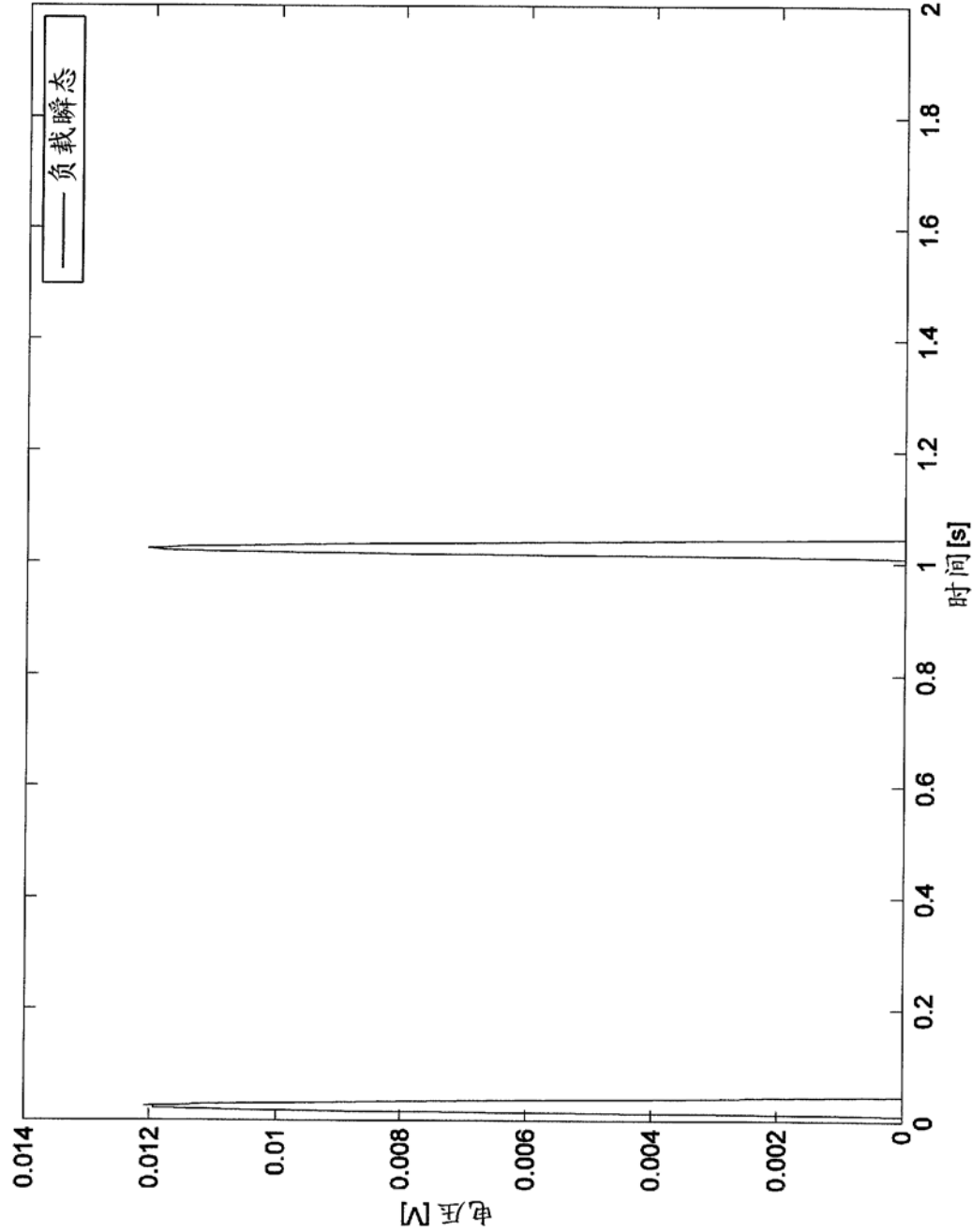


图 16E

