

基于遗传算法的太阳能烟囱发电站结构优化

黄明华^{1,2}, 刘广新³, 何雅玲², 李安桂¹, 陶文铨²

(1. 西安建筑科技大学建筑设备科学与工程学院, 710055, 西安; 2. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安; 3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安)

摘要: 为了研究太阳能烟囱发电站的几何参数与其输出功率之间的关系,本文提出了一个考虑系统不可逆损失的太阳能烟囱发电站理论分析模型。首先用西班牙 Manzanares 太阳能烟囱试验电站的实验数据验证所建立的理论模型的可靠性,结果表明该理论模型能较好地预测系统输出功率,不考虑系统不可逆损失时系统输出功率会高约 24%。然后利用该理论模型对集热棚半径、烟囱高度和烟囱半径进行参数敏感性分析,结果表明:集热棚半径增大到一个“拐点”后建筑成本依然近似线性增长但系统各项性能变化不明显;增加烟囱高度要比增加集热棚半径更有助于系统输出功率和热效率的提高;烟囱半径增大到一定程度后系统输出功率趋于稳定,上升气流速度不断减小但系统质量流量显著增大。最后基于遗传算法利用提出的理论模型和建筑成本模型开发了太阳能烟囱发电站的多目标结构优化程序。对西班牙 Manzanares 太阳能烟囱试验电站进行结构优化,优化后总建筑成本是原型的 2.47 倍,但是输出功率可达到原型的 3.91 倍。该研究内容可为太阳能烟囱发电站的设计提供理论指导。

关键词: 太阳能烟囱发电站;结构优化;遗传算法

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202110001 **文章编号:** 0253-987X(2021)10-0001-10



OSID 码

Structural Optimization of Solar Chimney Power Plant by a Genetic Algorithm

HUANG Minghua^{1,2}, LIU Guangxin³, HE Yaling², LI Angui¹, TAO Wenquan²

(1. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: A theoretical model of solar chimney power plant (SCPP) considering the system irreversible losses is presented to study the relationship between the geometrical parameters and the output power of the SCPP. Firstly, the proposed theoretical model is verified with the experimental data of Manzanares SCPP in Spain. Results show that the model predicts the system output power well, and the output power of the system is overestimated by about 24% without taking the irreversible losses of the system into account. Then, the model is used to analyze the sensitivity parameters of the heat collection shed radius and the height and radius of the chimney. The results show that when the radius of the heat collection shed increases to an inflection point, the construction cost still increases approximately linearly, but the performance of the system does not change appreciably. Increasing the chimney height is more helpful to improve the output

power and thermal efficiency of the system than increasing the collector radius. When the chimney radius increases to a certain extent, the output power of the system tends to be stable, the updraft velocity keeps decreasing, but the mass flow rate of the system increases significantly. Finally, by using a genetic algorithm, multi-objective structural optimization programs of the SCPP are developed based the proposed theoretical model and the building cost model. Structural optimization of the Manzanares pilot power plant shows that the optimized total construction cost is 2.47 times that of the prototype, but the output power is 3.91 times that of the prototype. The research results can provide theoretical guidance for the design of the SCPP.

Keywords: solar chimney power plant; structure optimization; genetic algorithm

世界上第一座太阳能烟囱发电站(SCPP)的设计是由德国科学家 Schlaich 在 20 世纪 70 年代末提出的,并于 1981 年由他及其团队设计和建造完成^[1]。该电站位于西班牙的 Manzanares 附近,峰值功率为 50 kW,太阳能集热棚半径为 122 m,烟囱高度 194.6 m,烟囱直径 10 m。Manzanares 试验电站在 1982—1986 年间成功地运行了 36 个月后在一场大风中被吹倒至今未能重建。Haaf 在 1984 年发表了该电站的初步测试结果^[2],证实了太阳能烟囱发电技术的可行性。太阳能烟囱发电站的示意图见图 1。

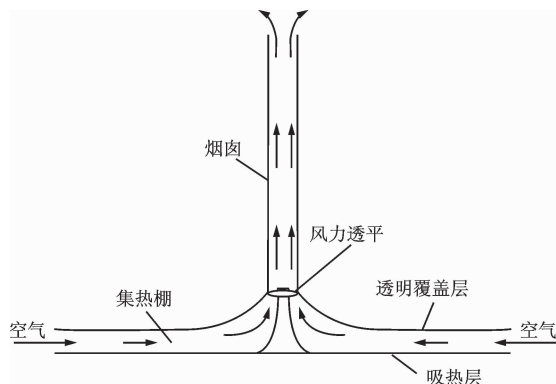


图 1 太阳能烟囱发电站示意图

Fig.1 A schematic diagram of the SCPP

太阳能烟囱发电站由集热棚、风力透平和烟囱组成(图 1),其中的物理过程大致可分为四个阶段:首先,入射和散射的太阳辐射通过集热棚的透明覆盖层投入到地面吸热层,地面下一定厚度的土壤被太阳能加热,一定量的热能被储存在土壤层,此外集热棚顶部和底部之间还发生辐射换热;空气流过地表被加热,内能增加导致温度升高、密度降低,受热空气与周围环境的温差和烟囱高度所产生的浮力驱动,空气由四周流向集热棚中心;热气流的动能驱动风力透平发电机组产生电能;最后热气流通过烟囱排向环境。

