“十三五”国家重点图书出版规划项目

中外物理学精品书系

前沿系列·48

从动力学到统计物理学

郑志刚　胡　岗　著

北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

“十三五”国家重点图书出版规划项目

中外物理学精品书系

前沿系列·48

从动力学到统计物理学

郑志刚 胡岗 著

北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

从动力学到统计物理学/郑志刚，胡岗著. —北京：北京大学出版社，2016.10
（中外物理学精品书系）
ISBN 978-7-301-27660-0

Ⅰ. ①从… Ⅱ. ①郑… ②胡… Ⅲ. ①动力学—研究 ②统计物理学—研究
Ⅳ. ①O313 ②O414.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 247517 号

书　　名	从动力学到统计物理学 CONG DONGLIXUE DAO TONGJI WULIXUE
著作责任者	郑志刚　胡　岗　著
责任编辑	刘　啸
标准书号	ISBN 978-7-301-27660-0
出版发行	北京大学出版社
地　　址	北京市海淀区成府路 205 号　100871
网　　址	http://www.pup.cn
电子信箱	zpup@pup.cn
新浪微博	@北京大学出版社
电　　话	邮购部 62752015　发行部 62750672　编辑部 62752021
印 刷 者	北京中科印刷有限公司
经 销 者	新华书店
	730 毫米×980 毫米　16 开本　32 印张　插页 3　610 千字
	2016 年 10 月第 1 版　2016 年 10 月第 1 次印刷
定　　价	89.00 元

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究

举报电话：010-62752024　电子信箱：fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题，请与出版部联系，电话：010-62756370

“十三五”国家重点图书出版规划项目

“中外物理学精品书系”
编 委 会

主　任：王恩哥

副主任：夏建白

编　委：（按姓氏笔画排序，标＊号者为执行编委）

王力军	王孝群	王　牧	王鼎盛	石　兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱　星
向　涛	刘　川＊	许宁生	许京军	张　酣＊
张富春	陈志坚＊	林海青	欧阳钟灿	周月梅＊
郑春开＊	赵光达	聂玉昕	徐仁新＊	郭　卫＊
资　剑	龚旗煌	崔　田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘　书：陈小红

需要全本请访问 www.ertongbook.com

序　言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础，同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天，物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴，而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到，改革开放三十多年来，随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展，我国物理学取得了跨越式的进步，做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下，近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势，在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看，尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书，但系统总结物理学各门类知识和发展，深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源，并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考，仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展，特别是展现近年来中国物理学者的研究水平和成果，北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了“中外物理学精品书系”，试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家，确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富，涵盖面广，可读性强，其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结，也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示；既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态，也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说，“中外物理学精品书系”力图完整呈现近现代世界和中国物理

科学发展的全貌，是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

“中外物理学精品书系”另一个突出特点是，在把西方物理的精华要义“请进来”的同时，也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻，引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态，可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面，改革开放几十年来，我国的物理学研究取得了长足发展，一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域，使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解，不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”，也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”，对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是，“中外物理学精品书系”还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20 世纪以来，中国物理界诞生了很多经典作品，但当时大都分散出版，如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中，读者们对这些论著也都是“只闻其声，未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫，对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值，不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献，充分发挥其应有的传世育人的作用，更能使广大物理学人和青年学子切身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统，真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在 2006 年中国科学技术大会上指出，“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径，是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新，而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信，这套“中外物理学精品书系”的出版，不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣，也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展，为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

