



欧美理科经典力学教材的现代化 (三) ——现代教学内容的发展

陈立群¹⁾

^{*}(上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444)

[†](上海市应用数学与力学研究所, 上海 200444)

摘要 本文是研究欧美理科经典力学教材内容更新系列论文的第 3 篇, 分析 6 部经典力学现代教材的理念、内容和特点。这些教材更重视运动微分方程解的定性和定量特性, 更重视定性分析方法和数值求解方法。所有教材都增加了混沌的内容。高级力学课程教材还增加了 Lagrange 力学和 Hamilton 力学的几何描述, 同时包括了必要的整体微分几何基础知识。有些高级力学课程教材包括了经典力学代数结构的基本知识。中级力学课程教材没有代数结构和几何描述的内容。

关键词 力学教育, 教材, 经典力学, 物理, 力学史

中图分类号: O31 文献标识码: A doi: [10.6052/1000-0879-22-386](https://doi.org/10.6052/1000-0879-22-386)

UPDATED MATERIALS IN EUROPEAN AND AMERICAN CLASSICAL MECHANICS TEXTBOOKS FOR SCIENCE MAJORS 3: MODERN CONTENTS DEVELOPED

CHEN Liqun¹⁾

^{*}(School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

[†](Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai 200444, China)

Abstract As the third paper of a series on the content update of European and American classic mechanics textbooks for science majors, this manuscript analyzes the ideas, the contents, and the features of 6 modern textbooks of classical mechanics. These textbooks pay more attentions to qualitative and quantitative characteristics of the solutions of differential equations of motion, and pay more attentions to qualitative analysis and numerical solutions. Chaotic dynamics is introduced into all the textbooks. Some textbooks for the advanced mechanics course include geometric descriptions of Lagrange mechanics and Hamiltonian mechanics with necessary fundamentals of global differential geometry, and essential algebraic structures of classical mechanics. However the textbooks for the intermediate mechanics course do not deal with algebraic structures and geometric descriptions of classical mechanics.

Keywords mechanics education, textbook, classical mechanics, physics, history of mechanics

20 世纪初, 物理学出现了以相对论和量子论为代表的科学革命。在此之前已经形成的力学成为经典力学, 仍然是物理学包括现代物理的基础。

20 世纪 50 年代和 60 年代, 出版了几部颇有影响的经典力学教材, 形成了经典力学的传统教学内容^[1]。20 世纪 70 年代, 经典力学的代数结构、几

本文于 2022-06-28 收到。

1) 陈立群, 博士, 教授, 研究方向为非线性动力学和振动控制。E-mail: lqchen@shu.edu.cn

引用格式: 陈立群. 欧美理科经典力学教材的现代化 (三)——现代教学内容的发展. 力学与实践, 2023, 45(3): 651-658

Chen Liqun. Updated materials in european and american classical mechanics textbooks for science majors 3: modern contents developed. *Mechanics in Engineering*, 2023, 45(3): 651-658

何描述和非线性动力学诸方面的进展引起广泛关注,经典力学重新焕发活力成为活跃的研究领域。这就要求经典力学的教学能够支撑和适应学科的发展。有些广泛采用的教材在修订时整合了某些新的研究进展^[2],但教学体系方面基本上没有改变,而且新增加内容与原有内容在逻辑上的一致性和风格上的统一性也有改进空间。本文研究另一种经典力学现代化的方式,编著新的教材。1980年以后出版的一些经典力学教材,在内容和体系方面有所更新,不仅只是在传统体系中补充一下新的知识,而是更全面和充分地反映了学科的发展。本文选择6部现代的经典力学教材加以讨论,分析其理念、内容和特点,并简介作者的学术简历。教材有多种版本时,一般只引用所见最新版本,并说明初版时间,如果有境内版也加以说明,同样版次时优先引用境内版本,这样或许便于读者阅读。

1 高级力学课程的现代教材

高级力学课程的教学内容选取有一定自由度,因此教材内容差别较大。Lagrange力学、Hamilton力学和刚体动力学都不可或缺,但深度广度可以有所不同。代数结构、几何描述和混沌是否包括以及如何整合,各种教材有不同处理。以下分析3种较为成功的教材。

1.1 《力学:从牛顿定律到确定性混沌》^[3]

