



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

软物质前沿科学丛书

纳米机器 ——基础与应用

Nanomachines: Fundamentals and Applications

[美] Joseph Wang/著 王威/译



科学出版社



龍門書局



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLISHING FOUNDATION

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

软物质前沿科学丛书

纳米机器

——基础与应用

Nanomachines: Fundamentals and Applications

[美] Joseph Wang 著

王威译

科学出版社
龙门书局

北京

图字: 01-2018-8369

内 容 简 介

本书的英文原版出版于2013年,作者是美国加州大学圣地亚哥分校的知名学者 Joseph Wang 教授。本书共7章,第1章讲述纳米尺度运动的基本特征及挑战,第2章讨论生物纳米机器,第3章概述分子和DNA机器,第4章讨论利用化学催化驱动的纳米机器,第5章讨论无需燃料驱动的纳米机器,第6章介绍微纳米机器在不同领域的潜在应用,包括药物输送、样品分离、环境监测等,最后第7章讨论本领域未来的发展前景、机遇和挑战。

本书对于微纳米机器领域的科研人员、研究生是一本很有价值的参考书,能够帮助大家形成清晰的研究大局观,并掌握扎实的基础知识和研究进展。除此之外,本书还适合对纳米技术的前沿科学问题与应用感兴趣的研究生、高年级本科生及同等知识水平读者。

All Right Reserved. Authorised Translation from the English Language edition published by John Wiley & Sons, Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with China Science Publishing & Media Ltd. (Science Press) and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

图书在版编目(CIP)数据

纳米机器:基础与应用/(美)约瑟夫·王(Joseph Wang)著;王威译. —北京:龙门书局,2019.1

(软物质前沿科学丛书)

书名原文: Nanomachines: Fundamentals and Applications

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 国家出版基金项目

ISBN 978-7-5088-5528-8

I. ①纳… II. ①约… ②王… III. ①纳米技术 IV. ①TB383

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第008267号

责任编辑:钱俊 陈艳峰/责任校对:杨然

责任印制:吴兆东/封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2019年1月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:220 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛 书 序

社会文明的进步、历史的断代，通常以人类掌握的技术工具材料来刻画，如远古的石器时代、商周的青铜器时代、在冶炼青铜的基础上逐渐掌握了冶炼铁的技术之后的铁器时代，这些时代的名称反映了人类最初学会使用的主要是硬物质。同样，20 世纪的物理学家一开始也是致力于研究硬物质，像金属、半导体以及陶瓷，掌握这些材料使大规模集成电路技术成为可能，并开创了信息时代。进入 21 世纪，人们自然要问，什么材料代表当今时代的特征？什么是物理学最有发展前途的新研究领域？

1991 年诺贝尔物理学奖得主德热纳最先给出回答：这个领域就是其得奖演讲的题目——“软物质”。以《欧洲物理杂志》B 分册的划分，它也被称为软凝聚态物质，所辖学科依次为液晶、聚合物、双亲分子、生物膜、胶体、黏胶及颗粒等。

2004 年，以 1977 年诺贝尔物理学奖得主、固体物理学家 P.W. 安德森为首的 80 余位著名物理学家曾以“关联物质新领域”为题召开研讨会，将凝聚态物理分为硬物质物理与软物质物理，认为软物质（包括生物体系）面临新的问题和挑战，需要发展新的物理学。

2005 年，《Science》提出了 125 个世界性科学前沿问题，其中 13 个直接与软物质交叉学科有关。“自组织的发展程度”更是被列入前 25 个最重要的世界性课题中的第 18 位，“玻璃化转变和玻璃的本质”也被认为是最具有挑战性的基础物理问题以及当今凝聚态物理的一个重大研究前沿。

进入新世纪，软物质在国外受到高度重视，如 2015 年，爱丁堡大学软物质领域学者 Michael Cates 教授被选为剑桥大学卢卡斯讲座教授。大家知道，这个讲座是时代研究热门领域的方向标，牛顿、霍金都任过这个最著名的卢卡斯讲座教授。发达国家多数大学的物理系和研究机构已纷纷建立软物质物理的研究方向。

