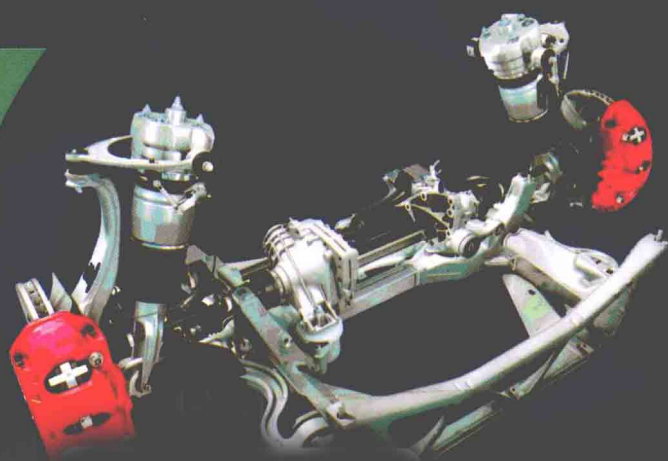


车辆悬架

设计及理论

周长城 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

车辆悬架设计及理论

周长城 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

车辆悬架决定和影响车辆行驶的平顺性和安全性,因此,本书首先介绍了车辆悬架的作用、组成、类型以及研究发展状况。然后以汽车简化振动模型和行驶振动模型为基础,介绍了单质量车身振动及特性、双质量车身车轮振动及特性、双轴汽车垂直振动和俯仰平面振动及特性、“人一车”三自由度系统的振动及特性以及车辆行驶随机振动及特性,介绍了汽车行驶的平顺性和安全性及评价,介绍了车辆悬架系统分别基于舒适性和安全性的最佳阻尼匹配,以及基于安全性和舒适性相统一的最佳阻尼比。同时,针对振动悬架系统组成部件的设计理论和方法进行介绍,即分别介绍了悬架弹簧、筒式液压减振器、悬架稳定杆的设计理论和方法。随后,分别对空气弹簧、油气悬架的类型、结构、工作原理、特性、设计理论,以及特性试验和分析进行了介绍;最后,对半主动悬架和主动悬架的类型、特点、设计理论、控制规律和控制策略进行了介绍。

目前国内外尚没有有关车辆悬架设计及理论方面的书,本书是在作者多年对车辆悬架研究成果的基础上总结后编写而成的,很多内容包含了作者的最新研究成果。本书内容叙述力求深入浅出、层次分明,既有理论分析,又有试验测试,各章节既有理论分析和实例讲解,最后又编排有该章小结。

本书可作为车辆工程、交通运输及相关专业的本科生和研究生参考用书,也可作为车辆工程技术人员进行车辆悬架设计的重要参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

车辆悬架设计及理论/周长城著. —北京:北京大学出版社, 2011. 8

ISBN 978-7-301-19298-6

I. ①车… II. ①周… III. ①汽车—悬架—设计 IV. ①U463.330.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 154952 号

书 名: 车辆悬架设计及理论

著作责任者: 周长城 著

责任编辑: 童君鑫

标准书号: ISBN 978-7-301-19298-6/TH·0250

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: pup_6@163.com

印刷者: 三河市富华印装厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 449 千字

2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 48.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

随着汽车工业的发展，人们对汽车的乘坐舒适性和操纵稳定性提出了更高要求，而车辆悬架决定和影响车辆行驶的平顺性、操作稳定性和乘坐舒适性。然而，尽管国内外很多专家对车辆悬架进行了大量的研究，但由于受关键设计理论和方法的制约，目前车辆悬架及关键零部件的设计大都是采用“经验+反复试验”的方法，即首先凭经验确定车辆悬架及零部件的关键参数，然后经过反复试验和修改，最终才确定出所设计的悬架及零部件的关键参数值。因此，传统的车辆悬架及关键零部件的设计方法，不能满足汽车工业快速发展的要求。进入世界贸易组织以后，我国研发具有自主知识产权的汽车产品，已经提到了议事日程。要提高我国汽车的自主研发能力，必须从基本原理和理论出发，根据车辆行驶平顺性、操作稳定性和乘坐舒适性的要求，对车辆悬架设计及理论进行研究。

目前国内外尚没有有关车辆悬架设计及理论方面的书，本书是在作者多年对车辆悬架研究成果的基础上总结后编写而成的，很多内容包含了作者的最新理论研究成果。本书可作为高等院校车辆工程、交通运输专业的本科生及研究生的参考书，对于从事汽车或其他车辆工程的技术人员也具有重要的参考价值。本书力求深入浅出，循序渐进，以车辆行驶振动简化模型为研究对象，以车辆行驶平顺性、操作稳定性和乘坐舒适性为研究目标，以车辆悬架及各零部件组成的设计理论和方法为主线，对车辆简化模型的振动及特性进行分析，对车辆行驶平顺性和安全性及评价进行了介绍，对车辆悬架最佳阻尼匹配进行分析；对车辆悬架的重要组成部件，即减振器、弹簧和悬架稳定杆的设计理论和方法进行介绍，对空气弹簧、油气悬架的设计理论和方法进行阐述；对车辆半主动悬架和主动悬架的设计理论和方法、可控减振器及节流参数控制规律以及半主动悬架和主动悬架的控制策略进行分析。本书内容精简、叙述力求深入浅出、层次分明，既有理论分析，又有特性试验，各章节注重前后的逻辑性和衔接性，将新理论和方法分析与设计实例讲解相结合，最后给出该章小结。

在本书编写过程中，得到了山东理工大学研究生赵雷雷、毛少坊、郭剑、李红艳、高春蕾和文森森等的大力支持，他们对书中的文字内容进行了校对，对书中的插图进行了绘制，在此表示感谢。

