

汽车先进技术论坛丛书

QICHE XIANJIN JISHU LUNTAN CONGSHU

汽车NVH性能开发

刘显臣 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

汽车先进技术论坛丛书

汽车 NVH 性能开发

刘显臣 编著

机械工业出版社

本书全面论述了汽车产品 NVH 性能开发过程。全书共分为三篇，第一篇“振动噪声基础知识”简要介绍与汽车 NVH 相关的基础知识和理论，以及常见的汽车 NVH 现象和原理。第二篇“汽车 NVH 性能开发方法”详细介绍汽车 NVH 性能开发过程，从概念设计、对标分析、目标设定、正向设计、试验验证和问题整改六个方面来详细阐述开发过程，重点介绍每部分工作重点、注意事项和设计标准。第三篇“汽车 NVH 开发案例”主要介绍汽车 NVH 开发过程中的典型案例，包括仿真分析案例和试验案例，以期为读者提供最直接的参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

汽车 NVH 性能开发/刘显臣编著. —北京: 机械工业出版社, 2017. 10
(汽车先进技术论坛丛书)

ISBN 978-7-111-57955-7

I. ①汽… II. ①刘… III. ①汽车—振动控制②汽车噪声—噪声控制
IV. ①U467.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 218380 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: 孙 鹏 责任编辑: 孙 鹏

责任校对: 张 薇 封面设计: 路恩中

责任印制: 张 博

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 25.75 印张 · 633 千字

0001—1900 册

标准书号: ISBN 978-7-111-57955-7

定价: 139.00 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

随着我国汽车市场的高速发展，人们对汽车乘坐舒适性的要求也越来越高。生产安静、舒适的汽车产品，也是汽车制造商不断追求的目标，以期其产品在市场上得到更多的认可。但是国内汽车 NVH 专业起步晚，无论是设计工程师还是试验工程师，都缺少经验。在处理汽车 NVH 问题时经常是不知所措，找不到可供参考的技术文献。这些都是限制汽车产品开发的不利因素。

笔者从事汽车、发动机振动噪声相关工作近 20 年，深知这门学科之复杂、高深。在工作过程中，经常苦于无法查阅到相关的技术文献。中国汽车工业起步晚，特别是在产品开发方面仍然处于模仿和摸索阶段。而国外一些大的汽车公司，在产品开发方面积累了丰富的经验，我们现在遇到的问题都是他们曾经遇到并且已经解决了的。参考相关的技术文献，借鉴其丰富的经验，可以大大缩短我们新产品的开发周期，快速解决研发过程中遇到的问题，是编写本书的出发点。

在本书编写过程中，得到了很多专家和同事的鼓励和帮助，在此表示感谢。

本书主要介绍汽车 NVH 性能的开发过程，从概念设计阶段开始，到目标设定、工程设计、试验验证和问题整改，详细介绍每一个阶段的 NVH 工作内容和方法以及重点注意事项。本书适用于汽车院校学生，各汽车公司、设计公司的 NVH 工程师，可作为解决汽车振动噪声问题、开展汽车产品设计的参考资料。书中介绍的一些案例多是笔者亲身参与过或者选自最新的问题改进、课题研究报告。由于笔者水平的限制，书中难免会有些错误及不足之处，真诚地欢迎读者指正（邮箱地址为：liuxch_nvnh@126.com）。

目 录

前 言

第一篇 振动噪声基础知识

第一章 振动和噪声概述	3
第一节 振动和噪声	3
第二节 汽车振动噪声的一般特性	12
第二章 汽车振动噪声控制策略	18
第一节 振动噪声控制	18
第二节 振动噪声控制流程	19
第三节 探查原因的基本方法	20
第四节 振动噪声解决方案	24
第三章 汽车常见振动噪声现象	29
第一节 整车级别振动现象	29
第二节 整车级别噪声现象	46
第三节 系统级别振动现象	59
第四节 系统级别噪声现象	73

第二篇 汽车 NVH 性能开发方法

第四章 汽车 NVH 开发流程	91
第一节 概念设计	91
第二节 对标分析	110
第三节 目标设定	113
第四节 正向设计	140
第五节 试验验证	157
第六节 问题整改	163
第五章 汽车 NVH 性能模拟	170
第一节 频率范围划分	170
第二节 有限元法	171
第三节 边界元法	174
第四节 结构—声耦合法	176
第五节 统计能量分析	178
第六节 混合 FE-SEA 法	181
第六章 汽车 NVH 模拟仿真技术	184
第一节 分析模型	185



