

# CFD 技术在汽轮机定子线圈冷却水 流量测量中的应用

肖惠民, 杨建东

(武汉大学 水文水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 利用超声波流量计检测大型汽轮发电机定子线圈冷却水流量大小, 可直接判断冷却水的堵、漏, 从根本上解决定子绕组冷却水堵塞问题, 但超声波流量计用于弯管段测量时存在误差。本文利用 CFD 技术计算了某火电厂定子线圈内冷却水的流速分布, 分析了管内流动对超声波测流的影响, 获得了不同测点处流量误差的变化趋势。采用 CFD 技术可确定超声波流量计的最佳安装位置, 为获得准确的流量提供理论依据。

**关 键 词:** 超声波流量计; 弯管; 计算流体动力学(CFD)

中图分类号: TK313 文献标识码: A

## 1 引 言

近年来, 由于定子线圈冷却水引水管漏水或堵塞, 引起的汽轮发电机工作效率下降和定子线圈过热事故较多, 经济损失巨大。对定子线圈引水管流通性检验方法的研究也引起了广泛重视。利用流量测量方法来检测大型汽轮发电机定子线圈冷却水流量大小, 可直接判断冷却水的堵、漏, 从根本上解决定子冷却水堵塞问题。而流量测量的方式只能采用非接触式, 超声波流量计无疑是最佳的选择。

## 2 超声波流量计的特点

与传统接触式流量计相比, 超声波流量计有以下优点: 可以不接触流体进行测量, 对流动不产生附加阻力; 不受被测流体物理性质和化学性质的影响; 对管道形状无严格要求; 流速测量范围广; 读数指示与所测流量成线性, 便于直接读数和记录; 可不受强电磁干扰影响等。

超声波束在通过流体内部时受到流体流动的影响,

从而带入流动信息, 通过信号检测及计算, 就可以获得流量的大小。由于分析超声波束获得的只是其传播路径上的线速度, 并不等同于整个管道截面上的平均流速, 因此必须进行修正。另外, 超声波法测流量的精度还依赖于流动状态, 而实际的流动状态与诸多因素有关, 因此测量时应充分考虑测量条件。

超声波流量计一般用于直管段流量的测量, 且测点上游至少需要 5 倍管径长的直管段, 测点下游至少需要 10 倍管径长的直管段。而汽轮发电机定子线圈是弯曲的, 尽管弯曲度较小, 测量误差必然存在。因此, 获得管道内部流体流动状态, 从而获得正确的流量修正系数, 对于提高超声波流量计的测量精度有着重要的意义。而通过引入 CFD(计算流体动力学)技术, 可获得弯曲管道截面上的速度分布和流量误差变化趋势, 为获得准确的流量提供理论依据。

## 3 数值模拟可靠性说明

为检验数值模拟的可靠性, 对一典型  $90^\circ$  圆形弯管三维紊流进行了计算。以 Taylor 等人的实验弯管<sup>[2]</sup> 为例进行了计算, 计算采用  $k-\omega$  紊流模型、simple 算法,  $Re = 43\ 000$ 。弯管的形状见图 1。图 2 为 4 个典型截面上的速度分布, 图中上半部分为实验结果, 下半部分为数值模拟结果,  $U_B$  为弯管进口平均流速。可以看出, 就整体而言, 计算结果和试验数据非常接近。因此可见, 采用 CFD 技术作为超声波测流的辅助手段是可行的。

