

机械工程手册

第 8 篇 声 学

第 9 篇 光 学

(试 用 本)

机械工程手册
电机工程手册

编辑委员会



机械工业出版社

本书包括《机械工程手册》“声学”及“光学”两篇。
主要提供与机械工程有关的声学 and 光学的基础性理论。

“声学”篇内容包括：声学基础、超声及其应用、噪声及其控制等。

“光学”篇内容包括：光的基本性质、几何光学、光的干涉、光的衍射、偏振光及其应用、光源和光谱、光电效应和光电接收器、激光、莫尔条纹技术、光学全息照相等。

机 械 工 程 手 册

第 8 篇 声 学

陕西师范大学应用声学研究所 主编

第 9 篇 光 学

北京工业学院 主编

(试 用 · 本)

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ · 印张 $7^{1/2}$ · 字数 201 千字

1979 年 6 月北京第一版 · 1979 年 6 月北京第一次印刷

印数 00,001—53,000 · 定价 0.59 元

*

统一书号: 15033 · 4616

编 辑 说 明

(一) 我国自建国以来, 机械工业在毛主席的革命路线指引下, 贯彻“独立自主、自力更生”和“洋为中用”的方针, 取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学研究方面的经验, 同时采用国外先进技术, 加强机械工业科学技术的基础建设, 适应实现“四个现代化”的需要, 我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》。

(二) 这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用, 也可供教学及其他有关人员参考。

(三) 这两部手册是综合性技术工具书, 着重介绍各专业的理论基础, 常用计算公式, 数据、资料, 关键问题以及发展趋向。在编写中, 力求做到立足全局, 勾划概貌, 反映共性, 突出重点。在内容和表达方式上, 力求做到深入浅出, 简明扼要, 直观易懂, 归类便查。读者在综合研究和处理技术问题时, 《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成, 构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分, 共七十九篇; 《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分, 共五十篇。

(四) 参加这两部手册编写工作的, 有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员, 更为广泛。许多地区

的科技交流部门，为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中，广泛征求意见，发挥了广大群众的智慧和力量。

(五) 为了使手册早日与读者见面，广泛征求意见，先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验，试用本在内容和形式方面，一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证，提出批评和建议，以便今后出版合订本时加以修订。

(六) 本书的两篇是《机械工程手册》第8篇和第9篇。第8篇由陕西师范大学应用声学研究所主编，参加编写的有太原工学院。第9篇由北京工业学院主编，天津大学对全篇进行了认真的审查。许多有关单位对编审工作给予大力支持和帮助，在此一并致谢。

机械工程手册 编辑委员会编辑组
电机工程手册

第8篇 声 学

目 录

编辑说明

常用符号表

第1章 声学基础

1 声波、声谱	8-1
2 声速	8-2
2.1 气体的声速	8-2
2.2 液体的声速	8-2
2.3 固体的声速	8-2
3 波动方程	8-2
3.1 运动方程	8-2
3.2 波动方程	8-7
4 声学的某些量	8-7
5 声波的反射和折射	8-8
5.1 反射和折射定律	8-8
5.2 三层介质的垂直入射情况	8-8
5.3 两层介质斜入射时的波型变换	8-9
5.4 面积突变时的垂直入射情况	8-9
6 声波的干涉、声驻波	8-10
6.1 声波的干涉	8-10
6.2 声驻波	8-10
7 声波的衍射、指向性、声全息	8-11
7.1 声波的衍射	8-11
7.2 声辐射器的指向特性	8-11
7.3 声全息	8-13
8 声波的衰减	8-13
8.1 衰减系数	8-13
8.2 流体介质中的声波吸收	8-13
8.3 散射衰减	8-14
8.4 流体和固体介质的衰减系数	8-14
9 多普勒效应	8-17

第2章 超声及其应用

1 超声电源(超声发生器)	8-18
---------------------	------

2 磁致伸缩换能器	8-18
2.1 磁致伸缩效应	8-18
2.2 磁致伸缩换能器的振动模式	8-19
2.3 磁致伸缩材料	8-19
3 压电换能器	8-20
3.1 压电效应	8-20
3.2 压电参数	8-20
3.3 压电方程	8-20
3.4 压电体振动模的计算	8-20
3.5 压电材料	8-20
4 变幅杆	8-28
4.1 变幅杆的作用	8-28
4.2 变幅杆的主要参数	8-28
4.3 单一型常用变幅杆	8-28
4.4 变幅杆材料	8-28
5 声聚焦设备	8-28
6 超声效应	8-30
6.1 超声的机械效应	8-30
6.2 超声的热效应	8-31
6.3 超声的化学效应	8-31
6.4 超声的空化效应	8-31
7 超声的应用	8-32

第3章 噪声及其控制

1 噪声及其性质	8-33
1.1 噪声	8-33
1.2 噪声的掩蔽效应	8-33
1.3 噪声级的相加	8-33
1.4 等响曲线和响度级	8-34
1.5 控制噪声的基本途径	8-34
1.6 噪声的容许标准	8-35
2 噪声的吸收	8-35
2.1 吸声系数	8-35
2.2 混响时间	8-38

8-VI 目 录

2.3 吸声减噪量的确定	8-38	3.4 隔声罩	8-42
2.4 吸声材料和吸声结构	8-39	4 振动的隔离	8-43
3 噪声的隔绝	8-41	4.1 减振系数的确定	8-43
3.1 噪声的传递	8-41	4.2 弹簧减振器计算	8-43
3.2 隔声结构	8-41	4.3 弹性或阻尼材料减振器设计	8-43
3.3 室内实际隔声量的确定	8-42	参考文献	8-44

