

一种船用电动舵机的设计与实现

经鹏飞¹, 马志刚², 胡发国¹, 张双喜¹, 董从林³

¹武汉船用机械有限责任公司科创与信息化研究中心, 湖北 武汉

²武汉船用机械有限责任公司技术中心, 湖北 武汉

³武汉理工大学交通与物流工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年5月26日; 录用日期: 2025年6月21日; 发布日期: 2025年7月4日

摘要

针对某些船舶舵机舱空间受限、振动噪声控制严格、自动化程度高的需求, 提出了一种高效精准变频控制电动直驱舵机设计方案, 试验结果表明: 该电动舵机的传动效率得到显著提升, 能耗和振动噪声明显降低, 在船舶长期运营过程中能够高效可靠运行。

关键词

电动舵机, 变频, 节能降噪, 高效

Design and Implementation of a Marine Electric Steering Gear

Pengfei Jing¹, Zhigang Ma², Faguo Hu¹, Shuangxi Zhang¹, Conglin Dong³

¹Science and Technology Innovation and Informatization Research Center, Wuhan Marine Machinery Plant Co., Ltd, Wuhan Hubei

²Technology Center, Wuhan Marine Machinery Plant Co., Ltd, Wuhan Hubei

³School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

Received: May 26th, 2025; accepted: Jun. 21st, 2025; published: Jul. 4th, 2025

Abstract

To address the challenges of limited steering gear compartment space, stringent vibration and noise control, and high automation requirements in certain ships, a design scheme for a high-efficiency, precise variable-frequency control electric direct-drive steering gear is proposed. Experimental results demonstrate that the transmission efficiency of the electric steering gear is significantly improved, while energy consumption, vibration, and noise are notably reduced. The system

can operate efficiently and reliably during long-term ship operations.

Keywords

Electric Steering Gear, Variable Frequency, Energy Saving and Noise Reduction, High Efficiency

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

舵机(操舵装置)是在正常航行情况下为驾驶船舶而使舵产生动作所必须的设备[1]，是保持或改变船舶航向、保证安全航行的重要设备[2]，其操控性和可靠性均要求较高。电动液压舵机尤其是拨叉式电动液压舵机，因其功率增益大、输出力矩大、运转平稳等优点[3]，而在主流营运船舶上广泛应用。然而，液压舵机需要布置大量的液压管路和阀件，在效率、维护性、可控性和集成性等方面存在许多缺陷，影响其功能更好的发挥[4]，尤其是在空间受限、振动噪声控制严格、自动化程度高的中小型客货船舶和无人舰船等领域则存在明显的不足。

降低噪声、提高声隐身性能已然成为当今世界舰船设计中的一场革命[5]。国外海军对此技术高度重视，英国海军研制了用于水面舰船及潜艇舵面控制的电动舵机。通过在 23 型护卫舰上进行试验和测试，证明其具有噪声低、可靠性高、维护简单、耗能少等优点[4]-[6]。电动舵机在复杂性、体积重量和维护性等方面更具优势，是未来集成一体化舵机发展的主流趋势[7]。

基于电动舵机的上述优点，本文提出一种新型船用电动舵机方案，开展了产品的可靠性和高效驱动控制策略设计，并进行了台架试验与实船性能测试，提高了其操纵性能、节能效果和静音水平。

2. 总体方案设计

电动舵机主要由变频驱动控制单元、变频电机、机械减速转舵机构及传感器等构成。来自操舵仪或自动舵的舵角指令，由变频驱动控制单元根据舵角指令信号分析运算，控制变频驱动模块输出相应的电信号驱动变频电机转动，进而通过机械式减速转舵机构带动舵在一定角度范围内往复转动。再经位于变频电机上的转速编码器和位于转舵机构上的舵角传感器的两级闭环反馈，以达到精准调整或保持船舶舵角的目的，如图 1 所示。

