

“十二五”国家重点出版物出版规划项目



中国汽车工程学会

汽车工程图书出版专家委员会 推荐出版

新能源汽车关键技术研究丛书

# 汽车结构轻量化设计与分析方法

DESIGN AND ANALYSIS APPROACHES TO  
AUTOMOTIVE STRUCTURAL LIGHTWEIGHT

陈吉清 兰凤崇 著

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

# 汽车结构轻量化 设计与分析方法

陈吉清 兰凤崇 著

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书主要介绍汽车结构轻量化设计与分析方法,分三个部分共8章。第一部分(第1、2章)阐述基本原理和提出问题,介绍国内外汽车结构轻量化发展背景、设计理论、设计方法、技术发展水平及轻量化评价方法。第二部分(第3~7章)介绍从汽车概念设计阶段到详细设计阶段的轻量化设计开发流程、设计方法及工程应用。针对汽车刚、强度、NVH、碰撞安全性与零部件可靠性等开发中的轻量化问题展开讨论,介绍了基于性能的轻量化思路与解决案例。第三部分(第8章)对电动汽车动力系统(重点对电池及电池包)的轻量化设计问题进行了阐述。

本书可作为从事汽车结构开发、零部件开发领域的工程技术人员工作学习读本,也可作为高等院校及大中专院校车辆工程专业的教学参考书与培训辅导资料。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

汽车结构轻量化设计与分析方法 / 陈吉清, 兰凤崇著. —北京: 北京理工大学出版社, 2017. 4

(新能源汽车关键技术研究丛书)

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-5682-3940-0

I. ①汽… II. ①陈… ②兰… III. ①汽车-车体结构-结构设计  
IV. ①U463. 82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 079977 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中画美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 27.75

彩 插 / 16

字 数 / 500 千字

版 次 / 2017 年 4 月第 1 版 2017 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 88.00 元

责任编辑 / 张海丽

文案编辑 / 杜春英

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

# 前言

汽车轻量化技术是现代汽车产业发展的重要方向之一，是全世界汽车厂商的共同选择，是我国应对能源安全、新能源汽车发展的必然选择和汽车工业可持续发展的必经之路，对于提升汽车产品的核心竞争力，提高汽车企业的创新能力有重要意义。然而，汽车轻量化理论和技术的实施涉及汽车安全、品质、材料、工艺、回收再利用等多学科多目标协同优化问题，特别是对于新能源汽车的特殊结构又有特殊问题，需掌握结构轻量化的基本原理并遵循科学的设计方法和开发流程，并且把轻量化开发的理念贯穿到产品开发的全过程。

本书从轻量化技术基本理论和方法入手，结合新能源汽车的特点，重点阐述轻量化设计对车身结构特性、碰撞安全性、整车 NVH 特性以及零部件的可靠性等诸多方面带来的影响和相应的解决方案。本书主要有以下几个特点：理论性与实践性相结合，在介绍各类轻量化基本理论方法的同时，针对不同问题展示了大量的工程实例，用实际案例阐述方法的应用流程；一般性与特殊性相结合，在介绍轻量化一般方法的基础上，注重一般方法体系在具体轻量化问题中的应用，如结构优化技术应用于考虑 NVH 性能的车身轻量化设计，轻质吸能材料应用于考虑碰撞安全性的轻量化设计以及电池电驱的轻量化技术等；教学性与研究性相结合，在讲解传统主流轻量化技术的同时，也注重当前热点前沿问题的介绍以及相关研究方法和手段的阐述，引导读者进行更多有意义的探索；知识性与逻辑性相结合，不仅提供了关于新能源汽车及其轻量化技术的知识本身，更深入阐明了本领域所涉及的各学科知识之间的内在联系，引领读者建立更丰富的知识结构体系，灵活运用不同层次、不同类别的知识分析和解决问题。

书中主要研究成果、观点和实例来源于华南理工大学车身结构与安全团队的科研积累。其中的主要章节曾是作者讲授研究生专业课程的教材。此外，还参考了同行学者和工程技术人员的研究工作。借此机会，向所引用的所有资料的作者一并表示感谢。