限于作者水平，书中难免有疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

周长城

2011年6月

目 录

第 1 章 车辆悬架概述 1

- 1.1 车辆悬架的定义、作用及性能要求 1
 - 1.1.1 车辆悬架的定义 1
 - 1.1.2 车辆悬架的作用 2
 - 1.1.3 车辆悬架系统的性能要求 ... 3
- 1.2 车辆悬架的组成 3
 - 1.2.1 弹簧 3
 - 1.2.2 减振器 7
 - 1.2.3 稳定杆 9
- 1.3 车辆悬架的类型 10
 - 1.3.1 非独立悬架系统 11
 - 1.3.2 独立悬架系统 11
 - 1.3.3 半主动悬架系统 16
 - 1.3.4 主动悬架系统 17
- 1.4 车辆悬架研究与发展状况 18
 - 1.4.1 被动悬架的研究及发展状况 18
 - 1.4.2 半主动悬架的研究及发展状况 19
 - 1.4.3 主动悬架的研究及发展状况 20
- 小结 23

第 2 章 车辆简化模型及振动 24

- 2.1 车辆振动简化模型 24
- 2.2 单质量车身振动 26
 - 2.2.1 单质量车身振动微分方程 26
 - 2.2.2 单质量系统的自由振动响应 26
 - 2.2.3 单质量系统在简谐激振力下的响应 28
 - 2.2.4 单质量系统在单位谐波函数激励下的响应 30

- 2.2.5 单质量系统振动响应的傅氏积分法 31
- 2.2.6 单质量车身在路面激励下的振动响应 31
- 2.3 双质量车身车轮振动 33
 - 2.3.1 双质量系统振动微分方程 33
 - 2.3.2 双质量无阻尼系统的自由振动 34
 - 2.3.3 双质量振动系统的传递特性 36
- 2.4 双轴汽车垂直和俯仰平面振动 37
 - 2.4.1 双轴汽车垂直振动和俯仰振动微分方程 38
 - 2.4.2 双轴汽车振动频率响应函数及振动响应 39
- 2.5 “人—车”三自由度系统的振动 ... 40
 - 2.5.1 “人—车”系统振动模型 40
 - 2.5.2 振动响应传递特性 41
- 2.6 车辆随机振动 42
 - 2.6.1 随机振动的基本概念 42
 - 2.6.2 随机振动的统计特性 43
 - 2.6.3 线性振动系统的随机响应计算 47
- 小结 51

第 3 章 汽车行驶平顺性与安全性 52

- 3.1 道路路面不平度的统计描述 52
 - 3.1.1 路面谱及其分类 52
 - 3.1.2 空间频率与时间频率功率谱密度的关系 54
 - 3.1.3 车辆路面不平输入的功率谱密度 55
- 3.2 平顺性分析 56



3.2.1	系统响应量的功率谱 密度和均方值	57
3.2.2	单质量系统的车辆 平顺性分析	57
3.2.3	双质量系统模型的车辆 平顺性分析	61
3.2.4	双质量系统参数的车辆 平顺性影响分析	64
3.3	车辆平顺性及评价	67
3.3.1	汽车平顺性的定义	67
3.3.2	人体对振动的反应	68
3.3.3	人体振动评价	70
3.3.4	车辆振动评价	72
小结		78
第4章	车辆悬架系统阻尼匹配	79
4.1	基于舒适性的悬架系统最佳 阻尼比	79
4.1.1	单轮二自由度悬架系统 响应的频响函数	79
4.1.2	车身垂直加速度 均方值	80
4.1.3	基于舒适性的车辆悬架 最佳阻尼比 ξ_{∞}	80
4.2	基于安全性的悬架系统最佳 阻尼比	81
4.3	基于舒适性和安全性的最佳 阻尼比	82
4.3.1	悬架动挠度	82
4.3.2	基于舒适性和安全性的 半主动悬架最佳阻尼比	82
4.3.3	路况及车速预测	85
4.4	被动悬架系统最佳阻尼可行性 设计区	87
4.5	悬架系统最佳匹配减振器的 阻尼特性	87
4.5.1	悬架系统最佳阻尼系数	87
4.5.2	减振器最佳阻尼 分段线性特性	88
小结		91

第5章 液压筒式减振器设计及

理论	92
5.1 筒式减振器的结构和工作原理 ...	92
5.1.1 减振器的结构	92
5.1.2 减振器的工作原理	93
5.2 液压减振器阻尼构件及阻尼力分析	93
5.2.1 阻尼构件分析	93
5.2.2 节流压力损失与叠加原理	97
5.2.3 减振器的阻尼力分析	98
5.3 减振器的特性及特性参数	100
5.3.1 减振器的示功图	100
5.3.2 减振器的速度特性	100
5.3.3 减振器的阻尼特性参数	101
5.4 减振器设计的基本理论	103
5.4.1 减振器节流阀片变形解析计算	103
5.4.2 节流阀片应力解析计算	111
5.4.3 减振器叠加阀片等效厚度计算	114
5.4.4 减振器叠加节流阀片等效拆分设计原则和方法	115
5.4.5 减振器油液非线性节流损失解析计算	116
5.5 基于速度特性的减振器阀系参数设计	117
5.5.1 减振器阀系参数设计顺序和设计方法	117
5.5.2 基于速度特性的减振器复原阀系参数的单点速度设计数学模型	119
5.5.3 基于速度特性的减振器压缩阀系参数的单点速度设计数学模型	122
5.5.4 基于速度特性的减振器常通节流孔面积的曲线拟合优化设计	124

