



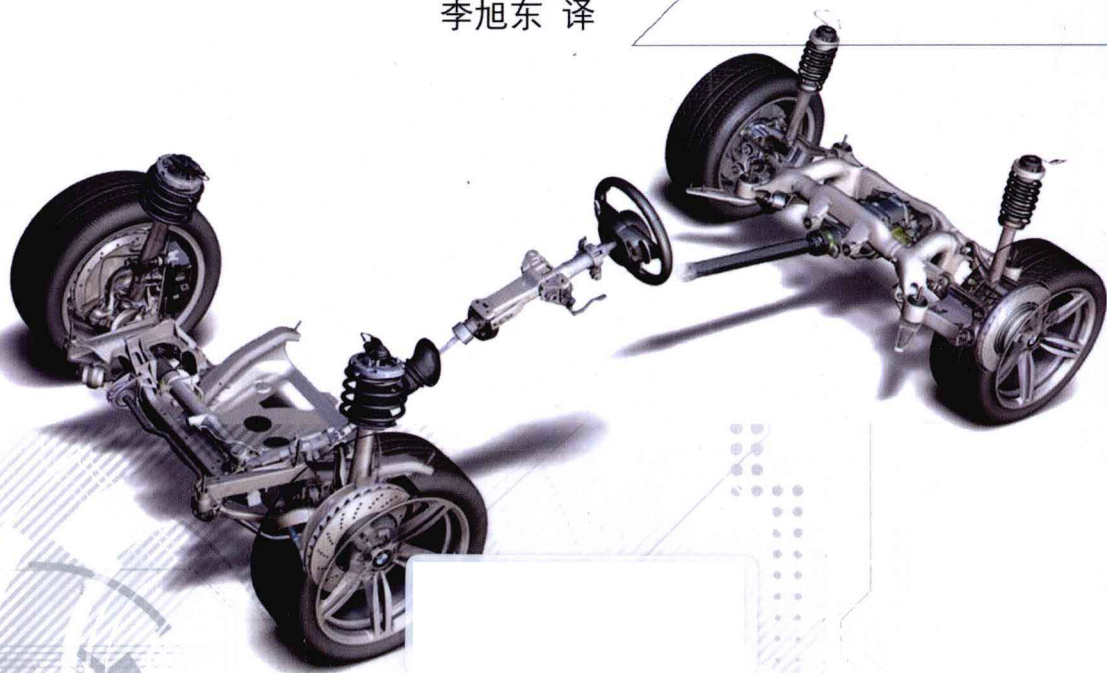
现代汽车技术丛书

汽车悬架

Fahrwerktechnik: Radaufhängungen

(中文版·原书第2版)

(德) 耶尔森·赖姆帕尔 著
李旭东 译



刚性悬架/独立悬架/优点/缺点/轮胎影响/运动学/弹性运动学/零部件/材料/成本



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



现代汽车技术丛书

汽车悬架

(中文版·原书第2版)

(德) 耶尔森·赖姆帕尔 著
李旭东 译



机械工业出版社

本书译自1988年德国弗戈出版社出版的耶尔森·赖姆帕尔主编的“汽车底盘技术”丛书的第三分册《汽车悬架》的第2版。汽车悬架的重要性众所周知，它直接决定了汽车的行驶性能。本书对各种悬架形式的结构、运动学以及弹性运动学的特性进行了详细的分析，包括刚性悬架、复合式悬架、双横臂悬架、纵摆臂悬架、斜臂式悬架等，以及各种衍生结构形式，如牵引杆悬架、扭转曲轴悬架、De-Dion悬架、Weissach悬架等。

本书配有丰富的插图、详细的知识和大量的实例，具有很强的实用性，自出版以来深受德国汽车界的称赞，成为德国汽车工程师的案头常备书。

Fahrwerktechnik: Radaufhängungen

2., überarb. u. erw.

Jörnsen Reimpell

ISBN 3-8023-0738-0

Copyright of the Original German language edition:

by Vogel Industrie Medien GmbH & Co KG, Würzburg (Germany).

All rights reserved.

本书中文简体字版由Vogel-Buchverlag Würzburg授权机械工业出版社独家出版。

版权所有，侵权必究。

本书版权登记号：图字01-2012-4429。

图书在版编目（CIP）数据

汽车悬架：第2版/（德）赖姆帕尔著；李旭东译．—北京：机械工业出版社，2013.4

（现代汽车技术丛书）

ISBN 978-7-111-41406-3

I. ①汽… II. ①赖…②李… III. ①汽车-车悬架 IV. ①U463.33

中国版本图书馆CIP数据核字（2013）第025055号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：冯春生 责任编辑：冯春生 韩冰

版式设计：霍永明 责任校对：刘怡丹 肖琳

封面设计：张静 责任印制：邓博

北京华正印刷有限公司印刷

2013年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.25印张·449千字

标准书号：ISBN 978-7-111-41406-3

定价：49.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

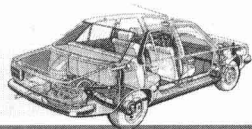
社服务中心：(010)88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010)68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203 封面防伪标均为盗版

前 言



也许 20 年前可以把整个的汽车底盘技术分成 3 册来进行阐述，汽车悬架只是其中的一个章节。随着工业技术尤其是汽车工业技术的迅猛发展，底盘技术有必要重新进行编写，原来只是一个章节的内容必须独立成册进行阐述。

汽车悬架是路面和车身之间的连接桥梁。它决定了车轮和车身之间相互关联的优劣。越来越高的车辆行驶速度迫使人们不断优化汽车空气动力学和发动机性能，所有部件承受的载荷也越来越大。四轮驱动和四轮转向已经投入应用，底盘的使用条件也因此深刻改变，需要全新的匹配。对行驶舒适性和经济性要求的日益增长，也同样影响着悬架技术的发展。

