

## 660 MW 机组送风机降速改造与变频改造的分析研究

孟庆龙<sup>1</sup>, 韦红旗<sup>1</sup>, 何长征<sup>2</sup>

(1.东南大学能源与环境学院,江苏南京 210096;2.南京博沃科技发展有限公司,江苏南京 210006)

**摘要:**为提高宁夏京能宁东发电厂 660 MW 机组送风机运行的安全、稳定、经济性,特进行了热态性能试验。针对其电机负载率偏低的问题,通过计算提出了送风机降速和变频调速 2 种改造方案,经过经济性和安全性对比分析,最终采用送风机降速改造方案。改造后的性能试验数据显示,送风机运行效率明显提高,且投资少、可靠性高。

**关键词:**送风机;降速改造;变频改造;节能降耗

**中图分类号:**TK223.26

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-0665(2014)03-0006-04

送风机是电站锅炉机组的主要辅机,也是保证机组安全和经济运行的关键设备之一。因此,通过对送风机进行热态试验,以了解风机运行性能,并根据实验数据和电厂现场情况,对送风机改造提出不同方案,分析可行性和经济性,选择最优方案,改造后的风机能高效、安全、经济地运行,以保证锅炉机组的长期稳定运行和较低的厂用电率,同时也起到节能降耗的作用。

## 1 锅炉和风机系统概述

宁夏京能宁东发电有限责任公司(以下简称京能宁电)的一期 2 号机组为 660 MW 燃煤汽轮发电空冷机组,锅炉为超临界参数变压运行螺旋管圈加垂直管直流炉,单炉膛、一次中间再热、采用切圆燃烧方式、平衡通风、固态干式排渣、全钢悬吊结构 II 型锅炉、室内布置煤粉锅炉,锅炉采用紧身封闭。锅炉型号:HG-2210/25.4-YM16,4 只低 NO<sub>x</sub> 墙式直流燃烧器,采用四面墙布置,燃烧器一、二次风喷嘴呈间隔排列,顶部设有 SOFA 二次风,底部设有 AA 直吹二次风,6 台 ZGM113G-II 中速磨煤机配正压直吹制粉系统。

宁东电厂送风机选配为沈阳鼓风机集团有限公司 2×50% 动叶可调轴流风机,型号为 ASN-3040/1600 型。其主要参数见表 1。电动机型号为 YKK710-6,其参数为:额定功率 1800 kW;额定电压 6000 V;额定电流 206 A;额定转速 995 r/min;功率因数 0.879。

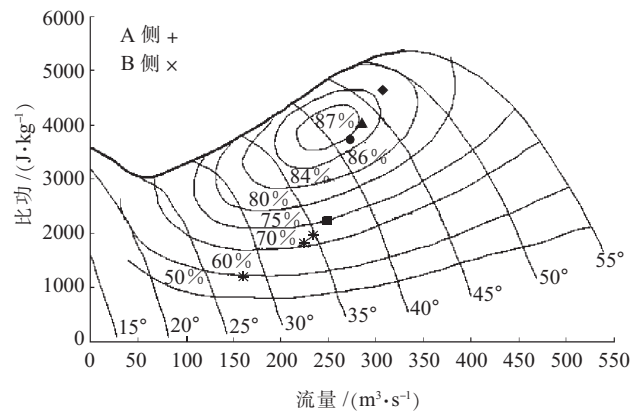
## 2 性能试验

送风机试验和有关数据的计算是依据 DL/T 469—2004<sup>[1]</sup>和 DL/T 5240—2010<sup>[2]</sup>进行的。送风机试验分别在机组负荷 644 MW,560 MW,458 MW 下进行,结果见图 1 和表 2。图中的最大蒸发量(推算)工况点是以试验煤质、最大蒸发量(2210 t/h)为条件,通过相关理论计算,得出送风机风量及风机全压。

表 1 送风机设备性能参数表

项目名称	风机设计工况(TB)	锅炉最大蒸发量工况(BMCR)	汽机热耗率验收工况(THA)
进口体积流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	306.27	283.94	272.98
风机全压/Pa	4555	4142	3837
风机比功/(J·kg <sup>-1</sup> )	4575	4032	3751
全压效率/%	85	87	87
风机轴功率/kW	1623	1382	1194
进风温度/℃	28	20	20

