

# 基于特征的多分辨 FEM 模型快速生成\*

吴海胖, 刘玉生

(浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 为了提高有限元分析效率, 对零件进行不同精度的有限元分析应该使用不同分辨的零件有限元网格 (FEM) 模型。针对这一需要, 提出了一种基于特征的多分辨 FEM 模型快速生成方法。首先确定出零件所有特征之间的接口; 然后对零件所包含的每一个设计特征和分析特征进行了以相关接口为约束的网格划分; 最后根据不同的特征层次结构选择相应的特征及其网格组合产生零件不同分辨的 FEM 模型。实验结果表明该方法快速而有效。

**关键词:** 计算机辅助设计; 有限元分析; 多分辨有限元网格; CAD 模型简化; 网格重用

中图分类号: TH164; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)06-0012-06

## A fast approach to feature-based multi-resolution FEM model generation

WU Hai-pang, LIU Yu-Sheng

(State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** To improve the efficiency of finite element analysis (FEA), multi-resolution finite element mesh (FEM) models meeting different precision requirements of analysis are needed. To support the generation of multi-resolution FEM model, a fast feature-based approach was presented. Firstly, the interfaces between features of the part were determined; then, the mesh models of each design feature and analysis feature were generated by taking related interfaces as constraints; finally, according to the level of detail (LOD), the corresponding features and their mesh models were selected to compose the multi-resolution FEM model of the part. The test results indicate that the method is fast and effective.

**Key words:** computer aided design (CAD); finite element analysis (FEA); multi-resolution finite element mesh (FEM); CAD model simplification; mesh reuse

## 0 引 言

目前有限元分析已被广泛地应用到产品设计过程之中<sup>[1]</sup>。CAD 系统产生的模型由于要满足设计、加工等方面的需要, 往往包含一些对于有限元分析来说比较复杂的细节。为了能在精度损失允许的范围内尽量减少分析时间, 通常的做法是在有限元分析之前对 CAD 模型进行必要的简化处理, 如细节移除和降维。而当前的简化算法一般以几何尺寸作为简化的标准, 而不是实际的物理条件如载荷、材料属性等<sup>[2]</sup>, 所以通过一般简化算法产生的简化模型往往是不准确的。

因此, 为得到所要求的分析精度, 需要对简化模型进行多次变更 (可以根据分析人员的经验或者误差估计算法的指导), 如恢复某个被移除的细节或者对某个降维产生的中面或中线进行增厚处理等<sup>[3]</sup>。这也决定了造型系统必须能够提供这些不同细节层次 (LOD) 和抽象层次 (LOA) 的分析模型。为此, Lee<sup>[4]</sup> 提出了基于特征的多分辨造型技术, 以特征作为细节移除和降维的基本单位, 通过组合不同细节层次和抽象层次的特征来产生多分辨的分析模型。这里存在的一个问题是, 由于上述不同分辨的模型之间的变动往往较小, 如果对每一个分辨的模型都进行整体的重新网格化,

必然造成巨大时间耗费。因此,如何在这些不同分辨的模型之间重用已有网格,避免进行整个模型的重新网格生成,就显得尤为重要。

本研究提出一种基于特征的多分辨 FEM 模型快速生成方法,目标是在分析过程中能够根据分析精度的要求,快速生成保证质量的 FEM 模型。本研究相关工作主要包括如下两方面:多分辨分析模型生成<sup>[5-6]</sup>,设计变动以后的基于网格重用的 FEM 模型快速生成<sup>[7-9]</sup>。

## 1 基本概念和方法概述

### 1.1 基本概念

**定义 1** 特征:特征是指带有工程语义的几何形状,已经被广泛地应用于产品生命周期的不同阶段,如设计、分析、加工等。

**定义 2** 设计特征:设计特征是指包含设计意图的几何形状,包括实体特征、过渡特征、阵列特征等。本研究仅讨论实体特征,并将实体特征分为两类:正实体特征和负实体特征。过渡特征和阵列特征也可以转化为实体特征。

**定义 3** 降维:降维简单地说是用低维的边、面来代替高维的实体以节省分析的时间,如细长的实体(某个维度上的尺寸远大于另外两个)可以用带截面属性的边(中边)代替,薄的实体(某个维度上的尺寸远小于另外两个)可以用带厚度属性的面(中面)代替。

