

■ 上册



主编 王 旭

# 基础物理学

内蒙古大学出版社

04 906  
W37  
1

# 基础物理学

## (上册)

王旭 主编

编委会成员(按姓氏笔画排序):

|     |     |     |
|-----|-----|-----|
| 丁铁柱 | 云国宏 | 刘文生 |
| 张玉仙 | 李 宏 | 李前忠 |
| 杨体强 | 赵显武 | 郭维生 |

内蒙古大学出版社

## 内 容 提 要

本书是国家高等教育教材建设专业委员会第二批立项课题“理科非物理专业‘基础物理学’教学内容现代化问题的研究”的研究成果。该书从现代科学技术的发展及理科对人才培养的总体要求出发,本着科学性、先进性、针对性和实用性的原则进行内容的取舍与结构安排。本书由五部分组成,分上、下册。上册包括力学和相对论、电磁学,下册包括光学、量子力学和热物理学。

本书可作为理、工和师范大学非物理专业的教科书和参考书。

## 内蒙古大学出版社基金委员会

主 任: 旭日干

副主任: 梁希侠(常务) 呼格吉勒图

委 员: 旭日干 梁希侠 呼格吉勒图

曹之江 包 祥 王 璋

刘 成 刘树堂 陈羽云

# 绪 论

## 1. 物理学与技术革命

物理学是探讨物质结构和运动基本规律的学科。物理学所研究的内容极其广泛,其空间尺度从亚核粒子到整个宇宙,其时间从宇宙诞生到宇宙的未来。物理学所研究的运动(包括机械运动、电磁运动、分子热运动、原子和原子核内部的运动等),普遍存在于其他高级复杂的物质运动形式(如化学、生物等)之中。因此,物理学所研究的物质运动规律,具有最大的普遍性。例如:天文学、地学、化学、生命科学等中都包含着物理过程与物理图像,这些科学无一例外都把物理学创造的科学语言和基本概念作为自身的最基本的语言和概念。因此,物理学是整个自然科学的基础。

十七世纪牛顿在伽利略、开普勒工作的基础上,建立了完整的经典力学理论,这是现代意义下的物理学的开端。从十八世纪到十九世纪,在大量实验的基础上,卡诺、焦耳、开尔文、克劳修斯等建立了宏观的热力学理论,克劳修斯、麦克斯韦、玻耳兹曼等建立了说明热现象的气体分子运动理论,库仑、奥斯特、安培、法拉第、麦克斯韦等建立了电磁学理论。至此,经典物理学理论体系建立。正当大功甫成之际,一系列与经典物理的预言极不相容的实验事实相继出现。在这些新实验事实的基础上,二十世纪初,爱因斯坦创立了相对论;在普朗克、爱因斯坦、玻尔、德布罗意、海森伯、薛定谔、玻恩等多人的努力下,创立了量子力学,奠定了近代物理学的理论基础。本世纪随着科学的发展,从物理学中不断分化出诸如粒子物理、原子核物理、凝聚态物理、激光物理等等繁多的新分支,以及物理学和其他学科交叉产生出来的,诸如天体物理、地球物理、化学物理、生物物理等众多交叉学科。正是近代物理学的成就,决定了二十世纪科学技术的面貌。

物理学的发展不仅推动了整个自然科学的发展,而且深刻地影

响和改变着人类的物质生产和精神生活。这一点已经为过去几百年的历史,特别是十九世纪和二十世纪的历史无可辩驳地给予证明。物理学的发展已经历了三次大的突破,每次突破都引起相应的工业革命,极大地促进了生产力的发展。在十七、十八世纪,由于牛顿力学的建立和热力学技术的研究,促进了蒸汽机的研制和机械工业的发展,引起了第一次技术革命,极大地改变了工业生产的面貌。到了十九世纪,由于麦克斯韦电磁理论的建立,使工业进入电气化时代,这就是第二次技术革命。二十世纪以来,由于相对论和量子论的确立和发展,直接促进了半导体、激光、电讯和计算机等学科的发展,并由此,许多边缘学科也发展起来了,新兴工业如雨后春笋般涌现,人类进入了原子能、计算机、自动化和空间技术的新技术时代,谓之第三次技术革命。这是一次更深刻、更广泛的革命。