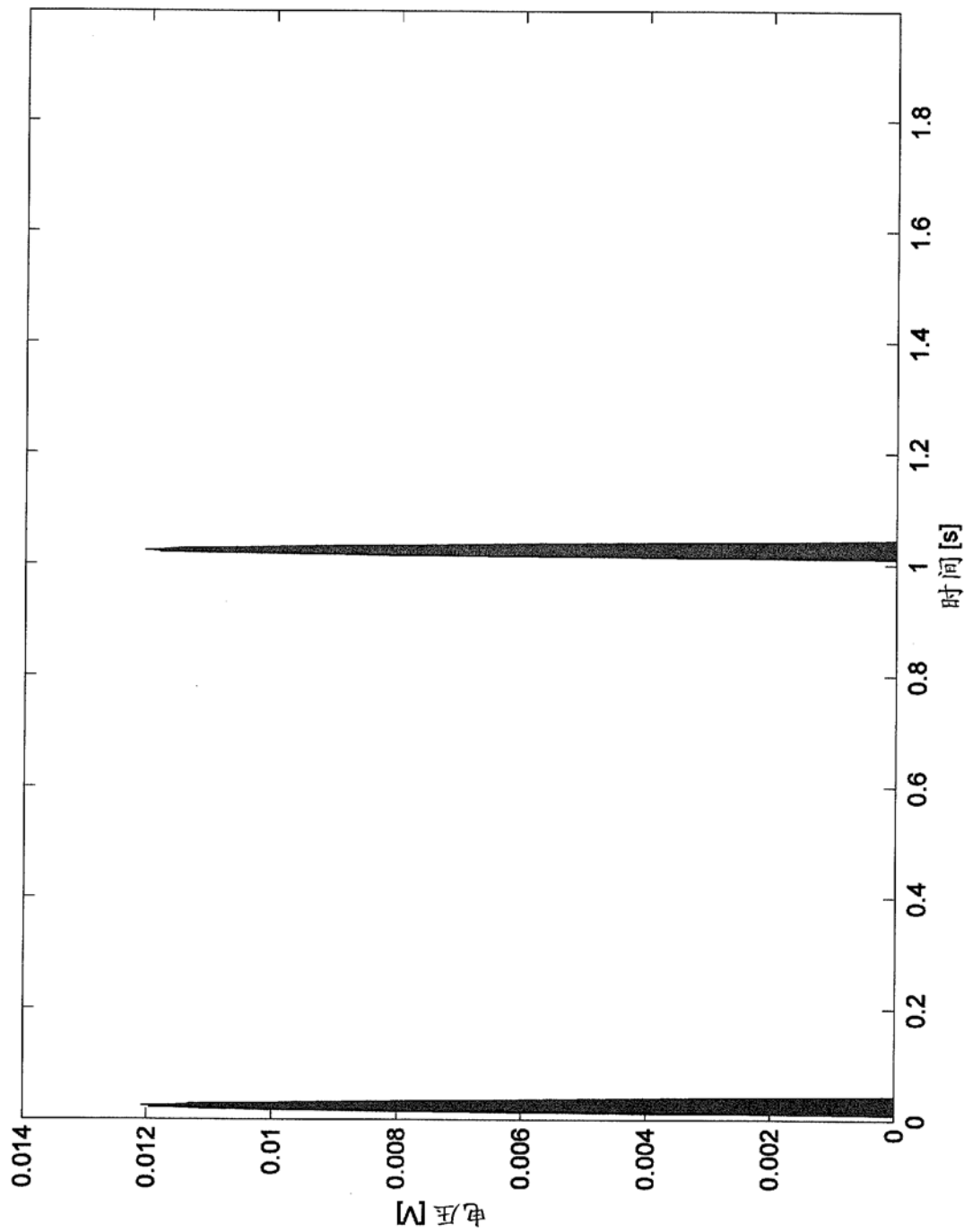


图 16F

