

火电厂直接空冷系统风洞热效应模拟实验研究

刘沛清¹, 赵万里¹, 徐则林²

(1. 北京航空航天大学 流体力学教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 国电科技环保集团, 北京 100034)

摘要: 将空冷凝汽器模型内通恒定温度的热水构成热循环系统, 在低速风洞中首次同时模拟了空气动力学、轴流风机的强迫对流以及热空气的浮力效应在内的复杂流动与热动力学耦合问题。提出影响空冷凝汽器散热效果的回流率的概念, 探求来流条件的变化对空冷岛底部平均回流率的影响, 并进行相应的 PIV 测速实验。结果发现, 空冷岛底部平均回流率随着风速的增大而增大; 不同风速的条件下, 空冷岛底部平均回流率随风向角的变化趋势基本一致, 并且风向为西风、西南风和西北风附近时空冷岛底部平均回流率较大; 增加挡风墙高度可以降低空冷岛底部平均回流率, 并且风墙高度为 14.64 m 时平均回流率最小。

关键词: 直接空冷; 凝汽器; 回流率; PIV 实验; 风洞试验; 热效应

中图分类号: TM62; O354 文献标识码: A

引 言

当今地球水资源日趋紧张, 使得直接空冷系统在火力发电厂的应用越来越广泛。尤其在富煤缺水地区, 建立直接空冷系统电厂, 具有节水、防冻性能好、占地面积小、投资费用低和利于环保等优点^[1~4]。然而直接空冷机组最大的缺点是受环境因素影响严重, 例如在严寒、酷暑、大风等条件下, 直接空冷凝汽器的散热效果是不同的, 特别是在炎热的夏季, 当自然风吹过锅炉房时, 会在空冷岛底部产生热回流, 严重影响机组的运行, 甚至造成停机。据有关报道^[5], 南非马廷巴(Matimba)燃煤空冷电厂装有 6×665 MW 直接空冷机组, 当全厂装有 4 台机组时, 投产几年来运行良好。在 1992 年 6 号机组投产后, 在夏季出现大于 6 m/s 西南风(锅炉侧吹来), 正吹在配汽管顶部上空, 把热气流压下造成热风回流, 迫使汽轮机背压急剧上升, 直至背压保护掉闸而停机。国电大同发电公司 2×600 MW 直接空冷系统燃煤机组于 2005 年 7 月, 环境温度 37.7 °C, 因大风从炉后侧吹过, 塔下形成热回流而发生机组跳闸事故。山西漳山发电公司 2×300 MW 直接空冷系统燃煤机组于 2005 年 6 月 22 日 17 点, 突起大风, 风速在 15~16 m/s, 汽轮机背压急剧升

高, 机组负荷由 254 MW 降至 223 MW, 机组保护动作, 而后跳闸停机。

由此可见, 在炎热夏季高温时段, 空冷机组背压的突然变化, 主要由环境大风引起的热风回流造成。如何避免或减少热回流的危害, 这是空冷机组目前所遇到的一大难题, 很必要开展风洞实验研究。本文将直接空冷凝汽器模型内通恒定温度的热水形成热循环系统, 在满足一定的相似准则时, 对直接空冷模型进行风洞热效应实验, 探求来流条件的改变对空冷岛底部平均回流率的影响, 并提出降低回流率的工程措施。

1 实验主要参数及相似准则

1.1 热风回流率定义

电厂运行时, 空冷凝汽器排出的热空气在环境风作用下常会出现热回流现象。为了定量说明热回流的大小, 本文定义回流率:

$$R = \frac{T_{in} - T_a}{T_{out} - T_a} \quad (1)$$

平均热回流率:

$$R = \sum R/N \quad (2)$$

式中: T_a —环境温度; T_{in} —风机入口处的平均温度; T_{out} —空冷凝汽器出口平均温度。

1.2 相似准则与相似条件

空冷凝汽器的强迫对流换热问题, 是一个在环境风作用下产生的复杂分离尾流场中的强迫对流换热现象, 涉及热气流与分离旋涡流的相互作用与干扰; 在风机抽吸动力作用下将产生一种特殊流动现象, 即热回流。因此必须考虑空气动力学、轴流风机的强迫对流以及热空气的浮力效应在内的相似理论。对于理想气体, 当考虑热浮力效应时流体动力学方程为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{\Delta T}{T_0} g_i - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (3)$$

