



汽车先进技术译丛

日本汽车技术协会·汽车技术经典书系

第11分册

# 汽车振动噪声 控制技术

[日] 高波克治 编著  
刘显臣 译



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

非  
外  
借

汽车先进技术译丛

日本汽车技术协会·汽车技术经典书系

# 汽车振动噪声控制技术

[日] 高波克治 编著  
刘显臣 译

机械工业出版社

《汽车振动噪声控制技术》是日本国内应用非常普遍的一本技术书籍，内容包括汽车振动噪声环境、振动噪声的评价方法、测试分析技术、模拟技术、部件的振动噪声控制技术、车外噪声控制技术、振动噪声主动控制，其研究与试验方法贴近工程实际，非常值得国内技术人员阅读借鉴。

Translation from Japanese language edition: 自動車の振動騒音低減技術，自動車技術会編集

Copyright © Originally published in Japan in 1996 by Asakura Publishing Company, Ltd.

Chinese translation rights arranged with Asakura Publishing Company, Ltd. through TOHAN CORPORATION, TOKYO.

All Rights Reserved.

版权所有，侵权必究。

This title is published in China by China Machine Press with license from Asakura Publishing Company, Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体版由 Asakura Publishing Company, Ltd. 授权机械工业出版社在中国境内（不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2015-0543 号。

## 图书在版编目（CIP）数据

汽车振动噪声控制技术/（日）高波克治编著；刘显臣译. —北京：机械工业出版社，2017.5

（汽车先进技术译丛·日本汽车技术协会·汽车技术经典书系）

ISBN 978-7-111-57232-9

I. ①汽… II. ①高…②刘… III. ①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 146777 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 李 军

责任校对：潘 蕊 封面设计：鞠 杨

责任印制：张 博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 8.75 印张 · 203 千字

0 001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-57232-9

定价：69.00 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](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线：010-68326294

机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# 序

本书是日本汽车技术协会主编的“汽车技术经典书系”全12册中的1册。本系列丛书旨在阐述汽车相关的焦点技术及其将来的发展趋势。本书由活跃在第一线的研究人员和技术人员编写。

日本汽车技术协会的主要责任是向读者提供最新技术课题所需要的必要信息，为此我们策划了本系列丛书的出版发行。本系列丛书的各分册中，相对于包罗万象的全面涉及，编者更倾向于有所取舍地选择相关内容，并在此主导思想下由各位执笔者自由地发表其主张和见解。因此，本书传递的将是汽车工程学、技术最前沿的热点话题。

本系列丛书的主题思想是无一遗漏地包含基础且普遍的事项，本协会的“汽车工学手册”属于对立的两个极端。另外，手册每十年左右修订一次，以包含当代最新技术为指导思想不断地进行更新，而本系列丛书则侧重于这十年当中的技术进展。再者，本次发行正值日本汽车技术协会开办50年之际，具有划时代的意义。本系列丛书基于以上多种背景原因而策划，将会为今后的汽车工学、技术，以及工业的发展发挥积极的作用。

在本系列丛书发行之际，我代表日本汽车技术协会向所有为本系列丛书提供协助的相关人员，以及各位执笔者所做出的努力和贡献表示衷心的感谢。

社团法人 日本汽车技术协会  
汽车技术经典书系出版委员会  
委员长 池上 询

# 前 言

基于大量的技术革新和相关人员的不懈努力，汽车已经成为丰富社会生活的必需品。

现阶段汽车还没有完全普及，无故障、快速、安全地到达目的地是人们重点关注的内容，目前与此相关的各方面性能已经可能很容易实现，进一步提高汽车的舒适性成为很重要的一个参考因素。另一方面，随着汽车的不断普及，从环境保护的角度出发，对汽车的车外噪声等性能要求也越来越严格。

在汽车的舒适性，特别是振动噪声相关的领域内，多数场合需要具备基础工程理论知识，一般来讲，作为研究对象的车身构造、零部件，会涉及多个知识领域，常常需要进行逻辑、系统性的研究。以前难以解决的问题，在计算机技术的推动下，CAE、分析技术、测试技术等都取得了巨大的进步，并且还在不断发展当中。接下来要做的是超越汽车安静性能，根据顾客的喜好、感受，来研究什么样的声品质才是所需要的，在更宽的范围内开展研究。

本书在以上背景的基础上，旨在传递正确的技术信息，邀请了多位活跃在技术第一线的研究人员执笔。另外，对于每一个课题，在从根本上加以理解的基础上，通过反复解释，各章节之间虽然因为个人理解等原因而有所矛盾，但是通过最大限度的调整，力求自由地阐述各人的观点是本系列丛书的编辑主旨。因此，单单一册书可能会有连贯性方面的缺陷，但是对于从事汽车振动噪声研究工作的读者们，如果在振动噪声相关的基础知识、最近的课题、将来的技术展望等方面，通过本书能够加深理解并有所帮助，将是所有编者的荣幸。

