

锅炉烟道高阻力工况下引风机的选型与节能改造分析

文/樊越 张鹏飞 胡传龙
深圳市汇川技术股份有限公司

摘要：主要介绍火力发电厂引风机的选型，通过理论数据结合锅炉风烟系统的阻力特性进行分析，重点从轴流式引风机与离心式引风机的特性、两种风机应用的经济性、提高引风机效率的措施等方面进行阐述，针对常见的动叶可调引风机在“双碳”政策下的节能改造方案进行分析。

关键词：轴流式引风机；离心式引风机；高压变频器；动叶可调；节能改造

轴流式风机在火电厂中广泛应用与相关工况

目前，国内300 MW及以上大型火力发电机组锅炉的送风机和引风机大部分以轴流式风机为主，通常送风机都采用动叶可调轴流式，引风机有应用动叶可调的也有用静叶可调的。送风机输送的是环境温度下的空气，温度低、几乎没有粉尘颗粒，由于工作条件比较好，锅炉送风机选用较高转速的动叶可调风机。引风机布置在锅炉的风烟系统中，设计入口温度为130℃，个别锅炉排烟温度高达180℃，运行环境较差，烟气中不可避免含有固体粉尘，由于叶轮磨损与其线速度2次方成正比，与烟气冲刷速度的3.5次方成正比，选用风机时必须考虑风机的运行环境；为了降低粉尘颗粒对叶片的磨损，选择较低转速的引风机有利于延长其使用寿命，因此低速静叶可调轴流式风机成了许多电厂引风机的设计首选。

轴流式风机在大型火力发电机组遵循自然界适者生存法则。早期火力发电厂或目前中小型机组仍然在大量使用离心式风机，与离心式风机相比，轴流式风机最突出的优点是在出口全压相同的条件下，风量可以很大，全程调节效率较高，综合平衡各种指标后受到使用者的青睐。这也和当时锅炉烟

道的阻力较低有直接关系，以300 MW等级锅炉为例，烟道总压头一般在3 000~3 500 Pa之间，在这个压头区间离心式风机流量无论如何也做不到100万m³/h。

烟道高阻力：风机选择必须面对工况条件的改变

近几年来，火力发电厂尤其燃煤电厂的环保指标越来越严格，烟气的含硫量、NO_x排量和含尘量都大幅降低，随着锅炉烟气脱硝（SCR）、除尘和脱硫装置（FGD）的安装及升级改造，锅炉烟道的阻力大幅上升，因环保设备的不同选择，烟道总压头已经升到8 Pa~11 kPa，而风量没有变化。为了保证锅炉的正常运行，引风机必然要进行更换。

风机如何选择是技术改造面对的实际问题

从大的方面讲，引风机选型无非就是两种类型离心式或轴流式。轴流式风机选型又可以选择动叶可调或静叶可调。当锅炉烟道阻力超过8 500 Pa时，如果引风机选用轴流式风机，则只能采用动叶可调型，而且必须采用多级动叶的结构形式。

1. 轴流式风机的主要特性

1) 工况变化时经济性高。风机的负荷—效率曲线近似一个长轴横放的椭圆，额定负荷时风机效率在85%~86%之间，高、低负荷区间效率相差不是特别明显，所以动叶可调轴流式风机在变工况运行时的经济性较好，如图1所示。

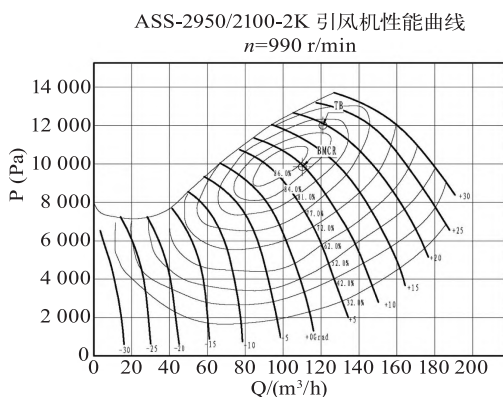


图1 动叶可调轴流风机特性曲线

2) 体积小、重量轻、起动转矩小。轴流式风机的结构紧凑，体积小、重量轻，可以选用较高的转速和流量系数，在相同的流量和全压的情况下，转子的重量较轻，起动转矩小，可减少电动机功率的选型裕量，也可降低对电动机起动特性的要求。

3) 由于轴流式风机尺寸小、重量轻、飞轮效应小，因此安装场地容易布置。

4) 轴流式风机自身的技术特点并不是在电厂中广泛得到应用的全部决定因素，而是轴流式风机与锅炉风烟系统的运行环境相互契合，结合当时锅炉烟道3 000~3 500 Pa的阻力全压条件，在大型火力发电厂中广泛应用。

