

交通部西部交通建设科技项目

合同号：2006 328 810 121

密 级：

交通编号：

单位编号：42500621-3

分 类 号：U664.14

内河小型船舶电力推进系统研制

研究报告简本



上海海事大学

云南省航务管理局

2010 年 1 月

1. 项目简介

在我国云南等西部地区，高原湖泊星罗棋布，特大及大中型水库众多，水上交通资源丰富。随着社会经济的发展，西部航运交通运输日益繁荣，各类航运船舶逐年增多，发展航运已成为当地经济增长的重要途径之一。但是，经济发展也使得西部高原湖库区污染加剧、水质下降，水域环境保护问题日益突出，大量以柴油机为动力装置的航运船舶对水域环境的污染不可忽视。因此，开发出满足我国西部高原湖库区水域环保要求的新型绿色船舶，是发展西部航运经济、减少机动船舶对水域环境污染的环保需求。

以电动机为推进动力装置的电力推进船舶，由于发电机组运行工况平稳，与柴油机推进船舶相比，不会出现推进主柴油机燃烧不充分冒黑烟现象，废气排放值低，舱底水生成量少，是目前获得航运界认可的可以替代柴油机推进的新型绿色船舶。但是，由推进系统、电站系统、以及相应的控制系统组成的内河船舶电力推进系统，结构复杂、技术要求高，我国目前还没有内河船舶电力推进系统成套产品。因此，研究和解决电力推进系统的关键技术问题、开发适用于西部高原湖库区的船舶电力推进系统应用技术，是发展新型电力推进船舶的技术需求。

“内河小型船舶电力推进系统研制”是上海海事大学承担的西部交通建设科技项目，合作研究单位是云南省航务管理局，依托工程是云南滇池绿色船舶建造工程和“新昆明港”建设项目。项目的实现目标是：建造国内第一艘高原湖库区滇池电力推进客渡船，实现环保型电力推进船舶在云南昆明示范应用的目的。

2. 主要研究工作

2.1 电力推进系统结构优化与参数匹配技术研究

根据内河小型船舶电力推进系统结构组成（图 2-1）。提出了满足国家标准和 CCS 规范要求的，基于船型及其船体参数为约束条件的内河小型电力推进船舶艉轴推进结构优化的技术方法和过程。综合优化推进电机、变频器和谐波滤波器的组成结构，使推进电机在低速下的输出转矩波动减少，低速性能提高，抗过载能力增强，调速范围宽。

分析了电力推进机桨工况配合的工作特性和运行范围；建立了电力推进机桨运动方程，定义了不同工况下的运行参数，以此作为电力推进系统机桨匹配运动控制的依据。考虑不同航行工况，进行推进电动机与螺旋桨的功率匹配、航行工况匹配、不同航行工况下的运行参数匹配、以及变频调速匹配。提出了基于电站发电机组单机容量满足经济航速负荷要求约束条件的电力推进船舶电站容量优化