最后，对于百忙之中抽出宝贵时间参与本书编辑的各位编者，表示深深的谢意！

高波克治

# 编者的话

本书是由日本汽车技术协会组织编写的“汽车技术经典书系”的第11分册《自動車の振動騒音低減技術》翻译而来的。本丛书的特点是对汽车设计、测试、模拟、控制、生产等技术的细节描写深入而实用，所有作者均具备汽车开发一线的实际工作经验，尤其适合汽车设计、生产一线的工程师研读并应用于工程实践！本丛书虽然原版出版日期较早，但因为本丛书在编写时集聚了日本国内最优秀的专家，使本丛书具有极高的权威性，是日本汽车工程技术人员必读图书，故多次重印，目前仍然热销。非常希望这套丛书的引进出版能使读者从本丛书的阅读中受益！本丛书由曾在日本丰田公司工作的刘显臣先生推荐，也在此表示感谢！

# 日本汽车技术协会 编辑 “汽车技术经典书系” 编辑委员会

编辑委员长	池上 询	京都大学工学部
副委员长	近森 顺	成蹊大学工学部
编辑委员	安部正人	神奈川工科大学工学部
	井上惠太	丰田汽车
	大沢 洋	日野汽车
	冈 克己	本田技术研究所
	小林敏雄	东京大学生产技术研究所
	城井幸保	三菱汽车
	芹野洋一	丰田汽车
	高波克治	五十铃工程技术有限公司
	迁村钦司	新 ANSYS 有限公司
	農沢隆秀	马自达汽车
	林 直义	本田技术研究所
	原 田宏	防卫大学校
	东出隼机	日产柴油发动机有限公司
	间瀬俊明	日产汽车
	柳瀬徹夫	日产汽车
	山川新二	工学院大学工学部

# 目 录

序	
前言	
编者的话	
第1章 绪论	1
第2章 汽车振动噪声环境	2
2.1 提高声音环境的强烈需求	2
2.1.1 提高乘坐舒适性:高品质及 环境安全	2
2.1.2 保护居住环境	2
2.2 车内噪声环境的发展动向	2
2.2.1 低噪声对象、技术及 轻量化	2
(1) 低噪声对象	2
(2) 降噪技术	3
(3) 轻量化	3
2.2.2 提高声品质,与感觉对应的 评价指标、生理现象	4
(1) 声品质的感觉表现	4
(2) 声音再现模拟,通过声音 加工追求舒适性	4
(3) 表现声品质的代用特征	5
(4) 与感觉对应的评价指标例子	5
(5) 对生理现象的影响	5
2.3 车外噪声控制动向	5
2.3.1 车外噪声控制对象、降噪技术	5
(1) 声源	5
(2) 控制方法	5
(3) 发动机噪声改良	6
(4) 降低放射噪声	6
(5) 降低排气噪声	6
(6) 降低轮胎噪声	6
(7) 测试技术、解析技术、 模拟技术	7
2.3.2 道路表面构造变更	7
2.3.3 交通流控制	7
2.4 法规动向	7
2.4.1 新车、旧车、非法改装车	7
2.4.2 各国的法规、试验方法的协调	8
2.4.3 今后的动向	8
2.5 汽车振动噪声现象	8
2.5.1 现象的种类、发生原理	8
2.5.2 激励源	9
2.5.3 传递系统	9
(1) 传递路径	9
(2) 传递系统的代表原因	9
(3) 轰鸣噪声的传递路径	10
(4) 传递路径的特性改进	10
(5) 振动传递系统构成部分的特性	10
(6) 构成部件的规格选择	10
2.5.4 车内噪声现象	10
2.5.5 车外噪声现象	13
参考文献	13
第3章 振动噪声的评价方法	14
3.1 前言	14
3.2 试验与评价	14
3.2.1 动力总成的多点激励法振动 解析试验	14
(1) 激励点的选择	14
(2) 激励试验方法	14
3.2.2 发动机扭转振动的测试和 解析	15
(1) 一般的解析方法	15
(2) 扭转角的解析方法	16
3.2.3 手动变速器怠速噪声的 台架解析方法	17
(1) 台架试验目标	17
(2) 试验方法	17
(3) 试验装置	18





