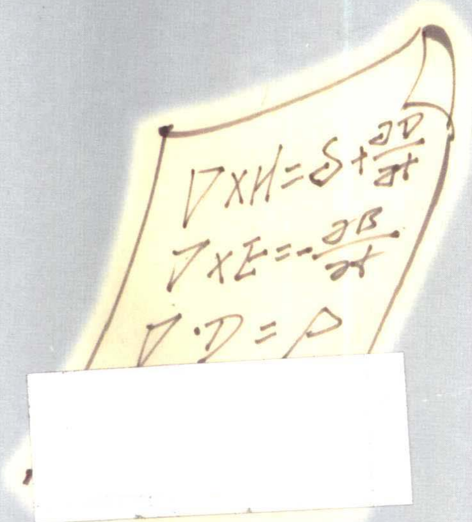
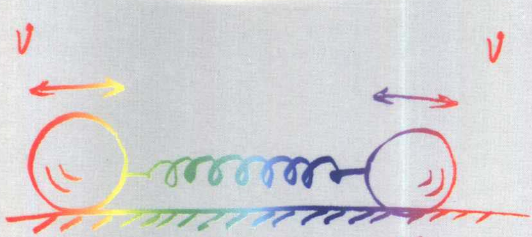
DAXUE WULI
XUEXI ZHIDAO

·大学物理·
学习指导

· 于丽 编著 ·





北京邮电大学出版社

DAXUE WULI XUEXI ZHIDAO

大学物理学习指导

于　丽　编著

北京邮电大学出版
·北京·

内容提要

本书是作者总结多年大学物理教学经验编写而成的.书中每一部分都包括基本概念、解题指导、例题.全书共分六大部分,包括了所有工科大学物理内容.本书的宗旨在于帮助读者掌握基础知识,提高分析问题、解决问题的能力.

本书是配合大学物理课程的通用参考书,还可为参加高等教育自学考试的读者作参考.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学习指导/于丽编.—北京:北京邮电大学出版社,2001.2

ISBN 7-5635-0047-2

Ⅰ.大… Ⅱ.于… Ⅲ.物理学—高等学校—自学参考资料 Ⅳ.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 01193 号

大学物理学习指导

责任编辑 梁惠信

北京邮电大学出版社出版发行

(北京市海淀区西土城路10号)

邮编:100876,发行部电话:62282185

E-mail:publish@bupt.edu.cn

各地新华书店经销

北京忠信诚胶印厂印刷

*

850 mm×1 168 mm 1/32 印张 11.75 字数 301 千字

2001 年 3 月第 1 版 2001 年 3 月第 1 次印刷

印数:1—5 000 册

ISBN 7-5635-0047-2/O·5 定价:20.00 元

前　言

物理学是一门基础学科，它是探讨物质结构和运动基本规律的. 一方面，物理知识渗透到工程技术各个领域，学生们只有学好物理，打下坚实的基础，才有可能在专业课学习及科研领域中获得较高的成就；另一方面，物理课在培养和提高学生科学素质、科学思维方法和科学研究能力上起着十分重要的作用. 为了使学生们学好物理学，我们编写了这本学习指导书.

编写本书的目的在于(1)明确每一部分内容的主要概念及规律，加深读者对它们的认识. (2)明确每一部分内容的解题原则、思路，提高解题能力. (3)例题部分列举了各种类型的典型习题，加深读者对各种概念、定理、定律的理解，提高解题能力.

本书在编写过程中得到了博士生导师杨伯君教授的具体指导，王永钢教授审阅了全书，提出了许多宝贵意见，物理教研室的老师给本人许多帮助，在此一一表示感谢.

