

高等学校教材

980470

力学

上册

梁昆森 编



(第三版)

高等教育出版社

力 学

上 册

(第 三 版)

梁昆森 编

俞 超 陈必武 修订

高等教育出版社

(京) 112号

内 容 提 要

本书第二版，1987年获国家教委高等学校优秀教材一等奖。此为第三版。这次修订，根据教学实践和修订者教学体会，在保持原书特点的同时，调整更换了某些内容、例题和习题，使难度水平适应于物理类各专业的“普通物理学力学部分”的课程。内容为力学，质点运动学，质点动力学的基本定律；运动定律与非惯性参考系；质点动力学运动定理；质点组运动定理，刚体力学；振动与波等七章，以及附录中的微积分初步。章末附有复习题及思考题，书末的附录二、三汇集了各章的习题及答案。

本书的特点是注意数学与物理紧密结合，两者相互启发，物理图象鲜明；通过理论分析与例题示范，训练学生的思考方法与运算能力。

本书可作为综合大学、高等师范院校物理类各专业或其他院校相近专业的教材，也可供中学教师参考。

力 学

上 册

(第三版)

梁昆森 编

俞超 陈必武 修订

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

唐山市印刷厂印装

*

开本850×1168 1/32 印张17.875 字数430 000

1965年11月第1版 1995年4月第3版 1995年4月第1次印刷

印数 0001—3 327

ISBN 7-04-003478-6/O·1052

定价：11.15元

初版序言(摘录)

本书是根据南京大学 1959 年以来物理系(还有天文系)一年级力学讲义编写而成。

我们设想,在一年级力学课开始时,一面采用图象分析进行论述,一面运用初步的微积分、矢量代数作为对照,有利于学生掌握图象方法与运算方法之间的联系,透过数学表达式弄清内在的物理含义。此后,可逐步减少图象方法而代之以运算方法。这样循序渐进,既能学会运用数学工具,又能更好地掌握力学概念的基础。

我们又设想,这样的调整特别有利于突破泛泛的理论陈述,使一年级力学针对学生思想方法的特点,切实帮助他们解除“链式推理”的思想束缚,诱导他们学会通过具体分析,应用力学的一般原则来解决具体问题。运用生动的例题启发他们认识“链式推理”对自己的束缚,并引导他们集中力量攻克 § 19(质点动力学问题)这个重要关键,基本上就可以达到这一要求,为整个课程的顺利进行铺平道路。

我们还设想,这样的调整有利于帮助学生及早地破除“不问条件总是用常量进行思维”的习惯,建立变量的观念。由于学生从高中带来的匀速、匀加速、常力的观念很深,在第一章中需要着重解决这个问题。

这些思考方法上的训练,对学习其他物理课程也有很大好处。

几年的实践初步证实了上述设想。教材的系统性有所加强,学生运用力学知识的能力和学习成绩确实比调整前有所提高,学

习负担有所减轻。当然还很不够。

本书还尝试作到生动有趣。根据我们的体会，生动的例子往往能尖锐地揭露矛盾，使问题解决较透，留下的印象也较深。

本书对回转仪奇特行径的物理实质所作的阐释 (§ 46) 以及对单杠“晚旋”的力学原理所作的阐释 (§ 47) 在其他书籍中尚未见到，是否恰当请读者指教。

本书正文中凡用到微积分运算的段落都用小号字排印，而用到微积分运算的例题则标以 * 号，如果跳过这些部分，并不影响连贯性。

成书以前，南京大学物理系领导多次组织了此教材与其它教材教学实践情况的对比调查研究。作者对组织者、分工审读的同事、以及给编写工作以协助的同事谨表谢意。

本书一定还有很多缺点错误，欢迎同志们提出意见。

梁昆森

1964—1978

第三版 序言

本书出版有年。此次特地约请在南京大学物理系多年使用本书进行教学的俞超、陈必武两位副教授根据多年教学实践以及当前师生实际情况,对本书进行修订。修改了个别提法,调整更换充实了某些内容、例题和习题。修订中,既注意保持原书风格,又适度降低难度水平,以适合广泛院校的物理类各专业“普通物理学·力学”课程的需要。

具体分工如下:俞超负责第一、三、五、七章及相应的习题,陈必武负责第二、四、六章及相应的习题。为了帮助尚未学过微积分的学生,由俞超加写了“附录一 微积分初步”。我参加了修订过程中的集体讨论。

