

物理世界观

运动是物质的固有属性和存在方式。没有不运动的物质，也没有脱离物质的运动。运动是永恒的。宇宙始终处在变化的状态中，自然界中没有永远一成不变的事物。力学研究的就是物质最简单、最基本的变化——运动。





伽利略（1564~1642），杰出的意大利物理学家和天文学家，实验物理学的先驱者，提出著名的相对性原理、惯性原理、抛体的运动定律、摆振动的等时性等。坚决捍卫哥白尼的日心学说。

《关于两门新科学的对话和数学证明对话集》一书，总结了最成熟的科学思想以及在力学和天文学方面的研究成果。

伽利略的发现以及他所应用的科学推理方法是人类思想史上最伟大的成就之一，标志着物理学的开端。——爱因斯坦

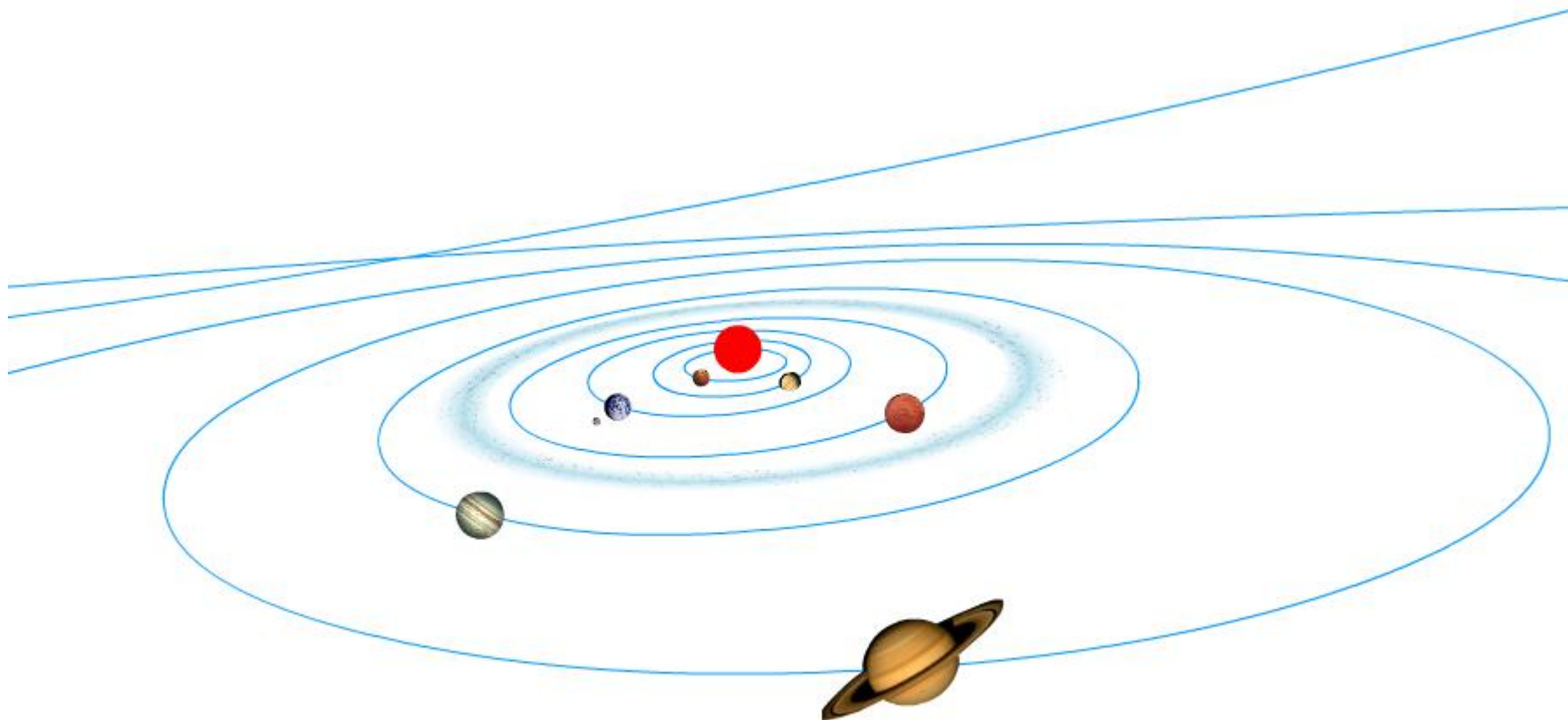


牛顿（1642–1727），杰出的英国物理学家，经典物理学的奠基人。不朽巨著《自然哲学的数学原理》总结了前人和自己关于力学及微积分方面的研究成果，其中含有牛顿三条运动定律和万有引力定律，以及质量、动量、力和加速度等概念。在光学方面，他说明了色散的起因，发现了色差及牛顿环，提出了光的微粒说。

人们问：“你是怎么发现万有引力的？”
牛顿说：“By thinking on it continually.”



宇宙中的一切物体都在运动，没有绝对静止的物体，称为运动的绝对性。



运动本身是绝对性，对运动的描述是相对的，运动必须选取参考系。



第一章 质点的运动



第一节 参考系 坐标系 质点

一、参考系

为描述物体运动而被假定为静止不动的参照对象。

注意

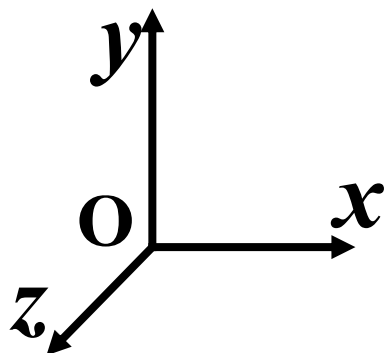
- (1) 运动学中，参考系的选择是任意的
- (2) 选择不同的参考系，对同一物体的描述是不同的
- (3) 描述物体运动时必须明确参考系
- (4) 通常选地面为参考系

二、坐标系

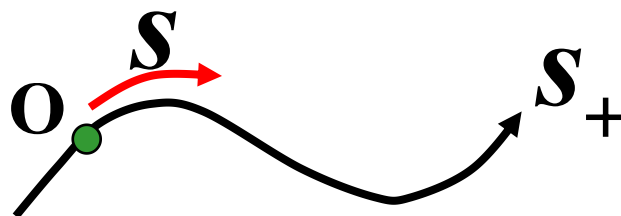
为定量描述物体的运动，在参照系上固定的一种抽象的数学框架。

三要素：原点、坐标轴(带刻度)、参考方向

1. 直角坐标系

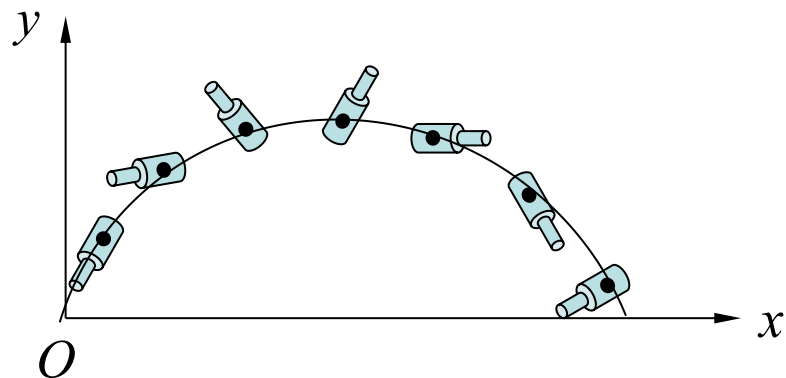
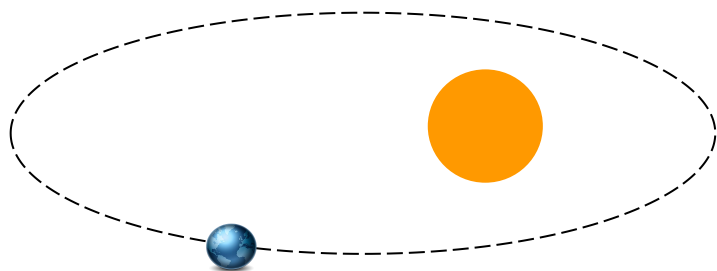


