

直流组网混合动力技术在车客渡船上的应用

孙向勇¹，王晓雷²，王春杰²

(1. 江苏省镇扬汽渡有限公司，2. 中国船舶重工集团公司第七一一研究所)

摘要：车客渡船航行距离和航行时间短，动力负荷切换频繁，传统柴油机推进油耗高、排放和噪声大。本文提出一种基于变速发电机组和超级电容储能装置的直流组网混合动力系统，以降低整船综合油耗作为目标，将变速发电技术和超级电容控制技术应用于动力系统。系统成功应用于江苏镇扬汽渡有限公司“江苏路渡”系列渡轮 4 艘，实船运行数据显示本方案不仅能实现较好的节油效果，降低排放和运营成本，更在操控性、舒适性上优于传统柴油机推进型式。

关键词：直流组网，变速发电机组，超级电容

1 引言

主流船舶推进技术绝大多数以直接推进的柴油机或驱动发电机组的柴油机作为主动力来源。船舶所在水域流体环境和船舶自身工况的变化使得柴油机负荷频繁变化，柴油机无法在最佳油耗区间持续工作。在柴油机直接驱动定距桨应用中，机桨匹配一般设定在某一服务航速，定距桨特性使得在其他航速时柴油机工作点偏离最佳运行区域。此时，柴油机燃烧不充分，燃油利用率大幅下降，排放变差，产生大量氮氧化物，长时间运行会导致柴油机积碳，缩短柴油机寿命和大修期。传统交流电力推进系统中一

般设有多台发电机组，可根据实际工况调整在网发电机组数量，这种配置可以增强多工况船舶中柴油机在燃油经济区间运行的适应性。但也还存在两方面的问题：（1）每台发电机组只有一个最佳工作区间，多台发电机组的最佳工作区间就是几个单台的组合，如果工况超出组合范围，将出现无法覆盖的情况；（2）机组的启动和并网都需要时间，对于工况频繁剧烈变化的船舶，这种配置适应性差。

在全球变暖和碳排放控制的大背景下，电力电子技术和储能技术的快速发展使得船舶推进领域的技术革新有了新的可能性。纯电动推进船舶以其在排放、操纵性和舒适性方面具有的优势而倍受关注，有潜力成为未来船舶推进系统的主流发展趋势之一。但由于电池技术在续航里程、能量密度、充电速度、循环寿命、安全性、造价方面存在的短板制约纯电船舶目前只适用于极小部分航线和船型，还是存在比较大的局限性。

为克服柴油机推进、传统柴电推进和纯电动推进在技术方面存在的问题和制约，并利用其各自优点，本文提出一种基于变速发电机组和超级电容储能装置的直流组网混合动力系统。分析变速发电技术、超级电容控制技术原理及其在直流组网混动系统中的设计，并结合“江苏路渡”系列渡轮实船应用来验证。

2 法规要求和环保理念

随着船级社和海事部门对船舶安全性要求的提高，《钢质内河船舶建造规范》和《内河船舶法定检验技术规则》对船舶机舱出入口布置及破损稳性计算作了新的规定。采用柴油机直接推进的动力型式无法满足新规要求，新建渡船需调整舱室布置。在与相关法规和设计单位咨询后，提出了

将渡船动力推进方式由柴油机直接推进调整为电力推进的方案，这样可将渡船机舱主要设备集中布置在中舱，从而保证主甲板上布置形式与已建渡船保持一致，以满足渡运装载的实际需求。

镇扬汽渡地处镇扬两市人口密集区和水源保护地，是长江沿线车流量和客流量较大的公路汽车渡口。环保的要求、对社会的责任迫切需要镇扬汽渡在渡船动力型式上采用更加环保节能的技术，直流组网混合动力技术正是在这种背景下应用到“江苏路渡”系列渡船上。本应用既顺应交通部打造绿色交通的要求，也是对“共抓长江大保护”政策的积极响应。

3 直流组网混合动力技术

3.1 变速发电技术

变速发电技术是相对于传统恒频、恒压发电技术而言，机组的频率和/或电压跟着负载的变化而变化。变速发电技术一般与整流器配合起来适用，适用的发电机类型有同步发电机、永磁同步发电机和异步感应发电机，不同类型的整流装置和滤波器配合不同类型的发电机使用。配合同步发电机使用的整流器有两种类型，一种为不可控二极管整流，还有一种为全控整流；为获得恒定的直流侧电压，采用二极管整流的发电机在低转速时需通过增大励磁的方式来获得恒定输出端电压，对励磁电路和AVR要求高，发电机需定制；采用全控整流的同步发电机不需要特殊选型。配合永磁同步发电机和异步感应发电机使用的一般为全控整流；永磁同步发电机配置绝对编码器，异步感应发电机配置增量编码器；永磁同步发电机效率高，异步感应发电机简单可靠，两种型式应用越来越多。

