

纳米科学与技术

# 自驱动系统中的 纳米发电机

王中林 著  
王中林 秦 勇 胡又凡 译



科学出版社



纳米科学与技术

# 自驱动系统中的纳米发电机

王中林 著

王中林 秦 勇 胡又凡 译

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

我们生活的环境中充满了各种各样的能量,例如振动能、形变能、肌肉活动能、化学能、生物能、微风能、太阳能、热能等。如果利用纳米技术可以把这些无时不有处处有的能量转换为电能来带动一些小型的电子器件,就可以制造出自驱动的微纳系统。为了解决这个纳米技术中的瓶颈问题,2006年王中林小组成功地在纳米尺度范围内将机械能转换成电能,研制出世界上最小的发电机——纳米发电机,并提出自驱动纳米技术的新思想。之后,世界上掀起了能量收集技术研究的热潮。过去的七年间,作者研究组在这一研究领域系统发表了一系列相关论文。为了给出一个关于纳米发电机发展的全面并且连贯的回顾与阐释,作者编写了这部专著,本书涵盖了这方面的基本理论、机理研究、工程放大以及纳米发电机的潜在应用。

全书共11章,内容系统、深入浅出、图文并茂,适合纳米科技领域及相关专业的广大科研工作者、大专院校师生参考阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

自驱动系统中的纳米发电机/王中林著;王中林,秦勇,胡又凡译. —北京:科学出版社,2012

(纳米科学与技术/白春礼主编)

ISBN 978-7-03-034397-0

I. 自… II. ①王… ②秦… ③胡… III. 纳米技术-应用-发电机  
IV. TM31

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第102260号

责任编辑:顾英利 杨震 刘冉 / 责任校对:钟洋  
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012年6月第一版 开本:B5(720×1000)

2012年6月第一次印刷 印张:11 1/2

字数:216 000

定价:58.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 作者简介

王中林博士是佐治亚理工学院终身校董事讲席教授、Hightower 终身讲席教授，中国科学院北京纳米能源与系统研究所(筹)首席科学家。他是中国科学院外籍院士和欧洲科学院院士。王教授荣获了美国显微镜学会 1999 年巴顿奖章，佐治亚理工学院 2000 年和 2005 年杰出研究奖，2001 年 S. T. Li 奖(美国)，2009 年美国陶瓷学会 Purdy 奖，2011 年美国材料研究学会奖章(MRS Medal)。王教授是美国物理学会会士(fellow)，美国科学发展协会(AAAS)会士，美国材料研究学会会士，美国显微镜学会会士。王教授在氧化物纳米带与纳米线的合成、表征与基本物理性质的理解；纳米线在能源科学、电子学、光电子学和生物学方面的应用等方面做出了原创性的贡献。他对于纳米发电机的发明及在该领域发展过程中所取得的突破性进展为从环境和生物系统中收集机械能给个人电子器件供电这一思想提供了基本原理和技术路线图。他关于自驱动纳米系统的研究激发了世界学术界和工业界对于微纳系统电源问题的广泛研究，这已成为能源研究与未来传感器网络研究中的特色学科。通过在新型的电子器件和光电子器件中引入压电势控制的电荷传输过程，他开创了压电电子学和压电光电子学学科并引领其发展，这在智能机电系统或纳机电系统、纳米机器人、人与电子器件的交互界面以及传感器方面具有重要的应用。王教授的著作已被引用超过 50 000 次，其论文被引用的  $h$  因子( $h$ -index)是 108。详细信息见主页(<http://www.nanoscience.gatech.edu>)。

## 《纳米科学与技术》丛书序

在新兴前沿领域的快速发展过程中,及时整理、归纳、出版前沿科学的系统性专著,一直是发达国家在国家层面上推动科学与技术发展的重要手段,是一个国家保持科学技术的领先权和引领作用的重要策略之一。

