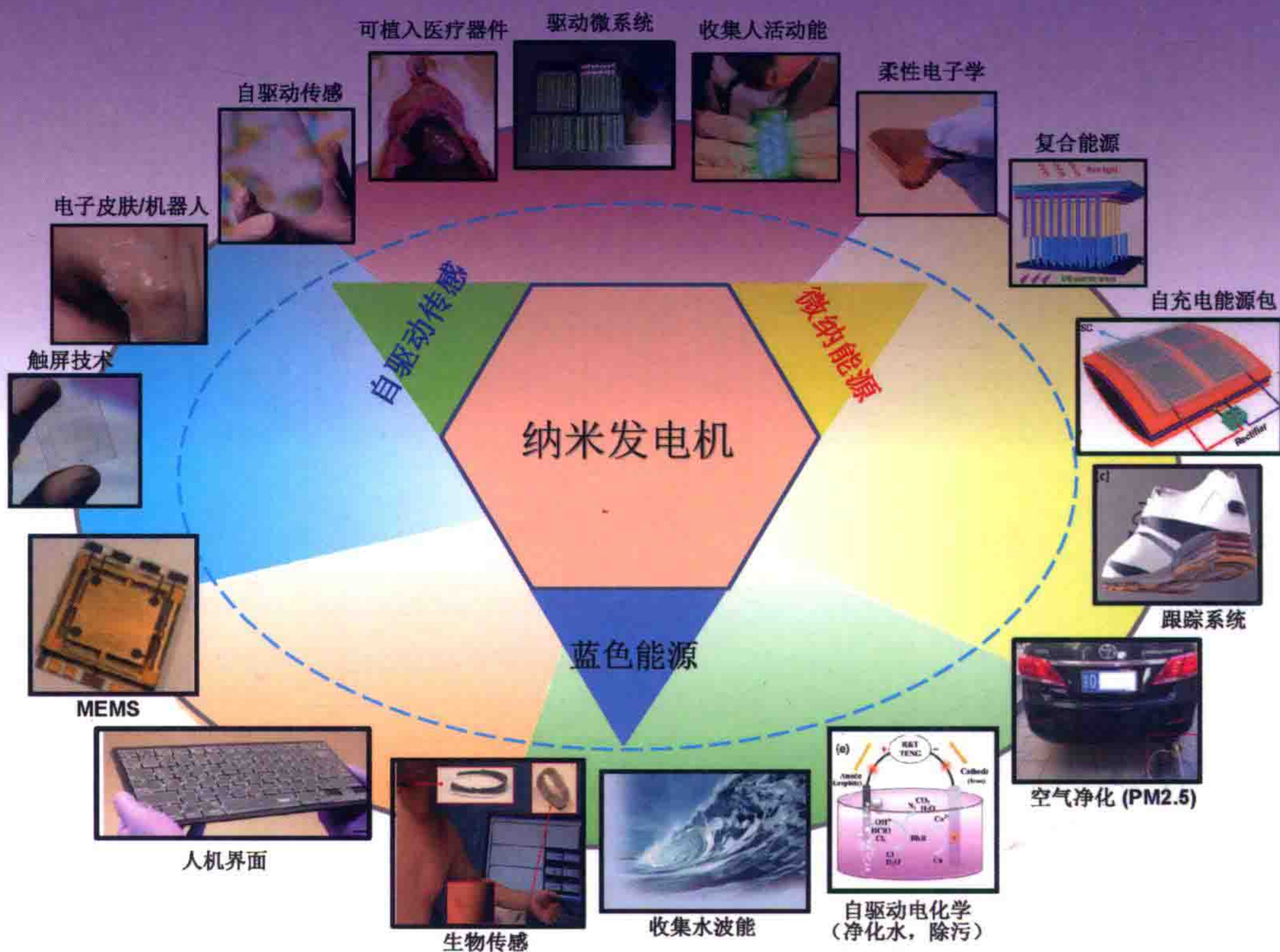


摩擦纳米发电机

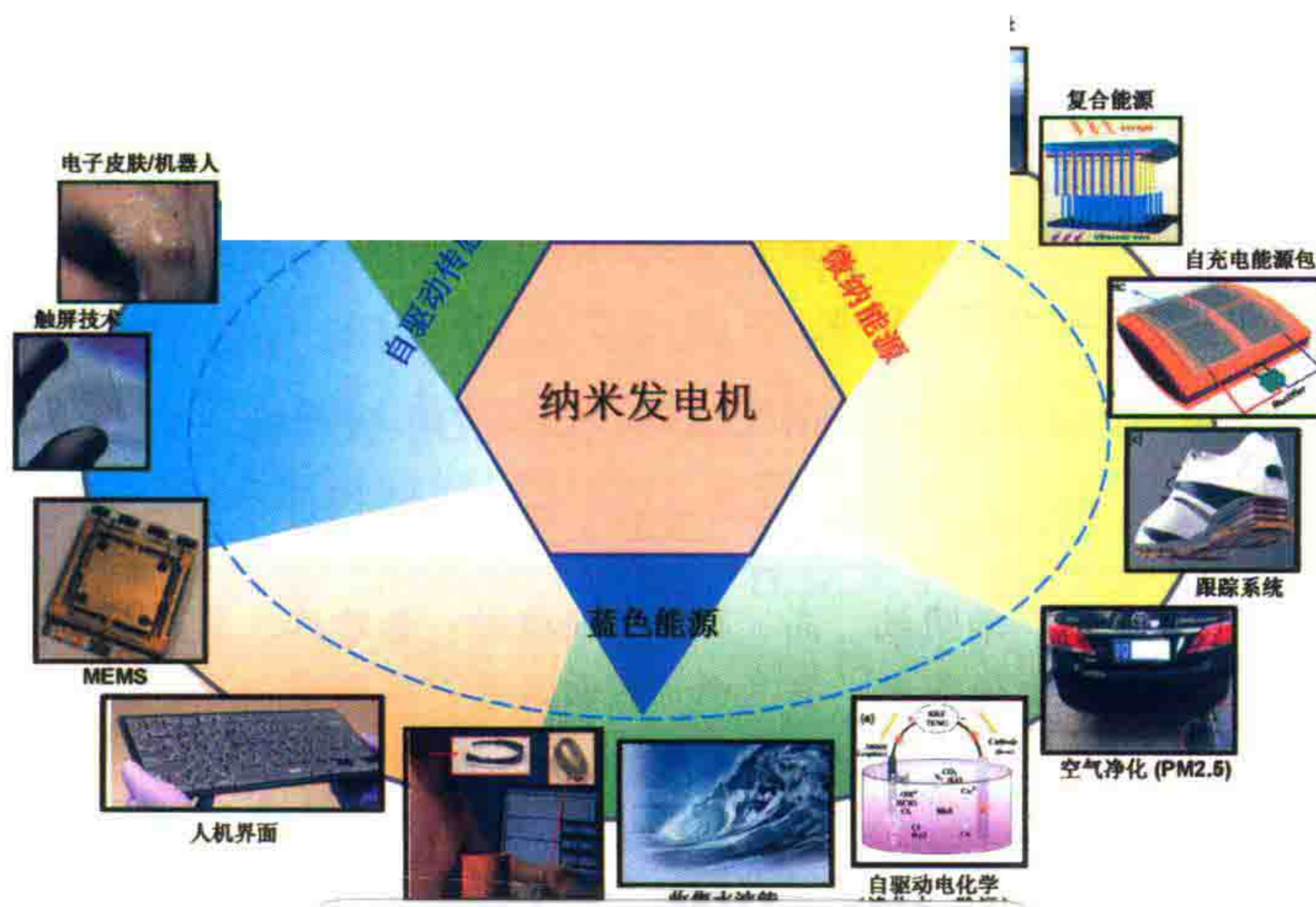
王中林 林龙 陈俊 著
牛思淼 訾云龙



 科学出版社

摩擦纳米发电机

王中林 林 龙 陈 俊 著
牛思淼 訾云龙



科学出版社

北京

内 容 简 介

摩擦纳米发电机是一项颠覆性技术并具有史无前例的输出性能和优点。与经典电磁发电机相比,摩擦纳米发电机在低频下的高效能是同类技术无法比拟的。同时它也可以作为自驱动传感器来感知由机械触发所产生的静态和动态过程的信息。本书是首部系统全面地介绍摩擦纳米发电机的四种工作模式,以及相应的理论模型和计算、器件设计及它们在回收人体活动、振动、风能、海洋能、水流等动能中的广泛应用的专著。同时也系统介绍了摩擦纳米发电机在移动/穿戴/柔式电子产品、生物医学器件、传感网络、物联网、环境保护和传感、基础设施检查和蓝色能源等方面的应用实例。重要的是,王中林最近发现麦克斯韦位移电流第二分量是纳米发电机的理论根基。纳米发电机将是麦克斯韦位移电流继电磁波理论和技术后在能源与传感方面的另一重大应用,有可能引领技术革新并深刻改变人类社会。

本书适合各大高校和科研院所能源领域相关专业研究人员、教师、研究生以上学生学习参考,也可直接作为研究生教材;对高新技术企业研发人员、专业技术人员和管理人员也是很好的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

摩擦纳米发电机/王中林等著. —北京:科学出版社, 2017.3

