

汽车悬架 论文集

陈耀明 编著



苏州大学出版社

SOOCHOW UNIVERSITY PRESS

汽车悬架论文集

陈耀明 编著

苏州大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

汽车悬架论文集 / 陈耀明编著. — 苏州: 苏州大学出版社, 2012. 9
ISBN 978-7-5672-0221-4

I. ①汽… II. ①陈… III. ①汽车—车悬架—文集
IV. ①U463.33-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 219613 号

汽车悬架论文集

陈耀明 编著

责任编辑 马德芳

苏州大学出版社出版发行

(地址: 苏州市十梓街 1 号 邮编: 215006)

常州市武进第三印刷有限公司印装

(地址: 常州市武进区湟里镇村前街 邮编: 213154)

开本 787 mm×1 092 mm 1/16 印张 22.25 字数 550 千

2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5672-0221-4 定价: 80.00 元

苏州大学版图书若有印装错误, 本社负责调换

苏州大学出版社营销部 电话: 0512-65225020

苏州大学出版社网址 <http://www.sudapress.com>



自序

本人自 1956 年参加工作以来,一直从事汽车悬架的研发和设计工作。在汽车研究所和东风汽车公司(二汽)连续 30 年稳定在这个专业(最后 10 年从事大客车底盘开发和试验能力建设)。1996 年年底退休之后,受聘于一些客车制造企业和空气悬架专业公司,仍继续从事汽车悬架特别是客车空气悬架的研发。也就是说,历时半个多世纪,本人绝大部分精力都投入到了汽车悬架这个领域。

本论文集纳入了本人所撰写的涉及汽车悬架的绝大部分论文。部分论著是本人工作时为“悬架专业委员会”举办学习班所撰写的教材以及“二汽”技术攻关的分析论文;多数论著是本人退休以后,主要为技术咨询和专题讲课而撰写的。为了系统化,本书将所有论文分为 8 篇。最后一篇“多轴汽车轴荷与纵向力计算、稳态转弯分析”,因受到悬架参数和安装位置的影响,相关论文也编入到本论文集。由于本人工作范围的关系,这些论文只涉及商用车(载货汽车、客车)和越野车。

由于每篇论文撰写的年代相隔较长,而且各自为不同的专题或目的而写,每篇论文都有相对的完整性,因此,本书保留了论文的原样,仅作为“论文集”合并在一起,并注明撰写的年月。对于各篇论文的术语定义、公式符号等的一些差异,不再作统一。另外,有个别内容会出现重复。由于重新编排和修改的工作量很大,受精力和时间的限制,本人未能对本论文集作更为严谨的处理,望读者谅解。

本论文集推导的计算公式和设计方法,多数已经经过东风汽车公司和相关客车制造企业、悬架专业公司所实践,证明是可信和实用的,也是本人多年来的理论和经验的总结。出版本书的目的是让更多的悬架工作者对汽车悬架有一个比较完整和清晰的概念。时代在进步,由于历史条件的限制,这些论文没有纳入一些现代化的设计理念和办法,同时,差错和分歧也在所难免,希望读者给予批评指正。

本论文集的出版是在“苏州市奥杰汽车技术有限公司”宿佳敏先生、李明先生和东风汽车公司陈彬先生的大力支持和鼓励下实现的,谨致以诚挚的谢意。

陈耀明

2012 年 6 月



目 录

第一篇 汽车悬架设计概述

汽车悬架设计的基本知识(提纲)	(1)
-----------------------	-----

第二篇 汽车钢板弹簧设计、计算、试验

钢板弹簧悬架设计规范(提纲)	(4)
汽车钢板弹簧的性能、计算和试验	(7)
汽车变截面钢板弹簧的设计计算	(32)
汽车钢板弹簧断面参数计算	(44)
汽车钢板弹簧的纵扭强度校核	(51)
不对称钢板弹簧的刚度计算	(57)
两级刚度复式钢板弹簧的设计计算	(64)
复合式钢板弹簧性能参数匹配	(73)
副簧下置的两级刚度复式钢板弹簧设计计算	(80)
根部为双支点的对称钢板弹簧设计计算	(116)
对钢板弹簧台架疲劳试验规范的分析和建议	(143)