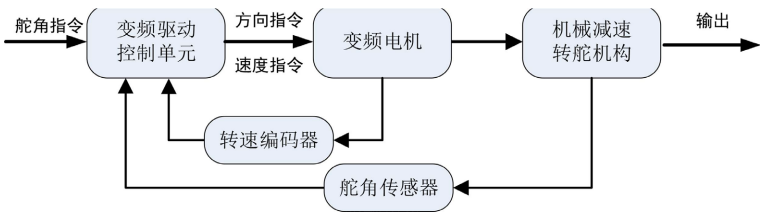


Figure 1. The schematic diagram of electric steering gear
图 1. 电动舵机工作原理

本文以内河某 3300 m³ LPG 运输船配套的电动舵机为例开展设计，该电动舵机的具体组成如图 2 所示，主要由变频驱动控制单元(3 套)、变频电机(3 台，含制动器)、转舵机构(3 台行星减速机 and 1 台平行

轴减速机)和舵柄连杆机构(1 个中舵柄、2 个边舵柄和 2 根连杆)等组成。

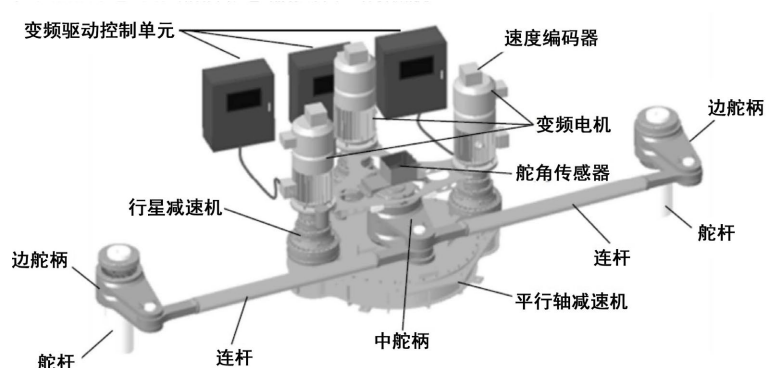


Figure 2. The system diagram of the electric steering gear
图 2. 电动舵机系统图

电动舵机的变频驱动控制单元之间通过 Profinet 工业以太网组成环网，实现各单元模块间的数据交互和控制系统的冗余。变频驱动控制单元与电机逐一串联控制，并通过速度编码器，实现电机转向和转速的闭环控制。每台电机可单独运行，也可通过变频驱动控制单元间的主从跟随控制策略，实现 2 台及以上的电机同步运行，从而保证了驱动动力单元的灵活度。平行轴减速机的输出轴与舵柄连杆机构的中舵柄机械连接，实现了一台电动舵机拖动两套舵杆转动的同时，释放了来自舵的冲击与挠度变形，有效保证了载荷传递的平稳性。

该电动舵机的额定输出扭矩为 160 kN·m，其核心部套主要技术参数如表 1 所示。

Table 1. Main parameters of electric steering gear
表 1. 电动舵机主要参数

零部件名称	主要参数	数值
变频驱动器	功率/kW	15
	变频电机	
变频电机	额定功率/kW	11
	同步转速/rpm	1000
行星减速机	减速比	1:140
平行轴减速机	减速比	1:5.1

3. 关键部件设计

3.1. 高可靠性转舵机构设计

电动舵机的转舵机构采用多套行星减速机和一套平行轴减速机集成的设计方案。行星减速机的数量与变频电机的数量一致且一一对应，变频电机的输出扭矩通过花键传递给行星减速机，多台行星减速机共同驱动平行轴减速机的大齿圈在一定角度范围内进行往复摆动。基于简化的结构和平顺的载荷传递，此设计方案能够有效降低系统的振动噪声，减少故障环节，并降低维护工作量。其结构如下图 3 所示。

1) 行星减速机的冗余设计

所用行星减速机与市面上通用的行星减速机结构相似，区别在于本方案中所设计的行星减速机，增设了自动隔离装置。其设计方案：在行星减速机低速级的外齿圈的外侧增设一滑动轴承副，同时并行配

