

13.32/5
高等学校教学用书

力学讲义

上册

江苏师范学院物理系編委会編

高等教育出版社

高等学校教学用书



力 学 讲 义

上 册

江苏师范学院物理系編委会編

高等教育出版社

本书系江苏师范学院物理系教师集体编写的物理学讲义的第一部分,内容包括普通物理的力学和理论力学,可供师范学院物理系作为力学的教学用书。如普通物理与理论力学分开讲授,亦可作为教学参考书。此外,本书还可供中学教师进修时参考。

本书分上、下两册。上册分八章,内容主要讲解运动学和静力学。

力 学 讲 义

上 册

江苏师范学院物理系编委会编

高等教育出版社出版 北京宣武门内大街恩寺7号

(北京市书刊出版业营业许可证出字第054号)

上海市印刷四厂印刷 新华书店发行

统一书号13010·718 开本850×1168 1/32 印张12 13/16

字数326,000 印数1—10,000 定价(4) 1.30

1959年12月第1版 1959年12月上海第1次印刷

序

在大跃进以来,我系师生在总路线的光辉照耀下,为了贯彻教育为无产阶级政治服务、教育与生产劳动相结合的方针,发扬了敢想、敢说、敢做的共产主义风格,在院党委和系党总支领导下,提出了教学计划改革的方案。这个方案中,除将生产劳动列入教学计划外,并把过去的普通物理、理论力学、理论物理这三个科目合并为一门“物理学”,以避免过去它们之间的重复与脱节现象。我们根据教育方针、高师特点、物理学迅速发展的情况,提出了面向中学、结合生产、反映最新科学成就的原则,编订了教学大纲。

“物理学”新大纲包括了过去普通物理、理论力学、理论物理试行大纲(1955年)的内容,删节了其中的重复部分,并适当充实了一些新的内容。共分为五部,即力学、热学、电磁学、光学和原子物理学。

力学讲义是把过去普通物理的力学部分和理论力学“打通”起来编写的。其内容除比过去大纲增添了人造地球卫星、宇宙火箭以及变质量质点的运动外,还把弹性力学和流体力学部分加以补充,并与波动、声学合并为连续介质力学,刚体运动学一章中也引入不少关于机械的实际知识。全篇共计十七章,分上下两册,上册有八章,介绍质点运动学与动力学、质点与刚体的静力学和刚体运动学,下册有九章,介绍刚体动力学、分析力学大意和连续介质力学。

本讲义为了体现高师特点,特别注意密切联系中学教材。文字叙述亦力求深入浅出。例题比一般课本多,既可帮助读者了解课文,也培养读者解题能力。在应用本教材上课时,我们曾佐以必要的演示实验,但由于时间有限,未及将演示实验在讲义中详加介绍,有待于以后补

完。

本讲义除可用作高师物理系本科教材外，亦可作为一般高等学校物理課的参考讀物，以及具有物理专修科数学、物理知識的中学教师們的进修讀物。

我們根据“打通”的精神編写这部力学讲义，是一个大胆的尝试。为了相互交流、广泛討論来共同解决高师物理学教材問題，特把这部讲义初稿刊印出来。限于我們的水平和時間的匆迫，內容难免錯誤，取材和編排上也还存在問題，誠懇地要求讀者和专家們多多提出宝貴意見，以資修訂。

本讲义是在党委领导下教师学生三結合所編的大綱和力学草稿的基础上編写的。参加編写的有朱正元(主編)、沈永昭、罗聚源、蔡銘之等。系內其他师生对編写工作也給予很多支持与协助，我們在此表示謝忱。

