

# Study on the Alternative Heat Source of a Grain Drying Center in Nanjing

Shuiqing Huang, Meiqin Ni, Changshuo Wu, Cheng Qian, Wei Wu, Yuxue Zhang

College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu  
Email: 1459763670@qq.com

Received: Jun. 22<sup>nd</sup>, 2020; accepted: Jul. 20<sup>th</sup>, 2020; published: Jul. 27<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

This article aims at the heat source reconstruction project of a grain drying center in Nanjing, comprehensively analyzes the energy-saving, economy and environmental protection of three drying heat sources of coal-fired hot blast stove, air source heat pump and gas hot blast stove, to find the best alternative heat source. The results show that the air source heat pump not only has the smallest energy consumption in operation, but only 23.6% of the equivalent standard coal and 69% of the equivalent standard coal, the drying cost per unit of rice is the smallest, which is 0.0405 yuan/kg and its payback period is only 251 days. When generating electricity from clean energy, the air source heat pump has the best environmental protection benefits. For this project, the air source heat pump is used as a heat source replacement, with the best comprehensive benefit.

## Keywords

Air Source Heat Pump, Drying Heat Source, Gas Hot Blast Stove, Economy, Environmental Protection

---

# 南京某粮食烘干中心热源替代方案的研究

黄水清, 倪美琴, 吴昌硕, 钱程, 吴炜, 张玉雪

扬州大学电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州  
Email: 1459763670@qq.com

收稿日期: 2020年6月22日; 录用日期: 2020年7月20日; 发布日期: 2020年7月27日

---

## 摘要

本文针对南京某粮食烘干中心的热源改造工程, 对燃煤热风炉、空气源热泵和燃气热风炉三种烘干热源的节能性、经济性和环保性进行综合分析, 以寻求最佳的替代热源。结果表明: 空气源热泵不仅运行能

耗最小,与燃煤热风炉相比,仅为当量标煤的23.6%、等价标煤的69%,并且单位稻谷的烘干成本最小,为0.0405元/kg,投资回收期仅为251天;当其运行所耗电能源来源于清洁能源发电时,空气源热泵的环保效益最佳。对于该项目而言,空气源热泵作为热源替代,综合效益最佳。

## 关键词

空气源热泵, 烘干热源, 燃气热风炉, 经济性, 环保性

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

粮食是人类赖以生存与发展的重要物质基础,而粮食干燥是提高粮食产量、保障粮食品质、实现粮食安全储藏的重要环节。目前全球性粮食因干燥和储藏不当造成的损失高达5%~10% [1],如何减少收获后的粮食损失,实现粮食高效、安全、经济的干燥对粮食安全意义重大。目前的谷物烘干以燃煤热风炉为主,因其出风温度较高、烘干速度快,单位谷物烘干成本较低,但其尾气排放产生严重的环境污染问题[1]。为实现环境质量显著改善,主要污染物排放总量大幅减少,江苏省于2018年底实施“两减六治三提升”行动,减少煤炭消费总量。因此,燃煤热风炉的应用越来越受到限制,寻找合适的烘干热源替代成为烘干行业的首要任务[2]。而热泵技术以其独特的干燥原理、高效的能源利用率及环保等优点逐渐应用于干燥领域,其应用前景广阔[3]-[8]。燃气热风炉因其使用天然气这一清洁能源,环保性能较佳,目前备受烘干市场青睐。

本文选取南京某粮食烘干中心的烘干热源改造工程为研究对象,该中心现有4台30吨和2台15吨的粮食烘干机,未改造前,采用3台65万大卡和1台50万大卡燃煤热风锅炉作为烘干热源。拟选用10台42匹的空气源热泵热风机组或4台60万大卡的燃气热风炉作为替代烘干热源,在保证稻谷相同烘干效果的情况下,现将燃煤热风炉、空气源热泵和燃气热风炉这三种烘干热源进行节能性、经济性和环保性比较,以探寻最佳的烘干热源替代。

## 2. 节能性分析

不同能源的计量方式不一样,因此将空气源热泵消耗的电能和燃气热风炉消耗的天然气转换成等价标煤,对三种热源方式的运行能耗进行比较,研究这三种热源方式的节能效益。根据文献[9]取空气源热泵所消耗的电能折标煤系数,其中当量折标系数为燃料的理论发热量与标准煤的发热量之比,等价折标系数是指二次能源的等价热量与标准热量之比[10]。三种烘干热源的能源热值与设备热效率根据文献[11][12]选取,具体取值如表1所示。