近代物理学的基本概念、研究方法和实验技术已深入到各个学科领域,并得到广泛的应用。它成为掌握现代科学技术不可回避的基础,成为现代科学技术人才不可或缺的科学文化素养的一部分。物理学是大学理工科专业的重要基础课。学生应该牢固掌握物理学的基本概念、基本知识和基本研究方法,逐步建立对物质世界的基本认识,提高自己的独立钻研、建立模型和逻辑推理的能力以及实验技能,为学习专业知识和各种科学技术奠定坚实的基础。

## 2. 物理学的研究方法

物理学的研究方法遵从人类对客观世界的认识法则,即实践——理论——实践的认识法则。具体地说,物理学的理论就是通过观察、实验、抽象、假说等研究方法,并通过实践的检验而建立起来的。检验理论正确性的唯一标准是实践。

观察是在不改变自然现象本身的情况下,对现象观测、记录和研究。例如,通过天文观测和计算,得知太阳表面的温度约为  $6000^{\circ}\text{C}$ 。

实验是在人为的控制下,使某些自然现象重复出现,并且有意识地把复杂的条件加以简化,突出主要因素,排除或减低次要因素,以

找出该自然现象的规律。这是一种非常重要的研究方法。

抽象是根据问题内容和性质的特点,采用一个与实际情况差距不大的理想化模型,以便于突出本质因素,忽略次要的、局部的和偶然的因素。例如“质点”模型,把物体看成“质点”时,“质量”和“点”是主要因素,物体的形状和大小是可以忽略不计的次要因素。又如把物体看成“刚体”时,物体的“形状”、“大小”和“质量分布”是主要因素,而物体的“形变”则是可忽略的次要因素。在物理学中把研究对象抽象成理想模型的方法是十分重要的。

假说是在观察和实验的基础上提出的对自然现象规律性的说明或解释,这是人们认识事物的一个飞跃。但是假说的正确与否,还有待于用它来说明或解释其他的同类现象,并且预言新的现象。在这一过程中,假说本身会得到修正和发展。如此不断地实践、认识、再实践、再认识,假说最终将上升成为理论。历史上关于光的本性问题,就发生过“微粒说”和“波动说”之争。这两种假说各自都可以解释一部分光学现象,然而两种观点却针锋相对。这两种假说到了后来,在扬弃了“微粒说”后,光的“波动说”似乎已确立不移了。然而事情却未从此了结,到了二十世纪初期,由于实验和理论研究的推动,爱因斯坦提出了光量子假说,成功地解释了光电效应。这使得人们对光的认识,由原来的波动性,上升到光的波—粒二象性,而且进一步启发人们去认识所有微观粒子的波—粒二象性。在此基础上,经过几代人的共同努力,建立起了近代的量子理论。

此外,在观察和实验中,物理学常常借助于各种精密的仪器、复杂的设备,以获得比较准确的数据,这给分析、说明物理现象提供了可靠的依据。在分析的过程中,物理学广泛使用各种数学知识,对物理现象中各个量之间的关系进行推理和表达,从而得到各种公式、方程式。这种简洁的、精确的数学“语言”是建立物理学理论的有力工具。

### 3. 物理学的学习方法

著名理论物理学家、诺贝尔奖获得者理查得·费曼说：“科学是一种方法。它教导人们：一些事物是怎样被了解的，什么事情是已知的，现在了解到什么程度（因为没有事情是绝对已知的），如何对待疑问和不确定性，证据服从什么法则，如何去思考事物，做出判断，如何区别真伪和表面现象。”学习物理学，不能仅仅掌握一些知识、定律和公式，更不要把自己的注意力只集中在解题上，而应在学习过程中努力使自己逐渐对物理学的内容和方法、工作语言、概念和物理图像，以及其历史、现状和前沿等方面，从整体上有个全面的了解。

