第二章质点动力学

§2-1牛顿三定律及其应用

一、牛顿运动定律

1、牛顿第一运动定律：自由物体永远保持静止或匀速直线运动状态。

(1)指明了任何物体都具有惯性。（称为惯性定律）

(2)准确提出力的含义—加速度的原因（包含合力为零）

(3)存在着特殊的参照系——惯性参照系（无穷多）

2、第二定律：基本内容： $\vec{F} = m\vec{a}$

(1)力的量度：标准千克（原因）（目前保存在巴黎附近的国际计量局中的铂铱圆柱体，国际协议规定其质量为1千克）

(2)质量可以作为惯性的定量量度

(3)力的独立性，即力的迭加原理（实验定理）

（与运动独立性或迭加原理是一致的）

3、第三定律：作用力和反作用力的性质是相同的，同时产生、同时存在、同时消失，并非原因与效果。

（系统的内力之和恒为零）

二、牛顿运动定律应用

1、用途：（1）已知：$\vec{r}(t)$ ，求 $\vec{f}$

（2）已知：$\vec{f}, \vec{v}_0, \vec{r}_0$，求 $\vec{r}(t)$

2、应用牛顿运动定律应注意的几个问题

（1）牛顿第三定律表示的是瞬时关系。

（2）是矢量式，蕴涵着力的独立性。

几个力同时作用在一个物体上所产生的加速度，等于各个力单独作用时的矢量和，成为力的迭加原理。

（3）实际应用时，经常使用分量式

直角坐标

$$\begin{cases} F_x = ma_x = m\dfrac{d^2x}{dt^2} \\ F_y = ma_y = m\dfrac{d^2y}{dt^2} \\ F_z = ma_z = m\dfrac{d^2z}{dt^2} \end{cases}$$

自然坐标

$$\begin{cases} F_n = ma_n = m\dfrac{v^2}{R} \\ F_t = ma_t = m\dfrac{dv}{dt} \end{cases}$$

（4）$\vec{F} = m\vec{a}$ 中， $\vec{F}$ 式合外力，在作变力图中应特别注意。

注：使用隔离体法解题的一般步骤

1、分析题意，确定研究对象。

2、分析研究对象的受力情况。

3、选择适当的坐标系，利用牛顿第二定律列出运动方程。

4、解方程。

5、讨论结果。

例2-1-3已知：小球的质量为m，水的浮力为$\vec{B}$，阻力与速度成正比系数为k，试计算小球在水中的沉降速度。(设小球的初始速度为零)

$$mg - B - R = ma$$

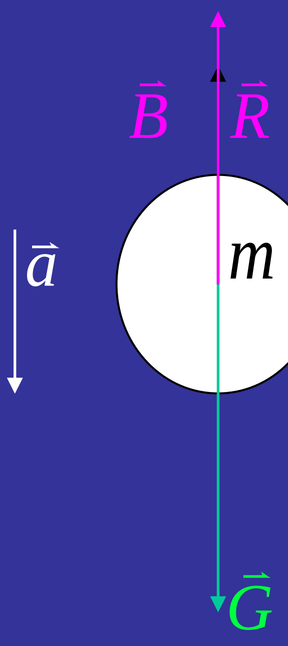
解：

$$mg - B - Kv = m\frac{dv}{dt} \qquad a = \frac{dv}{dt} = \frac{mg - B - Kv}{m}$$

$$t = 0, \qquad v = v_0 = 0 \qquad v_T = \frac{mg - B}{K}$$

设

$$\therefore \frac{dv}{dt} = \frac{K(v_T - v)}{m} \qquad \int_0^v \frac{dv}{v_T - v} = \int_0^t \frac{K}{m}dt$$



$$V = V_T(1 - e^{-\frac{K}{m}t})$$

所以

讨论：当 $t \to \infty$ 时，$V \to V_T$。

§2-2动量、冲量、动量定理

一、动量与动量定理

1、动量 $\vec{P} = m\vec{v}$

（1）动量是描述物体运动状态的物理量。

（2）动量与参照系的选择有关。

（3）对高速运动物体运动状态度的描述仍然有效。

注：高速物体的动量为动量的一般形式——相对论动量

$$\vec{P} = m\vec{v} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}}$$

当物体低速运动时可以近似写为 $\vec{P} = m_0\vec{v}$。

2、动量定理

（1）动量定理的微分形式

$$\vec{F}=\frac{d\vec{P}}{dt}=m\frac{d\vec{v}}{dt}+\vec{v}\frac{dm}{dt}$$

当物体低速运动时可以近似写 为 $\vec{F}=m\vec{a}$。

（2）动量定理的积分形式

对于 $\vec{F}dt=d\vec{P}$ 两边从 $t_1\sim t_2, P_1\sim P_2$ 积分，可得

$$\vec{I}=\int_{t_1}^{t_2}\vec{F}dt=\int_{\vec{P}_1}^{\vec{P}_2}d\vec{P}$$

定义：$\vec{I}=\int_{t_1}^{t_2}\vec{F}dt$ 为力在 $t_1\sim t_2$ 内，对物体的冲量。

二、物体系的动量定理

1、内力和外力的概念

（1）内力：系统内物体间的相互作用力。

（2）外力：外界对系统内物体的作用力。

2、物体系的动量定理

设物体系内有n个物体，外力用 $\vec{F}_i$ 表示，$\vec{f}_{ij}$ 表示第j个物体对第i个物体的作用力，则对第i个物体应用动量定理可得

$$\vec{I}_i = \int_{t_1}^{t_2} (\vec{F}_i + \sum_{j \neq i} \vec{f}_{ij}) dt = \int_{\vec{P}_{1i}}^{\vec{P}_{2i}} d\vec{P}_i$$

考虑到为 $\vec{f}_{ij}$ 内力，则系统内的内力总和为 $\sum_i \vec{f}_{ij} = 0$

$$\sum_i \vec{I}_i = \int_{t_1}^{t_2} (\sum_i \vec{F}_i) dt = \sum_i \int_{\vec{P}_{1i}}^{\vec{P}_{2i}} d\vec{P}_i = \vec{P}_2 - \vec{P}_1 \qquad \vec{P}_2 - \vec{P}_1 = \int_{t_1}^{t_2} (\sum_i \vec{F}_i) dt$$