第三篇 空气悬架设计

空气悬架知识讲座(提纲)	(151)
空气悬架的历史、现状和发展趋势	(153)
空气悬架的基本特性和优缺点	(158)
汽车复合式空气悬架设计计算	(164)
关于空气悬架高度控制阀数目和布置的分析	(181)
四连杆机构里上 V 形杆的布置问题	(184)
X 型导向臂的设计	(187)

第四篇 减振器的设计计算

汽车减振器的选型设计	(194)
------------------	-------



第五篇 悬架的抗侧倾、抗纵倾能力及侧翻校核

汽车空气悬架抗侧倾能力的分析	(202)
汽车悬架的抗纵倾能力	(214)
汽车质心位置的计算	(228)
汽车侧翻和侧倾的关系	(231)
汽车静态侧翻稳定角的计算方法	(234)
汽车的消扭悬架	(237)

第六篇 钢板弹簧悬架的运动轨迹

钢板弹簧纵扭问题分析	(243)
------------------	-------

第七篇 关联式钢板弹簧悬架

汽车平衡悬架的设计要点	(248)
汽车摆臂式悬架的设计计算	(258)

第八篇 多轴汽车轴荷与纵向力计算、稳态转弯分析

非关联式悬架的多轴汽车轴荷计算	(274)
部分关联的复合式空气悬架三轴汽车轴荷计算	(279)
感载阀控制的复合式空气悬架三轴汽车轴荷计算	(285)
部分关联的复合式空气悬架四轴汽车轴荷计算	(292)
感载阀控制的复合式空气悬架和主副簧复合的两级刚度钢板弹簧悬架组合的三轴汽车 轴荷计算	(300)
感载阀控制第三轴空气悬架的三轴汽车轴荷计算	(308)
感载阀控制第二轴空气悬架的三轴汽车轴荷计算	(315)
汽车列车轴荷计算	(322)
三轴越野汽车的稳态转弯及中、后桥错位问题的分析	(330)



第一篇 汽车悬架设计概述

汽车悬架设计的基本知识(提纲)

一、汽车悬架的基本概念

1. 悬架的定义和功能

- (1) 定义: 连接簧载与非簧载质量为一体的装置。
- (2) 功能: 缓冲、衰振、传力、导向。

2. 悬架的组成——三大元件

- (1) 弹性元件。
- (2) 阻尼元件。
- (3) 导向元件。

3. 悬架的分类

- (1) 按导向元件: ① 独立; ② 非独立。
- (2) 按弹性元件: ① 金属; ② 非金属: 固体和气体。
- (3) 按可控程度: ① 不可控; ② 可控: 开环和闭环。

4. 悬架的基本性能和参数

- (1) 弹性特性: 刚度、偏频, 线性、非线性。
- (2) 阻尼特性: 阻尼系数、阻尼比。
- (3) 导向特性: 运动轨迹、干涉量。
- (4) 抗侧倾特性、抗纵倾特性: 阻抗、倾角。

二、空气悬架的基本知识

1. 空气悬架的组成

- (1) 空气弹簧: 弹性元件。
- (2) 高度控制阀: 控制系统。
- (3) 减振器: 阻尼元件。
- (4) 导向杆系: 导向元件。
- (5) 管路、电路: 控制系统。

2. 空气悬架的分类

- (1) 全空气悬架(6气囊、4气囊)。
- (2) 半(复合、混合)空气悬架。
- (3) 辅助式空气悬架。

3. 空气弹簧即空气悬架的基本特性

- (1) 空气弹簧的刚度计算公式。

(2) 汽车悬架的理想弹性特性: 等频性和动容量。

(3) 空气弹簧的典型特性曲线。

4. 空气悬架的主要优缺点

5. 空气悬架各组成部分的设计要点

(1) 空气弹簧。

(2) 高度控制阀。

(3) 减振器: ① 阻尼比的计算: 空、满载, 复原、压缩, 线速度 3 或 4 种; ② 阻尼可调: 按空、满载调节和按路面不平度调节; ③ 反向限位; ④ 行程计算; ⑤ 橡胶铰接头设计。