虽然在软物质研究的早期历史上，享誉世界的大科学家如爱因斯坦、朗缪尔、弗洛里等都做出过开创性贡献，荣获诺贝尔物理奖或化学奖。但软物质物理学发展更为迅猛还是自德热纳 1991 年正式命名“软物质”以来，软物质物理不仅大大拓展了物理学的研究对象，还对物理学基础研究尤其是与非平衡现象（如生命现象）密切相关的物理学提出了重大挑战。软物质泛指处于固体和理想流体之间的复杂的凝聚态物质，主要共同点是其基本单元之间的相互作用比较弱（约为室温热能量级），因而易受温度影响，熵效应显著，且易形成有序结构。因此具有显著热波动、多个亚稳状态、介观尺度自组装结构、熵驱动的顺序无序相变、宏观的灵活性等特征。简单地说，这些体系都体现了“小刺激，大反应”和强非线性的特性。这些特性

并非仅仅由纳观组织或原子或分子的水平结构决定,更多是由介观多级自组装结构决定。处于这种状态的常见物质体系包括胶体、液晶、高分子及超分子、泡沫、乳液、凝胶、颗粒物质、玻璃、生物体系等。软物质不仅广泛存在于自然界,而且由于其丰富、奇特的物理学性质,在人类的生活和生产活动中也得到广泛应用,常见的有液晶、柔性电子、塑料、橡胶、颜料、墨水、牙膏、清洁剂、护肤品、食品添加剂等。由于其巨大的实用性以及迷人的物理性质,软物质自19世纪中后期进入科学家视野以来,就不断吸引着来自物理、化学、力学、生物学、材料科学、医学、数学等不同学科领域的大批研究者。近二十年来更是快速发展成为一个高度交叉的庞大的研究方向,在基础科学和实际应用方面都有重大意义。

为推动我国软物质研究,为国民经济做出应有贡献,在国家自然科学基金委员会中国科学院学科发展战略研究合作项目“软凝聚态物理学的若干前沿问题”(2013.7~2015.6)资助下,本丛书主编组织了我国高校与科研院所上百位分布在数学、物理、化学、生命科学、力学等领域的长期从事软物质研究的科技工作者,参与本项目的研究工作。在充分调研的基础上,通过多次召开软物质科研论坛与研讨会,完成了一份80万字研究报告,全面系统地展现了软凝聚态物理学的发展历史、国内外研究现状,凝练出该交叉学科的重要研究方向,为我国科技管理部门部署软物质物理研究提供一份既翔实又前瞻的路线图。

作为战略报告的推广成果,参加本项目的部分专家在《物理学报》出版了软凝聚态物理学术专辑,共计30篇综述。同时,本项目还受到科学出版社关注,双方达成了“软物质前沿科学丛书”的出版计划。这将是国内第一套系统总结该领域理论、实验和方法的专业丛书,对从事相关领域的研究人员将起到重要参考作用。因此,我们与科学出版社商讨了合作事项,成立了丛书编委会,并对丛书做了初步规划。编委会邀请了30多位不同背景的软物质领域的国内外专家共同完成这一系列专著。这套丛书将为读者提供软物质研究从基础到前沿的各个领域的最新进展,涵盖软物质研究的主要方面,包括理论建模、先进的探测和加工技术等。

由于我们对于软物质这一发展中的交叉科学的了解不很全面,不可能做到计划的“一劳永逸”,而且缺乏组织出版一个进行时学科的丛书的实践经验,为此,我们要特别感谢科学出版社钱俊编辑,他跟踪了我们咨询项目启动到完成的全过程,并参与本丛书的策划。

我们欢迎更多相关同行撰写著作加入本丛书,为推动软物质科学在国内的发展做出贡献。

主 编 欧阳钟灿

执行主编 刘向阳

2017年8月

中文版序言

自然界中高效的生物马达是经过亿万年的进化而出现的，并且在许多生物过程和细胞活动中有广泛的用途。不论宏观生命体还是微生物，都离不开这些微小的生物马达孜孜不倦的运动。最近十五年来，受这些精妙的微纳生物马达的启发，并受益于纳米技术的突飞猛进，科学家付出了巨大的心力，设计出许多种人工合成的微纳米马达。它们能够在微纳米尺度将各种形式的能量转换为运动，也因此蕴含着巨大的挑战和机遇。近年来，我们已经在微纳米机器的驱动、控制、功能化和多样化等方面取得了长足的进步，而对微纳米机器的研究也已经成长为一个具有广阔应用前景的激动人心的领域。随着学术界和社会大众对纳米机器的兴趣不断攀升，纳米机器领域在可预见的未来将获得飞速的发展，为许多领域带来深刻的变革，并大大改善我们的生活质量。