2. 离心式风机的主要特性

1) 离心式风机在发电厂中也有较长的历史和广泛的应用，压力系数高，在相同流量下，离心式风机的全压要比轴流式风机高出数倍。离心式风机的压力系数比较高，达到相同压力下所需的叶轮直径较小，而且转速相对较低。

2) 结构简单，长期运行维护成本较低。

3) 由于叶轮的磨损与其线速度的2次方成正比，与烟气冲刷速度的3.5次方成正比，因此离心式风机转速较低，叶轮结构简单，耐受磨损的能力较强。

4) 额定负荷下的效率也在85%~86%之间，离心式风机和轴流式风机两种风机能够达到的最高

装置效率相差无几（这点很重要，有些厂家拿出的最高效率可能高达88%~89%，指风机的级效率，而不是整套风机装置的效率），但随着火力发电厂参与负荷深度调峰，低负荷调节方面较轴流式风机差，总体平均效率低于轴流式风机。

5) 体积较大，要求布置的场地面积和空间较大，自重大，相应的安装基础也随之变大。

引风机的选配直接与锅炉风烟系统的阻力特性相关

除了轴流式风机和离心式风机各自的性能特点外，引风机的选配必然离不开锅炉风烟系统的阻力特性，在没有安装脱硫、脱硝和完善除尘设备以前的大型电站锅炉，烟道总的阻力约为3 300 Pa，烟气流量约为100万 m^3/h （具体参数因当地海拔、长年平均气温、锅炉排烟温度等参数而变）。当前锅炉烟道阻力因环保设备的安装造成了引风机的性能参数发生重大改变，特别是锅炉烟道阻力在BMCR工况下已经提高到10 000 Pa左右，而排烟温度和烟气流量也有微变或不变。这种运行工艺参数的特点是在流量相同的条件下，需要更高的风机全压。对于阻力8 500 Pa以上的烟道，当前普遍的改造方案是选用多级动叶可调轴流式风机。

采用多级动叶可调轴流式引风机的思考

广泛采用轴流式风机决定性的因素并不是没有那么大流量的离心式风机，而是轴流式风机的压力系数低，同样流量下离心式风机的压头过高，额定负荷下离心式风机的效率并不比轴流式风机差，但当时缺少有效的调节手段，难以深度调节，因效率损失大而被弃用。

当锅炉烟道的运行环境改变为这种高阻力的工况时，再分析离心式风机的性能特点，对引风机的选择可能会是一种新的思路。

离心式风机的压力系数比轴流式风机高得多，在锅炉烟气量相同的情况下，离心式风机要比轴流式风机的压头高出几倍。以300 MW等级的机组为例，10 000 Pa的烟道阻力，动叶可调轴流式风机至少要安装两级叶片，压头增加，设备结构也变得更加复杂，设备的复杂意味着今后长期维护量增加。对离心式风机而言，优势尽显，结构上没有特别

的改动，不用装备润滑油站，不用另外配备冷却风机。系统简单，结构简单，维护简单，且费用低。因为工艺环境的改变，虽然动叶可调风机精密，相同流量下的全压低，但应用在烟道高阻力尽显劣势。这种优劣互易，究其原因还是设备自身特点与应用环境是否适合。

两种风机的综合经济性比较

结合改造风机的实际工况参数，就离心式风机和轴流式风机这两种风机的性能、结构特点、安装、维护和经济性分别进行比较，结果见表1。

表1 两种风机参数

项目	工况	TB	BMCR
流量/(m ³ /s)		336.1	305.6
压头/Pa		12 000	10 000
温度/℃		160	160

按照上述参数，分别选择了离心式风机和轴流式风机，型号和性能参数见表2和表3。

(1) 离心式风机型号：DWSI50-34F（详见性能曲线和外形图）

表2 性能参数

项目	工况	TB	BMCR
流量/(m ³ /s)		336.1	305.6
压头/Pa		12 000	10 000
温度/℃		160	160
密度/(kg/m ³)		0.68	0.69
效率(%)		84	84.5
转速/(r/min)		990	900
轴功率/kW		4 773	3 633
电动机功率/kW		5 100	

(2) 轴流式风机型号：ASS-2950/2100-2K（详见性能曲线和外形图）

表3 性能参数

项目	工况	TB	BMCR
流量/(m ³ /s)		336.1	305.6
压头/Pa		12 000	10 000
温度/℃		160	160
密度/(kg/m ³)		0.68	0.69
效率(%)		83	85
转速/(r/min)		990	990
轴功率/kW		4 867	3 508
电动机功率/kW		5 100	

