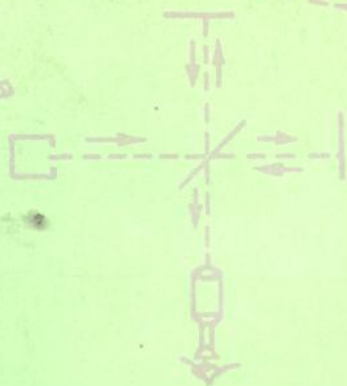
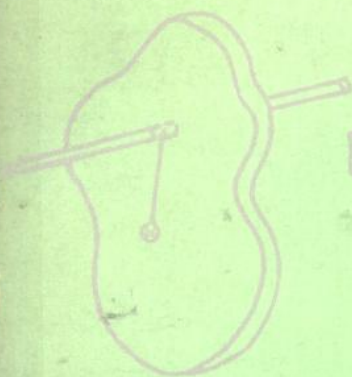


[美] D. KLEPPNER R. J. KOLENKOW 合著

力学引论

宁远源 刘爱晖 合译

人民教育出版社



本书根据美国 McGraw-Hill Book Company 出版的 D. Kleppner 和 R. J. Kolenkow 合著《力学引论》(An Introduction To Mechanics) 1973 年第一版译出。

本书原著是作者在美国哈佛大学、麻省理工学院长期从事教学工作而编写成的一本教科书。全书叙述简练，插图清晰，比较好地处理了数学与物理之间的关系，在基础理论方面充实了目前科学技术中的许多新课题、新成果。书中有例题和习题。

本书可作理工科大学力学、理论力学等课程的教学参考书。

中译本责任编辑：奚静平

力学引论

〔美〕D. Kleppner R. J. Kolenkow 合著

宁远源 刘爱晖合译

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

哈尔滨印刷二厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 20.75 字数 483,000

1980年 12 月第 1 版 1981年 8 月 第 1 次印刷

印数 00,001—13,500

书号 13012-0550 定价 1.80 元

序 言

理工科大学的物理课，传统上是从力学开始的。因为力学是纯粹科学和应用科学的基石。例如，能量的概念，对于研究宇宙的演化、基本粒子的性质以及生物化学反应的机制，都是最根本的。它对于心脏起搏器的设计，对于工业界各种增长限额的分析也是极重要的。但要写一本既生动又能启发理智的导论性力学教程，却有一些困难。力学是一门成熟的科学，表面的简单处理很难对其原理作出令人满意的讨论。企图用加强高深课题的方法来“丰富”其内容，又会走向另一极端，产生一种深奥而庞杂的假象，只是加强了技巧，而没有加深对原理的理解。

本教程是我们先在哈佛大学，更久地是在麻省理工学院从事大学一年级教学多年而写成的。我们力图给力学以引人入胜的形式，为将来在纯粹科学与应用科学领域中的工作，提供一个坚实的基础。我们处理教材的方法和传统上所不同的，主要不是在内容取舍上，而是在于深度和风格方面。虽然如此，这本书还是反映了廿世纪物理学家们所持有的力学观点。

本书主要是为懂得一点微积分、能对简单函数求微分和积分^①的学生而写的。但也曾成功地用于要求和微积分同时开课的情况。（对于这种性质的课程，应把第一章看成是准备知识，暂时推迟矢量运动学的详细讨论。其它的建议列于《致教师》中。）根据我们的经验，对于大多数学生来说，学习中困难根源主要在于如何运

① D. Kleppner 与 N. Ramsey 著“Quick Calculus” John Wiley & Sons, New York, 1965, 一书提供的微积分基础，已经足够。

用数学来解决物理问题，而不是数学技巧本身。掌握微积分的基本内容相对说来是比较容易的，但解题能力的提高却需要细心的指导。我们在全书中提供了大量的例题，以有助于这种指导。有些例题，特别是前几章中的例题，基本上是教学方法方面的。但许多例题则是通过对于物理学上真正重要问题的应用，来说明物理的原理与方法。

第一章是数学导论，主要是矢量和运动学。在整个力学中起着重要作用的矢量变化率的概念，也许是书中最困难的数学概念了。因而，从解析的和几何的两个方面仔细地进行了讨论。特别是几何方法，以后表明，对于形象化地讨论角动量动力学是极其有用的。

