大学物理(1)

第 2 章

运动与力

这个由太阳、行星和彗星组成的最完美的体系，只能来自一个全智全能的主宰者的督促和统治。

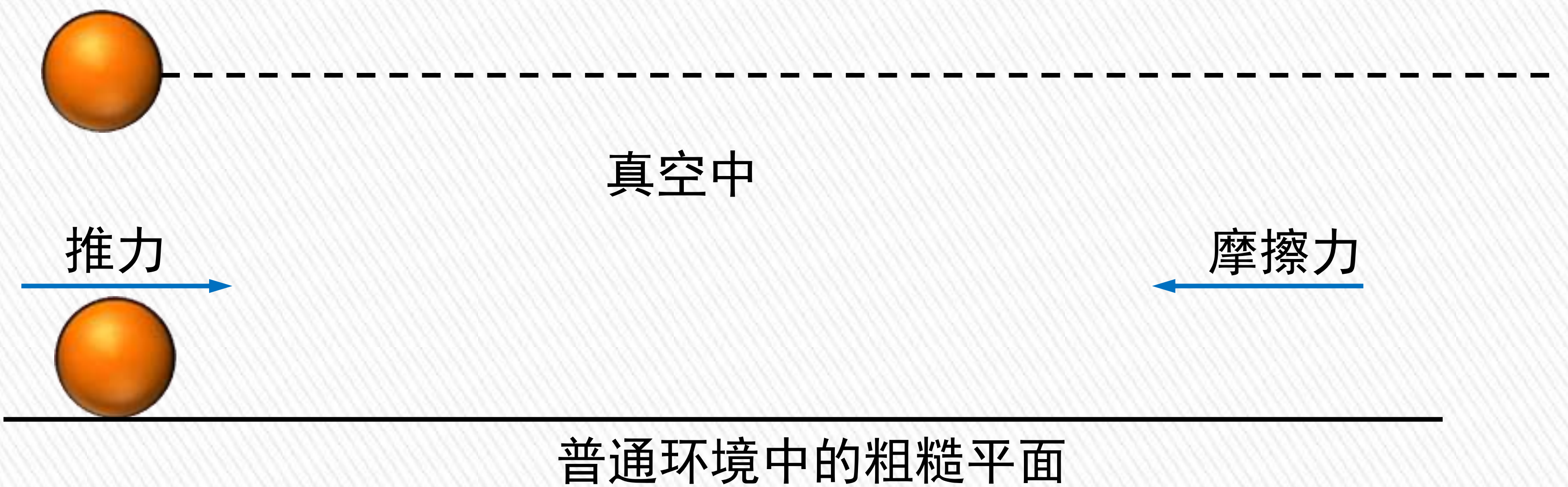
——— 伊萨克·牛顿，《自然哲学的数学原理》总释

任课教师：张艳

2.1 牛顿运动定律

» **第一定律** 任何物体都保持静止的或沿一条直线作匀速运动的状态，除非作用在它上面的力迫使它改变这种状态。（惯性定律）

重要概念：惯性，力(***F***)，动量(***p***)：$\vec{p}=m\vec{v}$

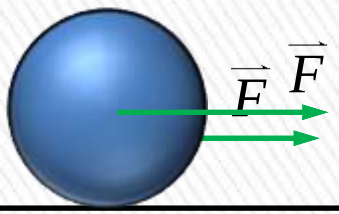


定性的！

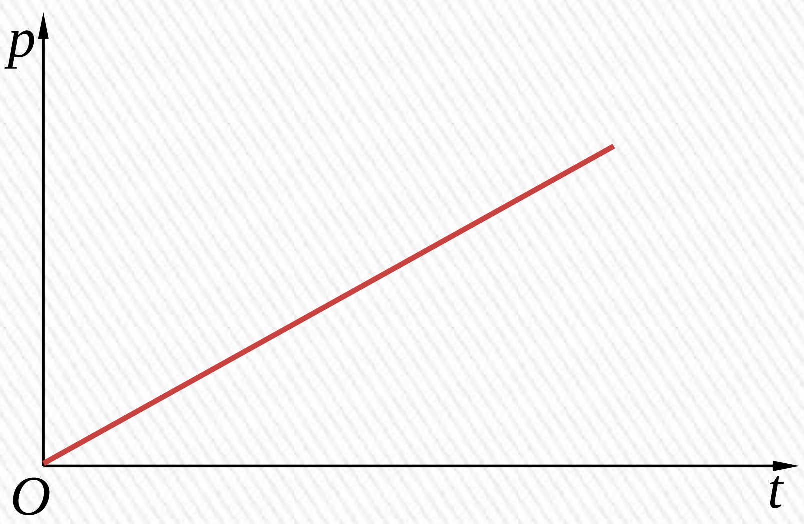
2.1 牛顿运动定律

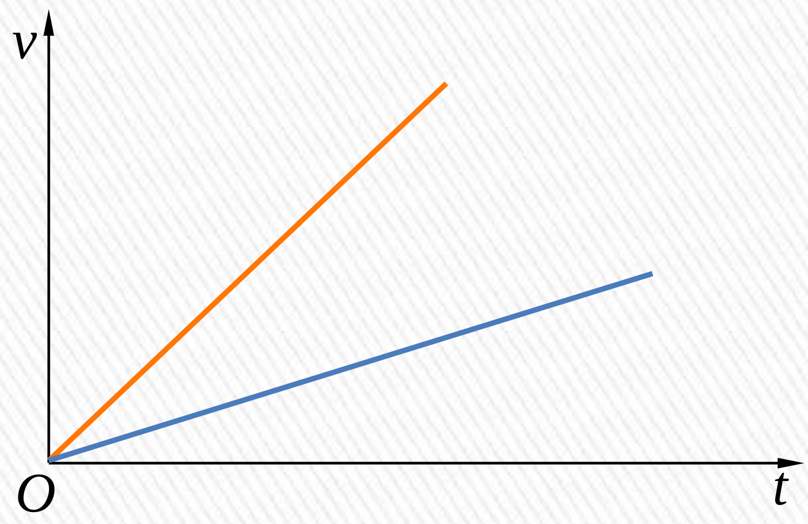
» **第二定律** 运动的变化与所加的力成正比，并且发生在这力所沿的直线方向上。

重要概念 $\vec{F}=\dfrac{\mathrm{d}\vec{p}}{\mathrm{d}t}$ ，力与加速度的关系：$\vec{F}=m\dfrac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}=m\vec{a}$



