

几何光学

基本定义

几何光学基本定律

直线传播

独立传播

反射、折射定律

光路可逆

光程与费马原理

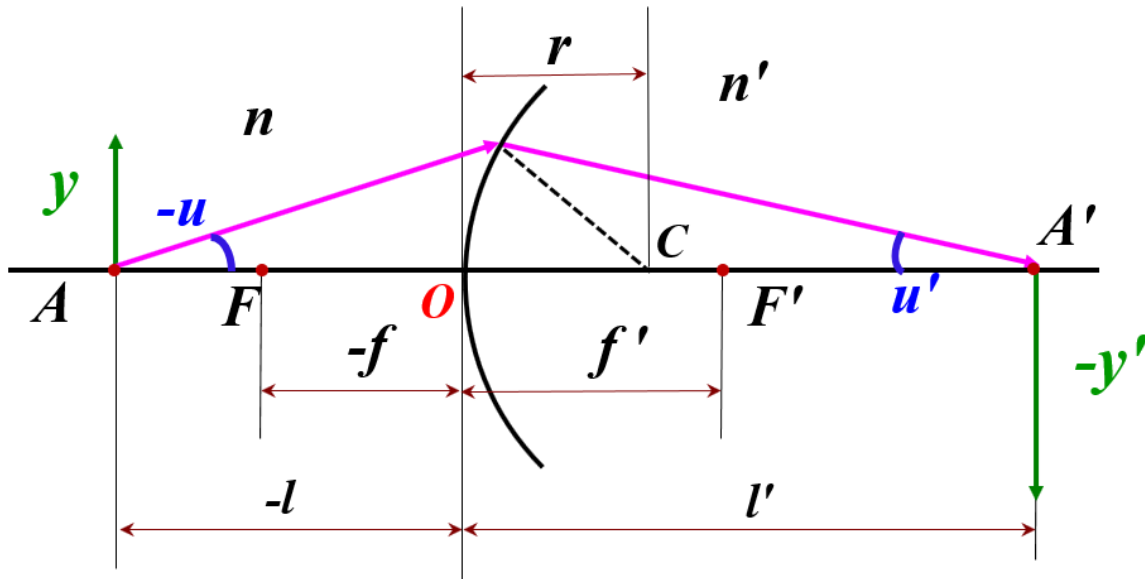
光线传播的几何路程与光线所在媒质的折射率的乘积为**光程**。

物象关系

物空间（实物、虚物） 像空间（实像、虚像）

几何光学-基本概念和公式复习

符号规则



单球面成像公式

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r}$$

折射球面

$$\frac{1}{l'} + \frac{1}{l} = \frac{2}{r}$$

反射球面

几何光学-基本概念和公式复习

理想光学系统

主点

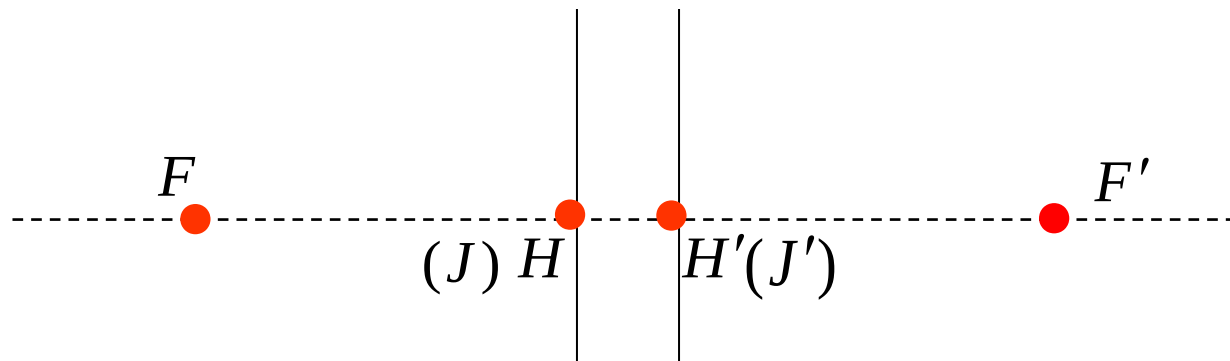
- 两个主点共轭 $\beta=1$
- 两主平面上的任一对等高点共轭

焦点

- 两焦点不共轭
- 焦点从主点量起

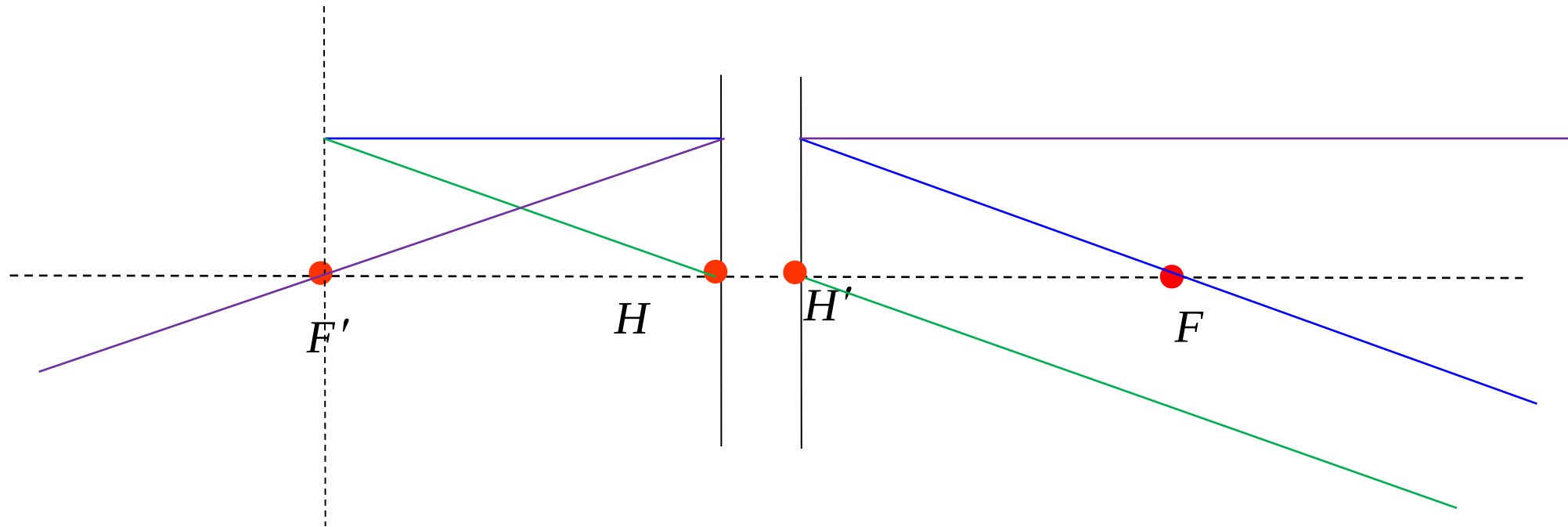
节点

- 两个节点共轭 $\gamma=1$
- 当成像系统的两边介质相同时，节点主点重合



几何光学-基本概念和公式复习

◆共轴理想光学系统 作图法



几何光学-基本概念和公式复习

◆ 共轴理想光学系统 解析法

□ 高斯公式

$$\frac{f'}{l'} + \frac{f}{l} = 1$$

□ 牛顿公式

$$xx' = ff'$$

□ 焦距关系

$$\frac{f}{f'} = -\frac{n}{n'}$$

□ 垂轴放大倍率

$$\beta = \frac{nl'}{n'l} = -\frac{fl'}{f'l} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}$$

□ 轴向放大倍率

