

机电一体化设计基于 VHDL-AMS 的多刚体系统建模与仿真方法

闵春平, 窦文华

(国防科技大学计算机学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 机械多体系统动力学建模与仿真是机电一体化集成设计中的难点, 通常的作法是采用计算多体系统动力学专用软件建模, 求得 DAEs 形式的运动方程后再转化为集成环境中的统一建模语言. 本文采用基于端口的建模模式, 构造了基于多端口组件的多刚体系统动力学计算模型, 并具体阐述了各组件行为模型的 VHDL-AMS 描述, 从而将多刚体系统纳入基于 VHDL-AMS 的集成设计和仿真环境中. 该文最后, 用一个实例进行了具体说明.

关键词: 机电一体化; 多体系统; 端口; VHDL-AMS

中图分类号: TH164 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 11-1685-05

Multi-Body Systems' Modeling and Simulation Method for Mechatronics Design Based on VHDL-AMS

MIN Chun-ping, DOU Wen-hua

(Department of Computer Science & Technology, N. U. D. T., Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Modeling and simulation of multi-body system dynamics is a difficulty in mechatronics integrated designing environment. Traditionally through multi-body domain-specific software packet, the DAEs is generated, which is then converted to the uniform modeling language and embedded in the integrated environment. Based on port-based modeling paradigm, this paper constructs the Multi-Ports Component model for multi-body system dynamics, and detailed component behavior model is given adopting VHDL-AMS uniform modeling language. At the end, an example is used to demonstrate the main ideas.

Key words: mechatronics; multi-body system; port; VHDL-AMS

1 引言

机电一体化集成设计与分析, 比如机电产品、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)^[1] 要求多领域集成统一建模与仿真, 即在产品设计的同时建立可操作的仿真模型并实现多领域(机械、电子、液压、控制)的有机集成与协同仿真, 从而在产品开发的各个阶段(特别是概念设计阶段)通过仿真来分析、评价、验证设计决策, 实现基于仿真的设计. 目前, 已有少许支持多技术系统集成的建模和仿真软件, 如面向对象的建模和仿真语言 Modelica^[2], 基于方程的组件化建模语言 Mast^[3] 和 VHDL-AMS^[4]、基于信号流的过程式仿真软件包 MatLab/Simulink、基于 Bond Graph 的 20 SIM^[5] 等. 目前最有潜力的是 VHDL-AMS, 比如欧洲汽车工业界将其作为建模与仿真的支撑语言^[6].

以上这些集成建模与仿真软件, 一般都直接支持一维机械平动和转动, 然而对于平面多刚体和空间多刚体的动力学建模与仿真一直是一个难点. 比如 Modelica, 虽然提供了机

械多刚体系统模型库, 然而为了处理运动闭环问题, 将铰分为 Tree Joint 和 Cut Joint^[2], 很不方便; 同时, Modelica 采用面向对象建模, 模型之间紧密关联, 不适合基于组件的设计. VHDL-AMS 虽然提供了很强的领域扩展能力, 然而现有的模型库中也只提供了对一维机械平动和转动的支持. 为了实现在 VHDL-AMS 中集成机械多体系统动力学模型, 目前的惯用作法是采用计算多体系统动力学专用软件建模(如 ADAMS、DADS 等), 求得 DAEs 形式的运动方程后, 再转化为 VHDL-AMS 描述^[6], 因而很不直观, 难以实现紧密的 CAD/CAE 集成和系统级的优化, 需要大量的手工劳动实现模型之间的衔接.

关于多体系统动力学建模与仿真理论的研究, 航天和机械工程从各自应用领域的特征出发, 采用虚功形式的动力学普遍方程建模, 分别提出了多刚体系统动力学的拉格朗日法和笛卡尔法, 相应的开发了大量的专用仿真软件包^[7]. G. Baciuc 等基于图理论, 采用带拉格朗日乘子的动力学普遍方程建模^[8]; Johan Scholliers 等采用 pSpice 进行多技术系统类比建模, 并建立了平面多刚体系统的动力学模型^[9]. 然而这些建模

方法均不能很好满足多领域集成设计与仿真的需求。

本文采用基于端口的建模思想,应用牛顿-欧拉动力学方程和达朗贝尔动静法原理,通过巧妙的定义端口和端口变量,以 VHDL-AMS 为支撑语言进行多刚体系统建模,从而将多体系统纳入到机电一体化集成设计和仿真环境中。

