

UNIVERSITY
PHYSICS

大学物理

(第二版)

(上)

主编 》 陈义万



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

院校理工类公共基础课『十三五』规划教材

UNIVERSITY
PHYSICS

大学物理

(第二版)

(上)

主 编 陈义万
副主编 闵 锐 邓 罡 周挽平
参 编 徐国旺 裴 玲 龚姣丽
朱进容 胡 妮 成纯富
张金业 陈之宜 李文兵



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

大学物理/陈义万主编.—2版.—武汉:华中科技大学出版社,2019.1
ISBN 978-7-5680-3288-9

I. ①大… II. ①陈… 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(2017)第 198118 号

大学物理(第二版)

Daxue Wuli(Di-er Ban)

陈义万 主编

策划编辑:彭中军

责任编辑:史永霞

封面设计:孢子

责任监印:朱玢

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录排:华中科技大学惠友文印中心

印刷:武汉洪林印务有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:34.75

字数:900千字

版次:2019年1月第2版第1次印刷

定价:68.00元(含上、下册)



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

序 言

1. 物理学的研究对象

物理学的研究对象是物质的结构和规律。物质的结构,从微观到宏观,再到天体和宇宙,尺度之大,范围之广,涵盖了所有的物质形态。微观范畴,如原子的结构、原子核的结构、粒子如何构成原子核;宏观范畴,如凝聚态的结构、材料的性质;天体范畴,如银河系的构成、河外星系的结构等,都属于物理学研究的对象。除了研究各个层次的物质的结构,还要弄清物质的运动规律。就目前的科学水平,在微观,主要的物理理论是量子力学;在宏观,起支配作用的是经典物理学,也就是力学和电磁学;在宇宙的尺度,主要的理论是广义相对论。这些理论,在人类不断加深对自然界认识的基础上不断发展。

2. 三次工业革命与物理学的关系

第一次工业革命 发生于 1760—1840 年,主要的标志是蒸汽机的发明和使用。由于有了蒸汽机代替人力和畜力,生产效率得到极大提高。火车代替了小马车,蒸汽机驱动的纺织机械代替了手工纺织,社会的产品极大丰富,出现了主要用于交换的商品,人类进入一个大发展时期。而蒸汽机的原理就是物理学中热学的内容。

第二次工业革命 发生于 1840—1950 年,主要的标志是电的发明和使用。电作为动力,在火车、汽车、电梯等方面得到广泛使用,成为最广泛使用的动力;电作为信息传输载体,在有线和无线通信,如电话、电报、传真、互联网等方面,得到非常广泛的使用。物理学电磁场的理论就是电的理论基础。

第三次工业革命 也叫作信息革命、知识经济时代(1950 年至今),是指以电子技术、集成电路、计算机为核心的信息技术时代。这个时代,改变了资本和有形的物质作为工业主体的格局,信息和知识作为工业的主体,计算机在许多方面代替了人的脑力劳动,知识的地位大大提升。这个时代的核心是计算机,而计算机的核心部件是 CPU。CPU 的基本元件是 PN 结和三极管,它们都是在硅(锗)的基片上形成的。固体物理是 CPU 的理论基础。

不仅与三次工业革命有紧密的联系,即使在当代,物理学与新技术也密不可分。比如 2007 年的诺贝尔物理学奖巨磁阻效应,2009 年的诺贝尔物理学奖光纤、CCD 电荷耦合技术,2010 年的石墨烯,这些物理学的成果,已经或者即将形成技术突破,极大地改变人类的生活。作为理工科的大学生,学习物理,了解物理学的新进展,是十分必要的。

3. 学习大学物理的作用

首先,大学物理作为公共基础课,与各个专业的后续课程都有关系。比如,机械类和土木类专业的同学,在后续要学习理论力学、材料力学、机械原理,都需要物理的力学作为基础;而检测类的专业,有不少课程与光学有关;电气信息类的同学,后续课程与电磁理论有关,都需要把大学物理作为基础;轻化类的同学,后续课程与热力学、量子力学有关。

其次,大学物理作为科学素养,是理工科同学必备的。人们在生活和工作中,不仅用到专业知识,更多的时候要与非专业的问题打交道,需要有物理的知识背景。比如,普遍使用的复印机,与电学有关;夏天雨后的彩虹,就是光的折射现象;检查身体的 X 光机、核磁共振仪与原

