大学物理

主讲教师：李波

E-mail：bli@ee.ecnu.edu.cn

办公地点：闵行校区信息学院351

如何在物理上处理运动这个现象？

1：如何描述这么复杂的运动？

物质--〉质点　　　　质点运动学（第一章）

2：物质为何会运动？

力与运动的关系？　质点动力学（第二章）

3：力与运动有密切关系！

力作用在物体上的时间：

力的时间效应　动量与角动量（第三章）

力作用在物体上使物体运动：

力的空间效应　功与能　（第四章）

4：牛顿力学在刚体中的具体应用！（第五章　刚体的定轴转动）

5：物体在高速下的运动？（第六章　狭义相对论）

第一章 质点运动学
(Kinematics of particles)

第一章 质点运动 (Kinematics of particles)

$$\vec{r}(t_1),\quad \vec{r}(t_2),\quad \vec{r}(t_3)\ldots\ldots\quad \vec{r}(t_n)$$ 位置矢量

$$\vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k}$$ 运动函数

$$\vec{v}(t) = v_x(t)\vec{i} + v_y(t)\vec{j} + v_z(t)\vec{k}$$

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

$$\vec{v} = \frac{dx}{dt}\hat{x} + \frac{dy}{dt}\hat{y} + \frac{dz}{dt}\hat{z}$$

$$\vec{v} = v_x\hat{x} + v_y\hat{y} + v_z\hat{z}$$

$$v = |\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

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

$$\vec{a} = \frac{dv_x}{dt}\hat{x} + \frac{dv_y}{dt}\hat{y} + \frac{dv_z}{dt}\hat{z}$$

$$\vec{a} = \frac{d^2x}{dt^2}\hat{x} + \frac{d^2y}{dt^2}\hat{y} + \frac{d^2z}{dt^2}\hat{z}$$

$$\vec{a} = a_x\hat{x} + a_y\hat{y} + a_z\hat{z}$$

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

运动学的两类问题：

$$\vec{r}(t) \underset{\text{积分}}{\overset{\text{求导}}{\rightleftarrows}} \vec{v}, \vec{a}$$

匀加速运动

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t \qquad \vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{1}{2}\vec{a}t^2$$

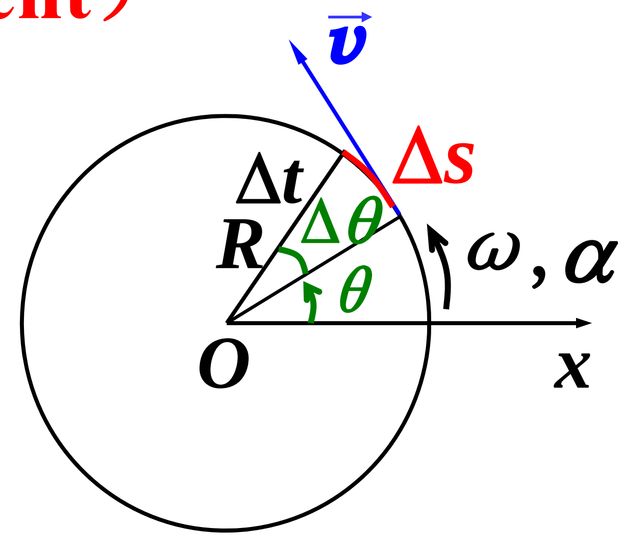
$\vec{a}$ 为常矢量，和 $\vec{v}_0$ 在 / 不在 一条直线上

直线 & 抛体运动

描述圆周运动的物理量

1.角位移（angular displacement）

$$\Delta\theta$$



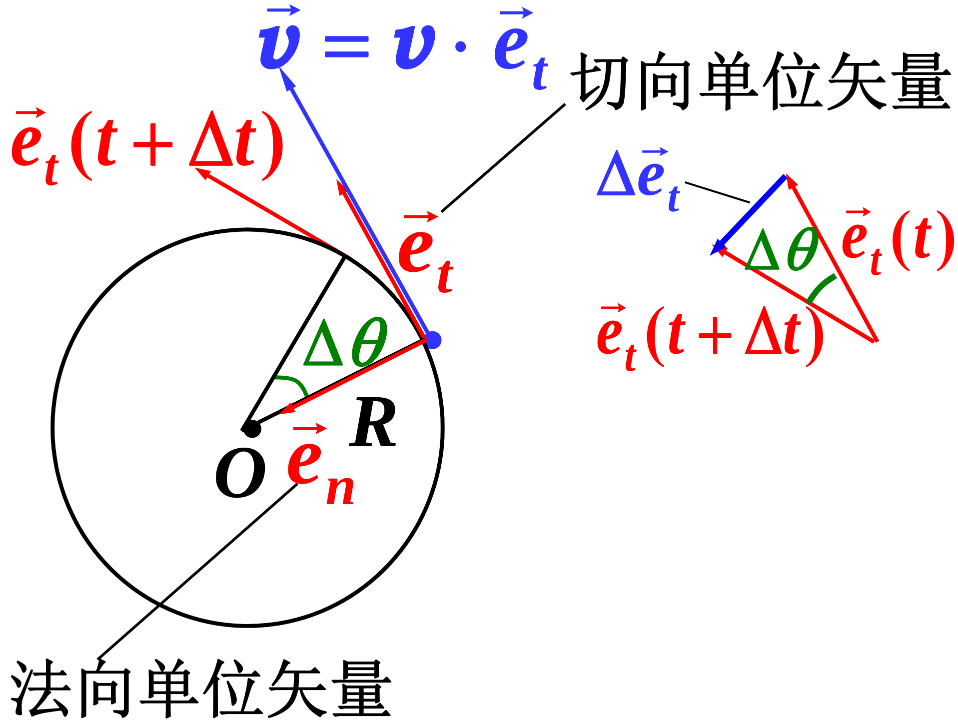
2.角速度（angular velocity）

$$\omega=\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\dot{\theta}$$

3.角加速度（angular acceleration） $\alpha=\dfrac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\ddot{\theta}$

4.线速度（linear velocity） $v=\dfrac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}=\dfrac{R\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=R\omega$

