

# 汽车发动机液阻悬置 设计、仿真与优化

李 堃 何 钢 著



科学出版社

# 汽车发动机液阻悬置设计、仿真与优化

李 慜 何 钢 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

发动机悬置元件是汽车上重要的减振、隔振元件,对提高汽车的 NVH (噪声、振动和声振粗糙度)性能具有重要意义。本书首先介绍悬置元件的发展历史及现状;振动理论-减振器设计的基础理论、流体力学相关知识;橡胶悬置与液阻悬置振动特性、液阻悬置振动机理;接着介绍液阻悬置集总参数模型的参数识别方法;最后介绍悬置元件的结构参数优化方法。

本书适合从事汽车减振系统及元件设计、制造的专业人员参考阅读,也可作为车辆工程及相关专业本科生和研究生的课程教材或参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

汽车发动机液阻悬置设计、仿真与优化/李璿,何钢著. —北京:科学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-03-056357-6

I. ①汽… II. ①李…②何… III. ①汽车-发动机-液压悬挂装置  
IV. ①U463.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 013238 号

责任编辑:惠 雪 高慧元/责任校对:彭 涛

责任印制:张克忠/封面设计:许 瑞

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2018年1月第一次印刷 印张:11 1/4

字数:227 000

定价:79.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

汽车发动机动力总成悬置系统既是汽车动力总成与车架或车身之间的弹性连接系统，也是发动机减振降噪的重要组成部分。随着发动机朝着高速、轻型以及大功率方向发展，其振动噪声问题日趋严重，而人们对振动与噪声控制的要求却日益严格，这就对发动机悬置系统提出更高的要求，要求在发动机的整个工作转速范围内都能有效地隔离发动机振动向车体的传递。汽车发动机动力总成悬置元件是汽车发动机动力总成悬置系统中重要的减振部件，目前在汽车上应用最多的汽车发动机动力总成悬置元件是橡胶悬置和液阻型橡胶悬置（简称液阻悬置），它们具有结构简单、工作可靠、性能稳定、价格低等特点。尽管国内外许多专家对橡胶悬置与液阻悬置进行大量的研究，但因减振器设计理论的制约，对于汽车发动机悬置元件尤其是液阻悬置的结构参数一直没有可靠的设计方法，大都采用“经验+反复试验”的传统方法。即首先凭经验确定发动机动力总成悬置系统及零部件的关键参数值。由于液阻悬置各主要部件参数之间相互耦合和影响，需要大量的试验才能确定满足系统特性要求的液阻悬置结构参数。随着汽车工业的快速发展和行驶速度的不断提高，人们对悬置元件的设计提出更高的要求，先前的悬置元件设计与仿真方法已不能满足汽车工业快速发展的需求；同时随着汽车工业国际竞争的不断加剧，提高我国汽车自主研发能力、开发具有自主知识产权的汽车产品成为提高我国汽车工业国际竞争力的基础。因此，必须从基本原理与理论出发，根据车辆行驶平稳性、操作稳定性和乘坐舒适性的要求，系统研究减振元件的设计理论和方法。

目前，关于汽车发动机动力总成悬置系统及其元件设计理论和方法的专业书籍很少。本书是在作者多年对汽车发动机悬置元件研究成果的基础上总结编写而成的，包含了作者的最新理论研究成果。本书力求深入浅出、循序渐进，以汽车发动机动力总成悬置系统为研究模型，以车辆行驶平稳性为研究目标，以汽车发动机动力总成悬置元件设计理论和方法为主线，分别对车辆简化模型的振动及特性进行分析，对橡胶悬置结构设计与仿真方法进行介绍，对液阻悬置线性与非线性减振模型以及模型的参数识别方法进行介绍，对液阻悬置参数对其动态特性的影响规律进行分析，最后介绍了橡胶悬置与液阻悬置的结构优化方法。本书内容

