§5.3 刚体绕定轴的转动

问题提出：

刚体绕定轴转动时作用力和运动之间的联系？

- 1.刚体的转动定律
- 2.力矩
- 3. 转动惯量及其计算

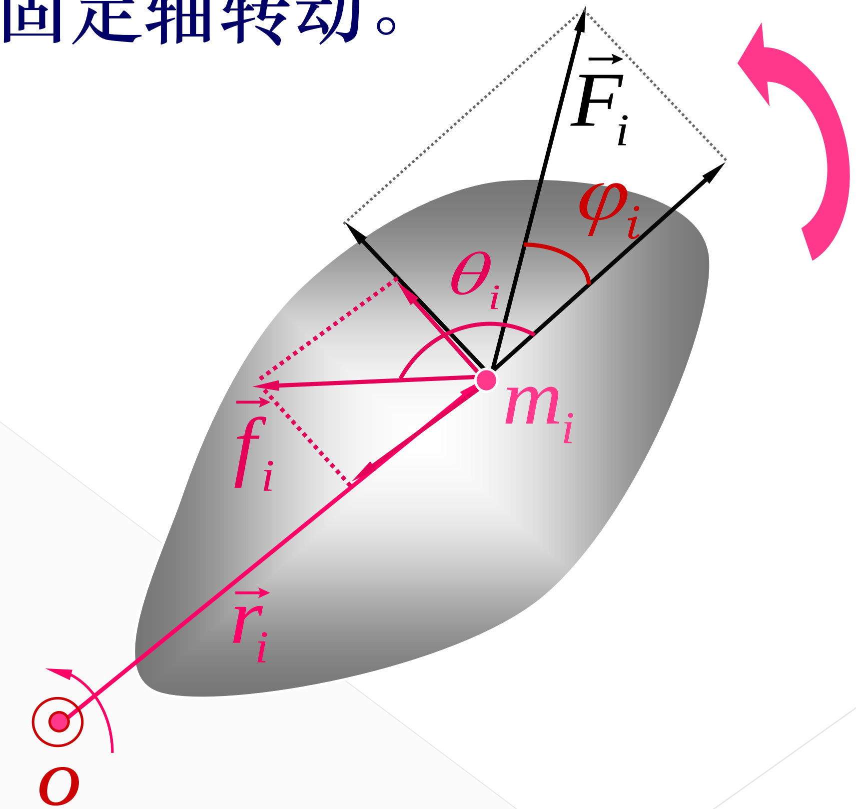
1. 转动定律

刚体绕过O点与图面垂直的固定轴转动。

m_i :刚体中任一质量元;

$\vec{F}_i$:该质量元所受合外力;

$\vec{f}_i$:该质量元所受合内力;



仅考虑受力处于与轴垂直的平面?

由牛顿第二定律：　$\vec{F}_i + \vec{f}_i = m_i \vec{a}_i$

写成分量形式：

$$\begin{cases} f_i \cos\theta_i + F_i \cos\varphi_i = m_i a_{in} = m_i r_i \omega^2 & \cdots(1) \\ f_i \sin\theta_i + F_i \sin\varphi_i = m_i a_{it} = m_i r_i \beta \cdots\cdots & (2) \end{cases}$$

对（2）式乘以r_i：

$$f_i r_i \sin\theta_i + F_i r_i \sin\varphi_i = m_i a_{it} = m_i r_i^2 \beta$$

对i求和：

$$\sum_i f_i r_i \sin\theta_i + \sum_i F_i r_i \sin\varphi_i = \sum_i m_i r_i^2 \beta$$

§ 5.3 刚体绕定轴的转动

$$\sum_i f_i r_i \sin\theta_i + \sum_i F_i r_i \sin\varphi_i = \sum_i m_i r_i^2 \beta$$

由内力的特性知： $\sum_i f_i r_i \sin\theta_i = 0$

故有：

$$\sum_i F_i r_i \sin\varphi_i = \beta \sum_i m_i r_i^2$$

令： $M_i = F_i r_i \sin\varphi_i$ 称为外力F_i对转轴的力矩；

$I = \sum_i m_i r_i^2$ 称为刚体对转轴的转动惯量；

$$\boxed{\sum_i M_i = I\beta}$$

$$\sum_i M_i = I\beta$$

以$M = \sum_i M_i$表示合外力矩则有：

$$\boxed{M = I\beta = I\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = I\frac{\mathrm{d}^2\varphi}{\mathrm{d}t^2}}$$

定轴转动定律：<u>刚体绕定轴转动时，作用在刚体上对与该轴的合外力矩等于刚体对与该轴的转动惯量和角加速度的乘积。</u>

以矢量形式表示：

$$\vec{M} = I\vec{\beta}$$

其中合力矩：

$$\vec{M} = \sum_i \vec{M}_i = \sum_i \vec{r}_i \times \vec{F}_i$$

转动惯量：

$$I = \sum_i m_i r_i^2$$

§ 5.3 刚体绕定轴的转动

➢ 讨论 $M = J\beta$

- 刚体定轴转动定律中的M是作用在刚体上的合外力矩；
- 刚体定轴转动定律是力矩的瞬时作用规律，也可以写成矢量关系式，即 $\vec{M} = J\vec{\beta}$
- 刚体定轴转动定律中的M、转动惯量 J和角加速度β三个物理量都是相对于同一转轴而言的；
- 刚体定轴转动定律是刚体定轴转动动力学的基本方程，如同质点力学中的 $\vec{F} = m\vec{a}$；

