

物理学与中国能源可持续发展 ——献给 2005 世界物理年

杜祥琬, 李庆忠

(中国工程院, 北京 100038)

[摘要] 物理学与工程技术有着密切的相互联系, 能源工程技术与物理学的关系具有典型的代表性, 物理学的应用可以对我国能源事业的发展做出重要的贡献。文章着重阐述了原子核物理学和核能工程(包括裂变核能和聚变核能), 光电效应与光伏发电, 风能、生物质能与物理学, 物理化学与煤的多联产、洁净化技术, 地球物理学与能源资源勘探等能源问题; 讨论了物理学在节能中的三个应用: 节能照明、建筑节能和交通节能; 分析了中国能源的可持续发展前景。

[关键词] 物理学; 中国; 能源; 节能; 可持续发展

[中图分类号] O59; TK12; TL3; TM914 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)02-0001-06

在现代社会进步的历程中, 基础性很强的物理学和应用性很强的工程技术扮演着不同的角色。但它们之间却存在着紧密的联系和深刻的相互作用。物理学对许多工程技术领域的开创起着先导、引领的作用, 而工程技术不仅直接地创造生产力, 而且反过来开拓、深化了物理学研究的领域。能源工程技术与物理学的关系具有典型的代表性。

我国能源的可持续发展引起了广泛的关注。面对我国的能源问题, 需要大力节能, 以控制能耗的总量; 需要大力发展洁净新能源, 以改善能源结构; 需要积极推进传统能源的洁净化, 以减少污染; 需加强能源资源勘探, 以开发潜在能源。在所有这些方面, 物理学的应用都可以做出重要的贡献。

1 原子核物理学与核能工程

1905年爱因斯坦在“论动体的电动力学”一文中, 提出了高速运动下的相对性理论, 提出了四维时空的新概念^[1]; 作为相对论的一个推论, 在文献^[2]中, 爱因斯坦又提出了质能关系及著名表达式

$E = mc^2$, 开创了原子核物理和核能应用的新时代。

在此之前, 19世纪末, 相继发现了X射线、放射性和电子。在此之后, 1911年卢瑟福提出了原子的核式模型; 1913年玻尔完善了原子结构理论; 1932年, 查德威克发现中子; 同年, 海森伯和伊凡宁柯分别独立提出了原子核由质子和中子组成的模型; 1934年约里奥-居里夫妇成功地用人工方法产生了放射性同位素。经过科学家们几年曲折的研究和严谨的分析, 1939年初, 宣布了哈恩和斯特拉斯曼发现在中子轰击下的铀核裂变以及梅特纳和弗里什的理论解释。对核结构和核质量的研究, 导致了人们对原子核结合能随原子量变化规律的认识: 当一个重核分裂成两个中等质量的核时, 会释放能量; 释放能量的大小可由爱因斯坦的质能关系式估计, $E = \Delta mc^2$, Δm 即裂变或聚变反应时原子核质量的变化, 称作质量亏损, 而一次核聚变时放出的能量要比核裂变时大4倍以上。

这些原子核物理的发现, 奠定了裂变核能与聚变核能应用的基础。而核能应用的实现还必须进一步解决一系列应用物理学和工程技术上的问题。

[收稿日期] 2005-11-11

[作者简介] 杜祥琬(1938-), 男, 河南开封市人, 中国工程院院士;

李庆忠(1930-), 男, 江苏昆山市人, 中国工程院院士, 中国石油天然气集团公司物探局教授级高级工程师

在突破了核武器技术之后, 遂开始把核能引向和平利用的方向, 作为洁净的能源, 为人类造福。目前已做出实际贡献的核能是基于核裂变反应堆的核电站。在我国目前主要是压水堆 (PWR) 核电站。核电站由核岛和常规岛两大部分组成, 在核岛内要使核能以可控的、安全的、长期持续的形式释放出来, 再通过常规岛转换成电能供人们使用。因此, 在核燃料的选择、制备、控制方法、结构设计、安全设计等方面, 要解决一系列的工程、技术问题。