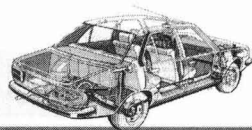
本版第 5、6、8 章内容在第 1 版的基础上进行了重新扩展编写。大量的数据和实例使这本书成为汽车工程师、高等院校教师和学生以及汽车维修和评估人员的知识宝库。

感谢所有慷慨提供技术资料的公司。特别感谢 Opel 公司的 Helmut Stoll 工程师、科隆专科学校底盘技术实验室主任 Guenter Gackstetter 先生及其同事 Helmut Rappenhoener 工程师。书中许多图表都来源于该实验室的测量结果。

Joernsen Reimpel 耶尔森·赖姆帕尔
弗赖堡/科隆

目

录

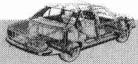


前言

1	车轮悬架和整车	1
1.1	要求	1
1.2	车身和车架应力	3
1.3	载力单元	5
1.3.1	副车架	5
1.3.2	弹簧减振器	5
1.3.3	弹簧支柱	8
1.4	车轮悬架的应用	10
1.5	车轮悬架的优缺点	12
1.6	载荷变换反应	16
1.6.1	概念确定	16
1.6.2	斜臂式悬架的影响	17
1.7	底盘缺陷及后果	19
1.8	底盘改装和运行许可	21
2	车轮悬架的零部件	24
2.1	弹簧和稳定杆	24
2.1.1	弹性系统零部件	24
2.1.2	纵置板簧	24
2.1.3	横置板簧	27
2.1.4	螺旋弹簧	28
2.1.5	扭杆	28
2.1.6	空气弹簧	30
2.1.7	稳定杆	31
2.2	铰杆和摆臂	32
2.2.1	杆件和撑杆	32
2.2.2	横摆臂	37
2.2.3	纵摆臂、斜摆臂	41



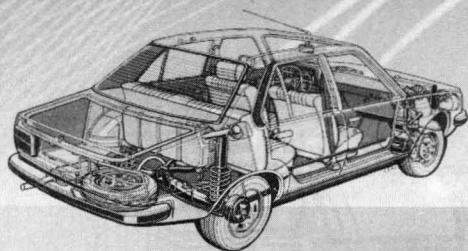
2.3 摆臂支承和车轮托架支承·····	42
2.3.1 转向节支承·····	42
2.3.2 车轮铰链·····	46
2.3.3 侧向和纵向高刚度的摆臂支承和铰杆支承·····	50
2.3.4 束带式轮胎滚动冲击的吸收·····	56
2.3.5 侧向弹性摆臂支承和纵向弹性摆臂支承·····	58
2.4 传动轴和万向节·····	63
2.4.1 轿车和货车的传动轴·····	63
2.4.2 传动轴特殊结构·····	69
2.4.3 万向节·····	69
2.4.4 后轮驱动轴·····	76
2.4.5 前轮驱动轴·····	79
2.4.6 材料·····	82
2.5 车轮轴承·····	83
2.5.1 非驱动车轮·····	83
2.5.2 独立悬架的驱动车轮·····	89
2.5.3 刚性驱动桥·····	98
2.5.4 车轮轴承密封·····	102
3 刚性悬架·····	108
3.1 纵置板簧悬架·····	108
3.2 通过纵摆臂和横摆臂进行导向的轿车悬架·····	112
3.3 通过纵摆臂和横摆臂进行导向的货车悬架·····	121
3.4 牵引杆悬架·····	126
3.5 通过抗弯摆臂进行纵向导向的轿车悬架·····	136
3.6 De-Dion 悬架·····	141
4 复合式悬架·····	144
4.1 优缺点·····	144
4.2 VW 车型的后桥·····	145
4.3 弹性特性·····	147
4.4 运动学特性·····	149
4.5 Opel 车型的后桥·····	155
5 双横臂悬架·····	157
5.1 运动学优点·····	157
5.2 前桥·····	160
5.2.1 前桥螺旋弹簧·····	160
5.2.2 带扭杆弹簧的前桥·····	167



5.2.3	带横板簧的前桥	170
5.2.4	带气液弹簧的前桥	173
5.3	后桥	175
5.3.1	驱动轴作为上摆臂	175
5.3.2	Weissach 悬架	176
5.3.3	四铰链-梯形臂悬架	176
5.3.4	空间摆臂悬架	180
5.3.5	带塑料单叶板簧的 Corvette 悬架	183
5.3.6	多摆臂悬架	184
5.3.7	双叉臂悬架	193
6	车轮导向的弹簧支柱和减振器支柱	198
6.1	优缺点及概况	198
6.2	运动学特性	199
6.3	力和摩擦	202
6.4	减振系统	205
6.4.1	不充气的双筒式减振器	205
6.4.2	充气的双筒式减振器	207
6.4.3	充气单筒式减振器	207
6.5	结构细节	209
6.6	前桥支承座	212
6.6.1	耦合式弹簧支柱支承座	212
6.6.2	解耦式弹簧支柱支承座	215
6.6.3	减振器支柱的支承座	216
6.7	前桥弹簧支柱	219
6.7.1	带螺旋弹簧的非驱动前桥	219
6.7.2	带螺旋弹簧的前驱动桥	225
6.7.3	带气液弹簧的前驱动桥	229
6.7.4	带空气弹簧的前驱动桥	231
6.8	前桥减振器支柱	232
6.8.1	优缺点	232
6.8.2	带螺旋弹簧的前桥	232
6.8.3	带扭杆弹簧的前桥	234
6.9	弹簧支柱后桥和减振器支柱后桥	236
6.9.1	优缺点	236
6.9.2	结构细节	237
6.9.3	非驱动后桥	240
6.9.4	驱动后桥	244



