



# University Physics

Notes

Lai Wei



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY





## 目录

I

### 大学物理A1

<b>1 质点运动学 .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 质点力学 .....</b>	<b>7</b>
1.1.1 参考系、质点 .....	7
1.1.2 位置矢量、运动方程、路程、位移 .....	7
1.1.3 位移、路程 .....	8
1.1.4 速度 .....	9
1.1.5 加速度 .....	10
1.1.6 例题 .....	11
<b>1.2 质点运动 .....</b>	<b>12</b>
1.2.1 一般曲线运动与圆周运动的定义 .....	12
1.2.2 圆周运动 .....	13
1.2.3 一般曲线运动 .....	16
<b>1.3 相对运动 .....</b>	<b>16</b>
1.3.1 时间与空间 .....	16
1.3.2 相对运动公式 .....	16
1.3.3 伽利略速度变换 .....	17





# 大学物理A1

1	质点运动学 .....	7
1.1	质点力学 .....	7
1.2	质点运动 .....	12
1.3	相对运动 .....	16





# 1. 质点运动学

## 1.1 质点力学

### 1.1.1 参考系、质点

#### 参考系

为描述物体运动而选的标准物。

#### 参考系

物体能否视为质点视具体情况而定。

#### 坐标系

定量描述物体运动。坐标系的原点一般固定在参照系上。

1. 直角坐标系( $x, y, z$ )
2. 球坐标系( $r, \theta, \varphi$ ): 二维极坐标
3. 柱坐标系( $\rho, \varphi, z$ )
4. 自然坐标系 $s$

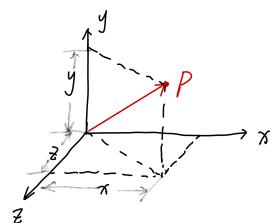
### 1.1.2 位置矢量、运动方程、路程、位移

#### 位置矢量

$$\vec{r} = x \vec{i} + y \vec{j} + z \vec{k} \quad (1.1)$$

$$r = |\vec{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.2)$$

$\vec{r}$ 的方向可以用一组方向角，即 $\vec{r}$ 与 $x$ 轴、 $y$ 轴、 $z$ 轴



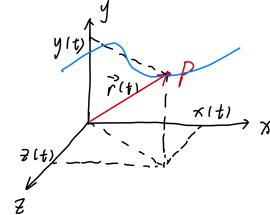
之间的夹角( $\alpha, \beta, \gamma$ )来表示。 $\cos \alpha = \frac{x}{r}, \cos \beta = \frac{y}{r}, \cos \gamma = \frac{z}{r}$ , 有 $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$ 。

### 运动方程 (直角坐标系下)

$$\vec{r}(t) = x\vec{i}(t) + y\vec{j}(t) + z\vec{k}(t) \quad (1.3)$$

分量式

$$\begin{cases} x = x(t), \\ y = y(t), \\ z = z(t). \end{cases}$$



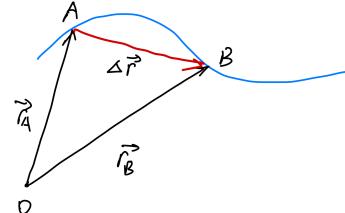
从上式中消去参数得质点的轨迹方程。

### 1.1.3 位移、路程

#### 位移 $\Delta \vec{r}$ (位置矢量的改变量)

$$\begin{aligned} \vec{r}_A &= x_A \vec{i} + y_A \vec{j} + z_A \vec{k}, \text{ (} t_A \text{ 时)} \\ \vec{r}_B &= x_B \vec{i} + y_B \vec{j} + z_B \vec{k}, \text{ (} t_B \text{ 时)} \end{aligned}$$

于是其位移



$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_B - \vec{r}_A = (x_B - x_A) \vec{i} + (y_B - y_A) \vec{j} + (z_B - z_A) \vec{k} \quad (1.4)$$

方向由A指向B。

#### 路程 $\Delta s$ 实际轨迹

从 $P_1$ 到 $P_2$ , 路程记为 $\Delta s = \hat{P}_1 P_2$ 。

位移与路程的区别:

1. 位移是适量, 路程是标量;
2. 两点之间位移是唯一的, 路程不是唯一的;
3. 一般情况下,  $|\Delta \vec{r}| \neq \Delta s$



在方向不变的圆周运动中,  $|\Delta \vec{r}| = \Delta s$  当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,  $|d\vec{r}| = ds$  (元位移 $d\vec{r} = dx\vec{i} + dy\vec{j} + dz\vec{k}$ )。