本书内容新颖、逻辑性强、深度适中，既是一本有理论意义的学术著作，又是一本有工程实用意义的专业读物，适用于汽车行业相关领域科研人员学习参考，亦可作为高等院校车辆工程专业研究生的参考教材。

由于作者水平有限，书中的缺点和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

陈吉清 兰凤崇  
2016年12月

# 目 录

## 第1章 概述 / 1

- 1.1 汽车轻量化发展背景 / 2
- 1.2 车身轻量化研究的发展 / 6
  - 1.2.1 国外车身轻量化的发展 / 6
  - 1.2.2 国内车身轻量化的发展 / 12
- 1.3 轻量化系数以及国内外车型轻量化水平评价 / 14
  - 1.3.1 如何评价汽车轻量化的设计水平 / 14
  - 1.3.2 国内外车型轻量化水平评价 / 15
- 1.4 新能源汽车结构轻量化问题概述 / 19
  - 1.4.1 轻量化设计的技术体系 / 19
  - 1.4.2 车身结构分析与优化的轻量化设计方法 / 21

## 第2章 汽车结构轻量化理论与设计方法 / 25

- 2.1 汽车结构轻量化问题的建立 / 25
  - 2.1.1 拓扑优化 / 26
  - 2.1.2 尺寸优化 / 38
  - 2.1.3 形状优化 / 40
  - 2.1.4 灵敏度分析 / 40
  - 2.1.5 多目标优化 / 44
- 2.2 基于性能的结构轻量化设计方法 / 48
  - 2.2.1 基于刚强度、频率性能的多目标优化方案 / 48
  - 2.2.2 基于碰撞安全性的多目标优化方案 / 51
  - 2.2.3 基于可靠性的多目标优化方案 / 51
  - 2.2.4 SFE 车身概念设计优化技术 / 52
  - 2.2.5 全新架构“性能-材料-结构”一体化设计技术方案 / 53
- 2.3 基于新材料的轻量化解决方案 / 54
  - 2.3.1 基于新材料的开发流程分析 / 54
  - 2.3.2 基于碰撞安全性的轻质吸能材料应用方案 / 57
  - 2.3.3 基于可靠性的轻量化材料应用方案 / 61

- 2.3.4 基于环境生命周期的轻量化材料应用方案 / 62
- 2.3.5 实例分析——钢铝混合材料单帽型直梁轻量化 / 63
- 2.4 基于新工艺的轻量化解决方案 / 66
  - 2.4.1 各类轻量化新工艺的发展与应用 / 66
  - 2.4.2 基于可靠性的轻量化工艺应用方案 / 71
  - 2.4.3 基于碰撞安全性的轻量化工艺应用方案 / 76

### 第3章 概念设计阶段汽车轻量化设计与开发 / 93

- 3.1 概念设计阶段汽车轻量化概述及理论 / 93
  - 3.1.1 现代整车开发方法概述 / 93
  - 3.1.2 概念设计阶段概述 / 95
  - 3.1.3 传统车身概念设计阶段开发的一般流程 / 95
  - 3.1.4 现代车身概念设计阶段开发的一般流程 / 98
  - 3.1.5 概念设计阶段汽车轻量化理论 / 98
- 3.2 概念设计阶段汽车轻量化设计途径 / 104
  - 3.2.1 概念设计阶段结构轻量化设计 / 105
  - 3.2.2 概念设计阶段材料轻量化设计 / 112
- 3.3 概念设计阶段汽车轻量化的开发新方法 / 128
  - 3.3.1 国内 VCD-ICAE 开发 / 129
  - 3.3.2 国外 SFE 开发 / 139
- 3.4 CAE 技术在汽车概念设计阶段轻量化中的应用 / 144
  - 3.4.1 国外 CAE 技术在汽车概念设计阶段轻量化中的应用 / 144
  - 3.4.2 国内 CAE 技术在汽车概念设计阶段轻量化中的应用 / 147
  - 3.4.3 CAE 技术在汽车概念设计阶段轻量化的实例 / 149

