



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115438513 B

(45) 授权公告日 2023.03.31

(21) 申请号 202211381404.0

(22) 申请日 2022.11.07

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 115438513 A

(43) 申请公布日 2022.12.06

(73) 专利权人 人工智能与数字经济广东省实验室(广州)

地址 510330 广东省广州市海珠区新港东路2429号首层自编051房

专利权人 华南理工大学

(72) 发明人 陈太聪 郭琴

(74) 专利代理机构 广州科粤专利商标代理有限公司 44001

专利代理师 劳剑东 黄培智

(51) Int.Cl.

G06F 30/20 (2020.01)

G06F 30/13 (2020.01)

G06F 111/10 (2020.01)

G06F 119/14 (2020.01)

审查员 陈英

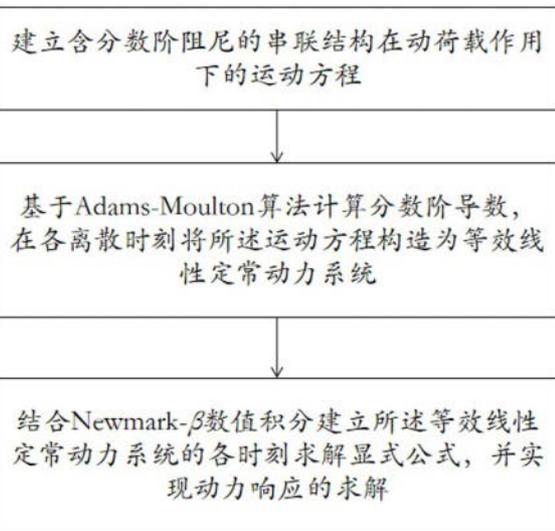
权利要求书7页 说明书12页 附图3页

(54) 发明名称

分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法、系统、设备和介质

(57) 摘要

本发明公开了一种分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法、系统、设备和介质,涉及抗震结构设计领域,所述方法包括建立含分数阶阻尼的串联结构在动荷载作用下的运动方程;基于Adams-Moulton算法计算分数阶导数,在各离散时刻将所述运动方程构造为等效线性定常动力系统的各时刻求解显式公式,并实现动力响应的求解。本发明方法具有良好的计算精度、计算稳定性和计算效率表现,易于嵌入通用动力分析软件,方便工程应用。



1. 一种分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法,其特征在于,包括:

建立含分数阶阻尼的串联结构在动荷载作用下的运动方程;

基于Adams-Moulton算法计算分数阶导数,在各离散时刻将所述运动方程构造为等效线性定常动力系统;

结合Newmark- β 数值积分建立所述等效线性定常动力系统的各时刻求解显式公式,并实现动力响应的求解;

所述含分数阶阻尼的串联结构为各层间布置有分数阶阻尼器的串联结构,所述运动方程包含所述分数阶阻尼器的恢复力模型,其中,

所述运动方程具体为:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} + \mathbf{\Lambda}\mathbf{F} = \mathbf{P}(t) \quad (1)$$

式中,

$$\mathbf{X} = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = [f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_n]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & & \\ & 1 & -1 & & & \\ & & \ddots & \ddots & & \\ & & & 1 & -1 & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为结构质量、阻尼和刚度矩阵; x_i 、 \dot{x}_i 、 \ddot{x}_i 分别为第*i*个质点的位移、速度和加速度, $i = 1, 2, \dots, n$; f_i 为第*i*个分数阶阻尼器的恢复力; $\mathbf{\Lambda}$ 为阻尼器恢复力的定位矩阵;

所述分数阶阻尼器的恢复力模型具体为:

所述分数阶阻尼器的材料本构采用Kasai定义的广义应力-应变关系进行描述:

$$\tau(t) + aD^\delta\tau(t) = G(\gamma(t) + bD^\delta\gamma(t)) \quad (5)$$

式中, $\tau(t)$ 和 $\gamma(t)$ 为材料剪应力和剪应变; G 为材料弹性参数; δ 为分数阶次, $0 < \delta < 1$; a 、 b 为温频等效参数; $D^\delta = d^\delta/dt^\delta$ 为RL型分数阶导数算子,定义为,

$$D^\delta g(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\delta)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{g(\zeta)}{(t-\zeta)^\delta} d\zeta \quad (6)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 为Gamma函数;

由式(5),可得第*j*个阻尼器恢复力与各质点位移的关系为,

$$f_i(t) + aD^\delta f_i(t) = k'(x_i(t) - x_{i-1}(t)) + k'bD^\delta(x_i(t) - x_{i-1}(t)) \quad (7)$$

式中 $k' = GA/h$, A 和 h 分别为阻尼器面积与厚度;

在 $0 < \delta < 1$ 的条件下, RL型分数阶导数可以转化为Caputo型分数阶导数的表达,

$$D^\delta g(t) = {}^c D^\delta g(t) + \frac{t^{-\delta} g(0)}{\Gamma(1-\delta)} \quad (8)$$

式中, ${}^c D^\delta$ 为Caputo型分数阶导数算子, 定义为

$${}^c D^\delta g(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\delta)} \int_0^t \frac{\dot{g}(\zeta)}{(t-\zeta)^\delta} d\zeta \quad (9)$$

在第 t_p 离散时刻, 基于Adams-Moulton算法的Caputo分数阶导数求解如下,

$${}^c D^\delta g(t_p) = \frac{\Delta t^{1-\delta}}{\Gamma(3-\delta)} \sum_{j=0}^p q_{j,p} \dot{g}(t_j) \quad (10)$$

式中, $p = t_p/\Delta t$; $q_{j,p}$ 取值为:

① 当 $j = 0$ 时,

$$q_{j,p} = (p-1)^{2-\delta} - p^{1-\delta}(p+\delta-2)$$

② 当 $0 < j < p$ 时,

$$q_{j,p} = (p-j-1)^{2-\delta} - 2(p-j)^{2-\delta} - (p-j+1)^{2-\delta}$$

③ 当 $j = p$ 时,

$$q_{j,p} = 1$$

根据式(7), 当 $g(t)$ 取 $f_i(t)$ 时, $\dot{g}(t_j)$ 采用一阶差分 $[f_i(t_j) - f_i(t_{j-1})]/\Delta t$ 近似计算; 当

$g(t)$ 取 $x_i(t) - x_{i-1}(t)$ 时, $\dot{g}(t_j)$ 等于 $\dot{x}_i(t_j) - \dot{x}_{i-1}(t_j)$;

构造等效线性定常动力系统的步骤具体为:

在第 t_p 离散时刻, 综合式(2)、(3)和(7), 可得阻尼力向量和质点位移向量之间满足如下关系,

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(t_p) = & -aD^\delta \mathbf{F}(t_p) + k' \Lambda^T \mathbf{X}(t_p) \\ & + k' b \Lambda^T D^\delta \mathbf{X}(t_p) \end{aligned} \quad (11)$$

结合式(8)和(12),对 $D^\delta \mathbf{F}(t_p)$ 和 $D^\delta \mathbf{X}(t_p)$ 进行数值求解表达,再代回式(11),最终整理可得,

$$\mathbf{F}(t_p) = \frac{\lambda \Delta t}{\mu + \Delta t} \Lambda^T \dot{\mathbf{X}}(t_p) + \frac{k' \Delta t}{\mu + \Delta t} \Lambda^T \mathbf{X}(t_p) \quad (12)$$

$$-\mathbf{B}(t_p)$$

式中,

$$\mu = \frac{a \Delta t^{1-\delta}}{\Gamma(3-\delta)} \quad (13)$$

$$\lambda = \frac{k' b \Delta t^{1-\delta}}{\Gamma(3-\delta)} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(t_p) = & -\frac{\lambda \Delta t}{\mu + \Delta t} \Lambda^T \sum_{j=1}^{p-1} q_{j,p} \dot{\mathbf{X}}(t_j) + \frac{\mu \Delta t}{\mu + \Delta t} \\ & \cdot \left(\sum_{j=1}^{p-1} q_{j,p} \frac{\mathbf{F}(t_j) - \mathbf{F}(t_{j-1})}{\Delta t} - \frac{\mathbf{F}(t_{p-1})}{\Delta t} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $\mathbf{B}(t_p)$ 应用了零初始条件进行简化,即 $\mathbf{F}(0) = \dot{\mathbf{F}}(0) = \mathbf{X}(0) = \dot{\mathbf{X}}(0) = \mathbf{0}$;

