

文章编号 1004-924X(2010)01-0197-08

MEMS 节点化建模及其在集成微系统设计中的应用

王永泉¹, 陈花玲¹, 彭 倍², 朱子才¹

(1. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 电子科技大学 机电工程学院, 四川 成都 610054)

摘要:为实现 MEMS 产品的快速设计和性能验证,在借鉴其结构化设计思想即节点分析法的基础上,提出了一种与常规信号流类比不同,适于集成机电系统快速仿真的等效电路建模思路和方法。首先,对系统及 MEMS 器件进行功能及结构分解;然后,分别对各基本单元进行节点化建模,并在一定的机电类比规则下将其转换为等效电网络(元件);最后,根据节点变量约束关系,将这些等效网络(元件)逐层重构为器件级和系统级等效电路。结合一类典型 MEMS 集成系统——梳齿式静电反馈微加速度计的分析实例,对上述方法进行了具体介绍和验证。利用 OrCAD 等电路仿真器分析、测试了所建立的体现多能域耦合关系的微系统数字化分析原型,结果显示,相对于 VHDL-AMS 描述法,该模型具有单一域内的更加直观的模型形式和快捷的仿真速度,表明本文提出的方法在复杂 MEMS 集成系统的分析设计中具有一定的应用价值。

关键词:微机电系统(MEMS);系统级仿真;节点分析法;VHDL-AMS;等效电路

中图分类号:TN603.5;TP212 **文献标识码:**A

MEMS nodal modeling and its application to design of integrated microsystems

WANG Yong-quan¹, CHEN Hua-ling¹, PENG Bei², ZHU Zi-cai¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China;

2. School of Mechatronics Engineering, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, 610054, China)

Abstract: In order to achieve a rapid design and verify the performance of MEMS products, a new approach suited to establishing equivalent electrical representations of an integrated MEMS but different from the conventional signal-flow principle is proposed in this paper. Based on the structured design methodology of the MEMS, i. e., nodal analysis method, this approach starts from the functional decomposition of the system and MEMS device. Then, the nodal models of these decomposed elements (emphases laid on those transductional ones) are created and transformed as equivalent networks or components by rule of a certain electrical analogy, F - V analogy. Finally, according to the constraint relations for node variables (General Kirchhoff's law), the equivalent networks (components) are hierarchically reconstructed as device-level models and system-level equivalent circuits. Aiming at the analysis and design of a comb-shaped electrostatic feedback micro-accelerometer, the approach is specif-

收稿日期:2009-02-18;修订日期:2009-04-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50801009);西安交通大学新教师支持计划项目(No. 08141010)

ically illustrated and validated. The achieved “computational prototype” of such a mixed-domain system can be expediently implemented by OrCAD. Moreover, compared with VHDL-AMS models, it provides that proposed model has more explicit physical conception and more less computation time. It indicates that the approach has its application value in analysis and design of complex integrated MEMSs.

Key words: Microelectromechanical System(MEMS); system-level simulation; nodal analysis method; VHDL-AMS; equivalent circuit

1 引言

作为现代科技一项变革性的新兴技术,微机电系统(Microelectromechanical Systems, MEMS)近年来的发展令人瞩目,正日益走向更为广阔的应用空间。由于 MEMS 本质上强调和追求的是将微机械器件与信号处理、控制单元等有机集成为具有完整功能的一体化微型系统,因此在很多情况下,尤其是在实用产品的开发中,更值得关注的是系统的整体特性;若能在昂贵的物理样机试制前预先建立一个系统级的“数字化分析原型”以实现设计思想和产品性能的快速评估与验证^[1-2],则对提高设计效率、降低开发成本,具有重要意义。

MEMS 典型的多学科特性,使其建模分析需同时描述多个能量域的行为或多物理场的耦合作用,当分析对象为包含微电路在内的完整系统时,问题将变得更加复杂。文献[3]通过集成不同的仿真工具,对一种涉及结构、流场、热及电路耦合作用的 MEMS 系统整体行为进行了分析。该方法虽具有较高精度也能兼顾器件局部特性,但这种由不同的域仿真器构成的所谓“Heterogeneous”仿真环境,普遍存在抽象层次和数据格式不统一,收敛性较差等缺点。事实上,对 MEMS 系统级仿真来说,更为可行的方式是建立一种关于多能域系统的统一表达,以使得整个仿真分析能在同一环境(平台)下进行。这里所面临的关键问题,是如何处理非电能量域的 MEMS 器件并将其有机地植入系统环境,亦即器件宏模型(Macromodel)的创建与描述问题。宏模型实际是反映器件本质行为的一种低阶或缩聚模型^[1,4-5],它又可进一步转化为特定工具所支持的,与电路模型“同质”或兼容的仿真模型。以此为基础,系统级

