

固定频率下主通风机工频与变频运行时的对比实验研究

贾腾¹, 王海桥¹, 陈世强^{1,2,3}, 赵杰¹, 章晓伟¹

- (1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;
2. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083;
3. 湖南科技大学 湖南省矿山通风与除尘装备工程技术研究中心, 湖南 湘潭 411201)

摘要:针对通风机节能的问题,利用自主研发的矿用通风机实验平台,测定了K45-4-No9/18.5kW型轴流主通风机在变频和工频频率均为50 Hz下的风机性能参数.利用软件分析实验数据并绘制风机性能曲线,结果表明:主通风机在变频100%和工频2种情况下运行的风机性能曲线变化大体一致;变频100%运行时的风量、风压曲线比工频运行时的风量、风压曲线波动大,说明变频100%运行时风压更容易受风量的影响;在大风量情况下,工频运行相对于变频100%运行节能,最大节电率达到3.756%;工频运行时的效率高于变频100%运行时的效率,且两者的最大效率值相差2.93%.

关键词:矿用主通风机;变频调速;风机性能曲线;节能;对比实验

中图分类号:TD724 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2014)04-0063-05

Comparative study of main fan frequency and frequency operation under the fixed frequency

JIA Teng¹, WANG Haiqiao¹, CHEN Shiqiang^{1,2,3}, ZHAO Jie¹, ZHANG Xiaowei¹

- (1. School of Mining and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
3. Hunan Provincial Engineering Research Center of Mine Ventilation and Dust Removal Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In view of the fan energy saving problem, this paper adopts the experiment system of the mine main fans developed by the researchers, and determines that the K45-4-No9/18.5kW axial flow fan performance parameters of main fan under frequency and power frequency is 50 Hz. It uses the software analysis of experimental data and drawing fan performance curve. Results show that the main fan in the frequency conversion 100% and power frequency in both cases run is broadly in line with a fan performance curve; frequency conversion 100% air volume and air pressure curve at runtime is bigger than runtime power frequency curve fluctuations, illustrate air pressure of frequency conversion 100% is more susceptible to the influence of the air; under the condition of large air volume, it runs the power frequency relative to the frequency conversion 100% energy-saving operation, the biggest power saving rata reaches 3.756%; power frequency efficiency is higher than the efficiency of the frequency conversion 100%, and the maximum efficiency of the difference is between the value of 2.93%.

Key words: a mine main fan; variable frequency; the fan performance curve; energy saving; contrast experiment

收稿日期:2014-05-06

基金项目:深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLGDUK1018);湖南科技大学研究生创新基金资助项目(S130004)

通信作者:王海桥(1962-),男,湖北武汉人,博士,教授,研究方向:矿山职业健康与环境控制. E-mail: hqwang1962@126.com

在矿业生产耗能中,主要通风机能耗约占矿井生产总能耗的1/3,通风电力消耗约占通风能耗的70%^[1].由于通风机无调速装置,长期处于恒速运转,既浪费了风量,又增加了电能消耗.采用变频器调速的矿用通风机,可以实现动态供风,是解决现有依赖调节通风机叶片角度等传统技术手段,而难以适应煤矿实时需风量变化,导致通风不安全问题的有效途径.此外,大量研究表明,变频调速具有明显的节能效果,不失为目前最理想的调速节能方案^[2].文献[3-6]分别对煤矿和电厂的风机进行了变频改造,现场应用表明节能效果显著.

为了全面评定通风机的性能,就必须了解在各种工况下通风机各个性能参数之间关系,这就需要通过风机性能实验作出风机性能曲线.已有的研究成果,要么侧重于工程应用,理论讨论很少;要么侧重于讨论变频风机各个频率下的性能曲线变化,很少涉及风机在变频与工频2种工况下的性能曲线变化规律的研究;对于主通风机,变频调速可以节能,那么对于安装变频器的主通风机来说,在不改变转速的情况下,同一风机变频运行相对工频运行是否节能还不清楚.在矿用主通风机的性能实验研究方面,前期已完成了变频频率值-转速值、风量-风压和风量-功率的研究^[7-9],本文通过实验实测矿用主通风机在工频和变频2种情况下频率为50 Hz时风压(H)、风量(Q)以及输入功率(N),并在此基础上计算出效率(η),分别作出相应的 $H-Q$ 、 $N-Q$ 和 $\eta-Q$ 这3条曲线,对比分析

同一频率2种工况下的风机性能曲线,探讨2种工况下矿用主通风机运行特性的异同.

