

新型环境 能量采集技术

New Ambient Energy
Harvesting Technology

陈仁文◎编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

新型环境能量采集技术

陈仁文 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

前 言

在面临能源紧缺、全球气候变暖等严重问题的今天,寻找和利用清洁能源是各国都在重点解决的重大问题之一。新型环境能量采集技术是将自然界广泛存在的各种环境能量,包括太阳能、风能、热能、振动能、海洋能,以及其他能量如人体动能、生化能等,利用各种新型换能材料、结构或系统,将其转化为电能并存储和利用的一种技术。对周围环境中存在的能量进行采集,并供给用电设备,这是一种十分清洁的“绿色”能源技术,是关系到国计民生的大事,因此,各国都在投入大量人力财力进行研究,并且发展势头迅猛。国外已有专用的振动能量采集模块销售,也有与之配合的无线网络节点;有用于战士背包的能量采集系统,也有置于鞋底的压力能量采集器;有即将投产的海洋波动能量采集装置,也有还在进行科研的可采集太阳能和风能(振动)的能量采集树;有卫星、太空站、无人飞行器上的应用,也有可穿戴的计算机设想等。

新型能量采集技术是一种军民两用技术,除民用领域外,其在国防上也有着广泛的应用前景。国防上的应用包括各种军事基地的无线检测监视网络、无人值守的军事领域、海防各种浮标信号及位置装置、边防安全传感网络、步兵携带的各种电子设备等。过去,很多电子设备需要采用干电池供电,带来了更换困难、更换成本高、有时甚至无法更换(如在建筑内部布置的传感器)等问题,如能够采集周围能量,供给这些电子设备使用,将使以上问题迎刃而解。另外一个重要的应用方面,还包括无人机利用采集的太阳能使自己续航时间更长以及太空站、航天结构、卫星等的太阳能采集等。可见,新型能量采集技术不论是在民用领域还是在国防领域都有巨大应用前景。

本书重点论述了利用智能材料和结构技术的一些最新的能量采集技术,如振动能、海洋能、热能,以及小型太阳能、风能等的采集与利用等。本书的主要特点:深入浅出,既有基本概念,便于一般入门人员的了解,又有较深的理论分析,以便专业人员使用;既适合教学需要,又可用于科研和工程实际参考;既较系统全面,又有

重点。追求系统全面的目的,是让读者对该技术能有全面了解。追求重点的目的,是让更多的科研人员了解国内外最新的、重点研究的技术领域,使其不需要花费大量时间用于文献阅读就能获得这些领域的最新发展动态。

参加本书编写的有朱莉娅、陈亮亮、于丽、刘祥建、雷娴、隆志远等。另外,在本书编写过程中引用或参考了大量国内外文献,在此表示诚挚感谢。书中必有一些缺陷和错误,欢迎学术探讨。

编著者

目 录

第 1 章 新型环境能量采集技术导论	1
1.1 概述	1
1.1.1 新型环境能量采集技术的定义	1
1.1.2 环境能量采集技术的分类与基本特征	2
1.2 环境能量采集技术的应用现状	4
1.2.1 电力系统应用	4
1.2.2 微小型电子设备及无线传感器网络应用	7
1.2.3 微机电系统应用	10
1.3 环境能量采集技术面临的问题	14
1.4 环境能量采集技术的发展趋势	15
第 2 章 太阳能采集与利用	16
2.1 太阳能采集的两种形式	16
2.1.1 太阳能的热采集	17
2.1.2 太阳能的光采集	18
2.2 太阳能光伏发电技术	21
2.2.1 太阳能光伏发电的基本原理	22
2.2.2 大型光伏系统的组成	22
2.2.3 微小型光伏发电系统的组成	24
2.2.4 光伏发电系统的分类及应用	27
2.3 光伏发电系统的控制技术	30
2.3.1 蓄电池的充放电控制	30
2.3.2 最大功率点的跟踪控制	34
2.4 太阳能供给无线传感网络应用实例	39
第 3 章 风能采集与利用	43
3.1 风的产生与基本特征	43
3.1.1 风的产生	43
3.1.2 风能的特点	44
3.1.3 风的变化	44