的技术方法，实现无应急机组的双发电机组电站配置。

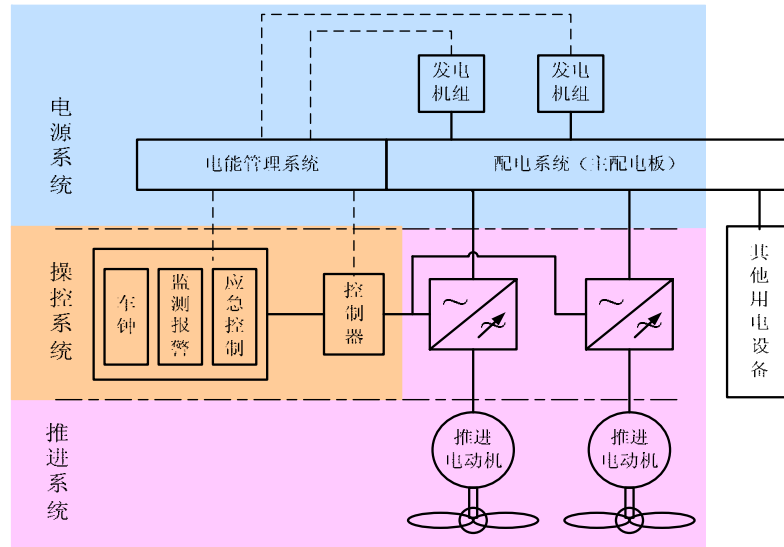


图 2-1 内河船舶电力推进系统结构组成

2.2 电力推进船舶电站动态管理技术研究

针对内河小型电力推进船舶电站的电能综合管理，建立了发电机组启动与停车、合闸与分断的逻辑控制模型；根据柴油发电机组运行特性，建立了发电机组多变量动态控制模型。在这种混合多变量动态控制模型基础上，提出了频率和有功功率、电压和无功功率进行调节的基本方法与控制算法。对于电能优化分配，根据航行工况，可选择恒平均功率增/减机管理原则或恒储备功率增/减机管理原则的发电机组自动增减机的具体过程和策略。

实时监视推进电动机运行状态和推进负荷，根据推进负荷需要，自动转移其它电力负荷，实现电能统一调配。单机组或双机组运行时的负荷率均可保持在 80% 以上。

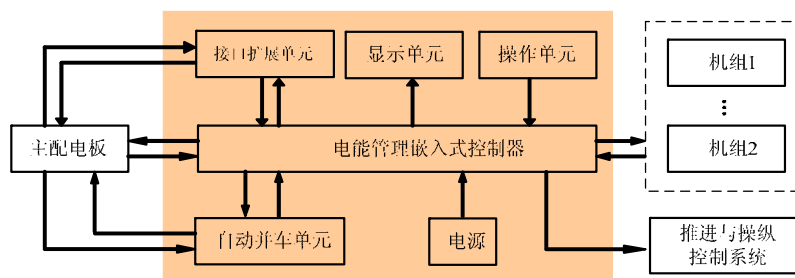


图 2-2 嵌入式电能管理系统组成框图

研发了基于嵌入式技术的电力推进电站的电能管理系统（图 2-2），实现了机组合闸并车控制、频率与有功功率分配控制、电压与无功功率分配控制、负荷转移控制等电能管理系统监控软件主要功能模块的程序流程。依据国标和中国船级

社规范要求进行了完整的系统试验和测试，发电机组瞬态电压率为 $-15\%\sim+12\%$ ，恢复时小于 1.2s ，瞬态调速率为 $-6\%\sim+8\%$ ，恢复时间小于 2.5s ，均优于国标和CCS规范的规定。

2.3 电力推进船舶智能化操纵控制技术研究

根据分离型船舶运动建模方法，建立了电力推进船舶水面运动方程；导出了以艏向推进力为输入、艏向航速为输出的船舶电力推进运动响应方程，推论出四种典型工况下的电力推进船舶运动工况。

根据所建立的电力推进船舶运动方程，提出了以给定速率程序及其最大负荷限制为安全条件的转速控制模式，以给定负荷程序及其最大转速限制为安全条件的负荷控制模式的内河小型船舶电力推进控制结构。在不同运行工况下，根据状态逻辑模型实现电力推进控制状态自动转换的控制算法，解决了不同操纵模式下的控制方法和自动转换。详细论述了不同操纵控制模式下的控制方法和要求。在转速控制模式下，车钟从 10% 加速至 100% 时，推进电动机转速在正/倒车转速范围内连续可调，实现良好的平滑连续无级调速性能。

