

太阳能烟囱发电系统中的涡轮机研究进展

左潞, 刘玉成, 袁越

河海大学能源与电气工程学院, 南京 210098

摘要 空气涡轮机作为太阳能烟囱发电系统(SCPP)的主要出力设备,其性能直接影响整个系统的效益。涡轮机类型、结构、布置及参数变化对SCPP整体效益的影响将成为SCPP的研究重点。简要概括了国内外SCPP中涡轮机的研究进展,总结了涡轮机性能研究的历程和研究方法、成果,并提出了今后研究的重点和方向。

关键词 太阳能烟囱发电;空气涡轮机;可再生能源

中图分类号 TK514

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.05.019

Research progress of turbine in solar chimney power plant

ZUO Lu, LIU Yucheng, YUAN Yue

College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

Abstract Airturbine is the main output device of a solar chimney power plant (SCPP). Its performance directly affects the effectiveness of the whole system. The influence of the type, structure, layout and parameters of the turbine on the overall effectiveness of SCPP will be the next research focus. This paper briefly summarizes research progress in this area at home and abroad, introducing the history, research methods, and achievements of studies on turbine performance and pointing out future research directions.

Keywords solar chimney power plant; airturbine; renewable energy

全球性常规资源短缺,供需矛盾日益增大;全球气候变暖,生态保护迫在眉睫,迫使人们将更多的目光聚焦于储量巨大、完全清洁的太阳能资源开发。太阳能烟囱发电(solar chimney power plant, SCPP)以其设计简单、建造成本低、运行维修费用低、可昼夜连续运行、使用寿命长、无环境污染、应用领域广、适合大规模发电利用、可改善局部环境及气候条件等优点备受青睐。

SCPP主要由烟囱、集热棚、蓄热层和空气涡轮机组4部分构成,涡轮机作为系统的主要出力设备,其性能直接影响系统的整体效益。本文从涡轮机的布置方式、运行工况、压降因子和效率、涡轮机数值模拟和实验研究等方面总结分析SCPP中空气涡轮机的研究进展及成果,并展望今后研究的重点和方向。

1 涡轮机布置方式

在SCPP中,透光隔热的集热棚相当于一个巨大的玻璃温室,其下方的地表蓄热层吸收太阳短波辐射后温度升高,并加热棚内空气,空气受热膨胀后和外部环境形成密度差,在烟囱作用下形成一股强大的上升热气流驱动空气涡轮发电机组发电,同时,集热棚周边的冷空气进入棚内,形成持续不断的空气循环流动。在集热棚出口段和烟囱进口段,气流速度增大,压强骤减,负压较大,将涡轮机布置在这2个区域能获得较高的输出功率。

SCPP中空气涡轮机型主要有两种:布置在烟囱底部的垂直轴式涡轮机和集热棚出口段的水平轴式涡轮机。垂直轴式涡轮机可分为单台(图1(a))和多台(图1(b))两种布置方式,水平轴式涡轮机只有多台(图1(c))一种布置方式。按照

收稿日期:2014-08-26;修回日期:2014-12-02

基金项目:高等学校学科创新引智计划项目(B14022)

作者简介:左潞,副教授,研究方向为可再生能源利用,电子信箱:zuoluyu1@163.com;刘玉成(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为太阳能热气流的

综合应用,电子信箱:446454092@qq.com

引用格式:左潞,刘玉成,袁越.太阳能烟囱发电系统中的涡轮机研究进展[J].科技导报,2015,33(5):115-119.

