国家自然科学基金（51305367，50975240，51575461）资助

高速列车数字化设计、分析及集成技术

丁国富　黎荣　邹益胜　张剑　著

西南交通大学出版社
·成　都·

内容简介

本书从系统论和过程论的角度，系统地阐述了高速列车数字化设计、分析及优化的集成理论与技术方法。内容涉及 CAD、CAE、建模与仿真、优化设计等相关技术及方法，是数字化设计理论在高速列车创新研发中的实践。

本书的内容可以为高速列车数字化设计提供帮助，也可为其他复杂机电系统数字化设计提供技术指导，适合从事产品数字化设计、基于仿真的优化设计领域的研究者、工程技术人员参考，也适合作为 CAD/CAE/优化等专业的本科生、硕士生和博士生的教材。

图书在版编目（CIP）数据

高速列车数字化设计、分析及集成技术 / 丁国富，黎荣，邹益胜著. —成都：西南交通大学出版社，2016.2

ISBN 978-7-5643-4430-6

I. ①高… II. ①丁… ②黎… ③邹… III. ①数字技术 - 应用 - 高速列车 - 设计 IV. ①U292.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 295789 号

高速列车数字化设计、分析及集成技术

丁国富　黎 荣　邹益胜　张 剑　著

责任编辑	王　旻
特邀编辑	王玉珂
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 （四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼）
发行部电话	028-87600564　028-87600533
邮政编码	610031
网　　址	http://www.xnjdcbs.com
印　　刷	成都蓉军广告印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm×260 mm
印　　张	14.25
字　　数	354 千
版　　次	2016 年 2 月第 1 版
印　　次	2016 年 2 月第 1 次
书　　号	ISBN 978-7-5643-4430-6
定　　价	56.00 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

序

以数字化设计为特征的虚拟样机技术是一种基于计算机仿真为核心的崭新数字化开发方法，它以 CAX/DFX、多体系统运动学和动力学为基础，按照相似性理论，强调在基于产品的数字模型上对其进行外观、功能和行为上的模拟，是建立在仿真建模理论方法学基础上的产品全过程数字化模拟和仿真；它支持产品“自顶向下”的设计模式，并主张在多领域共同协作来完成对虚拟模型进行优化和评估，是对现代设计方法学的发展和延伸，也是先进制造技术的重要领域。虚拟样机是解决复杂机电系统数字化研发非常有效的关键技术。

高速列车作为一种重要的载运旅客的轨道交通工具，由一定数量的车辆编组而成，每个车辆主要由车体、转向架、牵引传动系统、制动系统、辅助供电系统、网络控制系统、环控（空调等）等关键部分组成，是一个典型的复杂机电系统。由于运行速度提高，高速列车与其运行环境的相互作用加剧，要保持高的高速列车品质，其相关的研究受到更多、更大的技术挑战，尤其是高速列车的动力学性能以及其衍生的其他性能，对高速列车的运行品质起到决定性的作用。采用虚拟样机等先进的数字化设计技术，是研究高速列车复杂系统的有效技术手段。

本人一直从事机车车辆动力学及试验研究，采取先进的数字化研发技术指导学生结合试验进行了有关弓网系统的虚拟样机研究，取得了很好的效果。在与博士后出站分配到西南交通大学机械工程学院的丁国富博士的交流和沟通中，了解到其主要从事产品数字化设计与制

造研究，于是鼓励其从事有关机车车辆的动态设计相关研究，并引荐其参加轨道交通国家实验室高速列车数字化平台的设计、论证与建设工作。随着我国高速铁路的快速发展，丁国富博士及其科研团队紧紧抓住了铁路的这一需求，持续 10 多年坚持不懈地研究，取得了相应的技术进展，并完成了本书的写作。

本书从系统论和过程论的角度，系统地阐述了高速列车数字化设计、分析以及优化的集成理论及技术方法。在所提出的基于 MRA 架构的高速列车设计、分析、优化集成闭环设计理论框架基础上，详细论述了这一闭环设计过程的系列关键技术。在先进的三维 CAD 平台基础上，阐述了基于三维 CAD 的高速列车动力学属性提取及拓扑结构建立，CAD/CAE 集成的多视图映射，动力学模型的可视化重构等，解决了在常规三维 CAD 平台上进行设计模型向分析模型顺利过渡的问题；在多分析视图模型的基础上，采用基于组件的计算机建模方法，提出了多层级阶梯控制的多领域耦合仿真方法，实现了不同积分步长的多层级耦合仿真，保证了耦合过程中的动态数据的时空同步性；为了有效地构建优化模型，采用拉丁超立方进行上百次的精确仿真计算采样，以获得仿真计算样本，以此构建基于 BP 神经网络的代理模型，在可接受的逼近误差内来代替原有的精确计算模型；基于这种逼近模型，以高速列车的动力学性能评价的有关指标为优化对象，进行基于差分进化的智能优化，从而方便快速地找到高速列车动力学性能设计参数域，以及各性能设计参数对设计目标的敏感程度或重要度；最后，书中还阐述了基于商业化软件构建出的高速列车数字化设计、分析、优化集成平台，为高速列车数字化研发提供了理论和平台基础。

该书是一本将先进的三维 CAD 技术、图形学和可视化技术、CAE 技术、信息集成技术、

计算机建模及仿真技术、智能优化技术、代理模型技术、DOE 技术与机械载运学科相互交叉融合的学术著作。所研究的内容既是对先进的数字化设计技术的深入研究和应用，又将新的理论引入了高速列车的创新研制领域，是机械载运与数字化领域的国际前沿技术，对促进我国高速列车向着速度更高、更安全、更可靠、更经济环保的方向发展有重要学术价值。随着我国高速铁路走出去战略的深入开展，《中国制造 2025》规划的出台，本书必将对我国的先进轨道交通装备的创新研发起到重要的推动作用，具有很高的出版价值。

张卫华

2015 年 12 月

前　言

2002 年作者从牵引动力国家重点实验室博士后出站时，虚拟样机技术是航空航天领域非常热门的研究领域，结合作者对我国机车车辆领域研发现状的肤浅认识以及在机械学科从事数字化设计与制造方向的特点，希望很深入地了解虚拟样机技术在机车车辆领域的研究现状和情况。通过查阅相关资料，并与我国机车车辆领域著名专家张卫华教授沟通后，觉得这个领域非常有前景，正好张教授承担了一个有关机车车辆性能动态设计的铁道部项目，他建议我加入到该领域的研究，当时也正是在先进制造领域确定研究方向的徘徊时刻，觉得这是未来发展的方向之一，于是果断听取了张教授的建议。后续在张教授的支持下，深入开展了有关数字化设计与制造在机车车辆领域的研究工作，并有幸参加了轨道交通国家实验室（筹）的高速列车数字化仿真平台的建设工作。

2007 年以后迎来了高速列车在我国的大发展时期，在张教授的带领下，我和我的团队成员有幸参与了科技部与铁道部的两部联合行动计划，并在后续的研究中实质性地参与了有关高速列车创新研制的国家需求项目，也得到了多个国家自然基金项目的资助，在高速列车数字化设计研究方面有了一些实质性的进展，于是在归纳总结的基础上，将其成文，希望为我国高速列车的创新有所帮助。

本书重点从系统论的角度，论述设计模型、分析模型、仿真模型、优化模型之间的信息及数据传递或过渡的机理及技术方法，以形成设计驱动的高速列车整机性能参数动态优化设计方法，使得设计过程在一个相对闭环的迭代过程中，有效找到高速列车整机性能参数的设计域，设计参数变化规律和设计参数对设计目标的重要程度，从而指导高速列车整机性能参数的优化设计和试验，在数字化样机阶段无风险地分析并减少设计缺陷，提高设计质量和效率，降低设计往复的成本，尽量减少物理试验次数和对物理样机的过渡依赖。

本书是团队一起合作完成的结果，其中第 1～2 章由丁国富及博士生何邕完成，第 3 章由丁国富、黎荣、博士生张海柱完成，第 4 章由邹益胜完成，第 5 章由丁国富及博士生何邕完成，第 6～7 章由张剑和博士生姜杰完成，第 8 章由黎荣及博士生张海柱、姜杰、谢星完成，丁国富负责整个统稿工作，其中邹益胜、张剑和姜杰参与了大量的校对工作，在此对数字化设计与制造团队所有成员表示感谢。

本书的出版得到了国家自然科学基金（51305367，50975240，51575461）资助，部分内容也来自国家科技支撑计划、四川省青年科技基金的支持，在此对资金提供的单位表示感谢。本书的研究也得到了牵引动力国家重点实验室张卫华教授及其同仁的大力支持，是他们将我引入了高速铁路的舞台，在此，对他们的帮助和支持表示深深的感谢。

丁国富

于西南交通大学

2015 年 10 月

目　录

第 1 章　概　述 …… 1

1.1　复杂机电系统 …… 1

1.2　复杂机电产品虚拟样机技术 …… 2

1.3　高速列车的复杂机电系统 …… 7

1.4　高速列车虚拟样机技术 …… 9

1.5　高速列车虚拟样机技术现状及趋势 …… 11

1.6　本书内容 …… 12

1.7　本章小结 …… 12

参考文献 …… 12

第 2 章　高速列车设计、分析、优化集成 …… 14

2.1　引　言 …… 14

2.2　复杂机电系统数字化设计、分析、优化集成 …… 15

2.3　高速列车数字化设计、分析、优化集成建模 …… 19

2.4　面向设计模型的高速列车设计、多体动力学分析集成描述 …… 28

2.5　本章小结 …… 38

参考文献 …… 38

第 3 章　面向设计模型的高速列车分析模型映射 ····· 40

3.1　复杂机电系统分析模型属性提取 ····· 40

3.2　高速列车动力学分析模型属性提取方法 ····· 51

3.3　本章小结 ····· 65

参考文献 ····· 65

第 4 章　高速列车多分析视图耦合仿真 ····· 67

4.1　复杂机电系统多分析视图耦合仿真 ····· 67

4.2　高速列车多分析视图模型耦合仿真 ····· 73

4.3　本章小结 ····· 85

参考文献 ····· 85

第 5 章　面向多体系统的高速列车动力学参数灵敏度分析 ····· 87

5.1　灵敏度分析概述 ····· 87

5.2　面向设计的多体系统灵敏度分析模型 ····· 88

5.3　面向设计模型的高速列车灵敏度分析模型研究 ····· 100

5.4　本章小结 ····· 112

参考文献 ····· 112

第 6 章　高速列车基于代理模型的整机性能设计参数灵敏度分析 ····· 114

6.1　高速列车动力学模型构建 ····· 114

6.2　高速列车设计空间缩减和确定 ····· 121

6.3 高速列车动力学代理模型方案 …… 124

6.4 构建高速列车改进神经网络代理模型 …… 128

6.5 高速列车设计参数灵敏度分析和关键参数识别 …… 133

6.6 本章小结 …… 136

参考文献 …… 136

第 7 章 高速列车基于代理模型的动力学设计参数优化 …… 139

7.1 概 述 …… 139

7.2 高速列车动力学设计参数优化算法和流程 …… 141

7.3 优化模型的建立 …… 143

7.4 高速列车动力学设计参数优化过程 …… 148

7.5 Pareto 非支配解集数据分析 …… 155

7.6 本章小结 …… 160

参考文献 …… 160

第 8 章 高速列车设计、分析、优化集成平台 …… 162

8.1 高速列车数字化设计面临的挑战 …… 162

8.2 高速列车设计、分析、优化集成框架 …… 168

8.3 高速列车设计、分析、优化集成平台搭建 …… 171

8.4 本章小结 …… 218

参考文献 …… 219

第 2 章　高速列车设计、分析、优化集成

2.1　引 言

设计分析集成是一个普遍的问题，由于各 CAD 和 CAE 开发历程的原因，导致 CAD/CAE 之间有效集成形成一体化模型一直没有得到很好解决，尽管采用了第三方文件格式（比如 IGES 和 STEP 等方式）进行中间过渡，但因为传递信息的不准确或者过少，导致模型的精度不高。要实现真正的虚拟样机，需要在数字样机上进行各种功能和性能试验。进行基于仿真的设计，必须将 CAD 和 CAE 有效地集成起来，在底层共享相关数据。

针对复杂机电系统，目前设计分析能够集成起来的研究很少，大部分还是借助于三维 CAD 的中性文件输出，进行模型修剪操作后进行 CAE 分析。但这种数据已经不能回到 CAD 环境中，尤其经过了拓扑或者性能优化的模型，很难将按照网格组合的模型返回到具有实体特性的 CAD 环境中。究其根本原因，三维 CAD 环境是基于产品的特征进行建模，这种特征更适合设计、制造等。而 CAE 是基于 CAD 三维模型，一旦被处理后，所得到的模型已经只是几何本身，没有其他相关实体和特征等信息。这导致双方交换数据存在瓶颈，这种瓶颈是制约现在 CAD 和 CAE 不能很好衔接的关键因素，具有挑战性。

复杂机电系统的设计是一个循环往复的过程，从这个角度理解设计是一个闭环的过程，即是在给定的需求、指标情况下，确定研发目标，然后驱动设计活动，使得产品逐渐满足各

项指标，达到要求。设计、分析的结果需要进行处理，而这些可以通过优化来完成，使得开环设计变成真正的闭环设计。优化设计已经广泛应用在产品的研发上，尤其在产品的结构优化、拓扑优化上，现在也逐渐在动力学领域得到探索和应用。