梁昆森

1990年9月

目 录

初版序言(摘录)

第三版序言

绪论	1
§ 1. 物质与运动	1
§ 2. 物理学	3
§ 3. 量度 国际单位制 量纲	5
§ 4. 实际对象的简化 理想化的模型	9
§ 5. 力学	11
第一章 质点运动学	14
§ 6. 空间与时间 参考系	14
§ 7. 直线运动	18
§ 8. 曲线运动 位移	32
§ 9. 速度 速率	35
§ 10. 加速度	37
§ 11. 坐标系的运用	42
§ 12. 直角坐标系	43
(1) 直角坐标系 (2) 矢量及其分量 (3) 质点的位置 (4) 质点的速度与速率 (5) 质点的加速度	
§ 13. 极坐标系	
(1) 极坐标系 (2) 矢量及其分量 (3) 质点的位置 (4) 质点的速度与速率 (5) 质点的加速度	
§ 14. 自然“坐标系”	65
复习问题	70
第二章 质点动力学的基本定律	72
§ 15. 惯性定律 惯性参考系	72
§ 16. 力与加速度 惯性质量	74

	(1) 力的概念 (2) 力的量度 (3) 力与加速度的关系 (4) 惯性质量 (5) 牛顿第二定律 (6) 力是矢量	
§ 17.	力学中常遇到的力 作用力与反作用力	81
	(1) 万有引力 (2) 弹性力 (3) 摩擦力 (4) 力是一种接触作用 (5) 作用力与反作用力	
§ 18.	力的合成与分解算法举例	91
§ 19.	质点动力学问题	96
§ 20.	摩擦力	120
	(1) 干摩擦 (2) 湿摩擦 (3) 干摩擦而带有湿摩擦的特点	
§ 21.	约束运动	138
	复习问题	144
第三章	运动定律与非惯性参考系	147
§ 22.	问题的提出 解决途径	147
§ 23.	平动参考系	149
	(1) 伽利略相对性原理 (2) 平动参考系中的惯性力	
§ 24.	转动参考系(一)	160
§ 25.	转动参考系(二)	169
	(1) 柯里奥利加速度 (2) 柯里奥利力 (3) 质点作一般的“相对”运动 (4) 地球自转对地面上物体运动的影响	
	复习问题	182
第四章	质点动力学的运动定理	184
§ 26.	动量定理	185
§ 27.	动量矩定理	187
	(1) 力对于轴线的力矩 (2) 对于轴线的动量矩(角动量)和动量矩定理 (3) 动量矩守恒原理 (4) 对于点的力矩、动量矩、动量矩定理、动量矩守恒原理	
§ 28.	功	196
§ 29.	势能(位能)	202
	(1) 势能的概念 (2) 如何计算质点在已知的有势力场中的势能 (3) 质点在有势力场中的势能为已知,如何计算相应的有势力 (4) 惯性力“势能”	
§ 30.	动能 动能定理	208
	(1) 动能 (2) 动能定理	

§ 31. 机械能守恒原理	211
§ 32. 功能原理	216
§ 33. 功率	217
§ 34. 有心力	
(1) 有心力 (2) 研究有心力问题的基本方程 (3) 有效势能	
复习问题	229
第五章 质点组动力学的运动定理	231
§ 35. 质点组动力学的困难所在 两体问题	231
(1) 质点组动力学的困难所在 (2) 两体问题 (3) 质心的运动	
(4) 相对的运动	
§ 36. 质心运动定理——动量定理	237
§ 37. 碰撞	248
(1) 对心碰撞(正碰) (2) 斜碰	
§ 38. 动量矩定理	256
(1) 对于轴线的动量矩定理 (2) 质点组的动量矩与质心的动量矩	
(3) 参考系的选择 (4) 动量矩守恒定理 (5) 对于点的动量矩定理	
§ 39. 动能定理	262
(1) 动能定理 (2) 质点组的动能与质心的动能 (3) 机械能守恒原理与功能原理 (4) 参考系的选择	
复习问题	270
第六章 刚体力学	273
§ 40. 刚体——一种质点组	273
(1) 刚体 (2) 刚体是一种质点组,有六个自由度 (3) 刚体的质心 (4) 对于刚体,内力所作功的和为零	
§ 41. 施于刚体的力系的简化	281
(1) 滑移矢量 (2) 特例:共点力系、平行力系 (3) 力系简化的困难及其克服 (4) 力系的简化	
§ 42. 刚体的平衡	286
(1) 刚体的平衡问题 (2) 平衡的稳定性问题 (3) 桁架问题	
§ 43. 刚体的平动	297
§ 44. 刚体的定轴转动	301
(1) 定轴转动的运动学 (2) 定轴转动的动力学基本方程式	

