

# 次声发生机理与装置的研究<sup>\*</sup>

陈 源 黄其柏 师汉民

(华中理工大学机械科学与工程学院 武汉·430074)

**摘要** 本文从平面活塞运动的发声机理出发,研究了次声发生机理,建立了次声场的数学模型;并在此基础上,研制出一种频率、幅度均可调的次声发生装置。通过实验验证了理论模型的正确性,并分析了次声的频率、活塞的振幅、活塞的面积及空间点到声源距离与次声的声压级之间的关系。

**关键词** 活塞发声,次声机理,次声特性

## Research of infrasonic radiation mechanism and equipment

CHEN Yuan HUANG Qibai SHI Hanmin

(Huazhong University of Science & Technology, Wuhan·430074)

**Abstract** In this paper, the mechanism of infrasonic radiation is studied and mathematical model of infrasonic field is established based on plane piston radiation mechanism. The infrasonic radiation equipment, which can adjust the frequency and amplitude of infrasound, is developed. Moreover, the theoretical results are verified by the experiments. The relation among the sound pressure level and infrasonic frequency, piston amplitude, piston area, and distance from infrasonic source to space are discussed.

**Key word** piston infrasonic radiation, infrasonic mechanism, infrasonic characteristics

### 1 引言

次声是频率为 $2\text{Hz}\sim 20\text{Hz}$ 的低频声波,国内外的研究证明,次声是一种对人体有害的声学污染源,它可以引起人的心理烦躁、头晕、头痛、疲劳、失眠及呼吸困难等。但到目前为止,国内外对次声发生机理及次声发生装置的研究还不够完善,特别是在可控次声源的研究方面,不论是在发声频率还是在声辐射能量方面均不够充足,而且次声发生装置复杂。本文主要根据活塞运动的发声机理,对活塞运动产生次声的理论进行了分析,建立了理想情况下次声辐射的数学模型,研制了一种简单的、其频率、幅度均可调的活塞式次声发生装置,并进行了实验测试和理论计算。本文的研究成果可为更深入揭示次声

的规律提供理论依据和科学手段。

### 2 活塞式次声发生机理与数学模型的建立

次声是一种频率很低的声波,在不需考虑重力波影响的频率范围之内(频率在 $0.03\text{Hz}$ 以下时必须考虑重力波影响),次声源仍满足理想介质中声波传播的假设条件。

平面活塞作周期振动时,可以看成是偶极子声源。由于次声的波长又很长( $17\text{m}\sim 170\text{m}$ ),在自由开放空间中难以形成较高强度的次声场。为此,本文采用封闭一极的办法形成了活塞单面辐射的次声源。

#### 2.1 次声场的数学模型的建立

设想将活塞表面分成无限多个小面元,每

<sup>\*</sup> 国家“95”攀登计划项目的资第一作者:陈源,1971年6月生,硕士研究生

收稿日期:98-7-28;修回日期:99-1-20

一个小面元都看成是一个点源。如图 1 所示:

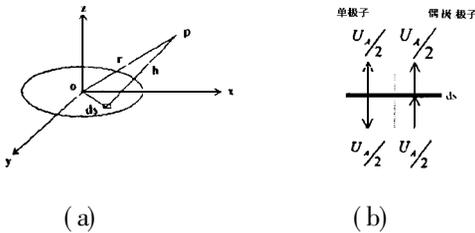


图 1 活塞运动次声辐射几何模型

单面辐射的小面元可以看成为一个单极子源和一个偶极子源迭加而成(图 1b), 忽略偶极子源辐射的声场, 根据单极子点声源的辐射理论, 可得小面元  $dS$  在空间  $P$  点产生的声压为<sup>[1]</sup>:

$$dP = j \frac{k \rho_0 c_0}{4 \pi h} U_A dS e^{j(\omega t - kh)}$$

则活塞运动单面辐射的总声压近似为:

$$P = \iint dP = \iint j \frac{k \rho_0 c_0}{4 \pi h} U_A \cdot e^{j(\omega t - kh)} dS$$

式中  $r$  为活塞圆心到  $p$  点的距离,  $k$  为波数,  $\rho_0$  为平衡态时媒质的密度,  $c_0$  为声速,  $U_A$  为活塞表面振动速度的幅值,  $S = \pi a^2$ ,  $a$  为活塞的半径。

