

全国中小学教师继续教育
专业必修课教材

高中物理专题分析丛书

牛顿运动定律

NIUDUN YUNDONG DINGLU 教育部师范教育司组织编写
缪钟英 编著



人民教育出版社

牛頓運動定律



高中物理专题分析丛书

牛顿运动定律

缪钟英

人民教育出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

牛顿运动定律/缪钟英编. —北京: 人民教育出版社, 2002

(高中物理专题分析丛书)

ISBN 7-107-16339-6

I. 牛...

II. 缪...

III. 物理课-高中-教学参考资料

IV. G633.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 104188 号

人民教育出版社出版发行

(北京沙滩后街 55 号 邮编: 100009)

网址: <http://www.pep.com.cn>

北京四季青印刷厂印装 全国新华书店经销

2003 年 12 月第 1 版 2003 年 12 月第 1 次印刷

开本: 890 毫米×1 240 毫米 1/32 印张: 5.125

字数: 120 千字 印数: 0 001~3 000 册

定价: 8.10 元

高中物理专题分析丛书编委会

主 编 陈熙谋

副 主 编 周誉蔼

编 委 (汉语拼音为序)

陈熙谋 北京大学

洪安生 北京市海淀区教师进修学校

缪钟英 四川联合大学

彭前程 人民教育出版社

施桂芬 上海教育出版社

王天谥 北京市东城区教育教学研究中心

张大昌 人民教育出版社

周誉蔼 北京十五中

本册作者 缪钟英 四川大学

本册审稿 张三慧 清华大学

卢圣治 北京师范大学

方 妍 清华大学附属中学

如发现印、装质量问题，影响阅读，请与出版社联系调换。

(联系地址：北京市方庄小区芳城园三区 13 号楼 邮编：100078)

目 录

一、概述	(1)
1. 牛顿运动定律是经典力学的基础	(1)
2. 牛顿运动定律在中学物理教学中的地位和作用	(3)
3. 关于力和物体的受力分析	(4)
4. 本书内容	(7)
二、牛顿第一定律 惯性系	(9)
1. 牛顿第一定律的表述	(11)
2. 第一定律的意义	(11)
3. 第一定律中的循环论证	(14)
三、牛顿第二定律	(16)
1. 牛顿第二定律	(16)
2. 力和质量的量度	(17)
3. 从牛顿力学到狭义相对论力学，质量和力概念以及动力学方程有什么发展	(23)
四、牛顿第三定律	(27)
1. 牛顿第三定律	(27)
2. 牛顿第三定律的运用范围	(28)
3. 牛顿第三定律与动量守恒定律	(29)
五、力学相对性原理 伽利略变换	(30)
1. 力学相对性原理（伽利略相对性原理）	(30)
2. 伽利略变换	(32)
3. 狭义相对论的相对性原理与洛伦兹变换	(34)
六、几种较常见的力和约束反作用力	(37)

1. 万有引力 重力	(37)
2. 弹力 弹性力	(40)
3. 浮力	(41)
4. 液体对运动物体的阻力	(42)
5. 约束反作用力	(45)
七、物体的弹性、弹力.....	(50)
1. 固体的弹性、应变和应力	(50)
2. 扭转 弹簧的弹性力	(57)
八、摩擦力.....	(62)
1. 怎样分析和求解与静摩擦有关的问题	(64)
2. 摩擦的几何描述 摩擦角	(69)
3. 皮带轮的最大传动力	(74)
九、质点动力学问题.....	(79)
1. 已知运动规律求力	(79)
2. 已知质点受力规律和运动初值, 求解质点的运动规律	(88)
十、解连接体动力学问题的一般方法.....	(99)
1. 用隔离体法解连接体动力学问题的方法	(99)
2. 如何寻求各物体运动的关联方程	(101)
十一、非惯性系 惯性力.....	(108)
1. 加速平动的非惯性系中的动力学方程	(108)
2. 对惯性力的认识	(109)
十二、匀角速转动参考系 惯性离心力和柯氏力.....	(118)
1. 转动参考系中的加速度合成定理	(118)
2. 转动参考系中的动力学方程 惯性离心力和柯氏力	(123)
十三、地球自转引起的效应.....	(127)
1. 物体的视重随纬度的变化	(127)

