



中原工学院

Zhongyuan University of Technology

# 6 机械波

任课教师 [曾灏宪](#)

中原工学院 理学院

# 内容提要

- 波的能量特征  $\leftrightarrow$  与振动能量对比  $\leftarrow$  分析方法
- 声波的能量  $\rightarrow$  声强级
- 波的衍射（惠更斯原理）和干涉（振动加强和减弱，产生条件）
- 驻波：形成、特点和分析方法
- 半波损失（相位跃变）

大学物理（上）

6 机械波

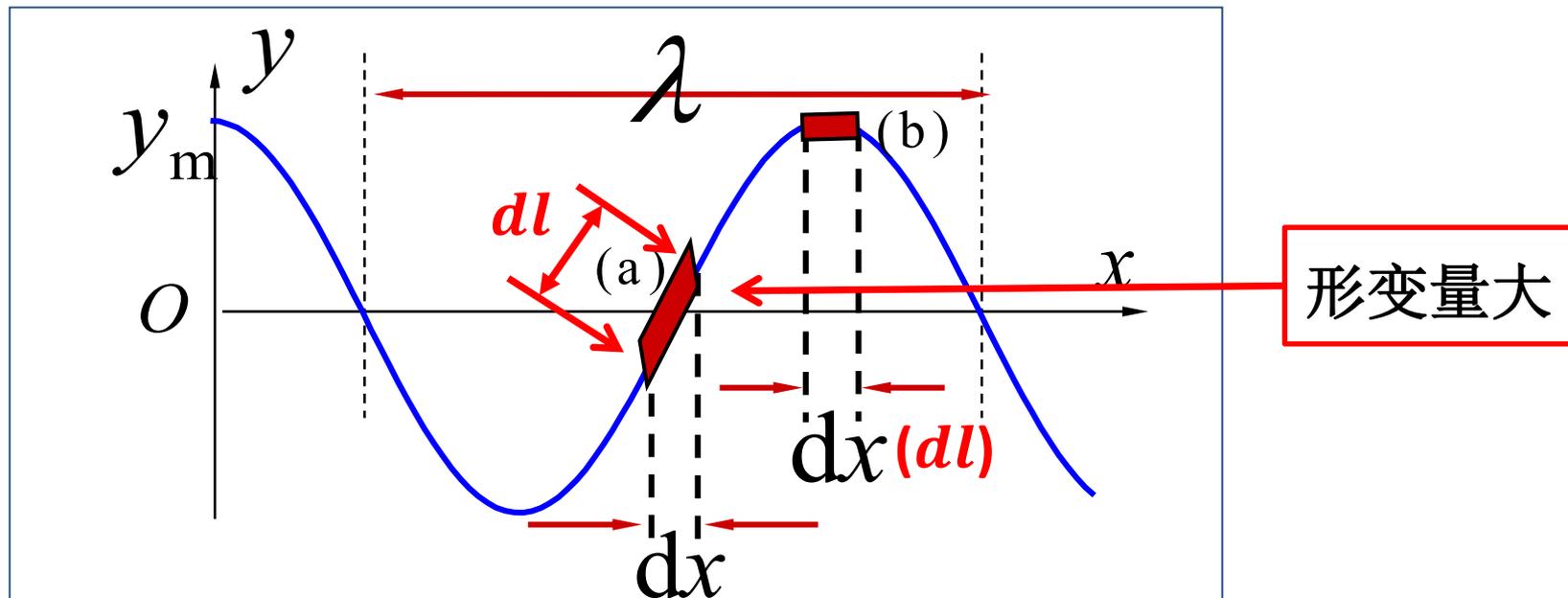
## 6.3 波的能量 声强级

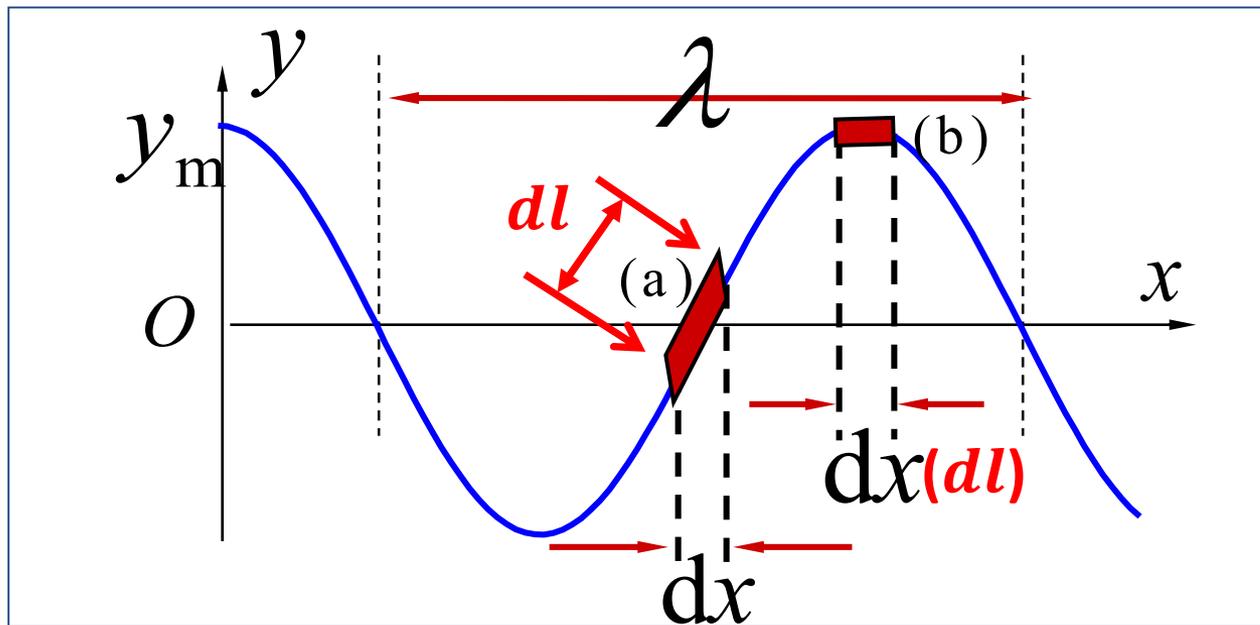
# 一 波动能量的传播

当机械波在媒质中传播时，会有什么形式的能量？

- 各个质点振动  $\rightarrow$  振动动能
- 介质弹性变形  $\rightarrow$  弹性势能

以绳波（横波）为例分析波动能量的传播。





取长度为  
 $dx$  的体  
积元

- 体积元在平衡位置 (a) 时，动能、势能和总机械能均最大。体积元在位移最大处 (b) 时，三者均为零。(为什么?)
- 动能、势能和总机械能，同时达到最大值，同时达到最小值 (振动呢?)
- 介质中所有参与波动的质点都在不断地接受来自波源的能量，又不断把能量释放出去。波动是能量传递的一种方式。

## 结论:

最大位移  $\longrightarrow$  平衡位置: 能量增大, 从前面输入能量;

平衡位置  $\longrightarrow$  最大位移: 能量减小, 向后面输出能量。

$E$  随  $t$ 、 $x$  变, 不守恒! 能量传输!

