

# 基于等效焓降法的百万千瓦机组汽轮机驱动式引风机经济性分析

王 骏，张耀华

(江苏方天电力技术有限公司，江苏 南京 211102)

**摘 要：**本文在等效焓降法的基础上对百万千瓦机组汽轮机驱动式引风机进行经济性分析，采用等效焓降法对引风机的经济性分析进行计算，其计算结果和使用常规的的热平衡法计算结果一致，证明了等效焓降法在百万千瓦机组汽轮机驱动式引风机中应用的合理性。以百万千瓦机组汽轮机驱动式引风机为对象，采用等效焓降法定量研究了引风机电动和汽动方式下的经济性，节能分析表明汽轮机驱动式引风机相对于电动方式节能效果非常明显，在低负荷下其煤电综合收益达到了356元/h。论文所述节能分析方法可为同类型机组引风机的节能改造提供借鉴作用。

**关键词：**汽轮机驱动；引风机；等效焓降法；节能

## 0 引言

随着社会经历的快速发展，百万千瓦机组已成为我国火电机组发展的必然趋势。风机是发电厂的重要辅助机械，厂用电的一大部分都消耗在风机中<sup>[1]</sup>。目前，国内大型发电厂均采用动叶或静叶可调节的轴流风机，其主要特点是调节效率高，节能效果好，在实践中广受欢迎，但其机身功率大、耗电量高等缺点也十分明显，这在某种程度上限制了其高效的运转，成为其发展提升的短板，尤其是发电机组在启动和停止的过程中，对用电量的消耗极大，从而大大降低了效率。实践证明采用汽轮机驱动式引风机具有显著的优势，较多百万千瓦机组的引风机开始尝试使用这种驱动方式<sup>[2]</sup>。海门电厂、北仑电厂以及泰州电厂1000MW机组等一系列大型发电机组陆续尝试使用汽轮驱动式引风机，使用中取得良好的效果。本文以1000MW超临界机组作为范例，对该机组的引风机汽动改造使用等效焓降法进行了能耗分析，并对驱动式和电动定速式引风机进行了能耗方面的比较，可为工程实践中引风机的气动改造提供参考。

## 1 引风机简介

引风机是一种从动的流体机械，它主要是依靠外部输入的机械能，提高气体压力并排送气体。引风机在实际工程中的应用范围广，主要用于工厂、

矿井、隧道、冷却塔、锅炉和工业锅炉等工程中的通风和引风。引风机的工作原理与透平压缩机基本相同，不同之处就是引风机中的气体流速较低，压力变化小，气体比容的变化在引风机中可不加以考虑，把气体当作不可压缩流体。在机组启停及低负荷时由引风机导叶控制负压，风机小机在最小转速运行，负压为自动调节状态时，导叶控制范围为0%~80%，转速自动调节范围为2800~6200r/min。

## 2 引风机驱动方式

以1 000MW超临界机组的设计为例，设计时机组采用平衡通风方式，气流在机组流通过程中的各项阻力是采用一次风机、送风机、引风机和脱硫增压风机来克服。引风机的布置方式和运行系统如图1所示。

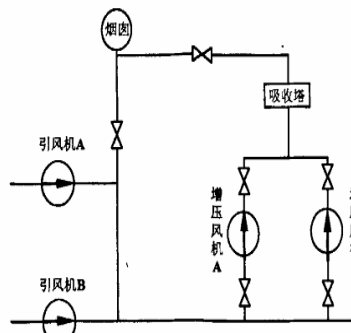


图1 风烟系统

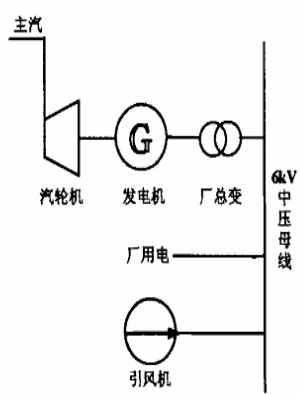


图2 电动方案

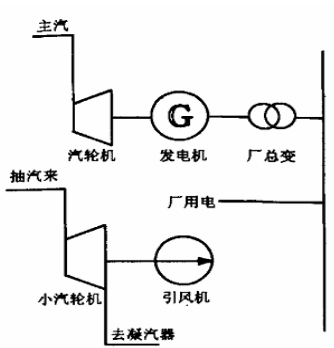


图3 汽动方案

修改设计前，此种引风机基本采用电力驱动的方式，设计形式如上图2，引风机的电动机接在6kV中压母线上；修改设计后如图3，当机组运转正常的情况下，引风机不是依靠厂内电驱动，而是一台汽轮机单独配置在引风机外，引风机通过汽轮机变速箱的多级变速拖动。该汽轮机和汽泵的进汽方式基本相同，分低压、高压汽源，在这两种汽源中，低压汽源可以由辅汽以及同一机组的一路低压抽汽提供，高压汽源可以由再热冷段或者一级再热汽提供，同时汽轮机的抽汽或者排汽具备供热或者回收除氧器及凝汽器的条件。