仿真的实现主要有两种方法:一是在特定的电子设计自动化(EDA)平台上,利用统一的模拟/混合信号硬件描述语言(VHDL-AMS、Verilog-A 等)对 MEMS 器件及系统进行建模描述和仿真测试^[6-9];另一种则是基于电气和机械系统的相似性,建立 MEMS 器件和系统的等效电路模型,然后利用 SPICE 等软件进行仿真分析^[10-13]。

节点分析法是近年来颇受关注的一种 MEMS 宏建模方法^[2,14-17],它所形成的多能域节点化模型可由 VHDL-AMS 等语言方便描述并基于 Saber 等电子设计平台进行仿真分析,因此有些文献对模拟/混合信号硬件描述语言与作为其实现基础的节点分析法并不做严格区别。相对而言,等效电路法的具体实现尚缺少统一的标准,适用对象也不及前者广泛;但它在某些方面的优点,如单一电路形式对系统工作机理和过程的直观揭示,以及快捷的仿真速度等,仍对设计者具有相当的吸引力。鉴于利用硬件描述语言进行节点化建模的研究已较多,本文将主要针对后一种建模描述方法即等效电路法进行讨论,提出一种与常规的信号流类比规则不同,而是基于节点分析思想构建复杂 MEMS 系统等效电路的思路和方法,并将通过一个典型集成微传感系统的设计实例,加以具体分析和验证。

2 系统级仿真的两种统一建模方法

2.1 节点分析法与 VHDL-AMS 语言

MEMS 节点分析法(Nodal Analysis Method)是由卡内基梅隆大学研发的一种结构化设计方法,它源于已在电子设计领域成功应用的分层设计规范。正如电路是由电阻、电容、电感等基本元件逐层构建那样,节点分析法也建立在由锚点、梁、平板、静电梳齿等基本单元构成的模型库之

上;这些组件单元不仅具有一定的几何实体特性,而且表征着特定的参数化集总行为。设计者根据实际器件的几何拓扑结构、材料属性及所属能量域,通过对模型单元调用、组合,便可实现 MEMS 器件及系统的建模描述。显然,在这样的结构化设计体系下,模型的建立、修改和验证都非常方便;设计活动在不同的抽象层级间沿“自顶向下”的设计路径和“自底向上”的验证路径来回移动,将有效提高 MEMS 设计的效率和自动化程度。

在节点分析法中,每个单元都被表示为一个多端口(Port/Terminal)的克希霍夫型网络(Kirchhoffian Network),每个端口又由一对特征变量所描述。不同单元通过端口在“节点(Node)”处映射连接(只有同类端口方可连接),实现能量与信息交换。单元行为特性即由端口变量间的关系所表征,单元建模或称节点化建模的主要任务,就是要寻求和建立这种关系。在构成端口的 2 个特征量中,一个称为跨量(Across Quantity),另一个称为通量(Through Quantity),它们分别具有如下基本属性:跨量沿任一闭合环路的积分为零,即相互连接的端口具有相同的跨量;而流入同一节点的所有通量之和为零。显然,在电域,跨量和通量分别对应于电压和电流;在机械域,这种对应关系则通常约定为位移(转角)-力(力矩)。其他物理域相应的特征变量此处不再给出。这种适用于不同物理域节点变量属性定义及其约束关系,实际是一种广义的克希霍夫定律,它为统一环境下多能域混合系统的仿真分析提供了理论基础。