科学技术的发展和应用,离不开知识的传播:我们从事科学研究,得到了“数据”(论文),这只是“信息”。将相关的大量信息进行整理、分析,使之形成体系并付诸实践,才变成“知识”。信息和知识如果不能交流,就没有用处,所以需要“传播”(出版),这样才能被更多的人“应用”,被更有效地应用,被更准确地应用,知识才能产生更大的社会效益,国家才能在越来越高的水平上发展。所以,数据→信息→知识→传播→应用→效益→发展,这是科学技术推动社会发展的基本流程。其中,知识的传播,无疑具有桥梁的作用。

整个 20 世纪,我国在及时地编辑、归纳、出版各个领域的科学技术前沿的系列专著方面,已经大大地落后于科技发达国家,其中的原因有许多,我认为更主要的是缘于科学文化的习惯不同:中国科学家不习惯去花时间整理和梳理自己所从事的研究领域的知识,将其变成具有系统性的知识结构。所以,很多学科领域的第一本原创性“教科书”,大都来自欧美国家。当然,真正优秀的著作不仅需要花费时间和精力,更重要的是要有自己的学术思想以及对这个学科领域充分把握和高度概括的学术能力。

纳米科技已经成为 21 世纪前沿科学技术的代表领域之一,其对经济和社会发展所产生的潜在影响,已经成为全球关注的焦点。国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)会刊在 2006 年 12 月评论:“现在的发达国家如果不发展纳米科技,今后必将沦为第三世界发展中国家。”因此,世界各国,尤其是科技强国,都将发展纳米科技作为国家战略。

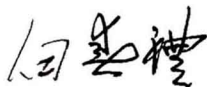
兴起于 20 世纪后期的纳米科技,给我国提供了与科技发达国家同步发展的良好机遇。目前,各国政府都在加大力度出版纳米科技领域的教材、专著以及科普读物。在我国,纳米科技领域尚没有一套能够系统、科学地展现纳米科学技术各个方面前沿进展的系统性专著。因此,国家纳米科学中心与科学出版社共同发起并组织出版《纳米科学与技术》,力求体现本领域出版读物的科学性、准确性和系统性,全面科学地阐述纳米科学技术前沿、基础和应用。本套丛书的出版以高质量、科学性、准确性、系统性、实用性为目标,将涵盖纳米科学技术的所有领域,全面介绍国内外纳米科学技术发展的前沿知识;并长期组织专家撰写、编辑出版下去,为我国

纳米科技各个相关基础学科和技术领域的科技工作者和研究生、本科生等,提供一套重要的参考资料。

这是我们努力实践“科学发展观”思想的一次创新,也是一件利国利民、对国家科学技术发展具有重要意义的大事。感谢科学出版社给我们提供的这个平台,这不仅有助于我国在科研一线工作的高水平科学家逐渐增强归纳、整理和传播知识的主动性(这也是科学研究回馈和服务社会的重要内涵之一),而且有助于培养我国各个领域的人士对前沿科学技术发展的敏感性和兴趣爱好,从而为提高全民科学素养做出贡献。

我谨代表《纳米科学与技术》编委会,感谢为此付出辛勤劳动的作者、编委会委员和出版社的同仁们。

同时希望您,尊贵的读者,如获此书,开卷有益!



中国科学院院长

国家纳米科技指导协调委员会首席科学家

2011年3月于北京

## 中文版序

2006年,我们利用压电材料纳米线研制出了世界上第一个纳米发电机[Wang & Song, *Science*, 312, 242-246 (2006)],它成功地将机械能转化为电能。自那之后,世界上掀起了能量收集技术研究的热潮。这篇发表于2006年的论文提出了自驱动纳米技术的新思想,即利用纳米发电机从纳米器件或纳米系统工作的环境中收集能量为它们提供电源供应。在过去的七年间,我们发表了一系列相关的论文,内容涵盖了这方面的基本理论、机理研究、工程放大以及纳米发电机的潜在应用。这些系统性的研究正在引导世界范围内二十多个研究组在相关领域开展研究和应用。为了给出一个关于纳米发电机发展的全面并且连贯的回顾,在我们已发表论文的基础上,我于2011年撰写了这本书的英文版:*Nanogenerators for self-powered devices and systems*, Georgia Institute of Technology, SMARTech digital repository, 2011 (<http://hdl.handle.net/1853/39262>),而且是以网络自由下载的形式发表的。经过我、秦勇博士和胡又凡博士的翻译,现在出版的是这一作品的中文版。