将式(12)代入第 t_p 离散时刻的结构整体运动方程(1)中,最终整理可得,

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}}(t_p) + \bar{\mathbf{C}} \dot{\mathbf{X}}(t_p) + \bar{\mathbf{K}} \mathbf{X}(t_p) = \bar{\mathbf{P}}(t_p) \quad (16)$$

式中,

$$\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{C} + \frac{\lambda \Delta t}{\mu + \Delta t} \Lambda \Lambda^T \quad (17)$$

$$\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K} + \frac{k' \Delta t}{\mu + \Delta t} \Lambda \Lambda^T \quad (18)$$

$$\bar{\mathbf{P}}(t_p) = \mathbf{P}(t_p) + \Lambda \mathbf{B}(t_p) \quad (19)。$$

2. 根据权利要求1所述的分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法,其特征在于,结合Newmark- β 数值积分建立所述等效线性定常动力系统的各时刻求解显式公式的步

骤具体为：

利用Newmark- β 建立动力响应的逐时刻求解列式如下：

$$\mathbf{X}(t_p) = \tilde{\mathbf{K}}^{-1} \tilde{\mathbf{P}}(t_p) \quad (20)$$

$$\dot{\mathbf{X}}(t_p) = a_1 (\mathbf{X}(t_p) - \mathbf{X}(t_{p-1})) - a_4 \dot{\mathbf{X}}(t_{p-1}) - a_5 \ddot{\mathbf{X}}(t_{p-1}) \quad (21)$$

$$\ddot{\mathbf{X}}(t_p) = a_0 (\mathbf{X}(t_p) - \mathbf{X}(t_{p-1})) - a_2 \dot{\mathbf{X}}(t_{p-1}) - a_3 \ddot{\mathbf{X}}(t_{p-1}) \quad (22)$$

$$\mathbf{F}(t_p) = \frac{\lambda \Delta t}{\mu + \Delta t} \Lambda^T \dot{\mathbf{X}}(t_p) + \frac{k' \Delta t}{\mu + \Delta t} \Lambda^T \mathbf{X}(t_p) - \mathbf{B}(t_p) \quad (23)$$

式中，

$$\tilde{\mathbf{K}} = \bar{\mathbf{K}} + a_0 \mathbf{M} + a_1 \bar{\mathbf{C}} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{P}}(t_p) = & \mathbf{P}(t_p) + \Lambda \mathbf{B}(t_p) \\ & + \mathbf{M} (a_0 \mathbf{X}(t_{p-1}) + a_2 \dot{\mathbf{X}}(t_{p-1}) + a_3 \ddot{\mathbf{X}}(t_{p-1})) \\ & + \bar{\mathbf{C}} (a_1 \mathbf{X}(t_{p-1}) + a_4 \dot{\mathbf{X}}(t_{p-1}) + a_5 \ddot{\mathbf{X}}(t_{p-1})) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{cases} a_0 = 1/(\beta \Delta t^2) & a_1 = \gamma/(\beta \Delta t) \\ a_2 = 1/(\beta \Delta t) & a_3 = 1/(2\beta) - 1 \\ a_4 = \gamma/\beta - 1 & a_5 = \Delta t(\gamma/\beta - 2)/2 \end{cases} \quad (26),$$

其中 $p = 1, 2, \dots, n$ 。

3. 一种分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析系统，其特征在于，包括：

第一处理单元，其用于建立含分数阶阻尼的串联结构在动荷载作用下的运动方程；

第二处理单元，其用于基于Adams-Moulton算法计算分数阶导数，在各离散时刻将所述运动方程构造为等效线性定常动力系统；

第三处理单元，其用于结合Newmark- β 数值积分建立所述等效线性定常动力系统的各时刻求解显式公式，并实现动力响应的求解；以及，

输出单元，其用于输出动力响应的解；其中，

所述含分数阶阻尼的串联结构为各层间布置有分数阶阻尼器的串联结构，所述运动方程包含所述分数阶阻尼器的恢复力模型，其中，

所述运动方程具体为：

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K} \mathbf{X} + \Lambda \mathbf{F} = \mathbf{P}(t) \quad (1)$$

式中，

$$\mathbf{X} = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = [f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_n]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & \\ & 1 & -1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & 1 & -1 \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为结构质量、阻尼和刚度矩阵; x_i 、 \dot{x}_i 、 \ddot{x}_i 分别为第 i 个质点的位移、速度和加速度, $i = 1, 2, \dots, n$; f_i 为第 i 个分数阶阻尼器的恢复力; $\mathbf{\Lambda}$ 为阻尼器恢复力的定位矩阵;

所述分数阶阻尼器的恢复力模型具体为:

所述分数阶阻尼器的材料本构采用Kasai定义的广义应力-应变关系进行描述:

$$\tau(t) + aD^\delta \tau(t) = G(\gamma(t) + bD^\delta \gamma(t)) \quad (5)$$

式中, $\tau(t)$ 和 $\gamma(t)$ 为材料剪应力和剪应变; G 为材料弹性参数; δ 为分数阶次, $0 < \delta < 1$; a 、 b 为温频等效参数; $D^\delta = d^\delta / dt^\delta$ 为RL型分数阶导数算子, 定义为,

$$D^\delta g(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\delta)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{g(\zeta)}{(t-\zeta)^\delta} d\zeta \quad (6)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 为Gamma函数;

由式(5), 可得第 i 个阻尼器恢复力与各质点位移的关系为,

$$f_i(t) + aD^\delta f_i(t) = k'(x_i(t) - x_{i-1}(t)) + k'bD^\delta(x_i(t) - x_{i-1}(t)) \quad (7)$$

式中 $k' = GA/h$, A 和 h 分别为阻尼器面积与厚度;

在 $0 < \delta < 1$ 的条件下, RL型分数阶导数可以转化为Caputo型分数阶导数的表达,

$$D^\delta g(t) = {}^c D^\delta g(t) + \frac{t^{-\delta} g(0)}{\Gamma(1-\delta)} \quad (8)$$

式中, ${}^c D^\delta$ 为Caputo型分数阶导数算子, 定义为

$${}^c D^\delta g(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\delta)} \int_0^t \frac{\dot{g}(\zeta)}{(t-\zeta)^\delta} d\zeta \quad (9)$$

在第 t_p 离散时刻, 基于Adams-Moulton算法的Caputo分数阶导数求解如下,

$${}^c D^\delta g(t_p) = \frac{\Delta t^{1-\delta}}{\Gamma(3-\delta)} \sum_{j=0}^p q_{j,p} \dot{g}(t_j) \quad (10)$$

式中, $p = t_p / \Delta t$; $q_{j,p}$ 取值为:

① 当 $j = 0$ 时,

$$q_{j,p} = (p-1)^{2-\delta} - p^{1-\delta}(p+\delta-2)$$

② 当 $0 < j < p$ 时,

$$q_{j,p} = (p-j-1)^{2-\delta} - 2(p-j)^{2-\delta} - (p-j+1)^{2-\delta}$$

③ 当 $j = p$ 时,

$$q_{j,p} = 1$$

根据式(7), 当 $g(t)$ 取 $f_i(t)$ 时, $\dot{g}(t_j)$ 采用一阶差分 $[f_i(t_j) - f_i(t_{j-1})] / \Delta t$ 近似计算; 当

$g(t)$ 取 $x_i(t) - x_{i-1}(t)$ 时, $\dot{g}(t_j)$ 等于 $\dot{x}_i(t_j) - \dot{x}_{i-1}(t_j)$;

