

 同济大学研究生教材

# 轨道车辆设计

RAILWAY VEHICLE DESIGN

陆正刚 王文斌 编著



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

 同济大学研究生教材

# 轨道车辆设计

---

RAILWAY VEHICLE DESIGN

陆正刚 王文斌 编著

## 内 容 提 要

铁道车辆和城市轨道交通车辆设计是一个多学科集成和交叉的系统工程,同时又是一个多学科设计优化的过程,所设计的轨道车辆既需要满足现代轨道交通系统对产品高安全可靠、环境友好的性能要求,又要降低设计和制造成本,缩短研发周期。本书从轨道车辆的车体和转向架的结构设计出发,重点介绍疲劳可靠性、多学科设计优化、被动安全和数字化虚拟设计等现代设计理论和方法,以及在轨道车辆及零部件设计方面的应用。全书共7章,主要内容包括绪论、车体结构设计、环境友好型转向架设计、疲劳可靠性设计、被动安全设计、多学科设计优化及虚拟设计。

本书为轨道车辆及相关专业的研究生课程教材、本硕贯通一体化课程教材,也可以作为相关研究人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

轨道车辆设计/陆正刚,王文斌编著. --上海:同济大学出版社,2015.12

ISBN 978-7-5608-6115-9

I. ①轨… II. ①陆… ②王… III. ①轨道车辆—设计 IV. ①U270.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 298990 号

---

## 轨道车辆设计

陆正刚 王文斌 编著

责任编辑 李小敏

责任校对 徐春莲

封面设计 潘向葵

出版发行 同济大学出版社

www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 20.75

字 数 518 000

版 次 2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6115-9

定 价 68.00 元

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

# 前 言

铁道和城市轨道交通车辆,无论是机车、高铁动车组、城市轨道交通车辆还是现代有轨电车均是机、电、控制一体化和信息技术相结合的高技术、高安全产品,集成度高、复杂程度大。从概念、设计、零部件试验、整车装配和性能测试到最终产品的确认全过程开发周期长、试验成本巨大,而运用过程性能优劣和零部件的疲劳和可靠性预测和防治更需要长时间的数据积累。

现代轨道车辆的性能要求可以从安全可靠(包括运行稳定性和安全性、结构强度与疲劳、系统可靠性等)、舒适性(包括动力学性能、车内噪声等)、低能耗(包括牵引系统优化、节能电机、再生制动、低运行阻力车体与转向架、节能技术等)和环境友好(包括低噪声设计、低振动传递、绿色设计、环保材料使用等)等四大方面来描述,因此轨道车辆的设计过程是一个多学科交叉的系统工程,包括动力学、有限元、疲劳可靠性、被动安全、空气动力学、NVH、材料等不同学科及学科交叉,同时又是一个多学科集成和优化的过程。

本书将轨道车辆的性能设计要求与现代设计理论和方法结合在一起,一方面重点介绍疲劳可靠性设计、被动安全设计、多学科设计优化、数字化虚拟设计等现代设计理论和方法;另一方面以轨道车辆的车体、转向架及零部件结构和性能设计为导向,提出轨道车辆基于安全可靠、环境友好、多学科设计优化的设计方法和数字化设计平台。

本书重点介绍近年来国内外在现代设计理论和方法领域的理论、方法,轨道车辆设计方面的工程实例,以及编著者和研究团队近年来的研究成果。通过设计理论与工程实际的结合及案例分析来提升学生在轨道车辆设计方面的理论水平和解决工程设计的能力。

本书由同济大学陆正刚、王文斌编著。具体包括:陆正刚负责第1章绪论,第3章环境友好型转向架设计,第6章多学科设计优化,第7章虚拟设计以及第4章的第6节等;王文斌负责第2章车体结构设计,第4章疲劳可靠性设计的第1~5、7节,第5章被动安全设计等。在编写过程中,我们还得到了相关单位、行业专家、老师和研究生的支持,在此一并表示感谢。

本书的不少内容借鉴了国内外相关教材,也融入了近年来的研究成果,限于作者水平,难免有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

