

基于正交设计的太阳能烟囱发电结构优化研究

傅铭堃

上海市位育中学 上海 210000

摘要: 太阳能烟囱发电是一种绿色新能源发电技术, 本文针对一种太阳能烟囱发电装置结构开展了仿真优化, 用于提高发电装置的能量利用率。课题中主要应用了湍流 $k-\epsilon$ 双方程模型来模拟热气流从集热棚向烟囱出口的流动过程。对集热棚的进口高度、集热棚至烟囱的斜度、烟囱的直径采用正交实验方法设计了 $L_9(3^3)$ 实验并全部进行了模拟计算, 通过正交分析得出了最优实验, 通过补充实验验证了正交分析的合理性。提出的优化方案可以供工程人员进行参考。

关键词: SCP; 流场; 正交设计; 集热棚

Optimization of solar chimney power generation structure based on orthogonal design

Mingkun Fu

Shanghai Weiyu High School

Abstract: Solar chimney power generation is a kind of new energy generation technology, this paper focuses on the structure optimization of the solar chimney in order to improve the capacity usage ratio of the generating set. It mainly uses the $k-\epsilon$ two-equation turbulence model to simulate the flow process of the hot air from the collector to the coping of the chimney. The paper uses orthogonal experiments to design and calculate $L_9(3^3)$ experiments for the inlet height, inclination from the heat collecting shed to the chimney, and the diameter of the chimney. The optimal experiment was obtained by orthogonal analysis, and the rationality of orthogonal analysis was verified by supplementary experiments. The proposed optimization scheme can be used for reference by engineers.

Keywords: SCP; flow field; orthogonal design; Heat collecting shed

前言

随着科技的发展, 人口数量的增多, 人们对于能源的需求越来越多, 能源发展面临着前所未有的压力。因此, 开发可再生能源是建设现代化能源体系的必需。太阳能烟囱发电是一种新能源发电技术, 又称 scp 技术, 这个发电系统由太阳能集热棚, 太阳能烟囱和涡轮机发电机组三个部分组成。集热棚下面的土地吸收透过覆盖层的太阳辐射能, 并加热土地和集热极覆盖层之间的空气, 使集热棚内空气温度升高, 密度下降, 并沿着烟囱上升, 集热棚周围的冷空气进入系统, 从而形成空气循环流动, 当空气流到达烟囱底部时将会在烟囱内形成向上的气流, 利用这股气流来推动烟囱底部的涡轮机, 进行发电。利用太阳能烟囱进行发电的优势是设备简单, 运行的费用低, 而且不会产生有害物, 对环境友好。SCP 系统适合建造在沙漠等人烟稀少的地区, 不仅能够进行发电, 也能一定程度的抑制沙尘。

SCP 技术最早由斯图加特大学教授 J.Schlaich 提出, 这一研究引起了学者的关注。1981 年, 前西班牙政府与电力公司耗时两年, 建造了世界上第一座太阳能发电烟囱。由此可见 SCP 技术的可行性, 但是由于其初期投资过高, 资金回收周期长,

政府与企业对其热情并不高。太阳能烟囱发电装置的结构设计对于提高其能量利用率具有较大的影响, 也是项目在建设初期必须要考虑的重要内容之一。

本课题针对某一种太阳能烟囱发电装置开展了结构优化, 拟通过流体力学和正交实验方法来找出影响发电效率的结构因素, 并提出最优的结构配置, 供设计和建设研究人员参考。

一、数值模拟方法

1.1 基本假设

- (1) 蓄热层发热温度恒定为 313K;
- (2) 忽略发热层和外壁面的能量损失;
- (3) 忽略风速在一天中的变化, 入口风压恒定不变;
- (4) 考虑了密度与温度之间的变化, 密度采用毕辛涅斯克假设进行设置。

1.2 物理模型

本文选取的研究对象为某一太阳能发电烟囱, 截面如图 1 所示。

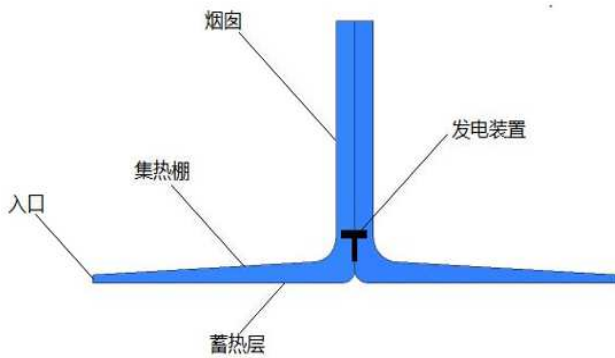


图 1 太阳能发电烟囱装置截面图

本文选用 ANSYS FLUENT15.0 软件求解。在自然通风状况下，经过对于烟囱内部以及进出风口雷诺数的计算，烟囱内的气流应为湍流，因此采用 k-ε 湍流模型进行计算。

1.3 气流流动数值模型

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]_i - \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (2)$$