为了收集足够多的太阳能用来发电,太阳能烟囱发电站需要巨大的集热棚和较高的烟囱。相比于一般的能源建筑,这种大型的建筑结构更需要合理的设计。为了研究各种环境条件和几何参数对太阳能烟囱发电站性能的影响,学者们已经建立了各种数学与实物模型。Pasumarthi 和 Sherif 在美国佛罗里达州搭建了 3 个小型太阳能烟囱模型,并报告了实验数据以评估太阳能烟囱概念的可行性,同时开发了一个理论模型来研究各种环境条件和几何形状对系统内空气温度、风速和太阳能烟囱输出功率的影响^[3-4]。Padki 等开发了一个简单的数学理论模型来研究各种几何参数和环境参数对太阳能热气流烟囱性能的影响^[5]。Gannon 等使用一个简单的太阳能集热器模型结合系统内空气的热力循环分析对太阳能烟囱系统的损失进行了分析,包括烟囱的摩擦、风力透平和烟囱出口的动能损失^[6]。文献[7-10]提出了不同的理论模型用于分析太阳能烟囱发电站。近十几年来,一些研究者利用 CFD(computational fluid dynamics)方法,在求解质量、动量和能量耦合方程的基础上,研究几何参数对太阳能烟囱发电站的影响^[11-17]。CFD 方法虽能得到太阳能烟囱系统内详细的物理场分布,但是较理论模型分析法需要更多的计算时间。而以上关于几何参数分析的研究中只是对几何参数分别进行敏感性研究,没有使用特定的优化技术研究最佳的几何参数组合。文献[18-20]应用遗传算法对太阳能烟囱发电站进行结构优化,将预测太阳能烟囱发电站输出功率的理论模型和建筑成本模型结合,以输出功率最大和建筑成本最低为目标对太阳能烟囱发电站进行结构优化,研究表明遗传算法对太阳能烟囱发电站的设计和优化是一种非常有用的方法。但上述文献采用的太阳能烟囱发电站输出功率的理论预测模型均不考虑系统不可逆损失。

本文在前人研究的基础上,依据工程经验提出

了一种新的考虑系统不可逆损失的理论模型,并利用西班牙 Manzanares 太阳能烟囱试验电站的实验数据进行了验证。然后开发了基于遗传算法的太阳能烟囱发电站的多目标结构优化程序,以系统输出功率和建筑成本为目标函数,以集热棚半径、烟囱高度和烟囱半径为设计变量对太阳能烟囱发电站进行结构优化研究。

1 理论模型

本文依据热力学第一定律和太阳能烟囱发电系统的能量守恒定律建立数学模型。太阳能烟囱发电站从集热棚进口到风力透平完成由太阳能向电能的转化。如果忽略烟囱内空气温度和密度的变化,则可通过分析集热棚内的能量转换建立数学模型。集热棚内能量转换示意图如图 2 所示。

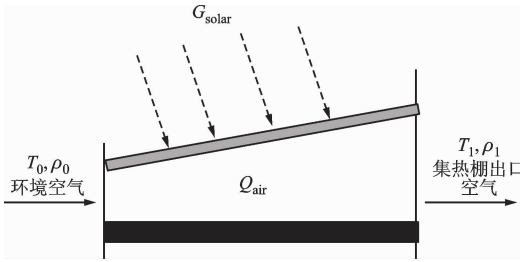


图 2 集热棚内能量转换示意图

Fig. 2 A schematic diagram of energy conversion in the collector

数学模型假设如下:太阳辐照恒定,且均匀照射地面;环境大气温度恒定;集热棚内空气温度不随高度变化;烟囱内空气温度不变。

太阳能热气流烟囱发电站的集热棚是一个巨大的空气集热器,其底面吸收太阳辐射而温度升高,加热了流过集热棚的空气使空气内能增加。集热棚内空气内能的增加量记为 Q_{air} ,可表示为

$$Q_{\text{air}} = \eta_{\text{coll}} A_{\text{coll}} G_{\text{solar}} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (1)$$

式中: η_{coll} 为集热棚热转换效率; A_{coll} 为集热棚面积, m^2 ; G_{solar} 为环境太阳辐照, W/m^2 ; $\dot{m}$ 为空气质量流量, kg/s ; c_p 为空气的比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ΔT 为集热棚内温升, K ,可表示为 $\Delta T = T_1 - T_0$, T_0 、 T_1 分别为集热棚进出口平均温度。集热棚热转换效率可通过经验公式估算^[21]

$$\eta_{\text{coll}} = \alpha_{\text{eff}} - h_{\text{eff}} \frac{\Delta T}{G_{\text{solar}}} \quad (2)$$

式中: α_{eff} 为集热棚对太阳辐射的有效吸收比; h_{eff} 为反映环境对流和辐射的热损失系数,单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

由质量守恒可知,集热棚内的空气质量流量等于烟囱中的空气质量流量,可表示为

$$\dot{m} = \rho_1 u_{\text{ch}} A_{\text{ch}} = \pi \rho_1 u_{\text{ch}} R_{\text{ch}}^2 \quad (3)$$

式中: ρ_1 为集热棚出口空气密度; u_{ch} 为烟囱内空气流速, m/s ; A_{ch} 为烟囱横截面积, m^2 ; R_{ch} 为烟囱半径, m 。

集热棚进出口空气的温差导致密度变化从而产生浮力,同时由于烟囱的抽吸作用导致压强差 ΔP_{tot} ,计算公式为

$$\Delta P_{\text{tot}} = \left| g \int_0^{H_{\text{ch}}} (\rho_{\text{ex}} - \rho_{\text{in}}) dh \right| \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度,取 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; H_{ch} 为烟囱高度, m ; ρ_{ex} 和 ρ_{in} 分别为高度 h 处的环境空气密度和太阳能烟囱内空气密度, kg/m^3 。由于模型假定环境空气温度不变,烟囱内空气温度不变,因此有

$$\Delta P_{\text{tot}} = (\rho_0 - \rho_1) g H_{\text{ch}} \quad (5)$$

结合自然对流的 Boussinesq 假设^[22-23]

$$\rho_0 - \rho_1 = \rho_0 \beta \Delta T \quad (6)$$

式中: ρ_0 为环境空气密度; β 为热膨胀系数,对于理想气体常取 $\beta = 1/T_0$,单位为 K^{-1} 。因此,太阳能热气流烟囱系统可产生的压强差可表达为

$$\Delta P_{\text{tot}} = \rho_0 g H_{\text{ch}} \frac{\Delta T}{T_0} \quad (7)$$

如果烟囱内不安装风力透平,则烟囱内能产生的最大空气流速为

$$u_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{\text{tot}}}{\rho_1}} \quad (8)$$

但当系统中有风力透平工作时,一部分空气内能转化为机械能,系统总压强差和透平压降的关系可表示为

$$\Delta P_{\text{turb}} = \Delta P_{\text{tot}} - \frac{1}{2} \rho_1 u_{\text{ch}}^2 \quad (9)$$

