(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2015 年 12 月 17 日 (17.12.2015)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2015/188514 A1

(51) 国际专利分类号:
G06F 17/50 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2014/087283

(22) 国际申请日: 2014 年 9 月 24 日 (24.09.2014)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201410255068.4 2014 年 6 月 10 日 (10.06.2014) CN

(71) 申请人: 广东工业大学 (GUANGDONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国广东省广州市广州大学城外环西路 100 号, Guangdong 510006 (CN)。

(72) 发明人: 陈新 (CHEN, Xin); 中国广东省广州市广州大学城外环西路 100 号, Guangdong 510006 (CN)。 白有盾 (BAI, Youdun); 中国广东省广州市广州大学城外环西路 100 号, Guangdong 510006 (CN)。 杨志军 (YANG, Zhijun); 中国广东省广州市广州大学城外环西路 100 号, Guangdong 510006 (CN)。 高健 (GAO, Jian); 中国广东省广州市广州大学城外环西路 100 号, Guangdong 510006 (CN)。 杨海东 (YANG, Haidong); 中国广东省广州市广州大学城外环西路 100 号, Guangdong 510006 (CN)。 王梦 (WANG, Meng); 中国广东省广州市广州大学城外环西路 100 号, Guangdong 510006 (CN)。

(74) 代理人: 北京品源专利代理有限公司 (BEYOND ATTORNEYS AT LAW); 中国北京市海淀区莲花池东路 39 号西金大厦 6 层, Beijing 100036 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明，要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明，要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO,

[见续页]

(54) Title: PLANNING METHOD OF ASYMMETRIC VARIABLE ACCELERATION BASED ON DYNAMIC RESPONSE SIMULATION OF NONLINEAR FINITE ELEMENT

(54) 发明名称 : 基于非线性有限元动力学响应仿真的非对称变加速度规划方法

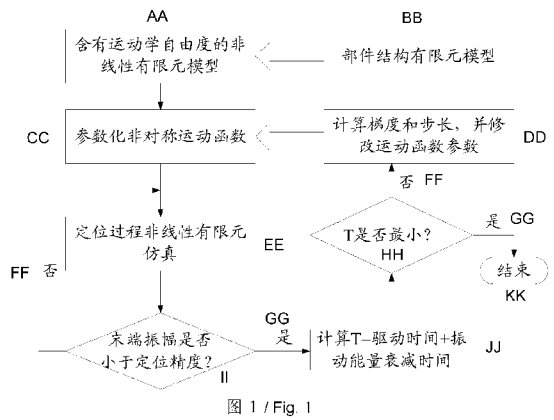


图 1 / Fig. 1

AA Nonlinear finite element model containing a kinematic degree of freedom
BB Component structure finite element model
CC Parametric asymmetric motion function
DD Calculate the gradient and the step size and modify parameters of the motion function
EE Nonlinear finite element simulation of positioning process
FF No
GG Yes
HH Is T the minimum?
II Is the amplitude of the end less than the positioning accuracy?
JJ Calculate T = drive time + vibration energy decay time
KK End

(57) Abstract: A planning method of asymmetric variable acceleration based on dynamic response simulation of a nonlinear finite element. The method comprises: solving a positioning course of a nonlinear finite element model containing a kinematic degree of freedom and a parametric motion function as boundary conditions; determining whether the amplitude of an execution end after the drive stops meets the positioning accuracy, if not, continuing solving, and if yes, the vibration energy decay time; and determining whether a target response time is a minimum value, if the time is the minimum value, determining set motion parameters as optimal parameters, and if the time is not the minimum value, calculating the gradient and step size of the motion parameters and resetting motion parameters for solution. By means of the method, the problem of motion planning for a mechanism with high speed and high acceleration with nonlinear effects such as large flexible deformation and precision positioning requirements is resolved. The precision positioning and smooth position/force switching under high acceleration conditions can be achieved. The method is also applicable to the problem of motion planning for an execution mechanism with the traditional solving method.

(57) 摘要:

[见续页]

WO 2015/188514 A1

RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

一种基于非线性有限元动力学响应仿真的非对称变加速度规划方法，包括对含有运动学自由和参数化运动函数作为边界条件的非线性有限元模型定位历程进行求解；判断驱动停止后的执行端的振幅是否满足定位精度，若不满足则继续求解，若满足则振动能量衰减时间；判断目标响应时间，是否为最小值，若是最小值则确定设定的运动参数为最优参数，若不是最小值则计算运动参数梯度和步长，并重新设定运动参数进行求解，通过以上方法，解决存在大柔性变形等非线性影响和精密定位要求的高速高加速机构的运动规划问题，可以实现在高加速条件下的精密定位以及位/力平滑切换，也适用于传统解决方法的执行机构运动规划问题。

说 明 书

基于非线性有限元动力学响应仿真的非对称变加速度规划方法

本专利申请要求于 2014 年 06 月 10 日提交的，申请号为 201410255068.4，申请人为广东工业大学，发明名称为“基于主频能量时域最优分布的非对称变加速度规划方法”的中国专利申请的优先权，该申请的全文以引用的方式并入本申请中。

