第十章 动量定理

质点→有限个质点→无限质点系→单个刚体→刚体系统

动量	动量定理	力
动量矩	动量矩定理	力矩
动能	动能定理	功

§10-1 动量的计算

§10-2 动量定理

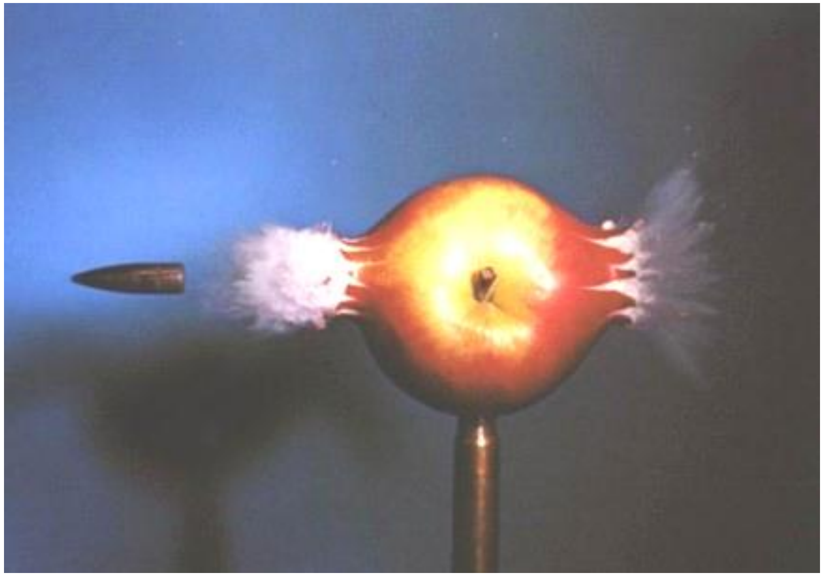
§10-3 质心运动定理

§ 10-1 动量的计算

1. 概念

动量（momentum, linear momentum）

物体的质量与速度矢的乘积，是物体机械运动强弱的一种度量。



2. 动量的计算

质点的动量： 质点的质量(m)与速度矢(v)的乘积。

动量为矢量
- 大小为mv, 单位N s
- 方向与质点速度的方向一致
- 位置经过质点

质点系的动量： 各质点动量的矢量和。 $\boldsymbol{p}=\sum_{i=1}^{n} m_i \boldsymbol{v}_i$

动量矢量
- 大小
- 方向

—几何法, 投影法

♦ 没有位置属性

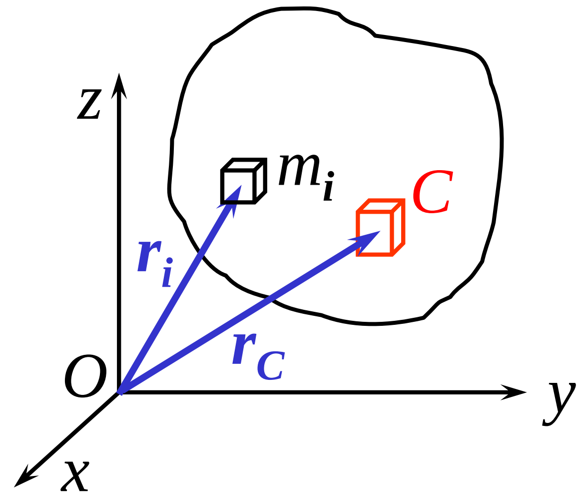
3. 质心与运动的关系

$$\boldsymbol{r}_C=\frac{\sum m_i\boldsymbol{r}_i}{\sum m_i}=\frac{\sum m_i\boldsymbol{r}_i}{m}$$

$$\left.\begin{aligned}x_C&=\frac{\sum m_i x_i}{m}\\ y_C&=\frac{\sum m_i y_i}{m}\\ z_C&=\frac{\sum m_i z_i}{m}\end{aligned}\right\}$$

$$m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}_C}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\sum m_i\boldsymbol{r}_i$$

$$=\sum m_i\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}_i}{\mathrm{d}t}$$



$$\boldsymbol{p}=\sum m_i\boldsymbol{v}_i=m\boldsymbol{v}_C$$

$$p_x=\sum m_i v_{ix}=mv_{Cx}$$

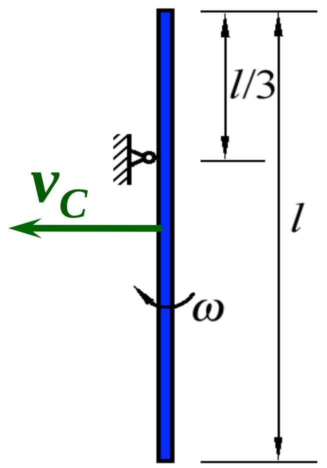
$$p_y=\sum m_i v_{iy}=mv_{Cy}$$

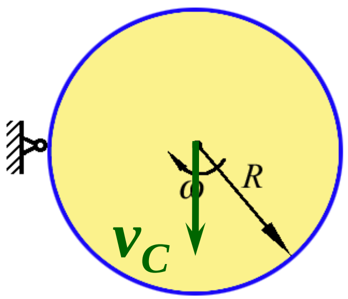
$$p_z=\sum m_i v_{iz}=mv_{Cz}$$

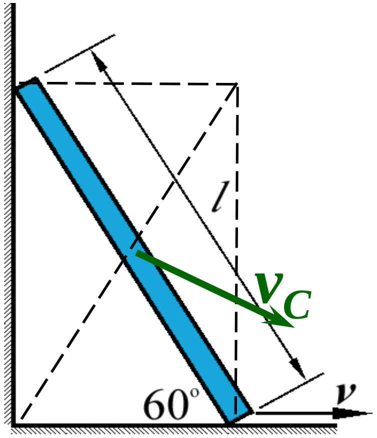
质点系的动量，等于质点系的总质量与质心速度的乘积。

例 计算下列刚体的动量(各刚体质量为m)