第二节	刚度分析·····	201
第三节	模态分析·····	203
第四节	频率响应分析·····	207
第五节	瞬态响应分析·····	210
第六节	优化分析·····	213
第七节	其他辅助分析·····	220
第七章	汽车 NVH 问题诊断和改进方法 ·····	225
第一节	振动噪声的主观评价·····	225
第二节	系统及零部件的振动噪声·····	243
第三节	振动噪声问题的解决方法·····	277
 第三篇 汽车 NVH 开发案例 		
第八章	CAE 优化分析案例 ·····	319
第一节	怠速振动噪声性能预测·····	319
第二节	异响·····	325
第三节	车身分析·····	330
第四节	路面噪声·····	339
第五节	制动抖动及摆振模拟技术·····	346
第九章	实际案例 ·····	351
第一节	怠速转向盘抖动优化案例·····	351
第二节	SUV 加速轰鸣噪声控制·····	359
第三节	MPV 降噪·····	367
第四节	微型车降噪·····	376
第五节	制动抖动·····	384
第六节	过减速带冲击·····	392
第七节	轿车加速轰鸣噪声控制·····	398
参考文献	·····	405

第一篇 振动噪声基础知识

第一章 振动和噪声概述

第一节 振动和噪声

振动噪声现象产生原理复杂，涉及动力学、运动学、理论力学、材料力学等多门学科，对工程师的基础知识和理论背景要求很高。为了便于解决振动噪声问题，对振动噪声有关的基础知识加以介绍。

一、振动基础知识

1. 振动和振动频率

振动是指物体以某一点为中心按照一定的周期进行往复运动，其运动与时间的关系如图 1.1.1 所示。

振动频率表示 1s 的时间内往复运动的次数，单位为 Hz。

如图 1.1.1 中所示为简单的单线摆模型，当对摆锤施加一个外力时，如向一边拉起，然后松手。摆锤将以静止位置（A）为中心开始摆动。摆锤的摆动就是振动，从图中可以了解到，其振动频率约为 2Hz，即 1s 时间内，往复摆动两次。

2. 自由振动和固有振动频率

由弹簧和具有一定质量的物体构成的振动系，如图 1.1.2 所示，当重物受到牵引等外力

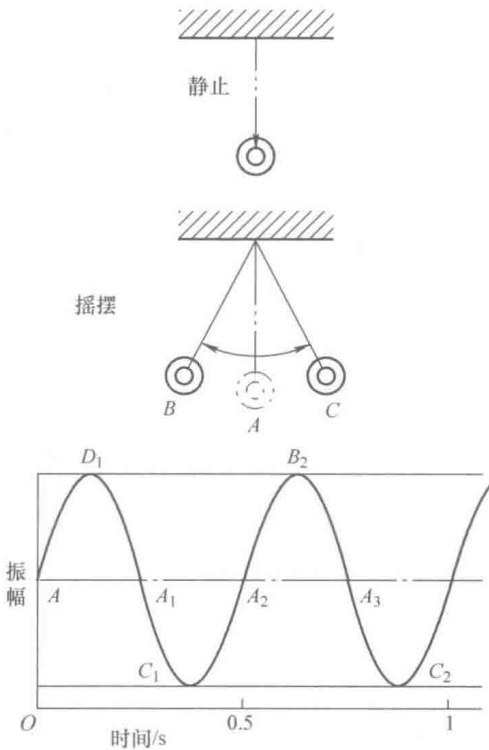


图 1.1.1 单线摆振动

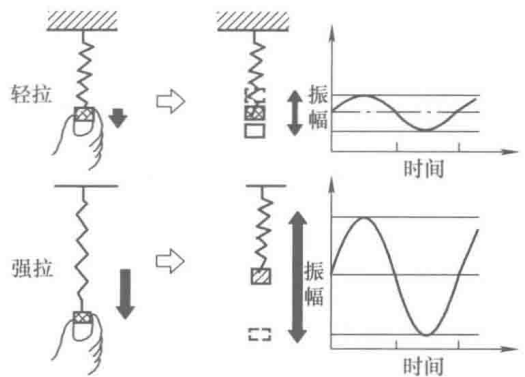


图 1.1.2 自由振动



作用时，振动系就按照系统固有的频率开始振动。这样的振动称为自由振动，其振动的频率称为固有频率。固有频率由弹簧的刚度和重物的质量决定，与外力无关。

对重物施加较小的牵引力和较大的牵引力，振动的幅度虽然不同，但是其振动的频率是不变的，如图 1.1.3 所示。而当改变振动系的弹簧刚度和重物的重量时，系统的固有振动频率会改变。弹簧的刚度越大，物体的重量越轻，则固有振动频率越高。