MEMS 节点化模型可由 VHDL-AMS 等模拟/混合信号硬件语言加以描述。VHDL-AMS 是在数字信号硬件描述语言 VHDL 的基础上拓展而成的一种新标准(IEEE1076. 1-1999),它克服了前者无法进行模拟信号仿真的缺点,为设计者提供了一个能够用统一的计算机语言描述模拟、数字及数模混合系统的集成建模环境^[18]。该语言通过在 VHDL 的 Port 中引入上述 Terminal 和 Quantity 的概念而实现了对跨越不同物理域的节点化模型的统一描述,从而使机械、热、磁、流体等非电物理规律和行为的描述成为可能。由 VHDL-AMS 所描述的端口模型将在仿真器中自动形成网表(Netlist)以建立节点方程;仿真分析的过程也就是联立求解这些关于模拟变量的节点

方程的过程。此外,用户也可自己定义变量方程,只要能用常微分代数方程组(DAEs)表示的物理过程,都可用 VHDL-AMS 语言加以描述,并通过模拟仿真器进行求解。从这个意义上讲,VHDL-AMS 似乎更像是一个逻辑数学工具而非专用的电路描述语言;它所具备的强大功能,无疑为包含不同能量范畴的 MEMS 系统的设计提供了有力支撑。

作为近年来 MEMS 设计领域的一个关注热点,有关节点分析法及 VHDL-AMS 语言等方面的研究及应用实例已有很多,这里不再详述。以此为基础,下面重点讨论 MEMS 系统级建模描述的另一重要方法——等效电路法。

2.2 基于节点分析的等效电路法

等效电路法的实现基础,是机械(包括声学等)和电气系统的动态行为在数学形式上的相似性。实际中机电比拟的基本规则有两种:一种是从力与电压的类比关系出发来确定其他量之间的对应关系,称为 $F-V$ 约定;另一种则是将机械域的广义力与电流相对应,称之为 $F-I$ 约定^[12]。

建立等效电路的常规方法,是将由器件集总行为抽象得到的质量-弹簧-阻尼系统类比为 RLC 振荡电路。这种模型虽较为简单,但它实际只描述了信号流,而并没能揭示和表征器件结构内部的能量关系,以及某些重要的局部行为;对于含有多种功能组件的复杂 MEMS 器件来说,应用此法是很难得到理想结果的。但我们并不能因此而对电路等效的思想简单地加以否定。上述处理方法其实并非等效电路法惟一的实现形式,如果仅从这种简单的信号流类比关系出发来认识和评价等效电路法,得出的结论难免失之片面。如有文献曾将等效电路法与体现 VHDL-AMS 语言仿真要求的节点分析法视为两种不相兼容的方法而加以对比,但事实上,本文正是试图通过将节点分析的思想引入等效电路的构建过程,来探寻一种适于复杂 MEMS 系统快速仿真的新的思路和方法。

如前所述,MEMS 的节点分析法是由电子电路设计规则发展而来的,电路模型本质上是一种节点化模型。从保守场能量关系出发,若能将一个以 Kirchhoffian 网络形式表示的 MEMS 结构单元的节点化模型,类比转换为相应的等效电路网络,则既能实现精确仿真,又能与电路设计兼容,可有效避免信号流等常规方法的不足。Til-

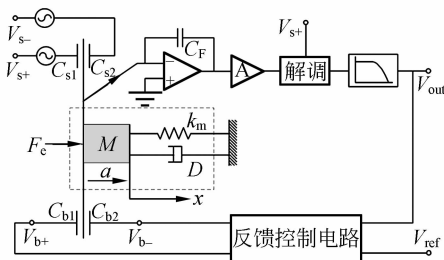
mans 等从机电(磁)换能元件的端口能量关系出发,曾系统探讨了几种典型元件的电路等效原理及方法^[10],但从该法的应用情况来看,目前还都是针对功能单一、结构相对简单的器件进行的,并未有效地拓展到复杂 MEMS 器件及集成系统的仿真分析之中。为此,作者在这里借鉴 MEMS 节点分析法的基本思想,提出一种以器件结构化分解为基础和特征的等效电路建模方法。具体来说,就是首先对系统及 MEMS 器件进行功能分解,然后针对各基本单元(重点是与外部电路连接的换能单元)进行节点化建模,并在一定的机电类比规则下将其转换为等效电网络(元件);再根据节点变量约束关系,将这些等效网络(元件)重构为器件级等效电路。最后,通过与真实电路环境相连接,得到完整系统的等效电路模型。

