

一种新的汽轮发电机组真空系统漏气率 在线检测方法

郭 盈¹, 姚 飞², 王学同¹, 周广顺¹

(1. 山东电力研究院 汽机所, 山东 济南 250002; 2. 吉林电力勘测设计院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 提出了一种新的汽轮发电机组真空系统漏气率在线测量方法, 通过在电厂凝汽器的抽气管道上加装温度、压力、流速和相对湿度测点, 将在线测量得到的这些参数带入推导出的计算式中, 可计算得到凝汽器的空气漏入率。为了验证方法的正确性, 模拟搭建了电厂凝汽器抽真空管道环境的实验台, 不确定度分析显示整个实验系统的不确定度为 0.54%, 具有较高的对比可靠性。比较了实验数据与计算结果, 5 种不同工况下, 实验值与计算值的相对偏差均在 1% 以内, 验证了上述方法的准确性。

关 键 词: 汽轮发电机组; 真空系统; 漏气率; 在线检测

中图分类号: TK14 文献标识码: A

引 言

众所周知, 火电厂电力生产过程中的冷端损失是整个热力循环中能量损失最大的一个环节^[1], 汽轮发电机组高真空的维持是减小冷端损失的必要条件^[2], 也是维持电厂较高经济性的重要保障^[3]。另外, 从安全生产的角度考虑, 真空低时漏入凝汽器的空气, 恶化了凝汽器中的热量交换、加剧了低压管道和低压加热器的腐蚀、增加了抽气器的负担和易导致机组振动^[4-7]。因此, 实际生产中, 若能及时准确的在线检测凝汽器的漏气率, 以便能够维持机组较高的真空, 对于电厂的经济性和安全生产都有重大意义。

目前, 电厂实际生产中测量凝汽器漏气率的方法是^[8]: 隔离掉抽真空装置后, 通过多次向凝汽器中放入空气来测量其真空下降率和漏气量的关系, 然后绘图拟合出真空系统的漏气率。这是一种间接的方法, 需要经过多次测量, 而且要人为的向凝汽器中放入空气, 对真空的破坏较大, 对安全生产不利。

本研究提出一种能够直接在线测量凝汽器漏气量的方法。通过测量水环式真空泵之后剩余混合气体的温度、压力、流量和湿度等参数, 确定其中水蒸

气含量, 并最终计算得到真空系统漏气率。该方法简单可靠, 可以在实际生产过程中在线实时测量, 利于电厂安全、经济运行。

1 理论推导

1.1 测量原理

电厂实际生产中, 采用水环式真空泵对凝汽器抽真空的抽气系统如图 1 所示, 通过在真空泵之后的抽汽管道上安装温度、压力、流速和湿度测点, 通过在线测量这些参数, 实时计算得到凝汽器中的空气漏入率。

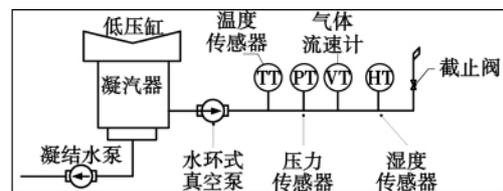


图 1 汽轮发电机组真空系统漏气量
在线检测方法原理图

Fig. 1 Schematic drawing of an on-line method for inspecting and measuring the leakage flow rate of the vacuum system of a turbo-generator unit

在水环式真空泵前, 抽汽管道中混合气体的温度、压力分别为 t_1 、 p_1 , 气体成份为湿饱和蒸汽与空气的混合物, 质量平衡关系式为:

$$G_{\text{混合气体}} = G_{\text{湿饱和蒸汽}} + G_{\text{空气}} \quad (1)$$

在水环式真空泵之后, 由于真空泵内工作水的冷却作用, 混合气体温度降为 t_2 ; 同时由于泵的升压作用, 混合气体压力升高为 p_2 , 这样一个降温增压的过程致使混合气体中大量湿饱和蒸汽凝结成水, 被水环式真空泵中的工作水带出, 剩余未凝结的饱和蒸汽与空气形成湿空气, 这个过程的质量平衡