1 矿井主通风机性能测试实验

1.1 矿井主通风机性能测试实验系统装置

本实验为矿井主通风机性能测试实验,包括测量装置及测试系统2部分.实验系统主要由K45-4-No9/18.5kW型轴流通风机、节流装置、差压式流量计以及压力传感变送器等组成,测量段和过渡段采用半径为500 mm的圆形管道.

实验系统主要技术参数如下:

测量范围:变频器功率为1.1~20 kW;频率:0~50 Hz;风量范围:5 000~60 000 m³/h,精度:±1.5%;静压差:0~2 500 Pa,精度:≤0.2%.

实验用主通风机性能参数如下:电动机额定功率,18.5 kW;静压,350~950 Pa;额定转速:1 470 r/min.

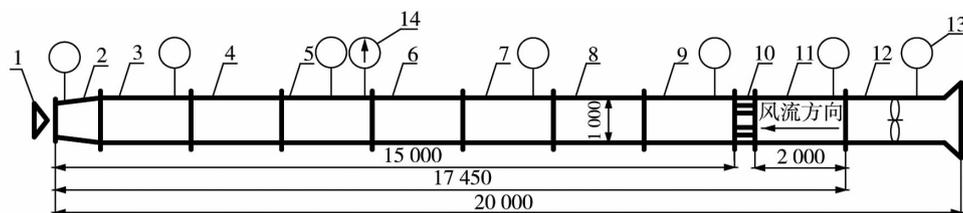
差压式流量计:型号,LJC-1000-114100;量程范围,0.00~675.99 Pa;类型:强力巴流量计.

高精度压力传感变送器:量程范围,0~2 kPa;精度:±0.3% FS.

测试软件是自主开发的风机性能测试系统,测试系统中风机控制有电网启动和变频启动2种方式.

1.2 矿井主通风机性能测试实验过程

矿用主通风机性能测试系统,其系统结构如图1.



1: 节流装置;2,4,6,8: 过渡段;3,5,7,9,11: 测量段;10: 整流段;12: 主通风机;13: 高精度压力传感变送器;14: 差压式流量计

图1 矿用主通风机性能测试系统结构图

当需要软件控制电机旋转时,可以选择变频启动,并将控制柜的转换开关打到“变频”及“程控”,在速比文本框中输入相应的值(范围0~100),然后点击“OK”按钮对电机的转速进行控制.实验中变频情况下在速比文本框中输入100(取工频频率的百分比,其中工频频率为 $f=50$ Hz),根据实验所需,通过按住控制箱中的按钮来控制节流装置1,

进而通过控制节流装置1的前进和后退来调节流量(时间根据软件上流量显示而定);节流装置1的移动长度大约为950 mm,当按下控制箱中的按钮时,节流装置1会移动10 mm,此时风机的风量发生变化,等数据稳定后,记录数据,重复调节和记录数据,直至走完节流装置1全程.最后调节转速至零,停下风机,点击“停止采集”按钮.在风机完

全停止旋转后,将强电柜上旋转开关转至“电网”及“手动”,风机接电网运行,按照风机变频启动节流装置1的方法,利用软件采集数据.实验过程中,通过差压式流量计测定流风量,高精度压力传感变送器测定风压,由软件直接记录不同频率下风机的风量、风压和输入功率等.

实验装置配有7个高精度压力传感变送器,根据传感变送器离主通风机距离的远近,会产生7组不同的风机性能参数.本文中,选取其中一组实验

数据进行研究.

2 实验结果及分析

2.1 矿用主通风机在2种工况下的风机性能曲线

频率50 Hz时变频和工频2种情况下矿用主通风机测得的风机性能参数实验数据如表1;表2为实验数据拟合曲线的相关系数和误差平方和,相关系数越接近1,误差平方和越小,拟合越精确.