式中: u_j —流体质点速度; g_i —重力加速度分量; p —

流体质点静压强; ρ_0 —流体特征密度; T_0 —特征温度; ν —流体运动粘性系数。如果取 ρ_0 、 L_0 、 V_0 、 T_0 为特征物理量, 式(3)的无量纲形式为:

$$Sr \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{g_i}{Fr^2} - \frac{g_i}{Fr_T^2} - Eu \frac{\partial \phi}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (4)$$

式中, $Sr = L_0 / V_0 t_0$ —斯特劳哈数, 表征流体质点非定常惯性力与迁移惯性力的比值; $Fr = V_0 / \sqrt{gL_0}$ —弗汝德数, 表示惯性力与重力之比; $Fr_T = V_0 / \sqrt{gL_0 \frac{\Delta T}{T_0}}$ —密度弗汝德数, 表征惯性力与浮力的比值; $Eu = p_0 / \rho_0 V_0^2$ —欧拉数, 表征压力与惯性力的比值; $Re = L_0 V_0 / \nu$ —雷诺数, 表征惯性力与粘性力的比值; 上式说明相似流动的无量纲数相等。对于忽略重力作用的流动, 动力相似准则是表征热浮力效应的密度 Fr_T 数和表征阻力相似的 Re 数相等。若取模型挡风墙高度 108.3 mm 为特征长度, 风洞最小风速 $V_m = 6 \text{ m/s}$ 为特征速度, 相应的 $Re = 4.5 \times 10^4$, 该值大于目前文献建议的临界雷诺数 $Re_c = 1.1 \times 10^4$, 因此流动与雷诺数关系不大, 可不考虑雷诺数 Re 效应。在有热回流存在时, 风机进口的密度 Fr'_T 数与无热回流时的密度 Fr_T 数之间的关系是:

$$Fr'_T = \frac{V_0}{\sqrt{gL_0 \left(\frac{\Delta T}{T_0} \right)}} = Fr_T \left(\sqrt{\frac{\Delta T}{T_0} [1 - R]} \right) \quad (5)$$

式中: ΔT —空冷散热器进出口温差, 特征温度 $T_0 = T_{out} - T_a$

$$\left(\frac{\Delta T}{T_0} \right)' = \frac{T_{out} - T_{in}}{T_{out} - T_a} = \frac{T_{out} - T_a - (T_{in} - T_a)}{T_{out} - T_a} = 1 - \frac{T_{in} - T_a}{T_{out} - T_a} = 1 - R \quad (6)$$

参照文献[7~10], 在风洞热效应实验中, 要使两个流动相似, 需要满足的条件有:

- (1) 几何相似: 将汽机房与空冷岛外形按照同一线性比例缩小, 形成几何相似的缩比模型。
- (2) 运动相似: 在模型和原型相似流动中, 对应点速度和加速度大小成比例, 方向相同。包括来流风速和凝汽器排出热空气的速度(或风机进口速度)比相似, 也即风速比相似。
- (3) 动力相似: 满足表征热浮力效应相似的数量 Fr_T 和表征阻力相似的 Re 数相等。
- (4) 热效应相似: 翅片管束出口与凝汽器入口的温度差相似, 即保证原模型 $\Delta T / T_0$ 相等。
- (5) 保持风机流量、压差和功率相似。其相似条件为:

压差相似: $\lambda_p = \lambda_\rho \lambda_n^2 \lambda_L^2$

功率相似: $\lambda_N = \lambda_\rho \lambda_n^3 \lambda_L^5$

式中: λ_L —长度比尺; λ_n —转速比尺; λ_ρ —空气密度比尺; λ_q —流量比尺; λ_p —压差比尺; λ_N —功率比尺。

(6) 来流条件相似: 在风洞实验中, 按照指数律模拟与实际来风相同的大气边界层流动。

2 模型实验热循环系统与设备

2.1 实验热循环系统

在模型外, 用 3 个功率为 9 kW 的电加热棒对供水箱进行加热, 水箱出口处设有温度控制装置以确保循环系统内的水温恒定。在下游水泵驱动压力作用下将水箱内的热水送至蒸汽分配箱, 热水流经翅片管束, 最终由凝结水管接收送至凝结水箱, 再由水泵送至加热水箱形成一个循环。加热水箱、凝结水箱、水泵等直接固定在风洞转盘的正下方, 确保与转盘上的模型同步转动。待整个系统达到稳定后, 即可对模型进行吹风试验, 图 1 为实验热水循环示意图。

