

基于 AHP 法的拖轮推进动力系统多方案评估

陆 鹏¹, 邱爱华¹, 周晓洁², 周庆波²

(1. 上海齐耀系统工程有限公司, 上海 200090; 2. 七一一研究所, 上海 200090)

摘 要: 针对拖轮工况多且复杂, 船体结构小, 空间紧凑及多在港口内低速运行等特点, 从环保节能角度出发, 提出不同的推进动力系统设计。利用自主研发的基于 AHP 算法的多方案评估软件对方案进行评估, 最终优选出合适的推进动力系统方案。该方案采用可逆轴带电机布置在高速推进轴上的柴电混合动力系统, 使拖轮在各种作业模式下均处于经济运行状态, 相比传统拖轮主推进柴油机装机功率减小约 20%, 大幅提升了综合能效。

关键词: 拖轮; 推进动力系统; 多方案评估

中图分类号: U664.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2018)06-0011-04

Multi-Program Evaluation of the Tug Propulsion Power System Based on AHP

Lu Peng¹, Qiu Aihua¹, Zhou Xiaojie², Zhou Qingbo²

(1. Shanghai Qi Yao System Engineering Co., Ltd., Shanghai 200090;

2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

Abstract: In view of the characteristics of tugs, including complex operating condition, small hull structure, compact space and low speed operation at the port, from the environmental protection and energy saving point of view, different design programs of the propulsion power system are put forward. With the use of self-developed multi-program evaluation software based on the AHP algorithm, the different design programs were evaluated, and the appropriate propulsion power system design was determined. In this design, the diesel-electric hybrid system is arranged on the high-speed propulsion shaft by the reversible shaft motor, so that the tug could realize economic operation under various operating modes. Compared with the main diesel engines of traditional tugs, the installed power is reduced by about 20%. The comprehensive energy efficiency increases significantly.

Key words: tug; propulsion power system; multi-program evaluation

0 引 言

港作拖轮采用不同推进动力系统直接关系到拖轮的建造成本、周期和寿命。而推进动力系统各指标相互影响, 相互制约, 须要权衡利弊, 综合考量。在以往的动力系统方案选择中, 一般都以定性分析为主, 再综合专家经验、用户要求等。定性分析反映了一种思维过程, 具有模糊性和随意性, 缺

少量的比较。此外, 船舶动力系统集成项目往往有多家单位参与竞标, 快速的反应可以抢占先机; 商务谈判中方案越是具体、合理, 就越有说服力。因此, 急须设计和开发相应的专业软件, 实现快速的船舶动力系统多方案评估。

本文利用自主研发的基于 AHP 算法的多方案评估软件进行港作拖轮推进系统的方案评估, 可快速评价推进动力系统设计方案的优劣。

收稿日期: 2018-02-09; 修回日期: 2018-04-11

基金项目: 受上科委科研计划项目资助 (16DZ1203200)。

作者简介: 陆鹏(1977-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为船舶与海洋工程动力系统, 13651969199@163.com。

1 基于 AHP 法的动力系统多方案评估方法

基于 AHP 法的多方案评估通过对拖轮工况和总能需求分析,将可能的推进动力系统选型方案^[1-3]进行归纳与总结,并对各自的特点进行分析;再根据 AHP 法的技术指标评价体系流程,快速获得合理的推进系统选型方案。

1.1 AHP 法简介

AHP 法又叫层次分析法,是一种常用的多方案比较方法,它是由美国运筹学家 T. L. Saaty 教授在 20 世纪 80 年代初提出的一种由两种比较过渡到多种比较的系统方法,亦是半定性、半定量问题转化为定量问题的行之有效的方法。该分析法可以使人们的思维过程层次化,逐层比较多种关联因素,从而为分析、决策、预测或控制事物的发展提供定量的依据。

AHP 的实现大致可分为以下三个步骤:

(1) 首先将问题归结为确定模型中最底层相对于最高层的权重分配。AHP 法须把一个复杂的系统对象表示为一个有序的递阶层次结构模型,即层次化。

(2) 其次将排序的计算通过特征向量法转化成因素的成对比较判断。在排序计算中,每一层的因素相对上一层某一因素的单排序问题可以简化为一系列成对因素的判断比较,从而计算出最底层因素相对于最高层因素的相对重要性权值或相对优劣的排序值。