2. 自然坐标系



三、质点与理想化模型方法

在所研究的问题中，如物体的大小和形状可忽略，可近似地把物体看成一个只有质量而无大小形状的点。



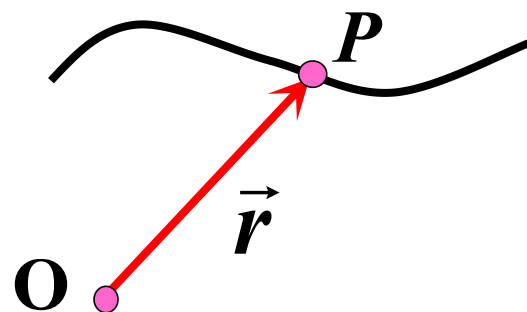
第二节 位置矢量 位移 速度 加速度



一、位置矢量

从坐标原点指向质点所在位置的矢量。

$$\vec{r} = \overrightarrow{OP}$$



大小: $r = |\vec{r}|$ P 点到原点的距离

方向: $O \rightarrow P$ 质点相对坐标系的方位

运动方程: $\vec{r} = \vec{r}(t)$

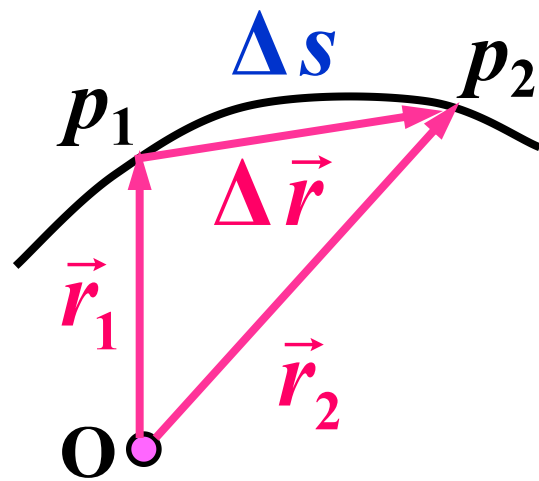
反映位置随时间的变化规律。

二、位移矢量

$$\Delta \vec{r} = \overrightarrow{p_1 p_2} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$

$$\text{大小: } |\Delta \vec{r}| = \left| \overrightarrow{p_1 p_2} \right| = \overline{p_1 p_2}$$

运动前后质点位置的
实际直线距离。



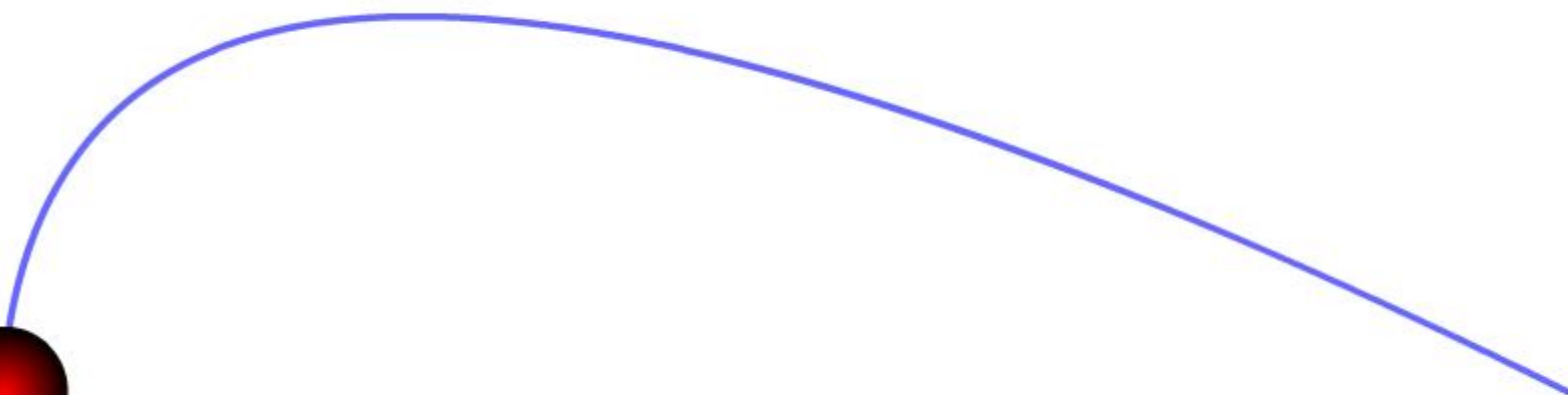
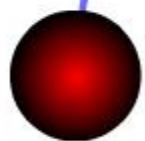
方向: $p_1 \rightarrow p_2$ 从初位置指向末位置。