3.2	风力发电机	46
3.2.1	风力机	46
3.2.2	发电机	51
3.2.3	利用压电材料的换能装置	54
3.3	风力发电系统	55
3.3.1	风力发电的基本原理	55
3.3.2	风力发电系统的分类	55
3.3.3	微小型风力发电系统的基本组成	56
3.4	风力发电的控制技术	58
3.4.1	最佳功率点跟踪控制(MPPT)	58
3.4.2	定桨距控制风力	67
3.4.3	变桨距控制	68
3.5	风能供电无线传感网络应用实例	71
第4章	热能采集与利用	73
4.1	温差发电原理	73
4.1.1	热电效应	73
4.1.2	温差发电原理	75
4.2	温差发电器	76
4.2.1	温差发电器理论及其结构	76
4.2.2	温差发电器的制备	84
4.2.3	国外微小型温差发电器的研究进展	85
4.2.4	温差发电器的应用实例	88
4.3	热电材料	90
4.3.1	概述	90
4.3.2	热电材料的制备	91
4.3.3	热电材料性能的优化	94
第5章	海洋能采集与利用	97
5.1	海洋能	97
5.1.1	海洋和海洋能简介	97
5.1.2	海洋波浪与波浪能	99
5.1.3	海流与海流能	103
5.1.4	海洋其他形式能源	105
5.2	海洋能发电技术	106
5.2.1	波浪能发电技术	106
5.2.2	海流能发电技术现状	115

5.2.3	几种海洋能发电的新思路	117
第6章	振动能量采集与利用	121
6.1	振动能量的表征	121
6.1.1	振动源	121
6.1.2	振动能量转换模型	121
6.2	振动能量采集方法	124
6.2.1	振动能量采集典型方法	125
6.2.2	振动能量采集方法特性比较	125
6.3	静电式振动能量采集方法	126
6.3.1	静电式振动能量采集方法的理论基础	126
6.3.2	静电式采集结构的两种工作方式	126
6.3.3	驻极体与静电式振动能量采集结构	132
6.3.4	静电式采集结构仿真与实验分析	134
6.3.5	静电式振动能量采集结构实例	137
6.4	电磁式振动能量采集方法	138
6.4.1	电磁式采集方法的理论基础	138
6.4.2	电磁式采集结构的基本组成	140
6.4.3	电磁式采集结构输出功率分析	144
6.4.4	电磁式能量采集结构实例	147
6.5	压电式振动能量采集方法	152
6.5.1	压电材料理论基础	152
6.5.2	压电式振动能量采集结构分析	165
6.5.3	压电式振动能量采集方法的理论基础	177
6.5.4	单级压电式振动能量采集电路	180
6.5.5	多级压电式振动能量采集电路	190
6.5.6	各种能量采集电路仿真与实验	197
6.5.7	压电式采集方法的制约因素	202
第7章	其他能量采集技术	203
7.1	人体能量采集技术	203
7.1.1	人体能量采集技术分类	203
7.1.2	人体能量采集技术发展趋势	206
7.2	雨滴能量采集技术	207
7.3	生物质能量采集系统	207
第8章	电能存储与变换技术	209
8.1	电能存储技术	209

8.1.1	机械储能方式	209
8.1.2	电磁储能方式	211
8.1.3	化学储能方式	211
8.2	电源变换的基本电路及工作原理	213
8.2.1	DC-DC 变换电路	213
8.2.2	AC-DC 变换电路	222
8.2.3	DC-AC 变换电路	227
8.2.4	AC-AC 变换电路	229
参考文献		232