子物理有关。对我们在日常生活中遇到的仪器设备,即使我们只要对它们稍作了解,就需要有大学物理知识。更不用说理工科的学生,在以后的工作中,要结合自己的专业,把物理的最新知识应用到专业中去。如前面提到的巨磁阻效应、石墨烯等等,可以预见在不久的将来会在技术上突破,只有及时地把这些物理上的进展,与自己的专业结合,才可能取得突出的成绩。

最后,也是就业的需要。学生进校后,学习的专业是确定的,而就业则带有偶然性。由于社会需求的变化,可能很多同学要跨专业就业,在另外一个专业领域,学生以前学习的非常专业化的知识这时候起不到多少作用。我们都知道,很多问题,最后都归为物理模型和数学方程,所以,大学物理为同学们提供了一个普遍的可以长期起作用的基础。

4. 学习大学物理的要求

第一,做好预习。预习对于集中注意力听课,做到当堂理解,培养自己的自学能力都有好处。

第二,适当地做笔记。把教师在课堂上讲的与教材不同的地方记下来,供课后复习参考。

第三,独立完成作业。作业不在多,在精练,要独立完成,真正培养自己独立解决问题的能力。

第四,适当阅读其他参考书。中外有很多优秀的大学物理教材和参考书,同学们要善于利用,在教师指导下,有选择性地阅读,扩大自己的知识面。

前 言

本套教材按照教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会制定的基本要求编写,包括了所有规定的 A 部分的内容,也有选择性地包含了 B 部分的内容,可以供理工类本科和专科各类学生学习大学物理使用。

本书的编写有以下几个特点。

(1)注重书的历史厚重感。在讲解物理的重要知识时,简要地讲述它的背景和来龙去脉,让学生更好地把握科学的发展历程,而不至于感到物理知识是断裂的、片段的知识。

(2)穿插介绍近 20 多年来与人类生活密切相关的诺贝尔物理学奖,让学生及时接触、了解物理学的前沿领域的发展。

(3)考虑到一些对力学要求比较高的专业的需要,增加了分析力学基础一章。

在最后的 3 章,专门介绍了物理学与新技术:激光及其应用,纳米技术,非线性科学:混沌、分形、孤立子。这些内容虽然不在传统的大学物理教学范围内,但是,可以作为选讲内容或学生课外阅读材料。

(4)每一章和节的标题,以及每章中的重要定理都附有英语翻译。主要是考虑到目前大多数学生还没有机会学习物理的双语课程,通过此种形式,让学生尽早地接触英语中重要的物理名词。

本书还按照内容,分为几大篇,便于不同专业按照模块安排教学。

这些改进或者说特色,是我们对物理教学的一点尝试,效果如何,还要看实践的检验。也希望使用本书的教师和学生及时反馈修改意见。

本书的参编人员大多数为湖北工业大学教师,周挽平为湖北工业大学工程技术学院教师。

本书编写过程中,参考了国内外多种优秀教材及网络资料,在此对原作者一并致谢。

本书主编为陈义万,上册副主编为闵锐、邓罡、周挽平,下册副主编为胡妮、裴玲、朱进容。本书编写人员如下:周挽平(第 1 章、第 3 章、第 10 章、第 11 章、物理学诺贝尔奖介绍 1),邓罡(第 2 章、第 4 章、第 18 章、物理学诺贝尔奖介绍 4),陈义万(第 5 章,第 6 章,第 23 章,第 25 章,第 29 章,第 30 章,物理学诺贝尔奖介绍 3、7),徐国旺(第 7 章),闵锐(第 8 章,第 13 章,第 14 章,物理学诺贝尔奖介绍 6、8),裴玲(第 9 章、第 15 章、第 27 章、物理学诺贝尔奖介绍 2),龚姣丽(第 12 章),朱进容(第 16 章、第 17 章),胡妮(第 19 章、第 24 章、第 26 章、物理学诺贝尔奖介绍 5),成纯富(第 20 章),张金业(第 21 章),陈之宜(第 22 章),李文兵(第 28 章)。



