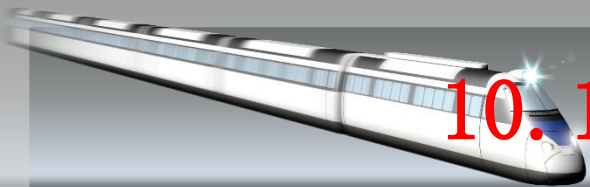


A photograph of a modern high-speed train, possibly a Shinkansen, traveling on an elevated concrete bridge. The train is white with blue and grey accents. The background shows a cloudy sky and some greenery.

第十章 机械波

海上吉小町駅





10.1 机械波的形成和传播

1 什么是机械波

机械波：机械振动在连续介质内的传播

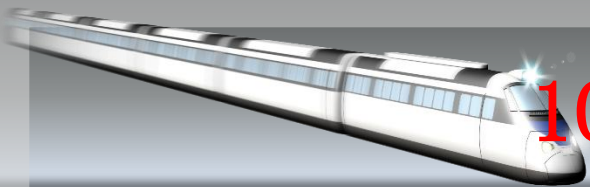
2 机械波产生的条件：

- ✓ 有作机械振动的物体——波源
- ✓ 有连续的介质

简谐振动在理想介质中的传播，叫简谐波。

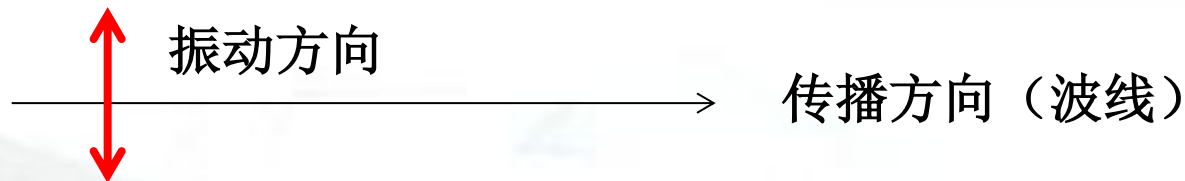


波是振动运动状态的传播，介质的质点并不随波传播



10.1.2 横波 纵波

横波：质点的振动方向和波的传播方向垂直。只能存在于有剪切应力的介质中。（固体、稠液体）



特征：具有交替出现的波峰和波谷

纵波：质点的振动方向和波的传播方向平行。存在于固体、液体、气体各种媒质中。



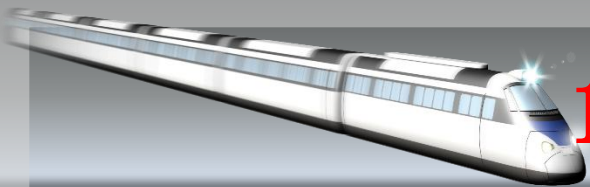
特征：具有交替出现的密部和疏部

[横波与纵波演示视频](#)

[上一页](#)

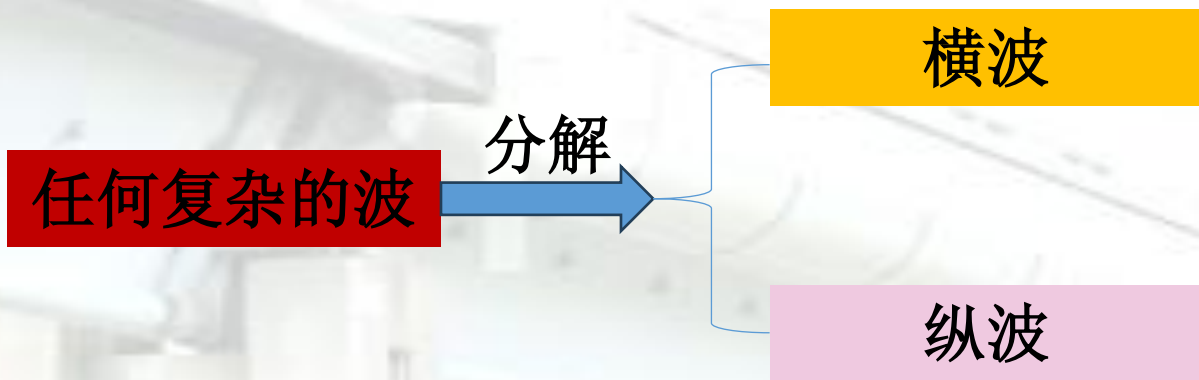
[下一页](#)

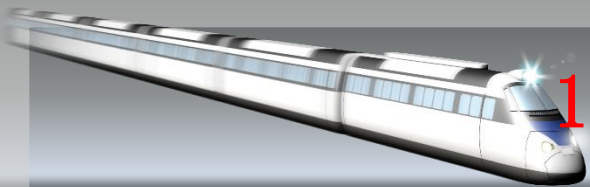
[返回目录](#)



10.1.2 横波 纵波

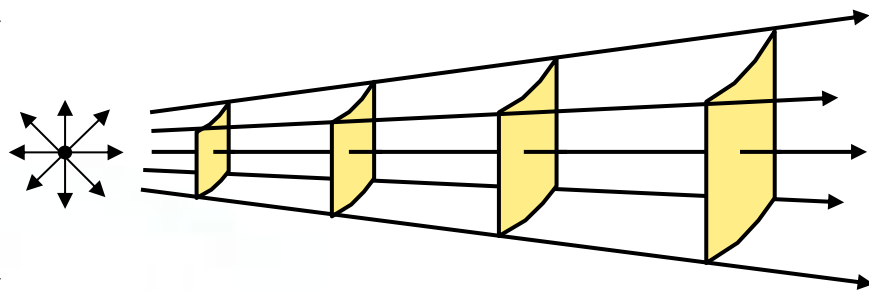
一般而言，介质中质点的振动情况是很复杂的，由此产生的波也很复杂。例如水面上传播的水面波，水质点既有上下振动，也有前后运动，因此既不是纯粹的横波，也不是纯粹的纵波。