(3) 转动惯量的计算 (4) 惯量张量 惯量主轴 (5) 刚体定轴转动问题举例 (6) 动能定理的应用 (7) 约束反力问题与动平衡问题

§ 45. 刚体的平面平行运动	324
(1) 平面平行运动的运动学 (2) 平面平行运动的动力学	
(3) 滚动摩擦	
§ 46. 刚体的定点运动	344
(1) 没有外力力矩的定点运动 (2) 旋转对称刚体的定点运动	
(3) 两个自由度回转刚体的定点运动	
§ 47. 单杠的“晚旋”	359
(1) 动量矩守恒 (2) 动量矩的计算公式 (3) 晚旋的纵转是怎样产生的	
复习问题	365

第七章 振动与波 367

§ 48. 一个自由度的振动	367
(1) 谐振动 (2) 阻尼振动 (3) 受迫振动 (4) 谐波分析 频谱	
§ 49. 谐振动的合成	391
(1) 方向相同, 频率相同 (2) 方向相同, 频率不同 (3) 方向垂直, 频率相同 (4) 方向垂直, 频率不同	
§ 50. 两个自由度的振动	404
§ 51. 一维波的形成	409
(1) 绳上波的形成 (2) 固体弹性介质里横波的形成 (3) 弹性介质里纵波的形成 (4) 谐波的解析表达式 (5) 能流密度 波强	
[附]弹性模量	425
§ 52. 一维波传播的一些问题	427
(1) 特征阻抗 (2) 反射波 (3) 驻波 (4) 多普勒效应 (5) 色散波的群速	
§ 53. 空间波	448
(1) 波面 波前 波射线 (2) 惠更斯原理 (3) 波的衍射 (4) 波的反射 (5) 波的折射	
§ 54. 波的干涉	454
(1) 波的叠加原理 (2) 波的干涉 (3) 全息照相	

复习问题.....	464
附录一 微积分初步.....	466
附录二 习题.....	496
附录三 答案.....	542

绪 论

§ 1. 物质与运动

自然界的力量是极为伟大的。就拿自然界中极小的一个方面来说，全世界风力的总功率据估计竟达 60 亿马力。设想按 50 亿人口“分配”，每人约可“分得” 1.2 马力。单纯凭借体力，人的功率平均只有 0.1 马力。（人在持续工作中大约有 1/2 马力，短时间使猛劲可以达到 7 马力，但人需要休息与睡眠，按一昼夜平均则只有 0.1 马力。）这就是说，每个人“分到”的风力约为自己体力的 20 倍，每 8 人“分到”一部拖拉机的功率，每 30 人“分到”一部汽车的功率，每 1500 人“分到”一辆机车（火车头）的功率。

单个的人比起自然来是太渺小了。个人远远不足与自然对抗，就连取得生存也是极为困难的。但是生产劳动、社会化，使人比自然更为伟大，在生产斗争中、在对自然的斗争中，取得巨大的成就，改变了整个自然界的面貌，使之打上人的烙印。人，掌握着巨大的动力装备，气势磅礴地改造自然。他要叫高山低头，叫河水让路。人，谁能充分预计你的成就将达到怎样的高度！

人改造自然的伟大力量是从哪里来的呢？这种伟大的力量不是什么神奇的东西。“自由是对必然的认识，…自由是在于根据对自然界的必然性的认识来支配我们自己和外部自然界；…”^①人的力量在于通过实践认识世界，发掘客观规律，并利用它们来征服自然。

① 恩格斯：反社林论。人民出版社 1970 年版，111—112 页。

说到认识世界,凡是没进疯人院、没有被唯心主义哲学蒙蔽的人,都具有这样的素朴的信念:人们生活于其中的世界是客观存在着的。唯物主义则自觉地以这素朴的信念作为其认识论的基础。各种各样的事物,凡是客观的实在,称作物质。“物质是标志客观实在的哲学范畴,这种客观实在是人感觉到的,它不依赖于我们的感觉而存在,为我们的感觉所复写、摄影、反映。”^①