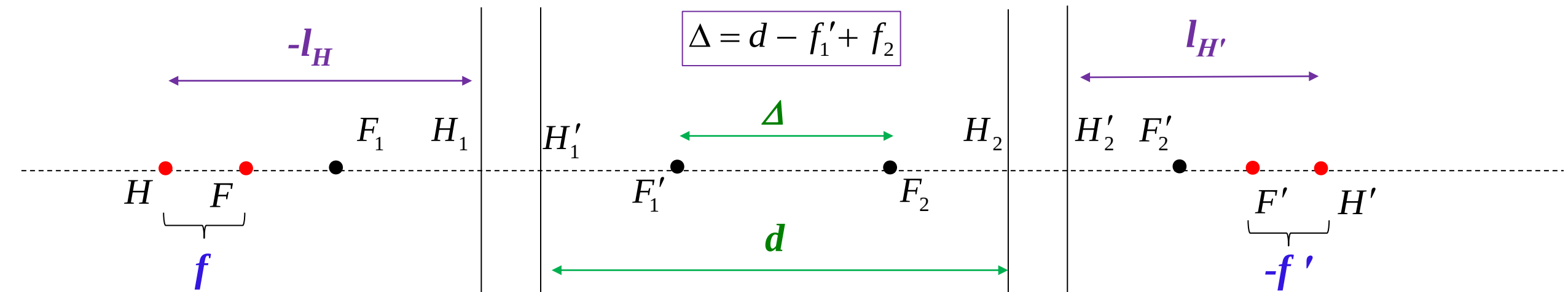
$$\alpha = \frac{dx'}{dx} = -\frac{x'}{f'} \cdot \frac{f}{x} \cdot \frac{f'}{f} = -\beta^2 \cdot \frac{f'}{f}$$

□ 角放大倍率

$$\gamma = \frac{u'}{u} = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{1}{\beta}$$

几何光学-基本概念和公式复习

共轴理想光学系统组合



$$f' = -\frac{f'_1 f'_2}{\Delta}$$

$$f = \frac{f_1 f_2}{\Delta}$$

$$l'_H = -f' \frac{d}{f'_1} = f'_2 \frac{d}{\Delta}$$

波动光学

光的干涉

两束光的相遇区形成稳定的、有强有弱的光强分布的现象

光的相干性

- 振动方向相同
- 振动频率相同
- 相位相同或相位差恒定

振动合成

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \phi_1) \quad x_2 = A_2 \cos(\omega t + \phi_2)$$

场强叠加

$$x = x_1 + x_2 = A \cos(\omega t + \phi)$$

合振动的振幅

$$\left\{ \begin{array}{l} A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta \phi \\ \Delta \phi = (\phi_2 - \phi_1) - 2\pi \frac{r_2 - r_1}{\lambda} \end{array} \right.$$