或



手机扫描二维码,可迅速将文件传到手机

目 录

A 篇 力 学

第 1 章 质点运动学	(3)
1.1 质点的位置与位移	(3)
1.2 质点的速度 加速度	(5)
1.3 自然坐标系中的速度 加速度	(8)
1.4 圆周运动中的角度量	(12)
1.5 相对运动	(14)
【思考题与习题】	(14)
物理学诺贝尔奖介绍 1	(19)
1985 年 量子霍尔效应	(19)
第 2 章 牛顿运动定律	(22)
2.1 牛顿第一定律	(22)
2.2 牛顿第二定律	(23)
2.3 牛顿第三定律	(26)
2.4 牛顿运动定律的应用	(27)
【思考题与习题】	(31)
第 3 章 功和能	(34)
3.1 功	(34)
3.2 动能定理	(36)
3.3 势能	(38)
3.4 机械能守恒定律	(41)
【思考题与习题】	(43)
第 4 章 动量和冲量	(47)
4.1 动量 动量定理	(47)
4.2 动量守恒	(49)
4.3 碰撞	(51)
4.4 质心	(54)
4.5 变质量问题 火箭的推进器	(56)
【思考题与习题】	(58)
第 5 章 刚体力学基础	(60)
5.1 刚体运动的描述	(60)
5.2 刚体定轴转动定律	(61)

5.3	力矩的功 刚体的动能	(67)
5.4	质点的角动量及角动量定理	(68)
5.5	刚体对轴的角动量及角动量定理	(69)
5.6	进动	(70)
	【思考题与习题】	(71)
第6章	分析力学基础	(75)
6.1	约束 广义坐标	(75)
6.2	虚功原理	(76)
6.3	拉格朗日方程	(79)
6.4	哈密顿正则方程	(82)
6.5	泊松括号与泊松定理	(85)
6.6	哈密顿原理	(87)
6.7	正则变换	(91)
6.8	刘维尔定理	(92)
	【思考题与习题】	(94)
物理学诺贝尔奖介绍 2		(95)
1987年	高温超导	(95)

B 篇 电 磁 学

第7章	静电场	(101)
7.1	电荷 库仑定律	(101)
7.2	静电场 电场强度	(103)
7.3	电场线 电场强度通量	(107)
7.4	电场强度的高斯定理	(109)
	【思考题与习题】	(113)
第8章	电势	(117)
8.1	保守力做功的特点 电势能	(117)
8.2	电势与电势差	(119)
8.3	电场强度与电势的微分关系	(123)
	【思考题与习题】	(125)
第9章	静电场中的导体 电容 电介质	(129)
9.1	静电场中的导体	(129)
9.2	电容	(133)
9.3	电介质的极化	(135)
9.4	电位移 电位移的高斯定理	(138)
9.5	电场的能量	(141)
	【思考题与习题】	(143)

物理学诺贝尔奖介绍 3	(147)
1997 年 激光冷却和陷俘原子	(147)
第 10 章 稳恒电流的磁场	(152)
10.1 电流密度 微分形式的欧姆定律 电动势	(152)
10.2 磁场 磁感应强度	(156)
10.3 磁感应强度的高斯定理	(157)
10.4 毕奥-萨伐尔定律	(158)
10.5 磁场的安培环路定理	(162)
【思考题与习题】	(165)
第 11 章 磁场对电流的作用	(169)
11.1 安培定律	(169)
11.2 磁场对载流线圈的作用	(171)
11.3 带电粒子在磁场中的运动	(174)
11.4 霍尔效应	(176)
【思考题与习题】	(177)
第 12 章 磁介质	(180)
12.1 磁介质	(180)
12.2 磁介质的磁化	(181)
12.3 H 的环路定理	(183)
12.4 铁磁质	(186)
【思考题与习题】	(188)
物理学诺贝尔奖介绍 4	(191)
2005 年 光相干的量子理论和激光精密光谱学	(191)
第 13 章 电磁感应	(193)
13.1 电磁感应定律	(193)
13.2 动生电动势	(197)
13.3 感生电动势和感生电场	(200)
13.4 自感和互感	(203)
13.5 磁场的能量	(205)
【思考题与习题】	(207)
第 14 章 麦克斯韦方程组	(214)
14.1 位移电流	(214)
14.2 麦克斯韦方程组的积分形式	(216)
14.3 麦克斯韦方程组的微分形式	(218)
14.4 电磁波	(219)
【思考题与习题】	(223)
参考答案	(227)