- 第 4 章 面向汽车结构基础特性的轻量化设计方法 / 164
  - 4.1 车身静态特性分析方法概述 / 165
    - 4.1.1 车身结构的力学特性 / 165
    - 4.1.2 车身结构优化方法 / 166
  - 4.2 车身结构刚度设计及优化分析 / 169
    - 4.2.1 车身结构刚度分析与评价 / 169
    - 4.2.2 车身结构刚度的有限元模拟及优化 / 175
  - 4.3 车身结构强度设计及优化分析 / 193
    - 4.3.1 车身结构强度及其评价指标 / 193
    - 4.3.2 车身结构强度工况分析 / 194
    - 4.3.3 车身结构强度分析及优化 / 196
  - 4.4 车身结构刚度和强度测量 / 213
    - 4.4.1 车身结构的刚度测量 / 213
    - 4.4.2 车身结构的强度测量 / 223
- 第 5 章 面向 NVH 性能的汽车轻量化设计方法 / 227
  - 5.1 汽车 NVH 问题概述 / 228
    - 5.1.1 汽车的 NVH 性能和 NVH 技术的发展 / 228
    - 5.1.2 汽车噪声与振动的特征 / 230
    - 5.1.3 汽车噪声与振动的主要问题 / 231
    - 5.1.4 汽车 NVH 设计思路 / 232
  - 5.2 面向 NVH 性能的轻量化设计思路 / 239
    - 5.2.1 基于结构的轻量化-NVH 设计思路 / 239
    - 5.2.2 基于材料的轻量化-NVH 设计思路 / 242
  - 5.3 基于结构的轻量化-NVH 设计思路 / 243
    - 5.3.1 以模态频率为约束的结构优化设计 / 243
    - 5.3.2 面向声固耦合现象的车身结构优化设计 / 257
    - 5.3.3 面向声辐射特性的板结构优化设计 / 258
  - 5.4 吸声、隔声结构和阻尼的应用 / 260
    - 5.4.1 吸声处理 / 261
    - 5.4.2 隔声处理 / 265
    - 5.4.3 表面阻尼应用 / 274





- 5.4.4 考虑轻量化的声学包 / 276
- 5.5 NVH 相关试验综述 / 283
- 第 6 章 面向碰撞安全性的汽车轻量化设计方法 / 294**
  - 6.1 汽车碰撞安全性的分析与评价方法 / 294
    - 6.1.1 碰撞安全性与轻量化的关系 / 294
    - 6.1.2 碰撞安全性研究的背景 / 296
    - 6.1.3 汽车碰撞事故的分类 / 298
    - 6.1.4 碰撞安全法规与评价指标 / 301
  - 6.2 基于碰撞安全性的车身结构轻量化设计 / 303
    - 6.2.1 车身结构与碰撞安全性的关系 / 303
    - 6.2.2 车身关键梁及截面的优化设计 / 304
    - 6.2.3 车身结构多目标优化的方法 / 308
    - 6.2.4 基于碰撞安全性的车门轻量化 / 310
  - 6.3 轻质吸能材料的应用 / 317
    - 6.3.1 新型轻质材料 / 317
    - 6.3.2 混合材料车身 / 323
    - 6.3.3 泡沫铝的应用 / 325
  - 6.4 先进制造工艺和成形技术的应用 / 332
    - 6.4.1 先进制造工艺及成形技术 / 332
    - 6.4.2 新型连接技术 / 334
    - 6.4.3 应用 TRB 的 B 柱优化设计 / 339
    - 6.4.4 压-胶复合连接应用于车身前纵梁的吸能特性分析 / 349
- 第 7 章 面向零部件可靠性的汽车轻量化设计方法 / 357**
  - 7.1 汽车零部件可靠性优化设计的重要性 / 357
  - 7.2 汽车零部件可靠性基本概念 / 358
    - 7.2.1 可靠性的概念 / 358
    - 7.2.2 可靠性的尺度 / 360
    - 7.2.3 可靠性的分类 / 360
    - 7.2.4 可靠度和失效率的计算 / 362
    - 7.2.5 平均首次故障时间 / 367
    - 7.2.6 平均剩余寿命 / 367
  - 7.3 满足零部件可靠性的结构优化设计 / 367