$$\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}_C$$



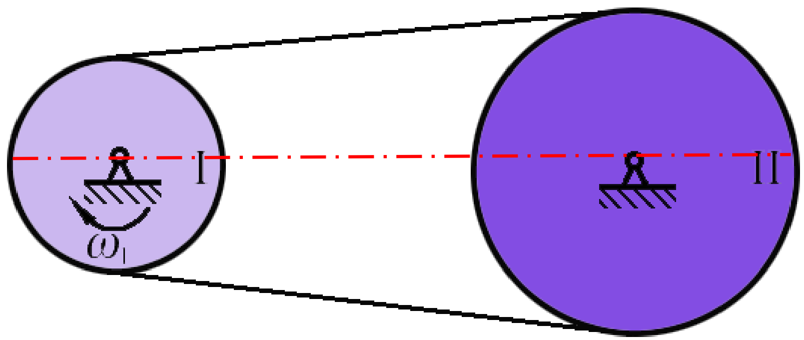




$$p = \frac{ml\omega}{6}$$

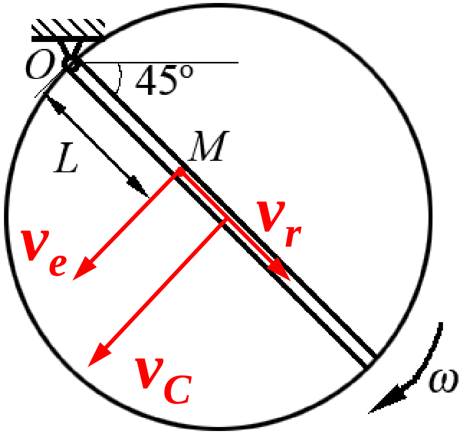
$$p = mR\omega$$

$$p = \frac{\sqrt{3}mv}{3}$$



例 两轮皆为匀质圆盘,质量为m_1、m_2，半径为r_1、r_2，皮带为匀质，质量为m。计算系统动量。

$$\boldsymbol{p} = \sum m_i \boldsymbol{v}_i = m\boldsymbol{v}_C$$



例 一直径为D, 质量m_1的匀质圆盘，在水平面内以匀角速度ω绕O轴转动。一质量为m_2的小球M，在通过O轴的直径槽内以$L=kt$(k为常量)的规律运动，求t瞬时系统的动量的大小。

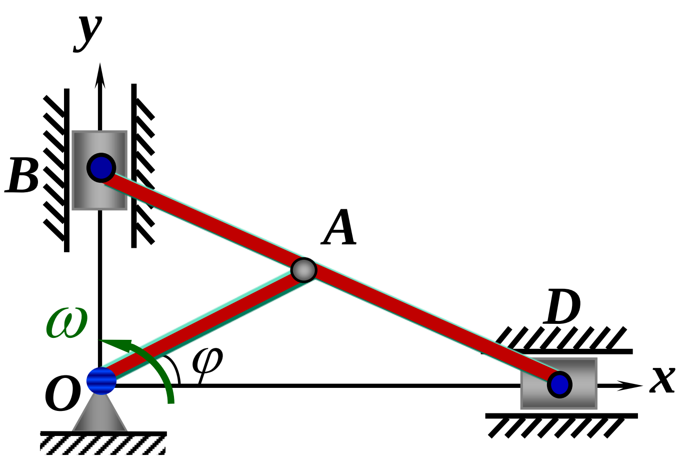
$$\boldsymbol{p}_{总}=\boldsymbol{p}_{盘}+\boldsymbol{p}_{球}$$

$$p_{盘}=m_1v_C=m_1D\omega/2$$

$$p_{球}=m_2v_a \qquad v_e=kt\omega \quad v_r=k$$

$$p=\sqrt{(\frac{m_1D}{2}+m_2kt)^2\omega^2+m_2^2k^2}$$

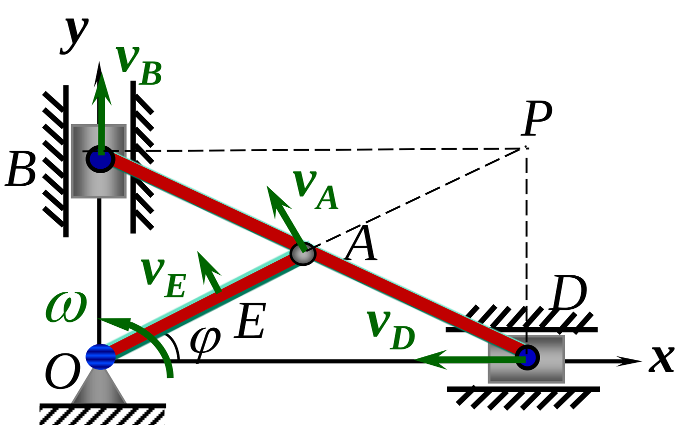
例 画椭圆的机构由匀质的曲柄OA，规尺BD以及滑块B和D组成，曲柄与规尺的中点A铰接。已知规尺长$2l$，质量是$2m_1$；两滑块的质量都是m_2；曲柄长l，质量是m_1，并以角速度ω绕定轴O转动。试求当曲柄OA与水平成角φ时整个机构的动量。



$$\boldsymbol{p}=\sum m_i\boldsymbol{v}_i=m\boldsymbol{v}_C$$

$$=\sum m_j\boldsymbol{v}_{Cj}$$

解： $\boldsymbol{p}=\boldsymbol{p}_{OA}+\boldsymbol{p}_{BD}+\boldsymbol{p}_{B}+\boldsymbol{p}_{D}$



系统的动量在坐标轴x，y

上的投影分别为：

$$p_x=-m_1v_E\sin\varphi-(2m_1)v_A\sin\varphi-m_2v_D$$

$$=-m_1\frac{l}{2}\omega\sin\varphi-(2m_1)l\omega\sin\varphi-m_2 2l\omega\sin\varphi$$

$$=-(\frac{5}{2}m_1+2m_2)l\omega\sin\varphi$$

$$p_y=m_1v_E\cos\varphi+(2m_1)v_A\cos\varphi+m_2v_B$$

$$=m_1\frac{l}{2}\omega\cos\varphi+(2m_1)l\omega\cos\varphi+m_2 2l\omega\cos\varphi$$

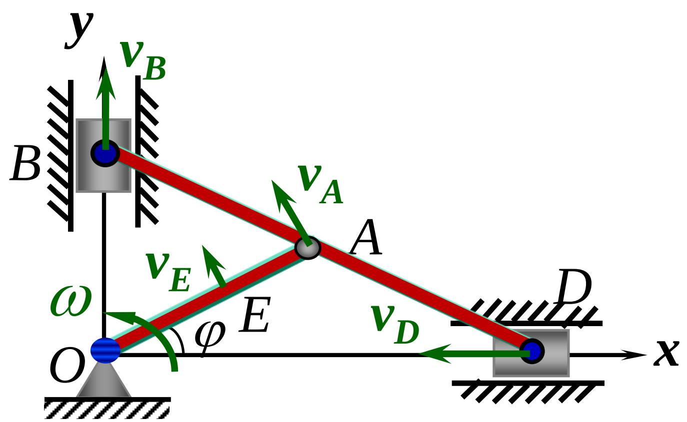
$$=(\frac{5}{2}m_1+2m_2)l\omega\cos\varphi$$

$$p=\sqrt{p_x^2+p_y^2}$$

$$=\frac{1}{2}(5m_1+4m_2)l\omega$$

另解： $\boldsymbol{p} = \boldsymbol{p}_{OA} + \boldsymbol{p}_{BD} + \boldsymbol{p}_B + \boldsymbol{p}_D$

