

文章编号 1004-924X(2017)增-0120-10

微光机系统工程设计工具

杨东上¹, 韩雪冰¹, 曾 议^{1*}, Jason Clark², 司福祺¹

- (1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 普度大学 机械工程系, 印第安纳州 47906)

摘要:为提升多物理域耦合的复杂微光机系统设计分析能力,提出了高效的基于系统级构架的设计和建模方法。而使用传统的建模工具在模拟这样的微系统时存在困难,这些工具或是基于分散的单元分析,计算较复杂费时;或基于传统集总单元分析,不易处理代数约束条件。对于系统设计,建立易用的图形用户界面(GUI),允许设计者立体、快速的配置复杂系统。创立功能丰富的网表语言,并将模型与之结合来满足设计的灵活性。应用系统动力学理论,通过能量方程、约束和载荷来表示复杂的、多学科的组件,建立和求解微分代数方程。对桑迪亚国家实验室制作的一个复杂微光机系统进行了有效的建模和计算,系统包括微镜片、齿轮、铰链、滑块、电子元器件、梳状驱动器和挠性梁。结果显示了方法的有效性,说明该方法有利于模拟微光机这样多学科的、含有静态和动态约束的系统。

关键词:建模;仿真;DAE;系统级;集总分析;微系统

中图分类号:O411.3;TP391.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172513.0120

Simulation tool for complex-engineered micro-optical electromechanical system

YANG Dong-shang¹, HAN Xue-bing¹, ZENG Yi^{1*}, JASON Clark², SI Fu-qi¹

- (1. *Key Lab of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;*
 2. *Department of Mechanical Engineering, Purdue University, IN 47906, USA)*
- * *Corresponding author, E-mail: yzeng@aiofm.ac.cn*

Abstract: In order to improve the design and analysis ability of complex microsystems with multi-physical domain coupling, an efficient design and modeling method based on system-level structure was presented. In comparison, it was difficult to simulate such kind of microsystem using conventional modeling tools. Such tools were either based on distributed-element analysis, which was time-consuming and too computationally intensive for complex systems, or based on traditional lumped-element analysis, which was limited by an inability to handle algebraic constraints in general. For design, a novel graphical user interface (GUI) was presented. It allowed users to quickly configure complex systems in 3D using a computer mouse or pen at a faster rate than it might be drawn with pencil and paper. The GUI was coupled to a novel and powerful netlist language for design flexibility. For

收稿日期:2017-05-31;修订日期:2017-06-17.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFC0200400);国家自然科学基金资助项目(No. 41605017)

modeling, recent advances in analytical system dynamics and differential-algebraic equations (DAEs) were applied into a framework that facilitates the systematic modeling of multidisciplinary systems that may comprise static or dynamic constraints. For a test case, a complex microsystem fabricated by Sandia National Laboratory (SNL) was efficiently modeled and simulated. This micro optics electro mechanical system comprises mirrors, gears, hinges, a slider, electronic components, comb drives, and electromechanical flexures. The results prove the effectiveness of the method, which presents the netlist language and modeling methodology are beneficial to configure and simulate one of the most complex-engineered micro systems to date.

Key words: modeling; simulation; DAE; system level; lumped analysis; micro system

1 引言

基于有限元分析的离散单元工具常用来表征新型的几何结构及其相互作用^[1-6]。然而大量的微系统设计采用的是参数化特征明显的单元集,它在建模和设计领域的发展引导了微光机电系统的系统级工具开发^[7-9],如加州大学伯克利分校的 Sugar^[10-12]和卡内基梅隆大学的 Nodas^[13-14]和 Covenor 公司的 Architect 模块^[15-16]和 Intelisense 的 Synple 功能^[17]。此外, Toshiyoshi 等开发了一种物理场耦合的仿真平台^[18],常洪龙等人建立了一种参数化的振动陀螺仪简化模型^[19], McCorquodale 等人提出了一种分析综合工程的 CAD 工具^[20], Kamalian 提出了一种交互式布局的综合 CAD 工具^[21]。这些工具的共同特点是: (1)可以提取网表形式的系统配置,其文本中每一行用来表述单元间的连通性、方向和它的建模参数。(2)通过利用基于降阶模型和矩阵结构分析以及节点优化分析的方法,采用具有高效计算的集总单元,相比较于离散单元,可以明显地减少计算时间^[10-17]。这些优点有助于利用多个组件探索系统的参数化设计空间。

在之前的研究中(Sugar^[12]),我们对有效构型、建模和仿真进行了演示,并对几百个梳状振动齿组成的先进微镜进行实验验证,但其不能在个人电脑上利用传统的分散单元工具进行仿真。而利用不到十几行的参数化组件网表,却可以很容易在 Sugar 中体现出其先进的设计。换言之如梳齿的个数,悬臂梁的宽度等可以很容易被修改。并且已经利用分散单元验证了 Sugar 中的集总式单元。

之前所做研究与现在所做的不同在于以下方

面:之前的工作,其用户界面不能够对复杂的微系统进行仿真,如桑迪亚国家实验室开发的具有多种约束类型的复杂工程微系统,但用户希望可以有效的去探究这种复杂微系统。另外用户需要更加友好的图形用户界面,更多灵活的网表功能,以及更少的复杂建模框架^[12]。为了研究满足这些需求,本文详细描述了之前利用用户界面所做出的研究,并提出了利用 Sugar 开发一种交互的 GUI-网表和系统建模框架。基于此,我们提出了 Psugar 的工具。首先介绍了网表的突出特点,提出了一种新型的 3D 交互式 GUI 技术,介绍了所采用的系统建模框架,讨论了微分方程解算器。最后给出了一个由桑迪亚国家实验室开发的基于复杂微系统的仿真实例。