**定义 4** 面对:基于面配对<sup>[10]</sup>的方法是对实体模型进行降维的一种方法。两个面  $F_1, F_2$  可以组成面对必须满足如下条件:①  $F_1, F_2$  平行;②  $F_1, F_2$  的法向相反;③  $F_1, F_2$  之间的距离小于给定阈值  $T$ 。如图 1 中的  $F_8$  与  $F_{10}, F_4$  和  $F_2, F_7$  与  $F_5, F_1$  与  $F_5$  就是可以组成面对的面。中面可以通过对面中的面进行插值或对其中一个面进行偏移得到,如图 1 中粗实线标出的面。

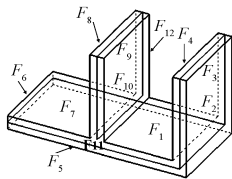


图 1 B-Rep 模型和产生的中面

元的自由度和形函数都不一样,保证两侧单元的节点在接口处的一致性能得到更高的分析精度。这里笔者使用“接口”概念表示特征之间的接触关系,并作为特征进行网格生成的约束。

这里使用 Feature 对象统一表示上述两类特征。每个 Feature 对象使用 feature\_type 属性表示特征的类型;LOD 属性表示特征的细节层次;LOA 属性表示特征的抽象层次,如梁、壳,或实体;entity\_list 属性保存与特征相关的几何对象,如通孔特征会有一个圆柱实体对象与其相关,壳特征会有中面与其相关。笔者在每个几何对象与其所属的网格单元之间建立了关联,如 body 对象与体单元,face 对象与面单元等,从而建立起特征对象与网格单元之间的所属关系。另外,设计特征还包含最终 B-Rep 模型中属于该特征的面。

### 1.2 方法概述

多分辨 FEM 模型生成的方法框架图如图 2 所示。鉴于满足不同分析精度要求的零件的多分辨 FEM 模型均可由零件模型中的全部或部分设计特征或分析特征对应的网格模型组合而成,笔者首先对零件模型中的所有设计特征和分析特征本身进行网格划分。然后在分析过程中,对于给定分析精度下形成的简化模型,通过将简化模型中所包含的所有设计特征和分析特征所对应的网格模型进行组合形成所需的 FEM 模型。为了保证特征网格之间的组合质量,笔者对每个特征进行保证特征之间接触部分网格一致的网格划分。其中,设计特征可以从 CAD 系统导出或利用特征识别技术从零件模型中提取。分析特征采用基于面配对的方法由设计特征映射过来。

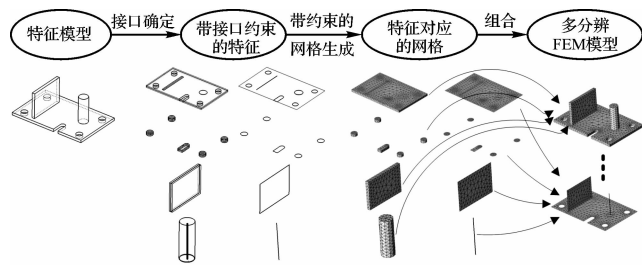


图 2 方法框架图

## 2 特征之间的接口分类

为了保证网格的质量,特征的网格生成以接口作为约束,为此首先需要确定出每个特征所涉及的接口及其类型。这里对这些特征之间可能存在的接口类型进行了讨论。为引述方便,笔者将不同特征之间相互接触的几何对象称为“引用对象”,将“引用对象”之间

