

汽车先进技术论坛丛书

QICHE XIANJIN JISHU LUNTAN CONGSHU

汽车NVH 综合技术

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 综合技术

刘显臣 编著



机械工业出版社

本书全面论述了汽车振动和噪声的各种现象和解决方案,以及在汽车产品开发过程中,如何对汽车的各个子系统开展优化设计,以保证最优的振动噪声性能。全书共分为三篇:第一篇详细介绍了与汽车 NVH 相关的基础知识和理论;第二篇介绍了汽车在各种行驶工况下,经常出现的振动和噪声现象,以及常用的解决方案;第三篇对汽车上与振动噪声相关的各子系统进行详细论述,阐述在汽车产品开发过程中各子系统的设计方法及注意事项,以保证产品具有最佳的 NVH 性能。

图书在版编目(CIP)数据

汽车 NVH 综合技术/刘显臣编著. —北京:机械工业出版社, 2014. 4

(汽车先进技术论坛丛书)

ISBN 978-7-111-46010-7

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(2014)第 036602 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:徐巍 责任编辑:徐巍

版式设计:霍永明 责任校对:刘怡丹

封面设计:路恩中 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 22. 25 印张 · 541 千字

0001—2500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-46010-7

定价:79. 90 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 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版



前 言

随着中国汽车市场的高速发展，人们对汽车乘坐舒适性的要求越来越高。生产安静、舒适的汽车产品，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 专业起步较晚，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二十年，深知这门学科之复杂、高深。中国汽车工业起步较晚，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，在产品开发方面已积累了丰富的经验，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，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。

日本 NVH 专家吉川先生是我的良师益友，在我的学习和工作过程中，得到了吉川先生多年的指导。本书中的部分资料得益于吉川先生的讲座，特此深深致谢。

本书中阐述的汽车振动噪声现象、解决方案及设计方法，涉及汽车的各个部分，包括车身、动力总成、驱动系统、内饰系统、进气系统、排气系统和转向系统等各个 NVH 关键子系统。

本书适合汽车院校学生，各汽车公司、设计公司的 NVH 工程师阅读使用，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，书中难免会有错误及不足之处，真诚地欢迎读者指正(邮箱为 li-uxch_nvch@126.com)。

编 者

目 录

前言

第一篇 汽车 NVH 概述

第一章 汽车 NVH 介绍	3
第一节 汽车 NVH 设计思路	3
一、主观评价的重要性	5
二、现场感受的重要性	6
三、理解发生原理	6
四、CAE 的应用	7
五、实验的应用	8
第二节 NVH 基础知识	9
一、声音的基础理论	9
二、人类的听觉特性	12
三、等响度曲线	13
四、计权网络	14
五、倍频程	15
六、人体的振动感觉特性	17
第三节 NVH 设计项目及评价标准	18
参考文献	18

第二篇 汽车行驶工况与 NVH 现象

第二章 发动机起动机车体振动	23
参考文献	25
第三章 发动机起动机噪声	26
第一节 发动机噪声	26
一、发动机噪声对整车噪声的贡献	26
二、发动机噪声目标	27
三、发动机噪声测试	27
第二节 发动机音质	28
一、曲轴系弯曲振动引起的半阶次振动	29
二、转矩变动引起的半阶次振动	29
三、其他的半阶次振动	32
参考文献	32
第四章 怠速振动	34

第一节 怠速时车身振动	34
第二节 空档加速时车身振动	39
第三节 怠速品质	39
参考文献	39
第五章 怠速噪声	41
第一节 车外噪声	41
第二节 变速器噪声	44
第三节 辅助机构噪声	46
一、链条噪声	46
二、传动带噪声	46
三、机油泵噪声	46
四、燃油泵噪声	46
五、风扇噪声	47
六、空调压缩机噪声	48
参考文献	50
第六章 车辆起步时车身振动	51
第一节 过渡转矩变动	51
第二节 驱动系统振动	52
一、缠绕振动	52
二、离合器抖动	54
参考文献	54
第七章 车辆起步时车内噪声	56
第一节 车内轰鸣噪声	56
第二节 驱动系统异响	56
一、差速器异响	57
二、差速器异响的解决方法	57
参考文献	58
第八章 正常行驶时车体振动	60
第一节 随机路面	60
一、汽车基本参数对乘坐舒适性的影响	64
二、车轴布置的区别、形态的背景和乘坐舒适性	68
三、轴距和载重量对乘坐舒适性的影响	71
第二节 起伏不平路面	75
第三节 路面接缝	85
第四节 驱动系统弯曲振动	88
第五节 轮胎不平衡	91
一、转向盘摆振	91
二、车身抖动	92
第六节 传动轴夹角	93

