



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110096738 A

(43)申请公布日 2019.08.06

(21)申请号 201910221695.9

(22)申请日 2019.03.22

(71)申请人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区清华园

(72)发明人 叶佐昌 胡文菲 王燕

(74)专利代理机构 北京清亦华知识产权代理事

务所(普通合伙) 11201

代理人 张润

(51)Int.Cl.

G06F 17/50(2006.01)

权利要求书2页 说明书9页 附图2页

## (54)发明名称

基于灵敏度分析的建模方法及装置

## (57)摘要

本发明公开了一种基于灵敏度分析的建模方法及装置,其中,该方法包括:根据满足预设方程形式的电路系统,获取电路系统的状态向量;根据预设方程的参数条件确定预设方法以对状态向量进行处理,得到状态向量的灵敏度;根据灵敏度建立电路模型。该方法可以利用灵敏度构建电路行为模型或性能模型,有效减少仿真次数,提高模型构建速率。



1. 一种基于灵敏度分析的建模方法,其特征在于,包括以下步骤:

根据满足预设方程形式的电路系统,获取所述电路系统的状态向量;

根据所述预设方程的参数条件确定预设方法以对所述状态向量进行处理,得到所述状态向量的灵敏度;

根据所述灵敏度建立电路模型。

2. 根据权利要求1所述的基于灵敏度分析的建模方法,其特征在于,所述预设方程为:

$$f(x) = \frac{dQ(p, x, t)}{dt} + F(p, x) - B(p, t) = 0$$

其中,  $f(x)$  为预设方程,  $x$  为电路系统的状态向量,  $p$  为电路系统的灵敏度参数,  $t$  为时间,  $B(p, t)$  为系统的输入向量。

3. 根据权利要求2所述的基于灵敏度分析的建模方法,其特征在于,还包括:

计算雅克比矩阵  $J_{ac}$ :

$$J_{ac} = \frac{df}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \frac{dQ}{dt} + F(x) - B(t) \right) = \frac{d^2Q}{dx dt} + \frac{dF}{dx};$$

根据所述雅克比矩阵对所述状态向量  $x$  进行迭代以使所述状态向量  $x$  满足精度要求,迭代公式为:

$$\Delta x = (J_{ac})^{-1} \cdot rhs$$

其中,  $\Delta x$  为迭代后精确地状态向量,  $rhs$  表示预设方程的残差,  $(J_{ac})^{-1}$  为雅克比矩阵  $J_{ac}$  的逆矩阵。

4. 根据权利要求2所述的基于灵敏度分析的建模方法,其特征在于,所述状态向量的灵敏度通过对所述预设方程求导得出:

$$\frac{df}{dp} = \frac{d}{dt} \frac{dQ}{dp} + \frac{dF}{dp} - \frac{dB}{dp}$$

其中,  $\frac{df}{dp}$  为对预设方程求到导。

5. 根据权利要求1所述的基于灵敏度分析的建模方法,其特征在于,所述预设方法包括直接法和伴随法;

所述根据所述预设方程的参数条件确定预设方法以对所述状态向量进行处理,具体包括:

电路系统的灵敏度参数  $p$  个数小于等于第一预设阈值,所述预设方程个数大于等于第二预设阈值时,采用直接法对所述状态向量进行处理;

电路系统的灵敏度参数  $p$  个数大于第一预设阈值,所述预设方程个数小于第二预设阈值时,采用伴随法对所述状态向量进行处理。

6. 一种基于灵敏度分析的建模装置,其特征在于,包括:

第一获取模块,用于根据满足预设方程形式的电路系统,获取所述电路系统的状态向量;

第二获取模块,用于根据所述预设方程的参数条件确定预设方法以对所述状态向量进行处理,得到所述状态向量的灵敏度;

建模模块,用于根据所述灵敏度建立电路模型。

7. 根据权利要求6所述的基于灵敏度分析的建模装置,其特征在于,所述预设方程为:

$$f(x) = \frac{dQ(p, x, t)}{dt} + F(p, x) - B(p, t) = 0$$

其中,  $f(x)$  为预设方程,  $x$  为电路系统的状态向量,  $p$  为电路系统的灵敏度参数,  $t$  为时间,  $B(p, t)$  为系统的输入向量。

8. 根据权利要求7所述的基于灵敏度分析的建模装置,其特征在于还包括:计算模块和迭代模块;

所述计算模块,用于计算雅克比矩阵  $J_{ac}$ :

$$J_{ac} = \frac{df}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \frac{dQ}{dt} + F(x) - B(t) \right) = \frac{d^2Q}{dx dt} + \frac{dF}{dx};$$

所述迭代模块,用于根据所述雅克比矩阵对所述状态向量  $x$  进行迭代以使所述状态向量  $x$  满足精度要求,迭代公式为:

$$\Delta x = (J_{ac})^{-1} \cdot rhs$$

其中,  $\Delta x$  为迭代后精确地状态向量,  $rhs$  表示预设方程的残差,  $(J_{ac})^{-1}$  为雅克比矩阵  $J_{ac}$  的逆矩阵。