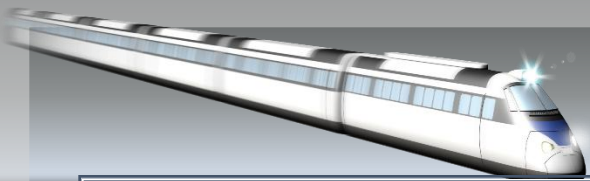
10.1.3 波面 波线

- 1 波所传播到的空间叫**波场**
- 2 从波源沿各传播方向所画的带箭头的线，称为**波线**。
- 3 波在传播过程中，所有振动相位相同的点连成的面，称为波面。最前面的一个波面称**波阵面**（或波前）

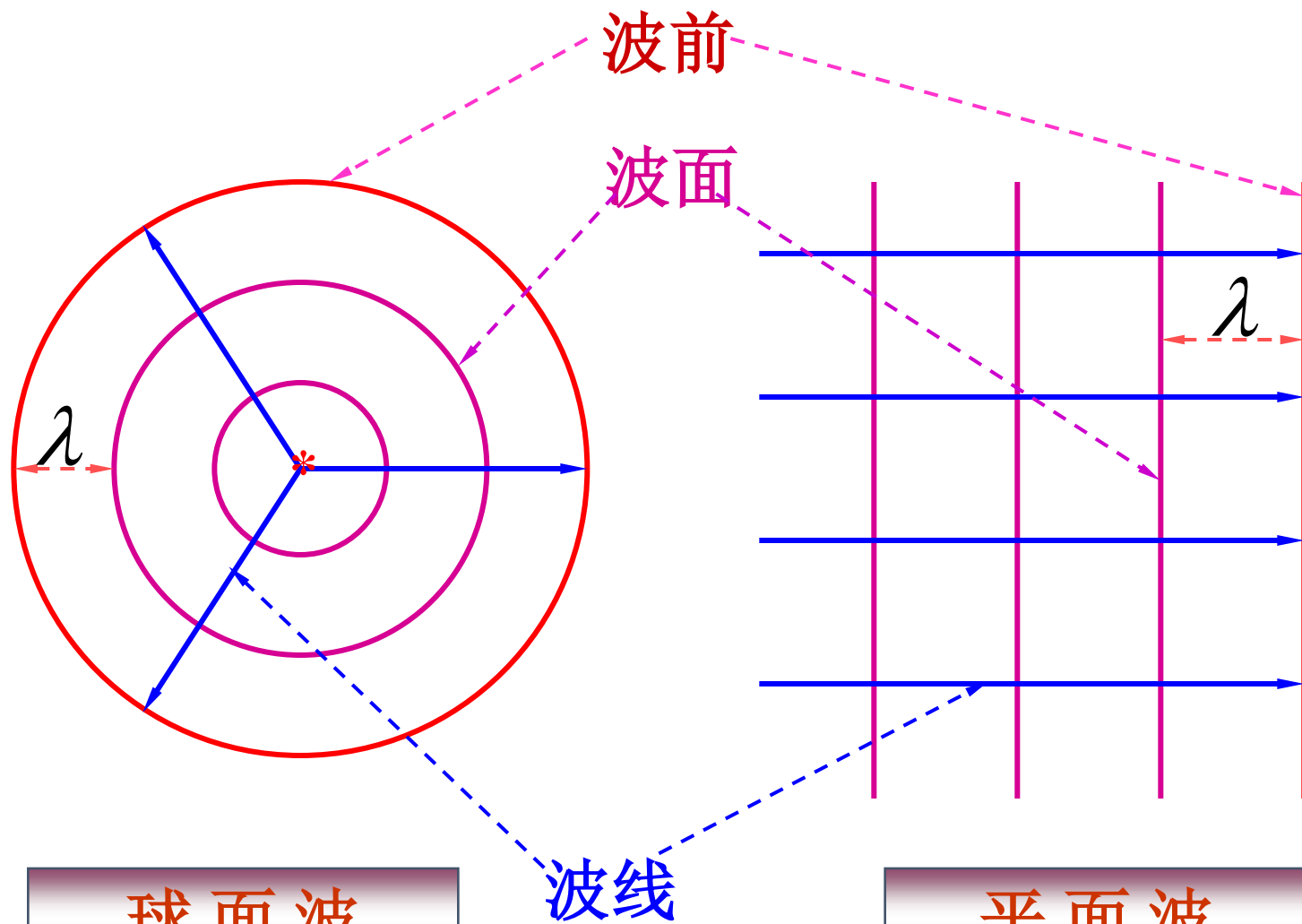


在各向同性介质中，波线恒与波面**垂直**

按波面的形状分类：平面波、球面波和柱面波等

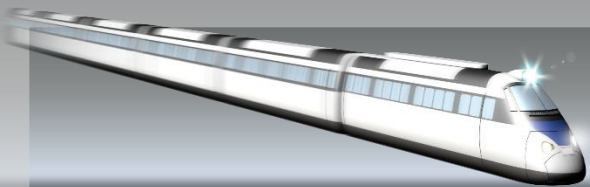


10.1.3 波面 波线



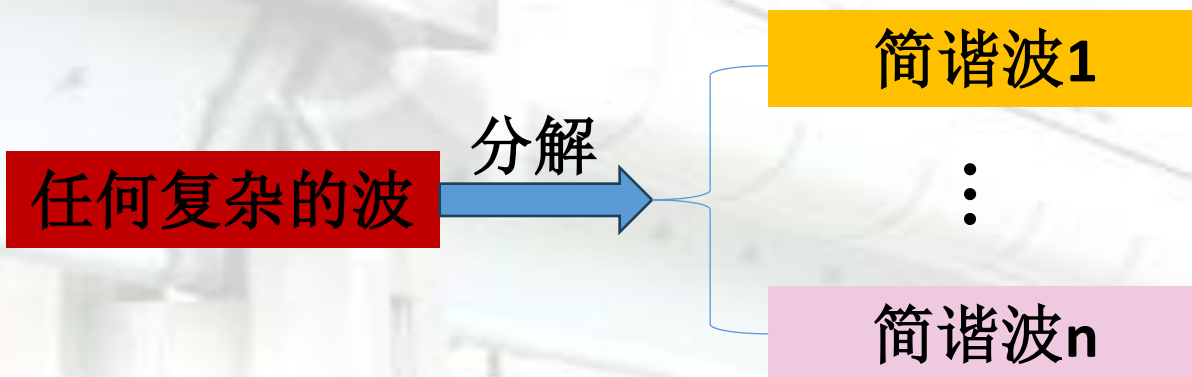
球面波

平面波



10.1.4 简谐波

一般说来，波动中各质点的振动是**复杂**的。最简单而又最基本的波动是**简谐波**，即波源以及介质中各质点的振动都是谐振动。这种情况只能发生在**各向同性、均匀、无限大、无吸收的连续弹性**介质中。



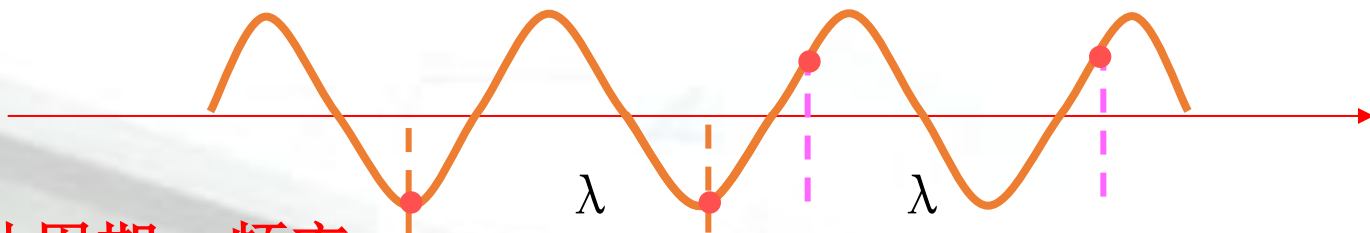


