

● 普通高等教育大学物理规划教材



大学基础物理学习指导

Learning Guide for University Physics

◎ 郑勇林 朱晓玲 卢孟春 戴松晖 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育大学物理规划教材

大学基础物理学习指导

郑勇林 朱晓玲 卢孟春 戴松晖 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书是与《大学基础物理学》(上、下)配套的辅导教材。本书依据教育部非物理专业基础课程教学指导委员会颁布的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》,从科学技术的发展和工程技术人才培养的总体要求出发,兼顾实用性和先进性,内容覆盖了所有需要掌握的基本理论和方法。书中对每章的教学重点和主要内容做了明确提示,精选例题分析有助于提高读者的解题能力,丰富的习题及参考答案有助于读者强化对所学知识的理解和运用。

本书可作为高等学校非物理类专业大学物理课程的辅助教材,也可供相关领域的工程技术人员、研究生学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

大学基础物理学习指导 / 郑勇林等编著. — 北京: 电子工业出版社, 2014.3
(普通高等教育大学物理规划教材)
ISBN 978-7-121-22012-8

I. ①大… II. ①郑… III. ①物理学—高等学校—教学参考资料 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 282178 号



策划编辑: 张小乐

责任编辑: 张小乐

印 刷: 三河市双峰印刷装订有限公司

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×980 1/16 印张: 15 字数: 340 千字

印 次: 2014 年 3 第 1 次印刷

定 价: 32.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

为了更好地适应我国高等教育发展,满足目前社会对一般高等学校大众化教育背景下人才培养的各项要求,进一步探索和完善我国高等学校应用型人才培养体系,积极探索适应 21 世纪人才培养的教学模式,我们根据教育部非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》(后简称“纲要”)的思想和精神,编写了《大学基础物理学》(上、下)(郑勇林、杨维、卢孟春、赵茂娟等编著)教材及《大学基础物理学习指导》辅导教材。

大学基础物理是工科大学生学习其他后续课程的基础课,是一门全面、系统地培养学生综合素质的课程。大学基础物理课程的学习,可以培养学生科学的思维方式和研究问题的方法,能开阔学生思路,激发学生的探索和创新精神,提高学生科学素养,增强社会适应能力。同时,相应的学习指导和习题又是帮助学生理解和掌握物理学基本概念、基本规律、基本方法的必要手段,也是培养学生掌握科学的学习方法,培养独立获取知识和解决问题的能力的有效途径。为了帮助学生更好地学好大学物理基础知识和解题方法,我们根据多年的教学经验编写了本书。

本书共 12 章,与《大学基础物理学》(上、下)教材配套使用,但本书在章节的编排上相对教材具有一定独立性,以体现学习指导书的特征,同时也能对不使用配套教材的读者学习大学基础物理学提供学习指导。

本书符合一般院校大学物理课程的教学要求并方便课堂教学,覆盖了需要掌握的基本理论和方法,精选了大学物理课程教学内容的知识点,每章按学习要求、内容提要、精选例题分析、重点难点分析、习题等几部分编写。学习要求部分,遵照“纲要”精神分为了解、理解、掌握和熟练掌握四个层次对学生提出不同要求,为教学不同的对象提供了理论依据。内容提要概述了本章需要掌握的基本概念、基本公式、定律和方法,重要的知识点等内容,从易于学生理解的角度给出一定的分析阐述。精选例题部分主要从本章难于理解的知识点入手,对相关知识的应用给出一定的解题方法及关键步骤,旨在帮助学生学会运用基本理论分析解决实际问题。重点难点分析部分,一是指导教学双方理清思路,抓住主线,正确把握相关知识内容的教与学;二是对本章难点之处进行分析讨论,提出具体的解决方法。习题部分是对本章内容学习之后的自我检测。题目中含有基本概念、知识点的一般应用、综合应用等题目。在本书最后附有习题的参考解或答案。

本书第 1~3 章由赵茂娟、王晓茜、戴松晖编写,第 4~8 章由杨维、朱晓玲、刘鸿、陆智编写,第 9~12 章由郑勇林、卢孟春、孙婷雅、朱晓玲编写,李伯恒、陆智参加了例题、习题的编写及本书的讨论。全书由郑勇林统稿。

