

复杂机械系统动力学建模技术研究与应用*

张云清 周凡利 王波 陈立平

(华中科技大学 国家企业信息化应用支撑软件工程技术研究中心, 武汉 430074)

摘要 采用面向对象技术对复杂机械系统动力模型元素进行了分析. 根据其特点提出了支持动力学仿真建模平台的模型元素类体系结构, 并对该平台关键技术——关联关系管理和子系统建模进行了探讨. 最后应用上述技术开发出了仿真建模平台 InteDyn, 并以汽车整车模型和悬架模型为例证明了这些技术的可行性和有效性.

关键词 建模, 复杂机械系统, 面向对象, 子系统

引言

对复杂机械系统来说, 传统的设计流程是“设计-试制-试验-再设计”, 但这种基于物理样机的设计模式往往成本高、周期长^[1]. 而采用虚拟样机技术可以在各种虚拟环境中真实的模拟各种实际工况以进行仿真分析, 获得各种数据, 并进行最优化处理^[2,3].

在产品开发过程中, 采用虚拟样机技术与传统的设计方法相比较具有明显的优势, 如降低研发成本、缩短研发周期、提高产品质量^[4]等等.

复杂机械系统动力学仿真过程一般分3个阶段: 前处理(建立模型)、求解器求解、后处理, 见图1所示^[5]:

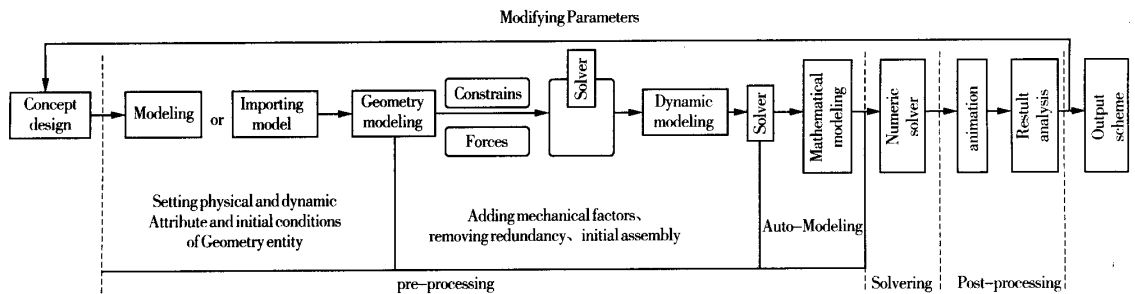


图1 复杂机械系统动力学仿真过程

Fig. 1 The dynamic simulation process of complicated mechanical system

复杂机械系统动力学仿真过程中多体动力学模型的建立直接关系到仿真的后续工作. 从图1中可以看出几何模型和力学模型的建立主要由工程师完成. 对于一个比较复杂的多体系统模型, 工程师不得不花大量的时间和精力来建立仿真模型, 并且很多模型是重复建立, 这不仅增加用户劳动强度, 也影响了工作效率. 国外一项统计, 不采用面向设计师的建模高度自动化的数字化虚拟样车仿真系统时, 工程师80%

的时间用于建模, 20%的时间用于仿真分析; 而采用面向设计师的建模高度自动化的数字化虚拟样车仿真系统时, 则工程师20%的时间用于建模, 80%的时间用于仿真分析、优化设计, 而且对工程师的要求大大降低. 由此可见, 建模效率的高低直接影响整个分析工作的最终效率. 因此建模逐渐受到人们的重视, 国外也出现了专门用于动力学建模的软件, 如Alatir公司HyperWorkers 其中模块之一MotionView主

2004-03-12 收到第1稿, 2004-05-10 收到修改稿.

