■院士新论

风力发电：我国能源和电力可持续发展的现实选择

□何祚庥 王亦博

国外风电发展现状

风电一直是世界上增长最快的能源，装机容量每年增长超过30%。到2003年初，全球风力发电装机容量达到3200万千瓦，亦即其总量已经相当于32座标准的核电站，足以供应1600万欧洲普通家庭或4000万欧洲居民的电力需求。

近几年来，风力发电的发展不断超越其预期的发展速度。由表可见，过去5年中全球风电累计装机容量的平均增长率，一直保持在33%，而每年新增风电装机容量的增长率则更高，平均为35.7%。

表1997—2002年世界风电市场的增长

年度	总装机容量(万千瓦)	增长速度(%)	新增装机容量(万千瓦)	增长速度(%)
1997	763.6	——	156.8	——
1998	1015.3	33	259.7	66
1999	1393.2	37	392.2	51
2000	1844.9	32	449.5	15
2001	2492.7	35	682.4	52
2002	3203.7	29	722.7	6
5年内平均增长率		33.2		35.7

资料来源：《风力12》中国环境科学出版社2004年

最近，欧洲风能协会和绿色和平组织签署了《风力12——关于2020年风电达到世界电力总量的12%的蓝图》的报告，期望并预测2020年全球的风力发电装机将达到12.31亿千瓦（注意：这是2002年世界风电装机容量的38.4倍），年安装量达到1.5亿千瓦，风力发电量将占全球发电总量的12%”。“风力12%”的蓝图展示出风力发电已经成为解决世界能源问题的不可或缺的重要力量。风力发电不再是一种可有可无的补充能源，已经成为最具有商业化发展前景的成熟技术和新兴产业，有可能成为世界未来最重要的替代能源。

风力12%蓝图勾画的数字基础来自于未来17年的所假设的每年20%—25%的平均增长率。然而每年20%—25%的增长率对于风电产业而言并不是高增长，过去5年风电机组装机容量的年均增长率接近36%；预计到2013年之后，增长率会降至15%。到2018年，会再下降到10%。

基于上述发展趋势可以预测：

从目前到2008年，平均每年风电装机容量会增加25%，按此增长速度，到2008年底，并网的装机容量会达到13374.6万千瓦；从2009年到2014年，预计年均增长率会降低到20%，到2013年，装机容量便会达到46225.3万千瓦，之后年增长率会降低至15%，直到2018年增长率会降至10%，但是风电的年装机量仍会在很高的水平上增长。因此，到2020年底，根据上述发展方案，风电在全球的装机容量可以达到12亿千瓦。这代表年发电量共有3万亿千瓦时，相当于世界电力需求量的12%（世界电力的需求已经考虑了比目前上升2/3）。

目前欧洲占全世界风电装机容量74%，其他地区也在崛起。约50个国家加入了风力发电的行列，整个行业就业的员工约9—10万人，其中7—8万人在欧洲。

将世界主要风电国家的发展情况简述如下：

（1）德国——世界风电发展之首

德国一直引领着世界风电市场的发展。德国在2002年新增的风电装机容量已经突破以往的记录，达到324.7万千瓦，使全国风电总容量增至1200万千瓦（最新数字表明德国2003年底发电装机容量1460.9万千瓦，比2002年又新增260.9万千瓦），相当于全国电力需求的4.7%，2004年预计风电占德国发电总量的5.3%；预计到2010年风电比例升至8%。德国制定了一个新的风电发展长远规划，设定到2025年风电至少占总用电量的25%，到2050年占总用电量的50%。

（2）丹麦和西班牙——紧随德国之后

丹麦和西班牙的风电也在高速发展。西班牙的2002年新增装机容量达150万千瓦，欲挑战德国争夺欧洲之冠的地位。丹麦已经成功的用风电来满足国内18%的电力需求，是世界上风电贡献率最高的国家。