注意

(1) 注意位移与路程区别

路程: 质点运动的实际路径长度

$$\Delta s = \widehat{p_1 p_2}$$



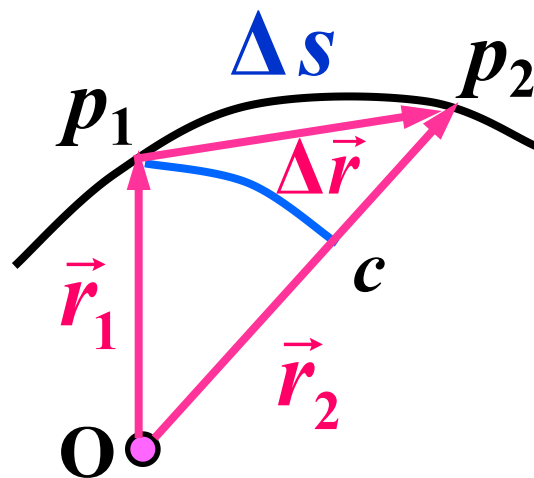
一般情况下，位移的大小不等于路程。

$$|\Delta \vec{r}| \neq \Delta s$$

$$\Delta t \rightarrow 0: |\Delta \vec{r}| \rightarrow |\mathrm{d}\vec{r}|$$

$$\Delta s \rightarrow \mathrm{d}s$$

$$|\mathrm{d}\vec{r}| = \mathrm{d}s$$

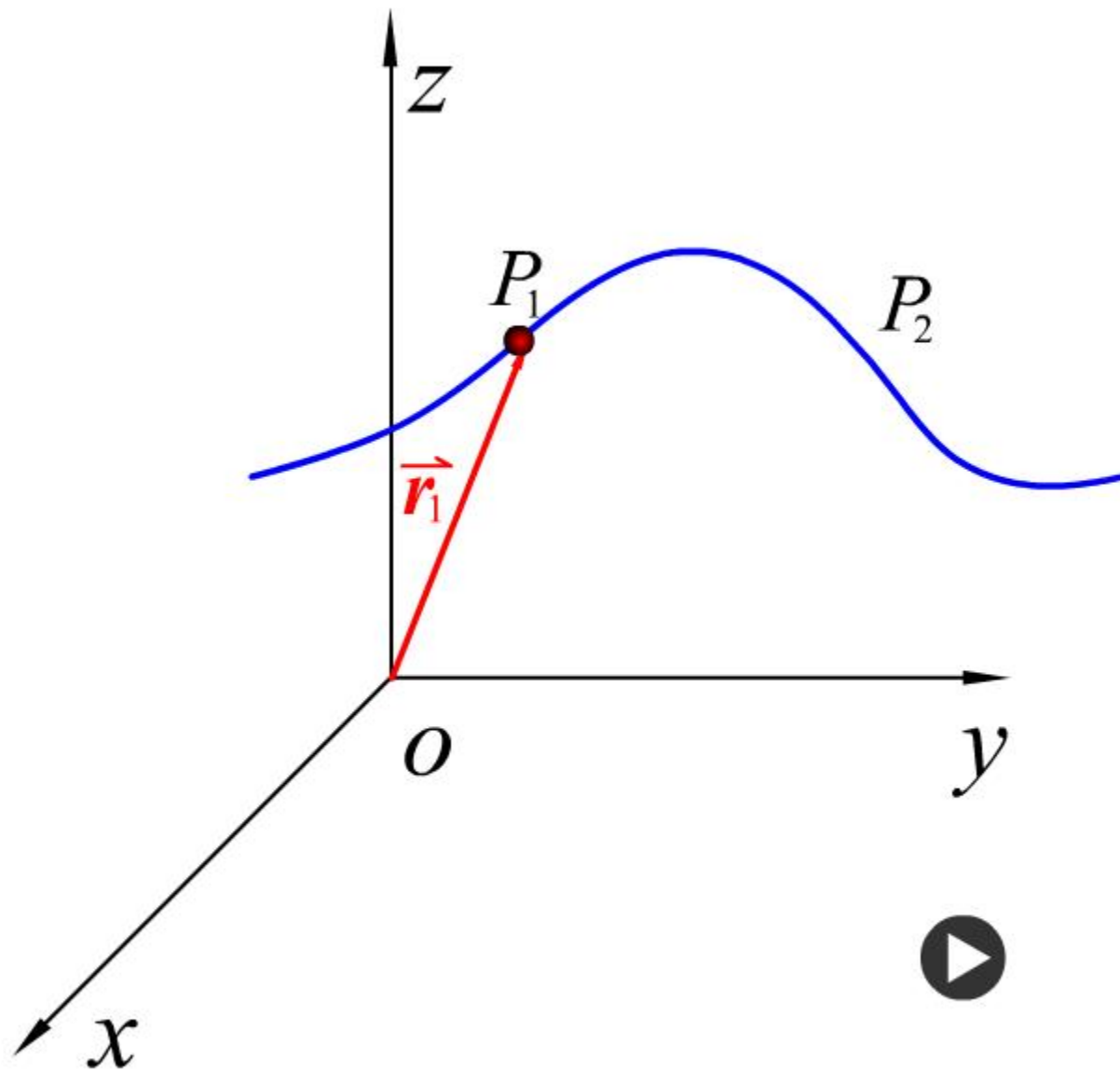


(3) $|\Delta \vec{r}|$ 与 Δr :

$$|\Delta \vec{r}| = |\vec{r}_2 - \vec{r}_1| = \overline{p_1 p_2}$$

$$\Delta r = \Delta |\vec{r}| = |\vec{r}_2| - |\vec{r}_1| = r_2 - r_1 = \overline{p_2 c}$$

$$\therefore |\Delta \vec{r}| \neq \Delta r \quad |\mathrm{d}\vec{r}| \neq \mathrm{d}r$$

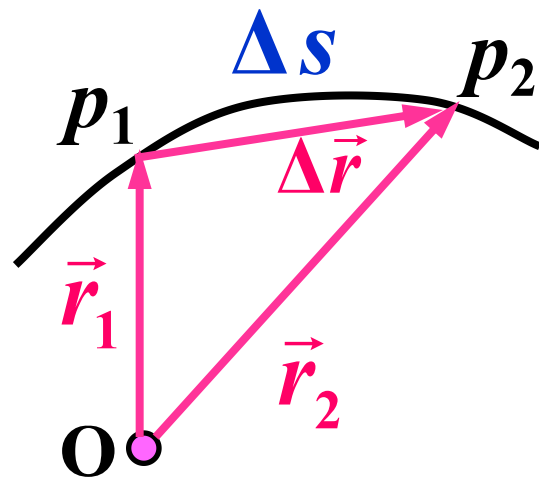


三、速度 速率

1. 平均速度 $\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$

大小: $|\vec{v}| = \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t}$

方向: 与 $\Delta \vec{r}$ 方向相同



注意

与平均速率区别

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \neq \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} = |\vec{v}|$$

