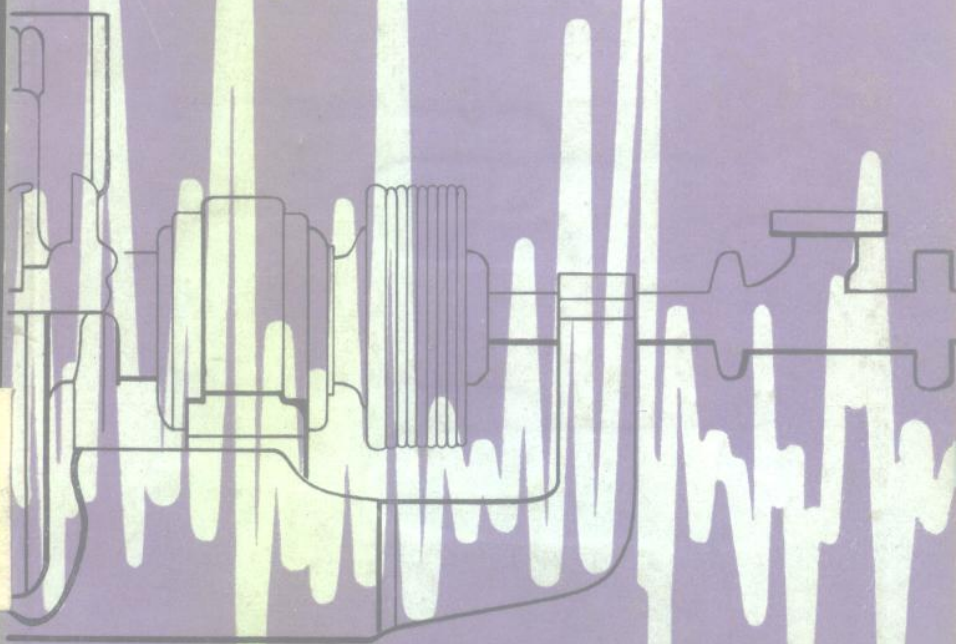


机器噪声和诊断学

(美) R. H. 莱昂 著



科学出版社

机器噪声和诊断学

(美) R. H. 莱昂 著

盛元生 顾伟豪 译
刘 岚 俞 播

盛元生 校

人民邮电出版社

内 容 简 介

本书以独创的方式将有关机器噪声和机器诊断学两个领域的内容结合到一起,为那些对设计低噪声机器或设计监控机器工作状态的诊断系统有兴趣的工程技术人员,提出了该两领域中所共有的振动、激励、传播和接收等方面的理论及其应用。

本书着重介绍了设计更安静(低噪声)的机器,而不是描述添加的和“拼凑”的噪声控制装置。本书还详述了用于分析振动特征的先进的信号处理技术。通过这些技术检测到的故障特征可显露出振动路径上的变化、结构中的功能失常或者工作参数的变化。

本书引用了现场和实验室的数据来表明所涉及的原理。作者尽可能地用物理概念来解释有关问题,避免过多的数学推导。

本书对于机械专业工程技术人员和高等院校师生、研究生均有参考价值。

R. H. Lyon

MACHINERY NOISE AND DIAGNOSTICS

Butterworths, 1987

机器噪声和诊断学

[美] R. H. 莱昂 著

盛元生 顾伟豪 译
刘 岚 俞 播

盛元生 校

责任编辑 陈德义

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1989年6月第一版 开本:850×1168 1/32

1989年6月第一次印刷 印张:10 5/8

印数:平1—1000 插页:插2

字数:272 000

ISBN 7-03-001196-1/TH·9 (平)

ISBN 7-03-001197-X/TH·10 (精)

定价:平 装 6.80 元
布脊精装 9.80 元

中 文 版 序

由盛元生教授等翻译的这本《机器噪声和诊断学》一书是我于1986年4月至5月访问沈阳所结出的丰硕成果。沈阳工业大学樊鹏教授于1983年访问美国马萨诸塞理工学院之后,邀请了我访问沈阳。马萨诸塞理工学院的休假年(从1985年9月至1986年6月)使得我这次访问成为可能。我于1986年4月到达中国北京,约一周后到达沈阳。我花了稍多于四周的时间在沈阳访问这个地区的大学和工厂,并讲授一些课程。

我沈阳的“家”就在樊鹏教授任教的工业大学,在那里,我讲授了一系列机器噪声与诊断学课程,参加者约50人,其中包括盛教授和刘岚女士。这些授课使用了经改编的本人在麻省理工学院和其它地方就这个主题讲授过多次的短课的讲义。在这些课程讲授过程中,盛教授和刘女士建议将该讲义译成中文。