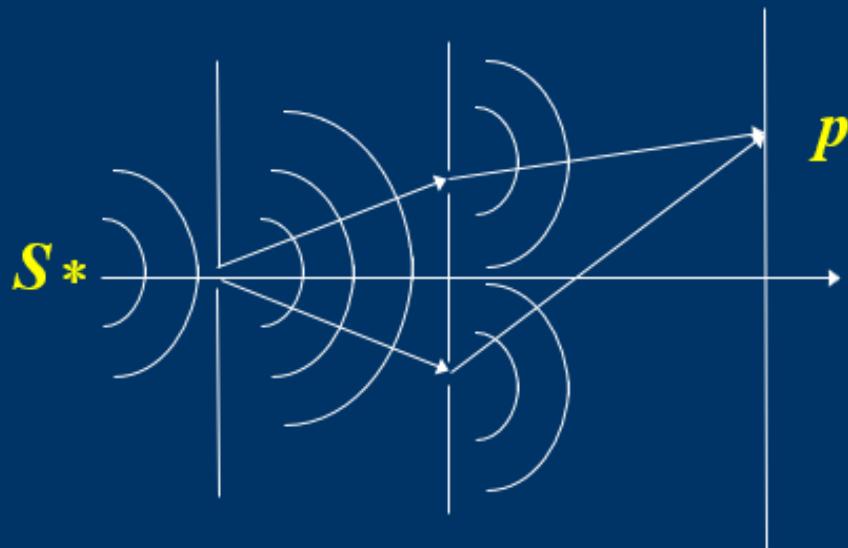


$$\Delta \phi = \pm 2k\pi \quad \bullet \text{干涉相长}$$

$$\Delta \phi = \pm (2k + 1)\pi \quad \bullet \text{干涉相消}$$

获得相干波源的方法

分波面法

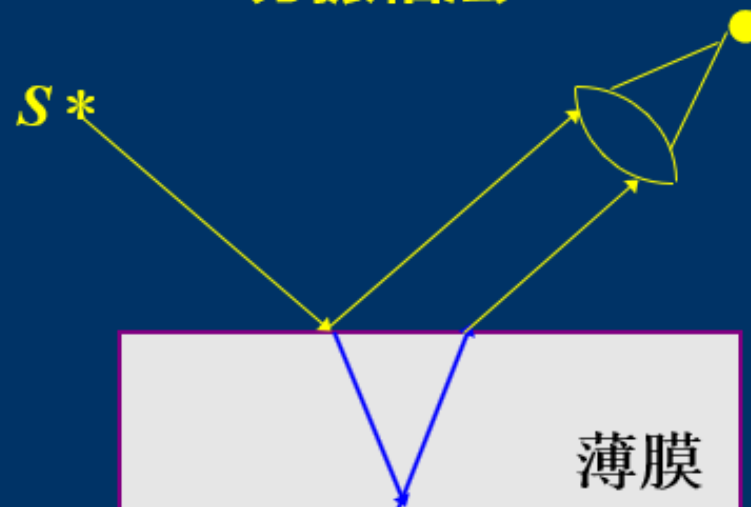


杨氏双缝干涉

菲涅耳双面镜

菲涅尔双棱镜实验

分振幅法



等倾干涉

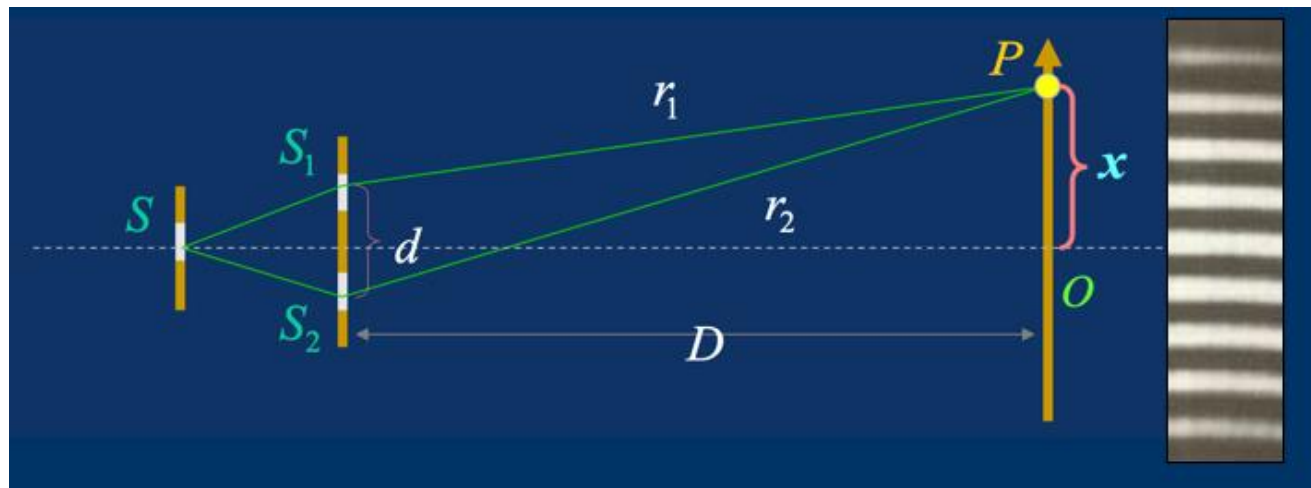
等厚干涉

杨氏双缝干涉

两列波在P的相位差和波程差

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{xd}{D}$$

光程差?



• 明纹

$$\delta = \frac{xd}{D} = k\lambda$$

$$\Delta\phi = 2k\pi$$

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

• 暗纹

$$\delta = \frac{xd}{D} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$\Delta\phi = (2k + 1)\pi$$

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

相邻明（暗）条纹中心间距

$$\Delta x = x_{k+1} - x_k = \frac{D\lambda}{d}$$

条纹间距与 d , D , λ 的关系

薄膜干涉

等倾干涉 (薄膜厚度均匀)

