

SIMPACK动力学分析系列教材

# SIMPACK

## 动力学分析高级教程

( 轨道车辆 ) SIMPACK  
DONGLIXUE FENXI GAOJI JIAOCHENG

缪炳荣 罗 仁 王 哲 阳光武 编著  
罗世辉 傅秀通 主审



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

SIMPACK 动力学分析系列教材

# SIMPACK 动力学分析高级教程

(轨道车辆)

缪炳荣 罗仁 王哲 阳光武 编著

罗世辉 傅秀通 主审

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内 容 简 介

本书根据作者多年使用 SIMPACK 软件的经验 and 体会, 结合铁路应用实例对 SIMPACK 软件的机械系统动力学分析的高级建模、分析、优化等基本应用, 由浅入深地阐述, 重点介绍利用 SIMPACK 进行机械系统动力学分析的高级建模和分析方法, 特别结合轨道车辆的实例进行建模和分析。

本书可作为高等院校机械系统动力学分析课程的参考教材, 也可作为控制工程、铁道工程及土木专业相关工程技术人员、教学科研人员的参考用书, 对从事新产品虚拟样机系统高级建模与仿真的科研与工程技术人员也具有参考和实用价值。同时, 该书面向已经具备一定 SIMPACK 应用基础的读者, 是掌握 SIMPACK 动力学分析技术的重要资料。

---

### 图书在版编目 (C I P) 数据

SIMPACK 动力学分析高级教程. 轨道车辆 / 缪炳荣等  
编著. —成都: 西南交通大学出版社, 2010.6  
(SIMPACK 动力学分析系列教材)  
ISBN 978-7-5643-0699-1

I. ①S… II. ①缪… III. ①机械系统—系统动力学—  
—应用软件—教材②轨道车—系统动力学—应用软件—教  
材 IV. ①TH113-39②U216.61-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 113903 号

---

### SIMPACK 动力学分析系列教材 SIMPACK 动力学分析高级教程 (轨道车辆)

缪炳荣 罗 仁 王 哲 阳光武 编著

\*

责任编辑 李芳芳

特邀编辑 李 娟

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

\*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 21.75

字数: 543 千字 印数: 1—3 000 册

2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0699-1

定价: 58.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 前 言

SIMPACK 的 Wheel/Rail (轮轨) 模块是目前世界上著名的、功能最强大的轨道车辆系统动力学分析的数值仿真软件之一。

众所周知, 应用软件的目的是服务于实际工程, 要准确编写 SIMPACK 动力学分析 (关于轨道车辆) 的高级教材, 任务颇为艰巨。它不仅要求作者具备扎实的轨道车辆动力学理论背景, 还需要娴熟的软件应用水平。面对一些技术难题, 笔者自己也深感知识储备不足, 只能本着学习和不断提高的态度反复摸索, 努力补充欠缺的知识。事实上, 软件的应用价值在于真正地指导工程应用, 而个人分析水平的提高也需要通过大量工程实例应用和试验结果进行验证比较。

SIMPACK 软件版本不断更新, 特色很多, 学习难度也很大, 如果没有经过系统地培训和学习, 读者在短时间内是很难将该软件应用好。因此, 对于国内进行机械系统和其他结构动力学分析的读者, 特别是对广大研究生和科研工作人员而言, 如何快速提高 SIMPACK 的应用水平, 将其强大功能应用于新产品的开发之中一直是我们值得深刻思考和不断研究的问题。由于 SIMPACK 动力学分析软件功能十分强大, 如何结合工程领域的研究课题进行应用并在此基础上进行进一步的开发工作是关键所在。正如笔者在《SIMPACK 动力学分析基础教程》中所说, SIMPACK 的资料十分匮乏, 我们也是在不断学习和整理国内外相关文献和应用资料的基础上, 结合帮助文件在摸索中不断学习以求进步的。在如何撰写 SIMPACK 的高级应用教材方面, 我们希望可以听取更多专家和学者的建议, 力争完善这部分的知识内容。

为了区别于其他应用软件教材的一般写法, 本书结合轮轨模块的特点, 将所阐述的轨道车辆动力学的基本原理和应用方法有效地结合起来, 并将其作为本书不断追求的目标。为了更好地完成轨道车辆和其他机械系统动力学特性的研究, 特别邀请罗仁博士和阳光武博士一起参与这项任务繁重的工作, 力争将这项工作做好做实。王勇副研究员及姚远博士生也为本书部分章节的编写提供了极大的帮助。这些工作基本都是在各自科研和教学任务比较艰巨的前提下, 利用业余时间和休息日完成的。轮轨模块是 SIMPACK 的核心和特色之一, 将在本书中进行逐步分解阐述。轨道车辆系统动力学的数值仿真研究还在不断的进展之中, 如何有效地利用 SIMPACK 软件轮轨模块进行车辆动力学分析, 极大地推进车辆结构的动态设计将是本书追求的目标。本书分为三部分: 基础篇、高级建模篇和应用实例篇。内容安排上由浅入深, 包括软件的算法、软件操作和工程应用等, 兼顾轮轨动力学分析的初学者以及科研和工程高级分析人员的需求。