Table 1. Energy calorific value and equipment thermal efficiency

表 1. 能源热值与设备热效率

热源方式	能源种类	理论热值	热效率	实际热值	当量折标系数	等价折标系数
燃煤热风炉	煤	29.3 MJ/kg	0.73	21.39 MJ/kg	1 kg.ce/kg	1 kg.ce/kg
空气源热泵	电	3.6 MJ/kWh	3.1	11.16 MJ/kWh	0.1229 kg.ce/kWh	0.36 kg.ce/kWh
燃气热风炉	天然气	35.6 MJ/Nm <sup>3</sup>	0.9	32.04 MJ/Nm <sup>3</sup>	1.2143 kg.ce/Nm <sup>3</sup>	1.2143 kg.ce/Nm <sup>3</sup>

如前所述, 烘干 150 吨稻谷一天所需制热量为  $3.01 \times 10^7$  kcal, 根据表 1 所示数据对采用三种热源方式的烘干系统能耗进行计算, 得到各热源方式的能耗如表 2 所示。

**Table 2.** Operating energy consumption of the three heat source methods  
**表 2.** 三种热源方式的运行能耗

热源方式	能源种类	运行能耗	当量标煤(ce)	等价标煤(ce)
燃煤热风炉	煤	5890.603 kg	5890.603	5890.603
空气源热泵	电	11290.32 kWh	1387.581	4064.516
燃气热风炉	天然气	3292.584 Nm <sup>3</sup>	4775.337	4775.337

由表 2 可知, 在保证稻谷相同烘干效果的情况下, 三种热源方式的运行能耗折合成当量标煤和等价标煤计算, 空气源热泵的运行能耗最小, 与燃煤热风炉相比, 仅为其当量标煤的 23.6%、等价标煤的 69%, 而燃气热风炉的运行能耗占燃煤热风炉所消耗的当量标煤的 81%, 说明空气源热泵的节能效果较为显著。

### 3. 经济性分析

烘干热源的经济性是选择烘干热源的重要因素之一, 因此, 本文分别从初投资、单位稻谷的烘干成本和投资回收期三个方面对这三种热源方式的经济性能进行比较。

#### 1) 初投资

本项目为热源改造项目, 原有烘干热源为燃煤热风炉, 因此, 本文的初投资仅考虑空气源热泵和燃气热风炉这两种热源设备的初投资, 如表 3 所示。

**Table 3.** Initial investment of two heat source equipment  
**表 3.** 两种热源设备的初投资

热源方式	型号	数量(台)	单价(万元)	总价(万元)
空气源热泵	HZHG140	10	10	100
燃气热风炉	RLY-60	4	3	12

由表 3 可知, 与燃气热风炉相比, 空气源热泵的初投资较高。

#### 2) 单位稻谷烘干成本

单位稻谷的烘干成本计算公式[13]为:

$$P = \frac{W \times t_{\text{电}} + S \times t_{\text{能}} + P_{\text{人}}}{G} \quad (1)$$

式中:  $P$ ——单位稻谷的烘干成本, 元/kg;

$W$ ——干燥系统总能耗, kWh;

$t_{\text{电}}$ ——电价, 元/kWh;

$S$ ——干燥系统其他能源总能耗, t;

$t_{\text{能}}$ ——其他能源价格, 元/t;

$G$ ——烘干塔处理量, t;

$P_{\text{人}}$ ——人工费, 元。

烘干系统所耗能源的单价按照南京地区 2019 年商用能源价格计算,其中电价享受农业补贴,为 0.45 元/kWh。空气源热泵干燥与燃气热风炉可实现全自动运行,无需人员看守,而燃煤热风炉则需要司炉工进行看守。因此,采用燃煤热风炉作为烘干热源需要在干燥成本中计算人工费,该项目未改造前需 12 人两班倒,本文人工费按 3000 元/天计算;而改造后留 4 人两班倒。在保证稻谷相同烘干效果的情况下,三种热源方式的干燥成本计算结果见表 4。

