

汽车先进技术论坛丛书

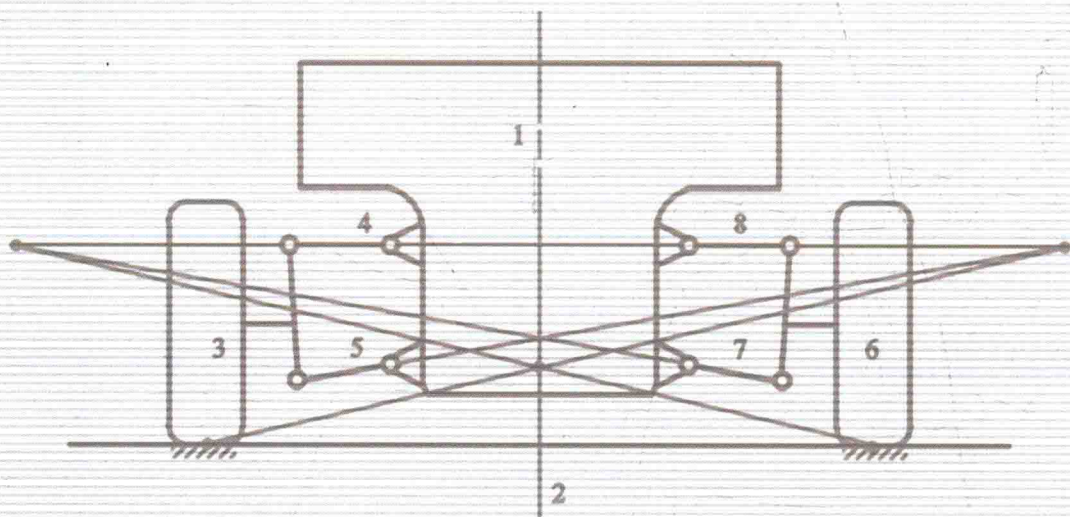
QICHE XIANJIN JISHU LUNTAN CONGSHU

汽车悬架构件的设计计算

彭莫 刁增祥 党潇正 著



第2版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



汽车先进技术论坛丛书

汽车悬架构件的 设计计算

(第2版)

彭 莫 刁增祥 党潇正 著



机械工业出版社

本书的核心内容是汽车悬架构件（导向机构、弹性元件、梯形机构、稳定装置和阻尼元件等）的设计计算，同时也概括叙述了汽车悬架的现状和发展，介绍了汽车悬架的相关基础理论和有关悬架系统的部分知识，具有理论与实际相结合的特点。

本书适合汽车工程技术人员进行汽车悬架设计计算之用，也可供相关专业师生、技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

汽车悬架构件的设计计算/彭莫，刁增祥，党潇正著. —2版. —北京：机械工业出版社，2016.1

（汽车先进技术论坛丛书）

ISBN 978-7-111-51964-5

I. ①汽… II. ①彭…②刁…③党… III. ①汽车-车悬架-设计
IV. ①U463.330.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 256659 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：何士娟 责任编辑：何士娟

责任校对：张薇 封面设计：路恩中

责任印制：乔宇

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2016 年 2 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 21.75 印张 · 538 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-51964-5

定价：59.80 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

服务咨询热线：010-88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

前 言

本书拟为汽车工程技术人员进行汽车悬架设计计算之用，也可供相关专业师生、技术人员参考。

本书认真贯彻了理论与实际相结合的原则，既力争简明清晰，推证严密，又注重实际，以解决实用中的设计计算问题。全书力求结构严谨、层次鲜明、分析透彻、由浅入深、浅而不俗、深而不秘。特别注重实事求是，力避华而不实。

全书由汽车悬架的基础知识、汽车悬架的基础理论、汽车悬架构件的设计计算和悬架系统等内容组成。汽车悬架构件包括导向机构、弹性元件、梯形机构、稳定装置和阻尼元件等部分。在具体内容和选材上，既突出了汽车悬架构件设计计算这个核心，又概括叙述了汽车悬架的定义、内容、构成、要求、分类以及各种悬架的特点和发展演变过程，以对汽车悬架有一个全面的了解。同时，为给深入研究汽车悬架构件打下基础，还着重介绍了汽车悬架的特定术语、多轴汽车特性参数以及汽车平顺性和操纵稳定性的评价指标等基础理论。

