



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115795230 A

(43) 申请公布日 2023. 03. 14

(21) 申请号 202211287224.6

(22) 申请日 2022.10.20

(71) 申请人 广东工业大学

地址 510006 广东省广州市番禺区大学城  
外环西路100号

(72) 发明人 周献前 彭慧 林典敏 吴可廷

(74) 专利代理机构 广东南北知识产权代理事务  
所(普通合伙) 44918

专利代理师 肖湘漓

(51) Int. Cl.

G06F 17/12 (2006.01)

B06B 1/06 (2006.01)

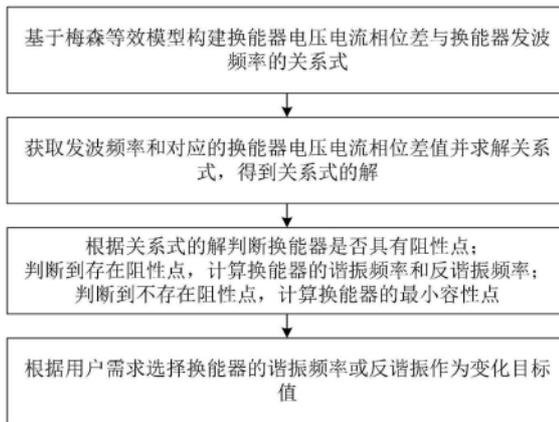
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

## (54) 发明名称

一种压电换能器的全状态频率跟踪方法及系统

## (57) 摘要

本发明公开了一种压电换能器的全状态频率跟踪方法及系统,该方法包括:基于梅森等效模型构建换能器电压电流相位差与换能器发波频率的关系式;获取发波频率和对应的换能器电压电流相位差值并求解关系式,得到关系式的解;根据关系式的解判断换能器是否具有阻性点;判断到存在阻性点,计算换能器的谐振频率和反谐振频率;判断到不存在阻性点,计算换能器的最小容性点;根据用户需求选择换能器的谐振频率或反谐振作为变化目标值。该系统包括:关系式构建模块、解模块、判断模块和输出模块。本发明作为一种压电换能器的全状态频率跟踪方法及系统,可广泛应用于换能器跟踪控制领域。



1. 一种压电换能器的全状态频率跟踪方法,其特征在于,包括以下步骤:  
 基于梅森等效模型构建换能器电压电流相位差与换能器发波频率的关系式;  
 获取发波频率和对应的换能器电压电流相位差值并求解关系式,得到关系式的解;  
 根据关系式的解判断换能器是否具有阻性点;  
 判断到存在阻性点,计算换能器的谐振频率和反谐振频率并根据用户需求选择换能器的谐振频率或反谐振作为变化目标值;  
 判断到不存在阻性点,计算换能器的最小容性点并将最小容性点作为变化目标值。
2. 根据权利要求1所述一种压电换能器的全状态频率跟踪方法,其特征在于,还包括:  
 根据设定的跟踪速度和跟踪精度对变化目标值进行后处理。
3. 根据权利要求2所述一种压电换能器的全状态频率跟踪,其特征在于,所述换能器电压电流相位差与换能器发波频率的关系式公式表示如下:

$$\tan \theta = K_1 \omega^3 + K_2 \omega - \frac{K_3}{\omega}$$

$$K_1 = -\frac{C_0 L_1}{R_1}$$

$$K_2 = \frac{2C_0 L_1 + C_1 L_1 - 2C_0 L_1}{R_1 C_1}$$

$$K_3 = -\frac{C_0 + C_1}{R_1 C_1^2}$$

上式中, $L_1$ 表示换能器的动态电感, $R_1$ 表示换能器的动态电阻, $C_1$ 表示换能器的动态电容, $C_0$ 表示换能器的静态电容, $\tan \theta$ 表示换能器电压电流相位差角的正切值, $\omega$ 为换能器当前的工作频率。

4. 根据权利要求3所述一种压电换能器的全状态频率跟踪方法,其特征在于,所述根据关系式的解判断换能器是否具有阻性点这一步骤中的判断规则如下:

当 $K_2^2 - 4K_1 K_3 \geq 0$ ,换能器当前存在阻性点;

当 $K_2^2 - 4K_1 K_3 < 0$ ,换能器当前不存在阻性点。

5. 根据权利要求4所述一种压电换能器的全状态频率跟踪方法,其特征在于,所述换能器的谐振频率和反谐振频率的计算公式如下:

$$\begin{cases} f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 4K_1 K_3}}{2K_1}} \\ f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 4K_1 K_3}}{2K_1}} \end{cases}$$

上式中, $f_r$ 表示谐振频率, $f_a$ 表示反谐振频率。

6. 根据权利要求5所述一种压电换能器的全状态频率跟踪方法,其特征在于,所述换能器的最小容性点的计算公式如下:

$$f_l = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{-K_2}{2K_1}}$$

上式中,  $f_l$  表示换能器的最小容性点。

7. 根据权利要求6所述一种压电换能器的全状态频率跟踪方法, 其特征在于, 所述根据设定的跟踪速度和跟踪精度对变化目标值进行后处理这一步骤, 其具体包括:

设定最大步长值、稳态抖动值和抖动相位差值;

判断到换能器电压电流相位差值小于抖动相位差值, 将下一步的目标值调整为稳态发波频率与稳态抖动值之和;

判断到换能器电压电流相位差值大于抖动相位差值且下一步的目标值与当前发波频率的差小于最大步长值时, 输出变化目标值;

判断到换能器电压电流相位差值大于抖动相位差值且下一步的目标值与当前发波频率的差大于最大步长值时, 输出最大步长值。

8. 一种压电换能器的全状态频率跟踪系统, 其特征在于, 包括:

关系式构建模块, 基于梅森等效模型构建换能器电压电流相位差与换能器发波频率的关系式;

解模块, 用于获取发波频率和对应的换能器电压电流相位差值并求解关系式, 得到关系式的解;

判断模块, 用于根据关系式的解判断换能器是否具有阻性点; 判断到存在阻性点, 计算换能器的谐振频率和反谐振频率; 判断到不存在阻性点, 计算换能器的最小容性点;

输出模块, 用于根据用户需求选择换能器的谐振频率或反谐振作为变化目标值。

## 一种压电换能器的全状态频率跟踪方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及换能器跟踪控制领域,尤其涉及一种压电换能器的全状态频率跟踪方法及系统。

### 背景技术

[0002] 目前,由于超声波可以产生机械效应、空化效应、化学效应及热效应,被广泛应用于清洗、检测、加工、焊接等领域。超声电源是超声波发生系统的核心组成部分,目标是生成特定频率交流电,使压电换能器工作在谐振状态。压电换能器的谐振频率受负载、驱动电压的影响,在工作的过程中往往随时间呈现非线性变化。因此,频率跟踪技术是超声电源的关键技术之一。在换能器处于大负载的情况下,会出现无阻性点状态。能够同时适配压电换能器的无阻性点和有阻性点的频率跟踪的方法称为全状态频率跟踪方法。

### 发明内容

[0003] 为了解决上述技术问题,本发明的目的是提供一种压电换能器的全状态频率跟踪方法及系统,能够同时适配于谐振频率与反谐振频率,具有误跟踪自复位和全状态频率跟踪能力。

[0004] 本发明所采用的第一技术方案是:一种压电换能器的全状态频率跟踪方法,包括以下步骤:

[0005] 基于梅森等效模型构建换能器电压电流相位差与换能器发波频率的关系式;

[0006] 获取发波频率和对应的换能器电压电流相位差值并求解关系式,得到关系式的解;

[0007] 根据关系式的解判断换能器是否具有阻性点;

[0008] 判断到存在阻性点,计算换能器的谐振频率和反谐振频率;

[0009] 判断到不存在阻性点,计算换能器的最小容性点;

[0010] 根据用户需求选择换能器的谐振频率或反谐振作为变化目标值。

[0011] 进一步,还包括:

[0012] 根据设定的跟踪速度和跟踪精度对变化目标值进行后处理。

[0013] 进一步,所述换能器电压电流相位差与换能器发波频率的关系式公式表示如下:

$$[0014] \quad \tan \theta = K_1 \omega^3 + K_2 \omega - \frac{K_3}{\omega}$$

$$[0015] \quad K_1 = -\frac{C_0 L_1}{R_1}$$

$$[0016] \quad K_2 = \frac{2C_0 L_1 + C_1 L_1 - 2C_0 L_1}{R_1 C_1}$$

$$[0017] \quad K_3 = -\frac{C_0 + C_1}{R_1 C_1^2}$$

[0018] 进一步,所述根据关系式的解判断换能器是否具有阻性点这一步骤中的判断规则如下:

[0019] 当 $K_2^2 - 4K_1K_3 \geq 0$ ,换能器当前存在阻性点;

[0020] 当 $K_2^2 - 4K_1K_3 < 0$ ,换能器当前不存在阻性点。

[0021] 进一步,所述换能器的谐振频率和反谐振频率的计算公式如下:

$$[0022] \quad \begin{cases} f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 4K_1K_3}}{2K_1}} \\ f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 4K_1K_3}}{2K_1}} \end{cases}$$

[0023] 上式中, $f_r$ 表示谐振频率, $f_a$ 表示反谐振频率。

[0024] 进一步,所述换能器的最小容性点的计算公式如下:

$$[0025] \quad f_l = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{-K_2}{2K_1}}$$

[0026] 上式中, $f$ 表示换能器的最小容性点。

[0027] 进一步,所述根据设定的跟踪速度和跟踪精度对变化目标值进行后处理这一步骤,其具体包括:

[0028] 设定最大步长值、稳态抖动值和抖动相位差值;

[0029] 判断到换能器电压电流相位差值小于抖动相位差值,将下一步的目标值调整为稳态发波频率与稳态抖动值之和;

[0030] 判断到换能器电压电流相位差值大于抖动相位差值且下一步的目标值与当前发波频率的差小于最大步长值时,输出变化目标值;

[0031] 判断到换能器电压电流相位差值大于抖动相位差值且下一步的目标值与当前发波频率的差大于最大步长值时,输出最大步长值。

[0032] 本发明所采用的第二技术方案是:一种压电换能器的全状态频率跟踪系统,包括:

[0033] 关系式构建模块,基于梅森等效模型构建换能器电压电流相位差与换能器发波频率的关系式;

[0034] 解模块,用于获取发波频率和对应的换能器电压电流相位差值并求解关系式,得到关系式的解;

[0035] 判断模块,用于根据关系式的解判断换能器是否具有阻性点;判断到存在阻性点,计算换能器的谐振频率和反谐振频率;判断到不存在阻性点,计算换能器的最小容性点;

[0036] 输出模块,用于根据用户需求选择换能器的谐振频率或反谐振作为变化目标值。

[0037] 本发明方法及系统的有益效果是:本发明具有误跟踪自复位能力,能很好的解决频率误跟踪的问题;同时自适应各种不同的振子和应用场景,可较为简单的选择跟踪目标,无需PID那种繁琐的参数调试过程,跟踪速度快,精度高;能够适配无阻性点状态下换能器的控制,实现换能器的全状态控制。

## 附图说明

- [0038] 图1是本发明一种压电换能器的全状态频率跟踪方法的步骤流程图；  
 [0039] 图2是本发明一种压电换能器的全状态频率跟踪方法的梅森等效电路图；  
 [0040] 图3是本发明压电换能器的特征频率图；  
 [0041] 图4是本发明一种压电换能器的全状态频率跟踪方法的程序流程图；  
 [0042] 图5是本发明一种压电换能器的全状态频率跟踪系统的结构框图。

## 具体实施方式

[0043] 下面结合附图和具体实施例对本发明做进一步的详细说明。对于以下实施例中的步骤编号,其仅为了便于阐述说明而设置,对步骤之间的顺序不做任何限定,实施例中的各步骤的执行顺序均可根据本领域技术人员的理解来进行适应性调整。