最后, 对 SIMPACK 软件中国总代理 GET 集团北京奥斯普公司的授权, GET 集团总裁傅秀通的大力支持, 参与编著的该公司王哲和陈志伟工程师; 对西南交通大学牵引动力国家重点实验室主任张卫华教授、国内铁路领域 SIMPACK 动力学分析的应用资深专家罗世辉教授, 以及实验室其他领导和长期从事动力学分析的前辈和同事给予的多年支持和帮助, 对引用相关文献的作者及其成果; 对为这本书出版提供许多帮助的卜继玲副教授和王勇副研究员及其

他老师和研究生们，在此一并表示衷心感谢。

西南交通大学罗世辉教授和 SIMPACK 中国公司总经理傅秀通对全书内容做了认真细致的审阅，提出了许多宝贵的修改建议，在此表示衷心的感谢。此外，还要感谢西南交通大学出版社的编辑人员为本书出版付出的辛勤劳动。

因作者水平和经验有限，书中难免存在不足和不妥之处，敬请各位读者批评指正，如有任何建议可联系本书作者 Email 地址：brmiao\_sim@163.com。也真心希望这本书能成为 SIMPACK 轨道动力学分析领域抛砖引玉的一本书，愿和朋友们一起分享本书中对 SIMPACK 应用不断探索的热情。

作 者

2010 年 3 月

# 目 录

|                    |   |
|--------------------|---|
| 第 1 章 绪 论          | 1 |
| 1.1 背景介绍           | 1 |
| 1.2 铁路动力学分析软件的比较   | 2 |
| 1.3 SIMPACK 轮轨模块特点 | 4 |
| 1.4 动力学软件在工程中的应用   | 9 |

## 基 础 篇

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第 2 章 车辆动力学基本理论      | 15 |
| 2.1 多体系统在轨道车辆应用的理论概述 | 15 |
| 2.2 轮轨接触准线性化         | 16 |
| 2.3 等效圆弧踏面可视化        | 20 |
| 2.4 轮轨接触函数的准线性化计算    | 21 |
| 2.5 其 他              | 24 |
| 第 3 章 前 处 理          | 26 |
| 3.1 建模基础             | 26 |
| 3.2 轨道车辆的拓扑结构        | 27 |
| 3.3 轮轨坐标系及其他         | 28 |
| 3.4 轮轨建模基本策略         | 30 |
| 3.5 前处理基本功能          | 41 |
| 第 4 章 轮对和转向架的基本建模    | 51 |
| 4.1 轨道的定义            | 51 |
| 4.2 轮对基本建模           | 70 |
| 4.3 二轴转向架的建模         | 85 |
| 4.4 新版本中铁路模块的改进      | 96 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第 5 章 常规车辆和列车的建模 .....      | 97  |
| 5.1 常规车辆的建模 .....           | 97  |
| 5.2 无轮轨函数的车辆模型 .....        | 103 |
| 5.3 车辆铰接及力元种类 .....         | 107 |
| 5.4 常规车辆仿真 .....            | 109 |
| 5.5 带有控制的客车建模 .....         | 113 |
| 5.6 列车建模 .....              | 117 |
| 第 6 章 轨道车辆动力学分析方法 .....     | 123 |
| 6.1 基本计算方法 .....            | 123 |
| 6.2 主要分析方法 .....            | 140 |
| 6.3 线性系统矩阵 .....            | 157 |
| 6.4 时间积分 .....              | 158 |
| 6.5 计算测量 .....              | 165 |
| 6.6 线性随机分析 .....            | 170 |
| 6.7 符号码 .....               | 178 |
| 第 7 章 后处理模块 .....           | 185 |
| 7.1 2D 显示模块 .....           | 189 |
| 7.2 3D 动画显示 .....           | 198 |
| 7.3 运动视图界面 .....            | 203 |
| 7.4 从命令行执行 SIMPACK 模式 ..... | 205 |
| 7.5 时间积分、平衡计算和逆运动学分析 .....  | 206 |
| 7.6 测试调用和模型检测 .....         | 207 |
| 7.7 线性系统矩阵及分析 .....         | 209 |
| 7.8 特征值计算 .....             | 209 |
| 7.9 动力弹簧生成 .....            | 210 |
| 7.10 在线测量与结果输出 .....        | 210 |
| 7.11 虚拟实验室 .....            | 211 |