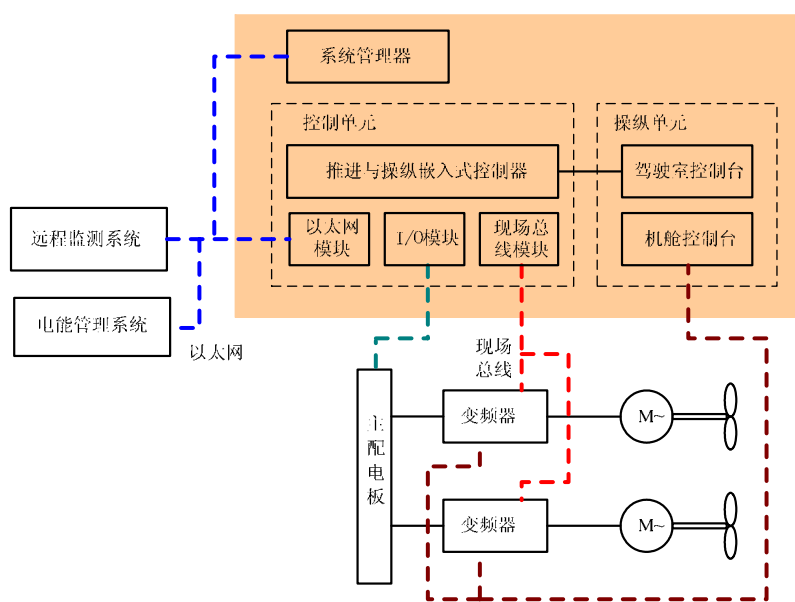


图 2-6 嵌入式电力推进操纵控制系统组成

研发了电力推进系统驾机一体化嵌入式控制系统（图 2-6），采用传输速率 $>128\text{kb/s}$ 的现场总线实现对推进变频器的驾驶室遥控，对推进电动机进行起动、制动、调速、完车、安全限制，故障报警和越控等功能；通过以太网实现对控制系统的参数设置和修改，并且可实时监测电力推进控制系统的运行状态。

2.4 电力推进系统变频装置动态稳定性技术研究

建立了电力推进变频调速运动模型，分析了船舶自由航行工况、系缆工况和反转工况这三种典型工况对电力推进电动机调速运行的影响。根据推进电动机变频调速原理，建立了转速控制与变频器输出频率之间的函数关系，保证了在车钟转速突加、突减、或转速换向工况下，实现不依赖于车钟快慢的线性加/减速过程，加/减速速率 $8.0\sim 120.0\text{rpm/s}$ 可调节；确定合理的指令转速步长跟随推进电动机的实际响应，获得平稳加/减速力矩，提高了线性加减速稳定控制质量。

建立了内河小型船舶电力推进系统谐波模型，提出了基于遗传算法的无源滤波装置的优化设计方法，研制了无源电力滤波器（图 2-8），能够有效抑制电力推进船舶电力系统的 5 次、7 次和 11 次及其以上的谐波影响，同时满足无功补偿和进入变频器的基波电压不低于 380V 的要求。经实船测试，在接入滤波器后，在满载时的电流畸变率为 7%，电压畸变率为 3.5%，均优于国标和 CCS 规范的规定。