目前, 在世界电力的结构中, 核电已占有总电力的 16%。我国发展核电的决策较晚, 目前核电的贡献虽然仅有约 1%, 但国家已明确了积极发展核电的方针, 至 2020 年, 这一比例将达到约 4%, 并将进一步加快发展。

基于核聚变反应堆的聚变电站是解决人类未来能源问题的一个希望, 它既要实现热核燃料的“点火”并有净能量输出, 还必须控制热核能聚变反应的速率, 其中高温等离子体物理的研究具有重要意义。目前较有希望的技术途径是磁约束受控聚变 (MCF), 这是一项有难度的大科学工程, 目前处于前期实验研究阶段。国际上有 ITER 合作研究计划, 我国在国内研究的基础上, 也积极参与国际合作。目前是实验堆阶段, 然后还要经过演示堆阶段, 再进入商用堆开发。据估计, 在 21 世纪后半期, 受控聚变核能将开始为清洁能源作出实际贡献。这对能源的长期持续发展具有重要意义。

2 物理学与可再生新能源

2.1 光电效应与光伏发电

爱因斯坦在提出光的量子理论的基础上, 进一步提出了光电效应的概念, 这是发光二极管的理论基础, 也是光伏发电的理论基础。当太阳光的光子被适当的材料吸收后, 其能量将转换到电子上。

到达地球表面的太阳光功率强度约为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ 。当前应用的光伏能量转换器大部分是单晶硅太阳能电池。商用的硅太阳能电池的光电转换效率已达 16%, 实验室研究中的已达到 24%。

太阳能在解决能源供应和环境保护上有明显优势。中国 2/3 以上国土的年日照大于 2 200 h, 年辐射总量平均大于 $5\ 900\ \text{MJ}/\text{m}^2$, 资源非常丰富, 有必要和可能大力发展。中国太阳能光电池产业发展迅速, 生产能力从几年前的不足 10 MW 增加到目前

的 100 MW 以上。深圳最近建成亚洲最大的 1 MW 太阳光电系统, 年发电量 $100 \times 10^4\ \text{kW}\cdot\text{h}$, 2008 年北京奥运村 80% 的路灯将采用太阳能供电, 已建立 7 座光伏电站。最近, 尚德公司生产能力为 120 MW 的晶硅太阳能电池生产线已正式投入运行。预计 2020 年, 太阳能发电装机容量可达 $200 \times 10^4\ \text{kW}$ 。

在总体上, 中国的太阳能利用, 特别是太阳能光电利用, 还处于初级阶段, 高成本是制约光伏发电大规模应用的主要因素 (如高纯度硅的制备), 目前, 上网电价约为常规发电的 10 倍, 缺乏市场竞争力, 需要政策支持和技术进步推动。预计到 2010 年有望下降至每度 0.8 元, 接近常规发电的 2 倍, 竞争力将显著提高。另外, 太阳能的能量密度低, 集能面积大, 需要在科学技术上取得重大突破, 大幅度提高光电转换效率, 降低成本。

技术创新的方向之一是提高光电转换效率。硅对光的吸收效率不高, 所以需用厚的吸收层, 耗费材料。薄片太阳能电池可能是一个出路, 其中使用对光吸收性能更好的半导体材料。进一步提高光电效率的途径也在探索中, 例如, 串列结构的半导体材料、半导体纳米结构迭成的量子阱系统, 使用复合材料或有机染料等。这些都有赖于物理上和技术上创造性的努力。我国将在天津建设一条铜铟硒薄膜太阳能电池中试线。太阳能发电事业前景广阔。

说得更长远一些, 还有空间太阳能电站的想法。即在地球的静止轨道上建太阳能电站, 然后将能量转换成微波, 定向发送到地球上加以利用。与在地球上利用太阳能相比, 空间利用太阳能的优点是: 光强度高, 光照时间更长, 环境比较洁净。但在太空利用太阳能, 需要解决一些物理上和技术上的难题, 例如, 需要提高能量转换效率; 要有低成本的地面接受; 还有结构、轻量化等很多难题。1997 年美国宇航局提出两个太阳能电站方案, 即电池阵由数百个圆盘形电站组成的太阳塔方案; 用高效薄膜电池阵发电的太阳盘方案, 这样一个电站大概需要 400 亿美元。空间太阳能虽然比煤炭、核能、水电要贵, 但比地面利用太阳能要便宜。如果这个方案把造价降到 100 亿美元以下, 它就具有可行性了; 联合国第三次外空会议号召加强空间太阳能电站技术与经济可行性的研究, 推动国际合作。预计到 2030 年, 第一个试验性的空间太阳能电站可望升空。

