

# 轮胎CAE仿真分析平台的开发

王国林, 殷 旻, 梁 晨

(江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:**将Abaqus软件二次开发技术应用到轮胎研发领域, 开发并集成针对轮胎力学性能仿真计算的平台系统。系统包括2个子模块: 参数化建模模块与自动仿真后处理模块。参数化建模模块主要用于轮胎网格自动划分、材料库和轮胎库构建、轮胎各部件材料属性参数设置和边界条件参数化设置。自动仿真后处理模块主要通过自动后处理获得轮胎的不同性能。系统开发了友好的人机交互界面, 简化了有限元仿真人工操作流程, 提高了仿真前后处理效率。

**关键词:**轮胎; CAE仿真; Abaqus脚本; 二次开发; 有限元分析

**中图分类号:** TQ336.1<sup>+</sup>1; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8171(2018)00-0000-06

轮胎作为汽车与路面接触的唯一部件, 其性能对于车辆的操控性、安全性和平顺性等有直接影响。随着计算机技术的发展, 轮胎性能的研究方法由最初单纯通过试验逐渐转变为试验与仿真技术相结合。CAE仿真作为一种成熟的计算机工程辅助技术越来越多地应用到轮胎生产研发中。

目前市场上的商用有限元软件大多操作复杂, 同时应用领域宽, 并不仅仅针对轮胎, 初学者难以快速掌握其分析流程, 且其结果文件只能输出模型基础力学量如应力和应变等, 用户若想获取特殊力学指标则需自己编写程序计算。近年来, 随着计算机技术的发展, 通过脚本编程的方式, 对CAE软件进行二次开发的技术越来越成熟, 国外学者多将二次开发技术应用于CAE软件的自动前、后处理过程开发。E. C. Pegg等<sup>[1]</sup>利用Python编写了用于在有限元软件Abaqus中设置骨架单元材料属性的软件工具。A. Tchalla等<sup>[2]</sup>利用Fortran和Python开发了针对Abaqus的多尺度有限元计算工具箱, 大大节约了计算时间, 提升计算效率。F. Gassara等<sup>[3]</sup>利用Python在Abaqus中编写一系列算法程序, 优化了L型屈服回弹过程的计算过程, 提升计算效率。B. Xiao等<sup>[4]</sup>在研究孔洞应力积分

有限元算法时, 采用Python脚本二次开发Abaqus, 实现前期快速建模, 提高建模效率。

在国内, 陈学义<sup>[5]</sup>基于Abaqus及其二次开发技术以某多管火炮为依托, 编制了相关动力学分析插件, 实现快速参数化建模、模态验证和动力学仿真。熊威等<sup>[6]</sup>采用Matlab对Abaqus的前、后处理程序进行开发。开发了用于更改材料参数、模具形状和网格大小的前处理程序及用于自动提取仿真结果数据和成型半径的后处理程序。孟令乾<sup>[7]</sup>使用Abaqus中的UMAT用户子程序接口, 修正了Abaqus软件自带的摩尔-库伦模型, 使其符合工程要求。并利用该子程序对复合筒型基础模型进行有限元计算。

综上所述, Abaqus软件的二次开发在工程上应用日益广泛, 但是多通过插件的方式编写二次开发程序, 少有针对特定产品的二次开发仿真平台。而轮胎有限元分析流程复杂, 分析得到的信息量大, 急需开发专用仿真分析平台, 以达到减少重复操作、提高效率的目的。