上式称为系统的动量定理即<u>系统动量的改变量等于合外力对系统的总冲量。</u>

注：

（1）内力对系统的总动量没有贡献，但内力使得动量在系统各个物体间相互传递，重新分配。

（2）牛顿第二定律主要体现力的瞬时性，针对单个物体；而动量定理主要体现力对时间的积累效果，适用于物体系。

（3）动量定理只适用于惯性系，对于非惯性系必须引入惯性力。

（4）对于碰撞、爆炸、变质量等问题，使用动量定理较为方便。

三、动量守恒定理

对于物体系应用物体系的动量定理，

$$\vec{P}_2 - \vec{P}_1 = \int_{t_1}^{t_2} (\sum_i \vec{F}_i) dt$$

若合外力 $\sum_i \vec{F}_i = 0$ ， 或内力远大于外力，作用时间很短

则： $\vec{P}_2 = \vec{P}_1$ ， $\vec{P}$ 为恒矢量，系统动量守恒。

分量式 若 $\begin{cases} \sum F_{ix} = 0 \\ \sum F_{iy} = 0 \\ \sum F_{iz} = 0 \end{cases}$ 则 $\begin{cases} P_x = C_1 \\ P_y = C_2 \\ P_z = C_3 \end{cases}$

注：

（1）动量守恒是对于系统而言的，是动量总量不变而在系统的各个物体间重新分配。

（2）守恒条件为合外力为零，各个分量的合外力为零也满足守恒条件。

（3）某些如（爆炸、碰撞等）特殊过程，虽然体系合外力不为零，但与内力的冲量相比可以忽略不计，可用动量守恒定理来研究系统内各部分之间的动量再分配问题。

（4）动量守恒是自然界中最基本的守恒定律之一，是空间对称性的体现。

四、质心与质心运动定理

（一）质心

1、定义：系统质量的中心，能够代表系统的运动状态。

2、表达式：

（1）质心的位矢 $\vec{r}_C$

$$\vec{r}_C=\frac{\sum_i m_i\vec{r}_i}{\sum_i m_i}$$ （质量离散分布的物体）

或 $$\vec{r}_C=\frac{\int \vec{r}dm}{\int dm}$$ （质量连续分布的物体）

分量式

$$\begin{cases} x_C=\dfrac{\sum_i m_i x_i}{\sum_i m_i} \\ y_C=\dfrac{\sum_i m_i y_i}{\sum_i m_i} \\ z_C=\dfrac{\sum_i m_i z_i}{\sum_i m_i} \end{cases}$$ 或 $$\begin{cases} x_C=\dfrac{\int xdm}{\int dm} \\ y_C=\dfrac{\int ydm}{\int dm} \\ z_C=\dfrac{\int zdm}{\int dm} \end{cases}$$

（2）质心的速度 $\vec{v}_C$

$$\vec{v}_C = \frac{\sum_i m_i \vec{v}_i}{\sum_i m_i}$$

分量式

$$\begin{cases} \vec{v}_{Cx} = \dfrac{\sum_i m_i \vec{v}_{ix}}{\sum_i m_i} \\ \vec{v}_{Cy} = \dfrac{\sum_i m_i \vec{v}_{iy}}{\sum_i m_i} \\ \vec{v}_{Cz} = \dfrac{\sum_i m_i \vec{v}_{iz}}{\sum_i m_i} \end{cases}$$

（3）质心的加速度 $\vec{a}_C$

$$\vec{a}_C = \frac{\sum_i m_i \vec{a}_i}{\sum_i m_i}$$

分量式

$$\begin{cases} \vec{a}_{Cx} = \dfrac{\sum_i m_i \vec{a}_{ix}}{\sum_i m_i} \\ \vec{a}_{Cy} = \dfrac{\sum_i m_i \vec{a}_{iy}}{\sum_i m_i} \\ \vec{a}_{Cz} = \dfrac{\sum_i m_i \vec{a}_{iz}}{\sum_i m_i} \end{cases}$$

注：（1）质心的位置与物体的大小、形状、质量分布有关。

（2）质心的位置与坐标系的选取有关。

（二）质心运动定理

由系统的牛顿第二定律可得

$$\sum \vec{F}_i = \frac{d(\sum \vec{P}_i)}{dt} = \frac{d(\sum m_i \vec{v}_i)}{dt} = (\sum m_i)\frac{d}{dt}\left(\frac{\sum m_i \vec{v}_i}{\sum m_i}\right) = (\sum m_i)\frac{d\vec{v}_C}{dt} = (\sum m_i)\frac{d^2\vec{r}_C}{dt^2}$$

对于系统的质心运动定理为

$$\sum \vec{F}_i = (\sum m_i)\vec{a}_C = (\sum m_i)\frac{d\vec{v}_C}{dt} = (\sum m_i)\frac{d^2\vec{r}_C}{dt^2}$$

其中，$\sum \vec{F}_i$ 为合外力；$\sum m_i$为系统的总质量；

注：（1）质心代表系统的运动状态，质心运动定理描述了系统的运动状态的变换与外力的关系。

（2）质心的位矢并不是各个质点的位矢的几何平均值，而是它们的加权平均值，质心的性质只有在系统的运动与外力的关系中才体现出来，故质心并不是一个几何学或运动学大概念，而是动力学的概念。

（3）体系质心的坐标与坐标原点的选取有关，但体系内各个质点的相对位置与原点的选取无关。

（4）作用在体系上的诸外力一般不在一条直线上，就作用效果而言不等效于一个合力，如：也许会产生转动效果；但对质心而言，非共点力的作用效果都等效作用在质心上。

（5）将坐标原点取在质心上，坐标轴与某惯性系平行的平动参照系为质心坐标系或质心系。对于外力的矢量和为零或不受外力作用的参照系质心系为惯性系，否则为非惯性系。

§2-3动能定理、功能原理、机械能守恒定理

一、功、动能、动能定理

1、功

（1）微功的定义 $$dA = \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

（2）总功

$$A_{ab} = \int_a^b dA = \int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

讨论：合力的功

$$A_{ab} = \int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_a^b \sum \vec{F}_i \cdot d\vec{r}_i = \sum \int_a^b \vec{F}_i \cdot d\vec{r}_i = \sum A_i$$