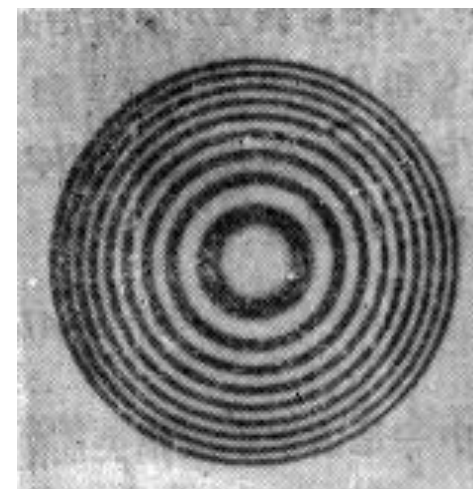
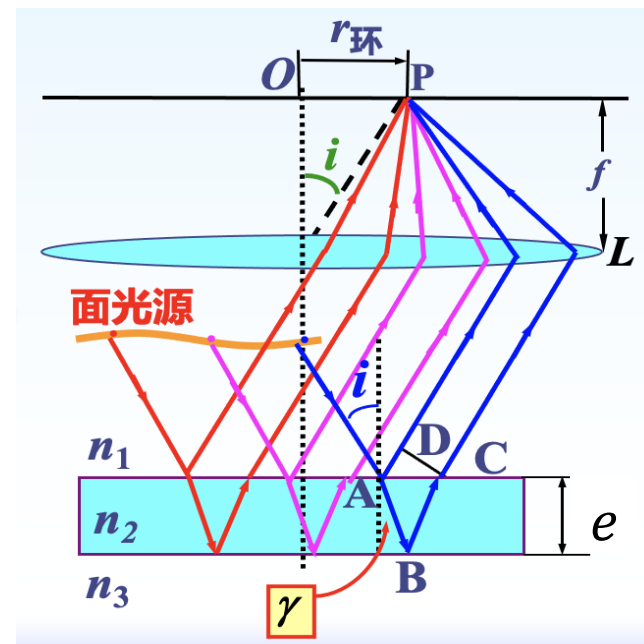
$$\delta = 2e \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}$$

$$= 2n_2 e \cos \gamma + \frac{\lambda}{2}$$

$$\begin{cases} k\lambda, & k = 1, 2, \dots & \text{明纹} \\ (2k + 1)\frac{\lambda}{2}, & k = 0, 1, \dots & \text{暗纹} \end{cases}$$

半波损失

光波从光疏介质向光密介质入射时, 反射光要产生数值为 π 的相位突变, 相当于反射光波多走了(或少走了)半个波长.



一系列同心圆环

等厚干涉 (薄膜厚度不均匀)

$$\delta = 2n_2e \cos\gamma + \frac{\lambda}{2} = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2\sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}$$

劈尖干涉

光程差

$$\delta = 2d + \frac{\lambda}{2}$$

$$\begin{cases} k\lambda, & k = 1, 2, \dots \\ (2k + 1)\frac{\lambda}{2}, & k = 0, 1, \dots \end{cases}$$

明纹

暗纹

相邻条纹所对应的间距:

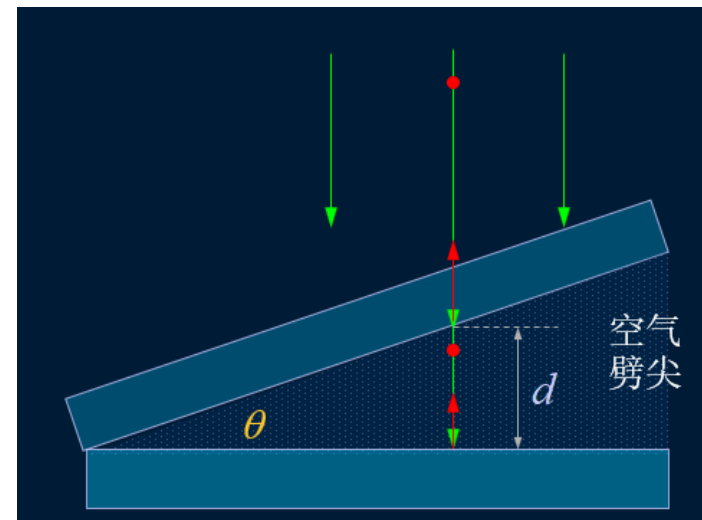
$$a \sin\theta = \frac{\lambda}{2}$$

→ 所对应的膜厚之差为 $\frac{\lambda}{2}$

牛顿环、迈克尔逊干涉仪.....

