



内燃机科技丛书

内燃机噪声振动 与控制

中国内燃机学会 组编
吴炎庭 袁卫平 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



内燃机科技丛书

内燃机噪声振动与控制

中国内燃机学会 组编

主 编 吴炎庭 袁卫平

副主编 静 波 孙蕙庆

参 编 陈之炎 钱人一 周岳康

主 审 严济宽 杨庆佛



机械工业出版社

本书简要介绍了内燃机噪声、振动及其测试技术的基本理论。在分析了内燃机主要噪声源、振动源的基础上,结合作者从事内燃机噪声振动工作的实践,提出了降低内燃机噪声、振动的相应措施。本书内容既包括内燃机气体动力性噪声、燃烧噪声、机械噪声、整机振动、扭转振动及噪声振动测量传感器、测量仪器等经典基础知识,又包括内燃机结构噪声辐射、模态分析在内燃机中的应用、有源振动控制和先进的测试、信息分析等国内外最新科学技术。本书以大量成功的工程实例,系统地阐述了低噪声内燃机设计、内燃机减振和噪声振动测试分析的理论。

本书主要面向从事汽车、内燃机、工程机械的工程技术人员,也可作为高等院校相关专业的大学生、研究生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

内燃机噪声振动与控制/吴炎庭,袁卫平主编.—北京:机械工业出版社,2005.3

(内燃机科技丛书)

ISBN 7-111-16141-6

I.内… II.①吴…②袁… III.内燃机-噪声控制
IV.TK401

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第011354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 赵爱宁 责任编辑:冯 铨 版式设计:冉晓华
责任校对:樊钟英 封面设计:姚 毅 责任印制:陶 湛
北京诚信伟业印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行
2005年5月第1版·第1次印刷
850mm×1168mm^{1/32}·12.375印张·328千字
定价:32.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294
封面无防伪标均为盗版

中国内燃机学会“内燃机科技丛书”

编辑委员会成员名单

(按姓氏笔划排序)

名誉主任	何光远			
主任	张小虞			
副主任	干凤琪	刘洪林	阳树毅	李 骏
	俞银贵	崔殿国	景平利	蓝祖佑
	蒋德明			
委员	马京夫	王建明	李颜章	朱厚国
	刘永长	闫麟角	孙少军	朴甲哲
	吴培基	张仪萌	何建光	何瑞祥
	李树生	肖正海	苏万华	卓 斌
	范 仲	周建能	苑 发	林 松
	赵建仁	唐克林	奚国伟	钱恒荣
	高宗英	黄 松		

编辑部主任 阳树毅(兼)

编辑部副主任 王士杰 周龙保 陶陆根 蒲启南

序

“内燃机科技丛书”经作者、编审人员、编辑部及编委会成员两年来的共同努力与广大读者见面了。这套“丛书”从今天开始陆续出版并计划于 2000 年内完成。“丛书”的出版是我国内燃机科技界的一件好事，将对内燃机行业的科技进步起重要的推动作用。

党的十五大提出了我国 21 世纪经济和社会发展的宏伟蓝图，提出了在新世纪实施科教兴国战略、加快科技发展的重大目标和任务。我国科技界肩负着重大的历史使命，要求广大科技工作者把握当代世界科技发展的趋势，走在科技兴国的前列，担当起推动科技进步，解放和发展生产力的重任。随着科学技术的发展及许多高新技术在内燃机上的推广应用，内燃机的新技术、新结构、新原理、新材料和新工艺层出不穷，技术水平有了飞速发展和提高。为了担负起历史赋予的重任，迎接新世纪的挑战，中国内燃机学会决定组织编撰一套“内燃机科技丛书”，以推动我国内燃机工业发展和技术进步，并适应培养内燃机界高层次技术人材的需要。

“内燃机科技丛书”共 14 本，选题涉及内燃机工业发展技术进步的一些重要领域，是以单行本出版发行的专题性内燃机工程读物。“丛书”面向 21 世纪，内容新、起点高，不但有最新的专业理论研究，而且有比较成熟的应用技术成果，体现了科学性、先进性和实用性；反映了内燃机设计制造、开发研究诸方面国内外最新科技成就、动向及经验，是一套我国内燃机行业的重要图书。

