

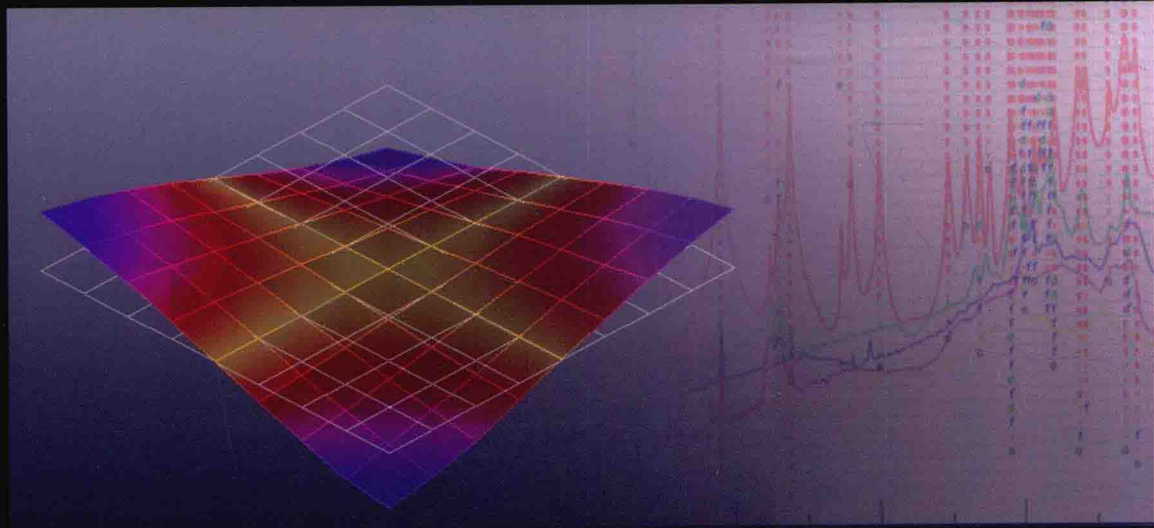
ModalSpace 模态空间系列丛书

从这里学NVH

噪声、振动、模态分析的入门与进阶

谭祥军◎编著

一本書读懂、读透NVH
汇集作者10余年的实践经验
3万+专业粉丝的共同认可



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



模态空间系列丛书

从这里学 NVH

——噪声、振动、模态分析的
入门与进阶

谭祥军 编著

常州大学图书馆
藏书章



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书主要介绍了工程噪声基础、振动噪声信号采集与信号处理、实验模态测试与实验模态分析等 NVH 方面的内容。本书使用通俗易懂的语言来描述 NVH 实践所需的基础知识，极少使用烦琐的数学公式，这样更方便读者理解与应用。内容从实际应用出发，侧重于实际工程问题与常用基本操作，即使是 NVH 初学者，也可轻松、准确地掌握 NVH 的基本概念与方法，快速提升 NVH 工程实践能力。

本书可以作为机械制造、汽车、航天航空、土木工程、石油化工、海洋工程、船舶、家电等领域的工程技术人员和科研工作者从事 NVH 工作的参考书，也可以作为理工院校师生学习 NVH 的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

从这里学 NVH: 噪声、振动、模态分析的入门与进阶/谭祥军编著. —北京: 机械工业出版社, 2018. 5 (2018. 7 重印)
(模态空间系列丛书)

ISBN 978-7-111-59643-1

I. ①从… II. ①谭… III. ①噪声控制②结构振动控制
IV. ①TB53②TB123

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 071840 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: 徐强 责任编辑: 徐强

责任校对: 张征 封面设计: 鞠杨

责任印制: 孙炜

保定市 中画美凯印刷有限公司印刷

2018 年 7 月第 1 版第 4 次印刷

184mm × 260mm · 21 印张 · 10 插页 · 523 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-59643-1

定价: 89.00 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

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

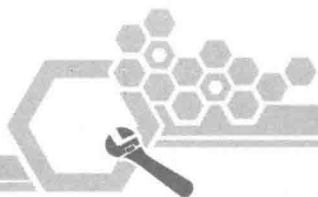
机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

序 言



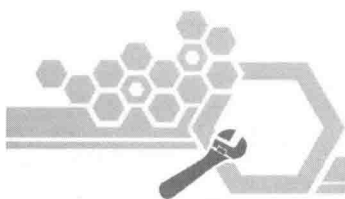
汽车 NVH (Noise、Vibration and Harshness) 性能是汽车舒适性的关键因素, 振动小、安静的汽车已经成为购车者的主要追求。为此, 各大汽车主机厂及零部件供应商都投入了巨大的人力和物力, 来不断地提高他们 NVH 的分析能力和试验能力, 以便为广大的消费者提供更加舒适的汽车产品。

一名汽车 NVH 工程师想要把汽车的 NVH 性能做好, 必须具备以下三个方面的知识: 一是深厚的基础理论知识, 包括数学、振动理论、声学理论等; 二是良好的分析能力和试验能力; 三是足够的车辆工程方面的专业知识。除此以外, 在该领域长期的工程实践和经验积累也至关重要, 这是一个漫长而艰辛同时又充满无限乐趣的求索过程。然而, 时间是有限的, 对于一名有志的 NVH 工程师而言, 除了从自己工作中不断积累总结之外, 也会主动地从他人的经验中学习 (包括从书本中学习), 从而快速地提高自己做好汽车 NVH 性能的水平。