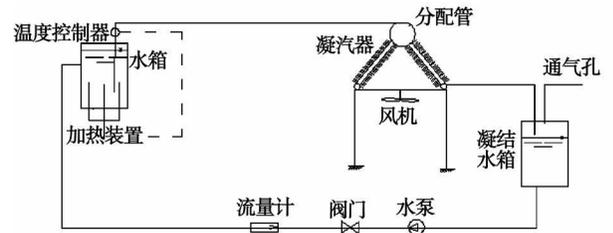


图 1 实验热水循环示意图

2.2 实验模型与设备



图 2 风洞缩比模型(长度比例尺 1:120)

实验在中国航空工业空气动力研究院(627 所)的 FL-8 风洞中进行。该风洞为单回路闭口风洞, 实验段截面为 $3.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 的扁八边形, 截面积为 7.685 m^2 , 实验段长 5.5 m , 风洞最大风速 70 m/s 。缩比模型按大同二电厂 7、8 号直接空冷机组, 几何缩比为 1:120, 如图 2 所示。主厂房模型用有机玻璃

制作而成,并且和空冷塔架均安放在直径为 2 m 的转盘上,实验模拟大同地区 B 类地貌大气边界层,时均速度剖面指数 $\alpha=0.16$,近地湍流度 $>5\%$ 。实验测温装置采用美国 Keithley 公司生产多路(100 路)温度巡检仪,温度传感器采用 T 型热电偶。实验在风机入口和翅片管束出口共布置了 92 个测点。实验中采用香港龙威电子有限公司生产的 TPR-3030D 型直流稳压电源向 112 个模型风机供电,而且电压连续可调。

3 实验结果与分析

3.1 风速大小对热回流率的影响

风速的变化对空冷岛底部平均回流率影响很大。理论而言,无风条件下热回流很小,风速大到一定值后将出现不同程度的热回流问题。当来流正对锅炉房吹过时(风向角 $\beta=0^\circ$, 西风),模型风洞速度分别为 6、8、10、12、14 m/s,实验发现,随着风速的增加,空冷岛底部平均热回流率逐渐增加,如图 3 所示。热回流增加的主要原因是由于风速的增大使得来流惯性力对热气流的作用增强,这样热气流更易被卷回到空冷平台底部。

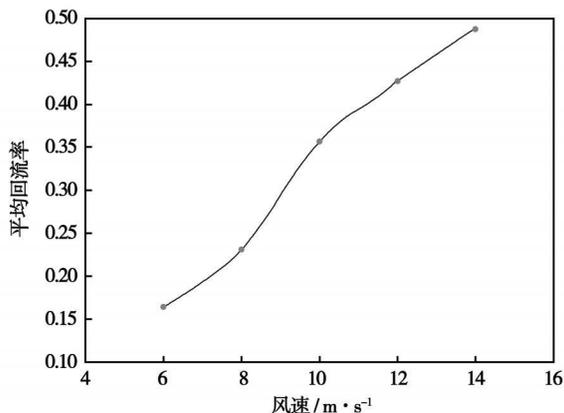


图 3 风向角 $\beta=0^\circ$ 时不同风速大小与热回流率之间的关系

3.2 风向角对热回流率的影响

为了反映风向角对回流率的影响,实验取 16 个风向角(间隔 22.5°),风速为 6 和 8 m/s。实验表明最不利风向角为 $\beta=0^\circ$ (正对锅炉房,西风),热回流率的数值明显高于其它风向;其次是风向角 $\beta=\pm 45^\circ$ (风向角为西北风和西南风)。风速为 8 m/s 的条件下,热回流率随风向角的变化趋势与风速为 6 m/s 的情况基本一致,但热回流率在风向角为 $0^\circ, \pm 22.5^\circ, \pm 45^\circ, \pm 135^\circ, \pm 157.5^\circ$ 和 $\pm 180^\circ$ (分别对应西风、西北风、西南风和东风)时数值高于风速为 6 m/s 的数值,如图 4 所示。