# 目 录

## 前言

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 1 章 绪论               | 1  |
| 1.1 机车车辆产品设计演变         | 1  |
| 1.1.1 机车               | 1  |
| 1.1.2 客车和动车组           | 4  |
| 1.1.3 货车               | 6  |
| 1.2 轨道车辆设计基本原则         | 8  |
| 1.2.1 车辆设计总体原则         | 8  |
| 1.2.2 车体设计原则           | 9  |
| 1.2.3 转向架设计原则          | 9  |
| 1.3 现代设计理论和方法          | 11 |
| 1.3.1 优化设计             | 13 |
| 1.3.2 疲劳可靠性设计          | 14 |
| 1.3.3 虚拟设计             | 14 |
| 1.3.4 创造性设计            | 16 |
| 1.3.5 现代设计方法在产品开发中的重要性 | 16 |
| 1.4 轨道车辆现代设计方法         | 16 |
| 参考文献                   | 17 |
| 第 2 章 车体结构设计           | 18 |
| 2.1 车辆强度设计内涵及其技术进展     | 18 |
| 2.1.1 车辆强度设计的内涵        | 18 |
| 2.1.2 轨道车辆结构设计与分析技术的进展 | 20 |
| 2.2 客车车体设计             | 21 |
| 2.2.1 设计规范概述           | 21 |
| 2.2.2 作用在车体上的载荷        | 22 |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 2.2.3 应力评定 .....                | 29 |
| 2.2.4 车体刚度评定 .....              | 31 |
| 2.2.5 振动模态 .....                | 32 |
| 2.2.6 客车强度标准的发展趋势 .....         | 33 |
| 2.2.7 轨道车辆车体结构的有限元模型及计算实例 ..... | 34 |
| 2.3 货车车体设计 .....                | 36 |
| 2.3.1 设计规范概述 .....              | 36 |
| 2.3.2 车辆基本作用载荷(或力)及其组合 .....    | 36 |
| 2.3.3 应力评定 .....                | 40 |
| 2.3.4 AAR 标准与我国标准的比较 .....      | 40 |
| 2.4 低阻力车体设计 .....               | 41 |
| 2.4.1 列车车体空气动力学问题 .....         | 41 |
| 2.4.2 高速列车外形设计 .....            | 44 |
| 2.5 轻量化车体设计 .....               | 47 |
| 2.5.1 车体轻量化的必要性 .....           | 47 |
| 2.5.2 轻金属材料的选择 .....            | 47 |
| 2.5.3 新型轻质结构材料及其在车体结构中的应用 ..... | 51 |
| 2.5.4 结构优化设计理论 .....            | 53 |
| 2.5.5 车体结构优化实例——磁浮车车体结构优化 ..... | 55 |
| 参考文献 .....                      | 58 |

### 第3章 环境友好型转向架设计 .....

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 3.1 转向架基本型式、功能和组成 .....     | 59 |
| 3.1.1 转向架基本型式 .....         | 59 |
| 3.1.2 转向架功能 .....           | 61 |
| 3.1.3 转向架组成 .....           | 61 |
| 3.2 转向架基本性能要求和设计规范 .....    | 71 |
| 3.2.1 转向架基本性能要求 .....       | 71 |
| 3.2.2 转向架设计规范 .....         | 71 |
| 3.2.3 转向架设计基本准则 .....       | 73 |
| 3.3 低阻力径向转向架设计 .....        | 76 |
| 3.3.1 径向转向架基本概念与动力学原理 ..... | 77 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 3.3.2 径向转向架基本型式 .....        | 83         |
| 3.3.3 国内外低阻力径向转向架实例 .....    | 86         |
| 3.3.4 径向转向架设计原则 .....        | 90         |
| 3.4 低噪声转向架设计 .....           | 91         |
| 3.4.1 轮轨系统噪声及限制标准 .....      | 91         |
| 3.4.2 轮轨滚动噪声分析 .....         | 100        |
| 3.4.3 降低轮轨滚动噪声技术 .....       | 109        |
| 3.5 转向架弹性及减振元件设计 .....       | 122        |
| 3.5.1 金属-橡胶复合弹簧 .....        | 122        |
| 3.5.2 磁流变液减振器 .....          | 134        |
| 3.5.3 位移选择型减振器 PDD .....     | 143        |
| 3.5.4 频率选择型减振器 FSD .....     | 146        |
| 参考文献 .....                   | 147        |
| <b>第 4 章 疲劳可靠性设计 .....</b>   | <b>149</b> |
| 4.1 疲劳破坏与疲劳设计 .....          | 149        |
| 4.1.1 疲劳破坏的特点 .....          | 149        |
| 4.1.2 疲劳破坏过程 .....           | 150        |
| 4.1.3 疲劳设计方法 .....           | 151        |
| 4.2 疲劳载荷谱 .....              | 152        |
| 4.2.1 疲劳载荷及其分类 .....         | 152        |
| 4.2.2 随机疲劳载荷的处理及编谱 .....     | 152        |
| 4.3 材料强度-寿命曲线 .....          | 154        |
| 4.3.1 疲劳应力循环 .....           | 154        |
| 4.3.2 S-N 曲线 .....           | 154        |
| 4.3.3 $\epsilon$ -N 曲线 ..... | 155        |
| 4.3.4 循环应力-应变曲线 .....        | 156        |
| 4.4 疲劳寿命分析 .....             | 157        |
| 4.4.1 疲劳寿命评估方法 .....         | 157        |
| 4.4.2 疲劳累积损伤理论 .....         | 162        |
| 4.4.3 疲劳寿命分析流程 .....         | 165        |
| 4.5 疲劳强度与寿命评定 .....          | 168        |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 4.5.1 应力应变疲劳寿命估算法 .....        | 168        |
| 4.5.2 等效应力幅评估法 .....           | 168        |
| 4.5.3 疲劳极限线图法 .....            | 169        |
| 4.6 基于标准的疲劳寿命评估方法 .....        | 170        |
| 4.6.1 基于 AAR 标准 .....          | 170        |
| 4.6.2 基于 FKM 标准 .....          | 171        |
| 4.6.3 基于 IIW 标准 .....          | 174        |
| 4.7 车体结构疲劳寿命分析实例 .....         | 175        |
| 参考文献 .....                     | 177        |
| <b>第 5 章 被动安全设计</b> .....      | <b>178</b> |
| 5.1 车辆被动安全技术概述及耐撞击安全性能评价 ..... | 178        |
| 5.1.1 车辆被动安全技术概述 .....         | 178        |
| 5.1.2 轨道车辆耐撞击安全性能评价标准 .....    | 181        |
| 5.2 车辆被动安全系统组成及设计 .....        | 182        |
| 5.2.1 车辆碰撞的能量 .....            | 182        |
| 5.2.2 车辆被动安全系统的设计及其组成 .....    | 183        |
| 5.3 轨道车辆撞击吸能元件及装置 .....        | 186        |
| 5.3.1 吸能元件及结构的原理和要求 .....      | 186        |
| 5.3.2 薄壁圆管轴向碰撞吸能特性 .....       | 187        |
| 5.3.3 防爬器 .....                | 188        |
| 5.4 乘员二次碰撞安全防护 .....           | 190        |
| 5.4.1 撞击伤害及其影响因素 .....         | 190        |
| 5.4.2 乘员碰撞安全防护设计 .....         | 192        |
| 5.5 车辆碰撞仿真和试验技术 .....          | 193        |
| 5.5.1 车辆碰撞仿真分析技术 .....         | 193        |
| 5.5.2 车辆碰撞试验技术 .....           | 197        |
| 5.6 设计分析案例 .....               | 200        |
| 5.6.1 地铁车辆耐碰撞仿真分析 .....        | 200        |
| 5.6.2 高速动车组 .....              | 203        |
| 参考文献 .....                     | 209        |