从中国回到美国之后,我决定将授课讲义改编成书,并着手重写和审定材料。这项努力于1986年夏末完成,并选了 Butterworths 出版公司为英文版发行者。新的手稿复印件被送到中国进行翻译。译者工作得十分努力和迅速,因为希望在英文版于1987年夏出版后能尽快见到中译本。

在狄更斯的《唐培和儿子》一书中有这样一段话:“观念,就像幽灵,在它们将显示自己之前必然要被说到一些。”我常用这段话来强调在科学和技术方面对话的重要意义,我们也可把它应用于人民、文化和社会制度之间的更重要对话。在我们的过去,有着许许多多的幽灵需要加以阐明。如果这本译著能成为对话的一小部分,那末我的讲课和译者的努力将不仅仅是技术交流。

R.H. 莱昂

1987年7月 于马萨诸塞州,坎布里奇

译 者 的 话

本书是作者根据 1986 年来华讲学所用讲义改写而成。这本讲义在美国麻省理工学院和澳大利亚及希腊授课中用过多次，深受工程师和学生们欢迎。本书的内容特点已经在作者所写的“前言”中阐明，它从振动、噪声的产生、传播和辐射机制方面来进行机器噪声分析，又根据对信号的测量和分析目的把结构改进和诊断学与振动及噪声有机地结合起来。这样独特的内容体系为近年同类书籍中所仅见。

R. H. 莱昂博士是美国麻省理工学院 (MIT) 机械工程系教授。他的研究主要是在机械动力学、随机振动、声发生、声与结构交互作用、统计能量法应用、环境声传播等方面。早年他在能量统计分析 (ESA) 方面作了具有开创性的研究和贡献，近年又在诊断学、信号波形恢复方面进行了许多卓有成效的研究。莱昂教授是噪声和机械故障诊断领域中很有影响的知名专家。他是美国声学学会的出版董事会、执行理事会以及授奖委员会的成员，噪声控制和工程研究所的噪声控制和国际会议组织委员会成员，并担任美国工业和政府顾问。莱昂教授与咨询研究机构波尔特·布林奈克和组曼公司协作达 10 年，在此期间他完成了许多声学及振动方面的研究和咨询项目，其中许多是为 N A S A 和国防部进行的。

由于作者具有坚实的理论基础，丰富的研究实践经验和教学实践经验，所以书中在阐述物理概念的同时，能够注意联系实践，内容十分精湛。1987 年在北京召开的国际声学 (Internoise) 会议上，莱昂教授作了与本书内容有关的低噪声结构设计方面的学术报告，执行主席在大会总结时推荐了他的这本著作。相信，本书对我国读者必将有所裨益。

本书由盛元生、顾伟豪、刘岚、俞播、李应娟等同志翻译。最后全书由盛元生进行了精心的校核,但翻译中不当之处仍在所难免,希读者指正。

沈阳航空工业学院教授 盛元生

1988年2月

前 言

本书试图为工程技术人员提供关于动态力如何在机器中产生结构振动,以及结构振动如何在机器中传播并产生声辐射等概念。这些概念在机器噪声上的应用是明显的。如果知道了力怎样产生,那末改进机器结构就可能使引起音频频率的激励小些,因此产生较小的噪声。或者,通过改变关键部件的柔度或质量载荷来改进轴、轴承座、构架或机器的其它元件,以降低振动传播。最后,通过降低壳体或壁板的振幅或降低这些结构对周围空气的耦合来降低结构的声辐射。

应用本书所描述的原理可使设计人员研制出低噪声的产品,或者改进现有的机器以使它们噪声更低。没有受过声学培训的工程人员对声辐射只带走极少量的功率,典型的情况只有几毫瓦,常常感到十分惊奇。并且,机器结构在音频频率(200—5000Hz)上表现出的差异要比它们在各工作转速上的差异还大。因此,一个似乎是刚硬而又沉重的壳体会在音频频率下共振而成为良好的声辐射体。本书试图帮助工程技术人员对这些过程有所了解,并能预测结构变化对于振动传播和声辐射的影响。

读者将发现,本书与许多噪声控制书籍不同之处在于本书中没有讨论附加的和“拼凑”的噪声控制装置,诸如包覆、消声器、隔离器等。我们的出发点是设计出噪声小的机器。对于已经在用的机器常常只能借助于附加的装置来降低噪声。关于噪声控制装置方面的书籍可以买到。

本书第二项主要任务是借助机器产生的振动或信号来了解其工作状态。机构力产生的振动可以显露机构本身的故障或振动路径的某些变化。显露的故障可能是实际的功能失常或者仅仅是工作参数的改变。在后一种情况,工作状态可由控制系统来改变,但