5. 线加速度（linear acceleration）



$$\vec{a} = \frac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(v \cdot \vec{e}_t)$$

$$= \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\vec{e}_t + v\frac{\mathrm{d}\vec{e}_t}{\mathrm{d}t}$$

$$\frac{\mathrm{d}\vec{e}_t}{\mathrm{d}t} = \lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta\vec{e}_t}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\vec{e}_n$$

$$= \omega\,\vec{e}_n = \frac{v}{R}\vec{e}_n$$

$\Delta t \to 0$时， $\Delta\theta \to 0$

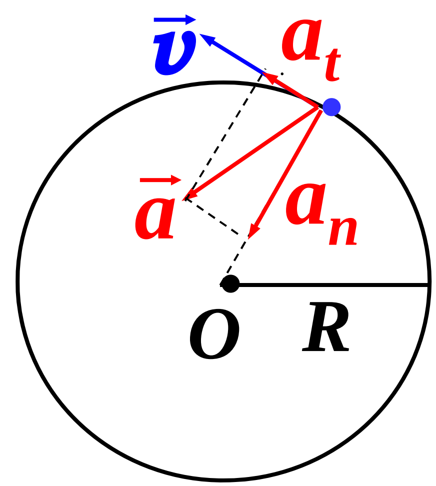
$$\left|\Delta\vec{e}_t\right| = \Delta\theta \cdot \left|\vec{e}_t\right| = \Delta\theta$$

$$\Delta\vec{e}_t \perp \vec{e}_t \to \Delta\vec{e}_t \,//\, \vec{e}_n$$

$$\to \Delta\vec{e}_t = \Delta\theta \cdot \vec{e}_n$$

$$\therefore \quad \vec{a} = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\vec{e}_t + \frac{v^2}{R}\vec{e}_n$$

$$= a_t \cdot \vec{e}_t + a_n \cdot \vec{e}_n$$



$$\boxed{a_t = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}}$$ — 切向加速度

(tangential acceleration)

a_t是引起速度大小改变的加速度。

$$\boxed{a_n = \frac{v^2}{R}}$$ — 法向加速度

(normal acceleration)

或 向心加速度

(centripetal acceleration)

a_n是引起速度方向改变的加速度。

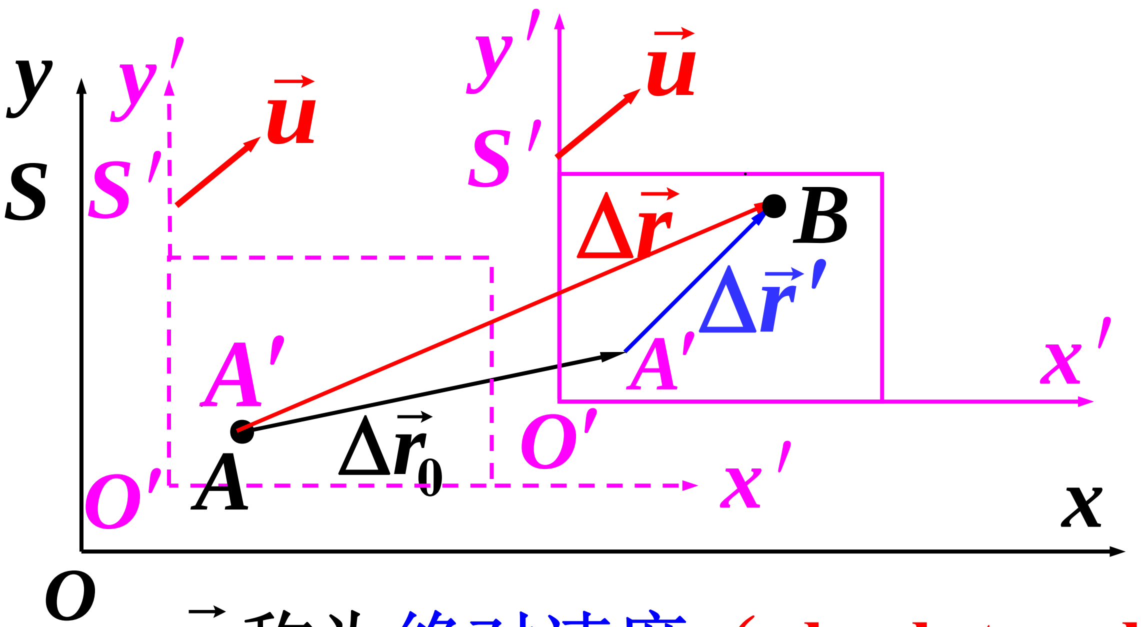
角量与线量的关系

$$\text{线量}\left\{\begin{array}{l} \boldsymbol{v} = R\omega \\ a_t = \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = R\alpha \\ a_n = \dfrac{\boldsymbol{v}^2}{R} = R\omega^2 \end{array}\right\}\text{角量}$$

§ 1.6 相对运动（relative motion）

相对运动是指不同参考系中观察同一物体的运动。

仅讨论一参考系 S' 相对另一参考系 S 以速度 $\vec{u}$ 平动时的情形：



位移关系：

$$\boxed{\Delta\vec{r} = \Delta\vec{r}\,' + \Delta\vec{r}_0}$$

速度关系：

$$\boxed{\vec{v} = \vec{v}\,' + \vec{u}}$$

$\vec{v}$ 称为绝对速度（absolute velocity）

$\vec{v}\,'$ 称为相对速度（relative velocity）

$\vec{u}$ 称为牵连速度（connected velocity）

$$\boxed{\vec{v} = \vec{v}\,' + \vec{u}}$$ 称为伽利略速度变换

（Galilean velocity transformation）

加速度关系：在 S' 相对于 S 平动的条件下

$$\boxed{\vec{a} = \vec{a}\,' + \vec{a}_0}$$

若 $\vec{u} = \text{const}$. 则 $\vec{a}_0 = \dfrac{\mathrm{d}\vec{u}}{\mathrm{d}t} = 0$, 有 $\vec{a} = \vec{a}\,'$

