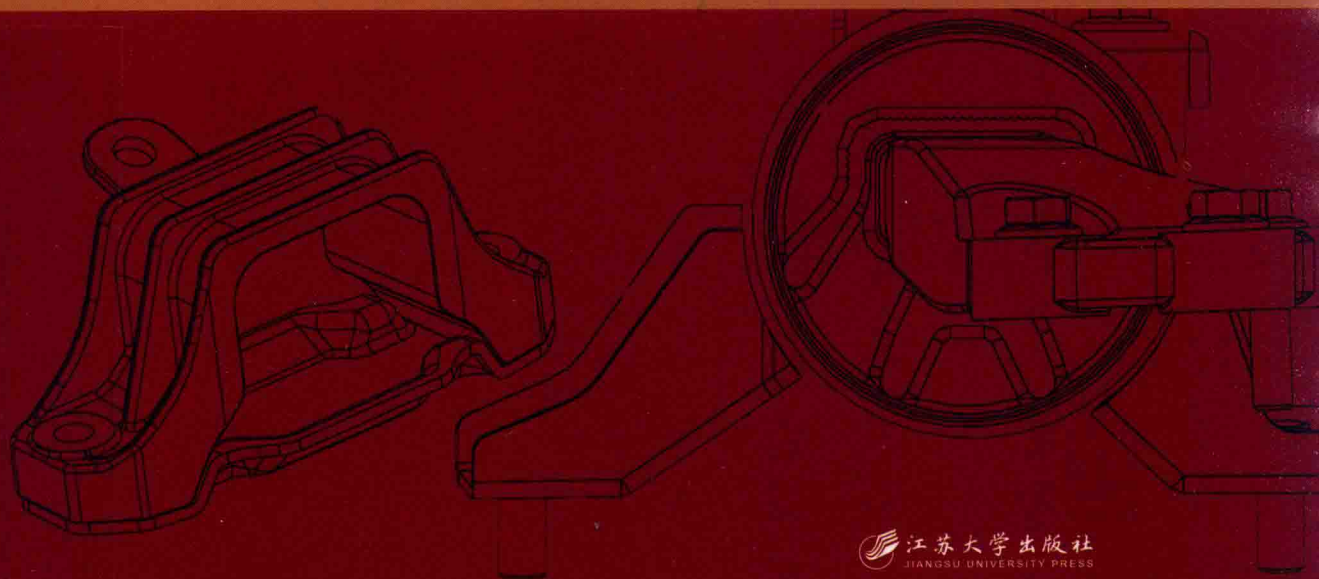


Design and Performance Development of
Powerplant Mount System



汽车悬置系统设计 及性能开发

董加加 编著



 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

汽车悬置系统设计 及性能开发

Design and Performance Development of
Powerplant Mount System

责任编辑：吴蒙蒙
装帧设计：米 兰



2019

U463.33
2

Design and Performance Development of
Powerplant Mount System



汽车悬置系统设计 及性能开发

董加加 编著



江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS
镇江

图书在版编目(CIP)数据

汽车悬置系统设计及性能开发 / 董加加编著. — 镇江 : 江苏大学出版社, 2019.5
ISBN 978-7-5684-0974-2

I. ①汽… II. ①董… III. ①汽车—车悬挂装置—系统设计 IV. ①U463.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 263600 号

汽车悬置系统设计及性能开发

Qiche Xuanzhi Xitong Sheji Ji Xingneng Kaifa

编 著/董加加

责任编辑/吴蒙蒙

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press.ujs.edu.cn

排 版/镇江市江东印刷有限责任公司

印 刷/镇江市江东印刷有限责任公司

开 本/787 mm×1 092 mm 1/16

印 张/10.5 插页 4 面

字 数/255 千字

版 次/2019 年 5 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0974-2

定 价/48.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

序

动力总成悬置系统是汽车重要的子系统之一,其设计的好坏直接影响整车的 NVH 性能。良好的 NVH 性能也是车辆具有良好平顺性和舒适性的重要保证。

作为一名悬置系统工程师,若想把悬置系统设计好,首先,必须具备良好的基础知识和车辆工程方面的专业知识,如材料力学、机械设计、数值分析、汽车理论、汽车系统动力学等;其次,要对悬置的结构特性、性能特点有深入的掌握。良好的悬置方案必须满足动力总成的隔振要求、位移控制要求、结构强度等性能要求,同时还要轻量化。最终的悬置系统的设计还需要通过高热、高寒等地区的耐久试验验证。

