

文章编号：1005-8451（2013）06-0041-04

# 高速列车多学科仿真集成可视化平台研究

张绍东<sup>1</sup>, 邱利伟<sup>1</sup>, 刘振宇<sup>2</sup>, 田粟裕<sup>1</sup>, 刘志昆<sup>1</sup>

(1. 唐山轨道客车有限责任公司, 唐山 063035;  
2. 浙江大学 CAD&CG国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要：**本文在对高速列车三维CAD模型进行结构、流场、噪声等多学科仿真分析的基础上, 通过有限元分析软件与可视化软件间的数据接口开发, 研究高速列车CAD模型与有限元模型的网格简化方法及异构有限元模型之间的网格融合技术, 实现高速列车多学科仿真分析结果在同一可视化平台上的集成。

**关键词：**接口开发; 网格简化; 网格融合; 可视化

中图分类号: U266 : TP39 文献标识码: A

## Research on integrated visualization platform of multi-discipline simulation for high-speed trains

ZHANG Shaodong<sup>1</sup>, QIU Liwei<sup>1</sup>, LIU Zhenyu<sup>2</sup>, TIAN Suyu<sup>1</sup>, LIU Zhikun<sup>1</sup>

(1. Tangshan Railway Vehicle CO., LTD, Tangshan 063035, China;

2. State Key Laboratory of CAD&CG, ZheJiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Based on the multi-discipline simulation analysis of high-speed trains CAD models, such as structure analysis, fluid analysis and noise analysis, the data interface between finite element analysis software and the visualization software was developed, the mesh simplification algorithm of CAD models and finite element models for high-speed train were studied and the mesh mergence technology of different finite element mesh was explored. The result of multi-discipline simulation for high-speed trains could be integrated on the same visualization platform.

**Key words:** interface development; mesh simplification; mesh mergence; visualization

高速列车的设计制造是机电一体化的复杂工程, 涉及机械结构、电力电子、桥梁道路、空气流场等技术。在高速列车设计过程中, 需要进行结构模态、轮轨噪声、车体流场和多体动力学等多学科有限元分析, 以确保高速列车的安全性、快速性和舒适性。为了更好地评价多学科有限元分析的结果, 并直观地展示高速列车的运行过程, 有必要构建一个高速列车多学科仿真集成可视化平台。相对于一般机电产品的多学科仿真<sup>[1]</sup>, 高速列车多学科仿真集成可视化存在两方面难点: 多学科有限元分析的结果数据需要通过异构网格的融合处理才能在统一的仿真软件中集成可视化; 高速列车的海量数据难以仿真分析和集成显示。

收稿日期: 2012-11-29

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2009BAG12A01)。

作者简介: 张绍东, 工程师; 邱利伟, 工程师。

本文在高速列车三维CAD模型进行结构、流场、噪声等多学科仿真分析的基础上, 通过各类分析软件与可视化软件间的数据接口的梳理和开发, 研究了模型的网格简化方法及异构有限元模型之间的网格融合技术, 实现了高速列车多学科仿真分析结果在同一可视化平台上的集成。

### 1 多学科仿真集成平台的功能与接口

高速列车多学科仿真集成可视化平台建立的基本思路是: 在高速列车的三维CAD模型的基础上进行结构、流场、噪声等多学科仿真, 然后将多学科仿真结果在统一的软件界面中可视化; 整个多学科仿真流程和仿真数据由统一的多学科仿真数据管理系统来整合管理; 某种型号的高速列车集成可视化的数据文件可以存储在数据库中, 供用户使用。高速列车多学科仿真集成可视化平