几点说明：

1.以上结论是在绝对时空观下得出的：

只有假定“长度的测量不依赖于参考系”（空间的绝对性），才能给出位移关系式：

$$\boxed{\Delta\vec{r} = \Delta\vec{r}\,' + \Delta\vec{r}_0}$$

只有假定“时间的测量不依赖于参考系”（时间的绝对性），才能进一步给出关系式：

$$\boxed{\vec{v} = \vec{v}\,' + \vec{u}}$$

$$\boxed{\vec{a} = \vec{a}\,' + \vec{a}_0}$$

绝对时空观只在 $u << c$ 时才成立。

2.不可将速度的合成与分解和伽利略速度变换关系相混。

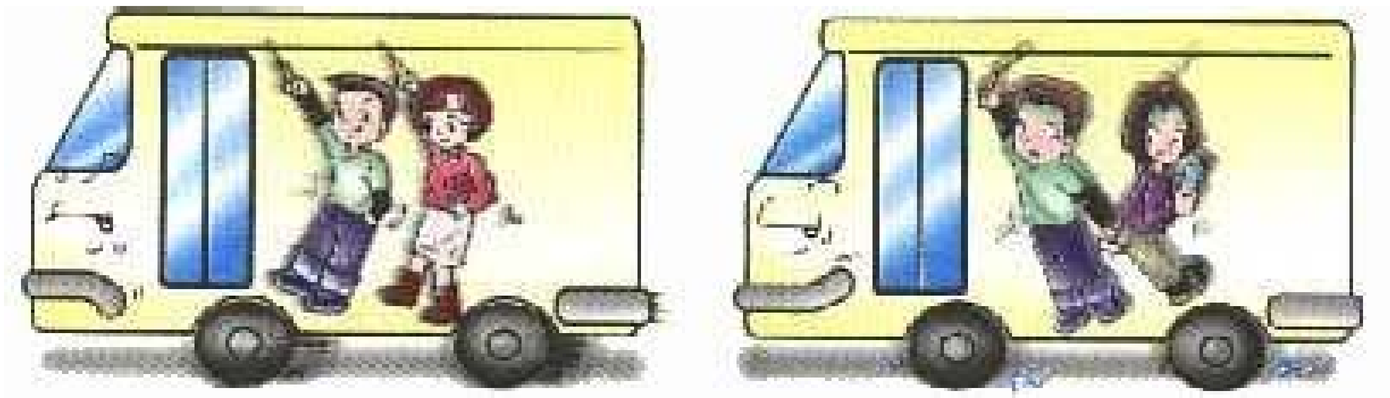
速度的合成是在同一个参考系中进行的，总能够成立；

伽利略速度变换则应用于两个参考系之间，只在$u \ll c$时才成立。

本章目录

△ §2.1 牛顿运动定律

▲ 第一定律 （First law，Inertia law）



（惯性定律）

△ § 2.1 牛顿运动定律

▲ 第一定律（惯性定律）（**First law，Inertia law**）

任何物体都保持静止或匀速直线运动的状态，除非作用在它上面的力迫使它改变这种状态。

第一定律的意义：
- 定性给出了"力"与"惯性"的概念
- 定义了"惯性系"（**inertial frame**）

▲ 第二定律（**Second law**）

运动的变化与所加的动力成正比，并且发生在力所沿的直线方向

$\vec{F}$：物体所受的合外力。

m：质量（**mass**），它是物体惯性大小的量度，也称惯性质量（**inertial mass**）。

若$m = \text{const.}$，则有：

$$\boxed{\vec{F} = m\vec{a}}$$

$\vec{a}$：物体的加速度。

▲ 第二定律（**Second law**）

$$\boxed{\vec{F}=\frac{dp}{dt}=\frac{d}{dt}(m\vec{\mathrm{v}})}$$

$\vec{F}$：物体所受的合外力。

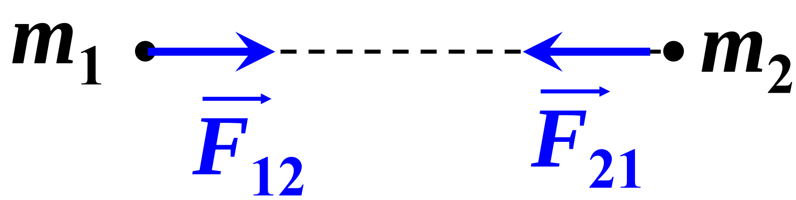
m：质量（**mass**），它是物体惯性大小的量度，也称惯性质量（**inertial mass**）。

若$m=$ const.，则有：

$$\boxed{\vec{F}=m\vec{a}}$$

$\vec{a}$：物体的加速度。

▲ 第三定律（Third Law）



$$\boxed{\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}}$$

作用力与反作用力


KOA

对牛顿定律的说明：

1.牛顿定律只适用于惯性系；

2.牛顿定律是对质点而言的， 而一般物体可认为是质点的集合， 故牛顿定律具有普遍意义。

3.牛顿三定律是一个整体:

第一定律说明了任何物体都有惯性;

第二定律进一步说明了物体的惯性,物体的机械运动状态的改变及物体与其它物体相互作用三者的关系;

第三定律则说明了力出现的性质,即力是物体之间的相互作用,力是成对出现的,而且性质相同.

量纲

基本量：七个基本物理量长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量、发光强度

导出量：　　速度，加速度，力……

<u>量纲相同：加减，写出等式</u>

Δ §2.2 常见的几种力

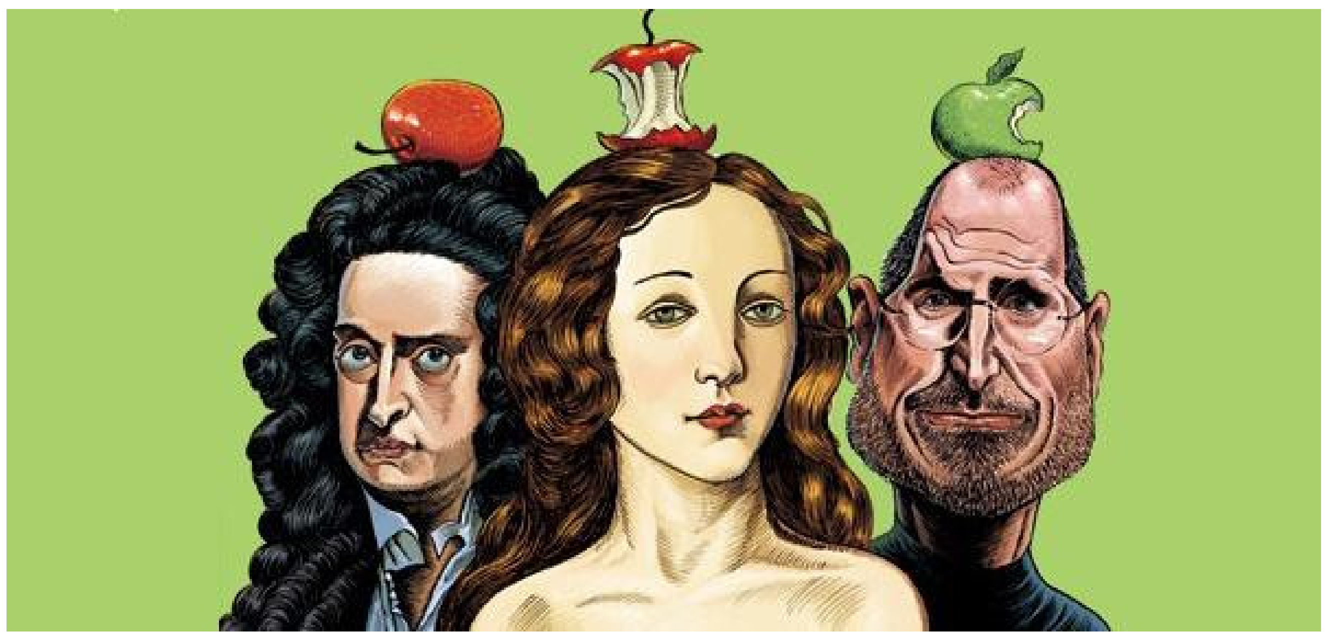
1、重　力：(Weight)

地球表面附近的物体受到地球的吸引作用。

重力加速度为：**g**

根据牛顿第二运动定律有: $\vec{G} = m\vec{g}$

万有引力



Δ §2.2 常见的几种力

2、弹性力：(Elastic force)

物体由于形变后要恢复原状，而产生的力

压力

拉力(张力)