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2003AA001032), 湖北省科技攻关项目(2001AA101A04)

要用于专业化机械系统动力学建模。

目前在市场上较有影响的动力学建模仿真软件有美国 MSC 公司的 ADAMS, 比利时 LMS 的 DADS, 德国航天局的 SIMPACK, Altair 的 Motion/View, 南韓的 RecurDyn 等, 在国内也有一些自主开发的多体系统动力学仿真软件^[6~9], 但由于许多技术上和非技术上的原因, 目前都只停留在实验室中。总的说来, 动力学建模仿真软件还存在以下不足:

- 1) 国外软件成本高, 售后服务、项目实施困难, 本地化水平低;
- 2) 建模效率较低, 比如建模工作不能被很好的重用、不能方便地集成更大的新系统^[11];
- 3) 模型不易维护, 修改时改动量大, 信息一致性维护困难^[10];
- 4) 信息杂乱, 模型结构不易理解, 不利于用户进行二次开发。

目前我国在复杂机械系统建模方面的商业化软件还是空白, 而虚拟样机技术也越来越受到企业家的重视。在面临尊重知识产权、加入 WTO 的良好契机, 参考目前主流的动力学仿真软件, 按照我国工程标准规范以及工程师的习惯, 开发出具有自主知识产权且高效实用的复杂机械系统仿真建模平台意义深远, 前景广阔。

1 复杂机械系统动力学建模技术研究

1.1 复杂机械系统动力学模型面向对象分析

面向对象技术具有抽象、封装、继承、多态的特点, 目前已被成熟的运用。在多体系统动力学领域, 也得到不少国外学者的探讨和研究。例如在文献[8]中提出了采用面向对象技术建立机械系统几何模型的方法; 在文献[10]中提出了面向对象的物理多体建模(Object-Oriented Physical Multimodeling, OOPM)应用框架, 提出了采用面向对象技术的建模和仿真的组件和模型范例的应用框架; 文献[11]提出了一种采用面向对象的技术在多体系统建模和分析应用的方法, 认为面向对象技术具有简化代码体系结构、代码容易重用、功能更容易扩展等优点, 并以多体系统基本 4 元素为基础, 抽象出这 4 类元素, 形成多体系统类体系结构; 文献[12]中讨论了面向对象技术的特点及其如何利用它的特点应用到建立复杂大型化的模型和仿真中。当然, 还有其它的学者在这方面也作出了不少努力。总的说来采用面向对象技术在复杂机械系统建模技术中有以下优点:

- 1) 能够建立复杂、大型的模型^[12]。
- 2) 平台体系结构更层次化, 维护、功能扩展容易;
- 3) 比较容易实现子系统建模功能, 提高建模效率及质量;
- 4) 能够开发出适合我国用户习惯的界面。

1.1.1 模型元素类型分析

根据多体动力学理论, 构成多体系统力学模型的基本要素是物体(部件)、铰(约束)、外力(偶)、力元^[13], 这种分类实际上是根据模型元素的特点进行的分类, 是对整个模型系统所有元素的抽象。多体动力学模型仅抽象出这 4 类要素对实现建模平台是远远不够的, 因为每一基本要素又是由许多元素组成, 而在这些元素中, 某些元素和另外一些元素又有不同的特点, 如铰就多达几十种。其中有基本约束、工程约束等等, 因此必须细化模型元素的分类。此外还需要一些环境类, 比如材料、重力加速度等等来支持多体仿真建模系统。另外采用面向对象思想, 整个模型也作为一个种类。具体见表 1。