常 用 符 号 表

A ——面积 m^2	h_{ij} ——压电应力电感系数 N/C
B ——磁感应强度 G	j —— $\sqrt{-1}$
D ——直径 m	k ——波数
D ——指向性指数 dB	k ——耦合系数
D ——声强透射系数 $\%$	l ——长度 m
E ——弹性模量 $\text{N/m}^2, \text{kgf/cm}^2$	p ——声压 N/m^2
G ——切变弹性模量 $\text{N/m}^2, \text{kgf/cm}^2$	r ——半径 m
G ——传导系数 m	s_{ij} ——弹性系数 m^2/N
H ——磁场强度 Oe	t ——时间 s
I ——声强 W/m^2	t ——厚度 m
K ——相对介电常数	t ——摄氏温度 $^{\circ}\text{C}$
K ——放大系数	u ——振速 m/s
L ——噪声级 dB	α ——声压透射系数 $\%$
L_p ——声压级 dB	β_{ij} ——介电诱导率 m/F
L_{ra} ——声功率级 dB	γ ——比热比
L_i ——声强级 dB	δ ——拉曼常数 N/m^2
M ——分子量	ε ——损耗系数
N ——频率常数 $\text{Hz}\cdot\text{m}$	ε_{ij} ——介电常数 F/m
R ——普适气体常数 ($8315 \text{ J/deg}\cdot\text{kmol}$)	θ ——角度 deg
R ——声强反射系数 $\%$	$\Delta\theta$ ——波束宽度 deg
S ——面积 m^2	κ ——压缩系数 $\text{m}\cdot\text{s}^2/\text{kg}$
T ——混响时间 s	λ ——波长 m
TL ——隔声量 dB	λ ——拉曼常数 N/m^2
P_a ——声功率 W	λ ——磁致伸缩应力常数 Oe
Z ——阻抗 $\text{N}\cdot\text{s/m}^5$	μ ——泊松比
Z_a ——声阻抗 $\text{N}\cdot\text{s/m}^5$	μ ——磁导率 H/m
Z_m ——力阻抗 $\text{N}\cdot\text{s/m}$	ξ ——应变 m/m
Z_s ——声阻抗率 $\text{N}\cdot\text{s/m}^3$	π ——圆周率
a ——衰减系数 dB/m	ρ ——密度 kg/m^3
a ——吸声系数 $\%$	ρ ——声压反射系数 $\%$
b ——宽度 m	ρ ——电阻率 $\Omega\cdot\text{m}$
c ——声速 m/s	ρ_a ——声能密度 J/m^3
c_{ij} ——弹性模量 N/m^2	σ ——正应力 $\text{N/m}^2, \text{kgf/cm}^2$
d_{ij} ——压电应变电场系数 C/N	$[\sigma]$ ——许用应力 $\text{N/m}^2, \text{kgf/cm}^2$
e_{ij} ——压电应力电场系数 C/m^2	τ ——切应力 $\text{N/m}^2, \text{kgf/cm}^2$
f ——频率 Hz	φ ——形状因素
g_{ij} ——压电应变电感系数 m/C	ω ——圆频率 rad/s

第9篇 光 学

目 录

常用符号表

第1章 光的基本性质

1 光波	9-1
2 光子	9-2
3 光的传播	9-2
4 光的反射和折射	9-2
4.1 反射定律和折射定律	9-2
4.2 反射率和折射率	9-3
4.3 全反射现象	9-3
5 光的吸收	9-3
6 光的色散	9-4
7 光的散射	9-4

第2章 几何光学

1 理想光学系统的成像	9-4
1.1 符号规则	9-5
1.2 单个折射球面的物象位置关系式	9-5
1.3 基点和基面	9-5
1.4 理想光学系统基本公式	9-6
1.5 近轴光线光路计算	9-7
2 实际光学系统的成像和象差	9-8
2.1 子午不变式和弧矢不变式	9-8
2.2 实际光学系统的光路计算	9-8
2.3 玻璃平板的初级象差公式	9-11
2.4 光学系统中成像光束的选择	9-11
2.5 光学系统的分辨率	9-11
2.6 象差的容许限度	9-12
3 光学系统的光能	9-12
3.1 光谱灵敏度、视见函数	9-12
3.2 象平面的照度和照度分布	9-13
3.3 光学系统中光能的损失	9-13
3.4 照相物镜的光圈数	9-13
4 典型光学系统	9-14

4.1 视角鉴别率	9-14
4.2 双眼立体视觉	9-14
4.3 视放大率	9-14
4.4 放大镜	9-15
4.5 望远系统和它的物镜与场镜	9-15
4.6 显微系统和显微物镜	9-15
4.7 目镜	9-16
4.8 照相物镜	9-18
4.9 照明系统	9-19
4.10 光学玻璃牌号和性能	9-20

第3章 光的干涉

1 光的干涉现象	9-24
1.1 干涉场的强度分布	9-24
1.2 强度的极值条件	9-24
1.3 条纹的间距	9-24
2 相干光波的实现	9-25
2.1 分波前法	9-25
2.2 分振幅法	9-25
3 等厚干涉与等倾干涉	9-25
4 双光束干涉与多光束干涉	9-26
5 典型干涉仪	9-26
5.1 迈克尔逊干涉仪	9-26
5.2 马赫-陈德尔干涉仪	9-27
5.3 法卜利-白洛干涉仪	9-27
6 条纹的可见度及其影响因素	9-27
6.1 两束光强度不同的影响	9-27
6.2 光源时间相干性的影响	9-27
6.3 光源空间相干性的影响	9-28
6.4 其它影响可见度的因素	9-28
7 光学薄膜原理	9-28
7.1 透光膜	9-28
7.2 反光膜	9-28

7.3 析光膜	9-28
---------------	------

第4章 光的衍射

1 衍射公式	9-29
2 夫琅和斐衍射	9-29
2.1 单缝衍射	9-29
2.2 圆孔衍射	9-30
3 菲涅耳衍射	9-30
3.1 半波带的划分	9-30
3.2 波带片	9-31
4 双缝和多缝的衍射	9-31
5 衍射光栅	9-32
5.1 透射光栅	9-32
5.2 反射光栅	9-32
5.3 二维光栅	9-32
5.4 三维光栅	9-32