$= \boldsymbol{p}_{OA} + \boldsymbol{p}'$

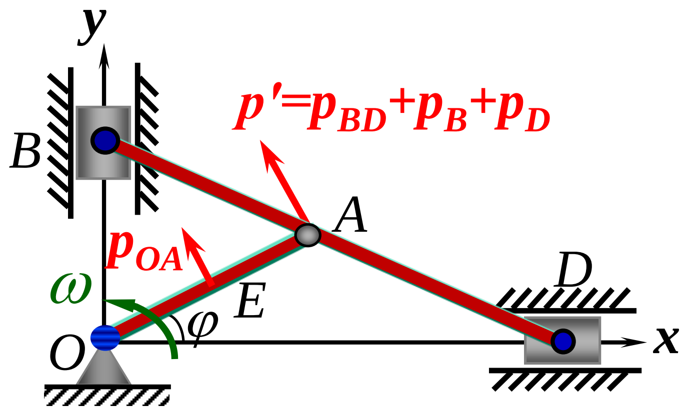


$p_{OA} = m_1 v_E = m_1 l\omega/2$

方向同$\boldsymbol{v}_E$

$p' = p_{BD} + p_B + p_D = 2(m_1 + m_2)v_A$

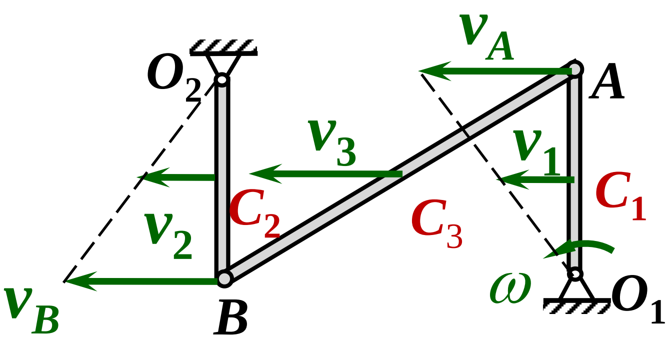
方向同$\boldsymbol{v}_A$



$$p = p_{OA} + p' = \frac{1}{2}m_1 l\omega + 2(m_1 + m_2)l\omega$$

$$= \frac{1}{2}(5m_1 + 4m_2)l\omega$$

例 如图所示的平面四杆机构中，各均质杆质量均为m，O_1A与O_2B杆长度均为l。图示瞬时，O_1A杆角速度为ω，且与O_2B杆平行。试求此时系统的动量。



杆O_1A： $p_{x1} = mv_1 = \dfrac{l}{2} m\omega$

杆AB： $p_{x3} = mv_3 = lm\omega$

杆O_2B： $p_{x2} = mv_2 = \dfrac{l}{2} m\omega$

$$p_x = p_{x1} + p_{x2} + p_{x3} = 2ml\omega$$

另解：此瞬时系统的质心与AB杆的质心C_3重合。此时系统的动量 $p_x = 3mv_3 = 3ml\omega$?

小结

动量的计算： 1. 定义　2. 质心的动量

$$\boldsymbol{p} = \sum m_i \boldsymbol{v}_i = m\boldsymbol{v}_C$$

一般质点系 —— $\boldsymbol{v}_C$不好求

单个刚体 —— $\boldsymbol{v}_C$好求

刚体系统 —— 每个刚体的$\boldsymbol{v}_C$好求

$$\boldsymbol{p} = \sum m_i \boldsymbol{v}_i = m\boldsymbol{v}_C = \sum m_j \boldsymbol{v}_{Cj}$$

§ 10-2 动量定理

1. 质点的动量定理

$$m\boldsymbol{a} = \Sigma \boldsymbol{F} \longrightarrow m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = \Sigma \boldsymbol{F}$$

导数形式 $$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(m\boldsymbol{v}) = \Sigma \boldsymbol{F}$$

微分形式 $$\mathrm{d}(m\boldsymbol{v}) = \Sigma \boldsymbol{F} \cdot \mathrm{d}t$$

积分形式 $$m\boldsymbol{v}_2 - m\boldsymbol{v}_1 = \Sigma \int_{t_1}^{t_2} \boldsymbol{F}(t) \cdot \mathrm{d}t$$

力$\boldsymbol{F}$是常矢量或是时间的已知函数

2. 质点系的动量定理

$$\boldsymbol{p} = \sum m_i \boldsymbol{v}_i$$

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t} = \sum \frac{\mathrm{d}(m_i \boldsymbol{v}_i)}{\mathrm{d}t} = \sum m_i \boldsymbol{a}_i = \sum \boldsymbol{F}_i$$

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t} = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{F}_i^{(e)} + \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{F}_i^{(i)}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{F}_i^{(i)} = 0$$

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t} = \sum \boldsymbol{F}_i^{(e)} = \boldsymbol{F}_R$$

质点系动量对时间的导数，等于质点系所受外力的矢量和(主矢)，称为动量定理。

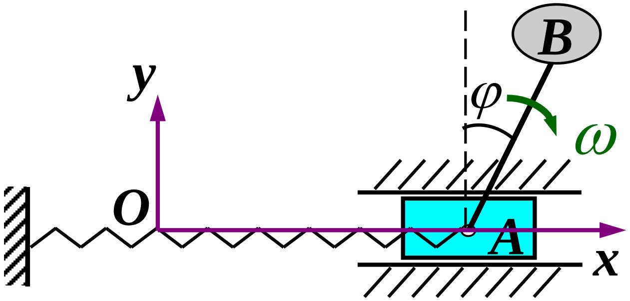
动量定理的直角坐标投影式

$$\left.\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}p_x}{\mathrm{d}t} &= \sum F_x^{(e)} \\ \frac{\mathrm{d}p_y}{\mathrm{d}t} &= \sum F_y^{(e)} \\ \frac{\mathrm{d}p_z}{\mathrm{d}t} &= \sum F_z^{(e)} \end{aligned}\right\}$$

思考 质点系的内力并不影响质点系动量的改变，只有外力才是质点系动量变化的原因。

内力可以改变什么？

例：质量为m的滑块A，可以在水平光滑槽中运动，具有刚度系数k的弹簧一端与滑块A铰接，另一端固定。质量为m_1的小球B固结在杆端，AB杆长l，质量忽略不计，在铅垂面内绕A以匀角速度ω转动。如φ等于零时，弹簧恰为原长，求滑块的运动规律。



