

超声波在建筑工业中的应用

建筑工程部技术情报局 选译



建筑工业出版社

超声波在建筑工业中的应用

建筑工程部技术情报局 选译

建筑工业出版社

1960.

內 容 提 要

本書介紹国外对各种超声波发生器的設計、計算、用途、性能和理論研究。其中对建筑工业中所用的各种超声波裝置，以及在檢測、探伤、洗滌、加工、凝聚、沉淀和杀菌等方面的应用也作了詳尽的介紹。

本書可供科学研究、生产和教育等部門的有关人員以及对超声波有兴趣的讀者参考。

超声波在建筑工业中的应用

建筑工程部技术情报局 选譯

1960年5月第1版

1960年5月第1次印刷

850×1168 $\frac{1}{32}$ • 170千字 • 印張 6 $\frac{1}{4}$ • 定价(10⁰) 1.00元

建筑工程出版社印刷厂印刷 • 新华書店发行 • 書号: 2954

建筑工程出版社出版(北京市西郊百万庄)

(北京市書刊出版业营业許可證出字第052号)

目 录

一、超声波的产生	(1)
1. 超声波发生器	(1)
2. 装设超声波发生器的方法	(19)
3. 机械超声波发生器	(21)
4. 热力超声波发生器	(25)
5. 静电和动电的超声波发生器	(26)
6. 磁致伸缩的超声波发生器	(27)
7. 压电的超声波的产生	(29)
8. 强力超声波发生器	(41)
9. 一种新型的超声波发生器	(43)
10. 试验性气笛的两种结构	(45)
11. 气笛理论与计算	(51)
12. 超声波用电声换能器的一些基本问题(着重于空化现象)	(74)
13. 气笛型超声波发生器的设计参考资料	(92)
二、超声波的装置	(93)
1. 工业用的超声波发生器	(98)
2. 超声波加工器	(101)
3. 超声波加工速度的改进	(102)
4. 超声波洗涤器	(103)
5. 超声波洗涤原理及其在设计中应注意的问题	(104)
6. 超声波乳化-分散装置	(105)
7. 超声波焊接机	(106)
8. 超声波焊铁	(107)
9. 材料试验用超声波装置	(108)
10. 超声波厚度测量器	(111)

11. 超声波装置分类和尚待研究的項目	(112)
---------------------------	---------

三、超声波的应用

(一) 检测、探伤

1. 利用超声波檢驗材料質量	(114)
----------------------	---------

2. 探伤	(127)
-------------	---------

1) 混凝土非破損試驗的发展	(127)
----------------------	---------

2) 利用超声波作混凝土探伤	(129)
----------------------	---------

3) 用超声波非破損方法檢查混凝土質量	(132)
---------------------------	---------

4) 应用超声波脉冲方法在結構中檢查混凝土的質量	(132)
--------------------------------	---------

5) 关于混凝土柱抗压强度与柱中超声波脉冲傳播速度的关系	(133)
------------------------------------	---------

