

清华大学学术专著

声强技术 及其在汽车工程中的应用

蒋孝煜 连小珉



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

声 强 技 术

及其在汽车工程中的应用

蒋孝煜 连小珉

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书从声学的基本理论出发,全面阐述了声强测量的原理和方法;详细介绍了声强柔性测量系统的硬件组成和数字计算;对国内外声强技术应用的各个方面,尤其是在汽车噪声控制中的应用作了充分的介绍。

本书可供有关的专业技术人员阅读,也可作为高等学校相关课程的参考教材。

书 名: 声强技术及其在汽车工程中的应用

作 者: 蒋孝煜 连小珉

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者: 北京市人民文学印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 850×1168 1/32 印张: 8 字数: 207 千字

版 次: 2001 年 6 月第 1 版 2001 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-04507-0/TH·93

印 数: 0001~2500

定 价: 26.00 元

前 言

声强技术在 20 世纪 70 与 80 年代之交随着电子及信号处理技术的发展而逐渐成熟,已成为声学领域中一种重要的测量技术,尤其在声功率测定及主噪声源识别方面有其独到的优点。

英国的 F. J. Fahy 于 1989 年发表了《Sound Intensity》第一本专著。至今 10 年过去了,声强技术有了很大发展。国际标准化组织 ISO 于 1993 年及 1996 年颁布了用声强法测定声功率级的标准方法。使广大使用者有了共同的标准,并取得了很多新的成果。

作者及其同事们在清华大学汽车工程系从事汽车噪声控制的研究已有 10 年。我们开发了适合我国国情的声强柔性测量系统,其硬件组成及数字计算均有自己的创新,所研制的信号数字化仪获得了国家专利。该系统已推广到多家工厂及高等学校,并为十多台国产汽车进行了主噪声源的识别,为采取降噪措施提供可靠依据,取得了满意的结果。在此期间,我们还积累了一批国内外有关声强技术的文献资料。本书的写作就是在声学基本理论的基础上,总结我们的工作并归纳国内外的有关文献,供同行们参考。

本书第 1,2,3,6,7 章由蒋孝煜执笔,第 4,5 章由连小珉执笔。先后参加过本课题组声强技术开发工作的还有:刘起元、胡长战、许国贤、荣强、谢华、顾守丰、吴敌、任明章、仪垂杰、郑四发等人,执笔者对他们表示感谢。

书中不免有错漏之处,欢迎批评指正。

作 者

2000 年 4 月

Preface

At the beginning of the eighties the sound intensity technique was growing up to maturity along with the progress of electronic engineering and signal processing. Sound intensity technique has its own advantages, especially, in determination of the sound power and distinguishing the noise sources. It has occupied an important position in the field of acoustic measurement.

The first monograph, 《Sound Intensity》, written by F. J. Fahy, was published in 1989. In the after ten years the technique of sound intensity is progressing continuously. In 1993 and 1996 the International Standards Organization (ISO) issued the standard methods for determination of sound power levels using sound intensity. It promoted further development of the sound intensity technique.

In the Automotive Engineering Department of Tsinghua University, authors and their colleagues have been working on automotive noise control for more than ten years. We developed flexible measurement system of sound intensity, which is applicable for the condition of our country. The composition of the hardware and the method of digital calculation have its own new ideas. The signal digitizer composed in this system has got the state patent. This system has been spreaded to a good few factories and institutes. Besides, we have distinguished the main noise

sources of ten automobiles using this system, which provided reliable basis for taking effective measures to reduce the noise level with satisfactory results. In this period we accumulated a lot of internal and external references. This monograph is the summary of our work and the concourse of the relevant references.

In this book the chapters 1, 2, 3, 6, 7 are written by Jiang Xiaoyu. The chapters 4, 5 are written by Lian Xiaomin. The authors wish to convey hearty gratitude to the colleagues: Liu Qiyan, Hu Changzhan, Xu Guoxian, Rong Qiang, Xie Hua, Gu Shoufeng, Wu Di, Ren Mingzhang, Yi Chuijie, Zheng Sifa and the others. They successively participated in our group and made contributions respectively to the development of this system.

Any observations on this book are welcome.