## 比较:

谐振动物点

孤立系统, 机械能守恒

$E_k, E_p$  反相变化

波动介质元

非孤立系统,  $E$  不守恒

$dE_k, dE_p$  同相变化

## ➤ 能量密度

- 单位体积介质中的波动能量

$$w = \frac{dE}{dV} = \rho A^2 \omega^2 \sin^2 \omega \left( t - \frac{x}{u} \right)$$

单位:  $J \cdot m^{-3}$

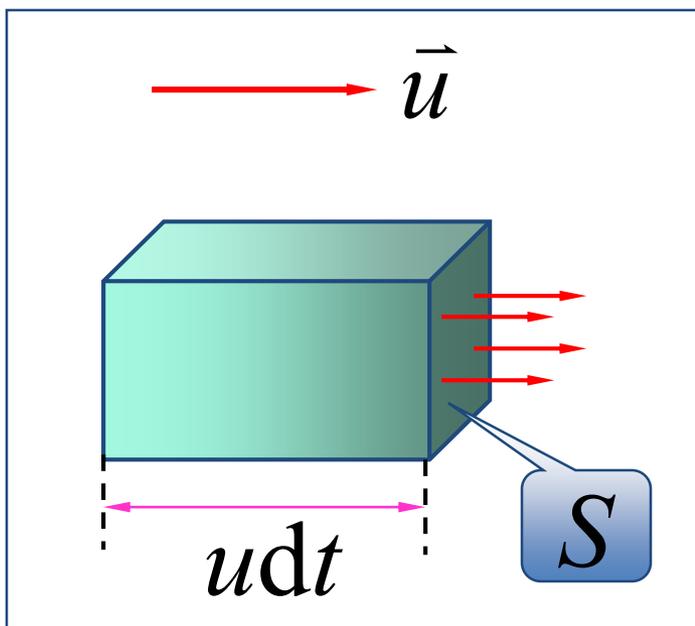
## ➤ 平均能量密度

- 能量密度在一个周期内的平均值.

$$\begin{aligned} \bar{w} &= \frac{1}{T} \int_0^T w dt \\ &= \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 \end{aligned}$$

## 波的能量和能流密度

- 能流：单位时间内垂直通过某一面积的能量。
- 平均能流： $\bar{P} = \bar{w} u S$



- **能流密度** (波的强度)  $I$ : 通过垂直于波传播方向的单位面积的平均能流。

$$I = \bar{P} / S = \bar{w} u$$

$$I = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 u$$

## 二 声强 声强级

**声强：** 声波的能流密度.  $I = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 u$

能够引起人们听觉的声强范围：  $10^{-12} \sim 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

**声强级：** 人们规定声强  $I_0 = 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ （即相当于频率为 1000 Hz 的声波能引起听觉的最弱的声强）为测定声强的标准. 如某声波的声强为  $I$ ，则比值  $I/I_0$  的对数，叫做相应于  $I$  的声强级  $L_I$ .

$$L_I = \lg \frac{I}{I_0} \text{ 贝尔 (B)}$$

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ 分贝 (dB)}$$

## 几种声音的近似声强、声强级和响度

声源	声强 $W/m^2$	声强级dB	响度
引起痛觉的声音	1	120	
摇滚音乐会	$10^{-1}$	110	震耳
交通繁忙的街道	$10^{-5}$	70	响
通常的谈话	$10^{-6}$	60	正常
耳语	$10^{-10}$	20	轻
树叶的沙沙声	$10^{-11}$	10	极轻
引起听觉的最弱声音	$10^{-12}$	0	

# 超声波在科学研究和生产上的应用

## 1. 在检测中的应用

超声波频率高（可达 $10^9$  Hz）、能量大、穿透本领大，可用于测量海洋深度，海底地形，探测沉船和鱼群；工业探伤；医学上用超声波显示人体内部病变部分图象等。

**声纳探测器：** 船只上的发射器先向海底发射超声波，然后通过仪器接收和分析反射回来的讯息，从而得到整个海床的面貌。



**B超：** 因为不同身体构造反射是不同的，所以高频率声音（超声波）可用来作医学成像。越短的波长，得到的解像度就越高。



## 2. 在加工处理和医学治疗中的应用

**超声波**在液体中会引起**空化作用**，它可用于捣碎药物制成各种药剂，食品工业上用于制作调味剂，建筑业上用于制作水泥乳浊液。

**多普勒超声波扫描术**：利用多普勒效应，反射超声波物体的运动会改变回声的频率，可测量血流速度。

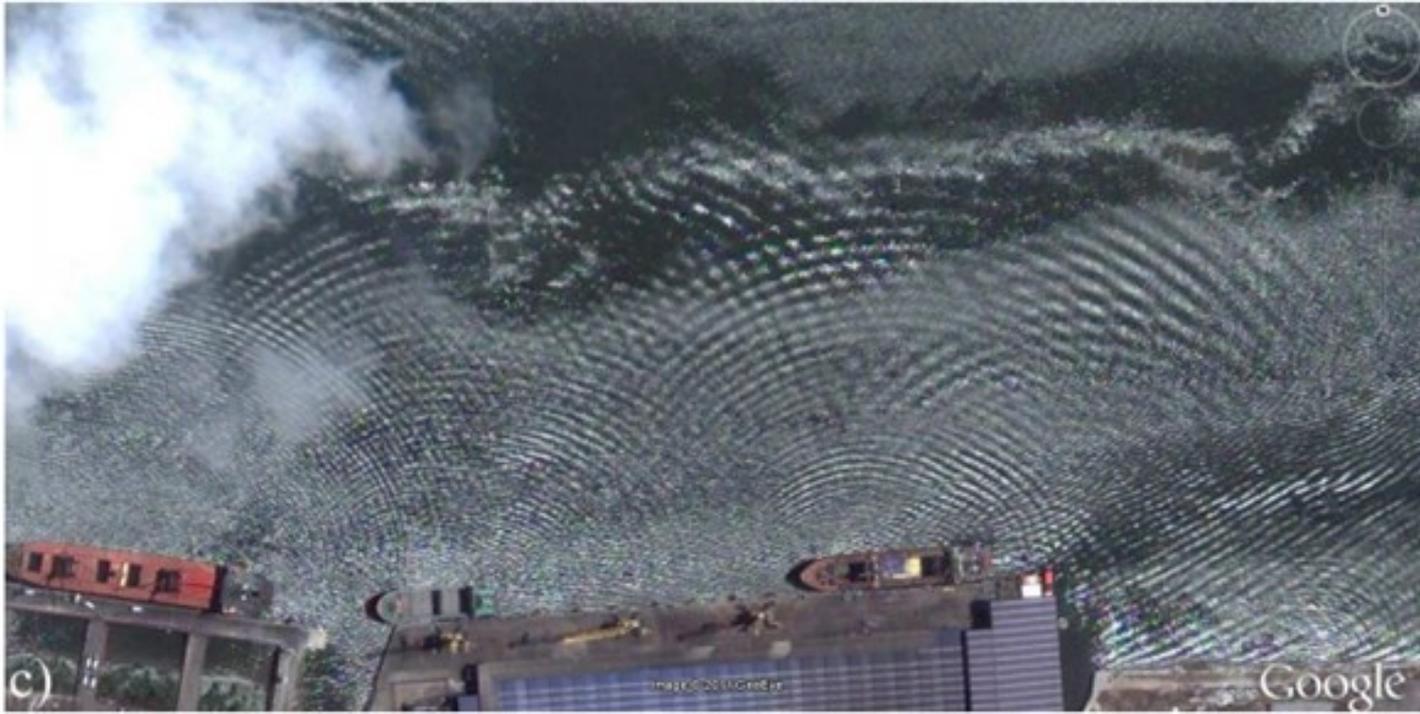
**超声波**可以用来弄碎肾石，消毒食物，因为高速的振动会令细菌难以抵抗。超声波亦可以用来清除眼镜或饰物的污垢。

