

52.51  
714

# 超声的基本原理与应用

基本原理和在物理学、工程技术、  
工业、生物学及医学中的应用

[德意志民主共和国] L. 赫尔福尔特 合著  
H. M. 温特尔

同济大学“超声的基本原理与应用”译校工作组译

上海科学技术出版社

## 內 容 提 要

本书包括基本原理与在各方面的应用两部分，对于超声的原理和应用的可能性作了概括的介绍。对于各种应用皆列有具体数据以及资料来源，可供读者作进一步研究时参考。本书可供一般读者及工程技术、生物、医学方面人员阅读。

参加本书译校工作的，有：陆振邦、金经昌、翟立林、魏墨鑫、俞载道、王福楹、顾善德、严煦世、周善生、潘昌乾、魏以新、戴社民和汪兴传十三位同志。参加译校的组织工作的，有：夏正行和巫锡麟两位同志。

## 超声的基本原理与应用

ULTRASCHALL

原 著 者 [德意志民主共和国] L. Herforth  
H. M. Winter

原出版者 B. G. Teubner 1958 年版

译 者 同济大学“超声的基本原理与应用”译校工作组

\*

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可证出 093 号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店经售

上海市印刷四厂印刷

\*

开本 787×1092 1/32 印张 7 4/32 插页 12 字数 155,000

1961年10月第1版 1961年10月第1次印刷

印数 1-21,000

统一书号: 15119·1625

定 价: (十二) 0.98 元

# 序

自从超声波获得重视以及发展成为专门学科以来，曾经出版了许多专著，或者概括地介绍超声方面的整个情况——如 Bergmann<sup>[1]</sup> 的篇幅甚多的专著，全书共计 1114 页，并举出 5162 种参考文献——或者介绍了超声的专门的应用范围。

这本小册子不可能也不应该代替已经出版的书籍。它只是为那些要对超声的基本原理和应用有一个概括认识的读者而写的。我们认为可以把它叫作“超声学小教科书”，这个书名最能确切地反映这本书的特点。

到目前为止，已经出版的专著，特别是 Bergmann 的著作以及其他许多原著，对于编写本书提供了很大帮助。在本书的第二部分中，我们曾引用了某些特殊的超声著作。

我们感谢许多厂商，他们供给了大量的图片和产品说明书。

我们还感谢 Schreiber 教授，他给了不少宝贵的指示。

我们特别衷心地感谢出版社，它考虑了我们的愿望，并出版了本书。

我们希望，这本有关超声的小册子的发行，不致辜负出版社的期望。

L. Herforth

H. M. Winter

1958 年春于来比锡和柏林

05583

· 1 ·

# 目 录

## 序

导言	1
第一部分 一般原理	3
I. 超声波的发生	3
§1. 机械的超声波发生器	3
(一) Galton 笛	3
(二) 气流振动发生器	5
(三) Janovski 和 Pohlman 液笛	6
(四) 超声旋笛	6
(五) Holtzmann 超声发生器	7
§2. 热学的超声发生器	8
§3. 静电和电动超声发生器	9
(一) 静电超声发生器	9
(二) 电动超声发生器	9
§4. 磁致伸缩超声发生器	10
(一) 磁致伸缩效应	10
(二) 磁致伸缩超声发生器	10
§5. 压电超声发生器	13
(一) 压电效应	13
(二) 压电超声发生器	15
§6. 連續变换频率的超声发生器	26
§7. 等幅声和脉冲声	28
II. 超声場和超声場中的作用	29
§8. 超声場的特征值	29
(一) 声强	29