2. 在地面附近运动的物体的柯氏效应	(129)
十四、潮汐.....	(143)
1. 潮汐 引潮力	(143)
2. 引潮力对地月系统运动的影响	(148)
2. 伴星被主星的引潮力撕裂的条件	(149)

1. 牛顿运动定律是经典力学的基础

牛顿在 1687 年出版的《自然哲学的数学原理》中，发表了他的运动三定律和万有引力定律。三个多世纪后的今天，受过中等以上教育的人中，几乎无人不知道牛顿定律，它是最广泛普及的少数几个自然定律之一。这充分表明牛顿定律作为科学的基础性和应用的广泛性。

在人类的生活、科学实验中和生产活动中，最经常接触到的自然现象之一，就是物体间相互作用支配的天上和地面物体的机械运动。然而几千年来，人们对物体间的相互作用和物体运动变化的关系，却停留于片面的、不正确的认识中。直到 16 世纪，波兰学者哥白尼在临终前（1543 年）发表的《天体运行论》中提出“日心说”，建立日心体系后，使科学从神学的束缚中解放出来。随后，近代科学的先驱们，如布鲁诺、伽利略、开普勒、笛卡儿等，用自由探索的精神去研究自然界包括从天上星体到地面物体的运动现象，为牛顿发现运动三定律和引力定律，完成人类科学史上第一次创造性的大综合准备了条件。

牛顿在《原理》中，首先科学地阐明了惯性、动量等基本概念，定性地定义了力，接着把支配地面上和天上星体运动的基本规律归结为三条运动定律。第一定律阐明了不受力物体的运动状态，从而纠正了自古以来流行的关于力和运动关系的错误观念。并通过不受力物体的运动状态的陈述，定义了惯性参考系，作为牛顿力学，乃至经典物理的出发点。第二定律建立了力与受力物体运动变化之间的定量关系，成为质点动力学的基本方程。第三定律是牛顿

独自发现的有关力的定律，它揭示了物体间的相互作用力的一种依赖关系。由它和第二定律，便可解决物体系（质点系）的动力学问题。这三条运动定律，组成一个整体，必要且充分地成为支配宏观物体机械运动的基本规律。

牛顿在《原理》中，在三条运动定律之后阐述的六条“推论”，包括了力的平行四边形法则，动量守恒，质心运动定理，相对性原理，力系等效原理等。接着讨论了两体碰撞问题，讨论了物体在流体介质中的运动等等。最为精彩的是，在《原理》的第三编中，牛顿根据开普勒行星运动定律，应用他的运动定律和他发明的“流数术”（即微积分），发现了万有引力定律，并用以讨论天体运动和地面海洋的潮汐问题等。所有这些，使运动定律立即显示出巨大的威力，成为初具规模的力学体系。

2

《原理》的出版，运动定律和引力定律的发现，在英国本土和欧洲大陆掀起了力学研究的热潮。经伯努利父子、欧拉、达·朗贝尔、哈密顿、拉格朗日、托马斯·杨、彭塞利、科里奥利等物理学家和数学家的努力，最终建立起了以牛顿定律为基础的经典力学体系（包括分析力学）。

根据牛顿定律，导出质点和质点系的三个运动定理，即动量定理，动能定理和角动量定理，并得到动量守恒，机械能守恒以及角动量守恒三大运动守恒定律。三个守恒定律是实验中发现的自然规律。相对论、量子论被发现后，在近代物理范围内，牛顿力学已经不能适用，但三个守恒定律仍是普遍适用的。然而在只涉及机械动量，机械能，机械角动量的情况下，牛顿定律则包容了三个守恒定律，并对它们的条件和内容作出确切的说明，使它们从最初实验的总结，（如笛卡尔、惠更斯的动量守恒和莱布尼兹，惠更斯的活力守恒），上升为科学的规律。以牛顿定律为基础的三个运动定理以及三个运动守恒定律，构成经典力学的理论基础。在此基础上，发展了刚体力学，流体力学，弹性力学，空气动力学……等等，形成

