

# 智能可穿戴式压电能量收集器研究现状

曾 洲<sup>1,2</sup>, 罗豪魁<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海硅酸盐研究所 201800; 2. 中国科学院大学 100049)

## 1. 引言

便携式低功耗微电子设备在近些年得到了飞速的发展,尤其在人体健康检测系统、嵌入式系统、军事安全应用系统等方面得到了广泛的应用。这些器件依靠传统的电化学电池提供能量,如锂离子电池,聚合物电池等。随着复杂数字系统集成技术(IC)以及微机电技术(MEMS)的高速发展,微电子器件在尺寸和能耗方面大大减小,已经达到了微瓦和毫瓦级别,如表1所示;然而这些器件的电源由于本身体积较大,成为其发展的瓶颈之一。据统计,自1990年以来,半导体工艺中芯片存储量已经增加了10倍,而电池能量密度却只增加3倍,如图1(a)所示。低能量密度的化学电池已经成为限制这些微功耗器件向着小型化,集成化方向发展的重要因素;再者,化学电池寿命有限,需要定期更换,对于某些特殊的应用场合,如嵌入在衣服、人体和动物体内的电子系统等,更换电池是相当困难甚至是不可能的事情。对于一些野外行军者或者旅游者来说,电子设备的断电可能会给生命安全甚至是战争结果带来巨大威胁。在这些情况下,研究者尝试利用其他的供能方式,来替代化学电池或

者是延长其使用寿命,以保证低功耗便携式电子设备的正常工作。

表1 一些低功耗的智能设备能量消耗表

产品	小型FM收音机	随身听	手机通话/待机	LED灯珠	蓝牙
功耗(mW)	30	60	2000/35	60	60~70

能量收集(energy harvesting)是非常有效且环境友好型的能量供应方式。该技术是将环境中广泛分布的能量(包括热能、风能、声能、水能、太阳能、电磁波、光、机械振动能和人体活动能等)的一种或者多种收集起来转换成电能,然后直接给电子器件供电或者存储在电容器、超级电容器或可充电的电池等储能器件中。在石化能源资源日益减少的今天,世界各国正在大力发展太阳能、风力、潮汐等各种可再生能源,能量回收技术越来越受到人们的广泛关注。从各种能量源中收集能量的方法有很多种,如利用压电材料、电磁感应、静电、太阳能、射频辐射、温差能等。每种方法都能够提供不同方式的能量,且各有其优缺点。图2是目前环境中一些能源和化学电池的对比。从图2中我们可以看到,环境中的振动机械能能量密