我衷心感谢那些对纳米发电机和压电电子学领域的发展做出贡献的我研究组的成员和合作者(排名不分先后):宋金会、王旭东、杨如森、秦勇、周军、胡又凡、徐升、魏亚光、丁勇、高普猷、何志浩、费鹏、张岩、刘晋、李舟、高一凡、武文倬、杨青、朱光、李泽唐、劳长石、吕明霏、李成、许晨、林时胜、顾煜栋、黄骑德、王思泓、Ben Hansen、Will Hughes、刘莹、高志远、张跃、Giulia Mantini、Joon Ho Bae、Minbaek Lee、Jung-il Hong、Yolande Berta、Robert Snyder、Lih-J. Chen、S.-Y. Lu、Li-Jen Chou、Aurelia Wang等。我们感谢以下机构给予的资助: DARPA, NSF, DOE, NASA, Airforce, NIH, Samsung, MANA NIMS, 中国科学院和中国国家留学基金管理委员会。我对佐治亚理工学院和纳米结构表征中心在基础条件和设备方面给予的支持表示感谢。最后,我要对我的夫人和女儿们表示衷心的感谢,感谢她们多年来一贯的支持和理解。如果没有她们的支持,我的这一研究就不可能完成。

王中林

佐治亚理工学院,美国

中国科学院北京纳米能源与系统研究所(筹)

电子信箱: zlwang@gatech.edu

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

# 目 录

## 《纳米科学与技术》丛书序

### 中文版序

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 纳米器件的电源 .....	1
1.2 自驱动传感器网络和系统 .....	2
1.3 机械能的收集 .....	5
1.4 纳米发电机 .....	6
参考文献 .....	7
<b>第 2 章 纳米发电机的基础材料</b> .....	8
2.1 氧化锌的晶体结构 .....	8
2.2 气-固-固法生长纳米线/纳米带 .....	10
2.3 气-液-固方法生长纳米线阵列 .....	11
2.4 脉冲激光沉积法制备纳米线阵列.....	13
2.5 化学法生长纳米线阵列.....	14
2.5.1 基本方法.....	14
2.5.2 垂直曲线纳米线阵列的图案化生长 .....	18
2.5.3 柔性基底上氧化锌纳米线的生长 .....	19
2.5.4 超细纤维上生长氧化锌纳米线阵列 .....	20
2.5.5 水平一致取向纳米线阵列的图案化生长 .....	21
2.6 激光图案化法生长晶圆级规模的纳米线阵列.....	22
2.7 织构化氧化锌薄膜.....	24
参考文献 .....	25
<b>第 3 章 压电和压电势</b> .....	27
3.1 控制方程.....	27
3.2 前三阶微扰理论.....	28
3.3 垂直纳米线的解析解.....	30
3.4 横向弯曲纳米线的压电势.....	32
3.5 横向弯曲纳米线的压电势测量.....	33
3.6 轴向应变纳米线的压电势.....	34
3.7 掺杂半导体纳米线的平衡电势.....	38