ISBN 978-7-03-051749-4

I. ①摩… II. ①王… III. ①纳米技术—应用—发电机 IV. ①TM31

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第027081号

责任编辑:李明楠 高 微 / 责任校对:彭珍珍 贾伟娟

责任印制:肖 兴 / 封面设计:铭轩堂

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>

北京盛通印刷股份有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年3月第一次印刷 印张:29 1/4

字数:589 000

定价:198.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介

王中林，中国科学院外籍院士和欧洲科学院院士。佐治亚理工学院终身校董事讲席教授，Hightower终身讲席教授，化学系兼职教授和电机系兼职教授。首位中组部“千人计划”顶尖人才与团队入选者；教育部长江学者讲座教授。中国科学院北京纳米能源与系统研究所首席科学家和首任所长。



国际公认的纳米科技领域领军人物，在一维氧化物纳米结构制备、表征及其在能源技术、电子技术、光电子技术及生物技术等应用方面均作出了原创性重大贡献。发明了压电纳米发电机、摩擦纳米发电机，并首先提出了自驱动系统的概念，为微纳电子系统的发展开辟了新途径。开创了纳米结构压电电子学和压电光电子学研究的先河，对纳米机器人、人-机界面、纳米传感器、医学诊断及光伏技术的发展具有里程碑意义。