转子类型, 涡轮机可分为单转子(图2, s代表导叶, a、b代表前、后转子)和反转双转子(图3), 也可以按照有无导叶及扩散器等进行分类。Manzanares 试验原型电站采用的是布置在烟囱底部的无导叶及扩散器的单转子垂直轴式涡轮机^[1]。2010年, SeragEldin 等^[2]利用马格纳斯效应, 设计了一组类螺旋桨的圆柱型转子替代传统的垂直轴式涡轮机(图4), 该新型转子造价较低, 更耐久且易于替换、维修。

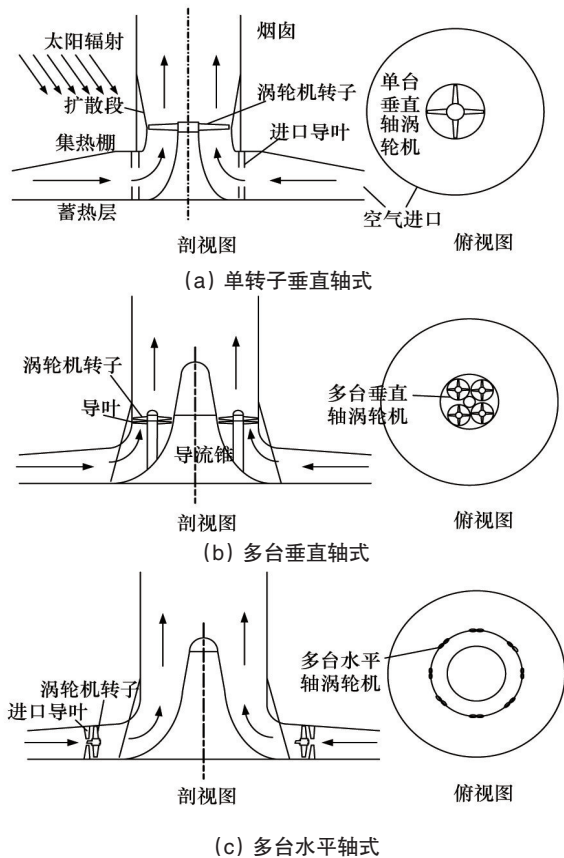


图1 涡轮机布置图和俯视图

Fig. 1 Layout plans and vertical views of the turbines

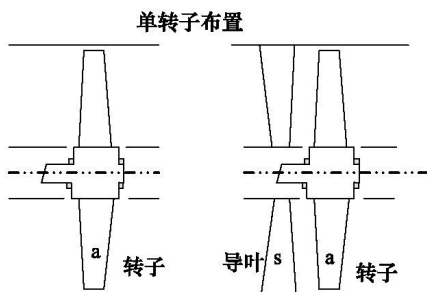


图2 有、无导叶的水平轴单转子涡轮机

Fig. 2 Single-rotor horizontal-axis turbines with and without guide vane

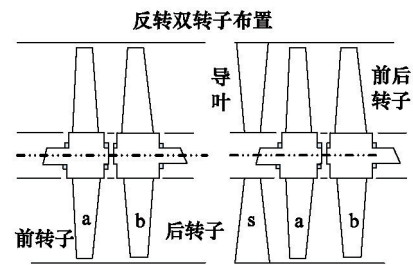


图3 有、无导叶的水平轴反转双转子涡轮机

Fig. 3 Dual-rotor horizontal-axis reversal turbines with and without guide vane

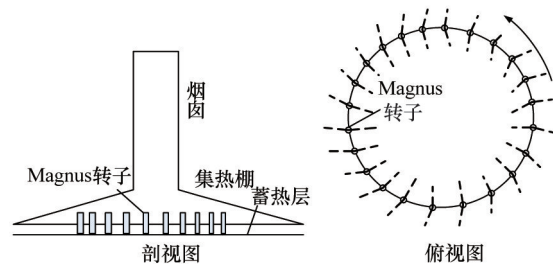


图4 Magnus 转子布置

Fig. 4 Layout of Magnus rotors

2 涡轮机压降因子和效率研究

von Backström 等^[3]指出, 与风力发电机组所采用的速度级涡轮机不同, SCPP 采用压力级空气涡轮机, 此涡轮机前后压差是速度级涡轮机的 10 倍以上, 其工作原理与水轮机相似, 吸收静压并转换成涡轮的旋转能。涡轮机的叶片数介于速度级涡轮机与燃气轮机之间, 叶片设计接近于燃气轮机的叶片设计, 涡轮机参数介于速度级涡轮机与燃气轮机之间。不同于较为独立的速度级涡轮机叶片, SCPP 中的涡轮机是在管道内运行, 进口气流的速度方向恒定, 涡轮机虽然不受恶劣环境影响, 但要承受更高的温度。由于集热棚与蓄热层之间的大体积区域可对气流进行缓冲, 涡轮机及其组件承担的动荷载相对较小。