经典力学的完整体系。至今，在以现代物理学成就为基础的现代科技中越来越广泛而深刻地影响着当代人类生活的各个方面。

2. 牛顿运动定律在中学物理教学中的地位 and 作用

由于物理学研究的成果，它提供的科学思想、科学方法，以及对其它自然科学以及现代科学技术的深刻影响，物理学已成为自然科学和技术科学的基础。在中学教育中，物理教学也就成了自然科学教育和科学素质教育的重头戏。物理学研究物质的各种运动形式及其相互转化的规律。其中，机械运动又是物质的各种运动形式中最直观、最简单、最基础的运动形式。物理学从力学讲起，符合物理学发展的实际，也符合教学规律。力学教学是中学物理教学的入门和基础，因而作为动力学基础的牛顿定律，在中学物理教学中的基础地位是明确的。

牛顿定律在中学物理教学中的地位 and 作用不仅表现为知识结构中的基础重要性，更突出地表现在对学生科学思维素质的培养 and 分析问题解决问题的能力培养方面。

首先，牛顿定律是学生第一次面对的重要科学定律，它所支配的运动又是学生常见的机械运动。学生在生活中接触到不少力以及物体的运动现象，已形成了一些感性的体验或看法。这些看法与科学概念可能相去甚远，有的还是错误的，但总归是已有相当的感性认识基础。如何以学生对现象的感性体验为背景，引导学生通过去粗取精，去伪存真，由表及里，从感性的片面的认识上升为正确的理性认识，从而建立惯性，质量，动量，力以及惯性参考系等科学的概念及有关规律的科学认识。这对学生来说，是第一次经历的科学认识论的实践。因此，牛顿定律涉及到的概念与规律的教学，是对学生进行辩证唯物主义认识论方面培养的很好载体。

其次，牛顿第二定律的突出特点是表述的简明性和应用的广泛性。背诵它的条文、记住公式轻而易举，但应用它去分析解决具体的力学问题，对大多数的初学者来说，并不是一件容易的事。用正确的概念和观念作为指导，对丰富多样的具体物体的具体运动，以及这个物体同周围环境（物体）的相互作用进行实事求是的分析，才可能正确地应用 $F=ma$ 这样一个十分好记的公式。这对从初中升入高中的学生来说是一个极大的挑战。牛顿定律及其应用的教学，正好在引导学生迎接这一挑战的过程中，培养科学思维的素质，提高分析问题解决问题的能力，为以后的物理教学打好牢固的基础。

4 牛顿第二定律是一个矢量规律。力是矢量，加速度是矢量。学生第一次真正面临着应用矢量规律，解决矢量运算的问题。矢量运算的解析法，是在物理学中应用很广的数学方法。在进行牛顿定律及其应用的教学，切实地指导学生学会处理矢量运算的方法，掌握好正交分解，会应用解析法建立矢量方程的分量式，从而求得问题的解决，是对学生应用数学解决物理问题的能力的培养。

3. 关于力和物体的受力分析

(1) 牛顿在《原理》的第一版序言中写到：“我奉献这一作品，作为哲学的数学原理，因为哲学的全部责任似乎在于——从运动的现象去研究自然界中的力，然后从这些力去说明其他的现象。”牛顿本人正是实践这个责任的典范。他根据行星运动的开普勒定律，发现了万有引力定律；再应用引力定律去说明更多的现象。后来人们甚至应用他的万有引力定律和运动定律，从理论上准确地预言了海王星和冥王星的存在。牛顿以后的三百多年来，一代又一代的物理学家从自然界的各种运动现象，包括从宏观到微观各个层次

及各种形式的物质运动中，寻找支配这些运动现象的力。到今天为止，物理学界公认支配物质世界各种运动现象的力可归结为四种基本相互作用，这就是：引力相互作用，电磁相互作用，弱相互作用和强相互作用。

弱相互作用和强相互作用是短程力，有效作用距离在 10^{-15} m 以下，因此这两种作用只有在原子核尺度内，在核子和一些基本粒子的特定反应过程中起作用。引力和电磁力是长程力。宏观物体之间的相互作用，引力（重力）显然是引力作用，电荷之间的相互作用固然是电磁相互作用，所有接触力都是大量原子、分子间的电磁相互作用的宏观表现。以上四种相互作用按强度排列的顺序是：强作用，电磁作用，弱作用和引力作用。如果考虑两个相距为 10^{-15} m 的原子，它们之间四种相互作用都存在，按其数量级的比例为：

$$\text{强} : \text{电} : \text{弱} : \text{引力} \simeq 1 : 10^{-2} : 10^{-6} : 10^{-38}.$$

