

力学

学习导引

LIXUE XUEXI DAOYIN

LIXUE XUEXI DAOYIN

■ 许钟城 主编



GUANGXI NORMAL UNIVERSITY PRESS

广西师范大学出版社

力学

学习导引

LIXUE XUEXI DAOPYIN

许钟城 主编



GUANGXI NORMAL UNIVERSITY PRESS

广西师范大学出版社

· 桂林 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

力学学习导引 / 许钟城主编. — 桂林: 广西师范大学出版社, 2009.3

ISBN 978-7-5633-8305-4

I. 力… II. 许… III. 力学—高等学校—教学参考资料
IV. O3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 027494 号

广西师范大学出版社出版发行

(广西桂林市中华路 22 号 邮政编码: 541001)
网址: <http://www.bbtpress.com>

出版人: 何林夏

全国新华书店经销

广西南宁华侨印务有限责任公司印刷

(广西南宁市北湖南路 20 号 邮政编码: 530001)

开本: 720 mm × 960 mm 1/16

印张: 15 字数: 268 千字

2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

印数: 0 001~2 000 册 定价: 27.00 元

如发现印装质量问题, 影响阅读, 请与印刷厂联系调换。

《力学学习导引》编委名单

主 编:许钟城

副主编:彭金松 许敏明 钟友坤 梁玉娟 蒙成举

编 委:韦世滚 文明春 石道明 卢森锴 刘海英

许明生 许钟城 许敏明 苏建欢 杨雄玲

何奇文 言经柳 张大平 陆安山 钟友坤

施家添 莫建平 黄安甲 黄玛莉 梁玉娟

彭金松 蒙成举 蒋志年 覃 泽 覃 铭

赖家胜 曾令宏 曾宪彪 潘大胜 潘彩娟

誉其胜 盘世准

力学是物理学专业最重要的课程之一,是进入大学学习的第一门专业课,是整个普通物理学的前导和后继课程的基础。力学内容具有系统完整、理论严谨、应用广泛等特点,由于学生初学高等数学和未掌握学习方法等问题,因此学起力学来困难重重。

漆安慎、杜婵英编的《力学》是高等师范院校物理学专业的试用教材,该书系统完整,理论严谨,由浅入深,层次分明,受到读者的欢迎。为此,我们配合这本教材第二版编写了学习导引,目的是让学生阅读教材时做到主次分明,心中有数,能够集中精力掌握各章节的主要内容。

本书的特点是:按照教材的章节顺序编排,每章均由三个部分组成,它们是学习要求、基本规律、解题指导。对每一个概念、规律都有学习注意事项,每一章都有本章解题指导,每一个例题都有小结论,以帮助读者了解力学的知识,帮助读者学好力学。此书的习题提示将另册出版。

本书既适用于使用漆安慎、杜婵英编的《力学》一书的高等院校物理学专业的师生作参考书,由于力学的基本规律是不变的,其解题方法相似,因此也适用于使用其他力学教材的高等院校师生作参考书,也可作为中学物理教师在学习时的参考书。

出版说明 (代序)

力学是物理学专业最重要的课程之一,是进入大学学习的第一门专业基础课,是整个普通物理学的前导和后继课程的基础。

力学内容具有系统完整、理论严谨、应用广泛等特点,而且力学基本内容、规律在科学上已经很成熟。但是不管是从教学角度考虑,还是从学生学习的深度考虑,还是有许多问题值得进一步探讨。

漆安慎、杜婵英编的《力学》一书是高等师范院校物理学专业的试用教材,也可以作为其他院校师生及中学教师的参考书,该书概念清楚、由浅入深、层次分明,书后还附有历史资料和提高性的内容,受到了读者的欢迎。

本书是配合这本教材第二版的学习指导书。全书按照教材的章节顺序编排,每章均由学习要求、基本理论、解题指导三个部分组成(第一章、第十二章除外),各部分的编写意图和教学功用简介如下:

一、学习要求

1. 学习要求。学习要求是根据教学大纲的要求和教学内容提出的,目的是让学生阅读教材时做到主次分明,心中有数,有的放矢,能够集中精力掌握各章的主要内容。对于力学知识的要求,根据学生的特点,可把知识分为三个层次:

①了解。主要是指对物理现象、物理概念和物理规律有初步认识,能了解它的

要点大意。

②理解。主要是反映对知识有进一步的认识,了解知识的确切含意,并能用来分析、解决简单现象和问题及进行计算。

③掌握。主要是指能比较熟练地运用概念和规律,比较灵活地分析解决一些比较简单的综合性、灵活性和应用性问题。

2. 学习重点。在学习要求中简要地列出应着重理解的重点知识。重点知识在知识结构中处于关键的中心地位。当掌握了重点知识的确切含义,应用得比较熟练和灵活时,这一知识在整个章、节、单元之中的地位和联系就日益明确起来。

3. 学习难点是指根据知识的深浅程度、学习条件环境、年龄特征等提出在学习比较难以理解的知识,以引起学生的重视。有些知识常常既是重点,也是难点。往往想方设法突破了难点,掌握了知识,实际上就掌握了重点知识。

二、基本理论。由基本概念、基本规律组成。

1. 基本概念。概念的重要意义是:物理概念是物理学最重要的基础知识;让学生掌握好物理概念是物理教学的关键;物理概念教学是培养能力,开发智力的重要途径。

在介绍概念时,注意了下面几个问题:①明确建立概念的事实依据和形成概念的抽象概括方法。②理解物理概念的内涵,它指的是概念所反映的物理现象、物理过程所特有的本质属性。③了解物理概念的外征,它是指具有概念所反映的本质属性的对象。通常说的概念的适用范围就是指此概念的外征,例如重力、弹性力、摩擦力、压力、惯性力等就是这一概念的外征。④了解概念与有关概念的联系与区别,例如:功与能、动量与动量矩的区别等。了解了概念之间的区别,学生就能分清不同概念所反映的不同本质属性,避免概念之间的混淆不清,这对于正确理解概念,是十分必要的。⑤学会运用概念,学以致用是我们的教学目的,也是概念教学的一个基本要求,因为只有通过运用,学生才能真正掌握概念。⑥每个概念都有“注意事项”,主要是如何理解此概念,注意哪些问题,概念之间比较,概念的意义、应用和适用条件等。

2. 基本规律。物理规律反映了物理现象、物理过程在一定条件下必然发生、发展和变化的规律,它反映了运动变化的各个因素之间的本质联系,揭露了事物本质属性之间的内在联系,在一定意义上说,物理规律反映了在一定条件下某些物理量之间内在的必然联系。

在学习物理规律时,注意如下几点:①把握新旧知识的联系和建立物理规律的事实依据,懂得研究物理规律的方法。②理解物理力学规律的物理意义。③明确物理规律的适用条件和范围。如动量守恒定律,其条件是 $F_{\text{外}}=0$ 或 $F_{\text{外}} \ll F_{\text{内}}$,其适用范围研究的对象是质点(组)。④认清所研究的物理规律与有关的物理概念和物理规律之间的关系。物理规律总是与许多物理概念紧密联系在一起,与某些物理规律也互相关联,学生应当把物理规律与和它相关的物理概念和物理规律之间的关系搞清楚。例如动量矩定律 $M = \frac{dr \times mv}{dt}$,必须理解力矩 M 、动量 mv 、位置矢量 r 、动量矩 $r \times mv$ 的概念,它们之间的关系是质点受到的外力矩等于动量矩对时间的变化率。⑤学会运用物理规律说明和理解现象,分析和解决实际问题。对于重点物理规律,不仅要求学生理解,而且要求会灵活运用,因为掌握物理的目的就在于能够应用物理规律去解决问题。⑥每一个规律都有注意事项。主要介绍力学规律的物理意义、适用范围、适用条件、与其他物理概念的关系、规律的应用等。