本书核心内容大部分取材于著者的学术论文，是他们多年设计实践的经验总结，其中有不少新的思维和新的方法，如悬架轴线、多轴汽车的特性参数、变丝径螺旋弹簧的计算方法等。然而，为了本书的系统性、完整性和读者使用的方便性，也收编了现有书刊中的部分相关内容，如油气弹簧和橡胶弹簧等。

在书写本书的过程中，卫晓军、曲学春、于新龙、陈钢、曲博野、马帅等做了不少工作，在此对他们表示真诚的感谢！

由于水平所限，加之汽车悬架的复杂性，书中难免有不妥和疏漏之处，敬请同行人士和广大读者批评指正。

著 者

目 录

前言

第一章 汽车悬架的基本知识	1
第一节 汽车悬架构件	1
一、导向机构	1
二、弹性元件	2
三、梯形机构	2
四、阻尼元件	2
五、稳定装置	2
第二节 汽车悬架形式	3
一、悬架的基本要求	3
二、悬架的分类	4
(一) 按功能原理划分	4
(二) 按导向机构划分	4
(三) 按弹性元件划分	13
第三节 汽车悬架形式的发展	21
一、导向机构悬架形式的发展	21
(一) 单臂悬架的发展	21
(二) 从单臂到双臂	22
(三) 麦弗逊悬架	23
(四) 平衡悬架	24
二、弹性元件悬架形式的发展	24
(一) 钢板弹簧悬架	24
(二) 螺旋弹簧悬架	32
(三) 扭杆弹簧悬架	34
(四) 空气弹簧悬架	35
(五) 油气弹簧悬架	40
第二章 汽车悬架的基础理论	42
第一节 汽车悬架术语和力矩中心	42

一、特定术语	42
二、力矩中心	43
(一) 定义	43
(二) 相关定理	44
(三) 悬架的侧倾力矩中心	49
(四) 多轴汽车的纵倾力矩中心	51
第二节 多轴汽车的特性参数	52
一、特性参数	53
(一) 振动中心距	53
(二) 组合线刚度	54
(三) 中性面	55
(四) 内心距	57
(五) 换算线刚度	57
二、角刚度与角刚度比	59
(一) 角刚度	59
(二) 角刚度比	62
第三节 汽车平顺性的评价指标	67
一、ISO2631 标准	68
二、常用评价指标	70
第四节 汽车操纵稳定性的评价指标	71
一、定义及研究对象	71
二、评价指标	72
三、车身稳定性	72
第三章 汽车悬架构件的设计计算	74
第一节 汽车导向机构	74
一、车轮定位参数	74
(一) 轮距	74
(二) 车轮外倾角	75
(三) 前束	76
二、麦弗逊悬架的导向机构	77
(一) 悬架中心和力矩中心	77
(二) 换算线刚度和角刚度	77
(三) 受力分析	78
三、半拖臂悬架的导向机构	80

(一) 相关参数	81
(二) 线刚度与角刚度	84
(三) 设计要点	85
四、双横臂悬架的导向机构	87
(一) 空间模型	87
(二) 运动学特性	91
(三) 弹性元件受力	95
(四) 换算线刚度与角刚度	98
(五) 摆臂临界角	105
五、单纵臂悬架的导向机构	105
六、钢板弹簧悬架的导向机构	107
(一) 对称板簧的运动特性	107
(二) 非对称板簧的运动特性	108
(三) 中心扩展法的作图步骤及其修正方法	109
(四) 两点偏转法的作图步骤及其修正方法	112
第二节 汽车弹性元件	114
一、钢板弹簧	114
(一) 普通钢板弹簧	115
(二) 变断面钢板弹簧	139
(三) 渐变刚度钢板弹簧	160
(四) 非对称钢板弹簧	171
二、螺旋弹簧	176
(一) 普通压缩螺旋弹簧	178
(二) 变参数压缩螺旋弹簧	181
(三) 变节距压缩螺旋弹簧	192
(四) 变圈径等节距压缩螺旋弹簧	193
(五) 等螺旋角圆锥压缩螺旋弹簧	196
(六) 变丝径等内径压缩螺旋弹簧	203
三、扭杆弹簧	209
(一) 端部结构和相关参数	210
(二) 变形及刚度	211
(三) 扭杆直径的确定	212
(四) 容量与容量比	213
(五) 材料和应力	214
四、空气弹簧	215

