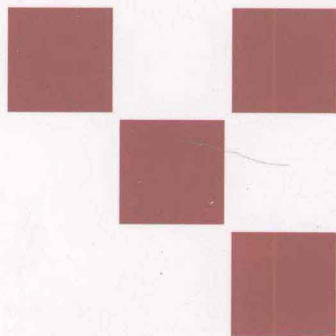


车身结构轻量化设计 理论、方法与工程实例

孙凌玉 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

车身结构轻量化设计理论、 方法与工程实例

孙凌玉 编著

国防工业出版社

·北京·

前 言

不管是传统内燃机汽车还是各种新能源汽车,节能和减排都是今后汽车产业发展的目标。而汽车所需燃料或电池的多少,与汽车自重密切相关。其中,车身重量在整车中所占比例较大,因此,车身的轻量化程度直接影响整车的节能和减排效果。

实现车身轻量化的途径主要有:优化车身的空间拓扑结构形式,使各种工作载荷及碰撞冲击载荷能有效地进行传递;减小车身尺寸或减薄零部件厚度;优化零件形貌,减少用于增强刚度的加强件数目;通过改进零件成形及连接工艺减少零件数目;采用低密度材料替换高密度材料等。此外,轻量化的同时,还必须满足车身结构的强度与刚度、振动与噪声、碰撞与吸能等设计准则和各种法规,并保证工艺性和经济性。该过程涉及计算力学、实验力学、材料学、振动学、软件学以及机械工程和汽车等多学科专业知识。而一切指标的好坏,最终以人体感受为评价指标,因此,车身轻量化还涉及与生物力学或人体生理学相关的人机工程学,特别是汽车正常行驶或发生碰撞事故时的动态人机界面设计方法学。

目前关于汽车车身设计的图书主要涉及与造型相关的车身空气动力学、与覆盖件成形相关的车身制造工艺学、与车身总布置相关的车身人机工程学、与结构承载能力相关的车身结构设计以及与碰撞相关的计算机仿真方法等内容。目前国内从事车身设计、研发的技术人员,大部分来源于汽车或机械专业,很多设计经验来自于对先进设计的解剖和工程实际探索,尚未形成系统的理论体系,难以指导全新设计,从而制约了我国汽车车身的原创能力;对于进入该领域的科研人员,由于涉及专业知识太多,对理论的掌握只能蜻蜓点水般浮在表面,因此只能跟踪并局部改进国外的设计,不敢对结构和模具进行革命性的改变,主要是缺乏系统的理论指导。

本书作者根据自己多年来在车身结构分析、设计、轻量化及性能优化等方面的科研和教学经历,系统地总结了车身结构轻量化所涉及的基础理论和方法。除作者本人及研究生的成果外,还补充了大量国内外最新相关资料,使内容更加系统、全面,并通过工程实例,将理论与实际紧密结合。作者感谢目前在读博士研究生冷鼎鑫,硕士研究生姚京宁、李喆、郭世融、汪丽军、于人杰、李伟、张健、向建东等为本书的插图绘制、图表编号、参考文献和文字校对等所做的细致工作;也感谢在读博士生陈卫卫和已经毕业的硕士生袁俊、张广越、李飞、石娜、张振帆、崔丽、张永闯、杨雨泽、史国宏、姜力娜、苏庆以及本科生王云龙等提供的前期研究成果。

全书共分7章:

第1章回顾汽车车身结构形式与所用材料的发展历程,并介绍现代车身典型结构、基本术语和制造工艺;描述车身承受的主要工作载荷和碰撞载荷,为结构力学性能分析提供

依据;给出车身结构应满足的各种设计准则;提出车身轻量化设计中的关键科学与技术问题。

第2章主要介绍车身设计中关于材料与结构的各种基本概念、基本原理、基本方法,包括材料选择、评价方法及失效准则;车身概念及详细结构设计阶段的常用方法;车身分有限元建模技巧;车身性能响应面构成方法;车身结构优化方法。

第3章介绍车身刚度与强度检验的必要性及相关准则;给出车身及其子结构的线性及非线性刚度计算方法;介绍车身刚度与强度分析的有限元建模原则与方法;分析强度与刚度的关系,总结如何提高车身结构强度与刚度的主要途径。

第4章介绍各种汽车碰撞事故类型及其危害,提出车身结构安全性设计的基本要求,介绍各国相关碰撞法规并进行比较;给出评价汽车耐撞性、相容性、吸能性及乘员伤害的主要指标;介绍分析汽车碰撞的典型方法及基本理论;给出车身材料及结构碰撞性能检验的各种实验方法;归纳各种汽车碰撞吸能器的原理、分类,以及实现自适应吸能的各种途径;特别分析影响吸能管吸能效果的各种因素;分析影响汽车碰撞相容性的刚度、质量及接触部位几何因素;给出如何提高碰撞安全性的整体与局部措施。

第5章介绍结构振动与噪声的基本概念;给出评价车身振动与噪声的基本指标;分析车内噪声的产生机理与传递路径;根据影响车内振动与噪声的主要因素,提出提高车身NVH性能的各种措施;介绍车身振动与噪声分析的各种方法及适用范围;给出该领域近30年来主要研究热点。

