

# 太阳能热气流发电及其对 我国能源与环境的深远影响

潘 垣 龚承林 周理兵 卫 军 黄声华 李朗如 马志云

(华中科技大学,武汉 430074)

陈允平 刘涤尘

(武汉大学,武汉 430070)

**摘要:**为从根本上扭转我国能源面临的资源短缺、需求增势高、结构不合理、环境压力大等困境,本文从国情出发,提出充分利用我国广大荒漠化、沙化土地及其太阳能资源,大规模开发太阳能热气流发电,大幅度提高电力在终端能源结构中的比重,处理好与其它类型发电的兼容性与互补性,从根本上改善现行不合理的能源结构,将是在聚变能实现前即本世纪上半叶乃至中叶,解决我国能源困境的有效途径。太阳能热气流发电与风能的大规模互补联合开发,将有利于提高供电稳定性和电能质量,实现大面积荒漠绿化、沙尘暴治理和局部气候改善;发展基于太阳能热气流发电的电解制氢和海水淡化,将缓解我国油、气、水资源之不足;利用节余燃煤发展煤的液化、气化可进一步弥补我国油、气不足。

关键词:可再生能源 太阳能 太阳能热气流发电 太阳能烟囱

THEO A

The Generation of Electricity by Solar Hot Air-flows  
And Its Effect on China's Energy Sources and Environment

PAN Yuan GU Chenglin ZHOU Libing WEI Jun

HUANG Shenghua LI Langru MA Zhiyun

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

CHEN Yunping LIU Dichen

(Wuhan University, Wuhan 430070)

**Abstract:** Energy sources are confronted with many threats, which include insufficiency of coal and oil, great increment of actual demand as the population explosion, climatic and environmental disasters caused by energy-related emissions and excessively rapid, non-reversible exploitation of nature. In this paper, the solar hot air-flows electric generation is considered as an effective way of using solar energy on a large scale in China. This type of solar-powered generating system can make the most of abundant solar energy in the region of vast wastes and desert.

**Key words:** renewable energy sources, solar energy, the generation of electricity by solar hot air-flows, the solar chimney

## 1 我国能源面临的严峻形势与潜在危机

据有关资料报道<sup>[1,2]</sup>,我国能源的现状与前景均不乐观。

首先,我国能源资源十分有限,特别是作为我国目前能源主体的化石能源资源,其储采比只有世界储采比的一半左右。已经探明的人均可采储量,煤炭为世界人均值的1/2;石油为1/10。水能资源虽然很丰富,但大部分集中在难以开发的西南高山峡谷区,该地区恰好是我国重要的生态环境保护区,又是地震极为活跃的多发地带。作为原子能的主要原料铀资源虽然较为丰富,但铀的品位不高。我国能源资源的另一不利因素是分布不均,而富集地区条件又非常恶劣。

第二,我国能源消费量大,占世界总消费量的1/10强,居世界第二位。但是,能效很低,能源强度远高于世界平均值,为发达国家的3~4倍。加之我国人口众多,人均能耗并不高,目前只有世界平均值的一半,为美国的1/10。所以随着我国经济的快速发展,能源需求增势将远超出世界平均水平,供求矛盾必将日益突出,尤其是油、气缺口将越来越大,严重影响我国的能源安全。

第三,以煤为主的不合理能源结构长期难以解决,必将导致甚至加速我国环境质量的恶化。从世界范围看,目前我国CO<sub>2</sub>排放量占全球排放量的14%强,仅次于美国,居世界第二。但是我国的能源结构决定了我国的CO<sub>2</sub>排放增势高,随着所占比重的进一步增加,我国必将面临越来越大的国际压力。

要从根本上扭转上述困境,必须寻找可大规模开发的新能源,改善以燃煤为主的不合理能源结构。太阳能热气流发电是实现大规模开发和利用太阳能的一种新的途径,是解决我国能源危机的有效途径之一。