2.2 风能

中国古代就有大量利用风能的风车。初步表明,中国可开发利用的地表风电资源,陆地约为 2.5×10^8 kW,海上数亿 kW,如果扩展到50~60 m以上高空,风力资源更多,如能开发其中的2/3,就能提供约 10×10^8 kW以上的电力,再加上约 5×10^8 kW的水电,将能大幅度补充2050年所需电力的缺额。

近20年来,国际上风能发电发展迅速,2002年,全世界风电装机容量达到 3200×10^4 kW,平均年增长速度超过30%,近10年成本下降了一半。至2020年,风力发电可提供世界电力需求的12%,创造180万个就业机会,并减少 100×10^8 t以上的CO₂排放。中国风力发电十几年来迅速发展,建成了43座大型风电场,2004年并网风电装机容量达到 57×10^4 kW,但总体规模仍不大,对国家能源供应的贡献很小。风力发电是目前中国最具有大规模产业化前景的可再生能源,2020年装机容量有望超过 3000×10^4 kW。目前,国家正在推进大型风电设备的国产化,以大幅降低风电成本,提升产业竞争力。

降低风能成本,推进国产化,需要解一系列物理和技术问题。例如,风能/轴功率的能量转换过程涉及风轮的空气动力学和气动弹性的稳定性的研究,变速风力机的整体动力学的控制问题等。

2.3 生物质能

生物质主要有农林产品和生产及加工废弃物、工业废水、城市生活垃圾等。开发生物质能是在不破坏环境的前提下,利用各种生物质、采用先进技术开发和生产的各种气体、液体和固体能源,以及电力和热能,目前主要包括沼气、生物乙醇、生物柴油和生活垃圾发电。

中国生物质能资源量很大,据初步估算,每年可利用的生物质能资源总量为 5×10^8 t标准煤。中国是农业大国,农业废弃物资源量巨大,其中秸秆年产量超过 6×10^8 t,可作为能源的有 3.5×10^8 t,折合 1.5×10^8 t标准煤。但利用中国农村分散的秸秆,也存在效费比的问题。

中国目前农村和工业利用生物废弃物和废水产生沼气,每年产量达 45×10^8 m³。生物质发电的装机容量已经达到 190×10^4 kW,其中 170×10^4 kW为利用甘蔗渣的热电联产, 15×10^4 kW是利用垃圾发电, 5×10^4 kW是利用稻壳发电。近年来,中国生物乙醇和生物柴油等产业不断发展,生物乙醇生

产已超过 100×10^4 t,已在全国5个省大规模使用,是有希望的液体燃料和石油替代燃料。生物质还可固化成型作为高效燃料。

在生物质能的产业链条中,有一系列物理问题需要解决。如生物质燃烧过程中锅炉受热面的腐蚀性机理和防治措施的研究;垃圾燃烧发电过程中对不可燃物的处理及燃烧生成气体中的有害物在排放之前的化学、物理处理等。

3 物理化学与煤的多联产及洁净化技术

煤是我国能源中的大户,今后相当长的时期内仍将如此。但目前的燃煤所带来的环境污染,已到了不能容忍的地步。为了可持续发展,必须提高燃煤效率和发展煤的洁净化技术,加强超临界发电技术,控制污染物的排放。这是我国能源可持续发展的战略选择。

多联产技术是利用物理-化学方法达到煤的高效、洁净利用的途径。它以煤气化为中心,可以将95%以上的煤转换成一种称为合成气的可燃气体。主要成分是一氧化碳和氢气的合成气,类似于天然气那样可用于蒸汽轮机-燃气轮机联合循环发电;它又是一种基本原料,可以用来生产化工产品和合成液体燃料,如氢气、氨气、二甲醚、“费-托”汽油和柴油。因此,多联产就是用单一的合成原料生产多项产品,其中包括电力。