### 3. 超声电子学

利用超声元件代替电子元件制作在  $10^7 \sim 10^9$  Hz 内的延迟线、振荡器、谐振器、带通滤波器等仪器，可广泛用于电视、通讯、雷达等方面。

**次声**（ $10^{-4} \sim 20$  Hz）：在火山爆发、地震、陨石落地、大气湍流、雷暴、磁暴等自然活动中都会有次声产生，次声是研究地球、大气、海洋运动的有力工具。

**次声波武器**：用振荡频率与人体大脑节律或人体内脏器官固有频率相近的次声波，使人神经错乱或破坏内脏至死亡。这是目前威力最大的声波武器。



大学物理（上）

6 机械波

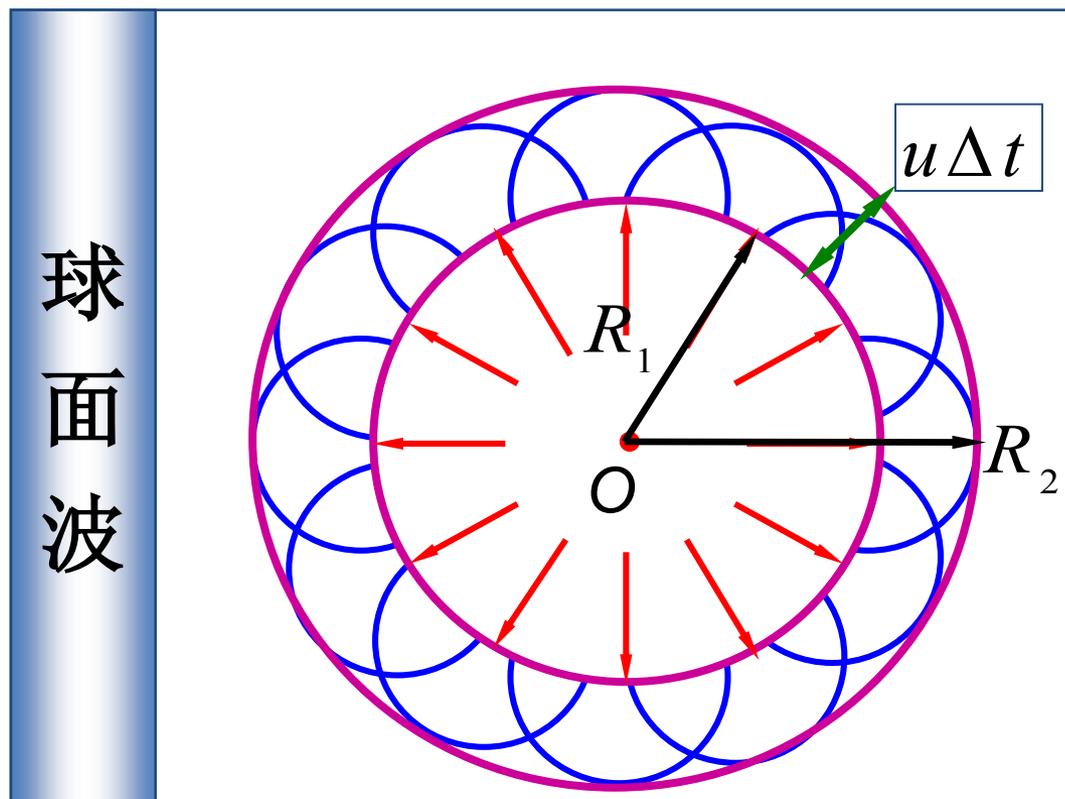
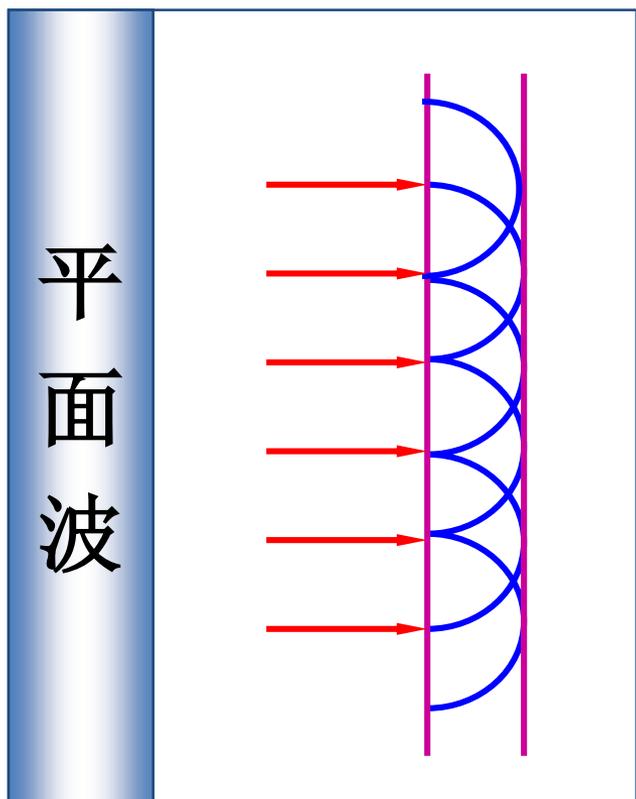
A Google Earth image of **interference of water waves** occurring in the Chao Phraya River, Bangkok, Thailand. ([source](#))

