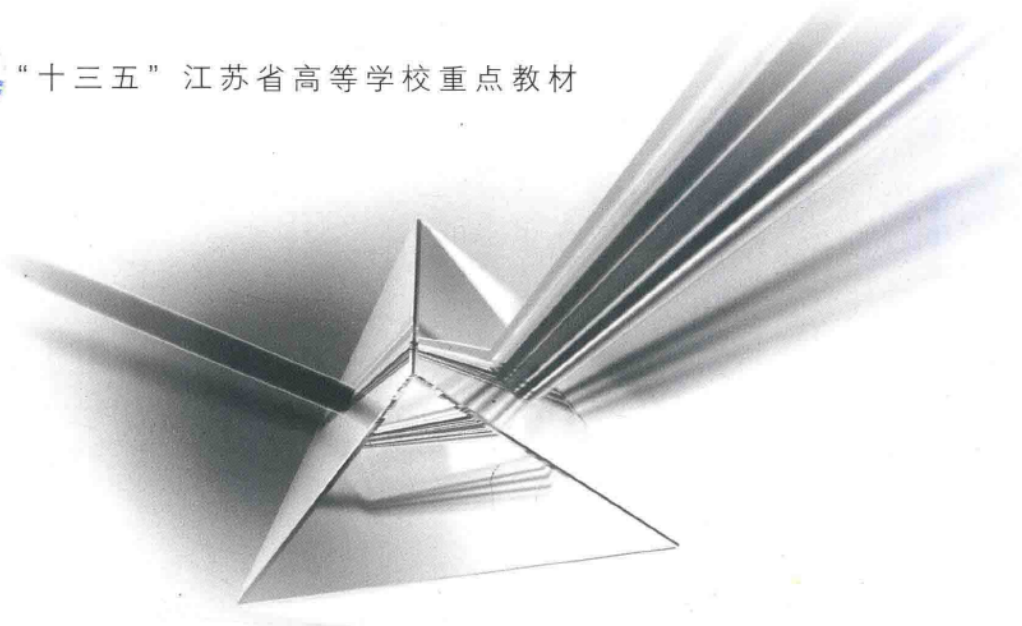




“十三五”江苏省高等学校重点教材



★名师视频

★知识点动画

★拓展资料

大学物理

(核心知识)

编著 周雨青
刘甦 董科 彭毅 侯吉旋

DAXUE WULI HEXIN ZHISHI



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

“十三五”江苏省高等学校重点教材

大学物理

(核心知识)

周雨青 刘甦 董科 彭毅 侯吉旋 编著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

• 南京 •

内 容 简 介

《大学物理(核心知识)》立体化教材根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会 2010 年颁布的“理工科类大学物理课程教学基本要求”,将课堂教学内容分解为 76 条知识点(66 条核心内容、10 条扩展内容),涵盖了力学、振动与波、热学、电磁学、波动光学、狭义相对论基础、量子物理基础的内容。本教材辅有近 100 个富媒体资料,包括了彩图、动画、视频,以帮助学习者更好地理解所学知识,增加教材的可读性和趣味性。本教材可供全日制非物理专业理工科学生使用,亦可为在线学习大学物理专题 MOOC 的学习者提供阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理.核心知识/周雨青等编著. —南京:东南大学出版社,2019.1

ISBN 978-7-5641-8127-7

I. ①大… II. ①周… III. ①物理学-高等学校-教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 261614 号

大学物理(核心知识)

周雨青 刘 甦 董 科 彭 毅 侯吉旋 编著

出版发行 东南大学出版社
社 址 南京市四牌楼 2 号 邮编:210096
出版人 江建中
责任编辑 夏莉莉
网 址 <http://www.seupress.com>
经 销 全国各地新华书店
印 刷 江苏扬中印刷有限公司
版 次 2019 年 1 月第 1 版
印 次 2019 年 1 月第 1 次印刷
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 17
字 数 314 千
书 号 ISBN 978-7-5641-8127-7
定 价 40.00 元

《大学物理(核心知识)》勘误

由于排版过程及编校过程中工作人员的疏忽,书稿习题中出现了一些错误,实属抱歉!今复核全书,附录勘误如下:

1. P63,习题 1-2 中的 m 改为 m ;
2. P98,习题 2-1 选项中的 p 改为 π ;
3. P98,习题 2-3 中“做谐振动”改为“做简谐振动”;
4. P99,习题 2-5 中“位移”改为“位置”;
5. P100,习题 2-11 中的 f 改为 ϕ ;
6. P100,习题 2-17 选项中的 p 改为 π ;
7. P101,习题 2-19 选项中的 p 改为 π ;
8. P101,习题 2-21 及选项中的 l 改为 λ ;
9. P101,习题 2-23 及选项中的 n_s 改为 ν_s ;
10. P102,习题 2-26 中的 l 改为 λ ;
11. P102,习题 2-28 中的 $\frac{1}{3}\pi$ 改为 π , l 改为 λ ;
12. P102,习题 2-29 中的 l 改为 λ ;
13. P180,习题 4-6 中“两级平行”改为“两级板平行”;
14. P180,习题 4-12 中 E 改为 \mathcal{E} ;
15. P234,习题 6-3 后括号及内容删除;
16. P264,习题 7-12 中的“峰宽”改为“缝宽”。

前 言

本教材的编写思路来源于江苏省在线开放课程的立项项目“大学物理专题 MOOC”的成功运营:课程于 2017 年 9 月 11 日在中国大学 MOOC 平台上线开课。开课伊始,吸引了上万学生的关注和学习,以不同 IP 地址为指标的统计,该课程共吸引了 176 所高校过万人学习。这一现象引起了我们团队的思考:富媒体的运用有助于推动学生的学习!建设《大学物理(核心知识)》立体化教材的想法应运而生。

《大学物理(核心知识)》立体化教材根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会 2010 年颁布的“理工科类大学物理课程教学基本要求”,将课堂教学内容分解为 76 条知识点(66 条核心内容、10 条扩展内容),保证了知识点的完整性和系统性,并且为了让更多读者获益,这本教材还应该有一定的普适性,因此确定以下编写原则和特色:

(1) 教材的深度适中偏下。考虑到知识点的有用性,我们对知识点的阐述尽可能简洁,不做很深入的推导与讨论,比如电磁学中的各定理、定律和近代物理中的各理论等。

(2) 教材章节缩编。一般大学物理的教材有十四五章左右,我们确定的章节是七章,力学和电磁学部分做了较大的缩编,以配合少学时教学和自学的需要。

(3) 彩图、动画、视频大量融合。教材以二维码形式将“大学物理专题 MOOC”中的 35 个视频全部有机结合在教材中,这样能将课程与教材直接拉近到“零距离”,除此之外,还有配合知识点的彩图和动画,全书的富媒体资料约为 100 个。这为本教材提供了丰富的“附加值”,增加了可读性和趣味性。

本教材可为普通高等院校在校学生提供 50~80 学时的教学内容,也可为学习“大学物理专题 MOOC”的学生提供较全面的知识储备,希望能获得教师 and 学生的认可与接受。

全书编写工作分工如下:周雨青负责第一章至第三章、刘甦负责第四章、董科负责第五章、彭毅负责第六章、侯吉旋负责第七章,周雨青做全书统稿工作。

感谢东南大学出版社对本教材建设的支持。同时感谢东南大学计算机软件学院的白丰硕、刘骁、高语伦和叶绵四位同学,他们为我们修编了“大学物理专题 MOOC”视频之外的所有动画和视频。感谢东南大学教务处原处长雷威教授,是他的关怀与包容成就了我们的选题——“大学物理专题 MOOC”,使我们得以突破传统课程的概念,以专题的形式出现在“中国大学 MOOC”平台。最后感谢教务处所有领导,有了领导们的关心,本教材才能被列入东南大学 2018 年重点建设教材,并获 2018 年江苏省高等学校重点教材立项!