本工作通过Abaqus二次开发和混合编程等手段, 开发了针对轮胎不同力学性能CAE仿真分析平台。

**基金项目:** 国家青年科学基金资助项目(51405201)

**作者简介:** 王国林(1965—), 男, 吉林伊通人, 江苏大学教授, 博士, 主要从事车辆动态性能、载运工具运行安全控制和汽车轮胎力学的研究。

**E-mail:** glwang@mail. ujs. edu. cn

## 1 系统开发环境

轮胎CAE仿真分析平台架构如图1所示。

各模块包含由C#编写的简洁的前界面, 用户只需在界面上填写少量关键信息, 系统在后台自

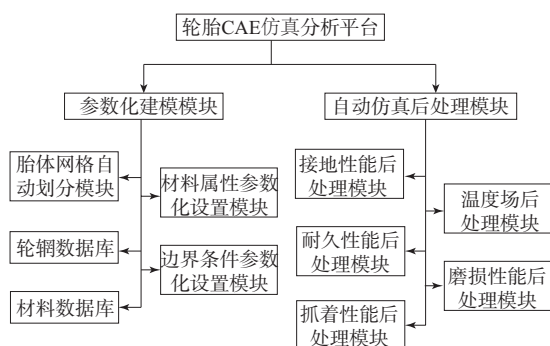


图1 轮胎CAE仿真分析平台构架

动生成相应处理脚本或input文件,并与CAE软件内核通讯,根据用户设置完成计算分析过程。最终,计算结果将以可视化的方式显示在前界面上。

轮胎CAE仿真分析平台主程序及前界面由C#编写。平台主要通过Abaqus的二次开发实现参数化建模与自动仿真计算。同时,在后期轮胎力学性能计算时,系统采用Matlab编写针对不同性能的算法程序,并将这些程序编译为可执行文件供主程序调用。

### 1.1 C#及其开发环境

C#是由微软公司发布的面向对象的高级程序设计语言。C#由C/C++衍生而出,在继承C/C++强大功能的同时去除了一些复杂特性。C#对强类型检查、数组维度检查、未初始化的变量引用检测、自动内存释放技术的支持使其成为一种高效、简单、安全的语言。其综合了VB简单的可视化操作和C++的高运行效率,可移植性好,可调用以C/C++编写的本机原生函数,C#4.0支持动态编程,可直接与Python和Ruby等脚本语言实现通信,支持异步调用,适用于主程序编写<sup>[8]</sup>。

C#编写的GUI界面风格简洁、美观,用户体验好。同时其提供丰富的图形控件为GUI界面编写提供了便利。本系统的主程序和GUI界面均采用C#编写,效果如图2所示。

### 1.2 Abaqus二次开发

Abaqus软件是一款功能强大的有限元分析软件,其提供的丰富的材料模型库可模拟包括橡胶材料在内的典型工程材料的性能<sup>[9]</sup>。

在提交分析任务时,用户可直接在Abaqus用户界面提交,或编写相应inp文件提交计算。inp文

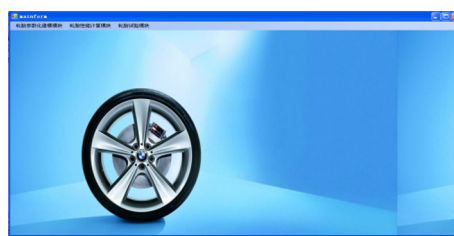


图2 C#编写的GUI界面效果

件是一种特殊格式的文本文件,可通过编写程序对其中的关键信息参数进行修改。

在对结果文件后处理时,用户同样可以直接在Abaqus界面进行操作,但操作繁琐,效率较低。Abaqus内核由Python编写,用户在Abaqus/CAE中进行可视化操作时,均调用由Python编写的命令。在二次开发时,用户可运用Python语言,编写Abaqus脚本,使用批处理命令调用脚本文件直接与Abaqus内核通讯。Abaqus内核会根据脚本内容自动对指定结果文件进行相应后处理,输出所需基础力学量。

### 1.3 Matlab可执行文件

Matlab是一款用于算法开发及数值计算的高级计算语言和交互式环境,其指令表达式与数学式相近,故其解算较C等传统语言简洁<sup>[10]</sup>。

由于轮胎在CAE后处理中会输出大量基础力学信息,如各节点三维坐标、应力、应变和应变能密度等。这些基础力学信息量庞大,普通编程语言难以在较短时间内开发出合适算法,而Matlab在数值运算及矩阵运算上较传统语言有明显优势。