5.5.5 基于速度特性的减振器 节流阀片厚度的曲线拟合 优化设计	126	5.9.7 汽车减振器温度特性 试验	150
5.5.6 基于速度特性的减振器 其他阀系参数的曲线 拟合优化设计	128	5.9.8 汽车减振器抗泡沫性 试验	151
5.6 减振器阀系参数黄金分割优化 设计	128	小结	152
5.6.1 单分段速度特性的黄金 分割速度设计点	129	第6章 悬架弹簧设计	153
5.6.2 多分段速度特性的黄金 分割速度设计点	129	6.1 悬架主要参数的确定	153
5.7 基于车辆参数的减振器阀系 参数设计	132	6.1.1 前、后悬架的偏频	153
5.7.1 车辆悬架最佳阻尼匹配 减振器速度特性	132	6.1.2 前、后悬架的静挠度	153
5.7.2 基于车辆参数的减振器阀系 参数设计	133	6.1.3 悬架的动挠度	154
5.8 减振器阀系参数 CAD 设计	134	6.1.4 悬架的弹性特性	154
5.8.1 减振器阀系参数 CAD 系统 简介	134	6.2 悬架及弹簧刚度的设计	154
5.8.2 CAD 软件的研发工具	135	6.2.1 悬架刚度设计	154
5.8.3 减振器 CAD 软件的 相关技术	136	6.2.2 弹簧刚度设计	155
5.8.4 C++与 AutoCAD 数据 传递接口设计	137	6.3 悬架主、副弹簧刚度设计	156
5.8.5 基于控件技术实现图形与 图纸处理	138	6.3.1 比例中项法	156
5.8.6 减振器阀系参数 CAD 设计实例	138	6.3.2 平均载荷法	157
5.9 减振器特性试验	144	6.4 螺旋弹簧设计与安装	158
5.9.1 汽车减振器特性试验 内容	144	6.4.1 螺旋弹簧设计	158
5.9.2 试验设备	144	6.4.2 螺旋弹簧的安装	159
5.9.3 汽车减振器阻尼特性 试验	145	6.4.3 特殊弹簧的使用	161
5.9.4 汽车减振器摩擦力 试验	148	6.5 扭杆弹簧设计	162
5.9.5 汽车充气减振器充气力 试验	149	6.5.1 扭杆断面形状及端部 结构	162
5.9.6 汽车减振器耐久特性 试验	149	6.5.2 扭杆直径设计	163
		6.6 橡胶扭簧设计	165
		6.6.1 橡胶扭簧	165
		6.6.2 橡胶扭簧宽度 h 的 设计	166
		6.6.3 橡胶扭簧的强度校核	167
		6.7 钢板弹簧设计	167
		6.7.1 钢板弹簧的布置方案	167
		6.7.2 钢板弹簧主要参数的 确定	167
		6.7.3 钢板弹簧各片长度的 确定	170
		6.7.4 主、副钢板弹簧厚度的 解析设计	171
		6.7.5 钢板弹簧的刚度验算	174



6.7.6	钢板弹簧总成在自由状态下的弧高及曲率半径计算	176	8.1.1	空气悬架的研究发展状况	202
6.7.7	钢板弹簧弧高与曲面形状的解析设计	177	8.1.2	空气悬架的组成	203
6.7.8	钢板弹簧总成弧高的核算	180	8.1.3	空气悬架的分类	203
6.7.9	钢板弹簧的强度验算	180	8.2	空气悬架的工作原理及使用特点	204
6.7.10	少片钢板弹簧	182	8.2.1	空气悬架的工作原理	204
小结		184	8.2.2	使用特点	204
第7章	悬架稳定杆设计	185	8.2.3	空气弹簧的特点	205
7.1	稳定杆安装结构	185	8.3	空气弹簧的布置	206
7.2	稳定杆悬架轴套的变形	185	8.4	高度控制阀	207
7.2.1	橡胶衬套及叠加力学模型	186	8.4.1	高度控制阀的分类	207
7.2.2	橡胶衬套径向变形求解	187	8.4.2	高度控制阀的工作原理	208
7.2.3	橡胶轴座的线性径向刚度	193	8.5	囊式、膜式、复合式空气弹簧	209
7.3	稳定杆端点的位移	193	8.5.1	囊式空气弹簧	209
7.3.1	橡胶支座变形引起的稳定杆端点位移	193	8.5.2	膜式空气弹簧	210
7.3.2	稳定杆变形产生的端点位移	194	8.5.3	复合式空气弹簧	211
7.3.3	稳定杆端点的总位移及等效线性刚度	195	8.6	空气弹簧的刚度及固有频率	211
7.4	横向稳定杆最佳刚度匹配	195	8.6.1	空气弹簧的垂直刚度	211
7.4.1	汽车侧倾模型	196	8.6.2	空气弹簧的平衡位置刚度	212
7.4.2	汽车侧倾刚度	196	8.6.3	空气弹簧的动、静刚度	212
7.4.3	稳定杆刚度匹配设计	197	8.6.4	空气弹簧的固有频率	213
7.5	稳定杆直径设计	199	8.7	空气弹簧的阻尼特性	214
7.5.1	稳定杆直径设计数学模型	199	8.8	空气弹簧悬架的特性试验与分析	215
7.5.2	稳定杆直径设计实例	200	8.8.1	空气弹簧悬架的试验原理	215
7.6	稳定设计影响因素分析	200	8.8.2	空气弹簧悬架的静特性试验	215
小结		201	8.8.3	空气弹簧悬架的动特性试验	216
第8章	空气悬架设计	202	8.8.4	空气弹簧悬架的动特性分析	216
8.1	空气悬架的研究发展状况、组成及分类	202	小结		218
8.1.1	空气悬架的研究发展状况	202	第9章	油气悬架设计	219
8.1.2	空气悬架的组成	203	9.1	油气悬架的发展和研究状况	219
8.1.3	空气悬架的分类	203	9.1.1	油气悬架的发展状况	219
8.2	空气悬架的工作原理及使用特点	204			
8.2.1	空气悬架的工作原理	204			
8.2.2	使用特点	204			
8.2.3	空气弹簧的特点	205			
8.3	空气弹簧的布置	206			
8.4	高度控制阀	207			
8.4.1	高度控制阀的分类	207			
8.4.2	高度控制阀的工作原理	208			
8.5	囊式、膜式、复合式空气弹簧	209			
8.5.1	囊式空气弹簧	209			
8.5.2	膜式空气弹簧	210			
8.5.3	复合式空气弹簧	211			
8.6	空气弹簧的刚度及固有频率	211			
8.6.1	空气弹簧的垂直刚度	211			
8.6.2	空气弹簧的平衡位置刚度	212			
8.6.3	空气弹簧的动、静刚度	212			
8.6.4	空气弹簧的固有频率	213			
8.7	空气弹簧的阻尼特性	214			
8.8	空气弹簧悬架的特性试验与分析	215			
8.8.1	空气弹簧悬架的试验原理	215			
8.8.2	空气弹簧悬架的静特性试验	215			
8.8.3	空气弹簧悬架的动特性试验	216			
8.8.4	空气弹簧悬架的动特性分析	216			
小结		218			
第9章	油气悬架设计	219			
9.1	油气悬架的发展和研究状况	219			
9.1.1	油气悬架的发展状况	219			

