

煤矿主要通风机风量测试误差对比分析

余德杰¹, 桑 聪^{2,3}, 刘彦青^{2,3}, 程志恒^{2,3}

(1. 郑煤集团(河南)白坪煤业有限公司, 河南 登封 452470;

2. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院, 北京 100013;

3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013)



扫码移动阅读

摘 要: 为了降低煤矿主要通风机性能测试过程中风量测试误差, 基于适用于准定常流动的伯努利方程, 从理论上对静压差法与动压法的测试精度进行了对比分析。以白坪煤业公司东翼风井主要通风机为试验对象, 分别利用静压差法与动压法对主要通风机风量进行了实测分析。结果表明: 2 种方法现场实测风量结果的相对误差均小于 6%, 准确度均能满足现场生产需求, 但静压差法中局部阻力损失无法确定及测点布置不均匀会产生较大的测试误差, 其准确度小于动压法, 因此从精准化角度考虑, 应优先采用动压差法测试通风机风量。

关键词: 静压差法; 动压法; 主要通风机; 风量测试; 误差分析

中图分类号: TD722

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2018)12-0164-05

Comparison analysis on air flow testing error of mine main ventilator

YU Dejie¹, SANG Cong^{2,3}, LIU Yanqing^{2,3}, CHENG Zhiheng^{2,3}

(1. Baiping Coal Industry Company Limited, Zhengzhou Coal Group (Henan), Dengfeng 452470, China;

2. Mine Safety Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. National Key Lab of Coal

Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to reduce the air flow test error of the mine ventilator during the performance test process of the mine main ventilator in the coal mine, based on Bernoulli equation suitable for the quasi-steady flow, from the theory, a comparison and analysis was conducted on the test precision between the static pressure difference method and the dynamic pressure method. Taking the main ventilator of East Ventilation Mine in Baiping Coal Company as the experiment object, the static pressure difference method and the dynamic pressure method was individually applied to the measurement of the air flow of the main ventilator and the comparison analysis was conducted on the measured results. The study showed that the site measured air flow results of the two methods had a relative error both less than 6%, the accuracy could meet the requirements of the site production, but in the static pressure difference method, the local resistance loss could not be determined and the uneven layout of the measuring points would cause big measurement error. The accuracy of the calculation results by the static pressure difference method was less than the dynamic pressure method. Therefore, from the consideration of the precision, the dynamic pressure method should have the first priority to be applied to measure the air flow of the ventilator.

Key words: static pressure difference method; dynamic pressure method; mine main ventilator; air flow test; error analysis

0 引 言

煤矿地面主要通风机是矿井通风系统的核心, 为地面新鲜空气源源不断地进入井下, 到达用风地点及排出地面提供动力, 矿井主要通风机性能测试

是保障通风机安全运行的必要条件之一。为了确保矿井主要通风机的安全稳定运行, 《煤矿安全规程》规定煤矿新安装的主要通风机在投入使用前需要进行 1 次通风机性能测试, 以后每 5 年至少进行 1 次风机性能测试^[1], 矿井通风机性能测试工作中最为

收稿日期: 2018-07-08; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2018.12.026

作者简介: 余德杰(1970—), 男, 河南郑州人, 工程师。通讯作者: 刘彦青, Tel: 13671175449, E-mail: lyqing0906@163.com

引用格式: 余德杰, 桑 聪, 刘彦青, 等. 煤矿主要通风机风量测试误差对比分析[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(12): 164-168.

YU Dejie, SANG Cong, LIU Yanqing, et al. Comparison analysis on air flow testing error of mine main ventilator[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(12): 164-168.

重要的就是风机风量测试工作,目前常用的风量测量方法有静压差法和动压法。

为了方便风机性能测试工作和风机风压风量日常监控,风机制造厂家在风机机壳上预先装设了全压和静压测试管路,在现有风机测压管路条件下,国内学者为了准确测试风机风量进行了一系列相关研究。风机进风口处风流流速和压力沿截面分布很不均匀,经过数个当量直径后风流才会恢复至缓变流^[2-3],矿用对旋轴流风机叶轮入口前环形通道内存在缓变流截面^[4],在缓变流界面测量压力数据波动幅度小,测试误差较低。采用静压差法测量风机风量时,选择的2个流体截面应为缓变流截面,且不必考虑两缓变流截面之间有无急变流截面^[5-6]。采用动压法测试地面主要通风机时,用测试地点全压减去静压求得动压,风速越大,全压越大,测量误差越小,采用动压法测试风机风量时,测风点一般选择在风速较大、通风断面较小的地方。