(4) 导向杆系: ① 分类及方案介绍; ② 运动轨迹分析; ③ 橡胶铰接头设计; ④ 侧倾角刚度计算。

(5) 管路与电路设计: ① 气密性; ② ECAS 控制姿态、隔离阀。

(6) 抗侧倾能力: ① 弹性元件 (高度控制阀的作用); ② 稳定杆; ③ 导向元件 (含前工字梁)。

三、汽车钢板弹簧的基本知识

1. 钢板弹簧的分类

(1) 按结构特征分: ① 半椭圆钢板弹簧; ② 四分之一椭圆钢板弹簧; ③ 全椭圆钢板弹簧 (已淘汰)。

(2) 按片数多少分: ① 多片钢板弹簧 (等断面); ② 少片钢板弹簧 (变截面); ③ 单片钢板弹簧 (变截面)。

2. 钢板弹簧的基本特性

(1) 弹性特性: ① 线性弹簧; ② 非线性弹簧。

(2) 阻尼特性: ① 库仑阻尼特征; ② 动刚度。

(3) 导向特性: ① 垂直变形的运动轨迹; ② 纵扭运动及干涉。

3. 钢板弹簧非独立悬架的主要优缺点

(1) 兼有悬架三大功能 (至少两大功能), 因而结构简单、可靠, 成本低, 是沿用至今的主要原因。

(2) 受结构尺寸及材质强度的限制, 刚度也即偏频不可能选择低值, 使平顺性水平不可能很高; 此外, 受车身高度变化的限制, 静挠度也不可能选太大。因此, 近代轿车及高等级大客车已不再采用板簧悬架。

(3) 库仑 (摩擦) 阻尼的利弊: ① 阻尼和正压力成正比, 使空、满载阻尼比接近; ② 在高频小振幅的好路面上, 动刚度变大 (锁死), 平顺性变差。因此, 在好路面行驶的高速车已不用。

(4) 非独立悬架的非簧载质量大, 导致车轮动载系数大, 抓地能力差, 操稳性变坏, 对路面破坏力大。

(5) 在有角振动工况下, 由于陀螺效应导致转向轮摆振。

(6) 在转弯侧倾工况下, 某些车轮定位参数, 如轮距、对地面外倾角、前束角等相对变化较小。

4. 钢板弹簧的计算方法

(1) 单片和少片变断面弹簧: 刚度和应力计算方法。



(2) 多片等断面弹簧:① 刚度和工作应力计算:共同曲率法和集中载荷法;② 各单片长度的确定;③ 弧高和预应力计算。

(3) 设计计算中的几个具体问题。

(4) 四分之一椭圆和不对称钢板弹簧的计算。

5. 钢板弹簧悬架的选型设计——基本规格及参数的确定

(1) 确定设计的原始依据:① 轴荷;② 非簧载质量;③ 轴距;④ 重心高度;⑤ 车架上平面(基准)至车轮中心的距离;⑥ 最大制动力、驱动力;⑦ 钢板弹簧布置空间(长、宽)的范围;⑧ 控制的重量指标和寿命。

(2) 垂直振动工况的核算。

① 基本参数及规格的选择。

a. 刚度的确定→计算基本规格尺寸(长×宽×厚一片数):初定形状系数、初定无效长度、弹性模数、根部惯性矩。

b. 比应力的计算及许用值。

c. 总成自由弧高的确定(夹紧弧高,自由弧高)。

② 装车后各参数的核算。

a. 系统的偏频(固有频率)、静挠度。

b. 满载平均静应力及许用值。

c. 极限应力及许用值、极限动行程的确定。

d. 满载设计弧高的核算。

(3) 最强制动时的强度校核:① 动态轴荷的计算;② 根部纵扭应力校核;③ 卷耳应力校核。

(4) 抗侧倾能力的校核:① 钢板弹簧角刚度:对称钢板弹簧角刚度、不对称钢板弹簧角刚度;② 横向稳定杆角刚度;③ 侧倾力臂;④ 侧倾角及侧倾阻抗。

(5) 钢板弹簧运动学及干涉校核:① 垂直跳动的校核:纵拉杆的跳动干涉量及限值、转向轮的干涉转向、侧倾轴转向效应、传动轴的干涉量(花键伸缩量,夹角变化);② 纵扭干涉及制动跑偏的校核:纵扭角计算、纵拉杆纵扭干涉、减小跑偏的措施。

6. 汽车钢板弹簧悬架的设计规范(正规化企业的要求)

包括选型设计和结构设计。

7. 汽车钢板弹簧的试验及相关标准(略)

(2009年4月27日)

第二篇 汽车钢板弹簧设计、计算、试验

钢板弹簧悬架设计规范(提纲)

一、钢板弹簧钢断面参数($R=h/2$, $R=h$, $R=3h/4$)