（3）印度——发展中国家的先锋

在1990年代后期印度风电市场一度低靡，但最近却开始复苏。截至2002年底，风电装机容量已达170.2万千瓦，印度已经成为全球第五大风电生产国。

（4）中国——风电发展进展缓慢

相比之下，我国风电发展进展极其缓慢。尽管从上世纪80年代就开始发电，但是目前仍然停留在起步阶段，未有突破性进展。1995年电力部曾提出2000年底我国风机规模要达到100万千瓦的目标，但事实上，截止到2003年底，全国风电场总装机容量仅为56.7万千瓦，占全国总装机容量的0.14%。尽管已建有40个风电场，但平均每个风电场的装机容量不足1.5万千瓦，远未形成规模效益。此外，在风机设备的制造水平上，已经成为国际主流机型的兆瓦级机组在我国尚处于研制阶段，目前大型风机只能依赖进口，或与外商合作生产。

风电技术已经相当成熟

为什么在发达国家中风电的年装机容量以35.7%高速度增长？一个重要原因是风电技术已经相当成熟。目前单机容量500、600、750千瓦的风电机组已达到批量商业化生产的水平，成为当前世界风力发电的主力机型。

更大型、性能更好的机组也已经开发出来，并投入生产试运行。如丹麦新建的几个风电场，单机容量都在2兆瓦以上；摩洛哥在北方托莱斯建造的风电场，采用的风电机组功率达到2.1兆瓦；德国正在北海建设近海风电场，总功率在100万千瓦，单机功率为5兆瓦，可为6000户家庭提供用电，计划2004年投产。据国外报道，该公司5兆瓦的机组是世界上最大的风力发电机，其旋翼区直径为126米，面积相当于2个足球场。发电机塔身和发电机总重量为1100吨，发电机由3片旋翼推动，每片长61.5米，旋翼最高点离地面183米。该风电场生产出来的电量之大，相当于常规电厂而且可以在几个月的时间内建成。

同时，在风电机组叶片设计和制造过程中广泛采用了新技术和新材料。由于现代大部分水平轴风电机组都有三个叶片，重量大，制造费用高。为了减轻塔架的负重，有些国家如瑞典把大型的水平轴风力机设计成两个叶片。瑞典Nordic WindpowerAB公司已完成重量轻的双叶片500千瓦和1兆瓦机组的设计。

此外，风电控制系统和保护系统方面广泛应用电子技术和计算机技术。这不仅可以有效地改善并提高风力发电总体设计能力和水平，而且对于增强风电设备的保护功能和控制功能也有重大作用。

风电成本已经具有市场竞争能力

长期以来，人们以风电电价高于火电电价为由，一直忽视风电作为清洁能源对于能源短缺和环境保护的意义，忽视了风电作为一项高新技术产业而将带来的巨大的产业前景，更忽视了风电对于促进边远地区经济发展所能带来的巨大作用。但近10年来，风电的电价呈快速下降的趋势，并且在日趋接近燃煤发电的成本。

以美国为例，风电机组的造价已由1990年的1333美元降至2000年的790美元，相应地发电成本由8美分/千瓦时减少到4美分/千瓦时，下降了一半，预计2005年可降至2.5—3.5美分/千瓦时，达到可与常规发电设备相竞争的水平。

美国1980年代初期第一个风电场的发电成本高达30美分/千瓦时。目前，美国政府为所有新建风电场的前十年运行提供1.5美分/千瓦时的发电税收减免，使得一些新建风电场的合同电价已降至3美分/千瓦时以下。

据丹麦BTM咨询公司的计算，该国风力发电的成本也越来越具有竞争力。现在风电成本已经降至0.26丹麦克朗/千瓦时。通过技术进步和成本优化，今后5年内预计每度电成本将再下降20%，因此，风电的度电成本（包括资金投入）将接近化石燃料发电成本。目前风电的销售电价平均为0.43丹麦克朗/千瓦时（约合人民币0.43元/千瓦时）。

风电机组的设计寿命通常为20到25年，其运行和维护的费用通常相当于风电机组成本的3%—5%。

风电成本已经可以和新建燃煤电厂竞争，在一些地方甚至可以和燃气电厂匹敌。

上述比较只计算了风电和化石燃料发电的内部成本（亦即本身发电的成本），尚未将社会承担的污染环境这些外部成本计算在内。更为科学、更为平等的比较风电和其他燃料发电成本的话，还应该计算不同发电方式的外部成本。