6) 用超声波脉冲試驗混凝土(波速度与抗压强度的关系)	(135)
-----------------------------------	---------

7) 超声波在地瀝青混凝土試驗中的应用	(134)
---------------------------	---------

8) 大焊縫的超声波探伤	(134)
--------------------	---------

9) 用超声波測定岩石破損程度和深度	(154)
--------------------------	---------

3. 用超声波方法檢查陶瓷制品的孔隙度和机械强度	(155)
--------------------------------	---------

4. 超声波在硅酸盐工业中的应用	(160)
------------------------	---------

5. 利用超声波測量液面	(161)
--------------------	---------

6. 利用声脉冲控制球磨机中的供料	(162)
-------------------------	---------

7. 超声波操縱的拉鋸	(163)
-------------------	---------

8. 利用电子声学 and 輻射測量仪器檢驗和控制建筑施工的工艺过程	(163)
--	---------

9. 活动电子声学 and 輻射測量試驗室	(164)
-----------------------------	---------

10. 用超声波研究混凝土的彈性性質	(165)
--------------------------	---------

(二) 加工

1. 超声波鑽机	(171)
----------------	---------

2. 超声波在矿业和冶煉业中的应用	(172)
-------------------------	---------

3. 利用超声波焊接和鍍錫	(174)
---------------------	---------

4. 利用超声波焊接塑料	(179)
--------------------	---------

5. 鋁合金的超声波焊接	(182)
--------------------	---------

(三) 凝聚、沉淀和杀菌

1. 超声波除尘	(181)
----------------	---------

2. 利用超声波净化空气	(187)
3. 超声波对微生物及菌类的作用	(188)
4. 超声波对细菌和毒素的作用	(189)
5. 利用超声波进行水的消毒	(190)
6. 利用超声波保护鍋爐磚	(193)

一、超声波的产生

1. 超声波发生器

(波兰) 罗曼·维热科夫斯基

首先应当说明，通用的名词“超声波发生器”，或简称“发生器”，与哈尔特曼 (Hartman) 发生器是完全不相同的。虽然，两者都是空气振荡器，但哈尔特曼发生器与普通发生器在作用原理、构造和理论上都是根本不同的。不应混淆这两个名词，在普通的发生器中，声波是由于装有压缩空气的导管的出口周期性地启闭而产生的。最简单发生器是一个与压缩空气槽相连的小管，这种管子的出口可以用手来控制开闭。但是，为了能产生声音，每秒至少需要16次的振动，我们的手是不能这样迅速地使管子开闭的，因此，便在轴上安置一个可转动的金属盘，盘的周边上有小孔，孔的直径与小管的出口完全相等。图1便是这种最简单发生器。可以用手摇柄转动带孔的圆盘，使管的出口周期性地打开，同时排出压缩空气，使得盘的另一边的空气中产生一次干扰。如果盘的转速能使这种干扰的次数在一秒钟内超过16次，我们就可以听到声音。转动速度增加时，振动频率和发生器的声强亦随之增大。如果用电动机代替手摇柄，便可以产生更高的转动速度，不仅能够得到任意的声强，而且可以超过人的听觉上限 (20,000赫芝)，达到超声波的范围。

上述极简单的发生器模型，不仅辐射力很弱，而且是不实际的。因为转盘很大，而声音只由小管极狭窄的出口产生。因此，通常用压缩空气槽代替小管，槽的底部和前一个模型中的圆盘一样，是有孔的；这些孔用另一个具有同样孔的圆盘来控制开闭。

第二个圆盘借电动机转动。图 2 所示便是这种发生器。这两种发生器中空气排出的方向都是与转动盘的轴平行的，所以称为轴式发生器。下文我们将谈到，这并不是发生器的唯一构造形式。

现在我们仔细地研究一下发生器声音的辐射现象。我们希望

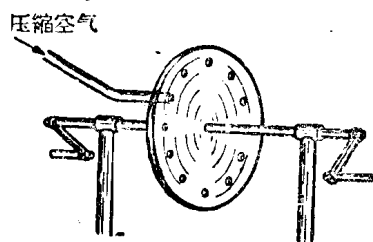


图 1

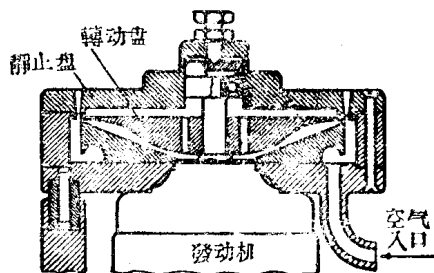


图 2

声音的强度，即辐射孔每平方厘米上的能量，愈大愈好。

为了正确运用表示强度的公式^①，应当了解所列公式中的压力，在这里便是孔的出口处声波中的超压力；大家知道，声音的传播是依靠介质疏密相间的扩散作用。空气振动质点的速度就是音速，这两个值是周期性变化的。当孔全开时速度最大，孔全闭时速度最小。因此，大体上可以得出速度变化的正弦曲线。压力的变化与此相似。最低压力不一定与周围的压力相等，因为，由于不断向孔外“喷射”空气的结果，即使是孔关闭时的压力也可能稍稍高于周围压力。图3 a 表示压力的变化。在形成声波中，与我们有关的仅仅是变化的超压力，因此，本文中的所谓声波超压力仅仅是指成正弦曲线变化的部分，也就是压力 P 和压力 P_0 之差。在声波扩散的过程中，超压力常常被简称为压力，它是用下列简单公式表示的：