技术领域

本发明涉及机械工程与数学研究技术领域，具体涉及基于主频能量时域分布最优的非对称变加速度运动规划方法。

背景技术

运动加速度达到 10g 以上的机构装置被视为“柔体”，其动力学特性与一般的刚体机构差异较大。上述高加速的执行机构存在很大的惯性能量影响，在高速启停等高加速度情况下的残余振动很大，造成机构弹性振动能量需要较长的衰减时间才能满足高精密定位的需求。为保证高速高加速执行机构的精密定位要求，常见的解决方案主要为：设计平滑的加速度运动规划曲线来减少高速运动中因加速度变化带来的振动冲击。例如，制造业常见的 S 型曲线规划。

传统解决方案主要是从保证运动加速度曲线几何光顺进行运动规划设计。由于其并非从机构刚度、惯性、固有频率等内在本质物理原因角度来对执行机构的运动规划进行优化，得到的运动曲线在驱动过程中可能会产生谐波，因此又有学者提出了采用滤波来消除谐振分量。但该方法仍然存在两个问题：1）机构的固有频率随运动位形变化，需要设计变带阻的滤波器；2）滤波后导致运动不到位，需要进一步运动补偿，降低了效率。

为解决上述问题，专利 201310460878.9 提出了通过柔性多体动力学仿真优化，获得减小残余振动的 S 型运动曲线规划方法，将 S 型曲线参数由几何设计转为动力学设计，提高了适应性。

然而，微电子封装等高速设备需要实现极限速度，整个运动过程是加速或减速过程，没有匀速段。极速启停引起机构的宽频振动，使得基于小变形假设的柔性多体动力学应用受到制约，因此有必要引入新的方法来对高速机构动力学响应进行求解。

专利201310460878.9中提出一种高速机构减小残余振动的S型运动曲线规划方法，该方法主要是考虑机构柔性振动衰减对定位时间的影响，在传统的S型运动规划方法的基础上增加了衰减时间段，建立以定位时间最短为目标的考虑高速机构残余振动影响的S型曲线规划模型，可以较好地保证高速机构的运动平稳性，减少高速机构的定位时间。专利201310460878.9提出的方法中利用高精度截尾动态子结构方法来创建执行机构的柔性多体动力学模型，在后续的运动参数调整优化过程中上述柔性多体动力学模型保持不变。当执行机构的运动加速度进一步提升时，执行机构的响应将表现出很强的非线性，运动参数的修改将会对执行机构的柔性振动响应特性产生较大影响，即柔性多体动力学模型将发生较大变化，从而导致专利201310460878.9提出方法的适用范围将主要限制在高速执行机构运动过程中非线性影响较小的场合。

发明内容

本发明提出一种基于非线性有限元动力学响应仿真的非对称变加速度规划方法，解决存在大柔性变形等非线性影响和精密定位要求的高速高加速机构的运动规划问题，可以实现在高加速条件下的精密定位以及位/力平滑切换。同时，本发明提出的方法也适用于上述采用传统解决方法的执行机构运动规划问题。

为达此目的，本发明采用以下技术方案：

基于非线性有限元动力学响应仿真的非对称变加速度规划方法，该基于非线性有限元动力学响应仿真的非对称变加速度规划方法包括以下步骤：

步骤一、根据机构几何模型，建立包含运动学自由度的装配体有限元模型，并创建非线性有限元分析解算方案；

步骤二、设定运动参数，得到参数化非对称运动函数，并作为边界条件施加

到非线性有限元模型中;

步骤三、对参数化非对称运动函数进行定位历程仿真，即通过非线性有限元求解得到实时动态历程响应曲线;

步骤四、判断驱动结束后实时振动响应曲线的振幅是否满足定位精度，若不满足，则计算梯度和步长，并修改运动函数参数，继续步骤三；若满足则终止步骤三的非线性有限元求解历程，获取直至终止时刻的时间 T，进入步骤五;

步骤五、通过驱动时间和惯性能量衰减时间的测定，判断目标响应时间 T 是否为最小值，若是最小值则确定设定的运动参数为最优参数；若不是最小值则计算运动参数的梯度和步长，并重新设定运动参数，进入步骤三进行求解。

步骤一的具体方法如下:

a、建立机构的三维几何模型;

b、利用有限元软件对三维模型定义材料属性并进行网络划分，转换为有限元模型;

c、在机构部件的运动关节处创建运动约束，从而在有限元分析环境中建立机构的包含运动学自由度的装配体有限元模型;

d、在驱动关节，施加参数化非对称运动函数边界条件;

e、创建非线性有限元分析解算方案。

根据非对称运动的定义，运动分为：以急动度 G_1 进行的加加运动速段(T_1)；以急动度 G_2 进行的减加运动速段(T_2)；以急动度 G_3 进行的减加运动速段(T_3)；以急动度 G_4 进行的减减运动速段(T_4)；为了考虑惯性能量的影响，增加考虑惯性能量的衰减时间 T_5。