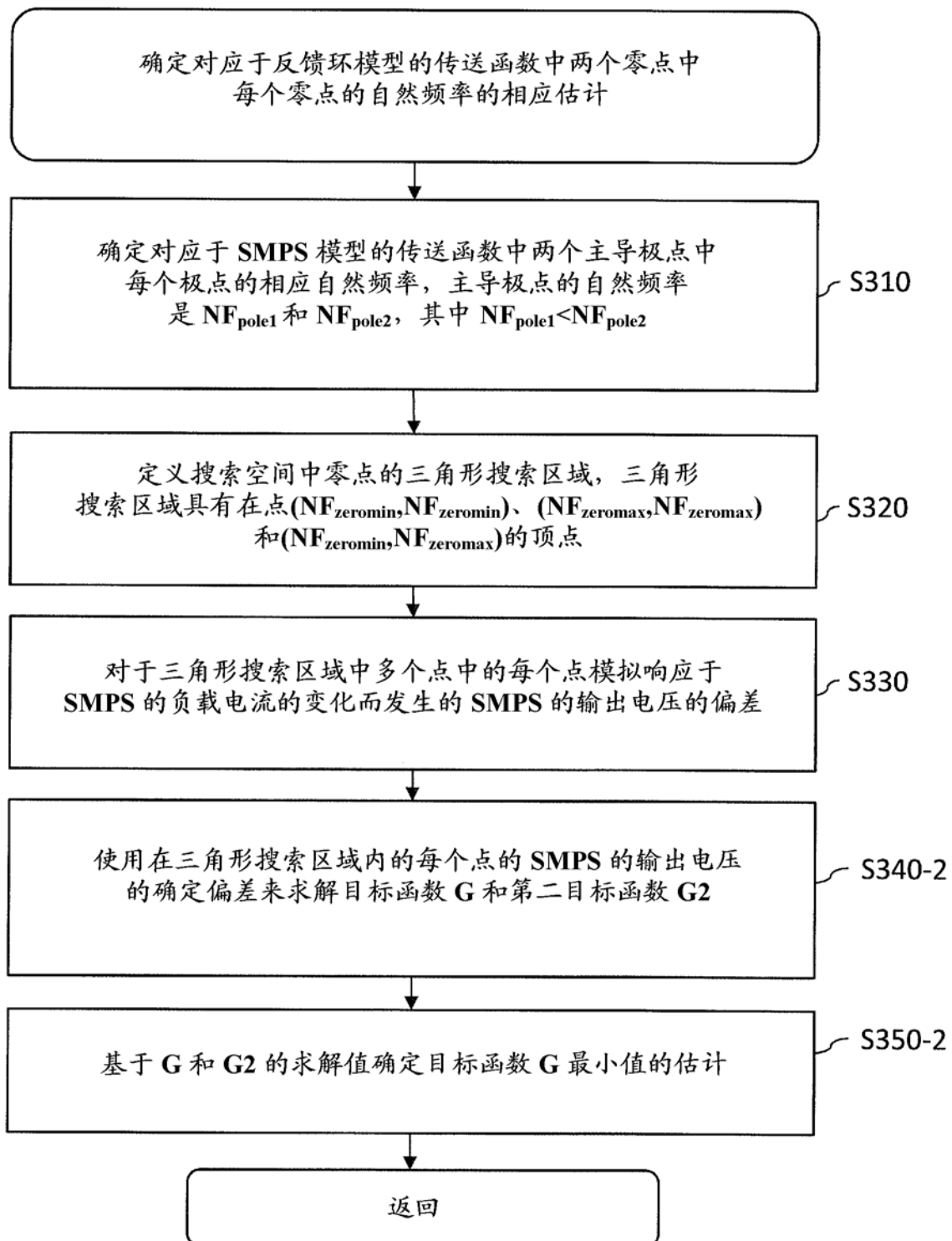


图 17

