

## 关于空气中声速测量实验的讨论

## 物理实验

孙向辉, 周国辉, 刘金来, 杨吉生

(天津大学 应用物理学系, 天津 300072)

摘要: 提出用固定行程系统测量空气中声速的新方法, 与以往所用的变化行程系统进行比较。

关键词: 声速; 固定行程; 变化行程

中图分类号: O 422.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0712(2001)05-0025-04

## 1 引言

声波是在介质中传播的一种机械波。对于声波特性的测量(如频率、波速、波长、声压衰减、相位等)是声学应用技术中的主要内容。特别是声速测量, 在声波定位、探伤、测距等应用中具有重要意义。

在物理实验中, 进行声速测量一般采用超声波。这是因为超声波具有定向好、波长短的特点。采用的方法一般为干涉法<sup>[1]</sup>。

干涉法由于仪器简单且灵敏度高, 所以在测量气体中声速时经常被使用。干涉法分为两类: 变化行程和固定行程<sup>[2]</sup>。变化行程干涉法是历史上先发展和采用的方法。它是指发射器固定不动, 反射器兼作接收器, 并相对发射器做相向运动, 老式的克内泽尔干涉仪就属于这种干涉法。固定行程干涉法理论是鲍尔格斯尼提出的, 它是指发射器和反射面都固定不动, 接收器是用专门的装置在发射器与接收器之间进行声波的接收。伦敦工学院物理实验<sup>[3]</sup>中声速测量就属于这种系统。

现在大多数大中专院校开设的普通物理实验中“空气中声速的测量”属于变程系统, 并提出所谓“驻波法”<sup>[4,5]</sup>, 在实验结果上所得声速一致偏大。其实, 在发射器与接收器之间不是严格驻波场<sup>[6]</sup>, 这在后面的讨论中会看出。利用固定行程理论制成的声速测量仪, 在不增加多少成本的情况下, 原理清楚, 测量精度高, 实验结果较好。

## 2 原理

声速的测量是利用公式  $c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$ , 其中  $f$  为声

波频率, 等于发射换能器的谐振频率, 可由频率计直接读出;  $\lambda$  为本实验所要测量的量。用频率计激振发射换能器, 使之发射简谐声波, 声波在空气中传播遇到反射面发生反射, 反射波与入射波叠加形成驻波, 利用接收换能器对声波进行接收, 从示波器上得到接收到的波形, 两相邻极大值之间的间距为  $\lambda/2$ 。下面就两种系统下, 极大值之间间距的测量进行讨论。

## 2.1 变化行程系统

现在各院校所采用的测量仪, 都属于变程系统测量。以武汉大学科学仪器厂生产的 SBZ-A 型超声声波测定仪为例, 其原理如图 1。

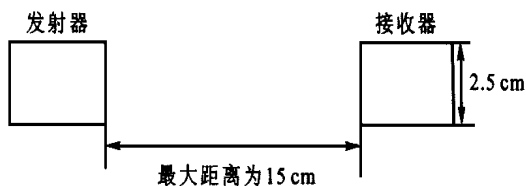


图 1 变程系统原理图

测量仪典型尺寸为: 圆柱形压电陶瓷换能器, 底面直径为 2.5 cm, 长 3 cm, 接收器与发射器最大距离为 15 cm, 换能器频率为 40 kHz。

为计算变程系统中的声场, 这里提出两种模型进行模拟。只讨论在变程系统中的入射波问题, 通过简单模型的模拟, 我们可以看出变程系统中声压分布规律。

1) 两点式变程系统声场的模拟。在图 2 中, 取  $O$  点为声源, 取声场中两根声线  $OA$ 、 $OB$ , 位置如图。把每一条声线看成按简谐平面波传播的路径。由声压公式<sup>[7]</sup>

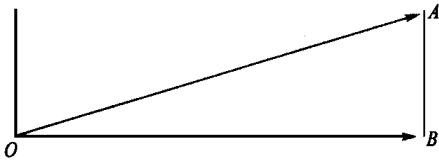


图2 两点式变程系统声场模拟图

$$P(x, t) = P_0 \cos(\omega t - kx)$$

得 A 点声压为  $P_A = P_0 \cos(\omega t - k \cdot |OA|)$ , B 点声压为  $P_B = P_0 \cos(\omega t - k \cdot |OB|)$ , 令  $|OB| = x$ ,  $|AB| = a$ ,  $|OA| = \sqrt{a^2 + x^2}$ ,  $a = 0.015 \text{ m}$ . 则用两点模拟的声场声压为

$$P = P_A + P_B = P_0 [\cos(\omega t - kx) + \cos(\omega t - k \sqrt{a^2 + x^2})]$$

图3为两条入射声线的声压图, 其中, 点线代表  $P_B$ , 实线代表  $P_A$ , 可以看出两条曲线周期不相等. 可见合成后, 入射波不为简谐波.