第 1 章 新型环境能量采集技术导论

能源、物质和信息是推动人类生存与发展的主要因素。在人类历史上,能源应用经历了石化燃料、水能、风能、太阳能、热能等方式的变革,极大地推进了人类社会物质文明与精神文明的发展。随着能源应用的日趋紧张以及全球环境不断恶化,如何在可持续发展的前提下解决能源供给是全世界共同面临的问题之一。节能减排、治理环境污染是解决该问题的方法之一,但是从长远角度出发,需要积极探索和开发新能源、科学有效地利用各种可再生资源,以主动解决能源增量问题,建立安全、清洁、可靠的可持续能源系统。

1.1 概述

1.1.1 新型环境能量采集技术的定义

新型环境能量采集技术是指将自然界广泛存在的各种环境能量,包括太阳能、风能、热能、振动能、海洋(河流)能,以及其他能量如人体动能、雨滴能量、生化能等,利用各种新型换能材料、结构或系统,将其转化为电能并存储和利用的一种技术。

自然环境中存在的能源种类繁多、分布广泛,而且取之不尽,用之不竭。通过各种环境能量采集技术采集的能量大到可以提供给电力系统,小到可以提供给无线传感器和微机电系统(Micro Electric-Mechanical System, MEMS)等。后者是目前研究的热门。

过去使用的无线传感器网络节点大都采用电池或电缆供电。但在一些应用场合,如埋在大型建筑内部和安装在野外分散的无线传感器,要采用电缆或电池供电是不现实的。即使可以采用电池供电,定期的大规模电池的更换也相当困难。因此,能量供给是目前无线传感器亟待解决的首要问题之一;另一方面,随着大规模集成电路制作技术、超精密机械加工技术的迅速发展, MEMS 已经或将广泛应用于工业、农业、军事、航空航天、医学、生物工程、环境监测和家庭服务等诸多领域,但现有微机电系统中电源装置占据了相当一部分体积和质量,因此,寻找新型的微电源也是 MEMS 急需解决的问题之一。

以上需求牵引导致新型环境能量采集技术的应运而生。当然,该技术得到迅速的兴起和发展,还得益于微电子、低功耗设计以及网络技术的发展。

可喜的是,目前许多电子器件和装置需要的电能可以做到十分微小。以研究较为集中的无线传感器为例,其所需的总功率已经减少到了 μW 级。这使得许多新型的能量采集系统能够为其供电。表 1-1 为能够采集的环境能量的能量密度情况。

表 1-1 一些新型能源功率密度的比较

能 量 形 式	功率密度/ $(\mu\text{W}/\text{cm}^3)$ 使用 1 年	功率密度/ $(\mu\text{W}/\text{cm}^3)$ 使用 10 年
太阳能(室内)	15000(阳光直射)	15000(阳光直射)
	150(多云)	150(多云)
太阳能(室内)	6(办公桌)	6(办公桌)
振动能	200	200
噪声	0.003(75dB)	0.003(75dB)
	0.96(100dB)	0.96(100dB)
每天温度变化	10	10
温差能	15(温差 10°C)	15(温差 10°C)
嵌入鞋内	330	330
一次性锂电池	45	3.5
可充电锂电池	13.7	0
碳氢燃料微热发电机	333	33
甲醇燃料电池	280	28

1.1.2 环境能量采集技术的分类与基本特征

1.1.2.1 太阳能采集技术

从广义上讲,太阳能不仅包括直接投射到地球表面的辐射能,还包括像生物质能、水能、风能、海浪能等同样起源于太阳辐射的间接方式的太阳能量。太阳能具有蕴藏丰富、可再生和开采独立等优点,同时也存在能量密度较低、不能连续发电、受季节天气影响较大等不可忽视的问题。

太阳能大规模供电技术以光伏效应为理论基础,利用半导体电子器件有效地吸收太阳光辐射能,并使之转变成电能。它具有安全可靠,无噪声,无污染,能量易获取,受地域限制影响小,故障率低,无需架设输电线路等优点。

