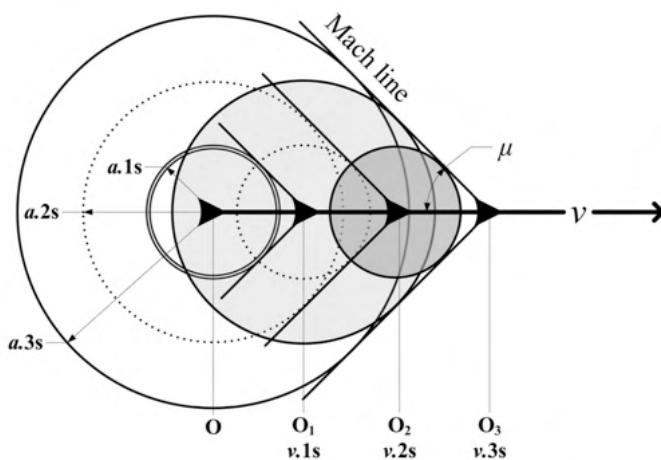


Capítulo 2

Velocidad del sonido





Introducción

Una onda sonora es una onda de presión, la cual es una onda longitudinal. Una onda de presión se desplaza en un medio a la velocidad del sonido. El medio puede ser un sólido, líquido, gas o una mezcla estos estados. Cualquier cambio en las propiedades del medio puede provocar un cambio en la velocidad del sonido. La siguiente tabla ejemplifica los valores de la velocidad del sonido en diferentes medios. Estos valores dependen de las propiedades del material, por ejemplo, este ejemplo se ha considerado con una temperatura específica. Cualquier modificación de esta, modificaría los resultados finales.

Velocidad del sonido en diferentes medios a 20°C	
Medio	Velocidad
Aire	343
Aire a 0°C	331
Dióxido de Carbono	258
Agua	1480
Agua de Mar	1470
Kerosene	1451
Aluminio	5200
Titanio	6070

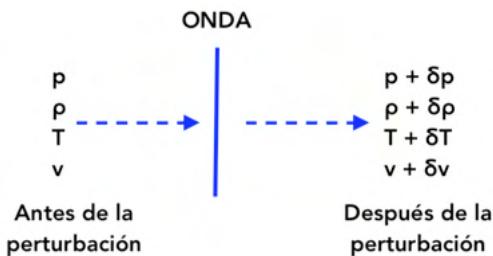
Una perturbación en las propiedades del aire se propagará a través de este a la velocidad del sonido en todas las direcciones. Por ejemplo, un pistón comprime el aire en un cilindro: la presión del aire aumenta en todas partes dentro del cilindro cuando se empuja el pistón. En este caso, la velocidad del movimiento del pistón es mucho menor que la velocidad del sonido, por lo que la onda de cambio de presión se propaga por todo el cilindro antes del próximo movimiento del pistón, y el aumento de la presión del aire dentro del cilindro es uniforme.

Velocidad del sonido en el aire

Una onda de sonido es una onda de presión (una perturbación de presión), y una onda de presión se propaga a la velocidad del sonido. En un sistema de gas, la densidad o la temperatura, o ambas, podrían cambiar si cambia la presión del

sistema. Para establecer la relación entre la velocidad del sonido y las propiedades del aire, necesitamos configurar un sistema de flujo que simplemente muestre el cambio de presión del aire, densidad y temperatura cuando la perturbación atraviesa el sistema.

El sistema que utilizamos aquí es un sistema de aire uniforme unidimensional inicialmente; luego, se produce una perturbación de presión y esta onda de perturbación se propaga a la velocidad del sonido dentro de este sistema. Supongamos que un observador se encuentra en esta onda y viaja junto con ella. Para el observador, el aire fluye constantemente de un lado de la onda al otro a la velocidad de la onda (v) y se asume que la velocidad y las propiedades del aire cambian una vez que pasa a través de la onda, como se muestra aquí.