尽管宏观物体之间的接触力，如弹力，摩擦力，其最终的本源都是电磁相互作用，但在力学中不满足于承认这种本源，也不具体去揭示产生这些力的微观机理。力学中讨论力是要了解这些力的宏观规律，也就是在宏观层次内探讨这些力的规律，并研究在这些力作用下物体的运动。

在力学中常见的力，按性质和规律分，有引力（重力），弹性力，摩擦力，介质的阻力，电场力，洛伦兹力等。这些力都有其自身确定的变化规律。另外，在处理受约束物体的动力学问题时，约束（即限制物体运动的其它物体）常用理想的刚化模型简化。因此约束作用于物体的力，即约束反作用力，便是由作用于物体的其他力和物体的运动情况决定的力。求解这些未知的约束反作用力，构成动力学的一类问题。

(2) 怎样认识和解决受力分析中的难点？

在中学物理教学中，受力分析普遍地成为教学中的难点。为了解决这个问题，应对难在何处，为什么难有一个全面的认识，以便

对症下药，解决困难。

首先，应充分估量正确建立关于力的科学概念必然存在困难。学生在学习物理以前已从生活感受中形成了有关力的一些体验，如“我有力”，“他的力大”，“有力才能维持运动”，“运动物体有冲力”等等，这些与科学的力概念相去甚远，要拨乱反正是困难的。只要回顾在科学的力学诞生以前，人类在关于力和运动关系方面的错误认识中徘徊了非常漫长的历史，就完全可以理解：要去掉学生从直观感受中形成的、习惯的关于力的模糊观念，代之以正确的认识，任务是艰巨的。

其次，要注意引导学生把周围环境对物体的作用，抽象为若干力。而且力是矢量，有大小、方向、作用点三要素。每一个力又有受力物体和施力物体之分。一些力（如重力）是已知的，或已知规律的（如弹性力）。有些力则是未知的（如约束反力），又如何判定他的方向，用一个大小待定的未知力矢量来表示，等等。对初学者来说，这样丰富的、需要思维分析加工作出判断的问题摆在面前，既有对具体的力的规律的认识把握问题，又有从对具体环境的分析中，抽象概括为若干力的思维能力问题。这对他们来说，在认识和科学思维素质方面都是一个新台阶。

第三，困难还产生于“平衡思维定势”，把在讨论平衡时所得到的关于某些力（主要是约束反力）的结论，当作普遍规律，形成习惯随意套用。如支承面对物体的支持力（压力）总是等于物重或物重在垂直支承面方向的分量（ $mg\cos\theta$ ）等等。这种问题在一定程度上是由于对约束反力的特点没有正确认识造成的。还有，对牛顿第二定律的理解和认识方面的缺陷也会造成困难。牛顿第二定律 $F=ma$ ，是物理规律的表达式，而不是如“ $\sin\frac{\pi}{2}=1$ ”这样的纯

数学等式。 $\sin\frac{\pi}{2}$ 等于1，意即 $\sin\frac{\pi}{2}$ 就是1。而作为物理定律的等

式, $F=ma$ 表示其它物体作用于物体的合力与物体的质量和加速度之乘积在方向和量值上相等的规律, 他不是力“ F ”与力“ ma ”相等的等式. 有的初学者容易犯这样的错误, 如“物体还受到向心力 $\frac{mv^2}{R}$ ”等. 这就要求在讲解牛顿定律时, 注意正确引导, 避免产生这类问题.