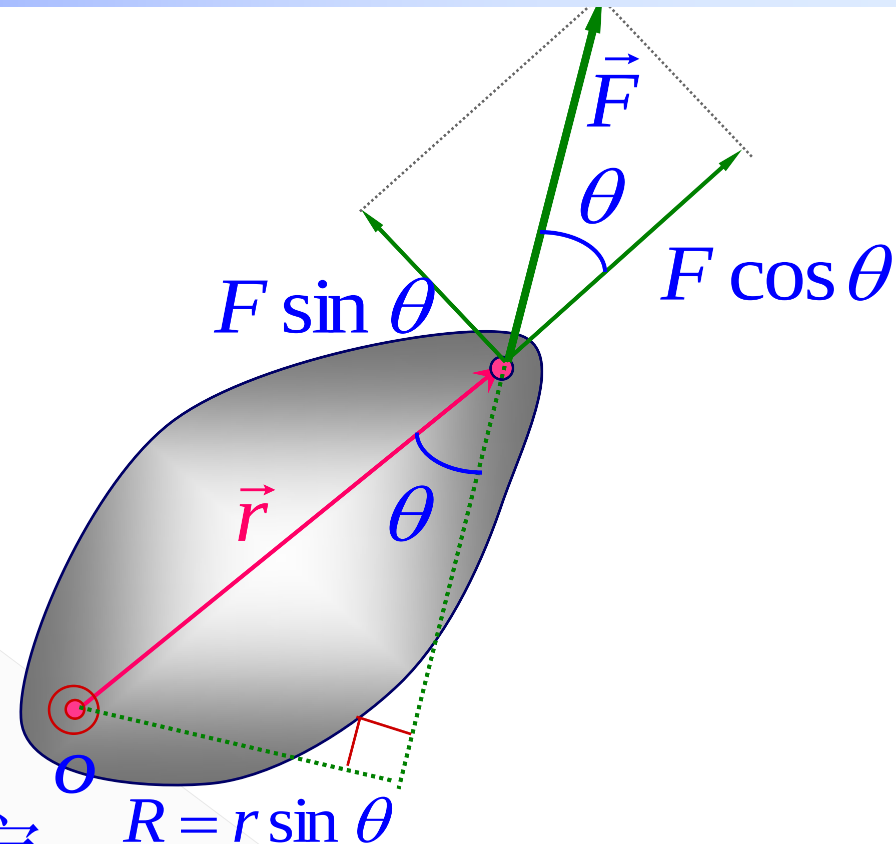
力矩是使刚体改变转动状态的原因，是使刚体转动产生角加速度的原因。

- 刚体定轴转动定律仅适用于惯性系。

2. 力矩

定义：力相对于某转轴的力矩，等于力的作用点相对于轴的矢径和作用力的叉乘。

$$\boxed{\vec{M}=\vec{r}\times\vec{F}}$$



大小：$M=rF\sin\theta=FR$

方向：由$\vec{r}$和$\vec{F}$用右手螺旋确定。

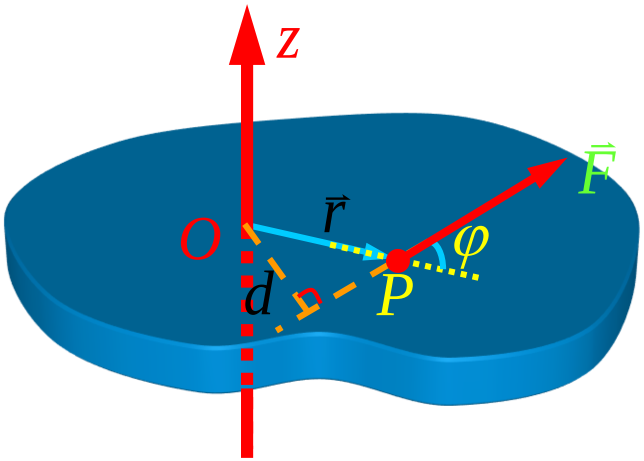
单位：$\mathrm{N\cdot m}$

量纲：$[\mathrm{M}]=\mathrm{ML^2T^{-2}}$

特性：力矩是矢量。力矩的和不等于合力的力矩。每个力的力矩和力的作用点有关。

§ 5.3 刚体绕定轴的转动

力的大小、力的方向和力的作用线相对于转轴的位置是决定刚体转动效果的重要因素。

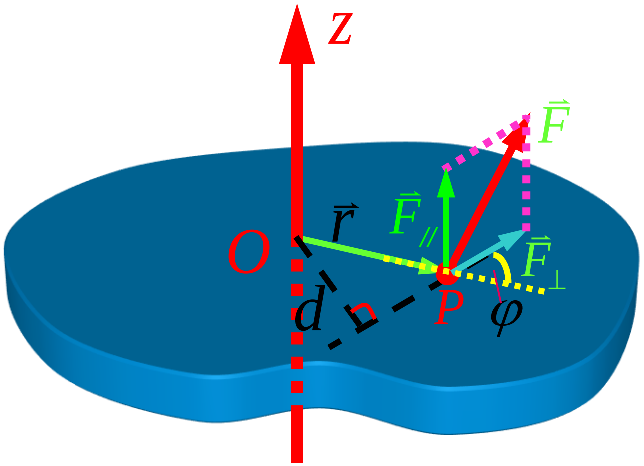


- 若刚体所受力 $\vec{F}$ 在转动平面内

  力臂： $d = r\sin\varphi$

  力 $\vec{F}$ 对转轴z的力矩： $M_z = \pm Fd = \pm Fr\sin\varphi$

- 若刚体所受力 $\vec{F}$ 不在转动平面内



  平行于转轴 $\vec{F}_{//}$ 分量不能使刚体发生转动

  在定轴转动中，只有 $\vec{F}_{\perp}$ 起作用

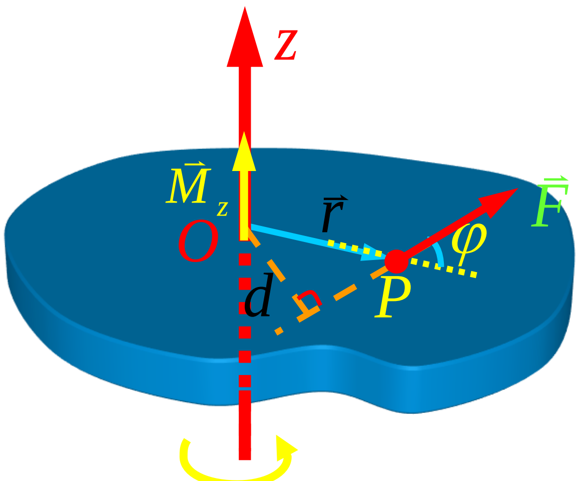
  力 $\vec{F}_{\perp}$ 对转轴z的力矩

$$M_z = \pm F_{\perp} d = \pm F_{\perp} r\sin\varphi$$

§ 5.3 刚体绕定轴的转动

- 对于刚体的定轴转动，力矩M_z可看成是**代数量**。力矩的正负由右手螺旋法则确定。

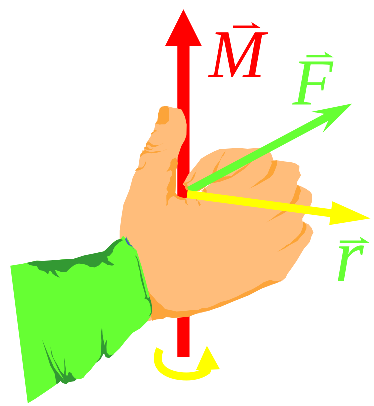
从z 轴正端向负端看，若力F 使刚体沿逆时针方向转动，则力矩M_z为正，反之为M_z为负。



- 几个作用力同时作用在一个绕固定轴转动的刚体上时，合力矩等于这几个力各自的**力矩的代数和**。

- 对于刚体的定轴转动，力矩M_z也可认为是**矢量**。即 $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$

方向：满足右手螺旋法则。



3. 转动惯量及其计算

定义：

$$\boxed{I=\sum_i m_i r_i^2=\int r^2 \mathrm{d}m=\int \rho r^2 \mathrm{d}V}$$

单位：$\mathrm{kg\cdot m^2}$　　量纲：$[\mathrm{M}]=\mathrm{ML}^2$

特性：

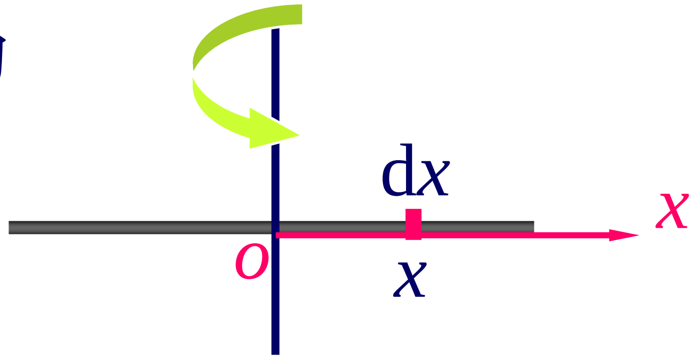
（1）转动惯量是标量，它是反映刚体转动惯性的物理量。

（2）它是相对于某一特定的转轴而言的，转轴不同转动惯量不同。

（3）它与刚体的质量和质量的分布有关。

转动惯量的计算

（1）垂直细棒通过质心轴的转动惯量。棒长l，总质量m。



设棒的线密度为：$\eta = \dfrac{m}{l}$

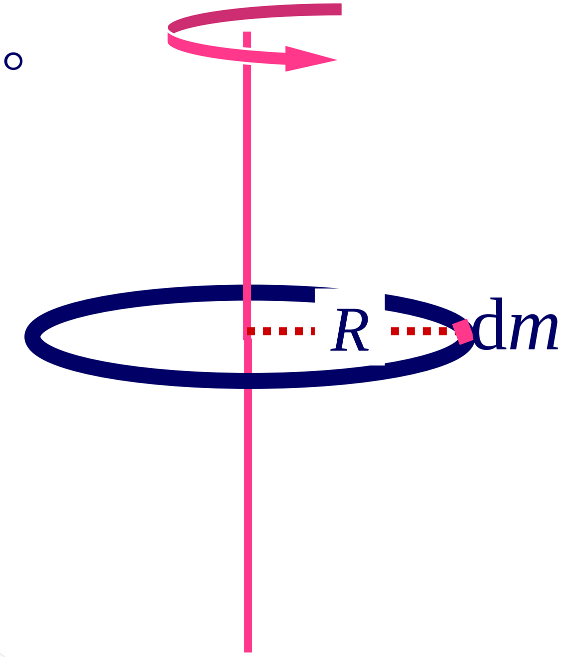
$$I = \int x^2 \mathrm{d}m$$

则有：$I = \int x^2 \mathrm{d}m = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} x^2 \eta \mathrm{d}x$