江苏师范学院物理系編輯委员会

1959年9月

上册目录

序

緒論	1
----	---

第一章 质点运动学	9
-----------	---

§1.1 质点	9
---------	---

§1.2 参照体和坐标系	10
--------------	----

§1.3 运动方程和軌道	13
--------------	----

§1.4 位移	16
---------	----

§1.5 直綫运动中的速度	19
---------------	----

§1.6 直綫运动中的加速度	26
----------------	----

§1.7 曲綫运动中的速度	32
---------------	----

§1.8 曲綫运动中的加速度	38
----------------	----

§1.9 速度和加速度的图解	43
----------------	----

第二章 剛体运动学	52
-----------	----

§2.1 自由度	52
----------	----

§2.2 剛体的平动	54
------------	----

§2.3 剛体繞固定軸的轉动	56
----------------	----

§2.4 角速度矢量	64
------------	----

§2.5 剛体平面运动的几何研究	70
------------------	----

§2.6 剛体平面运动的分析研究	78
------------------	----

§2.7 剛体繞固定点运动的几何研究	88
--------------------	----

§2.8 剛体繞固定点运动的分析研究	91
--------------------	----

§2.9 自由剛体的运动	98
--------------	----

第三章 质点运动的基本定律	100
---------------	-----

§3.1 牛頓第一运动定律	100
---------------	-----

§3.2 力的种类和力的計量 质量及其計量	102
-----------------------	-----

§ 3.3 牛顿第二运动定律	105
§ 3.4 单位制度和量纲	109
§ 3.5 牛顿第三运动定律	114
§ 3.6 摩擦力	117
§ 3.7 质点动力学第一类问题	120
§ 3.8 质点动力学第二类问题	131
§ 3.9 动量和冲量 动量定理 动量守恒定律	146
§ 3.10 动量矩 动量矩定理	153
§ 3.11 功和功率	155
§ 3.12 动能 动能定理	159
§ 3.13 位能	162
§ 3.14 机械能守恒定律 能量守恒及转换定律	173
§ 3.15 碰撞	178
§ 3.16 牛顿力学的适用范围	185
第四章 振动	188
§ 4.1 简谐运动	188
§ 4.2 简谐运动的速度和加速度 简谐运动的能量	196
§ 4.3 阻尼振动	201
§ 4.4 受迫振动 共振	205
§ 4.5 同一直线上振动的合成	212
§ 4.6 互相垂直的振动的合成	218
第五章 有心力 万有引力	227
§ 5.1 速度矩 面积速度	227
§ 5.2 有心力作用下的质点的轨道方程 比内公式	229
§ 5.3 开普勒定律和万有引力定律	230
§ 5.4 地球的引力 重力和重量	239
§ 5.5 万有引力位能	247
§ 5.6 万有引力作用下质点的运动 行星运动	250
§ 5.7 人造地球卫星的运动	256
§ 5.8 苏联宇宙火箭的运动	263
§ 5.9 二体问题 开普勒第三定律的普适形式	269

§ 5.10 α 粒子之散射	273
第六章 变质量质点力学	281
§ 6.1 密歇尔斯基方程——减质量情况	282
§ 6.2 齐奥尔科夫斯基的第一问题	284
§ 6.3 齐奥尔科夫斯基的第二问题	289
§ 6.4 密歇尔斯基方程——增质量情况	293
第七章 质点在非惯性系中的运动	298
§ 7.1 平动坐标系中质点的相对速度和牵连速度	298
§ 7.2 平动坐标系中质点的相对加速度和牵连加速度	304
§ 7.3 质点在加速平动的坐标系中的运动 非惯性系和惯性力	306
§ 7.4 质点在转动坐标系中的运动 惯性离心力和科里奥利力	314
§ 7.5 既平动又转动的坐标系中质点的速度和加速度	319
§ 7.6 非惯性系中的质点动力学	324
§ 7.7 牵连惯性力在地球表面上的表现	327
§ 7.8 科里奥利力在地球表面上的表现	331
§ 7.9 地球自转对单摆运动的影响 傅科摆	340
第八章 质点和刚体静力学	346
§ 8.1 质点的平衡	346
§ 8.2 力的可传性	349
§ 8.3 力矩	350
§ 8.4 平行力系的合力	353
§ 8.5 重心	358
§ 8.6 古鲁金-巴比斯定理	364
§ 8.7 力偶	367
§ 8.8 空间力系的简化	370
§ 8.9 刚体平衡的条件	372
§ 8.10 平衡的种类	380
§ 8.11 几个物体的平衡	388
§ 8.12 桁架	390
§ 8.13 连续分布于曲线上的质点组的平衡	394

