

节电技术应用实践丛书

高压变频调速技术 应用实践

徐甫荣 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

节电技术应用实践丛书

高压变频调速技术 应用实践

徐甫荣 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



内 容 提 要

火力发电厂是电能的生产单位,同时也是耗电大户。发电厂大量的风机、水泵是节能改造的首选设备,具有巨大的节能潜力。随着厂网分家、竞价上网政策的实施,发电厂对主要辅机设备进行节能改造,以降低厂用电率,从而降低发电煤耗,减少温室气体的排放,具有巨大的经济效益和社会效益。

风机、水泵节能改造,尤以变频调速改造为最佳方案,节能效果最好。本书主要讨论了采用高压变频技术对发电厂风机、水泵进行节能改造时所涉及的生产工艺要求、系统设计、方案的经济性分析和可靠性措施以及谐波干扰等方面的问题,并辅以大量的工程应用实例。本书内容丰富、资料翔实,将会对发电厂辅机节能改造项目的可行性研究、设备选型、安装调试以及调速系统的性能测试等方面起到指导和规范的作用。

本书可供从事风机、水泵节能改造的专业技术人员参考,也可供大、中专院校的相关专业师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

高压变频调速技术应用实践 / 徐甫荣编著. —北京:中国电力出版社, 2007

ISBN 978-7-5083-4842-1

I. 高… II. 徐… III. 火电厂—附属装置—变频调速
IV. TM621.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 118694 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

— 2007 年 2 月第一版 2007 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18 印张 453 千字

印数 0001—3000 册 定价 28.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前 言



我国的电源结构中，火电装机容量占 74%，发电量占 80%；水电装机容量占 25%，发电量占 19%；核电装机容量和发电量仅占 1% 左右。因此火电机组及其辅机设备的节能改造工作，就显得十分重要。火电厂的各类辅机设备中，风机、水泵类设备占了绝大部分，蕴藏着巨大的节能潜力。随着火电装机容量的迅速扩大，火电机组的调峰力度也不断加大，机组的负荷变化范围很大，必须实时调节风机、水泵的流量。目前流量的调节方式多为节流阀调节，由于这种调节方式仅仅是改变了通道的通流阻力，电动机的输出功率并没有多大的改变，结果是白白地浪费掉大量的能源。随着电力行业改革的不断深化，厂网分家、竞价上网政策的逐步实施，降低厂用电率，降低发电成本，提高上网电价的竞争力，已经成为各火电厂努力追求的目标。

随着电力电子技术和计算机控制技术的发展，从 20 世纪 80 年代开始，国外多家公司研制出了不同型号的高压大功率变频装置，并在火电厂辅机节能改造中广泛应用。20 世纪末，国内少数电厂也开始采用进口高压变频器对风机、水泵进行节能改造，取得了令人满意的效果。进入 21 世纪以来，国产高压变频器迅速崛起，并以惊人的速度占领市场，采用高压变频器对电厂风机、水泵实现调速改造，已成为公认的节能首选方案，到目前为止，在全国火力发电厂中，已有约 1200 套的高压变频器投入使用。

编写本书的目的是供火电厂采用高压变频器对风机、水泵实现节能改造的用户参考和借鉴。希望能对高压变频改造项目的可行性研究，设备的选型，调速系统的设计，技术方案的经济性分析，设备的安装调试以及变频调速系统的性能测试等方面的工作起到抛砖引玉的作用。

为了便于火电厂用户在实施高压变频节能改造项目时，在项目考察，资料搜集，设备选型和招标，方案设计与论证时有所依据，除列举了丰富的工程应用案例外，还提供了设备招标文件和调速系统技术规范书参考样本，国内外高压变频器生产厂商和产品的资料，以及在电力行业的用户业绩表。希望读者能从这些资料中有所获益。

在本书的编写过程中，无论从资料的收集和技术信息的交流上都得到了国内同行和业内专家学者的帮助和支持，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促，加之编者水平有限，书中的错误与不妥之处一定不少，恳切欢迎读者批评指正。

编者

目 录



前言

第一章 发电厂风机、水泵调速节能运行的技术经济分析

第一节 风机、水泵调速运行的必要性和优越性	2
第二节 风机、水泵的调速方式	7
第三节 风机、水泵的低效调速节能方式	7
一、液力耦合器调速	7
二、液力调速离合器调速	9
三、电磁转差离合器调速	9
四、鼠笼式异步电动机定子调压调速	11
五、绕线式电动机转子串电阻调速	15
六、各种低效调速方式的节能效果比较	17
第四节 风机、水泵的高效调速节能方式	17
一、变极调速	18
二、变频调速	18
三、绕线式电动机的串级调速	24
四、无刷双馈变频调速电动机	30
五、无换向器电动机调速	32
第五节 各种调速方式的综合性能分析	35
一、不同的调速方式适用的电动机容量和转速范围	35
二、各种调速方式的电动机及其调速装置的综合效率	35
三、各种调速系统的电源功率因数	36
四、各种调速方式的初投资和	

回收期

五、各种调速方式的性能比较

第二章 中高压变频器的分类和比较

第一节 变频调速技术的发展历史及现状	43
第二节 中高压变频器的分类和比较	44
一、交—交变频器	45
二、负载换流式晶闸管变频器 (LCI)	46
三、功率器件串联二电平电流源型高压变频器	47
四、功率器件串联直接高压二电平电压源型高压变频器	48
五、多电平电压源型变频器	49
六、单元串联多重化电压源型变频器	55
七、多电平+多重化高压变频器	59
八、变压器耦合输出高压变频器	60
九、矩阵式变换器	63
第三节 变频调速中的关键控制技术及其发展	64
一、矢量控制技术	64
二、无速度传感器矢量控制技术	64
三、直接转矩控制技术	64
四、PWM 控制技术	64
五、数字化控制技术	65
六、自整定技术	65
七、交流传动系统的智能控制	66
第四节 变频调速技术的发展趋势	66