Authors

April 2000

符 号

A	简谐波振幅
$A'_A(n)$	声压数字谱 $D'_A(n)$ 的模
$A'_B(n)$	声压数字谱 $D'_B(n)$ 的模
$A''_A(n)$	声压数字谱 $D''_A(n)$ 的模
$A''_B(n)$	声压数字谱 $D''_B(n)$ 的模
B	当量吸声面积
C	复声强
C_A	通道 A 的模数转换常数
C_B	通道 B 的模数转换常数
$C_A(n)$	通道 A 传递函数谱幅值与模数转换常数的组合
$C_B(n)$	通道 B 传递函数谱幅值与模数转换常数的组合
C_I	声强系数
c	声速
$D(n)$	$d(k)$ 的频谱
$D_A(n)$	通道 A 的声压数字谱
$D_B(n)$	通道 B 的声压数字谱
$D_I(n)$	声强数字谱
D_Σ	数字谱之积求和
$D'_A(n)$	第一次标定时通道 A 的声压数字谱
$D'_B(n)$	第一次标定时通道 B 的声压数字谱
$D''_A(n)$	第二次标定时通道 A 的声压数字谱
$D''_B(n)$	第二次标定时通道 B 的声压数字谱
d	双传声器声学中心之间的距离

$d(k)$	组合成的时域复数序列
$d_A(k)$	通道 A 得到的声压数字量
$d_B(k)$	通道 B 得到的声压数字量
E	声能
E_k	动能
E_p	形变位能
e	声能密度
F_1	声场短暂变化率指数
F_2	测量面压-强指数
F_3	局部负功率指数
F_4	声场不均匀指数
F_{pl}	测量面压-强指数(扫描法)
$F_{+/-}$	局部负功率指数(扫描法)
f	频率
f_0	声强测量的下限频率
f_c	1/3 倍频程中心频率
f_l	1/3 倍频程带下限频率
f_n	离散频率
f_s	采样频率
f_u	1/3 倍频程带上限频率
$G_{AA}(n)$	传声器 A 处声场声压单边自谱
$G_{AB}(f)$	声场声压 $p_A(t)$ 和 $p_B(t)$ 间的单边互谱密度函数
$G_{BB}(n)$	传声器 B 处声场声压单边自谱
$G_{pp}(n)$	声场声压单边自谱
$\hat{G}_{AB}(n)$	声场声压 $p_A(t)$ 和 $p_B(t)$ 间的单边互谱
$g(n)$	压-强关系函数
$H_A(n)$	通道 A 的传递函数谱
$H_B(n)$	通道 B 的传递函数谱

$h_A(t)$	通道 A 模拟测量部分的系统脉冲响应函数
$h_B(t)$	通道 B 模拟测量部分的系统脉冲响应函数
I	声强
I_0	基准声强
$I_A(n)$	$D_A(n)$ 的虚部
$I_B(n)$	$D_B(n)$ 的虚部
I_a	有功声强
I_d	只有基准相位差 kd 时测到的声强
$\text{Im}[\]$	取虚部
$I_{pA}(n)$	声场声压谱 $P_A(n)$ 的虚部
$I_{pB}(n)$	声场声压谱 $P_B(n)$ 的虚部
I_r	无功声强
$I_{r1/3}(f_c)$	1/3 倍频程声强谱
I_{rA}	A 计权总声强
$I_{rA}(f_c)$	1/3 倍频程 A 计权声强谱
I_s	残余总声强, 扩散场中的声强
$I_s(n)$	残余声强谱
$I_{s1/3}(f_c)$	1/3 倍频程残余声强谱
$I(n)$	$D(n)$ 的虚部
$\tilde{I}_r$	数字计算方法得到的总声强
$\tilde{I}_r(n)$	声强谱
$\tilde{I}_s$	统计意义上的残余总声强
$\tilde{I}_s(n)$	统计意义上的残余声强谱
i	序列代号
$\text{int}[\]$	取整函数(无四舍五人)
j	-1 的开方
K	系统误差因子
K_1	一个 1/3 倍频带的第一根谱线序号