緒 論

物質和運動

我們周圍的世界是一個物質世界，所謂物質，如列寧所說，就是“作用於我們的感覺而引起感覺的東西，物質是在感覺中給予我們的客觀的對象”。從這個物質的定義可以看出，物質既是客觀實在，它必是有意義的，不倚賴於意識而存在，並且能夠由我們的感覺而認識的東西。人們對於物質的認識，有的是感覺器官直接感覺到的，有的是要通過另外一些物質客體或特制儀器為中介才能間接感覺到的。日月、星辰、房屋、樹木、車船、機器都是可以由感覺器官直接感覺的東西，分子、原子、質子、中子、電子等客觀實在則須借助於儀器來感知。物理學所研究的物質分成兩種基本形式，即實物和場。分子、原子、質子、中子、電子以及由它們所組成的各種大小的物體的這種物質形式叫做實物。電磁場和引力場也是在我們意識之外的客觀實在，可以作用於我們的感覺器官而被感知（借助於儀器間接感知）的東西，所以它們也是物質。

實物和場有其共同的特性，也有不同的特性。例如實物和場都具有質量、動量和能量，但實物皆具有靜止質量而上述兩種場則不具靜止質量；實物能以各種不同的速度運動，而這兩種場只以一定的速度（光速）傳播^①。實物和場既可以相互作用，也可以相互轉化。例如帶電粒子在電磁場中就受到場的作用，同時也給予場以作用；又如電子與正電子偶可以轉化為光子（電磁場粒子），光子也可以轉化為電子與正電子偶。

① 原子核物理學中所發現的介子場則具有靜止質量，速度在零與光速之間。

在我們周圍的物質世界里，一切形形色色的現象，都是物質客體進行着各種運動的表現。這裡所說的運動不是僅指簡單的位置變動，而是如恩格斯所說，“它包括宇宙中所發生的一切變化和過程，從簡單的位置變動起直到思維止。”物質和運動是不可分割的，運動是物質存在的根本條件，是物質的固有屬性，我們只有通過物質的運動才能認識物質。另一方面運動也和物質是不可分割的，宇宙間從來不存在任何一種沒有物質的運動。

物質運動是多種多樣的，但可分成幾種基本形式：~~機械運動~~、物理變化、化學變化、生命過程和社會現象。與這些不同的運動形式相對應的科學就是力學、物理學、化學、生物學和社會科學等等。

空間和時間

每個物質客體都存在于空間中，而物質運動都與某種或大或小的空間位移聯系着，所以空間是物質運動的根本條件。物質過程都按先後順序進行，都有不同的持續時間，所以物質運動又是在時間中進行的。列寧說：“世界上除了運動着的物質以外沒有別的任何東西，而運動着的物質除了在空間與時間之內就不能運動。”既然物質的運動總在空間和時間中進行，而物質跟運動又是不可分割的，可見物質跟空間和時間也是不可分割的。辯證唯物主義教導我們，空間和時間是物質的存在形式。這個原理一方面表示物質不能存在于空間和時間之外，另一方面表示空間和時間也只存在于物質之中。

古典物理學對於空間和時間的本質的見解是英國天才學者牛頓（1642—1727）所提出的。牛頓認為空間和時間是客觀存在着的，不以人們的觀念為轉移的。這是牛頓的觀念的唯物方面。但牛頓又認為空間和時間是不變的，彼此分開的，而且跟運動着的物質也是分開的。他把這樣理解的空間和時間叫做“絕對的”空間和時間，在二十世紀以前，物理學中就流行着這樣的見解。這種孤立地考慮問題的方法是形而上