荣获 1999 年美国显微学会巴顿奖章，2009 年美国陶瓷学会普帝（Purdy）奖，2011 年美国材料学会奖章（MRS Medal），2012 年美国陶瓷学会爱德华·奥顿纪念奖（Edward Orton Memorial），美国化学学会纳米讲座奖，2013 年中华人民共和国国际科学技术合作奖，2014 年美国物理学会詹姆斯·马克顾瓦迪（James C. McGroddy）新材料奖，2014 年佐治亚理工学院杰出教授终身成就奖，2014 年欧洲 NANOSMAT 奖，2014 年材料领域世界技术奖，2015 年汤森路透引文桂冠奖，2016 年美国东南地区大学联盟（麻省理工学院，杜克大学，得克萨斯大学奥斯汀分校等 70 余所大学）杰出科学家奖，2016 年欧洲先进材料奖（Advanced Materials Laureate）。

曾获美国自然科学基金委员会 CAREER 基金。中国国家自然科学基金委员会首批海外优秀青年科学家基金，中国科学院海外杰出学者基金，美国物理学会 fellow，美国科学发展协会（AAAS）fellow，美国材料学会 fellow，美国显微学会 fellow，美国陶瓷学会 fellow。

在国际一流刊物发表期刊论文 1200 余篇（其中 12 篇发表在 *Science*，4 篇发表在 *Nature*；16 篇发表在 *Nature* 子刊，4 篇发表在 *Science* 子刊），获授权专利 200 项，出版专著 7 部，编辑书籍和会议文集 20 余部。受邀做过 900 余次学术讲演和大会特邀报告。学术论文他引十万次以上，*h* 因子（*h*-index）160，是世界上材料和纳米技术论文引用次数最多的前五位作者之一，在当今世界最杰出科学家排名榜位列第 25 位（<http://superstarsofscience.com/scientists>）。*Nano Energy*（<http://www.nanoenergyjournal.com>）的发刊主编和现任主编。

前 言

我们小组于 2012 年首次发明了基于有机材料的摩擦纳米发电机 (TENG)，它的工作原理基于摩擦起电效应和静电感应效应的耦合。当两种不同材料在外力驱动下互相接触时，两种材料的表面会带上符号相反的静电荷；在外力作用下两个接触表面发生分离时，两种静电荷的分离而产生的电势差会驱动电子在分别附着于两种材料的上下表面电极之间流动，从而产生电流输出。几年来，我们在摩擦纳米发电机的基础研究和技术应用方面都取得了飞速的进展。在本书中，我们详细阐述了摩擦纳米发电机的四种基本工作模式、理论模型以及其用来收集不同形式的机械能的应用。这些能量形式包括人体运动、振动、机械触发、轮胎转动、风能、水能等。同时，摩擦纳米发电机还可以用作自驱动传感器，即用其本身输出的电压和电流信号来表征机械触发的动态过程。这种机械传感器在触屏和电子皮肤等技术中具有潜在应用。我们还讨论了摩擦纳米发电机用来收集海洋能量的应用，即“蓝色能源”。我们撰写本书的目的是系统地介绍摩擦纳米发电机，它不但可以作为一本教科书也可以作为参考书来推广这项发明的基础研究和实际应用。

本书的撰写主要参考了我们自 2012 年以来大量发表的科技论文，而书中的大多数插图都取自我们在公开领域发表的文章。在这里，要感谢我们课题组的所有成员，以及我们的研究合作者，他们为摩擦纳米发电机的发展作出了巨大的贡献（名单不分顺序）：范凤茹、朱光、王思泓、杨亚、林宗宏、林龙、陈俊、周瑜升、牛思淼、杨进、杨维清、温肖楠、曹霞、周军、秦勇、范兴、程纲、郑莉、訾云龙、张弛、韩昌报、唐伟、于爱芳、张虎林、谢燕楠、白鹏、井庆深、李胜明、苏元捷、田中群、叶旻鑫、衣芳、李召岭、郭恒宇、文震、潘曹峰、蒋涛、Sangmin Lee、刘莹、吴昌盛、王杰、胡陈果、奚伊、侯德谦、陈翔宇、何志浩、丁勇、杨伯康、Ken Pradel、李修函、王晓峰、李玉芳、吴英、周桃、陈梦晓、张丽敏、杜伟明、骆健俊等。我们同样要感谢研究中的其他合作者：张跃、田中群、Christian Falconi、Sang-Woo Kim、Jeong-Min Baik、张青、张海霞以及 Magnus Willander 等多位教授。另外，考虑到本书和其已出版英文版专著在图表表达上的一致性以及受众读者的阅读习惯，本书绝大部分图和表沿用英文表达。

最后，我要感谢我的所有家人多年来对我的工作的理解和支持。没有他们的帮助，我不可能取得今天的成就。



2017 年 1 月

王中林

中国科学院北京纳米能源与系统研究所

美国佐治亚理工学院

个人主页: <http://nanoscience.gatech.edu/>

课题组: <http://124.16.153.201:8001/>

SCI 发表记录: <http://www.binn.cas.cn/ktz/wzlyjz/>

谷歌学术引用: <http://scholar.google.com/citations?user=HeHFFW8AAAAJ&hl=enss>

目 录

前言	
第 1 章 摩擦起电和摩擦发电	1
摘要	1
1.1 纳米能源和大能源	2
1.2 摩擦起电效应	3
1.3 摩擦起电的定量化	3
1.4 摩擦起电的材料	8
1.5 范德格拉夫起电机	9
1.6 摩擦纳米发电机	11
1.6.1 垂直接触-分离模式	11
1.6.2 水平滑动模式	12
1.6.3 单电极模式	12
1.6.4 独立层模式	12
1.7 纳米发电机的理论源头：麦克斯韦位移电流	14
1.7.1 麦克斯韦的位移电流	14
1.7.2 压电纳米发电机的理论	15
1.7.3 摩擦纳米发电机的理论	17
1.7.4 纳米发电机的电容模型	18
1.8 展望	19
1.8.1 纳米发电机的三大应用方向	19
1.8.2 麦克斯韦位移电流的未来新兴产业：能源与传感	21
1.8.3 信息领域的“四化”	22
参考文献	24
第 2 章 垂直接触-分离模式摩擦纳米发电机	27
摘要	27
2.1 基本原理	27
2.2 基础理论	29
2.3 基本器件结构	32
2.3.1 间隔物结构	32