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

换句话说，我们将认为压力 p 是沿着作为零线的平均压力线

① 此处系指原书第 1 章中的公式，例如：“强度 = $\frac{\text{能量}}{\text{面积}} = \frac{\text{力} \times \text{速度}}{\text{面积}} = \text{压力} \times \text{速度}$ ”。——译者

变化的。高于这条线， p 是正值（ $P > P_0$ ）；而低于这条线，是负值（ $P < P_0$ ）。

振动质点的速度（用 u 表示）的变化大体上也是正弦曲线的（图3b）。但在一般情况下，这两条正弦曲线是互有变动的，这种变动在图上用 φ 表示。因为习惯认为，角度是在表示 p 或 u 的变化的正弦函数之下，所以角度中的 φ 被称为相位角。在这种情况下，当然不能用前面举出的那些方程式直接计算强度，我们只能将这些方程式视为对某些值的定义的提示和计算的公式。

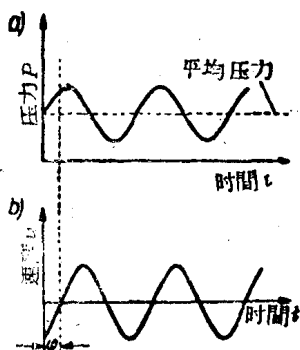


图 3

如果用 p_0 和 u_0 表示 p 和 u （所谓波幅）的最大绝对值，那么强度由下列简单公式表示：

$$I = \frac{1}{2} p_0 u_0 \cos \varphi \quad (2)$$

如果 p_0 和 u_0 都是用cos系统的单位表示，将公式（2）的计算结果乘以 10^{-7} ，则得到以每平方厘米瓦特为单位的强度。

声强取决于 φ 角 的值，当 $\cos \varphi = 0$ ， $\varphi = 90^\circ$ 时，声强等于零（虽然 p_0 和 u_0 都不等于零）。

因此，应当在辐射孔的出口保证使 $\cos \varphi$ 尽量接近1，而 φ 角接近零的辐射条件。

在考虑如何保证获得这一条件之前，让我们再想一想，为了保证发生器的良好辐射作用，还需要哪些条件。我们知道，当转动盘打开静止盘的孔时，压缩空气便从孔中排出。气流冲击周围的空气，这便是冲量干扰和产生声音的原因。换言之，压缩空气的能量变成了声波能。也许有人会认为，对空气流的阻力愈大，声音的能量也就愈大。但是应当了解，这一阻力也会使排出空气发生困难，减小气流速度和能量，而气流能量又是产生声能的源泉。

因此，发生器良好辐射的第二个条件，便是选择适宜的阻力。这一阻力与孔的形状、大小和振动频率以及介质的质量都有关系。

发生器良好工作的两个条件是相互有密切联系的。 φ 角 $=0$ 时，阻力最适当，反之，保持最理想的阻力是与使 φ 接近零同等重要的。

现在我们回到第一个条件并研究实现这一条件的办法。用德·亚尔古昂特线图可以清楚、简单明了地标出振动现象。一般在横坐标上标出数学上称为实分量的单位，在纵坐标上，用字母 j 表示虚分量。