太阳能微电子系统供电技术以光电采集为理论基础,利用光电材料吸收大量的光子,光子累积一定程度时可以激活光电池中的电子,通过结合相应的调整和储存电路,为负载提供稳定的电压。太阳能能量采集技术作为最具有吸引力与最可能广泛应用的技术之一,目前已广泛应用于计算器、手表、充电器、MP3 等电子设备中。

1.1.2.2 风能采集技术

风力发电有助于减少环境污染,调整电力工业结构,推进技术进步。近年来全世界风力发电均以每年超过 30% 的速度增长。风电技术经过 20 余年的开发日臻成熟,大规模的风力发电系统已逐步实现商业化。风能具有储量大、可再生、分布广、无污染等优点,但同时也存在能源密度低、能量稳定性较差、存在地区差异等局限性。常用的风力发电系统包括风力机和发电机,风力机将风能转化为机械能,发电机将机械能转换为电能输出。

近年来,发展了一种利用仿生树叶或小型风扇的微小风能采集技术,能够为电子装置提供微小能量。

1.1.2.3 热能采集技术

热能采集技术以温差发电为理论基础,利用热电材料的塞贝克(Seebeck)效应实现热能向电能的直接转化,是一种全固态的能量采集方式,可利用的热能资源包括太阳能、地热能、工业余热、汽车废热等。

热能具有能量种类繁多、储量巨大的优点,以此为原理制成的热电发电机具有体积小、重量轻、结构紧凑,运行无振动、无噪声、无磨损、性能可靠,维修少、可在极端恶劣环境下长时间工作的特点,适用于 5W 以下的小功率电源、军事、航空航天等领域中各种无人监视的传感器,以及医学和生理学研究仪器等。目前,温差发电技术研究的核心内容是通过对于热电转换材料的深入研究和新材料的开发,不断提高热电性能,争取在热源不变的情况下提高电输出功率。

1.1.2.4 海洋能采集技术

海洋能作为衡量海水各种运动形态的大小尺度,通常是指海洋中所蕴藏的可再生的自然能源,主要包括潮汐能、波浪能、海流能、温差能和盐差能。广义的海洋能还包括海洋上空的风能、海洋表面的太阳能及海洋生物能等。

海洋能源按存储形式可以分为机械能、热能和化学能。其中,潮汐能、海流能和波浪能为机械能,温差能为热能,盐差能为化学能。海洋能较常规能源而言,能量密度较低且随时变化。但是同时海洋能在可再生能源中,具有可观的能流密度,海洋将太阳能以及派生的风能等以热能、机械能等形式蓄在海水里,能量不易流失。

1.1.2.5 振动能量采集技术

振动能量广泛存在于如桥梁、飞机、汽车、建筑等各种环境中,利用振动能量采集技术将振动能量转换成电能已经成为 MEMS 能量供给研究领域中的重点之一,也是各种微型能量采集技术中实用性较强的方法。利用振动能量为 MEMS 供电,在解决能量供给问题的同时,可以减小振动对周围环境中结构的损伤、延长结构的使用寿命、降低结构的维护成本。振动能量采集技术利用机电换能元件将机械能转换成电能,并通过机械结构,将环境中振动源的变化最大程度地转换成电能

输出。

根据能量转换原理的不同,振动能量采集技术主要包括以下几种方法:静电式振动能量采集技术、电磁式振动能量采集技术及压电式振动能量采集技术。其中,静电式振动能量采集技术与集成电路制作技术、MEMS 技术有良好的可集成性,易于微型化设计及大批量生产,但受到初始引导能量供给方法的限制;电磁式振动能量采集技术输出电能能力受能量采集结构体积影响较大,微型化下如何有效地输出一定量级的能量是其面临的最大问题;压电式振动能量采集结构价格较低、安装简便且机电能量转换效率较高,是目前研究较为集中且发展较快的振动能量采集方法,其主要问题在于需要与外界环境中振动源处于共振状态时,才能保证输出电能水平较高。