7	纵摆臂悬架	246
7.1	结构细节	246
7.2	带螺旋弹簧的后桥	249
7.3	带螺旋弹簧的前桥	252
7.4	带扭杆弹簧的后桥	252
7.5	带气液弹簧的后桥	258
8	斜臂式悬架	260
8.1	简单结构	260
8.2	运动学关联	261
8.3	后掠角和坡度角	268
8.4	后驱动桥	269
8.4.1	带螺旋弹簧的后桥	269
8.4.2	带扭杆弹簧的后桥	272
8.4.3	精确摆臂式悬架	273
9	其他独立悬架形式	279
9.1	双铰链摆动式悬架	279
9.2	单铰链摆动式悬架	281
9.3	双纵摆臂悬架	282
9.4	纵横摆臂悬架	283



1

车轮悬架和整车

1.1 要求

车轮悬架作为车身和地面之间的连接部件，应重量轻，在确保理想的行驶安全性的条件下，尽可能地提高行驶舒适性。悬架除了应保证车轮精确导向外，还要保证精准、轻便地转向；另外，还要隔离路面噪声，并避免车轮滚动产生的噪声传到车身。车轮接地点处的力都是通过车轮悬架传递到车身的（图 1-1），因此对车轮悬架的强度和耐久性必须给予充分考虑。

车轮托架和车身间的连接件有摆臂、撑杆和弹簧，它们必须与这些要求相适应。铰链在实际应用中应满足易于转动、挠度小并且隔离噪声的要求。摆臂应能承受各个方向的力以及驱动、制动力矩；同时摆臂又不能太重，以免制造费用过高。弹簧应尽可能有效地利用材料，并且结构简单，易于布置，保证足够的车轮跳动量。

轿车的车桥通常不是直接固定在车身上的，而是通过副车架固定；副车架和悬架单元构成一个装配模块。这样布置可以简化装配线，也可以使调整工作以及将来的维修变得简单；此外，也为增加橡胶件降低噪声提供了条件。车架只是在个别情况下才在轿车上使用（图 1-2）；轿车车身本身可以承载，与车身和车架分开的轿车相比，承载式车身不仅重量轻而且制造更经济。只有中型、重型货车和多功能越野车还使用车架，以提高强度（图 1-3 和图 5-34）；另外，采用车架能够使用户进一步改装车身的愿望得以实现。前车轮应该有尽可能大的转向角，驱动桥应该能够安装防滑雪链。但遗憾的是宽胎往往不可能安装防滑雪链。

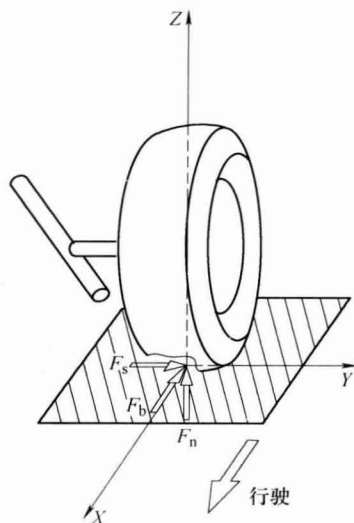


图 1-1 轮胎和地面之间的力通过悬架传递到车身，图示为左前桥上的垂直力 $+F_n$ 、滚动阻力和制动力 $-F_b$ 以及由内向外作用的侧向力 $+F_s$ 。