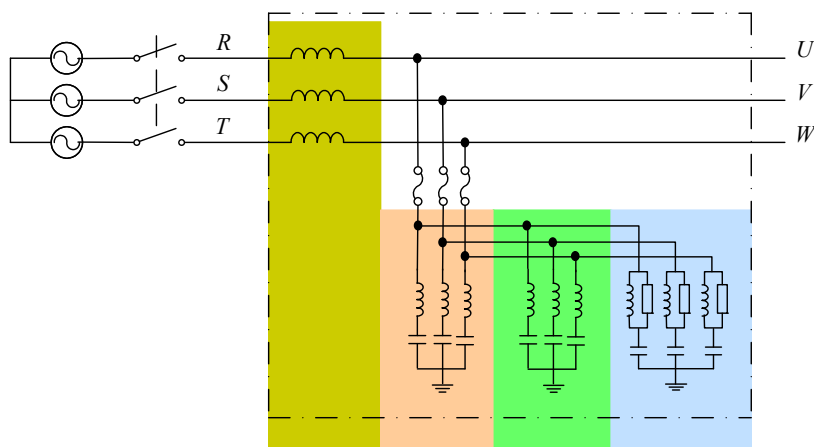


图 2-8 无源滤波装置的拓扑结构图

2.5 电力推进船舶节能与环保技术研究

以内河双体双桨船舶为原型船，提出了以机桨匹配原理为基本原则的高原湖库区电力推进船舶动力装置容量优化配置的计算步骤和计算公式。对于内河双机双桨小型电力推进船舶，柴油机装机动力总容量可比同类船型的柴油机推进船舶的装机总容量下降 $2.4\%\sim 24\%$ 以上，在经济航速下，电力推进系统总需用功率比柴油机推进系统下降 10%，相应百公里燃油消耗节省了 10% 左右。

建立了以电站剩余容量为控制原则的电力推进船舶电能统一调配的的高效节能和低排放控制方法，使之长期保持船舶电站发电机组运行在较高负荷率上。在经济航速工况下，仅 1 台柴油发电机组即可满足推进功率需求，实船试验与计算表明，在经济航速下，电力推进系统整体效率比柴油机推进系统提高约 $4.7\%\sim 5.8\%$ 。

根据高原湖库区的环境特点，通过电子控制技术实现船舶柴油机排放限制，对应用于云南滇池电力推进客渡船的船用发电机组柴油机进行 D2 循环试验。试验

结果表明，发电机组柴油机 NO_x 排放值为 9.58 kg/kWh，优于 IMO 规定的船舶柴油机排放标准。电力推进客渡船机舱的舱底水生成比同类船型柴油机推进船舶减少了 30%以上，机舱无泄漏。电力推进客渡船在正/倒车全速航行时的客舱噪声平均值小于 65 db。

3. 创新点

(1) 研制了国内第一艘满足我国高原湖库区节能减排要求的电力推进客渡船——云南滇池环保型电力推进客渡船。

(2) 解决了内河小型船舶电力推进效率优化、电力推进稳定性、推进操纵控制、电动态管理、谐波抑制等内河船舶电力推进系统的技术难点，研发了内河船舶电力推进系统推进操纵控制技术、电力推进系统电站能量管理技术、电力推进系统谐波检测与补偿技术、电力推进系统节能环保技术等一系列新技术。

(3) 研制了基于实时操作系统的嵌入式电子监控装置——驾机一体化电力推进操纵控制系统和电力推进电站的电能管理系统。

4. 研究成果与应用

4.1 云南滇池电力推进客渡船

本项目的示范船——国内第一艘适应于高原湖库区水域环境的云南滇池电力推进客渡船（图 4-1）。2008 年 11 月在昆明开工，2009 年 12 月底出厂投入使用。示范船为双体船形，总长 36.00m，型宽 8.40m，型深 1.90m，吃水 1.10m，排水量 120t，客位 216 人，航速 10kn。



图 4-1 滇池电力推进客渡船

对云南滇池电力推进客渡船的环保指标，节能指标，以及电力推进电站系统、

推进系统和操控系统的性能指标进行了陆上联调试验和实船试验（图 4-2）。试验结果表明，客渡船的电力推进系统各项技术指标达到了项目研究的预期要求。



图 4-2 滇池电力推进客渡船实船试验

电力推进客渡船与同类柴油机常规推进船舶相比，在经济航速下全船柴油机总需用功率下降 10%，相应节省燃料 10%。电力推进系统年维护费用约降低 30% 左右，节省年维修保养工时 200 小时左右。因此，虽然建造电力推进内河船舶与同类柴油机推进船舶相比，初次建造费用约高出 20% 左右。但营运期每年节省燃油费用 10%，降低维修费用 30%，因此 8~9 年可收回多投入的造船费用。电力推进船舶的使用年限可达 15~20 年，其综合经济效益优于柴油机推进船舶。

电力推进客渡船废气排放限制值满足国际海事组织的规定。与相同推进功率的柴油机船舶相比，不会出现类似推进主柴油机燃烧不充分冒黑烟现象；机舱的舱底水生成量减少，机舱满足无泄漏要求。满足滇池航运环境保护的迫切需求，能够有效遏制滇池旅游航运船舶对空气及水体的污染，改善水域生态环境。