$$= 2\eta \int_0^{\frac{l}{2}} x^2 \mathrm{d}x$$

$$= \frac{1}{12}\eta l^3 = \frac{1}{12} m l^2$$

（2）均匀薄圆环绕中心垂直转轴轴的转动惯量。半径R，总质量m。



$$I=\int r^2\mathrm{d}m$$

$$=\int R^2\mathrm{d}m=R^2\oint\mathrm{d}m$$

$$=R^2m$$

（3）绕中心垂直转轴的空心圆柱体的转动惯量。

内径R_1，外径R_2, 高l，总质量m。

设其质量密度为：

$$\rho=\frac{m}{\pi l\left(R_2^2-R_1^2\right)}$$

取半径为r处，

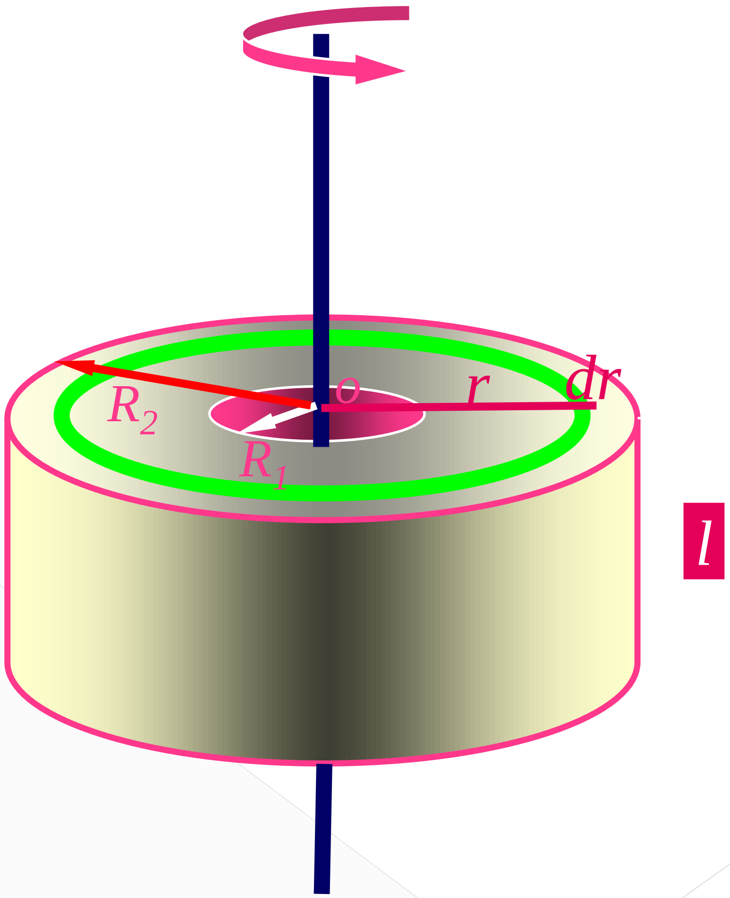
厚度为dr薄壳为质量元：

$$\mathrm{d}m=\rho\mathrm{d}V=\rho 2\pi r l\mathrm{d}r$$

$$I=\int r^2\mathrm{d}m$$

$$=2\pi l\rho\int_{R_1}^{R_2}r^3\mathrm{d}r=\frac{\pi l\rho}{2}(R_2^4-R_1^4)$$

$$=\frac{1}{2}m(R_1^2+R_2^2)$$

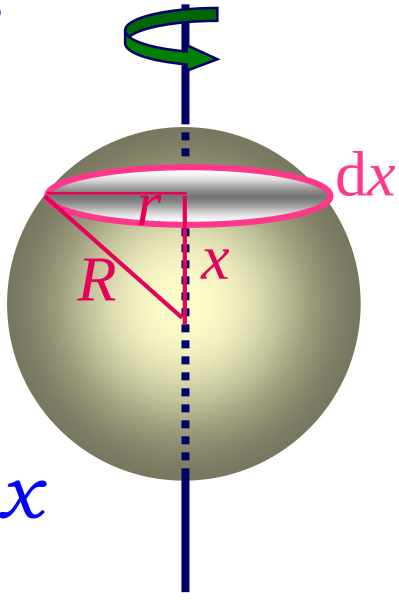


该式同样适用于薄圆盘

（4）绕通过质心转轴的均匀球体的转动惯量。半径为R，总质量m。

设其质量密度为：$\rho=\dfrac{3m}{4\pi R^3}$

方法1：



取距球心为x处，厚度为$\mathrm{d}x$半径为r的薄圆盘为质量元：

圆盘半径：$r=\sqrt{R^2-x^2}$

体积元：$\mathrm{d}V=\pi r^2\mathrm{d}x=\pi(R^2-x^2)\mathrm{d}x$

质量元：$\mathrm{d}m=\rho\mathrm{d}V$

圆盘的转动惯量：

$$\mathrm{d}I=\frac{1}{2}r^2\mathrm{d}m=\frac{\pi\rho}{2}(R^2-x^2)^2\mathrm{d}x$$

圆盘的转动惯量：

$$\mathrm{d}I=\frac{1}{2}r^2\mathrm{d}m=\frac{\pi\rho}{2}(R^2-x^2)^2\mathrm{d}x$$

故球的转动惯量为：

$$I=\int\mathrm{d}I=\int_{-R}^{R}\frac{\pi\rho}{2}\mathrm{d}x$$

$$=\pi\rho\int_0^R(R^2-x^2)^2\mathrm{d}x$$

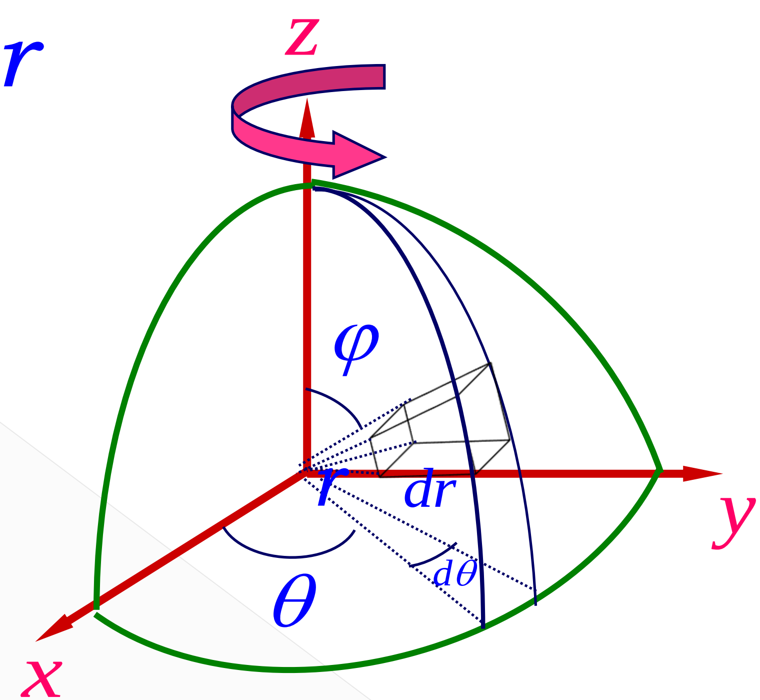
$$=\frac{8\pi\rho}{15}R^5=\frac{2}{5}mR^2$$

方法2：

在球极坐标中取dθ，dφ，dr确定的六面体积元：

$$\mathrm{d}V = r^2 \sin\varphi \mathrm{d}\varphi \mathrm{d}\theta \mathrm{d}r$$

质量元：$\mathrm{d}m = \rho \mathrm{d}V$



故球的转动惯量为：

$$I_z = \int r^2 \sin^2\varphi \mathrm{d}m$$

$$= \iiint \rho r^4 \sin^3\varphi \mathrm{d}\varphi \mathrm{d}\theta \mathrm{d}r$$

$$= \rho \int_0^R r^4 \mathrm{d}r \int_0^{2\pi} \mathrm{d}\theta \int_0^{\pi} \sin^3\varphi \mathrm{d}\varphi$$

$$= \frac{8\pi\rho}{15} R^5 = \frac{2}{5} mR^2$$

一般计算步骤：

质量密度为：$\rho = \dfrac{m}{V}$

取体积元：$\mathrm{d}V$

则质量元：$\mathrm{d}m = \rho \mathrm{d}V$

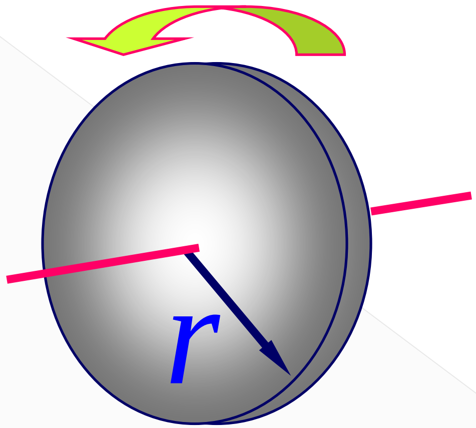
$$I = \int r^2 \mathrm{d}m = \int \rho r^2 \mathrm{d}V$$

直角坐标系：$I = \rho \iiint\limits_V r^2(x, y, z)\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z$

球极坐标系：$I = \rho \iiint\limits_V r^4 \sin^3 \varphi \mathrm{d}\varphi \mathrm{d}\theta \mathrm{d}r$