2.3.2	拱形结构	35
2.3.3	弹簧支持的分离结构	38
2.3.4	多层叠加结构	41
2.3.5	微孔洞-纳米颗粒复合结构	43
2.4	总结	47
	参考文献	47
第3章	水平滑动式摩擦纳米发电机	49
	摘要	49
3.1	基本原理	49
3.2	基础理论	50
3.2.1	一个单元的水平滑动式摩擦纳米发电机	50
3.2.2	栅状结构式摩擦纳米发电机	53
3.3	基本器件结构	61
3.3.1	平面滑动结构	61
3.3.2	栅状电极结构	64
3.3.3	旋转圆盘结构	71
3.3.4	旋转圆柱体结构	75
3.3.5	管状封装结构	78
3.3.6	液态金属结构	79
3.4	能量转化效率	82
3.4.1	固体-固体型	82
3.4.2	固体-液体型	83
3.5	总结	83
	参考文献	84
第4章	单电极模式摩擦纳米发电机	86
	摘要	86
4.1	基本工作原理概述	86
4.2	基本理论	87
4.2.1	基本工作原理和静电屏蔽效应	87
4.2.2	电极间距的影响	90
4.2.3	面积尺寸大小的影响	92
4.2.4	单元间隙对规模放大的影响	94
4.3	基本的器件结构	94
4.3.1	接触-分离式	94

4.3.2 平面滑动结构	98
4.4 总结	99
参考文献	100
第 5 章 独立层模式摩擦纳米发电机	102
摘要	102
5.1 滑动式独立层模式摩擦纳米发电机	102
5.1.1 基本原理	102
5.1.2 基本理论	107
5.2 接触式独立层模式摩擦纳米发电机	114
5.2.1 基本原理	115
5.2.2 基本理论	117
5.3 高级器件结构	122
5.3.1 栅状电极结构	122
5.3.2 旋转轮盘状结构 1	126
5.3.3 旋转轮盘状结构 2	129
5.4 滚动摩擦工作模式	132
5.5 能量转化效率	136
5.6 总结	138
参考文献	138
第 6 章 摩擦纳米发电机的理论模型	140
摘要	140
6.1 固有电容属性和控制方程	140
6.2 一阶集总参数等效电路模型	142
6.3 电荷参考状态	143
6.3.1 电荷参考状态对摩擦纳米发电机固有特性的影响	144
6.3.2 电荷参考状态选取对摩擦纳米发电机输出特性的影响	145
6.3.3 经典电荷参考状态	146
6.4 阻性负载特征	146
6.4.1 阻性负载特性概述和“三个工作区域”	146
6.4.2 最优电阻负载	151
6.5 容性负载和充电特性	154
6.5.1 摩擦纳米发电机在单向运动下的充电特性	155
6.5.2 摩擦纳米发电机在周期性机械运动中的充电特性	156
6.6 总结	164

参考文献	164
第 7 章 定量表征摩擦纳米发电机的品质因数	165
摘要	165
7.1 摩擦纳米发电机的工作循环	166
7.1.1 $V-Q$ 曲线及其特征	166
7.1.2 能量输出循环	167
7.1.3 最大能量输出循环	168
7.1.4 操作循环的实验验证	171
7.2 摩擦纳米发电机的品质因数	172
7.3 结构品质因数的计算和模拟	173
7.4 材料品质因数的测量	177
7.4.1 表面电荷密度的测量	177
7.4.2 基于归一化电荷密度以及无量纲材料品质因数的定量化摩擦序列	179
7.5 总结	180
参考文献	180
第 8 章 摩擦纳米发电机收集身体运动能量	183
摘要	183
8.1 组装型摩擦纳米发电机	183
8.2 基于纺织物的摩擦纳米发电机	187
8.2.1 纤维基摩擦纳米发电机	187
8.2.2 纺织物基摩擦纳米发电机	190
8.2.3 纤维基复合纳米发电机	193
8.3 纸基摩擦纳米发电机	196
8.3.1 单张纸基摩擦纳米发电机	196
8.3.2 纸基折纸式摩擦纳米发电机	198
8.4 皮肤基单电极摩擦纳米发电机	201
8.5 滑动式独立层模式摩擦纳米发电机	203
8.6 总结	206
参考文献	206
第 9 章 摩擦纳米发电机用于振动能采集	208
摘要	208
9.1 基于摩擦纳米发电机的振动能采集的基本工作模式	208
9.1.1 垂直接触-分离式	208
9.1.2 接触单电极模式	211