第5章 偏振光及其应用

1 光的偏振结构	9-32
1.1 偏振光	9-32
1.2 自然光	9-33
1.3 部分偏振光	9-33
1.4 椭圆偏振光和圆偏振光	9-33
2 产生偏振光的方法和光学元件	9-33
2.1 偏振片	9-33
2.2 反射产生偏振光	9-34
2.3 折射产生偏振光——玻片堆和 偏振膜	9-34
2.4 散射产生偏振光	9-34
2.5 双折射产生偏振光	9-34
3 双折射元件	9-35
3.1 波片(阻波片)	9-35
3.2 双折射光楔	9-36
3.3 补偿器	9-36
4 偏振光的干涉	9-36
4.1 平行偏振光的干涉	9-36
4.2 会聚偏振光的干涉	9-37
5 偏振光干涉的应用	9-38
5.1 零点补偿法	9-38
5.2 单 $\lambda/4$ 波片法	9-38
5.3 双 $\lambda/4$ 波片法	9-38
6 人为双折射	9-38

6.1 固体形变时的双折射现象	9-38
-----------------------	------

6.2 电光效应	9-39
----------------	------

7 旋光现象	9-39
--------------	------

第6章 光源和光谱

1 原子光谱和分子光谱	9-40
1.1 原子的能级和光谱	9-40
1.2 分子的能级和光谱	9-41
2 单色辐射光源	9-42
3 连续辐射光源	9-43
3.1 热辐射和白炽灯	9-43
3.2 超高压弧光灯	9-44
3.3 荧光灯	9-45
3.4 其他	9-45

第7章 光电效应和光电接收器

1 外光电效应和光电管	9-46
2 内光电效应和光电池、光电二 极管	9-47
2.1 光电导效应和光敏电阻	9-47
2.2 光生伏打效应和光电池	9-47
2.3 光电二极管和光电雪崩二极管	9-48

第8章 激光

1 激光器的原理	9-49
2 激光输出特性	9-49
2.1 激光的纵模和谱线宽度	9-49
2.2 激光的横模和方向性	9-50
3 气体激光器	9-51
3.1 氦氖激光器	9-51
3.2 氩离子激光器	9-52
3.3 二氧化碳激光器	9-52
4 固体激光器	9-52
4.1 红宝石激光器	9-52
4.2 钕玻璃激光器	9-52
4.3 掺钕YAG激光器	9-52
5 半导体激光器和其他	9-52
6 激光应用概况	9-53

第9章 莫尔条纹技术

1 莫尔条纹形成原理	9-53
------------------	------

2 莫尔条纹用于长度计量.....9-54	2.5 像平面全息图9-61
2.1 长光栅9-54	2.6 振幅全息图和位相全息图9-62
2.2 圆光栅9-55	2.7 体积全息图9-62
2.3 莫尔条纹的亮度变化9-56	3 全息干涉.....9-62
3 莫尔条纹用于消除干涉仪的系统误差.....9-56	3.1 单次曝光全息干涉9-63
4 莫尔条纹用于测量周期性误差.....9-56	3.2 二次曝光全息干涉9-63
	3.3 时间平均值全息干涉9-63
	3.4 双波长全息干涉9-63
	3.5 全息干涉应用9-64
	4 全息照相应用简介.....9-64
	5 全息照相实验条件.....9-64
	5.1 全息照相的光源9-64
	5.2 全息照相的记录材料9-64
	5.3 全息照相的实验装置9-65
	参考文献9-65

第10章 光学全息照相

1 全息照相原理.....9-57
2 全息照相的主要类型.....9-59
2.1 基元全息图9-59
2.2 近场全息照相9-59
2.3 远场全息照相9-60
2.4 付立叶变换全息图9-61

常 用 符 号 表

B ——亮度 sb	P ——偏振度
C ——光在真空中的速度 m/s	R ——曲率半径 mm
E_0 ——电磁波的振幅 V/m	R ——面发光度 lm/m^2
E ——照度 ph	T ——周期 s
E ——原子或分子的能级 eV	t ——振幅透射率
F ——焦点	v ——光在介质中的位相速度 m/s
F ——光通量 lm	Y ——物高 mm
f ——时间频率 Hz	Y' ——象高 mm
H ——主点	α ——轴向放大率
I ——光强度 W/m^2	β ——垂轴放大率
i_1 ——入射角 $^\circ$	γ ——角放大率
i_2 ——折射角 $^\circ$	λ ——光的波长 $\text{\AA}$
i_1' ——反射角 $^\circ$	ρ ——反射率
K ——波数 c/mm	Σ ——波面
k ——空间角频率 rad/mm	τ ——透射率
n ——折射率	τ ——能级寿命、弛豫时间、相干时间 s

声学是研究物质中机械波的产生、传播和接收的科学。物质包括固体、液体、气体和等离子体，它可以是均匀的各向同性的，也可以是不均匀的各向异性的；可以是静止的，也可以是流动的。声波是弹性波或非弹性波；线性的或非线性的；频散的或非频散的；有衰减或无衰减等。

声学工作从研究对象可分为三个方面：（1）与人密切相关的；（2）与物质结构、性质有关的；（3）与远距离探测地球以及星体研究有关的。

近代声学有很宽的频率范围和多样的介质类别，分支多、范畴广，只要能够用其所长，舍其所短，就能利用声波来达到各种不同的目的。例如，低频声波衰减减小，可以用来探测大气中的声学现象，

研究海洋和地层中的某些运动规律；高频声波波长很短，有很高的分辨率，可用来分析物质内部的某些细微结构等。

研究声波在物质中传播的规律，是目前探索物质性质的三大技术之一。超声在气体、液体或固体中传播时，声速和吸收的变化可用来鉴别、分析和探测物质的某些物理和化学性质。另外，超声也是研究气体和液体中高速化学反应的重要工具之一。