2 基于多端口组件的建模模式

2.1 广义基尔霍夫网络

定义 1 广义基尔霍夫网络(Generalized Kirchhoff Network, 简称 GKN) 一个物理系统如电网,由若干组件(Component 或元件 Element)组成,组件之间以及组件与环境之间通过端口(Port 或端点 Terminal, Pin, Cut, Frame, Flange) 相互连接形成网络,称为广义基尔霍夫网络。

端口即组件之间以及组件与环境之间的能量交互点。多个组件的端口连在一起,形成一个节点(Node)。通过端口的能量流动采用端口变量对进行描述,即:势变量(Across Variables, 也称 Potential 或 Difference) 和流变量(Through, 也称 Flow Variables 或 Effects)。势变量是对在端口处相对于一个全局参考(基准端口)的物理量的测量,比如“速度”、“电压”等;流变量则是对通过端口流入或流出组件的物理量的测量,比如力、电流等。端口变量对的选择使得它们的乘积为功率,当然可以被相应的导数或积分变量代替,比如可以用“位移”代替“速度”。端口之间的连接导致端口变量之间施加了代数约束关系(拓扑约束),类似于电网的 KCL 和 KVL,称为广义基尔霍夫网络定律(Generalized Kirchhoff Network Law, 简称 GKNL)。

2.2 多端口集成组件

定义 2 多端口集成组件 广义基尔霍夫网络中的每一个组件内部可含有若干能量域,比如机械、电子、信号等,而各端口则相应的属于某一能量域,因而称为多端口集成组件。

每一个端口用端点势(Teminal Across)和端点流(Teminal Through) 变量对描述。对于二端组件,一对有向(有符号)支路变量(Branch Variables) 被定义,即支路势(Branch Across) 和支路流(Branch Through)。相应的通过端点变量、支路变量、内部变量来描述组件行为的数学方程,称之为组件方程(Component Equation)。组件分元组件(行为建模)和复合组件(结构建模)。

2.3 VHDL-AMS 对机电一体化系统建模与仿真的支持

VHDL-AMS(IEEE Std. 1076. 1 1999) 是 VHDL(IEEE Std. 1076 1993) 的严格超集,同时吸收了 Spice 和 GKN 的建模思想,因而支持数模混合建模与仿真,支持 Event Driven、Signal Flow、Procedural、Conservative Law 建模与仿真。特别是对 VHDL 的完全支持,因而完全支持数字电路的设计和综合,支持行为建模、结构建模和结构配置,支持基于有限状态机、PetriNet 等事件驱动系统的建模与仿真(这正是 Mast、Modelica、MatLab/Simulink 等的弱项)。VHDL-AMS 已成为机电一体化系统、数模混合电路设计分析、MEMS 设计等应用领域的首选建模语言。比如欧洲汽车工业界将其作为工程系统建模与仿真的底层支撑语言。目前各大 EDA 公司(如 Mentor、Cadence 等)在已有的 HDL 仿真器基础之上均提供了 AMS 扩展,以支持数模混合电

路的设计与仿真。

3 平面多刚体系统基于多端口组件的建模框架

3.1 机械多体系统基于端口建模的力学原理

对于机械多体系统,刚体之间通过运动副(Joint, 也作铰 Hinge) 相连接,实现运动转换和力/力矩的传递。根据空间刚体动力学牛顿-欧拉方程和达朗贝尔原理,引入惯性力(矩),将动力学方程化为静力学形式:

$$\begin{cases} \sum F_{\text{外}} + F_{\text{惯}} = 0 & F_{\text{惯}} = -ma \\ \sum T_{\text{外}} + T_{\text{惯}} = 0 & T_{\text{惯}} = -(ja + \omega \times J\omega) \end{cases}$$

如果将作用于刚体的质心的惯性力(矩)的施力物体约定为大地(惯性基或全局基),在刚体之间的交互点上建立连体参考系(连体基),则刚体之间的运动学特性可以由这些连体基之间的相对位置和姿态加以描述,而动力学特性可以类似于电网中的电流进行处理,各个连体基(包括惯性基、质心基、端点基)相当于电网中元件的端点或网络的节点。如果取这些连体基为端口,则可以采用基于端口的思想进行建模。