Matlab编写的算法程序一般被保存为.m文件,其必须在装有完整Matlab软件的计算机上才能运行,且在混合编程时不易被主程序调用。因此,本研究将编写好的.m文件通过mcc命令编译为可执行文件,再供系统调用。需要注意的是,这种可执行文件的运行虽然不依赖完整的Matlab软件,但仍需安装Matlab运行环境库(MCR),以确保其顺利运行。

## 2 参数化建模模块

轮胎有限元分析流程为:轮胎网格划分→材料属性及边界条件设置→Abaqus内核计算→结果文件后处理→力学性能指标。参数化建模模块主要用于轮胎网格划分后对模型材料属性及边界条

件参数化设置。

参数化建模模块主要包括胎体网格自动划分模块、轮辋库、材料库、模型材料属性参数化设置模块和边界条件参数化设置模块。

### 2.1 胎体网格自动划分模块

轮胎结构相对固定,同一规格不同设计方案间改动较小,其网格划分流程为:由CAD断面图生成二维网格,再旋转获得三维网格模型。本系统通过TCL编写脚本,采用区域识别算法,实现了轮胎二维断面在Hypermesh中的网格自动生成及网格质量自动调整。

模块用户界面如图3所示,用户只需导入轮胎断面轮廓图,点击“生成网格”按钮,系统即可自动完成网格划分,同时“网格质量”文本框会显示出网格质量(其值越小,网格质量越高)。一般而言,当网格质量值小于100时,用户可直接提交计算,无需手动调整。用户若需调整网格质量,可点击“调整”按钮,系统会调出Hypermesh界面,用户可在界面上调整网格质量。

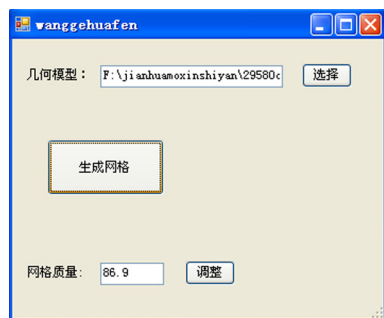


图3 模块用户界面

### 2.2 轮辋库

在轮胎有限元分析中,由于轮辋不是主要分析目标,一般将其设置为解析刚体,并对其几何特征进行简化。考虑到轮辋是周向均匀、纵向对称的环体,对其截面上几何特征进行简化,如图4所示,提取轮辋界面的5个几何关键点,通过作弧及直线连接后对称,即可得到简化轮辋截面。在轮辋数据库的构建中,系统只需存储不同型号轮辋的几何关键点在轮胎截面坐标系中的坐标,即可在有限元模型中重构轮辋截面,并通过旋转命令构建简化轮辋。

在构建轮辋库时,系统将标准轮辋的几何关



图4 轮辋库界面

键点在以轮胎中心为原点的坐标系内的坐标保存在MDB数据库中。在需要时,主程序通过SQL结构化查询语句从轮辋库中根据轮辋型号提取关键坐标,在模型中构建出简化轮辋。用户可根据国家标准向轮辋库中添加轮辋尺寸及规格。

### 2.3 材料库

轮胎主要由橡胶材料和钢丝帘线构成。橡胶材料是典型的粘弹性材料,本系统采用Yeoh模型作为橡胶材料本构模型,其应变能密度函数<sup>[11]</sup>为

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (1)$$

式中, $I_1$ 为第一阶应变不变量; $C_{10}$ ,  $C_{20}$ 和 $C_{30}$ 为模型参数,需通过试验数据拟合获得。

材料库的搭建与前述轮辋库的搭建类似,也是通过MDB文件进行存储,主程序调用SQL语言对其进行操作。材料库界面如图5所示,用户只需在其中填写材料名及试验数据拟合参数 $C_{10}$ ,  $C_{20}$ 和 $C_{30}$ 即可将新材料加入到材料库中。同时,用户也可使用该界面对材料库进行删除、查看、编辑等操作。