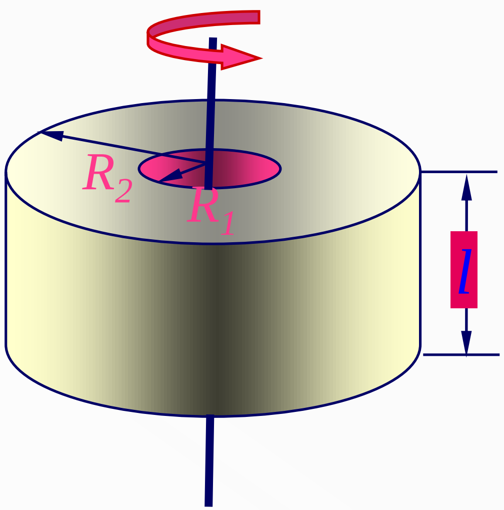
常见刚体的转动惯量

薄圆盘



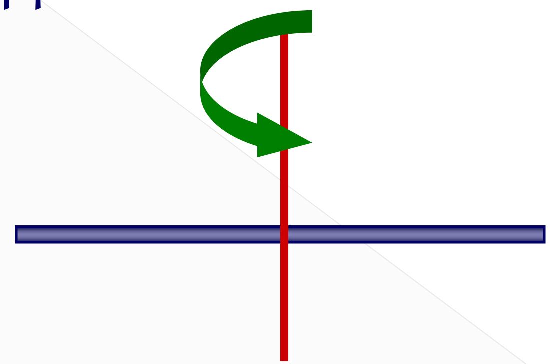
$$I=\frac{1}{2}mr^2$$

圆柱



$$I=\frac{1}{2}m(R_1^2+R_2^2)$$

细棒



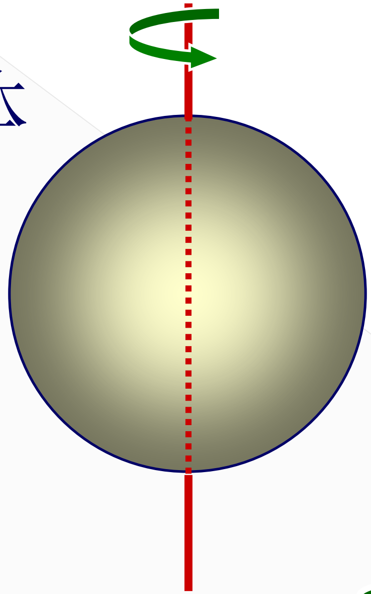
$$I = \frac{1}{12}ml^2$$

细棒

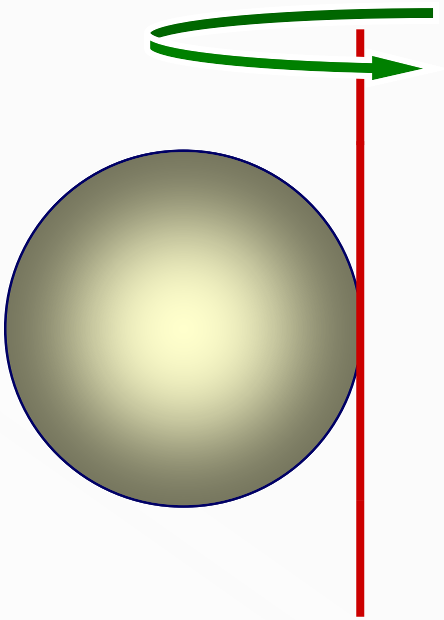
$$I = \frac{1}{3}ml^2$$

§ 5.3 刚体绕定轴的转动

球体



$$I = \frac{2}{5} mR^2$$

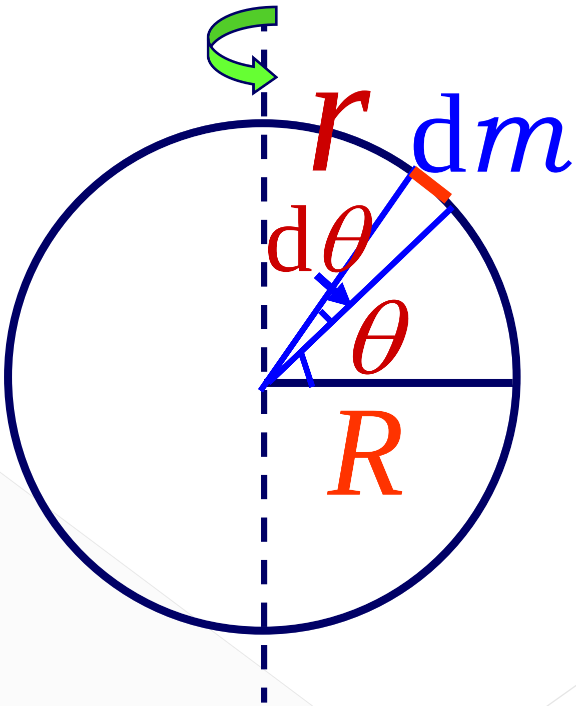


$$I = \frac{7}{5} mR^2$$

例1.求半经为R质量为m的均匀圆环,对于沿直径转轴的转动惯量

解：圆环的质量密度为

$$\lambda = \frac{m}{2\pi R}$$



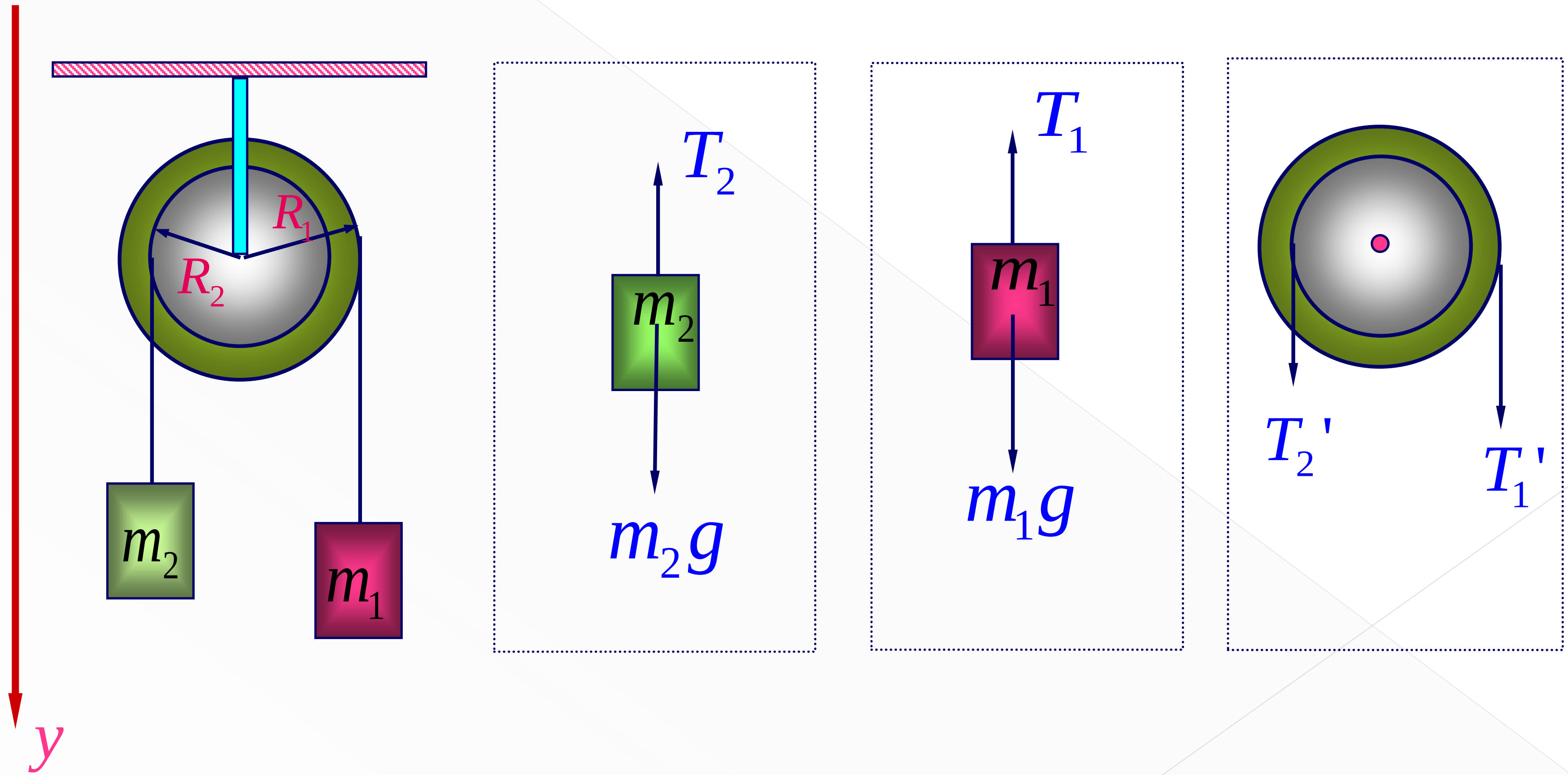
在环上取长度元dS，质量元dm，dm距转轴r

$$\mathrm{d}m = \lambda \mathrm{d}S = \lambda R \mathrm{d}\theta$$

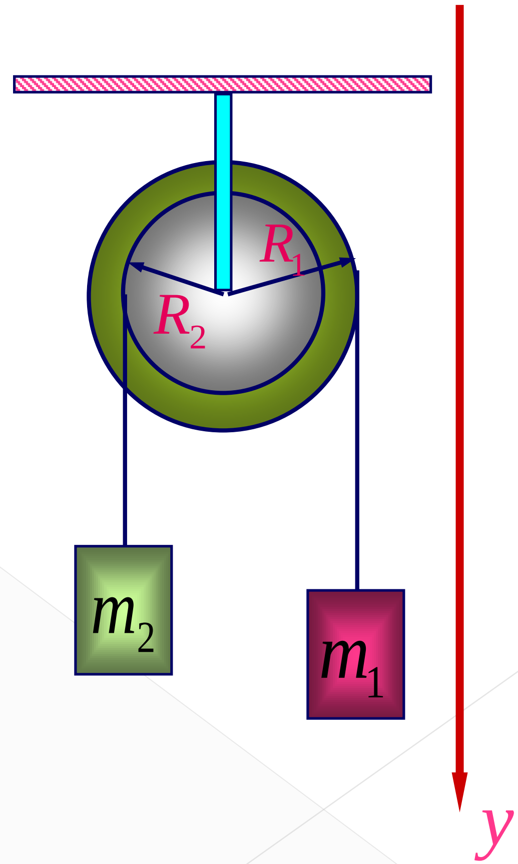
$$r = R\cos\theta$$

$$
\begin{aligned}
I &= \int r^2 \mathrm{d}m \\
&= 2\int_{-\pi/2}^{\pi/2} R^2 \cos^2\theta \cdot \lambda R \mathrm{d}\theta \\
&= \lambda R^3 \pi = \frac{1}{2} m R^2
\end{aligned}
$$

例4.在半径分别为R_1和R_2的阶梯形滑轮上反向绕有两根轻绳，各挂质量为m_1、m_2的物体。如滑轮与轴间的摩擦不计，滑轮的转动惯量为I。求滑轮的角加速度β及各绳中的张力T_1、T_2。



解： 取向下为直线运动的正方向，顺时针为旋转的正方向。隔离物体分别分析受力，由牛顿定律和转动定律列出动力学方程：