煤炭气化技术的主要优点是灵活的原料、高气体产率以及相对容易的污染控制,减少硫和颗粒物的排放比燃煤锅炉的情况要容易。合成气多联产的另一个突出优点是可能避免二氧化碳的排放。由于合成气中二氧化碳的浓度较高,又是高压,从中分离二氧化碳无论从技术上还是成本上看都比处理燃煤废气容易。

与传统的分开生产电和其他产品的单元相比,合成气多联产可以降低成本。例如,单独生产甲醇的成本是每升12美分,三联产时甲醇的成本可以降低到每升6.5美分。成本的降低是因为在集成的工艺中,合成气原料和过程余热可以被更有效、更充分的利用。在发电方面,将合成气用于联合循环发电可以获得比常规燃煤发电高的能源利用效率。目前,联合循环发电可以达到45%的效率,而且有望在将来接近60%。而大多数中国燃煤电厂的热效率仅30%。多联产、洁净化技术是实现煤基

洁净能源的有竞争力的途径。

4 地球物理学与能源资源勘探

地球物理勘探（下简称为物探）是迅速发展的高科技领域，是当前地质研究中的重要手段，寻找各种有用矿藏离不开地球物理探测。例如，石油、煤炭、天然气水合物、铁矿、重金属矿、放射性元素（铀矿藏寻找），等等，而且在环境保护及考古探测方面也有较大的成效。

石油物探工作是专门为国家寻找石油的，物探方法是利用地球表面的引力场、磁场、电场、大地电磁场及弹性波场进行测量、计算，从而获得地下地质结构的信息。

在物探行业中应用最广泛的是反射地震勘探方法，它利用炸药在浅井中爆炸后，用精密的地震探测仪器接收来自地下各沉积岩层的反射波，随后根据回声的原理推断各种沉积地层的埋藏深度及高低起伏的构造情形。精密的“三维地震勘探技术”就像“CT”一样对地下各断面做成解剖，因而成为寻找石油的有力武器。

在我国，地球物理勘探已发挥了重要作用。我国现有的油气田中除老君庙油田、延长油矿及西部少数油田是地面地质调查发现的外，95%以上的油田是物探方法发现的。

海上石油勘探更加重视物探。由于海上钻井成本特别高（每口探井花几千万元，甚至上亿元），所以国内外的惯例是把石油物探放在海洋勘探工作的重中之重。尤其是海上的地震勘探采用拖缆和气枪连续放炮，工作效率高、成本低、精度高，所以被大量采用，成就显著。

在全球范围内，近年来在深海（及冻土层）中找到大量的天然气水合物（gas hydrates）。它是甲烷、乙烷等与水分子在低温及较高压力下凝结成的一种固态物质，简称“可燃冰”。它的储量极大，估计为现有燃料资源的2倍，是未来可能的新能源。寻找这种天然气水合物主要还要依靠地震勘探技术。在天然气水合物的底界面附近，常常可以发现一个平行于海底地形的强反射，简称“似海底反射”，（bottom simulating reflection, BSR）。我国南海北部的多处陆架边缘以及东海的深处存在可靠的BSR数据，预示着我国也存在大量的天然气水合物资源。在南海的陆架边缘通过地震资料波阻抗反演技术，可以清楚地显示固态的水合物分别区，及游

离气存在的位置。

近年来在西部寻找油气方面，物探更是大显身手。20世纪80年代后期以来，在我国西部的塔里木、准葛尔及吐鲁番等盆地的油气勘探中，物探技术获得了进一步的发展和提高，发现了一系列新的油气田，说明我国山区地震勘探的技术水平在国际上也是毫无逊色的。

要取得勘探的成功需要加强预探，加强地震勘探以及综合研究工作。三维地震、山地地震、偏移成像、储层预测及砂体描述等都处于不断的发展中，特别是山地地震的勘探技术这几年来我国有长足的进步。随着科技进步，重磁电等地球物理方法也有很大发展，重力仪已由毫伽级提升到微伽级，磁力仪已由质子旋进磁力仪发展出光泵磁力仪，过去一些无法识别的异常，经过线性与非线性方法的计算机处理，都已经可以获得明确的答案。由此可见，在解决复杂地质问题中，更应充分发挥地球物理勘探的综合优势。