简练、层次分明，既有理论分析，又有特性试验，各章节注重前后衔接，将新理论与方法和实际设计相结合。

本书得到了江苏省自然科学基金项目(BK20130237) 资助，并获得河海大学各级领导的大力支持，在此表示衷心的感谢。

限于作者水平，书中难免会有不妥之处，恳请读者批评指正。

李 哲

2017年9月

# 目 录

## 前言

1 绪论	1
1.1 汽车动力总成悬置系统作用及性能要求	1
1.1.1 悬置系统的主要功能	1
1.1.2 悬置元件的理想动力学特性	3
1.2 悬置元件的发展状况	4
1.2.1 橡胶悬置	5
1.2.2 被动式液阻悬置	6
1.2.3 半主动和主动式液阻悬置	9
1.3 国内外研究现状	14
1.3.1 悬置振动模型及减振机理的研究现状	14
1.3.2 结构优化以及多目标优化方法的研究现状	18
1.3.3 现有研究存在的主要问题	20
1.4 本书的意义及主要内容	21
2 车辆振动简化模型及振动特性	22
2.1 车辆振动简化模型	22
2.1.1 整车七自由度模型	22
2.1.2 动力总成悬置系统六自由度模型	22
2.1.3 汽车双轴四自由度模型	23
2.1.4 单轮两自由度模型	23
2.1.5 单轮单自由度模型	23
2.2 单自由度系统振动	24
2.2.1 单自由度系统的简化及其模型	24
2.2.2 单自由度系统自由振动	25
2.2.3 单自由度系统受迫振动	28
2.3 两自由度系统振动	34
2.3.1 系统的运动微分方程	34
2.3.2 固有频率和主振型	35
2.3.3 两自由度系统的受迫振动	40

2.4	本章小结	45
3	橡胶悬置结构、性能与仿真	46
3.1	橡胶悬置结构	46
3.2	橡胶悬置特性	46
3.3	橡胶悬置静态特性试验与仿真	48
3.3.1	橡胶悬置静刚度试验	48
3.3.2	橡胶悬置静刚度的有限元仿真	51
3.4	橡胶悬置动态特性的测试	57
3.5	本章小结	59
4	悬置元件内部油液特性	60
4.1	悬置元件内部油液的物理性质	60
4.1.1	油液的密度	60
4.1.2	油液的黏性	60
4.1.3	压力对黏度的影响	61
4.1.4	温度对黏度的影响	62
4.1.5	油液的可压缩性	62
4.2	悬置元件内部油液的化学性质	62
4.3	惯性通道圆形管道内液体的流动	63
4.3.1	层流和紊流	63
4.3.2	圆管层流	65
4.3.3	圆管紊流	66
4.3.4	管流局部损失	68
4.4	缝隙流动	72
4.4.1	平行平板缝隙流动	73
4.4.2	环形缝隙流动	74
4.5	本章小结	76
5	液阻悬置集总参数模型	77
5.1	液阻悬置结构与工作过程	77
5.2	液阻悬置减振性能的评价指标	79
5.2.1	动刚度、滞后角和阻尼系数	79
5.2.2	力的传递率	80
5.3	惯性通道活动解耦盘式液阻悬置的集总参数模型	81
5.3.1	低频、大振幅激励下液阻悬置的动态特性	82
5.3.2	高频、小振幅激励下液阻悬置的动态特性	85

5.4 惯性通道活动解耦盘式液阻悬置的非线性模型 .....	89
5.4.1 惯性通道内液体流动的非线性 .....	90
5.4.2 解耦器内液体流动的非线性 .....	92
5.5 本章小结 .....	94
<b>6 基于有限元的液阻悬置集总参数辨识 .....</b>	<b>96</b>
6.1 液固耦合有限元分析方法 .....	96
6.2 液阻悬置集总参数辨识 .....	99
6.2.1 橡胶主簧刚度与阻尼的辨识 .....	99
6.2.2 橡胶主簧等效活塞面积的辨识 .....	101
6.2.3 上液室体积刚度的辨识 .....	103
6.2.4 液体流经惯性通道的惯性系数和阻尼系数的辨识 .....	104
6.2.5 液体流经解耦器的惯性系数和阻尼系数的辨识 .....	106
6.2.6 惯性通道横截面积的辨识 .....	109
6.3 参数辨识结果的分析 .....	109
6.4 本章小结 .....	111
<b>7 液阻悬置动力学特性分析 .....</b>	<b>112</b>
7.1 液阻悬置与橡胶悬置动态力学性能的比较 .....	112
7.2 液阻悬置参数对其动态特性影响规律的分析 .....	113
7.2.1 液阻悬置参数对其低频动态特性的影响规律 .....	114
7.2.2 液阻悬置参数对其高频动态特性的影响规律 .....	125
7.3 本章小结 .....	133
<b>8 悬置元件结构优化 .....</b>	<b>135</b>
8.1 结构优化算法 .....	135
8.1.1 基于遗传神经网络的单目标结构优化方法 .....	135
8.1.2 基于 Pareto 遗传算法的多目标参数优化方法 .....	142
8.2 悬置元件结构优化实例 .....	149
8.2.1 橡胶悬置元件的结构优化 .....	149
8.2.2 液阻悬置结构优化 .....	153
8.3 本章小结 .....	159
参考文献 .....	160
索引 .....	171



