

文章编号: 1004-4353(2015)03-0215-04

非惯性运动下声波的多普勒效应

武璇, 黄双印, 郭振平*

(延边大学理学院 物理系, 吉林 延吉 133002)

摘要: 由于惯性运动的苛刻条件, 生活中没有绝对的惯性运动, 更多的是非惯性运动; 因此, 在生活中应用声波的多普勒效应时, 须考虑声源和观察者运动的加速度. 本文用时空结合的方法, 描述出观察者或声源沿声波方向做匀变速直线运动的多普勒效应及其相应的表达式. 结果表明, 多普勒效应不仅与观察者相对声源的运动初速度有关, 还与其相对加速度有关.

关键词: 多普勒效应; 非惯性运动; 加速度; 时空图

中图分类号: O412.1

文献标识码: A

The Doppler effect of sound wave under non inertial motion

WU Xuan, HUANG Shuangyin, GUO Zhenping*

(Department of Physics, College of Science, Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: Due to the harsh conditions of the inertia motion, no inertial motion in our daily life and non inertial motion is common. So, the application of the Doppler effect should take the acceleration of motion of the observer and sound source into consideration. In this paper, we use the method combining space and time to describe the Doppler effect of observer or sound source moving along the direction of the wave with certain acceleration. Combining mathematical graph and analysis to infer that the Doppler effect is not only associated with the speed of the observer to the sound source, but also related to acceleration of the observer to the sound source.

Key words: the Doppler effect; no inertial motion; acceleration; the space-time diagram

多普勒效应是波源和观察者有相对运动时观察者接受到的波的频率与波源发出不同频率的现象. 目前所讨论的声波的多普勒效应要求声源和观察者必须做惯性运动^[1-9], 而非惯性运动是生活中最常见的运动形式, 例如: 坐在加速运动的动车组中听到车外声音的频率变化, 在航海中应用多普勒声呐给加速运动的船舶定位, 特别是喷气机、洒水车、火箭这类的变质量系统, 其运动速度总是在变化的. 近年来, 人们对非惯性运动进行了一些研究, 例如: 张洪波等^[10]探讨了非惯性运动目标弹道预报技术, 周树道等^[11]研究了基于非惯性运动状态的气象无人机测风方法, 熊标等^[12]导出了非惯性系之间的相对运动方程. 在现代工程中, 一些学者还对非惯性运动的多普勒效应的应用进行了研究, 如周继惠等^[13]基于多普勒效应设计了超声波测振系统, 张万君等^[14]基于连续波雷达微多普勒效应对弹丸转速进行了测试, 张伟等^[15]考察了双站 SAR 雷达目标旋转部件的微多普勒效应, 叶娇等^[16]探讨了高速移动下轨道交通无线通信系统的多普勒效应. 然而, 由于没有理清多普勒效应的适用条件, 导致了一些应用上的误区, 如应用多普勒效应测量重力加速度^[10]、测量物体运动的加速度^[11], 等等; 因此, 研究非惯性下声波的多普

勒效应具有重要的理论意义和实际价值. 本文将用时空结合的方法, 描述出观察者或声源沿声波方向做匀变速直线运动的多普勒效应及其相应的表达式, 并结合生活实例讨论其应用.

1 观察者沿声波方向做匀变速直线运动的多普勒效应

如图 1 所示, 假设声源发声时, 观察者沿着声传播方向做初速度为 u 且加速度为 a 的匀变速直线运动, l 表示观察者在运动方向上离声源的初始距离, 声音在静止空气中传播的速度为 v , 则 t 时刻观察者运动到距离声源

$$x=l+ut+\frac{1}{2}at^2.$$

(1)

这里规定远离声源方向时 u 、 a 为正值, 靠近声源方向时 u 、 a 为负值. 声源的振动以相速在空气中传播, 可以认为每一个周期发出一个同相位信号^[9], 声源每一周期发出声信号的相位在静止空气中的传播时间为:

$$t=k_0x+nT, n=0,1,2,3,\cdots.$$

(2)