表1 风机性能实验实测数据

序号	变频 100%			工频		
	$Q/(m^3/h)$	H/Pa	N/W	$Q/(m^3/h)$	H/Pa	N/W
1	42 540.70	530.30	11 647.1	42 540.70	549.57	11 510.1
2	41 414.50	551.90	11 590.7	41 206.00	566.70	11 544.7
3	40 663.80	563.07	11 613.6	40 538.60	574.15	11 495.0
4	40 538.60	563.07	11 617.7	39 871.30	586.81	11 515.0
5	39 871.30	563.82	11 598.4	38 286.30	597.98	11 522.0
6	38 202.90	577.22	11 563.2	38 244.60	597.23	11 494.7
7	37 869.20	588.40	11 641.5	37 598.10	610.64	11 165.7
8	37 222.70	597.33	11 641.1	37 222.70	649.37	11 174.6
9	35 199.80	645.75	11 549.7	34 553.30	662.03	10 746.0
10	34 553.30	656.92	11 032.6	31 863.10	575.63	9 958.3
11	34 532.50	647.24	10 988.9	27 316.80	485.51	9 180.4
12	33 051.80	655.43	10 979.1	26 545.10	484.77	9 155.8
13	27 567.00	477.42	9 103.4	24 522.20	492.96	9 185.6
14	26 545.10	469.23	9 097.6	23 854.90	516.05	9 218.2
15	24 835.00	470.72	9 017.5	21 519.10	551.06	9 280.8
16	23 875.70	484.87	9 050.4	20 372.10	573.40	9 599.2
17	22 228.20	500.51	9 591.7	18 808.00	604.68	9 991.1
18	21 206.30	551.16	9 630.6	17 473.30	654.58	10 023.0
19	19 412.80	563.07	9 781.4	15 909.20	679.16	10 391.5
20	18 516.10	589.14	10 209.3	14 491.10	742.47	10 781.5
21	16 722.60	647.98	10 206.7	13 198.10	770.03	10 730.3
22	15 867.50	668.84	10 354.1	11 321.20	839.30	11 554.2
23	13 907.20	720.23	10 874.1	9 861.40	866.11	11 578.4
24	13 073.00	764.92	10 971.4	7 859.30	904.84	11 976.0
25	10 737.30	836.42	11 608.4			

表2 实验数据拟合曲线的相关系数和误差平方和

拟合曲线	相关系数/R		误差平方和/SSE	
	变频 100%	工频	变频 100%	工频
$H-Q$	0.988 9	0.995 0	141 9	126 4
$N-Q$	0.988 9	0.997 1	0.103 8	0.047 0

根据表1作出的 $H-Q$ 、 $N-Q$ 风机性能曲线(图2和图3),由表1中的 H 、 Q 、 N 数据计算出效率,并绘制 $\eta-Q$ 曲线,见图4.

图2中,随着风量的增加,拟合曲线先单调下降,再平缓上升,最后再单调下降;图3中拟合曲线变化情况与图2相似;图4中,随着风量的增加,拟合曲线一直单调上升,到达峰值点后,再平缓下降.图2和图3的曲线变化规律,是由于叶片顶切对主通风机特性曲线的影响而导致的^[10,11].此外,上图中实测数据点基本通过曲线或均匀分布在曲线两侧,且表2中的相关系数都在0.9以上,拟合曲线