2.1 百万机组引风机的工作参数

此发电机组所配备的引风机每年将会运行大约5000h，而抽汽供给每一台引风机所需汽源，汽轮机排汽进入主凝汽器。运行状况如下：①发电机组工况维持在50%负荷及其以下时，引风机将会仅仅单侧运行；②在发电机组的运行负荷为400MW时，一台引风机所对应的风机电效率以及汽轮机的工作效率和750MW负荷时两台引风机的工作效率基本相当。为详细了解汽轮机驱动式引风机在不同机组的

不同负荷状况下的节能效果，对比如表1所示。

表1 百万千瓦引风机的主要性能参数

机组发电总功率/MW	1000MW	800MW	500MW
引风机功率/kW	4086	2900	1873
电动引风机工作效率/%	87.1	76.1	56
小汽轮机工作效率/%	82	78	68
机组发电煤耗/(g/kW·h))	275	280	285
主汽流量/(t/h)	2996.3	2227	1290.4
主汽焓/(kJ/kg)	3481.2	3528	3607.3
再热热段流量/(t/h)	2479.9	1869.9	1128.3
再热热段焓/(kJ/kg)	3662.6	3667.6	3693.7
给水焓/(kJ/kg)	1321.5	1129.3	1079.3
主汽轮机排气焓/(kJ/kg)	2565.9	2565.9	2565.9
抽汽焓/(kJ/kg)	3114.2	3141.7	3176.3

2.2 百万千瓦机组汽轮机驱动式引风机系统简介

在百万千瓦机组汽轮机驱动式引风机系统中，引风机采用小汽轮机作为驱动装置，循环冷却水系统、小汽轮机进汽系统、小汽轮机轴封系统、小汽轮机润滑油系统在百万千瓦机组汽轮机驱动式引风机系统中必须设置。

引风机小汽机供汽汽源采用锅炉一级再热器出口蒸汽，低负荷工况采用冷段混汽到小机正常进汽。系统还需要辅助蒸汽系统作为备用，作为系统调试的气源。机组正常工作情况下的进汽压力参数为4.0MPa，温度为475℃，额定的蒸汽流量为79.3t/h。

3 等效焓降法的计算模型

大型发电机组一般都具备再热系统，等效焓降的计算具有一定的特点。使用等效焓降法进行运算时的步骤是：验算出各等级抽汽的等效焓降值；再热器热段之后抽汽的等效焓降为  $H_j$  的表达式为式

(1):

$$H_j = h_j - h_n - \sum_{r=1}^{j-1} A_r \eta_r \tag{1}$$

在上述关系式中  $H_j$  表示  $j$  级抽汽口的蒸汽焓。

①当加热器  $j$  与  $r$  无疏水联系时， $A_r = \tau_r$ ；②

当加热器  $j$  与  $r$  有疏水联系时， $A_r = \gamma_r$ ， $\gamma_r$  为 1 kg 水在加热器  $r$  中所释放的能量。

再热器冷段的等效焓降  $H_j$  的表达式为式 (2):

$$H_j = h_j + \sigma - h_n - \sum_{r=1}^{j-1} A_r \eta_r \quad (2)$$

通过对比式 (1) 和式 (2) 可知, 排挤抽汽在再热器冷段的前面出现, 其经过再热器时将会吸收热量。排挤抽汽做的功, 不仅包含加入热量  $q_j$  在汽轮机中的做功, 还包括由于排挤抽汽导致的再热器吸热量增加的做功。抽汽等效焓降  $H_j$  与排挤 1kg 抽汽所需热量  $q_j$  之比即为  $j$  级的抽汽效率  $\eta_j$ 。求出各回热抽汽等效焓降和抽汽效率后, 便可求出新蒸汽的毛等效焓降  $H_m$ :

$$H_m = h_0 + \sigma - h_n - \sum_{r=1}^n \tau_r \eta_r \quad (3)$$

计算出各个供热抽汽、小汽轮机、轴封漏气、给水泵, 以及附加部分导致的做功效率降低。考虑到目前大型机组供热抽汽过程中会有回水或者补水的状况, 在通常情况下凝汽器是热力系统的通道, 所以做功的实际损失为:

$$\Pi_{cq} = \alpha_{cq} (h_{cq} - h_n) \quad (4)$$

由此得出其等效焓降为:

$$H = H_m - \sum \Pi = h_0 + \sigma - h_n - \sum_{r=1}^n \tau_r \eta_r - \sum \Pi \quad (5)$$