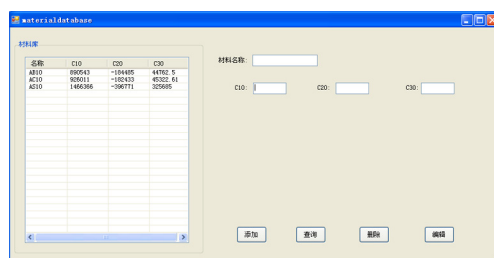


图5 材料库界面

### 2.4 材料属性参数化设置模块

材料属性及边界条件参数化设置模块界面如图6所示。主要用于设置轮胎各部件的材料及帘线的间距、密度、角度和本构模型参数,其中钢丝帘线本构模型采用线弹性模型。

由于在轮胎方案设计中帘线相关参数需要频繁改动,因此系统允许用户在模块前界面上直接设置这些参数。

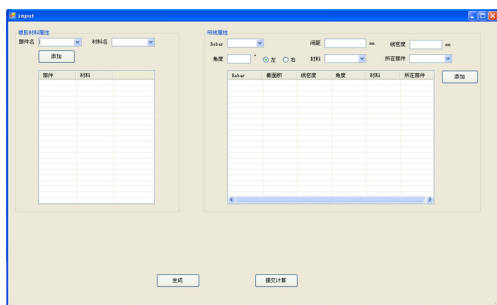


图6 材料属性及边界条件参数化设置界面

## 2.5 边界条件参数化设置模块

在轮胎有限元分析中,轮胎不同性能计算需要在不同工况下进行,各工况具有不同的边界条件。本模块主要对常见工况的边界条件进行参数化设置。常见工况包括装配充气工况、静态加载工况、自由滚动工况、ABS制动工况及滚动温度场计算。

用户在不同工况计算时,可设置相应的边界条件,如轮辋型号、充气压力、额定负荷和滚动速度等。设置完成后,系统自动生成相应inp文件,用户通过任务提交界面(见图7),即可向Abaqus内核提交计算任务。

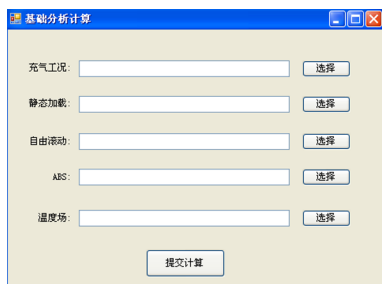


图7 边界条件参数化设置提交界面

## 3 自动仿真后处理模块

计算完成后,需对Abaqus结果文件进行后处理,获取所需轮胎性能。自动仿真后处理模块包含接地、耐久、滚动阻力、抓着、温度场和磨损等子模块。各模块针对不同性能输出其特征力学指标。

### 3.1 模块开发解决方案

轮胎性能对应的力学指标各不相同,但从仿真结果文件中计算获取这些指标的流程是相似的。首先,通过界面操作从结果文件中导出计算所需的基础力学量,再将其导入由Matlab编写的算

法程序中,计算获得力学指标。

由于Abaqus界面操作繁琐,同时人为导入Matlab程序时无法保证数据格式一致,有必要将此流程自动化。

系统主程序通过在后台调用Abaqus脚本,实现基础力学量的自动输出。获得所需基础力学量后,系统调用Matlab编写的可执行文件进行插值、拟合、回归等计算,最终获得轮胎性能力学指标,并以可视化方式呈现在前界面上。

解决方案包括如下技术要点。

(1) 主程序与Abaqus脚本间参数传递:不同性能计算需要不同的基础力学量,因此,需将各性能对应的脚本文件预先以文本模板的形式存放于系统内,并在关键参数如结果文件名、分析步数、帧数等前加入特殊字符串作为关键字。在调用时,系统读入模板文件,在关键字位置写入用户指定的值,再将其以文本格式写出,并修改后缀名,从而完成参数传递及脚本文件的编写。