# 1 绪 论

汽车发动机动力总成悬置系统是汽车动力总成与车架或车身之间的弹性连接系统，是发动机减振降噪的重要组成部分。汽车动力总成悬置系统可对在动力总成与车架间传递的振动进行双向隔离，对降低车内振动和噪声起着重要的作用。对于定型的发动机和车体，选择和设计合适的发动机悬置系统是减小发动机产生的振动和噪声向车身传递的关键。随着发动机朝着高速、轻型以及大功率方向发展，其振动噪声问题日趋严重，而人们对振动与噪声控制的要求却日益严格，这就对发动机悬置系统提出更高的要求，要求在发动机的整个工作转速范围内都能有效地隔离发动机振动向车体的传递。

## 1.1 汽车动力总成悬置系统作用及性能要求

近年来，汽车设计向轻型化与经济型发展，但是少缸、大功率发动机以及轻质化车架和车身的的应用往往使得发动机振动激励的增大与车体刚度的减小，从而导致由发动机传递至车身的振动加剧，使车内的振动和噪声特性恶化。特别是采用平衡性较差的四缸四行程发动机的 FF 式（发动机前置-前轮驱动式）轿车，其发动机动力总成的振动对汽车乘坐舒适性的影响越来越突出。与此同时，人们对乘坐舒适性的要求又在不断提高，乘坐舒适性已成为汽车尤其是乘用车的主要性能指标之一。为了解决这些矛盾，必须加强对发动机动力总成与车体间振动传递的隔离，才能有效地降低车身振动和车内噪声。

### 1.1.1 悬置系统的主要功能

悬置系统的主要功能包括以下几个方面。

#### 1) 动力总成支撑和定位

根据整车空间及减振的需要，发动机被支撑在几个悬置元件上，在发动机本身振动和外界作用力的驱动下，发动机和车架之间存在相对运动，汽车发动机动力总成悬置系统六自由度模型如图 1-1 所示。因此悬置系统具有控制发动机相对运动和位移的功能，使发动机始终保持在相对稳定的位置上，不能让发动机在各方向的运动中与底盘以及车身上的零件产生干涉和触碰。

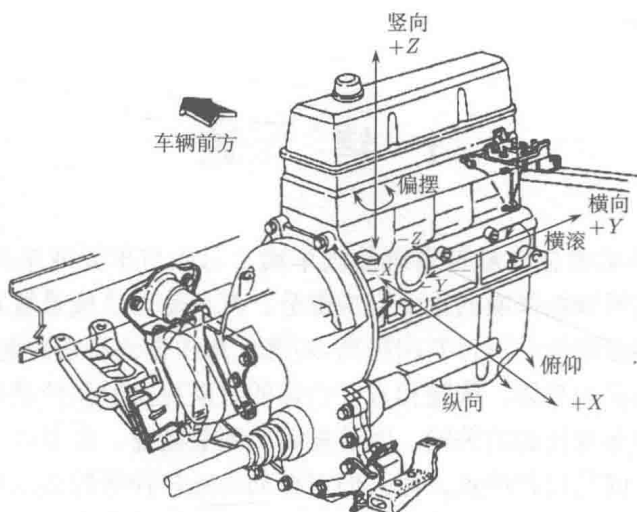


图 1-1 汽车发动机动力总成悬置系统六自由度模型

## 2) 隔离振动

发动机在工作转速范围内运转产生的振动必须通过悬置系统加以隔离，尽可能降低传递到车身及汽车底盘的高频振动；同时悬置系统还需隔离由道路不平引起的车轮与悬挂系统的低频振动，避免这一振动向发动机传递而造成发动机振动加剧，以满足车辆运行时的平稳性和舒适性；悬置系统还应保证怠速和停机过程中发动机的稳定性，这就是悬置系统所谓的双向隔振功能。