9. 根据权利要求7所述的基于灵敏度分析的建模装置,其特征在于,所述状态向量的灵敏度通过对所述预设方程求导得出:

$$\frac{df}{dp} = \frac{d}{dt} \frac{dQ}{dp} + \frac{dF}{dp} - \frac{dB}{dp}$$

其中,  $\frac{df}{dp}$  为对预设方程求到导。

10. 根据权利要求6所述的基于灵敏度分析的建模装置,其特征在于,所述预设方法包括直接法和伴随法;

所述根据所述预设方程的参数条件确定预设方法以对所述状态向量进行处理,具体包括:

电路系统的灵敏度参数  $p$  个数小于等于第一预设阈值,所述预设方程个数大于等于第二预设阈值时,采用直接法对所述状态向量进行处理;

电路系统的灵敏度参数  $p$  个数大于第一预设阈值,所述预设方程个数小于第二预设阈值时,采用伴随法对所述状态向量进行处理。

## 基于灵敏度分析的建模方法及装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电子设计自动化技术领域,特别涉及一种基于灵敏度分析的建模方法及装置。

### 背景技术

[0002] 电子设计自动化(Electronics Design Automation,EDA)是以软件为载体的用于在设计阶段分析预测集成电路性能的方法,常见的电路仿真工具有Synopsys公司的HSPICE和Cadence公司的Spectre等。电路仿真所针对的对象是采用电路网单或其它形式描述的电路,通过采用一定的器件模型计算得到电路的电学特性。

[0003] 电路仿真通过基尔霍夫电压和电流定律建立方程并求解方程,其实施步骤通常由两部分组成。第一部分为电路方程的建立,在电路方程的建立阶段,电路仿真根据电路结构以及电路中节点的电压和支路的电流建立方程。第二部分是电路方程的求解,具体求解的方程的类型依不同的电路仿真方法而不同,包括微分方程、线性方程和非线性方程。

[0004] 瞬态分析是一种电路仿真方法,主要根据电路结构、驱动信号以及仿真参数(输入信息)计算出电路中各个节点的电压随时间变化的曲线(输出结果)。

[0005] 瞬态分析的输入通常包含以下信息:

[0006] (1) 电路结构:电路的元件组成与拓扑结构。

[0007] (2) 驱动信号:电路的外部激励信号。

[0008] (3) 仿真参数:所需要做的仿真的属性,例如仿真类型、总时间,步长,精度等。

[0009] 瞬态分析的输出通常为电路中各个节点的电压随时间变化的曲线,又称为各个节点电压的波形。利用这个波形可以进行进一步的后处理来得到其它想要的信息,例如电路的频谱特性等。

[0010] 近年,计算机计算能力的大幅度提升使大规模动态电路的动态响应精度提升,这些动态响应与系统参数之间的瞬态灵敏度在集成电路自动化设计算法中发挥着十分重要的作用,数据同化(Data Assimilation,DA)在考虑数据时空分布以及观测场和背景场误差的基础上,在数值模型的动态运行过程中融合新的观测数据的方法,在过程模型的动态框架内,通过数据同化算法不断融合时空上离散分布的不同来源和不同分辨率的直接或间接观测信息来自动调整模型轨迹,以改善动态模型状态的估计精度,提高模型预测能力)、参数估计、量化不确定性、稳定性分析中均有广泛应用。工程上,灵敏度作为算法不可或缺的梯度也经常用来做电路优化。

[0011] 对于门电路来说最重要的指标就是电路的工作速度,也就是时钟频率。在统计性电路分析中,统计性的时需分析也因此受到关注。统计静态时序分析(Statistical static timing analysis,SSTA)的应用,使统计性的延时能像单个数值一样在时序电路图中传播。此方法中,将延时的分布表示成特殊的格式,一般是浮动的器件参数(或者为其主成分)的低阶形式,使其分布表示格式能够像单个数值一般比较最大值和相加。或者直接根据最终关注延时与参数的灵敏度建立低阶联系,寻找延时分布,这种方法尽管经过了全局低

阶近似,但是以其快速的特点应用前景广泛。无论哪一种方法,瞬态灵敏度在其中都发挥着不可或缺的重要作用。

[0012] 确定参数瞬态灵敏度,传统的暴力求解方法 (Brute-force Method) 使通过分别微扰每一个器件的每一个参数来获得最终所有参数的灵敏度,仿真复杂度与参数数目和器件数目乘积呈线性关系。为了克服这种复杂性,有人使用经验聚类变化的器件组,而不是将它们视为不相关的。该方法将仿真复杂度下降为与参数数目呈线性关系,但需要对电路行为有深入的了解,并且主要适用于顺序数字逻辑。暴力求解方法由于需要经过若干次仿真,在单次仿真时间就能达到若干小时的今天就显得十分不便利了。