弹性回复力　胡克定律　$f = -kx$

Δ §2.2 常见的几种力

3、摩擦力： (Frictional force)

相互接触的物体在沿接触面相对运动时，或有相对运动趋势时，在接触面之间产生一对阻止相对运动的力。

静摩擦力 $f_{s\max}=\mu_s N$

滑动摩擦力 $f_k=\mu_k N$

滚动摩擦力等

材料 A	材料 B	摩擦系数			
		干摩擦条件		润滑摩擦条件	
		静摩擦	滑动摩擦	静摩擦	滑动摩擦
铝	铝	1.05-1.35	1.4	0.3	
铝	低碳钢	0.61	0.47		
制动材料	铸铁	0.4			
制动材料	铸铁（湿）	0.2			
黄铜	铸铁		0.3		
砌块	木头	0.6			
青铜	铸铁		0.22		
青铜	钢			0.16	
镉	镉	0.5		0.05	
镉	低碳钢		0.46		
铸铁	铸铁	1.1	0.15		0.07
铸铁	橡胶		0.49		0.075
铬	铬	0.41		0.34	
铜	铸铁	1.05	0.29		
铜	铜	1.0		0.08	
铜	低碳钢	0.53	0.36		0.18
铅铜合金	钢	0.22		-	
金刚石	金刚石	0.1		0.05 - 0.1	
金刚石	金属	0.1 -0.15		0.1	
玻璃	玻璃	0.9 - 1.0	0.4	0.1 - 0.6	0.09-0.12
玻璃	金属	0.5 -		0.2 -	

Δ §2.2 常见的几种力

4、流体阻力：(Fluid resistance)

(液体或气体)

通常有 $$f_d = k\upsilon$$ (相对速率较小时)

$$\boldsymbol{f}_d = \boldsymbol{k}\boldsymbol{\upsilon}^2$$ (相对速率较大时)

k 黏度， 密度

Δ §2.2 常见的几种力

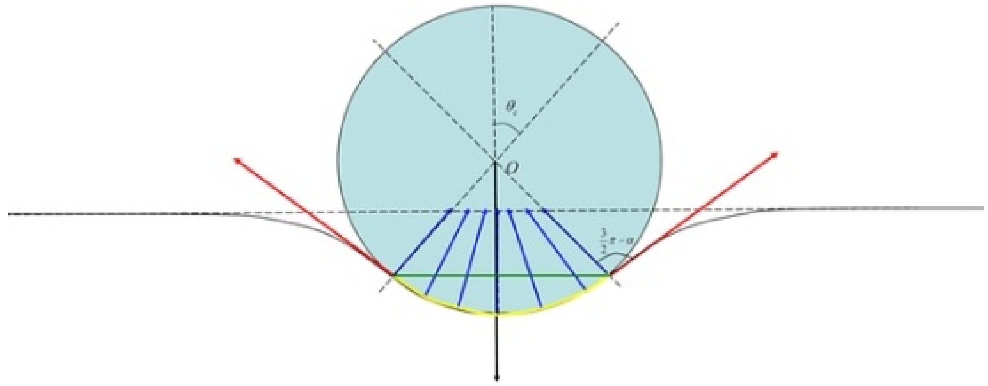
5、表面张力：(Fluid resistance) (液体)

Δ §2.2 常见的几种力

5、表面张力:(Fluid resistance) (液体)

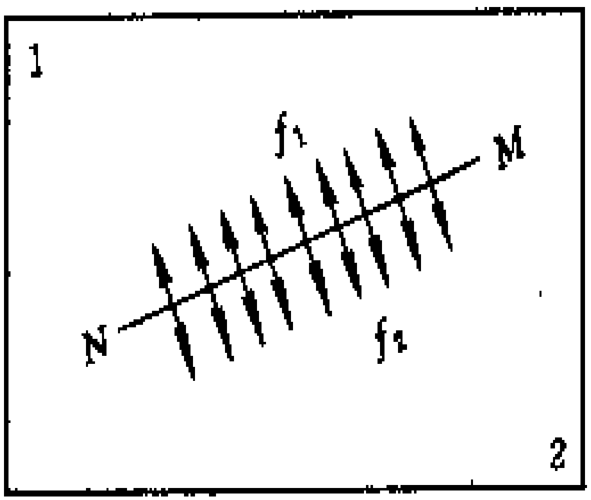
液体具有收缩其表面，使表面积达到最小的趋势。这说明液体表面存在着张力，这种张力称为表面张力

Δ §2.2 常见的几种力



5、表面张力：(Fluid resistance) (液体)