## 3) 保护发动机

汽车发动机在车辆中的安装形式如图 1-2 所示。车辆在行驶过程中发动机同



液阻悬置

橡胶悬置

图 1-2 某型轿车上悬置元件的布置方式

时承受着动态载荷和冲击载荷,当这些载荷超过发动机的许用载荷时就会引起发动机的破坏,例如,在冲击载荷过高时,发动机缸体后端面与飞轮壳的结合面上的弯曲力矩过大会导致发动机产生开裂;车辆在崎岖道路上行驶时,车架的扭曲变形会使发动机承受扭曲应力,使发动机局部受到载荷而遭到破坏。悬置系统可以防止发动机上个别部位因承受过大的冲击载荷而损坏,从而起到保护发动机的作用。布置合理、减振性能优越的悬置系统能充分缓冲和抵御外力的冲击,保护发动机。

### 1.1.2 悬置元件的理想动力学特性

汽车动力总成既是一个激振源,也是被隔振的对象。动力总成受到的激励主要有<sup>[1,2]</sup>:

(1) 发动机往复不平衡惯性力主谐量的激励,其频率范围为 30~250Hz,特点是激励的幅值较小,习惯上称其为高频、小振幅激励,由其引起的振动称为高频、小振幅振动;

(2) 怠速不平衡扭矩主谐量的激励,频率一般低于 30Hz;

(3) 经过轮胎和悬架系统过滤后的路面激励和瞬时冲击。

后两类激励的频率一般低于 30Hz,特点是激励的幅值较大,习惯上将其称为低频、大振幅激励,相应的振动称为低频、大振幅振动。

为了有效隔离高频段往复不平衡惯性力主谐量激励所引起的振动向车体的传递,提高乘坐舒适性和降低噪声,特别是空腔共鸣声,要求悬置元件具有低刚度、小阻尼特性;另外,为了抑制怠速波动扭矩主谐量的激励引起动力总成在共振频率附近较大振幅的振动,同时为了限制那些准静态载荷,如起动、换挡、加速、制动、转弯以及不平路面冲击等载荷作用下引起的动力总成的位移,并且将其诱发的较大幅度自由振动尽快衰减,又要求悬置元件具有高刚度、大阻尼特性。这就是动力总成隔振对悬置元件提出的两个基本而又相互矛盾的要求,即对动力总成悬置提出了“低频域具有高刚度、大阻尼,高频域具有低刚度、小阻尼”这两个基本而又相互矛盾的要求。

由以上得到的动力总成悬置系统的理想特性如图 1-3 所示,可描述为<sup>[3,4]</sup>:

(1) 悬置系统具有较高的静刚度以支撑动力总成质量;

(2) 悬置系统在低频 (1~30Hz) 时应具有大阻尼、高刚度特性,以衰减由输出扭矩的波动和汽车加速 (或者制动) 引起的动力总成大振幅振动,以及衰减由路面激励引起的动力总成的低频振动;

(3) 悬置系统在高频区域 (30Hz 以上) 时应具有小阻尼、低动刚度特性, 以降低振动传递率和增强降噪效果。

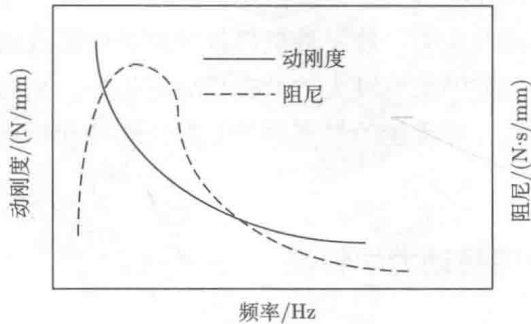


图 1-3 悬置的理想动力学性能

因此, 对动力总成悬置系统动特性的要求是十分复杂的, 有时甚至是相互矛盾的。然而轿车对于振动和噪声隔振水平的要求在逐步提高, 同时现代轿车设计向车身轻量化和发动机高动力的趋势发展, 重量的减轻和动力的增加会对振动特性产生不利的影响, 特别是直列四缸机的广泛应用, 极大地增加了振动和噪声的水平。这两方面冲突促使动力总成悬置系统的隔振性能仍然需要改进。