## 6.4 惠更斯原理 波的干涉

# 一 惠更斯原理

- 介质中波动传播到的各点都可以看作是发射子波的波源，而在其后的任意时刻，这些子波的包络就是新的波前。

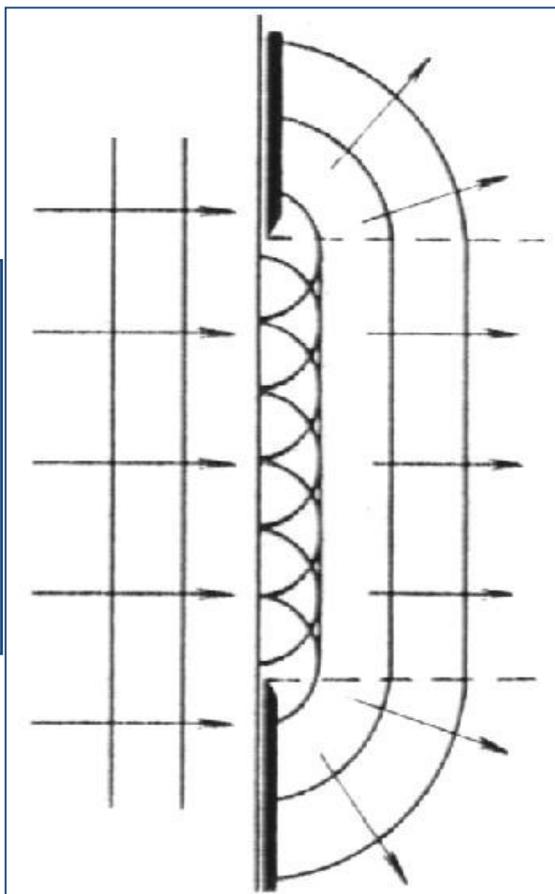
——惠更斯原理



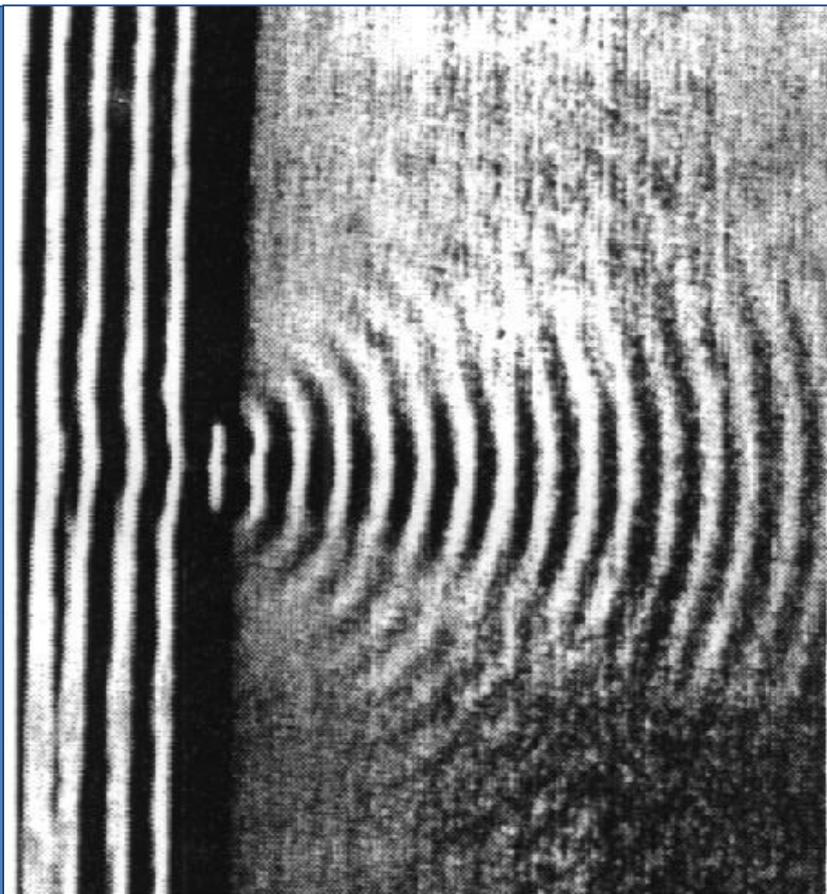
# 波的衍射

波在传播过程中遇到障碍物时，能绕过障碍物的边缘，在障碍物的阴影区内继续传播。

波的衍射

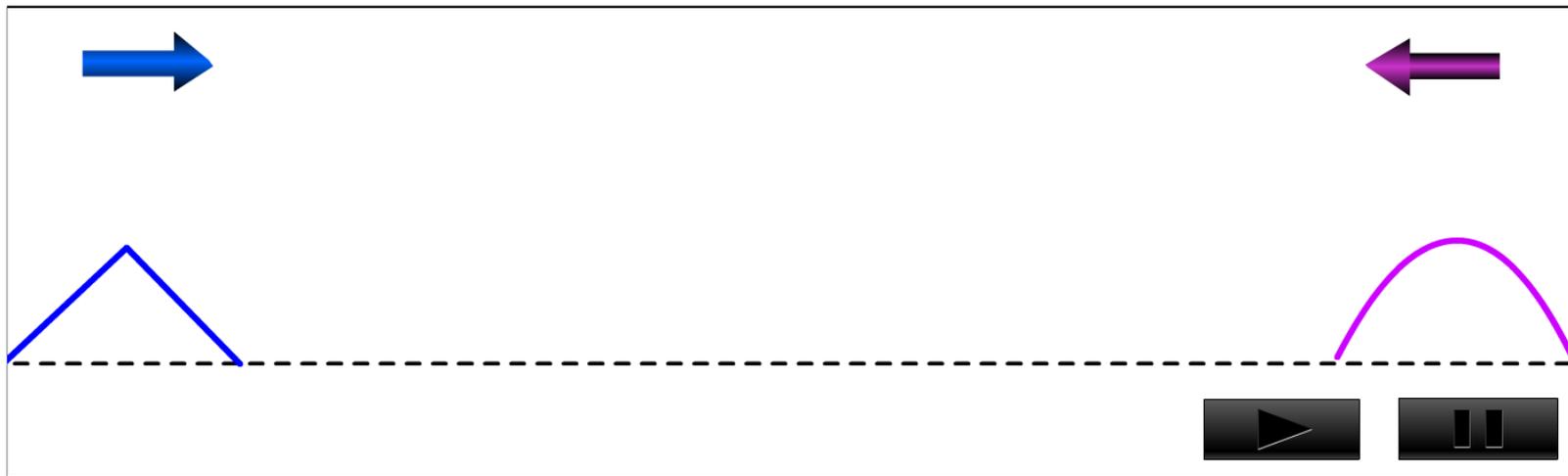


水波通过狭缝后的衍射



## 二 波的干涉

### 1 波的叠加原理



#### ➤ 独立性

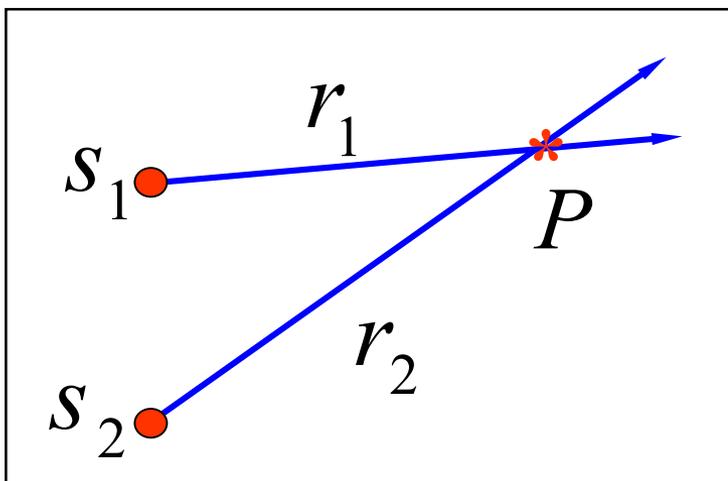
- 几列波相遇之后，仍然保持它们各自原有的特征（频率、波长、振幅、振动方向等）不变，并按照原来的方向继续前进，好象没有遇到过其它波一样。

#### ➤ 叠加性

- 在相遇区域内任一点的振动，为各列波单独存在时在该点所引起的振动位移的矢量和。

## 波的相干条件

- 1) 频率相同;
- 2) 振动方向平行;
- 3) 相位相同或相位差恒定.

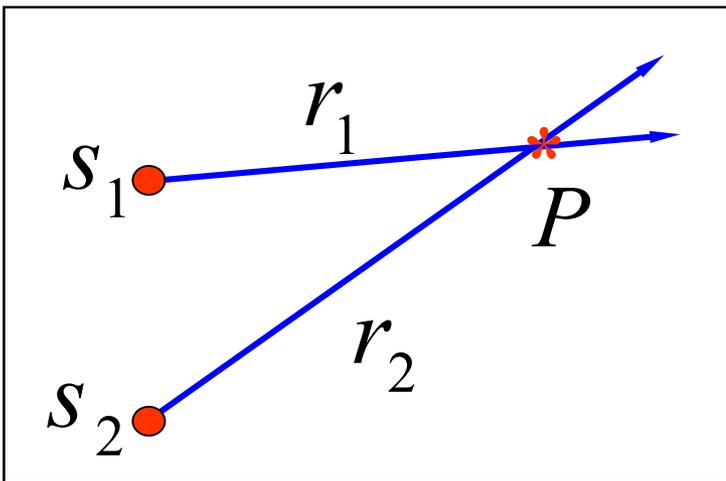


波源振动

$$\left\{ \begin{array}{l} y_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \\ y_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2) \end{array} \right.$$

点  $P$  的两个分振动

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{1p} = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1 - 2\pi \frac{r_1}{\lambda}) \\ y_{2p} = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2 - 2\pi \frac{r_2}{\lambda}) \end{array} \right.$$



## 点 $P$ 的两个分振动

$$\begin{cases} y_{1p} = A_1 \cos\left(\omega t + \varphi_1 - 2\pi \frac{r_1}{\lambda}\right) \\ y_{2p} = A_2 \cos\left(\omega t + \varphi_2 - 2\pi \frac{r_2}{\lambda}\right) \end{cases}$$

$$y_p = y_{1p} + y_{2p} = A \cos(\omega t + \varphi)$$

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta \varphi}$$

$$\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda}$$

常量

$$\tan \varphi = \frac{A_1 \sin\left(\varphi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda}\right) + A_2 \sin\left(\varphi_2 - \frac{2\pi r_2}{\lambda}\right)}{A_1 \cos\left(\varphi_1 - \frac{2\pi r_1}{\lambda}\right) + A_2 \cos\left(\varphi_2 - \frac{2\pi r_1}{\lambda}\right)}$$

讨论:

$$\begin{cases} A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta \varphi} \\ \Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} \end{cases}$$

1) 合振动的振幅（波的强度）在空间各点的分布随位置而变，但分布是稳定的。

$$2) \begin{cases} \Delta \varphi = \pm 2k\pi \quad k = 0, 1, 2, \dots \\ A = A_1 + A_2 \quad \text{振动始终加强} \\ \Delta \varphi = \pm (2k + 1)\pi \quad k = 0, 1, 2, \dots \\ A = |A_1 - A_2| \quad \text{振动始终减弱} \\ \Delta \varphi = \text{其他} \quad |A_1 - A_2| < A < A_1 + A_2 \end{cases}$$