10.1.6

描述波动的几个物理量

1 波长 λ

同一波线上两个相邻的相位差为 2π 的质点间的距离，即一个完整波的长度称为波长。



2 波动周期、频率

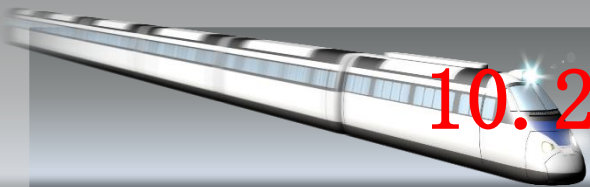
周期 T : 一个完整波形通过波线上某点所需要的时间

频率 ν : 单位时间内通过波线上某点的完整波的数目 $\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$

3 波速 u

在波动过程中，某一振动状态（即振动相位）在单位时间内所传播的距离叫做波速，用 u 表示。**波速决定于介质的性质。**

$$\lambda = u \cdot T = \frac{u}{\nu} = \frac{2\pi \cdot u}{\omega}$$



10.2 平面简谐波的波函数

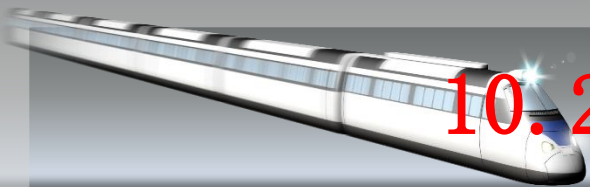
介质中任一质点（坐标为 x ）相对其平衡位置的位移（坐标为 y ）随时间的变化关系，即 $y(x,t)$ 称为波函数。

