

汽车先进技术论坛丛书

QICHE XIANJIN JISHU LUNTAN CONGSHU

车辆悬架弹性力学 解析计算理论

周长城 赵雷雷 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

车辆悬架系统性能是由各组成零部件的特性及相互配合所决定的,它决定和影响汽车行驶的平顺性和安全性。车辆悬架系统及零部件的设计与特性仿真建模等问题,大都与弹性力学问题有关。然而,弹性力学基本理论不能直接用于悬架设计,即不能满足车辆悬架系统及零部件实际设计的要求,必须根据实际悬架零部件力学模型,建立满足悬架及零部件设计与特性仿真的弹性力学解析计算理论。

本书介绍了在车辆悬架设计和特性仿真应用中的弹性力学解析计算的理念、思维和方法,也为解决其他工程设计中所遇到的弹性力学问题提供了有效的思维方法,对其他工程领域设计也具有重要的启发性和参考应用价值。本书可作为机械工程、车辆工程、交通运输、弹性力学及相关专业的本科生和研究生的学习参考用书,亦可作为车辆工程技术人员进行车辆悬架设计的重要参考用书,同时还可以作为其他工程领域技术人员进行弹性力学理论问题分析计算的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

车辆悬架弹性力学解析计算理论/周长城,赵雷雷著.

—北京:机械工业出版社,2012.2

(汽车先进技术论坛丛书)

ISBN 978-7-111-37229-5

I. ①车… II. ①周…②赵… III. ①汽车—车悬架

—弹性力学—计算方法 IV. ①U463.33

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第012428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:鞠杨

责任印制:杨曦

北京市朝阳区展望印刷厂印刷

2012年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16.5印张·404千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-37229-5

定价:54.80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

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着汽车工业的快速发展和汽车行驶速度的不断提高,人们对汽车行驶平顺性和安全性提出了更高的要求。车辆悬架决定和影响车辆的行驶平顺性、操作稳定性和乘坐舒适性,而悬架系统性能是由悬架各关键零部件性能及相互匹配所决定的。尽管国内外很多专家对车辆悬架进行了大量的研究,但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”的传统方法,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。这主要是由于受车辆悬架设计理论的制约,缺乏可用于悬架及零部件设计的弹性力学解析计算式。传统的车辆悬架及关键零部件的设计方法,已不能满足汽车工业快速发展的要求。随着汽车工业国际竞争的不断加剧,提高我国汽车的自主研发能力、开发具有自主知识产权的汽车产品,已经提到了重要日程,因此,必须根据悬架零部件实际力学模型,利用弹性力学基本理论,解决悬架设计中的弹性力学解析计算问题,建立车辆悬架设计理论和方法。

目前,国内外与车辆悬架设计相结合的弹性力学解析计算理论方面的书很少。本书是在周长城教授与所指导的研究生赵雷雷多年对车辆悬架进行研究所取得的成果之基础上总结编写而成的。本书主要介绍了所建立的关于车辆悬架设计的弹性力学解析计算理论及在车辆悬架及零部件设计与特性仿真方面的应用实例。

本书为高等院校汽车工程专业的本科生及研究生提供了一本比较系统的有关悬架系统及零部件设计的弹性力学解析计算理论及实际设计实例方面的学习参考用书,对于从事车辆工程的技术人员也具有重要的参考应用价值。书中处理实际弹性力学解析计算的理念、思维和方法,对其他与弹性力学相关专业的学生和工程技术人员也具有一定的参考价值。

本书力求深入浅出,循序渐进,以弹性力学基本理论为研究基础,以车辆悬架系统的各零部件组成为研究对象,以各零部件的受力情况为力学模型,以弹性弯曲为研究问题,以建立弯曲解析计算理论为研究重点,以建立各零部件参数解析优化设计模型为研究目标,以 ANSYS 建模仿真作为理论验证,以实际应用作为实例验证。其中,对于弹性力学基本理论,分别介绍了弹性力学的基本概念、基本假定、基本理论、研究对象和任务,并介绍了弹性力学在悬架设计中的研究现状。对于车辆悬架系统的重要组成部件减振器,介绍了节流阀片在各种不同压力情况下(均布压力、非均布压力、环形集中压力及任意非均布压力)的弯曲变形和应力解析计算理论,介绍了等半径叠加节流阀片和不等半径叠加节流阀片的等效厚度解析计算式及拆分设计方法;介绍了基于速度特性和车辆参数的减振器阀系参数设计数学模型和优化设计方法;介绍了减振器特性仿真分段函数数学模型;介绍了减振器 CAD 及特性仿真软件开发及其特点和功能。对于车辆悬架钢板弹簧,介绍了等长和不等长叠加钢板弹簧的弯曲变形和应力解析计算理论及等效厚

