寻根究底拨迷雾 抽丝剥茧探真相*

——探究声音传播条件实验的商榷与改进

罗宇航 (苏州市吴中区胥口中学 江苏 215164)

摘 要 对论证声音传播条件改进实验进行了研究,在查阅大量声学资料的基础上,从理论上分析了传声介质对声音响度的影响,发现并实验论证了薄膜共振吸声是响度减小的本质原因。文章在磁悬浮声源的基础上对实验进行再改进,借助真空储气罐实现静音抽气,利用磁场力实现声源在水中稳定悬浮,使学生能够连续和清晰地体验实验过程,突出了科学的本质。

关键词 声波 真空不能传声 实验改进

文章编号 1002-0748(2024)6-0030 **中图分类号** G633·7 **文献标识码** B

1 引 言

声音的传播是苏科版《物理(八年级上册)》第1章第一节中的教学内容。教材安排如图1所示的实验演示真空不能传声,由于用电动抽气机抽气时噪音较大,细线也能传出声音,存在一定瑕疵,为此实验有诸多改进方案。如图2所示,有一种普遍改进是将声源直接放入塑料袋中,再将注射器或者手动抽气机伸入到塑料袋中,用手抓紧塑料袋和针筒,尽可能使其密封,在抽气到一定程度时塑料袋会紧贴在声源上,此过程声音能明显减小。为了避免塑料袋贴合后固体传声,实验方案有进一步改进。如图3所示[1],将网状镂空笔筒倒扣在声源上,底部垫泡沫,把它们放置在塑料袋中包裹好,不断地往外手动抽气,当塑料袋紧贴笔筒后,传出声音响度会急剧减小。笔者实测当气压将至80 kPa(标准大气压0.8倍)时,响度能降低12.5 dB。



图1


图2


图3

这类改进实验所需器材简易,操作简单,实验现象明显。但是,仅仅降低0.2个标准大气压就使传出声音响度降低这么明显,真的是因为传声介质的变化导致的吗?对此笔者进行了深入探究。

2 介质传声的理论分析

声音产生于物体的振动,这种介质质点的机械振动由近及远的传播就称为声振动的传播或者称为声波[2],弹性介质的存在是声音传播的必要条件。声强表示通过垂直于声音传播方向的单位面积上的平均声能量流大小,声强一般用符号I表示。本文仅讨论固体振动后通过空气传声时的声强大小,它的计算式为:

$$I=\frac{1}{2}\rho_0 c v_a^2 \qquad ①$$

ρ_0为空气的密度,单位kg/m^3;c为空气中的声速,单位m/s,v_a为质点速度幅值,单位m/s。式①表明,声强大小取决于声速c、空气密度ρ_0、质点速度幅值v_a。根据热力学原理可推出声速理论公式:

$$c=\sqrt{\frac{\gamma R}{\mu}T} \qquad ②$$

γ为绝热指数,对于空气$\gamma=1.402$;μ为摩尔质量,对于空气$\mu=0.029$ kg/mol;$R=8.31$ J/K·mol为理想气体常数;T为绝对温度,单位为K。γ、μ取决于气体的种类,与热力学状态无关,忽略由于气压减小导致空气成分比例的微弱变化,则抽气过程中声速是不变的。声速与空气密度并没有关系,国际标准大气(ISA)[3]的数据也印证了这一点:比如,在海拔为10058 m高度,空气密度为海平面处的0.2586倍,温度-50.4℃(合222.75 K)、声速581 kt(合

* 基金项目:本文系江苏省规划课题“指向育人方式变革的初中物理跨学科实践研究”(课题编号:E/2022/06)和“基于数字化技术的初中物理实验创新实践研究”(课题编号:2023/LX/02/198/06)的研究成果。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