(二) 声功率	29
(三) 振幅	30
(四) 速度振幅和声阻抗率	30
(五) 交变声压强	30
(六) 声辐射压强	31
§9. 超声的物理性质	31
(一) 反射和折射	31
(二) 声吸收	33
(三) 干涉的形成	34
(四) 驻声波	35
§10. 超声的作用	36
(一) 机械的作用	36
(二) 空化作用	37
(三) 空化作用的发光现象	39
(四) 热学的作用	39
(五) 化学作用和化学物理作用	42
<b>III. 超声的检验和测量</b>	<b>47</b>
§11. 机械的方法	47
§12. 超声测量的热学方法	50
§13. 电学的超声接收器	52
§14. 光学的方法	55
(一) Toepler 的示踪方法	55
(二) 超声波中的光绕射	57
(三) 次级干涉方法	60
(四) 超声光学的成象方法	63
<b>第二部分 超声的实际应用</b>	<b>67</b>
<b>IV. 物理学、工程技术和工业中的超声</b>	<b>67</b>
§15. 声速的测定	67
(一) 气体中的声速	68
(二) 液体中的声速	69
(三) 固体中的声速	72

§16. 声吸收的测定	79
(一) 气体中的声吸收	80
(二) 液体中的声吸收	82
(三) 固体中的声吸收	88
§17. 关于高频率的光调制	91
(一) 超声频闪观测器	91
(二) 超声发光计	92
(三) 在光电话和电视接收中的超声	94
§18. 通讯技术中的超声	96
(一) 回声测深仪和回声图示仪	96
(二) 超声导盲器	103
(三) 延迟线段	103
§19. 用超声进行材料无损检验	106
(一) 透声法	106
(二) 脉冲回声法	111
(三) 显形法	114
(四) 共振法	117
§20. 工业中应用的超声方法	117
(一) 工业中的超声仪器	118
(二) 化学工业中的超声	120
(三) 超声应用于采矿和冶金	121
(四) 用超声毒化气体	124
(五) 用超声防止锅炉垢	127
(六) 超声洗涤器和声洗涤器	128
(七) 超声焊接	129
(八) 用超声检验高压绝缘体	131
(九) 超声在啤酒工业和制酒工业中的应用	132
(十) 超声在硅酸盐工业中的应用	134
(十一) 超声钻机	135
(十二) 超声在照相工业中的应用	136
V. 生物学中的超声	138

§21. 超声在生物学中的作用	138
(一) 生物学中超声的物理作用	139
(二) 生物学中超声的化学作用	139
(三) 生物学中超声的热学作用	141
(四) 生物学方面的超声作用	142
§22. 生物学实验的超声技术	143
(一) 用作生物学试验的超声发生器	145
(二) 显微超声技术	147
§23. 生物学超声试验的结果	152
(一) 超声对鱼、蝶螺、蛙等的作用	153
(二) 超声对昆虫(幼虫和成虫)的作用	155
(三) 超声对微生物的作用	157
(四) 超声对细菌和病毒的作用	158
(五) 对玻璃器中和组织中结核杆菌作声处理	160
(六) 超声对血图的作用	162
(七) 超声对于恶性肿瘤的作用	163
(八) 超声对个别器官的作用	165
(九) 超声对于植物的作用	168
(十) 在超声场里细胞学的试验	169
(十一) 用菌做超声试验	170
(十二) 声与超声作为动物界的定向因素	170
VI. 医学中的超声	175
§24. 超声治疗的基础	175
(一) 剂量问题	176
(二) 超声治疗仪器	179
§25. 治疗技术	183
(一) 直接接触治疗	184
(二) 间接接触治疗	185
(三) 频率问题	187
(四) 连续的和脉冲的超声治疗	188
§26. 关于超声治疗	189

(一) 超声治疗周围神经系统疾病·····	189
(二) 超声治疗关节病·····	190
(三) 超声治疗呼吸道疾病·····	192
(四) 超声治疗胃病·····	192
(五) 超声治疗炎性病变·····	193
(六) 超声治疗牙科疾病·····	194
(七) 超声治疗眼科疾病·····	195
(八) 超声治疗儿科疾病·····	195
(九) 超声治疗妇科疾病·····	196
(十) 用超声治疗的结果·····	196
(十一) 超声治疗法同其他治疗法的联合使用·····	199
(十二) 超声的损害·····	201
§27. 超声诊断学·····	202
(一) 诊断学中的超声回声法·····	202
(二) 诊断学中的超声显形法·····	204



