

凝汽器水下在线清洗机器人水动力特性研究

陈 宁, 万 翼, 彭 伟, 吴楠楠
(中国矿业大学 动力系, 江苏 徐州 221119)

摘 要: 运用数值模拟和实验研究了某在研 300 MW 机组凝汽器在线清洗工业机器人的水动力特性。指出该清洗机器人置入凝汽器回水室后不会影响凝汽器的正常工作, 但机器人作业时存在 3 类不利工作区。第一不利区处于凝汽器隔栅上方 5 倍于隔栅管径区域内; 第二不利区位于机器人二级臂水平, 三级臂与二级臂成 $3\sim 7^\circ$ 夹角的范围内; 第三不利区是机器人机械手指向凝汽器角点的工作区。在上述区域工作, 机械手的振动显著增大, 影响定位作业。最后探讨了克服不利区的方法, 指出机器人臂杆上加装自适应旋转整流罩是有效的方法之一。

关 键 词: 凝汽器; 水下机器人; 高压水射流; 数值模拟; 振动

中图分类号: TP241.2 文献标识码: A

引 言

凝汽器是火力发电厂的主要辅助设备之一, 其工作性能的好坏直接影响着电厂的发电效率、发电煤耗率等指标^[1]。凝汽器管内表面结垢一直是困扰发电厂凝汽器运行的突出问题之一, 必须采取一定的除垢措施对凝汽器管内表面进行清洗。

火电厂凝汽器高压水射流在线清洗机器人技术是近年来国内提出的新技术^[2~7], 该技术将机器人置于凝汽器回水室内, 利用它自主完成高压水射流在线清洗。既保持了离线高压水射流清洗的清洗彻底和对凝汽器无损害、无污染等特点, 又能实现在线除垢, 避免了启、停机带来的经济损失, 对比目前使用的化学在线清洗技术可大大降低对环境的污染, 具有良好的环保效益和经济效益。

尽管火电厂凝汽器在线清洗机器人技术具有一些突出的优点, 但目前其工程设计上仍面临诸多问题需要加以研究。从水动力特性角度, 两类问题必须给予重视: 首先, 当机器人置于回水室后将改变室内原有流场, 这种改变是否会影响凝汽器的正常工作; 其次, 机器人本身在水室水流的冲击下将产生振

动, 从而影响机器人的定位作业, 针对这些问题, 基于某 300 MW 机组凝汽器回水室结构, 开展了数值模拟和实验研究。

1 物理模型

某 300 MW 机组凝汽器回水室结构如图 1 所示^[8], 凝汽器回水室包括水室上部、钢管焊制的隔栅和水室下部 3 部分, 循环冷却水从凝汽器水室下部冷却水入水管板流入, 经由隔栅, 从凝汽器水室上部的出水管板流出。

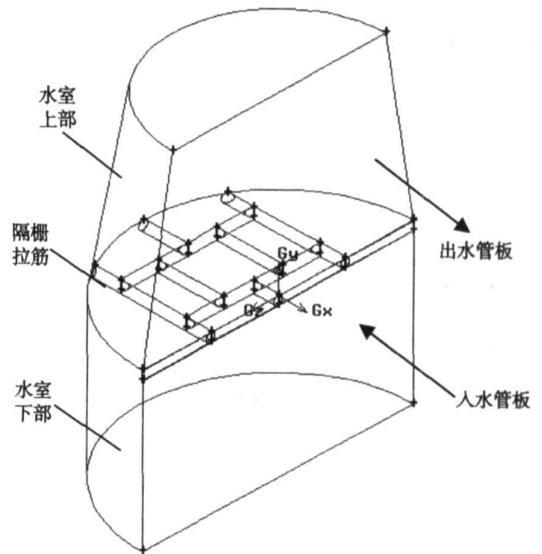


图 1 凝汽器回水室简化模型

清洗机器人外形结构选取某在研关节式工业机器人, 如图 2 所示。它包括一级臂、一级关节、二级臂、二级关节、三级臂和机械手等部件。通过两个关节的转动, 机器人可以实现准确的二维定位。

为了便于数值计算和实验模拟, 在物理模型建立时, 对凝汽器和机器人实机进行了一些必要的简化,

收稿日期: 2007-09-03; 修订日期: 2007-09-10

基金项目: 江苏省高科技发展计划基金资助项目 (BG200614)