K_2	一个 1/3 倍频带的最后一根谱线序号
$K_A(f_c)$	A 计权系数
K_{lp}	压-强关系常数
k	波数, 时域离散序数
L	噪声级
L_A	通道 A 的声压转换常数
$L_A(n)$	传声器 A 处的声场声压级谱
L_B	通道 B 的声压转换常数
$L_B(n)$	传声器 B 处的声场声压级谱
L_{CI}	声强常数
L_{CP}	声压常数
L_d	动态能力指数
L_e	误差级
L_I	声强级
$L_{1/3}(f_c)$	1/3 倍频程声强级谱
L_{IA}	A 计权总声强级
$L_{IA}(f_c)$	A 计权 1/3 倍频程声强级谱
L_{inew}	修正后的无偏差声压转换常数
L_{old}	原来的有偏差声压转换常数
L_{Ir}	r 方向上的总声强级
$L_{Ir}(n)$	r 方向上的声强级谱
L_{IS}	合成声强级
L_p	声压级或总声压级
$L_{p1/3}(f_c)$	1/3 倍频程声压级谱
$L_{pa}(n)$	算术平均声压级谱
L_{pA}	A 计权总声压级
$L_{pA}(f_c)$	A 计权 1/3 倍频程声压级谱
$L_{pR}(n)$	几何平均声压级谱

L_{p1}	单个传声器(传声器 1)处的声场总声压级
L_{ps}	合成声压级,标准单频声压级
L_s	合成噪声级
L_w	声功率级
m	质量
N	测点总数,一个分析段的采样数
n	频域离散序数
n_0	声强测量下限频率对应的频域序数
$p_A(n)$	传声器 A 处的声场声压谱
$p_B(n)$	传声器 B 处的声场声压谱
$p^2(n)$	均方声压谱
$p_{1/3}^2(f_c)$	1/3 倍频程均方声压谱
$P_A^2(f_c)$	1/3 倍频程 A 计权均方声压谱
p	声压
$p_A p_B$	双传声器测到的声压
p_0	声压波动幅值
p_c	声压的复振幅
p_e	有效声压(声压)
p_l	气压
p_i	入射声压
p_r	反射声压
p_s	合成声压
$p(t)$	瞬时声压
p_0	基准声压,静压
Q	无功声强的幅值
R	隔声量
R_{pu}	p 和 u 的互相关函数
$R(n)$	$D(n)$ 的实部

$R_A(n)$	$D_A(n)$ 的实部
$R_B(n)$	$D_B(n)$ 的实部
$R_{A^*}(n)$	声场声压谱 $P_A(n)$ 的实部
$R_{pB}(n)$	声场声压谱 $P_B(n)$ 的实部
r	声强正方向, 径向距离
r_A	声源与传声器 A 的声学中心之间的距离
r_B	声源与传声器 B 的声学中心之间的距离
S	面积
S_{pu}	p 和 u 的互谱
s	偏差
$\text{sign}[\]$	取符号
T	周期
t	时间
t_k	采样时刻
u	质点速度
u_a	质点速度幅值
u_b	和声压同相的质点速度分量
u_c	质点速度的复振幅
u_e	有效质点速度
u_r	和声压相位差 90° 的质点速度分量
V	体积
W	声功率
w	声能流密度
x	双传声器测头轴线方向
Z	声阻抗率
Z_0	分界面法向声阻抗率
a	吸声系数
$\bar{a}$	平均吸声系数