精度基本满足要求。

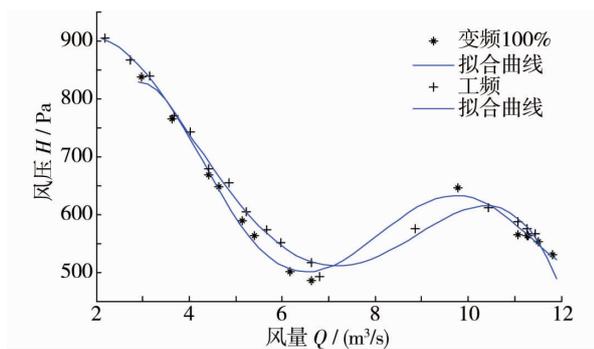


图2 主通风机 $H-Q$ 曲线

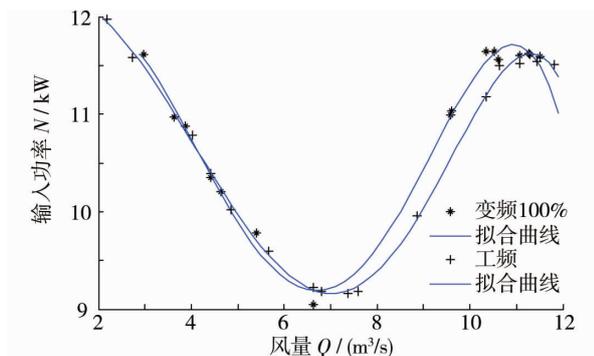


图3 主通风机 $N-Q$ 曲线

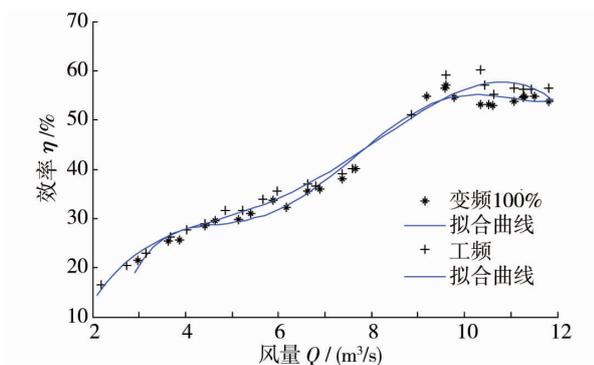


图4 主通风机 $\eta-Q$ 曲线

2.2 变频 100% 和工频 2 种情况下风机性能曲线的对比

图 2 中,工频和变频 100% 这 2 种情况下的 $H-Q$ 性能曲线的变化趋势大体一致. 结合表 1, 进一步分析图 2, 可以看出, 当 $Q < 7.14$ 和 $10.56 < Q < 11.67$ 时, 工频条件下风压大于变频 100% 条件下的风压. 同时可以看出工频下的 $H-Q$ 性能曲线相对变频 100% 下的 $H-Q$ 性能曲线变化平缓一些, 说明风机变频 100% 运行时, 风压对于风量的变化更敏感.

图 3 中, 当 $Q < 4$ 和 $6.62 < Q < 11.26$ 时, 工频条件下电机输入功率小于变频 100% 条件下的输入功率; 当 $4 < Q < 6.62$ 且 $Q > 11.62$ 时, 工频条件

下电机输入功率大于变频 100% 条件下的输入功率, 从整体上来看, 变频 100% 条件下的输入功率明显比工频时的输入功率大. 电机工频直接启动会产生一个大的启动电流, 而当使用变频器时, 变频器的输出电压和频率是逐渐加到电机上的, 所以电机启动电流和对电网冲击要小些, 消耗电量也少些, 在轻载情况下可以实现一定程度的节能. 图 3 中 $Q > 11.62$ 时, 在较小的风量变化范围内, 变频 100% 时的输入功率小于工频时的输入功率, 可能就是风机加变频器后软启动引起的; 图 2 中 $Q > 10.56$ 时, 工频条件下风压大于变频 100% 条件下的风压可能也是这方面的原因, 电机工频启动时对电网造成严重的冲击, 启动时产生的大电流和震动对风压的影响很大. 分析 $Q = 6.62 \sim 11.26$ 区间, 工频明显比变频 100% 节能, 而且节能量很大; 实验过程中, 风机变频运行时的电压和电流都要大于风机工频运行时的电压和电流, 根据功率计算公式, 变频 100% 时的功率要大于工频运行时的功率. 在 $Q = 4 \sim 6.62$ 区间, 变频 100% 时的功率略小于工频时的功率, 出现这种情况有 2 个原因; 一是随着风量的减小, 变频 100% 和工频 2 种情况下的电流、电压值基本趋于一致; 二是由于变频器具有功率因数补偿的功能. 实验中变频 100% 时风机的功率因数达到了 0.9, 减少了无功功率, 在极大的增加了有功功率同时, 也减少了设备的电能损耗.

综合图 2 和图 3, 图 2 中 $Q = 7.14$ 作为一个分水岭, 左边工频下的风量大于变频 100% 时的风量, 右边变频 100% 时的风量大于工频下的风量; 图 3 中 $Q = 6.62$ 作为一个分水岭, 左边工频下的输入功率大于变频 100% 时的输入功率, 右边变频 100% 时的输入功率大于工频下的输入功率, 且 2 图的变化有很强的相似性. 从图 2 和图 3 的整体来看, 以 2 图的分水岭作为高风量与低风量的分界点, 有如下规律: 低风量、高风压时, 变频 100% 和工频运行状态下的风压和输入功率大致相当; 低风压、低风量时, 变频 100% 和工频运行状态下的风压和输出功率出现变化, 但是变化较小; 而当高风量时, 随着风量的增加, 变频 100% 和工频 2 种状态下的风压和输出功率变化逐渐增大, 直至最后趋于相近. 关于风机变频与工频的研究, 通常关注的总是能不能节能和节能多少的问题, 图 3 中不难发现当风量大于一定值时, 变频 100% 比工频耗能,