噪声现已成为污染环境的公害之一。噪声控制就是把不需要的声波用最合理的措施减少到允许程度的科学。它是很多学科交叉的综合性学科。大力开展噪声控制工作，建立安静的工作环境，减少噪声对人们身心健康的危害，已是一项非常重要和具有深远意义的工作。

第1章 声学基础

1 声波、声谱

a. 声波 机械振动在弹性介质中的传播过程称声波。声波是机械波。

振动每往复一次的时间间隔称振动的周期（ T ）。周期的倒数（ $\frac{1}{T}$ ），即每秒钟振动的次数称振动频率（ f ）。频率的单位是赫兹（Hz）。

振动的一定周相在一振动周期内传播的距离称波长（ λ ），即振动周相相同而且相距最近两点间的距离，如图 8·1-1 所示。

振动的传播方向称波线。

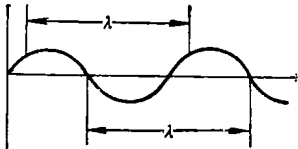


图 8·1-1

某时刻振动周相相同的各点的轨迹形成一个同相面称波阵面。

如果介质中质点振动的方向与波的传播方向平行，此种波称纵波。如果质点振动的方向和波的传播方向相垂直，则称为横波。

声波传播的空间称声场。

b. 声谱 声波依频率高低可划分为：次声、可听声、超声、特超声（图 8·1-2）。

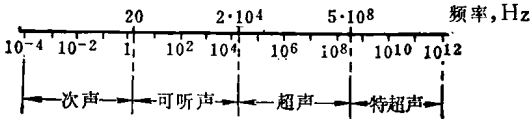


图 8·1-2 声谱

（1）次声 次声是指低于人们听觉范围的声波。它应用于探测气象变化、核爆炸，预报地震、风暴、极光、海啸，监视火箭、导弹的发射及宇宙飞船的起飞等。

(2) 可听声 可听声是人耳可以听到的声音。人们可借助可听声来进行语言和文化的交流等;另外,还可探测上空气象条件的分布和变化。

(3) 超声 当声波的频率高到超过人耳听觉范围的频率极限时,人们就觉察不出声波的存在,因而称这种高频率的声波为“超”声。超声技术在生产、科研等方面有着广泛的应用,已形成一门独立的学科,叫超声学。

(4) 特超声 特超声指高于超声频率上限的超高频声波。对超声频率的上限,曾有不同的划分建议,如有建议选用 300 兆赫、500 兆赫、1000 兆赫等。它主要应用于探索物质的微观结构及无线电电子学、光电子学等方面。

2 声 速

声波在介质中的传播速度称声速。

在气体和液体中,由于介质只有体积弹性,所以声波只能以纵波的形式传播。声速一般不依频率而变。在固体介质中,除体积弹性外,还有伸长弹性、弯曲弹性、扭转弹性等,所以声波既可以纵波形式传播,也可以横波形式传播。这些弹性波的传播速度不但依赖于物质的特性,而且也物体的形状有关。在晶体中,除此以外,声速还和声波在晶体中传播方向有关。

2.1 气体的声速

在小讯号(声速与振动无关)情况下,气体的声速 c 为

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} \quad (8.1-1)$$

或

$$c = \sqrt{\frac{\gamma}{M} RT} \quad (8.1-2)$$

式中 ρ —— 密度 kg/m^3 ; p —— 大气压强 N/m^2 ; γ —— 比热比; M —— 分子量; T —— 绝对温度 K ; $R = 8315 \text{ J/kmol} \cdot \text{deg}$ (普适气体常数)。

空气的声速 c 为

$$c = 331.4 \sqrt{1 + \frac{t}{273}} \approx 331.4 + 0.6 t \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (8.1-3)$$

式中 t —— 摄氏温度 $^{\circ}\text{C}$ 。

普通气体在常温下的声速见表 8.1-1。

2.2 液体的声速

在小讯号的情况下,液体的声速 c 为

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \kappa_j}} \quad (8.1-4)$$

或

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \kappa_d}} \quad (8.1-5)$$

式中 κ_j —— 绝热压缩系数 $\text{m} \cdot \text{s}^2/\text{kg}$;

κ_d —— 等温压缩系数 $\text{m} \cdot \text{s}^2/\text{kg}$ 。

液体的声速见表 8.1-2。

蒸馏水实验声速公式为

$$c = 1557 - 0.0245(74 - t)^2 \text{ m/s} \quad (8.1-6)$$

海水实验声速公式为

$$c = 1449.22 + \Delta c_t + \Delta c_p + \Delta c_s + \Delta c_{tp} \text{ m/s} \quad (8.1-7)$$

$$\begin{aligned} \text{式中 } \Delta c_t &= 4.6233 t - 5.4585 \times 10^{-2} t^2 + 2.822 \\ &\quad \times 10^{-4} t^3 - 5.07 \times 10^{-7} t^4 \text{ (温度修正项);} \\ \Delta c_p &= 1.60518 \times 10^{-1} p + 1.0279 \times 10^{-6} p^2 \\ &\quad + 3.451 \times 10^{-9} p^3 - 3.503 \times 10^{-12} p^4 \\ &\quad \text{(压强修正项);} \\ \Delta c_s &= 1.391(s - 35) - 7.8 \times 10^{-2}(s - 35)^2 \\ &\quad \text{(盐分修正项);} \\ \Delta c_{tp} &= (s - 35)(-1.197 \times 10^{-2} t + 2.61 \\ &\quad \times 10^{-4} p - 1.96 \times 10^{-7} p^2 - 2.09 \times 10^{-9} p t) \\ &\quad + p(-2.796 \times 10^{-4} t + 1.3302 \times 10^{-6} t^2 \\ &\quad - 6.644 \times 10^{-8} t^3) + p^2(-2.391 \times 10^{-7} t \\ &\quad + 9.286 \times 10^{-10} t^2) - 1.745 \times 10^{-10} p^3 t \\ &\quad \text{(综合修正项);} \\ t &\text{ —— 摄氏温度 } ^{\circ}\text{C}; p \text{ —— 压强 } \text{N/m}^2; \\ s &\text{ —— 盐分 } \%。 \end{aligned}$$