3.2.4	风振颤声试验方法	18	第4章	测试分析技术	41
3.2.5	悬置衬套类的振动特性试验	18	4.1	测试分析技术的发展动向	41
3.2.6	防振材料评价试验	18	4.2	实机振动模态分析	42
(1)	单板梁	18	4.2.1	前言	42
(2)	中央激励法	19	4.2.2	激励模态分析	42
(3)	双线悬吊法与2点支撑法	19	4.2.3	实机振动模态分析	42
3.3	要因分析	21	4.2.4	对实机模态振型的考察	43
3.3.1	要因分析的概要与种类	21	4.3	近场声学灵敏度	44
3.3.2	激励点的要因分析	22	4.3.1	前言	44
(1)	激励点要因分析的计算方法	22	4.3.2	试验分析方法概要	44
(2)	激励评价法	22	(1)	试验分析方法流程	44
(3)	车身声学灵敏度评价法	23	(2)	板件声学灵敏度模拟	44
3.3.3	放射系统的要因分析	23	(3)	从声学灵敏度到板件贡献量的 变换	45
3.3.4	基于信号处理的要因分析	24	(4)	声压预测及贡献量计算方法	46
(1)	相干法	24	4.3.3	分析结果	46
(2)	时间领域贡献量分析	25	(1)	车内噪声预测结果	46
3.3.5	SEA法	26	(2)	板件贡献量分析结果	46
(1)	SEA法概要	26	4.3.4	实车改良案例	47
(2)	SEA法的理论	26	4.4	近场声全息法	47
(3)	基于SEA法的要因分析	27	4.4.1	前言	47
(4)	SEA法的特征	28	4.4.2	近场声全息法的原理	47
3.4	汽车的声品质评价	29	4.4.3	近场声全息法的应用	48
3.4.1	声品质评价的基本方法	29	4.4.4	应用案例	49
(1)	声品质开发的基本方法	29	4.5	二重声全息法	53
(2)	主观评价试验	29	4.5.1	前言	53
(3)	主观评价试验结果的分析方法	30	4.5.2	二重声全息法原理	53
(4)	噪声加工系统	30	(1)	声学全息法原理	53
(5)	相关分析	30	(2)	二重声全息法的原理和特征	54
3.4.2	实际声品质问题的应用 案例	30	4.5.3	扬声器激励试验	55
(1)	加速时发动机噪声	30	4.5.4	发动机声源探测	56
(2)	排气噪声	32	(1)	测试试验方法	56
(3)	车外噪声	34	(2)	试验结果	56
(4)	路面噪声	35	4.6	今后的展望	58
(5)	车门关闭声	36	参考文献	参考文献	58
(6)	异响	37	第5章	模拟技术	59
3.4.3	新声品质评价方法的组合	38	5.1	模拟技术发展动向	59
3.4.4	听觉训练	39	5.2	模拟模型的要求	60
参考文献	参考文献	40	5.2.1	掌握现象	60



5.2.2 模型的表现 .....	60	(3) 主减速器降噪技术——调整驱动 系统结构 .....	88
5.2.3 系统模型 .....	60	6.3 底盘噪声 .....	90
5.2.4 模型的搭建和验证 .....	62	6.3.1 概述 .....	90
5.3 优化流程 .....	64	6.3.2 制动啸叫 .....	91
5.3.1 优化系统 .....	64	(1) 掌握低频啸叫现象 .....	92
5.3.2 多峰性和拓扑优化 .....	65	(2) 制动啸叫的理论分析 .....	92
5.4 模型的简化 .....	66	(3) 试验确认 .....	95
5.4.1 边界条件 .....	66	6.3.3 路面噪声 .....	96
5.4.2 结合刚度 .....	67	(1) 路面噪声分析 .....	96
5.4.3 高阶和低阶模型的省略 .....	67	(2) 路面噪声控制技术 .....	97
5.4.4 静态模型简化 .....	68	6.4 车身 .....	98
参考文献 .....	69	6.4.1 概述 .....	98
<b>第6章 部件的振动噪声控制技术</b> .....	<b>70</b>	6.4.2 控制敲鼓噪声 .....	98
6.1 发动机噪声 .....	70	(1) 降噪的理论分析 .....	98
6.1.1 概述 .....	70	(2) 噪声控制案例 .....	100
(1) 发动机的振动传递噪声 .....	70	(3) 总结 .....	101
(2) 发动机放射噪声 .....	70	6.4.3 发动机噪声控制 .....	101
(3) 燃烧激励 .....	70	(1) 性能改进的理论方法 .....	102
(4) 机械力 .....	71	(2) 低频噪声隔声 .....	102
(5) 振动传递系统 .....	72	(3) 高频噪声隔声 .....	103
(6) 放射噪声和进排气噪声 .....	73	(4) 总结 .....	104
6.1.2 缸体振动传递控制 .....	73	参考文献 .....	105
(1) 缸体基本构造的探讨 .....	74	<b>第7章 车外噪声控制技术</b> .....	<b>107</b>
(2) 根据实机评价而采取的低 噪声化措施 .....	75	7.1 概述 .....	107
(3) 未来展望 .....	76	7.2 车外噪声源对策 .....	108
6.1.3 半阶次振动 .....	77	7.2.1 发动机噪声控制 .....	109
(1) 曲轴系弯曲振动引起的 半阶次振动 .....	77	(1) 模拟声源 .....	109
(2) 转矩变动引起的半阶次振动 .....	77	(2) 吸声材料、隔声材料的噪声 控制 .....	109
(3) 其他的半阶次振动 .....	80	(3) 隔声对策 .....	109
6.1.4 喷油泵噪声 .....	80	7.2.2 控制轮胎道路噪声 .....	110
(1) 喷油泵本体放射噪声 .....	81	(1) 轮胎路面噪声现状 .....	110
(2) 驱动系引起的噪声 .....	82	(2) 轮胎道路噪声的发生原理 .....	110
6.2 驱动系统振动噪声 .....	83	(3) 轮胎道路噪声的对策 .....	111
6.2.1 概要 .....	83	7.2.3 排气噪声控制 .....	112
6.2.2 主减速器噪声 .....	84	(1) 排气噪声发生原理 .....	112
(1) 主减速器噪声的理论分析 .....	84	(2) 排气噪声控制对策 .....	112
(2) 激励模拟方法的应用 .....	85	7.3 车外噪声分析的新方法 .....	113