描述湍流运动的 k - ε 双方程模型:

k 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \left[\frac{C_{\varepsilon 1} G \varepsilon}{k} - \frac{C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon^2}{k} \right] \quad (4)$$

$$\text{其中, } G = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right);$$

$$\text{有效粘度 } \mu_{eff} = \mu_l + \mu_t = \mu_l + \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (5)$$

模型中的常数采用 Spalding 所推荐的如下数据:

$$C_{\varepsilon 1} = 1.43, C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0,$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.3$$

$$\text{能量方程: } \frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + S_T \quad (6)$$

密度采用毕辛涅斯克假设进行设置，其描述公式如式 (7)

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0 \beta (T - T_0)g \quad (7)$$

虽然计算系统的主体气流的温度变化较大，气流密度也有变化，但在计算中采用理想气体的物性参数来定义，具体参数如下:

分子量: 28.966;

定压比热 C_p : 1006.43J/kg·K;

导热系数 λ : 0.0242w/m·K;

粘性系数 μ : 1.7894×10⁻⁵kg/m·s

热膨胀系数 β : 3.33×10⁻³ 1/K

1.4 网格划分与边界条件设置

烟囱的几何模型如图 2 所示，在这里要注意的是，这仅仅是初始模型。由于本文研究的要素包括集热棚入口高度和过渡角及烟囱直径，因此烟囱的几何模型也会随研究对象的改变而作出调整。对几何模型进行网格划分，使入口至少包含三层以上网格，并且在划分完成后对结果进行检查与修正，尽量使各网格呈规则正方形或长方形，网格数量约为 4340 个。

边界条件具体设置如下:

- (1) 集热棚入口采用入口压力边界条件，压力值 P=16Pa;
- (2) 烟囱出口: P=-ρgH=-1.25*9.8*100=-1225Pa;
- (3) 集热棚下方蓄热层采用 Heating wall: 313K。

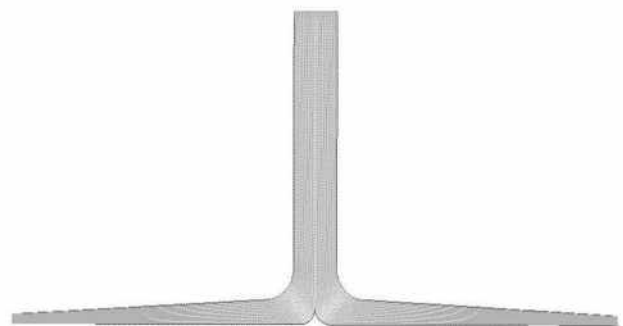


图 2 烟囱网格模型

二、实验方案与结果分析

2.1 因素、水平及正交试验表的选取

烟囱自然冷却通风的影响因素有很多，在本文中，我们选取集热棚入口高度和过渡角及烟囱直径共 3 个影响因素作为主要影响因素，每个影响因素分别选取 3 个水平，见表 1。由因

素与水平选取 L9 (33) 型正交试验表, 表 2 为试验方案。

表 1 因素水平表

水平	A (集热棚入口高度/m)	B (过渡角/°)	C (烟囱直径/m)
1	3.0	3.0	16
2	4.0	4.0	18
3	5.0	5.0	20

表 2 试验方案表

试验号	A (集热棚入口高度/m)	B (过渡角/°)	C (烟囱直径/m)
1	3	3	16
2	3	4	18
3	3	5	20
4	4	3	18
5	4	4	20
6	4	5	16
7	5	3	20
8	5	4	16
9	5	5	18

2.4 正交实验结果分析

经 Fluent 软件运算得到的试验数据如表 3 所示, 采用正交法进行数据分析, 得到的结果如以下图表所示, 在表中统计了发电机位置的平均速度, 如图 3 所示。从表中可以看出, case1 烟囱发电结构在发电机位子的平均速度最大, 而 case9 烟囱发电结构在发电机位子的平均速度最小。

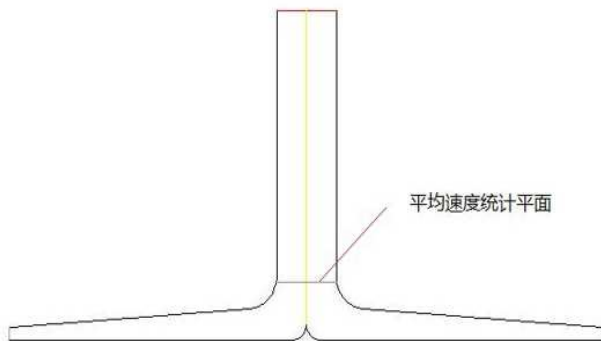


图 3 进行平均速度统计的平面位置示意图

表 3 正交实验结果统计表

试验号	入口高度 ——h (m)	过渡角 ——α (m)	烟囱直径 ——d (m)	平均速度 (m/s)
Case1	3	3	16	44.4
Case2	3	4	18	42.9
Case3	3	5	20	40.3
Case4	4	3	18	44.2
Case5	4	4	20	43.1
Case6	4	5	16	38.4
Case7	5	3	20	43.6
Case8	5	4	16	39.7
Case9	5	5	18	36.7