9.1.2 油气悬架的研究状况	220	9.6.5 油气悬架油液节流 阻尼力及变化曲线	247
9.2 油气悬架的类型、结构和工作 原理	223	9.6.6 油气悬架油阻尼特性 分析	248
9.2.1 油气悬架的类型	223	小结	249
9.2.2 油气悬架的结构和工作 原理	224	第 10 章 半主动悬架设计及控制	250
9.3 油气悬架的特点和应用领域	226	10.1 主动悬架及其分类	250
9.3.1 油气悬架的特点	226	10.1.1 主动悬架的定义	250
9.3.2 油气悬架的应用 领域	227	10.1.2 主动悬架的分类	250
9.4 油气悬架设计的基本理论	227	10.1.3 主动悬架的控制功能	251
9.4.1 油液可压缩性	227	10.2 半主动悬架及设计	254
9.4.2 气室压力和容积变化 规律	228	10.2.1 半主动悬架的分类	254
9.4.3 油液节流压力分析 计算	229	10.2.2 半主动悬架可控 减振器	254
9.4.4 阀片最大变形和应力 计算	229	10.2.3 可控减振器驱动方式	256
9.4.5 叠加阀片等效厚度计算及 拆分设计理论	231	10.3 半主动悬架控制系统的理论 模型	257
9.4.6 车辆悬架最佳阻尼特性 匹配数学模型	233	10.3.1 半主动悬架动力学 模型	257
9.5 油气悬架气室初始压力及节流阀 参数解析设计	235	10.3.2 控制系统问题的数学 描述	257
9.5.1 油气弹簧气室初始充气 压力设计	235	10.3.3 半主动悬架控制问题的 数学定义及无阻尼约束的 最优解	258
9.5.2 节流孔式油气弹簧阀系 参数设计	235	10.4 半主动悬架最优控制律	260
9.5.3 节流阀片式油气弹簧阀系 参数设计	238	10.4.1 基于最优控制力的控制 规律	260
9.5.4 油气弹簧阀系参数设计 实例	240	10.4.2 基于悬架系统最佳阻尼 比的阻尼控制规律	263
9.6 油气悬架特性试验及特性参数 分析	240	10.4.3 半主动悬架可控减振器 节流阀参数控制规律	264
9.6.1 油气悬架特性试验	240	10.4.4 半主动悬架可控减振器 节流阀参数与转角之间 关系	267
9.6.2 油气悬架阻力及变化 曲线	241	10.4.5 半主动悬架可控减振器 步进电机转角随车辆 行驶状态变化规律	272
9.6.3 油气悬架惯性力及变化 曲线	243	10.4.6 最佳阻尼比控制律 仿真	273
9.6.4 油气悬架气室压力及 变化曲线	244	10.5 半主动悬架控制及策略	274



10.5.1 汽车半主动悬架系统的控制原理	274	11.3.1 闭环传递函数	287
10.5.2 半主动悬架控制策略分类	275	11.3.2 主动系统响应渐进线 ...	287
10.5.3 悬架控制策略	275	11.4 悬架问题的不动点及其特性影响分析	288
小结	279	11.4.1 悬架问题的不动点	288
第 11 章 主动悬架系统设计	280	11.4.2 基于不动点的综合性能分析	289
11.1 主动悬架模型及振动微分方程	280	11.5 主动悬架速度反馈控制器及液压执行器	291
11.1.1 主动悬架模型	280	11.5.1 主动悬架速度反馈控制器	291
11.1.2 主动悬架振动微分方程	280	11.5.2 主动悬架的液压执行器	292
11.2 主动控制	281	11.6 主动悬架的模糊控制	293
11.2.1 传递函数	281	11.6.1 模糊控制器结构的选择	293
11.2.2 LQR 算法及与 H_2 最优控制关系	281	11.6.2 模糊控制规则的选取 ...	293
11.2.3 基于 LQR 算法的主动悬架设计	282	11.6.3 模糊输出量的确定和模糊判决	295
11.2.4 LQR 控制器的性能研究	283	小结	296
11.3 主动系统的渐进线	287	参考文献	298

