



中学物理教师用书

# 牛顿运动定律

常利

北京教育出版社

中学物理教师用书

# 牛顿运动定律

常 利

北京教育出版社

## 内 容 提 要

本书围绕牛顿定律及与其有关的知识，对牛顿定律、万有引力定律、质心运动定理、重量和质量、惯性系和非惯性系等知识做了透彻的分析；还讲述了与中学教材关系密切的力学单位制和量纲问题；简单介绍了经典力学、近代物理学的关系。

## 牛 顿 运 动 定 律

Niudun Yundong Dinglü

常 利

\*

北京教育出版社出版

(北京北三环中路8号)

新华书店北京发行所发行

马池口印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 32开本 6.875印张 147,000字

1987年11月第1版 1987年11月第1次印刷

印数1—3,000

ISBN 7—5303—0008—3/0·4

书号: 7327·5 定价: 1.20元

## 编者的话

中学物理教学的不断发展和改革，对广大物理教师在业务上提出了新的要求。为了帮助教师深入理解物理学基础理论的主要内容，以便高屋建瓴地驾驭教材，我们编写了这套《中学物理教师用书》。

这套丛书按照全日制重点中学教材系统选题，每个选题自成系统，分册出版（书目见后）。每一分册基本上与中学物理课本的一章相对应。这套书不是供教师直接用于讲课的教学参考资料。它从普通物理的高度或运用理论物理的观点，对中学物理中重要概念、规律的来龙去脉以及与有关知识的联系，进行较系统的分析和阐述，把高等师范院校物理课与中学物理课的知识加以沟通。书中对中学物理教师在教学中遇到的学生难于理解、掌握的内容和常见的错误，进行了深入的分析。为了开阔教师思路，本套书也适当提供了一些与基本概念、规律、方法有关的物理学史资料；对中学物理课所涉及的物理学内容至今的发展状况以及有关的近代物理知识，也做了一些介绍。

这套书是应广大中学物理教师的要求而写的。在确定选题、制定编写方针的过程中，北京师范大学的阎金铎同志、北京15中学的周誉嵩同志和北京师范大学的乔际平同志提了许多有益的建议、做了很多工作。本套书各册的提纲，都是经王天谔、王杏村、申先甲、乔际平、周誉嵩、张维善、唐

树德、常利、钱玄、梁敬纯、阎金铎、缪秉成、魏凤文等同志集体讨论确定的。

我们希望这套书能够对中学物理教师进修提高和钻研教材都有用处。但由于我们的水平有限，很难如愿。盼望广大中学物理教师在使用中提出宝贵意见。

本书经北京师范大学阎金铎同志审阅。

一九八四年六月

## 前 言

中学物理教材中的力学知识，基本上属于牛顿力学的范围。而牛顿运动三定律是全部牛顿力学的基础。因此，关于这三条定律的教学在中学物理教学工作中所占地位的重要性是不言而喻的。牛顿对这三条定律的表述并不复杂，但要准确理解它们所包含的物理内容，并能正确地 对它们加以运用，却不是一件容易的事。对这三条定律在理解上会存在许多模糊和混淆，在应用上会产生各种歧离和错误，这可能并不 仅是初学者的苦恼。为此，作者想围绕着牛顿运动定律这个内容，把自己多年来向各方面学习所获得的一些肤浅体会，以及从本人所犯错误中汲取的大量深刻教训汇集起来，提供给从事中学物理教学工作不久的青年同行们参考。这就是本书的编写目的。愿望是好的，但水平有限，其中不妥与谬误之处必定很多。望读者不吝指正。