此外，原子分子物理学方法对于探测开发能源资源（如利用痕量样品通过高灵敏度的原子分子光谱分析探测海底石油等），也将发挥重要作用。

5 物理学与节能

控制中国能源消耗的总量及大力节能，是中国能源可持续发展的必然战略选择。应用物理学可以为此做出多方面的贡献，下面举三方面的例子。

5.1 发展和推广发光二极管（LED）

全球电力约22%消耗在照明上，因此照明节能是一个重要方面。以化合物半导体材料为发光元件的半导体固态发光二极管（LED）是一种新型照明光源，正引发人类照明史上的一次革命。同样亮度下，半导体灯的电能消耗仅为白炽灯的1/8，而寿命则是白炽灯的100倍。半导体照明具有节能、长寿命、免维护、环保等特性。如同晶体管代替电子管一样，半导体灯替代传统的白炽灯和荧光灯，已是大势所趋：第一，应用非常灵活，可以做成点、线、面各种形式的轻薄短小产品；第二，环保效益很好，由于光谱中没有紫外线和红外线，属于典型的洁净照明光源；三是控制极为方便，只要调整电流，就可以随意调光。不同光色的组合变化多端，更能达到丰富多彩的动态变化效果。需要研究的物理和技术问题主要有：提高半导体芯片的发光效率；提高单管最大可发光通量；降低成本以

降低价格；延长发光二极管的使用寿命等，以实现规模化的商用。

5.2 发展节能型建筑

我国的能源消耗中，建筑耗能是大户，约占30%，现有建筑的绝大多数是高耗能建筑。发达国家在低能耗，甚至零能耗建筑方面已有大量成功经验，我国也开始了示范工程。许多物理方法有助于建筑节能。

可通过建筑材料和结构设计的改进，利用太阳能发电、供暖（冷）。如皇明集团提出的“太阳能建筑一体化”设计；光伏电站的群控系统和用户电源智能化控制系统（青海、西藏）；聚苯板粘贴外墙保温体系与“低温热水地板辐射供暖（哈密）；被动式太阳能采暖房（甘肃）；太阳能热循环系统采暖、恒温建筑示范工程（北京）；100 kW 光伏并网发电系统和360 kW 太阳能空调制冷、采暖和热水综合系统（北京）等，都是非常有益的实践。

5.3 交通节能

在中国的能源消耗中，汽车占有相当的比例，且呈不断增长势头，必须限制汽车总量，同时用先进的清洁、低耗能的汽车取代高耗能的大排气量汽车，发展混合动力型汽车、绿色柴油车、电动和燃料电池汽车等。

粗略的估计表明，2020年全国平均每百人中拥有10辆汽车比拥有6辆汽车汽油的消耗要多 6000×10^4 t 甚至更多！所以，第一，我国必须控制汽车的总保有量；第二，必须发展小排量、低排放的环保、节能、经济型汽车，鼓励发展轻型车，提高燃油经济性。为此，需要研究不同燃料的燃烧学，发展减排降污技术、燃料电池技术、氢能利用、摩擦学与磨损学的研究等与物理学息息相关的工作，这些对交通节能有重大效益。

总之，物理学对照明节能、建筑节能和交通节能都有实际的意义。控制中国能源消耗的总量，大力节能，是中国能源可持续发展的必然战略选择。物理学将为此做出多方面的贡献。

还有一些物理学的新成果将为未来的能源发展做出有份量的贡献。如低温物理的一个光辉篇章是超导体的研究。20世纪从低温超导到高温超导取得了迅速发展，并开始得到多方面的应用。在能源领域，超导将在电能输运、储能等方面产生显著的效益。

6 我国能源可持续发展的前景^[3]

首先，通过大力节能控制总量，达到用能源翻一番多一点，支持国民经济翻两番的目标。同时，发展高效、洁净多元结构的能源，并不断优化。我国能源是有希望持续发展的。

在我国的电力结构中，按所占的百分比排序，在2000年是煤炭（火电）第一，水电第二，其他（包括核电、天然气电、新能源发电）比例极小；至2060年可能变化为煤电与煤气电、核电、水电的发电份额相当，差不多是三分天下的局面。这是一个粗略的预测，有待进一步定量研究。