度解析计算式,介绍了等强度钢板弹簧,主、副钢板弹簧的拆分设计理论和方法,还介绍了钢板弹簧曲面形状解析设计方法。对于橡胶衬套及稳定杆,介绍了橡胶衬套径向变形和刚度解析计算理论,分析了橡胶衬套径向变形的影响因素,介绍了基于橡胶衬套变形的稳定杆设计理论和方法。对于油气弹簧,介绍了油气弹簧的类型、结构和工作原理、特点和应用领域,介绍了油气弹簧节流阀片最大变形和应力解析计算理论、气室压力与容积变换规律,介绍了油气弹簧节流阀参数设计数学模型和设计实例,介绍了油气弹簧特性仿真数学模型的建立及其仿真实例。对油气弹簧特性试验数据分析方法进行了介绍,并介绍了基于特性试验数据的油气弹簧节流阀参数反求数学模型。

本书内容精简,层次分明,既有悬架零部件的弹性弯曲解析计算理论和数值仿真验证,又有应用设计实例和试验验证。本书以悬架系统各零部件的弹性力学解析计算理论及参数设计为主线,各章节注重前、后的逻辑性和衔接性,将弹性力学解析计算理论与车辆悬架零部件设计实例相结合,具有重要的参考应用价值。

本书的出版得到了山东理工大学领导的大力支持,同时在书稿编写过程中,周长城教授指导的研究生也做了大量工作,其中,毛少坊对弹性力学解析计算理论进行了 ANSYS 建模仿真验证工作;郭剑、李红艳、高春蕾、文森森、孔艳玲、刘小亭和谢家报等,对书中的文字内容进行了校对,对书中的插图进行绘制,在此表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中难免有错漏、不妥之处,恳请读者批评指正。

著 者

作者简介

周长城，男，博士，教授，1962年出生，山东省泰安人。1986年本科毕业于山东理工大学，1993年研究生毕业于江苏大学，2006年博士毕业于北京理工大学。博士论文研究课题“汽车减振器阀系解析计算与特性综合仿真研究”，获得北京理工大学与山东理工大学“全国百篇优秀博士论文育苗奖励基金”的联合资助，并获得北京理工大学优秀博士学位论文奖。博士毕业后一直在山东理工大学从事车辆悬架设计及理论研究，建立了减振器设计基本理论和方法，解决了一直制约减振器阀系参数设计的关键性问题，先后发表与车辆悬架设计及理论方面的研究论文96篇，其中，EI收录46篇，国外期刊论文4篇，出版教材和专著10部。

在车辆悬架设计及理论方面取得的创新研究成果：建立了减振器节流阀片变形、应力解析计算方法、减振器叠加阀片等效厚度解析计算公式和叠加阀片等效拆分设计原则和方法，建立了减振器油液非线性节流损失解析计算方法，建立了基于多点速度特性和车辆参数的减振器阀系参数曲线拟合优化设计方法，建立了减振器特性仿真分段函数数学模型，开发了“汽车减振器CAD及特性仿真”软件，并进行了推广应用，得到了国内、外同行专家的关注和好评，2010年获得“2010年度中国汽车工业科技进步三等奖”，获得山东省淄博市科技进步一等奖。同时，对油气弹簧进行研究，建立了油气弹簧节流阀参数设计理论和方法；对油气弹簧特性试验数据分析及节流阀参数反求进行了研究，建立了基于特性试验数据的油气弹簧节流阀参数反求数学模型；对钢板弹簧进行研究，建立了车辆悬架钢板弹簧解析优化设计理论和方法；对悬架稳定杆进行研究，建立了橡胶衬套变形和刚度解析计算方法及横向稳定杆设计理论和方法；对半主动悬架和主动悬架设计及理论也进行了研究，建立了基于安全性和舒适性相统一的车辆半悬架实时最佳阻尼匹配数学模型，为车辆半主动悬架及主动悬架设计奠定了理论基础。

利用弹性力学基本理论，解决了制约车辆悬架设计的弹性力学问题，建立了车辆悬架设计理论和方法，对于提高我国车辆悬架设计研究领域的理论水平，提升我国在车辆悬架研究领域的自主创新能力，提高我国汽车行业在国际上的竞争实力，推动车辆悬架及零部件加工行业的发展将发挥重要作用。同时，所开发的“汽车减振器CAD及特性仿真软件”，可提升减振器企业现代化CAD设计手段，加快减振器设计开发速度，降低设计和试验费用，对提高减振器设计水平和制造质量，提高车辆的行驶平顺性、操作稳定性和乘坐舒适性都将产生积极推动作用。