$$y = y(x, t)$$

各质点相对平衡位置的位移

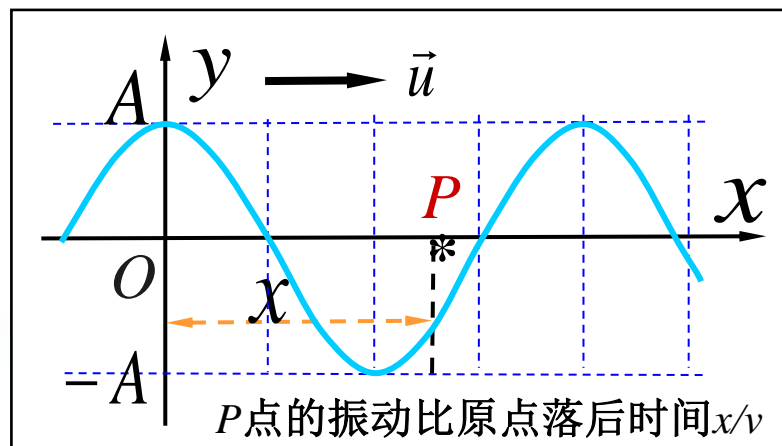
波线上各质点平衡位置

- 简谐波：在均匀的、无吸收的介质中，波源作简谐运动时，在介质中所形成的波。
- 平面简谐波：波面为平面的简谐波。



10.2.1 平面简谐波的波函数

以速度 \vec{u} 沿 x 轴正向传播的平面简谐波。设原点处的质点振动表达式为 $y_0 = A\cos(\omega t + \varphi_0)$



时间推
迟方法

点 O 的振动状态
 $y_0 = A\cos(\omega t + \varphi_0)$

$$\Delta t = \frac{x}{u}$$

点 P

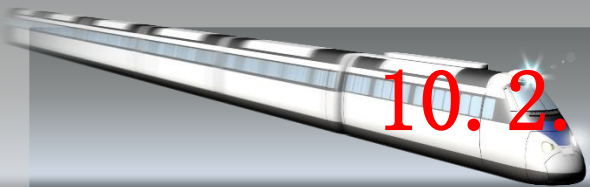
$t - x/u$ 时刻点 O 的运动



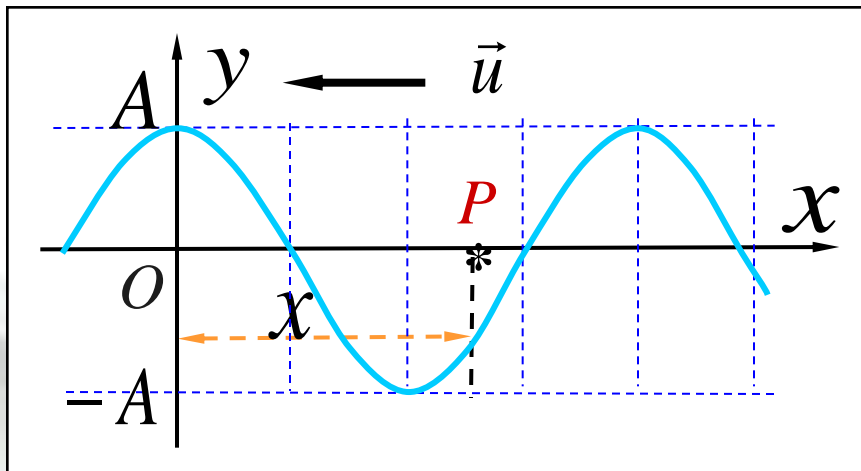
t 时刻点 P 的运动

P 点在 t 时刻的振动方程 $y = A\cos[\omega(t - \frac{x}{u}) + \varphi_0]$

上式为沿 x 轴正方向传播的平面简谐波的波函数



10.2.1 平面简谐波的波函数

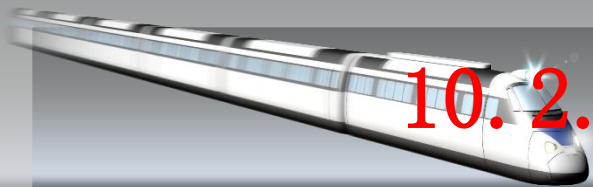


若沿 x 轴负方向传播点 O
振动方程 $y_0 = A\cos(\omega t + \varphi_0)$

P 点的振动**超前** O 点的振动，超前的时间为 $+\frac{x}{u}$ 。 t 时刻 P 点的振动状态就是 $t + \frac{x}{u}$ 时刻 O 点的振动状态。

点 P 振动方程 $y = A\cos[\omega(t + \frac{x}{u}) + \varphi_0]$ （沿 x 轴负向传播）

上式为沿 x 轴负方向传播的平面简谐波的波函数



10.2.1 平面简谐波的波函数

波函数

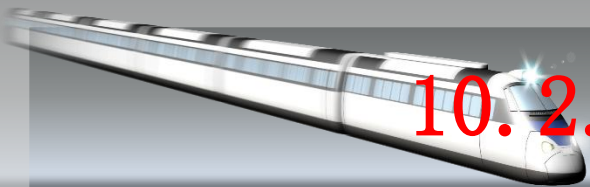
$$y = A \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{u}\right) + \varphi_0\right] \quad u \text{沿} x \text{轴正向}$$

$$y = A \cos\left[\omega\left(t + \frac{x}{u}\right) + \varphi_0\right] \quad u \text{沿} x \text{轴负向}$$

✓ 平面简谐波波函数的其它形式

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

$$y = A \cos\left[2\pi\nu t \mp \frac{2\pi x}{\lambda} + \varphi_0\right]$$



10.2.1 平面简谐波的波函数

我们可以将上述推广到更一般的情形, 若波沿 Ox 轴正方向传播, 且已知 x_0 处点 Q 的振动表达式为

$$y_Q = A \cos(\omega t + \phi_{x_0})$$

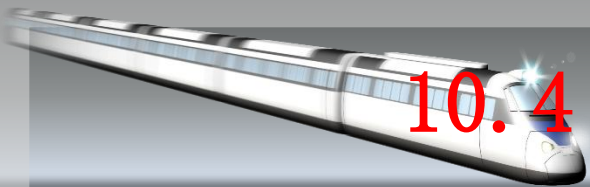
则相应的波的表达式为

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

由波的表达式可以求得介质中各质点的振动速度 v 和振动加速度 a , 即

$$v = \frac{\partial y}{\partial t} = -\omega A \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{u} \right) + \phi_0 \right]$$

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\omega^2 A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{u} \right) + \phi_0 \right]$$