1.1.2 模型元素类及类体系结构的实现

结合表 1, 利用面向对象技术对模型元素进行抽象和封装。

标架在多体系统中是非常重要的模型元素, 定义其它模型元素的位置和方向, 也是实现参数化功能的关键要素。因此将它单独作为一个类, 它具有坐标位置, 欧拉角等属性。

在多体动力学系统中组成部件的可视化图形如连杆、圆柱体、圆台、椭球体等几何实体的属性(几何中心、体积等)及对这些元素的公共操作(访问/设置属性等)提取出来形成它们的抽象基类几何体类(MbsGeoBody)。把组成模型的基本零件的质量、惯性张量、初始条件(速度和位移)、连体标架、材料等属性和访问/设置属性、计算(质量体积)等操作封装起来, 形成部件类(MbsPart), 也为几何容器, 包含所属几何实体和标架的信息。由于约束、力(偶)、力元、驱动用于连接两个不同的部件, 故可以利用这个特点将它们共同定义元素 I 标架、J 标架等属性和对属性的操作抽象出来, 进行封装形成它们的共同抽象基类连接类(MbsConnection), 而约束类(MbsConstraint)、力类(MbsForce)、力元类(MbsFlexForce)、驱动类(MbsMotion)又为组成它们元素的基类。MbsModel 是模型容器类, 管理着所有模型元素及其之间相互关联的信息。子系统(MbsSubsystem)是特殊的模型, 因此将其从 Mbs Model

表 1 模型元素分类

Table. 1 The classification of model elements

Type	Characteristic	Model Elements
Model	Whole system and subsystem	model, subsystem
Part	Components building multibody system	parts
Marker	Defining orientation of all model elements	marker
Geometry	Geometry of components	link, cylinder, frustum, ellipsoid, sphere, box, tours
Constraint Class	Primitive constraints	Inpoint/Inline/Inplane, parallel axes, perpendicular
	Kinematical joints	fixed, sphere, hooke, universal, constant velocity, planer revolution, translation, cylinder, screw
	Coupler joints	rack and pinion, gear, coupler
	Higher pair constraints	PtCv, CVCV
Force Class	Defining general forces	six components forces
	Defining single component force	single component force
	Defining three component forces	three component forces
Force Element	Force between parts	field, beam, bush, spring-damper
Motion	driver	joint motion, marker motion
Environment Factors	Auxiliary factors	units, material, coordinate system
Math	Supporting vector and matrix operation	math, vector, matrix, etc.

派生。对于辅助的元素如单位、材料、数学计算等根据它们自身特点形成类。此外,可以把大多数模型元素的公共属性如 ID、名字、类型等和一些操作抽象出来形成实体类(MbsEntity),由它派生出大多数模型元素。

根据以上分析,可以得到图 2 所示模型元素类继承层次体系结构。

一个实用高效的建模平台除了有一个合理的体系结构外,还应该有良好的机制维护模型元素的拓扑结构,并支持子系统、参数化建模、仿真控制、后处理等功能,但最重要的还是体现在对模型元素之间关联关系的管理和子系统建模功能的实现上,前者使建模平台稳定健壮,而后者则能提高建模效率和建模质量。下面将对这两个关键技术进行探讨。

1.2 关联关系管理技术

复杂机械系统不仅模型元素众多,而且模型元素之间存在着关联关系,整个模型拓扑构型表现为网状结构,对模型元素自身数据的管理采用面向对象技术比较容易实现,而对关联关系的处理是实现动力学建模的关键,是实现模型拓扑结构一致性的保证。例如,元素删除时,可能同时要删除一系列的关联元素。模型容器必须保证删除操作后信息的一致性;同理,元素修改时,不同属性的修改会导致关联信息的不同变化,模型容器也必须对此进行统一维护。模型中元素之间的相互关联使得模型结构比

较复杂,因此在复杂机械系统仿真建模过程中,关联信息的管理是模型管理的关键,也是难点。

1.2.1 关联分析及其数据结构表示

对复杂机械系统中所有模型元素之间可能存在的关联进行分析,可以抽象为以下 4 类:

1) 成员关联:元素与元素之间的父子所属关系,主要指部件与几何实体、标架之间的关联。

2) 特征定义关联:元素和定义该元素的特征元素之间的关联,如部件和质心标架之间的关联,约束与约束坐标定义标架之间的关联等。

3) 模型关联:模型元素在模型容器中的映像,是模型对所有元素信息直接保存的体现。

4) 逆向关联:元素的逆向依赖关系。若删除某元素则其逆向关联元素必须被删除,对逆向关联的管理是 4 种关联中最复杂的。元素必为它的特征定义关联元素的逆向关联元素。