(一) 空气弹簧的特点	215
(二) 空气弹簧的类型	215
(三) 空气弹簧的刚度计算	216
五、油气弹簧	221
六、橡胶弹簧	226
(一) 橡胶弹簧的类型和弹性特性	226
(二) 橡胶弹簧的静刚度计算	228
第三节 汽车稳定装置	237
一、稳定装置的设计规范	237
二、稳定装置的设计计算	240
三、结构及布置	243
四、普通型杆体变形公式的推导	244
第四节 汽车梯形机构	246
一、普通梯形机构	246
(一) 内外轮转角关系	247
(二) 转弯半径的计算	247
(三) 梯形机构的转向特性	248
(四) 转向机构附加牵动轮转向	252
二、断开式梯形机构	256
(一) 机构的设计	256
(二) 内外轮转角关系	258
(三) 侧倾牵动车轮偏转角	261
第五节 汽车阻尼元件	271
一、汽车阻尼元件的分类及发展	271
(一) 减振器的分类	271
(二) 减振器的发展	273
二、汽车阻尼元件的选用设计	278
(一) 阻尼特性	278
(二) 阻尼比	279
(三) 阻尼系数	279
(四) 最大卸荷力	292
(五) 工作缸直径的确定	292
(六) 合理的布置位置	292
第四章 汽车悬架系统	294
第一节 多轴汽车的负荷分配	294

一、负荷分配检验计算	294
(一) 公式的建立	294
(二) 计算示例	296
二、负荷分配设计计算	297
(一) 等刚度负荷分配法	298
(二) 等频率负荷分配法	299
(三) 均布轴负荷分配法	302
第二节 悬架特性	304
一、悬架的弹性特性	305
(一) 合理的满载频率	305
(二) 合适的频率特性	305
二、获得最大动容量的条件	308
三、行程和容量的分配	309
(一) 线性特性的情况	309
(二) 二刚度特性的情况	311
(三) 渐变刚度特性的情况	312
第三节 轮胎气压的地位和选定	314
一、轮胎气压的重要地位	315
(一) 轮胎变形公式	315
(二) 轮胎接地压力公式	316
(三) 单次通过圆锥指数公式	316
(四) 轮胎的侧偏刚度公式	316
二、轮胎气压的选取	316
(一) 依照主参数统计式选取	316
(二) 防止功率循环	317
(三) 服从额定气压限制	319
(四) 远离公路临界气压	319
(五) 满足接地压力要求	319
(六) 按使用条件调压	320
(七) 参考公路经济气压	320
三、计算示例	320
附表	324

附表1 变丝径等圈径等螺旋角压缩螺旋弹簧 (+ — — —)

附表2 等丝径变节距等圈径压缩螺旋弹簧 (— — + +)

