

# 对我国能源可持续发展的 战略思考<sup>\*</sup>

严陆光

(中国科学院电工研究所 北京 100080)

**摘要** 我国能源可持续发展时间跨度大、涉及面广、战线长、投资大,其发展战略研究需反复滚动式地长期、综合、持续地进行。本文基于作者近年来参与的相关研究和讨论,拟对用好煤、保障石油供应和为化石能源逐渐枯竭做好准备等方面提出一些战略思考。

**关键词** 中国,能源,可持续,战略



严陆光院士

为满足我国经济与社会发展的紧迫需求,近年来我国已拟定了至2020年的能源中长期发展规划纲要并进行了相应的部署。按照中央提出的全面、

协调、可持续发展的科学发展观,还有一些涉及能源可持续发展的重大问题需进一步研究明确。近一年多来,我参与了有关研究和讨论,本文将简要介绍在这些研究中形成的有关战略思考,主要包括:用好煤、保障石油供应和为化石能源逐渐枯竭做好准备。

## 1 我国能源可持续发展的基本估计

表1列出了我国能源发展的现状与预测<sup>[1]</sup>,包括一次能源、石油与电力三个方面。

总体上看,我国当前总能耗约为1.26吨标煤/人年,发电装机容量约为0.3千瓦/人,2020年将增长至约2吨标煤和0.7千瓦,2050年将达约3吨标煤和1.5千瓦。根据这一有较大共识的预测结果,可以看出我国能源发展有以下主要特点。

煤炭在21世纪上半叶仍为最主要的一次能源,但在能源结构中的份额将逐渐下降,由2003年67%降至2050年的约40%。2003年我国煤炭总产量为16.7亿吨,近年仍在快速增长,预计2020年将达约25亿吨,2020年后将稳定在30亿吨左右,新增煤炭绝大部分用于发电。因此,提高煤电效率与降低污染,实现高效、低污染燃煤发电技术及其产业化和大规模应用,将是很长一段时期内能源科技的重点。煤炭份额的下降(约27%),主要靠水能外的可再生能源(约15%)和天然气(约9%)补充。

保障石油供应是能源安全的关键。2003年我国石油进口已达0.9亿吨,占全国总耗油量的35%,预期2020年将达2.7亿吨(60%),2050年达6.2亿吨(78%)。而世界石

<sup>\*</sup> 收稿日期:2006年6月20日

表 1 我国能源发展预测

时间		2003	2020	2050
一次能源	总能耗 108 tce	16.8	29	~50
	煤(%)	67.1	~55	~40
	石油(%)	22.7	~22.0	~23.0
	天然气(%)	2.8	~8.0	~12.0
	水电 + 核电(%)	7.4	~8.0	~10.0
	可再生(%)	/	~7.0	~15.0
石油	耗量(亿吨 /%)	2.6/100	4.5/100	~8.0/100
	进口量(亿吨 /%)	0.9/35	2.7/60	~6.2/78
	交通用油(亿吨 /%)	~0.7/27	2.56/57	~5.0/62
电力	总装机(亿千瓦 /%)	3.9/100	9.5/100	24/100
	煤电(亿千瓦 /%)	2.9/74	5.9/62	9.6/40
	气电(亿千瓦 /%)	/	0.55/6	1.2/5
	水电(亿千瓦 /%)	0.95/24	2.45/26	3.6/15
	核电(亿千瓦 /%)	0.06/1.6	0.36/3.7	2.4/10
	可再生(亿千瓦 /%)	/	0.22/2.3	7.2/30

油产量将在 2035 年左右达到峰值,供需矛盾将更加突出。解决石油保障问题,要从“开源”、“节流”两方面努力。我国必须大力“开源”,包括石油资源的勘探开发和推进补充、替代能源的发展及产业化。在“节流”方面,交通运输是石油消耗的大户,我国交通用油 2000 年为 0.55 亿吨,占全国总油耗的 25%;预期 2020 年将增至 2.56 亿吨。减缓交通耗油增长,对保障石油供应有重要作用。