第6章首先介绍轻量化的意义及实现途径;然后给出评价车身轻量化的各种指标;分析通过结构优化实现车身轻量化的典型工程实例;介绍高强度钢、铝合金、镁合金、塑料及其复合材料等各种轻质材料的分类、特点、工艺、结构设计要点及其在车身上的应用实例;介绍液压成形、内高压成形、激光拼焊、TOX连接等多种减重新工艺及其在车身上的应用;介绍未来车身发展的新方向——多材料体设计。

第7章分析汽车正常行驶或发生碰撞事故时人—车界面动态设计方法,包括座椅的振动特性分析、体压分布计算、车身动刚度优化、车内乘员约束系统优化、自适应吸能材料头枕、基于行人保护的保险杠和发动机盖设计、追尾时保护乘员的座椅参数优化、基于虚拟光学法设计的仪表盘结构等工程实例;并以仪表盘为例,介绍多学科优化的实现方法。

本书适用于机械、交通、汽车等领域的研究生、高年级本科生以及汽车设计院所和高等院校相关专业工程技术人员及教师学习和参考。

由于本人水平有限,而且时间比较仓促,错误之处在所难免,欢迎各位读者批评指正。

作者

2010年12月于北京

本书符号说明

符号	单位	含 义	符号	单位	含 义
l	m	长度	s	m	位移
b	m	宽度	M_b	N·m	弯矩
H	m	高度	M_t	N·m	扭矩
D	m	直径	E	GPa	弹性模量
A	m ²	面积	G	GPa	剪切模量
I	m ⁴	截面惯性矩	E_1	GPa	沿纤维方向弹性模量
t	s	时间	E_2, E_3	GPa	垂直纤维方向弹性模量
ω	s ⁻¹	圆频率	G_1	GPa	沿纤维方向剪切模量
f	Hz	频率	G_2, G_3	GPa	垂直纤维方向剪切模量
F	N	力	δ	m	变形
m	kg	质量	μ	—	泊松比
ρ	kg/m ³	密度	δu	—	均匀伸长率
W	N	重量	ε	—	应变
a	m/s ²	加速度	σ	MPa	应力
v	m/s	速度	σ_b	MPa	抗拉强度
$\ddot{\theta}$	rad/s ²	角加速度	σ_s	MPa	屈服应力
$\dot{\theta}$	rad/s	角速度	Δ	—	变化量
θ	rad	角度	χ	—	设计变量
p	MPa	压强	α, β, \dots	—	待定系数
k	N/m	刚度	C_1, C_2, \dots	—	常数
P	kW	功率	V_f	—	纤维体积百分含量
U	J	能量	fun()	—	函数
U_s	J/kg	比吸能	下标 0	—	初始值
M	N·m	力矩	v_c	m/s	碰撞前两车逼近速度
e	—	弹性恢复系数	v_f	m/s	碰撞后两车一致速度
v_e	m/s	有效碰撞速度	L_p	dB	声压级
K	MPa	体积模量	L	kg	轻量化系数
F_m	N	平均力		[N·m/(°)]·m ²	
F_p	N	峰值力	W_z	m ³	抗弯截面模量
h	m	厚度			

目 录

第 1 章 汽车车身结构概述	1
1.1 车身功能、材料及结构的演变	1
1.1.1 车身功能及材料的演变	1
1.1.2 车身及车架结构形式的演变	2
1.2 现代车身典型结构与制造工艺	8
1.3 车身承受的主要载荷	11
1.3.1 弯曲载荷	12
1.3.2 弯扭载荷	12
1.3.3 纵向载荷	13
1.3.4 侧向载荷	14
1.3.5 碰撞载荷	14
1.4 现代车身设计准则	15
1.5 现代车身轻量化设计中关键科学与技术问题	16
参考文献	16
第 2 章 车身结构轻量化设计理论与方法	17
2.1 车身材料强度理论与轻量化材料选择方法	17
2.1.1 材料的基本力学指标	17
2.1.2 车身材料模型	22
2.1.3 车身强度设计中的材料屈服与破坏准则	26
2.1.4 车身材料选择的原则	28
2.2 车身概念设计常用的几种方法	31
2.2.1 车身设计的简单结构面法	31
2.2.2 车架设计的材料力学法	36
2.2.3 骨架结构的载荷极限分析法	37
2.2.4 概念车身结构的拓扑与尺寸优化	38
2.2.5 系列车型的参数化 CAD	39
2.2.6 系列车型的参数化 CAE 及网格自动更新技术	41
2.2.7 基于 CAD/CAE/CAM/PDM 的数字化车身集成开发技术	41
2.3 车身结构有限元建模方法	45
2.3.1 有限元基本原理	45
2.3.2 车身建模的简化原则	46
2.3.3 车身建模常用单元类型	47