### 1.1.4 速度

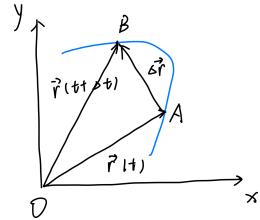
#### 平均速度

在 $\Delta t$ 内，质点位移（二维）为

$$\begin{aligned}\Delta \vec{r} &= \vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t) \\ &= \Delta x \vec{i} + \Delta y \vec{j}\end{aligned}$$

定义

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \vec{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t} \vec{j} \quad (1.5)$$



#### 瞬时速度

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，

$$\begin{aligned}\vec{v} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d \vec{r}}{dt} \\ &= \frac{dx}{dt} \vec{i} + \frac{dy}{dt} \vec{j} + \frac{dz}{dt} \vec{k} \\ &= v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k}\end{aligned} \quad (1.6)$$

即有，

$$v_x = \frac{dx}{dt}, v_y = \frac{dy}{dt}, v_z = \frac{dz}{dt}$$

所以

$$|\vec{v}| = \sqrt{\left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \quad (1.7)$$

方向角

$$\cos \alpha = \frac{v_x}{v}, \cos \beta = \frac{v_y}{v}, \cos \gamma = \frac{v_z}{v}$$

习惯上，二维情况下，用 $\tan \theta = \frac{v_y}{v_x}$ 表示方向。

同理，速率 $v = \frac{ds}{dt}$ ，而因为 $t \rightarrow 0$ 时，有 $|\vec{r}| = s$ ，则

$$v = |\vec{v}| = \left| \frac{d \vec{r}}{dt} \right| = \frac{|d \vec{r}|}{dt} = \frac{ds}{dt}$$

即有，速度的大小等于速率。

## 速度在自然坐标系下的表示

$$\vec{v} = \frac{ds}{dt} \vec{e}_t = v \vec{e}_t \quad (1.8)$$

其中， $\vec{e}_t = 1$ ，表示方向， $v$ 表示速度大小。

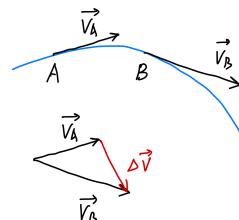
## 1.1.5 加速度

反应速度大小和方向随时间变化快慢。

### 平均加速度

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (1.9)$$

$\vec{a}$ 与 $\Delta \vec{v}$ 的方向相同。



### 瞬时加速度

特点：

1. "矢量性"
2. "瞬时性"
3. "相对性"（相对于某一参考系）

$$\begin{aligned} \vec{a} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d \vec{v}}{dt} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \\ &= \frac{dv_x}{dt} \vec{i} + \frac{dv_y}{dt} \vec{j} + \frac{dv_z}{dt} \vec{k} \\ &= a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k} \end{aligned} \quad (1.10)$$

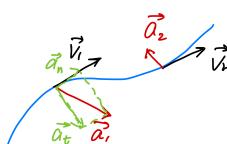
方向角 $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 满足

$$\cos \alpha = \frac{a_x}{a}, \cos \beta = \frac{a_y}{a}, \cos \gamma = \frac{a_z}{a}$$

习惯上，二维时方向表示为 $\tan \theta = \frac{a_y}{a_x}$ 。

加速度的方向：

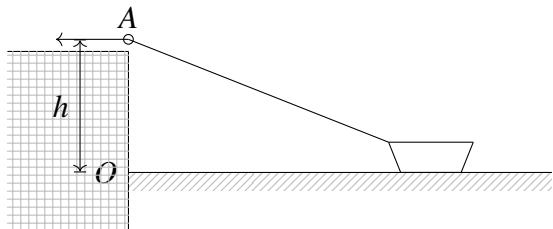
- 直线运动： $\vec{a} // \vec{v}$ 。
- 曲线运动：指向轨迹凹测。自然坐标系下， $\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_t$ 。



在变速曲线运动中，加速度的方向总是指向轨迹凹的一侧。与 $\vec{v}$ 呈锐角时，运动变快；与 $\vec{v}$ 呈钝角时，运动变慢。（因为 $\Delta \vec{v}$ 必定指向曲线凹的一侧。）

### 1.1.6 例题

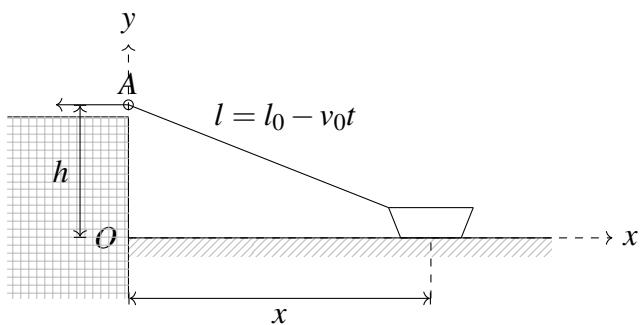
在离水面高为 $h$ 的岸上，有人用绳拉船靠岸，如图所示。设人以匀速率 $v_0$ 收绳，试求：当船距岸边 $x_0$ 时，船的速度和加速度的大小各是多少？



