

内河船舶电力推进系统的节能与环境效益评估

侯淑芳, 钱威岳

(南通航运职业技术学院 轮机工程系, 江苏 南通 226010)

摘 要: 为了适应我国船舶排放控制的要求, 内河船必须采取节能减排措施。以两艘实船为基础, 分析柴油机直接推进和电力推进系统的能耗和排放数据, 得出电力推进系统具有更好的节能优势和较大的环境效益。我国正加大力度研究电力推进的核心技术和关键设备, 也必能促进电力推进产品的发展, 提高相应产品的质量并且降低价格, 将来内河船有望逐步拓展采用电力推进系统。

关键词: 船舶排放控制; 节能减排; 电力推进系统; 柴油机直接推进系统

中图分类号: U664.14

文献标志码: A

文章编号: 1671-9891(2019)02-0042-05

0 引言

环境问题与每个人的切身利益密切相关, 已成为关系人身健康的重要话题。为了防治大气污染, 我国于 2016 年设立三大船舶排放控制区, 取得良好成效后, 提议对现有的排放控制区进行扩容和升级, 将范围扩大到沿海和内河水域, 进一步控制硫氧化物、氮氧化物和颗粒物的排放。2020 年后, 为满足限排要求, 靠岸停泊船舶应使用硫含量低于 0.1% m/m 的燃油。因此, 越来越多的远洋船和内河船为了避免不必要的麻烦, 直接选用硫含量低于 0.1% m/m 的船用柴油, 但由此导致的燃油费用支出占船舶运营成本的 50% 以上。鉴于内河航行实际需要, 要实现节能减排、绿色运行, 船舶电力推进系统具有得天独厚的优势, 越来越多地被用于内河船舶。

1 船舶电力推进系统方案

船舶电力推进是船舶推进方式之一, 是一种由电动机驱动螺旋桨从而推动船舶行进的推进系统。该系统通常由电源系统、配电系统、调速控制系统、推进电动机、监控系统和螺旋桨等组成。电力推进系统减少了柴油机, 电动机可设置在船体外即吊舱内, 一方面提高了船舶的舱容面积, 提高了经济效益; 另一方面方便采用两套甚至多套推进系统, 可互为备用, 提高了可靠性。此外, 电动机的控制方便、迅速, 机动性好, 操作灵活, 容易实现加减速、倒车、急停等操作, 有利于适应内河实际工况。

目前, 电源系统可由柴油发电机组提供支持, 通过配电盘为推进电动机和全船其它设备供电。根据电量需求, 系统中的柴油机可被燃气轮机取代, 比如豪华游轮。柴油发电以及燃气发电技术已经成熟可靠, 可选定最佳工况运行, 但产生的废气仍会造成环境污染。

由于内河船具有频繁停靠港口的优势, 电源系统越来越多地采用足够容量的蓄电池组, 也有的采用超级电容电源系统, 再辅助以太阳能光伏发电或风力发电或风光互补发电等清洁型新能源, 供应船舶航行及停泊时的全船动力、照明及生活用电。因此, 全船不设燃油系统, 实现了零排放、零污染, 有利于实现船舶航行绿色环保。

2 电力推进的节能优势

船舶电力推进常规采用柴油发电机供电, 由于存在两次能源转换, 与柴油机直接驱动相比是否具有有效率和节能优势一直存在争议。能源消耗量和消耗率这两个概念是针对不可再生能源而言的, 表现为燃油的

收稿日期: 2019-04-11

基金项目: 江苏省大学生创新训练指导项目(201812703020X)

作者简介: 侯淑芳(1980—), 女, 湖南衡阳人, 南通航运职业技术学院轮机工程系讲师, 硕士。

消耗率而不考虑能源的回收率。^[1] 本文将从能源类型、效率、能源消耗量及运行成本等方面全面分析, 综合比较两者的优劣。

2.1 柴油发电的效率分析

我国沿海和内河水域的排放控制逐步与国际接轨, 许多船舶将选择使用含硫量低于 0.1% m/m 的燃油。因此, 可设定能源类型为低硫柴油, 计算分析系统效率, 并比较其柴油消耗量和运行成本。

首先, 采用系统功率链的方法, 分析比较柴油机直接驱动和柴油发电式电力推进两种方式的效率。任何一个能量系统都会存在传输与转换的损耗功率 P_{loss} , 设定其输入功率为 P_{in} , 输出功率为 P_{out} , 那么系统总效率为 $\eta = P_{out}/P_{in} = P_{out}/(P_{out} + P_{loss})$ 。船舶推进系统则是由若干个功率单元串联而成的功率链, 总效率为功率链中各功率单元的子系统效率之积, 其中柴油机的子效率取我国国内产品的较高值, 其他功率链的子效率均取 ABB 公司的试验值。