No hay intercambio de calor ni pérdida de masa cuando el flujo de aire atraviesa la onda, por lo que es un proceso adiabático, y la tasa de flujo de masa a través de la onda se puede expresar mediante los parámetros del flujo de aire en ambos lados de la onda. Por lo tanto, podemos utilizar la ecuación de continuidad (EC) y la ecuación de Euler (EE) para este flujo estacionario unidimensional.

$$\text{EC: } \rho v A = (\rho + \delta \rho)(v + \delta v) A$$

Donde A es el área del frente de onda, que es constante para el flujo de aire de ambos lados. La ecuación se transforma en:

$$\rho v = (\rho + \delta \rho)(v + \delta v) = C$$

Número de Mach

Cuando las partículas de aire se desplazan a una velocidad mayor que la velocidad del sonido, cualquier cambio en las propiedades del aire no podrá propagarse por todo el sistema de flujo de aire. La relación entre la velocidad del aire (v) y la velocidad local del sonido (a) indica qué tan cerca está la velocidad del aire de la velocidad del sonido. Esta relación es el número de Mach. Es adimensional y se denota como M . El número de Mach lleva el nombre de Ernst Mach (1838-1916), un físico y filósofo austriaco especializado en óptica y pionero en el estudio de la mecánica de fluidos supersónicos y las ondas de choque.

$$M = \frac{v}{a}$$

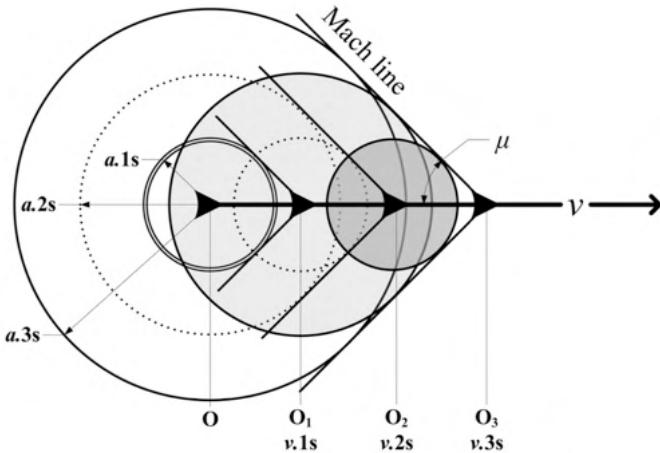
El número de Mach es un parámetro importante que indica las características de un flujo compresible de fluido a alta velocidad:

El flujo de aire es subsónico cuando $M < 1$. Las partículas de aire se desplazan a una velocidad menor que la velocidad local del sonido.

El flujo de aire es sónico si $M = 1$. Las partículas de aire se desplazan a la velocidad del sonido.

El flujo de aire es supersónico cuando $M > 1$. Las partículas de aire se desplazan a una velocidad mayor que la velocidad del sonido.

Cuando el flujo de aire relativo alrededor de un objeto, por ejemplo, una aeronave, es supersónico, la velocidad relativa del aire v es mayor que la velocidad del sonido, $v > a$. El objeto es la fuente del cambio en las propiedades del aire, por ejemplo, la presión del aire. La onda de presión se propaga a la velocidad del sonido, por lo que el cambio de presión siempre va detrás del objeto, como se muestra en esta figura:



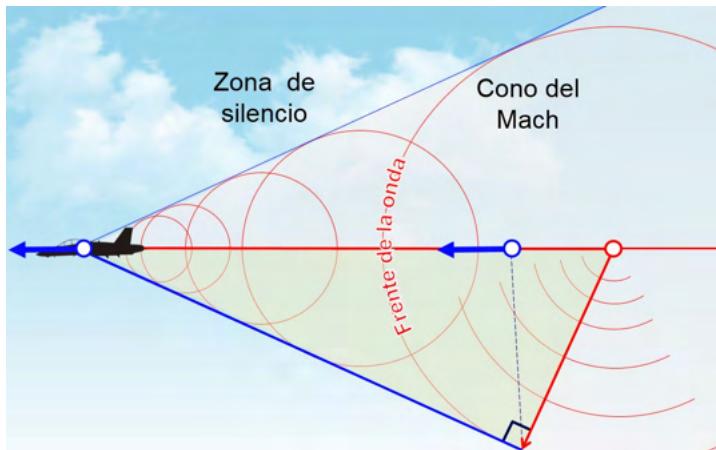
En la Figura, el objeto parte desde el punto "O" a una velocidad $v > a$. El objeto alcanza los puntos "O₁", "O₂" y "O₃" después de haber viajado 1 segundo, 2 segundos y 3 segundos, respectivamente. La onda de perturbación de presión se propaga esféricamente desde el objeto a una velocidad del sonido, a .