编者:周雨青

2018 年 8 月于成贤小楼

目 录

第一章 力学	1
1-1 质点运动的描述 相对运动	1
1-2 牛顿运动定律及其应用	9
1-3 非惯性系 惯性力	23
1-4 质点系的动量定理和动量守恒	25
1-5 功 保守力的功 动能定理 机械能守恒	32
1-6 对称性与守恒定律	44
1-7 刚体定轴转动	46
1-8 理想液体的流动和伯努利方程	59
习题	63
第二章 振动与波	67
2-1 简谐振动 旋转矢量法	67
2-2 阻尼、受迫振动 共振	74
2-3 一维简谐振动的合成 拍	78
2-4 机械波 简谐波波函数	81
2-5 惠更斯原理 波的衍射	87
2-6 波的叠加原理 波的干涉和驻波	88
2-7 多普勒效应	96
习题	98
第三章 热学	103
3-1 理想气体状态方程	103
3-2 理想气体压强和温度	105
3-3 能量均分定理	108
3-4 麦克斯韦速率分布律	110
3-5 气体分子的平均自由程和平均碰撞频率	112
3-6 热力学第一定律 典型热力学过程	115
3-7 卡诺循环 热机效率 制冷系数	122
3-8 热力学第二定律 熵与熵增原理	124

习题	128
第四章 电磁学	131
4-1 库仑定律 电场强度及其叠加原理	131
4-2 静电场的高斯定律	138
4-3 电势 电势叠加原理 静电场的环路定理	145
4-4 导体的静电平衡 电容	150
4-5 稳恒电流 磁感强度 毕奥-萨伐尔定律	156
4-6 恒定磁场的高斯定理和安培环路定理	161
4-7 安培定律 洛伦兹力	166
4-8 法拉第电磁感应定律	170
4-9 动生电动势和感生电动势	171
4-10 自感 互感和磁场能	173
4-11 位移电流 麦克斯韦方程组的积分形式	177
习题	179
第五章 波动光学	182
5-1 相干光	182
5-2 光的干涉	183
5-3 光的衍射	192
5-4 光的偏振	198
习题	204
第六章 狭义相对论基础	206
6-1 经典力学的相对性原理 伽利略变换	206
6-2 狭义相对论的基本原理 洛伦兹变换	210
6-3 狭义相对论的时空观	216
6-4 狭义相对论动力学	221
习题	233
第七章 量子物理基础	237
7-1 波粒二象性 薛定谔方程	238
7-2 原子与光谱	252
习题	263
参考文献	265

第一章 力学

机械力学通常可分为运动学和动力学两部分。运动学只描述物体的运动状态随时间的变化规律,而不涉及引起运动和改变运动的原因;动力学则研究物体的运动与物体间相互作用的内在联系。

本章主要讨论的内容包括质点力学、刚体力学和部分的流体基本概念。质点、刚体和理想流体都是理想的物理模型,其中尤以质点模型最为重要,刚体模型可看作没有相对运动的质点的集合(质点系),理想流体可看成能流动的质点集合体。

1-1 质点运动的描述 相对运动

1-1-1 参照系 坐标系

运动是物体存在的形式,是物质的固有属性,这称为**运动的绝对性**。但选择不同的物体作为参照物来描述同一个物体的运动,其结果往往是不同的。例如,当你在行驶的车上伸手向车窗外释放一颗石头,在你看来这颗石头将向下做(近匀加速)直线运动。而对于静止于地面上的观察者来说,这颗石头做(近)平抛运动,其运动轨迹为(近)抛物线。又如,人造地球卫星的运动,若以地球为参照物,其运动轨道是圆或椭圆,如图 1-1(a)所示;如果以太阳为参照物,卫星的运动轨道则是形如图 1-1(b)所示的复杂曲线。这种以不同物体作为参照物,得出对同一物体运动的不同描述,称为**运动描述的相对性**。由于运动的描述具有相对性,因此在描述一个物体的运动时,必须首先选择一物体作为参照物。例如,要观察轮船在大海中的航行,可以选择海岸、灯塔甚至恒星作为参照物。这种研究物体运动时被选作参照物的物体,称为**参照系**。同一物体的运动,由于参照系不同,对其运动的描述就不同。当我们描述一个物体的运动时,必须指明是相对于哪个参照系。