“中外物理学精品书系”编委会 主任

中国科学院院士，北京大学教授

王恩哥

2010 年 5 月于燕园

内容提要

本书从动力学出发讨论了平衡态和非平衡态统计物理的基本问题以及与此密切相关的一些重要应用，介绍了这一领域的重要研究成果，例如非线性动力学的内禀随机性问题、从动力学的遍历理论到平衡态统计物理基本问题、少体系统动力学与平衡和非平衡统计物理、非平衡体系的涨落定理、低维系统热传导与反常扩散、分子马达与定向输运等. 本书第 1 章通过系统论述确定性动力系统的不稳定性与内禀随机动力学阐明了随机性的微观动力学起源，为动力系统的统计和热力学描述提供了理论基础. 第 2 章进一步建立了有限自由度系统的平衡态统计描述，系统阐述了遍历理论的基本内容，并通过微分几何理论论述了微观系统的动力学特征与微分几何拓扑特征的关系，以及它们的变化与平衡态相变等宏观热力学行为的密切联系. 第 3 章以耗散可逆动力系统为基础建立了对非平衡态系统的确定性描述，并在混沌假设的基础上建立起测度不变分布，详细介绍了加拉沃蒂-科恩涨落定理、伊万斯-瑟尔斯瞬时涨落定理、加津斯基自由能等式与克鲁克斯涨落定理及变温自由能等式等几个典型的非平衡涨落关系. 第 4 章系统阐述了低维和少体系统的热传导行为及其调控，探讨非线性、不可积性、遍历性与混沌等微观动力学特征对宏观热传导的影响，并从集体激发模式与能量载流子的角度来进行研究. 第 5 章对非平衡定向输运问题进行了讨论，从动力学、统计物理、热力学等方面对无方向偏置系统出现的定向输运进行了分析，并对生物分子马达从生物特征、动力学的物理建模及影响马达与定向输运的各种因素等方面进行了讨论.

本书可供从事统计物理、复杂性科学及其非线性动力学研究的工作者、理工科大学的教师、大学高年级学生和研究生阅读，对在相关交叉领域从事应用研究的同行也有一定的参考价值，也可为现行非线性动力学及统计物理教学与教材等提供有益的材料.

前　言

这是一本试图在动力学与统计物理学之间架起桥梁的书. 动力学指的是一个系统在微观自由度层面的变量的演化行为，在物理上由经典力学或量子力学来描写. 统计物理学则是一门对一个系统宏观热力学给予统计解释的学科. 要架起一座桥梁并不容易，因为虽然统计物理学已经发展了 100 多年，但动力学与统计力学的关系至今仍然是一个颇具争议的问题，历史上它被称为统计物理基本问题. 微观动力学与统计力学及宏观热力学的关系在平衡态与非平衡态统计物理中都广泛存在. 近年来随着小系统、小尺度、非广延、非平衡等因素的介入，有关基本问题的研究由于涉及统计力学的根基而显得更加重要.

传统统计物理学的研究对象是由大量单元组成的热力学系统，它成功地从微观出发阐述了大自由度系统的宏观热力学现象及各种宏观行为的转变. 通过引进合理的统计假设及考虑系统的各种作用，统计物理可以利用系综运算处理微观层次的复杂性，从而在宏观层次上理解热力学的一般规律. 如今统计物理的思想方法和研究成果已被用于大量的领域.

统计物理自诞生之日起就面临两对矛盾的挑战. 一是系统微观动力学的确定性与统计物理研究对象行为的随机性之间的矛盾. 这引出了统计物理的第一个基本问题，即统计性或随机性的动力学根源. 第二对矛盾则是系统微观动力学的时间可逆性与宏观热力学过程的不可逆性之间的矛盾. 这引出了统计力学中最古老和最有趣的问题之一，即第二个基本问题——宏观热力学时间不可逆性的微观起源.