目 录

前言

作者简介

第 1 章 车辆悬架及弹性力学问题	1
1.1 弹性力学研究对象和任务	1
1.2 车辆悬架的基本结构、作用和特性要求	2
1.3 车辆悬架的类型	4
1.4 车辆悬架中的弹性力学计算元件	12
1.5 弹性力学在悬架设计中的应用及研究现状	17
第 2 章 弹性力学基础	21
2.1 弹性力学的基本概念和假定	21
2.2 平面问题的基本理论	24
2.3 空间问题的基本理论	39
第 3 章 节流阀片变形曲面微分方程	53
3.1 基本概念和计算假定	53
3.2 弹性弯曲的基本方程	55
3.3 薄板横截面上的内力	57
3.4 圆形薄板的弯曲	60
3.5 节流阀片的轴对称弯曲	61
第 4 章 减振器节流阀片变形量与应力解析计算	64
4.1 节流阀片在均布压力下的变形量解析计算	64
4.2 节流阀片在均布压力下的应力解析计算	67
4.3 节流阀片在非均布压力下的变形解析计算	69
4.4 节流阀片在非均布压力下的应力解析计算	73
4.5 节流阀片在环形集中力下的变形解析计算	74
4.6 节流阀片在环形集中力下的应力解析计算	80
4.7 节流阀片在任意非均布压力下的变形解析计算	84
4.8 节流阀片在任意非均布压力下的应力解析计算	86
4.9 变厚度节流阀片在均布压力下的变形解析计算	89
4.10 变厚度节流阀片在均布压力下的应力解析计算	93
第 5 章 减振器叠加阀片的弯曲问题	97
5.1 等半径节流阀片的弯曲问题	97
5.2 外圆受剪切力和弯矩的等半径叠加阀片弯曲问题	102
5.3 不同外半径叠加节流阀片的弯曲问题	104
第 6 章 悬架钢板弹簧设计理论	123

6.1	等长叠加钢板弹簧	123
6.2	不等长叠加钢板弹簧	126
6.3	等强度钢板弹簧拆分设计	134
6.4	主副簧组成的钢板弹簧	138
6.5	钢板弹簧弧高与曲面形状解析设计	141
第7章	橡胶衬套变形及稳定杆系统设计	143
7.1	橡胶衬套径向变形解析计算	143
7.2	橡胶衬套径向变形实例与对比验证	150
7.3	橡胶衬套径向变形影响因素分析	151
7.4	基于橡胶衬套径向变形的稳定杆系统设计	152
第8章	液压筒式减振器节流阀参数设计实例	159
8.1	液压减振器的结构和工作原理	159
8.2	液压减振器阻尼构件及阻尼力分析	160
8.3	减振器特性及特性参数	167
8.4	基于速度特性的减振器阀系参数设计	170
8.5	基于车辆参数的减振器阀系参数设计	175
第9章	液压筒式减振器特性建模仿真	178
9.1	减振器特性	178
9.2	减振器开阀速度及特性分析	179
9.3	减振器外特性仿真建模	183
9.4	减振器内特性仿真建模	187
9.5	减振器特性仿真实例与特性试验验证	192
第10章	减振器节流阀参数 CAD 及特性仿真软件	194
10.1	减振器节流阀参数 CAD 软件简介	194
10.2	CAD 软件研发工具软件及相关技术	198
10.3	减振器 CAD 软件的功能设计	199
10.4	减振器 CAD 软件的数据传递接口设计	201
10.5	减振器 CAD 软件的控件技术实现图形与图纸处理	202
10.6	减振器特性仿真软件简介	203
10.7	特性仿真的研发工具软件及相关技术	214
第11章	油气弹簧节流阀参数设计与特性仿真	217
11.1	油气弹簧的研究发展状况	217
11.2	油气弹簧的类型、结构和工作原理	221
11.3	油气弹簧的特点和应用领域	223
11.4	油气弹簧设计的基本理论	225
11.5	油气弹簧节流阀参数解析设计	228
11.6	油气弹簧阻力特性仿真解析建模	230
第12章	油气弹簧特性分析及节流阀参数反求	238
12.1	油气弹簧特性试验及数据组成	238

12.2	油气弹簧外特性分析	240
12.3	油气悬架惯性力	241
12.4	油气悬架气室压力及气室阻力	242
12.5	油气弹簧油液节流阻尼力及节流压力	247
12.6	油气弹簧节流阀参数反求	249
12.7	油气弹簧节流阀开度增量及开度	251
参考文献		253

第 1 章 车辆悬架及弹性力学问题

弹性力学及其相关力学理论只是给出了基本理论和方法，不能直接应用于实际工程，没有创建可用于设计与仿真的简单、准确、可靠、实用的解析式。车辆悬架的很多零部件是弹性力学问题，正是由于受到节流阀片弯曲变形问题、等外半径及不等外半径的叠加阀片等效拆分设计问题、钢板弹簧弯曲及叠加钢板簧拆分设计问题、橡胶衬套变形问题等关键力学问题的制约，先前车辆悬架系统及零部件设计大都是采用传统的“经验和反复试验”的方法，对于车辆悬架系统及零部件设计依然缺乏可靠的解析设计理论和方法，更未开发出适应现代汽车零部件日趋精益化和快速设计要求的相应的 CAD 和特性仿真软件。随着汽车工业的快速发展，人们对汽车悬架及其零部件的设计与仿真提出了更高的要求。为实现车辆悬架及零部件的解析设计与特性仿真及 CAD，必须根据弹性力学基本理论，对车辆悬架系统及零部件设计中涉及的弹性力学实际问题进行分析和研究，创建车辆悬架系统及零部件的设计理论和方法。

