

性能与排放

船舶主机油耗模型发展现状及展望

周春斌¹, 袁成清^{1,2,3}, 张彦^{1,2,3}

(1. 武汉理工大学能源与动力工程学院可靠性工程研究所, 湖北 武汉 430063;

2. 船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430063;

3. 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063)

摘要: 根据船舶主机油耗模型的建模思路和原理, 对现有的油耗模型进行梳理, 重点论述了基于经验公式的油耗模型和基于实测数据的油耗模型的建模原理和发展现状, 并从精度和通用性等方面进行了对比分析。分析表明: 现有模型主要存在对外界影响因素考虑不全面; 不同类型船舶适应性差; 精度有待进一步提高等问题。据此提出了船舶主机油耗模型的发展方向和建议。

关键词: 船舶主机; 油耗模型; 能效

中图分类号: U676.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2017)06-0012-04

Review and Prospect of Fuel Consumption Model for Marine Main Diesel Engines

Zhou Chunbin¹, Yuan Chengqing^{1,2,3}, Zhang Yan^{1,2,3}

(1. Reliability Engineering Institute, School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430063; 2. Key Laboratory of Marine Power Engineering & Technology (Ministry of Transport), Hubei Wuhan 430063; 3. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Hubei Wuhan 430063)

Abstract: The existing fuel consumption models are analyzed according to the modeling ideas and principles, with the focus on modeling ideas and status of the fuel consumption model based on empirical formula as well as measured data. The two different models are compared and analyzed from the aspects of accuracy and generality, etc. The results show that the existing models have the problems such as: not considering the external influence factors comprehensively; poor adaptation to varied ships; the accuracy should be enhanced further. Finally, aiming at the shortcomings of the existing models, the trends and suggestions of marine main engine fuel consumption models were put forward.

Key words: marine main engine; fuel consumption model; energy efficiency

0 引言

随着国内外航运业的快速发展, 船舶营运中的节能环保问题越来越受到重视^[1-2]。而燃油费用在船舶营运成本中所占的比例一直居高不下, 加之近年来经济环境的持续低迷, 航运业的节能减排迫在眉睫。由于船舶航速与燃油消耗量之间存在着直接关系, 所以现阶段降速航行是很多船舶采用的节能

措施之一。而如何确立合理而经济的航速就成为降速航行的关键。建立船舶主机油耗模型可以为营运船舶选用经济航速航行和进行航程规划提供依据。此外, 通过建立船舶主机油耗模型掌握其影响因素, 对于在营船舶来说可以有效降低其船舶能效营运指数 (Energy Efficiency Operational Indicator, EEOI)^[3]。

船舶主机油耗模型是指船舶主机的燃油消耗量

收稿日期: 2017-02-24; 修回日期: 2017-04-20

基金项目: 国家优秀青年科学基金项目 (51422507); 湖北省高端人才引领培养计划资助项目 (鄂科技通 [2012] 86 号)。

作者简介: 周春斌 (1996 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为船舶新能源与节能减排技术, E-mail: zhouchunbin2012@163.com。

与航速、主机转速等参数之间的关系模型。利用该模型可以根据航线和航行时间从环保和经济的角度更好地规划航程；同时基于此模型的预测数据，可以对船舶航行进行航速优化，保证船舶在相对较高的能效下航行，从而有效降低航运企业运营成本^[4]。从早期只能近似估计航速和油耗之间的关系，到现在已经能基于两者的数学关系建立具体的船舶主机油耗模型，并能较好地预测主机油耗和规划船舶航程，船舶主机油耗模型已经取得了较大的发展，但是在模型精度、通用性等方面仍具有进一步提高和优化的空间。

本文从船舶主机油耗模型的基本概念出发，论述现有模型的用途及存在的不足，旨在对国内外船舶主机油耗模型的研究现状和相关成果进行比较分析；并在此基础上，对未来发展趋势做出展望。

1 船舶主机油耗模型分类

船舶主机油耗模型的建立都是以减少船舶燃油消耗为目标，通过寻求油耗、航速以及其余外界因素之间的关系来动态调整航速，以达到减小油耗的目标。根据建立油耗模型的方式或原理的不同，大致可以分为两大类：一种是基于理论公式对船舶主机油耗与航速等参数的关系进行推导，得出航速与油耗之间的大致关系或经验计算公式；另一种是在理论关系的基础上，建立输入输出关系，通过对船舶主机的台架试验或航行过程中的大量实测数据进行分析处理，验证并优化船舶主机油耗模型。此外，虽然众多油耗模型建立的基本原理是类似的，但实际操作方法又存在差异。