《力学:从牛顿定律到确定性混沌》德文初版于1988年,1990年作者本人将德文第2版写成英文发表为英文第1版,该版1992年有境内版^[4],目前最新的英文版是2018年第6版^[3],对应德文第8版。作者Florian A. Scheck(1936—)于1964年在德国弗莱堡大学获得理论物理博士学位,随后在以色列魏茨曼科学研究所任客座科学家两年,在海德堡大学任研究助理两年,在瑞士欧洲核子研究中心任研究员两年,1970—1976年,在瑞士核研究所任理论组组长,苏黎世联邦理工学院讲师和名誉教授。1976年起任美因茨大学理论物理学教授,2005年荣休。该书作者认为经典力学不仅是最古老的物理学分支,也是全部理论物理的基础。物理学的现代发展,在一定程度上影响着力学的阐述方式。当代对称和不变性

原理、时空连续统的结构和力学的几何结构起着重要作用。力学不再如过去所认为是封闭的学科,而是令人激动的研究领域,有许多重要的问题尚未解答。正是为回应力学的现代发展,该书全面更新了经典力学的内容。该书篇幅较大,部分内容可以用于中级力学课程,整体上是高级力学课程教材。

《力学:从牛顿定律到确定性混沌》^[3]一书共分7章。第1章是牛顿力学,包括力学中的基本概念、牛顿定律的诠释、质点系的动量定理、动量矩定理和动能定理、时空的Galilei不变性、旋转参考系、中心力场中两质点散射、有限变形体和均功定理,也有相空间、微分方程解的存在唯一性定理、齐次和非齐次线性系统。第2章是分析力学,具体包括约束和广义坐标、D'Alembert原理、Lagrange方程、Hamilton变分原理、Euler-Lagrange方程、规范变换、Legendre变换、正则系统、对称和守恒律、Noether定理、旋转群、正则变换、正则方程的结构、相空间的辛结构、Liouville定理、Poisson括号、Hamilton-Jacobi方程可积系统、摄动准周期Hamilton系统、平均法和广义Noether定理。第3章是刚体力学,包括惯性张量、刚体的动能和动量矩、刚体运动的描述、刚体动力学方程及其典型可积情形,主要是牛顿力学的应用,也涉及分析力学。第4章是狭义相对论力学。第5章是关于力学的几何方面,现代微分几何基础知识包括微分流形、向量场、切丛、外形式等基本概念以及微分流形上的微积分,在力学中的应用有Hamilton力学和Lagrange力学的几何描述和力学中的Riemann流形。第6章是稳定性与混沌。稳定性主要有平衡点及其稳定性、运动稳定性、吸引子、Poincaré映射、临界点分岔和周期轨道分岔,确定性混沌主要有混沌的描述、呈现混沌的抛物线迭代映射、进入混沌的路径、Lyapunov指数、分形维数与奇怪吸引子以及天体力学中的混沌运动。第7章是连续系统。先用离散系统取极限方法揭示了离散与连续系统的关系,随后给出了连续系统的Hamilton原理以及与Lagrange描述的关系,以无限单摆链为研究对象建立了Sine-Gordon方程并引入了孤子解的概念,最后简要讨论了连续系统的不变性和Noether定理等。

《力学：从牛顿定律到确定性混沌》^[3]是一部很有特色的教材，这表现在以下几个方面。第一，内容全面。该书几乎涉及力学各个方面。从物理系统看，从单自由度系统到无限多自由度系统；从相应的数学模型看，从线性常微分方程到联立非线性常微分方程组和偏微分方程；从力学理论看，对牛顿力学、分析力学和几何力学都有阐述。第二，在力学和数学结合方面非常出色。在牛顿力学中，介绍了常微分方程解的存在唯一性定理，以及线性系统和其他可积系统。在分析力学中，引入并应用了特殊正交群的概念。在几何力学中，详细说明了微分流形、切丛、余切丛、外积、外导数等近代微分几何的概念。在稳定性和混沌一章中，讲述了动态系统理论。这样可以使该书的数学准备知识降低到最低限度，只需要微积分和线性代数。第三，引入较多现代内容。除了前面提到的几何力学，还介绍了分岔、混沌、奇怪吸引子、分形、孤立子等非线性动力学的新概念。第四，该书例题和习题充分，有助于对内容的理解。前 3 章有大量的例题充分说明了理论的应用，后 2 章的整个讲解都是结合例子进行；除了最后 1 章，前 6 章有百余道习题，并附有解答。最后注重历史与逻辑统一，在正文中有丰富的历史注记，最后还有相关学者的传记资料。