台的架构如图 1 所示。

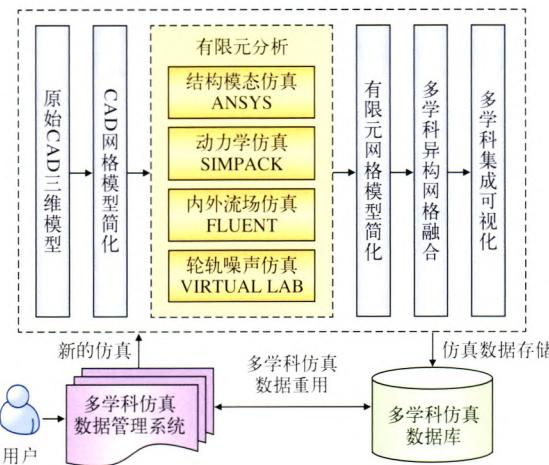


图 1 高速列车多学科仿真集成可视化平台的构架

在多学科仿真过程中，高速列车的原始 CAD 模型采用 Pro/E 构建，有限元仿真部分采用 ANSYS 进行结构模态分析，采用 SIMPACK 进行动力学分析，采用 FLUENT 进行流场分析，采用 VIRTUAL LAB 进行轮轨噪声分析。本文提出了将有限元分析结果在 ENSIGHT 软件中实现集成可视化。整个仿真流程由数据管理系统整合管理，仿真结果及中间文件存储在底层 Oracle 多学科仿真数据库中，供用户使用。用于多学科集成可视化的 ENSIGHT 软件具有强大的接口导入功能，能够识别大部分有限元软件的分析结果，但缺少动力学分析软件 SIMPACK 以及振动噪声软件 VIRTUAL LAB 的接口，因此进行了自行开发。针对高速列车多学科仿真集成可视化平台，有限元分析软件的仿真结果需要提取的物理量以及与 ENSIGHT 软件的接口情况如表 1 所示，virtual.lab 接口开发如图 2 所示，simpack 软件接口开发如图 3 所示。

表1 ENSIGHT与分析软件接口情况

分析软件	ENSIGHT 接口	主要分析内容	主要提取物理量信息
ANSYS	有接口	静力学分析	节点几何坐标，以及节点移位、应变、应力等
		变形模态分析	各时间历程下的节点几何坐标，节点移位、应变、应力等，以及节点各阶频率状态下移位坐标
FLENT	有接口	车体外流场分析	各时间步长中流场内部节点的几何坐标，流体密度、粘度等物理属性值，以及节点速度和压强等物理量
		车内空调通风	
SIMPACK	无接口，需要开发	运动学分析	刚性模型或柔性体的节点移位
		动力、牵引分析	构件的约束力以及加速度等
VIRTUAL LAB	无接口，需要开发	系统振动分析	各阶模态下的节点几何坐标和节点模态位移等物理量
		噪声分析	统计能量建模等分析部位

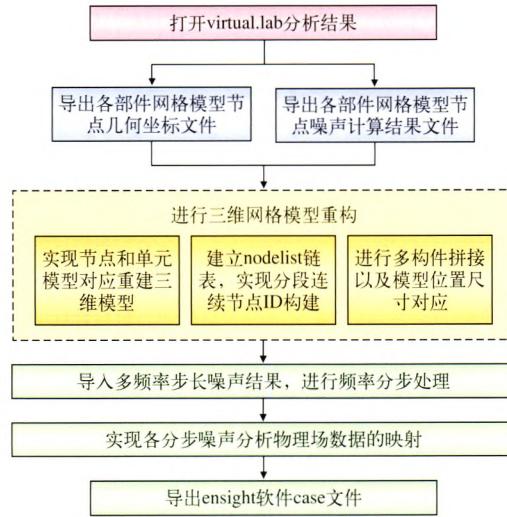


图 2 virtual.lab 接口开发

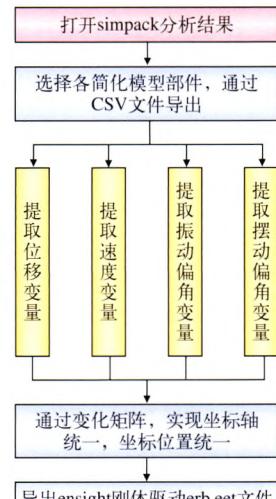


图 3 simpack 软件接口开发

## 2 高速列车网格模型的简化

高速列车多学科仿真的显著特点是海量数据，体现在两个方面：高速列车 CAD 三维模型的数据量很大；有限元分析结果的数据量也很大。以高速列车动车组的头车为例，一个车头的 Pro/E 三维模型就有 3 G 数据量。如此大的数据模型不仅难以在普通计算机内存中储存，也难以导入有限元软件中分析。多个学科有限元分析的结果数据要导入 ENSIGHT 软件中集成显示，形成的海量数据难以实时可视化。

采用二次误差测度 QEM 方法<sup>[2-3]</sup>对高速列车的 Pro/E 原始三维模型进行简化。图 4 是车头骨架的 STL 格式的原始模型，图 5 是骨架