3.2 端口变量定义

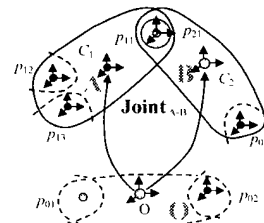


图 1 多刚体系统

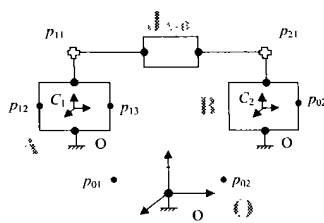


图 2 多端口组件模型

如图 1 所示的多刚体系统, O 为地,有 A 、 B 等多个刚体, A 和 B 之间有铰 Joint_{A-B} 。记 C_i 为刚体 i 的质心(Center of Mass), P_{ij} 为刚体 i 上的第 j 个端点(如铰点、驱动点等)。分别在 O 、 C_i 、 P_{ij} 处建立连体基 $\{O\}$ 、 $\{C_i\}$ 、 $\{P_{ij}\}$,取 $\{O\}$ 为全局基,则 $\{C_i\}$ 、 $\{P_{ij}\}$ 相对于 $\{O\}$ 的变换表示各连体基的位置和姿态,而 $\{P_{ij}\}$ 相对于 $\{C_i\}$ 的固定变换说明了刚体上的交互点在各自刚体上的位置和方向。由于平面运动刚体的姿态变量只需要以绕 Z 轴的相对旋转角,并且转角和转矩满足标量加减运算,可定义端点变量对如下:

• f_p ——流变量,由连体基 $\{p\}$ 原点处的力和力矩相对于总体基 $\{o\}$ 的坐标阵组成:

$$f_p = (\mathbf{F}_p^T \quad \mathbf{T}_p^T)^T = (F_p^x \quad F_p^y \quad F_p^z)^T$$

• d_p ——势变量,由连体基 $\{p\}$ 相对于总体基 $\{o\}$ 的位置和姿态坐标阵组成:

$$d_p = (\mathbf{r}_p^T \quad \mathbf{R}_p^T)^T = (r_p^x \quad r_p^y \quad \theta_p^z)^T$$

由于力、位移、速度、加速度等均须相对于某参考系度量,故须表明各变量的相对参考基。设端点 p 处的参考基记为 $\{p\}$,比如 f_p 和 d_p 分别表示基 $\{p\}$ 处的流变量和势变量是相对于基 $\{q\}$ 度量的,且有: $f_p = f_p$ 及 $d_p = d_p$ 、 $d_o = 0$ 。在进行端口变量的代数加减运算时须相对于同一参考基,因此引入方向余弦阵和齐次变化阵进行基变换,定义如下:

定义 3 方向余弦阵。设端点基 $\{p\}$ 相对于端点基 $\{q\}$ 的

姿态角为 θ_p , 记基 $\{p\}$ 相对于基 $\{q\}$ 的方向余弦阵为 qA_p , 有:

$${}^qA_p = \begin{bmatrix} \cos\theta_p & -\sin\theta_p \\ \sin\theta_p & \cos\theta_p \end{bmatrix} \text{ 且 } {}^qA_p \equiv A_p \text{ 且 } A_o \equiv I_2.$$

定义 4 齐次变换阵 设基 $\{p\}$ 相对于基 $\{q\}$ 的方向余弦阵为 qA_p , 记基 $\{p\}$ 相对于基 $\{q\}$ 的齐次变换阵为 qB_p , 有: ${}^qB_p = \begin{bmatrix} {}^qA_p & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 及 ${}^qB_p \equiv B_p$ 且 $B_o \equiv I_3$.

3.3 基本组件及组件方程

如图 2 所示为图 1 中所示多刚体系统基于组件的广义基尔霍夫网络模型, 包括 Body、Joint、ForceDriver、MotionDriver、Ground 等五类组件, 下面逐一说明.

3.3.1 Body 组件 Body 组件用以描述刚体所受力(矩)力和惯性的作用情况, 如图 2 中的组件 A 和 B. 其端口包括所有的铰点、驱动作用点以及一个必须接地的虚拟端口(相当于电路中芯片的接地引脚). 其组件方程为:

$$\sum f_p^c + f_G = - \begin{bmatrix} m I_2 & 0 \\ 0 & J_z \end{bmatrix} \dot{d}_c$$

$$d_p = d_c + B_c \begin{bmatrix} {}^c\rho_p \\ {}^c\varphi_p \end{bmatrix}$$

其中: $d_c = (r_c \theta_c)^T$ 为刚体质心基 $\{c\}$ 的势变量(取为状态变量); d_p 为刚体上端点基 $\{p\}$ 的势变量; ${}^c\rho_p$ 和 ${}^c\varphi_p$ 为端点基相对刚体质心基的矢径(在质心基中度量)和姿态; $f_G = (0 - mg \ 0)^T$ 为刚体所受的重力; f_p^c 为端点基 $\{p\}$ 处的流变量平移到质心基 $\{c\}$ 的等效流(在总体基 $\{o\}$ 中度量).