**定义 5** 分析特征:这里采用文献[11]中的定义,将分析特征定义为可降维的连通子区域,包括梁、壳、实体 3 种类型。梁特征由中边组成,壳特征由中面组成。由于这里的实体特征与设计特征中的定义重叠,以下提到的分析特征仅指梁、壳两类。

**定义 6** 接口:“接口”概念一般用于表示不同维度的几何对象之间的接触部分<sup>[12]</sup>。由于接口两侧单

的相交部分称为“接口对象”。“接口对象”是作为“引用对象”网格生成的约束。特征之间的接口分类如表 1 所示,并对接口对象进行了加粗显示,其中相互接触的两个特征由  $F_1, F_2$  标出。

表 1 特征之间的接口分类

类型	描述	例子
1	梁特征对应的中线之间的接口	
2	梁特征对应的中线与壳特征对应的中面之间的接口	
3	梁特征对应的中线与实体特征之间的接口	
4	壳特征对应的中面之间的接口	
5	壳特征对应的中面与实体特征之间的接口	
6	正实体特征与正实体特征之间的接口	
7	负实体特征与正实体特征之间的接口	

### 3 带约束的特征网格生成

本节将讨论不同接口类型中涉及的几何对象之间的约束情况,并给出一种带约束的网格生成方法。如表 2 所示,根据约束对象和被约束对象的维度,对几何对象之间的约束关系进行了分类,并对约束对象进行了加粗显示。由于简化模型中一般不存在低维几何对象在三维实体对象内部的情况,这里不做讨论。简化模型中出现的非流型的情况(有些情况需要经过求交和分割处理)基本都可以归结到这几种类型,如三维实体边界上的约束可以归结到实体的面、边上的约束。第 5 类约束和第 6 类约束之间的不同点是:第 6 类约束除了要求同约束面边界上的一维剖分保持一致外,还要求同约束面内的二维剖分一致。

本研究提出的带接口约束的网格生成方法主要基于波前法实现。选择波前法,是因为这种方法对几何边界的适应能力强<sup>[13]</sup>,比较适合处理这里涉及的非流型模型的情况。在使用波前法进行剖分时,二维剖分的波前是由面的边界边剖分产生的线段集合,三维剖分的波前是由实体的边界面剖分产生的面片集合。这

里主要通过约束波前来达到约束网格生成的目的,具体处理方法如下:

表 2 几何对象之间的约束关系分类

类型	约束对象	被约束对象	示例图
1	零维点约束	一维剖分域	
2		二维剖分域	
3	一维边约束 (约束边不闭合)	一维剖分域	
4		二维剖分域 (约束边不闭合)	
5	二维面约束	二维剖分域 (约束边闭合)	
6		二维剖分域	

(1) 对于带零维点约束的一维剖分的情况,如果约束点的位置在被约束边的端点处,则不用特殊处理。如果约束点的位置在被约束边的内部,处理方法是沿着约束点将被约束边分成两部分再分别剖分。

(2) 对于带零维点约束的二维剖分的情况,如果约束点在被约束面的边界上,则可以归结为点对边的约束。如果约束点在被约束面的内部,处理方法是添加一条过约束点的边,这样就转化为第 4 类约束。

(3) 对于带一维边约束的一维剖分的情况,处理方法是先对约束边进行一维剖分,然后将约束边沿着约束边分成几部分,其中与约束边重合部分的单元直接从约束边拷贝。

(4) 对于带一维边约束的二维剖分的情况,处理步骤是:①先处理二维剖分域中可能存在的低维约束的情况,如约束边与约束边或约束边与边界边相交则产生第一类约束,重合则产生第三类约束。②将约束边的边单元拷贝两份作为被约束的二维剖分域的波前,并保证两份单元方向相反。如果约束边是不闭合的,那么这些单元首尾相连组成了一个退化的内环波前。如果约束边是闭合的,那么这些单元会组成两个绕向相反的波前环,一个向约束边包围的内部区域推进,另外一个向约束边的外围推进。③对于约束边重合的情况,还需要额外的处理。如果与约束边重合的边是被约束的二维剖分域的边界,那么删除刚才拷贝的属于该约束边的单元。如果与约束边重合的边也是约束边,那么删除属于其中一条约束边的单元。