1. 单面双槽钢
 - (1) 断面积。
 - (2) 中性层位置。
 - (3) 惯性矩。
 - (4) 断面系数。
 - (5) 拉、压应力比。
2. 矩形断面钢
 - (1) 断面积。
 - (2) 惯性矩。
 - (3) 断面系数。

二、钢板弹簧总成基本特征参数

1. 刚度(自由刚度、夹紧刚度)
 - (1) 多片簧。
 - (2) 少片簧。
2. 比应力
 - (1) 多片簧(根部应力)。
 - (2) 少片簧:
 - ① 根部应力;
 - ② 最大应力点应力。
3. 弧高
 - (1) 夹紧弧高。
 - (2) 自由弧高。

三、有关整车性能参数的校核

1. 悬架固有频率
 - (1) 静挠度。
 - (2) 固有频率(推荐值)。
 - (3) 两极刚度复式板簧的挠度和频率。



2. 侧倾校核
 - (1) 侧倾角刚度：
 - ① 板簧；
 - ② 稳定杆。
 - (2) 侧倾力臂。
 - (3) 侧倾角(推荐值)。
3. 杆系的运动学校核
 - (1) 板簧运动当量杆的计算：
 - ① 基线角；
 - ② 圆心位置；
 - ③ 当量杆长度(半径)；
 - ④ 相关点的平移。
 - (2) 纵拉杆与板簧运动干涉量计算(推荐限值)。
 - (3) 传动轴伸缩量与万向节夹角校核。
4. 制动时的纵扭干涉
 - (1) 板簧纵扭特性：
 - ① 纵扭瞬心位置；
 - ② 纵扭角。
 - (2) 纯纵扭干涉引起的跑偏量。
 - (3) 纵扭与“点头”同时干涉的跑偏量。
5. 轴转向效应
 - (1) 当量杆斜度。
 - (2) 轴转向效应系数。

四、强度校核

1. 设计载荷下的平均静应力(推荐值)
 - (1) 等比应力。
 - (2) 不等比应力：
 - ① 多片簧各片不等厚；
 - ② 少片簧。
2. 最大行程下的极限应力(推荐值)
 - (1) 等比应力。
 - (2) 不等比应力。
3. 纵扭时应力校核(推荐值)
 - (1) 制动：
 - ① 前簧；
 - ② 后簧(倒车)。
 - (2) 驱动：后簧。

4. 卷耳应力校核(推荐值)

- (1) 制动。
- (2) 驱动。

五、钢板弹簧各单片的设计

1. 多片簧各单片长度的确定

2. 各单片弧高的确定

(1) 总成弧高的选定:

- ① 装车后满载弧高;
- ② 装车后无载弧高;
- ③ 自由弧高与曲率半径。

(2) 各单片预应力的选定:

- ① 预应力选取原则;
- ② 自平衡条件。

(3) 各单片自由弧高和曲率半径的计算(多片簧、少片簧):

- ① H_k ;
- ② R_k 。

六、生产文件中有关参数的选定

1. 预压缩行程
2. 验证负荷
3. 无载与设计负荷下的总成弧高
4. 设计负荷下的刚度值及其测定点

(1990年5月)



汽车钢板弹簧的性能、计算和试验

本文是为汽车工程学会悬架专业学组所办的“减振器短训班”撰写的讲义,目的是让汽车减振器的专业人员对钢板弹簧拥有一些基本知识,以利于其工作。内容分为三部分:钢板弹簧的基本功能和特性、设计计算方法以及试验等。因为这部分内容非本次短训班的重点,所以要求尽量简明扼要,也许有许多不全面的地方,仅供学习者参考。有关钢板弹簧较详细的论述,可参考汽车工程学会悬架专业学组所编的《汽车悬架资料》。

一、钢板弹簧的基本功能和特性

1. 汽车振动系统的组成

汽车在道路上行驶,由于路面存在不平度以及其他各种原因,必然引起车体产生振动。从动态系统的观点来看,汽车是一个多自由度的振动系统。其振源主要来自路面不平度的随机性质的激振,此外还有发动机、传动系统以及空气流动所引起的振动等。

为改善汽车的平顺性,也就是为减小汽车的振动,关键的问题是研究如何对路面不平度的振源采取隔振措施,这就是设计悬架系统的根本目的。换言之,就是在一定的道路不平度输入情况下,通过悬架系统的传递特性,使车体的振动输出达到最小。