来自中国的科学家在纳米机器领域做出了许多卓越的贡献，制备了利用多种方式驱动、能够执行多种任务的微纳米机器。借此机会，我想感谢我的中国同事和合作者们——包括我的实验室里许多中国学生和访问学者，感谢他们的奇思妙想和丰硕的成果。我衷心希望全世界课题组能够团结协作，将微纳米机器（微纳米马达）领域的研究推向新的高度。最后，我要特别感谢哈尔滨工业大学（深圳）的王威教授，谢谢他为将英文版《纳米机器》一书翻译为中文所做的努力。

Joseph Wang

2018年5月，于美国圣地亚哥

Preface

Nature has created efficient biomotors through millions of years of evolution and uses them in numerous biological processes and cellular activities. The movement of these tiny biomotors is essential for life in the macroscopic and nanoscopic scales. Inspired by the sophistication of nature biomotors and driven by recent nanotechnological advances, tremendous efforts over the past 15 years have been devoted to the design of efficient synthetic micro/nanoscale motors that convert diverse energies into movement. Designing and powering new synthetic nano/micro scale motors represent a major challenge and opportunity. Recent development have led to major advances in the power, motion control, functionality and versatility of these tiny machines. Nanomachines is an exciting research field which offers considerable potential for a wide range of applications. The tremendous interest in this topic indicates that nanomachines will advance rapidly in the near and foreseeable future. These advances are expected to have profound impact upon numerous fields and to bring new benefits to our quality of life.

Researchers in China have made tremendous pioneering contributions to the field of nanomachines that led to powerful devices propelled by different mechanisms and performing diverse tasks. I would like to thank all my Chinese colleagues and collaborators - including numerous Chinese students and visitors to my laboratories - for their impressive innovative ideas and remarkable achievements. I hope that such close collaboration between research groups around the world will move the field of micromotors to the next level. Special thanks to Professor Wei Wang from Shenzhen for his great effort towards realizing this wonderful new Chinese version of my *Nanomachines* book.

Joseph Wang
San Diego, USA
May 2018

译者序

什么是纳米机器 (nanomachines)?

这四个字常常让人与科幻小说或者科幻电影联系在一起。读者的脑海中可能会浮现出在血管中穿梭的小小机器人,有几个尖利的爪子,躲避着红细胞、白细胞,或者喷出药物,或者切割钻削,为守护健康而奔波;或者会联想到科幻电影中用于修复星际战舰船体的纳米机器人,在没有硝烟和声音的战场上,把破损的结构拆除、分解、修复。一想到这些场景,年轻的孩子们可能会兴奋憧憬,而年长的人们则往往会半信半疑甚至嗤之以鼻。1 纳米 (nanometer) 是 1 米的十亿分之一,这些比头发丝 (大约粗 5 万纳米,或者说 50 微米) 还细得多的纳米机器人似乎威力无穷但又遥不可及,近几十年来常常被人提起,却又好像从未真正出现过。

或许纳米机器终究只是科学家和科幻圈的一场小众狂欢?

这样的质疑和悲观似乎十分有道理。自 20 世纪五六十年代以来,在科技发展的大多数时间里,对纳米机器的研发都处于憧憬和梦想之中。纳米尺度的物体运动要克服太多的艰辛险阻。比如,物体越小,受到空气、水分子的不规则撞击影响就越大。这种被称为“布朗运动”的效应在宏观上几乎无法察觉,但在微观上会让物体的运动变得十分无规则。而当物体越来越小,我们就需要克服越来越明显的布朗运动,也就越来越难以精确控制它的运动方向和速度。因此,在纳米尺度,几乎所有的定向运动都会让位于相比起来巨大的环境扰动。

