大学物理
读书笔记与问题研究

何丽桥　王国光　主编

科学出版社
www.sciencep.com

大学物理读书笔记与问题研究

何丽桥　王国光　主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书为作者针对目前理工科大学生学习大学物理的重点和难点，考虑了现代化教学手段给学生上课带来的消极因素，如记笔记跟不上等，经过多年的实践编写而成.

本书内容主要包括三个部分：读书笔记部分围绕大学物理知识点，进行基本概念、易错问题、拓展知识、科学应用的注释，中间穿插典型思考题的讨论；典型习题部分围绕典型物理的基本题型，精选与知识点对应的习题，通过解题指导，以实例向学生展示解题方法和精辟点评；研究型讨论课设计部分按物理学科的分支，设计6个部分的研究型讨论课，包括力学、热学、电磁学、振动和波动、光学、近代物理.

本书适合不同层次理工科院校进行大学物理学习的本科生以及理工科院校进行大学物理教学的教师参考使用.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理读书笔记与问题研究/何丽桥，王国光主编. 北京：科学出版社，2008

ISBN 978-7-03-021679-3

Ⅰ. 大… Ⅱ. ①何… ②王… Ⅲ. 物理学-高等学校-教学参考资料 Ⅳ. O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第054344号

责任编辑：胡云志 唐保军 / 责任校对：陈玉凤
责任印制：张克忠 / 封面设计：耕者设计工作室

科学出版社 出版
北京东黄城根北街16号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com

北京市文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年10月第 一 版 开本：787×1092 1/16
2007年10月第一次印刷 印张：17 3/4
印数：1—4000 字数：350 000

定价：25.00元

前　　言

物理学是理工科院校学生必修的基础理论课，在培养学生的创新意识和科学素养中占有重要地位. 为了帮助学生掌握大学物理基本理论框架，培养科学的思维方法，全面提升解题能力和研究能力，我们集多年教学心得，编写了《大学物理读书笔记与问题研究》.

本书包括质点力学、刚体力学、热学、电磁学、振动和波、几何光学、波动光学和近代物理几个部分，覆盖了教育部物理基础课程教学指导分委员会制定的《大学物理课程教学基本要求》中全部 A 类知识点，并包含了若干 B 类知识点. 全书由三个有特色的模块组成：

（1）读书笔记模块. 按章以知识点形式梳理大学物理基本概念和规律，以精炼、简洁的方式，向学生呈现教师课堂授课内容，剖析概念，突破难点，诠释规律，帮助学生建立清晰的物理图像，有利于学生运用物理概念分析和解决问题. 同时，读书笔记也是为学生摆脱课堂上不能兼顾集中听课和完整记录授课内容的困难而设计的，可以使学生聚精会神地听课，提高学生课堂接受效果.

（2）典型题模块. 按章编写，以科学分类的方法，从茫茫题海中筛选出基本类型题，精心解答. 一方面弥补教材中例题不足，另一方面为学生提供解题范例，使学生掌握解决物理问题的思路和方法，加深对物理概念和物理规律的理解，体会物理问题所蕴含的奥妙和含义，形成举一反三的能力.

（3）研究型讨论题模块. 讨论题按力学、热学、电磁学、振动和波、光学和近代物理六部分设计，力求体现趣味性、深奥性、扩展性、综合性和应用性等特点，给学生创设一个可供探讨和研究的空间，引导学生以科学探究的态度求解物理问题. 通过研讨物理问题，体验物理学的魅力和价值，培养兴趣，启迪思维，提高研究能力.

本书由何丽桥、王国光主编，由吉林大学物理教学与研究中心教师合作完成. 编写人员有贺家宁（1.1 节、1.2 节）、何丽桥（1.3～1.14 节、1.16 节、1.17 节）、张凤琴（1.15 节、2.1～2.3 节、2.11 节）、李海英（2.4 节、2.5 节、2.12～2.14 节）、麻永杰（2.6～2.8 节）、刘震（2.9 节、2.10 节）、黄文龙（2.15～2.17 节）、张铁强（3.5 节）、王国光（3.1～3.4 节、3.6 节）. 全书由何丽桥统稿.

本书得到吉林大学新世纪教改基金资助，由教育部物理基础课程教学指导分委员会委员张铁强教授担任主审.

编者企盼本书能对学生学习大学物理有所帮助，但由于编者学识有限，不足之处在所难免，衷心欢迎使用本书的读者批评指正.

