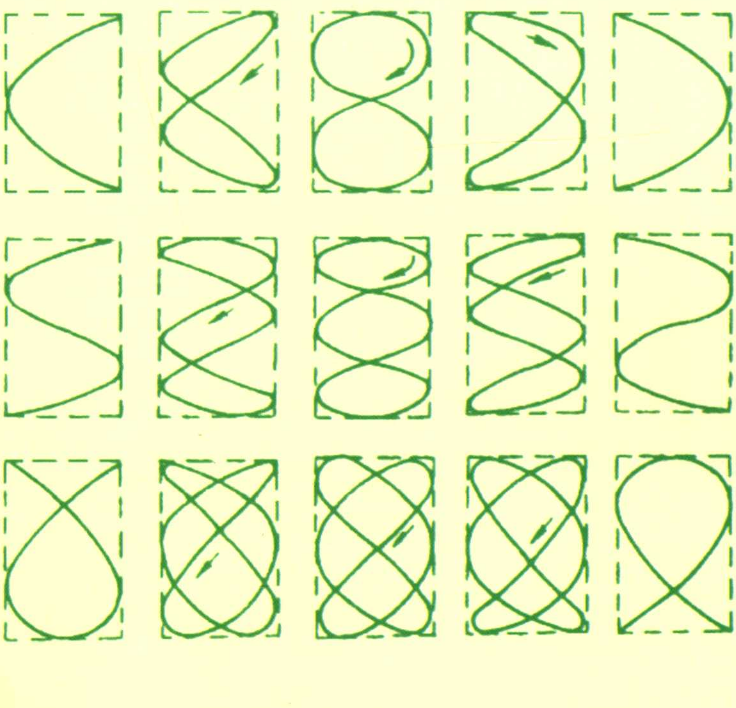
普通高等教育农业部“十二五”规划教材
全国高等农林院校“十二五”规划教材

大学物理

DAXUE WULI

杨亚玲 王开明 周 兵 主编



中国农业出版社

普通高等教育农业部“十二五”规划教材
全国高等农林院校“十二五”规划教材

大学物理

杨亚玲　王开明　周　兵　主编

中国农业出版社

图书在版编目（CIP）数据

大学物理 / 杨亚玲，王开明，周兵主编．—北京：中国农业出版社，2014.1（2015.6 重印）

普通高等教育农业部“十二五”规划教材　全国高等农林院校“十二五”规划教材

ISBN 978-7-109-18589-0

Ⅰ.①大…　Ⅱ.①杨…　②王…　③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（2013）第 289897 号

中国农业出版社出版

（北京市朝阳区农展馆北路 2 号）

（邮政编码 100125）

策划编辑　薛　波

文字编辑　薛　波

北京中新伟业印刷有限公司印刷　新华书店北京发行所发行

2014 年 1 月第 1 版　2015 年 6 月北京第 3 次印刷

开本：787mm×1092mm　1/16　印张：21.25

字数：520 千字

定价：38.00 元

内容简介

本书是列入普通高等教育农业部“十二五”规划教材和全国高等农林院校“十二五”规划教材的大学物理课程教材。本教材根据农林院校特点，精选了物理学基础理论，包括质点运动学、质点动力学、连续体力学、气体动理论、热力学、静电场、稳恒电流和稳恒磁场、电磁感应、振动和波、光的波动性等十章。书中注重对基本概念、基本规律及研究方法的阐述，同时注重物理理论的应用与培养学生的科学思维，提高学生的科学素养和创新能力。为此，除了基本内容外，还特别编写了物理窗口栏目作为选讲或选读内容，以扩大学生的视野。编写中力求基本内容简明扼要，选读部分通俗易懂。

本书可作为全国高等农林院校非物理类各专业大学物理（普通物理）课程教材，也可作为其他相关专业师生或科技工作者的参考书。

编 审 人 员

主　编　杨亚玲（西南大学）

王开明（四川农业大学）

周　兵（云南农业大学）

副主编　汪　健（四川农业大学）

杨建平（云南农业大学）

参　编　周素梅（西南大学）

徐小慧（西南大学）

卢常芳（四川农业大学）

赵金燕（云南农业大学）

审　稿　陈德万（西南大学）

前　言

物理学是自然科学的基础，是工程技术和农业技术的重要支柱，是培养学生科学素养和科学思维方法以及提高科学研究能力和创新能力的重要基础课。随着科学技术的迅速发展，各门学科又强烈地朝着相互交叉、渗透和综合的方向发展。物理学的理论、研究方法、实验技术在化学、生物科学、农业科学中已得到了广泛的应用，取得了丰硕的成果，并产生了一系列的交叉学科，如农业物理学、土壤物理学、生物物理学等。而生物物理学涉及的内容十分广泛，它包括了生物力学、生物系统热力学、生物电磁学、光生物物理学、量子生物学、辐射生物学，等等。实践表明，农业科技的发展、农业的现代化都迫切需要物理学，物理学应成为农林院校的重要基础课。

