

# 太阳能热气流透平发电系统数值模拟

明廷臻, 刘 伟, 许国良

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

## Numerical Simulation of the Solar Chimney Power Plant Systems With Turbine

MING Ting-zhen, LIU Wei, XU Guo-liang

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan 430074, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** Solar chimney power plant is one of the hotspots in the solar energy research of the world in the current time, but there is few study on the solar chimney power plant systems coupled with turbine. In this paper the whole system has been divided into three regions: the collector, the chimney and the turbine, and different mathematical models for heat transfer and flow have been set up for these regions. Using the solar chimney prototype in Manzanares, Spain, as a practical example, numerical simulation results show that the maximum output power of the system a little higher than 50 kW, which shows great agreement with the prototype model. In addition, the effect of the rotate speed of the turbine on the outlet parameters of the chimney is in accord with the principle of natural convection of the systems, which shows that the validity of the method advanced by the author. Later, design and simulation of MW-graded solar chimney power plant system with turbine have been carried out, and the numerical simulation results show that the output power of the system surpasses 10 MW. The methods numerical simulation and design in this paper present a guidance to the design and application of large-scale solar chimney power plant system.

**KEY WORDS :** solar chimney power plant system; natural convection; turbine; output power; efficiency

**摘要 :** 太阳能热气流发电技术是目前国际太阳能研究领域的一个热点之一,但对负载条件下太阳能热气流发电系统的研究并不多。该文将整个太阳能热气流发电系统分成集热棚、烟囱和透平 3 个区域,分别建立各个区域的传热与流动数学模型。以西班牙试验电站模型为实例进行了数值模拟。计算结果表明,系统的最大输出功率略大于 50 kW,与西班牙电站模型的额定功率相近,烟囱出口参数随透平转速的变化与自然对流原理相符,证明该文方法的正确性。此外,对 MW

级太阳能热气流发电系统进行了透平设计与计算,计算结果表明,系统输出功率超过 10 MW。该文数值方法和设计方案为大规模太阳能热气流发电系统的设计和应用提供参考。

**关键词 :** 太阳能热气流发电系统;自然对流;透平;输出功率;效率

## 0 引言

自 20 世纪 80 年代初开始,德、美、南非等国的研究人员对太阳能热气流发电技术展开了一系列的探索性研究<sup>[1-7]</sup>。1980 年, Schlaich 等<sup>[8-9]</sup>就对太阳能热气流发电系统的轴流式透平的运行机制进行了初步阐述。以 Schlaich<sup>[10]</sup>为首的研究组在西班牙建立了太阳能热气流试验电站,将轴流式风力透平置于烟囱底部并测试了系统的性能参数。1985 年, Kustrin 等<sup>[11]</sup>认为安装在烟囱底部的风力透平应当是单级且基于压力式的,描述了透平运行的基本原理,以西班牙试验电站的风力透平为基础进行了计算。南非的 Backstrom 课题组<sup>[12-18]</sup>对风力透平的运行原理、流道设计及优化、输出功率等特性参数进行了详尽细致的理论分析和实验研究。其主要工作如下: 设计了单机转子,引入烟囱进口导流叶片以诱导流体通过转子之前预旋流动,这有助于减少转子入口处的动能损失,基于相似模型给出了透平两组运行工况下的性能和效率实验结果; 基于透平区域流体流动、负荷因素、反动度建立了系统输出功率数学模型,数学模拟分析结果得到了最优的反动度、最大透平效率下的输出功率以及最大透平效率下的透平尺寸; 对包含入口导流叶片、单机透平的集热棚出口和烟囱进口的太阳能热气流发电系统的透平区域进行流体流动数值模拟,分析壁面