参考文献	94
第九章 正常行驶时车内噪声	96
第一节 结构传播噪声	96
第二节 空气传播噪声	105
第三节 车内噪声	109
参考文献	114
第十章 减速和制动时车体振动	115
第一节 制动抖动	115
一、制动盘产生厚度不均的原因	115
二、制动抖动的测试	116
三、预防及解决制动抖动问题	117
第二节 驱动系统引起的车体振动	118
参考文献	118
第十一章 减速和制动时噪声	119
第一节 驱动系统异响	119
第二节 制动噪声	120
一、制动噪声分类	120
二、制动噪声测试	121
三、制动噪声评价	121
第三节 制动噪声分析	122
一、低频啸叫	122
二、制动啸叫的理论分析	122
三、实验确认	126
四、常用制动噪声解决方案	127
参考文献	128
第十二章 加速时噪声	130
第一节 车内噪声	130
第二节 车外噪声	131
参考文献	133

第三篇 汽车 NVH 设计

第十三章 汽车 NVH 开发流程	137
第一节 商品规划	137
一、商品规划的作用	137
二、商品规划的内容	138
三、产品规划	140
四、发动机配置、驱动方式、车桥配置、悬架形式	141
五、车辆总布置计划	142
第二节 对标分析	143

881	一、标杆车测试	143
881	二、标杆车 CAE 分析	145
093	第三节 正向设计	148
091	一、CAE 分析	148
091	二、实验验证	148
091	三、解决问题	149
109	参考文献	154
109	第十四章 动力系统 NVH 设计	155
109	第一节 动力总成振动	155
109	第二节 发动机噪声	157
891	一、发动机噪声的分类及评价方法	157
891	二、发动机燃烧噪声及其控制	157
891	三、机械噪声	159
099	第三节 发动机激振力	161
091	一、激振力的测量方法	161
091	二、激振力的计算方法	162
091	三、怠速振动的模拟	163
091	四、探讨解决方案	164
091	五、对策效果的确认	165
091	第四节 动力总成 CAE 分析	167
091	参考文献	169
109	第十五章 变速器 NVH 设计	171
109	第一节 变速器敲击声	171
109	一、概要	171
109	二、噪声发生状态	171
109	第二节 离合器扭转刚度的影响	175
109	一、计算模型	176
109	二、离合器档位	177
109	三、计算实例	178
109	四、离合器扭转刚度特性的最佳化	179
109	五、副齿轮降噪	181
109	第三节 降低齿轮敲击噪声实例	181
109	一、概要	181
109	二、离合器扭转刚度特性和齿轮敲击噪声	181
109	三、数值模拟分析	183
109	四、变速器油温和齿轮敲击噪声	184
109	五、取力器和齿轮敲击噪声	186
109	六、结论	187
109	第四节 变速器 CAE 分析	187

547	一、有限元模型	188
247	二、振动特性分析	188
84	参考文献	189
第十六章 驱动系统 NVH 设计		190
24	第一节 驱动系统振动概述	190
941	一、驱动系统的振动和噪声	190
721	二、驱动系统的弯曲振动	191
221	三、缠绕振动	193
271	四、驱动系统的扭转振动	194
721	五、实车试验	194
721	六、总结	198
92	第二节 驱动系统振动分析	198
921	一、前言	198
101	二、各符号意义	199
121	三、驱动轴系弯曲变形能和动能	199
201	四、固有频率、固有振型、能量百分比的计算	203
161	五、计算例子	207
431	六、总结	209
28	第三节 传动系异响	209
701	一、异常噪声现象	209
901	二、消除异常噪声的对策	210
151	三、齿轮敲击噪声和异常噪声兼顾的离合器	211
17	第四节 传动轴的扭转振动	213
157	一、高速共振噪声现象	213
161	二、传动轴 2 阶激振力的影响因素	214
251	三、新激振力影响因素的研究	214
267	四、5 阶扭转共振对策总结	215
33	第五节 离合器延迟角对噪声的影响	217
801	一、概要	217
951	二、供试车辆和异常噪声	217
121	三、模拟计算	218
124	四、离合器延迟角的影响	220
118	参考文献	221
第十七章 动力总成悬置 NVH 设计		223
63	第一节 动力总成悬置概述	223
141	一、悬置的作用	223
781	二、悬置的种类	224
721	三、悬置的设计要点	226
721	四、隔振系统的评价指标	227

