中学
奥林匹克物理

● 舒幼生

OLPK

教育科学出版社

中学奥林匹克物理

舒幼生　著

教育科学出版社

（京）新登字第111号

中学奥林匹克物理

舒幼生 著　　责任编辑　刘进

教育科学出版社出版、发行（北京·北太平庄·北三环中路46号）

各地新华书店经销　　北京顺义燕华印刷厂印装

开本：787×1092毫米 1/32　印张：17.5　字数：420千

1993年8月第1版　　1993年8月第1次印刷

印数：00,001—10,000册

ISBN 7-5041-1128-7/G·1085　定价：9.80元

前　言

无须隐讳，任何一门学科教员的心中，对自己所教学生在学习优秀与否的程度上，都有着一条近正态分布的曲线，这种分布是学生能力、兴趣和其他诸多因素方面相对差异的表现。分办后的普通中学是如此，重点中学也是如此。原因是课堂教学在传授知识和培养学科能力方面，都必须遵循顺应大多数这一文明社会的稳定结构准则。课堂教学不可能充分满足某些学习优秀者的求知欲望，他们自然地希望能在课余时间通过某些途径和方式进行补充学习。三十年前数、理、化等科目的课外兴趣小组和现在的学科竞赛活动确是对学生这种积极性的正确引导，这有利于在中学阶段早期发现和培养学科优秀人才。从组织上来说，竞赛不是目的而是教育的一种辅助方式，这种方式尤其提倡学生的参与意识，而参与正是奥林匹克精神所在。本书为中学生课外学物理的参考书，故名以《中学奥林匹克物理》。

本书既为有志于提高物理素质的中学生和为部分中学物理教员而编写，理应以中学物理教学内容为主线索，同时需要有适当的知识扩充和理论引申。全书分为力学、热学、电学三部分，共十一章。为避免雷同于大学普通物理相应章节，舍去了光学与近代物理内容。每一章包含正文与例题两部分，就编写原意而言，正文、例题并重。

正文中的“概述”为各章提纲性内容，其后才是删选过的

具体内容。正文包含了以中学物理为基础的扩充和引申。有些知识在许多重点中学教学中已经涉及，而在统编教材中或者一带而过，或者并未提及，本书有意对此进行扩充。例如非微积分公式化的小量分析，物体或者说质点组的重心，物理学中的对称性分析等等。为提高学生的自学和探索能力，安排了若干引申性的内容。例如开普勒第一、第二定律在抛物线、双曲线轨道方面的引申。引申为学生提供了背景性知识，希望学生能以此为基础去讨论和解决布置在例题中的一些物理问题。为能给学生留下更多的思考余地，正文尽可能写得简要，所占篇幅约为全书的1/3。希望学生不会舍此1/3，以免读有所失。

考虑到中学与大学的区别，正文后编排了适量的例题。例题均可在正文所述范围内求解，作为整体既具有基础性也具有一定程度的趣味和疑难性。鉴于所存在的难度，例题需要有解答。写解答就不一定非集中在一起附印于后，造成使用上的麻烦。题解紧接题文，希望学生尽可能独立解答后再去“读”它，这样才能读有所得。

一本书的使用效果与编写意图之间常有一定距离，预计本书也不会例外。

舒幼生

1993年1月

目　　录

第一部分　力　　学

第二部分 热 学

第三部分 电 学

第一部分

力　学

第一章　质点运动学

概述

经典力学的内容常可分为运动学与动力学两部分。运动学将首先描述物体的运动，动力学则进而探讨运动的原因。

描述或是定性的或是定量的。物理学在自然科学中是一门最具定量性质的学科。凡是定量的，均需采用数学方式进行表述与推演，作为物理学一门分支的运动学也是如此。例如斜抛运动的轨道恰被表述为数学上的抛物线，简谐振动中的空时关系将用余弦或正弦函数来给出，圆周运动向心加速度的表述式则通过数学上的小量分析来导得。

物体有微观的与宏观的之分。经典力学涉及的大多是宏观物体，它们有大小尺寸，可以分割成各个部分。物体中各个部分取一致或可近似取为一致的运动显然是较理想的情况，因为物体的这种运动可简化为一个点的运动。物体中各个部分运动互不相同时，便需要将它分割成一系列尽可能小的部位，使得每一小部位中各处运动差异可以忽略，于是这种小部位的运动又可归结为一个点的运动。由此可见，一个点的运动是运动学中

