

火电厂凝汽器在线清洗机器人机械臂减振技术

陈 宁, 彭 伟, 吴楠楠

(中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

[摘要] 某在研 300MW 机组凝汽器在线清洗工业机器人在火电厂凝汽器回水室中作业时存在 3 类不利区, 在不利区工作时机械手在水流作用下的振动显著增大, 影响定位作业。为解决该问题, 进行了数值模拟和风洞实验研究。研究表明机器人臂杆加装自适应旋转整流罩是实现减振、减阻的有效方法之一。适用于机器人一、二级臂杆的整流罩翼型为 NACA0030 适用于三级臂的整流罩翼型为 NACA0050。风洞实验显示, 在上述翼型组合下, 加装自适应旋转整流罩的机器人在 3 个不利区内机械手振幅均有较大幅度的减少, 机器人的定位精度得以提高。此外机器人在凝汽器回水室内引起的压损可减少 34.3%, 体现出整流罩具的良好减阻效果。

[关键词] 蒸汽工程, 翼型, 数值模拟, 水下机器人, 振动

[中图分类号] TP242.6 [文献标识码] B [文章编号] 1672-1292(2009)01-0040-04

Vibration-Reducing Technology for the Arms of the On-line Washing Submarine Robot in the Condenser of Power Plant

Chen Ning Peng Wei Wu Nannan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract During the operation of an under-studying submarine on-line washing robot in the condenser's water chamber of a 300MW unit of the power plant it will face three disadvantageous regions in which the vibration of the robot's arms will increase greatly under the effect of the water and therefore the positioning of the robot will be difficult. Numerical simulation and wind tunnel experiments are carried out to solve the problem. It states that one of the effective methods to decrease the vibration and resistance is to add self-adaptive rotating cowlings on the arms of the robot. The proper airfoil for the cowlings of the first and second arms of the robot is NACA0030 and for the cowling of third arm is NACA0050. The data of wind tunnel experiments show that with the above airfoil combinations the vibration of the manipulator of the robot reduces greatly in the three disadvantageous regions. The positioning accuracy of the robot can be improved then. Besides, the pressure loss of the robot decreases by 34.3%, which shows that the cowlings are effective to reduce resistance.

Key words steam engineering, airfoil, numerical simulation, submarine robot, vibration

火电厂凝汽器高压水射流在线清洗机器人^[1-4]技术是近年来国内提出的新技术, 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、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, 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。

某 300MW 机组凝汽器回水室结构^[5]以及某在研清洗机器人外形结构分别见图 1 和图 2。机器人通过两个关节的转动, 可以实现准确的二维定位, 将清洗喷头对准凝汽器进出水管板上的冷却水管, 进行管内清洗。

由图 2 可见, 机器人原始结构中各级臂杆为圆柱形, 这使得它们易受水流冲击的影响, 且自身产生的涡流也会对其他部件产生不利影响。先前的数值模拟和风洞实验研究表明^[6], 在机器人的定位作业过程中存在 3 类不利区。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

收稿日期: 2008-09-28

基金项目: 江苏省高新技术研究 (BG2006014) 资助项目。

通讯联系人: 陈 宁, 副教授, 研究方向: 新能源及火电厂节能技术。E-mail: channing7@163.com

臂水平,三级臂与二级臂成 $3^{\circ} \sim 7^{\circ}$ 夹角; 第三不利区是机器人机械手指向凝汽器角点的工作区。在不利区工作时机械手的振动明显增大, 影响定位作业, 是研制火电厂凝汽器高压水射流在线清洗机器人必须解决的课题。