2 设计

图 1 为 Psugar 的原理构架。Psugar 利用 Matlab 进行编码,因为 Matlab 的概念验证效率

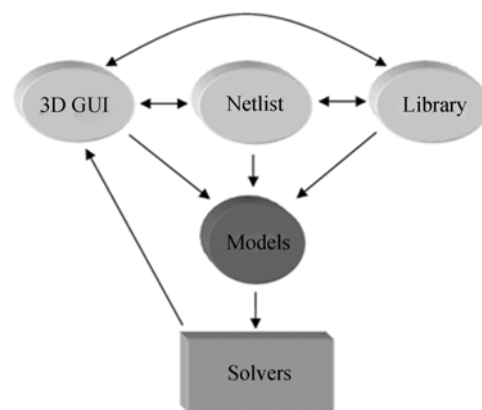


图 1 Psugar 的原理结构图

Fig. 1 Schematic diagram of Psugar

较高,并且便于用户修改和附加功能。图 1 中,椭圆形表示指定系统的参数和本构关系;长方形表示解算算法,用来对系统的数学表达进行整合解算;连线表示模块之间的通信路径。Psugar 以网表为中心,网表是 Matlab 中的 m 类型文件,用来描述系统配置,建模和材料属性以及系统仿真。

通常情况下,大部分的图形用户界面(Graph User Interfaces, GUIs)操作非常复杂,需要频繁的按键点击,致使在三维空间中对绘图平台和项目的设置上浪费了很多时间,而且繁琐复杂的工作会打断设计阶段的正常流程。为了解决这个问题,本文开发了一种按键操作最少的方法,从而方便对三维空间下设备单元的绘图平台进行配置。绘图平面可以在三维空间中由至少三个坐标点唯一确定。

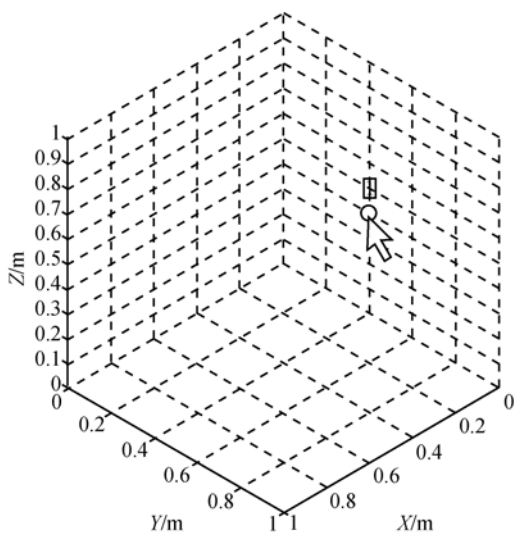
在 Psugar,这三个坐标点通过鼠标或绘图笔点击已经在屏幕上确定的轴平面或设备组件上的三个目标点来定义。由于鼠标和绘图笔指针在电脑中由二维坐标确定位置,所以可将光标投射到三维空间中的对象上。图 2(a)表示的是定义绘图平面三个坐标中的第一个点,第一次点击将光标投射到在 $x-z$ 平面上。图 2(b)表示的是绘图平面上第二个点的位置,图 2(c)表示的是最后一个点的位置,由此三个点唯一确定绘图平面。依次点击图 2(a)~2(c)中 3 个点只需要极短的时

间。图 2(d)表示的是绘图平面上元件的位置。这个含有两个节点的电阻器元件需要进行两次点击,而其他电阻器与最先确定的这个元件首尾相连,所以只需要额外的一次点击操作即可。

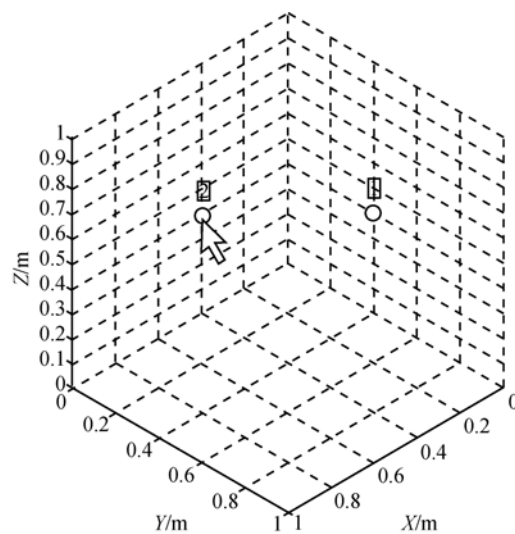
通过拖拽平面的节点在其相交的平面(如 $x-z$ 平面)上进行移动,从而实现平面的重新定位。单元上的节点也可以进行类似的定位。同时在操作过程中,坐标点有吸附到网格和节点上的功能,便于坐标点的自动定位。这种方法的显著特点是可以使系统比手绘更快的完成设置。

虽然有些工具可以将图表转换为图形符号,但却缺少将图形符号转换为图表的操作工具。在 Psugar 中,图形窗口和图表窗口间的联系如下:图形窗口中配置的任何单元都将立即显示在网表窗口中,并作为附加文本行,同样在图表窗口中输入的单元也会立即出现在图像窗口中。这种方式的优点是可以根据需要选择两种中最好的方式。例如,图形窗口可以快速配置一个过滤装置,但是由参数化设备阵列组成的布局最好通过在网表中使用嵌套循环来实现,该参数化阵列沿 x 方向和 y 方向有不同的特性变化。