作家杨绛先生曾说过“有些人之所以不断成长,就绝对是有一种坚持下去的力量。好读书,肯下功夫,不仅读,还做笔记。人要成长,必有原因,背后的努力与积累一定数倍于普通人。”这句话同样适用于立志在悬置系统设计开发有所建树的工程技术人员。工程技术人员在成长的过程中不仅需要从自己的工作中学习和总结,还要积极主动地学习他人的悬置系统开发思路和经验,集思广益,多思考,善于发现问题,从而快速地提升自己的理论水平和工程经验,培养分析和解决问题的能力,争取早日成为专家型人才。

在汽车工程领域,一名合格的悬置系统工程师的成长,必须经过多个项目开发的历练,需要不断学习新的理论知识和反复总结以往的工程经验。这是一个漫长的过程,但是若有一本从入门到精通的参考书,则可缩短培养一名悬置设计工程师的过程。我仔细阅读了这本书,该书较好地做到了理论与实践相结合。作者在书的开始部分说明了悬置系统的功用、结构、材料和制造工艺等内容,在书的中间部分较为详细地阐述了悬置系统的隔振性能和悬置系统的设计流程,在书的最后部分给出了悬置系统的性能试验评定方法和转动惯量测试方法、标准件的选用技巧等。该书较好地贴近一线的工程应用,具有一定的参考价值。

书的作者在工作过程中能详细地梳理所使用到的理论知识,及时地总结悬置的开发流程和经验,这是一个非常好的习惯。

支持年轻人,我欣然为之作序。

华南理工大学机械与汽车工程学院

上官文斌 教授

前 言

悬置系统对整车的驾乘体验有着显著的影响。当前越来越多的汽车厂家和零部件供应商意识到悬置系统的重要性。

悬置系统的设计在动力总成与整车的匹配中占据重要地位。悬置系统的设计需要考虑的整车因素较多,不同车型由于结构和布置的差异非常大,对悬置系统的结构和性能要求也各不相同。因此,对从业人员的理论水平和工程经验要求较高。

目前涉及悬置系统开发的理论和工程经验主要集中在相关论文中,比较零散,市场上缺乏专门探讨悬置系统设计和从悬置系统角度出发探讨整车 NVH 性能开发的书籍。基于此,编者结合相关理论基础和多年工程经验,以悬置系统为对象,着眼于全流程,系统地介绍了悬置系统的设计和基于悬置系统的 NVH 性能开发。

本书从“零部件级别—子系统级别—整车级别”着手,详细梳理和阐述了悬置系统设计与开发过程中需要考虑的各方面细节、工程经验和所需要使用的理论知识,并在每一个关键的设计环节给出推荐方案和需要达成的属性目标,以便为相关从业人员提供较全面的设计参考和综合性指导。

本书适用于从事动力总成悬置系统设计开发及整车 NVH 性能开发的工程技术人员,也可作为高年级本科生和研究生的科研参考。

本书在写作过程中得到了上官文斌老师的指导,上官老师一直秉承“为行业做点事情,行业进步了,大家都好”的理念,为汽车行业的进步做出了自己的贡献。上官老师豁达开朗的性格、平易近人的为人风格,还有“支持年青人”的想法深深地感染了我,在此致以崇高的敬意。

在本书的编写过程中,还得到了许多同事的帮助,感谢潘亚宁,帮忙校核书稿内容、格式,并提出了许多宝贵意见;感谢王军,帮忙搜集素材、制作文中插图、公式;感谢吴赵生经理,对本书的内容选材上给出的指导意见。

本书的编写,得到很多专家、同事及家人的鼓励和帮助,在此表示感谢!