(5) 对于带二维面约束的二维剖分的情况。具体步骤是先对二维约束面进行边界边的剖分,将这些边界边作为被约束面的一维约束,这里的处理方式同第 5 类约束。不同之处在于,这里不需要对约

束边包围的内部区域进行剖分,因为内部区域的面片单元需要直接从约束面拷贝,如果约束面与被约束面法向相反还需要对这些面片的法向进行反向。所以这里只需拷贝一份约束边的边单元,这些边单元首尾相连组成闭环,绕向与被约束面的内环绕向一致。这样就避免了对约束边包围的内部区域进行再次剖分。

## 4 多分辨 FEM 模型生成

多分辨 FEM 模型是指根据不同的细节层次 (LOD) 和抽象层次 (LOA) 选择不同的特征以及对应的网格,从而组合产生的一系列不同分辨率的 FEM 模型。由于每个特征对应的网格在带约束的网格生成阶段已经保证了接口部分的一致性,在这一步可以对每个特征对应的网格进行自由组合。

### 4.1 特征之间的重排列

在讨论具体步骤之前,笔者先考虑下特征重排列的问题。在特征造型中,结果实体模型的产生过程一般满足如下定义:

$$M_n = \prod_{i=0}^n \otimes_i F_i, \text{ where } \otimes_0 F_0 = \emptyset \otimes_0 F_0 \quad (1)$$

式中  $\otimes_i$ —布尔操作,包括布尔加(求两者的并集),使用符号  $\cup$  表示;布尔减(在前一个对象中减去两个对象之间的交集),使用符号  $-$  表示; $F_i$ —设计特征,其中正特征与布尔加( $\cup$ )对应,负特征与布尔减( $-$ )对应; $M_n$ —应用  $n$  次布尔操作产生的最终结果模型。

如果将一对存在相交关系的正特征和负特征之间的次序进行对调,那么最终产生的实体模型将会不同。如图 3 所示,图 3(a) 是在现有模型  $M_0$  的基础上添加了 4 个特征: $F_1$ (平板阵列)、 $F_2$ (圆柱通孔)、 $F_3$ (方形凸台)、 $F_4$ (圆柱凸台);在图 3(b) 中,笔者将特征  $F_1$ 、 $F_2$  之间的次序进行对调,由于两者存在相交,使得  $F_1$  平板阵列特征原本应该被切除的部分没有被切除,造成了最终的结果模型和次序对调前不一致。Lee 提出的“特征有效体”概念解决了这一问题,即无论特征的次序如何调整,使用该方法都能得到同样的实体模型。这里笔者同样要面对特征重排列的问题,所不同的是,笔者的目标是尽可能地重用已有网格。针对同样的输入模型,笔者仍然只需要对所有设计特征和分析特征进行一次网格生成,但是通过特征次序的调整得到了与输入模型不同的 FEM 模型,进一步提高了多分辨 FEM 模型的利用率。

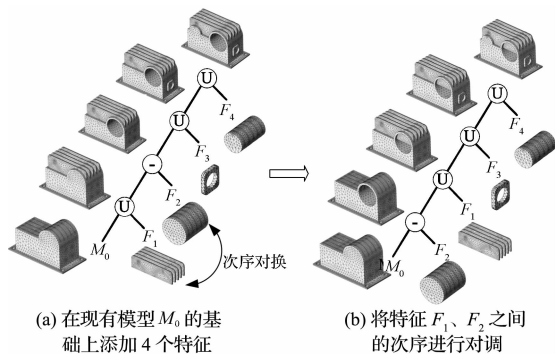


图 3 特征次序的重排列

### 4.2 多分辨 FEM 模型生成过程

多分辨 FEM 模型的生成过程与特征建模的过程类似,定义如下:

$$FEM_n = \prod_{i=0}^n \otimes_i' F_i', \text{ where } \otimes_0' F_0' = \emptyset \otimes_0' F_0' \quad (2)$$