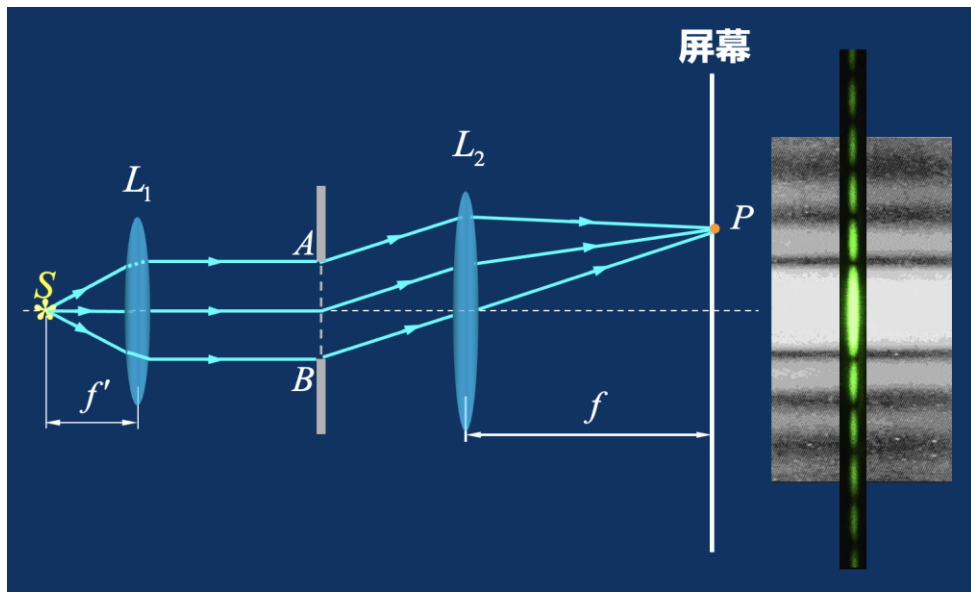
检验平整度

测量微小角度和大小等

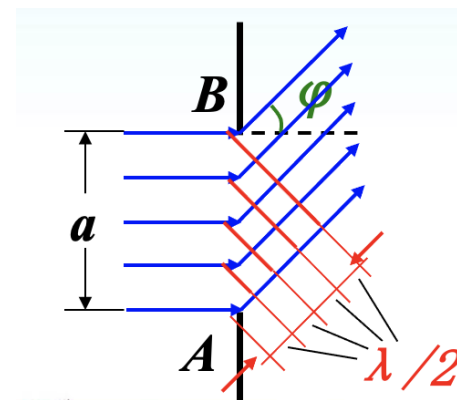


光的衍射

单缝的夫琅禾费衍射



半波带法



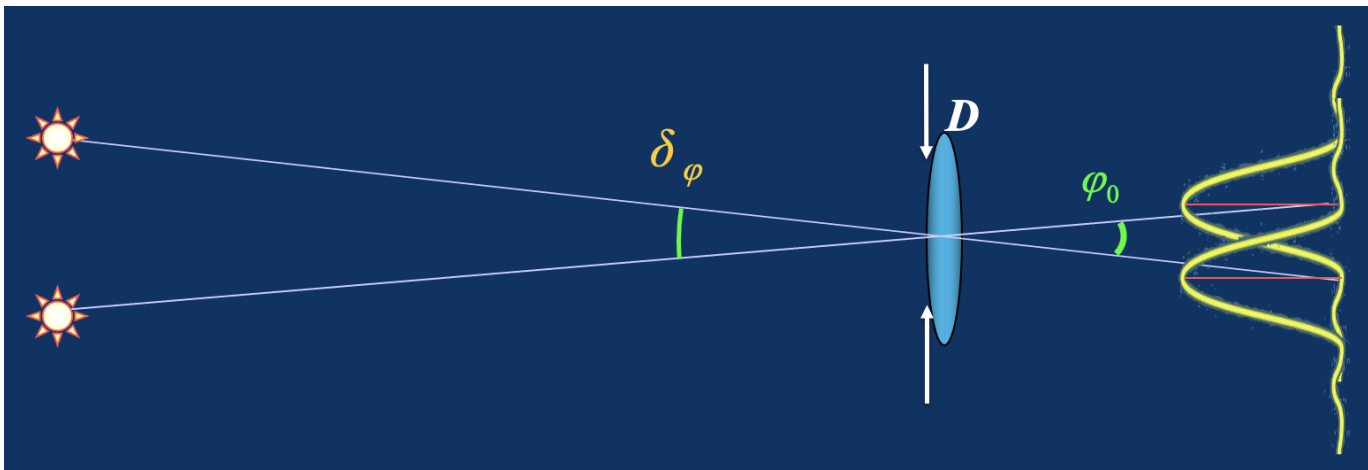
暗纹条件 $a \sin \varphi = \pm(2k) \lambda / 2 \quad k = 1, 2, 3 \dots$ (半波带数目为偶数)

明纹条件 $a \sin \varphi = \pm(2k + 1) \lambda / 2 \quad k = 1, 2, 3 \dots$ (半波带数目为奇数)

中央明纹中心 $\varphi = 0 \longrightarrow a \sin \varphi = 0$

光学仪器分辨率

瑞利判据： 对于两个等光强的非相干物点,如果一个像斑中心恰好落在另一像斑的中央亮斑的边缘(第一级暗纹处)上时, 就认为这两个像刚刚能够被分辨。



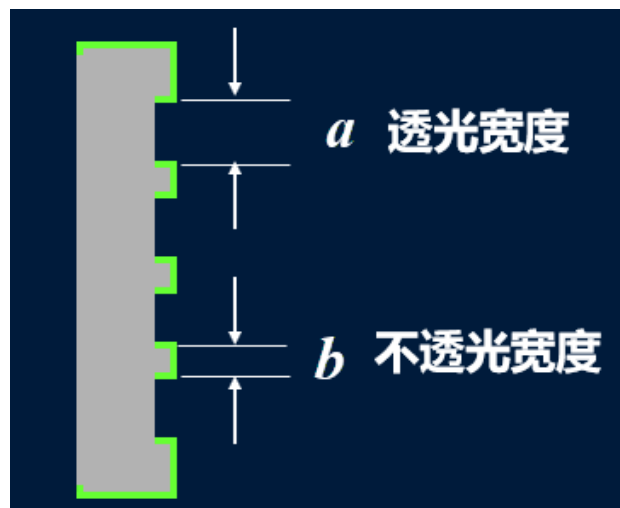
最小分辨角

$$\delta_\phi = \phi_0 \approx 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

