

University Physics: Mechanical Wave

Date: April 6, 2025

Wuhan University

Lai Wei

目录

1	机械波的产生和传播	1
1.1	机械波的基本概念	1
1.1.1	产生条件	1
1.1.2	横波和纵波	1
1.1.3	波的几何描述	1
1.2	描述机械波的物理量	2
1.2.1	波速	2
1.2.2	波长、周期和频率	3
2	平面简谐波的波动表达式	3
2.1	平面简谐波的波动表达式	3
2.2	波动表达式的物理意义	4

振动与波动的关系：振动是激发波动的波源；波动是振动的传播过程。

1 机械波的产生和传播

1.1 机械波的基本概念

1.1.1 产生条件

波是振动状态再空间的传播过程。

机械波是机械振动在弹性介质中的传播过程。

电磁波是交变电场在空间的传播过程。

弹性介质(elastic medium)：由无穷多个质元通过弹性力结合再一起形成的连续介质。

要产生机械波，必须满足两个条件：

1. 要有波源（即振动源）；
2. 要有能够传播机械振动的弹性介质。

机械波与电磁波的共同特征：

1. 具有一定的传播速度；
2. 能够产生干涉、衍射现象；
3. 伴随着能量的传播；
4. 具有相似的数学表达式。

1.1.2 横波和纵波

横波：质点的振动方向与波的传播方向垂直。横波中凸起的位置称为波峰,下凹的位置称为波谷。

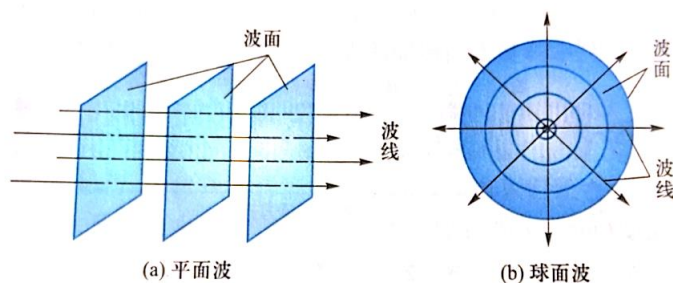
纵波（又称为疏密波）：质点的振动方向与波的传播方向平行。

在机械波中，横波只能在固体中出现；纵波可在气体、液体和固体中出现。空气中的声波是纵波。液体表面的波动情况较复杂，不是单纯的纵波或横波。

1.1.3 波的几何描述

波阵面(波面, wave surface)：相位相同的点连成的面；

波线(波射线, wave ray)：波的传播方向。



1.2 描述机械波的物理量

1.2.1 波速

单位时间内振动状态在介质中传播的距离称为波的传播速度，简称波速。在弹性介质中，机械波的传播速度取决于介质的惯性和弹性，也就是取决于介质的密度和弹性模量，与波源在介质中的运动速度无关。

在拉紧的弹性绳索中，横波的传播速度为

$$u = \sqrt{\frac{F}{\lambda}} \quad (1.1)$$

式中 F 为绳中的张力， λ 是绳的质量线密度。

在固体中，既可以传播横波，也可以传播纵波，它们的传播速度分别为

$$u = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{横波}) \quad (1.2)$$

$$u = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad ((\text{纵波})) \quad (1.3)$$

式中 ρ 是固体的密度， G 和 E 分别是固体的切变模量(shear modulus)和杨氏模量(Young's modulus)，它们是反应材料形变和内应力关系的物理量，其单位都是 $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

在液体和液体中，纵波的传播速度为

$$u = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (1.4)$$

式中 K 为介质的体积模量， ρ 是气体或液体的密度。

对于理想气体，根据分子动理论和热力学理论，可以证明理想气体中声波的传播速度为

$$u = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}} \quad (1.5)$$

式中 M 是气体分子的摩尔质量，是气体的摩尔定压热容与摩尔定容热容之比，简称摩尔热容比， p 是气体的压强， T 是热力学温度， R 是摩尔气体常量。式1.5表明，气体中声波的传播速度不仅与气体的性质有关，还与温度有关。

1.2.2 波长、周期和频率

波长(wave length): 波的传播方向上相邻两振动状态完全相同的质点间的距离（一完整波的长度），用 λ 表示。

周期: 波传播一个波长的距离所用的时间，用 T 表示。

波速 u 、波长 λ 和周期 T 三者之间有如下关系：

$$u = \frac{\lambda}{T} \quad (1.6)$$

频率: 单位时间内波向前传播的完整波的数目，是周期的倒数，用 ν 表示。于是式1.6可改写为

$$u = \nu\lambda \quad (1.7)$$

当波源和弹性介质没有相对运动（仅仅在介质中做振动）时，波源每做一次完全振动，波就会向前传播一个波长的距离，这表明波源的振动周期和振动频率在数值上与波的周期和波的频率是相等的，即两组物理量可以通用。如果波源与介质有相对运动，则两组物理量有差异，不可通用。