复杂机电系统的性能分析，最重要的是基于整机的动力学分析。如何建立设计、分析一体化的复杂机电系统动力学模型，对解决复杂机电系统自身性能起到非常关键的作用。除了前面 CAD/CAE 未能很好地集成起来以外，在动力学性能分析优化方面也未能很好结合。存在的主要挑战是：

（1）设计域的设计参数过多，导致设计空间过大，问题求解规模很大，很难进行设计优化。

（2）基于多体系统动力学优化，需要求解非常复杂的微分方程，解算繁琐。

（3）设计、分析和优化都在不同的平台上进行，很难将其整合在一起进行一体化研究。

复杂机电系统的闭环设计是将设计模型、分析模型以及优化模型等集成在统一的框架下，实现设计模型到分析模型映射、分析模型到优化模型的传递，最后基于优化模型得出的优化设计参数再反馈到设计，从而反馈修改或指导设计。

本章重点阐述以设计、分析、优化为核心的复杂机电系统闭环设计理论及方法，进而以高速列车的设计为对象，研究高速列车在设计、分析、优化集成中的具体技术。

2.2 复杂机电系统数字化设计、分析、优化集成

数字化设计是目前主流的设计方法，作为一种全新的设计手段，从系统工程的观点出发，强调设计、分析、优化为一个整体。产品从方案设计中获得设计原型，经过对各种分析领域建模，并提交分析工具进行分析求解，优化相关参数以获得结果；再根据结果进行综合，获得对设计目标的改进，并反馈给设计模型进行修改。循环以上过程，直到与目标接近或一致，从而减少试制次数，降低成本。由此可见，设计模型是设计的主体，任何分析模型不能脱离

该模型，分析模型的准确性必须严格依据设计模型而建立。

根据复杂机电系统的研究重点，其数字化闭环设计流程如图 2-1 所示。由于设计模型是分析模型的基础，首先进行复杂机电系统的参数化设计，通过参数设计形成复杂机电系统数字样机；然后基于设计模型进行不同学科的映射，以及不同学科的属性提取，得出不同学科分析模型的参数集。在此之后，基于不同学科的分析模型参数集进行各学科的分析模型重构，建立起各个学科的分析模型，再将分析模型转化成仿真模型；最后，基于仿真模型的输入和输出数据构建各个学科仿真的代理模型，基于代理模型构建复杂机电系统的多目标优化模型，通过多目标优化算法得出优化后的设计参数从而来反馈修改设计，得出满足设计目标的设计参数和设计模型，实现复杂机电系统的闭环设计。

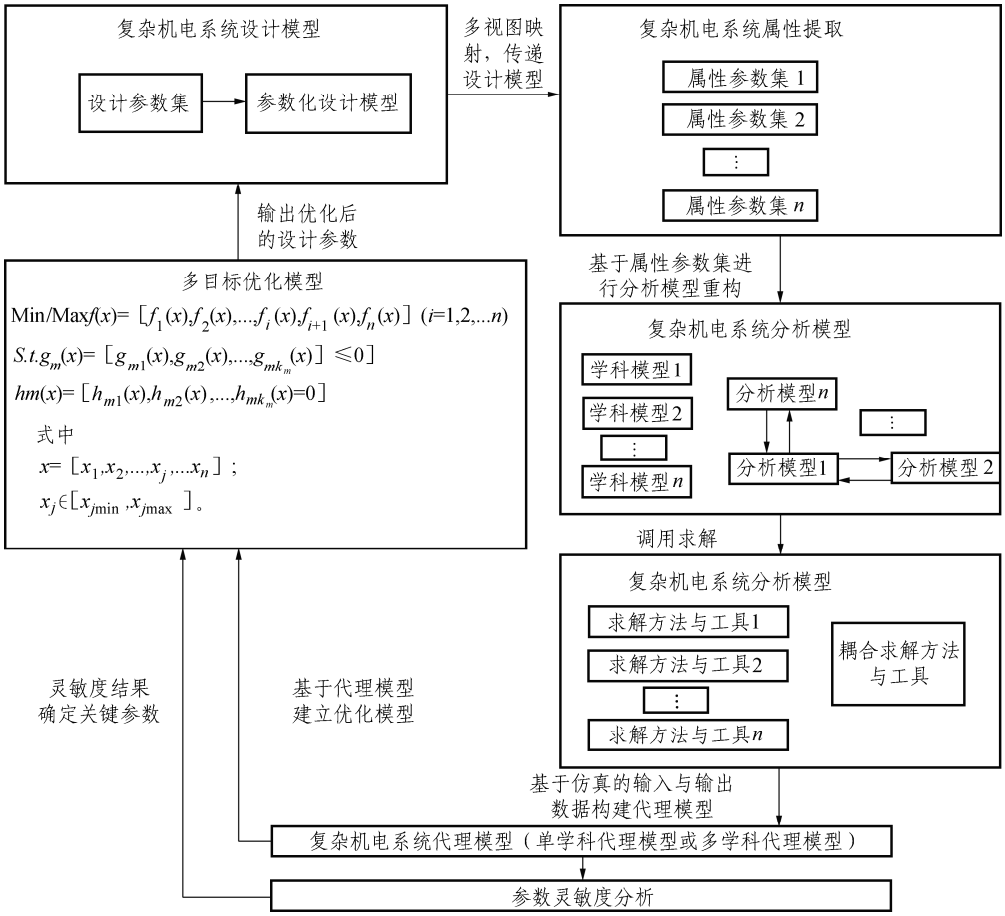

图 2-1　复杂机电系统数字化闭环设计流程

由上述过程可知，产品的设计更新是渐进的迭代过程。迭代多用于算法分析，应用于此引申为：在流程固定的基础上，通过不断修正产品设计的输入信息以获得朝着目标收敛的结果，如此循环运行，直至逼近或达到目标。产品的每个设计循环必须经过设计、分析和优化

等过程，模型综合分析的结果将以反馈的方式驱动这个过程继续迭代，直到获得满意的结果。因此，复杂机电系统的设计、分析、优化集成可以理解为产品闭环设计过程。由于设计过程的复杂性，如何驱动这些过程朝着设计目标收敛，需要具有感知设计过程的智能体（Agent）进行控制。智能迭代综合采用类似于人的演绎和推理技术，用于对设计前的分析并感知设计后的结果，以驱动设计更新，结合系统的信息反馈机理，可以加快设计的过程朝着设计目标逼近。

产品设计是串联和并联相结合的循序渐进过程，该过程可以抽象为图的形式。将产品模型表达为一种约束结构图，节点反映同一产品模型下不同的产品分析视图。视图是指产品在不同应用层面的投影，由数据对象和关系对象组成。图中：V_G 为几何视图；V_D 为动力学物理模型视图；V_F 为有限元结构模型视图。由图 2-2 可知，V_D，V_F 和 V_G 具有互联关系，V_D 和 V_F 可以由转化得到。在约束结构图纵向表达设计的不同阶段，节点所表达的视图发生相应的变化，可以支持设计进程和分析视图的变化。

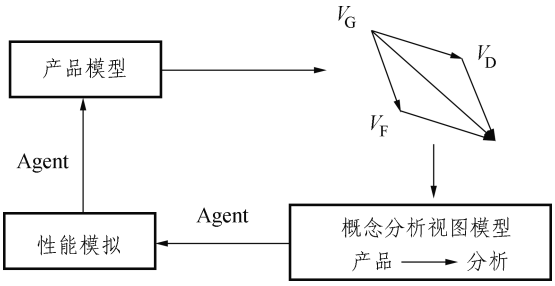

图 2-2　产品设计过程抽象

产品整个设计过程可以抽象为图 2-3 所示的带反馈信息的闭环系统。图中各子视图模型进行局部反馈以优化模型，综合评价包括了各个视图的结果并进行综合以优化全局视图模型，子视图之间通过权重决定对全局模型的贡献度。

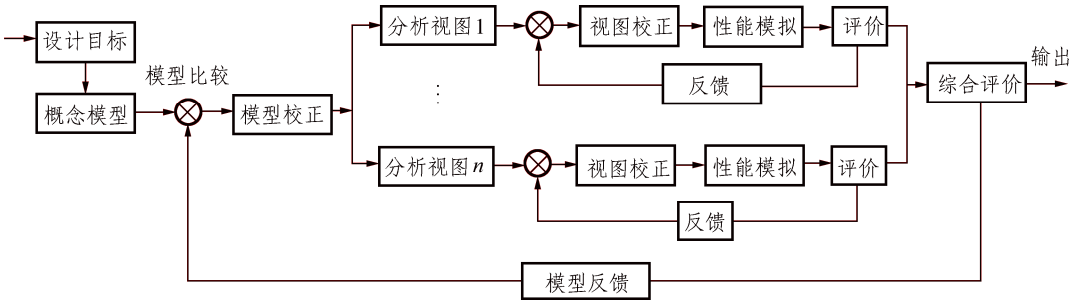

图 2-3　产品设计过程反馈模型

产品设计模型、分析模型、仿真模型和优化模型是实现反馈策略的关键。4 个模型贯穿于整个设计闭环过程，通过相互之间的关联感知模型更新和对模型进行校正，并推动模型反馈迭代，以获得满意的设计结果。

1．产品设计模型

产品设计模型具有多层结构，在每个设计层次中，含有本阶段相关的设计进程，包括产品需求、设计选择和设计组件（设计特征的集合），同时分析模型与产品需求（设计约束）及设计组件相关联。设计模型、用户等组件之间的交互通过设计知识和规则进行控制。设计模型在用户的交互下，驱动每一设计层次中的虚拟设计过程。在用户的交互下，不同的分析应用视图从设计组件中提取特征参数信息，导出分析模型。产品设计模型与分析模型间的关系如图 2-4 所示。

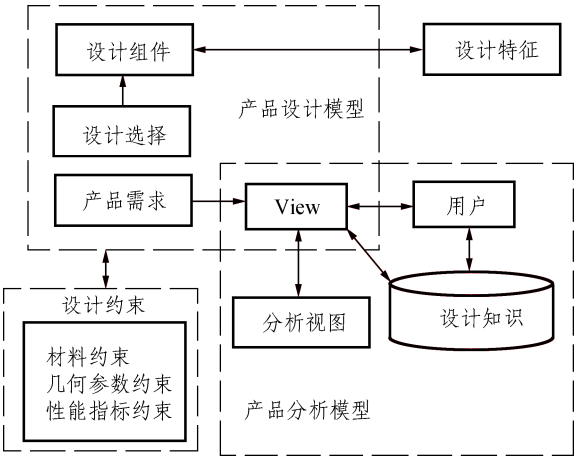

图 2-4　设计模型与分析模型的关系

2．产品分析模型

产品分析模型是衔接性能仿真模型和设计模型的纽带。分析模型根据分析的目标映射为不同的模型格式。以多体系统为例，在设计模型中必须抽象出性能分析模型的多体系统特征，建立组成多体系统的各种刚体、柔性体和相互之间位置和姿态关系的矩阵，定义各种约束的形式、抽象化表达和各种构件物理属性，最后完成多体系统拓扑结构的语义模型。

3．仿真模型

仿真模型主要用于实现物理性能分析的封装，实现分析模型在求解空间中的自动映射并表达为计算机能够解算的模型。同样以多体系统分析为例，当获得分析模型后，仿真模型自动感知该模型中多体系统的拓扑结构，恢复为可组建的可视模型，然后直接在计算机空间中由可视模型映射为数值仿真模型。仿真模型可根据系统功能的要求采用可视化模型进行人机交互，数值仿真进行后台求解，最后以可视的方式提交给用户，其中数值仿真模型是必不可少的。仿真模型是基于仿真设计的模型和数据基础。

4．优化模型

整个闭环设计系统要实现设计反馈与迭代，优化模型最为关键，优化模型帮助找到寻优的路径与结果，获得满意的参数域。这个过程需要不停地寻优、比较、分析，需要在灵敏度分析模型基础上进行，以确定哪些设计参数对设计目标的敏感程度和影响程度的大小，以进一步确定关键参数、简化迭代等。由于多学科建模涉及局部优化和全局优化等多优化过程，这些优化过程又涉及多学科建模与仿真，所以需要探索更深入的优化模型。为了保证设计进程顺利进行，将引入基于精确多学科仿真模型的代理模型来简化，然后在此基础上进行寻优。只要精度足够，这种代理模型将帮助找到合适的参数域。

基于以上模型，更进一步地提出一种面向设计模型的复杂机电系统闭环设计思路，如图 2-5 所示。该思路从系统的角度，考虑整个设计为一个闭环，复杂机电系统的设计过程在这个闭环过程中反复迭代设计，直到达到所要求的设计目标。很显然整个设计过程是一个多目标、单目标混合优化过程，也是一个局部优化和全局混合优化问题。其中局部优化主要实现零部件的设计，支持自底向上设计；全局优化主要实现整个复杂机电系统性能设计参数优化与匹配，支持自顶向下设计，几者相互配合实现产品的整个设计。图 2-6 所示为整机性能闭环设计中的设计优化抽象模型。