本书是一本理论和实践相结合, 能快速提升 NVH 工程师基础理论水平和试验测试技能的好书。作者谭祥军与我相识源于他作为 LMS 国际公司的 NVH 高级工程师为我们提供全方位的技术支持。通过这几年的接触, 以及他撰写的上百篇原创公众号文章, 我了解到他不仅具有丰富的实践经验, 而且具有扎实的理论基础。当他提出为本书作序的邀请时, 我欣然同意。

本书内容包括噪声、振动的基础理论和试验测试。其特点是概念清晰, 通俗易懂, 图文并茂, 实用性强。无论是仿真工程师还是试验工程师都可从中学到很多有用的东西。本书也将为 NVH 工程师, 特别是试验工程师, 提供一份宝贵的参考资料。

中组部“千人计划”专家
北京“海聚工程”专家 曾宪棣 博士
北汽福田乘用车设计院总工程师



自序

我曾希望能找两三位汽车行业的大咖为本书作序，但当托朋友牵线联系第一位时，他以不认识作者和没有通读全书两个理由委婉地拒绝了。这件事让我不高兴了一整天，但仔细想来，人家拒绝也是对的，毕竟对我不了解，也没有通读整本书的内容，仅凭我写的自我介绍和全书的目录肯定是不够的。吸取了这次教训，当我亲自前往北汽福田乘用车设计院，打印了一份全书的初稿，邀请总工程师曾宪棣博士为本书作序时，曾博士欣然同意。

之后，我想既然可以请行业大咖作序，为何不自己也为本书写个序呢，写一写这本书的创作过程及广大同行对我的支持，因此，才有了这篇自序的问世。

一开始，我并没有想到会出这本书，我最希望能出版的是我翻译的 *Modal Space in Our Own Little World*（《我们小小世界中的模态空间》）和计划撰写的《试验模态分析实例教程》。当我翻译完 *Modal Space in Our Own Little World* 之后，我联系原作者 Peter Avitabile，希望能出版。后来，国内其他单位获得了这本书的出版授权。因而，这本译作最终也没能由我出版，有些遗憾，毕竟我可能是国内第一位翻译完这本外文书籍的。

在翻译完 *Modal Space in Our Own Little World* 之后，我自己也计划写一本试验模态方面的书，书的章节内容格式参照石亦平博士所著的《ABAQUS 有限元分析实例详解》一书，这本书无论是基础理论还是实践，在当时学习 ABAQUS 都是首屈一指的，所以，我想以这本书为模版，打造一本试验模态分析实例方面的书，纵观整个图书市场，虽然模态分析理论方面的书很多，但没有一本主要讲试验模态分析实例方面的书。因此，利用工作之余，我撰写了两章：模态分析基础理论和简支梁锤击法模态，然后时间就定格在 2013 年 4 月，之后再也没有进展。因为做试验不是一个人能完成的，另一方面，缺少很多待测结构，如白车身等。虽然书没有进展，但是我仍有一颗不死的心，希望有朝一日能完成这本书。

2016 年我也写了一些文章，但比较随意，想到哪个主题就写哪个，文章很不系统，因为只是想着与同行分享知识与经验，也没有想过要出书。在这个不系统的写作过程中，我基本上完成了本书的振动噪声信号采集与振动噪声信号处理两章内容。与此同时，不断有同行在我的公众号中留言说希望我能够出书，如：

@周：谭工，读了你公众号里的文章，收获很多。我在想着你什么时候也出一本书啊，讲讲 NVH 的一些知识，或者把你现在的文章整理成书都可以。毕竟我们上班时在手机上看文章不是很方便。非常感谢您！

@王得羊：希望您劳逸结合，建议您出本书，哈哈哈，实在是受益匪浅！

既然同行们希望我出书，同时，我也觉得图书比在公众号里分享零散的内容要更正式、更系统，阅读起来也更方便，2017 年元旦，我便坚定了出书这个计划与目标。全年撰写了本书中的另外三章：工程噪声基础、实验模态测试与实验模态分析，同时我也将这些内容分散后发布在我的公众号中。最开始发布的是关于模态测试的文章，顾及模态测试的文章太多，可能会让读者感到厌烦，所以，就将工程噪声基础方面的文章与模态测试的文章穿插着发布。

当噪声方面的文章告一段落之后，为丰富公众号中 CAE 方面的内容，我邀请了王朋波博士来撰写汽车 CAE 方面的文章。得益于王朋波博士超强的行动力与执行力，公众号终于有了 CAE 方面的文章，不再只有试验的内容了。

在写作的过程中，有朋友曾建议我使用更大众化的调侃语言与风格来写，文章的阅读量会更大，阅读面会更广。但采用这种风格，可能不适合出版为正式图书。另一方面，我知道 Peter Avitabile 教授深谙如何用通俗易懂的语言来解释模态分析中的高深理论，这样一来，即使是他年迈的老母亲也能明白什么是模态分析。而我在翻译他的 *Modal Space in Our Own Little World* 的过程中，也是深受其影响。这样使得我在后续撰写公众号文章时，也是尽量地使用通俗易懂的语言，尽量不用或少用公式来说明问题。