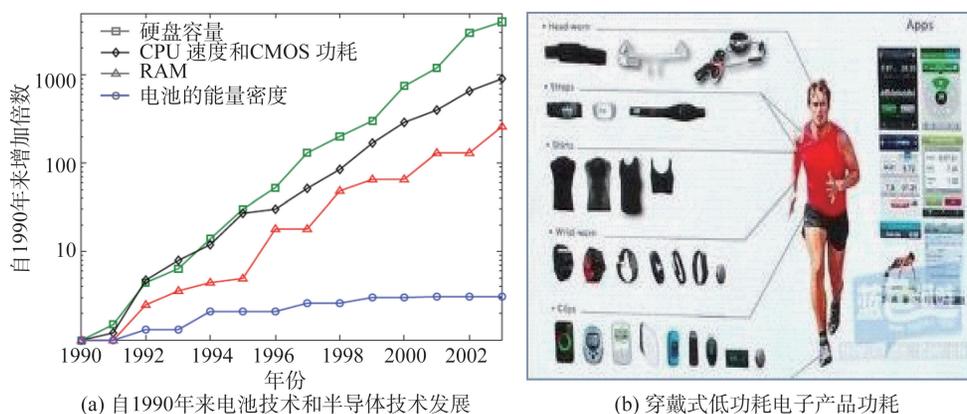


图1 化学电池技术发展和一些低功耗便携式电子产品

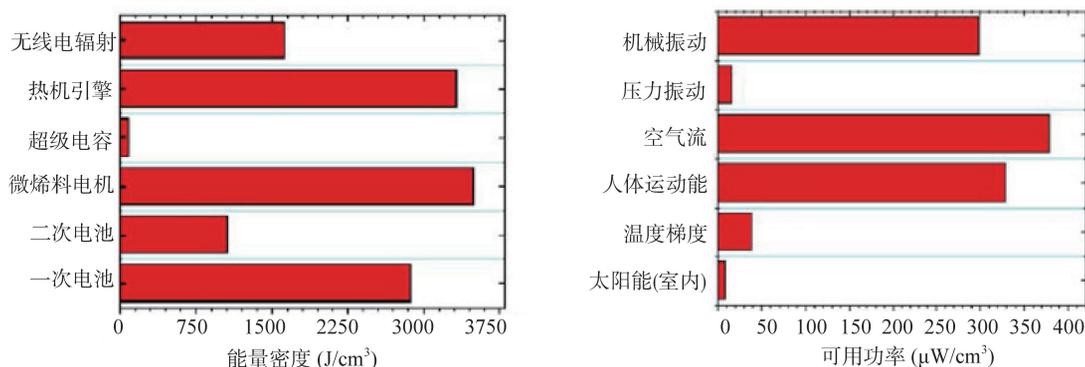


图2 几种不同的环境能量源以及化学电池能量密度对比图

度能够达到普通化学电池相当水平，而且广泛分布，不随天气和时间的因素发生变化，十分稳定；特别是在一些嵌入式或者封闭式的空间里，机械振动能具有唯一性和不可替代性。

在便携式低功耗电子设备所处环境中，人体运动所产生的机械能便是一种最为稳定的能量源。表2是一些人体部位活动时产生的功率，可以看出，这些能量是相当可观的。因此，如果能有效对人体活动时产生能量进行收集，制备出一种可穿戴式的自助供电系统，就能实现为这些便携式低功耗电子设备自助供电。而在所有收集振动能量的方式中，利用材料的压电性能，直接将机械能转变为电能是目前收集能量最为直接有效的一种方式。材料的正压电效应是指压电材料受到外界作用力的情况下，在材料表面产生感应电荷。利用材料的压电效应，将人体活动的能量收集起来给智能穿戴式设备、健康监测设备供电，将能够实现人体健康实时监测；或者将电能储存起来，当人处在野外等不方便充电的地方时，对电子器件进行供电。

表2 人体一些部位运动时产生的能量

运动部位	脚踝走路	膝盖弯曲	脚尖小跳	弯腰	肩部运动
能量(W)	69.8	49.5	39.2	2.1	2.2

美国国防先进项目研究署(DARPA)首先提出了利用压电器件“行军发电”这一概念，即利用士兵行军产生能量对其电子设备进行自助供电。英国军方于2009年率先启动了一项名为“Battery Free Soldier”的研究计划。该计划试图通过利用压电器件收集士

兵行军时产生的能量，并将其转换为电能储存起来，供给一些电子设备如蓝牙，通讯设备，夜视仪等使用，以达到减小军用电池的目的（通常大于10kg），为士兵行军减负并保证其用电补给。而韩国先进科技研究院(KAIST)目前也在大力研究柔性能量收集器，试图通过其收集人体内外动能，如关节弯曲，肌肉伸缩甚至是体内心脏、血管搏动等能量，给穿戴式低功耗电子设备或者体内健康检测传感器供电。由于压电法收集能量不仅对环境无污染，符合绿色低碳的和谐社会需求，而且其效果突出，国际上也有很多成功应用案例，我国相关产品的研发也在不断进步。

## 2. 穿戴式压电能量收集器

可穿戴式的压电能量收集器的核心为压电材料，其基本的工作原理为：人体通过各种各样的运动，如跑、跳、踩、踏、弯腰等，将运动产生的动能传递给穿戴式的压电能量收集结构，引起该结构的形变，然后结构将形变传递给压电材料，引起压电材料内部电偶极矩的变化，从而产生感应电荷，这时通过外接电路将电荷提取出来，直接利用或者先储存起来再利用，如图3所示。通过以上的分析可知压电式能量收集器分为三个部分：振动能吸收和传递模块，机电能转化模块以及电能提取与应用模块。压电能量收集器需要解决的关键问题就存在于这三个模块里：1. 声阻抗匹配；2. 高效机电能转化；3. 电阻抗匹配。声阻抗匹配指的是器件的谐振频率要与环境振动源相匹配，才能利用谐振保证声能最大程度的传递到压电材料上；

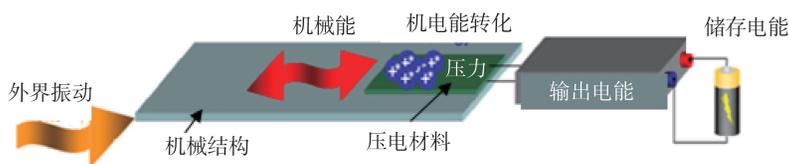


图3 压电能量收集器的工作原理示意图

高效机电能转化是指压电材料需要工作在最佳模式，材料压电性能尽可能高，才能保证转化效率越高；电阻抗匹配是指器件的内阻和后期电路的阻抗尽可能相等，才能保证电能尽可能多的转移到负载上。从图中的能流过程来看，可能某些过程会相互制约，因此三个过程需要综合考虑，设计出综合转化效率最高的压电器件。下面我们将从这三个方面分别阐述穿戴式的压电能量收集器发展现状。

## 2.1 压电材料

材料的压电性能是指压电材料在受到外力而发生形变时，在它的某些表面上出现与外力成线性比例的电荷积累，如图4所示。通常在压电能量收集器中，压电材料的工作模式有两种：3-1模式和3-3模式。前者指的是横向长度伸缩模式，也就是在长度方向施加力，在厚度方向收集到电荷。这种模式通常伴随材料弯曲，或者长度方向拉压等形式出现。后者指的是在厚度方向上施加外力，而在厚度方向上收集电荷。这种模式便常常伴随着材料厚度方向受挤压，如踩踏时产生。如果我们将其与外界负载相连接，则电荷由于中和能产生瞬时电压和电流。但是，通过压电效应产生的电能往往是比较低的，一般只能达到微瓦至毫瓦级别。这主要是由于压电材料在准静态下是一种呈电容特性的电介质体，内阻很大，从而导致电流也很小，输出功率很低。另一方面，材料的压电性能在很大程度上也决定了其输出功率的大小。