## 2 太阳能热气流发电技术的基本原理

太阳能热气流发电,源于德国斯图加特大学J. Schlaich教授1978年提出的大胆构想<sup>[3]</sup>。该发电

系统主要由太阳能集热棚、导流烟囱和涡轮发电机组三部分构成。集热棚采用透光且隔热的材料制成,用以吸收太阳辐射能量使棚内空气温度升高;位于集热棚中央的烟囱,高耸达数百米至上千米,烟囱上下自然压差有数十毛,在烟囱的抽吸和集热棚内热空气压力的联合作用下,烟囱引导棚内空气形成强大气流,驱动涡轮机带动发电机发电,其运行原理如图1所示。

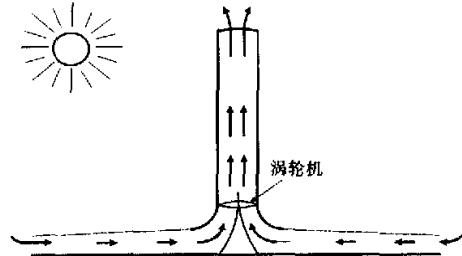


图1 太阳能热气流发电基本原理图

显然,太阳能热气流发电的能源直接来自太阳辐射,发电系统的作功工质来自空气,系统运行简便可行。由于烟囱为圆筒状高耸建筑,是形成气流的关键部分,又是发电系统的重要标志,故太阳能热气流发电又称太阳能烟囱发电。

根据太阳能热气流发电的基本原理,它具有以下基本特点:

这种发电系统是集热棚、烟囱、涡轮发电机等传统技术的集成,建造集热棚和烟囱的材料是玻璃、水泥、沙石和钢材等常规材料;

集热棚地表或棚内装设的特殊蓄热装置(如水箱等)在太阳充足时吸收的大量热量,在天阴或夜间仍会不断释放,形成气流继续发电,因此,可以提高供电连续性;

这种电站不需要燃料,也不需要冷却水,只占用沙漠和戈壁滩等荒芜土地。因此,电站的建设成本不高,一次性投资与建造同容量水电站相当,但不存在侵占耕地、破坏资源及库区移民等问题;

电站运行时不产生任何污染,还可能利用其温室效应等改善局部环境,社会效益更为显著。

## 3 太阳能热气流发电技术的国内外研究概况

1978年德国Schlaich教授提出太阳能热气流发电设想之后,1982年德国和西班牙合作在西班牙的Manzanares建造了第一座太阳能热气流发电原型电站<sup>[4,5]</sup>(集热棚直径为250m,烟囱高200m,功率为100kw),并一直运行至今。此后,一些国家开始关注这一技术的发展。如美国先后建立了多个不同型式的太阳能热气流发电模型电站,开展了一系列基础性研究<sup>[6]</sup>。而拥有充足沙漠和阳光的印度、南非和澳大利亚相继开展了太阳能热气流电站的工程设计研究和技术经济评估。其中,印度拉贾斯坦的塔尔沙漠100MW太阳能热气流发电站计划,已通过论证并即将实施。不幸的是由于印、巴之间的核竞赛而被迫夭折。

南非在其沙漠城锡兴的200MW的太阳能热气流发电站计划,正在论证之中。最近,澳大利亚的沙漠太阳能热气流发电站计划,据报导已通过论证进入筹建之中,该电站集热棚直径5000m,烟囱高1000m,功率200MW,计划总投资3~4.5亿欧元。近年还发表了一些太阳能热气流发电技术相关的研究报告,内容涉及结构模型、能量转换、发电质量控制以及可能产生的环境效应等方面<sup>[7]</sup>。

但是,二十年来太阳能热气流发电始终未能得到大规模推广。主要原因在于,发达国家一直坚定地维护其以油、气为主体的优势能源结构,只是近年由于受环境和资源的双重压力,才开始重视对再生能源的研究开发。但是,作为太阳能热气流发电思想的发源地欧洲,由于缺乏丰富的沙漠太阳能资源,因而也就缺乏进一步推进这一技术的热情和动力。至于大多数发展中国家,由于经济技术不发达,有些甚至尚处在解决温饱问题阶段,故虽拥有丰富的沙漠太阳能资源,也无力开发利用。唯独我国,从国情出发,非常适合于大规模开发太阳能热气流发电,其对改善我国的能源结构,缓解我国的能源与环境的矛盾,意义重大而深远。