讨论:

$$\begin{cases} A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta \varphi} \\ \Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} \end{cases}$$

若  $\varphi_1 = \varphi_2$  则  $\Delta \varphi = -2\pi \frac{\delta}{\lambda}$

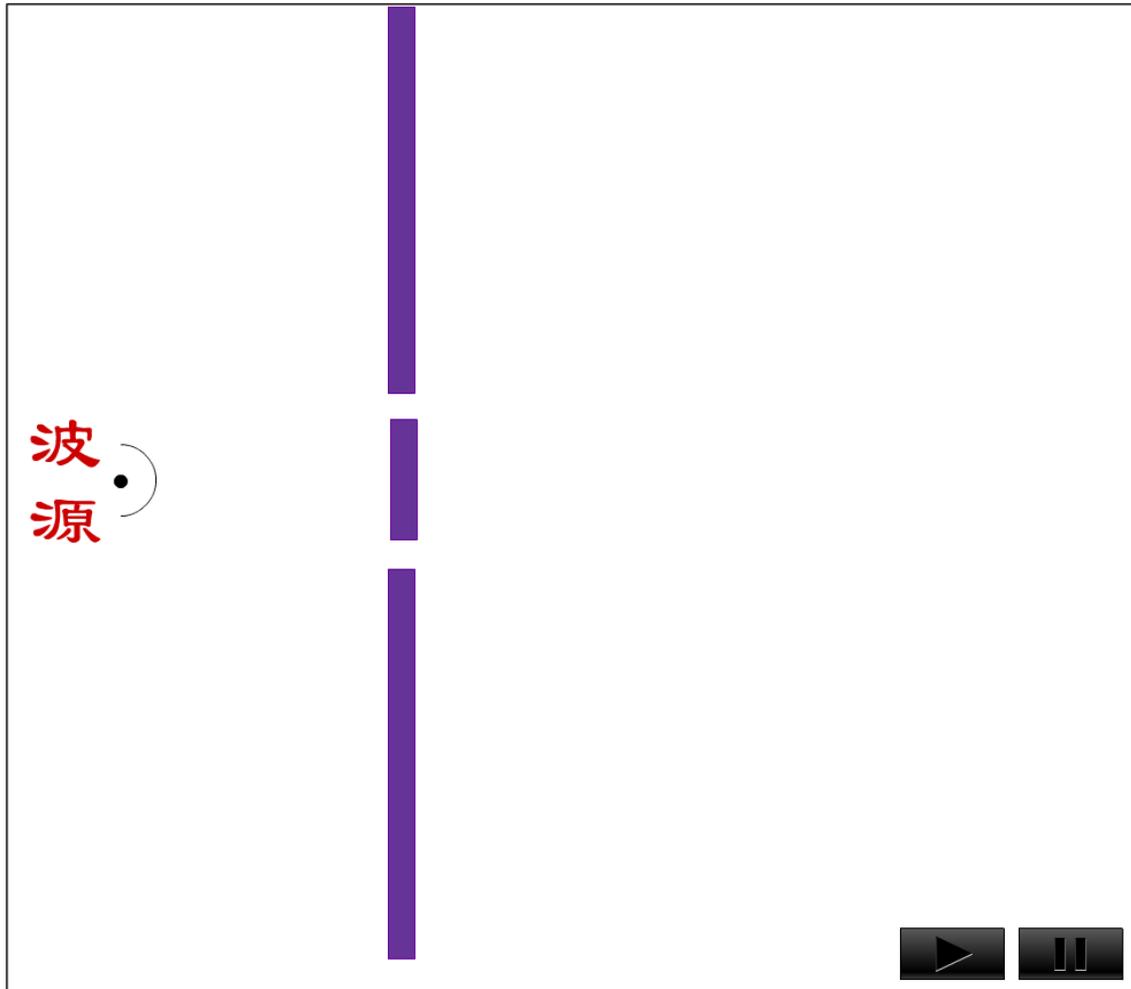
波程差  $\delta = r_2 - r_1$

3)  $\left\{ \begin{array}{l} \delta = \pm k\lambda \quad k = 0, 1, 2, \dots \\ \quad \quad \quad A = A_1 + A_2 \\ \delta = \pm (k + 1/2)\lambda \quad k = 0, 1, 2, \dots \\ \quad \quad \quad A = |A_1 - A_2| \\ \delta = \text{其他} \quad |A_1 - A_2| < A < A_1 + A_2 \end{array} \right.$

振动始终加强

振动始终减弱

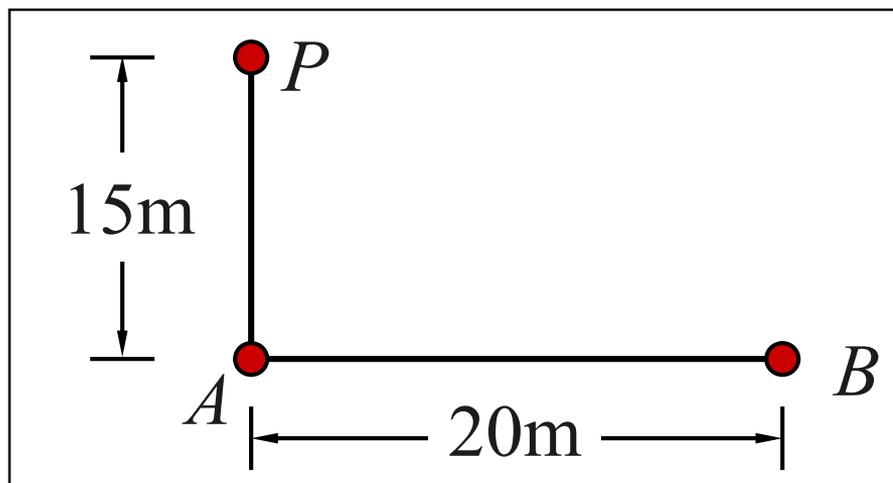
## 2 波的干涉



频率相同、振动方向平行、相位相同或相位差恒定的两列波相遇时，使某些地方振动始终加强，而使另一些地方振动始终减弱的现象

——波的干涉现象

**例** 如图所示， $A$ 、 $B$  两点为同一介质中两相干波源。其振幅皆为  $5\text{cm}$ ，频率皆为  $100\text{Hz}$ ，但当点  $A$  为波峰时，点  $B$  刚好为波谷。设波速为  $10\text{m/s}$ ，试写出由  $A$ 、 $B$  发出的两列波传到点  $P$  时干涉的结果。



➤ 虚拟实验：波的干涉

[https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference\\_zh\\_TW.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-interference/latest/wave-interference_zh_TW.html)