编　者

2001 年 2 月

目　　录

第一章　力　学

物体间或物体内各部分之间相对位置的变动称为机械运动．力学是研究机械运动的一门学科．力学包括质点力学和刚体力学两部分，其中质点力学是基础．普通物理的力学框架如下：

- 力学
  - 质点力学
    - 运动学
    - 动力学
      - 牛顿定律
      - 动量定理及动量守恒定律
      - 角动量定理及角动量守恒定律
      - 功能原理及机械能守恒定律
  - 刚体力学
    - 刚体定轴转动
    - 刚体平面平行运动

第一节　质点力学

质点力学研究质点运动采用由表及里，由现象到本质的过程，先是运动学，后是动力学．运动学的任务是描述质点的运动，不涉及运动原因．动力学是研究质点在什么情况下会做什么样的运动，深入到运动本质．

一、质点运动学

（一）基本概念

1．质点

物理学中存在许多理想模型，如质点、刚体、点电荷、线电流、简谐振动、平面简谐波、绝对黑体等等．理想模型的提出可以把原

本很复杂的东西简单化、抽象化、理想化，以便突出问题的主要特征，找出事物的普遍规律. 理想模型的提出不是脱离实际，而是更深刻更本质地反映事物本身. 力学中的质点是一个理想模型，当物体本身的限度远远小于问题中所涉及到的距离，而又不涉及物体的转动时，可以把物体看成一个仅有质量而没有大小的几何点——质点. 另外，当物体做平动时，由于其上每一点运动情况都一样，不论物体大小如何，总可以把它看成一个质点.

2. 参照系、坐标系

运动具有相对性，描述质点的运动首先要选择参照系. 在运动学中参照系的选取是任意的，可视问题的性质和方便而定（在动力学中则不然）. 为了定量地描写质点的运动，在参照系上还需建立适当的坐标系. 坐标系有直角坐标系、自然坐标系、平面极坐标系、球坐标系、柱坐标系等等. 力学中经常用到的是直角坐标系和自然坐标系. 物体的运动状态完全由参照系选取而定，与坐标系的选取无关. 坐标系选取不同，只是描述运动的变量不同而已，对应的物体运动状态并无不同.

3. 描述质点运动状态的物理量

(1) 位置矢量

位置矢量是由参考点指向质点所在位置的有向线段，如图 1-1-1 所示.

$$\boldsymbol{r} = \overrightarrow{OP}$$

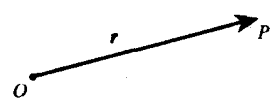


图 1-1-1

在直角坐标系中

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k}$$

当质点运动时，位置矢量随时间变化

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t)$$

此方程称为质点的运动学方程. 它的分量表示式为

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t)$$

(2) 位移

位移是质点在一段时间内位置矢量的改变，如图 1-1-2 所示.

$$\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t + \Delta t) - \boldsymbol{r}(t)$$

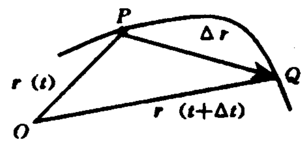


图 1-1-2

说明：

① 位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 不同于路程 Δs（如图 1-1-2 所示，$\Delta \boldsymbol{r}=\overrightarrow{PQ}$，$\Delta s=\overset{\frown}{PQ}$），位移是矢量，路程是标量，一般情况下 $\Delta s \geqslant |\Delta \boldsymbol{r}|$，但 $\mathrm{d}s=|\mathrm{d}\,\boldsymbol{r}|$.

② $|\Delta \boldsymbol{r}| \neq \Delta r$

(3) 速度

平均速度　　$\bar{\boldsymbol{v}}=\dfrac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}$

速度（瞬时速度）　　$\boldsymbol{v}=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t}=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$

平均速率　　$\bar{v}=\dfrac{\Delta s}{\Delta t}$

速率（瞬时速率）　　$v=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\dfrac{\Delta s}{\Delta t}=\dfrac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}$

速度在直角坐标系中的表达式

$$\bar{\boldsymbol{v}}=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}+\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k}=v_x\boldsymbol{i}+v_y\boldsymbol{j}+v_z\boldsymbol{k}$$