3.7.1	理论框架	38
3.7.2	考虑掺杂情况下压电势的计算	39
3.7.3	掺杂浓度的影响	43
3.7.4	载流子类型的影响	47
	参考文献	48
<b>第4章</b>	<b>纳米发电机的工作原理</b>	49
4.1	垂直一致取向纳米线构成的纳米发电机	49
4.1.1	压电纳米发电机的概念	49
4.1.2	电极-纳米线界面处的肖特基势垒	50
4.1.3	电荷的产生和输出过程	52
4.1.4	n型材料纳米发电机的原理	55
4.2	p型材料纳米发电机	57
4.2.1	输出信号的性质	57
4.2.2	p型和n型纳米线的检验标准	59
4.3	基于其他纤锌矿结构纳米线的纳米发电机	61
4.4	基于横向固定纳米线的纳米发电机	62
4.4.1	基本设计	63
4.4.2	输出测量	63
4.4.3	纳米发电机的原理	68
4.4.4	线性连接	70
4.4.5	能量转换效率	70
4.4.6	收集生物机械能	72
	参考文献	75
<b>第5章</b>	<b>纳米发电机输出信号的表征</b>	76
5.1	输出电流	76
5.2	输出电压	78
5.3	总结	80
	参考文献	80
<b>第6章</b>	<b>基于垂直纳米线阵列的高输出纳米发电机</b>	81
6.1	超声驱动纳米发电机	81
6.1.1	为何采用锯齿形电极?	81
6.1.2	工作机理	82
6.1.3	纳米发电机在50 kHz超声波作用下的输出	83
6.2	集成的纳米尖-纳米线相向排列方法	84
6.2.1	制备方法	84

6.2.2	工作机理	86
6.2.3	提高性能	88
6.3	端部稳固连接的集成化纳米发电机	90
6.3.1	结构设计	91
6.3.2	工作原理	91
6.3.3	增强的输出信号	93
6.3.4	自驱动纳米传感器	94
	参考文献	95
<b>第7章</b>	<b>基于横向纳米线阵列的高输出纳米发电机</b>	96
7.1	横向集成纳米发电机	96
7.1.1	器件制备	97
7.1.2	输出测量	99
7.2	柔性高输出纳米发电机	101
7.2.1	原理和制备	101
7.2.2	输出测量	103
7.2.3	发电量的存储	105
7.3	驱动一个发光二极管	106
	参考文献	107
<b>第8章</b>	<b>基于非接触纳米线的高输出纳米发电机</b>	108
8.1	基本设计	108
8.2	工作机理	109
8.3	常规输出	112
8.4	利用纳米发电机来驱动传统电子器件	113
8.5	小结	116
	参考文献	116
<b>第9章</b>	<b>基于纤维的纳米发电机</b>	117
9.1	微纤维-纳米线复合结构	117
9.1.1	结构制备	117
9.1.2	纤维纳米发电机的制备	119
9.1.3	工作机理	121
9.1.4	输出测量	121
9.1.5	性能提高	124
9.1.6	小结	124
9.2	压力驱动的柔性纤维纳米发电机	125
9.2.1	纤维上径向织构氧化锌薄膜的生长	125

9.2.2	纤维纳米发电机的工作原理 .....	127
9.2.3	空气压力驱动的纤维纳米发电机 .....	127
9.2.4	呼吸驱动的纳米发电机/传感器 .....	129
9.2.5	作为压力传感器的手腕脉搏驱动纳米发电机 .....	129
9.2.6	小结 .....	131
	参考文献 .....	132
<b>第 10 章</b>	<b>收集多种类型能量的复合电池 .....</b>	<b>133</b>
10.1	收集太阳能和机械能的复合电池 .....	133
10.1.1	结构设计 .....	134
10.1.2	工作机理 .....	135
10.1.3	输出表征 .....	136
10.2	同时收集生物机械能和生物化学能的复合电池 .....	139
10.2.1	基于 PVDF 纳米发电机 .....	140
10.2.2	利用生物燃料电池来收集生物化学能 .....	142
10.2.3	复合型生物化学和生物机械纳米发电机 .....	143
10.2.4	利用复合型电池来驱动一个纳米传感器 .....	145
	参考文献 .....	146
<b>第 11 章</b>	<b>自供能传感器与系统 .....</b>	<b>147</b>
11.1	自驱动系统的原理 .....	147
11.2	纳米发电机的设计 .....	149
11.3	使用超级电容器进行电荷存储 .....	151
11.4	自驱动光传感器与系统 .....	152
11.5	自驱动环境传感系统 .....	155
	参考文献 .....	157
<b>附录</b>	<b>王中林教授研究组 2006~2011 年间在纳米发电机和压电电子学领域 发表的期刊论文 .....</b>	<b>158</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 纳米器件的电源

