



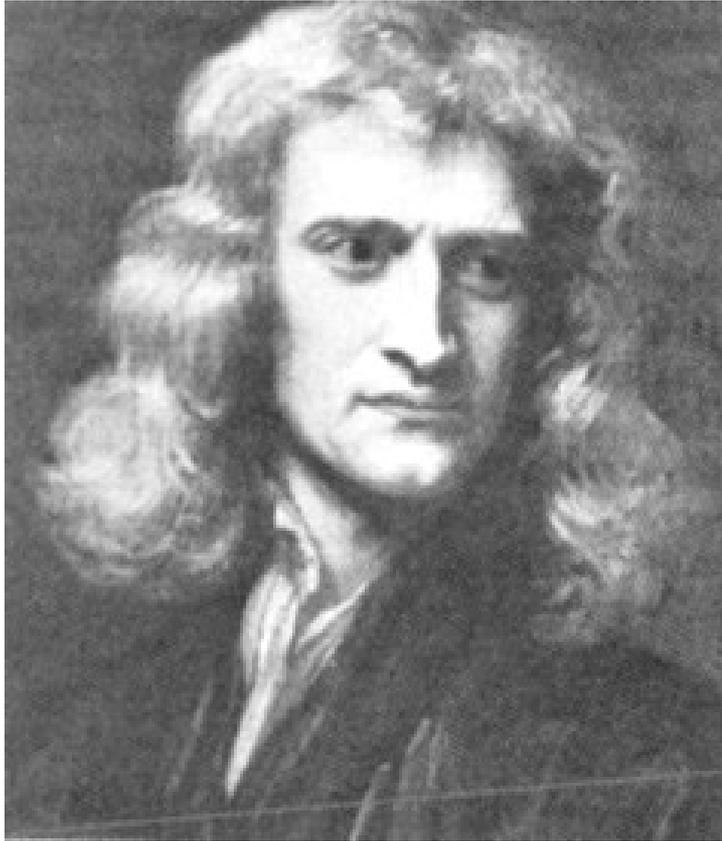
中原工学院

Zhongyuan University of Technology

2 牛顿定律

任课教师 [曾灏宪](#)

中原工学院 理学院



牛顿 **Issac Newton**
(1643—1727) 杰出的英国物理学家, 经典物理学的奠基人. 他的不朽巨著《自然哲学的数学原理》总结了前人和自己关于力学以及微积分学方面的研究成果. 他在光学、热学和天文学等学科都有重大发现.

大学物理（上）

2 牛顿定律

2.1 牛顿三定律

一 牛顿第一定律

任何物体都要保持其静止或匀速直线运动状态，直到外力迫使它改变运动状态为止。

数学形式： $\vec{F} = 0$ 时， $\vec{v} = \text{恒矢量}$

➤ 定义了物体的惯性

- 任何物体都有保持其运动状态不变的性质，这一性质叫惯性。

➤ 定义了力

- 力是物体运动状态发生变化的原因。

➤ 定义了惯性参照系

- 物体在某参考系中，不受其他物体作用而保持静止或匀速直线运动状态，这个参考系称为惯性系。相对惯性系静止或匀速直线运动的参照系也是惯性系。

二 牛顿第二定律

物体动量随时间的变化率 $d\vec{p}/dt$ 等于作用于物

体的合外力 $\vec{F} = \sum \vec{F}_i$ ，即

$$\star \quad \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}, \quad \vec{p} = m\vec{v}$$

★ 当 $v \ll c$ 时, m 为常量 $\vec{F} = m\vec{a}$

★ 牛顿第二定律只适用于质点的运动.

★ 质点所受合外力与获得的加速度为瞬时对应关系

★ 力的叠加原理

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots}{m} = \vec{a}_1 + \vec{a}_2 + \vec{a}_3 + \dots$$

★ 牛顿第二定律的数学表达式

一般表示

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$$

直角坐标表示

$$\left\{ \begin{aligned} F_x &= ma_x = m \frac{dv_x}{dt} \\ F_y &= ma_y = m \frac{dv_y}{dt} \end{aligned} \right.$$

自然坐标表示

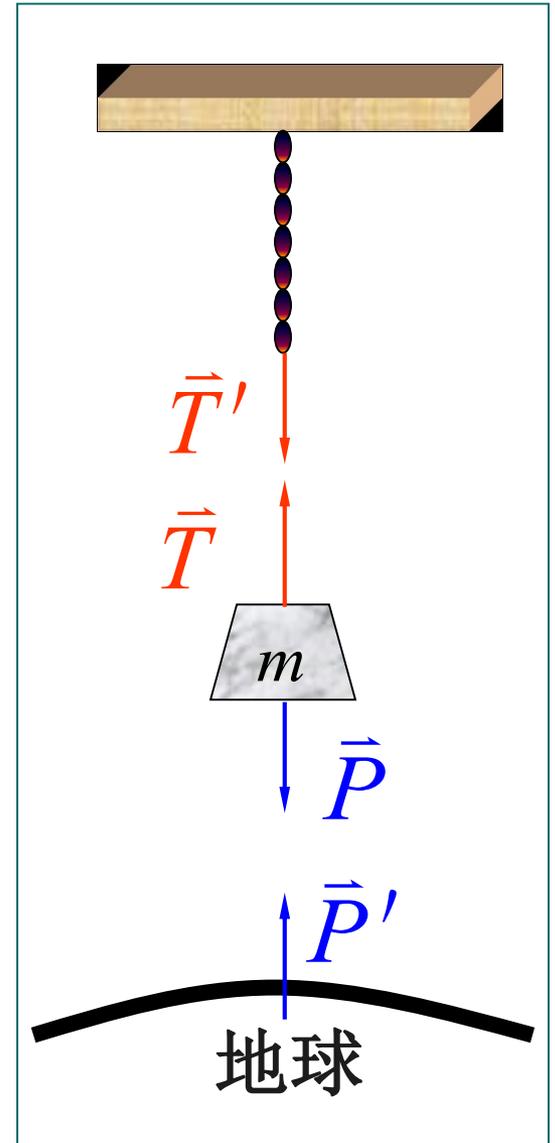
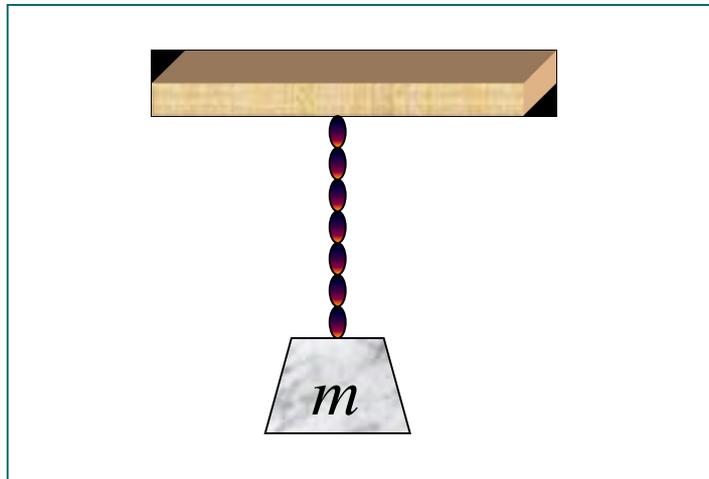
$$\left\{ \begin{aligned} F_t &= ma_t = m \frac{dv}{dt} = mr\alpha \\ F_n &= ma_n = m \frac{v^2}{r} = mr\omega^2 \end{aligned} \right.$$