柴油发电机组的燃油消耗率与柴油机运行的转速、功率有直接关系。

图1为某型柴油机万有特性曲线图。如图所示，图形上部外侧曲线为柴油机外特性曲线，黑色虚线为等功率曲线，黑色环状曲线为等油耗曲线。对于图中任一功率都能找到对应的最低油耗点，即等油耗曲线与等功率曲线切点，如图中A点（1080rpm，100kW）为100kW所对应的最佳油耗点，此时对应柴油机油耗率为203g/kWh，转速为1080rpm。同样，可以找到160kW和193kW对应的最佳油耗点B点（1230rpm，160kW）和C点（1315rpm，193kW）。以此类推，把各功率对应的最佳油耗点连成线，就可以得到柴油机的最佳油耗曲线。设计变速发电机组控制策略，把机组的最佳油耗曲线输入能量管理系统（PMS），PMS根据负荷实时调节机组转速，使机组沿着最佳油耗曲线运行，获得最佳燃油经济性。

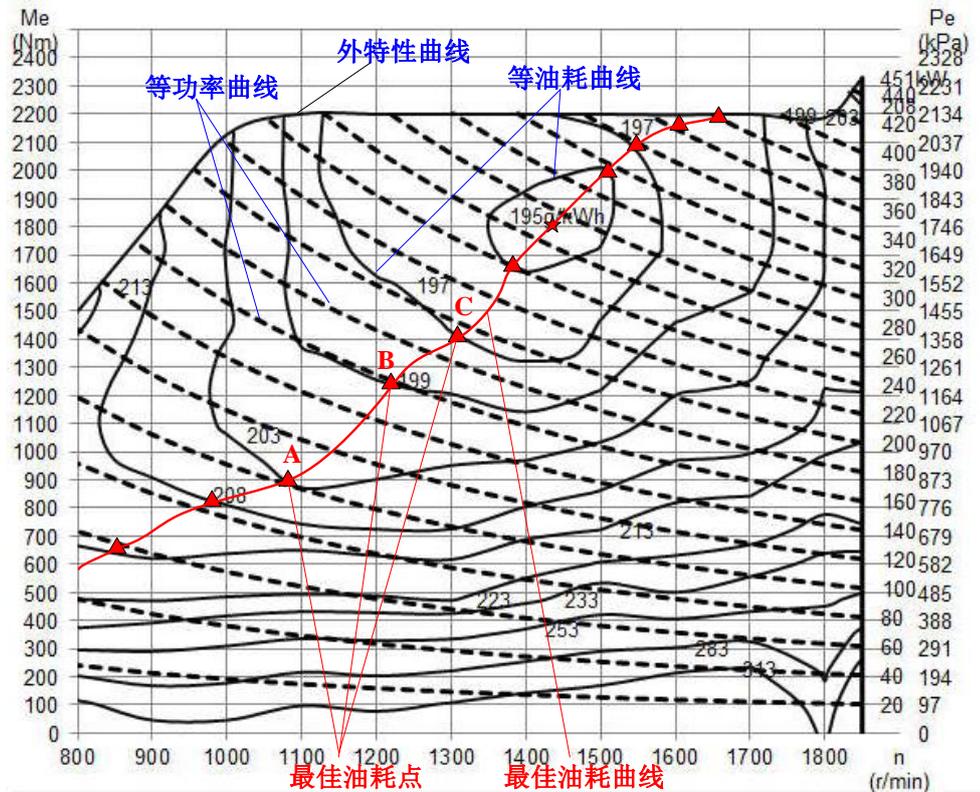


图1 某型柴油机最佳油耗曲线图

3.2 超级电容控制技术

变速发电机技术能给直流电推系统带来不错的节能效果，但机组的转速调节相对于负荷动态变化而言存在一定的滞后性。负荷的变化具有快速波动和不可预测的特点，转速调节滞后时间就是机组在最佳燃油消耗曲线外的工作时间，节能效果无法达到理论上最优。能量型超级电容作为一种储能气件，具有能量密度高、充放电倍率大、寿命长、环境温度适应性强等优点。超级电容由数量众多的超级电容单体经过串并联达到所需的容量和电压，配备超级电容管理系统（CMS），监控电容单体的电压、电流、温度等参数，自动均衡和实现安全保护。如图 2 所示，通过一种直流变换装置将超级电容接入直流电网，实现电能可在直流母排和超级电容之间能量快速可控双向流动。直流变换装置设置电流和电压两种控制模式，在全船能量管理系统的控制下与直流电网上其他电源装置并联运行，削峰填谷、平抑电网负荷的波动，达到节能效果。