9.1.3 接触式独立层模式	212
9.2 振动能采集中的高级结构设计	213
9.2.1 多方向振动能采集	213
9.2.2 多层的结构设计	216
9.2.3 基于液体-金属的结构设计	218
9.3 声波能量的采集	219
9.3.1 基于有机薄膜的摩擦纳米发电机	219
9.3.2 可卷曲的纸基摩擦纳米发电机	222
9.4 总结	225
参考文献	225
第 10 章 摩擦纳米发电机用于收集风能	227
摘要	227
10.1 基于转动结构的风能收集	227
10.1.1 转动式滑动独立层模式的风能摩擦纳米发电机	227
10.1.2 用于风能收集的其他转动结构	231
10.2 基于颤振摩擦起电的风能收集	236
10.2.1 第一种基于颤振片的风能摩擦纳米发电机	236
10.2.2 弹性-空气动力驱动的摩擦纳米发电机	240
10.3 总结	245
参考文献	245
第 11 章 摩擦纳米发电机网络收集大规模蓝色能源——海洋能	247
摘要	247
11.1 摩擦纳米发电机对水波能的采集	247
11.1.1 基于液体-固体接触起电的摩擦纳米发电机	247
11.1.2 基于摩擦纳米发电机的流体动力能的采集	253
11.1.3 双工作模式的摩擦纳米发电机	255
11.1.4 基于全封闭摩擦纳米发电机的水波动能采集	257
11.2 基于网络状结构摩擦纳米发电机群的海洋能采集	260
11.3 总结	264
参考文献	264
第 12 章 基于摩擦纳米发电机的复合式发电单元	266
摘要	266
12.1 交流电-交流电复合能量单元	266
12.1.1 电磁-摩擦复合纳米发电机	266

12.1.2 复合型摩擦电-压电/热释电纳米发电机	277
12.2 交流电-直流电复合能量单元	287
12.2.1 复合太阳能电池和摩擦纳米发电机	287
12.2.2 复合热电器件和摩擦纳米发电机	293
12.2.3 复合电化学电池和摩擦纳米发电机	296
12.3 总结	299
参考文献	299
第 13 章 摩擦纳米发电机在自驱动系统和电化学过程中的应用	302
摘要	302
13.1 摩擦纳米发电机与储能模块集成用于持续驱动便携式电子设备	302
13.1.1 直接集成和变压集成	302
13.1.2 通过能源管理电路板	309
13.2 基于摩擦纳米发电机的自驱动电化学	315
13.2.1 自驱动电化学降解	316
13.2.2 自驱动电解水	319
13.2.3 自驱动防腐蚀	321
13.2.4 自驱动空气过滤	323
13.2.5 自驱动电化学回收金属	327
13.2.6 应用于智能窗系统的自供电电致变色器件	330
13.3 应用于自供电生物刺激的摩擦纳米发电机	333
13.3.1 应用于自供电起搏器的体内植入摩擦纳米发电机	333
13.3.2 用于细胞增殖和分化的植入式自供电激光治疗系统	336
13.4 总结	339
参考文献	340
第 14 章 基于摩擦纳米发电机的自驱动压力传感器和人机交互系统	344
摘要	344
14.1 自驱动压强/触摸传感器	344
14.1.1 接触-分离模式的自驱动压强传感器	345
14.1.2 单电极模式的自驱动触摸传感器	350
14.1.3 双模式的超灵敏自驱动压强传感器	354
14.2 自驱动触摸成像	357
14.3 自驱动智能键盘	361
14.4 总结	365
参考文献	366

第 15 章 基于摩擦纳米发电机的振动和生物医学传感	367
摘要	367
15.1 自供电的振动传感器	367
15.1.1 振源的位置追踪	367
15.1.2 振动幅度的测量	370
15.2 声音传感器的自供电录音	371
15.2.1 基于亥姆霍兹共振腔的声音传感器	371
15.2.2 超薄纸基声音传感器	373
15.3 自供电的生物医学监测	374
15.3.1 基于耳膜的仿生薄膜传感器	374
15.3.2 基于薄膜的摩擦纳米传感器	383
15.4 总结	386
参考文献	386
第 16 章 基于摩擦纳米发电机的移动物体自驱动传感器	388
摘要	388
16.1 自驱动线性位移传感器	388
16.2 自驱动转动传感器	390
16.3 摩擦纳米发电机用来追踪移动物体	392
16.4 自驱动加速度传感器	397
16.5 总结	398
参考文献	399
第 17 章 基于摩擦纳米发电机的自驱动化学/环境传感器	400
摘要	400
17.1 自驱动化学传感器	400
17.2 自驱动紫外线传感器	405
17.3 自驱动环境监测	408
17.4 总结	415
参考文献	415
附录 A 各章符号定义	418
附录 B 各章缩写定义	430
附录 C 王中林小组在摩擦纳米发电机领域内发表的期刊文章 (2012~ 2016)	436