第 1 章

车辆悬架概述

1.1 车辆悬架的定义、作用及性能要求

1.1.1 车辆悬架的定义

16 世纪的四轮载人和载货马车为解决“路上感觉非常颠簸”的问题，将车厢用皮带吊在底盘的 4 根柱子上，就像翻过来的桌子一样。因为车厢是挂在底盘上的，所以人们渐渐将其称为“悬架(Suspension)”，并沿用至今，以描述整个一类的解决方案。车厢吊起式的悬架还不是一个真正的弹簧系统，但它确实使车厢与车轮的运动分离开来。半椭圆形的弹簧设计(也称为车载弹簧)迅速取代了皮带式的悬架。半椭圆形弹簧广泛用在四轮或两轮载人、载货马车上，并且通常在前、后轴上使用。不过，它们确实容易造成前后晃动，并且有较高的重心。当动力汽车面世时，人们陆续开发出其他更高效的弹簧系统，使乘客享有更平稳的行驶感觉。因此，车辆悬架是指汽车的车架与车桥或车轮之间的一切连接装置的总称，其作用是传递作用在车轮和车架之间的力和力矩，缓冲行驶过程中由路面不平引起并传递给车架或车身的冲击力，衰减由此引起的振动，以保证汽车能平顺地行驶，保证乘坐舒适和货物完好。悬架决定着车辆的操纵稳定性、乘坐舒适性和行驶安全性，是现代汽车十分重要的部件之一。车辆悬架在现代汽车中的装配如图 1.1 所示。

由汽车构造可知，车辆底盘包含了位于车身下方的所有重要系统，其中包括如下几项。

(1) 车架——承载负荷的结构性部件，用于支撑汽车的发动机和车身，而它本身由悬架支撑。

(2) 悬架系统——用于支撑重量、吸收和消除振动以及帮助维持轮胎接触的装置。

(3) 转向系统——使驾驶员能够操控车辆方向的机械。

(4) 轮胎和车轮——利用抓地与路面的摩擦力使车辆能够运动起来的部件。

因此，车辆悬架在任何车辆中都是主要系统之一。

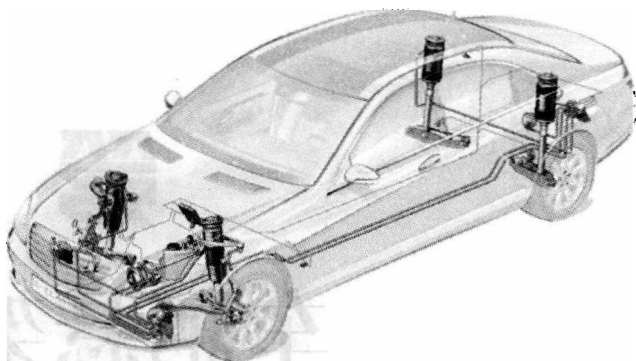


图 1.1 车辆悬架在汽车上的装配图

1.1.2 车辆悬架的作用

人们在考虑汽车的性能时，通常会关注马力、转矩和“0~100km/h”加速时间等参数。但是如果驾驶员无法操控汽车，那么活塞发动机产生的所有动力都将毫无用处。鉴于此，车辆工程人员在掌握了四冲程内燃发动机后，立即就把注意力转向了车辆悬架系统。

汽车悬架的工作是最大限度地增加轮胎与路面之间的摩擦力，提供能够良好操纵的转向稳定性，以及确保乘客的舒适度。但由于道路往往并不平坦，即使是新铺的高速公路，其路面也会略有凹凸不平而对汽车车轮造成影响，路面将力作用在车轮上。根据牛顿第三定律，车轮也会给地面一个反作用力，力的大小取决于车轮颠簸的程度。总之，车辆通过颠簸不平的路面时，车轮垂直于路面上下运动，并使车轮产生一个垂直加速度。如果没有一个居间结构，所有车轮的垂直能量将直接传递给在相同方向上运动的车架。在此情况下，车轮会完全丧失与路面的接触，然后在向下的重力作用下再次撞击路面。因此，车辆需要一个能够吸收垂直加速车轮的能量，使车轮顺着路面上下颠簸的同时车架和车身不受干扰的系统，即悬架系统。

行驶中车辆的动力学特性包括行驶特性和操纵特性，其中，车辆的行驶特性是指汽车平稳驶过崎岖不平的路面的性能；而车辆的操纵特性是指汽车安全地加速、制动和转弯的性能。这两个特征可通过路面隔离性能、抓地性能和转弯性能指标要求来反映，见表 1-1。

表 1-1 路面隔离性能、抓地性能和转弯性能指标要求

性能指标	定义	目标	解决方案
路面隔离性能	车辆吸收路面振动或将其与乘客席隔离的性能	使车身在驶过不平路面时不受干扰	吸收并消化路面颠簸产生的能量，从而使车辆不至于产生过度的振动
抓地性能	在各种类型的方向变化以及直线行驶过程中，汽车保持与路面接触的程度	保持轮胎与地面接触，因为轮胎与路面之间的摩擦力会影响车辆转向、制动和加速性能	尽量减少车身重量的左右和前后转移，因为这会降低轮胎的抓地性能
转弯性能	车辆沿弯路行驶的性能	尽量减少在车辆转弯时，车身的侧倾趋势	转弯时将汽车的重量从较高的一侧转移到较低一侧