3 微加速度计系统分析实例

3.1 系统概述

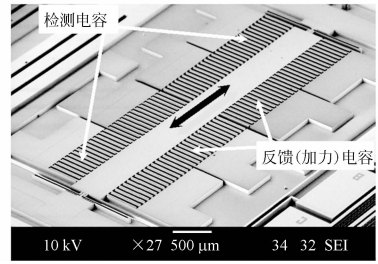
图 1 所示为一种梳齿式静电反馈微加速度计系统的总体构成,以及采用 SOIMUMPs 工艺加工的微敏感器件的三维结构^[19]。器件主体由可动的敏感质量和弹性折叠梁构成,通过两端锚点的支撑作用悬浮于基底之上。敏感质量两侧伸出若干梳齿作为可动电极,与布置在其上下两边的基体固定电极形成差动电容。这些差动电容按功能又被分为两组,它们在设置上相互独立,分别完成信号检测和反馈加(静电)力的任务。

当外界加速度 $a(t)$ 输入时,敏感质量 M 将在外部惯性力 $F_m = Ma$ 的作用下与基体间产生相对位移 $x(t)$,此位移将改变差动电容原有的平衡状态并被转化为相应的检测电荷。差动检测电容对 (C_{s1}, C_{s2}) 的两个固定电极上分别加载一对幅



(a) 系统构成及工作原理

(a) System architecture and its operating principle



(b) 微机械敏感器件 SEM 图

(b) SEM of micro-machined device

图 1 闭环微加速度计系统原理及器件结构图

Fig. 1 Illustration of a closed-loop accelerometer system and micro-machined device

值相同、相位相反的高频交变电压,用来对微弱电荷信号进行检测和调制。调制信号经前置积分放大、交流放大、同步解调及低通滤波等一系列处理后形成输出电压 V_{out} ,实现对输入加速度的最终度量。与此同时,此输出电压又通过反向控制电路,被同步反馈至另一组差动电容即加力电容 (C_{b1}, C_{b2}) ,通过与其两固定电极上的预载电压以不同方式分别叠加,来产生与敏感质量运动方向相反的静电回复力,使之始终活动在平衡位置附近——这样便形成了一个闭环静电伺服系统。可见,在此闭环微加速度计系统中,不论是 MEMS 器件还是接口检测、控制电路,都包含有多种不同的功能单元或元件,它们有机集成为一体,形成了一个典型的复杂 MEMS 系统。

3.2 等效电路建模及仿真

系统级等效电路的构建过程,就是建立 MEMS 器件的等效电路表达形式并将其与真实电子元器件相联结的过程。按照 MEMS 的结构化设计原则,微器件可分解为平板质量、挠性梁、分别承担检测和反馈功能的电容换能单元(静电间隙)、锚点等基本组件单元。限于篇幅,这里只以器件中关键换能单元端口模型的创建及等效转换为例,对上述过程做一概要介绍。

经器件分解后,由梳齿与定极构成的平行板可变电容,就是一个最基本的两端口机电换能元件,其结构型式如图 2 所示。动极板(梳齿)的纵向平动位移 $x(t)$ 与极板所受作用力 $F(t)$ 共同形成机械端口;电端口则由另一对变量,极板电压 $V(t)$ 和聚积电荷 $Q(t)$ 所描述。在只存在静电储能的情况下,极板受力相应地仅表现为静电力

F_e 。我们可由耦合场能量关系出发来确立这些变量间的定量关系,它们体现了一种非线性的单元行为。为建立便于实现机电类比的线性化端口网络模型,不妨对各端口变量的动态增量部分加以考察。利用二元函数的 Taylor 公式将有关表达式在元件静态偏置点展开并略去二阶以上项,整理化简后可得以矩阵形式表示的网络模型:

$$\begin{Bmatrix} q \\ f_e \end{Bmatrix} = \mathbf{B} \begin{Bmatrix} v \\ x \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_0 & -\Gamma \\ \Gamma & -k_e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v \\ x \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

式中 q 、 f_e 、 v 分别为电荷、静电力和偏置电压的动态增量; $C_0 = \epsilon A_e / g_0$ 是初始电容; $\Gamma = \epsilon A_e V_0 / g_0^2$ 称为元件的换能因子,其中 V_0 为初始稳态偏压; $k_e = \Gamma^2 / C_0 = \epsilon A_e V_0^2 / g_0^3$ 是体现静电力增量与位移 x 间成正比关系的系数项,称为静电刚度。