[0044] 如图1所示,本发明提供了一种压电换能器的全状态频率跟踪方法,该方法包括以下步骤:

[0045] S1、基于梅森等效模型构建换能器电压电流相位差与换能器发波频率的关系式;

[0046] S2、获取发波频率和对应的换能器电压电流相位差值并求解关系式,得到关系式的解;

[0047] 具体地,根据三个不同的发波频率及其对应的换能器电压电流相位差值求解相位差-发波频率关系式的三个未知数,关系式具体为:

$$[0048] \quad \tan \theta = \frac{-C_0 L_1^2 \omega^3}{R_1} + \frac{2C_0 L_1 + C_1 L_1 - R_1^2 C_1 C_0}{R_1 C_1} \omega - \frac{C_0 + C_1}{R_1 C_1 \omega}$$

[0049] 参照图2,式中, $L_1$ 为换能器的动态电感, $R_1$ 为换能器的动态电阻, $C_1$ 为换能器的动态电容, $C_0$ 为换能器的静态电容, $\tan \theta$ 为换能器电压电流相位差角的正切值, $\omega$ 为换能器当前的工作频率。

[0050] 待求解的方程组具体为:

$$[0051] \quad \begin{cases} \tan \theta_1 = \frac{-C_0 L_1^2 \omega_1^3}{R_1} + \frac{2C_0 L_1 + C_1 L_1 - R_1^2 C_1 C_0}{R_1 C_1} \omega_1 - \frac{C_0 + C_1}{R_1 C_1 \omega_1} \\ \tan \theta_2 = \frac{-C_0 L_1^2 \omega_2^3}{R_1} + \frac{2C_0 L_1 + C_1 L_1 - R_1^2 C_1 C_0}{R_1 C_1} \omega_2 - \frac{C_0 + C_1}{R_1 C_1 \omega_2} \\ \tan \theta_3 = \frac{-C_0 L_1^2 \omega_3^3}{R_1} + \frac{2C_0 L_1 + C_1 L_1 - R_1^2 C_1 C_0}{R_1 C_1} \omega_3 - \frac{C_0 + C_1}{R_1 C_1 \omega_3} \end{cases}$$

[0052] 其中 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ 、 $\tan \theta_1$ 、 $\tan \theta_2$ 、 $\tan \theta_3$ 为最近三次发波频率和对应的换能器电压电流相位差值,式方程组中的已知值, $\frac{-C_0 L_1^2 \omega^3}{R_1}$ 、 $\frac{2C_0 L_1 + C_1 L_1 - R_1^2 C_1 C_0}{R_1 C_1}$ 、 $\frac{C_0 + C_1}{R_1 C_1 \omega}$ 为三个待求解的未知数,为了表述方便,以 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 代替所述三个未知数。

[0053] S3、根据关系式的解判断换能器是否具有阻性点,判断到存在阻性点,计算换能器的谐振频率和反谐振频率,判断到不存在阻性点,计算换能器的最小容性点;

[0054] 换能器此时是否具有阻性点的具体判据为:

[0055]  $K_2^2 - 4K_1 K_3$ 的结果是否大于0,是则表明换能器此时存在阻性点,否则表明换能器此时不存在阻性点。

[0056] 换能器谐振频率的具体计算公式为：

$$[0057] \quad f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 4K_1K_3}}{2K_1}}$$

[0058] 换能器反谐振频率的具体计算公式为：

$$[0059] \quad f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 4K_1K_3}}{2K_1}}$$

[0060] 换能器最小容性点的具体计算公式为：

$$[0061] \quad f_l = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{-K_2}{2K_1}}$$