3. 振动强制力和振动体

形成振动需要具备引起振动的力即强迫振动力及受到力作用而运动的振动体两个条件。

如图 1.1.4 所示的弹簧和物体所组成的振动系中，手持弹簧上下移动，则物体会产生连续的上下方向的运动。

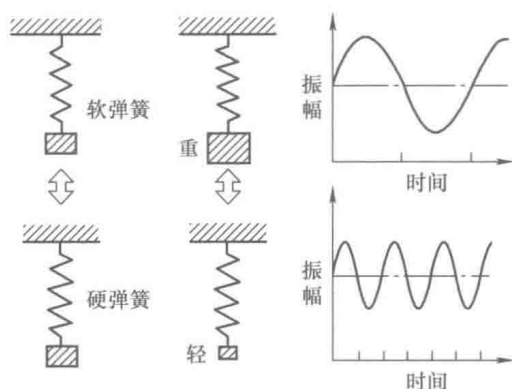


图 1.1.3 弹簧与重量的影响

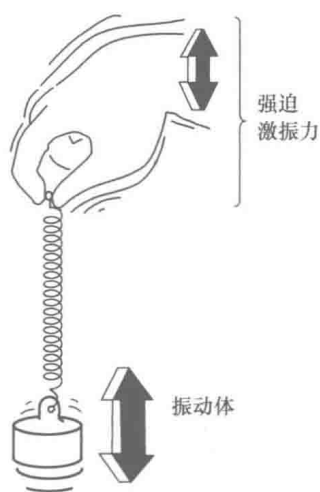


图 1.1.4 强迫振动

4. 共振

利用图 1.1.4 中的振动系进行实验，结果如图 1.1.5 所示。

保持手的移动幅度一定，慢慢改变上下移动的速度，观察物体如何运动。即保持振动强迫力的幅度不变，只改变强迫力的频率时，调查物体的运动有何变化。

(1) 振动强迫力的频率较小时

物体随着手的上下运动而开始运动，且振幅较小。

(2) 振动强迫力的频率较大时

手的上下运动渐渐加快时，物体的运动也加快，当手的移动速度达到一个特定的值时，物体的振幅达到最大。这种现象称之为共振。

(3) 振动强迫力的频率进一步加大时

当手的上下运动速度更大时，物体的振幅并没有相应增大，反而变小了。

以上实验现象说明，当振动强迫力的频率与振动系的固有频率一致时，产生共振，此时振动系的能量最大，这也是汽车的振动和噪声增大的原因，如图 1.1.6 所示。因此，在处理汽车的振动及噪声问题时，一定要特别注意共振现象。

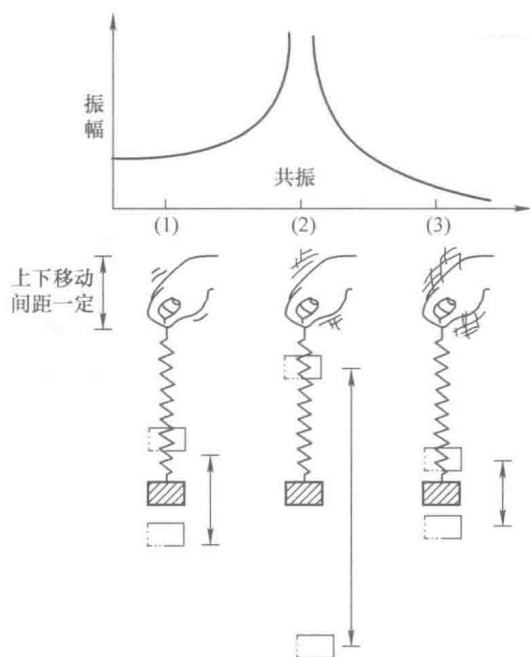


图 1.1.5 共振

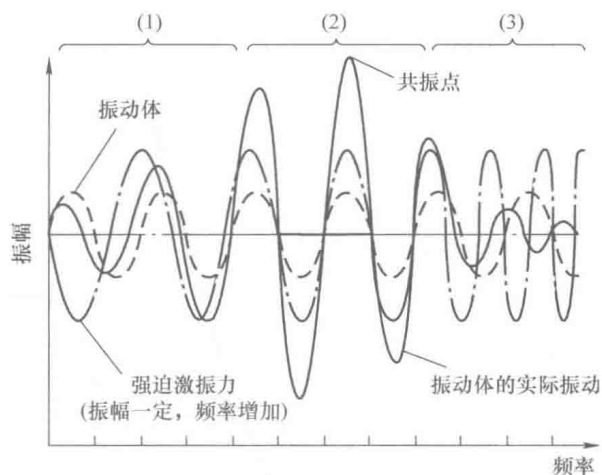


图 1.1.6 实际振动

5. 刚性振动和弹性振动

振动可以分为刚性振动和弹性振动。刚性振动即之前所叙述的弹簧和振动物体组成的振动系振动的情况。对于汽车来说,类似的振动系如由悬架的弹簧和车身所组成的结构,如图 1.1.7 所示。

