

超声速多普勒效应

渠基雷

(衡水师范专科学校 河北 053000)

多普勒效应是一种重要的物理现象. 当声源相对观察者以低于声速的速度运动时, 听到的声频变高或变低, 这是人们所熟知的. 但是, 当声源运动速度等于或大于声速时, 多普勒效应又怎样呢? 这是一个奇特而有趣的问题.

为简明起见, 本文采用时空线图解法, 取观察者始终静止, 而声源先静止, 尔后以不同速度沿直线向观察者运动, 着重讨论一下超声速时的多普勒效应.

一、声源与观察者都静止

为了直观地描述声信号的发射、传播与接收情况, 可采用时空线图解法. 在图 1 中, ox 轴为表示空间的一个直线坐标轴, 设声源与观察者分别位于 o 点和 o' 点, 再建立两个时间坐标轴 ot 与 ot' . 图 1 中直线 C' 为声信号传播的时空线, 其斜率 $\operatorname{tg}\alpha = \Delta t / \Delta x = 1/v$, 式中 v 为声速.

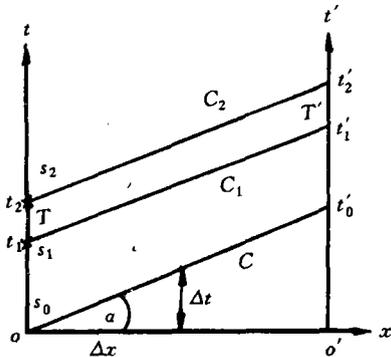


图 1

由图 1 可知, 声源在 $t = 0$ 时刻发出的信号 s_0 观察者在 t'_0 时刻听到. 而声源在 t_1 与 t_2 时刻发出的信号 s_1 与 s_2 , 观察者在 t'_1 与 t'_2 时刻听到. 由于 s_1 与 s_2 传播的时空线 C_1 与 C_2 皆平行时空线 C , 故 $t_2 - t_1 = t'_2 - t'_1$. 若 $t_2 - t_1 = T$, $t'_2 - t'_1 =$

T' , 则有 $T = T'$, 亦即 $f = f'$. 可见, 在此情况下声波的周期或频率均不变, 无多普勒效应, 且信号的先后次序不变, 为正时序. 这是平常的声传播现象.

二、声源速度小于声速

此情况下声源的时空线为 C_s , 其斜率 $\operatorname{tg}\beta = 1/v_s$, 式中 v_s 为声源的运动速度. 由图 2 可

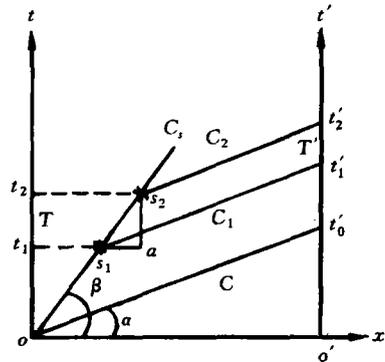


图 2

知, 声源在 t_1 与 t_2 时刻发出的声信号 s_1 与 s_2 , 观察者分别在 t'_1 与 t'_2 时刻听到. 固声波时空线 C_1 与 C_2 皆平行时空线 C , 故有 $t'_2 - t'_1 < t_2 - t_1$. 若 $t_2 - t_1 = T$, $t'_2 - t'_1 = T'$, 则 $T' < T$, 亦即 $f' > f$. 这说明听到的声音周期变短而频率增高, 信号的时序为正, 出现多普勒效应.

由图 2 中的 $\Delta s_1 s_2 a$ 还可看出, $\operatorname{tg}\alpha = (T - T') / (s, a) = 1/v$, $\operatorname{tg}\beta = T / (s, a) = 1/v_s$, 两式相除即可得到该情况下的多普勒效应公式

$$T' = (v - v_s) T / v \quad (1)$$

$$f' = \nu f / (v - v_s) \quad (2)$$

这是一般书中的结果.