## 高级建模篇

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第 8 章 径向转向架及协同仿真 ..... | 217 |
| 8.1 带导向轮对的转向架 .....    | 217 |
| 8.2 带主动控制的摆式列车建模 ..... | 220 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第 9 章 建立半主动控制车辆模型 .....         | 227 |
| 9.1 模型的描述 .....                 | 228 |
| 9.2 执行横向控制的步骤 .....             | 232 |
| 9.3 时间连续方式控制元素 .....            | 232 |
| 9.4 时间离散方式的控制元素的实施 .....        | 240 |
| 9.5 半主动控制应用 .....               | 242 |
| 第 10 章 SIMPACK 变截面轨道及道岔建模 ..... | 251 |
| 10.1 变截面轨道 .....                | 251 |
| 10.2 铁路车辆的道岔通过 .....            | 252 |
| 10.3 轮背接触元素 .....               | 258 |
| 10.4 允许车轮抬起 .....               | 260 |
| 第 11 章 弹性体及其弹性梁 .....           | 262 |
| 11.1 基本假定 .....                 | 262 |
| 11.2 SIMPACK 弹性体 .....          | 262 |
| 11.3 BEAM 模块 .....              | 263 |
| 11.4 SIMPACK 中考虑轨道弹性梁的局限性 ..... | 271 |
| 11.5 弹性轨道 .....                 | 275 |
| 11.6 FEMBS 及其弹性体应用 .....        | 280 |

## 应用实例篇

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第 12 章 铁道车辆建模及实例 ..... | 289 |
| 12.1 常规客车车辆建模 .....    | 289 |
| 12.2 机车建模与分析 .....     | 297 |
| 12.3 货车模型建模 .....      | 308 |
| 附录 SIMPACK 约束 .....    | 313 |
| 参考文献 .....             | 339 |

# 第1章 绪论

## 1.1 背景介绍

铁路的发展历史已经将近 200 年,现代轨道车辆应用最为广泛的就是旅客和货物运输。近 20 年来,随着科学技术的迅猛发展,轨道车辆面临着高速运行、降低能耗和缩减运营费用等迫切要求。由于车辆运行速度的不断提高,安全和舒适度是人们一直关心的核心问题。这就对高速列车的车辆动力学特性设计提出了更为严格的要求,需要探明一系列影响列车运行安全的关键问题,诸如如何有效识别影响车辆舒适度和脱轨问题的动力学参数匹配问题等,以便确保列车良好的安全特性。当然,对于车辆运行的舒适度和平稳度等问题,可以通过控制振动源和噪声源进行有效改善;对于脱轨和蛇行运动问题需要了解车辆的轮轨参数匹配和其他动力学特性参数设置<sup>[1-4]</sup>。

轨道车辆一般包括两种形式:一种是集中动力式列车,它主要由机车和车辆组成,机车负责牵引,本身并不载运旅客和货物,载运的任务主要由车辆承担;另一种是分散动力式列车,常见的就是动车组,没有专门的机车提供动力,每节或单元均具有牵引动力<sup>[5]</sup>。从车辆动力学的角度看,机车和车辆具有相似的振动特征,而轮轨系统是车辆动力学分析的核心内容。车辆是具有弹簧悬挂和减振器等装置的多自由度振动系统,在运行过程中会产生各种复杂的振动特性。而这些复杂的振动是由若干基本形式的振动组合而成的。如今车辆逐步发展成为机械、力学和控制相互耦合的大系统,整车的动力学特性的好坏直接影响着车辆运行的安全性和舒适度。由于计算多体力学的进步和计算机软硬件技术的发展,人们可以通过并行工程仿真的技术,建立详细的轨道车辆数学和物理计算模型,考虑各种复杂的边界条件因素,有效地研究车辆动力学性能,开发出高质量的新产品,提出列车运行的安全准则,因此,车辆动力学的分析软件必然会在现代轨道车辆的研制过程中扮演越来越重要的角色。动力学分析涉及内容主要包括如下几点<sup>[2,5]</sup>:

(1) 蛇行运动模拟。蛇行运动是轨道车辆在行驶过程中的一种特殊现象,即当列车行驶时,出现车体和转向架剧烈左右晃动和摇头的不稳定振动现象。它容易导致车辆舒适度降低,出现破坏轨道,甚至发生脱轨、倾覆等安全事故。

(2) 曲线通过能力计算。如何保证车辆的良好曲线通过能力,使得车辆在曲线通过时,车轮对于轨道的横向作用力最小,车辆安全性指标满足要求。

(3) 舒适度评价。车辆在各种复杂环境因素条件下的舒适度,诸如在轨道随机激励和冲击、设备振动、启动/制动、气动影响、高速会车、进出隧道压力波和通过桥梁等条件下的车辆舒适度评价。

(4) 脱轨和倾覆安全性评定。研究保证车辆在高速运行时不会脱轨的机制, 以及如何保证曲线通过时在横风的作用下防止车辆倾覆的问题。

(5) 车辆被动和主动悬挂优化。悬挂方式和悬挂参数的优化, 以及如何有效地将控制技术应用在列车或车辆的动力学控制系统设计中, 通过控制技术的运用, 提高列车运行的安全性和舒适度。