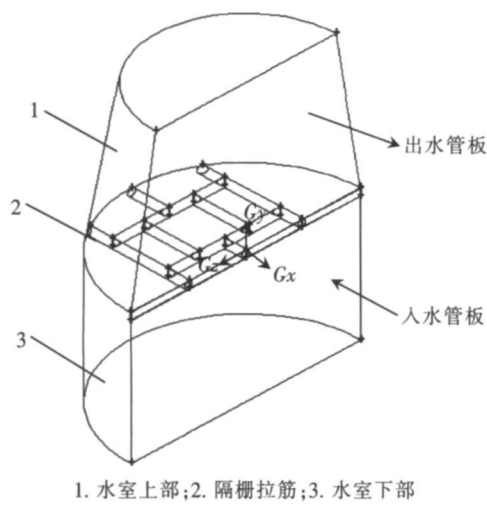


图1 凝汽器回水室简化模型

Fig.1 Model of condenser's water chamber

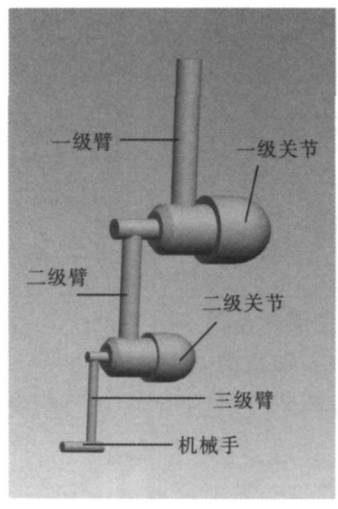


图2 机器人模型

Fig.2 Model of the robot

针对上述问题, 笔者运用数值模拟和风洞实验进行了探讨, 期望开发有效减少振动、降低阻力的技术, 保证机器人在不利工作区的正常运行。

1 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, 笔者首先运用 FLUENT 软件进行了三维数值模拟^[6-8]。数学模型方程组包括: 连续性方程 (1)、能量方程 (2) 和动量方程 (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。冷却水入口水的流速 $v_{in} = 1 \text{ m/s}$ 回水室温度定为 30°C , 根据冷却水入口和出口的流量平衡计算得到冷却水出口流速 $v_{out} = 0.955 \text{ m/s}$ 壁面水流速度为 0 紊流计算采用 $K-\epsilon$ 模型, 近壁的处理方式为标准的壁面函数形式, 详细的数学模型参见文献 [6]。

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

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(\frac{\mathbf{V}}{2} + \epsilon \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \cdot \mathbf{V} \left(\frac{\mathbf{V}}{2} + \epsilon \right) \right] = \rho \cdot \mathbf{V} + \rho q_k + \nabla \cdot (\sigma \cdot \mathbf{V}) + \nabla \cdot (k \nabla t). \quad (2)$$

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

数值模拟揭示了各不利工作区的成因。计算结果显示, 第一不利区的机械手振动是由于隔栅后部的乱流冲击三级臂造成; 第二不利区的振动起因是由于二级臂尾部紊流作用于三级臂; 第三不利区则是由于水流冲击二级臂和三级臂共同造成^[6]。考虑到流线型整流罩具有削弱水流冲击力, 减少尾部乱流的能力, 那么为各级臂杆加装整流罩应当是减少机械手在不利区内振动的有效途径之一。

2 机械臂整流罩翼型的选择

风洞实验验证了上述设想, 为各级臂杆加装具有一定翼型的整流罩确实可以减弱机械手的振动。在此基础上笔者进一步研究了整流罩的自适应旋转和整流罩翼型的优化问题。

2.1 整流罩的自适应旋转

当机器人的臂杆在凝汽器回水室内处于不同运行姿态时,所面对的水流冲刷方向也是千差万别的,如果简单地将具有某种翼型的整流罩固定在臂杆上,是不可能保证整流罩的翼型随时处于迎流方向的,这样在某情况下整流罩不但起不到整流、减振的作用,反而起负作用.

为了克服这一困难,自适应旋转整流罩是有效的方
法之一.这种整流罩固定在臂杆时可围绕臂杆轴心自由
旋转,同时使水力作用中心设置在旋转轴心之后.当来
流方向改变时,水流自动冲动整流罩旋转到小迎角的位
置,这样流场便得到改善,水流冲击力也大大削弱如图 3
所示.通过良好的轴承设计和浮力平衡等手段,机械结构
上是可以实现整流罩自适应旋转的.

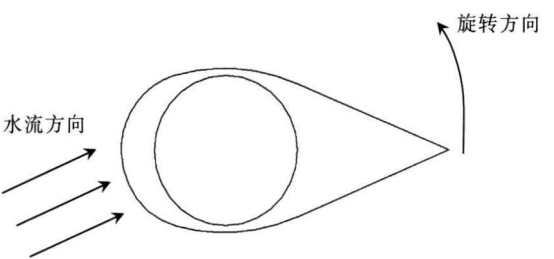


图 3 自适应旋转的整流罩的作用原理

Fig.3 The working principle of the self-adaptive rotating cowlings

2.2 二级臂和一级臂整流罩选型

各级机械臂整流罩翼型的选择是机械臂减振技术的
关键问题之一.针对实验中要求减小阻力、减少尾流区形成、翼型数据易获得和模型制作要求简单等因素,
选择 NACA 系列 4 位数对称翼型作为筛选对象.