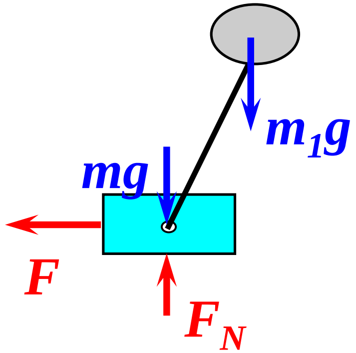
解：取系统为研究对象，受力分析

运动分析，弹簧原长处为坐标原点

$$\boxed{\frac{\mathrm{d}p_x}{\mathrm{d}t}=\sum F_x}$$

$$p_x = m\dot{x}+m_1\dot{x}_B = m\dot{x}+m_1(\dot{x}+l\omega\cos\omega t)$$

$$(m+m_1)\ddot{x}-m_1 l\omega^2\sin\omega t=-kx$$

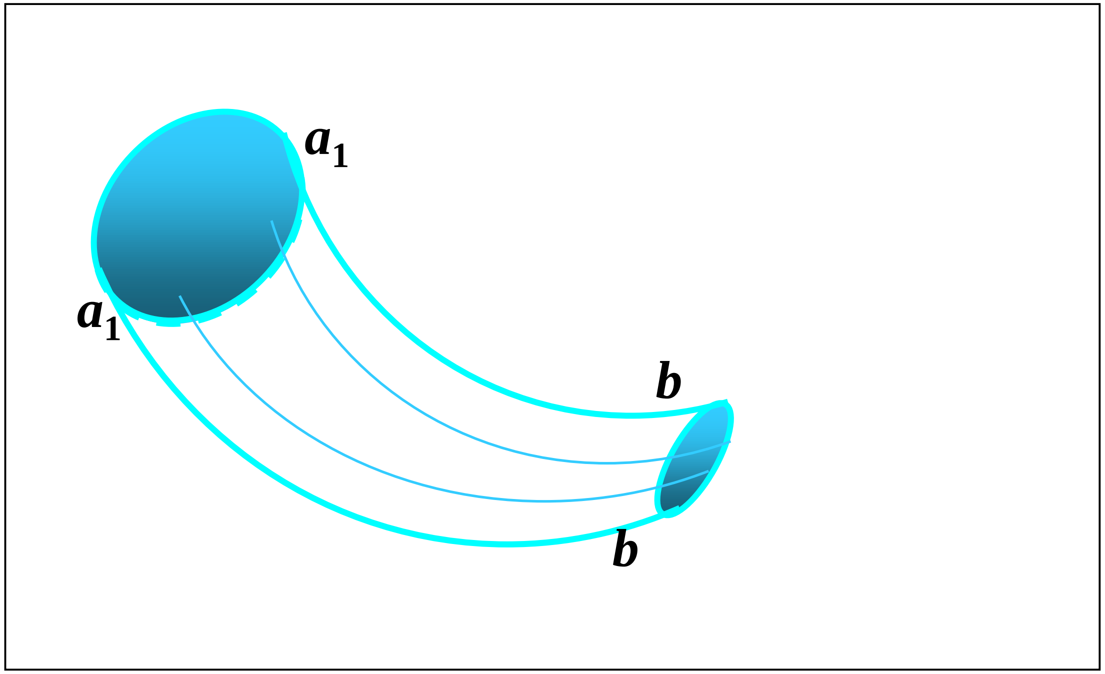


大家也可以借助复合运动分析方法建立二者的速度关系。

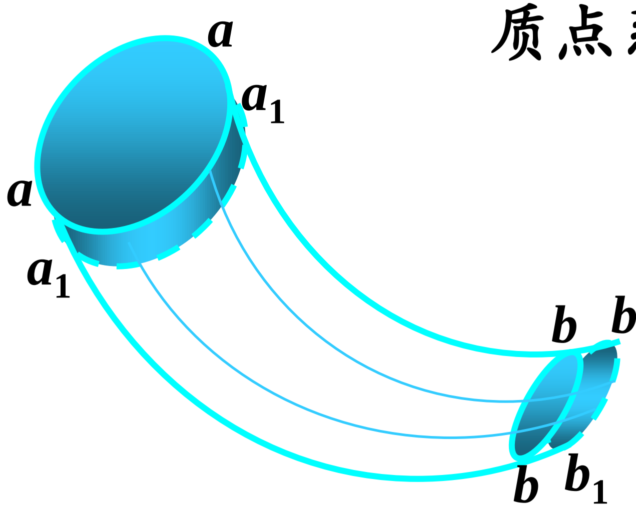
•**定常流体的动约束反力**

（定常流动：管道内每点压强、速度、密度等不随时间而变的流动）

如图表示水流流经变截面弯管的示意图。设流体是不可压缩的，流动是稳定的。求流体对管壁的作用力。



解：取两个截面aa与bb之间的流体作为质点系(管道内流体及dt内将流入的液体)。



设想经过无限小的时间间隔dt，这一部分流体流到两个截面a_1a_1与b_1b_1之间。令q_v为流体在单位时间内流过截面的体积流量，ρ为密度。

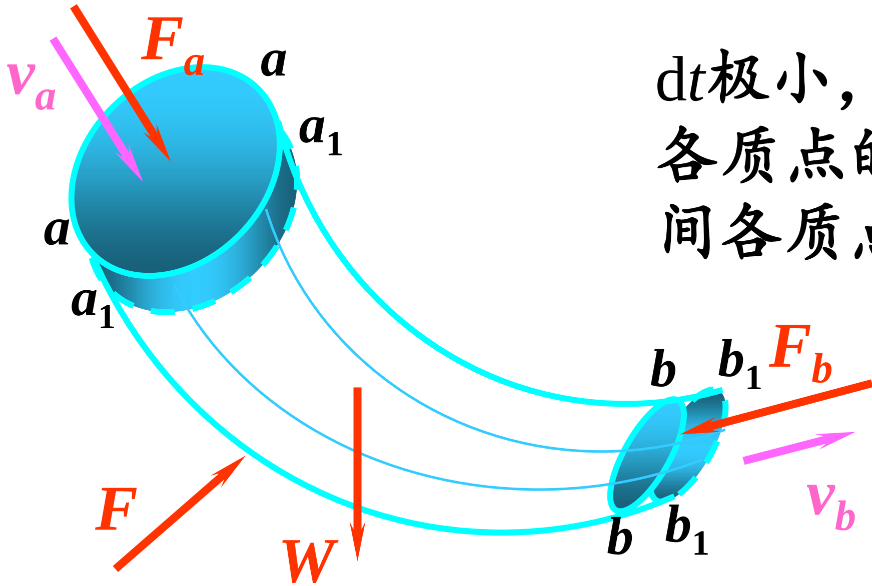
质点系在时间dt内流过截面的质量为 $\mathrm{d}m = q_v \rho \mathrm{d}t$

质点系动量的变化为

$$\boldsymbol{p} - \boldsymbol{p}_0 = \boldsymbol{p}_{a_1b_1} - \boldsymbol{p}_{ab} = (\boldsymbol{p}_{bb_1} + \boldsymbol{p}_{a_1b}) - (\boldsymbol{p}'_{a_1b} + \boldsymbol{p}_{aa_1})$$

因为管内流动是稳定的， $\boldsymbol{p}_{a_1b} = \boldsymbol{p}'_{a_1b}$

$$\boldsymbol{p} - \boldsymbol{p}_0 = \boldsymbol{p}_{bb_1} - \boldsymbol{p}_{aa_1}$$