为了准确测得煤矿地面主要通风机风量,笔者采用理论分析与现场试验相结合的研究方法对静压差法和动压差法的主要通风机风量测试误差进行对比分析,为风机风量的精准化测试提供实践指导。

1 静压差法与动压法测风误差理论对比分析

1.1 静压差法风机风量测试原理

研究对象为对旋轴流地面主要通风机,在风机或风硐上选择面积不同的断面 I—I 和断面 II—II,断面 II—II 位于对旋轴流式主要通风机的一级电动机前,该位置处机壳上均匀布置有若干个静压孔和全压孔,断面 I—I 位于一级电动机之前,该位置处机壳上均匀布置有若干个静压孔,如图 1 所示。

由于风流流通截面发生改变,风流由断面 I—I 向断面 II—II 流动过程中形成沿程摩擦阻力损失和局部阻力损失。风流由断面 I—I 向断面 II—II 流动过程中,速度场、气压场在时空上是定常分布的,可近似为准定常流动,基于动量守恒推导而来的伯努利方程^[7]适用于准定常流动,见式(1)。

$$P_1 + \rho_1 g Z_1 + \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 = P_2 + \rho_2 g Z_2 + \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 + h_r \quad (1)$$

式中: P_1 、 P_2 为断面 I—I、II—II 处的静压,Pa; ρ_1 、 ρ_2 为断面 I—I、II—II 处的空气密度,kg/m³; v_1 、 v_2 为断面 I—I、II—II 处的风速,m/s; Z_1 、 Z_2 为断面 I—I、II—II 处的标高,m; g 为重力加速度,取 9.8 m/s²; h_r 为风流从断面 I—I 到断面 II—II

II 过程中的阻力损失,Pa。

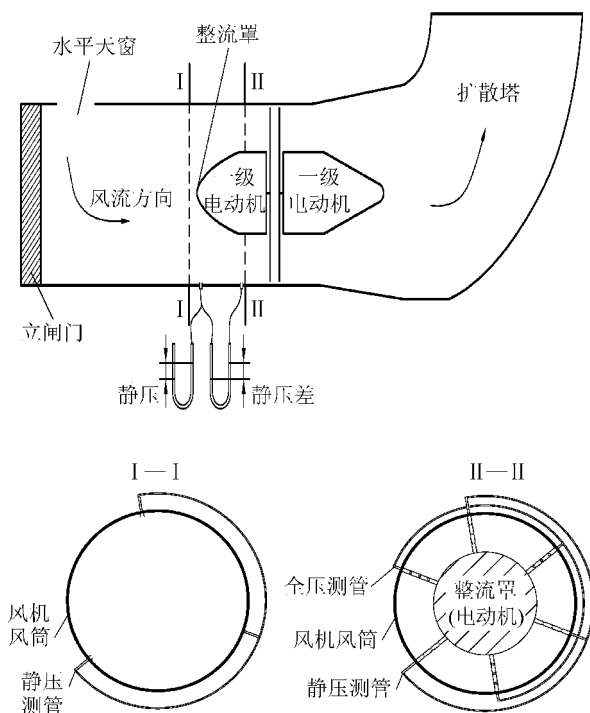


图 1 静压差法测试风机风量示意

Fig. 1 The sketch map of testing the air volume of the main fan by static pressure difference method

断面 I—I 和断面 II—II 处于同一水平高度,重力势能影响可忽略,根据连续性方程可知流经两断面风流质量相等,见式(2)。

$$v_1 S_1 \rho_1 = v_2 S_2 \rho_2 \quad (2)$$

式中: S_1 、 S_2 为断面 I—I、II—II 的面积,m²。

联立式(1)、式(2),并考虑断面 II—II 处变径的局部阻力损失和断面 I—I、II—II 间的摩擦阻力损失,推导出式(3),即断面 II—II 处的风速为

$$v_2 = S_1 \rho_1 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2 - h_r)}{\rho_2(S_1^2 \rho_1^2 - S_2^2 \rho_2^2)}} \quad (3)$$