学好物理学，关键是勤于思考，悟物穷理。

(1)要在掌握基本概念、基本规律上多下功夫。学好基本概念和基本规律，应着重从以下几个方面进行思考。为什么要引入这一概念？引入这一概念是根据哪些实验事实或哪些已知的基础理论？这一概念是如何从这些实验或基础理论中分析、综合、概括出来的？是如何定义的？其物理意义是什么？适用条件和范围是哪些？这一概念与其他有关的物理量之间有什么联系？应用这一概念及规律可以解释和说明哪些现象或解决什么问题？运用它们的思路和方法是什么？

要达到以上目的，学生应逐步养成独立阅读教材和有关参考书的习惯，逐步提高提出问题、分析问题、解决问题的能力。

(2)要针对基本概念、基本规律等重点适当作一些练习。做习题不仅有助于掌握学科重点，同时还可以培养分析问题、解决问题的能力。在演算习题的过程中，切忌硬套公式的不良习惯，因为这对大学的学习非但不会奏效，更为重要的是，长久下去必将影响智力、能力的发展。做习题不在于多，而在于精。正确的解题方法是，首先着重分析问题给定的物理条件、物理过程或物理背景，看看与哪些概念和规律有关，然后按照该规律寻找求解问题的思路和方法，逐步加以解决。其后，还应仔细地思考一下，解决这一问题使自己在什么概念和规律上有收获？有时候问题虽然解决了，但心里没底，对于自己的解

答没有把握,此时更应当进一步深入思考。对有关概念和规律搞不清楚时,应当再回头去阅读教材或有关参考书。如此反复磨练、穷根究底,基本概念和基本规律定能学得扎实。

(3)物理学是一门实验性很强的学科,物理实验是本课程的基本实践环节,也是培养学生进行科学实验的能力。因此,学生必须高度重视实验技能的训练,掌握一定的基本物理量的测量方法,熟悉常用物理仪器的原理并能正确使用、正确记录和正确处理实验数据,能写出完整的实验报告。这不仅可以使所学的物理知识得到实验的验证或应用,而且为本人学习其他专业知识和各种科学技术,成为理论知识扎实、动手能力强的科学技术人才奠定坚实的基础。

# 第一篇 力学和相对论

## 引 言

力学(mechanics)研究的是机械运动(mechanical motion),即物体位置的变动。这是物质运动最简单、最普遍,也是人们最早研究的一种运动形式。几乎在物质的一切运动形式中都包含这种最基本的运动形式。

力学在各种自然学科中最富于直观性,发展也最早。在人类历史的早期,人们从事狩猎、耕种等工作就已运用一些简单机械作为动力。十五世纪以后,欧洲正处于文艺复兴时期,随着资本主义生产关系的发展,商业、手工业、航海、纺织和军事事业等有了较快的发展,生产实践进一步提出了大量的力学问题。同时生产技术的发展提供了前所未有的科学实验手段,逐步建立了比较完整的系统理论。经过许多科学家的努力,特别是开普勒(Johannes Kepler 1571—1630)根据哥白尼的学说及天文观察资料建立起行星运动三定律;伽利略(G. Galilei, 1564—1642)研究了落体和斜面运动的规律,提出加速度的概念。到十七世纪,牛顿(I. Newton, 1642—1727)发表了著名的运动三定律和万有引力定律,建立了经典力学的基础。理论的建立进一步推动了力学研究的深入,同时它的应用范围也日益扩大,使生产技术又有更高的发展。到十九世纪末,经过许多人的努力,一个相当严密和完整的经典力学体系建立起来了。

本世纪以来,量子力学和相对论的建立,解决了经典力学所不能解决的微观粒子运动和接近光速运动的问题。经典力学是在量子效

应不明显和运动速率远小于光速时的极限情况,也就是宏观物体,其运动速度远比光速( $3 \times 10^8$  米/秒)小得多时的运动规律。因此,在一定范围内经典力学的理论能够很好地反映物体的运动规律,一旦超出这个范围,它就不再适用了,必须代之以新的理论。