所谓的弹性振动,例如当用手指拨动吉他的弦时,弦的振动即为弹性振动。总之,弹性振动是由物体自身的弹性和质量所构成的振动系所产生的连续振动,如图 1.1.8 所示。

汽车的排气管的弯曲振动即弹性振动。另外,对于同一个物体,根据振动频率的不同,有可能产生从刚性振动到弹性振动的转变,或者同时产生两种类型的振动。

例如,汽车的车身以较低的频率作簧上振动时,即悬架弹簧和车身所组成的振动系的刚性振动,当振动频率增加而产生冲击类的车身振动时,车身不仅仅体现为位置的变化,车身整体会产生弯曲或者扭转运动,此时为弹性振动。

因此,必须明确区分振动系的振动是刚性振动还是弹性振动。

二、噪声基础知识

1. 声音及其传递方式

如图 1.1.9 所示,用手指轻拂吉他的弦,或者敲鼓时,之所以能听到声音,是由于吉他的弦或者鼓面产生了振动,激起周围空气振动,并最终通过听觉神经使人产生听觉。振动是由于与振动体的接触通过触觉器官感觉到的,当手指离开振动物体时就感觉不到振动。而对于声音来说,即使离开振动体(当然是在一定的范围内),只要是在空气传播所能达到的范围内就能听到。这就是振动和声音的区别。

综上所述,有声音的地方就一定会有振动体的振动,正是由于振动体的振动才产生了声音。

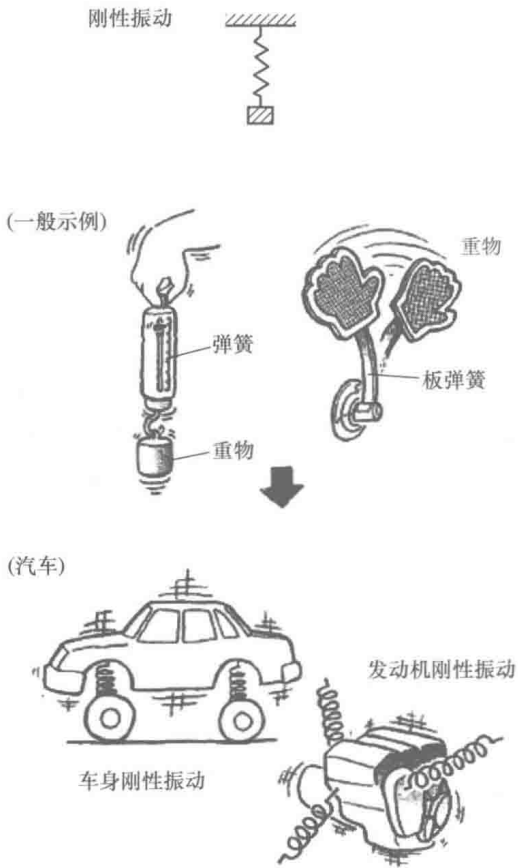


图 1.1.7 刚性振动

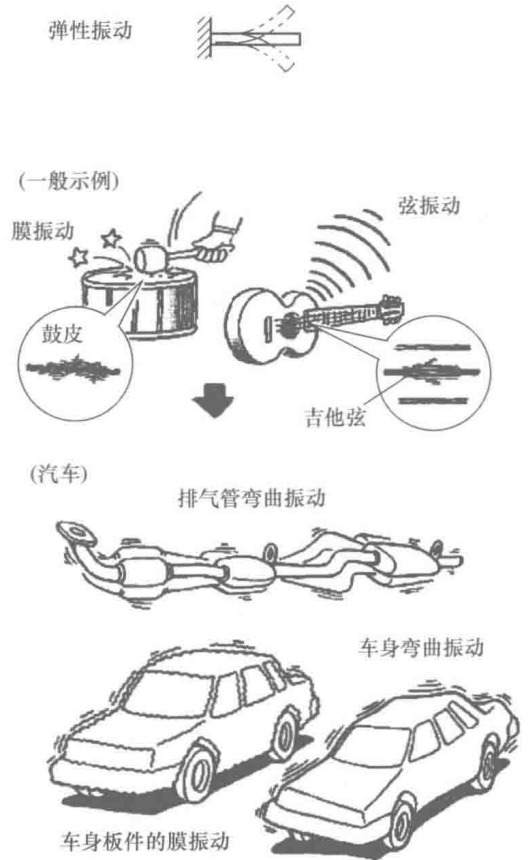


图 1.1.8 弹性振动

另外，关于声音在空气中的传播方式，举一个简单的例子。如图 1.1.10 所示，向池塘的水中投入一块石块时，石块产生的波纹会不断地扩大，时高时低地向远方传播。声音在空气中的传播也是同样的情形，激励使空气产生振动，空气的密度随着传播的距离而产生疏密变化，不断地向远处传播。