三 牛顿第三定律

两个物体之间作用力 \vec{F} 和反作用力 \vec{F}' ，沿同一直线，大小相等，方向相反，分别作用在两个物体上。

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

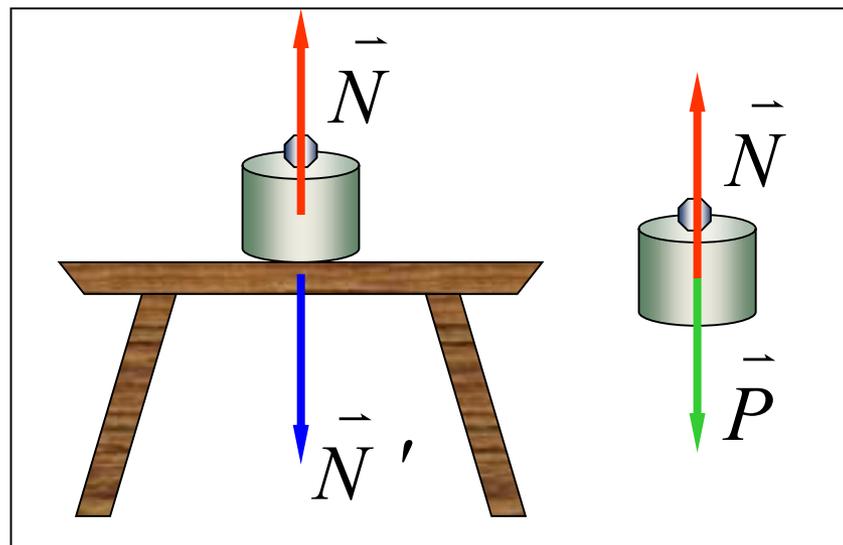
(物体间相互作用规律)



讨论:

理想光滑桌面上的约束力.

1. \vec{N} 的反作用力是什么?
2. 能否说 \vec{N}' 就是砝码的重力传下来的, 它们是一回事吗?



3. 砝码所受重力的反作用力是什么?

注意

- 作用力和反作用力应是同一种力.
- 牛顿三定律只在惯性参考系中成立.

➤ 牛顿三定律的研究对象是单个物体(质点). 若研究对象较复杂, 必须将它各部分隔离开来, 分别进行研究.

大学物理（上）

2 牛顿定律

2.2 物理量的单位和量纲

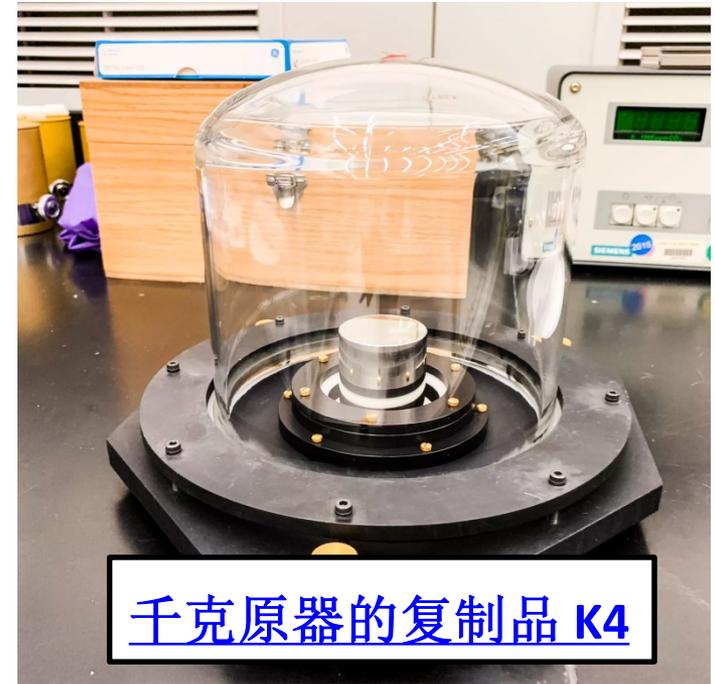
1984年2月27日，我国国务院颁布实行以国际单位制（SI）为基础的法定单位制。

力学的
基本单位

物理量	长度	质量	时间
单位名称	米	千克	秒
符号	m	kg	s

- ◆ **1m** 是光在真空中在（ $1/299792458$ s）内所经过的距离。
- ◆ **1s** 是铯的一种同位素 ^{133}Cs 原子发出的一个特征频率光波周期的 9192631770 倍。
- ◆ **“千克标准原器”** 是用铂铱合金制造的一个金属圆柱体，保存在巴黎度量衡局中。

- 国际千克原器（**International Prototype Kilogram (a.k.a. Big K, or Le Grand K)**），自1889年以来一直存在巴黎的 **International Bureau of Weights and Measures**。
- 从诞生以来已经消失了大约 **50 微克**。
- **2018.11.16 投票**决定更改【**千克**】的定义。（国际度量衡大会 **General Conference on Weights and Measures**）
- 新定义（**2019.05.20 生效**）：
根据精确的 **Planck** 常数值
 $6.62607015 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
来确定。（由秒和米来定义千克）



导出量

速率 $v = ds / dt$ $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ m/s}$

力 $\vec{F} = m \vec{a}$ $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

功 $dW = \vec{F} \cdot d\vec{r}$ $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$

实际时间过程的时间

宇宙年龄 \longrightarrow 约 $4.35 \times 10^{17} \text{ s}$ (138.2亿年)