2.3.4	车身模型的网格质量检查方法	47
2.3.5	大规模计算的算法选择	48
2.3.6	车身性能评估的关键技术指标	49
2.4	车身性能响应面的近似模型建立法	50
2.4.1	响应表面法概述	50
2.4.2	多项式插值及最小二乘法	50
2.4.3	基于模糊逻辑的神经网络法	52
2.4.4	克里格法	52
2.4.5	径向基函数法	54
2.4.6	各种方法比较	54
2.5	车身结构最优化方法	55
2.5.1	车身结构优化设计类型	55
2.5.2	灵敏度的概念及计算方法	56
2.5.3	形状与尺寸优化的基本原理及常用算法	56
2.5.4	拓扑优化基本原理与常用算法	58
2.5.5	形貌优化基本原理与常用算法	60
2.5.6	车身的多学科优化设计工程实例	61
	参考文献	65
第3章	车身结构刚度与强度设计方法	66
3.1	车身刚度与强度检验的必要性及设计准则	66
3.2	车身典型零件及整车刚度与强度计算方法	66
3.2.1	线性结构刚度计算方法	67
3.2.2	非线性结构刚度定义	68
3.2.3	车身结构强度定义与计算方法	69
3.3	车身刚度与强度计算的有限元方法	69
3.3.1	梁单元模型	70
3.3.2	板—梁混合模型	70
3.3.3	板壳单元有限元模型	70
3.3.4	刚度与强度有限元建模准则	71
3.4	车身零件及整车刚度与强度的试验测试法	72
3.4.1	车身整体静刚度与强度测量	72
3.4.2	测量车身外板局部刚度的静态压痕试验	74
3.4.3	测量车身外板抗动态冲击试验	75
3.4.4	典型路况的车身动强度试验	75
3.5	提高结构刚度和强度的途径	76
3.6	强度与刚度的关系	76
	参考文献	77
第4章	轻量化车身的耐撞性与碰撞相容性	78
4.1	汽车碰撞被动安全性概述	78

4.1.1	汽车碰撞类型与事故率	78
4.1.2	车身结构碰撞安全性基本要求	79
4.1.3	各国汽车碰撞法规简介	80
4.2	汽车碰撞安全性评价指标	84
4.2.1	耐撞性	84
4.2.2	相容性	84
4.2.3	吸能性评价指标	85
4.2.4	乘员伤害指标	87
4.3	汽车碰撞的理论分析方法	88
4.3.1	多刚体动力学法	88
4.3.2	基于多体动力学的集中参数法	90
4.3.3	有限元及多体动力学混合法	92
4.4	车身材料及结构碰撞特性的试验法	92
4.4.1	静动态材料参数测试	92
4.4.2	零部件抗冲击试验	94
4.4.3	整车碰撞试验装置	96
4.5	碰撞吸能性及影响因素	98
4.5.1	各种吸能原理分类	98
4.5.2	被动吸能结构与原理	98
4.5.3	自适应吸能材料与结构	105
4.5.4	管状件吸能性影响因素分析	108
4.6	碰撞相容性及其影响因素	114
4.6.1	刚度与碰撞响应的关系	114
4.6.2	质量与碰撞响应的关系	115
4.6.3	接触部位形状、几何与碰撞响应的关系	117
4.7	提高碰撞安全性的途径	118
4.7.1	整体结构方案	118
4.7.2	局部改进	119
	参考文献	119
第5章	车身结构振动与噪声的动态设计方法	123
5.1	车身振动与车内噪声的基本概念	123
5.2	车身振动与车内噪声评价指标	125
5.3	车内噪声的产生机理与传递路径	126
5.4	影响车身振动及车内噪声的因素	130
5.5	车身振动与噪声分析方法	134
5.5.1	试验测试方法	135
5.5.2	有限元法	136
5.5.3	统计能量分析法	140
5.5.4	边界元法	142

5.6	提高车身 NVH 特性的措施	143
5.7	该领域近 30 年来研究热点	145
	参考文献	146
第 6 章	车身轻量化与多材料体设计方法	148
6.1	车身轻量化的意义与途径	148
6.2	车身轻量化基本概念	148
6.2.1	车身轻量化评价指标	148
6.2.2	轻量化与材料、几何关系	149
6.3	轻量化结构设计方法与工程实例	149
6.4	车身轻量化材料及其结构设计	151
6.4.1	高强度钢	152
6.4.2	铝合金	161
6.4.3	镁合金及设计	169
6.4.4	塑料及复合材料件设计	171
6.5	能减小车身零件质量的成形与连接新工艺	182
6.5.1	液压成形和内高压成形	182
6.5.2	激光拼焊板	183
6.5.3	Tox 连接	184
6.6	多材料体车身结构设计	185
	参考文献	188
第 7 章	轻量化车身动态人机界面设计	190
7.1	引言	190
7.2	人机界面的振动控制	191
7.2.1	座椅振动特性	191
7.2.2	车身动刚度优化设计	194
7.3	车内结构噪声控制	197
7.4	冲击与碰撞	199
7.4.1	乘员约束系统多目标优化设计	199
7.4.2	采用吸能新材料的头枕设计	200
7.4.3	基于行人保护的保险杠	200
7.4.4	基于行人保护的发动机盖板设计	202
7.4.5	座椅参数对后面碰撞中颈部伤害的影响	204
7.5	驾驶舱虚拟视觉的光学设计	206
7.6	仪表板系统的多学科优化设计	209
	参考文献	212

第1章 汽车车身结构概述

根据不同历史时期的汽车使用环境和制造工艺水平,本章从车身的结构形式、使用材料、零件制造及连接技术等方面总结自汽车诞生以来车身结构的演变过程;介绍现代汽车白车身的典型结构形式、常用名词术语和典型制造装配工艺;归纳汽车正常行驶或发生碰撞事故时车身承受典型载荷与相应的设计准则;提出现代车身轻量化设计中的关键科学和工程问题。

1.1 车身功能、材料及结构的演变

以汽车为代表的各种机电产品的概念设计,首先要遵循“功能设计”原则。即通过定义各分总成在整个系统中承担的作用及其相互关系,最终保证整个装配系统的使用功能。作为一种交通工具,主要由发动机和底盘组成的传统汽车诞生于18世纪末期。虽然车身的出现相对较晚,但随着其功能的不断完善,审美及个性需求的不断增加,以及节能和环保对车身轻量化的要求,车身在整车设计中受到越来越多的重视。