## 1.2 铁路动力学分析软件比较

下面首先对国际上铁路领域流行的主要车辆动力学分析软件做一个简单的介绍。

### 1. ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) / Rail 软件

ADAMS/Rail 软件包是目前铁路车辆系统动力学数值分析的主流分析软件之一。ADAMS 是由美国 MDI 公司于 1980 年推出的机械系统仿真软件。1993 年, MDI 公司与荷兰铁路技术咨询公司合作, 将现代轮轨动力学理论的计算方法逐步引入到软件中。1995 年 ADAMS/Rail 开始正式进入铁道车辆动力学分析领域。1996 年 MDI 公司与 ArgeCare 公司合作, 采用 MEDYNA (SIMPACK 公司的前身) 软件的轮轨接触模块, 2002 年与英国的 AEA 公司 (VAMPIRE 软件的拥有者) 形成战略合作关系, 进一步增强了轮轨的计算能力。2002 年 MDI 公司被 MSC.Software 公司收购, 并且逐步融入 MSC 的软件系统, 在轮轨接触问题和计算速度上都有所提高, ADAMS 软件在 2005 年前后被德国 Vi-Grade 公司接管, 软件开发目前进展不大。

### 2. VAMPIRE (Vehicle dynamic Modeling Package In a Railway Environment) 软件

由英国铁路道比研究所 1989 年推出的 VAMPIRE 软件, 是专门针对铁路机车车辆系统开发的, 软件具有自动建模功能, 能够完成包括轮对模拟、蠕滑力计算、轨道曲线、轨道不平顺输入以及动力学特性预测, 程序也可以考虑刚体的模态。软件采用相对坐标系, 通过人机对话的方式来定义机车车辆结构的几何尺寸和参数, 也可按规定格式输入数据文件, 利用建模子程序, 自动生成用矩阵形式表示的系统运动方程, 给分析计算提供统一的模型。VAMPIRE 建模比较方便, 计算效率高, 但仅能用于不带刚性约束的车辆系统分析计算, VAMPIRE 侧重客车系统建模, 计算功能全面。同样可以实现包括动力学、特征值、频域、随机振动、时域积分等计算分析及数据和图形、动画的后处理功能。

### 3. NUCARS (New and Untried Car Analytic Regime Simulation) 软件

NUCARS 软件是由北美铁路协会 (AAR) 下属的普耶勃罗试验中心 (TTC) 开发的, 其 1.0 版本在 1989 年面世, NUCARS 软件也是应用多体系统动力学方法采用相对坐标系进行机车车辆系统的自动建模, 由于其针对以货车为主的铁路机车车辆进行模拟计算, 因此程序中嵌入了货车所特有的斜楔减振器以及心盘、旁承等摩擦模块, 而且程序不像 MEDYNA 那样庞大, Version 2.1 及以前版本的机车车辆系统数据准备均在文本环境中进行, 在 Version 2.3 的版本中增加了较强的可视化前后处理功能。NUCARS 软件能够考虑车体的一阶模态, 可以

进行车辆系统时域内的动力学数值积分分析,其缺点是不便于求解特征值问题。

#### 4. UM (Universal Mechanism) 软件

UM 软件 (Universal Mechanism (简称 UM)) 是俄罗斯新一代的机械系统运动学/动力学仿真分析软件,通过建模求解,可以分析多体系统的振动特性、受力及位移、速度、加速度等参数,进而预测复杂多体系统的运动学/动力学性能。它是由俄罗斯布良斯克国立理工大学 (Bryansk State Technical University) Dmitry Pogorelov 教授为团队研发的动力学分析软件。UM 是目前俄罗斯和部分东欧国家通用的机械动力学/运动学仿真分析软件之一。俄罗斯轨道车辆生产企业 90% 以上的车辆动力学仿真分析工作是使用 UM 完成的。UM 的突出特点表现在:具有高效易用的前后处理功能,并支持并行计算技术;模块众多,如汽车模块、铁道车辆 (包括机车、客车和货车) 模块、列车模块、疲劳分析模块及优化模块,还设有 CAD 软件、有限元软件及控制软件的接口;功能强大、适用性强,其子系统建模技术、刚柔耦合系统建模技术、强大的轮轨关系处理功能 (如实时绘制轮轨两点接触作用力的曲线等) 都使其具有良好的应用前景;UM 软件还在轨道车辆的动力学研究中不断探索,如 UM4 中的道砟模型经过升级后,可以研究罐车的液固耦合振动问题,还可以研究运煤敞车、粮食漏斗车等散装物运输货车的压力分布。UM5 已经开始考虑车桥耦合振动问题。模型修改非常方便,计算速度较快。此外,UM 软件还在内部嵌套了大量的使用功能,如计算器、滤波器等,使用非常方便,对计算三大件式转向架货车及机车的动力学性能来说,具有一定的优势。