作 者

1984年12月，于北京师院物理系

# 目 录

一、牛顿运动定律概述 .....	(1)
(一) 牛顿运动定律的表述 .....	(1)
(二) 牛顿运动定律在牛顿力学中的地位 .....	(3)
1. 牛顿第二定律是质点动力学的核心定律 .....	(3)
2. 牛顿运动定律是质点组动力学的基础 .....	(5)
(三) 牛顿运动定律的适用范围 .....	(10)
1. 牛顿力学和经典力学 .....	(10)
2. 经典力学的适用范围 .....	(11)
3. 牛顿运动定律的适用范围 .....	(14)
二、关于牛顿第一定律的讨论 .....	(16)
(一) 牛顿第一定律和伽利略 .....	(16)
(二) 牛顿第一定律和惯性 .....	(18)
(三) 牛顿第一定律和力 .....	(20)
(四) 牛顿第一定律和惯性参考系 .....	(22)
(五) 牛顿第一定律的实验验证问题 .....	(27)
1. 推理性的理想实验证明 .....	(27)
2. 气垫导轨实验 .....	(27)
3. 验证牛顿第一定律的推论 .....	(28)
(六) 牛顿第一定律的独立地位问题 .....	(29)
三、关于牛顿第二定律的讨论 .....	(31)
(一) 牛顿第二定律和质量的定义 .....	(31)

1. 牛顿的质量定义 .....	(31)
2. 惯性质量及其量度 .....	(34)
3. 惯性质量和引力质量 .....	(39)
4. 中学物理教学中的质量定义问题 .....	(41)
(二) 牛顿第二定律的矢量性和力的独立作用 原理 .....	(43)
(三) 牛顿第二定律的投影表示式和运动的独 立性原理 .....	(46)
<b>四、关于牛顿第三定律的讨论</b> .....	(53)
(一) 牛顿第三定律的适用范围 .....	(53)
(二) 牛顿第三定律在牛顿力学中的地位 .....	(60)
(三) 牛顿第三定律和物体的受力分析 .....	(63)
<b>五、力学单位制和量纲</b> .....	(70)
(一) 力学单位制 .....	(70)
1. 物理量和单位制 .....	(70)
2. 常见的力学单位制 .....	(72)
3. 单位换算及应注意的问题 .....	(76)
4. 三种单位制的比较 .....	(79)
5. 由重量求质量或由质量求重量的问题 .....	(80)
(二) 量纲简介 .....	(81)
1. 量纲 .....	(81)
2. 量纲式的应用 .....	(83)
<b>六、重量和质量</b> .....	(86)
(一) 重量 .....	(86)
1. 重量和重力 .....	(86)
2. 重力和万有引力 .....	(87)
3. 物体的重量随纬度和高度的变化 .....	(90)
(二) 重量和质量的关系 .....	(91)



(三) 重量和视重 .....	(96)
1. 视重和称重 .....	(96)
2. 失重和超重 .....	(98)
3. 重量的另一种定义 .....	(99)
七、牛顿运动定律和万有引力定律 .....	(101)
(一) 牛顿建立万有引力定律 .....	(101)
1. 行星的运动、开普勒定律 .....	(102)
2. 从开普勒定律到万有引力定律 .....	(105)
3. 用牛顿运动定律推导万有引力定律公式 .....	(107)
(二) 牛顿对万有引力定律的验证 .....	(109)
(三) 牛顿对测定万有引力恒量的实验设计 .....	(112)
(四) 牛顿对发射“人造卫星”的设想 .....	(115)
1. 环绕速度和第一宇宙速度 .....	(116)
2. 人造卫星轨道成圆的条件 .....	(117)
八、牛顿运动定律和质心运动定理 .....	(119)
(一) 一个简单的受力图的画法问题 .....	(119)
(二) 质心运动定理 .....	(121)
1. 质心 .....	(121)
2. 质心运动定理 .....	(123)
3. 牛顿第二定律和质心运动定理 .....	(128)
(三) 几个实例 .....	(129)
1. 球沿斜面下滚 .....	(129)
2. 汽车牵引力形成的原理 .....	(134)
3. 一些交通工具转弯的问题 .....	(140)
九、牛顿运动定律和连接体问题 .....	(148)
(一) 连接体问题与隔离法 .....	(148)
(二) 连接体间在运动学上的联系 .....	(152)
(三) 连接体间的相互作用力 .....	(161)