## 发明内容

[0013] 本发明旨在至少在一定程度上解决相关技术中的技术问题之一。

[0014] 为此,本发明的一个目的在于提出一种基于灵敏度分析的建模方法,该方法可以利用灵敏度建立电路模型,应用到电路优化及其它方面。

[0015] 本发明的另一个目的在于提出一种基于灵敏度分析的建模装置。

[0016] 为达到上述目的,本发明一方面实施例提出了一种基于灵敏度分析的建模方法,包括:根据满足预设方程形式的电路系统,获取所述电路系统的状态向量;根据所述预设方程的参数条件确定预设方法以对所述状态向量进行处理,得到所述状态向量的灵敏度;根据所述灵敏度建立电路模型。

[0017] 本发明实施例的基于灵敏度分析的建模方法,通过以矩阵计算角度出发理解伴随法计算瞬态灵敏度的方法,使用有向无环图辅助理解反向传播计算灵敏度,利用灵敏度建立电路行为模型或性能模型,降低仿真次数,减轻建模的复杂性,提高模型构建速率,可以应用到电路优化中及其它方面。

[0018] 另外,根据本发明上述实施例的基于灵敏度分析的建模方法还可以具有以下附加的技术特征:

[0019] 进一步地,在本发明的一个实施例中,所述预设方程为:

$$[0020] \quad f(x) = \frac{dQ(p, x, t)}{dt} + F(p, x) - B(p, t) = 0$$

[0021] 其中,  $f(x)$  为预设方程,  $x$  为电路系统的状态向量,  $p$  为电路系统的灵敏度参数,  $t$  为时间,  $B(p, t)$  为系统的输入向量。

[0022] 进一步地,在本发明的一个实施例中,还包括:

[0023] 计算雅克比矩阵  $J_{ac}$ :

$$[0024] \quad J_{ac} = \frac{df}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \frac{dQ}{dt} + F(x) - B(t) \right) = \frac{d^2Q}{dx dt} + \frac{dF}{dx};$$

[0025] 根据所述雅克比矩阵对所述状态向量  $x$  进行迭代以使所述状态向量  $x$  满足精度要求,迭代公式为:

$$[0026] \quad \Delta x = (J_{ac})^{-1} \cdot rhs$$

[0027] 其中,  $\Delta x$  为迭代后精确的状态向量,  $rhs$  表示预设方程的残差,  $(J_{ac})^{-1}$  为雅克比矩阵  $J_{ac}$  的逆矩阵。

[0028] 进一步地,在本发明的一个实施例中,所述状态向量的灵敏度通过对所述预设方

程求导得出：

$$[0029] \quad \frac{df}{dp} = \frac{d}{dt} \frac{dQ}{dp} + \frac{dF}{dp} - \frac{dB}{dp}$$

[0030] 其中， $\frac{df}{dp}$  为对预设方程求到导。

[0031] 进一步地，在本发明的一个实施例中，所述预设方法包括直接法和伴随法；

[0032] 所述根据所述预设方程的参数条件确定预设方法以对所述状态向量进行处理，具体包括：

[0033] 电路系统的灵敏度参数  $p$  个数小于等于第一预设阈值，所述预设方程个数大于等于第二预设阈值时，采用直接法对所述状态向量进行处理；

[0034] 电路系统的灵敏度参数  $p$  个数大于第一预设阈值，所述预设方程个数小于第二预设阈值时，采用伴随法对所述状态向量进行处理。

[0035] 为达到上述目的，本发明另一方面实施例提出了一种基于灵敏度分析的建模装置，包括：第一获取模块，用于根据满足预设方程形式的电路系统，获取所述电路系统的状态向量；第二获取模块，用于根据所述预设方程的参数条件确定预设方法以对所述状态向量进行处理，得到所述状态向量的灵敏度；建模模块，用于根据所述灵敏度建立电路模型。

[0036] 本发明实施例的基于灵敏度分析的建模装置，通过以矩阵计算角度出发理解伴随法计算瞬态灵敏度的方法，使用有向无环图辅助理解反向传播计算灵敏度，利用灵敏度建立电路行为模型或性能模型，降低仿真次数，减轻建模的复杂性，提高模型构建速率，可以应用到电路优化中及其它方面。

[0037] 另外，根据本发明上述实施例的基于灵敏度分析的建模装置还可以具有以下附加的技术特征：

[0038] 进一步地，在本发明的一个实施例中，所述预设方程为：

$$[0039] \quad f(x) = \frac{dQ(p, x, t)}{dt} + F(p, x) - B(p, t) = 0$$

[0040] 其中， $f(x)$  为预设方程， $x$  为电路系统的状态向量， $p$  为电路系统的灵敏度参数， $t$  为时间， $B(p, t)$  为系统的输入向量。

[0041] 进一步地，在本发明的一个实施例中，还包括：计算模块和迭代模块；

[0042] 所述计算模块，用于计算雅克比矩阵  $J_{ac}$ ：

$$[0043] \quad J_{ac} = \frac{df}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \frac{dQ}{dt} + F(x) - B(t) \right) = \frac{d^2Q}{dx dt} + \frac{dF}{dx}；$$

