

世界汽车

技术发展跟踪研究

Trace Research on World Automotive
Technology Development Lightweight

轻量化篇



中国汽车工程学会 组编



汽车轻量化技术创新战略联盟 支持



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

013045859

U46
48
V1 2013

世界汽车技术发展跟踪研究

轻量化篇

中国汽车工程学会 组编




U46

48

V1

2013

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



北航

C1653720

内 容 简 介

2007年12月,在中国科学技术部等政府部门的支持下,由中国汽车工程学会牵头组建了汽车轻量化技术创新战略联盟,并有国内骨干汽车企业、钢铁企业和在轻量化技术研究方面卓有建树的高校、研究机构加入其中。本书系统反映了联盟成立5年来的工作积累,综合描述了国内外相关领域的发展状况和最新进展,由专家委员会成员执笔完成,希望能够给专业人士带来工作上的便利,给汽车爱好者以及关心汽车工业发展的人士描述出汽车轻量化的整体概念。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

世界汽车技术发展跟踪研究.轻量化篇/中国汽车工程学会组编. —北京:北京理工大学出版社,2013.5

ISBN 978-7-5640-7482-1

I. ①世… II. ①中… III. ①汽车工业-技术发展-研究-世界
IV. ①U46-11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 041136 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 14.75

字 数 / 144 千字

版 次 / 2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

责任编辑 / 陈莉华

印 数 / 1~3 000 册

责任校对 / 陈玉梅

定 价 / 65.00 元

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,本社负责调换

序言

也许您已经发现，“轻量化”这三个字近年来频频出现在汽车媒体或是企业新产品的宣传册上。一些企业在制订未来技术发展规划时也把提升汽车轻量化水平列入其中。我们不禁要问，“轻量化”究竟是因为什么，值得让企业家和工程师们倾注如此多的心血？

如果您听过“过去的一百年汽车改变了世界，未来的一百年社会将改变汽车”这句话，那么就不难理解了。这句话出现在由中国汽车工程学会和世界汽车工程师学会联合会共同主办的“2012世界汽车工程年会暨展览会”开幕式上。细想起来的确如此。

从历史上看，汽车不过是一个代步工具——它让人们的生活变得快捷，扩展了人们的交往范围，给人以旅行的方便。然而，用今天的眼光看，汽车并不只是一个简单的代步工具——它要让车外和车内的人都安全（也就是我们关心的主动安全和被动安全），它要让对资源的消耗更少（也就是我们所关心的在全生命周期内节能、节材），它要对环境的影响尽可能小（也就是我们

所关心的在生产和使用阶段少排放、低噪声)。换言之,在资源和环境的制约下,汽车承担起了越来越多的社会责任。社会的发展决定了汽车只有在安全、节能和环保方面有更加突出的表现,才能够在未来社会发展进程中,继续表演重要角色。汽车轻量化的概念也正是在这一背景下被提出。

常识告诉我们:质量轻的物体运动起来需要的动力就少。汽车自重越轻就意味着使用时的油耗越低,排放也越少。世界铝业协会很早就公布过一个研究结论:车辆每减重10%,其燃油消耗可降低6%~8%。德国大众公司工程师的研究结果表明:车辆每减重100 kg,其每100 km可节省燃油0.3~0.5 L;有助于提高车辆的加速度和操控性,有助于车辆获得更好的制动响应,缩短制动距离;车重减轻后,我们就可以选用排量更小的发动机来满足车辆性能需要,油耗自然会进一步有所下降,反过来也会有利于车辆减重。

常识还告诉我们:当采用同样设计的两车发生相撞时,质量轻的一方很可能会吃亏,如果要满足安全要求,那么汽车应适当重些。提高车辆的设计规格、零件的用材规格和使用新材料似乎是个可行的选择,但必定会影响车辆成本。

为解决这些看似无法相互融合的矛盾,工程师们可谓绞尽脑汁。实现汽车轻量化成为一项复杂的系统工程,简单的材料替代是不可行的,必须在满足汽车基本使用要求和成本控制的前提下,集成应用汽车设计技术、轻量化材料技术及先进制造技术,来实现汽车产品减重。同时,还需要统筹车辆使用阶段的维修和报废后的回收再利用问题。这也就意味着汽车轻量化仅靠汽车工