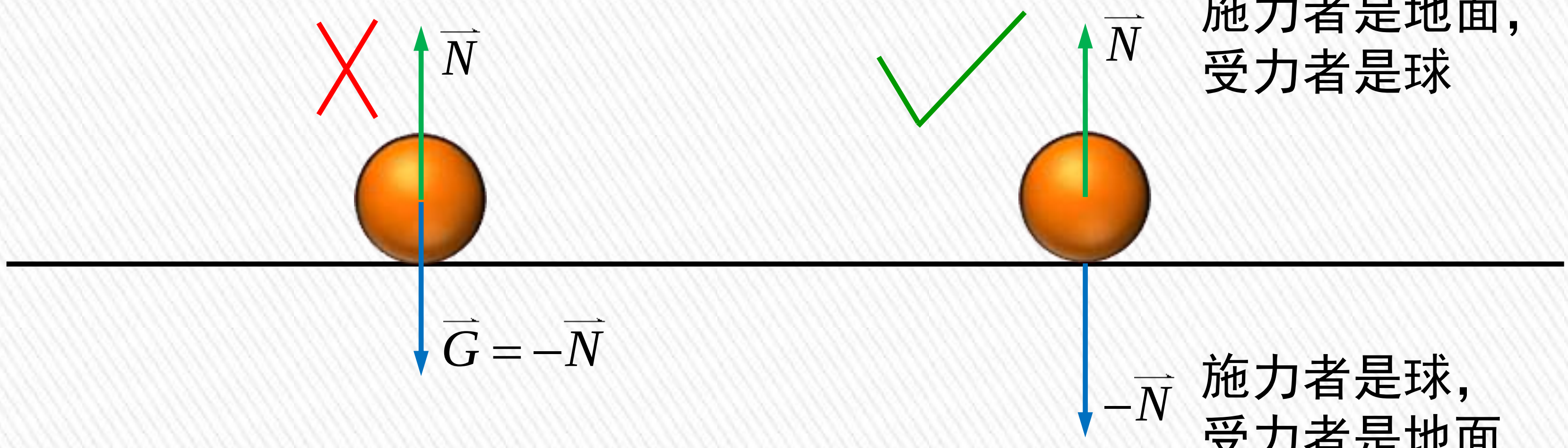
定量的！

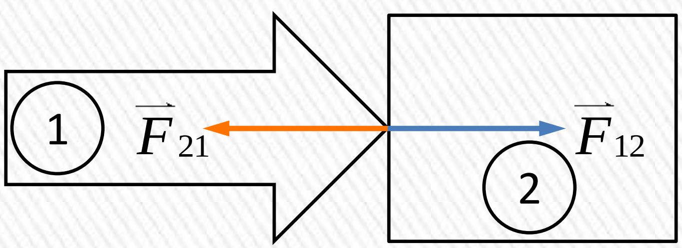




2.1 牛顿运动定律

» **第三定律** 对于每一个作用，总有一个相等的反作用与之相反；或者说，两个物体对各自对方的相互作用总是相等的，而且指向相反的方向。





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

同时存在，分别作用，方向相反，大小相等。

2.1 牛顿运动定律

» 力的单位

1. 在SI单位制中，力的单位为：kg·m·s^{-2}

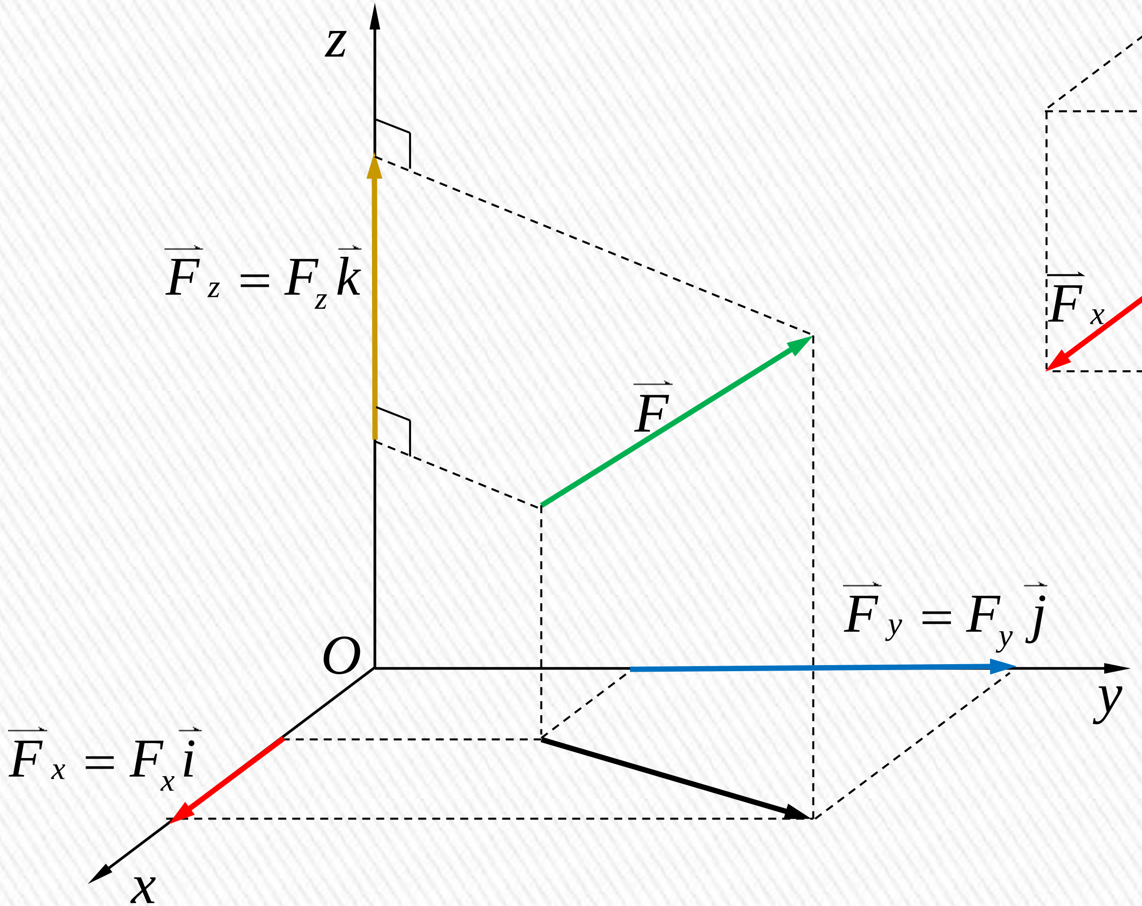
$$1\ \mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-2}=1\ \mathrm{N}(\text{牛顿})$$