注:转速均为 995 r/min。



◆ TB; ● THA; ▲ BMCR; ■ 最大蒸发量(推算)

图 1 2 号炉送风机各试验工况点与最大蒸发量点

通过计算,将 644 MW 实测值换算到最大蒸发量工况点(即试验 BMCR 工况),风机流量为 249.1 m<sup>3</sup>/s,风机全压为 2276 Pa;而 BMCR 工况的送风机设计流量为 283.94 m<sup>3</sup>/s,设计压力为 4142 Pa。经对比发现,该工况点的流量及压力均低于 BMCR 设计工况点,其中流量略小于设计值,其原因是由于空预器二次风侧与一次风侧之间的密封装置在试验期间为固定间隙,使得一次风道部分风量串入二次风道,导致送风机风量有所减小,所以送风机风量偏小是正常的。

送风机的实测参数与 TB 点比较,风量裕量 22.95%,风压裕量 100.13%。从风机选型角度出发,则风机的选型较不合理,尤其是风机全压裕量过于偏大。

表 2 送风机性能试验数据

风机编号	工况 1 (560 MW)		工况 2 (644 MW)		工况 3 (458 MW)	
	A 侧	B 侧	A 侧	B 侧	A 侧	B 侧
风机动叶电动执行阀位 /%	28.7	17.2	31.8	19.9	17.2	17.1
风机流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	219.0	220.6	235.7	233.1	160.3	160.2
风机比功/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	1821	1835	1962	1986	1161	1115
电动机电功率/kW	563.0	572.8	658.2	642.9	340.7	348.7
电动机功率因数	0.67	0.67	0.73	0.71	0.50	0.50
风机装置效率(含电动机)/%	70.3	70.2	71.2	72.8	55.5	52.0
风机轴功率/kW	514.2	523.2	606.2	590.4	303.4	310.5
风机效率/%	76.9	76.9	77.3	77.2	62.3	58.4
2 台风机入口总风量(实测)/( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ )	1583		1722		1177	
主蒸汽流量(计算)/( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ )	1800		2079		1407	

从风机效率来看,该风机在高负荷(550 MW 以上)运行时,风机效率在 70% 以上,但在低负荷运行(450 MW)时,风机效率(约 60%)相比高负荷工况有明显下降。同时,试验工况下,风机效率在 58%~80% 之间,与性能曲线图中各运行工况点对应效率(约为 57%~73%)略有偏差,而且与该型风机最高效率区的效率(87%)相比,仍有一定节能空间。

试验工况下,2 号机组送风机的电动机功率因数较低,尤其是在 450 MW 机组负荷时,其数值只有 0.50,分析认为主要是电动机的负载率过低所致,3 个试验工况的负载率分别为 32%,36%,19%。电动机的额定功率达到 1800 kW,由此可知电动机的额定功率选型值偏大,致使实际运行中电动机负载率和功率因数偏低,电动机效率低下。

### 3 送风机改造方案研究

送风机一般有叶轮本体改造、降速改造以及变频调速改造 3 种主要改造思路<sup>[3-6]</sup>。根据上述试验结果分析,结合电厂的实际情况和要求,在尽量减少现场改动量的前提下,选择了风机降速和变频调速 2 种节能改造方案进行研究。

#### 3.1 送风机降速改造方案

##### 3.1.1 电机降速改造方案

送风机的降速改造方案主要是对其电机转速进行调整,送风机电机原设计为 6 极电机,同步转速为 1000 r/min,工作转速为 990 r/min,转差率为 1%,由于电机变极降速要求,改后送风机电机极数只能为 8 极,对应同步转速为 750 r/min。取 1%~5% 的转差率范围,所以风机转速范围为 710~740 r/min。同时通过计算得知转速从 996 r/min 降到 740 r/min 后能满足锅

炉各种运行工况的需要,而且降速后各个运行工况点都位于高效区,各运行工况点也都远离失速区。图 2 给出了降速改造后的性能曲线和各运行工况点的位置(因 2 号机组 A 侧与 B 侧情况大致相同,故以后分析皆以 B 侧为例)。表 3 给出了改造后节能量的估算。改造后 2 台风机年节电量为 1 235 000 kW·h。