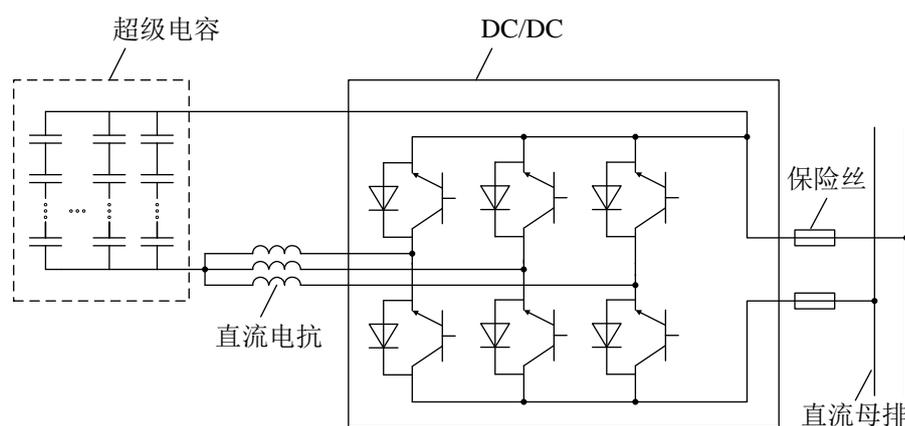


图2 双向直流变换装置（DC/DC）

3.3 并网控制和功率分配

对于多台发电机组和超级电容并联运行的工况，发电机组整流器输出

功率按直流电压下垂控制，必要时电能管理系统介入调整直流电压给定初始值来改变机组间的功率分配。负荷变化引起的直流电网电压在一定范围内波动，超级电容将不进行补偿；电网电压低于下限设定值时，超级电容直流变换装置欠压控制起作用，放电功率按实际电压进行欠压下垂控制；电网电压高于上限设定值时，超级电容直流变换装置过压控制起作用，充电功率按实际电压进行过压下垂控制；电能管理系统介入控制，根据电网负荷和节能策略控制超级电容充放电。

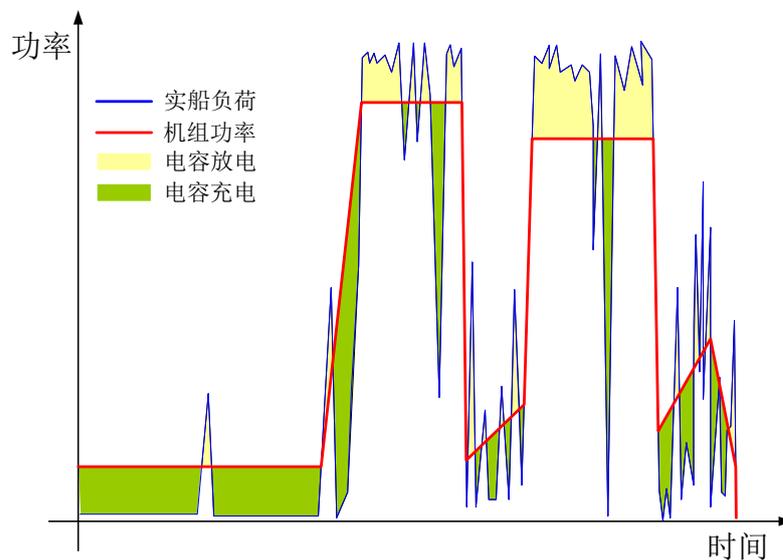


图3 机组和电网功率分配曲线图

如图 3 所示，蓝色曲线为某船的实际负荷曲线，总体来说负荷变化大且频繁，但在相对较长的时间轴范围内大负荷区间和小负荷区间边界比较明显，在大负荷区间和小负荷区间都有功率波动。在发电机组和超级电容同时在网的情况下，电能管理系统根据实际负荷调节在网机组数量，超级电容在大负荷区间和小负荷区间内实时补偿小的负荷波动，如图中黄色区域（电容放电）和绿色区域（电容充电）。由于电容吸收了电网中的瞬态负荷波动，发电机组可以工作在比较稳定的状态，如图 3 中红色曲线，同时电能管理