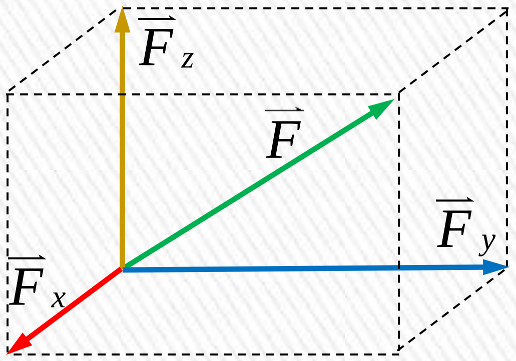
使质量为1千克的物体产生1米每秒平方的加速度的力就是 1 牛顿。

2.1 牛顿运动定律

» 力的矢量分解与合成

力是矢量，其分解与合成遵循矢量在空间中的分解与合成规则。

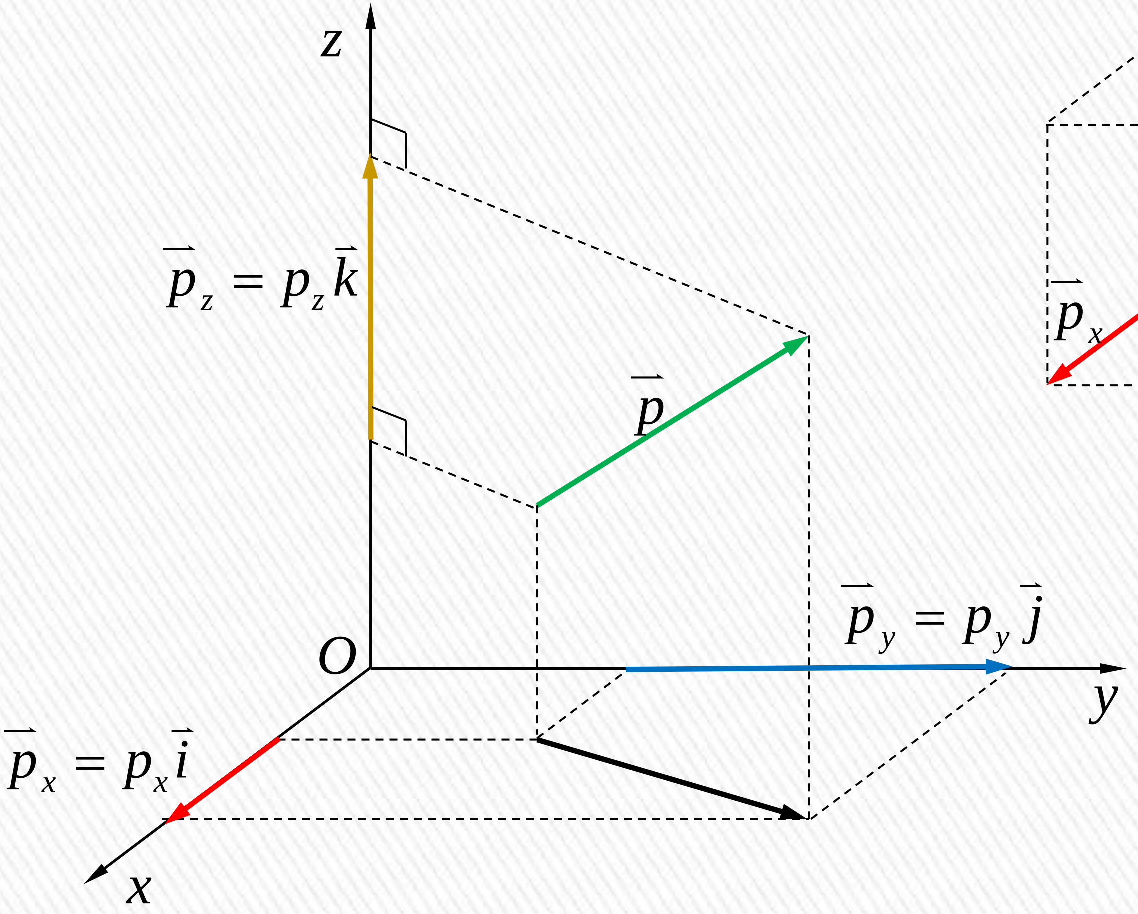


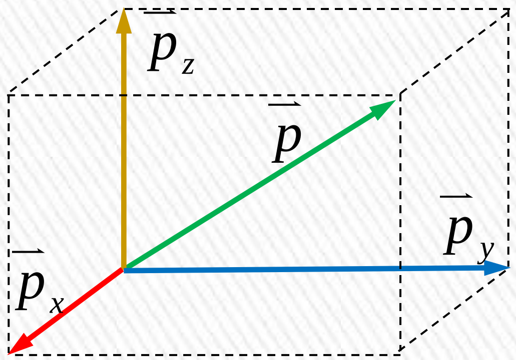


2.1 牛顿运动定律

» 动量的矢量分解与合成

动量也是矢量，其分解与合成也遵循矢量在空间中的分解与合成规则。

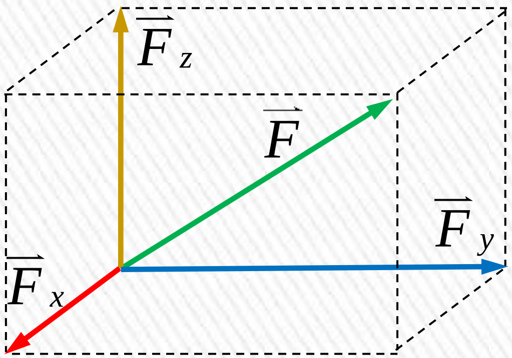


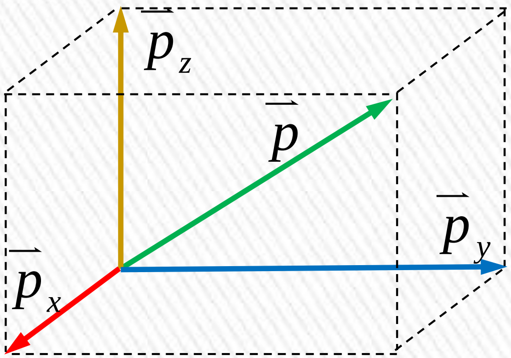


2.1 牛顿运动定律

» 动量分量与力的分量之间的关系

动量分量与力的分量之间有简单的微分关系





$$F_x = \frac{\mathrm{d}p_x}{\mathrm{d}t}, \qquad F_y = \frac{\mathrm{d}p_y}{\mathrm{d}t}, \qquad F_z = \frac{\mathrm{d}p_z}{\mathrm{d}t}.$$