|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第 6 章 多学科设计优化                 | 210 |
| 6.1 优化设计方法                    | 210 |
| 6.1.1 优化问题基本概念                | 210 |
| 6.1.2 优化问题分类                  | 211 |
| 6.1.3 优化方法                    | 212 |
| 6.2 无约束问题的优化方法                | 214 |
| 6.2.1 基于导数的优化算法               | 214 |
| 6.2.2 非导数的优化算法                | 216 |
| 6.3 约束问题的优化方法                 | 220 |
| 6.4 多学科设计优化                   | 221 |
| 6.4.1 多学科设计优化起源与发展            | 221 |
| 6.4.2 多学科设计优化理论               | 223 |
| 6.4.3 多学科设计优化平台 OPTIMUS       | 234 |
| 6.5 案例分析:基于多学科设计优化的高速轮对车轮型面镟修 | 238 |
| 6.5.1 问题提出                    | 238 |
| 6.5.2 车轮型面镟修多学科设计优化数学模型       | 239 |
| 6.5.3 优化镟修算例                  | 242 |
| 6.5.4 优化镟修后对车辆动力学性能的影响分析      | 244 |
| 参考文献                          | 245 |
| 第 7 章 虚拟设计                    | 246 |
| 7.1 虚拟设计与虚拟样机                 | 246 |
| 7.1.1 需求样机                    | 249 |
| 7.1.2 概念样机                    | 249 |
| 7.1.3 工程样机                    | 249 |
| 7.1.4 最终原型样机                  | 250 |
| 7.2 虚拟设计与虚拟现实                 | 253 |
| 7.3 轨道车辆虚拟样机建模与仿真             | 257 |
| 7.3.1 多体系统动力学基础               | 257 |
| 7.3.2 多体系统动力学虚拟样机建模与仿真        | 275 |
| 7.3.3 机械-控制系统虚拟样机建模与仿真        | 284 |
| 7.3.4 参数化建模与优化分析              | 288 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 7.4 轨道车辆虚拟设计仿真平台 .....    | 291 |
| 7.4.1 平台开发意义和必要性 .....    | 291 |
| 7.4.2 平台总体架构 .....        | 293 |
| 7.4.3 平台组织架构及配置 .....     | 294 |
| 7.4.4 轮轨接触几何和虚拟镟修模块 ..... | 296 |
| 7.4.5 全参数化车辆多体动力学模型 ..... | 300 |
| 7.4.6 动力学仿真模块 .....       | 307 |
| 7.4.7 FEA 静强度分析模块 .....   | 316 |
| 7.4.8 疲劳分析模块 .....        | 318 |
| 7.4.9 虚拟现实功能模块 .....      | 320 |
| 7.4.10 平台工程应用 .....       | 320 |
| 参考文献 .....                | 321 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 机车车辆产品设计演变