基金项目:教育部重点研究基金项目(104127)。

阻力损失系数、集热棚顶棚高度、烟囱直径、透平直径和叶片形状对透平进出口压降的影响。

2004 年, Pastohr 等<sup>[19]</sup>以西班牙太阳能热气流发电系统为基础进行了数值模拟。他将西班牙原始模型简化为轴对称二维模型, 考虑了蓄热层的影响, 将透平视为逆向风扇, 该逆向风扇的进出口条件根据贝茨理论人为给定一个压降。对包括蓄热层、集热棚、透平、烟囱的整个系统进行了稳态数值模拟。

上述文献表明: Pastor 等在进行数值模拟时就已基于贝茨理论确定了透平压降, 对于二维问题这可以较好的预测系统内部流动与传热特性, 但与实际三维问题存在一些偏差, 因为风扇进出口两端的压降随透平特性的影响比较显著; 关于透平的特性对太阳能热气流发电系统输出功率、效率等性能参数及系统出口参数的影响, 目前尚无文献报道。因此, 本文基于 Fluent 软件对负载条件下太阳能热气流发电系统进行三维稳态耦合数值模拟, 与西班牙试验电站模型实验结果进行对比, 并分析是否符合太阳能热气流发电系统的运行原理, 分析数值模拟方法的可行性; 对带有透平的 MW 级太阳能热气流发电系统进行三维稳态数值模拟, 为大中型太阳能热气流发电系统的理论分析和设计提供参考。

## 1 物理模型

考虑包括集热棚、透平和烟囱3个主要部件的太阳能热气流发电系统物理模型的难点在于透平区域, 本文以西班牙模型为基础, 其主要尺寸参数见文献[10], 在烟囱底部安装三叶片轴流式透平, 设计方案采用CLARK翼型。此外, 本文还建立了MW级太阳能热气流发电系统模型, 集热棚半径1500m, 进出口高度分别为4m和8m, 顶棚小角度倾斜设计, 烟囱半径30m, 高400m, 在烟囱底部30~40m处安装5叶片风力透平, 透平设计方案同样采用CLARK翼型<sup>[20]</sup>, 如图1所示。



图 1 MW 级太阳能热气流发电系统透平模型  
Fig. 1 Turbine model of MW-graded solar chimney power plant

叶片的实际安装角根据叶片各截面处的相对迎风角和平均迎角计算确定。由于本文只对稳态问题进行数值模拟, 故可不考虑蓄热层与整个系统的耦合。

## 2 数学模型

判断系统内流体流动过程是湍流还是层流, 可根据流体在系统中自然对流的  $Ra$  数来判断:

$$Ra = \frac{g\beta(T_h - T_c)L^3}{\alpha\nu} \quad (1)$$

式中:  $T_h$ 、 $T_c$  分别为系统的最高温度和最低温度;  $L$  为特征尺寸;  $\beta$ 、 $\alpha$  和  $\nu$  分别为流体热膨胀系数、热扩散率和运动黏度。经分析, 太阳能热气流发电系统的  $Ra > 10^{10}$ , 故系统内是湍流流动。在集热棚和烟囱通道内相应的控制方程通用形式如下:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi \quad (2)$$

其中, 对于连续性方程、NS 方程、能量方程和  $k-\varepsilon$  方程,  $\phi$  分别为  $1$ 、 $\mathbf{V}$ 、 $T$ 、 $k$  和  $\varepsilon$ ; 广义扩散系数  $\Gamma_\phi$  取值及相应的常数确定参见文献[21]。

透平区域流体的流动与集热棚及烟囱内不同, 由于流体推动透平转动, 流体除了轴向流动外, 还和透平一起以给定的转速转动, 在任意时刻其流动是非定常的, 这给数值模拟带来了较大的困难。对此建立一个与旋转设备一起运动的参考坐标系, 参考坐标系的旋转角速度与透平旋转角速度相等且方向相同, 则基于运动参考坐标系下透平区域流体的流动转化为定常流动, 使问题得到简化。当流动区域被定义于旋转坐标系中时, 由于旋转边界与参考系以相同的速度运动, 故旋转边界相对于旋转参考系是静止的。流体的运动必定对旋转设备产生一个与相对运动参考系同方向的扭矩, 扭矩乘以转速即为流体对旋转机械所做的功。在太阳辐射及其他条件给定情况下, 透平进出口压差和系统流量随透平转速的变化而变化。