(3) 最后进行一致性检验。在一般的决策问题中,决策者不能给出精确的判断,但由于 AHP 法借助了矩阵形式,因此能够从数学的角度来检验思维判断的一致性,即引用判断矩阵最大特征根以外的其余特征根的负平均值作为一致性指标,可以检查和保持决策者判断思维过程的一致性。

AHP 法的评估流程如图 1 所示。

1.2 推进动力系统多方案评估方法

AHP 法是把定性方法和定量方法相结合的一种拟定量方法。根据图 1 的 AHP 法评估流程及 AHP 法计算原理,采用 VB. net 2012 进行推进动力系统多方案评估软件^[4]的编制。

推进动力系统多方案评估方法如下:(1) 将问题表达为简明的概念,对于推进动力系统采用不同的方案所带来的不同尺寸、可靠性、重量等指标是越大越优还是越小越优进行定义,再利用系统分析和形成概念构架等手段建立层次模型。(2) 根据层次模型,采用 1~9 标度做出判断矩阵,如可

靠性和重量指标,前者的指标权重明显要比后者的重,通过在软件中进行设置,分别计算这些单层的判断矩阵的最大特征根及其对应的特征向量,并逐一对其进行一致性检验。单层的计算是最基本的,每一个判断矩阵都要经过单层一致性检验,以保证判断中思维的一致性。(3) 将专家打分权重结合进指标权重,在单层计算结果的基础上,逐步计算产生出层次总排序的权值,并且每一次都经过相应的层一致性检验,最后获得总结果。

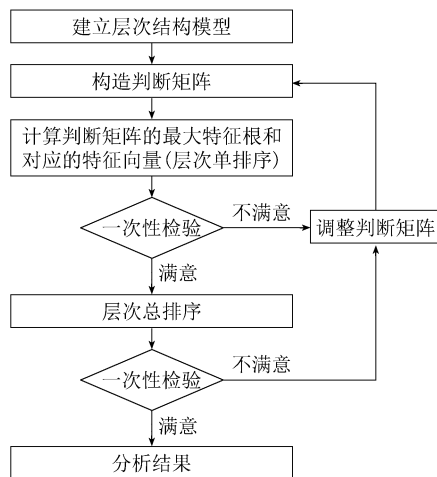


图 1 AHP 法评估流程

基于 AHP 法的多方案评估软件可对目标船舶的相关推进动力系统方案进行比较,实现方案的排序。将各型推进动力系统方案输入后,首先从设备选型(是否是标准产品、是否有现货、是否符合相关标准等)形成初步方案;其次从价格、技术指标等比较粗略的要求进行方案的筛选;最后将剩下的相对合理的方案再通过基于 AHP 法的推进动力系统技术指标评价体系,对方案进行打分,从分值大小直观获得推进动力系统方案的优劣排序。具体评估流程见图 2,其中虚线框为 AHP 法的软件设计内容。

2 案例分析

本例中设计船舶为港作拖轮,其工作环境和用途决定了推进动力系统型式一般为双机双全回转舵桨,这样就初步筛选出较为合理的少量方案。应用动力系统多方案评估软件对上述方案进行评估,并最终确定方案排序。