如上所述, 受力分析之难既表现在认识上, 又表现在分析和思维能力方面. 它不单纯是一个认识问题, 不仅是“知不知道”, 更重要是“能不能”的问题. 因此, 要解决好这一问题, 不是拟定一些条条, 让学生死记住就能凑效的. 这里需要针对困难之所在, 有的放矢地启发和诱导, 让学生建立关于力的正确概念和对牛顿定律的正确认识. 把握几种常见的主动力和约束反作用力的特点. 通过典型例子的分析, 让学生通过自己的努力在实践中悟出道理, 做到: 全面、细致的分析周围物体的作用, 并用相应的力表示出来, 避免遗漏; 掌握好力是物体对物体的作用, 有力必有施力物, 有作用必有反作用, 用此审视每一个力, 避免虚构并不存在的力; 要具体分析而不生搬硬套, 特别要把握好约束反力作为未知的被动力的特点, 克服“平衡思维定势”; 分清具体的作用力和合力, 掌握好矢量的分解合成等矢量运算的法则. 这样就能逐步提高分析判断能力, 掌握好对物体进行受力分析的方法.

4. 本书内容

本书内容由三部分组成.

第一部分讨论牛顿定律包含的概念和规律、它们的意义以及正确理解它们应注意的问题. 希望读者在读了这部分内容以后, 能对牛顿定律有更深刻的认识, 并了解牛顿定律中的哪些概念、结论或

规律，在近代物理中不适用了。而在近代物理中对这些概念、结论和规律作了什么修正，发展演化的大体情况如何。

第二部分讨论力学中常见力的规律，以及牛顿定律的应用。在各种力中，重点讨论了弹力，约束反力和摩擦力。在固体的弹性，以及弹性力学的基本概念基础上，讨论物体间相互作用的弹性力，以及弹性体的劲度等问题。笔者认为指出绳的约束反力以及接触面的法向反力本质上属于弹力只是问题的一个侧面，而正确理解它的在地位以及处理方法上的不同，因而能加以区别，正确应用，也是很重要的方面。在应用部分，刻意选取了几个必须应用微积分才能解决的例题。这些例题，从数学上说是繁难了一些，然而它们仍然是以中学物理教学为背景的。对这些问题的解决，或许能对中学物理中涉及到的一些运动现象，有一个更深入和更准确的理解。

8 第三部分主要讨论非惯性系和我们地球上发生的一些现象。这显然是超出现行中学物理教学的内容。笔者认为，中学物理教师对这些问题有一个比较广泛的了解，对于掌握教学内容的分寸必然是大有好处的，而且在辅导那些喜欢物理学、勤于思考的学生的课外科普活动中必定有所作为。

二 牛顿第一定律 惯性系

物体的机械运动是人们最经常接触到的自然现象，但由于历史的局限，很长时期以来，人们从感觉体验中得到的关于运动和力的关系的认识是不正确的。人们认为静止是地面物体的“自然状态”，运动必须受到推或拉等作用，要使物体运动得越快，这种推或拉的力也就越大。如果停止推、拉作用，原来已运动的物体就会静止下来。也就是说，运动是由推、拉等力来维持的。两千多年前希腊著名的哲学家亚里士多德集中表述了关于运动的上述观念。由于亚里士多德的威望的影响，这种观念一直为人们接受。直到三百多年前，近代科学的奠基者，意大利学者伽利略通过对现象的观察、实验，应用抽象思维，理想实验、科学推理方法，初步揭示物体的惯性行为，人们才抛弃旧的错误的观念，形成关于运动和力的正确观念。

伽利略提出对接斜面的理想实验，如图 2-1。小球从 A 点开始沿斜面 AB 滚下，将沿 BC 升到同样高度。如果将右边的斜面逐渐放平，则小球将相应到达相同高度的 $C_1, C_2, C_3 \dots$ 点。随着斜面 BC 倾斜角的减小，小球沿 BC 斜面运动的长度将增加。由此得出理想实验结论：如果 BC 变成水平面，则小球的运动将一直继续下去。伽利略根据这个理想实验，提出了他的惯性原理：

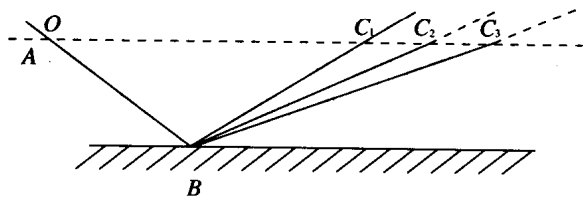


图 2-1