内河船传统推进系统多采用中速柴油机作为主机, 电力推进系统通常采用中高速柴油机作为原动机发电, 这里为了方便比较, 均选取中速柴油机。机械推进柴油机通过减速齿轮系直接驱动螺旋桨, 其功率链为主柴油机、齿轮箱、传动轴与螺旋桨, 考虑到主柴油机的运行工况比较复杂, 其输出功率和运行速度都是变化的, 依据船舶负载进行调节使船舶保持某范围的航速, 由于主要为推进工况, 因此只能取主柴油机效率中间值 $\eta_{ME}=0.35$ 。其他功率单元的效率分别为: 传动轴系与齿轮箱 $\eta_{CB}=0.9$, 螺旋桨 $\eta_P=0.8$, 可计算出系统总效率区间为:

$$\eta_{DD} = \eta_{ME}\eta_{CB}\eta_P = 0.35 \times 0.9 \times 0.8 = 0.25$$

电力推进系统的功率链主要由发电柴油机、发电机、配电系统、变压器、变频器、电动机和螺旋桨组成。发电柴油机设定选择中速柴油机, 柴油机按定速发电机工况运行, 通过管理策略可使发电柴油机处于最优运行状态, 因此可取较高效率 $\eta_D=0.45$ 。其他功率单元的效率按当今的技术水平可取为: 发电机 $\eta_G=0.95$, 配电系统 $\eta_{SB}=0.999$, 变压器 $\eta_T=0.99$, 变频器 $\eta_{CV}=0.98$, 电动机 $\eta_M=0.95$, 螺旋桨 $\eta_P=0.8$, 推算船舶电力推进系统的总效率 η 为:

$$\eta_{ED} = \eta_D\eta_G\eta_{SB}\eta_T\eta_{CV}\eta_M\eta_P = 0.45 \times 0.95 \times 0.999 \times 0.99 \times 0.98 \times 0.95 \times 0.8 = 0.31$$

从这两个数据可看出, 柴油机推进系统功率链虽然相对简单, 但是由于水况及螺旋桨工况持续变化, 效率依然略低于电力推进系统。由此可见, 电力传递环节的效率确实高于传统的机械传动方式。

2.2 柴油发电的油耗分析

本文以两艘实际运营的内河船为研究对象, 进行油耗测量计算。某一内河船, 柴油机通过减速齿轮箱直接驱动螺旋桨, 主机持续转速为 1 000 rpm, 持续功率为 240 kW; 另一条电力推进内河船, 设置了 2 台柴油发电机组, 柴油机额定功率为 240 kW, 额定转速为 720 rpm, 发电机额定功率为 200 kW, 额定转速为 720 rpm, 并配备了锂电池蓄电池组 10 组作为储能装置以及相应的充电接口和交流岸电箱, 发电机组作为主电源, 蓄电池组储能装置作为第二电源。

这两艘船靠港期间均使用岸电, 不考虑柴油推进船舶的副机运行, 但是电力推进船舶均设定同时采用岸电充电, 并将蓄电池组的荷电状态达到满电状态, 因此只取航行工况。通过测量计算, 获取航行期间的燃油消耗量、燃油消耗率(取 24 h), 同时依据当前的市场行情, 分析它们的油价成本, 如表 1 所示(高硫重油和低硫重油按现在行情取单价, 存在误差)。

表 1 柴油机直接推进和电力推进的油耗比较

	运行工况	燃油消耗量/t	燃油消耗率/(g/kW·h)	低硫轻油油价/元		效率
				单价	油费	
柴油机直接推进	60 %~100 %负载	1.21	209.7	6 350	7 638.5	0.25
电力推进	60 %~85 %负载	1.03	178.8		6 540.5	0.31

表 1 中的燃油消耗量为航行期间离港和到达下一港口之间的燃油消耗量, 取 24 h 的平均值, 油费为 24 h 消耗低硫轻油的费用, 燃油消耗率根据公式计算获得, 效率为前文计算的系统总效率。

柴油机直接推进船舶每天油耗要高于电力推进船。虽然直接推进中柴油机经常运行在 60%~100% 负载区间,其中涵盖某一负载工况产生最大的效率以及最低的油耗,但是也会遇到低负载工况,燃油消耗明显增加。电力推进船舶的发电柴油机根据用电负荷需求,可设置单台运行或多台并联运行,始终保持在高效率工作点。由于该船设置了能源管理系统,到港之后蓄电池组利用岸电充电至满电状态,柴发电机组可处于停机状态,因此更降低了燃油消耗量。通过既定程序的管理策略实现柴油发电机组和蓄电池组之间以及发电机组之间的切换和配合,发电机组保持输出恒定功率,达到最大程度的节油效果,从而降低了运营成本。