光学仪器分辨本领

$$R = \frac{1}{\delta_\phi}$$

衍射光栅



- 光栅常数

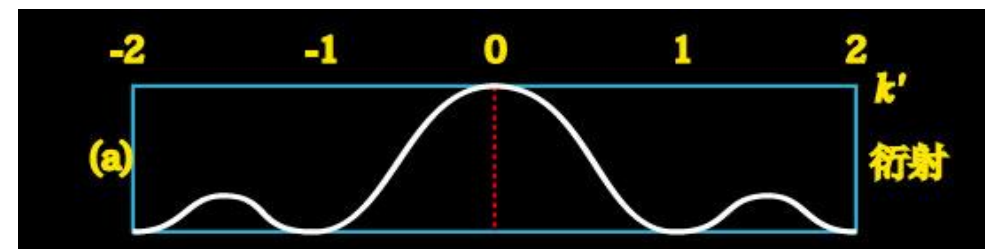
$$d = a + b$$

- 总缝数

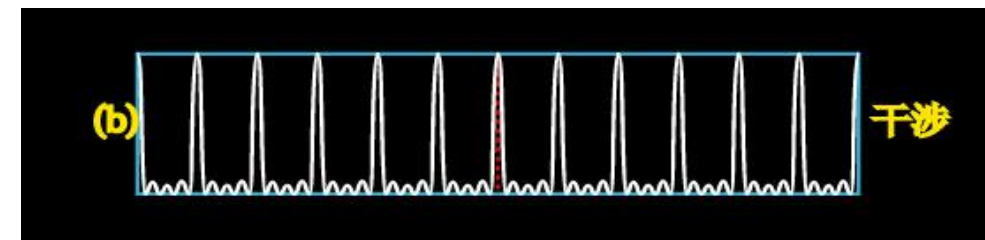
光栅宽度为 l mm, 每毫米缝

数为 m , 则为总缝数 $N = m \times l$

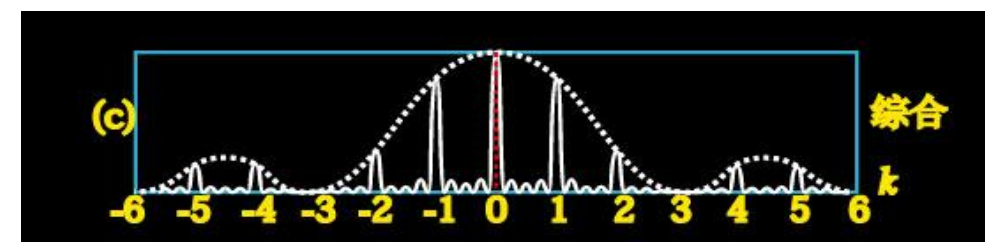
单缝衍射强度分布



多缝干涉强度分布



光栅衍射强度分布



光栅方程（主极大）： $d \sin \varphi = \pm k \lambda$ $k = 0, 1, 2, \dots$

暗纹方程： $N d \sin \varphi = \pm m \lambda$ $\left\{ \begin{array}{l} m = 0, 1, 2, \dots \\ m \text{ 为 } \neq kN \text{ 的整数} \end{array} \right.$

主级大明纹的位置与缝数 N 无关，它们对称地分布在中央明纹的两侧，中央明纹光强最大；

两个主极大之间有 $N-1$ 个暗条纹；

当 N 很大时，主极大越来越尖锐明亮，次级大越来越弱；

具有缺级现象 $\frac{d}{a} = \frac{k}{k'} \rightarrow k = \frac{d}{a} \cdot k' \quad k' \text{ 取非零整数}$

热 学

- 物体是由大量分子组成的，分子在永不停息地作无序热运动（扩散和布朗运动）

阿伏加德罗常数（1 mol 物质的粒子数）

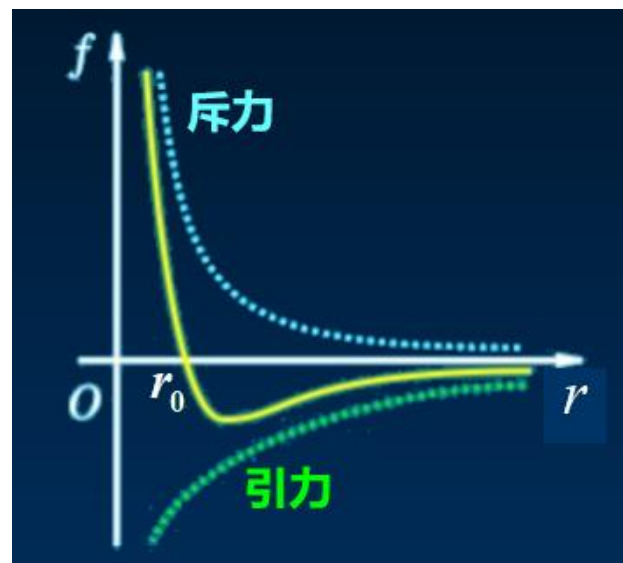
分子间存在相互作用力

- 热力学系统、温度与温标

热力学第零定律：（热平衡定律）

理想气体温标、热力学温标、国际温标、非线性温标

- 平衡态与准静态过程



气体热现象与理想气体状态方程

波意耳-马略特定律 (1676) 、查理定律 (1787) 、盖·吕萨克定律 (1802)