本书在编写过程中得到了成都大学教务处、长江师范学院教务处的大力支持，编者在此致以衷心的感谢。

西南大学郑瑞伦教授仔细审阅了书稿并提出许多修改意见，在此表示感谢。

成都大学汪令江教授，长江师范学院周晏副教授为本书编写做了大量工作，在此表示感谢。

本书编写中参考了其他出版社的同类资料，在此一并致谢。

由于编者水平有限，书中可能存在不妥甚至错误之处，敬请批评指正。

编 者

2014年1月于成都

目 录

第 1 章 力学 运动学	1
1.1 学习要求	1
1.2 内容提要	2
1.3 重点难点分析	14
1.4 精选例题分析	15
1.5 习题	21
第 2 章 振动	24
2.1 学习要求	24
2.2 内容提要	24
2.3 重点难点分析	32
2.4 精选例题分析	33
2.5 习题	36
第 3 章 波动	41
3.1 学习要求	41
3.2 内容提要	41
3.3 重点难点分析	47
3.4 精选例题分析	48
3.5 习题	52
第 4 章 静电场	55
4.1 学习要求	55
4.2 内容提要	55
4.3 重点难点分析	63
4.4 精选例题分析	63
4.5 习题	72
第 5 章 静电场中的导体与电介质	77
5.1 学习要求	77
5.2 内容提要	77

5.3	重点难点分析	84
5.4	精选例题分析	85
5.5	习题	89
第 6 章	稳恒磁场 恒定磁场中的磁介质	92
6.1	学习要求	92
6.2	内容提要	92
6.3	重点难点分析	98
6.4	精选例题分析	99
6.5	习题	105
第 7 章	电磁感应 电磁场理论	108
7.1	学习要求	108
7.2	内容提要	109
7.3	重点难点分析	116
7.4	精选例题分析	116
7.5	习题	121
第 8 章	气体动理论 热力学基础	126
8.1	学习要求	126
8.2	内容提要	127
8.3	重点难点分析	138
8.4	精选例题分析	138
8.5	习题	143
第 9 章	波动光学	147
9.1	学习要求	147
9.2	内容提要	148
9.3	重点难点分析	159
9.4	精选例题分析	160
9.5	习题	165
第 10 章	狭义相对论基础	168
10.1	学习要求	168
10.2	内容提要	168
10.3	重点难点分析	173
10.4	例题精选分析	174
10.5	习题	178

第 11 章 量子力学基础	180
11.1 学习要求	180
11.2 内容提要	181
11.3 重点难点分析	188
11.4 精选例题分析	189
11.5 习题	191
第 12 章 分子与固体 现代高新技术	193
12.1 学习要求	193
12.2 内容提要	194
12.3 重点难点分析	203
12.4 精选例题分析	203
12.5 习题	204
部分习题参考答案	205

第1章 力学 运动学

本章知识是在质点模型基础上,定义描述质点运动的4个物理量(位置矢量、位移、速度和加速度)及运动方程,同时指出它们的相互关系,进而讨论质点的直线运动、曲线运动、刚体的定轴转动;讨论质点的运动状态和运动状态的变化,以及引起物体运动状态变化的规律——牛顿定律,阐述力对物体的瞬时作用规律;进一步研究力的空间累积作用和力对时间的累积作用,提出质点与质点系的动量定理、动量守恒定律和能量守恒定律,进而建立起整个经典力学体系。

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式及物质相互作用和转化规律的学科。自然界的一切物质都处于永恒的运动之中,物质的运动形式是多种多样的。物理学的研究目的在于认识物质运动的普遍规律,揭示物质各层次的内部结构。在物质的各种运动中,机械运动是最普遍、最基本的物质运动形式,力学就是研究物体机械运动和相互作用的科学。

1.1 学习要求

1. 质点运动的描述

- (1) 掌握位置矢量、位移、速度、加速度等描述质点运动的物理量;理解平面曲线运动的角位移、角速度、角加速度、切向加速度、法向加速度等概念。
- (2) 理解圆周运动的角速度、角加速度、切向加速度、法向加速度。
- (3) 理解伽利略相对性原理,会利用伽利略坐标、速度变换式分析相对运动问题。

2. 牛顿运动定律

- (1) 掌握牛顿三定律及其适用条件,熟练运用隔离法和整体法分析物体受力。
- (2) 熟练掌握运用微积分方法求解一维变力作用下的简单质点的动力学问题。
- (3) 正确理解质量、力等基本概念,会分析三种基本力——万有引力、弹性力和摩擦力。

