

太阳能和风能的短期分散储存

陈成钧[†]

(哥伦比亚大学 纽约 美国纽约州 10027)

摘要 运用太阳能和风能是解决能源问题的根本和长期的途径.但是,传统的能源可以根据需要调节供应,而太阳能和风能是间歇性的而且不能随需要来控制.要有效地运用太阳能和风能,能量储存是必须的.大规模长期储存能量是非常昂贵的.解决这个问题的一种方案是太阳能和风能的短期分散储存.所谓短期,是指十几小时至几天,相当于太阳能和风能的变化周期.所谓分散,是指以单个建筑为单位,并且以多种不同的方式储存能量.从产业发展的角度看,太阳能和风能的短期分散储存的设备会形成一个新的大规模的工业部门.

关键词 新能源,太阳能,风能,能量储存

Short-term distributed storage of solar and wind energy

CHEN C. Julian[†]

(Columbia University, New York, NY 10027, USA)

Abstract Utilization of solar energy and wind energy is the ultimate solution to the energy problem. As traditional energy resources (including fossil-fuel, nuclear and hydropower) could be supplied on demand, solar energy and wind energy are intermittent and do not subject to human control. Energy storage is a necessary condition for an effective utilization of solar and wind energy. Long-term large-scale energy storage is very expensive. A practical solution is short-term distributed storage of solar and wind energy. Here, short-term means some ten hours to several days; distributed means at each building or each unit, such as a farm, and to use various types of storage methods. Equipment for short-term distributed storage of solar and wind energy may become a new industry of huge scale.

Keywords renewable energy, solar energy, wind energy, energy storage

1 引言

世界上越来越多的人认为,运用太阳能和风能是解决能源问题的根本和长期的途径.例如,2007年诺贝尔和平奖获得者,前美国副总统高尔在2008年7月17日提出了“新登月计划”,要求美国在十年之内,即到2018年,全部电力都用太阳能,风能和地热产生^[1].甚至富裕而盛产石油的阿拉伯联合酋长国,都展示了发展“石油以后”世界经济远见,出资180亿美元为初始基金,建立一个可再生能源研究示范城市Masdar,以无碳排放为目标,着重发展太阳能和风能^[2].以下的统计数字^[3]对此作了生动的说明:

每年流向地球的太阳能: 5.46×10^{24} J.

每年全球的可利用风能: 2.5×10^{21} J.

全世界石油总储量: 1.89×10^{22} J.

全世界天然气总储量: 1.57×10^{22} J.

全世界每年能量消耗量(2007年): 5.0×10^{20} J.

每年流向地球的太阳能的0.01%或风能的20%就足够全世界的能量消耗.根据德国太阳能工业协会Bundesverband Solarwirtschaft的预测^[4],在本世纪中叶以后,太阳能和风能,特别是太阳能电池发电(photovoltaics,简称PV),将成为主要的能源.见图1.

但是,与传统的能源(包括化石燃料和水电)相比,太阳能和风能有一个重大的缺点:传统的能源可以根据需要调节供应,而太阳能和风能是间歇性的而且不能随需要来控制.太阳能只有白天和晴天才

2008-12-11 收到

[†] Email: jcc2161@columbia.edu

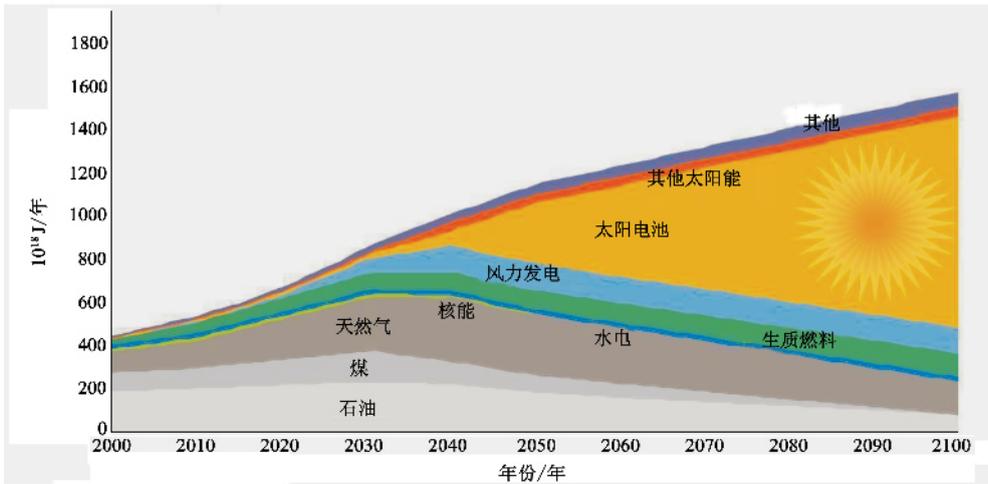


图1 21世纪世界能源的发展趋势预测

有。风力的大小则经常发生无法控制的剧烈变化。如所周知，风力的能流密度 P 与风速 V 的三次方成正比^[5]：

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3,$$

其中 ρ 是空气的密度，在标准状况下（1 大气压，温度 18°C ） $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 。速度 V 可以从 0 变化到每秒几十米。图 2 是纽约市郊区 White Plains 飞机场 2007 年 1 月的风能密度的变化情况。图 3 是同一地方 2007 年 7 月的风能密度的变化情况。如果说，太阳能的变化还是比较有规律的，风能就没有规律可循了。