[0062] S4、存在阻性点时，根据用户需求选择换能器的谐振频率或反谐振作为变化目标值，不存在阻性点时，则使用最小容性点作为变化目标值；

[0063] 具体地，根据需求选择跟踪目标为所述换能器的谐振频率还是反谐振频率并根据选择把谐振频率或者反谐振频率的计算值作为下一步的变化目标值 $T_0$ 。

[0064] 通过新增阻性点的判断，以适配无阻性点状态下换能器的控制。

[0065] S41、根据跟踪目标令 $T_0$ 等于谐振频率或者反谐振频率；

[0066] 具体地，参考图3，谐振频率 $f_r$ 或者反谐振频率 $f_a$ 为压电换能器的两个电抗为0的点，根据应用需求进行选择。一般来说，中低负载的超声加工应用场景选择 $f_r$ ，大负载的应用场景选择 $f_a$ 。

[0067] S42、计算 $T_0$ 与上一次发波频率的差的绝对值 $\Delta \omega$ 。

[0068] 具体地，步骤S1-S4的增益效果为可较为简单的选择跟踪目标，无需PID那种繁琐的参数调试过程，跟踪速度快，精度高。

[0069] S5、根据设定的跟踪速度和跟踪精度对变化目标值进行后处理。

[0070] S51、设定最大步长值、稳态抖动值和抖动相位差值；

[0071] 具体地，所述最大步长值可以为静态值也可以为动态值，用于限制所述算法单步的最大步长；所述算法此后每一步调整的大小均为稳态抖动值，所述稳态抖动值和抖动相位差值可以为静态值也可以为动态值。

[0072] S52、计算当前相位差是否低于设定阈值，是则下一步调整的目标值变为：稳态发波频率+稳态抖动值\*n%3，其中n为从算法开始运行算起，频率改变的次数。否则进行下一步判断。

[0073] 具体地，通过步骤S52和前方的计算公式结合，具有误跟踪自复位能力。

[0074] S53、 $\Delta \omega$ 是否大于设定最大步长值时，是则直接输出初始目标值，否则直接输出最大步长值。

[0075] 具体地，图4是全状态跟踪方法实现的程序框图，其中从开始到计算 $W_c$ 前都是准备步骤，为了得到最初的三个频率点和相位值。图1是计算 $W_c$ 的具体步骤，用户选择的谐振/反谐振点即计算结果 $W_c$ ，框图的 $W_c$ 后边的处理步骤是反应后的处理。

[0076] 如图5所示，一种压电换能器的全状态频率跟踪系统，包括：

[0077] 关系式构建模块,基于梅森等效模型构建换能器电压电流相位差与换能器发波频率的关系式;

[0078] 解模块,用于获取发波频率和对应的换能器电压电流相位差值并求解关系式,得到关系式的解;

[0079] 判断模块,用于根据关系式的解判断换能器是否具有阻性点;判断到存在阻性点,计算换能器的谐振频率和反谐振频率;判断到不存在阻性点,计算换能器的最小容性点;

[0080] 输出模块,用于根据用户需求选择换能器的谐振频率或反谐振作为变化目标值。

[0081] 上述方法实施例中的内容均适用于本系统实施例中,本系统实施例所具体实现的功能与上述方法实施例相同,并且达到的有益效果与上述方法实施例所达到的有益效果也相同。

[0082] 一种压电换能器的全状态频率跟踪装置:

[0083] 至少一个处理器;

[0084] 至少一个存储器,用于存储至少一个程序;

[0085] 当所述至少一个程序被所述至少一个处理器执行,使得所述至少一个处理器实现如上所述一种压电换能器的全状态频率跟踪方法。

[0086] 上述方法实施例中的内容均适用于本装置实施例中,本装置实施例所具体实现的功能与上述方法实施例相同,并且达到的有益效果与上述方法实施例所达到的有益效果也相同。

[0087] 一种存储介质,其中存储有处理器可执行的指令,其特征在于:所述处理器可执行的指令在由处理器执行时用于实现如上所述一种压电换能器的全状态频率跟踪方法。

[0088] 上述方法实施例中的内容均适用于本存储介质实施例中,本存储介质实施例所具体实现的功能与上述方法实施例相同,并且达到的有益效果与上述方法实施例所达到的有益效果也相同。