最简单和最基本的内容。在运动学范畴内，点的运动学中所包含的内容与该点是否有质量毫无关系。但既然运动学是动力学的基础，点的运动学知识必定要用于质点（具有质量的点）动力学理论，所以点的运动学又自然地被称为质点运动学。事实上质点运动学的所有公式中均不出现质量m，这些公式适用于任何几何点（例如投影点、曲线间交点）的运动。

运动的两个要素是空间与时间。质点空间位置随着时间的变化便形成了质点的运动。位置是一个相对观察者或者说参照物(参照系)才具有意义的概念，因此运动必定是相对的。位置的定量表述依赖于一系列或长或短的直尺，经典力学认为存在某种理想的直尺，它们的长度对任何参照系都是相同的。近代物理中的狭义相对论力学与广义相对论则指出不存在这种假想的直尺，任何直尺对不同的参照系可有不尽相同的长度，甚至同一直尺在同一参照系中处于不同位置或朝着不同方向时也可发生长度的伸缩，这种伸缩既然与位置和方向有关，因此宜使用尽可能短的直尺。经典力学认为时间是完全绝对的，即存在一种所有参照系都相同的时间定量表述。相对论则认为时间起源于运动中各个位置出现的单向序列性，时间的定量表述需通过某一特殊运动来实现，即这一特殊运动的时间先被规定为一个时间单位。例如可以将地面附近一定长度单摆往返一周的小角度运动，或光子在相隔一定真空距离的两个点之间往返一周的运动选定为具有一个时间单位的运动。既然就位置而言运动已具有相对性，上述每一特殊运动相对不同参照系便具有不同的个性，这种个性就有可能造成时间单位的不一致。例如设想有两个相隔很远、彼此作相对运动且完全相同的类地球星体A和B，它们各自在其地面附近按上述规则设置单摆，并由此

各自定义了自己的一个时间单位，但现在A认为B中单摆还兼有了规定之外的即随B一起的附加运动，因此不再是上述定义下的单摆运动，便不能保证它摆动一次所经时间与A自己的单摆摆动一次所经时间相同。自然B也有类似的议论。狭义相对论据光速不变原理肯定了时间度量上这种差异的存在性，但在参照系相对速度通常远小于光速的宏观世界中这种差异小到可以忽略，完全可用经典力学的观点来描述物体的运动，因此质点运动学中运动的相对性将被认为仅起源于质点位置的相对性。

本章将要讨论的显然是经典力学中的质点运动学。

一、质点运动学的基本结构

质点运动学对运动点的空时关系作客观的表述，表述中包含的公式与推演将适用于任何参照系，在这意义上可以说所有参照系就质点运动学而言都是平权的。参照系间的区别仅在于使用的方便性，即对具体某个或某些质点的运动选用这个或这些参照系来描述较为方便，选用其他参照系可能较为麻烦。

在选定的参照系中建立起(空间)坐标系后，质点的位置便可用它相对于坐标原点的位矢$\vec{r}$来表述。经典理论中任何参照系的空间都是平直空间，这种空间具有欧几里得几何性质，例如任意直边三角形内角和恒为180°，直角三角形三条边长间始终具有勾股定理所述的定量关系。与此相对应，经常采用笛卡儿两两垂直的直角坐标系$O—xyz$，$\vec{r}$也就被分解为x、y、z三个坐标分量。也可选用其他坐标系，例如平面问题中的极坐标系，在此系中平面位矢$\vec{r}$被分解为r、θ两个坐标分量。

所有参照系可以有共同的时间度量，常用t表述。

运动质点位矢随时间的变化均可数学地表述为函数关系

$$\vec{r}=\vec{r}(t) \tag{1-1}$$

或写成分量式，例如

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

式（1-1）是对质点运动的完整表述，质点运动的所有性质均可从中数学地获得，因此常称之为质点运动方程。质点运动的径迹构成一轨道，这与数学中动点的径迹为一曲线完全一致。如果将式（1-2）中的 t 视为一个数学参量，那么式（1-2）给出的正是空间曲线的一种参量方程表述形式。例如数学中椭圆的一种参量方程为

$$\begin{cases} x=A\cos\omega t \\ y=B\sin\omega t \end{cases}$$

若赋予t以时间的含义，它便成为作某种椭圆运动的质点的运动方程。既然质点运动学的基础方程——质点运动方程与数学中曲线的参量方程相吻合，而质点运动学理论在某种意义上又是这一方程的数学展开，因此运用本属物理学的质点运动学方法来讨论曲线某些数学性质（例如曲率半径的分布）便不足为怪了。