298.9 m/s)，实际声速与根据式②计算出的理论值接近。假设剩余空气质量为 M，抽气过程可以看做等温膨胀过程，根据理想气体克拉伯龙方程：

$$pV=\frac{M}{\mu}RT$$

$$p=\frac{M}{V\mu}RT=\rho_0\frac{RT}{\mu}$$

$$\rho_0=\frac{\mu p}{RT} \qquad ③$$

p 为气压，式③表明空气密度与气压成正比，在静态条件下，结合式①表明声强与气压成正比，抽气时声强随着气压的减小而减小。

由此可见，空气密度减小是声强减小的本质原因，但声速是不会随之减小的。从声音产生的微观机制来说，固体声源振动激发气体振动，抽气时气体分子数密度降低，减少了气体分子与固体的接触频率，也就降低了能量从固体转移到气体的效率。真空不能传声，不是因为真空中声衰减大或者声速为0，而是缺乏能量载体。在声学中，响度能大致反映声强级，声强级与声强成对数关系。如果排除容器的隔声、容器内声音的共振、气压减小导致的容器气密性变化、环境噪音的波动等因素影响，仅从自由声场条件下理论分析，在离点状声源距离固定时声强正比于气压，气压降低20%，响度降低量是远达不到12.5 dB的。

3　改进实验结构的分析

那么上述改进实验为什么能使传出声音响度明显减弱呢？有文献对它的科学性提出质疑[4]，认为是外界大气压将薄膜压在网状瓶盖上并张紧，增加了声波的反射，导致外界声音减小。这个解释值得商榷，如果增强了反射，声能仍然存在于容器内，并没有被消耗，在下一次遇到分界面的时候仍然要有一部分声能透出去。也就是说，就算是增强了反射，也仅仅是使声能传递产生了延时，能量消耗并没有增加。同时，反射声能在总能量的比例主要取决于入射角度、两种介质特性阻抗大小关系，认为薄膜张紧能增强反射是缺乏理论依据的，因此笔者进一步查阅关于隔声和吸声的资料以期获得解释。

从隔声角度分析，它主要遵循质量定律，即材料面密度越大，隔声性能越好。当气压降低，塑料袋薄膜绷紧时，面密度不会改变，反而可能会由于吻合效应而减弱隔声效果。

从吸声的角度分析，除了多孔性材料有较好的吸声能力外，利用共振也能够吸声。塑料袋内气压略低于大气压后，大气压把塑料袋压紧在笔筒外表面围成一个共振声学空腔，整体构成一个薄膜共振吸声结构，塑料袋材质的弹性和空腔内空气的弹性共同构成了吸声结构的弹性，当塑料袋受到声波的激励时系统发生共振，塑料袋产生变形，在形变的过程中塑料袋将要消耗能量，起到吸收声能的作用，因此传出的声音响度明显减小。

针对这个理论解释，笔者用实验进行了验证。如图4所示，实验过程为：①在塑料瓶各个面钻5 mm直径的孔，将正在播放声音的小音箱放入塑料瓶内。②塑料瓶外面用单层厚度均为20 μm的油纸、塑料袋(聚乙烯)、TPU膜整体包裹，收口处接抽气管并扎紧，用分贝仪放在离笔筒10 cm处测出声音响度。③用带有气压表的手动抽气机抽气，当气压均降至约0.8 kPa时，读出分贝仪显示的响度，然后计算出响度降低量。实验数据如表1所示。



图4

表1　薄膜吸声性能与弹性关系

材料	油纸	聚乙烯膜	TPU薄膜
弹性	差	较好	好
抽气前响度/dB	81.5	80.7	81.1
抽气后响度/dB	78.2	68.2	57.4
响度降低量/dB	3.3	12.5	23.7

这三种材料面密度接近，在没有抽气时具有相同隔声性能，油纸刚性最好，TPU薄膜则具有非常好的弹性。实验数据可以初步反映薄膜弹性越好，越容易发生薄膜共振消耗声能，从而传出声音响度越弱。因此，这类改进实验中，容器内趋于真空并不是声音响度减小的主要因素，薄膜共振吸声才是本质原因，并不适用于论证真空不能传声。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

用刚性容器进行实验可以避免薄膜共振，知网上有文章提出过此类改进实验，但仍存在问题。

方案1[5]：如图5所示，用橡皮筋拴住小喇叭并用双面胶固定在真空盖后面，打开小喇叭开关，将真空盖盖在玻璃瓶上并旋紧；用手机分贝仪软件测出传到瓶外的声音响度大小，用手动抽气机抽气后，声音响度从42 dB降至22 dB。这个数据的准确性是值得商榷的，基于以下三点考虑：