## 1.2 悬置元件的发展状况

发动机隔振技术是伴随汽车技术及汽车工业而发展起来的, 发动机与车身之间的连接介质经历了刚性连接、橡胶衬垫、橡胶悬置和液阻悬置 (包括被动式、半主动式和主动式液阻悬置) 等多个阶段, 每一阶段采用的悬置都带来了汽车隔振技术的革新和进步。

橡胶悬置作为汽车动力总成悬置系统中的隔振元件, 曾发挥了重要的作用, 目前较多地应用在平衡较好或中低档发动机上。橡胶悬置元件的动态特性有两点不足: 阻尼偏小, 不能满足对汽车动力总成悬置系统在低频域的隔振、减振性能要求; 在高频振动时会出现动态硬化现象, 导致其动刚度显著增大, 不能满足对汽车动力总成悬置系统在高频域的隔振、降噪性能要求。

从 20 世纪 70 年代末开始, 液阻悬置开始在国外汽车上推广应用。这种隔振元件是在封闭的橡胶悬置元件内附设液体阻尼机构而成的, 其弹性特性和阻尼特性都显著优于普通橡胶悬置元件, 能够在很大程度上弥补普通橡胶悬置元件的不足, 改善橡胶悬置刚度偏大、阻尼不足和低频动态硬化的缺点, 提升汽车动力

总成悬置系统的隔振降噪和减振缓冲性能<sup>[5]</sup>。

液阻悬置的发展初期均为被动式,但随着对悬置系统及悬置本身降噪减振的性能要求的不断提高,以及电控技术的应用越来越广泛,液阻悬置又增加了控制系统,可根据工况主动控制悬置的阻尼和刚度,这就是主动式液阻悬置。主动式液阻悬置响应速度快,其隔振性能比被动式液阻悬置更好,但存在系统复杂、功率消耗大、成本高、可靠性较低和安装不便等缺点,在实体车上还很少使用。由于制造成本与悬置元件减振性能等方面的原因,惯性通道活动解耦盘式液阻悬置依然是汽车发动机动力总成悬置系统中使用最为普遍的悬置元件之一<sup>[6]</sup>。

不同种类的动力总成悬置系统,从橡胶到液阻,从被动到主动,其性能日益发展与改善的过程见证了汽车发动机降噪减振技术发展的历程,动力总成悬置系统在汽车降噪减振方面的优化工作也日新月异。

### 1.2.1 橡胶悬置

车用内燃机在汽车上的固定方式经历了多次变化<sup>[7,8]</sup>。早期的汽车由于行驶速度低,制造工艺粗糙,发动机一般直接用螺栓连接在车架上。这样不但连接简单,而且可以利用发动机的缸体起到加强车架强度的作用。但是使用中发现这种连接经常造成发动机缸体开裂和发动机支架断裂。究其原因,是车架的剧烈振动直接传递给了发动机,使发动机和支撑连接处长期受到交变载荷的作用,最终发动机缸体出现疲劳断裂。后来的工程师逐渐认识到这一点,不再把发动机当成车架的加强横梁,而是在发动机和车架之间加入弹性材料,如皮衬垫、橡胶圈等。

随着汽车行驶速度的提高和汽车技术的发展,发动机产生的振动在汽车整车振动中占的比例越来越大,发动机支撑隔振性能的好坏对汽车乘坐舒适性的影响也越来越明显。人们开始认识到应该尽可能将发动机和车架隔开,使发动机产生的振动和扭矩波动尽可能少地传递到车架上,发动机支撑元件隔振性能的改善成为早期各大汽车公司努力追求的目标。在 20 世纪 30 年代以后的很长时间内,橡胶以其低廉的成本和良好的性能成为了发动机支撑最常用的材料。