1.2 《经典动力学：当代方法》^[5]

《经典动力学：当代方法》1998 年初版，2004 年有境内版^[5]。第 1 作者 Jorge V. José (1949-) 于 1976 年在墨西哥国立大学获得博士学位，经过在普林斯顿大学、芝加哥大学等进行博士后研究后，1980 年在东北大学任助理教授，1984 年晋升副教授，1988 年晋升教授，1996 年任校冠名杰出教授，2007 年荣休；2010 年起在印第安纳大学伯明顿分校任冠名杰出教授。第 2 作者 Eugene J. Saletan (1924-2012) 于 1962 年在普林斯顿大学获得博士学位，在罗格斯大学等高校任教后，任东北大学教授 25 年后荣休。他曾合著过用高等观点写成的经典力学教材^[6]，其中有用群论和 Lie 代数阐述的转动。该书作者认为，从 17 世纪到 19 世纪经典力学与数学携手共进成为物理学发展的主要驱动力，Newton、Euler、Lagrange、Hamilton、Jacobi 等大师的

工作形成经典力学的传统内容。但在二战后的几十年，经典力学只是现代物理的基础，不再具有自身的重要性。随着以混沌为核心的现代非线性动力学的兴起，经典力学重新成为活跃的学科。他们试图在传统内容和学科新发展之间架起桥梁，不仅要呈现学科的新发展，而且把新增内容与传统内容融为一体。他们也注意到现代微分几何在物理和数学文献中的广泛应用，因此在书中较早地引入几何概念并在后继内容中应用。该书并非以往教材^[6]的更新，而是一本全新的当代高级力学课程教材。

全书共分 9 章。第 1 章为力学基础，包括运动描述、Newton 定律、质点和质点系的动量、动量矩和动能、变质量、相空间和相轨迹。第 2 章为 Lagrange 力学基础，包括约束和位形流形、Lagrange 方程及其电磁场中应用、中心力运动和切丛。第 3 章为 Lagrange 动力学专题，包括变分原理与 Lagrange 方程、对称性与 Noether 定律、非有势力、Euler-Lagrange 方程与坐标无关的 Noether 定理。第 4 章为散射和线性振动，包括中心力散射、逆散射问题、混沌散射、Contor 集与分形维数、Lyapunov 指数、有磁偶极子散射电荷、小振动的线性近似、线性化、简正振型、不变环面、Poincaré 映射、耦合振子链、受迫和阻尼振动。第 5 章为 Hamilton 力学基础，包括 Hamilton 正则方程、相对论性 Kepler 问题、Legendre 变换、Poisson 括号、辛几何、正则变换、单参数群及其无限小生成元、Hamilton 流、Hamilton 形式的 Noether 定理、Poisson 括号、Liouville 定理和 Darboux 定理。第 6 章为 Hamilton 动力学专题，包括 Hamilton-Jacobi 方程、分离变量、光学类比、完全可积系统、Liouville 可积性定理、环面上运动、正则摄动理论、Lie 变换方法和绝热不变量。第 7 章为非线性动力学，包括受迫 Duffing 振子、van der Pol 振子、解的稳定性、Poincaré-Bendixon 定理、Poincaré 映射、线性化 Hénon 映射、Floquet 理论、竖直激励摆、离散映射中混沌、抛物线迭代的周期倍化及其普适性、标准正弦圆周映射及其魔鬼阶梯、Hénon 映射、Poincaré-Birkhoff 定理、同宿缠绕、Hamilton 系统中混沌和 KAM 定理。第 8 章为刚体动

力学,包括角速度矢量、动能、动量矩、空间和连体系统、动力学方程、Lagrange 和 Hamilton 描述、Euler 角、刚体的几何相、自旋陀螺、Cayley–Klein 参数、Pauli 矩阵、2 维特殊么正群与 3 维旋转群关系。第 9 章为连续体动力学,包括 Lagrange 形式、Noether 定理和相对论性场、Hamilton 形式、非线性场理论、流体动力学和非线性场论的 Hamilton 形式。