为了定量地表示出一个物体在各时刻相对于参照系的精确位置,通常还需要建立一个固定在参照系上的坐标系,运动物体

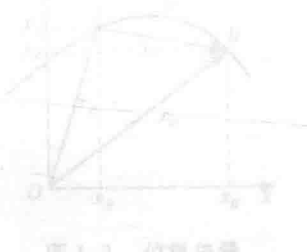


图 1-3 位移矢量



图 1-4 动画:参照系

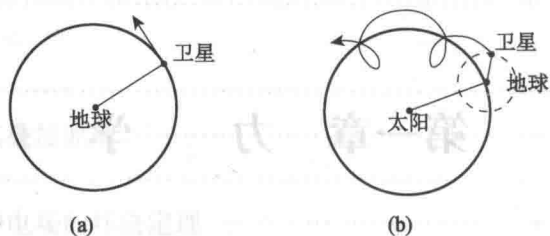


图 1-1 不同参照系中的卫星轨道

的位置就由它在坐标系中的坐标值决定。可以选择的坐标系有多种,如直角坐标系、极坐标系、自然坐标系、球坐标系等。选择合适的坐标系,可以大大方便问题的求解。在讨论直线运动、抛体运动时,通常选择直角坐标系,而在讨论圆周运动、刚体的定轴转动时,采用极坐标系更方便。

1-1-2 质点

任何物体都有一定的大小和形状。但是在很多情况下,由于物体的大小和形状与所研究的问题关系很小,在研究这类问题时,物体的大小和形状可以不加考虑。例如地球在绕太阳公转的同时,也绕地轴自转,地球上的各点相对于太阳的运动是各不相同的。但是由于地球到太阳的距离为地球直径的一万多倍,所以在研究地球的公转时,地球的大小和形状可不加考虑地当作质点来处理。所谓质点,是指只有质量而没有大小、形状和结构的点,是一个理想模型。一个物体是否可以看成质点,应根据具体问题而定。

研究质点具有普遍的意义。当物体的大小和形状不可以忽略时,常把物体看作是由无数个质点组成的质点系。通过分析质点系内所有质点的运动,可以弄清整个物体的运动,研究质点的运动是研究一般物体运动的基础,所以质点是物理学中一个非常重要的物理模型。

1-1-3 质点运动的描述

1. 位置矢量 运动方程

为了研究质点的运动情况,首先需要知道质点在任意时刻的位置。在直角坐标系中,为了确定一个运动质点 P 在任意时刻 t 所在的位置,可以用三个坐标 x 、 y 、 z 来表示。当质点的位置随时间变化时, x 、 y 、 z 都是时间 t 的函数,即

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t) \quad (1-1)$$

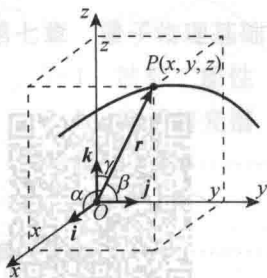


图 1-2 位置矢量

确定一个质点的位置,也可以用从原点 O 指向 P 点的有向线段 \boldsymbol{r} 来表示。 \boldsymbol{r} 称为质点的位置矢量(位矢),又称为矢径,如图 1-2 所示。在直角坐标系中位矢 \boldsymbol{r} 可以表示成

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) = x(t)\boldsymbol{i} + y(t)\boldsymbol{j} + z(t)\boldsymbol{k} \quad (1-2)$$

式中 \boldsymbol{i} 、 \boldsymbol{j} 、 \boldsymbol{k} 分别为沿坐标轴 x 、 y 、 z 三个方向的单位矢量。

位置矢量 \boldsymbol{r} 的大小为

$$r = |\boldsymbol{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1-3)$$

它表示质点离坐标原点的距离,而位置矢量 \boldsymbol{r} 的方向可用其与三个坐标轴之间的夹角的余弦表示

$$\cos \alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos \beta = \frac{y}{r}, \quad \cos \gamma = \frac{z}{r} \quad (1-4)$$

式(1-1)或者式(1-2)称为质点的运动方程。如果知道了运动方程,质点的运动就完全确定了。根据具体问题的条件,求解质点的运动方程是力学的基本任务之一。

质点在运动过程中,在空间所经历的路径称为轨迹。从式(1-1)中消去时间 t ,就可以得到质点的轨迹方程。质点若做平面运动或一维直线运动,则在上式中分别减少一个或两个坐标变量即可。