在 S 型非对称运动中，各加速过程中急动度为常数，运动结束时速度和加速度均为零；因此，有下列等式约束:

$$T_1G_1 = T_2G_2$$
$$T_3G_3 = T_4G_4$$
$$T_1G_1(T_1 + T_2) = T_3G_3(T_3 + T_4)$$

因此，T_2、T_3、T_4 均可以用 T_1 来表示。

衰减时间 T_5 由下式判断:

$$abs(s-s^*)+abs(v)<\varepsilon$$

在残余振动时，速度 v 要比位移数 s 值大，当速度 v 为几乎 0，即当机构位置 s 落在定位精度 ε 范围内，上式才成立。

步骤五所述的优化模型为：

$$\begin{aligned}
&T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 \\
&Find(G_1, G_2, G_3, G_4) \\
&Objective \quad : \qquad Min(T) \\
&Subject \quad to: \quad abs(s - s^*) + abs(v) < \varepsilon \\
&\qquad\qquad T_1 G_1 = T_2 G_2 \\
&\qquad\qquad T_3 G_3 = T_4 G_4 \\
&\qquad\qquad T_1 G_1 (T_1 + T_2) = T_3 G_3 (T_3 + T_4)
\end{aligned}$$

本发明通过以上方法，以满足定位精度下定位时间最短为目标，提出了惯性能量时间分布最优的非对称变加速规划方法：包括对含有运动学自由和参数化运动函数作为边界条件的非线性有限元模型定位历程进行求解；判断驱动停止后的执行端的振幅是否满足定位精度，若不满足则继续求解，若满足则振动能量衰减时间；判断目标响应时间（驱动时间与振动能量衰减时间之和）是否为最小值，若是最小值则确定设定的运动参数为最优参数，若不是最小值则计算运动参数梯度和步长，并重新设定运动参数进行求解。本发明提出方法的一个显著特点是：采用非线性有限元求解模块来对执行机构的全时间历程的惯性能量特性进行分析，充分考虑了高速启停过程中产生宽频振动的影响。上述特点确保本发明提出方法在非线性高速高加速机构的运动规划优化领域的适用性。本发明所提出的方法也同样适用于传统执行机构的运动规划优化领域。此外，本发明提出的方法还能够避免机构运动产生谐振分量，更有利于提升高速度条件下精密定位及位/力平滑切换能力。

附图说明

图 1 是本发明的一个实例的实施流程示意图。

图 2 是本发明的一个实例的非对称运动曲线示意图。

图 3 是本发明的一个实例的不同速度规划方案位移曲线示意图。

图 4 是本图 3 的不同速度规划方案惯性能量衰减曲线示意图。

具体实施方式

下面结合附图并通过具体实施方式来进一步说明本发明的技术方案。

基于非线性有限元动力学响应仿真的非对称变加速度规划方法，该基于非线性有限元动力学响应仿真的非对称变加速度规划方法包括以下步骤:

步骤一、根据机构几何模型，建立包含运动学自由度的装配体有限元模型，并创建非线性有限元分析解算方案;

步骤二、设定运动参数,得到参数化非对称运动函数，并作为边界条件施加到非线性有限元模型中;

步骤三、对参数化非对称运动函数进行定位历程仿真，即通过非线性有限元求解得到实时动态历程响应曲线;

步骤四、判断驱动结束后实时振动响应曲线的振幅是否满足定位精度，若不满足，则计算梯度和步长，并修改运动函数参数，继续步骤三；若满足则终止步骤三的非线性有限元求解历程，获取直至终止时刻的时间 T，进入步骤五;

步骤五、通过驱动时间和惯性能量衰减时间的测定，判断目标响应时间 T 是否为最小值，若是最小值则确定设定的运动参数为最优参数；若不是最小值则计算运动参数的梯度和步长，并重新设定运动参数，进入步骤三进行求解。

步骤一的具体方法如下:

a、利用 CAD 软件建立机构的三维几何模型;

b、利用有限元软件对三维模型定义材料属性并进行网络划分，转换为有限元模型;

c、在机构部件的运动关节处创建运动约束，从而在有限元分析环境中建立机构的包含运动学自由度的装配体有限元模型;

d、在驱动关节，施加参数化非对称运动函数边界条件;

e、创建非线性有限元分析解算方案。

根据非对称运动的定义，运动分为：以急动度 G_1 进行的加加运动速段 (T_1);

以急动度 G_2 进行的减加运动速段(T_2)；以急动度 G_3 进行的减加运动速段(T_3)；以急动度 G_4 进行的减减运动速段(T_4)；为了考虑惯性能量的影响，增加考虑惯性能量的衰减时间 T_5。