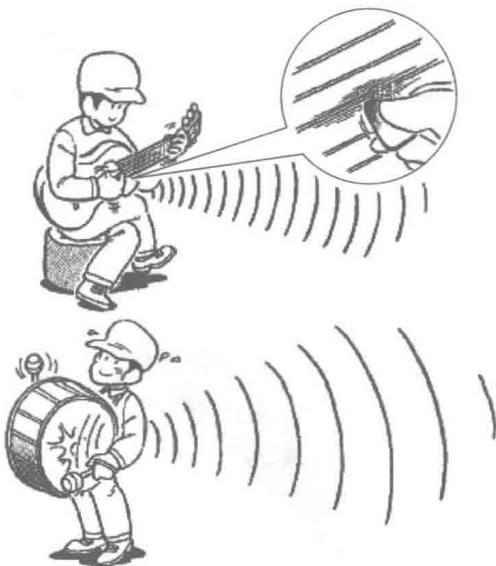


图 1.1.9 弹吉他和敲鼓

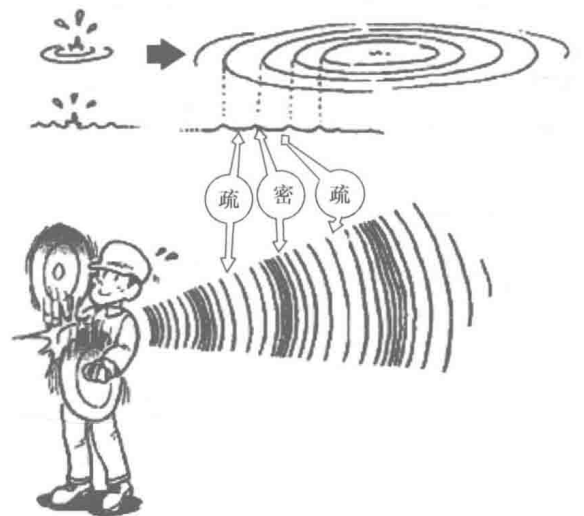


图 1.1.10 声波的传播



2. 声音的高低和声音的强度

声音的高低由频率决定，当频率较小时较低的声音能听到，当频率较大时较高的声音能听到。

例如，对于敲击小鼓和大鼓的情况，敲击大鼓会产生较低沉的声音，当加大敲击的力度并放慢敲击速度时，甚至可以凭肉眼观察到鼓面的振动。另一方面，敲击小鼓时会产生较高的声音，鼓面的振动则很难观察到。如图 1.1.11 所示。