置一套电动止动装置，该电动止动装置可约束外齿圈的旋转自由度。

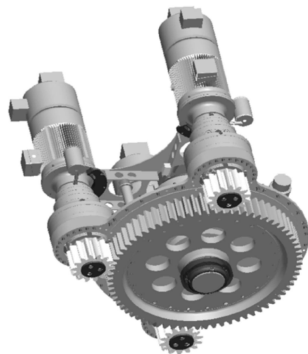


Figure 3. The schematic diagram of the actuator
图 3. 转舵机构结构示意图

工作原理：当转舵机构正常工作时，该电动止动装置处于锁止状态，其所约束的外齿圈与行星减速机壳体处于相对固定状态，该级行星减速机在太阳轮的驱动下，行星轮带动行星架及输出轴正常转动，实现行星减速机的减速传动。当某一行星减速机的高速端、变频电机、制动器，亦或控制路径上的某一电气元器件出现故障，导致该行星减速机卡死而不能转动时，通过相应的自动隔离装置动作释放外齿圈的旋转自由度，使得行星减速机的输出轴也可被动跟随转动，从而实现了该通道的自动旁通隔离，电动舵机可以在其它动力装置的驱动下进行操舵，保证了电动舵机在单一故障时的可操纵性和船舶的航行安全。

2) 平行轴减速机的鲁棒性设计

平行轴减速机作为电动舵机输出载荷的汇集点和衔接点，保证其在长期交变载荷和冲击载荷作用下的可靠性与稳定性尤为重要。为此，选用传动平稳的硬齿面渐开线圆柱齿轮副，并按照机械设计手册[8]对齿轮强度评定要求，分动载荷工况和静强度载荷两种工况，进行大小齿轮的齿面接触强度校核和齿根弯曲强度校核，通过优化迭代，确定其主要技术参数如表 2 所示。

Table 2. Main parameters of the involute cylindrical gears
表 2. 渐开线圆柱齿轮副技术参数表

参数名称	数值
材质	42 CrMo (锻件)
表面硬度/HRC	55~60 (渗碳淬火)
模数 m	16
小齿轮齿数 z1	14
大齿轮齿数 z2	72
压力角 α	20°
螺旋角 β	0°
小齿轮变位系数 x1	+0.4
大齿轮变位系数 x2	-0.4
齿顶高系数 haxing	1
齿顶系数 cxing	0.25

续表

小齿轮分度圆直径 d_1/mm	224
大齿轮分度圆直径 d_2/mm	1152
中心距 a/mm	688
小齿轮齿厚 b_1/mm	160
大齿轮齿厚 b_2/mm	155
齿轮精度等级	6 级

为了进一步验证所设计渐开线圆柱齿轮副的可靠性，兼顾质量最优，采用有限元的方法对其进行极限负载下的静力学仿真分析，得到的齿轮副等效力云图如图 4 所示。仿真结果显示，齿轮副的最大表面接触应力出现在大齿轮齿面的端部，768.91 MPa，小于材料的许用接触应力；最大齿根弯曲应力出现在大齿轮齿根，183.4 MPa，小于材料的许用弯曲应力；故整体强度满足设计要求。