收稿日期: 2011 - 12 - 14; 修订日期: 2012 - 03 - 19

作者简介: 郭 盈(1980 -), 男, 山东济南人, 山东电力研究院汽机所高级工程师, 博士。

式为:

$$G_{混合气体} = G_{疏出水} + G_{饱和蒸汽} + G_{空气} \\ = G_{疏出水} + G_{湿空气} \quad (2)$$

式(2)中的湿空气成份理论上应该是 t_2 温度下的饱和蒸汽和空气,但是实际生产上,在水环式真空泵之后的管路中可能由于管道温度低的原因,还会有很少量的蒸汽凝结于管内壁上,致使水蒸气达到一种未饱和状态,因此,水环式真空泵后的抽气管路中的气体质量关系式为:

$$G_{湿空气} = G_{水蒸气} + G_{空气} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,要想最终得到空气的流量,就必须知道总的湿空气量及空气在其中的含量,前者可以利用流速计测量,而后者可利用空气的分压力得到。

1.2 空气漏气率计算式推导

在水环式真空泵之后,抽气管道内压力略高于 1 个大气压,可以近似地看做理想气体。利用理想气体状态方程式代入空气的温度、压力和体积流量,就可以计算得到空气的摩尔流量:

$$n_{空气} = \frac{p_{空气} \cdot V_{空气}}{R(t_2 + 273.15)} \quad (4)$$

式中: p —空气压力, kPa; V —空气体积流量, m^3/s ; n —空气摩尔流量, mol/s ; R —普适气体常数, $8.314 J/(mol \cdot K)$ 。

若利用上式计算空气的摩尔流量,必需要知道空气的分压力,对于空气分压力的计算:假定 t_2 温度下对应的饱和蒸汽压力 p_s ,湿度计测量得到的相对湿度值为 x ,则该工况下的水蒸气分压力为 $x \cdot p_s$,空气分压力为 $p_2 - x \cdot p_s$,由此可以得到空气的质量流量计算式:

$$G_{空气} = 28.97 \times n_{空气} \\ = \frac{28.97 \times (p_2 - x \cdot p_s) \cdot V_{空气}}{R(t_2 + 273.15)} \quad (5)$$

其中, $V_{空气}$ 为空气体积流量, m^3/s ; 其值与抽气管道中湿空气的体积流量相等,由式(6)计算得到:

$$V_{空气} = V_{湿空气} = v \times S \quad (6)$$

式中: v —湿空气流速, m/s ,由气体流速计在线测量得到; S —抽气管道的横截面积, m^2 ,由抽气管道设备图纸得到。

2 实验验证

2.1 实验系统及不确定度分析

为了验证所提出的测量方法的准确性,模拟搭建了电厂凝汽器抽真空管道环境的实验台,实验系

统如图 2 所示。

实验中,给定不同的送风流量来模拟电厂实际运行中不同的空气漏入工况,通过测量不同工况下的温度、压力、湿度和流速参数,利用式(5)计算得到空气漏入率,将该计算值与实验给定值比较,确定本研究提出方法的可行性。实验中所用到的测量设备及其相关参数列于表 1 中。

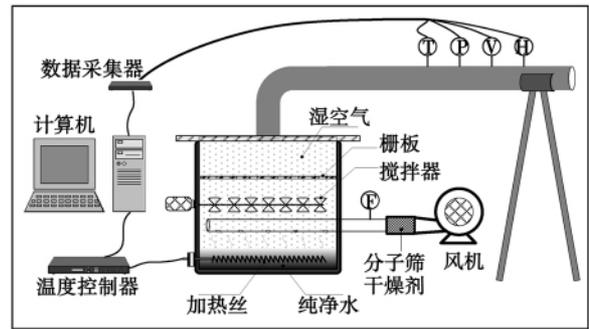


图 2 模拟电厂凝汽器抽真空管道环境的实验台
Fig. 2 Test stand for simulating the vacuum extraction pipeline environment of a condenser in a power plant