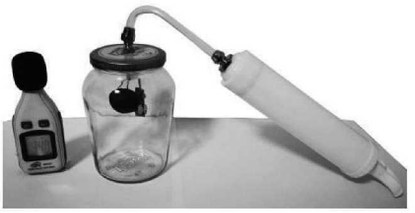

图5

(1) 即使在深夜安静的房间内，环境背景噪音值仍在25 dB以上，不可能低至22 dB。

(2) 笔者购买相同器材重复了上述实验，这种音乐芯片发声功率低，经过玻璃瓶隔声后传到外面的声音较弱，并不能在环境噪音响度值的基础上提高12.5 dB。

(3) 所用的塑料抽气机是不带逆止阀的，玻璃瓶的气密性由气密性很差的活塞决定，实测瓶内能达到的最低稳定气压高于90 kPa。用专业噪声测量仪器放在容器外10 cm处进行测量，抽气后响度减少量在3 dB以下。

方案2[4]：如图6所示，准备一个体积比声源略大的透明瓶子，底部垫一些海绵后把声源装入其中，盖上联通两用抽气筒的密封盖，在抽气过程中学生能听见传出声音略微减小。实验的结果与本文的分析较为吻合，这类常见的手动抽气筒气密性不好，气压降低量有限，而瓶子是刚性的，不会发生薄膜共振吸声，所以抽气过程中声音的降低量由真空度决定，有限的声音降低量使学生缺乏对声音减弱的过程体验，没能提供充分的科学事实，用实验推理法得出结论非常牵强。



图6

4　实验的再改进

4.1　改进后的实验装置

为了避免现行实验存在的问题，改进实验运用磁悬浮来隔绝固体传声，用真空储气罐来进行抽气。装置主体部分用到的材料主要有：平底透明塑料广口罐(上口直径100 mm，高200 mm，容积1.5 L)，网购的一个霍尔效应磁悬浮底座(直径120 mm)，电池(电压14.8 V)，蓝牙音箱(直径38.5 mm，高48 mm)，磁铁圆片(直径50 mm)，瓶子(内直径50 mm，高70 mm)。装配结构如图7所示，将广口罐底部粘接在磁悬浮底座上，瓶子底部粘接在此磁铁圆片上，把音箱放入瓶子后盖上盖子密封，利用同名磁极相斥，使瓶子整体在广口罐内“悬浮”于磁悬浮底座上方。



图7

在主体基础上进行器材补充：负压表两个，8 mm气管快速接头三套，分贝仪，节流阀，8 mm高压气泵管，容积为15 L的储气罐和抽气机，配套接头若干。如图8所示，在广口罐盖子顶部开孔，安装负压表和气泵管接头，从接头开始依次装气泵管、节流阀、气泵管、快速接头公头，在储气罐安装快速接头母头，抽气机上接快速接头公头，储气罐安装负压表。

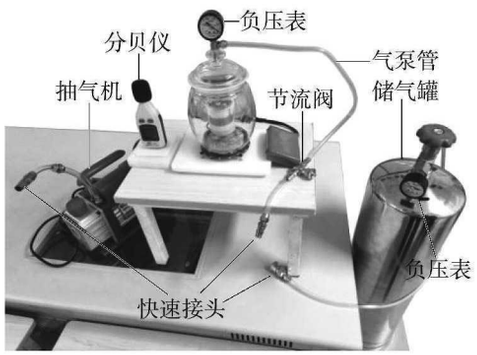

图8

4.2　演示真空不能传声

实验过程如图9所示。



图9

(1) 课前把抽气机以及储气罐的快速接头连接，将储气罐抽真空，关闭储气罐阀门。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(2) 课堂上把广口罐盖子以及储气罐的快速接头连接,接通磁悬浮底座电源,将蓝牙音箱打开电源后放入瓶中,盖上密封盖,磁铁朝下轻轻放入磁悬浮底座的正上方,使其悬浮,用手机控制蓝牙音箱播放重低音音乐,音箱上方放一些泡沫塑料粒,盖上广口罐盖子。

