

基于正交实验的大气涡旋引擎发电数值模拟研究

赵淑红, 陈 宁, 彭 伟

(中国矿业大学电力工程学院, 江苏 徐州 221008)

[摘要] 针对建造对太阳能烟囱发电的局限性, 大气涡旋引擎发电内部形成的旋风柱可代替物理的烟囱, 结合数学方程体系建立的涡旋引擎模型, 借助计算流体力学软件 CFX 可以很好地模拟生成龙卷风风柱, 同时运用正交实验法分析影响涡旋引擎发电效率的因素, 结果表明, 各影响因素的主次顺序为叶片安装角度、涡旋发生室出口断面直径与涡旋室断面直径比、涡旋发生室高度。

[关键词] 涡旋引擎, CFX, 正交实验

[中图分类号] TK514 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2013)03-0009-05

The Numerical Simulation of a Method of Power Generation Using Vertex Engine Based on Orthogonal Test Method

Zhao Shuhong, Chen Ning, Peng Wei

(College of Mechatronic, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In view of the limitations of chimney construction in solar chimney power generation, the physical chimney can be replaced by the towering cyclone column produced in vortex engine. In this paper, vortex engine model combined with the mathematical equation system can be well simulated to generate a tornado by the commercial CFD software CFX. Through the orthogonal test method to analyze the effect of various factors on the efficiency of the vortex generator, a conclusion is made that the primary and secondary order of all the factors are the installation angle of blades, the ratio of diameter between vortex engine export and the chamber where vortex happened and the height of vortex chamber.

Key words: vortex engine, CFX, numerical simulation

大气涡旋引擎发电是在自然界龙卷风的启发下而提出的一种能量利用方式. 大气涡旋引擎发电系统由太阳能集热棚、涡轮发电机组、涡旋引擎 3 部分组成, 其发电装置与太阳能烟囱发电装置类似. 由于高耸的烟囱增加了建造难度、强度和寿命的受限使太阳能烟囱发电存在很大的不足之处^[1], 而大气涡旋引擎发电理论计算其理想效率为 30%^[2], 大大高于太阳能烟囱发电效率, 并且由于离心力的作用, 涡旋引擎内部形成的高耸的旋风柱可以代替物理的烟囱, 在一定程度上弥补了太阳能烟囱发电的缺点, 因此, 大气涡旋引擎发电使得人们在太阳能热气流发电领域又看到另一个更为光明的应用前景.

大气涡旋引擎概念由加拿大工程师 Louis Michaud 最先提出. 他认为, 当大气层中的热量通过对流作用被带往高空的时候会做功, 由于热空气膨胀所做的功, 比压缩冷却后的同样的气体所需的功多, 因此近地面层的热空气由于对流作用在向高空大气层运动时, 一边做功一边冷却, 功有盈余, 盈余功的表现形式即是我们所见到的猛烈的大气流动现象, 比如龙卷风以及出现在海洋上的飓风等, 事实证明, 盈余功的总量非常巨大, 大到足以摧毁地面建筑. 基于以上分析, Louis Michaud 认为, 高耸的旋涡可以利用高空中 -30℃ ~ -60℃ 的大气作为冷源, 只需要 30℃ 的海水或是废热, 以及高空中 -30℃ 的大气, 就能够从二者之间的温差中提取大量的能量^[2]. 涡旋引擎中所需要的持续的热空气, 其热源既可以来自于太阳能, 也可以是低品位的热量(如燃烧低浓度瓦斯, 工业废热等). 在我国, 陈玉德发明的人造龙卷风发电系统, 其工作原理与大气涡旋引擎类似, 通过风塔周围斜向喷入的高速热气或者热火在塔内形成龙卷风, 形成抽吸力