从发展看,化石能源终将耗竭,有关能源结构的调整过程已经开始。作为未来主要能源,只能依赖于可再生能源和受控核聚变能。21 世纪上半叶,预计受控核聚变还难于成为可用的能源。而可再生能源的水力发电和非商品的生物质能,已得到大规模应用,太阳能、风能、生物质能、地热、潮汐能的离网发电已初步产业化,多种联网电站正在蓬

勃发展,大规模发展的正在酝酿。因此,要高度重视大规模可再生能源基地与技术的研究与发展,尽快部署有关工作,以发电为主时,同时还应重视速生能源植物与太阳能制氢的研究。

针对上述能源可持续发展的三大问题,下面将分述与之相关的一些战略思考。

## 2 用好煤

我国燃煤电站总装机容量已有 3 亿千瓦,至 2020 年还将新增 3 亿千瓦,至 2050 年新增 6—7 亿千瓦。新增煤产量主要用于发电,从而燃煤发电

的发展意义特别重大<sup>[2]</sup>。

燃煤发电的传统方式是蒸汽发电,即在锅炉中燃煤产生蒸汽,蒸汽驱动汽轮机带动发电机发电,其发展一直沿着提高蒸汽温度与压力以提高效率和降低供电煤耗、增大单机容量以改善其经济性能的方向前进(表 2);与此同时,采用多种除尘、脱硫、脱硝措施来降低污染。

国际上已有一批 60 万千瓦超超临界机组安全运行了多年,净效率达 40% 多。正在合作攻关的 700℃ 高温超超临界机组,效率可达 50% 多。我国国产超临界机组已在运行,高温超临界机组已获准建设,准备引进建设超超临界机组和参加 700℃ 高温超超临界机组的国际科技攻关。采用超临界与超超临界大容量蒸汽机组将成为新增燃煤电站

表 2 燃煤蒸汽机组的效率与煤耗

机组类型	蒸汽压力	蒸汽温度	电厂效率	供电煤耗
	(ata)	(℃)	(%)	(克标煤/度)
中压机组	35	435	27	460
高压机组	90	510	33	390
超高压机组	130	535	35	360
亚临界机组	170	540	38	324
超临界机组	255	567	41	300
高温超临界机组	250	600	44	278
超超临界机组	300	600	48	256
高温超超临界机组	300	700	57	215
超 700℃机组		>700	60	205

的主力机组,确保新建电厂的供电煤耗小于 300 克标煤/度,并逐步淘汰供电煤耗高于 350 克标煤/度的电站,得到了各方面的高度共识<sup>[2,3]</sup>。在确定以高参数蒸汽机组为主力机组方针下,要十分重视降污措施的研发与应用,除已注意的除腐与脱硫外,还要高度重视 Hg、NO<sub>x</sub>、PM2.5 及 CO<sub>2</sub> 的排放控制,大力加强法规的制定与实施力度。

20 世纪 80 年代以来,各国都致力于发展基于燃气-蒸汽联合循环的先进高效、低污染燃煤发电技术,包括增压流化床燃煤联合循环发电、整体煤气化联合循环发电、磁流体-蒸汽联合循环发电 3 种主要方式,我国对此都进行过积极工作。由于超临界与超超临界蒸汽机组已达到 40% 以上的电厂效率并实现产业化,联合循环电站已难以在燃煤发电中发挥重要作用。但为发展新技术,仍应继续发挥其低污染与多联产的优点,对联合循环先进技术开发给予必要关注。

### 3 保障石油供应

比较清楚的是,我国石油消耗在迅速增长,而国内产量由于资源和生产能力的限制将稳定在每年 1.8 亿—2.0 亿吨,因此对石油进口的依赖正不断增加。但国际石油供应

受到政治、经济、运输通道等多方面因素的影响与制约。要保障石油供应,除加强石油勘探开发与充分利用国际资源外,还必需从大力发展石油替代能源,发展节能、代用燃料及电动车辆,以及发展电气化轨道交通三方面积极进行开源,节流。