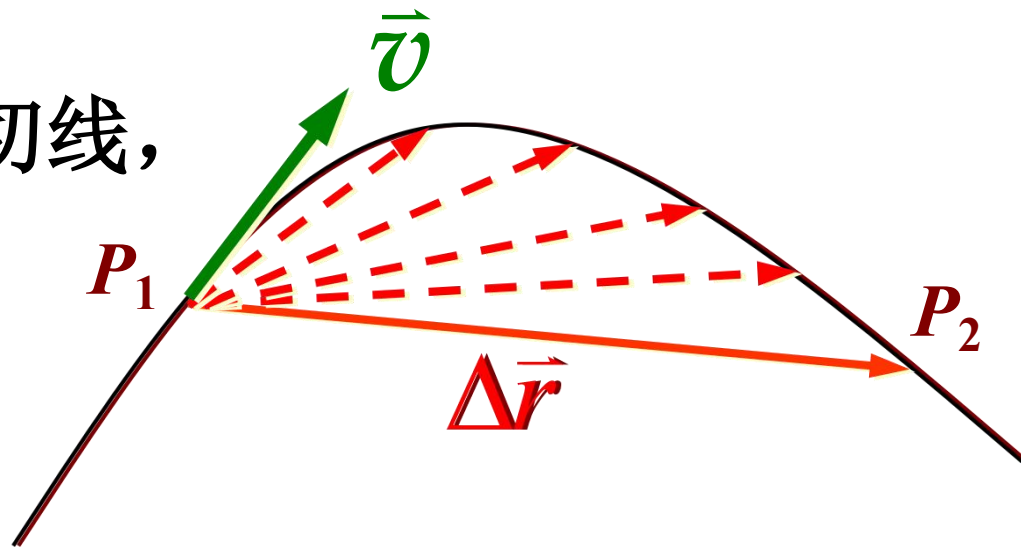
2. 瞬时速度

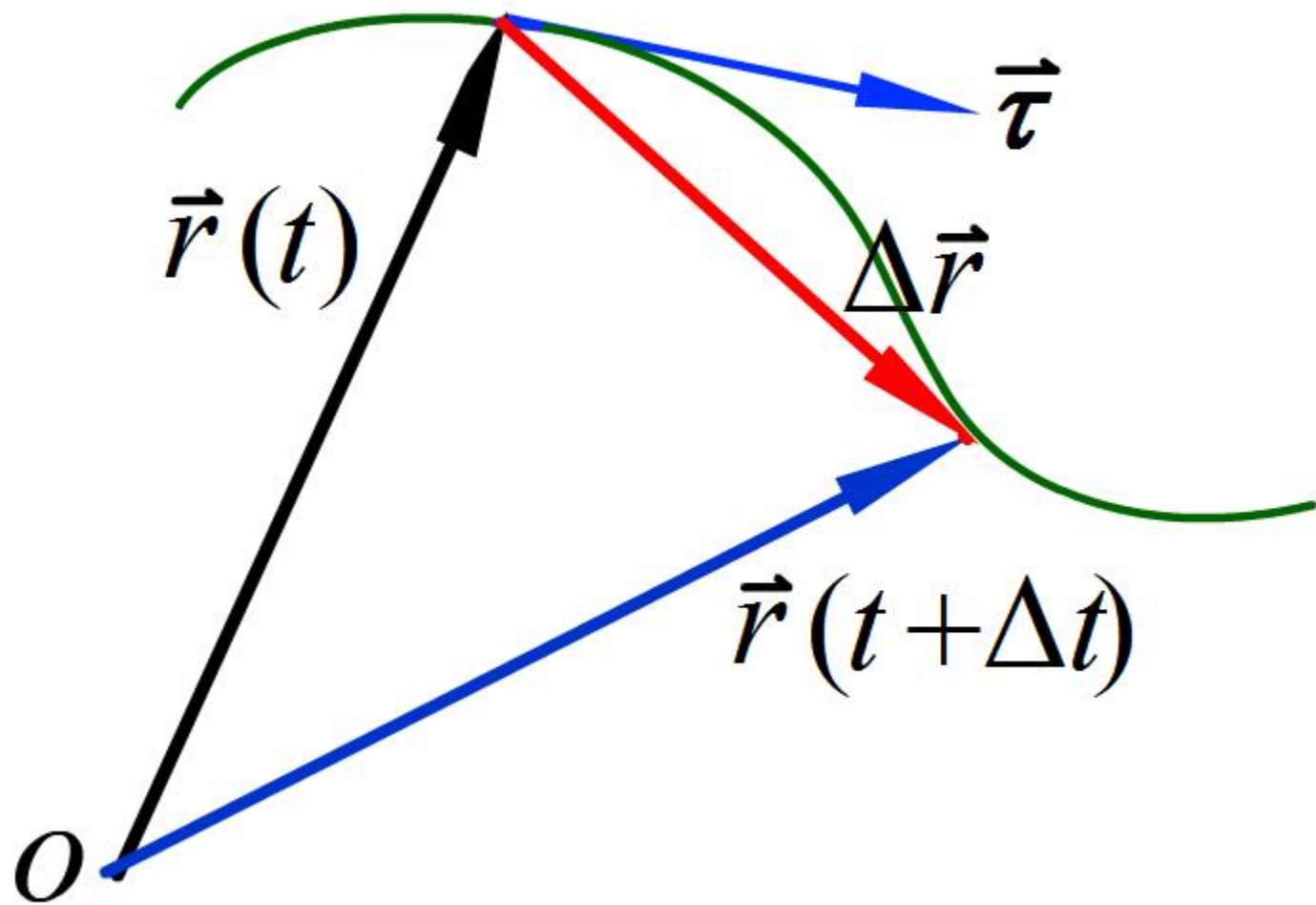
$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}$$

大小: $|\vec{v}| = \frac{|d\vec{r}|}{dt} = \frac{ds}{dt} = v$ (瞬时) 速率

方向:

沿轨道上该点的切线,
指向前进方向。



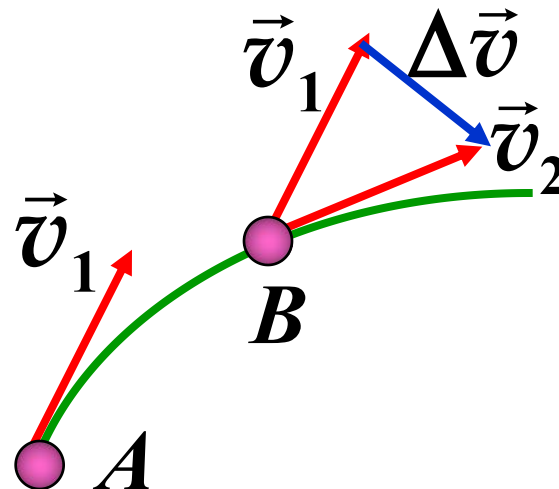


四、加速度

1. 平均加速度

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t}$$

方向：与 $\Delta \vec{v}$ 方向相同



2. 瞬时加速度

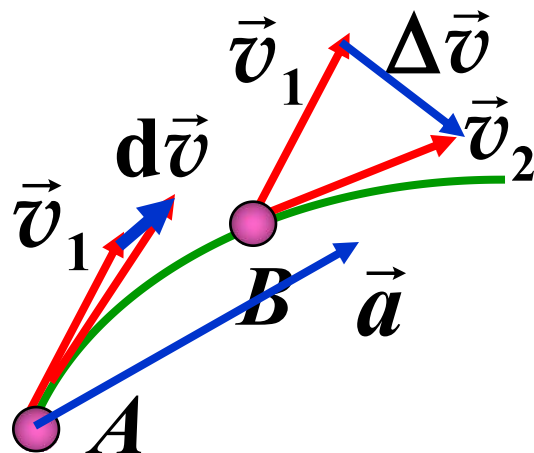
$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}$$



$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$$

(1) 矢量:

无论速度大小还是方向发生变化, 都有加速度。



(2) 方向:

$d\vec{v}$ 的方向, 不同于 \vec{v} 的方向
指向质点运动曲线的凹侧

(3) 位移、速度和加速度:

与参照系选取有关;
与坐标系的选取无关。

第三节 运动的直角坐标描述

一、直角坐标系中的位置、速度、加速度

1. 位置 (x, y, z)

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$$

大小:

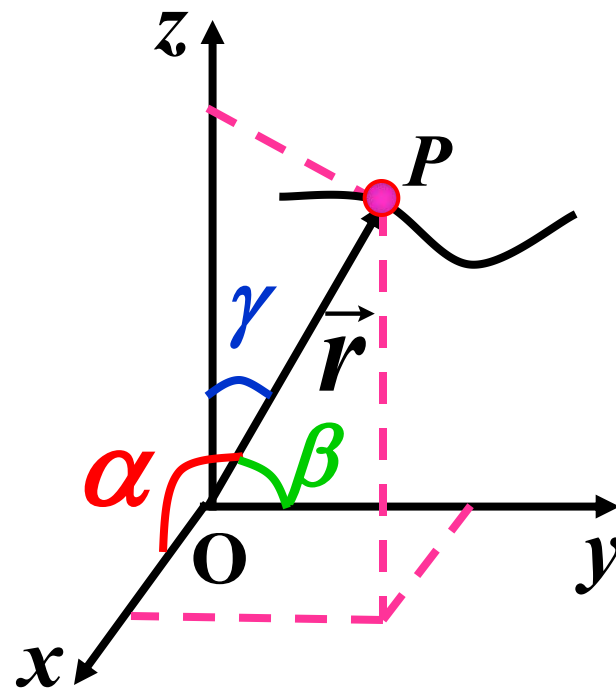
$$r = |\vec{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