[0089] 以上是对本发明的较佳实施进行了具体说明,但本发明创造并不限于所述实施例,熟悉本领域的技术人员在不违背本发明精神的前提下还可做作出种种的等同变形或替换,这些等同的变形或替换均包含在本申请权利要求所限定的范围内。

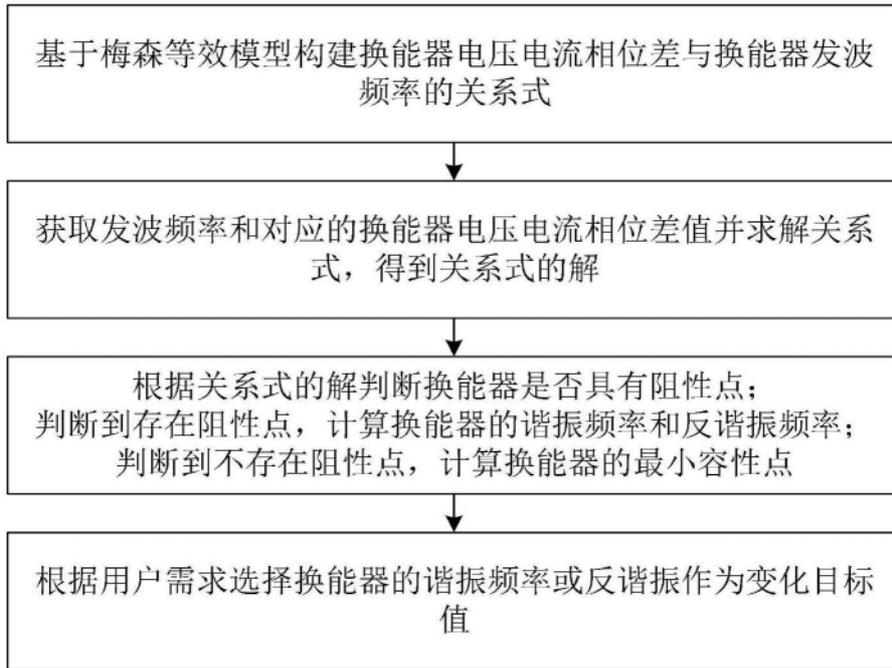


图1