声音的强度是由耳膜的振动强度所决定的，即代表了振动所产生的能量的大小。



图 1.1.11 声音的高低和强弱

3. 可听音和振动

有时候未必能听到振动体振动时所产生的声音。

例如，电视机或者音响所使用的遥控器所发射的是一种超声波，具有非常高的频率，这种声音是人耳所听不到的，如图 1.1.12 所示。

相反，蹦床等在上下方向以较高幅度振动的情况，也是听不到振动声音的，如图 1.1.13 所示。

以上的例子说明我们的耳朵具有一定的可听范围。即使声音的强度相同，如果振幅很小的话则无法听到。

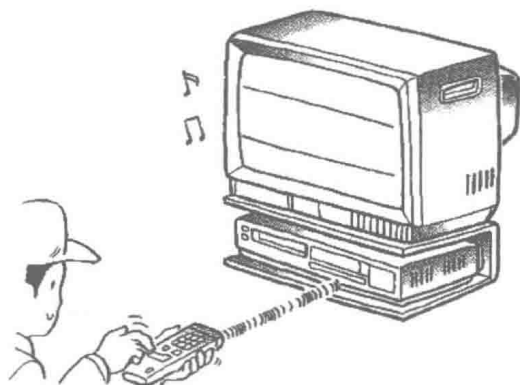


图 1.1.12 超声波

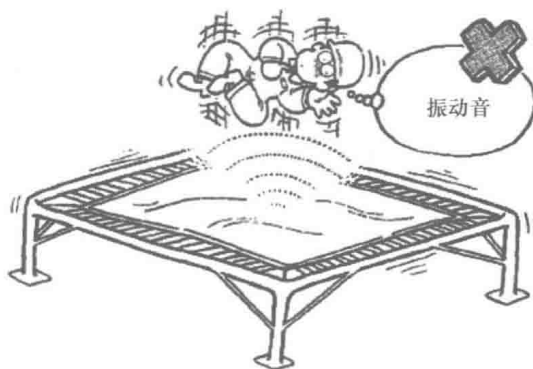


图 1.1.13 振幅较大的蹦床

图 1.1.14 显示了人的耳朵有多大的可听范围。

另外，最小可听范围曲线是指一部分听觉特别敏感的人而言的，对于普通的人来说，其最小可听范围如图中的虚线所示。



图 1.1.15 为等响度曲线，它显示了人耳能听到的声音的强度大小。

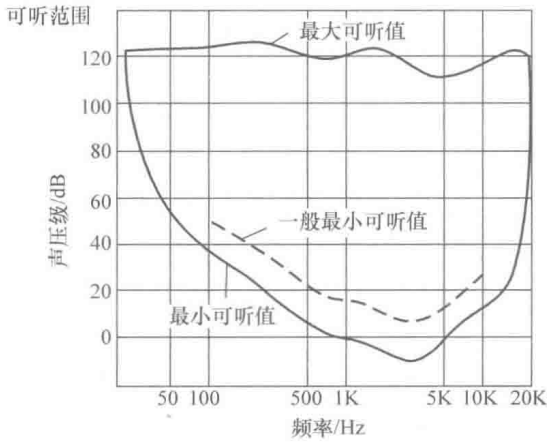


图 1.1.14 人耳的可听范围

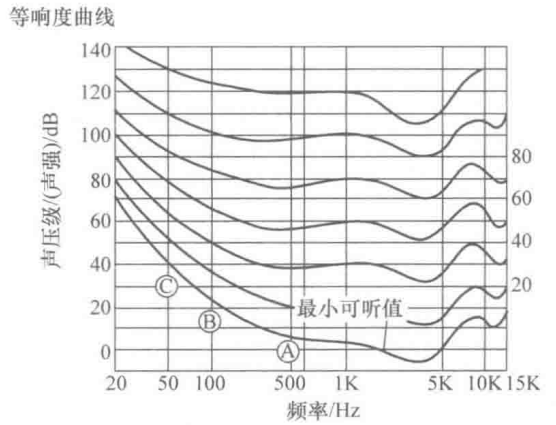


图 1.1.15 等响度曲线

一个身体健康的年轻人，正对声源，用两耳试听声音。使用 1000Hz 的标准声源，调整声压以促使频率改变，保证所听到的声音的大小（声强）相同，进而绘制得到的曲线为等响度曲线。例如，在 A 点 500Hz 的声音其声压听起来达到 60dB，在 B 点频率为 1000Hz 时声音降低，约为 25dB，在 C 点 50Hz 的声音听起来只有 42dB。

接下来根据可听范围曲线对汽车的各种噪声进行详细分类介绍，如图 1.1.16 所示。

在汽车噪声中，尤其是问题较为严重的低速及中速时所发生的轰鸣噪声，由于频率较低，虽然比较难于感觉到，但是由于声压较高，使耳膜产生一种压迫感，听到的是“嗡……”这样的声音，使人的感觉非常不舒服。同时由于振幅很大，能感觉到振动。

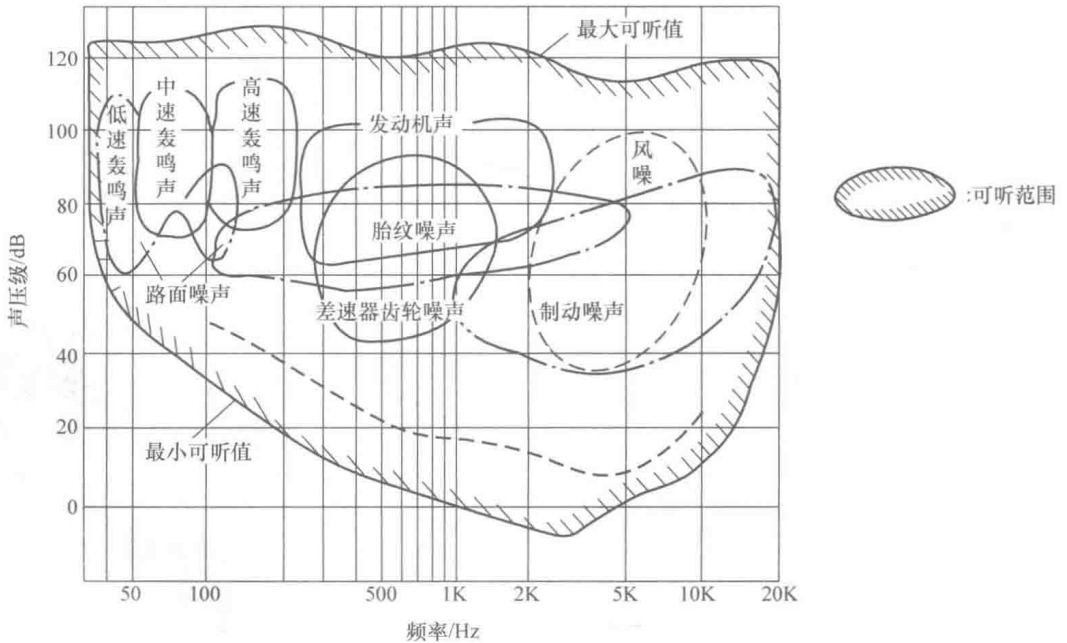


图 1.1.16 汽车常见噪声现象



三、振动和噪声的产生

在之前的叙述中，我们了解到物体振动而产生声音，因此，为了查找声源，就需要找到振动的物体，这是一般的常用方法。

对于振动体的振动为单纯的发声源（如发动机缸内气体爆发时的振动）时，振动源比较容易查找。而一些较为复杂的振动，振动体自身的振动幅度较小，但是由于与其他的物体相互接触，从而引起了其他部位的振动形成新的振动源。对于这样的需要处理的对象，确定振源则有一定的难度。