方向: 方向余弦表示

$$\cos \alpha = \frac{x}{r}$$

$$\cos \beta = \frac{y}{r}$$

$$\cos \gamma = \frac{z}{r}$$



运动方程: $x = x(t), y = y(t), z = z(t)$

轨迹方程: $f(x, y, z) = 0$

2. 速度

$$\vec{v} = \frac{dx}{dt} \vec{i} + \frac{dy}{dt} \vec{j} + \frac{dz}{dt} \vec{k} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k}$$

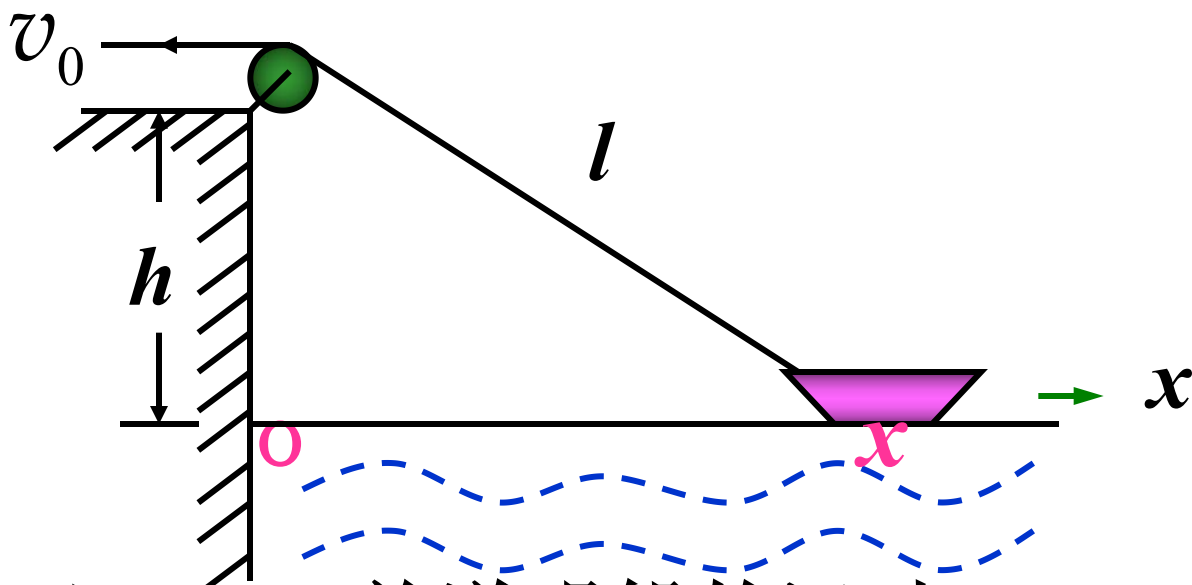
3. 加速度

$$\begin{aligned} \vec{a} &= a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k} \\ &= \frac{dv_x}{dt} \vec{i} + \frac{dv_y}{dt} \vec{j} + \frac{dv_z}{dt} \vec{k} \\ &= \frac{d^2x}{dt^2} \vec{i} + \frac{d^2y}{dt^2} \vec{j} + \frac{d^2z}{dt^2} \vec{k} \end{aligned}$$



二、直线运动

例：



$$\vec{r} = x\vec{i}$$

$$\vec{V} = \frac{dx}{dt}\vec{i}$$

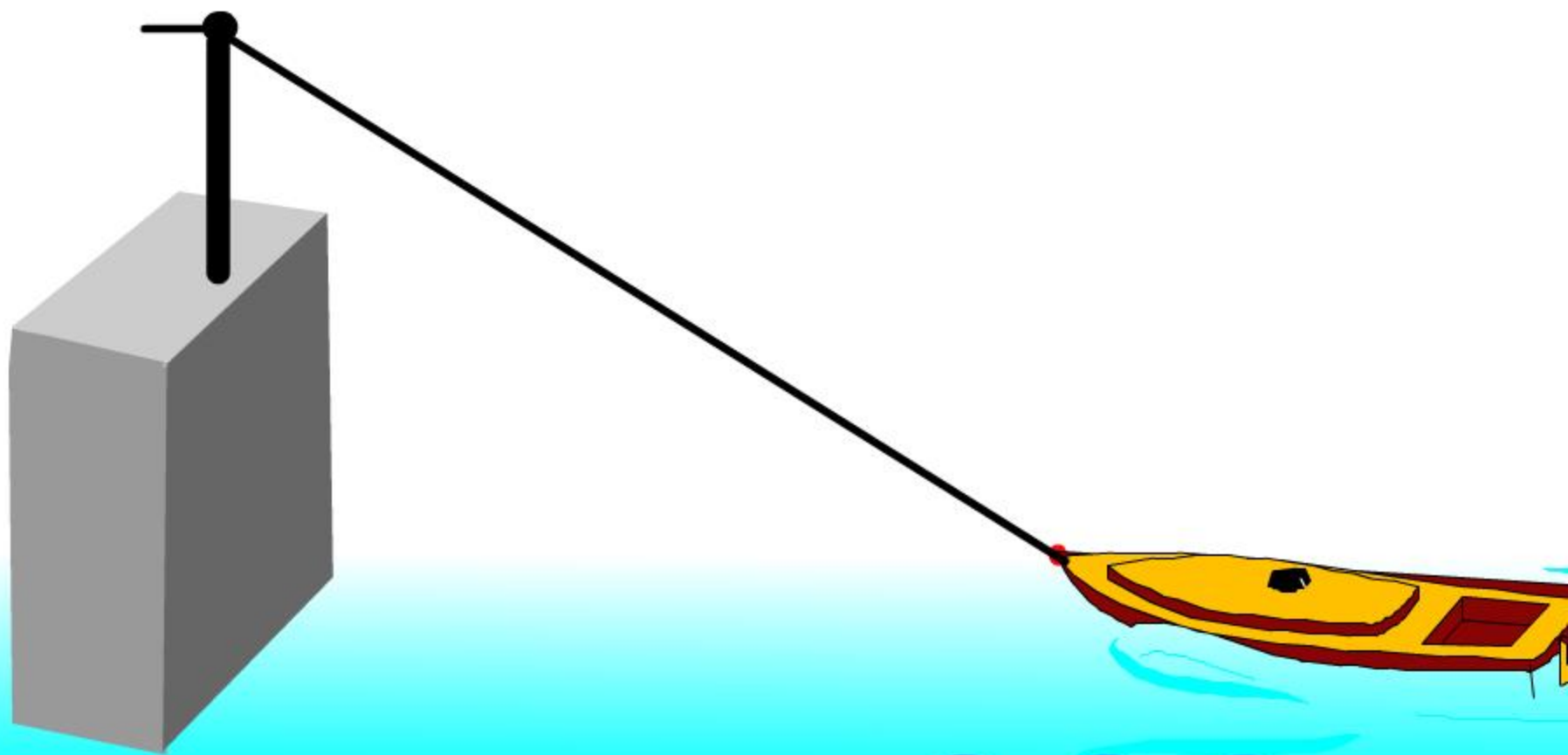
$$\vec{a} = \frac{d^2x}{dt^2}\vec{i}$$

求： \vec{V} 、 \vec{a} ， 并说明船的运动。

解： $x = \sqrt{l^2 - h^2}$

$$\begin{aligned} V &= \frac{dx}{dt} = \frac{2l}{2\sqrt{l^2 - h^2}} \cdot \frac{dl}{dt} = \frac{l}{\sqrt{l^2 - h^2}} (-v_0) \\ &= -\frac{\sqrt{x^2 + h^2}}{x} v_0 \end{aligned}$$