编　者

2008.1.10

于吉林大学

目　录

模块 3 研究型讨论题

模块 1 读书笔记

1.1 机械运动的描述

1.1.1 质点

定义 在一个力学问题中，如果物体的大小和形状可以忽略不计，我们可以把物体当作一个有质量的点来处理，称该点为质点.

注释

(1) 质点是一个理想模型，其运动只有位置的变化，而没有形状的变化.

(2) 质点是一个相对概念，一个物体能否视为质点，并非单纯看它的大小，而是看它的形状大小在所研究的问题中是否起显著作用. 比如，研究地球围绕太阳的公转时，可视其为质点，而研究地球和分子的自转时，无论其大或小，都不能视为质点.

(3) 在多数情况下，物体的大小和形状不能忽略，这时可以把物体无限分割成许多微元，每个无限小微元可以视为质点，整个物体就可以看成是由无限多个质点组成的. 因此，任何物体都能看作质点的集合. 所以讨论质点的运动规律，是讨论复杂系统运动规律的基础.

1.1.2 参考系

定义 物理学中把选作为标准的参考物体或物体系称为参考系.

注释

(1) 在运动学中，参考系的选取具有任意性，一般视讨论问题的方便而定. 参考系的选择不同，对同一物体的运动描述也就不同. 例如，当人乘坐电梯上楼时，以电梯为参考系时，人的运动是静止的；以地面为参考系时，人的运动则是竖直上升的.

(2) 坐标系是参考系的数学抽象. 要解决一个具体力学问题，首先要建立坐标系，建立了坐标系，才能够从数量上和方向上确定物体相对于参考系的位置、速度和加速度.

1.1.3 位置矢量

定义 由参考点指向质点所在位置的有向线段称为位置矢量，简称位矢或矢径.

注释

(1) 位置矢量是一个矢量，它与直角坐标的关系式为

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k} \tag{1.1.1}$$

其大小为

$$|\boldsymbol{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \tag{1.1.2}$$

方位是

$$\cos\alpha = \frac{x}{r},\quad \cos\beta = \frac{y}{r},\quad \cos\gamma = \frac{z}{r} \tag{1.1.3}$$

(2) 位置矢量具有相对性,相对于选定的参考系来说质点的位置矢量有确定值,参考系不同,同一质点的位置矢量也不同.

(3) 位置矢量具有瞬时性,位置矢量随时间的变化关系式 $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t)$ 称作运动方程. 其分量形式为

$$x = x(t),\quad y = y(t),\quad z = z(t) \tag{1.1.4}$$

由运动方程的分量形式消去参量 t,即可得到质点的轨道方程.

1.1.4 位移矢量

定义 由初位置指向末位置的矢量称为位移矢量,它等于质点在 Δt 时间内位置矢量的增量,即

$$\Delta\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1 \tag{1.1.5}$$

注释

(1) 位移是矢量,在直角坐标中与分量的关系式为

$$\Delta\boldsymbol{r} = \Delta x\boldsymbol{i} + \Delta y\boldsymbol{j} + \Delta z\boldsymbol{k} \tag{1.1.6}$$

式中

$$\Delta x = x_2 - x_1,\quad \Delta y = y_2 - y_1,\quad \Delta z = z_2 - z_1$$

位移的大小为

$$|\Delta\boldsymbol{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \tag{1.1.7}$$

位移的方位是

$$\cos\alpha = \frac{\Delta x}{|\Delta\boldsymbol{r}|},\quad \cos\beta = \frac{\Delta y}{|\Delta\boldsymbol{r}|},\quad \cos\gamma = \frac{\Delta z}{|\Delta\boldsymbol{r}|} \tag{1.1.8}$$

(2) 位移与参考系的选择有关. 如人坐在运动的车厢中,选车厢为参考系,其位移为零;若以地面为参考系,位移就不为零.

(3) 一般情况下,位移的大小不等于路程,即 $|\Delta\boldsymbol{r}| \neq \Delta s$. 如人沿着半径为 r 的圆形跑道跑了半圈,他的路程等于 πr,位移大小等于直径 $2r$. 只有在单方向的直线运动中,或在微分的情况下(无限短时间内),位移的大小才等于路程,即 $|\mathrm{d}\boldsymbol{r}| = \mathrm{d}s$.