在全球变暖和能源危机日益严峻的形式下,对于绿色可再生能源的探索成为维持人类文明可持续发展最为紧迫的挑战之一<sup>[1,2]</sup>。在宏观能源方面,除了当今世界正在使用的石油、煤、水力、天然气、核能等为大家所熟知的传统能源之外,人们也在积极地研究和开发一些可替代能源,如太阳能、地热、生物质能、核能、风能、氢气等。在更小的尺度范围,植入式生物传感器、超灵敏的化学和生物分子传感器、纳米机器人、微机电系统、远程移动环境传感器、国土安全乃至便携式或可穿着个人电子设备等供能器件的独立、持久、长时间免维护连续运行等都对能源技术提出了非常迫切的需求。参见图 1.1。例如,纳米机器人将是一种可以感知环境、适应环境、操纵物体、采取行动并且完成一些复杂功能的智能机器,但是其中一项关键的挑战是如何找到一种电源在不增加太多重量的前提下驱动纳米机器人。又

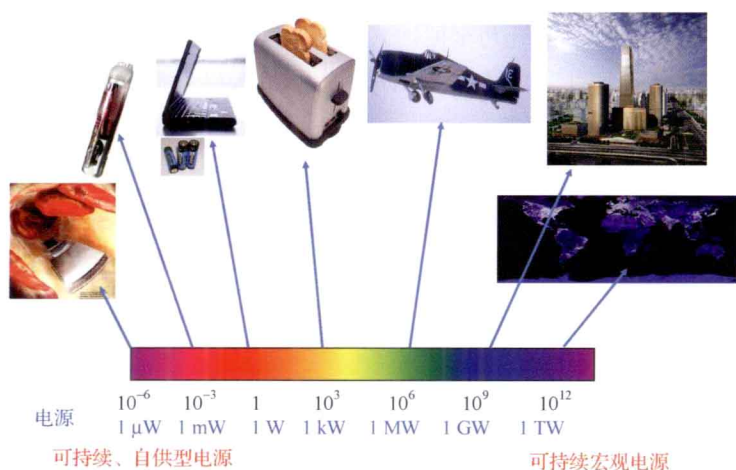


图 1.1 运行功率的量级。特定操作所需的能量紧密依赖于进行这一操作的尺度范围和具体应用。在全球范围内,需要太瓦量级的能量。而对于驱动一个小的器件来说,尽管运行这类器件所需要的总能量不大,但是也需要微瓦量级的能量。能量对于这类系统的运行来说是必需的,甚至是无比重要的。针对不同量级的能量问题必须开发不同的技术来解决世界能源问题

如,植入式无线生物传感器需要的电源是可以直接或间接地向电池充电来提供的。通常来说,电池的尺寸远大于纳米器件自身的尺寸,它决定了整个系统的大小。

在不远将来的研究将是如何把多功能纳米器件集成为一个纳米系统,使其像生物一样具有感知、控制、通信以及激励/响应功能。这种纳米系统不仅由纳米器件组成,还包括纳米电源(或纳米电池)。但是纳米电池小的尺寸极大地限制了它的使用寿命。无需电池的自驱动技术对于无线器件来说是非常值得期待的一种技术,对于植入式生物医学系统来说甚至是必需的一种技术,它不仅可以极大地提高器件的适应性,而且可以大幅度地减小系统的尺寸和重量。因此,开发一种可以从周围环境中收集能量来驱动纳米器件的自驱动纳米技术成为当务之急<sup>[3]</sup>。纳米技术的目标是建立一个自驱动的纳米系统,它具有超小的尺寸、超高的灵敏度、卓越的多功能性以及极低的功耗。因此,从周围环境中收集的能量足以为这一系统提供电源供应。

