

驻波法测声速原理教学的讨论

金靓婕, 郭冰, 张纪磊, 梁小蕊

海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台

收稿日期: 2024年2月15日; 录用日期: 2024年3月14日; 发布日期: 2024年3月22日

摘要

针对驻波法测声速实验, 本文说明了现行教材中原理阐释的不完善之处, 并基于大学物理的基础理论知识, 从驻波共振的角度出发, 以清晰简明的方式重新梳理实验原理, 使学生对此实验原理有更清楚的认识。

关键词

声速测量, 驻波共振, 波节势能

Discussion on the Teaching of the Measurement of Sound Velocity with Standing Wave Method

Liangjie Jin, Bing Guo, Jilei Zhang, Xiaorui Liang

Aviation Basic Institute, Nava Aviation University, Yantai Shandong

Received: Feb. 15th, 2024; accepted: Mar. 14th, 2024; published: Mar. 22nd, 2024

Abstract

In response to the experiment of the measurement of sound velocity using standing wave method, the imperfections of the explanation of principle in current teaching materials are explained. The experimental principle is rearranged in a clear and concise way so that students have a clearer understanding of the experimental principle.

Keywords

Measurement of Sound Velocity, Standing Wave Resonance, Wave Node Potential Energy



1. 引言

声速测量是大学物理实验中重要的实验课目之一, 学习该实验可加深学生对大学物理理论课程中学过的机械波传播方式、半波损失、驻波等基本概念的理解。声速测量通常以超声波为实验对象, 以示波器、信号发生器和平行正对放置的压电陶瓷超声换能器组为实验仪器, 采用驻波法和相位比较法进行实验。

驻波法测声速实验中, 两个压电陶瓷超声换能器平行正对放置, 分别称为发射探头和接收探头。发射探头位置固定, 利用逆压电效应将信号发生器的电信号转化成超声波信号向对面传播; 接收探头可以移动, 既可反射声波又可利用压电效应将超声波信号转化成电信号输入到示波器中进行检测。实验根据如下现象测量超声波波长: 示波器上的波形幅度随两个探头间距离的改变而改变; 当波形幅度从一次极大值变化到相邻的另一次极大值时, 接收探头移动的距离为半个波长。对该现象的解释是实验原理的关键所在。但是, 许多大学物理实验教材对该现象的叙述和阐释不完善, 影响了教师的课堂授课效果和学生的学习效果。本文说明常见教材对该原理解释的不完善之处, 而后基于大学物理的相关基础理论, 用清晰的物理图像梳理实验原理。

2. 教材中原理阐释的常见不完善之处

部分教材从波动方程出发解释驻波法测声速的原理[1]。发射探头发出超声波, 忽略空气的吸收, 该超声波在接收探头处发生全反射, 入射波和反射波在两个探头之间形成驻波。入射波, 反射波和驻波的波动方程分别为:

入射波:

$$y_1 = A \cos \left(\omega t - 2\pi \frac{x}{\lambda} \right) \quad (1)$$

反射波:

$$y_2 = A \cos \left(\omega t + 2\pi \frac{x}{\lambda} \right) \quad (2)$$

驻波:

$$y = y_1 + y_2 = \left(2A \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \right) \cos \omega t \quad (3)$$

式中, 位置变量 x 被认为代表了接收探头的位置。当接收探头位置不同时, 驻波的振幅不同, 进而对应示波器上不同幅度的波形。根据纵波的性质, 当接收探头位于驻波波节处时, 声压达到极大, 对应示波器上的波形幅度达到极大值。由于两波节之间的距离为半个波长, 因此移动接收探头依次测出波节位置, 即可求出波长的值。

上述解释的错误之处主要有 2 点。一是混淆了反射波波动方程中的位置变量与接收探头位置的关系。反射波波动方程如式(2)表述的前提之一是反射波和入射波之间的初相位皆为 0, 即二者之间无初始相位差[2], 而实验中的反射波相位存在着由接收探头与发射探头之间的距离 L 所产生的相位差, 而这在式(2)