当研究对象仅限于悬架系统时,人们往往把车体当做一个刚体来看待。即使这样,汽车仍然是一个很复杂的多自由度系统,见图 1。如果不涉及汽车的横向振动和角振动,可以将左右悬架合并,使汽车振动系统进一步简化,见图 2。

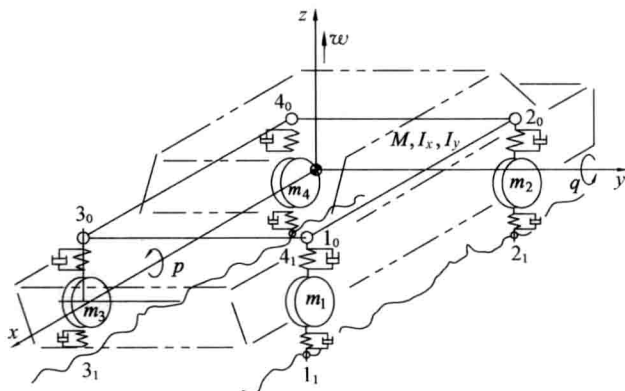


图 1 汽车振动系统

在一定条件下,也就是当质量分配系数等于 1,即前后悬架的输出与输入各自的相干特性达到最大值时,就可以将前、后悬架分开,单独看成一个两自由度振动系统。这时,组成每一个振动系统的元素就是质量(簧载质量与非簧载质量)、弹性元件(悬架弹簧和轮胎)和阻尼元件(悬架阻尼元件和轮胎阻尼),见图 3。

这些元素的组合,形成了振动系统的主要参数,如系统的自振(固有)频率,相对阻尼系数,悬架上、下质量比等。这些参数对悬架系统的传递特性(频响特性)有明显的影响,设计悬架时,必须适当地选择这些参数,才能获得良好的悬架性能。

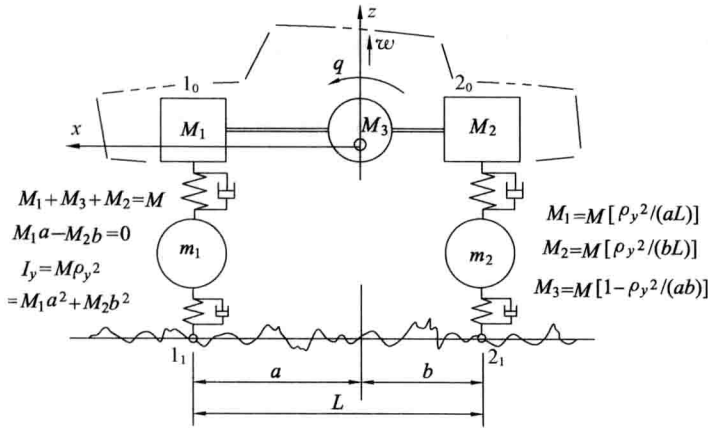


图2 简化的汽车平面振动系统

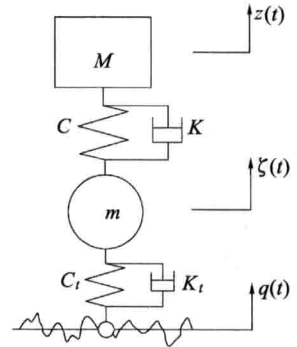


图3 两自由度振动系统

表征车体振动的主要特征是车体加速度对路面不平度输入的频响特性。为了分析悬架的动载以及轮胎的附着状态,还应了解悬架动行程以及轮胎动负荷对路面不平度输入的频响特性。加速度、动行程、动负荷这三方面,成为评价悬架性能好坏的主要指标。

对于一个线性系统,可以比较容易地建立两自由度系统的数学模型,并且用计算的方法,求出各个参数对频响特性的影响。简单地说,簧载质量的自振频率降低,可以使车体加速度的幅频特性明显改善。相对阻尼系数增大,可以使共振区的幅值下降,却使非共振区的