此外,目前 (2018 年) 最精密的机械加工精度大约是 10 纳米,这也是英特尔等芯片厂商通过数十年的不断努力所取得的惊人成绩。然而这样的精度或许仍不足以制造我们所需的精密部件,来组装成满足我们需要的纳米机器人,让其有手有脚有脑有天线等。而即便我们的加工精度达到了要求,如何在纳米尺度上用极其微小的镊子将这些比头发丝还小一万倍的零件一个个组装起来,更是技术上令人乍舌、甚至无法逾越的高峰。

另外,即便我们想出了办法克服布朗运动的干扰,也开发出了非常精密的技术以生产、组装纳米尺度的机器,我们仍然需要考虑这样的机器如何运作,能量从哪里来,其信号如何传输等问题。在宏观尺度,惯性的作用很强大,因而宏观世界的生物 (例如我们) 可以通过简单的扇动手臂或者身体摇摆就能够顺畅地运动起来

(想象一下游泳的姿势)。但这样的“往复式”运动 (reciprocal motion) 在微观世界则举步维艰。这一困境被科学家称为“扇贝定理”(书中详述), 因而需要开发新的方式以利用环境能源驱动微纳米物体运动。

这样看来, 纳米机器的确仿佛是遥不可及、甚至不可能完成的任务。但巨大的挑战也孕育着巨大的回报。纳米机器人在生物、医药、环境、军事、航天等多个国计民生重大领域有巨大的潜在用途, 或许能够让世界产生我们做梦都无法想象的变革, 因而吸引着一批批科技工作者前赴后继投身这个领域。

科技发展日新月异, 今天的我们已经拥有远胜于五十年前的知识和技术水平。纳米机器的合成、制备与开发已经逐渐变得可能。此外, 自然界早已充满了各式纳米机器。例如, 本书中我们会看到细胞内的运输蛋白如何克服布朗运动, 在轨道上来来回回运输巨大的货物, 也会看到 ATP 合成酶如何精巧地旋转一圈为细胞生产出所需的食物 ATP, 还会看到大肠杆菌、精子细胞、草履虫等如何八仙过海各显神通, 在恶劣的环境中游荡并找到食物。这些精巧卓绝的生物纳米机器让人惊叹, 也为我们设计纳米机器提供了最宝贵的经验。

在来自世界各地 (包括中国) 的科研人员的不懈努力下, 近二十年来已经在国际范围内掀起了微纳米机器研究的新的热潮。自 21 世纪初以来, 人们合成出了许许多多不同种类的微纳米材料, 并通过化学能、电能、磁能、光能、声能、热能等各种方式, 让这些颗粒状材料在微纳米尺度游动起来。人们发表了数以千计的论文、专利、学术报告, 来讨论这些材料的合成、驱动机理、相互作用机理, 并结合理论和数值模拟, 对实验中观察到的现象进行缜密而全面的分析。此外, 一大批科学工作者和工程师们通过精心设计, 已成功将这些微纳米机器用于生物探测、智能载药、可控药物释放、血栓清除、杀死肿瘤细胞、环境污染物监测、环境治理、微纳米组装等多个领域。这样看来, 说纳米机器遥不可及又过于悲观了。

特别需要指出的是, 虽然纳米机器人有许多潜在的应用, 社会大众也对这方面的研究十分关注 (参见文末的新闻稿), 但纳米机器人的研究不仅仅是应用研究, 也不仅仅涉及工程领域。事实上, 这是一个高度学科交叉的研究领域, 涉及物理、化学、材料、生物等多个学科的基础科学研究。例如, 微纳米机器的制备往往不能依靠机械加工手段 (即便是精密的微纳加工技术), 而是要通过物理、化学的方法制备出具有特殊结构和功能的微纳米材料。而这些材料如何在各种实验条件和参数下, 按照人们的需要作出前进、后退、旋转等运动, 离不开对其电学、磁学、化学性质等方面的深入了解, 以及对其周围环境中化学场、流体场、电磁场的分布的探索。

(想象一下游泳的姿势)。但这样的“往复式”运动 (reciprocal motion) 在微观世界则举步维艰。这一困境被科学家称为“扇贝定理”(书中详述), 因而需要开发新的方式以利用环境能源驱动微纳米物体运动。