三、解题指导。此部分由解题指导、习题类型和例题三个部分组成。

1. 解题指导。着重指导学生的解题思路和分析方法,针对学生在解题中常见的错误,引导学生利用正确的解题途径规范地解答习题。

要求学生:在解题中着重分析解题思路、方法和关键;对数学结果,注意与物理图象相联系,阐明物理意义,培养学生清晰的物理思想。

2. 习题类型。习题类型是根据该章的知识内容、知识结构和力学的概念和规律的应用,然后分门别类,组成习题类型。

3. 例题。学生在解题过程中常常会因各种困难未能及时解决而感到苦恼,不但会影响学习进度,甚至会使其丧失学习信心。为此,我们精选了一些典型的或难度较大的例题,注明解题方法,每个例题都写出小结,以总结解答此例题的方法、策略、注意事项和应用的观念和规律。有些例题采用多种方法求解,开阔学生解题思路,培养他们灵活运用理论解决实际问题的能力。

为此,我们对书中的习题给出解此题目应该应用什么知识、规律和方法。给学生提供一些提示,以启发学生的思维,提高其解题能力,进一步复习、消化本章的有关内容,亦有助于教师借此了解学生的学习动态和对内容的掌握程度。

出版《力学学习导引》的目的在于:①对学习还不够主动的学生来说,可以得到启发,找到进一步提高学习能力和改进学习方向。对学习比较主动的学生也可以获得更为丰富的知识,从而使各种不同程度的学生都能从中得到教益。②为上

力学课程的教师提供一本教学参考书。③为社会青年、函授生提供一本自学教学参考书。

本书的编写工作主要由河池学院的教授、副教授和讲师负责。许钟城教授负责本书的策划、组织和具体编写工作。

柳州师专的曾令宏、曾宪彪、石道明；桂林师专的莫建平、刘海英；钦州学院的张大平、陆安山；梧州职业技术学院的黄安甲；贺州学院的黄玛莉、杨雄珍；百色学院的覃铭、潘彩娟、潘大胜；南宁师专的言经柳、蒋志年、誉其胜、盘世准；河池学院的许钟城、韦世滚、彭金松、梁玉娟、许敏明、钟友坤、蒙成举等作为编委，提供了材料，提出了编写方案，并审阅了稿件。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳切希望兄弟院校的师生和广大读者批评指正。

许钟城

2008年6月8日

目 录

第一章 物理学与力学	1
一、物理模型	1
二、时间和长度的测量	3
三、单位制和量纲	5
四、数量级估计	8
五、参考系、坐标系与时间坐标轴	10
六、怎样学习物理学	17
第二章 质点运动学	18
一、学习要求	18
二、基本理论	19
三、解题指导	32
第三章 动量定量及动量守恒定律	42
一、学习要求	42
二、基本理论	43
三、解题指导	57
第四章 动能和势能	68

一、学习要求·····	68
二、基本理论·····	69
三、解题指导·····	81
第五章 角动量·····	89
一、学习要求·····	89
二、基本理论·····	90
三、解题指导·····	95
第六章 万有引力定律·····	100
一、学习要求·····	100
二、基本理论·····	101
三、解题指导·····	106
第七章 刚体力学·····	111
一、学习要求·····	111
二、基本理论·····	112
三、解题指导·····	126
第八章 弹性体的应力和应变·····	137
一、学习要求·····	137
二、基本理论·····	138
三、解题指导·····	147
第九章 振动·····	152
一、学习要求·····	152
二、基本理论·····	153
三、解题指导·····	169
第十章 波动和声·····	179
一、学习要求·····	179
二、基本理论·····	180
三、解题指导·····	194
第十一章 流体力学·····	203
一、学习要求·····	203
二、基本理论·····	204
三、解题指导·····	222

第一章 物理学与力学

一、物理模型

(一) 物理模型

物理学中被研究的对象称为客体。客体都具有多方面的性质(如几何形状与大小、化学性质、电荷性质及导电性能等)。但是,研究任何一个具体的物理现象,客体的多方面性质中往往只有某些因素起决定性作用,而另外一些因素只起次要作用或完全不起什么实质性的作用。因此,在不影响事物发展过程和获得正确结论的前提下,为了抓住事物的本质,常常突出客体中与被研究的物理现象有关的主要因素,而忽略那些次要因素。这样,比较复杂的客体就简化成一种理想化与抽象化了的东西——物理模型。