10.4 惠更斯原理 波的衍射

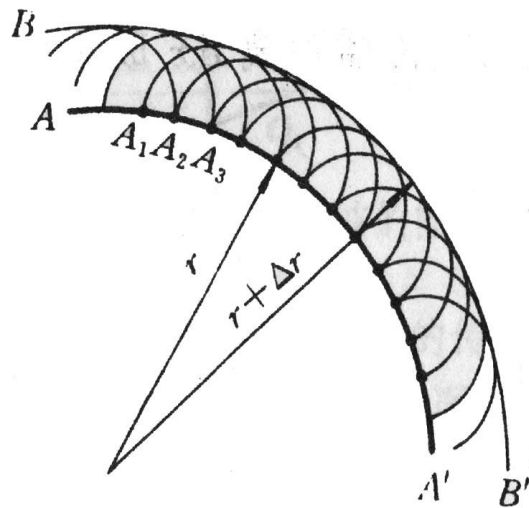
1 惠更斯原理

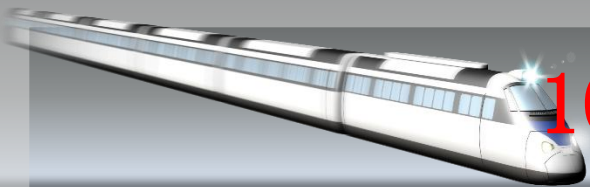
介质中波阵面(波前)上的各点, 都可以看做是发射子波的波源, 其后任一时刻这些子波的包迹就是新的波阵面。这就是惠更斯原理。

惠更斯原理不仅适用于机械波, 也适用于电磁波。不论传播波动的介质是均匀的还是非均匀的, 是各向同性的还是各向异性的, 只要知道某一时刻的波阵面, 就可以根据这一原理确定以后任一时刻的波阵面, 进而确定波的传播方向。此外, 根据惠更斯原理, 还可以很简单地说明波在传播中发生的反射和折射现象。



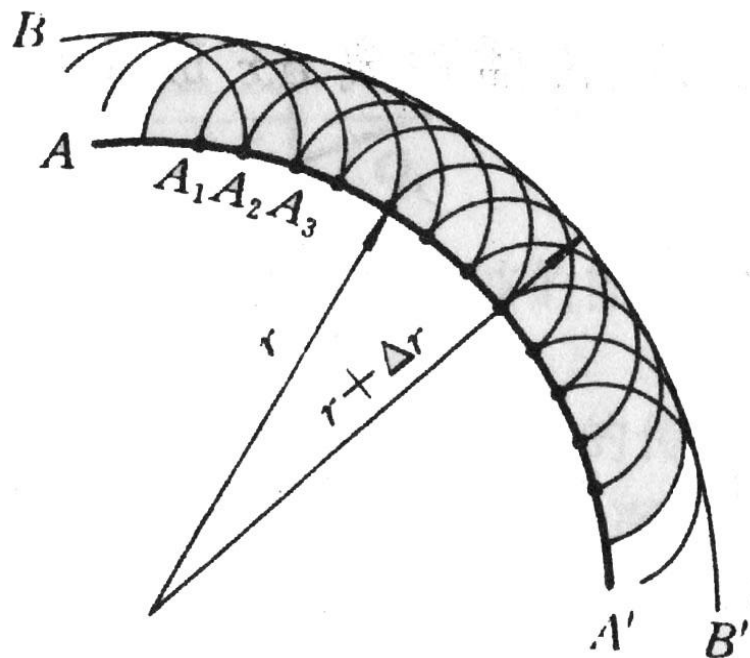
惠更斯, C.