@ Alan: 谭工文章通俗易懂，与 Peter 模态系列文章风格一脉相承，且专业面及领域更为广泛而丰富。期待来年推出更多新作！

其实 2016 年 6 月开始，我就始终坚持原创输出文章，这些文章对于解决工作中的实际问题是非常有帮助的。但创作的文章难免有错误出现，包括笔误、逻辑错误或一些低级错误，而在公众号上分享之后，广大同行都是火眼金睛，对文章中的细微错误都一一指出，这样一来可以确保在正式出版的图书中尽可能地减少错误。除此之外，在创作的过程中，也得到了许多同行的肯定、鼓励与支持，如（虽然有太多的同行称呼我为谭博士，但我真不是博士）：

@ Natalie: NVH 新手，文章全都很好，有些自己觉得模糊不清的概念很容易就被你讲懂了，最近买了好多书，都觉得不如读你的文章来得直接，最无私的分享就是知识的分享，毕竟知识才是最大的财富，支持你！

@ LiangTing: 刚开始是同事分享，我一开始以为是哪个论坛转发的，后来又看了几篇，发现好像并不是，和公司的模态试验比较相关，但认为讨论的是偏向普及性的，再后来发现，好多不懂的问题在这里竟然能找到答案，而且非常有助于我去检查 NVH 实验工程师的结果。开始时我认为试验都是对的，后来才发现不是，谢谢谭博士的分享，我才可以从各方面去完成我的工作，提升能力。

@ Anny: 感谢您的付出与努力！您是我们这个行业的好老师，看您的文章比看教科书明白很多。

@ Rex He: 关注您的公众号好久了，作为一名 CAE 工程师，从您这里收获了很多，希望您能多多分享！谢谢！

@ 刘笑天: 之前关注是因为我做 CAE 仿真，想要看看做实验的人都在干嘛，现在刚刚跳槽，（划重点）公司做样品有大量的实验内容。现在关注更多的是看看同事的实验过程好不好、结果对不对、怎么跟仿真结果对标、怎么改进我的产品。最后，谢谢作者，（敲黑板）一年来如此用心地运营公众号，推出了大量高质量的文章，望越来越成功！

正是因为有广大同行的肯定、鼓励、支持与大力推广，才给了我无限的创作动力。在工作之余，我花费了大量的休息时间来创作这些文章。公众号从开通至今，除了在一些交流群中推广之外，都是广大同行帮我推广：转发文章或者直接推荐给朋友或同事。订阅用户都是一个一个地积攒起来的，他们都是真正从事这方面工作或相关工作的。截至目前，订阅用户已超过 30000 人，在这里，我想说，一路走来，感谢你们，感谢你们的大力支持，感谢你们的肯定，感谢你们的陪伴！

如今，星星之火已成燎原之势，每周始终在固定时间点有规律地发布文章，我的这一行为或多或少地影响到一些同行。期间不断有学生向我咨询 NVH 工作的前景如何，哪个方向

(测试与仿真) 更适合他们等问题, 我都给出了我尽可能知道的答案, 回答可能不一定全面, 但我想至少能在某些方面帮助到他们。据我了解, 至少有几位因为我的回答从而进入了 NVH 行业, 成为我们的同行。这一点让我感到特别高兴, 因为或多或少地影响或帮助到了他们。除此之外, 受到我的影响, 也有几位同行开通了自己的公众号, 如江铃汽车徐光的公众号“品胎品车品人生”等, 以及那些正在想开公众号, 但还没有开的同行。说实话, 我更愿意看到有更多的同行分享自己的知识与经验, 正如下面两位同行所说, 只有我们这群热爱 NVH 的人一起努力, 咱们这个行业才会越来越好。毕竟, 众人拾柴火焰高, 百家争鸣更繁荣。

@NVH 小王: 工作之余经营一个近似福利的纯技术公众号, 你的坚持令人钦佩。有你这样的优秀同行, 就会有更多年轻人了解加入 NVH 行业, 成为我们的同事。

@夏勇: 我希望咱们这个公众号越办越好, 只有我们这群热爱 NVH 这个行业的人一起努力, 咱们这个行业才会越来越好, 天天都有拜读你的文章, 谭哥加油。

直至 2017 年 10 月, 利用国庆假期, 我又撰写了五篇模态分析方面的文章, 总算完成了这本书的所有章节内容。原计划将汽车疲劳耐久分析作为本书的第 6 章, 但不少同行认为疲劳耐久与前面五章的内容关联性不强, 建议去掉, 而我也采纳了同行们的建议, 最终全书只有五章内容。

关于书名, 我也希望听听来自同行们的声音, 所以, 我发起了一个关于书名与图书计划预定册数的投票, 同行们积极响应, 截至目前参与投票的同行近 3000 人, 预订的册数已超出 4000 册。关于书名, 广大同行给我提了不少很好的建议, 如采用简明通俗的标题, 甚至有同行, 像@重生, 冥思了 20 多分钟, 如此种种都让我感动, 因为他们真正关心这本书。我在此声明, 本文中留言上榜的同行, 每人赠送一本我亲笔签名的书作为感谢。当然, 最终的书名, 是需要与出版社商量决定的, 但我会将同行们的建议反馈给出版社, 在此衷心感谢大家。

@钱有胜: 建议书名《就这样学习 NVH》或者《从这里开始学习 NVH》, 以前学习过一本 Word 教材《就这样享用 Word》, 非常实用, 逻辑清晰, 层次分明, 写作严谨且处处为读者考虑, 非常适合初学者。希望本书可以面对广大刚入门的同行, 把涉及的基础问题, 疑难问题说清讲透, 从读者实用且易理解的角度来论述。谢谢!