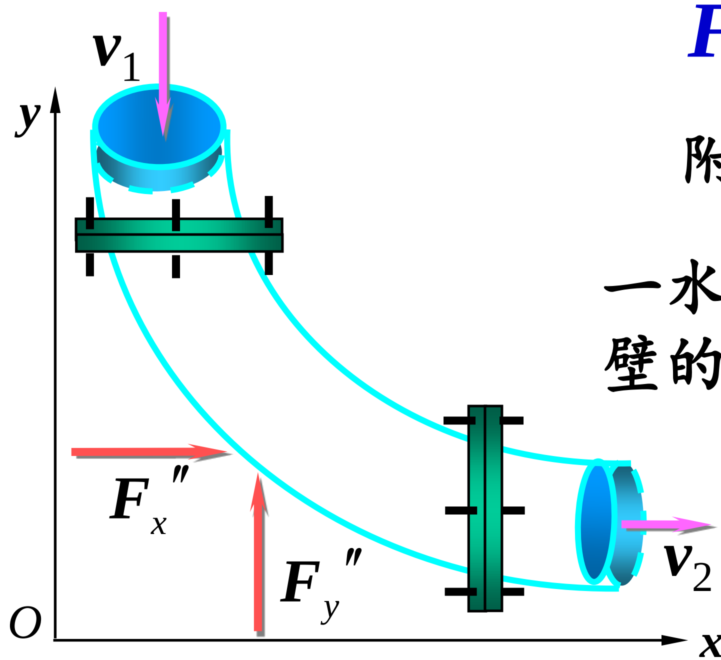
dt极小，可认为在截面aa与a_1a_1之间各质点的速度相同，截面b_1b_1与bb之间各质点的速度相同

$$\boldsymbol{p}-\boldsymbol{p}_0=q_v\rho\mathrm{d}t(\boldsymbol{v}_b-\boldsymbol{v}_a)$$

$$q_v\rho\mathrm{d}t(\boldsymbol{v}_b-\boldsymbol{v}_a)=(\boldsymbol{W}+\boldsymbol{F}_b+\boldsymbol{F}_a+\boldsymbol{F})\mathrm{d}t$$

$$\boldsymbol{F}=q_v\rho(\boldsymbol{v}_b-\boldsymbol{v}_a)-\boldsymbol{F}_a-\boldsymbol{F}_b-W$$

附加动约束力 $\boxed{\boldsymbol{F}''=q_v\rho(\boldsymbol{v}_b-\boldsymbol{v}_a)}$



一水平等截面直角弯管，流体对管壁的附加动约束力 $q_v=S_1v_1=S_2v_2$

$$F_x''=q_v\rho(v_2-0)=\rho S_2v_2^2$$

$$F_y''=q_v\rho(0-v_1)=\rho S_1v_1^2$$

3. 动量守恒定律

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t}=\sum \boldsymbol{F}_i^{(e)} \qquad \frac{\mathrm{d}p_x}{\mathrm{d}t}=\sum F_x^{(e)},\ \frac{\mathrm{d}p_y}{\mathrm{d}t}=\sum F_y^{(e)},\ \frac{\mathrm{d}p_z}{\mathrm{d}t}=\sum F_z^{(e)}$$

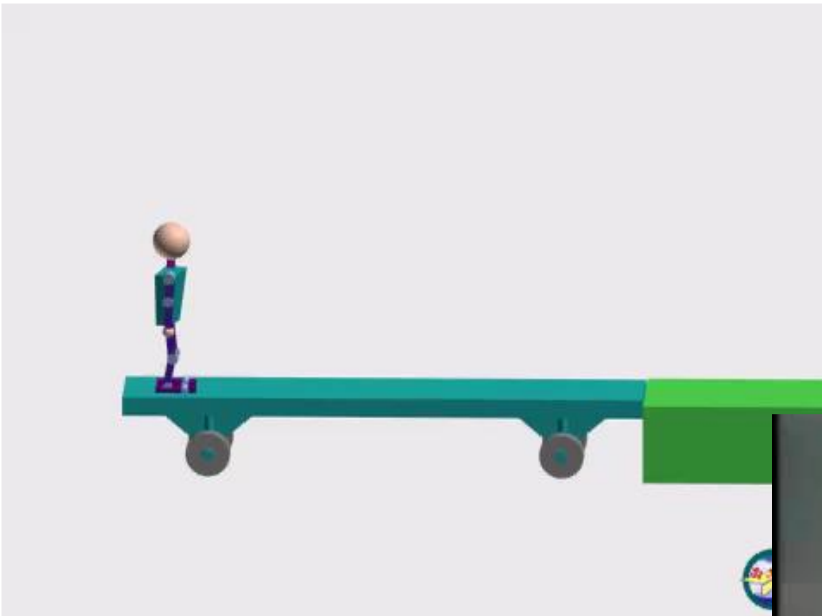
$$\boxed{\text{若} \sum \boldsymbol{F}_i^{(e)} \equiv 0,\ \boldsymbol{p}=\text{恒矢量}}$$

如果作用于质点系的外力的主矢恒等于零，质点系的动量保持不变--**质点系的动量守恒**

$$\boxed{\text{若} \sum F_x^{(e)} \equiv 0,\ p_x=\text{恒量}}$$

如果作用于质点系的外力主矢在某一坐标轴上的投影恒等于零，质点系的动量在该坐标轴上的投影保持不变--**质点系动量的投影守恒**

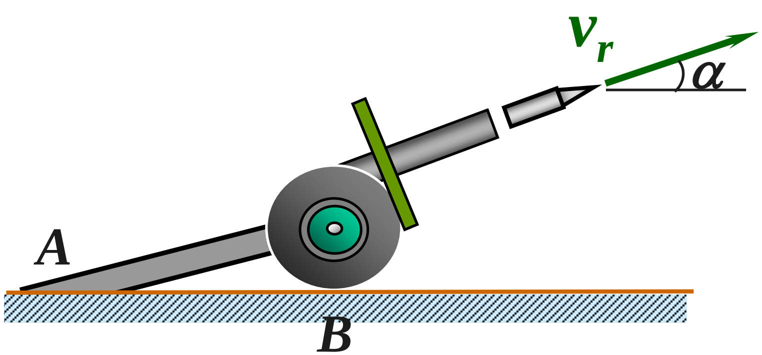
实例分析：人在光滑水平面的小车上行走



内力不改变整个质点系的动量，但是质点系每一部分的动量可能会改变。

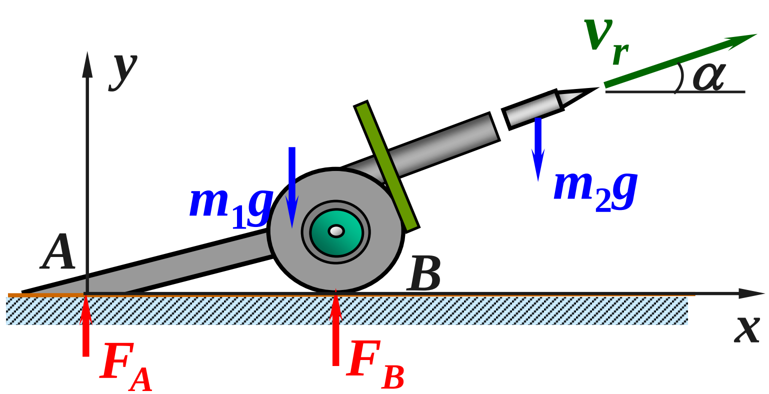
实例分析：反冲运动

例： 火炮（包括炮车与炮筒）的质量是m_1，炮弹的质量是m_2，炮弹相对炮车的发射速度是v_r，炮筒对水平面的仰角是α。设火炮放在光滑水平面上，且炮筒与炮车相固连，试求火炮的后坐速度和炮弹的发射速度。