推动置于斜向进气管内部涡轮机和同轴发电机发电。

总的来说国内外关于大气涡旋引擎发电的研究并不多,尤其对影响涡旋引擎发电效率的因素研究尚处于空白,这严重阻碍了太阳能发电技术的进一步开发和推广利用. 鉴于涡旋引擎发电装置与太阳能烟囱发电装置类似,有关太阳能集热棚对发电效率的影响可以借鉴其对太阳能烟囱发电效率的影响^[3],因此,本文侧重于涡旋引擎部分的研究,通过数值模拟分析其内部结构对涡旋引擎发电效率的影响。

1 涡旋引擎工作原理

如图 1 所示,热空气沿涡旋引擎室的斜切入口进入涡旋引擎,由狭窄通道上升时,气柱内外的温差将产生沿圆周方向的切向力,使得上升气流强烈旋转,离心力的作用使气柱中心的压力急剧降低,呈负压状态,使得均布在涡旋引擎外围的若干换热器的进口形成很强的压差,由于压差作用使环境空气从环形太阳能集热棚的环形入口被吸入进来,经地面的集热蓄热层加热后,通过涡旋引擎的周向布置的流道向旋转气柱靠近,随即跟着旋转. 将产生的涡旋稳定在一个固定容积的腔室(本文称之为涡旋发生室)中时,则外界空气只能通过该腔室的入口(本文定义为导流道)进入涡旋产生的低压区域,在腔室入口安装涡轮机,则入口处的高速气流将推动涡轮机旋转,涡轮机带动发电机发电^[4,5]。

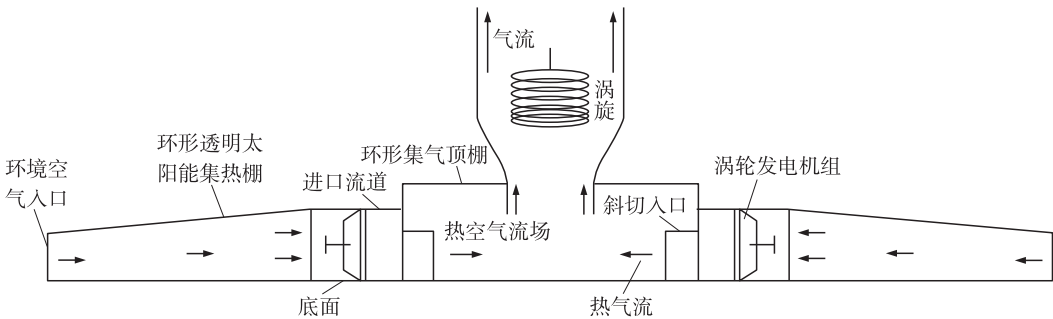


图 1 应用于太阳能的涡旋引擎发电装置
Fig. 1 System diagram of vortex engine applied to generate power with solar

2 基于 CFX 的涡旋引擎数值模拟

2.1 数学方程

(1)连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \tag{1}$$

形成稳定的龙卷风结构后在一定时间内可以作为稳定状态来处理,流体作定常流动,上述方程可简化为:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \tag{2}$$

式中 u, v, w 分别为是速度矢量在 x, y, z 方向上的分量, ρ 为微元体内空气密度.

(2)动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \rho \frac{du}{dt} &= \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right], \\ \rho \frac{dv}{dt} &= \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right], \\ \rho \frac{dw}{dt} &= \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right], \end{aligned} \tag{3}$$

式中 F_x, F_y, F_z 分别为微元体力在 x, y, z 上的分量, μ 为动力黏度.

对于流动气体不可压缩,动力粘度可以近似看作常数,上式简化为:

$$\begin{aligned}
\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho F_x - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right), \\
\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho F_y - \frac{\partial \rho}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \\
\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho F_z - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right).
\end{aligned} \quad (4)$$

2.2 计算模型

2.2.1 物理模型

借鉴文献[2,4,5],建立物理模型如图2所示,圆形涡旋发生室高度25 cm,涡旋生成区直径80 cm,涡旋室出口直径25 cm,为了完整地体现生成的龙卷风流场图,在涡旋出口后的涡旋稳定区采用实体流体域建模,稳定区的高度为120 cm,直径为60 cm,在涡旋室进口处设置周向的6个切向导流道,导流叶片的线型为圆弧线的一段,导流道进口处切线与涡旋室半径的法线之间夹角15°,定义为叶片安装角。