“丛书”读者对象主要是我国内燃机行业大专以上文化水平的工程技术人员，同时也可作为高等学校相关专业方向的选修课教材或教学参考书。这既能帮助读者拓宽视野、掌握动向、提高理论水平，又能在工程实际中应用，有助于读者提高分析和解决问题的能力。

为保证“丛书”的编写质量，中国内燃机学会组建了“丛书”编委会和编辑部，领导和具体组织“丛书”的编写工作，研究确定了“丛书”书目，组织审定了编撰大纲。编委会根据我国机械工业方针任务及广大用户读者的要求，择优遴选国内内燃机界有相当工作基础的单位和专家、教授、学者，请他们承担编写任务，聘为“丛书”的主编和主审。

由于“丛书”编辑出版时间仓促，疏漏和不足之处在所难免，欢迎广大读者指正。

中国内燃机学会理事长

“内燃机科技丛书”编委员会主任 李守仁

1999年6月

前 言

内燃机作为广泛应用的基本动力，其特殊的结构形式注定要产生振动并激励噪声。随着内燃机向高速、大功率、高效率方向发展，噪声、振动问题将更为突出，并直接关系到机器的使用寿命、工作效率、运营安全和环境污染。内燃机的噪声已成为国内外一项强制性指标，对内燃机噪声、振动的控制实为当务之急。

20世纪80年代以来，许多工程技术人员已对内燃机的噪声、振动问题进行了深入的研究，有限元法、边界元法、统计能量法、模态分析等高新技术在内燃机噪声、振动的理论研究和测试分析中得到了应用，为内燃机的减振降噪开创了良好的前景，取得了丰硕的成果。遵循中国内燃机学会“内燃机科技丛书”编委会对编写丛书“准、新、全、专、深”五字原则要求，书中除了介绍噪声、振动及其测试技术的基本理论外，着重分析了内燃机的噪声声源、振动振源及噪声振动控制措施，介绍了国内外内燃机噪声、振动研究的高新技术，并结合作者在“内燃机噪声、振动”科研工作的实践，列入了相应研究成果，分析了低噪声内燃机设计、内燃机减振和噪声振动测试的实例。全书从基础理论、设计计算、测试分析、评定准则到具体的减振降噪对策，形成了一个内燃机噪声、振动与控制的有机整体。

根据编写大纲审定会和有关专家的意见，对本书原来拟订的大纲进行了多次修改，删去了过多的基本理论叙述，调整了章节层次，形成了本书，内容包括内燃机噪声、振动控制及测试技术三大部分。它们之间既相互关联又相对独立，以适应内燃机工程技术人员以及高等院校相关专业大学生、研究生工作和学习的需

要，并更具针对性。

本书第1章“内燃机噪声与控制”由袁卫平、钱人一编写；第2章“内燃机振动与控制”由吴炎庭、陈之炎、周岳康编写；第3章“噪声、振动测试技术”由静波、孙蕙庆编写。

上海交通大学严济宽教授、太原理工大学杨庆佛教授对本书稿进行了认真仔细的审阅，并提出了许多宝贵的意见；还得到了上海内燃机研究所叶怀汉高级工程师、刘宝华先生的大力帮助。在此，一并向他们表示衷心的感谢。限于水平，错误不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

序

前言

第 1 章 内燃机噪声与控制	1
1.1 噪声的基本性质	1
1.1.1 噪声的产生和传播特性	1
1.1.2 噪声对人体的影响及噪声控制的一般原则	9
1.2 内燃机噪声	20
1.2.1 内燃机声源及其分类	20
1.2.2 内燃机噪声预测	22
1.2.3 内燃机噪声标准	23
1.3 内燃机噪声控制	24
1.3.1 内燃机气体动力性噪声控制	24
1.3.2 内燃机燃烧噪声与控制	49
1.3.3 内燃机机械噪声与控制	85
1.3.4 内燃机结构表面辐射噪声与控制	110
1.4 内燃机降低噪声实例	137
1.4.1 单缸内燃机降噪实例	137
1.4.2 多缸内燃机降噪实例	138
第 2 章 内燃机振动与控制	141
2.1 机械振动基础知识	141
2.1.1 概述	141
2.1.2 振动系统	144
2.1.3 自由振动	146
2.1.4 受迫振动	157
2.2 内燃机激振力	169
2.2.1 单缸内燃机激振力	170