[0044] 所述迭代模块，用于根据所述雅克比矩阵对所述状态向量  $x$  进行迭代以使所述状态向量  $x$  满足精度要求，迭代公式为：

$$[0045] \quad \Delta x = (J_{ac})^{-1} \cdot rhs$$

[0046] 其中， $\Delta x$  为迭代后精确地状态向量， $rhs$  表示预设方程的残差， $(J_{ac})^{-1}$  为雅克比矩阵  $J_{ac}$  的逆矩阵。

[0047] 进一步地，在本发明的一个实施例中，所述状态向量的灵敏度通过对所述预设方程求导得出：

$$[0048] \quad \frac{df}{dp} = \frac{d}{dt} \frac{dQ}{dp} + \frac{dF}{dp} - \frac{dB}{dp}$$

[0049] 其中,  $\frac{df}{dp}$  为对预设方程求到导。

[0050] 进一步地,在本发明的一个实施例中,所述预设方法包括直接法和伴随法;

[0051] 所述根据所述预设方程的参数条件确定预设方法,具体包括:

[0052] 电路系统的灵敏度参数p个数小于等于第一预设阈值,所述预设方程个数大于等于第二预设阈值时,采用直接法;

[0053] 电路系统的灵敏度参数p个数大于第一预设阈值,所述预设方程个数小于第二预设阈值时,采用伴随法。

[0054] 本发明附加的方面和优点将在下面的描述中部分给出,部分将从下面的描述中变得明显,或通过本发明的实践了解到。

### 附图说明

[0055] 本发明上述的和/或附加的方面和优点从下面结合附图对实施例的描述中将变得明显和容易理解,其中:

[0056] 图1为根据本发明一个实施例的基于灵敏度分析的建模方法流程图;

[0057] 图2为根据本发明一个实施例的拟合情况图;

[0058] 图3为根据本发明一个实施例的矩阵法理解简图;

[0059] 图4为根据本发明一个实施例的有向无环图;

[0060] 图5为根据本发明一个实施例的基于灵敏度分析的建模装置结构示意图。

### 具体实施方式

[0061] 下面详细描述本发明的实施例,所述实施例的示例在附图中示出,其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的,旨在用于解释本发明,而不能理解为对本发明的限制。

[0062] 下面参照附图描述根据本发明实施例提出的基于灵敏度分析的建模方法及装置。

[0063] 首先将参照附图描述根据本发明实施例提出的基于灵敏度分析的建模方法。

[0064] 图1为根据本发明一个实施例的基于灵敏度分析的建模方法流程图。

[0065] 如图1所示,该基于灵敏度分析的建模方法包括以下步骤:

[0066] 在步骤S101中,根据满足预设方程形式的电路系统,获取电路系统的状态向量。

[0067] 进一步地,在本发明的一个实施例中,预设方程为:

$$[0068] \quad f(x) = \frac{dQ(p, x, t)}{dt} + F(p, x) - B(p, t) = 0$$

[0069] 其中,  $f(x)$  为预设方程,  $x$  为电路系统的状态向量,  $p$  为电路系统的灵敏度参数,  $t$  为时间,  $B(p, t)$  为系统的输入向量,  $F$  为与状态与时间导数相关的量,  $F(p, x)$  为状态与时间相关的量。

[0070] 进一步地,在本发明的一个实施例中,还包括:

[0071] 计算雅克比矩阵  $J_{ac}$ :

$$[0072] \quad J_{ac} = \frac{df}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \frac{dQ}{dt} + F(x) - B(t) \right) = \frac{d^2Q}{dx dt} + \frac{dF}{dx};$$

[0073] 根据雅可比矩阵对状态向量x进行迭代以使状态向量x满足精度要求,迭代公式为:

$$[0074] \quad \Delta x = (J_{ac})^{-1} \cdot rhs$$

[0075] 其中,  $\Delta x$ 为迭代后精确的状态向量, rhs表示预设方程的残差,  $(J_{ac})^{-1}$ 为雅可比矩阵 $J_{ac}$ 的逆矩阵。

[0076] 具体地,对于一个非线性电路,可以假设要求解的系统满足如下形式的微分代数方程(Differential-Algebraic Equation, DAE):

$$[0077] \quad f(x) = \frac{dQ(p,x,t)}{dt} + F(p,x) - B(p,t) = 0 \quad (1)$$

[0078] 其中, x是系统的状态向量,比如电路的节点电压或者支路电流; p是要求解的瞬态灵敏度参数,比如MOSFET的阈值电压 $V_{th}$ 、饱和速度 $V_{sat}$ 、 $u$ ; t是时间, q和f分别是charge/flue和current。在给定初始状态 $x(t_0)$ 条件下,为计算stiff DAE系统的动态响应,基于Local Truncation Error (LTE)的估计确定时间步长,将连续的轨迹进行时间离散化。瞬态分析中,使用牛顿法或者升级的牛顿堵塞等方法来求解状态x。

[0079] 为了计算状态向量x,首先计算雅可比矩阵Jac,即对式(1)求导得:

$$[0080] \quad J_{ac} = \frac{df}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \frac{dQ}{dt} + F(x) - B(t) \right) = \frac{d^2Q}{dx dt} + \frac{dF}{dx}$$