由于 Joint 元件和 Driver 元件的作用点不在刚体的质心, 但刚体的动力学方程是在质心处相对于全局基列写的, 因此必须进行端点基处流的平移等效变换. 根据平面力系平移等效定律有:

$$\begin{cases} F_p^c = F_p \\ T_p^c = \rho_p \times F_p + T_p \end{cases}$$

写成矩阵为:

$$f_p^c = \begin{bmatrix} I_2 & 0 \\ \rho_p & 1 \end{bmatrix} f_p$$

其中: ρ_p 为端点基相对刚体质心基的矢径(在全局基 $\{o\}$ 中度量), 设 $\rho_p = (\rho_x \ \rho_y)^T$, 则 $\rho_p = (-\rho_y \ \rho_x)$. 当 f_p 不是相对于全局基时, 必须利用齐次变换阵进行基变换.

3.3.2 Joint 组件 Joint 组件用以限制两刚体之间的相对运动, 如图 2 中的组件件 J_{A-B} , 即两铰点基 $\{P_{\bar{j}} = h_0\}$ 和 $\{P_{mn} = h\}$ 之间的二端元件. 一般铰的组件方程为:

$$\Phi = \begin{pmatrix} h_0 & d_j \end{pmatrix} = 0 \text{ 或 } \Phi = \begin{pmatrix} B_{h_0}^T & d_j \end{pmatrix} = 0$$

其中: $h_0 d_j \equiv \begin{pmatrix} h_0 \rho_j^T & h_0 \zeta_j \end{pmatrix}^T$, $d_j \equiv \begin{pmatrix} \rho_j^T & \zeta_j \end{pmatrix}^T = d_{h_1} - d_{h_0}$ 为 Joint 元件的支路势, $h_0 f_j$ 为约束反力或驱动力元, $f_j = B_{h_0}^T \cdot h_0 f_j$ 为 Joint 元件的支路流. 对于平面多刚体系统, Joint 数目相对较少, 如转动铰、滑移铰等, 参见^[7].

3.3.3 Driver 组件 (1) Motion Driver: 包括 Abstract Motion Driver(相对于惯性基的驱动约束, 从全局基到驱动点基的二端组件), Relative Motion Driver(两刚体之间的相对驱动约

束, 两驱动点基之间的二端组件)以及 Joint Motion Driver(铰坐标驱动约束, 两铰点基之间的二端组件). 驱动约束, 对刚体的位姿施加约束, 从本质上讲与 Joint 组件约束是一致的; (2) Force Driver: 包括 Abstract Force Driver, 从惯性基作用到刚体上的力(力矩), 可以相对惯性基或刚体连体基度量, 亦即系统的外力(矩); Joint Force Driver, 作用于铰的未限制自由度方向的力(矩), 若是转动自由度则用 RSDA(Rotational Spring-Damper-Acutator)模型表示, 若是平移自由度则可用 LSDA(Linear Spring-Damper-Acutator)模型表示; Relative Force Driver, 作用两刚体之间的非约束力元, 一般可以用 LSDA(Linear Spring-Damper-Acutator)模型表示. 类似于 MotionDriver, ForceDriver 用二端组件表示.

3.3.4 Ground 组件 如图 2 中的组件 O, 类似于 Body 组件, 其端口包括所有的铰点、驱动作用点以及全局参考端点(接地), 用以表达所有的 AbstractMotionDriver、AbstractForceDriver、AbstractJoint 在支撑框架上作用点之间的相对位姿关系(通过作用点相对全局基的位姿表示).

3.4 平面多刚体系统广义基尔霍夫网络构造

构造平面多刚体系统广义基尔霍夫网络, 需要提取物理系统拓扑结构和结构参数, 即系统由那些组件组成以及这些组件之间的连接关系. 由于广义基尔霍夫网络与物理系统的设计模型保持高度的一致, 因此通过编译 CAD 设计模型, 可以提取系统的拓扑结构和结构参数, 按照以上建模框架即可建立平面多刚体系统广义基尔霍夫网络模型, 实现 CAD/CAE 集成. 其中需要提取的信息包括: ①铰、驱动的类型, 驱动的数学表达; ②铰、驱动的作用对象(刚体或参考框架); ③各铰点、驱动点在刚体(支撑框架)上相对于质心(全局基)的矢径和姿态角; ④各刚体的质量和转动惯量.