如检测出故障，或许需要关停机器。振动的路径方面的变化意味着结构元件需要更换或修理。

在机构或结构中，振动对于信号变化的这种应用称之为“机器诊断学”。它与机器噪声问题在概念上密切相关，同属于振动生成和传播领域。如果说声波用作诊断信号，那末声发射在诊断学中也是重要的。但是诊断学和噪声之间最大的不同是，诊断学一般与相当宽的频率范围有关，且所接受的信号要用电子方法进行处理而不是去听。为此，本书强调各种为恢复重要的动态特征所设计的信号处理技术。

本书试图为那些想要为某具体机器研制一个诊断系统或者要了解这个系统赖以工作的基础的工程人员提供帮助，而不打算详细介绍市场上出售的这些设备的各项性能。这类信息可以容易地从制造厂的小册子和技术讲座中获得。通过对诊断原理的强调，我们将向读者介绍现代诊断系统是怎样揭示机器的毛病的，并指出诊断系统在将来还能做些什么。

本书作者曾在美国麻省理工学院（MIT）以及澳大利亚、中国和希腊对在职工程人员讲授“机器噪声和诊断学”短课，本书就是在该课程讲义的基础上写成的。课程讲义最初根据讲课录音带整理出来，尽管经许多次修订，书中仍保留了谈话的形式。这本书特别适于自学。本讲义也曾在麻省理工学院用作研究生学习一整个学期的课程。它也可用作大学高年级学生及研究生的教科书。

大体在基本理论水平上涉及到本书所讨论主题的任何一本书都会包含有很多的数学内容。本人试图从物理角度上进行一系列论述，以避免过多的数学推导。此外，还提出了大量实验数据，从而使论述得到实例的支持。我希望有实践志向的读者将从这种综合的介绍中获益，并相信理论确实会在他们的工作中起着重要的作用。有许多人对噪声和诊断学的理论更感兴趣，我也希望他们会发现本书在他们将理论联系实际的过程中有所裨益。

但是，在任何领域中总有一些具有重要应用的实践不能完全

地从基本原理上加以证明。这些实践是这个领域的“艺术”，诊断学工作中也有着大量的艺术。在本书中我们将涉及一些这种艺术，但是要容纳很多这方面内容，就难免不使本书成为“如此、这般进行，便能工作”之类对一系列具体事例的详尽的描述。因为从这样一些例子中很难得出普遍的结论，所以本书对这些材料的使用是有限的。

目 录

中文版序

译者的话

前言

第一章 机器噪声与诊断学引言	1
1.1 机器噪声与诊断学之间的关系	1
1.2 降噪与诊断学目标的比较	2
1.3 降噪方案的一般特性	3
1.4 降噪设计——若干原理	5
1.5 将降噪结合于设计过程	8
1.6 成本评估	10
1.7 诊断系统设计的方法	12
1.8 源形态或“信号特征”的提取	13
1.9 故障的检测与分类	14
1.10 机器控制使用诊断学信号	14
1.11 判定分析和分类系统	15
第二章 振源	18
2.1 以振动发生器为源	18
2.2 不平衡在机器中激励的振动	18
2.3 往复式不平衡	19
2.4 以碰撞为振源	25
2.5 机械图解	31
2.6 活塞击缸	34
2.7 曲柄-滑块振动	38
2.8 位移源:被齿轮、凸轮以及类似的机器部件中的尺寸误差和其它误差所激励	39
2.9 波动的磁场力产生噪声	43
2.10 以柴油机燃烧压力为源	46

2.11 以紊流为振源.....	48
第三章 结构的激励响应.....	54
3.1 结构响应中的波动.....	54
3.2 纵向波动.....	56
3.3 有限杆的导纳.....	61
3.4 结构阻尼.....	63
3.5 弯曲波.....	66
3.6 弯曲波中功率流的测量.....	69
3.7 有限弯曲梁的共振.....	70
3.8 二维结构中的模态计数.....	73
3.9 曲率对模态密度的影响.....	75
3.10 某些机器结构的模态密度.....	77
3.11 响应函数与互易性.....	79
3.12 单自由度共振器的响应.....	80
3.13 不平衡量的结构响应.....	83
3.14 有限结构的模态响应.....	86
3.15 激励点平均导纳.....	88
3.16 传递函数.....	90
3.17 机器结构中力的传播——互易性的应用.....	92
3.18 柔性结构上的隔振器性能.....	94
第四章 机器结构中的振动传播.....	96
4.1 引言.....	96
4.2 用两端口法分析振动传播.....	96
4.3 系统部件的结合.....	103
4.4 结合关系应用于柴油发动机上.....	105
4.5 通过结构接合处的噪声传播.....	106
4.6 传播路线“有限元”分析.....	108
4.7 统计能量分析.....	112
4.8 耦合损耗因子.....	116
4.9 船舶结构中噪声传播实例.....	119
4.10 计算和实验结果的对比.....	122
4.11 组织振动数据时统计能量分析的应用.....	127
4.12 噪声传播估算中的误差.....	127