1.1 弹性力学研究对象和任务

弹性力学是固体力学的重要分支，它研究弹性物体在外力和其他外界因素作用下产生的变形和内力，也称为弹性理论。弹性力学是人们在长期生产实践与科学实验的丰富成果的基础上发展起来的。它的发展与社会生产发展有着特别密切的关系，它来源于生产实践，又反过来为生产实践服务。弹性力学已有一百多年的历史，它有一套较为完善的经典理论和方法，在工程技术的许多领域得到了广泛的应用。目前，弹性力学仍然是一门富有生命力的学科。

在研究对象上，弹性力学同材料力学和结构力学之间有一定的分工。材料力学基本上只研究杆状构件；结构力学主要是在材料力学的基础上研究杆状构件所组成的结构，即所谓杆件系统；而弹性力学研究包括杆状构件在内的各种形状的弹性体。对于工科各专业来说，弹性力学的任务是研究分析各种结构物或其构件在弹性阶段的应力、应变和位移，从而解决结构或机械设计中所提出的强度、刚度和变形等问题，并寻求其最优计算方法并加以改进。在材料力学和结构力学中主要是采用简化的可用初等理论描述的数学模型。在弹性力学中，则将采用较精确的数学模型。有些工程问题用材料力学和结构力学的理论无法求解，而在弹性力学中是可以解决的。有些问题虽然用材料力学和结构力学的方法可以求解，但无法给出精确可靠的结论，而弹性力学则可以给出用初等理论所得结果可靠性与精确度的评价。

材料力学、结构力学和弹性力学这三门学科之间的界线不是很明显的，更不是一成不变的。然而，它们只是给出了一些基本理论，还不能直接应用于工程实际。为此，我们不应当强调它们之间的分工，而应当更多地发挥它们综合应用的威力，根据基本理论创建相关工程应用理论，解决实际工程设计中存在的问题。

1.2 车辆悬架的基本结构、作用和特性要求

1.2.1 车辆悬架的基本结构

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四根柱子上，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。车辆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。

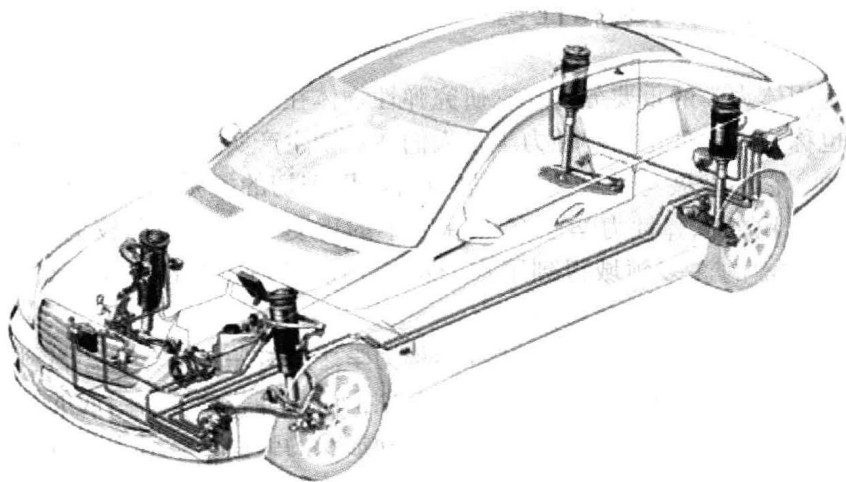


图 1-1 车辆悬架在现代汽车中的装配

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：

(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，而它本身车架由悬架支撑。

(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 使驾驶人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。

2. 车辆悬架的基本结构

典型车辆悬架系统的基本结构由弹簧、减振器、导向机构及稳定杆等组成，个别悬架结构则还有缓冲块，如图 1-2 所示。

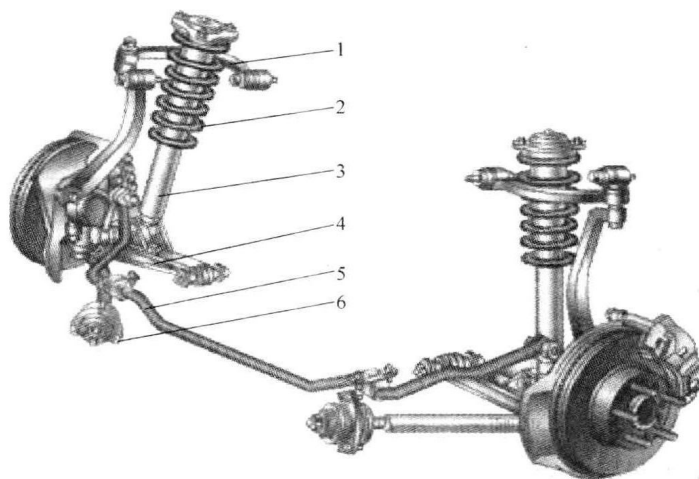


图 1-2 车辆悬架组成元件示意图

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

1.2.2 车辆悬架的作用

人们在考虑汽车的性能时，通常会关注其功率、转矩和“0 ~ 100km/h”的加速时间等参数。但是如果驾驶人无法操控汽车，则活塞发动机产生的所有动力都将毫无用处。有鉴于此，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，其路面也会有些微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，车辆在通过颠簸不平路面时，使车轮垂直于路面上、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，在车轮顺着路面上下颠簸的同时使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，如表 1-1 所示。