合外力所作的总功等于各个分力所作的功之和。

例2-3-1试计算下列过程中，理想气体从状态 $\mathrm{I}(P_1,V_1)$ 缓慢地膨胀到状态II (P_2,V_2) 的过程中对外界所作的功。

（1） $PV = C$ （2） $PV^n = C \quad (n>1)$

解： $f = Ps$

元功 $dA = fdx = Psdx = Pdv \qquad A = \int_{V}^{V_2} PdV$

（1） $PV = C$ 等温过程 $A = \int_{V}^{V_2} PdV = \int_{V}^{V_2} C\frac{dV}{V} = C\ln\frac{V_2}{V_1}$

（2） $PV^n = C$ 多方过程

$$A = \int_{V}^{V_2} PdV = \int_{V}^{V_2} C\frac{dV}{V^n} = C\left(\frac{V_2^{1-n}}{1-n} - \frac{V_1^{1-n}}{1-n}\right)$$

2、动能和动能定理

设质点在变力 $\vec{F}$ 的作用下，作曲线运动从a到b，由牛顿第二定律的自然坐标形式可得

$$F_t = ma_t = m\frac{dv}{dt}$$

由微功的定义可得 $dA = \vec{F}\cdot d\vec{r} = F_t\,|d\vec{r}| = m\frac{dv}{dt}vdt = mvdv$

两边积分可得

$$A = \int_a^b dA = \int_{v_a}^{v_b} mvdv = \frac{1}{2}mv_b^2 - \frac{1}{2}mv_a^2 = E_{K2} - E_{K1}$$

<u>动能定理</u>：<u>合外力对物体所作的总功等于物体的动能增量</u>。

注：

（1）动能是物体运动状态的单值函数，而功是物体能量变化的一种量度；动能是状态量、态函数。功是过程量。

（2）动能定理不是经典力学新的、独立的定律，仅是定义了功和动能之后，直接由牛顿第二定律导出了它们之间的关系，功与动能虽然都与坐标系的选择有关，但只要是惯性系，动能定理均成立。

（3）在某些情况下，动能定理比第二定律解决问题方便，它不必考虑物体复杂的运动过程。

（4）在物理学中，动能定理是将功和能这两个概念进行全面推广的起点，这个事实或许意义更为重大。

二、保守力的功、物体系的势能

1、保守力的功

（1）重力的功 $$A_{a\to b}=\int_z^b dA=\int_{h_1}^{h_2}-mgdh=mgh_1-mgh_2$$

满足：

$$A_{abcdea}=\oint \vec{G}\cdot d\vec{s}=0$$

（2）弹力的功

$$F=-kx \qquad A_{a\to b}=\int_a^b dA=\int_{x_a}^{x_b}-kxdx=\frac{1}{2}kx_a^2-\frac{1}{2}kx_b^2$$

（3）万有引力的功

$$\vec{F}=-G\frac{mM}{r^2}\vec{r} \qquad A_{a\to b}=\int_a^b dA=\int_{r_a}^{r_b}-G\frac{Mm}{r^2}dr=-GMm(\frac{1}{r_a}-\frac{1}{r_b})$$

注：（1）坐功只与位置有关，而与路径无关的力成为保守力。

（2）任意保守力的环流均为零。$A_{abcdea}=\oint \vec{F}\cdot d\vec{s}=0$

2、物体系的势能 E_P

（1）物理意义：由物体系间的相对位置和相互作用来决定的能量，称为势能。

（2）定义：定义物体系中的物体势能为将该物体由某一位置移动到零势能面的过程中保守力所作的功。

（3）势能的增量等于保守力作功的负值。$\Delta E_P = -A_{保守力}$

（4）势能是系统的状态函数，与零势能点的选择有关。

三、功能原理

1、分析

设由i个质点构成了一个质点组，$\vec{f}_{ij}$ 为第j个质点对第i个质点的作用力，$\vec{F}_i$ 为第i个质点所受到的合外力，则对该系统应用动能定理，有

$$A = E_{K2} - E_{K1}$$

$$A = \int_a^b (\sum_{i \neq j} \vec{f}_{ij} + \sum \vec{F}_i) \cdot d\vec{s} = \int_a^b \sum_{i \neq j} \vec{f}_{ij} \cdot d\vec{s} + \int_a^b \sum \vec{F}_i \cdot d\vec{s} = E_{K2} - E_{K1} = \Delta E_K$$

讨论：（1）内力大小相等、方向相反，若其总功为零。

$$A_{内力} = \int_a^b (\sum \vec{f}_{ij}) \cdot d\vec{s} = 0$$

（2）内力分为：保守内力和非保守内力，由保守力作功的特点可得

$$\Delta E_P = -A_{保守力}$$

$$A_{外力} + A_{保守内力} + A_{非保守内力} = E_{K2} - E_{K1} = \Delta E_K$$

移项可得：

$$A_{非保守内力} + A_{外力} = \Delta E_P + \Delta E_K = \Delta(E_P + E_K) = \Delta E$$

2、表述

<u>系统所受到的外力和非保守内力所作的总功，等于系统的机械能增量。</u>

四、机械能守恒定律、能量转化与守恒定律

1、机械能守恒定律

由功能原理可得：$A_{非保守内力}+A_{外力}=\Delta E_P+\Delta E_K=\Delta(E_P+E_K)=\Delta E$

若 $A_{非保守内力}+A_{外力}=0$ 则 $\Delta E_P+\Delta E_K=\Delta(E_P+E_K)=\Delta E=0$

即，系统的机械能守恒-----**机械能守恒定律**

注：迫使人们不断探索把机械运动的物体的力学与非机械的现象联系起来，使力学和物理学的所有其它部分沟通了。能量这一概念已经贯穿了所有物理学科。成为物理学中统一的概念之一。