通过对两种推进系统的实际数据比较可以看出,电力推进系统的燃油费用的降幅较大。根据 SIEMENS 公司统计,同等功率的船,电力推进要比柴油机直接推进耗油减少 10% 左右^[2];如果采用吊舱式推进器,电动机效率可进一步提高,总效率也进一步提高。从总体上看,电力推进系统的节能效果明显优于传统的柴油机直接驱动。

2.3 能量管理系统的节能优势

针对新型船舶的多种能源设计和布置,船舶设置先进的 PMS 能量管理系统对柴油发电机、锂电池系统、光伏或风力发电系统等进行实时监测和电力调度、管理,保证推进系统和生活用电的需求,提高锂电池的使用寿命。

上述电力推进内河船配备了两种能源,柴发电机组为主动动力源,锂蓄电池组为辅助动力源,采用能量管理系统之后,优化管理功率的分配,设定了三种工作模式自动切换。船舶靠岸时,由岸电给动力电池充电,保证蓄电池的能量。船舶正常航行时,则有纯电动模式 1、柴电模式 2,其中模式 1 优先于模式 2。系统启动后,依据蓄电池组的剩余电量值确定船舶推进所需的全部功率如何提供,可以单独由蓄电池组供电,蓄电池处于放电状态,柴油发电机组停机,或者由柴油发电机单独供电,蓄电池处于充电状态,或者由柴油发电机组和蓄电池组混合供电。后两种情况中,柴油发电机组必须运行,可选择运行在最佳效率的工作状态,输出几乎恒定的功率。由柴油发电机单独供电时,如果出现推进负载超过发电机提供的功率,此时设置功率限制,直到蓄电池组的剩余电量达到要求,取消功率限制,可由蓄电池组和柴油发电机混合供电。从这几种模式可看出,只有蓄电池组的剩余电量初始值较高的情况下,电池组才能单独供电,随着剩余电量的变小,柴发电机组的使用时间也变长,因此需确保开航前电池组的荷电状态为 100%。从上述分析看出,在能量管理系统的优化下,柴油发电机组是断续运行的,因此油耗有明显地减少,排放也明显地减少,并且提高了电力系统稳定性、可靠性和安全性,最大限度地防止船舶出现失电事故。PMS 能量管理系统对能量进行优化配置,能够提高船舶能效,减少燃油消耗,降低船舶运营成本。

2.4 清洁型新能源的节能分析

由于国家对环保的要求日益严格,目前在降低排放上已达到上限难于突破,因而已有内河船不再使用柴油发电技术,而是直接采用若干蓄电池和超级电容等储能装置作为主电源。这些船利用频繁靠港的优势采用岸电进行充电储能,同时采用光伏发电或风力发电作为辅助电源,为储能装置的补充充电电源,且已有船舶上使用风光互补的发电系统为船舶电网供电。这种纯电动模式可实现无污染和零排放,符合我国节能减排发展趋势。

3 电力推进的环境效益分析

3.1 降低硫氮气体排放环境效益

船舶大气污染物排放计算方法主要包括两种:自上而下统计法和由下而上动力法。自上而下统计法是从宏观层面出发,根据船舶消耗的燃油量直接乘以排放因子计算出大气污染物排放量,不会考虑到燃烧室里的燃烧情况和载重情况等。这里采用自上而下统计法,同时结合柴油机的排放试验数据进行一定程度的修正。

大气污染物的排放量降低,相应地其治理费用也会降低,即可将大气污染物的减少转换为经济价值,即环境效益。各种大气污染物的环境成本如表 2 所示。^[3]

表 2 大气污染物的环境成本

大气污染物	NO _x	SO _x	CO	CO ₂
环境成本/(元/t)	34 445	13 960	21	180

上述两条船在运营期间, 排放值按照表 1 中的油耗为平均值来计算, 只考虑航行工况, 估算 NO_x 和 SO_x 等污染物一年的排放量, 按当今的行情计算电力推进系统的环境效益, 扣除低硫轻油成本增加部分, 如表 3 所示。