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

(续)

性能指标	定义	目标	解决方案
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。

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, 乘员在车中承受的振动加速度应满足国际标准 ISO-2631—1997 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, 以保证车辆的正常行驶, 减少轮胎磨损等。

1.3 车辆悬架的类型

汽车的四个车轮是在两个独立系统上协同工作的, 其中, 两个车轮通过前轴连接, 另外两个通过后轴连接, 也就是说, 汽车可以并且通常在前后轴上具有不同的悬架类型, 即车轮可以通过刚性轴连接在一起, 也可以各自独立运动。因此, 根据汽车导向机构不同, 悬架系统可分为非独立悬架和独立悬架。根据阻尼和刚度是否随着行驶条件的变化而变化, 悬架系统又可分为被动悬架、半主动悬架和主动悬架, 而半主动悬架还可分为有级式和无级式两类。悬架系统的分类如图 1-3 所示。

1.3.1 独立悬架和非独立悬架

1. 非独立悬架系统

非独立悬架系统如图 1-4 所示, 它具有一个连接两个轮的刚性轴, 两侧车轮安装于一整体式车桥上。其特点是, 当一侧车轮受冲击力时会直接影响到另一侧车轮上, 当车轮上下跳动时定位参数变化小。若采用钢板弹簧作弹性元件, 它可兼起导向作用, 使结构大为简化, 降低成本。

非独立悬架一般用作汽车的前悬架, 它看起来像是车前部下方由叶片弹簧和减振器固定

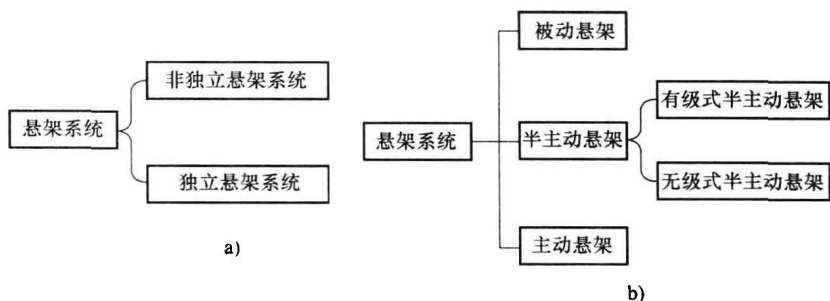


图 1-3 悬架系统分类框图

a) 按导向机构分类 b) 按阻尼和刚度变化情况分类

就位的一个实心杆。非独立悬架由于非簧载质量比较大，高速行驶时悬架受到的冲击载荷比较大，平顺性较差。非独立前悬架在货车和大客车上很常见，也有时用于轿车后悬架，但多年来一直没有在主流汽车上采用。

2. 独立悬架系统

独立悬架系统如图 1-5 所示，其两侧车轮分别独立地与车架（或车身）弹性地连接。

当独立悬架系统的一侧车轮受冲击时，其运动不直接影响到另一侧车轮，即两侧车轮独立移动，相互不影响，提高了汽车的平稳性和舒适性。独立悬架所采用的车桥是断开式的，这样使得发动机可放低安装，有利于降低汽车重心，并使结构紧凑。独立悬架允许前轮有大的跳动空间，有利于转向，便于选择软的弹簧元件使平顺性得到改善。同时独立悬架的簧下质量小，可改善汽车车轮的附着性，提高车辆行驶的安全性。

独立悬架的左右车轮不是由一个整体车轴连在一起的，它的两边的车轮运动相互没有联系，这类悬架型式有如下优点：

- 1) 汽车悬架弹簧下的重量减轻了，使乘用车的舒适性得到了改善。
- 2) 可以装用很软的弹簧，从而能提高乘车的舒适性。
- 3) 能预防前轮摆振的发生。
- 4) 对于发动机前置后轮驱动（FR）型汽车的后轮，它可将差速器固定在车身的侧面，从而使车身底板和后座椅的离地高度降低，进而使汽车的重心也降低。