3.3 挡风墙高度对热回流率的影响

为了降低热回流,从而改善空冷凝汽器散热效果,实验在模型来流风速为 6 m/s、风向角 $\beta=0^\circ$ (西风,由厂房侧吹过)的条件下,模型风墙的高度分别取 108.3、116.7、125、133.3、141.7 和 150 mm(相应原型高度为 13、14、15、16、17 和 18 m),测量空冷凝汽器各测点进出口温度,计算回流率,分析挡风墙高度变化对回流率的影响,图 5 给出空冷岛底部平均回流率与风墙高度之间的关系。

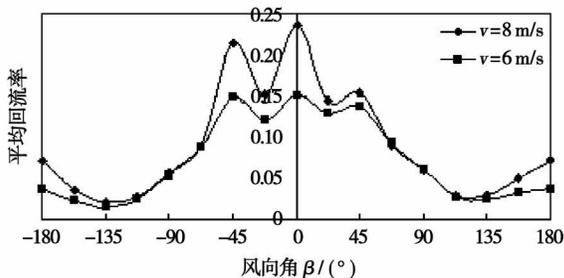


图 4 风向角与空冷塔下平均回流率之间的关系

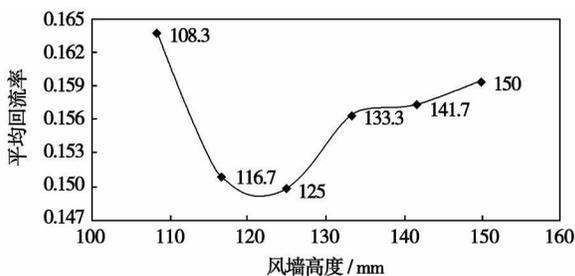


图 5 平均回流率随风墙高度变化关系

由图 5 可见,随着风墙高度的增大,空冷岛底部平均回流率先降低而后又增大,在 $H=122$ mm(原型高度 14.64 m)时平均回流率最低(为 14.9%),比原施工高度(13 m)的平均回流率减小 1.5%。因此,适当加高挡风墙高度有利于降低空冷岛底部的平均回流率。

为了进一步探讨挡风墙加高后,空冷岛前后的流场与回流率的关系,选择 8 号机组中截面进行 PIV 测速实验。图 6 和图 7 分别给出了来流风向角 $\beta=0^\circ$ (西风)、风速为 6 m/s 时,不同风墙高度条件下的流线片。

从图 6 和图 7 可以看出,当自然风从锅炉房吹过空冷岛时,由于空气在锅炉房顶部、空冷平台边缘发生了分离,在锅炉房的背风面以及远离汽机房的空冷平台下游均形成了巨大的漩涡结构。空冷凝汽器排出的大量热空气有一部分在汽机房上的漩涡结构与靠近汽机房的空冷平台边缘风机的抽吸作用

下,回到空冷平台底部;远离汽机房的热空气在下游漩涡结构和空冷平台边缘风机的共同作用下回到空冷平台底部而形成热回流。

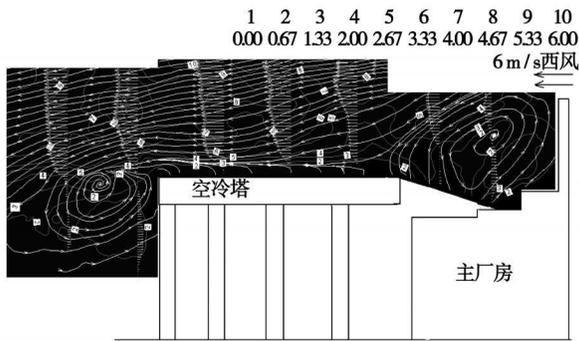


图6 设计风墙高度 $H=108.3$ mm时
截面流线图(风由右侧吹过)