该书的主要特色是在整合现代内容与传统内容方面进行了有益的尝试。在非线性的动力学方面,突出了非线性是一般情形、线性只是特殊情形的观念,把线性振动作为小幅值振动的线性化;在讨论线性振动的准周期响应时,引入 Poincaré 映射;在讨论散射时通过分析指数不稳定轨道,引入分形和初值敏感性概念。这样在非线性的动力学一章开始前已经有相关内容,而且该章的深度也与课程定位匹配,有些富有挑战性的内容,如 KAM 定理的证明思路阐述。在现代微分几何应用方面,几何描述或内禀表述也穿插在传统内容中,同步展开,如 Lagrange 力学中的位形流形、切丛、循环坐标对应的不变子流形、Hamilton–Jacobi 方程几何意义等。该书对于对称性和守恒量非常重视, Noether 定理在 Lagrange 力学、Hamilton 力学和连续体动力学中均有讨论。类似地,群的概念和相对论性力学也穿插其中。该书的另一个特色是注重数学方法,不回避现代微分几何的应用,根据力学内容展开的需要讲解相关的数学,如微分流形及其切丛余切丛、向量场及其 Lie 导数、1-形式和 2-形式、辛形式等。此外,该书有近 50 道详细分析的例题和 220 余道习题。

1.3 《经典力学的结构与阐释》^[7]

《经典力学的结构与阐释》初版于 2000 年^[8],目前最新的是 2014 年第 2 版^[7]。两位作者并非物理学家或数学家。第 1 作者 Gerald Jay Sussman (1947–) 是人工智能领域的专家,1973 年在麻省理工学院获得数学博士学位,随后在麻省理工学院任教,现为电气工程冠名教授,美国国家工程院院士和美国文理科学院院士;他是太阳系长期积分专用计算机的设计者,还合著有广泛使用的教材《计算机程序的结构与阐释》(*Structure and Interpretation of Computer Programs*)。第 2 作

者 Jack Wisdom (1953–) 是天文学家,1981 年在加州理工学院获得物理博士学位,1984 年起在麻省理工学院任教,现为行星科学教授,美国国家科学院院士和美国文理科学院院士;应用现代动力学方法研究太阳系长期稳定性和小行星带中 Kirkwood 间隙形成等难题。该书作者认为随着非线性动力学理论和电子计算机技术的发展,力学学科关注的重点已经从建立运动微分方程和寻找精确解转向借助定性理论和数值仿真而深入理解运动。因此该书的宗旨是聚焦于对运动的理解胜于推导运动方程,该书的内容把非线性动力学贯穿始终而不是单独附在最后,该书的独特处理方式是把数学符号精确化和理论方法程序化从而可以用编程语言表达所涉及的所有公式。

全书共分 7 章和两个附录。第 1 章是 Lagrange 力学,包括广义坐标、静态作用原理、Euler–Lagrange 方程、Lagrange 方程、Hamilton 原理、Lagrange 函数的不唯一性、Lagrange 方程初值问题的数值解、守恒量、Noether 定理、受约束运动、带乘子的 Lagrange 方程和非完整约束。第 2 章是刚体力学,包括转动动能、转动运动学、惯性张量、惯性主轴、转动动量矩、Euler 角、刚体自由转动及其定性特征、Euler 动力学方程、轴对称陀螺、姿态运动与轨道运动耦合与共振、月球和土卫七的转动、非奇异坐标与四元数和四元数表示的运动。第 3 章是 Hamilton 力学,包括 Hamilton 方程及其初值问题的数值解、Legendre 变换、从作用原理导出 Hamilton 方程、Poisson 括号、相空间降阶、Poincaré 映射、周期驱动系统、Hénon–Heiles 问题、非对称陀螺、Lyapunov 指数、Liouville 定理、Poincaré 回归和标准映射。第 4 章为相空间的结构,包括相空间的分割、线性稳定性、同宿缠绕、稳定与不稳定流形、可积系统、Poincaré–Birkhoff 定理和不变曲线及其消失。第 5 章为正则变换,包括点变换、一般正则变换、辛矩阵、正则变换的不变量、生成函数、非自治系统的增广相空间、Poincaré–Cartan 积分不变量和相空间降阶。第 6 章为正则演化,包括 Hamilton–Jacobi 方程、用 Poincaré–Cartan 积分不变量时间演化生成正则变换、用作用量原理说明时间演化生成辛变换、Lie 变换、