地球公转周期 \longrightarrow $3.2 \times 10^7 \text{ s}$

人脉搏周期 \longrightarrow 约 0.9 s

最短粒子寿命 \longrightarrow 10^{-25} s

长度实例 / m		质量实例 / kg	
可观察宇宙半径	10^{26}	宇宙	约 10^{53}
地球半径	6.4×10^6	太阳	2.0×10^{30}
地球到太阳距离	1.5×10^{11}	地球	6.0×10^{24}
说话声波波长	约 4×10^{-1}	雨点	约 10^{-6}
原子半径	约 10^{-10}	最小病毒	9×10^{-14}
质子半径	约 10^{-15}	电子（静止）	9.1×10^{-31}
夸克半径	约 10^{-20}	光子（静止）	0

量纲

- 定义：表示一个物理量如何由基本量的组合所形成的式子。

某一物理量 Q 的量纲

$$\dim Q = L^p M^q T^s$$

- 量纲作用

- 1) 可定出同一物理量不同单位间的换算关系。
- 2) 量纲可检验文字结果的正误。
- 3) 从量纲分析中定出方程中比例系数的量纲和单位。

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad G = \frac{Fr^2}{m_1 m_2} \quad \dim G = L^3 M^{-1} T^{-2}$$

“从运动的现象去研究自然界中的力，然后从这些力去说明其他现象”。
牛顿定律是以力的概念为核心的。

大学物理（上）

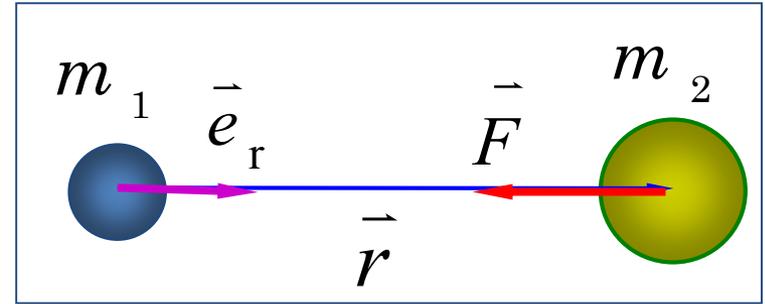
2 牛顿定律

2.3 几种常见的力

一 万有引力

- 物体间的万有引力:

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{e}_r$$



万有引力常数: $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$

- 万有引力定律适用于两个质点.
- 重力: 地球对地面附近物体的万有引力.

$$\vec{P} = m \vec{g}$$

$$g = Gm_E / r^2 \approx Gm_E / R^2 = 9.82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

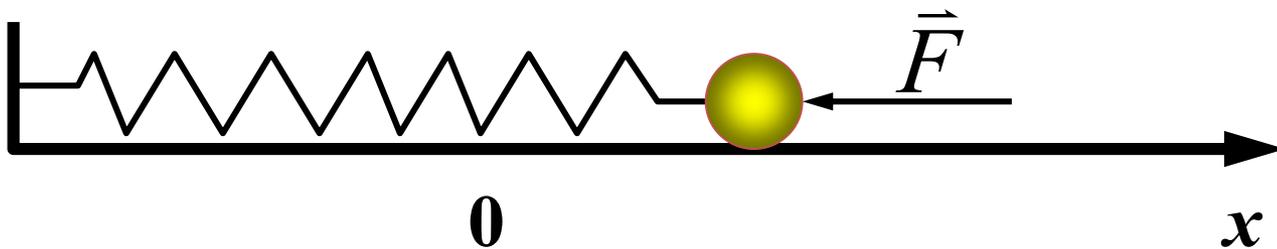
二 弹性力

(压力、支持力、张力、弹簧弹性力等)

物体在受力形变时，有恢复原状的趋势，这种抵抗外力，试图恢复原状的力就是弹性力。

压力、支持力的大小取决于相互挤压的程度，方向总是垂直于接触面并指向对方

➤ 在弹性限度内弹簧弹力遵从胡克定律 $F = -kx$



三 摩擦力

当相互接触的物体作相对运动或有相对运动的趋势时，它们中间所产生的阻碍相对运动的力称为摩擦力。

➤ 湿摩擦

- 液体内部或液体和固体表面的摩擦。

➤ 干摩擦

- 固体表面之间的摩擦。
- 可分为
 - 滑动摩擦
 - 静摩擦
 - 滚动摩擦

滑动摩擦力

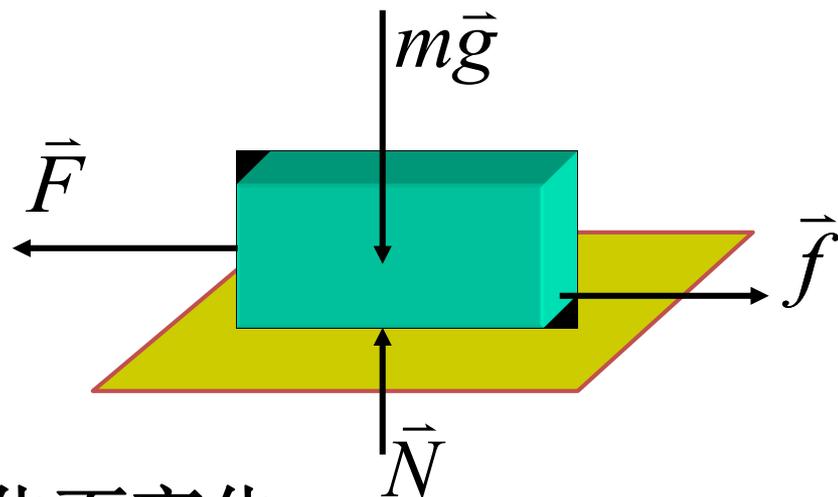
摩擦系数

$$F_f = \mu F_N$$

接触面间正压力

静摩擦力

$$0 < F_{f0} \leq F_{f0m}$$



静摩擦力的大小随外力的变化而变化。

最大静摩擦 $F_{f0m} = \mu_0 F_N$

一般情况 **滑动** 摩擦系数 $\mu \approx \mu_0$ **静** 摩擦系数

四种基本相互作用

力的种类	相互作用的粒子	力的强度	力程
万有引力	一切质点	10^{-38}	无限远
弱相互作用	大多数粒子	10^{-13}	$< 10^{-17}$ m
电磁力	电荷	10^{-2}	无限远
强相互作用	核子、介子等	1 *	10^{-15} m

* 以距源 10^{-15} m 处强相互作用的力强度为 1

大学物理（上）

2 牛顿定律

2.4 牛顿定律应用举例

解题的基本思路

- 1) 确定研究对象进行受力分析；
(隔离物体，画受力图，不要画力的分解图。)
- 2) 取坐标系；
- 3) 列方程（一般用分量式，用文字符号列方程式；根据定义、定理、原理等）；
- 4) 利用其它的约束条件列补充方程；
- 5) 先用文字符号求解，后代入数据计算结果。