2、能量转化与守恒定律

表述：对于一封闭系统，能量只能从一个物体传递到另一个物体，从一种形式变为另一种形式，其总量不发生变化。

注意：

（1）能量是系统状态的单值函数

（2）能量转化——物质运动的转化

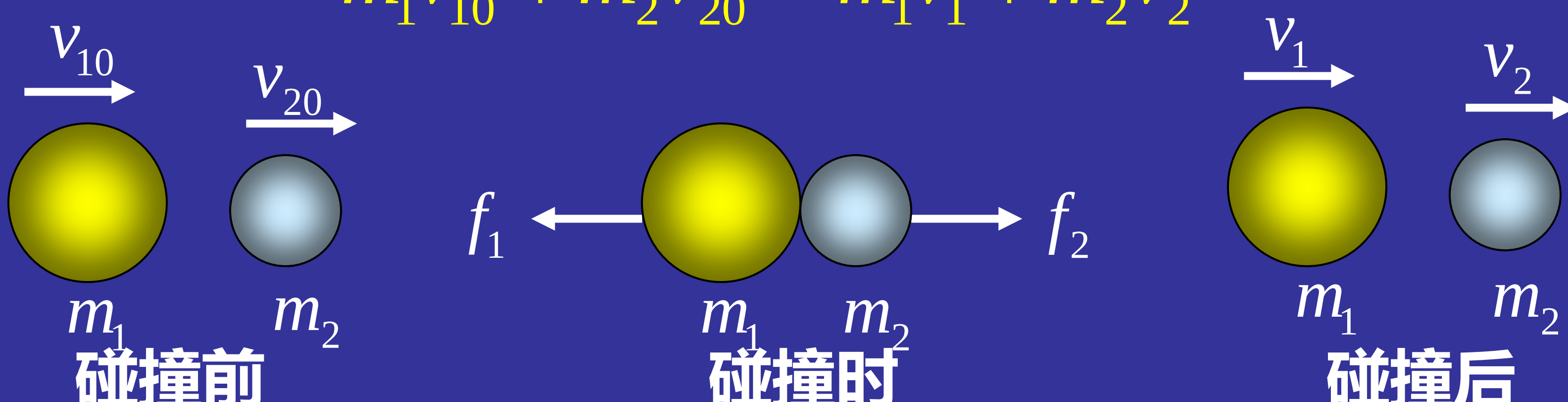
（3）功仅是能量转化的一种量度

碰 撞

如果两球在碰撞前的速度在两球的中心连线上，那么，碰撞后的速度也都在这一连线上，这种碰撞称为对心碰撞（或称正碰撞）。

设 $\vec{v}_{10}$ 和 $\vec{v}_{20}$ 分别表示两球在碰撞前的速度， $\vec{v}_1$ 和 $\vec{v}_2$ 分别表示两球在碰撞后的速度， m_1 和 m_2 分别为两球的质量。应用动量守恒定律得

$$m_1v_{10}+m_2v_{20}=m_1v_1+m_2v_2$$



碰　撞

牛顿的碰撞定律：碰撞后两球的分离速度 $(v_2 - v_1)$，与碰撞前两球的接近速度 $(v_{10} - v_{20})$ 成正比，比值由两球的材料性质决定。

恢复系数

$$e = \frac{v_2 - v_1}{v_{10} - v_{20}}$$

$e = 0$，碰撞后两球以同一速度运动，并不分开，称为完全非弹性碰撞。

$e = 1$，分离速度等于接近速度，称为完全弹性碰撞。

$0 < e < 1$，机械能有损失的碰撞叫做非弹性碰撞。

1. 完全弹性碰撞

$$e=\frac{v_2-v_1}{v_{10}-v_{20}}$$

$$m_1v_{10}+m_2v_{20}=m_1v_1+m_2v_2$$

$$\Rightarrow$$

$$v_1=v_{10}-\frac{(1+e)m_2(v_{10}-v_{20})}{m_1+m_2}$$

$$v_2=v_{20}+\frac{(1+e)m_1(v_{10}-v_{20})}{m_1+m_2}$$

$$v_1=\frac{(m_1-m_2)v_{10}+2m_2v_{20}}{m_1+m_2}$$

令 $e=1$

$$v_2=\frac{(m_2-m_1)v_{20}+2m_1v_{10}}{m_1+m_2}$$

完全弹性碰撞

讨论：

（1）设 $m_1 = m_2$ 得 $v_1 = v_{20},\ v_2 = v_{10}$ 两球经过碰撞将交换彼此的速度。

（2）设 $m_1 \neq m_2$，质量为 m_2 的物体在碰撞前静止不动，即

$$v_{20} = 0$$

$$v_1 = \frac{(m_1 - m_2)v_{10}}{m_1 + m_2} \qquad v_2 = \frac{2m_1 v_{10}}{m_1 + m_2}$$

（3）如果 $m_2 >> m_1$

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \approx -1 \qquad \frac{2m_1}{m_1 + m_2} \approx 0$$

$$\left.\begin{aligned} v_1 &= \frac{(m_1 - m_2)v_{10}}{m_1 + m_2} \\ v_2 &= \frac{2m_1 v_{10}}{m_1 + m_2} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \begin{aligned} v_1 &\approx -v_{10} \\ v_2 &\approx 0 \end{aligned}$$

质量极大并且静止的物体，经碰撞后，几乎仍静止不动，而质量极小的物体在碰撞前后的速度方向相反，大小几乎不变。

2. 完全非弹性碰撞

在完全非弹性碰撞中 $e=0$

$$v_1 = v_{10} - \frac{(1+e)m_2(v_{10}-v_{20})}{m_1+m_2} \qquad v_2 = v_{20} + \frac{(1+e)m_1(v_{10}-v_{20})}{m_1+m_2}$$

$$\Downarrow$$

$$v_1 = v_2 = \frac{m_1 v_{10} + m_2 v_{20}}{m_1+m_2}$$

3. 碰撞中的力和能

设在两球相碰撞的问题中，碰撞接触时间极短，用 Δt 表示，把动量定理应用于质量为 m_2 的小球得

$$\bar{f}=\frac{m_2v_2-m_2v_{20}}{\Delta t}$$

$$v_2=v_{20}+\frac{(1+e)m_1(v_{10}-v_{20})}{m_1+m_2}$$

$$\Rightarrow\quad \bar{f}=\frac{m_1m_2(1+e)(v_{10}-v_{20})}{(m_1+m_2)\Delta t}$$

表明：力的大小和两物体相遇前的接近速度成正比，而和接触时间成反比。力的大小与接触物体的质量和材料有关。

碰撞中的力和能

$$v_1 = v_{10} - \frac{(1+e)m_2(v_{10} - v_{20})}{m_1 + m_2} \qquad v_2 = v_{20} + \frac{(1+e)m_1(v_{10} - v_{20})}{m_1 + m_2}$$