(3) 打开储气罐阀门,略微打开节流阀,学生观察到随着气压慢慢降低,泡沫塑料粒的跳动幅度不变、声音响度减小。

(4) 关闭储气罐阀门和节流阀,断开快速接头,再略微打开节流阀使外部空气慢慢进入广口罐内,学生观察到随着气压慢慢升高,泡沫塑料粒的跳动幅度不变,声音响度增大。

假设标准大气压为 p_0,抽气过程传出声音响度与气压关系见表2。

表2　声音响度与气压关系

环境噪音/dB	36.3									
气压	p_0	$0.9p_0$	$0.8p_0$	$0.7p_0$	$0.6p_0$	$0.5p_0$	$0.4p_0$	$0.3p_0$	$0.2p_0$	$0.15p_0$
响度/dB	53.2	52.7	51.6	47.8	43.6	41.2	39.6	38.0	37.2	36.9

实验数据分析:如果储气罐完全真空,广口罐内空气缓慢流入储气罐,气体等温膨胀,假设储气罐和透明罐的容积分别为 V_1 和 V_2,两个容器内热力平衡后气压为 p_1,根据玻意耳定律:

$$p_0V_1 = p_1(V_1+V_2)$$

因为 $V_2 = 10V_1$,所以 $p_1 = 0.091p_0$,理论上能使透明罐气压降至 $0.091p_0$,但是抽气机实际只能将储气罐抽气至 $0.05p_0$,广口罐与储气罐联通后气压能够达到的最低值为 $0.15p_0$,将表2中气压和声音响度呈现在坐标图中,如图10所示,可以初步判断气压降低的初期和末期声音响度减小幅度很小,气压在 $0.8p_0$ 降至 $0.3p_0$ 到之间变化时声音响度减小幅度较大。实验避免了抽气机或者手动气泵抽气时带来的噪声干扰,学生能够连续和清晰地体验实验过程,在气压降至最低值 $0.15p_0$ 时,声音响度接近环境噪音值,在此基础上进行科学推理更能逼近科学的本质。

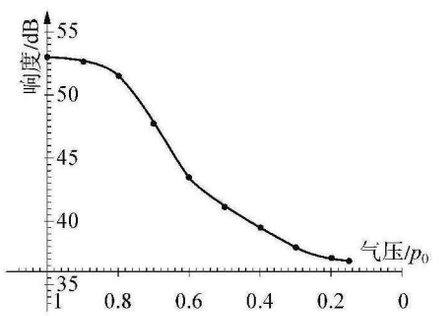

图10

4.3　演示气体、固体和液体传声

在得出真空不能传声基础上,可以演示气体、固体和液体传声,实验前在瓶子内底适当加入一些配重,使瓶子完全浸没于水中时总重力略大于浮力。

实验过程:

(1) 将蓝牙音箱打开电源后放入瓶中,使其悬浮。

(2) 操作手机使蓝牙音箱与手机配对,播放音乐,能听到声音,得出结论空气能传声。

(3) 盖上广口罐的盖子,仍然能听到声音,得出结论瓶体(固体)能传声。

(4) 如图11所示,打开盖子,向广口罐中倒入1.2 L水,使装有音箱的瓶子完全被水包围,仍然能听到声音,得出结论水能传声。



图11

演示好气体、固体和液体能传声,关键在于要排除其他传声介质的干扰,实现传声介质的唯一性,水能传声实验一般的改进仅靠调整浮力与重力使两者平衡,从而实验悬浮于水中,但稳定性非常差。通过浮力、重力、磁场力这三个力来实现平衡,所需磁场力大小会根据磁体间距离而自动调整,实验操作简便,现象明显。

5　结　语

物理学是以实验为基础的自然科学,实验是学生认识自然规律的基本途径。但是有些实验现象似是而非,教师追求实验简单易操作的同时不能忽视其科学性,应该以批判质疑的眼光去审视它们,通过对实验的不断改进创设有利于激发学生理性思考的感性素材,从而突出科学的本质。

(下转第47页)

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的字数宜控制在200字以内，这样既能够说清楚关键信息，同时又可以缩短学生的阅读时间，降低非智力性因素对考试的影响，增强学生对考试的信心。

4.3　问题设置高度关联，紧密联系素材情境

教师在命题时需要注意，问题的设置应该和传统文化素材情境紧密联系，不能出现戴帽子现象，即情境和问题是割裂开的，没有素材背景，学生也能答题。教师在设置问题时，可以从以下两个角度进行命制。