4 基于 VHDL-AMS 的多刚体系统行为建模

4.1 多刚体系统 Nature 的定义

由于 VHDL-AMS 支持数组、记录数据类型, 并且其 Terminal Nature 可以为复合类型, 因此可定义多刚体系统 Nature 如下:

```
Type ForceVector is Array(1 to 2) of Force;
Type DisVector is Array(1 to 2) of Displacement;
Type MbFlow is Record ForceXY: ForceVector; TorqueZ: Torque; End Record MbFlow;
Type MbDif Record DisXY: DisVector; AngleZ: Angle; End Record MbDif;
Nature MultiBody is MbDif Across MbFlow Through MbRef Reference;
```

4.2 平面多刚体系统基本组件的 VHDL-AMS 模型

基本组件的 VHDL-AMS 模型必须为参数化模型或者根据结构参数按照模板自动生成, 这样才能够采用手工拖拽方式或程式化自动的构建网络的 Block Diagram(类似于 pSpice). VHDL-AMS 支持组件参数化(Generic)、生成语句(Generate)以及文件读写(File I/O), 从而对以上两种组件建模方法都支持. 下面给出最重要的 Body 组件和 Joint 组件的 VHDL-AMS 模

型的实体说明,至于行为模型描述则根据上一节的论述不难推出:

```
Library ieee;
Use ieee.multi_body.all;
Type Amm is Record Dx, Dy: Displacement; Az: Angle;
End Record Amm;
-- Amm 为端点基相对刚体质心基的矢径(在质心基中
度量)和姿态
Entity RigidBody is -- 不同的刚体, Amm 和 Terminal 的个
数不等
Generic(m: Mass; J: Inertial; -- 刚体质量和转动惯量
...; -- 其它参数
A1, A2, ..., An: Amm)
Port(Terminal Ref: MultiBody; -- 接地端
Terminal P1, P2, ..., Pn: MultiBody)
End Entity RigidBody;
Entity RigidJoint is -- 不同的刚体, Joint 组件方程不同.
Generic( ... ) -- Joint 参数
Port(Terminal h0, h1: MultiBody)
End Entity RigidJoint;
```

4.3 平面多刚体系统广义基尔霍夫网络的 VHDL-AMS 模型

VHDL-AMS 支持结构描述,因此可以对复合组件(由元组件或子复合组件连接而成)进行结构和配置建模.比如图 2 中的模型可以描述为:

```
Entity MultiBodySystem is ...
End Entity MultiBodySystem;
Architecture Network of MultiBodySystem is ...
Begin
BodyA: Entity Body(behav) Generic Map( ... )
Port Map( ... );
BodyB: Entity Body(behav) Generic Map( ... )
Port Map( ... );
JointA B: Entity Joint(behav) Generic Map
( ... ) Port Map( ... );
...
End Architecture Network;
```

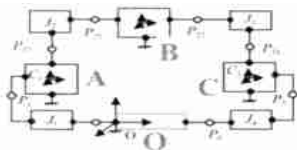


图3 平面四杆机构 图4 平面四杆机构的多端口组件模型

5 实例研究——平面四杆机构基于 VHDL-AMS 的动力学仿真

如图 3 所示的平面四杆机构,在 SolidWorks 中进行设计,包括支座、3 个连杆、4 个转动铰. Solidworks 具有友好的 GUI 和强大的二次开发能力.通过 SolidWorks 的二次开发工具,可以方便分析出系统的拓扑结构、铰类型,确定物性参数和几何参

数.从建立基于铰连接的装配体模型,该模型与多端口组件模型是一致的.图 4 为该四杆机构的广义基尔霍夫网络结构图,其中 O 为 Ground 组件, A 、 B 、 C 分别代表 3 连杆的 Body 组件, J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_4 为 4 个转动铰, P_j 为节点(端点).

给定一组系统结构参数(从设计模型中提取)和初始条件(约束方程的一个特解),在转动铰 1 上施加铰驱动力矩 T (波形为如图 5(a)的正弦曲线),采用商业 VHDL-AMS 仿真软件包求解.图 5(b)和 5(c)即为转动铰 1 角速度和 x 向约束反力的仿真曲线,仿真结果和理论推导是相符的.

6 分析与总结

(1) 机械多刚体系统动力学建模与仿真问题是机电一体化系统设计和仿真中的一个关键问题.文中提出基于端口的建模思想,构造了基于多端口组件的多刚体系统建模框架,给出了各组件的行为模型并用 VHDL-AMS 进行描述.在文章的最后,用一个具体的例子进行阐述.