#### 5. GENSYS 及其他软件

GENSYS 软件最早始于 1971 年美国工程师协会 (AES),是由瑞典开发的轨道车辆动力学分析程序,主要采用的是频域的线性动力学分析技术,在 1973 年将非线性的时间积分技术引入到其开发的程序中。该程序采用了特定的车辆动力学算法代码,具体包括两个部分:考虑车辆横向和垂向动力学特性。同时将该程序应用在瑞典开发的高速铁路测试车辆 X15 中,以及瑞典后来开发的 Rc4 型机车、ABB 车辆以及高速摆式列车 X2000。GENSYS 软件的官方版本发布是由 Evert Andersson 教授于 1977 年开发的。Evert Andersson 教授现在是斯德哥尔摩皇家技术学院 (Royal Institute of Technology) 铁路技术系的著名教授。GENSYS 软件在 20 世纪 80 年代曾相继发布了几个版本,但在 1992 年开始引入三维模型的计算,同时动力学的软件包也开始改名为 DESolver,随着继续发展,公司自 1993 年始正式定名为铁路车辆动力学分析工具,简称为“GENSYS”。目前在欧洲一些国家的铁路车辆的动力学分析中应用比较广泛。

其他的还有很多国家相继研发的轨道车辆的动力学分析软件。这里仅介绍部分专业软件。具体如 A 'GEM (Automatic) Generation of Equations of Motion) 软件是由加拿大的 Queens University 机械工程系研制的。其轨道车辆模块使用 AutoCAD 的图形界面,程序使用 DOS 执行处理的模块,可以计算轨道车辆的稳定性、舒适度、曲线通过性能,还可以计算其他轨道车辆的动力学性能。但是其在图形用界面、时频分析以及动画方面还有待改进。西南交通大学牵引动力国家重点实验室也相继开发了 TPL Train 的列车动力学分析软件和其下属列车线路研究所开发的“车辆轨道垂向相互作用仿真分析系统 VICT”和“车辆-轨道空

间耦合动力学仿真软件系统 TTISIM 软件”等铁路车辆专业软件分析包。前者主要用于面对列车的纵向、横向和垂向动力学进行系统模拟研究；后二者主要用于研究机车车辆对轨道结构的动力作用问题，以及机车车辆在实际弹性轨道上的运行安全性与平稳性，具有很强的专业性。

正如基础教程中所介绍的那样，SIMPACK 软件是国际著名的机械系统运动学/动力学仿真分析软件，其轮轨模块最新的市场占有率更是超过 60% 的国际市场份额。其所具备的分析内容包括：整车系统振动特性、各部件的受力状况、加速度等；描述并预测复杂多体系统的运动学/动力学性能。轮轨模块 [包括常规 Wheel/Rail 模块、道岔分析模块和最新开发的轮轨磨损 (wear) 预测模块] 是德国宇航中心 (DLR) 集合 20 多年来轮轨接触模拟的经验和现代先进的模拟技术及常用模拟工具于一体的技术结晶，也是当前先进铁路车辆动力学仿真软件的前驱之一。

由于 SIMPACK 软件立足自身开放性和非常灵活的建模概念，使其无论从独立轮对还是车辆主动/被动控制系统，都可以支持设计者自由的设计思想，使设计者能将更多的精力投入到具体设计工作的创新中。利用它人们可以对铁路复杂系统的动力学特性进行综合仿真分析。SIMPACK 软件还具有与有限元分析 (FEA)、CAD/CAE 以及 CACE (控制) 等软件的接口程序，具有友好的操作界面，功能强大。且其轮轨模块经过大量铁路车辆试验验证具有很高的仿真精度和效率，长期不懈的努力和技术创新使得 SIMPACK 已经成为国际上铁路领域多体系统动力学仿真工具领域的领导者之一。SIMPACK 的特色主要包括：

(1) 国际铁路行业设计标准的制定者。

目前为止，全球至少有 100 多种著名型号的跨国公司的轨道车辆是在 SIMPACK 的帮助下完成设计的，因此，SIMPACK 软件已经成为了目前全球铁路车辆系统动力学仿真的标准开发工具。在 DLR 拥有 20 多名国际著名的铁路专家长期进行 SIMPACK 软件的轮轨接触模型的开发，并进行了大量的工程领域动力学分析的试验验证工作。

(2) 采用全新的轮轨接触模型。

最新版本的 SIMPACK 轮轨模块的具体特点在本章 1.3 节进行介绍。

## 1.3 SIMPACK 轮轨模块特点

虽然最新的 SIMPACK 版本 8900 中采用了全新的轮轨接触模型，本书主要还是以 8800 作为主要的软件进行介绍。

### 1.3.1 轮轨接触力

采用新的计算方法计算轮轨接触斑上的接触力，获得车轮的法向力和导向力，它可以通过采用车轮和钢轨运动学约束模型获得接触压力，也可以采用赫兹接触弹簧-阻尼系统来计算得到，其优点在于可以有效考虑轮轨之间的高频接触振动。而实际状况中，含有高频成分的车辆振动仿真会极大地降低时域内积分的步长，但是对于在给定精度内的动力学性

能影响不大。因此,采用运动学约束计算方法可以有效提高动力学计算的速度,从而使 SIMPACK 满足行业的应用需求,并使其达到期望水平。SIMPACK 软件采用完全递归的计算方法,以及在相对坐标系中建立运动方程的算法,使其在计算轮轨接触时,可以建立最小数目的约束方程。同时 SIMPACK 高效的建模操作和仿真速度,使 SIMPACK 成为铁路行业仿真分析的领导者。当然,也可以选择利用接触弹簧-阻尼模型取代运动学约束模型,来建立轮轨之间的接触关系。