表 3 两艘船的环境效益分析对比

环境效益分析	柴油机推进	电力推进
年 NO _x 的排放量/t	$15\,629 \times 10^{-3}$	$11\,405 \times 10^{-3}$
年 SO _x 的排放量/t	$7\,819 \times 10^{-3}$	$6\,252 \times 10^{-3}$
年 CO 的排放量/t	$1\,045 \times 10^{-3}$	842×10^{-3}
年 CO ₂ 的排放量/t	$1\,104\,192 \times 10^{-3}$	$872\,310 \times 10^{-3}$
年环境效益/元	—	209 087
低硫轻油节省/元	—	395 460
年平均收益/元	—	604 547

根据表 3 来看, 采用柴油发电技术的电力推进, NO_x 年排放量降幅达 27%, SO_x 和 CO_x 年排放量降幅在 20 % 左右, 产生了较大的环境效益, 这里还不包括 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的环境效益, 最主要的是降低船舶排放可直接提高空气质量。

采用电力推进更有利于船舶减少排放, 这与理论分析结果相一致。采用电力推进系统时, 能量管理系统使投入运行的发电机组始终运行于最佳工作区, 燃油燃烧质量好, 且柴油发电机组属于断续运行, 油耗也减少, 因此燃烧产物中的 NO_x 和 CO_x 含量明显减少。柴油电力推进系统可大幅降低废气排放, 而采用清洁型能源的电力推进系统可实现零排放, 且清洁型能源均为可再生型能源, 未来的电力推进发电技术会朝着风力发电和光伏发电的方向迈进。

3.2 降低噪音环境效益

采用电力推进后, 主要振动源柴油机安装在弹性底座上, 和船体无直接连接, 以恒定转速运行, 可减少轴系和减速齿轮箱的接入, 从而大大减少了振动源和噪声源, 提高了船员舒适度。在上述两艘船舶中, 在柴油机正常航行工况下运行, 机舱中分别取 9 个点测取噪声值, 如表 4 所示, 平均噪声级均符合 IMO 国际海事组织要求, 噪声值降幅达 17 %。

表 4 两艘船机舱噪声测量值

dB (A)

测量点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
柴油机推进船机舱	106.5	107.8	74.5	74.7	84.9	108.9	109.5	107.5	106.8
电力推进船机舱	88.5	89.8	60.1	60.2	70.3	89.5	89.1	90.3	91.4

4 结束语

环境问题关系到每个人的身体健康, 已成为人们日常生活中所关注的重点之一。中国以及世界大多数国家都密切关注环境污染问题, 致力于节能减排, 发展绿色交通, 努力创造适宜人类居住的生活环境。文章以两艘船的实验数据为例分析得知, 柴电式电力推进有较大的节能优势, 同时明显降低了各种大气污染物的排放量, 具有较好的环境效益。如果用清洁型新能源取代柴电, 再配备强大的储能装置, 那么内河船舶运输可以实现零排放、零污染。目前已有内河船采用这种新能源方式, 取得了很好的节能环保效果, 但由于初始投资费用较高, 很多内河船还处于观望状态, 仍采用柴油机直接推进, 选择燃烧符合要求的低硫轻油。电力推进系统虽然初投资成本较高, 但通过营运实践, 总效率高, 节能、减排、降噪效果明显, 并且寿命增长, 维

修费用大幅降低,能带来巨大的经济效益和环境效益。我国正加大力度研究电力推进的核心技术和关键设备,也必能促进电力推进产品的发展,提高相应产品的质量并且降低价格,将来内河船有望逐步采用电力推进系统。

参考文献:

- [1]白益飞.伴有新能源特性的船舶电力系统稳定性与节能减排研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.
- [2]汤天浩,韩朝珍.船舶电力推进系统[M].北京:机械工业出版社,2015.
- [3]丁方平.硫排放控制区内船舶减排措施及效益分析[J].物流技术,2016(11):121-126.

(责任编辑 范可旭)

Energy-saving and Environmental Benefit Analysis of Electric Propulsion System on Inland River-going Vessels

HOU Shu-fang, QIAN Wei-yue

(Dept. of Marine Engineering, Nantong Vocational & Technical Shipping College, Nantong 226010, China)

Abstract: To meet the requirements of ship emission control in our country, measures should be taken on inland river-going vessels to save energy and reduce emission. Based on two real vessels, it analyzes the energy consumption and emission data of diesel engine direct propulsion and electric propulsion system, and draws the conclusion that the electric propulsion system has a higher energy-saving advantage and larger environmental benefit. Our country is increasing its efforts to study the core technologies and key equipment for electric propulsion, and it will also promote the development of electric propulsion products, improve the quality of corresponding products and lower prices. In the future, inland river-going vessels are expected to gradually expand the use of electric propulsion system.

Key words: ship emission control; energy-saving; emission reduction; electric propulsion system; diesel engine direct propulsion system