小船的运动



$$a = \frac{dV}{dt} = - \frac{\left(\frac{x^2}{\sqrt{x^2 + h^2}} \frac{dx}{dt} - \frac{dx}{dt} \sqrt{x^2 + h^2} \right) v_0}{x^2}$$

$$= - \frac{h^2 v_0^2}{x^3}$$

$$\vec{V} = - \frac{\sqrt{x^2 + h^2}}{x} v_0 \vec{i} \quad \vec{a} = - \frac{h^2 v_0^2}{x^3} \vec{i}$$

讨论

$V < 0$, $a < 0$, a 与 x 有关, 所以沿 x 负向作变加速直线运动, a 越来越大。

§ 1.4 运动的自然坐标描述

一、自然坐标系

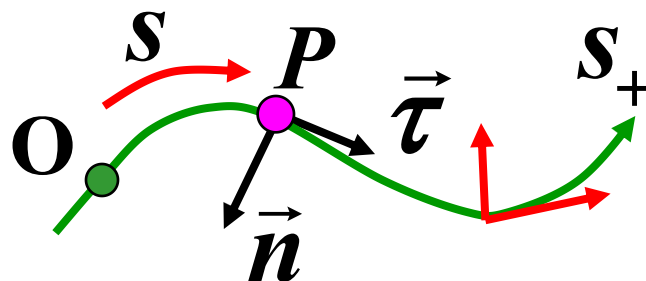
若质点运动轨迹 $y = f(x)$ 已知:

沿质点运动轨迹建立一条曲线坐标轴

选择坐标原点 O ,

选择坐标正方向 s_+ ,

s : 自然坐标。



s 是代数量 — 原点左: $s < 0$, 原点右: $s > 0$

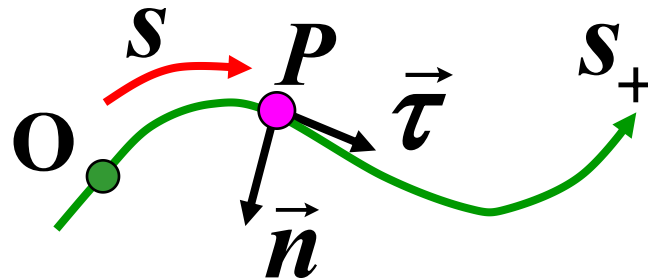
$\vec{\tau}$: 切向单位矢量 指向坐标正向

\vec{n} : 法向单位矢量 指向轨迹凹侧

二、自然坐标系中各量的表示:

1. 位置 s

运动方程: $s = s(t)$



2. 速度

$$\vec{v} = v_{\tau} \vec{\tau} + v_n \vec{n}$$

方向: 沿切向 $v_n = 0 \quad \therefore \vec{v} = v_{\tau} \vec{\tau}$

大小: $|\vec{v}| = \left| \frac{ds}{dt} \right| = |v_{\tau}|$

$$\therefore v_{\tau} = \frac{ds}{dt}$$

$$\therefore \vec{v} = \frac{ds}{dt} \vec{\tau}$$

3. 加速度

$$\vec{a} = a_{\tau} \vec{\tau} + a_n \vec{n} = \vec{a}_{\tau} + \vec{a}_n$$

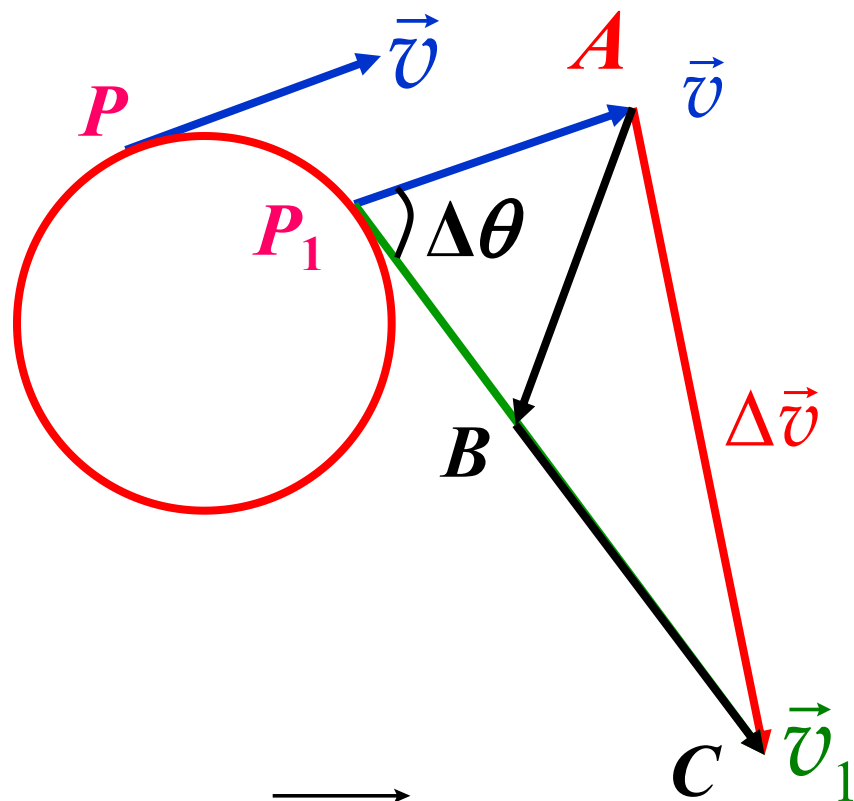
圆周运动的加速度

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$$

$$\Delta \vec{v} = \vec{v}_1 - \vec{v} = \overrightarrow{BC} + \overrightarrow{AB}$$

$$\therefore \vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{BC}}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{AB}}{\Delta t}$$

$$\Rightarrow \vec{a}_{\tau} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{BC}}{\Delta t} \quad \vec{a}_n = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\overrightarrow{AB}}{\Delta t}$$



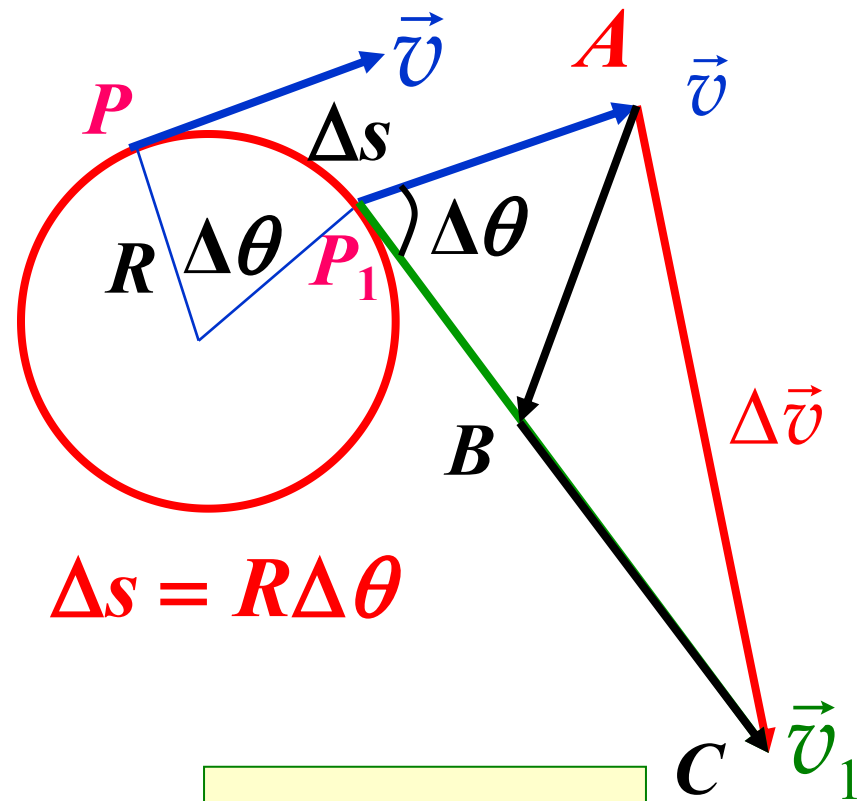
$$a_{\tau} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\left| \overrightarrow{BC} \right|}{\Delta t}$$