第三章 发电厂风机、水泵变频调速

节能改造解决方案..... 69

第一节 变频调速节能改造项目的

可行性研究 69

一、发电机组和辅机设备的基本

参数和运行数据调研 69

二、根据机组和辅机的运行情况，

确定节能改造的优选项目 71

三、调速范围的计算和校验 71

四、避免并联运行的风机、水泵

在调速运行时的抢风、抢水

和汽蚀现象..... 77

第二节 变频调速系统方案的设计

..... 80

一、发电厂主要辅机设备的运行

工艺要求 81

二、变频调速系统的备用方案和

切换控制 90

三、变频调速系统型式和容量的选择

..... 92

第三节 高压变频器性能的比较和

选择 95

一、高压变频器的性能指标和意义

..... 96

二、高压变频器的选型和采购原则

..... 100

三、设备招标文件和调速系统技术

规范书的编制 102

第四节 变频调速系统技术方案

的经济性评价和比较 103

一、静态分析法 104

二、动态分析法 105

第四章 变频调速系统的性能测试

和节能效益评估 109

第一节 变频调速系统性能测试

..... 109

一、静态测试 109

二、空载性能测试 109

三、负载性能测试 110

四、变频调速系统谐波测试 111

第二节 节能效益对比测试及实例

..... 112

第三节 设备的可利用率试验 114

第四节 竣工验收试验 115

一、总则 115

二、变频调速调节和挡板调节吸风机

系统的能耗对比试验 117

三、变频器的输出不对称度及输出

波形测试 122

四、变频器的效率测试 122

五、变频调速系统的谐波测试 126

六、直接起动和变频调速起动试验

..... 127

七、使用变频器对电动机轴电压、

振动和温升的影响试验 129

八、总结 131

第五章 发电厂风机变频调速节能

改造实例分析 133

第一节 河南省四个发电厂锅炉送、

引风机变频调速节能改造

实施情况和变频调速系统

性能试验..... 133

第二节 四川某电厂4号炉风机变频

调速节能改造实例分析

..... 144

第三节 华能某电站和华能某电厂

引风机变频调速节能改造

实例分析..... 148

第四节 山东某发电厂引风机变频

调速节能改造实例分析

..... 150

第五节 上海某发电厂引风机变频

调速节能改造实例分析

..... 153

第六节 湖北某电厂送风机变频

调速节能改造实例分析

..... 156

第七节 吉林某热电厂引风机变频

调速节能改造实例分析	160
------------	-----

第八节 焦作某发电厂引风机变频调速节能改造实例分析	162
---------------------------	-----

第九节 山西某发电公司引风机变频调速节能改造实例分析	165
----------------------------	-----

第十节 山西某电力公司送风机变频调速节能改造实例分析	169
----------------------------	-----

第十一节 大唐集团某电厂 300MW 机组引风机变频调速节能改造实例分析	172
--------------------------------------	-----

第十二节 大唐集团某发电厂引风机变频调速节能改造实例分析	176
------------------------------	-----

第十三节 浙江某环保热电厂引风机变频调速节能改造实例分析	177
------------------------------	-----

第十四节 江苏某电厂 300MW 机组一次风机变频调速节能改造实例分析	180
-------------------------------------	-----

第十五节 宁波热电公司锅炉风机变频调速节能改造实例分析	182
-----------------------------	-----

第十六节 浙江某热电厂引风机变频调速节能改造实例分析	185
----------------------------	-----

第六章 发电厂水泵变频调速节能改造实例分析 189

第一节 华能某电站 100MW 机组锅炉给水泵变频调速节能改造实例分析	189
-------------------------------------	-----

第二节 长春某热电厂母管制给水系统变频调速节能改造实例分析	191
-------------------------------	-----

第三节 新疆某热电厂给水泵变频调速节能改造实例分析	195
---------------------------	-----

第四节 山西某发电厂循环水泵变频	
------------------	--

调速节能改造实例分析	198
------------	-----

第五节 新疆某热电厂循环水泵变频调速节能改造实例分析	202
----------------------------	-----

第六节 大唐集团某电厂凝结水泵变频调速节能改造实例分析	205
-----------------------------	-----

第七节 大唐集团某发电厂凝结水泵变频调速节能改造实例分析	206
------------------------------	-----

第八节 江苏某电厂 125MW 机组凝结水泵变频调速节能改造实例分析	207
------------------------------------	-----

第九节 江苏某发电厂 300MW 机组凝结水泵变频调速节能改造实例分析	209
-------------------------------------	-----

第十节 江苏某发电厂 220MW 机组凝结水泵变频调速节能改造实例分析	213
-------------------------------------	-----

第十一节 浙江某发电厂 300MW 机组灰渣泵变频调速节能改造实例分析	217
-------------------------------------	-----

第十二节 国电集团某发电厂灰浆泵变频调速节能改造实例分析	219
------------------------------	-----

第十三节 吉林某热电厂灰渣泵变频调速改造实例分析	223
--------------------------	-----

第十四节 山东某热电厂热网泵变频调速节能改造实例分析	225
----------------------------	-----

附录 229

附录 A 国内外主要高压变频器厂商的产品技术参数和应用业绩	229
-------------------------------	-----

附录 B 设备招标文件与技术规范书编制实例	256
-----------------------	-----

参考文献 282

第一章 发电厂风机、水泵调速 节能运行的技术经济分析

风机和水泵在各行业的数量众多,耗电量巨大。据有关部门的统计,全国风机、水泵电动机装机总容量约 35000MW,耗电量约占全国电力消耗总量的 40% 左右。目前,风机和水泵运行中有很大的节能潜力,其潜力挖掘的焦点是提高风机和水泵的运行效率。据估计,提高风机和水泵系统运行效率的节能潜力可达 300 亿 ~ 500 亿 kW · h/年,相当于 6 ~ 10 个装机容量为 1000MW 级的大型火力发电厂的年发电总量。