这样看来, 纳米机器的确仿佛是遥不可及、甚至不可能完成的任务。但巨大的挑战也孕育着巨大的回报。纳米机器人在生物、医药、环境、军事、航天等多个国计民生重大领域有巨大的潜在用途, 或许能够让世界产生我们做梦都无法想象的变革, 因而吸引着一批批科技工作者前赴后继投身这个领域。

科技发展日新月异, 今天的我们已经拥有远胜于五十年前的知识和技术水平。纳米机器的合成、制备与开发已经逐渐变得可能。此外, 自然界早已充满了各式纳米机器。例如, 本书中我们会看到细胞内的运输蛋白如何克服布朗运动, 在轨道上来来回回运输巨大的货物, 也会看到 ATP 合成酶如何精巧地旋转一圈为细胞生产出所需的食物 ATP, 还会看到大肠杆菌、精子细胞、草履虫等如何八仙过海各显神通, 在恶劣的环境中游荡并找到食物。这些精巧卓绝的生物纳米机器让人惊叹, 也为我们设计纳米机器提供了最宝贵的经验。

在来自世界各地 (包括中国) 的科研人员的不懈努力下, 近二十年来已经在国际范围内掀起了微纳米机器研究的新的热潮。自 21 世纪初以来, 人们合成出了许许多多不同种类的微纳米材料, 并通过化学能、电能、磁能、光能、声能、热能等各种方式, 让这些颗粒状材料在微纳米尺度游动起来。人们发表了数以千计的论文、专利、学术报告, 来讨论这些材料的合成、驱动机理、相互作用机理, 并结合理论和数值模拟, 对实验中观察到的现象进行缜密而全面的分析。此外, 一大批科学工作者和工程师们通过精心设计, 已成功将这些微纳米机器用于生物探测、智能载药、可控药物释放、血栓清除、杀死肿瘤细胞、环境污染物监测、环境治理、微纳米组装等多个领域。这样看来, 说纳米机器遥不可及又过于悲观了。

特别需要指出的是, 虽然纳米机器人有许多潜在的应用, 社会大众也对这方面的研究十分关注 (参见文末的新闻稿), 但纳米机器人的研究不仅仅是应用研究, 也不仅仅涉及工程领域。事实上, 这是一个高度学科交叉的研究领域, 涉及物理、化学、材料、生物等多个学科的基础科学研究。例如, 微纳米机器的制备往往不能依靠机械加工手段 (即便是精密的微纳加工技术), 而是要通过物理、化学的方法制备出具有特殊结构和功能的微纳米材料。而这些材料如何在各种实验条件和参数下, 按照人们的需要作出前进、后退、旋转等运动, 离不开对其电学、磁学、化学性质等方面的深入了解, 以及对其周围环境中化学场、流体场、电磁场的分布的探索。

书籍因为语言、购买渠道、价格等因素而无缘与国内的大众或者科研人员见面。而这本《纳米机器》内容详实、通俗易懂，又是科研一线的业界大师所著，不论对于国内相关领域的科研工作者、学生，还是对于感兴趣的其他读者，都是一本非常优秀的科学著作。在翻译过程中，结合我自己的理解，在忠实于原文的基础上，我对部分词句进行了删减或补充，也修正了原文中个别明显的错误。此外，本领域近年来发展迅速，优秀的工作和精彩的综述不断涌现，为避免知识断层，特在本书最后附上部分原著出版（2013年）后截止目前发表的本领域综述性学术论文，相信对于本领域的研究人员和刚入门的学生是一个很好的补充。

说来也巧，我小的时候很喜欢看的一本中国科幻小说就是讲一艘火箭缩小后开到了人身体里的（书名已经不记得了），后来读博士的时候恰巧导师 Thomas Mallouk 教授有一个与微纳米机器相关的课题，我就非常兴奋地加入了这一研究中。自2008年从事博士生研究以来，我已经在本领域摸爬滚打十整年，发表了一些小小的工作，也有幸第一时间见证了从本领域发展早期至今许多重大工作的发表，激动于本领域层出不穷的新鲜思路和精妙成果，并为这个年轻、蓬勃的研究领域自豪。纳米机器是不是威力无穷？能不能实现我们寄予厚望的各种奇妙的功能？我们现在还不得而知。但几乎每一天都会看到相关研究取得了有趣和有意义的进展，相关的新闻报道也屡见不鲜。我衷心希望微纳米机器的研究能够走向更广阔的天地，得到中国社会大众的关注和支持，并吸引更多的老师、同学们投身这方面的研究。