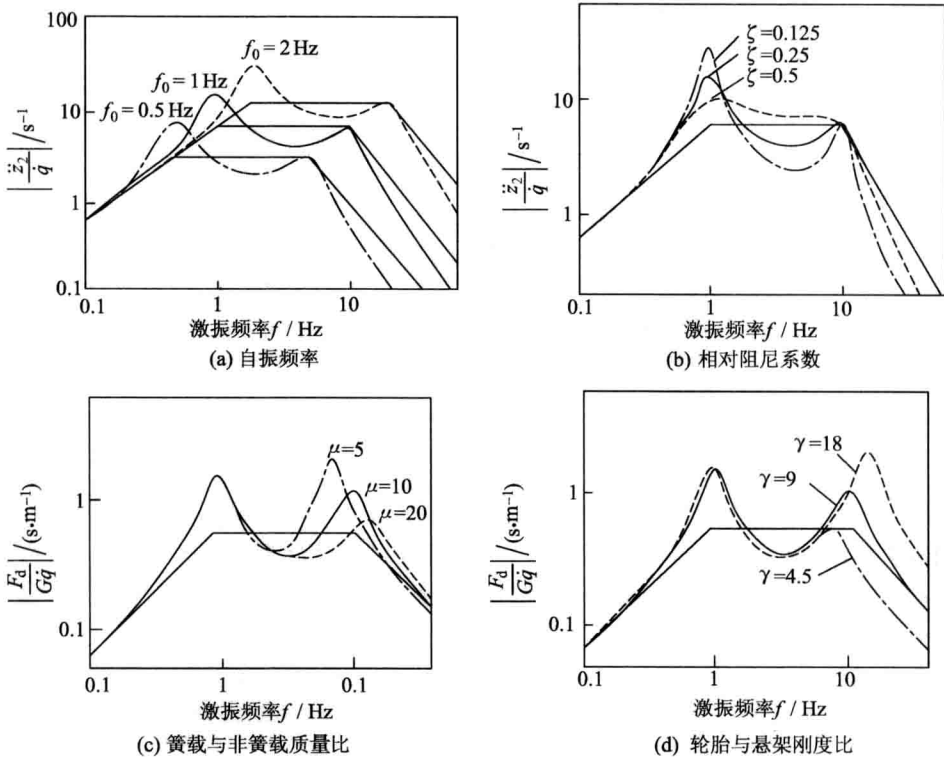


图4 影响频响特性的主要参数



幅值增大。簧载与非簧载质量之比增大,可使车轮对路面的动载系数减小,改善车轮对路面的附着,见图4。如果不考虑轮胎的弹性,可以进一步将悬架系统当做单自由度系统来分析,见图5。这个最简单系统的基本特性,也可以粗略表达该悬架系统的基本性质。

2. 悬架系统的组成和各元件的功能

汽车悬架系统是将车体(或车架)和车轮(或车轴)弹性地连接起来的隔振装置。它由弹性元件、阻尼元件和导向元件组成,与汽车的其他部分(簧载与非簧载两大部分)构成一个完整的振动系统。

弹性元件由各类弹簧担任,承受簧载质体的重量,是构成弹性连接的主要部件。阻尼元件由液力减振器(粘性阻尼)或摩擦元件(库仑阻尼)所组成,使系统成为有阻尼的振动系统。导向元件由各种导向杆系所组成,使车体与车轮之间有确定的运动关系,并传递弹性元件和阻尼元件所传递的力和力矩之外的力和力矩。

这三大元件可以由某些单独的部件分别承担,也可以由某些部件综合兼任。例如,钢板弹簧主要是悬架系统的弹性元件,又可以兼起导向元件的作用,多片弹簧有较大的摩擦阻尼,可以兼起阻尼元件的作用。由此可见,钢板弹簧可以兼作三大元件之用,因而使悬架系统结构简单,成本降低,这是其他弹性元件难以媲美的。因此,从汽车问世以来,钢板弹簧一直被应用着,而且今后仍有相当强的生命力。

3. 钢板弹簧的弹性特性

钢板弹簧承受垂直载荷,成为悬架系统的弹性元件,这时,就其弹性特性而言,可以分为线性和非线性两大类。一般的钢板弹簧,如果没有特殊的结构措施,其非线性程度非常小,可以看成是线性的,即负荷对变形呈线性变化,也就是刚度为常数。

线性弹簧作为悬架系统的弹性元件,有两方面的缺点。其一,当簧载重量变化后,系统的自振频率发生变化。如果汽车空、满载的负荷差别很大,就很难保证各种载荷状态下都得到良好的平顺性。其二,线性弹簧在受到冲击后,其动容量比非线性弹簧的要小,因而吸收或释放相同的能量就要有较大的变形,所以悬架的极限动行程就必须选得较大,以免悬架被“击穿”。