目前市场上常用的压电材料有PZT陶瓷，

BaTiO<sub>3</sub>陶瓷，弛豫铁电单晶PMN-PT以及有机材料PVDF等。得益于量产化优势和较高的压电性能，PZT陶瓷从20世纪初以来便是应用最为广泛的一种压电材料，而基于PZT陶瓷的压电能量收集器也发展迅速。另一种压电材料PVDF是一种有机材料，具有很大的柔性，符合人体工学，比较适合于制备穿戴式柔性压电能量收集器，但受限于其低的压电性能，目前距离应用还有比较长的距离。根据准静态工作的压电能量收集器输出能量公式： $U = \frac{1}{2} dg \left(\frac{F}{A}\right)^2$ ，其中 $U$ 为器件输出能量； $d$ 为压电电荷常数，表征压电材料受单位面积作用力能产生的电量； $g$ 为压电电荷常数，表征压电材料受单位面积作用力情况下能产生的电压； $F$ 为外力； $A$ 为外力作用面面积。可以看出能量密度优值 $dg$ 是衡量一种压电材料输出功率的重要指标。从表3中可以看出，和普通的压电材料相比，弛豫铁电单晶铌镁酸铅-钛酸铅 $x\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - (1-x)\text{PbTiO}_3$ （简称PMN-PT）具有极高的能量密度优值，非常适合于用在压电能量收集器中，因此也是近些年研究的热点材料。

表3 几种常用压电材料的性能参数

压电材料	$d_{33}$ (pC/N)	$g_{33}$ ( $10^{-3}\text{Vm/N}$ )	$d_{31}^2 g_{33}$ ( $10^{-15}\text{m}^2/\text{N}$ )	$d_{31}$ (pC/N)	$g_{31}$ ( $10\text{Vm/N}$ )	$d_{31}^2 g_{31}$ ( $10^{-15}\text{m}^2/\text{N}$ )
BaTiO <sub>3</sub>	149	14.1	2100	78	5	390
PVDF	-33	330	10890	23	216	4968
PZT-5H	593	19.7	11682	-274	-9.1	2493
0.7PMN-0.3PT	2000	34.2	68400	1883	53	99347

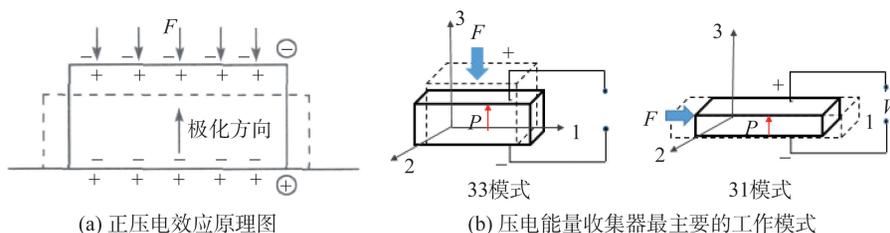


图4 压电效应原理图和压电能量收集器中压电材料常用的工作模式（3-3模式和3-1模式）

## 2.2 器件结构

为了设计回收人体活动能量的压电能量回收装置，必须首先研究各种潜在的人体活动能量。研究表明，踝关节、膝关节、臀部、肘部和肩膀运动各自可产生 69.8 W、49.5 W、39.2 W、2.1 W 和 2.2 W 能量。由于目前我们的能量振动源是人体，运动频率普遍在几个赫兹左右，比我们的能量收集器本征频率一般低了 1 个数量级以上，因此目前研究的穿戴式压电能量收集器工作状态一般都是准静态。而针对这些部位的运动能量进行可穿戴式的压电能量收集大多可以分为两类：刚性结构和柔性结构。这种分类是基于器件本身的柔软性和工作特性所划分的。刚性器件一般形变小，但是输出性能比较高，通常工作的模式是挤压，也有弯曲模式。而柔性器件形变非常大，工作最主要的模式是弯曲模式，也有少量挤压形式。近年来研究的热点由于更加注重舒适和高效性，因此穿戴式压电能量收集器的研究重心也逐渐由刚性器件向着柔性器件发展。

### 2.2.1 刚性器件

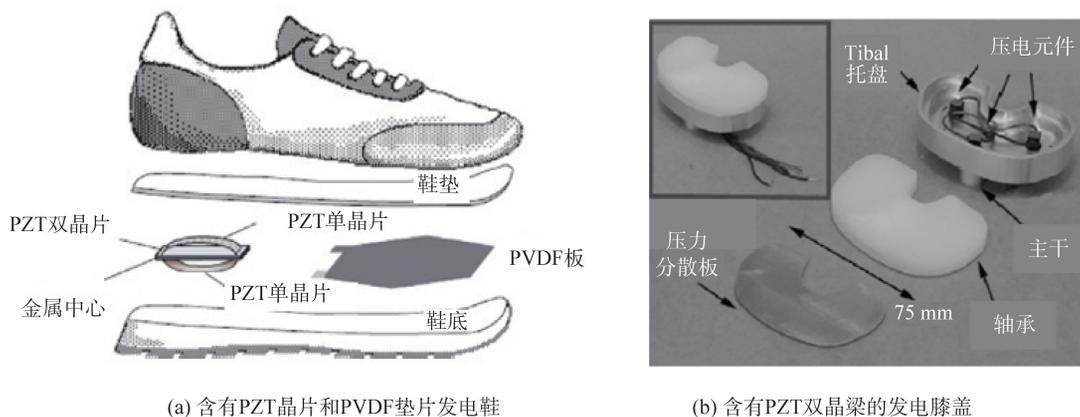
除了研究潜在的人体运动能，已有不少研究人员理论分析和研制了回收人体活动能量的压电能量回收装置。2001 年，申克 (Shenck) 和帕拉迪索 (Paradiso) 将压电能量回收装置安装于鞋中，如图 5(a) 所示。在保证鞋的舒适性的前提下，将偏氟乙烯 (PVDF) 压电材料铺埋在鞋的前部，将预压的 PZT 压电单晶片安装在鞋的根部。与 PVDF 相连的负载阻值为 250 kohm，当行走频率为 0.9 Hz 时，PVDF 输出的平均功率为 1.3