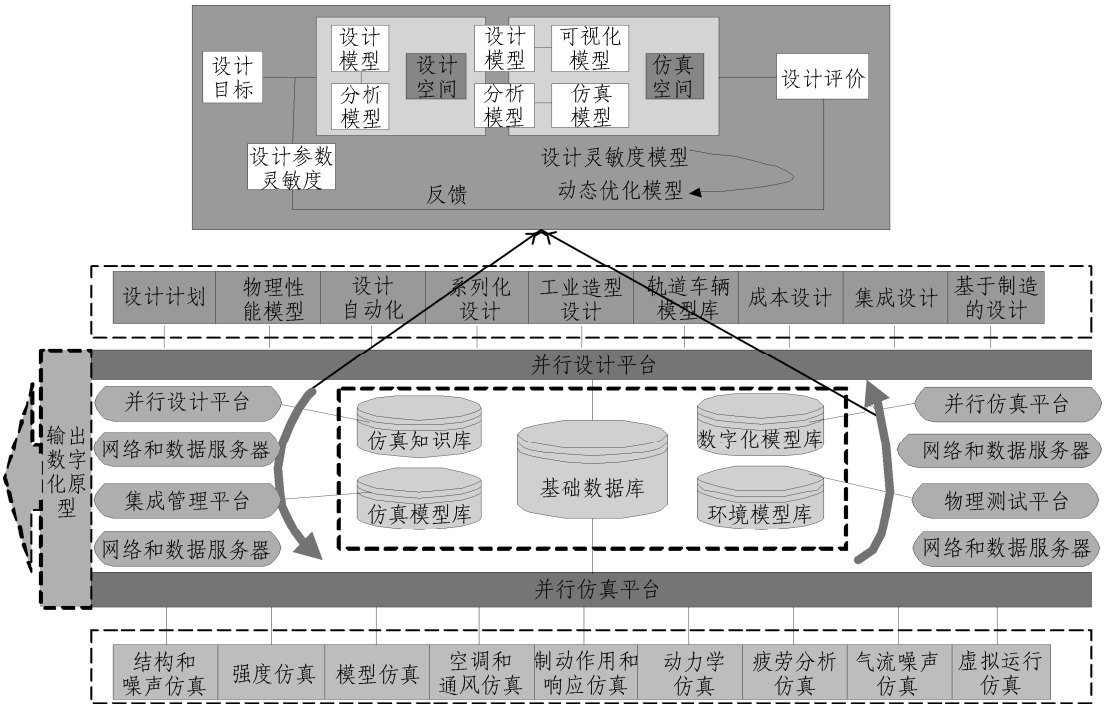

图 2-5　复杂机电系统产品闭环设计思路

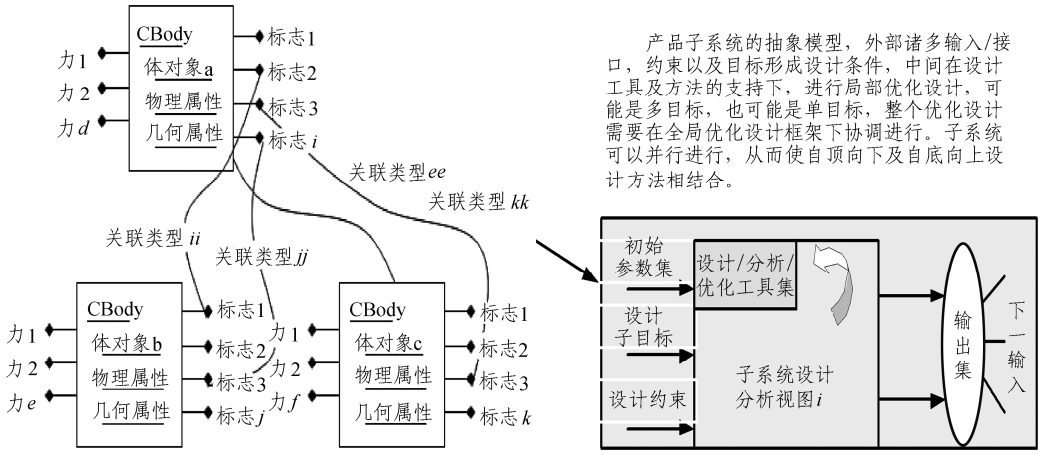

图 2-6　整机性能闭环设计中的设计优化抽象模型

各个子系统、子部件的优化设计可在给定设计目标、前置设计约束（含全局）和参数的边界条件下进行，干扰因素少，操作相对比较容易。针对整机动力学，由于需要建立整机的拓扑结构和性能分析模型，各子系统的设计结果或者设计要素都会在其中得到体现，设计参数复杂。

为了实现闭环设计，并获得满意结果，针对复杂机电系统的仿真分析复杂，多学科、多领域的情况比较多的特点，提出基于代理模型综合的优化设计思路，形成整个闭环设计的最后一环。该代理模型建立在精确仿真模型的基础上，通过对精确仿真模型进行大量的仿真试验获得样本数据，然后基于这些样本数据，用适合的逼近模型去逼近该仿真分析模型。只要逼近精度足够，就能代替仿真模型进行后续优化工作。这样也能在优化模型的支持下，进行设计空间的搜索和优化工作，从而获得满意的设计参数域。这种方法相比传统的经验、物理平台试验法更加科学化，更能进行无风险的创新设计，降低成本，方便调整复杂机电系统相关的设计参数，也能找到设计参数空间的参数重要度和对设计结果的灵敏度，能够从整机性能的基础上全面把握整个系统的特性。

2.3 高速列车数字化设计、分析、优化集成建模

2.3.1 集成模型

针对复杂机电系统的设计、分析、优化集成理论，重点以高速列车这个复杂机电系统进行研究。高速列车数字化闭环设计流程是复杂机电系统数字化闭环设计的具体实现，其涉及的主要技术包括基于参数化设计、设计模型的分析属性提取、分析模型重构、多分析视图耦合仿真、代理模型建立、灵敏度分析和面向整机性能的参数多目标优化等，具体流程如图 2-7 所示。

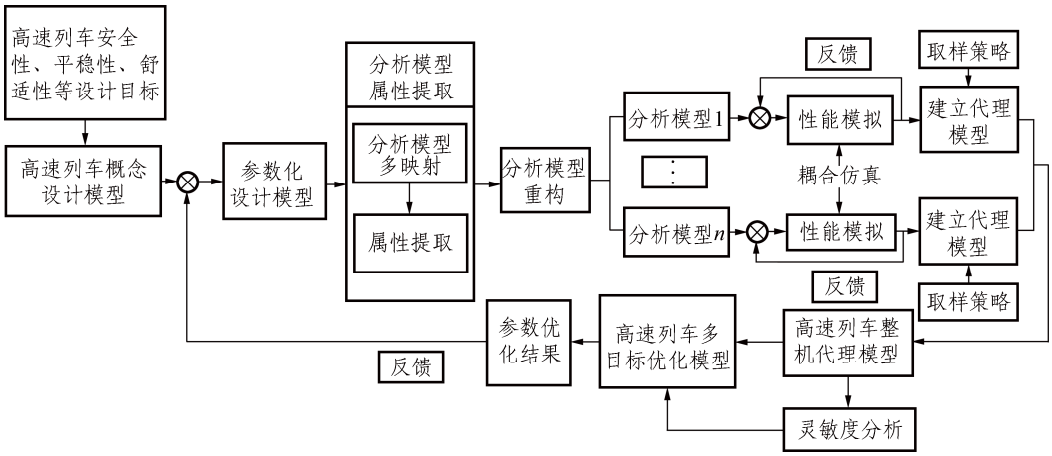

图 2-7 高速列车数字化闭环设计流程

高速列车闭环设计即是从高速列车的安全性、平稳性、舒适性等目标出发，先定义出概念设计模型，并在概念设计模型的基础上建立设计模型。基于高速列车设计模型进行分析模型的属性提取，根据提取出的属性构建各个视图的分析模型，并进行性能模拟和多视图耦合仿真，得出仿真数据。利用取样策略和多次仿真数据构建仿真模型的代理模型，形成高速列车整机代理模型，最终建立高速列车整机性能的多目标优化模型，通过多目标优化算法和调用代理模型生成输入输出数据不断进行阐述寻优和目标比较，直到得出满足设计目标的最优设计参数，并将最优设计参数反馈给概念设计的参数集，以驱动修改设计模型，进行模型对

比和修改，实现高速列车的数字化闭环设计。

2.3.2 设计分析一体化模型（HPDA）

设计与分析集成是数字样机模型无缝传递的关键，有效的模型表达将含减轻分析过程的各种工作量，并保证模型及数据传递的准确性。乔治亚州理工学院工程信息系统实验室在设计分析一体化领域已经进行了多年的理论和应用研究，典型的理论研究成果包括多描述架构（Multi-representation Architecture，MRA）和可分析的产品模型（Analyzable Product Model，APM）理论。R. S. Peak 等人从 CAE 和 CAD 应用之间共享数据的研究出发提出了多表示方法体系 MRA。目前从 CAD 领域来看缺乏支持产品设计的通用的、自动化的工程分析方法；而一种产品设计模型描述应该能够支持多种不同的分析应用对数据的要求。同一种类型的产品设计模型，经常会有多种分析模型与之对应，它们可以从不同的工程学科出发对产品进行分析，也可能采用不同的解算方法。即使同一学科门类的分析工具对模型的粒度和复杂度也有不同的要求。以此，提出了一种解决 CAD—CAE 一体化问题的 MRA 体系并把这个体系划分成 4 个子模型进行描述，即求解方法、分析构建块、产品模型和基于产品模型的分析模型。

在分析了高速列车多体系统产品设计分析模型特点的基础上，引用了 R.S. Peak 的研究成果 MRA 表达框架作为研究的背景信息。通过分析 MRA 已有的构建模块与功能后，提出添加面向设计的灵敏度分析模型和优化模型，扩展 MRA 表达框架，使其成为满足复杂多体系统产品设计—分析—再设计的广义集成框架 GMRA（Generalized MRA）。通过在各个设计阶段定义和构建 GMRA 获得研究所提出的 HPDA 模型如图 2-8 所示。它由 4 个视图组成，即系统层、子系统层、部件层和组件层，分别描述了不同设计阶段的设计过程和设计信息，符合自

顶向下的设计过程，支持模块定义和重用。

每个设计层由 6 个模块构成，虽然有相同的表示结构，但每层的每个模块都有其不同的描述。其构成每层视图的 6 个模块的广义定义为：

（1）AOM（Analyzable Object Model）：可分析的对象模型，不仅仅是设计模型，还包括设计方案等信息。

（2）ABB（Analysis Building Block）：分析构建块，各层分析模型的基元分析特征集。

（3）SMM（Solution Method Model）：求解方法模块，支持外部调用数据接口，支持其他形式的求解方法，如方案对比、论证等方法集。

（4）CBAM（Context-based Analysis Model）：基于上下文的分析模型，提供分析环境、分析组建规则，以及设计边界条件等。

（5）SAM（Sensitivity Analysis Model）：灵敏度分析模型，描述设计条件对设计方案的影响，以及设计参数对设计性能的影响等。

（6）OPT（Optimization Technology）：优化模型，根据灵敏度分析模型的结果，建立与之相适应的优化模型，实施优化和更新。

所建立的 HPDA 模型支持设计数据集成和过程集成，数据集成解决不同模块之间的信息表示及交换的一致性问题，而过程集成考虑的是如何以显示的、可理解的方式描述设计过程。