车辆悬架及其各种部件提供了上面所述性能指标要求，即路面隔离性能、抓地性能和转弯性能的全部解决方案。

1.1.3 车辆悬架系统的性能要求

汽车悬架性能是影响汽车行驶平顺性、操纵稳定性和行驶速度的重要因素，在悬架的设计中应满足如下性能的要求。

(1) 保证汽车有良好的行驶平顺性。为此，汽车应有较低的振动频率，乘客在车中承受的振动加速度应满足国际标准 ISO—2631—97 规定的人体承受振动界限值。

(2) 有合适的减振性能。它应与悬架的弹性特性很好地匹配，保证车身和车轮在共振区的振幅小，振动衰减快，使汽车具有良好的乘坐舒适性。

(3) 保证汽车有良好的操纵稳定性。导向机构在车轮跳动时，应不使主销定位参数变化过大，车轮运动与导向机构运动应协调，不出现摆振现象。转向时整车应有一些不足转向特性。

(4) 汽车制动和加速时能保持车身稳定，减少车身纵倾(即“点头”或“后仰”)的可能性。

(5) 能够可靠地传递车身与车轮间的一切力和力矩，零部件质量轻并有足够的强度和寿命，保证车辆的正行和减少轮胎磨损等功能。

1.2 车辆悬架的组成

典型的悬架系统结构由弹簧、减振器、导向机构及稳定杆等组成，个别结构还有缓冲块，如图 1.2 所示。

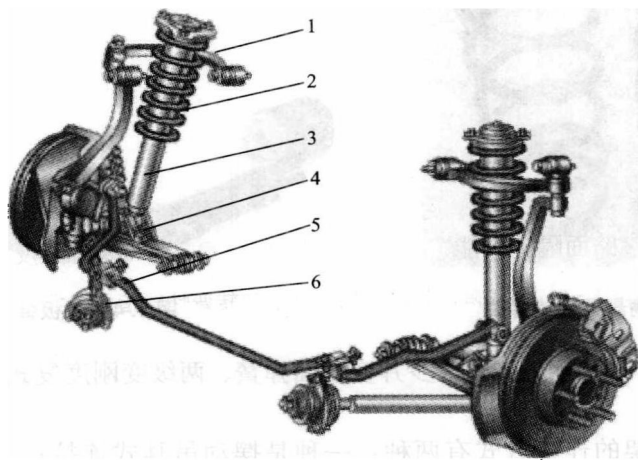


图 1.2 车辆悬架组成元件示意图

1—上摆臂；2—弹簧；3—减振器；4—下摆臂；5—稳定杆；6—纵向推力杆

1.2.1 弹簧

悬架弹簧的软硬对车辆行驶的安全性和乘坐舒适性有重要的影响。弹簧较软的汽车(如林肯城市这样的豪华汽车)可以彻底消除颠簸并提供极平稳的行驶感觉，车辆的舒适性



高,但同时在制动和加速过程中易产生俯冲和蹲伏现象,在转弯时易产生侧倾和翻滚趋势,即车辆的安全性差。然而,弹簧较硬的汽车(如马自达 Miata)在颠簸路面上的平稳性稍差,乘坐舒适性差,但车身移动非常小,这意味着即使是在转弯处,也可以用较激烈的方式来驾驶,即车辆的行驶安全性高。

现在的弹簧系统均以下面 4 种基本设计之一为基础。

1. 螺旋弹簧

螺旋弹簧是最常见的弹簧类型。它其实是一个绕轴盘绕的重型扭杆,通过伸缩来缓冲车轮的运动。螺旋弹簧结构简单,制造容易,应用最为广泛,常见的车辆悬架螺旋弹簧如图 1.3 所示。

2. 钢板弹簧

由若干片钢板组合在一起充当一个单元的金属层(称为“叶片”)组成,即由多片钢板弹簧叠加而成。扁平长方形的钢板呈弯曲形,以数片叠成的底盘用弹簧,一端以销子安装在吊架上,另一端使用吊耳连接到大梁上,使弹簧能伸缩。起初用在马车上,直到 1985 年才开始在大多数美国汽车上应用。目前适用于一些非承载车身的硬派越野车及中大型的货卡车上,如图 1.4 所示。

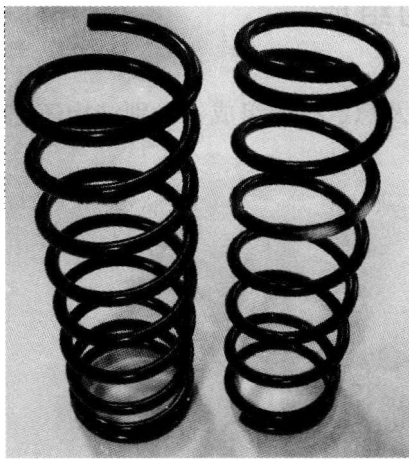


图 1.3 车辆悬架螺旋弹簧



图 1.4 钢板弹簧

钢板弹簧主要有多片钢板弹簧、少片变截面弹簧、两级变刚度复式钢板弹簧、渐变刚度弹簧等类型。

钢板弹簧与车架的连接方式有两种:一种是摆动吊耳式连接;另一种是滑板式连接。其中,滑板式连接方式的钢板弹簧一端有卷耳,另一端没有卷耳,插入与车架固定连接的支架内并可滑动。第一片簧片为平直的端头,第二片的端部有向下的弯角,以免车架剧烈跳动时钢板从支架中脱出。为避免钢板弹簧变形时直接摩擦支架,在后支架上装有滑块和两侧的垫板。由于钢板弹簧变形时,主片上表面与弧形滑块的接触点是变动的,因而钢板弹簧工作长度变化,其刚度也略有改变。当载荷小时,钢板弹簧有效长度较长,弹性好;而当载荷增大时,钢板弹簧的有效长度减小,刚度略有增加。