作者简介: 陈 宁 (1970-) 男, 河北青县人, 中国矿业大学副教授。

局部突出的螺栓头, 细小的端盖及沟槽等被省略。

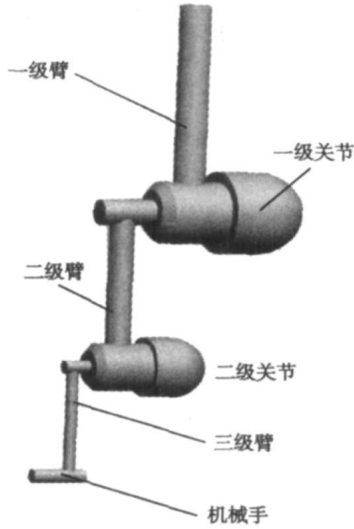


图2 机器人模型

2 数值模拟

为了总体把握机器人在各种不同的姿态下凝汽器回水室内水流场的分布特性, 减少后续实验研究的盲目性, 首先运用 Fluent 软件进行了三维数值模拟^[9-10]。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot V) = 0 \tag{1}$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho (\frac{V^2}{2} + e)] + \nabla \cdot [\rho V (\frac{V^2}{2} + e)] = \rho f \cdot V + \rho g_k + \nabla \cdot (\sigma \cdot V) + \nabla \cdot (k \nabla t) \tag{2}$$

动量方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu (\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2}) \\ \frac{dv_y}{dt} &= f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu (\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2}) \\ \frac{dv_z}{dt} &= f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu (\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}) \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

方程求解选用三维的隐格式定常非耦合求解模型, 速度的格式设置为绝对速度。紊流计算采用标准 $k-\epsilon$ 模型^[5-7], 这是一个基于模型输运方程求解湍流动能 k 和湍流扩散度 ϵ 的半经验模型^[11]:

$$\rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i}] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m \tag{4}$$

$$\rho u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} [(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \frac{\rho \epsilon^2}{k} \tag{5}$$

式中: G_k —取决于平均速度梯度的湍流动能产生量, 计算为:

$$G_k = \mu_t S^2 \tag{6}$$

式中: S —平均应力比模量:

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \tag{7}$$

平均应力比的计算方法为:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \tag{8}$$

近壁的处理方式为标准的壁面函数形式。

计算首先在水室内无机器人的情况下展开, 此条件将作为后续计算的比较基准, 然后再将机器人置于水室内并变换不同的姿态进行流场分析。

2.1 流场对凝汽器的影响

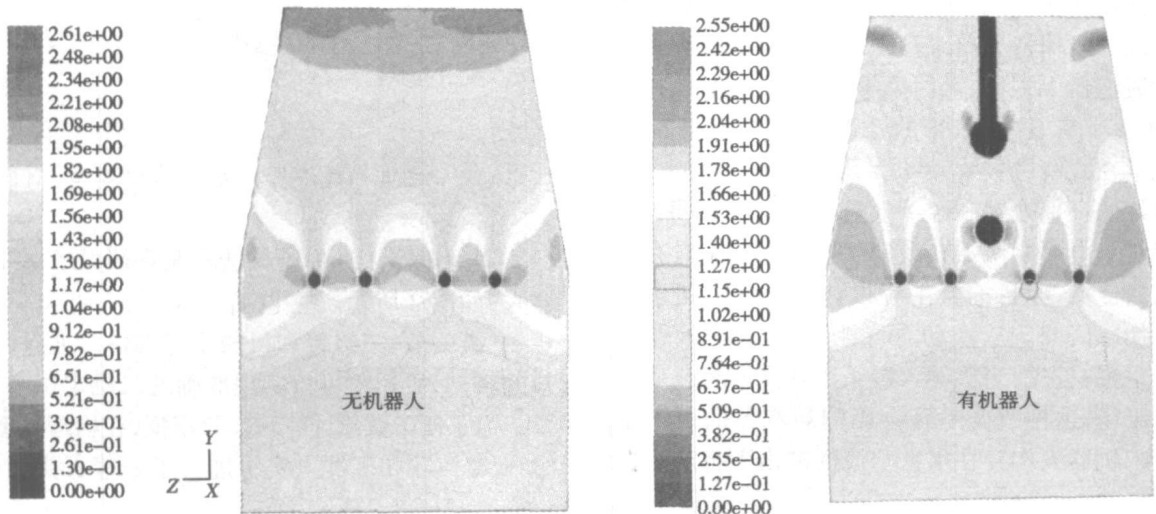


图3 机器人置于凝汽器前后流速分布云图

数值模拟显示, 某在研机器人置于水室后将使回水室内流体高速区有所扩展, 流速最大值也发生了改变, 如图 3 所示。基于改变后的流场, 计算表明, 各级臂杆尾流卡门涡阶的频率总体低于 3 Hz, 低于机器人臂杆的固有频率, 不会引起共振。