非相对论条件下，还可写成：

$$F_x = ma_x, \qquad F_y = ma_y, \qquad F_z = ma_z.$$

2.2 常见的几种力

1.引力和重力

任何两个有质量的物体都相互吸引，引力的大小与它们的质量的乘积成正比，与它们之间的距离的平方成反比。

$$f_{\text{引力}} = \frac{Gm_1 m_2}{r^2}$$

其中 G 称为万有引力常数， $G = 6.67408 \times 10^{-11} N \cdot m^2 \cdot kg^{-2}$

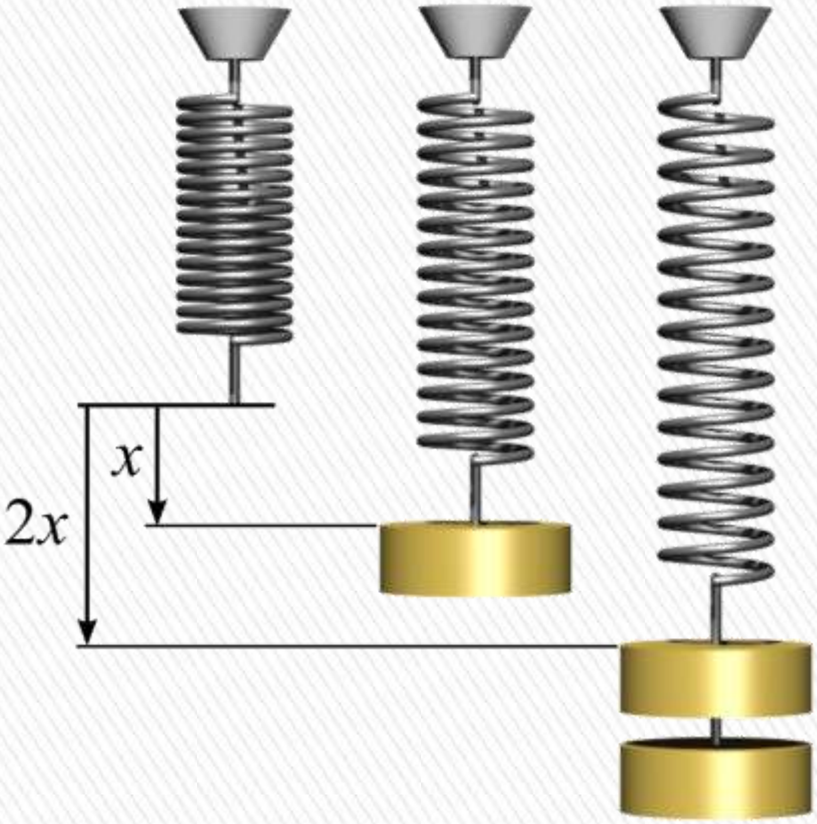
由于地球的**引力作用**而使物体受到的力称为重力。

$$W = \boxed{\frac{Gm_{\text{地球}}}{r_{\text{地球}}^2}} m = m \boxed{g}$$

2.2 常见的几种力

2.弹性力 发生形变的物体有**恢复原状的趋势**，从而对与其**接触**的物体产生的作用力称为弹性力。这种力本质上是由**电磁相互作用**引起的。

胡克定律：$f = -kx$