实验表明：f_1、f_2都与液面相切，并与分界线MN相垂直，大小相等，方向相反。而表面张力的大小F是和液面设想的分界线MN的长度L成正比的，因此有



$$F = \gamma L$$

γ——液体的表面张力系数，其在数值上等于沿液体表面作用在分界线单位长度上的表面张力。

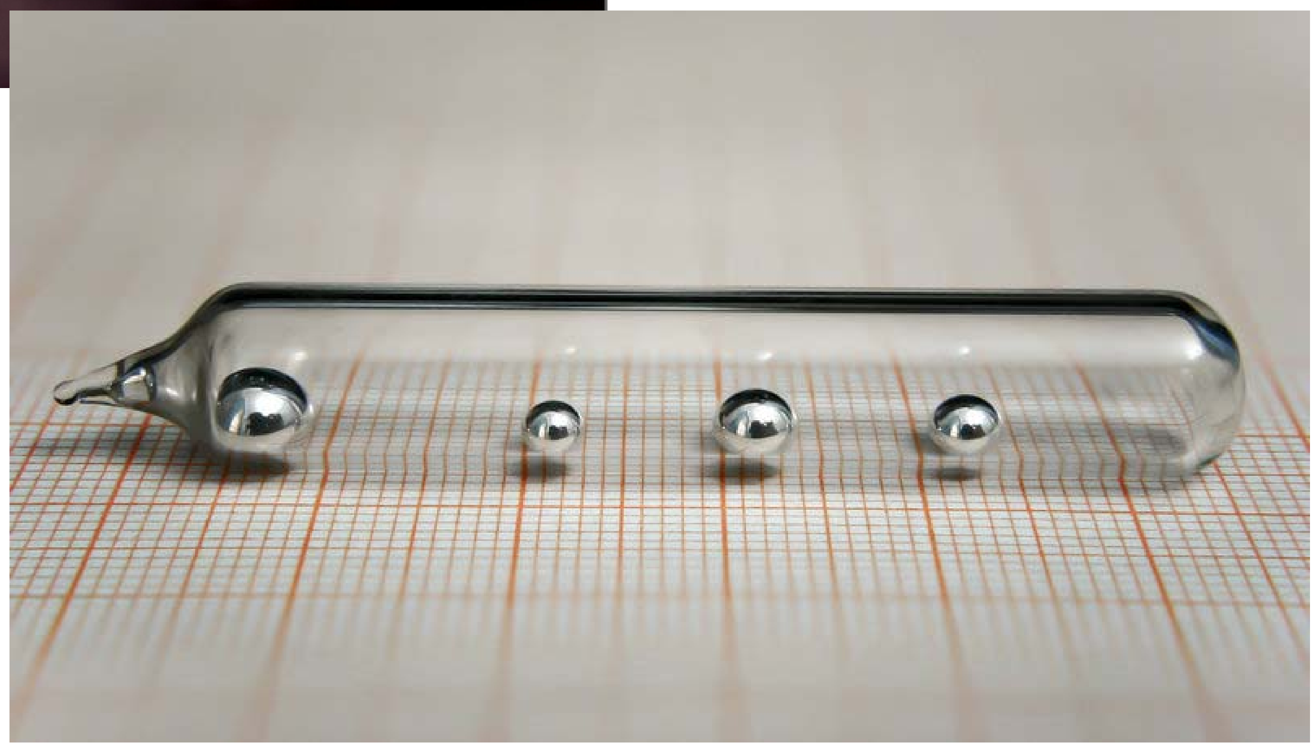
在国际单位制中，γ的单位是（$N \cdot m^{-1}$）

Δ §2.2 常见的几种力

5、表面张力：(Fluid resistance) (液体)

表 7-3 不同液体与空气接触时的表面张力系数 α

液体	温度(℃)	$\alpha(J\cdot m^{-2}$或$N\cdot m^{-1})$	液体	温度(℃)	$\alpha(J\cdot m^{-2}$或$N\cdot m^{-1})$
丙酮	20	0.0237	肥皂液	20	0.025
甲醇	20	0.0226	溴化钠	熔点	0.103
苯	20	0.0228	水	0	0.0756
氯仿	20	0.0271	水	20	0.0728
甘油	20	0.0634	水	30	0.0712
水银	15	0.487	水	100	0.0589



Δ §2.3 基本的自然力

1、万有引力：(Gravitation)

任何物体与物体之间都存在着相互吸引的力，这种力称为万有引力。

2、电磁力：(Electromagnetic force)

存在于静止电荷以及运动电荷之间的电性力和磁性力，统称为电磁力。在微观领域中，有些不带电的中性粒子也参与电磁相互作用。

3、强　力：(Strong nuclear force)

在微观领域中的一种短程力，存在于强子（核子、介子和超子）之间。

4、弱　力：(weak nuclear force)

微观领域中的一种短程力，存在于强子和轻子（电子、中微 子、μ 子等）之间。

基本自然力的性质与特征

力的种类	万有引力	电磁力	弱力	强力
力程	∞ 长程力	∞ 长程力	$<10^{-17}$m 短程力	$<10^{-15}$m 短程力
强度*	10^{-34}N	10^{2}N	10^{-2}N	10^{4}N
相互作用物体	一切物体之间	一切带电粒子之间	多数粒子之间	强子之间(核子、介子、超子)
传递媒介*	引力子 (尚未发现)	光子 γ	中间玻色子 $W^{\pm},Z^{0}$ (1983 年发现)	胶子 G (已被间接确认尚未被分离出来)
其他特点	大尺度范围内起决定作用（天体)		主要发生在粒子衰变及俘获过程中	

★ 物理学家的目标

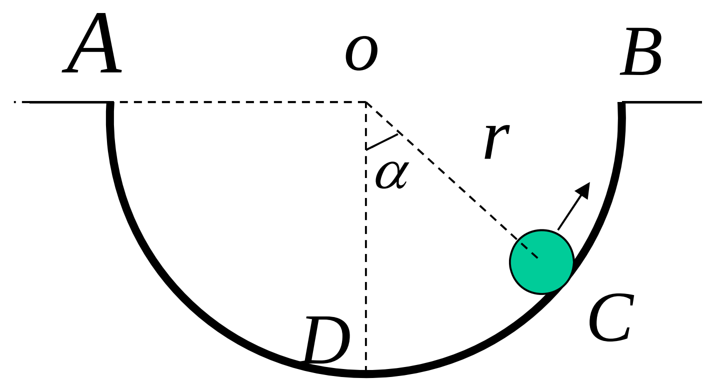
:

- 四种力可否从一种更基本、更简单的力导出?
- 各种力是否能统一在一种一般的理论中?

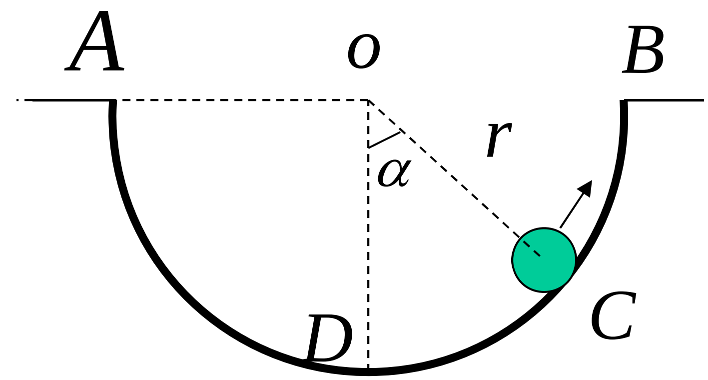
★已做和待做的工作:

- 20世纪20年代,爱因斯坦最早着手这一工作。最初是想统一电磁力和引力，但未成功。
- 弱、电统一:1967年温伯格等提出理论
  1983年实验证实理论预言
- 大统一 :弱、电、强 统一已提出一些理论
  因目前加速器能量不够而无法实验证实。
  (需要10^{15}Gev, 现10^{3}Gev)
- 超大统一:四种力的统一

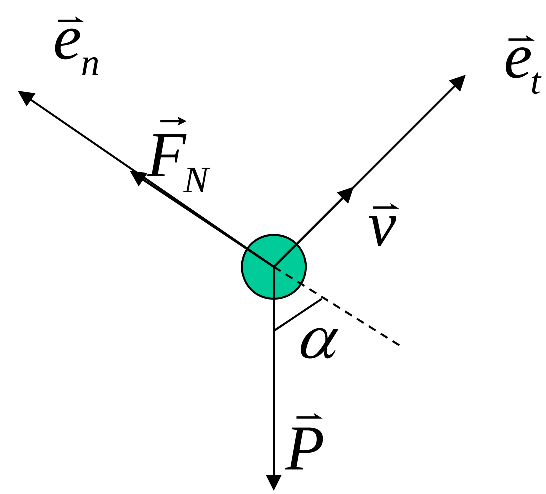
例：一质量为**m**的小球最初位于如图所示的**A**点，然后沿半径为**r**的光滑圆轨道**ADCB**下滑。试求小球到达点**C**时的角速度和对圆轨道的作用力。