第二章讨论惯性系、牛顿定律及某些常见的力。重点讨论牛顿定律的应用，因为，即使用普遍原理分析一个简单问题，开始时也会是一项需要认真对待的工作。分析一个复杂的系统，抓住它的本质，选择适当的惯性坐标系，以及区分力与加速度，这些都是要学到的技能。书中仔细地挑选了大量说明性的例题，以帮助提高这方面的技能。

随后的两章，叙述了动量和能量。第三章是动量，把牛顿定律应用于扩大了系统中。当学生试图用动量去研究火箭及其它含有质量流动的系统时往往发慌。我们解决的途径是对一个系统应用微分的方法，系统的划分，是使得在选定的时间间隔内无质量跨过其边界。这就保证了不致忽视全部动量的作用。这一章以讨论动量的流动而告结束。第四章是能量。讲述了功能定理及其对保守力与非保守力的应用；并通过碰撞问题的讨论，以阐明动量守恒定律与能量守恒定律。

第五章是关于保守力和势能的一些数学方面的处理；在全书的其它地方并不需要这部分内容，但是，有些学生想要得到这个问

题在数学处理上的完整知识,对于他们来说将是有益的.

学生们通常感到角动量与刚体运动的特性难以理解,部分原因是他们缺乏转动的经验,因而不能依靠其感性知识.结果是导论性教程往往不考虑这些问题的重要性而加以忽视.我们发现采用适当的方法后,转动是可以理解的;这些方法是:强调物理上的推理,而不拘泥于数学形式;借助于几何论证;以及提供大量演算的例题.第六章介绍了角动量,并讨论了定轴转动的动力学.第七章对自旋角动量支配的系统应用矢量论证,讨论了刚体运动的一些重要特征.这一章的最后一节里,给出了刚体一般运动的基本分析,以说明如何从简单的物理论证导出欧勒方程.这部分较高深的内容毕竟是选用教材,在我们自己的讲授中通常不讨论它.

第八章讨论非惯性坐标系,这样,牛顿力学原理的论述就完整了.直到目前为止,书中仅仅用了惯性系,是为了避免力与加速度的混淆.我们对非惯性坐标系的讨论侧重于它们作为计算工具的价值,及其对于力学基础的意义.

第九章和第十章分别讨论了有心力运动和简谐振子.这两章虽然没有涉及新的物理概念,但说明了力学原理对物理学中普遍关注的重要问题的应用.由于着重讨论能量,并运用简单的近似算法,从而在很大程度上避免了谐振子问题中复杂的代数演算.

第十一章到第十四章讨论了狭义相对论的原理及其某些应用.我们力图强调相对论的思想和经典的思想之间的协调一致.例如,我们认为:说明经典的守恒定律是如何统一于相对论中的,要比详细讨论所谓的“佯谬”更有意义.我们的处理是简明扼要的,并使复杂的代数运算减至最小程度.第十四章说明对称性的概念在相对论的建立过程中所起的重大作用.虽然我们注意到对象是一年级学生,但这里的概念比起前几章来,困难要大得多.愿意的话,可以略去这一章;但它通过说明对称性如何影响力学原理,从

而提供了活跃的思想方法和强有力的新工具。

不要被动地学习物理学；解决疑难问题是绝对没有别的办法可以代替的。正是通过解题，使学生得到由于对物理原理的真正理解而带来的那种满足和入迷。书中收集的习题是课堂使用多年而发展起来的。有一些题目是简单的，可作为练习；大多数习题着重于基本原理，需要认真思考和努力钻研。皮特·海恩(Peit Hein)有如下格言：

那些值得攻坚的难题，
攻克非易；
它们的价值就在于
使人们在反复努力中获得裨益。

我们正是以这种精神选择了习题，力图使学生为解题而付出的代价是值得的。

我们愉快地感谢对本书做了许多贡献的同事和学生。特别要对贝内德克(G. B. Benedek)教授和普利卡尔德(D. E. Pritchard)教授致以谢意，他们为本书提供了许多例题和习题。我们还应当高兴地感谢瑞克(L. Rieck)和费兹格娜德(M. P. Fitzgerald)，他们愉快地坚持为我们的初稿打字。

D. Kleppner
R. J. Kolenkow

① 摘自«Grooks 1», Piet Hein 著, Copyrighted 1966, The M. I. T. press.