钢板弹簧有摩擦阻尼和变刚度两个特点。

1) 摩擦阻尼

由于钢板弹簧在载荷作用下变形时,各片钢板之间有摩擦产生,对车辆振动有衰减作用。因此,在对减振要求不高的车辆,例如,一般中型货车的后悬架或重型货车悬架中,大都采用钢板弹簧的悬架,而不安装单独的减振器。但是各片钢板之间的干摩擦,将使车轮所受的冲击在很大程度上传给了车架,即降低了悬架缓和冲击的能力,并使各钢板之间的磨损加快。为了保证钢板片之间产生定值摩擦力以及消除噪声,可在钢板片之间夹入耐磨的塑料片,如在某些高级轿车的后悬架钢板弹簧,就采用了这种结构。

2) 变刚度

钢板弹簧采用不同的安装方式,可得到二级刚度钢板弹簧和渐变刚度钢板弹簧。其中,当货车上采用纵置式钢板弹簧非独立悬架时,如果主钢板弹簧的上面叠加副钢板弹簧,二者用 U 形螺栓固定装到后桥上,其中,主簧上端的连接如前所述,副簧两端平直,如图 1.5 所示,便可得到二级刚度钢板弹簧。

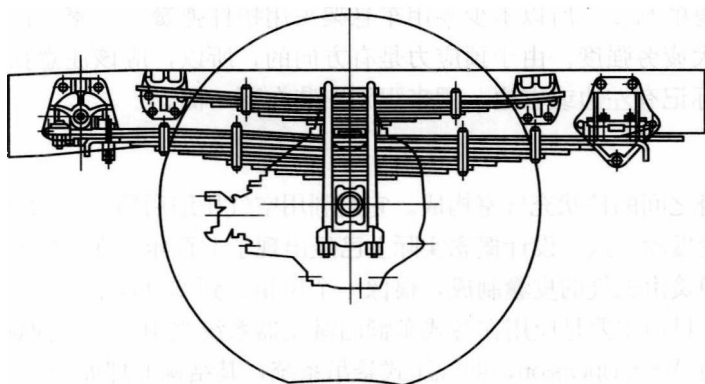


图 1.5 二级刚度的主、副钢板弹簧悬架

由图 1.5 可知,当汽车载荷不大时,其两端上表面与铆接在车架上的副簧托架之间存在空隙而不接触,故只有主簧起作用,副簧不起作用。当汽车重载或满载时,主簧变形大,副簧与托架接触,此时主、副簧同时工作,悬架刚度随之增大。

为了提高汽车的平顺性,有些轻型货车把副簧置于主簧下面,便形成渐变刚度的钢板弹簧,如图 1.6 所示。

由图 1.6 可知,渐变刚度钢板弹簧的主钢板弹簧 1 较薄,刚度小,翘度大,而副钢板弹簧 2 较厚,刚度大,翘度小,主、副钢板弹簧通过中心螺栓 3 叠加在一起,在两端主、副钢板弹簧之间有间隙。因此,当载荷小时,仅有主钢板弹簧起作用,而当载荷增大到一定程度时,副簧开始与主簧逐片接触,悬架刚度也随之平缓变化,从而改善了汽车行驶平顺性。

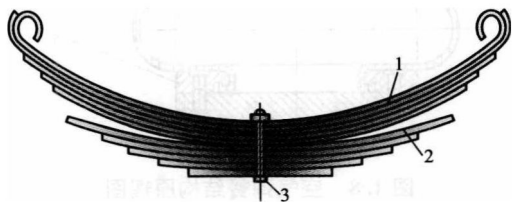


图 1.6 渐变刚度钢板弹簧后悬架

1—主钢板弹簧; 2—副钢板弹簧; 3—中心螺栓

3. 扭杆弹簧

扭杆弹簧的英文名称为 Torsion - Bar Spring, 利用钢棒的扭转特性来提供类似螺旋弹簧的性能, 并靠扭转弹力来吸收振动能量。扭杆用合金弹簧钢做成, 具有较高的弹



性,既可扭曲变形又可复原,实际上起到与螺旋弹簧相同的作用,只不过表现形式不一样而已。



图 1.7 扭杆弹簧示意图

1—控制臂; 2—扭杆弹簧;
3—与车架固定端

从截断面上看,扭杆弹簧有圆形、管形、矩形、叠片及组合式等。其工作原理是:钢棒的一端锚固在车架上,另一端与一个 A 形控制臂相连。A 形控制臂的作用就像一个垂直于扭杆移动的杠杆。当车轮遇到颠簸路面时,其垂直运动传递至 A 形控制臂,通过杠杆作用传递至扭杆,使扭杆被迫扭转变形,吸收冲击能量扭杆沿轴发生扭曲以提供弹力,当冲击力减弱时,杆的自然还原能力能迅速恢复到它原来的位置,使车轮回到地面,避免车架受到颠簸,如图 1.7 所示。

扭杆弹簧能够储存较大的能量,比相等应力的螺旋弹簧和钢板弹簧大得多。杆越短越粗,刚度也越大。在 20 世纪的五六十年代,欧洲的汽车制造商普遍使用此系统,同样的还有美国的 Packard 和克莱斯勒公司。

一般来讲,扭杆弹簧单位重量的储能量较大,且占用的空间位置最小,易于布置,还可以适度调整车身的高度,所以不少乘用车悬架采用扭杆弹簧。厂家在制造扭杆弹簧时施加了预应力,增大疲劳强度。由于预应力是有方向的,所以,应该注意扭杆弹簧也是有方向的。扭杆弹簧标记有左边或右边,用来识别安装在哪一侧。