同时，独立悬架系统与非独立悬架比较，也存在如下不足：

- 1) 独立悬架的结构复杂，制造成本高。
- 2) 汽车保养、修理困难。
- 3) 汽车行驶时前轮定位和轮距常发生变化，因此有时轮胎磨损较大。

根据独立悬架的特点，它多采用在乘用车的前后轮和中、小型货车的前轮上。独立悬架

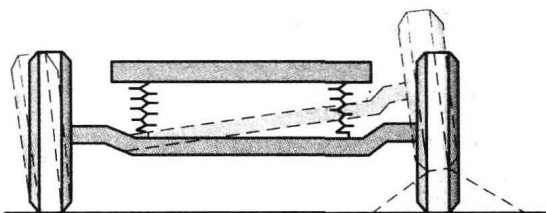


图 1-4 非独立悬架

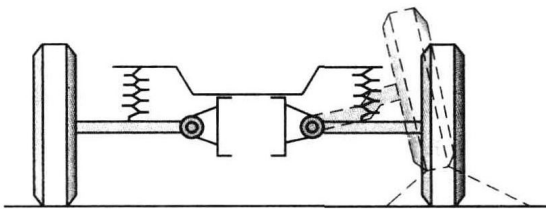


图 1-5 独立悬架

系统有横臂式悬架系统、烛式悬架系统、麦弗逊式悬架系统、多连杆式悬架系统、拖曳臂式悬架系统等。

(1) 横臂式悬架系统 横臂式悬架系统是指车轮在汽车横向平面内摆动的独立悬架系统,按横臂数量的多少又分为双横臂式和单横臂式悬架系统。

单横臂式悬架系统具有结构简单、侧倾中心高、有较强的抗侧倾能力的优点。但随着现代汽车速度的提高,侧倾中心过高会引起车轮跳动时轮距变化大,轮胎磨损加剧,而且在急转弯时左右车轮垂直力转移过大,导致后轮外倾增大,减少了后轮侧偏刚度,从而产生高速甩尾的严重工况。单横臂式独立悬架系统多用在后悬架系统上,但由于不能适应高速行驶的要求,目前应用不多。

双横臂式独立悬架系统按上下横臂是否等长,又分为等长双横臂式和不等长双横臂式两种悬架系统。等长双横臂式悬架系统在车轮上下跳动时,能保持主销倾角不变,但轮距变化大(与单横臂式相类似),造成轮胎磨损严重,现已很少用。对于不等长双横臂式悬架系统,只要适当选择,优化上下横臂的长度,并通过合理的布置,就可以使轮距及前轮定位参数变化均在可接受的限定范围内,保证汽车具有良好的行驶稳定性。横臂式独立悬架系统的分类,如图 1-6 所示。

双横臂式独立悬架在麦弗逊式悬架出现后,逐渐被麦弗逊式悬架所替代,但是进入 20 世纪 90 年代以来,随着轿车的豪华和高性能化,采用该结构的车种不断增加,在一些对平顺性和操纵稳定性要求较高的汽车上,不仅前悬架,而且后悬架也采用了双横臂式悬架。目前,不等长双横臂式悬架系统已广泛应用于轿车和轻型客、货汽车的前悬架上,部分运动型轿车及赛车的后轮也采用了这一悬架系统。双横臂式悬架系统的双横臂的臂有做成 A 字形或 V 字形, V 形臂的上下两个 V 形摆臂以一定的距离分别安装在车轮上,另一端安装在车架上,如图 1-7 所示。

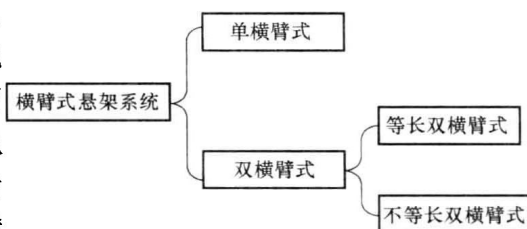


图 1-6 横臂式悬架系统的分类

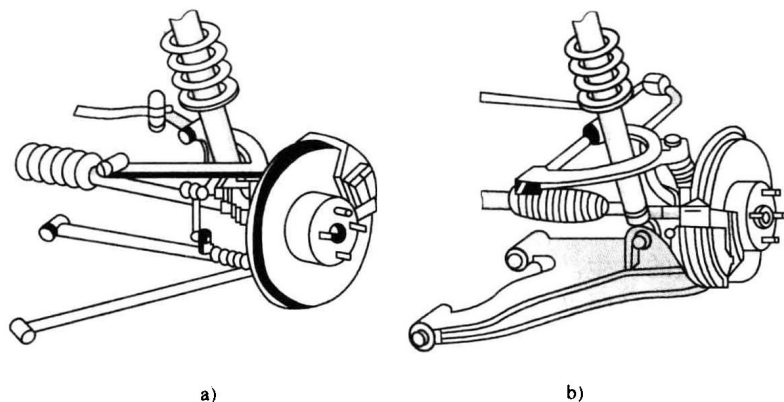


图 1-7 双横臂式悬架系统

a) A 字形 b) V 字形

双横臂式独立悬架的特点、优点及主要应用范围,如下所述。

1) 弹簧刚度和减振器阻尼可以根据需要较容易地进行调整;非簧载质量小,有利于行驶平顺性。

2) 由于设计的自由度大,可通过合理布置,使悬架与转向杆系的运动干涉减小,不易发生跳摆。

3) 可以通过调整其导向机构较容易地得到所需要的前轮定位参数,得到较好的整车性能。

4) 能够降低发动机和驾驶室的高度,从而降低质心(即重心)。

5) 有效弹簧距等于轮距,有利于提高横向角刚度,但一般来讲,其侧倾中心高度低,不利于其侧倾稳定性,一般需加横向稳定杆。

(2) 纵臂式独立悬架系统 纵臂式独立悬架系统是指车轮在汽车纵向平面内摆动的悬架系统结构,又分为单纵臂式和双纵臂式两种形式。当车轮上下跳动时,单纵臂式悬架系统会使主销后倾角产生较大的变化,因此它不用在转向轮上。双纵臂式悬架系统的两个摆臂一般做成等长的,形成一个平行四杆结构,这样,当车轮上下跳动时主销的后倾角可保持不变,因此,它多应用在转向轮上。纵臂式独立悬架系统如图 1-8 所示。