#### 3.1 石油替代能源

在我国石油需求快速增长和对外依存度迅速增大的情况下,大力发展石油替代能源、保障石油供应安全无疑是必要的重大措施<sup>[3]</sup>。从技术着眼,发展以煤及天然气和以生物质能为基础的液体燃料已有较好的基础。近年来,随着国际油价大幅上扬,实施石油替代燃料大规模产业化的积极性正在全国兴起。为此要对石油需求进行较为科学的预测,并对各种途径的资源来源、技术和经济性能的发展状况进行深入分析,产业的规模则需与可能出现的供需缺口和替代能源的经济性能相协调,何时开展大规模产业化应采取审慎态度。

以煤及天然气为基础的液体燃料已有长期的发展历史,形成了多种技术途径,如煤直接液化、间接液化和天然气基合成油、甲醇、二甲醚等,大多已经过长期研发,有着

成熟的工艺和小规模的生产,在有明确需求和资源、经济合理条件下,能较快扩大规模,形成产业,可成为替代石油的主力。

我国对煤直接液化与间接液化技术均积极进行了研发,正处于工业试验与筹建百万吨级工业示范厂阶段。需指出的是:煤液化生产 1 吨油需消耗 3—4 吨煤,必须与我国煤炭供应能力协调;液化过程中需用大量水且排放大量  $\text{CO}_2$ ,要考虑与水资源利用及环境问题的协调;煤液化工厂投资大,百万吨级厂的建设投资达 0.8—0.9 万元/吨,而成品油价格要低于石油市场价才可能有竞争力。近年内,我国应按原有计划,在改善技术和实现百万吨级工业示范方面做好工作,在大规模产业化推广方面进行准备,情况明朗后再下决心。

煤基醇醚燃料(甲醇、二甲醚)的原料易得,可用煤、煤层气、焦炉气等,且制造工艺多样,成熟简单,1.5—1.6 吨煤可制 1 吨甲醇,成本较低。值得注意的是,车用甲醇燃料存在一些问题,如汽油中掺入高含量甲醇(>15%)时,会发生冷起动性能差、对材料腐蚀性强以及需进行发动机更新换代等问题,这些问题应进行认真研究与试验,取得可靠的结果,以有利于进一步推广应用。

已发展成功的以生物质能为基础的液体燃料包括乙醇和生物柴油,它们被证明是良好的代用燃料。近年来,我国已能用陈化粮为原料生产乙醇,生产能力达 100 万吨/年。以油料作物和动物脂肪为原料生产生物柴油,我国也有 10 万吨/年产量。为减轻对原油的依赖,我国科技人员主张大力发展生物燃油产业,实现到 2020 年年产千万吨的规模。发展生物燃料所面临的问题主要是资源来源与生产成本。目前的燃料乙醇均用甘蔗、玉米、甜高粱、陈化粮等粮食作物为原料,3.5 吨粮食才能生产 1 吨乙醇,在我国大规模发展势必占用耕地,并与保障粮食安全

发生冲突。生物柴油用油料作物与动物脂肪为原料,同样受到资源与成本的限制。这些问题的最终解决有赖于深入研究与开发与农业争耕地的新型能源植物。

### 3.2 节能、代用燃料与电动车辆

公路在交通运输中的主导地位已不可逆转。我国的公路运输目前在客、货运周转量中已分别占 56%和 14%,且处于高速发展阶段。作为公路交通工具的汽车,我国 2004 年汽车保有量约 2 700 万辆,平均每千人拥有 24 辆,估计 2020 年保有量将达 1.3—1.5 亿辆,增长 4—5 倍,达每千人 100 辆水平,2020 年后仍将保持一定增长趋势。在汽车保有量不断增加的情况下,要能有效实现节油目的,汽车动力系统必须向能源多元化与动力电气化方向推进,包括发展节能汽车、代用燃料汽车与电动汽车。