式中 $k_0=\frac{1}{v}$, T 表示声源的振动周期, n 表示从零时刻起所发声波的周期数. 每一周期声信号的相位在静止空气中的传播和观察者的运动在时空图中的描述如图 2 所示. 图 2 中的一系列交点表示观察者对声相位信号的接收, 相邻相位信号的接收时间间隔表示观察者对声信号的接收周期 T' . 从图 2 中的一系列交点可以看到, T' 随着位置和时间的改变而改变, 即观察者沿声源方向做匀变速直线运动时, 所接受到的声信号的频率或周期随观察者相对声源的位置的变化而变化. 当声源的振动周期和观察者的运动速度比较小时, 图中 2 个交点之间的斜率($k_1, k_2, k_3, \cdots, k_n$) 可近似地看成是观察者的运动曲线上时间 t 对距离 x 的导数:

$$k_n=\frac{dt}{dx}=\frac{1}{\sqrt{u^2+2a(x-l)}}.$$

(3)

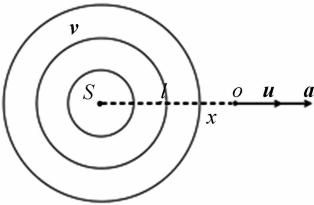


图 1 观察者相对声源做匀变速直线运动

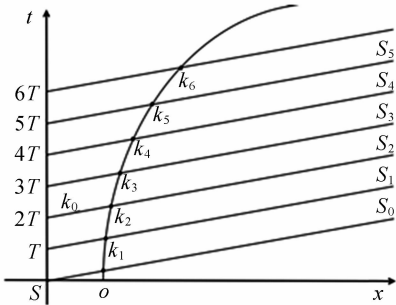


图 2 用时空图描述声信号的传播和观察者的运动

由图 2 中几何关系可看出 $\frac{T'-T}{k_0}=\frac{T'}{k_n}$, 于是得

$$T'=\frac{vT}{v-\sqrt{u^2+2a(x-l)}}.$$

(4)

式(4)表明, 观察者沿声波方向做匀变速直线运动时, 观察者接收声信号的周期除了与其运动的初速度有关还与其运动的加速度有关. 当取 $a=0$ 时, $T'=\frac{vT}{v-u}$, 此式即为观察者沿声波方向做匀速直线运动时的多普勒效应公式.

2 声源沿声波方向做匀变速直线运动的多普勒效应

如图 3 所示,假设声源沿着声传播方向做初速度为 u_s 且加速度为 a_s 的匀变速直线运动, l 表示声源在运动方向上离观察者的初始距离,则 t 时刻声源的运动位移为 $x = u_s t + \frac{1}{2} a_s t^2$, 如图 4 所示. 声源第 n 周期发出声信号时距离初始位置为:

$$x_A = u_s (nT) + \frac{1}{2} a_s (nT)^2, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \tag{5}$$

观察者接收到该信号的时刻为 $t = \frac{l - x_A}{v} + nT$, 即

$$t_n = \frac{1}{v} \left[l + (v - u_s) nT - \frac{1}{2} a_s (nT)^2 \right].$$

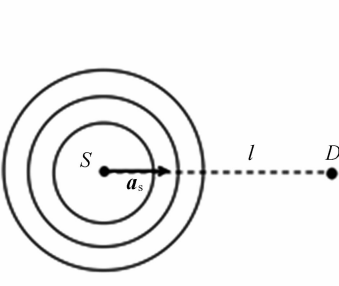


图 3 声源相对观察者做匀变速直线运动

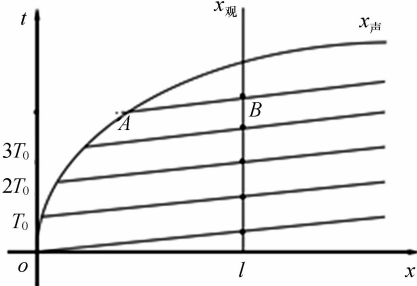


图 4 用时空图描述声信号的传播和声源的运动

按声信号的接收周期 T' 的定义,有

$$T' = t_n - t_{n-1} = \frac{1}{v} \left[(v - u_s) T - \frac{1}{2} a_s (2n - 1) T^2 \right]. \tag{6}$$

显然,在声源做匀变速直线运动时, T' 不仅取决于波速与声源初速之差,还与其运动加速度有关,而且随着其位置的改变而改变. 当 $a_s = 0$ 时, $T' = \frac{(v - u_s) T}{v}$, 即过渡到声源沿声波方向做匀速直线运动时的多普勒效应公式. 因此,观察者或声源沿声波方向做匀速运动的多普勒效应只是沿声波方向做匀加速运动的一个特例.