收稿日期: 2004-01-06

作者简介: 肖惠民(1973-), 男, 湖南永州人, 武汉大学讲师。

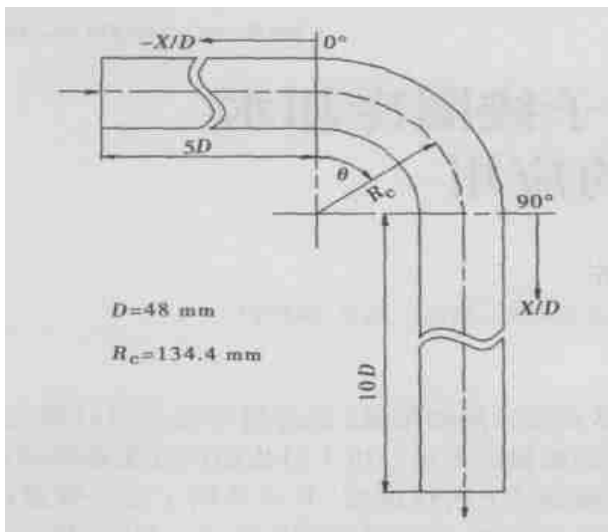


图 1 90° 圆形弯管几何外形

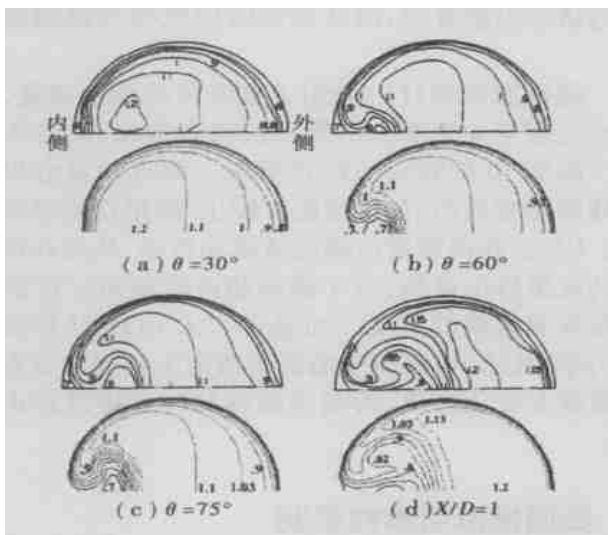


图 2 典型截面沿主流方向  $U/U_B$  等值线图

## 4 应用

利用 CFD 技术计算了某火电厂 300 MW 汽轮发电机定子线圈内冷却水的流速分布, 分析了管内流动对超声波测流的影响, 给出了流量误差的变化趋势及计算流量修正系数, 提出了确定最佳测点的方法。

发电机定子线圈内径  $D = 13.3$  mm, 壁厚  $h = 2.6$  mm, 管长  $L = 560$  mm, 弯曲半径  $R = 100$  mm. 200 mm、400 mm、600 mm 及直管(图 3a), 冷却介质为水。

### 4.1 不同测点位置的流量检测(同一定子线圈)

下面分别对超声波流量计安装在  $0^\circ \sim 180^\circ$  剖面、 $90^\circ \sim 270^\circ$  剖面上的流量大小及流量误差进行讨

论(剖面定义参见图 3b)。

计算和测量条件:  $R = 100$  mm、流量  $Q = 27.825$  L/min。各个测点的位置以  $\theta$  度量, 其中  $\theta$  为中心点  $O'$  与进口截面中心点的夹角(见图 3a、c)。