利用单元菜单窗口可以选择图形窗口中的单元。一个单元可以是最基本的元件,如分子、电阻器、运算放大器或者是一个挠度梁;也可以是基本组件间的连接单元,如碳纳米管,带通滤波器或是



(a) 绘图平面描述的第一个点
(a)Configuring draw plane, 1st click



(b) 绘图平面描述的第二个点
(b)Configuring draw plane, 2nd click

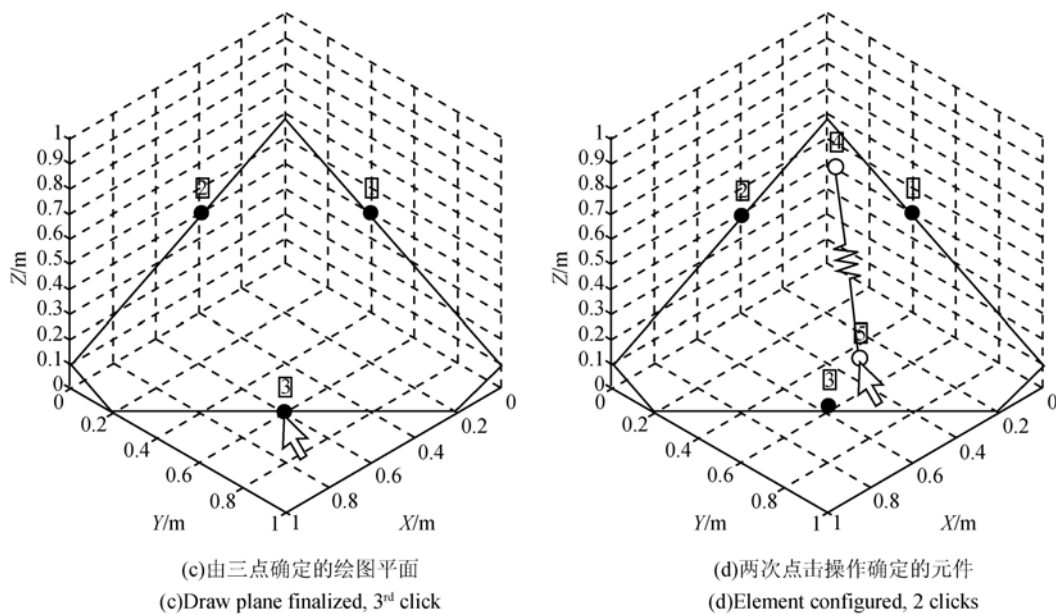


图 2 GUI 输入设计
Fig. 2 GUI design input

微型陀螺仪。用户可以通过对单元菜单窗口的单元选择列表进行定义,单元菜单窗口(Element Menus Window, EMW),图形窗口(Graph Window, GW)以及网表窗口(Netlist Window, NW)如图 3 所示。

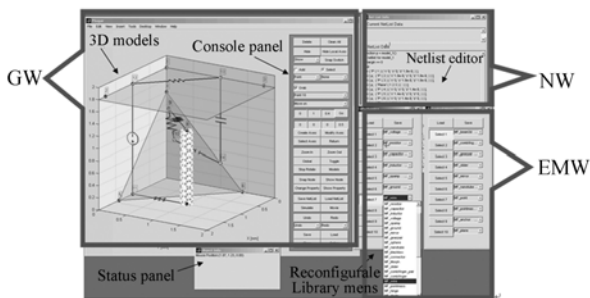


图 3 主要窗口图例
Fig. 3 Main interface

3 网 表

网表和 SPICE 因在电子网络的电路元件中以文本形式进行描述而得到广泛使用。每一个网表中每一行的常用语法包括单元模型、网络中单元间的连通性以及单元模型参数。这里在 Sugar 中扩充了网表在机械等领域的使用,为此开发了

三维空间定向参数和新模型。当然,用户界面的网表语言不允许含有复杂的计算指令,如处理矩阵或访问 Matlab 函数和工具箱的复杂计算,这限制了设计的灵活性。

Psugar 放宽了 Sugar 网表语言的限制,通过 Matlab 来实现。Psugar 网表是 Matlab 中的一个 m 文件,其中输出的每一行都是格式的一个结构单元,其格式如下:

[model; {nodes}; {parameters;}] for the j^{th} models

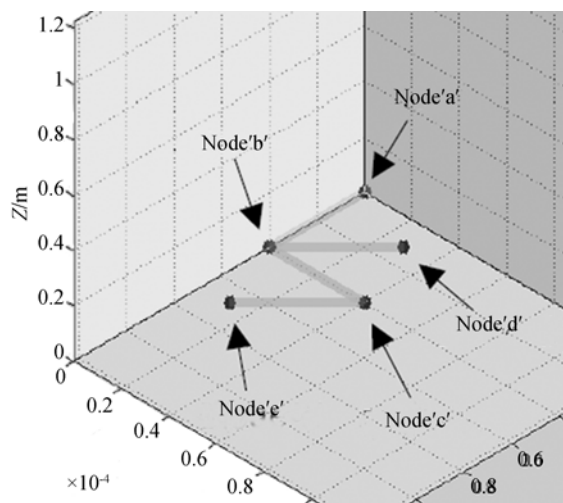


图 4 梁结构
Fig. 4 Beam structure

其中 $model_j$ 是模型函数名称, $nodes_j$ 是节点名称列表, $parameters_j$ 是建模参数列表。

图 4 所示的简单的梁结构的网表文件如表 1 所示。其中列表中第四行描述的是一个梁从节点 b 到节点 c 的长度是 $40 \mu\text{m}$, 它与水平线成 90° 。第七行所表达的是加到节点 e 上沿着 Y 的正方向的力。第八行表示的是施加到节点 a 上的所有自由度的约束, 即节点 a 的所有位移变量都是零。