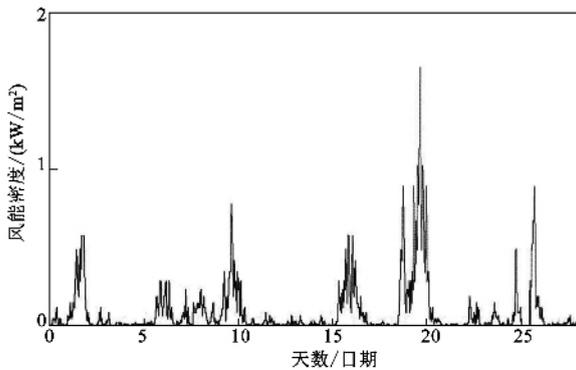


图2 纽约市郊区 White Plains 飞机场 2007 年 1 月的风能密度变化情况

从季节上来看，太阳能和风能是互补的。冬天风大而阳光弱，夏天风小而阳光强。但是，从短期来看，在几个小时到几天内，太阳能和风能远远不是互补的。从目前世界各国的经验来看，如果只依赖大范围的电网，太阳能和风能在总电力之中的份额只能是一小部分，例如 20%。大部分的电力仍然需要从化

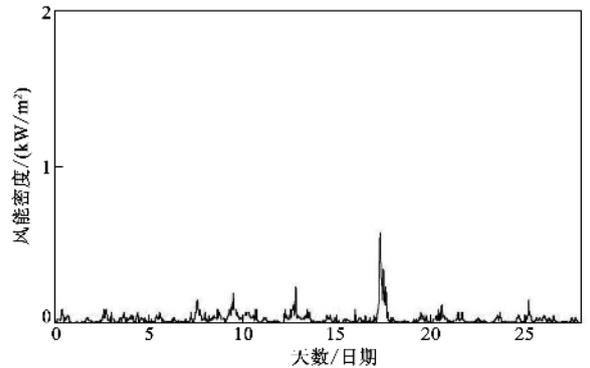


图3 纽约市郊区 White Plains 飞机场 2007 年 7 月的风能密度变化情况

石能源提供，或者用可逆的水电站调节，来按时满足能量的实际需要。例如，丹麦目前风力发电的比例已经超过了 20%。但是，没有好邻居挪威，这是很难做到的。丹麦和挪威的电网是连着的。挪威绝大部分的电力来自水电站。如果电力超过了需要，多余的电力就用来把水从海拔低的水库泵到海拔高的水库。当丹麦人需要更多的电力时，只要挪威把闲置的水力发电站开动起来，就可以满足需要。但是这种方法只有在特殊的地理环境下才能够实现。一般来说，大规模长期储存能量是非常昂贵的。

解决这个问题的一种方案是太阳能和风能的短期分散储存。从历史上看，这并不是一个全新的概念。在 1970—1980 年代的第一次能源危机期间，已经出现的许多零星的实例。所谓短期，是指十几小时至几天，相当于太阳能和风能的变化周期。所谓分散，是指以单个建筑为单位，并且以多种不同的方式储存能量。如果太阳能和风能变成了总能量供应的主流，能量的短期分散和储存势在必行。在这里，我

把太阳能和风能的短期分散储存作为和大电网能量传输供应方案平行的一个能量供应方案来讨论. 这一方案由于避免了昂贵的直流 - 交流变流器和电网的建设费, 减少了能量变换和传输过程中的损耗, 在经济上是合理的. 从产业发展的角度看, 太阳能和风能的短期分散储存的设备会形成一个新的大规模的工业部门. 由于人力、资源和国内市场的优势, 中国将在这一新兴的工业中占主导地位.

2 氢气

氢气曾经被认为是储存能量的最有希望的载体, 而燃料电池曾经被认为是把氢气转化成为电能的最佳方式. 如果用氢气来代替汽油和柴油作为汽车的动力, 污染问题就可以彻底解决了, 因为排放出来的是完全无害的水蒸气. Jeremy Rifkin 在 2002 年发表的畅销一时的题为《The Hydrogen Economy(氢经济)》的书中^[6], 着力阐述了氢气作为能量载体的优点. 2003 年, 美国的布什政府曾经拨款 12 亿美元来发展氢气 - 燃料电池技术. 几年过去了. 尽管花费了许多亿美元, 除了散落在世界各地的少数氢气演示车以外, 没有一点商业化的迹象. 这是为什么呢? 2005 年, 在美国克林顿政府担任过能源部副部长、多年亲自主持过美国氢气 - 燃料电池研究工作的 Joseph J. Romm, 在另一本畅销一时的题为《The Hype about Hydrogen(氢骗局)》的书中^[7], 以自己亲身的经验, 令人信服地阐明了, 氢气 - 燃料电池技术是不经济的, 因此在可预见的将来, 不可能成为有商业竞争能力的工业技术.