(2) 由于该文重点在于阐述系统级的集成建模与仿真,诸如初值问题、自由度分析、奇异构型判定和冗余约束剔除、速度与加速度约束方程等细节问题均省去.由于多端口模型可以转化为多刚体系统专用仿真软件的内嵌模型,因此从理论上讲,这些问题是可以解决的.另外对于机械平动和转动、液压系统、电子系统等,基于组件的模型相当直观,且已有现存的 VHDL-AMS 库,在 MEMS^[1]中应用非常广泛,文中亦略去.

(3) 本文提出的基于多端口组件的动力学模型与基于装配语义连接的装配体模型保持高度的一致,因而能够(特别是在概念设计阶段设计信息不完备时)实现自动的从设计模型中导出动力学模型进行仿真分析,同时可以支持概念设计阶段从功能行为中“综合”出概念几何形状,实现紧密的 CAD/CAE 集成和基于仿真的优化设计,较好的支持多领域集成概念设计.

(4) 在该文研究的基础上,进一步可以实现机电一体化系统基于组件的虚拟样机建模与仿真、基于组件的协同设计、基于组件的优化设计等等,进一步的研究工作将在其它的文章中阐述.

综上所述,本文提出的多刚体动力学模型对于实现基于虚拟样机的机电一体化设计和仿真是一个很好的思路,对于 MEMS 的建模与仿真也具有一定的价值.

参考文献:

- [1] Peter Schwarz, Peter Schneider. Model Library and Tool Support for MEMS Simulation [A]. Conference on "MICRO ELECTRONIC AND MEMS TECHNOLOGY" [C]. Edinburgh, Scotland: SPIE Proceedings 4407, Series, 2001, 5: 30-6, 1.

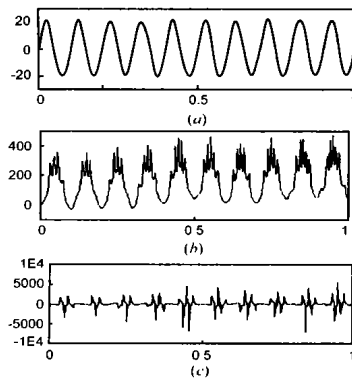


图5 (a)转动铰1驱动力矩;
(b)转动铰1角速度;
(c)转动铰1约束反力(x 向).

- [2] M Otter, H Elmqvist, F Cellier. Modeling of Multibody Systems with the Object-Oriented Modeling Language Dymola [J]. Nonlinear Dynamics, 1996, 9(1): 91- 112.
- [3] Mike Donnelly. Hardware Oriented Modeling and System Identification: Breaking the Barrier Between Design and Analysis[R]. Analog Inc. , Beaverton, OR, USA: 1997.
- [4] Analog Corporation. Introducing the HDL from Analog[R]. Analog Inc. , Beaverton, OR, USA: 1998.
- [5] Job van Amerongen. Modelling, Simulation and Controller Design for Mechatronic Systems with 20-sim 3.0[R]. Drexel Research Institute for Systems Engineering and Control Laboratory, Faculty of Electrical Engineering University of Twente, The Netherlands, 1998.
- [6] Eduard Moser, Norbert Mitwollen. VHDL-AMS: The Missing Link in System Design Experiments with Unified Modelling in Automotive Engineering[A]. Conference on Design, Automation and Test in Europe [C]. Germany: 1998. 59- 65.
- [7] 洪嘉振. 计算多体系统动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 9- 11.

- [8] G Baci, H K Kesavan. Graph theoretic Modeling of Particle mass and Constrained Rigid Body Systems[J]. Mechanism and Machine Theory, 1995, 30(7): 953- 967.
- [9] Johan Scholliers. Design and Simulation of Mechatronics Systems[R]. VTT Automation Home Pages, Finland, 1995.

作者简介:



闵春平 男, 1973 年生, 湖北应城人. 现为国防科技大学计算机学院博士生, 1995 年和 1998 年先后在国防科技大学机电工程系和自动控制系统获学士、硕士学位, 现从事虚拟样机、网络设计、CSCW 等方面的研究, 研究方向为多领域集成虚拟样机统一建模与仿真.

龚文华 男, 1946 年生, 国防科技大学计算机学院教授、博士生导师, 目前主要从事 CIMS、计算机网络应用、网络芯片设计等方面的研究.