A 篇 力 学

第1章 质点运动学

Chapter 1 Particle kinematics

宇宙世界是个万花筒,物质运动存在多种多样的运动形式,如机械运动、电磁运动、分子热运动等,其中最简单、最基本的就是机械运动,即一个物体相对于某个参照系发生位置的变化,如车辆的奔驰、天体的运动、“玉兔”号探月器在月球上漫步等,宇宙中一切物体不论大小都处于机械运动之中。

一个有形状和大小的物体的运动是复杂的。运动一般可分为平动、转动和振动三种运动形式。为了讨论问题的方便,本章只研究质点的平动问题,侧重描述一个物体的运动情况和物体的运动规律,不涉及引发物体运动状态改变的原因。首先介绍位置矢量、速度和加速度等描述质点运动的物理量,然后研究一种典型的曲线运动——圆周运动,重点讨论解决运动学中两类基本问题的方法。

1.1 质点的位置与位移

The location of the particle, The displacement

1. 质点和参照系

1) 质点

任何物体都是具有大小和形状的,但是在某些情况下,物体的大小和形状对讨论它的运动无关紧要。例如,当研究地球绕太阳转动时,由于地球直径(约为 $1.28 \times 10^7 \text{ m}$),比地球与太阳的距离(约为 $1.50 \times 10^{11} \text{ m}$)小得多,地球上各点的运动相对于太阳来讲可视为相同,此时可以忽略地球的大小和形状;但当研究地球绕自身轴转动时则不能忽略。所以说,只要物体运动的路径比物体本身尺寸大得多的时候,就可以近似地把此物体看成只有质量而没有大小和形状的几何点,这个抽象化的点就叫作质点。由地球的例子可以看出:把物体当作质点是有条件的(即地球与太阳的平均距离比地球直径大得多);相对于地球自转则不能将地球当作质点。

2) 参考系

宇宙万物,大至日、月、星、辰,小至原子内部的粒子都在不停地运动着。自然界一切物质没有绝对静止的,这就是运动的绝对性。但是对运动的描述却是相对的。例如:坐在运动着的火车上的乘客看同车厢的乘客是“静止”的,看车外地面上的人却向后运动;反过来,在车外路面上的人看见车内乘客随车前进,而看路边一同站着的人却是静止不动的。这是因为车内乘客是以“车厢”为标准进行观察的,而路面上的人是以地球为标准观察的,即当选取不同的标准物对同一运动进行描述,所得结论不同。因此,我们就把相对于不同的标准物所描述物体运动情况不同的现象叫作运动的相对性,而将被选为描述物体运动的标准物叫作参考系。参考系的选取以分析问题的方便为前提。如描述星际火箭的运动,开始发射时,可选地球为参考系,

当它进入绕太阳运行的轨道时,则应以太阳为参考系才便于描述。在地球上运动的物体,常以地球或地面上静止的物体作为参考系。

在参考系选定后,为了定量地描述物体的位置随时间改变的变化趋势,还必须在参考系上选择一个坐标系。坐标系的选取多种多样,如直角坐标系、极坐标系、自然坐标系、球坐标系、柱坐标系。在大学物理学中常用前三种坐标系。

2. 位置矢量和位移

1) 位置矢量

位置矢量是定量描述质点在某一时刻所在空间位置的物理量,简称位矢。如图 1-1 所示,设质点在某一时刻位于 P 点,从坐标系的原点 O 引向 P 点的有向线段 OP 称为该时刻质点的位置矢量,简称位矢,以 \boldsymbol{r} 表示。它在 X 、 Y 、 Z 轴上的投影(或位置坐标)分别为 x 、 y 、 z ,于是,位矢 \boldsymbol{r} 的表达式为

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

式中: \boldsymbol{i} 、 \boldsymbol{j} 、 \boldsymbol{k} 分别为 X 、 Y 、 Z 轴上的单位矢量(大小为 1,方向沿各轴正向的矢量)。

显然,位置矢量的大小为

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

其方向由它的三个方向余弦来确定。位矢的单位为米(m)。

2) 运动学方程

质点在运动过程中,每一时刻均有一对应的位置矢量(或一组对应的位置坐标 x 、 y 、 z)。换言之,质点的位矢是时间的函数,即

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

其投影式为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1-2(b))$$

这样

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

按机械运动的定义,函数式(1-2(a))描述了这个运动的过程,故称为质点的运动方程。知道了运动方程,就能确定任一时刻质点的位置,进而确定质点的运动。运动学的主要任务在于,根据问题的具体条件,建立并求解质点的运动方程。