一切物质都在不停地变化——或者说,运动。“就最一般的意义来说,就它被理解为存在的方式、被理解为物质的固有属性来说,它包括宇宙中发生的一切变化和过程,从简单的位置变动起直到思维。”^②有简单的运动,也有复杂的运动;有低级形式的运动,也有高级形式的运动。最简单的运动是位置的改变,即机械运动,其次有分子热运动、电磁过程等物理现象,再其次有化学变化、生物机体所固有的各种过程、还有属于社会现象的各种运动。各种科学的任务就是研究各种运动形式,研究该种运动形式的特殊规律性及其与其他运动形式的相互联系。

在高级的运动形式中,必定包含着较低级的运动形式。例如在化学变化中必然伴随着吸热或放热、膨胀或收缩、变色、放出气体、产生沉淀等等物理现象。又例如在生物机体的各种过程中必伴随有许多物理现象与化学变化;比方说,在呼吸过程中,气体从生物机体外部进入体内或从体内排出体外。这正说明基础学科的重要性。但是,物质的每一种运动形式又各具有质的特殊性,高级运动形式决不能归结为低级的运动形式。例如化学反应决不能归结为仅仅是吸热或放热等物理现象。又例如呼吸过程决不能归结为仅仅是气体的机械运动;将抽气机与打气机的联合动作称为呼吸显然是十分荒唐的。因此基础学科也不能代替其他学科。

① 列宁:唯物主义与经验批判主义。人民出版社1960年版,120页。

② 恩格斯:自然辩证法。人民出版社1971年版,53页。

§ 2. 物 理 学

(1) 物理学

作为基础学科之一的物理学，它的研究对象是比较低级形式的物质运动：机械运动、原子和分子的运动、电磁过程、原子与原子核内部的运动等等。由于较低级运动形式普遍存在于较高级的运动形式中，基础学科之一的物理学在各门自然科学之中占有十分重要的地位。

(2) 物理学与实践

人的认识从实践发生。物理学也是这样，它的发生与发展取决于人的社会实践，其最基本的即是生产活动。一方面这是因为生产活动给科学以生命力。手工业、航海等方面的需要促成了力学在古代产生；热机的使用、提高热机效率的要求促进了热学、热力学的蓬勃发展；近代火箭技术、宇航技术、原子能利用、通讯和自动控制等技术上的需要极为有力地推动了空气动力学、原子核物理学、无线电电子学、半导体物理学等物理学尖端部门的发展。另一方面，还因为任一门学科的发展水平有赖于其技术装备，而这也取决于生产技术发展的水平。

认识又服务于实践。物理学在生产与技术中起着非常重大的作用：(1) 它阐明了生产中广泛利用着的能量转变规律，指出生产所需能量的各种来源。例如原子核物理学提供了原子能，并且还提供了在生产上利用热核聚变能的现实可能性。人们近来又在探讨冷核聚变(室温下的核聚变)有无可能。(2) 它提供物质材料的物理性能，提供制备新材料的理论根据与方法。例如金属物理学已为火箭技术、原子能和平利用提供了耐高温、耐高压、耐核辐射的新合金材料。又如固体强度目前实际上才达到理论极限值的 $1/1000$ ，只要将实际强度提高十倍，一吨钢就可以当十吨钢使用，

就等于使钢的产量变为十倍。(3)它是新技术、新方法的源泉，为其他学科提供新工具、新方法。例如在生物科学、农业与医学中广泛应用的示踪原子，又如半导体技术与固体电子学使无线电电子学得以固体元件化，使无线电电子学向超高频、超小型、超快速、低噪音方向发展。又如超声波、红外线在各方面的广泛应用、物理方法在地下资源探勘中的应用。关于超导电性的研究已提供了时速达四、五百公里的悬浮列车。近年关于高温超导电体的研究获得迅猛进展，以致人们已设想室温下的超导电性。这将给发电、储能、交通、微电子器件带来难以想象的广阔前景。这些真是不胜枚举。

(3) 物理学与辩证唯物主义世界观

在物理学的发展史中贯穿着唯物主义与唯心主义的斗争。

由于物理学的研究对象就是物质，物理学家一般往往持有朴素的唯物主义——机械唯物主义。但是如果他们不懂得辩证法，不理解人对客观事物认识的辩证过程，那么当科学的进一步发展揭发了旧理论的片面性时，他们往往迷惑不解，成为唯心主义的俘虏。知识的相对性原理“在旧理论急剧崩溃的时期以特殊力量强使物理学家接受；在不懂得辩证法的情况下，这个原理必然导致唯心主义”。①