涡轮机输出功率正比于涡轮机进出口压降和涡轮机区域体积流量的乘积, 可表示为 $P = \eta_{\text{turb}} \times \eta_t \times \Delta p_{\text{tot}} \times \dot{V}$, 其中 η_{turb} 为涡轮机效率, η_t 为涡轮机压降因子, Δp_{tot} 为 SCPP 产生的可利用压降, \dot{V} 为系统体积流量。为了简化计算模型, 得到较为可靠的模拟结果, 模拟中往往将 η_{turb} 、 η_t 视为定值。

在研究 SCPP 性能时, 多数都将涡轮机设置成一个不占任何体积、不阻碍气流流动的逆向压降风扇来处理, 或者直接研究 SCPP 空载时的性能。对于系统涡轮机, 主要采用数值模拟和实验测试研究涡轮处的压降因子和涡轮机效率。

2.1 涡轮处压降因子

涡轮处压降因子指整个SCPP的总压力差消耗在涡轮处的份数,即 $\eta_t = \Delta p_{\text{turb}} / \Delta p_{\text{tot}}$, Δp_{turb} 为涡轮机进出口压差。Haaf等^[1]和Schlaich^[4]视烟囱内的涡轮机为速度级涡轮机,估算涡轮功率最大时 η_t 为2/3。Pastohr等^[5]在利用Fluent 5.7模拟SCPP内空气流动和换热时,涡轮处压降采用Beetz功率极限 $\Delta p_{\text{opt}} = -(2/3)^3 \rho_u \omega_u^2$,其中, ρ_u 为工质密度, ω_u 为切向速度。Yan等^[6]提出系统内涡轮不属于风力涡轮,不遵守风力涡轮的Beetz定律,即其最大理论效率不是16/27。Bernardes等^[7]认为 η_t 理论上可高达0.97,正常情况下可达到0.8~0.9。Schlaich等^[8]认为当 η_t 为0.8时,涡轮机发电功率达到最大值。von Backström等^[9]给出了2种寻找最佳 η_t 的方法,推导出SCPP输出最大发电功率时 η_t 的表达式为 $(n-m)/(n+1)$,其典型值在2/3和1之间,其中 m 为压力损失指数,其典型值在-1和0之间, n 为压力势能指数,其典型值为2;只有在压力势能保持不变,与烟囱内气流流量无关时, η_t 为2/3。Nizetic等^[10]认为 η_t 主要与系统进口风速和集热棚吸收系数与对流损失系数之比有关, η_t 与2个系数成正相关,变化范围为0.8~0.92。

2.2 涡轮机效率

实际上,计算涡轮机效率 η_{turb} 需考虑与涡轮机相关的损失。涡轮机处的损失主要包括:空气动力学损失、机械损失及发电损失。空气动力学损失包括进口损失 c_{in} 、涡轮机损失 c_{turb} 、扩散损失 c_{diff} 等,机械和发电损失包括变速器损失、发电机损失等。