2.2 常见的几种力

3.摩擦力

两个相互接触的物体，沿着接触面的方向有相对滑动或滑动趋势时，在各自接触面上受到阻止这种滑动或滑动趋势的力称为摩擦力。

这是由于两个物体相互作用而产生形变，或者物体微观凹凸表面产生相互啮合，或者产生分子粘结现象。

这种力本质上也是由**电磁相互作用**引起的。

无论是**动摩擦力**还是**最大静摩擦力**，都与压力 N 有如下关系：

$$f = \mu N$$

动摩擦力 $f_k = \mu_k N$

最大静摩擦力 $f_{s.\max.} = \mu_s N$

2.4 应用牛顿定律解题

动力学问题一般有两种类型：

1. 已知力的作用情况，求运动方程；
2. 已知运动情况，求物体所受的力。

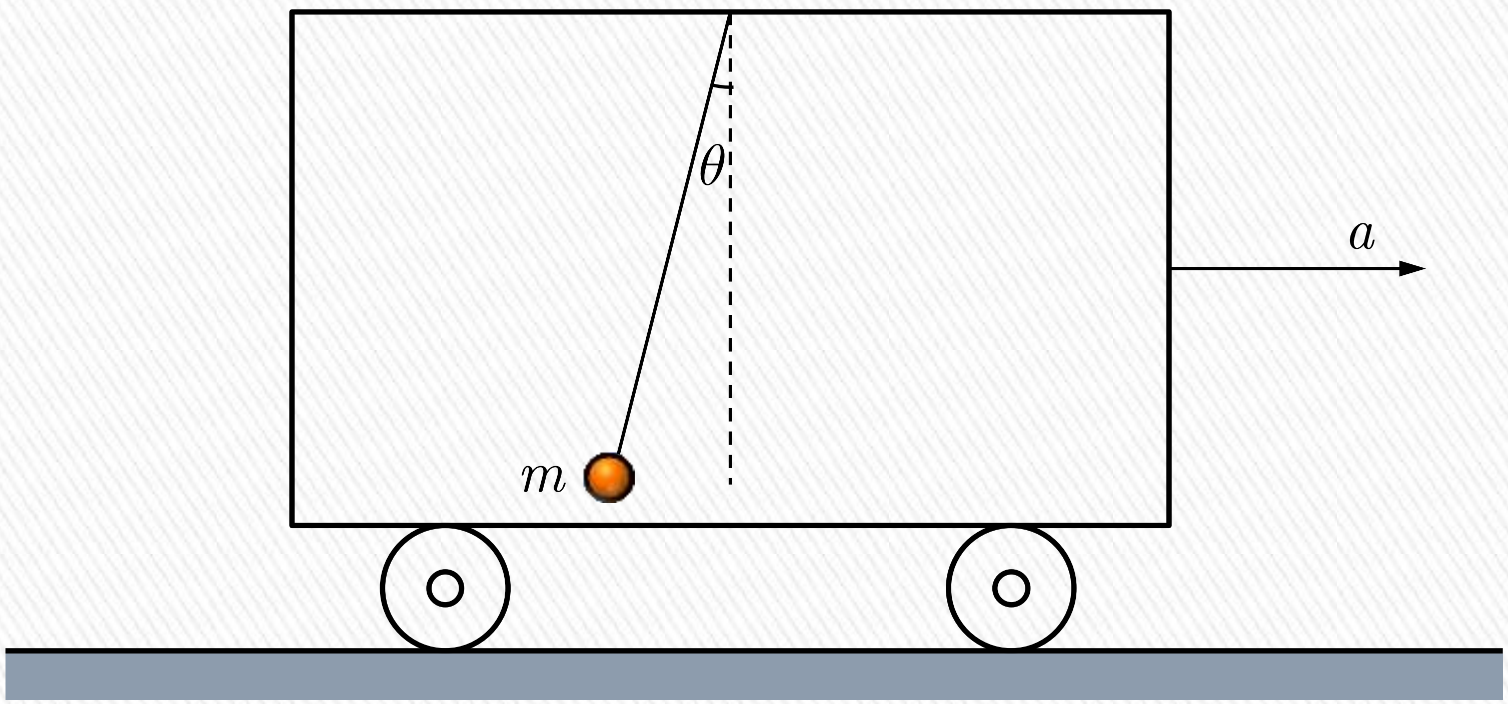
利用牛顿力学解题时，基本方法可归结为解题“三字经”：

认物体，看运动，查受力，列方程。

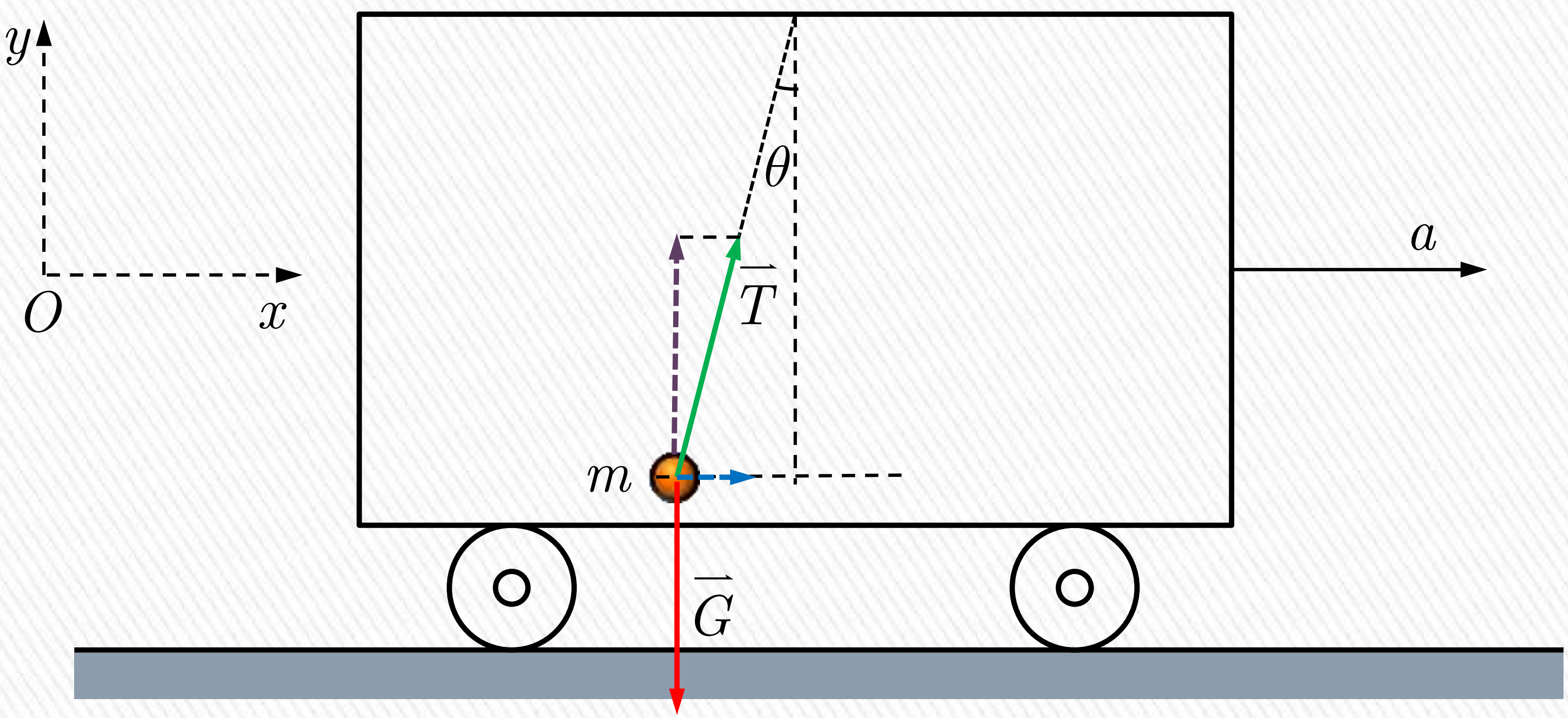
例：一辆车以加速度 a 做匀加速直线运动，一质量为 m 的小球用细绳悬挂于车厢顶部，试计算细绳与竖直方向的夹角。