质点运动轨道原则上可通过式（1-2）消去t来获得。例如由平抛运动方程

$$\begin{cases} x=v_0 t \\ y=\dfrac{1}{2}gt^2 \end{cases}$$

消去t，可得平抛轨道

$$y=\frac{g}{2v_0{}^2}x^2$$

这是一条抛物线。此例实属$z=0$的平面运动轨道。一般情况下$z\neq 0$，轨道为空间曲线，它的一种数学构造表述如下：

将曲线

$$\begin{cases} x=x(t) \\ y=y(t) \end{cases}$$

沿着z轴的正、负方向从xy平面拉出去以形成一柱面，同样可将曲线

$$\begin{cases} y=y(t) \\ z=z(t) \end{cases}$$

沿着x轴的正、负方向从yz平面拉出去以形成另一柱面，这一对柱面的空间交线即为质点运动轨道，当然这一对柱面的选择并不唯一。

质点在运动中的位置有时间上的前、后区分，从前一时刻t的位置到后一时刻$t+\Delta t$的位置引一矢量，便是位矢的增量

$$\Delta\vec{r}=\vec{r}(t+\Delta t)-\vec{r}(t) \tag{1-3}$$

简称位移。位移的三个分量为

$$\begin{cases} \Delta x=x(t+\Delta t)-x(t) \\ \Delta y=y(t+\Delta t)-y(t) \\ \Delta z=z(t+\Delta t)-z(t) \end{cases} \tag{1-4}$$

Δt越短，$\Delta\vec{r}$越向$\vec{r}(t)$位置的轨道切线靠拢，Δt无限小时，$\Delta\vec{r}$就无限靠拢$\vec{r}(t)$位置的轨道切线。因此可以说Δt无限小时，$\Delta\vec{r}$的方向即为$\vec{r}(t)$位置的轨道切线方向，这一方向也称为运动方向。例如圆周运动中任一位置的运动方向就是该位置的圆切线方向。

运动不仅有方向性而且有快慢程度性，于是引入平均速度

$\overline{\vec{v}}$ 来综合描述，它被定义为

$$\overline{\vec{v}}=\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} \tag{1-5}$$

即为Δt时间间隔内的位移变化率，这显然是一种平均效果量。仅当Δt无限小时（记为$\Delta t\to 0$），$\overline{\vec{v}}$才具有瞬时性，称为瞬时速度，简称速度，记为

$$\vec{v}=\frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}\bigg|_{\Delta t\to 0} \tag{1-6}$$

它的三个分量（分速度）为

$$\begin{cases} v_x=\dfrac{\Delta x}{\Delta t}\bigg|_{\Delta t\to 0} \\ v_y=\dfrac{\Delta y}{\Delta t}\bigg|_{\Delta t\to 0} \\ v_z=\dfrac{\Delta z}{\Delta t}\bigg|_{\Delta t\to 0} \end{cases} \tag{1-7}$$

速度的绝对值称为速率，记为$|\vec{v}|$，常简写为v，有

$$v=\sqrt{v_x{}^2+v_y{}^2+v_z{}^2} \tag{1-8}$$

速度也可随运动时刻而变化，即有

$$\vec{v}=\vec{v}(t) \tag{1-9}$$

于是又可引入速度随时间的瞬时变化率

$$\vec{a}=\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}\bigg|_{\Delta t\to 0} \tag{1-10}$$

称之为瞬时加速度，简称为加速度，这里的$\Delta\vec{v}$为Δt时间间隔内速度的增量。$\vec{a}$的三个分量为

$$\begin{cases} a_x = \left.\dfrac{\Delta v_x}{\Delta t}\right|_{\Delta t \to 0} \\ a_y = \left.\dfrac{\Delta v_y}{\Delta t}\right|_{\Delta t \to 0} \\ a_z = \left.\dfrac{\Delta v_z}{\Delta t}\right|_{\Delta t \to 0} \end{cases} \tag{1-11}$$