(3) 离心式风机的技术特点

作为引风机，不可避免地要接触到磨损问题，由于离心式风机的压力系数较高，达到相同压力下的周速较低，因此磨损相比轴流式风机要低很多，况且在离心式风机叶片的表面还可以通过做喷涂硬质合金或堆焊硬质合金耐磨层的处理来提高叶轮的耐磨程度，耐磨层方便更换，以此来提高离心式风机的使用寿命。离心式风机构的特性曲线如图2所示。

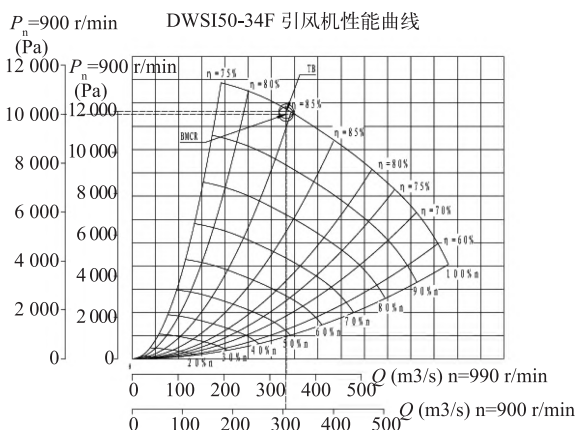


图2 离心式风机特性曲线

离心式风机的体积相对轴流式风机要大，占地面积也稍大，但是其结构简单，采用双列球面滚子轴承支撑，轴向力小，运行稳定，油浴润滑，铸铁轴承座采用水冷套结构（用水量为2.5~3.5 m³/h），使轴承温度在运行过程中始终低于80℃，保证了风机的安全稳定运行。

检修维护方面，由于离心式风机结构简单，设备的事故障点很少，不需要经过特殊培训的专业维修人员，就可按使用说明书中给出的检修方法去完成检修工作，维护成本低廉；离心式风机的采购包括风机本体、膜片联轴器、电动执行器和测温测振仪表等。离心式风机的生产周期相对较短，一般为3~4个月。

(4) 轴流式风机的技术特点

轴流式风机本身的压力系数较低，达到相同压力下所需的叶轮直径相对较大，叶片数较多，一般都在18~24片之间（而且转速较高），依据300 MW机组改造的参数一定要采用双级叶轮才能满足性能要求。这种风机在负荷深度调节上比离心式风机要大，调节效率较高。

作为轴流式引风机，其磨损程度要比离心式风

机要高很多，由于轴流式风机的叶片布置形式特殊，被烟气中的含尘介质磨损后，叶片表面型线受损，流经叶片表面的流场被破坏，使叶片的做功能力下降，导致风机出力不足，如果介质中含尘浓度进一步增加，则会使安全生产受到严重威胁。

检修及维护方面，由于轴流式风机结构复杂，安装准确度高，有润滑油站、调节油站和强制制冷风系统，因此设备的事故点非常多，必须需要经过特殊培训的专业维修人员进行检修维护。为保证装配质量，甚至还要在厂家专业人员指导下完成检修工作，所以维护成本不菲。

轴流式风机的采购包括风机本体、长轴膜片联轴器、电动执行器和测温测振仪表等。轴流式风机的生产周期相对较长，尤其是叶片的制造周期，一般为5~6个月，风机本体因为制造复杂，一般也要5个月左右。

选用离心式风机需要说明的问题

(1) 低负荷效率低和调节深度浅的问题

调节深度浅和效率低是相互关联的，这种结论也是因为利用风门挡板采用节流式风量调节造成的。近年来，随着科学技术的不断发展，高压变频器的日益成熟，为离心式风机配置变频器，通过改变电动机的供电频率对引风机进行转速调节，能较好地提高引风机的总体工作效率，根据泵与风机相似性定理，泵与风机的功耗和转速的3次方成正比，虽然实际应用中节电不如理论计算高，但采用高压变频器对离心式风机进行转速调节能够提高节电率已被大量的实践所证明。

(2) 离心式风机最主要的优点

与动叶可调轴流式风机相比，离心式风机的机械结构特别简单，没有动叶可调轴流式风机的液压调节系统，转动部件是叶轮而不是叶片，耐磨性能远高于叶片，离心式风机短粗的轴和轴承，比轴流式风机超长的驱动轴和高温下工作的轴承更加坚固耐用。这些机械结构有效保证了离心式风机长期安全运行。