2 基于经验公式的油耗模型

2.1 模型发展现状

基于经验公式的油耗模型就是通过现有的理论公式进行相关推导，或通过船舶历史航行数据，大致找到船舶主机油耗和航速之间的关系。

早在20世纪80~90年代，国内外就已经有学者通过理论分析寻找船舶油耗和航速之间的对应关系，对船舶采用经济航速航行进行了相关研究^[5-14]。由于目前没有精确公式能够动态反应出船舶油耗和航速之间的关系，所以该类模型往往都表现为依据现有理论关系进行推导，得出油耗和航速的估算关系，仅适用于整个航程中都是匀速、没有通航环境影响等理想情况下，在实际使用过程中往往存在较大的偏差；同时模型在具体操作时存在较大难度，无法准确地为船舶航行时航速的选择提供

合理建议，对船舶能效的提升情况也有待进一步改善。所以，此类简单估算模型因精确性较低而较少单独使用，常常是作为建立油耗模型的一个基础。

随着近年来各领域相关技术的发展，对模型的要求也越来越高，这种仅停留在理论分析的模型远不能满足实际应用。因此有学者提出通过如，船、机、桨匹配关系等理论公式推导出一个理论计算公式，并进一步结合船舶柴油机的台架试验数据或实际运行过程中的实测数据来验证和优化模型，如图1所示。此类模型由于有大量数据做验证和优化，往往比早期的模型具有更高的精度。

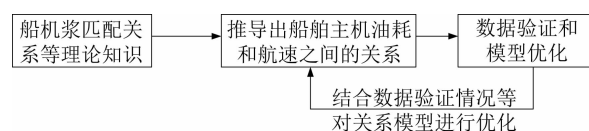


图1 建模原理框架

现有基于经验公式的油耗模型的发展主要表现为：在原有估算关系的基础上计算模型的精度有一定提高。即先根据船、机、桨之间的匹配关系，推导出一个关于油耗和航速之间的计算关系，并对航线进行分段简化处理，在考虑整个航程的前提下，尽可能实现各航段的航速优化，以达到全程的优化，建立出最优调度模型^[15-16]。而对于模型中的一些在航行过程中会实时发生变化的外界因素也进行了优化处理。如：通过使用柴油机台架试验的特性曲线或实际航行过程中的油耗数据拟合出油耗率和输出功率的关系，解决油耗率随输出功率改变而发生变化的问题^[17-22]。孟晓东等通过引入附加油耗将波浪对油耗的影响考虑进去，使模型准确性有所提高^[4]；Bialystocki通过分析排水量、天气原因、船体和螺旋桨的粗糙度等影响船舶油耗的主要因素与油耗的相关性，提出了一种简单的算法，并通过实际的算例验证了该算法的可行性，最后表明可以通过该算法来对油耗进行一定程度的预测^[23]。此类基于理论公式的优化模型精度有所提高，实用性较好，可以对大部分船舶油耗模型的建立提供参考依据，可以针对不同船型来合理选取理论公式或相关参数对模型进行优化。但是此类模型基本都是选取部分影响因素进行分析研究，不够全面，并且忽略了各个因素存在互相影响的可能性。

2.2 案例分析

案例船舶信息：内河某宽浅型船舶^[17]。

在本案例中，根据船、机、桨匹配关系，通过理论公式建立船舶航速与油耗量之间的关系，油耗量等于主机输出功率与油耗率的乘积。当船舶柴油

机功率转速发生变化时，由于受到喷油量、换气质量、转速等因素的影响，其燃油消耗率会随之发生改变^[18]；继而通过采用 MATLAB 软件中最小二乘法二次多项式拟合函数 $A = \text{polyfit}(x, y, 2)$ ，进行油耗率曲线拟合，建立主机输出功率与油耗率之间的关系^[19]，如图 2 所示；最后进一步得出船舶航速与油耗量之间的关系。