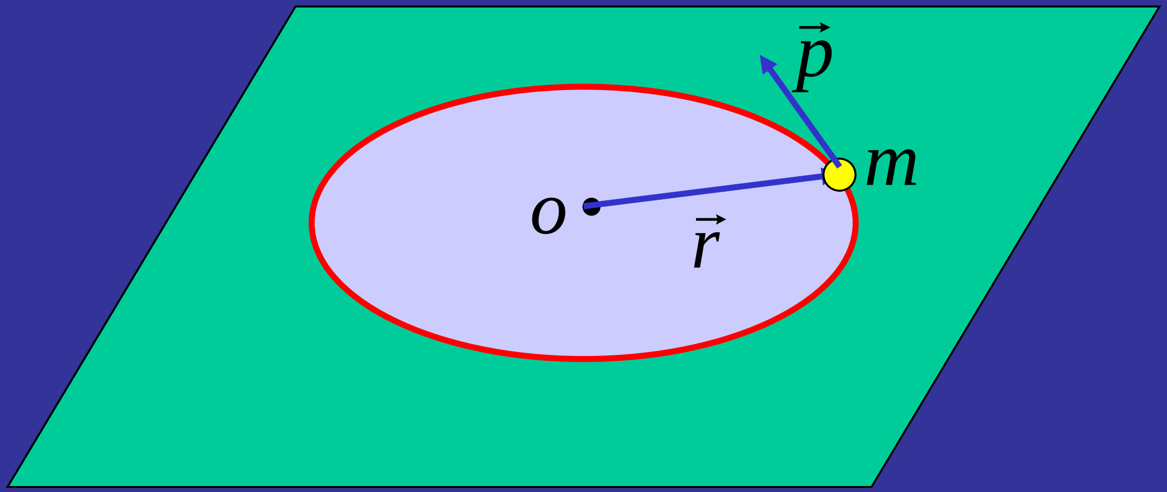
系统损失的机械能

$$\Delta E = \frac{1}{2}(1-e^2)\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}(v_{10} - v_{20})^2$$