我们编写教材坚持科学性、应用性、趣味性的原则。考虑到历年来许多农林院校物理学课时少的特点，精选和组织了农林院校学生所必须具备的物理学基础知识，通过知识的传授，使学生逐步掌握物理思想和研究方法，培养学生发现问题、分析问题、解决问题的能力，提高学生的科学素养和创新能力；同时，结合农林院校的特点，适当地为物理学前沿和应用打开窗口和安装接口。教材内容紧密结合理论的应用，精选习题，尤其是结合物理学在生物学、农业科学中的应用；自编了部分例题和习题，以提高学生应用理论解决实际问题的能力，从而激发学生学习物理学的积极性。在物理窗口中，除了介绍物理学前沿，如黑洞、耗散结构、全息光学、旋光与对称性破缺等外，还介绍了物理学与生物学的结合与应用，如生物力学、化学势与水势、生物电学、生物磁学、生物节律等，以提高学生学习物理的兴趣，扩大学生视野以及在各自专业领域内的思路。

参加本书编写工作的有：杨亚玲（西南大学）、王开明（四川农业大学）、周兵（云南农业大学）、汪健（四川农业大学）、杨建平（云南农业大学）、周素梅（西南大学）、徐小慧（西南大学）、卢常芳（四川农业大学）、赵金燕（云南农业大学）。陈德万教授认真仔细地审阅了本教材，提出了许多宝贵意见，在此，致以衷心感谢。

限于编者水平，书中不当之处在所难免，敬请读者不吝指正。

编　者

2013 年 11 月

目　　录

第一章 质点运动学

【本章要求】

1. 理解、掌握位置矢量的含义和表达式。

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

2. 理解、掌握速度矢量的含义和表达式。

$\boldsymbol{v}=v_x(t)\boldsymbol{i}+v_y(t)\boldsymbol{j}+v_z(t)\boldsymbol{k}$

$v_x(t)=\dfrac{dx}{dt}$，$v_y(t)=\dfrac{dy}{dt}$，$v_z(t)=\dfrac{dz}{dt}$

$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2}$

3. 理解、掌握加速度矢量的含义和表达式。

$\boldsymbol{a}=a_x(t)\boldsymbol{i}+a_y(t)\boldsymbol{j}+a_z(t)\boldsymbol{k}$

$a_x=\dfrac{dv_x}{dt}=\dfrac{d^2x}{dt^2}$，$a_y=\dfrac{dv_y}{dt}=\dfrac{d^2y}{dt^2}$，$a_z=\dfrac{dv_z}{dt}=\dfrac{d^2z}{dt^2}$

$a=\sqrt{a_x^2+a_y^2+a_z^2}$

4. 了解伽利略坐标、加速度变换，正确理解和应用伽利略速度变换式。

$$\begin{cases}x'(t)=x(t)-vt\\ y'(t)=y(t)\\ z'(t)=z(t)\end{cases}，\quad \begin{cases}t'=t\\ \boldsymbol{v}_{k'}=\boldsymbol{v}_k-\boldsymbol{v}\\ \boldsymbol{a}'(t)=\boldsymbol{a}(t)\end{cases}$$

研究宏观物体机械运动规律的科学称之为**力学**（mechanics）。质点运动学（kinematics）属于力学的研究范畴。研究对象是机械运动，所谓机械运动就是宏观物体之间（或物体各部分之间）相对位置随时间的变化。力学通常分为运动学（kinematics）、动力学（dynamics）和静力学（statics）三部分。运动学只描述物体的运动，不涉及运动和改变运动的原因；动力学则联系物体受到的力来研究物体的运动，讨论运动改变的原因；静力学是研究物体在力的作用下的平衡问题。

力学诞生于 17 世纪，它的创始人是英国杰出的物理学家牛顿。因此人们又常称这一学科为牛顿力学或经典力学。牛顿力学是研究低速（其速度远小于真空光速）宏观物体（其尺度远大于原子尺度）的运动规律，其中心内容是牛顿三大运动定律。在本章中主要讨论运动学中的一些重要概念及一些运动的基本规律。