今天,力学科学面临许多全新的课题。例如,星际航行的实现与超音速流体力学等有关,人造卫星、宇宙火箭的发射、宇宙航行的实现与物体运动轨道的计算等有关。正在兴起的“电磁流体力学”、“生物力学”、“地质力学”等,在科学和技术上起着重要的作用,今后在祖国的现代化建设中必将更加蓬勃发展。

# 第一章 质点力学

力学中一个极其重要的模型是质点。机械运动可分为平动、转动和形变。一般情况下,物体运动三者皆有,我们从平动入手讨论物体的运动,即在转动、形变可忽略的情况下,开始讨论物体的运动。在我们所研究的问题中,若物体的大小、形状不起作用或者所起作用可以忽略不计,我们就可以近似地把物体看作是一个没有大小和形状的而具有质量的点,称为质点。譬如,我们讨论地球公转问题时,并不涉及地球自转所引起的各部分运动的差别,以及地球的大小、形状,因此把地球可以看作质点。但是在研究地球自转运动时,又必须把它看作球体,而不能把它看作质点。

质点这一理想模型是由真实物体抽象出来的,它在一定程度上是客观实际的反映。在所研究的实际问题中,保留了起决定性、重要作用的某些性质,撇开了那些在问题中只起偶然或不起作用的性质。以后我们还将引入质点组、刚体等理想模型。掌握了质点的运动规律,就能用数学方法推导出质点组、刚体的运动规律。因此,在力学中,首先要研究质点的运动规律。

本章主要讨论质点力学,包括质点运动学和质点动力学。

## § 1.1 质点运动学

### 一、参考系

运动学(kinematics)是描写物体的空间位置变化,为此首先必须确定物体的空间位置。要确定一个物体的空间位置,就必须找另一

个物体作为参考,将这个参考的物体认为“静止”的,被选作参考的物体,就叫作参考系。关于物体位置的描述,运动的描述都是相对所选定的参考系而言的。

在参考系选定之后,物体的运动情况就可以确定了。但是,要把物体在各个时刻相对参考系的位置定量地表示出来,就必须在参考系上选取适当的坐标系。例如:直角坐标系、极坐标系等。

## 二、位置矢量与位移

为了精确表明质点相对于参考系的位置,取固定于参考系的一点  $O$  为原点和三条相互垂直的坐标轴  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴,如图 1—1 所示。 $P$  点的位置可由三个坐标  $(x, y, z)$  确定,一般用从原点  $O$  到  $P$  点的有向线段  $OP$  (并记作矢量  $\mathbf{r}$ ) 表示,矢量  $\mathbf{r}$  叫做位置矢量(position vector)或矢径(radius vector),矢径  $\mathbf{r}$  就确切地表明了某时刻质点相对于参考系的位置,在直角坐标系中,

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} \quad (1.1)$$

式中  $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$  表示沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴正方向的单位矢量,其大小和方向都不随时间而变。

质点在空间运动时,其位置随时间而变化,也就是说位置矢量或坐标是时间的函数。我们把表示运动过程的函数式

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1.2)$$

或

$$\begin{aligned} x &= x(t) \\ y &= y(t) \\ z &= z(t) \end{aligned} \quad (1.3)$$

称为运动方程。

为了描述质点在一定时间间隔内位置的变化,我们引入位移。如图 1—2 所示,在时刻  $t$ ,质点在  $A$  点;而在时刻  $t + \Delta t$ ,质点运动到  $B$

点。A、B 二点的位置矢量为  $\mathbf{r}(t)$  和  $\mathbf{r}(t + \Delta t)$ ，质点在时间间隔  $\Delta t$  内的位置变化，我们用从 A 点指向 B 点的有向线段 AB (记作  $\Delta \mathbf{r}$ ) 来表示，称为质点的位移(displacement)。显然