式中,  $\sum \Pi$  为所有辅助部分做功的损失。

### 3.1 等效焓降计算

为防止计算失误而造成不必要的损失, 本文依据最新的科研成果对汽轮机驱动式引风机经济性分析进行了总结。主要的计算步骤如下: 计算出各个等级抽汽的抽汽效率、等效焓降以及机组内热力系统的每个辅助设施的做功时损失的量, 最终计算出新蒸汽的等效焓降。

### 3.2 经济效益计算

汽轮机设备的工作效率表达式是:

$$\eta_i = \frac{H}{Q} = \frac{H}{h_0 + \alpha_{zr} \sigma - h_{gs}} \quad (6)$$

在此公式中,  $Q$  表示发电厂内机组的循环吸热量;  $h_{gs}$  为给水焓, 另外, 电厂内蒸汽的消耗率为:

$$d = \frac{1}{N_i \eta_{jx} \eta_d} \quad (7)$$

在上式中,  $N_i$  为循环内功;  $\eta_{jx}$  为机械效率;

$\eta_d$  为发电机的效率, 电厂热耗率为:

$$q = d(h_0 + \alpha_{zr} \sigma - h_{gs}) \quad (8)$$

消耗标准煤用于发电的量为:

$$B_{B(d)} = B_b - B_{b(g)} = \frac{3600D(h_0 + \alpha_{zr} \sigma - h_{gs})}{29308\eta_g \eta_{gd}} - \frac{Q_{gr}}{29308\eta_{\omega} \eta_g \eta_{gd}} \quad (9)$$

上述公式里,  $B_b$  表示发电机组单个工作时间单

位消耗的标准煤量;  $B_{b(g)}$  表示供热单个工作时间内的标准煤量;  $D$  表示锅炉单个工作时间内的蒸发量;  $\eta_g$  表示锅炉效率;  $\eta_{gd}$  表示管道效率;  $\eta_{\omega}$

表示热网效率;  $Q_{gr}$  表示发电机组单个工作时间所提供的热量。

### 3.3 等效焓降法的能耗分析<sup>[3]</sup>

运用等效焓降法分别对汽动引风机的单个工作时间标准煤的消耗量进行分析, 从而分析不同的驱动方式在机组不同负荷下的经济效益。

依据等效焓降法原理, 机组的循环吸热量为:

$$Q = h_0 + \alpha_{zr} \sigma - h_{gs} \quad (10)$$

在上述公式中,  $h_0$  表示主蒸汽焓;  $\alpha_{zr}$  表示相对于 1kg 的主蒸汽,  $\sigma$  表示 1kg 再热汽在再热器中的吸热量;  $h_{gs}$  表示给水焓。

蒸汽的等效热降  $H$  表示:

$$H=Q\times\eta_i$$

(11)

公式中 $\eta_i$ 表示发电机组的热效率，发电机组的标准煤耗增加值为：

$$\Delta b_b=b_b\delta\eta_i$$

(12)

由于可对比抽汽在小汽轮机做功导致的新蒸汽等效热降下降值为：

$$\Delta h=\alpha_1(h_2-h_n)$$

(13)

上述 $\alpha_1$ 表示相对于1kg主蒸汽的汽动引风机抽汽份额； $h_2$ 和 $h_n$ 表示主汽轮机排汽焓以及抽汽焓值。推算得装置效率的相对降低值为：

$$\delta\eta_1=\frac{\Delta H}{H-\Delta H}$$

(14)

4 经济性比较

在不同的工况下，电力启动的引风机方案会使得发电机组所产生的发电容量比汽轮机驱动的引风机设备所产生的容量小。应对运行机组的发电量的净增加值和标准发电煤耗的净增加值进行比较，以期更好地对其实际收益进行对比<sup>[4]</sup>。

表2 机组净增加的发电量和净增加的标准发电煤耗的综合收益比较

机组发电总功率/MW	1000	800	500
引风机消耗功率/MW	9.38	7.63	6.69
降低厂用电率/%	0.938	0.953	1.138
送电收益/(元/h)	2235	1907	1673
发电标煤增量/(g/kW·h))	3.45	3.38	4.39
增加燃煤费用/(元/h)	2070	1626	1317
煤电综合收益/(元/h)	275	281	356