### 1.3.2 摩擦力

SIMPACK 提供了许多模拟轮轨之间的摩擦力的不同方法,最常用的就是 Kalker 的简化非线性滚动接触理论,可以在计算速度和仿真精度方面取得较好的统一。软件中已有用来建立自定义的轮轨摩擦的模块,可以很方便地在 SIMPACK 中自定义轮轨接触模型,即允许用户将用户化的程序和内部算法添加到摩擦模型库中。

### 1.3.3 等效线性化接触

为了满足铁路车辆用于线性计算的方法,比如计算特征值或频域响应分析,需要一个等效线性化的轮轨接触模型, SIMPACK 带有一个高度自动化并经过大量试验验证的轮轨接触线性化模型,即等效线性化和协函数线性化。同时 SIMPACK 也提供了利用输入等效锥度和其他参数的方法来建立线性化模型的选项。

轮轨接触模型的特色如下:

- (1) 可以对每个车轮模拟两点及多点接触(踏面、轮缘和车轮背面);方便地选择不同的轮轨接触模型;采用约束模型获得极快的积分速度;采用单侧的弹簧阻尼模型,使得仿真时允许车轮抬起。
- (2) 考虑车轮和轨道的弹性,保证了接触点处理的稳定性(DLR 开发的方法)。
- (3) 利用 Kalker 理论计算切向力,也可以利用其他的理论(如 Polach 接触模型)或自定义的轮轨接触模型。
- (4) 摩擦系数可以和线路距离、车轮外形坐标以及接触点的相对速度有关。
- (5) 轮轨外形没有限制(标准和实测的),可以模拟滚动实验台的试验。
- (6) 采用线性化的接触函数(等效线性化、协函数线性化)。
- (7) 可以计算所有相关的参数,如轮轨力、蠕滑率、接触点位置、接触斑的尺寸大小等。

### 1.3.4 具有丰富的车辆建模元素数据库

SIMPACK 轮轨模块中的建模元素,以及用于建立多体系统中的标准元素是完全兼容的。在软件使用过程中,人们可以利用软件实现参数化和子结构建模,扩展轮轨的模型库,快速地建立铁路系统的模型,另外,可以利用 SIMPACK 对预定义模型结构。SIMPACK 提供了

良好的灵活性来支持用于现代铁路系统解决方案的任何边缘技术。所有车辆部件或线路均可以处理成弹性体,尤其是舒适度分析时,考虑车体的弹性十分必要。轮对和转向架的弹性也可能对车辆的动力学性能产生很大的影响。目前在 SIMPACK 中采用两种方法可以处理结构的弹性:

- (1) 利用 SIMBEAM 模块来建立结构的弹性。
- (2) 从 FEA 软件中输入弹性零部件。

SIMPACK 中有一个具备典型铁路车辆的建模扩展库,如空气弹簧、高圆弹簧和摩擦元素等,任何一个元素均可以根据需要进行参数的优化。在 SIMPACK 中,所有用于铁路车辆的特殊元素和通用机械系统的建模元素可以完全兼容,因此,简单的铁路车辆模型可以很方便地扩展成现代的摆式车和径向转向架模型。通过一个附加的界面友好的轮轨模块中心窗口,就可以得到所有的铁路模型参数。然后通过这个窗口对车轮钢轨的外形尺寸、车辆轮对的车轮半径、线路超高等所有的参数进行修改。设计者还可以充分利用 SIMPACK 已有的现成模型,如两轴客车转向架、货车转向架和单轴转向架,通过这些标准模块,根据需要改变这些模板中的设计参数,建立自定义的模型。

无论是传统的轮对还是独立的轮对,轮轨模块都提供了很多种解决方法,所有这些都被无缝集成在通用机械的多体分析系统中。

- ① 车轮或独立车轮。
- ② 没有限制车轮装配。
- ③ 弹性车轮(FE模型的集成)。
- ④ 非正常车轮和多边形车轮。

几乎任何一个 SIMPACK 软件版本中使用的建模元素都可以添加到数据库中,不仅在几种车辆中可以使用同一种结构形式的转向架,而且任何一个建模细节,如一个车体元素、空气弹簧、止挡、牵引系统和抗侧滚扭杆等,都可以当成一个独立的给定子结构。对于子结构的修改将会影响到所有和其相关的主模型,如果不想影响其他主模型,可以选择在模型中包括子结构,以保证其他主模型不会随之改变。

### 1.3.5 线路定义、轨道不平顺及路面外形

在 SIMPACK 的轮轨模块中,线路的定义是通过一条整体线路,然后叠加不平顺线路来生成的,它们可以单独处理和生成。

线路模型不仅可以包括轨道,而且可以包括线路的不平顺、线路的弹性以及轨道子结构。一条完整的线路可以利用标准库中的元素(如曲线通过时的进入、驶出、道岔等参数)和其他少量的参数,如长度、半径和线路超高来定义。直线和曲线段可以根据需要进行连接,可以在二维控制窗口中绘制曲线,并自动转换为三维图形表示。另外,对于实测的轨道数据,如垂向和水平曲率、线路超高等都可以直接从文件读入到模型中。