#### 4 太阳能热气流发电的可行性

### (资源、技术、经济)分析

#### 4.1 我国太阳能资源概况

当今世界,能源危机与环境污染是人类面临的最大挑战。开发利用可再生洁净能源是能源发展的战略方向,也是21世纪经济发展中最具决定性影响的技术领域。

大力开发利用新能源和可再生能源,是我国优化能源结构,改善环境,促进经济社会可持续发展的重要战略措施之一,尤其对解决边疆、海岛、偏远地区以及少数民族地区的用能问题,具有十分重要的作用。新能源和可再生能源主要包括:太阳能、风能、水能、生物质能、地热能和海洋能,其中水能总资源6.76亿kw,可开发利用的水能资源为3.78亿kw,目前已开发利用11%;风能资源总量为16亿kw,约10%可供开发利用,到2000年底累计建成26个风电场,形成了34万千瓦的发电能力;太阳能资源更为丰富,全球年能量消耗的总和只相当于太阳40分钟投射到地球表面的能量,太阳光日照地球一天的能量,大约相当于全球目前所有发电厂运行250年的总发电能量。我国可利用太阳能的国土面积占2/3以上,约600万平方公里,全年平均日照时间在2200~3300小时之间,年总辐射量超过1670kw·h/m<sup>2</sup>,开发利用前景十分广阔。

据国家林业局发布的第二次全国荒漠化、沙化土地监测结果<sup>[8]</sup>,在我国960万平方公里的国土面积中,荒漠化土地面积267.4万平方公里,占国土面积的27.9%,沙化土地面积174.31万平方公里,占国土面积的18.2%,这些不毛之地主要分布在我国西部和北部。另据中科院地理湖泊所报导<sup>[9]</sup>,在我国西部680万平方公里的土地面积中,沙漠和戈壁滩面积达126万平方公里,其中新疆的荒漠面积约占全疆面积的一半,而青藏高原约有2/3以上的土地为高原寒漠和永久冻土地区,面积达150万平方公里。但是,正是这些广袤地区,太阳能资源极为丰富。其数据如表1和表2所示<sup>[10,11]</sup>。

表1 我国太阳能资源分布状况

全年 日照时数	太阳辐射年总量 [kw·h/(m <sup>2</sup> ·a)]	相当于燃烧标准煤 (kg)	包括的地区
2800~3300	1860~2550	230~310	宁夏北部、甘肃北部、新疆东南部、青海西部和西藏西部和西藏高原南部
3000~3200	1630~1860	200~230	河北北部、山西北部、内蒙古和宁夏南部、甘肃中部、青海东部、西藏东南部和新疆南部
2200~3000	1390~1630	170~200	山东、河南、河北东南部、山西南部、新疆北部、吉林、辽宁、云南等省以及陕西北部、甘肃东南部、广东和福建的南部、江苏和安徽的北部、北京

表2 我国北纬200~500晴天太阳总辐射月总量

单位:kw·h/(m<sup>2</sup>·月)