在 S 型非对称运动中，各加速过程中急动度为常数，运动结束时速度和加速度均为零；因此，有下列等式约束:

$$T_1G_1 = T_2G_2$$
$$T_3G_3 = T_4G_4$$
$$T_1G_1(T_1+T_2) = T_3G_3(T_3+T_4)$$

因此，T_2、T_3、T_4 均可以用 T_1 来表示。

衰减时间 T_5 由下式判断:

$$abs(s\text{-}s^*)+abs(v)<\varepsilon$$

在残余振动时，速度 v 要比位移数 s 值大，当速度 v 为几乎 0，即当机构位置 s 落在定位精度 ε 范围内，上式才成立。

步骤五所述的优化模型为:

$$T = T_1+T_2+T_3+T_4+T_5$$
$$Find(G_1,G_2,G_3,G_4)$$
$$Objective \quad : \quad Min(T)$$
$$Subject \quad to: \quad abs(s-s^*)+abs(v)<\varepsilon$$
$$T_1G_1 = T_2G_2$$
$$T_3G_3 = T_4G_4$$
$$T_1G_1(T_1+T_2) = T_3G_3(T_3+T_4)$$

设 $Q=s^*$ 为目标位移，等式约束求解后，得到运动曲线各段时间:

记:

$$A=2G_1^2G_3^2G_4+2G_1^2G_3G_4^2+3G_1G_2G_3^2G_4+3G_1G_2G_3G_4^2+G_2^2G_3^2G_4+G_2^2G_3G_4^2$$

$$B=G_1G_3\sqrt{G_2G_3(G_3+G_4)G_1G_4(G1+G2)}+2G_1G_4\sqrt{G_2G_3(G_3+G_4)G_1G_4(G_1+G_2)}$$

$$C=G_2G_3\sqrt{G_2G_3(G_3+G_4)G_1G_4(G_1+G_2)}$$

$$D=2G_2G_4\sqrt{G_2G_3(G_3+G_4)G_1G_4(G_1+G_2))}$$

$$E=QG_2^2G_3G_4(G_3+G_4)G_1^2$$

$$F=2G_1^2G_3^2G_4+2G_1^2G_3G_4^2+3G_1G_2G_3^2G_4+3G_1G_2G_3G_4^2+G_2^2G_3^2G_4+G_2^2G_3G_4^2$$

$$G=G_1G_3\sqrt{G_2G_3(G_3+G_4)G_1G_4(G_1+G_2)}$$

$$H=2G_1G_4\sqrt{G_2\ G_3\ (G_3+G_4)G_1\ G_4\ (G_1+G_2)}$$

$$I=G_2G_3\sqrt{G_2G_3\ (G_3+G_4)G_1\ G_4(G_1+G_2)}$$

$$J=2G_2G_4\sqrt{G_2\ G_3(G_3+G_4)G_1G_4\ (G_1+G_2)}$$

各段运动时间如下:

$$T1=\sqrt[3]{\frac{\sqrt[3]{6}\ E(F+G+H+I+J)^2}{G_1\ (A+B+C+D)}}$$

$$T_2=\frac{G_1T_1}{G_2}$$

$$T_3=T_1\sqrt{\frac{G_1\ (1+\frac{G_1}{G_2})}{G_3\ (1+\frac{G_3}{G_4})}}$$

$$T_4=\frac{T_3G_3}{G_4}$$

T4=(T3 *G3 /G4)

实施案例:

高速固晶机摆杆式焊头机构，需要从取晶位高速运动到固晶位，并要保证±1μm 的定位精度要求，要求定位时间最短。按对称 S 型加速曲线优化，得到的最短定位时间为 23.33ms（其中驱动时间为 17.90ms，最大残余振幅 2.14μm，惯性能量衰减时间为 5.43ms）。通过本项目提出的非对称变加速度规划，进一步进行优化，优化过程如表 1 所示，在同样满足±1μm 定位精度下，定位时间 16.36ms（驱动时间为 12.90ms，最大残余振幅为 1.03μm，惯性能量衰减时间为 3.46ms），比原来缩短 30%(惯性能衰减时间降低 36%)。

迭代次数	定位时间(ms)	急动度 G1(°/s3)	急动度 G2(°/s3)	急动度 G3(°/s3)	急动度 G4(°/s3)	驱动时间(ms)	最大振幅(μm)	衰减时间（ms）
0（初始）	23.33	1.00E+09	1.00E+09	1.00E+09	1.00E+09	17.90	2.14	5.43
1	14.80	2.56E+11	1.28E+11	4.12E+11	5.08E+08	13.30	1.19	1.50
2	14.80	2.56E+11	1.28E+11	4.12E+11	5.08E+08	13.30	1.19	1.50
3	14.80	2.56E+11	1.28E+11	4.12E+11	5.08E+08	13.30	1.19	1.50
4（优化）	16.36	2.56E+11	1.28E+11	4.12E+11	5.58E+08	12.90	1.03	3.46
等效对称	21.94	2.67E+09	2.67E+09	2.67E+09	2.67E+09	12.90	4.65	9.04

表 1 优化历程

为了与对称加速度有更好的比较，按驱动时间为 12.90ms，计算的对称 S 型运动曲线参数为急动度 2.67E+09(° /s^3)，以同样的定位精度，获得最大残余振动振幅为 4.65μm，惯性能衰减时间为 9.04ms。与对称 S 变加速规划相比，非对称 S 型变加速运动规划的惯性能衰减时间降低 62%，总定位时间降低 25%。