必须注意,同一个客体,在研究不同的物理现象时,往往用不同的物理模型来代替它。模型不能随便选用,而应能正确地反映出客体在被研究的物理现象中起主要作用的因素。

常用的模型有:质点、刚体、完全弹性体、理想流体、弹簧振子等。

(二) 质点——一个理想的模型

质点是一个理想模型,是力学中一个十分重要的概念。它的重要性表现在:当物体的大小和形状对于所研究的问题无关紧要时,可以把物体当成一个质点,

使问题简化。把一个物体看做一个质点,实际上就是突出物体具有质量和占有位置这两个根本性质,而忽略了物体的大小和形状。

质点是具有质量而没有大小的物体,物体是否可以看成质点,应视所讨论问题的具体情况而定。具体地说,要看把该物体抽象成质点后,是否能反映该物体在所研究问题中的主要特征,这里重要的是物体的相对大小和所研究问题的性质。

例如:在研究铁饼的运动轨道时,就可以把铁饼看做一个质点。在研究炮弹飞行的大致弹道时,也可以把炮弹当做质点。研究地球绕太阳公转时,因为地球的直径(约 13×10^6 m)比它与太阳的距离(约 15×10^{11} m)小得多,可以忽略不计,所以我們也可以把地球看成质点。

这里我们说某物体在所研究的某个具体问题中可以看成质点,而不是在所有问题中都可以把该物体看成质点。例如,当我们研究抛出的铁饼绕它的中心旋转时,或研究空气阻力对于炮弹飞行的影响时,就不能再把铁饼或炮弹看成质点。当我们研究地球的自转时或是地球本身的其他问题时也不能把地球看成质点。所以同一物体能否被看做质点,完全取决于我们所研究的问题的性质。

质点是一个理想的模型,当我们研究运动物体的位置及其变化时,通过把物体或物体的一个小部分当做质点,就可以在一定的阶段上把问题加以简化。例如在弹道问题中,我们首先把炮弹当做质点来看,可以粗略地算出弹道的形式、射程等。然后再研究空气阻力问题、炮弹本身的旋转问题等,把理想的弹道加以修改,得出更接近于实际弹道的运动轨道形式来。在本课程中还会遇到刚体、理想液体这样一些理想模型,我们要注意学会利用理想模型来分析和解决问题。

在物体中设一固定坐标系,当物体运动时,如果 x 、 y 坐标轴始终和它们原来的方向保持平行,这种运动叫做平动。实际物体做平动时,不管它的大小和形状如何,都可以看做质点运动。因为在做平动的物体中每一点的位移和其他各点的位移相同,所以每一点的运动都可以代表其他点的运动。

一般说来,如果所研究的问题不涉及物体本身的转动或物体各部分的相对运动,只研究它的平动部分,就可以把运动物体视为质点。例如:汽车行驶时,其内部机械部分运动是十分复杂的。如果研究汽车在多少时间内跑出多远,我们关心的是汽车的整体运动,而不是汽车个别零件的运动,汽车的形状和大小可以忽略不计,因此可以把它当做质点来处理。但在研究空气阻力对汽车运动的影

响时,汽车的形状和大小就不能忽略,因此就不能把它看做质点了。

同一个物体,在有的问题中可以看做质点,而在另一些问题中则不能,这取决于该物体的大小和形状在所讨论的问题中,是否处于无关紧要的地位。

在不能把物体看做一个质点的问题中,可以把该物体分割成很多体元,而每个体元都足够小,以至于在所讨论的问题中可以看做质点,对于每个这样的体元,我们可以运用质点力学的规律,把所有体元叠加起来就可以得到整个物体的运动规律,这是质点概念重要性的另一表现,质点组力学和刚体力学就是这样去处理问题的。

注意,不能把质点与微观粒子混同起来,质点是没有大小和形状但具有宏观物体质量的理想模型,它并不是真实存在。微观粒子,如原子、电子等都具有一定的大小,但质量微小,正因为微观粒子的质量微小,因而不服从经典力学的运动规律,而遵从量子力学规律。