第一节　质点的运动方程

一、参照系与坐标系

在物理学中，为了突出研究对象的主要性质，暂不考虑一些次要因素，常引入一些理想化的物理模型来代替实际的物体，以便简化问题。**质点**（particle）就是一个理想化的模型，以后要讲到的刚体、理想气体、点电荷、原子模型等都是理想化的物理模型。质点就是一个有质量的点，当物体的线度和形状在研究的问题中所起的作用可以忽略不计时，可以把该物体作为质点来处理。

运动是物质的固有属性，一切物体都处在永恒的运动中，不存在绝对静止的物体。当具体描述一个物体的运动，我们总得选择另外一个物体系统作参照物，来描述此物体相对于该参照物的运动情况。这种被选择当作参考的物体系统叫做**参照系**（reference frame）。当选择不同的参考系去描述同一运动时可以得出不同的结论。例如，在平直公路上匀速行驶的汽车上自由掉下一个钢球，若以该汽车为参考系，钢球是做自由落体运动；若以公路旁的路牌作参考系，钢球是做平抛运动。当参照系被选定以后，要定量描述质点在参照系中各个时刻的位置，还需要在参照系中建立一定的**坐标系**（coordinate system），进而描述出该质点在此坐标系中位置随时间的变化规律。常采用的坐标系有直角坐标系、自然坐标系、平面极坐标系、柱坐标系、球坐标系、自然坐标系等。在实际应用中，具体该选哪一种坐标系要视具体情况而定，一般的三维空间问题，常用直角坐标系。例如，要研究飞机的运动情况，常选择地面作为参照系定量描述飞机在地面参照系中各个时刻的位置变化，如图1－1所示。x，y，z 均可随时间发生变化，由

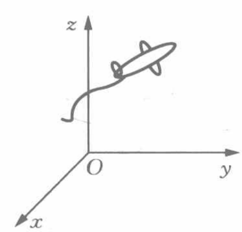


图 1－1　参照系与坐标系

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

所构成的一组含时间的参数方程，称之为质点的**运动方程**。通过这组运动方程消去时间参数 t 而得到的 x，y，z 间的函数关系式称之为质点的**运动轨迹**，亦即质点的轨迹方程。

二、位置矢量和位移

为了表征某时刻 t 质点在坐标系中的位置，我们从原点 O 到质点 P 作一个矢量 $\boldsymbol{r}=\overrightarrow{OP}$。通常把 $\boldsymbol{r}$ 称为质点在时刻 t 的**位置矢量**（position vector）。当质点在空间运动时，位置矢量随时间发生变化，是时间的函数，一般记为

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

直角坐标系中记为

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

其中，$\boldsymbol{i}$，$\boldsymbol{j}$，$\boldsymbol{k}$ 分别表示了沿 x，y，z 轴正方向的单位矢量（即大小都是 1 个单位的矢量）。

如图 1－2 所示，设质点沿某一轨迹做曲线运动，时刻 t 位于 A 处，位置矢量 $\boldsymbol{r}(t)$，时

刻 $t+\Delta t$ 位于 B 处，位置矢量 $\boldsymbol{r}(t+\Delta t)$，质点在 Δt 时间内位置的改变可以用从 A 到 B 的矢量 $\Delta\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(t+\Delta t)-\boldsymbol{r}(t)$ 来表示。我们称 $\Delta\boldsymbol{r}$ 为质点在时间 Δt 内的**位移**（displacement）。

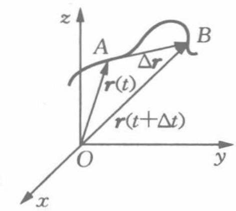


图 1－2　位置矢量及位移

位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 是矢量，它的方向由始点 A 指向终点 B。运动轨道上相应弧长 $AB=\Delta s$ 称为该质点在此时间 Δt 内经过的**路程**，路程是标量。一般情况下，位移的大小 $|\Delta\boldsymbol{r}|$ 不等于路程 Δs，即 $|\Delta\boldsymbol{r}|\neq\Delta s$。

第二节　速度和加速度

一、速度矢量

要描述质点在参照系中的运动状态，除去要说明它运动的快慢以外，还要说明它的运动方向。在物理学中引入速度矢量的概念，可同时将运动的快慢及方向表示出来。如图 1－2 所示，若质点在 Δt 时间内位置矢量的改变量为 $\Delta\boldsymbol{r}$，则定义

$$\overline{\boldsymbol{v}}=\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}\tag{1-3}$$

为质点在 $t\sim t+\Delta t$ 时间内的平均速度矢量。

$$\boldsymbol{v}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{r}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}\tag{1-4}$$