2.3 固体的声速

各向同性均匀固体声速公式见表 8.1-3。

普通固体的弹性常数与声速见表 8.1-4。

3 波动方程

3.1 运动方程

平面波沿 x 轴方向传播,如图 8.1-3 所示。设薄层介质的密度为 ρ ,介质中的正压力为 P ,振动位移为 ξ ,振速为 u ,则在单位面积上厚度为 dx

表8-1-1 普通气体常温下声速

气 体	化 学 式	温 度 t °C	密 度 ρ kg·m ⁻³	声 速 c m·s ⁻¹	比 热 比 γ	dc/dt m·s ⁻¹ ·deg ⁻¹
空气		0	0.1293×10 ⁻³	331.45		
氧	O ₂	20		326.5		0.60
氮	N ₂	20		349.0		
氢	H ₂	20		1307.6	1.405	2.25
二氧化碳	CO ₂	20		274.6	1.299	0.54
一氧化碳	CO	18		348.9		0.63
水蒸气	H ₂ O	27		432		
氦	He	17.5		997		1.83
氩	Ar	30		324		0.53
氖	Ne	19		450		0.83
氧化二氮	N ₂ O	20		276.6		0.5
一氧化氮	NO	16.3		334		
过氧化氮	N ₂ O ₄	30		202.4		
氯	Cl ₂	18		215		0.40
氨	NH ₃	18		428		0.73
苯	C ₆ H ₆	30		190.4		
二硫化碳	CS ₂	45		203		
二氧化硫	SO ₂	18		216		0.4
三氟化硼	BF ₃	25	2.81	208	1.20	
四氟化碳	CF ₄	25	3.61	180	1.16	
甲基氯	CH ₃ Cl	25	2.125	246	1.26	
甲烷	CH ₄	25	0.657	448	1.30	0.83
环丙烷	C ₃ H ₆	25	1.744	262	1.18	
己烷	C ₆ H ₁₄	35		176	1.06	
甲醇	CH ₃ OH	32		312.8		
乙烯	CH ₂ CH ₂	25	1.157	330	1.25	
乙炔	CHCH	25	1.081	341	1.24	
氘	D ₂	15		917	1.400	1.72

表8-1-2 液体的声速

液 体	化 学 式	温 度 t °C	密 度 ρ kg·m ⁻³	声 速 c m·s ⁻¹	压 缩 系 数 κ $\times 10^{-11}$ m ² ·N ⁻¹	$-dc/dt$ m·s ⁻¹ ·deg ⁻¹	特性阻抗 ρc $\times 10^8$ m ⁻² · kg·s ⁻¹
水	H ₂ O	20	0.99823	1483	45.55	-3.08	1.480
重 水	D ₂ O	20	1.1053	1388	47.1	-3.1	1.534
甲 醇	CH ₃ OH	20	0.7913	1121	100.6	3.30	0.8870
乙 醇	C ₂ H ₅ OH	20	0.7893	1168	92.90	3.50	0.9219
乙二醇	(CH ₂ OH) ₂	20	1.1131	1666	32.36	2.40	1.854
丙 醇	C ₃ H ₇ OH	20	0.8045	1225	82.83	4.0	0.9855
乙 醚	(C ₂ H ₅) ₂ O	20	0.7135	1006	138.5	5.45	0.7178
醋 酸	CH ₃ COOH	20	1.0495	1159	70.94	3.5	1.216
无水醋酸	(CH ₃ CO) ₂ O	30	1.0670	1249	57.8		1.333
氯 仿	CHCl ₃	20	1.4870	1001	68.01	3.47	1.488
四氯化碳	CCl ₄	20	1.5942	937.8	72.27	3.19	1.495
己 烷	C ₆ H ₁₄	20	0.654	1083	130	4.8	0.708

(续)