说明：

① 一般情况下 $|\bar{\boldsymbol{v}}| \neq \bar{v}$，但 $|\boldsymbol{v}|=v$

② $|\boldsymbol{v}| \neq \left(\dfrac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}\right)$

(4) 加速度

平均加速度　　$\bar{\boldsymbol{a}}=\dfrac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}$

加速度（瞬时加速度）　　$\boldsymbol{a}=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\dfrac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2}$

加速度在直角坐标系中的表达式

$$a=\frac{\mathrm{d}\,\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}+\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j}+\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k}$$
$$=a_x\boldsymbol{i}+a_y\boldsymbol{j}+a_z\boldsymbol{k}$$

加速度在自然坐标系中的表达式

$$\boldsymbol{a}=\boldsymbol{a}_n+\boldsymbol{a}_\tau=\frac{v^2}{\rho}\boldsymbol{n}+\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{\tau}$$

其中 $\boldsymbol{a}_n$ 为法向加速度，描写质点由于速度方向发生改变而引起的加速度. $\boldsymbol{a}_\tau$ 为切向加速度，描写质点由于速度大小发生改变而引起的加速度. 当质点做圆周运动时，加速度可表示为（如图 1-1-3 所示）

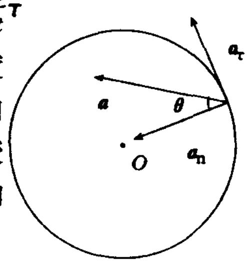


图 1-1-3

$$\boldsymbol{a}=\boldsymbol{a}_n+\boldsymbol{a}_\tau$$
$$\boldsymbol{a}_n=\frac{v^2}{R}\boldsymbol{n}=w^2R\boldsymbol{n}$$
$$\boldsymbol{a}_\tau=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{\tau}=\beta R\boldsymbol{\tau}$$

加速度大小

$$|\boldsymbol{a}|=\sqrt{a_n^2+a_\tau^2}=\sqrt{\left(\frac{v^2}{R}\right)^2+\left(\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\right)^2}$$
$$=\sqrt{(w^2R)^2+(\beta R)^2}$$

方向 $$\mathrm{tg}\theta=\frac{a_\tau}{a_n}$$

式中 θ 表示总加速度与法向（即径向）夹角.

4. 相对运动

同一质点 A 在不同参照系 K 及 K' 有不同速度. 令 A 相对 K 系的速度为$\boldsymbol{v}_{AK}$，相对 K' 系的速度为$\boldsymbol{v}_{AK'}$，K' 系相对 K 系的速度为$\boldsymbol{v}_{K'K}$，有

$$\boldsymbol{v}_{AK}=\boldsymbol{v}_{AK'}+\boldsymbol{v}_{K'K}$$

无论 K' 系对 K 系做平动还是转动，上式皆成立. 只不过 K' 相对 K

做平动时，$v_{K'K}$不随物体 A 在 K' 上的位置不同而异；当 K' 相对 K 做转动时，$v_{K'K}$与物体 A 在 K' 上的位置不同而发生变化. $v_{K'K}$指的是 K' 系中 A 所在点的速度相对 K 系的速度.

质点 A 相对 K 系的加速度为 $\boldsymbol{a}_{AK}$，相对 K' 系的加速度为 $\boldsymbol{a}_{AK'}$，K' 系相对 K 系加速度为 $\boldsymbol{a}_{K'K}$，有

$$\boldsymbol{a}_{AK} = \boldsymbol{a}_{AK'} + \boldsymbol{a}_{K'K}$$

上式只适用于 K' 系相对 K 系做平动的情形.

（二）解题指导

1. 质点运动学的习题有两种基本类型，一是由运动学方程求解质点的速度、加速度、位移及轨道方程等；二是由质点加速度（或速度）加上初始条件，求解质点的运动学方程等. 使用的数学工具主要是高等数学中最基础的微积分.