发展节能汽车方面,近期内可产生显著效果的主要措施有优化现有以石油和内燃机为基础的车用动力系统;实施汽柴油清洁化;大力发展各种合成燃料并与汽柴油混合,形成新型清洁燃料。发展先进的柴油轿车、发展节能汽油发动机技术、实现内燃机的混合化,并在技术经济成熟基础上迅速推进产业化与规模化应用工作,可望在交通节油中做出重要贡献。

代用燃料汽车包括天然气、液化石油气、醇醚类燃料和生物燃料汽车 4 类。这些燃料的转型需要发展相应的新型车辆,以及代用燃料的基础设施与供应网络。气体燃料汽车包括压缩天然气、液化天然气、吸附天然气与液化石油气等,已进入商业化应用阶段,全世界约有 500 万辆在使用。其它代用燃料汽车还有一些影响产业化和大规模应用的问题,需要在实际进程中逐步明晰。

积极研发电动汽车已成为全球潮流。虽然能源转型是一个长期过程,但汽车动力的电气化率与电驱动功率的比例必将逐步提

高。电动汽车包括混合动力车、纯电动汽车与燃料电池车 3 大类。经过近 20 年的大力推进,混合动力车已能批量生产并迈入快速增长期。纯电动车与燃料电池车也已研制成多种样车。电动汽车存在的问题主要是当前所用动力蓄电池组和燃料电池的寿命低、成本高、可靠性与可使用性尚差,大规模应用还要解决充电与供氢的基础设施建设与运行。总体上看,实现大规模产业化与应用还需要较长时间。

### 3.3 电气化轨道交通

由电气化铁路、城市轨道与磁浮交通组成的电气化轨道交通采用电力驱动,电可由各种能源产生,从而可大幅度节油,有效减少交通对于石油供应的依赖。电气化轨道交通无尾气排放,还可有效解决燃油交通带来的严重的大气污染问题。近年来,全球发展电气化轨道交通的积极性日益增强,一些新技术取得了令人鼓舞的进展,为推进电气化轨道交通的发展与产业化增强了活力<sup>[4]</sup>。

与先进国家相比,我国的交通运输事业仍处于高速发展阶段,构建科学的、可持续发展的综合交通体系的任务正提上日程。这为我国大力发展电气化轨道交通提供了良好的机遇。根据我国国情与需求,结合国际发展经验,优先发展电气化轨道交通,统一规划未来综合交通体系结构,使整个体系能很好解决公路、铁路、民航、水运、管道及磁浮 6 种运输方式协调发展,并与国家经济社会发展相协调,是近期的重大任务。只有电气化轨道交通达到相当大规模的产业化与应用,才能显著降低交通油耗。

努力保持铁路交通的骨干地位,使铁路在客运与货运周转量中的份额保持在 1/3 左右,应成为我国综合交通体系发展的重要原则。为此,必须努力扩大铁路网规模;建设客运专线网,实行客货分流;客运网应提高运速至 200 公里/小时以上,在长、大、干线

方面要在与民航竞争中实现有效分流;要大幅度提高电气化率,实现由当前的 26%增至 2020 年的约 50%。

加速城市轨道交通的发展是减少交通油耗的另一重要方面。其节油效果将表现为汽车数量增速减缓和单位车辆平均年耗油量下降。我国起步较晚,当前设备多由国外引进。因此,大力推进城市轨道交通设备的国产化进程,尽快形成完整的、现代产业体系是当务之急。在此过程中,要对相关新技术的发展与应用给予充分的关注。

积极推进新型磁浮交通的发展。经过长期努力,最高时速已达 550 公里/时的磁浮列车作为人类第 6 种运输方式已进入了实际应用。世界第一条磁浮运营线——上海浦东机场线在我国诞生,全长 170 公里的沪杭高速磁浮线建设也在筹备中。磁浮列车最适用于长距离、大城市间、大客流量的高速客运,应该成为我国计划建设的全长 1.2 万公里的快速客运专线网中的主导技术之一,并得到优先发展。磁浮列车的低噪音、高加速度、小转弯半径的优点,也能在城际与市内交通发展中发挥重要作用。我们应从长、大、干线与城市轨道交通两方面,大力开拓磁浮交通的应用,并与实用线的建设和运营紧密结合,努力推进成熟系统的产业化,加速新型系统的研究与开发,使我国在世界上率先实现实用化与产业化,为构建我国可持续发展的综合交通体系做出应有贡献。