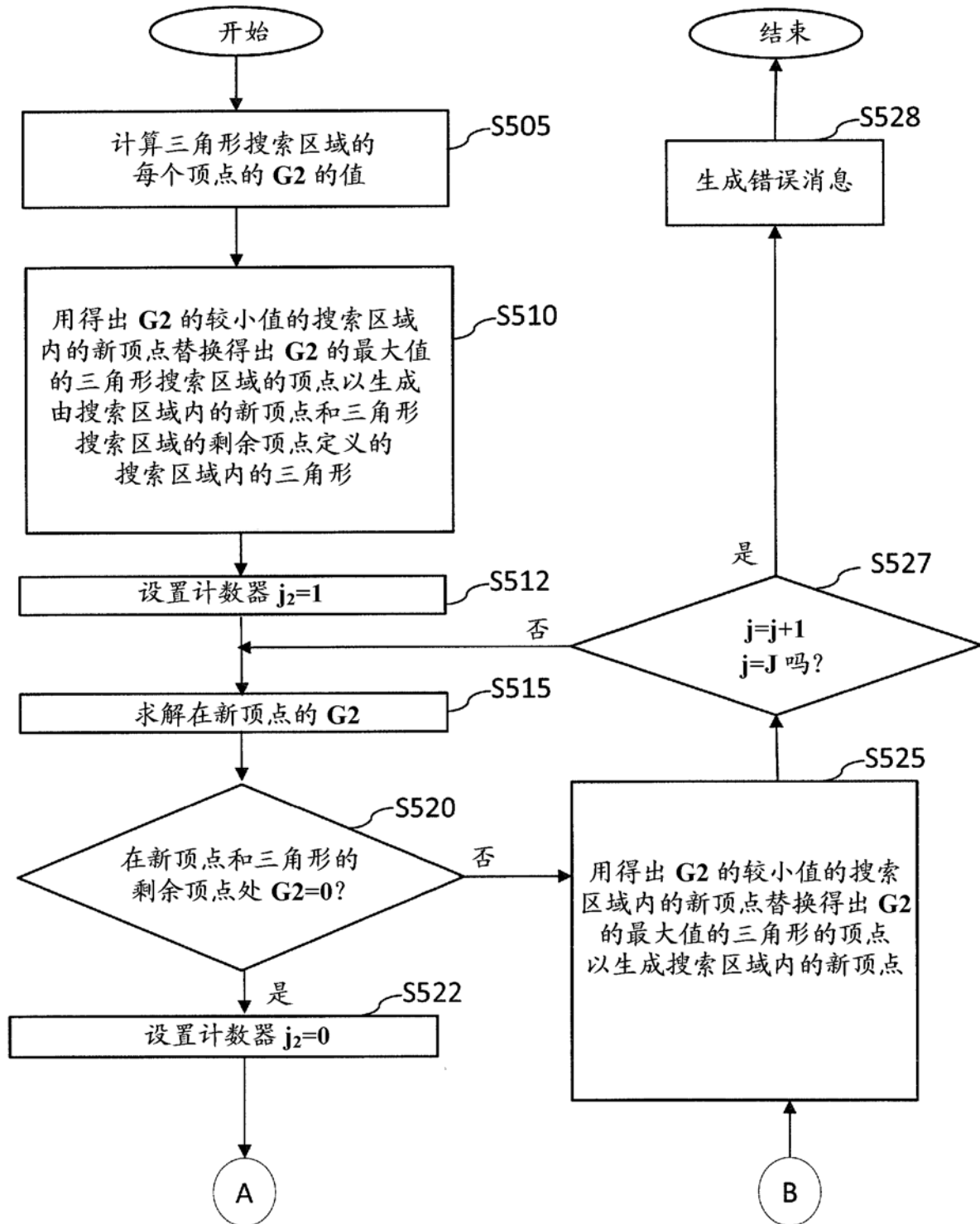


图 18A