2. 本节中所涉及到的物理量大部分是矢量，我们可以通过建立适当的坐标系如直角坐标系，把一个矢量方程写成一个或几个投影方程. 这样把矢量计算转化成代数量计算，使问题得以简化.

3. 中学学过匀变速直线运动、平抛、斜抛等运动学公式. 匀变速直线运动的运动学公式是最基本的，它的运动学公式为

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$$

$$v = v_0 + at$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$$

上述公式可由 a＝常量及初始条件（$t=0$ 时，$x=x_0$、$v=v_0$），采用积分方法推出. 使用上述公式应建立一维坐标系（如 x 轴），这样 v、v_0、a 的正负符号反映的就是$\boldsymbol{v}$、$\boldsymbol{v}_0$、$\boldsymbol{a}$ 的方向与选定的 x 轴正向是相同还是相反. 不建立坐标系，v、v_0、a 的正负无任何意义. 另外，质点运动的速率是增加还是减小，不由 a 的正负决定，而由 v、a 的正负号是否一致决定. v、a 的符号相同（都为正或都为负），表明质点做加速率运动；反之，质点做减速率运动.

4. 自然坐标系是大学普通物理课中接触到的一个新坐标系，它具有鲜明的物理意义：法向加速度反映由于速度方向的变化引起的加速度；切向加速度反映由于速度大小的变化引起的加速度，它可正可负.

$$\boldsymbol{a} = a_n \boldsymbol{n} + a_\tau \boldsymbol{\tau} = \frac{v^2}{\rho}\boldsymbol{n} + \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{\tau}$$

当质点沿直线运动时 $\rho=\infty$，有

$$|\boldsymbol{a}| = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$$

注意上式只有当质点做直线运动时才成立，一般情况下 $|\boldsymbol{a}| \neq \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$

当质点做圆周运动时 $\rho=R$，有

$$\boldsymbol{a} = \frac{v^2}{R}\boldsymbol{n} + \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{\tau}$$

当质点做匀速率圆周运动时 $v=c$，有

$$\boldsymbol{a} = \frac{v^2}{R}\boldsymbol{n}$$

当质点做匀速率曲线运动时 $v=c$，有

$$\boldsymbol{a} = \frac{v^2}{\rho}\boldsymbol{n}$$

二、质点动力学

质点动力学包括四部分内容：牛顿运动定律、动量定理及动量守恒定律、角动量定理及角动量守恒定律、功能原理及机械能守恒定律. 牛顿定律是基础，由它可推出三条运动定理及其守恒定律. 由于三条运动定理及其守恒定律不涉及物理过程的具体细节，故它们使分析问题和解决问题的思路更为开阔，方法和手段更加简单灵活. 事实上，守恒定律是比牛顿定律更为基本、普遍的定律.

（一）基本概念

1. 牛顿运动定律

(1) 牛顿三定律内容

第一定律　任何物体将保持静止或匀速直线运动状态，直到其他物体作用的力迫使它改变这种状态为止.

第二定律　在受到力的作用时，物体获得的加速度的大小与合力的大小成正比，与物体的质量成反比，加速度的方向与合力的方向相同，即

$$\boldsymbol{F}=m\boldsymbol{a}$$

直角坐标系中

$$\begin{cases}F_x=ma_x\\F_y=ma_y\\F_z=ma_z\end{cases}$$

自然坐标系中

$$\begin{cases}F_n=ma_n=m\dfrac{v^2}{\rho}\\[2ex]F_\tau=ma_\tau=m\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\end{cases}$$

第三定律　当物体 A 以力 $\boldsymbol{F}$ 作用于物体 B 时，物体 B 必同样以力 $\boldsymbol{F}'$ 反作用于 A. $\boldsymbol{F}$ 与 $\boldsymbol{F}'$ 大小相等，方向相反，在一条直线上，即

$$\boldsymbol{F}=-\boldsymbol{F}'$$

(2) 几种常见的力

应用牛顿定律的关键在于对物体进行正确的受力分析. 力学中常见的力有万有引力、重力、弹性力和摩擦力等. 万有引力及重力都由已知规律给出，只要物体的质量、位置确定，它们的大小及方向随之确定. 而弹性力(正压力，张力等)及摩擦力要复杂得多.