图 1-8 纵臂式独立悬架系统

(3) 多连杆式悬架系统 多连杆式悬架系统是由 3~5 根杆件组合起来控制车轮的位置变化的悬架系统,如图 1-9 所示。

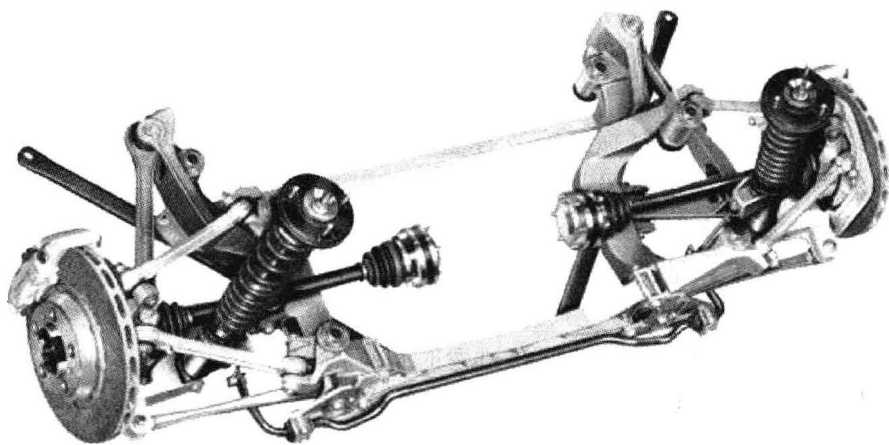


图 1-9 多连杆式悬架系统

多连杆式悬架系统可分为多连杆前悬架和多连杆后悬架系统。多连杆前悬架系统一般为 3 连杆或 4 连杆式独立悬架系统;多连杆后悬架系统则一般为 4 连杆或 5 连杆式后悬架系统,其中,5 连杆式后悬架系统应用较为广泛。

多连杆式能使车轮绕着与汽车纵轴线成一定角度的轴线内摆动,是横臂式和纵臂式的折中方案,适当地选择摆臂轴线与汽车纵轴线所成的夹角,可不同程度地获得横臂式与纵臂式悬架系统的优点,能满足不同的使用性能要求。多连杆式悬架系统的主要优点是:车轮跳动

时轮距和前束的变化很小, 不管汽车是在驱动状态还是在制动状态都可以按驾驶人的意图进行平稳地转向, 其不足之处是汽车高速时有轴摆现象。

(4) 烛式悬架系统 烛式悬架系统的结构特点是车轮沿着刚性地固定在车架上的主销轴线上、下移动, 其结构原理图如图 1-10 所示。

烛式悬架系统的优点是: 当悬架系统变形时, 主销的定位角不会发生变化, 仅是轮距、轴距稍有变化, 因此特别有利于汽车的转向操纵稳定和行驶稳定。但烛式悬架系统有一个大缺点: 就是汽车行驶时的侧向力会全部由套在主销套筒上的主销承受, 致使套筒与主销间的摩擦阻力加大, 磨损也较严重。烛式悬架系统现已应用不多。

(5) 麦弗逊式悬架系统 通用公司的厄尔·S·麦弗逊, 在 1947 年研发的麦弗逊式滑柱是使用最广泛的独立悬架系统, 在欧洲原产汽车中得到了广泛使用, 如图 1-11 所示。

麦弗逊式滑柱是通过 A 字型托臂将一个减振器和一个螺旋弹簧合并组成一个可以上下运动装置。下托臂通常是 A 字型的设计, 用于给车轮提供部分横向支撑力, 以及承受全部的前后方向应力, 减振器支柱除了减振还有支撑整个车身的作用。因此, 麦弗逊式悬架系统提供了一种结构更紧凑、质量更轻的独立悬架系统, 可用在前轮驱动的车辆上, 是当今世界应用最广泛的轿车前悬架之一。

麦弗逊式悬架结构简单, 所以它质量轻, 响应速度快, 并且在一个下摇臂和支柱的几何结构下能自动调整车轮外倾角, 让其能在过弯时自适应路面, 使轮胎的接地面积达到最大化。麦弗逊式悬架系统与双横臂式悬架系统相比, 其优点是: 结构紧凑, 车轮跳动时前轮定位参数变化小, 有良好的操纵稳定性, 加上由于取消了上横臂, 给发动机及转向系统的布置带来了便利; 与烛式悬架系统相比, 它的滑柱受到的侧向力又有了较大的改善。麦弗逊式悬架系统多应用在中小型轿车的前悬架系统上, 保时捷 911、国产奥迪、桑塔纳、夏利、富康等轿车的前悬架系统均为麦弗逊式独立悬架系统。虽然麦弗逊式悬架系统并不是技术含量最高的悬架系统, 但它仍是一种经久耐用的独立悬架系统, 具有很强的道路适应能力。