通过电力推进系统关键技术的研究与试验，将电力推进系统集成创新和电子监控装置创新相结合，实现了内河船舶动力装置技术性能和环保节能性能的提升，增强我国在内河小型电力推进船舶建造领域的核心竞争力。

4.2 内河小型船舶电力推进系统

研制完成了内河小型船舶电力推进系统。应用于示范船的电力推进系统配套主要设备是：具有电能动态管理功能的自动化电站，具有谐波滤波器的主配电板、推进电动机、变频器等。电站系统配置 2 套船用发电机组，柴油机额定功率 $2 \times 155\text{kW}$ ；发电机额定功率 $2 \times 120\text{kW}$ ，400V/50Hz 电制。主配电板由发电机控制屏和负载屏组成。推进系统配置 2 台三相交流异步推进电动机，额定功率 $2 \times 90\text{kW}$ ，配四叶定螺距双桨。推进变频器带现场总线接口，输出功率 $2 \times 110\text{kW}$ 。

4.3 电力推进操纵控制系统

研制了嵌入式电力推进操纵控制系统（图 4-3），通过现场总线实现驾驶台遥控，对推进电机进行起动、制动、调速、安全限制，故障报警和越控等功能；通过以太网实现参数设置和修改。主要功能和性能指标为：具备机控室/驾驶台切换操纵控制方式；车钟操纵，左右舷双舵桨驾机一体化控制，车钟从 10%加速至 100%时，推进电动机加速速率控制为 8.0~120.0r/s 可调；负荷限制与转速限制；电站容量不够时，自动限制推进功率；推进电动机及其舵桨回转过载报警。

4.4 电力推进电站的电能管理系统

研制了嵌入式电能管理系统（图 4-4），对电力推进电站的运行情况进行集中控制和动态管理。根据电网总负载决定发电机组的运行台数，合理控制各机组之的负载分配，实时监测电站负荷和运行参数。主要功能和性能指标为：当电网失电时系统立即起动处于备车状态的发电机组，并自动投入电网运行；自动进行调频调载，有功功率的分配差度 $\leq 10\% P_N$ ，频率调节精度 $50 \pm 0.5\text{Hz}$ ；当有机组在网、同时起动备用机组并网时，自动并车时间 $\leq 90\text{s}$ ，并车合闸角 $\leq 10^\circ$ ；当电网的剩余功率过小时自动增机，反之自动减机；接收到重载请求信号时，系统将起动备用机组并自动并联运行和调频调载，机组稳定后输出重载允许信号。



图 4-3 电力推进操纵控制系统



图-4-4 电能管理系统

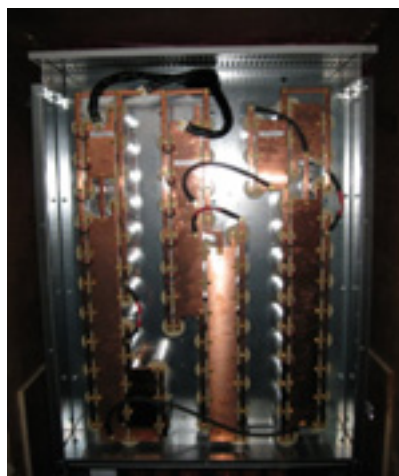


图 4-5 无源滤波装置

4.5 电力推进系统滤波装置

研制了电力推进系统无源滤波装置(图 4-5),额定电压 380V,额定频率 50Hz,5 次、7 次、11 次滤波支路。无源电力滤波器进行了工程试验,满足船级社电压畸变率低于 5%的要求。

4.6 专利、软件著作权和发表论文

在项目间就过程中,申请专利 8 件,其中发明专利 6 件,已获授权实用新型专利 1 件和外观设计专利 1 件;软件著作权 2 件;发表学术论文 18 篇。