1. 连接体间相互作用力的一般特点 .....	(161)
2. 直接接触的物体间的压力 .....	(162)
3. 绳索等柔体中的张力 .....	(163)
4. 摩擦力 .....	(171)
十、牛顿运动定律和非惯性系 .....	(177)
(一) 惯性系和非惯性系 .....	(177)
(二) 非惯性系和惯性力 .....	(178)
(三) 惯性离心力 .....	(185)
(四) 地球做为非惯性系 .....	(188)
十一、质点在变力作用下的运动 .....	(193)
(一) 自由质点的运动微分方程 .....	(193)
(二) 约束质点的运动微分方程 .....	(203)

## 一、牛顿运动定律概述

文艺复兴以后，十六、十七世纪，欧洲资本主义工商业的蓬勃发展有力地促进了科学事业的振兴。在古代就已发展起来的力学科学，经过中世纪的长期停滞，在这个时期也取得了长足的进展。通过哥白尼、开普勒、伽利略等众多学者的努力，力学发展成为一门具有完整理论系统的学科的条件已经成熟。伟大的英国学者牛顿（1642—1727）在前人成就的基础上，通过自己艰苦卓绝的工作，于1687年发表了他的传世杰作《自然哲学的数学原理》（以下简称《原理》），提出了著名的牛顿运动三定律，标志着牛顿力学体系的形成。

### （一）牛顿运动定律的表述

在《原理》中，牛顿给出了他的关于机械运动的三条定律的表述：

“定律1 每个物体继续保持其静止或沿一直线做等速运动的状态，除非有力加于其上迫使它改变运动状态。”

“定律2 运动的改变和所加的力成正比，并且发生在所加的力的那个直线方向上。”

“定律3 每一个作用总是有一个相等的反作用和它相对抗；或者说，两物体彼此之间的相互作用永远相等，并且各自指向对方。”

这就是我们所熟知的牛顿运动三定律。

在对牛顿的这些表述进行理解时，初步地应注意到以下几个问题：

(1) 定律表述中所谓的“物体”，是指具有质量的几何点——质点而言。

(2) 第一定律表述中的“运动状态”，是以运动质点的速度矢量表征的。质点运动的快慢及运动的方向，只要其中之一发生变化，质点的运动状态即发生了变化。

(3) 第二定律表述中的所谓“运动的变化”，实际上指的是“运动质点动量的变化”。参照牛顿自己在《原理》中所表露的思想，这个定律应表为

$$F = k \frac{d(mv)}{dt}, \quad (1-1)$$

式中  $k$  为比例恒量。它的数值和单位由式中其他各物理量的单位的选择决定。由 (1-1) 式不难看出，在本来意义下的牛顿第二定律和单个质点的动量定理实际上是等价的；牛顿从一开始就是以动量  $mv$  做为机械运动的量度的。

后来，人们把认为不变的质点质量  $m$  从求导符号中提出，而将 (1-1) 式变形为

$$F = km \frac{dv}{dt} = kma. \quad (1-2)$$

这是在现代更为通用的形式。对应这种形式，牛顿第二定律的物理意义应表述为：“质点运动的加速度矢量的大小和质点所受力的大小成正比，和质点本身的质量成反比；加速度矢量的方向与力的方向相同。”

通过适当的单位选择，可以使 (1-1) 式和 (1-2) 式中的比例恒量  $k = 1$ 。于是，这两式变为

$$F = \frac{dmv}{dt} \quad (1-3)$$

和

$$F = ma_0 \quad (1-4)$$

以后，我们讨论问题就从这样的表示式出发。

(4) 第一、第二定律的适用对象只是单个质点，而第三定律所涉及的却是两个质点。对定律表述中的“相互作用”，应理解为是相互作用的两质点分别各受一个力。

## (二) 牛顿运动定律在牛顿力学中的地位

只需浏览一下牛顿力学的结构，就可看出牛顿运动定律在牛顿力学中的重要地位，它们是牛顿力学的基础。

### 1. 牛顿第二定律是质点动力学的核心定律

力学的任务是研究物体机械运动的规律。各种物体的运动中，以质点的运动最为简单。如果仅从运动学的角度唯象地研究质点的运动，就只需讨论当参考系选定后质点的位置、速度、加速度和时间的关系以及质点的运动轨道等。其中加速度的确定是关键。这首先是因为质点究竟做怎样的运动：直线运动还是曲线运动，匀速率运动还是变速率运动，加速运动还是减速运动，都主要取决于质点的加速度矢量。以中学教材中出现的几类运动为例，就可清楚地看出这点：