(2) 主程序与Matlab可执行文件间参数传递:主要通过读写文本文件的方式进行。由于文件读写不会造成内存泄露或冲突,因此较为适合本系统的开发。

## 3.2 轮胎性能后处理模块

轮胎力学性能较多,本系统主要集成了接地性能、耐久性能、抓着性能、温度场和接地面摩擦功等的自动后处理模块。

(1) 轮胎接地性能对车辆操纵稳定性和舒适性等均有显著影响,模块界面如图8所示,用户只需选择需要处理的结果文件并输入轮胎接地面积,即可获得表征轮胎接地性能的各项指标。

在进行接地性能分析时,与人工操作分析时间进行了对比,人工操作所需时间约为使用本平



图8 接地性能模块界面

台进行操作时间的7~8倍。

(2) 轮胎耐久性能以轮胎接地中心截面上的应变能密度梯度表征,模块界面如图9所示,系统会自动计算出截面上左右胎肩与胎圈应变能密度最大的位置,并以箭头标出应变能密度梯度的方向。同时,系统会通过试验拟合的经验公式预测轮胎的耐久试验寿命,从而为轮胎耐久性能优劣提供判据。

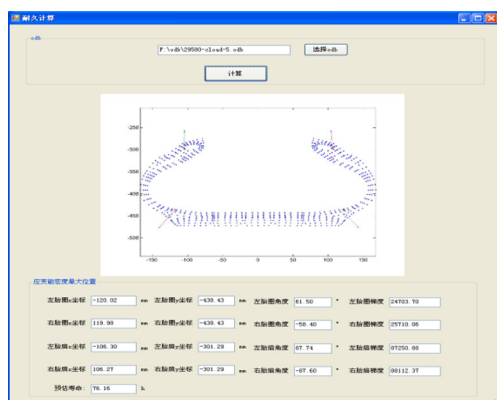


图9 耐久性能模块界面

(3) 轮胎抓着性能主要通过轮胎在最佳滑移率下的抓着力表征,模块界面如图10所示,用户选择不同滑移率下计算获得的结果文件,系统自动提取抓着力,并将其与滑移率绘制为滑移曲线,作为轮胎抓着性能优劣的判据。

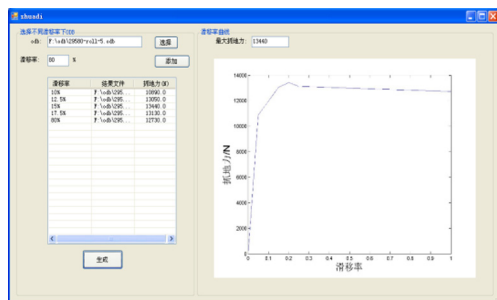


图10 抓着性能模块界面

(4) 轮胎温度场与滚动阻力和耐久性能有关,模块界面如图11所示,用户只需选择温度场计算结果文件,系统会给出温度场分布及温度场梯度最大值所在位置和方向。

(5) 轮胎接地面摩擦功对轮胎胎面磨损具有重要影响,模块界面如图12所示,模块设计为可计算两个并行轮胎或单个轮胎摩擦功的模式。系统自动计算出胎面摩擦功的总和及其偏度值,同时