三、声源速度等于声速

在此情况下, 声源的时空线与声波的时空

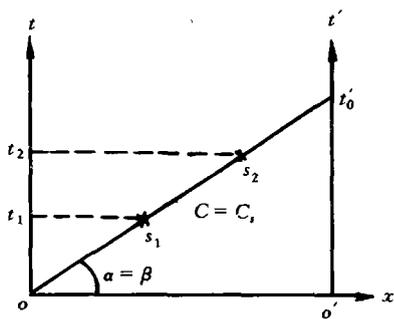


图 3

线重合,皆为直线 C 。由图 3 可知,以声速运动着的声源它在不同时刻 t_1 与 t_2 发出的声信号,却被观察者于同一时刻 t'_0 听到,亦即 $T' = 0, f' \rightarrow \infty$ 。这一结果也可由 (1) 式与 (2) 式导出。它说明以声速运动着的声源虽在不同时刻相继发出一些信号,但观察者接收这些信号却未用一点时间,出现一种特殊的多普勒效应——声爆现象。

四、声源速度大于一倍但小于二倍声速

在此情况下,声源时空线 C_2 的斜率 $\text{tg}\beta$ 小于声波线空线 C 的斜率 $\text{tg}\alpha$ 。由图 4 可知,声源在 t_1 与 t_2 时刻发出的声信号 s_1 与 s_2 , 观察者分别于 t'_1 与 t'_2 时刻收到。但 $t'_2 < t'_1$, 即两信号的先后次序反转了。并且 $t_2 - t_1 = T > 0, f > 0$, 而 $t'_2 - t'_1 = T' < 0, f' < 0$; 又 $|T'| < T, |f'| > f$ 。这一结果也可由 (1) 式与 (2) 式导出。它说明观察者听到的声音周期变短而频率增高,出现多普勒效应,但信号的时序却为负。这因为,先发出的信

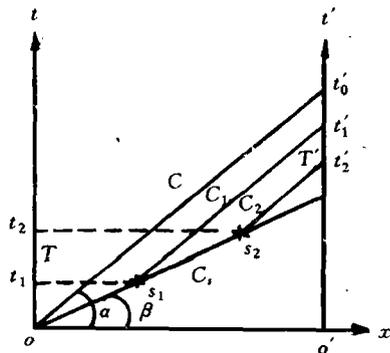


图 4

号是以声速向前传播的,而声源却在以超声速向前运动,它跑在了这个信号的前头,所以声源后发出的信号虽也以声音传播,但肯定要比先发出的信号提前传到观察者耳中。我们知道,静止的点波源发出的是球面波,那末以超声速运动的点波源,它跑在波面的前边,随着时间的推移,其波前又具何种形状呢?

现以超音速飞机为例,将它视为点波源。在图 5 中, $t = 0$ 时刻飞机正位于 O 点,它发出的声波在 $t = t'$ 时刻为一半径等于 $v_s t'$ 的球面;而在 $t = t'$ 时刻飞机却已到达 A 点, $OA = v_s t'$, $v_s t' > vt'$ 。飞机从 O 到 A 之间发出的声波则为一些小球面。显然这些球面的包络即波前是一圆锥面。因此,观察者只要站在锥面之外,不论离飞机多远,也不会听到飞机的隆隆声。面迎飞机的观察者,即使是先看到飞机,也只能待飞机掠过之后,耳朵进入了锥面之内才能听到隆隆声;并且听到的声音频率是增高的,还是反时序,这个圆锥面叫马赫锥,锥面形的声波叫马赫波。

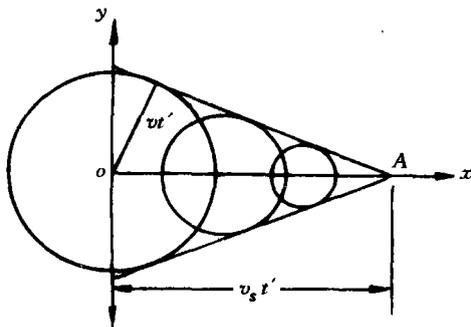


图 5

五、当声源以二倍声速运动时,利用时空线或由 (1) (2) 式可求得 $T' = -T, f' = -f$ 。即观察者接收信号的频率等于声源发出信号的频率,但时序相反。当声源速度大于二倍声速时,由时空线或由 (1) (2) 式可求得 $|T'| < 0$, 但 $|T'| > T$, 即 $|f'| < f$ 。这时观察者听到的声音频率反而减小,时序仍相反。详细讨论同前,这里从略。