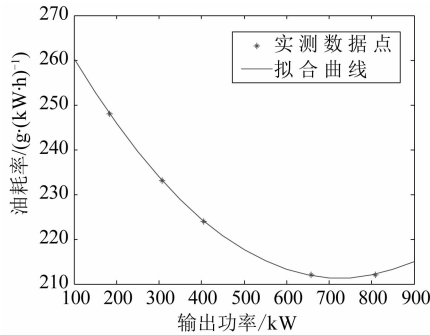


图 2 内河某船舶主机输出功率—油耗率拟合关系

模型计算数据与实测数据的对比表明：计算值的误差均小于 5%，能够较好地预测和计算船舶在航行过程中的油耗，为船舶经济航行提供参考。但本案例的计算在理论公式上仅采取了传统经验的方式，而没有将会对船舶的航速、油耗等造成一定影响的复杂的通航环境考虑进去^[24]。因此，传统的经验公式还不能完全体现各参数之间的准确关系。为了进一步提高油耗模型的精度，须结合船舶实际航行中的数据对其进行进一步的修正或优化。

3 基于实测数据的油耗模型

3.1 模型发展现状

随着计算机领域的迅速发展，对数据的处理和分析能力不断提高，也促进了船舶主机油耗模型的发展。众多学者基于计算机技术对船舶油耗模型展开了相关研究，通过建立输入输出关系，对历史数据进行学习训练，最后得出能够对船舶油耗进行有效预测的模型。

目前，国内外很多学者基于神经网络对船舶的油耗模型展开研究，并取得了一定的成果。叶睿等以丹麦籍客滚轮 MS Smyril 号作为研究案例，通过建立模拟大脑神经突触连接结构进行信息处理的数学模型，输入众多外界因素数据，通过这样一个神经网络得出与输出量油耗之间的关系^[3]，如图 3；Leifsson 等结合白箱模型和黑箱模型的特点，建立了串联和并联两种灰箱模型，通过输入螺旋桨螺距、主机转速等参数，白箱模型进行燃油消耗量和船舶对水航速的计算，而黑箱模型进行燃油

消耗和船舶对水航速的预测，最后通过仿真试验对两种模型的有效性进行了验证^[25]。BP 神经网络也是目前一个应用广泛并且比较成功的神经网络模型，其对非线性曲线关系的应用也得到了证实。Yan 等以内河船舶在航行过程中的风向、风速、水深、水流速度和方向以及主机的转速作为输入量，船舶的航速和油耗作为输出量，通过对 BP 神经网络模型的学习训练，得出了内河船舶营运能效模型，并进行了数据验证^[26]；同时，基于此研究，Garson 等通过相关算法的灵敏度计算对船舶在航行过程中复杂的通航环境中的多个因素进行分析，找出相对影响较大的主要因素^[27]；Petersen 等基于神经网络，建立了一种预测油耗的方法模型，采用瞬时模型确定当前目标值，抽头延迟模型预测未来值，并通过剩余模型的学习训练减小模型的误差，最终采用实际数据对模型进行了验证^[28]。



图 3 模型建立思路

3.2 案例分析

案例船舶：丹麦籍客滚轮 MS Smyril 号^[3]。

在本案例中可以发现：油耗模型主要依赖于船舶航行的实际数据，通过对数据的训练学习输出船舶航速与油耗之间的关系。通过这种方式建立起来的关系，由于以大量的船舶实测数据为依据，准确性比通过经验公式计算有所提高。但是，由于采集的数据众多，须要确认实际有影响的数据以及对数据对整个模型的敏感度，以防止信息冗余，增加成本的同时影响结果的准确性。此外，在船舶营运初期，由于没有过多在各种通航环境下航行的数据，无法通过此方法对船舶油耗进行计算或预测。

4 各类油耗模型对比分析

根据建模原理的不同，对船舶油耗模型的对比分析情况如图 4 所示，并选取了两种模型的典型实例进行精度对比分析^{[3],[21]}，如表 1 所示。第一类模型中的第一种，由于只得出一个估算关系，并且只适用于理想环境，所以实用性较差；而第二种模型在第一种模型的基础上做了较大改进，在理论知识的基础上，结合船舶主机的实际数据优化模型，在一定程度上减小了误差，提高了模型的精度，有较强的实用性，但是还是无法准确表达出复杂的通航环境对油耗的影响，这也是造成误差的一大原

因。第二类模型则主要是基于大量船舶实际运行中的数据建立的模型，能够对船舶主机的油耗做较好的预测，但是对数据的依赖性较大，由于各类船舶本体参数和通航环境等差异性较大，因此通用性较差。