提到车身设计,人们自然会把注意力放到外形和内饰的美学评价上,却忽略了藏匿于蒙皮和内饰之间、维持车身形状、承受各种载荷的车身结构部分。其实,车身承载骨架才是目前整车开发制造中投入成本最多的部分,其合理的设计是汽车各种力学性能的重要保证。

自1886年发明汽车以来,随着空气动力学及人机工程学技术的发展,传统汽车车身外形经历了几个明显变化阶段(马车—箱形车—甲壳虫车—船形车—鱼形车—楔形车)后,已在相当长的时间内渐趋稳定。但其结构形式及所用材料,却与材料制备能力、零件制造与装配工艺、车身强度、刚度、耐撞性、振动与噪声、重量、成本、环保、美学等众多因素密切相关。

此外,根据不同的使用需求,还派生出各种专门用途汽车,其车身结构与传统轿车有很大差别;根据不同的能源形式,如:目前开发出的纯电动、混合动力、氢能源动力等新能源汽车的车身结构,特别是底盘布置,也发生了较大变化。

1.1.1 车身功能及材料的演变

不同时期、不同地域、不同类型的汽车,其使用功能必然会存在一些差别。同时,功能的实现还受限于当时的设计水平、制造技术以及成本控制能力。

汽车发明初期,由于动力不足,车身不能太重,只作为载人平台使用,其结构为木制马车(coach)形式。随着动力的改进,车速稍有提高,但同时要求车身能够提供挡风避雨的

功能,因而出现了篷布覆盖在木制骨架上的软顶车身结构或全木制箱型马车车身。后来,随着运输的需要,车身要同时承担其自身重量及人员、货物重量,便借用了自行车的框架(frame)结构,在木制底盘上安装木制车身框架。由于木材不能承受扭转变形,而且具有干燥环境容易开裂、潮湿环境容易腐朽的缺点,常在木框表面覆盖金属板、木材片或织物。随着冶炼技术的进步,为进一步提高车身承载能力,逐步发展为钢制车架、木制车身、金属蒙皮的混合结构。到了1900年,全金属车身问世。20世纪30年代,钢板冲压技术得到发展,车身开始采用钢结构;但当时仍有少数汽车为追求手工木制雕刻带来的精致奢华感而仍采用木制车身,但价格较高;这一时期,某些高档汽车上也尝试使用铝制车身,虽然耐腐蚀性好,但价格贵,难以焊接,受撞后变形难以修复。20年代末,由于当时道路状况不佳,车内噪声很大,为改善乘坐舒适性,进一步通过采用在钢制部件中充填毛织物和射流消声的方法使汽车得以消声。30年代中期,钢制承载式车身开始出现。20世纪30年代—50年代,钢板冲压技术比较成熟,金属车身蒙皮增多,并逐渐形成与车架焊接为一体的整体车身结构。到了50年代,这种形式基本成熟,但由于当时工艺所限,焊点周围容易腐蚀。第二次世界大战后不久,由于钢铁紧缺,复合材料车身应运而生。1953年,玻璃纤维薄板加钢筋构成的车身问世。由于玻璃纤维/树脂具有无腐蚀、制造成本低、易于制成复杂形状等优点,对小规模或短期生产有一定吸引力;但难于与金属件连接,纤维材料成本高^[1]。

随着车速的提高和道路上车辆的增多,事故隐患也相应增加。为了提高汽车安全性,各汽车生产厂商推出了多种新技术。1906年,德国推出带缓冲弹簧的汽车保险杠;1952年,座椅安全带成为美国汽车标准配置;1957年,瑞典沃尔沃(VOLVO)所有轿车上安装了三带式安全带;1959年,德国奔驰(BENZ)进行了全球首次汽车碰撞和翻滚试验;1973年,美国轿车全部安装了前后保险杠并开始生产安全气囊;1997年,萨博(SAAB)公司生产了侧面防撞安全气囊。

汽车发展到今天,车身的设计除了为承载人员、货物及自身重量需满足强度、刚度准则外,还要满足碰撞安全、振动、噪声等各种性能法规,并受审美、重量、成本等约束。随着新能源汽车的快速发展,底盘总布置发生变化,传统车身结构也应随之改变,节能、环保、轻量化的要求又使车身向多材料体方向发展。因此,掌握车身现代设计理论与方法是实现汽车自主研发的关键之一。

1.1.2 车身及车架结构形式的演变

20世纪20年代,大规模应用的标准汽车结构形式,是将独立车身安装于支撑发动机和传动系的刚性车架上,即“车身+车架”(body-on-chassis, body-on-frame)结构,称为“非承载式车身结构”。正常行驶时,该类结构主要由车架承担来自路面及发动机、人员、货物等各部件重量载荷,车身只在与车架的连接部位有载荷传递,如图1-1所示。其优点是:在标准车架上可安装不同的车身,使造型设计更加灵活;同时,也可将车身与车架的制造分开进行,符合当时木制车身为主的状况,并且方便地将底盘上各种零件安装在统一的车架上。

20世纪30年代,车架的典型形式是钢制的平面梯形框架(ladder frame),也称格栅(grillages)结构,如图1-2所示。它由两根纵梁和若干横梁组成。纵梁最初采用开口的