## 4 为化石能源逐渐枯竭做好准备

### 4.1 大规模可再生能源发电

可再生能源,包括太阳能、风能、生物质能、水能、地热能、海洋能,是广泛存在、用之不竭、最终可依赖的初级能源。随着化石能源逐渐耗竭,它在人类能源持续发展中的作用日益增大,供应份额将逐步提高,进而成为人类持续、协调、稳定发展的支柱<sup>[5,6]</sup>。

水力发电的总装机容量已占全国总装

机容量的 1/4, 是我国电力供应的重要支柱。非水能的可再生能源一般存在功率密度低和随季节、昼夜与气候条件的变化而变化的特点, 用于发电需要解决聚集、跟踪、储能、转化等一系列科学技术问题。可喜的是, 我国近 30 年来在非水能可再生能源方面取得了令人鼓舞的进展, 奠定了今后发展的初步基础。国家在 2005 年通过《中华人民共和国可再生能源法》, 也将促进可再生能源发电的应用与产业化。

我国历来重视在农村与边远地区积极发展可再生能源。可再生能源对于农村边远、无电地区的重要性已取得了广泛共识; 小型离网发电也已实现初步产业化, 主要包括小型风电机组、光伏电源与风-光互补电站; 多种联网发电电站得到蓬勃发展, 联网风电场发展最快, 光伏发电、生物质发电、地热发电和海洋能发电也得到了相应发展。

可再生能源开发的关键是利用太阳的光辐射能。太阳能发电是大规模发展的主要方向, 光伏发电已经形成了初始产业, 在提高转换效率、大幅度降低成本和产业规模发展方面还需不断前进。太阳热发电国际上有槽式、塔式与蝶式 3 种方案, 虽有万千瓦级的示范规模, 但尚未进入实际应用阶段。由于太阳能的不连续性, 必须解决大规模电能储存或有效融入电力系统中有机组成互补的综合供电系统。利用好我国大面积的荒漠地区是建立大规模太阳能基地的一个方向, 但荒漠地区远离城市与负荷中心, 大容量长距离输电任务将更为艰巨, 发展超导电力可能成为主要的解决途径。总的说来, 应以大规模太阳能发电、储能、输电为目标, 认真研究我国太阳能技术发展的途径与战略, 做好长期规划, 合理部署, 抓紧实施。

风力发电近年来迅速发展, 仍应继续大力推进。我国陆地风力资源估计最大可发电 2.5 亿千瓦, 近海风力资源约为陆地的 3 倍,

达 7.5 亿千瓦。但近海风力开发存在台风频发问题, 需要认真加以研究。

#### 4.2 速生能源植物与太阳能直接制氢

太阳能转化而来的生物质能是人类在化石能源发展前的主要能源, 也是至今仍在广泛使用的非商品能源的主要部分。作为商品能源的生物质燃烧与汽化发电, 以及生物质能制造液体燃料, 近年来也有可喜进展。其原料主要是农业、林业废弃物和一些粮食与油料作物, 大规模发展仍受到原料限制。生物质能要成为未来的主要能源, 必须重视大力发展出能在荒漠地区有效繁殖的速生能源植物, 解决与农业争地的矛盾。当然, 在能源植物的生物质能转化与应用技术方面, 如制油、汽化、制氢, 也应重视。