当  $r \gg a$  时, 从各面元发出的声波到达空间  $p$  点, 振幅差异很小, 也就可以把  $h$  近似用活塞中心到  $p$  点的距离  $r$  来代替; 且由于活塞上任一面元产生的次声到空间  $p$  点波的行程差  $L$  与次声波的波长  $\lambda$  相比很小, 即  $L/\lambda$  应为小值, 忽略其高阶小量, 可以认为任一面元发出的声波到达空间  $p$  点的位相相同, 积分得出活塞式次声发生的声压公式为:

$$P = j \frac{k \rho_0 c_0}{4 \pi} \pi a^2 U_A \cdot e^{j(\omega t - kr)} \quad (1)$$

在通常情况下,  $r > 3a$ , 由上式计算声压, 具有足够的精度。

由上述分析可知: 当  $r > 3a$  时, 活塞运动的单面辐射次声波近似为无方向性的球面波, 声压随径向距离  $r$  反比地衰减。

## 2.2 活塞式次声发生装置的理论计算

由(1)式知: 声压的大小与活塞半径  $a$

及其表面振动速度的幅值  $U_A$  有关。这里  $a$  应是等效圆形活塞的半径, 对于边长为  $l$  的正方形活塞, 其值应为  $\pi a^2 = l^2$ , 即  $a = l/\sqrt{\pi}$ 。活塞表面的振动速度为:  $U_1 = U_A e^{j(\omega t - \varphi_0)} = \omega r_0 e^{j(\omega t - \varphi_0)}$  ( $\omega$  为电机转速,  $r_0$  为活塞的振幅即连杆的偏心距), 所以  $U_A = \omega r_0$ 。代入式(1)得:

$$P = j \frac{k \rho_0 c_0 \omega r_0 l^2}{4 \pi r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (2)$$

次声的有效声压为:

$$p_e = \frac{P_A}{\sqrt{2}} = \frac{k \rho_0 c_0 \omega r_0 l^2}{4 \sqrt{2} \pi r} = \frac{\rho_0 \omega^2 r_0 l^2}{4 \sqrt{2} \pi r} \quad (3)$$

式中  $P_A$  为声压幅值,  $k = \omega/c_0$  为波数, 声压

$$\text{级为: } SPL = 20 \lg \frac{P_e}{P_{ref}} = 20 \lg \frac{\rho_0 \omega^2 r_0 l^2}{4 \sqrt{2} \pi r P_{ref}} \quad (4)$$

式中:  $P_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。式(4)即为该次声发生装置的声辐射预测模型。

由式(4)知: 次声发生器的声压级与电机转速、活塞振幅、活塞面积及侧点到声源的距离有关, 调整次声发生器的结构与性能参数可以改变次声的发射频率和声辐射能量。

## 3 次声实验与理论预测

### 3.1 次声实验装置及仪器

本实验所采用次声发生装置为活塞式的, 为了将活塞两极分开, 在实验过程中我们将活塞的一面对着封闭的房间发射, 另一极向自由开放空间发射, 实验是在温度为  $20^\circ\text{C}$  情况下进行的。试验装置及测试分析仪器如图 2 所示。其中次声发生装置主要包括直流调速电机、正方形活塞、箱体等。

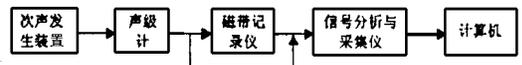


图 2 次声测试与分析框图

### 3.2 理论预测与实验验证

为了验证理论的正确性, 本文进行了试验测试与分析, 同时利用式(4)进行了理论计算, 试验与理论计算的参数为: 正方形活塞的面积  $s = l^2 = 1 \text{ m}^2$ , 温度  $20^\circ\text{C}$  时,  $\rho_0 = 1.21 \text{ kg/m}^3$

$m^2$ ,  $r_0 = 0.04m$ ,  $r = 3m$ , 理论计算值与实验结果如表 1 所示。

表 1 活塞式次声理论与实验结果

电机转速 $n$ (r/min)	152.4	222.6	284.4	322.2
次声频率 $f$ (Hz)	2.54	3.71	4.74	5.37
理论预测值 dB	81.3	87.9	92.2	94.3
实测值 dB	83	85.8	94.6	92.7
误差 dB	-1.7	2.1	-2.4	1.6