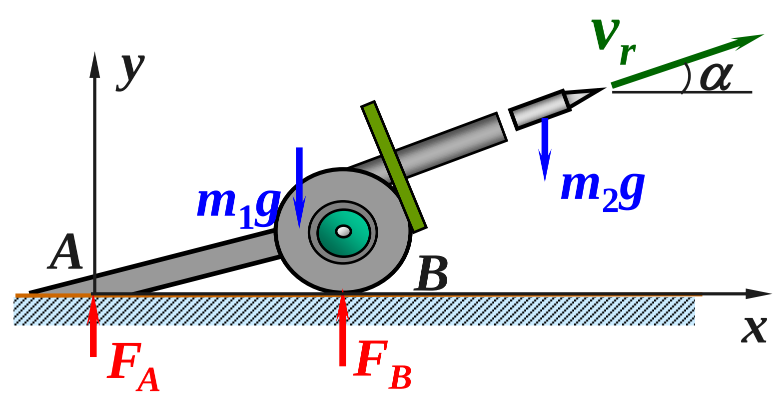
解：取火炮和炮弹（包括炸药）系统作为研究对象，受力分析

$$\sum F_{ix} = 0$$

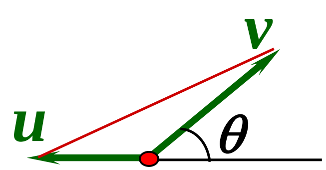


系统的动量在x轴上投影守恒，且初始瞬时静止，即有 $p_x = 0$

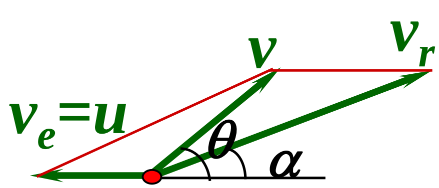
$$p_x = 0$$



设火炮的反坐速度是u，
炮弹的发射(绝对)速度是v，
对水平面的仰角是θ。



$$p_x = m_2 v\cos\theta - m_1 u = 0$$



$$v\cos\theta = v_r\cos\alpha - u$$

$$v\sin\theta = v_r\sin\alpha$$

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_e + \boldsymbol{v}_r$$

联立求解三个方程

$$u = \frac{m_2}{m_1 + m_2} v_r\cos\theta$$

$$v = v_r\sqrt{1 - \frac{(2m_1 + m_2)m_2}{(m_1 + m_2)^2}\cos^2\alpha}$$

$$\tan\theta = (1 + \frac{m_2}{m_1})\tan\alpha$$

v与v_r方向不同，$\theta > \alpha$
当$m_1 >> m_2$时，$\theta \approx \alpha$

§ 10-3 质心运动定理

--质点系动量定理在刚体系统中的应用

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t}=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{F}_i^{(e)} \xrightarrow{\boldsymbol{p}=M\boldsymbol{v}_C} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(M\boldsymbol{v}_C)=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{F}_i^{(e)}$$

$$M\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}_C}{\mathrm{d}t}=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{F}_i^{(e)}$$

$$\boxed{M\boldsymbol{a}_C=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{F}_i^{(e)}}$$

质点系的总质量与其质心加速度的乘积, 等于作用在该质点系上所有外力的矢量和（主矢），即质心运动定理。

直角坐标轴投影式 $\boxed{Ma_C = \sum_{i=1}^{n} F_i^{(e)}}$ 自然坐标轴投影式

$$\left.\begin{aligned} Ma_{cx} &= \sum F_x^{(e)} \\ Ma_{cy} &= \sum F_y^{(e)} \\ Ma_{cz} &= \sum F_z^{(e)} \end{aligned}\right\} \left\{\begin{aligned} M\frac{\mathrm{d}^2 x_C}{\mathrm{d}t^2} &= \sum F_x^{(e)} \\ M\frac{\mathrm{d}^2 y_C}{\mathrm{d}t^2} &= \sum F_y^{(e)} \\ M\frac{\mathrm{d}^2 z_C}{\mathrm{d}t^2} &= \sum F_z^{(e)} \end{aligned}\right.$$

$$M\frac{v_C^2}{\rho} = \sum F_n^{(e)}$$

$$M\frac{\mathrm{d}v_C}{\mathrm{d}t} = \sum F_\tau^{(e)}$$

$$\sum F_b^{(e)} = 0$$

- 具体应用三种形式:导数形式、微分形式和积分形式.
- 根据质心加速度的两种描述方法:直角坐标法和自然坐标法.
- 该定理反映出质心运动的变化取决于质点系所受外力主矢.
- 该定理涵盖了质点运动微分方程,可用于质点和一般刚体.
- 此定理只反映了物体(质点系)随质心的平动.

★ 质心运动守恒

$$Ma_C = \sum_{i=1}^{n} F_i^{(e)}$$

若:$\sum F_i^{(e)} \equiv 0$ ⟹ $a_C = 0,\ v_C$ =常矢量

当外力系主矢量等于零时，质心的加速度等于零，质心保持静止或作匀速直线运动。若开始静止，则质心的位置始终保持不变——**质心运动守恒**。

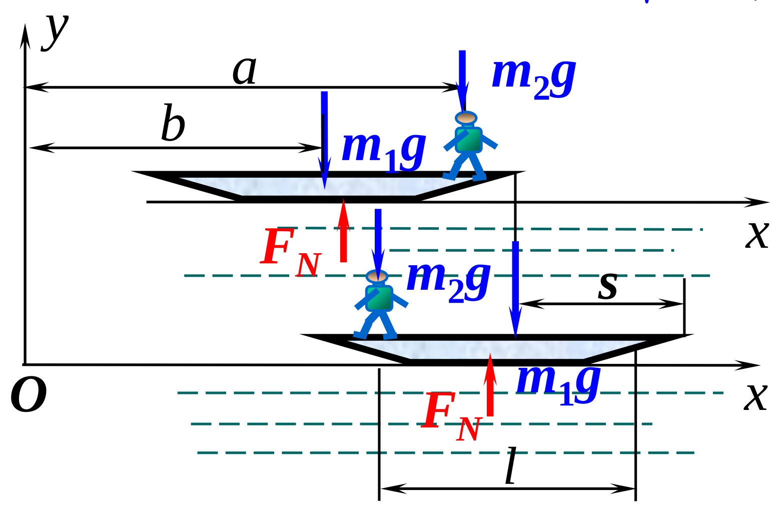
若:$\sum F_x^{(e)} \equiv 0$ ⟹ $a_{Cx} = 0$, 即 $v_{Cx} = \text{const}$