首先, Joseph J. Romm 纠正了一种常见的“氢气是能源”的误解. 在地球上, 氢只是以化合物的形式存在, 例如水. 要得到游离的氢气, 必须消耗能源. 目前, 世界上绝大部分氢气是由天然气产生的. 这种过程叫做“蒸汽重组(steam reform)”在很高的温度和压力下, 把天然气和水蒸气通过触媒, 转化为氢气和二氧化碳:



用电解水产生氢气, 能量效率最多只有 70%, 而且比蒸汽重组要昂贵许多倍. 所以很少使用. 因此, 氢气并不是可再生的能源, 而且会引起二氧化碳污染.

其次, Joseph J. Romm 分析了氢气储存的经济性和安全性问题. 目前唯一经过实践检验的储存氢气的方法, 是高压储气罐. 但是, 即使压缩到 350 个

大气压, 同样体积的压缩氢气, 所含的能量只是同样体积的柴油的十分之一. 但是, 压缩过程会消耗大量的能量, 而且这种高压储气罐十分昂贵. 安全性也令人担忧.

最后, Joseph J. Romm 分析了燃料电池的经济性和可靠性问题. 虽然在理论上, 燃料电池的效率可能达到 70%, 目前实际上达到的效率是 40% 左右, 并不比柴油机高多少. 而且需要用贵金属, 成本太高, 可靠性问题也远未解决.

世界上唯一宣布在几十年内实现氢气经济的国家是只有 30 万人口的冰岛. 冰岛的地热和水力资源远远超过能源的需求. 冰岛也是世界上按人平均国民经济总产值和财政资源最高的国家之一. 所以, 冰岛有过剩的财力物力来进行昂贵的氢气经济实验. 但是, 据一位长期在冰岛做地热研究的科学家介绍, 虽然在雷克雅维克有一间供参观用的加氢站和三辆供演示用的氢气汽车(每一辆的造价大大超过 100 万美元), 冰岛居民钟爱的还是用柴油驱动 SUV, 原因倒不是因为贵不贵, 而是, 如果氢气罐的体积和柴油罐的体积一样, 氢气汽车可以行走的距离只有柴油汽车的十分之一. 对于地广人稀的冰岛, 这不能不算一个问题.

作为没有污染的汽车能量载体, 氢气并不是唯一的选择. 作为储存能量的媒介, 蓄电池, 压缩空气和飞轮是与氢气等价的. 这些能量储存方式在使用的时候, 都不会排放二氧化碳, 都是绿色的. 究竟哪一种绿色的能量储存载体能够经得住达尔文式的市场竞争而获得广泛应用, 从而造福人类, 还是要看哪一种可以满足经济、高效和安全的要求.

3 蓄电池

1990 年代, 我在 IBM T. J. Watson Research Center 工作的时候, 曾参加过蓄电池汽车的实验项目. 第一代使用的是铅酸蓄电池. 第二代使用的是镍氢(NiMH)蓄电池^[8], 包括本田的一款. 根据我这许多年驾驶蓄电池汽车的经验, 蓄电池汽车完全可以满足日常交通的需要. 但是, 用铅酸蓄电池的汽车有两个问题. 首先, 铅酸蓄电池很重. 汽车的有效载重量就小了. 其次, 铅酸蓄电池只有几百次充电放电的寿命, 所以每年至少要更新一次. 用镍氢蓄电池的汽车, 就大有改善. 使我百思而不解的是, 从 George W. Bush 上台以后, 在美国, 蓄电池汽车的实验项目就嘎然而止了. 美国的三大汽车公司竞相生产费油

的 SUV 和小卡车。但是,在日本,蓄电池汽车的实验并没有停止。从 1997 年开始,丰田开始大批生产使用镍氢蓄电池的油电混合动力车 Prius,首先在日本销售。2003 年,改进的 Prius 进入美国市场,一举成功。截至 2008 年 5 月, Prius 在全世界共售出 100 万辆。由于油价高涨,非常省油的 Prius 成为汽车工业的一颗闪亮的明星。而美国的三大汽车公司,则由于费油的汽车乏人问津,走到了破产的边缘。

就在这几年中,蓄电池技术发生了一次划时代的进展。众所周知,锂离子蓄电池是各种蓄电池中能量密度最高的(见表 1),十多年来,它已经广泛应用于便携式电子设备,例如笔记本电脑、手机和电子照相机。然而,由于早期的、用钴酸锂作正极的锂离子蓄电池容易爆炸,造价太高,寿命有限,不适于作汽车的动力来源。1996 年,美国德克萨斯大学由 John Goodenough 领导的研究组发明了用磷酸铁锂制成的锂离子蓄电池正电极材料(简称 LFP)^[9]。经过几年的改进,磷酸铁锂蓄电池在能量密度、充电速度、安全性、环境影响、造价和寿命方面达到了用作纯电动汽车能量载体的要求。近年来,全世界各大汽车公司纷纷宣布,将成批生产用磷酸铁锂蓄电池的纯电动汽车。电动汽车时代已经到来。