[0081] 然后不断迭代更新x:

$$[0082] \quad \Delta x = (J_{ac})^{-1} \cdot rhs$$

[0083] 其中, rhs表示当前式(1)的残差。通过一次次的对x进行迭代,是x的精度越来越高,通常3次迭代即可达到所需状态x精度要求。

[0084] 在步骤S102中,根据预设方程的参数条件确定预设方法以对状态向量进行处理,得到状态向量的灵敏度。

[0085] 进一步地,在本发明的一个实施例中,状态向量的灵敏度通过对预设方程求导得出:

$$[0086] \quad \frac{df}{dp} = \frac{d}{dt} \frac{dQ}{dp} + \frac{dF}{dp} - \frac{dB}{dp}$$

[0087] 其中,  $\frac{df}{dp}$ 为对预设方程求到导。

[0088] 进一步地,在本发明的一个实施例中,预设方法包括直接法和伴随法;

[0089] 根据预设方程的参数条件确定预设方法以对状态向量进行处理,具体包括:

[0090] 电路系统的灵敏度参数p个数小于等于第一预设阈值,预设方程个数大于等于第二预设阈值时,直接法对状态向量进行处理;

[0091] 电路系统的灵敏度参数p个数大于第一预设阈值,预设方程个数小于第二预设阈值时,采用伴随法对状态向量进行处理。

[0092] 具体地,状态向量x的灵敏度为 $dx/dp$ ,为了计算 $dx/dp$ ,可以对预设方程(1)的p求导:

$$[0093] \quad \frac{df}{dp} = \frac{d}{dt} \frac{dQ}{dp} + \frac{dF}{dp} - \frac{dB}{dp}$$

[0094] 为解决 $\frac{d}{dt} \frac{dQ}{dp}$ 数值的问题,通过求解线性多步方程的形式来求解最终结果。在线性多步法中,某一步的计算结果不仅与当前的解有关,还与前面若干步的解有关,即利用前面多步的信息来预测下一步结果。

[0095] 在本发明的实施例中,解决 $\frac{d}{dt} \frac{dQ}{dp}$ 数值的问题,有两种计算方法,分别为直接法和伴随法。

[0096] 直接法和伴随法可以看作是求解与穷举的方向不同。下面以一个例子说明,0为目标方程,即上面实施例中的预设方程,p为要求解的瞬态灵敏度参数。

$$[0097] \quad \text{直接法: } \frac{dO}{dp} = \frac{\partial O}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial p} + \frac{\partial O}{\partial p} = \frac{\partial O}{\partial x} \cdot \left( \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^{-1} \cdot \frac{\partial f}{\partial p} \right) + \frac{\partial O}{\partial p}$$

$$[0098] \quad \text{伴随法: } \frac{dO}{dp} = \frac{\partial O}{\partial f} \cdot \frac{\partial f}{\partial p} + \frac{\partial O}{\partial p} = \left( \frac{\partial O}{\partial x} \cdot \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^{-1} \right) \cdot \frac{\partial f}{\partial p} + \frac{\partial O}{\partial p} = \left( \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^{-T} \cdot \left( \frac{\partial O}{\partial x} \right)^T \right) \cdot \frac{\partial f}{\partial p} + \frac{\partial O}{\partial p}$$

[0099] 在静态电路中,当参数p较少时,df/dp是一个列数较少的矩阵,先将df/dx的逆矩阵与df/dp相乘得到dx/dp,再与d0/dx相乘计算量较小,所以直接法计算了所有中间变量对系统参数的灵敏度,直到最终寻找到目标方程。

[0100] 如图2所示,当要求解的目标函数0较少时,d0/dx是一个行数较少的矩阵,先将df/dx的逆矩阵与d0/dx相乘得到d0/df,再与df/dp相乘计算量较小。

[0101] 与直接法对比,伴随法计算了目标方程对所有中间变量的灵敏度,直到最终寻找到系统参数。如图2所示,所以当参数p较少,目标函数0较多时,适合使用直接法求解。当参数p较多,目标函数0较少时,适合使用伴随法求解。

[0102] 在动态电路中,如图3所示,由链式法则推导0对p的导数,参数p和目标方程0之间存在很多时间点的状态x(tn),0对p的导数为所有p到0的路径导数乘积的和,两种方法的区别就演变成了枚举路径方向的差异。直接法从参数p出发,沿着时间步长顺序计算直到推至目标方程0。伴随法则在所有时间步长状态确定后,从目标方程0出发,沿时间步长反序推至参数p。

[0103] 进行电路瞬态灵敏度仿真面对大规模参数,小规模目标方程情况下,伴随法求解瞬态灵敏度。对于大规模电路,参数繁杂,电路仿真使用伴随法为宜,缩短电路仿真时间。