解答：小球在运动过程是受到重力**P**和圆轨道对它的支持力**FN**,取如图所示的自然坐标系,由牛顿定律得:



$$F_t = -mg\sin\alpha = m\frac{dv}{dt} \qquad (1)$$



$$F_n = F_N - mg\cos\alpha = \frac{mv^2}{R} \qquad (2)$$

由$v = \dfrac{ds}{dt} = \dfrac{rd\alpha}{dt}$,得$dt = \dfrac{rd\alpha}{v}$

代入(1)式,并根据小球从点A运动到点C的始末条件,进行积分,有:

$$\int_{o}^{v} v dv = \int_{90^0}^{\alpha} (-rg\sin\alpha) d\alpha$$

得: $$v = \sqrt{2rg\cos\alpha}$$

则小球在点C的角速度为: $\omega = \dfrac{v}{r} = \sqrt{(2g\cos\alpha)/r}$

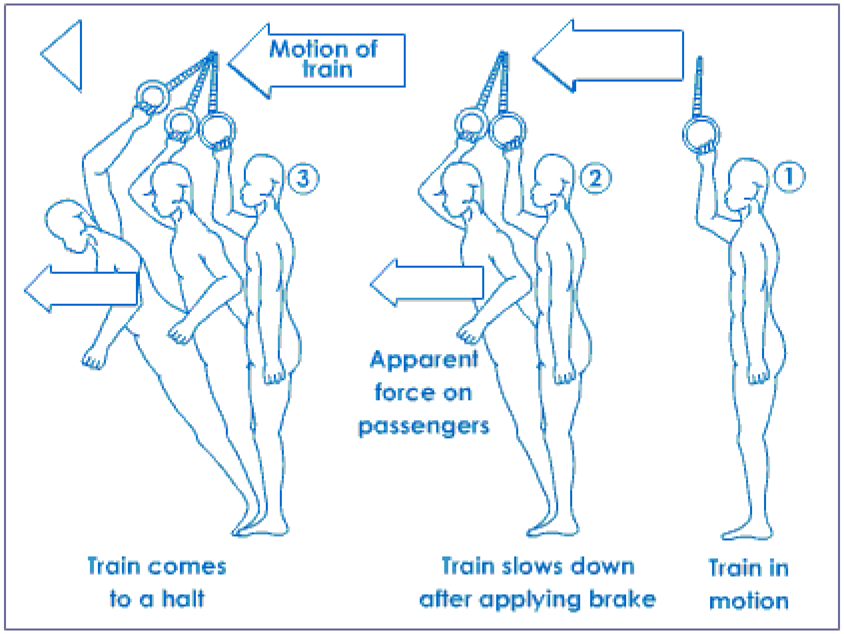
由式(2)得: $F_N = \dfrac{mv^2}{r} + mg\cos\alpha = 3mg\cos\alpha$

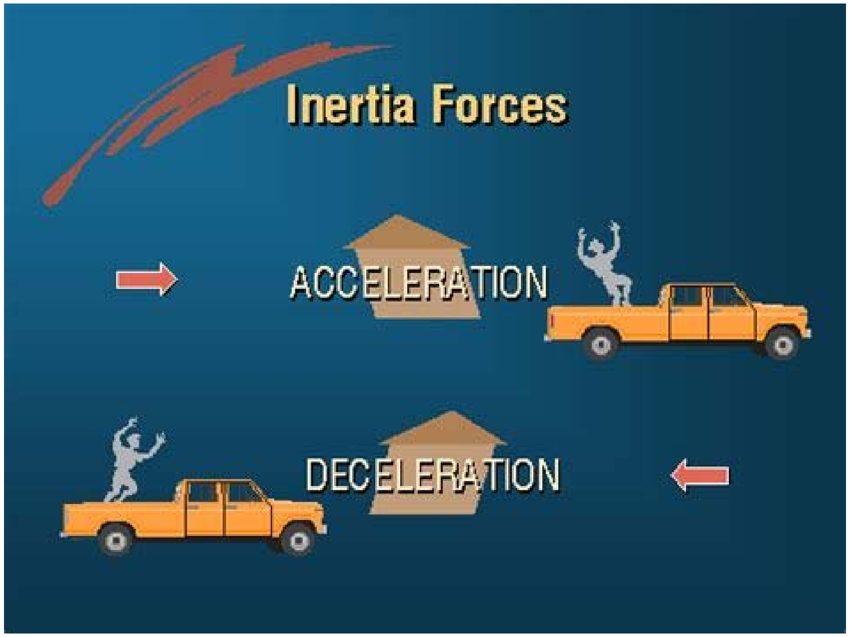
由此可得小球对圆轨道的作用力为:

$$F_N' = -F_N = -3mg\cos\alpha$$

负号表示 $\vec{F}_N'$ 与 $\vec{e}_n$ 反向.

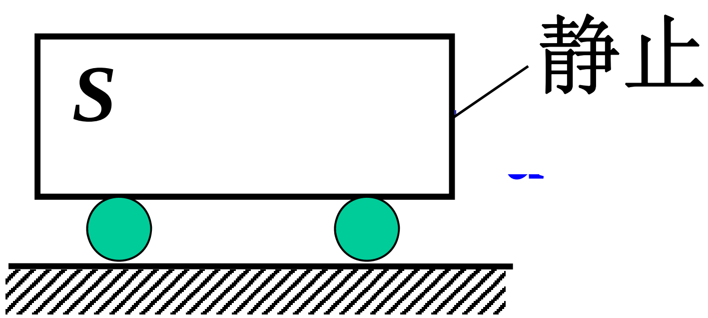
§ 2.5 非惯性系和惯性力


Motion of train
3
2
1
Apparent force on passengers
Train comes to a halt
Train slows down after applying brake
Train in motion