上述处理方法要求对动量方程作一些改变, 在旋转坐标系中动量方程将附加流体的加速度项。绝对速度  $\mathbf{v}$  和相对速度  $\mathbf{v}_r$  之间的关系如下:

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) \quad (3)$$

其中,  $\boldsymbol{\Omega}$  为角速度向量, 即为旋转坐标系的角速度;  $\mathbf{r}$  为旋转坐标系中的位置向量。于是旋转坐标系中的动量方程可表述如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_r \mathbf{v}) + \rho(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v}_r) + S_v \quad (4)$$

根据 $v$ 和 $v_r$ 的关系代入式(4), 消去 $v$ 得:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \nabla \cdot (\rho v_r v_r) + \rho(2\Omega \times r + \Omega \times \Omega \times r) + \rho \frac{\partial \Omega}{\partial t} \times r = \nabla \cdot (\mu \nabla v_r) + S_{v_r} \quad (5)$$

定义单位时间内推动透平转动的流体体积流量与透平进出口压降的乘积为流体可供透平输出的总功, 即热气流能  $N$  为

$$N = V \Delta p \quad (6)$$

其中,  $V$  为体积流量, 取透平进口截面来计算;  $\Delta p$  为透平进出口压差。通过透平可输出的轴功  $P$  为

$$P = \frac{2\pi n I}{60} \quad (7)$$

式中:  $n$  为透平转速;  $I$  为由透平叶片产生的总动量矩。则由式(6)、(7)可得透平效率  $\eta$  为<sup>[13]</sup>

$$\eta = \frac{P}{N} = \frac{2\pi n I}{60V \Delta p} \quad (8)$$

### 3 数值处理方法

由于太阳能热气流发电系统内的传热流动是与环境相通的自然对流, 在不同太阳辐射条件下, 系统的入流条件是未知的。因此将集热棚、烟囱和透平进行耦合计算时, 系统进出口速度、系统流量, 透平的进出口压差等重要参数均未知, 这给本问题的数值模拟造成了很大困难。

为了得到太阳能热气流发电系统负载条件下的性能参数, 作如下考虑: 在确定的太阳辐射条件下, 通过Pasumarthi热平衡模型<sup>[22]</sup>计算得到蓄热表面和集热棚顶棚温度分布; 人为给定透平转速;

不用给定透平进出口边界条件, 认为透平进口为集热棚和透平2个区域的接口, 透平出口为透平和烟囱区域的接口, 3个区域耦合计算, 其间数据可以在接口面上自动传输。

因此, 虽然透平功率、效率、流量等参数均未知, 但由条件 可根据自然对流计算得到集热棚进口速度和流量; 由条件 可以根据式(7)计算得到透平在给定转速下的动量矩, 从而计算输出功率; 同时可根据透平区域进出口压差及式(6)计算得到系统的热气流能, 从而得到系统的效率。

值得指出, 透平的转动方向对数值模拟结果具有重要影响。流体推动透平转动, 系统热气流能转变成机械能, 系统流量会随着透平转速的增加而减小。若转速设置相反, 则透平相当于向整个系统输入机械功, 导致系统在一定的外力作用强制流动,

系统的流量会随透平转速的增大而增大。

边界条件可利用Pasumarthi热平衡模型<sup>[22]</sup>计算得到, 作如下假设: 天气晴朗无云, 太阳辐射为 $1000 \text{ W/m}^2$ 且恒定不变, 环境空气温度恒定; 蓄热层吸收太阳辐射处处相等, 且不随太阳高度角变化; 集热棚内的空气密度变化采用Boussinesq假定; 忽略蓄热层和烟囱外壁面的能量损失。建立蓄热层、集热棚、透平和烟囱整个系统的热平衡方程, 可得到集热棚玻璃表面和蓄热层表面的温度分布, 数值模拟时, 以上述结果作为集热棚玻璃和蓄热层表面的温度边界条件。同时考虑系统内外压力分布关系<sup>[19,23]</sup>, 得到集热棚进口为相对压力进口边界, 烟囱出口为相对压力出口边界, 烟囱壁面考虑较小的散热损失。透平区域只需设定转速条件即可(其中 $p_r$ 表示相对压力)。