1.1.2.6 其他能量采集技术

其他能量采集技术包括对人体运动能量、雨滴能、电波辐射能、生物质能等的采集技术。

1.2 环境能量采集技术的应用现状

环境能量采集技术具有可再生、无污染等优点,应用前景广阔,应用领域包括电力、交通、海洋、空间开发、微小型电子设备供电、微机电系统供电等,本书仅列举其中几种应用实例以示说明。

1.2.1 电力系统应用

1. 太阳能

太阳能发电技术发展成熟,已经基本实现了为人类日常生活生产供电的目的。目前,世界上最大的薄膜太阳能电池电站 Rote Jahne 在德国建成,如图 1-1 所示。该电站由 JUWI SOLAR 公司承建,输出电能达到 6MW。为了获得足够多的太阳光,共应用 90000 块的太阳能电池组件。薄膜电池组件比普通的晶体硅太阳能电池组件价格便宜,且单位装置容量输出能量更高。该电站采用薄膜电池组件的表面积约 16.5 英亩,电站每年发电量为 $5700\text{MW} \cdot \text{h}$,可以满足 1900 户家庭的用电供给。

撒哈拉沙漠计划建造世界最大太阳能电厂,如图 1-2 所示,装机容量达到 100GW。其设计理念把太阳能电厂和淡水处理工厂及农业项目结合在一起,这样不但能够利用撒哈拉沙漠地区丰富的太阳能资源,还能为贫瘠的沙漠地区提供可饮用水、灌溉农作物。

我国目前装机容量最大的太阳能发电项目,青海省格尔木 200MW 大型荒漠并网光伏电站,第一期 20MW 工程已于 2009 年 8 月在格尔木戈壁上开工,计划于

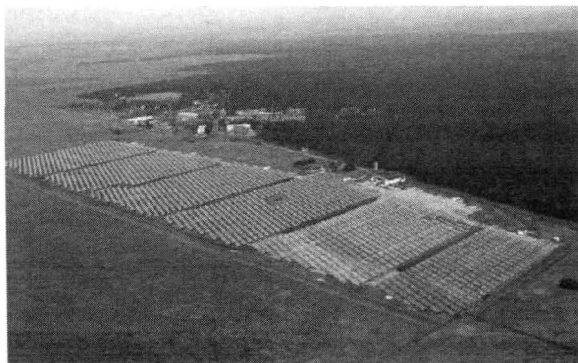


图 1-1 世界最大的薄膜太阳能电池电站

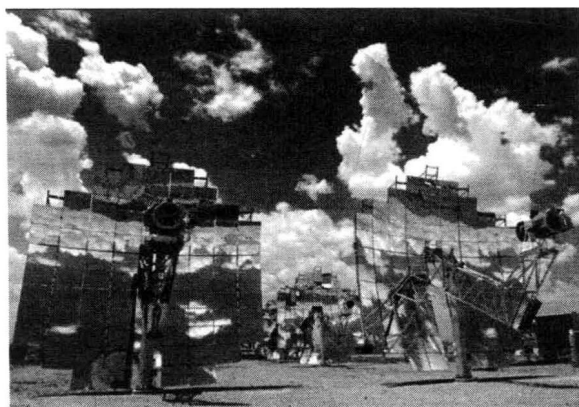


图 1-2 撒哈拉沙漠计划建造世界最大太阳能电厂

2010 年 9 月投产,年发电量约 $3600\text{kW} \cdot \text{h}$,年节约标准煤约 12500t ,可减少二氧化碳排放约 6067t ,减少粉尘排放约 175t 。