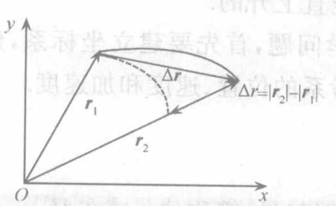

图 1.1.1

(4) 注意区分 $|\Delta\boldsymbol{r}|$ 与 Δr,$|\Delta\boldsymbol{r}|$ 是位置矢量($\boldsymbol{r}$)增量的大小,即位移的模,可表示为 $|\Delta\boldsymbol{r}| = |\boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1|$;$\Delta r$ 是位置矢量($\boldsymbol{r}$)模的增量,即质点位置沿径向的变化量,可表示为 $\Delta r = |\boldsymbol{r}_2| - |\boldsymbol{r}_1|$. 如图 1.1.1 所示,二者是有区别的.

1.1.5 速度

定义

平均速度 质点在 $t\sim t+\Delta t$ 内产生的位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 与 Δt 之比,称为此时间间隔内的平均

速度，表达式为

$$\bar{\boldsymbol{v}} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} \tag{1.1.9}$$

瞬时速度　当 $\Delta t \to 0$ 时，平均速度的极限值，即位置矢量对时间的一阶导数，称为质点在 t 时刻的瞬时速度，简称速度，表达式为

$$\boldsymbol{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} \tag{1.1.10}$$

注释

(1) 平均速度表示质点平均在每单位时间内发生的位移，是对质点真实运动的一种近似描述；瞬时速度是某时刻质点运动快慢和方向的精确描述. 一般情况下，二者不同，但当物体做匀速直线运动时，二者总是相等的.

(2) 速度是矢量，它在直角坐标系中的分量形式为

$$\boldsymbol{v} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k} = v_x\boldsymbol{i} + v_y\boldsymbol{j} + v_z\boldsymbol{k} \tag{1.1.11}$$

对比可知

$$v_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t},\quad v_y = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t},\quad v_z = \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}$$

其大小（速度的模）$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$，其方向沿轨道切线并指向质点运动的方向.

(3) 速度具有相对性，与参考系的选取有关. 同一质点的速度相对不同的参考系来说一般不同.

(4) 常用到的还有速率的概念，平均速率定义为

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \tag{1.1.12}$$

瞬时速率为

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{|\Delta s|}{\Delta t} = \left|\frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t}\right| = |\boldsymbol{v}| \tag{1.1.13}$$

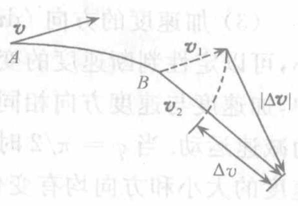

图 1.1.2

可见，瞬时速率等于瞬时速度的大小. 注意速率是标量，与速度的概念是不同的.

(5) 注意区分 $|\Delta \boldsymbol{v}|$ 与 Δv. $|\Delta \boldsymbol{v}|$ 是速度矢量增量的大小，即 $|\Delta \boldsymbol{v}| = |\boldsymbol{v}_2 - \boldsymbol{v}_1|$，如图 1.1.2 所示. Δv 是速度模的增量，即 $\Delta v = |\boldsymbol{v}_2| - |\boldsymbol{v}_1|$，二者是有区别的.

1.1.6 加速度

定义

平均加速度　在 $t \sim t + \Delta t$ 内质点速度的增量与时间之比，称为此时间间隔的平均加速度，表达式为

$$\bar{\boldsymbol{a}} = \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} \tag{1.1.14}$$

瞬时加速度　平均加速度的极限值，即速度对时间的一阶导数，或位置矢量对时间的二阶导数，称为质点在 t 时刻的瞬时加速度，简称加速度. 表达式为

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2 \boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2} \tag{1.1.15}$$

注释

(1) 平均加速度是某段时间内速度变化快慢的粗略描述;瞬时加速度是某时刻质点运动速度变化快慢的精确描述.

(2) 加速度是矢量,它在直角坐标系中的分量形式为

$$\boldsymbol{a} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{k} = \frac{\mathrm{d}^2 \boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2} = \frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{i} + \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{j} + \frac{\mathrm{d}^2 z}{\mathrm{d}t^2}\boldsymbol{k} = a_x\boldsymbol{i} + a_y\boldsymbol{j} + a_z\boldsymbol{k} \tag{1.1.16}$$

对比可知

$$a_x = \frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2},\quad a_y = \frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2},\quad a_z = \frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2 z}{\mathrm{d}t^2} \tag{1.1.17}$$

其大小(加速度的模)为 $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$.