(6) 拖曳臂式悬架系统 拖曳臂式悬架系统也称为单纵臂扭转梁独立悬架, 多用于轿车的后悬架系统, 由于这种悬架还装有横向连接两侧车轮的弹性元件(一般是扭杆弹簧或者扭力梁), 因此有些厂家称之为半独立式悬架。常见的拖曳臂式悬架系统如图 1-12 所示。

拖曳臂式悬架本身具有非独立悬架存在的缺点, 但同时也兼有独立悬架的优点, 拖曳臂

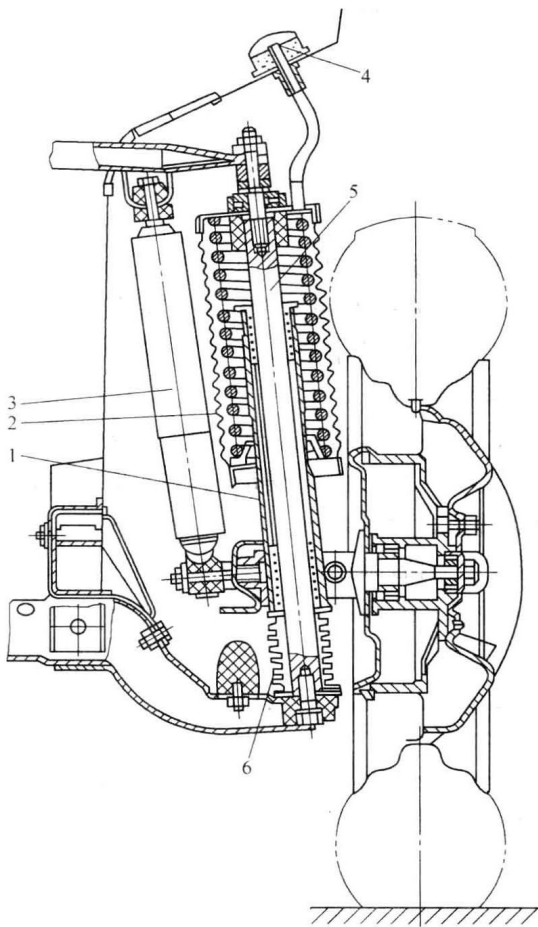


图 1-10 烛式悬架系统的结构原理图

1—通气管 2—减振器 3—套筒
4、6—防尘罩 5—主销

式悬架最大的优点是左右两轮的空间较大,而且车身的外倾角没有变化,减振器不发生弯曲应力,所以摩擦小。但是,这种悬架的舒适性和操控性均有限,当其制动时除了车头较重会往下沉外,拖曳臂悬架的后轮也会往下沉(以平衡车身),无法提供精准的几何控制。我们熟知的桑塔纳、捷达、宝来、东风悦达起亚 Rio 等车型都使用这种后悬架。此外,富康和东风标致 206 车型也使用这种后悬架,但因为这两款车的后悬架增加了车轮自偏转弹性元件(即后轮随动转向技术),因此其行驶表现比一般拖曳臂式后悬架要好。拖曳臂式悬架系统的特点是使用的元件不多,日常维护方便,同时能起到不错的减振效果。

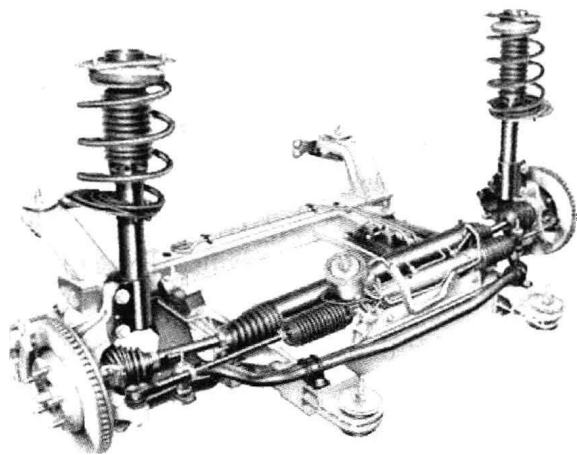


图 1-11 麦弗逊式悬架系统



图 1-12 拖曳臂式悬架系统

1.3.2 半主动和主动悬架系统

1. 半主动悬架系统

随着人们生活水平的不断提高,用户对汽车舒适性的要求也越来越高,传统的汽车悬架系统已不能满足人们的要求。人们希望汽车车身的高度、悬架的刚度、减振器的阻尼大小能随汽车的行驶速度以及路面状况等行驶条件的变化而自动调节,从而实现乘坐舒适性的提高。

1973 年,美国加州大学戴维斯分校的 D. A. Crosby 和 D. C. Karnopp 首先提出了半主动悬架的概念。其基本原理是:用可调刚度弹簧或可调阻尼的减振器组成悬架,并根据簧载质量的加速度响应等反馈信号,按照一定的控制规律调节弹簧刚度或减振器的阻尼,以达到较好的减振效果。

1975 年, Margolis 等人提出了由“开关”控制的半主动悬架。1983 年,日本丰田汽车公司开发了具有 3 种减振工况的“开关”式半主动悬架,并应用于丰田 Soarer280GT 型轿