2. 风能

1999 年 10 月 5 日,欧洲风能协会的一项国际能源研究报告指出:到 2020 年,风能可提供世界电力需求的 10%,创造 170 万个就业机会,并在全球范围减少 100 多亿吨二氧化碳废气。素以风车著名的荷兰,在阿姆斯特丹机场采用了一种形似打蛋器的发电装置,其旋转体成球状(图 1-3),相较于传统风力发电方式,该发电装置噪声较小,且维持正常工作的最小风速较低,受到了居民的喜爱。

3. 热能

空间探索方面,美国军方和航空航天局(NASA)以同位素温差发电机(Radio-isotope Thermoelectric Generator, RTG)代替太阳能供电,该发电机将放射性同位素的衰变产生的热能转变为电能,为航天器的电能供给提供了新来源。RTG 结构中主要部件为放射性同位素热源及温差电能转换器,如图 1-4 所示。RTG 同位素

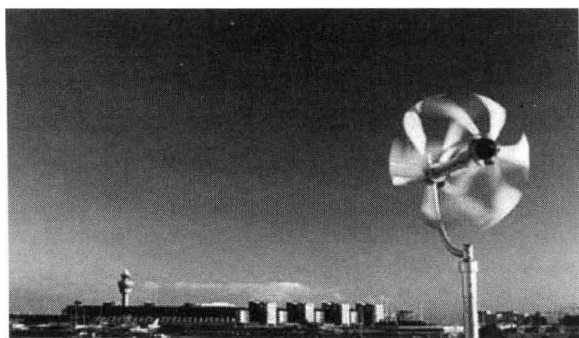


图 1-3 荷兰阿姆斯特丹机场“能源球”发电装置

热源产生的电能主要用于电源管理系统供电,余热全部或部分进入热控系统,为航天器系统中科学仪器供电或用于平台保温,为远离地球的行星探测系统正常工作提供了理想的探测电源。截至 2006 年,美国已经在 26 个空间飞行器上使用了 44 个 RTG,应用对象包括导航、通信卫星、气象卫星、月面站、火星着陆器等。例如,2003 年发射的“勇气”号和“机遇”号火星探测器、2006 年发射的“新视野”号行星探测器等。

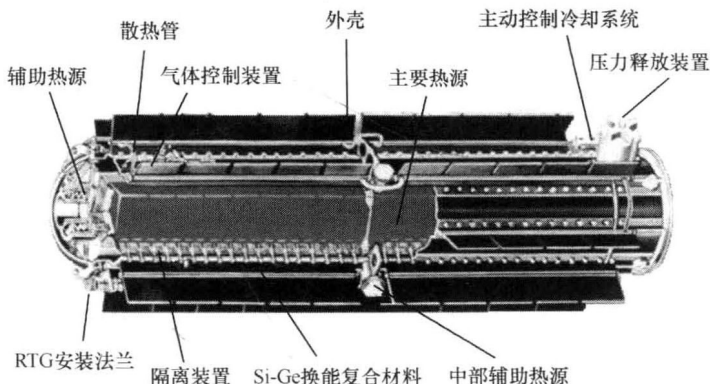


图 1-4 RTG 外观图

工业余热应用方面,日本东京公司研制出利用温差发电的工业余热回收系统,该系统以工业电炉的辐射热能为热源,热电转化效率约为 7.5%。汽车废气应用方面,日本国家功能材料研究中心(SMRC)以汽车尾气为热源开发热能采集技术,一方面能够实现热电转化,为汽车提供部分电力供给;另一方面,通过吸收、分解尾气中的有害气体,达到降污减排的目的。近年来,随着我国汽车用量的不断增长,高效合理地利用汽车废热,是减少污染、节约能源的有效途径之一。

海洋温差发电方面,从南纬 20°到北纬 20°,海水表层温度常年保持在 25℃ ~ 29℃ 之间,而海底 500m ~ 1000m 处的海水温度则保持在 4℃ ~ 7℃ 之间,两者之间存在 15K ~ 20K 的有效温差,理论上世界海洋温差能储量为 100 亿 kW。海洋温差