➤ 降噪耳机的原理？

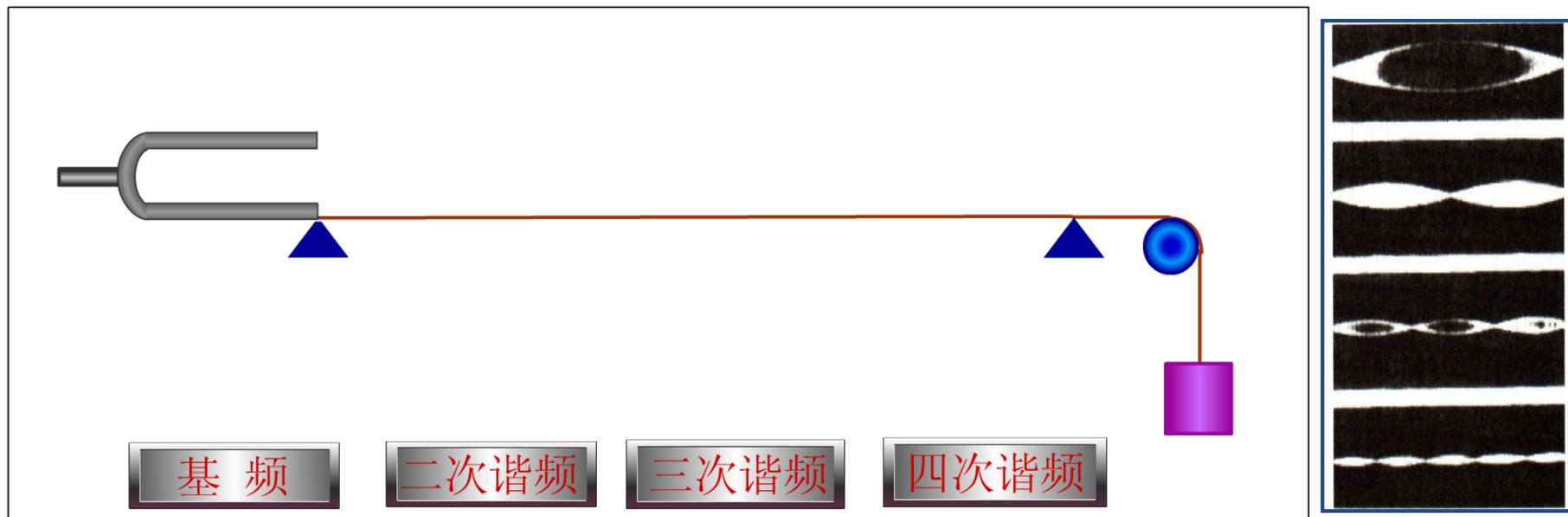
大学物理（上）

6 机械波

## 6.5 驻波

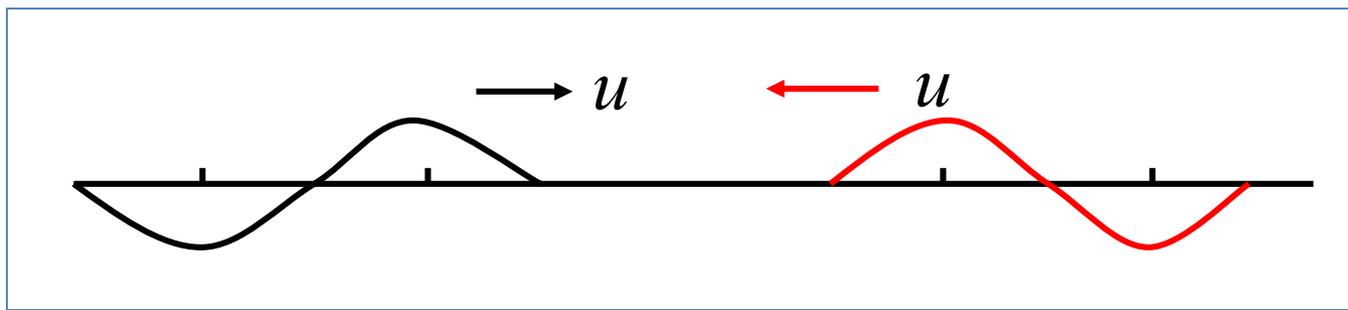
# 一 驻波的产生

振幅、频率、传播速度都相同的两列相干波，在同一直线上沿相反方向传播时叠加而形成的一种特殊的干涉现象。



## (1) 驻波的形成

条件: 相干波, 振幅相等, 在同一直线上反向传播。

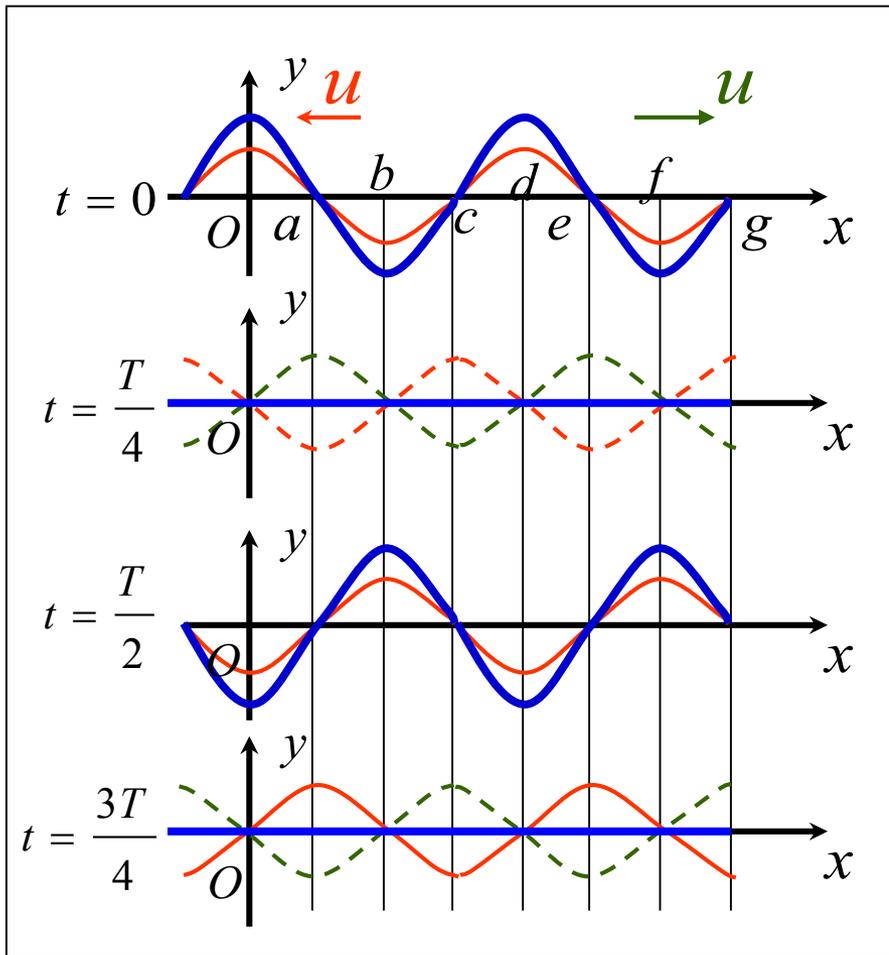


适当选择计时起点和原点, 使原点处  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$

右行波: 
$$y_1 = A_1 \cos\left(\omega t - 2\pi \frac{x}{\lambda}\right)$$

左行波: 
$$y_2 = A_1 \cos\left(\omega t + 2\pi \frac{x}{\lambda}\right)$$

合成波:  $y = y_1 + y_2 = 2A_1 \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \omega t$