为质点在 t 时刻的**速度矢量**（velocity vector），也称为瞬时速度，简称速度。

需要注意的是：速度是一个矢量，它是位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 对时间的变化率，即 $\boldsymbol{r}$ 对时间的一阶导数。它在直角坐标系中一般可表示为：$\boldsymbol{v}=v_x\boldsymbol{i}+v_y\boldsymbol{j}+v_z\boldsymbol{k}$ 。它的三个分量（v_x，v_y，v_z），可以通过式（1－2）对时间求导得到，即

$$v_x(t)=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t},\quad v_y(t)=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t},\quad v_z(t)=\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\tag{1-5}$$

速度的大小（速率）为

$$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2+v_z^2}\tag{1-6}$$

速度的方向为 $\Delta t\to 0$ 时的位移 $\Delta\boldsymbol{r}$ 的极限方向，即沿轨道的切线方向并指向前进的一侧。此外还应该注意：$|\Delta\boldsymbol{r}|$ 表示位移的大小，它不等于位置矢量模的增量 $\Delta|\boldsymbol{r}|$，即：$|\Delta\boldsymbol{r}|\neq\Delta|\boldsymbol{r}|$。

按照速度的定义，若质点的运动速度为 $\boldsymbol{v}(t)$，则它在时间 $\mathrm{d}t$ 内的位移为

$$\mathrm{d}\boldsymbol{r}=\boldsymbol{v}(t)\mathrm{d}t$$

自 t_0 时刻至 t 时刻质点的总位移，等于这段时间内各无穷小的时间内位移的矢量和，即

$$\boldsymbol{r}(t)-\boldsymbol{r}(t_0)=\int_{t_0}^{t}\boldsymbol{v}(t)\mathrm{d}t\tag{1-7}$$

式（1－7）说明，只要知道质点的运动速度 $\boldsymbol{v}(t)$ 及质点的初始位置矢量 $\boldsymbol{r}(t_0)$，就可以根据上式求出任意时刻质点的位置矢量。

例 1.1　已知质点的位置矢量为：$\boldsymbol{r}(t)=R(\boldsymbol{i}\cos\omega t+\boldsymbol{j}\sin\omega t)$，式中 R、ω 为常数，$\boldsymbol{i}$，$\boldsymbol{j}$ 为平面直角坐标系中的单位矢量。求：(1) 质点的运动速度及速率；(2) 质点的运动轨迹方程。

解　(1) 根据速度的定义，该质点的运动速度为

$$\boldsymbol{v}(t)=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t}=-(R\omega\sin\omega t)\boldsymbol{i}+(R\omega\cos\omega t)\boldsymbol{j}$$

该质点的运动速率为

$$v=|\boldsymbol{v}|=\sqrt{R^2\omega^2(\sin^2\omega t+\cos^2\omega t)}=R\omega$$

（2）质点的轨迹方程可通过运动方程消去时间参数 t 而求得，与式（1－2）比较得：

$$x(t)=R\cos\omega t$$
$$y(t)=R\sin\omega t$$

消去时间参数 t 而求得

$$x^2+y^2=R^2$$

这就是该质点的轨迹方程。

通过以上计算不难看出：质点的运动轨迹是 xOy 平面内的圆，半径为 R。质点的运动速率为常量，则进一步说明该质点在做匀速圆周运动。但其速度矢量随时间不断发生变化。

二、加速度矢量

质点的速度矢量$\boldsymbol{v}$随时间 t 变化（包括大小和方向的变化）的快慢程度用**加速度** $\boldsymbol{a}$ 来描述。如图 1－3 所示，设在时刻 t，质点位于 A 处，其速度为$\boldsymbol{v}_A$，在时刻 $t+\Delta t$，质点位于 B 处，其速度为$\boldsymbol{v}_B$，在时间 Δt 内质点速度矢量的增量为 $\Delta\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}_B-\boldsymbol{v}_A$，我们定义

$$\boldsymbol{a}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta\boldsymbol{v}}{\Delta t}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t} \qquad (1-8)$$

为质点运动的**加速度矢量**（acceleration）。

将式（1－4）代入上式得

$$\boldsymbol{a}=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}t^2} \qquad (1-9)$$

