

文章编号: 1671-6612 (2019) 05-513-04

# 基于空气动力加热炉的新型风能制热系统设计

丁艳 金文雯 李毅 魏中瑞 王凯

(中国矿业大学徐海学院 徐州 221008)

**【摘要】** 为了解决北方低温条件下空气源热泵能效低甚至不能工作的问题,设计了一种基于空气动力加热炉的新型风能制热系统,作为空气源热泵的辅助系统,通过提升入口空气温度以提升空气源热泵的能效、拓宽其适用范围,实现了风能到热能的直接转化,提高了能源转化效率,为空气源热泵提效提供了新思路。通过数值模拟分析其可行性,探讨其节能、经济及环保效益,结果表明,该系统节能效果显著,具有一定的推广和实用价值。

**【关键词】** 风能; 空气动力加热炉; 空气源热泵; 能效

中图分类号 TK89 文献标识码 A

## Design of a New Wind Energy Heating System Based on Aerodynamic Heating Furnace

Ding Yan Jin Wenwen Li Yi Wei Zhongrui Wang Kai

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

**【Abstract】** In order to solve the problem that the energy efficiency of air source heat pump is low or even can not work at low temperature in North China, a new type of wind energy heating system based on aerodynamic heating furnace is designed in this paper. As an auxiliary system of air source heat pump, the energy efficiency of air source heat pump is improved and its application scope is widened by raising the inlet air temperature. The direct conversion of wind energy to heat energy is realized and improved. Energy conversion efficiency provides a new idea for improving the efficiency of air source heat pump. The feasibility of the system is analyzed by numerical simulation, and its energy-saving, economic and environmental benefits are discussed. The results show that the system has remarkable energy-saving effect and has certain popularization and practical value.

**【Keywords】** Wind Energy; Aerodynamic Heating Furnace; Air Source Heat Pump; Energy Efficiency

## 0 引言

我国北方冬季气温低,居民供暖及生活热水用热量大,主要由热力发电厂提供<sup>[1]</sup>,一次能源消耗大,环境污染严重。随着国家“煤改电”、“煤改清洁能源”的不断推进<sup>[2]</sup>,空气源热泵以其高效、环保、安全、可靠的优势,在商用和民用空调领域快速发展,国家已将空气源热泵纳入可再生能源范围,并在“十三五”规划中设立了发展目标<sup>[3]</sup>。但空气源热泵机组的能效随着环境温度的降低而不

断降低,在北方极其寒冷地区<sup>[4]</sup>,由于冬季最冷室外温度较低,空气源热泵的应用受大了极大限制<sup>[5]</sup>。

空气动力加热炉(简称“空气加热炉”)是空气能利用研究过程中诞生的一项关键性技术,通过提高空气能利用设备入口温度来提高产品效率。该技术发源于俄罗斯,对于其他国家还属新兴技术。2013年12月中国航天科技集团四院西安航天化学动力厂对空气动力炉展开研究,填补了国内空气摩

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究面上项目资助(19KJD480001);

江苏省大学生创新创业训练计划项目(201613579003Y);

作者(通讯作者)简介:丁艳(1980-),女,硕士,讲师,E-mail:dingyan02@126.com

收稿日期:2019-04-11

擦发热应用研究的空白<sup>[1]</sup>。目前空气动力加热炉主要是采用电机驱动叶轮旋转，叶轮与空气摩擦产生热量，使空气加热，同时叶轮的旋转使炉腔内的空气循环流动，从而使整个炉腔内的温度不断上升，实现加热。空气动力炉具有热效率高、能耗低、无须电热元件、无明火和设备安全性好等优点。但空气加热炉一般采用电机驱动，电能消耗大。

本文拟采用风能作为空气加热炉的动力源，基于目前成熟的风力发电技术中的叶轮装置，将风吹叶轮旋转的机械能通过齿轮传动增速后传递给空气加热炉，实现对空气的加热，为空气能利用系统提高初温，从而实现风能与热能的直接转化，减少能量的二次损失。

### 1 系统设计

该新型风能制热系统主体如图1所示，主要包括风机叶轮、空气加热炉和增速装置等部分。该系统放置于建筑楼顶，借助建筑自身高度来缩短风机支架高度，在为风机提供充足动力的同时大大减少风机的持续应力，使风机运行更加安全稳定；垂直轴风机通过其对环境的较强适应性及较小的磨损性，为加热炉提供长期稳定的动能输出；齿轮增速装置通过行星齿轮将转速提升到加热炉需要的速度，并通过法兰连接传递给加热炉；基于摩擦生热原理的空气加热炉通过高速转动对空气进行连续重复加热，提高空气能利用设备的空气初始温度，以实现风能与热能的直接转化。