7.3.1 声源探测方法 .....	113	(2) 液压悬置的原理 .....	120
(1) 在移动声源中的应用 .....	113	(3) 液压悬置在汽车上的应用 .....	121
(2) 试验方法概述 .....	114	8.2.3 基于阻尼性能可变性的振动控制——	
(3) 车辆行驶时的轮胎噪声测试 .....	114	发动机冲击的半主动控制 .....	122
7.3.2 车外噪声的声场分析 .....	115	8.2.4 基于相位控制的怠速振动	
(1) 基于 BEM 法的车外噪声分析		改善 .....	123
方法 .....	115	8.2.5 总结 .....	124
(2) 发动机放射噪声的传播系统		8.3 主动噪声控制 .....	124
分析 .....	116	8.3.1 概要 .....	124
(3) 发动机放射噪声对策 .....	117	8.3.2 消声原理 .....	124
7.3.3 各部位放射噪声的测试 .....	117	8.3.3 轰鸣声控制 .....	125
(1) 测试原理 .....	117	(1) 轰鸣声的发生状态 .....	125
(2) 数值分析方法 .....	118	(2) 适应性控制的必要性 .....	125
(3) 大型货车上的应用案例 .....	118	(3) 控制算法 .....	126
参考文献 .....	119	8.3.4 实用化课题 .....	127
<b>第 8 章 振动噪声主动控制</b> .....	120	(1) 控制的稳定性 .....	127
8.1 前言 .....	120	(2) 声学系统的讨论 .....	128
8.2 发动机悬置控制 .....	120	8.3.5 实际应用 .....	128
8.2.1 概述 .....	120	8.3.6 总结 .....	129
8.2.2 液压悬置原理 .....	120	参考文献 .....	130
(1) 液压悬置的构造 .....	120		

# 第1章 绪 论

近年来,提高乘坐舒适性成为汽车制造商及购买者的追求目标,特别是降低汽车的振动噪声的呼声更高。本来,汽车的舒适性是通过人的感觉来进行评价的,所要求的水平也因人而异、因时而变。汽车是日常生活中不可缺少的工具,降低汽车的振动噪声水平已经成为一个专业领域。

本书所讲的不仅仅是针对车内乘员听到的噪声,对于社会环境的车外噪声也根据法规对其进行限制,而且有着逐年降低的趋势。

为此,对于降低汽车振动噪声的研究从很早以前就已经开始,并且取得了飞速的发展和显著的成果。同时,与振动噪声相对立的操纵稳定性、可靠性、轻量化、高速化等性能指标也得到了保证。

另一方面,最近随着汽车轻量化、低成本的要求以及高度的操纵稳定性、安全性要求等而采取的新材料、新结构,也产生了众多的课题。与以前相比,控制振动噪声的技术也得到了广泛的重视。

随着产品多样化发展,汽车开发周期也越来越短。汽车的振动噪声是与众多的零部件相关的综合性能,预测技术相当重要,CAE方法得到了广泛的应用。

振动噪声近期的技术方面的特征,是随着电子学和计算机技术的进步而发展起来的CAE技术、测试技术以及电子控制技术等,且已取得了多方的技术革新。

根据CAE方法取得设计阶段的数据和尺寸,根据有限元方法(FEM法)搭建数以百万计单元模型,对其进行分析,对振动、空气传播噪声等进行模拟,这些技术的预测精度和有效性成为重要的课题。另外,使用这些模拟技术进行合理、最佳的设计,即优化设计方法也取得了显著的成果。