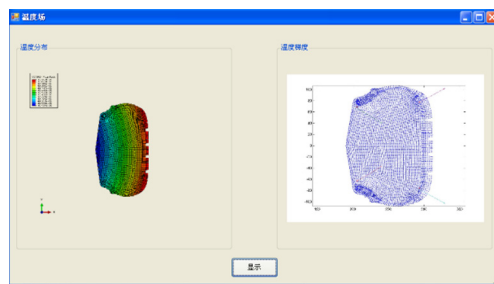


图11 温度场模块界面

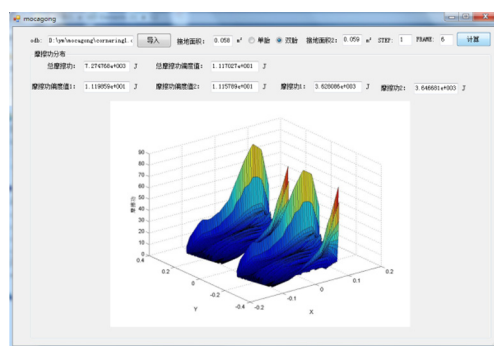


图12 摩擦功模块界面

将接地面摩擦功分布以三维云图的形式显示在前界面上。

## 4 结论

(1) 开发了针对轮胎的仿真建模过程的参数化建模模块。通过开发轮胎库和材料库等数据库使用户可在界面快捷方便地设置模型材料属性和边界条件。

(2) 利用Abaqus二次开发和Matlab编译可执行文件等技术,开发了针对轮胎不同性能的仿真自动后处理模块。用户只需在界面上选中需要处理的结果文件,系统调用内置的脚本模板对结果文件进行处理,提取所需基础力学量,再通过调用可执行文件进行计算,并将最终获得的性能指标以可视化的结果显示在界面上。

本平台通过二次开发等技术实现了轮胎仿真过程参数化、自动化,提升了轮胎有限元分析前后处理效率,方便轮胎一线生产工作者掌握有限元软件,具有重要实际意义。

## 参考文献:

- [1] Pegg E C, Gill H S. An Open Source Software Tool to Assign the Material Properties of Bone for Abaqus Finite Element Simulations[J]. Journal of Biomechanics, 2016, 49 (13): 3116-3121.

- [2] Tchalla A, Belouettar S, Makradi A, et al. An Abaqus Toolbox for Multiscale Finite Element Computation[J]. Composites. Part B. Engineering, 2013, 52(3): 323-333.
- [3] Gassara F, Rakesh K K, Sham G P. Optimization of Unitized Structures under Damage Tolerance Constraints[J]. Manuf. Technol., 2009, 44: 61-67.
- [4] Xiao B, Li K, Rong Y. Automatic Determination and Evaluation of Residual Stress Calibration Coefficients for Hole-drilling Strain Gauge Integral Method[J]. Strain, 2011, 47(S1): 525-534.
- [5] 陈学义. 基于Abaqus二次开发的多管火箭炮参数化建模与仿真分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [6] 熊威, 甘忠, 熊仕鹏, 等. 基于Matlab的Abaqus二次开发(上)——解决方案与技术要点[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(4): 21-26.
- [7] 孟令乾. 基于Abaqus二次开发的复合筒型基础承载力分析[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [8] 李诚刚, 赵佳宝, 陈兆荣. Visual C#与Matlab混合编程在可视化软件中的应用[J]. 软件, 2012, 33(2): 78-79.
- [9] 代汝林, 李忠芳, 王姣. 基于Abaqus的初始地应力平衡方法研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2012, 29(9): 76-81.
- [10] 周建新, 岂兴明, 矫津毅. Matlab从入门到精通[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 10-11.
- [11] 孙砚田, 王国林, 梁晨, 等. 计及外流场的子午线轮胎温度场建模方法[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(7): 985-990.

收稿日期: 2017-03-08

## Development of CAE Simulation Analysis System for Tire

WANG Guolin, YIN Min, LIANG Chen

(Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Using Abaqus secondary development into tire R & D, a simulation system was developed and integrated for the mechanical properties of tire, which included two sub-modules, ie. parametric modeling module and automatic after-processing module. The parametric modeling module was mainly applied to automatic tire mesh generation, material database and rim database building, parameter setting of material properties of tire components and parameterization of boundary conditions. The automatic after-processing module was mainly used to get the different mechanical properties of tire by automatically after-processing. A friendly human-computer interaction interface was developed in this system, the manual operation was simplified for finite element analysis, and the efficiency of simulation before and after processing was improved.

**Key words:** tire; CAE simulation; Abaqus script; secondary development; finite element analysis