Lie 级数和指数恒等式。第 7 章为正则摄动理论，包括用 Lie 级数的摄动理论、作为摄动转子的单摆、多自由度推广和非线性共振。两个附录分别是该书所用的算法语言 Scheme 简介和所采用的功能数学符号的说明。

该书的突出特色是经典力学内容与现代动力学观点深度整合，把动力学系统理论中相流定性分析贯穿始终，讨论了刚体自由转动中的相轨迹特性，混沌有机地融入 Hamilton 系统相空间描述，然后进一步分析相空间结构，特别是导致复杂动力学的横截同宿轨道。该书的另一个突出特色是数学公式的清晰精确，采用了通常力学教材中不常见的功能数学符号，与算法语言表达有直接的一一对应；并且把主要公式应用都用 Scheme 编程，Scheme 是第一作者 Sussman 与学生合作在 1975 年发明的语言。在强调清晰严谨的同时，也具有启发性。每章用段语录为题记，有画龙点睛之效；这些语录出自古代圣哲、科学大师、Nobel 奖得主、专著或教材作者、当代研究者等。此外穿插着丰富的历史注记。教材的结构安排也很便于阅读，每章开篇有较为详细的导读，结束前有该章的总结，还有称为“项目”的作业问题。

2 中级力学课程的现代教材

由于学生基础的限制，用现代观点组织中级力学课程的内容更具有挑战性。混沌动力学内容方法，可以有多种选择，而且可以用图像辅助说明，相对容易整合进入经典力学教材。以下讨论 3 种教材的处理各有特色。代数结构和几何描述所需要准备知识更多，目前还没有出现在中级力学课程的经典力学教材中。

2.1 《动力学引论》^[9]

《动力学引论》^[9]初版于 1982 年，境内有内部交流的影印版。第一作者 Ian Colin Percival (1931-) 是研究量子力学和经典力学的理论物理学家，1985 年当选英国皇家学会会士，该书出版时他为伦敦大学应用数学教授，荣休时为物理和天文系教授；第二作者 Derek Richards 在该书出版时为开放大学数学讲师。在该书作者看来，动力学的源头不仅有 Lagrange 和 Hamilton，也有 Poincaré 和 Lyapunov。因此他们在叙述 Hamilton

力学时，也介绍常微分方程的定性理论，尤其强调通过对相空间的几何分析研究稳定性问题。他们注重基本概念的理解而不追求结论的普遍性，局限于讨论单自由度系统，这样可以在中级课程中就阐述通常属于高级课程的现代观念和內容。

该书对内容的选择独具匠心。前 3 章为数学准备知识，分别是 1 阶自治系统、平面线性变换和 2 阶自治系统。随后 4 章是分析力学的简明阐述，包括 Hamilton 系统、Lagrange 方程、变换理论和角作用量。第 8 和 9 章讨论摄动方法及其在慢变 Hamilton 系统和周期弱外激励系统中的应用。第 10 章是线性系统的受迫振动和参激振动。第 11 章为混沌和非线性映射，包括抛物线迭代和平方保面积映射。该书的结构也适用于多种用途，第 5 到 9 章与最后两章彼此独立。

该书体现了动力学的现代观念。首先，动力学不仅仅研究物体系统运动与受力的关系，更广泛地研究系统状态随时间的变化。其次，发展优美的、统一的理论仅是力学的一个侧面，更重要的是研究具体的问题。该书注重具体例子的讲解，给出近 60 道例题和近 200 道习题。这不仅使内容便于学生接受，也使得有可能以较小的篇幅包括较多的内容。第三，线性系统仅是一种特殊情形，线性化也有其局限，需要给予非线性更充分的重视。第四，由于非线性方程一般难以得到显式的精确解，近似解析方法和数值积分方法起着重要作用。最后，该书的内容分别属于常微分方程、线性代数、分析力学、振动理论和非线性动力学。这种打破不同学科界限融不同学科内容为有机整体的努力，体现在中级力学课程教材中还很少见。上述各方面，体现在篇幅小(200 余页)、起点低的教材中，更是难能可贵。当然，在肯定该书取材和叙述方面特色的同时，也注意到它弱于传统经典力学教材的方面。主要是对动力学与机械系统的关系重视不够，因而对运动微分方程的建立有所忽视。

2.2 《经典力学：质点系统和 Hamilton 动力学》^[10]