驻波的振幅  
与位置有关

不含  $x$ , 各质  
点都在作同频  
率的简谐运动

$a, c, e, g \dots\dots$

始终不振动  $A=0$ , 称**波节**

$O, b, d, f \dots\dots$

振动最强  $A = 2A_1$ , 称**波腹**

其余点  $0 < A < 2A_1$

驻波不是波动, 而是一种特殊的振动

## (2) 特征

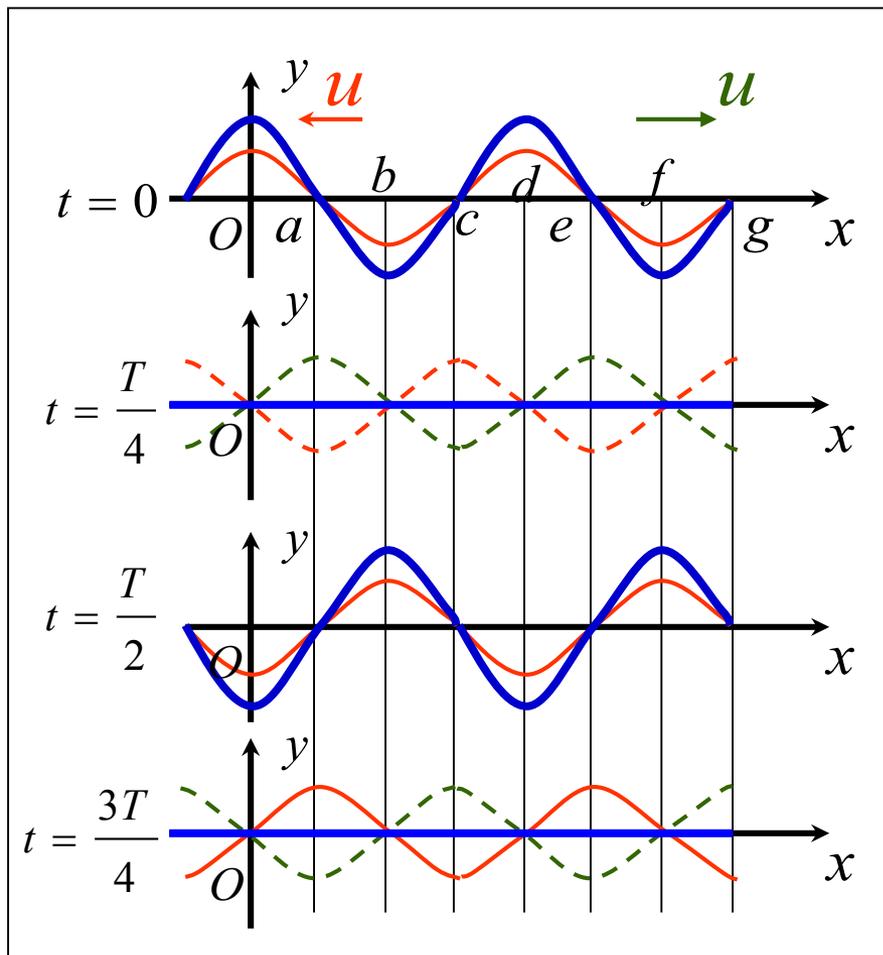
1) 波线上各点振幅不等，不是后一质点重复前一质点的振动，弦线分段振动（波节点为分段点）

振幅最强

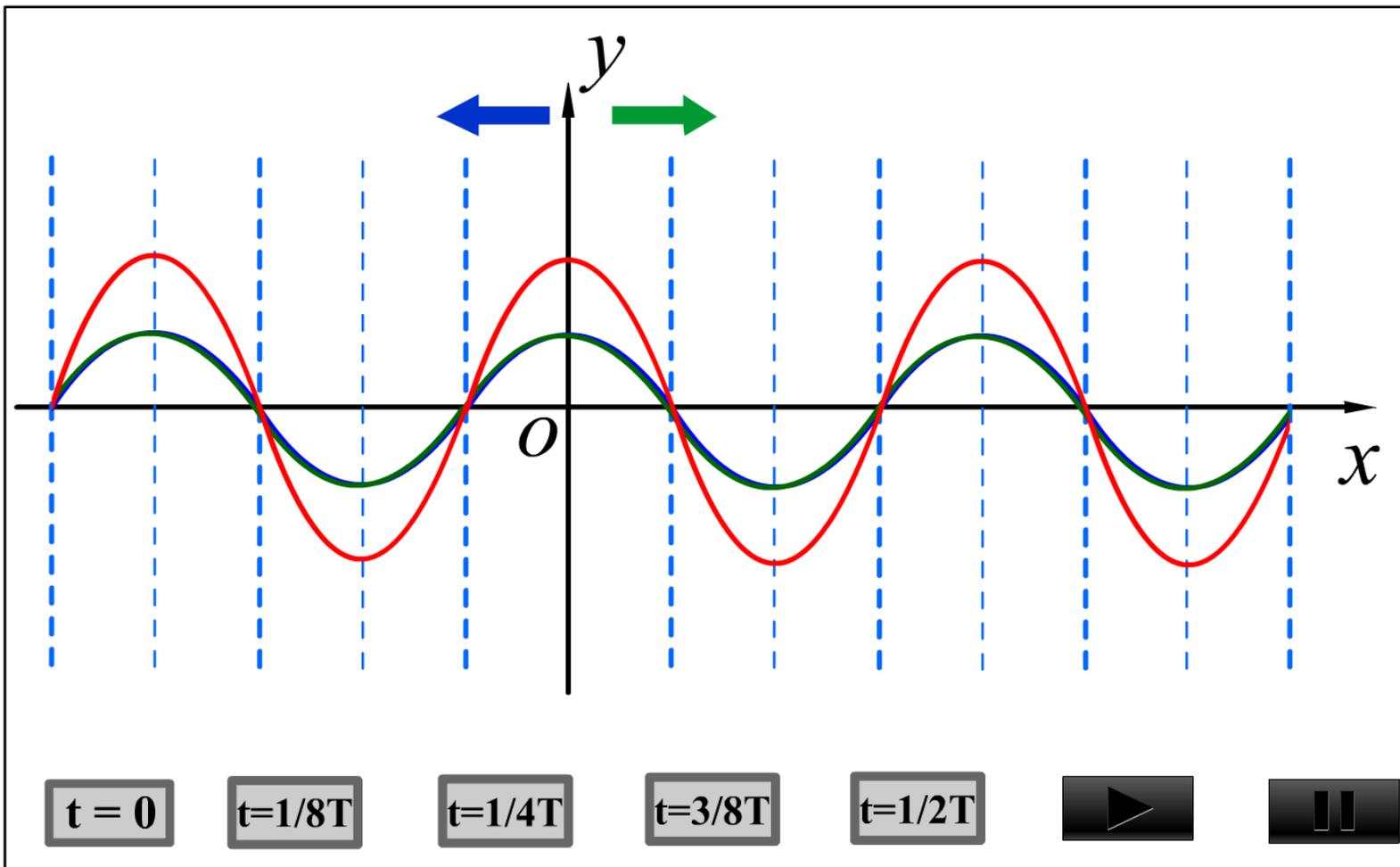
$A = 2A_1$  位置：波腹

振动最弱（相消）

$A = 0$  位置：波节



# 驻波的形成



## 二 驻波方程 $y = 2A \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \cos \omega t$

1) 振幅  $\left| 2A \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \right|$  随  $x$  而不同, 与时间无关.

$$\left| \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \right| = \begin{cases} 1 & 2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm k\pi \quad k = 0, 1, 2, \dots \\ 0 & 2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm \left(k + \frac{1}{2}\right)\pi \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{cases}$$

$$x = \begin{cases} \pm k \frac{\lambda}{2} & k = 0, 1, \dots \quad A_{\max} = 2A \\ \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{4} & k = 0, 1, \dots \quad A_{\min} = 0 \end{cases}$$

波腹

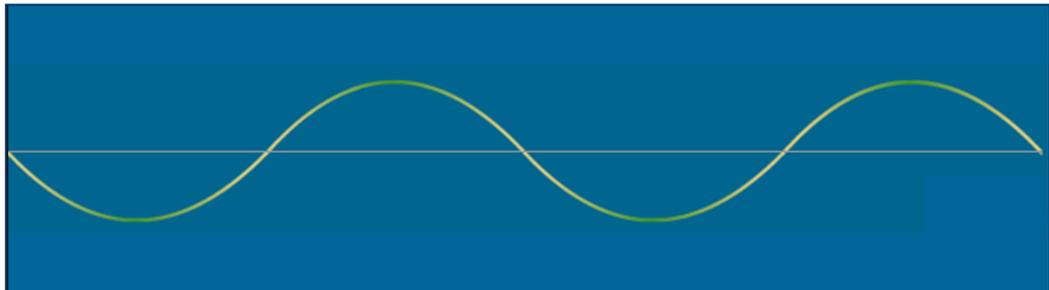
波节

相邻两波腹之间的距离： $x_{k+1} - x_k = (k+1)\frac{\lambda}{2} - k\frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}$