[0104] 在步骤S103中,根据灵敏度建立电路模型。

[0105] 进一步地,在通过上述步骤求出灵敏度后,可以根据灵敏度建模,构建电路行为模型或性能模型。

[0106] 电路模型即人们假设设计参数x与电路行为或电路性能y之间存在某种映射关系 $y=f(x)$ ,通过采样得到样本数据,使模型尽可能拟合已有数据。显然,获取的已知数据越多,所建立的模型就越可能接近真实情况(排除过拟合情况)。

[0107] 根据上述的介绍,可以通过仿真得到电路状态及其函数的解析值及其灵敏度,也可以得到事件触发型目标方程的解析值及其灵敏度,即在一次仿真中获取了建模所需数据f(x)与f(x)的导数。这种已知样本点及其导数的情况在常规机器学习的回归问题中是比较

罕见的。但导数的存在给建模提供了额外的信息,利用这部分信息可以降低对采样点数量的要求,利用采样点的梯度信息可以有效减少建模对采样点数量的需求,也就是完成相同的建模精度现在可以利用更少的仿真次数,减少了仿真时间,加速了电路设计速度。

[0108] 利用采样点的梯度信息还可以有效控制过拟合。

[0109] 以线性回归模型为例介绍灵敏度在降低采样点方面的应用。

[0110] 为描述X与Y之间的非线性关系,对X进行维度扩展得到 $(X, X^2, X^3, X^4, X^5)$ 。 $Y = w_0 + w_1 * X + w_2 * X^2 + w_3 * X^3 + w_4 * X^4 + w_5 * X^5$

[0111] 进行一次仿真,可以获得一组对应关系 $x_0, y_0, y_0'$ 。

[0112] 可得方程:

$$[0113] \quad y_0 = w_0 * 1 + w_1 * x_0 + w_2 * x_0^2 + w_3 * x_0^3 + w_4 * x_0^4 + w_5 * x_0^5 \quad y_0'$$

$$[0114] \quad = w_0 * 0 + w_1 * 1 + w_2 * (2 * x_0) + w_3 * (3 * x_0^2) + w_4 * (4 * x_0^3) + w_5 * (5 * x_0^4)$$

[0115] 在这种处理中,将导数表达式当作 $w_0$ 系数为0,其他坐标点相应降低次幂并乘以原次幂数的新坐标数据带入建模的计算中,如此可以在一定程度上降低对采样点数量的需求。此外,也可以先统一对导数建模,得到 $w_1$ 到 $w_5$ 的求解结果,再利用原本数据回归得到 $w_0$ 。

[0116] 若不降低采样点数据,导数的引入也可以在一定程度上降低过拟合。如图4(a)为非过拟合情况,图4(b)为过拟合情况。导数的引入限制了曲线的走势,也就不会出现再输入约0.78时的下降,约束了过拟合。

[0117] 可以理解的是,本发明实施例的方法不仅可以求电路系统中的灵敏度进行建模,更进一步地,可以求目标方程中目标参数的灵敏度,构建电路性能模型(如电路延时模型),下面以一个例子进行说明。

[0118] 在瞬态分析中,定义一些仅在某特定情况下发生的事件(如反相器的延时),针对这些事件的灵敏度分析在上面非实践触发的基础上继续讨论。

[0119] 定义触发事件需要满足方程:

$$[0120] \quad g_{ev}(\tau_{ev}^*, \vec{x}^*(\tau_{ev}^*), \vec{p}^*) = 0, \quad |$$

[0121] 目标方程:

$$[0122] \quad \vec{\phi}^* = \vec{h}(\tau_1^*, \tau_2^*, \dots, \tau_M^*, \vec{x}^*(\tau_1^*), \vec{x}^*(\tau_2^*), \dots, \vec{x}^*(\tau_M^*), \vec{p}^*).$$

[0123] 求解可得,事件触发型灵敏度:

$$[0124] \quad S_{\phi} = J_{hp}^* + \sum_{ev=1}^M (J_{h\tau_{ev}}^* S_{\tau_{ev}} + J_{hx(\tau_{ev})}^* S_{x_{ev}}).$$

[0125] 其中,

$$S_{\tau_{ev}} = - \frac{J_{g_{ev}x}^* S_x(\tau_{ev}^*) + J_{g_{ev}p}^*}{J_{g_{ev}x}^* \vec{x}^*(\tau_{ev}^*) + J_{g_{ev}\tau}^*}, \text{ and}$$

[0126]  $S_{x_{ev}} = S_x(\tau_{ev}^*) + \vec{x}^*(\tau_{ev}^*) S_{\tau_{ev}}$ , where

$$\vec{x}^*(\tau_{ev}^*) = \left. \frac{d}{dt} \vec{x}^*(t) \right|_{\tau_{ev}^*}, \quad \forall 1 \leq ev \leq M,$$

[0127] 根据本发明实施例提出的基于灵敏度分析的建模方法,通过以矩阵计算角度出发

理解伴随法计算瞬态灵敏度的方法,使用有向无环图辅助理解反向传播计算灵敏度,利用灵敏度建立电路行为模型或性能模型,降低仿真次数,减轻建模的复杂性,提高模型构建速率,可以应用到电路优化中及其它方面。