表 1 常用蓄电池性能比较^[8]

| 种类 | 电压 /(V) | 能量密度 /(W·h/l) | 能量质量比 /(W·h/kg) | 寿命 /次 |
|----------|------------|------------------|--------------------|----------|
| 铅酸 | 2.1 | 70 | <30 | 300 |
| 镍氢(NiMH) | 1.4 | 240 | 75 | 800 |
| 钴酸锂 | 3.7 | 400 | 150 | 1000 |
| 锰酸锂 | 4.0 | 265 | 120 | 1000 |
| 磷酸铁锂 | 3.3 | 220 | 100 | >3000 |

用蓄电池的纯电动汽车的出现,将推动太阳能和风能的广泛使用。虽然,给汽车蓄电池充电的最简单的方法是用电网的电源,但是,充电需要的是直流电,而且并不需要十分稳定。因此,太阳电池或风力发电机直接产生的直流电可以完全满足蓄电池充电的需要,无须经过电网。这样,可以省掉昂贵的变流器,并且消除两次变流的能量损耗。此外,汽车蓄电池的容量一般是 12—20kW·h。如果考虑到美国家庭平均每天用电 5—10kW·h,一辆汽车的蓄电池够用几天。因此,有可能出现这样的情况:早上,开汽车去上班。用工作单位的停车场的免费太阳能或风能来充电。晚上,用汽车的蓄电池给家庭供电,例如,照明、电视机、厨房用具、计算机,等等。

与氢气相比较,用锂离子蓄电池储能的优越性是不可争议的。首先,效率高。电解水制取氢的能量

效率是 70%。用高压储气瓶储存氢气的效率是 75%。用燃料电池把氢气的能量变成电能的效率是 40%。总的效率是 21%。用锂离子蓄电池,每次充电和放电,总的效率在 90% 以上。其次,与氢气系统相比,磷酸铁锂蓄电池是极为安全的。最后,目前磷酸铁锂蓄电池的成本已经比氢气系统小很多。由于磷酸铁锂蓄电池的原料来源丰富,结构简单,容易大量生产,将来成本和性能差距会越来越小。

4 热储能

用蓄电池,特别是锂离子蓄电池来做太阳能和风能的短期分散储存是十分方便而有效的。但是,它的成本仍然比较高。所以,在目前,还没有广泛的使用。但是,用热能作为储存太阳能的载体,已经得到了广泛的使用。在有些应用项目中,在完全没有政策性补助的情况下,在纯市场经济模式下获得了巨大的成功^[10]。以下是两个例子。

4.1 太阳能热水器

图 4 是 2005 年世界各国安装的太阳能热水器的统计。世界上的许多国家,对太阳能热水器都有政策性补助,例如美国和以色列。但是,在基本上没有政策性补助的条件下,中国生产并安装了全世界 63% 的太阳能热水器。

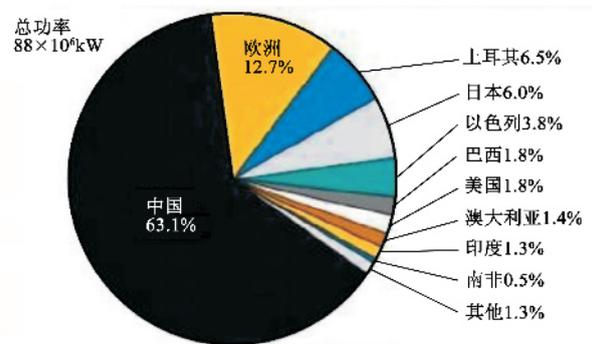


图 4 2005 年世界各国安装的太阳能热水器的统计

太阳能热水器在中国的流行,是市场规律作用的结果。由于中国的太阳能热水器生产厂家掌握了批量生产的技术和经验,使它的成本降低。用户购买了太阳能热水器后,几年之内,投资就可以回收。值得指出的是,在中国大量生产的太阳能热水器,并不是粗制滥造的低技术产品。它运用了多项物理学原理,技术上有丰富的内涵。例如,中国每年生产两亿根全玻璃真空集热管(见图 5),就是一件建立在物

理原理上的工程设计杰作.它基本上是一支杜瓦瓶.在内玻璃管的外壁,用真空溅射的方法,包上一层选择性吸收涂层,能吸收96%以上的可见光和近红外光,但是对于热水发射的远红外光,它的发射率还不到6%.由于有真空层,传导和对流传热完全不存在.这种集热管的收集和贮存太阳热能的功能几乎是完善的.用金属吸热板和热虹吸管原理制成的集热管的科技含量则更高.此外,热水水箱使用5—10cm厚的聚氨酯泡沫塑料作热绝缘层;即使在冬天,一昼夜的热损失只有摄氏一两度.所以,尽管每天太阳只晒几个小时,全天二十四小时都有热水用.这种储存太阳能的方式完全满足经济、高效和安全的要 求,是太阳能短期分散储存效果显著的成功例子.