第1章 摩擦起电和摩擦发电

摘 要

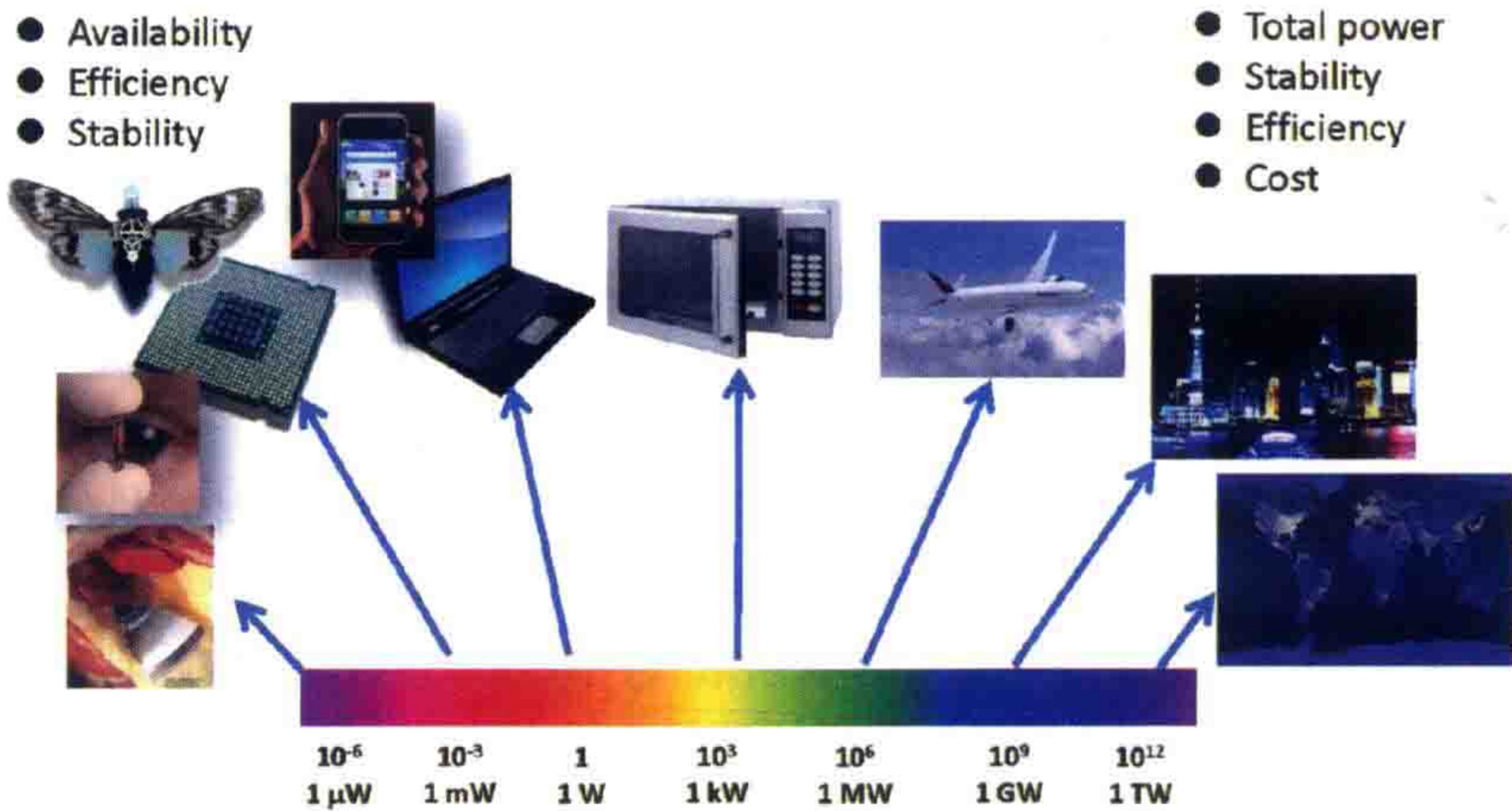
摩擦起电是一种众所周知的现象。本章首先介绍摩擦起电现象，进而介绍它是如何被用来把机械能转换为电能的，即摩擦发电。然后，介绍摩擦纳米发电机（TENG）作为一种全新的能源技术的发明和发展历史，以及其作为一种能源或自驱动传感器在各个领域的应用，包括可穿戴电子器件、物联网、环境、基础设施、医疗、安全等。最后，从麦克斯韦方程组出发，我们揭示了纳米发电机的根本原理是来自于麦克斯韦的位移电流，而纳米发电机则是位移电流在平行于电磁波应用之外，在能源和传感方面的另一重大产业应用。

电子设备的快速发展呈现小型化、可移动和多功能的趋势。计算机的发展就是器件小型化的一个典型例子。早期的计算机是基于真空管的大型设备，而后被基于固态金属-氧化物-半导体的场效应晶体管所取代，而当今的笔记本电脑具有更高的集成度和更小的尺寸。另一个例子是手机的数量激增，这是电子器件可移动化的一个代表型应用。在未来的几十年里，人们会在现有技术的基础上，致力于发展电子器件的多功能化。这个过程会不可避免地用到一系列的传感器，其功能包括但不限于导航、运动检测、化学传感、生物传感和气体传感等。在不久的将来，我们身边的电子设备会远远小于手机的尺寸，这样每个人都会拥有几十个、甚至上百个这样的电子产品。这种小型的电子产品能量消耗很小，使得利用环境中收集的能量为其供电成为可能^[1]。另外，这些传感器数量巨大且分布广泛，只用电池来驱动整个传感器网络是不现实的，而且电池的使用也会带来难以追踪和回收的问题，以及可能的环境污染和健康危害。因此，我们急需能够独立地为这种小型电子器件持续供电的新型电源，这种电源可以广泛应用在超敏感化学-生物传感器、纳米机器人、微机电系统、遥感及可移动环境传感器、国土安全甚至可移动-可穿戴的电子设备等各个领域。