表 1 实验测量设备及其相关参数

Tab. 1 Test measuring equipment items and its relevant parameters

设备	量程	精度等级
Pt100 热电阻	-40 ~ 200 °C	0.1
压力传感器	0 ~ 500 kPa	0.1
热线风速仪	0.1 ~ 20 m/s	0.1
相对湿度计	0 ~ 100%	0.1
气体流量计	5 ~ 500 m ³ /h	0.5

为了能够准确的评估本实验系统测量结果的可靠性,需要对整个实验系统的测量物理量进行不确定度分析。搭建的实验系统的不确定度主要有温度、压力、相对湿度以及混合气体流速这几个影响因素。根据国际标准化组织对实验不确定度的规定^[9],实验中合成不确定度 U 可计算为:

$$U = k \cdot u_c = k \sqrt{\sum (u_i)^2} \quad (7)$$

式中: u_i —各误差源的相对偏差; u_c —各误差合成的相对偏差; k —置信系数(当 $k=2$ 时,置信度为 95%; 当 $k=3$ 时,置信度为 99%),本研究中的合成不确定度的置信系数取 2。

由式(7)计算得出,本实验测量系统总的相对不确定度 0.54%,可以看出,由于实验中各传感器精度较高,所以整个实验系统的不确定度较小,从而

保证了实验结果的可靠性,确保计算值与实验值对比结果有较高的参考价值。

2.2 实验结果及其与计算值的比较

实验室的环境温度 25 °C ,压力 101.325 kPa ,查得空气密度为 1.169 1 kg/m³ ,模拟抽气管道直径 0.1 m ,实验中设定加热丝温度 95°C 以便能够提供

持续稳定的湿蒸汽 ,通过变频调节风机转速给定 5 个不同的模拟空气漏入率 ,分别为: 40、45、50、55 和 60 m³/h。这 5 个工况下测量的湿蒸汽参数、利用式 (5) 计算得到模拟的抽气管道中空气漏入率 ,以及实验值与计算结果的比较列于表 2 中。

表 2 实验结果及其与计算值的比较

Tab.2 Test results and their comparison with the calculation values

工况	给定值		管道测量结果					相对偏差/%
	质量流量 $G_0/\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	$t_2/^\circ\text{C}$	p_2/kPa	$x/\%$	$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	p_s/kPa	计算值 $G_1/\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	$\left \frac{G_1 - G_0}{G_0} \right \times 100\%$
1	46.76	43.17	102.63	83.12	1.56	8.725	46.41	0.75
2	52.61	41.21	102.82	81.54	1.72	7.873	52.33	0.53
3	58.46	39.23	103.01	78.65	1.88	7.085	58.08	0.65
4	64.30	37.26	103.19	74.23	2.03	6.371	63.89	0.64
5	70.15	35.29	103.37	68.79	2.18	5.719	69.64	0.73

从表 2 中我们可以看出 ,采用所提出的方法进行计算 ,其结果与实验给定值较为接近 ,相对偏差在 1% 以内 ,从而验证了所提出测量方法的正确性。

在实验工况下 ,拟合了温度、压力、相对湿度、气体流速与空气漏入率的关系曲线 ,如图 3 图 4 所示。可以看出 ,在较窄的测量范围内 ,上述 4 个状态参数与空气漏入率近似呈线性关系 ,为了便于利用在线测量值直接得到空气漏入率 ,拟合了多元非线性多项式:

$$G = 0.0059973 \times t^2 - 0.04643 \times t \cdot p + 0.34262 \times t \cdot x + 0.023813 \times p^2 - 0.13629 \times p \cdot v \quad (8)$$