在火力发电厂中,风机和水泵也是最主要的耗电设备,且容量大、耗电多。而且这些设备都是长期连续运行或经常处于低负荷及变负荷运行状态,其节能潜力则更加巨大。据统计,全国火力发电厂共有八种风机和水泵:送风机、引风机、一次风机、排粉风机、锅炉给水泵、循环水泵、凝结水泵、灰浆泵。其配套电动机的总容量为 15000MW,年总用电量为 520 亿 kW · h,占全国火电发电量的 5.8%。发电厂辅机电机的经济运行,直接关系到厂用电率的高低,随着电力行业改革的不断深化,厂网分家、竞价上网等政策的逐步实施,降低厂用电率,降低发电成本,提高上网电价竞争力,已成为各发电厂努力追求的经济目标。

我国火电机组的平均煤耗为 400g/(kW · h),比发达国家高 70 ~ 100g/(kW · h),而厂用电率的高低是影响供电煤耗和发电成本的主要因素之一。国产 300MW 机组的厂用电率平均为 4.71%,而进口(GE 公司)机组为 3.81%。国产机组比进口机组约高 20% 左右。国产机组厂用电率偏高的原因主要是辅机电机在经济运行方面存在问题和差距。

国外火电厂的风机和水泵已纷纷增设调速装置,而目前我国火电厂中除少量采用汽动给水泵,液力耦合器及双速电动机外,其他风机和水泵基本上都采用定速驱动。这种定速驱动的水泵采用出口阀,而风机则采用入口风门调节流量,都存在严重的节流损耗,尤其在机组变负荷运行时,由于风机和水泵的运行偏离高效点,使运行效率降低。调查表明:我国 50MW 以上机组锅炉风机运行效率低于 70% 的占一半以上,低于 50% 的占 20% 左右。由于目前普遍的机组负荷偏低,风机的效率就更低,有的甚至不到 30%,结果白白地浪费掉大量的电能,已经到了非改不可的地步。

目前国内的火电机组大都处于低负荷或变负荷运行状态,原因有三:①近年来由于装机容量的迅速增长,全国基本上摆脱了电力供应紧张的局面,电力供应有了盈余,火电机组不得不压低负荷运行;②由于负荷结构的变化,电网负荷的峰谷差加大,其值一般达到电网最高负荷的 30%,有的电网甚至高达 50%;③由于目前电网还缺少专门带尖峰负荷的机组(例如坝库式水电机组,抽水蓄能机组,燃气轮机组等),所以一般电网的尖峰负荷和低谷负荷都要求火电机组来承担,火电机组不得不作调峰变负荷运行。在机组变负荷运行方式下,如果主要辅机采用高效可调速驱动系统取代常规的定速驱动系统,无疑可节约大量的节流损耗,节电效果显著,潜力巨大。除此之外,由于可调速驱动系统都具有软起动功能,可使电厂辅机实现软起动,避免了由于电动机直接起动引起的电网冲击和机械冲击,从而可以防止与此有关的一系列事故的发生。例如,电动机转子笼条的疲劳断裂,定子端部绕组绝缘

损坏击穿等重大事故,提高了辅机运行的可靠性。

第一节 风机、水泵调速运行的必要性和优越性

一、风机

风机是火力发电厂重要的辅助设备之一,锅炉的四大风机(送风机、引风机、一次风机或排粉风机、烟气再循环风机)的总耗电量约占机组发电量的2%左右。随着火电机组容量的提高,电站锅炉风机的容量也在不断增大,如国产200MW机组,风机的总功率达6440kW(其中,送风机两台2500kW,引风机两台2500kW,排粉风机总功率1440kW),占机组容量的3%以上。因此,提高风机的运行效率对降低厂用电率具有重要的作用。

我国电站风机已普遍采用了高效离心风机,但实际运行效率并不高,其主要原因之一是风机的调速性能差,二是运行点远离风机的最高效率点。我国现行的火电设计规程DL5000—2000规定,燃煤锅炉的送、引风机的风量裕度分别为5%和5%~10%,风压裕度分别为10%和10%~15%。这是因为在设计过程中,很难准确地计算出管网的阻力,并考虑到长期运行过程中可能发生的各种问题,通常总是把系统的最大风量和风压裕度作为选择风机型号的设计值。但风机的型号和系列是有限的,往往在选用不到合适的风机型号时,只好往大机号上靠。这样,电站锅炉送引风机的风量和风压裕度达20%~30%是比较常见的。

电站锅炉风机的风量与风压裕度以及机组的调峰运行导致风机的运行工况点与设计高效点相偏离,从而使风机的运行效率大幅度下降。一般情况下,采用风门调节的风机,在两者偏离10%时,效率下降8%左右;偏离20%时,效率下降20%左右;而偏离30%时,效率则下降30%以上。对于采用调节门调节风量的风机,这是一个固有的不可避免的问题。可见,锅炉送、引风机的用电量中,很大一部分是因风机的型号与管网系统的参数不匹配及调节方式不当而被调节门消耗掉的。因此,改进离心风机的调节方式是提高风机效率,降低风机耗电量的最有效途径。

按照流体机械的相似定律,风机、水泵的流量 Q 、压头(扬程) H 、轴功率 P 与转速 n 之间有如下比例关系

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2; \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (1-1)$$