由于作者水平的限制,书中难免会有些疏漏及不足之处,真诚地欢迎读者指正,并提出宝贵意见。作者的邮箱为 donjach@163.com,微信号为 DONG_CQUT。

目 录

第1章 悬置系统概述	1
1.1 悬置系统的功用	1
1.2 悬置系统的结构	2
1.3 悬置系统的材料和制造工艺	6
1.4 悬置的弹性中心	17
第2章 动力总成的刚体运动	20
2.1 扭矩轴	20
2.2 惯量主轴	21
2.3 扭矩滚转轴	22
2.4 弹性轴	24
2.5 动态滚转轴	24
第3章 悬置系统隔振性能分析	26
3.1 悬置的刚度和阻尼	26
3.2 液阻悬置的动力学模型	27
3.3 隔振性能分析	29
第4章 悬置系统的概念设计	33
4.1 悬置系统的设计流程	33
4.2 悬置选型的考虑因素	34
4.3 悬置结构对整车的影响	36
4.4 悬置的静态刚度比	36
4.5 悬置系统总布置策略	38
4.6 动力总成刚体模态和解耦率计算	44
4.7 低频范围内的动力总成刚体模态	49
4.8 构建悬置隔振器的动态特性曲线	52
4.9 构建悬置隔振器的静态特性曲线	62
4.10 评定关键工况下的载荷和静态位移	73

4.11	评定悬架支撑的模态和动刚度	83
4.12	悬架支撑的耐久性考虑	89
4.13	悬架橡胶隔振器的疲劳寿命	93
第5章	悬架系统的 NVH 性能	101
5.1	悬架系统 NVH 属性的评定	101
5.2	悬架系统整车级别 NVH 性能开发	107
第6章	惯性参数的合成和测试	122
6.1	动力总成惯性参数的合成	122
6.2	动力总成惯性参数的测试	124
第7章	悬架系统的 CAE 评定	135
7.1	悬架系统的常用材料	135
7.2	极限/典型工况的零部件评判标准	136
7.3	碰撞工况的零部件评判标准	140
7.4	悬架支撑/支架模态评定标准	141
7.5	悬架橡胶弹性体刚度的 CAE 评定	142
第8章	悬架系统设计验证	144
8.1	试验的技术要求	144
8.2	液阻悬架台架试验验证方法	145
8.3	橡胶悬架台架试验验证方法	147
8.4	悬架支撑台架试验验证方法	148
8.5	基于整车的悬架试验验证方法	149
第9章	悬架系统的紧固件设计	150
9.1	紧固件使用的原则	150
9.2	螺栓连接性能	152
9.3	紧固件的夹紧长度	153
9.4	制造/装配	154
9.5	涉及紧固件的系统设计规范要求	155
9.6	腐蚀保固指南	156
参考文献	158

第 1 章 悬置系统概述

1.1 悬置系统的功用

悬置系统一般安装在动力总成和车架/副车架之间,结构类型有橡胶悬置、液阻悬置、半主动悬置等。悬置隔振器单元的数量为 2~6 个。悬置安装方式也因发动机的布置形式不同而不同,分为水平式安装、倾斜式安装等。悬置系统通常需要具备如下基本功能:

- ① 支撑和固定动力总成;
- ② 在等效扭矩变动过程中约束动力总成的位移;
- ③ 在 NVH 层面隔离动力总成与车架之间的振动传递;
- ④ 使动力总成作为一个动态吸振器用于抑制和吸收路面传递过来的激励和瞬态冲击;
- ⑤ 抵抗动力总成输出转矩和衰减动载荷的激励;
- ⑥ 通过刚体模态设定优化整车级别的响应。

悬置系统的设计和整车 NVH 性能之间有密切的关系。车辆的很多 NVH 问题都和悬置系统相关。例如,动力总成的振动大部分由相互连接的金属结构件传递给车身,在动力总成振动一定的情况下,一般只能通过传递路径的合理设计最大限度地衰减振动的传递。由于悬置的一端(主动端)和动力总成连接,一端(被动端)和车架/副车架连接,因此悬置系统在振动的传递路径上扮演非常关键的角色。也就是说,合理设计悬置系统能隔离绝大部分的振动传递。