@重生: 谭博, 我看“NVH 理论基础”这个名字投票人数最多, 但是我却不是很赞成。理由: 既然是理论基础, 就应该牵扯很多公式的推导, 而你在文中特意强调过本书的特色就是“用通俗易懂的语言来讲解 NVH, 避免了烦人的公式推导”, 所以我觉得书名应该把书的特色给体现出来。既然文中使用通俗易懂的语言描述了, 书名也稍微通俗点, 是不是这样更配呢? 就像《明朝那些事儿》这本书一样, 名字有点土, 但和文中气质很搭配, 一点也不影响畅销。我自己想了 20 多分钟, 想了一个很 low 的书名, 纯属个人意见, 《NVH 基础精讲必备篇》, 让谭博见笑了。

@Cheng Hui: 书名不要让读者去猜里面内容可能是什么, 也不要读起来很拗口, 不要让读者断句, 直接简单粗暴地引起读者兴趣, 比如《通俗易懂的 NVH》, 当然这个名字不登大雅之堂, 看作者对本书的定位, 要是想成为一本正儿八经的书, 这个名字就有点随意, 就像《夏洛特烦恼》这部电影, 虽然票房很高, 但永远不可能在电影节上获奖, 脱口秀再好, 也不可能上新闻联播。

完成全书的内容之后, 联系出版社也是颇费周折, 毕竟没有出书的经验, 完全不清楚流程。其实之前有位朋友与我联系过, 希望这本书作为他们 CAE 分析系列中的一本, 这样可能我会省很多出版方面的事, 但想到以后还可能有一系列书要出, 故不宜作为他们这个系列中

的一本，还请这位朋友见谅。联系出版社时，几位朋友推荐的编辑全都来自机械工业出版社，有汽车分社和机械分社，还有一位编辑没有联系过。由于推荐的编辑全是机械工业出版社，我个人觉得机械工业出版社也是非常不错的出版社，所以最终选择了机械工业出版社。经过一番沟通后，我最终选择本书由机械分社的一位编辑负责出版，与我联系的这位编辑虽然年轻，但非常热心，虽然我们没有见过面，但几次电话沟通之后，我还是非常满意的，他也在努力促成本书的早日面市。这就给我吃了一颗定心丸，如果合作愉快，那么，以后的系列丛书，也自然希望与这位编辑继续合作。

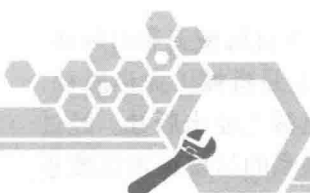
虽然这本书投票的预订册数已超过了4000册，但我最终确定起印的册数为5000册，这是因为如果第一次印刷过多的话，可能会存在积压库存的现象。另一方面，如果这5000册很快销售一空，那第二次印刷也很快，毕竟只有印刷这个环节。作为这本书的作者，我有理由相信这本书肯定是一本畅销书，我的期望是这本书能销售过万册。

一本书很难囊括振动噪声的方方面面，我希望这只是模态空间系列丛书的开始，后续还有更精彩的内容呈现给大家。同时，我也会持续地在我的公众号上更新振动噪声方面的知识，敬请各位读者关注我的公众号，下面是我的公众号“模态空间”的二维码。



最后，由衷感谢为我推荐出版社的朋友们，以及帮助过、支持过、鼓励过我的广大朋友们。同时我也希望越来越多的同行分享自己的知识与经验，共同繁荣 NVH 行业。还是那句话：让我们在 NVH 道路上，砥砺前行。

谭祥军



前言

NVH 是三个英文单词 Noise、Vibration 和 Harshness 首字母的缩写，是汽车噪声、振动和舒适性等各项指标的总称。这个名称来源于汽车行业，但其他行业正在慢慢接受它并使用它，所以，在本书中，我们仍用这个名称，而不是使用振动噪声，也不单单指车辆行业的 NVH，而是广义的 NVH，一切产品的振动噪声问题都属于这个范畴。

由于结构振动会产生噪声，进而影响到舒适性，所以当舒适性有问题时，必然存在相应的振动噪声问题。三者相关行业是同时出现且又密不可分的，因而常把它们放在一起进行研究。当今，产品的 NVH 性能越来越受到用户的重视，成为影响用户是否购买产品的重要因素之一，因此，各行各业在产品的研发阶段都非常注重 NVH。从 NVH 分析手段来说，包括分析产品的基本 NVH 表现（基本的振动噪声评价）、模态分析、TPA（传递路径）分析和噪声源定位等方法。

评价产品的 NVH 表现通常是指产品在其工作状态下评价其振动与噪声水平：振动噪声是否超标、是否有异响、是否符合相应的法规要求等。

模态测试分析可以帮助用户评价现有结构的动态特性、控制结构的辐射噪声、降低产品的噪声水平、找到振动噪声产生的根源，以及进行结构动力学修改、产品优化设计、验证有限元模型、提高数字模型的精度等。通过模态分析，用户可以深入了解产品的动力学特性，使得系统动力学设计对产品开发决策带来积极的影响。用户也可以使用模态分析的结果来检测产品的变化或损坏，以便及时采取优化对策。