发电不仅清洁无污染,而且生产成本极低,应用前景较好,但目前能量转换效率较低且投资费用较高。

4. 海洋能

海洋潮汐能量采集方面,英国 MCT(Marine Current Turbines)公司于 2003 年研制一台装机容量达到 300kW 的实验装置“SeaFlow”,安置在英国布里斯托海湾。该装置可以理解为置于水流中的风力发电机,叶片直径为 11m,转速为 15r/min,在涨潮和落潮时可以捕捉潮汐能。“SeaGen”作为“SeaFlow”的后续项目,其发电能力可以达到 5MW,如图 1-5 所示。



图 1-5 潮汐能量采集装置“SeaGen”

海洋波浪能采集技术方面,英国安普敦大学最新研制出一种海浪发电装置“巨蟒”(Anaconda),如图 1-6 所示。该装置长约 150m,直径 7m,由橡胶制成,漂浮在海岸上。橡胶管两端密封,管内充满水。每当海浪经过时,橡胶管随海浪上下起伏摆动,橡胶管受到挤压产生的压力随着管内部的水传递,在管内部产生随着海浪幅度加大而增强的内部压力波,并以此带动尾部的涡轮发电机产生电能,再通过海底电缆进行电能传输。“巨蟒”制作材料以橡胶为主、无须液压油缸、铰链和铰链接头,因此,它比其他波浪能能量采集装置重量轻,构造简单,制造和维修成本较低,故障率较低。

1.2.2 微小型电子设备及无线传感器网络应用

1. 微小型电子设备应用实例

Miniwiz 公司以绿色环保能源为设计理念,着重开发可再生能源的利用,该公司于 2009 年推出了 SolarBulb 太阳能供电 LED,如图 1-7 所示。这款太阳能灯经过阳光照射 3h~4h 所获得的能量,可供 LED 连续照亮 5h。灯上部的太阳能电板可以旋转,以适应不同太阳照射方向,灯内置一个光敏感元件,当光线较弱时自动照明。

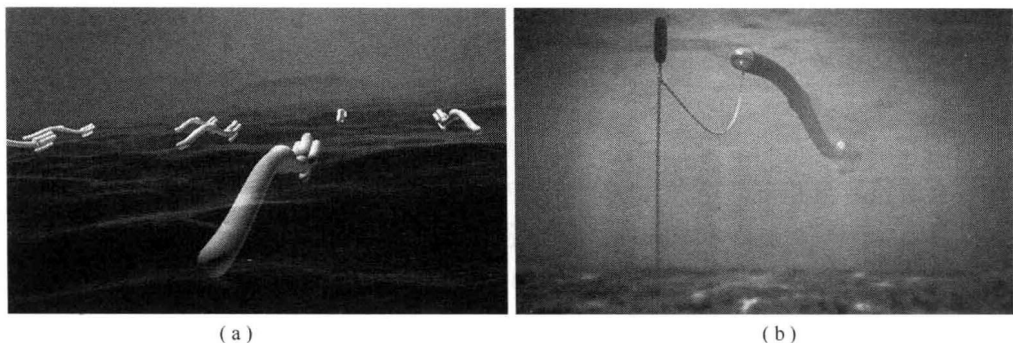


图 1-6 海浪发电装置“巨蟒”