2. 位移

知道了质点的运动方程,就可以讨论质点的位置随时间的变化。设一质点在 xOy 平面内沿图 1-3 所示的曲线轨迹 AB 运动。 t 时刻,质点的位置在始点 A 处, $t + \Delta t$ 时刻,质点运动到终点 B 处。则 A 、 B 间曲线的长度 Δs 称为质点在 Δt 时间内走过的路程。实际上,质点从始点 A 到达终点 B 可以有很多条路径,但出发地到目的地的直线距离和出发地指向目的地的方向是唯一的,此即称为位置的变化。在讨论质点的运动时,更重要的是要知道它的位置的变化。

因此,我们由质点的初位置 A 向末位置 B 引一个矢量 $\Delta \boldsymbol{r}$,用它来表示质点位置的变动,其矢量的大小为位置改变的大小,方向为位置改变的方向。矢量 $\Delta \boldsymbol{r}$ 叫作质点在给定时间间隔 $t \rightarrow t + \Delta t$ 内的位移矢量,简称位移。记作

$$\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t + \Delta t) - \boldsymbol{r}(t) = \boldsymbol{r}_B - \boldsymbol{r}_A \quad (1-5)$$

因此质点在 $t \rightarrow t + \Delta t$ 时间内的位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 等于质点在这段时间内位置矢量的增量。

考虑到式(1-2),位移矢量 $\Delta \boldsymbol{r}$ 也可写成

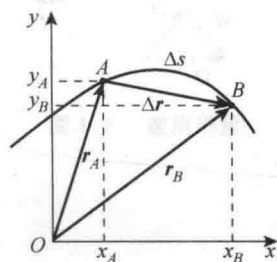


图 1-3 位移矢量

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A = (x_B - x_A)\mathbf{i} + (y_B - y_A)\mathbf{j} \quad (1-6)$$

位移矢量的大小为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}$$

位移矢量的方向可由它与 x 轴之间的夹角 α 确定,即

$$\tan \alpha = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}$$

需要特别注意的是,路程 Δs 和位移 $\Delta \mathbf{r}$ 是两个完全不同的概念。路程 Δs 是标量而位移 $\Delta \mathbf{r}$ 是矢量,位移只反映在一段时间内质点位置变动的总效果,它并不代表质点实际走过的路程。在国际单位制中,位置矢量、位移和路程的常用单位是米(m)。

3. 质点运动的速度

为简单起见,我们只讨论质点在一平面(如 xOy 平面)上的运动情况。设时刻 t ,质点位于 A 点,时刻 $t + \Delta t$,它沿曲线 AB 运动到 B 点(图 1-3),则该质点在 Δt 时间内的位移 $\Delta \mathbf{r}$ 是(见式 1-6)

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{r} &= \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A = (x_B - x_A)\mathbf{i} + (y_B - y_A)\mathbf{j} \\ &= \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} \end{aligned} \quad (1-7)$$

我们把位移 $\Delta \mathbf{r}$ 与时间 Δt 之比,定义为在时间 Δt 内质点的平均速度,用矢量 $\bar{\mathbf{v}}$ 表示

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-8)$$

平均速度的大小等于 $|\Delta \mathbf{r}| / \Delta t$,其方向与位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同,即由 A 指向 B 的方向。平均速度只能反映质点在 Δt 时间内运动的平均情况,为了精确地描述质点在轨道上每一点的运动情况,把 $\Delta t \rightarrow 0$ 时平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 的极限称为质点在某一时刻的瞬时速度,简称速度,用矢量 \mathbf{v} 表示

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-9)$$

式(1-9)表明,瞬时速度等于位置矢量对时间的一阶导数。

由图 1-4 可见,当质点沿着某曲线从 A 向 B 运动时,位移 $\Delta \mathbf{r}$ 以及平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 沿割线的方向。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,割线趋向于轨迹曲线的切线方向。因此,质点瞬时速度 \mathbf{v} 的方向总是沿着轨迹上质点所在点的切线方向。