致 教 师

前八章是经典力学的综合介绍,并且构成一学期课程的核心.若以十二周为一学期,一般说来,我们能教完前八章及第九章或第十章的部分内容.但第五章和第七章、第八章中的某些高深问题通常略去,尽管有些学生还是能独立地读完它们.

第十一章、十二章和十三章对狭义相对论作了完整的介绍,第十四章是关于变换理论和四元矢量,为有兴趣的学生提供了较为深入地理解这个问题的机会.我们曾在三周的短期课程中用过相对论这几章的内容,另外,作为第二学期电学和磁学课程的一部分也使用过这几章的内容.

每章后面的习题,一般是按难易程度分类的.它们也是逐渐积累起来的;来自前面各章中的概念与方法,又在本书后面的章节中,重复地提了出来.这是希望在课程行将结束时,学生将获得解决新问题的良好思维能力,例如,对于一个问题他将能做出理智的估计,究竟是从动量还是从能量出发进行探讨;并且,要是第一种方法失败了的话,他会知道怎样用新的方法重新开始.很多学生谈到,他们由于获得这些技能而深感满意.

习题中的很多题目要求文字符号的答案,而不是数字答案.这并不意味着减弱了数字计算的重要性,而是加强用文字符号分析问题的习惯.有些习题给了答案,另一些提供了数值的“答案线索”,便于学生核对其文字符号结果.有些习题是比较难的,需要认真的思考和钻研.因为一次留给学生的难题太多,会使他们受到挫折,所以,每次留题时应难易搭配.

第一章 讲授力学课程,虽然我们倾向于从讨论物理开始,而不是从讨论数学开始,但头几次课讲授机械运动的数学,却有着实际的好处。运动学的概念大部分是简明的,因而首先透彻地掌握它们,就有助于处理第二章牛顿动力学所提出的较难问题。本章和传统上不同的是运用极坐标来讨论运动学。很多学生起初感到这个问题很困难,掌握它需要认真付出很大的努力。但是,我们认为这种努力将不是白费的。首先,由于能顺利地使用极坐标,转动运动学就很容易理解,径向加速度也不再觉得不可思议了。更为重要的,是通过这部分内容的学习,使学生对随时间变化的矢量性质能理解得更深入,更透彻。这是很有用的,因为这种理解不仅简化了第二章中的质点动力学,而且对讨论第三章的动量流动,第六章与第七章中的角动量,以及第八章中的非惯性坐标的应用都是非常重要的。这样,在第一章中为理解变矢的性质而付出的努力,在课程的以后各章里,将陆续收到重要的效益。

如果要求学生在学习本课程的同时,也开始学习微积分,则建议第一章的某些部分推迟讲授。在讲完第一章的前六节后,第二章就可以开始。从例题 2.5 开始,要用到转动运动学,就这一点来说,应当介绍 1.9 节中所提供的概念。有关矢量积分的 1.7 节,可以一直推迟到学生已熟悉积分时再讲授;在这以前,含有积分的例题和习题都要略去。1.8 节是矢量微分的几何解释,是第六章和第七章的必要准备,但不宜过早地讨论。

第二章 本章内容常常是学生第一次认真地试图把抽象的原理应用到具体情况中去。牛顿运动定律并非不证自明的;大多数人是在不自觉地跟随亚里斯多德的思想。我们发现,经过开始的一段不确定的时期后,学生们变得习惯于按照原理而不是凭含糊的直觉去分析问题。最初,一些困难的共同根源是把力和加速度混淆了,所以我们强调要用惯性系;并且,因为要到第八章才讨论

到非惯性坐标系的正确应用，故坚决主张在第八章之前不要用非惯性坐标系。特别是，在前面几章里运用离心力，会引起惯性系与非惯性系间无休止的混乱；而且在任何情况下，用转动坐标系来分析运动是不合适的。

第三章和第四章 推导火箭方程有好几种不同的方法。但是，火箭问题不是唯一的有质量流动问题的，所以，采用易于推广的方法是重要的。还要求这种方法与动量守恒定律协调一致，用更通俗的话来说，就是要有实效。把 3.5 节中的微分方法加以发展，以满足这些要求。这个方法也许不是最好的，但它简单明了，并且有着十分普遍的意义。