悬置用橡胶是一种由异戊二烯 ( $C_5H_8$ ) 单体构成的链状高分子材料<sup>[9]</sup>,其中的单键因热运动具有某种程度的自由旋转,根据其分子的旋转情况有非常多样的分子形状,这种分子形态的多样性实际上就是橡胶具有弹性的根本原因,而一般固体的弹性是由与原子间隔的变化相对应的内部能量引起的。因此可以理解橡胶的弹性特征是:低弹性模量、高弹性极限。工业上应用减振橡胶已经有很长的历史了,自 20 世纪 30 年代以来,橡胶和金属的黏接强度和可靠性有了非常大的改善,橡胶作为工业减振制品成为可能。减振橡胶最早用在军用飞机和舰船上,后

来向民用技术转移, 橡胶材料在汽车工业中的大量应用, 极大促进了橡胶工业的发展。

发动机橡胶悬置的主体是一定硬度的橡胶块。在各种减振材料中, 橡胶以其特有的减振性能, 在现代工业机械中得到越来越广泛的应用。它具有以下一些优点:

(1) 形状不受限制, 可自由选定, 因此可有效地利用空间, 同时可相当自由地选定三个方向上的弹性常数。

(2) 弹性模量较小, 可以得到较大的弹性变形, 易于实现理想的非线性特性。

(3) 橡胶有内摩擦, 因而具有较高内阻, 不会产生大的共振振幅, 不至于形成螺旋弹簧所特有的共振激增现象。一般情况下, 减振橡胶都是由橡胶和金属层结合而成的, 对于突然冲击和高频振动的吸收和隔音具有良好的效果。

(4) 同一橡胶减振件能同时承受多向载荷, 因而可使系统的机构简化, 且无需润滑, 所以有利于维护和保养。

橡胶材料优异的弹性特性和低廉的制造成本, 使其在很长一段时间内成为动力总成悬置元件普遍选用的材料。直到 20 世纪 70 年代, 随着汽车制造技术的发展及人们对汽车乘坐舒适性需求的提高, 橡胶材料自身的一些缺点显得更加明显。例如, 高频小振幅激振时橡胶的动态硬化明显, 减振性能差, 容易断裂; 小阻尼橡胶对发动机的大幅度振动难以起到有效的抑制作用, 易发生蠕变。单纯的橡胶材料不能满足发动机悬置系统对悬置的低频高刚度、大阻尼和高频低刚度、小阻尼的要求, 橡胶悬置设计中只能采取某些性能上的折中<sup>[10]</sup>。尤为重要的是, 现代汽车向小型、经济、轻量化和高舒适性方向发展, 使得一般轿车普遍采用发动机前置-前轮驱动方式, 且多使用平衡性差的四缸发动机, 同时车身质量轻量化, 弹性增加, 使车身振动水平上升。这种情况下, 为达到更好的乘坐舒适性, 对汽车各子系统的振动控制的要求更加严格, 动力总成悬置系统的减振性能必须有明显的改善。这样传统的橡胶悬置已经不能满足要求, 液阻悬置则成为一种理想的选择<sup>[11,12]</sup>。

### 1.2.2 被动式液阻悬置

液阻悬置在橡胶悬置的基础上增设了液体内腔, 并利用液体在液阻悬置内部结构流动时的阻尼产生悬置的非线性特性, 以满足在不同的工况下表现出良好的隔振特性, 同时通过内部阻尼结构的变化及部件的增加提高或优化在多个频段的特性, 改善或克服了普通橡胶悬置刚度偏大、阻尼不足和高频动态硬化的弱点, 能较好满足悬置系统要求的频变与幅变特性。其优良的隔振、减振和降噪性能主



要表现为：在低频域具有大阻尼和高动刚度特性，既可有效地隔离和衰减发动机怠速以及汽车行驶在不平路面上时动力总成的稳态振动，又可很好地控制和衰减汽车在起步、加速、转弯、制动和发动机起动、停机等非稳态工况下动力总成的大位移冲击激励和非稳态振动；在高频域具有小阻尼和低动刚度的特性，可在较宽频带内克服橡胶主弹簧的动态硬化效应，显著地扩大动力总成悬置系统的有效隔振频率范围，因此可较好地隔离动力总成的高频振动、降低汽车在高速行驶中的车内振动和噪声（尤其是 Booming 声）以及改善汽车的乘坐舒适性。