第二节 动力总成悬置的理论分析	229
一、概要	229
二、分析方法	230
三、动态减振器功能	234
第三节 惯性主轴	236
一、概要	236
二、惯性主轴和转矩轴	236
三、惯性矩的测量	237
四、惯性矩的计算值和测量值	238
参考文献	239
第十八章 进气系统 NVH 设计	240
第一节 进气噪声概述	240
第二节 进气系统设计	241
一、进气口位置及方向	242
二、进气管道的刚度	242
三、进气管的支持方法	243
第三节 进气系统声学分析	243
一、进气系统的声学特性分析	243
二、进气系统声学分析模型及分析结果	243
三、谐振腔优化设计	244
四、谐振腔的微调	245
第四节 进气噪声的测试和评价方法	246
一、进气噪声测试方法	246
二、进气噪声指标	248
参考文献	249
第十九章 排气系统 NVH 设计	250
第一节 排气系统设计的基本方法	250
一、消音器设计基础	251
二、传递损失和减衰量的计算	255
三、排气系统的设计、评价标准	256
四、排气噪声的试验方法	258
五、排气噪声贡献量的测试方法	259
第二节 气流噪声的评价和对策	260
一、气流噪声的发生原理	260
二、消音器优化设计	265
第三节 大型车的排气噪声对策	269
第四节 排气系统 CAE 分析	272
一、柔性连接	272
二、排气系统 CAE 模型	273

三、排气系统模态分析	274
四、排气系统动力分析	275
五、吊挂设计	275
参考文献	277
第二十章 转向系统 NVH 设计	278
第一节 转向盘摆振	278
一、强迫振动引起的转向盘摆振	278
二、自激振动引起的转向盘摆振	280
三、转向盘摆振和车轮陀螺作用的耦合	282
四、实车分析案例	286
五、转向盘摆振对策	287
第二节 甩摆	288
第三节 转向助力器	290
一、设计思路	290
二、响应延迟发生的原因和改善方法	291
第四节 转向系统 CAE 分析	293
一、转向系统 CAE 模型	293
二、转向系统 CAE 分析内容	295
参考文献	296
第二十一章 车身 NVH 设计	297
第一节 车身结构设计	297
一、车身刚度	297
二、车身模态	300
三、车身灵敏度	302
第二节 车身阻尼	303
一、车身灵敏度、模态和阻尼	303
二、阻尼材料的属性	304
三、车身板件阻尼处理	306
四、拉伸型阻尼材料	306
五、钢-树脂-钢约束层阻尼材料	307
六、层压钢板	308
七、其他剪切型阻尼材料	308
第三节 声学包装	308
一、声源	308
二、声源的测试方法	308
三、车身降噪设计	310
第四节 车身 CAE 分析	312
一、分析模型	312
二、分析内容	318

参考文献	330
第二十二章 悬架系统 NVH 设计	332
第一节 路面的种类	332
一、周期性凸凹不平路面	332
二、随机性凸凹不平路面	332
三、脉冲激励路面	333
第二节 常用悬架类型	333
一、非独立悬架	333
二、独立悬架	334
第三节 悬架系统 CAE 分析	335
一、悬架系统 CAE 模型	335
二、悬架系统传递的激振力	336
三、路面噪声的计算方法	336
四、降低路面噪声的有效措施	337
参考文献	337
附录	339
附录 A NVH 现象	339
附录 B NVH 名词解释	341

第一篇 汽车 NVH 概述

第一章 汽车 NVH 介绍

振动和噪声是任何一个拥有正常感觉器官的人都可以感知到的现象，并不需要特殊的理论和经验就可以对其加以评价。日常生活中，在感受到动态的激励或者构造物本身的振动的同时，也一定会感受到声音。但是，为了使其降低到可以接受的程度，是需要一定的经验和知识的，从事这方面工作的工程技术人员，经常是苦于寻找有效解决措施而花费大量的精力。本书中，以汽车为对象，理解声音和振动发生的原理，在声音和振动产生的源头加以控制。为了能更好地理解，尽可能多地举一些实际的例子加以说明。

第一节 汽车 NVH 设计思路

随着汽车设计水平及生产技术的不断提高，以及各级供应商和整车厂之间日益紧密的合作，不同品牌汽车的使用性能和安全性能之间的差别越来越小。相比之下，汽车的舒适性就常常成为区分汽车品牌好坏的重要因素之一。因此，汽车厂商非常重视提高噪声振动性能，并把它作为新车的亮点。噪声、振动与舒适性，是衡量汽车制造质量的一个综合性问题，它给汽车用户的感受是最直接和最表面的。业界将噪声、振动与舒适性(Noise、Vibration、Harshness)，统称为车辆的 NVH 问题，它是国际汽车业各大整车制造企业和零部件企业关注的问题之一。有统计资料显示，整车约有 1/3 的故障和车辆的 NVH 问题有关，而各大公司有近 20% 的研发费用消耗在解决车辆的 NVH 问题上。