$$j = \sqrt{-1} \quad (3)$$

当然，虚数的平方根是无法求得的，因为没有—个实数的平方可以得出虚数，不过，由(3)式可以知道：

$$j^2 = -1$$

可是，数字都是某种抽象的概念，生活中我们碰到的不是纯粹的数目字，而是这种或那种事物以及单位的数量。所以，称 j 的值为“虚分量”，实际上不是很恰当的。因为可以用这一单位很好地说明许多物理现象。不过，关于“虚分量”这一名词是否恰当的问题，还是让这方面的专家们去讨论吧。对于我们重要的一点是：所有转动一个直角，即相位移 90° 的单位，可以认为是虚值。与速度 u 相比，相位移角等于 φ 的压力 p ，在线图(图4)上是在 φ 角下与实际坐标上的 u 画在一起的线段。压力 p 可以分作两部分： $p_1 = p_0 \cos \varphi$ 和 $p_2 = p_0 \sin \varphi$ ，前者是与压力平行的，后者是与压力垂直的。将 p_1 的值加上与之垂直的虚值 p_2 ，便成下列简单的公式：

$$p_0 = p_1 + jp_2 \quad (4)$$

在这一式中，能量、强度和各种变化值的相互关系的计算是非常简单的，而这些计算在别的情况下则往往需要很多公式和文字来加以说明。

我們再將 p_0 画在实际坐标上 (图 5)。首先应注意的一点是: φ 在这里才真正成为一个角, 才是名符其实的。

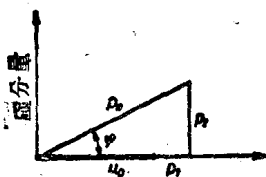


图 4

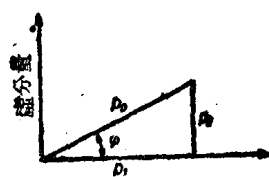


图 5

我們已經知道了 $p_0 = p_1 + jp_2$, 这样便可以計算与 p_0 有关的全部值。 p_0 段的长度 (見上图) 为:

$$p_0 = \sqrt{p_1^2 + p_2^2}$$

相位角的計算式是:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{p_2}{p_1}$$

用 $\frac{1}{2}u_0$ 乘图中用綫段标示的所有的值, 图 5 便变成强度图 (图 6)。

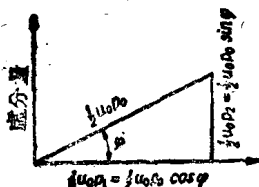


图 6

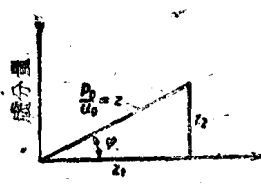


图 7

$$I_0 = I_1 + jI_2 \quad (5)$$

$$I_1 = \frac{1}{2} u_0 p_0 \cos \varphi \quad (6)$$

$$I_2 = \frac{1}{2} u_0 p_0 \sin \varphi \quad (7)$$

由此可見，实际得到的强度便是德·亞尔古昂特綫图中实际坐标上的强度分值。这里值得提一下关于功的定义，功便是运动方向上的分力与运动距离之积。我們从上式得出的結果，很好地証明了物理上著明的原理：作功的，也就是产生能量和功率的，是在同一相位中并且方向一致的分力。

輻射面积或某种介質的阻力决定着所謂声阻。阻力的大小能告訴我們产生声波时的压力 p 对于介質質点的振动范围有多大。在同一压力下，声阻（用字母 Z 表示）愈大，振动質点的速度当然愈小。

因此 $u = \frac{p}{Z}$ ，并由此得出阻力的公式

$$Z = \frac{p}{u} \quad (8)$$

因为 p 值和 u 值不是同相的， Z 值將由两部分組成：实数值和虚数值。用速度 (u_0) 除图 5 的比例，可以很容易地說明这一点。从图 7 可以看出，要求得出相位移角 φ ，必須写出下式：

$$Z = Z_1 + jZ_2 \quad (9)$$

由此得出一个条件：如果要使速度和压力在同相位中 (φ 角 = 0)，应当使声阻的虚数值 (Z_2) 等于零。

电学家們在研究交流电时，也碰到相似的問題，为了避免混淆，我們通常把 Z 值称做“阻抗”，而“阻力”仅仅是指实数值。

各种形状的孔的声阻抗計算，是非常困难和复杂的数学問題。至今，科学家們仅能計算出圓孔的阻抗和椭圆形、长方形孔阻抗的实数部分。圓阻抗公式是英国物理家雷力 (Rayleigh) 发明的，故称雷力公式

$$Z = \rho c \left[1 - \frac{2\beta_1(w)}{w} + j \frac{2S_1(w)}{w} \right] = Z_1 + jZ_2 \quad (10)$$