mW。基于 2 根 PZT 压电单晶片的压电结构，平均回收的功率为 8.4 mW。为了进一步说明压电发电鞋的可行性和实际意义，将 RF 节点 (其能够发射可识别代码即 ID) 安装在鞋后部，在行走时利用上述的压电回收装置为 RF 节点供电，这样穿着压电鞋就可满足通信联络需求。2005 年，Platt 等研制出了一种应用于膝关节假体的压电能量回收装置和压电传感器，如图 5(b) 所示。通过模拟人体行走时膝关节的受力情况，对该装置进行实验研究，回收功率可达 0.85 mW，这个回收功率完全可以满足膝关节假体内部微处理器 (向外界传输传感信息) 的供电需要。

芬斯特拉 (Feenstra) 等人设计了“悬挂式负重”的背包，如图 6 所示。通过将 20 ~ 38 kg 负重垂直运动时的机械能转换成电能，正常行走时可产生 7.4 W，相当于压电鞋装置 (20 mW) 的 300 倍。这个发电设备可有助于科学工作者、探险者和救灾人员摆脱沉重的设备电源及电池，提高了他们在偏远地区使用便携式电子设备的能力。

### 2.2.2 柔性器件

由于人体运动多是产生大形变的应力传递方式，因此通过与人体贴合方式来吸收运动能的柔性压电器件是目前研究一大热点。早期我们把压电柔性器件称为纳米发电机 (Nanogenerator)。2006 年，王中林教授研究组发明了压电纳米发电机，利用 ZnO 纳米线将机械能转换为电能。其具体工作原理如图 7 所示：ZnO 纳米线在外力的作用下发生弯曲时，其相对的两个面上会分别发生拉伸和压缩。由于压电效应会在其拉伸面上会产生正电荷，而在其压缩面上会产生负电荷。



(a) 含有PZT晶片和PVDF垫片发电鞋

(b) 含有PZT双晶梁的发电膝盖

图5 内置压电能量收集器的发电鞋与发电膝盖

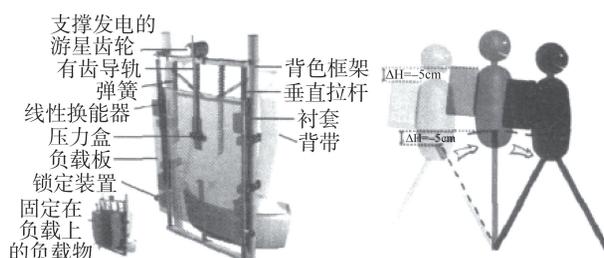


图6 悬挂式负重背包发电装置

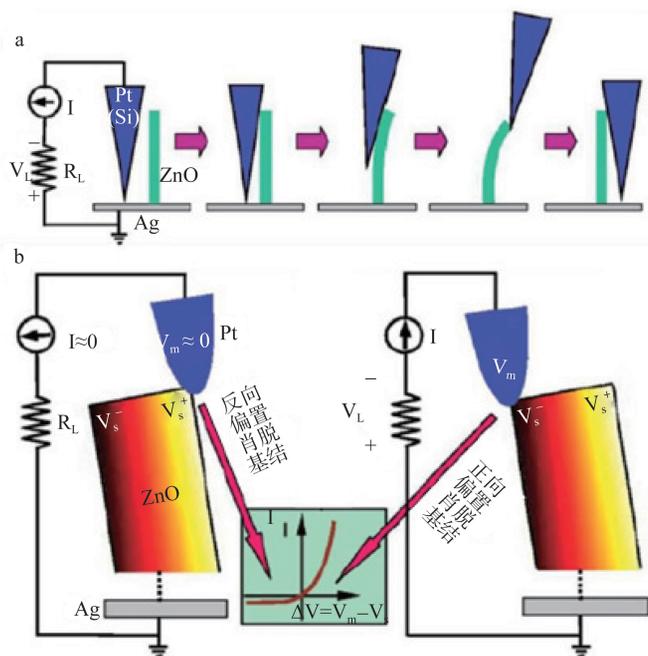


图7 基于原子力显微镜的ZnO的纳米线结构工作过程(a)和工作原理图(b)

由于氧化锌是一种n型半导体，在氧化锌与Pt之间形成肖特基接触，当探针与氧化锌的拉伸面接触的时候，在肖特基结的作用下，电子无法从Pt表面流到氧化锌纳米线的内部，负电荷在氧化锌表面的正电荷静电力的作用下积累在探针的表面，同时，由于氧化锌形变的过程相对比较缓慢，在这个过程中产生的电压很小，无法被测量到。而当探针扫到氧化锌纳米线的压缩面时，肖特基结处于导通状态，氧化锌纳米线上的负电荷和探针上积累的负电荷通过探针流过外电路。这个过程是在探针与压缩面顶端接触的瞬间发生的，会在外电路中产生一个足够测量的电压。