$$= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v_1 - v}{\Delta t}$$

$$= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$$

$$a_n = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\left| \overrightarrow{AB} \right|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v \Delta \theta}{\Delta t}$$

$$= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v \Delta s}{R \Delta t} = \frac{v}{R} \frac{ds}{dt} = \frac{v^2}{R}$$



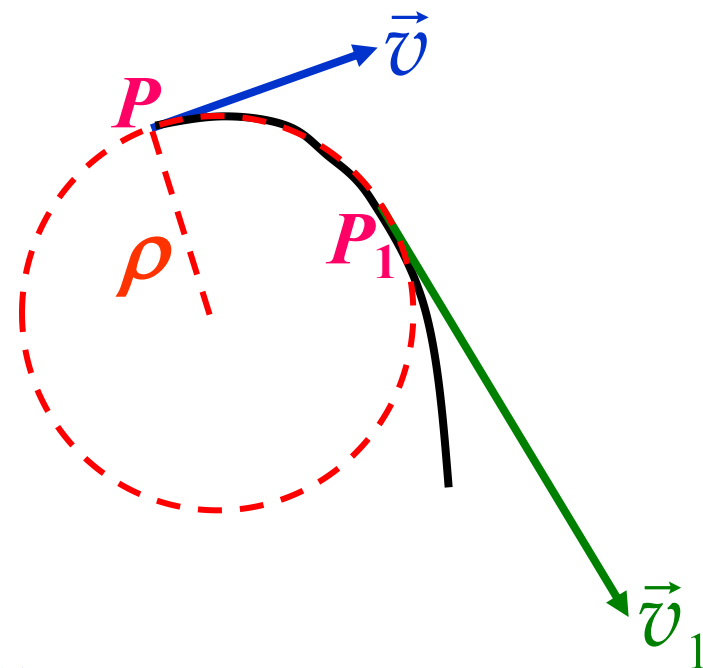
$$\vec{a}_{\tau} = \frac{dv}{dt} \vec{\tau}$$

