



新概念力学十讲

Ten Lectures on New
Concept Mechanics

赵凯华 罗蔚茵 编著

四川教育出版社

03
244

新概念力学十讲

Ten Lectures on New
Concept Mechanics

赵凯华 罗蔚茵 编著



四川教育出版社

2002.3

图书在版编目(CIP)数据

新概念力学十讲/赵凯华 罗蔚茵编著. —成都:
四川教育出版社, 2002.3
ISBN7-5408-3642-3

I. 新... II. 赵... III. 力学-普及读物
IV. 03-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 093039 号

责任编辑:唐瑾怀 何 杨

技术编辑:王 凌

封面编辑:金 阳

责任印制:姜 卫

新概念力学十讲

四川教育出版社出版发行

(成都盐道街3号 邮政编码610012)

四川大学树德电子工程公司照排

成都市书林印刷厂印刷

(地址:成都市武侯区机投镇武青南路13号(双星大道) 邮政编码:610045)

2002年3月第一版 2002年3月第一次印刷

880×1230 1/32 印张8 插页2 字数180千

印数:1—3000册

ISBN7-5408-3642-3/O·1 定价:13.00元

* * *

本书若出现印装质量问题,请与工厂调换,电话:(028)87421198

前 言

我们编写的《新概念物理教程·力学》(以下简称《新概念力学》)于1995年出版以来,先后举办了八次有关新概念物理教程的教师讲习班。讲授内容由力学逐步扩展到包括热学和量子物理。这本《新概念力学十讲》就是根据历次讲习班有关力学的课题而编写的。这些课题围绕新概念力学的改革思路,对某些教学要点提供较为深入的知识背景。

《新概念力学》提出要用现代的观点来审视和改革传统的教学体系,以动量、角动量和机械能守恒三大定律为核心的教学体系,代替以牛顿运动定律为核心的传统体系。本书第一讲“力的表象和能量表象”介绍了两个体系的来龙去脉、两者的联系和优劣之比较,列举现代物理的例子来阐明能量表象优于力的表象,使读者能更好地领会新体系的用意。

《新概念力学》为提高认知规律的层次,强调对称性原理在物理学中的地位。运用对称性原理考虑问题,往往可以超越对具体物理规律认识的局限性,从更高层次的普适法则去探索未知领域的某些规律。这是现代物理学方法论的精髓。这种思想方法的训练,将对培养学生的好科学素质具有深远的意义。本书第二讲和第三讲较详细地介绍了对称性原理和对称性自发破缺的概念和实例,包括宇称不守恒、宇宙早期的真空相变与暴胀、重子-反重子的不对称以及分子水平上的生物左右不对称性等接近前沿的知识。

近年来,在经典物理学领域内也出现了前沿课题,这就是混沌理论。《新概念力学》主张要为基础知识装上通往前沿领域的接口。从振动引伸到混沌就是其中的尝试。本书第四讲和第五讲介

绍的非线性振动和混沌提供了这个接口的一些背景知识和有趣的例子。

第六讲“万有引力纵横谈”是牛顿力学开往天体物理的一个窗口。这里从历史到前沿,从天文又回到物理,通过介绍万有引力的方方面面,展示牛顿力学最成功、最精彩的片段。

《新概念力学》认为要突破牛顿力学的绝对时空观,确立现代的相对论时空观,加强相对论的教学。但是,如何在普物水平上讲好相对论,确实是一个教学上的难点。此外,这些与日常经验相去甚远的理论,往往引发学生许多疑问。本书的第七讲和第八讲,就这方面的教学难点和疑点,介绍了教材处理的特点,并对长期有争议的孪生子效应作了较详尽的剖析。其中特别针对相对论中究竟哪个参考系的钟变慢,通过具体的例子予以分析。

第九讲和第十讲从惯性的本质打开通往广义相对论的窗口。从弱等效原理到强等效原理,介绍了广义相对论的效应,并联系到暗物质、潮汐现象、引力透镜和黑洞等引人入胜的话题。其中用普物的风格讨论了光速在引力场中变慢的物理含义。这对澄清与光速在惯性系中不变是否有矛盾的疑惑应当有所启发。