附表 3	等丝径等节距圆锥压缩螺旋弹簧 (— $\frac{+}{\ominus}$ — $\frac{+}{\ominus}$)	326
附表 4	等丝径等螺旋角圆锥压缩螺旋弹簧 (— $\frac{+}{\ominus}$ $\frac{+}{\ominus}$ —)	327
附表 5	变丝径等簧径变节距变螺角压缩螺旋弹簧 ($\frac{+}{\ominus}$ — $\frac{+}{\ominus}$ $\frac{+}{\ominus}$)	328
附表 6	变丝径等节距变圈径压缩螺旋弹簧 ($\frac{+}{\ominus}$ $\frac{+}{\ominus}$ — $\frac{+}{\ominus}$)	329
附表 7	变丝径等螺角圆锥压缩螺旋弹簧 ($\frac{+}{\ominus}$ $\frac{+}{\ominus}$ $\frac{+}{\ominus}$ —)	330
附表 8	变丝径等螺旋角圆锥压缩螺旋弹簧 ($\frac{+}{\ominus}$ $\frac{+}{\ominus}$ $\frac{+}{\ominus}$ —)	331
附表 9	变丝径变节距变螺角圆锥压缩螺旋弹簧 ($\frac{+}{\ominus}$ $\frac{+}{\ominus}$ $\frac{+}{\ominus}$ $\frac{+}{\ominus}$)	332
附表 10	变丝径等螺角中凹双圆锥压簧, 变丝径变节距中 凸变圈径压缩螺旋弹簧 ($\frac{+}{\ominus}$, $\frac{+}{\ominus}$)	333
附表 11	无簧圈叠压变丝径等螺角圆锥压缩螺旋弹簧	334
附表 12	变丝径等螺角上直下锥压缩螺旋弹簧 ($\frac{+}{\ominus}$)	335
附表 13	变丝径等内径组合式压缩螺旋弹簧	336
附表 14	各种截面形状的扭杆弹簧的设计计算公式	337
参考文献	338

第一章

汽车悬架的基本知识

所谓汽车悬架，就是把汽车悬挂质体悬置和架设起来的装置，也就是联系汽车悬挂质体和非悬挂质体的所有总成部件（传动轴除外）的总称。它具有承载、传力（矩）、缓冲、衰振、散能以及调节车身高度等主要功能。

汽车悬架的品质，不仅决定着汽车的平顺性、操纵稳定性和车身稳定性，而且还关系着汽车动力性的发挥，关系着汽车平均技术速度的高低，关系着客车、货车的运营成本以及军用车的使命任务周期，特别是还关系着承载系统和行驶系统的动载，以及影响相关零部件的使用寿命等。

汽车悬架虽然十分复杂，但它主要包括悬架构件、悬架形式和悬架系统（包括总布置设计等）三个方面的内容。悬架构件构成不同的悬架形式，各轮、轴的悬架形式又决定着整桥和整车的悬架系统。本章具体介绍悬架构件、悬架形式和悬架系统的发展。

第一节 汽车悬架构件

悬架构件，是构成悬架的总成部件，是悬架的基础。一个完整的悬架，其悬架构件应包括导向机构、弹性元件、梯形机构、阻尼元件、稳定装置和限位胶块等部分。值得注意的是，在某些特定条件下，某一零部件可兼起多种悬架构件的作用。例如钢板弹簧，它既是弹性元件，又是导向机构。又如麦弗逊悬架（Mepheron Strut Suspension）中的减振器柱，它既是阻尼元件，又是导向机构等。

一、导向机构

导向机构是导向和传力的机构，它关系着车轮相互间的位移特征并保证其间的力和力矩的可靠传递，是任何悬架都不可缺少的。此外，它不仅起着导向和传力的作用，而且还决定着悬架的独立与相关。悬架的名称也往往是由导向机构决定的，如单纵臂悬架、双横臂悬架、半拖臂悬架等。

导向机构控制着车辆的运动方向，决定着车轮的运动轨迹和定位参数的变化，决定

着悬架的悬架中心和整车的侧倾中心和纵倾中心,影响着汽车的平顺性以及车身的稳定性和操纵稳定性。

二、弹性元件

弹性元件起着承载和缓冲的作用,它保证着悬挂质体和非悬挂质体之间的弹性联系,并把刚性传递转变为满足乘坐和运载需求的输出。弹性元件也是悬架代表性的构件,有时也独立地命名悬架,如扭杆弹簧悬架等。

弹性元件决定着悬架的垂直刚度、挠度及其振动频率,影响平顺性能及其动力性能的发挥;弹性元件还决定着角刚度,影响车身稳定性和转向特性。

弹性元件主要有钢板弹簧、螺旋弹簧、扭杆弹簧、橡胶弹簧、空气弹簧和油气弹簧等。

三、梯形机构

习惯上把梯形机构划入转向机构,但不可单纯地把它视作转向机构,还应把它纳入悬架之中来考虑。这样做不仅符合悬架的定义,更重要的是梯形机构与悬架问题以及稳态转向特性都紧密相关。