C 型截面梁(图 1-3(a)),通过铆接与横梁相连。横梁采用 Z 型截面(图 1-3(d))。整体结构主要承受框架平面的法线方向载荷,但在汽车运行时,由于承载重物及路面不平,整体结构还承受扭转载荷,但单根梁只承受弯曲和剪切载荷。

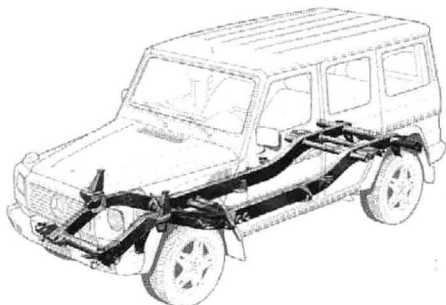


图 1-1 非承载式车身结构

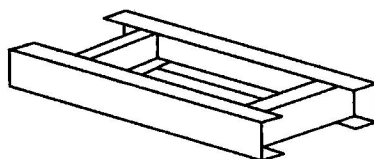


图 1-2 平面梯形车架^[1]

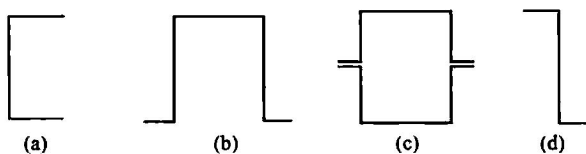


图 1-3 几种典型梁截面形状

(a) C 型; (b) U 型单帽; (c) 双帽闭口箱形; (d) 典型开口。

在 1936 年—1954 年生产的雪佛兰(Chevrolet)车上也使用类似 U 形的单帽型截面梁(图 1-3(b))。但无论 C 型还是 U 型,开口截面的刚度不如闭口,且容易生锈。因此,常将两个 C 型梁焊接成闭口的箱型截面,如图 1-3(c)所示,以增加刚度。也有将 U 型梁与车身底板焊接在一起提高了刚度,使其应用范围得到扩大。

由于梁结构的弯曲刚度与截面高度有关(详见第 3 章弯曲刚度计算),如果车架开口截面梁深度不够,将会导致弯曲刚度较差。20 世纪 20 年代,设计人员应用材料力学方法,在梁结构弯矩和剪力分布设计上花了很大精力,目的是提高车身、车架各自及整体装配结构的弯曲刚度。车身与车架的典型连接形式如图 1-4(a)所示。

承受弯曲载荷时,通过刚性螺栓连接的车身与车架相当于彼此串联(图 1-4(b))。假设车身和车架的弯曲刚度分别为 k_{B-body} 和 $k_{B-frame}$,则装配后的总弯曲刚度为

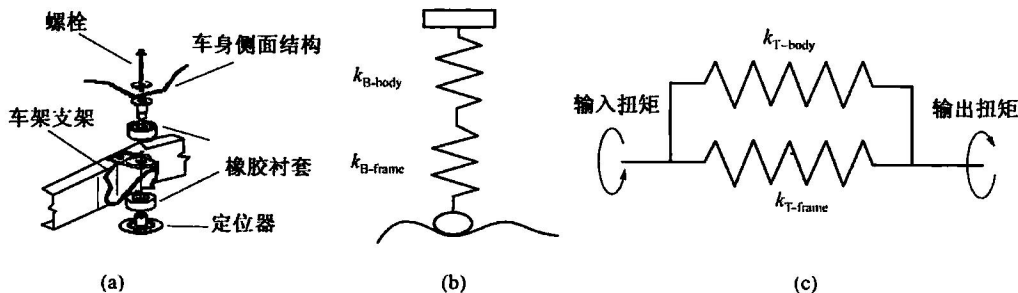


图 1-4 车身和车架的典型连接

(a) 连接形式^[2]; (b) 串联(弯曲工况); (c) 并联(扭转工况)^[3]。

$$k_B = \frac{1}{\frac{1}{k_{B-body}} + \frac{1}{k_{B-frame}}} \quad (1-1)$$

增加车身或车架任何一方的刚度都会使装配后的总刚度提高。但是,由于车身与车架的相对变形

$$\delta_{B-body}/\delta_{B-frame} = k_{B-frame}/k_{B-body} \quad (1-2)$$

刚度小的将发生更多的变形。

当承受扭转载荷时,通过刚性螺栓连接的非承载式车身相当于两个并联的扭转弹簧(图1-4(c))。假设车身和车架的扭转刚度分别为 k_{T-body} 和 $k_{T-frame}$,则装配后的总扭转刚度为

$$k_T = k_{T-body} + k_{T-frame} \quad (1-3)$$

车身与车架分担的扭矩之比为

$$T_{body}/T_{frame} = k_{body}/k_{frame} \quad (1-4)$$

由此可见,扭转刚度大的将承担更多的扭转载荷。因此,要获得良好的整体扭转刚度并合理分配各自承担的载荷,需要车身与车架的刚度能很好地匹配。

早期用开口截面梁构成的底盘,其扭转刚度较低,即使用T形接头的铆接也不能很好地将弯曲与扭转载荷向相邻构件传递。但是,由于当时的车身主要为木制结构,本身的扭转刚度也较低,扭转载荷可由彼此共同承担。若闭口截面金属车架与木制车身联合使用,扭转载荷将主要由金属车架承受。要很好地匹配车身与车架的扭转刚度,对于相对车架具有较高扭转刚度的车身,可采取一些降低车身扭转刚度的措施,例如,使用柔性金属接头连接木制车身元件,蒙皮采用织布材料,在高应力区使用铝包覆层,造成结构的不连续。