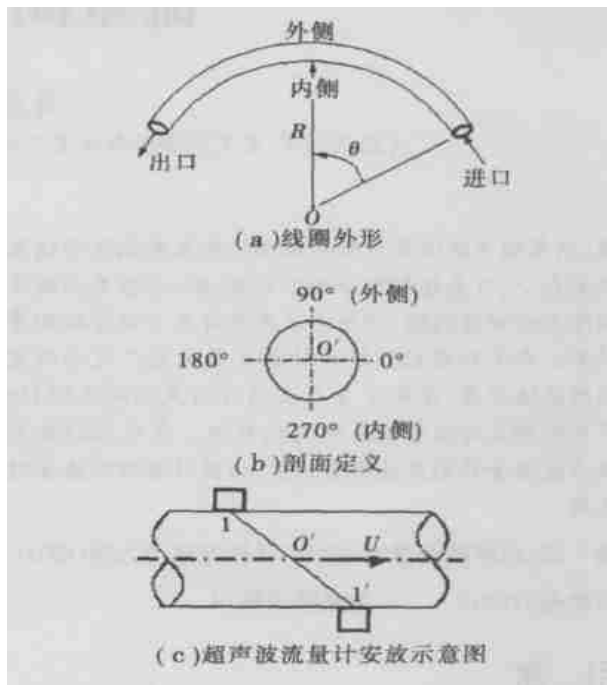


图 3 定子线圈超声波测流示意图

表 1 测点位置

$O'$	A	B	C	D	E
$\theta$	$10^\circ$	$90^\circ$	$147^\circ$	$210^\circ$	$284^\circ$

### 4.1.1 $0^\circ \sim 180^\circ$ 剖面的流量及流量误差分析

本文定义流量误差  $\epsilon = [(\text{仪表值或计算流量} - \text{标准值}) / \text{标准值}] \times 100\%$ 、流量修正系数  $\alpha = \text{标准流量} / (\text{仪表值或计算流量})$ , 其中“标准流量”为实际流量,“仪表值”为超声波流量计的测量值,“计算流量”是对超声波束经过的路径  $1-1'$ (图 3c) 上的流速取平均值再乘管道截面得到的流量。

$0^\circ \sim 180^\circ$  剖面各测点的流量误差见表 2。

表 2 流量误差

标准流量 / $L \cdot \text{min}^{-1}$	$O'$	仪表值 / $L \cdot \text{min}^{-1}$	实测误差 / %	计算流量 / $L \cdot \text{min}^{-1}$	流量误差 / %	计算流量修正系数 $\alpha$
27.825	A	28.18	1.27	28.13	1.11	0.989
	B	—	—	28.12	1.07	0.989
	C	26.57	-4.51	27.13	-2.49	1.026
	D	—	—	27.98	0.55	0.995
	E	26.94	-3.18	28.18	1.29	0.987

由表 2 可以看出, 各测点的流量误差由进口到出口是先由大变小, 再由小变大。这主要是由超声波束所经过路径上的流速分布决定的(见图 4): 流速分布基本上是对称的, 在进口段, 流动从层流向紊流发展, 弯管两侧流速较大; 在中间段, 流动已发展为紊流, 流速分布均匀; 在出口段, 由于受出口的影响, 流速分布再次发生改变。因此, 对于弯管, 测流时测点应布置在离进口和出口有一定距离的地方。