**Table 4.** The drying costs per unit of rice for the three heat sources

**表 4.** 三种热源方式单位稻谷的烘干成本

热源方式	燃煤热风炉		空气源热泵		燃气热风炉	
总制热量 kW	34,960.5 kW		34,960.5 kW		34,960.5 kW	
单位成本	煤价	1200 元/t	电价	0.45 元/kWh	燃气价	2.8 元/Nm <sup>3</sup>
消耗量	用煤量	5890.603 kg	用电量	11,290.32 kWh	用气量	3292.584 Nm <sup>3</sup>
人工费	3000 元		1000 元		1000 元	
运行费用	10068.72 元		6080.64 元		12,011.23 元	
单位烘干成本	0.0671 元/kg		0.0405 元/kg		0.0801 元/kg	

由表 4 可知,稻谷的单位烘干成本分别为:燃煤热风炉 0.0671 元/kg,空气源热泵 0.0405 元/kg,燃气热风炉 0.0801 元/kg。显然,空气源热泵烘干的单位成本最低,其次为燃煤热风炉,而燃气热风炉的单位稻谷烘干成本最高,约为空气源热泵的 2 倍。因此,采用空气源热泵替代燃煤热风炉作为烘干热源,一天可节约烘干成本约 4000 元,与其他烘干热源相比,具有较好的经济效益。

### 3) 投资回收期

投资回收期是评价工程经济性的参数之一,因此,本文对三种热源方式的投资回收期进行比较,寻找经济效益最佳的烘干热源替代。投资回收期的计算公式[14]如下:

$$\sum_{t=0}^{P_t} CI_t - CO = 0 \quad (2)$$

式中:  $P_t$ ——投资回收期,天;

$t$ ——时间,天;

$CI$ ——日节省费用,元;

$CO$ ——初投资,元。

因粮食烘干系统是季节性运行,在夏热冬冷地区一般分为稻季和麦季,本文假设一年中稻季和麦季合计共 180 天,而该粮食烘干中心日烘干产量为 150 t。由表 3、表 4 以及公式(2)计算可知,燃气热风炉的初投资虽然比空气源热泵较低,但是其单位烘干成本高于原有燃煤热风炉,约为空气源热泵的 2 倍。而空气源热泵虽然初投资较高,但是其单位烘干成本较低,仅为 0.0405 元/kg,投资回收期仅为 251 天,经济效益可观。

## 4. 环保性分析

本文从污染物的排放量来分析比较三种热源方式的环保性。空气源热泵仅消耗电能,对环境友好,在此假设电能来源于燃煤发电,将其转换成燃煤发电过程中产生的污染物排放。各消耗单位能源产生的污染物排放量[15][16][17]如表 5 所示。

**Table 5.** Emissions of pollutants consuming unit energy  
**表 5.** 消耗单位能源的污染物排放量

热源方式	能源种类	烟尘(kg)	SO <sub>2</sub> (kg)	NO <sub>x</sub> (kg)	CO (kg)	CO <sub>2</sub> (kg)
燃煤热风炉	原煤(t)	7.5	16.72	3.62	22.7	2334
空气源热泵	燃煤发电(104 kWh)	33.5	80.3	69	0.72	10523
燃气热风炉	天然气(104 Nm <sup>3</sup> )	3.02	6.30	18.43	0.063	20180

根据表 2 所示的运行能耗结合如表 5 所示的单位能耗的污染物排放量计算可得烘干 150t 稻谷各热源方式产生的污染物排放量, 如表 6 所示。

**Table 6.** Emissions of pollutants by heat source  
**表 6.** 各热源方式的污染物排放量

热源方式	能源种类	烟尘(kg)	SO <sub>2</sub> (kg)	NO <sub>x</sub> (kg)	CO (kg)	CO <sub>2</sub> (kg)
燃煤热风炉	原煤	44.18	98.49	21.32	133.72	13748.67
空气源热泵	燃煤发电	37.82	90.66	77.90	0.81	11880.81
燃气热风炉	天然气	1.19	2.48	7.25	0.02	7935.96

综上所述, 燃气热风炉的总污染物排放量最小, 环保效益最佳。此外, 燃气热风炉的初投资最低。但燃气热风炉所用的天然气为一次能源, 且其单位稻谷烘干成本最高, 约为空气源热泵的 2 倍。同时使用燃气热风炉附近需有天然气管道, 目前大部分粮食烘干中心的地理位置不具备条件。而空气源热泵虽然总污染物排放量大于燃气热风炉, 初投资较高, 但是其对粮食烘干中心周围无直接环境污染。若其电能来源于清洁能源发电而非燃煤发电时, 换算成一次能源后空气源热泵的总污染物排放量大大地降低, 并且空气源热泵技术属于可再生能源。综合分析三种热源的节能、经济及环保效益, 对于南京某烘干中心的热源改造工程, 空气源热泵作为燃煤热风炉的替代, 综合效益最佳。