橡胶弹簧和液阻减振机构组成一个整体用于减振的思想源于 20 世纪 40 年代<sup>[13]</sup>，1962 年通用汽车公司的 Rasmussen 等完善了这种思想，并试制了世界上第一个液阻型橡胶悬置 (hydraulically damped rubber mount, HDRM)，简称液阻悬置 (hydraulic engine mount, HEM)。自 20 世纪 80 年代开始，世界各大汽车公司和研究机构竞相研究开发液阻悬置，使之得到迅速发展，现已成为汽车动力总成的主要隔振技术之一<sup>[14]</sup>。德国是较早进行液阻悬置的设计研究与开发应用的国家，在 1979 年即已开发了三种可用于五缸和六缸发动机动力总成的 Audi/Boge、Freudenberg 和 Audi II 悬置系统，并首先由 Audi 公司在 Audi 五缸 Otto 发动机上安装使用，这是第一次将液阻悬置批量应用于产品。试验结果表明，液阻悬置可以大大地降低车辆的振动，明显改善乘坐的舒适性<sup>[15]</sup>。1981 年德国 Porsche 944 运动型轿车安装了液阻悬置，有效地降低了车内噪声，提高了乘坐舒适性，且在 6Hz 附近，滞后角最大可达  $28^\circ$ <sup>[16]</sup>。1982 年日本将被动式液阻悬置应用于前置后驱式轿车，以此来减少发动机怠速振动，效果明显<sup>[17,18]</sup>。1984 年 Escan 公司和 Freudenberg-Megulastik 公司联合开发了惯性通道固定解耦膜型液阻悬置，应用于一种 FR 式汽车的直列六缸汽油机悬置系统，车内噪声可以降低 3~5dB<sup>[19]</sup>。1985 年 Daimler-Benz 公司为 190/190E、201 和 124 系列轿车开发了液阻悬置，进行了悬置惯性通道长度、横截面积和橡胶硬度等参数优化设计分析，结果能有效地衰减地面激励引起的动力总成低频振动。1988 年 Audi V8 发动机的所有悬置均采用液阻悬置。美国通用汽车公司于 1985 年开始在所有 A 型和 X 型车身四缸和六缸发动机动力总成悬置系统中采用液阻悬置，从此液阻悬置开始在美国汽车上推广应用。同年，Ford 汽车公司也在 Supercab 轻型货车动力总成悬置系统中采用液阻悬置，从此液阻悬置由高级轿车向其他类型的汽车普及。此外，液阻悬置的应用范围也不断扩大，它已被应用于汽车车轮独立悬架导向机构的连接元件、车身及驾驶室悬置等重要的隔振系统；同时，它不仅作为标准部件在轿车上普及，并且开始在客车、货车及其他车型以及包括船舶和飞机等在内的移动式机械及动力机械上得到应用。

液阻悬置历经几十年的不断改进和发展，结构形式都有明显不同，性能上也

有明显的改进。现在应用的液阻悬置主要有惯性通道型、惯性通道固定解耦膜型、惯性通道活动解耦盘式等。随着其性能趋于完善，结构则趋于复杂。根据历史发展顺序及结构演变过程，液阻悬置大体可分三种，目前产业化的液阻悬置虽在结构上与图 1-4~图 1-7 中的结构略有不同，但基本可以从中找到三种典型结构的特征。