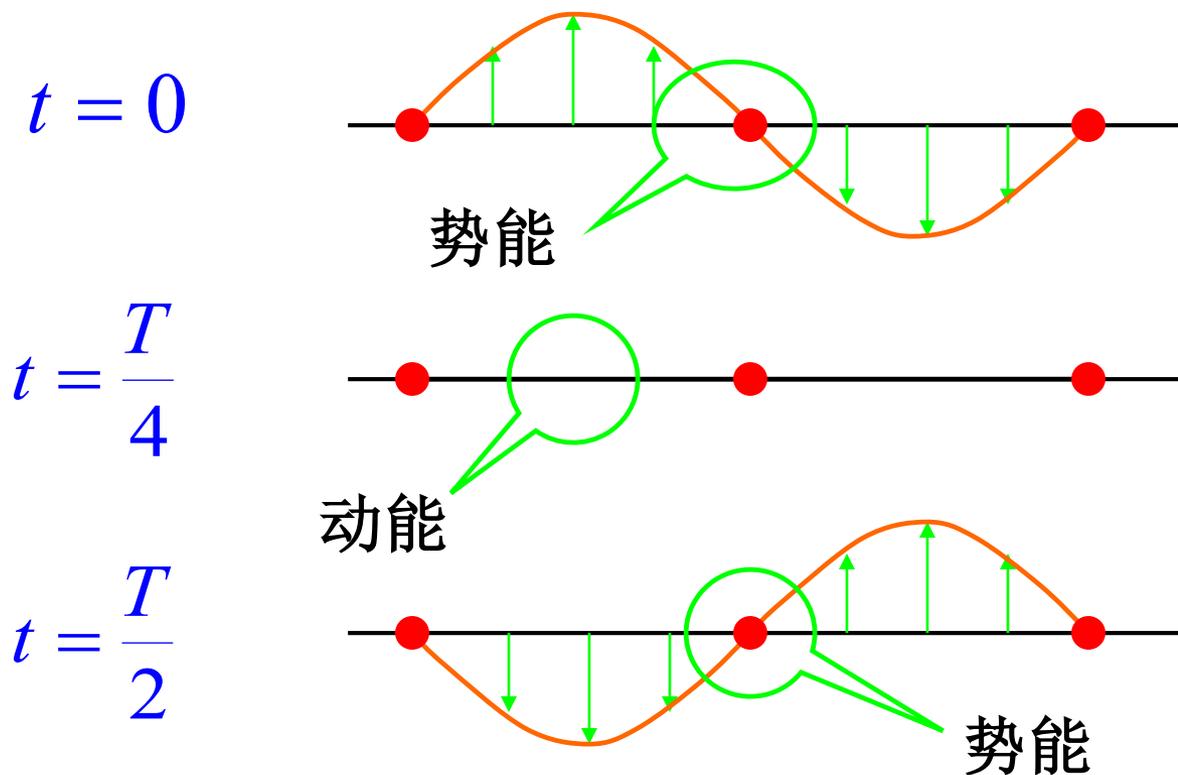
相邻两波节之间的距离： $x_{k+1} - x_k = [2(k+1)+1]\frac{\lambda}{4} - (2k+1)\frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda}{2}$

相邻波腹和波节间距 =  $\lambda/4$

2) 所有波节点将媒质划分为长  $\lambda/2$  的许多段，每段中各质点的振动振幅不同，但相位皆相同；而相邻段间各质点的振动相位相反；即驻波中不存在相位的传播。



3) 没有能量的定向传播。能量只是在波节和波腹之间进行动能和势能的转化。



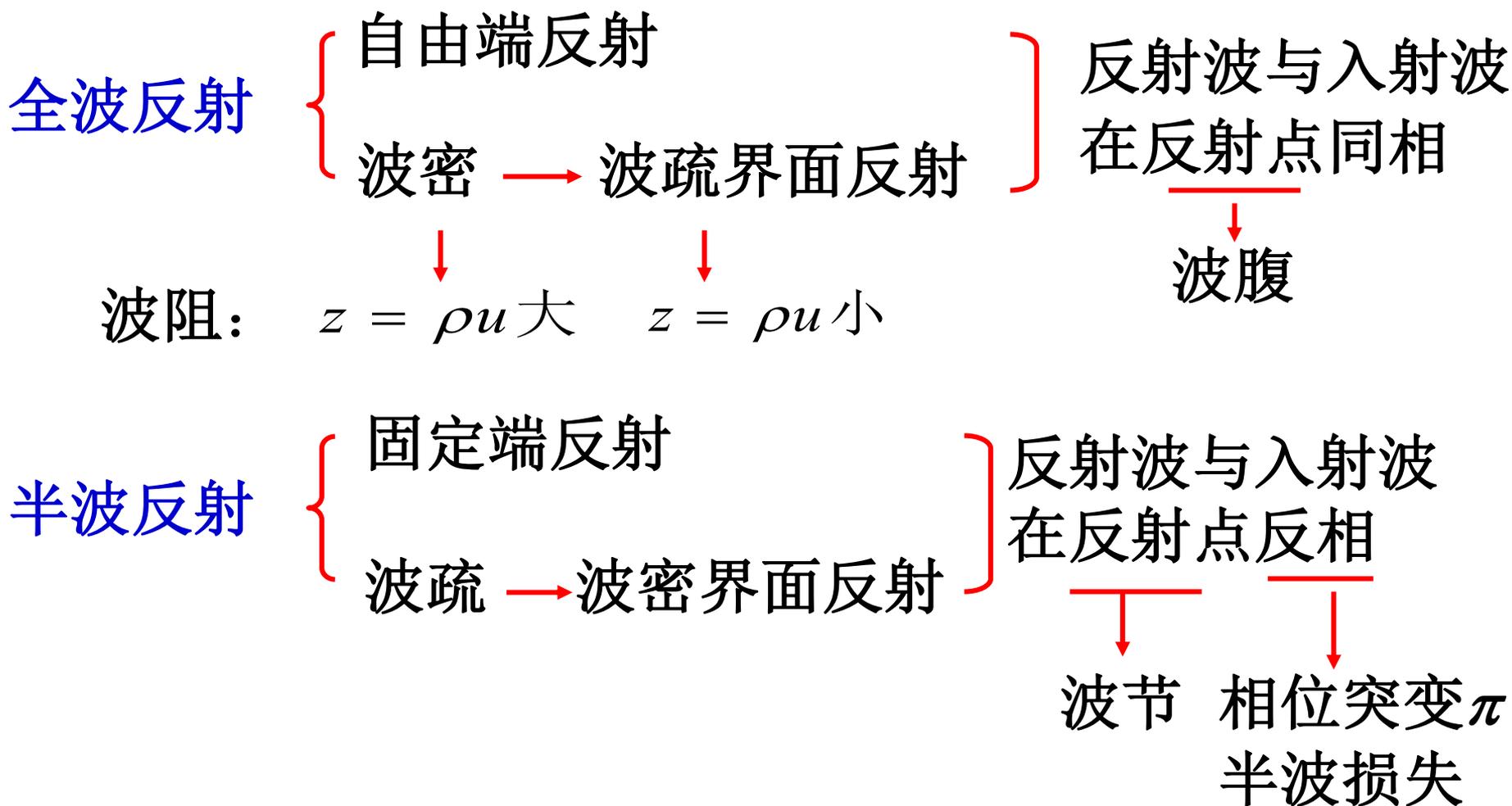
总之：

“驻”波

{ 外形象波：具有空间、时间周期性；  
波形、能量不向前传播、无滞后效应。

### 三 相位跃变（半波损失）

波在两种不同介质界面上的反射



# 作业

➤ **P176: 10; 13; 14;**

## 版权声明

本课件根据高等教育出版社《物理学教程（第二版）上册》（马文蔚 周雨青 编）配套课件制作。课件中的图片和动画版权属于原作者所有；部分例题来源于清华大学编著的“大学物理题库”；其余文字资料由 [Haoxian Zeng](#) 编写，采用 [知识共享 署名-相同方式共享 3.0 未本地化版本 许可协议](#) 进行许可。详细信息请查看[课件发布页面](#)。