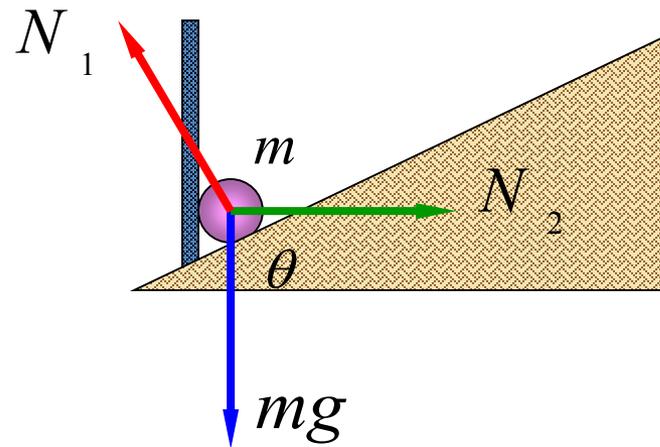
例：在倾角为 θ 的固定光滑的斜面上，放一质量为 m 的小球，球被竖直的木板挡住，当竖直木板被迅速拿开的瞬间，小球获得的**加速度**

(A) $g \sin \theta$

(B) $g \cos \theta$

★ (C) $g \tan \theta$

(D) $\frac{g}{\cos \theta}$



$$N_1 \cos \theta = mg$$

$$N_1 \sin \theta = N_2$$

竖直木板抽走时， N_2 突然消失

$$a = \frac{N_2}{m} = \frac{N_1 \sin \theta}{m} = g \tan \theta$$

例 在一只半径为 R 的光滑半球形碗内，有一质量为 m 的小球，当球以角速度 ω 在水平面内沿碗内壁作匀速圆周运动时，它离碗底有多高？

解： 设小球位置如图所示，受力分析得，

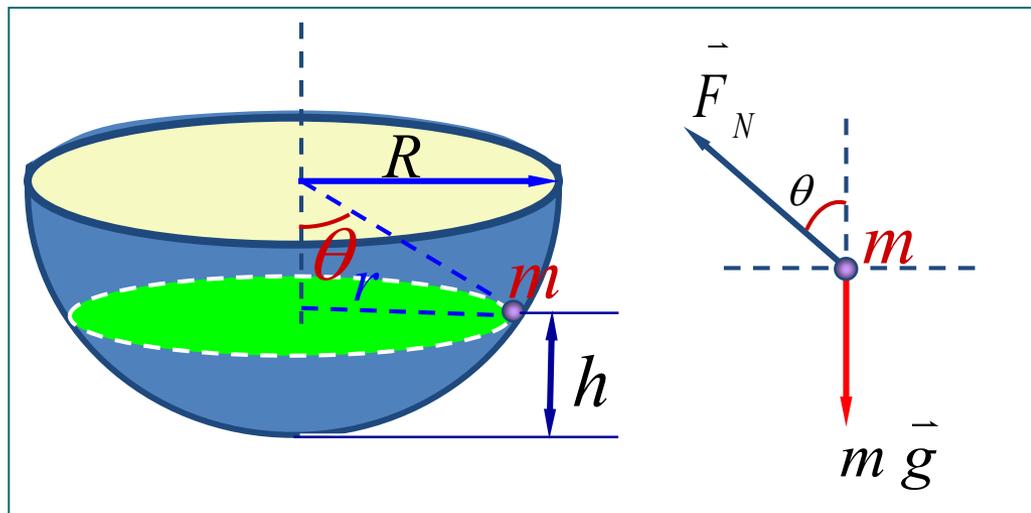
$$F_N \cos \theta = mg$$

$$F_N \sin \theta = m \omega^2 r$$

又，

$$r = R \sin \theta, \quad \cos \theta = \frac{R - h}{R}$$

$$h = R - \frac{g}{\omega^2}$$



例 已知一物体质量 m 沿水平方向运动，初速度为 v_0 ，所受的阻力为 $f = -kv$ ，求停止运动时，物体运动的距离。

解： $f = -kv = ma = m \frac{dv}{dt}$

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dx}$$

$$-kv = m v \frac{dv}{dx}$$

$$-\frac{k}{m} dx = dv$$

$$-\frac{k}{m} \int_0^x dx = \int_{v_0}^0 dv$$

$$-\frac{k}{m} x = -v_0$$

$$x = \frac{m}{k} v_0$$

例 如图长为 l 的轻绳，一端系质量为 m 的小球，另一端系于定点 O ， $t = 0$ 时小球位于最低位置，并具有水平速度 \vec{v}_0 ，求小球在任意位置的速率及绳的张力。

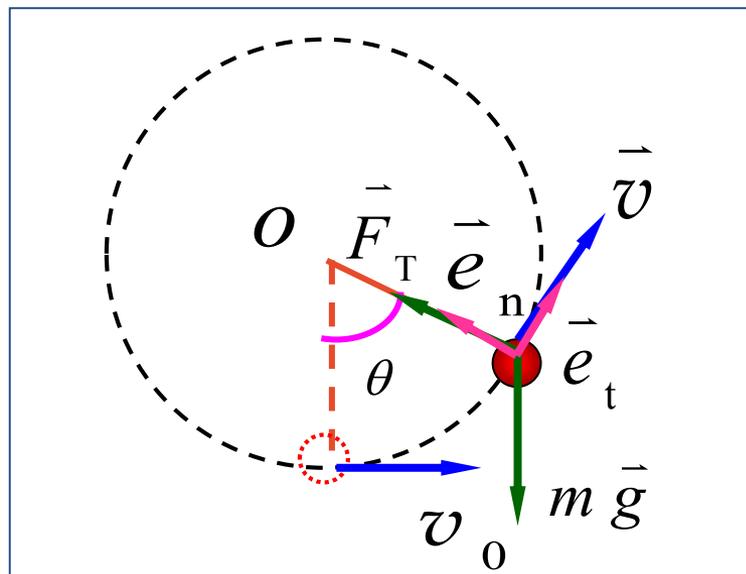
解
$$\begin{cases} F_T - mg \cos \theta = ma_n \\ -mg \sin \theta = ma_t \end{cases}$$

$$F_T - mg \cos \theta = m v^2 / l$$

$$-mg \sin \theta = m \frac{dv}{dt}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \frac{v}{l} \frac{dv}{d\theta}$$

$$\int_{v_0}^v v dv = -gl \int_0^\theta \sin \theta d\theta$$



$$v = \sqrt{v_0^2 + 2lg(\cos \theta - 1)}$$

$$F_T = m \left(\frac{v_0^2}{l} - 2g + 3g \cos \theta \right)$$

例 质量为 m 的物体，在 $F = F_0 - kt$ 的外力作用下沿 x 轴运动，已知 $t = 0$ 时， $x_0 = 0, v_0 = 0$ ，求：物体在任意时刻的加速度 a ，速度 v 和位移 x 。