对使用《新概念力学》教材的教师和学生,我们希望这十讲的内容,可以作为配套的教学参考书。对还未读过《新概念力学》的读者,可以作为《新概念力学》撷英来阅读。

作者

2001年11月

目 录

第一讲 力的表象和能量表象	1
1. 力的表象和牛顿运动定律	1
2. 从牛顿力学到分析力学——经典力学由抽象而深化	3
3. 能量表象	9
4. 结束语	21
第二讲 对称性	22
1. 什么是对称性?	22
2. 对称性原理	35
3. 宇称不守恒	38
第三讲 对称性破缺	43
1. 对称性自发破缺的概念和实例	43
2. 宇宙早期的真空相变与暴胀	50
3. 重子-反重子的不对称性	53
4. 生物界的左右不对称性	58
5. 对称性意味着不可分辨性	65
第四讲 非线性振动浅说	69
1. 分岔 突变	69
2. 自激振荡 极限环	77
3. 同步	83
第五讲 混沌(耗散系统)	92
1. 单摆的运动并不简单	93
2. 奇怪吸引子与混沌	105

3. 混沌吸引子的刻画	115
第六讲 万有引力纵横谈	121
1. 哥白尼拦住了太阳,推动了地球	122
2. 开普勒是如何走出本轮迈向椭圆的?	125
3. 从牛顿的苹果到月亮	130
4. 称量地球和太阳	134
5. 从笔尖下发现的行星到宇宙的边缘	137
6. 太阳系稳定吗?	140
7. 位力定理和负热容	141
8. 看不见的物质	143
9. 宇宙膨胀动力学	149
10. 引力有多大?	150
11. 引力的几何性	151
第七讲 狭义相对论的时空概念	153
1. 伽利略相对性原理	153
2. 旧理论(经典力学)的困难	158
3. 爱因斯坦的假设	163
4. 时空相对性的定性讨论	164
5. 钟慢尺缩效应	168
6. 洛伦兹变换	172
7. 关于钟慢尺缩效应的进一步讨论	178
第八讲 孪生子效应及其狭义相对论解释	182
1. 从孪生子佯谬到孪生子效应	182
2. 孪生子效应的狭义相对论解释	183

3. 对孪生子效应狭义相对论解释的质疑	186
4. 孪生子如何得知对方时光流逝的情况?	188
5. 光子火箭的通讯	193
6. 孪生子效应与广义相对论的关系	195
第九讲 从惯性的本质到(弱)等效原理	196
1. 惯性定律的发现和“绝对空间”	196
2. 对“绝对空间”的批判	200
3. 弱等效原理与局域惯性系	208
4. 潮汐现象与引潮力	214
5. 潮汐在天文上的作用	220
第十讲 广义相对论的时空观	225
1. 广义相对论的建立与时空弯曲	225
2. 等效原理和引力的时空效应	229
3. 几个可观测的广义相对论效应	236
4. 黑洞	242
5. 结语	247

第一讲 力的表象和能量表象

1. 力的表象和牛顿运动定律

在物理科学中,为了具体地描述某种运动的变化过程和运动规律,需要使用一定的概念、符号、图像和物理量等。这些所使用的基本概念、符号、图像和物理量等就构成了描述这种运动的表象。同一种运动可以使用不同的表象。

1.1 力的表象的意义

在经典力学中,通常使用的基本概念和物理量是相对位置、速度、加速度、质量和相互作用力等,赫兹称这种表象为力的表象。

力的表象用位置坐标描述物体(质点)的位置状态,用速度描述物体的运动状态,加速度表征运动状态的变化;又用质量来表征物体所具有的运动内禀性质,用力来描述物体间的相互作用,作为改变物体运动状态的外因。

力的表象的基本框架是由许多先驱(如伽利略等)奠定基础 and 增砖添瓦,最后由牛顿集其大成而建立的。牛顿在《自然哲学的数学原理》前言中指出:

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它现象。

用力表象的牛顿力学以牛顿三大运动定律及万有引力定律为核心,可以解决两类基本问题:一是已知力学系统中的相互作用力和初始状态,求在以后任一瞬间力学系统的位置和运动状态;二是已知力学系统每一瞬间的运动状态,求每一瞬间的相互作用力。

实际上这两类问题往往交织在一起,互相牵制,因此要求一并解决。

牛顿力学除解释和确定了地面附近物体的运动规律(如落体、抛体等)外,还预言了日食、月食和行星的出没时刻,推断未知行星(海王星和冥王星)的存在,发挥了巨大威力,显示了力的表象的辉煌成果。

1.2 牛顿运动定律是自然规律

由于力的表象的基本概念和物理量是力、质量和加速度,这些概念和物理量的定义和计量都和牛顿第二定律(即运动定律)紧密相连,因而往往会被误认为该定律只不过是力和质量的定义。正如我们在本书第九讲“从惯性的本质到弱等效原理”中指出的,惯性定律是一条普遍的自然规律而不是惯性参考系的定义一样,下面我们将要指出,牛顿运动定律是自然规律而不是力和质量的定义。