动力总成的振动沿着传递路径首先通过悬置系统,再通过一系列的连接结构件传递给车身,引起的常见整车 NVH 问题(图 1-1)有:① 激励起车身局部板结构的振动,对车内辐射噪声、与声腔模态耦合共振;② 动力总成的二阶次振动可激励起转向管柱的模式,也可激励起车身的一阶次弯曲模态,引起方向盘抖动。



图 1-1 振动传递给车身引起的 NVH 问题

如果悬架系统设计不合理,甚至会放大动力总成的一阶次振动,引起明显的座椅导轨抖动。

悬架系统的合理设计还能使动力总成起到动态吸振器的作用。在低频大幅值抖动工况下,若将液阻悬架系统的阻尼峰值频率或橡胶悬架系统的垂向(Bounce)模态频率设定为与悬挂的同向/反向跳动频率一致,则利用动力总成的质量可以很好地抑制由不平路面引起的车身跳动。因此对于整车 NVH 性能来说,悬架系统的合理设计显得尤为重要。

1.2 悬架系统的结构

1.2.1 悬架系统的布置方式

动力总成纵置(“N/S”方向布置)的后轮驱动(RWD)车型,曲轴平行于整车 X 轴。通常情况下,此类车型的悬架系统包含三个悬架。变速箱悬架布置在动力总成弯曲模态节点上,一般位于变速箱后端的延伸壳体底部。发动机悬架布置在发动机的左右两侧,位于同变速箱悬架相关联的撞击中心处,如图 1-2 所示。其他一些因素也影响到悬架的布置,如一些特殊考虑和重量均衡化。

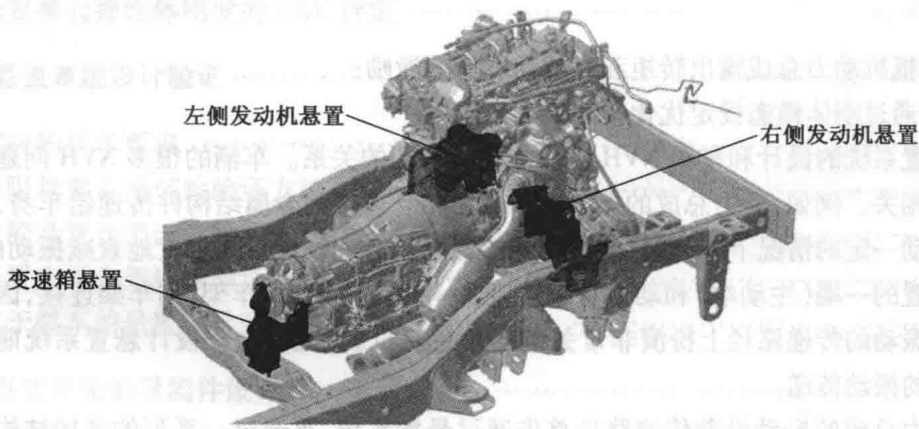


图 1-2 纵置(N/S)动力点或三点式悬架布置

动力总成横置(“E/W”方向布置)的前轮驱动(FWD)车型,曲轴与整车的 Y 轴方向平行。此种布置形式具有车内空间大、动力传递距离短、传动效率高等优点,但前轮同时承担转向和驱动工作,也有高速稳定性较差且半轴不等长出现扭矩转向等缺点。此种布置形式的悬架特点为:基于扭矩滚转轴布置,一般有一个悬架位于发动机的前端顶部,另外一个位于变速箱的后端顶部,尽可能靠近扭矩滚转轴。这种布置形式通常情况下还需要一个到两个防扭拉杆(摆动支撑)连接在变速箱壳体上,靠近 RFOB(缸体后端中心点),如图 1-3 所示。