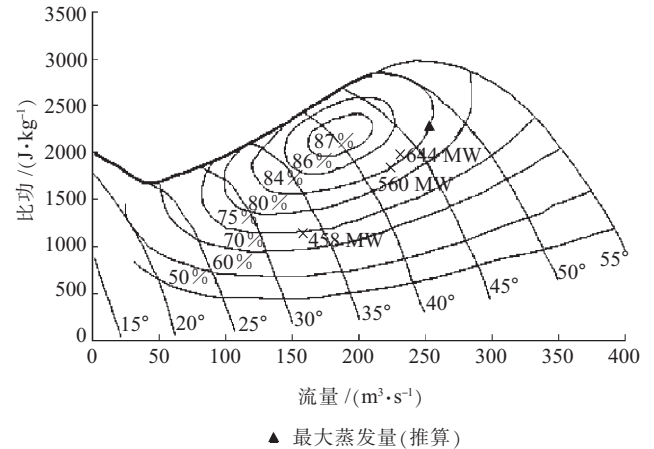


图 2 送风机各试验工况点与最大工作点在 740 r/min 转速下性能曲线中的位置

表 3 送风机降速改造后的节能量分析

参数名称	工况 1	工况 2	工况 3
机组负荷 /MW	560	644	458
风机效率 /%	84.0	84.5	74.5
运行效率提高 /%	7.1	7.3	16.0
风机耗功减少量 /kW	70	88	89
年节电量 / (kW·h)	175 000	220 000	222 500

注:以年运行 7500 h 计,各负荷年平均运行 2500 h,下同。

##### 3.1.2 送风机电机功率的确定

与宁东公司的技术人员交流及试验得知,其空预器一、二次风间漏风量较大,而且也准备进行改造。进行电机功率确定时考虑到此问题,假设其改造后的空预器性能达到设计值,届时在维持最大入炉二次风量的情况下,送风机流量将要增加。为确定送风机改造后的最大工作点,从宁东公司收集并统计了 2 号机组在冬季、夏季不同典型负荷下的送风机运行参数,在 660 MW 工况下,2 台送风机最大合计流量为 1890 t/h;同时,由试验、计算可大致算得空预器一次风侧至二次风侧的漏风量比其设计值大 160 t/h 左右,建议最大工作点流量取 1025 t/h(1890/2+160/2),送风机进口空气密度为 1.0 kg/m<sup>3</sup>,则送风机进口体积流量 284.7 m<sup>3</sup>/s,由表 2 试验数据推算,最大工作点的比功为 2643 J/kg(即送风机的全压约为 2643 Pa)。取改造后送风机的最大工作点流量为 284.7 m<sup>3</sup>/s,全压为 2643 Pa,此工况点风机运行的效率为 80%。则单台送风机运行时的轴功率为 931 kW,此时电机的负载率为 51.7%,同时考虑

机械传动效率为 98%、电机效率为 94%，电机输入功率为 1011 kW，电机裕量取为 5%，电机功率则为 1062 kW。考虑到 TB 点的工况，电机功率的选取应在 1062 kW 以上。

### 3.2 送风机变频改造方案

#### 3.2.1 变频改造的基本原理

变频调速的改造也是对电机方面的改造，是通过增加变频器，使风机实现变速运行。变频效果主要依据风机相似定律，由相似定律可得到同一工况点在不同转速下的风机效率及各转速下的风机性能曲线。在相似工况下运行的风机其流量、压力、功率与转速之间的关系，可由如下简化公式表示：

$$\begin{cases} \frac{q_1}{q_2} = \frac{n_1}{n_2} \\ \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \\ \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $q$  为风机流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ； $p$  为风机压力， $\text{Pa}$ ； $P$  为风机功率， $\text{W}$ ； $n$  风机的转速， $\text{r}/\text{min}$ 。当机组负荷变化使送风量减小时，扬程随着转速下降而降低，可以大幅度减少节流损失；采用变频调速时风机的工作效率  $\eta$  总是处于高效区；而且变频改造后，变频器具有根据负载轻重情况调节输入电压的功能，提高了电动机的工作效率和功率因数。