#### Solution

##### Part One

建立如图所示的坐标系。



设初始时刻，船与岸上A点之间的绳长为 $l_0$ 。在任意时刻船离岸边的距离为 $x$ ，绳长为 $l_0$ 。船在运动过程中， $l$ 和 $x$ 均是时间 $t$ 的函数。

由题意， $l = l_0 - v_0 t$ ，所以

$$v_0 = -\frac{dl}{dt}$$

又由几何关系

$$l^2 = x^2 + h^2$$

对上式两边同时对 $t$ 求导，可得

$$2l \frac{dl}{dt} = 2x \frac{dx}{dt}$$

则船的运动速度为

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{l}{x} \frac{dl}{dt} = -\frac{l}{x} v_0$$

### Part Two

再将速度对时间 $t$ 求导，即可得到船的加速度为

$$a = \frac{dv}{dt} = -\frac{v_0}{x^2} \left( x \frac{dl}{dt} - l \frac{dx}{dt} \right) = -\frac{v_0^2 h^2}{x^3}$$

### Part Three

令 $x = x_0$ ，得船在离岸边为 $x_0$ 时的速度和加速度分别为

$$v = \frac{\sqrt{x_0^2 + h^2}}{x_0} v_0, \quad a = -\frac{v_0^2 h^2}{x_0^3}$$

## 1.2 质点运动

### 1.2.1 一般曲线运动与圆周运动的定义

#### 一般曲线运动

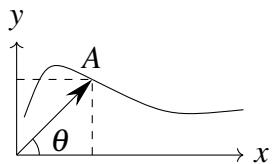
特点：曲率半径随时间变化，不是定值。描述曲线运动一般选自然坐标系。

#### 圆周运动

圆周运动是一种常见的、简单而基本的曲线运动，是研究一般曲线运动的基础

## 1.2.2 圆周运动

### 位置量的描述

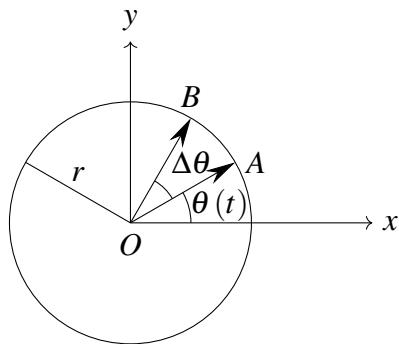


$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \end{cases}$$

于是

$$\vec{r} = x \vec{i} + y \vec{j} = r \cos \theta \vec{i} + r \sin \theta \vec{j}$$

### 圆周运动的角量



角坐标  $\theta(t)$ , 角位移  $\Delta\theta = \theta(t) - \theta(t_0)$ 。  
平均角速度

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (1.11)$$

角速度

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1.12)$$

$\omega$ 是赝矢量，方向与  $d\theta$  一致，由右手螺旋定则确定，且总是垂直于圆平面，沿着圆周的轴线方向。

平均角加速度

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (1.13)$$

角加速度

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (1.14)$$

### 角量与线量的关系

路程与角距离的关系

$$\Delta s = r\Delta\theta \quad (1.15)$$

速率与角速度的关系

$$b = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = r \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

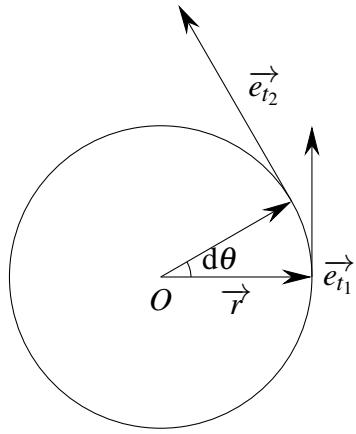
故

$$v(t) = r\omega(t) \quad (1.16)$$

速度

$$\begin{aligned} \vec{v} &= \frac{ds}{dt} \vec{e}_t \\ &= v \vec{e}_t \\ &= r\omega \vec{e}_t \end{aligned} \quad (1.17)$$

### 圆周运动的切向加速度和法向加速度



质点做变速圆周运动时

$$\vec{\alpha} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}(v\vec{e}_t) = \frac{d\vec{v}}{dt}\vec{e}_t + v\frac{d\vec{e}_t}{dt} \quad (1.18)$$

$$\alpha_t = \frac{dv}{dt} = r\frac{d\omega}{dt} = r\alpha \quad (1.19)$$

因为 $|e_{t1}| = |e_{t2}| = 1$ , 所以 $|d\vec{e}_t| = |e_{t1}| \cdot d\theta = d\theta$ 。