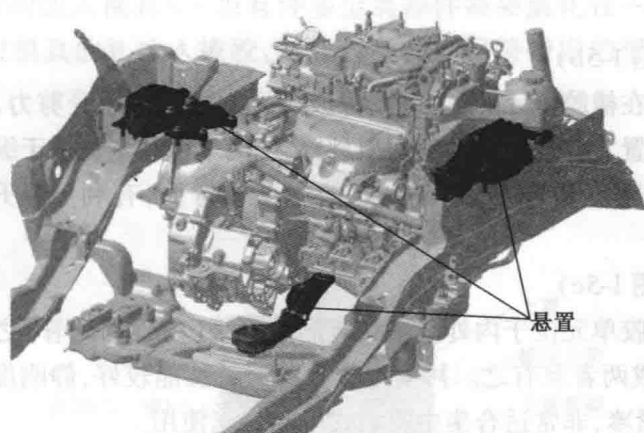


图 1-3 基于扭矩滚转轴的三点式悬置布置

此外,FWD 车型中也有动力总成纵置的形式。此时悬置系统的布置类似于 RWD 车型,前传动轴位于动力总成的中部,可以更好地分配整车的重量。由于此种布置形式仅存在于极少部分德系车型中,故本书中不作过多的讨论。

轻卡(Light Truck)通常采用纵置动力总成后轮驱动形式(RWD)。轻卡的悬置系统需要承受动力总成较高的反作用扭矩,故一般采用四点式悬置布置。发动机侧两个悬置的布置形式同 RWD 布置乘用车。变速箱侧两个悬置分别位于变速箱的两边,同时位于第三横梁的下侧,如图 1-4 所示。

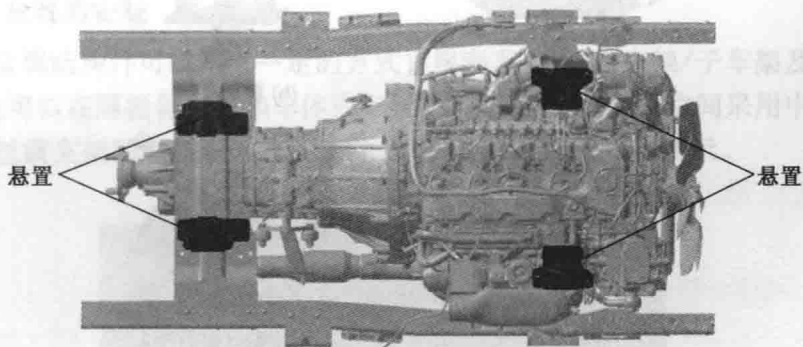


图 1-4 典型的轻卡动力总成悬置布置

1.2.2 悬置的类型和构造

1. 悬置的类型

常见的悬置结构有压缩型、剪切型、衬套型、角度型(复合型)等。悬置的形状设计成不同类型的原因是使其三个方向的刚度比能够适应广泛的需求。

(1) 压缩型(图 1-5a)

压缩型悬置的上下侧通常各有一个连接螺栓(分别用于连接主被动端支撑)和一个定位销(用于防止螺栓连接拧紧时橡胶主簧的扭转变形)。压缩型悬置能承受较大的载荷,通常情况下用于载荷较大或要求较小动态位移的场合。在压缩型悬置的两侧通常还

设计有限位装置。

(2) 剪切型(图 1-5b)

金属材料硫化在橡胶单元的“两侧”,橡胶单元主要用于承受剪力,承受的载荷较小,通常用于变速箱悬置。合理地设计剪切型悬置,使两个橡胶主簧位于纵向轴线方向,可使悬置在整车侧向的刚度非常小,整车纵向的刚度非常大,有利于提升悬置系统的解耦性能。

(3) 衬套型(图 1-5c)

形状各异的橡胶单元位于内外两个圆筒形金属管(内管和外管)之间,橡胶可以用于承受压力或剪力,或两者兼有之。衬套型悬置的耐久性能较好,静刚度曲线线性段较小,且体积较小,结构紧凑,非常适合集中驱动式电动汽车使用。

(4) 角度型(复合型)(图 1-5d)

角度型悬置也称为复合型悬置。从结构上看,是把两个压缩型悬置对称倾斜使用,能兼顾压缩、剪切两种变形,使得悬置在整车垂向和侧向的刚度较为接近。合理地调整角度型悬置两侧橡胶主簧的角度可以获得不同的弹性中心高度,在悬置的设计上有较大的发挥空间,该类型的悬置比较适合作为内燃机动力总成的变速箱悬置使用。