1.认物体：小球

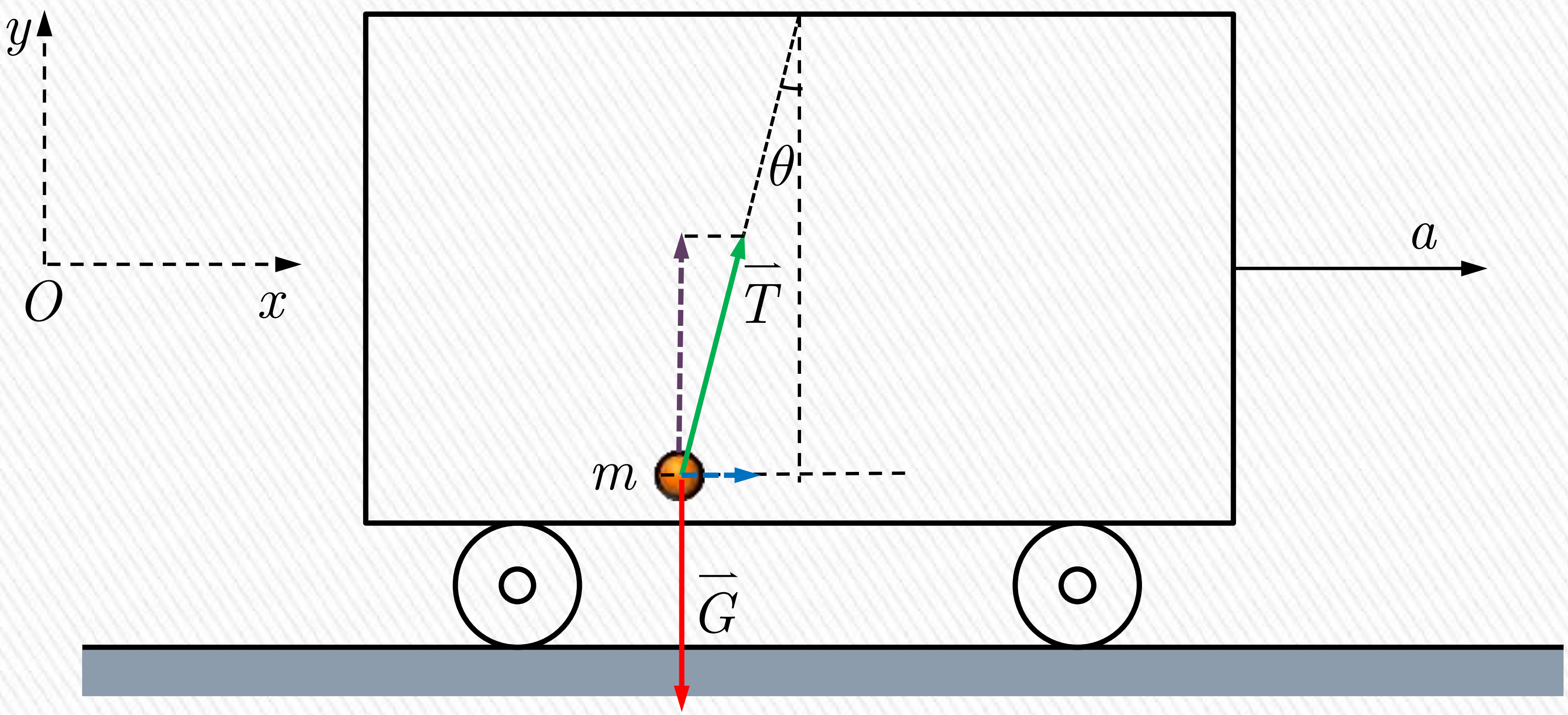
2.看运动：匀加速直线运动



3. 查受力：绳子张力 $\vec{T}$ ，重力 $\vec{G}$



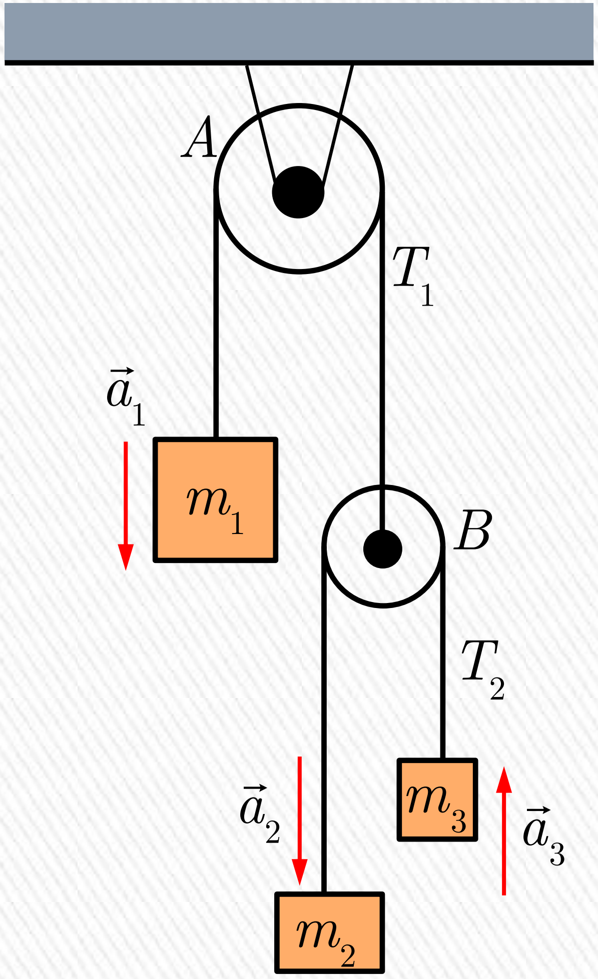
4. 列方程，动力学基本关系：$\vec{F} = m\vec{a}$



$$\begin{cases} x\text{ 方向：}\quad T\sin\theta = ma \\ y\text{ 方向：}\quad T\cos\theta - mg = 0 \end{cases}$$

解方程组 ⇒ $\theta = arc\tan\dfrac{a}{g}$

P70 习题2.5：如图所示，A为定滑轮，B为动滑轮，3个物体的质量分别为 $m_1 = 200$ g, $m_2 = 100$ g 和 $m_3 = 50$ g。忽略绳子的质量、伸长量和绳与滑轮的摩擦，(1) 求每个物体的加速度；(2) 求两根绳中的张力 T_1 和 T_2 。



解：设 3 个物体的加速度分别为 $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ ，方向如图：

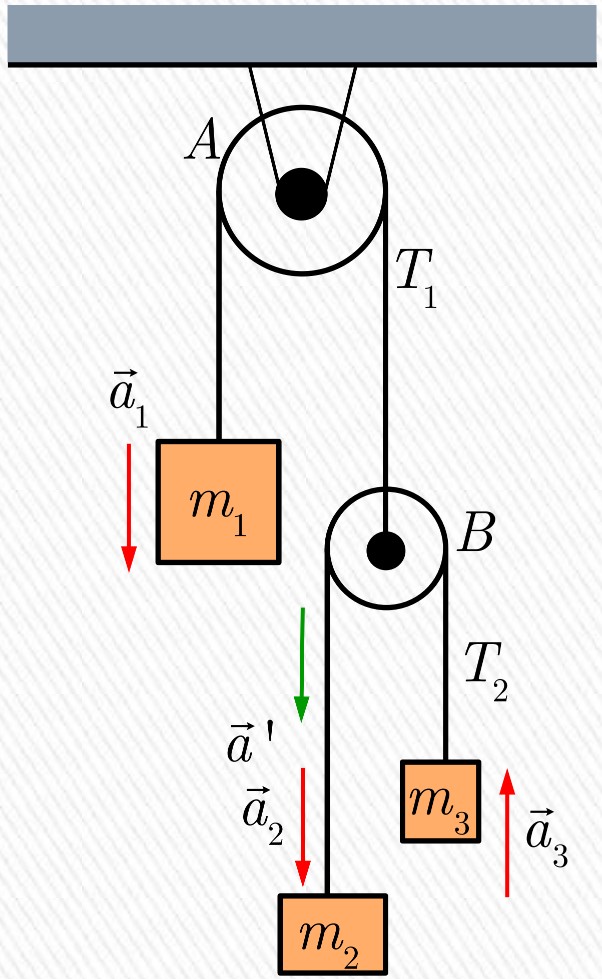
$$\begin{cases} m_1\ \text{受力分析：}\ m_1 g - T_1 = m_1 a_1 \\ m_2\ \text{受力分析：}\ m_2 g - T_2 = m_2 a_2 \\ m_3\ \text{受力分析：}\ m_3 g - T_2 = -m_3 a_3 \\ \text{滑轮受力分析：}\ T_1 = 2T_2 \end{cases}$$

5个未知量 a_1, a_2, a_3, T_1, T_2 只有4个方程，无法得到唯一解，因此还需要找到一个方程。

P70 习题2.5：如图所示，A为定滑轮，B为动滑轮，3个物体的质量分别为 m_1 = 200 g, m_2 = 100 g 和 m_3 =50 g。忽略绳子的质量、伸长量和绳与滑轮的摩擦，(1) 求每个物体的加速度；(2) 求两根绳中的张力 T_1 和 T_2 。

解(续)：以 $\vec{a}\,'$ 表示 m_2 对滑轮 B 的加速度，研究 m_2 和 m_3 ，得到第 5 个方程：

$$\begin{cases} a_2 = a' - a_1 \\ a_3 = a' + a_1 \end{cases} \Rightarrow a_3 - a_2 = 2a_1$$