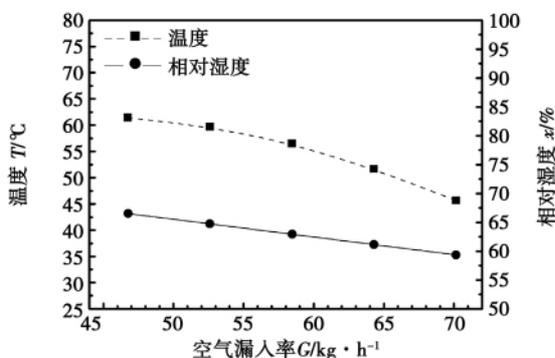


图 3 温度 T 、相对湿度 x ,与空气漏入率 G 的关系曲线

Fig.3 Temperature, T , relative humidity, x , versus the air in-leakage rate G

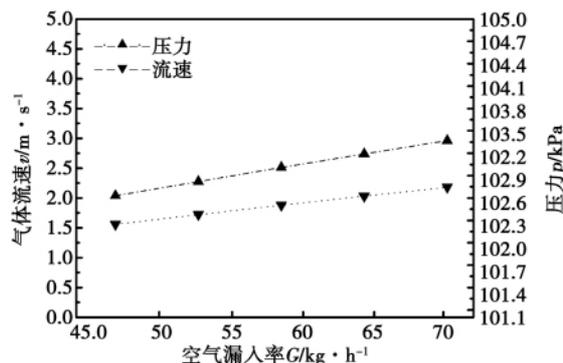


图 4 压力 p 、气体流速 v ;与空气漏入率 G 的关系曲线

Fig.4 Pressure p , the flow velocity, v , versus the air in-leakage rate G

3 结 论

(1) 空气漏入率计算公式的推导是建立在热力学理想气体状态方程的基础上的 ,在水环式真空泵之后 ,抽气管道中的大量水蒸汽被冷凝疏出 ,剩余的混合气体中蒸汽含量很少 ,故混合气体完全可以当做理想气体对待。

(2) 搭建的实验系统经不确定度为 0.54% ,为实验数据与计算结果的比较奠定了可靠的基础。实验中 5 个不同工况下 ,计算结果与实验值的最大相

对偏差 0.75% 验证了提出计算方法的准确性。

(3) 拟合了温度、压力、相对湿度、气体流速与空气漏入率的关系曲线,同时拟合了这些参数与空气漏入率的多元非线性多项式,便于实际生产中利用在线测量得到的数据直接计算漏气率,方便工程计算使用。

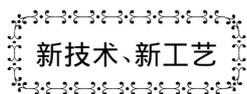
本研究工作为下一步研制集成化的汽轮发电机组真空系统漏气率在线测量装置奠定了基础。

参考文献:

- [1] 李 清,黄竹青,左从瑞,等. 蒸汽参数对电厂热经济性影响的研究[J]. 湖北电力 2011, 35(3): 21-28.
LI Qing, HUANG Zhu-qing, ZUO Cong-ru, et al. Study of the influence of steam parameters on the thermal cost-effectiveness of a power plant [J]. Hubei Electric Power 2011, 35(3): 21-28.
- [2] 王学栋,孙维国,陈义森. 300 MW 机组冷端系统试验研究与性能优化[J]. 中国电力 2008, 41(11): 29-32.
WANG Xue-dong, SUN Wei-guo, CHEN Yi-sen, Experimental research and performance optimization of the cold-end system of a 300 MW unit [J]. China Electric Power 2008, 41(11): 29-32.
- [3] 李保忠,丁柏寿. 汽轮机凝汽器真空低原因分析及处理措施[J]. 重庆电力高等专科学校学报 2010, 15(1): 1-3.
LI Bao-zhong, DING Bo-shou, Analysis of the causes for a low vacuum inside the condenser of a steam turbine and their remedies [J]. Journal of Chongqing Electric Power Higher Specified School, 2010, 15(1): 1-3.
- [4] 肖子光,曾祥松. 汽轮发电机组真空压力低原因分析及处理[J]. 冶金动力 2009(2): 46-48.