《经典力学：质点系统和 Hamilton 动力学》德文初版于 1989 年，2003 年作者本人将德文版写成英文为英文第 1 版，该版 2008 有境内版^[11]。目前最新的德文版是 2008 年第 8 版，最新的英文

版是2010年第2版^[10]，德文版的标题更为贴切，《经典力学II：质点系统、Lagrange-Hamilton动力学和非线性现象》^[12]。作者Walter Greiner (1935—2015)于1961年在德国弗莱堡大学获理论物理博士学位。1962年起在美国马里兰大学任助理教授两年，随后在弗莱堡大学任研究助理。1965年起任歌德大学教授、理论物理研究所所长，曾任物理学院院长。2003年任新创建的歌德大学法兰克福高等研究院院长。该书是作者十余种理论物理学系列教材的第2卷，经典力学的第2部分。第1部分是《经典力学：质点和相对论》(1989年德文初版，2004年英文第1版，2008年有境内版^[13])，内容较为传统，本文就不讨论了。在《经典力学：质点系统和Hamilton动力学》中，作者试图以有趣而易懂的方式处理经典力学，重视实际物理问题与必要数学知识的结合，特别是增加了非线性力学的现代发展以激发学生兴趣。

《经典力学：质点系统和Hamilton动力学》^[10]的内容分为8部分。第1部分是转动坐标系中的牛顿力学，包括转动坐标系中的相对运动微分方程，及其在转动地球上落体和Foucault摆分析中的应用。第2部分是质点系力学，包括自由度和质心的概念以及动量定理、动量矩定理和动能定理。第3部分是振动系统，包括离散质量串、弦线和膜的振动。第4部分是刚体力学，包括刚体的定轴转动和定点转动，以及陀螺的运动学和动力学分析。第5部分是Lagrange方程，包括广义坐标、D'Alembert原理、完整和非完整系统的Lagrange方程、速度依赖势、耗散函数和Lagrange乘子。第6部分是Hamilton理论，包括Hamilton方程、Hamilton变分原理、Liouville定理、正则变换、Hamilton-Jacobi理论及其相对论性分析力学。第7部分是非线性动力学，包括吸引子、平衡点及其稳定性、极限环、轨道稳定性、Poincaré截面、Floquet理论、平衡点和周期轨道分岔、混沌、Lyapunov指数、分形维数、抛物线迭代映射、Feigenbaum常数、受周期性冲击阻尼转子、周期驱动阻尼摆和土卫七混沌姿态运动。第8部分是力学史，17世纪西方物理学的出现。

《经典力学：质点和相对论》^[13]与《经典力

学：质点系统和Hamilton动力学》^[10]总体上为中级力学课程教材，虽然深度略超过传统教材，而且《经典力学：质点系统和Hamilton动力学》^[10]本身不包括更基础性的内容。中级力学课程教材特点尤其体现在对连续系统的处理，增加了具体的弦线和膜的振动，而没有涉及抽象的场和连续介质的力学。反映动力学现代发展的内容主要是增加的非线性动力学部分，有稳定性、分岔和混沌最基本的内容；这部分作者是建议学生自学，因此在该部分开始时专门列出了推荐读物，而且在行文中引用；前面更传统的内容都没有这种处理。该书主要优点是内容处理易于接受，叙述清晰简洁，数学细节详尽。有160余道例题和练习，都有完整的讨论和解答，既有理论的扩展和补充，也有比较具体的应用。该书还有一个值得称道之处是对科学史的重视，行文中涉及的学者都有简要传记，还有专章讨论力学史，附有推荐读物，并在注释中有较为详尽的传记资料。

2.3 《分析力学》^[14]

《分析力学》1998年初版^[14]。第1作者Louis N. Hand于1961年在斯坦福大学获得物理学博士学位，随后在哈佛大学任教，1964年任助理教授，1965年任康奈尔大学副教授，1971年晋升教授，2008年荣休。第2作者Janet D. Finch在康奈尔大学获得理论物理硕士和教学硕士学位后担任物理系教学助理，1994年起与第一作者进行经典力学课程教学。该书的名称虽然是分析力学，但却是为康奈尔大学的中级力学课程经典力学所写的教材。该书作者将经典力学视为引入理论物理所需基本工具的良好时机。写该书是为本科和研究生的物理训练更好衔接，要强调后续课中起重要作用的内容。为此打破中级力学的教学传统，直接从分析力学讲起。分析力学不仅能更容易地推导方程，而且可以通过对称性和守恒量等更深刻地认识系统特性。该书的另一个目的是为讲授后续课需要的数学方法，例如求解特征值和特征向量，同时也与经典力学自身的价值相关——60年代兴起的混沌研究使得经典力学重新成为现代物理的前沿。因此该书也有混沌的导引性阐述。