梯形机构参数决定着内、外车轮的转角关系,影响其转向特性;车身在侧向加速度的作用下侧倾时,梯形机构将牵动车轮转向,而牵动的数值又往往不可忽视。因此,孤立地把梯形机构划入转向机构,还不如也把它归入悬架之中,进而全面地来认识它的作用。

事实上,人们早就把梯形机构作为悬架构件在研究,如三段式梯形机构断开点的确定,内、外车轮转角关系如何影响转向特性等。

四、阻尼元件

阻尼元件是一个吸能和散能的装置。它除能衰减振动和耗散振动能量之外,还能抑制车身、车轮的共振,减小车身的垂直振动加速度,减小车轮的振幅和车轮着地压力的变化,保持良好的抓地性能。特别地,它还能抑制车身的角位移,降低角加速度,从而获得良好的平顺性和柔顺性。

一个悬架,如果完全没有阻尼,那么外界激励所造成的振动将无休无止地继续下去。悬架阻尼除来自所有运动件的摩擦和变形之外,主要来自减振器。目前减振器有液力摇臂式和液力筒式两种,而汽车主要用的是双向作用筒式减振器。

五、稳定装置

稳定装置是角刚度的调节器,它既能统一平顺性和车身稳定性这一矛盾,还能调节

汽车的转向特性和车身承受附加力矩的状况和大小。

平顺性和车身稳定性始终是一对矛盾，高平顺性要求具有低的垂直刚度，低垂直刚度必造成低角刚度，低角刚度又会使车身的角位移增大。然而，稳定装置却既能补偿角刚度，又不增大垂直刚度。

轴间角刚度比影响整车的转向特性，调整角刚度就调整了角刚度比，从而调整了整车的转向特性。

车身在外力矩的作用下，不同的轴间角刚度将提供不同的反倾力矩，从而使车身承受不同的附加力矩。因此，调整不同车轴的角刚度就调整了车身的受力状况。

稳定装置有横向和纵向之分，横向稳定装置保证控制车身的侧倾角，纵向稳定装置负责控制车身的纵倾角。

第二节 汽车悬架形式

悬架形式就是悬架的类型和模式。悬架形式是五花八门、纷纭复杂的，但从总的角度来看，都存在一些可循的规律。根据这些规律，不仅可以对悬架形式及其构成的悬架系统提出一些共性的要求，而且还可进行有序的分类。

一、悬架的基本要求

- ① 保证承载的稳定性以及力和力矩的稳定传递。
- ② 必须具有良好的平顺性和柔顺性，也就是要具有较低的振动频率（乘坐车应在 $0.9 \sim 1.5\text{Hz}$ 范围内）和较小的振动加速度（乘用车不大于 4m/s^2 ，货车不大于 7m/s^2 ）。
- ③ 必须具有足够的动行程和动容量，保证悬架不被“击穿”。
- ④ 必须使车轮定位参数合理，在全程跳动范围内，车轮外倾角的变化不得大于 3° ，轮距变化不得大于 40mm ；必须具有良好的操纵稳定性能，在侧向加速度 $j=0.4g$ 时，前后轴轴偏角差应在 $1^\circ \sim 3^\circ$ 的范围内。
- ⑤ 必须合理布置导向杆系和转向杆系，既要避免运动干涉，防止车轮与转向盘摆振，更要避免过大地牵动车轮转向。
- ⑥ 选择合适的侧倾中心和纵倾中心，保证适度的车身角位移。
- ⑦ 选择合适的平均阻尼比（ $\psi=0.25 \sim 0.35$ ），保证适度的减振能力和良好的抓地性能，并降低垂直振动和角振动的加速度。
- ⑧ 减少非悬挂质量，以降低动量，防止对车身的过大冲击。
- ⑨ 必须使悬架构件具有足够的强度和刚度，提高使用寿命。
- ⑩ 合理设计，给总布置留出空间。