离心式风机在变速调节的过程中,如果不考虑管道系统阻力 R 的影响,且风压 H 随流量 Q 成平方规律变化,则风机的效率可在一定的范围内保持最高效率不变(只有在负荷率低于80%时才略有下降)。图1-1示出了离心式风机不同调节方式耗电特性比较,图1-2示出了采用风门调节和转速调节方式时,风机的效率-流量曲线。

由图1-2可知:在风机的风量由100%下降到50%时,变速调节与风门调节方式相比,风机的效率平均高出30%以上。因而,从节能的观点来看,变速调节方式为最佳调节方式。发电厂辅机采用定速驱动时,风机靠风门调节,水泵则靠阀门开度来调节流量,除产生大量的节流损耗外,反应速度慢,导致锅炉的燃烧无法自动投入,因而机组的协调控制无法投

入, 机组无法响应负荷的动态变化。辅机采用调速驱动后, 机组的可控性提高了, 响应速度加快, 控制精度也提高了。从而使整个机组的控制性能大大改善, 不但改善了机组的运行状况, 还可以大大节约燃料, 进一步节约能源。同时, 采用变速调节以后, 可以有效地减轻叶轮和轴承的磨损, 延长设备使用寿命, 降低噪声, 大大改善起动性能。工艺条件的改善也能够产生巨大的经济效益。

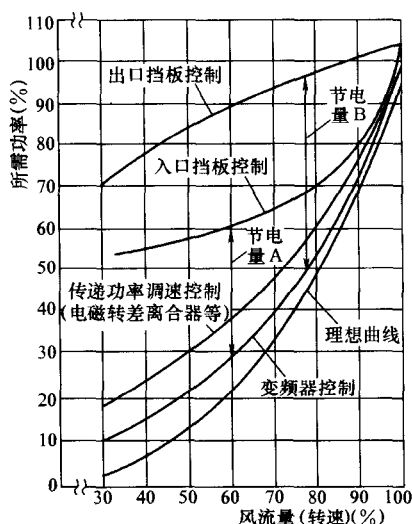


图 1-1 离心式风机不同调节方式耗电特性比较

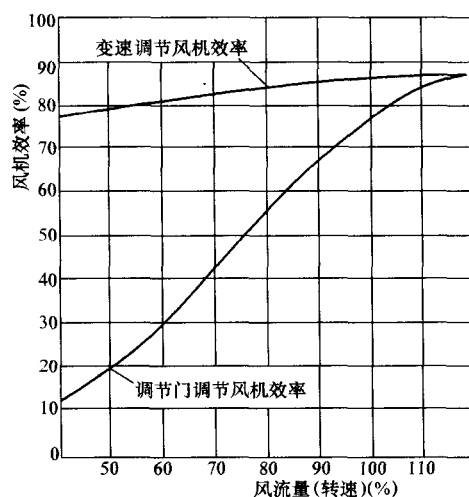


图 1-2 采用风门调节和转速调节方式下的风机效率 - 流量曲线

二、水泵

火力发电机组必须配备的水泵主要有锅炉给水泵、循环水泵和凝结水泵, 其次还有射水泵、低压加热器疏水泵、热网水泵、冷却水泵、灰浆泵、轴封水泵、除盐水泵、清水泵、过滤器反洗泵、生活水泵、消防水泵和补给水泵等。这些水泵数量多, 总装机容量大。50MW 火电机组主要配套水泵的总装机容量为 6430kW, 占机组容量的 12.86%; 100MW 机组为 10480kW, 占 10.48%; 200MW 机组为 15450kW, 占 7.73%。100MW 机组主要配套水泵的总耗电量约占全部厂用电量的 70% 左右。由此可见, 水泵确实是火力发电厂中耗电量最大的一类辅机。因此, 提高水泵的运行效率, 降低水泵的电耗对降低厂用电率具有举足轻重的意义。

与风机一样, 由于设计中层层加码, 留有过的富裕量, 造成大马拉小车现象之外, 由于采用节流调节, 为满足生产工艺上的要求, 造成更大的能源浪费现象。以锅炉给水泵为例, 一台 200MW 发电机组的给水泵, 其电动机功率达 5000kW, 水泵的出口压力为 25.0MPa, 而正常运行时的汽包压力为 16.5MPa。水泵的出口压力与正常的汽包压力之间的差别如此之大 (8.5MPa) 的原因有两个:

- 1) 锅炉检修以后打水压试验的需要。
- 2) 为给水调节阀前提供较大的压力, 以提高调节系统的反应速度。

由以上分析可知, 当电动机定速运行时, 为了维持汽包压力在正常值, 必须在给水管道上加装给水调节阀, 增加阻力, 以至消耗大量的能源。若电动机采用调速驱动, 则可用改变电动机的转速来满足不同的压力要求, 节省了因阀门阻力引起的附加损耗, 达到节能的目的。

的。同时以调速方法改变压力的响应速度远比改变阀门开度来的快，使锅炉汽包水位自动调节系统的反应加快，从而改善了锅炉给水调节系统的性能。

为了降低水泵的能耗，除了提高水泵本身的效率、降低管路系统阻力、合理配套并实现经济调度外，采用调速驱动是一种更加有效的途径。因为大多数水泵都需要根据主机负荷的变化调节流量，对调峰机组的水泵更是如此。根据目前我国电网的负荷情况，大多数 125MW 机组已参与调峰，为扩大调峰能力甚至一些 200MW 机组也不得不参与调峰运行。为这类调峰机组配套的各种水泵最好采用调速驱动，以获得最佳节能效果。例如，有一台国产 200MW 机组配备三台 DG400-180 型定速给水泵，当主机负荷为 180MW 时运行两台泵，调节阀的节流损失高达 2.21MPa，仅此一项每年浪费电能 883.9 万 kW·h。如果改用一台全容量调速给水泵则可以节省大量电能（见表 1-1）。由表 1-1 可见，当主机采用定压运行方式时，可平均节电 20%，当主机采用定-滑-定运行方式时可平均节电 30%。以上是没有考虑给水焓升变化的计算结果，如果考虑调速泵中给水焓升较小，则平均节电率将下降 3%~5%。