$$\begin{cases} m_1 g - T_1 = m_1 a_1 \\ m_2 g - T_2 = m_2 a_2 \\ T_1 R_1 - T_2 R = I\beta \end{cases}$$

又由运动之间的联系可得：

$$\begin{cases} a_1 = R_1 \beta \\ a_2 = -R_2 \beta \end{cases}$$

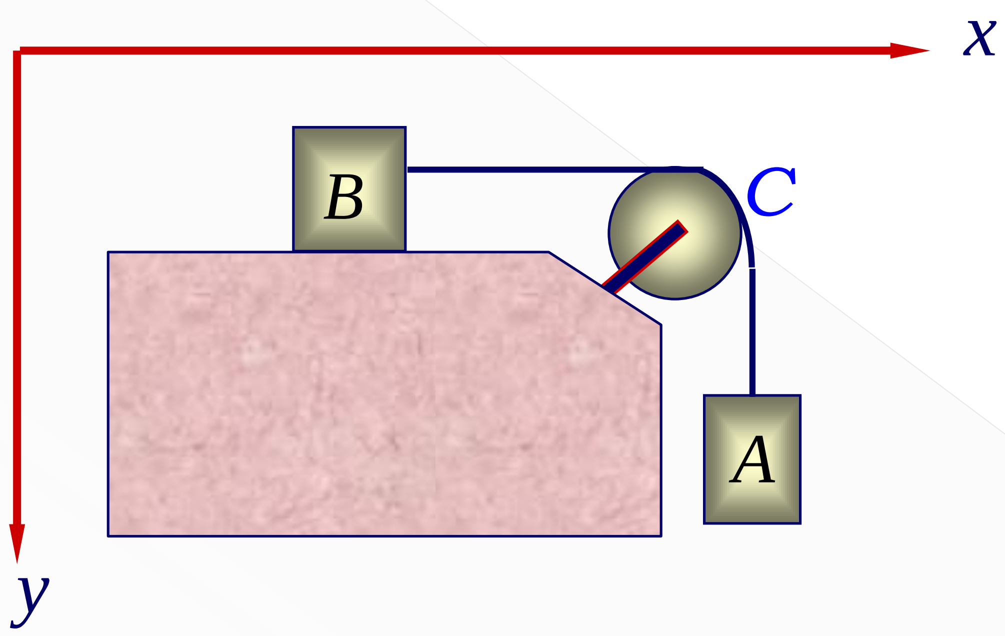
联立解得：

$$\beta = \frac{m_1R_1 - m_2R_2}{I + m_1R_1^{\ 2} + m_2R_2^{\ 2}} g$$

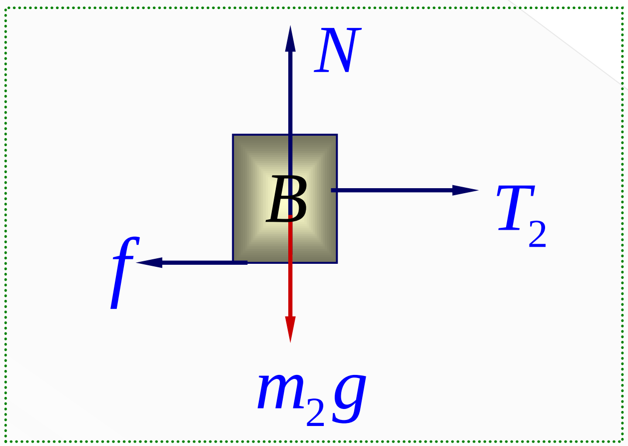
$$T_1 = \frac{I + m_2R_2^{\ 2} + m_2R_1R_2}{I + m_1R_1^{\ 2} + m_2R_2^{\ 2}} m_1 g$$

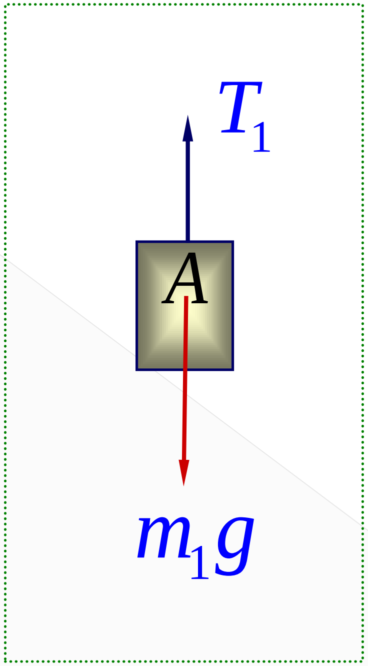
$$T_2 = \frac{I + m_1R_1^{\ 2} + m_1R_1R_2}{I + m_1R_1^{\ 2} + m_2R_2^{\ 2}} m_2 g$$

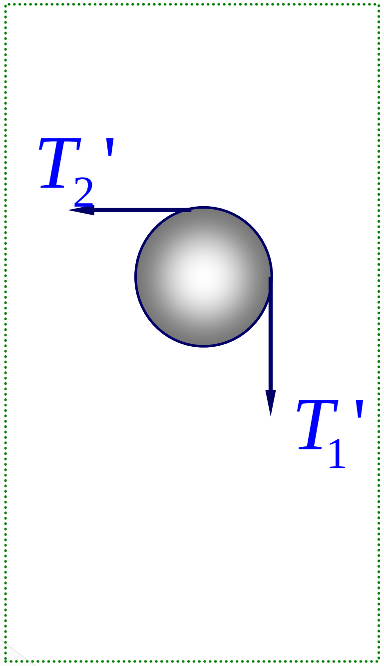
例5. 物体A、B的质量分别为m_1和m_2，用一轻绳相连，绳子跨过质量为M，半径为R的匀质定滑轮C。如A下降，B与水平桌面间的滑动摩擦系数为μ，绳与滑轮之间无相对滑动，求系统的加速度及绳中的张力T_1和T_2。($I=\frac{1}{2}MR^2$)



解：建立如图坐标系，并取顺时针为旋转的正方向。隔离物体分别分析受力，由牛顿定律和转动定律列出动力学方程：







$$\begin{cases} T_2 - f = m_2 a_2 \\ m_2 g - N = 0 \\ f = \mu N \end{cases}$$

$$m_1 g - T_1 = m_1 a_1$$

$$\begin{cases} T_1 R - T_2 R = I\beta \\ I = \frac{1}{2} M R^2 \end{cases}$$

整理以上方程有:

$$\begin{cases} T_2 - m_2 g\mu = m_2 a_2 \\ m_1 g - T_1 = m_1 a_1 \\ T_1 R - T_2 R = \frac{1}{2} M R^2 \beta \end{cases}$$