构造等效线性定常动力系统的步骤具体为:

在第 t_p 离散时刻, 综合式(2)、(3)和(7), 可得阻尼力向量和质点位移向量之间满足如下关系,

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(t_p) = & -a D^\delta \mathbf{F}(t_p) + k' \Lambda^T \mathbf{X}(t_p) \quad (11) \\ & + k' b \Lambda^T D^\delta \mathbf{X}(t_p) \end{aligned}$$

结合式(8)和(12), 对 $D^\delta \mathbf{F}(t_p)$ 和 $D^\delta \mathbf{X}(t_p)$ 进行数值求解表达, 再代回式(11), 最终整理可得,

$$\mathbf{F}(t_p) = \frac{\lambda \Delta t}{\mu + \Delta t} \Lambda^T \dot{\mathbf{X}}(t_p) + \frac{k' \Delta t}{\mu + \Delta t} \Lambda^T \mathbf{X}(t_p) \quad (12)$$

$-\mathbf{B}(t_p)$

式中,

$$\mu = \frac{a \Delta t^{1-\delta}}{\Gamma(3-\delta)} \quad (13)$$

$$\lambda = \frac{k' b \Delta t^{1-\delta}}{\Gamma(3-\delta)} \quad (14)$$

$$\mathbf{B}(t_p) = -\frac{\lambda \Delta t}{\mu + \Delta t} \mathbf{\Lambda}^T \sum_{j=1}^{p-1} q_{j,p} \dot{\mathbf{X}}(t_j) + \frac{\mu \Delta t}{\mu + \Delta t} \cdot \left(\sum_{j=1}^{p-1} q_{j,p} \frac{\mathbf{F}(t_j) - \mathbf{F}(t_{j-1})}{\Delta t} - \frac{\mathbf{F}(t_{p-1})}{\Delta t} \right) \quad (15)$$

其中 $\mathbf{B}(t_p)$ 应用了零初始条件进行简化, 即 $\mathbf{F}(0) = \dot{\mathbf{F}}(0) = \mathbf{X}(0) = \dot{\mathbf{X}}(0) = \mathbf{0}$;

将式 (12) 代入第 t_p 离散时刻的结构整体运动方程 (1) 中, 最终整理可得,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t_p) + \bar{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{X}}(t_p) + \bar{\mathbf{K}}\mathbf{X}(t_p) = \bar{\mathbf{P}}(t_p) \quad (16)$$

式中,

$$\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{C} + \frac{\lambda \Delta t}{\mu + \Delta t} \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Lambda}^T \quad (17)$$

$$\bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K} + \frac{k' \Delta t}{\mu + \Delta t} \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Lambda}^T \quad (18)$$

$$\bar{\mathbf{P}}(t_p) = \mathbf{P}(t_p) + \mathbf{\Lambda} \mathbf{B}(t_p) \quad (19)。$$

4. 一种电子设备, 其特征在于, 所述电子设备包括处理器和存储器, 所述存储器中存储有至少一条指令、至少一段程序、代码集或指令集, 所述至少一条指令、所述至少一段程序、所述代码集或指令集由所述处理器加载并执行, 以实现如权利要求1至2任一所述的分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法。

5. 一种计算机可读存储介质, 其特征在于, 所述存储介质中存储有至少一条指令、至少一段程序、代码集或指令集, 所述至少一条指令、所述至少一段程序、所述代码集或指令集由处理器加载并执行以实现权利要求1至2任一所述的分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法。

分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法、系统、设备和介质

技术领域

[0001] 本发明涉及抗震结构设计领域,具体涉及一种分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法、系统、设备和介质。

背景技术

[0002] 分数阶导数广泛应用于电磁学、热力学和流体力学等学科领域,在振动工程中常用于描述粘弹性阻尼器和磁流变阻尼器等的本构模型,高精度地拟合力学性能与温度、频率等因素之间的关系。

[0003] 含分数阶阻尼的结构呈现时间记忆特征,其动力响应的解析计算通常需要转换到拉氏域或傅氏域内进行,少数情况下能得到单自由度振子的精确解答。相对而言,时域内的数值求解更具有实践意义。对于Grunwald-Letnikov型分数阶导数,Oldham和Spanier提出了G1算法,已应用于随机振动分析及灵敏度分析等研究。对于实践中更为普遍的Riemann-Liouville (RL)型分数阶导数,Oldham和Spanier引入时间步长内的常一阶变化率假设,提出了L1算法。基于该算法,Koh和Kelly应用中心差分法进行了单自由度振子的动力分析,Shokooh和Suárez应用中心差分法和平均加速度法,求解了1/2阶振子系统的动力响应。进一步地,Singh和Chang引入常二阶变化率假设和常三阶变化率假设,提出类L1算法,发展了减震结构地震作用分析方法。在相关应用研究中,由于这些计算假设的引入,初始起步条件往往需要特别计算处理,大阻尼情况下也需要避免计算失稳问题。

[0004] 考虑到阻尼器性能的频率相关性,工程实践中通常根据结构基频,近似计算阻尼器的等效刚度矩阵和阻尼矩阵,然后按照拟线性结构求解动力响应。该工程近似算法虽然简单高效,但对于加速度、速度、阻尼力等高阶频率效应显著的响应求解有一定误差。

[0005] 因此,现有技术中的含分数阶阻尼的结构的动力响应的算法存在计算精度低、计算稳定性差和计算效率低的不足。

发明内容

[0006] 针对现有技术中的不足,本发明提供一种分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法、系统、设备和介质,其具有良好的计算精度、计算稳定性和计算效率表现,易于嵌入通用动力分析软件,方便工程应用。

[0007] 为实现上述目的,本发明的技术方案是这样实现的:

[0008] 第一方面,本发明提供一种分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法,其包括:

[0009] 建立含分数阶阻尼的串联结构在动荷载作用下的运动方程;

[0010] 基于Adams-Moulton算法计算分数阶导数,在各离散时刻将所述运动方程构造为等效线性定常动力系统;

[0011] 结合Newmark- β 数值积分建立所述等效线性定常动力系统的各时刻求解显式公式,并实现动力响应的求解。

[0012] 第二方面,本发明提供一种分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析系统,其包括:

[0013] 第一处理单元,其用于建立含分数阶阻尼的串联结构在动荷载作用下的运动方程;

[0014] 第二处理单元,其用于基于Adams-Moulton算法计算分数阶导数,在各离散时刻将所述运动方程构造为等效线性定常动力系统;

[0015] 第三处理单元,其用于结合Newmark- β 数值积分建立所述等效线性定常动力系统的各时刻求解显式公式,并实现动力响应的求解;以及,

[0016] 输出单元,其用于输出动力响应的解。

[0017] 第三方面,本发明提供一种电子设备,所述电子设备包括处理器和存储器,所述存储器中存储有至少一条指令、至少一段程序、代码集或指令集,所述至少一条指令、所述至少一段程序、所述代码集或指令集由所述处理器加载并执行,以实现如上所述的分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法。

[0018] 第四方面,本发明提供一种计算机可读存储介质,所述存储介质中存储有至少一条指令、至少一段程序、代码集或指令集,所述至少一条指令、所述至少一段程序、所述代码集或指令集由处理器加载并执行以实现如上所述的分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法。

[0019] 本发明与现有技术相比,其有益效果在于:本发明针对分数阶阻尼结构,基于高精度和强稳定的分数阶导数的数值求解算法,构造得到等效线性定常动力系统,继而结合Newmark- β 法建立了动力积分显式公式,实现了对结构动力响应的高效时域数值求解。本发明通过单自由度振子和多自由度减震结构算例,对比考察了本发明方法、解析解和多种数值算法,验证了本发明方法具有良好的计算精度、计算稳定性和计算效率表现,易于嵌入通用动力分析软件,方便工程应用。