例如在上世纪末与本世纪初，在物理学中有一系列革命的发现：从前认为不可分的原子，竟然具有复杂的结构；放射现象表明甚至原子核也是可分的；从前认为一成不变的质量竟然随着运动速度而改变，如是等等。这一切不过是再一次证实了辩证唯物主义。但有的物理学家由于不懂得辩证法，因而感到迷惑，认为物理学发生了“危机”。经验批判主义者(马赫主义者)则乘机发展“物

① 列宁：唯物主义与经验批判主义。人民出版社1960年版，309页。

理学的”唯心主义,声称“物质消灭了”等等,并且俘虏了不少物理学家。列宁在《唯物主义与经验批判主义》一书中深刻地指出:“‘物质正在消失’这句话的意思是说:迄今我们认识物质所达到的那个界限正在消失,我们的知识正在深化;那些从前以为是绝对的、不变的、原本的物质特性(不可入性、惯性、质量等等)正在消失,现在它们显现出是相对的、仅为物质的某些状态所特有的。…承认某些不变的要素、‘物的不变的实质’等等,并不是唯物主义,而是形而上学的即反辩证法的唯物主义。”^①又例如本世纪二十年代建立起来的量子力学表明微观粒子并不遵守牛顿力学,又有人竟由此否定了微观粒子运动的客观规律性,甚至声称电子有自由意志。

由此可见,在物理学的研究与学习中,必须以辩证唯物主义世界观为指导。

§ 3. 量度 国际单位制 量纲

(1) 量度

人认识事物的过程总是从感性到理性,在探索自然现象的未知领域时,总是首先诉之于观察与实验。在研究自然现象过程中所建立起来的理论又必须经得住实验与实践的考验。由此可见,实验对于自然科学具有多么巨大的意义。实验,那就意味着量度一些物理量并寻求物理量之间的联系。因此,必须对量度给以很大的注意。

要量度某个物理量,首先,需要选定该物理量的比较标准,即单位。单位应体现于具体的事物——原器或其复制品。其次,需要规定该物理量与单位的比较规则。原器与比较规则固然是由人

^① 列宁:唯物主义与经验批判主义。人民出版社1960年版,260页。

们规定的，然而决不是任意规定的。这种规定应该从该物理量的本性出发，使得量度结果具有可重复性与唯一性。至于所作的规定是否能满足以上要求，应由实践加以考验。

(2) 任何一种量度都不是绝对精密的

我们不可能绝对精密地量出一个物理量的值，量度结果总会带有一些偶然因素。例如用米尺量度长度。米尺上最小刻度是毫米，若进行估计还可以量到 $1/10$ 毫米，至于百分之几、千分之几毫米的读数则不知道。改用螺旋测微器，可以量到 $1/1000$ 毫米，至于万分之几毫米的读数还是不知道。利用光学干涉仪，准确度可以大大提高，但毕竟也还是有限的。量度结果的精密度取决于所拥有的设备以及从事量度的细心程度。一般地说，量度所可能达到的精密度与当时的技术水平是相适应的。

量度所得结果既然只具有一定的精密度，我们的量度记录也就应该尊重这个事实。凡是记下来的数字都必须是可以肯定的，不能肯定的数字就不应写出来，以免造成假象。例如说 15.4 克并不同于 15.40 克。15.4 克意味着在量度中未曾能够精密到百分之一克，15.40 克则意味着已能量到百分之一克，只是该位数字恰恰是零。在单纯进行记录时，一般还容易做到这点。但在计算中，往往有不少人喜欢算出很多位数字，以为这样才表示精密；其实这是不尊重客观事实。例如求某物体的密度时，已量得体积 12.5 厘米^3 （准到 0.1 厘米^3 ，大约占所量体积的 1%），质量 15.40 克（准到大约 0.1%）。则密度 $= 15.40 \text{ 克} / 12.5 \text{ 厘米}^3 = 1.23 \text{ 克} / \text{厘米}^3$ 。假如写成密度 $= 1.232 \text{ 克} / \text{厘米}^3$ ，那就造成了假象，好象密度居然可以准到大约 0.1%。

既然量度不可能是绝对精密的，从量度所得资料总结出来的物理学原理、理论也就不可能是绝对准确的。物理学的各个原理、理论只有在一定准确度内才是正确的；更精密的量度可能揭示它