3 结果与讨论

在日常生活中,声源或观察者做匀变速直线运动的例子非常多. 例如一辆汽车以初始速度 u_s 行驶在马路上,在距离行人 l 处发现行人并鸣笛,然后以加速度 $-a_s$ 开始减速,根据式(6),取 $n = 1$, 有

$$T' = \frac{1}{v} \left[(v - u_s) T + \frac{1}{2} a_s T^2 \right],$$

则行人接收到汽笛的频率为 $f' = \frac{vf}{v - u_s + \frac{a_s}{2f}}$. 通常, $u_s < v$, 因此随着汽车的靠近,行人听到汽笛声的频率比车静止时要小,换言之,音调由低变高时汽车将停止.

下面考察利用多普勒效应测定重力加速度的问题. 在文献[17]中给出了如下的测量方案:“实验开始,将恒定频率声源从高处抛下,让其做初速度为零的自由落体运动,与此同时,在地面安置的声波接收器开始接收声波频率”,这里显然声源是朝向接收器做加速运动的,不宜应用惯性运动的多普勒效应.

下面再考察根据多普勒效应测量物体运动的加速度的问题. 文献[18]的作者利用美国 PASCO 公司生产的声传感器、数据采集接口和专用的实验数据处理软件直接实时测量拍周期,进而根据多普勒效应利用气垫导轨测量了做匀加速运动物体的加速度,这里明显忽略了多普勒效应的适用条件.

4 结束语

本文针对非惯性运动的场合容易误用惯性运动的多普勒效应的问题,探讨了非惯性运动多普勒效应的表达式,得出:在观察者沿声波方向做匀变速直线运动时,观察者接收声信号的周期除了与其运动的初速度有关还与其运动的加速度有关;在声源做匀变速直线运动时,观察者接收声信号的周期不仅取决于波速与声源初速之差,也与其运动加速度有关,而且随着其位置的改变而改变.

参考文献:

- [1] 张汉壮,王文全. 力学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2015.
- [2] 赵凯华. 不同参考系中多普勒效应公式的统一[J]. 大学物理,2006,25(7):1-3.
- [3] 钟锡华. 多普勒效应的普遍公式[J]. 大学物理,1995,14(10):16-18.
- [4] 贾湘平. 多普勒效应探讨[J]. 辽宁工业大学学报,2011,31(6):395-397.
- [5] 赵峥. 大爆炸和宇宙学红移中常被误解的几个观念[J]. 大学物理,2011,30(2):9-12.
- [6] 李光仲,刘俊英,闫鹏,等. 基于数字存储示波器的超声多普勒效应实验系统的研究与应用[J]. 大学物理,2009,28(12):33-35.
- [7] 黄逸菁. 超声多普勒法的血流检测[J]. 大学物理,1997,16(2):37-39.
- [8] 龚劲涛,王素芳. 对多普勒效应中几个问题的探讨[J]. 物理与工程,2010,20(4):65-67.
- [9] 王克勋. 用时空线分析多普勒效应[J]. 大学物理,1997,16(12):8-11.
- [10] 张洪波,谢愈,陈克俊,等. 非惯性运动目标弹道预报技术探讨[J]. 现代防御技术,2011,39(6):26-31.
- [11] 周树道,王彦杰,王敏,等. 基于非惯性运动状态的气象无人机测风方法研究[J]. 传感技术学报,2011,24(1):155-158.
- [12] 熊标,郭振平. 非惯性系之间相对运动方程的探讨[J]. 延边大学学报(自然科学版),2014,40(2):121-124.
- [13] 周继惠,陈刚,曹青松,等. 基于多普勒效应的超声波测振系统设计[J]. 仪表技术与传感器,2015(7):61-85.
- [14] 张万君,吴晓颖,冷雪冰,等. 基于连续波雷达微多普勒效应的弹丸转速测试方法[J]. 装甲兵工程学院学报,2012,26(5):47-50.
- [15] 张伟,童创明,张群. 双站 SAR 雷达目标旋转部件的微多普勒效应[J]. 现代雷达,2011,33(3):51-54.
- [16] 叶娇,覃添翼,李亚斌. 高速移动下轨道交通无线通信系统的多普勒效应[J]. 城市轨道交通研究,2013,16(2):34-37.
- [17] 汉泽西,徐岳,甘志强. 利用多普勒效应测定重力加速度[J]. 计量与测试技术,2009,36(8):32-34.
- [18] 金聪,段品佳,王爱军,等. 根据多普勒效应测量物体运动的加速度[EB/OL]. [2015-07-02]. <http://wenku.baidu.com/view/c613197302768e9951e7381b.html>.