按“输入-振动系统-响应”模型（也称为“源-路径-接受者”）来分类，评价产品的 NVH 性能主要是对响应进行分析，而模态分析则是分析振动系统的固有属性。

阅读对象

本书主要面向 NVH 的初级和中级人员，同时也为 NVH 高级人员提供有价值的参考。不管读者是试验 NVH 人员还是仿真 NVH 人员，本书都能为读者提供借鉴。所以本书既是入门参考书，也是建立全面知识体系的高级参考书。

- 初级人员：通过对本书的学习与实践，了解 NVH 基本概念与方法。
- 中级人员：在对 NVH 已有一定认识的基础上，通过对本书的学习可以加深理解与认识。
- 高级人员：通过全面系统的学习，能进一步建立自己的 NVH 知识体系。
- 试验人员：在本书可以找到很多试验过程中碰到的问题与解决方案，明白试验方法与深入理解试验背后的原理。
- 仿真人员：试验与仿真是产品研发过程中两种不同的方法，二者经常需要对标，因此，在本书中仿真人员除了可以找到 NVH 理论之外，还可深入了解试验原理与方法，对工作有极大的帮助。

本书可以作为机械制造、汽车、航天航空、土木工程、石油化工、海洋工程、船舶、家电等领域的工程技术人员和科研工作者从事 NVH 工作的参考书，也可以作为理工院校师生学习 NVH 的教材。

主要特色

- 本书最大特色是使用通俗易懂的语言来描述 NVH 实践所需的基础知识，极少使用烦琐的数学公式，这样更方便读者理解与应用。
- 本书是作者自身长期 NVH 工作经验与总结的分享，因此，实用性更强。
- 本书内容从实际应用出发，侧重于实际工程问题与常用基本操作，即使读者是 NVH 初学者，也可轻松、准确地掌握 NVH 基本概念与方法，快速提升 NVH 工程实践能力。
- 本书理论知识点紧扣实践关键环节，既有理论介绍，又有典型工程实例，更方便读者加深理解。
- 本书每个知识点都会扩展介绍这个知识点的相关方面，更进一步深化并丰富 NVH 知识体系。
- 本书采用问答形式介绍 NVH 知识，因此，在阅读时或作为参考时，能方便快捷地找到想要的知识点。

主要内容

全书共分为五章，内容包括工程噪声基础、振动噪声信号采集与振动噪声信号处理、实验模态测试与实验模态分析。

第 1 章：工程噪声基础，偏向于噪声测量方面的基础知识。

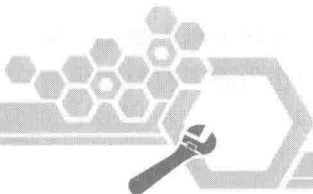
第 2 章：振动噪声信号采集，就信号测试链中的各个环节进行讲解，包括传感器、导线、信号调理、抗混叠滤波器、ADC 等方面。确保采集到的信号包含所需要的完整准确信息。

第 3 章：振动噪声信号处理，从信号中提取有用的信息是信号处理的最终目的，这些信息可以帮助工程人员进行工程决策，解决实际工程问题，因此，正确地进行信号处理是前提。这章主要介绍信号处理中可能会遇到的各个环节。

第 4 章：实验模态测试，实验模态测试分为锤击法和激振器法。本章主要介绍实验模态测试过程中的边界条件、测点分布、激励方式、参考点选择等内容。

第 5 章：实验模态分析，获得精确的模态参数是模态分析的目的，但是在模态分析过程中有诸多因素导致产生错误的结果，因此，本章主要介绍模态分析过程中遇到的问题与细节。

由于作者水平有限，难免会有错误出现，真诚欢迎广大读者批评指正，提出宝贵意见。作者的邮箱为 linmue@qq.com。



致 谢

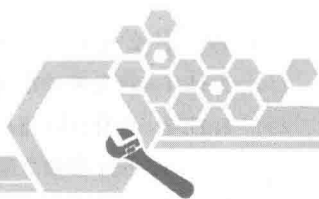
在撰写这部著作的过程中，得到许多同行的鼓励与帮助。中央组织部“千人计划”专家、北京“海聚工程”专家、北汽福田乘用车设计院总工程师曾宪棣博士对本书提出了宝贵的意见并做序。北京科技大学范让林教授对本书提出了宝贵的建议。在此，我对他们表示真挚的感谢！

另外，我也要感谢我所工作过的两个单位：北京东方振动和噪声技术研究所与西门子工业软件（北京）有限公司。北京东方振动和噪声技术研究所是我毕业后的第一家单位，是它带我进入了 NVH 的大门。在这个单位工作近六年的时间里，我做了大量的各类试验，积攒了丰富的现场试验经验。同时非常感谢刘进明总工程师在工作中给予的帮助与指导。从北京东方振动和噪声技术研究所离开后，我进入了西门子工业软件（北京）有限公司工作至今，得益于西门子工业软件（北京）有限公司相关产品在汽车 NVH 领域的广泛应用，使我对汽车 NVH 有了更深入的认识。在这些年的工作过程中，许多同事给予我很多帮助，在此，对他们表示感谢。

在创作的过程中，得到广大同行的支持、鼓励与肯定，还有一些同行提出了不少问题，正是他们的提问使我获得了一些创作灵感，将他们的问题转化成本书的内容。还有那些不遗余力为公众号推广的朋友们，对本书提出宝贵建议的同行们，感谢你们！正是因为有你们的大力支持与帮助，我才有更大的动力前行。