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t) \quad (1.4)$$

即位移定义为位置矢量的增量，其大小和方向只与 A、B 二点的位置有关，而与参考系的选择无关。这一点与位置矢量不同。

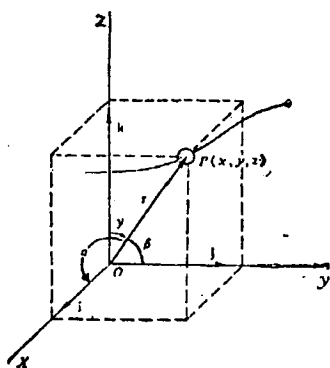


图 1-1 位置矢量

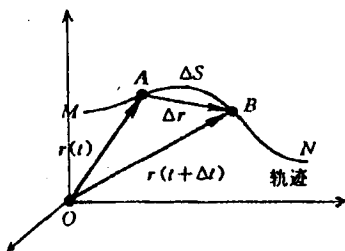


图 1-2 位移

### 三、速度与加速度

位移描述了质点在一段时间内位置变化的总效果，为了描述质点位置变化的快慢程度，我们引入平均速度和瞬时速度。质点在  $\Delta t$  时间内的位移

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)$$

与发生这位移的时间间隔  $\Delta t$  之比，称作质点在这段时间内的平均速度，记作

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1.5)$$

即平均速度等于位置矢量的增量对时间的平均变化率。该平均速度只反映质点在  $\Delta t$  这段时间内总变化方向和平均快慢,却不能详尽地反映出这段时间内质点运动快慢的细致变化。为了详尽地掌握质点运动快慢的细致变化,精确地描述质点在各个时刻的运动快慢情况,我们可以令  $\Delta t$  趋于零,取平均速度  $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$  的极限值。这个极限值描述了在时刻  $t$  质点的运动状态。我们称之为质点在时刻  $t$  的瞬时速度,简称速度(velocity),用  $\mathbf{v}$  表示。则

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1.6)$$

即速度等于位置矢量  $\mathbf{r}$  对时间的一阶导数。速度的方向就是  $\Delta t \rightarrow 0$  时,  $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$  或  $\Delta \mathbf{r}$  的极限方向,即轨道上质点所在点的切线方向,并指向质点前进的方向。

速度的大小叫速率,以  $v$  表示,则有

$$v = |\mathbf{v}| = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \right| \quad (1.7)$$

如用  $\Delta S$  表示在  $\Delta t$  时间内质点沿轨道所经的路程,当  $\Delta t \rightarrow 0$  时,  $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} |\Delta \mathbf{r}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta S$ 。因此可以得到

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \right| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt} \quad (1.8)$$

也就是说,速率的大小又等于路程对时间的一阶导数。

质点的运动速率随时间改变时,常常需要了解速度变化的情况(包括大小、方向),为了描述质点运动速度变化的快慢,我们引入加速度的概念。若质点在时刻  $t$  在位置  $A$ ,其速度为  $\mathbf{v}_A$ ,在时刻  $t + \Delta t$ ,质点运动到  $B$  点,其速度为  $\mathbf{v}_B$ ,如图 1—2 所示,则在  $\Delta t$  时间内质点的速度增量为

$$\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A \quad (1.9)$$

与平均速度的定义类似,用  $\Delta t$  时间间隔内的速度增量  $\Delta v$  与这段时间间隔  $\Delta t$  之比  $\frac{\Delta v}{\Delta t}$  来描述质点在这段时间间隔内速度的平均变化率,我们称之为平均加速度,用  $\bar{a}$  来表示

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1.10)$$

平均加速度只是反映在时间间隔为  $\Delta t$  内的平均变化率,为了确切地描述质点在任一时刻的速度的变化率,我们引入瞬时加速度的概念。当  $\Delta t \rightarrow 0$  时平均加速度的极限值为瞬时加速度 (acceleration), 用  $a$  来表示

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (1.11)$$

结合(1.6)式有

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 r}{dt^2} \quad (1.12)$$

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。

由以上讨论可知,已知质点的运动学方程,可求出任意时间间隔的位移,任意时刻的速度和加速度,即可了解质点全部运动状况。因此可以说,运动方程是运动学的核心。但这并不意味着削弱速度和加速度概念的重要性。在许多实际问题中,往往可以先求质点的加速度,在此基础上求出质点在各时刻的速度和运动方程。