如果消去式(1-2(b))中的参变量 t ,则得到质点运动的轨迹方程。如果质点限制在平面内,则可在该平面上建立 XOY 坐标系,于是式(1-2(b))中的 $z(t) = 0$,从中消去时间 t ,得

$$y = y(x) \quad (1-3)$$

此即质点在 XOY 平面内运动的轨迹方程。

3) 位移

位移是表示质点位置变化的物理量。

如图 1-1 所示,设时刻 t 质点经过 P 处,位矢为 \boldsymbol{r} ,在时刻 $t + \Delta t$,质点经过 P' 处,位矢为 $\boldsymbol{r}(t + \Delta t)$ 。在时间 Δt 内,质点位置的变化可用它的位移表示。由图 1-1 可知:

$$\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t + \Delta t) - \boldsymbol{r}(t) \quad (1-4)$$

位移是矢量,其大小为有向线段 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的长度,其方向由始点指向末点。

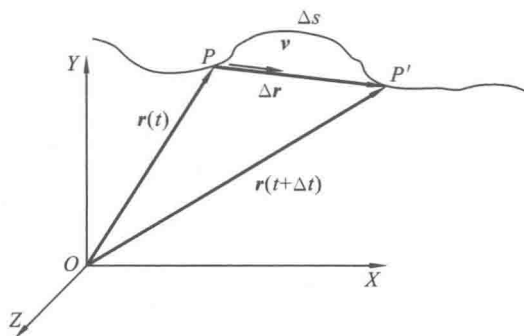


图 1-1 位置矢量图

必须指出,位移和路程不同。位移是矢量,是质点在一段时间内的位置变化,而不是质点所经历的实际路径;路程为标量,是指该段时间内质点所经历的实际路径的长度,以 Δs 表示(如图 1-1 中的弧长)。位移和路程除了矢量、标量不同外,总有 $\Delta s \geq |\Delta \mathbf{r}|$ 。只有质点在作单向直线运动时才有 $\Delta s = |\Delta \mathbf{r}|$ 。但是在 $\Delta t \rightarrow 0$ 的极限情况下, $ds = |d\mathbf{r}|$ 。其次,还要注意 Δr 与 $\Delta \mathbf{r}$ 的区别,一般以 Δr 代表 $|\mathbf{r}_2| - |\mathbf{r}_1|$,因此总有 $|\Delta \mathbf{r}| \geq \Delta r$,只有在 \mathbf{r}_2 与 \mathbf{r}_1 方向相同的情况下 $|\Delta \mathbf{r}|$ 与 Δr 才相等。

1.2 质点的速度 加速度

The speed of the particle, The acceleration

1. 速度

速度是表示质点位置变化快慢和变化方向的物理量。将质点的位移与完成位移所需的时间的比值称为质点在该段时间内的平均速度。

Speed is the particle's velocity of the change in position and direction, the ratio of the displacement of the particle and the time required for the completion is called the average rate over the time.

平均速度用 $\bar{\mathbf{v}}$ 表示,即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)}{\Delta t} \quad (1-5)$$

平均速度是矢量,其方向与 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同。

质点所经历的路程与完成这段路程所需时间之比,称为质点在该段时间内的平均速率,以 \bar{v} 表示。

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-6)$$

平均速率为标量。在一般的情况下,平均速度的大小并不等于平均速率。

平均速度只能反映一段时间内质点位置的平均变化情况,而不能反映质点在某一时刻(或某一位置)的瞬时变化情况。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,平均速度的极限值才能精确地反映质点在某一时刻(或某一位置)的运动快慢及方向。这一极限值称为质点在该时刻的瞬时速度,或简称速度,以 \mathbf{v} 表示,即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-7)$$

速度是矢量,其方向与 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向一致,即为运动轨迹上该点的切线方向。从式(1-7)可以看出,速度是位置矢量对时间的一阶导数。速度的单位是米·秒⁻¹($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

反映质点运动瞬时快慢的物理量称为瞬时速率(简称速率),它是 $\Delta t \rightarrow 0$ 时平均速率的极限值,即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} v = \frac{ds}{dt} \quad (1-8)$$

由于 $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $|d\mathbf{r}| = ds$,故质点在某一时刻的速度大小与该时刻的瞬时速率相等。

2. 加速度

加速度是描述质点速度随时间变化快慢的物理量。

Acceleration is physical quantity describing particle velocity changes with time .