在关联关系的管理上主要是数据结构的设计及其对数据结构的维护。采用链表这样的存储结构来建立关联关系的数据结构:

```
typedef vector<MbsEntity * > Attach; // 逆向关联链表
class EntityContainer
{
public:
..... // 构造/析构,元素操作等
```

```
public:
vector<MbsEntity * > entityVec; //元素链表,
用它来作为成员关联、模型关联、特征定义关联链表
vector<Attach * > AttachVec; //关联链表
};
```

AttachVec 链表中每个元素为逆向关联链表指针, Attach 链表与元素链表一一对应, Attach 为对应元素的逆向关联链表. 对关联关系的管理主要表现在对这两个链表的操作上.

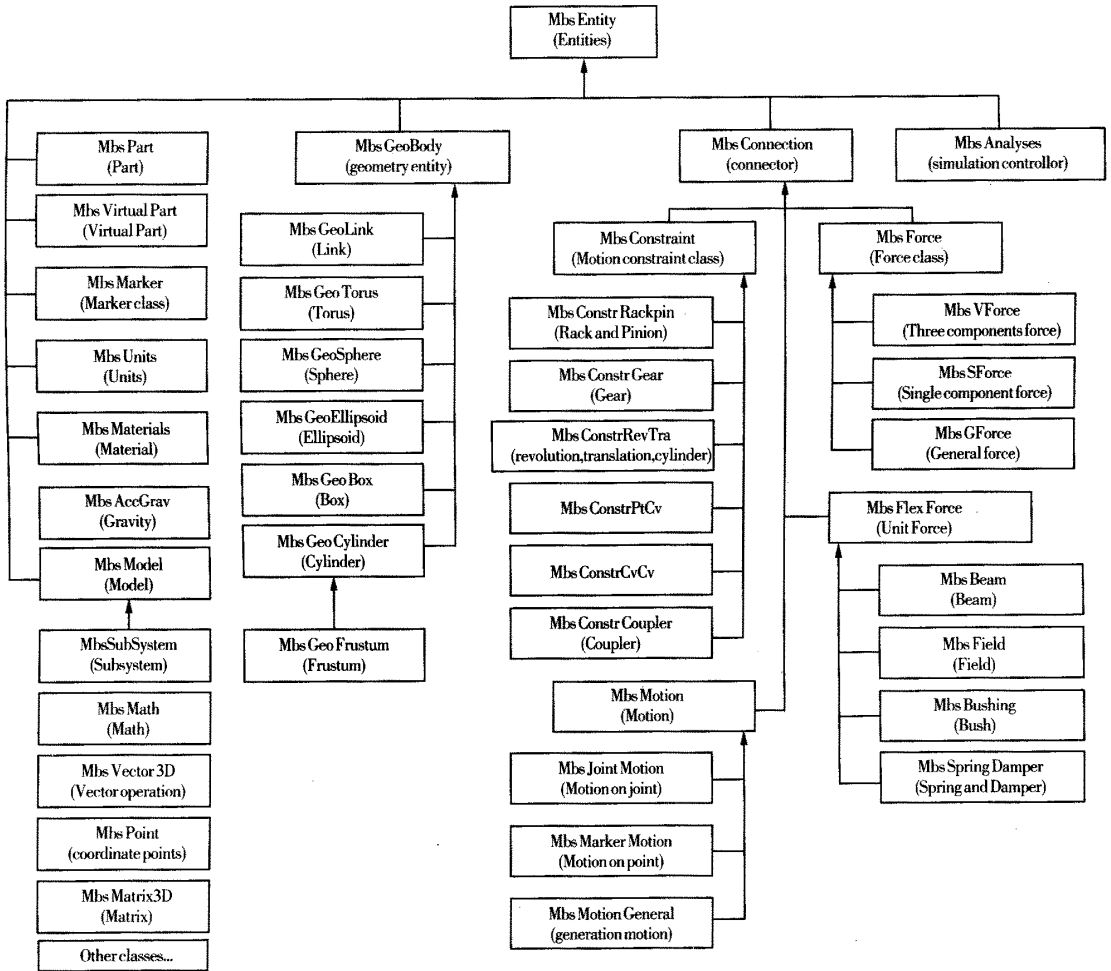


图2 模型元素类体系结构

Fig. 2 The class architecture of model element

1.2.2 关联关系管理的实现

对关联关系的管理主要通过模型元素的创建、删除、修改来体现. 元素的创建除了要设置自身属性, 还需要建立成员关联、特征定义关联、模型关联、逆向关联等关联信息. 在处理逆向关联信息时, 要根据元素的种类分别处理: 如果有特征定义元素, 则元素进入其特征定义元素的逆向关联链表中(部件类元素: 进入其质心标架、惯性标架的逆向关联链表; 几何体类: 进入到特征 Marker 链表中; 连接类: 进

入到其特征标架链表中); 如果为连接类元素, 元素还需要进入所连接两部件的逆向关联链表.

元素的删除根据元素种类不同处理. 删除一个元素必须将该元素与其它模型元素的关系“切断”, 主要完成两件事: 一是假如该元素在其它元素的关联链表中, 则将其从链表中移除, 二是删除该元素的逆向关联元素和它的特征定义元素和成员元素, 这是通过递归算法完成. 为了维护元素删除后的模型拓扑关系一致性, 删除在模型层次上进行.