§3-6 质点的角动量与角动量守恒定律

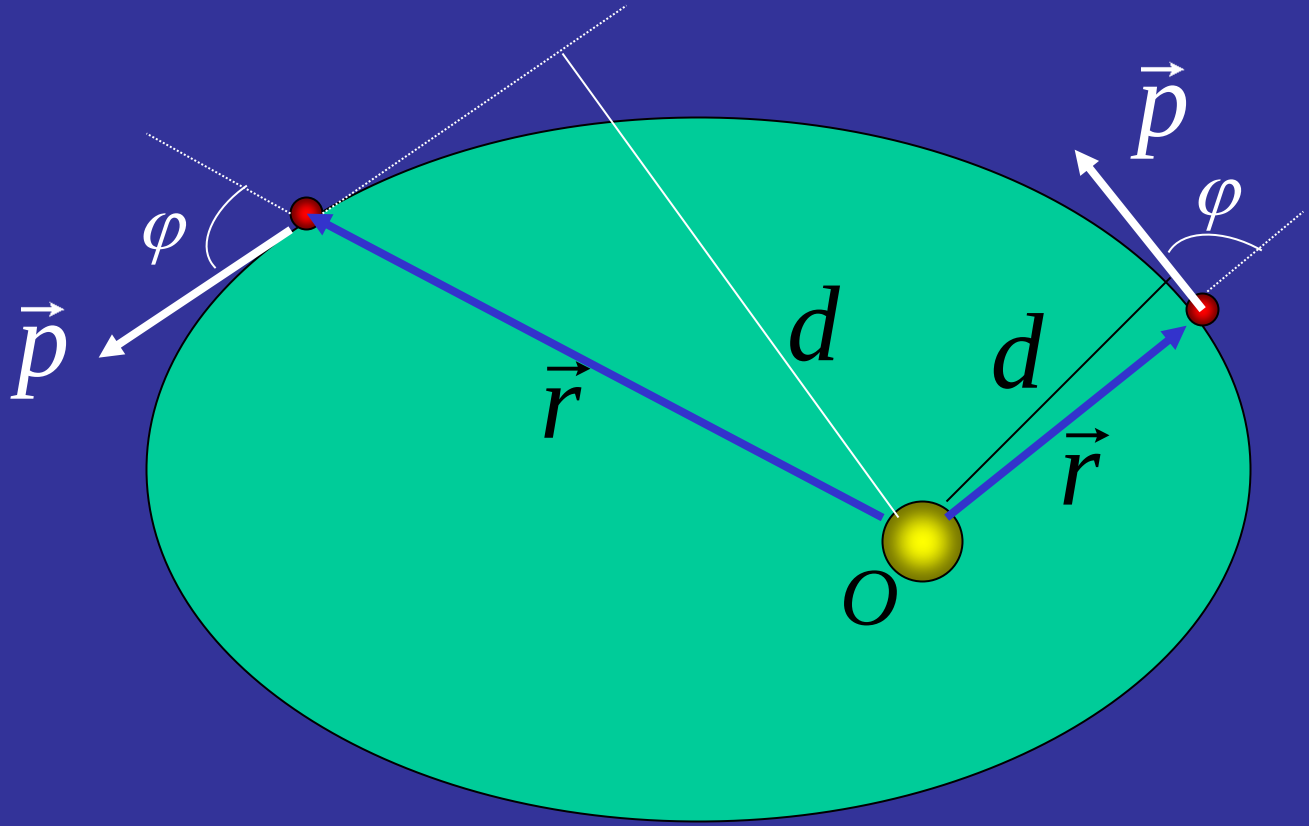
1. 角动量

质点对圆心的角动量



$$L = pr = mvr$$

行星在公转轨道上的角动量



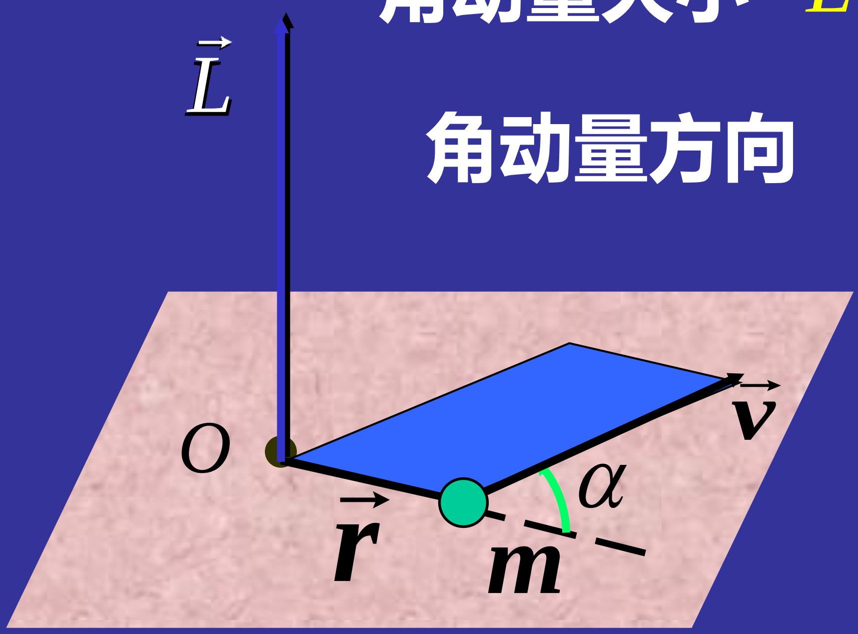
$$L = pd = pr\sin\varphi$$

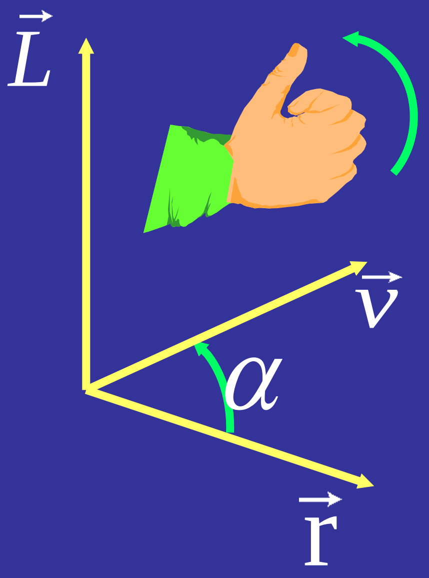
定义：质点对点的角动量为

$$\vec{L}=\vec{r}\times\vec{P}=\vec{r}\times(m\vec{v})$$

角动量大小 $L=rmv\sin\alpha$ **（面积）**

角动量方向

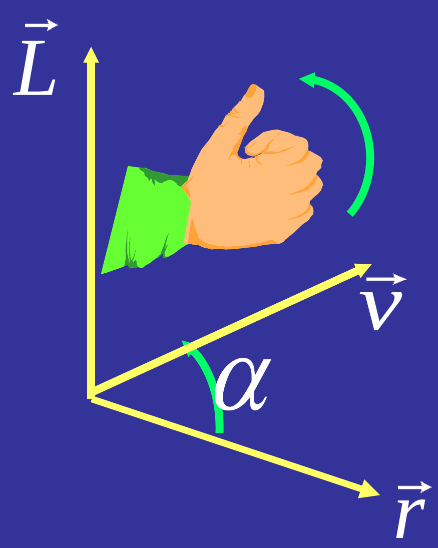


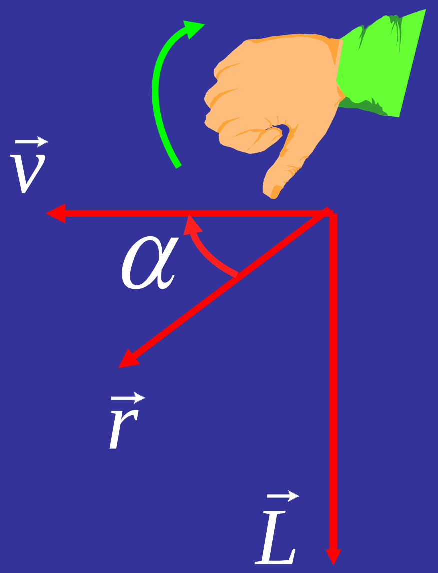


讨 论

（1）质点对点的角动量，不但与质点运动有关，且与参考点位置有关。

（2）$\vec{L}$ 方向的确定



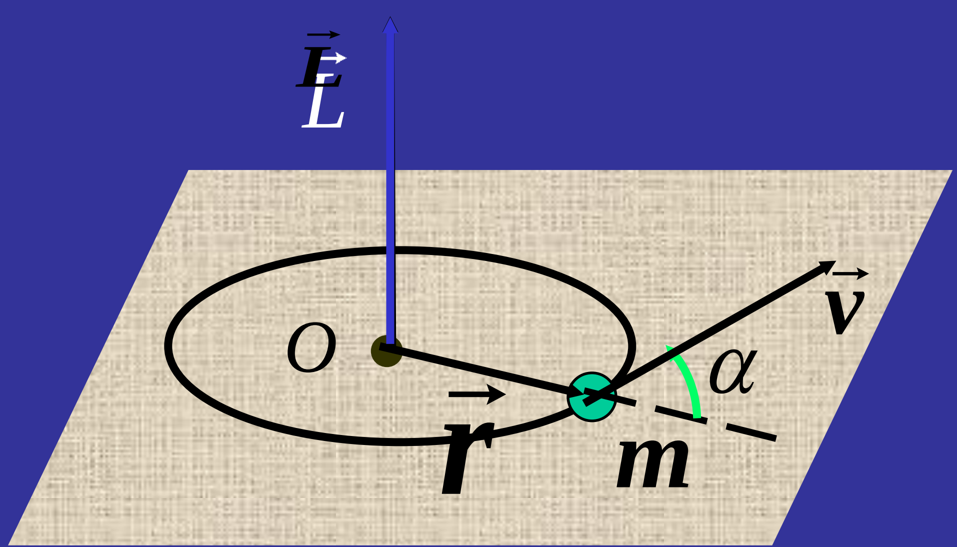


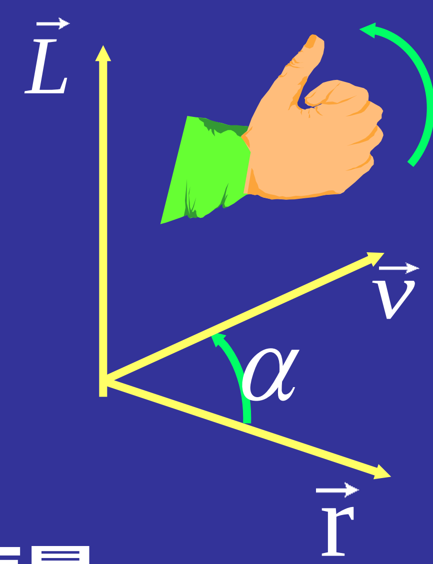
（3）做匀速圆周运动时，由于 $\vec{r} \perp \vec{v}$ ，质点对圆心的角动量大小为