活塞作周期运动所产生的声波频率可由

$f_k = K \frac{n}{60}$  ( $K = 1, 2, 3 \dots$ ) 计算, 当电机转速 223 r/min 时, 活塞运动声辐射的理论预测基频及谐波频率分别为  $f_1 = 3.71\text{Hz}$ ,  $f_2 = 7.42\text{Hz}$ ,  $f_3 = 11.13\text{Hz}$ 。图 3 为该转速情况下次声的实测频谱图(在  $r = 3m$  处采样)。由表 1 及图 3 可知: 本文的理论预测结果与实测结果是基本一致的。

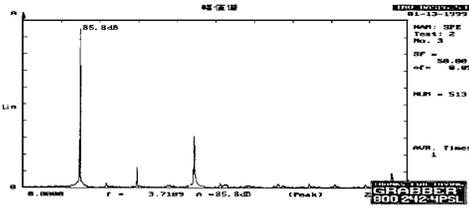


图 3 活塞式次声发生装置的频谱图

#### 4 活塞式次声发生装置的声学特性分析与结论

在实验验证理论正确的基础上, 利用式 (4) 计算了活塞运动的次声声压级与  $r_0$ 、 $S$ 、 $f$  及  $r$  之间的关系, 其结果如图 4~7 所示。

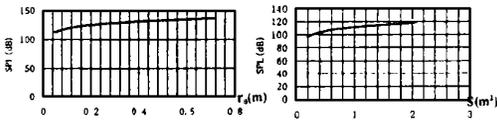


图 4 次声声压级与振幅  $r_0$  的关系

( $f = 10\text{Hz}$ ,  $r = 3m$ ,  
 $S = l^2 = 1m^2$ )

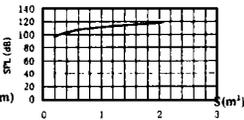


图 5 次声声压级与面积  $S$  关系

( $f = 10\text{Hz}$ ,  $r = 3m$ ,  
 $r_0 = 0.04m$ )

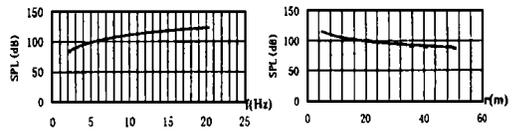


图 6 次声声压级与  $f$  的关系

( $S = 1m^2$ ,  $r = 3m$ ,  
 $r_0 = 0.04m$ )

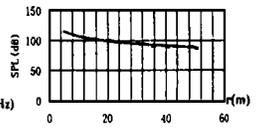


图 7 次声声压级与测点距离的关系

( $S = 1m^2$ ,  $r_0 = 0.04m$ ,  
 $f = 10\text{Hz}$ )

由图 4~7 的分析可得:

(a) 次声辐射的能量随活塞振幅的增加而增加; 声压级与活塞振幅的关系: 在自由开放空间中某点,  $SPL$  随  $r_0$  的增加而增加,  $r_0$  较小时,  $SPL$  增加较快, 随着  $r_0$  增大,  $SPL$  增加的幅度逐渐减小, 当  $r_0 \geq 0.5m$  时,  $SPL$  与  $r_0$  的关系曲线逐渐趋向平缓。

(b) 次声的声压级  $SPL$  与活塞面积  $S$  之间的关系:  $SPL$  随  $S$  的增加而增加, 但随着  $S$  的逐渐增加, 声压级增加的幅度也逐渐减小。由图 5 知, 面积  $S$  从  $0.2m^2$  增加到  $1m^2$ , 声压级  $SPL$  增加了将近 15dB, 而从  $1m^2$  增加到  $2m^2$ , 声压级只增加 6dB 左右, 所以活塞面积不宜选得过大。

(c) 随着次声频率的增加, 活塞运动所产生的次声声压级  $SPL$  也随之增加, 但其增加的幅度逐渐减小。

(d) 次声声压级  $SPL$  随着测点到活塞式声源的距离  $r$  的增加而逐渐衰减, 但其衰减的幅度随  $r$  的增加是逐渐减小的。

(e) 本文所建立的次声辐射预测模型及所研制的试验装置对于揭示次声的发生机理、探索次声的声学规律具有实用价值。

#### 参考文献

- 杜功焕等编著. 声学基础. 上海科学技术出版社, 1981
- 黄其柏等. 次声研究的进展与展望. 工程力学的理论与应用. 北京大学出版社, 1998; 4