中没有体现。二是混淆了驻波方程中振幅随位置变量的变化关系与接收信号幅度随两个探头之间距离的变化关系[3]。假设发射探头与接收探头之间距离一定，二者之间形成稳定的驻波，另取一示波器探头进行探测可以得到该驻波波节的信号。但实验中，随着接收探头的移动，两个探头之间不断形成着不同的驻波，因此从一个驻波方程表达式中得到的“两个波节之间的距离为半个波长”的原理表述是错误的。

一些物理实验教材编者已注意到从波动方程出发解释驻波法测声速原理的不完善之处。近年来，许多教材从驻波共振的角度阐释声速测量原理。改变接收探头的位置，当发射探头和接收探头之间的距离 ΔL 满足

$$\Delta L = n \frac{\lambda}{2} \quad (n=1, 2, 3 \dots) \tag{4}$$

两个探头之间出现驻波共振现象，即形成幅度达到极大值的驻波[4]。根据式(4)，相邻两次驻波共振之间接收探头移动的距离为半个波长。但是，对式(4)产生的原因及其与实验现象的关系，教材中缺乏必要的解释和分析，许多学生表示通过上述描述并不能真正理解实验原理。

3. 驻波法测声速原理的教学讲解

综合考虑知识传递的准确性和学生的理论基础，我们在教学中综合运用大学物理中的相关基础理论知识，从驻波共振的角度建立了实验现象和实验原理之间的清晰物理图像，教学中需要重点讲清 3 个问题：① 为什么式(4)条件下会出现驻波共振现象？② 驻波共振条件下的驻波有什么特点？③ 为什么驻波共振状态下示波器上的波形幅度出现极大值？

3.1. 驻波共振状态的成因

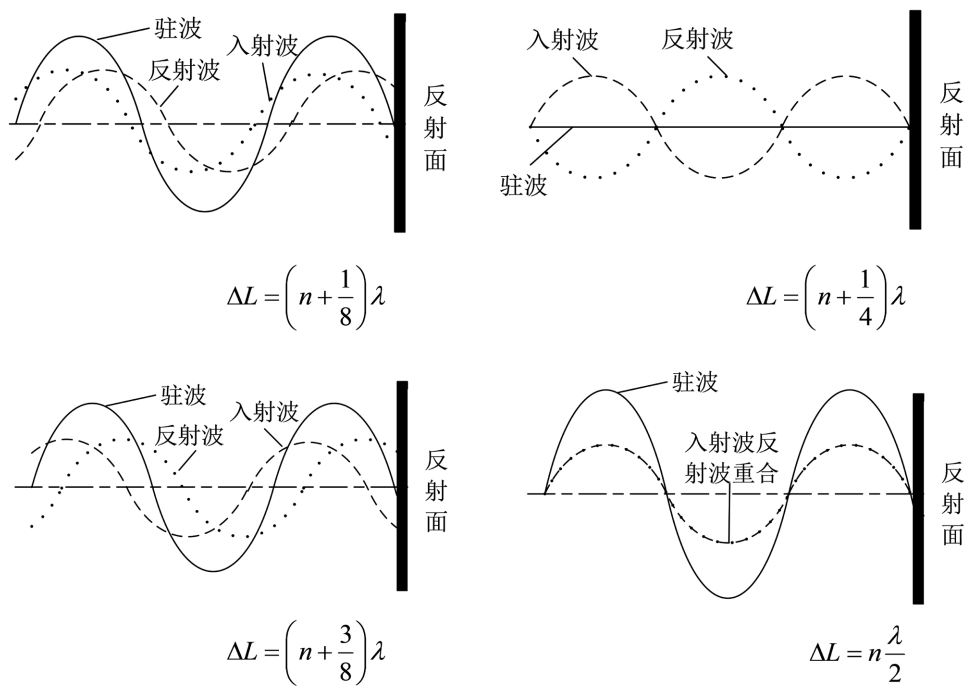


Figure 1. Standing wave when the probe is in different position
图 1. 接收探头位于不同位置时的驻波