3. 运动的守恒定律

- (1) 掌握力做功的概念,会计算变力的功;掌握保守力做功的特点及势能的概念;会计算重力、弹性力、万有引力的势能。
- (2) 掌握质点的动能定理和动量定理,理解质点系的内力和外力,了解质心概念和质心运动定理。

(3) 掌握质点系的动量守恒定律、机械能守恒定律,并能熟练应用功能关系解决一些简单实际的问题。

(4) 了解完全弹性碰撞和完全非弹性碰撞的特点。

4. 刚体定轴转动

(1) 掌握描述刚体转动的物理量及角量与线量的关系;理解转动惯量的概念,理解刚体定轴转动的转动动能的概念,了解刚体定轴转动的一般特点。

(2) 掌握角动量概念,掌握刚体绕定轴转动的角动量守恒定律及其适用条件。

(3) 理解刚体的定轴转动的转动定律,能在有刚体绕定轴转动的问题中正确应用机械能守恒定律。

(4) 能应用刚体的定轴转动的角动量定律和角动量守恒定律解决简单的刚体运动的力学问题。

1.2 内容提要

1. 基本概念

(1) 质点与刚体

把物体视为一个具有一定质量而大小可忽略的几何点,这样的几何点称为质点。质点是物体的一种理想模型。例如,导航地图中显示的移动的汽车、雷达屏幕上显示的飞行的飞机等就被处理成一个质点。

在外力的作用下,物体的大小和形状都不变的物体称为刚体。刚体是物体的又一种理想模型。例如,某一特殊的质点系,无论它在多大的外力作用下,系统内任意两质点间的距离始终保持不变。

(2) 参考系与坐标系

为了描述物体的运动而被选定的参考物体称为参考系。为了定量描述物体相对参考系的位置与运动情况,在①选定的参考系上建立的,②带有标尺的数学坐标,称为坐标系。在科学研究中通常选用的坐标系有直角坐标系、自然坐标系、柱坐标系和球坐标系等。

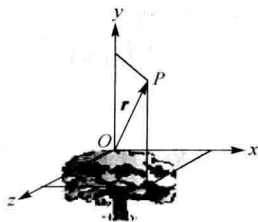


图 1.1 位置矢量

(3) 描述质点运动的物理量

① 位置矢量。在坐标系中质点的位置用一个被称为位置矢量(简称位矢)的矢量来描述。在参考系中任意取定一点 O 作为参考点,如图 1.1 所示,从 O 点指向质点在某一时刻所处的位置 P ,作一矢量 $\mathbf{r}$,称为质点在该时刻的位矢,即

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

在直角坐标系中,位矢 $\mathbf{r}$ 可表示为

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} \quad (1-1)$$

其中, P 点的位置坐标 x 、 y 、 z 就是该点位矢 $\mathbf{r}$ 在直角坐标系 $Oxyz$ 中沿各轴的分量。直角坐标系 $Oxyz$ 中各轴 Ox 、 Oy 、 Oz 的正方向分别用相应的单位矢量 $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 表示, 而 $\mathbf{r}_x = x\mathbf{i}$, $\mathbf{r}_y = y\mathbf{j}$, $\mathbf{r}_z = z\mathbf{k}$ 是位矢 $\mathbf{r}$ 的三个分矢量。

质点的位置矢量 $\mathbf{r}$ 随时间 t 的变化关系式

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-2)$$

叫做质点的运动方程。

② 位移。位移是指自运动始点指向终点的有向直线线段。它描述质点在某段时间内位置的变化, 为

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \quad (1-3)$$

位移是位置矢量的增量。

③ 速度。速度是描述质点运动快慢和运动方向的物理量, 速度的大小称为速率。

平均速度:
$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta\mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-4)$$