7.3.1	基于“约束法”的可靠性优化设计 / 368
7.3.2	基于有限元法的可靠性优化设计 / 380
7.4	新材料与新技术的应用 / 402
7.4.1	新材料的应用 / 402
7.4.2	新技术的应用 / 403
7.4.3	汽车零部件新材料与新技术应用 展望 / 404
<b>第 8 章</b>	<b>新能源汽车动力系统轻量化设计 / 406</b>
8.1	新能源汽车动力电池及电池包轻量化技术 / 406
8.1.1	电动汽车的发展概述 / 406
8.1.2	电动汽车用动力电池介绍 / 409
8.1.3	电动汽车动力电池包设计原则 / 411
8.1.4	电动汽车新型高能量密度电池的 发展 / 416
8.2	电驱传动总成轻量化技术 / 421
8.2.1	驱动电机轻量化技术 / 422
8.2.2	基于功能集成的轻量化电驱动总成 设计 / 427
	<b>参考文献 / 431</b>

# 第 1 章

## 概 述

21 世纪, 汽车的发展呈现出系统化、模块化、轻量化、小型化、电子化(自动化、智能化)和个性化的总体趋势。但是, 随着能源短缺和环境污染成为全球两大主要问题, 汽车车身结构轻量化的重要性日益凸显出来。无论从社会效益还是经济效益考虑, 低能耗、低排放、高性能的汽车都是当今社会的发展需要, 而车身结构的轻量化正是实现这一需要的重要技术手段。据统计, 客车、轿车和多数专用汽车的车身质量占整车总质量的 40%~60%。这样看来, 对车身进行轻量化设计一方面节约了原材料, 降低了生产成本; 另一方面也降低了油耗, 减少了尾气排放, 从而对节能和环保有重要意义。

汽车车身轻量化, 就是根据社会、经济、环境等各方面的要求, 通过各种技术手段, 在保证汽车性能要求的前提下, 降低整个车身及零部件总成的质量, 以实现汽车自身质量降低的目的。因此, 汽车的轻量化, 首先应保证汽车原有的性能不受影响, 既要有目标地减小汽车自身的质量, 又要保证汽车行驶的安全性、耐撞性、抗振性及舒适性; 同时应使汽车本身的制造成本不被提高, 避免给用户造成经济上的压力。实现车身轻量化的方法有很多, 可以从车身结构设计、材料选择、制造工艺等方面进行研究。

对于新能源汽车, 轻量化更增加了其内涵。目前, 由于受电池单位质量储能太小和续航里程的限制, 对车身的轻量化设计显得更加重要。新能源汽车轻量化作为汽车结构优化技术的一部分, 在节能环保以及改善汽车性能等方面均起到了重要作用。从电动汽车发展的趋势看, 随着国家“十一五”和“十二五”规划的完成及“十三五”规划的展开, 在电动公交车“十城千辆”计划以及电动汽车补贴政策的推动下, 新能源汽车将成为我国汽车发展的主题, 电动汽车的轻量化技术也将是新能源汽车技术发展的方向之一。

本书所述的新能源汽车，其定义与工信部给出的定义一致，即采用非常规的车用燃料作为动力来源（或使用常规的车用燃料，采用新型车载动力装置），综合车辆的动力控制和驱动方面的先进技术，形成技术原理先进，具有新技术、新结构的汽车。新能源汽车种类繁多，包括纯电动汽车、增程式电动汽车、混合动力电动汽车、燃料电池电动汽车、氢发动机汽车及其他新能源汽车等。如无特别说明，本书所述新能源汽车均指以自载电池作为电源，依靠大功率电动机提供动力的电驱动汽车。

## 1.1 汽车轻量化发展背景

(1) 汽车平均整备质量不断增加。

近年来，随着汽车保有量的持续高速增长，汽车轻量化对社会能源供给、环境保护和交通安全带来日益巨大的影响。汽车工业石油消耗占中国石油产量的近 50%，汽车的尾气排放也对环境造成了严重的影响。国家发改委于 2004 年颁布的《汽车产业发展政策》第十条明确提出：“汽车产业及相关产业要注重发展和应用新技术，提高汽车的燃油经济性。2010 年前，乘用车新车平均油耗比 2003 年降低 15%以上。”

《中国汽车工业“十一五”发展规划》也提出：“要积极开发应用新材料，树立发展循环经济的理念，在汽车产品设计、生产中广泛应用各种新材料，充分考虑其报废后的可回收性和可利用性，推广应用高强度材料及轻质、环保、复合材料，限制使用对环境污染或安全有危害的材料。到 2012 年，汽车整备质量减轻 10%。”