《分析力学》^[14]的内容分为12章。第1章是Lagrange力学，包括约束、自由度、虚位移、

虚功、广义力、Lagrange 方程、Lagrange 函数、Hamilton 函数和循环坐标。第 2 章是变分法及其在力学中应用，包括变分法简史、Euler 方程、Hamilton 原理、多自由度系统、Lagrange 乘子法、不可积非完整约束和 Maupertuis 原理。第 3 章为单自由度线性振动，包括稳定与不稳定平衡、简谐振子、阻尼简谐振子、外力驱动的振子、Green 函数、 δ 函数、任意力的响应、简谐受迫振子的共振和相差。第 4 章为中心力和 Kepler 问题，单自由度系统定性分析、单摆运动、Kepler 问题的历史、中心力问题求解、引力的特例、轨道类型、平方反比斥力和暗物质。第 5 章为 Noether 定理和 Hamilton 动力学，包括转动不变性与角动量守恒、Noether 定理、Hamilton 动力学、Legendre 变换、Hamilton 运动方程、Liouville 定理及其证明、动量空间、加速系统和 Poincaré 回归定理。第 6 章为从正则变换到作用-角度变量的理论力学，包括正则变换、生成函数 3 种新形式、Boisson 括号、Hamilton-Jacobi 方程、单自由度系统作用-角度变量、可积系统、不变环面与卷绕数、辛性质。第 6 章为转动坐标系，包括矢量的定义、无限小转动与角速度矢量、空间有限转动、转动参考系、瞬时角速度矢量、惯性力、落体偏东、飓风旋转和 Foucault 摆。第 8 章为刚体动力学，包括刚体的动能、惯性矩张量、刚体的动量矩、不受力刚体的 Euler 方程、不受力矩作用的陀螺、地球进动、Euler 角、角速度矢量、无力矩作用非对称陀螺的运动、重对称陀螺、岁差和 Mach 原理。第 9 章为微幅振动，包括耦合摆及其 Lagrange 函数、运动方程的单频解、不同模态的叠加、复模态幅值、线性 3 原子分子、频率和振型的性质和弦线连接多个质点。第 10 章为无精确解问题的近似解法，包括力学系统的稳定性、参数共振、Lindstedt-Poincaré 摄动理论和受迫非线性振子。第 11 章为混沌动力学，包括作为保守混沌的双摆、Poincaré 截面、KAM 环面、无理卷绕数、Poincaré-Birkhoff 定理、不动点领域的线性化、同宿缠绕、Lyapunov 指数、双摆的全局混沌、阻尼驱动摆、分形、太阳系中的混沌、抛物线迭代、倍周期分岔进入混沌和重整化。第 12 章为狭义相对论。

《分析力学》^[14] 的主要特色是非线性动力学内容的整合。在单自由度线性振子一章的习题中，就有非线性振动的习题，虽然该章正文完全没有涉及非线性；单自由度系统一章讨论了保守系统的相轨迹特性，并以单摆为例具体说明；近似解析方法一章聚焦参数振动和非线性振动的经典理论；混沌动力学则分别介绍了保守系统和耗散系统中的混沌，以附录的方式介绍了不太容易纳入经典力学中的 1 维映射中的混沌；这样呈现了相对完整的非线性动力学基础知识，并努力与经典力学有机融合。该书的特点还有注重逻辑与历史的统一，重要的历史发展用整节描述。变分法历史一节，包括 Jean Bernoulli 提出“最速降线”问题，Leibnitz、Daniel Bernoulli 和 Newton 都作出解答，Euler 发展了现代的变分法，Lagrange 应用于力学，Hamilton 提出最小作用原理；Kepler 问题的历史一节，从 Ptolemy 开始，经 Copernicus, Kepler 和 Galileo，最终是 Newton 奠定经典力学的基础；此外在混沌动力学导言中介绍了 Poincaré 在研究限制性三体问题中发现混沌的历史。该书在教学法方面的考虑尤其出色。每章开始有概览，结束时有总结。书中有 150 余道思考题和 250 道习题。部分习题在教材出版前的讨论课上用过，学生分组完成，在课堂上讲解解答。这是书中建议的习题完成方式。对求解的建议是不要像考试答卷，而是像给同伴讲解，即不仅要解答而且要解释答案。