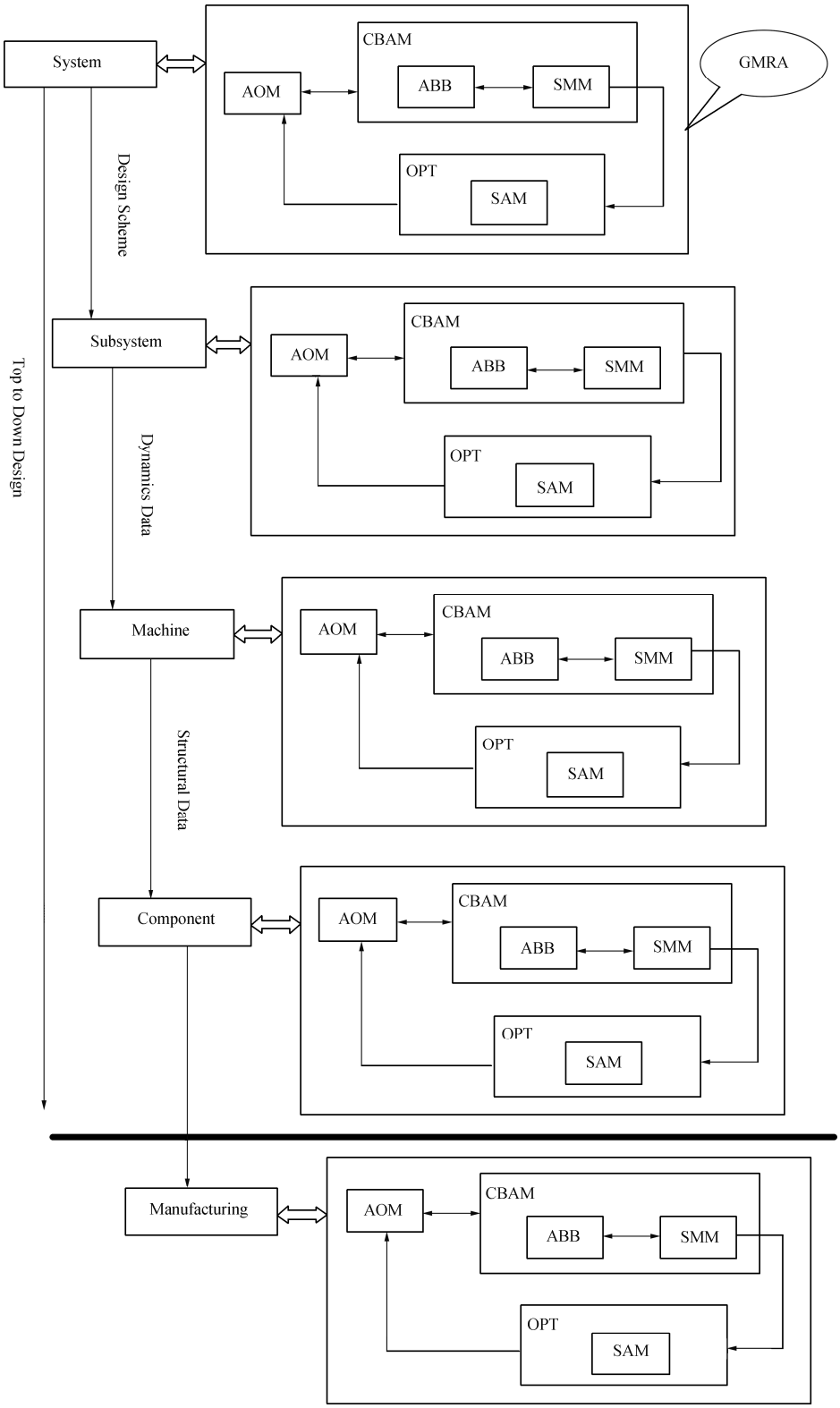

图 2-8　完整的产品设计分析模型（HPDA）

（1）系统层。主要描述机械产品的设计要求与设计方案。一个复杂产品的设计，往往涉及多种设计方案选择，通过进行对比分析和方案论证，获得一种满足设计性能要求、设计时间、设计成本等要求的方案。在系统层，可分析的对象模型（AOM）主要被作为设计方案进行描述，包含设计方法及技术手段；分析构建块（ABB）描述的设计方案的功能要求、性能要求、结构要求等；基于上下文的分析模型（CBAM）描述的设计条件、提供设计师、分析师、产品调研师、用户等可供讨论分析的环境以及设计要求与设计条件的关联关系等；灵敏度分析模型（SAM）反映的是哪些设计条件、设计资源、外部因素制约、影响设计要求，以及它们之间的影响程度等信息；优化模块（OPT）根据方案对比、灵敏度分析，提出改进设计方案及设计方法，优化设计资源配置等信息。

（2）子系统层。描述了复杂机械产品的动力学信息。根据系统层获得产品初始样机模型及动力学性能设计要求，作为子系统层的输入，在子系统层进行样机动力学性能分析与优化设计。根据系统层获得的先验性设计模型，它主要描述的是产品的几何参数和相应的设计要求。可分析的对象模型（AOM）在子系统层则为可分析的产品模型（APM）。可分析构建块（ABB）描述了机械产品多体系统的基元分析特征，通过组建这些基元分析特征，能够描述多体系统拓扑结构，即适用于多体系统动力学分析的、描述各部件的装配关系、连接关系及约束关系的结构。通过映射 ABB 到 APM，获得具有分析特征的产品设计模型。而基于上下文的分析模型（CBAM）为 ABB 到 APM 的映射提供规则和环境，同时 CBAM 提供 ABB 到 SMM 的映射。求解方法模块（SMM）支持开发的动力学计算包，同时提供如 ADAMS 和 Simpack 这些商业软件计算所需的接口。灵敏度分析模型（SAM）作为连接动力学性能与设

计模型设计参数的桥梁，反映了产品在动态运行过程中参数和性能的演变规律，对优化设计起着重要的导向作用。优化模块（OPT），根据灵敏度分析结果，进行针对性地优化设计，以改进设计模型的设计性能。整个模型采用广义多描述架构进行描述，支持数据的一致性，易于实现产品的循环设计。

在对高速列车进行动力学性能分析与设计时，主要考虑车辆的稳定性（安全性）、平稳性以及曲线通过能力。根据动力学性能分析的结果优化车辆系统的物理参数（如质量、惯量）、结构参数（如转向架轴向跨距、车辆定距）、悬挂参数（如弹簧刚度、阻尼系数）以及轮轨接触等参数。图 2-9 中所示为车辆设计子系统层设计—分析的描述图。车辆、轨道 CAD 模型作为子系统层的输入，通过简化并抽取 CAD 模型的几何特征，获得适于动力学分析的几何和实体信息。然后添加非几何属性如系统拓扑结构、物理属性。对于轨道还需描述其线路特征，如直线、圆曲线以及其不平顺特性等分析参数。也即在 CBAM 中，实现 ABB 到 APM 的映射，获得后续的分析模型。然后通过在 SMM 中调用动力学求解器进行求解，获得各部件的动力学数据，如轮轨横向力、脱轨系数、临界速度等。通过子系统设计过程，输出产品的动力学品质数据、载荷及结构物理属性等，这些数据中的部分又作为下一个设计层的输入，如采用有限元对轮对结构进行分析时，轮对的载荷以及各力作用点、边界条件等信息就是部件层的输入。

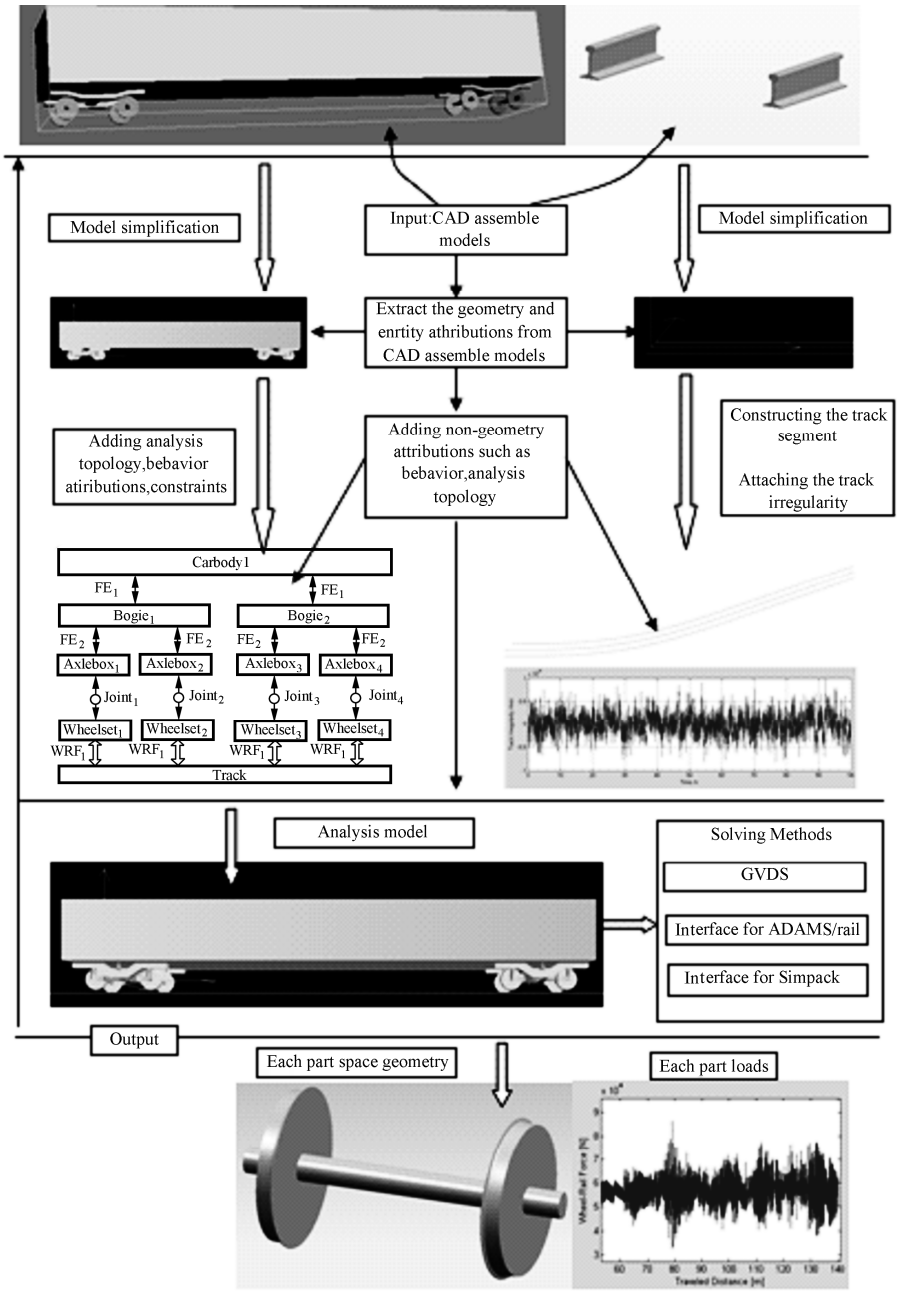

图 2-9　高速列车子系统层建模描述

（3）部件层。CAD 模型与各部件的约束及受力作为该层的输入，实现对机械产品的强度和疲劳特性的分析和优化。CAD 模型必须进行简化和重构以便于获得可供分析的网格和几何数据，并作为该层的可分析对象模型。ABB 是一些理想化的参数和基元分析特征，如有限分

析中的梁模型，部件的材料属性等。SMM 提供可以调用外部有限元分析软件（如 ANSYS、ABQUES）的接口，实现对其结构的分析。SAM 进行结构灵敏度分析，并根据分析结果进行结构参数优化设计。图 2-10 表示了部件层的设计模型—分析模型集成过程。

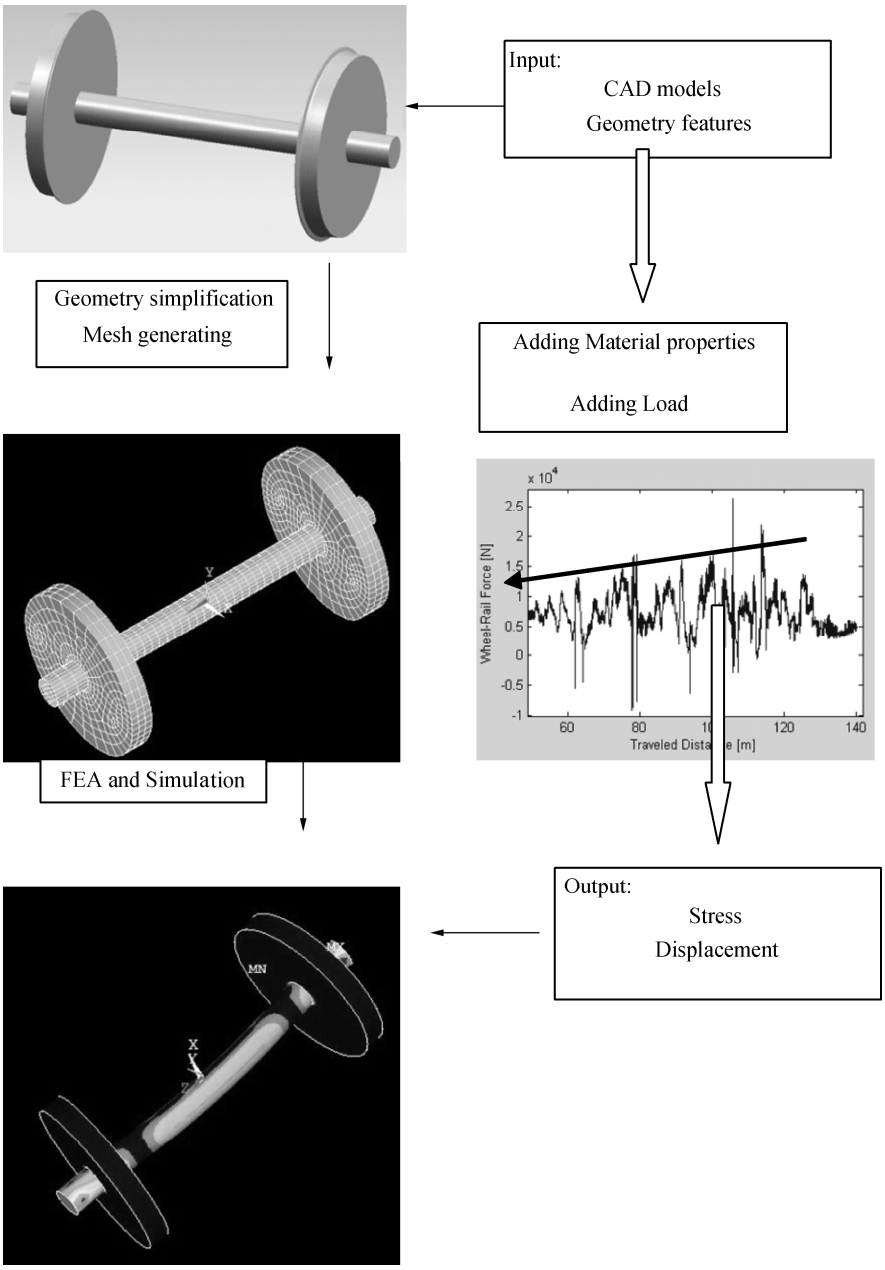

图 2-10　高速列车部件层建模描述

（4）组件层。描述组成各部件的零件的结构特性，与部件层类似，以零件的 CAD 模型和载荷作为输入，以零件的结构尺寸作为输出，以供后续的加工模块进行加工制造。

2.3.3 基于 GMRA 建模

为了更明确地分析高速列车整机性能，主要集中在子系统层，即对复杂产品的动力学性能进行分析与设计。以 R.S. Peak 的研究成果 MRA 表达框架作为研究的背景信息。在分析了 MRA 已有的构建模块与功能后，提出添加面向设计的灵敏度分析模型、优化模型以及基于灵敏度分析的优化模型，并对原有模块进行扩展，形成广义的描述架构 GMRA，改进其原集成框架应用领域单一、不能进行设计迭代、反馈描述等问题。因此，所改进的 GMRA 是一个完整的支持设计循环的构架，不仅适用于有限元分析的描述，还适合复杂多体系统动力学的分析描述以及加工、制造的描述。图 2-11 详细地描述了该广义集成框架。