式中： ρ ——傳播声音的介質密度（此处指空气）；

c ——音速；

w ——代替式子： $\frac{4\pi a}{\lambda}$ ，式中： a ——孔的半徑； λ ——波長。

$J_1(w)$ 和 $S_1(w)$ 表示某种函数，在举出这些函数的名称以前，需要作一些解釋。因为关于这些函数的知識，目前还被当作是物理数学部分最保密的資料。因此，不加說明地列举这些函数的名称，可能使許多讀者感到困惑。

首先，函数 $\sin x$ 和 $\cos x$ 是什么意思呢？每个人都会很快地回想起三角学上的概念，如：股、弦、比例等等。但是，在物理上并不是指这些而言的。物理学中的正弦或余弦函数，是表示簡諧振动过程或者声波扩散现象的函数。这便是正确的定义，更精确的措詞应当是：这是符合振动运动微分方程式的函数，不过，这只是在某种情况下适用，例如，适用于琴弦的声波和盛水的長筒、通风管道以及長廊中的声波，也就是說适用于声波向單一方向傳播的各种情况。圓形水塘表面、綑紧的鼓和圓板上朝各个方向扩散的声波，是用与正弦或余弦函数相似的函数表示的，不同之处在于振幅不断減小，而零点的位置也不如正弦函数那样分布得均衡。这些函数称为圆柱函数，因为它们表示所謂圓柱坐标的声波。不知为什么緣故，人們把这些函数看成是十分难懂的概念。当然，我們沒有必要去考究数学上的細节。同样，运用正弦函数时，我們也沒有考虑这些細节問題。因此，只需要說明所指的是拜塞尔 (Bessel) 函数， S 表示 斯脫夫 (Stuiv) 函数。下面的符号“ I ”表示函数的順序；因为这些函数有一个缺点，那就是：正弦和余弦一共只有两个函数，而这里却有很多种类，所以

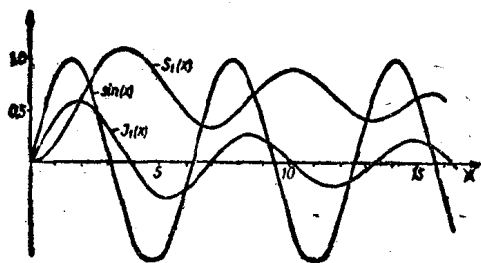


图 3

在下面用符号来表示。图 8 上的函数为 $\sin x$, $f_1(x)$ 和 $S_1(x)$ 。

图 9 依照公式 (10), 并根据变数 w 表示出圆孔阻抗的实数值 (Z_1) 和虚数值 (Z_2)。这些图线便是所谓的圆孔阻力。可以看出, 当 w 大于 16 时, 虚数值是很小的, 以致可以不去注意它。因为 $w = \frac{4\pi a}{\lambda}$, 所以声波必须相应地短 (当 a 的值一定时), 或者, 孔的半径可以相应地大。

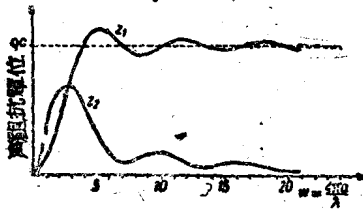


图 9

从图 9 上还可以看出, 当阻抗的虚数值接近零时, 实数值等于 ρc 。这是什么意思呢?