当外力系在某轴上投影的代数和等于零时，质心的加速度在该轴上投影为零——**投影守恒**。

若初始静止，$x_C = x_{C0} =$ 常量，则质心沿该轴的坐标保持不变 ——**质心位置守恒**。

思考：质心运动守恒与质点系动量守恒的关系？

例 如图所示，在静止的小船上，一人自船头走到船尾，设船的质量为m_1，人质量为m_2，船长l，水的阻力不计，求船的位移。



解：取人与船组成的系统，受力分析

$$\sum F_{ix} \equiv 0$$

质心运动水平投影守恒，系统初瞬时静止，质心水平位置守恒。 $x_C = x_{C0}$

建图示坐标系，初始系统的质心坐标为

$$x_{C0} = \frac{m_2 a + m_1 b}{m_2 + m_1}$$

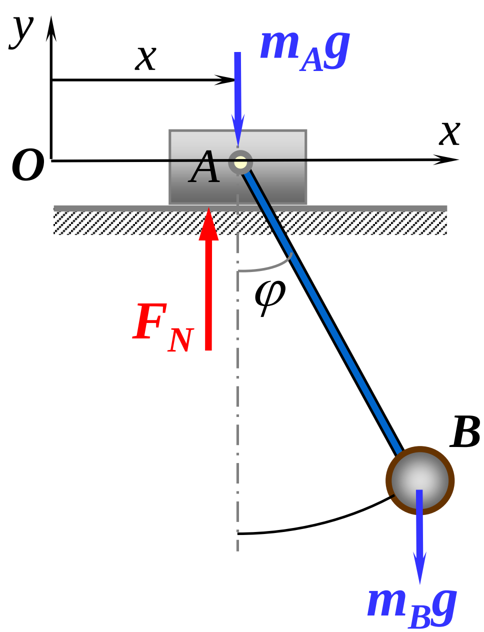
人走到船尾时，船移动距离s，此时质心的坐标为

$$x_C = \frac{m_2(a - l + s) + m_1(b + s)}{m_2 + m_1}$$

$$s = \frac{m_2 l}{m_2 + m_1}$$

质点系的内力（鞋底与船间摩擦力）虽不能改变系统质心的运动，但能改变系统中各部分的（人与船）运动。

例 图示单摆B的支点固定在一可沿光滑的水平直线轨道平移的滑块A上，设A，B的质量分别为m_A，m_B运动开始时，$x=x_0$，$\dot{x}=0$，$\varphi=\varphi_0$，$\dot{\varphi}=0$。试求单摆B的轨迹方程。



解：以系统为对象，其运动可用坐标x和角度φ两个独立坐标确定。

x方向无外力作用，且初始静止，系统质心水平位置守恒。

$$x_C=\frac{m_Ax+m_B(x+l\sin\varphi)}{m_A+m_B}$$

$$=\frac{m_Ax_0+m_B(x_0+l\sin\varphi_0)}{m_A+m_B}=x_{C0}$$

$$x=x_{C0}-\frac{m_B}{m_A+m_B}l\sin\varphi$$

B的坐标

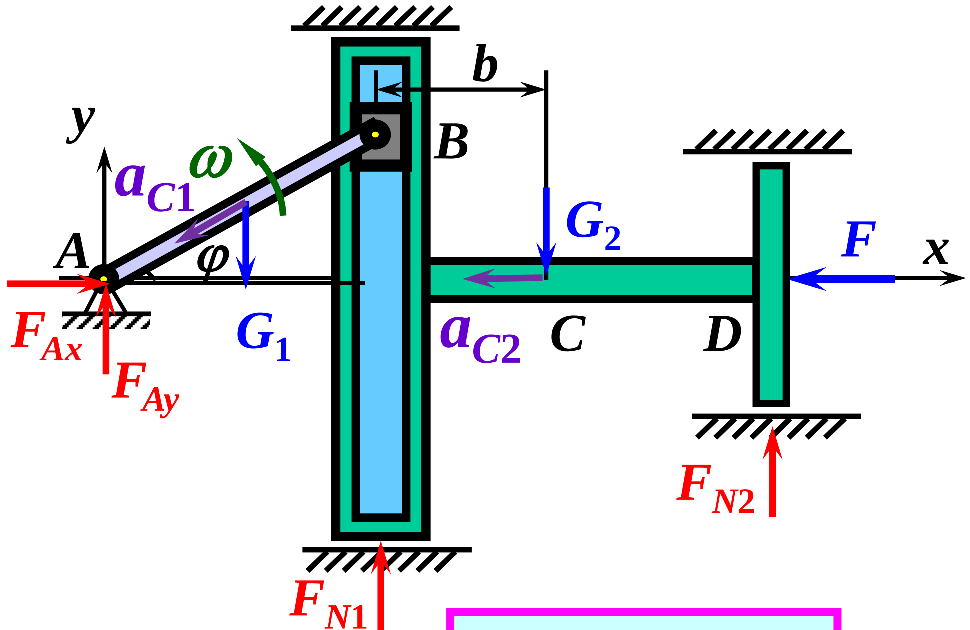
$$x_B=x+l\sin\varphi=x_{C0}+\frac{m_A}{m_A+m_B}l\sin\varphi$$

$$y_B=-l\cos\varphi$$

$$(1+\frac{m_B}{m_A})^2(x_B-x_{C0})^2+y_B^2=l^2$$

以 $x=x_{C0}$ ，$y=0$ 为中心的椭圆方程，因此悬挂在滑块上的单摆也称为椭圆摆。

例： 曲柄AB长r，重G_1，以匀角速度ω转动，并带动滑槽连杆及活塞D，滑槽连杆、活塞共重G_2，质心在点C，活塞受恒力F。求作用于曲柄轴A上的最大水平分力F_{Ax}（滑块B质量不计，略去各接触面的摩擦）。



解：研究系统受力如图

建立坐标系

整个系统的质心位置

$$x_C = [G_1 \cdot \frac{r}{2}\cos\varphi + G_2(r\cos\varphi + b)]\frac{1}{G_1 + G_2}$$

$$a_{Cx} = \frac{d^2 x_C}{dt^2} = \frac{-r\omega^2}{G_1 + G_2}(\frac{G_1}{2} + G_2)\cos\omega t$$

$$\frac{(G_1 + G_2)}{g}a_{Cx} = F_{Ax} - F$$

$$F_{Ax} = F - \frac{r\omega^2}{g}\left(\frac{G_1}{2} + G_2\right)\cos\omega t$$

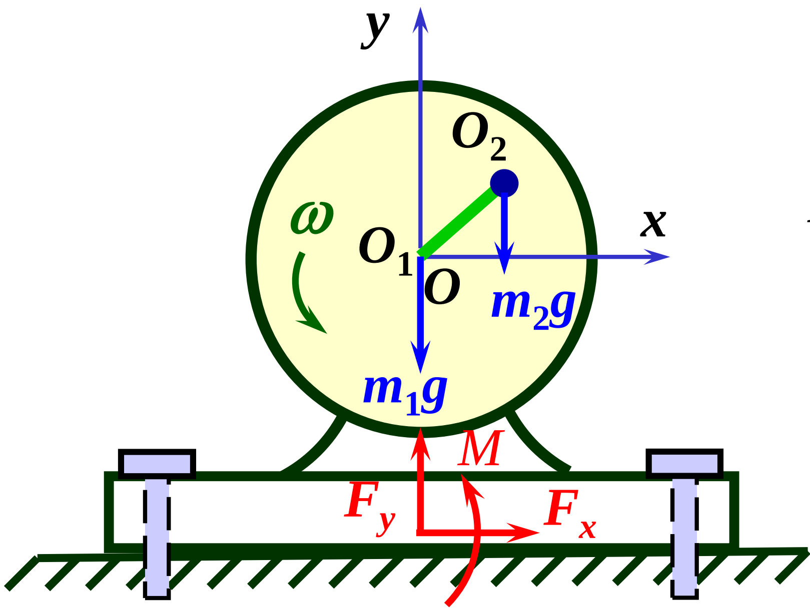
$$F_{Ax\max} = F + \frac{r\omega^2}{g}(\frac{G_1}{2} + G_2)$$

$$\boldsymbol{Ma}_C = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{F}_i^{(e)}$$

$$\boldsymbol{Ma}_C = \sum_{I=1}^{N} M_I \boldsymbol{a}_{CI} = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{F}_i^{(e)}$$