集热棚进口:  $p_{r,i}=0$ ,  $T_a=293 \text{ K}$ ; 集热棚玻璃:  $T = f_c(x, y, z)$ ,  $u_c=0$ ; 蓄热层表面:  $T = f_s(x, y, z)$ ,  $u_s=0$ ; 烟囱内壁面:  $q_w=60 \text{ W}$ ,  $u_i=0$ ; 烟囱出口:  $p_{r,o}=0$ ; 透平转速:  $\omega=n$ 。

数值计算在Fluent6.0中进行, 计算中均选取 RNG  $k-\varepsilon$  双方程湍流模型, 计算方法采用segregate隐式方法, 压力项采用PRESTO!格式, 湍流动能、湍流耗散项、动量方程都采用Quick格式; 压力和速度的解耦采用SIMPLEC算法。西班牙试验电站模型的透平区域网格数达50万个, 整个系统的网格数达150万以上, 计算结果与网格数无关。

## 4 计算结果与分析

### 4.1 数值方法可靠性验证

为验证数值模拟结果的可行性, 以西班牙试验电站模型<sup>[10]</sup>为基础, 对集热棚、透平和烟囱3个区域进行耦合数值模拟。负载条件下西班牙模型的计算结果如图2~4所示。

图2为西班牙模型的烟囱出口平均速度和出口平均温度随透平转速的变化关系。从图中可以看到, 随着透平转速的增加, 烟囱出口平均速度显著减小, 这是因为当太阳辐射、环境温度以及太阳能热气流发电系统的几何参数一定时, 轴流式透平转速的增加导致系统较高的阻力和压降。阻力的增加导致系统流量的减小, 流量的减小引起2个方面的变化, 一个方面是使流体速度减小, 另一个方面是由于流速的减小使流体在集热棚内加热的时间增大, 从而导致流体密度的减小。正因为如此, 加热时间的增大

导致流体出口温度的升高,图2中烟囱出口平均温度的变化趋势与分析结果相吻合。

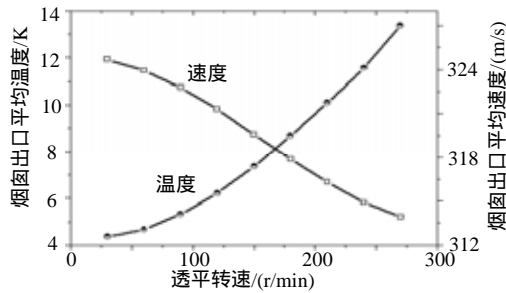


图 2 透平转速对西班牙模型烟囱出口参数的影响

Fig. 2 Effect of turbine rotate speed on the chimney outlet parameters of the Spanish prototype

图3为透平进出口压降和系统流量随透平转速的变化关系。由图中可见,系统流量的变化随透平转速的变化非常显著。当透平转速低于50r/min时,系统的流量高于1000kg/s,随着透平转速的增加,系统的流量几乎呈线性减小。这说明由透平转速增加导致的透平区域阻力非常显著。可以预测,当透平叶片数增大时,透平的密实比<sup>[20]</sup>增大,阻力将会更大,从而系统流量的减小将会更加显著。另外,当透平转速增加时,其进出口压降增大,这说明随着透平转速增加,系统提供给透平能量转换的压头增大,这与风力透平的运行原理相一致。但从图中还可以看到,随着透平转速的增大,透平进出口压降增大的趋势减小,这说明能量的可利用度减小。