在平面直角坐标系中,位置矢量为式(1-2),则按式(1-9),瞬时速度可表示为

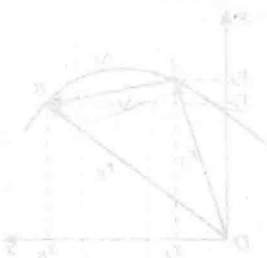


图 1-3 位移矢量

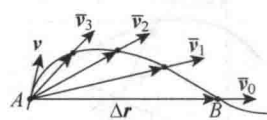


图 1-4 瞬时速度的方向

$$\mathbf{v} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} \quad (1-10)$$

式中 $v_x = \frac{dx}{dt}$ 和 $v_y = \frac{dy}{dt}$ 为速度沿 x 轴和 y 轴的分量。

速度的方向由它与 x 轴正方向之间的夹角 θ 给定

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} \quad (1-11)$$

瞬时速度的大小称为**瞬时速率**,简称**速率**,用字母 v 表示,其数值为

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (1-12)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,位移的大小 $|\Delta \mathbf{r}|$ 可认为与路程 Δs 相等,所以

$$v = |\mathbf{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1-13)$$

式(1-13)表明,速率等于路程对时间的一阶导数。

4. 质点运动的加速度

一般来说,质点做曲线运动时,其速度矢量的大小和方向都会随时间变化,用加速度这一物理量来表示速度随时间变化的快慢情况。设在 t_1 时刻,质点在 A 处,速度为 \mathbf{v}_1 ,在 t_2 时刻,质点在 B 处,速度为 \mathbf{v}_2 ,见图 1-5。在 $\Delta t = t_2 - t_1$ 时间内,质点速度的大小和方向都发生了变化,速度在 Δt 时间内的增量应由矢量减法来表示,即

$$\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1 \quad (1-14)$$

$\Delta \mathbf{v}$ 和 Δt 之比可以反映出在 Δt 时间内质点速度变化的平均情况,称为**平均加速度**,用矢量 $\bar{\mathbf{a}}$ 表示

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1-15)$$

为了精确描述质点在某一时刻速度变化的情况,把 $\Delta t \rightarrow 0$ 时平均加速度的极限称为质点在某一时刻的**瞬时加速度**,简称为**加速度**,用矢量 \mathbf{a} 来表示,即

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \quad (1-16)$$

也就是说,加速度等于速度对时间的一阶导数,或位置矢量对时间的二阶导数。



动画:平均速度和平均速率

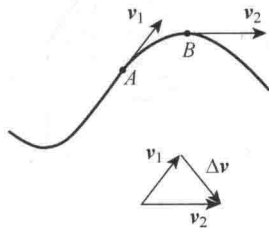


图 1-5 速度增量



微信扫码，获取更多资料

在平面直角坐标系中,加速度可表示为

$$\mathbf{a} = \frac{dv_x}{dt}\mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt}\mathbf{j} = \frac{d^2x}{dt^2}\mathbf{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\mathbf{j} = a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} \quad (1-17)$$

式中, $a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{dx^2}{dt^2}$ 和 $a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{dy^2}{dt^2}$ 为加速度沿 x 轴和 y 轴的分量。

加速度的大小为

$$a = |\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \quad (1-18)$$

加速度的方向就是当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,平均加速度速度 $\Delta\mathbf{v}/\Delta t$ 或速度增量 $\Delta\mathbf{v}$ 的极限方向,它由加速度矢量 \mathbf{a} 与 x 轴正方向之间的夹角 θ 确定

$$\tan \theta = \frac{a_y}{a_x} \quad (1-19)$$

需要注意的是,与直线运动不同,曲线运动中速度的方向总在不断变化。由图 1-5 可见,速度增量 $\Delta\mathbf{v}$ 的方向及其极限方向一般不在轨道的切线方向,因而曲线运动中,加速度 \mathbf{a} 的方向与同一时刻速度 \mathbf{v} 的方向一般是不一致的,即加速度的方向一般不指向轨道的切线方向。

例 1-1 质点运动方程为

$$\mathbf{r} = 2t\mathbf{i} + (4t^2 + 2)\mathbf{j}$$

式中 \mathbf{r} 的单位为 m, t 的单位为 s。试求:

- (1) 质点运动的轨迹方程;
- (2) 质点在 $t = 1\text{ s}$ 至 $t = 3\text{ s}$ 内的位移;
- (3) 速度的直角坐标分量表达式;
- (4) 加速度的直角坐标分量表达式。

解 (1) 由题意可知, $x = 2t$, $y = 4t^2 + 2$, 消去 t 可得抛物线轨迹方程为

$$y = x^2 + 2$$

(2) 将 $t = 1\text{ s}$ 和 $t = 3\text{ s}$ 代入位矢的表达式,得

$$\mathbf{r}(t = 1\text{ s}) = 2\mathbf{i} + 6\mathbf{j}$$

$$\mathbf{r}(t = 3\text{ s}) = 6\mathbf{i} + 38\mathbf{j}$$

因此,质点在 $t = 1\text{ s}$ 至 $t = 3\text{ s}$ 内的位移为

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}(t = 3\text{ s}) - \mathbf{r}(t = 1\text{ s}) = 4\mathbf{i} + 32\mathbf{j}$$

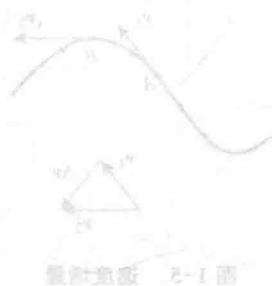


图 1-5 曲线运动中速度的方向

图 1-6 质点运动的位移

(3) 速度的 x 和 y 方向分量分别为

$$v_x = \frac{dx}{dt} = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, v_y = \frac{dy}{dt} = 8t \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

(4) 加速度的 x 和 y 方向分量分别为

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = 0, a_y = \frac{dv_y}{dt} = 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

因此,加速度恒定,其大小为

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

利用上一问中的结果,可得速度的大小为

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = 2\sqrt{1 + 16t^2}$$

1-1-4 相对运动

质点运动的轨迹因参照系(观察者)的不同选择而不同。我们研究物体运动时,通常总是选取地球或者相对于地球静止的物体作参照系(称为**实验室参照系**),但也可以选取相对于地球运动的物体作参照系。由于运动的描述是相对的,因此,同一物体的运动,在不同的参照系中有不同的描述。例如,在无风的雨天,坐在车内的旅客看到雨滴的运动情况是随着车辆运动情况的不同而变的。当车辆静止时,旅客若看到雨滴是竖直下落的,而当车辆运动时,旅客看到雨滴运动的轨迹是倾斜的,车速越快,雨滴运动的轨迹倾斜得越厉害。在不同的参照系中对同一物体运动的不同描述之间存在着什么变换关系呢?

设有两个参照系,一个为 S 系(即 xOy 坐标系),另一个为 S' 系(即 $x'O'y'$ 坐标系)。两参照系的各对应坐标轴保持相互平行,参照系 S' 相对于 S 以速度 u 沿 x 轴正向做匀速直线运动, $t=0$ 时刻, S 和 S' 系完全重合,则在 t 时刻, $OO' = ut$ (图 1-6)。设 t 时刻,质点 P 在 S 系中的位置矢量是 r , 在 S' 系中是 r' , 由图 1-6 中的矢量关系可知

$$r = r' + u \quad (1-20)$$

对式(1-20)求时间的一阶导数,有

$$\frac{dr}{dt} = \frac{dr'}{dt} + u$$

即



扫码下载, 轻松学习

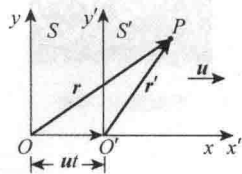


图 1-6 相对运动

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}' + \boldsymbol{u} \quad (1-21)$$

其中, \boldsymbol{v} 是质点相对于 S 系的速度, \boldsymbol{v}' 是质点相对于 S' 系的速度。式(1-21)的物理意义是:质点相对于 S 系的速度等于它相对于 S' 的速度与 S' 系相对于 S 系的速度的矢量和。