太阳能烟囱发电站的输出功率为透平压降与体积流量的乘积,如下式所示

$$P_{\text{shaft}} = \Delta P_{\text{turb}} A_{\text{ch}} u_{\text{ch}} \quad (10)$$

为了评估太阳能烟囱发电站的输出功率,研究人员定义透平压降与系统总压强差之比,定义 f_{opt} 为实现系统最大发电量的最优透平压降比,则透平压降和系统压强差的关系又可表示为

$$\Delta P_{\text{turb}} = f_{\text{opt}} \Delta P_{\text{tot}} \quad (11)$$

文献[24-26]对 f_{opt} 的取值进行了研究,很多研究者在假设加入透平后集热棚内温差变化不大的情况下,将式(8)(9)代入式(10),可得

$$P_{\text{shaft}} = \frac{1}{2} \rho_1 (u_{\text{max}}^2 - u_{\text{ch}}^2) A_{\text{ch}} u_{\text{ch}} \quad (12)$$

对式(12)中的 u_{ch} 求导并对输出功率取极值 $\frac{\partial P_{\text{shaft}}}{\partial u_{\text{ch}}} =$

$u_{\text{max}}^2 - 3u_{\text{ch}}^2 = 0$ 可得

$$u_{\text{ch}} = \frac{u_{\text{max}}}{\sqrt{3}} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{\text{tot}}}{3\rho_1}} \quad (13)$$

可以看出当烟囱内空气流速为 $u_{\text{max}}/\sqrt{3}$ 时, 太阳能烟囱发电站的输出功率有最大值, 代入式(9)和式(11)可得最优透平压降比 $f_{\text{opt}} = 2/3$ 。但文献[24-26]指出, 实际情况中透平压降变化引起系统流量的变化, 集热棚内温升也会变化, 在耦合了系统流量和透平压降之后提出了更高的 f_{opy} 。

结合式(1)~(11)可得太阳能烟囱发电系统的理论最大输出功率

$$P_{\text{shaft, max}} = f_{\text{opt}} \frac{\rho_0}{\rho_1} \frac{gH_{\text{ch}}}{c_p T_0} \eta_{\text{coll}} A_{\text{coll}} G_{\text{solar}} \quad (14)$$

由式(14)可以看出, 系统输出功率与几何参数、空气状态参数和太阳辐照量有关。

实际上, 太阳能烟囱系统内会不可避免地产生不可逆能量损失。如何定量地表示太阳能热气流烟囱发电系统的实际输出功率呢? 本文借鉴工程上常用的处理方式, 用风力透平的效率来表示输出机械能和输入机械能的比值, 将系统的局部损失表示为动能的某一倍数, 这一倍数被称为阻力系数。主要的能量损失包括: 进入烟囱弯管的局部损失、烟囱沿程的阻力损失和烟囱出口的突扩局部损失。太阳能烟囱发电站的实际输出功率可表示为

$$P_{\text{shaft}} = \left[\Delta P_{\text{tot}} - (1 - \eta_{\text{turb}}) \Delta P_{\text{turb}} - \left(1 + \lambda \frac{H_{\text{ch}}}{d_{\text{ch}}} + \xi \right) \frac{\rho_1 u_{\text{ch}}^2}{2} \right] A_{\text{ch}} u_{\text{ch}} \quad (15)$$

式中: η_{turb} 为风力透平的机械效率; λ 为沿程阻力系数; d_{ch} 为烟囱当量直径, 对于圆柱形烟囱而言即为烟囱内径; ξ 为局部阻力系数。

太阳能烟囱发电站系统的实际输出功率也可表示为

$$P_{\text{shaft}} = \eta_{\text{turb}} f_{\text{opt}} \Delta P_{\text{tot}} A_{\text{ch}} u_{\text{ch}} \quad (16)$$

联合式(15)和式(16), 可求出烟囱中实际上升气流速度 u_{ch} 为

$$u_{\text{ch}} = \sqrt{\frac{2(1 - f_{\text{opt}}) \Delta P_{\text{tot}}}{\rho_1 \left(1 + \lambda \frac{H_{\text{ch}}}{d_{\text{ch}}} + \xi \right)}} \quad (17)$$

对比式(8)烟囱内能产生的最大空气流速和式(17)可知, 由于风力透平发电和系统不可逆损失的存在, 烟囱中上升气流的速度减小。

2 基于遗传算法的太阳能烟囱发电站结构优化

2.1 目标函数和决策变量

太阳能热气流烟囱发电站设计的主要目标是实现发电量最大化, 由公式(14)可以看出, 影响系统发电量(即输出功率)的因素有太阳辐照、工质的初状态、终状态和系统几何结构。而工质的初状态、终状态又和太阳辐照相关, 系统的几何结构又决定着太阳辐照的吸收量, 所以在太阳辐照和环境温度不变的情况下, 影响系统发电量的变量为系统的几何结构参数, 包括集热棚半径、烟囱高度和烟囱半径。

文献[18-20]的研究表明, 如果只考虑最大化的电能输出, 则不存在最优的结构配置。这一点很容易理解, 因为集热棚越大, 烟囱越高, 产生的系统抽力越大, 输出的电功率也就越大。但实际上又不可能建造一个集热棚无限大的太阳能热气流烟囱, 因为在考虑太阳能烟囱结构优化时应考虑其经济效益。太阳能烟囱发电站往往结构巨大, 建设投入成本高, 但由于太阳能烟囱发电站目前没有商业化的运行装置, 很难收集到其实际运行中的成本和收益数据, 因此本文采用 Pretorius 等提出的简单的太阳能烟囱成本模型^[27], 仅考虑其投入的建筑成本, 不考虑土地成本、维护成本和后期盈利效益。所有的建筑投入资本成本均以货币单位 U 定义。定义特定资本成本(E_{sc})为每立方米烟囱容积的成本, 取 1 U, $E_{\text{sc}} = 1 \text{ U/m}^3$ 。假定烟囱高度每增加 1 m 平均烟囱厚度就增加 1 mm, 则烟囱的资本成本可以表示为

$$E_{\text{ch}} = (\pi/4) [(D_{\text{ch}} + 0.001 H_{\text{ch}})^2 - D_{\text{ch}}^2] H_{\text{ch}} E_{\text{sc}} \quad (18)$$