而且能量差很大,因此,有必要讨论工频与变频100%时两者之间的最大能量差值.变频100%与工频时 $N-Q$ 曲线的函数关系如式(1)和式(2).

$$N_{\text{变}} = -0.000\ 198\ 5Q^5 - 0.000\ 300\ 1Q^4 + 0.099\ 96Q^3 - 1.063Q^2 + 3.145Q + 9.058; \quad (1)$$

$$N_{\text{工}} = -0.000\ 45Q^5 + 0.010\ 47Q^4 - 0.063\ 84Q^3 + 0.038\ 87Q^2 - 0.129\ 6Q + 12.49. \quad (2)$$

其中工频相比于变频100%的节能量 $\Delta N = N_{\text{变}} - N_{\text{工}}$,如式(3):

$$\Delta N = N_{\text{变}} - N_{\text{工}} = 0.000\ 251\ 5Q^5 - 0.010\ 770\ 1Q^4 + 0.163\ 8Q^3 - 1.101\ 87Q^2 + 3.274\ 6Q - 3.432. \quad (3)$$

令式(3)等于0,并对 Q 求导,当 $Q = 9.473\ 6$ 时, ΔN 存在最大值,此时 $\Delta N_{\text{max}} = 0.408\ 5\ \text{kW}$, $N_{\text{变}} = 10.875\ 3\ \text{kW}$.

那么工频相比于变频100%时的最大节能率为

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\Delta N_{\text{max}}}{N_{\text{变}}} \times 100\% = \frac{0.408\ 5}{10.875\ 3} \times 100\% = 3.756\%. \quad (4)$$

图4中,可以直观的看到工频条件下的效率明显高于变频100%时的效率;风机变频运行时,变频器会输出谐波,谐波会降低电机等用电设备的效率,考虑变频器和变频器开关损耗等的影响,由变频器和电机组成的系统效率将会下降更多.结合图4和表1的数据,可以得出工频时的最大效率值要大于变频100%时的最大效率值,差值达到2.93%.

综上所述,主通风机工频运行时比变频100%运行时更节能,且工频运行时的效率大于变频100%运行时的效率.变频节能主要体现在改变频率进而改变电机转速这点上,否则即使加了变频器,但是不改变转速,变频风机可能会在软启动和功率因数的增大这2点上有一定优势,最终节能效果方面并不明显,甚至会更加耗能.

3 结论

1)当频率为50 Hz时,主通风机变频条件下的 $H-Q$ 曲线比工频下的 $H-Q$ 曲线波动大,说明变频条件下风压随风量的变化更敏感.

2)当频率为50 Hz时,主通风机工频运行相对于变频运行节电率达到3.756%,且工频运行时的最大效率比变频运行时的最大效率高2.93%.

参考文献:

- [1] 王海桥,赵云胜,陈世强,等.矿井主要通风机扩散器结构形式及其性能评价[J].矿业安全与环保,2008,35(5):25-27.
- [2] 张恒,谢国政,张黎海,等.风机变频调速节能改造的分析及计算[C]//2011装备制造业绿色创造节能减排发展论坛论文集.昆明:云南省机械工程学会出版社,2011.
- [3] 胡林,颜纲要.风机变频改造及自动切换功能的应用[J].电力科技与环保,2011,27(4):60-62.
- [4] 刘晓军,肖丽峥.引风机变频改造热工逻辑设计与节电效果分析[J].华电技术,2012,34(2):47-49.
- [5] 王志斌.煤矿轴流式风机应用变频调速实现节电分析[J].煤矿机械,2007,28(5):136-138.
- [6] 王天涛.变频技术及其在矿井主扇中的应用[J].煤,2010,3(19):43-45.
- [7] 贾腾,王海桥,陈世强,赵杰,崔海蛟.矿用通风机性能曲线图的函数化再现[J].矿业工程研究,2014,29(2):70-74.
- [8] 贾腾,王海桥,陈世强,赵杰,章晓伟,李雪文.矿用风机电机变频频率比与转速比的关系模型[J].黑龙江科技大学学报,2014,24(04):397-400.
- [9] 陈世强,王海桥,杨超,李雪文,贾腾.变频矿用主通风机流量比与功率比的非等比特性实验研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2015,30(3).
- [10] 叶增明,朱婷婷.轴流风机叶片切割性能的计算方法[J].流体机械,2009,37(10):42-44.
- [11] 吕峰,赵燕杰,李景银,等.叶片顶切对大型轴流风机性能的影响[J].风机技术,2012(2):18-22.