在测试方面,开发了以声源探查和声音的

可视化为首的实用性设备,更高精度的测试结果和测试方法也常有报告。关于分析方法,模态分析已经应用到各种零部件以及车辆整体。

电子技术在防振动领域得到灵活应用,以被动控制技术为基础的电子控制降振方法,以及主动控制产品也得到了一定范围内的应用。今后也会向更深层次的领域发展。

另外,以前所开展的各种评价实验方法,要求进行更加严密的要因分析,根据人类的听觉进行评价的声品质问题也需要进行更高层次的研究。因此,为了降低汽车的振动噪声所采取的对策方案,涉及丰富、深度的技术领域。

如上所述,振动噪声领域的技术包含研究阶段及实用阶段等各种各样的状态。随着需求的进一步提升,基于计算机技术的飞快进步一定会得到更深、更高的发展。

在这种背景下,在本汽车技术系列《汽车振动噪声控制技术》一卷中,将向读者介绍最新的技术,致力于解决实际问题。本书以实际案例为基础,书中内容未必着眼于将来可能普及的技术,而是定位于现阶段的技术,至少是活跃在目前第一线的编著者亲身所经历的案例或者发表的论文。

由于篇幅的关系,无法详细说明的部分请参考有关的文献。

在本书中也记载了振动中与噪声相关的较高频率的振动问题,以低频现象为主的乘坐舒适性问题,在汽车技术系列丛书的第4卷中加以详细阐述。

另外,对于振动噪声相关的基础理论知识,特别是关于振动有很多的著作,故本书中只作简要介绍。与汽车相关的一般常用试验结构,将在日本汽车技术会发行的“汽车技术手册”中论述,本书只从宏观上进行概略介绍。

## 第 2 章 汽车振动噪声环境

### 2.1 提高声音环境的强烈需求

#### 2.1.1 提高乘坐舒适性：高品质及环境安全

不论是以驾驶汽车为职业，还是将汽车作为交通工具的人，都希望有一个更加舒适的乘坐环境。提高车辆的性能，保证在日常的使用过程中感觉不到任何不舒适，那么最应该受到重视的是振动噪声性能，相信对于这一点不会有任何的异议。确保车内有一个舒适的声音环境，能缓解长时间乘车时的紧张和疲劳，预防事故的发生。在高速行驶的车辆内，确保乘员之间能清晰交流，以及欣赏音乐等行为都是车辆应该提供的基本功能。

车内噪声水平已经得到了很好的控制，首先在高级汽车上应用的减振降噪技术，如今在普通的大众汽车上也已经得到了广泛的应用。

当车内噪声水平足够低时，声音的品质问题又暴露了出来。不但是些本质上的声音，一些异响、令人感到不舒服的声音都已经得到了很好的控制。如下述的一些常见的现象，已经通过各种各样的研究得到了很好的控制。

##### 1) 行驶噪声。

① 发动机：发动机噪声、冷却风扇噪声、气门噪声、辅助机构噪声、增压器噪声、传动带噪声、进排气系统噪声。

② 驱动系统：齿轮啮合噪声、齿轮敲击噪声、主减速器噪声、怠速敲击噪声。

③ 车身：轰鸣噪声、透射噪声、路噪、风噪、石块撞击声、异响。

##### 2) 操作声。车门关闭声、空调声、起

动机声、辅助制动系统噪声、开关声、刮水器声、电动机声。

##### 3) 音频设备。声场控制。

#### 2.1.2 保护居住环境

汽车的保有量正在逐年增加。虽然国家不断地修建和维护道路，但根据 1992 年设在全国各处的道路监测点所提供的数据显示，未达到基准噪声环境的场所仍然占很高的比例。

对作为噪声源的汽车采取更进一步降噪措施的同时，道路环境、交通状况的改善等综合措施也是非常必要的。

从保护居住环境的观点出发，应取缔影响更大的非法改装车辆，因此汽车换装部件的认证、制止非法改装等方面的措施需要同时开展。同时，夜间施工、24 小时营业场所，虽然给工程、生活带来了诸多的便利，但是它们在深夜、早晨所发出来的噪声，也给周边居民的生活带来了困扰，这些也是保护居住环境中重要的环节。

### 2.2 车内噪声环境的发展动向

#### 2.2.1 低噪声对象、技术及轻量化

##### (1) 低噪声对象

降低车内噪声，提高乘坐舒适性，通过实验、解析方法确定噪声产生的原因，并设定合理的结构。即通过对噪声现象的定量化测试，研究车辆及构成部件的特性，借助模拟工具，以寻求最佳的结构状态，并将其反映到设计图纸上。如图 2-1 所示。