學的，這也是由於歷史的局限性。到了二十世紀初期，由於相對論的創立和近代物理實驗的證明，人們對於空間和時間的特性有了更深刻、更全面的認識，即空間和時間的特性是和運動的物質緊密聯繫的，是為運動着的物質所制約的，而空間和時間也是相互緊密聯繫的，相互制約的。應該指出，這種關於空間和時間的論斷，早在十九世紀已為辯證唯物主義所指出了。由此可見，我們只有以辯證唯物主義的觀點來認識物質世界、來研究各種科學，才能正確地反映物質的客觀規律，使科學得到迅速的發展，而免於陷入形而上學的錯誤。

機械運動和力學

力學是研究物質的機械運動的科學。機械運動就是物體對物體或物體的各部分間的相對位置的變動，它是一種最簡單的運動形式。力學還研究物體靜止時力的問題（靜力學）。這裡所謂靜止只是相對的，即對於某些個別物體（例如地球）的相對靜止，而不是對整個全部物質來說的絕對靜止（世界上沒有絕對靜止的物體），相對靜止只是兩個物體或一組物體做同一狀態的機械運動罷了^①，它絲毫不意味著物質可以存在於運動之外。

每一個較高級、較複雜的運動形式，都包含着簡單的機械運動，例如各種物理過程、化學過程都包含着位移過程。但是只用機械運動的規律不能充分說明物理過程、化學過程，也就是說，較高級、較複雜的運動形式不能還原為機械運動。這是辯證唯物主義的物質運動觀不同於機械唯物主義的主要特徵之一。

較高級、較複雜的運動既然包含着較簡單的機械運動，那末研究機械運動就成為研究其他自然科學的基礎了。我們研究物理學時也是先從力學入手的。

力學是研究物體在空間里的位置隨時間而變的科學，因此空間和

^① 這些物體的分子運動、電機過程等就不一定是同一狀態了。

時間是力学中的基本概念。此外，物体在机械运动里所表現的一个重要特性就是它的質量，所以質量也是力学中基本概念之一。質量这个名詞是牛頓首先用来表示“物質之量”的，而从牛頓第一定律和第二定律看来，質量又是物体慣性的量度。牛頓认为，一个物体的質量是永恒不变的，即不管物体是在靜止或者以任何速度在运动，它的質量总是始終如一的。这种質量不变的觀念，在物理学中一直保持到十九世紀之末。二十世紀的物理学，証明了物体的質量随它的速度而变，相对論并明确地給出了質量和速度的数量关系[公式(3.16-1)]。

客觀存在的物体不是彼此孤立的，而是不断地相互作用着。物体运动状态(用速度表征的)的变化正是这种相互作用的結果。这种引起物体运动状态变化的作用便叫做力。力，和空間、時間、質量一样，同样是力学中的基本概念。

力学是以空間、時間、質量、力这些基本概念和一些公理为基础而建立起来的。力学的公理是牛頓总结前人的研究和他自己的精湛研究而确立的三条运动定律^①。以牛頓运动定律为基础的力学叫做牛頓力学或古典力学。

牛頓的質量不变的觀念虽然不完全符合客觀实际，但在古典力学中所研究的物体运动只限于速度远远小于光速的物体运动(例如地球上物体的普通运动和星体的較慢运动)，質量随速度而改变的数值非常微小，可以忽略不計，因此質量不变的觀念在表述古典力学定律时还是可以适用的。根据同样道理，牛頓的絕對空間和絕對時間的觀念在古典力学中也是可以适用的，事实上牛頓的这些觀念一直是在用着的。

力学的研究方法 力学的分类

力学的基本定律是根据生活經驗和生产实践中的观察和实验总结出来的。自牛頓在他的名著“自然哲学的数学原理”(1687年出版)中

^① 第三定律完全是牛頓发现的。

发表运动三定律以后,通过逻辑推理与数学工具的运用,力学发展成为理論严密、体系完整的一門科学。数学一直是力学的有力工具(同时力学問題也推动了数学的发展),用数学推得的結論又受到实践和实验的验证,力学内容就越加丰富起来。所以力学的发展,和其他科学研究一样,正是遵循着毛主席实践論中所說的“实践——理論——实践”的規律。