我利用空余时间来写作，占用了大量本该与家人好好相聚的时光，如果没有家人的理解与支持，特别是我妻子金艳梅女士，我是很难完成这部著作的。经常，周末她一人带着孩子出去，而我窝在家里写文章，所以要特别感谢妻子对我的大力支持。

目 录



序言
自序
前言
致谢

第1章 工程噪声基础	1	1.5.5 dBA	24
1.1 什么是声波	2	1.5.6 dB 叠加	26
1.1.1 声波的定义	2	1.6 有趣的分贝公式	28
1.1.2 声波的描述参数	3	1.6.1 相关的正弦声源	28
1.1.3 描述声波的基本物理量	4	1.6.2 不相关的正弦声源	29
1.1.4 声波的传播特性	5	1.6.3 随机声源	29
1.2 什么是声音	6	1.6.4 叠加原则小结	31
1.2.1 什么是纯音	7	1.7 什么是倍频程	31
1.2.2 声音的频率成分	7	1.7.1 倍频程的定义	31
1.2.3 空气声与结构声	8	1.7.2 怎么计算中心频率	33
1.2.4 声音的传播路径	9	1.7.3 倍频程标准中心频率	35
1.2.5 怎么评价声音	10	1.7.4 倍频程的计算	37
1.3 什么是声场	11	1.8 什么是声学计权	38
1.3.1 声场的定义	11	1.8.1 为什么要使用计权	38
1.3.2 声波的叠加	12	1.8.2 频率计权	39
1.3.3 近场与远场	13	1.8.3 时间计权	40
1.3.4 自由场与消声室	14	1.9 细说传声器	40
1.3.5 混响场与混响室	14	1.9.1 传声器构造	40
1.4 什么是声压级	15	1.9.2 常见的传声器类型	41
1.4.1 声压级的定义	16	1.9.3 性能指标	42
1.4.2 为何基准是 $20\mu\text{Pa}$	18	1.9.4 声场应用类型	45
1.4.3 声压级的计算	18	1.9.5 测量传声器附件	45
1.4.4 灵敏度对声压级的影响	20	1.9.6 怎样选择传声器	46
1.5 什么是分贝 dB	21	1.10 什么是声强	46
1.5.1 分贝的定义	22	1.10.1 声强的定义	46
1.5.2 声音大小	22	1.10.2 声强探头的构造	47
1.5.3 dB 的性质	23	1.10.3 声强的测量原理	49
1.5.4 -3dB	24	1.10.4 声强的应用	50

1.11 什么是声功率	52	2.5.2 抗混叠滤波器	86
1.11.1 声功率的定义	52	2.5.3 为什么要用2.56倍	87
1.11.2 为什么要测量声功率	52	2.6 AD 位数对信号幅值的影响	88
1.11.3 三个参数之间的关系	53	2.6.1 量化	88
1.11.4 声功率测量方法	54	2.6.2 量化误差	89
1.11.5 测量方法的差异	55	2.6.3 减小量化误差的方法	90
1.12 基于声压法的声功率测量	56	2.7 采样过程中存在的误差	92
1.12.1 自由场法	56	2.7.1 潜在的结构问题	93
1.12.2 混响室法	57	2.7.2 传感器引入噪声	93
1.12.3 标准声源法	58	2.7.3 接地循环噪声	93
1.12.4 现场测量法	58	2.7.4 导线噪声	94
1.12.5 声压法测量标准	59	2.7.5 信号调理噪声	94
1.13 基于声强法的声功率测量	61	2.7.6 滤波器噪声	95
1.13.1 基本原理	61	2.7.7 ADC 误差	95
1.13.2 离散点法	63	2.7.8 本底噪声	96
1.13.3 扫描法	64	2.7.9 计算误差	96
1.13.4 测量方法的差异	65	2.8 如何实现高质量的信号采集	96
1.14 基于声强法的声功率测量 实例	65	2.8.1 数据采集的目的	97
第2章 振动噪声信号采集	71	2.8.2 测量链的组成	97
2.1 振动传感器怎样选型	71	2.8.3 影响测量的因素	98
2.1.1 传感器分类	72	2.8.4 测量前的准备工作	98
2.1.2 常见加速度计类型	72	2.8.5 采样参数设置	99
2.1.3 选型指标	73	2.8.6 现场测试	100
2.1.4 选型原则	75	2.8.7 如何判断信号	101
2.2 传感器怎样安装才能满足测试 要求	76	2.9 脉冲数与转速测量的关系	103
2.2.1 安装位置	76	2.10 细说动态范围的各种定义	104
2.2.2 安装要求	77	第3章 振动噪声信号处理	108
2.3 信号 AC 和 DC 的区别	79	3.1 DSP 基本名词术语及关系	108
2.3.1 AC 定义和 DC 定义	80	3.1.1 时域名词术语	109
2.3.2 AC 耦合和 DC 耦合	81	3.1.2 频域名词术语	110
2.3.3 怎样选择耦合方式	82	3.1.3 各名词术语之间的关系	112
2.3.4 趋势项	83	3.2 信号处理若干名词解释	113
2.3.5 扭振信号	84	3.2.1 模拟信号与数字信号	113
2.4 采样频率多大才不会使信号幅值 明显失真	84	3.2.2 时域与频域	113
2.5 采样频率 2 倍和 2.56 倍的 区别	86	3.2.3 角度域与阶次域	114
2.5.1 混叠	86	3.2.4 传递函数与频响函数	114
		3.2.5 拉普拉斯域与傅里叶域	115
		3.2.6 物理空间与模态空间	115
		3.2.7 阶与阶次	116
		3.2.8 带宽与宽带	116