⑪ 降低成本, 便于维修保养。

二、悬架的分类

悬架形式可以按其功能原理、导向机构或弹性元件的不同来进行分类。

(一) 按功能原理划分

按功能原理的不同, 悬架可分为主动悬架、被动悬架及半主动悬架。

主动悬架 (Full-active Suspension System) 就是靠自身能源通过执行元件对振动进行“主动”干预的悬架。

被动悬架 (Passive Suspension System) 则是弹性特性和阻尼特性受到外界激励时, 只能被动地做出响应的悬架。

半主动悬架 (Semi-active Suspension System) 以及执行元件频带宽较窄的慢主动悬架 (Slow-active Suspension) 是介于上述二者之间的悬架。它虽无能源, 但增加了自动调节装置, 其阻尼是根据汽车行驶状态的动力系统要求进行无级调节的。

(二) 按导向机构划分

按导向机构的不同, 悬架可分为相关悬架、独立悬架和半独立悬架, 如图 1-1 所示。

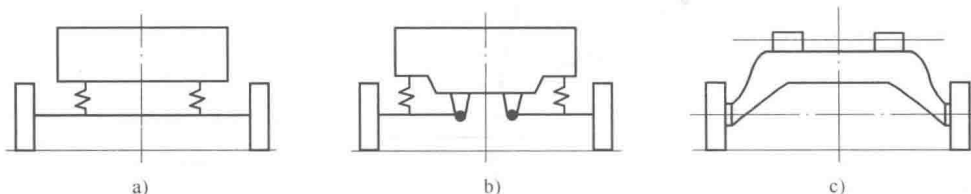


图 1-1 悬架的相关与独立

a) 相关悬架 b) 独立悬架 c) 半独立悬架

1. 相关悬架

相关悬架 (Interrelating Suspension) 也叫非独立悬架, 它是左、右车轮装在一根整体的刚性轴或非断开式驱动桥桥壳上的悬架, 是左、右车轮相互关联的悬架。

(1) 相关悬架的优点

- ① 结构简单, 制造、维修方便, 成本低廉。
- ② 工作可靠, 寿命较长。
- ③ 悬架跳动时, 轮距、前束不变, 轮胎磨损较小。
- ④ 车身侧倾时, 车轮外倾角不变, 不影响侧向力的传递。
- ⑤ 侧倾中心较高, 侧倾力臂较小, 可减小车身侧倾角。
- ⑥ 板簧相关悬架, 易于通过支架和摆耳的布置来获得不足转向趋势。