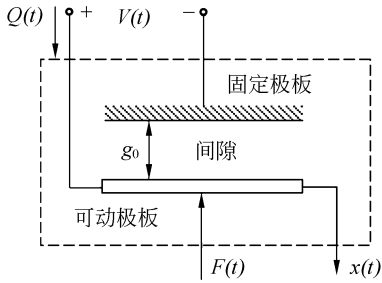


图 2 可变电容元件及端口变量示意图

Fig. 2 Changeable capacitor and its port variables

从等式两端端口变量的特征属性看,右端激励向量的元素 v 、 x 均为跨量(势),而响应 q 与 f_e 均是通量(流),因此矩阵 \mathbf{B} 又称为导纳矩阵(Admittance Matrix)。

不失一般性,设 $x(t) = X \sin \omega t$,并引入速度 $u = dx/dt$ 和电流 $I = dq/dt$ 。对式(1)进行适当变形处理,可得单元动态特性的另一种矩阵表达式:

$$\begin{Bmatrix} v \\ I \end{Bmatrix} = \mathbf{T} \begin{Bmatrix} f_e \\ u \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\Gamma & k_e/j\omega\Gamma \\ j\omega C_0/\Gamma & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_e \\ u \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

式(2)称为单元传递方程,它和式(1)共同描述了偏置点附近端口增量信号间的线性关系,揭示了静电电容单元的工作机理和换能规律,并使得这种关系可通过机电类比的方法统一地等效为含有耦合元件的电路网络(F - V 约定),如图 3 所示。

差动电容可看作由两个可变电容在动极板处连接形成,其中每个电容又可用上述耦合单元模型加以描述。从节点分析的观点出发,它实际是一个三端口网络单元,包含了两个电端口和一个

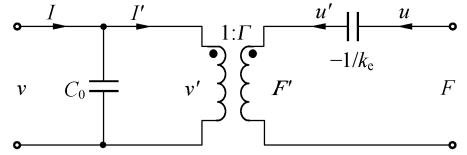


图 3 二端口换能单元的等效电路

Fig. 3 Equivalent electrical networks of 2-port transducer

共享的机械端口;但在实际配置中,两个端口电压又往往并非完全独立,而是具有某种关联关系(相等或互异),差动电容因此又可等效成一个类如普通电容的双口换能单元。具体推导此处从略。

在此闭环加速度计的仿真建模中,问题的关键是要正确认识到作为器件核心功能单元的两类差动电容在工作机理上的不同之处,并据此建立各自的等效模型。对检测单元来说,其功能行为主要体现在感应电荷 q_s 的形成上,这里的激励信号实际只有机械端口的动态变量即极板位移 x ,而在电能端口并不存在独立的电压增量($v=0$),也即感应电荷和静电力只由机械位移引起,因此检测单元可视为耦合场双口网络的特殊形式。按照机电类比关系,它可等效为由流控电流源(CCCS)、积分器和一个独立源(提供载波)组成的电路网络。反馈单元的主要功能是形成力反馈回路。作为反馈信号的输出电压将以增量的形式输入单元,与极板位移同时作为端口激励信号对单元的动态性能产生影响。它一般具有标准的双端口网络形式,故可用图 3 所示的含有理想变压器的等效电路形式加以描述。

将上述耦合单元与经结构化分解形成的其它组件单元通过端口映射关系相互连接,利用牛顿第二定律与电路拓扑约束关系(KVL 或 KCL)在数学表达形式上的一致性,我们便可将其重构为器件级等效电路,并进而建立完整系统的等效电路表达。图 4 所示,为最终所得微加速度计系统等效电路拓扑结构图。

图中闭合环路中的电子元件分别对应于各机械参数,如电压源与外界惯性力 F_m ,电感与敏感质量 M ,电阻与粘性阻尼系数 C ,电容与机械柔度 $1/k_m$ 等。空气阻尼由压膜阻尼模型描述,这里综合所有梳齿单元的作用效应将其表示为单一电阻。检测和反馈单元分别以虚线框标示,它们与