对于集热棚成本, 定义每平方米的成本为 p_{coll} E_{sc} , 而集热棚高度每增加 1 m, 成本增加的百分比为 p_{Hcoll} , 集热棚的总成本可以按下式计算

$$E_{\text{coll}} = (1 + p_{\text{Hcoll}} H_{\text{coll}}) A_{\text{coll}} p_{\text{coll}} E_{\text{sc}} \quad (19)$$

其中, 参考文献[20]对 p_{coll} 和 p_{Hcoll} 均取 8%。

风力透平的成本可取烟囱和集热棚投资成本之和的百分比, 定义百分比参数为 p_{turb} , 则风力透平成本可表示为

$$E_{\text{turb}} = p_{\text{turb}} (E_{\text{ch}} + E_{\text{coll}}) \quad (20)$$

其中, 参考文献[20]对 p_{turb} 取 10%。

太阳能热气流烟囱发电站的总投入成本为

$$E_{\text{scpp}} = E_{\text{ch}} + E_{\text{coll}} + E_{\text{turb}} \quad (21)$$

公式(15)和(21)组成了太阳能热气流烟囱发电站结构优化的多目标函数, 决策变量为集热棚半径、

烟囱高度和烟囱半径。实际上,公式(19)中还包含了集热棚高度,但是集热棚高度太高时入口流速太小,容易受环境风干扰,而且考虑设备和人员进入也不宜太低,所以集热棚高度一般不会有较大的选择范围,故在结构优化时可根据实际用途把集热棚高度设为定值。优化的目标是希望建筑投入成本最低,电功率输出最大。显而易见,这两个目标是相互矛盾的,因此存在最优解,而且目标函数和决策变量为非线性化关系。对于非线性问题的优化,一般的梯度优化算法容易产生局部最优解,因此本文采用更为先进的遗传算法来进行结构优化。

2.2 遗传算法

进化算法是参考达尔文的进化论和孟德尔的遗传学说,从包括遗传、基因突变、自然选择和杂交等生物进化的部分现象发展而来的。在优化问题中,进化算法应用迭代随机搜索策略来找到最佳解决方案。遗传算法是进化算法的一种,通过模仿自然界生物进化机制,发展出了自适应全局随机搜索和优化的方法。通过设计个体种群,每个个体由决策变量(集热棚半径、烟囱高度和烟囱半径)的取值确定。种群中个体的好坏用适应度函数(输出功率最大和建筑成本最小)来评价,适应度越高的个体质量越高。给定种群通过个体间选择、交叉和变异进行进化并向增加整体适应度的方向发展。种群不断进化那么最终总能找到最优的解。遗传算法与常规优化方法相比主要有三个方面的优势:

(1)与其他传统方法从单个点进行搜索不同,遗传算法从一组点进行并行搜索,因此,遗传算法可以潜在地避免陷入任何本地解决方案点;

(2)遗传算法考虑概率命令,而不是确定性规则;

(3)遗传算法仅使用从目标函数获得的相关信息,而无需考虑其他辅助信息,表现出良好的健壮性。

本文利用遗传算法对西班牙 Manzanares 试验电站进行结构优化,集热棚半径为 100~200 m,烟囱高度为 150~250 m,烟囱半径为 2~30 m,有两个优化目标即建筑成本最小和系统的输出功率最大。由于这两个目标是矛盾的,一个解在某个目标上是最好的,在另一个目标上可能是最差的,因此,优化后得到一组目标函数最优解的集合(Pareto 最优集),最优集在空间上形成的曲面称为 Pareto 前沿面。本文在第 3 节将从 Pareto 前沿面中选择最佳解。值得指出的是,遗传算法并不一定是最优的优化算法,后续的工作中可以通过比较不同的优化算法,如粒子群优化算法(PSO),来筛选出一个最优

的算法。

3 结果讨论与分析

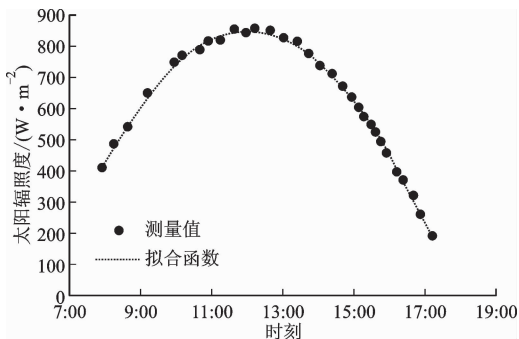
3.1 模型验证

为了验证本文所建立的理论模型,本节将理论模型的计算结果和西班牙 Manzanares 试验电站的测量结果进行了比较。文献[2]给出了当地 1982 年 9 月 2 日的太阳辐照度和环境温度,如图 3 所示。图中虚线表示对太阳辐照度和环境温度测量值进行多项式拟合的结果,使其作为理论计算的输入条件更加方便。太阳辐照度和环境温度的拟合参数 R^2 分别为 0.997 和 0.990,拟合函数为

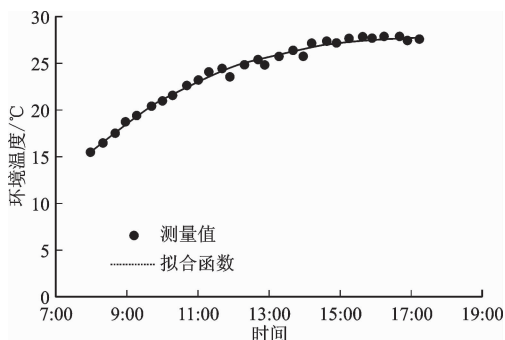
$$G = -25.67t^2 + 619.77t - 2\,894.5 \quad (22)$$

$$T_0 = 0.008\,7t^3 - 0.498\,1t^2 + 9.530\,7t - 33.243 \quad (23)$$

文献[2]记录了 1982 年 9 月 2 日 Manzanares 试验电站集热棚内温升、烟囱内流速和风力发电机组实际输出功率的实测值。本文用理论模型的计算值与实验测量值进行比较,在理论计算中取 8~17 时每个整点的太阳辐照度和环境温度,风力透平效率和 f_{opt} 参考文献[2]分别取 75% 和 2/3,沿程阻力系数