历史上对上述两对矛盾的研究是相互关联的. 在微观世界中，分子运动所遵循的运动方程对时间反演不变，这种微观可逆性在某种条件下会在宏观热力学上体现出来，例如非平衡输运过程中的昂萨格倒易关系就是典型的漂亮结果. 然而一般情况下，热力学过程的不可逆性是热力学的根本特点，它由热力学第二定律给出. 统计物理学先驱玻尔兹曼于 1872 年推导出了稀薄气体单

体约化概率分布随时间演化的方程，并推导了单粒子熵随时间单调演化的 H 定理，阐释了气体系统热力学过程的不可逆性. 这个方程取得了巨大成功，成为百年来气体系统非平衡演化及流体力学的奠基性方程，但也受到了一些物理学家和数学家的猛烈攻击. 为从动力学层面解释宏观不可逆性，玻尔兹曼提出了遍历性，由此开启了遍历理论的建立和发展过程. 遍历理论在动力学和统计之间搭建了从微观到宏观的重要桥梁，此课题的重要性和意义在混沌动力学研究开展的几十年后已不言自明. 近几十年来的研究已经表明，系统微观动力学遍历性揭示了随机性和统计手段的内在起源，它们并非来自外来因素，而是来自系统微观动力学的不稳定性与内禀随机性，其中微观动力学的不稳定性密切联系着宏观过程的不可逆性. 因此，从统计意义上来看，宏观过程的不可逆性与微观动力学的可逆性二者之间并不矛盾. 在此意义上，系统的无限大自由度已不是决定性的因素. 人们可以系统建立少自由度系统的统计力学及热力学.

虽然关于热力学系统平衡态的微观动力学与统计之间的关系已基本清楚，但人们对非平衡态的理解，无论从宏观层面还是微观层面上都还远未清楚，系统动力学的非线性与复杂性产生的非平衡过程的多样性是建立普遍性基础理论的主要困难之一. 非平衡态统计理论同样涉及类似于平衡态统计的基本问题，即动力学与统计之间的关系问题，称为非平衡态统计物理基本问题. 在过去的半个多世纪里，非平衡态统计力学和不可逆过程热力学理论研究和框架构建也取得了许多令人振奋的进展. 非平衡现象的研究领域已经从近平衡态扩展到了远离平衡态的系统，普利高津的耗散结构论与哈肯的协同学等一系列成果掀起了人们对非平衡系统研究的热潮，对各种非平衡现象及其内在本质普遍规律的细致深入研究已经成为了当前理论物理和其他交叉学科的重要前沿课题. 纳米尺度下的非平衡行为在近二十年成为研究的热点. 在纳米尺度下，一些效应变得非常重要，人们发现了系统在非平衡条件下的一系列称为涨落定理的行为关系，其中包括 1995 年加拉沃蒂与科恩针对满足阿诺索夫性的系统在混沌假设下提出的基于动力学层面的涨落定理、伊万斯与瑟尔斯在 1994 年从统计系综的角度对正逆过程的不对称性进行阐述及提出的瞬时涨落定理、加津斯基于 1997 年在热力学层面对一般非平衡过程热力学量之间关系的自由能等式、1998 年克鲁克斯建立的热力学过程做功概率满足的半热力学涨落定理等. 这些定理或关系的提出及其诠释是对一个多世纪以前统计物理基本问题和不可逆性起源问题的延续，人们在从动力学到热力学的不同层面以小系统为研究对象取得了更为深刻的理论结果，为 100 多年前的那

些论战提供了更为清晰的回答.另一方面,由于小尺度和小系统热力学本身就是近年来随技术发展已经提上日程的应用研究的重要问题,因此这些理论研究成果跨越了少体系统的平衡态和非平衡态统计物理与应用之间的鸿沟,实验研究为理论提供了重要的实例验证,理论结果又为小系统的热力学分析及测量提供了理论依据和方法.

有关热力学第二定律基本问题讨论的本质是对非平衡过程的理解.自然界大量的非平衡物理过程、化学反应动力学、生命过程乃至人类社会各种活动等表面上看起来似乎完全不同的非平衡现象背后是非平衡区域的输运行为,它们通过物质、能量或信息的时空迁移过程,如扩散、漂移、热传导、黏滞性等宏观现象展现出来.近年来,作用于系统上的外力总效果为零甚至无偏置外力情况下物质或能量在空间中产生的定向输运问题受到了广泛关注,对这一大类问题的研究有助于深入理解各种非平衡过程,而从非线性动力学到非平衡统计及输运过程的分析手段为此提供了有力的工具.