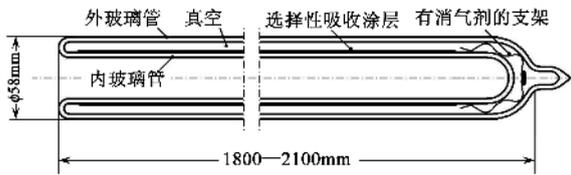


图5 全玻璃真空太阳能集热管

4.2 太阳能屋顶风扇

美国大部分的住房是单家庭独立房,俗称别墅.绝大部分都有三角形的屋顶.夏天,太阳光会把屋顶晒得滚热.尽管顶棚有一定的隔热作用,仍然是不舒服的.而且,过热的屋顶会损坏房屋的结构.许多人家装上了屋顶风扇,把屋顶中的热气抽出去.同时,屋顶风扇使地下室的冷空气通过房屋流向屋顶,给整个房子降温.在太阳能电池流行之前,屋顶风扇是用电网的电力驱动的.不但费电,而且需要人工控制.近年来,由于太阳能电池成本的下降,太阳能屋顶风扇已经成为主流.

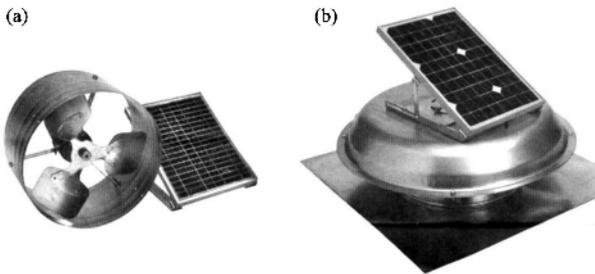


图6 两种太阳能屋顶风扇.(a)装在屋顶的垂直墙上的 (b)装在屋顶上部的.太阳能电池(黑色的模块)安装在支架上,可以进行2个自由度的调节

图6 是在美国流行的两种太阳能屋顶风扇.所

用的太阳能电池功率在20W左右,直接驱动直流电机,不用开关.它的工作是完全自动的自然循环.阳光越强,产生的风力越大,冷却力也越大.阴天下雨,不需要屋顶风扇的时候,它自动停止.当太阳快下山的时候,整个房屋里充满了凉爽的空气.由于房子各个部分的热容量,凉爽的空气可以保持一段时间.值得一提的是,在美国出售的这种太阳能屋顶风扇绝大部分是在中国生产的.

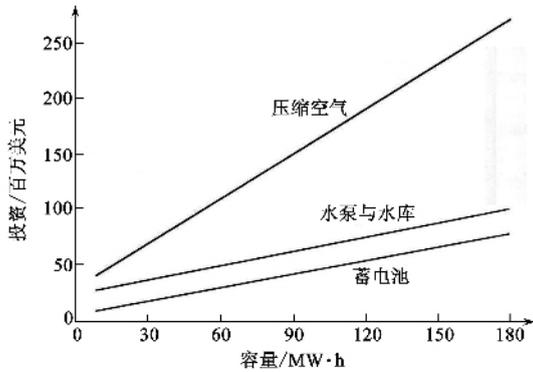
5 能量短期分散储存的概念

通过以上的几个例子,现在我们来讨论一个普遍的概念:太阳能和风能的短期分散储存和直接利用.我们要从科学上和经济上说明它的重要性和必要性.

目前在世界上的太阳能和风能的利用,绝大部分是所谓“并网”应用.太阳能电池直接产生的是直流电.风力发电机虽然直接产生的通常是三相交流电,但是频率随着风速变化.如果要把风电输进电网,第一步是把它整流成为直流电.在两种情况下,都需要用变流器把直流电变成与电网频率上严格同步、相位上准确匹配的交流电.这不但需要昂贵的设备,而且导致变流时能量损耗.由于太阳能和风能的间歇性,特别是太阳能和风能的高峰时间与用电的高峰时间在大部分情况下不吻合,如果要使太阳能和风能成为主要的能源,能量储存是不可缺少的.

几十年来,大规模的集中能量储存一直是重要的科学研究项目.经济、高效和安全是评估成果的标准.图7是对三种重要的大规模能量储存方式的经济评估^[1].投资最低的、也是最常用的方式是(铅酸)蓄电池.由于大的系统只是用了大数量的蓄电池,它的投资与容量成正比.其他两项则有一个最小起始投资,而且依赖于特殊的地理环境.对于水泵与水库系统,合适的地理环境比较容易找到.压缩空气系统的要求则十分严格.目前世界上只有两处成功的例子,一处在德国,一处在美国Alabama州,都是利用废弃的矿洞作成的^[5].有效的能量存储要求矿洞具有很高的气密性.此外,使用能量把空气压入矿洞是一个绝热过程.压缩空气的温度会急剧提高.当压缩空气和周围岩石交换能量时,会引起可观的能量损耗.在取出能量时,膨胀的空气会变冷.在实际使用时,常常用天然气与膨胀的空气混合燃烧来恢复能量.回路能量储存效率只有50%左右.