业自身努力是无法实现的，必须集合冶金、非金属材料、装备等行业的力量共同努力。

推动汽车轻量化的进程在世界汽车强国已经走过数十年的历程，但在我国，从概念的提起到现在也只有短短的数年。为整合行业优势资源，推进中国汽车轻量化技术的进步，2007年12月，在中国科学技术部等政府部门的支持下，由中国汽车工程学会牵头组建了汽车轻量化技术创新战略联盟，并有国内骨干汽车企业、钢铁企业和在轻量化技术研究方面卓有建树的高校、研究机构加入其中。本书系统反映了联盟成立5年来的工作积累，综合描述了国内外相关领域的发展状况和最新进展，由专家委员会成员执笔完成，希望能够给专业人士带来工作上的便利，给汽车爱好者以及关心汽车工业发展的人士描述出汽车轻量化的整体概念。

作为一个科技型的社会团体，及时且准确地反映当今世界汽车技术发展状况和趋势是我们的职责，同时我们的工作也离不开社会各个方面的支持。在此，谨向参与本次研究工作的专家们、向为保证本次研究工作顺利进行提供大力支持的各个单位任职人员表示衷心的感谢！

中国汽车工程学会

2013年1月

目 录

序言

第 1 章 乘用车轻量化设计国内外研究进展	1
1.1 概述	1
1.2 基于有限元的轻量化设计方法	2
1.3 结构轻量化优化设计方法	5
1.4 基于灵敏度分析的车身结构轻量化设计	9
1.5 拓扑、形貌和尺寸优化轻量化设计方法	11
1.5.1 尺寸优化设计	13
1.5.2 拓扑优化设计方法	14
1.5.3 形状优化设计方法	16
1.6 车身结构参数化轻量化设计方法	17
1.7 总结	18
参考文献	19
第 2 章 轻量化车身的正向设计发展趋势	25
2.1 前言	25
2.2 车身轻量化实施路径	26
2.3 轻量化设计优化角度对比——三种车身设计模式及 实例	29
2.3.1 车身逆向设计模式	29

2.3.2	传统的车身正向设计模式	31
2.3.3	全参数化的车身正向设计模式	32
2.3.4	国内外采用全参数化车身正向设计模式的实例介绍	35
2.4	结束语	41
	参考文献	42
第3章	汽车用高强度钢近年来的进展情况	45
3.1	引言	45
3.2	国外汽车用高强度钢情况	46
3.3	国内汽车用高强度钢生产供应情况	52
3.4	高强度钢板发展方向和使用面临的挑战	56
	参考文献	58
第4章	铝合金和镁合金在汽车轻量化中的应用	60
4.1	概述	60
4.2	汽车应用铝合金的现状	64
4.3	汽车用铝合金的进展	67
4.4	汽车用镁合金的进展	84
4.5	汽车镁合金材料产业的国内外发展现状及趋势	87
4.6	结束语	94
	参考文献	96
第5章	工程塑料及复合材料在汽车上的应用	100
5.1	工程塑料及复合材料的概念	100
5.2	典型热塑性工程塑料在汽车上的应用	102
5.3	典型的复合材料部件及其优势	104

5.4	典型复合材料在汽车上的最新应用	108
5.4.1	SMC/BMC	108
5.4.2	碳纤维复合材料	110
5.4.3	LFT 热塑性复合材料	113
5.5	我国车用塑料及复合材料应用中的问题	116
5.6	回收问题	118
第 6 章	碳纤维复合材料在汽车轻量化上的应用	120
6.1	碳纤维复合材料及其成型工艺	121
6.2	碳纤维复合材料在汽车上的应用	124
6.3	汽车碳纤维复合材料发展状况及有待解决的问题	129
	参考文献	133
第 7 章	车身零件成型技术应用趋势	134
7.1	概述	134
7.2	激光拼焊板坯 (TWB)	135
7.2.1	拼焊板坯优点	135
7.2.2	拼焊板坯典型零件的应用	136
7.2.3	国内拼焊板坯应用情况	138
7.3	不等厚度轧制板 (TRB)	139
7.3.1	TRB 钢板的优点	139
7.3.2	德国 Mubea 公司生产 TRB 钢板的情况	141
7.3.3	TRB 钢板应用的典型零件	143
7.3.4	TRB 钢板国内开发情况	146
7.4	冲压成型	146