(a) 太阳辐照度



(b) 环境温度

图 3 西班牙 Manzanares 试验电站在 1982 年 9 月 2 日的气象条件^[2]

Fig. 3 Meteorological conditions at the Manzanares pilot plant in Spain on 2 September, 1982^[2]

和局部阻力系数按照工程经验分别取 0.011 和 0.2。

图 4 比较了烟囱内风速、集热棚内温升和风力发电机组实际输出功率的测量值和理论计算值。可以看出,3 个参数理论计算值和测量值变化趋势一致,但是理论计算值的变化更加平滑,而测量值则呈现明显的峰谷波动,尤其是烟囱内风速。这是因为理论模型假设环境状态是稳定不变的,而在太阳能热气流烟囱实际工作中,其性能受瞬变的大气环境和地面环境影响很大。从图 4 还可以发现,理论计算值和测量值在某些时刻较为接近而某些时刻偏差

较大。由于理论计算中取 8~17 时每个整点的环境参数,因此本文选择对 8~17 时每个整点的理论计算值和测量值进行比较。8 时烟囱内风速、集热棚内温差和输出功率的误差最大分别为 32.99%、43.76%和 51.85%。对比这 10 个整点的理论计算值和测量值,以误差 15%为阈值,烟囱内风速、集热棚内温差和输出功率的误差小于 15%的比率分别为 50%、80%和 70%。因此可以认为本文提出的理论模型对太阳能热气流烟囱发电系统的预测是合理有效的。对比图 3 和图 4 可以发现,太阳能热气流烟囱发电站的集热棚温升、烟囱内风速和输出功率与太阳辐射的大小呈正相关,且在正午时均有最大值。

图 5 比较了理论计算的最大输出功率和考虑不可逆损失后理论计算的输出功率。理论计算最大输出功率比理论计算实际输出功率平均约高 24%。因此在太阳能烟囱发电站的实际设计中,要合理考虑热气流流动过程中各项不可逆损失。

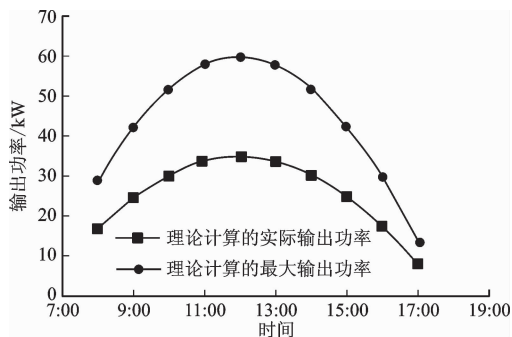


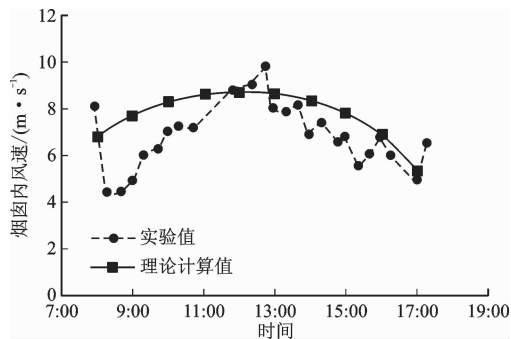
图 5 理论计算的最大输出功率和理论计算的输出功率比较

Fig. 5 A comparison of the theoretical maximum output and the theoretical actual output

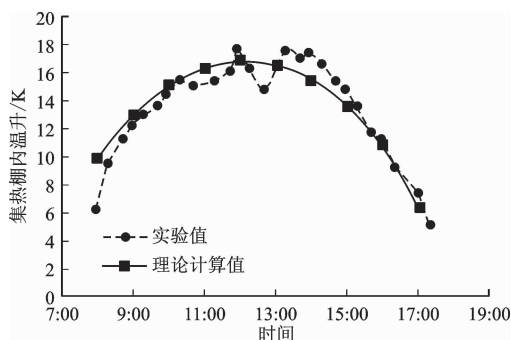
3.2 参数敏感性分析

本节研究集热棚半径、烟囱高度和烟囱半径对太阳能烟囱各性能指标及经济成本的影响。以西班牙 Manzanares 试验电站为原型,太阳辐射取固定值 850 W/m^2 ,环境温度为 300 K 。

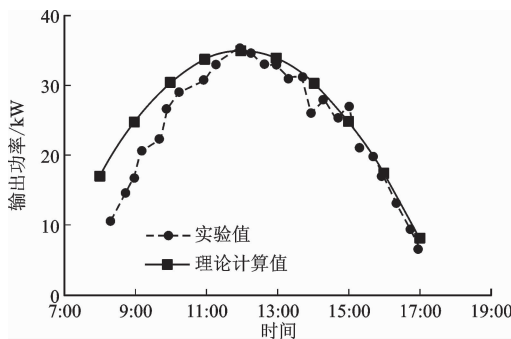
当集热棚半径为 $40 \sim 2\,500 \text{ m}$ 时,集热棚半径对太阳能热气流烟囱性能和经济指标的影响如图 6 所示。增大集热棚半径则系统吸热能力增强,因此集热棚内空气温升、上升气流速度、系统输出功率均增加;相应地,质量流量、热效率和成本也增加。值得注意的是,当集热棚半径增大到一定程度时会出现明显“拐点”,“拐点”之后继续增大集热棚半径对系统温升、上升气流速度、输出功率、质量流量和热效率的影响越来越小,而成本依然近似线性增长。