解： $a = \frac{F}{m} = \frac{F_0 - kt}{m} = \frac{dv}{dt} \quad \therefore dv = \frac{F_0 - kt}{m} dt$

$$\int_0^v dv = \int_0^t \frac{F_0 - kt}{m} dt \quad v = \frac{F_0}{m} t - \frac{k}{2m} t^2$$

由 $v = \frac{dx}{dt}$ **有** $dx = v dt$

$$\int_0^x dx = \int_0^t \left(\frac{F_0}{m} t - \frac{k}{2m} t^2 \right) dt \quad x = \frac{F_0}{2m} t^2 - \frac{k}{6m} t^3$$

例 设有一质量为 $m = 2500\text{kg}$ 的汽车，在平直的高速公路上以每小时 120km 的速度行驶。若欲使汽车平稳地停下来，驾驶员启动刹车装置，刹车阻力是随时间线性增加的，即 $F_f = -bt$ ，其中 $b = 3500\text{N}\cdot\text{s}$ 。试问此车经过多长时间停下来。

解 汽车的加速度

$$a = -\frac{bt}{m}$$

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$\int dv = \int a dt$$

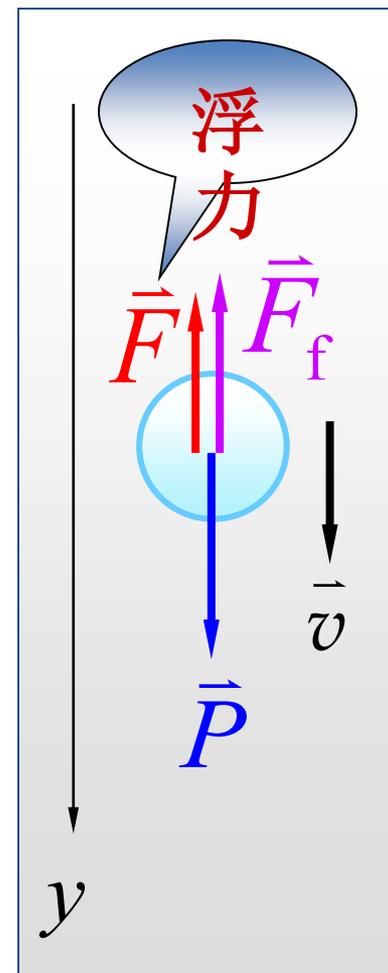
$$\int_{v_0}^0 dv = \frac{1}{m} \int_0^t (-bt) dt$$

$$t = \left(\frac{2v_0}{b} m \right)^{1/2} = 6.90 \text{ s}$$

思考： 在 6.90s 的时间里，汽车行进了多长的路程？

例 雨滴的收尾速度. 设半径为 r 质量为 m 的雨滴, 从距地面高空某处以速度 140m/s 落下 (相当于声速的 $1/3$). 如果这样的雨滴密集的打在人的身上, 将会对人造成很大的伤害. 幸好, 由于大气对雨滴的阻力作用, 使雨滴的落地速度大为减小, 并使雨滴匀速地落向地面, 这个速度也叫做**收尾速度**. 空气对雨滴的阻力 F_f 与很多因素有关, 作为一般计算, 常用从实验得到的经验公式即

$F_f = 0.87r^2v^2$, 式 r 和 v 中分别是雨滴的半径和速度. 试求雨滴的半径分别为 0.5mm 、 1.0mm 和 1.5mm 时的收尾速度是多少?



解: $F_f = 0.87 r^2 v^2$ 雨滴的密度为: $\rho_1 = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

空气的密度为 $\rho_2 = 1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

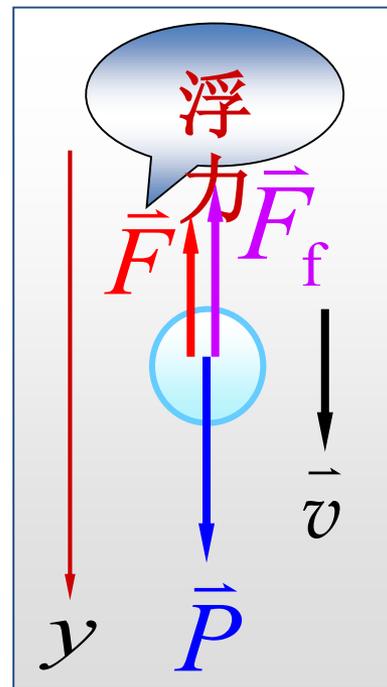
$$mg - F - F_f = m \frac{dv}{dt}$$

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_2 g - 0.87 r^2 v^2 = m \frac{dv}{dt}$$

$$\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_1 - \rho_2) g - 0.87 r^2 v^2 = m \frac{dv}{dt}$$

雨滴匀速时 $a = 0$

$$v_L = \left[\frac{4 \pi (\rho_1 - \rho_2) g}{3 \times 0.87} r \right]^{1/2} = \begin{cases} 4.86 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} & r = 0.5 \text{ mm} \\ 6.88 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} & r = 1.0 \text{ mm} \\ 8.41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} & r = 1.5 \text{ mm} \end{cases}$$