- XIAO Zi-guang, ZENG Xiang-song, Analysis of causes for a low vacuum and pressure of a turbo-generator unit and their treatment [J]. Metallurgical Power 2009(2): 46-48.
- [5] 种道彤,刘继平,严俊杰,等. 漏空气对凝汽器传热性能影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报 2005, 4(4): 152-157.
CHONG Dao-tong, LIU Ji-ping, YAN Jun-jie, et al. Experimental research of the influence of the leaked air on the heat transfer performance of a condenser [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2005, 4(4): 152-157.
- [6] 吕继奎. 国产引进型 300 MW 机组真空严密性试验研究[J]. 汽轮机技术 2003, 45(4): 225-227.
LU Ji-kui, Experimental study of vacuum air-tightness of an introduced and domestically-made 300 MW unit [J]. Steam Turbine Technology 2003, 45(4): 225-227.
- [7] 马汀山,蒋安,郝彦明,等. 真空严密性与凝汽器漏入空气流量的定量关系[J]. 热力发电 2009, 38(6): 65-67.
MA Ting-shan, JIANG An, QIE Yan-ming, et al. Quantitative relationship between the vacuum tightness and leakage air flow rate into a condenser [J]. Thermal Power Generation 2009, 38(6): 65-67.
- [8] 居文平,马汀山,于新颖. 一种新的凝汽器及真空系统漏入空气流量测量方法[J]. 热力发电 2008, 37(2): 65-58.
JU Wen-ping, MA Ting-shan, YU Xin-ying. A new method for measuring the leakage air flow rate of a condenser and its vacuum system [J]. Thermal Power Generation 2008, 37(2): 65-58.
- [9] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement; International Organization for Standardization: Geneva Switzerland 1995.

(丛敏 编辑)



新技术、新工艺

联合循环装置驱动的海水淡化装置

据《Gas Turbine World》2011年11月-12月刊报道, Siemens 已接受了 Hydrochen 的订单, 供应额定功率 411 MW 联合循环装置的动力装置和其它主要部件, 用来驱动新加坡西北部的 Tuaspring 海水淡化装置。

Siemens 供货范围将包括: 1 台 288 MW、39.8% 效率的 SGT5-4000F 燃气轮机、余热锅炉、1 台 135 MW 汽轮机、1 台氢冷发电机、测量仪表和控制系统、以及辅助系统。

此外, Siemens 还获得一个包括主要设备的长期服务合同, 并将供应电厂的开关装置和变压器。

单轴联合循环装置将与海水淡化装置一起运行, 并预计于 2014 年投入运行。

(吉桂明 摘译)

rotating speed respectively. There exists an optimum blade tip machining extent at which a relatively big increment of the stability margin can be obtained by the rotor at various rotating speeds. **Key words:** axial flow compressor , leakage flow , leading edge blade tip machining , stability margin , numerical simulation

燃气透平动叶不同叶顶结构对顶部泄漏流动和换热的影响 = **Influence of Various Rotating Blade Tip Structures on the Blade Tip Leakage Flow and Heat Exchange of a Gas Turbine** [刊 , 汉] / LI Peng , ZHANG Chao , LIU Jian-jun (Engineering Thermophysics Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Beijing , China , Post Code: 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 , 27 (5) . - 535 ~ 539

With the first stage of a heavy-duty gas turbine serving as the object of study , numerically studied was the influence of such blade tip structures as flat blade tip , slot , shoulder on both the pressure surface and the suction surface on the blade tip leakage flow and heat exchange. The simulation results show that the blade tip structure has a relatively big influence on the leakage flow in the blade tip clearance and the pressure distribution on the suction surface nearing the blade tip. Compared with the flat blade tip structure , the slot structure and shoulder one on the pressure surface can decrease the total pressure loss caused by the leakage vortices while the shoulder structure on the suction surface can increase the loss. The flat blade tip structure has the highest mean heat exchange coefficient while the shoulder structure on the suction surface has the lowest mean heat exchange coefficient , about 70% of the flat blade tip structure. **Key words:** gas turbine , blade tip structure , leakage flow , blade tip heat exchange