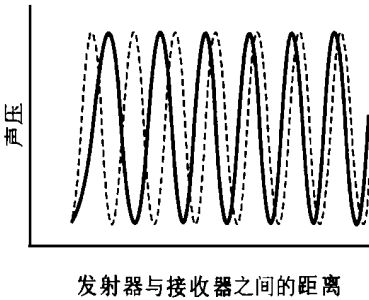


图3 两条声线传播声压分布图

## 2) 平面活塞式换能器的变程系统声场的模拟

用声线法模拟入射声波传播过程时, 不考虑互阻抗、边缘效应和散射场的影响. 设发射面 S 与接收面 S' 的半径均为 a, 相距为 z.

声发射面发出简谐波, 从其上取一点声源 O, 辐射到 S' 面上, 其中声线 1 投射到 S' 上点 A(x, y, z), 则 S' 面接收到由点源 O 发射的声场总压力为

$$P = \iint_{S'} p_1 dS'$$

$p_1$  为声线 1 对 S' 的垂直入射声压, 有

$$p_1 = p_0 e^{i(\omega t - kx \cos \alpha_1 - ky \cos \alpha_2 - kz \cos \alpha_3)} \cos \beta$$

其中  $\cos \alpha_1, \cos \alpha_2, \cos \alpha_3$  为声线 1 的方向余弦,  $\cos \beta$  为 1 与  $OO'$  夹角的余弦, 由图 4 得:

$$\cos \alpha_1 = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \cos \alpha_2 = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

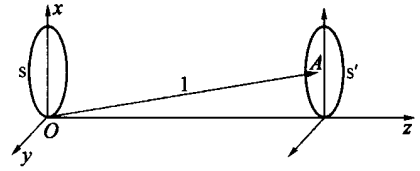


图4 变程系统发射接收模拟图

$$\cos \alpha_3 = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}, \cos \beta = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

$$P = \iint_{S'} p_1 dS' = \int_{-a}^a dy \int_{-\sqrt{a^2 - y^2}}^{\sqrt{a^2 - y^2}} p_1 dx$$

即在 S' 面上接收到从点 O 发射声波的声压大小为

$$P = \int_{-a}^a dy \int_{-\sqrt{a^2 - y^2}}^{\sqrt{a^2 - y^2}} p_0 e^{i[\omega t - \frac{k}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}(x^2 + y^2 + z^2)]} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} dx = \int_{-a}^a dy \int_{-\sqrt{a^2 - y^2}}^{\sqrt{a^2 - y^2}} p_0 e^{i[\omega t - k \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}]} \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} dx$$

声波频率为 27.5 kHz, a 为 1.25 cm, 算得入射波极大值间距分布如图 5. 图中横轴为发射器与接收器之间的距离, 纵轴为极大值间距大小, 虚线为参考水平线. 由此可见, 极大值间距并不为恒定值.

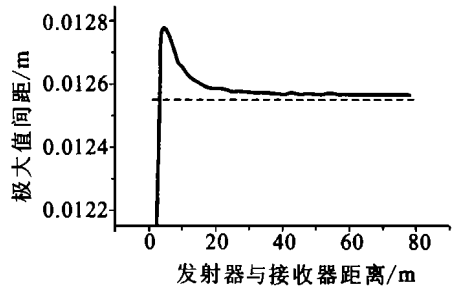


图5 声场中相邻声压极大值间距的变化示意图

如果计算整个发射面发射的声波声压的变化规律, 则应把 P 对整个发射面进行积分, 这里从略.