关于化石燃料或核能发电的外部成本，由于存在大量不确定因素，一般难以被具体确认和量化。但是欧洲最近公布了一个历时10年的研究项目的成果（在欧盟15个成员国进行评估包括计算一系列燃料成本的“Extern E”计划），给出了不同燃料的外部成本，这个研究的结论是，如果把环境和健康有关的外部成本计算在内，来自煤或石油的电力成本会增加一倍，而来自天然气的成本会增加30%，核电则要面对更大的外部成本，如公众的责任、核废料和电厂退役等。而风电的外部成本最小，与现行价格比较几乎可以忽略不计。

风能资源十分丰富

为什么发达国家中会竞相大力发展风电呢？另一个重要原因是风力资源非常丰富。按目前技术水准，只要离地10米高的年平均风速达到5—5.5m/s（四级风速为5.5—7.9m/s）以上，风力发电就是经济的。科技进步可能把可利用风能的风速要求进一步降至5m/s以下。

据估计，世界风能资源高达每年53万亿千瓦时，预计到2020年世界电力需求会上升至每年25.578万亿千瓦时。也就是说，全球可再生的风能资源是整个世界预期电力需求的2倍。

对我国来说，我国也拥有可供大规模开发利用的风能资源。据初步探明结果，陆地上可开发的风能资源即达2.53亿千瓦；加上近海（15米深的浅海地带）的风能资源，全国可开发风能资源估计在10亿千瓦以上。与之对照，我国水能资源可开发量仅为3.9亿千瓦！我国2003年的装机容量为3.85亿千瓦，所以国外专家评论，中国单靠风力发电就能轻而易举地将现有的电力生产翻上一番。

■第一生产力

美国州政府重视用科技促经济发展

□武夷山

美国联邦政府对科学技术的重视是众所周知的。尤其是，对于着眼长远的基础研究，联邦政府一直狠抓不懈。美国各州（尤其是经济发展相对滞后的州）政府近年来对科技发展的热衷程度有增无减，“技术促进经济发展”（Technology-based Economic Development，简称TBED）成了一个热门的缩略语。用Google在网上检索的结果，“Technology-based Economic Development”命中5700多条记录。

仅在2003年的1月份，美国50个州中就有25个州的州长宣布，要加强本州技术促进经济发展的计划。在2004年1月6日至1月14日期间发表州情咨文演讲或预算演讲的18位州长中，有14位强调了投资科技以促进就业的问题。为什么会对TBED这样青睐呢？因为州政府普遍将就业问题作为政府工作的最优先目标之一，而人们发现，在1990年代，凡是重视技术开发和创业的城市，比如圣胡塞、圣迭戈、盐湖城、奥斯汀、波士顿和亚特兰大，其就业增长率就要比全美城市就业增长率的平均值高出50%。

州政府对科技的重视也经历了一个渐进发展过程。开始，大家最重视的是对厂房、设备等物质资本的投资。后来逐渐认识到，在方兴未艾的知识经济中，知识就是力量，就是金钱，就是经济增长。因此，很多州都不遗余力地促进科技知识的生产、传播和利用。肯塔基和俄亥俄州政府也不例外。

肯塔基是美国比较落后的一个州。2002年，该州的人均收入在全国各州中排在39位。1999年，肯塔基成立了肯塔基科技协会，这是一个社团性的组织，其成员为大公司和大学，以加强知识生产部门与经济部门的互动。该州又通过了《肯塔基创新法》，其中包含几条重大措施，如：设立了2000万美元的肯塔基研究开发凭证基金，帮助中小公司与大学合作开展研发项目；设立了100万美元的肯塔基农村创新基金，支持农村小企业在大专院校和小企业发展中心的协助下开展研发活动；设立了2000万美元的肯塔基商业化基金，为本州大学开发出的有市场化前景的技术项目提供种子资金。所有这些努力已经初显成效。1992年，该州平均每万家企业获得的专利数只有37项（在50个州中排名第39位），到2001年时增加至61项（35位）。