瞬时速度:
$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-5)$$

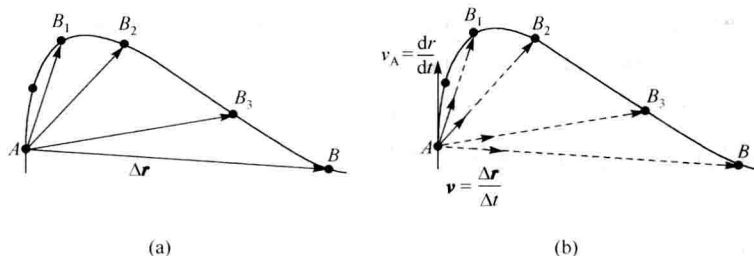
平均速度是位移 $\Delta\mathbf{r}$ 与时间 Δt 的比值, 反映了一段时间内位置变化的平均快慢, 方向与 $\Delta\mathbf{r}$ 相同。在描述质点运动时, 也常采用“速率”这个物理量, 把路程 Δs 与时间 Δt 的比值 $\Delta s / \Delta t$ 称为质点在时间 Δt 内的平均速率。平均速度与平均速率都与 t 和 Δt 有关系。瞬时速度是位置矢量对时间的一阶导数, 是 $\Delta t \rightarrow 0$ 时平均速度的极限值, 反映了 t 时刻位置变化的快慢和方向, 瞬时速度只与 t 有关系。位移 $\Delta\mathbf{r}$ 、平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 与瞬时速度 $\mathbf{v}$ 的关系如图 1.2 所示。位移沿割线 AB 的方向, 当 Δt 趋于零时, B 点逐渐趋近于 A 点, 相应的割线 AB 逐渐趋近于 A 点的切线, 所以质点的速度方向是沿着轨迹上质点所在点的切线方向并指向前进的一侧, 亦即质点位矢时间的瞬时变化率。

速度在直角坐标轴上的表示为

$$\mathbf{v} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} \quad (1-6)$$

沿坐标轴的分量分别是

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} \\ v_y &= \frac{dy}{dt} \\ v_z &= \frac{dz}{dt} \end{aligned} \quad (1-7)$$

图 1.2 平均速度 $\bar{v}$ 与瞬时速度 v

也就是说, 质点运动的速度矢量在直角坐标轴上的分量等于相应的位置坐标对时间的一阶导数 (标量导数)。所以速度的大小可以用下式计算:

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \quad (1-8)$$

速度的方向可用下式计算:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{v_x}{v} \\ \cos \beta &= \frac{v_y}{v} \\ \cos \gamma &= \frac{v_z}{v} \end{aligned} \quad (1-9)$$

式中, α , β , γ 分别为速度矢量 $\mathbf{v}$ 与 x , y , z 轴之间的夹角。

在自然坐标系中, 速度矢量可表示为

$$\bar{\mathbf{v}} = v \mathbf{e}_\tau = \frac{ds}{dt} \mathbf{e}_\tau \quad (1-10)$$

④ 加速度。加速度是反映质点速度矢量随时间变化的物理量。

平均加速度:

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1-11)$$

瞬时加速度:

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \quad (1-12)$$

平均加速度是速度矢量增量与时间的比值, 反映了一段时间内速度变化的平均快慢和总体方向; 瞬时加速度是速度矢量对时间的一阶导数, 反映了某瞬时速度变化的快慢和方向。

在直角坐标系中, 可将加速度用分量式表示为

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k} = \frac{dv_x}{dt} \mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt} \mathbf{j} + \frac{dv_z}{dt} \mathbf{k} = \frac{d^2 x}{dt^2} \mathbf{i} + \frac{d^2 y}{dt^2} \mathbf{j} + \frac{d^2 z}{dt^2} \mathbf{k} \quad (1-13)$$

在自然坐标系中, 加速度矢量可表示为

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_\tau + \mathbf{a}_n = \frac{dv}{dt} \mathbf{e}_\tau + \frac{v^2}{\rho} \mathbf{e}_n \quad (1-14)$$

式中, ρ 是质点的运动轨迹上某点的曲率半径, $\mathbf{e}_\tau$ 为质点沿切向方向的单位矢量, $\mathbf{e}_n$ 是垂直于 $\mathbf{e}_\tau$ 并指向曲率圆心的单位矢量, $\frac{dv}{dt}$ 为切向加速度, 反映速度大小的变化, $\frac{v^2}{\rho}$ 为法向加速度, 反映速度方向的变化。

2. 描述质点运动的角量

角位置 (角坐标)。某时刻质点和坐标原点的连线与参考轴的夹角 θ 称为角位置, 质点运动时, 角位置随时间的变化表示为 $\theta = \theta(t)$ 。