2.2.2 网格划分

采用四面体形式自由网格划分方法^[6],网格最大尺寸为2 cm,最小为0.1 cm,在涡旋引擎进口处和出口处分别进行网格的细化.考虑到涡旋由中心到外围压力逐渐增大至接近大气压,速度逐渐下降至零的特点,即形成的龙卷风主要位于中心一个垂直的气柱内,所以在模型中心进行网格的精细划分.网格的长度规模是0.4 cm,影响半径是5 cm,中心细化区高度从底部一直延伸到出口处,另外在所有流固面处都划分边界层网格,边界层网格层数为10层,最大的厚度为0.5 cm,划分完的网格数共计300万个。

2.3 边界条件设置

(1) 模拟状态和湍流模型

整个区域定义为流体区域,流体类型为参考温度在25℃的空气,参考气压为1 atm.由于RNG $k-\varepsilon$ 模型对于处理高应变率和流线弯曲程度较大的流动具有优势,因此湍流模型选择RNG $k-\varepsilon$ 模型^[7];

(2) 进口边界条件

进口空气与大气相连,因此设置进口边界条件为压力进口,压力为0 Pa(相对于大气压力),进口空气温度为60℃;

(3) 出口边界条件

出口边界设置为开放的自由界面,出口相对压力为0 Pa,出口空气温度为环境温度15℃。

2.4 结果分析

2.4.1 压力场

如图3所示,在涡旋发生室的中心最底位置产生了一个负压区,正是这个负压区使得周围空气源源不断地被抽吸进来,维持生成的旋风柱,推动涡旋引擎持续工作;在涡旋发生室内,压力由中心向四周逐渐增大,符合龙卷风自由涡和固体涡叠加的压力表现^[8-11]。

2.4.2 速度场

如图4和图5所示,在涡旋生成室内沿半径方向,中心速度由小逐渐增大,增大到一个最大值(自由涡和固体涡的交界面),然后又逐渐下降,出现了自由涡和固体涡叠加的现象;在稳定区形成比较稳定的旋风柱,速度由中心向周围逐渐降低,与龙卷风自由涡的旋转速度分布相吻合^[8-11]。