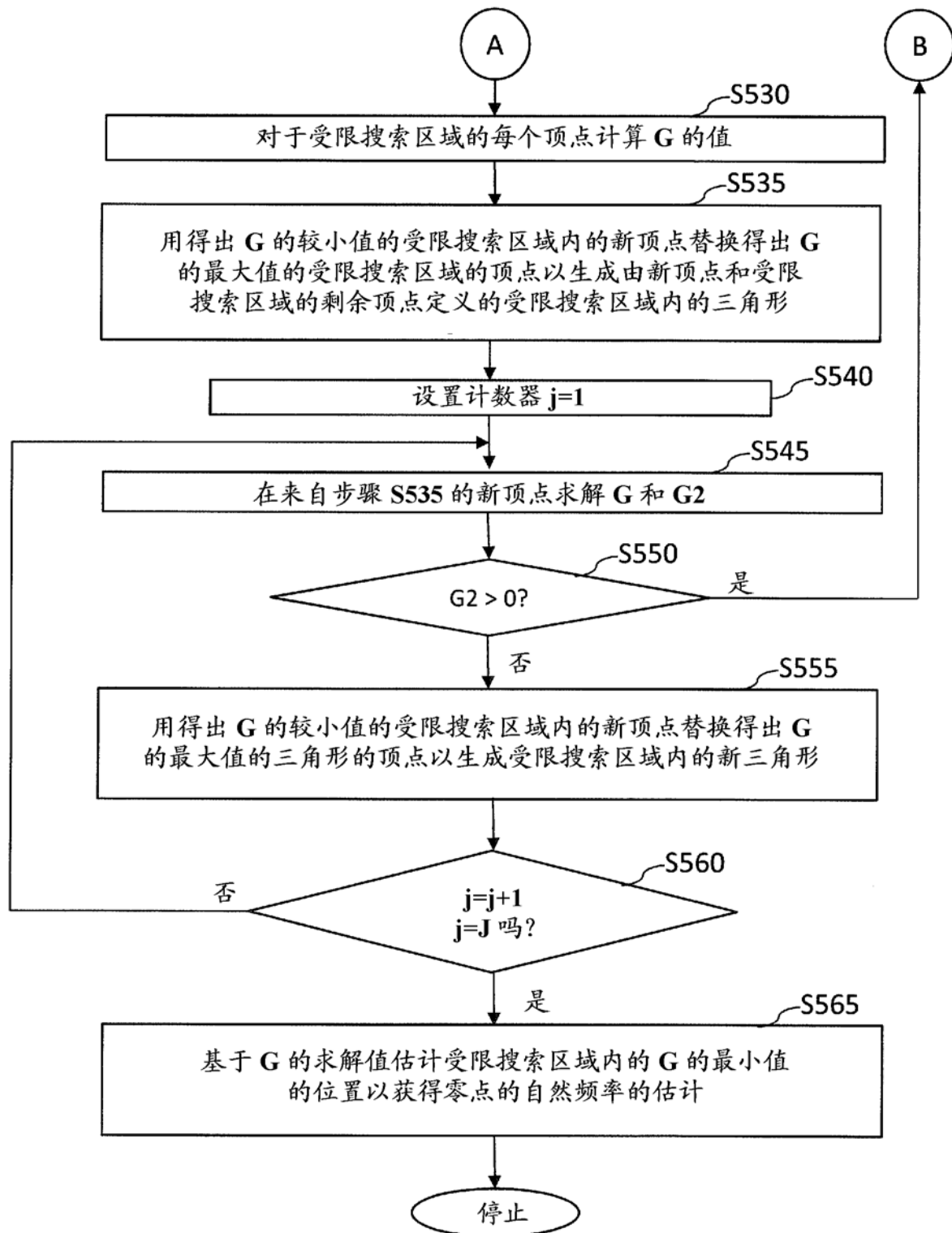


图 18B