角位移是指角位置在 Δt 时间内的变化量, $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ 。

角速度是指角位移对时间的变化率, 表示为

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1-15)$$

角加速度是指角速度对时间的变化率, 表示为

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \quad (1-16)$$

线量与角量的关系 (质点做半径为 R 的圆周运动时) 为

$$\begin{aligned} \Delta s &= R\Delta\theta \\ v &= R\omega \\ a_\tau &= R\alpha \\ a_n &= \frac{v^2}{R} = R\omega^2 \end{aligned} \quad (1-17)$$

3. 相对运动

不同参考系对同一个物体运动的描述是不同的, 如图1.3所示。 $O'x'y'$ 坐标系相对于 Oxy 坐标系沿 Ox 轴以速度 u 运动, 那么, 一个运动质点在两个做相对运动的参考系中的位移及速度关系为

$$\begin{aligned} \Delta\mathbf{r} &= \Delta\mathbf{r}' + \Delta\mathbf{r}_0 \\ \mathbf{v} &= \mathbf{v}' + \mathbf{u} \end{aligned} \quad (1-18)$$

式中, $\Delta\mathbf{r}$ 为运动质点相对于 S 系的位矢变化, $\Delta\mathbf{r}'$ 为运动质点相对于 S' 系的位矢变化, $\Delta\mathbf{r}_0$

为 S' 系原点对 S 系原点的位矢变化, $\mathbf{v}$ 为质点相对于 S 系的速度, $\mathbf{v}'$ 为质点相对于 S' 系的速度, $\mathbf{u}$ 为 S' 系相对 S 系的速度, 也称为牵连速度。

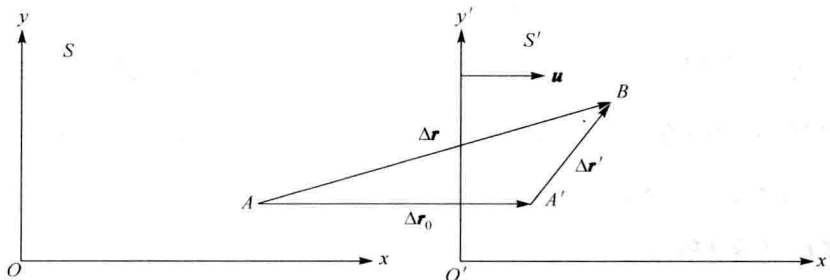


图 1.3 相对运动的描述

4. 惯性与惯性系

物体保持静止或匀速直线运动状态的特性, 称为惯性。

在研究物体相对运动时, 牛顿第一定律定义了一种参考系, 在这种参考系中观察, 一个不受力作用的物体将保持其静止或匀速直线运动的状态不变。这样的参考系称为惯性参考系, 也叫惯性系。也就是说, 牛顿第一定律成立的参考系是惯性系。相反, 第一定律不成立的参考系称为非惯性系。

5. 力与力矩

(1) 力

力是物体与物体之间的相互作用, 力是矢量, 有大小和方向。它是量度物体间相互作用的物理量。它能使质点运动的状态发生变化或使物体发生形变。牛顿三条定律都涉及力, 牛顿第一、第二定律以受力物体为对象来研究力的作用效果, 牛顿第三定律则指出物体间的相互作用是相互的。

日常生活中常见的力有: 重力 $W = mg$, 弹力 $f = -kx$, 摩擦力包括静摩擦力 $f \leq \mu_s N$ (μ_s 为静摩擦系数) 和滑动摩擦力 $f = \mu_k N$ (μ 摩擦系数)。

近代物理证明, 自然界物体之间的相互作用力可归结为 4 类: ①万有引力 $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ (重力属这类力); ②电磁力 (弹力、摩擦力、黏性力等相邻原子或分子之间的作用力); ③强力, 属物质内更深层次的一种作用力; ④弱力, 属亚原子之间的一种力。

*另一类是惯性力, 即在加速参考系中引入牛顿运动定律的力, 如在平动加速参考系中, $\mathbf{F} = -m\mathbf{a}$, 惯性离心力 $\mathbf{F}_i = -m\omega^2 r\mathbf{n}$ 。