由于压电纳米发电机所基于的纳米材料相对于块体材料具有优良的力学性能，且对外界微小的力具有很高的灵敏度，因此它们能够有效地搜集人体活动与外界微弱的机械能。为了提高发电机的性能，纳米发电机的材料的选取ZnO扩展至ZnS、GaN、BaTiO<sub>3</sub>、

PVDF等，结构的设计从基于单根线到横向纳米线阵列集成、垂直纳米线阵列集成，而且实现了机械运动源与压电纳米线无需直接接触的非接触式机械能收集。由于ZnO的压电性能不高，大多数基于它的压电能量收集器器件的输出功率非常低，能量收集效率比较低下；而且无机材料天然具有脆性，易疲劳失效。因此，通过材料和器件结构的改变获得集高压电性能，高柔性和高可靠性于一体的压电能量收集器便是接下来纳米发电机发展的主题。

人们试图探索高压电性能材料的纳米发电机，其中含铅压电陶瓷PbZr<sub>0.52</sub>Ti<sub>0.48</sub>O<sub>3</sub>(PZT)由于具有高的压电系数、剩余极化矢量，被广泛地应用于机械能电转换器件中。2013年，Gu等人将定向的PZT纳米线薄膜与PDMS相结合，以此来提高薄膜的柔韧性，再将横向排列的纳米线阵列旋转成为垂直取向的纳米线阵列(图8)。这种方式不仅可以制得超长的PZT纳米

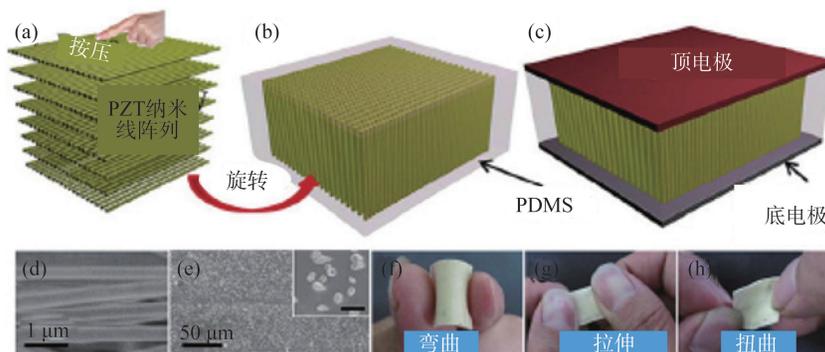


图8 PZT 纳米发电机的制备过程和结构表征：(a)~(c) 利用区域定向的电纺纳米纤维来制备高输出纳米发电机的步骤；(d) 区域定向的电纺 PZT 纳米纤维的 SEM 照片；(e) 垂直取向的超长 PZT 阵列的扫描电子显微镜 (SEM) 顶视图；(f)~(h) 不同形变下的垂直取向超长 PZT 阵列的光学照片

线阵列，而且还可以集成大量的 PZT 纳米线。阵列的长度极大地影响纳米发电机的输出电压，并联纳米线的数量则会影响输出电流。所以这种方式能够同时提高输出电压和输出电流。其输出电压和电流最高分别可达 209 V, 50  $\mu$ A。

由于压电电体本身阻抗高，因此输出电流非常小，从而产生的能量并不能直接带动低功耗的电子设备，这是限制柔性压电器件进一步发展的主要因素。解决该问题最主要还是得从制备和改善高性能压电材料出发。基于弛豫型铁电体 PMN-PT 和 PZN-PT 单晶由于具有极高的压电能量密度优值而引起了广泛的关注。如果能将其引用在柔性压电领域将会极大地增加输出功率和能量转换效率，甚至能够直接带动一些低功耗电子设备直接工作。2014 年，Hwang 等人将块体高性能 PMN-PT 单晶通过机械化学减薄的方式，制备出了面积为  $1.7 \times 1.7 \text{ cm}^2$  的厚度为  $8.4 \mu\text{m}$  的柔性器件，如图 9 所示。该器件制备时候利用了一种特殊的转移法，从而使得 PMN-PT 保持了块体材料的完整机械性

能同时又具有相当的柔性，因此能够非常有效的收集包括肌肉运动，体内器官搏动等运动能量。在应变为 0.33% 下，其开路电压和短路电流最大值能够达到稳定的 8V 和  $140 \mu\text{A}$ ，最大输出功率能够达到  $0.16 \text{ mW}$ ，成功带动了心脏起搏器 ( $3 \text{ V}$ ,  $100 \mu\text{A}$ ) 工作。该器件最大的贡献在于将压电能量收集器的短路电流提升了一个数量级，从而使得电能克服内部阻抗大，无法有效直接转移到后端负载的劣势。

然而，PMN-PT 单晶也有其自身的劣势：内部畴尺寸较大，一般能达到  $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 。因此，当晶体厚度尺寸降至这个范围内时，畴结构会受到表面夹持作用。这种夹持会使得晶体的压电性能随着厚度降低而迅速衰减，从而使得能量转化效率过低。解决这个问题的一般有几种：1. 通过样品制备、极化工艺来改善；2. 制备压电材料厚度较大的器件；3. 通过掺杂的方式减小畴尺寸。前两种方法在实际应用中存在着电学和机械上的不稳定性，在实际的应用中伴随着退极化和断裂失效的问题，因此并不可靠。