附图说明

[0020] 为了更清楚地说明本发明实施例中的技术方案,下面将对实施例中所需要使用的附图进行简单的介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本申请的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0021] 图1为本发明实施例中的含分数阶阻尼的串联结构的结构示意图;

[0022] 图2为本发明实施例中两种荷载和两种阻尼情况下基于0.05s时间步长的位移时程计算结果图;

[0023] 图3为本发明实施例中EL Centro 地震动作用下各层最大响应计算结果图;

[0024] 图4为发明实施例中分析方法的流程图;

[0025] 图5为发明实施例中实施方法的系统的结构示意图;

[0026] 图6为发明实施例中实施方法的电子设备的结构示意图。

具体实施方式

[0027] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整的描述,显然,所描述的实施例仅是本申请一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实

施例,都属于本申请保护的范围。

[0028] 实施例:

[0029] 需要说明的是,本发明的说明书和权利要求书及上述附图中的术语“第一”、“第二”等是用于区别类似的对象,而不必用于描述特定的顺序或先后次序。应该理解这样使用的数据在适当情况下可以互换,以便这里描述的本发明的实施例能够以除了在这里图示或描述的那些以外的顺序实施。此外,本发明实施例的术语“包括”和“具有”以及他们的任何变形,意图在于覆盖不排他的包含,例如,包含了一系列步骤或单元的过程、方法、系统、产品或设备不必限于清楚地列出的那些步骤或单元,而是可包括没有清楚地列出的或对于这些过程、方法、产品或设备固有的其它步骤或单元。

[0030] 在本发明的描述中,“多个”的含义是至少两个,例如两个、三个等,除非另有明确具体的限定。此外,除非另有明确的规定和限定,术语“安装”、“相连”、“连接”应做广义理解,例如,可以是固定连接,也可以是可拆卸连接,或一体地连接;可以是机械连接,也可以是电连接;可以是直接相连,也可以通过中间媒介间接相连,可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言,可以根据具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

[0031] 下文中所用的词语“示例性”的意思为“用作例子、实施例或说明性”。作为“示例性”所说明的任何实施例不必解释为优于或好于其它实施例。

[0032] 本发明针对RL分数阶阻尼结构,通过引入Caputo型分数阶导数和基于多步预估-校正的Adams-Moulton算法对RL分数阶导数进行数值求解表达,继而在各离散时刻构造等效线性定常动力系统,再结合无条件稳定的数值积分方案推导得到各时刻计算显式公式,实现对动力响应的高精度、强稳定和直接快速求解。在数值算例中,首先以单自由度振子受简谐荷载和单位脉冲为例,对比考察解析解、两种L1型直接算法和本发明方法的计算精度和稳定性;再以多层阻尼减震结构受地震作用为例,对比考察迭代数值算法、工程近似算法和本发明方法在计算精度和计算效率上的综合表现,检验工程应用前景。

[0033] 基于此并参考图4,本发明提供一种分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法,具体可以包括下述步骤:

[0034] 步骤1:建立含分数阶阻尼的串联结构在动荷载作用下的运动方程。

[0035] 具体的,如图1所示,图1展示了本发明实施例中的含分数阶阻尼的串联结构的结构示意图,不失一般性,考虑串联结构,各层间布置分数阶阻尼器。在动荷载作用下,其运动方程可表示为:

$$[0036] \quad M\ddot{X} + C\dot{X} + KX + \Delta F = P(t) \quad (1)$$

[0037] 式中,

$$\mathbf{X} = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = [f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_n]^T \quad (3)$$

$$[0038] \quad \mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & \\ & 1 & -1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & 1 & -1 \\ & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0039] 其中, \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为结构质量、阻尼和刚度矩阵; x_i 、 \dot{x}_i 、 \ddot{x}_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 分别为第 i 个质点的位移、速度和加速度; f_i 为第 i 个分数阶阻尼器的恢复力; $\mathbf{\Lambda}$ 为阻尼器恢复力的定位矩阵。

[0040] 分数阶阻尼器的材料本构采用Kasai定义的广义应力-应变关系进行描述:

$$[0041] \quad \tau(t) + aD^\delta \tau(t) = G(\gamma(t) + bD^\delta \gamma(t)) \quad (5)$$

[0042] 式中, $\tau(t)$ 和 $\gamma(t)$ 为材料剪应力和剪应变; G 为材料弹性参数; δ 为分数阶次 ($0 < \delta < 1$); a 、 b 为温频等效参数; $D^\delta = d^\delta / dt^\delta$ 为RL型分数阶导数算子, 定义为,

$$[0043] \quad D^\delta g(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\delta)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{g(\zeta)}{(t-\zeta)^\delta} d\zeta \quad (6)$$

[0044] 其中, $\Gamma(\cdot)$ 为Gamma函数。

[0045] 由式(5), 可得第 i 个阻尼器恢复力与各质点位移的关系为,

$$[0046] \quad \begin{aligned} f_i(t) + aD^\delta f_i(t) = & k'(x_i(t) - x_{i-1}(t)) \\ & + k'bD^\delta(x_i(t) - x_{i-1}(t)) \end{aligned} \quad (7)$$

[0047] 式中 $k' = GA/h$, A 和 h 分别为阻尼器面积与厚度。

[0048] 进一步的, 在对分数阶阻尼器恢复力的数值求解的问题中, 在 $0 < \delta < 1$ 的条件下, RL型分数阶导数可以转化为Caputo型分数阶导数的表达,

$$[0049] \quad D^\delta g(t) = {}^c D^\delta g(t) + \frac{t^{-\delta} g(0)}{\Gamma(1-\delta)} \quad (8)$$

[0050] 式中, ${}^c D^\delta$ 为Caputo型分数阶导数算子, 定义为

[0051]
$${}^c D^\delta g(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\delta)} \int_0^t \frac{\dot{g}(\zeta)}{(t-\zeta)^\delta} d\zeta \quad (9)$$

[0052] 由于Caputo定义中包含的整数阶导数具有明确的物理意义,也易于处理初始条件,因此,RL导数的求解可以方便地采用Caputo导数进行。

[0053] 研究人员试图利用传统L1算法求解,如Oldham和Spanier将Caputo导数离散为序列时间步的累积积分运算,

[0054]
$${}^c D^\delta g(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\delta)} \sum_{j=1}^{n-1} \int_{(j-1)\Delta t}^{j\Delta t} \frac{\dot{g}(\zeta)}{(t-\zeta)^\delta} d\zeta \quad (10)$$

[0055] 在各时间步内,假设一阶变化率 $\dot{g}(\zeta)$ 为常数,即

[0056]
$$\int_{(j-1)\Delta t}^{j\Delta t} \frac{\dot{g}(\zeta)}{(t-\zeta)^\delta} d\zeta \approx \frac{g(j\Delta t) - g((j-1)\Delta t)}{\Delta t} \int_{(j-1)\Delta t}^{j\Delta t} \frac{1}{(t-\zeta)^\delta} d\zeta \quad (11)$$

[0057] 则通过对时间函数的独立积分可实现近似计算。这种L1算法本质上属于单步预估算法,精度和稳定性不能充分保障。其它引入常二阶变化率假设和常三阶变化率假设的算法与L1算法一样同属单步预估算法,计算表现相似。

[0058] 本发明针对式(9)定义的Caputo分数阶导数,将引入Adams-Moulton算法进行数值表达。该方法无需对被积函数进行假设,采用含预估-校正机制的多步算法进行高精度的求解,具有 $0 < \delta < 1$ 阶次内的绝对稳定性,在常/变阶次分数阶微分方程求解中已得到了广泛的应用。

[0059] 在第 t_p 离散时刻,基于Adams-Moulton算法的Caputo分数阶导数求解如下,

[0060]
$${}^c D^\delta g(t_p) = \frac{\Delta t^{1-\delta}}{\Gamma(3-\delta)} \sum_{j=0}^p q_{j,p} \dot{g}(t_j) \quad (12)$$

[0061] 式中, $p = t_p/\Delta t$; $q_{j,p}$ 取值为:

[0062] 当 $j = 0$ 时,

[0063]
$$q_{j,p} = (p-1)^{2-\delta} - p^{1-\delta}(p+\delta-2)$$

[0064] ② 当 $0 < j < p$ 时,

$$[0065] \quad q_{j,p} = (p - j - 1)^{2-\delta} - 2(p - j)^{2-\delta} - (p - j + 1)^{2-\delta}$$

[0066] ③ 当 $j = p$ 时, $q_{j,p} = 1$

[0067] 根据式 (7), 当 $g(t)$ 取 $f_i(t)$ 时, $\dot{g}(t_j)$ 采用一阶差分 $[f_i(t_j) - f_i(t_{j-1})]/\Delta t$ 近似计算; 当 $g(t)$ 取 $x_i(t) - x_{i-1}(t)$ 时, $\dot{g}(t_j)$ 等于 $\dot{x}_i(t_j) - \dot{x}_{i-1}(t_j)$ 。

[0068] 原则上, 采用以上方法对式 (7) 进行数值求解, 并与结构整体运动方程式 (1) 之间进行往复迭代计算, 可以实现对结构动力响应的高精度求解。但该迭代数值算法的计算效率低下, 特殊的求解程序设计也难以在通用动力分析软件中直接应用。

[0069] 本发明以下将基于 Adams-Moulton 算法进行线性系统等效, 继而实现高效率直接求解。

[0070] 步骤 2: 基于 Adams-Moulton 算法计算分数阶导数, 在各离散时刻将所述运动方程构造为等效线性定常动力系统;

[0071] 具体的, 在第 t_p 离散时刻, 综合式 (2)、(3) 和 (7), 可得阻尼力向量和质点位移向量之间满足如下关系,

$$[0072] \quad \begin{aligned} \mathbf{F}(t_p) = & -aD^\delta \mathbf{F}(t_p) + k' \Lambda^T \mathbf{X}(t_p) \\ & + k' b \Lambda^T D^\delta \mathbf{X}(t_p) \end{aligned} \quad (13)$$

[0073] 结合式 (8) 和 (12), 对 $D^\delta \mathbf{F}(t_p)$ 和 $D^\delta \mathbf{X}(t_p)$ 进行数值求解表达, 再代回式 (13), 最终整理可得,

$$[0074] \quad \begin{aligned} \mathbf{F}(t_p) = & \frac{\lambda \Delta t}{\mu + \Delta t} \Lambda^T \dot{\mathbf{X}}(t_p) + \frac{k' \Delta t}{\mu + \Delta t} \Lambda^T \mathbf{X}(t_p) \\ & - \mathbf{B}(t_p) \end{aligned} \quad (14)$$

[0075] 式中,

$$[0076] \quad \mu = \frac{a \Delta t^{1-\delta}}{\Gamma(3-\delta)} \quad (15)$$

$$[0077] \quad \lambda = \frac{k' b \Delta t^{1-\delta}}{\Gamma(3-\delta)} \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{B}(t_p) = & -\frac{\lambda\Delta t}{\mu + \Delta t} \mathbf{\Lambda}^T \sum_{j=1}^{p-1} q_{j,p} \dot{\mathbf{X}}(t_j) + \frac{\mu\Delta t}{\mu + \Delta t} \\
 [0078] & \cdot \left(\sum_{j=1}^{p-1} q_{j,p} \frac{\mathbf{F}(t_j) - \mathbf{F}(t_{j-1})}{\Delta t} - \frac{\mathbf{F}(t_{p-1})}{\Delta t} \right) \quad (17)
 \end{aligned}$$

[0079] 其中 $\mathbf{B}(t_p)$ 应用了零初始条件进行简化, 即 $\mathbf{F}(0) = \dot{\mathbf{F}}(0) = \mathbf{X}(0) = \dot{\mathbf{X}}(0) = \mathbf{0}$ 。

[0080] 将式 (14) 代入第 t_p 离散时刻的结构整体运动方程 (1) 中, 最终整理可得,

$$[0081] \quad \mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}}(t_p) + \bar{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{X}}(t_p) + \bar{\mathbf{K}}\mathbf{X}(t_p) = \bar{\mathbf{P}}(t_p) \quad (18)$$

[0082] 式中,

$$[0083] \quad \bar{\mathbf{C}} = \mathbf{C} + \frac{\lambda\Delta t}{\mu + \Delta t} \mathbf{\Lambda}\mathbf{\Lambda}^T \quad (19)$$

$$[0084] \quad \bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K} + \frac{k'\Delta t}{\mu + \Delta t} \mathbf{\Lambda}\mathbf{\Lambda}^T \quad (20)$$

$$[0085] \quad \bar{\mathbf{P}}(t_p) = \mathbf{P}(t_p) + \mathbf{\Lambda}\mathbf{B}(t_p) \quad (21)$$

[0086] 由式 (18) 可见, 该时刻的结构已等效为一个线性动力系统, 且等效系统的质量、阻尼和刚度矩阵均为常数矩阵, 只与原系统矩阵和阻尼器参数有关, 与结构响应无关, 因此为线性定常动力系统。

[0087] 步骤3: 结合Newmark- β 数值积分建立所述等效线性定常动力系统的各时刻求解显式公式, 并实现动力响应的求解。

[0088] 具体的, 对于上述得到的等效线性定常动力系统, 可以方便地采用任意通用的动力时程计算方案来求解结构动力响应。

[0089] 考虑到广泛应用的Newmark- β 数值积分方案具有无条件稳定性, 且不需要额外处理起步计算问题, 因此本发明以Newmark- β 方案为例, 建立动力响应的逐时刻求解列式如下

$$(p = 1, 2, \dots, n),$$

$$\mathbf{X}(t_p) = \tilde{\mathbf{K}}^{-1} \tilde{\mathbf{P}}(t_p) \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}(t_p) &= a_1 (\mathbf{X}(t_p) - \mathbf{X}(t_{p-1})) - a_4 \dot{\mathbf{X}}(t_{p-1}) \\ &\quad - a_5 \ddot{\mathbf{X}}(t_{p-1}) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{X}}(t_p) &= a_0 (\mathbf{X}(t_p) - \mathbf{X}(t_{p-1})) - a_2 \dot{\mathbf{X}}(t_{p-1}) \\ &\quad - a_3 \ddot{\mathbf{X}}(t_{p-1}) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(t_p) &= \frac{\lambda \Delta t}{\mu + \Delta t} \Lambda^T \dot{\mathbf{X}}(t_p) + \frac{k' \Delta t}{\mu + \Delta t} \Lambda^T \mathbf{X}(t_p) \\ &\quad - \mathbf{B}(t_p) \end{aligned} \quad (25)$$

[0092] 式中,

$$\tilde{\mathbf{K}} = \bar{\mathbf{K}} + a_0 \mathbf{M} + a_1 \bar{\mathbf{C}} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{P}}(t_p) &= \mathbf{P}(t_p) + \Lambda \mathbf{B}(t_p) \\ &\quad + \mathbf{M} (a_0 \mathbf{X}(t_{p-1}) + a_2 \dot{\mathbf{X}}(t_{p-1}) + a_3 \ddot{\mathbf{X}}(t_{p-1})) \\ &\quad + \bar{\mathbf{C}} (a_1 \mathbf{X}(t_{p-1}) + a_4 \dot{\mathbf{X}}(t_{p-1}) + a_5 \ddot{\mathbf{X}}(t_{p-1})) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{cases} a_0 = 1/(\beta \Delta t^2) & a_1 = \gamma/(\beta \Delta t) \\ a_2 = 1/(\beta \Delta t) & a_3 = 1/(2\beta) - 1 \\ a_4 = \gamma/\beta - 1 & a_5 = \Delta t(\gamma/\beta - 2)/2 \end{cases} \quad (28)$$