二十年来，俄亥俄州政府一直通过其“托马斯·爱迪生计划”支持着7个技术援助与企业援助中心，10个企业孵化器。由于多方面的努力，企业的技术能力不断提高。1992年，俄亥俄州每千美元州内生产总值中，有7美分是本州小企业从联邦政府争取到的“小企业创新研究”项目费。2001年，该数值达到13美分，在各州中排名第12位（而该州2002年的人均收入排名只是全国第25位）。2002年，俄亥俄州州长塔夫特又宣布了一项名为“第三前沿工程”的计划，拟用10年时间，投入16亿美元，将俄亥俄建成拥有众多高薪水的高技术岗位的州。

越来越多的州政府在实实在在地支持科技发展以及高技术发展所需要的创投资金。最近，密歇根州州长葛兰霍尔姆签署了一项法律，建立1.5亿美元的创投基金，并希望这笔基金能带动7.5亿美元的私人资金。亚利桑那州州长拿波利塔诺正在积极鼓吹一项一揽子的技术开发税收优惠计划，提出要加强对大学研发的资助，还要创立1亿美元的创投基金。北达科他州州长霍文要求州议会批准他提出的5000万美元的“卓越中心”基金，以支持本州的高校开展高水平的研究开发。纽约州已经建立了2.5亿美元的卓越中心计划，帕塔基州长最近又提出了巩固该计划成果的一系列倡议。印第安纳州1999年创立了21世纪研发基金，旨在鼓励大学和公司共同开发新产品，该基金在2003年又获得州政府3750万美元的支持。该州的研发税收优惠措施本来是2004年期满，州政府于2003年决定将它延长到2013年。

更加值得注意的动向，是不同的州联合起来，以获得更强的竞争优势。例如，“美国辛辛那提伙伴关系”就是由俄亥俄州西南部、肯塔基州北部和印第安纳州西南部的16个县、100多个市镇的许多公共机构和私营机构组成的，受到三州州政府的支持。该伙伴关系下有一个叫作“美国辛辛那提技术”的协调组织，只有3名全时雇员，年度预算50万美元。它的使命不是另搞一套研发项目，而是将已有资源更好地集中和组织起来，发挥杠杆作用。它已经做的几件事是：帮助小企业和初创企业同本地的骨干企业建立联系；打算为“三州增长资金基金会”募集1000万至4000万美元；推动三个州的议会通过技术促进经济发展的立法；对本地区中小企业的技术准备程度进行定标比对，鼓励它们采用实用技术；推动劳动力培训和科技教育。

正如在环保领域人们已认识到，为了短期经济增长而“先污染后治理”是不可取的一样，在科技活动领域，“先抓经济，经济发达之后再抓科技”同样不可取。美国州政府，尤其是经济落后州的州政府的做法是意味深长的。

■科学家

“水利泰斗”张光斗

□王建柱

张光斗，著名水利水电工程专家、工程教育家、中国科学院院士、中国工程院院士。

2002年6月1日，年逾90高龄的张光斗荣膺第四届“光华工程科技奖成就奖”，奖金100万元人民币。与前三届不同的是，成就奖是在原来奖项基础上首次设立的。为此，他成为第一个获得此项殊荣的工程科学家。“国家科技进步奖”、“国家教学成果奖”“何梁何利奖”、“水利功勋奖”“哈兹（Haas）国际奖”“光华工程科技奖成就奖”……2003年6月1日零时，三峡工程的成功下闸蓄水，张光斗功不可没。宋健称赞他为“当代李冰”。对这些荣誉，老人看得很淡。他最关心的是还能为祖国做多少工作。“我感到很惭愧，我只是做了应该做的一点事情，感到受之于人民多，为人民工作得少”

爱国学子

在清华大学西南角那处幽静而普通的教师住宅区里，一个竹篱笆围成的小院便是张光斗老人的寓所。院中有夫人钱玫荫亲手栽种的两排整齐的玉簪花，使小院绿意盎然。

在卧室的一角，摆放着一台电脑。因手抖得厉害写字很吃力，张光斗老人在85岁时开始学习用电脑打字。当笔者得知56万字的自传书稿《我的人生之路》是张老借助放大镜的帮助下自己在计算中上一个字一个字地敲进去时，一种崇敬的心情油然而生。这部自传，张光斗笃志科技报国，志在水电事业的人生追求如叶脉般清晰可辨。老人经常要工作到深夜。对于他，时间总是不够用的。