由于大批量生产的需要,20世纪30年代开始大量采用金属冲压,经焊接或铆接的车身与传统的开口截面车架铆接。30年代中期,车身和车架之间用螺栓连接,使两者更好地集成。当采用金属闭式车身代替木制车身时,车身扭转刚度大大提高,更多扭转载荷由车身承担,因此,在车身和车架之间出现咯咯、吱吱的响声,以及车身开裂等新问题。

对此可采取以下一些协调刚度匹配的措施:

(1) 在汽车前部及后部的车身和车架之间,使用橡胶垫等柔性支座充当扭转弹簧(图1-5)。

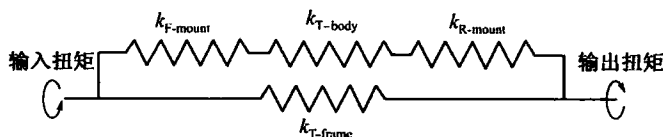


图1-5 车身与车架之间的柔性支座充当扭转弹簧^[1]

由于前、后支座的扭转刚度 $k_{F-mount}$ 和 $k_{R-mount}$ 均远远小于车身扭转刚度 k_{T-body} ,因此,连接后的车身总扭转刚度远小于未安装柔性支撑之前,即

$$k'_{T-body} = \frac{1}{\frac{1}{k_{T-body}} + \frac{1}{k_{F-mount}} + \frac{1}{k_{R-mount}}} < k_{T-body} \quad (1-5)$$

此时车身与车架的扭转刚度之比为

$$k'_{T-body}/k_{T-frame} = T'_{body}/T_{frame} < T_{body}/T_{frame} \quad (1-6)$$

可见,降低了车身承担的扭转载荷。

(2) 增加车架刚度。在早期由于开口截面梁仍是主流,为提高车架扭转刚度,经常采用十字支撑结构(图 1-6(a))增加扭转刚度,构成如图 1-6(b)所示的含 X 型中间梁的边梁式车架。尽管整体承受扭转载荷,但单个零件仅受弯曲和剪切,因此,仍可采用开口截面梁。但必须在图 1-6(a)所示中心点 C 有很好的、连续的、弯曲载荷传递路径。

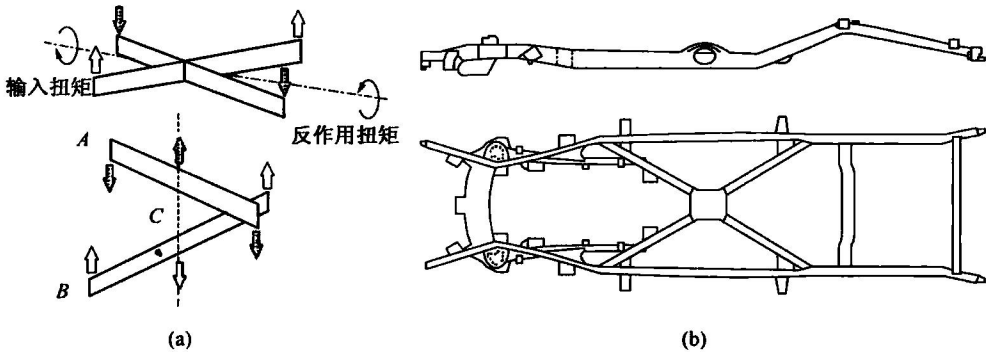


图 1-6 边梁式车架元件及装配

(a) 十字形连接元件的隔离体; (b) 含十字梁的边梁式车架^[1]。

此外,采用由剪力板构成的大截面闭口脊梁式车架(图 1-7(a)),或者将小截面管焊接成三角式框架结构、构成脊骨式底盘(图 1-7(b)),可形成有效的剪力承载结构,有利于提高车架刚度。后者也常用玻璃纤维增强塑料作为车身蒙皮,在多点与底盘相连,使装配后的整车刚度大于单独的车身或车架刚度。此外,采用小截面双管或多管充当车架中的梁,将相邻元件焊接在一起,也可提高车架刚度。这种结构在 1930 年—1950 年的赛车上使用比较多。

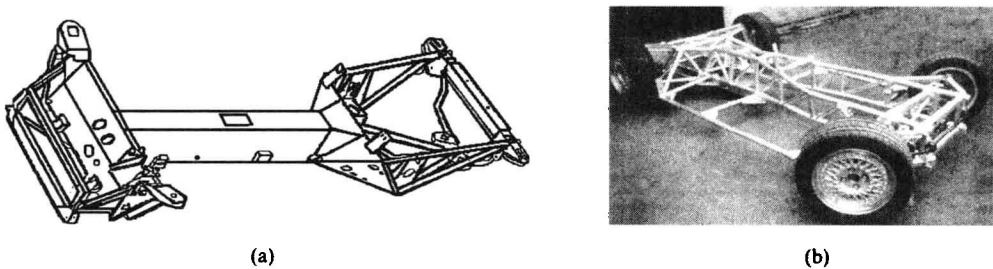


图 1-7 脊梁式车架^[3]