2 平面简谐波的波动表达式

2.1 平面简谐波的波动表达式

波是运动状态的传播，介质的质点并不随波传播。

设波源在 t 时刻的振动方程：

$$y_O = A \cos(\omega t + \varphi)$$

求波线 x 轴上平衡位置位于 P 点的质点的振动表达式。设 P 点与 O 点的距离为 x ，因为波动从 O 传到 P 点处所需的时间为 $\frac{x}{u}$ ，所以 P 点处的质点在 t 时刻的位移与 O 点处的质点在 $t - \frac{x}{u}$ 时刻的位移相同，即

$$y_P(t) = y_O\left(t - \frac{x}{u}\right) = A \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{u}\right) + \varphi_0\right]$$

质点的振动表达式（即位移随时间的变化规律），忽略下标 P ，上式可写为

$$y(x, t) = A \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{u}\right) + \varphi_0\right] \quad (2.1)$$

这就是沿 x 轴正方向传播的平面简谐波的波动表达式，也称为波函数。

当然，我们也可以用相位的超前与落后关系求出波函数。由于沿波的传播方向，波线上各点的振动相位依次落后，每隔一个波长的距离，后者比前者的相位落后 2π 。因此，如果已知波长 λ ，则当波从 O 点传到 P 点时， P 点的振动相位比 O 点落后 $\Delta\varphi = 2\pi\frac{x}{\lambda}$ ，即

$$\varphi_P = \varphi_0 - \Delta\varphi = \varphi_0 - 2\pi\frac{x}{\lambda} \quad (2.2)$$

所以 P 点的振动表达式，即此波的波函数为

$$y(x, t) = A \cos(\omega t + \varphi_P) = A \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}x + \varphi_0\right) \quad (2.3)$$

考虑到 $u = \frac{\lambda}{T}$ ， $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ ， $\frac{\omega}{u} = \frac{2\pi}{\lambda}$ ，所以式2.1和式2.3两种形式的波动表达式实际上是等价的。同理可得波动表达式的其他形式，如

$$y(x, t) = A \cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) + \varphi_0\right] \quad (2.4)$$

如果波动沿 x 轴的负方向传播，那么 P 点处质点的振动要比 O 点处的质点早开始 $\frac{x}{u}$ 时间，即 P 点处的质点在 t 时刻的位移与 O 点处的质点在 $t + \frac{x}{u}$ 的位移相同；从相位的角度来看， P 点处质点的振动相位要比 O 点的相位超前 $\Delta\varphi = 2\pi\frac{x}{\lambda} = \frac{\omega}{u}x$ ，即

$$\varphi_P = \varphi_O + \Delta\varphi = \varphi_O + 2\pi\frac{x}{\lambda}$$

所以 P 点处质点的振动表达式为

$$y(x, t) = A \cos\left[\omega\left(t + \frac{x}{u}\right) + \varphi_0\right] \quad (2.5)$$

或

$$y(x, t) = A \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda}x + \varphi_0\right) \quad (2.6)$$

$$y(x, t) = A \cos\left[2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right) + \varphi_0\right] \quad (2.7)$$

2.2 波动表达式的物理意义

当 x 一定时，如 $x = x_0$ ：

$$y(t) = A \cos\left[\omega\left(t - \frac{x_0}{u}\right) + \varphi_0\right] \quad (2.8)$$

是 $x = x_0$ 处质点的振动表达式。

将波动表达式分别对时间求一阶和二阶偏导数，可得波线上任一质元 P 振动速度和加速度分别为

$$v(x, t) = \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} = -A\omega \sin \left[\omega \left(t \pm \frac{x}{u} \right) + \varphi_0 \right] \quad (2.9)$$

$$a(x, t) = \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} = -A\omega^2 \cos \left[\omega \left(t \pm \frac{x}{u} \right) + \varphi_0 \right] \quad (2.10)$$

当 t 一定时，如 $t = t_0$ ：

$$y(x) = A \cos \left[\omega \left(t_0 - \frac{x}{u} \right) + \varphi_0 \right] \quad (2.11)$$

表示 t_0 时刻 x 轴上各质点的位移。