(2) 相关悬架的缺点

- ① 车桥、车轮一起跳动, 占用空间较大, 影响发动机和行李箱的布置。

② 板簧相关前悬架，由于弹簧较短，故刚度较大，频率较高。

③ 驱动桥的非悬挂质量较大，影响平顺性，破坏接地性。

④ 当汽车行经不平路面，左、右车轮跳动高度不一致时，车身、车桥都将发生倾斜。

⑤ 当汽车直线行驶于不平路面时，由于左、右车轮跳动高度的不一导致轴转向，进而破坏直线行驶的稳定性的。

⑥ 作为驱动桥，输入的驱动力矩将引起左、右车轮的负荷转移。

(3) 相关悬架的部分悬架形式

① 纵置板簧，如图 1-2 所示。

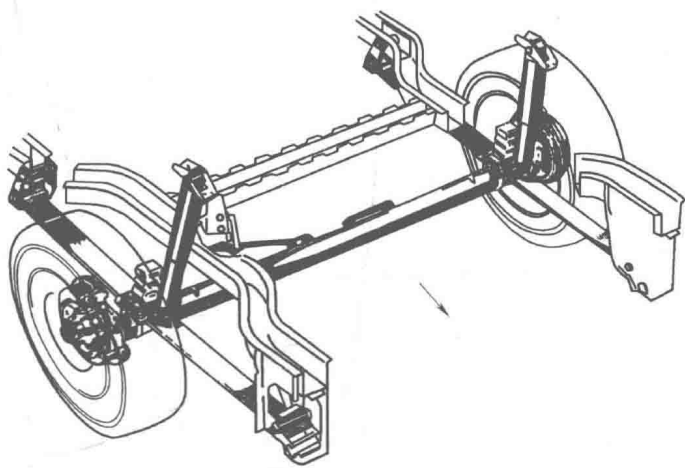


图 1-2 纵置板簧相关悬架

② 交错板簧，如图 1-3 所示。

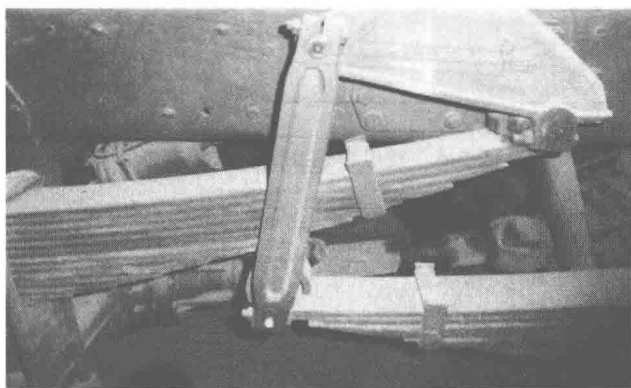


图 1-3 交错板簧相关悬架

③ 单纵臂螺旋弹簧，如图 1-4 所示。

④ 双纵臂螺旋弹簧，如图 1-5 所示。

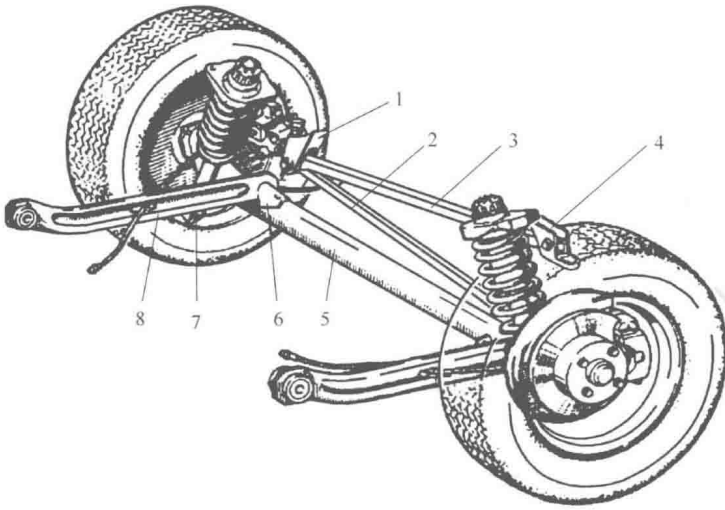


图 1-4 单纵臂螺旋弹簧相关悬架

1、4—支架（固定在车厢两侧） 2、3—传力杆 5—横梁
6—加固焊接用蹄片 7—减振器下支点 8—纵臂

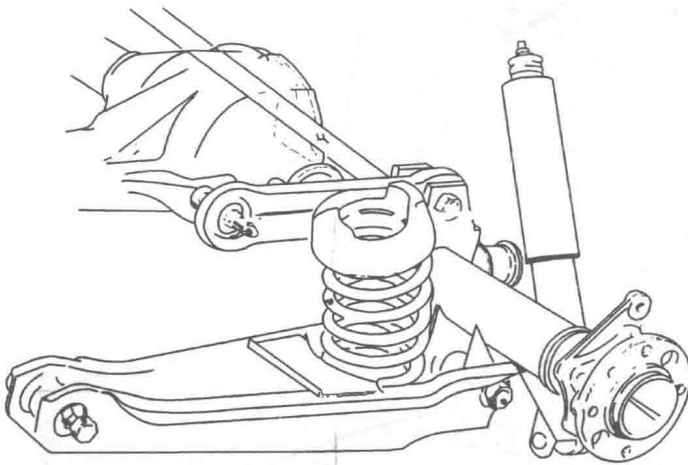


图 1-5 双纵臂螺旋弹簧相关悬架

- ⑤ 三杆后悬架，如图 1-6 所示。
- ⑥ 四杆后悬架，如图 1-7 所示。
- ⑦ 导向杆式平衡悬架，如图 1-8 所示。
- ⑧ 摆臂式平衡悬架，如图 1-9 所示。
- ⑨ 挂车平衡悬架，如图 1-10 所示。