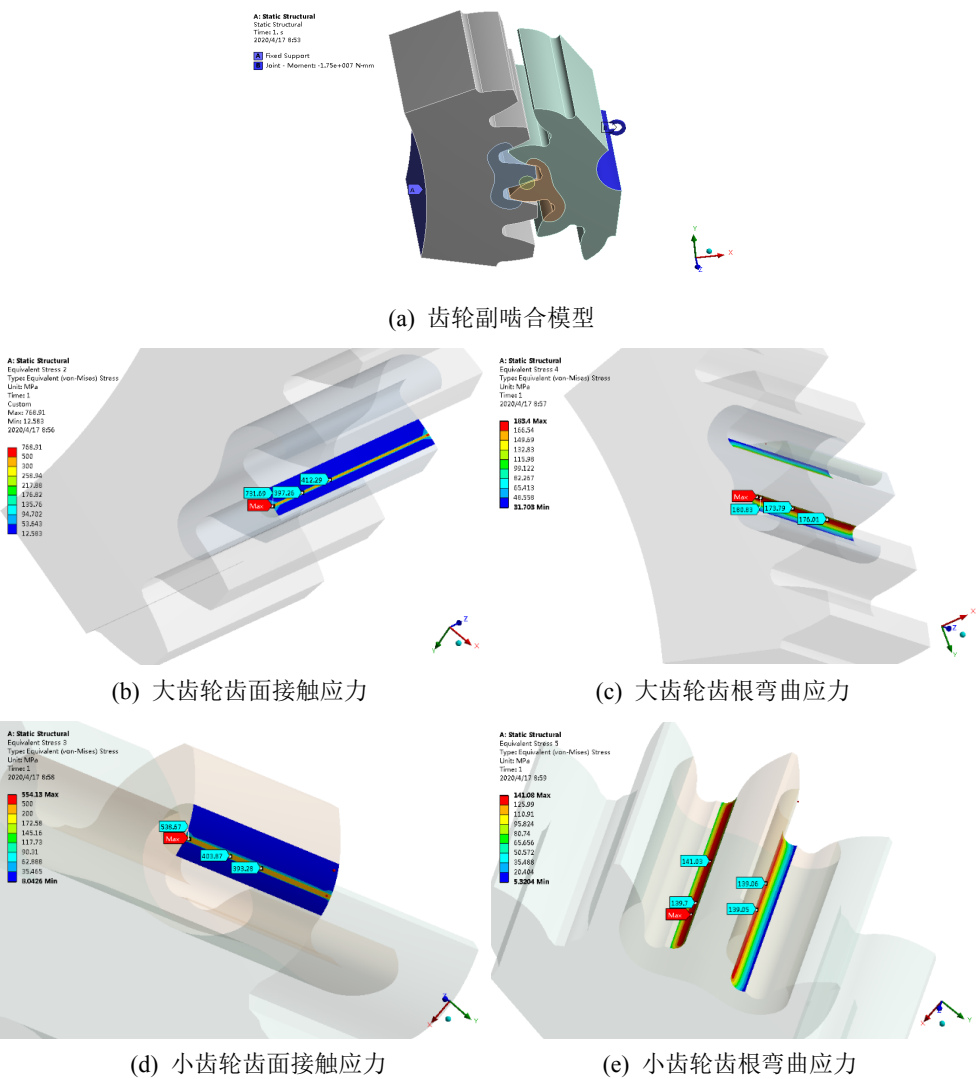


Figure 4. The simulation analysis of the involute cylindrical gears
图 4. 渐开线圆柱齿轮副仿真分析

3.2. 高效驱动控制设计

1) 驱动系统架构

电动舵机采用“1拖1”驱动方式，每台电机都由一台变频器驱动。三台变频器共直流母线，直流母线上通过双向DCDC变换器连接超级电容，同时直流母线上挂接直流应急电源，在交流电源失效时，通过直流应急电源为变频器直流母线供电，实现应急操舵。

2) 多机组协同控制策略

为了保证各动力机组驱动的一致性，动力机组间采用主从协同控制[9]。为了保证非定常载荷下的转舵速度的可控，主机需采用速度控制，但是由于机械减速转舵机构齿隙的存在，从机不能选用常规的速度跟随控制或转矩跟随控制策略。当选择速度控制时，由于整个齿轮传动链上的柔性较差，会导致各个电机单元的载荷不均匀；而当从机选择转矩控制时，又会导致各个动力机组速度的不同步而发生抖动。

为了更好地实现速度和载荷的同步，采用优化速度主从控制，主机选用速度控制，从机选择速度给定修正的速度控制，通过上位机监测的从机输出转矩实时修正从机的速度给定值，从而达到了主从机组间的速度同步和载荷均衡。其控制流程如图5所示：