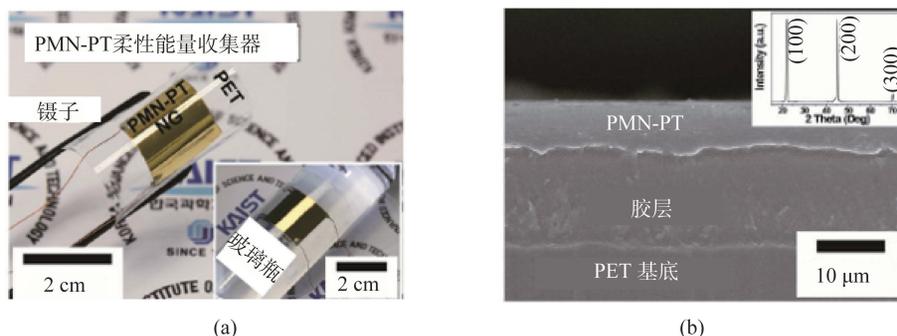


图9 由 Hwang 等人设计制备的基于超薄 PMN-PT 的柔性压电能量收集器实物图 (a) 和 SEM 图像 (b)

而通过第三种方法在材料性能上加以改善是最符合实际需求的。第二代高性能弛豫铁电单晶 PIN-PMN-PT，是一种将 PMN-PT 掺入稀土元素 In 的方式改善了其矫顽场，居里温度，畴尺寸等。其内部畴结构一般能保持在  $10\mu\text{m}$  以下，因此在微米级别性能和体材料相差不大。基于此，研究者开展了柔性压电器件的制作。笔者在 2016 年制备出了一种基于弛豫型铁电单晶的柔性阵列式能量收集器，如图 10 所示。首先通过化学机械抛光减薄、划切的方式制备出了晶面取向为 (110) 的 PIN-PMN-PT 长薄片，这种薄片厚度为  $45\mu\text{m}$ ，长宽分别为  $20\text{mm}$  和  $2\text{mm}$ 。大的长宽比不仅能够降低刚度改善柔性，还能减少裂纹扩展几率，增强器件的疲劳断裂特性。然后将多个 PIN-PMN-PT 长条片与柔性电路板、ABS 塑料基底粘结在一起，形成一种电学并联阵列式柔性压电能量收集器。该器件在压电材料应变为  $0.18\%$  时的开路电压和短路电流分别能够达到  $24\text{V}$  和  $105\mu\text{A}$ ，并

且在最佳匹配阻抗下能够有  $0.25\text{mW}$  的输出。

### 2.3 能量管理电路和应用对象

由第二部分的原理分析我们知道，压电能量收集器产生的电信号是交流信号，无法直接供给电子设备。因此，在接负载之前，我们需要将其进行整理处理。图 11(a) 是压电能量收集的标准电路。电流先经过整流，再储存于电容器上，最后供给负载使用。这是压电能量收集器工作系统的最简单结构。然而，由于器件与负载之间的电阻抗一般是不匹配的，而且电能转化、转移过程中会产生很高的损耗，这就使得原本输出不大的功率更加低下，严重影响其工作效率。近些年来，一些高效能量管理电路应运而生，如基于电感的同步开关能量采集电路 SSHI，同步电荷提取电路 SECE 等，这些电路能提升效率高达  $400\% \sim 900\%$ 。同时，国外一些大的电路芯片制造公司引入 MEMS 和 IC 技术，将低功耗的电子元件与能量管理芯片结合起来，制造

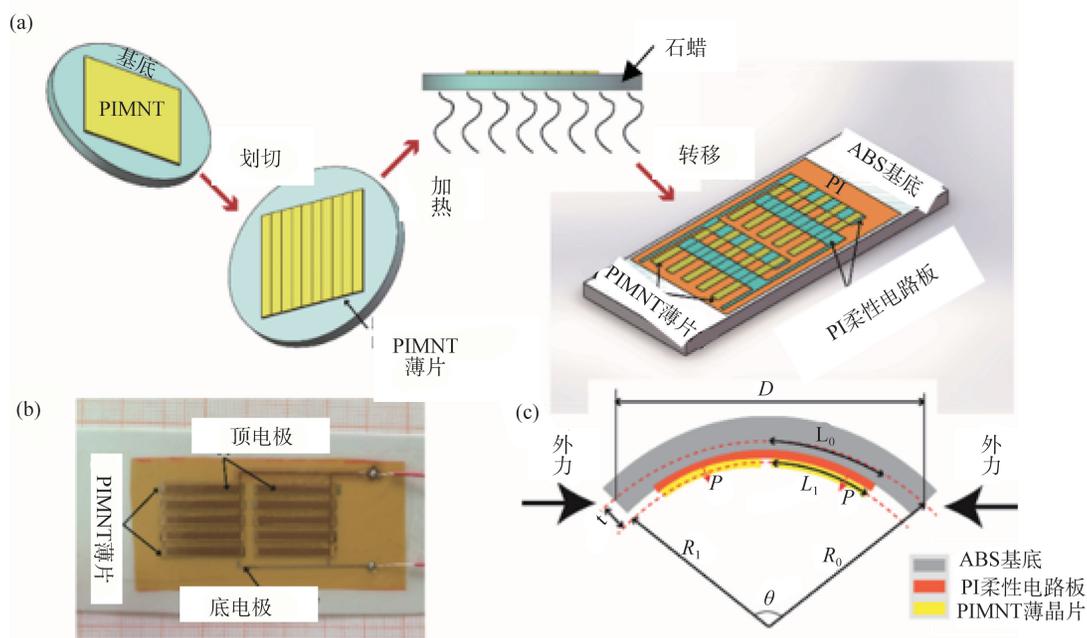


图 10 笔者设计制备的基于长薄片状 PIN-PMN-PT 阵列的柔性压电能量收集器的制备工艺 (a) 实物图 (b) 和工作原理示意图 (c)