[0128] 其次参照附图描述根据本发明实施例提出的基于灵敏度分析的建模装置。

[0129] 图5为根据本发明一个实施例的基于灵敏度分析的建模装置结构示意图。

[0130] 如图5所示,该基于灵敏度分析的建模装置包括:第一获取模块100、第二获取模块200和建模模块300。

[0131] 其中,第一获取模块100用于根据满足预设方程形式的电路系统,获取电路系统的状态向量。第二获取模块200用于根据预设方程的参数条件确定预设方法以对状态向量进行处理,得到状态向量的灵敏度。建模模块300用于根据灵敏度建立电路模型。

[0132] 该基于灵敏度分析的建模装置可以利用灵敏度建立电路模型,利用到电路优化及其它方面。

[0133] 进一步地,在本发明的一个实施例中,预设方程为:

$$[0134] \quad f(x) = \frac{dQ(p, x, t)}{dt} + F(p, x) - B(p, t) = 0$$

[0135] 其中, $f(x)$ 为预设方程, $x$ 为电路系统的状态向量, $p$ 为电路系统的灵敏度参数, $t$ 为时间, $B(p, t)$ 为系统的输入向量。

[0136] 进一步地,在本发明的一个实施例中,还包括:计算模块和迭代模块;

[0137] 计算模块,用于计算雅克比矩阵 $J_{ac}$ :

$$[0138] \quad J_{ac} = \frac{df}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \frac{dQ}{dt} + F(x) - B(t) \right) = \frac{d^2Q}{dx dt} + \frac{dF}{dx};$$

[0139] 迭代模块,用关于根据雅克比矩阵对状态向量 $x$ 进行迭代以使状态向量 $x$ 满足精度要求,迭代公式为:

$$[0140] \quad \Delta x = (J_{ac})^{-1} \cdot rhs$$

[0141] 其中, $\Delta x$ 为迭代后精确地状态向量, $rhs$ 表示预设方程的残差, $(J_{ac})^{-1}$ 为雅克比矩阵 $J_{ac}$ 的逆矩阵。

[0142] 进一步地,在本发明的一个实施例中,状态向量的灵敏度通过对预设方程求导得出:

$$[0143] \quad \frac{df}{dp} = \frac{d}{dt} \frac{dQ}{dp} + \frac{dF}{dp} - \frac{dB}{dp}$$

[0144] 其中, $\frac{df}{dp}$ 为对预设方程求到导。

[0145] 进一步地,在本发明的一个实施例中,预设方法包括直接法和伴随法;

[0146] 根据预设方程的参数条件确定预设方法,具体包括:

[0147] 电路系统的灵敏度参数 $p$ 个数小于等于第一预设阈值,预设方程个数大于等于第二预设阈值时,采用直接法;

[0148] 电路系统的灵敏度参数 $p$ 个数大于第一预设阈值,预设方程个数小于第二预设阈值时,采用伴随法。

[0149] 需要说明的是,前述对基于灵敏度分析的建模方法实施例的解释说明也适用于该

实施例的装置,此处不再赘述。

[0150] 根据本发明实施例提出的基于灵敏度分析的建模装置,通过以矩阵计算角度出发理解伴随法计算瞬态灵敏度的方法,使用有向无环图辅助理解反向传播计算灵敏度,利用灵敏度建立电路行为模型或性能模型,降低仿真次数,减轻建模的复杂性,提高模型构建速率,可以应用到电路优化中及其它方面。

[0151] 此外,术语“第一”、“第二”仅用于描述目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此,限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括至少一个该特征。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。

[0152] 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。

[0153] 尽管上面已经示出和描述了本发明的实施例,可以理解的是,上述实施例是示例性的,不能理解为对本发明的限制,本领域的普通技术人员在本发明的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