# 导 言

超声应理解为听觉阈以外的声振动。

在超声方面所讨论的不是电磁振动，而是机械振动。在听觉范围内，声振动的规律适用于这些振动。

人所共知，只有在机械振动发生器和受声器（例如人耳）之间存在着传送振动的介质（例如空气）时，机械振动才能成为声波而为人所觉察。

人耳可以感觉低自 16 赫、高至 16,000~20,000 赫之间的振动（每秒振动一次称 1 赫）。听觉上阈随人的年龄而不同，年老者约为 12 千赫。

在听觉阈（16 赫）以下的声振动，称为“亚声”。亚声虽然也是在听觉范围以外，但本书不拟讨论，这种振动在空气中有较大的波长，其值从

$$\lambda = \frac{v}{N} = \frac{333}{16} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{s}}{1} \right] = 20.8 \text{ 米}$$

起。式中  $v$  为空气中的声速； $N$  为振动频率。例如当地震时，在地球内部就会发生这种振动。

本书着重于讨论高于听觉阈的频率极高的声振动。这种范围的机械振动，也叫做“高频声”。

应用近代方法，可能发出直到  $10^6$  千赫 = 1,000 兆赫左右的振动。因此，超声域包括约 16 个倍频程的频率范围。

传送超声需要传波介质。空气中声振动的传播速度为 333 米/秒；液体中为 1,200 米/秒；固体中为 4,000 米/秒。与此相应的超声域（20 千赫到  $10^6$  千赫）内的波长，在空气中介

于 1.7 厘米和  $0.3 \times 10^{-4}$  厘米; 液体中介于 6 厘米和  $1.2 \times 10^{-4}$  厘米; 固体中介于 20 厘米和  $4 \times 10^{-4}$  厘米之間。

在这些超声範圍內的短波情形下, 产生特別高的能量密度。由此出現了我們在低頻机械振动範圍內所一向不知道的現象。

近 20 年来已經出現了 2,000 种以上的著作, 闡述超声的特殊作用。

超声波成束化和定向化是易于做到的, 这就有可能将超声振动作为“輻射”来使用。因此目前在測量技术、檢驗技术以及医学和生物学方面, 都不能再忽視超声輻射的使用, 虽然关于超声的特殊作用, 还有許多問題需要今后繼續研究和闡明。

# 第一部分

## 一般原理

### I. 超声波的发生

发生超声波和发生低频声波的原理相同：使固体、板、杆或气柱(笛)受激发而发生机械振动，并把振动传达到四周的介质中。机械振动的激发可以采用机械方法、热学方法、电力方法、磁致伸缩方法或压电方法。就实用意义来说，用电的方法发生超声波的装置是主要的。为了完备起见，也要讨论到用非电的方法发生超声波。

#### §1. 机械的超声波发生器

在应用机械方法发生超声波时，是把机械能转变为声能。虽然，这方法只能发生到约 10 千赫的振动。但 König<sup>[2]</sup> 已在 1899 年成功地用小音叉在空气中发生 90 千赫的超声。Melde<sup>[3]</sup> 在摩擦 10~12 毫米厚、直径约 35 毫米的圆钢板时，达到了 35 千赫的声振动。在应用纵向振动的钢弦时，也曾经达到了 30 千赫的超声振动。

##### (一) Galton 笛

振动的气柱(笛)能发出听觉范围内的声振动。人所周知的有乐笛。笛愈长，则所产生的振动频率愈低，从而音调愈低。应用此种装置来发生超声波，需用极短的笛。

Galton<sup>[4]</sup> 最先提出了这种笛，因此取名为 Galton 笛。Edelmann<sup>[5]</sup> 制造了这种笛并加以改进。Galton 笛可以发生直到 40 千赫的振动。