修改有两类:一类是元素数据的变化,指元素属性数据的改变;第二类是引用的变化,指其特征定义元素的改变,比如铰连接的一个部件被修改为另外一个部件.数据的改变不会引起拓扑信息的变化,而引用的改变则会影响拓扑结构.不论哪类修改,同创建和删除一样,关联信息的处理都会超出元素本身“视野”,所以对元素修改时,关联信息管理要在模型层次上进行.引用变化有连接特征定义标架引用变化、几何定义标架引用变化、部件质心/惯性标架引用变化、连接特征定义部件引用变化.前三者对引用变化的处理是将连接元素/几何实体/部件从旧标架逆向关联链表中移除,加到新标架逆向关联链表中,最后一种是将连接元素从要改变的关联部件的逆向关联链表移除,加到新关联部件的逆向关联链表.

以图3中四杆机构杆L₂及其相关操作为例说

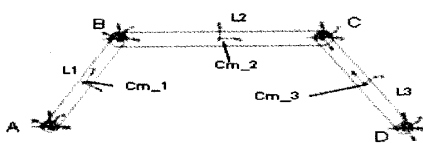


图3 四杆机构实例

Fig.3 Example of four links machine

明. 关联链表说明如下:

- 1) 部件L₂成员关联链表成员:几何实体BC, Cm₂, M₁, M₂, M₃, M₅;
- 2) 部件L₂特征定义关联链表成员: Cm₂;
- 3) 部件L₂逆向关联链表成员:铰B,铰C;
- 4) Cm₂逆向关联链表成员:部件L₂;
- 5) 模型关联链表:包含所有模型元素;
- 6) 铰B(C)特征定义关联链表成员: M₃, M₄(M₅, M₆)

其中Cm₂为部件L₂质心标架;M₁, M₂为几何定义标架.

• 创建部件L₂

按照上述对链表成员说明分别建立相关链表.

• 删除部件L₂

部件L₂无父对象,故将先通过递归算法删除其逆向关联元素铰B和铰C(因采用递归调用,删除铰B铰C之前先删除它们的特征定义标架M₃, M₄, M₅, M₆),然后将L₂从Cm₂的逆向关联链表中移除,递归调用删除部件L₂的成员关联

元素,然后把L₂从模型关联链表中移除.这时,L₂成为一个孤立部件,最后再删除L₂.