纳米能源，作为一个全新的研究领域，是指利用新技术和微纳米材料高效收集和储存环境中的能量，来实现微纳系统的可持续运转。在过去的十年里，我们研发了纳米发电机，并用其构建自驱动系统和主动式传感器^[2]。我们主要利用了两种物理效应来收集小型机械能：压电效应和摩擦起电效应。我们在最近出版的一本书中^[2]和几篇综述文章中^[3, 4]详细介绍了压电纳米发电机。而本书的目的是对摩擦纳米发电机进行系统的描述，从其理论到实验、从基本操作模式到技术应用、从单个器件到系统集成、从一种新能源技术到自驱动传感器。

1.1 纳米能源和大能源

从一般意义上讲，能源是指诸如为工厂、城市乃至国家供电的大型能源，其功率大小是以兆瓦或千兆瓦的量级来衡量的。这种大型能源的主要性能指标包括总功率、稳定性、转换效率和成本。在很多情况下，成本是最重要的指标，如太阳能电池（图 1.1）。



Nanoenergy: energy required for the sustainable, maintains free and self-powered operation of micro/nano-systems

图 1.1 不同尺度的能源及其应用。大尺度的能源是用来为城市甚至整个国家供电的，而纳米尺度的能源可以为小型电子器件供电。这两种不同的应用也是通过不同的测量方式表征的（本图已获得 Wiley 许可）^[5]

另外，随着可移动电子设备的数量激增，关于能源存储的研发显得更加重要，而目前的技术大多由电池实现。虽然每个电子器件本身消耗的能量很小，但是器件的整体数目非常巨大。世界上有超过 30 亿人拥有移动电话。如果全球都安装了传感器网络，数目巨大的传感器会遍布世界各个角落；而用电池来驱动这种数目惊人的、数以万亿计的传感器是不大可能的，因为人们需要不时地寻找电池的位置、更换电池以及检测电池是否正常工作。在这种情况下，一个可能的替代方案就是收集传感器所在环境中的能量。这是一个新的领域，纳米能源，即为微纳系统提供持久的、不需维护的、自驱动的能量^[5]。纳米能源的基本性能指标包括可用性、转换效率和稳定性（图 1.1）。当器件处在光照环境下，使用太阳能电池是一个自然的选择。而当器件靠近一个发动机却处在黑暗中，收集机械振动的能量是最佳的选择。对于生物应用，收集肌肉拉伸中的形变能也是一个不错的方式。

虽然太阳能电池具有很高的效率，但当环境条件中的光照有限时，高效的太阳能电池可能就不是对这种器件的最佳选择了。因此，用来收集的能量类型取决于器件所处的具体工作环境。这就是我们强调的在具体应用中的能量来源的可用性。能量来源的稳定性也很重要，因为它保证了器件的长期运转。以太阳能电池为例，它的性能受到昼夜、天气甚至季节等诸多因素影响。这就是我们选择研发转换机械能为电能，并作为自驱动传感器的能量来源的原因。

1.2 摩擦起电效应

摩擦起电效应是一种由接触引发的带电效应，即在一种材料与另一种材料发生摩擦的过程中，它会带上电荷。摩擦起电效应是我们生活中各种静电荷的基本来源。一种材料所带电荷的符号取决于它与和它接触的材料之间的相对极性。

摩擦起电效应很可能是为数不多的人们已经知道了几千年的效应。虽然这种效应是我们每天不可避免都会经历的现象，但它背后的物理机制一直存在争论^[6, 7]。人们通常认为，当两种材料发生接触时，二者的表面之间会形成化学键（或称黏结），然后电荷会从一种材料中移动到另一种材料中，来平衡二者的电势差。这种转移的电荷有可能是电子，也可能是离子或分子。当两种材料分离时，有的成键原子倾向于保留多余的电子，有的倾向于失去电子，这样就有可能在材料表面产生摩擦电荷。

具有较强接触起电现象的材料一般都是导电性较差的或是绝缘体。因此，这些材料会捕获转移电荷，并保持相当长的一段时间，持续积累静电荷。这种现象在我们的生活和生产中通常被当作一种不良效应。例如，飞机在飞行过程中会由于骨架与空气的摩擦而产生静电荷，它会干扰射频信号的发射。由于静电荷会导致爆炸或引燃可燃性气体，它也会产生安全隐患。运输可燃性气体和液体以及易爆化学品的汽车为了防止火灾，需要妥善处理静电荷的消除问题。某些电子器件，最著名的是互补金属氧化物半导体（CMOS）集成电路和金属氧化物半导体场效应晶体管（MOSFET），它们会被手套上的静电荷放电产生的高电压破坏。因此，摩擦起电在我们的生活中大多被当作负面效应，这也是为什么这种现象已存在几千年，却没有实际的正面的应用的原因。直到最近，摩擦起电效应才被广泛应用到机械能采集和自驱动机械传感器中。

1.3 摩擦起电的量化

虽然摩擦起电效应已存在数千年，我们对它的物理机制的了解仍然有限。人

们曾用多种方法来表征摩擦起电的过程，如用滚动球工具来收集在介电圆盘上方的滚动球产生的感应电荷^[8, 9]，以及用原子力显微镜（AFM）来测量表面与微型图像材料接触过程中产生的表面静电力和静电势^[10-12]。但是，这些方法要么没有精确控制起电过程，要么没有直接揭示摩擦界面，或者两者兼而有之，因此用这些方法很难得到对摩擦起电过程的原位理解。