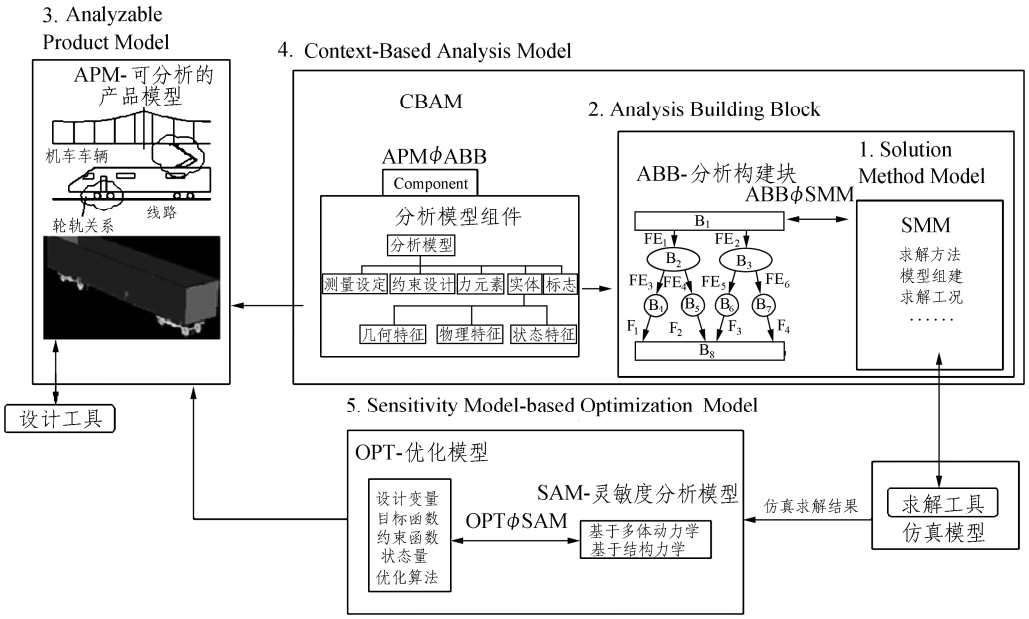

图 2-11 基于广义多描述架构（GMRA）的高速列车闭环设计

可分析的产品模型（APM）有效地描述了产品的设计模型，它被赋予了面向设计的属性以及面向多体系统动力学分析的关联属性，以支持动力学分析的信息需求，如刚体质量、惯量、位置、姿态、设计变量、状态变量和标志等属性。

分析构建块（ABB）通过组建动力学分析的基元特征，实现对产品用于动力学分析的描述。如产品的拓扑信息、约束类型和连接关系等。

基于上下文的分析模型（CBAM）通过设计分析关联规则，将 ABB 映射到 APM 以获得适于动力学分析的分析模型。包含外部接口调用、设计需求和设计目标。

求解方法集（SMM）描述多体系统动力学求解方法，支持 ADAMS、Simpack 等商业分析软件的计算输入与输出。结合多体系统理论与轮轨接触理论开发了一个多体系统求解器（GVDS），SMM 可以直接调用其求解。采用 ADAMS 对 GVDS 计算的准确性进行了验证。

灵敏度分析模型（SAM）作为设计与优化的桥梁，描述了设计参数对设计性能的影响程度。它定义了一般表达形式的模板，采用一阶伴随变量法将设计变量与分析结果相关联。

优化模型（OPT）定义了多体系统动态优化模型表达的通用模板，定义了目标函数、约束函数的处理方法库，定义了优化算法模板。

基于灵敏度分析的优化模型（SBOM）定义多种灵敏度模型的优化模型模板，集成了灵敏度目标函数、约束函数，优化算法。提供优化输入接口与输出接口，能调用外部优化计算工具和程序，支持灵敏度分析中的设计变量的选择以及优化数据向设计模型传递。

集成框架能够帮助设计开发人员以简单、直观的描述方法，快速生成各种假定方案，通过循环设计，自动进行性能分析，从而加快设计进程，减少迭代设计过程的时间和费用。

数据集成定义了产品的数据形式和内容，以解决不同模块之间的信息表示及交换的一致性问题。过程集成以显示的形式化的方式表示设计过程，能够体现设计的主要思想，如顺序控制、反馈迭代和优化等。

产品的数据模型主要描述产品的数据需求，如造型设计中的三维 CAD 信息的数据模型，动力学分析中的对输入、输出数据项的描述等。采用 STEP 标准的 EXPRESS 和 EXPRESS-G 语言建模。

```
SCHEMA    Top1
    ENTITY MARKER
            ID          INTEGER
            Name        STRING
            Position    REAL
            Dep         STRING
            LinkA       STRING
            LinkB       STRING
            …….
    END_ENTITY

    ENTITY Bogie
            ID          INTEGER
            Name        STRING
            Position    REAL
            Makers      STRING
            …….
    END_ENTITY

    ENTITY CarBody
            ID          INTEGER
            Name        STRING
            Position    REAL
            Makers      STRING
            …….
    END_ENTITY
END_SCHEMA
```

图 2-12　简化 EXPRESS 建模

虽然分析模型与仿真模型对产品模型描述的层次和粒度要求比设计模型低，但是分析模型绝不仅仅是一个简化的设计模型。设计模型主要关注产品的几何结构以及产品零部件的位置关系，而分析模型与仿真模型因具有不同的应用领域而具有非常广泛的定义。对设计模型、分析模型、仿真模型给出如下定义：

（1）设计模型：用于表达产品结构及其零部件相互之间位置关系的设计原型。

（2）分析模型：用于描述产品在某一分析领域性能关系的抽象表达，本研究中指高速列车的整机性能模型，建立在车辆动力学基础上。

（3）仿真模型：用于获得产品在某一分析领域性能的方法集，包括数学方程的自动组集、求解等，本研究中指获得高速列车动力学性能的方法集。

GMRA 采用 EXPRESS 和 EXPRESS-G 描述各对象模型，图 2-12 描述实体对象的基本属性，图 2-13 描述产品设计模型与分析构建块的映射关系。

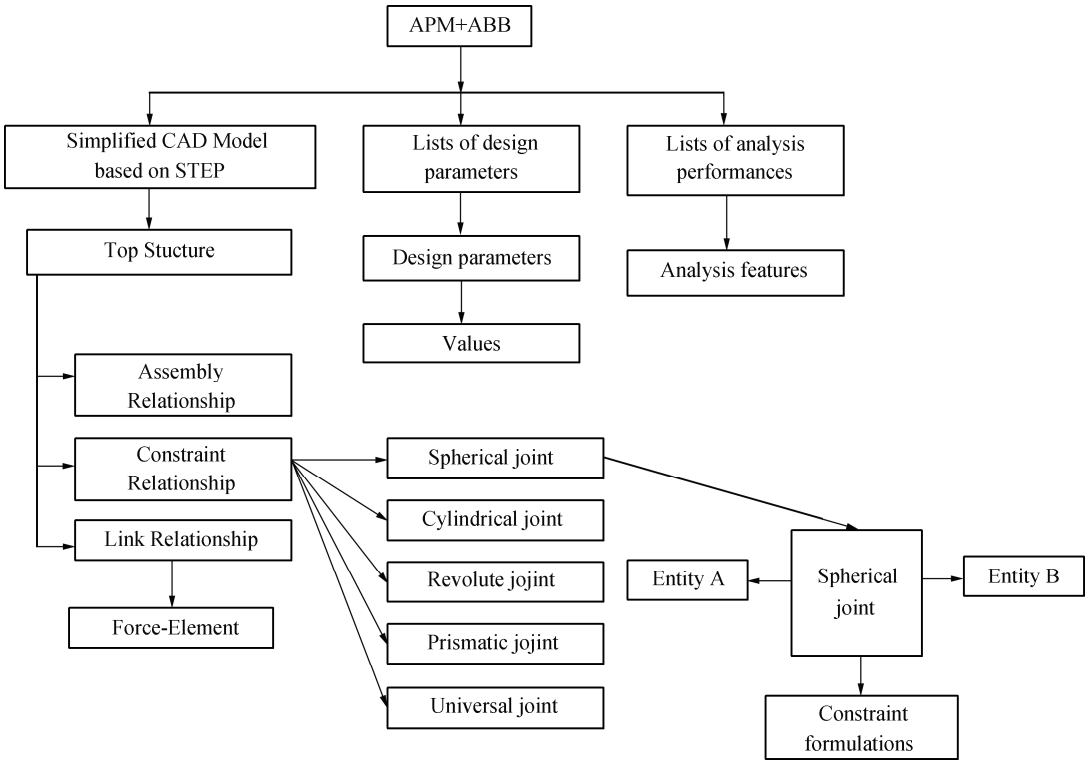

图 2-13　简化 EXPRESS-G 建模

2.3.4　基于特征的语义集成形式化表示

传统的 CAD 模型不能描述零部件之间的连接关系，即不能提供后续多体系统动力学分析需要的拓扑构型。通过对多体系统分析，可将连接关系特征化。特征就是为设计描述提供

一种产品及其设计过程属性描述的信息载体，它包含了设计过程中与产品相关的语义信息描述，反映零件的各种属性及其相应工程意义。

1．零部件几何位形特征

$$PF = \{FF, Q\}$$

PF——各部件的几何位形特征；

FF——零部件的几何实体特征元素，常见有长方体、圆柱体、棱柱体和球体等；

Q——各部件的位置和姿态，零部件的位姿，定义为映射到分析模型中时，相对于全局坐标系的位置和方向，采用基于欧拉四元数的笛卡儿坐标系描述。

2．连接关系特征

前面分析的各部件的位形特征，仅仅描述了各部件之间的相对几何位置关系，而对于各部件之间的连接关系需要用连接关系特征来表达。其连接关系特征包含的信息有：

（1）连接关系的类型：球铰连接、万向节连接、圆柱铰连接、旋转铰连接、棱柱铰连接、弹性连接、阻尼连接等。

（2）被连接部件几何位置关系：即前面描述的各部件位形特征，以及定义多体系统中的连接点。

（3）约束关系：指满足给定连接的需要满足的空间位置、姿态、尺寸等约束关系以及描述空间转动与平动的约束特征，这些可映射到连接关系里。

（4）物理特征：指各部件的基本物理特征，包括质量、体积等。

3．面向设计的分析模型

面向设计的分析模型，描述产品模型各层次关系、空间位形关系、拓扑关系、设计

参数及其约束关系、分析特征等信息的数据结构，它支持产品从概念设计到零部件设计的过程。

4．拓扑构型层次关系

一个拓扑构型是一组相互关联的部件和零件的组合，它以某种关系或约束进行连接与关联，主要有下面 4 个方面的信息需求：

（1）拓扑构型中各部件之间的层次关系，如车辆模型中，顶层是车体，然后是转向架、轮对，下面是轨道。

（2）拓扑构型中部件之间的位置、连接关系，如车辆模型中，各部件的质心位置关系，空气弹簧等连接。

（3）拓扑构型中部件之间的设计参数和设计约束的相互关系。

（4）部件自身的信息。

5．拓扑关系描述

拓扑关系是部件与部件之间几何位置关系、连接关系等的集合，用连接特征可以描述拓扑关系信息。

定义一：分析对象（AO，Analysis Object）是构建机械系统拓扑构型的基本体，可以是零件或部件。

定义二：连接特征（LF，Link Feature）是描述分析对象之间的连接关系，如力元连接，反映了两个分析对象的相对位置关系以及相对运动关系。

连接特征 LF 表示为：

$$LF=<BF(i), BF(j), R(i)>$$

$BF(i)$和 $BF(j)$——分析对象待连接的位置特征；

$R(i)$——分析对象的连接关系。

2.4 面向设计模型的高速列车设计、多体动力学分析集成描述

2.4.1 高速列车几何位形描述

所设计的产品在 CAD 建模中，主要关注产品的几何结构、外观造型，在产品进行实际生产制造之前，要采用虚拟样机技术进行产品的物理性能仿真与再设计。因此，在 CAD 模型向 CAE 模型映射过程中，必须首先定义空间坐标系，以描述设计模型中各个部件的相对位置关系。

针对高速列车研究的特殊性，为了方便研究，除需要按一般多体系统定义其空间绝对坐标系、随体坐标系外，还需要定义轨道坐标系，即在轨道上建立一个轨道坐标系。空间绝对坐标系，为静态坐标系，它是其他坐标系的绝对参考；随体坐标系，固结于刚体上，一般置于其质心处，随着刚体的运动而运动，是一个动坐标系；轨道坐标系定义了左、右轨以及轨道中心的空间位置与姿态。