2.2.2	单列式多缸内燃机激振力	180
2.2.3	主副连杆式 V 形单排内燃机激振力	186
2.2.4	其他振动激励源	193
2.3	内燃机振动及其控制	193
2.3.1	内燃机装置整机振动	195
2.3.2	内燃机装置隔振设计	213
2.3.3	非刚性基础的振动隔离	232
2.3.4	振动主动控制简介	234
2.4	内燃机轴系扭转振动与减振	239
2.4.1	概述	239
2.4.2	当量系统	240
2.4.3	自由振动计算	245
2.4.4	受迫振动计算	252
2.4.5	单缸熄火时扭振计算	261
2.4.6	扭振减振器设计计算	264
2.5	模态分析及其在内燃机中的应用	275
2.5.1	模态分析概述	275
2.5.2	模态分析基本理论	277
2.5.3	模态分析试验方法	281
2.5.4	模态分析在内燃机中的应用	284
2.6	内燃机振动评定	293
2.6.1	整机振动评定	293
2.6.2	轴系扭转振动评定	295
第 3 章	噪声、振动测试技术	300
3.1	测量传感器及测量仪器	300
3.1.1	测量传感器	300
3.1.2	测量仪器	318
3.1.3	记录仪	324
3.2	信息分析技术	326
3.2.1	数据采集	326
3.2.2	FFT 技术	334
3.2.3	声强测量分析	343

3.2.4 利用噪声振动测试分析进行内燃机故障诊断	346
3.3 振动测试工程实例	349
3.3.1 测试系统的标定	349
3.3.2 编制测试大纲	354
3.3.3 工程实例	355
附录 内燃机噪声测量不确定度	371
参考文献	383

第 1 章 内燃机噪声与控制

1.1 噪声的基本性质

1.1.1 噪声的产生和传播特性

1.1.1.1 声的产生

用小锤敲一下音叉，音叉就产生振动。音叉振动时扰动了空气，这种扰动在空气中以疏密波的形式传播，就形成声。可见声是弹性媒质传播的机械振动和波。上例中声音通过空气这一媒质传播，便称作空气声。如果声在液态或固态媒质中或其表面上传播，便称作液体声或固体声。

如果声波传播的方向各点相同，波前为一平面，则称为平面声波；如果声波由一点向四面八方均匀地传播，波前为一球面，则称为球面声波。成线分布的声源发出的声波称为柱面声波。

本书介绍的许多内容均以平面声波为前提。但在球面声波和柱面声波的场合，只要离声源足够远，都可以近似地看作为平面声波并使用平面声波情况下得出的结论。

1.1.1.2 声的特性参数

1. 频率和周期

每秒钟声振动的次数称为声的频率，记作 f ，单位为 Hz。人耳能听到的声，其频率范围是 20~20000Hz。低于 20Hz 的声称为次声，高于 20000Hz 的声称为超声。人耳对于 3000Hz 左右的声感觉最灵敏；对低于 63Hz 和高于 16000Hz 的声，即使勉强听得见，反应也很不灵敏。所以，在噪声控制领域内，主要对 63~16000Hz 的声感兴趣。

周期是一次声振动所经历的时间，记作 T ，单位为 s。周期与频率互为倒数，即

$$T = 1/f \quad (1-1)$$

2. 波长和声速

在一个声振动周期 T 内，声波传播的距离叫做波长，记作 λ ，单位为 m。

声速是声波在媒质中传播的速度，记作 c ，单位为 m/s。根据初等热力学，声在气体媒质中的传播速度为

$$c = \sqrt{\gamma RT} \quad (1-2)$$

式中， γ 为比热容比，即比定压热容 c_p 与比定容热容 c_v 之比； R 为气体常数； T 为热力学温度，单位为 K。

对于空气， $\gamma=1.4$ ， $R=287\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，代入式 (1-2) 得