## 1.2 自驱动传感器网络和系统

纳米系统是多功能纳米器件的集成系统,具有感知、控制、通信和激励/响应等多种功能。系统的低功耗决定了可以从外界环境中收集能量来驱动这一纳米系统。对于那些独立、可持续工作、无需维护的植入式生物传感器、远程移动环境传感器、纳米机器人、微机电系统乃至便携式/可穿戴个人电子器件来说,通常需要微瓦量级的功耗。参见图 1.2。举例来说,纳米机器人可以感知适应环境、操控物

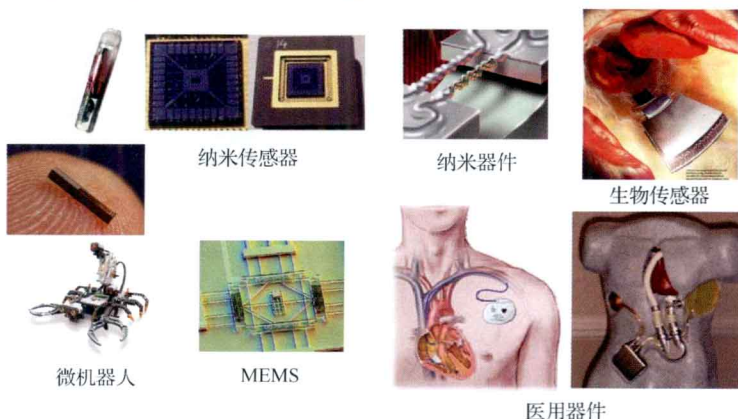


图 1.2 基于纳米技术的大量器件大概需要微瓦到毫瓦量级功率的电源才能运转。尽管所需功率小,电源都是必需的,不管成本怎样! 虽然在很多情况下电池都是一个很好的选择,但从环境中收集能量可能可以完全替代电池或者延长电池的时间,从而使得器件可实现持续运转

体、采取行动并完成一些复杂的功能,但一个关键的问题是找到一种可以在不增加太多重量的情况下驱动纳米机器人的电源。同时,自驱动传感器对于远距离油/气输运线的监控来说也是必要的。

容错传感器网络利用诸如射频识别(RFID)、传感器、全球定位系统(GPS)以及激光扫描仪等信息传感设备来将物体和互联网链接在一起,实现通信、识别、定位、追踪、监控和管理的功能,而自驱动传感器是容错传感器网络的核心构件。用大量独立移动传感器取代区域内散布的有限数量传统类型传感器后,通过互联网对这些大量传感器网络信号进行收集并统计分析后就可以得到准确可靠的信息。物联网可以把日常的物体和器件与大的数据库和网络(如互联网)关联起来,是医疗保健、医疗监控、基础设施/环境监控、产品跟踪和智能住宅的未来希望。参见图 1.3和图 1.4。

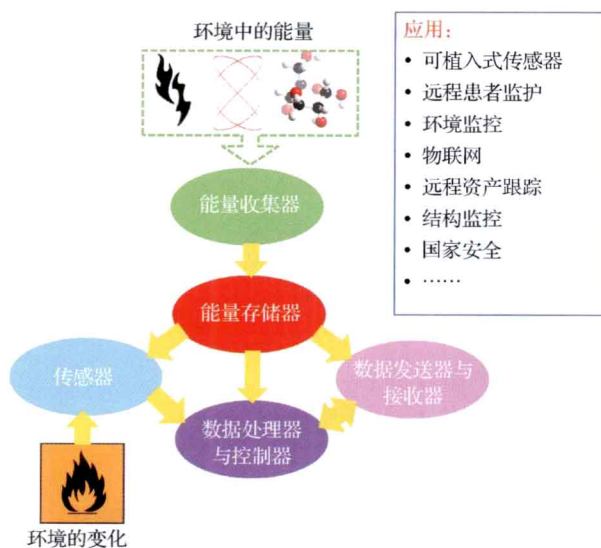


图 1.3 自驱动传感器系统及其潜在应用

但是,由于数量巨大以及环境和健康方面的原因,如果每个传感器都用一个电池为其供电,这种传感器网络将难以实现。参见图 1.5。然而,一种可以从外界环境中收集能量的可持续、自供型微纳电源为传感器网络提供了一个可能的电源解决方案。不过,我们周围环境中可利用的机械能具有频率分布宽和振幅随时间变化的特点。这种能量称为“随机能量”,可以来源于不规则振动、轻微的空气流动、噪声以及人类活动。