下面对较小的振动是如何转变成较大的振源过程加以介绍。

物体振动时将成为振源，振动在向与其相互接触的物体传递时，如果传递过程中某一部位产生共振，那么传递过来的振动能量将被无限增幅放大，并继续向下传递。因此，共振是振动能量被放大的关键。

这种现象在日常生活中十分普遍，如图 1.1.17 所示，在汽车中，发动机振动所产生的力将会通过悬置和排气管吊挂向车身传递，在传递路径上如果出现共振，那么传递的能量将会被大幅提高，从而使车身板件产生严重的振动，并最终产生噪声。

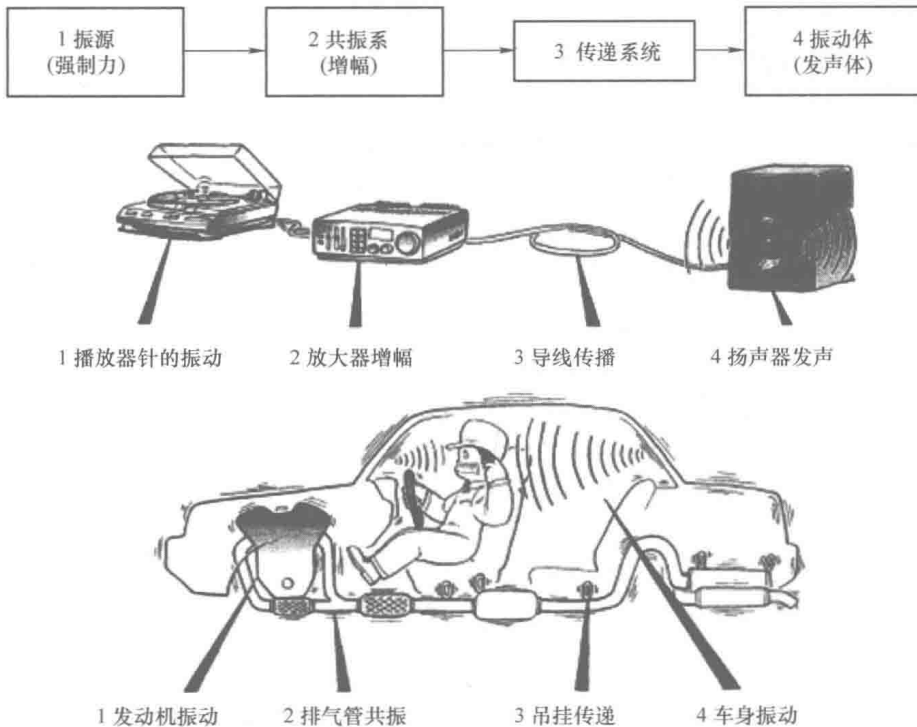


图 1.1.17 振动噪声发生原理示意图

四、令人在意的振动和噪声

不仅仅局限于汽车，日常生活中经常会发生某一种振动或者噪声，对于某些人来说会感到不适，而对于另外一些人来说则没有这种感觉甚至会乐于接受。例如对于爵士乐的声音，年轻人很喜欢听，而对于一些年纪较大的人来说则视其为令人厌烦的噪声。



另外，对于相同的振动，因为汽车价格的不同，有的人会觉得这是一种无法接受的问题。总之，是否在意相同的一种振动噪声，在主观上的感觉是不同的。因为用户的感受是不同的，所以需要站在用户的角度上对现象进行评价，甚至需要争取第三者的意见。另外，此时还需要了解用户对问题整改的期望值。

判断一种声音是否为需要避免和解决的噪声，对判断者的经验要求很高。汽车公司通常设有专门的部门和人员从事这种工作。实验人员要事先经过严格的培训，如听觉训练、心理分析和测试设备操作等。有时还需要借助外部的资源来完成实验，如有的汽车公司在对一款新产品进行测试时，邀请媒体人员或者群众参与测试，以保证测试结果的可靠性和实用性。

对于已经推向市场的产品，也要注意收集客户的投诉和反馈。因为有些工况在实验中难以涵盖，只有用户才能真实地反映出产品中存在的没有被发现的问题。对于用户反馈过来的信息，要及时处理，条件允许时，尽量和用户一起对问题实际体验。这样才能真实地感受到用户反映的实际情况。

另外，还可以通过其他的渠道来收集信息，如调查问卷、走访用户等。这样不但能及时地获取用户反馈的信息，还有助于提升产品在用户心中的形象，提高产品的知名度。

五、振动和噪声的大小及表现

对于完全没有经历过的振动和噪声，即使在头脑中经过了认真的考虑，也可能做出不正确的判断。因此，在处理振动和噪声问题时，有必要对实际上发生的现象进行体验。并对体验的结果进行详细的记录，以防止遗忘。