表 1-1 200MW 机组采用全容量调速给水泵的节电效果

主机负荷 /MW	给水流量 /(t/h)	主机定压运行		主机滑压运行	
		节约功率/kW	相对节电率(%)	节约功率/kW	相对节电率(%)
200	616	710	14.61	950	19.69
180	535	770	17.15	1050	23.08
160	470	875	20.59	1530	36.00
140	410	950	23.93	1750	43.21

发电厂所用的各种水泵绝大多数是离心泵，它们的性能曲线如图 1-3 所示。（ $H-Q$ ） n_1 是泵在额定转速 n_1 时的性能曲线，它与管路系统阻力曲线 R_1 的交点 A 为额定工况点。对应的额定流量为 Q_1 、额定扬程为 H_1 、额定效率为 η_A 。运行中如果需要减小流量到 Q_2 ，可以用节流调节和转速调节两种方法来实现。用节流调节法即通过关小出口调节阀，使系统阻力曲线由 R_1 变为 R_2 ，以得到新的运行工况点 B。对应 B 点的流量即为所需的 Q_2 ，扬程为 H_2 ，这时泵的运行效率为 η_B ，如用转速调节法，可使转速由 n_1 降到 n_2 ，这时泵的性能曲线变为 $(H-Q)n_2$ ，C 点即为新的运行工况点，对应的流量为 Q_2 ，扬程为 H_3 。转速改变后，泵的效率曲线由 η_{n1} 变为 η_{n2} ，对应 C 点的效率为 η_c 。

水泵轴功率的计算公式为

$$P_a = \frac{\rho g Q H}{1000 \eta} \quad (1-2)$$

式中 P_a ——泵的轴功率，kW；

Q ——流量， m^3/h ；

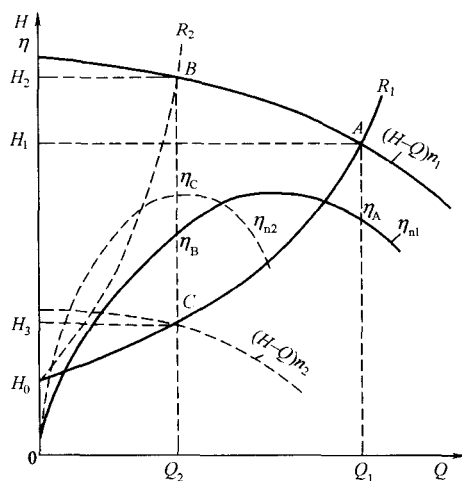


图 1-3 离心泵性能曲线

H ——扬程, m;
 ρ ——水的密度, kg/m^3 ;
 g ——重力加速度, m/s^2 ;
 η ——泵效率。

为分析问题方便, 以系数 K 来表示 $\rho g/1000$, 于是式 (1-2) 可改写为

$$P_a = \frac{KQH}{\eta} \quad (1-3)$$

用阀门节流调节时, 运行于 B 点, 轴功率 P_{aB} 为

$$P_{aB} = \frac{KQ_2 H_2}{\eta_B}$$

变化此式可得

$$P_{aB} = KQ_3 H_3 + KQ_2 (H_2 - H_3) + KQ_2 H_2 \left(\frac{1}{\eta_B} - 1 \right) \quad (1-4)$$

式中 $KQ_2 H_2$ ——有用功;

$KQ_2 (H_2 - H_3)$ ——阀门节流损失的功率;

$KQ_2 H_2 \left(\frac{1}{\eta_B} - 1 \right)$ ——泵本身损失的功率。

用转速调节法时, 运行于 C 点, 轴功率 P_{aC} 为

$$P_{aC} = \frac{KQ_2 H_2}{\eta_C}$$

同样变化此式可得

$$P_{aC} = KQ_2 H_3 + KQ_2 H_3 \left(\frac{1}{\eta_C} - 1 \right) \quad (1-5)$$

用转速调节法比用节流调节法少消耗的轴功率 ΔP_a 为

$$\Delta P_a = P_{aB} - P_{aC} = KQ_2 (H_2 - H_3) + KQ_2 \left[H_2 \left(\frac{1}{\eta_B} - 1 \right) - H_3 \left(\frac{1}{\eta_C} - 1 \right) \right] \quad (1-6)$$

从式 (1-6) 可知, 转速调节法节省的功率由两部分组成: 一是因不存在阀门节流损失而少消耗的功率; 二是与节流调节法相比, 因 $H_3 < H_2$ 和 $\eta_C > \eta_B$ 而使泵内少消耗的功率。

节流损失的大小与泵的性能曲线 ($H-Q$) 和管路系统阻力曲线 R 的形状有关, 这两条曲线越陡减小流量时的节流损失越大, 而改用转速调节法的节电效果也越显著。

对锅炉给水泵来说, 节流损失的大小还与负荷和汽轮机的运行方式有关 (见表 1-2)。在同一种运行方式下负荷越小节流损失越大; 在负荷相同时采用滑压运行方式的节流损失比采用定压运行方式还大。因此, 对调峰和滑压运行的机组, 采用调速给水泵的节电效果尤为显著。

表 1-2

DG500-180 (高效) 型泵改为调速泵的节电效果

给水流量/ (t/h)	每小时节电量/ ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{h}$)	
	主机定压运行	主机滑压运行
400	14	319
350	75	365
300	125	450
250	160	560