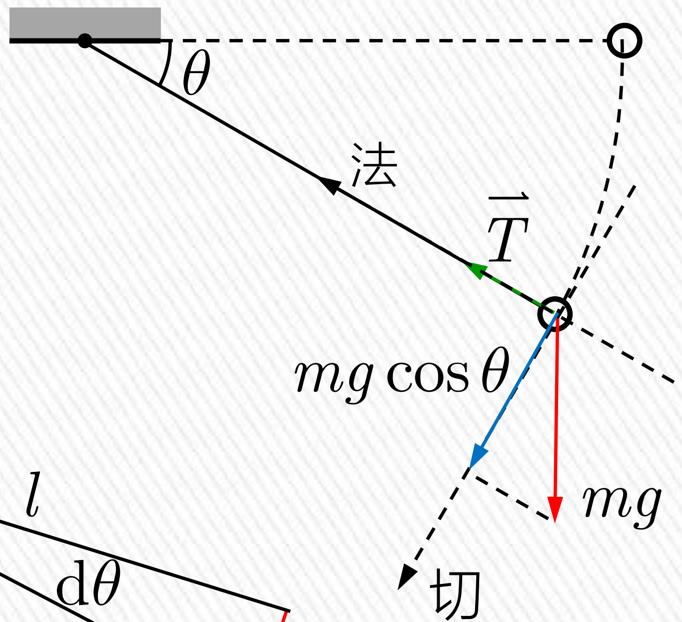


联立5个方程，即可解出5个未知量 a_1, a_2, a_3, T_1, T_2 。

$$\begin{cases} m_1 g - T_1 = m_1 a_1 \\ m_2 g - T_2 = m_2 a_2 \\ m_3 g - T_2 = -m_3 a_3 \\ T_1 = 2T_2 \\ a_3 - a_2 = 2a_1 \end{cases}$$

P54 例2.3 (课本解法，分解为切向和法向)

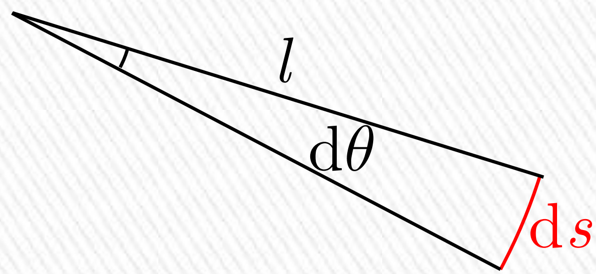
一个质量为 m 的珠子系在线的一端，线的另一端绑在墙上的钉子上，线长为 l。先拉动珠子，使线保持水平静止，然后松手使珠子下落。求线摆下至 θ 角时，珠子的速率和线的张力。



解：当线摆下至 θ 角时，对珠子进行切向受力分析得：

$$mg\cos\theta = ma_t = m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \Rightarrow g\cos\theta = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$

等式两边同时乘以弧微元 $\mathrm{d}s$：



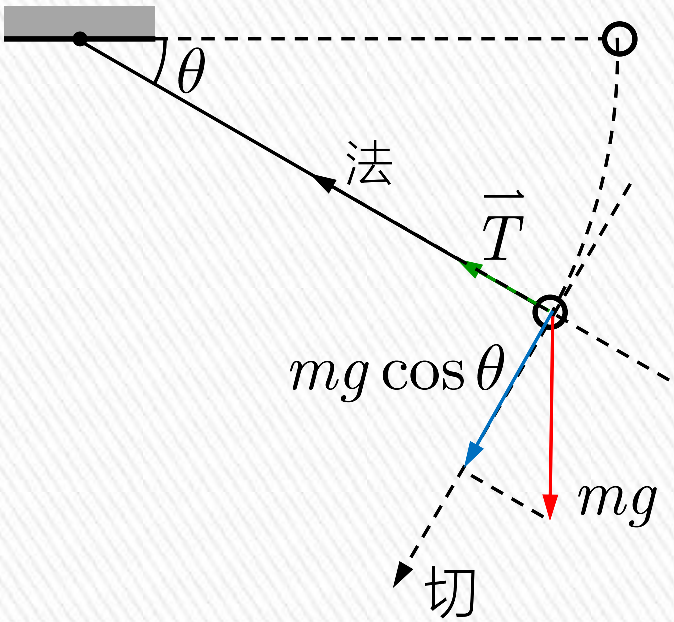
$$g\cos\theta\,\mathrm{d}s = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}s$$

左边= $gl\cos\theta\,\mathrm{d}\theta$ ，右边= $v\mathrm{d}v$ ，即 $gl\cos\theta\,\mathrm{d}\theta = v\mathrm{d}v$ 。

P54 例2.3 (课本解法，分解为切向和法向)

一个质量为 m 的珠子系在线的一端，线的另一端绑在墙上的钉子上，线长为 l。先拉动珠子，使线保持水平静止，然后松手使珠子下落。求线摆下至 θ 角时，珠子的速率和线的张力。

解(续)：对 $gl\cos\theta \mathrm{d}\theta = v\mathrm{d}v$ 左右两边进行积分，注意积分限保持物理上的一致：



$$\int_0^{\theta} gl\cos\theta \mathrm{d}\theta = \int_0^{v_\theta} v\mathrm{d}v$$

积分得：

$$gl\sin\theta = \frac{1}{2}v_\theta^{\ 2} \Rightarrow v_\theta = \sqrt{2gl\sin\theta}$$

再对珠子进行法向受力分析得：

$$T - mg\sin\theta = m\frac{v_\theta^{\ 2}}{l} \Rightarrow T = m\frac{v_\theta^{\ 2}}{l} + mg\sin\theta = 3mg\sin\theta$$