式中  $F_i'$ —特征对应的网格,包括实体对应的体网格、中面对应的面网格或中线对应的边网格,由特征的 LOA 属性来确定具体选择哪种网格,由 LOD 属性确定特征是否参加运算; $\otimes_i'$ —网格之间的布尔操作,包括布尔加(求两者对应网格单元的并集);布尔减(在前一个对象对应的网格中移除两个对象共同拥有的网格单元); $FEM_n$ —应用  $n$  次上述布尔操作产生的 FEM 模型。

在接口确定阶段,笔者对设计特征和分析特征之间的相交关系进行了识别,并把特征之间的相交部分保存在相关特征的 entity\_list 里,而且在网格生成阶段又保证了相交部分的网格满足了相应的约束,所以笔者在实现上述两类布尔操作时,并不是进行网格单元的实际对比,而是比较两个特征 entity\_list 里几何对象的 ID:布尔加(求两个特征包含的几何对象 ID 的并集),布尔减(在前一个特征中减去两个特征包含的几何对象 ID 的交集)。当最终模型里面包含的所有几何对象 ID 确定以后,最终的 FEM 模型也就确定了。另外,为了支持特征重排列,笔者在特征表示中加入 creation\_order 属性表示特征参加布尔运算的次序。这里还存在一个问题是:由于上述特征生成网格的顺序和组合的顺序不一致,最终产生的 FEM 模型在节点序号上很可能是不连续的。节点序号不连续会给后面的分析过程带来不便。所以这里还需要对 FEM 模型中的节点进行重新编号。

## 5 实验结果与分析

本研究算法采用 C++ 语言在 WinXP 系统上实

现,所用内核是 ACIS 19,网格划分部分基于 NETGEN 开源代码。带不同接口约束的特征生成网格的结果如图 4 所示,为了清楚地显示,两个特征进行了相对偏移。从图中可以看出,本研究给出的算法不仅很好地处理了各种非流型模型的情况,也保证了特征之间接触部分网格的一致性。多分辨 FEM 模型生成的一个例子如图 5 所示。原始输入模型特征建模的次序是  $F_0 - F_1 - \dots - F_8$ 。这里仅列出了按照特征建立的原始次序产生的多分辨 FEM,特征次序重排列以后产生的 FEM 模型并未列出。图的第 1 列是输入模型中包含的所有设计特征和分析特征生成网格的结果;图的其余 3 列是根据特征的不同细节层次(LOD)和抽象层次(LOA)组合产生的不同分辨的 FEM 模型。从上往下, FEM 模型的细节层次(LOD)逐步降低,每向下一层移除一个特征;从左往右, FEM 模型的抽象层次(LOA)逐步提高,第 3 列是对  $F_3$  平板阵列特征进行降维处理,第 4 列是对  $F_0$  基座特征进行降维处理。可以看到,通过本算法只需要进行一次网格生成,就能组合产生分析过程中所需要的各种分辨的 FEM 模型,而不需要任何额外的全局或局部网格重构操作。

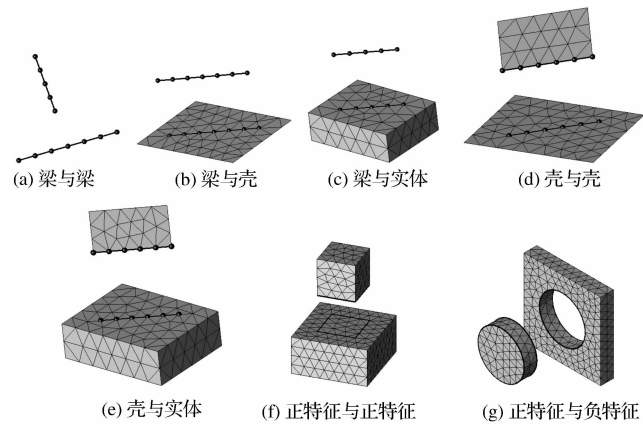


图 4 带不同接口类型约束的特征生成网格的结果

此外,有研究表明<sup>[14]</sup>,对于很多分析应用,使用六面体网格比四面体网格能够得到更高的分析精度。虽然本研究提出的方法目前主要针对四面体网格,但是可以变更网格生成部分,改用基于六面体网格的生成算法,就能得到基于六面体网格的多分辨 FEM 模型,方法的整体思路不变。当然基于六面体网格的生成算法需要考虑更多复杂的情况,如网格生成的收敛性问题等。