图 2-1 汽车噪声改进流程中的主观感受的量化

车辆构成部件的主要机械特征如下所示:

#### 构成要素的机械特征举例

发 动 机:	振动 - 噪声辐射特性 悬置的振动隔断特性
排 气 系 统:	振动 - 噪声辐射特性 消声器的消声性能
驱 动 系 统:	振动 - 噪声辐射特性 啮合力 扭转振动特性
车 身:	振动 - 声学灵敏度 隔声特性 外部空气流动
底 盘:	悬架的振动传递特性 轮胎的振动传递特性 轮胎花纹噪声

## (2) 降噪技术

为了实现降低噪声的目的, 正确查明振动噪声产生的原因所必需的技术是非常必要的。查找振动噪声的激励源头、确定传递路径、确定噪声的辐射体等各种技术已经被开发出来。首先, 为了查找振动噪声的激励源, 必须对振动噪声现象进行测试, 并进行高精度的分析。作为实验方法一种的模态分析, 是通过灵敏度分析正确掌握振动现象, 推定产生原因。为了确保模拟的精度, 解析所使

用的模型必须进行验证。

模拟技术比有限元法 (FEM)、边界元法 (BEM) 能够更有效地确定解决方案。通过试制实物的小比例模型, 以使问题再现, 通过实验方法得到正确的答案。随着制作模型技术的进步, 这种方法被证明是非常有效的。为了降低振动噪声, 需要对各个部位的灵敏度进行分析, 以寻找最佳的构造, 另外, 有着良好隔声效果的新型隔声材料 (防振、隔声、吸声) 也得到了广泛的应用, 均能得到良好的降噪效果。

而振动噪声的主动控制技术, 则彻底颠覆了传统的减振降噪方法和策略。它是一种主动产生一种与原振动幅度相同而相位相反的附加振动, 通过对原振动能量的衰减而实现降低振动的方法。虽然存在成本高等问题, 但均能显著地减振降噪。

## (3) 轻量化

为了保护地球环境, 减少燃料消耗的呼声越来越高, 另外, 减少机动车废气排放的需求也日趋紧迫。降低车辆自身的重量, 即汽车轻量化, 正是实现上述要求的最佳途径。但是对于振动噪声问题来说, 在实现车身轻量化时, 一般均会使车身及主要零部件的固有模态降低, 使隔声性能下降, 因此, 车辆



轻量化与减振降噪课题是互相矛盾的。

为了解决这一问题，以达到车辆振动噪声性能与轻量化目标的最佳平衡，最主要的技术当属基于模拟分析的优化设计方法。因轻量化的需要而减弱的零部件的固有模态要控制在允许范围内，通过灵敏度分析将部分零部件的部分结构去除，对影响较大的部分应给予必要的加强以控制应力的增加，优化选择零部件的形状、材料，在重量不增加的情况下实现性能的提升。另外，还可以在实施主动控制振动噪声的同时，寻找对轻量化有利的方案。

### 2.2.2 提高声品质，与感觉对应的评价指标、生理现象

#### (1) 声品质的感觉表现

为了打造舒适的声音环境，在实现低声化的同时，如何提高声品质成为重要的课题。传统的以声压的高低来对车辆进行评价的方式已经无法满足对声品质的评价。为了提高声品质评价的精度，对声品质进行评价时所使用的 subjective 感受评价进行了更为科学和实用性的定义。

通过 SD (Semantic Differential, 语义分化) 法，对代表声音性质的各种词语进行了分类，并用简单明了的词语对各种声音的主要特征、重要程度等进行了明确的表达 (见表 2-1)。

以怠速时的声品质评价为例，贡献量最大的是第 1 主成分 (吵闹 clamorous)，而对第 2 主成分则使用类金属 (metallic)、混浊 (thick) 等词汇进行表述 (图 2-2)。

#### (2) 声音再现模拟，通过声音加工追求舒适性

在对声音进行高精度的评价时，为了确保声音的再现，经常使用现场录音并在室内播放的方式对其进行评价。另外，当声压很低但仍然感觉到不满意时，可对声音的频率成分进行数字过滤等方式进行任意变更。当然，

表 2-1 主观评价用语

序号	主观评价用语	
1	柔和 (soft)	— 生硬 (hard)
2	清晰 (distinct)	— 迟钝 (dull)
3	吵闹 (clamorous)	— 安静 (quiet)
4	深邃 (deep)	— 类金属 (metallic)
5	清晰 (clear)	— 混浊 (thick)
6	强烈 (strong)	— 软弱 (weak)
7	轰鸣 (booming)	— 响亮 (ringing)
8	平静 (calm)	— 尖锐 (shrill)
9	和谐 (harmonic)	— 不和谐 (discordant)
10	愉快 (pleasant)	— 不愉快 (unpleasant)
11	强壮 (powerful)	— 不足 (unsatisfactory)
12	平滑 (flat)	— 咕噜咕噜 (rumbling)
13	低劣 (cheap)	— 高贵 (expensive)
14	平顺 (smooth)	— 刺耳 (harsh)