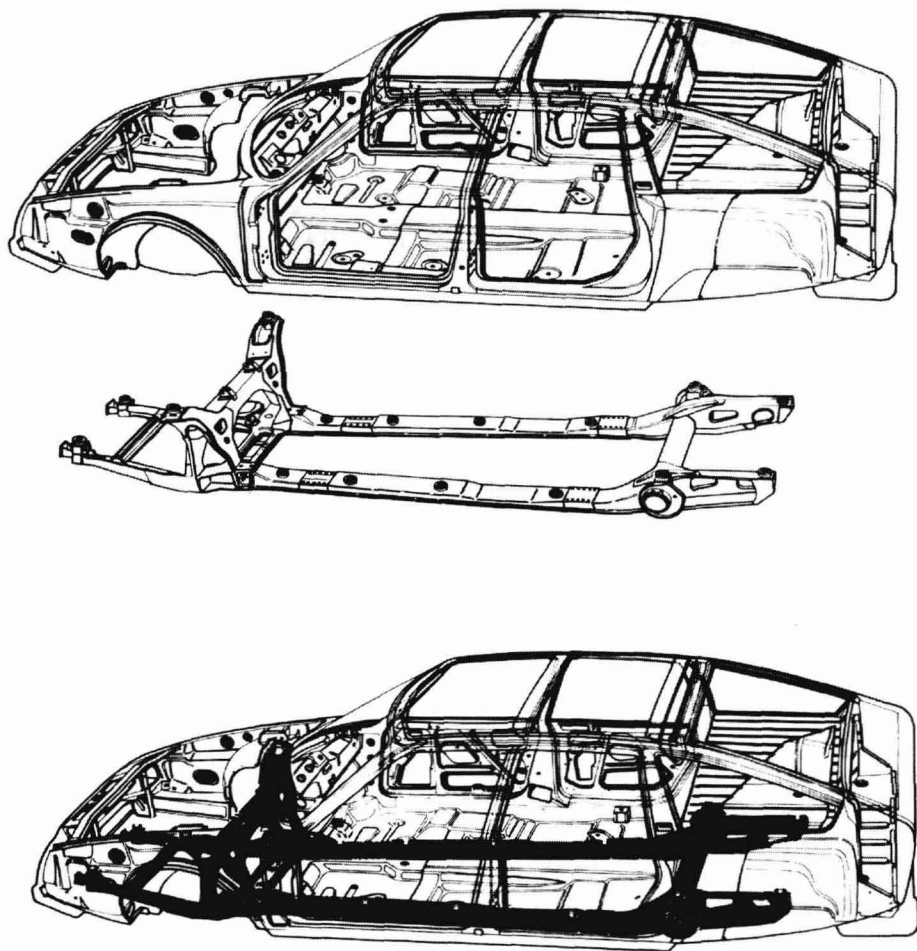


图 1-2 为了隔离路面噪声和钢丝束带式轮胎[○]的滚动冲击，Citroën 的 CX 车型采用了车架，车架通过 16 个橡胶支承连接到车身。

○ 子午线轮胎——译者注

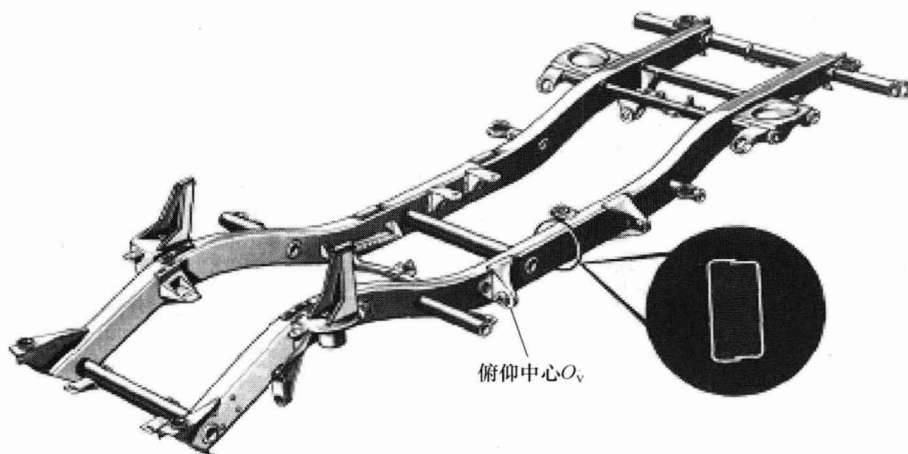


图 1-3 图示为 Daimler-Benz G 车型，四轮驱动多用途车。可以有多种轮距，用于装配不同的车身。230GE 车型如图 1-15 所示。

1.2 车身和车架应力

弹簧应支撑在车身的主承载区：发动机中间、后座椅下和行李箱下（图 1-4），以及在后座椅和行李箱之间（图 1-5）。车身应力会由此减小，车身可以轻量化。货车和特种轿车采用板簧，以便承受较高的载荷（图 1-6 和图 3-2）。带扭杆弹簧的纵臂式悬架能够把所有的弹簧力通过悬臂以弯矩的形式传递到车身（图 1-7 中位置 4 和图 7-12）。此种方式的缺点是：垂直力被传到车轮前面，车身从转动点 5（图 1-7）开始成为一个自由悬臂；另外减振器会产生一定的拉力。

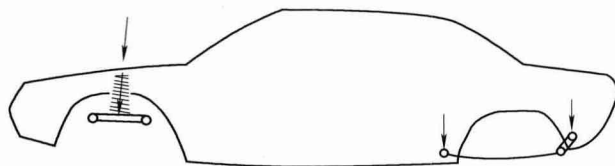


图 1-4 纵置板簧支撑车身的两个地方：后座椅和行李箱，优点是车身应力较小。

图 5-26 和图 6-57 所示为带纵向布置扭杆的前桥，两个扭杆的弹力作用方向相反，从而支撑车身。简单、隔噪、易于布置的横梁支撑着扭杆，车身的高度可以进行无级调整。

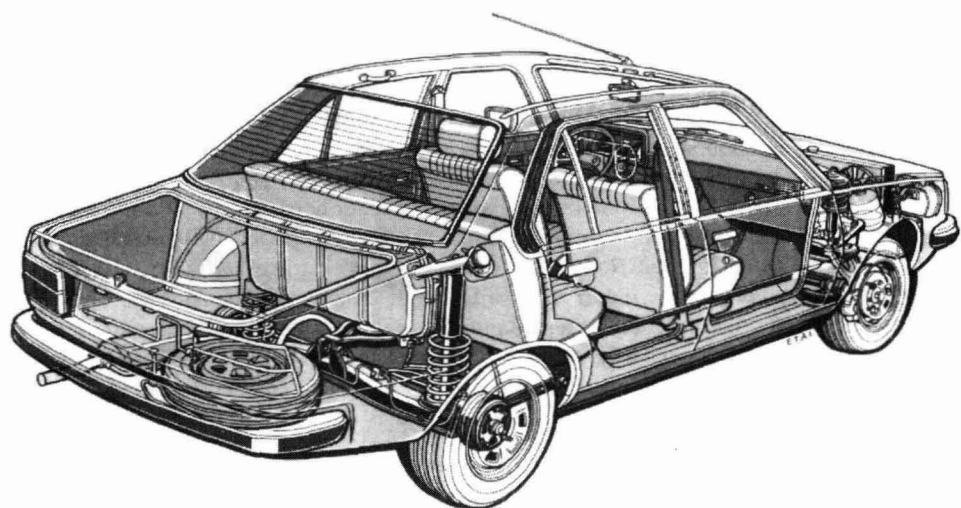


图 1-5 Renault 18 车型中位于桥体上的螺旋弹簧支撑车身的位置为后座椅靠背和行李箱之间。刚性后桥不可避免地产生横向通道，油箱布置在该通道上，优点是行李箱的地板保持平坦。备用轮胎放在下面，并将其上面固定（防止被盗）。带有拉伸止位块和压缩止位块的减振器位于螺旋弹簧内部，与弹簧一同构成载力单元。