用来发生较高频率的笛是这样的短（短于 1 毫米），以致于振动的空气柱只能辐射低于 0.1 瓦的音量。要发生具有较大功率的较高频率，可用下页所述的 Hartmann 发生器。

图 1 表示 Galton 笛的纵断面。气流从孔口  $\delta$  经环形缝口  $S$  通到圆形刃口  $Sch$ 。这样在刃口处发生周期性的涡流，使空间  $V$  受激发而产生固有振动。利用微动螺旋  $M_1$ ，通过活动杆  $St$ ，可以改变笛长，从而改变空间  $V$  的大小（因此也改变音调高度）。利用第二个微动螺旋  $M_2$ ，调整刃口和喷口之间的距离（叫做口距），使笛的空间容积最为适当。涡流的频率和气流速度与口距之间的比成正比。Edelmann 所做的改进，在于把两个微动螺旋的调节（笛的空间容积和口距）彼此相互连接起来，以便在调节到预期的音调高度（笛的空间容积）时，口距自动地达到准确的数值。

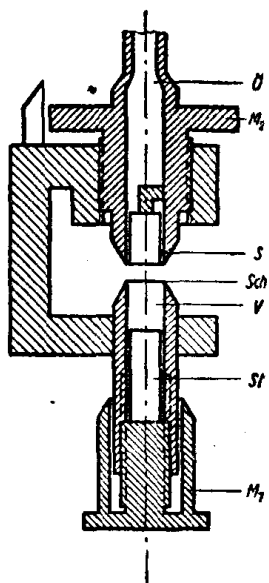


图 1 Galton 笛的纵断面

当笛的长度（空间容积  $V$  的长度）等于  $l$  [毫米] 时，声的波长  $\Delta$  [毫米] 等于：

$$\Delta = 4(l + k)$$

$k$  是与喷气压强有关的常数（例如，根据 Bergmann 的研究，对于 Edelmann 笛，当  $p = 51$  [托里] 时， $k = 6.2$ ）。

在温度等于  $t$  [°C] 时空气中的振动频率  $N$  [赫] 可按下式

計算:

$$N = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4(l+k)} = \frac{331800\sqrt{1+0.00307l}}{4(l+k)}$$

式中  $v$  为声速。

Galton 笛的声功率在 0.1 和 10 瓦之間。此外, Levavasseur<sup>[6]</sup> 做成了功率为几百瓦的大功率笛, 其效率为 8~10%——效率是指声能与所用机械能之比。在这种笛中, 由于压缩气流激发而产生的固有振动的空间容积具有环筒形。

## (二) 气流振动发生器

图 2 表示 Hartmann<sup>[7][8]</sup> 气流振动发生器的原理(包括喷口后边的周期压强分布)。

以超声速 (压强  $> 0.9$  大气压) 从喷口  $D$  出来, 流入自由空间的气流, 击中了放在射流本身不稳定压强区中的共振器。共振器周期性地变空, 而且共振器的腔室  $H$  愈小, 则变空周期的时间愈短。

经振动器腔室产生的超声射流波长  $\lambda$ , 主要和腔室长度  $l$  及腔室直径  $d$  有关, Helmholtz 提出下列关系:

$$\lambda = 4(l + 0.3d)$$

( $l = d = 1$  毫米时, 在空气中的声频率  $N$  约为 64 千赫)。

应用 Hartmann 气流振动发生器, 在空气中可达到 50 瓦的声功率。

变更  $d$  值、 $l$  值、气体压强和气体种类, 可以得到具有各种频率、功率和效率的发生器。

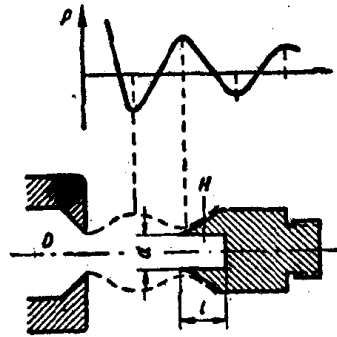


图 2 Hartmann 的气流振动发生器

上述各种笛和空气射流振动发生器的缺点是声场处在发生振动的气流中。现在已有很多办法，使声场也能传送到其他的气体 and 液体。

在 Ehret 和 Hahnemann<sup>[9]</sup> 的气体动力的板振动器中，系利用 Hartmann 振动发生器的共振器所产生的周期性的压强变化来带动一个具有同样固有频率的机械振动系统，于是声得以与干扰的气流隔开而引到任意的试验空间中去。