无线传感器具有激活的工作模式,但更为重要的是,它还具有待机的工作模式,在这种待机模式下,传感器处于能量消耗最低的“休眠”状态。能量收集器所产

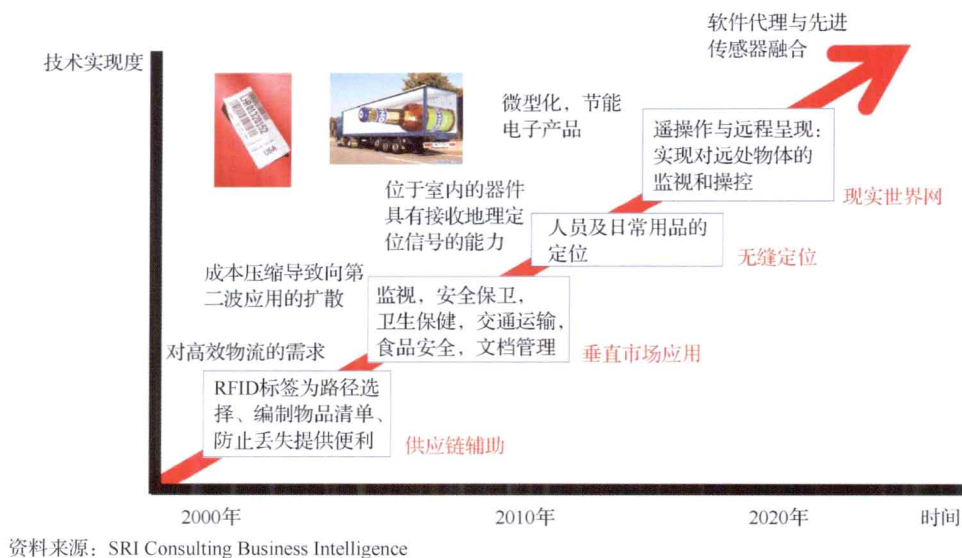


图 1.4 自驱动系统在传感器网络中的潜在应用



图 1.5 电池对于很多个人电子产品和小型电子器件来说都是最好的选择之一, 但它的替换、回收和处理都会带来巨大的环境问题

生的电力可能不足以驱动一个器件连续工作,但它长时间所积累的电量足以驱动器件工作几秒钟。这在具有待机和激活工作模式的器件方面具有实际的用途,比如可以用于下列器件:葡萄糖和血压传感器乃至蓝牙传输器(驱动功率约 5 mW,数据传输速率约 500 kbits/s,功率消耗 10 nW/bit)等个人电子器件,它们只需要周期性地处于激活状态。器件待机时段内产生的能量可以为激活工作模式下驱动器件提供足够的电源供应。

### 1.3 机械能的收集

光伏、热电和电磁感应都是非常完善的能源转换技术,为什么我们还需要收集机械能呢?现在我们来考虑一下这些场合:单个传感器很难布置的情况(如敌方战场),或者如果传感器网络由分布于广大地区的大量节点构成,这使得在需要的时候进行电池更换变得不太可能。一个自维持的电源从环境中汲取能量,因而无需任何维护,这无疑是非常吸引人的。为了使得任何系统都能成为自维持的系统,系统必须能从其周围环境中收集能量,并且把这些收集的能量存储起来以备后用。例如,纳米机器人将是一种可以感知适应环境、操控物体、采取行动并且完成复杂功能的一种智能机器,然而纳米机器人尚未解决的一个重要挑战是如何找到一种在不增加太多重量前提下可以驱动它的一个电源。如果想把纳米机器人放入体内执行传感、诊断以及治疗功能,人们很容易把它导入体内,但是要把它从体内取出来更换电池却很难,有时甚至是不可能的。在军事应用背景下,传感/监测节点的位置可能是在难以到达的地点,可能需要隐蔽,也可能在脏乱、有雨、黑暗以及/或者茂密的森林环境中工作。因为光源在这些环境下不可获得,从而排除了使用太阳能技术的可能性。适用于解决这种问题的能源收集方法可能包括利用随机振动(例如公路附近的各种振动),利用温度梯度(例如地表以下通常是常温,地表与地下通常存在温度梯度),或者利用任何其他一些现象来提供能量的系统。因此,开发机械能收集的技术是非常必需的。