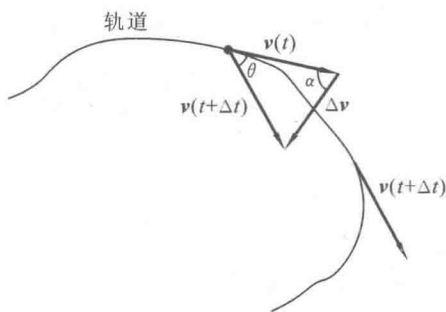


图 1-2 质点的速度增量

如图 1-2 所示, t 时刻质点的速度为 $\mathbf{v}(t)$, $t + \Delta t$ 时刻质点的速度为 $\mathbf{v}(t + \Delta t)$, 则该质点的加速度为

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbf{v}(t + \Delta t) - \mathbf{v}(t)}{\Delta t} \xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} \mathbf{a} \\ &= \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \end{aligned} \quad (1-9)$$

由式(1-9)可以看出,质点的加速度等于速度对时间的一阶导数,或等于位置矢量对时间的二阶导数。换句话说,我们可以通过对速度或位矢求导来计算加速度。加速度的单位是米·秒⁻²($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

3. 质点运动学的两类基本问题

质点运动学所要解决的问题一般分为两类:一类是已知质点的运动学方程,求质点在任意时刻的速度和加速度,在数学处理上需用导数运算,称为微分问题;另一类是已知质点的加速度及初始条件(即初始时刻的位矢及速度),求任意时刻的速度和位置矢量(或运动学方程),在数学上需用积分运算,称为积分问题。第一类问题前面已讨论过,下面以匀变速直线运动为例来讨论第二类问题。

例 1.1 设质点作匀变速直线运动,在 $t=0$ 时,其初始位置坐标和速度分别为 x_0 和 v_0 ,求任意时刻质点的运动状态,也就是要求其坐标 x 和速度 v 随时间 t 变化的函数表达式。

分析:先将瞬时加速度的数学式改写,然后积分得

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \rightarrow d\mathbf{v} = \mathbf{a} dt \xrightarrow{\text{积分}} \int_{v_0}^v d\mathbf{v} = \int_0^t \mathbf{a} dt$$

即

$$\mathbf{v} - \mathbf{v}_0 = \mathbf{a} t \quad \text{或} \quad \mathbf{v} = \mathbf{a} t + \mathbf{v}_0 \quad (1-10)$$

式(1-10)就是确定质点在匀加速直线运动中速度的时间函数式。

根据瞬时速度的数学式,将式(1-10)改写并积分得

$$\mathbf{v} = \frac{dx}{dt} \rightarrow dx = \mathbf{v} dt \xrightarrow{\text{积分}} \int_{x_0}^x dx = \int_0^t \mathbf{v} dt$$

即

$$x - x_0 = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad \text{或} \quad x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (1-11)$$

式(1-11)就是匀加速直线运动中确定质点位置的时间函数式,也就是质点的运动方程。

此外,如果把瞬时加速度的数学式改写成

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dv}{dx} v \rightarrow v dv = a dx$$

对两边取积分就得

$$v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0) \quad (1-12)$$

式(1-12)就是质点作匀加速直线运动时,质点坐标和速度 v 之间的关系式。

我们把 $a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dv}{dx} v \rightarrow v dv = a dx$ 称为加速度的微分式的变换式。

以上讨论以 x 方向运动为例,同理可求得 y 、 z 方向的分量关系,这里不再赘述。下面讨论两个特例。

1) 直线运动实例

(1) 自由落体运动 物体自由下落,是近似于匀加速直线运动的一个实例。在自由下落过程中,若无空气阻力,则无论物体的大小、形状、质量等如何,在距地面上同一高度处,它们均有相同的加速度,若降落距离不太大,在降落过程中,加速度可当作常量,空气阻力、 g 随高度变化忽略不计,这种理想的运动叫作自由落体运动。

自由落体运动中加速度 g 是常数,则为匀变速直线运动,以上讨论的公式均适用。因自由落体在开始时, $v_0 = 0$, 且选坐标轴的正方向向下,将这些条件代入匀变速直线运动公式后有

$$v = gt, \quad y = \frac{1}{2} g t^2, \quad v^2 = 2gy$$

(2) 竖直上抛运动 与自由落体运动相反,竖直上抛运动有向上的初速度,取向上为坐标轴正方向,且运动过程中加速度为重力加速度,方向始终向下,取负值。则由匀变速直线运动公式得

$$v_0 \neq 0, \quad a = -g, \quad y_0 = 0$$

$$v = v_0 - gt, \quad y = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2, \quad v^2 = v_0^2 - 2gy$$