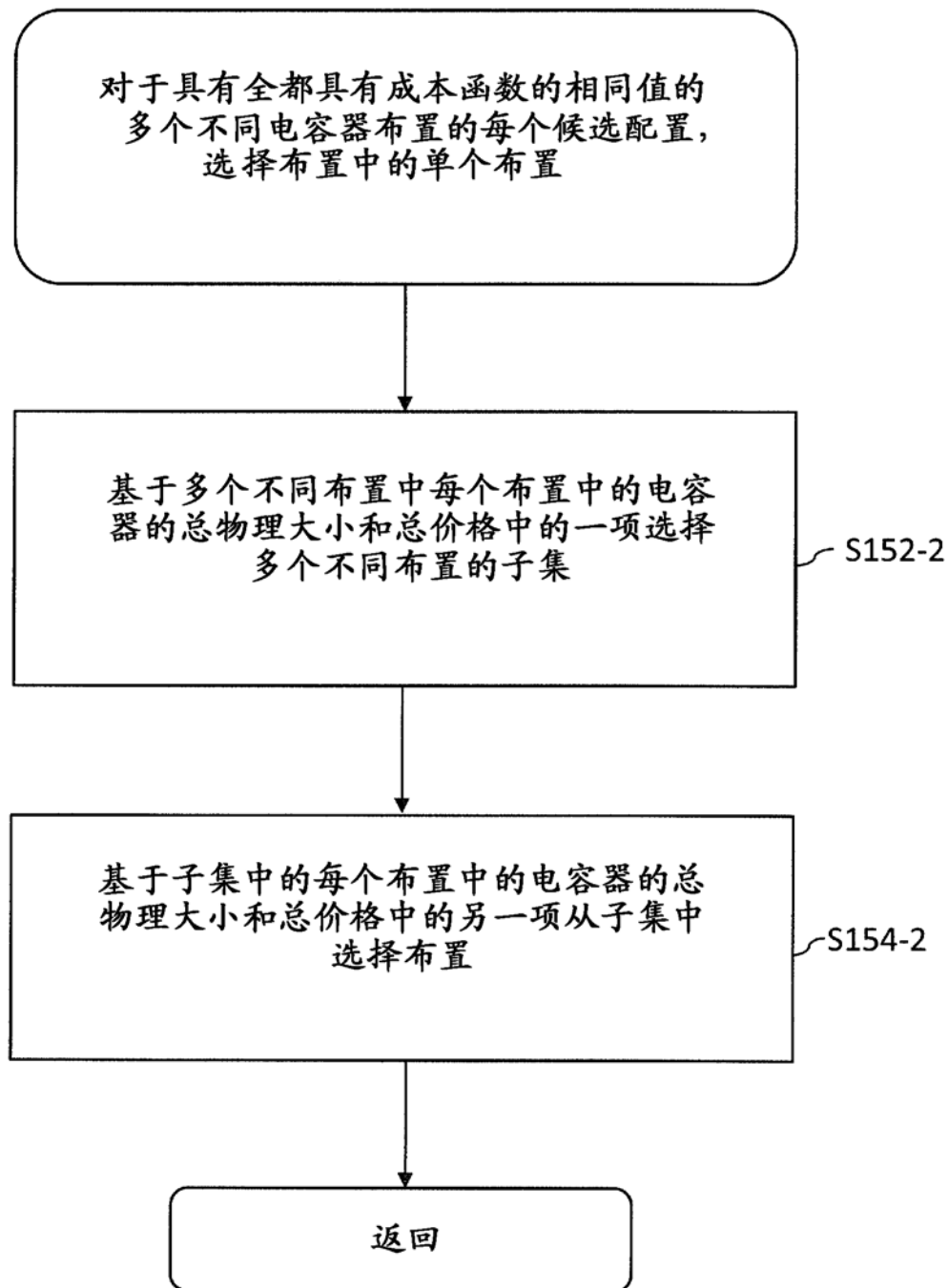


图 19