匀速直线运动——加速度矢量  $a = 0$ 。

匀变速直线运动——加速度矢量  $a$  的大小不变，方位线和速度矢量  $v$  的方位线重合。其中，若  $a$  与  $v$  同向，则为匀加速直线运动；若  $a$  与  $v$  反向，则为匀减速直线运动。

匀速率圆周运动——加速度矢量  $a$  的大小不变，方向恒指向圆轨道的中心。

一维简谐振动——加速度矢量  $a$  的大小和质点位移矢量

的大小成正比，方向恒指向平衡位置。

不仅质点的运动类型由加速度矢量决定，而且只要能掌握在每一时刻的加速度矢量，那么在一定的初条件（初位置和初速度）下，就可进而求出质点在任一时刻的速度矢量和所在的空间位置，从而使质点的运动完全确定。举一个特例。如图1-1所示，若已知沿坐标轴 $ox$ 运动的质点 $P$ 的加速度数值不变，初始坐标和初始速度分别为 $x_0$ 和 $v_{0x}$ ，则可求得在任一时刻 $t$ 质点的速度和坐标为

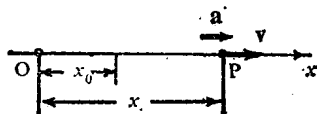


图 1-1

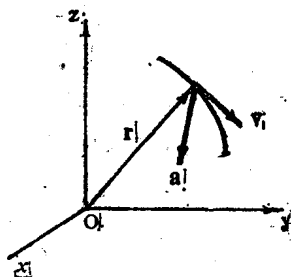


图 1-2

$$v_x = v_{0x} + a_x t$$

和

$$x = x_0 + v_{0x} t + \frac{1}{2} a_x t^2,$$

这里的角标“ $x$ ”表示矢量在 $ox$ 轴上的投影。推广一些，若如图1-2所示的一个做一般运动的质点 $P$ ，其加速度矢量 $a$ 做为时间的函数是已知的，

$$a = a(t),$$

则同样可以求出

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

和

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{V}_0 t + \int_0^t \mathbf{V}(t) dt,$$

其中  $\mathbf{r}$  是质点在任意时刻  $t$  的位置矢量,  $\mathbf{r}_0$  和  $\mathbf{V}_0$  是初条件。这样, 这个质点的运动也就完全确定了。

可见, 解决质点运动问题的关键是掌握其加速度矢量。那么, 质点的加速度矢量又决定于什么呢? 适用于单个质点的牛顿第一、第二定律, 正是确定质点加速度矢量的根据。这两个定律告诉我们, 对于一个特定的质点, 其加速度矢量唯一地由它所受的力决定。第一定律告诉我们的, 是在质点完全不受力的作用 (孤立质点) 时, 其加速度矢量的情况 ( $\mathbf{a} = 0$ )。第二定律告诉我们的, 是在质点受力 (包括虽受力, 但所受诸力的作用相互抵消) 时, 其加速度矢量的情况 ( $\mathbf{a} \propto \mathbf{F}$ )。由此不难体会到, 牛顿第一、第二定律是解决质点力学问题的基本定律。特别是第二定律, 是一条核心定律。

## 2. 牛顿运动定律是质点组动力学的基础

能把一个实际物体抽象成质点, 从而可以单独由牛顿第一或第二定律出发去讨论它的运动的情况是不多见的。那么, 如何研究一个一般的实际物体的运动呢? 由力学的观点看来, 任何一个实际物体都可视为一群以一定方式互相联系的质点的组合——质点组。而对组中的每一个单独的质点, 牛顿第一、第二定律都是适用的。所以从原则上说来, 出路好象是仍从牛顿第一、第二定律出发, 分别讨论质点组中每个质点的运动。若每个质点的运动确定了, 则整个质点组的运动也就确定了。但事实上并不这样简单。和单个质点的情况不同, 质点组中任一质点除了可能受到质点组以外的物体施