● 理想气体状态方程

气体的状态方程

$$T = f(p, V)$$

“一定条件下”

$$pV = \nu RT = \frac{m}{M} RT$$

普适气体常量

$$R = 8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

● 功 热量 内能 (过程量、状态量)

$$Q = E_2 - E_1 + A = \Delta E + A \quad \text{热力学第一定律}$$

系统从外界吸收的热量 Q , 一部分使系统的内能增加 ΔE , 而另一部分用于系统对外界做功 A

准静态过程中功和热量

功

$$dA = f dl = p S dl = p dV$$

热量

$$Q = \nu C_x (T_2 - T_1)$$

内能

$$(E_2 - E_1) = Q - A$$

理想气体气体的内能仅是其温度的函数（焦耳定律）

定体摩尔热容 C_V 和 定压摩尔热容 C_p

$$C_p = C_V + p \left(\frac{dV}{dT} \right)_p$$

$$C_p = C_V + R$$

迈耶公式

对单原子分子气体为:

$$C_V = (3/2)R$$

对双原子分子气体为:

$$C_V = (5/2)R$$

对多原子分子气体为:

$$C_V = (6/2)R$$

理想气体内能的计算

$$E = \nu C_V T$$

热力学第一定律对理想气体在典型准静态过程中的应用

● 等温过程、等体过程、等压过程、绝热过程

典型过程中内能的变化（增加或减少）、系统所做的功（正功还是负功）、系统与外界的热量交换（吸收还是放出）

Q : 系统从外界吸收热量为正，放热为负

热量的计算：由 $Q = \nu C_x(T_2 - T_1)$ 出发，摩尔热容 C_x 是过程量，等体过程 $C_x = C_V$ ；

等压过程 $C_x = C_p$ ；绝热过程 $Q = 0$ ；等温过程 $Q = A$

ΔE : 系统内能增加为正，内能减少为负

理想气体的内能是温度的单值函数（状态量）

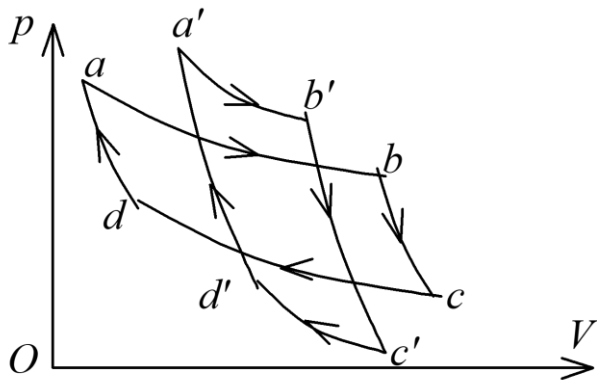
$$\Delta E = \nu C_V \Delta T = \nu C_V (T_2 - T_1)$$

A : 系统对外界做功为正，外界对系统做功为负

由 $A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$ 出发，根据过程特点找到 $p-V$ 关系，代入求解。规则图形可直接计算面积

循环过程

系统从某一状态出发经历一系列变化后又回到了原态的整个变化过程。



顺时针 正循环 热机

$A_{\text{静}} > 0$ 系统对外作正功

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

循环过程内能变化 **$\Delta E = 0$**

循环曲线包围面积
代表系统作的净功

$$A_{\text{静}} = Q_{\text{吸}} - Q_{\text{放}}$$

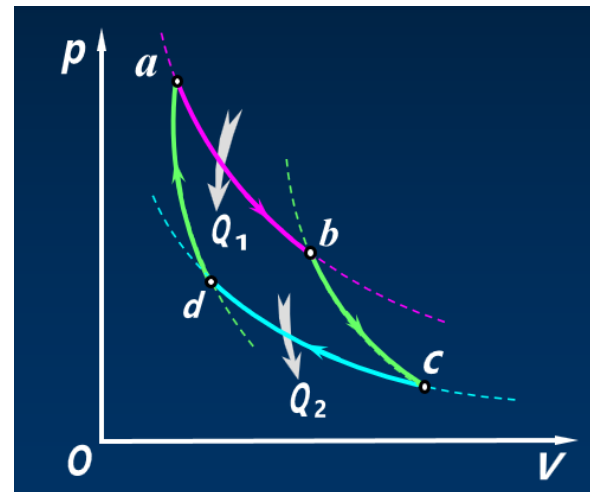
逆时针 逆循环 致冷机

$A_{\text{静}} < 0$ 外界对系统做功

$$W = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

卡诺循环

两个等温
两个绝热 过程构成的一种理想循环



卡诺循环的效率

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

卡诺循环的制冷系数

只与高温热源和低温热源温度相关，与工质无关

$$W = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

- 给出循环过程 (p-V, p-T) , 能够判断循环过程中的吸放热、做功、循环效率等

气体分子动理论

气体分子热运动服从统计规律

分子速度按方向的分布均匀，由于碰撞，分子向各方向运动的概率相同，所以

$$\overline{v_x} = \overline{v_y} = \overline{v_z} = 0 \quad \overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$$

理想气体的压强公式

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon}$$

$\bar{\varepsilon}$ 平均平动动能

玻尔兹曼常数

$$k = \frac{R}{N_0} = 1.38 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{3}{2} kT$$

分子平均平动动能只与温度有关，与气体的种类无关

温度是大量分子热运动平均平动动能的度量，反映了宏观量 T 与微观量 ε 的统计平均值之间的关系。

气体分子自由度

分子结构	单原子	刚性双原子	刚性多原子
自由度数目	3	5	6

能量按自由度均分定理

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} \mu \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$$

平衡态, 沿 x, y, z 三个方向运动的概率均等 $\frac{1}{2} \mu \overline{v_x^2} = \frac{1}{2} \mu \overline{v_y^2} = \frac{1}{2} \mu \overline{v_z^2} = \frac{1}{2} kT$

在温度为 T 的平衡状态下, 分子的每个自由度的平均动能均为 $(1/2) kT$ 。
这样的能量分配原则称为**能量按自由度均分定理**。

某种气体分子具有 t 个平动自由度和 r 个转动自由度, s 个振动自由度, 则每个气体分子的平均总动能 $\frac{1}{2} (t + r + s) kT$, 对于刚性分子 $s = 0$, 则每个气体分子平均总能量 $\frac{i}{2} kT$