有些采用定速给水泵的机组，在额定负荷下的节流损失较大（见表1-3）。这是因为给水泵是按锅炉最大连续蒸发量设计的，并且考虑到磨损、老化、参数变化和汽水损失等因素，流量的富裕量较大。另外，从调节阀本身的工作特性来说，为使调节阀的流量特性不致畸变，其压降不得小于某一个值，因此必须有一定的节流损失。在这种情况下，采用调速泵虽然因液力耦合器转差损失而额外增加了功耗，但还比定速泵经济（见表1-3）。

表 1-3 125MW 机组额定负荷时调速泵与定速泵的比较

给水泵类型	机组负荷 /MW	给水流量 / (t/h)	主蒸汽压力 /MPa	泵出口压力 /MPa	调节阀压差 /MPa	电流 /A
定速给水泵 DG500 - 180	125	400	13. 24	17. 16	2. 75	310
调速给水泵 DGT480 - 180SM	125	385	13. 19	15. 20	0. 78	288

从效率变化方面来看，节流调节法在工况改变时泵的效率曲线不变，因此随着流量减小，泵的效率下降比较快；而采用转速调节法，当水泵转速改变时，泵的效率曲线也相应改变。因此，可以保证泵始终在高效区范围内运行。

如果管路系统的静扬程 $H_0=0$ （例如水平开式供水的情况），那么管路系统阻力曲线近似于相似抛物线，泵的运行工况点近似于相似工况点。这样，泵在变速运行过程中性能参数的变化可用比例定律表示，由式（1-1）可得

$$Q_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right) Q_1; \quad H_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 H_1; \quad P_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 P_1$$

因此，用转速调节法调节流量可以大幅度节约电能。例如流量下降到额定流量的 80%，轴功率将下降到额定值的 51%；如果流量下降到 50%，那么轴功率可以大幅度地下降到 13%。当然，实际上还要考虑调速装置的转差损失等因素，即使如此节电效果也是十分可观的。如果静扬程 H_0 不太大，也可以近似用比例定律来估计调速节能的效果。

以上叙述了一台泵单独供水时调速节能的原理，火力发电厂中单泵供单炉的单元制给水系统就属于这种情况。但是，单机容量 100MW 以下的火力发电厂基本上采用母管制给水系统，这种系统根据所需给水量变化增减运行泵的台数，即所谓台数调节法。如果泵的台数比较多，采用这种方法也可以使各泵的运行工况点接近于高效区，所以运行经济性也比较好。有些给水系统还配备了流量大小不同的给水泵，根据负荷进行大小泵搭配运行，即所谓经济调度，这样运行经济性会更好些。但是，为了最大限度地提高运行经济性，最理想的方案还是转速调节，因为台数调节法仍然存在一些节流损失，而且在变负荷时泵的运行效率仍然有些降低，图 1-4 表示采用台数调节法与转速调节法时泵轴功率的差异。

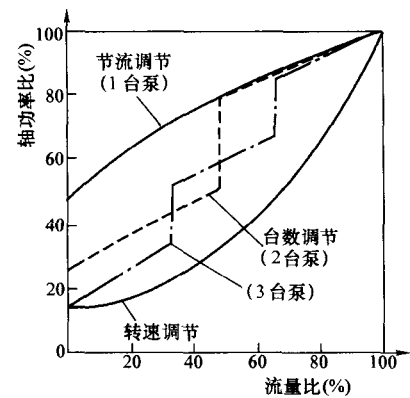
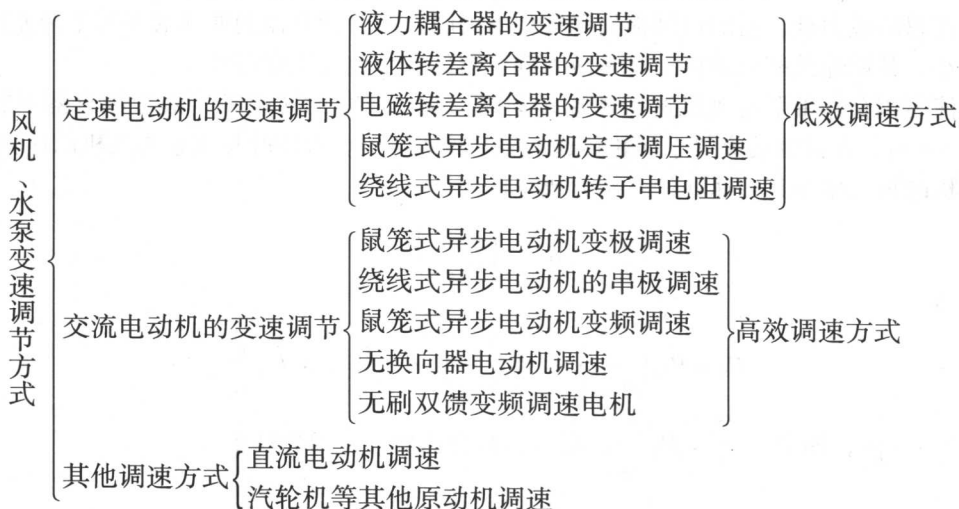


图 1-4 采用不同调节法时泵的轴功率

另外，与转速调节法相比，台数调节法不仅经济性差，而且安全性也差，因为它必须根据负荷经常起动和停泵，增加了不安全因素。

第二节 风机、水泵的调速方式

风机、水泵的流量调节方式可分为非变速调节和变速调节两大类,非变速调节方式有节流调节,分流调节,离心式和轴流式风机的前导叶调节,混流式、轴流式水泵和风机的动叶调节,离心泵的汽蚀调节和风机水泵的增减运行台数调节等,因非变速调节方式不在本书讨论的范围,这里不加详细叙述。风机、水泵常用的变速调节方式如下:



说到底,各种调速方式的差别,主要表现在对转差功率的处理上。

1. 转差功率消耗型(属低效调速方式)

- 1) 液力耦合器调速。
- 2) 液力调速离合器(ω 离合器)调速。
- 3) 电磁转差离合器(滑差电动机)调速。
- 4) 鼠笼式异步电动机定子调压调速。
- 5) 绕线式电动机转子串电阻调速。

2. 转差功率回馈型(属高效调速方式)

绕线式异步电动机的串极调速。

3. 转差功率不变型(属高效调速方式)

- 1) 变极调速(多速电动机)。
- 2) 变频调速。
- 3) 直流电动机调速。

第三节 风机、水泵的低效调速节能方式

一、液力耦合器调速

液力耦合器是一种利用液体(多数为油)的动能来传递能量的叶片式传动机械。安装

在定速电动机与风机、水泵之间,达到平滑调节转速的目的。

液力耦合器的调速效率等于输出功率与输入功率之比。在忽略各种阻力扭矩时可以近似认为

$$M_B = -M_T$$

式中 M_B ——稳定流动时,泵轮叶片作用于液体的扭矩;

M_T ——稳定流动时,液体作用于涡轮的扭矩。

则有

$$\eta_v = \frac{P_2}{P_1} \approx \frac{P_T}{P_B} = \frac{-M_T \omega_T}{M_B \omega_B} = \frac{-M_T n_T}{M_B n_B} = \frac{n_T}{n_B} = i$$

即在忽略液力耦合器的机械损失和容积损失时,液力耦合器的调速效率等于转速比。转速比越小,其调速效率也越低,这是液力耦合器的一个重要工作特性。

当液力耦合器带泵与风机进行调速传动时,泵或风机的转速等于液力耦合器涡轮的转速,即 $n = n_T$, 而其轴功率等于涡轮传递的轴功率 $P = P_T$ 。根据叶片式泵与风机的比例定律,泵与风机的轴功率与其转速 n 的三次方成正比

$$\frac{P_T}{P_{Tn}} = \left(\frac{n_T}{n_{T\max}} \right)^3$$

或改写成

$$P_T = P_{Tn} \left(\frac{n_T}{n_{T\max}} \right)^3 = P_{Tn} \left(\frac{n_T}{n_B} \right)^3 \cdot \left(\frac{n_B}{n_{T\max}} \right)^3 = P_{Tn} \frac{i^3}{i_n^3}$$

因为 $i = \frac{P_T}{P_B}$, 即 $P_B = \frac{P_T}{i} = P_{Tn} \frac{i^2}{i_n^3}$, 则液力耦合器的转差损失功率

$$\Delta P = P_B - P_T = P_{Tn} \frac{i^2 - i^3}{i_n^3}$$

为了求出最大转差功率损失处的转速比 i , 将上式对 i 求导数, 再令导数为零, 可求出其极值点

$$\frac{d(\Delta P)}{di} = \frac{P_{Tn}}{i_n^3} (2i - 3i^2) = 0$$

得 $i = \frac{2}{3} = 0.667$ 时

$$\Delta P_{\max} = \frac{P_{Tn}}{i_n^3} \left[\left(\frac{2}{3} \right)^2 - \left(\frac{2}{3} \right)^3 \right] = \frac{4}{27} \cdot \frac{P_{Tn}}{i_n^3} = 0.148 \frac{P_{Tn}}{i_n^3} = 0.148 \frac{P_{Bn}}{i_n^2}$$

通常, 液力耦合器的 $i_n = 0.97 \sim 0.98$, 则

$$\Delta P_{\max} = (0.157 \sim 0.162) P_{Tn} = (0.154 \sim 0.157) P_{Bn}$$

由此证明, 液力耦合器带泵或风机进行调速传动时, 其最大转差功率损耗 $\Delta P_{\max}$ 发生在转速比 $i = 2/3$ 处, 并不是转速越低, 损耗越大。

虽然液力耦合器工作在低速时其调速效率很低(等于转速比), 但在带泵与风机调速时, 与节流调节相比较, 仍具有显著的节能效果。例如某离心风机, 当流量 $Q = 190 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 风机的轴功率为 158 kW , 当通过节流调节使流量 $Q = 95 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 风机的轴功率为 115 kW 。当用液力耦合器调速时, 由于流量为原流量的一半, 则风机的轴功率应为其 $1/8$ 。

$$158 \text{ kW} \times \left(\frac{1}{2} \right)^3 = 19.75 \text{ kW}$$

再考虑到 $i = 1/2$ 时的液力耦合器效率 $\eta = i = 0.5$ 。原动机的输出功率应为 $19.75\text{kW} \times 2 = 39.5\text{kW}$ ，较之节流调节仍有 $115\text{kW} - 39.5\text{kW} = 75.5\text{kW}$ 的节电效果，仍是相当可观的。

液力耦合器的优点是：

- 1) 无级调速，调速范围大，较之节流调节有显著节能效果。
- 2) 可空载起动电动机和逐步起动大惯量负荷，降低了起动电流，延长电动机使用寿命，使起动更为安全可靠。
- 3) 隔离振动，能减轻负荷冲击，延长电动机和泵与风机的寿命。
- 4) 过载保护，保护电动机及风机、水泵。
- 5) 除轴承外无其他磨损部件，因转差损耗产生的热量均匀地分散到油中，不会引起局部过热，故工作可靠，能长期无检修工作，寿命长。
- 6) 工作平稳，可以和缓地起动、加速、减速和停车。
- 7) 便于控制，液力耦合器是无级调速，便于实现自动控制，适合于各种伺服控制系统。
- 8) 能用于大容量泵与风机的变速调节，目前单台液力耦合器传递的功率已达 20MW 以上。