### (三) Janovski 和 Pohlman 液笛

要在液体中产生超声波，上述各种方法都不适用。Janovski 和 Pohlman<sup>[10]</sup> 按下列原理造成了液笛，见图 3：



图 3 Janovski 和 Pohlman 液笛示意图

在一种液体中，把液体的射流从喷嘴 D 以速度  $u$  喷射到簧片 P 的刃口上，喷嘴与刃口相距为  $d$ 。簧片在两个节点 K 处固定，使之能够进行弯曲振动。正确地选定  $u$

和  $d$ ，簧片就发生强烈的共振振动而发出强大的声波到四周的液体中。这种簧片的固有频率是可以算出的。

用这样装置产生的音调的频率可用下列关系表示：

$$N = \frac{u}{d}$$

用这种液笛可以发生 4~32 千赫的频率。

### (四) 超声旋笛

Allen 和 Rudnick<sup>[11]</sup> 做成了频率达 34 千赫的旋笛。图 4 所示是这种超声旋笛上部的纵断面。在称为定子 S 的圆形盖板上，沿圆周钻有 100 个锥形小孔 O。紧靠着定子的下方，连在电动机轴上，装有转子 R，为一个自中心向外逐渐削薄的硬铝盘，周围有 100 个小孔。经过管子 L 从下通入压缩空

气。空气进入环形室  $K$  并由此经环形窄缝  $A$  而到达各个孔口  $O$ 。转子转动，于是在定子面上就产生声波，其频率由电动机转速决定。

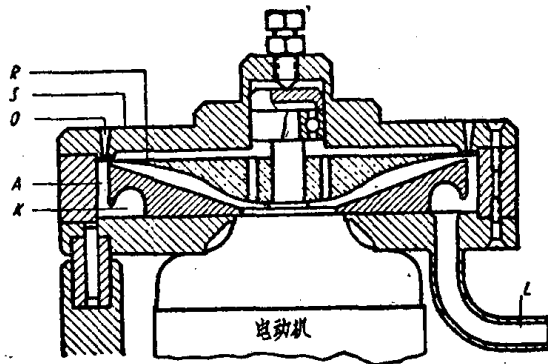


图 4 Allen 和 Rudnick 旋笛上部的纵断面

根据 Porter<sup>[12]</sup> 的研究，使用超声公司 (Ultrasonic-Corporation) 所制造的超声旋笛，能够发生到 200 千赫的频率。这种旋笛的声功率和效率都相当大。当频率为 8~10 千赫时，声功率可达 35 千瓦，效率达到 50% 以上。

Müller 和 Beier<sup>[13]</sup> 利用空气动力奇象在液体和气体中发生超声波。这种方法可以回溯到 Angerer 等人，他们曾经为了水下声技术的目的而设计了一种声源。

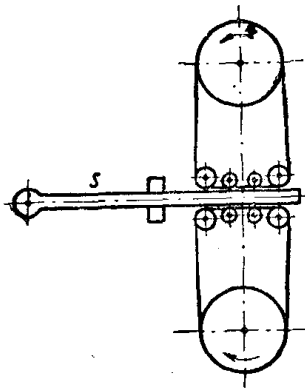
原理如下：一块刚性板，在板的中心有一通入压缩空气或压力水的入口，使与用连杆牢固连接的第二块板以极小的间距相对平行放置，这样，压缩空气或压力水便以高速从环形狭缝中流出。按照 Bernoulli 定律，在板与板之间产生较外部大气（或水）为低的一定的负压，因此，两板就相互靠近；这时，由于环形狭缝变小，压缩空气（或压力水）的压强立即发生作用，使原有状态重新恢复。这种周期性的调节过程构成简单的超声发生器的原理。根据 Beier<sup>[14]</sup> 的报告，目前可以发生 24 千赫的频率。