在自然坐标中,加速度的表示形式为

$$\boldsymbol{a} = a_t\boldsymbol{\tau} + a_n\boldsymbol{n} \tag{1.1.18}$$

式中,$a_t = \dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}$ 称为切向加速度分量,反映的是速度大小的变化;$a_n = \dfrac{v^2}{\rho}$ 称为法向加速度分量,反映的是速度方向的变化. 当 $a_t = 0, a_n = 0$,质点做匀速直线运动;当 $a_t \neq 0, a_n = 0$,质点做变速直线运动;当 $a_t = 0, a_n \neq 0$,质点做匀速率圆周运动;当 $a_t \neq 0, a_n \neq 0$,质点做曲线运动. 物体做曲线运动时必定有加速度,加速度的法向分量必不为零.

(3) 加速度的方向 ($\mathrm{d}\boldsymbol{v}$) 一般与速度 $\boldsymbol{v}$ 的方向不同. 从速度与加速度之间夹角 φ 的大小,可以定性判断速度的变化情况:当 $\varphi = 0$ 时,速度只有大小的变化而无方向的变化,其中,加速度与速度方向相同时,速度随时间增大,称为加速运动;反之速度随时间减小,称为减速运动. 当 $\varphi = \pi/2$ 时,速度只有方向的变化而无大小的变化. 当 φ 为锐角或钝角时,速度的大小和方向均有变化,其中 φ 为锐角时,速率随时间而增大;φ 为钝角时,则速率随时间而减小.

(4) 加速度具有瞬时性,即 $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}(t)$. 只有质点做匀变速直线运动时,$\boldsymbol{a}$ = 恒矢量,这时有如下运动公式

$$\begin{cases} v = v_0 + at \\ x - x_0 = v_0 t + \dfrac{1}{2}at^2 \\ v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0) \end{cases} \tag{1.1.19}$$

(5) 加速度具有相对性,对于不同的参考系来说,质点的加速度一般不同. 在两个相对做匀速直线运动的参考系中(两个惯性系),质点具有相同的加速度.

(6) 加速度与速度本身无关,只与速度的变化(包括方向或大小的变化)有关. 某时刻速度为零而加速度不为零是可能的. 例如,竖直上抛运动到顶点时,$\boldsymbol{v} = 0$,但 $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{g} \neq 0$.

1.1.7　运动学的基本问题

表述　质点运动问题一般可以归结为如下两类:

微分问题　已知运动方程，求速度、加速度. 因求解方法用微分方法，故称此类问题为微分问题.

积分问题　已知加速度和初始条件，求速度、运动方程. 因求解方法用积分方法，故称此类问题为积分问题.

注释

（1）微分问题可以利用速度和加速度定义，通过运动方程对时间求一阶导数得到速度，求二阶导数得到加速度. 再代入具体的时间就可以求得任意时刻的速度和加速度.

（2）积分问题对于初学者来讲，掌握起来有一定的难度. 求解思路也是利用速度和加速度定义，通过分离变量，然后取积分，并由题中给定的初始条件，将积分变为定积分，从而求得质点运动的速度和位置. 依照加速度的表示有三种情况，讨论如下：

① 当 $\boldsymbol{a}=\boldsymbol{a}(t)$ 时，利用定义 $\boldsymbol{a}=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}$，分离变量并取积分可得

$$\mathrm{d}\boldsymbol{v}=\boldsymbol{a}(t)\mathrm{d}t \rightarrow \boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_0+\int_0^t \boldsymbol{a}(t)\mathrm{d}t$$

即

$$v_x=v_{0x}+\int_0^t a_x(t)\mathrm{d}t,\quad v_y=v_{0y}+\int_0^t a_y(t)\mathrm{d}t,\quad v_z=v_{0z}+\int_0^t a_z(t)\mathrm{d}t$$

同理，利用定义 $\boldsymbol{v}=\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}$，分离变量并取积分，得出

$$\boldsymbol{r}\quad \boldsymbol{r}_0=\int_0^t \boldsymbol{v}_y(t)\mathrm{d}t$$

即

$$x=x_0+\int_0^t v_x(t)\mathrm{d}t,\quad y-y_0=\int_0^t v_y(t)\mathrm{d}t,\quad z=z_0+\int_0^t v_z(t)\mathrm{d}t$$

下面两种情况均以直线运动为例讨论.