为了突出与所研究的问题有关的主要因素,忽略一些影响很小的次要因素,抓住本质,解决问题,从而建立理想模型,这种研究问题的方法,在物理学中是经常运用的。

二、时间和长度的测量

(一)空间和时间的测量标准

物体的运动不能离开时间和空间(可归结为长度),因此,必须首先研究物理学中时间和长度的测量问题。

由于生活、生产和科学研究的需要,人们曾经制定了一系列测量时间和长度的标准。为适应科学文化交流的需要,国际上制定了国际单位制,国际单位制中规定测量长度和时间的单位分别是米(m)和秒(s)。

1983年10月,第十七届国际计量大会规定:1 m 是光在真空中于 $1/299\,792\,458$ s 内光程的长度。即真空中的光速值为 $c=299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1967年第十三届国际计量大会规定:1 s 等于铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 $9\,192\,631\,770$ 个周期的持续时间。

在物体运动过程中,为了把各时刻物体相对于参考系的位置定量地表示出来,还需在参考系上选择适当的坐标系以及安放在坐标系各处的同步的时钟,时

钟用来记录各个时刻,坐标系用来记录运动物体的空间位置。

(二)时间的测量

我国最早的计时仪器有“圭表”和“日晷”,分别利用太阳的影长和影的方向计时;其后又有“漏刻”,以静水的周期性漏滴作为计时的基础;唐、宋时期制造的水运浑天仪和水运仪象台,利用齿轮传动机构,将计时精度提到一个新的高度。后者堪称世界上最古老的天文钟。古代欧洲也采用水漏和沙漏计时,直到 12~13 世纪,才有用齿轮传动的钟。至今,机械传动的钟表仍是日常生活中常用的计时仪器之一。

但机械钟表的精度不高,日差可达数秒,近年来,基于晶体振荡和电子技术的电子钟表得到了广泛的应用,晶体振荡器具有很高的稳定性,使电子钟表的计时准确度大大提高,日差常不到 1 s。基于电子技术的电子振荡器,可使振荡周期仅为 1 s 的 10 的若干次方分之一,配以适当的计数技术,可以对比秒短得多的短时间进行测量,并使计时数字化。利用现代电子技术,已能制造出周期约为 10^{-12} s 甚至更短的振荡器,这使时间测量的精度大大提高。

比 10^{-12} s 更短的时间,例如某些基本粒子的寿命,常用它在感光乳剂中留下的径迹长度来测量,由于基本粒子通常以接近光速的速度运动,这样测得的时间(寿命)常需经过相对论修正。

对于比年长得多的时间,常用的测量方法是半衰期法,例如碳-14 的半衰期是 5 000 a,通过测量有机物中碳-14 的剩留量,就能估计出该有机体的年龄,铀的一种同位素的半衰期约 10^9 a,通过对海洋中铀的测量,测得地球本身的年龄约为 5×10^9 a。

(三)长度的测量

通常用米尺测量长度,当不能用米尺直接量度长度(例如山的高度)时,可以通过三角法进行间接测量。较小的长度,例如细丝的直径,可用游标卡尺和螺旋测微器测量,精度分别可达 10^{-1} mm 和 10^{-2} mm。

很小的长度常借助光学方法测量,细菌和细胞的线度可用显微镜量度,薄膜厚度、平面的平整度受到光的衍射的限制,其精度不能小于光的波长(可见光约

10^{-7} m, X 射线约 10^{-10} m)。由于电子的德波罗电波长更短(约 10^{-12} m), 电子显微镜(包括透射电镜和扫描电镜)的分辨精度比光学显微镜高得多, 对于微小的长度, 常用微米(μm , $1\mu\text{m}=10^{-6}$ m)、纳米(nm, $1\text{nm}=10^{-9}$ m)和埃($\text{\AA}$, $1\text{\AA}=10^{-10}$ m)作单位。