但与上述要求不对应的是，为了满足安全、排放、舒适性、可靠性、智能化等要求，在汽车上装备了越来越多附件，导致汽车自重不断上升。

图 1.1 所示为 1977—2004 年，美国新款乘用车（New Passenger Car）平均自重演变图，该图是根据 NHTSA（the National Highway Traffic Safety Administration）公布的数据绘制而成的。1977 年美国乘用车的平均自重为 1 651 kg，1982 年降低到 1 275 kg，降幅约 23%。此后车辆的自重又开始缓慢回升，到 2004 年已达 1 470 kg，较 1982 年上升约 15%。中国也是如此，目前自主品牌乘用车的自重比发达国家同类乘用车高 8%~10%，商用车重 10%~15%。随着各汽车厂商对汽车轻量化的深入研究及轻量化材料的推广，这种情况将逐步改善，预计到 2020 年全球乘用车的平均质量将下降到 1.6 t 左右，如图 1.2 所示。

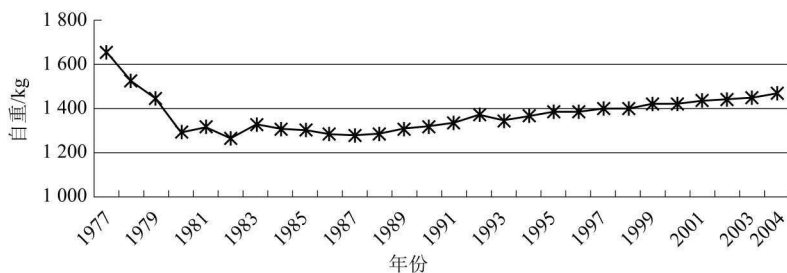


图 1.1 美国 1977—2004 年新款乘用车的平均自重

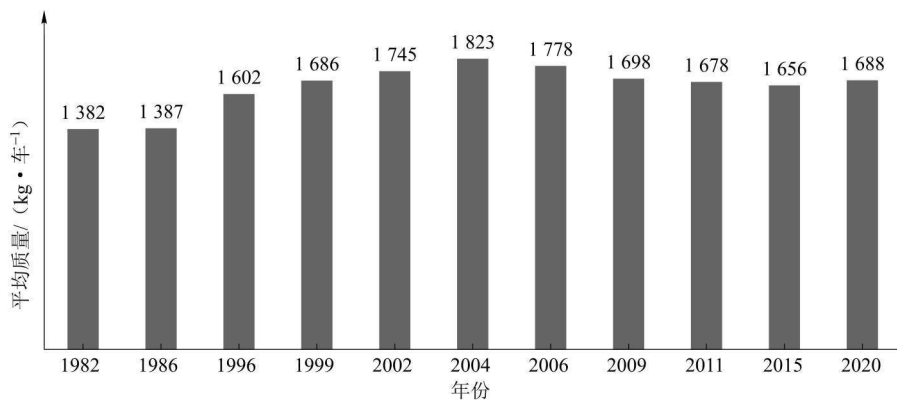


图 1.2 全球乘用车平均质量变化趋势与预测 (来源: 盖世汽车网)

(2) 轻量化是汽车节能减排的重要途径。

从节能减排的角度出发,汽车质量变小,其生产所消耗的原材料和能源消耗,以及使用过程中的燃油消耗和污染物排放都会显著降低,有利于节能减排。世界铝业协会的报告指出:汽车自重每减小 10%,燃油消耗可降低 6%~8%。燃油消耗量减小不仅有利于节约能源,也可有效减少污染物排放。但是从日益严苛的整车安全和消费者对汽车越来越多的功能需求角度来说,又要求汽车设计者不断增加各类附件,以满足安全、排放、舒适性、可靠性、智能化等要求。因此,解决上述矛盾的途径就是采用轻量化材料及其关键应用技术实现汽车的轻量化。