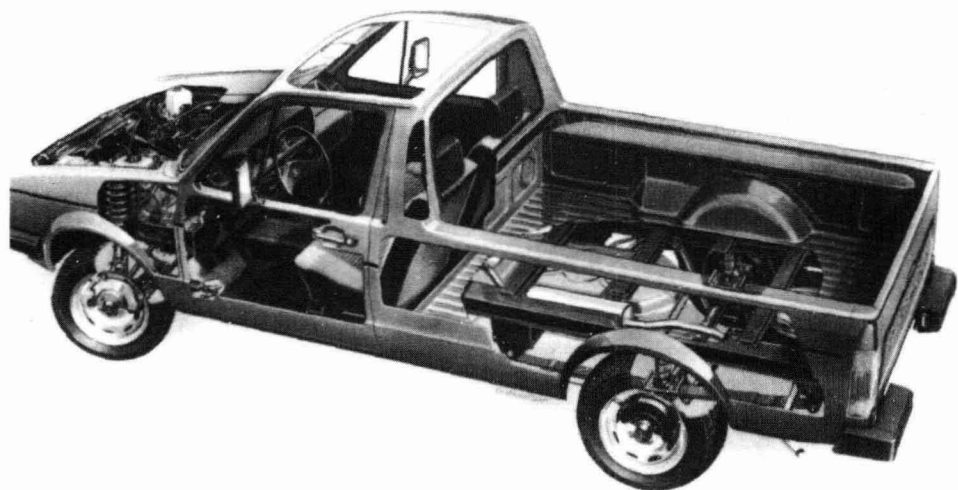


图 1-6 在 VW Golf 车型的基础上开发出的车型 Caddy，是一种带平板车箱的轿车。刚性后桥采用纵置板簧，板簧前后固定在纵梁上，有效支撑装载区域。装载总量（不包括驾驶员）可达到 625kg。

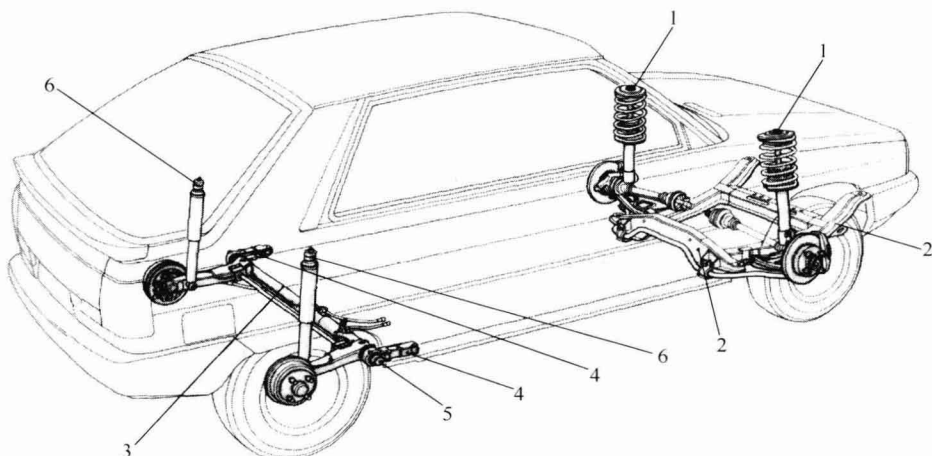


图 1-7 Renault 11 车型的车头由弹簧支柱 1 支撑，弹簧支柱下面与向前伸展的副车架 2 相连。后桥纵臂式悬架带有管横梁载力单元 3，两侧的扭杆位于管横梁中。其产生的扭矩通过悬臂 4 传递到车身底板。垂直力通过位于轮心前面的摆动中心点 5（参见图 7-12）；其他力通过减振器上的连接点 6 传递到轮罩，进而传递到车身后悬部位。

1.3 载力单元

1.3.1 副车架

为了阻隔路面噪声和衰减传递到车身上的力，双横臂式悬架采用了副车架（图 1-8）。副车架不仅支撑弹性元件，如螺旋弹簧 1、拉伸止位块 2、压缩止位块 3 和减振器 4，而且支撑横摆臂以及发动机悬置（在板 5 上）。

20 世纪 70 年代初以前，副车架通常使用在标准驱动形式的轿车上，由于其高成本，前碰撞褶皱吸能区难以构建，难以实现在一定方向吸收规定的能量，因此大多数汽车生产厂放弃了这种载力单元。如图 5-17 所示，新的轻型货车 VW LT 车型上还可以看到副车架，只是这里的副车架通过螺栓固定在纵梁上。

为了增大行李箱的有效容积，纵臂式悬架中弹簧和减振器水平布置，并且和副车架固定，从而省去了行李箱中两侧的“炮弹筒”（图 7-12 和图 7-17）。图 1-9 所示为装载宽度增加的 Citroen BX 车型，而图 1-10 所示则为因为弹簧支柱而产生“炮弹筒”使容积变小的行李箱。

1.3.2 弹簧减振器

弹簧减振器来源于摩托车，后来越来越多地应用在轿车上，独立悬架、非独立悬架（刚性悬架）以及复合悬架都采用弹簧减振器（图 1-11）。这种最早被称为弹簧支柱的载力单元几乎包含了所有的弹性元件：螺栓弹簧 1、拉伸止位块 2、副簧 4（图 1-12）和作为承载件的减振器。