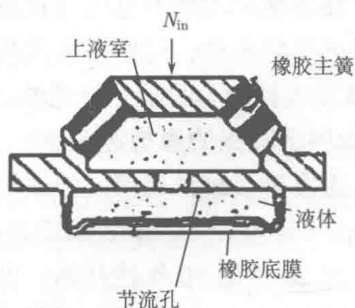


图 1-4 节流孔型液阻悬置

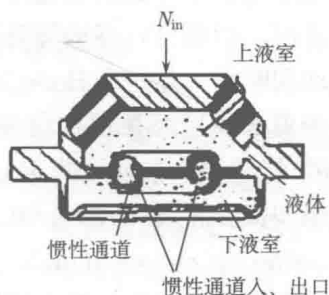


图 1-5 惯性通道型液阻悬置

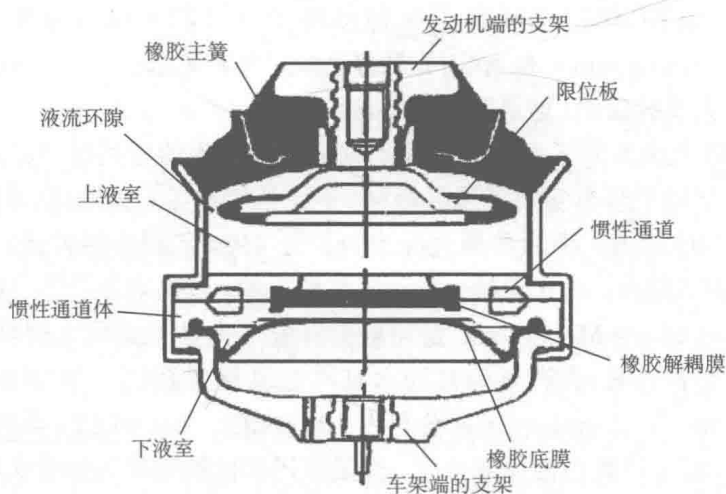
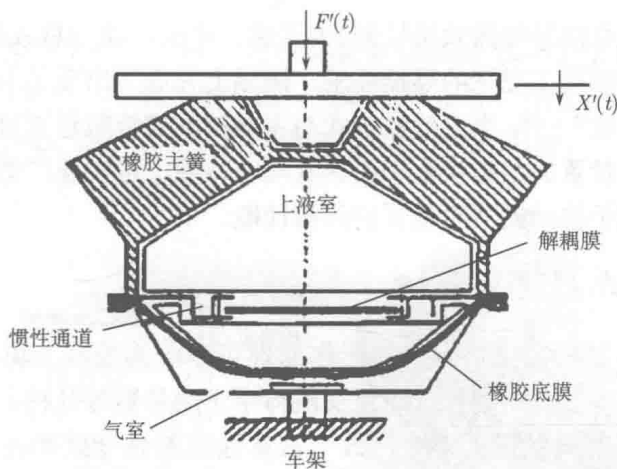


图 1-6 惯性通道固定解耦膜型液阻悬置

### 1.2.2.1 节流孔型和惯性通道型液阻悬置

节流孔型液阻悬置是液阻悬置的初期形式，其结构如图 1-4 所示，它很快被图 1-5 所示的惯性通道型液阻悬置所替代。这类液阻悬置内腔被金属结构分为上液室和下液室，上、下液室之间由小孔、螺旋形或环形惯性通道连通，靠液体流过小孔（或者惯性通道）的节流阻尼来衰减振动，在低频时大阻尼特性可以控制发动机振动的位移，但高频时产生高频硬化现象，使隔振效果恶化。



图 1-7 惯性通道活动解耦盘式液阻悬置<sup>[6]</sup>

### 1.2.2.2 惯性通道固定解耦膜型液阻悬置

由于节流孔型和惯性通道型液阻悬置在高频时的不佳表现，学者对其结构进行了改进，如图 1-6 所示，在惯性通道式液阻悬置的基础上增加了解耦膜。当悬置受到高频小振幅激励时，惯性通道中的液体不发生流动，解耦膜随上、下液室的压力波动而上下振动。惯性通道型固定解耦膜型液阻悬置在高频小振幅激励下相比节流孔型和惯性通道型液阻悬置具有小阻尼和低刚度的特点，但还是存在高频动态硬化的缺点。

### 1.2.2.3 惯性通道活动解耦盘式液阻悬置

当惯性通道活动解耦盘式液阻悬置受到高频、小振幅激励时，解耦盘在其自由行程中运动，如图 1-7 所示。它改善了液阻悬置高频动态硬化现象，拓宽了悬置在高频使用频率的范围，在很宽的振动频率范围内都具有良好的隔振性能。惯性通道活动解耦盘式液阻悬置的结构也相对比较简单，其隔振性能也能较好地满足汽车发动机悬置系统的要求。由于制造成本等方面的原因，惯性通道活动解耦盘式液阻悬置是汽车发动机动力总成悬置系统中使用普遍的悬置元件之一。

## 1.2.3 半主动和主动式液阻悬置

被动式液阻悬置具有结构相对较简单、安装简便、成本低、可以在一定频段内显著提高汽车乘坐舒适性等优点，但由于解耦膜具有很强的非线性特性<sup>[4,12]</sup>，导