在我们生活的环境中存在大量的、各种类型的机械能,如微风、身体运动、肌肉拉伸、声波/超声波、噪声、机械振动以及血液流动,参见表 1.1 和表 1.2。但什么类型的机械能是我们想要收集的呢?我们着眼于具有以下特点的一些机械能。首先,能量微弱,不能驱动传统的发电机,因此不能用传统的能量收集技术进行收集;其次,频率范围宽,大部分能量处于低频。这就需要一种可以从几赫兹的低频到几千赫兹相对高频的宽频率范围工作的能量收集技术。最后,环境状况可以改变。这需要一种具有很高适应性的能量收集技术。针对具有上述特点的机械能,我们在过去七年里所研发的纳米发电机是一种非常有潜力的能量收集技术。



表 1.1 日常我们每个人身边可以用来发电的机械能源

人体/活动	运输	基础设施	工业	环境
呼吸, 血液流动/压力, 呼气, 行走, 手臂活动, 手指活动, 慢跑, 谈话……	飞行器, 汽车, 火车, 轮胎, 轨道, 刹车, 涡轮引擎, 振动, 噪声……	桥梁, 道路, 隧道, 农场, 房屋结构, 控制开关, 水/气管道, 交流电系统……	发动机, 压缩机, 致冷器, 泵, 风扇, 振动, 切割, 噪声……	风, 洋流/海浪, 声波……

表 1.2 典型身体活动产生的机械能以及理论计算的可转换电能值

活动	机械能	电能	每次运动产生的电能
血液流动	0.93 W	0.16 W	0.16 J
呼气	1.00 W	0.17 W	1.02 J
呼吸	0.83 W	0.14 W	0.84 J
上肢	3.00 W	0.51 W	2.25 J
手指打字	6.9~19 mW	1.2~3.2 mW	226~406 $\mu$ J
步行	67 W	11~39 W	18.8 J

## 1.4 纳米发电机

我们于 2006 年首先提出了自驱动纳米技术, 并且为自驱动系统研发了纳米发电机。这种纳米发电机利用压电氧化锌纳米线阵列把随机的机械能转化为电能。纳米发电机的发电机制依赖于在外部应变下纳米线上产生的压电势: 纳米线的动态应变使得外部负载电路中的电子在压电势的驱动作用下发生瞬时的流动。利用纳米线的优势在于它们可以被微弱的物理运动激发, 并且激发频率可以从一赫兹到几千赫兹, 这对于收集环境中的随机能量来说是非常理想的。通过把几千根纳米线的发电输出集成起来, 一个轻微的应变可以产生 1.2 V 的电压, 这足以驱动一个发光二极管和一个小型液晶显示器。

纳米发电机的发明, 被中国科学院和中国工程院院士评为 2006 年度世界十大科技进展之一; 2008 年, 基于纤维的纳米发电机被英国《物理世界》(*Physics World*) 评选为物理领域重大进展之一; 英国《新科学家》(*New Scientist*) 期刊把纳米发电机评为在未来十到三十年以后可以和手机的发明具有同等重要性和影响的十大重要技术之一<sup>[4]</sup>; 2009 年, 纳米压电电子学被麻省理工学院《科技创业》(*MIT Technology Review*) 评选为十大创新技术之一<sup>[5]</sup>; 2010 年, 纳米发电机被《探索》(*Discovery*) 杂志评为纳米技术领域的 20 项重大发明之一; 2011 年, 纳米发电机被欧盟委员会评为六大未来新兴技术之一, 将在下一个十年里受到资助<sup>[6]</sup>。