断面 I—I 与断面 II—II 处空气密度无法直接测得,空气密度 ρ 可由空气静压、温度和相对湿度计算得到,计算公式见式(4)。

$$\rho = 0.003\,484(P - 0.377\,9\varphi P_q) / T \quad (4)$$

式中: P 为空气静压,Pa; T 为空气的绝对温度,K; P_q 为空气温度为 T 时饱和水蒸气分压力,Pa; φ 为空气相对湿度,%。

风流由断面 I—I 流至断面 II—II 的能量损失无法直接测量,利用能量损失系数进行修正^[8-9],主要通风机风量计算公式见式(5),主要通风机静压计算公式见式(6)。

$$Q_j = k S_2 S_1 \rho_1 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_2(S_1^2 \rho_1^2 - S_2^2 \rho_2^2)}} \quad (5)$$

$$P_F = P_1 - \frac{1}{2} \rho_1 \left(\frac{Q_j}{S_1} \right)^2 \quad (6)$$

式中: k 为能量损失系数, 经验取值范围为 0.96 ~ 0.99; P_F 为主要通风机静压, Pa; Q_j 为静压差法测得主要通风机风量, m^3/s 。

1.2 动压法测试风机风量原理

对旋轴流式主要通风机在一级电动机前的断面 II—II 位置处的有效通风断面较小, 相对而言风速较大, 其动压与速度的平方成正比, 在断面 II—II 处测量动压较大, 能够有效降低因读数和仪器精度而产生的相对误差, 因此, 断面 II—II 为最佳动压法测试断面, 断面 II—II 机壳上均匀布置有若干个静压孔和全压孔, 在风机外部分别通过环型钢管连接在一起, 采用多点测试的方法得到测点所在截面的平均全压和平均静压, 两者求差得到平均动压^[9-10], 从风机外壁的全压管和静压管各引出一条胶皮管, 连接到倾斜压差计的两端, 测量断面 II—II 处的平均动压。动压法测量主要通风机风量如图 2 所示。

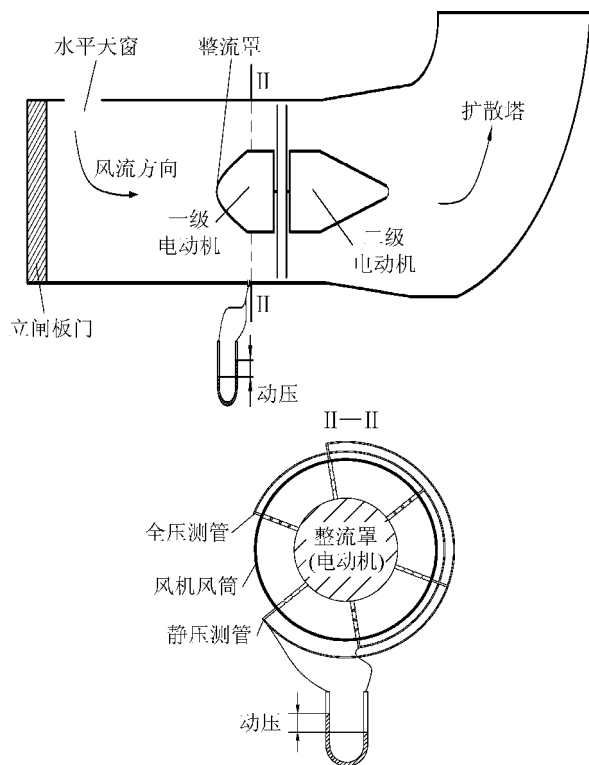


图 2 动压法测试风机风量示意

Fig. 2 The sketch map of air volume testing of the main fan by dynamic pressure method

断面 II—II 处平均动压计算公式见式(7), 断

面 II—II 处平均风速计算公式见式(8)

$$P_{12} = P_2 + P_{v2} \quad (7)$$

$$v_2 = \sqrt{2(P_{12} - P_2) / \rho_2} \quad (8)$$

式中: P_{12} 为断面 II—II 处的全压, Pa; P_{v2} 为断面 II—II 处的动压, Pa。

动压法中无须考虑风流局部阻力损失与摩擦阻力损失, 主要通风机风量计算公式见式(9), 主要通风机静压计算公式见式(10)。

$$Q_d = S_2 \sqrt{2(P_{12} - P_2) / \rho_2} \quad (9)$$

$$P_F = P_2 - \frac{1}{2} \rho_2 \left(\frac{Q_d}{S_2} \right)^2 \quad (10)$$

式中: Q_d 为动压法测得主要通风机风量, m^3/s 。

1.3 两种风机风量测试方法对比分析

在静压差法测试风机风量的计算中存在 2 点问题:

1) 风机风筒内气流流动类似于管道内气体流动, 参考管道内气流速度分布特征, 断面 I—I 平面内风流并非均匀分布, 机壳附近气流速度小而静压大, 而风筒中心区域气流速度大而静压小, 而断面 I—I 处静压测点布置在机壳上, 因此测得断面 I—I 静压大于断面 I—I 实际平均静压, 造成测得的风机风量大于真实风量。

2) 空气由断面 I—I 流向断面 II—II 的过程中, 风筒气体流通断面发生变化导致风流紊乱程度加剧, 产生一定的局部阻力, 静压差法中局部阻力损失系数的经验取值范围为 0.96 ~ 0.99, 局部阻力损失系数取值不合理可能会造成较大的误差。

相对于静压差法, 动压差法测试中只涉及断面 II—II 位置处的风流状态, 而断面 II—II 处静压测点与全压测点均布置在电动机整流罩与机壳之间的连接杆上, 可以测得断面 II—II 的整个空间平面内的平均静压与平均全压。

综上所述, 静压差法测得的风机风量会大于真实风量, 动压法测得的风机风量更接近于真实风量, 动压法风机风量测试结果误差小于静压差法。

2 风量误差现场实测对比分析

2.1 试验工程概况

郑煤集团白坪煤业矿井设计生产能力 300 万 t/a 。矿井当前采用中央并列式通风, 主斜井及副斜井进风, 东翼风井与中央风井回风。东翼风井安装 2 台 FBCDZ-No32 型抽出式对旋轴流主要通风机,

风机配备 2 台 YBF2-450M-10G 防爆电动机,电动机功率为 280 kW,东翼风井布置如图 3 所示。

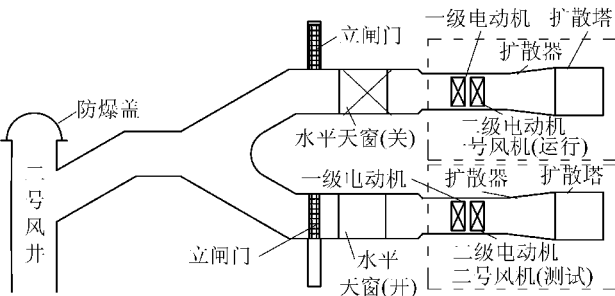


图 3 主要通风机风量测试期间风硐布置示意

Fig. 3 Sketch map of layout of the fan drift during testing air volume of the main fan

在风机正常运行时,井下风流通过东翼风井到达地面风硐,通过岔口进入一号风机(在用),然后通过扩散器和扩散塔排到大气中。在风机进行性能测试时,立闸板门将二号风机(测试)与风井和一号风机隔离开来,保证矿井正常通风。风流由水平天窗进入被测风机风硐,然后通过一级电动机及二级电动机后由扩散塔排到大气中。

2.2 2 种风机风量测试方法实测结果对比分析

采用静压差法测试风量时,从断面 I—I、II—II 处分别引一条静压测管,测量两断面的静压差,断面 I—I 处的面积 $S_1=9.08\text{ m}^2$,断面 II—II 处的面积 $S_2=4.96\text{ m}^2$,通过 U 型水柱计读取断面 I—I 与断面 II—II 之间的静压差以及断面 I—I 的相对静压,能量损失系数分别取 0.96 与 0.99 两种情况,通过公式(5)计算风机风量。

采用动压法测试风量时,从断面 II—II 处的静压管和全压管分别引一条胶皮管接到倾斜压差计上,断面 II—II 处的面积 $S_2=4.96\text{ m}^2$,通过 U 型水柱计读数断面 II—II 的动压,通过公式(9)计算风机风量。

通过调节水平天窗开启面积改变风机负载,对风机风量进行调节。利用 2 种方法对不同水平天窗开启面积下的风机风量进行测试,2 种测风方法的相对误差计算公式见式(11),2 种测试方法的测试结果见表 1。