系统根据机组负荷调节转速，确保机组转速和功率沿着最佳油耗曲线运行。

4 镇扬汽渡实船应用和改进

4.1 “江苏路渡 3011” 轮应用





图4 江苏路渡3011轮实景照片

上述基于变速发电技术和超级电容的直流组网混合动力系统已经“江苏路渡 3011 轮”上得到了应用。如图 4 所示，左上角为“江苏陆渡 3011 轮”全貌，右上角为变速发电机组，左下角为直流配电板，右下角为超级电容储能系统。2017 年 2 月签订直流组网电力推进系统供货合同。4 月~5 月，陆续完成了单个设备的制造和船级社检验工作。6 月中旬到 7 月中旬在中国船舶重工集团公司第七一一研究所闵行试验场地进行了系统联调试验，在船检和船东的共同见证下，完成了变速发电机组试验、机组和电容并联和负荷分配试验、直流配电系统短路和选择性保护试验，储能装置的应用策略也得到了验证，联调试验取得成功，设备接受了船检机构的认证。9 月 30 日装在直流组网混合动力系统的“江苏路渡 3011 轮”在江苏省镇江船厂顺利下水，10 月完成了系统调试和系泊试验。11 月 13 日进行了航行试验，各项指标均达到设计要求。11 月 18 日交船，到目前已稳定运行 32 个月。

4.2 后续建造船舶的改进

“江苏路渡 3011 轮”的投入运营，开始积累重要的运行数据，为设备性能匹配、控制参数优化和后续新建船舶动力设备选型提供了数据支撑。在

后续建造的“江苏路渡 3012”、“江苏路渡 3015”、“江苏路渡 3016”3 艘 60m 车客渡船中，超级电容的容量进行了放大，由原来的 9.5kWh 增大到了 17.1kWh，超级电容功率由 200kW 增大到了 300kW，超级电容续航能力和“削峰填谷”能力进一步加强；推进电机由原来的卧式风冷异步推进电机调整为立式水冷永磁同步电机，电机的尺寸更小，冷却效果更好；此外，舵桨省去了上齿轮箱，推进系统的传动效率进一步提高，如图 6 所示。



图6 “江苏路渡3012轮”超级电容和推进电机实景照片

5 新技术带来的性能提升

直流组网混合动力技术作为一种动力系统形式，在越来越多的船上得到了应用，尤其对于镇扬汽渡这种工况复杂的船型，电力推进系统优势明显。直流组网技术把配电板和变频设备整合到一起，省去了交流电推系统中的移相变压器，减少了 25%的设备体积和 30%的设备重量。系统各设备之间通过电缆柔性连接，**轴系没有**，较柴油机直接推进系统更容易布置，有利于优

化船舶的尾部线型，充分利用尾部机舱空间。推进电机在全转速范围内扭矩特性较好，与全回转舵桨结合可实现 360 度全回转，提高了船舶的操纵性。超级电容在船舶加速阶段释放能量，在减速阶段吸收能量，大大提高了推进电机的加减速性能，提高了船舶的机动性。推进电机振动噪声低，变速发电机组根据负荷变转速运行，低负荷段机组的振动噪声降低，再加上超级电容的续航供电能力可让机组在码头装卸车阶段全部停机，系统总体振动噪声水平大大降低，整船的舒适性有很大提高。此外，系统自动化程度高，船舶智能化水平高。

除了上述优点外，本系统最大的优点是实现节能减排，降低燃油消耗，降低营运费用。与同船型柴油机直接推进相比，3011 轮燃油经济性优势明显，节油率达 10%。后续新建船舶，在超级电容和推进电机进一步优化后，节能效果达到 12%。

6 结论

综上所述，基于变速发电机组和超级电容储能系统的直流组网电力推进系统适用于“江苏路渡”系列这种工况复杂，动力切换频繁，负荷变化大的船舶。方案不仅能实现较好的节油效果，降低排放和运营成本，更在操控性、舒适性上优于传统柴油机推进型式，值得在同类型船舶上推广应用。

参考文献：

- 【1】 庄伟，孙坚，王春杰等. 超级电容储能装置在混合动力型直流电推系统中应用与实践. 上海：中国船舶重工集团公司第七一一研究所，2018.

- 【2】 陈刚, 张思全. 超级电容和锂电池技术在船舶电力推进系统中的应用研究概述. 上海: 上海海事大学, 2015.
- 【3】 孙彦琰, 高迪驹, 褚建新. 混合动力电动船舶功率分配控制方法. 上海: 上海海事大学, 2014.
- 【4】 杨光, 牟照欣, 吴迪, 贾颜培, 孙逊. 船舶直流组网电力推进技术发展优势[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(13):8-14.
- 【5】 童正军. 民用船舶直流电网发展现状分析[J]. 船舶工程, 2014, 36(S1):104-106+119.

作者简介:

孙向勇, 男, 助理工程师, 江苏镇扬汽渡有限公司, 主要从事机务管理新技术开发应用工作, 13952889957

王晓雷, 男, 助理工程师, 中国船舶重工集团公司第七一一研究所, 主要从事电力推进系统技术工作, 17317734537。

王春杰, 男, 高级工程师, 中国船舶重工集团公司第七一一研究所, 主要从事电力推进系统技术工作, 18017940606。



江苏船舶公众号, 欢迎关注, 欢迎投稿