• 修改铰B关联部件

将部件L₁与部件L₂关联改为与部件L₃连接.对关联链表的处理是:把铰B从部件L₂的逆向关联链表中移除,在部件L₃的逆向关联链表中加入成员铰B.

1.3 子系统建模技术

子系统是把结构和功能上相对独立的模型系统封装起来,作为一个独立模块进行处理,可以作为单独的实体模型在建模平台中导入导出.子系统建模技术解决了模型重用问题,对实现快速化建模和方便模型管理具有重要意义.复杂的模型可以由几个子系统装配而成,而子系统也可以由其他子系统组成,故采用子系统建模之后,复杂模型的结构是树形层次化结构.在建立这种树形层次化结构模型时,重点考虑的是视图变换和接口.

1.3.1 视图变换

视图变换是当创建或者进入子系统时,为了用户操作方便,展现在用户面前的不是全局坐标系,也不是父系统的坐标系,而是当前子系统的坐标系,这就需要视图变换.图4中GCS为全局坐标系,子系统内的坐标系称为基础坐标系.当从GCS变换到BaseFrame1时,用户只能看到Subs1以及其嵌套的子系统Subs3中的模型,而Subs2中的模型对用户是不可见的,这个时候Subs3中实体是相对BaseFrame1显示,而不是相对GCS.

当把全局坐标系统看作所有子模型的父系统时,子系统建模中存在一种变换:子系统与其嵌套子系统之间的变换.视图变换可以通过坐标变换矩阵解决.

图4中,p点为在Subs1中点,s为p点相对

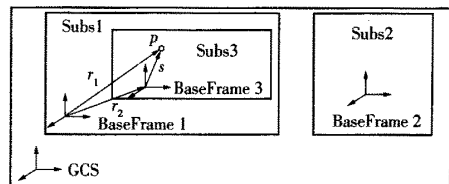


图4 子系统视图变换

Fig.4 The view transform of the subsystem

BaseFrame3的矢量,r₁为p点相对父系统的矢量,r₂为Subs3相对父系统BaseFrame1的矢量,它们

之间关系为

$$r_1 = r_2 + A s$$

其中 A 为余弦矩阵

$$A = [f, g, h] = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix}$$

其中 f, g 和 h 分别为基础坐标系 3 个坐标轴 (x, y, z) 的单位矢量。方向余弦矩阵 A 为正交矩阵。从孙系统向祖父系统变换则通过该式上溯而成, 从父系统向子系统变换是其逆变换。

1.3.2 子系统接口

由于子系统封装了模型部分结构, 故必须提供接口与其他子系统之间形成关联关系。接口连接创建包括内部接口创建和外部接口创建, 内部接口创建指在子系统内部创建子系统内部部件与外部部件之间的连接, 外部接口创建指在子系统外部创子系统内部部件与外部部件之间的连接。

当子系统进行装配时, 连接元素会找到在两个子系统内的接口部件进行连接, 但当子系统保持独立时, 如何表示这些连接元素? 对此, 采用虚部件概念, 也就是当子系统独立保存时, 外部接口部件为虚部件, 当子系统被导入实例化时, 虚部件指向具体的部件。

采用子系统后, 会对模型管理产生较大影响, 尤其是对连接的删除操作。不论是子系统内部接口还是子系统外部接口, 在子系统内部创建连接, 要先创建虚 Part, 并将外部 Part 传给它, 外部特征定义 Marker 加到虚 Part 上。在子系统内关于连接的操作, 如删除关联 Part 或特征定义 Marker 的响应同一般模型, 在模型外删除关联 Part, 则置连接外关联 Part 为地。但对于子系统内部接口来说, 连接属于子系统, 而对子系统外部接口, 连接属于外系统。本文的子系统实现思想是基于视图变换和接口技术。子系统建模是比较复杂的技术, 还涉及到其数据结构、导入导出、爆炸包含、参数化等方面, 限于篇幅将另文专述。