### 1.1.1 机车

从 1804 年英国人德里维斯克改进瓦特的蒸汽机造出了一台货运蒸汽机车开始,铁路运输从最初的马车牵引转变为蒸汽动力牵引。铁路机车的 200 多年发展历史,经历了从蒸汽机车、内燃机车、电力机车的不同动力集中驱动方式到目前高速列车的动力分散的电动车组,列车的速度从最初的每小时几公里,发展到超过 500 km/h 的轮轨驱动的最高纪录。

1810 年,英国人史蒂文森开始自己动手制造蒸汽机车,到 1814 年他的“布鲁克”号机车开始运行,这台机车有两个汽缸、一个 2.5 m 长的锅炉,装有凸缘的车轮可以拉着 8 节矿车载重 30 t,以 6.4 km/h 的速度前进。1825 年从达灵顿到斯托克顿的铁路建成通车,两根轨道之间的距离为 1 435 mm,这是世界上第一条采用机车牵引并同时办理客运和货运业务的铁路。图 1-1 为现存的最早的蒸汽机车。

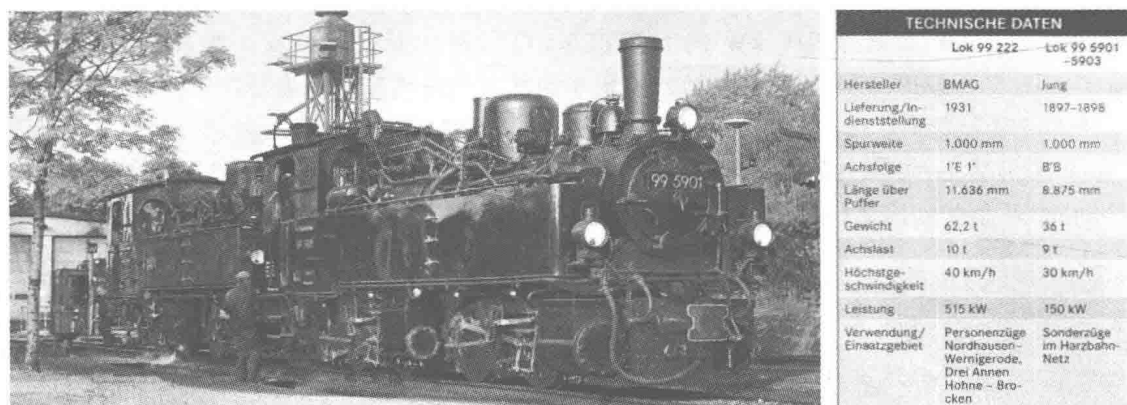


图 1-1 现存的最早的蒸汽机车(1897 年)

在随后的几十年中,蒸汽机车虽然得到广泛应用,但也存在着许多难以克服的缺点,比如运送的煤的 1/4 被机车自己“吃掉”了,每行驶 80~100 km 就要加水,行驶 200~300 km 就要加煤,行驶 5 000~7 000 km 还要洗炉,在行驶中要排放黑烟,污染环境,尤其是在过山洞时,浓烟难以散出去,影响旅客和车上工作人员的健康,正是由于这些原因,曾经辉煌一时的蒸汽机车开始退出历史舞台,逐渐被新一代的电力机车和内燃机车所取代。

1879 年,德国人西门子制造出一台小型电力机车,由 150 V 直流发电机供电。1890 年,英国的电力机车正式用于营业;美国于 1895 年开始将电力机车应用于干线运输;以后德国、日本相继研制出了实用的电力机车,从此,电气化铁路迅速发展起来。目前电力机车的牵引功率可达 6 400 kW, 7 200 kW, 9 600 kW,图 1-2 为西门子公司 2010 年生产的牵引功率 6 400 kW 的 Vectron 电力机车。