简化 50% 的结果, 图 6 是骨架简化 90% 的结果, 可见得到的简化结果在只有原来节点数目 10% 的情况下, 能保证几何特征和轮廓误差要求, 能够满足可视化要求。



图4 原始模型



图5 简化50%



图6 简化90%

大规模有限元仿真分析的结果简化涉及到网格面片的几何模型和节点信息的物理属性。有限元仿真分析中运用的单元模型众多, 必须将单元模型三角化, 从而能够基于统一的网格模型来简化。在有限元分析的结果数据中, 存在很多辅助边界面片信息, 因此需要剔除。由于节点具有物理属性, 因此需要将属性值作为节点的权值, 从而在简化过程中将物理属性与几何模型同时考虑。考虑到上述问题, 项目组在原几何模型简化的基础上进一步完善, 将节点几何误差与节点物理属性误差综合考虑, 从而建立节点收缩代价链表, 进行逐步简化, 具体算法步骤如下:

**Step1:** 在有限元分析的结果数据中, 按照几何数据量要求和模型分析可视化要求, 抽取出关键简化部件, 去除冗余信息;

**Step2:** 将有限元分析结果模型转化为几何结构模型, 从而建立点、边、面的拓扑结构。建立待简化模型的边节点数据链表, 实现模型的边链表和节点存储, 以便于整个模型的边链表和节点搜索;

**Step3:** 根据节点物理属性建立节点向量, 并赋予初始权重值, 构建各三角形面片的顶点及其物理属性的网格模型;

**Step4:** 搜索所有的有效边链表, 建立各边的有效收缩点, 从而建立所有边的收缩代价链表, 使收缩后面积变化最小;

**Step5:** 在边收缩代价链表中, 选择代价最小的进行收缩, 然后更新边链表的代价链表, 继续上述收缩操作, 直到达到预定的简化数目为止;

**Step6:** 将简化后的几何模型, 转化成有限元仿真分析模型的结构形式, 建立单元模型拓扑结构, 生成用于集成可视化的数据文件。

按照上述算法, 以高速列车横风仿真分析结果为例, 简化前几何模型数据为 16 073 K、物理属性文件为 3 097 K, 而简化 95% 的模型导出后的几何模型数据为 295 K、物理属性文件为 26 K, 满足高速列车多学科仿真集成可视化的要求。

### 3 多学科仿真异构网格的融合

高速列车多学科仿真的分析结果将在 ENSIGHT 软件中实现集成可视化。由于 ENSIGHT 软件支持单个有限元软件分析结果的可视化, 但无法实现多种有限元软件分析数据的集成可视化, 因而需要对多学科仿真结果进行异构网格的融合处理。各类有限元软件网格模型的数据结构各不相同, 通常有限元分析的结果数据由两部分组成<sup>[4]</sup>: (1) 几何信息, 包括网格节点、网格单元、特征线以及特征面等元素; (2) 物理属性, 包括有限元边界条件、施加的载荷、节点对应的场量值等信息。

异构网格融合的前提是构建统一的有限元网格模型。网格模型的基本数据结构如下所示, 统一有限元模型中的节点数目和单元大小根据集成可视化的要求确定。

```
struct Model{ // 统一的有限元模型
    int nIndex; // 模型编号
    Model *pNext; // 下一模型
    Model *pSubModel; // 子模型
    Element *pElemList; // 单元链表
    Node *p NodeList; // 节点链表
    ..... // 其它信息 }

struct Element{ // 单元的数据结构
    int nIndex; // 单元编号
    Element *pNext; // 下一单元
    int n1, n2, n3; // 单元节点号
    ..... // 其它单元数据 }

struct Node{ // 节点的数据结构
    int nIndex; // 节点编号
    Node *pNext; // 下一节点
    double x,y,z; // 节点坐标 }
```

```

Property *pProList; // 物理属性列表
..... // 其它节点数据 }
struct Property{ // 物理属性数据结构
    int nStep; // 仿真时间步
    double time; // 时刻
    double stress; // 应力属性
    double strain; // 应变属性
    double tempt; // 温度属性
..... // 其它物理属性 }

```

在统一的有限元网格模型的节点上赋予物理属性值，这需要进行空间节点间的插值运算，算法步骤如下：

Step1：根据统一模型中某节点的空间坐标值，记为  $P(x_p, y_p, z_p)$ ，搜索原始有限元分析的结果文件中距离  $P$  点最近的节点，并记为  $Q$ ；