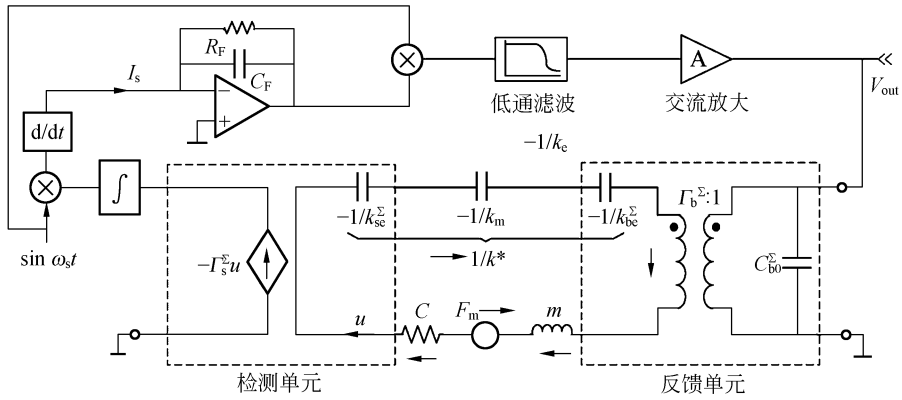


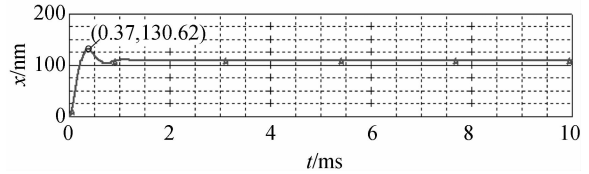
图 4 集成微加速度计系统等效电路拓扑图

Fig. 4 System-level equivalent electrical topology of integrated micro-accelerometers

代表敏感元件机械行为的中间闭合环路,共同构成了以等效电路形式表示的器件宏模型。图中的箭头标注了电压降(等效力)的相对方向。可见,图 4 在系统层级上实现了对该闭环加速度计多能域耦合关系的电路等效,建立了形式简洁的单一域仿真模型,同时也为我们进一步认识、评价系统的工作过程及性能提供了直观的物理解释。

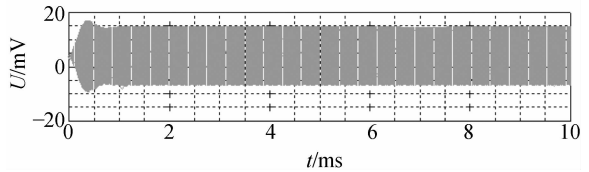
将此图对应转化为 OrCAD/Pspice9 下的电路模型,在相同的参数设定下,其仿真结果与基于 Simplorer 的 VHDL-AMS 模型的仿真结果非常接近,仅存在极微小的差异^[13],这表明由节点化模型出发构建的系统级等效电路模型是正确的,并能满足仿真精度要求。有关等效电路建模过程及仿真分析的详细介绍,有兴趣的读者可参看文献^[19]。

在图 4 的基础上,所有理想化的电路功能模块又可根据实际电路设计代之以具体的电子元器件;利用这样一个更接近于物理真实的“计算原型”,可对系统性能进行更加准确的预测、评估,和对设计结果进行快速验证。图 5 给出了某虚拟系统在单位重力加速度(1g)的阶跃输入作用下,在 0~10 ms 内的瞬态响应。通过这种仿真分析,我



(b) 敏感质量位移

(b) Displacement of proof mass



(c) 前置积分器输出电压

(c) Output voltage of preamplifier

图 5 阶跃输入下等效模型的时域分析结果

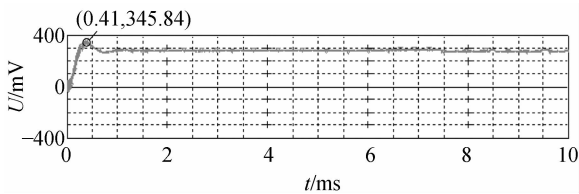
Fig. 5 Step response of equivalent model

们不仅得到了系统最终输出结果,而且可对系统运行过程中的中间变量加以详细考察。

4 结 论

MEMS 系统级建模和仿真的实质,就是要在计算机上建立一个便于分析、计算的微系统虚拟样机,从而能在产品设计阶段就可对各种设计方案进行快速、准确的评估和验证。这一过程,可以说是 MEMS,尤其是复杂和集成 MEMS 系统分析设计中一个必不可少的重要环节。