在研究SCPP的性能时,往往假设 η_{turb} 不变,Haaf等^[1]、Bernardes等^[11]假设 η_{turb} 为83%,Mullett^[12]假设 η_{turb} 为40%~80%,Schlaich等^[4,8]、Gannon等^[13]、Pretorius等^[14]、Santos Bernardes^[15]都假设 η_{turb} 为80%,Hedderwick^[16]采用 η_{turb} 为70%,Bernardes等^[17]设定 η_{turb} 为75%,Pasumarthi等^[18]分别设定5、30、100 MW的电站的涡轮效率 η_{turb} 为77.0%、78.3%和80.1%。Khoshmanesh等^[19]认为涡轮机的总比总效率最大可达到0.89。Koonsrisuk^[20]分析了倾斜式SCPP的 η_{turb} 、涡轮机区域温度增加、速度和流量系数的关系,对SCPP的初始设计有指导意义。Magnus转子性能对于操作参数的选择非常敏感,最大效率可达到0.87,进一步优化操作参数可提高转子效率^[2]。

对于涡轮机进口和扩散损失的相关研究较少。Kolb等^[21]用CFD模拟了200 MW的SCPP性能时,设计了一个粗糙的由矩形渐变为圆形的进口。Fluri等^[22]改进了这个过渡段,设计了一个圆形喇叭状进口,使得气流速度更加均匀,其进口损失计算公式为 $c_{\text{in}} = 0.5e^{-14.114(\frac{r}{d_h})}$,其中, r 为进口半径, d_h 为水力学直径,当 $\frac{r}{d_h} = 0.12$ 时, c_{in} 取0.09。

Fluri等^[22]在计算200 MW电站时认为扩散器效率取0.75,扩散段面积比在0.5~1.0时,其效率变化不大,大于1.0后,效率下降明显;还考虑了多组涡轮机尾流混合损失,在混

合角度为15°时, c_{diff} 取0.1。Baines等^[23]认为扩散段效率取0.7~0.9是合理的。

尽管涡轮机叶片参数的变化会改变SCPP的流体流动、涡轮机前后压降、流量等参数,而将整个SCPP流场都模拟出来,要求计算机必须具有很大的内存和运行速度,因此将涡轮机处的压降因子或效率简化为一个定值有利于预测SCPP的性能。

3 涡轮机实验研究

1981年,Schwarz等^[24]设计了Manzanares试验原型电站的涡轮发电机组,涡轮采用无导叶单转子型(图1(a)), η_{turb} 低于0.4,其涡轮机运行工况远远偏离设计工况,是效率低下的重要原因^[25]。

2003年,Gannon等^[26]用实验手段观测SCPP中涡轮机的性能,借鉴燃气轮机相关理论,发现涡轮机尾流中含有少量或者没有漩涡时,涡轮机效率会更高;由此设计了单转子涡轮(图5),并利用烟囱的支撑结构,将其改进充当进口导叶,提高了涡轮机性能,改善了导叶与转轮之间的气流流动,增强了烟囱抗扭强度。结果表明,大规模电站的涡轮机的总比总效率可以达到90%。当反动度和流量系数一定时,总比总效率可到达0.85。

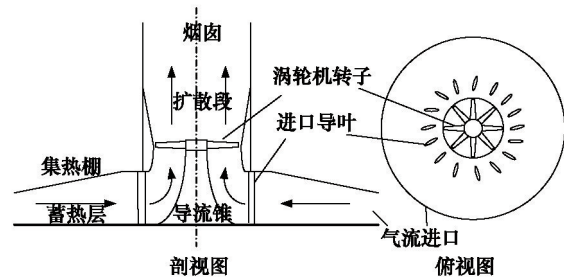


图5 Gannon等设计的涡轮机

Fig. 5 Turbine designed by Gannon et al

2004年,von Backström等^[27]开发了一套简单模型,用来预测涡轮机的 η_{turb} 和运行状况,使SCPP达到最优化设计。使用单轴涡轮机,空气通过入口流道垂直流入涡轮机, η_{turb} 取决于叶片排列和扩散损失系数。引入流量系数、负载系数、反动度等开展理论分析,研究各系数对 η_{turb} 影响,得出最优反动度、额定发电量的最大效率以及压缩涡轮尺寸最大效率的解析解。基于该理论,涡轮机的总比总效率在特殊工况时可达90%。他们用一个直径720 mm的涡轮机验证了该分析模型的可靠性,并给出预测结果。