② 当 $a=a(v)$ 时，应该先从加速度的微分公式出发，进行变量调整，即

$$a(v)=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}\rightarrow \mathrm{d}t=\frac{\mathrm{d}v}{a(v)}$$

将变量分离彻底后，再取积分 $\int_0^t \mathrm{d}t=\int_{v_0}^{v}\dfrac{\mathrm{d}v}{a(v)}$，从而可得到速度方程和运动方程.

③ 当 $a=a(x)$ 时，首先将加速度公式变形为

$$a(x)=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=v\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}x}\rightarrow a(x)\mathrm{d}x=v\mathrm{d}v$$

注意变量分离彻底后再取积分，就可以得到速度随位置坐标和位置 x 随时间的变化（运动方程）.

1.1.8　刚体

定义　在外力作用下保持其大小、形状不变的物体称作刚体. 刚体内任意两点间的距离均保持不变.

注释

（1）刚体也是一种理想模型. 如果在我们所研究的问题中，物体的微小形变对运动过程影响甚小，以至于可以忽略不计，我们就可以把物体看作刚体.

（2）刚体的运动可分为平动和转动两种基本形式. 若刚体上任意两点间连线在运动中始终保持平行，称此为平动. 平动中刚体上各质点的运动特征完全相同，可用其上任一点（一般取质心）的运动代表整个刚体的运动，遵从质点运动规律；若刚体上每一点都同时绕轴做圆周运动时，称为转动. 转轴固定不动的转动是定轴转动. 定轴转动中各质点具有角量一致性，通常用角量来描述其转动的状态及状态的变化.

1.1.9　角位置与角位移

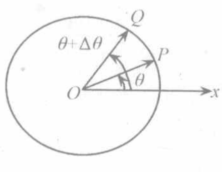

图 1.1.3

定义

角位置　刚体上任一点在 t 时刻到达 P 点，刚体的方位可由 $\overrightarrow{OP}=\boldsymbol{r}$ 与 Ox 之夹角 θ 来确定，称为 t 时刻的角位置，亦称角坐标. 如图 1.1.3 所示.

角位移　若 t 时刻刚体的角位置为 θ，$t+\Delta t$ 时刻角位置为 $\theta+\Delta\theta$，则 $\Delta\theta$ 称为刚体在 Δt 时间内的角位移.

注释

（1）角位置是用来确定刚体位置的量，其大小随参考方向选择不同而不同，并且有正负之分. 通常规定自参考方向 Ox 轴逆时针转到参考点的矢径时 θ 为正；反之为负. 角位移的正负规定与角位置相同，当刚体逆时针转动时，则 $\Delta\theta>0$；反之 $\Delta\theta<0$.

（2）与质点的运动方程相似，称角位置随时间的变化关系式 $\theta=\theta(t)$ 为角运动方程.

（3）刚体在 Δt 时间内转过的角位移为 $\Delta\theta$，刚体上 P 点沿半径为 r 的圆周走过的路程为 s，它们之间的几何关系为

$$\Delta s = r\Delta\theta \tag{1.1.20}$$

1.1.10　角速度与角加速度

定义

平均角速度　刚体在 $t\to t+\Delta t$ 内产生的角位移 $\Delta\theta$ 与 Δt 之比，称为 Δt 时间内的平均角速度. 表达式为

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \tag{1.1.21}$$

瞬时角速度　$\Delta t\to 0$ 时平均角速度的极限值. 表达式为

$$\omega = \lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} \tag{1.1.22}$$

平均角加速度　在 $t\sim t+\Delta t$ 内刚体角速度的增量与时间之比，称为此时间间隔内的平均角加速度. 表达式为

$$\bar{\beta} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \tag{1.1.23}$$

瞬时角加速度　$\Delta t \to 0$ 时平均角速度的极限值. 表达式为

$$\beta = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \tag{1.1.24}$$

注释

(1) 瞬时角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 是矢量. 其方向服从右手定则,即四指沿转动方向弯曲,拇指伸直所指的方向就是角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 的方向,如图 1.1.4 所示. 当刚体作定轴转动时,因只有两种可能的转动方向,故角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 的方向可用正、负表示.

图 1.1.4

(2) 瞬时角加速度 $\boldsymbol{\beta}$ 也是矢量,其方向就是角速度增量 $d\boldsymbol{\omega}$ 的方向,定轴转动中 $\boldsymbol{\beta}$ 的方向与 $\boldsymbol{\omega}$ 的方向平行,也可以用代数量表示. 当二者方向相同时,刚体做加速转动;当二者方向相反时,则刚体做减速转动.