其缺点是：

- 1) 和节流调节相比，增加了初投资，增加了安装空间，大功率的液力耦合器除本体设备外，还要一套诸如冷油器等辅助设备与管路系统。
- 2) 由于液力耦合器的最大转速比 $i_n = 0.97 \sim 0.98$ ，因此液力耦合器的输出最大转速要比输入转速低。
- 3) 调节延迟时间较长，不适应处理紧急事故的要求，因此液力耦合器适合于较高转速的泵与风机调速的场合。
- 4) 调速精度不高，不适用于要求精确转速的场合使用。
- 5) 因为无直联机构，故液力耦合器一旦发生故障，泵与风机也只能停止工作。
- 6) 调速效率低 ($\eta = i$)，产生的损耗大，在各种变速装置中属低效调速装置。

二、液力调速离合器调速

液力调速离合器是一种以油为工作介质，依靠摩擦力传递功率的变速传动装置。它是一种新型的液力无级调速传动装置，既能实现无级调速，又能像普通离合器一样，既可将主动部分与从动部分分离，又可将主动部分与从动部分无相对运动地合在一起，所以称其为液力调速离合器，也称奥米伽离合器。

其调速特性与液力耦合器基本相似，也属于低效调速装置，但其最大调速比 $i_n = 1$ ，调速效率 $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{M_2 \omega_2}{M_1 \omega_1} = \frac{n_2}{n_1} = i$ ，当泵与风机相连、 $i = 2/3$ 时， $\Delta P_{\max} = 0.148 P_n$ ，体积比液力耦合器较小，投资差不多，但功率较小。

三、电磁转差离合器调速

电磁转差离合器的功用和液力耦合器及液力调速离合器相同，都是安装在定速电动机与泵或风机之间的一种变速传动装置，使泵与风机可以实现无级调速。

电磁转差离合器的基本部件为电枢与磁极，这两者之间没有机械联系，各自可以自由

旋转。电枢是主动部分，直接与电动机的输出轴连接，并由电动机带动其旋转。电枢通常为圆筒形整块铸钢，在外表面常铸或焊有风扇叶，以提高散热效果。磁极为从动部分，它通过联轴器与泵或风机的输入轴相连。磁极由铁心和励磁绕组组成，励磁绕组装设在转子上的，也可固定在机壳上的。前者的励磁电流需通过集电环和电刷引到转子。图 1-5 所示为电磁转差离合器的示意图。从图可见，主动部分（电枢）与从动部分（磁极）之间在机械上是分开的，当中有气隙。当励磁绕组无励磁电流通过时，则这两部分互不相干；只有在通以励磁电流时，才能靠电磁效应相互联系起来。

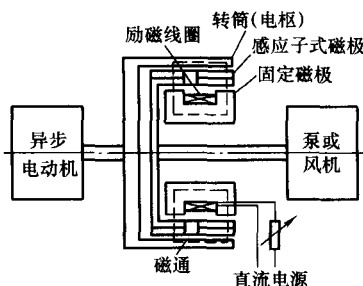


图 1-5 电磁转差离合器示意图

电磁转差离合器的调速原理是基于电磁感应定律。当励磁绕组通以直流电时，沿气隙圆周面将形成若干对极性交替的磁极，其磁通穿过气隙与电枢相连。当电动机带动电枢旋转时，电枢与磁极之间有相对运动，因感应而产生电动势，这一感应电动势将在电枢中形成涡流，其方向可由右手定则确定。此涡流又与磁场的磁通相互作用，产生电磁力，其方向可按左手定则确定，这个力作用于电枢一个转矩，其方向与电枢的旋转方向相反，是与带动电枢旋转的拖动转矩相平衡的制动力矩。这个力及力矩也同样作用在磁极上，其方向与电枢旋转方向相同，它使磁极沿电枢旋转方向旋转，并拖动泵或风机旋转。

电磁转差离合器与硬性联接的普通联轴器传动的不同之处是：电磁转差离合器的磁极转速 n_2 是可以连续调整的，且 n_2 一定小于电枢转速 n_1 。这是因为若 $n_2 = n_1$ ，则磁极与电枢之间不存在相对运动，即电枢没有切割磁力线，也就不可能在电枢中感应出电势，更谈不上产生力和转矩了。因此，电磁转差离合器的磁极与电枢之间必存在一个转速差 $\Delta n = n_1 - n_2$ ，这和异步电动机的原理相似。

磁极转速 n_2 的高低由磁极磁场的强弱而定，亦即由励磁电流的大小而定。当励磁电流大时， n_2 就高，磁极与电枢之间只要有较小的转差率，就能产生足够大的涡流转矩来带动负载；当励磁电流小时， n_2 就低，必须有大的转差率才能产生带动负载的涡流转矩。所以，改变励磁电流的大小就可达到泵或风机调速的目的。

根据电磁转差离合器的上述工作原理，所以它又被称作涡流联轴器、涡流式电磁转差离合器等。

电磁转差离合器也是一种有转差损耗的低效调速装置，调速效率等于调速比 $\eta = \frac{n_2}{n_1} = i$ ， $i_n = 0.83 \sim 0.87$ ，当与泵或风机联接调速时，最大调速损耗为

$$\Delta P_{\max} = 0.148 \frac{P_{2\max}}{i_n^3} = 0.148 \frac{P_{1\max}}{i_n^2} \approx (0.23 \sim 0.26) P_{2\max}$$

调速的经济性比液力耦合器及液力调速离合器更差。

其优点是：

- 1) 可靠性高，只要把绝缘处理好，就能实现长期无检修工作。
- 2) 占地面积小，控制功率小，一般仅为电动机额定功率的 1% ~ 2%。
- 3) 结构简单，加工容易，价格低廉。