7.5	热成形	147
7.5.1	热成形技术应用趋势	147
7.5.2	使用热成形技术的典型零件	149
7.5.3	多种热成形工艺方法	152
7.5.4	国内热成形技术开发情况	155
7.6	液压成型	156
7.6.1	液压成型的应用趋势	156
7.6.2	液压成型车身应用实例	156
7.6.3	不锈钢管液压成型	160
7.6.4	液压成型钢管的应用	160
7.6.5	国内液压成型应用的情况	162
7.7	辊压成型	162
7.7.1	辊压成型技术优势	162
7.7.2	采用辊压成型技术的典型零件	163
7.7.3	三维辊压成型技术	165
7.7.4	辊压成型对材料的要求	167
7.7.5	国内辊压成型技术发展情况	169
	参考文献	169
第8章	汽车轻量化材料试验技术最新发展动态	171
8.1	概述	171
8.2	高速拉伸试验技术	172
8.2.1	试验装置	174
8.2.2	试样	177
8.2.3	试样装夹方式	179

8.2.4	测量仪器	180
8.3	材料动态性能测试新方法	182
8.3.1	金属板材三点弯曲冲击试验	182
8.3.2	金属材料高温冲击拉伸试验	184
8.3.3	钢管轴向冲击试验	186
8.3.4	金属板材动态抗凹性试验	188
8.3.5	高强度钢丝疲劳试验方法	191
8.3.6	非金属复合材料压溃比能试验	192
8.4	接头连接性能试验与评价方法	195
8.4.1	接头连接有效性试验评价方法	195
8.4.2	连接接头动态力学性能评价	198
8.4.3	连接接头试样设计有关问题	202
8.5	材料其他物理力学性能试验方法	206
8.5.1	轻金属螺栓连接载荷保持试验	206
8.5.2	塑料-金属界面磨损试验方法	207
8.5.3	冲压用镀锌钢板表面摩擦性能测试新方法	211
8.6	金属工艺性能试验方法	212
8.6.1	金属板材成型回弹性能的标准试验方法	212
8.6.2	液压成型用金属管材自由膨胀试验	214
8.6.3	液压成型用金属管材角落填充试验 (Corner Fill Test)	215
	参考文献	217

第 1 章

乘用车轻量化设计 国内外研究进展

王登峰

吉林大学汽车工程学院

1.1 概述

乘用车的轻量化设计主要包括车身结构的轻量化设计和底盘关键零部件的轻量化设计。由于乘用车车身结构重量占整车重量的 1/3 以上，并存在较大的减重空间，近年来针对车身结构轻量化设计方法的研究越来越多。

轻量化设计是汽车轻量化的重要途径之一，是轻量化汽车产品开发的基础和前提。通过轻量化设计，使相应的材料、最优的结构形状和尺寸用在汽车结构合适的位置，使每部分材料都能发挥出最大的承载或吸能作用，可提高材料利用率，降低车重，减

少材料成本，实现节能、减排、降耗的目标。

一方面，传统的汽车结构轻量化设计仍然以对标或类比设计为主，局限在零件壁厚优化以及使用高强度或轻质材料的简单替代上，没有对零部件的结构和断面形状以及尺寸参数进行拓扑优化、形貌优化和尺寸优化，结构上有些部位的材料仍未充分发挥其承载、增加刚度或吸收能量的作用，因此结构轻量化仍然有较大空间。另一方面，由于汽车结构复杂，轻量化设计必须同时满足强度、刚度、振动和噪声（NVH）、结构安全性和耐久性多个性能指标要求，因此传统的以减重为单一目标的结构轻量化优化设计方法无法满足汽车零部件对多性能目标优化的需求，限制了在汽车结构上能充分挖掘减重的潜力。

目前，应用于汽车结构的轻量化设计方法主要有：有限元法，单一目标优化设计法，多目标优化法，多学科协同优化法，灵敏度分析法，拓扑优化、形貌优化和尺寸优化法，车身结构参数化轻量化设计方法。