$$c = 20.05 \sqrt{T} \quad (1-3)$$

由此可算出 15°C 时空气中的声速为 340m/s 。

频率 f 、波长 λ 与声速 c 之间有如下关系式：

$$c = f\lambda \quad (1-4)$$

假定声在 15°C 的空气中传播，便可根据式 (1-4) 算出一些有代表性的声波频率所对应的波长，如表1-1所示。

表 1-1 一些声波的频率与波长

频率 f/Hz	实 例	波长 λ/m
100	声学工程中的下限频率	3.4
440	音乐中的标准音	0.77
1000	声学工程中的标准参考频率	0.34
4000	钢琴最高阶音	0.085

声在液态和固态媒质中的传播速度通常比在空气中的传播速度大得多。表 1-2 列出了室温下某些常用媒质的声速近似值。

由于声速不同，同样频率的声在固体和在空气中传播的波长大不相同。例如，声在钢中的速度约为在空气中的 15.1 倍，所以同样频率的声在钢中的波长为在空气中的 15.1 倍。

表 1-2 室温下 (20℃) 某些常用媒质的声速

媒 质	声 速/m·s ⁻¹	媒 质	声 速/m·s ⁻¹
空气	344	铅	1219
水	1372	钢	5182
混凝土	3048	硬木	4267
玻璃	3658	软木	3353
铁	5182		

3. 质点振动速度

媒质分子在声传播过程中作往复运动的速度叫做质点振动速度，记作 v ，单位为 m/s 。质点振动速度有别于声速。声传播过程中，质点在平衡位置附近振动。这种振动被传播开去，而质点振动的平衡位置却保持原地不动。

4. 声压及其瞬时值、平均值和有效值

对于空气等流体媒质，设体积元内媒质处于平衡状态时的静压力为 P_0 ，在声波作用下的压力为 P ，则压力增量

$$p = P - P_0 \quad (1-5)$$

叫做声压。声压与压力的单位均为 Pa 。

声压瞬时值记作 $p(t)$ 。假定讨论的是纯音，则

$$p(t) = p_m \cos(\omega t + \theta) \quad (1-6)$$

式中， p_m 为幅值，即最大值； ω 为圆频率， $\omega = 2\pi f$ 。

声压的平均值为

$$p_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (1-7)$$

对于纯音，其平均值为零。幸好人耳听到的声音强弱不是由平均值的大小决定的，否则将听不到任何纯音。声音的强弱是由声压有效值的大小决定的。有效值就是均方根值，记作 p_{rms} ，对周期函数，有

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (1-8)$$

对于纯音, $p_{\text{rms}} = p_m / \sqrt{2}$ 。

通常情况下, 如果不加说明, 所谓声压, 就是指有效声压。

声压有效值(即均方根值)的平方称作均方值。

5. 声强

单位时间内某一点通过与某一方向垂直的单位面积的平均声能叫声强, 记作 I , 单位为 W/m^2 。

显然, 谈论声强而不提所论方向, 是毫无意义的。

迄今还没有能够直接测量声强的传感器。通常用两个声压传感器通过信号分析及处理来间接测量声强。

6. 声功率

声功率是声源以空气声的形式辐射的功率, 记作 W , 单位是 W 。

声功率不能直接测量, 通常根据声压和测量面等间接测量。

声压是就声场中某一点而论的。声强是就声场中某一点和某一方向而论的。而声功率是就某一声源而论的。谈论声场中某一点的声功率是毫无意义的; 或者, 谈论某声源的声压而不言明哪一点, 也是毫无意义的。

1.1.1.3 平面声波的基本方程

1. 平面声波的传播方程

假定媒质是没有粘滞性的理想流体, 这种理想流体是均匀的, 不受外力干扰时是静止的。此时声的传播就是媒质的疏密交替变化过程, 而且声的传播过程中没有媒质内部的能量损耗。