风量相对误差最大值不大于 6%,2 种测试方法均可满足现场生产要求。相同风机静压下,动压法测试结果整体小于静压差法,现场实测结果验证了前文中静压差法风量测试结果大于动压法的理论分析结果。

$$d_r = \frac{|Q_d - Q_j|}{Q_d} \times 100\% \tag{11}$$

式中: d_r 为静压差法与动压法实测风量结果相对误差,%。

表 1 静压差法与动压法实测风量结果对比
Table 1 Comparison of measured air volume results by static pressure difference method and dynamic pressure method

风机静压/ Pa	实测风机风量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)			相对误差 最大值/%
	静压差法 ¹	静压差法 ²	动压法	
388	224.84	231.87	223.32	3.83
547	215.27	222.00	211.64	4.89
698	204.40	210.79	199.97	5.41
1 014	185.89	191.70	182.26	5.18
1 272	175.28	180.76	171.37	5.48
1 477	168.76	174.03	164.43	5.84
1 631	148.31	152.94	145.09	5.41

注:静压差法¹的能量损失系数取 0.96;静压差法²的能量损失系数取 0.99。

3 结 论

1)从风机测压位置与计算公式推导过程 2 个方面分析可得,静压差法测得风机风量会大于真实风量,而动压法测得的风机风量更接近于真实风量,动压法风机风量测试结果误差小于静压差法。

2)以郑煤集团白坪煤业公司东翼风井主要通风机为试验对象,利用静压差法与动压法对主要通风机风量进行了实测,2 种方法的现场实测风量结果的相对误差均小于 6%,说明静压差法和动压法的实测风量结果的准确度均能满足现场工程需求;相同风机静压下,动压法测试结果整体小于静压差法,现场实测结果验证了前文中静压差法风量测试结果大于动压法的理论分析结果。

3)从精准化科学研究角度考虑,风机风量测试方法应优先采用动压法。

参考文献 (References):

[1] 国家安全生产监督管理总局.煤矿安全规程[M].北京:煤炭工业出版社,2016.
[2] 刘 敏.矿用轴流通风机现场测试技术的研究[J].流体机械,1996,24(12):3-7.
LIU Min.Research on field test technology of axial fan in mine[J].Fluid Mechienry,1996,24(12):3-7.
[3] 李 曼,马 欢.矿井主要通风机风量测试方法的模拟研究[J].煤炭科学技术,2017,45(2):151-155.

- LI Man, MA Huan. Simulation research on airflow measuring method of mine main ventilator[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(2): 151-155.
- [4] 张景松. 矿井主要通风机装置的计示压力[J]. 流体机械, 1996, 24(2): 45-47, 21.
- ZHANG Jingsong. Calculation pressure of mine main fan device [J]. Fluid Mechienry, 1996, 24(2): 45-47, 21.
- [5] 张新民, 于 栋. 煤矿通风机性能测试技术的研究[J]. 煤矿机械, 2007, 28(6): 38-40.
- ZHANG Xinmin, YU Dong. Study of performance for mine fan[J]. Fluid Machinery, 2007, 28(6): 38-40.
- [6] 吴文臻. 矿井主要通风机在线监控技术[J]. 煤矿安全, 2016, 47(7): 109-111.
- WU Wenzhen. Online monitoring technology of mine main fan[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(7): 109-111.
- [7] 樊丽俭. 关于粘流伯努利方程的存疑与新证[J]. 长安大学学报; 自然科学版, 2004, 24(3): 70-74.
- FAN Lijian. Doubts and new lights on Bernoulli theorem in viscous fluid[J]. Journal of Changan University; Natural Science Edition, 2004, 24(3): 70-74.
- [8] 周西华, 梁 茵, 王小毛, 等. 饱和水蒸汽分压力经验公式的比较[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(3): 331-333.
- ZHOU Xihua, LIANG Yin, WANG Xiaomao, *et al.* Comparison of saturation vapor pressure formulas [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(3): 331-333.
- [9] 刘 毅. 河南煤矿在用主要通风机性能曲线测试方案实践[J]. 煤炭工程, 2017, 49(1): 103-105, 107.
- LIU Yi. Practice on performance curve test of coal mine main fan in Henan[J]. Coal Engineering, 2017, 49(1): 103-105, 107.
- [10] 樊小利, 张钧祥, 邢 伟. 煤矿主要通风机性能测定误差分析[J]. 煤矿安全, 2015, 46(9): 184-187.
- FAN Xiaoli, ZHANG Junxiang, XING Wei. Error analysis of coal mine main fan performance measuring[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(9): 184-187.