为克服上述缺点,在悬架设计时往往采取一些措施,使系统呈现一定的非线性弹性特性。对于独立悬架,可以靠合理选择导向杆系的运动关系,使线性的弹性元件在车轮接地点上转化为非线性的悬架弹性特性。此外,还可以用组合的方法构成复式弹簧,或加装橡胶副簧和限位块等,使弹性元件本身呈现一定的非线性特性。

从理论上讲,只要是微幅振动,就可以用次切距来计算自振频率。这样,为保证载荷变化时自振频率保持不变,可以导出“等频”的弹性特性,见图6。其负荷与变形可以用下式表达:

$$\begin{cases} P = C_m f & (P < P_c) \\ P = P_c e^{(f/f_c - 1)} & (P \geq P_c) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 、 f 为任意点的负荷与变形; P_c 为某一特定负荷,一般取空载负荷; f_c 为在 P_c 负荷下的静挠度(变形)。

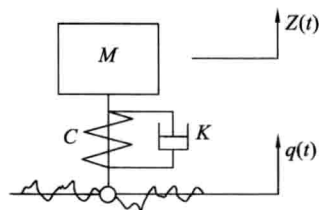


图5 单自由度振动系统

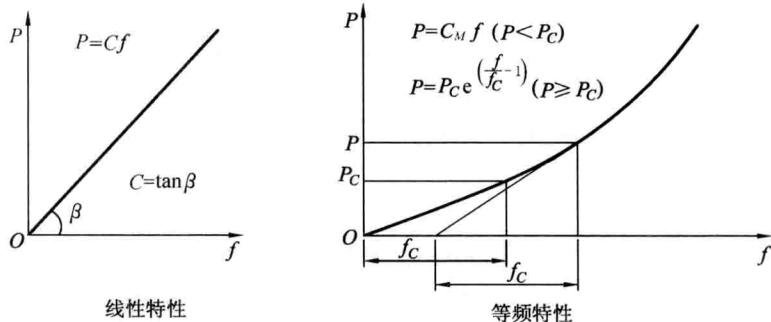


图 6 等频弹性特性

而 $C_M = \frac{P_C}{f_C}$, 即按所要求的自振频率确定的初始刚度, 这时自振频率为

$$N_C = \frac{5}{\sqrt{f_C}} \text{ Hz} = \frac{300}{\sqrt{f_C}} \text{ 次/分, 为常数}$$

这样的弹性特性并不能解决动容量小的缺点, 因而不能使要求的极限动行程有效地减小。

为此, 可以导出“理想”的弹性特性, 它由一组曲线组成。在各种负荷情况下, 其折算静挠度(次切距)都相同, 因而保证了等频性。此外, 曲线的平衡点为拐点, 当悬架偏离平衡点振动时, 曲线呈现不同向的弯曲, 使系统吸收或释放的能量明显增大, 见图 7。这种“理想”的弹性特性, 只有采用充排介质的空气弹簧或油气弹簧加上附加的橡胶弹簧才可能实现。

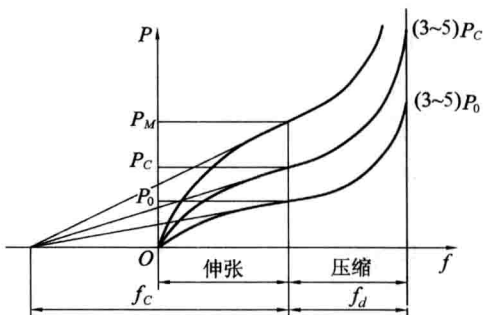


图 7 理想弹性特性

就钢板弹簧而言, 采取某些措施之后, 只能在一定程度上接近等频特性。常见的有以下三种结构:

- (1) 两级刚度的复式钢板弹簧。

将主、副簧并联组合, 在小负荷时只有主簧工作, 当负荷增大到一定程度后, 副簧与支架接触, 两个弹簧一起承受载荷。复式弹簧的弹性特性为一折线, 见图 8。这种特性不可能做到等频, 只能使自振频率在各种载荷下变化较小。