除了以上三种能量储存方式以外,许多国家对

图7 三种大规模的能量储存系统的比较^[5,11]

超导磁环和压缩氢气也进行了研究。但是，这些新想法距离工业实践还是十分遥远的。因此，大规模的能量储存，至少在当前还无法解决太阳能和风能的间歇性所带来的问题。

从前几节描述的事实和分析来看，太阳能和风能的短期分散储存和直接利用在技术上已经逐渐成熟，经济效益已经被证实，有些已经在达尔文式的市场上站住了脚。虽然大规模的集中的发电厂和广泛稠密的电网在可见的未来仍然是能量传输的主干，太阳能和风能的短期分散储存系统将会日益普遍，与电网共存，构成完整的能量供应系统。

在计算机领域和通信技术领域，相类似的情况已经发生过。在计算机领域，从1945到1980年，大型中心计算机占统治地位，原因之一是信息存储技术无法分散。从1980年起，PC开始盛行，原因之一是信息存储元件的微型化。目前状况是：大型中心计算机与分散的微型计算机平行作业，在不同的领域发挥各自的优点。在通信技术领域，从1860到1980年，大型电话中心占统治地位，原因之一是铜电线是当时最好的信号载体。1980年起，射频蜂窝电话开始使用，原因之一是无线传送技术逐渐成熟，成本降低。目前状况是：大型电话中心与射频蜂窝电话平行作业，在不同的领域发挥各自的优点。这两次历史性转变的最后的动力，都是市场机制。在能源领域中，化石能源储量的枯竭和日益昂贵是人类面临的一个基本问题。可再生能源和化石能源在成本上的竞争是决定胜负的最终因素。由于可再生能源的资源是无限的，免费的，可再生能源的收集、储存和使用设备的大量廉价生产是解决能量问题的根本途径。由于在人力、资源和国内市场上的优势，中国将在能源革命的历史进程中起关键作用。

6 太阳能和风能短期分散储存的一些新设想

这里，我们描述几项可能在短期内发展成功并商业化的太阳能和风能的短期分散储存设备的例子，其中包括：用甘油的水溶液储存能量的太阳能冷气机；用熔融石蜡储存能量的风力取暖装置；局部低压直流电网；用太阳能风能直接为电动汽车充电的装置。现分别介绍如下：

6.1 用甘油的水溶液储存能量的太阳能冷气机

在美国、中国和许多其他国家，冷气（空调）是“电荒”的主导性因素。在2005年，中国夏季空调用电已相当于3个三峡电站。取暖与空调占美国建筑能耗的46%。这不仅是经济问题，而且是重要的战略问题。众所周知，需要冷气的地区，有充沛的太阳能。从时间上看，哪一天阳光强，哪一天就更需要冷气。所以，用太阳能驱动冷气机是一个逻辑的解决方案。用太阳能驱动冷气机的基本问题是能量储存。太阳光白天才有，晚上没有。用太阳能直接驱动冷气机，在一天之内，温度会有很大的波动。当太阳刚刚下山的时候，环境温度仍然很高，太阳能已经消失了。太阳能最强的时候是中午，但不是一天最热的时候（一天最热的时候是下午3—5点）。在傍晚和晚上，虽然冷气仍然需要，阳光已经没有了。

现在流行的太阳能空调，是用太阳的热能作为吸收式空调的辅助热源。大部分的能量仍然需要从电网或天然气管道供应。设备相当庞大而复杂，需要大量的冷却水，没有储能环节，主要用于大型公共建筑。图8是一种只用太阳能的冷气机。它用太阳电池产生的直流电直接驱动蒸气压缩型的制冷机的压缩机，不通过电网。储存能量的材料是甘油和水的混合物。制冷机的蒸发管道放在存有甘油和水的混合物的热绝缘的容器中，将它冷冻成小粒冰块悬浮在甘油水溶液中的雪浆。实验表明，用5%甘油和95%水的混合物，冷冻后类似于湿雪。用10%甘油和90%水的混合物，冷冻后是微小片状晶体冰的悬浮液。用7.5%甘油和92.5%水的混合物，冷冻后是微小晶体冰在粘稠甘油水溶液中的雪浆。因为这种雪浆是流动的，它不会伤害容器和热交换管道。另一方面，微小晶体冰的熔解热与普通冰类似，每克80cal，或者335J。雪浆的温度是-1℃至-5℃。通过另一组热交换管道，空气流被雪浆冷却，通过风扇或鼓风机