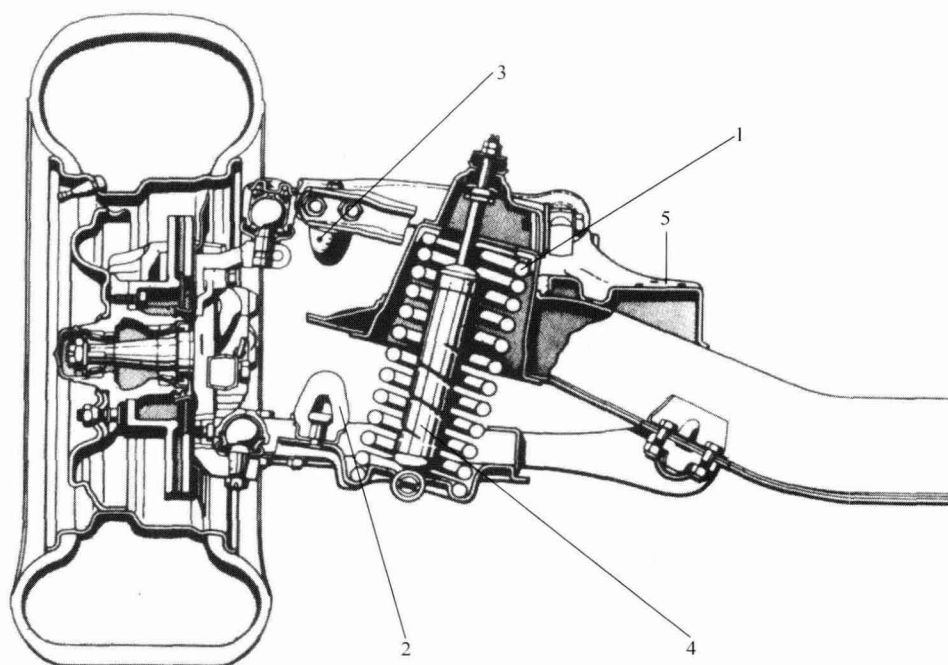


图 1-8 双横臂前桥, 1969 ~ 1975 年 Opel 生产的 Admiral 车型和 Diplomat 车型带有副车架作为载力单元。减振器 4 比弹簧 1 长, 因此减振器需要借助销轴式铰链与向上隆起的“炮弹筒”连接。“站立”布置的上导向球铰侧面被夹紧, 同样“站立”布置的承载球铰通过 1:10 的锥面连接。车轮轴承为圆锥滚子轴承; 通风制动盘从内侧连接到车轮轮毂上 (装配不便), 由此可以获得较大的车轮固定螺栓孔圆周直径。



图 1-9 图示为 Citroen BX 车型宽阔的后行李箱, 1/3:2/3 的可折叠后座椅靠背。纵臂式后桥的副车架使得地板装配更加便利, 在轮罩处不需要另外的空间。较低的行李箱使得装载工作变得轻松。

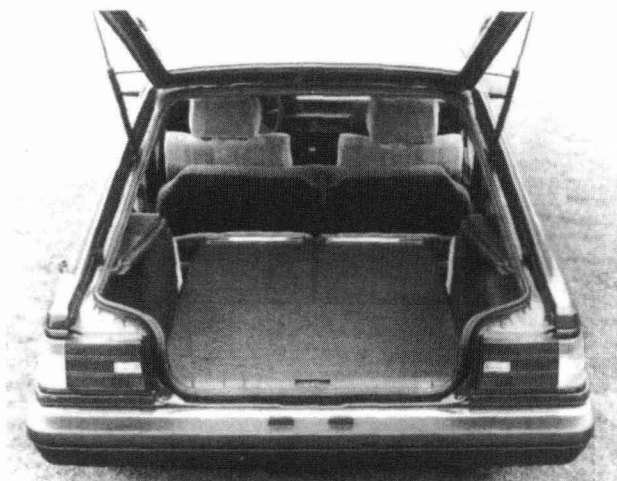


图 1-10 Toyota Camry 车型由于要给出弹簧支柱的安装位置，在行李箱中形成“炮弹筒”，使得行李箱变窄。后座椅靠背分开，较低行李箱底板以及向下伸展的边沿使装卸更加容易。减振器支柱在侧面需要的空间要小一些。