从两个模型可以看出, 由发射面发射的声波在空间传播时不是以简单而又标准的简谐波传播, 而是在近场区表现出没有周期性规律的特征, 直到远场区才能近似认为是简谐波. 只有入射波为简谐波, 经反射叠加才能形成驻波, 从而测得两相邻极大值的间距. 变化行程系统发射面与反射面相距为 10 cm 左右, 处于远场区的开始阶段, 入射波不能近似为标准的简谐波, 因此, 和反射波叠加后不为标准的驻波, 任意两相邻极大值的间距不等, 导致在不同位置测得的  $\lambda/2$  不同, 这在

实验记录数据中可以观察到, 由此计算所得的声速就可能会有很大的误差。

另外, 我们在做实验中, 观察到示波器上声压极大值的幅度随换能器之间的距离的增大衰减很快, 呈几何衰减, 为球面波的特征。从中可以看出, 测量段声波为球面波, 球面波按汉克函数展开, 取其实部为贝塞尔函数, 它是不等周期函数, 其极大值之间的间距不等。

由于变化行程系统的反射面用的是接收换能器, 而用换能器作为反射面本身就有许多弊端。例如, 用换能器作为反射面导致反射面的大小受到一定限制, 使反射的效率降低。另外, 由于换能器的形状和大小会使其成为声场中的散射体, 在空间激起散射波, 误差加大。

固定行程系统则可避免上述这些弊端。首先, 反射面与接收面分离可以把反射面放置离发射面较远处, 一般为 1~1.5 m, 这样传播到反射面的声波已经为标准的简谐平面波, 从而经反射叠加形成标准驻波, 这样测得的  $\lambda/2$  为常数, 与测量位置无关; 其次, 反射面用相对于声波绝对硬的材料作成, 尺寸可以自定, 通常不小于 15 cm×15 cm, 这样可以使反射的效率提高, 也可以减少由反射面产生的散射场对驻波场的影响; 另外, 在设备上, 使用大功率换能器和电子滤波放大电路也会使误差减小, 而且易于观察记录。

2.2 固定行程系统

定程系统是指发射面固定, 反射面与接收面分离, 如图 6。其中, P 为平面活塞发射换能器, S 为反射面, R 为接收换能器。

在实验中, P 半径为 1.5 cm, R 为一圆柱体, 底面半径为 1.5 cm, 高 3 cm, S 为一 15 cm×15 cm 的刚性平板, 激励源电压有效值为 10 V, 频率为 27 kHz 左右, PR 轴心在同一水平线上, PS 之间为 150 cm, PR 距离大于 50 cm, RS 最小距离不小于 15 cm, 激励源频率误

差< 0.05%, 卡尺读数精度为 0.02 mm。

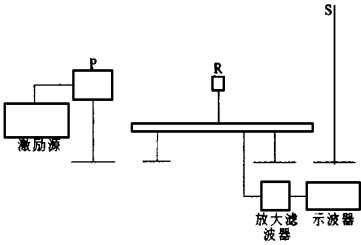


图 6 定程系统装置原理图

从以上参数可知, 入射到 R 上的声波符合远场条件, 可以认为是很好的平面简谐波。入射波和经 S 面的反射波叠加形成驻波, R 为在驻波场中的接收器, 这里可以忽略因 R 的尺寸而形成的散射场, 而无论 R 存在与否, 空间驻波场是存在的。由 R 测得驻波场的声压极大, 两个相邻极大值间的距离为所要测得的  $\lambda/2$ 。

3 实验结果和结论

利用两种系统测量空气中的声速, 下面给出了具体的实验结果并与理论值比较(见表 1)。

理论值计算如下:

测量前: 干泡温度 18.0℃, 湿泡温度 11.0℃;

测量后: 干泡温度 18.0℃, 湿泡温度 11.0℃;

查表: 18℃时相应声压为  $0.020\ 636\times 10^5\text{Pa}$

平均值:  $t=18.0\text{℃}$ ,  $r=26\%$ ,

$$P_s=0.020\ 636\times 10^5\text{Pa}$$

利用公式<sup>[8]</sup>  $v=331.5\sqrt{1+\frac{t}{T_0}}\sqrt{1+0.31\frac{rP_s}{P}}$  m/s  
得  $v=342.53\text{ m/s}$ 。