3.2.9 宽带与窄带	117	3.8.4 功率谱密度 PSD	143
3.2.10 谱线与线谱	117	3.8.5 能量谱 ESD	143
3.2.11 时间分辨率与频率分辨率	118	3.8.6 互谱 CrossPower	143
3.2.12 平均	118	3.8.7 频响函数 FRF	144
3.2.13 重叠与步长	118	3.8.8 相干函数	144
3.2.14 稳态与跟踪	119	3.8.9 Overall Level	145
3.2.15 自谱与互谱	119	3.9 频谱和线性自功率谱的区别	145
3.2.16 自相关与互相关	119	3.9.1 概念描述	145
3.2.17 相关分析与相干分析	119	3.9.2 能量平均与线性平均	146
3.2.18 阶次分析与阶次跟踪	120	3.9.3 对比能量平均和线性平均	147
3.3 计算信号的 RMS	120	3.9.4 结论	148
3.4 什么是泄漏	122	3.10 频谱真的不能线性平均吗	148
3.4.1 信号截断	122	3.11 谱线对随机信号和周期信号的 PSD 或自谱的影响	151
3.4.2 周期截断	122	3.11.1 讨论参数	151
3.4.3 非周期截断	123	3.11.2 啤酒和杯子	152
3.4.4 FFT 变换要求	124	3.11.3 随机信号的自谱与 PSD	152
3.4.5 泄漏	124	3.11.4 正弦信号的自谱与 PSD	153
3.4.6 窗函数	125	3.11.5 结论	154
3.5 什么是混叠	125	3.12 什么是 ZoomFFT	155
3.5.1 混叠的定义	126	3.12.1 傅里叶变换对	156
3.5.2 混叠实例	126	3.12.2 ZoomFFT 变换过程	156
3.5.3 怎样最小化混叠	127	第 4 章 实验模态测试	158
3.5.4 计算混叠后的频率	128	4.1 什么是固有频率	159
3.5.5 阶次混叠	129	4.1.1 固有频率的定义	159
3.6 什么是窗函数	130	4.1.2 影响因素	160
3.6.1 为什么要加窗函数	130	4.1.3 为什么存在多阶固有频率	160
3.6.2 窗函数的定义	130	4.1.4 基频和主频	161
3.6.3 窗函数的时频域特征	131	4.1.5 固有频率与共振频率的区别与 联系	162
3.6.4 加窗函数的原则	134	4.1.6 激励频率离固有频率多远可避免 共振	162
3.6.5 模态测试所用窗函数	134	4.1.7 固有频率测量	164
3.6.6 窗函数带来的影响	135	4.2 什么是模态分析	166
3.7 什么是 Overall Level	136	4.2.1 为什么要进行模态分析	166
3.7.1 OA 的定义	136	4.2.2 模态分析与振动分析的区别	168
3.7.2 怎样计算 OA	136	4.2.3 试验类型的分类	170
3.7.3 窗函数对 OA 的影响	138	4.2.4 试验方法的分类	170
3.7.4 OA 与阶次切片的区别	138	4.2.5 模态试验设计	173
3.8 各种谱函数的区别与应用	140	4.3 细说模态分析四大基本假设	173
3.8.1 Peak、RMS 和 Peak-Peak 定义	141		
3.8.2 频谱 Spectrum	141		
3.8.3 自谱 AutoPower	142		

4.3.1	线性假设	174	4.10.2	怎么评价影响	199
4.3.2	时不变性假设	174	4.10.3	传感器移动带来的影响	201
4.3.3	可观测性假设	175	4.11	什么是模态参考点	202
4.3.4	互易性假设	176	4.11.1	模态参考点的定义	202
4.4	试验模态测试分析一般流程	179	4.11.2	怎样选择模态参考点	203
4.4.1	预试验分析	179	4.11.3	多参考点的好处	204
4.4.2	建立模态模型	179	4.11.4	多参考点的布置原则	204
4.4.3	数据采集	180	4.11.5	参考点与驱动点的区别	205
4.4.4	参数识别	180	4.11.6	Test. Lab 中设置的 Reference 不一定是模态参考点	205
4.4.5	结果验证	181	4.12	模态分析之窗函数	206
4.5	模态边界条件: 自由边界与约束边界的差异	182	4.12.1	激振器法的窗函数	207
4.5.1	刚体运动与弹性运动	182	4.12.2	锤击法的窗函数	207
4.5.2	刚体模态与弹性模态	183	4.13	模态测试之数据采集	208
4.5.3	自由边界与约束边界的区别	183	4.13.1	采集的基本步骤	209
4.5.4	自由边界与约束边界的联系	185	4.13.2	预采集	210
4.5.5	边界支承刚度要求	186	4.13.3	正式采集	211
4.6	为什么要做自由模态分析	187	4.14	什么是锤击法	211
4.6.1	实际工作边界为自由边界	187	4.14.1	SRIT 和 MRIT	211
4.6.2	为供应商提自由模态指标	188	4.14.2	移动力锤与移动传感器的区别	212
4.6.3	校准数字模型	188	4.14.3	锤击法的主要步骤	213
4.6.4	确定合适的安装位置	188	4.15	锤击法测试注意事项	214
4.7	怎么选择激励方式	189	4.15.1	锤头选择与预触发	214
4.7.1	测试设置的差异	189	4.15.2	力谱衰减多少可接受	215
4.7.2	频响函数的差异	190	4.15.3	平均	216
4.7.3	优缺点总结	191	4.15.4	锤击手法	216
4.7.4	选择的原则	191	4.15.5	无泄漏测量	218
4.8	测量自由度的数目与分布	191	4.16	制动盘模态实例	219
4.8.1	测量自由度	192	4.16.1	什么是重根模态	220
4.8.2	测量自由度多少足够	192	4.16.2	制动盘测量方案	221
4.8.3	测点布置原则	194	4.16.3	制动盘模态分析结果	222
4.8.4	测点不合理的影响	195	4.16.4	试验模态与计算模态不一致	225
4.9	模态分析之几何模型	196	4.17	风机叶片模态实例	225
4.9.1	几何模型的作用	196	4.17.1	测试设置	226
4.9.2	如何生成几何模型	196	4.17.2	模态测点布置	227
4.9.3	测点方向与总体坐标不一致	197	4.17.3	模态分析结果	228
4.9.4	某些测点没有测量数据可用	198	4.18	什么是激振器法	231
4.10	评价传感器附加质量对模态频率的影响	199	4.18.1	激振器系统	231
4.10.1	实例说明	199	4.18.2	常见的激励信号	232
			4.18.3	激振器测量的 FRF	232