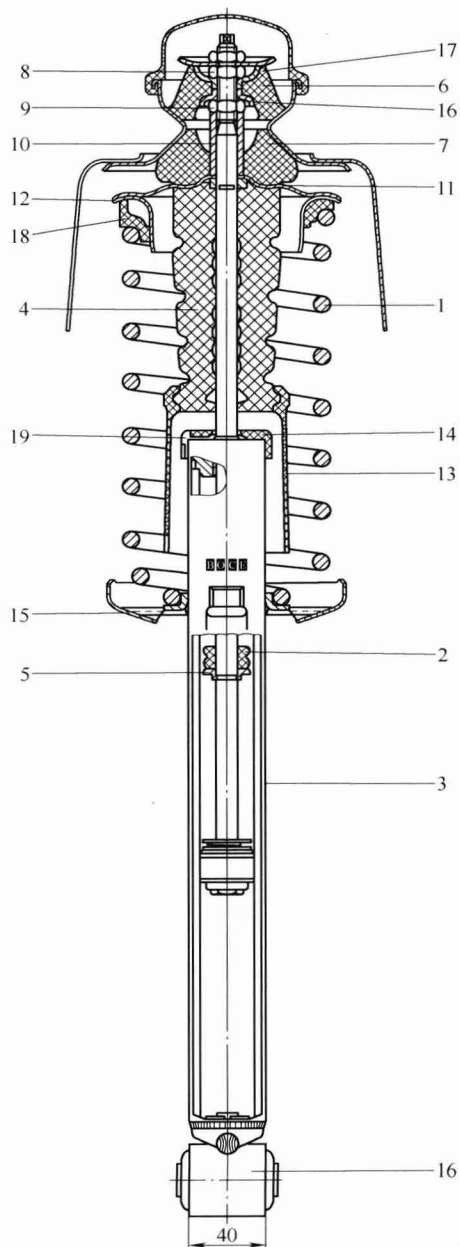


图 1-11 图示为 Boge 公司生产的用于 VW Golf II 车型（以及 Jetta 车型）上的弹簧减振器，1 为螺旋弹簧，在剖面上可看到拉伸止位块 2，拉伸止位块套在直径为 11mm 的活塞杆上，比直径为 27mm 的活塞高出 107mm，以保证在弹簧最大拉伸时活塞杆仍有足够的导向长度；止位块托盘 5 嵌在活塞杆的槽中。上面和车身通过销轴式铰链连接，弹簧力及冲击力通过大体积橡胶块 6 和 7 隔噪传递到车身。两个橡胶件通过六角螺母 8 和 9 拧紧到一起；套管 10 和衬套 16、17 用于固定时产生一定大小的预紧力。下垫片 11 支撑在卡环上（卡环卡在活塞杆半圆形槽中），同样间隔套管 10 和弹簧上托盘都支撑在卡环上。弹簧上托盘通过弹性橡胶圈 18 支撑弹簧 1 和聚氨酯副簧 4，副簧下周有一圈隆起，以便固定塑料防尘罩 13。车轮向上跳动时，副簧 4 接触罩盖 14，罩盖起到保护活塞杆密封的作用，另外沟槽 19 可以排除副簧挤压时内部产生的高压气体。弹簧下托盘支撑在 3 个凸台上（位置 15），凸台是由减振器外管 3 从内向外压胀产生的，其外径的公差为 $\pm 0.5\text{mm}$ 。铰链 16 的宽度为 40mm，这样压在套管内的橡胶件在承受垂直力时只产生较小的变形；减振器用 M10 螺栓联接到车桥上。

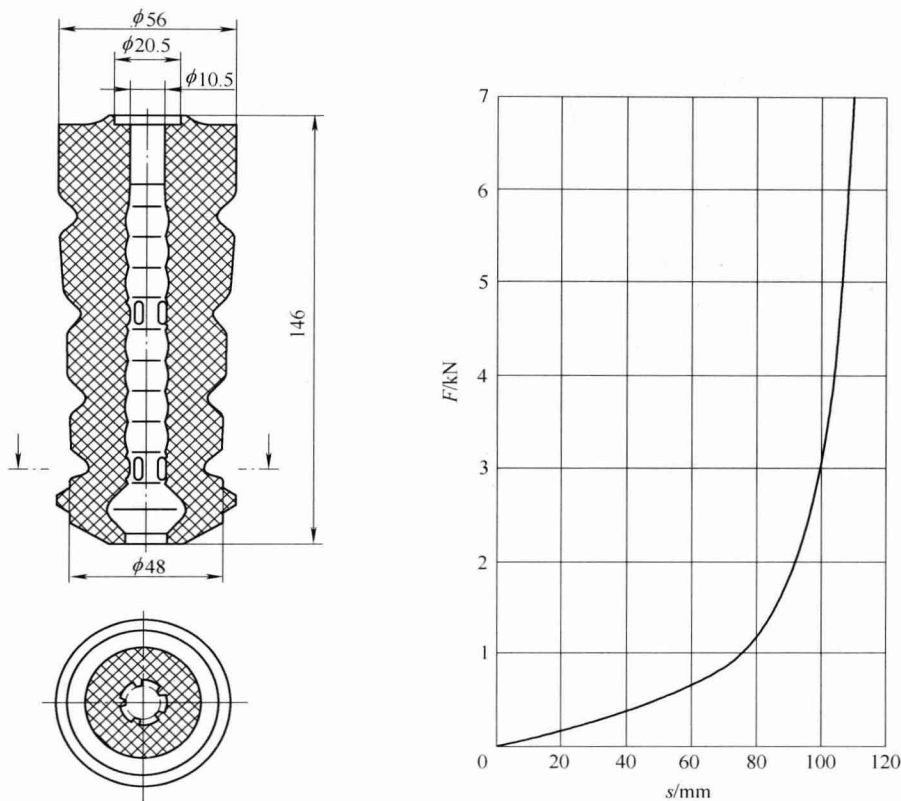


图 1-12 图示为 VW Golf II 车型后桥采用的副簧, 由 Elastogran 公司制造, 材料为蜂窝状聚氨酯弹性体 Cellasto。其材料及形状使得该副簧能够产生很强的非线性弹性。总长为 146mm 的蜂窝状体可压缩至 110mm, 可承受超过 7kN 的冲击载荷, 即 $F_{no} \geq 7\text{kN}$ 。

图 1-13 所示为 Renault 18 车型的前驱动的双横臂悬架, 螺栓 5 不仅固定弹簧减振器而且支撑着连接稳定杆 6 的耦合杆。与车轮托架相连的上承载臂承受所有的垂直力, 下摆臂上的导向球铰的摩擦较小。