在上述汽车结构轻量化设计方法中，有限元和灵敏度分析方法是应用最多、技术相对最成熟的轻量化设计方法。从目前国内外关于汽车结构轻量化设计研究文献上看，其他轻量化设计方法正在探索之中。下面对这些汽车结构轻量化设计方法的现状和进展进行详细综述。

1.2 基于有限元的轻量化设计方法

近年来，随着高性能计算机技术的不断发展和数值计算方法

的深入研究,结构分析和优化技术日趋成熟,并逐渐应用到汽车各个设计阶段。以有限元方法为主体的汽车结构分析和轻量化设计,避免了设计的盲目性,减少了设计成本,缩短了汽车结构的开发周期,减轻了汽车结构重量;以有限元法为基础的汽车结构分析和轻量化设计已成为一种面向汽车结构设计全过程的分析方法。汽车结构设计的过程也成为一种设计、分析和优化并行的过程,结构优化的思想在设计各个阶段被引入。

有限元法在汽车结构分析上的使用可以追溯到20世纪60年代,并在20世纪80年代得到普及。早期的有限元分析多只用于汽车零部件模态或静刚度等线弹性分析,对车结构的轻量化设计也只限于板壁厚度的分析与优化上;汽车耐撞特性的有限元分析与模拟技术直至20世纪80年代中后期才开始迅猛发展,并得到大量应用。在这之前,限于当时的理论水平,人们还不可能对汽车碰撞这种复杂的力学问题有深入全面的了解。当时主要依靠多刚体系统动力学方法和机械振动学方法来进行汽车碰撞响应分析。此后,显式有限元方法研究获得突破,标志着汽车碰撞仿真研究进入了新时期。动态非线性显式有限元方法采用中心差分法,可以用来计算具有大位移、大变形、复杂接触和高速冲击等特性的复杂力学问题,常用的动态显式有限元软件有LS-DYNA、MCRASH、RADIOSS等。动态显式有限元方法的发展为汽车整车碰撞安全性以及基于零部件抗碰撞特性的轻量化设计研究,提供了有力工具。许多学者借此对汽车碰撞安全性及其结构轻量化设计进行了深入研究和分析,主要包括:整车的碰撞安全性分析,关键零部件的吸能模式和机理,结构的减重设计研究等。

有限元方法作为一种分析手段，其主要功能是对已给定结构的设计方案进行精确评价和校核。传统的汽车结构设计过程为：设计人员通过对标分析或类比设计确定出零部件的结构设计方案，然后进行性能分析和校核，再根据分析结果依靠经验和直觉提出改进设计方案，直到找到一个满意的设计结果。用有限元方法进行结构轻量化设计流程如图 1-1 所示。这种设计过程不仅耗时费力而且容易出错，并且得到的结果仅仅是一个可行方案，而非结构重量最轻的最优设计方案。