4.18.4 激振器法的注意事项	232	5.5.2 节线	271
4.19 常见的各种激励信号	233	5.5.3 节径与节圆	271
4.19.1 各种激励信号介绍	233	5.6 什么是极点	272
4.19.2 各种激励信号对比	238	5.6.1 极点的定义	272
4.19.3 激励信号的选择	238	5.6.2 极点的类型	274
4.20 激振器的安装	239	5.6.3 极点的性质	275
4.20.1 激振器支承方式	239	5.6.4 确定极点的方法	275
4.20.2 力传感器的安装	241	5.7 什么是模态振型	277
4.20.3 激励点的选择	242	5.7.1 模态中的单自由度系统	277
4.20.4 顶杆的影响	242	5.7.2 模态振型的定义	278
4.21 白车身模态试验注意事项	243	5.7.3 模态振型的性质	280
4.21.1 试验工具清单	243	5.7.4 模态振型的缩放方法	280
4.21.2 测量准备工作	245	5.8 实验模态数据分析的一般 流程	281
4.21.3 测量建议	246	5.8.1 模态数据选择	281
第5章 实验模态分析	248	5.8.2 确定分析频带	282
5.1 为什么只关心低阶模态	248	5.8.3 确定系统极点	282
5.2 什么是频响函数 FRF	250	5.8.4 计算模态振型	284
5.2.1 FRF 定义	251	5.8.5 结果验证	285
5.2.2 FRF 性质	252	5.9 什么是模态截断	285
5.2.3 FRF 形式	252	5.9.1 模态叠加计算响应	286
5.2.4 共振峰与反共振峰	254	5.9.2 结构动力学修改 SDM	287
5.2.5 单自由度 FRF	256	5.9.3 模态贡献量分析	287
5.2.6 驱动点 FRF 和跨点 FRF	256	5.10 什么是曲线拟合	288
5.2.7 为什么有的 FRF 有反共振峰, 有的没有	258	5.10.1 为什么要进行曲线拟合	288
5.2.8 力锤 FRF 与激振器 FRF 的区别	258	5.10.2 什么是曲线拟合	290
5.2.9 FRF 计算	259	5.11 各种常见的曲线拟合方法	291
5.2.10 FRF 估计类型	260	5.11.1 时域拟合与频域拟合	291
5.2.11 FRF 的影响因素	261	5.11.2 单自由度拟合与多自由度拟合	292
5.3 传递函数、频响函数和传递率的 区别	262	5.11.3 局部拟合与整体拟合	293
5.4 什么是动刚度	266	5.12 什么是稳态图	294
5.4.1 静刚度	267	5.12.1 稳态图的定义	294
5.4.2 单自由度动刚度	267	5.12.2 稳态图的计算过程	294
5.4.3 多自由度动刚度	268	5.12.3 残余项对稳态图的影响	296
5.4.4 源点动刚度	269	5.13 各种常见的模态指示函数	298
5.4.5 悬置动刚度	269	5.13.1 SUM 函数	299
5.4.6 支架动刚度	270	5.13.2 MIF 函数和 MMIF 函数	300
5.5 节点、节线、节径和节圆	270	5.13.3 CMIF 函数	301
5.5.1 节点	270	5.14 什么是模态验证	302
		5.14.1 振型动画验证	302

5.14.2	FRF 综合	302	5.15.2	几何模型的区别	307
5.14.3	MAC	303	5.15.3	求解理论的区别	308
5.14.4	模态参与	305	5.15.4	其他方面的区别	310
5.14.5	模态相位共线性	306	5.15.5	二者怎么对比	310
5.14.6	其他验证参数	306	5.15.6	二者的关联性	312
5.15	试验模态与计算模态的区别与联系	306	后记		314
5.15.1	自由度的区别	307	参考文献		319