表 1 输入网表

Tab. 1 Input netlist

```
function p=NetList_4beams
%net list for the beams structure of 3D
p={'beam3d'{'a' 'b'{'L'40e-6;}};
p=[p;{'beam3d'{'b' 'c'{'L'40e-6; 'rz'pi/2;}}];
p=[p;{'beam3d'{'b' 'd'{'L'40e-6; 'rz'3 * pi/4;}}];
p=[p;{'beam3d'{'c' 'e'{'L'40e-6; 'rz' - pi/4;}}];
p=[p;{'effort'{'e'{'e.y'100e-6;}}];
p=[p;{'constraint'{'a'{'displacement' 'all';}}];
```

利用 Matlab 语言, 可以使设计者自由访问 Matlab 函数、数学运算、工作空间、工具箱 (如 Simulink™)、第三方插件 (如 Comsol™) 以及常见的程序环境。

Psugar 中的可编程网表可以极大扩展用户的设计能力。例如, 一个主网表可以访问另一个程序, 根据主网表的需求, 让其执行一个不同的网表仿真, 并获得结果。又如, 在有限状态机等情况中, 一个仿真在继续执行仿真前需要重置原始网表。再如, 用户可能希望在网表中表示一个机器人配置, 也可以在网表外表示机器人的 CPU。

4 建模

分布式或者有限元分析工具不需要预定义模型, 而系统级工具与以上工具不同, 非常依赖于集总模型。但是, 集总模型往往计算效率更高, 且相对于有限元需要的存储和计算时间非常少。集总和分散式分析模型的差异见图 5, 举例说明了半圆形悬臂梁的偏转。相比于集总模型, 分散式模型分析需要 3 个数量级多的单元, 并且有超过 3

个数量级的自由度, 以及耗费多于 2 个数量级的时间去完成计算。但两模型的相对误差仅小于 1%。人们通常假设分散式分析可以获得更多的物理特性, 所以在各个方面的计算都更精确。这种假设成立的条件是单元数量足够多, 从而可以实现屈服收敛。如图 5 所示, 在比较集总模型和分布式模型时, 经常遇到一个屈服拐点。在这里, 由于将分布式网格划分得很小, 分布式模型收敛于集总式模型, 但却使得模型的计算变得繁琐。两种模型相比, 单元的个数比是 1 : 1 487, 自由度比值为 12 : 9 783, 仿真时间比是 0. 375 : 72. 86, 挠度分别是 12. 512 和 12. 39 m。

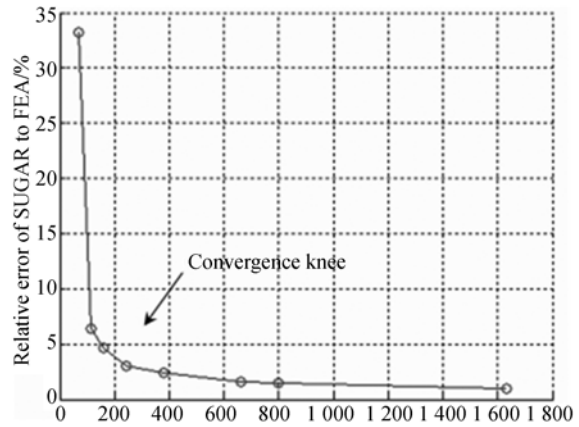
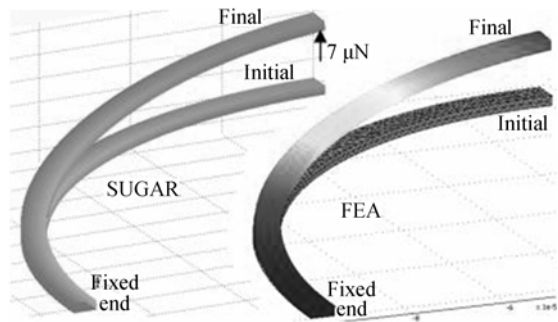


图 5 Sugar 和 Comsol 计算结果比较

Fig. 5 Calculation result of Sugar versus Comsol

在使用 Sugar 的过程中, 本文提出了一个二阶微分方程 (ODEs) 组成的微系统。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{R}\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} - \mathbf{F}_{\text{ext}} = 0, \quad (1)$$

其中: \mathbf{M} , \mathbf{R} 和 \mathbf{K} 分别是系统的质量、阻尼和刚度矩阵; $\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{f}$, 是速度矢量; \mathbf{F}_{ext} 是外部作用的力矢量, 可以是静电力、重力、非惯性力、电压、压力

等^[12]。当系统质量矩阵 \mathbf{M} 是奇异矩阵或者零矩阵时,ODE 解算器并不能解算微分代数方程 (DAEs)^[22]。而有许多复杂的微系统需要 DAE 方程组进行验证,如不含有惯性力的单元,含有位移、流体、动态变化或约束力的单元,以及那些不等式约束的单元。微分代数方程组表示一个系统可以用多种形式表达,可能会产生不同的差分指数。其中,所使用的微分代数方程来源于热力学第一定律(详见 Layton and Fabien^[23]),其差分指数最大为 3。具体推导过程可见文献[24]。在 Psugar 中,运动微分代数方程的形式为:

$$F(\bullet) = \begin{pmatrix} \dot{q} - f \\ \mathbf{M}\dot{f} + \Phi_q^T \kappa + \Psi_q^T \mu - \gamma \\ \Phi \\ \Psi \\ \Gamma \\ \vdots \\ s - \Lambda \end{pmatrix} = 0, \quad (2)$$