[例题 1—1] 抛体运动。从某一点以初速度  $v_0$  与水平方向夹角为  $\theta$  抛出一物体,试求其运动方程。

解: 从地面某点向空中抛出一物体,它在空中的运动就是抛体运动。物体抛出后,忽略空气阻力的影响,它的轨道总是被限制在通过抛射点的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。它在各时刻的加速度都是重力加速度  $g$ 。我们以

抛出点为原点,沿水平方向和  
 竖直方向为  $x$  轴和  $y$  轴建立  
 坐标系,如图 1—3 所示。以抛  
 出时刻开始计时,则  $t = 0$  时,  
 物体的初位置为  $r = 0$ ,以  $v_0$   
 表示物体的初始速度, $\theta$  表示  
 抛射角。则有

$$\begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{cases} \quad (1.13)$$

$$\begin{cases} v_{0x} = v_0 \cos \theta \\ v_{0y} = v_0 \sin \theta \end{cases} \quad (1.14)$$

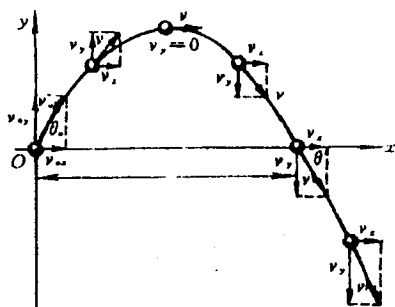


图 1—3 抛体运动

“—”号表示加速度方向与  $y$  轴的方向相反。 $a_x$  和  $a_y$  分别表示加速度  
 沿  $x$  轴和  $y$  轴的分量, $v_{0x}$  和  $v_{0y}$  分别表示初速度沿  $x$  轴和  $y$  轴的速  
 度分量。

根据加速度的定义式(1.11)

$$a = \frac{dv}{dt}$$

将上式对时间  $0 \rightarrow t$  求积分,可得

$$\int_0^t a dt = \int_0^t \frac{dv}{dt} dt = v(t) - v(0)$$

式中  $v(0)$  是质点在初始时刻的速度,即  $v_0$ ,  $v(t)$  是质点在任一时刻  $t$   
 的速度,因此得到

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a dt \quad (1.15)$$

或

$$v_x = v_{0x} + \int_0^t a_x dt$$

$$v_y = v_{0y} + \int_0^t a_y dt \quad (1.16)$$

对抛体运动, 将(1.13)式代入(1.16)式得

$$\begin{aligned} v_x &= v_0 \cos \theta \\ v_y &= v_0 \sin \theta - gt \end{aligned} \quad (1.17)$$

关于质点的运动方程, 可由速度的定义式(1.6)式对时间从 0— $t$  求积分, 得

$$\int_0^t \mathbf{v} dt = \int_0^t \frac{d\mathbf{r}}{dt} dt = \mathbf{r}(t) - \mathbf{r}(0)$$

式中  $\mathbf{r}(0)$  表示初始时刻  $t=0$  质点的位置矢量, 通常记为  $\mathbf{r}_0$ ,  $\mathbf{r}(t)$  表示任一时刻  $t$  质点的位置矢量, 因此得到

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}_0 + \int_0^t \mathbf{v} dt \quad (1.18)$$

或

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + \int_0^t v_x dt \\ y(t) = y_0 + \int_0^t v_y dt \end{cases} \quad (1.19)$$

则在任一时刻物体在空中的位置为

$$\begin{aligned} x &= v_0 t \cos \theta \\ y &= v_0 t \sin \theta - \frac{1}{2} g t^2 \end{aligned} \quad (1.20)$$

这便是大家在中学已熟悉的公式。将(1.20)两式中消去  $t$  得抛体运动的轨道方程

$$y = x \tan \theta - \frac{1}{2} \frac{g}{v_0^2 \cos^2 \theta} x^2 \quad (1.21)$$

对一定的  $v_0$  和  $\theta$ , 这一函数表示一条通过原点的二次曲线——抛物线, 抛体运动这个名称就是由这里来的。