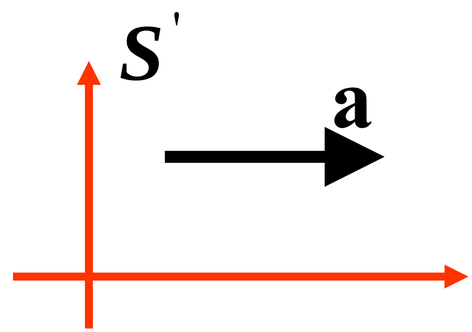

Inertia Forces
ACCELERATION
DECELERATION

牛顿定律仅适用于惯性系。

例如：



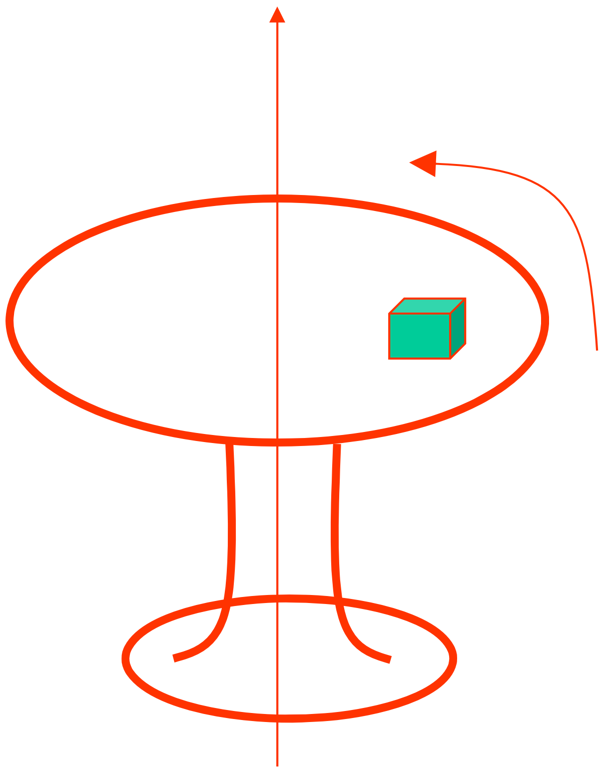
S：牛顿定律成立



S'：牛顿定律不成立

牛顿定律仅适用于惯性系。

例如：



S'： 观察者站在圆盘上

S'： 牛顿定律不成立

S ： 牛顿定律成立

为何还要在非惯性系中研究问题呢？

▲有些问题需要在非惯性系中研究，

如：

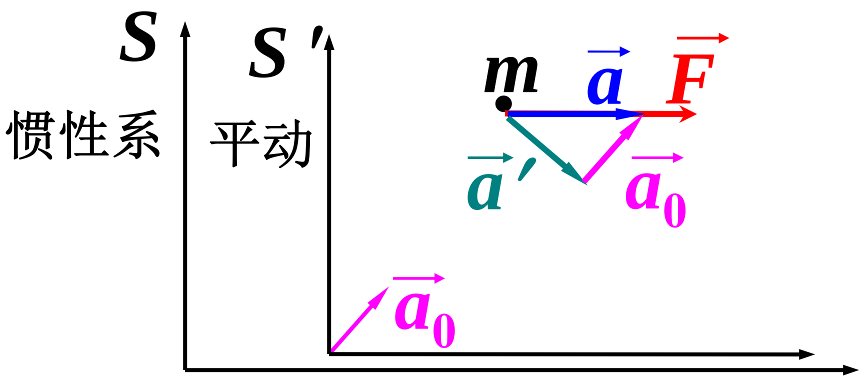
地面参考系，地球自转加速度 $a \approx 3.4\times10^{-2}\ \mathrm{m/s}^2$（赤道）

地心参考系，地球绕太阳公转加速度 $a \approx 6\times10^{-3}\ \mathrm{m/s}^2$

太阳参考系，太阳绕银河系转加速度 $a \approx 1.8\times10^{-10}\ \mathrm{m/s}^2$

▲有些问题在非惯性系中研究较为方便。

一. 平动非惯性系中的惯性力



S ：　$\vec{F} = m\vec{a}$

S' ：　$\vec{a}' = \vec{a} - \vec{a}_0 \neq \vec{a}$

$\vec{F}' = \vec{F}$ ， $m' = m$ ，

故　$\vec{F}' \neq m'\vec{a}'$

修改牛顿第二定律，使之于适用平动非惯性系：

由　$\vec{F} = m\vec{a} = m(\vec{a}' + \vec{a}_0) = m\vec{a}' + m\vec{a}_0$

得　$\vec{F} - m\vec{a}_0 = m\vec{a}'$

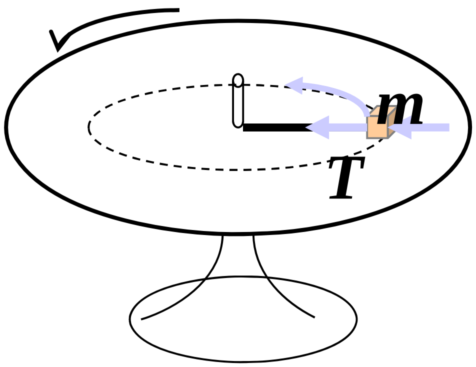
定义惯性力（inertial force）—　$\boxed{\vec{F}_0 = -m\vec{a}_0}$

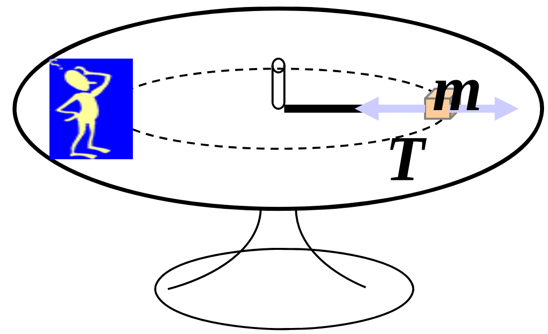
则有　$\boxed{\vec{F} + \vec{F}_0 = m\vec{a}'}$ — 非惯性系中的牛顿第二定律

惯性力是参考系加速运动引起的附加力，
本质上是物体惯性的体现。

它不是物体间的相互作用，没有反作用力，
但有真实的效果。

惯性离心力:





地面观察者：质点受绳子的拉力提供的向心力，所以作匀速圆周运动。

圆盘上观察者：质点受绳子的拉力，为什么静止？

在匀速转动的非惯性系中，小球受到一个惯性离心力（**inertial centrifugal force**）的作用，大小与绳子的拉力相等，方向与之相反，所以小球处于静止的平衡状态。

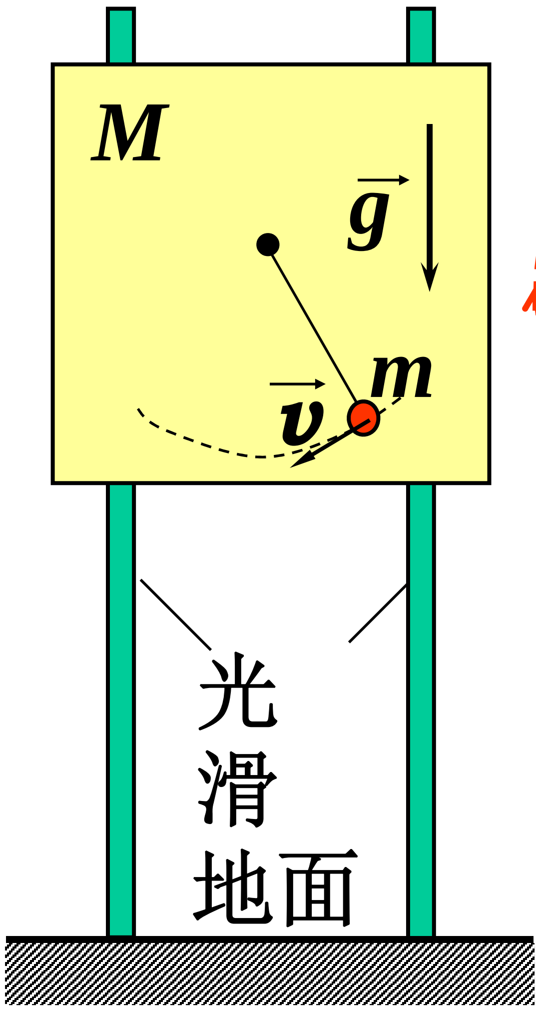
$$\vec{\mathrm{F}} + \vec{F}_i = -m\omega^2\vec{R} + \vec{F}_i = 0$$