对于汽车而言，NVH 问题是处处存在的，根据问题产生的来源又可分为发动机 NVH、车身 NVH 和底盘 NVH 三大部分，进一步还可细分为空气动力 NVH、空调系统 NVH、道路行驶 NVH、制动系统 NVH 等。

NVH 问题是系统性的。例如，有些轿车行驶时车厢噪声大，查源头在发动机。那么，这个噪声问题可能就涉及三个部分：一个是发动机本身的噪声大，一个是发动机悬置部件减振效果差，一个是车厢前围和地板隔音效果不好，这些是互相关联的系统问题。当采取解决措施时，人们一般考虑加强车厢隔音性能和材料，而对真正的噪声发生源——发动机则是无能为力，这无法从根本上解决问题。运用 NVH 解决方案，从噪声的源头上想办法，对发动机、悬置及车架等进行结构调整和优化，才能从根本上解决问题。因此，NVH 问题实质是汽车设计阶段要解决的问题，而不是汽车进入市场后要解决的问题。

汽车的发动机和车身通过弹性元件支承在车架和轮胎上，构成一个弹性振动系统，整个系统按照各总成部件又分成多个“弹性振动子系统”。当汽车因路面凹凸不平、发动机及传动系抖动或车轮不平衡而受激振动时，各“弹性振动子系统”发生振动且互相关联。

汽车 NVH 问题也涉及零部件生产企业。近年来,随着专业化分工,整车制造企业已经逐渐将大部分零部件交给零部件生产企业来做。盛行的“模块化”生产方式把汽车装配生产线上的部分装配劳动转移到装配生产线以外的地方去进行。这样,零部件生产企业必然会遇到 NVH 问题。设计者考虑的问题也不单纯是零部件本身,而是零部件与零部件之间、零部件与整车之间的关系。

例如,在解决发动机 NVH 问题时,一些发动机公司为了获得更好的降噪效果,除对发动机作降噪处理外,还对车辆的发动机舱、车厢内部设计结构都进行了声学研究,以求得到最好的解决方案。轮胎也是噪声的主要来源之一,一些厂商除选用低噪声轮胎外,对车轮罩衬垫进行声学特性设计,使其起阻隔噪声的作用。

汽车的噪声源有多种,发动机、变速器、驱动桥、传动轴、车厢、玻璃窗、轮胎、继电器、喇叭和音响等都会产生噪声。这些噪声有些是被动产生的,有些是主动发生的(如人为按动喇叭)。但是主要来源只有两个方面:一个是发动机,另一个是轮胎,它们都是被动发生的,只要车辆行驶就会产生噪声。

在发动机各种噪声中,发动机表面辐射噪声是最主要的。发动机表面辐射噪声由燃烧噪声和机械噪声两大类构成,是发动机内部燃烧及机械振动所产生的噪声。燃烧噪声是指气缸燃烧压力通过活塞、连杆、曲轴和缸体等途径向外辐射产生的噪声,机械噪声是指活塞、齿轮、配气机构等运动件之间机械撞击产生的振动噪声。一般情况下,低转速时燃烧噪声占主导地位,高转速时机械噪声占主导地位。两者是密切相关、相互影响的。实践表明,减少振动是降低噪声的根本措施。增加发动机结构刚度和阻尼,是减少振动的方法,从而达到降低噪声的目的。

轮胎在路面上滚动产生的噪声也是很大的。有关研究表明,在干燥路面上,当汽车时速达到 100km 时,轮胎噪声成为整车噪声的重要噪声源。而在湿路面上,即使车速低,轮胎噪声也会盖过其他噪声成为最主要的噪声源。轮胎噪声来自泵气效应和轮胎振动。所谓泵气效应是指轮胎高速滚动时引起轮胎变形,使得轮胎花纹与路面之间的空气受压挤,随着轮胎滚动,空气又在轮胎离开接触面时被释放,这样连续的“压挤释放”,空气就迸发出噪声,而且车速越快噪声越大,车辆越重噪声越大。轮胎振动与轮胎的刚度和阻尼有关,刚度增大(例如轮胎帘布层数目增加),阻尼减少,轮胎的振动就会增大,噪声也就大了。要降低轮胎的噪声,胎面可采用多种花纹节距,采用高阻尼橡胶材料,调整好轮胎的负载平衡以减少自激振动等。