在第四章中，我们强调功能定理的普遍性质，以及保守力与非保守力间的差别。虽然引进并解释了线积分，但只需要计算简单的线积分，至于一般的计算方法，不应给予过分的注意。

第五章 本章内容使我们对能量有了完整的概念，同时对势能理论和矢量运算作了有益的介绍。然而，这是比较高深的问题，它只会引起爱好数学的学生的兴趣，其结果在本书其它地方并不需要，所以建议将本章作为选用教材，或者作为一个专题。

第六章和第七章 在初等力学中，很多学生感到角动量是最难的物理概念。主要的概念障碍是想象角动量的矢量性质。所以在这两章中，我们反复强调角动量的矢量性质。特别是刚体运动的许多特性，依靠对前几章讲述的变矢概念，是可以形象地了解的。强调刚体运动的定性特征，要比强调它的形式方面——例如转动惯量的张量——更为有利。愿意的话，这种定性的讨论可以适当地坚持下去，就象附注 7.2 中对回转仪章动的分析那样。7.7 节中对欧勒方程的基本讨论，打算只作为选用教材。虽然第六章、第七章的内容比较深，但很多学生还是能从物理学的角度理解角动量和刚体运动，这对导论性课程来说确是难得的，而在高等课程

中这往往被数学所掩盖。

第八章 非惯性系的内容，为变换理论与等效原理这类抽象而有兴趣的课题，提供了天然的跳板。从更为实用的观点看，运用非惯性系是解决很多物理问题的重要方法。

第九章和第十章 在这两章中，把前面讲述的原理应用于两个重要问题，即有心力运动和简谐振子。通常处理这两个问题，虽然都是作形式刻板的讨论，但我们设法简化了数学推导。有心力运动的讨论主要依靠守恒定律和能量曲线。对于简谐振子的处理，通过集中讨论弱阻尼振子，避开了大部分通常是复杂的代数运算。在这两章中，应用与例题起着重要的作用。

第十一章至第十四章 狭义相对论给力学课程带来惊人的飞跃变化。我们的讨论着重于相对论与经典思想的联系，并利用迈克尔逊-莫雷实验来启发这种讨论。虽然人们过分夸大了这个实验在爱因斯坦思想中的突出地位，但这种方法有一个优点，即把讨论建立在真实的实验基础之上。

我们力求把讨论集中于事件的概念和它们的变换，而不着重于计算方法（例如图解法）。这样处理就能把许多所谓的佯谬降到次要地位。

对于很多学生来说，相对论真正的奥秘不在于它的假设或变换定律，而在于为什么变换定律会突然成为产生新的物理定律的基本概念。这触及到了爱因斯坦思想的最深刻、最令人兴奋的方面。第十四章讨论四元矢量，介绍了变换理论，这个理论统一和概括了以前的论述。这一章拟作为选用教材。

D. Kleppner
R. J. Kolenkow

目 录

序言	i
致教师	V
第一章 矢量与运动学——数学预备知识	1
1.1 引言	1
1.2 矢量	1
矢量的定义 (2); 矢量代数 (3)	
1.3 矢量的分量	10
1.4 基矢	13
1.5 位移与位置矢量	15
1.6 速度与加速度	18
一维运动 (18); 多维运动 (19); 略谈量纲与单位 (24)	
1.7 运动方程的形式解	25
1.8 矢量导数的进一步讨论	30
1.9 平面极坐标中的运动	36
极坐标 (36); 求 $\frac{d\hat{r}}{dt}$ 的值 (41); 极坐标中的加速度 (47)	
附录 1.1 数学近似方法	51
二项式级数 (53); 泰勒级数 (55); 微分 (58); 微积分课程 的一些参考书 (60)	
习题	60
第二章 牛顿定律——牛顿力学的基础	64
2.1 引言	64
2.2 牛顿定律	66
牛顿第一定律 (68); 牛顿第二定律 (69); 牛顿第三定律 (73)	
2.3 标准和单位	79
基本标准 (79); 单位制 (81)	