式（1－9）给出了在位置矢量已知的情况下，计算加速度矢量的一种方法。即

$$a_x=\frac{\mathrm{d}v_x}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2},\qquad a_y=\frac{\mathrm{d}v_y}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2y}{\mathrm{d}t^2},\qquad a_z=\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}^2z}{\mathrm{d}t^2} \qquad (1-10)$$

$$a=\sqrt{a_x^2+a_y^2+a_z^2} \qquad (1-11)$$

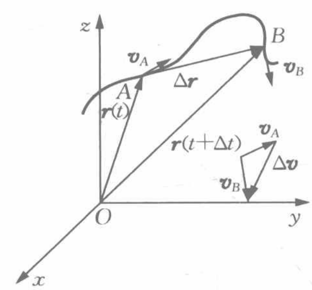


图 1－3　加速度矢量

按照加速度的定义，若质点运动的加速度为 $\boldsymbol{a}(t)$，则它在时间 $\mathrm{d}t$ 内的速度增量为

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

自 t_0 时刻至 t 时刻质点运动速度的改变量，等于这段时间内各无穷小时间内速度增量的矢量和。即

$$\boldsymbol{v}(t)-\boldsymbol{v}(t_0)=\int_{t_0}^{t}\boldsymbol{a}(t)\mathrm{d}t \qquad (1-12)$$

式（1－12）说明，只要知道质点运动的加速度 $\boldsymbol{a}(t)$及质点的初始速度矢量$\boldsymbol{v}(t_0)$，就可以根据式（1－12）求出任意时刻质点的速度矢量$\boldsymbol{v}(t)$。

注意：对于给定的参照系，矢量描述与具体的坐标系的选择无关。因此，在解决具体问题的时候，可根据问题的特点选择适当的坐标系。例如：当质点运动的加速度为常矢量的时

候，往往选择直角坐标系，比较简单；而当质点做平面运动且加速度总指向某一定点时，采用平面极坐标来描述则是很方便的。

例 1.2　一质点在 xOy 平面内运动，其运动函数为 $x=R\cos\omega t$ 和 $y=R\sin\omega t$，其中 R、ω 为常数，$\boldsymbol{i}$，$\boldsymbol{j}$ 为平面直角坐标系中的单位矢量。求质点任意时刻的位矢、速度和加速度。

解　位矢可以表示为

$$\boldsymbol{r}(t)=\boldsymbol{i}x+\boldsymbol{j}y=\boldsymbol{i}R\cos\omega t+\boldsymbol{j}R\sin\omega t$$

速度矢量：

$$\boldsymbol{v}(t)=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}(t)}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{i}\frac{\mathrm{d}(R\cos\omega t)}{\mathrm{d}t}+\boldsymbol{j}\frac{\mathrm{d}(R\sin\omega t)}{\mathrm{d}t}=-\boldsymbol{i}R\omega\sin\omega t+\boldsymbol{j}R\omega\cos\omega t$$

加速度矢量：

$$\boldsymbol{a}(t)=\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}(t)}{\mathrm{d}t}=-\boldsymbol{i}R\omega^2\cos\omega t-\boldsymbol{j}R\omega^2\sin\omega t$$

第三节　曲线运动

一、直角坐标系中的抛体运动

从地面上某点向空中抛出一物体，它在空中的运动就叫做抛体运动。忽略风的作用，它的运动总是被限制在通过抛射点由抛出速度方向和竖直方向所确定的平面内，因而，抛体运动一般是二维运动。在地球表面附近不太大的范围内，重力加速度可以近似看成是常量。在忽略空气阻力的情况下，二维抛体运动的水平分量和竖直分量是相互独立的。这时候可选择平面直角坐标系来描述这一运动。取 x 轴与 y 轴分别沿水平和竖直方向，抛出点为坐标原点。如图 1-4 所示，设质点以初速度 $\boldsymbol{v}_0$、与 x 轴成 θ_0 角被抛出，沿 x 轴方向做匀速直线运动，沿 y 轴方向做匀加速直线运动，加速度为 $-g$，在任意时刻 t，质点的两个速度分量分别为 v_x，v_y，则

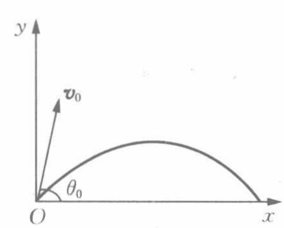


图 1-4　抛体运动

$$v_x=\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}=v_0\cos\theta_0 \tag{1-13}$$

$$v_y=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=v_0\sin\theta_0-gt \tag{1-14}$$

将以上两式对 t 积分后可以得到质点在任意时刻的位置坐标

$$x=(v_0\cos\theta_0)t \tag{1-15}$$

$$y=(v_0\sin\theta_0)t-\frac{1}{2}gt^2 \tag{1-16}$$

再通过以上两式消去时间参数 t，即可得到质点做抛体运动时的轨迹方程：

$$y=x\tan\theta_0-\frac{g}{2v_0^2\cos^2\theta_0}x^2 \tag{1-17}$$

可以看出，这是一条抛物线。在式（1-14）中令 $v_y=0$，可求出质点上升到最高点的时间为

$$t=\frac{v_0}{g}\sin\theta_0 \tag{1-18}$$