(2) 力矩

在转动的研究中, 力矩是一个重要的概念。通常有力 $\mathbf{F}$ 对给定点的力矩和力 $\mathbf{F}$ 对定轴转动的力矩两个概念。

力 $\mathbf{F}$ 对给定点 O 的力矩 M_o 为位矢 $\mathbf{r}$ 与力 $\mathbf{F}$ 的矢量积表示

$$\mathbf{M}_o = \mathbf{r} \times \mathbf{F} \quad (1-19)$$

这是个矢量, 对于可以绕 O 点任意转动的刚体, 这个力矩矢量将决定它转动状态的变化;

力 $\mathbf{F}$ 对给定轴 Oz 的力矩 M_z , 因为力 $\mathbf{F}$ 可以分解为平行于转轴的分力 $F_{//}$ 和垂直于转轴的分力 $F_{\perp}$, 而 $F_{//}$ 对刚体转动没有贡献, 只有 $F_{\perp}$ 能使刚体转动。力 $F_{\perp}$ 的力矩可表示为

$$M_z = F_{\perp} r \sin \varphi = F_{\perp} d \quad (1-20)$$

M_z 叫做力 $\mathbf{F}$ 对转轴 Oz 的力矩。式中, φ 为 $F_{\perp}$ 与转轴到力作用点半径 r 的夹角。

说明: 如果有几个力同时作用, 那么上述力 $\mathbf{F}$ 可认为是几个力的合力。

(3) 转动惯量

转动惯量是表征刚体转动惯性大小的物理量, 定义为

$$J = \sum \Delta m_i r_i^2 \quad (1-21a)$$

式中, Δm_i 为刚体中任一质量元, r_i 为该质量元到转轴的距离。当刚体质量为连续分布时, J 表示为

$$J = \int_V r^2 dm \quad (1-21b)$$

计算转动惯量的平行轴定理

$$J = J_c + mh^2 \quad (1-21c)$$

式中, J_c 是刚体对通过刚体质心的轴线的转动惯量, J 是刚体对任一转轴的转动惯量, 它等于刚体对通过质心并与该轴平行的轴的转动惯量 J_c 加上刚体质量与两轴间距离 h 的二次方的乘积, m 是刚体的质量。由式 (1-21c) 可见, J 的大小不仅与刚体质量有关, 还与质量的分布和转轴的位置有关。

(4) 转动定律

刚体在总外力矩 M_z 的作用下所获得的角加速度 α 与总外力矩的大小成正比, 并与转动惯量 J 成反比, 这种关系称为定轴转动定律, 其数学表达式为

$$M_z = J\alpha = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-22)$$

式 (1-22) 表明了力矩的瞬时作用规律。与牛顿第二定律 $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ 相比, 力矩 M_z 与力 $\mathbf{F}$ 对应, 转动惯量 J 与质量 m 对应, 角加速度 α 与加速度 $\mathbf{a}$ 对应。

6. 动量与角动量

(1) 动量

与速度类似, 动量也是描述物体运动状态的物理量, 即 $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ 。它是矢量, 其方向与

速度方向一致。在物理学中,用 $(\mathbf{r}, \mathbf{p})$ 来表示质点的运动状态比用 $(\mathbf{r}, \mathbf{v})$ 来表示更能体现其物理意义。因此,也可以说动量是物体做机械运动的度量。动量的单位是 $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 角动量

质点的角动量是对某一定点而言的,其定义为

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = m\mathbf{r} \times \mathbf{v} \quad (1-23)$$

式(1-23)表明角动量 $\mathbf{L}$ 的大小为 $L = rp \sin \varphi$, 方向垂直于位矢 $\mathbf{L}$ 和动量 $\mathbf{p}$ 所组成的平面,指向是由 $\mathbf{r}$ 经小于 180° 的角转到 $\mathbf{p}$ 的右手螺旋前进的方向。

注意:式(1-23)中的 $\mathbf{r}$ 是该质点相对给定点 O 的位矢,参考点不同,角动量也不同,因此提到角动量一定要说明是对哪一个参考点而言的。

思考题:质点做圆周运动,以圆心为参考点的角动量是怎样的?