一种新的汽轮发电机组真空系统漏气率在线检测方法 = **New Method for On-line Measuring the Gas Leakage Rate of a Turbo-generator Unit Vacuum System** [刊 , 汉] / GUO Ying , WANG Xue-tong , ZHOU Guang-shun (Steam Turbine Research Institute , Shandong Electric Power Academy , Jinan , China , Post Code: 250002) , YAO Fei (Jilin Electric Power Prospecting Design Institute , Changchun , China , Post Code: 130022) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 , 27 (5) . - 540 ~ 543

Presented was a new method for on-line measuring the gas leakage rate of a turbo-generator unit vacuum system. The method in question can be used to calculate and obtain the air leakage rate of a condenser by additionally installing temperature , pressure and relative humidity measuring points on the gas extraction pipeline of the condenser of a power plant and insert the parameters such on-line measured into the calculation formula derived herein. To verify the correctness of the method , a test rig for simulating the vacuum extraction pipeline environment of the condenser of a power plant was set up. The uncertainty degree of the whole test system from an uncertainty analysis was

0.54% ,having a relatively high contrast reliability. Through a comparison of the test data with the calculation results obtained by using the method in question ,the relative deviations of the test values from the calculation ones are all within a range of 1% at five operating conditions ,thus verifying the correctness of the method under discussion.

Key words: turbo-generator unit ,vacuum system ,gas leakage rate ,experimental study

微型分轴燃气轮机 HAT 循环性能的机理试验研究 = **Experimental Study of the Mechanism Governing the HAT (Humid Air Turbine) Cycle Performance of a Split-shaft Micro Gas Turbine** [刊 ,汉] / PU Qiang ,WEI Chen-yu ,GE Bin ZANG Shu-sheng(Education Ministry Key Laboratory on Power Machinery and Engineering ,College of Mechanical and Power Engineering ,Shanghai Jiaotong University ,Shanghai ,China ,Post Code: 200240) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012 27(5) . -544 ~ 548

Based on a split shaft micro gas turbine and through a saturator additionally installed ,constituted was the HAT cycle performance test rig of the turbine. On this basis ,tests of the mechanism governing the HAT cycle performance were carried out. The test results show that after the air is humidified ,it has a conspicuous influence on the cycle performance and both specific power and efficiency of the cycle have a very big enhancement when compared with that of the simple cycle. When the humidification quantity reaches its maximum of 4.2% ,the output power of the cycle will increase by 16% . The simulation results under the test conditions are in very good agreement with the test ones. On this basis ,a simulation calculation was performed of the test system with a recuperator. The calculation results show that under the condition that the initial gas temperature is kept unchanged ,the incorporation of the recuperator will result in an increase of the pressure loss of the system and the specific power of the device will decrease by about 3% -10% ,however ,in the meantime ,the oil consumption rate will lower by 20% -45% and the efficiency will go up by 30% -80% . In such a case ,the performance of the system is markedly enhanced. **Key words:** split shaft micro gas turbine test rig ,HAT cycle ,gas turbine performance calculation

基于遗传算法的联合循环机组模型参数辨识 = **Parameter Discrimination of a Combined Cycle Unit Based on the Genetic Algorithm** [刊 ,汉] / QIU Xiao-zhi ,SI Pai-you ,HUANG Bao-hua (North China Electric Power Science Academy Co. Ltd. ,Beijing ,China ,Post Code: 100045) ,WANG Wei (Dispatchment and Communication Center ,Beijing City Electric Power Company ,Beijing ,China ,Post Code: 100031) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012 27(5) . -549 ~ 553

In the light of the actual demand of introducing a model for combined cycle units into an electric power system sta-