4. 空气弹簧

由车轮和车身之间的柱状充气室构成。它是利用空气压缩后所产生的弹力性而制成的弹簧形式,减缓车轮振动。这一设计概念实际上已经出现了上百年,在两轮马车上就有它的踪迹。最初的空气弹簧由充气的皮囊制成,很像一个风箱。到 20 世纪 30 年代,它们被模压橡胶空气弹簧取代,目前主要是应用在各式车辆的避振器系统之中。空气弹簧这一名称来自日文,英文则称之为 Air Suspension,即气压式悬吊系统,其结构原理如图 1.8 所示。

汽车橡胶空气弹簧是利用橡胶的弹性和空气压力获得综合吸振、减振、隔振、防噪和缓冲的性能,从而起到承载负荷的弹性支撑作用。橡胶空气弹簧作为汽车减振的核心部件,它的性能的好坏直接影响着汽车的舒适性和对公路的破损性。目前在车辆上广泛使用的空气弹簧如图 1.9 所示。

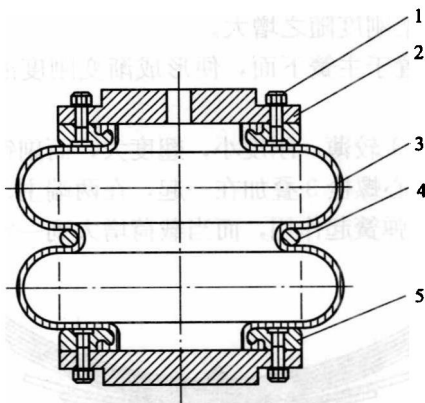


图 1.8 空气弹簧结构原理图

1—特制螺栓; 2—上盖板(用户自配);
3—橡胶空气弹簧; 4—腰环; 5—铝合金法兰

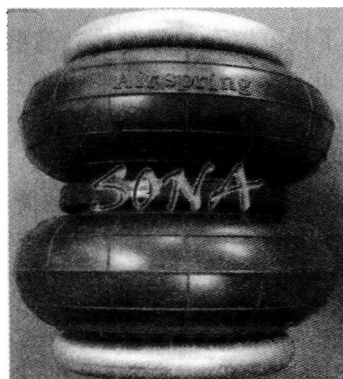


图 1.9 空气弹簧

空气弹簧从结构形式上分为膜式、囊式和复合式。另外，还有一种可以动态调整空气弹簧内部空气量的空气弹簧系统，其内部的空气量可根据需求进行动态调整。但因为其需要考虑调整空气量的额外装置与调整后车辆高度的变化，故此空气悬架系统的设计比一般空气弹簧的设计要复杂。

根据弹簧在汽车上的位置(例如位于车轮与车架之间)，一般为了便于分析，将车辆质量分为簧上质量(Sprung Weight)和簧下质量(Unsprung Weight)。其中，簧上质量是弹簧所支撑的与车体直接连接的零部件和车体的质量，而簧下质量为弹簧未支撑的质量，没有与车体直接连接的零部件的质量，也即除去簧上质量以外的车辆的质量。

1.2.2 减振器

弹簧具有极佳的能量吸收或释放性能，但在耗散能力方面要稍差一些。因此，如果车辆不使用阻尼结构，也无其他阻尼部件，汽车弹簧将以不可控制的速率弹开并释放它所吸收的振动能量，并继续按其自身频率往复振动，直到耗尽最初施加在它上面的所有能量，所以，仅构建在弹簧上的悬架自身会使汽车根据地形以弹跳方式行驶且不受控制，势必使汽车振动加剧，甚至发生共振，因此，为了满足车辆的行驶安全性、乘坐平顺性和操纵稳定性的要求，车辆悬架一般都安装一个重要的阻尼部件，即悬架减振器，并且使其阻尼特性与弹性元件特性相匹配。

减振器也称为缓冲器，它通过一种称为阻尼的过程来控制不希望发生的弹簧运动。减振器通过将悬架运动的动能转换为可通过液压油耗散的热能，来降低和减弱车辆的振动。因为减振器和滑柱与汽车操控性能密切相关，可以将其视为非常重要的安全性能。已磨损的减振器和滑柱会使过多的车身重量向前后左右转移，这会降低轮胎的抓地性能以及操控和制动性能。

按照不同的结构、工作介质和作用方式等，减振器有不同的分类。

1. 按能量转换介质分类

按能量转换介质进行分类，减振器可分为摩擦式减振器、液压式减振器、电磁式减振器，其中，摩擦式减振器原先用在重型载重车上，现已很少使用；电磁式减振器分为电流变减振器、磁流变减振器，国外已经有应用，但目前国内正处于开发研制阶段；液压式减振器目前广泛采用，如图 1.10 所示。

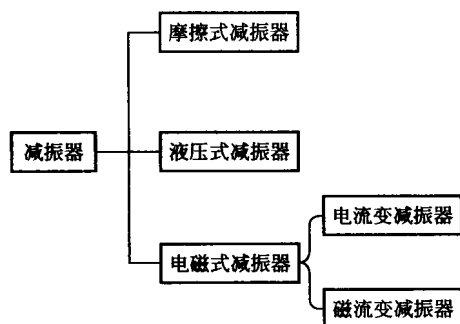


图 1.10 按能量转换介质减振器分类框图

2. 按结构分类

按结构进行分类，减振器分为摇臂式减振器和筒式液压减振器，其中，摇臂式减振器目前很少使用；筒式液压减振器又分为双筒式液压减振器和单筒式液压减振器，双筒式和单筒式液压减振器可分为非充气式液压减振器和低压充气式液压减振器，非充气式双筒式液压减振器目前广泛用于卡车、中低档轿车等；低压充气式液压减振器用于中高档轿车，国内外已广泛采用，其中单筒低压充气式减振器用于中高档轿车，但使用比例比较少。按结构减振器分类如图 1.11 所示。