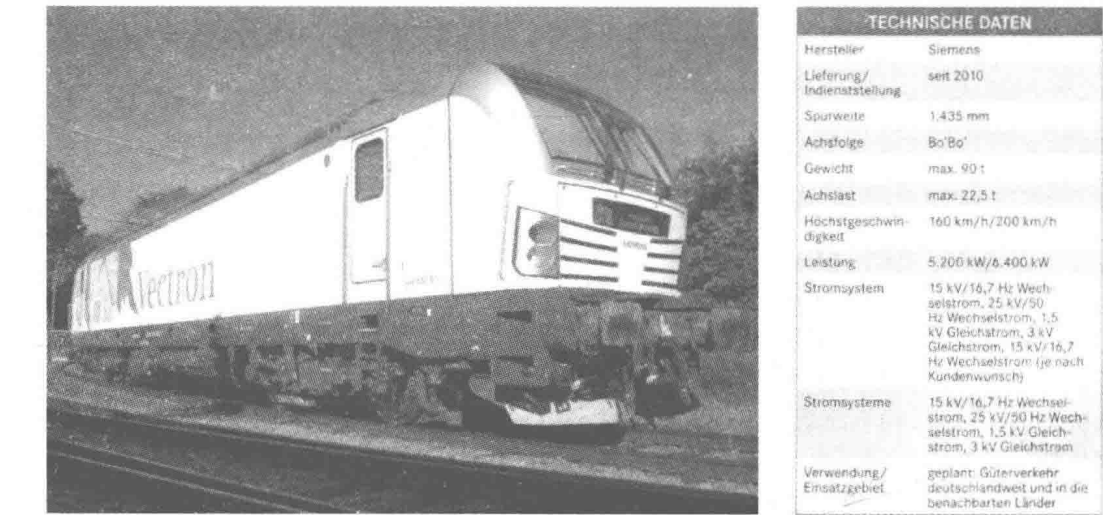


图 1-2 西门子公司生产的 Vectron 电力机车(2010 年)

20 世纪初,美国通用电气公司组装了一辆汽油机车,用内燃机带动发电机,再通过发电机带动电动机,推动机车前进。柴油机发明后,由于它的经济性好,很快在铁路得到广泛应用。

1925 年,美国新泽西州的中央铁路使用了第一辆 220 kW 的小型柴油机机车。后来很快出现了 2 574 kW 甚至 5 516 kW 的大型机车,可以牵引超过 5 000 t 的货物,速度高达 145 km/h。特别是第二次世界大战后,柴油机车的性能和制造技术迅速提高,功率增加了近一倍,并逐渐向大功率发展,加之石油价格低廉,促进了内燃机车的发展。美国、英国、加拿大等国都在 10 年左右的时间内实现了内燃机车化。图 1-3 为美国通用公司(GE)生产的 ND5 和 AC6000CW 型柴油内燃机车。



图 1-3 美国 GE 公司生产的 ND5 内燃机车和 AC6000CW 型柴油机车

最早的动车出现在 1906 年,是英国人制造的一台电传动 150 kW 汽油动车,可坐 91 人,

并带有行李间,用于不繁忙地段。到了20世纪二三十年代,柴油动车发展迅速,随着动车功率的增大,人们开始在动车后面加挂一节或几节轻型无动力车辆,形成动车组。

中国从1952年开始自制蒸汽机车,1958年开始自制内燃机车,1960年开始自制电力机车。目前,中国铁路开始了向高速重载发展的新时期。随着大秦重载铁路万吨重载列车的开行,我国还自行研制了时速超过170 km/h的SS9型电力机车和DF11G型内燃机车。主要干线在提速至160 km/h的基础上向更高速度迈进。

ND5型机车是美国通用电器公司(GE)运输系统商业分公司制造的交一直流电力传动干线客、货运内燃机车(图1-3a)。柴油机装车功率为2 942 kW,机车整备重量为138 t,构造速度为118 km/h,通过最小曲线半径为85 m,能够多机重联牵引。

美国通用电气公司为北美市场提供的“创新”系列柴油机车和AC6000CW型柴油机车(图1-3b)。牵引功率为4 474 kW,在此基础上,中国南车集团戚墅堰机车有限公司及美国通用电气公司(GE)共同研制了HXN5型柴油机车(图1-4a),2009年投入运用。该型机车是根据中国铁路技术规范改进设计而成6 000 HP交流传动货运柴油机车,机车轴式Co-Co,轴重为25 t,采用单司机室外走廊车架承载结构车体、GEVO-16电子喷射柴油机、IGBT牵引变流器、CCA微机控制系统等技术,可在平直线路上单机牵引5 000 t货运列车,最高运行速度为120 km/h。

青藏线用DF8B内燃机车是以目前国内干线装车功率最大的重载牵引货运内燃机车——东风8B型机车为基础,进行高原适应性设计改进,满足青藏线内燃机车在海拔5 100 m处机车功率不小于2 700 kW的技术要求。同时为了适应青藏高原地理环境特点机车采用许多新技术、新结构,如:司机室玻璃采用防紫外线镀膜玻璃,并在司机室顶部后端设有制氧机,供司乘人员使用;为满足机车电机、电器在高海拔地区使用,进行了相应的高原适应性设计改进,蓄电池选用低温性能好的超高倍率碱性蓄电池。冷却水系统采用加压冷却,减振垫采用低温性能好、抗辐射的橡胶减振垫,同时机车增设防雷设施等新技术(图1-4b)。



(a) HXN5型货运内燃机车(2009年)



(b) DF8B高原内燃机车(2008年)