## 6 结束语

本研究提出了一种基于特征的多分辨 FEM 模型快速生成方法,能快速生成分析过程中需要的各种分辨的 FEM 模型。该方法的主要特点在于:①仅通过对

特征的网格模型进行组合生成零件的多分辨 FEM 模型,而不用独立生成每一个分辨的 FEM 模型,因此算法效率高;②通过对特征进行以相关接口为约束的网格划分,有效保证了特征网格之间在接口处具有一致性。目前该方法还不能处理增加新特征或对已有特征的尺寸修改等情况,因此未来工作将是扩展现有方法,使其能够处理这些情况。

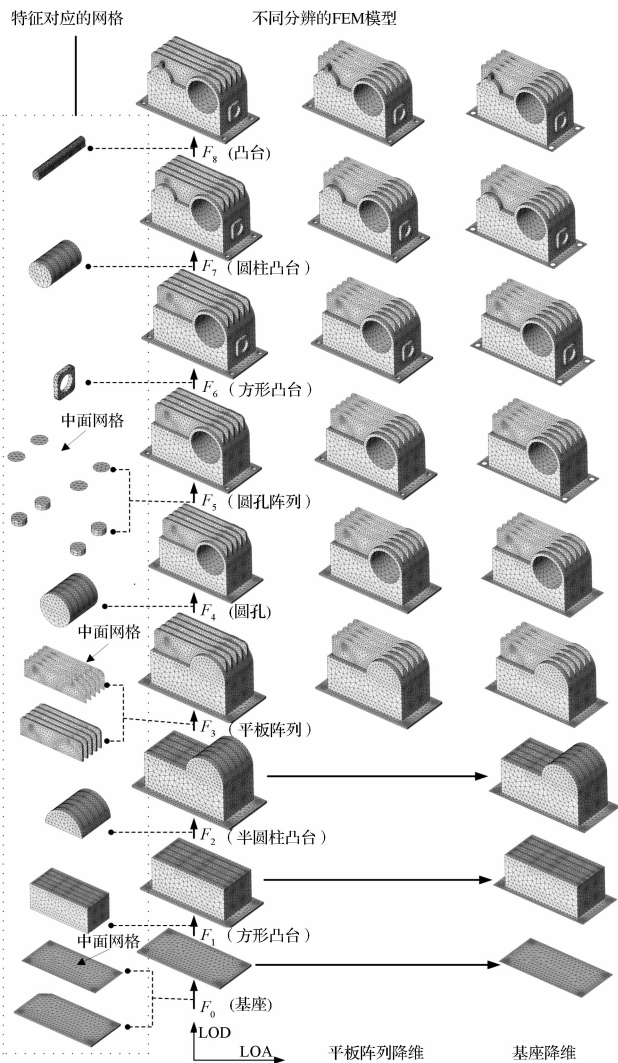


图 5 多分辨 FEM 模型生成

## 参考文献 (References):

[1] 李 喆. 机械设计的有限元分析及结构优化[J]. 机电工程技术, 2008, 37(7): 128 - 130.

[2] THAKUR A, BANERJEE A G, SATYANDRA K G. A survey of CAD model simplification techniques for physics - based simulation applications [J]. **Computer-Aided Design**, 2009, 41(2): 65 - 80.

[3] FERRANDES R, MARIN P M, LEON J C, et al. A posteriori evaluation of simplification details for finite element model preparation [J]. **Computers and Structures**, 2009, 87(1 - 2): 73 - 80.