### (五) Holtzmann 超声发生器

如果用机械方法使一杆件发生弹性的纵向的固有振动，

这个杆就可以辐射出声波来。

Holtzmann<sup>[15]</sup> 把一条在中間夹牢的杆  $S$ , 連續地激发出



强烈的振动, 使杆的自由的一头辐射出声波 (图 5)。他用 7.5 厘米长的玻璃管作为杆, 发出約 33 千赫的声頻。为了連續地引起激发, 可用一条循环的帶子套在大、小滾輪上, 在玻璃管上順着滑动。用这种方法所能达到的声功率較标准的 Galton 笛約大 100~150 倍。

图 5 Holtzmann 超声发生器

当杆的长度为  $l$  [厘米], 材料密度为  $\rho$  [克/厘米<sup>3</sup>], 彈性模量为  $E$  [达因/厘米<sup>2</sup>] 时, 杆的彈性基本振动的頻率为:

$$N = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

## §2. 热学的超声发生器

Altberg<sup>[16]</sup> 曾应用由阻尼振蕩回路饋給的电火花隙发生頻率直到 300 千赫的声波。从这种电火花发出的是混杂的頻率, 而且振幅的恒定性不大, 采用以交流电疊加的直流电弧, 可以获得比較恒定的超声波。在弧光中由此发生的周期性的热变化导使弧光容积周期性地变化。如果交流电的强度大于直流电的强度, 則产生双倍頻率的声。Dieckmann<sup>[17]</sup> 曾利用弧光本身作为振动发生器, 并使用 Poulsen 发生器在煤气中发生了頻率到 780 千赫的声波。Palaiologos<sup>[18]</sup> 利用电子管发射器发生交流电, 这样就能够用电弧光在空气中发生頻率达



到2,000千赫的声波。Klein<sup>[19]</sup> <sup>[20]</sup> 在一个漏斗室(叫做意諾风(Ionophon))的下端利用高频率所促动的气体放电发生声波。

热学的超声波发生器很少实用意义。

### §3. 静电和电动超声发生器

在静电和电动超声波发生器中是把交变电流转变成声振动。

#### (一) 静电超声发生器

静电超声发生器的原理如下:取一条金属杆在中間夹牢,并在和它的平整的底面相距不远处,装置一金属薄片。在这样构成的电容器上加上交流电压,其频率等于杆的固有频率之半。这样,杆就受到静电力而发生固有振动。

由 Vincent<sup>[21]</sup> 首先創制的这一超声发生器,以后由 Ide<sup>[22]</sup>——在电容器薄片之間装置云母片——以及 Bancroft 和 Jacobs<sup>[23]</sup>——用自激装置——分别加以改进,使之益臻完善。Sell<sup>[24]</sup> 和 Meyer<sup>[25]</sup> 按照电容器式电话的方式制成了静电超声发生器(频率可达到50千赫)。

#### (二) 电动超声发生器

Pintsch 所建議的电磁超声发生器,是使一个运动的导体在有交变磁通量所透射的空气隙縫間振动。运动导体是一个圓筒体,其上端用圓形膜封住,声波經此射出。

Clair<sup>[27]</sup> 应用同样的原理制成了一种超声发生器。通过变压器的綫圈輸入交流电,其频率和一个圓柱体的纵向固有频率共振。在一个圓形硬鋁圈中发生同样频率的强力的感应电流,因此鋁圈在磁隙中被拉伸或被压缩。圓柱体作纵向振动,它上部的面就射出声波。Clair 对于这个系統的自激进行了研究。应用这种装置,可以发生具有可供使用的能量达到