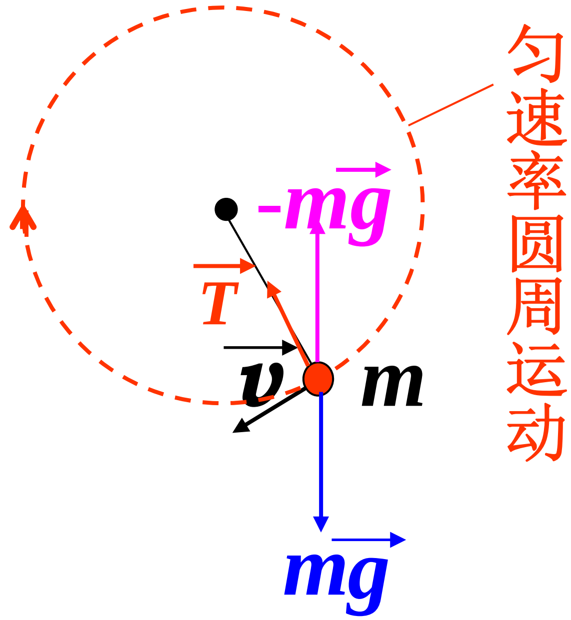
$$\vec{F}_i = m\omega^2\vec{R}$$

▲在非惯性系中讨论问题更方便的情况举例：

讨论 M 自由下滑后，m 对地面的运动情况。

$M >> m$　直接讨论 m 对地面的运动较困难。





失重情况

可分两步讨论：

（1）在 M 参考系中观察，m 作速率为v 的圆周运动。

（2）M 对地作自由落体运动。

m 对地面的运动，是以上两种运动的叠加。

混沌


《三体》三部曲
三体
刘慈欣 著
三体 II
黑暗森林
DEAD END
死神永生
刘慈欣 著
第一部《三体》
第二部《黑暗森林》
第三部《死神永生》


change one thing. change everything.
the butterfly effect
ASHTON KUTCHER
AMY SMART
IN THEATERS JANUARY 23rd 2004
www.butterflyeffectmovie.com AOL Keyword: BUTTERFLYEFFECT TM & © MMIV New Line Productions, nc. All rights reserved.

§2.5 牛顿运动定律的应用

动力学问题:

- 已知力，求物体的运动状态;
- 已知物体的运动状态，求力。

适用范围:

- 牛顿力学只适用于在惯性系内，解决低速运动问题；

  何谓高速？ --- 可与光速相比， 相对论
- 牛顿力学只适用于宏观问题 。

  何谓微观？--- 分子、原子、电子、原子核等，量子力学

解题步骤:

- 确定研究对象;
- 进行受力分析;
- 选择坐标系;
- 列运动方程;
- 解方程;
- 必要时进行讨论。

1.5、一个质点沿 X 轴作直线运动，其运动学方程为 $X = 3 + 6t + 8t^2 - 12t^3$，则

（1）质点在 $t = 0$ 时刻的速度 $v_0 =$ ____________，加速度 $a_0 =$ ____________；

（2）加速度为 0 时，该质点的速度 $v =$ ____________。

解:（1）$v = 6 + 16t - 36t^2$，当 t=0 时，V_0=6m/s；$a = 16 - 72t$，加速度 a_0= $16m/s^2$

（2）当 $a = 0$ 时，$a = 16 - 72t$，$t = \frac{16}{72} = 0.22s$

$$v = 6 + 16 \times \frac{16}{72} - 36 \times (\frac{16}{72})^2 = 7.8m/s$$

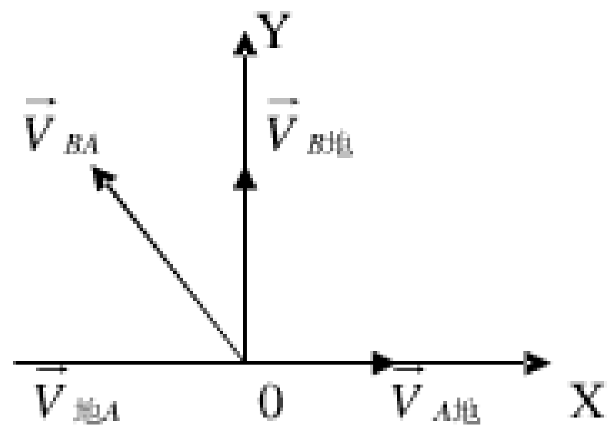
1.10、一质点做半径为 0.1m 的圆周运动，其运动方程为$\theta=\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}t^2$（SI），则切线加速度为$a_t=$________________。

解： $\omega=\frac{d\theta}{dt},v=R\omega,a_t=\frac{dv}{dt}$，$a_t=R\frac{d^2\theta}{dt^2}=0.1\times1=0.1(m/s^2)$

1．30、在相对地面静止的坐标系内，A、B 两船都以 2m/s 的速率匀速行驶。A 船沿 X 轴正向；B 船沿 Y 轴正向。今在 A 船上设置与静止的坐标系方向相同的坐标系（X、Y 方向单位矢量用 $\boldsymbol{i}$ 和 $\boldsymbol{j}$ 表示）。那么，A 船看 B 船，它对 A 船的速度为（速度的单位是 m/s）

（A）、$2\boldsymbol{i}+2\boldsymbol{j}$；（B）、$-2\boldsymbol{i}+2\boldsymbol{j}$；

（C）、$-2\boldsymbol{i}-2\boldsymbol{j}$；（D）、$2\boldsymbol{i}-2\boldsymbol{j}$。



解答：这也是一道速度矢量合成的题，

依题意作图，所以（B）、$-2\boldsymbol{i}+2\boldsymbol{j}$ 为正确答案。

1．32、一质点沿半径为 R 的圆周运动，质点经过的弧长与时间的关系为 $S=bt+\frac{1}{2}ct^2$，式中 b、c 是大于零的常数。求从 $t=0$ 开始到达切线加速度与法线加速度大小相等所经过的时间。

解：$v=\frac{dS}{dt}=\frac{d(bt+ct^2/2)}{dt}=b+ct, a_t=\frac{dv}{dt}=c$，$a_n=\frac{v^2}{R}=\frac{(b+ct)^2}{R}$

由已知条件：$a_t=a_n, c=\frac{(b+ct)^2}{R}, t=\sqrt{\frac{R}{c}}-\frac{b}{c}$。

作业

2.2 2.4 2.11 2.16