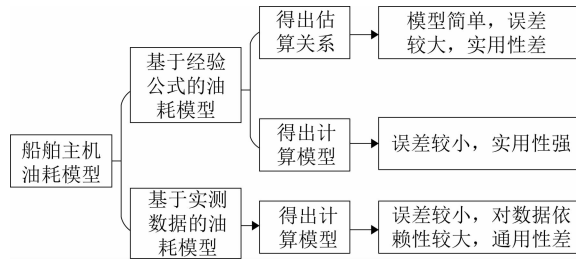


图 4 各类模型对比情况

表 1 模型精度对比

模型类别	建模原理	相对误差
基于经验公式的油耗模型 (案例 2.2) ^[17]	理论推导 + 数据拟合	5% 左右
基于实测数据的油耗模型 (案例 3.2) ^[3]	神经网络学习训练	1.5% 左右

5 总结与展望

5.1 总结

综上所述，目前船舶主机油耗模型的研究取得了一定的成果，但仍待进一步改进，具体如下：

(1) 现有模型所考虑的外界影响因素不够全面，模型精度有待进一步提高；

(2) 对于众多外界影响因素不能进行定量分析，并且难以得出这些影响因素之间的具体影响和相互影响关系，缺少对众多影响因素的整体性研究；

(3) 对于基于大量数据的油耗模型，由于受到数据采集和学习训练的限制，不同类型甚至不同船舶之间缺乏通用性。

5.2 发展趋势及建议

建立船舶主机动态油耗模型，除了用来预测船舶航行时的油耗，更重要的是基于该模型设计能效控制系统。通过模型提供的参考，根据实际航行中各个参数和外界因素的改变合理控制航速，降低 EEOI 数值，提高船舶能效。船舶在实际运营过程中，除了保证其节能减排效应和经济性，同时更应兼顾船舶的航行安全，在这三者之间寻求一个实时的最佳值，也即在保证船舶安全航行的情况下，尽可能提高船舶能效。

综合上述船舶油耗模型的发展可以看出：随着

对模型的精确度要求的提高，更多地须依赖于实际航行中的数据。因此，建立一个合理、准确的船舶主机油耗模型，可以从以下几个方向努力：

(1) 由于船舶在航行过程中，通航环境的复杂性和不确定性会对油耗造成一定影响，所以应尝试对每个因素对油耗产生的具体影响进行研究分析，并以此为依据来优化现有模型。

(2) 由于外界环境因素过多，可以先找出主要影响因素进行具体分析，再逐步进行深入研究，通过对大量数据的采集分析，对模型进行优化，得出一个自适应外界环境的动态油耗模型。

(3) 在保证模型精度的基础上，通过对不同类型船舶对模型适应性的检验和研究，对不同油耗模型的优点进行综合，并根据不同类型船舶的差异性对模型进行优化，使模型的通用性得到进一步提高。

参考文献

[1] 尹红鑫. 船舶大型化对航运业碳排放影响研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2015.

[2] 袁成清, 张彦, 白秀琴, 等. 船舶非碳能源利用模式和能效提升的协同作用 [J]. 船舶工程, 2013 (6): 116-119.

[3] 叶睿, 许劲松. 基于人工神经网络的船舶油耗模型 [J]. 船舶工程, 2016 (3): 85-88.

[4] 孟晓东, 袁章新. 考虑不规则风浪影响的最小油耗航速模型 [J]. 上海海事大学学报, 2016 (1): 19-24.

[5] 王月萍. 使用经济航速节约能源——减速航行技术研讨 [J]. 山东交通科技, 1987 (3): 9-16.

[6] 胡强生. 谈船舶航速的选择与节能 [J]. 船舶节能, 2001 (3): 18-20.

[7] 毛卫斌. 关于船舶运行期间燃油成本的研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2001.

[8] FAGERHOLT K, NORSTAD I. Reducing fuel emissions by optimizing speed on shipping routes [J]. Journal of the Operational Research Society, 2010, 61 (3): 523-529.

[9] CARIU P. Is slow steaming a sustainable means of reducing CO₂ emissions from container shipping? [J]. Transportation Research Part D Transport & Environment, 2011, 16 (3): 260-264.

[10] CORBETT J J, WANG H F, WINEBRAKE J J. The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping [J]. Transportation Research Part D Transport & Environment, 2009, 14 (8): 593-598.