又由运动之间的联系可得:

$$a_1 = a_2 = a = R\beta$$

联立解得:

$$a = \frac{2(m_1 - \mu m_2)}{2(m_1 + m_2) + M} g$$

$$T_1=\frac{2(\mu+1)m_2+M}{2(m_1+m_2)+M}m_1g$$

$$T_2=\frac{2(\mu+1)m_1+M\mu}{2(m_1+m_2)+M}m_2g$$

◆ 刚体动力学的两类问题

1. 已知转动运动方程 $\theta=\theta(t)$，求刚体所受合外力矩M;
2. 已知刚体所受合外力矩 M 及初始条件，求刚体的角加速度 β 、角速度 ω 和转动运动方程。

◆ 应用定轴转动定律求解刚体动力学的一般思路

- 要注意正确选取角速度、角加速度和力矩的正负；
- 除了受力分析，还要进行力矩分析。在进行受力、力矩分析时，对刚体要找准力的作用点，以便求力矩；
- 对平动的刚体列出牛顿第二定律方程，对定轴转动的刚体列出定轴转动定律方程；
- 注意利用角量与线量的关系。

§5.4 角动量定理与
角动量守恒定律

问题提出：

刚体绕定轴转动时作用力在时间上的累积和运动之间的联系？

- 1.角动量定理
- 2.角动量守恒定律

1.角动量定理

由转动定律有：

$$M = I\beta = I\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(I\omega)$$

令： $L = I\omega$

刚体对于该转轴的角动量或动量矩

矢量形式为： $\boxed{\vec{L} = I\vec{\omega}}$

则有： $M=\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t}$

一般为： $\vec{M}=\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t}$

$M\mathrm{d}t=\mathrm{d}L$

积分： $\int_0^t M\mathrm{d}t=\int_{L_0}^{L}\mathrm{d}L$

$\int_0^t M\mathrm{d}t$ 称为力对转轴的冲量矩。

$$\boxed{\int_0^t M\mathrm{d}t=L-L_0}$$

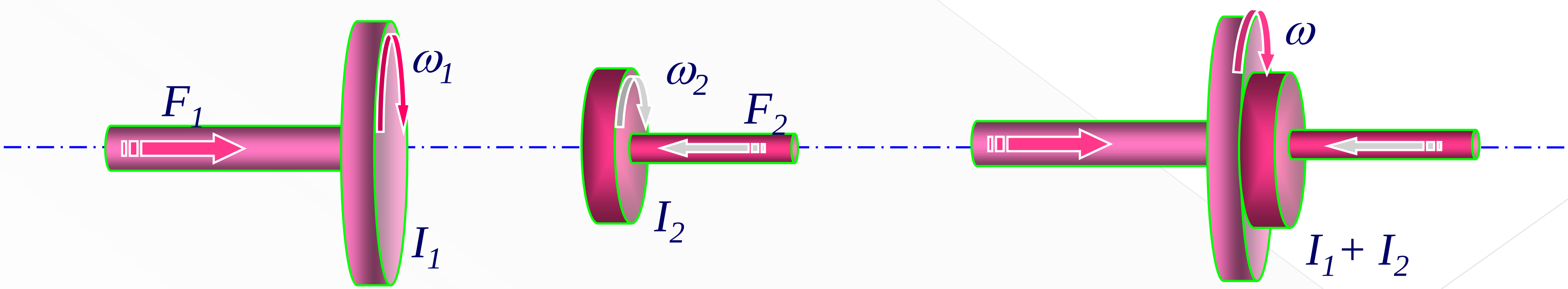
角动量定理：刚体在定轴转动时，角动量的增量等于作用在刚体上的冲量矩。

2.角动量守恒定律

由角动量定理： $\int_0^t M\mathrm{d}t = L - L_0$

$\boxed{\text{有：} \quad M = 0, \qquad L = L_0 = \text{恒量}}$

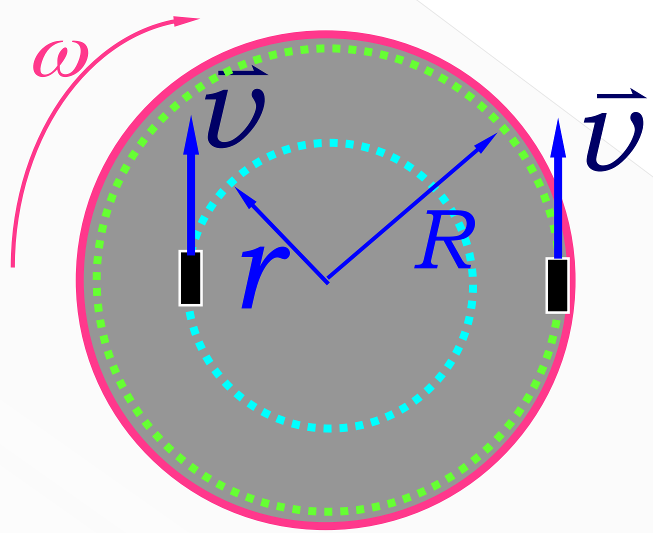
角动量守恒定律：刚体在定轴转动时，刚体合外力矩为零时，其角动量始终保持不变。



作用前角动量 $\xrightarrow{M=0}$ 作用后角动量

$$I_1\omega_1 + I_2\omega_2 \quad = \quad (I_1+I_2)\ \omega$$

例8. 质量为M、半径为R的水平放置、圆盘转台上，两质量均为m的电动汽车模型可分别沿半径为R和$r(R>r)$两轨道运行。最初小车和转台都不动，令外轨道小车作反时针转动，内轨道小车顺时针转动，相对于转台的速率均为v。求转台对地面的角速度。



解： 设顺时针方向为正方向，转台对地面的角速度为ω ，运动过程中无外力作用所以系统角动量守恒：

A相对于地面的角速度： $$\omega_A = \omega - \frac{v}{R}$$

B相对于地面的角速度： $$\omega_B = \omega + \frac{v}{r}$$

由角动量守恒： $$I_A\omega_A + I_B\omega_B + I\omega = 0$$

其中： $$I_A = mR^2 \quad I_B = mr^2 \quad I = \frac{MR^2}{2}$$

代入可得:

$$mR^2\omega - mRv + mr^2\omega + mrv + \frac{MR^2}{2}\omega = 0$$

$$\omega = \frac{2mv(R-r)}{2m(R^2+r^2)+MR^2}$$

转台顺时针旋转

§5.5 定轴转动的动能定理与机械能守恒定律

问题提出：刚体绕定轴转动时作用力在空间上的累积和运动之间的联系？

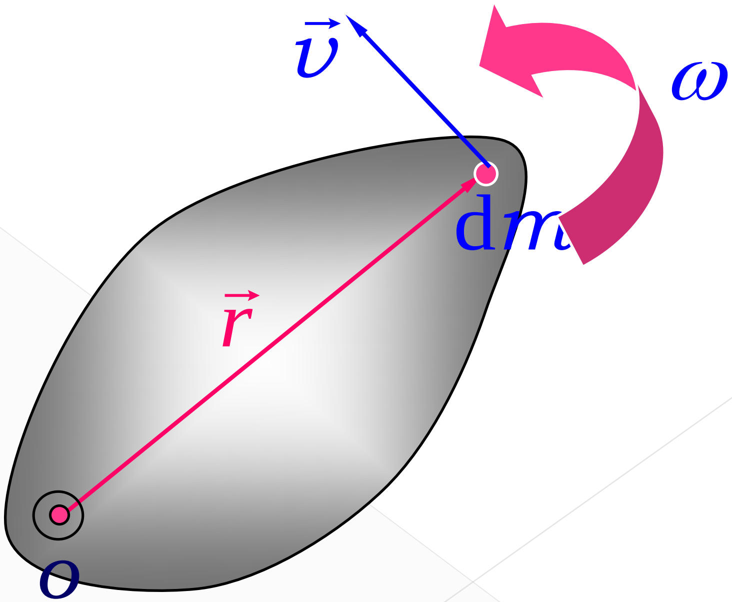
- 1.刚体的总机械能
- 2.刚体转动时力矩做的功
- 3.刚体定轴转动的动能定理
- 4.刚体机械能守恒定律

1.刚体的总机械能

刚体的转动动能

刚体定轴转动时，距轴为r的质量元dm线速度为v其动能为：

$$\mathrm{d}E_k = \frac{1}{2}v^2\mathrm{d}m = \frac{1}{2}r^2\omega^2\mathrm{d}m$$