β_1	通道 1 的声压转换系数
β_2	通道 2 的声压转换系数
γ	总残余相差率 等压与等容的比热之比
$\gamma(n)$	残余相差率谱
δ_{pl}	压-强指数
δ_{pI0}	残留压-强指数
δ_p	相位误差指数
Δf	频域分辨率或频谱间隔
$\Delta L(n)$	两个传声器处的声场声压级之差
$\Delta L_{ag}(n)$	算术平均声压级与几何平均声压级之差
$\Delta L_A(f_c)$	A 计权修正谱
$\Delta L_\varphi(n)$	相位失配误差谱
$\Delta L_{1/3}(f_c)$	1/3 倍频程声强相位失配误差谱
$\Delta \tilde{L}_\varphi(n)$	统计意义上的相位失配误差谱
$[\Delta L_{i\varphi}]$	许允的相位失配误差
$\Delta \tilde{L}_\varphi$	统计意义上的总声强相位失配误差
	声器 1 和 2 之间的声学间距
Δt	采样时间间隔
$\Delta \varphi(n)$	两个测量通道间的系统相位差谱
$\Delta \varphi_1(n)$	系统相差标定相位推导中间值
$\Delta \varphi_2(n)$	系统相差标定相位推导中间值
$\Delta \varphi_f(n)$	声场在两个传声器上产生的相差
$\Delta \varphi_r(n)$	声强测量中的实际相差谱
$\Delta \varphi_s(n)$	系统两个测量通道间的残余相差
$\Delta \bar{\varphi}_s(n)$	系统意义上的残余相差
$[\Delta \varphi(n)]_1$	第一次系统相差标定的结果
$[\Delta \varphi(n)]_2$	第二次系统相差标定的结果
θ_i	入射角

θ_r	反射角
θ_i	折射角
λ	波长
ξ	质点位移
ρ	气体密度
ρ_a	静态平衡时的气体密度
ρ'	密度增量
σ	声辐射效率
σ_a	空气传声的辐射效率
σ_s	结构传声的辐射效率
τ	大气温度
$\phi_A(n)$	传递函数谱 $H_2(n)$ 的相角
$\phi_B(n)$	传递函数谱 $H_1(n)$ 的相角
$\phi'_A(n)$	声压数字谱 $D'_1(n)$ 的相位角
$\phi'_B(n)$	声压数字谱 $D'_2(n)$ 的相位角
$\phi''_A(n)$	声压数字谱 $D''_1(n)$ 的相位角
$\phi''_B(n)$	声压数字谱 $D''_2(n)$ 的相位角
ϕ_d	双传声器基准相位差
ϕ_l	由声场引起的相位差
ϕ_p	声压相位
ϕ_r	声压与质点速度之相位差
ϕ_s	双传声器通道相位失配
ϕ_u	质点速度相位
ω	圆频率

目 录

符号	11
第 1 章 声波与声场	1
1.1 声波的传播	1
1.2 声压	3
1.3 声压与气体密度的关系	3
1.4 质点的速度	6
1.5 质量守恒方程	7
1.6 运动方程	8
1.7 波动方程	10
1.8 平面声波	11
1.9 球面声波	14
1.10 声波的叠加与干涉	16
1.11 驻波	19
第 2 章 声能与声强	22
2.1 声能	22
2.2 声能流密度和声波强度	24
2.3 有功声强及无功声强	28
2.4 复声强	31
2.5 扩散声场中的声强	34
2.6 声强的量度	35
2.7 分贝的合成	36
2.8 频谱	38

第3章 声强的测量	41
3.1 声强测量的发展过程	41
3.2 声强测量的基本原理	48
3.3 声强的频域分析法	50
3.4 双传声器探头	53
3.5 声强信号处理方法	55
3.6 误差分析	58
3.7 标定	70
第4章 声强测量的硬件系统	73
4.1 硬件系统的要求	73
4.2 硬件系统的实现	74
4.3 硬件系统的标定	96
第5章 声强测量的数字计算	100
5.1 声场声压的数字表示	100
5.2 声强的数字计算	104
5.3 声压的数字计算	109
5.4 系统传递特性标定	118
5.5 相位失配误差估计	124
5.6 1/3 倍频程分析	130
5.7 A 计权分析	133
第6章 声强测量技术在声学工程中的应用	138
6.1 用分布测点法现场测定声源的声功率	138
6.2 用扫描法现场测定声源的声功率	150
6.3 识别主要噪声源	159
6.4 测定材料的声阻抗率及吸声系数	164
6.5 测定声能传递损失	172
6.6 测定振动表面声辐射效率	178

第7章 声强测量技术在汽车噪声控制中的应用	187
7.1 汽车噪声的允许标准	187
7.2 声功率排序法	189
7.3 等声强线及三维图法	196
7.4 矢量图及能流线图	211
7.5 负声强	219
7.6 声功率的自动测量	222
7.7 复声强的应用	228
参考文献	230