2006年,Denantes等^[28]为SCPP设计了反转双转子涡轮机,并修改了von Backström模型,在该模型基础上研究了在入口有无导叶的情况下,反转双转子涡轮机的性能。发现单转子涡轮机在设计工况下有较高的涡轮机效率;在非设计工况时运行不佳;反转双转子涡轮机能承担更高的负载因子。考虑到涡轮机运行工况大部分时间都在设计工况以外,采用

反转双转子涡轮机能获得更高的输出功率。

2008年, Fluri等^[29]比较了布置在集热棚出口附近的4种涡轮叶片(图2、图3)设计的性能。结果表明,无导叶的单转子型涡轮性能最差,其峰值动子-静子效率为66.9%,主要原因是此类涡轮机出口速度较大,漩涡较多;而安装其他三型涡轮的SCPP性能较好,相差不大。和带导叶的单转子型涡轮机相比,反转双转子涡轮的峰值效率最高(入口有导叶型峰值 η_{mb} 达80.1%),但此时转速相对较低,第一个转子的转速为20 r/min,从而导致生产同样电功率时需要更高的转力矩。由于反转双转子涡轮随转速变化较缓,在低速情况下效率也挺好,所以适合于小规模发电站或大中规模发电的无辐照天气下发电。

4 涡轮机数值模拟

Ming等^[30]利用Fluent软件模拟了涡轮机的转动对SCPP发电性能的影响规律,考虑到将整个系统的流场模拟出来对计算硬件要求太高,采用编程辅助手段,得到涡轮机进出口边界条件,代入流场单独对涡轮机区域模拟仿真。他们以西班牙电站为原型,耦合涡轮机发电,得到最大输出功率超过50 kW;耦合涡轮叶片的转动模拟技术,模拟了5叶片单轴涡轮机运行特性,对MW级电站模拟结果显示涡轮机输出功率和效率分别为10 MW和50%,为大功率电站提供了参考。欧阳穗等^[31]发现在相同透平压降下,随着转速的增大,系统流量和总的输入功率不断减小,输出轴功率出现峰值。该峰值由透平的翼型决定,与透平的转速无关,据此可设计具有最大效率的透平翼型。当太阳辐射改变时,透平的压降随之改变,此时合理调整透平的运转速度能保证透平在较佳效率下运行,可提高整个系统的经济效益。

Aldabbas^[32]模拟三叶片涡轮机,结果显示,涡轮机转速增大时,烟囱出口风速、系统流量下降,烟囱出口温度和涡轮机压降变化相反,最大可用功、涡轮机输出和效率均有峰值,与Ming等^[30]的研究结果相近。

2010年,陈义胜等^[33]从叶片数、台数、涡轮直径、叶尖速比、转速、切向速度、安装角、片最大转矩、角速度等因素分析单台功率和总功率的变化规律,选型时要考虑涡轮的尺寸与集热棚的适应问题,并建议SCPP以中型为主,涡轮机的尺寸应该避免过大。分析了引起出口速度略大于进口速度的原因,是由于流体有小部分静压转化为动压所致,而且随压差的增加,二者的差异也会不断增大。Lorente等^[34]研究了多台轴流涡轮机组的布置方式,将效率解析成电站尺寸函数,虽然单台涡轮机工作效率高,但其分配性差,考虑SCPP发电并网要求,合理的方式是几个大涡轮机加多个小涡轮机一起发电,并指出发电效率与使用土地面积也有重要关系。

5 结论

目前对SCPP涡轮机的研究,以下意见基本一致:SCPP中的涡轮机不属于风力涡轮,不遵守风力涡轮的Beetz定律,即

其最大理论效率不是16/27;压降因子一般在2/3~0.9之间;涡轮机效率约0.8;导叶的加入将利于提高涡轮机效率,反转双转子涡轮较单转子具有更好的非设计工况适应性;涡轮机运行特性基本符合自然对流式系统、轴流式涡轮机的运行原理。