刚体定轴转动时总动能：

$$E_k = \int \mathrm{d}E_k = \int \frac{1}{2}r^2\omega^2\mathrm{d}m$$

$$= \frac{1}{2}\omega^2\int r^2\mathrm{d}m = \frac{1}{2}I\omega^2$$

刚体的重力势能

$$E_p = mg\frac{\int h\mathrm{d}m}{m}$$

$$= mgh_c$$

刚体的平动动能

$$E_k' = \frac{1}{2}mv^2$$

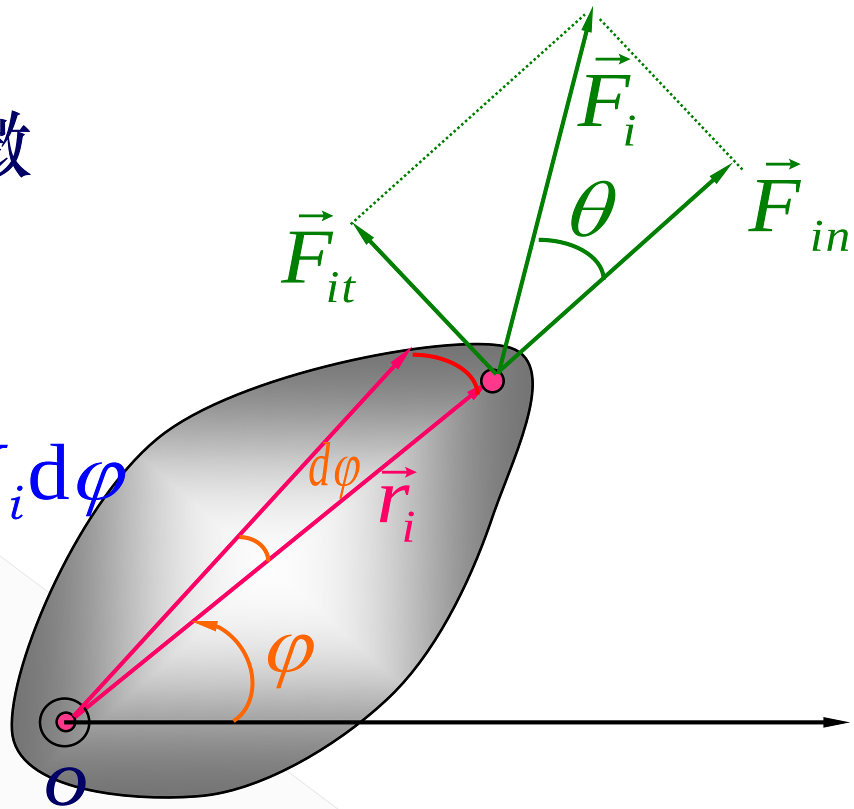
刚体的总机械能

$$E = E_k + E_k' + E_p$$

$$= \frac{1}{2}I\omega^2 + \frac{1}{2}mv^2 + mgh_c$$

2.刚体转动时力矩做的功

刚体定轴转动时，有一微角位移$d\varphi$力做的功：



力F_i元功：

$$\mathrm{d}A_i = F_{it}\mathrm{d}s = F_{it}r_i\mathrm{d}\varphi = M_i\mathrm{d}\varphi$$

所有力的总元功：

$$\mathrm{d}A = \sum_i \mathrm{d}A_i = \sum_i M_i\mathrm{d}\varphi$$

刚体从φ_1到φ_2力做的总功：

$$A = \int \mathrm{d}A = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sum_i M_i\mathrm{d}\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M\mathrm{d}\varphi$$

$$\boxed{A=\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M\mathrm{d}\varphi \quad \text{刚体从}\varphi_1\text{到}\varphi_2\text{合力矩做的功。}}$$

3.刚体定轴转动的动能定理

由转动定律有:

$$M=I\beta=I\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=I\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}\varphi}\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}t}=I\omega\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}\varphi}$$

$$M\mathrm{d}\varphi=I\omega\mathrm{d}\omega$$

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M\mathrm{d}\varphi=\int_{\omega_1}^{\omega_2} I\omega\mathrm{d}\omega$$

$$=\frac{1}{2}I\omega_2^2-\frac{1}{2}I\omega_1^2$$

§ 5.4定轴转动的动能定理与机械能守恒定律

$$A=\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M\mathrm{d}\varphi=\frac{1}{2}I\omega_2^2-\frac{1}{2}I\omega_1^2=\Delta E_k$$

$$\boxed{A=\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M\mathrm{d}\varphi=\Delta E_k}$$

动能定理：<u>刚体在定轴转动时，合外力矩所做的功等于其转动动能 的增量。</u>

4.刚体机械能守恒定律

由定轴转动的动能定理有:

当$M=0$时:

$$A=\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M\mathrm{d}\varphi=\Delta E_k=0$$

$$\boxed{E_k=E_{K0}=\text{恒量}}$$

在有重力时:

当$M=0$时:

$$\boxed{E_k+E_p=E_{K0}+E_{p0}=\text{恒量}}$$

在一般情况下：

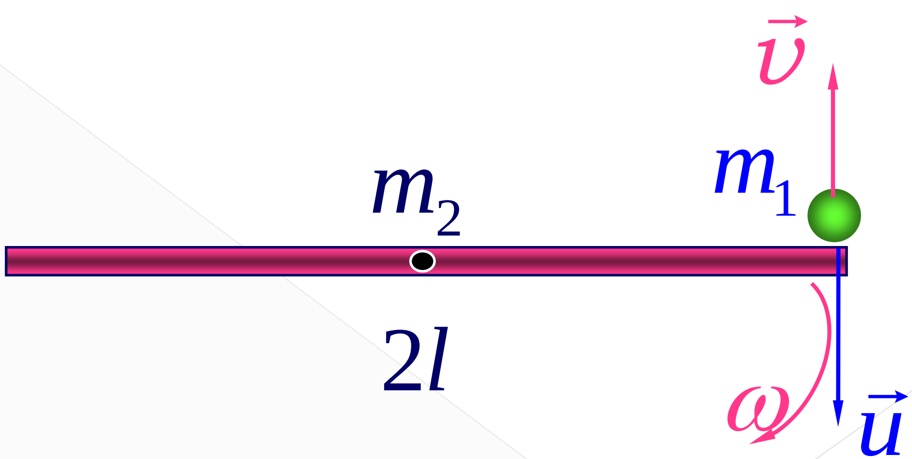
当$M=0, F=0$ 时：

$$\boxed{E_k + E_p + E_k' = E_{K0} + E_{p0} + E_{k0}' = \text{恒量}}$$

例1. 质量为m_1的小球与质量为m_2长为$2l$的棒作完全弹性碰撞，棒可绕通过中心的轴转动(如图)。求球的反弹速度和棒的角速度。

解：小球的重力与冲击力相比可忽略，顺时针旋转为正方向。

设小球反弹速度为υ，棒的角速度为ω，碰撞前后系统角动量守恒：



$$m_1 l^2 \frac{u}{l} = I\omega - m_1 l^2 \frac{\upsilon}{l}$$

其中 $$I=\frac{1}{12}m_2(2l)^2=\frac{1}{3}m_2l^2$$

又弹性碰撞机械能守恒：

$$\frac{1}{2}m_1u^2=\frac{1}{2}m_1v^2+\frac{1}{2}I\omega^2$$

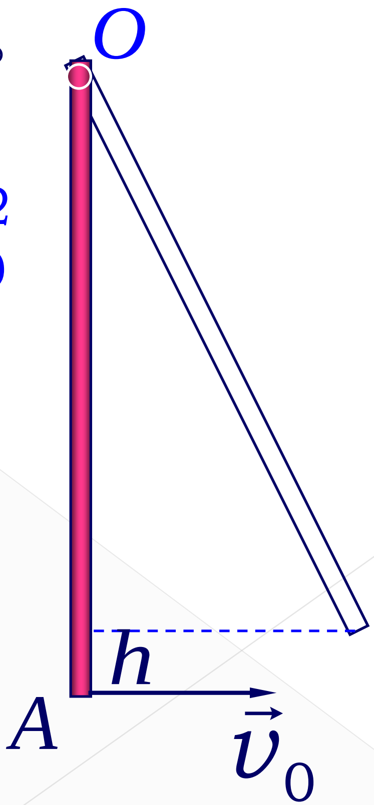
解得

$$v=\frac{(m_2-3m_1)u}{m_2+3m_1}$$

$$\omega=\frac{6m_1u}{(m_2+3m_1)l}$$

例2. 长为l，质量为m的均匀细杆OA，绕通过其一端点O的水平轴在铅垂面内自由转动。已知另一端A过最低点时的速率为v_0。求杆摆动时A点升高的最大高度(不计空气阻力和轴的摩擦力)

解：除重力外合力矩为0，故机械能守恒。



最低点处动能 $E_{k0}=\frac{1}{2}I\omega_0^2=\frac{1}{6}mv_0^2$

势能 $E_{p0}=0$

最高点处动能 $E_k=0$

势能 $E_p=\frac{1}{2}mgh$

由:

$$E_{k0} + E_{p0} = E_k + E_p$$

有:

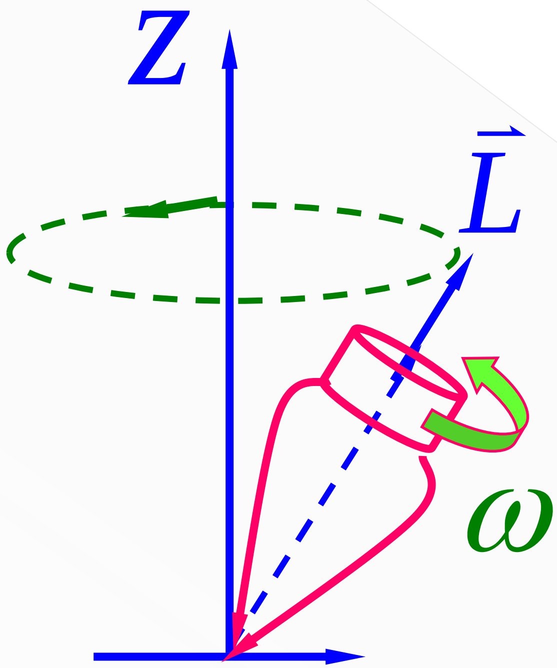
$$\frac{1}{6} m v_0^2 = \frac{1}{2} m g h$$

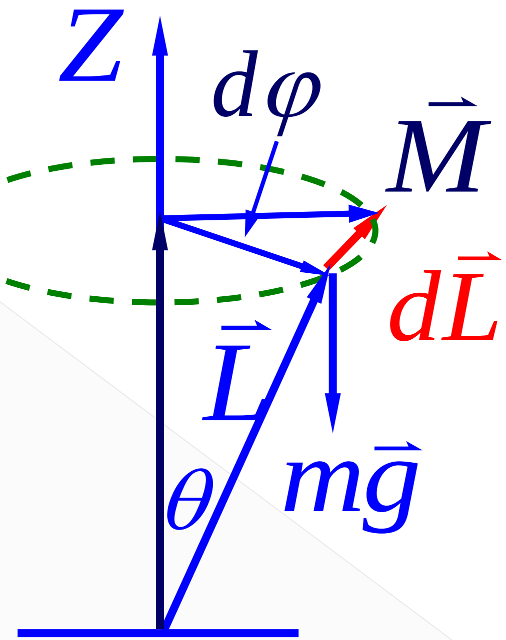
可求得

$$h = \frac{v_0^2}{3g}$$

进 动

视频





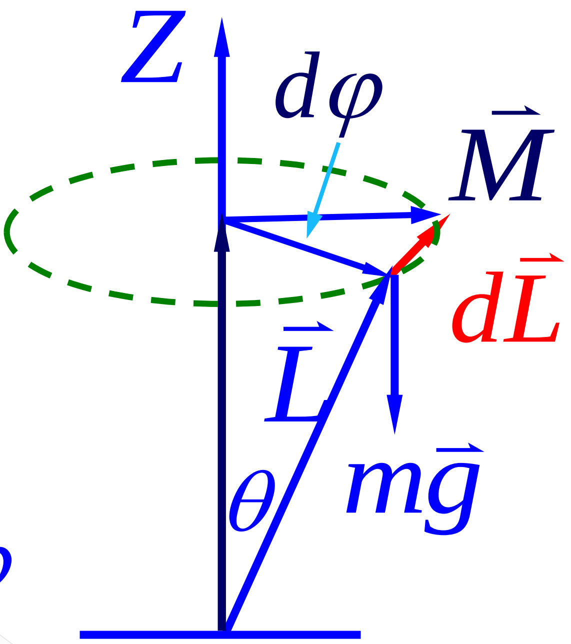
由：$\vec{M} = d\vec{L}/dt$

有：$\vec{M}dt = d\vec{L}$

$$d\vec{L} = L\sin\theta d\varphi \vec{e}_\varphi$$

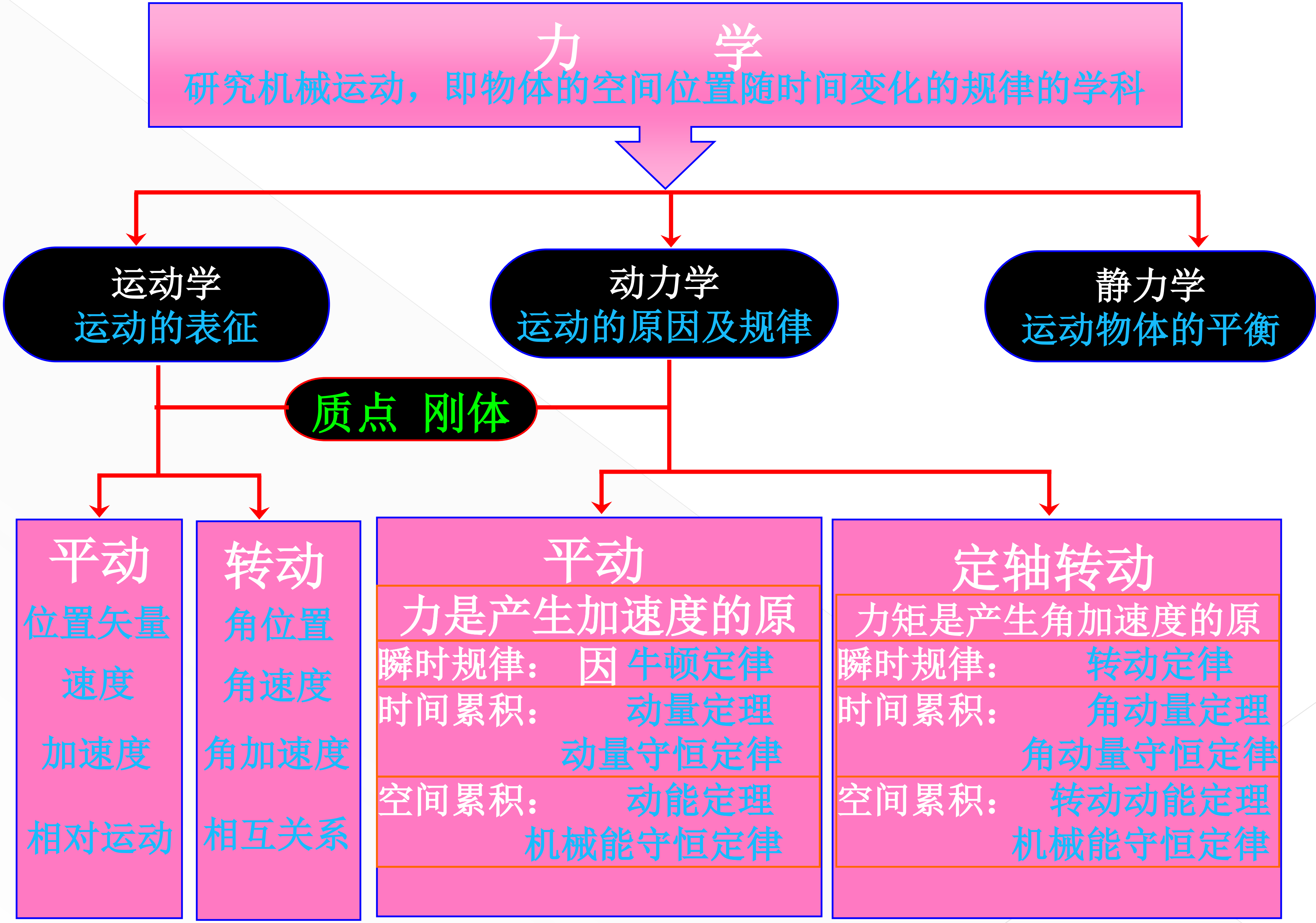
$$= I\omega\sin\theta d\varphi \vec{e}_\varphi$$

又由：$Mdt = I\omega\sin\theta d\varphi$



可得进动角速度：

$$\omega_p = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{M}{I\omega\sin\theta}$$


力 学
研究机械运动，即物体的空间位置随时间变化的规律的学科
运动学
运动的表征
动力学
运动的原因及规律
静力学
运动物体的平衡
质点 刚体
平动
位置矢量
速度
加速度
相对运动
转动
角位置
角速度
角加速度
相互关系
平动
力是产生加速度的原
瞬时规律： 因 牛顿定律
时间累积： 动量定理
动量守恒定律
空间累积： 动能定理
机械能守恒定律
定轴转动
力矩是产生角加速度的原
瞬时规律： 转动定律
时间累积： 角动量定理
角动量守恒定律
空间累积： 转动动能定理
机械能守恒定律