## 5. 结语

本文以南京某粮食烘干中心的热源改造工程为研究对象, 对燃煤热风炉、空气源热泵和燃气热风炉三种烘干热源的节能性、经济性和环保性进行分析, 得出以下结论:

1) 空气源热泵的运行能耗最小, 与燃煤热风炉相比, 仅为当量标煤的 23.6%、等价标煤的 69%, 而燃气热风炉的运行能耗为燃煤热风炉消耗的当量标煤的 81%, 空气源热泵的节能效果较为显著。

2) 虽然空气源热泵的初投资较高, 但其单位烘干成本最低, 仅为 0.0405 元/kg, 投资回收期仅为 251 天, 经济效益可观; 而燃气热风炉虽然初投资较低, 但其单位烘干成本最高, 不仅高于原有燃煤热风炉烘干, 而且约为空气源热泵的 2 倍。

3) 燃气热风炉的总污染物排放量最小, 环保效益最佳。但燃气热风炉所用的天然气为一次能源, 并且使用燃气热风炉需附近有天然气管道, 目前大部分粮食烘干中心的地理位置不具备条件。而空气源热泵虽然总污染物排放量大于燃气热风炉, 但是其对粮食烘干中心周围无直接环境污染。若其电能来源于清洁能源发电而非燃煤发电时, 换算成一次能源后空气源热泵的总污染物排放量大大地降低, 并且空气源热泵技术属于可再生能源。

## 基金项目

本论文由扬州大学大学生科技创新基金资助 X20190483。

## 参考文献

- [1] 张振涛, 杨鲁伟, 董艳华, 等. 热泵除湿干燥技术应用展望[J]. 高科技与产业化, 2014(5): 70-73.
- [2] 赵宗彬, 朱斌祥, 李金荣, 等. 空气源热泵干燥技术的研究现状与发展展望[J]. 流体机械, 2015, 43(6): 76-81.
- [3] 戚玉欣, 陶志国. 空气源热泵干燥技术的研究现状与发展展望[J]. 资源节约与环保, 2016(5): 69.
- [4] 娄正, 刘清, 赵玉强, 等. 空气源热泵干燥技术在农产品产后处理中的应用[J]. 农业工程, 2017, 7(5): 68-72.
- [5] Li, W., Sheng, W., Zhang, Z., *et al.* (2018) Experiment on Performance of Corn Drying System with Combination of Heat Pipe and Multi-Stage Series Heat Pump Equipment. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **34**, 278-284.
- [6] Thing, C.T., Mei, X.N., Shu, H.G., *et al.* (2018) Impacts of Different Drying Strategies on Drying Characteristics, the Retention of Bio-Active Ingredient and Colour Changes of Dried Roselle. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **26**, 303-316. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.05.011>
- [7] Liu, S., Li, X., Song, M., *et al.* (2018) Experimental Investigation on Drying Performance of an Existed Enclosed Fixed Frequency Air Source Heat Pump Drying System. *Applied Thermal Engineering*, **130**, 735-744. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.068>
- [8] 左希桐. 空气源热泵干燥技术在蚊香生产中的优化研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [9] BT2589-2008, 综合能耗计算通则[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [10] 马武忠. 浅议电力折标系数及其对节能工作的影响[J]. 能源研究与利用, 2011(1): 34-35.
- [11] 李玉洁. 家用太阳能热水系统的节能与环境效益分析[J]. 节能技术, 2007, 25(3): 211-226.
- [12] 陆海荣. 复合热泵热水系统在某高校洗浴中心的应用与研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2019.
- [13] 郜坤. 谷物干燥过程热质交换及能耗研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [14] 梁普, 苍雪娇. 液化天然气气化冷能用于建筑空调系统的研究[J]. 暖通空调, 2020, 50(3): 76-79.
- [15] 酆建国, 朱法华, 孙雪丽. 中国火电大气污染防治现状及挑战[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 2-10.
- [16] 虞江萍, 崔萍, 王五一. 我国农村生活能源中 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 及 TSP 的排放量估算[J]. 地理研究, 2008, 27(3): 547-555.
- [17] 陈磊. 中小燃煤锅炉气态污染物排放因子实测研究[J]. 科技视界, 2014(19): 231-233+324.