软件中可以采用三种类型的不平顺:确定性函数(正弦、阶跃或锯齿函数)、随机函数(用 PSD 定义)以及给定的激励函数(根据现场实测的表格形式的数据)。不平顺可以独立地作用在每一侧钢轨上,也可以做成一条随两股钢轨轨距变化的函数。

最后为了扩展已有的标准外形库,任意的车轮和钢轨外形是利用一个专门的前处理程序来完成的,即利用样条函数来拟合截面的外形,并将其处理成仿真用的数据。截面的外形数据可以采用实际测量的数据,但需保存为 ASCII 代码格式的表格形式。

其他的特点还包括:

- (1) SIMPACK 中的轮轨建模能够实现所有参数化。
- (2) 采用标准的线路形式:直线、曲线(考虑进出曲线)、S-曲线轨道及道岔等。
- (3) 输入实际运行线路图。
- (4) 线路不平顺(轨道文件输入的 ASCII 格式,或者采用功率谱密度 PSD 多项式形式)。
- (5) 轨枕和/或钢轨的弹性扣件。
- (6) 不同的钢轨外形(沿车轮的纵向位置)。
- (7) 每个车轮可以允许有三点接触的转辙(道岔)。
- (8) 进行实际线路的滚动试验台的模拟。
- (9) 考虑线路弹性。

### 1.3.6 轮轨的应用领域

SIMPACK 软件最新版本的轮轨模块可以解决目前几乎所有的铁路车辆的动力学仿真问题,满足在频域或时域中的车辆动力学仿真计算。每个使用者都可以快速和方便地分析自己建立的动力学模型,这一点对于缩短车辆新产品的开发周期也是非常必要的。基于特征值的动力学分析计算模块,可以计算获得车辆的稳定性轨迹。这也是 SIMPACK 软件系统的一个标准的通用后处理工具;通过时域积分计算可以获得车辆稳态及动态曲线通过时的结果。而且可以对参数化的模型进行参数变化,研究不同的设计方案。

(1) 对含有轨道不平顺的线路进行时域分析时,主要任务包括:

- ① 车辆乘坐舒适度;
- ② 曲线通过性能;
- ③ 轮轨作用力;
- ④ 故障工况;
- ⑤ 脱轨;
- ⑥ 可靠性等。

(2) 准静态分析(曲线通过性能的分析)。

(3) 线性特征值分析。

(4) 线性系统的频率响应分析,功率谱线性稳定性图。

(5) 参数变化研究及参数优化。

(6) 独有的道岔动力学分析。

(7) SIMPACK 新版本的其他几个突出的应用:

- ① 车桥耦合。

SIMPACK 软件可以将由有限元描述的弹性桥梁结构引入到 TRACK 中,并进行复杂的车桥耦合分析,同时可以进行道岔分析(也称转辙分析)。这个轮轨模块的新特点也是同类软件

中,目前唯一可以处理和模拟道岔复杂的动力学问题的分析软件。车辆的道岔动力学分析与常规标准的轮轨分析主要有两个显著的区别:钢轨的外形必须是线路坐标的函数;除踏面和轮缘接触外,在轮缘的背面和导轨、翼轨之间也存在接触。为了定义道岔,在 SIMPACK 中采用了一个专用程序,将沿钢轨形面测量得到的钢轨外形数据以 ASCII 的文件格式保存,处理成近似的钢轨外形,并自动产生道岔全三维的外形。

### ② 悬链系统。

通过与德国铁路的悬链仿真工具 ProSA 的协同仿真, SIMPACK 可以模拟高速铁路的悬链系统。这样做的好处是可以有效地模拟车辆受电弓的动力学特性,使得模型的动力学分析结果更加准确。同时,在车辆动力学模型中将会考虑悬链系统的柔性、控制系统和受电弓等因素的综合影响。经过大量实际线路的试验验证,可以保证 SIMPACK 软件是一个高度实验化的可靠的仿真软件。另外,通过 SIMPACK 强大的弹性体处理和接触技术(包含弹性体几何刚度非线性)可以直接利用 SIMPACK 软件自身建立悬链系统,在国内外已有应用的案例。

### ③ 流固耦合。

SIMPACK 软件的最新版本中已经成功地解决货车振动与罐中液体之间非常复杂的流固耦合的作用。

### ④ 参数化。

微分方程的计算需要进行一系列大量的参数优化计算。由于其独特的算法和快速的求解器可以实现参数化、计算过程的控制结构后处理的自动化。由于 SIMPACK 软件开放和先进的数据结构以及大量的和其他软件的接口,使得它可以成为伴随铁路车辆系统的和设计创新的有利工具。利用 SIMPACK 先进的模拟环境,可以保持产品的领先和创新,并具有竞争力。