牛顿运动定律表明力和质量以及加速度之间的定量关系,这个关系究竟是定律(客观规律)还是定义(人为的规定)呢?曾在物理学界引起过一番争论。下面我们来介绍如何从实验结果总结出这个关系,并由此说明它是一个客观规律。

加速度和力的普遍关系:对于一定的物体,外界作用愈强,它所获得的加速度也就愈大。选某一标准物体,以不同的力 F 作用在它上面,有不同的加速度 a ,我们定义 $F \propto a$ (对标准物),然后用它去校正弹簧秤的刻度,作为量度力的标准。

实验证明,对于任何一个物体,用以上方法量度的力作用在它上面时所获得的加速度恒满足:

$$a \propto F, \quad (\text{对任何一个物体})$$

可见加速度与力成正比是一普遍关系,而不是人为的定义(定义只

是对标准物而言的)。这就是说, $\mathbf{a} \propto \mathbf{F}$ 是一客观规律。

加速度和质量的普遍关系: 选某一定大小的标准力, 作用在不同的物体上, 由它们所获得的加速度的大小来量度物体的惯性; 定义质量 $m \propto 1/a$ (对标准力)。

实验证明: 不管任何大小的力作用在不同的物体上, 下面的关系同样成立,

$$\mathbf{a} \propto 1/m, \quad (\text{对任意力})$$

可见加速度与质量成反比的关系是普遍的, 是机械运动的客观规律性的反映。

由上述结果可见, 物体所获得的加速度与其所受的外力成正比, 并与物体的质量成反比。即

$$\mathbf{a} \propto \mathbf{F}/m.$$

写成等式就是

$$\mathbf{F} = k\mathbf{m}\mathbf{a}.$$

其中 k 是比例常数, 与各物理量所选用的单位有关, 如果选取适当的单位, 令 $k = 1$, 则有

$$\mathbf{F} = \mathbf{m}\mathbf{a}.$$

牛顿第二定律的文字表述为: 在受到外力作用时, 物体所获得的加速度的大小与外力矢量和的大小成正比, 并与物体的质量成反比, 加速度的方向与外力矢量和的方向相同。总而言之, 牛顿运动定律的确是通过实验总结出来的自然规律而不是力和质量的人为定义。

2. 从牛顿力学到分析力学 —— 经典力学由抽象而深化

一切科学的(正确的、非瞎说的)抽象, 都更深刻地反映着自然, 是对事物本质更深入的认识和概括。18~19世纪分析力学的建立, 早已不是牛顿力学原始思维格式的简单延续, 它以其框架的

更加完整和普适,使经典力学跨入更高阶段,成为后来长驱直入地进入近代物理宏伟殿堂的阶梯。

2.1 分析力学的普遍意义

大家知道,确定一个质点的位置状态需要三个独立的坐标。随着力学系统愈来愈复杂,所需确定的坐标数就愈来愈多。然而,在一个力学系统中,并非所有的坐标都是独立的。例如一个限定在某一曲面上运动的质点,确定它的位置的独立坐标数就只有两个;若限定质点只能在一曲线上运动,则它的独立坐标就只有一个。又如刚体,由于其中的任意两个质点间的距离不变,尽管一个刚体中有无限多个质点,但实际上只有六个坐标是独立的。

以上所说的种种限制质点(物体)自由运动的条件称为约束,而确定力学系统所需的独立坐标数则称为系统的自由度。限制力学系统自由运动的约束可以用以坐标为变数的方程来表示,系统所受的约束愈多,约束方程的数目也愈多。自由度就等于确定系统各质点的总坐标数减去约束方程的数目。

若决定系统位置状态的总坐标数为 N , 系统的约束方程数为 n , 则系统的自由度为 $s = N - n$. 任意选取 s 个独立变量 $q_i (i = 1, 2, \dots, s)$, 则可以通过约束方程解出系统笛卡儿坐标 $x_j (j = 1, 2, \dots, N)$ 与独立变量 q_i 的函数关系。换句话说,只要确定 q_i , 就可以确定 x_j . 因此把 q_i 称为广义坐标, q_i 的时间导数 dq_i/dt 称为广义速度。引入广义坐标的直观意义在于,描述力学系统的变量减少了,求解就会简单一些。

必须指出的是,引入广义坐标已完全脱离开坐标原来的几何意义,由此而引伸并建立起来的“分析力学”,是对力学运动更抽象的描述。难怪传说对分析力学的建立作出重要贡献的拉格朗日(J. L. Lagrange)曾对人炫耀说,他的著作《分析力学》全书中没有一

张几何图形!