(3) 离心式风机配高压变频器的方案在效率相同的情况下工程造价

离心式风机配置高压变频器能有效降低能耗、提高风机效率，根据目前国内的技术案例，即便是

动叶可调风机配用变频器也有25%左右的节能量，变频调速的离心式风机通常的节能量可以达到35%~40%。其原因在于风机容量的选择要考虑多种因素，以风机的TB点为基准，TB点容量比BECR工况高出20%。为了适应锅炉连续的不同工况，要对引风机进行调节，配用变频器的引风机采用转速调节能有效地让引风机全程靠近最佳效率点工作。动叶可调风机总体价格要比离心式风机高出50%左右，但如果离心式风机要配用高压变频器，需要一定费用，加上基础处理、风道改造等因素，配用高压变频器的离心式风机要比多级动叶可调轴流式风机的整体工程造价高10%左右。如果以一个A级检修为周期，把5年的运行维护费用也考虑进去，风压高阻力的锅炉烟道中采用高压力系数的离心式风机在安全和经济方面都是较为合理的选择。

动叶可调轴流式风机节能改造建议及分析

上述高压力系数的离心式风机+变频调节相比液压系统调节下的动叶可调轴流式引风机是较为合理的选择，对于新建机组目前非常适用，但对于已经采用动叶可调轴流式引风机的机组，如何在不做大范围改动的前提下实现火力发电厂机组“三改联动”及“双碳”的政策适配是关键。

动叶可调风机的电耗水平和设备单耗并没有取得显著优于静叶可调风机”的节电效果，未达到预期的良好目标。动叶可调风机在固定转速运行时，通过改变叶片角度满足生产工艺需求，风机运行效率也随之改变。是否可以采用某种方式将叶片角度固定在最高效率点，同时通过改变风机的转速来满足工艺需求的风压或风量，实现风机性能曲线的平移，对此有三种方案可具备适用性。

(1) 动叶开度固定不变，变频调节

将动叶可调风机的动叶开度固定在一个合适的高效率区间并保持不变，即此刻将动叶可调看似成传统的静叶风机。根据机组的实际负荷需求，通过炉膛负压反馈调节，将调节信号给到高压变频器，通过调整动叶风机电动机转速达到调整风机出力的效果。相比于单一调整动叶角度的运行模式，该运行模式可使风机在一段区间内保持高效率，同时通过高压变频器调整出力提高电动机效率，达到一定的节能目的。

(2) 变频频率固定不变，动叶调节

通过高压变频器将电动机输入频率由工频状态下的50 Hz降低至确保通过调节风机动叶角度能够满足最大负荷出力前提下的定频频率，相当于压缩了风机动叶调节的出力区间，改造后的风机仍由动叶角度调节，只是风机电动机的输入频率下降至某一固定频率。风机降频定频的动叶调节运行方式相比50 Hz下定频的调节方式也有一定的节能空间。

(3) 变频调节+动叶调节

简而言之，动叶调节找高效率点，变频调节定出力。动叶开度的确定主要通过安全有效的试验获取。变频改造前，机组不同电负荷下对应风机不同的出力。以改造前“负荷—引风机出力”为基点，变频改造后调节动叶开度，增大扭矩出力，同时调节变频器频率，使改造后机组同一状态下“双调”引风机出力与改造前同一状态下引风机出力一致。

上述方案中，方案一固定动叶开度，只能保证动叶可调引风机在一段区间内保持高效率，并不能实现全程高效率，节电效果不彻底。方案二变相地压缩了风机的出力区间，且只能在风机选型裕量大的情况下使用，针对性太过于单一。方案三不管从安全还是节能方面，都是最优选择。故第三种“变频调节+动叶调节”方式为最优推荐方案。

结束语

1) 随着电力电子技术发展与突破，高压变频器既安全可靠又便于维护，高压变频器+离心式风机的调节方式及节能效果远优于液压系统调节下的动叶可调轴流式风机。在满足风压高阻力的锅炉烟道引风系统出力应用的场景下，从多个方面考虑，新建机组采用高压力系数的离心式风机+变频调节都是较为合理的选择。

2) 对于已经投运动叶可调轴流式风机机组，在不做大范围改动的前提下采用“变频调节+动叶调节”方式为实现“三改联动”及“双碳”政策的最优方案。EA

参考文献

- [1] 任嘉谋. 电厂锅炉风机选型的探讨[J]. 风机技术, 1995(6): 17-21.
- [2] 吴跃东, 李泰勋. 轴流通风机做为引风机时各方面的分析比较[J]. 风机技术, 1998(2): 33-34.
- [3] 宋杰. 离心引风机叶轮的磨损分析及处理措施[J]. 风机技术, 2017(4): 50-52.