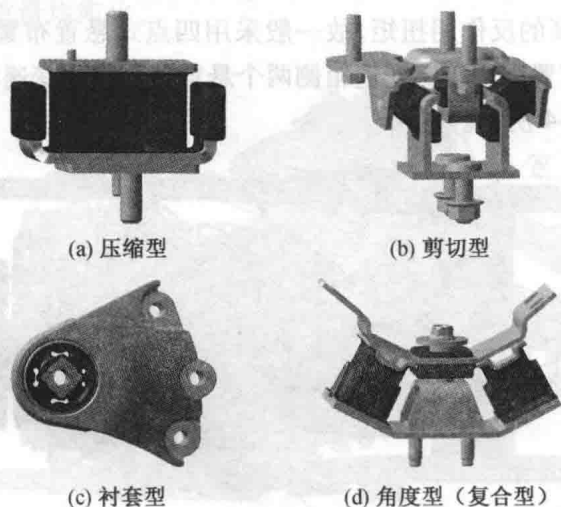


图 1-5 悬置结构的类型

2. 悬置的构造

随着对整车 NVH 性能要求的提高,近年来,液阻悬置在轿车和 SUV 车型上大量使用,其结构如图 1-6 所示。悬置内部顶端起支撑和隔振作用的橡胶主簧(MRE)主要承受剪力,因此液阻悬置也可归类于剪切型悬置。悬置内部还有流道、流道盖板,以及夹在这两者之间的解耦膜,流道盖板和橡胶主簧之间的空间构成上液室。此外,液阻悬置底部还有一个有扩展性的囊状物,也叫皮碗,构成下液室,用于存储液体。

悬置隔振弹性体一般采用橡胶材料制作,通常是天然橡胶,硫化到金属结构件(骨架)上,该金属骨架可以是冲压钣金件,也可以是铸造件。硫化或固化过程是把事先涂

有粘接剂的金属骨架放入模具中(当有许多金属部件需要硫化在一起的时候,通常是多腔模),然后通过模具的孔注入橡胶,硫化过程需要保持指定的温度和压力,并维持一定的时间。

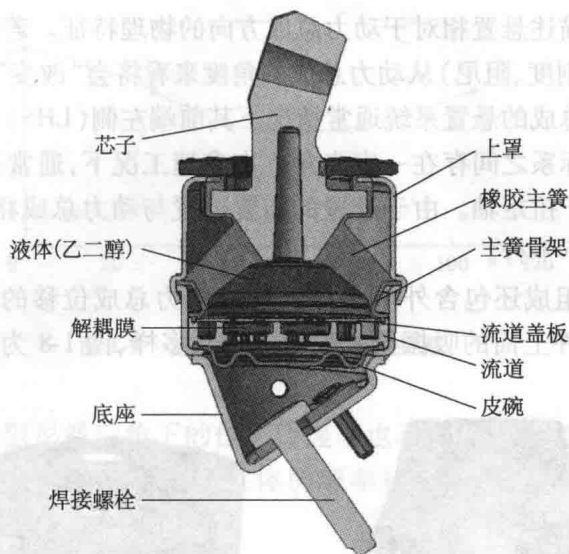


图 1-6 液阻悬架结构

1.2.3 悬架的安装

悬架的金属结构件可以采取一定的方式直接和车身和/或车架/子车架及动力总成连接在一起,也可以在隔振器总成和车体或车架/子车架及动力总成之间采用中间过渡支架连接。中间过渡支架的材料通常为冲压件、铸铁或铸铝,如图 1-7 所示。