热传导是能量在空间的定向输运过程,是典型的非平衡统计热力学问题.传统热传导问题是非平衡热力学系统输运理论与线性响应理论的重要组成部分,其早期研究主要采用唯象理论,并得到了线性响应下的傅里叶定律.基于经典和量子的微观动力学,利用统计物理方法导出热传导基本定律是非常重要的课题.低维与纳米材料的热传导理论与实验研究近年来形成了两个方面的小热潮,一个方面是正常热导率的动力学机制研究,另外一个方面则是低维体系热传导行为的应用,特别是热调控器件的理论与实验研究.

正常热导率的问题是热传导微观动力学机制研究中非常重要的问题.近年来人们发现,低维体系的热导率不仅与材料性质有关,而且还可能是系统尺寸的函数,这种反常的热导率现象引起了人们的极大兴趣.人们从微观动力学的不同角度对大量一维和二维系统的热传导性质开展了研究,使得微观动力学行为与宏观能量输运之间的关系扩展到了更深入的从非线性动力学、声子与非线性模式动力学等角度对热传导机制的解释.这些研究促进了大自由度系统的统计性质、集体模激发性质、非线性波等相关问题的研究.基于声子图像的热传导微观理论,特别是声子的重整化理论不仅解释了热传导的微观机制,而且成功地应用到了低维材料的热导性质参数的计算中.

热传导微观机制的研究也为实现能量输运与热传导过程的调控提供了必要的理论基础.以近年来通过引入缺陷成功控制热流而开辟热输运调控的新方向为起点,人们提出了热二极管、热三极管、热逻辑门等热调控器件的基本机制,并已在实验研究方面取得了进展.这些潜在的应用推动沉寂多年的声子

需要全本请访问 www.ertongbook.com

学作为一门兼跨理论研究与实际应用的学科与电子学和光子学等站在一起，焕发出新的生机和活力.

非平衡系统在外力总效果为零的情况下发生定向输运，意味着内部或外部的某些对称性被打破，以此将非定向驱动的能量或涨落转化为定向的物质流动或做功. 这种现象在物理上称为棘轮效应. 在生物学中也有一类与此相关的被称为分子马达的分子机器. 分子马达的行为是生命活动中最典型、最基本的非平衡现象. 生命体区别于非生命体的重要标志是主动运动，实现各种主动的运动是通过被称为分子马达的蛋白酶来完成的，它们扮演着生命宏观活动的微观守护神的角色，在生物体内无处不在，并执行着如肌肉收缩、细胞内和细胞间的物质输运、DNA 复制、细胞分裂等各种各样的生物功能. 因此，探索细胞层次的生命运动不仅是生物学的重要使命，也是物理学家非常感兴趣的领域.

分子马达的结构和功能具有多样性. 另一方面，很多不同种类的分子马达分享着类似的基本物理原理. 因此，即使不同分子马达进化过程毫不相关，生物功能也各不相同，但对某一分子马达的分析都可以不断地启示我们对其他分子马达功能的确定. 物理学家更喜欢透过现象看本质，并通过建立简单的模型来探讨分子马达产生定向输运的生物复杂性行为，通过了解这些不同种类的分子马达的结构和功能，进一步在物理上利用简单的机理和方程来揭示和描述其运动. 对于分子马达功能的深入和更为丰富的理解，需要生物学、物理学、化学和力学的交叉. 生物分子马达的研究是近年来生物学和物理学融合成果丰硕的热点领域之一. 由于分子马达蛋白尺度小以及它们的工作大多处在热运动起重要作用的条件下，测量分子马达速率及发现相关的物理量在技术上就很具挑战性. 许多用于各种物理概念测量的精巧技术大部分是由生物学家和物理学家一起合作开发的.