以车辆系统为例，定义绝对坐标系为 X 轴指向车辆前进方向，Z 轴向上，根据右手笛卡儿法则，获得 Y 轴指向。车辆系统中各刚体随体坐标系的原点设在刚体的质心上，针对机车车辆的各个刚体的运动特性，并根据其习惯性命名为沿着 X，Y，Z 轴的 3 个平动分别称为伸缩、横摆和沉浮；绕 3 个坐标轴的旋转运动分别称为侧滚、点头和摇头，因此可以通过定义车辆系统中各刚体的质心位置以及关于各坐标轴的欧拉角来描述（车辆各部件在运动过程中，当欧拉角大于一定角度时，则表示已翻车，因此避免了欧拉角的奇异值点）。其位形阐述如图 2-14 所示。

```
SCHEMA    Top1
      ENTITY CARBODY
                ID          INTEGER
                Name        STRING
                MassC.X     REAL
                MassC.Y     REAL
                MassC.Z     REAL
                Ang.X       REAL
                Ang.Y       REAL
                Ang.Z       REAL
                …….
      END_ENTITY
                    …….
END_SCHEMA
```

图 2-14　车辆模型空间位形 EXPRESS 描述

2.4.2　机车车辆拓扑构型描述

高速列车作为组成列车的独立载体，其主体由车体、转向架、轮对和悬挂等部件组成，属于多体系统范畴。以某型车为例来进行描述，二系悬挂主要包括空气弹簧提供的 3 个方向的刚度和垂向阻尼、二系横向减振器提供的横向阻尼、抗蛇行减振器提供的纵向阻尼；一系悬挂主要包括轴箱弹簧提供的 3 个方向的刚度、轴箱定位装置提供的定位刚度、一系垂向减振器提供的垂向阻尼；同时还包括横向止挡和抗侧滚扭杆的作用。其简化平面模型如图 2-15 所示，其参数含义如表 2-1 所示。

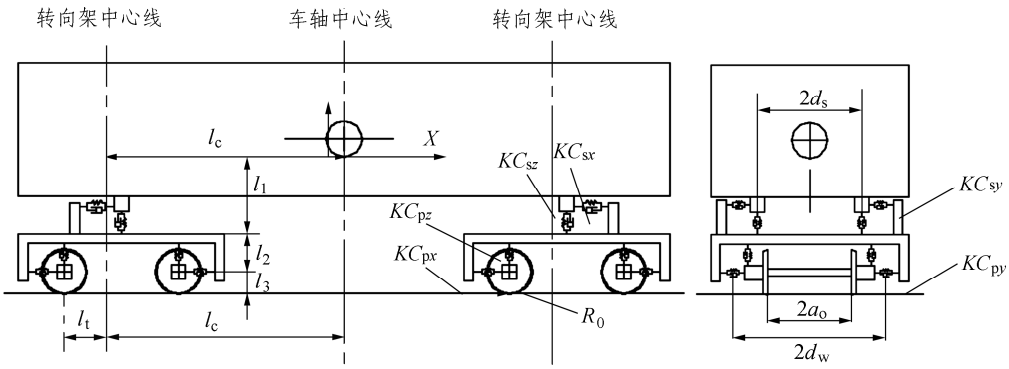

图 2-15　车辆平面模型

表 2-1　车辆平面模型参数说明

符号	名称及含义	单位
l_c	车辆定距之半	m
l_t	转向架轴距之半	m
l_1	二系弹簧上到车体质心距离	m
l_2	转向架质心到二系簧下的距离	m
l_3	一系弹簧下到转向架质心的距离	m
d_s	空气弹簧横向跨距之半	m
a_0	车轮滚动圆横向跨距之半	m
d_w	一系垂向悬挂横向跨距之半	m
R_0	车轮滚动圆半径	m
KC_{sx}	二系悬挂纵向刚度和阻尼	MN/m，kN·s/m
KC_{sy}	二系悬挂横向刚度和阻尼	MN/m，kN·s/m
KC_{sz}	二系悬挂垂向刚度和阻尼	MN/m，kN·s/m
KC_{px}	一系悬挂纵向刚度和阻尼	MN/m，kN·s/m
KC_{py}	一系悬挂横向刚度和阻尼	MN/m，kN·s/m
KC_{pz}	一系悬挂垂向刚度和阻尼	MN/m，kN·s/m

典型的车辆拓扑结构如图 2-16 所示，各部件通过悬挂系统及铰约束相连接，各部件之间相互作用。传统的轮轨系统是以约束形式建模，即轮对不能离开轨道，这样减少了轮对的自由度。而高速列车在实际运行过程中，轮对是可以短暂离开轨道的。因此，为了真实地反应轮轨之间的动态作用关系，轮轨之间不附加任何约束条件，仅以力的形式进行相互作用。

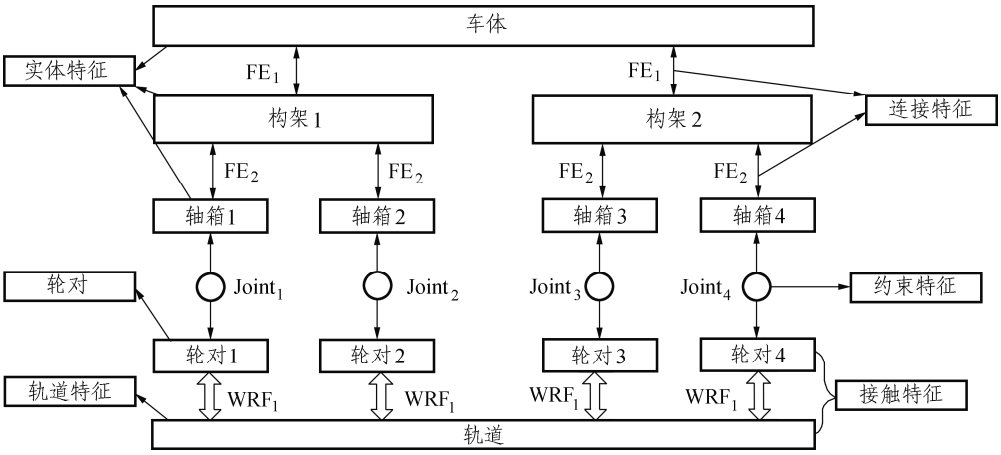

图 2-16　高速列车拓扑构型

在 CAD 建模过程中，通常是独立建立车体、转向架、轮对、悬挂装置，然后再进行装配构成车辆的设计模型。所建立的设计模型，仅仅是基于图形的实体表示，不具有分析属性（如质量、惯量等）和分析特征（如连接特征、约束特征等）。因此，当设计模型在进行向后续分析与再设计转换的过程中，必然要进行模型的抽取与映射，使其既能反应其外观特征，又能供后续潜在的不同领域的分析与应用。本章主要研究 HPDA 模型的子系统层，即动力学分析与优化层。因此，当获得的 CAD 模型向 CAE 模型进行拓扑结构映射时（APM-ABB），可以采用 EXPRESS-G 描述拓扑结构映射。拓扑结构映射过程如图 2-17 所示。

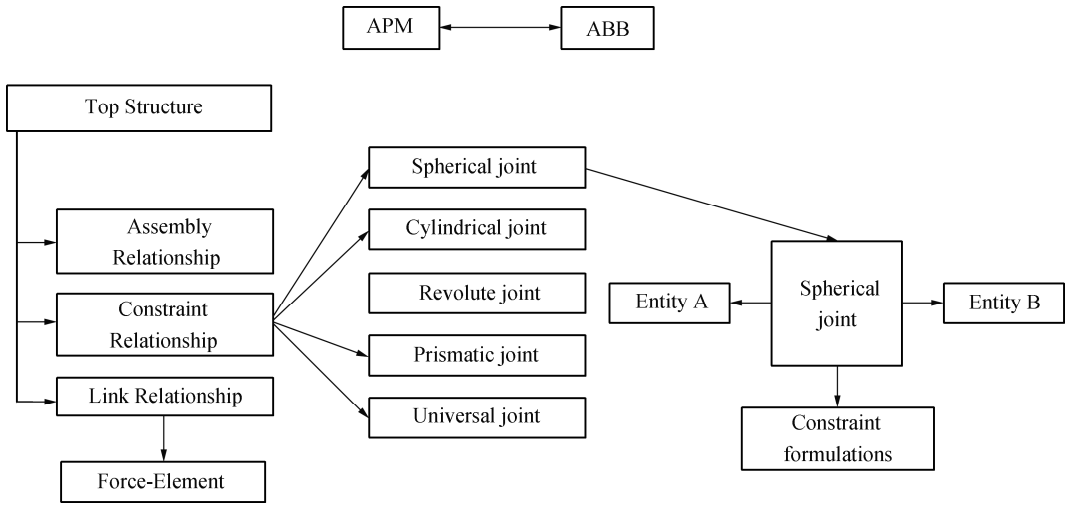

图 2-17　拓扑结构映射过程

不同领域的分析模型，由于其特有的复杂性，如果不进行模型的层次分解，很难在设计模型、分析模型、求解方法之间建立与之相对应的关系，这不仅导致了设计、分析人员无法理解其模型描述，也使计算机无法实现。因此，必须将模型分解到基本特征语素层次，其复杂的模型对应关系就可以通过基本特征建模语素以及层次分解之间的对应关系来描述。从图 2-16 可以看出，高速列车的拓扑构型主要由实体特征、连接特征、约束特征、轮轨接触特征和轨道特征等构成，因此必须对每个特征进行基于特征语素层的描述。

1．实体特征描述

高速列车的 CAD 模型主要关注各部件的几何、实体、结构尺寸，以及它们之间的装配关系。为了能进行后续的动力学分析，必须对各个部件（刚体）赋予具有动力学分析的物理属性，如质量、惯量、初始速度和角速度等，同时实体特征还包含了各几何部件的位形特征。如车辆系统中的车体由几何位形特征、质量、速度，以及其自身的几何特征构成，采用 EXPRESS 描述，如图 2-18 所示。

由于 EXPRESS 和 EXPRESS-G 具有面向对象的特性，如继承、派生等，因此，各个实体以及它们的属性之间有多种组合关系。

2．连接特征描述

高速列车主要由一系、二系悬挂将车辆系统各部件连接起来。因此，将悬挂元件分解为基本的悬挂特征进行分析。在一般多体系统领域，弹簧通常可以近似认为其特性曲线是线性的，但对于应用在高速列车中的空气弹簧、止挡、液压减振器、库仑摩擦来说，其特性曲线呈现非线性特征。要十分准确地描述其非线性特性是很困难的，因此，在建模过程中，必须

做一些简化处理。

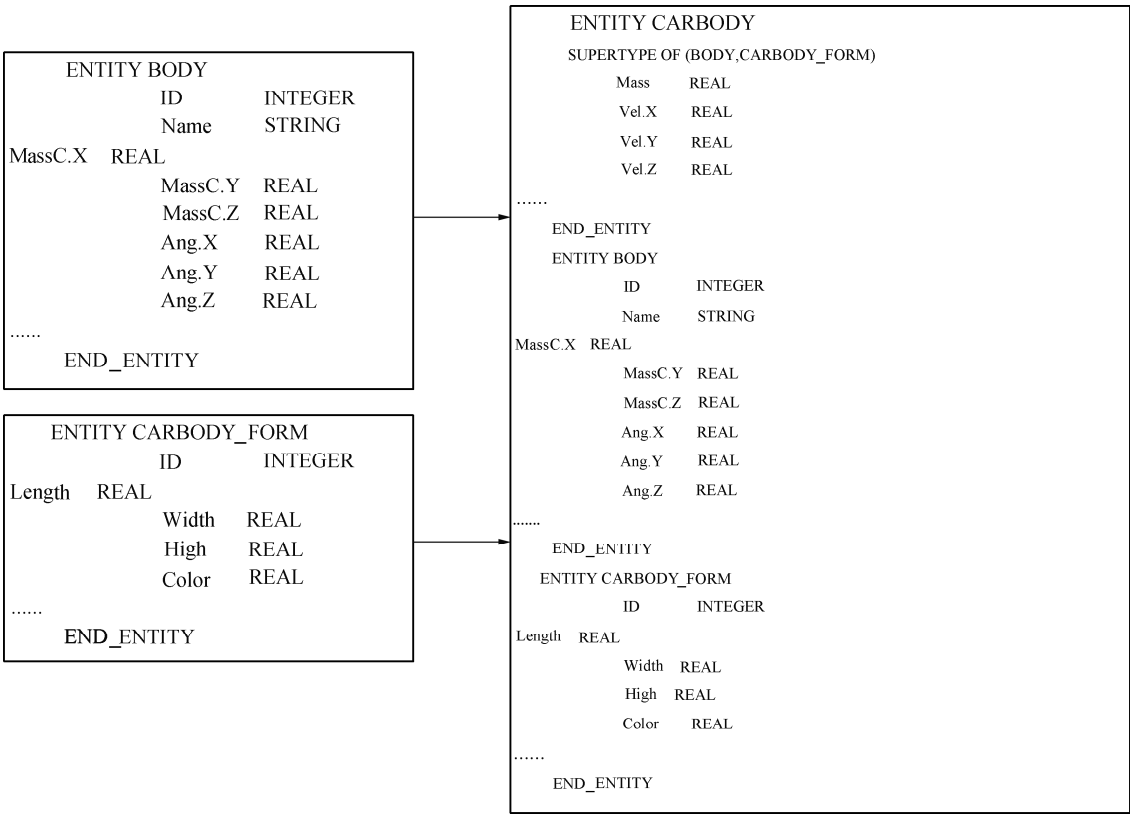

图 2-18　车体简化 EXPRESS 描述

为了比较准确地描述空气弹簧和减振器的分析特性，可以将这些悬挂元件的特性做成数表，在分析过程中，采用插值法来求得具体的数值，不过这种方法的存储量和计算量都比较大。通过分析其基本原理，采用分段线性化的处理方法如图 2-19 所示，以刚度为例的表示式为

$$K=\begin{cases}K_1 & |S|\leqslant S_1\\ K_2 & S_1\leqslant |S|\leqslant S_2\\ \vdots & \vdots\\ K_n & |S|>S_n\end{cases}$$