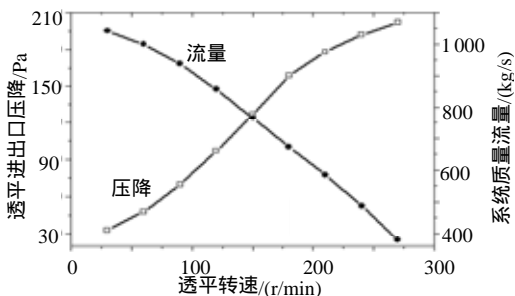


图 3 透平转速对西班牙模型透平压降和系统流量的影响  
Fig. 3 Effect of turbine rotate speed on the pressure drop across the turbine and the mass flow rate of the Spanish prototype

图4为系统热气流能和透平轴功以及透平效率随透平转速之间的变化关系。对于本文所设计的西班牙模型的三叶片透平,系统的热气流能在透平转速为180r/min时到达最大值,超过了100kW,此后系统热气流能减小。但此时透平输出的轴功尚未达到最大值,而是当透平转速达到210 r/min时,透平输出轴功达到最大值,略大于50kW。该计算值能够达到西班牙模型的原始设计要求,且此时透平效

率达到最大值,约为52%。需要指出,本文所设计的三叶片透平模型与西班牙模型的原始模型存在差异,其原始模型的预定叶片数为4个,但可以预测,当采用本文方法建立四叶片模型的数值模拟时,其轴功取最大值和效率取最大值时的透平转速将会显著减小,优化透平结构以及透平区域流道结构可望实现更高效率的能量转换<sup>[13]</sup>。

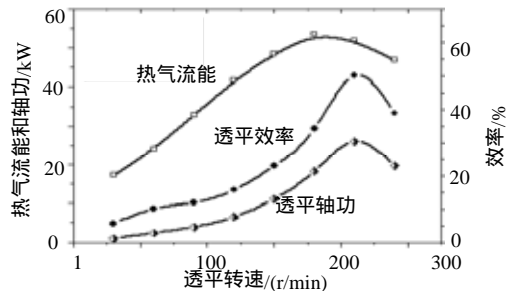


图 4 透平转速对西班牙模型透平的轴功与效率的影响  
Fig. 4 Effect of turbine rotate speed on the output power and efficiency of the Spanish prototype

由西班牙模型的数值模拟结果表明,随着透平转速的增加,系统出口平均速度减小,出口平均温度增加,透平压降增大,系统的热气流能、透平轴功和透平效率都存在一个峰值。模拟结果与自然对流式系统、轴流式透平的运行原理相符合,证明数值模拟方法是正确的,且本文模拟结果和西班牙模型的设计值相符,说明本文的数值模拟结果是有效的,设计方案是可行的。

#### 4.2 MW 级负载系统概念设计

为给中型规模或大规模太阳能热气流发电系统的设计提供参考,本文对负载条件下 MW 级太阳能热气流发电系统进行了概念设计和数值模拟。图 1 为 MW 级太阳能热气流发电系统透平模型。图 5~7 为负载条件下 MW 级太阳能热气流发电系统数值模拟的结果。

图5为MW级太阳能热气流发电系统模型烟囱出口参数随透平转速的变化关系。由图可见,该模型的出口参数随透平转速的变化趋势与图2中的变化趋势完全相同。随着透平转速的增加,系统流速减小比较显著,而出口温度变化也不明显。流速的显著变化来源于透平转速增大造成了显著阻力,而温度变化微弱的原因在于太阳能热气流发电系统的集热棚范围相当大,在整个集热棚内,系统有足够的时间将其内部流动的气体加热至一个较高的温度,因此,透平转速的变化不至于对系统出口温度产生显著的影响。