这里只讨论平面声波的传播。媒质质点相对于平衡位置的位移可用下式表述:

$$\zeta(t) = A \sin \omega t \quad (1-9)$$

式中, A 为振幅, ω 为简谐振动的圆频率。

设当 $t=0$ 时, 媒质质点位移为零, 即处于平衡位置。将平衡位置定为 x 轴的原点。媒质质点位移引起媒质的疏密变化, 这种疏密变化沿 x 轴向传播出去, 形成平面声波。平面声波从平衡位置传到坐标为 x 处所经历的时间为 x/c 。 c 为声速。所以

该处在时刻 t 的质点位移 $\xi(t, x)$ 实际上等于在时间 x/c 之前原点的质点位移, 即

$$\xi(t, x) = A \sin(\omega t - x/c) = A \sin(\omega t - kx) \quad (1-10)$$

式中

$$k = \omega/c = 2\pi f/c = 2\pi/\lambda \quad (1-11)$$

称作波数。该处在时刻 t 的质点振动速度 v 和加速度 a 分别为

$$v(t, x) = A\omega \cos(\omega t - kx) \quad (1-12)$$

和

$$a(t, x) = -A\omega^2 \sin(\omega t - kx) \quad (1-13)$$

2. 平面声波的运动方程

理想流体媒质中平面声波的质点振动速度与声压的关系为

$$p(t, x) = \rho_0 c v(t, x) \quad (1-14)$$

式中, ρ_0 为流体媒质处在平衡状态时的密度; $\rho_0 c$ 称为声特性阻抗, 记作 Z_c , 单位为 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 。在海平面上, 有 $\rho_0 c \approx 406 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 。

3. 平面声波的连续性方程

理想流体媒质中平面声波的质点振动速度与流体媒质密度的关系为

$$\frac{\Delta \rho(t, x)}{\rho_0} = \frac{v(t, x)}{c} \quad (1-15)$$

式中的 $\Delta \rho(t, x)$ 是由平面声波的传播引起的媒质密度相对于平衡状态媒质密度 ρ_0 的增量, 也是时间与地点的函数。

4. 平面声波的物态方程

理想气体媒质中平面声波的声压与媒质密度的关系为

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1-16)$$

5. 平面声波中声强与声压的关系

声强是矢量。对于一个稳态的各态历经的声信号, 声强可表作某一点的瞬时声压 $p(t)$ 和该点瞬时质点振动速度在所论方向上投影 $v(t)$ 的乘积的时间平均值

$$I = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p(t)v(t)dt \quad (1-17)$$

在流体媒质的平面声波中，式 (1-14) 成立，代入上式得

$$I = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \frac{p(t)}{\rho_0 c} dt = \frac{p_{rms}^2}{\rho_0 c} \quad (1-18)$$

6. 平面声波中声能密度与声压的关系

考虑平面声波在理想气体媒质中传播的情况。设平面声波沿 x 轴传播，在 Δt 时间内传播的距离为 Δx 。考察垂直于 x 轴的平面 S 与 Δx 构成的长方体元。设该长方体元的平均声能密度为 δ ，则长方体元内的总声能为

$$\Delta E = \delta S \Delta x \quad (1-19)$$

根据前述假设， ΔE 在 Δt 时间内穿过垂直于 x 轴的平面 S ，所以声强为

$$I = \frac{\Delta E}{S \Delta t} = \delta \frac{\Delta x}{\Delta t} = \delta c \quad (1-20)$$

将此式代入式 (1-18) 得

$$\delta = \frac{p_{rms}^2}{\rho_0 c^2} \quad (1-21)$$

1.1.1.4 级和分贝

从刚刚听得出的声强到人耳可能接触到的最大声强，数值相差 10^{12} 倍以上。在这样广阔的数值范围内描述其大小极不方便。所以用级来描述声的强弱。级包括声压级、声强级和声功率级等，级的单位为分贝 (dB)。

1. 声压级和声强级

声压级的定义为

$$L_p = 20 \lg(p/p_0) \quad (1-22)$$

式中， L_p 为对应于声压 p 的声压级， $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ ，为基准声压。

声强级的定义为

$$L_I = 10 \lg(I/I_0) \quad (1-23)$$

式中， L_I 为对应于声强 I 的声强级， $I_0 = 10^{-12} \text{W/m}^2$ ，为基准