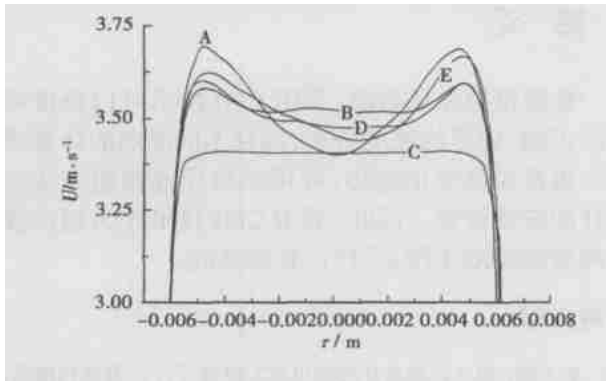


图 4 0° ~ 180° 剖面 A ~ E 各点流速 U 分布

可以看到, 计算流量误差与实测流量误差的变化趋势相吻合(见图 5)。

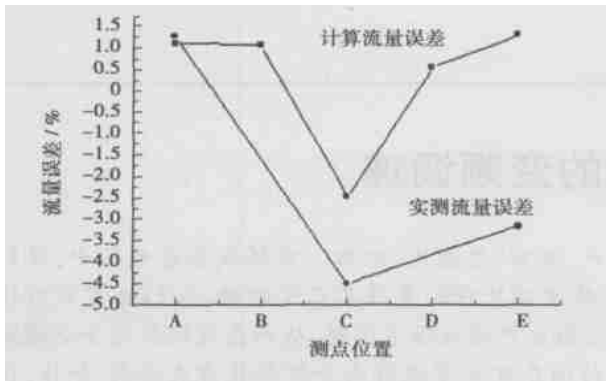


图 5 不同弯曲半径下的流量误差变化趋势

4.1.2 90° ~ 270° 剖面的计算流量及流量误差  
计算流量的流量误差见表 3。

表 3 计算流量的流量误差

标准流量 /L · min <sup>-1</sup>	计算流量 /L · min <sup>-1</sup>	流量误差 / %	计算流量 修正系数 α
0'			
27.825	A	- 7.01	1.075
	B	- 4.26	1.044
	C	- 2.50	1.026
	D	- 4.73	1.050
	E	- 5.13	1.054

由表 3 可见, 各测点的流量误差均为小于零, 且流量误差都比较大, 这也是由超声波束所经过路径上的流速分布所决定的(见图 6): 除 C 点外, 流速分布完全不对称, 内侧流速远小于外侧, 其平均流速小于截面平均流速。

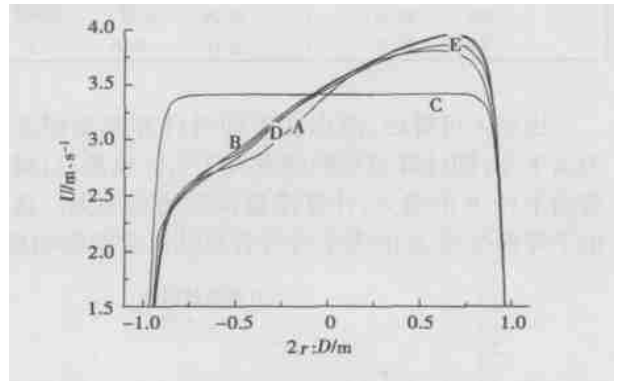


图 6 90° ~ 270° 剖面 A ~ E 各点流速 U 分布

因此, 若在 90° ~ 270° 剖面上测量流量, 流量误差较大, 且在 90° ~ 270° 剖面上难以安装超声波流量计。所以, 一般不在 90° ~ 270° 剖面上测量流量。

4.1.3 超声波流量计最佳安装位置的确定

根据计算流量误差变化趋势, 可选择 0° ~ 180° 剖面上流速分布相近、流量误差接近的弯管段作为超声波流量计的安装位置, 一般在弯管中部, 从而可采用相近流量修正系数对流量进行修正。

4.2 同入口压力、声速, 不同弯曲半径下的流量检测

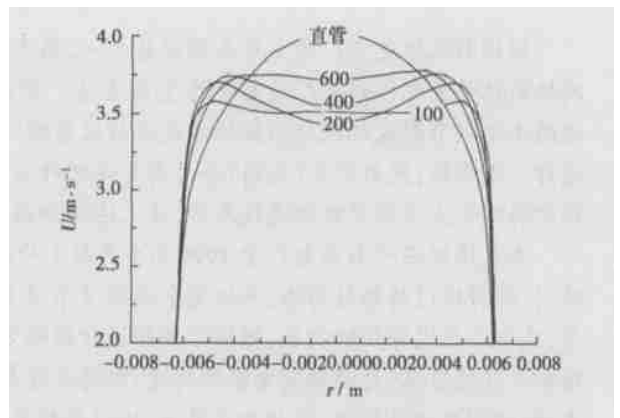


图 7 不同弯曲半径下中间测点流速 U 分布

0° ~ 180° 剖面上各测点流量误差如表 4 所示, 测点位置均在弯管的中间。

表 4 流量误差

标准流量 /L·min <sup>-1</sup>	弯曲半径 R/mm	仪表值 /L·min <sup>-1</sup>	流量误差 (测量)/% /L·min <sup>-1</sup>	计算流量 (计算)/%	流量误差 (计算)/%	修正系数 α
28.07	直管	26.10	-7.0	29.23	4.14	0.96
	600	25.85	-7.9	28.96	3.16	0.969
	400	25.65	-8.6	28.67	2.13	0.979
	200	25.61	-8.7	28.29	0.77	0.992
	100	26.57	-5.3	28.05	-0.06	1.0