在力学中为了使問題简单化,常把所研究的物体或物体的微小部分看成为一个理想模型。力学中的理想模型有四种,即质点、剛体、完全彈性体和理想流体。在研究一个物体的运动时,如果这物体的体积远远小于运动区域的大小,或研究一个物体的各微小部分运动时,我們便引用质点(体积无限小而具有有限质量或无限小的质量的物体)的概念。在研究固体的运动时,如果这固体的形状、体积的变化对于运动的影响可以忽略时,我們便引用剛体(永不改变形状、体积的固体)的概念。但实际上任何物体的形状、体积在外力作用下都要发生或大或小的变化,而且在某些情况下,例如在所謂靜不定問題(如在§8.9例題4中所指出的)中,单纯应用剛体力学的原理而不考虑物体的彈性形变,便不能得出确定的結果,因此必須确立所謂彈性体的概念。实际的彈性体受外力則变形,外力移去后并不能完全恢复原来的形状、体积,但是如果剩余形变微不足道时,我們便把它当作完全彈性体看待而应用胡克定律来研究它的彈性。流体(液体和气体)在力学中也被看成是质点的集合体或质点組,但它又具有和彈性体或剛体不同的特性,即流动性。对于流体力学的研究,我們又建立理想流体的模型,即不可压缩的、沒有粘滯性的流体模型。

根据研究对象的不同,我們把力学分为质点力学、剛体力学、彈性体力学和流体力学,后者又总称为連續介質力学。就問題性质的不同,我們把力学分为运动学、动力学和靜力学。运动学只从几何观点研究物体的运动状态,而不考虑决定运动状态的外因(力)和内因(質量)。

动力学則联系力和质量来研究物体的运动。靜力学研究物体平衡的規律。平衡是运动的一个特殊情况,因此靜力学可以作为动力学的特殊情况来处理;但是由于平衡問題对工程技术非常重要,靜力学一般还是和动力学分开来研究。动力学中必須用到运动学的知識,过去只把运动学作为动力学一部分的内容来研究;但是机械制造工程中一些問題可以仅用运动学来解决,所以运动学不仅是动力学的基础,也有其独立研究的价值。

力学发展簡史^①

力学是自然科学中发展最早的一門科学。这不仅由于物体的机械运动最简单最直观,也由于人类的生产实践中常常需要力学知識。例如简单机械的創制,宮殿城堡的建筑、水利工程的兴修、船只車輛的制作等等都和力学原理密切联系的。其中尤以靜力学原理为主,因此靜力学又发展得比較早。

我国墨翟(公元前 468—382)在他所著的“墨經”中,对力的概念、杠杆的原理等方面都有明确的闡述。它可說是世界上研究力学現象(以及其他物理)最早的紀錄。希腊亚里斯多德(公元前 384—322)在他的著作“物理学”和“力学”两书中也討論到杠杆和其他简单机械的問題以及运动的一般学說。但是亚里斯多德所用的方法是不科学的,他不倚靠观察和实验而企图通过單純的思考来找出現象的产生原因,因而他所得的結論常常和事实不符。例如,他认为重的物体降落較快而輕的物体降落較慢,后来伽利略用实验証明这种論断是錯誤的。阿基米德(希腊,公元前 287—212)研究了平面图形的平衡和重心問題,对杠杆的理論作了严格的論証,从而奠定了靜力学的科学基础。阿基米德关于浮力定律的发现,也为液体靜力学奠定了基础。

^① 关于力学发展史,柯斯莫节米揚斯基著的理論力学教程(綏佐华等譯)一书中叙述較詳,可以參閱。

经过中世紀羅馬帝國傾覆之后的一度停頓，十五世紀起力學在意大利開始向動力學方面發展。這是列奧那多·達·芬奇(1452—1519)和伽利略(1564—1642)等人的貢獻。列奧那多·達·芬奇研究了機構理論、機器里的摩擦和斜面上的運動，他第一個認識到力對於點的矩的重要性。