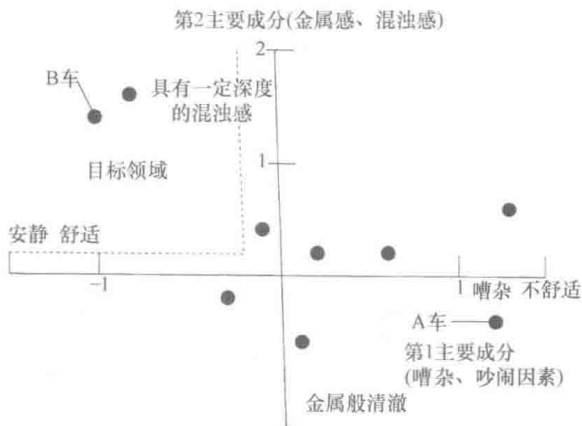


图 2-2 怠速时车外噪声的主要成分

可对某些频域的声压成分适当提高，以观察其影响。在车辆加速时使人感受到强烈力感的声音、机械的工作节拍声音、活跃气氛的高调声音等，这些声音都是在某些情况下希望能感受到的，通过声音的加工来体现这些特殊声音的存在，也是汽车振动噪声设计的课题之一。而要想知道某种声音具体达到哪种舒适程度才能让乘员感受到身心愉悦，就需要对声音进行多方的调试，以谋求最佳的效果。



### (3) 表现声品质的代用特征

对声音进行测试,过去只能通过感觉才能表现的声音的物理特性,现在可以通过图表或者曲线的方式来描述。对声音的性质进行可视化转换,所表现的方法可以通过利用计算机的高速数据处理能力成为现实。举一个典型的数值分析的例子,在乘员耳边或者其他指定的位置设置传声器,对声音进行测试,再通过频率分析,可以得到声压的瀑布图(图2-3)、声学灵敏度、声学全息图等。从这些结果中可以得到数值化的量,据此可以和主观感受的量值进行对比,对二者的相关性进行具体的研究。

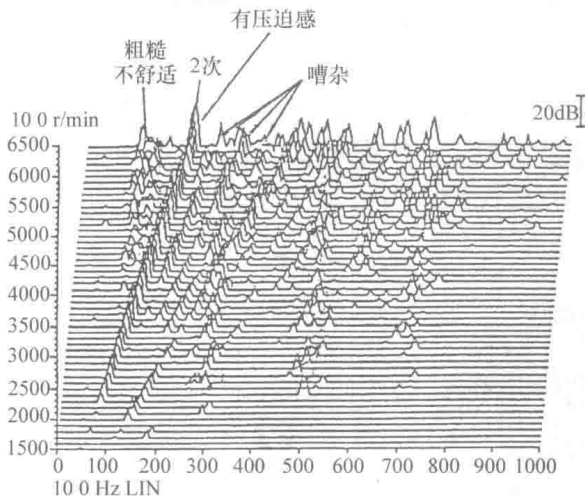


图2-3 车内噪声的瀑布图

### (4) 与感觉对应的评价指标例子

在对声音的嘈杂程度进行评价时,通常使用A计权特性。但是,当产生不适的声音很多时,特别是不连续的声音、混杂的声音、变动的声音和尖锐的声音,使用A计权特性评价时就很难与主观感受保持一致性。

不同的人对某种声音所产生的感受可能是不同的,因此需要寻求一种适用于大多数人的评价标准。在不同的场合,作为经常被使用的指标有ABCDE频率修正特性(weighting)、响度(loudness)、等价噪声级别(Leq.)、会话妨碍级别(PSIL)、评价

噪声级别(PNL)、合成噪声暴露指数(CNEL)等。

### (5) 对生理现象的影响

声音的舒适、不适是人体的生理现象所反映出来的主观感觉。对声音环境下的脑电波、心跳等进行测试,对主观评价得到的感觉量值和用数值所表现的声音特性进行相关性调查,生理现象和感觉量之间的对应关系,处于活跃状态下的脑电波种类(频率带)、脑电波和心跳的波动(1/f)、心跳的变动(HRV)等所表现出来的关系……均已汇总成研究报告。

## 2.3 车外噪声控制动向

### 2.3.1 车外噪声控制对象、降噪技术

#### (1) 声源

车外噪声的控制对象,主要是指法规中所指定的车辆通过噪声、夜间或者清晨的怠速噪声。应该得到控制的车外噪声,根据汽车上具体噪声发生源头可以分为:发动机噪声、驱动系统噪声、排气噪声、轮胎噪声等。