液 体	化 学 式	温度 t ℃	密 度 ρ kg·m ⁻³	声 速 c m·s ⁻¹	压缩系数 κ $\times 10^{-11}$ m ² ·N ⁻¹	$-dc/dt$ m·s ⁻¹ · deg ⁻¹	特性阻抗 ρc $\times 10^6$ m ⁻² · kg·s ⁻¹
环己烷	C ₆ H ₁₂	20	0.779	1284	78.2	4.0	1.000
辛 烷	C ₈ H ₁₈	20	0.7021	1192	100.2	4.25	0.8369
邻二甲苯	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	20	0.871	1360	62.1	4.1	1.185
氯 苯	C ₆ H ₅ Cl	20	1.1042	1289	55.23	3.85	1.423
硝基苯	C ₆ H ₅ NO ₂	20	1.207	1473	38.2	3.7	1.778
苯	C ₆ H ₆	20	0.8790	1324	64.9	4.85	1.164
甘 油	C ₃ H ₅ (OH) ₃	20	1.2613	1923	21.4	1.83	2.425
醋酸乙酯	CH ₃ COO·C ₂ H ₅	20	0.900	1164	82.00	4.50	1.048
甲 苯	C ₆ H ₅ CH ₃	20	0.8657	1328	65.5	4.3	1.150
丙 酮	(CH ₃) ₂ CO	20	0.7905	1190	89.37	4.25	0.8407
苯 胺	C ₆ H ₅ NH ₂	20	1.0216	1659	35.57	4.05	1.695
二硫化碳	CS ₂	20	1.2634	1158	59.03	3.28	1.463
水 银	Hg	20	13.5955	1451.0	43.494	0.460	19.73
间二甲苯		20	0.8641	1343	64.2	4.1	1.160
对二甲苯		20	0.8611	1334	65.3	4.8	1.149
醋酸甲酯	CH ₃ COO·CH ₃	20	0.928	1181	77.28	4.60	1.096
吡 啶	C ₆ H ₅ N	20	0.9832	1441	49.63	4.25	1.417
庚 烷	C ₇ H ₁₆	20	0.6836	1154	110.0	4.3	0.7889
癸 烷	C ₁₀ H ₂₂	20	0.7314	1253.4	87.03	3.8	0.9167
丁 醇	C ₄ H ₉ OH	20	0.810	1268	76.9		1.027
戊 醇	C ₅ H ₁₁ OH	20	0.816	1294	73.2		1.056
己 醇	C ₆ H ₁₃ OH	20	0.822	1318	70.03		1.083
庚 醇	C ₇ H ₁₅ OH	20	0.823	1341	67.6		1.104
辛 醇	C ₈ H ₁₇ OH	20	0.827	1358	65.7		1.123
甲酸甲酯	CH ₃ COOCH ₃	20		1181		4.6	
甲酸乙酯	HCOOC ₂ H ₅	23.5	0.9048	1263	69.3		1.143
醋酸丙酯	CH ₃ COOC ₃ H ₇	20		1189			
醋酸丁酯	CH ₃ COOC ₄ H ₉	20		1214			
醋酸异戊酯	CH ₃ COOC ₅ H ₁₁	20	0.860	1218	78.4	3.95	1.047
苯甲醇	C ₆ H ₅ CH ₂ OH	20	1.045	1540			1.609
环己酮	C ₆ H ₁₀ O	20	0.949	1449	50.2		1.375
邻甲酚	C ₆ H ₄ CH ₃ (OH)	25		1506			
邻氯酚	C ₆ H ₄ ClOH	20		1417			
水杨酸甲酯	C ₆ H ₄ (OH)COOCH ₃	28	1.180	1408	42.8		1.661
乙酰醋酸乙酯	CH ₃ COCH ₂ ·COOC ₂ H ₅	25.5	1.020	1417	48.8		1.445
苯(甲)酸甲酯	C ₆ H ₅ COOCH ₃	30	1.0784	1392	47.9		1.501
丙二酸乙酯	CH ₂ (COOC ₂ H ₅) ₂	22		1386	49.6		
苯二甲酸二乙酯	C ₆ H ₄ (COOC ₂ H ₅) ₂	23	1.121	1471	41.2		1.649
苯甲醚	C ₆ H ₅ OCH ₃	26	0.987	1453	48.0		1.434
苯甲醛	C ₆ H ₅ CHO	20	1.046	1479	43.7		1.547
丁 酮	CH ₃ CO·C ₂ H ₅	20	0.8053	1217	84.95	4.289	0.9801
二溴甲烷	CH ₂ Br ₂	25		943			
橄榄油		32.5	0.904	1381	58.73		1.248
蓖麻油		20	0.960	1502		3.8	1.442
桐 油		20	0.938	1450		2.4	1.360
花生油		20	0.911	1472			1.341

(续)

液 体	化 学 式	温度 t ℃	密 度 ρ kg·m ⁻³	声速 c m·s ⁻¹	压缩系数 κ $\times 10^{-11}$ m ² ·N ⁻¹	$-dc/dt$ m·s ⁻¹ · deg ⁻¹	特性阻抗 ρc $\times 10^6$ m ⁻² · kg·s ⁻¹
0°柴油		20	0.8406	1385		2.7	1.164
大港航煤		20	0.7963	1298		3.0	1.034
大庆2°航煤		20	0.7868	1290		3.1	1.015
66°汽油		20	0.7246	1171		3.7	0.8485
80°汽油		20	0.7055	1139		3.7	0.8036

表8-1-3 各向同性均匀固体声速公式①

波 型	声 速 符 号	声 速 公 式		
		以 λ 、 δ 表示	以 E 、 μ 表示	以 K 、 G 表示
无限固体介质 纵 波	c_L	$\sqrt{\frac{\lambda + 2\delta}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}$	$\sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}}$
无限固体介质 横 波	c_T	$\sqrt{\frac{\delta}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}$	$\sqrt{\frac{G}{\rho}}$
板 中 纵 波②	c_p	$2\sqrt{\frac{\delta(\lambda + \delta)}{\rho(\lambda + 3\delta)}}$	$\sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu^2)}}$	
棒 中 纵 波②	c_B	$\sqrt{\frac{(3\lambda + 2\delta)\delta}{\rho(\lambda + \delta)}}$	$\sqrt{\frac{E}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{9KG}{\rho(3K + G)}}$
半径 r 无限杆 弯 曲 波	c_B		$\sqrt{\pi r f} \sqrt[4]{\frac{E}{\rho}}$	
厚度 d 无限薄片 弯 曲 波	c_B		$\sqrt{\pi d f} \sqrt[4]{\frac{E}{3(1-\mu^2)\rho}}$	

- ① 表中 λ 、 δ 是拉曼常数； E 是弹性模量； μ 是泊松比； K 是体积弹性模量； G 是切变弹性模量 ($G = \delta$)； ρ 是密度， f 是频率。
- ② 均为低频极限值。

表8-1-4 普通固体的弹性常数与声速

固 体	密 度 ρ kg·m ⁻³	弹性模量 E $\times 10^{10}$ N·m ⁻²	剪切弹性模量 G $\times 10^{10}$ N·m ⁻²	泊 松 比 μ	声 速				特性阻抗 ρc_l $\times 10^7$ m ⁻² · kg·s ⁻¹
					c_B m·s ⁻¹	c_p m·s ⁻¹	c_L m·s ⁻¹	c_T m·s ⁻¹	
铁 Fe	7.7	20.6	8.03	0.28	5180	5390	5850	3230	4.50
镍 Ni	8.8	20.1	7.71	0.31	4785	5030	5630	2960	4.95
钨 W	19.1	35.4	13.1	0.35	4360	4600	5460	2620	10.42
锰 Mn	8.4	12.3	4.64	0.33	3830	4060	4660	2350	3.90
铝 Al	2.7	6.85	2.65	0.34	5040	5360	6260	3080	1.69
铜 Cu	8.9	12.3	4.55	0.35	3710	3960	4700	2260	4.18
黄铜	8.1	8.82	3.40	0.30	3300	3460	3830	2050	3.10
康铜	8.8	16.3	6.13	0.33	4300	4550	5240	2640	4.60
铅 Pb	11.4	1.64	0.586	0.44	1200	1340	2170	700	2.46