对于涡轮机的模拟,建立三维模型为最佳方法,耦合多个边界条件,将涡轮机区域与整体连接,实现数据实时传递与变化。考虑到计算硬件的限制,选择2D或者利用算法得到涡轮机进出口边界条件,代入流场进行单个涡轮机区域模拟,得到结果的可靠性较低。

科技的发展使得目前的计算硬件可实现整体SCPP模拟,借助仿真软件可模拟涡轮机参数的变化对整体性能的影响。因此,对涡轮机的下一步研究工作是通过模拟优化涡轮机设计,寻找涡轮机运行策略,实现SCPP的持续高输出,研究过程大概可分为以下3个阶段:

- 1) 研究有负载的SCPP流场和整体效益。
- 2) 考虑涡轮机布置方式和涡轮机参数对SCPP的影响。
- 3) 研究非稳态工况下涡轮机运行策略,实现涡轮机优化,达到SCPP持续稳定的高输出。

参考文献(References)

- [1] Haaf W, Friedrich K, Mayr G, et al. Solar chimneys, part I: Principle and construction of the pilot plant in Manzanares[J]. International Journal of Solar Energy, 1983, 2: 3-20.
- [2] SeragEldin M A, Latif M A A. Magnus-effect rotors for solar chimney power plants[C]//ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting collocated with 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. Montreal, Canada: American Society of Mechanical Engineers, 2010: 819-828.
- [3] von Backström T W, Harte R, Höffer R, et al. State and recent advances in research and design of solar chimney power plant technology[J]. VGB PowerTech, 2008, 88(7): 64-71.
- [4] Schlaich J. The solar chimney: Electricity from the sun[M]. Geislingen, Germany: Axel Menges, 1995.
- [5] Pastohr H, Kornadt O, Gurlebeck K. Numerical and analytical calculations of the temperature and flow field in the upwind power plant[J]. International Journal of Energy Research, 2004, 28(6): 495-510.
- [6] Yan M Q, Sherif S A, Kridli G T, et al. Thermo-fluids analysis of solar chimneys[J]. Ind Apphcnuid Mech, ASMEFED-2, 1991(2): 125-130.
- [7] Bernardes M, Vob A, Weinrebe G. Thermal and technical analyzes of solarchimneys[J]. Solar Energy, 2003, 75(6): 511-524.
- [8] Schlaich J, Bergermann R, Schiel W, et al. Design of commercial solar updraft tower systems—utilization of solar induced convective flows for power generation[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 127(2): 117-124.
- [9] von Backström W, Fluri P. Maximum fluid power condition in solar chimney power plants: An analytical approach[J]. Solar Energy, 2006, 80(11): 1417-1423.
- [10] Nizetic S, Klarin B. A simplified analytical approach for evaluation of the optimal ratio of pressure drop across the turbine in solar chimney power plants[J]. Applied Energy, 2010, 87(2): 587-591.
- [11] Bernardes S, von Backström W. Evaluation of operational control