(a) 剪力板结构脊梁; (b) 三角架结构脊梁。

还有一种车架,采用平底船(punt)式或平台式结构(图 1-8),使中地板为具有较高扭转及弯曲刚度的零件,彼此连接成大型闭口截面格栅结构,而车身一般不承载。它用于少量生产,可方便变换车身样式,如莲花爱丽丝(Lotus Elise)铝车架。

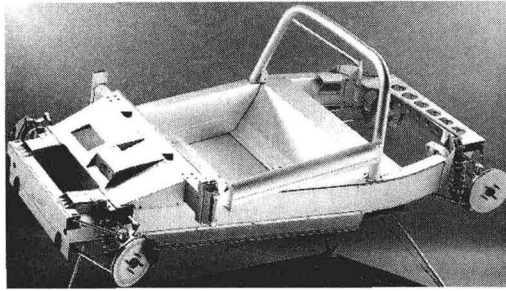


图 1-8 平底船式底盘^[3]

非承载式结构中,车架承受了各种作用力并保护了轿车底部。通过车身与车架间的各种减振措施,使车身振动噪声环境得到改善,但重量相对提高,目前多用于中、高级轿车上。此外,卡车、公共汽车、某些 SUV 及其他重型商用车至今仍用此结构,如图 1-9 和图 1-10 所示。

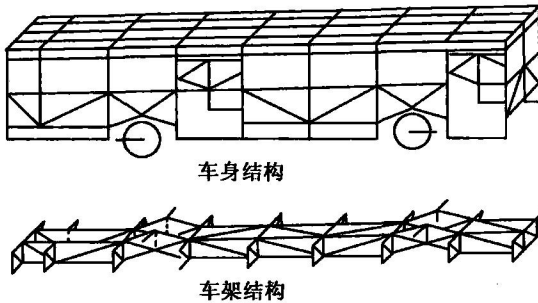


图 1-9 非承载式大客车结构

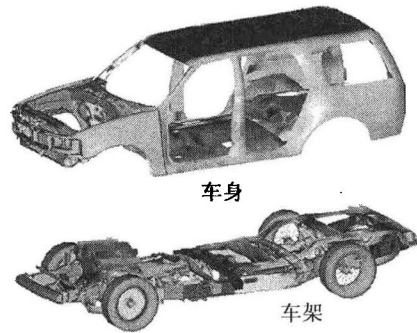


图 1-10 非承载式 SUV 车^[2]

为提高整体扭转刚度并减轻自身质量,可以将车身和车架作为一个制造和装配单元,共同承担载荷,构成“承载式汽车结构”。

第一个承载式车身是 20 世纪 30 年代的雪铁龙(CITROËN)11 CV,采用这种结构使其扭转刚度从 $934\text{N} \cdot \text{m}/(^{\circ})$ 提高到 $3390\text{N} \cdot \text{m}/(^{\circ})$ 。其特点是没有完整的车架,由经过加强的车头、车身、车尾和底板所组成的空间结构来承受各种作用力。其车身重量轻、刚度大、地板低、上下车方便,但对造型变化适应性差,换型较困难,目前常用于普通经济型轿车。

承载式车身主要由以下几种典型结构及制造工艺实现:

(1) 将小截面管焊接成多个平面三角形结构,共同围成空间槽形车身骨架。这种结构与增加车架扭转刚度的方法类似,如图 1-11 所示。用于赛车,可将扭转刚度提高 5 倍。其优点是金属覆盖件可直接附在骨架上,但不适合大批量生产。

(2) 仿飞机应力蒙皮结构,应用“单体壳”(monocoque)形成汽车车身(图 1-12),减

重效果明显。如果是完全封闭结构,扭转刚度可明显提高,但需防止蒙皮屈曲并应承受面外载荷。然而,由于一般汽车需要开门窗,无法达到理想效果,因此一般仅用于赛车。用碳纤维增强塑料(CFRP)制成的 F1 赛车,仅壳体部分的扭转刚度就大于 $30000\text{kN}/(^{\circ})$ 。

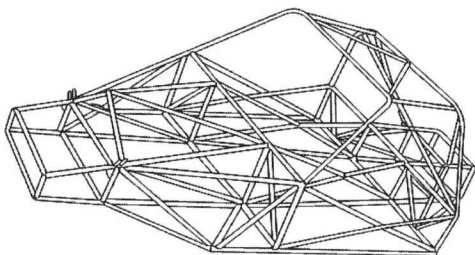


图 1-11 三角结构平面构成的空间车架^[1]

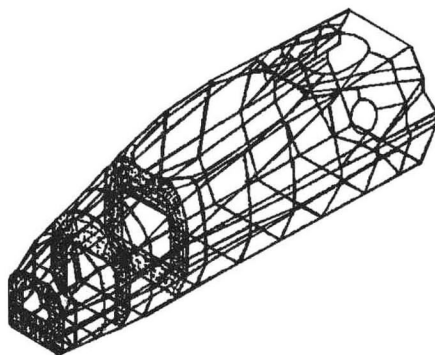
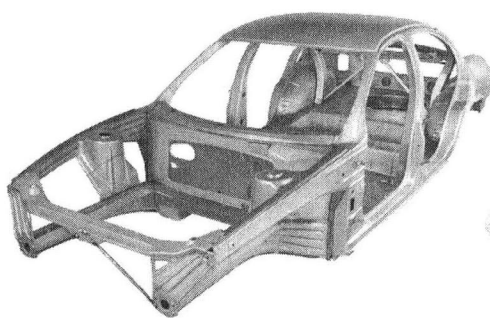
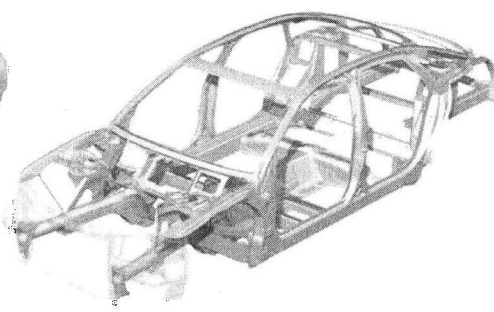