张光斗1912年5月出生于江苏常熟县鹿苑镇一个贫寒家庭。1924年张光斗小学毕业后，到上海南洋大学附中学习，后经交通大学预科升入交通大学土木工程学院，学习结构工程。1934年秋天张光斗大学毕业后，以优异成绩考取了清华大学水利专业留美公费生。

到美国后，他先后在伯克利加利福尼亚大学和哈佛大学攻读硕士学位。张光斗在留学生中口碑甚好，导师也非常看好这个黄皮肤的勤奋学生，希望他能继续读博士，留在美国。张光斗加倍努力，获得哈佛大学攻读博士学位的全额奖学金。“七七事变”给了张光斗极大的震动。他毅然放弃了继续深造的机会，回国参加抗日。他说：“国将不国，我心何安。”解放前夜，在华工作的美国水电工程师力邀张光斗“逃离沉船”，赴美工作。然而他回答：“我是中国人，是中国人民养育了我，我有责任建设祖国，为人民效力。”对张光斗来说，优厚的物质利益诱惑怎比得过他对祖国的一片赤子之心。

解放前夕，国民党政府曾多次下令，让张光斗把自己多年参与查勘、积累的水电资料送往台湾，可他就是不肯。在地下党的帮助下，张光斗巧施“掉包计”将假资料交了出去，20大箱真资料藏到地下保存。解放后，他将这些资料全部捐赠出来，成为国家“一五”期间水电建设的重要依据。

投身水利

解放后，在新中国规模空前的水利水电建设中，张光斗渊博的学识和高深的造诣得到了充分的施展和发挥。

在1950年代初，张光斗就意识到国内水利理论教学的贫乏，他钻研、摸索了一套教学大纲，率先在我国开设了水工结构专业课，编写了国内第一本《水工结构》教材，建立了国内最早的水工结构实验室，开创了水工结构模型实验。

1960年代，他花费了大量精力，搜集国内外资料，结合实践经验，编写了《水工建筑物》一书，未及出版，“文化大革命”便开始了，辛苦写就的几百万字的书稿在混乱中散失。这是多大的打击啊！多年之后，年老的他每日伏案，重著此书，相继于1992、1994、1999年出版了《水工建筑物》上、下册和《专门水工建筑物》共三部学术巨著，让人敬佩不已。

即使在极端艰难的逆境之中，他仍一如既往地工作。1976年7月28日唐山大地震波及北京，密云水库告急。为了抢险加固，北京市委急召在外地的张光斗火速回京。张光斗连夜赶到密云水库工地。当时“四人帮”还很猖獗，张光斗处于受审查、受批判的逆境中，他被告知：“这次加固工程的设计你要负责，但不准在图纸上签字。”在蒙受如此不公正待遇和极端扭曲的工作环境中，他不顾一切地投入到工程的加固工作之中。每天奔波在大坝工地，爬上爬下检查施工质量，对设计图纸一张一张的仔细审查，提出意见后交给“负责人”签字。用他自己的话说：“我是为人民工作的，不是为哪一个人工作，让我签字也好，不让我签字也好，总之我要对人民负责。”

在中国，一个泱泱大国的版图上，留下了他多少脚印!在有河流的地方就有他的目光!从黄河上游的龙羊峡、拉瓦西到长江中上游的葛洲坝、三峡，从雅砻江的二滩到红水河的龙滩，他的身影频频出现，穿着黑靴子，戴着安全帽，弯着腰，抚摸并审视面前的堤岸。

情系三峡

长江三峡水利枢纽是治理和开发长江的关键性骨干工程，张光斗是60多年来三峡工程规划、设计、研究、论证、争论，直至开工建设这一全过程的见证人和主要技术把关者。

1993年5月，张光斗被国务院三峡工程建设委员会聘为《长江三峡水利枢纽初步设计报告》审查核心专家组的组长，主持了三峡工程初步设计的审查。在汇集10个专家组、126位专家意见的基础上，他慎重研究，反复推敲，逐字逐句地核定最终审查意见。面对300万字的三峡工程初步设计报告，他提出了“要抓住设计中的大问题，即关键性问题”这一指导原则，并身体力行，亲自研究和指导审定了一系列重大方案。