(a) 烟囱内风速



(b) 集热棚内温升

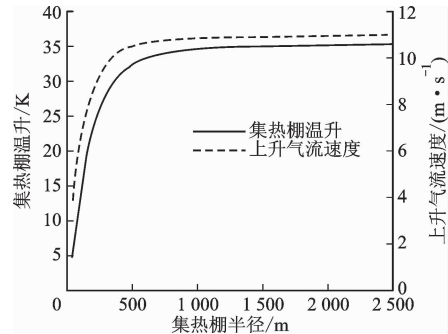


(c) 发电机组输出功率

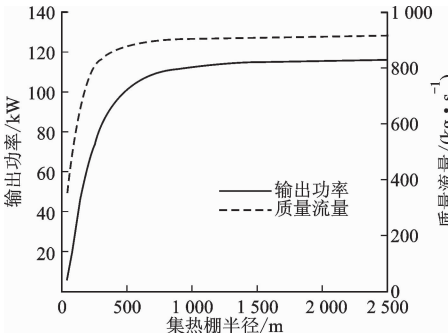
图 4 西班牙 Manzanares 试验电站测量值和理论计算值的比较

Fig. 4 A comparison of measured values and theoretical calculating values of the Manzanares pilot plant in Spain

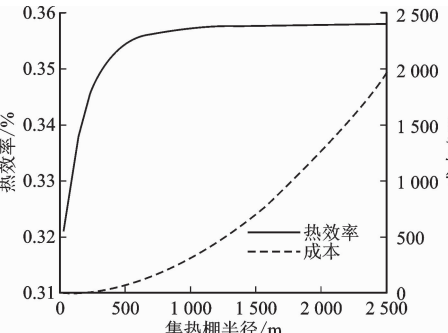
如图 6 所示,“拐点”大致在集热棚半径为 450~600 m 处,当集热棚半径为 500 m 时,集热棚温升为 32.38 K,上升气流速度为 10.45 m/s,输出功率为 101.53 kW,质量流量为 877.57 kg/s,系统热效率为 0.35%,建筑成本为 80.01 kU。



(a)集热棚内温升和上升气流速度



(b)系统输出功率和质量流量



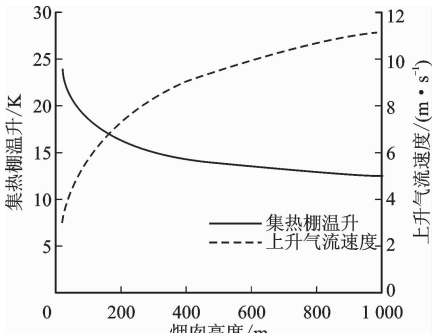
(c)系统热效率和成本

图 6 集热棚半径对太阳能烟囱发电站性能和经济指标的影响

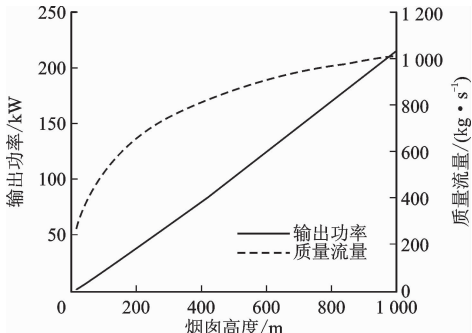
Fig. 6 Influence of the radius of the collector on the performance and economic index of SCPP

烟囱高度是太阳能热气流烟囱系统设计中的一个重要参数,烟囱高度为 20~1 000 m 时其对电站的影响如图 7 所示。增加烟囱高度,则系统抽力增强,因此上升气流速度和系统输出功率增加,相应地,质量流量、热效率和成本也增加。而当集热棚面积不变时,进气量的增加会导致集热棚内空气温升

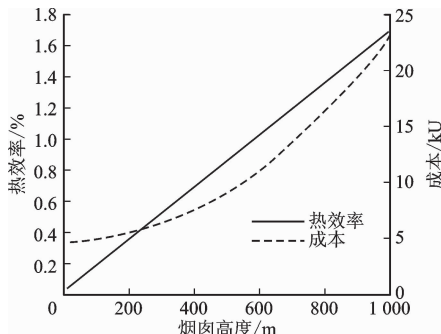
不断降低。由公式(8)和(14)可以看出,上升气流速度主要受 $\sqrt{H_{ch}}$ 影响而输出功率主要受 H_{ch} 影响,因此如图 7b 所示输出功率与 H_{ch} 几乎成线性关系。对比图 6,增加烟囱高度要比增加集热棚半径更有助于系统输出功率和热效率的提高,同时增加烟囱高度的成本也小于增加集热棚面积的成本。但需要指出的是,超高烟囱建造需要考虑飞机飞行安全、高空风环境和地震等自然灾害的因素,因此虽然理论上提高烟囱高度有助于提高能源利用率,但是在实际建造中需要结合实际情况对烟囱高度有一定的限制。



(a)集热棚内温升和上升气流速度



(b)系统输出功率和质量流量

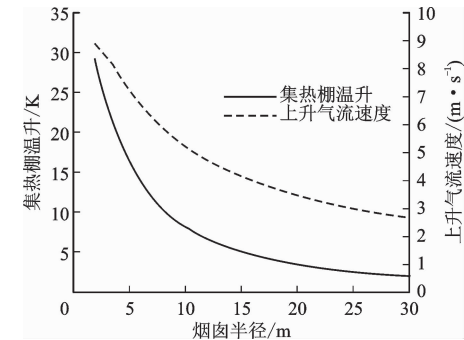


(c)系统热效率和成本

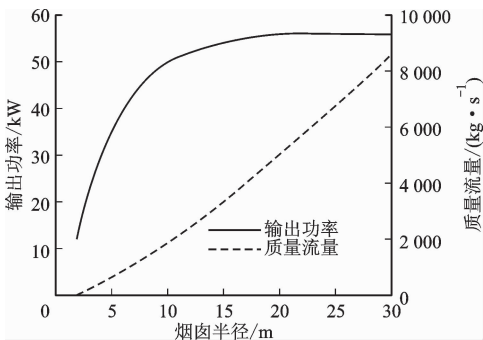
图 7 烟囱高度对太阳能烟囱发电站性能和经济指标的影响

Fig. 7 Influence of the height of the chimney on the performance and economic index of SCPP