对振动和噪声的状态及大小用数据记录下来，在日后再一次查看这些数据时，就很容易回想起当初的状态。

在实验中记录下来的数据是十分重要的，对于噪声大小的评价尺度大概可以分为五个层次，见表 1.1.1。

表 1.1.1 评价判断等级

评价等级	状况描述	特征描述	客户反映
1	客户不可接受并且必须改进	差	生气
2	客户感到苦恼并且希望有改进措施	较差	苦恼
3	客户不期望的，或不具有竞争性，但不会使客户苦恼	合格	失望
4	客户经常感知到，但认为不是问题	较好	可察觉
5	客户很少感知到	好	满意

另外，车速、档位、发动机转速等信息越多，则对后期的判断和处理越为有利。

六、噪声测试设备

当人的耳朵连续听到较大的声音后，鼓膜对声音就有了习惯性，听起来会比实际上的要小，相反对比较低的声音集中精力去听时，会对该声音很敏感，听起来比实际上的要大。

对于自己比较喜爱的声音，即使较高也不会感到厌烦，而对于不喜欢的声音，即使很低也会觉得不舒服。人的耳朵对环境有适应能力，具有可变性，在主观上对某些声音具有吵闹、安静等感受。但是在汽车噪声处理过程中，有必要取得客观的测试数据，而且测量的尺



度必须统一，声级计和传声器是常用的声音测试装置。图 1.1.18 所示为声级计。

声级计具有以下几个优点：

- 1) 使用相对稳定的刻度对噪声的大小进行测试。
- 2) 可以对修理前后的幅值进行对比，以确认效果。
- 3) 可以用具体的数值来表示噪声，对于用户来说更具说服力。

对于声音的形容经常会使用一些拟声词，另外还可以用数字来记录。

使用声音记录设备可以很简单地将声音记录下来并能反复回放，对于这种声音完全不了解的人也可以在不同的场合很方便地试听和分析。

在实验中对声音记录的状态需要加以明确。例如，在乘员耳边位置相对应的地方设置声级计，并在相同的车速、激励条件下进行实验测试，这样测得的数据才具有真实性。但是，记录下来的声音与实际的声音并不是完全一致，因此需要事先了解其中的少许差别。

由于声音的级别在不同的场合会有少许的差别，在测试时尽可能在靠近耳边的位置设置传声器。

声级计有前述的多项优点，但是如果单单依赖声级计也会出现问题。之所以这样说，是因为人类的耳朵构造非常复杂，具有声级计无法比拟的可听音范围。因此，声级计测得的结果虽然有所下降，但是听起来却没有明显的变化。总之，声级计的数据虽然在某种程度上有效，最终还是要通过人耳的感觉来验证。

常用的声级计有各种各样的型号，对于汽车上使用的声级计，通常为小型、便携式的，在车厢内部也可以灵活使用。

如图 1.1.18 所示，声级计通常在前端有一个电容式传声器，可以感知声压并转变为电信号，电信号通过听觉修正回路进行特性修正后显示出来。

图 1.1.19 为常用的传声器。可以连接到数据采集仪上，这样就可以获得连续的数据信号。通过设备配置的软件，对数据进行分析，就可以得到各种有用的信息。

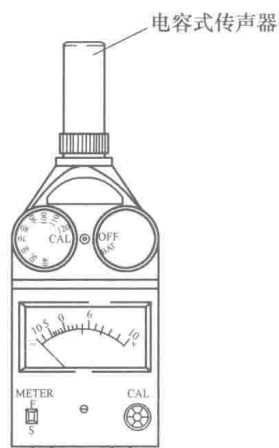


图 1.1.18 普通式声级计

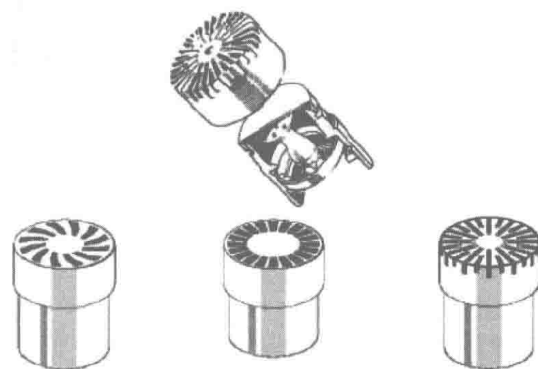


图 1.1.19 传声器

除了上述两种常用的声学测试仪器以外，还有其他一些从传声器衍生出来的测试设备。如图 1.1.20 所示的声强探头、传声器阵列、声全息阵列、人工头等设备，用来进行各种各样的声学测试。