下面给出多次测量的结果, 图 7 为变化行程系统, 图 8 为固定行程系统。

表 1

系统	变化行程					固定行程				
组数	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
频率/kHz	40.40	40.70	41.10	42.40	42.70	26.23	26.47	26.66	27.00	26.57
$l_1/\text{mm}$	44.500	49.805	32.284	35.770	33.681	5.93	5.86	23.29	22.46	16.23
$l_2/\text{mm}$	48.720	53.110	36.495	39.900	37.762	19.04	18.95	37.23	34.95	29.64
$l_3/\text{mm}$	53.020	57.400	40.679	44.060	41.848	32.34	31.35	50.03	48.21	43.09
$l_4/\text{mm}$	57.120	61.635	45.041	48.100	45.890	45.69	43.95	62.98	61.20	55.52
$l_5/\text{mm}$	61.550	65.835	49.267	52.340	49.950	59.19	57.57	75.72	74.34	68.40
$l_6/\text{mm}$	65.835	70.200	53.431	56.420	53.983	71.95	70.15	88.39	86.53	81.80
$l_7/\text{mm}$	70.110	74.385	57.682	60.560	58.042	84.44	82.63	101.11	98.84	94.49

续表

系统	变化行程					固定行程				
组数	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
$l_8/\text{mm}$	74.320	78.720	61.938	64.660	62.144	98.06	95.41	114.74	111.58	107.02
$l_9/\text{mm}$	78.690	83.010	66.159	68.780	66.165	111.22	109.55	126.98	123.85	119.99
$l_{10}/\text{mm}$	82.980	87.412	70.439	72.940	70.179	123.64	122.51	139.33	137.23	133.53
$l_{11}/\text{mm}$	87.200	91.725	74.643	77.150	74.234	136.87	135.80	152.75	150.63	145.71
$l_{12}/\text{mm}$	91.670	95.985	78.725	81.230	78.255	150.40	147.55	165.71	163.29	158.70
$\bar{\delta}l/\text{mm}$	25.872	25.542	25.398	24.789	24.318	78.432	77.603	77.171	76.288	77.461
$\lambda/\text{mm}$	8.624	8.514	8.466	8.263	8.106	13.072	12.933	12.862	12.715	12.91
$u_\lambda/\text{mm}$	0.371	0.484	0.063	0.043	0.045	0.522	0.861	0.513	0.409	0.565
声速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	348.41	346.52	347.95	350.35	346.13	342.88	342.36	342.90	343.30	343.02
$u_c/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.50	3.3	0.43	0.31	0.32	2.28	3.79	2.28	1.84	2.5
相对误差	1.72%	1.16%	1.58%	2.28%	1.05%	0.11%	0.05%	0.11%	0.22%	0.14%

注:  $l_i$  为极大值时接收器位置;  $\bar{\delta}l$  为  $l_{(i+6)}-l_i$  的平均值;  $u_\lambda$  为波长测量的合成标准不确定度 ( $P=68\%$ );  $u_c$  为声速测量的标准不确定度 ( $P=68\%$ )

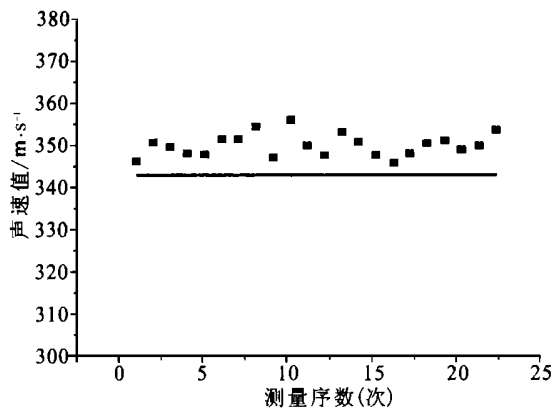


图 7 利用变程系统仪器所做实验结果与理论值的比较

图 7 和图 8 中, 点为根据实验测量结果计算所得值, 实线为理论值(其中包括温度补偿). 由图可见, 利用变化行程系统进行测量, 结果一致偏大, 而利用固定行程系统进行测量, 误差小. 因此, 利用固定行程系统进行测量可以提高精度, 而且原理清楚, 仪器简单, 适合大学物理实验采用.

在试验过程中, 得到了天津大学理学院物理试验中心老师们的大力帮助, 特此感谢.