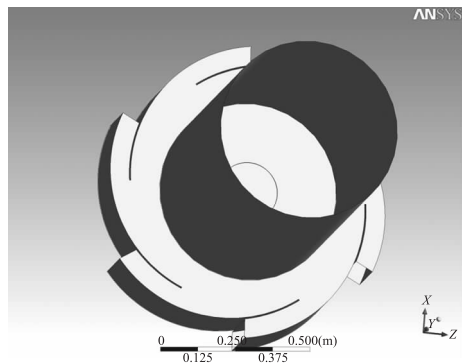


图2 数值计算模型

Fig. 2 The numerical model

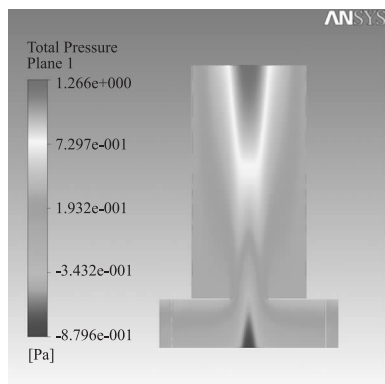


图3 垂直面压力云图

Fig. 3 Cloud image of pressure on vertical plane

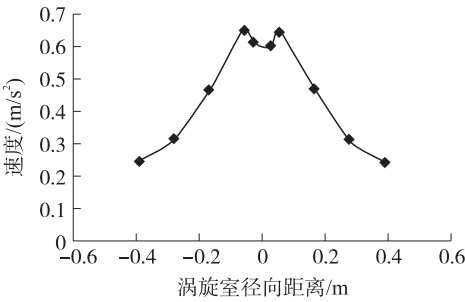


图 4 $Z=20\text{ cm}$ 平面内径向速度变化图

Fig.4 Velocity change along the diameter on $z=20\text{ cm plane}$

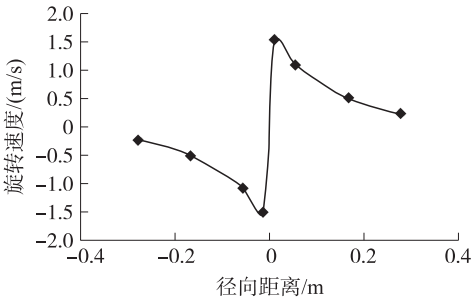


图 5 $Z=100\text{ cm}$ 平面内径向旋转速度变化图

Fig.5 Velocity change along the diameter on $z=100\text{ cm plane}$

模拟结果表明,压力与速度分布均符合龙卷风形成机理,本文给出的模型可以很好地模拟生成龙卷风.

3 正交实验分析影响涡旋发电效率的因素

3.1 实验方法介绍

在科学研究与工程实践中,为了揭示多种因素对实验或计算结果的影响,一般都需要进行大量的多因素组合实验,随着实验次数的指数增长,增加研究工作量的同时造成资源和时间的巨大浪费.应用数理统计概念和正交原理编制的正交表,可以从次数众多的全面实验中挑选出次数较少而又具有代表性的组合条件,以提高研究效率^[12],因此,本文使用正交实验表安排实验方案对涡旋形成过程进行模拟.

3.2 因素、水平及正交实验表的选取

由于生成旋风柱强度的大小决定抽吸空气的快慢,进而直接影响进口处速度及涡轮机组的工作效率.因此,以涡旋发生室入口处空气平均流速作为性能指标分析影响涡旋发电效率的因素,选取涡旋发生室高度 Ha 、涡旋发生室出口断面直径与涡旋室断面直径比 $R1/R2$ 、叶片安装角度 θ 3 个影响因素,每个因素选取 3 个水平,具体安排见表 1,由因素及水平数选取 $L9(3^4)$ 正交实验表进行试验.

表 1 因素水平表

Table 1 Factor level table

水平	A Ha/cm	B $R1/R2$	C $\theta/(^{\circ})$
1	30	25/140	20
2	25	20/140	10
3	15	30/140	30

3.3 结果分析

数值模拟结束后,在后处理中统计涡旋室入口处的空气平均流速,得到正交实验结果见表 2.

表 2 正交实验结果

Table 2 Results of orthogonal test method

实验号	A Ha/cm	B $R1/R2$	C $\theta/(^{\circ})$	入口空气平均流速/ (m/s)
实验 1	30	25/140	20	0.496 547
实验 2	30	20/140	10	0.497 528
实验 3	30	30/140	30	0.439 931
实验 4	25	25/140	10	0.469 186
实验 5	25	20/140	30	0.422 024
实验 6	25	30/140	20	0.476 023
实验 7	15	25/140	30	0.422 971
实验 8	15	20/140	20	0.417 395
实验 9	15	30/140	10	0.624 525

采用直观分析法分析实验结果,通过计算比较极差的大小可判断主次因素的顺序.极差公式如下:

$$R=\max(K1,K2,K3)-\min(K1,K2,K3).$$
(5)

根据实验结果所得极差数据分析见表 3.

比较表 3 中各因素的极差值 $R,RA=0.032,RB=0.067,RC=0.102,RC>RB>RA$,由此可以得出在本实验安排的因素水平条件下,叶片安装角对涡旋室入口处空气平均流速的影响最大,其次是涡旋发生室出口断面直径与涡旋室断面直径比,然后是涡旋发生室高度.