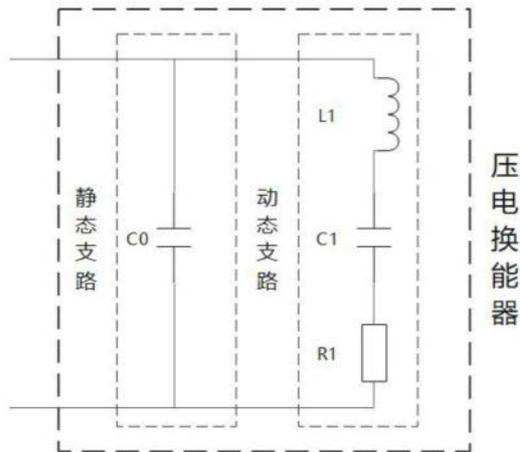


图2

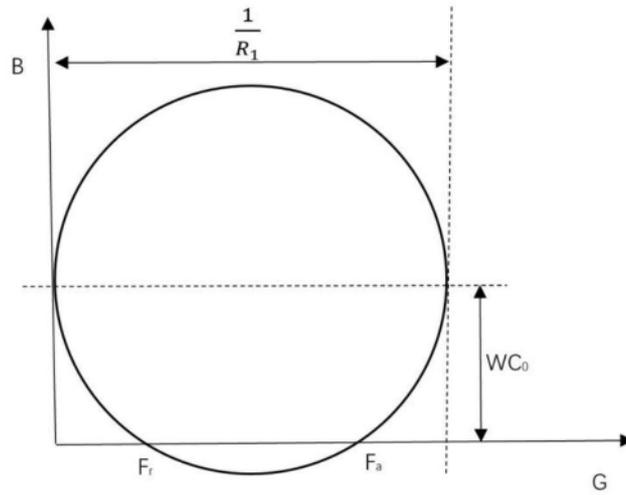


图3

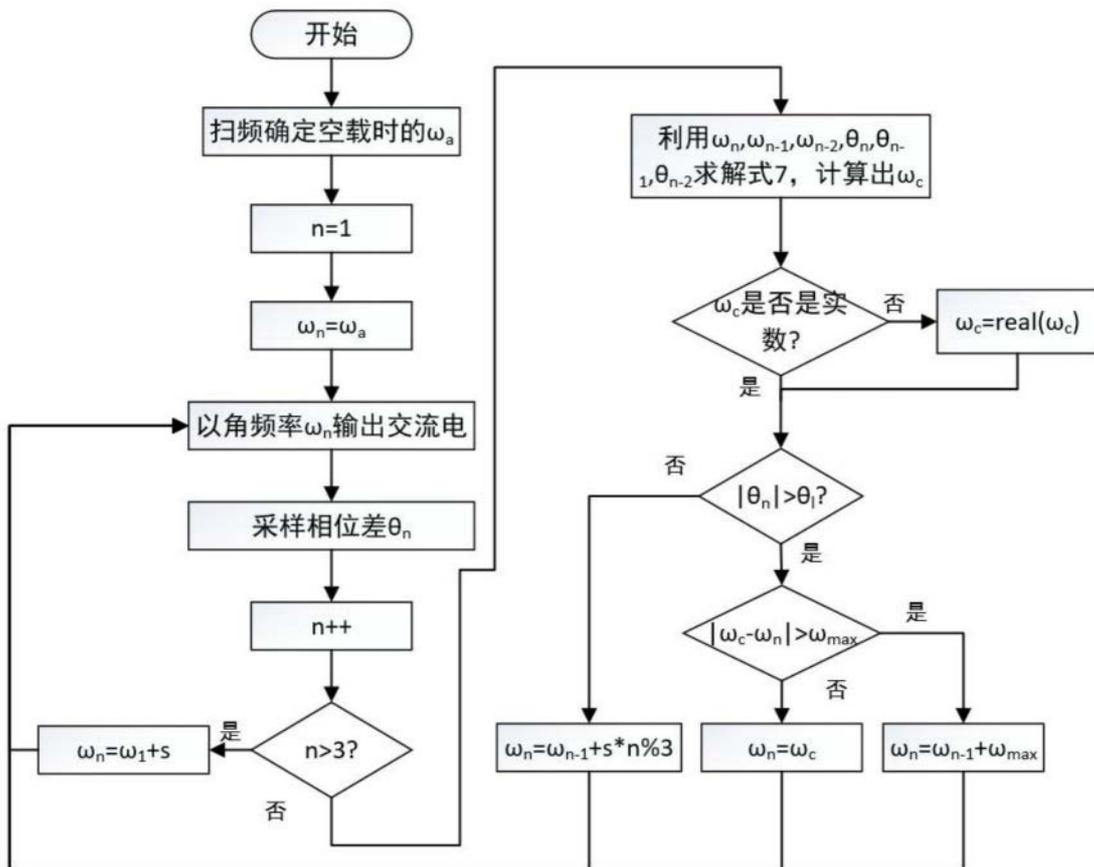


图4

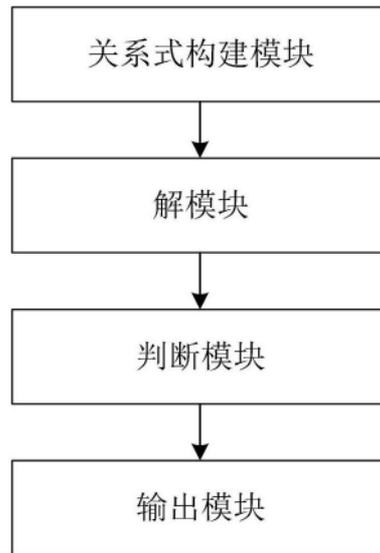


图5