大学物理（上）

2 牛顿定律

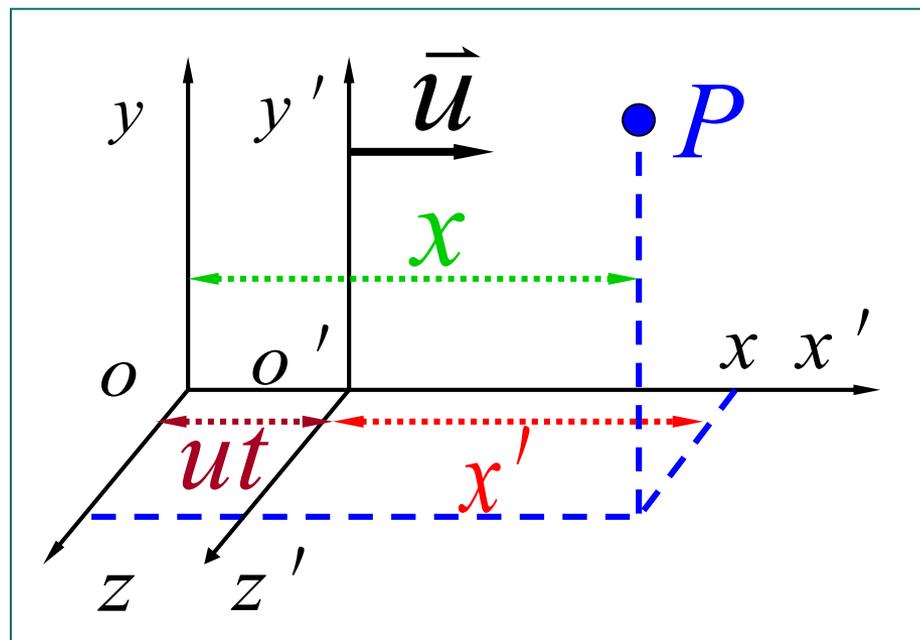
***2.5 力学相对性原理 非惯性系与惯性力**

一 力学相对性原理

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

$$\vec{u} \text{ 为常量} \quad \therefore \vec{a} = \vec{a}'$$

$$\vec{F} = m \vec{a} \quad \vec{F}' = m \vec{a}'$$



结论:

1) 凡相对于惯性系作**匀速直线运动**的一切参考系都是惯性系。

2) 对于**不同**的惯性系，牛顿力学的规律都具有**相同**的形式，与惯性系的运动无关。

——伽利略相对性原理

二 非惯性系和惯性力

1 非惯性系

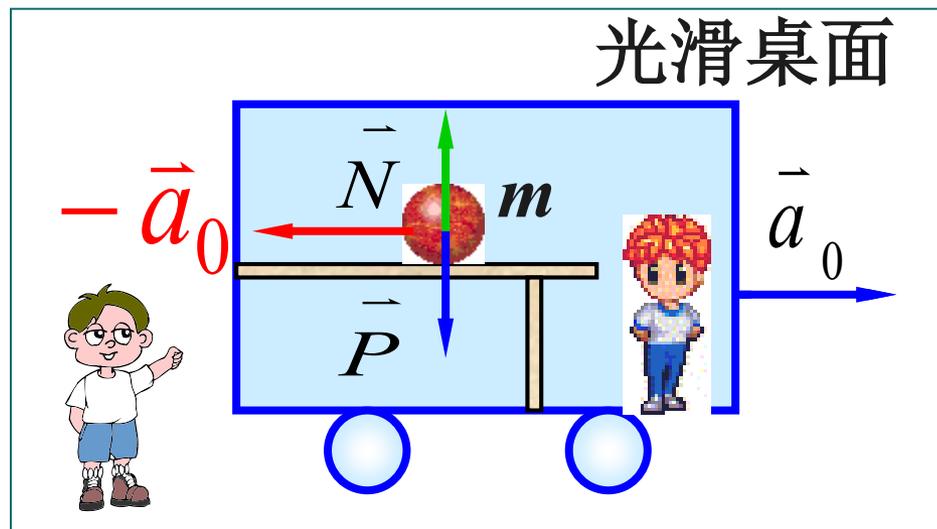
地面参考系：小球保持匀速直线运动。

$$\vec{F} = \vec{P} + \vec{N} = 0$$

车厢参考系：小球加速度为 $-\vec{a}_0$ 。

$$\vec{F} = \vec{P} + \vec{N} = 0 \neq m(-\vec{a}_0)$$

► **定义**：对某一特定物体，惯性定律成立的参考系叫做**惯性参考系**。相对惯性系作加速运动的参考系为**非惯性参考系**。



如何判断一个参考系是否惯性系？

相对已知惯性系**静止或匀速直线运动**的参考系是**惯性系**；相对已知惯性系**加速运动**的参考系是**非惯性系**。

实际处理：选择对所研究问题适宜的近似惯性系

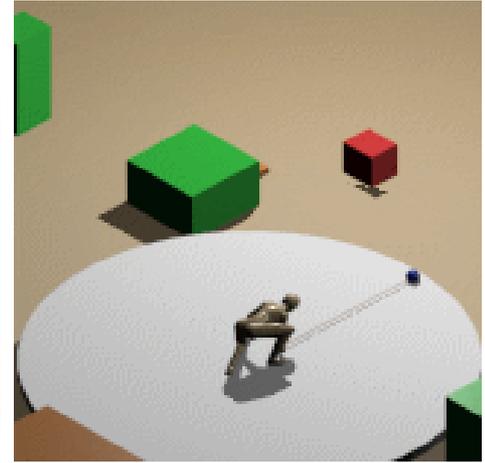
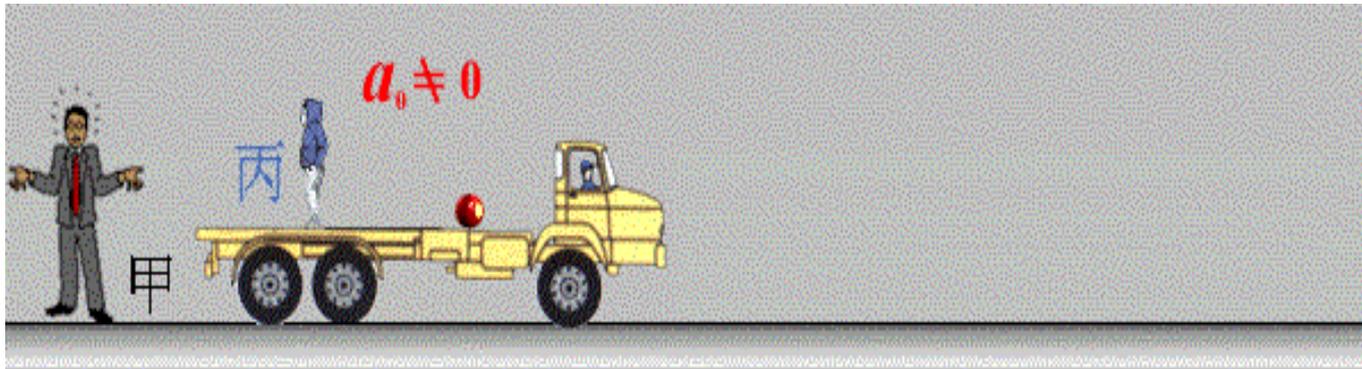
太阳绕银河系中心公转： $a_n = 1.8 \times 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

太阳参考系（恒星基准）：较好的惯性系

地球绕太阳公转： $a_n = 6 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

地心参考系（恒星基准）：近似的惯性系

对日常运动的研究和实验，地面可作为近似程度相当好的惯性系；而相对地面加速运动的参考系是非惯性系。



实际生活中存在大量非惯性系，分为两类：

加速平动参考系

转动参考系

} 其中牛顿运动定律不成立

问：此现象无法用牛顿定律说明，应如何解决？

2 惯性力— 惯性在非惯性系中的表现.