表 3 极差数据分析表
Table 3 Results of poor data analysis

实验号	A <i>Ha/cm</i>	B <i>R1/R2</i>	C $\theta/(^{\circ})$	入口空气平均流速总和/ (m/s)
均值 <i>K1</i>	0.478	0.463	0.463	4.266 094
均值 <i>K2</i>	0.456	0.446	0.530	
均值 <i>K3</i>	0.488	0.513	0.428	
极差 <i>R</i>	0.032	0.067	0.102	

4 结论

(1)本文结合运动数学方程体系而建立的模型可以很好地模拟生成龙卷风,为后续者研究涡旋引擎发电提供了理论方法和依据.

(2)涡旋室入口空气平均流速的大小间接反映大气涡旋发电效率,运用正交实验方法,分析各因素对大气涡旋引擎发电效率的影响,在其他条件不变的情况下,各因素对大气涡旋引擎发电效率的影响主次顺序为叶片安装角度、涡旋发生室出口断面直径与涡旋室断面直径比、涡旋发生室高度.

[参考文献](References)

[1] 杨家宽,李劲,肖波,等. 太阳能烟囱发电新技术[J]. 太阳能学报,2003,24(4):565-569.
Yang Jiakuan, Li Jing, Xiao Bo, et al. A novel technology of solar chimney for power generation[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2003, 24(4):565-569. (in Chinese)

[2] Michaud L M. The atmospheric vortex engine[J]. Toronto International Conference-Science and Technology for Humanity, 2009;971-975 .

[3] 张静敏,张华,卢峰,等. 太阳能烟囱集热器性能影响因素的试验研究[J]. 太阳能学报,2008(8):993-998.
Zhang Jingmin, Zhang Hua, Lu Feng, et al. Experimental study on the factors influencing collector performance in solar chimney[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2008(8):993-998. (in Chinese)

[4] 徐海超,陈宁,杨丽,等. 应用于煤矿瓦斯发电的涡旋引擎技术概述[J]. 矿山机械,2009,34(24):27-30.
Xu Haichao, Chen Ning, Yang Li, et al. Summarization on the vortex engine technique applied in coal mine gas generate electricity[J]. Mining and Processing Equipment, 2009, 34(24):27-30. (in Chinese)

[5] Hugo, Hidalgo D V, Chen Ning. Application of vortex process to cleaner energy generation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 71-78;2 196-2 203.

[6] 王汉青. 高大空间多射流湍流场的大涡数值模拟研究[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院,2003:13-38.
Wang Hanqing. Research on large eddy simulation of turbulent flow field in great space with multiple air jets[D]. Changsha: Hunan University, School of Civil Engineering. 2003:13-38. (in Chinese)

[7] 李进良,李承曦,胡仁喜,等. 精通 FLUENT6.3 流场分析[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
Li Jinliang, Li Chengxi, Hu Renxi, et al. Proficient in FLUENT6.3 Flow Field Analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. (in Chinese)

[8] 张景松. 人造龙卷风形成机理[J]. 煤炭学报,1996,21(4):403-406.
Zhang Jingsong. Mechanism for generation of artificial tornado[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(4):403-406. (in Chinese)

[9] 顾兆林,赵永志,郁永章,等. 尘卷风的形成、结构和卷起沙尘过程数值研究[J]. 气象学报,2003,61(6):751-759.
Gu Zhaolin, Zhao Yongzhi, Yu Yongzhang, et al. Numerical study of the fomation evolution and structure of dust devil[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(6):751-759. (in Chinese)

[10] 赵永志,顾兆林,郁永章,等. 盆地涡涡动过程数值研究[J]. 水利学报,2002(12):1-6.
Zhao Yongzhi, Gu Zhaolin, Yu Yongzhang, et al. Numerical simulation of the vortex in a tub[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(12):1-6. (in Chinese)

[11] Amit R Mishra, Darryl L James. Physical simulation of a single-celled tornado-lik vortex, Part A: Flow field characterization [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96:1 247-1 257.

[12] 《正交实验法》编写组. 正交实验法[M]. 北京:国防工业出版社,1976.
The Orthogonal Experiment Editorial Group. The Orthogonal Experiment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1976. (in Chinese)

[责任编辑:刘 健]