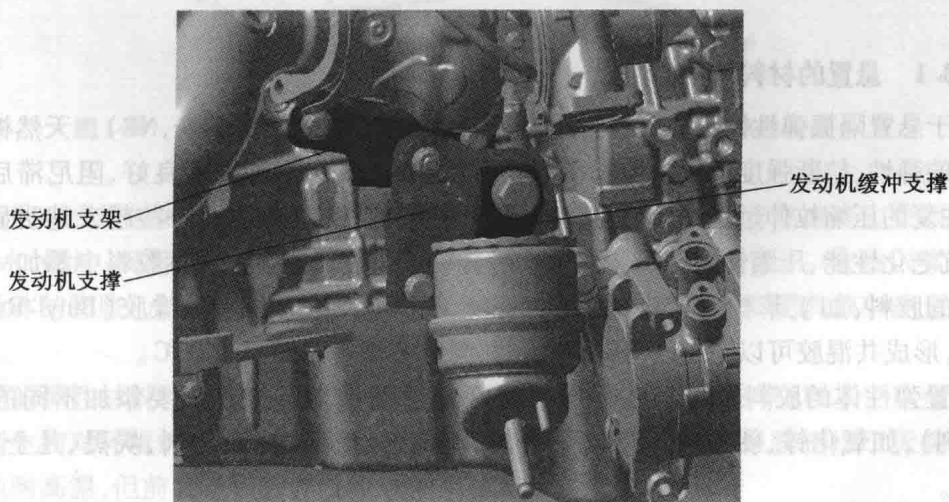


图 1-7 液阻悬架及其连接支架

安装点,即悬置与发动机或车身安装螺栓的位置。安装点的数量、螺栓位置、螺栓样式和到悬置的距离等都在设计发动机侧支架和车身侧支架中扮演一个重要的角色。这些参数影响支架的共振、空间包络和制造方法(冲压或铸造),制造方式不同,成本也不同。

安装方向是一个描述悬置相对于动力总成方向的物理特征。若把悬置绕某轴转动一个角度,则其性能(动刚度、阻尼)从动力总成的角度来看将会“改变”。

三点式纵置动力总成的悬置系统通常情况下其前端左侧(LHS)和右侧(RHS)悬置的局部坐标系和整车坐标系之间存在一定夹角。在怠速工况下,通常要求悬置的刚度最小并且在其方向上垂直于扭矩轴。由于悬置的布置位置与动力总成相关,故悬置局部坐标系一般与整车坐标系不平行。

悬置系统的其他组成还包含外形多样的约束动力总成位移的限位装置、液压阻尼器和安装在金属结构件上面的吸振器。吸振器形状多样,图 1-8 为常见吸振器实物图。



图 1-8 吸振器

1.3 悬置系统的材料和制造工艺

1.3.1 悬置的材料及其特性

用于悬置隔振弹性体的橡胶材料通常是天然橡胶(Natural Rubber, NR)。天然橡胶具有很高的弹性、拉断强度及拉断伸长率等物理特性,还具有耐碱性能良好、阻尼滞后损失小、在往复的压缩拉伸过程中发热量较低、价格便宜等优点,但也有一些越来越明显的缺点,如抗老化性能、压缩性能、耐高温性能、耐臭氧性能较弱等。在天然胶料中添加一些其他类型的胶料,如丁苯橡胶(Styrene Butadiene Rubber, SBR)和丁基橡胶(Butyl Rubber, IIR)等,形成共混胶可以明显改善其缺点。共混胶甚至可耐温至 150 ℃。

悬置弹性体的胶料为了实现不同的硬度和达到预期特性还需要添加不同的材料(添加剂),如氧化锌、硬脂酸、石蜡、促进剂、硫化剂、硫黄、抗老化剂、炭黑、凡士林、松焦油等。

评定橡胶弹性体性能的参数通常有常温和工作环境温度(85 ℃, 72 h 后测定)下的邵尔硬度、拉断强度、拉断伸长率等。不同的胶料其性能参数也有非常大的差别。

橡胶弹性体在不同的剪切角下的剪切强度不同,剪切强度与剪切角的关系如图 1-9 所示。在悬置结构设计过程中,为了达到目标刚度值并考虑到局部的应力集中和胶料的散热等,需要在金属骨架对橡胶弹性体的拉、压、剪之间做合理的妥协。