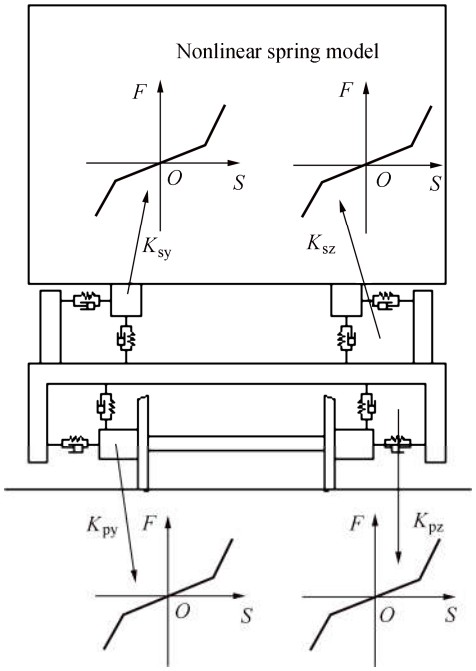

图 2-19　弹簧曲线的简化

式中，$S_1,S_2,\cdots,S_n$——区间端点位置坐标。

3．约束特征描述

刚体在绝对空间中有 6 个自由度，即 3 个平动和 3 个转动。通过定义铰约束连接的两个刚体其相对运动受到限制，如应用在高速列车中的轮对与轴箱的旋转铰约束，使轮对相对于轴只有一个转动自由度。由于刚体在空间的运动分为平动和转动，因此，相对平动约束可以用两个刚体上点的相对距离来描述，相对转动约束则可以以分别固结在两刚体上矢量的相对关系来描述，如正交、平行。因此，可以建立其基本的约束特征，然后通过组装这些基本的约束特征来描述（建模）各种不同类型的铰约束特性。

4．灵敏度分析特征描述

根据所建立的多体系统模型和灵敏度分析模型，考虑到灵敏度分析变量可以是刚体的质量、惯量、铰约束位置、弹簧刚度、阻尼系数、主动力大小、主动力作用位置等，以及灵敏

度分析求解过程需要计算相关量对系统状态量的微分，因此，对基元约束特征，进行面向灵敏度的基元分析特征建模，将系统广义力分解为惯性力和主动力，继续将主动力分解为集中力、集中力矩、弹簧-阻尼-作动器和扭簧-阻尼-作动器，并对它们相对前述设计变量、系统的状态进行基元微分信息建模。

高速列车运行时的轮轨接触状态严重制约车辆的运行品质，而轮对左、右轮的踏面形状以及轨道左、右轨的截面形状严重影响轮轨接触状态。因此，必须对轮轨接触计算模块中的轮对左右轮的踏面形状、轨道截面形状以及轮轨接触状态进行特征化建模。

5．轮对踏面描述

轮对作为高速列车的组成部件，除与车体等其他部件一样具有动力学分析属性外，根据高速列车轮轨接触特征，它还具有轮对左右轮踏面形状（几何）特征，并且这个踏面特征严重影响轮轨接触参数。轮对踏面是由每个轮的踏面曲线绕轮对中心轴旋转形成，根据踏面曲线的不同可以分为圆锥形踏面（TB），磨耗型踏面（LM），还有由其他任意曲线旋转形成的踏面。轮对踏面建模过程如图 2-20 所示，轮对的踏面曲线可以用两个参数来描述，通过 3 次样条插值，保证样条曲线二阶连续。

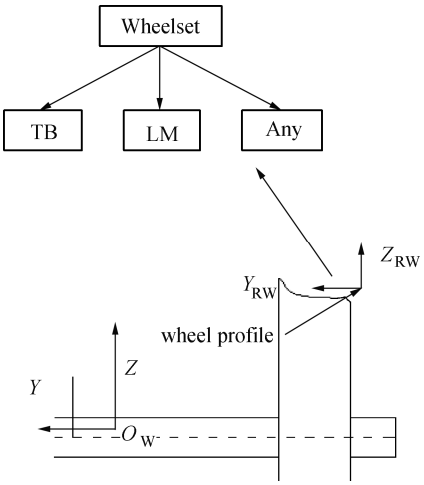

图 2-20　轮对踏面建模过程

因此，可以用轮对几何特征、实体特征与踏面特征来描述高速列车中的轮对，如图 2-21 所示。

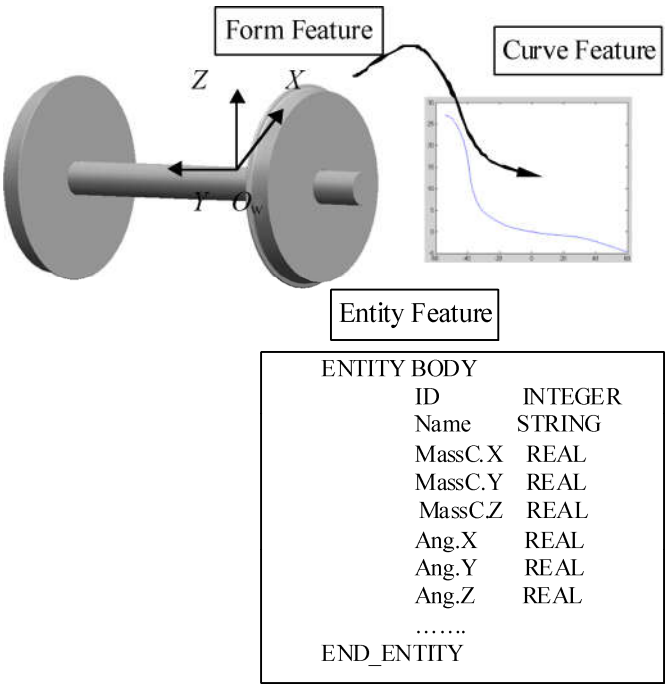

图 2-21　基于特征的轮对建模

6．轨道描述

轨道特征是高速列车不同于其他车辆的特性，轨道建模的准确性决定了车辆仿真结果的

可靠性。轨道不平顺性作为高速列车动力学品质分析的主要激励输入，对高速列车性能评估起着重要的影响作用。轨道一般由直线段、曲线段、缓和曲线段组成，具有左、右轨的接触特征。因此，轨道建模可由轨道线（左、右轨心线及轨道中心线）特征、轨道截面特征以及轨道不平顺特征来描述，如图 2-22 所示。

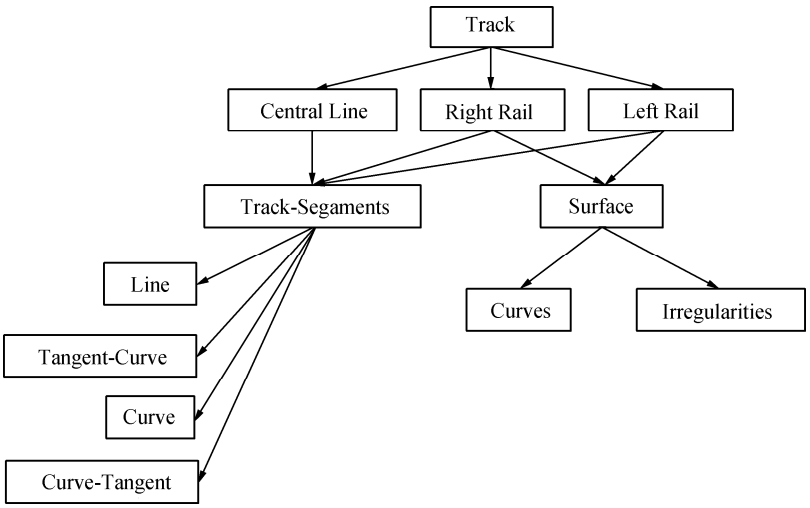

图 2-22　轨道描述简化 EXPRESS-G 图

轨道的截面建模与轮对踏面建模类似，采用两个参数描述。确定轨道激励类型后，通过傅里叶逆变换，将轨道谱的频域特性转换成计算所需的时域特性参数，然后附着在轨道的截面上，形成具有分析特征的轨道截面。

轨道的中心线、左右轨的空间曲线，通过直线、圆曲线及过渡曲线（3 次螺旋曲线）的数学表达式进行描述，形成具有分析特征的空间曲线。

具有分析特征的轨道截面沿着左、右轨空间曲线扫描获得具有分析特征的轨道。这些组成轨道 ABB 模型的过程如图 2-23 所示。

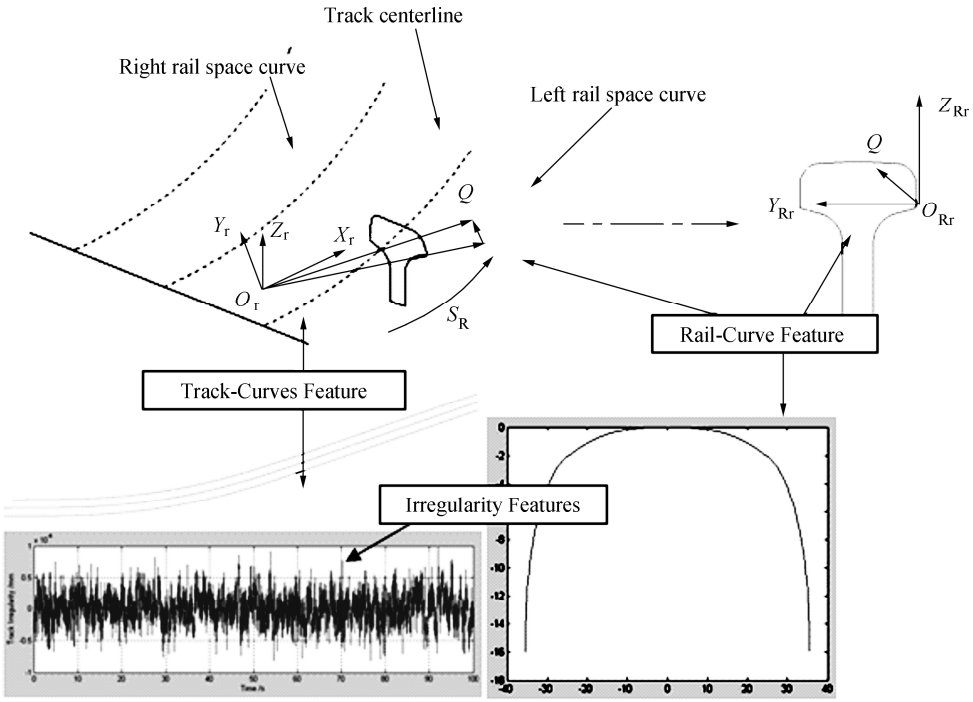

图 2-23　轨道的 ABB 模型

2.4.3　车辆描述

通过将高速列车系统各部件进行逐层分解，获得最基本的分析元素，建立具有分析特征的分析构建块。采用所提出的 HPDA 模型和 GMAR 架构，对复杂高速列车进行 CAD 到 CAE 集成描述。首先，根据系统层视图获得设计需求及相应的先验性数据模型，并在 CAD 环境中建立其初步的设计模型。基于 STEP 采用 EXPRESS 和 EXPRESS-G 描述车辆的 APM 模型到 ABB 模型的转化，由于 ABB 模型具有基元分析特征，因此，可以直接将 ABB 映射到 SMM 中，并利用所开发的高速列车计算包进行车辆的动力学性品质分析与计算。高速列车 APM 与 ABB 拓扑映射过程如图 2-24～图 2-26 所示。