• x •

第五章	机器辐射的声	129
5.1	引言	129
5.2	平面波辐射及辐射效率	129
5.3	几何辐射效率: 来自振动球体的声	132
5.4	其它基本声源	134
5.5	碰撞零件的声辐射	137
5.6	声导纳率及声强	141
5.7	运用声强测量声功率	143
5.8	混响室声功率	145
5.9	运用互易性确定声辐射	149
5.10	用小混响室测量产品声	151
5.11	结构表面的声辐射	155
5.12	结构弯曲波的辐射	158
5.13	低于临界频率的辐射	161
5.14	声辐射的数值方法	167
第六章	应用信号能的诊断学	169
6.1	引言	169
6.2	旋转机器振动的能量对时间分析	169
6.3	应用高频共振的包络线法	173
6.4	根据噪声数据确定齿轮传动误差	175
6.5	在谱诊断学中应用功率倒频谱	179
6.6	卧式离心机的诊断	181
6.7	阀与阀座碰撞的诊断法	185
6.8	气阀共振的分析	188
6.9	反滤波器的应用	189
6.10	振动传播中的误差	192
6.11	传递函数量值的模化随机性	194
第七章	应用信号相位的诊断法	201
7.1	引言	201
7.2	气缸压力波形恢复	201
7.3	波形恢复的倒频谱分析	209
7.4	结构传递函数的相位特性	216
7.5	输入函数和传递函数的相位	218

7.6	传递函数的零点和极点	220
7.7	激励点系统函数	222
7.8	一维声学管	223
7.9	二维系统相位	225
7.10	相移的实验研究	228
7.11	结构传递函数的相位变易性	230
7.12	非最小相位系统及倒频谱分析	233
第八章	诊断学中的先进课题	236
8.1	引言	236
8.2	同时工作的源的波形恢复	236
8.3	诊断系统的设计和应用	244
8.4	运用标准正交函数的系统鉴别	249
附录 A	有关的数学概念	255
A.1	引言	255
A.2	复变量	255
A.3	周期函数: 傅里叶级数	259
A.4	非周期函数: 傅里叶积分变换	263
A.5	傅里叶级数和傅里叶积分变换的关系	265
A.6	序列分析	268
A.7	频率分析	270
A.8	采样公式	271
A.9	频域中的防混淆	272
A.10	Z 变换	274
A.11	Z 逆变换	277
A.12	离散傅里叶变换	277
A.13	希尔伯特变换	279
A.14	功率频谱和倒频谱	281
附录 B	机器噪声和振动的标准	284
B.1	引言	284
B.2	听力损失	286
B.3	机器噪声的响度	290
B.4	工作场所语言交流的标准	294
B.5	混合噪声标准	297

B.6	基于感受质量的标准.....	299
B.7	振动标准.....	304
附录 C	按实测数据确定传递函数.....	306
C.1	引言.....	306
C.2	根据测得数据构成反滤波器.....	306
参考文献		310
索引		311

第一章 机器噪声与诊断学引言

1.1 机器噪声与诊断学之间的关系

许多公司或作为产品设计活动或为了工厂环境的原因而进行机器降噪。从事这项工作的工程师们都在声学方面受到培训。因为他们感兴趣的噪声的频率比机器运转频率高得多，他们感兴趣的振动也是在高频下的振动。降噪工程师们受有不同的教育，但以电气专业、机械专业和物理专业为多。他们涉及碰撞、齿轮啮合、结构挠曲、声辐射和声传播最多。

振动监控也被许多公司用来预测机器是否需要修理。振动信号特征经常是频谱，它包含机器工作转速的若干个不同倍数，以显示不平衡、不同轴、轴承环缺陷以及诸如图 1.1 所示的故障。这些问题所涉及的频率比噪声问题的要低得多。设计和使用诊断系统的工程师们常常具有机器动力学和振动的底子。他们所受教育是在机械设计或工程力学方面，因而他们和降噪工程师们之间没有什么共同语言。