Step2：从  $Q$  点开始，在原始有限元分析的结果文件中查找  $Q$  点的相邻节点，以及其他相邻点等，将这组节点记为  $\{Q\}$ ，使得  $\{Q\}$  构成的单元体包含  $P$  点，并到  $P$  点的距离之和最小；

Step3：以  $P$  点到  $\{Q\}$  中各点的距离为权重，根据  $\{Q\}$  中各节点的物理属性值计算  $P$  点对应的物理属性值。

按照上述方法即可获得统一的有限元网格模型中的节点物理属性值，实现高速列车多学科仿真过程中异构网格的融合。

#### 4 高速列车多学科集成可视化实例

目前京沪高速铁路中使用的 CRH-3 型高速动车组由中国北车集团唐山车辆厂负责研发和生产。在高速动车组列车设计阶段，通过读取 Pro/E 模型数据和有限元仿真数据，进行 CAD 网格模型简化和有限元网格模型简化，在多学科异构网格融合的基础上实现了高速列车的集成可视化，在同一平台下同时获知不同物理场的结果信息，更直观地展示出各场间的相互影响和联系。隧道中的运动学和外流场集成可视化如图 7 所示。内流场与振动模态集成可视化如图 8 所示。

#### 5 结束语

高速列车多学科仿真集成可视化平台，通过

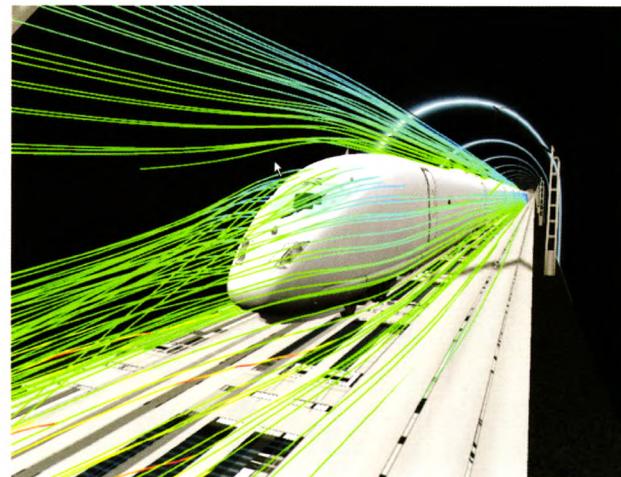


图7 隧道中的运动学和外流场集成可视化

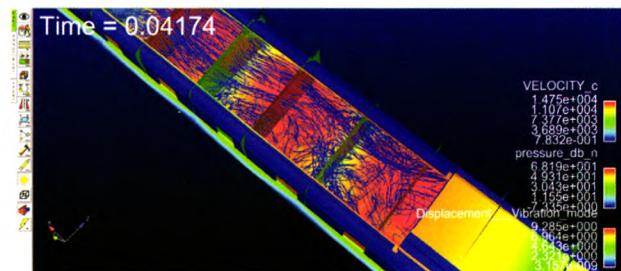


图8 内流场与振动模态集成可视化

对高速列车的三维 CAD 模型进行结构、流场、噪声等多学科仿真，实现多学科仿真结果的集成可视化。本文开发了相关软件之间的数据转换接口，着重研究了高速列车海量数据的简化与多学科异构网格的融合技术。集成可视化平台可以更好地评价高速列车多学科有限元分析的结果，为研究从多场的角度考虑各单场之间对整车的性能影响以及各单场之间的相互影响关系提供了手段和技术支持。

#### 参考文献：

- [1] Gupta R, Whitney D, Zeltzer D. Prototyping and design for assembly analysis using multimodal virtual environments [J]. Computer-aided design, 1997, 29(8): 585-597.
- [2] 卢 威, 曾定浩, 潘金贵. 支持外观属性保持的三维网格模型简化 [J]. 软件学报, 2009, 20 (3): 713-723.
- [3] 张亚萍, 熊 华, 姜晓红, 石教英. 大型网格模型简化和多分辨率技术综述 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22 (4): 559-568.
- [4] 刘振宇, 傅 云, 谭建荣. 基于异构网格耦合的产品多物理场有限元数据集成与可视化仿真 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (7): 114-121.

责任编辑 陈 蓉