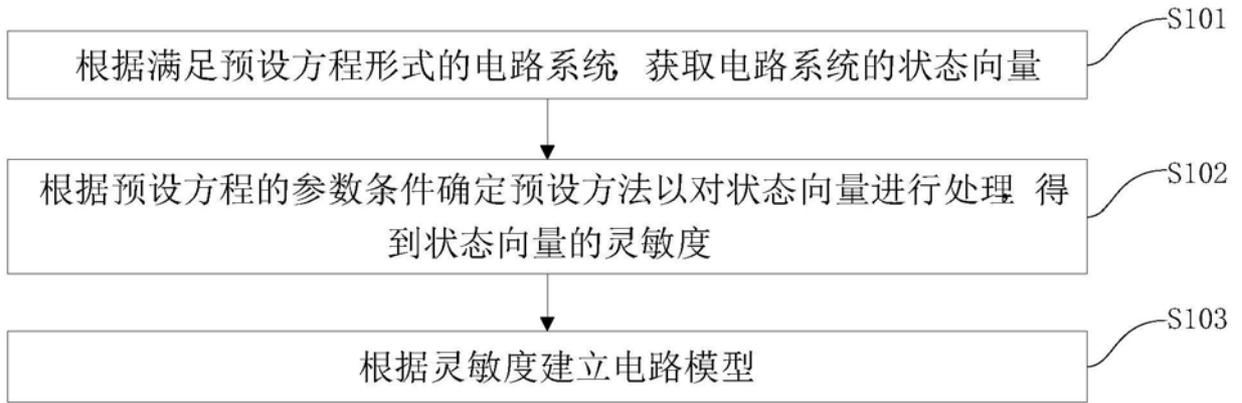


图1

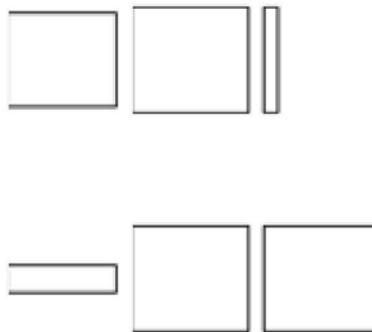


图2

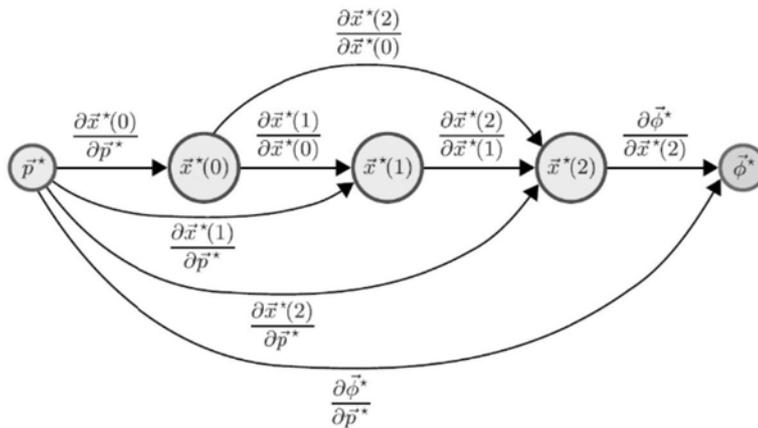


图3

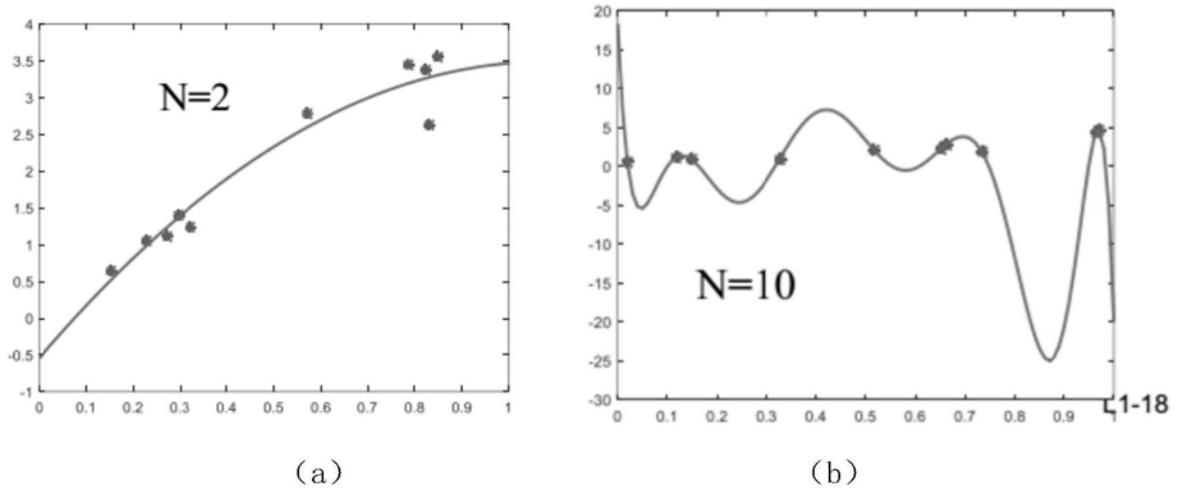


图4

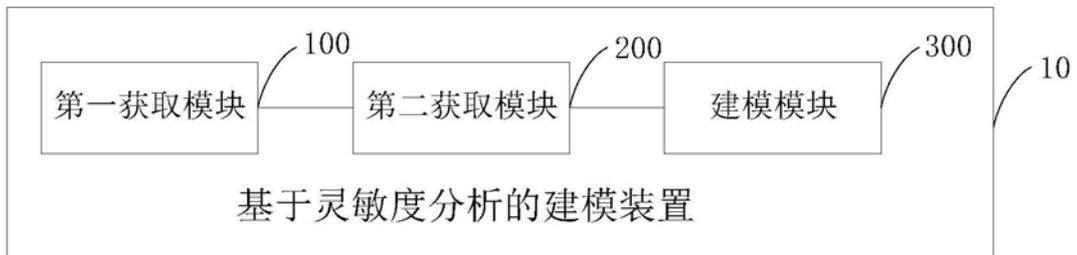


图5