性的多车型共享底盘悬架设计及仿真分析系统,该系统提供两种实验台:整车虚拟仿真试验台和四柱试验台。运用该仿真分析系统可以对影响整车平顺性的各因素进行分析,此外,该分析系统具有很强的通用性,可作为通用的平顺性仿真分析试验平台,因此具有重要的工程应用价值。

(3) 通过利用该分析模块对两款使用共享底盘的车型(H1、C2)进行前后偏频的测定、脉冲激励仿真和B级路面仿真分析,结果表明采用该共享底盘的两款车型满足行驶平顺性要求。

### 参考文献(References):

[1] 张红斌. 三维数字化技术在汽车分析中的应用[J]. 机电工程技术, 2008, 37(8): 60, 124.

[2] ELS P S. The applicability of ride comfort standards to off-road vehicles[J]. Journal of Terramechanics, 2005, 42(1): 47-64.

[3] SLATENGREN J. Utilization of ADAMS to Predict Tracked Vehicle Performance[C]//SAE Paper, 2000-01-03.

[4] 刘涛. 汽车设计[M]. 1版. 北京: 北京大学出版社, 2008.

[5] GB5902-86. 汽车平顺性脉冲输入行驶试验方法[S]. 国家标准局, 1983-03.

[6] ISO 2631-1:1997(E). Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part1: General requirements[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1997-05.

[7] GB7031-1987 车辆振动输入-路面平度表示方法[S]. 国家标准局, 1986-11.

[8] 张挺玖, 李丹, 黄兴无. 基于ADAMS软件的WWB型脉动式无级变速器速度分析[J]. 轻工机械, 2008(6): 110-113.

[9] 贺兵, 刘扬, 刘建华. 基于ADAMS软件的啤酒瓶装箱机双回杆机构的运动仿真优化[J]. 轻工机械, 2008(5): 34-37.

[10] Mechanical Dynamic Inc.. ADAMS/Tire Option[M]. Mechanical Dynamic Inc, 1999.

[11] 余志生. 汽车理论[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2006. [编辑: 李辉]

(上接第16页)

[4] LEE S H. A CAD-CAE integration approach using feature-based multi-resolution and multi-abstraction modelling techniques[J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(9): 941-955.

[5] CIGNONI P, MONTANI C, SCOPIGNO R. A comparison of mesh simplification algorithms[J]. Computer Graphics, 1998, 22(1): 37-54.

[6] CHOI D H, KIM T W, LEE K. Multiresolutional Representation of B-rep Model using Feature Conversion[C]//Proceedings of Trans Soc CAD/CAM Eng. Korean: [s. n.], 2002: 121-30.

[7] FRANCOIS V, CUILIERE J C. 3D automatic remeshing applied to model modification[J]. Computer-Aided Design, 2000, 32(7): 433-444.

[8] SHEFFER A, UNGOR A. Efficient Adaptive Meshing of Parametric Models[C]//Proceedings of the Sixth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications. Michigan, United States: ACM Press, 2001: 59-70.

[9] SMIT M S, BRONSVOORT W F. Efficient tetrahedral remeshing of feature models for finite element analysis[J]. Engineering with Computers, 2009, 25(4): 327-344.

[10] REZAYAT M. Midsurface abstraction from 3D solid models: general theory and applications[J]. Computer-Aided Design, 1998, 28(11): 905-915.

[11] CAO Wei-juan, WU Hai-pang, JIANG Yu-qin, et al. Automated Generation of Analysis Feature Model for Interaction of CAD and FEA[C]//Proceedings of ASME DETC/CIE 2009. San Diego, California, USA: [s. n.], 2009: [s. n.].

[12] SHIM K W, MONAGHAN D J, ARMSTRONG C G. Mixed dimensional coupling in finite element stress analysis[J]. Engineering with Computers, 2002, 18(3): 241-252.

[13] 胡恩球, 张新访, 向文, 等. 有限元网格生成方法发展综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1997, 9(4): 378-383.

[14] BENZLEY S E, PERRY E, MERKLEY K, et al. A Comparison of all Hexahedral and all Tetrahedral Finite Element Meshes for Elastic and Elastic-plastic Analysis[C]//Proceedings of the Fourth International Meshing Roundtable. Sandia National Laboratories: [s. n.], 1995: 811-47. [编辑: 李辉]