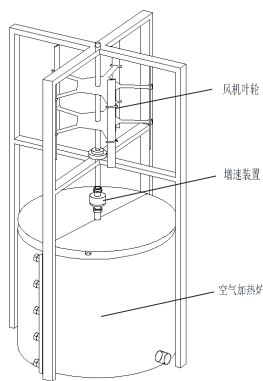


图1 系统示意图

Fig.1 Systematic schematic diagram

#### 1.1 风机叶轮设计

本系统采用垂直轴式升力H型叶轮。垂直轴式风机相比于水平式轴式风机，寿命长，可靠性高，

噪音低，便于维护，风能利用效率达40%以上，垂直阻力型风轮由于其工作特性决定了它没有很高的工作转速，效率也受到了很大限制。而翼型升力型垂直轴式风机则恰恰克服了阻力型的缺陷，其风轮依靠叶片产生的升力工作，在现实中广泛应用。其中H型垂直轴风力机叶片形式简单，成本较低。风力发电机叶片可以通过改变其叶片与来流风向之间夹角来改善其自启动性能，还可以通过这种方法来控制风轮叶片的尖速比来提高风力发电机的风能利用率。并且直叶片型风力发电机的叶片是由一个固定的截面通过扫略过一条直线而形成的，叶片形状简单，加工方便，成本较低。

根据空气动力学分析方法以及叶素-动量理论进行叶轮物理参数计算，确定叶轮的扫风面积，进而计算出叶轮的直径和高度。

叶轮扫风面积为：

$$S = \frac{2P_n}{(\rho\eta v^3 C_p)} \tag{1}$$

式中： $P_n$ 为叶轮的额定功率； $\rho$ 为空气密度； $v$ 为额定风速； $\eta$ 为叶轮的转动效率； $C_p$ 为风能的利用率。

风轮高度：

$$H = \sqrt{1.5S} \tag{2}$$

风轮直径：

$$D = \frac{S}{H} \tag{3}$$

实度：

$$\sigma = \frac{BC}{D} \tag{4}$$

式中： $B$ 为叶轮的叶片数； $C$ 为叶片弦长。

具体计算如表1所示。

表1 叶轮系统有关计算

Table 1 Computation of Impeller System			
物理参数	结果	物理参数	结果
额定功率 $P_n/W$	145.49	风轮直径 $D/m$	2.0
空气密度 $\rho /Kg/m^3$	1.293	叶尖速比	1
风能利用率 $C_p$	0.4	叶片数 $B/片$	5
额定风速 $V /m/s$	4.5	弦长 $C/m$	0.133
转动效率	1	实度 $\sigma$	0.33
风轮扫风面积 $S/m^2$	6.18	风轮转速 $r/min$	42.38
风轮高度 $H/m$	3.1	风功率 $W$	363.73

## 1.2 空气加热炉设计

空气加热炉内主要包括隔板、叶片和主轴等部分,如图2所示。

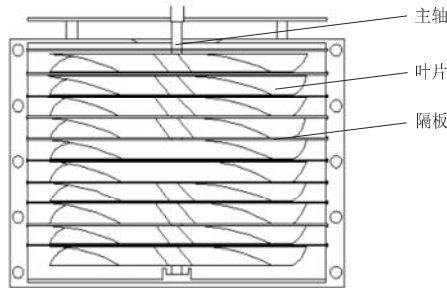


图2 炉体内部结构

Fig.2 Internal structure of furnace body

空气加热炉的目的是将空气加热到一定的温度。根据热力学第一定律,在制热设备的热力系统中,空气从进入制热设备开始到最后流出制热设备期间吸收的热量等于制热设备所放出的热量,即制热设备在这段时间内所需要做的功。取北方城镇内蒙赤峰市为例,当地空气平均比热  $C_p$  为  $11.007\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$ ,空气密度  $\rho$  为  $1.293\text{kg/m}^3$ ,空气额定流量  $Q_m$  为  $300\text{m}^3/\text{h}$ ,提升温度  $\Delta t$  为  $30^\circ\text{C}$ ,根据公式  $Q=C_p Q_m \rho \Delta t$ ,可以计算出空气动力加热要提升  $\Delta t$  温升所需的热量  $Q$  约为  $3.255\text{kJ}$ 。