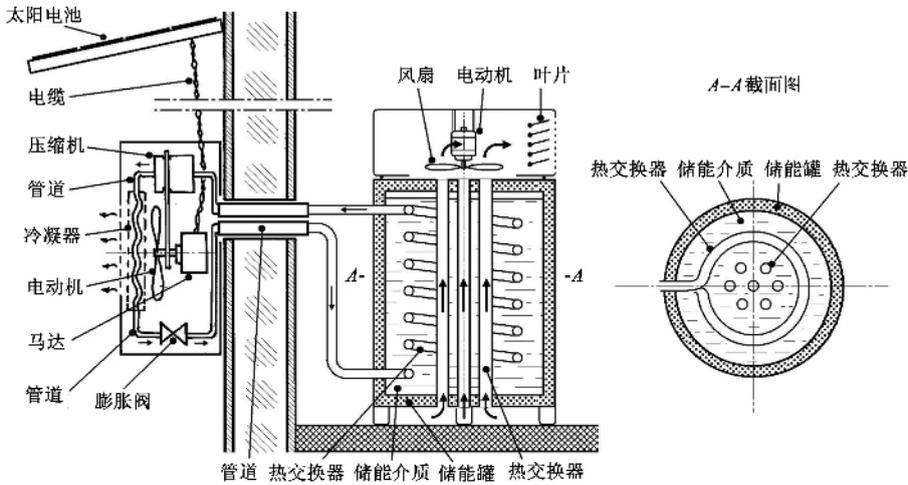


图8 用甘油的水溶液储存能量的太阳能冷气机

送到需要冷却的房间. 风扇或鼓风机的电源由一个恒温器控制, 来使被冷却的房间达到预定的温度.

这个系统的关键部件是储能罐. 典型的热绝缘材料是聚氨酯泡沫塑料, 导热系数是 0.025 W/mK . 一个直径为 1m 高为 1.27m 的储能罐, 可以储存 1m^3 的水. 冰的熔解热是 $3.35 \times 10^8 \text{ W}$. 如果泡沫塑料的厚度是 5cm , 室温比储能介质(冰)高 30 度, 热损失是 70W . 这样的储能罐可以保温 29 天, 所储存的能量 供应 2kw 冷却, 可以用两天. 如果房子的绝缘良好, 所储存的能量足够给整个房子提供冷气.

这里, 我们来解释一下为什么要用甘油和水的混合物做储能介质. 首先 5% 至 10% 甘油的水溶液在冷冻以后具有良好的机械性能. 其次, 甘油是完全无毒的. 最后, 造价和成本是产品活力的重要因素. 甘油是生物质柴油制造过程的副产品. 每生产 1 吨生物质柴油, 就会产生 150 公斤的粗甘油. 目前, 每年有 100 万吨粗甘油被当作辅助燃料消耗掉. 如何利用这种生物质柴油副产品已经成为一项重要的科研项目.

6.2 用熔融石蜡储存能量的风力取暖装置

在北温带的北部, 例如美国的东北部和中部, 中国的东北、华北北部和西北地区, 主要的建筑耗能是冬季取暖. 冬季太阳能很弱, 不能满足供暖的需要. 但是, 风力一般是很强的. 把风力发电机产生的直流电力直接驱动热泵的压缩机, 就可以产生数倍于输入能量的热量. 问题是, 如何把热量储存起来, 解决风力间歇性的问题.

据一份瑞典的研究报告^[12], 对房屋取暖和热水, 最适当、最有效的储能介质是熔融石蜡. 它是石

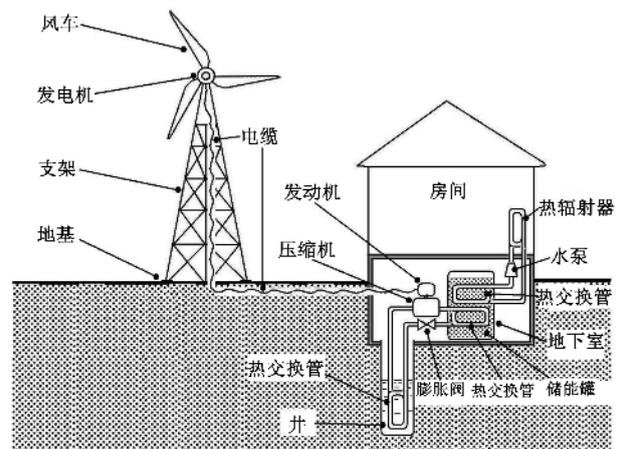


图9 “西北风取暖”装置的示意图. 储能罐中的石蜡

油分馏构成的副产品. 它完全无毒, 非常安全. 低熔点($50-60^\circ\text{C}$)的石蜡, 有一定的但是有限的工业用途, 例如制造蜡烛和涂地板. 高熔点($70-80^\circ\text{C}$)的石蜡, 用途就更少, 所以价格不高. 图9是用熔融石蜡储存能量的风力取暖装置示意图. 热泵由压缩机、膨胀阀、两组热交换管道组成. 热泵可以理解为把普通的蒸气压缩型制冷机倒过来用, 在室外(井下)吸热, 在室内(储能罐)放热. 类似的计算可以得出, 1m^3 的熔融石蜡足够给一间绝缘良好的房子取暖和供应热水. 在美国, 每一间别墅平均每年要消耗 4m^3 的燃料油, 而石蜡的市场价格不高于燃料油, 所以石蜡储能是经济的. 垂直轴中小型风力发电机近来发展迅速, 是一种在性能和成本上有竞争能力的产品, 可望普及.