#### 3.2.2 变频改造效果分析

通过计算分析可知，现有风机动叶在  $45^\circ$  开度时，风机的运行效率最高。风机的出力也能满足其最大蒸发量工况点的运行需求。图 3 给出了动叶固定在  $45^\circ$  时的转速调节性能曲线和各运行工况点的位置。表 4 给出了风机变频改造前后节能量的估算。改造后 2 台风机年节电量为 1 280 000  $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。

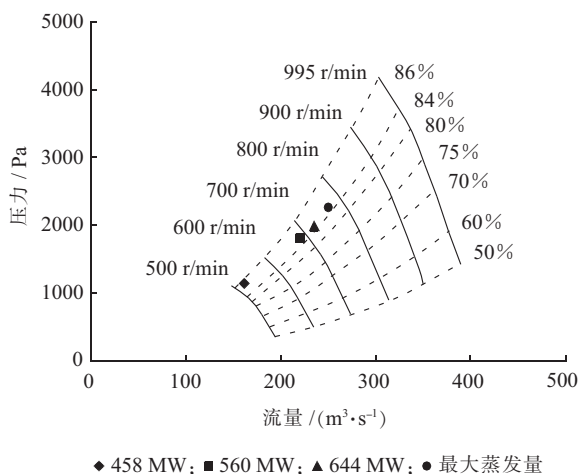


图 3 送风机动叶角度  $45^\circ$  变频后的性能曲线及设计参数的位置

表 4 送风机变频改造后的节能分析

参数名称	工况 1	工况 2	工况 3
机组负荷 /MW	560	644	458
风机效率 /%	84.5	84.5	74.5
运行效率提高 /%	7.6	7.3	27.0
风机耗功减少量 /kW	81	75	100
年节电量 / ( $\text{kW}\cdot\text{h}$ )	202 500	187 500	250 000

## 4 2 种改造方案比较

### 4.1 经济性分析对比

由上述分析可知，在高中负荷时，2 种方案的风机效率提高差不多；而在低负荷时，变频改造方案的节能效果稍微明显一些。从节电量上来看，送风机的变频改造比降速改造每年多节约 45 000  $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。2 种方案的投资回收比较分析见表 5。

表 5 2 种改造方案投资、回收的对比

项目	降速改造	变频改造
节电量 /kW	1 235 000	1 280 000
节约费用 / 万元	49.4	51.2
投资设备费用 / 万元	86	223
回收年限 / 年	1.74	4.35

注：上网电价按 0.4 元 / ( $\text{kW}\cdot\text{h}$ ) 计。

由表 5 可以看出，2 种方案的年节省费用基本相同，但变频改造前期投资大，回收期达 4 年多，而降速改造仅不到 2 年就可以收回投资，由于变频改造的控制系统相对复杂，可能需要更多的投入，而降速改造则简单很多，几乎和改造前一样，而且如果再算上维护、检修费用，两者的投资费用差距更为明显。由此考虑，送风机降速改造的经济性更为理想。

### 4.2 安全性分析对比

送风机的降速改造，本体以及其他设备不需进行改动，只要对电机改动即可，改动量极少，安全性较高。

送风机的变频改造，也不用对风机本体改造，但送风机的热工控制系统、电气保护系统等需要进行改造，还要加装变频设备柜。同时，为了防止送风机在较低转速时风机本体与其构件、风道导流叶片等发生共振（比如叶片共振和轴系扭振，可能会造成叶片疲劳折断和主轴断裂等）或是相邻风机机组产生的拍振危险，所以电厂还需对变频后可能的共振或拍振频率进行测量，以避免危险运行频率，确保风机的安全运行。同时，在控制系统方面，变频器的控制系统比较复杂，可靠性没有原来的系统高。

综上分析，从经济性、运行维护及产出比与安全性等方面的对比可知，将现有送风机电动机的转速由



995 r/min 降到 740 r/min 的降速方案更优。

## 5 改造后的效果评估

宁东电厂 2 号机组在大修间实施了送风机电机降速节能改造,风机转速从 995 r/min 降至 747 r/min(电动机从 6 级改为 8 级),能够满足各个工况的运行要求,机组运行中送风机效率在各个工况点都有不同程度的提高。表 6 给出了改造前后电机参数对比。

表 6 电机改造前后参数对比

项目	改造前	改造后
电机型号	YKK710-6	YKK710-8
额定功率/kW	1800	1250
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	995	747
额定电流/A	206	88.23