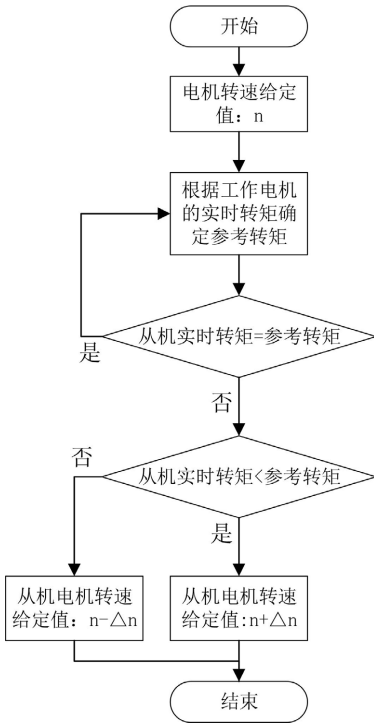


Figure 5. The multi-unit cooperative control diagram

图 5. 多机组协同控制流程图

3) 能量回收管理策略

在舵叶由大舵角向正舵偏转的过程中，水流主动推动舵叶转动，此时动力机组工作在制动模式，通过连接在直流母线上的双向DC/DC转换器，连接超级电容，利用直流母线的泵升电压升高打开转换器向超级电容充电，回收再生能量，从而保证了直流母线电压的平稳。舵机正常工作时转舵电机工作电动工况，超级电容向母线放电。从而实现了电能的回收利用，降低了对船舶电网的冲击。其控制原理如图6所示：

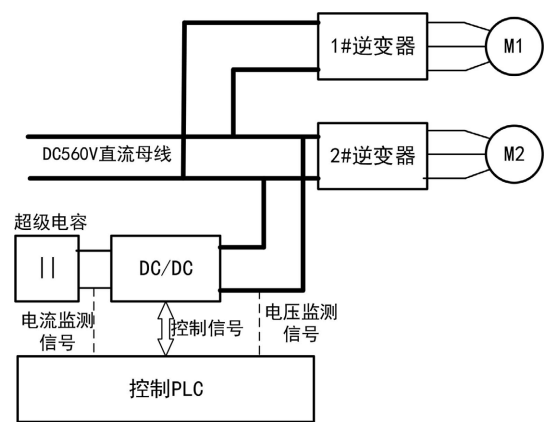


Figure 6. The schematic diagram of regenerative energy recovery
图 6. 再生能量回收控制原理图

双向 DC/DC 变换器，工作模式分为：充电模式、放电模式和待机模式。具体工作模式如下：

- 1) 充电模式：当舵叶被水流推动转舵时，电动机工作在制动发电工况，制动能量进行回收，直流母线电压 V_{dc} 升高，当高于设定高压 V_{dcmax} (580 V)，DC/DC 导通对超级电容进行充电；
- 2) 放电模式：当主动转舵时，电机工作在电动机工况，消耗能量直流母线电压下降，当低于下限电压 V_{dcmin} (560 V) 时，DC/DC 导通超级电容对直流母线放电保持直流母线电压稳定，并补充电网的电能消耗；
- 3) 待机模式：母线电压 V_{dc} 介于 V_{dcmax} 和 V_{dcmin} 之间时不动作，超级电容既不充电也不放电。

4. 试验验证

4.1. 台架试验

台架试验主要用来测试电动舵机在不同负载下的性能特性，采用由电动舵机与拨叉式舵机对扭的试验方案，拨叉式舵机作为模拟负载，通过调整液压油源的压力实现负载扭矩大小的调节。

试验时，在连杆组件的中间部位按照一定的方位张贴应变片，组成半桥，并连接信号电缆至应变应力测试仪，检测到的电信号实时传输到计算机处理，即可得到连杆的拉压应力曲线，如图 7 所示。



Figure 7. Loading simulation test of the electric steering gear
图 7. 电动舵机加载模式试验

通过电动舵机的实际输出扭矩与所测得的连杆拉压应力之间的关系式(1)，得到电动舵机输出扭矩如表 3 所示。试验过程中，通过多组次测量，得到当驱动控制单元控制变频电机输出 50%至 100%之间的扭矩时，电动舵机的平均输出扭矩对应在 63.1 kN·m 至 168.1 kN·m，达到了电动舵机的额定输出扭矩，且在整个试验过程设备运行平稳、无冲击。

$$T = \sigma \pi \frac{D^2 - d^2}{4} R \frac{\cos(\theta)}{10^6} \tag{1}$$

式中， T 为电动舵机输出扭矩，kN·m； σ 为连杆的拉压应力值，MPa； D 为连杆外径，133 mm； d 为连杆内径，101 mm； R 为舵柄臂半径，550 mm； θ 为试验时最大扭矩出现时的舵角，取 28°。