制热设备内部叶片固定在圆形叶轮上,所以制热设备实际的工作区域并不是一个整体的圆柱形区域。根据设计参数可知制热设备的工作半径为  $0.75\text{m}$ ,叶轮的半径为  $0.25\text{m}$ ,所以风流过的区域为外径  $1.5\text{m}$ ,内径  $0.5\text{m}$  的圆筒体的区域。在制热设备的外侧内壁上设计 8 个隔板,8 个隔板将制热设备在轴向分上为 8 个区域,同时制热设备共拥有 10 级叶片,每 1 级叶片看作 1 个计算区域,共分为 80 个计算区域。

设加热炉内叶片外圈半径为  $r_1$ ,叶片内圈半径为  $r_2$ ,通过下面的计算公式可以得出每一个计算扇形面积为:

$$S = \frac{(r_1^2 - r_2^2)\pi}{8} = 0.19625\text{m}^2 \quad (5)$$

设每级叶片的高度为  $h$  (取  $0.1\text{m}$ ),可知每个扇形体积为:

$$V_1 = Sh = 0.019625\text{m}^3 \quad (6)$$

扇形的总体积为:

$$V = V_1 \times 8 \times 10 = 1.57\text{m}^3 \quad (7)$$

设计制热设备主轴额定转速  $\omega$  为  $2300\text{r/min}$ ,叶片的根部风速为:

$$v = r_1 * 2\pi\omega \approx 60.25\text{m/s} \quad (8)$$

每个扇区做功:

$$W_1 = \frac{mv^2}{2} \approx 45.38\text{J} \quad (9)$$

每秒整体做功为:

$$W_2 = W_1 * 8 * 10 = 3.6304\text{kJ} \quad (10)$$

$W_2$  为制热设备整体上单位时间所做的功,所以制热设备内部单位时间做功为  $3.6304\text{kJ}$ 。而制热设备在按设计工况所需求为  $3.2551275\text{kJ}$ 。制热设备实际功率大于设计功率,所以该设备理论上是可以实现运行的。

## 2 可行性分析

### 2.1 模拟验证

采用 ANSYS FLUENT 软件对本文的空气加热炉部分进行了数值模拟,设空气加热炉入口速度为  $0.053\text{m/s}$ ,入口温度为  $270\text{K}$ ,叶轮旋转速度为  $2300\text{r/min}$ ,Fluent 模拟后的温度分布云图如图 3 所示。图中可以看出入口处的温度为  $270\text{K}$ ,出口处的温度为  $300\text{K}$ ,加热系统中的叶轮旋转使得空气温升提高了  $30^\circ\text{C}$ 。达到了预期的效果。

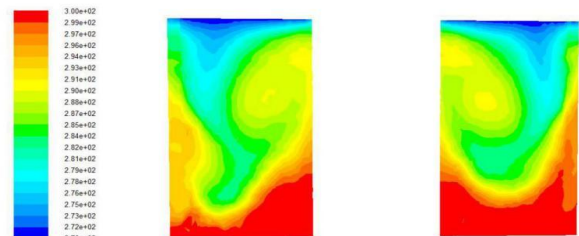


图3 空气加热炉内温度场分布图

Fig.3 Distribution of Temperature Field in Air Heating Furnace

### 2.2 节能与经济性分析

#### 2.2.1 空气源热泵采暖

以内蒙地区一台 5 匹的空气源热泵,冬季平均室外温度  $-10^\circ\text{C}$ ,入口空气温度提升  $30^\circ\text{C}$  为例进行核算。

5 匹空气源热泵功率为  $3.675\text{kW}$ ,室外温度  $-10^\circ\text{C}$  时生产  $45^\circ\text{C}$  热水(内蒙地区冬季自来水温取  $5^\circ\text{C}$ ),其能效比约为 2,将空气温度提升  $30^\circ\text{C}$ ,能效比约提升 2 倍,产热相同时,则耗电量缩小 1 倍。该热泵热水器  $-10^\circ\text{C}$  时产生 1 吨热水需消耗  $23.34$  度