在降噪和诊断两方面，目前的趋势是，即使这两部分人员各自保留截然不同的目标，但是在方法和兴趣方面却越来越紧密地靠拢。这是对教育的挑战——为实践工程师和那些在校学习的人讲授这些领域间共同的理论基础。

机构在机器内工作时产生导致振动的力，这些振动通过机器传播并引起外表面振动和声辐射。不管是把声音或振动作为噪声问题来关心或在诊断系统中用于故障检测，这些激励、传播和辐射的特征都是重要的。噪声问题和诊断在这些基本方面的相似性是明显的。

诊断和噪声分析两者都用激励源的功率谱作为有价值的信

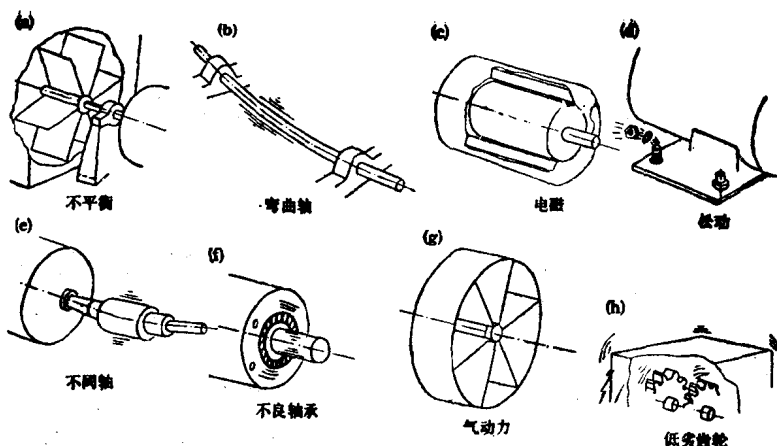


图 1.1 机器的各种各样故障和工作条件能产生振动谱，它们作为故障信号特征是有用的。大多数实际系统是用于旋转机器，但新的先进系统是用于往复的和冲击的机构

号。诊断通常使用了转动机械的线谱来检测其不平衡、不同轴和其它故障。因为对应于轴(频)倍数的各谱线之相对强度是重要的，这种振动传播路线对频率的依赖关系也是重要的。

宽频带、倍频或三分之一倍频程的频谱在噪声分析中是特别的重要，它们也可用于诊断。例如，在轴承中碰撞和粗糙度产生宽频带激励，在这些高频频带中简单的能量检测能指示出故障以及在每转一次碰撞中出现的跳动；这种跳动将引起在低频为线谱向高频为连续谱的转变。

1.2 降噪与诊断学目标的比较

诊断与降噪之间最大的差别在于它们各自不同的目标。机器工作正常而无故障时也可能有很大的噪声，而形成了重大故障的机器也可能安静地工作。对于诊断可能是十分重要的信号特征(如相位)在噪声问题中常被忽略。语音频带的信号能量在噪声问题中显得如此重要，而在诊断中却没有特别的地位。

降噪计划通常包括下面的一个或几个目标:

- 降低危害性(如听力损失或高血压);
- 降低功能的损伤(如语言干扰或任务执行);
- 增大声音可接受性(如满足消费者的要求)和有关的目标;
- 提高产品形象。

后两个目标对消费品制造厂往往更为重要,且代表了降噪工程可以为产品设计做较多工作的领域。为了帮助制造厂达到这些目标,在产品声学评价中要求采用新的方法,从A加权的强度测量改变为非常适于具体产品的评价方法,如附录B中所讨论。

任何诊断的目标应包括下面一个或更多的内容:在机器运转中检测故障,识别故障的性质和预测机器运转中的事故。后者有时称之为预报。除故障之外,诊断系统也可用来确定机器的某些工作特性,从而提供对机器运转进行控制或调整的有用数据。

这些诊断的目标常被从正面来理解,如果从相反的方面即按出现的差错来描述这些目标或者更为恰当。在诊断中可能造成两种差错:

误差类型 I——没有故障,而报告为故障状态。

误差类型 II——有故障,而报告为安全状态。

根据具体情况,对于造成每种差错的相对代价可能十分不同。假如不必要中断生产过程,那末类型 I 的误差可能代价很高;而在安全系统中类型 II 的误差会有特别的破坏性。在 1.11 节中要讨论这些误差对系统设计方面的关系。

1.3 降噪方案的一般特性

根据某些教科书,机器噪声控制包括缠绕或包封有噪声的零件,在排气管装消声器,在结构的内部和表面加阻尼以及将机器安置在弹簧上等。很容易理解机器用户或制造厂不会对这样的手段产生好感。这样的“拼凑”是一种非生产的额外费用,它们不但降低可达性和可见性而且还可带来危害安全和降低可靠性的结