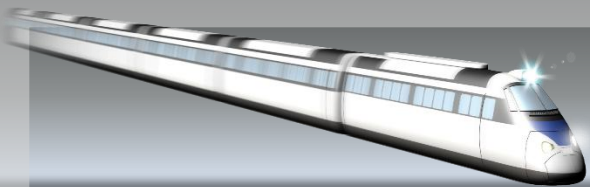


10.4.1 惠更斯原理

2 确定下一时刻的波阵面（波前）

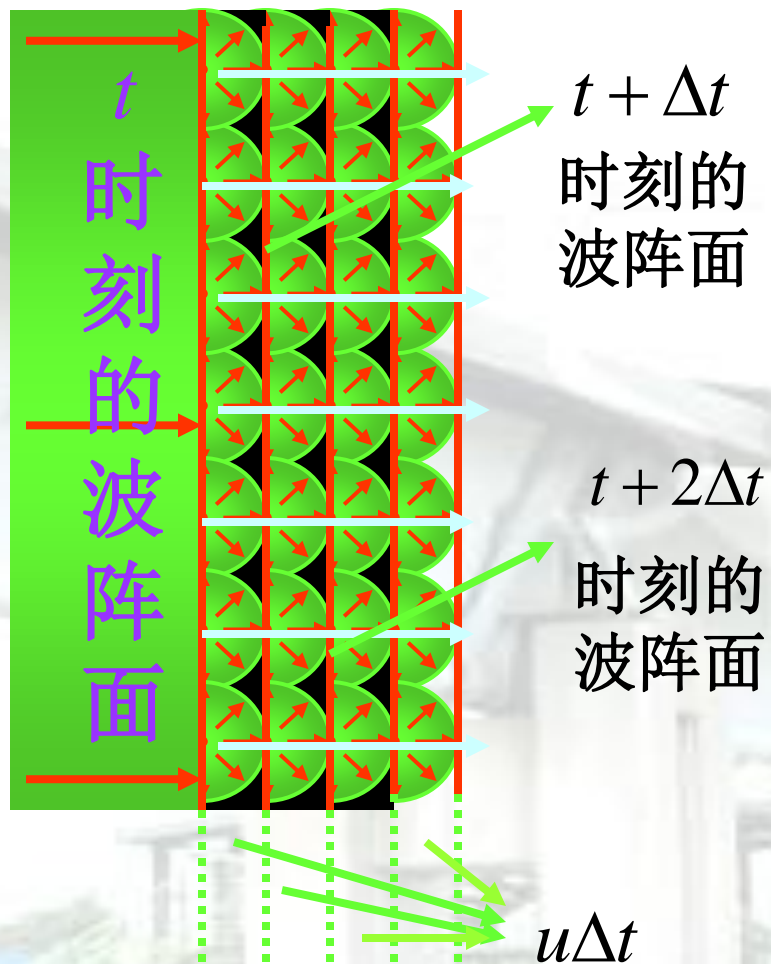


假设 t 时刻波动传至波面 AA' 上各点 A_1 、 A_2 、 A_3 、 \dots ，每一点都可看作是一个新的波源（子波源），由子波源发射出新的波动（子波）。经 Δt 时间，子波均向前传播了 $\Delta r = u\Delta t$ 的距离。取这些子波的包面 BB' ，就是原来的波动在 $t + \Delta t$ 时刻的新波面