在本书完稿之际，我想特别感谢为本次翻译顺利完成做出了重要贡献的人。首先，要特别感谢周超、李泽珩、白兰君、王欣择、孙梅、徐江琼、张亮亮、吕军杰、肖祖耀、周冰玉、陈曦、王启璋、杨舟、吕相龙等我课题组的博士生、硕士生同学们（排名不分先后）。他们在工作和课业之余，不辞辛苦，细致地协助我进行翻译、校订、整理工作。没有他们的辛勤工作和大力支持，本书是无法完成的。我也格外希望本书能够帮助到像他们一样的微纳米机器领域的同学们。此外，我非常感谢国家出版基金和科学出版社的大力支持，以及出版社钱俊编辑等工作人员的努力工作。最后，要感谢我的妻子周雅惠、父母和其他亲朋好友、同事们对我工作和生活的支持和帮助。

谨以此书，献给所有怀有微纳米机器梦想的大朋友、小朋友，以及为让这一梦想走到现实而日夜奋战的同行们。也对帮助我走上这一奇妙旅程的美国宾州州立大学授业恩师 Thomas Mallouk 教授、Ayusman Sen 教授、Darrell Velegol 教授、汪洋师姐、段文涛师弟等，以及哈尔滨工业大学的顾大明教授、郝素娥教授等大学、中学老

师们表达真诚的敬意和感谢!感谢国家自然科学基金(11774075、11402069)、广东省自然科学基金杰出青年基金项目(2017B030306005),及深圳市科创委(JCYJ20170307150031119、KQCX20140521144102503)的资助。

最后,附上一段网络媒体2013年对于微纳米机器人的描述。这不仅告诉我们社会大众对于纳米机器人的期待有多么高,也提醒各位科研人员我们的研究仍然任重而道远。

“将来某一天,一名脑血栓病人躺在医院手术室中等待接受危险的脑血栓移除手术,然而,为他做手术的并不是穿着白大褂的医生,而是两百万个肉眼看不见的‘纳米机器人’!它们被装在一个透明的玻璃瓶中,当医生将装有纳米机器人的液体注入患者血管后,这些‘纳米机器医生’开始游向患者脑部,然后分工合作为患者做手术。

一些纳米机器人会从事导航任务;一些纳米机器人会从事信号传递任务,以便让手术室中的外科医生能从电子屏幕上监控手术情况;一些纳米机器人负责用‘纳米镊子’夹住血栓,让另一些纳米机器人用‘纳米手术刀’将血栓切成无数小块然后运走;最后一批纳米机器人则给患者大脑中的受伤组织直接上药,好让这些手术伤口能尽快痊愈。整个手术耗时不到半小时,当手术成功结束后,所有纳米机器人都会在患者的血管中进入‘休眠’状态,等待从他的身体中排泄出去。”来源:《“纳米机器医生”即将进入人体做手术》,链接:<http://news.163.com/13/1118/03/9DUD8NS700014Q4P.html>

王 威

2018年10月,于深圳西丽大学城

原书前言

合成能够将能量转化为运动和力的纳米机器，是纳米技术最神奇的课题之一。纳米尺度的物体在液体环境中的运动对于基础研究和实际应用来说都十分有意义，也因此吸引了大量研究人员的目光。当前，世界各地的研究小组正在努力设计一种纳米机器，使其能够模仿生物马达执行运送诊疗药物、组装纳米结构及合成纳米结构和器件等艰巨的任务。

自 20 世纪 50 年代末和 60 年代以来，许许多多的研究人员就梦想着制作纳米级的马达了。诺贝尔物理学奖获得者理查德·费曼在美国物理学会 1959 年的年会报告《在底部大有可为》(*There is plenty of room at the bottom*) 中首次提出“分子级纳米机器”这个概念。而自 1966 年电影《神奇旅程》(*Fantastic Voyage*) 以来，可以执行复杂手术的微型机器一直是科幻小说的重要组成部分。在这部电影中，医务人员登上被缩小了的微型潜艇中，进入到一个受伤的外交官的血液内，挽救了他的生命。