由于二级臂后形成的尾流作用于三级臂是形成第二类不利区的主要因素,因此在进行二级臂整流罩
选型时,需要考虑的首要因素应是消除在二级机械臂后形成的尾流.

据三维数值模拟^[6],无整流罩的机器人置入凝汽器回水室后,二级臂工作区附近水流的流速
< 1.6 m/s 笔者以此为初始条件,研究翼型的流场.

经过比较,发现 NACA 0035 是一个界限.选择相对厚度小于它的翼型可保证不会出现明显边界层分离
和尾流区如图 4 所示.而翼型后两位数字大于 NACA 0035 后,随着翼型相对厚度增大,边界层的分离随之
出现,尾流区域也会扩大和延长.图 5 显示了 NACA 0040 翼型的流场云图,图中翼型的尾部已出现微弱的
尾流区.

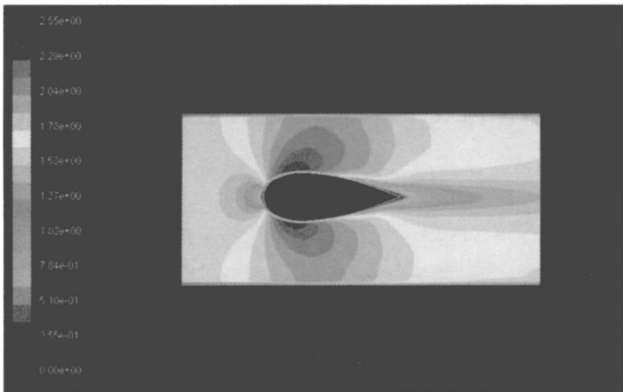


图 4 NACA0035 翼型流场云图

Fig.4 Contour of the flow around NACA0035

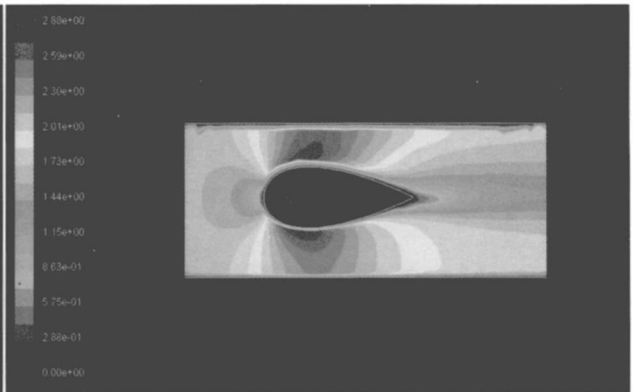


图 5 NACA0040 翼型流场云图

Fig.5 Contour of the flow around NACA0040

除了满足流场的要求,翼型选择还受到机器人机械结构的限制.翼型的厚度必须满足包容二级机械臂
的要求,翼型弦长又需要足够地短以防止整流罩与三级臂发生干涉.经综合考虑,选定 NACA 0030 作为二
级机械臂整流罩的翼型.

机器人的一级臂是一段固定机械臂,只要在机械结构允许的前提下保证流场顺畅,无附面层分离即
可.经过比较,也可选择 NACA 0030 作为一级臂整流罩翼形.

2.3 三级臂整流罩翼型的选择

三级臂连接机械手,对于水流的冲击相对敏感.如何减少水流对三级臂冲击是选择三级臂整流罩翼型
的主要因素.