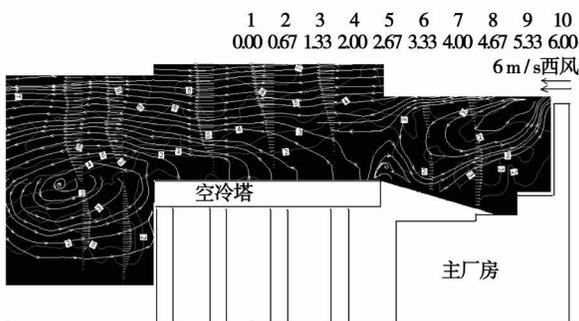


图7 风墙高度 $H=150$ mm时
截面流线图(风由右侧吹过)

从图7中可以看出,由于设计条件下的挡风墙高度较低,在锅炉房背风面的漩涡结构的作用下,靠近汽机房的空冷平台边缘,出现了少许的“倒灌”现象。随着挡风墙高度的增加,锅炉房背风面以及空冷平台下游的漩涡结构均向上抬升,并且下游漩涡的涡核明显远离空冷平台,向下游甩去,因而被卷回到空冷平台底部的热空气就减少。同时从来流方向的速度剖面可以看出,与设计风墙高度相比,加高风墙高度后,空冷平台上方的速度型明显变窄,并且靠近底部的水平速度明显变小(水平惯性力作用减小),在浮力作用不变的条件下,这有利于热空气的排出,因而可以改善空冷凝汽器的散热效果。

4 结论

在低速风洞内对直接空冷系统进行了环境风、风机动力和热浮力效应的模拟实验。通过计算不同来风条件下回流率,分析了影响热回流的主要因素,所得结论如下:

(1) 在本次风洞实验的速度范围内,空冷岛底

部平均回流率随着风速的增大而增大。

(2) 空冷岛底部的平均回流率随着风向角的变化而变化。在来流风速为6和8 m/s条件下,平均回流率随风向角的变化趋势基本一致;风向角为西风、西南风和西北风附近时空冷岛底部平均回流率值较大。

(3) 增加挡风墙的高度可以降低空冷岛底部平均回流率,挡风墙原型高度为14.64 m时平均回流率达到最小值。

(4) 由PIV测速结果可见,加高挡风墙使得空冷平台前后的整体流线上抬,有利于热空气的排出;同时锅炉房背风面的漩涡结构向上抬升,远离汽机房的空冷平台下游产生的漩涡结构向上抬起,并且涡核明显远离空冷平台,向下游甩去,被卷回空冷平台底部的机率大大降低,因而降低了空冷平台底部的平均回流率。

参考文献:

- [1] SCHWARZKOPF DIETER. Recirculation, interference and plume diffusion in power stations and the effects on the efficiency[C]. wind Engineering into 21st Century, Proceedings of the tenth international conference on wind engineering Copenhagen, Denmark June 1999; 21-24.
- [2] EPA-600/8-81-009 April 1981, Research and Development, Guideline for Fluid Modeling of Atmosphere Diffusion, Environment Sciences Research Laboratory, United States Environment Protection Agency[S].
- [3] 王佩璋. 借鉴经验发展我国大型火电直接空冷技术[J]. 华北电力技术, 2004, 5: 31-38.
- [4] 丁尔谋. 发电厂空冷技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [5] 王佩璋. 我国大型火电直接空冷技术的特点[J]. 电力建设, 2004, 2: 35-38.
- [6] KROGER D E. Reduction in performance due to recirculation in mechanical draft cooling towers[J]. Heat Transfer Engineering, 1989, 10(4): 37-43.
- [7] GU ZHIFU. Wind tunnel simulation on re-circulation of air-cooled condensers of a power plant[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2005, 93(6): 509-520.
- [8] GU ZHIFU. Wind tunnel simulation of exhaust recirculation in an air-cooling system at a large power plant[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2007, 46(3): 308-317.
- [9] 顾志福, 张文宏. 电厂直接空冷系统风效应风洞模拟实验研究[J]. 热能与动力工程, 2003, 18(2): 159-215.
- [10] 顾志福, 陈学锐. 大型电厂直接空冷系统风效应风洞模拟[J]. 力学学报, 2005 35(5): 558-563.
- [11] 赵学端, 廖其冀. 粘性流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [12] 马义伟. 空冷器设计与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [13] 续宏, 于天群. 6000 KW 机组直接空冷系统实验研究[J]. 山西电力, 2003, 3: 1-4.