$$L = rmv$$

大小不变

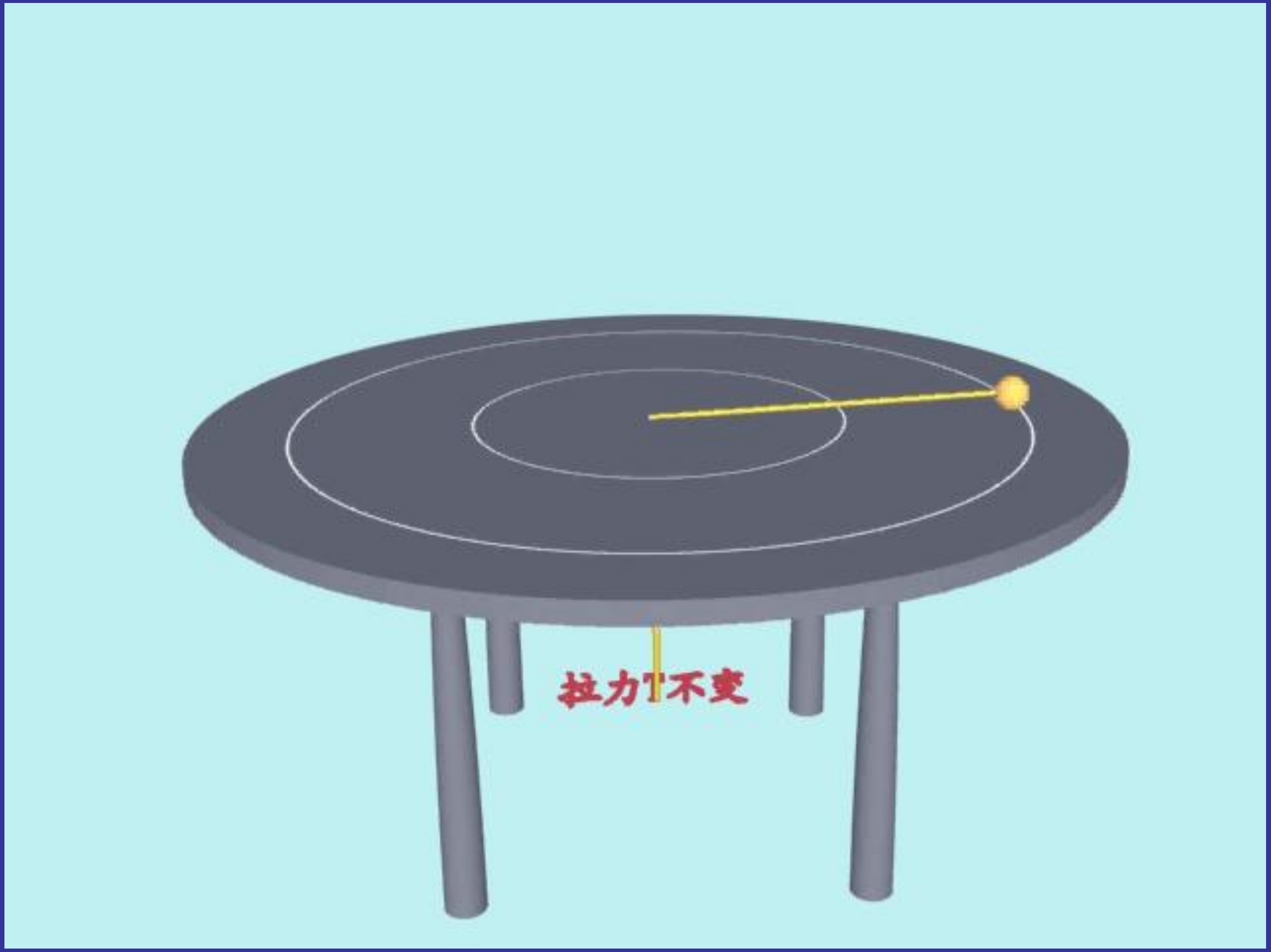
方向不变





质点对圆心O的角动量为恒量

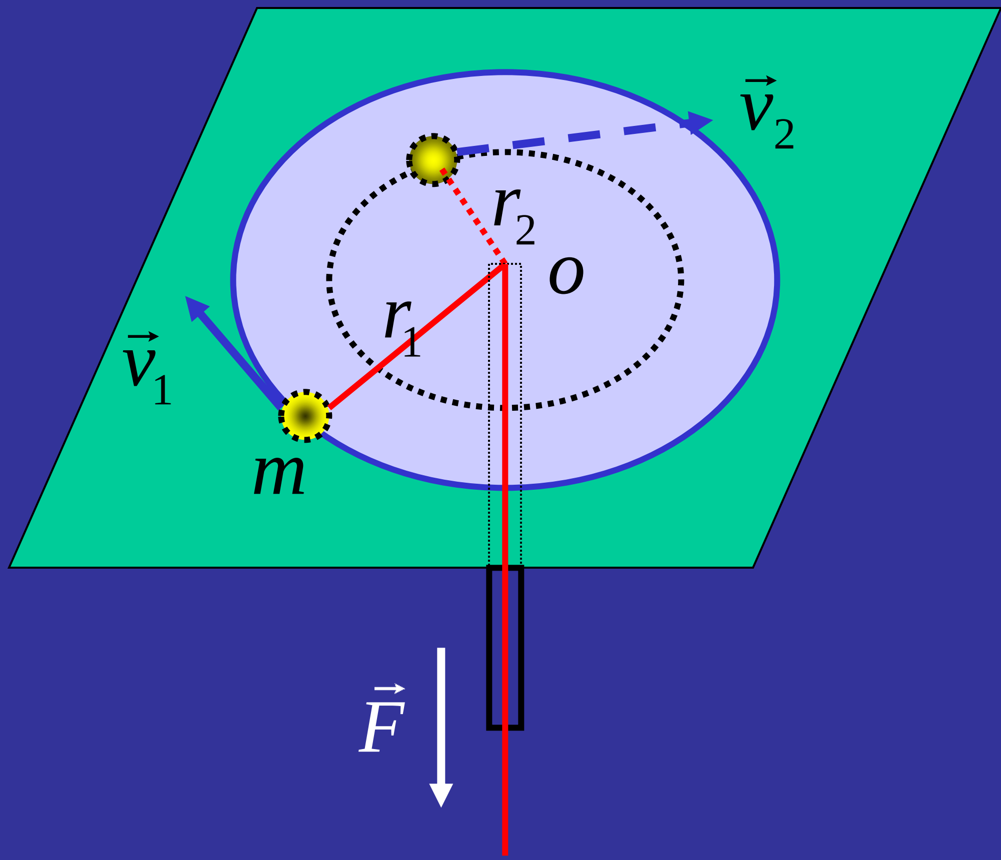
2. 角动量守恒定律



角动量守恒定律

实验中发现

$$v_2 r_2 = v_1 r_1$$



$$m v_2 r_2 = m v_1 r_1$$

表明小球对圆心的角动量保持不变

角动量守恒定律

$$\vec{L}=\vec{r}\times\vec{P}$$

对t求导

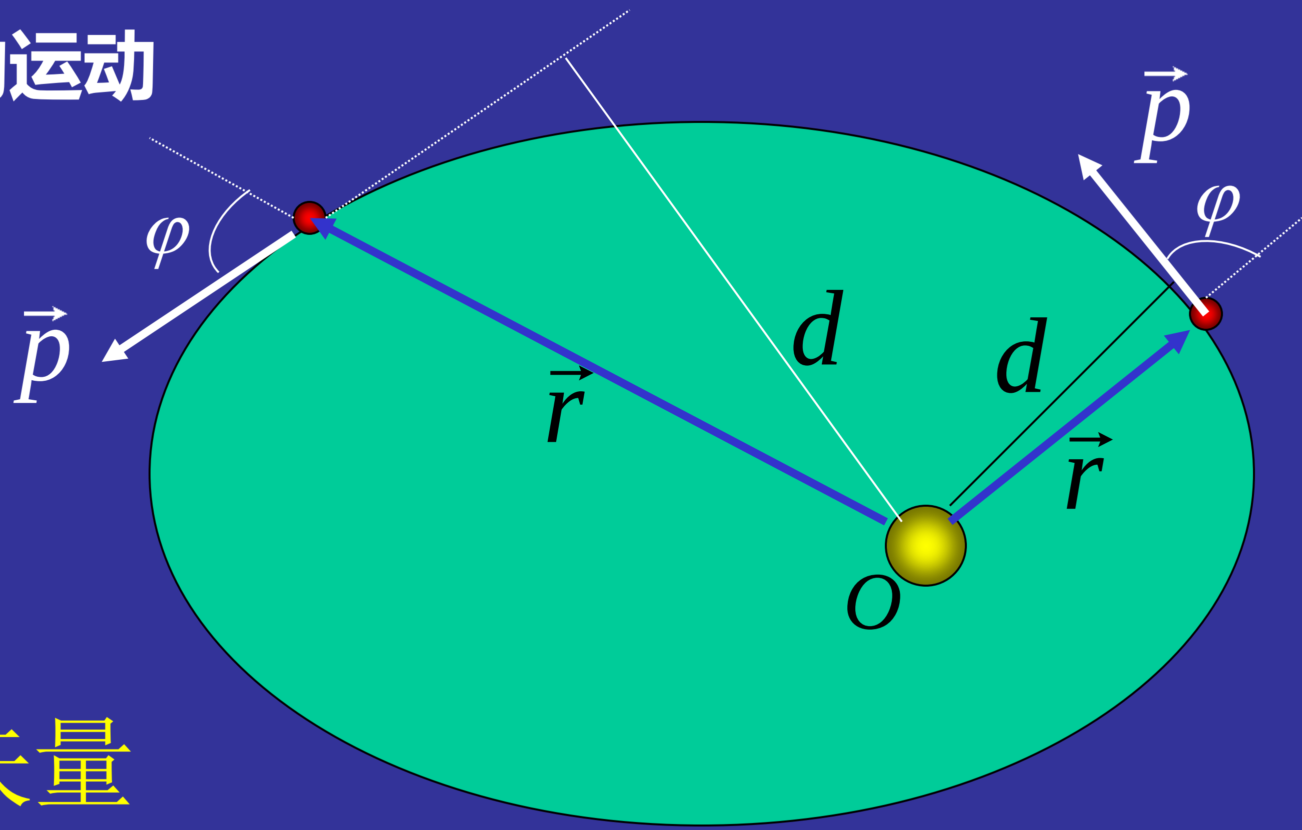
$$\frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\vec{r}\times\vec{P})=\frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t}\times\vec{P}+\vec{r}\times\frac{\mathrm{d}\vec{p}}{\mathrm{d}t}$$

$$\because \frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t}=\vec{v},\frac{\mathrm{d}\vec{r}}{\mathrm{d}t}\times\vec{p}=\vec{v}\times(m\vec{v})=0$$

$$\boxed{\therefore \frac{\mathrm{d}\vec{L}}{\mathrm{d}t}=\vec{r}\times\frac{\mathrm{d}\vec{p}}{\mathrm{d}t}=\vec{r}\times\vec{F}}$$

质点的角动量守恒定律： **如果作用在质点上的外力对某给定点O的力矩$(\vec{r}\times\vec{F})$为零，则质点对O点的角动量在运动过程中保持不变。这就叫做角动量守恒定律。**

行星绕太阳的运动



$$pd = \text{常量}$$

$$\vec{r} \times \vec{p} = \text{常矢量}$$

表明行星在运动过程中，对太阳的角动量保持不变。

§3-7　质点在有心力场中的运动

1. 有心力

有心力的定义：运动质点所受的力的作用线始终通过某个给定点，而且力的大小也只依赖于质点对该给定点的距离，这种力叫做有心力。这个给定点叫做力心。

有心力场中质点运动的性质：（1）质点在有心力作用下，它的角动量守恒；（2）质点在有心力作用下，它的机械能守恒；（3）有心力是保守力。