如图 3 至图 4 所示，非对称变加速曲线运动过程中主频靠前分布，为产生的振动提供更多的衰减时间，使得惯性能量分配更合理。有效地提高了高速高加速运动下机构的动态性能，显著提高微电子封装设备等有精度要求的执行机构的执行效率。

本发明通过以上方法，以满足定位精度下定位时间最短为目标，提出了惯性能量时间分布最优的非对称变加速规划方法：对高速高加速机构含有运动学自由度的非线性有限元动态响应方程在时间历程上进行离散，并将运动学自由度方程通过广义逆缩减到弹性自由度上，然后通过直接积分法获得高加速启停过程中冲击响应。本发明提出方法的一个显著特点是：采用非线性有限元求解模块来对执行机构的全时间历程的惯性能量特性进行分析，充分考虑了高速启停带来的宽频振动影响。上述特点确保本发明提出方法在非线性高速高加速机构的运动规划优化领域的适用性。本发明所提出的方法也同样适用于传统执行机构的运动规划优化领域。此外，本发明提出的方法还能够避免机构运动产生谐振分量，更有利于提升高速度条件下精密定位及位/力平滑切换能力。

以上结合具体实施例描述了本发明的技术原理。这些描述只是为了解释本发明的原理，而不能以任何方式解释为对本发明保护范围的限制。基于此处的解释，本领域的技术人员不需要付出创造性的劳动即可联想到本发明的其它具体实施方式，这些方式都将落入本发明的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1. 基于非线性有限元动力学响应仿真的非对称变加速度规划方法，其特征在于：该基于非线性有限元动力学响应仿真的非对称变加速度规划方法包括以下步骤：

步骤一、根据机构几何模型，建立包含运动学自由度的装配体有限元模型，并创建非线性有限元分析解算方案；

步骤二、设定运动参数，得到参数化非对称运动函数，并作为边界条件施加到非线性有限元模型中；

步骤三、对参数化非对称运动函数进行定位历程仿真，即通过非线性有限元求解得到实时动态历程响应曲线；

步骤四、判断驱动结束后实时振动响应曲线的振幅是否满足定位精度，若不满足，则计算梯度和步长，并修改运动函数参数，继续步骤三；若满足则终止步骤三的非线性有限元求解历程，获取直至终止时刻的时间 T，进入步骤五；

步骤五、通过驱动时间和惯性能量衰减时间的测定，判断目标响应时间 T 是否为最小值，若是最小值则确定设定的运动参数为最优参数；若不是最小值则计算运动参数的梯度和步长，并重新设定运动参数，进入步骤三进行求解。

2. 根据权利要求 1 所述的基于非线性有限元动力学响应仿真的非对称变加速度规划方法，其特征在于：步骤一的具体方法如下：

a、建立机构的三维几何模型；

b、利用有限元软件对三维模型定义材料属性并进行网络划分，转换为有限元模型；

c、在机构部件的运动关节处创建运动约束，从而在有限元分析环境中建立机构的包含运动学自由度的装配体有限元模型；

d、在驱动关节，施加参数化非对称运动函数边界条件；

e、创建非线性有限元分析解算方案。

3. 根据权利要求 1 所述的基于非线性有限元动力学响应仿真的非对称变加速度规划方法，其特征在于：根据非对称运动的定义，运动分为：以急动度 G_1 进行的加加运动速段(T_1)；以急动度 G_2 进行的减加运动速段(T_2)；以急动度 G_3 进行的减加运动速段(T_3)；以急动度 G_4 进行的减减运动速段(T_4)；为了考虑惯性

能量的影响，增加考虑惯性能量的衰减时间 T_5。

4. 根据权利要求 3 所述的基于非线性有限元动力学响应仿真的非对称变加速度规划方法，其特征在于：在 S 型非对称运动中，各加速过程中急动度为常数，运动结束时速度和加速度均为零；因此，有下列等式约束：

$$T_1G_1 = T_2G_2$$
$$T_3G_3 = T_4G_4$$
$$T_1G_1(T_1 + T_2) = T_3G_3(T_3 + T_4)$$

因此，T_2、T_3、T_4 均可以用 T_1 来表示。

5. 根据权利要求 3 所述的基于非线性有限元动力学响应仿真的非对称变加速度规划方法，其特征在于：衰减时间 T_5 由下式判断：

$$abs(s\text{-}s^*)+abs(v)<\varepsilon$$

在残余振动时，速度 v 要比位移数 s 值大，当速度 v 为几乎 0，即当机构位置 s 落在定位精度 ε 范围内，上式才成立。

6. 根据权利要求 1 所述的基于非线性有限元动力学响应仿真的非对称变加速度规划方法，其特征在于：步骤五所述的优化模型为：

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5$$
$$Find(G_1, G_2, G_3, G_4)$$
$$Objective \quad : \quad Min(T)$$
$$Subject \quad to: \quad abs(s - s^*) + abs(v) < \varepsilon$$
$$T_1G_1 = T_2G_2$$
$$T_3G_3 = T_4G_4$$
$$T_1G_1(T_1 + T_2) = T_3G_3(T_3 + T_4)$$