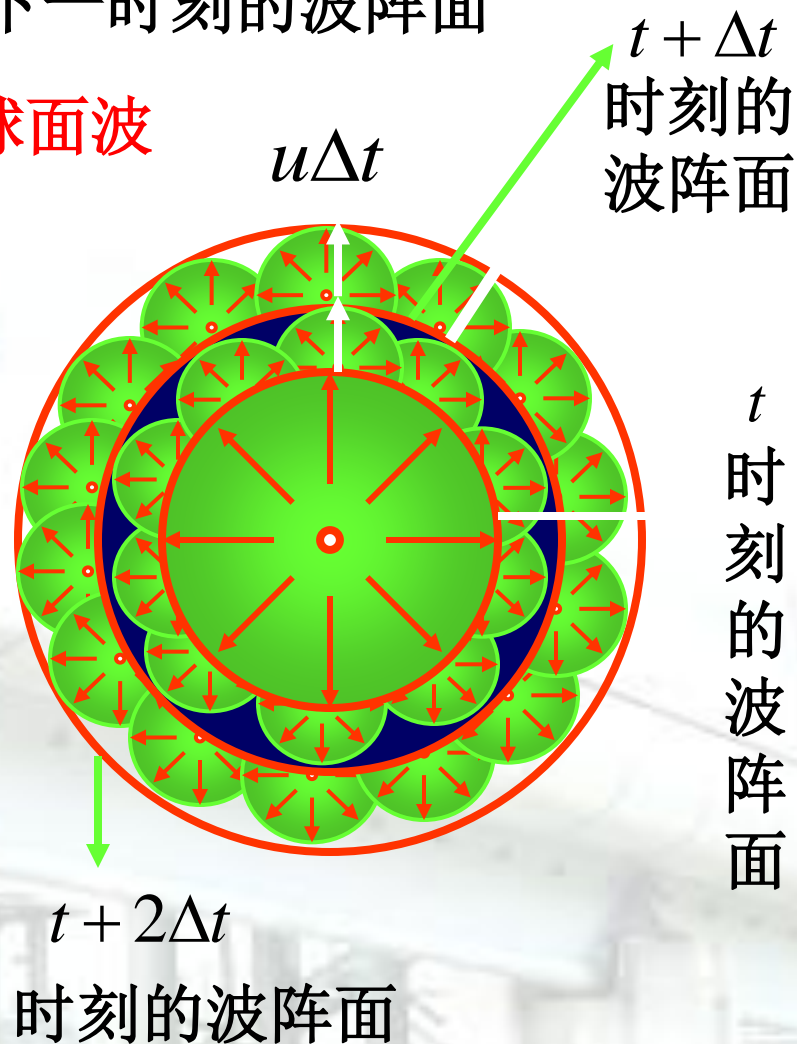


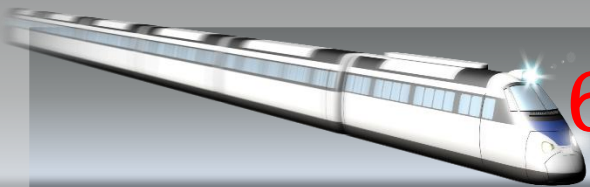
10.4.1 惠更斯原理

平面波从某时刻的波阵面得到下一时刻的波阵面



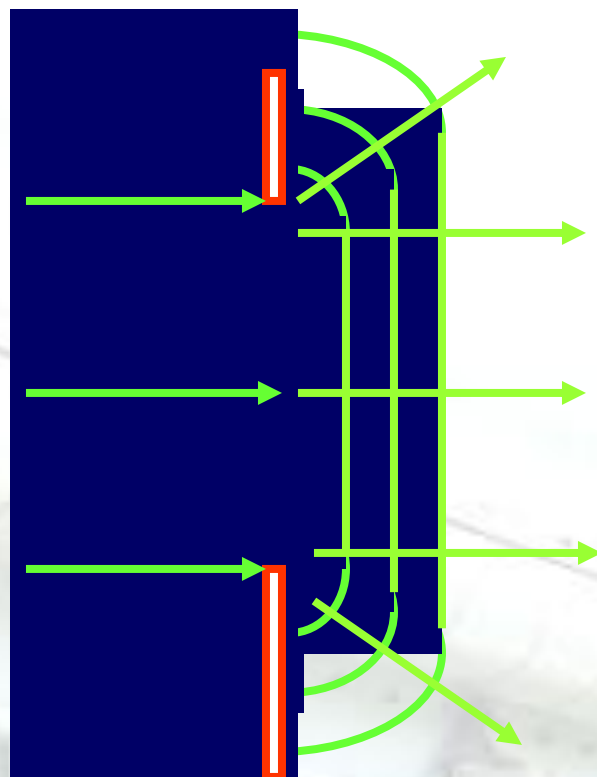
球面波



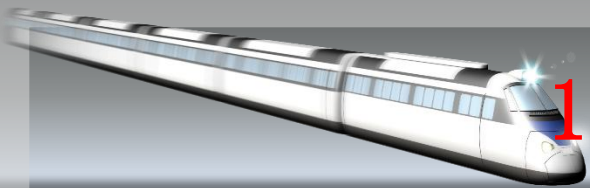


6.4.1 惠更斯原理

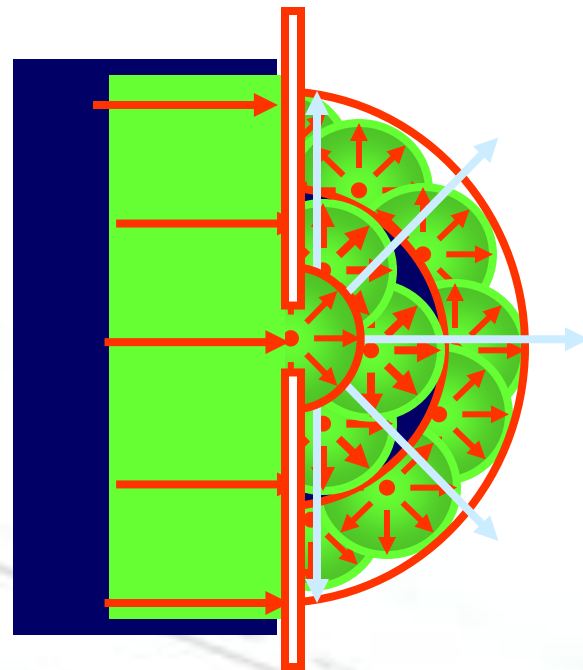
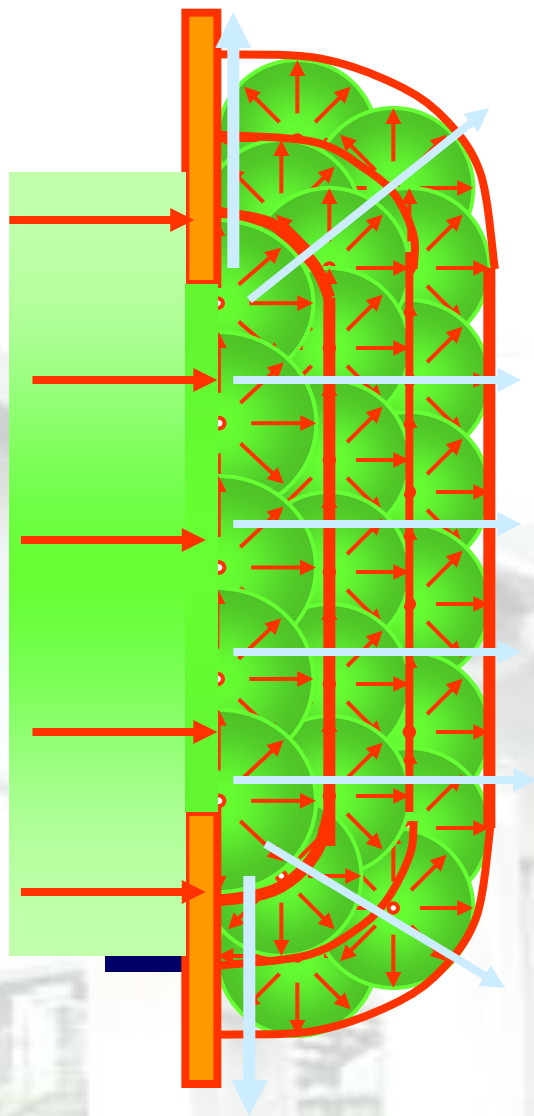
3 波的衍射 衍射（绕射）——波动在传播过程中遇到障碍物时能绕过障碍物的边缘前进的现象



“室内讲话，墙外有耳”



10.4.1 惠更斯原理



不足：不能解释波的强度及为什么只考虑向前传播的波。

1 波的叠加原理

波的叠加原理包含两个内容，一是波传播的**独立性**，二是波的**可叠加性**，具体来说：

(1) 几列波相遇以后，仍然保持它们各自原有的特性（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。

(2) 在相遇区域内任一质点的振动位移，等于各列波单独存在时在该点所引起的振动位移的矢量和。

两列波相遇会发生什么？



10.5 波的叠加原理 波的干涉

2 波的干涉

两列波若**频率**相同、**振动方向**相同、在相遇点的**相位相同或相位差恒定**，则在合成波场中会出现某些点的振动始终**加强**，另一些点的振动始终**减弱**（或完全抵消），这种现象称为波的**干涉**。