[0094] 由式(17)~(28)可见:(1) $\tilde{\mathbf{K}}$ 为定常矩阵,只需在第 t_1 时刻计算,无需逐时刻更新;(2) $\tilde{\mathbf{P}}(t_p)$ 与之前时刻的响应线性相关,无需进行迭代求解。因此,本发明新算法比迭代数值算法的计算效率更高,也易于在通用动力分析软件中直接应用。

[0095] 为了检验本发明方法的精度和稳定性,以分数阶阻尼单自由度振子分别受简谐荷载和单位脉冲为例,对比考察已有解析解、本发明方法和两种常用L1算法的计算结果。

[0096] 所考察的振子运动方程为,

$$m \ddot{x} + 2\eta m \omega_n^{3/2} D^{1/2} x + kx = P(t) \quad (29)$$

[0098] 式中, $m = 1$; $k = 100$; $\omega_n = 10 \text{rad/s}$; η 为分数阶阻尼比参数。 $P(t)$ 考虑两种荷载形式:

[0099] ① 简谐荷载 $F_0 \sin(\Omega t)$, $F_0 = 100$, $\Omega = 8 \text{ rad/s}$; ② 初始时刻的单位脉冲。

[0100] 已知简谐荷载稳态位移响应和单位脉冲位移响应的解析解分别为^[12, 28, 29]

[0101]
$$x(t) = \frac{F_0 \sin(\Omega t - \phi_3)/m}{\sqrt{(\omega_n^2 - \Omega^2 + \sqrt{2}\eta\omega_n^{3/2}\Omega^{1/2})^2 + 2\eta^2\omega_n^3\Omega}}$$

[0102]
$$\dot{h}(t) = \frac{\gamma}{m\omega_d} e^{-\eta\omega_n t/\sqrt{\chi}} \sin(\omega_d t + \phi) + \frac{4\eta\omega_n^{3/2}}{\pi m} \int_0^\infty \frac{u^2 e^{-u^2 t}}{(u^4 + \omega_n^2)^2 + (2\eta\omega_n^{3/2}u)^2} du$$

[0103] 式中各关键参数的计算详见文献。

[0104] 用于计算对比的两种典型L1算法为Shokoo和Suárez提出并得到应用的L1-中心差分法和L1-平均加速度法。

[0105] 在应用本发明方法时,对应振子的计算参数为 $a = 0$ 、 $b = 10$ 、 $C = 0$ 、 $k' = 2\eta\omega_n^{3/2}/b$,原始刚度为 $k_0 = k - k'$,Newmark- β 计算参数取为 $\gamma = 1/2$ 和 $\beta = 1/4$ 。

[0106] 分别针对小阻尼振子 ($\eta = 1$) 和大阻尼振子 ($\eta = 5$) 开展计算。在简谐荷载下的计算总时长为100s,以得到稳态响应,考察三种时间步长(0.03s,0.02s,0.01s)的计算精度。在单位脉冲下的计算总时长为1s,考察三种时间步长(0.002s,0.001s,0.0005s)的计算精度。此外,为了考察算法的稳定性,针对两种阻尼振子的两种荷载情况还开展了大时间步长(0.05s)的计算。

[0107] 表1 两种荷载和两种阻尼情况下基于三种时间步长的代表性位移计算结果

[0108]

荷载类型	阻尼 η	时间步长 (s)	解析解	本发明方法	误差(%)	L1-中心差分法	误差(%)	L1-平均加速度	误差(%)
简谐	1	0.03	0.4840714	0.4850214	0.196	0.4772257	-1.434	0.4788353	-1.082
		0.02	0.4856138	0.4860999	0.100	0.4813347	-0.889	0.4820995	-0.724
		0.01	0.4856138	0.4857551	0.029	0.4840347	-0.326	0.4842259	-0.286
	5	0.03	0.1084471	0.1085594	0.104	0.1068305	-1.513	0.1069147	-1.413
		0.02	0.1084008	0.1085094	0.100	0.1075122	-0.827	0.1075445	-0.790
		0.01	0.1086626	0.1087642	0.094	0.1084152	-0.228	0.1084239	-0.220
脉冲	1	0.0020	0.0457426	0.0457341	-0.019	0.0457711	0.062	0.0457585	0.035
		0.0010	0.0457460	0.0457439	-0.005	0.0457552	0.020	0.0457522	0.014
		0.0005	0.0457460	0.0457455	-0.001	0.0457491	0.007	0.0457484	0.005
	5	0.0020	0.0180502	0.0180359	-0.079	0.0181014	0.283	0.0180810	0.171
		0.0010	0.0180502	0.0180467	-0.019	0.0180672	0.094	0.0180621	0.066
		0.0005	0.0180503	0.0180495	-0.004	0.0180560	0.032	0.0180547	0.024

[0109] 三种时间步长下的计算结果如表1所示,其中,简谐荷载下给出的是稳态阶段的位移幅值结果,单位脉冲下给出的是瞬态最大位移结果。由表列结果可见,随着时间步长变

小,三种数值方法的计算精度都有所提高,其中各步长下本发明方法的结果精度最高,误差水平优于两种L1算法近1个量级。

[0110] 0.05s时间步长下的位移时程结果如图2所示,观察可见,当采用大时间步长时:

[0111] (1)在小阻尼情况下,三种数值方法都能保持计算稳定,但有一定计算误差(图2中的(a)和图2中的(d));

[0112] (2)在大阻尼情况下,本发明方法和L1-平均加速度法仍能保持计算稳定,但有较大计算误差(图2中的(b)和图2中的(e));而L1-中心差分法无法保持计算稳定(图2中的(c)和图2中的(f)),虽然0.05s的时间步长已充分满足计算稳定性要求的小于 $T_n/\pi(0.507s)$ 甚至更严格的小于等于 $0.1T_n(0.159s)$,仍出现了计算发散问题。

[0113] 为了检验方法在工程实践中的应用前景,以10层粘弹性阻尼钢框架结构受地震作用为例,对比考察本发明方法、迭代数值算法和工程近似算法在计算精度和计算效率上的综合表现。

[0114] 考虑加速度峰值200Gal的EL Centro(NS,1940)地震动。结构各层质量为 $m = 8 \times 10^5 \text{Kg}$,层间刚度为 $k = 2 \times 10^8 \text{N/m}$,阻尼矩阵为 $C = 0.0785M + 0.0029K$ 。

层间阻尼器的参数为: $A = 0.0976\text{m}^2$, $h = 0.0635\text{m}$, $G = 2.5 \times 10^6 \text{N/m}^2$, $a = 0.0347$,

$b = 4.16$, $\delta = 0.71$ 。

[0115] 采用三种方法和0.02s步长计算得到的结构各层最大位移、速度、加速度和阻尼恢复力结果如图3所示。由图可见,基于结构基频的工程近似算法相对于迭代数值算法有一定偏差,其中位移最大偏差约为5%,速度最大偏差约为10%,加速度和阻尼恢复力的最大偏差约为20%;而本发明方法与迭代数值算法的各类响应结果几乎一致。

[0116] 采用个人电脑(Intel i5-12400 CPU,8G内存)进行计算,迭代数值算法、工程近似算法和本发明方法的计算耗时分别为54.805s、2.584s和3.829s。对比可见,本发明方法与工程近似算法的计算效率相当,相对于迭代数值算法有10余倍的提高,表明本发明方法在计算精度和计算效率上具有较强的综合优势。

[0117] 参见图5,基于同一发明构思,本发明实施例还提供一种分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析系统,其包括:第一处理单元、第二处理单元、第三处理单元和输出单元,具体的,第一处理单元用于建立含分数阶阻尼的串联结构在动荷载作用下的运动方程;第二处理单元用于基于Adams-Moulton算法计算分数阶导数,在各离散时刻将所述运动方程构造为等效线性定常动力系统;第三处理单元用于结合Newmark- β 数值积分建立所述等效线性定常动力系统的各时刻求解显式公式,并实现动力响应的求解;输出单元用于输出动力响应的解。

[0118] 由于该系统是本发明实施例的分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法对应的系统,并且该系统解决问题的原理与方法相似,因此该系统的实施可以参见上述方法实施例的实施过程,重复之处不再赘述。