图 1-12 单体壳车身结构^[3]

(3) 整体式(integral, unitary)环形空间框架。该结构是单体壳和鸟笼式框架结构的综合体,一般采用钢板冲压、点焊连接,是目前广泛采用的形式,适用于大批量生产。具有较轻车身质量的典型结构如图 1-13(a)和(b)所示。



(a)

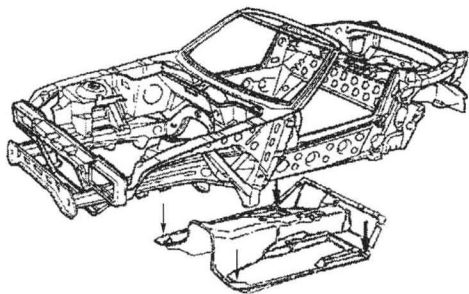


(b)

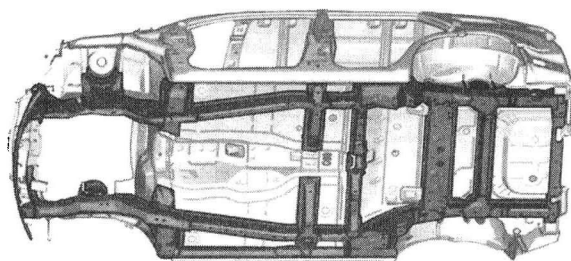
图 1-13 整体承载式典型结构

(a) 承载式超轻全钢车身(ULSAB)^[3]; (b) 承载式鸟笼框架结构(全铝)。

除非承载式和整体承载式车身外,还有半承载式,如图 1-14(a)和(b)所示。以车架承载为主,但车身也承担少部分载荷。



(a)



(b)

图 1-14 两款部分承载式汽车结构

1.2 现代车身典型结构与制造工艺

现代轿车典型结构如图 1-15 所示。在本书后面的各章,用到一些车身常用术语,为避免与车身演变进程中的名称混淆,帮助读者阅读国内车身资料,在此进一步明确现代车身中以下名称的内涵:

(1) 车架(chassis, frame)。通常为钢制矩形框架,通过弹簧与车轴相连,承载车身和发动机重量。

(2) 副车架(subframe)。悬架通过它与车身前端或后端连接,形状为箱型框架,但并非完整车架。

(3) 车身(automotive body)。汽车中置于车架上的封闭空间结构,由发动机舱乘员舱和行李舱组成。

(4) 车身骨架(body frame 或 body skeleton)和车身蒙皮(external panel 或 cover panel)。汽车车身由骨架和蒙皮焊装构成,骨架是支撑部件,蒙皮是外观部件,即车身外板。

(5) 白车身(body-in-white, BIW)。在车身制造过程的某个阶段,已安装了车身金属板(包括门、发动机盖、行李厢盖),但某些外部零部件(底盘及发动机)及内部零件(挡风玻璃、座椅、装饰、电子产品等)还未安装时的车身。由于还未喷漆,所以称白车身。其组成零件部分如图 1-15 所示,构成零件的中英文名称见表 1-1。

(6) 装饰车身(trimmed body)。在白车身基础上安装了各种内饰件的车身。

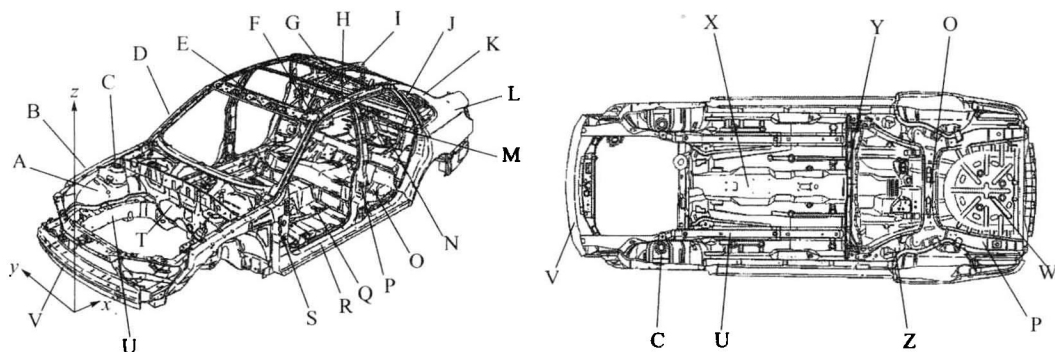


图 1-15 白车身零件组成^[1]

表 1-1 白车身零件名称中英文对照

序号	英国表述	美国表述
A	内翼子板 Inner wing panel	发动机舱侧板 Motor compartment side panel
B	翼子板上部边梁 Upper wing member	发动机舱上部边梁 Motor compartment upper rail