说 明 书 附 图

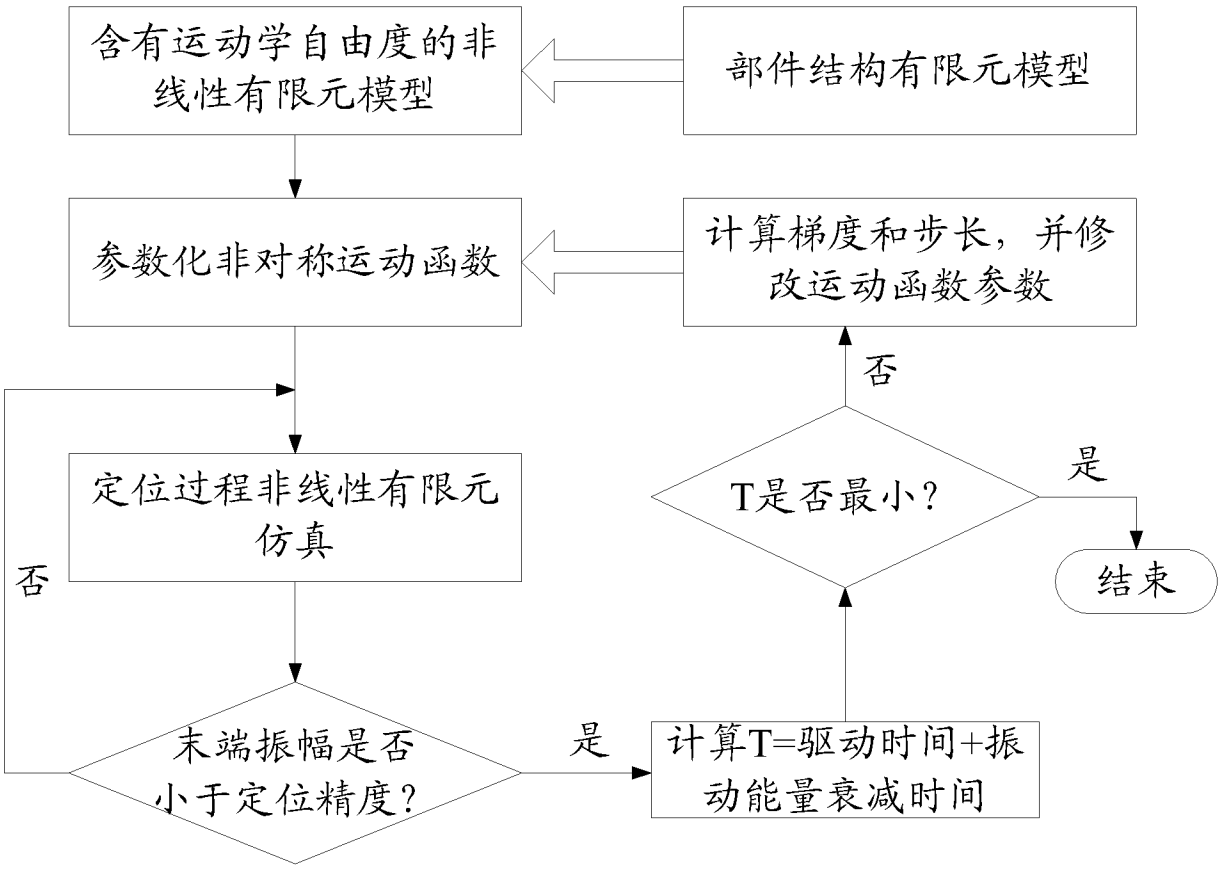

含有运动学自由度的非线性有限元模型
部件结构有限元模型
参数化非对称运动函数
计算梯度和步长，并修改运动函数参数
否
定位过程非线性有限元仿真
T是否最小？
是
结束
否
末端振幅是否小于定位精度？
是
计算T=驱动时间+振动能量衰减时间