以下是一些实验数据,用来说明车身轻量化对节能减排的作用。图 1.3 所示为日本统计的部分乘用车的自重与油耗之间的关系。不难看出,当车辆的自重从 1 500 kg 下降到 1 000 kg 时,每升燃油平均行驶的里程由 10 km 上升到 17.5 km,相当于每减重 100 kg,每升油可多行驶 1.5 km。换言之,在此区间内,燃油的经济性提高了 5.7%~10%。车辆自重对排放的影响如图 1.4 所示,由图可知,两者基本呈线性关系。

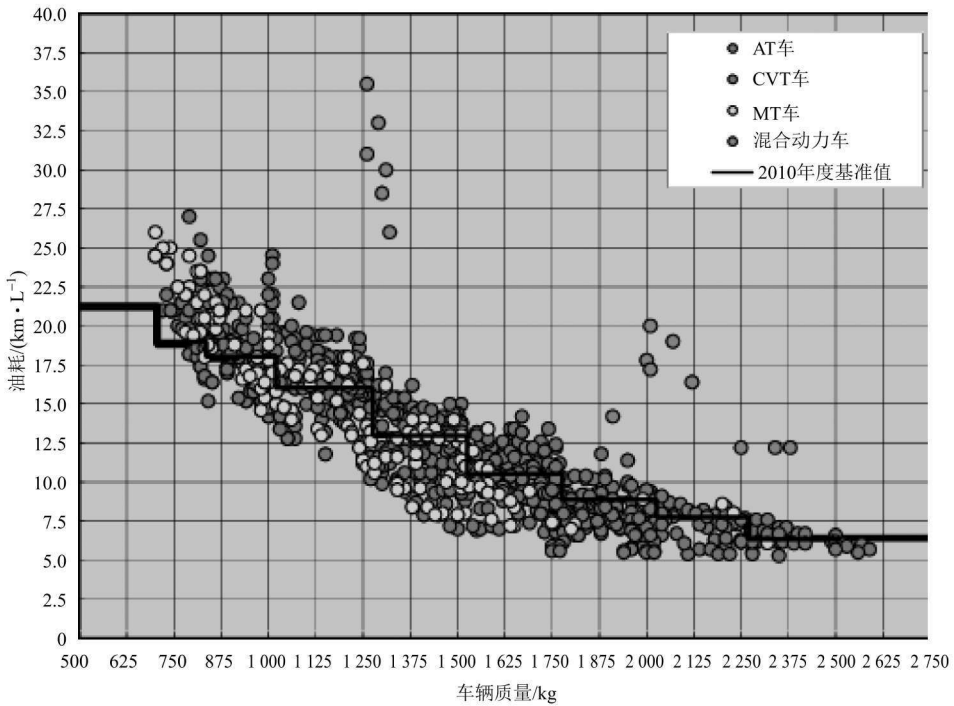


图 1.3 日本乘用车自重与油耗之间的关系（见彩插）

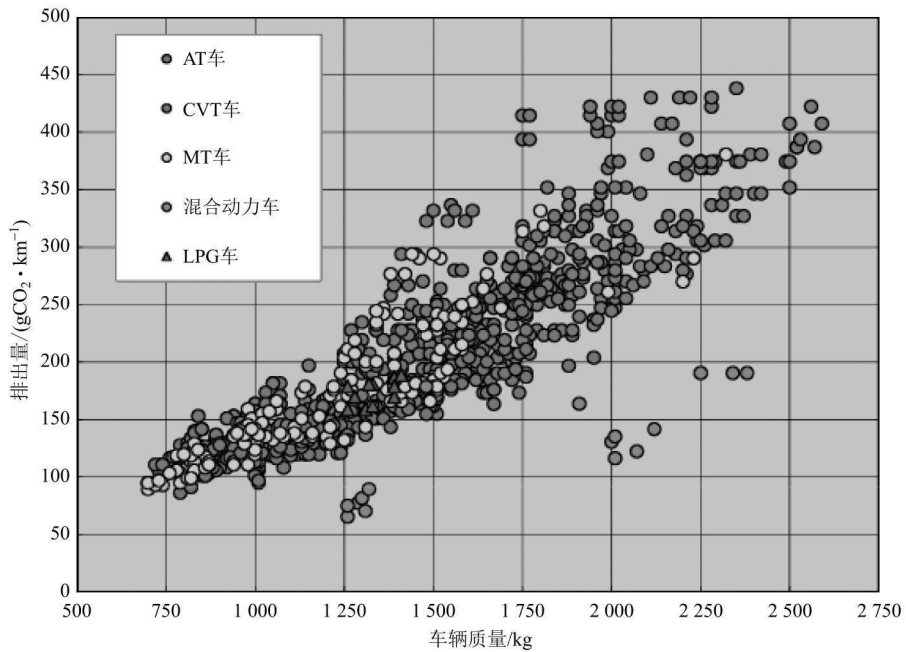


图 1.4 车辆自重对排放的影响（见彩插）

相比于传统汽车，电动汽车更需要车身结构轻量化技术。因为电动汽车目前使用的动力电池与传统汽车使用的液体燃料的比能量差距非常大（见表 1.1）。电动汽车中的动力源主要是电池，一般占整车总质量的 30%~40%，这使得电动汽车在同等能耗（电耗量/100 km）下，不如传统汽车靠一次补充能量就能实现长距离的行驶。因此，电动汽车必须采取比传统意义上的轻量化技术更先进的方法和措施，减小电动汽车车身质量，延长一次充电的行驶距离，改善动力传动系统的负荷，提高电动汽车的效率。从这个角度看，电动汽车车身轻量化技术的研究更有必要和意义。

表 1.1 现有动力电池与液体燃料的比能量  $W \cdot h/kg$

项目	铅酸电池	锂电池	汽油	备注
理论比能量	200	450	12 000	理论计算值
实际比能量	33~55	110~130	3 000	目前的产业化水平
系统比能量	30~50	70~90	—	加上管理系统质量之后的平均值

注：按照热力学第一定律，内燃机的转换效率最高为 33%，此处汽油机按 25% 计算。

（3）新能源汽车轻量化相比传统燃油汽车增加了电池轻量化等更多内涵。