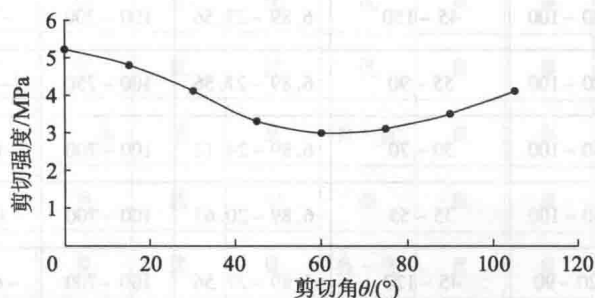


图 1-9 剪切强度与剪切角的关系

橡胶弹性体在不同阻尼滞后角下的位移传递率也不同,阻尼滞后角越大,越能衰减抖动的能量。不同阻尼滞后角下橡胶弹性体的频率比与位移传递率的关系如图 1-10 所示。

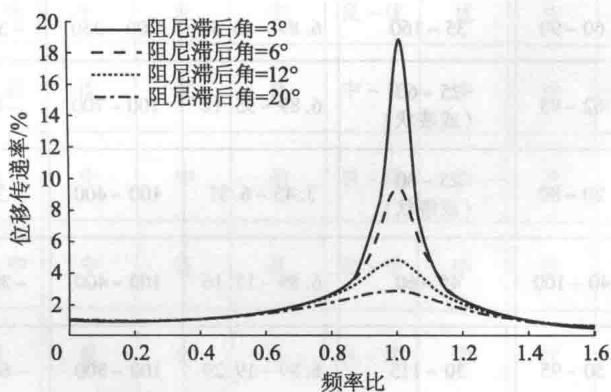


图 1-10 不同阻尼滞后角下橡胶弹性体的频率比与位移传递率的关系

在抵抗环境侵蚀的过程中,悬置的弹性体是最薄弱的部分。环境侵蚀的主要因素有液体(如水、燃油、润滑油等)和高温(发动机辐射热量和周围环境温度)。这些因素造成悬置弹性体的膨胀(水、燃油、润滑油)、脱胶(润滑油、燃油)和老化(发动机辐射热量和环境温度)。

不同的弹性材料(天然橡胶、丁基橡胶、三元乙丙橡胶、丁苯橡胶等)和基于这些弹性材料的衍生物对环境的耐受性差别很大,见表 1-1。例如,三元乙丙橡胶相比于天然橡胶能更好地耐高温,但前者是牺牲其抗拉强度来达到此优点的。

优异的环境抗力将增加悬置的鲁棒性,可阻止其生命周期内的性能相较设计状态下降过快。

表 1-1 常用的橡胶

橡胶类别	相对密度	邵尔 A 硬度	门尼黏度 (ML100℃ 1+4)	拉断强度/ MPa	拉断伸长 率/%	实际使用 温度范围/℃	推荐使用 温度范围/ ℃
天然橡胶	0.93	20~100	45~150	6.89~27.56	100~700	-75~90	-60~80
异戊橡胶	0.94	20~100	55~90	6.89~27.56	100~750	-75~90	-50~100
丁苯橡胶	0.94	40~100	30~70	6.89~24.12	100~700	-60~100	-50~100
顺丁橡胶	1.93	30~100	35~55	6.89~20.67	100~700	-100~100	-60~100
氯丁橡胶	1.23	20~90	45~120	6.89~27.56	100~700	-60~120	-45~100
丁基橡胶	0.91~0.93	20~90	45~80	6.89~20.67	100~700	-60~150	-40~120
丁腈橡胶	0.96~1.02	30~100	30~130	6.89~27.56	100~600	-50~120	-30~100
乙丙橡胶	0.85	30~100	40~100	6.89~20.67	100~300	-60~150	-50~150
硅橡胶	0.98	20~95	液状	3.45~10.34	50~800	-120~280	-60~200
氟橡胶	1.4~1.95	60~90	35~160	6.89~16.54	100~350	-50~300	-20~200
聚氨酯甲 酸酯橡胶	0.85	62~95	25~60 (或液状)	6.89~55.12	100~700	-60~80	-30~80
聚硫橡胶	1.34~1.41	20~80	25~60 (或液状)	3.45~6.81	100~400	-30~80	-50~100
丙烯酸酯 橡胶	1.1	40~100	45~60	6.89~15.16	100~400	-30~180	-25~150
氯磺化聚 乙烯橡胶	1.1	50~95	30~115	6.89~19.29	100~500	-60~150	-20~120
氯醇橡胶	1.27	60~90	60~70 (均聚) 85~125 (共聚)	6.89~17.23	100~400	-60~150	-40~140