Table 3. Output torque of the electric steering gear
表 3. 电动舵机输出扭矩表

电机输出扭矩/%	实测连杆最大应力		电动舵机输出扭矩/kN·m
	拉应力/MPa	压应力/MPa	
50	23.822	20.376	63.1
75	48.351	39.380	125.3
90	50.014	47.878	139.8
100	63.387	54.346	168.1

4.2. 实船试验

1) 能耗对比测试

电动舵机的能耗对比测试方法如下：

① 挑选一艘船型相似、载重吨位相当且同为双舵配置的原油运输船(X3001)，其操舵装置的配置为一拖二的拨叉式电动液压舵机。船员为同一营运公司，且均为操船 10 年以上的老船员。

② 能耗计量区间：南京 - 武汉航段，且规定从南京到武汉的上水航段为满载，从武汉至南京的下水航段为空载。

③ 每一测量航次，时间偏差 ≤ 3 天，且航速偏差控制在 1 km/h 以内，保证对比试验船航行时的水文条件基本相同。

实船测得电动舵机在上水航段的节能比例为 62.9%，下水航段的节能比例为 35%。综合考虑外部环境因素和船型因素导致的测量误差，相较拨叉式电动液压舵机，电动舵机的平均节能比例在 30%~60%之间。取得该节能效果的因素主要体现如下三个方面：一、在非操舵时段，电动舵机的变频电机处于停止状态，耗电量基本为零；二、电动舵机省去了液压能二次转换的中间环节，提高了系统工作效率；三、能量回收系统向超级电容反向充电的设计，进一步降低了电动舵机向船端电网的能量消耗。

2) 振动噪声测试

电动舵机的振动噪声测试方法[10]如下：

① 在船舶正常航行，且主机功率达到满负荷的 85%以上，电动舵机正常操舵。

② 测量点距舵机舱甲板高度在 1.2 m 和 1.6 m 之间，且距离电动舵机 1 m 左右。

根据 AWA5688 型多功能声级计实船测得数据，新型电动舵机空气噪声结果 ≤ 72 dB(A)，在相同工况下，优于常规电动液压舵机 10~20 dB(A)。影响振动噪声水平的因素主要体现如下两个方面：一、电动舵机省去了液压泵、液压阀件等元器件，从源头上减少了主要噪声源；二、在非操舵时段，电动舵机的

变频电机处于停止状态，系统噪声趋近于零。

5. 结论

本文提出了一种高效精准变频控制电动直驱舵机设计方案，重点研究了齿轮减速传动转舵机构的可靠性设计和多机组协同变频驱动控制策略，试验结果表明，该型电动舵机性能符合内河船舶操纵要求，且相对于同型号常规舵机，平均节能比例在 30%~60%之间，空气噪声 $\leq 72 \text{ dB(A)}$ 。此外，本文设计的电动舵机有效解决了内河船的空间紧凑、绿色节能、高度自动化等方面的需求，为节能降噪、高可靠性的内河船舵机设计提供了新的方向。

基金项目

《绿色智能内河船舶创新专项》([2019]358 号)。

参考文献

- [1] 中国船级社. 钢质海船入级规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2024.
- [2] 苏文海. 直驱式电液伺服转叶舵机关键技术及其控制系统研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [3] 李娟. 浅谈电动液压舵机的常见故障及排除[J]. 科技信息(科学教研), 2008(23): 744+749.
- [4] 谢俊超, 肖青, 花靖. 船用新型电动舵机可行性研究[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(10): 78-81.
- [5] 张阳阳, 邢继峰, 彭立坤, 等. 电动舵机用电动缸滚珠丝杠振动特性[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(12): 29-31, 41.
- [6] 陈俊杰, 马德森, 汪远银, 等. 舰船用新型高效底噪电动舵机技术研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(7): 133-137.
- [7] 曹洪涛, 陈峰, 陈佳. 集成一体化舵机技术研究综述[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(7): 1-7.
- [8] 成大先. 机械设计手册[M]. 第 6 版. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [9] 杭阿芳, 王秀梅. 基于模糊 PID 的多电机并联运行主从控制仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(6): 316-320.
- [10] 马建忠, 朱显明, 蒋宜, 吕宗强, 胥绪湘, 秦洪发. 舰船设备噪声、振动测量方法(GJB4058-2000) [S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2000.