本文所提出的等效电路法,与传统的信号流类比法和将整个 MEMS 器件集总等效的处理方



(a) 输出电压

(a) Output voltage

式不同,实际是将 MEMS 节点分析的思想引入了系统等效电路的构建过程,即以微器件的功能分解为基础,从各基本单元的节点化建模出发,先将其类比转换为等效的电路网络(元件),然后再根据节点变量约束关系,将这些等效网络(元件)重构为器件和系统级电路模型。因此,从本质上讲,这种方法与 VHDL-AMS 语言描述法是一致的,即二者都是基于节点分析的思想,通过将克希霍夫定律推广应用到电学以外的其它物理域,按照结构化的设计规则,依托于一定的电子设计平台来实现对系统的建模描述和仿真分析;所不同的是,VHDL-AMS 提供了一种标准化、自动化的语言描述工具,而等效电路法却需要设计者自行完成由非电端口模型到电路网络的类比转换。

从等效电路的构建过程可看出,此法一般需

将器件或节点化单元的行为在其工作点附近线性化,这使它主要适用于小信号分析,等效元件的选取有时也会受限于 SPICE 元件库。这虽然在一定程度上限制了该法的应用,但针对性的研究已在积极进行,如 Tilmans 基于模态分析的思想建立了挠性结构的等效电路模型^[20],闻飞纳等人则讨论了大信号器件的等效电路类比方法等^[21]。另外,复杂系统等效电路的构建往往需要设计者较为准确、深刻地认识各种物理规律及其内在联系,故一般具有相当的难度;但辩证地看,基于这种理解和认识而成功构建的等效模型,也往往具有直观、清晰的物理意义,相比于抽象的语言描述,它更能从物理本质上深刻揭示系统的工作机理和行为特性。尤其是它所具有的快捷的仿真速度,将为原型产品的分析和验证提供很大便利。

参考文献:

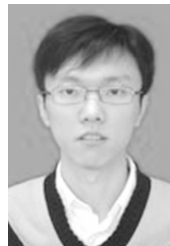
- [1] SENTURIA S D. CAD challenges for microsensors, microactuators, and microsystems [C]. *Proceedings of the IEEE*, 1998,86(8):1611-1626.
- [2] 潘武,钟先信,刘积学. 微机电系统(MEMS)的仿真和模型分析[J]. *光学精密工程*, 2003,11(1):30-36.
PAN W, ZHONG X X, LIU J X. Simulation and model analysis of MEMS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003,11(1):30-36. (in Chinese)
- [3] SCHWARZ P, HAASE J. Behavioral modeling of complex heterogeneous microsystems [C]. *Proc. 1st Intern. Forum on Design Languages (FDL'98)*, Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology, 1998,2:53-62.
- [4] 季国顺,张永康. 微机械系统建模与仿真技术研究[J]. *光学精密工程*, 2002,10(6):626-630.
JI G SH, ZHANG Y K. Study of the technology of modeling and simulation of MEMS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(6):626-630. (in Chinese)
- [5] 林谢昭,应济,陈子辰. 静电致动硅膜板的宏模型建立方法[J]. *光学精密工程*, 2008,16(5):839-844.
LIN X ZH, YING J, CHEN Z CH. Macro modeling method for electrostatic drive silicon diaphragm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(5):839-844. (in Chinese)
- [6] JAKOVLJEVIC M, FOTIU P, MRCARICA Z, et al.. A system-level simulation of complex multi-domain microsystems by using analogy hardware description languages [J]. *Sensors and Actuators A*, 2002,82:30-39.
- [7] MUKHERJEE T, FEDDER G K, RAMASWAMY D, et al.. Emerging simulation approaches for micromachined devices [J]. *IEEE Transactions on Computer-aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2000,19(12):1572-1589.
- [8] ZHOU G Y, PHILIP D. A method to include micromechanical components into the system level simulation [J]. *Sensors and Actuators A*, 2002,97-98:386-397.
- [9] 孙振新,黄庆安,李伟华. MEMS 器件 VHDL-AMS 宏模型[J]. *微纳电子技术*, 2003(5):33-36.
SUN ZH X, HUANG Q A, LI W H. VHDL-AMS macromodels of MEMS devices [J]. *Micronano-electronic Technology*, 2003(5):33-36. (in Chinese)
- [10] TILMANS H A C. Equivalent circuit representation of electromechanical transducers: I. Lumped-parameter systems [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 1996,6:157-176.
- [11] TARIK B, JEAN-PAUL G. Modeling micropumps with electrical equivalent networks [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 1996,6:398-404.
- [12] 戎华,黄庆安,李伟华. F-I 类比方法及 MEMS 梁的等效电路器件宏模型[J]. *半导体学报*, 2003,24(5):528-532.
RONG H, HUANG Q A, LI W H. An equivalent