$\vec{a}$ 的绝对值常简写为a，有

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \tag{1-12}$$

加速度也可随t而变，即有

$$\vec{a} = \vec{a}(t) \tag{1-13}$$

从运动学角度考虑可以进而引入描述$\vec{a}$随时间变化率的所谓"加加速度$\vec{a}'$"，继而再引入"加加加速度$\vec{a}''$"……等量。事实上并没有这样去做，原因是从数学方面来看，$\vec{r} = \vec{r}(t)$已包含质点运动的全部信息，所有其他运动量(诸如$\vec{v}$、$\vec{a}$、$\vec{a}'$、$\vec{a}''$……等量）均可从中通过数学演算来导得，便没有必要一一列出。从物理方面来看，运动学最终要与动力学结合起来，而经典质点动力学中最重要的牛顿第二定律可表述成$\vec{F} = m\vec{a}$，即外界对质点的作用直接表现为$\vec{a}$的产生。正由于$\vec{a}$在动力学中有如此特殊的地位，所以运动学中通常讨论到$\vec{a}$为止。

二、直线运动

轨道为直线的运动称为直线运动。

运动方程：$x = x(t)$。（已将x轴置于轨道上）

速度：v_x，有时也常记为v，则v可正（朝x轴正方向）、可负（朝x轴负方向）。

速率：$|v_x|$，有时也常省略地写成v，若是，则v值恒为正。

加速度：a_x，也常记为a，则a可正（朝x轴正方向）、可负（朝x轴负方向）。

加速度绝对值：$|a_x|$，也常省略地写成a，若是，则a值恒为正。例如常用$g=9.8$米/秒^{2}表示重力加速度绝对值。

匀速运动：$v=$常量，则$a=0$。若记$t=0$时质点位置为x_0，则t时刻质点位置为

$$x=x_0+vt \tag{1-14}$$

静止也可视为匀速运动中$v=0$的特例。

匀加速运动：$a=$常量。若记$t=0$时刻质点速度为v_0、位置为x_0，则t时刻质点速度与位置分别为

$$v=v_0+at \tag{1-15}$$

$$x=x_0+v_0t+\frac{1}{2}at^2 \tag{1-16}$$

由（1-15）式可得

$$v^2-v_0{}^2=2a\left(v_0t+\frac{1}{2}at^2\right)$$

与（1-16）式联立，消去$v_0t+\frac{1}{2}at^2$，便可得

$$v^2-v_0{}^2=2a(x-x_0) \tag{1-17}$$

变加速运动：$a\neq$常量。例如简谐函数式的直线运动（简谐振动）

$$x=A\cos(\omega t+\phi)$$
$$v=-\omega A\sin(\omega t+\phi)$$
$$a=-\omega^2A\cos(\omega t+\phi)\neq\text{常量}$$

其中v、a表述式的得来，可参阅后面关于匀速圆周运动在某一直径方向分运动的讨论。

三、曲线运动

轨道为曲线的运动称为曲线运动。因为直线可视为半径 R 趋向无穷大的圆，所以直线运动也常可包含在曲线运动范畴之内。

曲线运动一种经常处理的方法是把它分解为三个互相垂直方向（即x、y、z方向）上的直线运动，如(1-2）式所示，于是曲线运动可在直线运动基础上结合矢量叠加方法得以解决。例如斜抛运动可分解为x方向(某一水平方向)上的匀速直线运动、y方向（铅垂向上或向下方向）上的匀加速直线运动及z方向（垂直于xy平面的一个水平方向）上$v_z=0$的匀速直线运动（实为静止）。

曲线运动的上述分解，其基础是$\vec{r}$的矢量性，即$\vec{r}$可作下述矢量分解

$$\vec{r}=\vec{x}+\vec{y}+\vec{z}$$

其中$\vec{x}$、$\vec{y}$、$\vec{z}$两两垂直。事实上$\vec{r}$的三个矢量分解方式并不唯一，即$\vec{x}$、$\vec{y}$也可以不是两两垂直，但要求它们不共面。例如对于初速为$\vec{v}_0$的斜抛运动，可建立新的x'轴，其正方向与$\vec{v}_0$方向一致，而y、z方向仍如前述，那么此斜抛运动也可分解为x'、y、z三个方向上的直线运动。z方向上的分运动仍然为零运动（静止），x'方向上的分运动仍为匀速运动，y方向上的分运动也仍为匀加速运动。与前面不同的是x'方向分运动初速为v_0（原x方向分运动初速为$v_0\cos\theta$，其中θ为$\vec{v}_0$与x轴的夹角），y方向分运动初速则为零(原y方向分运动初速为$v_0\sin\theta$或为$-v_0\sin\theta$）。

当轨道为平面曲线时，总可使三个直线方向分运动中的一