其中: k 和 μ 是待求拉格朗日乘数; $\Phi(q, t) = 0$ 和 $\Psi(f, q, t) = 0$, 分别是位移和流动约束; $\Gamma(e^j, s, q, q, t) = 0$, 是隐含的力约束的代数矢量; s 是解释说明的动态变量,用来说明如流体导数 $\dot{s} = df/dt$, 或是位移积分 $s = \int q dt$ 等; $M(f, q, t) = \nabla_f^2 T^*$, 表示质量, 而 $\Upsilon = Q - (\nabla_f T^*)_q f - (\nabla_f T^*)_i + \nabla_q T^* - \nabla_q V - \nabla_j D$ 。

Psugar 中的系统模型如式(3)所示, 每一个单元都有一个典型的参数模型函数, 包括其能量函数、约束和力。例如, 一个电动机械的模型函数 j 返回的是系统标量-势能 $V_j = \frac{1}{2} q_j^T K_j q_j$, 动能 $T_j = \frac{1}{2} f_j^T M_j f_j$, 而 $D_j = \frac{1}{2} f_j^T R_j f_j$ 表示功率

损耗, 其中 $\mathbf{K}, \mathbf{M}, \mathbf{R}$ 是多域矩阵。汇编程序是组成能量函数的 N 个集合, 如 $V = \sum_{j=1}^N V_j$, $T = \sum_{j=1}^N T_j$, 以及 $D = \sum_{j=1}^N D_j$, Q 为外部作用的力矢量, Φ 和 Ψ 分别为代数位移和流体约束矢量。之后, 汇编程序把这些函数替换到式(2)中的特征微分。对于运算效率, 所得到的运动方程被自动从符号形式转换为 .m 的格式文件, m 类型的文件可以重复迭代计算。因此, 在 Psugar 中, 模型受到的载荷被显著减小以简化能量函数, 约束和力。所以严格处理一个模型成特殊格式(由 Sugar 和 SPICE 生成^[12,25])等常用操作不能在 Psugar 中实现。

Psugar 利用一种改进的节点分析方法在可行的时间内完成多能量域的设计和仿真, 所需时间比有限元分析方法少。这里选择集总模型, 而不是采用分布式模型, 因为很多微系统都可以分解成计算效率高的通用的集总构型模块和集总模型。交叉学科系统也可以分解成集总模型的组合。运动方程也是基于能量损失和能量交换的微分代数方程(见式(3))。式(3)描述了建模的框架, 即 DAE 方程组设置。其中, e 为力; f 为流体; p 为位移; s 为动态变量; e^j 为隐含的力; k, u 为乘法器。

建模步骤如下: 首先, 建立坐标 (q, f) , 设定初始环境; 定义虚功力 Q 。第二, 设置指定坐标系下的固定函数, 包含动能 T^* 、势能 V , 容积 D 和虚功 δW , 以及指定坐标下的约束规划。然后通过计算惯性矩阵和雅克比矩阵把这些值代入一系列的微分代数方程中, 见式(3)。最后, 调用静止和时间域的解算器, 结果可以在平面图中以三维可视化的动态形式表现出来。

$$\frac{d}{dt} \nabla_q T^* - \nabla_q T^* + \nabla_q V + \nabla_q D - Q + \Phi_q^T \kappa(t) + \Psi_q^T \mu(t) = 0.$$

动能: $T_i = \int p_i df$
 势能: $V_i = - \int e_i dq$
 储能: $D_i = - \int e_i df$

q_j 方向上所作的虚功
 位移、流体、力和动态变量约束
 $\Gamma(e^j, s, \dot{q}, q, t) = 0$
 $\Phi(q, t) = 0$
 $\Psi(\dot{q}, q, t) = 0$
 $s - \Lambda(e^j, s, \dot{q}, q, t) = 0$

(3)

常用力的分类见表 2。

表 2 统一的变量设置

Tab. 2 United set of variables

力 e	流量 f	位移 q	动量 p
集中力 F	速度 v	位置 x	线动量 p
扭矩 τ	角速度 ω	角度 θ	角动量 H
电压 u	电流 i	电荷 q	磁通匝连数 λ
压力 P	体积比 Q	体积 V	压力势能 ρ
BH 温度 T	熵率 S	熵 S	

5 仿 真

在本节中,我们将讨论与 DAE 仿真有关的问题。对于很多 ODE,由于存在奇异或者零质量矩阵或者代数约束,所以不能准确的对 DAEs 进行积分运算。约束通常产生于高阶(大于 1、2 阶)的差分指数,所以很难进行解算。DAE 的近似解方法包含对每一步的对应非线性代数方程的解算。在 Psugar 中,式(2)的 DAE 方程转换成对应的非线性代数,而代数约束的余数可以用来进行精度控制。为了简便,这里通过用线性有限差分替换其微分来表示式(2)的低阶近似,例如 $\dot{q}_{n+1} \approx (q_{n+1} - q_n)/h_{n+1}$ 。因此式(2)的形式变为:

$$\mathbf{M}_{n+1} \begin{pmatrix} \frac{q_{n+1} - q_n}{h_{n+1}} - f_{n+1} \\ \frac{f_{n+1} - f_n}{h_{n+1}} + \Phi_q^T|_{n+1} \kappa_{n+1} + \Psi_q^T|_{n+1} \mu_{n+1} - \Gamma_{n+1} \\ \Phi_{n+1} \\ \Psi_{n+1} \\ \Gamma_{n+1} \\ \frac{s_{n+1} - s_n}{h_{n+1}} - \Lambda_{n+1} \end{pmatrix} = 0. \quad (4)$$