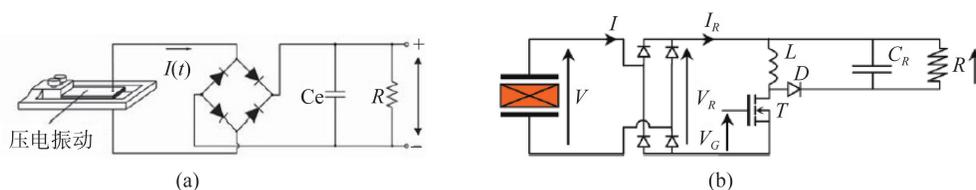


图 11 用于压电能量采集的标准电路 (a) 和同步电荷提取电路 (b)

了很多的能量管理电路系统。如 Linear 的电源管理芯片 LTC3588-1, TI 的 MSP430 系列超低功耗单片机, Microsemi 公司的超低功耗无线发射模块 ZL70250 等。这些低功耗能量管理系统在很大程度上解决了标准电路后端电路能量损耗大的问题。

在应用对象方面, 穿戴式压电器件的展示对象以 LED 灯珠, LCD 屏幕为主, LED 灯珠是一种发光二极管, 具有单向导通的特性。当正向导通时, 灯光发亮。这个导通的电压和灯珠本身特性有关, 大约在 2~4V 之间不等。低功耗的 LED 灯珠正常工作所需的瞬时功率约为几十个毫瓦。由于压电能量收集器的高阻抗特性, LED 灯珠以串联形式效果为好。笔者将柔性阵列式压电能量收集器置于膝盖后侧并利用护膝固定, 在走动和跑动过程中器件的开路电压分别能达到 14V

和 19V, 而且在跑动过程中能点亮 48 颗蓝色 LED 灯珠, 如图 12 所示。

另外, 收集起来的能量用于低功耗电子、射频通讯器件等的自助供电也成为目前微能量收集的一大发展方向。这是由于化学电池电量始终有限, 当电量用完后可能会给那些不方便更换电池的使用者带来一定的安全隐患, 例如, 士兵行军打仗, 或者在偏远地区的旅行者。如果能够收集运动能量收集起来给手表甚至是手机供电, 我们就可以减少电池体积甚至是不需要化学电池, 从而达到安全, 轻松, 环保的目的。韩国 KAIST 研究机构目前利用弛豫铁电单晶制备了柔性压电器件, 用于收集足后跟关节弯曲能量, 用以带动电子设备, 达到减少行军电池目的, 如图 13 所示。

近年来, 穿戴式的压电能量收集器与医疗相结合

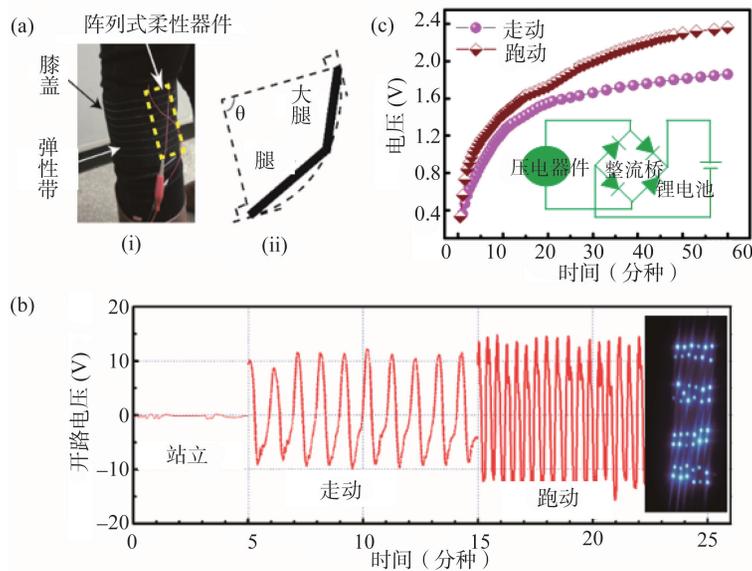


图 12 笔者设计的柔性阵列器件收集人体膝盖运动示意图 (a) 运动产生开路电压波形 (b) 和运动时器件后接可充电电池 ML414 的充电曲线图 (c)