對於動力學的發展起巨大作用的是伽利略的研究和著作。通過對落體運動和物體在斜面上運動的研究，伽利略確立了勻加速運動的規律和慣性定律(牛頓第一定律)。他引進了加速度的概念，並指出力是產生加速度的原因。他還發現擺的等時性定律、力的獨立作用原理和力學相對性原理。伽利略對物體運動的研究所以取得卓越的成就，主要由於他重視觀察與實驗的方法。他是實驗科學的奠基者，也是動力學的創始人。

惠更斯(荷蘭，1629—1695)繼承伽利略的研究，建立了關於物理擺和離心力的理論。他還引用了轉動慣量的概念。

古典力學之所以能成為一門結構嚴密、系統完整的科學，是由於牛頓的偉大貢獻。牛頓總結了過去的成就，找出機械運動最基本的定律，奠定了古典力學的基础。全部古典力學是以牛頓三定律為基本假設而建立其理論體系的。牛頓所發現的萬有引力定律成為理論天文學和天體力學的基础，也為哥白尼(波蘭，1473—1543)的太陽中心學說找到了科學的理論根據。牛頓還與萊布尼茨(德，1646—1716)同時發明微積分，這門學問不僅使數學科學得到蓬勃的發展，也對力學研究提供了有力的工具。

俄國科學院院士歐拉(1707—1783)首先應用無窮小分析法勝利地研究了剛體繞定點和定軸運動的問題。柏努利確立的虛功原理(1717)是分析力學的基本定律。達朗貝爾(法，1717—1783)在他的著作(1743)中提出了把動力學問題變為平衡問題來處理的方法。這個解法現在叫做達朗貝爾原理。拉格朗日(法，1736—1813)以虛功原理作為

靜力学基础,再应用达朗貝尔原理,給出了动力学的分析形式的基本方程。在他的名著“分析力学”(1788)中,拉格倫日从这个基本方程出发,完全用严格的分析方法处理整个力学問題。

在拉格倫日之后,分析力学有进一步的发展。同时力学問題的几何研究法也在发展着。璣璣(法,1777—1859)在这方面的貢獻最大。列宁所称的俄罗斯航空之父儒可夫斯基(1847—1921)也重視力学問題的几何研究法。他并在空气动力学方面做出了杰出的貢獻。

科学的进一步发展,暴露出古典力学的局限性,对于許多物理現象,古典力学已显得无能为力。在二十世紀就有相对論力学和量子力学的創立。但是当物体运动的速度远小于光速而質量頗大于原子質量时,古典力学仍是十分准确的。(参閱 § 3.16)

第一章 质点运动学

在这一章里,我們将从空間和時間的概念出发,用几何学的观点来研究质点的运动,也就是研究质点运动时軌道的形式(直綫和曲綫)、运动的状态(位置和速度),以及运动状态的改变(加速度),至于为什么作这样运动的問題,在本章中暂时不予討論。

§1.1 质点

任何物体都有一定的大小,当物体作机械运动时,物体各部分的运动状态不一定相同,因而要全面的确定某一物体的运动,就必须知道物体各部分的运动,也就需要把物体分成許多部分来研究。分的部分愈多,每部分就愈小,那末每部分內各点的运动状态就愈接近相同。这样很小的一部分可以近似地当做一点,但它又不同于几何学上的点,因为它还具有质量,而且体积虽小,但不等于零。这样的点,就叫做质点。如果物体內各质点的运动状态都知道了,那末这个物体的整个运动状态也就知道了。因此,研究质点的运动,就成为研究物体运动的基础。

不仅如此,而且当一个物体的大小和同一問題中其他度量相比为甚小时,以及当一个物体沒有轉动或者轉动可被忽略时,我們就可以把整个物体当作一个质点来看待。这样一来,問題就可大为簡化。但能否这样做,还要看具体問題而定。例如研究地球的繞日运动时,就可以把地球当做一个质点,因为地球的直徑比之它繞日运动軌道的直徑是很小的,它的各部分对于太阳的运动状态就沒有多大差别,因而可以看做是一个质点,但是当研究地球的自轉时,各部分的运动状态則有很大