$$\vec{a}_n = \frac{v^2}{R} \vec{n}$$

$$\vec{a}_\tau = \frac{dv}{dt} \vec{\tau}$$

$$\vec{a}_n = \frac{v^2}{\rho} \vec{n}$$

$$\therefore \vec{a} = \frac{dv}{dt} \vec{\tau} + \frac{v^2}{\rho} \vec{n}$$



意义

\vec{a}_τ 反映速度大小的变化

\vec{a}_n 反映速度方向的变化

判断: $a_\tau = 0$: 匀速率

$a_\tau \neq 0$: 变速率

$a_n = 0$: 直线运动

$a_n \neq 0$: 曲线运动



$$v = \frac{ds}{dt} \quad s = s_0 + \int_0^t v dt$$

$$a_\tau = \frac{dv}{dt} \quad v = v_0 + \int_0^t a_\tau dt$$

特例: $a_\tau = \text{常数}$

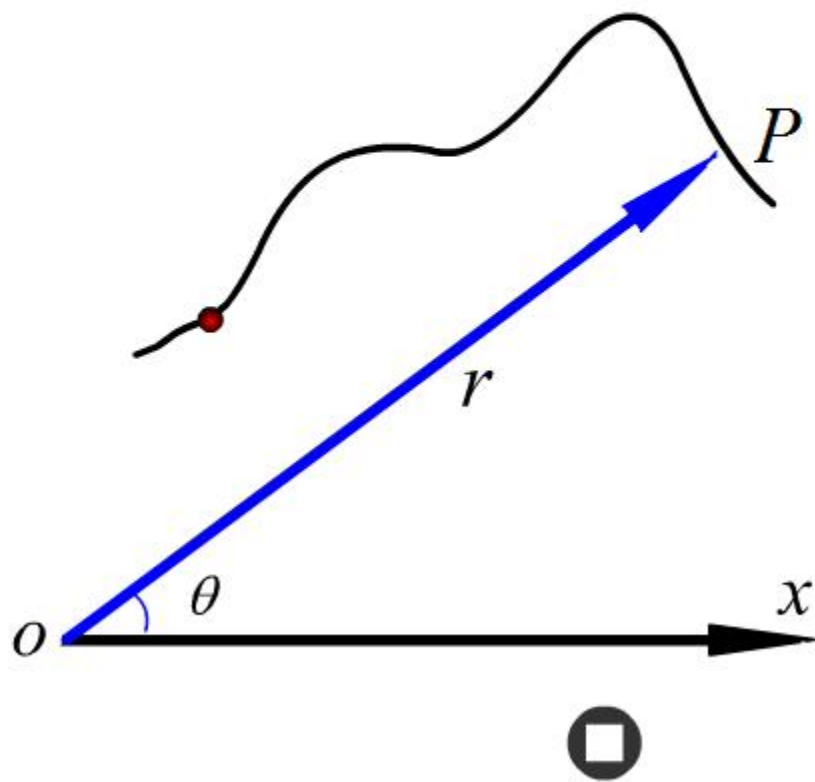
$$v_t = v_0 + a_\tau t$$

$$s = s_0 + v_0 t + \frac{a_\tau t^2}{2}$$

$$v_t^2 - v_0^2 = 2a_\tau (s - s_0)$$

$$(a_\tau, v, s) \rightarrow (a, v, x)$$

§ 1.5 运动的极坐标描述

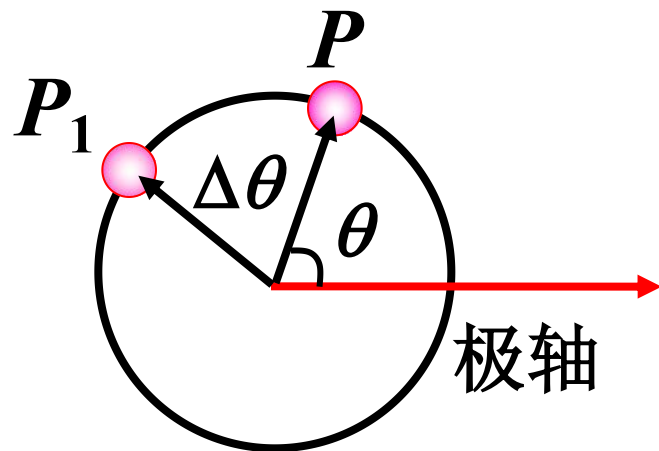


§ 1.6 圆周运动的角量描述

一、角量描述

1. 角位置 θ

角位移 $\Delta\theta$

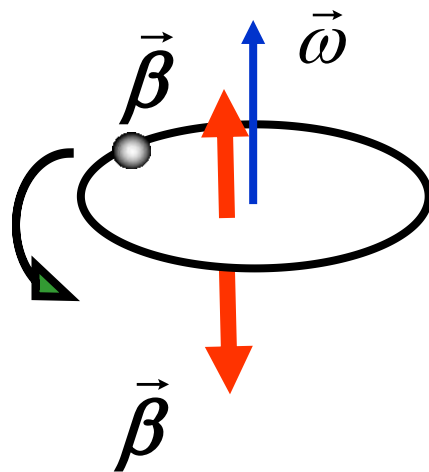


2. 角速度 $\omega = \frac{d\theta}{dt}$

3. 角加速度 $\beta = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$

规定：逆时针为转动的正方向

注：通常情况下， $\vec{\omega}$, $\vec{\beta}$ 都在转轴上，故可不用矢量，而只写标量。



二、线量与角量关系

$$s = R\theta$$

$$\Delta s = R\Delta\theta$$

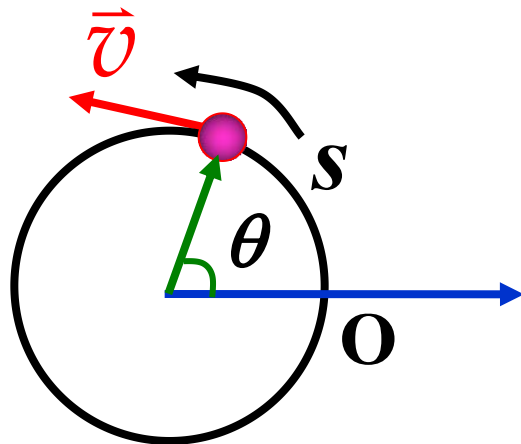
线量

$$v = \frac{ds}{dt} = R \frac{d\theta}{dt} = R\omega$$

角量

$$a_{\tau} = \frac{dv}{dt} = R \frac{d\omega}{dt} = R\beta$$

$$a_n = \frac{v^2}{R} = R\omega^2$$



§ 1.7 相对运动 参考系变换

一、相对量的表示法

A 是运动物体, B 是参考系

位移: $\Delta\vec{r}_{AB}$ 速度: \vec{v}_{AB} 加速度: \vec{a}_{AB}

二、相对量之间的关系

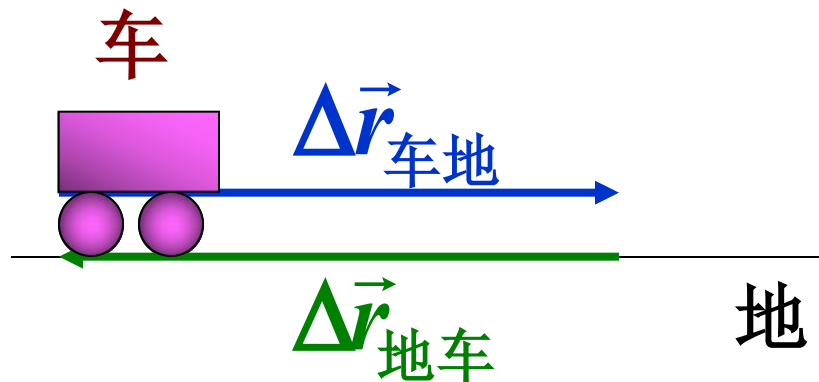
设: A 是运动物体, S 、 S' 是两个参考系

1. S 、 S' 互为参考系

$$\Delta\vec{r}_{S'S} = -\Delta\vec{r}_{SS'}$$

$$\vec{v}_{S'S} = -\vec{v}_{SS'}$$

$$\vec{a}_{S'S} = -\vec{a}_{SS'}$$



2. $A \rightarrow S$

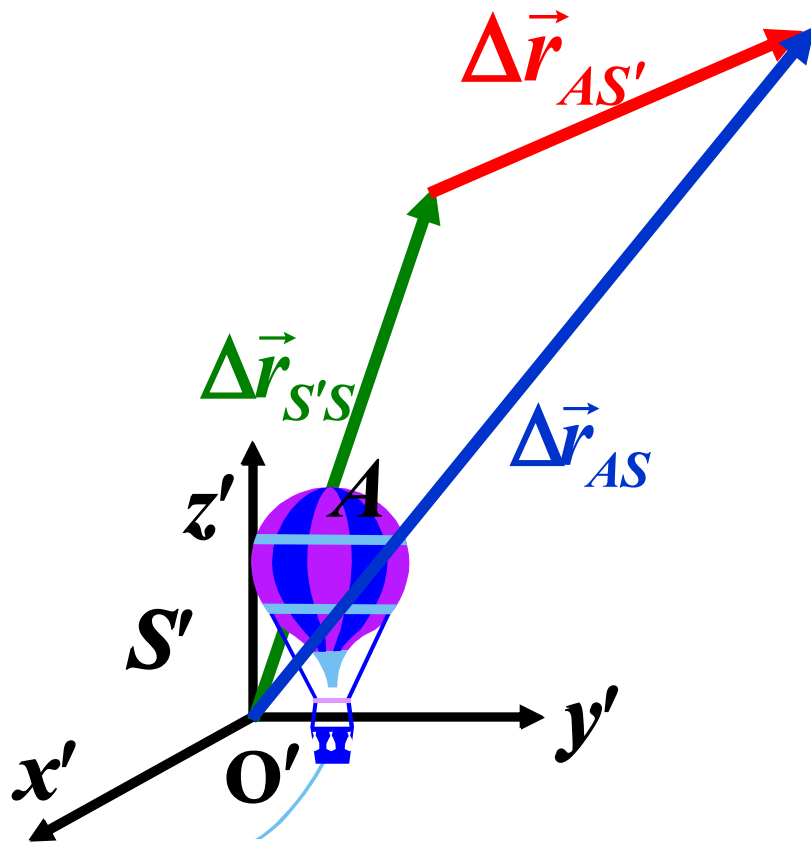
S 系：静止 S' ：平动

$$\Delta \vec{r}_{AS} = \Delta \vec{r}_{AS'} + \Delta \vec{r}_{S'S}$$

$$\vec{v}_{AS} = \vec{v}_{AS'} + \vec{v}_{S'S}$$

$$\vec{a}_{AS} = \vec{a}_{AS'} + \vec{a}_{S'S}$$

注意下标传递性！



例：河水以 2m/s 的速度向正北流，一人划船过河，船相对水的速度是正东 3m/s。

求：船相对地面的速度。

解： $\vec{v}_{\text{船水}} = 3\vec{i}$ $\vec{v}_{\text{水地}} = 2\vec{j}$

$$\begin{aligned}\vec{v}_{\text{船地}} &= \vec{v}_{\text{船水}} + \vec{v}_{\text{水地}} \\ &= 3\vec{i} + 2\vec{j} \text{ m/s}\end{aligned}$$

$$v = \sqrt{13} \text{ m/s}$$

与x轴夹角：

$$\theta = \arctan \frac{2}{3} = 33.7^\circ \quad \text{东偏北}$$