(3) 刚体绕轴转动时,其上的任一质点都绕轴做圆周运动,既可以用线量来描述,又可以用角量来描述,角量与线量的关系为

$$\begin{cases} v = r\omega \\ a_t = r\beta \\ a_n = r\omega^2 \end{cases} \tag{1.1.25}$$

1.1.11　刚体定轴转动的基本问题

表述　刚体绕定轴的转动问题一般可归结为如下两类:

微分问题　已知角运动方程,求角速度、角加速度. 因求解方法用到微分方法,故此类问题称作微分问题.

积分问题　已知角加速度和初始条件,求角速度、角运动方程. 因求解方法用到积分方法,故此类问题称作积分问题.

注释

(1) 描述刚体定轴转动时,有关的矢量方向均可用代数量表示,类比于线量在一维直线运动中的表示,二者有如下对应关系:

$$x \to v = \frac{dx}{dt} \to a = \frac{dv}{dt}$$

$$\theta \to \omega = \frac{d\theta}{dt} \to \beta = \frac{d\omega}{dt}$$

(2) 刚体定轴转动的两类问题中积分问题稍微复杂一些,分三种讨论如下:

① 当 $\beta = \beta(t)$ 时,可直接利用定义

$$\beta = \frac{d\omega}{dt} \to d\omega = \beta(t)\,dt$$

求得任一时刻的角速度,有

$$\omega = \omega_0 + \int_0^t \beta(t)\,dt$$

又由 $\omega = \dfrac{d\theta}{dt}$,进一步求得任一时刻的角位置,即

$$\theta = \theta_0 + \int_0^t \omega(t)\mathrm{d}t$$

② 当 $\beta = \beta(\omega)$ 时，根据定义对变量进行调整，即

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

然后取积分并代入初始条件就可以求出角速度方程，进一步可以求出角运动方程.

③ 当 $\beta = \beta(\theta)$ 时，需作如下变换

$$\beta = \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}\theta}\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \omega\,\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}\theta}$$

然后分离变量取积分，求出角速度方程和角运动方程.

(3) 考虑如下两种特殊情况

① 当刚体做匀变速转动($\beta = C$)时，如下公式成立：

$$\begin{cases} \omega - \omega_0 = \beta t \\ \theta - \theta_0 = \omega_0 t + \dfrac{1}{2}\beta t^2 \\ \omega^2 - \omega_0^2 = 2\beta(\theta - \theta_0) \end{cases} \tag{1.1.26}$$

② 当刚体做匀速转动($\beta = 0$)时，公式 $\theta - \theta_0 = \omega t$ 成立.

1.2　质点运动的基本定律

1.2.1　牛顿第一定律

表述　任何物体都保持静止或匀速直线运动状态，直到其他物体的作用迫使它改变这种状态为止.

注释

(1) 第一定律给出了惯性的概念. 即任何物体都有保持自己原有运动状态不变的性质，而且定律中还指出，在没有外力作用时物体将保持静止或匀速直线运动状态——物体做惯性运动. 惯性是物体固有的属性，它和物体是否受力并无关系；而惯性运动则必须在没有外力作用(或外力平衡)的条件下才能实现. 从而揭示了惯性是维持物体运动状态的原因.

(2) 第一定律又给出了力的概念. 按着第一定律，在没有外力作用的情况下，物体的状态保持不变，而受到外力时，则受力物体运动的状态发生变化，所以说力是物体运动状态变化的原因.

(3) 自然界中的各种作用力，就其本质而言，可归结为四种基本的相互作用，即引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用.

1.2.2　牛顿第二定律

表述　在外力的作用下，物体所获得的加速度的大小与所受的合外力的大小成正比，与物体的质量成反比. 加速度的方向与合外力的方向相同，其数学表达式为

$$\boldsymbol{F}=m\boldsymbol{a} \tag{1.2.1}$$

注释

(1) 叠加性. 牛顿第二定律概括了力的叠加原理. 即几个力同时作用在一个物体上所产生的加速度,等于每个力单独作用时产生的加速度的矢量和.

(2) 矢量性. 根据矢量的性质,牛顿定律可以写成相应的分量式. 如在直角坐标系中,有

$$\begin{cases} F_x = ma_x \\ F_y = ma_y \\ F_z = ma_z \end{cases} \tag{1.2.2}$$

在自然坐标系中,则有

$$\begin{cases} F_\tau = ma_\tau = m\dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} \\ F_\mathrm{n} = ma_\mathrm{n} = m\dfrac{v^2}{\rho} \end{cases} \tag{1.2.3}$$

分量式不仅是一种数学变换,还包含物理上的规律性. 即物体在某一方向的加速度只取决于外力在该方向的分量,而与其他方向所受的外力无关. 也就是说,如果物体在某一方向不受力,则它在该方向上的加速度为零. 这一性质是合外力与加速度之间存在线性关系的结果.