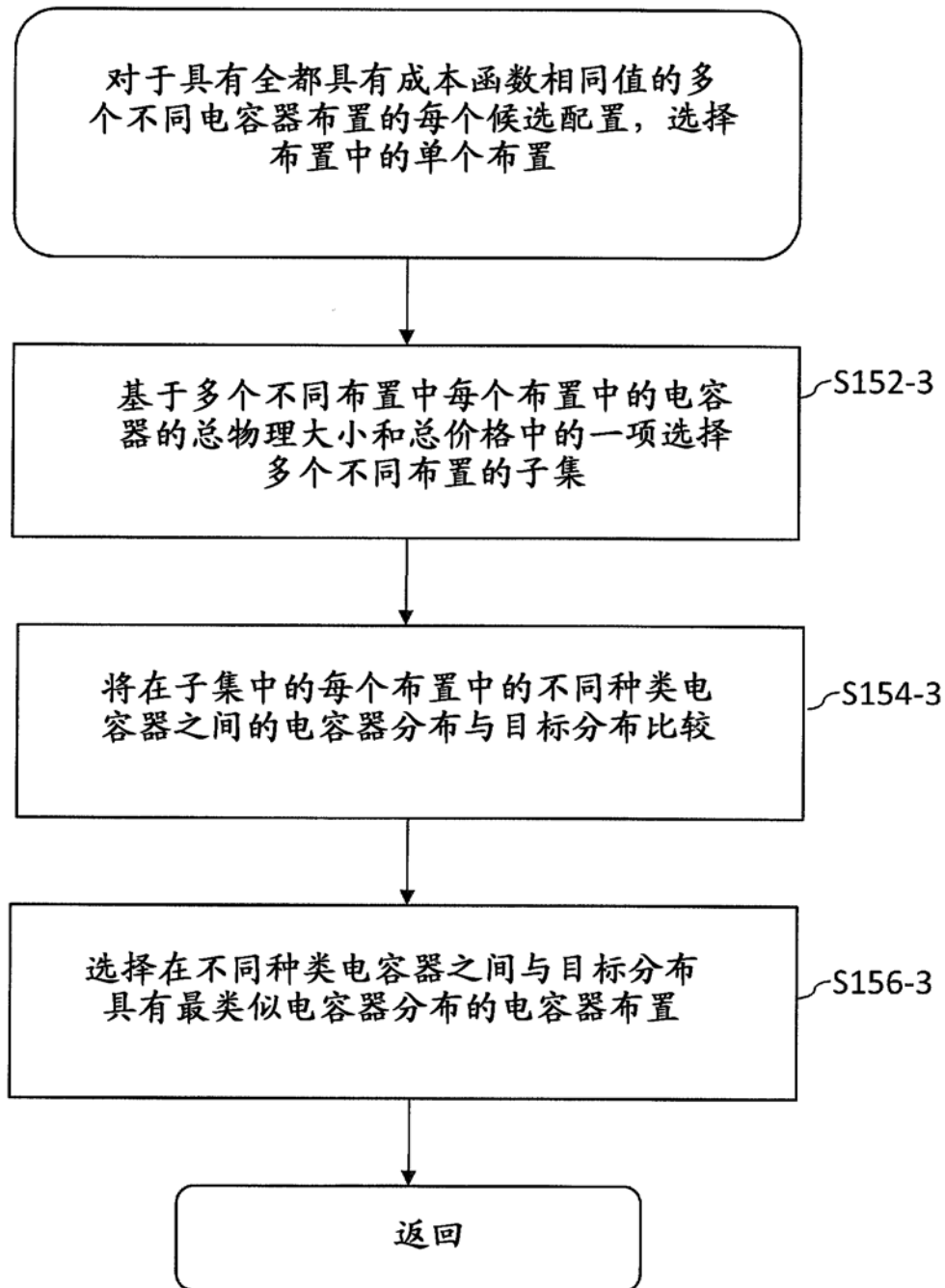


图 20