当前，全球众多的科研人员正在努力回应《神奇旅程》中呈现的愿景和挑战。完成这一任务，需要设计新型功能化的微纳米马达，使用不同的驱动机制，并使用先进的方式引导它们到达目的地。

不论在纳米还是宏观尺度，运动对生命都至关重要。例如，动物能够快速地逃离危险，而蛋白纳米马达能够将“货物”沿着细胞内微管束轨道运输。这些微小的生物马达的定向运动和速度控制技术先进，其运动能力令人惊叹。生物纳米发动机的工作十分复杂，这也为科学家和工程师设计更先进的人造纳米/微米机器带来了启发，帮助他们解决将自然界游动的机制转换为人造的微纳米游体的难题。通过对大自然非凡生物马达的基本规律的理解，研究人员们对于如何制备更复杂的人造纳米机器也有了更多的认识；并从自然界，特别是微生物中获取了灵感，模仿这些天然游体 (swimmer) 和分子生物马达，制备出了人造的纳米/微米运动颗粒。虽然我们在该领域的研究仍处于起步阶段，过去的十年间科学和技术的快速进步已经为解决本领域一些重要的挑战带来了许多重要的进展，包括将传统的机械设计缩小至纳米/微米尺度，以及为这些微小的机器提供能量等。

人工合成的纳米机器能够满足未来技术和生物医学的需求，在许多领域有着广阔的应用前景，充满了无限的可能性。人造纳米级和微米级机器可以如活细胞中的纳米马达一般传输分子，或者将质子跨细胞膜运输，以促进化学反应。近来，在自发运动的人造纳米/微尺度机器领域，研究人员已经在供能、能效、导向、运动控制、功能化以及多样性等方面取得了一系列重要的进展。纳米/微米级机械有广阔的应用前景，能够进行多样的操作，执行重要的任务，例如定向药物运输、核酸和蛋白质的生物监测、细胞分离、微斑图、纳米手术、探索危险环境、微纳操控等。因此，这一激动人心的研究领域必将为不同的应用领域做出重要的贡献，通过强大的微纳米机器带来目前无法实现的新功能，并显著提高我们的生活质量。

通过本书，我希望能够描绘一幅纳米/微米机器领域最新进展的真实图景，并促进该领域的发展。本书适用于研究生层次的纳米机器课程，或者作为高年级本科生的纳米工程、纳米科学与技术课程的补充教材。本书对于那些有意向在纳米生物技术、纳米医药和纳米工程学领域开展纳米马达研究的科研人员也是一本极有价值的参考书。鉴于本领域多学科交叉的性质，我试图将本书写成一本自给自足的零起点教材，以方便感兴趣的学生、科研人员及工程技术人员使用。

本书分为 7 章。第 1 章讲述纳米尺度运动的基本特征及挑战；第 2 章讨论生物纳米游体 (nanoswimmer)；第 3 章概述分子和 DNA 机器；第 4 章讨论利用化学催化产生动力的纳米马达；第 5 章讨论无燃料外部驱动 (磁、电、超声波驱动) 的纳米马达；第 6 章重点介绍纳米/微米机器在不同领域的潜在应用，包括药物输送、样品的分离等；最后，在第 7 章我将讨论本领域未来的发展前景、机遇和挑战。

我希望这本书的内容对你有帮助，也期待本书能够启发本领域的研究，并带来激动人心的新进展。

最后，我要感谢我的好妻子 Ruth，感谢她对我的耐心、爱和支持。我要感谢高伟、On Shun Pak、Allen Pei 和 UCSD 纳米马达团队的其他成员提供的帮助。我要感谢 Wiley-VCH 出版社的编辑和出版团队的支持和帮助。我更感谢全球众多的科学家和工程师，他们的工作带来了本书中描述的《神奇旅程》一般非凡的成就。谢谢大家！