数值模拟显示,第一不利区内流体流动速度不仅快而且流动方向也相对紊乱,采用翼型进行整流时难
以随时保证流体绕流迎角为 0°的条件,选择细长型翼型并不总能保证减小机械臂振动,某些情况下振动

甚至会加剧. 笔者曾在实验中尝试在三级臂使用细长型水力翼型 E838 在第一不利区工作时机械手径向振幅分别由 104. 17 μm 减小到 48. 42 μm , 但是轴向振幅却从 95. 58 μm 增大到 132. 02 μm . 分析其原因, 气流流过翼型时, 径向冲击力被削弱, 减小了振幅, 但细长型翼型轴向过流面大, 垂直向气流冲刷力增大, 导致轴向振动更为强烈. 因此, 三级臂整流罩选择相对厚度较大的翼型会获得更好的综合效果.

通过实验筛选认为 NACA0050翼型是三级臂整流罩良好翼型. 表 1 显示的是在第一不利区内, 三级臂加装 NACA0050自适应旋转整流罩前后振幅对比. 从数据中可以看出整流罩的加入使得轴向振幅和径向振幅分别下降了 27. 7%和 45. 8% .

2. 4 整流罩减振效果

对一二级臂加装 NACA0030翼形整流罩、三级臂加装 NACA 0050翼形整流罩后的机械手振动情况进行了测试. 在第一不利区减振效果数据与表 1 相仿. 在第二、三不利区减振效果数据见表 2 从表 1 和 2 中, 可以明显地看到喷头振动的减小. 这种改善的取得从整流前后的功率谱的频率特征^[9]中也得到反映. 以第二不利区的径向振动为例, 在未加整流罩之前, 影响喷头振动的主要频率是 7. 5 Hz和 16. 2 Hz 这些频率在功率谱中表现出的峰值要远远大于其它频率的功率峰值. 整流后的功率谱上这两个频率处的功率峰值已经不是最大, 且其它频率处的功率峰值也都普遍得到了减小. 因此机械手的振动得到改善也就顺理成章.

此外, 加入整流罩后机器人引起的回水室压损也得到减小. 根据风洞实验数据, 经相似准则变换, 得到回水室实际压力损失减小为 34. 3%. 需要指出的是, 这一数据是仅在机械臂加装整流罩的前提下获得的, 如果对机器人的各级关节也加装良好的整流罩, 减阻的幅度还要增大.

3 结 论

通过上述讨论有如下结论:

- (1)凝汽器在线清洗机器人机械臂整流罩外型设计的筛选域应以对称翼型为主;
- (2)为保证水流小迎角绕流翼型, 采用自适应旋转整流罩改善振动的效果要明显好于固定整流罩;
- (3)经实验研究一、二级臂整流罩翼型可选择 NACA0030 三级臂采用 NACA0050
- (4)加装整流罩后的机器人机械手振幅在 3个不利区均有较大幅度的减少, 提高了机器人的定位精度;
- (5)机器人实机加装整流罩后, 凝汽器回水室压损减少约 34. 3%, 翼型整流罩起到了减阻的效果.

[参考文献] (References)

[1] Zhang Hui, Wang Yaonan, Peng Jinzhu. Research on the design and control strategy of cleaning robot for power plant condenser[J]. Hunan Daxue Xuebao/ Journal of Hunan University Natural Science, 2008, 35(6): 31-35.
[2] China University of Mining and Technology. On-line high pressure water jet Washing Robot of the power plant condenser. China ZL 200520069296. 9[P]. 2006-05-10.
[3] China University of Mining and Technology. High pressure jet equipment of on-line high pressure water jet Washing Robot of the power plant condenser. China ZL 200520069938. 5[P]. 2006-05-10.
[4] China University of Mining and Technology. High pressure pipeline management system of on-line high pressure water jet Washing Robot of the power plant condenser. China ZL 200520069939. X[P]. 2006-05-10.
[5] Zhang Zhuocheng. The Condenser of Large Power Plant[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1993.
[6] Chen Ning, Wan Yi, Peng Wei. Researches on the hydrodynamics of the on-line washing sulmarine robot in condenser of power plant[J]. Thermal Power Engineering, 2008(2): 183-186.
[7] Richard Epper. Airfoils with boundary layer suction: design and off-design cases[J]. Aeronaut Sci Technol, 1999(3): 403-415.
[8] Ma Tieyou. Computational fluid Dynamics[M]. Beijing: Beijing Aviation Academy Press, 1986: 1-120.
[9] Ying Huaqiao. Waveform and Spectrum Analysis and Random Signal Processing[M]. Beijing: China Railway Press, 1983.

[责任编辑: 刘 健]