上述的一系列涉及统计物理的激动人心的新课题表明了一个重要事实，那就是系统的微观动力学扮演着重要的角色. 一方面，微观动力学的遍历理论为统计思想和方法的运用提供了基础，架起了从动力学到统计的桥梁；另一方面，微观动力学远远不限于满足遍历性这样相对简单的满足一定统计性的特征，遍历性破缺的情形随处可见. 系统在微观动力学上的这种复杂性使得系统会表现出各种非平衡的宏观涌现行为. 物理上的平衡态与非平衡态相变就为我们展现了丰富多彩的由于遍历性破缺或对称破缺而产生的现象. 我们不准备在本书中对这些问题的各个方面进行面面俱到的讨论，而是集中论述平衡态和非平衡态统计物理的基本问题及其近年来围绕基本问题的一些重要研究

成果，主要内容包括非线性动力学内禀随机性的问题，平衡态统计物理基本问题，即动力系统理论与遍历理论，少体系统的平衡与非平衡态统计物理，有限非平衡体系的涨落定理，低维体系的热传导与反常扩散，分子马达与定向输运等. 本书自始至终贯穿的一条主线是热力学与统计力学中微观动力学扮演着重要角色的那些宏观集体行为. 本书的内容安排如下：

第 1 章将系统阐述确定性动力学系统的不稳定性与内禀随机动力学. 我们从经典力学开始，以哈密顿系统的混沌行为为核心切入问题的讨论，通过对混沌动力学的详细分析来阐明随机性的微观动力学起源于非线性系统的动力学不稳定性及其导致的混沌运动. 混沌动力学研究表明，确定性系统会由于“差若毫厘，谬以千里”的初值敏感性混沌特点而导致长时间行为的随机性，这一特征缩小了确定论和随机论之间的鸿沟，为动力学系统的统计描述提供了理论基础. 对具有随机性的动力学系统有必要引入概率描述，而统计力学的思想和方法也将自然地进入动力学系统的框架和分析之中.

第 2 章将在第 1 章的基础上完成从动力学到统计的过渡，进一步建立对有限自由度系统的平衡态统计描述. 我们将系统阐述遍历理论的基本内容，将动力学系统的随机性概念，如回归性、遍历性、混合性、K 系统、阿诺索夫系统等按照由弱到强的顺序加以介绍，并在遍历性基础上建立少体系统的统计力学框架. 大自由度哈密顿系统的统计热力学及其平衡态相变与哈密顿动力学特征有密切联系，通过建立哈密顿系统的微分几何理论，人们不仅可以利用微分几何的拓扑量来计算哈密顿系统的动力学特征指数，而且可以发现系统的动力学特征、几何拓扑特征的变化与平衡态相变等宏观热力学行为的密切联系. 这将是该章的重要内容之一.

第 3 章将讨论非平衡系统的基本问题及其应用. 随着计算机模拟的广泛应用和纳米尺度实验技术的出现，人们有条件深入研究系统处于非平衡态下纳米尺度小系统的动力学行为细节，并发现了一系列被称为涨落定理的非平衡关系. 该方面的研究在近二十年中取得了长足的进步，并对纳米尺度下系统的研究产生了实质性推动. 这一系列的突破来自于几个与小系统非平衡涨落有关的定理的发现和建立. 在第 3 章中，我们将集中介绍小系统的非平衡涨落效应. 首先该章以耗散可逆动力学系统为基础建立对处于非平衡态的系统的确定性描述，并在混沌假设的基础上建立起 SRB 不变分布. 然后我们将详细介绍几个重要的，包括加拉沃蒂-科恩涨落定理、伊万斯-瑟尔斯涨落定理、加津斯基自由能等式和克鲁克斯涨落关系在内的非平衡涨落关系. 以少体硬球系统为例，我们还将从动力学系统出发讨论非平衡不可逆过程.