再对式(1-21)求时间的一阶导数,并考虑到 S' 系相对于 S 系做匀速直线运动, \boldsymbol{u} 为常矢量,有

$$\frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d\boldsymbol{v}'}{dt}$$

即

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}' \quad (1-22)$$

其中, \boldsymbol{a} 是质点相对于 S 系的加速度, \boldsymbol{a}' 是质点相对于 S' 系的加速度。

由上讨论可见,在两个相对做匀速直线运动的参照系中观察同一个质点的运动时,关于该质点的运动方程(或位置)和速度的描述是不同的,与两参照系的相对速度有关,但在两参照系中关于该质点的加速度的描述是完全相同的,这表明质点的加速度对于相互做匀速直线运动的各参照系来说是个绝对量。

式(1-20)、式(1-21)和式(1-22)三式给出了在两个以恒定的相对速度运动的参照系中,质点的位矢、速度和加速度之间的变换关系,称为伽利略变换公式。应当指出,这些变换公式并不是在任何情况下都是正确的,当质点的速率接近于光速时,伽利略变换公式应由洛伦兹变换公式代替。关于这一点将在狭义相对论中加以论述。

例 1-2 一艘小船要横渡一条宽 D 为 200 m 的大河,河水的流速是 1.5 m/s,流动方向平行于河岸,小船相对于静水的行驶速率是 2.0 m/s,见图 1-7。

(1) 如果小船向着正对岸驶去,要用多少时间到达对岸?到达对岸的位置偏离正对方多少距离?

(2) 如果要使小船到达正对岸,小船应如何行驶?用多少时间到达对岸?

解 以小船为研究对象,设河岸为参照系 S ,流动的河水为参照系 S' ,则小船在 S' 系中的速度是其相对于静水的航速 \boldsymbol{v}' ,在 S 系中的速度是其相对于河岸的速度 \boldsymbol{v} , S' 相对于 S 的速度 \boldsymbol{u} 就是河水的流速。由式(1-21)

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}' + \boldsymbol{u}$$



动画:飞机投弹



图 1-7 例 1-2 图

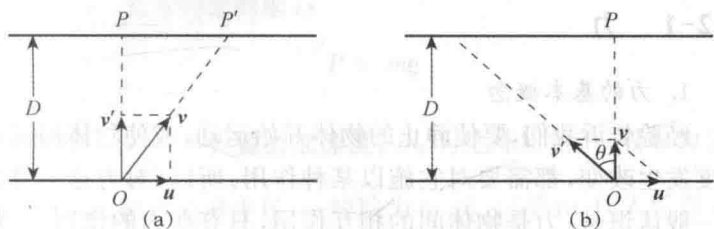


图 1-7 例 1-2

(1) 若小船向着正对岸行驶, 则 v' 指向正对岸的 P 点, 而 v 就指向偏下游的 P' 点, 如图 1-7(a) 所示。小船到达对岸的时间

$$t = \frac{D}{v'} = \frac{200}{2.0} = 100 \text{ s}$$

偏离正对岸的距离

$$\overline{PP'} = ut = 1.5 \times 100 = 150 \text{ m}$$

(2) 要使小船到达正对岸, 则小船相对于河岸的速度 v' 应指向正对岸的 P 点, 如图 1-7(b) 所示。这时小船相对于河水的航向应向上游偏 θ 角, 且 $v' \sin \theta = u$, 即

$$\sin \theta = \frac{u}{v'} = \frac{1.5}{2.0} = 0.75$$

解得

$$\theta = 48.6^\circ$$

所以, 小船到达正对岸的时间

$$t = \frac{D}{v' \cos \theta} = \frac{200}{2.0 \times \cos 48.6^\circ} = 151 \text{ s}$$



动画: 小船过河

1-2 牛顿运动定律及其应用

1687 年, 牛顿在他的名著《自然哲学的数学原理》中提出了关于机械运动的三条规律, 这三条定律称为**牛顿运动定律**。牛顿运动定律是质点动力学的基础, 虽然牛顿运动定律一般只对质点才成立, 但复杂物体原则上可以看成是由大量质点组成的系统, 因此牛顿运动定律也是研究一般物体(如刚体、弹性体、流体等)机械运动的基础。