2.4	牛顿定律的某些应用	82
2.5	物理学中常见的力	97
	重力、重量和引力场 (99); 静电力(106); 接触力 (107); 张力—— 绳子的力 (107); 张力和原子力 (112); 法向力 (113); 摩擦力 (114); 粘滞性 (117); 线性回复力: 胡克定律, 弹簧和简谐运 动 (120)	
附录	2.1 球壳的万有引力	124
	习题	127
第三章	动量	137
3.1	引言	137
3.2	质点系动力学	138
	质量中心 (141)	
3.3	动量守恒	149
	质心坐标 (154)	
3.4	冲量及再论动量关系式	157
3.5	动量和质量流动	161
3.6	动量传输	167
附录	3.1 质量中心	175
	习题	178
第四章	功和能	182
4.1	引言	182
4.2	一维运动方程的积分	183
4.3	一维运动的功-能定理	187
4.4	三维运动方程的积分	189
4.5	功-能定理	192
4.6	功-能定理的应用	195
4.7	势能	202
	势能的实例 (204)	
4.8	关于力的问题, 势能给了我们什么启示	207
	稳定性(208)	
4.9	能量曲线图	211
4.10	束缚系统中的微小振动	214

4.11	非保守力	219
4.12	能量守恒普适定律	222
4.13	功率	224
4.14	守恒定律和粒子碰撞	225
	碰撞和守恒定律 (226); 弹性和非弹性碰撞 (227); 一维的碰撞 (228); 碰撞和质心坐标 (230)	
	习题	236
第五章	力和能量的一些数学形式	244
5.1	引言	244
5.2	偏导数	244
5.3	已知势能求力	248
5.4	梯度算符	250
5.5	梯度的物理意义	254
	等势能面与等势能线 (254)	
5.6	怎样判别一个力是否为保守力	259
5.7	斯托克斯定理	271
	习题	275
第六章	角动量与定轴转动	278
6.1	引言	278
6.2	质点的角动量	280
6.3	力矩	286
6.4	角动量与定轴转动	298
6.5	绕一个轴的纯转动动力学	305
6.6	物理摆	308
	单摆 (308); 复摆 (310)	
6.7	包括平动与转动的运动	314
	功-能定理 (322)	
6.8	玻尔原子	327
附录 6.1	蔡斯勒斯定理 (Charles' Theorem)	331
附录 6.2	摆的运动	334
	习题	336

第七章 刚体运动	347
7.1 引言	347
7.2 角速度和角动量的矢量性	347
7.3 回转仪	357
7.4 回转仪运动的某些应用	363
7.5 角动量守恒	370
7.6 刚体转动的角动量	373
角动量和惯性张量 (373); 主轴 (379); 转动动能 (380); 绕固定点的转动 (382)	
7.7 刚体转动动力学中的高深课题	384
引言 (384); 不受力矩的进动: 地球为什么摆动 (384); 欧勒方程 (389)	
附录 7.1 有限的转动和无限小的转动	397
附录 7.2 对于回转仪的进一步讨论	399
情况 1. 均匀进动 (403); 情况 2. 不受力矩的进动 (403); 情况 3. 章动 (403)	
习题	406
第八章 非惯性系与虚拟力	411
8.1 引言	411
8.2 伽利略变换	411
8.3 匀加速系统	415
8.4 等效原理	418
8.5 转动坐标系中的物理学	429
矢量的时间导数与转动坐标系 (430); 相对于转动坐标系的加速度 (433); 转动坐标系中的表观力 (435)	
附录 8.1 等效原理与引力红移	447
附录 8.2 转动坐标变换	449
习题	451
第九章 有心力运动	455
9.1 引言	455
9.2 作为单体问题的有心力运动	455
9.3 有心力运动的普遍性质	458