(3) 瞬时性. 牛顿第二定律指出了物体获得的加速度 $\boldsymbol{a}$ 和其所受的合外力 $\boldsymbol{F}$ 是一种瞬时关系. 由加速度的定义,可以给出牛顿第二定律的微分形式

$$\boldsymbol{F}=m\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=m\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2} \tag{1.2.4}$$

即方程中的加速度 $\boldsymbol{a}$ 和合外力 $\boldsymbol{F}$ 是时时(点点)对应的关系. 如果已知各瞬时物体所受的合外力,利用第二定律的微分关系,不仅可以求出各相应瞬时的加速度 $\boldsymbol{a}$,还可以借助于初始条件确定各瞬时的速度和位置.

(4) 注意 $m\boldsymbol{a}$ 不是物体受的外力,而是合外力产生的效果.

1.2.3 牛顿第三定律

表述 当物体 A 以 $\boldsymbol{F}_1$ 作用在物体 B 上时,物体 B 也必定同时以 $\boldsymbol{F}_2$ 作用在物体 A 上,$\boldsymbol{F}_1$ 和 $\boldsymbol{F}_2$ 在同一直线上,大小相等而方向相反. 用数学式表示,有

$$\boldsymbol{F}_1=-\boldsymbol{F}_2 \tag{1.2.5}$$

注释

(1) 作用力和反作用力没有主次、先后之分,二者同时存在,同时消失,任何一方都不能孤立地存在,都以对方作为自己存在的条件.

(2) 作用力和反作用力分别作用在两个物体上,它们不是平衡力,因此二者不能互相抵消.

(3) 作用力和反作用力必是属于同一性质的力. 例如,作用力是万有引力,那么反作用力也一定是万有引力;如果作用力是弹性力,那么反作用力必然也是弹性力.

(4) 牛顿定律的适用对象. 牛顿第一、第二定律是涉及物体速度、加速度的规律，只有当物体可以看成质点时，才能谈及物体的速度和加速度，因此，牛顿定律只适用于可以看成质点的物体.

(5) 在应用牛顿运动定律时，应当注意如下问题：

一是明确牛顿定律的适用范围是在惯性系中做低速、平动的宏观物体. 然而许多实际的力学问题在非惯性系中分析和处理起来非常简便，这时可应用牛顿定律在非惯性系中的修正式. 另外，由于牛顿方程只适用于质点，若研究的对象是一个系统时，要采用隔离体法分别研究.

二是受力分析是求解力学问题的关键. 最好做出示力图，切忌将作用力与反作用力混在一起作用于同一物体上.

三是应用牛顿第二定律时可将其矢量表达式变为标量表达式. 根据质点的运动特点选取坐标系，根据受力分析，列出牛顿定律的分量形式；对变力作用下的物体，应该应用牛顿定律的微分形式，由合外力求出任一时刻的加速度、速度和运动方程.

1.2.4 惯性系与非惯性系

定义 牛顿第一定律成立的参考系称作惯性系. 牛顿第一定律不成立的参考系称为非惯性系.

注释

(1) 判断一个参考系是否可以看做惯性参考系的主要依据是实验. 确切地说，如果一个物体远离其他物体，那么就可以认为这个物体不受外力，如果在某个参考系中观察到这个物体保持惯性运动，则那个参考系就可以看成惯性系. 实验表明，由于银河系中的许多恒星相距很远，可以把它们看成不受外力作用的物体. 所以认为由太阳及其恒星所组成的参考系是精确的惯性系.

(2) 由相对运动的知识可知，一切相对于惯性系做匀速直线运动的参考系都是惯性系. 如果将地球表面近似地认为是惯性系，那么固定在地球表面上的参考系也是惯性系.

(3) 对于一切惯性系，力学规律相同，这就是伽利略相对性原理.

(4) 第二定律是在惯性系中由实验得出的定量关系，因此，牛顿第二定律只适用于惯性系.

1.2.5 惯性力

定义 $\boldsymbol{F}_{\text{惯}}=-m\boldsymbol{a}$，其中 $\boldsymbol{a}$ 是非惯性系相对惯性系的加速度.