图 4 对正交试验的结果进行了分析, 得出了因素中的水平影响趋势, 基于此我们首先进行了影响程度分析。对上述的正交实验结果分别求 R 值如下:

$$R(h) = 42.55 - 40.01 = 2.54$$

$$R(\alpha) = 44.10 - 38.49 = 5.61$$

$$R(d) = 42.35 - 40.87 = 1.48$$

可以看出, 对于太阳能烟囱发电机位置流速影响最大的结构参数是集热棚的过渡角, 而次要影响因素是集热棚空气入口高度, 影响程度最小的因素是烟囱的直径, 三种影响因素的占比分别是: $R(h) : R(\alpha) : R(d) = 26.3\% : 60.1\% : 13.6\%$ 。

单个因素对于风速的影响

(1) 在以集热棚进口高度为因素的情况下, 发电机位置平均风速随着集热棚进口高度的增大而减少。在上述实验中, A1 条件下的平均风速最大。

(2) 在以集热棚过渡角为因素的情况下, 发电机位置平均风速随着集热棚过渡角的增大而减少。在上述实验中, B1 条件下的平均风速最大。

(3) 在烟囱直径为因素的情况下, 发电机位置平均风速随着烟囱直径的增加而增大。在上述实验中, C3 条件下的平均风速最大。

由上述分析可以得出结论: 在本次试验中, A1B1C3 是最优组合, 而与原正交实验相对照后, 发现最优组合并不在其中, 需要进行补充实验。

通过开展补充正交实验, 对 A1B1C3 (入口高度 3m, 过渡角 3°, 烟囱直径 20m) 的结构进行仿真分析, 得出其截面的流场和温度场, 并进行了发电机位置平均风速的统计, 得出其值

为 45.5m/s, 说明正交实验分析优化结果正确。

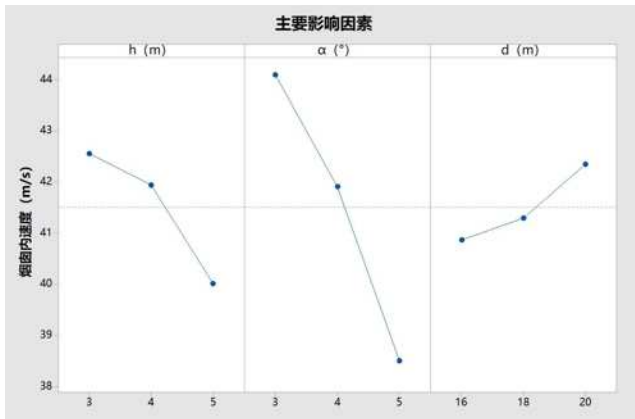


图 4 对正交实验结果进行的分析

三、总结

1、建立了模拟太阳能烟囱发电模型, 考虑了入口高度和烟囱直径及过渡角这三个因素, 水平分别为 (3.0 米, 4.0 米, 5.0 米)、(16 米, 18 米, 20 米)、(3°, 4°, 5°)。

2、设计了 L9 (3³) 正交实验, 分析了各种情况下结构内部的流动情况。

3、经过对于极差的分析, 得出以下结论:

(1) 在以集热棚进口高度为因素的情况下, 发电机位置平均风速随着集热棚进口高度的增大而减少。在上述实验中, A1 条件下的平均风速最大。

(2) 在以集热棚过渡角为因素的情况下, 发电机位置平均风速随着集热棚过渡角的增大而减少。在上述实验中, B1 条件下的平均风速最大。

(3) 在烟囱直径为因素的情况下, 发电机位置平均风速随着烟囱直径的增加而增大。在上述实验中, C3 条件下的平均风速最大。

(4) 在本次试验中, A1B1C3 是最优的通风组合。

参考文献:

[1] 王圣.用 CFD 技术研究室内空气污染与净化规律[M]:[硕士学位论文].北京:北京工业大学.2007 年 5 月.

[2] 唐超,高岩,李德英,陈晓春,郝军.基于正交试验的工业厂房自然通风影响因素数值分析 [J]. 建筑科学,2011,Vol.27,No.21.

[3] 闫凤英,王新华,吴有聪.基于 CFD 的室内自然通风及热舒适性的模拟[J].天津大学学报,2009,Vol.42,No.5.

[4] 李福强.基于 CFD 技术的冶炼厂房空气污染物治理研究[M]:[硕士学位论文].湖南:湖南工业大学.2016 年 6 月.

[5] 万鑫、苏亚欣、杨艳超.工业厂房自然通风的数值模拟及结构改进[J].中国安全科学学报,2008,Vol.8,No.18.

[6] 万鑫,苏亚欣.现代建筑中自然通风技术的应用[J].建筑节能,2007,Vol.9,No.3