由表2中可以总结出，在机组净增加的发电量和净增加的标准发电煤耗的综合收益比较可看出明显差异。节流调节方法浪费了大量的电能，如果能够充分利用此部分能源将会给企业带来巨大的效果。

在发电机组满负荷的工况下，单个工作时间内送电收益较汽轮机驱动式引风机少2435元。在额定负荷工况下，燃煤发电的各项收益单位工作时间内降幅到达275元，经济收益显著。通过表格中的数据可以得出，在低于额定500MW负荷工况下，燃煤发电的各项综合经济效益达到最高，单位工作时间内高达356元。究其原因，在低负荷的工况时，电力驱动式引风机的转速是额定的，负荷的调节是依靠入口导叶开度的变化来进行调整，这种汽轮机驱动调节方式和采用大功率风机变频目的一样。值得考虑的是，由于维护费用以及单位造价的高昂，引风机变频器应用不可能得到较大普及，汽轮机驱动将会是大功率风机所使用的降低风机耗能的有效方法，可以为发电机组节能改造的可行性提供参考，另采用汽轮机驱动引风机方式后，厂用电率下降，并利于整体厂区的配电等级降级。

上述计算结果是基于发电标准煤的价格600元/t获得，这个等级的发电标煤价是在市场中较为稳定和常见的。可能出现的情况是：市场上的发电标准煤价格升高，导致我们所采用的这种驱动引风机的效益大打折扣，可能算出汽轮机驱动引风机的实际收益远低于电力驱动的引风机的实际收益。所以，根据各地的电网价格不同以及发电标煤的不同，需要对驱动方式做出适时做出调整，以便更好的产生经济效益。

表3 各种驱动方式引风机的经济效益

项目		汽轮机置效率	电厂汽耗率	电厂热耗率	发电消耗标准煤量	发电标准煤耗量
		/%	/(kg/kW·h)	/(kJ/kW·h)	/(t/h)	/(g/kW·h)
原始 VWO 工况	常规热平衡法	48.19	2.96	7549.1	182783	275.8
	等效焓降法	48.19	2.96	7549.1	182783	275.8
冷段抽气工况	常规热平衡法	47.25	3.03	7699.4	177618	274.1
	等效焓降法	47.25	3.03	7699.4	177618	274.1
热段抽气工况	常规热平衡法	47.19	3.02	7708.3	178655	274.8
	等效焓降法	47.19	3.02	7708.3	178655	274.8

通过与常规热平衡法的比较,可以发现等效焓降法和常规热平衡法之间的计算结果非常一致,这一结果证明了再热器冷段抽汽、热段抽汽过程中应用等效焓降法的合理性。与常规热平衡法不同的是,等效焓降法不需要计算出各股抽汽所做的功以及各等级的加热器抽汽系数,计算相对而言准确方便。

## 5 结论

通过上述比较和分析,本文对于百万千瓦级别的机组,使用等效焓降法做出的评价,得到如下结论:

(1) 节能效果对比明显:在低与正常工作运行负荷的情况时,引风机入口挡板处的能量损失在汽轮机变速调节的情况下解决了,导致其优良的节能效果。

(2) 由于各个地区的发电方式不同,经济状况不同,发电标准煤以及电价收益的不同,各个地区的发电企业应根据实际情况做出适当的调整,这就需要企业认真分析自身情况从而选择最适合自身发展的引风机驱动方式。

(3) 汽轮机驱动式引风机可能会出现的风险有:系统的复杂性较强,因为是新引进的驱动方式,所以可能会经验很少,运行安全性得不到保障等,解决的办法是需要建立和完善操作规范,认真总结,以防止出现任何可能的风险,从而达到收益的最大化。

### 参考文献:

- [1] 连锁,吕玉坤.泵与风机[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [2] 刘经校.高炉鼓风机电动鼓风与汽动鼓风方案对比中的节能分析[J].钢铁技术,2008(3):53-54.
- [3] 朱军,安华民,唐燕萍,等.1000MW超超临界宣接空冷机组锅炉给水泵配置方案探讨[J].中国电力,2009,42(4):7-9.
- [4] 林万超.火电厂系统节能理论[M].西安:西安交通大学出版,1994.

### 作者简介:

王 骏(1978—),男,江苏丹阳人,高级工程师,研究方向:火电及联合循环机组启动调试,技术改造,性能试验和运行优化工作, E-mail: aries\_wj@126.com。