[0119] 参见图6,基于同一发明构思,本发明实施例还提供一种电子设备,所述电子设备包括处理器和存储器,所述存储器中存储有至少一条指令、至少一段程序、代码集或指令

集,所述至少一条指令、所述至少一段程序、所述代码集或指令集由所述处理器加载并执行,以实现如上所述的分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法。

[0120] 可以理解的是,存储器可以包括随机存储器(Random Access Memory, RAM),也可以包括只读存储器(Read-Only Memory)。可选地,该存储器包括非瞬时性计算机可读介质(non-transitory computer-readable storage medium)。存储器可用于存储指令、程序、代码、代码集或指令集。存储器可包括存储程序区和存储数据区,其中,存储程序区可存储用于实现操作系统的指令、用于至少一个功能的指令、用于实现上述各个方法实施例的指令等;存储数据区可存储根据服务器的使用所创建的数据等。

[0121] 处理器可以包括一个或者多个处理核心。处理器利用各种接口和线路连接整个服务器内的各个部分,通过运行或执行存储在存储器内的指令、程序、代码集或指令集,以及调用存储在存储器内的数据,执行服务器的各种功能和处理数据。可选地,处理器可以采用数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)、现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)、可编程逻辑阵列(Programmable Logic Array, PLA)中的至少一种硬件形式来实现。处理器可集成中央处理器(Central Processing Unit, CPU)和调制解调器等中的一种或几种的组合。其中,CPU主要处理操作系统和应用程序等;调制解调器用于处理无线通信。可以理解的是,上述调制解调器也可以不集成到处理器中,单独通过一块芯片进行实现。

[0122] 由于该电子设备是本发明实施例的分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法对应的电子设备,并且该电子设备解决问题的原理与该方法相似,因此该电子设备的实施可以参见上述方法实施例的实施过程,重复之处不再赘述。

[0123] 基于同一发明构思,本发明实施例还提供一种计算机可读存储介质,所述存储介质中存储有至少一条指令、至少一段程序、代码集或指令集,所述至少一条指令、所述至少一段程序、所述代码集或指令集由处理器加载并执行以实现如上所述的分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法。

[0124] 本领域普通技术人员可以理解上述实施例的各种方法中的全部或部分步骤是可以通程序来指令相关的硬件来完成,该程序可以存储于一计算机可读存储介质中,存储介质包括只读存储器(Read-Only Memory, ROM)、随机存储器(Random Access Memory, RAM)、可编程只读存储器(Programmable Read-only Memory, PROM)、可擦除可编程只读存储器(Erasable Programmable Read Only Memory, EPROM)、一次可编程只读存储器(One-time Programmable Read-Only Memory, OTPROM)、电子抹除式可复写只读存储器(Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory, EEPROM)、只读光盘(Compact Disc Read-Only Memory, CD-ROM)或其他光盘存储器、磁盘存储器、磁带存储器、或者能够用于携带或存储数据的计算机可读的任何其他介质。

[0125] 由于该存储介质是本发明实施例的分数阶阻尼减震结构抗震设计的分析方法对应的存储介质,并且该存储介质解决问题的原理与该方法相似,因此该存储介质的实施可以参见上述方法实施例的实施过程,重复之处不再赘述。

[0126] 在一些可能的实施方式中,本发明实施例的方法的各个方面还可以实现为一种程序产品的形式,其包括程序代码,当程序产品在计算机设备上运行时,程序代码用于使计算机设备执行本说明书上述描述的根据本申请各种示例性实施方式的分数阶阻尼减震结构

抗震设计的分析方法的步骤。其中,用于执行各个实施例的可执行的计算机程序代码或“代码”可以用诸如C、C++、C#、Smalltalk、Java、JavaScript、Visual Basic、结构化查询语言(例如,Transact-SQL)、Perl之类的高级编程语言或者用各种其它编程语言编写。

[0127] 在本说明书的描述中,参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不必针对的是相同的实施例或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。此外,在不相互矛盾的情况下,本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。

[0128] 上述实施例只是为了说明本发明的技术构思及特点,其目的是在于让本领域内的普通技术人员能够了解本发明的内容并据以实施,并不能以此限制本发明的保护范围。凡是根据本发明内容的实质所做出的等效的变化或修饰,都应涵盖在本发明的保护范围内。