其中 h_{n+1} 代表第 $(n+1)$ 步。式(4)的雅克比行列式的第 j 列近似为:

$$[F(\tilde{y}_j, t_n) - F(\tilde{y}_j, t_n)]/2\epsilon, \quad (5)$$

其中:

$$\tilde{y}_j = [f_j, q_j, e_j^\lambda, s_j, \mu_j, \kappa_j]^T - \epsilon;$$

$$\dot{y}_j = [f_j, q_j, e_j^\lambda, s_j, \mu_j, \kappa_j]^T + \epsilon;$$

$$\epsilon = 10^{-d},$$

ϵ 为扰动参数, d 等于有效数值的一半^[22]。

DAEs 中提供了几个公用的解算器^[22], 解算器的选择取决于 DAE 中的差分指数; 即部分或所有方程的差分最小次数来确定其底层 ODE。然而, 以 ODE 为基础, 利用 ODE 解算器会存在一些不足, 因为解算路径经常与通过初始 DAE 定义的确约束解算有偏差。BDF (backward differentiation formula) 和 IRK (implicit Runge-Kutta) 等方法通过利用高阶近似和变步长来提高欧拉的解算方法。

由于 Matlab 的 15s 和 ode23t 解算器仅对指数为 1 的 DAE 系统有效, 因为式(2)的指数最高为 3 阶, 所以我们只能利用它们直接解算式(2), 最近, 我们采用了一个公用的高指数 DAE 计算器。后续的工作包括开发一个 DAE 计算器, 可以更好地开发特定的 DAE 结构。

6 实 例

当前, 用户主要关注的是对高效设计、建模和复杂工程微系统的仿真实验。图 6 所示为一个有关复杂微系统的实例, 该对象是由桑迪亚国家实验室开发的复杂工程微系统, 该系统的复杂性体现在其多种耦合的工程领域和物理现象。它含有电子电路单元、电场、机械转动单元、机械平移单

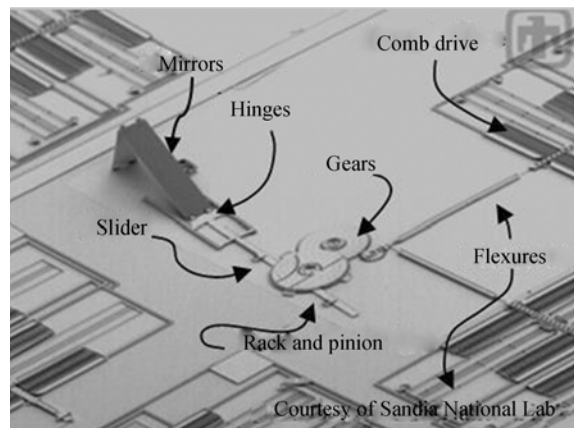


图 6 桑迪亚实验室的复杂工程微系统^[27]

Fig. 6 A complex engineered micro system in Sandia labs^[27]

元、流体动力学、机械接触和摩擦。桑迪亚国家实验室的研究人员建造了这个系统,由于没有足够的建模和仿真工具,所以通过反复试验来实现运行过程^[26]。

该系统中含有微镜片、齿轮、链条、滑块、齿轮齿条副、梳状驱动器以及挠性梁。系统的设计目的是为核弹头提供一种防爆保护,而单程机械密码锁隐藏于系统中。为了验证本文所采用的方法,微系统仿真模型与桑迪亚国家实验室类似,如图 6 所示。由于该微系统建模困难并需要采用传统手段进行仿真,之前没有对其进行建模^[26]。微系统涉及的多学科的单元包括电阻器、电容、电压电源、力学挠度、铰链、滑块、镜面和静电梳状驱动器。所生成的 Psugar 复杂的装备见图 7。

本文已利用实验和传统的 CAD 工具进行了确认和证实,微系统仿真结果采用 Sugar^[12]。Sugar 中所有单元都已导入到 Psugar 中并证实。Psugar 的代数模型和分析模型不同,这里已经在实验上验证了 Psugar 的代数模型,类似的验证工作将是未来的研究重点。

图 8 是对两个垂直放置的梳状驱动器给予相同的斜坡电压,其齿轮转动对时间的函数。第一次激励使最小齿轮转动 90° 。在去除电压后,系统指数衰减到其初始状态。在此处的模型中,不考虑铰链和齿轮齿之间的松弛情况,但在 Psugar 中,类似的松弛变化可以实现建模。在图 6 中并没有提供焊接结构和微系统的材料属性,并且也不知道实际情况下的铰链齿轮和滑块摩擦。

系统级建模和仿真的突出优点是简化了参数,即参数化模型的较高计算效率有利于对设计空间的探索,由此极大地节省了与设计、制造和试错法测试有关的时间和成本。图 8 和图 9 为这个复杂微设备的静态和瞬态响应参数。图 9 中,施加固定电压,最小齿轮的静态偏转角度是梳状驱动器屈服宽度的函数。这些分析验证了梳状驱动器的强度是屈服刚度的函数。图 10 为一组挠曲宽度的瞬态响应,微系统的阶跃响应是时间的函数。上述分析验证了设备的自然响应是几何结构的函数,可影响有效刚度和质量。