在建立分析力学的最初阶段时,还引入广义力等概念,可见它仍属力的表象的范畴。此阶段最重要的概念是虚位移和虚位移的功(又称虚功)。对于力的表象,约束的意义在于通过施加约束力而限制力学系统的运动,如物体在桌面上运动,桌面施给物体支承力,使它不致下坠;又如物体受绳子的束缚而作圆周运动,是由于绳子施加向心力于物体上的结果,如此等等。在可忽略耗散作用的理想约束情况下,约束力总是垂直于虚位移(可能的位移,如桌子的支承力和物体的滑动方向垂直,绳子的向心力和作圆周运动的物体运动方向垂直等)。这就使得虚位移的功(虚功)总是等于零,这就是虚功原理,它是分析力学的基本原理之一。换句话说,理想约束不会改变力学系统的能量,这就使得能量在描述系统的运动状态中达到了举足轻重的地位。

沿着这条思路,加上使用泛函分析的数学方法,经达朗贝尔(D'Alembert)、欧拉(Euler)、拉格朗日(Lagrange)、哈密顿(Hamilton)、雅可比(Jacobi)、泊松(Poisson)和庞加莱(Poincaré)等人高度创造性的努力,终于建立起现在形式的力学新体系——分析力学。新力学体系的基本特色是与具体力无关的普遍形式,用作用量、能量、动量和抽象相空间,取代加速度、质量、力和直观的三维平直几何空间。

由于原理的普适性和形式的普遍性,分析力学不但适用于经典力学、经典电磁场理论和连续介质力学等,还可推广应用于近代物理学中的相对论和量子力学。

2.2 从分析力学看时空对称性和守恒定律

分析力学中,普适运动方程——哈密顿正则运动方程为:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t}, \quad \frac{dp_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_i}, \quad \frac{dq_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_i}. \quad (1.2)$$

式中 $H(p, q, t)$ 为哈密顿量, 在一定的条件下等于系统的动能加势能, 即

$$H = T + V = E, \quad (\text{系统的总能量}) \quad (1.3)$$

q_i 为第 i 个广义坐标, p_i 为第 i 个广义动量。显然, 若 H 中不显含 t , 则

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} = 0, \quad H = \text{const.} \quad (1.4)$$

即能量守恒。若 H 中不显含 q_i , 则

$$\frac{dp_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q_i} = 0, \quad p_i = \text{const.} \quad (1.5)$$

即广义动量 p_i 守恒。

以上的结果具有非常重要的物理意义。表征系统特征的哈密顿量 H 不显含时间, 意味着系统具有时间平移对称性(或不变性); 换句话说, 具有时间平移对称性的系统, 其能量守恒。此外, 如果 H 不显含某个代表线量的广义坐标, 即系统具有该坐标的平移对称性(不变性), 则系统相应的线动量守恒; 如果 H 不显含某个代表角量的广义坐标, 即系统具有该坐标的转动对称性(不变性), 则系统相应的角动量守恒。这反映了时空的对称性与三个重要的守恒定律有着紧密的联系。

2.3 不用分析力学看时空对称性和守恒定律

用分析力学从时空对称性导出守恒定律是直截了当的, 但在普通物理课程中不能用。现在我们用普通物理的方法讨论能量、动量和角动量等守恒定律与时空对称性的关系。这就不能那样严格和普遍了。

首先看能量守恒定律。从宏观的角度看, 物体系有保守系和非

保守系之分,前者机械能守恒,后者则不然。从微观的角度看无所谓耗散力,在一切系统中,粒子与粒子之间的相互作用可通过相互作用势(分子力势能)来表达。时间均匀性,或者说,时间平移不变性意味着,这种相互作用势只与两粒子的相对位置有关,亦即,对于同样的相对位置,粒子间的相互作用势不应随时间而变。在这种情况下系统的总能量(动能 + 势能)自然是守恒的。我们可以举一个例子来说明,在相反的情况下能量可以不守恒。广东省从化山区建设了一个抽水蓄能电站,夜间用电低谷时抽水上山;白天用电高峰时放水发电。利用昼夜能源的价值不同,可以获得很好的经济效益。倘若昼夜变化的不仅是能源的价值,而且是重力加速度 g (它代表着万有引力的强度),从而水库中同样水位所蓄的重力势能 mgh 作周期性的变化,则抽水蓄能电站获得的不仅是经济效益,而且是能量的赢余。于是,永动机的梦想实现了。时间的平移不变性不允许出现这种情况。