1 mol 理想气体的内能

$$E = N_0 \frac{i}{2} kT = \frac{i}{2} RT$$

麦克斯韦速率分布定律

设某气体处于平衡态下，总分子数为 N ，则在 $v \sim v+dv$ 区间内分子数 dN 与总分子数 N 的比值

$$\frac{dN}{N} = f(v)dv$$

$$f(v) = \frac{dN}{Ndv}$$

$f(v)$ 为速率分布函数
(概率密度函数)

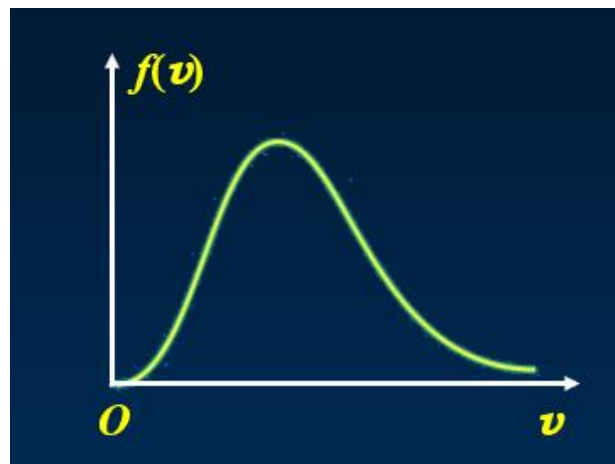
意义：分布在速率 v 附近单位速率间隔内的分子数与总分子数的比率

$$f(v) = 4\pi\left(\frac{\mu}{2\pi kT}\right)^{3/2} v^2 e^{-\mu v^2/2kT}$$

$$\int_0^{\infty} f(v)dv = \int_0^N \frac{dN}{N} = 1$$

$$\int_0^{\infty} f(v)dv = 1$$

归一化条件



分子速率的三种统计平均值：平均速度、方均根速率、最概然速率

稳恒磁场

磁力线及其特征

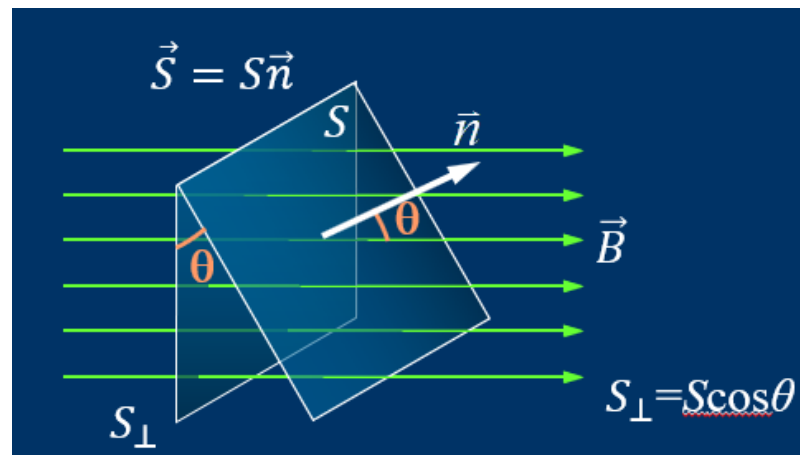
- (1) 无头无尾的闭合曲线
- (2) 与电流相互套连，服从右手螺旋定则

磁通量

$$N = BS \cos \theta = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

磁场的高斯定理

$$\Phi_m = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$



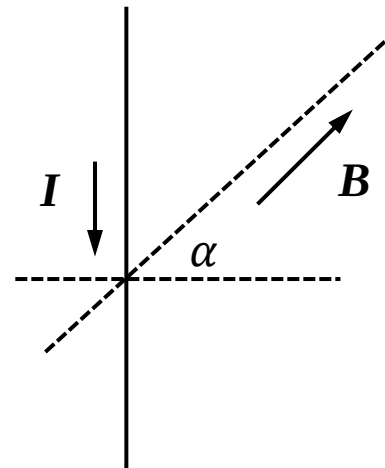
运动电荷受到的磁力 (右手定则判断方向)

$$\vec{f}_m = q\vec{v} \times \vec{B} = qvB \sin \theta$$

应用：霍尔效应

一段长为 L 长直载流导线所受的磁力

$$\vec{f}_m = q\vec{v} \times \vec{B} \quad \longrightarrow \quad \boxed{\vec{F}_m = I\vec{L} \times \vec{B} = ILB\sin\alpha}$$



闭合线圈在匀强磁场所受的磁力

$$d\vec{F}_m = Id\vec{L} \times \vec{B} \quad \longrightarrow \quad \vec{F}_m = 0$$

应用：载流线圈所受的磁力矩

$$\vec{M} = I\vec{S} \times \vec{B} \quad \longrightarrow \quad \text{直流电动机}$$

法拉第电磁感应定律

穿过闭合导体回路的磁通量发生变化，此回路中就会有电流产生，这种电流被称为感应电流，这一现象被称为**电磁感应现象**。

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt}$$

移动的导轨

$$\varepsilon = \frac{d\phi_m}{dt} = Bl \frac{dx}{dt} = Blv$$

□ 在回路中产生感应电动势的原因是由于通过回路平面的磁通量的变化，而不是磁通量本身，即使通过回路的磁通量很大，但只要不随时间变化回路中依然不会产生感应电动势。

● 楞次定律-用来判断感应电动势的方向

感应电流具有这样的方向，即感应电流的磁场总要阻碍引起感应电流的磁通量的变化

$$\varepsilon = - \frac{d\phi}{dt}$$

动生电动势 感生电动势