- strategies applicable to solar chimney power plants[J]. Solar Energy, 2010, 84(2): 277-288.
- [12] Mullet B. The solar chimney overall efficiency, design and performance [J]. International Journal of Ambient Energy, 1987, 8(1): 35-40.
- [13] Gannon J, von Backström W. Solar chimney cycle analysis with system loss and solar collector performance[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2000, 122(2): 133-137.
- [14] Pretorius P, Kröger G. Solar chimney power plant performance[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2006, 128(8): 302-311.
- [15] dos Santos Bernardes M A. Solar chimney power plants: Developments and advancements[J]. Solar Energy, 2010, 84(6): 978-953.
- [16] Hedderwick A. Performance evaluation of a solar chimney power plant [D]. Cape Town, South Africa: University of Stellenbosch, 2001.
- [17] Bernardes M, Vob A, Weinrebe G. Thermal and technical analyzes of solar chimneys[J]. Solar Energy, 2003, 75(6): 511-524.
- [18] Pasumarthi N, Sherif S. Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model- Part I: Mathematical model development[J]. International Journal of Energy Research, 1998, 22(3): 277-288.
- [19] Khoshmanesh S, Mouji M, Bordbar S. Solar Turbine, flow passage design [C]. International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Cordoba, Spain, April 8-10, 2014.
- [20] Koonsrisuk A. Mathematical modeling of sloped solar chimney power plants[J]. Energy, 2012, 47(1): 582-589.
- [21] Kolb S, Helmrich T. Aerodynamic design of a 200 MW solar chimney power plant[D]. Stuttgart: Universität Stuttgart, 1996.
- [22] Fluri P, von Backström W. Performance analysis of the power conversion unit of a solar chimney power plant[J]. Solar Energy, 2008, 82(11): 999-1008.
- [23] Baines N, Japikse D. Introduction to turbomachinery[M]. Vermont, USA: Concepts ETI Inc, 1994.
- [24] Schwarz G, Knauss H. Aerodynamic design of the solar chimney power plant in Manzanares[D]. Stuttgart: Universität Stuttgart, 1981.
- [25] Xu G, Ming T, Pan Y, et al. Numerical analysis on the performance of solar chimney power plant system[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(2): 876-883.
- [26] Gannon J, von Backström. Solar chimney turbine performance[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2003, 125(1): 101-106.
- [27] von Backström, Gannon J. Solar chimney turbine characteristics[J]. Solar Energy, 2004, 76(1): 235-241.
- [28] Denantes F, Bilgen E. Counter-rotating turbines for solar chimney power plants[J]. Renewable Energy, 2006, 31(12): 1873-1891.
- [29] Fluri T P, von Backström T W. Comparison of modeling approaches and layouts for solar chimney turbines[J]. Solar Energy, 2008, 82(3): 239-246.
- [30] Ming T Z, Liu W, Xu G L, et al. Numerical simulation of the solar chimney power plant systems coupled with turbine[J]. Renewable Energy, 2008, 33(5): 897-905.
- [31] 欧阳穗, 高伟, 黄树红, 等. 太阳能热气流电站中涡轮机流动特性分析[J]. 可再生能源, 2007(5): 8-12.
- Ouyang Sui, Gao Wei, Huang Shuhong, et al. Flow characters analysis of turbine in solar chimney power plant system[J]. Renewable Energy, 2007 (5): 8-12.
- [32] Al Dabbas M A. A performance analysis of solar chimney thermal power systems[J]. Thermal Science, 2011, 15(3): 619-642.
- [33] 陈义胜, 杨靖辉, 魏毅力, 等. 太阳能电站中涡轮机的设计[J]. 能源工程, 2010(2): 37-40.
- Chen Yisheng, Yang Jinghui, Wei Yili, et al. Design of turbine in solar power plant[J]. Energy Engineering, 2010(2): 37-40.
- [34] Lorente S, Koonsrisuk A, Bejan A. Constructal distribution of solar chimney power plants: Few large and many small[J]. International Journal of Green Energy, 2010, 7(6): 577-592.

(编辑 陈华姣)

·学术动态·



中国科协部署开展“作精神文明表率”活动

2015年3月6日,中国科协印发“关于在科技界开展‘作精神文明表率’活动的意见”,强调:科技工作者作为科技知识和科学精神的直接载体,对社会变化和科技发展的观察细致敏锐,言行举止具有很高的权威性和很强的示范性,对社会公众的思维方式和行为模式有着直接而重要的导向作用,理应在社会主义精神文明建设中走在前列、做出表率。鉴此,中国科协决定广泛开展“作精神文明表率”活动,并要求广大科技工作者:

- 1) 作坚定理想信念的表率。
- 2) 作践行社会主义核心价值观的表率。
- 3) 作为国创新奉献的表率。
- 4) 作思想道德建设的表率。
- 5) 作尊法守法的表率。
- 6) 作科学文化建设的表率。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/16253721.html>。