(下转第 19 页)

再次增大 I 参数, 转速稳定时间由 3.2 s 进一步下降至 2.3 s; 方案 2 下降幅度较大, 可见 I 参数的调整与转速稳定时间的关系并不呈线性关系。

表 6 0→60%突加负荷优化计算方案

I 参数	转速/(r·min ⁻¹)				
	1 400	1 450	1 400	1 450	1 400
原方案	4	2.5	1.8	2.5	4
方案 1	5	3	2	3	5
方案 2	6	4	3	4	6

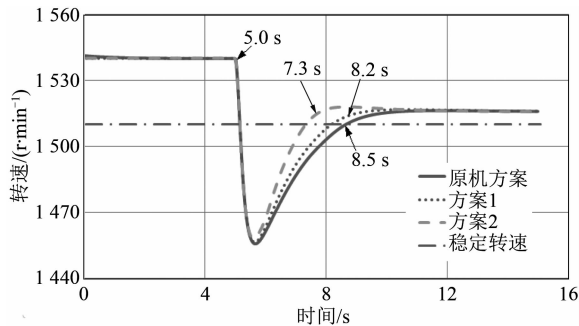


图 6 不同 I 参数对负荷突加过程转速稳定时间的影响

(上接第 15 页)

- [11] CARIOU P, CHEAITOU A. The effectiveness of a European speed limit versus an international bunker-levy to reduce CO₂ emissions from container shipping [J]. *Transportation Research Part D Transport & Environment*, 2012, 17 (2): 116-123.
- [12] NORSTAD I, FAGERHOLT K, LAPORTE G. Tramp ship routing and scheduling with speed optimization [J]. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2011, 19 (5): 853-865.
- [13] LINDSTAD H, ASBJØRNSLETT B E, STRØMMAN A H. Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds [J]. *Energy Policy*, 2011, 39 (6): 3456-3464.
- [14] RONEN D. The effect of oil price on containership speed and fleet size [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2011, 62 (1): 211-216.
- [15] 王在忠. 内河船舶分段航速节能优化研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
- [16] 江涛. 内河船舶能效的数学模型及算法研究 [D]. 武汉理工大学, 2012.
- [17] 张伟, 王红, 张澍宁, 等. 内河船舶主机动态油耗模型的研究与建立 [J]. *交通运输研究*, 2013 (22): 95-97.
- [18] 苑毅. 船舶最低单位距离油耗航速及控制系统研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [19] 王在忠, 张跃文, 孙培廷, 内河船用中速柴油机油耗率模型的建立 [J]. *中国航海*, 2015, 38 (2): 34-37.
- [20] 刘伊凡, 张剑, 张跃文. 纵倾优化下的船舶能效数值模型 [J]. *船舶工程*, 2015 (12): 31-34.
- [21] 范爱龙, 严新平, 尹奇志, 等. 船舶主机能效模型 [J]. *交通运输工程学报*, 2015, 15 (4): 69-76.
- [22] 陈前昆, 严新平, 尹奇志, 等. 基于 EEOI 的内河船舶航速优化研究 [J]. *交通信息与安全*, 2014, 32 (4): 87-91.
- [23] BIALYSTOCKI N, KONOVESSIS D. On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve: a statistical approach [J]. *Journal of Ocean Engineering & Science*, 2016, 1 (2): 157-166.
- [24] 宋昕. 考虑水流速度的内河营运船舶主机能效分析研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [25] LEIFSSON L P, SÆVARSDÓTTIR H, SIGURÐSSON S P, et al. Grey-box modeling of an ocean vessel for operational optimization [J]. *Simulation Modelling Practice & Theory*, 2008, 16 (8): 923-932.
- [26] YAN X P, SUN X, YIN Q Z. Multiparameter sensitivity analysis of operational energy efficiency for inland river ships based on backpropagation neural network method [J]. *Marine Technology Society Journal*, 2015, 49 (1): 148-153 (6).
- [27] GARSON G D. Interpreting neural-network connection weights [J]. *Ai Expert*, 2012, 6 (4): 46-51.
- [28] PETERSEN J P, WINTHER O, JACOBSEN D J. A machine-learning approach to predict main energy consumption under realistic operational conditions [J]. 2012, 59 (1): 64-72.

4 结 语

本文搭建了某船用柴油机的一维仿真计算模型, 通过稳态试验数据的标定得到了具有一定精度的仿真计算模型; 根据该船用柴油机的调速特性试验数据对瞬态模型进行了标定。通过对调速特性数据的分析表明: 该柴油机为 3 级电站调速精度, 但通过参数优化提高调速精度的潜力较大。通过调整 I 参数, 达到了控制突卸及一级突加时转速稳定时间的目的; 该船用柴油机最终达到 2 级电站调速精度要求。

参考文献

- [1] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [2] 霍荣康, 高德明, 李宁, 等. 8G32 型船用中速柴油机的设计开发 [J]. *柴油机*, 2008, 30 (3): 1-6.