被约束在一平面上的运动 (458); 能量和角动量是运动常数 (459); 等面积定律(461)	
9.4 寻求实际问题中的运动	461
9.5 能量方程和能量曲线图	462
9.6 行星运动	470
9.7 开普勒定律	483
附录 9.1 椭圆的性质	486
习题	490
第十章 谐振子	493
10.1 引言与回顾	493
解的标准形式 (494); 名词 (494); 能量的考虑 (495); 时间平均值(496); 平均能量 (497)	
10.2 阻尼谐振子	498
能量(501); 振子的 Q 值 (503)	
10.3 受迫谐振子	507
无阻尼受迫振子 (507); 共振 (509); 受迫阻尼谐振子 (510); 轻阻尼系统中的共振: 品质因素 Q (511)	
10.4 时间响应与频率响应的对比	520
附录 10.1 未受驱动阻尼振子的运动方程的解	521
复变数的用途 (521); 阻尼振子 (523)	
附录 10.2 受迫振子运动方程的解	525
习题	526
第十一章 狭义相对论	530
11.1 新的思想方法的需要	530
11.2 迈克耳孙-莫雷实验	534
11.3 狭义相对论的假设	540
普适速度 (541); 相对性原理 (541); 狭义相对论假设 (542)	
11.4 伽利略变换	543
11.5 洛伦兹变换	546
习题	549
第十二章 相对论性运动学	552
12.1 引言	552

12.2	同时性和事件的次序·····	554
12.3	洛伦兹收缩与时间膨胀·····	557
	洛伦兹收缩 (557); 时间膨胀 (559)	
12.4	速度的相对论变换·····	563
12.5	多普勒效应·····	566
	声音的多普勒频移 (567); 相对论性多普勒效应 (569); 观察者 不在运动方向上的多普勒效应 (570)	
12.6	孪生子佯谬·····	573
	习题·····	578
第十三章 相对论性动量和能量 ·····		582
13.1	动量·····	582
13.2	能量·····	586
13.3	无质量的粒子·····	594
13.4	光是以光速传播吗?·····	602
	习题·····	606
第十四章 四元矢量和相对论性不变性 ·····		609
14.1	引言·····	609
14.2	矢量和变换·····	609
	绕 z 轴的转动 (611); 变换的不变量 (614); 物理定律的变换性 质 (615); 标量不变量 (615)	
14.3	闵可夫斯基空间和四元矢·····	616
14.4	动量-能量四元矢·····	622
14.5	结束语·····	629
	习题·····	631

例 题 目 录

第一章 矢量与运动学——数学预备知识的例题.....1

- 1.1 余弦定律 (6); 1.2 功和点积 (6); 1.3 物理学中矢量的例子 (8); 1.4 面积矢量 (9); 1.5 矢量代数 (12); 1.6 垂直矢量作法 (12); 1.7 由 $\mathbf{r}$ 求 $\mathbf{v}$ (22); 1.8 匀速圆周运动 (23); 1.9 由加速度求速度 (27); 1.10 均匀重力场中的运动 (28); 1.11 变加速度——无线电波对电离层中电子的作用 (29); 1.12 圆周运动与旋转矢量 (32); 1.13 极坐标中的圆周运动和直线运动 (44); 1.14 有孔小球在辐条上的速度 (46); 1.15 圆心不在极坐标原点的圆运动 (46); 1.16 有孔小球在辐条上的加速度 (49); 1.17 无加速度的径向运动 (50)

第二章 牛顿定律——牛顿力学基础的例题.....64

- 2.1 太空中的宇宙航行者——惯性系与虚拟力 (74); 2.2 宇宙航行员的拔河赛 (86); 2.3 运输列车 (88); 2.4 约束 (90); 2.5 系于绳子上的物体 1 (92); 2.6 系于绳子上的物体 2 (93); 2.7 旋转着的物体 (94); 2.8 锥动摆 (95); 2.9 升降机中的海龟 (104); 2.10 物体和细绳 3 (107); 2.11 悬挂着的绳子 (108); 2.12 旋转的绳子 (109); 2.13 滑轮 (111); 2.14 有摩擦的木块和劈 (115); 2.15 转笼 (116); 2.16 在粘滞媒质中的自由运动 (118); 2.17 弹簧和物体——简谐运动方程 (121); 2.18 弹簧枪——说明起始条件的例子 (122)

第三章 动量的例题.....137

- 3.1 玻拉 (Bola) (140); 3.2 乐队队长的指挥棒 (142); 3.3 非均匀杆的质心 (145); 3.4 三角形薄板的质心 (146); 3.5 质心运动 (149); 3.6 弹簧枪的反冲 (150); 3.7 地球、月球和太阳——三体问题 (152); 3.8 一推一拉的运动 (155); 3.9 橡皮球的回跳 (158); 3.10 如何避免踝骨折断 (160); 3.11 质