参考文献:

[1] 贾志富. 声学测量实验[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989. 21 ~ 25.

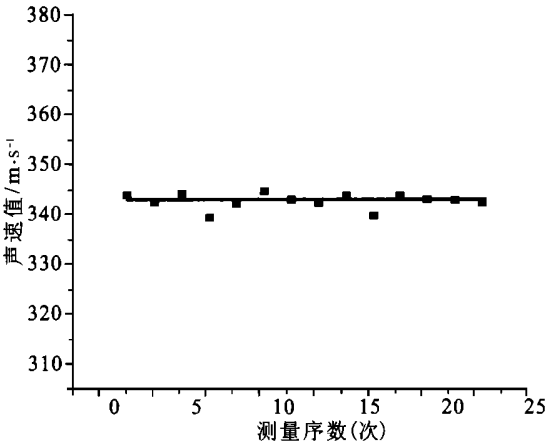


图 8 利用定程系统仪器所做实验结果与理论值的比较

[2] 别尔格曼 L. 超声学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1964. 291 ~ 297.

[3] 惠特利 R M, 亚伍德 J. 伦敦工学院 200 个物理实验[M]. 蔡峰怡等译. 北京: 科学技术出版社, 1984. 195 ~ 196.

[4] 刘振飞, 董明薇. 大学物理实验[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1992. 112 ~ 114.

[5] 张立. 大学物理试验[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1988. 88 ~ 92.

[6] 朱鹤年. 物理实验研究[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994. 219 ~ 233.

(下转 32 页)

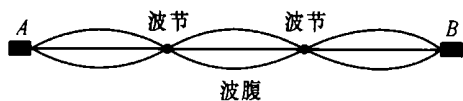


图 4

连接, 所以产生两列频率相同(50 Hz)、振动方向相同、振幅相同、传播方向相反的波, 这两列波叠加会产生驻波, 且其振幅会更强. 再次调整细绳的紧张程度, 使之产生最强的驻波. 此时的驻波比前者强 1 倍左右, 其波腹可达 3 cm, 现象非常明显.

此实验首先采用入射波和反射波相叠加形成驻波的方式(即只用一个电磁打点计时器), 使学生对反射波及驻波的形成机制有一个初步的认识. 然后, 再用两

个打点计时器演示两列同频率、同振幅、同振动方向而沿相反方向传播的波, 所形成的较强的“驻波”, 从而使学生对驻波产生更深刻的认识.

在实验过程中, 只需改变细绳的张紧程度(即改变波速), 就可以改变波长及绳上波形的数目. 绳越松弛, 波长越短, 波数越多; 绳越紧, 波长越长, 波数越少. 现象非常形象直观. 通过上述实验, 学生定会对“驻波”产生深刻的认识.

#### 参考文献:

- [1] 复旦大学, 上海师范大学物理系. 物理学: 力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 397.
- [2] 顾建中. 力学教程[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979. 198.

## The experiment about standing wave with electromagnetic shooting point calculagraph timer

YUAN Nai-rong<sup>1</sup>, SONG Yan-zhi<sup>2</sup>

(1. Department of Physics Hebei Teachers University, Shijiazhuang Hebei, 050091, China;

2. Yutian Teachers School, Yutian, Hebei, 064100, China)

**Abstract:** The shortcomings of traditional experiment “standing wave” is indicated. The new experimental method and effect with electromagnetic shooting point calculagraph timer is expounded.

**Key words:** electromagnetic shooting point calculagraph timer; standing wave; wave loop; wave node

(上接 28 页)

- [7] 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981. 62 ~ 64. 238 ~ 240.
- [8] 丁慎训, 张孔时. 物理实验教程(普通物理实验部分)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992. 258 ~ 262.

## A discussion of an experiment on measuring the velocity of sound in the atmosphere

SUN Xiang-hui, ZHO U Guo-hui, LIU Jin-lai, YANG Ji-sheng

(Department of the Applied Physics Tianjin University, Tianjin, 300072 China)

**Abstract:** A new method of measuring the velocity of sound in the atmosphere is proposed, which uses fixed journey system, comparing to that used varied journey system before.

**Key words:** velocity of sound; fixed journey system; varied journey system  
 ?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>