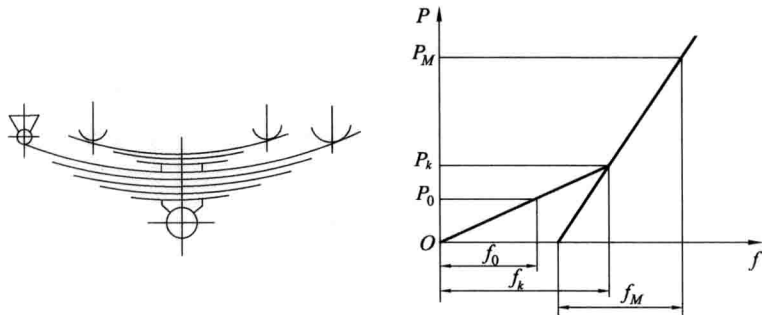


图 8 复式弹簧的弹性特性



主副簧刚度的匹配以及副簧接触点的选择,对悬架性能和弹簧应力有很大的影响。通常有两种方法来选择这些参数:一种为比例中项法,另一种为平均负荷法。这两种方法都可以保证空、满载范围内自振频率变化不大。但就主副簧的具体结构而言,往往不易保证弹簧的强度或疲劳寿命对应力的要求,所以实际设计时一般要加以修正。

(2) 渐变刚度钢板弹簧。

这种弹簧也是由主副簧组合而成的。在无载状态下,主副簧的自由曲率半径不同。当负荷增大时,借主簧曲率半径从根部向外逐渐增大,使副簧与其接触的区域增多。接触后的这部分副簧共同承受载荷,弹簧的刚度也就逐渐增大。这种弹簧的特性见图 9,在副簧未参加工作前和副簧全部接触完之后,均为线性特性,而中间区段为渐变的非线性特性。设计时只要选择合适的参数,就可以获得较好的等频性。

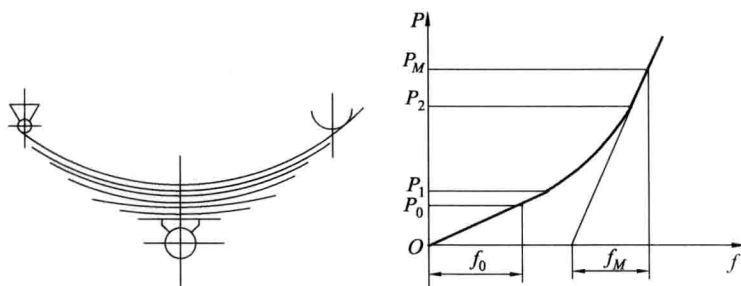


图 9 渐变刚度弹簧的弹性特性

采用滑板端支架,使钢板弹簧承载后由于曲率半径的增大,接触点向内移动,缩小作用长度而增大刚度,也可以获得一定的非线性,见图 10。除非选用很长的滑板,否则难以获得明显的非线性,当然也难以达到等频的要求。

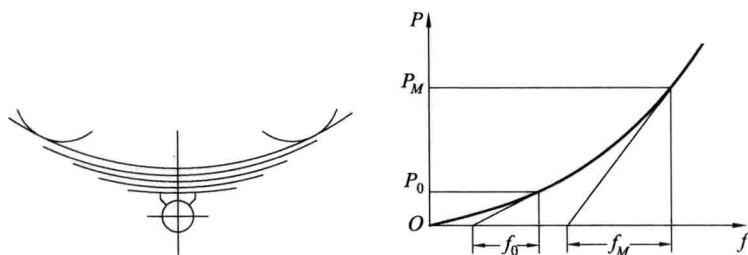


图 10 滑板式弹簧的弹性特性

(3) 多种复合的组合式弹簧。

当汽车空、满载的负荷变化很大时,采用单一的结构措施往往难以达到所期望的弹性特性或应力规范,这时可以将上述几种非线性的措施综合起来,形成一种多种复合的钢板弹簧,见图 11。它由两端长滑板、渐变刚度的副簧以及常规的副簧组合起来。选择合适的参数和接触位置,可以获得相当好的等频性。这种弹簧要用单独的一根主片(或导向杆)来传递纵向力。近年来,美国的载重汽车广泛采用这种弹簧作为其后悬架。

4. 钢板弹簧的阻尼特性

多片弹簧存在片间摩擦,所以当它承受垂直载荷时,这种摩擦力就要反映到弹簧的弹性特性上来,形成一个迟滞回线,称为阻尼特性。如果摩擦力严格符合库仑定律,这个回线就