其次看动量守恒定律。如图 1-1 所示,考虑一对粒子 A 和 B , 它们的相互作用势能为 U 。现将 A 沿任意方向移动到 A' (见图 1-1a), 这位移 Δs 造成势能的改变

$$\Delta U = -f_{BA} \cdot \Delta s,$$

(抵抗 B 给 A 的力所作的功)

若 A 不动,将 B 沿反方向移动相等的距离到 B' (见图 1-1b), 则势能的改变为

$$\Delta U' = -f_{AB} \cdot (-\Delta s) = f_{AB} \cdot \Delta s.$$

(抵抗 A 给 B 的力所作的功)

上述两种情况终态的区别仅在于由两粒子组成的系统整体在空间

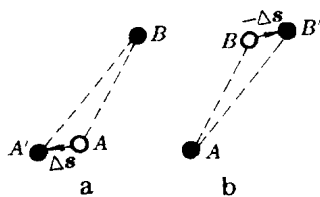


图 1-1 空间平移
不变性与动量守恒

有个平移,它们的相对位置是一样的: $A'B = AB'$. 空间均匀性,或者说,空间平移不变性意味着,两粒子之间的相互作用势能只与它们的相对位置有关,与它们整体在空间的平移无关。从而两种情况终态的势能应相等:

$$U + \Delta U = U + \Delta U',$$

$$\text{即} \quad \Delta U = -f_{BA} \cdot \Delta s = U' = f_{AB} \cdot \Delta s.$$

Δs 是任意的,故有

$$f_{BA} = -f_{AB}.$$

要知道,“作用力和反作用力大小相等,方向相反”和“动量守恒”两种说法是等价的。于是,我们从空间的平移不变性推出了动量守恒定律。

最后,我们看角动量守恒定律。仍考虑一对粒子 A 和 B . 固定 B , 将 A 沿以 B 为心的圆弧 $\Delta \hat{s}$ 移动到 A' (见图 1-2), 从而相互作用势能改变

$$\Delta U = - (f_{BA})_{\text{切}} \Delta \hat{s},$$

空间各向同性意味着,两粒子之间的相互作用势能只与它们的距离有关,与二者之间连线在空间的取向无关。所以上述操作不应改变它们之间的势能,从而 $\Delta U = 0$, 即相互作用力的切向分量 $(f_{BA})_{\text{切}} = 0$, 或者说,“两粒子之间的相互作用力沿二者的连线”。这说法与“角动量守恒”是等价的。于是,我们从空间的各向同性推出了角动量守恒定律。

2.4 定律和法则的层次

物理学各个领域里有那么多定理、定律和法则,但它们的地位并不是平等的,而是有层次的。例如,力学中的胡克定律,热学中的物态方程,电学中的欧姆定律,都是经验性的,仅适用于一定的物

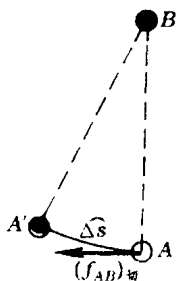


图 1-2 空间各向同性与角动量守恒

料,一定的参量范围。这些是较低层次的规律。统帅整个经典力学的是牛顿定律,统帅整个电磁学的是麦克斯韦方程,他们都是物理学中整整一个领域中的基本规律,层次要高得多。超过了弹性限度胡克定律不成立,牛顿定律仍有效;对于晶体管,欧姆定律不适用,麦克斯韦方程组仍成立。是否还有凌驾于这些基本规律之上更高层次的法则?是的,对称性原理就是这样的法则,由时空对称性导出的能量、动量等守恒定律,也是跨越物理学各个领域的普遍法则。这就是为什么在不涉及一些具体定律之前,我们往往有可能根据对称性原理和守恒定律作出一些定性的判断,得到一些有用的信息。这些法则不仅不会与已知领域里的具体定律相悖,还能指导我们去探索未知的领域。当代理论物理学家(特别是粒子物理学家),正高度自觉地运用对称性法则和与之相应的守恒律,去寻求物质结构更深层次的奥秘。

3. 能量表象

从分析力学的建立和发展可见,能量和动量已逐渐取代质量和力的地位,成为表述运动过程的基本概念和物理量。以能量和动量作为基本概念和物理量的表象称为能量表象。在经典力学中,力的表象和能量表象是等价的,它们之间可以互相导出,并没有实质上的差异。但对于近代物理,能量表象不仅优于力的表象,而且当力的表象被近代物理的某些实验否定时,它也能作出正确的结论。

3.1 从能量表象导出力的表象

从力的表象导出能量表象我们是熟知的了;反过来我们也可从能量表象导出力的表象。下面以动量守恒定律为例,导出质量和力的概念。

动量守恒定律是惯性参考系中空间平移不变性的直接推论,