Los frentes de onda están representados por los círculos. La onda de presión desde "O" alcanza el círculo de línea doble después de que el objeto viaja durante 1 segundo y llega a "O₁". La distancia entre el punto O y el punto O₁ es $v \cdot 1s$, y el radio del círculo de línea doble es $a \cdot 1s$.

Los círculos con líneas discontinuas son los frentes de onda de presión desde "O" y "O₁" después de que el objeto viaja durante 2 segundos y llega a "O₂". La distancia entre el punto O y el punto O₂ es $v \cdot 2s$, y el radio del círculo discontinuo desde "O" es $a \cdot 2s$, y el radio del círculo discontinuo desde "O₁" es $a \cdot 1s$.

Los círculos con una línea sólida son los frentes de onda de presión desde "O", "O₁" y "O₂" después de que el objeto viaja durante 3 segundos. La distancia entre el punto O y el punto O₃ es $v \cdot 3s$. Los radios de los círculos de línea sólida desde "O", "O₁" y "O₂" son $a \cdot 3s$, $a \cdot 2s$, y $a \cdot 1s$, respectivamente.

Se puede trazar una línea tangente común desde el objeto hasta los círculos que representan los frentes de onda de presión en cualquier momento, y esa línea tangente común es una onda de Mach o línea de Mach. En el espacio tridimensional, las líneas de Mach forman una superficie que tiene forma de cono, denominada cono de Mach.

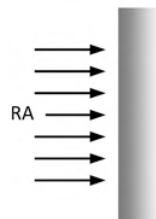


La perturbación de presión causada por el objeto solo puede propagarse dentro del cono de Mach, por lo que el exterior del cono de Mach se llama la “zona de silencio”. Una de las maneras de experimentar la zona de silencio es cuando estás en un espectáculo aéreo militar y ves pasar un avión a reacción supersónico. No escucharías al avión acercarse, incluso si estuviera justo frente a ti, pero de repente podrías escuchar un fuerte sonido golpeando tus oídos después de que el avión te pasa, porque ahora estás en el cono de Mach causado por el avión. Antes de esto, estabas en la “zona de silencio” y no podías escuchar el ruido hecho por el avión.

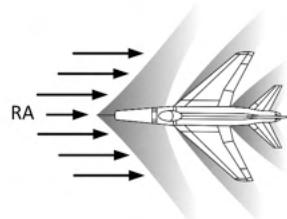
Ondas de choque

Las ondas de choque se formarán cuando el flujo de aire se vuelva supersónico si hay perturbaciones de presión compresivas. Una onda de choque es un frente de onda acumulado, muy delgado, con menos de 1 mm de grosor. La presión del aire, la densidad y la temperatura aumentarán repentinamente después de una onda de choque. En un flujo de aire supersónico, $v > a$, si hay una fuente de perturbación de presión compresiva, la fuente de la perturbación (las partículas de aire) se desplaza más rápido que la perturbación o el cambio de presión. Debido a que el "cambio" nunca puede alcanzar a las partículas de aire, ya que estas se desplazan más rápido que la velocidad del sonido, las propiedades del aire no son uniformes y el "cambio" no es continuo en todo el sistema de flujo de aire. Por lo tanto, las perturbaciones generadas por el movimiento de la fuente se acumulan (o se construyen) para formar un frente de onda fuerte, y este frente de onda es una onda de choque. Hay tres tipos de ondas de choque:

Onda de choque normal: el frente de onda es perpendicular a la dirección del flujo de aire relativo (RA).



Onda de choque oblicua: el frente de onda no es perpendicular a la dirección del flujo de aire relativo (RA).



Onda de choque de arco (o bow shockwave): una combinación de onda de choque normal y onda de choque oblicua.