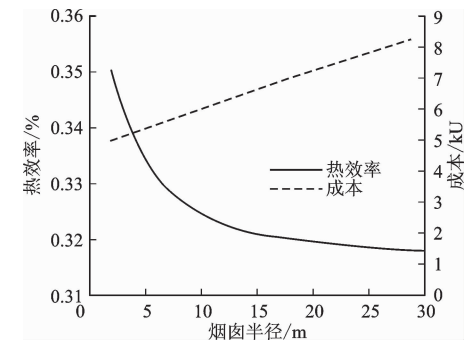
图 8 给出了烟囱半径对系统性能和经济指标的影响。烟囱半径为 2~30 m 时,增加烟囱的半径会引起系统输出功率、质量流量和建筑成本增加,而集热棚温升、上升气流速度和系统热效率减小。随着烟囱半径的增大,系统输出功率逐渐趋于稳定,意味着对于太阳能热气流烟囱发电系统而言,烟囱半径存在一个最优值。此外值得注意的是,增大烟囱半径虽然会使上升气流速度降低但从公式(3)可以看出,系统质量流量与 $u_{ch}R_{ch}^2$ 有关,因此虽然上升气流速度降低但烟囱半径不断增大将使系统质量流量显著增加。所以在以系统的流量大为目标的应用中,应适当增加烟囱半径。



(a)集热棚内温升和上升气流速度



(b)系统输出功率和质量流量



(c)系统热效率和成本

图 8 烟囱半径对太阳能热气流烟囱性能和经济指标的影响
Fig. 8 Influence of the radius of the chimney on the performance and economic index of SCPP

3.3 结构优化

本节以西班牙 Manzanares 试验电站为原型进行太阳能烟囱发电站结构优化,以系统输出功率最大和总建筑成本最小为目标函数,以集热棚半径、烟囱高度和烟囱半径为决策变量,环境参数和决策变量范围见表 1。图 9 为西班牙试验电站的最优解(Pareto)前沿面,点 A 和点 B 分别是经济角度和系统输出功率的最优解点,点 C 为输出功率最大、总建筑成本最低的理想点,系统显然不能在此条件下运行,点 D 作为最接近理想点的点,可以认为是系统有效运行且关联成本最优的最佳解点。在实际设计中,设计者可以根据实际情况选择 Pareto 前沿面上的任何一点。

表 1 结构优化环境参数和决策变量范围

Table 1 Environmental parameters and range of decision variables for structural optimization

参数	数值
太阳辐照度/($W \cdot m^{-2}$)	850
环境温度/K	300
R_{coll}/m	100~200
H_{ch}/m	150~250
R_{ch}/m	2~30

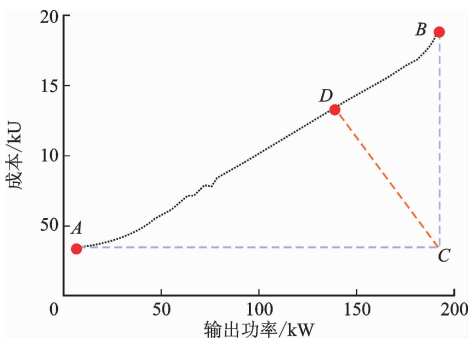


图 9 最优解(Pareto)前沿面

Fig. 9 Pareto frontier

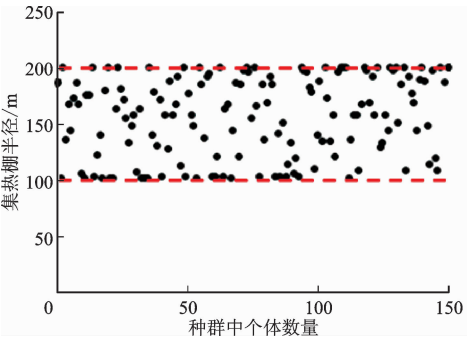
表 2 列出了西班牙试验电站原型与最佳解点 D 的比较结果。可以看出,结构优化后的建筑要比西班牙试验电站原型大,优化后的总建筑成本是电站原型的 2.47 倍,但是输出功率是原来的 3.91 倍。

为了更好地了解各参数的最佳取值范围,图 10 给出了 Pareto 前沿面代表的最优种群中的最优设计参数的散点分布,图中虚线表示决策变量的极限值。由图可知,集热棚半径的最优解点分布在设定的集热棚半径的整个范围内;烟囱高度的最优解点趋于最大值(上界 250 m),87% 的最优解点的烟囱

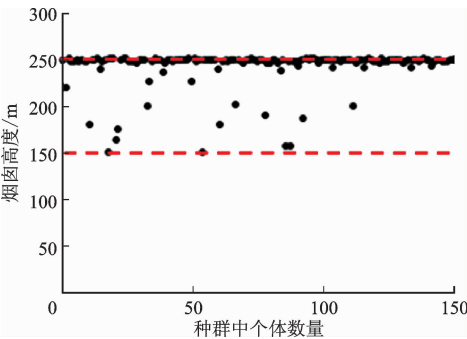
高度大于 240 m;而烟囱半径的最佳范围主要集中在 5~15 m,在该范围内最优解点的分布率为 59%。

表 2 原型电站和最佳解(点 D)的比较

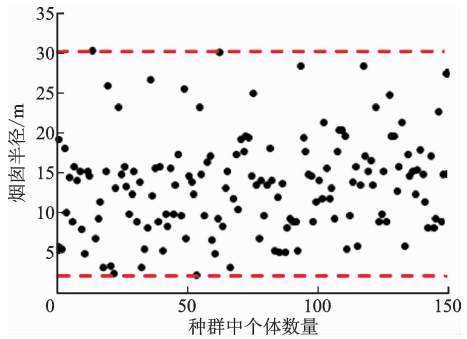
Table 2 A comparison of the prototype SCPP and the optimal solution (point D)		
参数	原型	最佳解
R_{coll}/m	122	178.50
H_{ch}/m	194.6	249.99
R_{ch}/m	5.08	14.97
热效率/%	0.33	0.42
输出功率/kW	35.56	139.19
建筑成本/kU	5.39	13.29



(a)Pareto 前沿面中集热棚半径的散点分布



(b)Pareto 前沿面中烟囱高度的散点分布



(c)Pareto 前沿面中烟囱半径的散点分布

图 10 最优设计参数的散点分布

Fig. 10 Scatter distribution of optimal design parameters

4 结 论

(1)比较了不考虑系统内不可逆损失的太阳能烟囱发电站理论最大输出功率和考虑不可逆损失后理论计算的输出功率,发现理论计算的最大输出功率比理论计算的输出功率平均高约 24%,理论计算的输出功率与实验测量值接近。