Joseph Wang

2013 年 1 月，于美国圣地亚哥

目 录

第 1 章 基础知识：小尺度下的驱动	1
1.1 引言.....	1
1.2 纳米机器的发展史.....	3
1.3 纳米尺度驱动的挑战.....	4
1.4 低雷诺数流体力学.....	7
参考文献.....	9
第 2 章 自然界纳米游体的运动	14
2.1 引言.....	14
2.2 化学驱动的马达蛋白.....	15
2.2.1 生物马达：细胞中的活性主力.....	15
2.2.2 蛋白马达的工作基本原理.....	16
2.2.3 驱动蛋白.....	18
2.2.4 肌球蛋白.....	19
2.2.5 动力蛋白.....	22
2.2.6 微芯片器件中基于生物马达的主动纳米尺度输运.....	22
2.3 旋转生物马达.....	25
2.4 游动的微生物.....	27
2.4.1 细菌鞭毛-大肠杆菌.....	28
2.4.2 精子的运动.....	29
2.4.3 纤毛驱动的草履虫游动.....	30
2.4.4 细菌的输运与致动.....	31
参考文献.....	32
第 3 章 分子机器	38
3.1 应激响应型轮烷、类轮烷以及索烃纳米机器人.....	39
3.2 分子旋转马达.....	446
3.3 基于顺反异构化的光驱动分子机器.....	48
3.3.1 偶氮苯类纳米机器.....	48

3.4	纳米汽车	50
3.5	DNA 纳米机器	52
3.5.1	酶辅助 DNA 自主纳米机器	56
3.5.2	DNA 蜘蛛	57
3.5.3	pH 和光引发的可开关 DNA 机器	58
	参考文献	59
第 4 章	化学自驱动装置	66
4.1	自驱动催化纳米线马达	68
4.1.1	催化纳米线马达的运动机理	72
4.1.2	催化纳米线马达的磁导向运动	73
4.2	催化微管马达	74
4.2.1	管状微引擎的气泡推进机理	76
4.2.2	管状微引擎的制备	78
4.3	具有催化活性的 Janus 微粒: 球形马达	81
4.3.1	催化 Janus 颗粒马达的制备	81
4.3.2	催化 Janus 球形马达的推进机理	84
4.4	化学驱动微纳马达的运动控制	86
4.4.1	热控纳米马达	87
4.4.2	催化马达的光控制	88
4.4.3	催化马达的电控制	88
4.5	为化学驱动的微/纳米马达寻找替代燃料	89
4.6	集体行为: 集群与趋化性	91
4.6.1	微粒的触发自组装	91
4.6.2	趋化性: 沿浓度梯度运动	93
4.7	生物催化驱动	95
4.8	化学物质非对称释放引发的运动	98
4.9	聚合诱导反应引发的运动	99
	参考文献	99
第 5 章	外场驱动的无需燃料纳米马达	108
5.1	磁驱动的纳米马达	108
5.1.1	螺旋状磁驱马达	109

5.1.2 柔性磁驱马达	113
5.1.3 表面行走型磁驱马达	114
5.1.4 磁致动的人造纤毛阵列	116
5.2 电驱动的纳米马达	116
5.2.1 微型二极管马达	116
5.2.2 双极电化学驱动的微米马达	117
5.3 超声驱动微米马达	119
5.4 光驱动微米马达	120
5.5 混合动力纳米马达	121
参考文献	122
第 6 章 微纳米马达的应用	126
6.1 货物牵引: 药物运输	126
6.1.1 货物装载策略	126
6.1.2 货物释放方法	129
6.1.3 药物递送: 实现《神奇旅程》的愿景	131
6.2 生物传感和目标分离	132
6.2.1 基于生物马达的传感: “智能尘埃”设备	132
6.2.2 基于运动的信号传导	134
6.2.3 生物目标的分离: “游动-捕获-分离”	136
6.3 微芯片装置中人造马达的主动纳米尺度运输	139
6.4 基于纳米马达的表面图案化和自组装	141
6.5 利用微纳米马达进行环境监测与修复	142
参考文献	143
第 7 章 结论和展望	148
7.1 发展现状和未来机遇	148
7.1.1 微纳米马达在医学领域的未来发展	149
7.2 未来的挑战	150
7.3 总结	152
参考文献	153
词汇表	154
附录 部分代表性综述	163