注释

(1) 惯性力的方向与非惯性系的加速度的方向相反. $\boldsymbol{F}_{\text{惯}}$ 的具体形式与非惯性系的运动状态有关，在平动加速参考系中，$\boldsymbol{F}_{\text{惯}}=-m\boldsymbol{a}_0$，$\boldsymbol{a}_0$ 为非惯性系的加速度；在转动参考系中，$\boldsymbol{F}_{\text{惯}}=m\omega^2\boldsymbol{r}$，式中，$\omega$ 为转动系的角速度，$\boldsymbol{r}$ 为物体在转动系中的矢径.

(2) 引入惯性力的概念后，牛顿方程在非惯性系中形式上得以成立，有 $\boldsymbol{F}+\boldsymbol{F}_{\text{惯}}=m\boldsymbol{a}'$. 式中，$\boldsymbol{F}$ 为真实力，$\boldsymbol{F}_{\text{惯}}$ 为惯性力，$\boldsymbol{a}'$ 为质点在非惯性系中的加速度. 从产生的效果看，惯性力与真实力一样，都可以改变物体的运动状态，即产生加速度.

1.2.6 冲量和动量

定义

冲量 力 $\boldsymbol{F}$ 对时间的积分，称为该段时间内的力 $\boldsymbol{F}$ 的冲量，即

$$\boldsymbol{I}=\int_{t_1}^{t_2}\boldsymbol{F}(t)\mathrm{d}t \tag{1.2.6}$$

动量 质点质量与其速度矢量的乘积，即 $\boldsymbol{p}=m\boldsymbol{v}$.

注释

(1) 冲量是矢量，其在直角坐标中的分量为

$$I_x=\int_{t_1}^{t_2}F_x\mathrm{d}t,\quad I_y=\int_{t_1}^{t_2}F_y\mathrm{d}t,\quad I_z=\int_{t_1}^{t_2}F_z\mathrm{d}t \tag{1.2.7}$$

在恒力情况下，冲量可表示为

$$\boldsymbol{I}=\boldsymbol{F}(t_2-t_1) \tag{1.2.8}$$

(2) 冲量是一过程量，反映了力对时间的积累作用.

(3) 作用力和反作用力的冲量之和恒为零.

(4) 在一些情况下作用力的变化比较复杂，如冲击力等，这时可以引入在作用时间 $t_1\sim t_2$ 内的平均力，其表示为

$$\overline{\boldsymbol{F}}=\int_{t_1}^{t_2}\frac{\boldsymbol{F}(t)\mathrm{d}t}{(t_2-t_1)} \tag{1.2.9}$$

(5) 动量是物体机械运动的量度，它是由质点运动状态($\boldsymbol{v}$)决定的状态量.

(6) 动量具有矢量性、瞬时性和相对性.

1.2.7 质点的动量定理

表述 质点所受的合外力的冲量等于其动量的增量，即

$$\boldsymbol{I}=\int_{t_1}^{t_2}\boldsymbol{F}(t)\mathrm{d}t=m\boldsymbol{v}_2-m\boldsymbol{v}_1 \tag{1.2.10}$$

注释

(1) 质点的动量定理反映了力的持续作用与物体机械运动状态变化之间的关系. 即质点动量的变化取决于力的冲量. 不论力是大还是小，只要力的冲量相同，也就是力对时间的累积量相同，就可以造成质点动量相同的改变，只不过力较大时，作用时间需要短一些，而力较小时作用时间需要持续更长一些罢了. 因此也可以这样理解，冲量是用动量变化来衡量的作用量.

(2) 如果力 $\boldsymbol{F}$ 的方向不随时间变化，冲量的方向与力的方向一致. 例如，重力的冲量就与重力的方向一致；如果力 $\boldsymbol{F}$ 的方向是变化的，冲量的方向就不能由某一个时刻力的方向来确定了. 例如，质点做匀速率圆周运动的时候，合外力表现为向心力，其方向由质点所在处指向圆心，方向是不断变化的. 在这种情况下，冲量的方向可以根据质点动量的增量来确定，也就是说，不论力的方向怎样变化，合外力的冲量 $\boldsymbol{I}$ 方向始终与动量增量 $\Delta\boldsymbol{p}=\boldsymbol{p}_2-\boldsymbol{p}_1$ 的方向一致.

(3) 动量定理是矢量式，在直角坐标系中的分量式为