月份 纬度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年总和
(1) 平原区													
50.0	66.3	100.0	161.7	208.2	254.7	268.7	262.7	218.6	169.8	116.3	74.4	54.7	1956
47.5	77.9	111.7	169.8	214	257.0	271	264.0	224.5	176.8	127.9	87.2	66.3	2048
45.0	89.6	123.3	175.6	219.8	258.2	272.1	266.3	230.3	182.6	138.4	98.9	76.8	2132
42.5	101.2	131.4	182.6	224.5	260.5	273.3	267.5	236.1	189.6	148.9	110.5	86.1	2212
40.0	109.3	138.4	186.1	226.8	262.8	274.5	269.8	240.7	196.6	157.0	118.6	95.8	2276
37.5	115.1	139.6	186.1	224.5	259.4	267.5	264.0	238.4	196.6	160.5	122.1	101.2	2275
35.0	117.5	140.7	184.9	221	252.4	259.4	255.9	233.8	195.4	161.7	125.6	108.2	2256
32.5	121	140.4	184.9	216.3	246.6	251.2	248.9	228	195.4	164	131.4	112.8	2243
30.0	127.9	147.7	186.1	214	243.1	250.1	246.6	225.6	196.6	168.6	139.6	118.6	2264
27.5	140.7	158.2	191.9	219.8	245.4	253.5	248.8	230.3	202.4	177.9	148.9	131.4	2349
25.0	153.5	168.6	195.4	226.8	253.5	260.5	258.2	237.3	208.2	187.2	160.5	144.2	2454
22.5	154.7	167.5	193.1	224.5	250.1	255.9	253.5	237.3	208.2	183.8	160.5	145.4	2434
20.0	154.7	164	188.4	217.5	244.2	250.1	247.7	232.6	202.4	179.1	159.3	145.4	2385
(2) 青藏高原区													
37.5	117.5	146.5	189.6	238.4	280.3	289.6	282.6	254.7	211.7	167.5	124.4	104.7	2407
35.0	123.3	154.7	191.9	243.1	282.6	293.1	284.9	259.4	218.6	173.3	133.8	115.1	2473
32.5	140.7	171	211.7	253.5	286.1	296.6	288.4	262.8	225.6	187.2	150.0	125.6	2599
30.0	167.5	198.9	236.1	271	294.2	302.4	295.4	272.1	241.9	210.5	177.9	148.9	2817

若按200MW太阳能热气流电站的数据( $p_{emax} = 10000\text{kw}/\text{km}^2, E = 0.306 \times 10^8 \text{kw}\cdot\text{h}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ )推算,1万平方公里的荒漠化面积即可提供1亿kw的太阳能热气流发电,年发电量3000亿度,相当于5.5个三峡电站,若按我国水力总资源6.76亿kw,水能总资源1.923亿度/年推算,也只相当于6.5万平方公里荒漠化土地面积提供的太阳能热气流发电量,该面积仅占我国荒漠化土地面积的2.4%,或沙化土地面积的3.7%。

#### 4.2 太阳能热气流发电的技术与经济性分析

太阳能热气流发电主要包括将太阳光辐射转换为热能、热能转换为风能、风能转换为电能的过程,太阳能热气流发电的能量转换环节如图2所示。

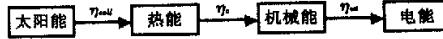


图2 太阳能热气流发电的能量转换环节

太阳能热气流发电的基本定标关系为<sup>[3]</sup>

$$P_{emax} = \frac{2}{3} \eta_{coll} \eta_{ut} \frac{G}{c_p T_0} H_c A_{coll} G$$

式中  $\eta_{coll}$ —集热棚效率,近似取  $\eta_{coll} = 0.6$ ;

$\eta_{ut}$ —机电效率,近似取  $\eta_{ut} = 0.8$ ;

$G$ —太阳辐射强度,近似取  $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ ;

$g$ —重力加速度,  $g = 9.81\text{m/s}^2$ ;

$c_p$ —空气比热,  $c_p = 1005\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;

$T_0$ —大气环境温度,通常取标准值  $T_0 = 293\text{K}$ ;

$A_{coll}$ —集热棚面积( $\text{m}^2$ ),其直径为  $D_{coll}$ ;

$H_c$ —烟囱高度( $\text{m}$ );

$P_{emax}$ —最大输出电功率(W)。

代入相关常数后可得到

$$P_{emax} = 0.010661 H_c A_{coll}$$

典型算例如表3所示。

表3 太阳能热气流发电站基本技术指标(设太阳能辐射能量强度为  $2300\text{kw}\cdot\text{h}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ )

最大发电功率 $P_{emax}$ (MW)	10	50	100	200	300
单位面积发电功率 $p_{emax}$ ( $\text{kw}/\text{km}^2$ )	3183	5197	7958	10000	12627
集热棚直径 $D_{coll}$ (km)	2.0	3.5	4.0	5.0	5.5
烟囱高度 $H_c$ (m)	300	500	750	960	1200
烟囱直径 $d_c$ (m)	30	50	80	120	150
综合能量转换效率 $\eta_e$ (%)	0.48	0.8	1.2	1.53	1.92
年发电量 $E$ ( $\times 10^8\text{kw}\cdot\text{h/a}$ )	0.347	1.77	3.47	6.91	10.49