在平的声波中, p 和 u 是在同相中的 (φ 角 $= 0$)。因此声阻抗的实数值仅仅取决于介质的物理特性, 正好是等于 ρc 。当声波与振荡器的尺寸相比是非常“短”时, 振荡器的每一点都产生阻力, 就象是一个无边际的大平原那样, 并辐射出平的声波。但是, 为了使孔辐射出平波, 也就是说使 p 和 u 在同一相中, 使阻抗的虚数值等于零而实数值等于 ρc , 则需要怎样的实际条件呢? 当然, 频率不是无穷大的, 而要根据设计发生器时的计算。当我们作这样的计算时, 就会知道, 如果频率为 2 万赫芝, 辐射孔的最小直径必须为 3~4 厘米。要制造这样的发生器, 辐射盘一定要非常大; 或者必须具有根本无法达到的转速。为克服这种困难, 只有一种方法, 那便是改善发生器小孔的辐射条件。改善辐射条件的办法, 是使用与哈尔特曼发生器中相同的“声角”。这是一个变截面的管子, 它的入口的尺寸与静止盘和转动盘的孔

相同，并要根据发生器构造的需要，可以将管径扩大，以便取得下列条件：

1. 管的截面用适当的阻力来保证入口的负荷。这种变截面的管子安置在发生器的孔上以后便使阻力发生变化，因为孔的辐射条件不同了，声波不是直接进入大气了。声学家们可以很容易地计算出在孔上安了喇叭会产生多大的阻力，以及为了得到理想的阻力，喇叭的截面应当如何等问题。

2. 管的出口与辐射波的长度相比应是足够大的，以便使声角出口的（圆形孔）声阻抗的虚数值实际上等于零。

假如这后一个条件不具备，管子便不能向外辐射全部声能。用 $\frac{1}{2} p_0 u_0 \cos \varphi$ 表示的能量部分辐射出去了，而以 $\frac{1}{2} p_0 u_0 \sin \varphi$ 表示的部分则反折到内部，并扰乱发生器的工作。

现代声学能够精确计算所需的喇叭（也就是“声角”）的截面。用所谓双曲余弦函数线表示的截面，特性最佳。这一截面如图10所示。

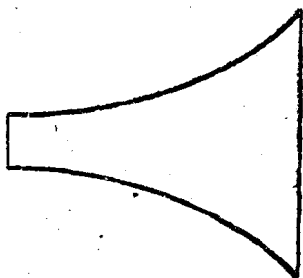


图 10

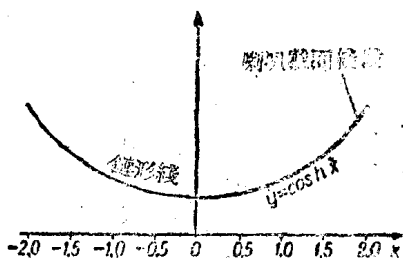


图 11

为了使不懂得高等数学的读者也了解本书的内容，我想加以说明，所谓双曲余弦函数就是链子或软绳自由下垂的形状（图11）。弧形曲线的一半便是喇叭的截面。 $y = \cosh x$ 。这条函数线因此有链形线之称。

链形的喇叭可使入口有适宜的声阻。而最重要的是：声阻抗的虚数部分在入口处等于零，压力和速度是在同相中。因此，链形喇叭入口对于声波的产生和向出口辐射提供了良好的条件。