(续)

固 体	密度 ρ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	弹性模量 E $\times 10^{10}$ $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	剪切弹性 模量 G $\times 10^{10}$ $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$	泊 松 比 μ	声 速				特性阻抗 ρc_l $\times 10^7 \text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
					c_B $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	c_P $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	c_L $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	c_T $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	
锌 Zn	7.1	10.3	4.12	0.25	3810		4170	2410	2.96
锡 Sn	7.3	5.44	2.04	0.33	2730	2890	3320	1670	2.42
锑 Sb	6.7	7.75			3400				
金 Au	19.3	7.95	2.78	0.42	2030	2240	3240	1200	6.26
铂 Pt	21.4	16.8	5.97	0.39	2800	3040	3960	1670	8.46
铱 Ir	22.4	51.4			4790				
银 Ag	10.5	7.32	2.36	0.38	2640	2850	3600	1500	3.80
钽 Ta	16.6	18.6			3350				
镉 Ca	8.6	4.95	1.94	0.30	2400	2520	2780	1500	2.40
铋 Bi	9.8	3.14	1.19	0.33	1790	1900	2180	1100	2.14
石英玻璃	2.7	7.50	3.21	0.17	5370	5450	5570	3515	1.45
火石玻璃	3.6	5.76	2.36	0.22	4000	4100	4260	2560	1.54
无铅玻璃	2.5	7.02	2.92	0.22	5300	5430	5660	3420	1.41
象牙	1.8	0.871			2200				
有机玻璃①	1.18		0.252	0.824			2720	1460	
聚苯乙烯①	1.05		0.128	0.341			2340	1150	0.246
聚乙烯①	0.92						1900		0.174
橡胶①	0.95						1550		0.147
胶木(硬橡胶)①	1.2	0.296			1570		2300		0.276
软木塞	0.2	0.0050			500				

① 这些高分子物质的声速随测试频率不同而变化,表中数据是 1 MHz 时声速值。

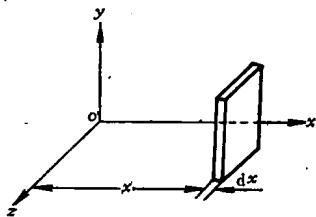


图8-1-3 薄层介质的运动

一段介质的运动方程为

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = - \frac{\partial P}{\partial x} \tag{8-1-8}$$

这一运动方程对任何平面波都能适用,可运用于不同介质和不同波型的各种情况。

(1) 纵波在无限大各向同性均匀流体介质中无衰减传播时的运动方程为

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{K}{\rho} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \tag{8-1-9}$$

式中 K ——体积弹性模量。

(2) 切变波在无限大各向同性均匀固体介质中传播时的运动方程为

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \tag{8-1-10}$$

式中 G ——切变弹性模量。

(3) 切变波在纯粘性牛顿液体中传播时(图 8-1-4),切变粘滞应力 τ 为

$$\tau = - \eta \frac{\partial u}{\partial x} \tag{8-1-11}$$

式中 η ——流体的动力粘滞系数。

假若 τ 是以 ω 为圆频率的周期性应力,则切变波的运动方程为

$$\rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = j \omega \eta \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \tag{8-1-12}$$

式中 $j = \sqrt{-1}$ 。

(4) 切变波在粘弹性固体中传播时的运动方程为

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{G + j \omega \eta}{\rho} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \tag{8-1-13}$$

(5) 切变波在粘弹性流体中传播时的运动方程为

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \rho^{-1} \left(\frac{1}{G} + \frac{1}{j \omega \eta} \right)^{-1} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \tag{8-1-14}$$

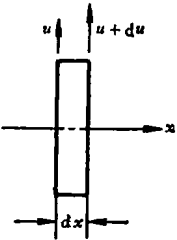


图8-1-4 切变波的传播

3.2 波动方程

假定:

- (1) 介质是理想流体, 即没有能量损耗;
- (2) 过程进行得很快, 即在流体体积发生形变时, 没有热的交换;
- (3) 讯号是小讯号, 即 $p \ll p_0$, $\xi \ll \frac{\lambda}{2\pi}$, $u \ll c$, $\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \ll 1$ (p_0 ——大气压强, ρ_0 ——无声波时的介质密度)。

则理想流体的波动方程为

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) \quad (8.1-15)$$

或
$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p \quad (8.1-16)$$

解式 (8.1-16), 可以求出 p 、 u 依赖于时间和空间的关系。再依一定的初始条件, 可求出在空间中任一点 p 、 u 的瞬时值以及其间的相互关系。随之, 可以求出声阻抗、声功率、声强等声学量。

a. 平面声波的波动方程

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} \quad (8.1-17)$$

解为 $p = A_1 \varphi \left(t - \frac{r}{c} \right) + A_2 \varphi \left(t + \frac{r}{c} \right) \quad (8.1-18)$

式中 A_1 、 A_2 是积分常数; φ 为任意函数, 其形式决定于激发振动的性质; r 是波前离声源的距离。

若声源的振动是谐和振动时, 则

$$p = A_1 e^{j(\omega t - kr)} + A_2 e^{j(\omega t + kr)} \quad (8.1-19)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ (波数)。

b. 球面声波的波动方程

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) \quad (8.1-20)$$

或
$$\frac{\partial^2 (rp)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 (rp)}{\partial r^2} \quad (8.1-21)$$

若声源的振动是谐和振动时, 则

$$rp = A_1 e^{j(\omega t - kr)} + A_2 e^{j(\omega t + kr)} \quad (8.1-22)$$

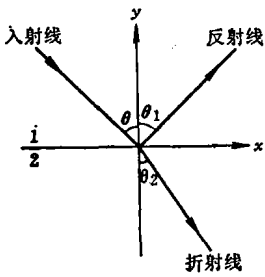
4 声学的某些量 (表 8.1-5)