对于更小的长度, 例如原子核的直径, 通常只能通过它对入射粒子散射的多少来间接测定。卢瑟福等就曾根据 α 粒子散射实验结果估计出金原子核的直径约为 10^{-12} m。

对于很长的距离, 例如行星、太阳和恒星到地球的距离, 我们可以通过测定雷达波的往返时间或通过三角法进行测量, 前者测出的是绝对值, 后者测出的是相对值, 在用三角法测恒星距离时, 常以地球轨道的直径作为基线, 该基线长度的一半常作为量度天体间距离的单位, 称为天文单位(符号 AU, $1\text{ AU}\approx 1.5\times 10^8$ km)。天文学上常用的长度单位还有光年和秒差距。光年是光在 1 a 中行进的距离(即光在真空中经一年走过的距离), 常用符号 l. y. 表示, 约合 9.46×10^{12} km 或 6.32×10^4 AU。秒差距是地球轨道半径对其张角为 $1''$ 的距离, 符号为 pc, 约合 3.09×10^{13} km 或 2.06×10^5 AU。

对于更远的恒星, 三角法不能应用, 这时可以从星体的亮度和颜色来估计它的距离。

三、单位制和量纲

(一)基本单位和导出单位

基本单位: 直接规定其单位的物理量叫做基本量, 其单位称为基本单位。

导出单位: 不直接规定其单位的物理量称为导出量, 其单位称为导出单位。

注意事项:

(1) 在国际单位制中, 选择七个量作为基本量, 即长度、质量、时间、电流、温度、物质的量和发光强度, 其他所有物理量都是导出量。在力学中只有三个基本量, 它们分别以米(m)、千克(kg)、秒(s)为单位。

(2) 基本单位和导出单位的关系。

确定了基本单位后, 可以通过有关的定义、定律推导出导出单位。

例如力是导出量, 力的单位是导出单位。可以由牛顿第二定律导出力的单

位。通常规定质量为 1 kg 的物体产生 $1\text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的加速度所需要的力是 1 N (牛顿)。因此若选用国际单位, 牛顿第二定律可以表示为

$$F(\text{N}) = m(\text{kg}) \cdot a(\text{m/s}^2)$$

(3) 在曾广泛使用过的工程单位制中, 先规定力和加速度的单位, 然后根据 $F = m \cdot a$ 规定质量的单位, 力的单位是千克力。1 千克力是国际千克原器在纬度为 45° 的海平面上受到的重力。精确的实验测出, 1 千克任何物体在 1 千克力的作用下, 产生的加速度为 $9.806\,65\text{ 米/秒}^2$, 因此有:

$$1\text{ 千克力} = 9.806\,65\text{ 牛顿}$$

在一般情况下, 我们取

$$1\text{ 千克力} = 9.8\text{ 牛顿}$$

加速度的单位是米/秒², 有了力和加速度的单位就可以规定质量的单位了, 在工程单位制中规定, 在 1 千克力的作用下, 产生 1 米/秒^2 加速度的物体质量为 1 工程单位质量, 即:

$$1\text{ 千克力} = 1\text{ 工程单位质量} \times 1\text{ 米/秒}^2$$

工程单位质量和国际单位的关系为:

$$1\text{ 工程单位质量} = 9.8\text{ 千克}$$

使用工程单位制容易造成混乱, 目前国际计量委员会建议一般不采用它。如果遇到工程单位制给出的千克力, 可以将它换算为国际单位制的牛顿再进行运算。

(二) 量纲式

1. 在国际单位制中, 用 L 、 M 、 T 分别表示长度、质量和时间三个基本量时, 力学中的其他任一导出量 Q 与基本量的比例关系可表示为

$$[Q] = L^p M^q T^\tau$$

式中 p 、 q 、 τ 称为导出量 Q 在国际单位制中的量纲指数, 或量纲。公式表示出导出量与基本量的关系, 称为导出量的量纲公式, 或量纲式。例如, 力的量纲公式

$$\begin{aligned} [F] &= [m][a] \\ &= M \cdot L \cdot T^{-2} \end{aligned}$$

所以, 在力中量纲指数分别为 $p=1$, $q=1$, $\tau=-2$ 。