正压力：它的方向垂直于物体的接触面，大小和物体所受其他力及运动状态有关，最终由牛顿定律决定.

张力：它的方向沿绳（或杆）的方向，张力的大小与物体所受的其他力及运动状态有关.不受摩擦的轻绳上的张力处处相等，且等于绳子两端所受到的拉力.

摩擦力：已知它的作用线位于接触面内.对滑动摩擦力，其方向和相对运动方向相反，大小正比于正压力，即

$$f_{动} = \mu N$$

其中 μ 为滑动摩擦系数，N 为正压力.

对静摩擦力，其方向和相对运动的趋势相反.大小可以是零到最大值之间的任一值，这个最大值叫最大静摩擦力.

$$f_{静最大} = \mu_0 N$$

其中 μ_0 为静摩擦系数，N 为正压力.

静摩擦力的大小和方向都与物体所受其他力及物体的运动状态有关.

(3) 非惯性系中力和加速度之间的关系

牛顿运动定律只在惯性系中成立，但有时需要考察物体相对非惯性系的运动.牛顿定律可推广成

$$\boldsymbol{F} + \boldsymbol{F}_{惯} = m\boldsymbol{a}'$$

其中 $\boldsymbol{F}$ 为质点所受到的其他物体所施的作用力的矢量之和. $\boldsymbol{F}_{惯}$ 为质点所受到的所有惯性力的矢量之和. $\boldsymbol{a}'$ 为质点相对非惯性系的加速度.

若非惯性系是以加速度 $\boldsymbol{a}_0$ 相对惯性系平动的参照系，则

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

若非惯性系是相对于惯性系以角速度 ω 均匀转动的参照系，且物体相对于该转动参照系静止，如图 1-1-4 所示，则

$$\boldsymbol{F}_{惯} = m\omega^2\boldsymbol{r}$$

若非惯性系相对惯性系的转动有角加速度，物体相对非惯性系运动，惯性力比较复杂，这部分知识超过了普通物理内容.

惯性力是在非惯性系中考察物体运动的动力学规律时引入的，

它和前面提到过的力学中常见力不同之处在于它不是物体之间的相互作用，因此惯性力也叫“虚拟力”.

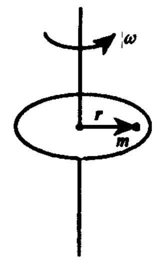


图 1-1-4

2. 动量定理及动量守恒定律

(1) 质点的动量定理

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

积分形式
$$\int_0^t \boldsymbol{F}\mathrm{d}t = (m\boldsymbol{v}) - (m\boldsymbol{v}_0) = \boldsymbol{P} - \boldsymbol{P}_0$$

冲量 $\boldsymbol{I} = \int_0^t \boldsymbol{F}\mathrm{d}t$

动量 $\boldsymbol{P} = m\boldsymbol{v}$

在直角坐标系中

$$\begin{cases} \int_0^t F_x\mathrm{d}t = mv_x - mv_{x0} = P_x - P_{x0} \\ \int_0^t F_y\mathrm{d}t = mv_y - mv_{y0} = P_y - P_{y0} \\ \int_0^t F_z\mathrm{d}t = mv_z - mv_{z0} = P_z - P_{z0} \end{cases}$$

(2) 质点系的动量定理

$$\int_0^t \boldsymbol{F}_{外}\,\mathrm{d}t = \left(\sum m_i\boldsymbol{v}_i\right) - \left(\sum m_i\boldsymbol{v}_{i0}\right) = \left(\sum \boldsymbol{P}_i\right) - \left(\sum \boldsymbol{P}_{i0}\right) = \boldsymbol{P} - \boldsymbol{P}_0$$