图 1

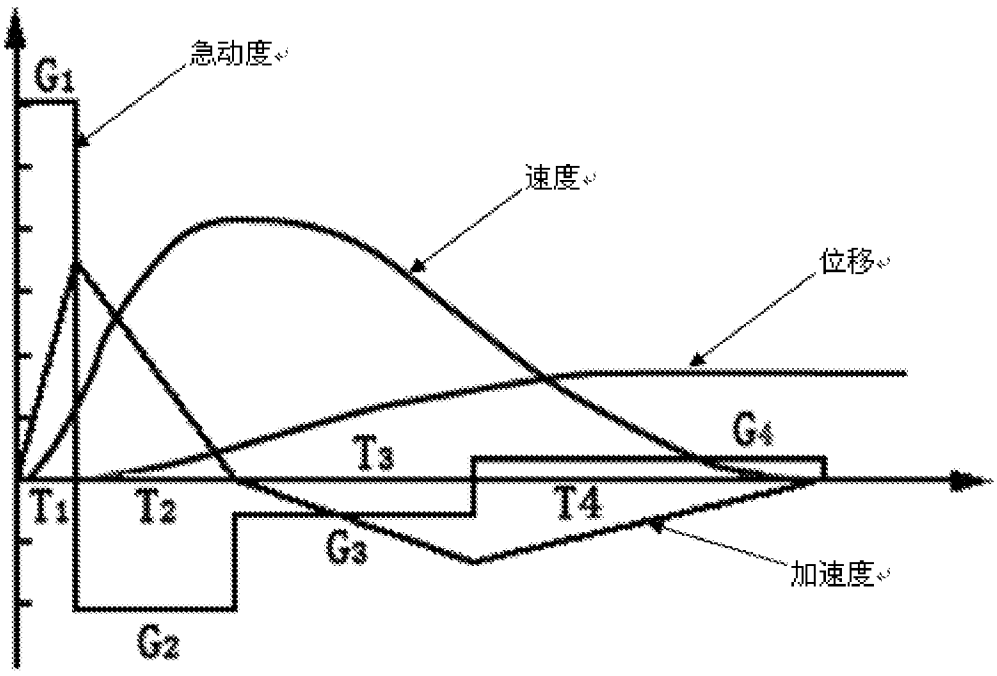

急动度
速度
位移
G1
G2
G3
G4
T1
T2
T3
T4
加速度

图 2

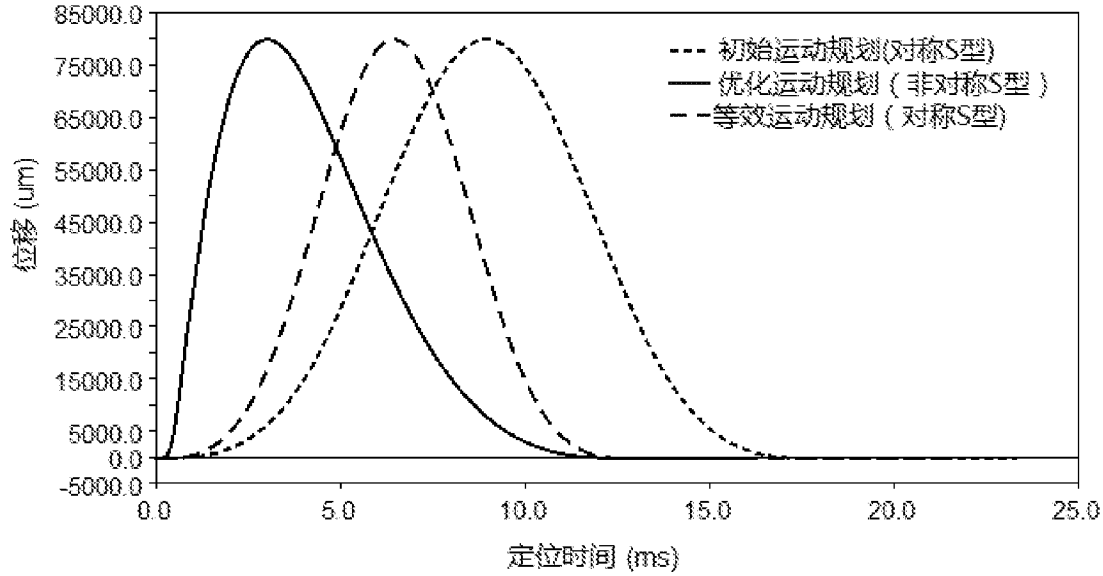

85000.0
75000.0
65000.0
55000.0
45000.0
35000.0
25000.0
15000.0
5000.0
0.0
-5000.0
位移 (um)
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
定位时间 (ms)
初始运动规划(对称S型)
优化运动规划（非对称S型）
等效运动规划（对称S型)