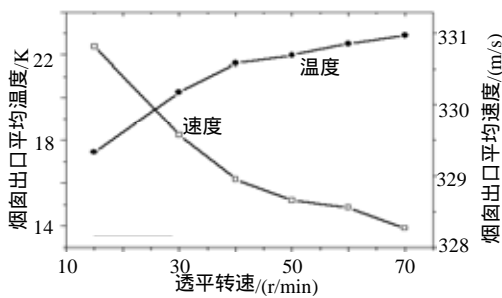


图5 透平转速对 MW 级电站模型烟囱出口参数的影响  
Fig. 5 Effect of turbine rotate speed on the chimney outlet parameters of the MW-graded solar chimney power plant system

图6显示了MW级太阳能热气流发电系统模型的透平压降和系统流量随透平转速之间的变化。从图中可以看到,当透平转速低于50r/min时,随着透平转速的增大,透平进出口压降显著增大,系统流量显著减小。但当透平转速高于50r/min时,透平进出口压降和系统流量变化平缓,这为MW级太阳能热气流发电系统的设计提供了重要依据,可以认为,采用本文设计的5叶片透平时,将透平转速定为50r/min左右,可望取得较高的系统输出功率和较高的能量转换效率。

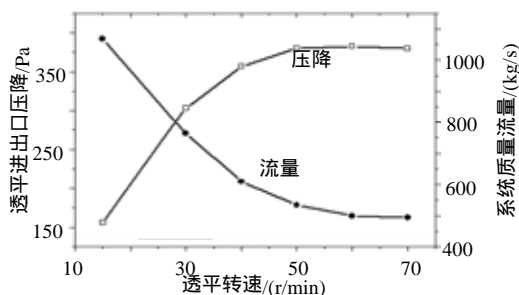


图6 透平转速对 MW 级电站模型透平压降和系统流量的影响

Fig. 6 Effect of turbine rotate speed on the pressure drop across the turbine and the mass flow rate of the MW-graded solar chimney power plant system

图7的计算结果正好印证了上述判断,当透平转速为50r/min时,其热气流能达到最大值,但此时的轴功和透平效率不是最大。当透平转速45r/min时,其最大轴功超过10MW,透平效率超过了50%。

需要指出,本文提出的5叶片透平模型只能给MW级太阳能热气流发电系统的设计提出一个参考,其翼型、密实比、尖速比等重要参数的选择和设计要经过进一步的优化<sup>[20]</sup>,同时对于大、中规模太阳能热气流发电系统,需要考虑采用多透平设计方案,但这将为数值计算可能带来更大的困难。本文的数值模拟方法和设计方法为负载条件下的太阳能热气流发电系统的设计提供一种可行方案。

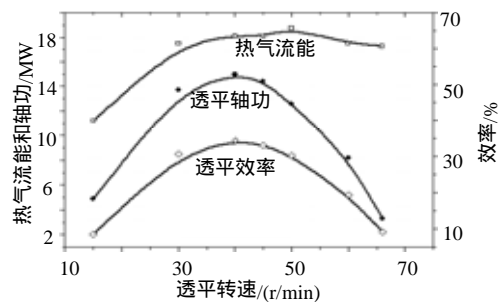


图7 透平转速对 MW 级电站模型透平的轴功与效率的影响

Fig. 7 Effect of turbine rotate speed on the output power and efficiency of the MW-graded solar chimney power plant system

## 5 结论

通过对负载条件下西班牙太阳能热气流发电系统进行数值模拟,计算结果发现:

(1) 随着透平转速的增大,系统的平均出口速度减小,平均出口温度升高,系统流量减小,透平压降增大,与太阳能热气流发电系统的运行原理相一致,透平轴功和透平效率存在一个峰值,且轴功最大值达到了西班牙模型的设计值,说明本文关于透平的设计方案可行,对包括透平的太阳能热气流发电系统数值模拟方法有效。

(2) 进一步对负载条件下 MW 级太阳能热气流发电系统进行了数值模拟,模拟结果变化趋势与西班牙模型相关计算结果的变化趋势相一致。当5叶片透平的转速为45r/min时,系统的最大轴功超过10MW,透平效率超过50%。