（1）基于素材的真实情境，让学生解释现象、定性分析。例如2023年安徽省中考第2题：图7为我国晋代顾恺之所绘《斫琴图》的局部，展示了古代乐师调整琴弦长度的情景。调整琴弦的长度，主要是为了改变乐音的_____（选填“音调”“响度”或“音色”）。试题基于斫琴图的实际情境，乐师在演奏前改变琴弦长度来调整音准，考查乐音三要素里的音调，用物理知识解释现象。这类试题难度较小，适合编制成选择题或填空题。



图7　斫琴图（局部）

（2）基于素材的真实情境，让学生进行推理、论证和定量计算。例如2023年重庆中考A卷第19题：桔槔是《天工开物》中记载的一种原始的汲水工具。如图8所示，硬杆用细绳悬挂在树上，杆可绕O点自由旋转且与树之间无作用力，用细绳将重力为20 N、容积为2.8×10^{-2} m^{3}的桶悬挂在B端，在A端重120 N的拗石辅助下，人可轻松将一桶水从井中提起，$OA:OB=3:2$；悬挂桶的绳子始终保持在竖直方向上，忽略杆和绳的重力。求：①桶装满水时，求水的质量；②空桶在井中漂浮时，求桶排开水的体积；③一重力为480 N的人用桔槔将装满水的桶提出水面后（忽略桶外壁沾水），桔槔处于平衡状态时，人与地面的受力面积为500 cm^2，求人对地面的压强。试题基于古人利用桔槔取水的情境，围绕整个取水的过程，给出具体数据，进行相关的设问。三个小问循序渐进，难度逐步加大，第一小问利用密度的公式进行质量的计算；第二小问借助漂浮时的受力情况并结合阿基米德原理进行体积的计算；第三小问则是对人进行受力分析，结合前两小问的数据，同时根据牛顿第三定律求出人对地面的压力，从而计算压强，难度最大。试题考查了学生运用所学知识进行逻辑推理、分析论证，最后进行定量计算的能力。这类试题难度较大，适合编制成实验探究题、计算题或者综合应用题。



图8　桔槔图

5　结　语

试题中渗透中华传统文化是未来命题的一大趋势，这既能考查学生对物理知识掌握的情况，同时也有利于弘扬中华优秀传统文化，增强学生的民族自豪感和文化自信心。对于教师而言，把握试题中文化元素的渗透既有利于教师提高课堂教学质量，同时也能提升试题命制能力，为振兴中华文明贡献自己的一份力量。

参考文献

[1] 中华人民共和国教育部. 义务教育物理课程标准（2022年版）[S]. 北京：北京师范大学出版社，2022.

[2] 中华人民共和国教育部. 关于印发《完善中华优秀传统文化教育指导纲要》的通知[R]. 教社科[2014]3号[EB/OL]. (2014-03-28)[2022-03-23]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A13/s7061/201403/t20140328_166543.html.

[3] 中华人民共和国教育部. 关于印发《中华优秀传统文化进中小学课程教材指南》的通知[R]. 教材[2021]1号[EB/OL]. (2021-01-19)[2022-03-23]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A2b/s8001/202102/t20210203_512359.html.

[4] 王雪，杨瑛，邵明辉，李文卓. 中华传统文化元素融入中学物理教学探索　以“光学”专题教学为例[J]. 物理教师，2023(2).

[5] 杜明荣，孔桢乐. 中华传统文化融入物理教学的价值与策略[J]. 物理通报，2023(6).

（上接第33页）

参考文献

[1] 刘燕妮，汤金波. 学生自主创新实验在初中物理复习课中的巧妙应用　以“声音的复习”为例[J]. 中学物理，2020(6)：43　46.

[2] 杜功焕，朱哲民，龚秀芬. 声学基础[M]. 南京：南京大学出版社，2012.

[3] Cavcar M. The international standard atmosphere (ISA) [J]. Anadolu University, Turkey, 2000, 30(9): 1-6.

[4] 姚慧源，张伯林. 从实验的科学性角度看物理教具创新　“真空铃”实验改进及反思[J]. 中学物理，2021(1)：18　20.

[5] 姬影，彭朝阳. “双减”背景下学生自主创新实验作业的实施　以真空铃实验改进为例[J]. 中学物理教学参考，2022(12)：66　68.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net