第 4 章将对低维和少体系统的热传导行为及其调控进行系统阐述，试图从微观动力学角度对宏观热传导的机制及其应用进行探讨. 在能量输运和热传导的微观动力学机制研究方面，我们将从两个层面加以考虑. 第一个层面是考虑系统的微观哈密顿力学，探讨非线性、不可积性、遍历性与混沌等微观动力学特征对宏观热传导的影响，特别要探讨在诸多动力学特征中哪些因素与正常热导率直接相关. 第二个层面是从能量载流子的角度来进行研究. 热传导系统微观动力学中的集体激发模式是实现能量空间迁移输运的重要因素，其中典型的线性激发模式是声子，而高温下系统的非线性相互作用会使得非线性激发模，如孤子和呼吸子等在能量输运中变得重要起来. 近些年提出来的重整化声子理论将声子动力学由线性区域推广到了非线性情形.

第 5 章将着重讨论从生物分子马达与物理学背景下抽象出来的非平衡定向输运问题，并从动力学、统计物理和热力学方面加以分析. 传统的关于物理定向输运的研究是从热力学，特别是热机及其密切相关的热力学第二定律开始的，是非平衡态情况下的有限时间热机问题的延伸. 生物分子马达作为精巧的热力学机器用传统的热力学是无法简单描述的，用单纯的统计力学方法也是不够的，不仅要考虑分子马达蛋白的内部构型及其构型变化过程，还要考虑化学供能的过程以及该过程与力学做功过程的结合. 从这一点来看，生物分子马达的刻画与描述过程中，内部动力学的非线性效应、化学供能过程与机械做功过程的耦合等因素不可避免，甚至起着重要和关键的作用. 本章通过对分子马达生物学机理、动力学建模、各种动力学参数对马达行为形成和效率的影响的分析等论述了这些作用.

为使读者更好地阅读本书，我们一方面力求在基本知识铺垫的基础上展现最新的进展，另一方面尽可能通过合理的内容安排使读者可以相对独立地单独阅读每一章的内容. 对于个别在不同章节出现的共同的基础知识，本书在附录部分给出. 本书通过综合、全面地向读者展示统计物理基本问题与理论及其应用的新发展，希望以此引起读者的兴趣，并对现行统计物理教学与教材等提供有益的材料.

本书主体内容的写作基于两位作者多年来的科研及教学工作及其与诸多同事、研究生的讨论合作. 我们自 1992 年开始的师生之谊及对动力学与统计物理学之间关系的共同探索兴趣支撑着这二十多年的密切合作. 我们共同完成了一批该方面的研究工作. 在此感谢岁月赐予我们的珍贵友谊和这本以我们成果积淀为基础的专著. 作者要感谢已故的休斯敦大学教授、香港浸会大学物理系前系主任、非线性研究中心主任胡斑比先生. 两位作者与斑比先生的

合作始于1996年，近20年的合作和友谊跨越了世纪，跨越了香江的历史变迁，跨越了统计物理学与非线性动力学的界限. 我们谨以本书来纪念我们的挚友胡斑比先生. 作者还要感谢学界的郝柏林、于禄、陈式刚、孙义燧、葛墨林、欧阳钟灿、郑伟谋、刘寄星、龙桂鲁、孙昌璞、欧阳颀、胡进锟、汪秉宏、何大韧、Michael Cross、来颖诚、屈支林、汤雷瀚、李保文、Choi-Heng Lai、赵鸿、王炜、刘杰、刘宗华等各位教授的学术支持与合作，众多的前辈与朋友，长长的名单，恕不能一一列出，在此一并致谢. 作者感谢北京师范大学非平衡统计物理与非线性动力学课题组多年来的研究生们，正是与他们的不断合作，教学相长，才使得本书的一些科研成果逐渐沉淀成为可以写入教科书的内容. 感谢北京师范大学的方福康、杨展如、狄增如、张丰收、晏世伟、包景东、邵久书、李新奇、严大东、涂展春等同事，本书所涉及的领域自20世纪80年代起就是北师大物理学科的特色. 作者蒙北师大众多统计物理与非线性科学领域的同行与合作者的鼓励、讨论与指点，相互学习，取长补短.