与传统燃油汽车相比，电动汽车目前所使用的动力电池的比能量比燃油的比能量小很多，且电池的引入大幅增加了汽车的整车质量，这使得电动汽车的续航里程远不如传统燃油汽车，因此电动汽车的轻量化相比传统燃油汽车有了更多内涵。专门针对电动汽车的轻量化研究目前相对较少，轻量化研究分类也不一致，但大致可分为以下 4 个方面：电池轻量化、电驱传动总成轻量化、车身轻量化和其他零部件轻量化。其中电池及车身占据整车质量的近 80%，因此这两方面的轻量化设计尤为重要。

电动汽车的整车部分主要由内外饰、电池、车身、电机、底盘、动力传动机构、制动系统与轮胎等构成。对电动汽车实施整车轻量化则需要对各个部位进行轻量化并能够将其有效集成，其重点在于对车身及底盘的轻量化。在电池能量密度达到瓶颈的情况下，由于电池的引入相当于增加了整车 20%~30% 的质量，降低质量也有继续装载更多电池的可能，则需要对整车实现 50% 的轻量化。然而基于以往的钢制材料而采用的工艺技术、所有产品及相关措施最多只能够降低 10% 左右的质量，因而不能有效满足电动汽车对实际减重的需求。因此，目前主要的轻量化手段在新材料、新工艺中需要有所突破。新能源汽车车身轻量化主要的发展方向有高强度钢车身、全铝车身、改性塑料车身以及碳纤维增强复合材料车身，详细介绍及案例将在下面章节中叙述。

## 1.2 车身轻量化研究的发展

### 1.2.1 国外车身轻量化的发展

通过上述分析知道,减小汽车质量是降低油耗、减少废气排放最有效的方法之一。汽车轻量化的一个重要途径就是选用轻质材料或者复合材料,并采用先进的设计制造技术,从而获得质轻、优质、净形、价廉的汽车零部件。现在在各种汽车上,我们看到铝、镁、高强度复合材料等轻质材料已被广泛使用。另外,这些材料还具有比强度和比刚度高、阻尼减振性好、导热和导电性好等特点。在一些汽车工业发达国家,这些轻质合金材料已经被越来越多的汽车生产企业用于汽车相关产品的生产中。在未来的几十年里,这些轻质材料会慢慢取代钢材,成为汽车的主要原材料。