2) 平面曲线运动实例

(1) 运动叠加原理 从同高度的平抛运动与自由落体运动同时落地的实验事实,说明平抛运动中水平运动不影响竖直方向的运动,即平抛运动是竖直方向的自由落体运动和水平方向的匀速运动的叠加。进一步推广可知,一个运动可以看成几个各自独立进行的运动的叠加。

根据类似的无数客观事实,可得到这样一个结论:一个运动可以看成几个各自独立进行的运动的叠加。这个结论称为运动的叠加原理。

(2) 抛体运动 选坐标系如图 1-3 所示,质点在平面内作抛体运动。则

$$a_x = 0, a_y = -g \quad (\text{水平方向为匀速,竖直方向为匀变速})$$

$$t=0 \text{ 时, 有 } \begin{cases} x_0 = 0, v_{x0} = v_0 \cos \theta \\ y_0 = 0, v_{y0} = v_0 \sin \theta \end{cases}$$

根据匀变速直线运动公式得:

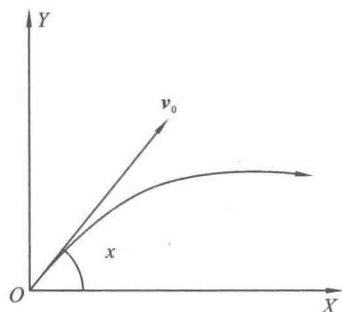


图 1-3 质点平面内抛体运动

$$\begin{aligned}v_x &= v_0 \cos \theta, x = (v_0 \cos \theta)t \\v_y &= v_0 \sin \theta - gt, y = v_0 \sin \theta t - \frac{1}{2}gt^2\end{aligned}\quad (1-13)$$

式(1-13)描述了抛体在任意时刻的速度和位置,称为抛体运动方程式。

由 x 和 y 的表达式消去时间 t 可得轨迹方程:

$$y = x \tan \theta - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \theta}$$

这是一个抛物线方程。

由抛体的运动方程式和轨迹方程可知,抛体的轨迹和在任一时刻的运动状态取决于 v_0 和 θ 。在 v_0 一定的情况下, $\theta = \pi/2$, 对应于上抛运动; $0 < \theta < \pi/2$, 对应于斜上抛运动; $\theta = 0$, 对应于平抛运动。

根据抛体运动方程(或轨迹方程)可得出体现抛体运动特征的三个重要物理量:射高 H 、射程 R (落地点与抛出点在同一水平面上的水平距离)和飞行时间 T 分别为

$$\begin{cases} \text{射高 } H = \frac{v_0^2}{2g} \sin^2 \theta \\ \text{射程 } R = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\theta \\ \text{飞行时间 } T = \frac{2v_0 \sin \theta}{g} \end{cases}$$

显然,以相同的速率而以不同的抛射角 θ 抛出时,其射程一般不同。容易证明,当 $\theta = 45^\circ$ 抛出时,抛体取得最大射程 $R = \frac{v_0^2}{g}$ 。

1.3 自然坐标系中的速度 加速度

Natural coordinate system of the speed, The acceleration

前面讲过,为了定量地描述物体的位置和位置随时间的变化关系,在参考系上还需要选择一个坐标系。下面介绍三种常用坐标系中的各物理量及其变化的表达式,重点介绍自然坐标系中的速度及加速度。

1. 直角坐标系(rectangular coordinate system)

1) 位移

在直角坐标系中,位移可表示为

$$\Delta \mathbf{r} = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} + (z_2 - z_1)\mathbf{k} = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k} \quad (1-14)$$

位移的大小: $|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$

其方向由三个方向余弦确定,分别为

$$\cos \alpha = \frac{\Delta x}{|\Delta \mathbf{r}|}, \cos \beta = \frac{\Delta y}{|\Delta \mathbf{r}|}, \cos \gamma = \frac{\Delta z}{|\Delta \mathbf{r}|}$$

2) 速度

由速度定义知,速度是位置矢量对时间的一阶导数,即

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} \quad (1-15)$$