由上表可见,发电站容量的增大,其效率提高。根据文献<sup>[5]</sup>研究表明,这种电站占地虽然比较大,

但一般可以建在那些不可耕种的土地上,所以可不考虑土地占用费。随着电站容量增加,单位容量建设投资费用迅速降低。Schlaich教授研究预测,对于这种大型太阳能发电站,初期建设成本可以降到大约为5000~8000元/kw左右,每度电运行成本约为0.1~0.25元。一次性投资预计与建造同容量水电站相当,但不存在侵占耕地、破坏资源及库区移民等问题,也不产生任何污染,并可以改善局部环境。

目前我国太阳光伏电池年生产能力为15MW,累计拥有量只有53MW。光伏发电系统造价比较高,系统造价为30000~50000元/kw,发电成本为每度电2元左右。因此由于这种技术难度较大,成本较高,在我国短期内还难以实现大规模开发。

## 5 太阳能热气流发电和其它发电类型的比较

太阳能热气流发电与其它主要发电类型的比较如表4所示。表5则给出了太阳能热气流发电与风力发电、光伏发电的性能比较。

表4 主要发电形式的社会经济比较

发电类型	火电	水电	核电	太阳能热气流发电
初始能源	化石燃料	水位能	核裂变能	太阳能
作功工质	水蒸汽	水	水蒸汽	空气
能源性质	不可再生	可再生	不可再生	可再生
资源规模	大	有限度	有限度	大
资源寿命	有限	无限	有限	无限
建设费用	低	较高	高	适中
运行费用	高	低	高	低
建设周期	短	长	较长	短
占地性质	占用少量耕地	大面积淹没耕地	占用少量耕地	充分利用荒漠化、沙化土地
社会影响	较小	大量移民影响大	心理影响大	无
环境影响	大气污染	生态地质影响	核废料污染	友好、有利
发电性能	稳定	季节变化	稳定	昼夜变化

表5 太阳能热气流发电与风力发电、光伏发电性能比较

发电类型	光伏发电	风力发电	太阳能热气流发电
单元容量	小	中	大
开发规模	小	中等	可大规模开发
建设费用	高	较高	适中
发电性能	受气候和昼夜影响,不能连续发电	受气候影响,波动很大	存在气候和昼夜峰谷波动,但仍能连续发电

由上可以看出,与其它各发电类型相比,太阳能

热气流发电虽具有明显优势,但由于其固有的发电特性昼夜波动,使它缺少火电和水电所特有的适应负荷变化和稳定系统的品质。因此,其在系统中所占容量比重必定存在一定限额。这正说明,它与其它发电类型是互补和兼容的。由于它建在边远的荒漠化、沙化地区,远离负荷中心,与系统的联接及输送电力的方式,可考虑采用直流输电为宜。

## 6 太阳能热气流发电对我国能源发展战略影响的见解

由于太阳能热气流发电的单元规模可达到50~300MW,因而太阳能热气流发电是实现太阳能大规模开发的重要途径;

我国的荒漠化、沙化面积约占国土总面积的1/3,在这些地区,太阳能资源极为丰富。这就为我国大规模开发太阳能热气流发电变荒为宝提供了物资资源条件,并为本世纪上半叶乃至中叶即聚变能实现之前扭转我国能源困境提供了一条有效途径;

大规模开发太阳能热气流发电,应同时大幅度提高电力在我国终端能源结构中的比例,落实以电力为中心的能源建设方针;

充分利用节余的燃煤,转型发展煤的液化、气化以弥补我国油、气资源之不足,提高国家的能源(石油)安全;

发展基于太阳能热气流发电的电解制氢和海水淡化,可进一步缓解我国油、气、水资源的压力;