由表 4 可看出,测点在中间时计算流量误差均为大于零,即计算得到的流量大于实际流量,且随着弯曲半径 R 的增大,计算流量误差随之增大。这是由于弯曲半径 R 的大小对弯管流动有重要影响造

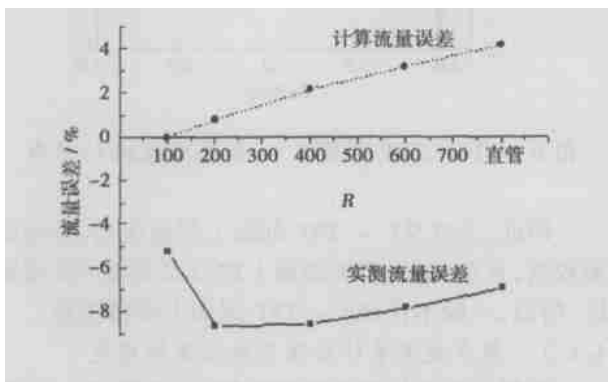


图 8 不同弯曲半径下的流量误差变化趋势

成的(见图 7):流动从进口开始就受到管道弯曲壁面的约束,弯曲半径 R 越小约束越强,最大速度区偏移弯管中心的距离越大,从而使平均流速、流量误差相对较小。

对于不同弯曲半径的线圈,除 R = 100 mm 外(估计是试验误差引起的),计算流量误差与实测流量误差变化趋势相吻合(见图 8)。

### 5 结 论

数值模拟结果表明,采用 CFD 技术可以获得弯管内正确、详尽的速度分布,得到不同测点的计算流量和流量误差变化趋势,可用来指导选择超声波流量计的安装位置。因此,采用 CFD 技术作为超声波测流的辅助手段是可行、有意义的。

### 参考文献:

[ 1 ] 崔学雷. 超声波流量计的应用及工程设计[ J]. 自动化博览, 2001, 18( 1): 20—22.  
 [ 2 ] ENAYET M M, GIBSON M M, TAYLOR A M, et al. Laser-doppler measurements of laminar and turbulent flow in a pipe bend[ J]. Int J Heat & Fluid Flow, 1982, 3(4): 213—219.

## 电厂锅炉引风机的变频调速

锅炉引风机是电厂的主要负荷设备之一,属于耗电大户,素有“电老虎”之称。在煤炭自备电厂中,仅引风机的耗电量就占到全厂用电量的 25% 左右。同时,为了维护锅炉膛的负压及正常燃烧,人们通常采用传统的手动调节引风机风门挡板的方式进行风量调节,这样会给生产造成很多问题,从而危及锅炉的安全稳定运行。近年来,兖州矿业(集团)公司南屯煤矿研石热电厂与山东矿业学院济南分院科技开发公司合作,在锅炉引风机上应用变频调速技术后,使上述这个困扰多年的问题终于得到了解决。

南屯煤矿研石干石热电厂于 1998 年 5 月对 1 号炉的引风机安装了变频调速控制系统,由于不再需要调节风门,故将风门的挡板拆除,不但完全消除了节流损失,节约了大量的电能,而且大大降低了引风机的故障率,减少了压火停炉的次数,维持了锅炉运行的稳定。在正常情况下,变频器运行在“自动”工作方式,实时跟踪炉膛的负压,自动调节电机的转速,保持炉膛负压稳定在设定值上,减轻了运行人员的劳动强度。实践表明:控制器操作简便,运行方式灵活,运行参数变化一目了然。引风机启动时,由于频率能够手动或自动调整,因此不仅不会对供电电网造成冲击,同时还能够使开关设备的故障率大为减少,延长了开关电器的使用寿命,减少了设备的维护工作量。为了将炉膛的负压设定值稳定地维持在一 20 Pa(正常范围为 0~50 Pa),将电机运行频率调整到较佳的 36~38 Hz,此时电机输出功率在 80 kW 左右,一年就可以节约电能为 50 万 kWh,年节约效益达到 20 万元,变频器的全部投资费用可在 1~2 年内完全回收。