为了防止发动机噪声和轮胎噪声传入乘员厢,设计人员除了尽量减少噪声源外,也在车厢的密封结构上下工夫,尤其是前围板和地板的密封隔音性能。

变速器噪声主要是由齿轮啮合而引起的。齿轮啮合时,由于齿轮刚度的变化及啮合偏差,引起齿轮间振动力的产生。激振力直接引起空气压力的变化,透过壳体形成空气传播噪声。同时,也会引起构造物的振动,经过壳体或线束等传递,形成结构传播噪声。

驱动系统噪声是由于减速齿轮的啮合偏差引起驱动系和后悬架系共振,发生车内噪声。正常行驶、缓加速、缓减速时均有可能发生。并且,随着加速踏板的踩入速度的不同,声音的大小也不同。驱动系统噪声以啮合频率成分为主体,由于是高频,所以同环境噪声相比更显著。

制动噪声主要是由制动系统之间的摩擦产生的自励振动作为激振力,造成制动、悬架系

强烈振动,产生噪声。最常见的是制动抖动。制动抖动是踩下制动踏板时,引起车体的振动,强烈时会出现制动踏板前后振动的一种现象。一般在高速且突然猛烈制动时发生,同车轮的旋转有一样的周期。主要原因是制动盘的厚度不均,夹在两块制动板之间旋转时,时宽时窄,进而产生很大的力,这个力通过制动管传递到制动踏板。

除了上面介绍的一些主要内容以外,还有如进气噪声、排气噪声、风噪、车门关闭声和一些辅助机构类噪声等诸多 NVH 现象。

从以上叙述可知,汽车的振动噪声涉及整车许多方面,包括汽车的结构设计、工艺水平、装配密封性等。在整车规划或解决 NVH 问题时,需要从整体角度去考虑。

目前,国内一般还都是实车跑路试,对测量数据进行分析;采取增加焊点、结构变更等措施,把共振频率错开,但实际效果不是太好。国外先进的汽车厂家从 20 世纪 80 年代以来已经将汽车结构的动态特性纳入产品开发的常规内容。尤其是 20 世纪 90 年代以来,丰田、通用、福特和克莱斯勒等汽车公司的工程研究中心专门设立了 NVH 部门,集中处理汽车的噪声、振动和来自路面接触冲击的噪声声振粗糙度。

当前,国内外知名汽车公司在汽车设计阶段就开始用 CAE 做 NVH 性能设计了。在产品开发的初期、中期及后期,利用 CAE 技术对整车的 NVH 性能进行预测、优化。如在开发中期,可以计算一些关键零部件的振动特性,利用综合模态技术计算驾驶人耳边的声压、地板和转向盘的振动等。而在开发的后期,设计完毕,CAE 计算出各方面的性能。当各项性能指标基本达到要求后,才开始制作模型样车。试验工程师对样车进行主观评价,发现各种振动噪声问题,然后测试数据,为进一步 CAE 分析和设计新结构提供数据。在 CAE 分析的指导下,可以避免盲目的测试。同时,这些数据和分析还为以后开发新车积累了很多宝贵的资料。

一、主观评价的重要性

声品质本身反映了人对声音的主观感受。目前,现有的测试仪器和相关方法尚无法直接测量该指标。不过,研究显示,声品质能够用直接测量和计算获得的客观物理参数来描述。这些反映不同声音信号造成主观感受差异的客观物理参量,综合考虑了人体心理反应机制和声学感知特性,称为心理声学参数。

国外进行的声品质主观评价方面的研究,其基本思路和流程大体相同:首先,组织评价者对多个不同的有效车辆噪声采样信号进行评分。常用评价方法有两种:等级评分法和成对比较法。前者可获得声音评价的绝对数值,后者则可提供多个噪声采样之间的相对排序。然后,以统计学方法对噪声样本进行多重回归分析,确定主观评分等级与客观物理参数之间的相关性。最终,建立用心理声学参数表达的声品质函数公式,并以此作为汽车产品设计和制造的声学参考和评价指标。

汽车产品必须满足的 NVH 目标值,除了车外噪声是国家相关法规强制要求的以外,都是以乘员的主观评价为基础,并将其转换为相应的物理量。因此,必须将目标值对应的物理量、乘员的感受通过某种方式结合起来。例如,乘员所处的驾驶室的振动、转向盘的振动、地板的振动等都有不同的幅值,或者乘员耳边的噪声也有一定的幅值和频率。如何将这些具体的幅值和主观感受对应起来,就需要一定的经验积累和标准支持。又例如,对乘坐舒适性的评价,由于乘员主要是感受到上下方向的振动,因此,需要重点关注的就是汽车的上下跳