图 3

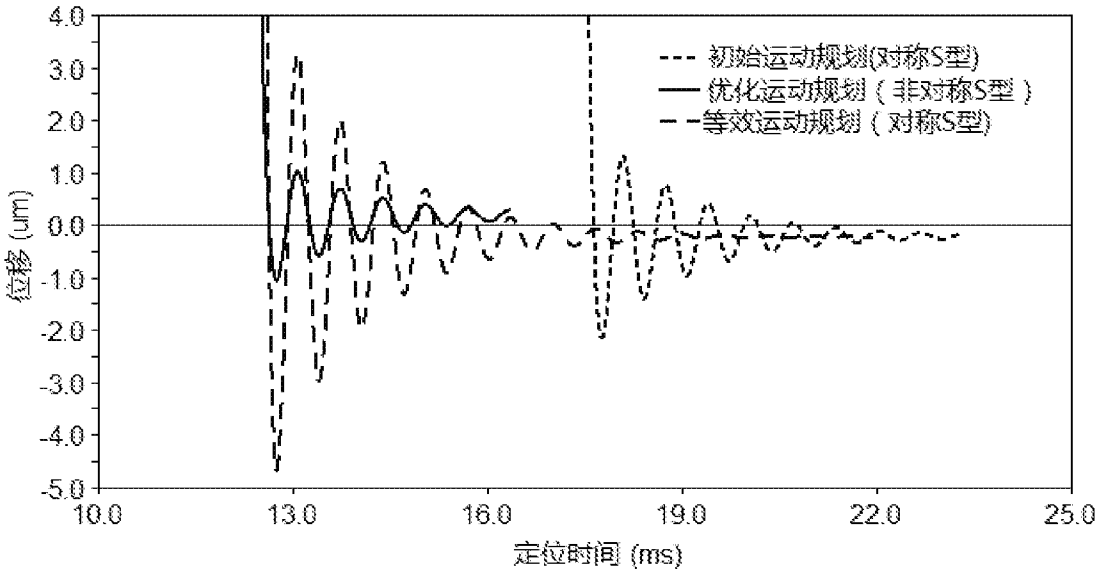

4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
-1.0
-2.0
-3.0
-4.0
-5.0
位移 (um)
10.0
13.0
16.0
19.0
22.0
25.0
定位时间 (ms)
初始运动规划(对称S型)
优化运动规划（非对称S型）
等效运动规划（对称S型)

图 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2014/087283

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 17/50 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F 17/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, WPI, EPODOC, CNKI: finite element, variable acceleration; nonlinearity, finite, element, dynamics, asymmetric, variable, acceleration, planning, model, function, vibration, amplitude, time

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 104008250 A (GUANGDONG UNIVERSITY OF TECHNOLOGY), 27 August 2014 (27.08.2014), claims 1-6	1-6
A	CN 103217212 A (NORTHEASTERN UNIVERSITY), 24 July 2013 (24.07.2013), description, paragraphs [0071]-[0104]	1-6
A	CN 102043876 A (BEIHANG UNIVERSITY et al.), 04 May 2011 (04.05.2011), the whole document	1-6
A	CN 202195941 U (FUJIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY), 18 April 2012 (18.04.2012), the whole document	1-6
A	CN 102024085 A (BEIHANG UNIVERSITY), 20 April 2011 (20.04.2011), the whole document	1-6
A	US 2013338977 A1 (FUJITSU LTD.), 19 December 2013 (19.12.2013), the whole document	1-6

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
21 November 2014 (21.11.2014)	**30 December 2014 (30.12.2014)**
Name and mailing address of the ISA/CN: State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No.: (86-10) 62019451	Authorized officer **WANG, Yong** Telephone No.: (86-10) **82245838**

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2014/087283

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 104008250 A	27 August 2014	None	
CN 103217212 A	24 July 2013	None	
CN 102043876 A	04 May 2011	None	
CN 202195941 U	18 April 2012	None	
CN 102024085 A	220 April 01 1	WO 2012083593 A1	28 June 2012
US 2013338977 A1	19 December 2013	WO 2012111082 A1	23 August 2012
		EP 2677444 A1	25 December 2013

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2014/087283

A. 主题的分类

G06F 17/50(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G06F17/-

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用）)

CNPAT,WPI,EPODOC,CNKI;非线性，有限元，动力学，非对称，变加速度，规划，模型，函数，振动，振幅，时间;
nonlinearity, finite, element, dynamics, asymmetric, variable, acceleration, planning, model, function, vibration, amplitude, time

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 104008250 A (广东工业大学) 2014年 8月 27日 (2014-08-27) 权利要求1-6	1-6
A	CN 103217212 A (东北大学) 2013年 7月 24日 (2013-07-24) 说明书第【0071】-【0104】段	1-6
A	CN 102043876 A (北京航空航天大学等) 2011年 5月 04日 (2011-05-04) 全文	1-6
A	CN 202195941 U (福建工程学院) 2012年 4月 18日 (2012-04-18) 全文	1-6
A	CN 102024085 A (北京航空航天大学) 2011年 4月 20日 (2011-04-20) 全文	1-6
A	US 2013338977 A1 (FUJITSU LTD.) 2013年 12月 19日 (2013-12-19) 全文	1-6

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

"A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

"E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

"L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）

"O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

"P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

"T" 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件

"X" 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

"Y" 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性

"&" 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2014年 11月 21日	2014年 12月 30日

ISA/CN的名称和邮寄地址	受权官员
中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN) 北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 中国 传真号 (86-10)62019451	王勇 电话号码 (86-10)82245838

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2014/087283

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	104008250	A	2014年 8月 27日	无			
CN	103217212	A	2013年 7月 24日	无			
CN	102043876	A	2011年 5月 04日	无			
CN	202195941	U	2012年 4月 18日	无			
CN	102024085	A	2011年 4月 20日	WO	2012083593	A1	2012年 6月 28日
US	2013338977	A1	2013年 12月 19日	WO	2012111082	A1	2012年 8月 23日
				EP	2677444	A1	2013年 12月 25日