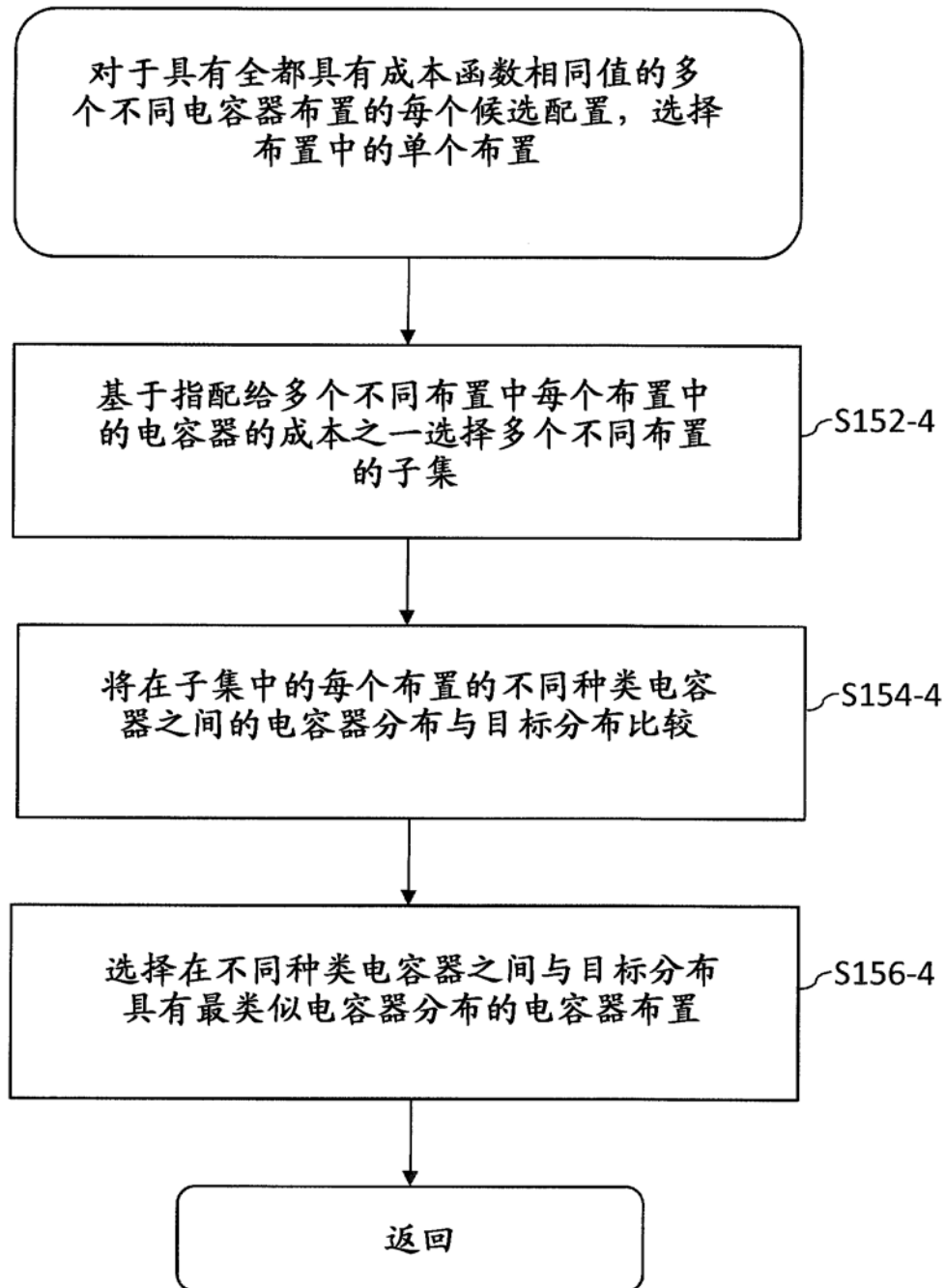


图 21