当发生器有许多小孔时，这些孔都通到一个共同的“声角”（如图12所见），在声角的底部可以清楚地看到静止盘的孔。

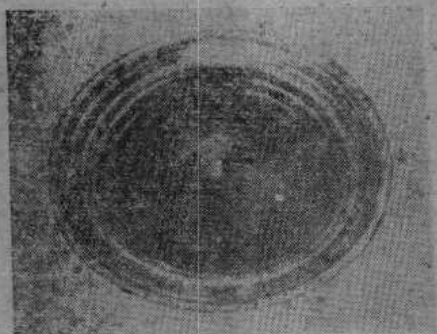


图 12

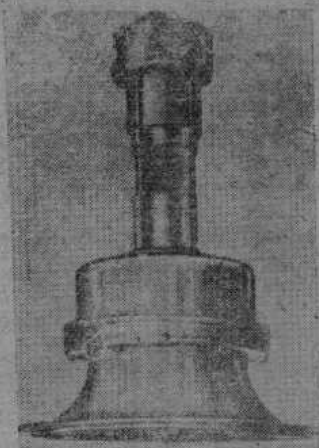


图 14

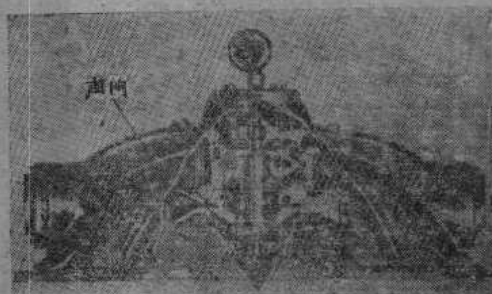


图 13

我們已經說過，軸心式发生器不是发生器的唯一形式。还可以制造另一种发生器，它的空气儲槽是一个有一排小孔的圓輥，輥的外面或里面是另一个有同样小孔的圓輥。这种发生器的特点，是空气出口位于輥的半徑方向，所以叫做半徑式发生器。圓輥是很短的，只要能安排下所需的小孔便行了。因此，从图13上可能一下子看不出所以然来。但仔細看过后，便会发现在一个粗軸的活动盘上装着带有小孔的圓輥，沿着半徑方向是固定輥和喇叭口（声角），声角基本上与哈尔特曼发生器中的相同，这种发生器也是向着拋物綫的平面輻射的。

图14所示是工业上用的“額式发生器”。

我們已經知道了发生器的构造和作用原理，現在再来探討另一个問題，假設我們是制造发生器的設計者，那么，如何利用已得的知識来設計一个发生器呢？为了得到要求的能量，发生器需要多少壓縮空气，它的尺寸又应当是怎样的呢？

設計发生器时首先要選擇类型。因为制造低頻率的半徑式发生器是很困难的（声波長，因此要在拋物綫平面中安装很大的声角，这是困难的），所以，当制造20千赫芝的发生器时，采用軸心式。当要求較大的能量和頻率高于2.5~3万赫芝时，采用半徑式发生器。其次，要决定轉动盘上孔的数目和直徑以及轉动盘的直徑，这需要依据积累的經驗。好的发生器，在它声角的入口应产生500瓦/平方厘米的强度。如果我們要得到5,000瓦的能量，孔的总面积当然必須为10平方厘米，因为，500瓦/平方厘米 $\times$ 10平方厘米=5,000瓦。讀者也許要問，設計者是否有把握在声角入口取得这样的强度呢？当然是有把握的。可是必須在計算中确实保證得到所需的能量。

現在已得出，孔的总面积是10平方厘米。这10平方厘米分成多少孔呢？这要看頻率才能决定。前面已經說明，发生器頻率是2万赫芝。因此，就需要从結構的角度考虑轉动盘的最大轉速，考虑軸承的强度和質量以及轉动盘和轉动軸的强度，等等。例如，轉速是每分鐘12,000轉，即每秒鐘200轉。一秒鐘內轉动盘旋轉200次，而振動頻率要求它在这段時間內20,000次地关闭靜止盘上孔，因此，轉动盘每轉一次時必須关闭100个孔，这也就是說在周边上必須有100个孔。假如把10平方厘米分作100份，則每个孔所占的面积是0.1平方厘米。既有了圓面积，就可以很容易地算出直徑：每个孔的直徑是3.6毫米。因为，通常孔間距离大于孔本身，所以假設孔+孔間距离=7.5毫米。100孔則需要 $100 \times 7.5 = 750$ 毫米。所以，这一发生器的轉动盘鑽孔部位上的圓周必須等于750毫米，相当的直徑是239毫米。轉动盘本身必須稍大一些，使孔能自由分布，同时在边上留出一定的距离。因此我們規