当 $d\theta \rightarrow 0$ 时,  $d\vec{e}_t \perp e_{t1}$ , 故 $d\vec{e}_t$ 的方向与 $\vec{e}_n$ 方向相同, 即

$$d\vec{e}_t = d\theta \vec{e}_n \quad (1.20)$$

所以

$$v\frac{d\vec{e}_t}{dt} = v\frac{d\theta}{dt}\vec{e}_n = v\omega$$

于是

$$\alpha_n = \omega v \quad (1.21)$$

$$= \frac{v^2}{r} \quad (1.22)$$

综上所述, 切向加速度 $\vec{\alpha}_t = \frac{dv}{dt}\vec{e}_t$ ,  $\alpha_t = \frac{dv}{dt}$ ; 法向加速度 $\vec{\alpha}_n = \frac{v^2}{r}\vec{e}_n$ ,  $\alpha_n = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r = \omega v$ 。

### 1.2.3 一般曲线运动

同圆周运动理知,

$$\alpha_t = \frac{dv}{dt} \quad (1.23)$$

$$\alpha_n = \frac{v^2}{\rho} \quad (\rho \text{ 是曲率半径}) \quad (1.24)$$

而  $\vec{\alpha} = \vec{\alpha}_t + \vec{\alpha}_n$ , 所以

$$|\vec{\alpha}| = \sqrt{\alpha_t^2 + \alpha_n^2} \quad (1.25)$$

自然坐标系下的加速度表达式:

$$\vec{\alpha}_t = \frac{dv}{dt} \vec{e}_t = \frac{d^2s}{dt^2} \vec{e}_t \quad (1.26)$$

$$\vec{\alpha}_n = \frac{v^2}{\rho} \vec{e}_n \quad (1.27)$$

## 1.3 相对运动

### 1.3.1 时间与空间

在两个相对作直线运动的参考系中, 时间的测量是绝对的, 空间的测量也是绝对的, 与参考系无关。

时间和长度的的绝对性是经典力学或牛顿力学的基础。

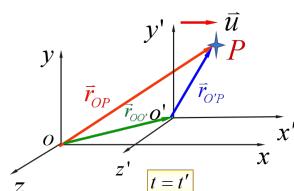
在两个相对作直线运动的参考系中, 时间的测量是绝对的, 空间的测量也是绝对的, 与参考系无关, 时间和长度的的绝对性是经典力学或牛顿力学的基础。

### 1.3.2 相对运动公式

如右图,  $\vec{r}_{OP} = \vec{r}_{OO'} + \vec{r}_{O'P}$ ,

对方程两边对时间求导数, 得

$$\frac{d\vec{r}_{OP}}{dt} = \frac{d\vec{r}_{OO'}}{dt} + \frac{d\vec{r}_{O'P}}{dt}$$



即

$$\overrightarrow{v_{P \rightarrow O}} = \overrightarrow{v_{P \rightarrow O'}} + \overrightarrow{v_{O' \rightarrow O}} \quad (1.28)$$

(绝对速度 = 相对速度 + 牵连速度)

方程两边对时间求导数, 得

$$\overrightarrow{a_{P \rightarrow O}} = \overrightarrow{a_{P \rightarrow O'}} + \overrightarrow{a_{O' \rightarrow O}} \quad (1.29)$$

(绝对加速度 = 相对加速度 + 牵连加速度)

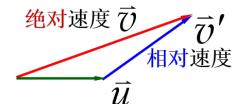
如果  $\vec{u}$  是恒矢量, 则  $\frac{d\vec{u}}{dt} = 0$ ,  $\overrightarrow{a_{PO}} = \overrightarrow{a_{PO'}}$ ,  $\overrightarrow{a_{O'P}} = 0$ 。

注意:

1. 当  $\vec{u}$  接近光速时, 速度变换、加速度变换不成立;
2. 仅仅讨论  $\vec{u} = u_x \vec{i}$  的情况 ( $u_x$  为常数), 即水平方向有变换, 其他方向上没有变换。

### 1.3.3 伽利略速度变换

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u} \quad (1.30)$$



绝对速度  $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$ , 相对速度  $\vec{v}' = \frac{d\vec{r}'}{dt}$ , 牵连速度  $\vec{u}$ 。

加速度关系:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d\vec{v}'}{dt} + \frac{d\vec{u}}{dt} \quad (1.31)$$

若  $\frac{d\vec{u}}{dt} = 0$ , 则  $\vec{a} = \vec{a}'$