- circuit macromodel for a MEMS beam and F-I analogy[J]. *Chinese Journal of Semiconductor*, 2003,24(5):528-532. (in Chinese)
- [13] WANG Y Q, CHEN H L, HE X M. System-level modeling and simulation for an electrostatic-feedback micro-accelerometer based on equivalent electrical representation[J]. *Micorsystem Technologies*, 2007,13:613-624.
- [14] FEDDER G K. Structured design of integrated MEMS[C]. *Technical Digest of the 12th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Orlando*, 1999:1-8.
- [15] CLARK J V, ZHOU N, BINDEL D, et al.. 3D MEMS simulation modeling using modified nodal analysis [C]. *Proceedings of the Micro - scale Systems: Mechanics and Measurements Symposium, Orlando FL, USA*, 2000:68-75.
- [16] 肖志勇, 杨振川, 张海霞, 等. 加速度系统的结点化模型仿真[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2004, 40(3):432-436.
XIAO ZH Y, YANG ZH CH, ZHANG H X, et al.. Nodal model simulation of a accelerometer [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2004,40(3):432-436. (in Chinese)
- [17] 单光宝, 刘佑宝, 魏海龙. 硅微加速度计的建模与仿真[J]. *功能材料与器件学报*, 2006,12(15):399-403.
- SHAN B G, LIU Y B, WEI H L. Modeling and simulation of micor-silicon accelerometer [J]. *Journal of Functinal Materials and Devices*, 2006,12(15):399-403. (in Chinese)
- [18] 杨华中, 罗嵘, 汪蕙. 面向微系统芯片的建模方法[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
YANG H ZH, LUO R, WANG H. *Modeling Methodology for System-on-chip* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [19] 王永泉. 面向梳齿式微加速度计的复杂 MEMS 系统设计及关键技术研究[D]. 西安:西安交通大学, 2007.
WANG Y Q. *Systematic design and key techniques of complex MEMS for a comb-finger micromachined accelerometer*[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [20] TILMANS H A C. Equivalent circuit representation of electromechanical transducers; II. Distributed-parameter systems[J]. *J. Micromech. Microeng*, 1997,7:285-309.
- [21] WEN F N, LI W H, HUANG Q A, et al.. Large-signal lumped-parameter macromodels for equivalent circuit representation of electromechanical transducers [J]. *J. Micromech. Microeng*, 2004,14:452-461.

作者简介:



王永泉(1976—),男,甘肃定西人,博士,讲师,1999年、2002年、2007年于西安交通大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事微机电系统(MEMS)、结构动力学分析等方面的研究。E-mail: yongquanwang@gmail.com



彭 倍(1977—),男,四川成都人,博士,副教授,1999年于北京航空航天大学获得学士学位,2008年于美国西北大学获得博士学位,主要从事微纳机电系统(MEMS/NEMS)、纳米技术和复合材料领域的研究。E-mail: beipeng@uestc.edu.cn



陈花玲(1954—),女,陕西韩城人,博士,教授,博士生导师,1982年、1984年、1990年于西安交通大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事机械振动与噪声控制理论及技术、微机电系统(MEMS)等方面的研究。E-mail: hlchen@mail.xjtu.edu.cn



朱子才(1984—),男,湖北荆州人,博士研究生,2006年、2008年于西安交通大学分别获得学士、硕士学位,主要从事微机电系统(MEMS)、智能材料等方面的研究。E-mail: zhuzicai@stu.xjtu.edu.cn