2 应用实例

参照目前主流的动力学仿真软件——ADAMS, 根据前面提出模型元素逻辑类体系结构、关联关系维护机制和子系统建模技术, 并结合计算机图形学、VC++7.0 等技术开发出复杂机械系统建模仿真平台 InteDyn, 该平台实现了通用机械系统的所有建模元素。利用它的关联关系管理机制能

够建立有机的机械系统模型, 并能方便对模型进行操作, 由于采用了子系统技术, 建立子模型库, 实现了层次化快速建模。本节以某型号汽车为例, 介绍在该平台上的应用。该车整车由车体子系统、前后悬架子系统、转向子系统、传动子系统、前后稳定杆子系统、轮胎子系统构成, 整个模型含有 53 个部件和 51 个约束, 是复杂的机械系统。在建立整车模型时, 先建立子系统模型, 通过每个子系统接口装配成整车模型。图 5, 图 6 为前悬架和转向子系统, 图 7 为整车模型。

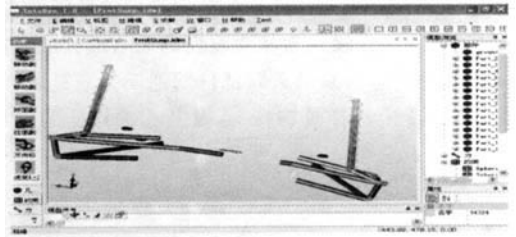


图 5 前悬架子系统模型

Fig. 5 The model of front suspension subsystem

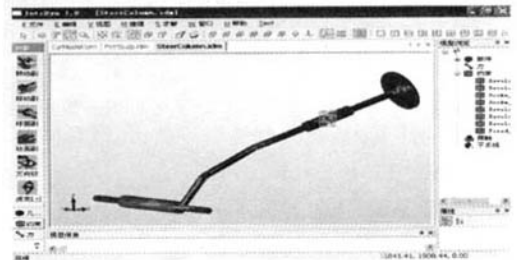


图 6 转向子系统模型

Fig. 6 The model of steer system

3 结论

建模在动力学仿真中属于前处理阶段, 直接影响仿真结果和效率。本文对动力学建模技术进行了探讨, 利用面向对象技术提出了建模仿真平台的类体系结构, 阐述了关联关系管理技术和子系统建模技术。并利用以上技术开发出动力学建模仿真平台 InteDyn 原型系统, 以汽车这类复杂机械系统的模型在该平台中的建立为例证明了建模技术的可行性和有效性。这对实现我国商业化动力学建模平台将具有重要意义。