2. 独立悬架

独立悬架 (Independent Suspension) 是左、右车轮分别装于车身之上，且其运动互不相关的悬架。

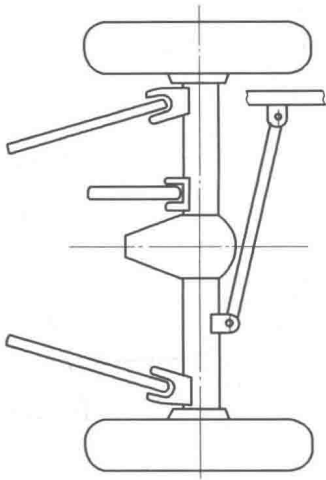


图 1-6 三杆后悬架

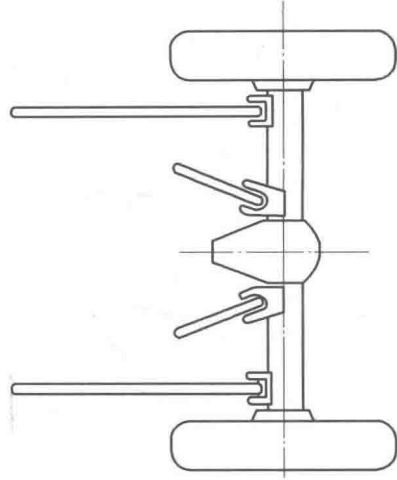


图 1-7 四杆后悬架

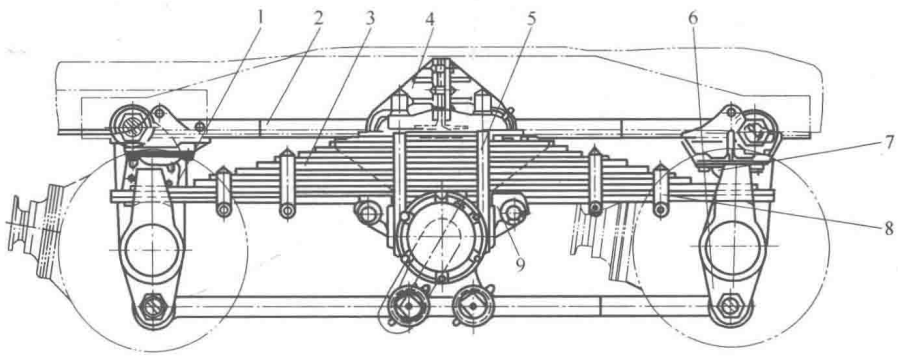


图 1-8 导向杆式平衡悬架

- 1—反作用杆上臂 2—反作用杆 3—钢板弹簧 4—支架 5—U形螺栓
6—反作用杆下臂 7—限位块 8—弹簧夹 9—螺栓

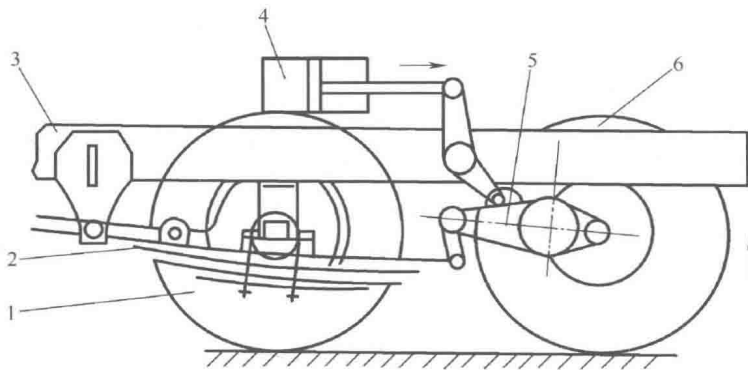


图 1-9 摆臂式平衡悬架

- 1—驱动轮 2—钢板弹簧 3—车架 4—液压缸 5—摆臂 6—从动轮