图 7 显示的是图 6 中桑迪亚设备的 Psugar 表示,图中对多学科的组件进行了标记,图中的光束是微镜的激光反射。

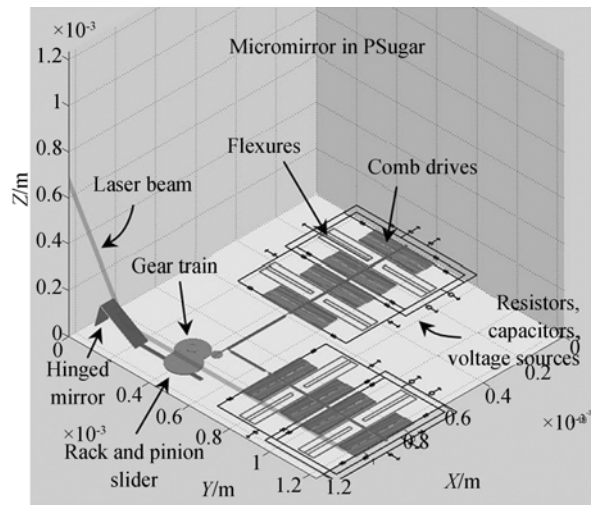


图 7 Psugar 配置

Fig. 7 Psugar configuration

图 8 所示的状态是一对斜坡电压加到两组正交的梳状驱动器,最小的齿轮转动 90° (见图 7)。这个上升趋势在 0.001 s 的时候结束,然后系统回到它的非制动状态。

图 8 显示的是齿轮转动角度是梳状驱动器下折叠挠曲宽度的函数(见图 7)。

图 9 显示的是齿轮转动的角度是梳状驱动器下的折叠挠曲宽度的函数(见图 7)。

图 10 表示的是一系列折叠挠曲宽度下,齿轮转动参数化仿真响应是时间的函数,图中可清楚看到频率的变化。

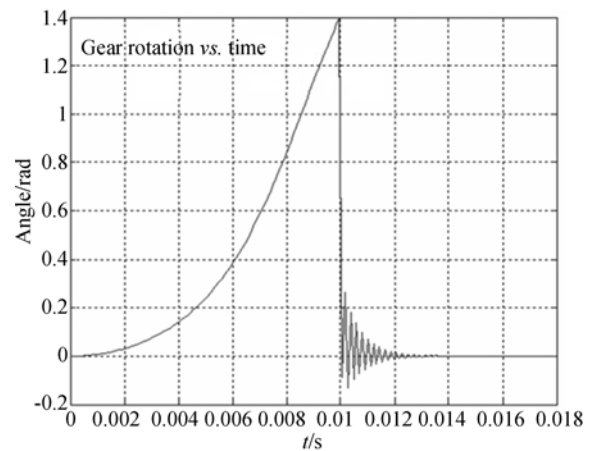


图 8 齿轮转动仿真

Fig. 8 Simulation of gear rotation

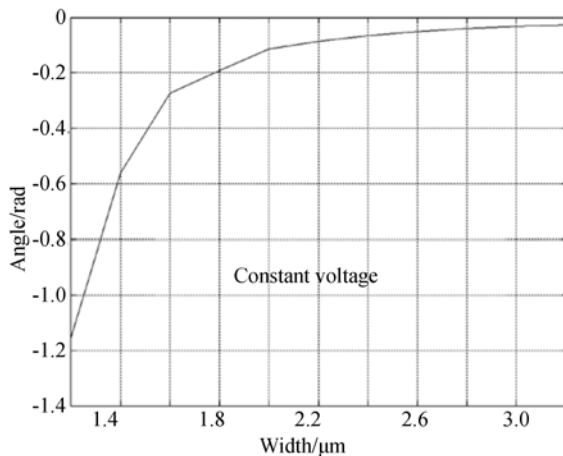


图 9 齿轮转动与挠曲宽度

Fig. 9 Gear rotation versus flexure width

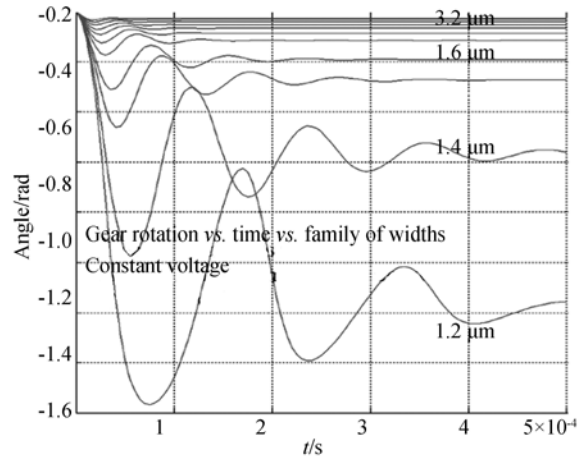


图 10 齿轮转动和时间、挠曲宽度的关系

Fig. 10 Relations gear rotation, time and flexure widths

7 结 论

文章演示了系统级的设计、配置、建模和一个复杂微系统的仿真。由于包含滑块、齿轮、铰链、镜面、机电挠曲、阻尼、残余应力、热应力、静电力、电压和电子元件等组合成的微系统,导致多物理域的网格划分困难,使得这个复杂系统很难利用传统的 MEMS-CAE 软件进行仿真。针对复杂的工程微系统,提出了一种新的高效的基于系统级

构架的设计和建模方法。关于设计,提出了交互式图形用户界面,允许用户快速、轻松地完成复杂的配置;同时提出强大的网表语言,它利用 Matlab 环境下的自由性和功能性;在模型构造方面,讨论了用系统方法通过能量方程、约束和载荷来表示复杂的、多学科的组件。

后续工作包括系统性能的进一步测试,开发新的集总单元精准模型如微镜片、滑块、铰链、齿轮等,优化解算器,更好地利用 DAE 模型的优势,增强组件库,以及模拟其他复杂的微光机系统。