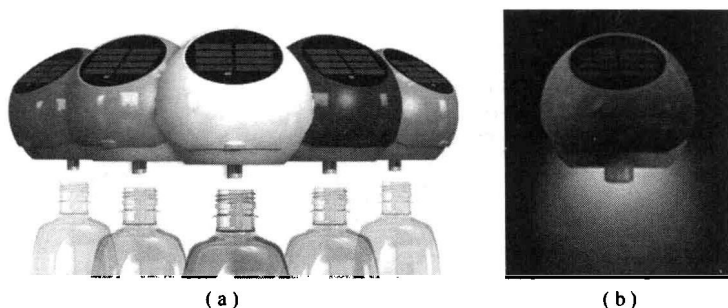


图 1-7 SolarBulb 太阳能供电 LED

Miniwiz 公司同时推出了利用风能以及太阳能,为 MP3、手机、PDA、数码相机等 DC/5V 便携电子设备充电的便携式充电器 HYmini Wind + Solar Power Battery Charger,如图 1-8 所示。HYmini 充电器内置一块储能用、容量 $1200\text{mA} \cdot \text{h}$ 的锂电池,充电器能量输入源包括交流电源(家用 220V)、电脑 USB 接口、微型太阳能电板以及内置的微型风力发电机等。HYmini 充电器针对不同的便携式电子设备,设计了不同的接口和插头,如 USB2.0、Micro USB、Mini USB 等。



图 1-8 HYmini 风能、太阳能充电器

HYmini 充电器内置的风力发电用叶轮,正常工作所需的最低风力为 7m/h,所能承受的最大风力是 40m/h,叶轮输出最大功率为 1W。充电器的叶轮由弹性聚乙烯材料制成,当充电器受到超过安全范围的冲击时,叶轮会自动停止转动以保证使用者安全。实验结果表明,以 19m/h 的风力为 HYmini 充电 20min 所获得的电能,可以为 MP3 充电 40min、或为手机充电 4min、或用数码相机拍摄 20 张照片。HYmini 充电器还可以与附带的 miniSOLAR 微型太阳能电板连接,使用时最多可并联 4 片太阳能板。HYmini 充电器输出电压为 DC/5V,输出电流为 200mA ~ 860mA,miniSOLAR 单独使用时输出电压最大为 5V,输出电流最大为 140mA。

Coniinum Control Corp 公司研究的 iPower 振动能量采集结构通过智能、高效的电路,采集压电材料形状变化所产生的能量,能用来驱动单机器件。iPower 系统由两项自有技术组成,分别为 PiezoFlex 复合材料和自供能电子技术。iPower 系统应用广泛,包括高尔夫或网球自感应系统,它可以感应球手的挥拍动作;可以感应并控制车内噪音的汽车仪表板;可以用于直升机叶片,以使其适应不同的飞行状态、获得最大的燃油效率、速度和爬升率等。当压电材料发生振动的时候,采用振动能量采集技术提取、存储和使用压电材料所转换的电能。

2007 年 2 月,Advanced Linear Devices 宣布了第一款面向工业应用的能量采集模块 ALD's EH300,如图 1-9 所示。ALD's EH300 适用于低功率、间歇性工作、器件储能时间长的场合,可以与太阳能电池、PZT 等压电复合材料、热电发电器等多种能量来源相匹配,并且可以自适应调节输出电压和功率的带宽。该模块具有高效的能量储存效率,能量采集可靠性高,并且解决了电池或者交流电源的限制,因此得到了广泛应用。

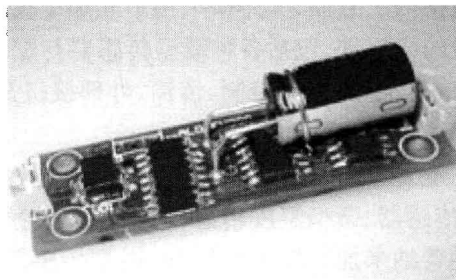


图 1-9 能量采集模块 ALD' EH300

目前,Continuum Control、Ember、Enoean Applieactions、Ferro Solutions、Millenni-al Net、Microstrain 和 Microtrend Systems 等规模较小的厂商在这个新兴研究领域处于前列,飞思卡尔、罗克韦尔(Rockwell)和德州仪器等大公司也参与其中。未来将有望实现对重型机械、轮胎压力和车内温度的监测等应用,以及轮船和飞机等应用场合的结构监测。