问题：如何在加速参考系（非惯性系）中借用牛顿定律形式研究物体的运动？

1). 加速平动参考系

↓
以加速度 \vec{a}_0 相对于惯性系 S 平动的非惯性系 S'

设想其中所有物体都受一虚拟力（惯性力）的作用

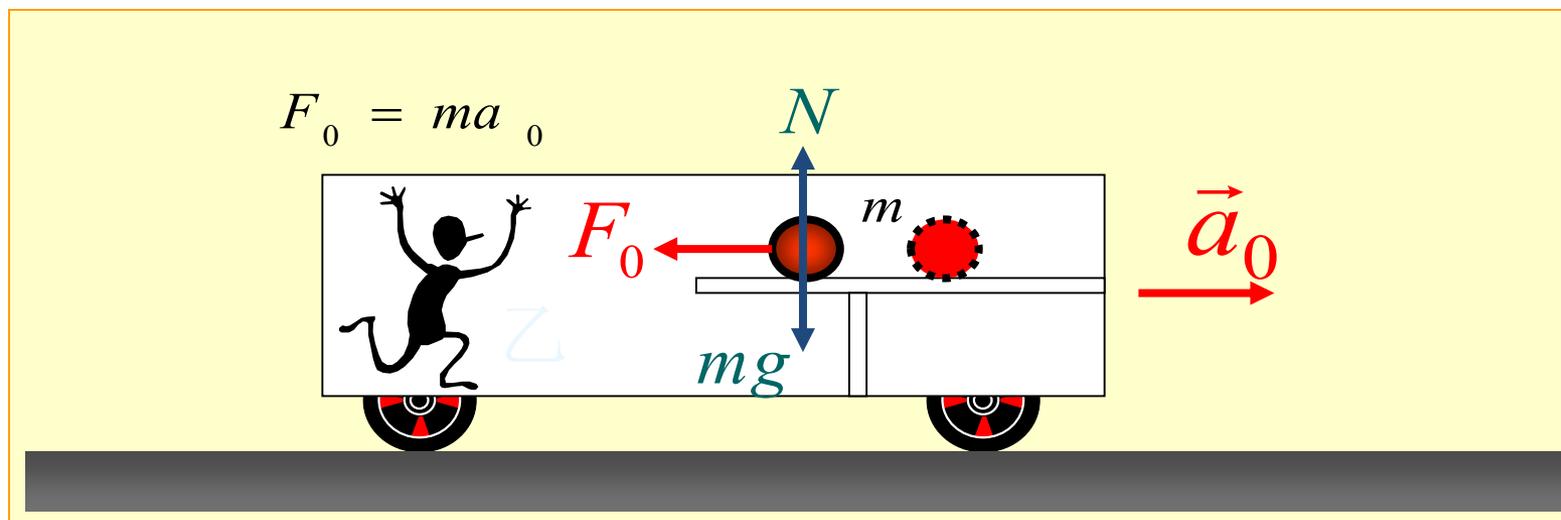
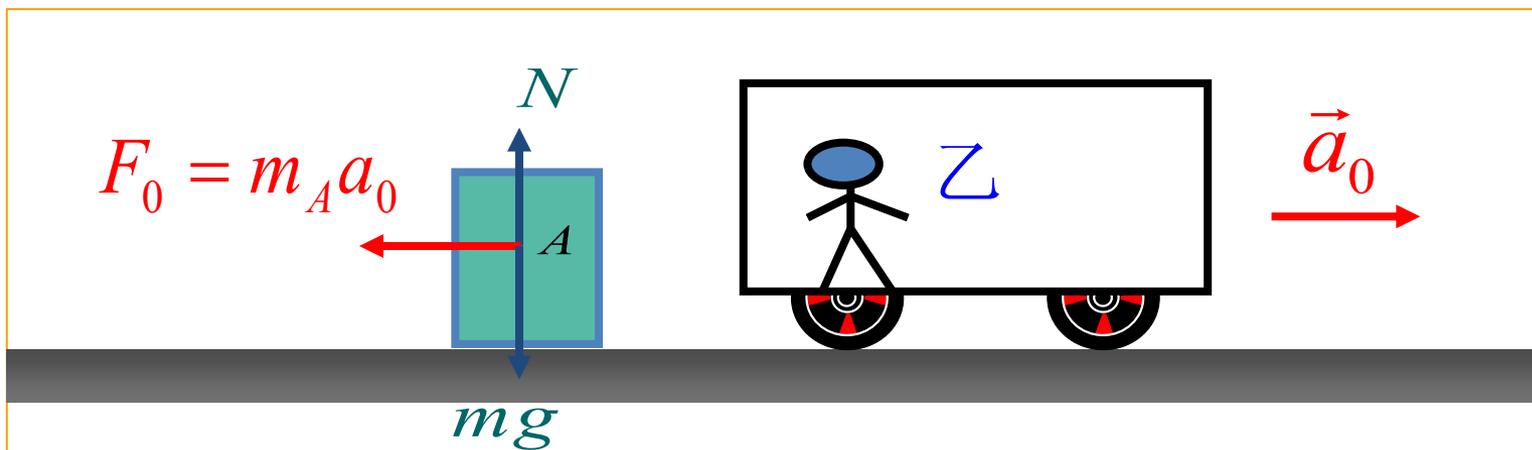
大小：物体质量与非惯性系对惯性系的加速度的乘积