## 参考文献

- [1] Lodhi M A K . Application of helio-aero-gravity concept in producing energy and suppressing pollution[J] . Energy Conversion & Management, 1999, 40(4): 407-421 .
- [2] Gannon A J ,Backström T W . Solar chimney cycle analysis with system loss and solar collector performance[J] . Journal of Solar Energy Engineering, 2000, 122(3): 133-137 .
- [3] Ninic N . Available energy of the air in solar chimneys and the possibility of its ground-level concentration[J] . Solar Energy, 2006, 80(7): 804-811 .
- [4] Lodhi MAK , Mulaiman YM . Helio-aero-gravity electric power production at low cost[J] . Renewable Energy, 1992, 2(2): 183-189 .
- [5] Schlaich J ,Bergemann R ,Schiel W ,et al . Design of commercial solar updraft tower systems-utilization of solar induced convective flows for power generation[J] . ASME Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 127(1): 117-124 .
- [6] Bilgen E , Rheault J . Solar chimney power plants for high latitudes [J] . Solar Energy, 2005, 79(5): 449-458 .
- [7] Pretorius J P , Kröger D G . Critical evaluation of solar chimney power plant performance[J] . Solar Energy, 2006, 80(5): 535-544 .

- [8] Schlaich J, Mayr G, Haaf W. Aufwindkraftwerke-die demonstrationanlage in Manzanares/Spain[C]. The National Conference on Power Transmission, Hamburg, Ger., 1980.
- [9] Schlaich J. Aufwindkraftwerke das prinzip-der prototyp in spanien-zukunftsaussichten[J]. VGB Kraftwerkstechnik, 1983, 62(11): 926-929.
- [10] Haaf H, Friedrich K, Mayer G, et al. Solar chimneys [J]. International Journal of Solar Energy. 1983, 2(1): 3-20.
- [11] Kustrin I, Tuma M. Sončni dimnik[J]. Strojnicki Vestnik, 1985, 31(11): 309-314.
- [12] Gannon A J. Solar chimney turbine performance[D]. University of Stellenbosch, Matieland, South Africa, 2002.
- [13] Backstrom T W V, Gannon A J. Solar chimney turbine performance [J]. ASME J. Sol. Energy Eng. 2003, 125(1): 101-106.
- [14] Backstrom T W V, Gannon A J. Solar chimney turbine characteristics [J]. Solar energy, 2004, 76(1-3): 235-241.
- [15] Kirstein C F, Backstrom T W V. Flow through a solar chimney power plant collector-to-chimney transition section[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2006, 128(3): 312-317.
- [16] Serag-Eldin M A. Analysis of effect of turbine characteristics on performance of solar chimney plants[C]. The ASME Summer Heat Transfer Conference, San Francisco, CA, United States, 2005.
- [17] Bilgen E, Denantes F. Counter-rotating turbines for solar chimney power plants[J]. Renewable Energy, 2006, 31(12): 1873-1891.
- [18] Kirstein C F, Backstrom T W V, Kroger D G. Flow through a solar chimney power plant collector-to-chimney transition section[C]. The 2005 International Solar Energy Conference, Orlando, FL, United States, 2006.
- [19] 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.
- [20] 苏绍禹. 风力发电机设计与运行维护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [21] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [22] Pasumathi N, Sherif S A. Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model-part : mathematical model development[J]. International Journal of Energy Research, 1998, 22(3): 277-288.
- [23] Ming T Z, Liu W, Xu G L. Analytical and numerical investigation of the solar chimney power plant systems[J]. International Journal of Energy Research, 2006, 30(11): 861-873.

收稿日期：2007-05-24。

作者简介：

明廷臻(1976—)，男，博士，讲师，从事新能源利用与节能技术研究，mtzhen@163.com；

刘伟(1956—)，男，教授，博士生导师，主要从事多孔介质传热传质理论与应用，新能源利用与节能技术，电子器件散热与冷却技术研究；

许国良(1967—)，男，教授，主要从事稳燃稳焰技术，新能源利用与节能技术，数值计算方法研究。

(编辑 王剑乔)