密切关注聚变研究的进展,为保障本世纪下半叶及以后我国能源持续发展作好准备。

## 7 太阳能热气流发电与风能大规模联合互补开发及其环境效应

太阳能与风能存在着天然的季节互补、气候互补性和昼夜互补性。实施联合开发,必将降低发电容量的峰谷波动,提高供电稳定性和电能品质,从而提升资源利用效益。众所周知,所有荒漠化、沙化地区的生态环境都非常脆弱。土地表层干旱松散是沙化内因,频繁强劲的大风吹蚀是沙化外因。故成功的治理经验是:造林种草、防风治沙,形成良性循环的生态系统。采用太阳能热气流发电,可以使大面积的荒漠化、沙化地表被集热棚覆盖,切断了裸露的沙源。若再合理布置风电机组群,组成大面积分层、立体风机阵列,从而形成风场屏障和风力阻尼。这就从沙源和风势两个方面缓解了沙尘暴的强度。

此外,由于太阳能热气流电站的导流烟囱高耸入云,其所产生的强烈上升热气流与高空冷气流相会,形成雷雨云,增加了局部降雨的机会。而在地下水较富集地区,更可利用部分电能抽水浇灌,因而实现荒漠绿化也是完全可能的。

## 参考文献

- [1]中国工程院,工程科技与发展战略咨询报告,2000.2,内部资料
- [2]中国工程院,中国高技术产业发展研究—“十五”高技术产业发展咨询报告,2001.2,内部资料
- [3]J. Schlaich. The Solar Chimney. 1995 Edition Axel Menges, Stuttgart
- [4]Robert Richards, Madrid. Solar prototype developments in Spain show great promise. Modern Power Systems(MPS) Review, April 1982, 21~23
- [5]Robert Richards. Hot air starts to rise through Spain's solar chimney. Electrical Review, Vol. 210, No. 15, April 1982, 26~27
- [6]N. Pasumarthi, S. A. Sherif. Performance of A Demonstration Solar Chimney Model for Power Generation. Proceeding of the 1997 35<sup>th</sup> Heat Transfer and Fluid, p203~240, Sacramento, CA, USA
- [7]M. A. K. Lodhi, Application of helio-aero-gravity concept in producing energy and suppressing pollution, Energy Conversion & Management, 1999, 407~421
- [8]国家林业局.第二次全国荒漠化、沙化土地监测结果.2002.1.28公布
- [9]吴楚材.我国西部土地资源合理利用与生态保护问题.科技导报,2000.11,p55
- [10]李申生.太阳能物理学.北京:首都师范大学出版社,1996
- [11]岑幻霞.太阳能热利用.北京:清华大学出版社,1997

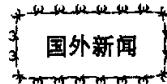
## 作者简介

**潘垣**(PAN Yuan-),中国工程院院士,华中科技大学教授、博士生导师。我国核聚变科学技术和脉冲功率技术专家。

**辜承林**(GU Chenglin-),华中科技大学教授、博士生导师,博士。现任华中科技大学电气与电子工程学院常务副院长,国际计算磁学会(ICS)创始会员,英国电气工程师学会(IEE)会员,中国电工技术学会高级会员,湖北省电工技术学会副理事长。主要从事电机理论与应用的教学和科研工作。

**周理兵**(ZHOU Libing-),博士,华中科技大学教授,主要从事电机理论与设计、电机传动与控制、新能源开发等教学研究。

(责任编辑:房俊民)



## 日本新信息技术基本战略浮出水面

日本政府不久前把体现中期信息技术政策方针的新信息技术基本战略提交给以首相小泉为部长的日本信息技术战略总部。新战略的目标重点从信息技术基础建设转向推进信息技术的应用,在医疗、中小企业金融等7个领域制定了应用信息高速网络的量化目标。

新信息技术基本战略的基本思路是,利用信息技术积极变革社会和经济体制。通过信息技术超越现有体制框架对各种业务重新定义,提高竞争力,进一步搞活经济。到2005年日本要成为世界上最先进的信息技术国家,2006年以后要继

续保持领先地位。

为了建成让人感到充满活力、健康、安定和便利的社会,新信息技术基本战略在与人们切身利益相关的医疗、食品、生活、中小企业金融、知识、就职和行政服务7个领域制定了量化目标。

同时,基本战略对信息技术基础建设也提出了新的目标。到2005年,行政机关、学校等公共机构原则上都要连接双向高速因特网。到2008年建成全国普及的高速无线局域网系统。(新华社供本刊稿)