方向：与非惯性系对惯性系的加速度方向相反

$$\vec{F}_{\text{惯}} = \vec{F}_0 = -m\vec{a}_0$$

性质：不是真实的力，无施力物体，无反作用力。

作用：引入惯性力后，在非惯性系中，牛顿第二定律形式上成立。



注意： 惯性力有真实效果，可以测量。

练习： 为什么要系安全带？（库柏 《物理世界》）

汽车： $v = 108 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

刹车： $\Delta t = 1\text{s}$ 内停下

$m = 70 \text{ kg}$ 乘客所受惯性力： $F_0 = ma_0 = 2100 \text{ N}$

无法靠静摩擦力平衡，必须系安全带。

非惯性系中的力学定律：

$$\vec{F}_{\text{合}} = \vec{F}_{\text{真}} + \vec{F}_{\text{惯}}$$

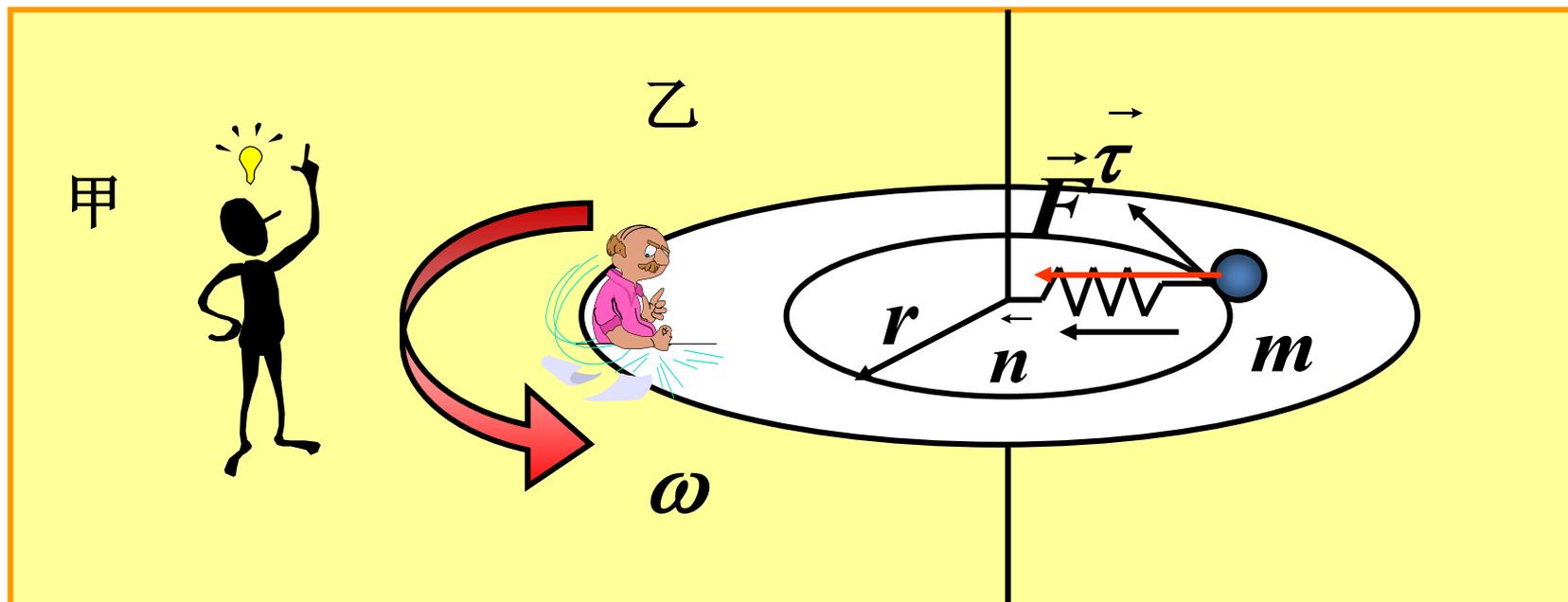
$$\vec{F}_{\text{合}} = \vec{F} + F_0 = \vec{F} + (-m\vec{a}_0) = m\vec{a}'$$

式中 \vec{a}' 为 m 相对于非惯性系的加速度。

与惯性系中的力学定律比较：

$$\vec{F}_{\text{真}} = m\vec{a}$$

2). 转动参考系

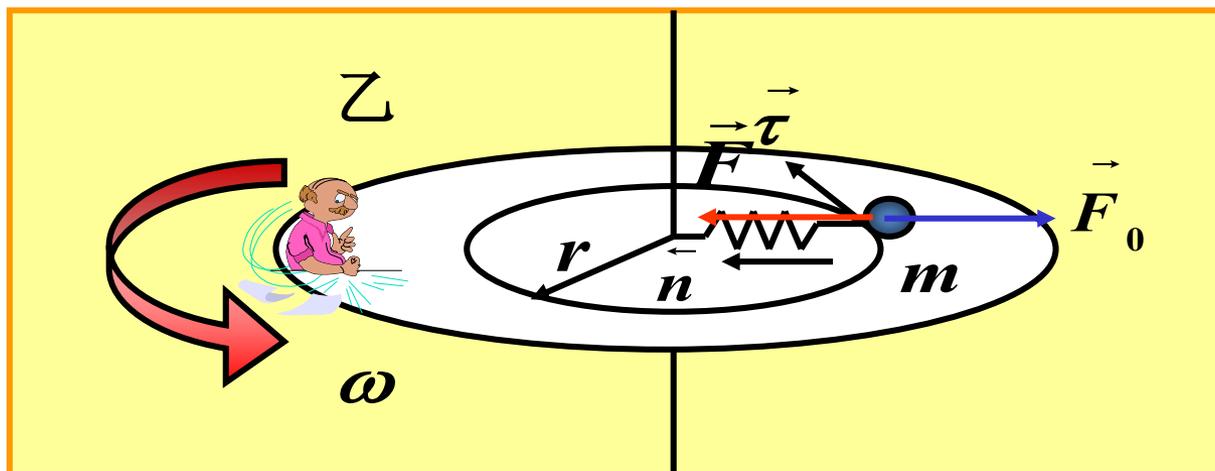


对甲：小球受弹力 $\vec{F} = m \omega^2 r \vec{e}_n$ 作圆周运动

对乙： m 受到弹性力 $\vec{F} = m \omega^2 r \vec{e}_n$ 的作用却不运动，

为什么？ 因为圆盘为非惯性系，牛顿定律不成立。

解决方法： m 除受到弹性力作用外，还受到一与圆盘向心加速度方向相反的惯性力的作用。



我们将在转动参考系中沿半径向外的惯性力称为
惯性离心力：

$$\vec{F}_0 = -m \omega^2 r \vec{e}_n$$

引入惯性离心力后，在转动参考系中可以用牛顿运动定律形式列方程。

作业

➤ **P42: 13; 14**

版权声明

本课件根据高等教育出版社《物理学教程（第二版）上册》（马文蔚 周雨青 编）配套课件制作。课件中的图片和动画版权属于原作者所有；部分例题来源于清华大学编著的“大学物理题库”；其余文字资料由 [Haoxian Zeng](#) 编写，采用 [知识共享 署名-相同方式共享 3.0 未本地化版本 许可协议](#) 进行许可。详细信息请查看[课件发布页面](#)。