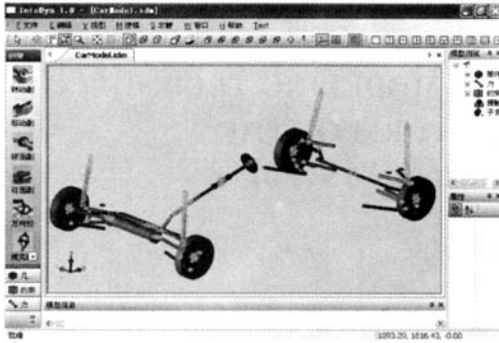


图7 整车模型

Fig. 7 The model of full car

参 考 文 献

- 1 李瑞涛,方湄,张文明. 虚拟样机技术的概念及应用. 机电一体化,2000(5):17~19(Li Ruitao, Fang Mei, Zhang Wenming. Conception and application of virtual prototyping. *Mechatronica*, 2000,5:17~19(in Chinese))
- 2 熊光楞,李伯虎,柴旭东. 虚拟样机技术. 系统仿真学报,1998,13(1):114~117 (Xiong Guangleng, Li Bohu, Cai Xudong. Virtual prototyping. *Journal of System Simulation*, 1998, 13(1):114~117(in Chinese))
- 3 姜士湖,闫相桢. 虚拟样机技术及其在国内的应用前景. 机械,2003,30(2):4~9 (Jiang Shihu, Yan Xiangzhen. Virtual prototyping and its application future. *Machine*, 2003,30(2):4~9(in Chinese))
- 4 Lin Rongshine. Virtual prototyping: virtual environments and the product design process. *IIE Transactions*, MAR, 1998,30(3):279
- 5 周凡利. 约束机械系统动力学分析实时积分算法研究与系统实现. [硕士论文]. 武汉:华中科技大学图书馆,2001 (Zhou Fanli. Research of Integration Method and System Realization of Dynamics in Constrained Mechanical System. [MSC Thesis]. WuHan: Huazhong University of Science and Fechnology, 2001(in Chinese))
- 6 陆佑方. 柔性多体系统动力学. 北京:高等教育出版社,1996 (Lu Youfang. Flexible Multi-body System Dynamics. Beijing: Higher Education Press, 1996 (in Chinese))
- 7 刘贤喜,刘竹青,周一鸣. 机械系统虚拟样机软件原型的实用化研究. 中国农业大学学报,2002,7(2):76~80(Liu Xianxi, Liu Zhuqing, Zhou Yiming. Study on a mechanical system virtual prototyping software for practicability. *Journal of China Agricultural University*, 2002,7(2):76~80(in Chinese))
- 8 毛恩荣,杭伟,周一鸣. 面向对象技术在机械系统运动图形仿真中的应用. 中国农业大学学报,1999,4(6):85~88 (Mao Enrong, HangWei, Zhou Yiming. Application of object-oriented technique to graph simulation of mechanical system motion. *Journal of China Agricultural University*, 1999,4(6):85~88(in Chinese))
- 9 熊会元,周凡利,姚建初. 约束机械系统自动建模公式化矩阵组装方法. 华中科技大学学报,2003,31(9):90~92 (Xiong Huiyuan, Zhou Fanli, Yao Jianchu. Formulation of matrix assembly for self -driven modeling of constrained mechanical system. *Journal of Huazhong Science and Technology University*, 2003,31(9):90~92(in Chinese))
- 10 Robert M Cubert, Paul A Fishwick. OOPM: An object-oriented multimodeling and simulation application framework. *Computer Simulation*, 1998,70(6):379~395
- 11 Kunz DL. An object-oriented approach to multiBody systems analysis. *Computer & Structures*, 1998,69: 209~217
- 12 Chell A Roberts, Yasser M Dessouky. An overview of object-oriented simulation. *Computer Simulation*, 1998,70(6):359~368
- 13 洪嘉振. 计算多体系统动力学. 北京:高等教育出版社,1999,4~6 (Hong Jiazhen. Computational Dynamics of Multibody Systems. Beijing: Higher Education Press, 1999:4~6(in Chinese))

RESEARCH AND APPLICATION OF THE MODELING TECHNOLOGY IN THE SIMULATION PLATFORM OF THE COMPLICATED MECHANICAL SYSTEM*

Zhang Yunqing Zhou Fanli Wang Bo Chen Liping

*(National Engineering Research Center For CAD, Huazhong University of
Science and Technology, Wuhan 430074, China)*

Abstract Based on the object-oriented technology, the model elements of a complicated mechanical system were analyzed according to their characteristics, and their class architecture in dynamic modelling platform to support dynamics simulation was presented. The two key technologies in the platform, i. e. management of relationship and subsystem modelling, were discussed. A simulation and modelling platform-InteDyn was developed using the above two technologies, and a car suspension and a full car models were built by the InteDyn, which validated the effectiveness and feasibility of the technologies.

Key words dynamic modeling, complicated mechanical system, object-oriented, subsystem

Received 12 March 2004, revised 10 May 2004.

* The project supported by the National "863" High-tech Research and Development Plan(2003AA001032) and Hubei Science and Technology Research Plan(2001AA104A04)