我们研发了用接触模式的 AFM 和扫描开尔文探针显微镜 (SKPM) 结合的办法，用来对纳米尺度的摩擦起电过程进行原位定量表征^[13]。因为 AFM 具有可控电荷转移和原位测量的功能，我们可以用它来研究表面的摩擦电荷转移。在一个模型系统中，二氧化硅薄膜在同一个区域以相同大小的接触力被摩擦数次。图 1.2 (a) 显示了每次摩擦之后相应的 SKPM 图像，图 1.2 (b) 表示从中提取出的电势变化。在 8 个摩擦周期之内，电势大小从 0.1V 缓慢增加到 0.7V。如图 1.2 (c) 所示，电荷的聚集和饱和有一个明显增长的趋势。通过对实验数据进行定量拟合，可以发现摩擦之前的表面电荷密度是 $\sigma_0 = (-12 \pm 3) \mu\text{C}/\text{m}^2$ ，而经过无数次摩擦周期之后的饱和电荷密度是 $\sigma_\infty = (-150 \pm 8) \mu\text{C}/\text{m}^2$ 。接近表面区域的电场强度是大约 $1.7 \times 10^7 \text{V}/\text{m}$ ，这可以很容易产生很高的电压。这种接触引发的电荷转移是我们的摩擦纳米发电机的实验基础。

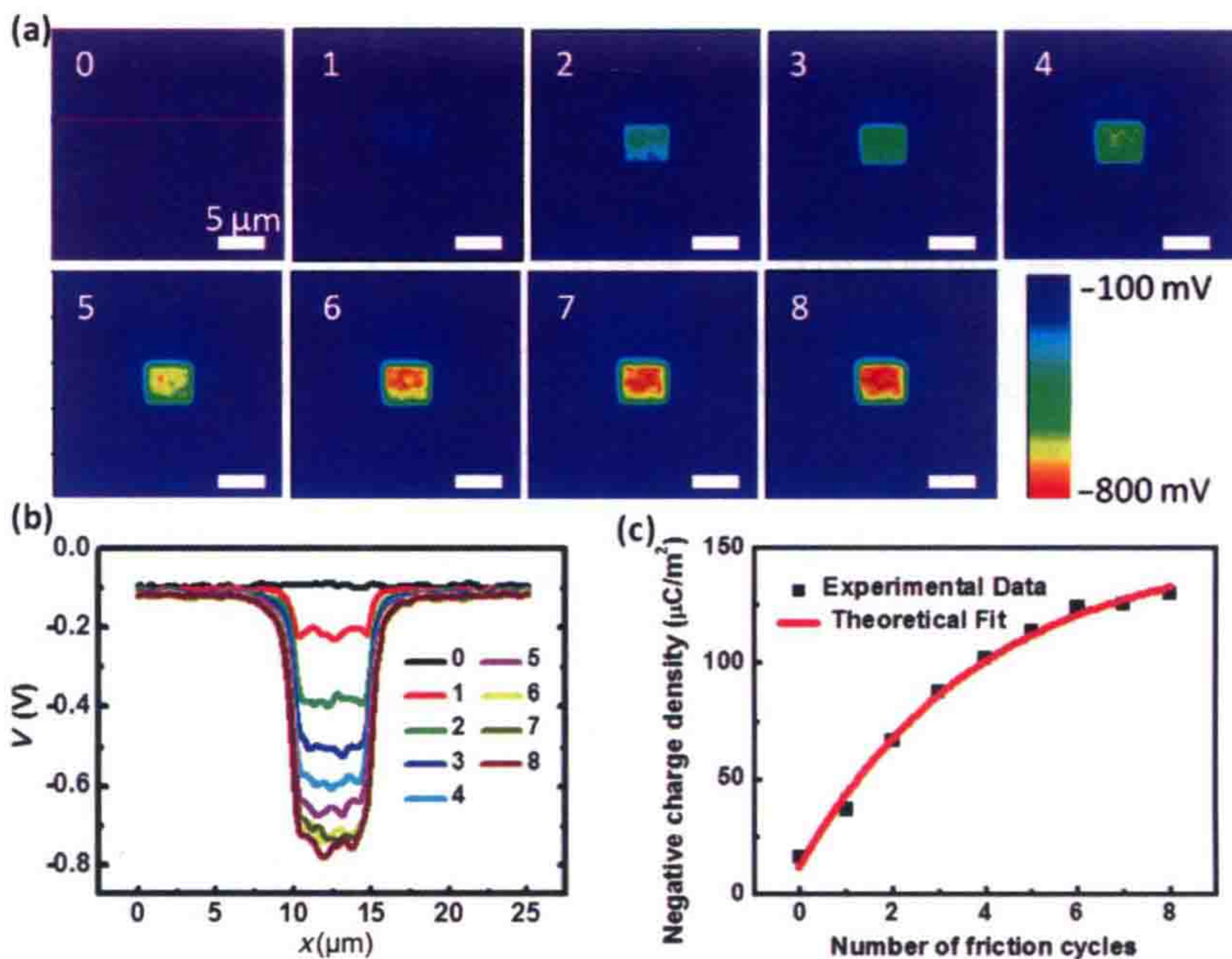


图 1.2 随着在同一区域不断摩擦次数的增加，二氧化硅表面的摩擦电荷积累不断增加。(a) 在 1~8 个摩擦周期之后，同一块区域的表面电势分布图的变化；(b) 与之相应的电势分布曲线；(c) 通过电势数据推算出的表面电荷密度随摩擦周期的变化关系，其中的拟合曲线是基于电荷积累理论获得的（本图已获得美国化学学会许可）^[13]