发动机噪声包括发动机本体所发生的机械噪声,另外还有进气噪声、冷却风扇噪声等。

驱动系统噪声是从发动机传递过来的振动,通过离合器壳体、变速器壳体等处辐射出来的,另外还包括齿轮啮合力矩所引起的壳体的放射噪声。

排气系统噪声通常是通过消声器、排气管等处辐射出来的,另外,发动机的振动、高温高压气流的脉动也可能成为噪声源。排气口直接发出来的排放噪声也有较高的贡献。

#### (2) 控制方法

为了降低噪声,首先需要考虑的是从噪声的源头上加以控制,还可以在噪声传递路径上采取措施。在实际操作中,并不局限于





某一种方法，重要的是要根据实际情况，分析各种限制条件来采取最合适的解决方案。常见的制约条件，以发动机为例，有废气排放、功率、油耗以及其他的相关性能，另外还要考虑重量、成本等因素。

降低噪声的有效途径，是减小激励力，或者设计出即使受到激励也难以辐射噪声的结构。为净化排放废气而设置的高压燃油喷射系统会产生较大的激励，必须通过适当的结构优化以消除或者减弱其影响。

对噪声的遮蔽效果，会因材料、位置、隔声结构等因素的不同而具有较大的差别。在仔细调查噪声特性的基础上，采取最合理的隔声方案，在控制噪声的同时，还可以实现轻量化目标。应在不改变部件的基础构造，并且对汽车的其他性能不产生影响的前提下，寻找最佳的改良措施。

### (3) 发动机噪声改良

为了降低发动机产生的空气传播噪声，

以及因为发动机振动而产生的结构传播噪声，可对发动机气缸内的气体燃烧过程进行改良，使缸内的高温高压气体产生的冲击变得更加平稳，也可对受到冲击而容易辐射噪声的部位的振动特性进行优化。同时，也可通过减小活塞的上下运动、曲轴的旋转运动所带来的激励，或者通过专门的减振机构设计来降低发动机自身的振动。以上措施都是改进发动机噪声常用的有效方法。

### (4) 降低放射噪声

为了降低发动机、驱动系统、排气系统零部件表面所产生的放射噪声，不仅仅要降低产生振动的激励，还要对结构的振动特性加以改良。这样，即使结构受到激励，也难以产生放射噪声。通过模拟计算，对发动机缸体、油底壳等的表面所产生的噪声进行预测，使用结构优化方法，使上述结构达到轻量化的同时，还可以实现最佳的振动特性（图 2-4）。

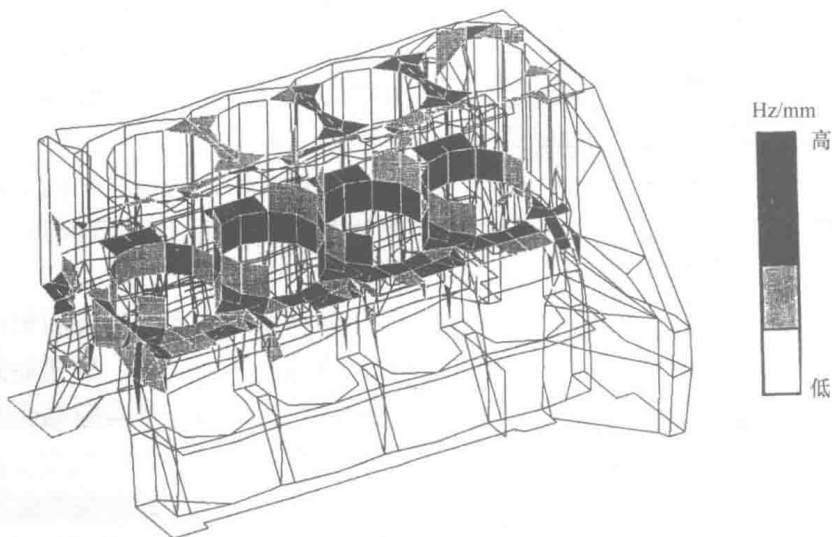


图 2-4 扭转模态灵敏度分布

### (5) 降低排气噪声

根据对消声器声音衰减特性的精确模拟，在不增大排气阻抗的前提下，来降低通过消声器以后的排气口噪声。另外，在排气口附近设置相位相差  $180^\circ$  的主动声源，利

用主动控制方式来降低排气噪声，也是非常有效的方法（图 2-5）。

### (6) 降低轮胎噪声

随着测试技术、理论计算、模拟技术的进步，轮胎噪声的产生原理已经明确。通过