予的作用力——外力以外，还要受到质点组内部其他各质点施予的作用力——内力。例如，如图 1-3 所示，当把地球和月球视为一个由两个质点组成的质点组时，它们所受太阳的引力  $F_{\text{日对地}}$  和  $F_{\text{日对月}}$  都是外力，而它们之间的相互引力  $f_{\text{月对地}}$  和  $f_{\text{地对月}}$  就是内力。表面看来，仿佛只要考虑了一个质点所受的全部外力和内力，则仍可由牛顿第二定律确定它的运动。但由于各质点相互作用的内力常是未知的，这就会造成因未知量的数目超过方程的数目（往往是大大超过），而使问题无法求得解答。因此，想只由牛顿第二定律出发，逐个逐个地确定质点组每个质点的运动，一般是办不到的。

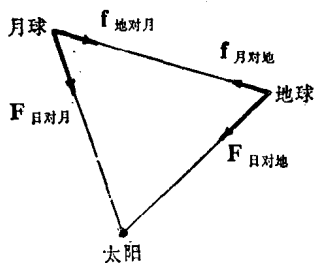


图 1-3

当然，这并不意味着在质点组动力学问题面前，牛顿运动定律已束手无策。因为至关重要的第三定律尚未被用到。从整个质点组看来，使问题变得棘手的质点组各质点间的内力，是两个质点间的相互作用，是成双

作对出现的，故它们必定服从牛顿第三定律。这样，把牛顿第二定律和第三定律联合起来应用于质点组，首先就可以使某些简单质点组或受到足够多的特加限制的质点组的运动问题获得完全的解决。如由两个质点组成的质点组的问题（二体问题）就是前一种情况的例子，所谓用“隔离法”解“连接体”的问题（参看后面的第九部分），就是后一种情况的例子。

为了能对上述思想有些具体的认识，做为一个实例，我们由牛顿运动定律出发，来推导出刚体绕固定轴转动的转动



定律。刚体是一类比较简单的特殊质点组，其体内各质点间的相对位置在任何情况下都不发生变化。刚体绕固定轴转动时，其运动受到固定轴的限制，因而组成刚体的每一个质点都将绕固定轴做圆周运动，如图 1-4 所示。设刚体中第  $i$  个质点的质量为  $m_i$ ，加速度为  $a_i$ ，所受外力的合力为  $F_i$ ，内力的合力为  $f_i$ ，则由牛顿第二定律有

$$F_i + f_i = m_i a_i. \quad (1-5)$$

又由运动学的知识得知， $m_i$  做圆周运动的切向加速度  $a_{it}$  和它的角加速度（也就是整个刚体转动的角加速度） $\beta$  之间有以下关系：

$$a_{it} = r_i \beta, \quad (1-6)$$

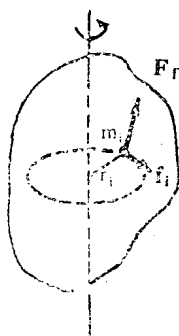


图 1-4

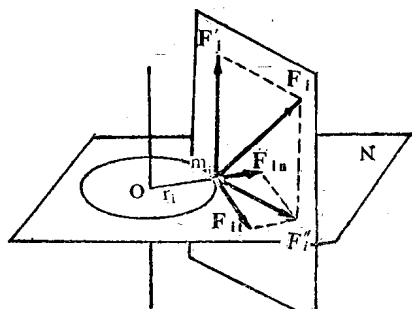


图 1-5

式中  $r_i$  是  $m_i$  到固定轴的距离（也就是它做圆周运动的轨道半径）。写出 (1-5) 式的切向分量式，把 (1-6) 式代入，再以  $r_i$  乘各项，即得

$$F_{it} r_i + f_{it} r_i = m_i r_i^2 \beta. \quad (1-7)$$

其中  $F_{it} r_i$  和  $f_{it} r_i$  两项，恰好分别是合外力  $F_i$  和合内力  $f_i$  的切向