近年来, 国际上开始关注作为二次能源载体的氢能的发展。与已大规模应用的二次能源——电能相比, 在可储存、可携带性方面氢能都有明显的优越性。虽然在推进“氢经济”的设想方面, 科技界还存在很大争议, 但积极进行太阳能制氢的研究是必要的。太阳能制氢包括直接和间接利用太阳能两种途径。间接利用是利用太阳能发电, 用电解水产生氢, 其特点是技术成熟但经济成本过高。直接利用太阳能、将水分解制氢尚处于研究阶段, 正在探索多种技术路径, 包括极高温直接分解、光热化学分解、光电化学分解和光催化分解, 应该引起高度重视。

无论速生能源植物, 还是太阳能直接制氢, 目前还处于探索阶段, 距大规模产业应用还有较长的路。鉴于它们对未来能源可持续发展的重大意义, 当前就应组织起创新能力强、精干的队伍, 给他们以长期、稳定的支持, 期待我国能够逐步形成原始创新能力, 并在国际上率先进入大规模的实际应用。

#### 5 结束语

我国能源可持续发展时间跨度大、涉及面广、战线长、投资巨大, 其发展战略研究需

要反复滚动式地长期、综合、持续地进行。中科院作为超脱于国家行政管理部門的科学思想库应发挥重要作用,做出应有的贡献。

各种能源科学技术的发展都是一个长期持续的过程,大致要经过研发、示范、初步产业化与大规模产业化 4 个阶段,只有达到大规模产业化,才能在国家能源系统中发挥显著作用。而各阶段所需解决的任务不同,方针与政策也不同,必须顺序前进不可逾越。根据各种技术所处的发展阶段、需求与意义,进行科学布置十分重要。

我国近期内应立足长远认真安排一些起步工作,大力支持多方面的研发与示范工作,有选择地开展一些初步产业化工作,在大规模产业化方面,应采取谨慎态度,要充

分论证后再做决定。

#### 主要参考文献

- 1 严陆光.我国能源可持续发展的战略思考.2006 高技术发展报告.北京:科学出版社,2006,258-266.
- 2 黄毅诚.大幅度提高煤炭利用效率减少煤炭的总用量.能源政策研究,2004,(2):5-6.
- 3 周凤起.中国的石油供应安全再思考.能源政策研究,2005,(1):26-30.
- 4 严陆光.大力发展节油洁净的电气化交通.电工技术学报,2004,19(8):1-9.
- 5 严陆光.我国荒漠地区大规模太阳能的开发利用应该起步.干旱区地理,2005,28(4):419-423.
- 6 严陆光.中国可再生能源发电的技术发展.中国新能源,2005,(9):15-20.

## Strategy Consideration for the Sustainable Energy Development in China

Yan Luguang

(Institute of Electrical Engineering, CAS, 100080 Beijing)

To fulfill the urgent energy needs of the economical and social development in China, our government already defined the middle-long term energy development program and arranged the related work for its realization. But there are still some important problems to be studied. Based on the recent studies and discussions some suggestions for sustainable energy development strategy have been worked out. The present paper provides their short description, concerning with the coal utilization, oil supply and preparation for gradually exhausting of the fossil energy.

**Keywords** energy, strategy, sustainability

**严陆光** 中国科学院院士,中科院电工研究所研究员。1959年毕业于苏联莫斯科动力学院电力系。现任中科院电工研究所学术委员会主任、宁波大学名誉校长,中科院能源研究委员会副主任。曾任中科院电工研究所所长,中科院技术科学局局长,宁波大学校长。长期从事特种电工装备的研制和电工新技术的研发工作。在我国开创了大能量电感储能装置的系统研制;领导研制和建成了我国第一台托卡马克 CT-6 电磁系统;领导进行了超导电工的多方面应用基础研究,研制成多台实用超导磁体;组织领导了“863”计划燃煤磁流体发电主题工作,开创了磁流体船舶推进工作,研制成功 HEMS-1 模型船;组织建成了空间阿尔法磁谱仪的大型永久磁体;积极倡导与促进了我国可再生能源发电与高速磁浮列车的研究发展。获国家与中科院科技进步奖 10 项,发表学术论文 130 余篇。