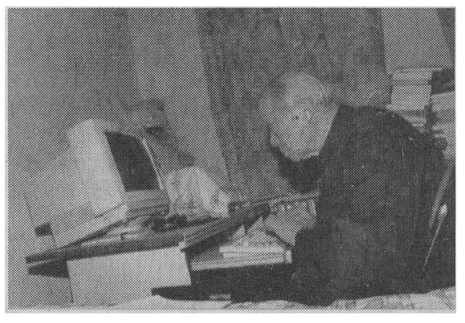
三峡工程开工后，张光斗担任国务院三峡建委三峡工程质量检查专家组副组长，他每年至少两次来到三峡工地的施工现场进行检查与咨询。2000年末，耄耋之年的张光斗又一次来到三峡工地，他为考察导流底孔的表面平整度是否符合设计要求，硬是从基坑攀着脚手架爬到底孔位置，眼睛看不清，他就用手去摸孔壁。他说：“我爬到56（米）高程，实在是爬不动了，要不然……”之后张光斗在质量检验总结会上极力坚持修补导流底孔，以确保工程质量。在场的三峡总公司陆佑楣总经理和其他同志，望着脚穿套鞋、头戴安全帽的老人瘦弱苍劲的身影，一个个感动得说不出话来。

长江三峡水利枢纽是举世瞩目的跨世纪工程。张光斗对三峡工程情有独钟。三峡工程开工时，他已是八十岁高龄,但他每年坚持必来工地，必到施工现场。考虑到他年事已高，大家总是劝阻他到高处和比较安全地地点给予指导，但这些劝阻总是无效，有时还甚至遭到他的责备。他的座右铭是“工人能去，我为什么不能去？！”

淡泊名利

张光斗是个“工作狂”，他对大江大河有着深厚的感情。在他的生活中，却有着粗疏的一面，由于工作，他忽略了亲情，忽略了和家人的交往，他的儿子先他而去，白发人送黑发人时，老人心中的悲伤无法驱除。

1980年夏天，张光斗唯一的爱子因脑溢血病逝，年仅37岁。当时他正在葛洲坝工地审查设计方案，“当我从工地返回家中，看到6岁的孙女正站在灵床前哭泣，我心如刀绞。可为了对工程设计负责，张光斗硬是强忍着“白发人送黑发人”的悲痛，在追悼会结束后的两天时间里和泪写出一份大坝工程审查意见书，分送水利部和设计单位。他说：“再苦再难能为国家和人民工作也值得了。”对张光斗来说，惟有加倍地工作，才能排遣心中的哀痛，才能告慰儿子九泉下的亡灵。



老人不幸丧子，女儿又在国外，只能与体弱多病的老伴相依为命。1996年，在清华大学党委和学校教育基金的支持下，清华园社区服务中心老龄互助服务社成立了，服务社成立后，工作人员特别关照两位老人的生活。服务社的工作人员说，像张光斗老人这样的国家有功之臣，我们再怎么关心，再怎么照顾都不过分。

张光斗现在每天早上六点半起床，工作量并不算小。岁数大了，他外出的时间相对少。也许是一辈子跑惯了水利工地，家里的清静和悠闲他很难适应。每天吃完早饭，他都要步行到办公室，进门第一件事情是浏览当天的报纸和信件。在办公室里，他用王大珩院士给他特制的高倍放大镜阅读全国各大水利水电工程发来的资料，遇到他认为不对的事，马上就会给有关部门打电话或写信，提出建议。如果问题特别重大，他还会去搜集大量资料，拿出充分论据，写成文章投寄报刊，甚至汇报中央。

张光斗老人毕生为祖国水利事业操劳奋斗，功勋卓著。但让很多人不理解的是，2000年清华大学蓝旗营的院士楼建成时，他说什么也不肯搬进去，他说我的住房条件很好，新房还是让给年轻的院士吧，他是那样的恳切，听后让人感动不已。