表8.1-5 声学的某些量的定义式及单位

名 称	符 号	定 义 式	单 位	备 注
声 压	p	$p_i - p_0$	帕 (Pa) 或 牛顿/米 ² (N/m ²) 微巴 (μbar)	p_i —空间某点压强 p_0 —大气压强
声 压 级	L_p	$20 \lg \frac{p}{p_0}$	分贝 (dB)	$p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa
力 阻 抗	Z_m	$\frac{F}{u}$	力欧姆或 牛顿·秒/米 (N·s/m)	F —振动力 u —振速
声 阻 抗	Z_a	$\frac{p}{U}$	声欧姆或 牛顿·秒/米 ⁵ (N·s/m ⁵)	U —体积速度
声阻抗率	Z_s	$\frac{p}{u}$	瑞利或 牛顿·秒/米 ³ (N·s/m ³)	$Z_a = \frac{Z_s}{A} = \frac{Z_m}{A^2}$
特性阻抗	ρc		瑞 利	在各向同性均匀介质的 平面自由声波中
声 功 率	P_a	单位时间内垂直通过指定面积的声能量	瓦 (W)	
声功率级	L_{P_a}	$10 \lg \frac{P_a}{P_{a0}}$	分贝 (dB)	$P_{a0} = 10^{-12}$ W
声能密度	ρ_a	单位体积内的声能量	焦耳/米 ³ (J/m ³)	
声 强	I	$\langle p \cdot u \rangle_m$	瓦/米 ² (W/m ²)	
声 强 级	L_I	$10 \lg \frac{I}{I_0}$	分贝 (dB)	$I_0 = 10^{-12}$ W/m ²

5 声波的反射和折射

当声波从介质 1 传播到介质 2 时,在分界面上,一部分声能反射回介质 1, 其余的部分穿过界面在介质 2 继续传播 (图 8·1-5), 称前一种为反射现象, 后一种为折射现象。



5·1 反射和折射定律

a. 反射和折射定律的公式

sin theta / c_1 = sin theta_1 / c_1 = sin theta_2 / c_2 (8·1-23)

式中 theta、theta_1、theta_2 分别为入射角、反射角、折射角; c_1、c_2 分别为在介质 1、2 中的声速。

b. 反射系数和透射系数 在各向同性均匀介质中,当声波是无衰减传播时,则

(1) 声压反射系数 rho 为

rho = (p_1max - p_2max) / (p_1max + p_2max) = (Z_2 cos theta - Z_1 cos theta_2) / (Z_2 cos theta + Z_1 cos theta_2) (8·1-24)

式中 Z_1 = rho_1 c_1; Z_2 = rho_2 c_2。

(2) 声压透射系数 alpha 为

alpha = (p_2max - p_1max) / (p_2max + p_1max) = (2 Z_2 cos theta) / (Z_2 cos theta + Z_1 cos theta_2) (8·1-25)

(3) 声强反射系数 R 为

R = I_1 / I = ((Z_2 cos theta - Z_1 cos theta_2) / (Z_2 cos theta + Z_1 cos theta_2))^2 (8·1-26)

(4) 声强透射系数 D 为

D = I_2 / I = (4 Z_1 Z_2 cos^2 theta) / (Z_2 cos theta + Z_1 cos theta_2)^2 (8·1-27)

声波在某些材料分界面上的反射系数见表 8·1-6。

5·2 三层介质的垂直入射情况

设介质 1 和介质 3 分别沿 x 轴左方和右方延至无限远处,在两者之间夹有一层厚度为 d 的介质 2

(图 8·1-6)。当介质 1 中有沿 x 正向的行进波垂直入射于分界面 A, 一部分声波反射回介质 1 与入射波叠加而成驻波; 另一部分声波透过 A 而进入介质 2, 当到分界面 B 处又发生反射和折射。最后,有一部分声波透过 B 而进入介质 3, 并以行波的形式一直传播到无穷远处。

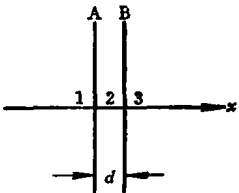


图 8·1-6 三层介质的入射、反射和折射

若不考虑声波在介质中传播时的衰减,则声强透射系数 D 为

表 8·1-6 声波在某些材料分界面上的反射系数值

介 质	波 速 c_L km/s	密 度 rho kg/m^3	特性阻抗 rho c x 10^6	在完全接触的边界面的法线方向上入射的声波能量的反射率 %													
				空气	变压器油	水	酚醛塑料	聚苯乙烯	玻璃	水银	铅	黄铜	铜	镁	镍	钢	铝
铝	6.22	2.65	1.70	100	74	72	42	50	2	1	3	14	18	9	24	21	0
钢	5.81	7.8	4.76	100	89	88	76	77	31	16	9	1	0.3	43	0.2	0	
镍	5.6	8.9	4.98	100	90	89	75	79	34	19	12	2	0.8	47	0		
镁	4.33	1.74	0.926	100	58	54	19	27	2	12	20	36	40	0			
铜	4.62	8.93	4.11	100	88	87	71	75	19	13	7	0.2	0				
黄铜	4.43	8.5	3.61	100	87	86	68	73	23	10	5	0					
铅	2.13	11.4	2.73	100	80	79	55	62	9	1	0						
水银	1.46	13.6	1.93	100	76	75	6	8	4	0							
玻璃	4.9~5.9	2.5~5.9	1.81	100	67	65	32	40	0								
聚苯乙烯	2.67	1.1	0.924	100	17	12	1	0									
酚醛塑料	2.59	1.4	0.363	100	23	18	0										
水	1.43	1.00	0.143	100	0	0											
变压器油	1.39	0.92	0.128	100	0												
空气	0.331	0.0012	0.000042	0													