参考文献:

- [1] SANDMAIER H, OFFEREINS H L, FOLKMER B. CAD tools for micromechanics[J]. *J. Micro-mech. Microeng.*, 1993, 3(3): 103-106.
- [2] SENTURIA S D, HARRIS R M, JOHNSON B P, et al. A computer-aided design system for Microelectromechanical Systems (MEMCAD)[J]. *J. Microelectromechanical Systems*, 1992, 1(1): 3-13.
- [3] BAKER D J, GONDER C, WILLIAMS F, et al. Design and simulation of PZT-based MEMS piezoelectric sensors[J]. *SPIE*, 2014, 9057.
- [4] MATEUSZ G, ANDRZEJ K. Design, modeling and simulation of MEMS pressure sensors[C]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2013, 8903.
- [5] ANSYS, Inc. [Z/OL]. <http://www.ansys.com>.
- [6] COMSOL, Inc. [Z/OL]. <http://www.comsol.com>, 2014.
- [7] SENTURIA S D. CAD Challenges for Microsensors, Microactuators and Microsystems[C]. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(8): 1611-1626.
- [8] AROKIA N. *Microtransducer CAD*[C]. *European Solid-State Device Research Conference*, 2014: 707-715.
- [9] SENTURIA S D, ALURU N, WHITE J. Simulating the behavior of MEMS devices: computational methods and needs[J]. *IEEE Computational Science and Engineering*, 1997, 4(1): 30-43.
- [10] DENG C J. The applied model and simulation for MEMS vibration accelerometer sensors[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 433: 241-245.
- [11] ZHANG Y, KAMALIAN R, AGOGINO A M, et

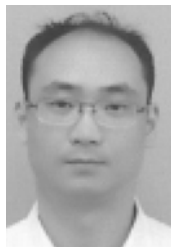
- al.. Hierarchical MEMS synthesis and optimization[C]. *Smart Structures and Materials 2005-Smart Electronics, MEMS, BioMEMS, and Nanotechnology*, San Diego, CA, 2005:96-106.
- [12] CLARK J V, PISTER K S J. Modeling, simulation, and verification of an advanced micromirror using sugar[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2007, 16(6): 1524-1536.
- [13] FEDDER G K. Structured design of integrated MEMS[C]. *Proc. 12th IEEE Intl Micro Electro Mechanical System Conf.*, 1999: 1-8.
- [14] FEDDER G K, JING Q. NODAS 1.3: Nodal Design of Actuators and Sensors[C]. *Proc. IEEE/VIUF Int. Workshop on Behavioral Modeling and Simulation, Orlando, FL*, Oct 1998.
- [15] Coventorware, 951 Mariners Island BLVD, Suite 205, San Mateo CA 94404 [Z/OL]. <http://www.coventor.com>, 2014.
- [16] GUAN L, CHU J K, GAO J L. Design and system-Level simulation of a novel on-chip test based on macromodels[J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 483: 38-42.
- [17] IntelliSense Corporation, 600 W. CummingsPark-Suite2000, Woburn MA 01801 [Z/OL]. <http://www.intellisense.com>, 2014.
- [18] TOSHIYOSHI H, KONISHI T, MACHIDA K, et al.. A multi-physics simulation technique for integrated MEMS[C]. *Technical Digest-International Electron Devices Meeting, IEDM*, 2012: 6.3.1-6.3.4.
- [19] CHANG H L, ZHANG Y F, XIE J B, et al.. Integrated behavior simulation and verification for aMEMS vibratory gyroscope using parametric model order reduction[J]. *Journal of MEMS Systems*, 2010, 19(2): 282-293.
- [20] MCCORQUODALE M S, MCCANN J L, BROWN R B. Newton: A library-based analytical synthesis tool for RF-MEMS resonators[C]. *Proceedings of the ASP-DAC 2006, Asia and South Pacific Design Automation Conference 2006*, Jan 24-27, 2006, Yokohama, Japan.
- [21] KAMALIAN R, AGOGINO A M, HIDEYUKI T. Interactive evolutionary CAD system for MEMS layout synthesis[C]. *2006 IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Oct 8-11, 2006, Taipei, Taiwan.
- [22] BRENAN K E, CAMBELL S L, PETOLD L R. Numerical solution of initial-value problems in differential-algebraic equations[C]. SIAM, 1996.
- [23] FABIEN B C, LAYTON R A. Modeling and simulation of physical systems III: An approach for modeling dynamics constraints[C]. *In IASTED Int. Conf. Applied Modeling and Simulation, Banff*, 1997.
- [24] LAYTON R A. *Analytical System Dynamics*[D]. Seattle: University of Washington, 1995.
- [25] NAGEL L. SPICE: A Computer Program to Simulate Semiconductor Circuits[M]. UCB/ERL M520, 1975.
- [26] SANDISON D. Keynote address: moving MEMS from novelty to necessity-a national security perspective[C]. *TEXMEMS VII, El Paso TX*, 2005.
- [27] Sandia National Laboratories [Z/OL]. <http://mems.sandia.gov>, 2012.

作者简介:



杨东上(1994—),男,山东烟台人,硕士研究生,2016年于湖南师范大学获得学士学位,主要从事光学仪器设计和环境光学监测的研究。E-mail: ydshang@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:



曾 议(1978—),男,重庆人,博士,副研究员,2001年、2006年于中国科学技术大学分别获得学士、博士学位,主要从事微光机系统优化设计、环境光学监测、空间光学遥感方面的研究。E-mail: yzeng@aiofm.ac.cn