图1-4 中国21世纪制造的内燃机车

近年来,中国的电力机车技术发展迅速,HXD2B型机车是中国北车集团大同电力机车有限责任公司与法国阿尔斯通公司联合研发。其设计以阿尔斯通PRIMA6000机车为原型车。HXD2B型机车采用中间走廊,整体独立通风系统,分布式微机控制系统,实现逻辑控制与自诊断功能,IGBT功率模块变流器,异步牵引电动机,牵引电机采用滚动抱轴式悬挂装置,牵引

控制装置采用独立轴控方式,单轴功率为 1 600 kW,总功率 9 600 kW,可牵引 8 000 t 货运列车,最大运行时速达 120 km/h(轴式 Co-Co,图 1-5b)。



(a) SS9 型电力机车(2001 年)



(b) HXD2B 电力机车(2009 年)

图 1-5 中国 21 世纪制造的电力机车

典型的中国机车型式及主要参数如表 1-1 所示。

表 1-1 典型的中国机车型式及主要参数

| 型号     | HXD2B             | SS9 型             | DF11        | DF8B(高原型)                                  | HXN5          |
|--------|-------------------|-------------------|-------------|--------------------------------------------|---------------|
| 电力种类   | 电力                | 电力                | 内燃/客运       | 内燃/客、货运                                    | 内燃/货运         |
| 设计制造   | 阿尔斯通-大同           | 中国株洲              | 中国戚墅堰       | 中国戚墅堰                                      | 美国-中国         |
| 建造年份   | 2009 年            | 2001 年            | 1991 年      | 2008 年                                     | 2009 年        |
| UIC 轴式 | Co-Co             | Co-Co             | Co-Co       | Co-Co                                      | Co-Co         |
| 轨距     | 1 435 mm          | 1 435 mm          | 1 435 mm    | 1 435 mm                                   | 1 435 mm      |
| 电力系统   | 交流<br>25 kV/50 Hz | 交流<br>25 kV/50 Hz | 交一直流<br>电传动 | 交一直流电传动<br>齿轮传动比 77/17                     | 交一直一交流<br>电传动 |
| 最高速度   | 120 km/h          | 170 km/h          | 160 km/h    | 100 km/h                                   | 120 km/h      |
| 输出功率   | 9 600 kW          | 5 400 kW          | 3 040 kW    | 海拔 5 100 m:2 700 kW<br>海拔 2 800 m:3 400 kW | 4 003 kW      |
| 轴重     | 23 t              | 21 t              | 23 t        | 23 t                                       | 25 t          |

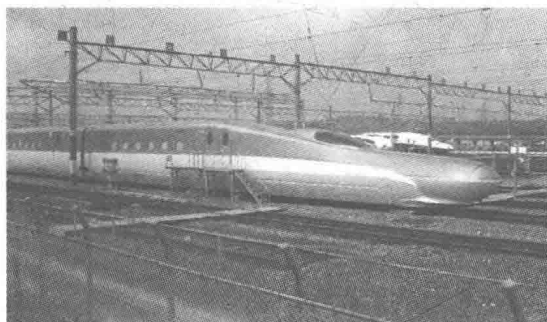
1.1.2 客车和动车组

铁路以其快速、安全、节能和环保等特点,一直是人类最为重要的交通运输工具之一。为了增强铁路与公路、水运和航空运输竞争的能力,必须提高旅客列车的运行速度,缩短旅行时间,改善乘车条件,保证行车安全,制造出轻、快、稳的铁路客车。

在第二次世界大战结束后,铁路客运发展缓慢,中远程不如航空运输,短程不如公路运输,曾经被戴上“夕阳产业”的帽子。为了摆脱铁路客运的困境,增强与航空、高速公路的竞争能力,发展高速铁路是铁路旅客运输走出低谷的唯一途径。1964 年 10 月日本东海道新干线高

速客运列车揭开了世界高速铁路建设运营的序幕,它以  $210\text{ km/h}$  的高速运行于东京与大阪之间。后来,西欧的德国、法国等发达国家也开通了运行速度更高( $250\sim 300\text{ km/h}$ )的高速客运列车。高速铁路由于具有高速、安全、环境污染小、载客量大等优点,因此,20 世纪 80 年代以来,高速客运发展迅速。作为高速列车中的高速客车,在常规客车的基础上,在性能、结构、材料和装备上有了重大的改进,典型的如日本新干线列车、法国的 TGV 高速列车、德国的 ICE 高速列车等,与此适应的高速铁路客车也各有其特点(图 1-6a, b, c)。