(千瓦时)电,而在20℃下工作时,产生1吨热水仅需消耗11.67度电,节省一半,相当于节省3.5kg标准煤。

以内蒙赤峰地区100m<sup>2</sup>的典型家庭住宅为例,采取节能措施基础上的5匹空气源热泵进行间歇性供暖,工作时间不超过12h、出水温度38~45℃。根据《城镇供热管网设计规范》,节能型住宅12h供暖热指标为80~90W/m<sup>2</sup>,取上限则100m<sup>2</sup>的节能型住宅采暖热负荷为9KW,采暖1小时需要热水量为0.1929吨,空气源热泵间歇供暖12h,生产热水量为2.31吨,空气源热泵提升进口空气温度后,按每天供暖12小时计算,生产2.31吨热水可节约26.96度电,相当于节省标准煤8.09kg。内蒙赤峰地区采暖时间按180天计,可节约电能约4852.8度,相当于1456.2kg标准煤。

根据上述节能分析可知,100平方米的家庭住宅,采用本项目辅助空气源热泵进行供暖,因热泵能效提升2倍,一个采暖期可节约4852.8度电,电价按0.5元/kWh计,可节省2426.4元,若考虑生活热水供应,则节能效益更加可观。该新型风能制热系统成本约为1200元,半个采暖期即可全部收回成本。

### 2.2.2 空气源热泵热水器

空气源热泵在国标工况下的能效比COP值一般在2.9~4.5之间,但环境温度低于5℃后,机组能效开始衰减。在北方极寒寒冷地区,由于冬季最冷室外温度往往会低于-25℃,此时常规的空气源热泵已无法使用,即使超低温空气源热泵可以实现在-25℃正常工作,但此时的能效衰减至2.0以下。若冬季采用传统电热水器提供生活热水,与采用空气源热泵热水器相比,能耗差异巨大。

以典型家庭(5口人)为例,根据国家生活热水的标准,热水温度为55℃,年生活热水耗热量约为19.1625×10<sup>6</sup>kJ。电热水器功率按100%,提升温度前的空源热泵热水器能效比约为2,提升30℃后的空气源热泵热水器能效比约为4,以此可计算出内蒙地区典型家庭一年生活热水能耗比,具体见表2。

由表2可知,内蒙地区典型家庭采用提升入口空气温度的空气源热泵热水器,比传统电热水器每年节约电能3992.2kWh,以1度电花费0.5元计,提升初温后空气源热泵热水器比传统电热水器可节省1996.1元。

表2 年生活热水能耗比(内蒙5口之家)

Table 2 Energy Consumption Ratio of Domestic Hot Water (5 Houses in Inner Mongolia)

	传统电热水器	空气源热泵热水器(提温前)	提空气源热泵热水器(提温后)
家庭全年热水用电量(kWh)	5322.9	2661.5	1330.7
家庭全年热水耗煤量(千克标准煤)	1596.9	678.5	399.21

### 2.3 环保分析

1 千克标准煤燃烧可产生 0.625kg 粉尘、2.5kg 二氧化碳、0.075kg 二氧化硫和 0.0375kg 氮氧化物排放,一个冬季采用基于空气加热炉的新型风能制热系统辅助空气源热泵供暖,由于提升了空气源热泵的能效,可节约电能 4852.8kWh,相当于节约 1456.2kg 标准煤,同时减少 910.13kg 碳粉尘、3640.50kg 二氧化碳、109.22kg 二氧化硫、54.61kg 氮氧化物。由此可见,采用该新型风能制热系统提升空气源热泵供暖,其减排效果十分显著。

## 3 结论

首次提出风力机带动空气加热炉来提高空气源热泵入口温度的系统设计方案,设计结果表明,该系统提高了空气源热泵的能量转化率,拓宽其适用范围;将风能直接转化为热能,避免了风能转化为电能再转化为热能的中间能量消耗,提高了能源转化效率,拓展了风能的利用形式。该系统成本低、机构简单、操作方便,适用于辅助北方家庭空气源热泵采暖和生活用热水系统,具有一定的推广和实用价值。

### 参考文献:

- [1] 丁艳,赵培涛,唐果,等.一种新型风能制热系统[P].中国:ZL201820126602.5. 2018-10-16.
- [2] 盛学章.谁说空气源热泵将取代多联机?[J].机电信息,2017,(16):12-13.
- [3] 马一太,代宝民.热泵在开发可再生能源领域的作用及其贡献率的计算方法[J].制冷学报,2016,(2):65-69.
- [4] 封海辉.空气源热泵热水系统的应用与能效评价研究[D].成都:西华大学,2015.
- [5] 张灿,常茹,吕建.埋管地源热泵制热性能测试与分析[J].煤气与热力,2012,(10):1-4.