驻波是由振幅、频率和传播速度都相同的两列相干波，在同一直线上沿相反方向传播时叠加形成的

一种特殊形式的干涉现象。实验中超声波入射到接收探头表面发生反射形成反射波, 探头铝制表面对空气中声波的反射比约为 1, 发射波和反射波满足形成驻波的条件。考虑到半波损失, 反射波与入射波存在半个周期的相位差, 因此接收探头的位置始终处于驻波的波节。当两个探头之间的距离 ΔL 不同时, 叠加形成的驻波振幅不同, 如图 1 所示。

从图 1 可以看出, 两个探头之间形成的驻波的振幅大小随接收探头位置的改变而改变。根据波的叠加原理, 驻波的波形由发射波和反射波在各点相加所得。当两个探头之间的距离为半波长的整数倍时, 入射波和反射波的波形刚好重合, 合成后的驻波的幅度达到极大, 即出现驻波共振状态。而当两个探头之间的距离不是半波长的整数倍时, 驻波系统偏离共振状态, 驻波振幅随之减小, 直至再次达到共振状态时, 驻波的振幅再次达到极大值。两个相邻的驻波共振状态之间的距离为半个波长。实验中通过移动接收探头测量的也正是这一系列相邻的驻波共振状态之间的距离。

3.2. 驻波共振状态下波节的能量特点

驻波不传播能量, 其能量可以看作波腹处动能和波节处势能的周期性转化。当波腹处分子运动到位移极大值时, 波腹处动能为零, 波节处势能最大。合振动的总能量与合振幅对应[5]。驻波共振状态下波腹振幅达到极大值, 驻波振动的总能量也达到极大值。在此状态下, 当波腹分子运动到位移极大值, 波节势能将大于其他任意状态下的驻波波节势能。由于空气中的声波是纵波, 可以判断驻波波节处势能是空气介质的伸缩势能。

3.3. 驻波共振状态下的波节势能与示波器波形

声波振动信号需要转化成电信号才能够用示波器进行观测, 从能量上来说是势能到电能的转换, 转换的核心器件是接收探头, 即压电陶瓷换能器。在驻波共振状态下, 当驻波波腹分子运动到位移极大值时, 驻波波节处的空气介质伸缩势能达到极大值, 即换能器表面的声压达到极大值。根据换能器的工作原理, 此时通过换能器转换出的电能也相应达到极大值, 进而对应示波器上的波形幅度达到极大值。反过来, 根据示波器的波形幅度从一个极大值变化到相邻的另一个极大值的实验现象, 可以判断出接收探头从一个驻波共振状态的位置变化到了相邻的另一个驻波共振状态的位置, 接受探头移动的距离为半个波长。

4. 结论

针对驻波法测声速课堂教学中实验原理阐释的不完善之处, 本文基于大学物理的相关基础理论重新梳理阐释实验原理: 发射波与反射波合成驻波, 接收探头处始终是驻波波节; 当两个探头之间的距离为半波长的整数倍时, 出现驻波共振, 此时驻波波节势能在波腹分子运动到位移极大值时达到极大值, 接收探头处的声压达到极大值, 产生的电信号达到极大值, 对应示波器上的波形幅度的极大值。教师在教学中需要引领学生理清原理和现象之间的物理路径, 提高学生综合利用所学知识解决实际问题的能力。

参考文献

- [1] 陈巧玲. 工科大学物理实验[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021: 133-135.
- [2] 东南大学等七所工科院校. 物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2020: 66-67.
- [3] 罗志娟, 段永法, 何艳, 等. 声速测量的讨论[J]. 物理通报, 2019(7): 101-103.
- [4] 丛晓燕, 吕刚, 曹学成. 声速测定实验的教学实践研究[J]. 大学物理实验, 2020, 33(5): 39-41.
- [5] 梁德清. 振动相消的质点能量哪里去了? [J]. 物理教师, 2015, 36(8): 55-57.