送风机改后试验结果表明,风机降速改造后,其运行开度明显增大(增大约 40%~80%),运行效率明显提高(提高约 4%~15%),如果按年运行 7500 h,年平均三个工况点各运行 2500 h 算,每台机组(2 台送风机)可以节约耗电量 1 534 000 kW·h,上网电价每千瓦时按 0.4 元计算<sup>[7]</sup>,每年可节约 61.36 万元。表 7 给出了改造前后送风机性能对比及节电量分析。

表 7 送风机改造前后性能参数对比及节电量分析

项目	试验工况(B 侧送风机)					
	改造前	改造后	改造前	改造后	改造前	改造后
机组负荷/MW	458	465	560	550	644	630
动叶开度/%	17.1	24.1	17.2	31	19.9	41
风机入口流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	160.2	168.6	220.6	198.0	233.1	245.2
比功/(J·kg <sup>-1</sup> )	1115	1170	1835	1355	1986	1737
电动机功率因数	0.50	0.36	0.67	0.44	0.71	0.56
效率/%	58.40	73.79	76.90	80.83	77.20	87.16
效率提高/%	15.40		3.93		9.96	
风机轴功率/kW	310.5	269.7	523.2	354.6	590.4	493
轴功率减少/kW	40.8		168.6		97.4	
各负荷年节电量/(kW·h)	102 000		421 500		243 500	

## 6 结束语

通过试验可知,送风机出力较大,选型不合理且电动机的额定功率选择也过大,有很大的节能空间。确定降速改造方案时,最大蒸发量工况点的确定十分重要,需根据电厂实际情况及试验数据来计算。试验工况下送风机的效率与性能曲线中各运行工况点对应效率,由图可知略有偏差,这与制造、安装、测量误差都有一定关系。通过对 2 种改造方案的对比分析可知,对于宁东电厂的送风机而言,送风机降速改造的经济性以及安全性等更为理想。改造后,2 台风机在高负荷运行时,风机效率在 86%以上,高于设计值( $\geq 85\%$ ),两侧阻力平衡,2 台风机运行稳定,可靠。综合考虑,对送风机而言,降速改造方案改动少,投资小,且改造的经济性十分理想,值得推广。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 469—2004 电站锅炉风机现场性能试验[S]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [2] 国家能源局. DL/T 5240—2010 火力发电厂燃烧系统设计计算技术规程[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [3] 刘家钰. 我国电站风机节能的途径探讨[J]. 风机技术,2007(3):50-55.
- [4] 卫运钢. 变频技术在热电厂风机节能改造中的应用[J]. 风机技术,2010(5):57-61.
- [5] 冒士平,丁平,赵启明. 330 MW 机组送风机电机降容改造及节能分析[J]. 电力科学与工程,2009,25(8):62-64.
- [6] 宓洪武,李智娟,许凤玲,等. 浅谈火力发电厂风机节能改造[J]. 风机技术,2010(3):53-57.
- [7] 严加发. 650 MW 燃煤机组引风机和增压风机合并节能分析[J]. 江苏电机工程,2013,32(4):74-76.

### 作者简介:

孟庆龙(1990),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为电站风机改造选型以及优化运行;  
韦红旗(1966),男,安徽霍山人,副教授,从事电厂各设备性能试验、分析研究及性能优化研究;  
何长征(1978),男,江西新余人,工程师,从事热动力系统与设备的性能测试、分析、优化工作。

## Research on Retrofit Through Frequency Conversion or Operation at Lower Speed for Forced Draft Fans of 600 MW Power Unit

MENG Qinglong<sup>1</sup>, WEI Hongqi<sup>1</sup>, HE Changzheng<sup>2</sup>

(1.School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Bowo Science and Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210006, China)

**Abstract:** In order to improve the safety, stability, and operational economy of the forced draft fans, performance tests were performed in the 600 MW power unit of Ningdong Power Generation Company. Based on the acquired test data, two retrofit schemes were proposed for the draft fans, including frequency conversion and operation at lower speed. According to the contrast results, the latter scheme was adopted finally. The test results after retrofitting showed that the efficiency of forced draft fans had been greatly improved, and very satisfactory energy-saving results were achieved.

**Key words:** forced draft fan; retrofit at lower speed; frequency conversion; energy saving and consumption reduction