机器人置入后, 回水室内压力损失有所增加, 而且其值与机器人臂杆的姿态有关, 计算获得的压损最大值为 520 Pa, 此增量的相对值为 0.19%, 对循环水量的影响甚微。

大多数姿态下, 机械臂的偏移将引起回水室内流场不均匀, 但其影响的范围是有限的, 由于管板的整流作用, 在管板附近流场基本恢复均匀。

2.2 流场对机器人的影响

从机器人受流场影响的角度, 数值计算表明存在两类不利区域:

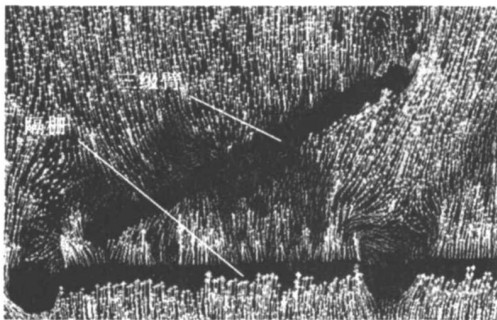


图 4 凝汽器隔栅上方紊乱的流场

区域一, 位于从凝汽器隔栅上方。在该区域内, 凝汽器冷却水流受隔栅的影响, 一方面流速加快, 另一方面绕流隔栅圆管时产生大量紊流, 这些都会对机器人的定位作业产生影响。图 4 显示了隔栅上方流场作用于机器人三级臂的情况, 由图中可见, 三级臂杆附近的流场异常紊乱。在该区域内工作时, 机器人臂杆在紊流的作用下将会产生较强烈的振动。

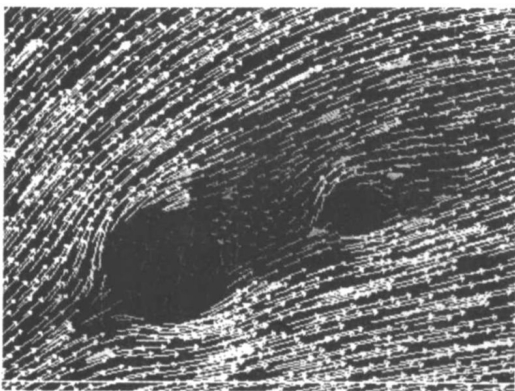


图 5 二级臂和三级臂间流场

区域二, 在机器人工作的某些姿态下, 二级臂产生的尾流会作用于三级臂, 产生臂间流场干扰, 这种情况也应予以重视。图 5 显示了存在臂间干扰时的流场。

3 实验研究

3.1 实验台结构

为了进一步研究清洗机器人的流体动力特性, 并验证数值计算的准确性, 在数值模拟的基础上进行了风洞实验研究。风洞实验台由矩形入口段、整流段、实验段、梯形出口段、二次整流段、梯形收缩段、圆形直管段和风机组成。依据某 300 MW 的凝汽器回水室结构图纸按 1:3 的比例建造实验段, 实验段内按比例制作了机器人、凝汽器隔栅和凝汽器管板的模型, 如图 6 所示。

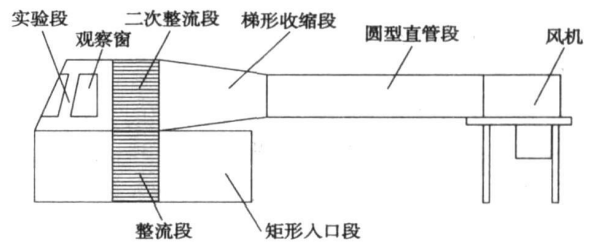


图 6 实验台

在整流段出口和二次整流段入口分别布置有微压计, 用于测量实验段压差变化; 圆形直管段中部布置有流量测点, 用于测量实验风量; 机器人机械手端部沿机械手的轴向和径向分别布置了振动传感器, 用于测量模型在各个姿态下的振动情况。获得的数据通过相似准则分析可反映真实机器人在水下工作的情况。

3.2 实验结果

经过大量的吹风实验, 结果显示, 当机器人模型置入流场后, 测得的额外压损为 3.2 Pa。运用相似准则推算获得的实际压损为 517.6 Pa, 这个结果与数值模拟的结果极为吻合。