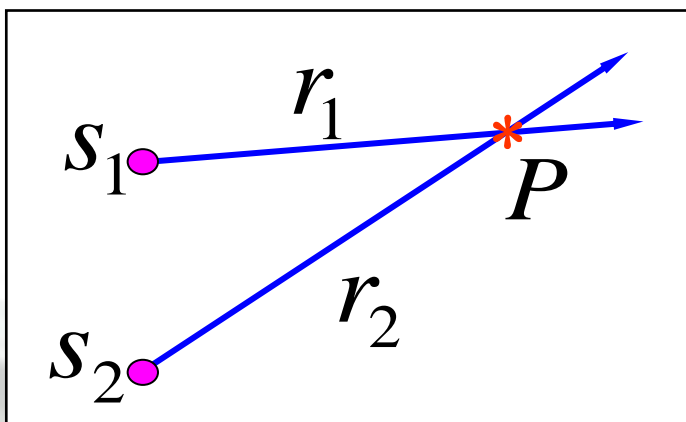
满足上述条件的波源，称为**相干波源**，由相干波源发出的波，称为**相干波**。两列波产生干涉的条件称为**相干条件**。

波的相干条件是：**频率相同、振动方向相同、在相遇点的位相相同或位相差恒定**。

[波的干涉演示动画](#)

10.5.

波的叠加原理 波的干涉



✓ 波的相干条件

1) 频率相同

2) 振动方向相同

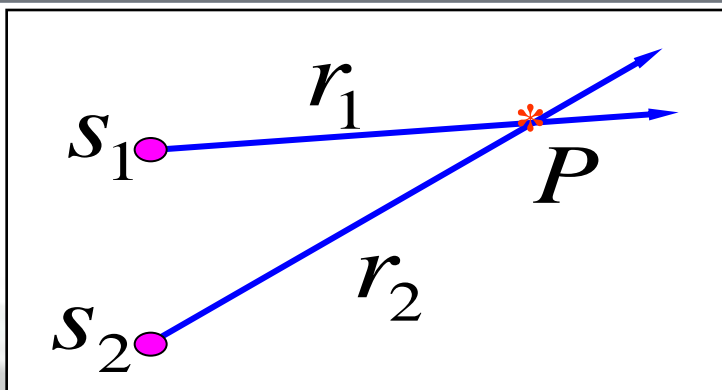
3) 位相相同或位相差恒定

设 S_1 和 S_2 为两相干波源，它们的简谐振动方程分别为

$$\text{波源的振动方程} \begin{cases} y_{10} = A_{10} \cos(\omega t + \varphi_{10}) \\ y_{20} = A_{20} \cos(\omega t + \varphi_{20}) \end{cases}$$

$$P\text{点的振动方程} \begin{cases} y_1 = A_1 \cos(\omega t - \frac{2\pi r_1}{\lambda} + \varphi_{10}) \\ y_2 = A_2 \cos(\omega t - \frac{2\pi r_2}{\lambda} + \varphi_{20}) \end{cases}$$

10.5. 波的叠加原理 波的干涉



P 点的合振动方程

$$y = y_1 + y_2 = A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$\tan \varphi_0 = \frac{A_1 \sin(\varphi_{10} - \frac{2\pi r_1}{\lambda}) + A_2 \sin(\varphi_{20} - \frac{2\pi r_2}{\lambda})}{A_1 \cos(\varphi_{10} - \frac{2\pi r_1}{\lambda}) + A_2 \cos(\varphi_{20} - \frac{2\pi r_2}{\lambda})}$$

振幅

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

位相差

$$\Delta\varphi = (\varphi_{20} - \varphi_{10}) - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda}$$



10.5. 波的叠加原理 波的干涉

振幅 $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi$

位相差 $\Delta\varphi = (\varphi_{20} - \varphi_{10}) - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda}$

$\varphi_{20} - \varphi_{10}$ 是两个相干波源的相位差, $r_2 - r_1$ 为一常量;
 $2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda}$ 是两个相干波源发出的两列波传到点 P 的几何路程之差,
是两列波之间因波程差产生的相位差, 对于空间任一给定点 P
它也是常量; 对于叠加区域内任意确定点来说, $\Delta\varphi$ 为一常量。

1) 合振动呈现出振幅或强度分布不均匀、而又相对稳定

$\Delta\varphi = \pm 2k\pi \quad k = 0, 1, 2, \dots$

$A = A_1 + A_2$ 振动始终加强, 干涉相长

2) $\Delta\varphi = \pm (2k + 1)\pi \quad k = 0, 1, 2, \dots$

$A = |A_1 - A_2|$ 振动始终减弱, 干涉相消

$\Delta\varphi = \text{其他} \quad |A_1 - A_2| < A < A_1 + A_2$



10.5. 波的叠加原理 波的干涉

$$\begin{cases} A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi \\ \Delta\varphi = (\varphi_{20} - \varphi_{10}) - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} \end{cases}$$

若 $\varphi_{10} = \varphi_{20}$ 则 $\Delta\varphi = -2\pi \frac{\delta}{\lambda}$

波程差 $\delta = r_2 - r_1$

3) $\begin{cases} \delta = \pm k\lambda & k = 0, 1, 2, \dots & \text{干涉相长} \\ A = A_1 + A_2 & \text{干涉加强} \\ \delta = \pm(k + 1/2)\lambda & k = 0, 1, 2, \dots & \text{干涉相消} \\ A = |A_1 - A_2| & \text{干涉减弱} \\ \delta = \text{其他} & |A_1 - A_2| < A < A_1 + A_2 \end{cases}$



10.5. 波的叠加原理 波的干涉

结论

当两个相干波源同位相时，在两列波的叠加区域内，波程差 δ 等于零或半波长偶数倍的各点，振幅和强度最大；波程差 δ 等于半波长奇数倍的各点，振幅和强度最小。