6.3 局部低压直流电网

近几年来在美国非常流行的、不需要政策性补贴而在市场上也大获成功的一项太阳能产品,是太阳能庭院灯,见图 10. 一小片几瓦特的太阳电池,在有太阳光的时候,发出直流电向蓄电池充电. 晚上,一支光电管打开电门,把蓄电池的电力接通到发光二极管(light emitting diode, LED). 因为 LED 的功率只有几分之一瓦特,容量几瓦特小时的蓄电池就够用了. 绝大部分太阳能庭院灯都是中国生产的.



图 10 太阳能庭院灯(由太阳电池、蓄电池和 LED 灯组成)

同样的思路可以扩展到整个房屋,不论是别墅、公寓或者办公楼. 由于发光二极管照明会成为主流,大部分的现代电器用具,例如计算机和外围设备、黑色家用电器、手机、数码照相机、小型电动工具和电动自行车都使用低压直流电,直流-直流变压器既价廉而效率又高,局部低压直流电网(例如 36V 或 48V)是一个肯定会广泛使用的供电系统. 它可以直接用太阳电池或风力发电机供电,由在地下室内的一组电池储存能量. 因为重量不是问题,从经济角度着眼,铅酸蓄电池仍然是一个选项.

局部低压直流电网的另外一种可能的储能方式是飞轮. 在真空中运行,用磁悬浮轴承的飞轮,储存能量的效率是所有储能装置中最高的. 20 世纪初,用飞轮作为车辆的储能装置的曾经有过工业规模的应用. 但是,用于车辆的飞轮,在重量和安全性上都有严格的要求. 放在地下室中的作为建筑用电的储能装置的部件的飞轮,没有严格的重量要求,也没有撞车的危险,很可能发展成一种经济、高效而安全的储能装置.

6.4 用太阳电池和风力发电机直接为电动汽车充电

目前,电网被认为是电动汽车充电的电源. 虽然比用汽油或柴油要价廉,但是远不是绿色的,更不是最经济的. 在美国和中国,大部分电力还是用煤的火

力发电. 大体说来,只不过是使用一种化石燃料(煤)来取代另一种化石燃料(汽油)而已. 从经济角度来看,电力的零售价格的一半以上是电网和服务费. 例如在纽约,每一度电成本是 5 美分,零售价是 21 美分. 目前,风力发电的成本已低于用煤的火力发电的成本,太阳能发电的成本也已接近用煤的火力发电成本. 给蓄电池充电需要的是直流电,而且并不需要十分稳定的电压和频率. 因此,太阳电池或风力发电机直接产生的直流电可以完全满足蓄电池充电的需要,无须经过电网. 这样,可以省掉昂贵的变流器,省去电网和服务,并且消除两次变流的能量损耗.

用太阳电池或风力发电机给汽车用的充电站可以设在机关、公司、购物中心的停车场,住宅的车房或地下室,或者是专门的商业化的汽车蓄电池充电站. 由于发电能力和充电的高峰时间不常一致,能量的储存也是一个重要环节. 飞轮可能是一种理想的系统. 因为飞轮的短期输出功率可以很大,所以便于进行快速充电.

致谢 在撰写过程中,作者曾与哥伦比亚大学 Klaus Lackner 教授和 Vijay Modi 教授,中国的何祚庥院士、黄学杰博士、马重芳教授进行了多次讨论,在此表示感谢.

参考文献

- [1] The (Annotated) Gore Energy Speech. New York Times , 19 July , 2008
- [2] See www. masdaruae. com
- [3] 来源 美国能源部 Energy Information Administration (EIA)
- [4] See www. solarwirtschaft. de
- [5] Patel M R. Wind and Solar Power Systems. Second Edition , Taylor and Francis , 2006
- [6] Rifki J. The Hydrogen Economy. New York : Penguin Group , 2002
- [7] Romm J J. The Hype about Hydrogen. Washington DC : Island Press , 2005
- [8] Linden D , Reddy T B. Handbook of Batteries. Third Edition , McGraw Hills , 2002
- [9] Padhi A K , Nanjundaswamy K S , Goodenough J B. J. Electrochem. Soc. , 1997 , 144 : 1188
- [10] 罗运俊,何梓年,王长贵. 太阳能应用技术. 北京:化学工业出版社,2005 [Luo Y J , He Z N , Wang C G. Technology of Solar Energy. Beijing : Chemical Industry Press , 2005 (in Chinese)]
- [11] Enslin J , Jansen C , Bauer P. Renewable Energy World , January - February 2004 , 104
- [12] He B , Martin V , Setterwall F. Energy , 2004 29 : 1785