通过子系统层，获得高速列车的整体性能数据、各个部件的物理参数、载荷及空间可达域等参数。根据子系统层获得的数据，可以进行下一层部件级的结构分析或疲劳分析。

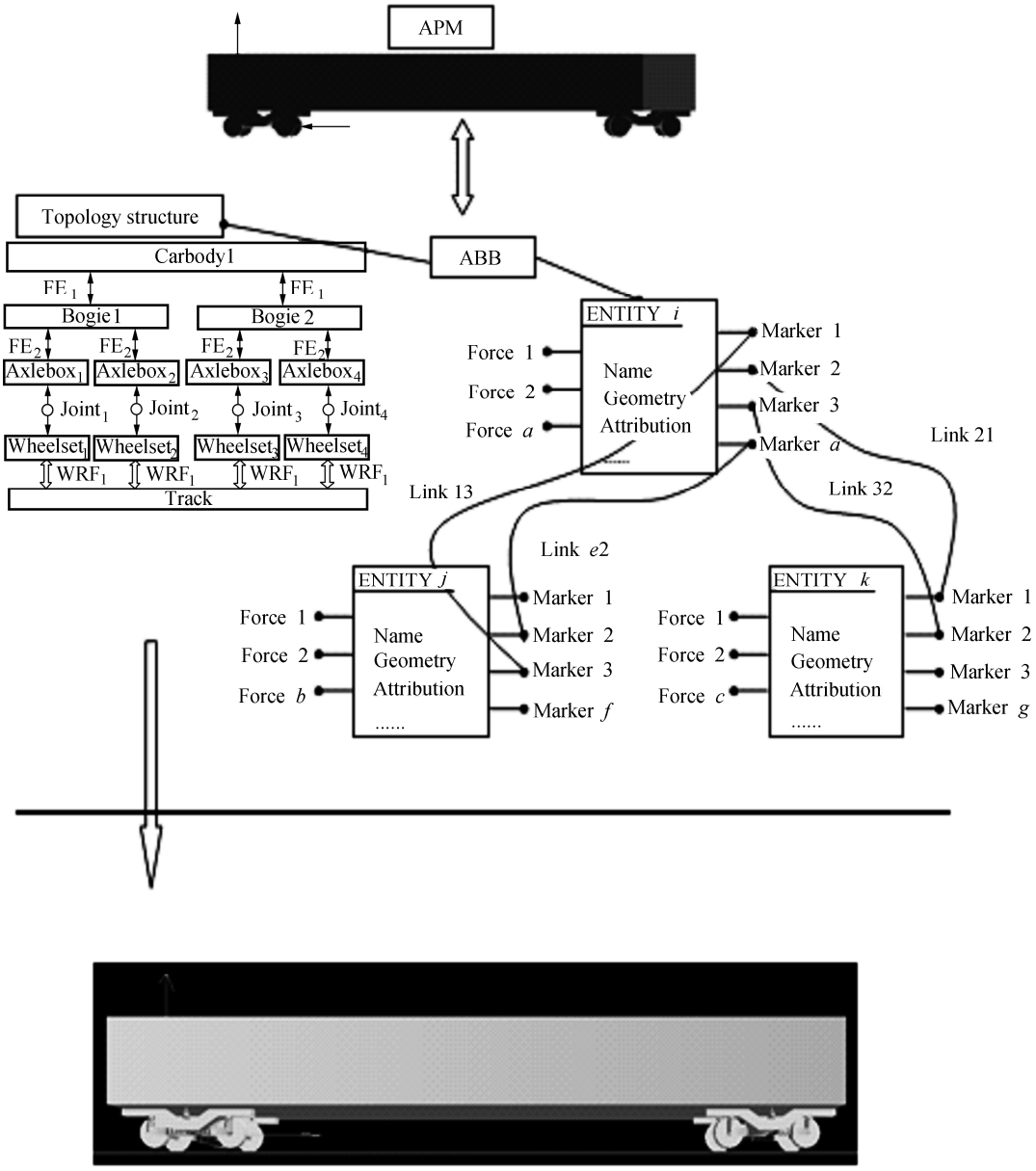

图 2-24　基于 EXPRESS-G 的车辆 APM 与 ABB 映射过程

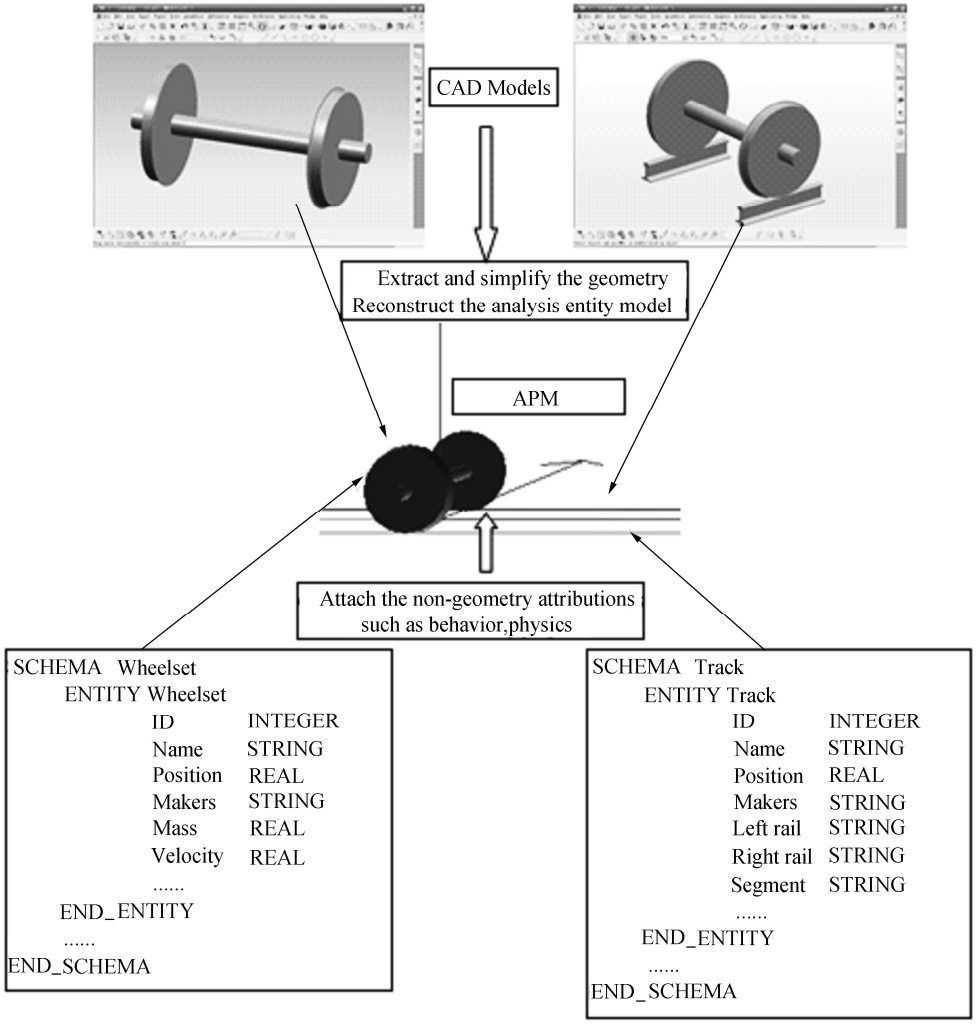

图 2-25　基于 EXPRESS 的车辆轮轨接触模型映射过程

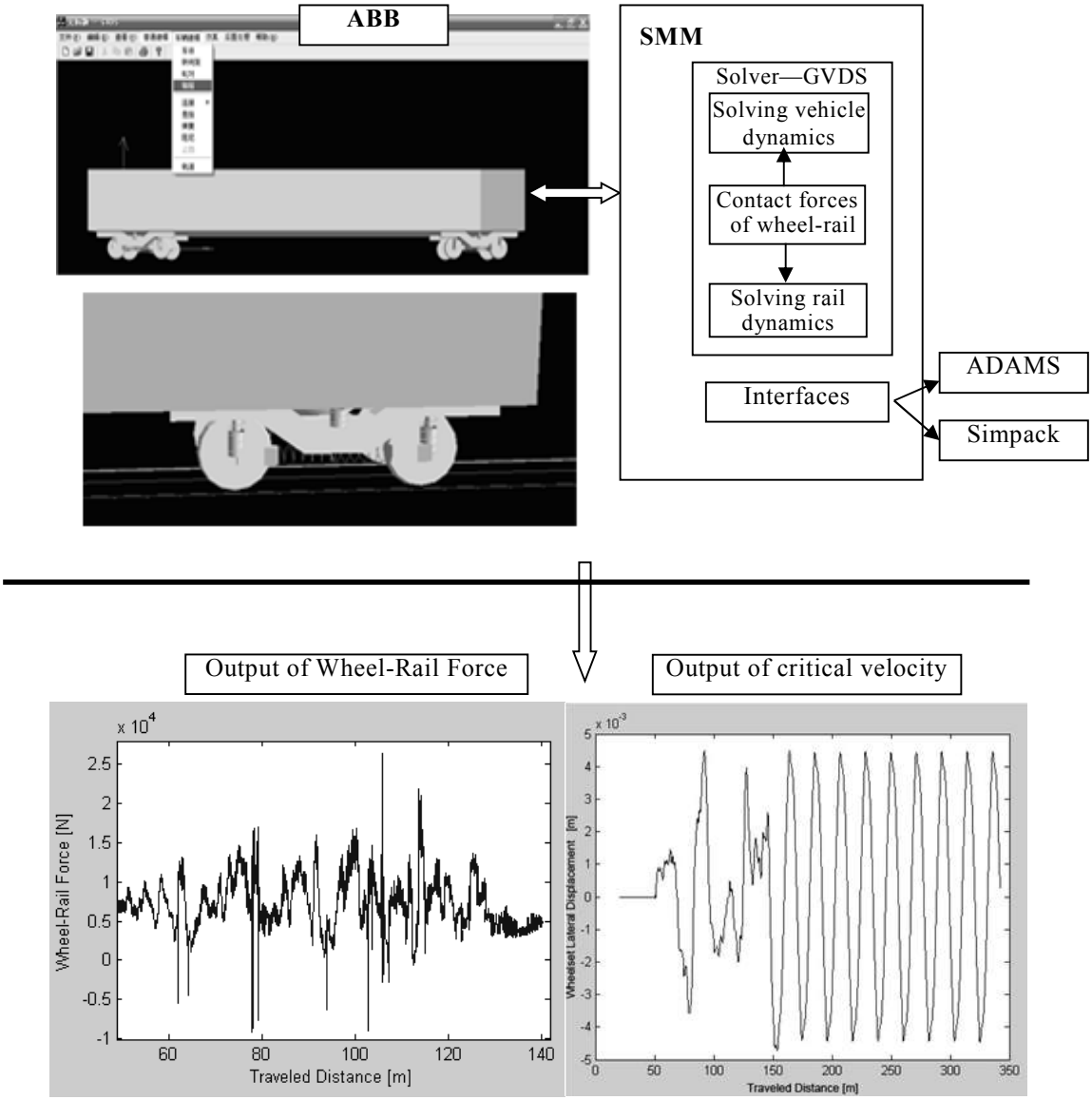

图 2-26　车辆 ABB 与 SMM 映射过程

2.5　本章小结

给出复杂机电系统设计、分析、优化集成闭环设计理论，进而针对高速列车的设计、分析、优化集成问题，提出相应的闭环设计理论，基于 MRA 架构，阐述具体集成的思路及方法，从而为高速列车的设计闭环和迭代提供指导。

参考文献

[1] 丁国富,何邕,邹益胜,等. 基于虚拟样机的产品设计进程反馈模型[J]. 西南交通大学学报,2008,43(3):367-372.

[2] Hamri O, Leon J C, Giannini F. Software environment for CAD/CAE integration[J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41: 1211-1222.

[3] Yang, D. Y., Ahn, D. G., Lee, C. H., Park, C. H., Kim, T. J. Integration of CAD/CAM/CAE/RP for development of metal forming process[J].Journal of Materials Processing Technology, 2002, 26-34.

[4] Kao, Y. C., Cheng, H. Y., She, C. H. Development of an integrated CAD/CAE/CAM system o taper-tipped thread-rolling die-plates[J]. Journal of Materials Processing Technology,2006,177,98-103.

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

[6] Martina D T, Falcidieno B, Habinger S.Design and Engineering Process Integration Through a Multiple View Intermediate Modeler in a Distributed Object-oriented System Environment[J]. Computer Aided Design, 1998, 30: 437-452.

[7] Sypkens S M, Bronsvoort W F. Integration of design and analysis models[J]. Computer-aided design and application, 2009, 6(6): 795-808.

[8] 季炳伟,潘双夏,冯培恩. 面向 CAD/CAE 集成的虚拟样机建模方法[J]. 农业机械学报,2006,37(3):95-99.

[9] 关振群,顾元宪,张洪武,等. 三维 CAD/CAE 一体化的参数化动态有限元建模[J]. 计算机集成制造系统,2003,9(12):1112-1119.

[10] 陈明,邓矢斧,朱睿,等. 基于 CATIA 平台的 CAD/CAE 集成[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(7):1078-1082.

[11] 丁国富,闫开印,张卫华,等. 面向虚拟样机设计的产品属性提取研究[J]. 计算机集成制造系统,2006,12(1):14-20.

[12] 丁国富,邹益胜,张卫华,等. 基于虚拟原型的机械多体系统建模可视化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(6):793-799.

[13] R. S. Peak,R. E. Fulton,A. Chandrasekhar,S. Cimtalay,M. A. Hale,D. Koo,L. Ma,A. J. Scholand, D.R.Tamburini, M.W.Wilson (Feb. 2, 1999b) Design-Analysis Associativity Technology for PSI, Phase IReport: Pilot Demonstration of STEP-based Stress Templates Georgia Tech Project E15-647, The Boeing Company Contract W309702.

[14] Peak, R. S. Product Model-Based Analytical Models (PBAMs): A New Representation of Engineering Analysis Models. Doctoral Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 1993.

[15] Peak R S, Fulton R E, Ichirou Nishigaki, Noriaki Okamoto. Integrating Engineering Design and Analysis Using a Multi Representation Approach[J]. Engineering with Computers, 1998, 14: 93-114.

[16] Diego Romano Tamburini. The Analyzable Product Model Representation to Support Design-Analysis Integration[R]. A Thesis presented to Academic Faculty, Georgia Institute of Technology, May 1999.

[17] Ding GF, He Y, Qin SF, Jia MW, Li R. A holistic product design and analysis model and its application in railway vehicle systems design[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2012, 27(1): 173-186.

[18] 王颋,丁国富,张卫华,等. 基于组件的虚拟原型下的多体动力学仿真研究[J]. 系统仿真学报,2006,18(3):643-648.

[19] 王颋，丁国富，张卫华，等. 基于组件的多体系统虚拟原型的分析模型研究[J]. 系统仿真学报，2006，18（4）：943-946，950.
[20] 何邕. 面向设计模型的铁道车辆动力学建模与灵敏度分析[D]. 成都：西南交通大学，2012.