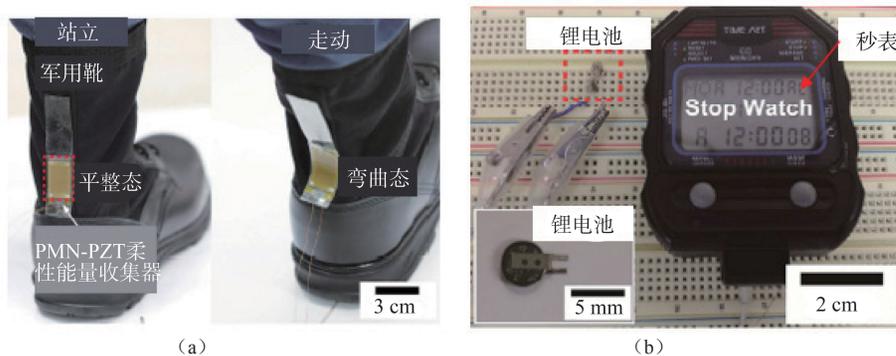


图 13 柔性器件与踝关节外侧贴合通过弯曲来产生电量 (a) 和带动秒表工作 (b)

也是现阶段研究的热点。一些健康检测节点往往需要分布在人体内部，如心脏起搏感知器。这些传感器需要利用锂电池供电，但是锂电池寿命一般低于 10 年，并且存在失效风险。如果能够收集人体自身运动的能量来带动这些器件，或者说延长电池的使用寿命，都将在很大程度上帮助病患者延长手术周期，降低手术

风险。Hwang 等人利用 PMN-PT 制备的柔性器件已经成功激发了心脏起搏器，并且在小白鼠身上成功测试，如图 14 所示。

### 3. 结论和展望

压电能量收集器可以以刚性和柔性的形式制备出

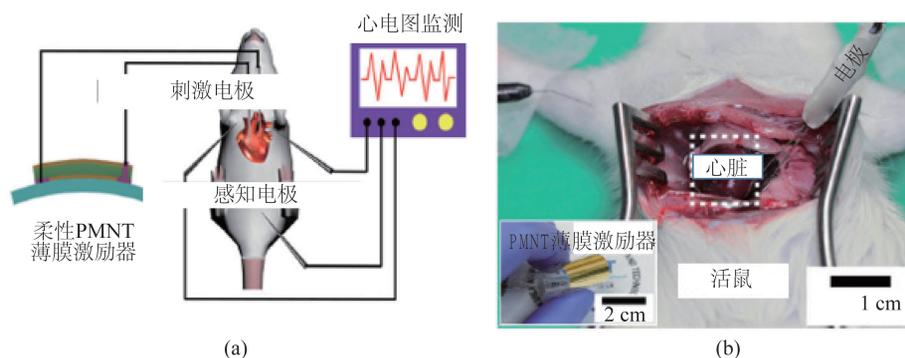


图 14 由 Hwang 等人制备的 PMN-PT 极薄柔性器件对小鼠心脏的成功起搏示意图 (a) 和试验实物图 (b)

高性能的智能穿戴设备，从而达到收集人体运动能的目的。刚性器件一般以金属材料为主，结构简单，输出功率高，能达到 10mW 以上的量级，适合于收集足底能量。而柔性器件制备工艺难度比较大，输出能量也比较低，一般都会低于 1mW，但是其适应人体工学，几乎不影响人体舒适度，非常适合用在人体大部分的关节部位或是肌肉部位。两种方式各有优缺点，也能配合使用。近年来，由于穿戴设备目前发展趋势更加注重人体舒适性，而把输出功率作为次要的因素，因此，结构上灵活多变的柔性器件受到越来越多人的青睐。穿戴式压电能量收集器正处于蓬勃发展之期，并正在逐步走向成熟。但是穿戴式压电能量收集器输出功率还是较低，普遍在  $1 \mu\text{W} \sim 10 \text{mW}$ ，难以直接驱动功能电路工作。因此，提升其输出性能是现阶段发展的主题。笔者认为，推动其输出功率提升可以从以下几方面进行：

1. 谐振式穿戴压电器件：可穿戴能量收集器的绝大多数都是工作在准静态，与人体运动声阻抗不匹配，因此机械能吸收效率低。如果能将人体运动频率经过上转换实现与器件谐振频率匹配；或者是将器件频率降低，与人体运动频率相匹配，都能达到降低内阻，提升输出电流和功率的目的。

2. 多种能量收集方式结合：就穿戴式压电能量收集器而言，其输出并不稳定，随人的运动状态变化而变化；因此，我们不能只单单依靠压电能量收集来制备自助供电系统。近些年来对于混合式的能量收集研究比较多，即将压电器件与光电，热电，摩擦发电等器件结合起来，制备一种能吸收多种人体能量形式的混合式器件，这是解决实现高输出的一条有效途径。

3. 低功耗能量管理电路和芯片研制：能量管理电路能有效解决器件和负载之间的电阻抗匹配问题，从而提升输出功率；但是引进这些电路的同时会造成原本功率就不高的压电能量收集器能量进一步损耗。因此，从硬件和软件两方面设计低功耗的能量管理电路依然是促进压电能量收集技术应用的必要手段。

另一方面，按照 IC 技术和 MEMS 技术发展速度，相信在不久的将来微电子器件功耗将会进一步降低，穿戴式压电能量收集器将会有更大的用武之地。它将为未来生产无需电池的电子产品，数码产品，传感通讯设备等提供强有力的技术支持，并可直接用于医疗监护（人体发电驱动的医疗监护系统）设备，甚至是手持式终端设备中。这种物理式的绿色能源一旦突破应用瓶颈，将会给人们生活、生产方式等带来革命性变化。