1995 年 SIMPACK 最早实现从 FEM 软件中引入弹性的车体。由于其自身强大的轮轨接触建模和高效的求解器能力,保证了采用轻量化车体结构的高速列车的舒适度。现在全球许多铁路客户已经使用车体 FE 模态来考虑结构弹性影响,实现舒适度的动力学计算,为产品降低风险和成本提供保证。SIMPACK 通过自身的控制模块和 CACE 软件集成,如借助 MATLAB/Simulink 或用户程序实现机械动力学系统和控制系统的协调仿真。这也使得现代轨道车辆可以利用虚拟样机概念向摆式系统驱动系统以及创新的驱动系统方向的发展提供条件。

### ⑤ 模型验证。

轮轨模块重点放在车辆动力学建模和仿真精度上,特别是如何改善轮轨接触模型的建模能力。SIMPACK 的计算结果都是通过一系列的标准考题(如 ERRI 考题、IAVSD 考题和曼彻斯特考题等)和实际测量的数值结果进行严格的对比验证。最主要的结论也是通过 ERRI(欧洲铁路研究所)以及德国铁路管理部门联合进行分析和试验结果的相互验证后得出的结果。试验的方案,主要是针对不同类型的货车和一个三节车组成的货物列车进行了大量的反复试验比较,轮轨导向力和轮对的主要动力学分析指标的试验结果和分析计算结果有很好的吻合。另外德国慕尼黑的铁路车辆滚动实验台以及 DLR 开发的 1:5 的比例滚动台上进行了大量的试验验证。同时,在每次推出新版本的软件功能开发后,都会进行不同的转向架模型对比计算和试验。除了 SIMPACK 自身的轮轨接触模型试验外,铁路车辆的一些主要的部件

和子系统的模型都在进行不同课题内容的重点研究，如可控的单个车轮的悬挂系统和新开发的悬链系统（接触网）的研究等。

## 1.4 动力学软件在工程中的应用

多体系统动力学分析软件的主要应用领域还是车辆动力学的工程问题。目前在国内外机械动力学系统的发展中，动力学分析已经和有限元分析、控制系统等多个并行工程相结合补充和优化，克服在结构动态设计中很多机械系统纯力学机制存在的缺陷问题，例如，可以减少因为动载荷过大导致的各种能量损耗、噪音和结构磨损及其他失效问题的产生。下面结合国外部分文献对国内外部分铁路车辆动力学的发展和应用进行简单地阐述。可以说在这些铁路车辆新产品的每一步开发中几乎都离不开 SIMPACK 的帮助。具体如图 1.1 至图 1.7 所示。

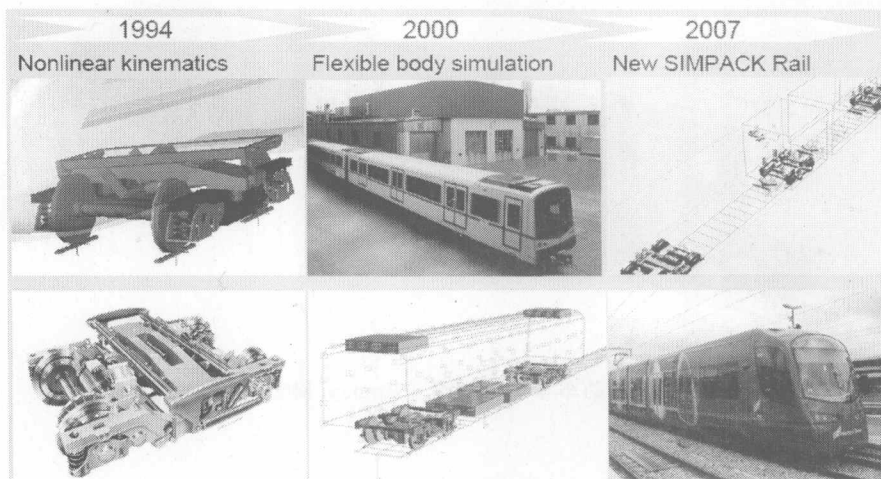


图 1.1 SIMPACK 在铁路产品中的开发应用（西门子）

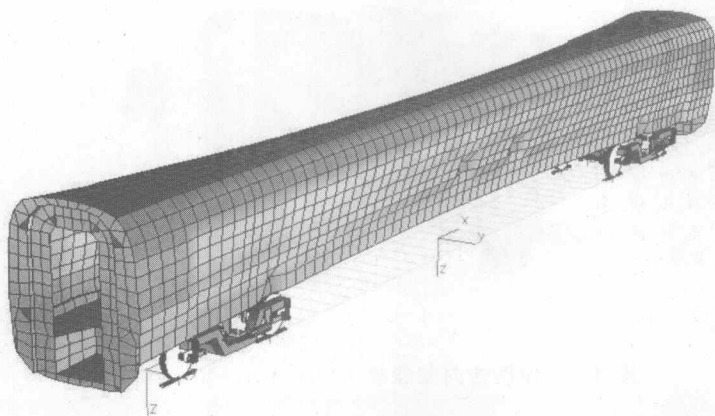


图 1.2 弹性车体及悬挂系统