2.5 非惯性系与惯性力

» **惯性系和非惯性系**

如果在某个参考系中，一个物体不受力，则该物体保持静止或匀速直线运动状态。那么这个参考系就是**惯性系**。

或者说，牛顿第一定律成立的参考系就是惯性系。

反之，如果牛顿第一定律在某个参考系中不成立，则该参考系为**非惯性系**。

» **牛顿定律的适用条件**

牛顿定律只在惯性系中成立，在非惯性系中不成立。

为了在非惯性系中使用牛顿运动定律解决问题，需要对它们做形式上的修正、补充。

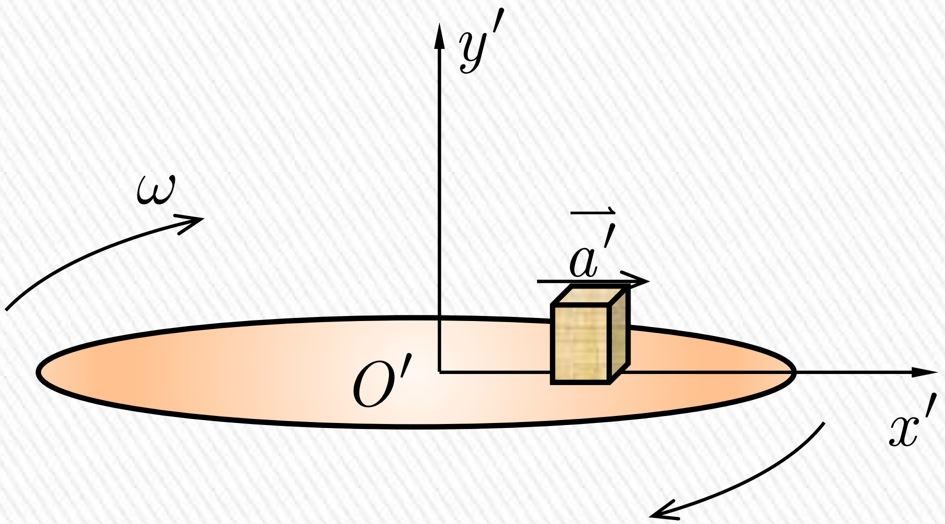
2.5 非惯性系与惯性力

» **例如：转动的粗糙圆盘上滑动的物块**

» 在随圆盘一起转动的 O' 系中观察，我们将会看到：

» 物块受到向内的摩擦力作用，但却向着盘边缘作加速运动。

» 牛顿运动定律在此时显然不成立了。



2.5 非惯性系与惯性力

» **如何判断一个参考系是惯性系还是非惯性系？**

实验的方法：利用实验进行测量。（单摆、抛射、天文观测等等）

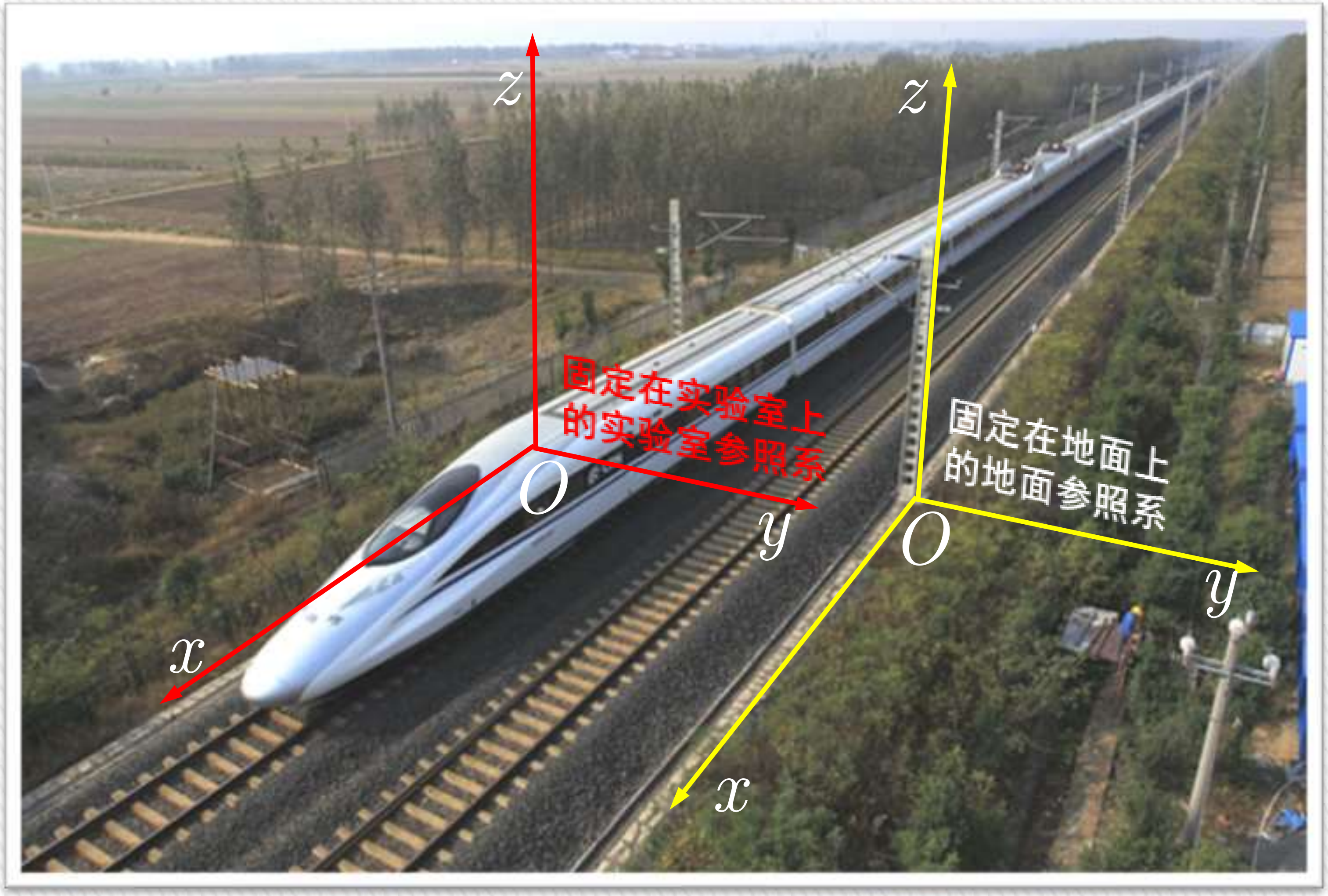
理论的方法：

如果一个未知参考系相对另一个已知的惯性系作匀速直线运动，那么这个未知参考系一定是惯性系；

反之，如果一个未知参考系相对另一个已知的惯性系作变速运动，那么这个未知参考系一定不是惯性系。

2.5 非惯性系与惯性力

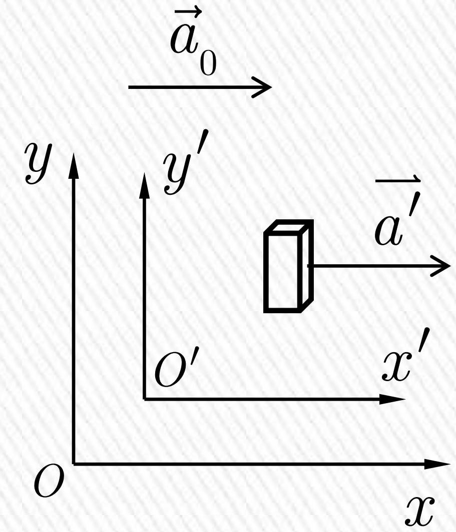
» 地面参考系和实验室参考系



2.5 非惯性系与惯性力

» 使牛顿定律在形式上依然成立的方法：(平动参考系，引入**惯性力**)

设有一惯性系 $S: xoy$ ，另一参考系 $S': x'o'y'$ 相对于 S 以加速度 $\vec{a}_0$ 进行平动。



设有一质量为 m 的质点，在惯性系 S 中受力 $\vec{F}$，加速度 $\vec{a}$ ；在参考系 S' 中的加速度为 $\vec{a'}$ ，由运动的相对性可知：

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

则有 $\vec{F} = m\left(\vec{a}_0 + \vec{a'}\right) \Rightarrow \vec{F} + \boxed{-m\vec{a}_0} = m\vec{a'}$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{\vec{F}} + \boxed{\vec{F}_i} = m\boxed{\vec{a'}}$$

实际存在的力

物体在非惯性系里的加速度

惯性力，是一个虚拟力

2.5 非惯性系与惯性力

» 使牛顿定律在形式上依然成立的方法：(转动参考系，引入**惯性离心力**，一个**虚拟力**)

设地面是一个惯性系，圆盘参考系 $S':x'o'y'$ 相对于地面以角速度 ω 进行转动。

在圆盘参考系 $S':x'o'y'$ 中引入**惯性离心力** $\vec{F}_i$ ：

$$\vec{F}+\vec{F}_i=m\vec{a'}$$

其中，$\vec{F}_i=m\omega^2\vec{r}$