在直角坐标系中

$$\begin{cases} \int_0^t F_{外x}\mathrm{d}t = \left(\sum m_iv_{ix}\right) - \left(\sum m_iv_{ix0}\right) = P_x - P_{x0} \\ \int_0^t F_{外y}\mathrm{d}t = \left(\sum m_iv_{iy}\right) - \left(\sum m_iv_{iy0}\right) = P_y - P_{y0} \\ \int_0^t F_{外z}\mathrm{d}t = \left(\sum m_iv_{iz}\right) - \left(\sum m_iv_{iz0}\right) = P_z - P_{z0} \end{cases}$$

说明：

① 只有外力才对体系的总动量变化有贡献，内力对体系的总动量变化没有贡献，但内力对动量在体系内部的分配是有贡献的.

② 动量定理只适用于惯性系.

(3) 质点系的动量守恒定律

① 若系统不受外力作用或所受外力矢量之和为零，则系统总的动量不随时间变化. 即：

$$\sum \boldsymbol{F}_{外} = 0 \text{ ,有 } \sum m_i \boldsymbol{v}_i = \boldsymbol{C}$$

② 若系统在某一方向上不受外力作用或在该方向上所有外力的代数之和为零，则系统在该方向上动量守恒. 即：

若 $\sum F_x=0$，有 $\sum m_i v_{ix} = C$；若 $\sum F_y=0$，有 $\sum m_i v_{iy} = C$；若 $\sum F_z = 0$，有 $\sum m_i v_{iz} = C$

说明：

① 对于所研究的系统，尽管有外力作用，但外力远小于内力(如爆破，碰撞等过程)，对系统内各部分的动量变化来说，外力的作用可以忽略，此时可近似认为动量守恒.

② 体系动量守恒并不要求体系不受外力，只要求所受外力的矢量之和为零.

③ 动量守恒定律虽然由牛顿定律推出，但它比牛顿定律更普遍. 特别是在微观领域内的某些过程中，牛顿定律也许不成立，但只要计及场的动量，动量守恒定律仍然成立.

(4) 质心运动定律

质心定义

$$\boldsymbol{r}_c = \frac{\sum m_i \boldsymbol{r}_i}{\sum m_i}$$

或

$$\boldsymbol{r}_c = \frac{\int \boldsymbol{r} \mathrm{d}m}{M}$$

直角坐标系中

$$x_c=\frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i},\ y_c=\frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i},\ z_c=\frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i}$$

或

$$x_c=\frac{\int x\mathrm{d}m}{M},\quad y_c=\frac{\int y\mathrm{d}m}{M},\quad z_c=\frac{\int z\mathrm{d}m}{M}$$

质心运动定律

$$\boldsymbol{F}_{外}=M\boldsymbol{a}_c$$

即质点系的总质量与质心加速度的乘积等于体系所受外力的矢量之和.这里可以看出:只要系统所受外力的矢量之和为零,系统质心将静止或保持匀速直线运动.

3. 角动量定理及角动量守恒定律

(1) 质点的角动量定理

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

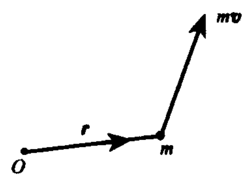


图 1-1-5

其中角动量(动量矩)如图 1-1-5 所示

$$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{r}\times m\boldsymbol{v}$$

力矩如图 1-1-6 所示

$$\boldsymbol{M}=\boldsymbol{r}\times\boldsymbol{F}$$

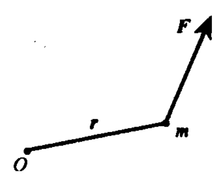


图 1-1-6

在直角坐标系中

$$\begin{cases}M_x=\dfrac{\mathrm{d}L_x}{\mathrm{d}t}\\[2ex] M_y=\dfrac{\mathrm{d}L_y}{\mathrm{d}t}\\[2ex] M_z=\dfrac{\mathrm{d}L_z}{\mathrm{d}t}\end{cases}$$