(编辑 伟)

火电厂直接空冷系统风洞热效应模拟实验研究 = **Simulation and Experimental Study of the Wind-tunnel Thermal Effect of a Directly Air-cooled System in a Thermal Power Plant** [刊, 汉] / LIU Pei-qing, ZHAO Wan-li (Education Ministry Key Laboratory on Hydromechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, Post Code: 100083), XU Ze-lin (China Guodian Scientific Environment Protection Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100034) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(3). — 240 ~ 243

With constant-temperature hot water passing through an air-cooled condenser model to form a thermal circulation system, simulated simultaneously for the first time in a low speed wind tunnel was the coupling of complex flow with thermodynamics, including aerodynamics, forced convection in an axial compressor and buoyant effect of hot air. A concept of return flow rate that influences the heat dispersion effectiveness of the air-cooled condenser was presented and the influence of the change of coming flows on the averaged return flow rate at the bottom of the air-cooled island explored. In addition, PIV (Particle Image Velocimetry) velocity-measuring experiments were performed accordingly. It has been found that the average return-flow rate in question increases with an increase in air speed, assumes a basically identical variation tendency with the change in air flow direction at different air speeds. The above-mentioned return flow rate is comparatively large when the air flow direction is approximately west, southwest and northwest. The average return flow rate in question will decrease with an increase of the height of the windbreak wall and attains a minimum value when the windbreak wall is 14.64 m tall. **Key words:** direct air-cooling, return flow rate, PIV (Particle Image Velocimetry) experiment, measures aimed at improvement

基于主成份分析法与贝叶斯网络的汽轮机故障诊断方法 = **Steam Turbine Fault Diagnosis Methods Based on the Main Constituent Analysis Method and Bayesian Network** [刊, 汉] / HAN Pu, ZHANG De-li, HAN Xiao-juan, JIAO Song-ming (College of Control Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(3). — 244 ~ 247

When Bayesian network is used to diagnose a fault, the establishment of a model for fault diagnosis of steam turbines has a direct bearing on the complexity of the fault diagnosis process. Therefore, to establish a model of Bayesian network becomes an issue of first priority and the collection of characteristic parameters reflecting the fault status constitutes an important link for setting up a model. Through a discussion of the collection of fault characteristics by using the main constituent analysis method, presented was the modeling method for steam turbine fault diagnosis based on the main constituent analysis and Bayesian network. In addition, the proposed method has been compared with the traditional frequency characteristics modeling method. The results show that the model in question for turbine fault diagnosis is simple and lends itself to easy reasoning, thus enhancing the efficiency of turbine fault diagnosis. **Key words:** steam turbine, fault diagnosis, main constituent analysis method, Bayesian network

船用正车油动机电液伺服系统改进 = **Electrohydraulic Control-based Improvement of a Marine Forward-drive Oil Servomotor** [刊, 汉] / XU Sheng-hang (Military Representative Office of Chinese Navy Resident at Harbin Turbine Works Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150046), WANG Chong, LUAN Hai-feng, LIU Jiang (No. 703 Research Institute of CSIC, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(3). — 248 ~ 251

To overcome the shortcomings of the original forward-drive oil servomotors, such as slow response speed and easy seizure of the electrohydraulic conversion portion, a comprehensive evaluation method was employed to perform a type selection of electrohydraulic converters, focusing on reliability and maintainability etc. An electrohydraulic control-based improvement scheme was finalized by using a sourceless self-capacitance type electrohydraulic actuator ReXA, which has a large output power and strong anti-seizure capacity. Being fully enclosed and capable of avoiding erosion of equipment internals by salt mist in the engine room, it is suited for use on board vessels. After the improvement, the transition duration of the forward-drive oil servomotor is shortened from the original 40 seconds to 18.2 seconds and even to a minimum of 3.3 seconds depending on specific needs. **Key words:** oil servomotor, electrohydraulic servo, improved design