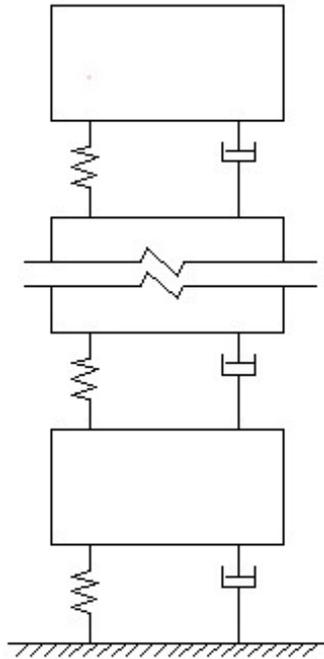


图1

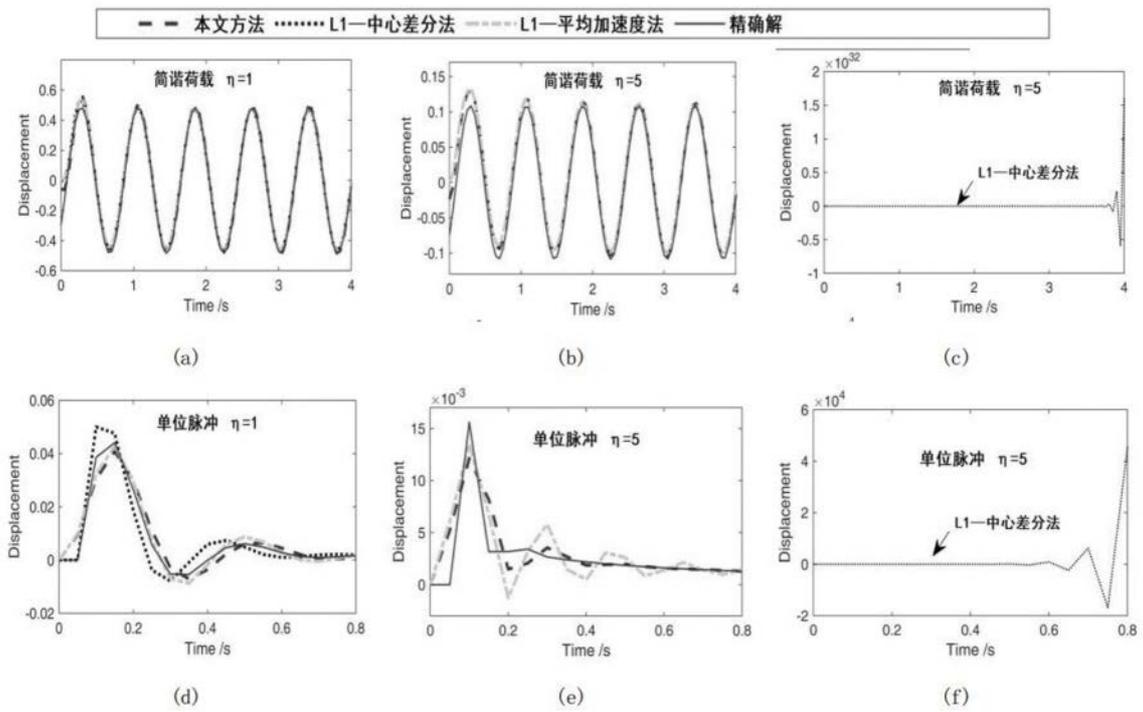


图2

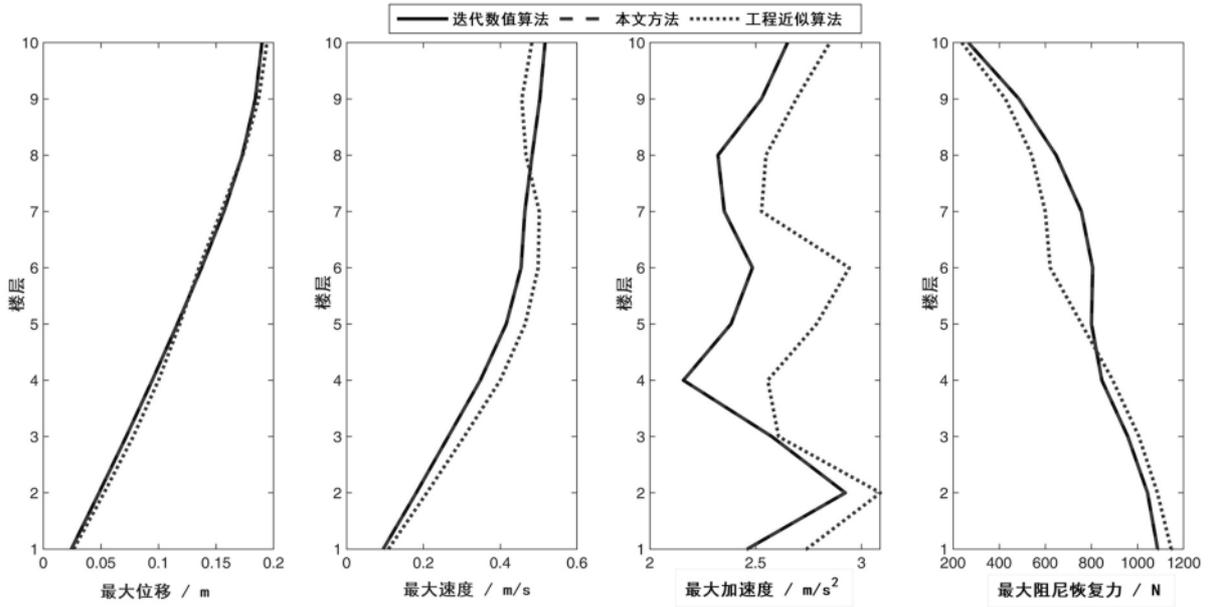


图3

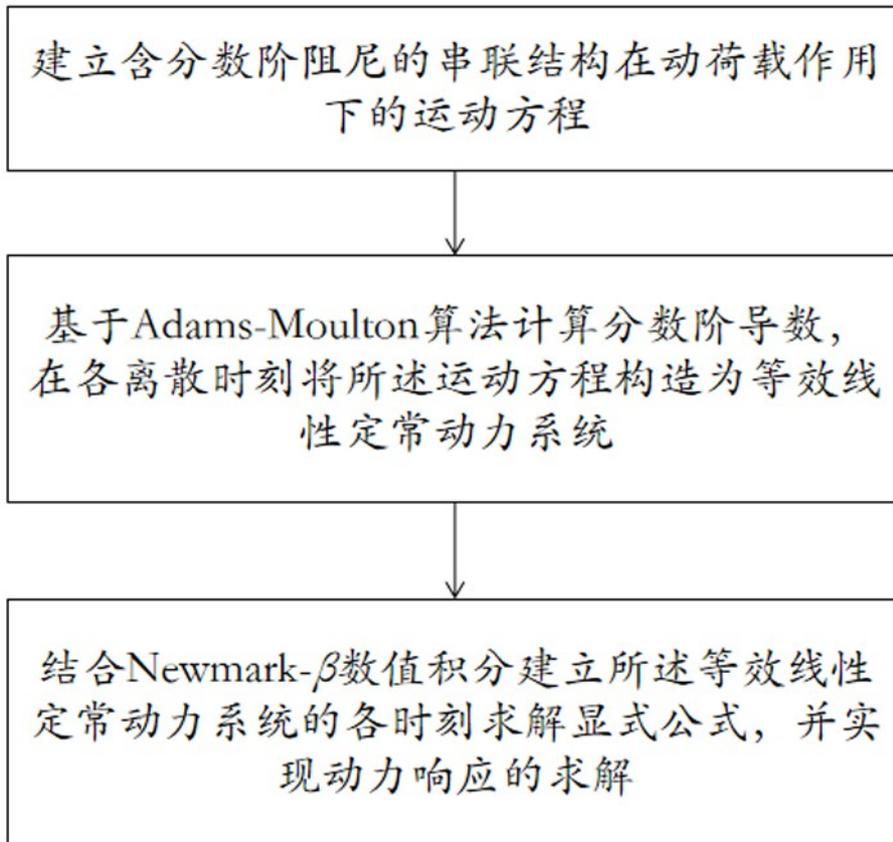


图4

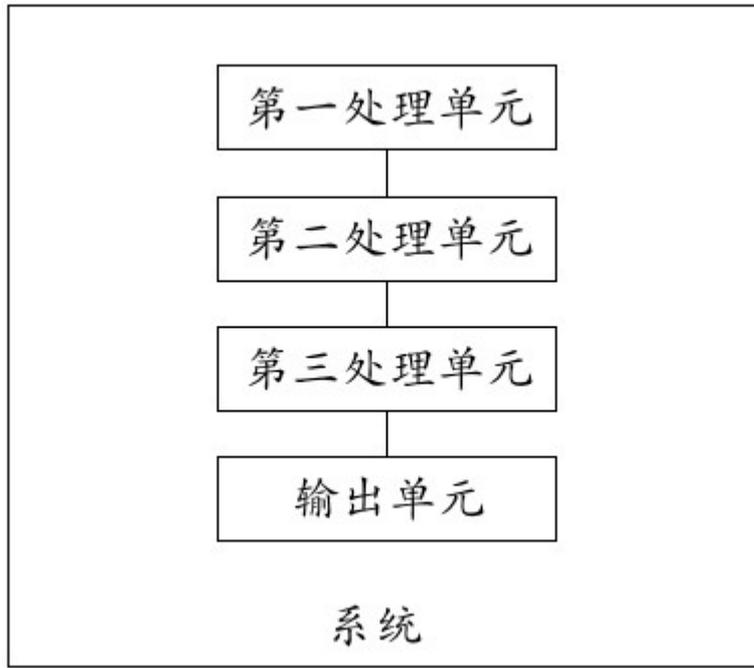


图5

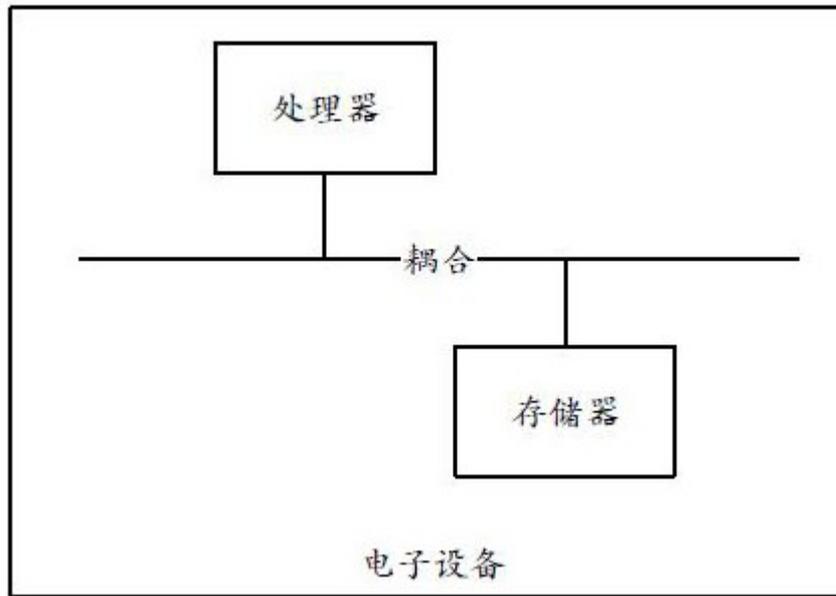


图6