3 结论

本文分析了高级力学和中级力学课程的经典力学教材各 3 部，有如下主要结论。

(1) 教材的理念有不同程度的变化：不仅是为量子力学和统计力学等后续课程提供力学和数学基础，也为经典力学自身发展奠定基础；不仅侧重用不同的方式建立系统运动微分方程，也强调运动微分方程解的定性和定量特性；不仅关注运动微分方程的解析求解方法，也发展定性分析方法和数值仿真算法。

(2) 教材的内容以不同方式更新：所有教材均包括了混沌的内容，深度和广度参差不齐，与传统经典力学整合程度不等；有些高级力学课程

的经典力学教材增加了 Lagrange 力学和 Hamilton 力学的几何描述,同时包括了必要的整体微分几何基础知识,但几何方法还没有进入中级力学课程教材;有些高级力学课程教材包括了经典力学代数结构的基本知识,中级力学课程还没有相关内容,但多数教材都有对称性和 Noether 定理的内容。

(3) 本文与本系列论文的前两篇^[1-2]共同回顾和分析了欧美理科经典力学教材现代化的过程。在 20 世纪 50 年代,之前的理论物理学的力学部分改称为经典力学,并在 50 年代和 60 年代形成了高级力学课程和中级力学课程的传统教学内容,Newton 力学、Lagrange 力学和 Hamilton 力学;20 世纪 70 年代,经典力学的代数结构、几何描述和混沌行为受到关注,使得经典力学重新焕发活力,教材的更新成为必要;一些传统的优秀教材修订时补充了新的知识点,主要是混沌相关内容;还有些现代教材不仅知识有所更新,教学理念也有所变化。

参 考 文 献

- 1 陈立群. 欧美理科经典力学教材的现代化(一)——传统教学内容的形成. 力学与实践, 2023, 45(1): 157-162
Chen Liqun. Updated materials in European and American classical mechanics textbooks for science majors 1— traditional contents formulated. *Mechanics in Engineering*, 2023, 45(1): 157-162 (in Chinese)
- 2 陈立群. 欧美理科经典力学教材的现代化(二)——传统教学内容的更新. 力学与实践, 2023, 45(2): 418-422
Chen Liqun. Updated materials in European and American classical mechanics textbooks for science majors 2— traditional contents revised. *Mechanics in Engineering*, 2023, 45(2): 418-422 (in Chinese)
- 3 Scheck F. *Mechanics: From Newton's Laws to Deterministic Chaos*, 6th edn. Berlin: Springer, 2018
- 4 Scheck F. *Mechanics: From Newton's Laws to Deterministic Chaos*. Beijing: World Publishing Corp, 1992
- 5 José JV, Saletan EJ. *Classical Dynamics: A Contemporary Approach*. Beijing: World Publishing Corp, 2004
- 6 Saletan EJ, Cromer AH. *Theoretical Mechanics*. New York: Wiley, 1971
- 7 Sussman GJ, Wiskom J. *Structure and Interpretation of Classical Mechanics*, 2nd edn. Cambridge: The MIT Press, 2014
- 8 Sussman GJ, Wiskom J. *Structure and Interpretation of Classical Mechanics*. Cambridge: The MIT Press, 2000
- 9 Percival I, Richards D. *Introduction to Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982
- 10 Greiner W. *Classical Mechanics: Systems of Particles and Hamiltonian Dynamics*, 2nd edn. Heidelberg: Springer, 2010
- 11 Greiner W. *Classical Mechanics: Systems of Particles and Hamiltonian Dynamics*. Beijing: World Publishing Corp, 2008
- 12 Greiner W. *Klassische Mechanik II: Teilchensysteme—Lagrange—Hamiltonsche Dynamik—Nichtlineare Phänomene*, 8. Auflage. Noumey: Europa-Lehrmittel, 2008
- 13 Greiner W. *Classical Mechanics: Point Particles and Relativity*. Beijing: World Publishing Corp, 2008
- 14 Hand LN, Finch JD. *Analytical Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998

(责任编辑: 胡 漫)