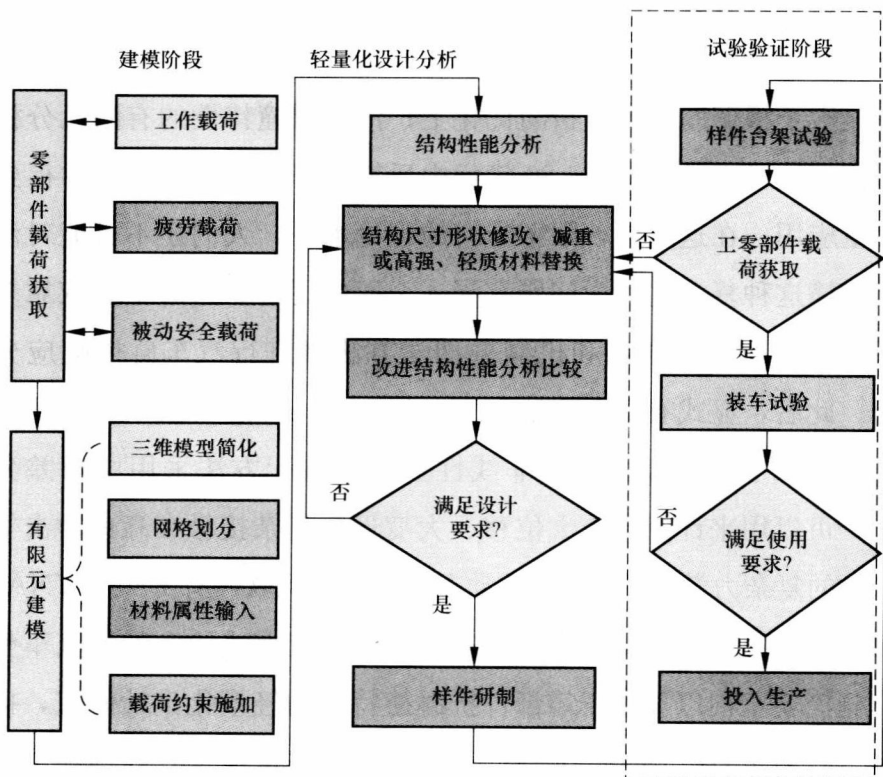


图 1-1 基于有限元方法的轻量化设计流程

随着高强度和轻质材料技术的迅速发展，汽车上的许多零部

件也开始广泛应用各种高强度和轻质材料,如悬架控制臂、扭转梁和副车架等承载件,车身前后防撞梁、B柱、前纵梁、门槛加强梁等安全构件,以及动力总成支架、方向盘和座椅骨架、车身内板和饰件等。有限元方法也大量用于轻量化材料替代后的结构性能分析与评价方面。

随着计算机技术的发展,把有限元分析方法与优化设计方法相结合,成为汽车结构轻量化优化设计有效方法之一,并开始在汽车产品开发中得到广泛应用。

1.3 结构轻量化优化设计方法

常见的汽车结构轻量化优化设计的基本思想是:将优化设计理论与有限元方法相结合,构建以减重为单一目标的汽车结构轻量化优化设计模型,同时考虑一些结构性能方面的约束条件,基于优化设计算法进行迭代计算,直到找到最优解。这种以单一准则的汽车结构轻量化设计方法在国内外高校、研究机构和汽车厂商中,应用较为普遍。其缺点是该方法不能同时很好地满足对汽车零部件多性能目标的要求,有时甚至会出现使零部件在某一方面性能改善的同时,导致其他方面性能恶化的问题。国内外在这方面的研究文献较多,研究人员针对薄壁构件、车身部件乃至整车结构耐撞性能的优化设计技术,开展了广泛的优化研究。

Marklund. P. O. 和 Nilsson L.^[1]通过比较分析局部和全局近

似方法在汽车侧面碰撞优化中的应用效果,指出:汽车碰撞这类瞬态问题应该使用全局近似方法来构建近似模型。并在此基础上,对B柱进行基于碰撞安全性的轻量化优化设计,使得B柱的质量减轻25%。Avalle M.等^[2]基于响应面方法,使用多点优化步骤,以最大碰撞力与平均碰撞力的比值为优化目标,优化设计波纹圆管、锥形圆管以及锥形方管三种薄壁构件。王海亮等^[3]使用中心组合法,在设计空间中选择少量样本,并获得设计的响应特性,然后用二阶响应面模型构建近似模型,并应用Pareto遗传算法对方形薄壁构件以及汽车前纵梁进行耐撞性轻量化优化设计。Ebisugi T.等^[4]提出一种解决薄板构件在非线性动态载荷下的结构优化方法,这种方法的基本思路是:在优化过程中,使得所有壳单元的塑性应变值尽可能地相等。

随着结构分析能力和手段的不断完善,以及现代优化设计理论不断发展,汽车结构轻量化优化设计的研究范围已从单一准则减重优化,发展到考虑结构强度、刚度、耐撞性、NVH性能和耐久性优化在内的多学科和多目标优化设计。需要建立包含多个目标的优化设计目标函数,并合理分配各目标之间的权重,确定优化设计的约束条件 and 设计变量,并通过多目标优化设计计算法的求解,得到同时满足多个性能目标要求的优化求解方案。常用的多目标优化设计算法主要有:线性目标规划法、分层求解法、响应面法、模糊优化方法、遗传算法和神经网络方法等。

Andersson J. 和 Redhe M.^[5]采用中心组合法构造样本空间,利用二阶响应面方法构建近似模型,同时考虑驾驶舱侵入距离和碰撞加速度两个目标,采用遗传算法进行汽车正面耐碰撞优