在中国的交通能源结构中，在2000年是国产油占第一位，进口油第二位，其他交通能源的贡献甚微；至2060年可能变化为替代油、电动与氢能大约各占1/4的份额，而石油（包括国产和进口）将降至不到1/4。这个初步估计有待进一步研究。

中国能源可持续发展是有路可走的，但走好这条路并不容易，需要付出巨大的努力。物理学基础研究与应用的深入发展，可为能源可持续发展做出多方面的贡献，也只有为可持续发展做出贡献的物理学，才更能显现出它的价值和光辉。

在这个发展过程中，值得在全民族大力提倡科学的发展观和节约型社会的消费观、文明观，这也正是物理学家们倡导的理念。

爱因斯坦说过：“照亮我的道路，并且不断地给我新的勇气去愉快地正视生活的理想，是善、美、真。人们所努力追求的庸俗的目标——财产、虚荣、奢侈的生活——我总觉得都是可鄙的。”

树立崇尚质朴的、适度的物质生活和丰富的精神追求的人生观、价值观，不仅对能源的可持续发展具有实际意义，而且也是建设高素质社会，实现中华崛起的精神力量。

参考文献

- [1] Einstein A. 论动体的电动力学[A]. 范岱年, 赵中立, 许良英译. 爱因斯坦文集[M]. 北京: 商务印书馆, 1983
- [2] Einstein A. 物体的惯性同它所含的能量有关吗[A]. 范岱年, 赵中立, 许良英译. 爱因斯坦文集[M]. 北京: 商务印书馆, 1983
- [3] 徐大懋, 倪维斗, 郑洪弢. 能源战略 多联产 核电[A]. 中国电力发展论文集[C]. 2005

Physics and Energy Sustainable Development in China ——For the World Year of Physics 2005

Du Xiangwan, Li Qingzhong

(Chinese Academy of Engineering, Beijing 100038, China)

[Abstract] There is a close correlation between physics and engineering technology, and the relationship between physics and energy engineering is a typical example. Applied physics could make significant contribution to China's energy development. This article discusses some energy problems, such as nuclear physics and unclear energy (including fission and fusion energy), photoeffect and photovoltaic electricity, physics and wind/bio-mass energy, physical chemistry and clean coal technology, and geophysics and energy resource exploration. The article also discusses three applications of physics in energy saving in fields of illumination, building and transportation. Finally, the article analyses the prospects of energy sustainable development in China.

[Key words] physics; China; energy; energy saving; sustainable development

《中国工程科学》2006 年第 8 卷第 3 期要目预告

- | | |
|--|---|
| <p>“大规模定制”生产模式在钢铁企业的应用实践 周世春等</p> <p>中华医道的认识领域及其理论纲纪 傅景华</p> <p>我国工程管理学科现状及发展 汪应洛等</p> <p>论技术科学与工程科学 沈珠江</p> <p>化爆冲击波在 90°拐角通道内的到时规律 沈俊等</p> <p>一个描述机器人团队形成动态演化模型 李淑琴等</p> <p>综放沿空掘巷围岩稳定性分类模型及应用 朱川曲等</p> <p>大型重载支承轴的疲劳裂纹时间序列诊断分析 李学军等</p> <p>多带同步模型用于噪声环境下语音识别 孙 暉等</p> | <p>自适应小波阈值去噪在重力仪信号处理中的应用 赵立业等</p> <p>基于遗传算法的火灾环境下建筑内人员安全疏散可靠度计算 汪金辉等</p> <p>一种 OFDM 系统动态子载波比特和功率分配联合算法 高欢芹等</p> <p>三维编织锥体织物的减纱技术 朱建勋</p> <p>硇室加深孔预裂爆破振动测试分析 申振宇等</p> <p>受污染水源水的生物处理工艺试验研究 桑军强等</p> <p>基于 GA-ANN 的震灾风险预测模型研究 刘明广等</p> <p>基于 TWW 函数的道路交通安全灰色评价方法研究 郭 仪等</p> |
|--|---|