#### 1. 超轻钢汽车研究计划

鉴于当前的技术水平和轻质材料昂贵的价格,汽车钢材在相当长的时期内还会被采用,因此利用钢材来实现车身轻量化的研究就显得很有意义。20世纪90年代,国际钢铁协会成立了超轻钢车身(Ultra Light Steel Auto Body, ULSAB)项目组,该组织吸收了35个钢铁企业,分布在世界上18个国家和地区。该组织主要通过对汽车的车身结构进行重新设计和对生产工艺进行改革来达到整车车身轻量化的目的。其轻量化的前提是保证汽车的原有强度、刚度性能且不增加生产成本。该组织进行轻量化的主要手段包括:

- ① 利用高强度板材来代替传统板材。
- ② 采用新的生产工艺,如激光焊接工艺、液压成形工艺等。
- ③ 利用有限元法对现有的车身进行重新优化设计,利用计算机仿真技术以保证车身的各种性能指标。

该项目完成时,取得了令人满意的效果,试制的车身质量比原来降低了25%。其车身弯曲刚度、一阶模态频率、车身扭转刚度都有了不同程度的提高,而生产成本比原来降低了15%,整个车身的各项性能与原来相比没有丝毫的降低。

ULSAB项目组委托Porche公司,投入2200万美元开展了超轻钢车身(ULSAB)项目。90%以上车身部件采用高强度钢板,制造出了高性能的车身样品,如图1.5(a)所示。ULSAB车身质量为203 kg,比同级别轿车车身平均质量降低25%,同时扭转刚度提高80%,弯曲刚度提高52%,车身一阶固有频率上升到60 Hz,并且完全满足碰撞安全性法规要求。1997年,总投入880万美元的超轻钢汽车组件(Ultra Light Steel Auto Component, ULSAC)项目启



动。ULSAC 项目采用无框架车门结构，使用高强度钢制造车门外板（钢的种类有 BH210、DP500、DP600 等），使用 DP650/840 制造车门管件。单个车门质量为 21 kg（包括车门本体、后视镜、铰链、玻璃升降器等），在满足所有结构性能要求的前提下降低车门质量 36%，而制造成本仅为 133 美元。图 1.5 (b) 所示为 ULSAC 车门样品。



图 1.5 高强度钢汽车车身及车门  
(a) ULSAB 样品；(b) ULSAC 车门样品

继 ULSAB 项目获得成功之后，钢铁企业于 1998 年又开始实施超轻钢车身—先进汽车概念 (Ultra Light Steel Auto Body—Advanced Vehicle Concepts, ULSAB—AVC) 计划，总投入 1 000 万美元，进一步从整体上研究开发新一代钢铁材料的汽车结构。研制的 PNGV 级车车身质量 215 kg，质量降低 20%。白车身成本约 972 美元，车身附件成本 383 美元。车身结构性能方面，不仅明显提高了弯曲和扭转刚度，而且达到了 2004 年美国 and 欧洲的五星级碰撞安全标准。在 ULSAB—AVC 项目中，白车身 100% 使用高强度钢板，其中超过 80% 为先进高强度钢板，双相 (Dual—Phase, DP) 钢成为车身主要制造材料。图 1.6 比较了 ULSAB 和 ULSAB—AVC 的车身材料构成。

除此之外，世界各国单独对车身轻量化技术的探索也从未停止过。在美国，无论是 1993 年克林顿政府时期实施的新一代汽车合作伙伴计划 (the Partnership for a New Generation of Vehicles, PNGV)，还是 2002 年布什政府时期实施的自由合作汽车研究与燃油伙伴计划 (the Freedom Car and Fuel Partnership Plan, FCFPP)，汽车轻量化都是其中的核心技术路线之一。美国航空航天局兰利研究中心的 J.Sobieszczanski—Sobieski 和福特公司车辆安全部门的 R. Y. Yang 以及 SGI 公司的 S.Kodiyalam 共同进行了轿车的 BIP (Body In Prime) 基于汽车 NVH (Noise Vibration Harshness, 噪声、振动与声振粗糙度) 和碰撞安全性要求下的轻量化研究。他们通过应用 MSC/NASTRAN 和 RADIOSS 分