可以借助复合运动分析方法建立加速度关系。

分析例： 电动机的外壳固定在水平基础上，定子质量m_1，其质心为O_1，转子质量m_2，转子的转轴通过O，但由于制造误差，转子的质心O_2到O_1的距离为e。已知转子以匀角速度ω转动。求基础的水平和铅垂反力。



$$F_x = -m_2 e\omega^2 \cos\omega t$$

$$F_y = (m_1 + m_2)g - m_2 e\omega^2 \sin\omega t$$

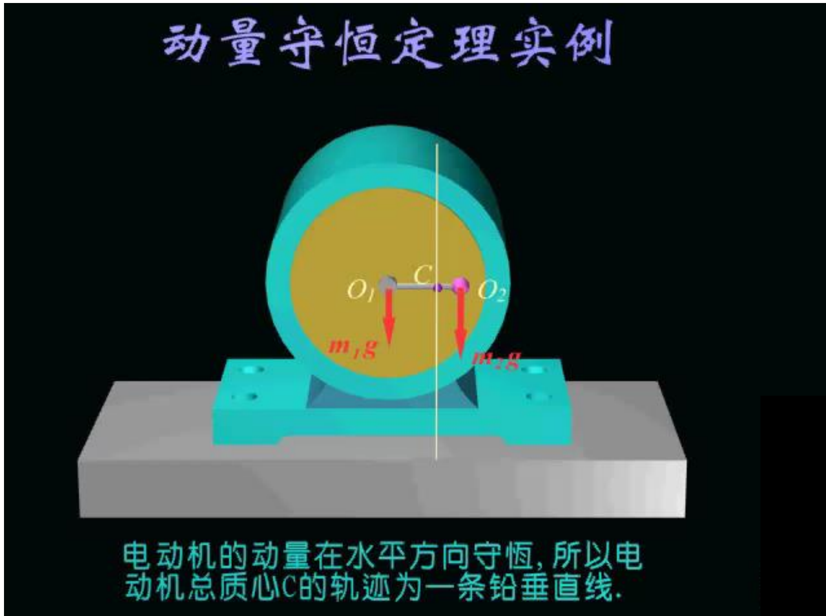
支座反力的最大值和最小值：

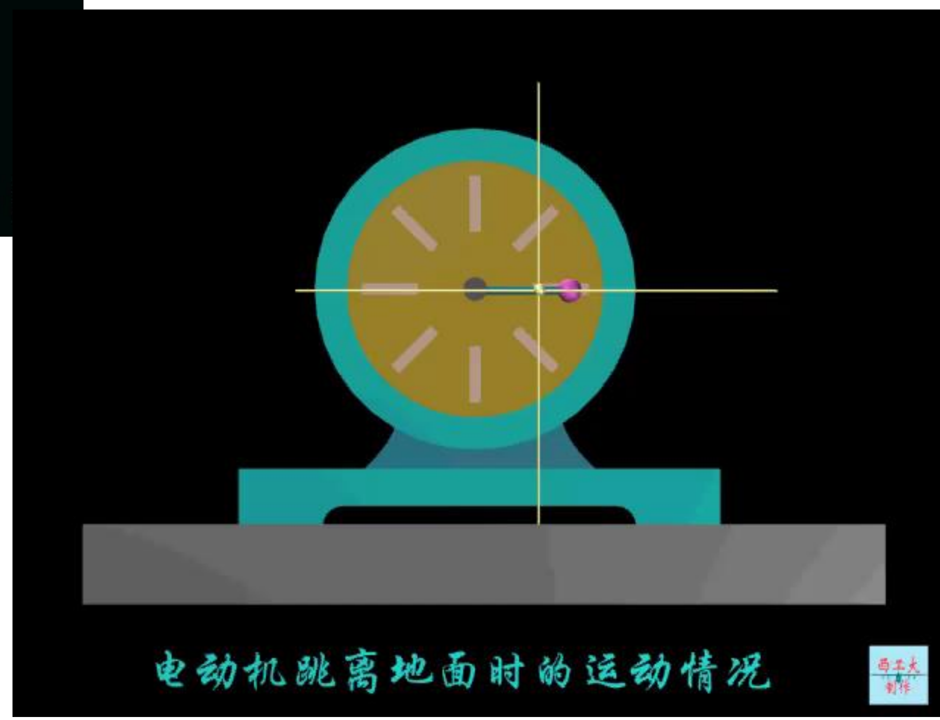
$$F_{xmax} = m_2 e\omega^2 \qquad F_{xmin} = 0$$

$$F_{ymax} = (m_1 + m_2)g + m_2 e\omega^2$$

$$F_{ymin} = (m_1 + m_2)g - m_2 e\omega^2$$

分析若此例中的电动机不用螺栓固定，静止放在光滑水平面上，求通电后电机在水平方向上的运动规律（O_2C初始铅垂）及不脱离地面的最大角速度。





$$\omega_{max}=\sqrt{\frac{m_1+m_2}{m_2 e}g}$$

利用质心运动定理解题步骤：

1） 选取研究对象；

2） 受力分析；

3） 判断是否守恒；

4） 若守恒，且初始静止则质心位置保持不变；

5） 若不守恒，计算系统质心坐标，求系统质心（或分别各部分的质心）加速度，然后利用质心运动定理求未知力。在外力已知时，求质心的运动规律。

小结

质点系动量的计算

$$\boldsymbol{p} = \sum_{i=1}^{n} m_i \boldsymbol{v}_i \qquad p = m v_C$$

质点系动量定理

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{p}}{\mathrm{d}t} = \sum \boldsymbol{F}_i^{(e)} = \boldsymbol{F}_R$$

——可用于流体

$$m\boldsymbol{a}_C = \sum \boldsymbol{F}_i^{(e)}$$

——质心运动定理

——主要应用于刚体和刚体系统

质点系的动量守恒

若 $\sum F_x^{(e)} \equiv 0$， $p_x =$恒量

应用形式为投影式

$$a_{Cx} = 0, \text{即} v_{Cx} = \text{const}$$

$$x_C = x_{C0} = \text{常量}$$

——主要使用投影守恒和位置守恒