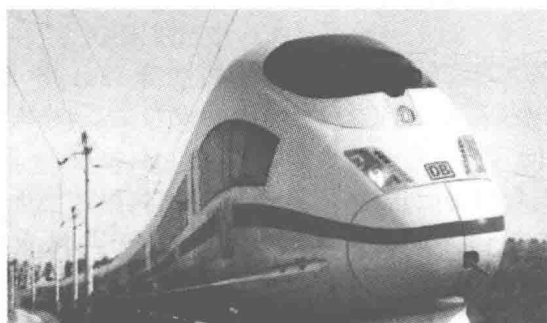
进入 21 世纪,中国高速铁路得到了快速发展,《中长期铁路网规划》提出,到 2020 年,全国铁路营业里程达到 12 万  $\text{km}$  以上,建设高速铁路 1.6 万  $\text{km}$  以上。中国高速铁路发展以“四纵四横”为重点,构建快速客运网的主要骨架,形成快速、便捷、大能力的铁路客运通道,逐步实现客货分线运输。中国高速动车组的发展从 2004 年从法国的阿尔斯通、加拿大的庞巴迪及日本的川崎重工引进时速  $200\text{ km}$  的高速动车组开始,经过引进、消化、吸收再创新的过程,目前已有拥有了持续运行速度达到  $350\text{ km/h}$  的 CRH380 系列、具有中国特色的高速电动车组(图 1-6d)。



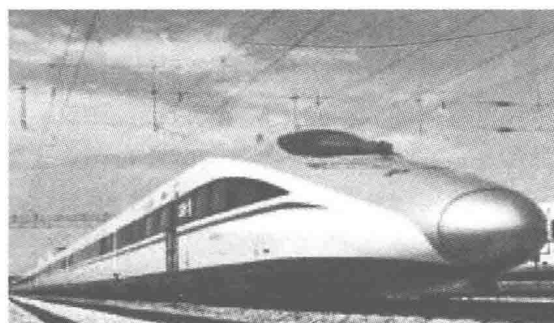
(a) 日本新干线动车组 E5(2009 年)



(b) 法国 TGV 高速列车(1996 年)



(c) 德国 ICE3 动车组(2002 年)



(d) 中国 CRH380 系列动车组(2010 年)

图 1-6 世界高速列车

传统客车仍然是铁路客运的主要车辆,铁路客车车种有硬座车、硬卧车、软卧车、餐车、行李车、邮政车等。

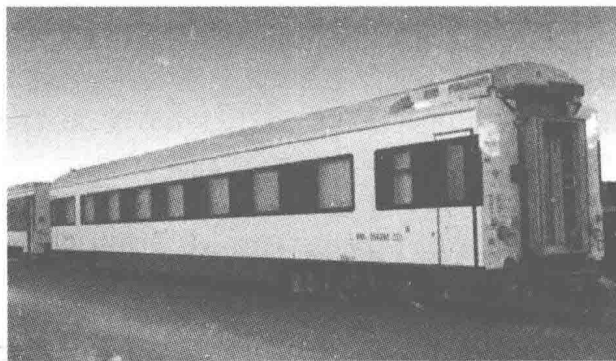
随着国民经济的发展、科学技术的进步和人民生活水平的提高,铁路客车的设计制造水平也不断提高。铁路客车制造业从 1953 年开始自行设计生产我国的第一代产品,即 21 型系列客车产品,1961 年停止生产。该型客车构造速度为  $100\text{ km/h}$ ,由于其构造速度低、制造工艺性差,技术经济指标和舒适性等方面都满足不了要求,所以被 22 型客车所取代(图 1-7a)。22 型客车是



我国的第二代铁路客车,1959 年开始生产,其构造速度为 120 km/h,各种性能均较 21 型客车先进,22 型客车车体钢结构是由普通碳钢制造,钢结构腐蚀严重,其结构及车辆性能满足不了时代的要求,需要更新换代,由产品性能和技术经济指标更先进的新型客车来代替,即第三代客车——25 型客车(图 1-7b)。该型客车从 1966 年开始研制,1990 年生产,1993 年定型为大型客车,车体长为 25.5 m,车辆定距为 18 m,耐候钢制车体结构,车辆寿命可达 25~30 年。



(a) 22 型硬座客车(1959 年)



(b) 25 型软卧车(1995 年)

图 1-7 中国制造的客车

### 1.1.3 货车

目前中国由铁路运输完成的货运量占全国货物运输量的 55% 左右,铁路货车的数量、品种、质量等对铁路运输能力的提高以及运输质量的保证起着重要作用。截至 2012 年年底,中国铁路运营里程为 9.5 万 km,日均装车数 166 072 车,年货物运送总发送量超过 39 亿 t,其中行包发送量 1 222 万 t,货物运输总周转量 2.9 万亿 t·km,其中行包周转量 295.18 亿 t·km。国有铁路货车保有量超过 65 万辆。

货运重载化和快捷化是世界铁路运输发展的两大方向。

重载化能大幅度提高运输效率,降低运输成本,以煤炭、铁矿石、钢铁等运输为主,保持铁路在大宗、散装低值货物运输市场的竞争优势。

快捷化旨在提高货物送达速度、缩短送达时间、保证准时送达,增强铁路在中、高附加值货物运输市场上的竞争力。在快捷货物运输方面,中国 2007 年完成行包周转量 260.87 亿 t·km,2011 年全国铁路行包周转量完成 335.49 亿 t·km,五年增长 28.8%。据预测,在快捷货运方面,中国货物运输发展的基本态势是:

- (1) 全社会货运总量和货物快运总量都呈增长势头;
- (2) 快运量在总货运量中的比重呈上升趋势,快运需求增长高于货运总需求的增长;
- (3) 快运量年均增长率高于货运总量的年均增长率。

随着经济和产业结构的调整和体制改革的深化,运输市场中货物的品类增加、技术资金含量增大,货物结构逐步轻型化,高附加值货物的运输量在总货运量的比重逐步增加,对外贸易货物运输快速发展,货物运输需求明显地表现为对服务层次的多样化和对服务质量要求的不断提高。

快捷货运提供了更加安全、快速、准时的货运服务。据不完全统计,在运送高运价率货物时,90% 的托运人更关心的是运输时间而非运费。虽然公路运输运费高、运距长,但货主还是

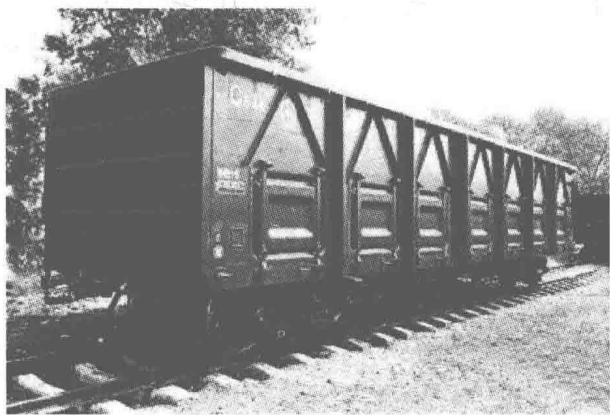


被其快捷性所吸引。

其中,有时限要求的运输几乎都是通过快捷货运方式实现的。快速货运产品成为货运市场上各种运输方式的竞争焦点。

铁路货车的发展伴随着对不同货物的运输要求,形成了各种各样的车辆型式,包括敞车、平车、棚车、罐车和特种运输车等,比如自卸车、漏斗车、集装箱专用平车及运输小汽车双层平车等。车辆载重不断增加,轴重从最初的几吨,到现在的 25 t、30 t 甚至 40 t。车辆运行速度不断提高,一般为 70~120 km/h,最新研制的快捷货车运行速度可达 160 km/h。目前北美、南非、澳大利亚等以重载运输为主,中国、欧洲、俄罗斯则是重载快速并重。

图 1-8a 是中国 1975 年生产的 C64 敞车,图 1-8b 是德国联邦铁路(DB)运用的货物自卸车。



(a) 中国 C64 敞车(1975 年)



(b) 德国联邦铁路自卸车(2010 年)

图 1-8 不同时期货车型式

中国铁路货车的发展经历了两个阶段,实现了三次大的升级换代。第一阶段是从 1949 年至 1957 年的仿制国外产品阶段;第二阶段是从 1957 年至今的自行设计、自主创新阶段。  
①1956—1957 年,新中国第一个自主设计的 P13 型棚车,标志着中国铁路货车实现了载重由 30 吨级向 50 吨级的第一次升级换代。  
②1976—1978 年,中国铁路货车实现了载重 50 吨级向 60 吨级的第二次升级换代。  
③2003—2006 年,中国铁路货车实现了由载重 60 吨级向 70~80 吨级、速度由 70~80 km/h 向 100~120 km/h 的第三次大的升级换代。

20 世纪 20 年代,美国完成了大规模铁路建设,迄今仍以约 23 万 km 的线路里程遥居世界各国铁路路网规模首位。I 级铁路营业里程约占路网总里程的 67%。美国铁路以货运为主。美国国土辽阔,矿产资源和农产品丰富,尤其是煤炭运输量大的特点,为货运铁路发展提供了广阔的前景。货运铁路在综合交通体系中发挥骨干作用,近年来货运铁路市场份额在 40% 左右。2007 年,美国货运铁路完成货运量 22.6 亿 t,实现货运收入 568 亿美元,I 级铁路煤运量占总运量的比例为 43.8%。此外铁路是汽车的主要运送工具,美国生产的汽车中约有 70% 是通过铁路运输的。美国铁路在大宗货物长途重载运输方面一直占有巨大优势。

在重载货车研发方面,21 世纪开始,中国重载车辆的代表是 C80 型铝合金和 C80B 型不锈钢运煤敞车,由原中国北车集团齐齐哈尔轨道交通装备有限责任公司为大秦线开行 2 万 t 重载列车而开发的专用车辆。C80, C80B 型专用运煤敞车(图 1-9),车体材料采用轻型铝合