机器人在前述数值模拟预测的两类不利区域内工作时, 传感器均测量到了较大的振幅。表 1 的数据显示了机械手距隔栅不同距离时的振幅水平。从表中可以看出机械手越接近隔栅其振动水平越大。而姿态 I 由于机械手远离危险区其振动幅度大大小于机械手处于危险区的姿态 II 和 III。实验表明, 机械手只要距离隔栅 5 倍隔栅管径以上, 振动就减小到与姿态 I 相近的水平, 因此隔栅至其上方 5 倍管

径的区域为第一个不利区。在二级臂与三级臂的相互干扰方面,实验也给出了肯定的答案。这种干扰主要出现在二级臂水平、三级臂与二级臂成 $3\sim 7^\circ$ 夹角的情况下,这一区域被称为第二不利区。实验中该区域下测得的最大径向振幅为 $67.03\ \mu\text{m}$,但此时机械手轴向的振幅并不大,为 $35.5\ \mu\text{m}$ 。

表 1 不利工况分析

工况	姿态 I:	姿态 II:	姿态 III:
	二级臂垂直 三级臂与 水平面呈 45°	二级臂垂直 三级臂水平	二级臂垂直 机械手贴近隔栅
机械手轴向振幅/ μm	20.7	95.58	104.07
机械手径向振幅/ μm	32.96	109.12	111.46

实验还表明,当机械手出现最大臂展的工况时,机械手的振动水平也较高,实验测得的振幅为轴向 $61.43\ \mu\text{m}$ 和径向 $87.66\ \mu\text{m}$ 。该工况下呈现出的较大振幅与机械臂转轴承受最大的力矩有关,这一工作区域被称为第三不利区。

除了上述工况,还设想了一些其它的不利情况,例如一级臂与二级臂或三级臂间的不利干扰,一级和二级关节对机械臂或机械手的不利干扰等等,但经过实验并未发现上述不利干扰有明显的作用,机械臂振动幅值无显著增大。

3.3 改进途径

基于前述,清洗机器人置于某 300 MW 机组凝汽器回水室后,对凝汽器工作的影响可以忽略不计,但自身的工作存在 3 类不利区,需要加以克服。

不利区一的存在是由于隔栅附近的乱流冲刷三级臂造成的,可以通过对隔栅整流达到削弱紊流、减少振动的目的,此外三级臂加装减阻翼型也可因水流的冲击力的减弱而使机械手的振动得以削弱。

第二类不利区的存在是由于二级臂的脱体涡作用于三级臂造成的。其改进可从二级臂整流入手,通过给二级臂加装整流罩可以达到消除脱体涡的目的,从而减少第二不利区振动。

对于第三类不利区,解决它的根本方法是加强机器人关节的刚度,但在刚度一定的条件下,拥有流线型整流罩的臂杆依然可因流体作用力减少而使振动削弱。

由上述分析可以看出,机器人臂杆加装整流罩在 3 类不利区都是有益的,在未来凝汽器在线清洗机器人的设计上应体现这一特点。必须说明的是,机器人在不同的工作姿态下流过其臂杆的水流流向也会大大不同,因此简单地将整流罩固定在臂杆上

是毫无意义的。整流罩应能绕臂杆轴线自由旋转,以适应不同来流方向,称之为“自适应旋转整流罩”。本实验应用具有某翼型的自适应旋转整流罩在 3 个不利区内均获得了削弱振动 50% 左右的效果,同时机器人在水室的总阻力也下降了 34%。

4 结 论

通过数值模拟和实验研究,对某 300 MW 机组凝汽器在线清洗机器人的水动力特性有下列结论:

(1) 机器人置于凝汽器回水室后,不会影响凝汽器的正常工作。

(2) 机器人在线工作时存在 3 类不利工作区域,第一不利区处于凝汽器隔栅上方 5 倍于隔栅管径区域内;第二不利区位于机器人二级臂水平,三级臂与二级臂成 $3\sim 7^\circ$ 夹角的范围内;第三不利区是机器人机械手指向凝汽器角点的工作区。在上述区域工作,机械手的振动显著增大,影响定位作业。

(3) 在机器人臂杆上安装具有某翼型的“自适应旋转整流罩”后,在 3 类不利区内均获得削弱振动 50% 的效果,同时还能减少机器人的水下阻力,在未来凝汽器在线清洗机器人的设计中可考虑加装。

参考文献:

- [1] 霍德双. 凝汽器的安全经济运行[J]. 上海电力, 2005(1): 101-103.
- [2] TANAKA KIYOHICO. Tank cleaning robot[J]. Robot, 1996, 5: 81-87.
- [3] YAGUCHI HIROSHI. Robot introduction to cleaning works in East Japan Railway Company[J]. Katakana/Robot, 1994, 5: 35-41.
- [4] OH YONGJOO, WATABABE Y. Development of small robot for home floor cleaning[J]. Sice, 2002, 5: 3222-3223.
- [5] PALACIN J, SAISE J A, VALGANON, et al. Building a mobile robot for a floor-cleaning operation in domestic environments[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004 5(5): 1418-1424.
- [6] BRANCH A C. Case study of a floor cleaning robot //Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering[C]. 1998. 19-29.
- [7] SCHRAFT R D, BRAUNING U, ORLOWSKI T, et al. Automated cleaning of windows on standard facades[R]. Fraunhofer Institute Manufacturing Engineering and Automation IPA, Nobelstr. 12, D-70569 Stuttgart, Germany. Automation in Construction, 2000. 489-501.
- [8] 张卓澄. 大型电站凝汽器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [9] RICHAR K PPLER. Airfoils with boundary layer suction, design and off design cases[J]. Aerosp Sci Technol, 1999 3: 403-415.
- [10] 马铁犹. 计算流体动力学[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1986.
- [11] WILCOX D C. Comparison of two-equation turbulence models for boundary layers with pressure gradient[J]. AIAA, 1993, 31(8): 1414.

(编辑 韩 锋)

in various control processes. By the combined use of a prediction control and PID controller in the control of a reheat steam temperature system and with a neural network serving as a system prediction model, an on-line optimization has been performed of PID parameters through a chaos-based optimization algorithm. A computer-based simulation test has verified the effectiveness of the algorithm. Compared with the traditional PID control, the PID prediction control based on chaotic theory is capable of timely tracking system changes and overcoming any outside perturbations. As a result, achieved is a good control effectiveness and the exhibition of a very strong robustness performance. **Key words:** prediction control, PID (proportional-integral-differential) controller, chaos-based optimization, neural network, reheat steam temperature

凝汽器水下在线清洗机器人水动力特性研究 = A Study of Hydrodynamic Characteristics of an Underwater On-line Condenser-cleaning Robot [刊, 汉] / CHEN Ning, WAN Yi, PENG Wei, et al (Power Department, China University of Mining and Technology, Xuzhou, China, Post Code: 221009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 183 ~ 186

By using a numerical simulation and related tests, a study has been performed of the hydrodynamic characteristics of an on-line-cleaning industrial robot destined for the condenser of a 300 MW steam turbine, which is now still under development. It is noted that the robot under discussion will not affect the normal operation of the condenser after being put into the return water chamber of the condenser, but there exist three unfavorable working zones for the operation of the robot. The first zone is located in a region above the condenser partition grate within a height five times of the tube diameter of the partition grate. The second unfavorable zone is situated at the robot's second-stage arm level in a region where the third-stage and second-stage arm form an included angle of 3 to 7 degrees. The third unfavorable zone is in a working region where the manipulator of the robot is pointing to the corner of the condenser. When the robot is working in the above-said unfavorable zones, the vibration of the robot manipulator will increase considerably, thus affecting the fixed location operation. Finally, the authors have conducted an exploratory study of the methods for coping with the above unfavorable zones and noted that an additional installation of a self-adaptive rotary flow-straightening hood on the arm rod of the robot is one of the effective measures. **Key words:** underwater robot, high pressure water jet flow, numerical simulation, vibration

CaO 孔结构分形特性研究 = A Study of Fractal Characteristics of a CaO Porous Structure [刊, 汉] / WANG Chun-bo, CHEN Chuan-min, LI Yong-hua, et al (Energy Source and Power Engineering Institute, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 187 ~ 190

On the basis of fractal theory, an exploratory study has been conducted of the characteristics concerning the porous structure of a modified desulfuration agent. Furthermore, the influence of additive content and calcination temperature on CaO fractal dimension has also been studied. The research results show that the increase of both the additive content and calcination temperature can result in a decrease of CaO fractal dimension. For instance, at a temperature below 900 °C, when the additive content increases from 0.7% to 3.4%, the fractal dimension will decrease by about 0.24. With the additive content being 2%, however, when the calcination temperature has increased from 870 °C to 1 000 °C, the fractal dimension will decrease by about 0.08. In the meantime, the authors have also studied the effectiveness of reflecting the CaO pore diameter distribution by using the fractal dimension. With a decrease of the fractal dimension, the CaO pore diameter distribution will tend to shift to the direction of a bigger average pore diameter, and at the same time have a even bigger pore diameter, indicating that the fractal dimension can reflect exceedingly well the characteristics of CaO pore diameter