1.3.3 弹簧支柱

具有车轮导向功能的弹簧支柱也是载力单元, 能承受弹簧和稳定杆的力, 在 Opel Omega 和 Senator B 车型上承受这些力的是承载管 1 (图 1-14)。活塞杆 2 (由于车轮导向因而加粗) 的上面为副簧 11, 下面为拉伸止位块 (图中没有标出)。弹簧托盘 3 和支架 4 以同样的方式固定在承载管 1 上。耦合杆 5 上面的球铰从内侧与支架 4 连接。这种连接方式可以有效地减小稳定杆的直径。G 点处可以是比较简单的球铰, 它只承受侧向力和纵向力。

转向时, 弹簧支柱围绕连线 EG 转动。连线延伸到地面的交点位于车轮中心平面以外, 即主销偏移距为 $r_s = -1\text{mm}$ 。

副车架也是载力单元, 它用于和车身连接, 同时也支撑横摆臂以及稳定杆 7; 另外发动机支承 8 也固定在副车架上。Opel Omega 车型前桥的其他细节可参见图 6-30、图 6-38 和图 6-41。

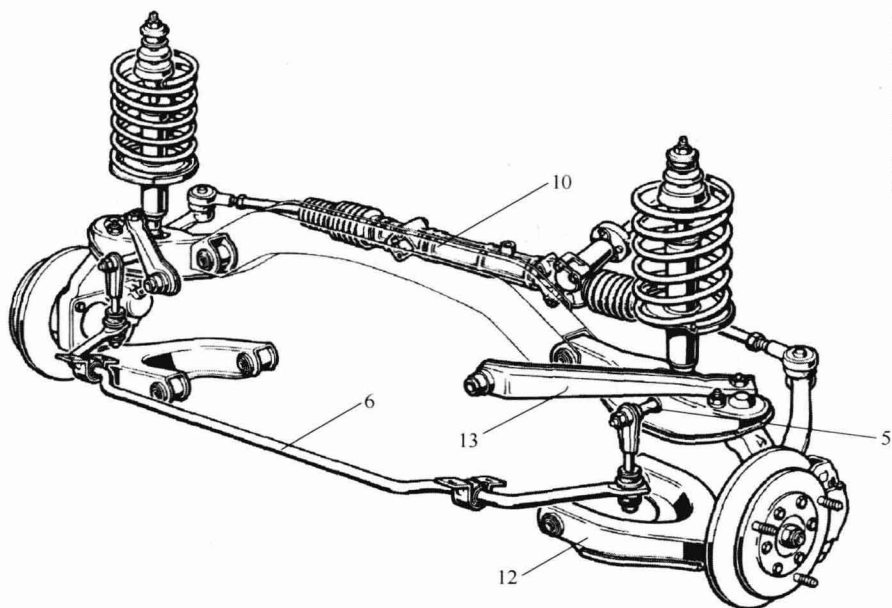


图 1-13 图示为 Renault 18 车型的双横臂悬架。为了让出传动轴的安装通道，弹簧减振器装在上面摆臂上。转向机 10 固定在车身横梁上。

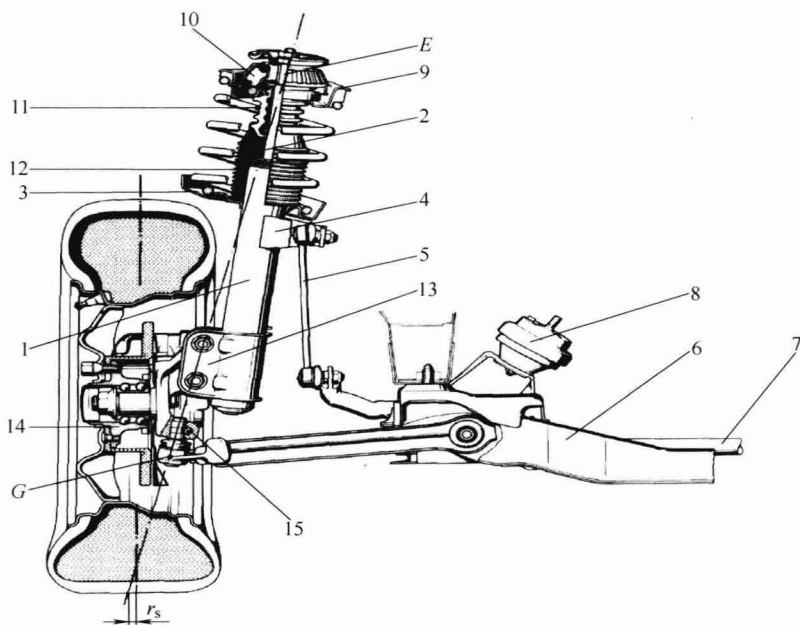


图 1-14 图示为 Opel Omega 以及 Senator B 车型的带摆动稳定杆的弹簧支柱前桥左侧后视图。螺旋弹簧斜置，以减小活塞杆与减振器套管导向部分之间的摩擦。活塞杆 2 和上弹簧盘 9 通过推力轴承和翼子板内板固定于 E 点。

弹性体材料的副簧 11 在内部卡在上弹簧盘 9 上，防尘波纹管 12 嵌在副簧下面，保护表面镀铬的活塞杆。车轮上跳时，副簧支撑在承载管 1 的盖板上。

夹板 13 和承载管 1 焊接在一起，夹板通过两个螺栓和车轮托架连接，其中上面的螺栓孔为腰形孔，以便调整出规定的车轮外倾角，消除生产过程中产生的误差，达到必需的精度。车轮导向由第三代双列角接触球轴承 14 来完成，具体结构如图 2-135 所示。

导向球铰 G 的球销通过夹紧与车轮托架相连。横向拧紧的螺栓 15 贴合球销上的沟槽，以防螺栓拧紧力矩松动导致球销从车轮托架脱出。