(李剑峰 供稿)

depth analysis was conducted of the influence of thermal non-equilibrium effect, fluid physical properties, wall surface inclination angle and Reynolds number on the stability of stationary waves. The results of the study indicate that the influence of thermal non-equilibrium effect on the stability of the stationary waves is relatively significant only under small Reynolds numbers. At higher Reynolds numbers the stability is mainly dependent on inertial force and viscosity force. In the whole range of Reynolds number, fluid physical properties and wall surface inclination angle all play a very conspicuous role. **Key words:** evaporation, cooling, thermal non-equilibrium effect, thin liquid film, stationary wave, stability

汽液相变换热过程唯象系数的计算 = **Calculation of Phenomenological Coefficient in the Heat Exchange Process of Liquid-vapor Phase Transition** [刊, 汉] / WU Shuang-ying, ZENG Dan-ling (College of Power Engineering under the Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 593 ~ 596.

In the light of the theory of non-equilibrium thermodynamics derived is formula for calculating the chemical potential variation and vapor bubble critical radius in the heat exchange process of liquid-vapor phase transition. On this basis, a phenomenological coefficient is proposed to evaluate the intensity of phase-transition heat exchange process. Meanwhile, a formula for calculating the phenomenological coefficient of phase-transition heat exchange process is given and a numerical calculation performed. The impact of the driving force of the phase-transition process, and bubble radius, etc on the phenomenological coefficient is also discussed. **Key words:** phase transition, phenomenological coefficient, non-equilibrium thermodynamics

有叶扩压器内部流场的 PIV 实验测量 = **PIV (Particle Image Velocimetry) Experimental Measurements of the Flow Field in a Bladed Diffuser** [刊, 汉] / ZHANG Li, WANG Qi-jie (Power Engineering Department, Shanghai Electric Power Institute, Shanghai, China, Post Code: 200090), CHEN Han-ping (Mechanical College under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 597 ~ 600.

By making use of PIV (particle image velocimetry) techniques capable of acquiring an instantaneous velocity field an experimental investigation is conducted of the flow in a bladed diffuser. The flow field in the diffuser at different flow conditions was measured. The test data were processed by the use of an integral averaged method and diagrams showing velocity field distribution at various flow conditions were obtained. An analysis and discussion of the above was also conducted. **Key words:** bladed diffuser, experimental measurement, particle image velocimetry

CFD 技术在汽轮机定子线圈冷却水流量测量中的应用 = **The Application of CFD (Computational Fluid Dynamics) Technology for the Measurement of Cooling Water Flow in a Turbogenerator Stator Coil** [刊, 汉] / XIAO Hui-min, YANG Jian-dong (National Key Laboratory of Water Resources & Hydropower Engineering Sciences under the Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(6). — 601 ~ 604.

By using an ultrasonic flowmeter to detect and measure the flow rate of cooling water in a large-sized turbogenerator stator coil it is possible to directly ascertain whether there exists a phenomenon of cooling water jamming and leak, thus thoroughly solving the problem of cooling water blocking. However, when the ultrasonic flowmeter is used for conducting measurements in a curved tube section, errors may occur. By using CFD (computational fluid dynamics) technology the authors have calculated the cooling-water flow velocity distribution in the generator stator coil at a thermal power plant and analyzed the influence of in-tube flow on ultrasonic flow gauging. As a result, the variation tendency of measurement errors at various measuring locations was obtained. The use of CFD technology makes it possible to determine the optimum installation location for an ultrasonic flowmeter, thus providing a theoretical basis for obtaining an accurate flow rate. **Key words:** ultrasonic flowmeter, curved pipe, computational fluid dynamics