(2)在其他参数不变的情况下,随着集热棚半径的增大,太阳能烟囱系统的温升、上升气流速度、输出功率、质量流量和热效率均增长,但是集热棚半径增大到一个“拐点”后系统各项性能变化不明显,而投入成本依然近似线性增长。

(3)增加烟囱高度要比增加集热棚半径更有助于太阳能烟囱系统输出功率和热效率的提高,同时增加烟囱高度的成本也小于增加集热棚面积的。

(4)随着烟囱半径的增大,系统输出功率的增长会趋于稳定,说明对于太阳能烟囱发电系统而言,烟囱半径存在一个最佳值。另外烟囱半径的增大会使上升气流速度降低但质量流量显著增大。

(5)对西班牙 Manzanares 试验电站进行结构优化,优化后的最佳集热棚半径、烟囱高度和烟囱半径分别为 178.50、249.99、14.97 m。优化后总建筑成本是西班牙试验电站原型的 2.47 倍,但是输出功率可达到原型的 3.91 倍。

参考文献:

[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(1): 3-20.

[2] HAAF W. Solar chimneys; part II preliminary test results from the Manzanares pilot plant [J]. International Journal of Sustainable Energy, 1984, 2: 141-161.

[3] PASUMARTHI N, SHERIF S A. 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.

[4] PASUMARTHI N, SHERIF S A. Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model; part II experimental and theoretical results and economic analysis [J]. International Journal of Energy Research, 1998, 22(5): 443-61.

[5] PADKI M M, SHERIF S A. On a simple analytical model for solar chimneys [J]. International Journal of

- Energy Research, 1999, 23: 345-349.
- [6] GANNON A J, VON BACKSTRÖM T W. Solar chimney cycle analysis with system loss and solar collector performance [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2000, 122: 133-137.
- [7] BERNARDES M A D S, VOB A, WEINREBE G. Thermal and technical analyses of solar chimneys [J]. International Journal of Solar Energy, 2003, 75(6): 511-524.
- [8] BERNARDES M A D S, VON BACKSTRÖM T W, KRÖGER D G. Critical evaluation of heat transfer coefficients applicable to solar chimney power plant collectors [C] // Proceedings of ISES Solar World Congress 2007: Solar Energy and Human Settlement. Berlin, Germany: Springer, 2007: 1706-1713.
- [9] ZHOU Xinping, YANG Jiakuan, XIAO Bo, et al. Simulation of a pilot solar chimney thermal power generating equipment [J]. Renewable Energy, 2007, 32(10): 1637-1644.
- [10] LI Jingyin, GUO Penghua, WANG Yuan. Effects of collector radius and chimney height on power output of a solar chimney power plant with turbines [J]. Renewable Energy, 2012, 47: 21-28.
- [11] VIEIRA R S, GARCIA C, JUNIOR I C A, et al. Numerical study of the influence of geometric parameters on the available power in a solar chimney [J]. Thermal Engineering, 2015, 14(1): 103-109.
- [12] PATEL S K, PRASAD D, AHMED M R. Computational studies on the effect of geometric parameters on the performance of a solar chimney power plant [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 77: 424-431.
- [13] CAO Q F, HUANG M H, KUEHN T H, et al. Urban-scale SALSCS: part II a parametric study of system performance [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2018, 18: 2879-2894.
- [14] 毛宏举, 李戡洪. 集热棚对太阳能烟囱发电系统效率的影响 [J]. 可再生能源, 2006(6): 6-9.
MAO Hongju, LI Jianhong. Analyses on collector influence on efficiency of solar chimney power plant [J]. Renewable Energy, 2006(6): 6-9.
- [15] 范振河, 刘发英. 太阳能烟囱发电系统的 CFD 模拟研究 [J]. 可再生能源, 2009(4): 7-9.
FAN Zhenhe, LIU Faying. CFD Simulation research on solar chimney power system [J]. Renewable Energy, 2009(4): 7-9.
- [16] 姚昌模, 陈凌希. 烟囱形状及集热棚结构参数对太阳能烟囱发电系统流动与传热特性的影响 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(24): 74-79.
YAO Changmo, CHEN Lingxi. Influence of structure parameter of solar collector and chimney on the flow and heat transfer characteristics of solar chimney power plant system [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(24): 74-79.
- [17] 陈伟华. 太阳能烟囱热气流发电系统的优化模拟研究 [D]. 内蒙古包头: 内蒙古科技大学, 2013: 52-64.
- [18] DEHGHANI S, MOHAMMADI A H. Optimum dimension of geometric parameters of solar chimney power plants: a multi-objective optimization approach [J]. Solar Energy, 2014, 105: 603-612.
- [19] GHOLAMALIZADEH E, KIM M H. Thermo-economic triple-objective optimization of a solar chimney power plant using genetic algorithms [J]. Energy, 2014, 70: 204-211.
- [20] ALI B. Techno-economic optimization for the design of solar chimney power plants [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 138: 461-73.
- [21] SCHLAICH J. The solar chimney: electricity from the Sun [M]. Stuttgart, Baden-Württemberg, Germany: Axel Menges Publisher, 1995: 30.
- [22] GRAY D D, GIORGIN A. The validity of the Boussinesq approximation for liquids and gases [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1976, 19: 545-551.
- [23] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 240-243.
- [24] BACKSTROEM T W V, FLURI T P. Maximum fluid power condition in solar chimney power plants: analytical approach [J]. Solar Energy, 2006, 80(11): 1417-1423.
- [25] 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.
- [26] KOONSRIKUK A, CHITSOMBOON T. Theoretical turbine power yield in solar chimney power plants [C] // 3rd International Conference on Thermal Issues in Emerging Technologies Theory and Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 339-346.
- [27] PRETORIUS J P, KRÖGER D G. Thermoeconomic optimization of a solar chimney power plant [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2006, 130(2): 863-869.

(编辑 亢列梅)