作者感谢多年来国家自然科学基金委、科技部973项目、教育部、北京师范大学、华侨大学等多方科研项目的支持. 感谢夏建白院士、王恩哥院士对我们撰写本书的盛情邀请.

目　录

第 1 章　非线性系统的动力学与混沌 …… (1)
§1.1　引言 …… (1)
§1.2　从牛顿力学到拉格朗日与哈密顿力学 …… (9)
§1.3　哈密顿系统的运动积分与正则变换 …… (15)
§1.4　可积系统的动力学 …… (25)
§1.5　近可积系统——小分母问题与 KAM 定理 …… (33)
§1.6　庞加莱-伯克霍夫定理与混沌运动 …… (42)
§1.7　走向混沌——从蝴蝶效应谈起 …… (59)
§1.8　分形几何与奇异吸引子 …… (80)

第 2 章　从动力学到平衡态统计物理 …… (102)
§2.1　统计物理基本问题研究概述与历史回顾 …… (102)
§2.2　遍历理论 …… (112)
§2.3　少体系统的统计与热力学 …… (132)
§2.4　硬球系统的统计力学 …… (138)
§2.5　哈密顿系统动力学的微分几何理论 …… (152)
§2.6　哈密顿系统的李指数与平衡态相变 …… (162)

第 3 章　少体系统的非平衡涨落理论与自由能关系 …… (179)
§3.1　近平衡态热力学简介 …… (182)
§3.2　非平衡统计物理基本问题 …… (191)
§3.3　基于微观动力学的涨落定理 …… (202)
§3.4　加津斯基自由能等式 …… (208)
§3.5　克鲁克斯涨落关系 …… (222)
§3.6　变温热力学过程自由能关系 …… (227)
§3.7　少体硬球系统的不可逆过程与涨落 …… (239)

第 4 章　非线性系统的热传导与动力学 …… (255)
§4.1　非线性系统热传导引论 …… (255)
§4.2　热传导过程的理论研究方法 …… (261)
§4.3　动力学系统的遍历性质与热传导 …… (271)

§4.4 晶格热传导的声子气体理论 …… (291)
§4.5 声子重整化理论 …… (309)
§4.6 热传导与非线性能量载流子 …… (319)
§4.7 反常热传导与反常扩散 …… (340)

第5章 分子马达动力学与合作定向输运 …… (351)
§5.1 热力学棘轮与布朗马达 …… (353)
§5.2 布朗马达的定向输运 …… (360)
§5.3 生命体内的分子马达 …… (377)
§5.4 分子马达动力学机制与物理建模 …… (387)
§5.5 耦合作用对定向输运的影响 …… (405)
§5.6 耦合引起的对称破缺与定向输运 …… (414)

附录A 张量与黎曼几何初步 …… (432)
A.1 张量分析与对称性 …… (432)
A.2 矢量平移、仿射联络与协变微商 …… (434)
A.3 曲率张量与测地线方程 …… (436)
A.4 黎曼空间的度规张量与克氏联络 …… (438)
A.5 黎曼空间中的测地线与曲率张量 …… (440)

附录B 布朗粒子在势场中的逃逸与跃迁 …… (442)
B.1 克莱默斯逃逸速率 …… (442)
B.2 首通时间 …… (445)
B.3 福克-普朗克方程非定态与逃逸率 …… (447)

附录C 分数阶微积分简介 …… (450)
C.1 常见的分数阶微积分定义 …… (451)
C.2 分数阶微积分的性质 …… (454)
C.3 分数阶导数的拉普拉斯变换与傅里叶变换 …… (455)

参考文献 …… (458)

需要全本请访问 www.ertongbook.com