刚体做定轴转动的角动量定义为

$$\mathbf{L} = J\boldsymbol{\omega} \quad (1-24)$$

J 与 $\boldsymbol{\omega}$ 分别是刚体绕同一固定轴的转动惯量与角速度。 $\mathbf{L}$ 与 $\boldsymbol{\omega}$ 都是矢量,但在定轴转动情况下,仅有正负之分,用代数量处理即可。

7. 冲量与冲量矩

冲量是描述力对时间累积作用的物理量。冲量定义为 $\mathbf{I} = \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F}(t)dt$, 它是矢量,其方向与力的方向一致(说明: $\mathbf{I}$ 的方向和大小要由这段时间内所有微分冲量 $\mathbf{F}(t)dt$ 的矢量和来决定,而不是由某一瞬时的 $\mathbf{F}$ 决定,但在恒力作用时 $\mathbf{I}$ 与 $\mathbf{F}$ 同向)。上述积分中 $\mathbf{F}(t)$ 的关系一般比较复杂,无法确切知道其具体形式。当力作用时间很短时,为了计算方便,常用平均冲力 $\bar{\mathbf{F}}$ 代替 $\mathbf{F}(t)$ 来计算冲量,其关系为

$$\mathbf{I} = \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F}(t)dt = \bar{\mathbf{F}}(t_2 - t_1) \quad (1-25a)$$

恒力作用时,冲量为

$$\mathbf{I} = \mathbf{F}\Delta t = \mathbf{F}(t_2 - t_1) \quad (1-25b)$$

冲量的单位是 $\text{N} \cdot \text{s}$ 。

冲量矩(力矩的冲量)是力矩的时间积累效应,定义为 $\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{M}_z(t)dt$, 冲量矩是矢量。也可理解为 Δt 时间内对轴的力矩的冲量和或冲量矩之和。

8. 动量定理和动量守恒定律

(1) 动量定理

物体在运动过程中所受合外力的冲量,等于质点(或质点系)动量的增量。其数学形式为

$$\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F}(t) dt = m\mathbf{v}_2 - m\mathbf{v}_1 \quad \text{或} \quad \mathbf{I} = \mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1 \quad (1-26a)$$

它是牛顿第二定律的另一种表达形式, 阐述力对时间累计效应的物理规律。其微分形式为

$$\mathbf{F} dt = d\mathbf{p} = d m \mathbf{v} \quad (1-26b)$$

理解动量定理时注意以下几点:

① 尽管外力在运动过程中时刻改变, 物体的速度方向也可逐点不同, 但却总是遵守动量定理。即不管物体运动过程中动量变化的细节如何, 冲量的大小和方向总等于物体始末动量的矢量差。

② 动量定理不仅适用于碰撞或打击过程, 也适用于其他力学过程。式(1-26a)、式(1-26b)中的力 $\mathbf{F}$ 是物体所受的合外力。在处理铅直方向的碰撞这类问题时还应考虑重力, 当物体相互作用力远大于重力时, 重力可被忽略。

③ 动量定理是由牛顿第二定律推导出的, 而牛顿第二定律只适用于惯性系, 所以动量定理也只适用于惯性系。具体应用时, 需要选择合适的坐标系, 用其在坐标轴上的分量式进行计算。

(2) 动量守恒定律

若系统所受合外力为零, 即 $\sum_i \mathbf{F}_i = 0$, 则系统的总动量不随时间改变, 即

$$\sum m_i \mathbf{v}_i = m \mathbf{v}_c = \text{常矢量} \quad (1-27)$$

这一结论称为动量守恒定律。不难看出, 系统的动量不变与质心保持匀速直线运动状态是等效的。

动量守恒定律表明, 在物体机械运动转移过程中, 系统中某一物体获得动量的同时, 必然有别的物体失去了一份与之相等的动量。所以, 动量守恒定律的深刻含义在于它是物体机械运动的一种量度。物体动量的转移反映了物体机械运动的转移。

9. 角动量定理和角动量守恒定律

(1) 角动量定理

式(1-23)和式(1-24)分别定义了质点对定点的角动量和刚体做定轴转动的角动量, 质点角动量定理和刚体角动量定理可以共同表示为

$$\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{M}(t) dt = \mathbf{L}_2 - \mathbf{L}_1 \quad (1-28)$$

式中, $\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{M}(t) dt$ 是作用在物体上的冲量矩。式(1-28)的物理意义是, 作用于物体的冲量矩等于角动量的增量。对于质点而言, 力矩 $\mathbf{M}$ 和角动量 $\mathbf{L}$ 必须是对同一个参考点的; 对于刚体而言, 力矩和角动量必须是对同一转轴的。