2.1 推进动力系统选型方案

根据该船舶设计参数,如有效功率-航速曲线、船型参数、机桨匹配参数等,并考虑功率冗余后,初步设计如下三种推进动力系统选型方案。

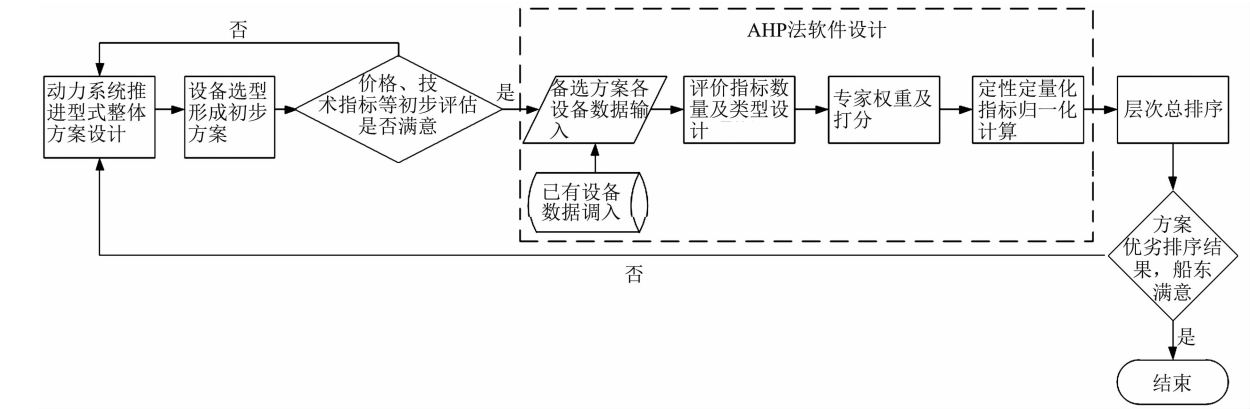


图2 基于 AHP 法的多方案评估流程图

(1) 常规动力推进。主推进系统采用两台约 1 300 kW 的柴油机作为主驱动，另配 2 台套 100 kW 机组供船上用电和备用。

(2) 双燃料全回转推进。主推进系统采用两台约 1 500 kW 双燃料主机作为主动力驱动两套 CPP 全回转推进器，另配 2 台套 100 kW 机组供船上用电和备用。

(3) 柴电混合推进。采用两台约 1 000 kW 柴油机作为主驱动，加上两台 400 kW 推进电机作为辅助驱动，安装在驱动轴上，通过万向轴联合驱动舵桨；配置 3 台主发电机组，其中 400 kW 两台，100 kW 一台，两台 400 kW 发电机组用于为两台推进电机供电，100 kW 发电机组可用于柴油机单独推进时全船其他设备供电。

近年来，随着电机技术的发展，出现了一种新型穿轴式电动机，由于电动机安装在推进轴上，减少了齿轮箱，即减少了一个噪声源，提高了机舱舒适度；同时，节约了安装布置空间，适应拖轮小巧灵活的特点，第三种方案就是其典型应用。

对上述三种推进动力系统选型方案做归纳如表 1。

表 1 拖船动力系统选型方案

方案类型	常规推进	双燃料全回转推进	柴电混合推进
主机	2 台，约 1 300 kW	2 台，约 1 500 kW	2 台，约 1 000 kW
推进电机	不需要	不需要	2 台，400 kW
变频器	不需要	不需要	2 台
万向联轴节	2 台	2 台	2 台
全回转舵桨	2 台定距桨	2 台 CPP	2 台定距桨
主发电机组	2×100 kW 台	2×100 kW 台	2×400 kW 主发
备用机组	一用一备	一用一备	1×100 kW 备用

2.2 推进动力系统多方案评估过程

(1) 将该船舶设计参数和三个待评估的方案输

入设计软件中。在整个推进动力系统中，主机占整个动力系统成本近 40%。三个备选方案主要区别是主机不同及是否采用穿轴电机的形式，具体见表 2。

表 2 港作拖轮推进动力系统备选方案及主机选型

推进动力设计选型	传动方案	主机参数			
		型号	额定功率/kW	额定转速/(r·min ⁻¹)	生产厂家
方案 1	常规双机 + 全回转舵桨	6320ZCd-4	1 324	500	广柴
方案 2	DF 双机 + PTO + 全回转舵桨	9L20DF	1 584	825	瓦锡兰
方案 3	常规双机 + 套轴电机 PTO/PTI + 全回转舵桨	6CS21/32-2	1 100	1 000	七一一研究所

(2) 进行多方案评估的指标选取。该多方案评估软件内设 20 个评估指标，其中价格、重量、燃油消耗率等为必选指标，其它指标可根据船东关心的指标要求来选取。选取的指标并非越多越好，还要兼顾软件的计算规模和指标选择的合理性，如定性和定量指标的数量须匹配。本例选取了尺寸、操作性、维修性、动力模块燃油消耗率、可靠性、机动性、费用、重量 8 个评估指标，并规定了指标的属性，指标的权重没有顺序；根据需要还可以增减评估指标数量。所选指标中尺寸、费用、重量和动力模块燃油消耗率为定量指标，其余四个为定性指标。

(3) 进行“专家权重及打分”设置。设定参加评估的专家数量，并进行命名。专家各自的权重可以不同，但总权重和为 1。例如，设置甲、乙、丙三位专家，其中甲为首席专家，其权重相应较高，设为 0.4，乙和丙均设为 0.3。根据需要可以增加或减少专家人数，分别给专家命名和赋予权重值。

(4) 进行“指标权重”设置和计算。根据

AHP 法的判断尺度和判断矩阵的定义, 进行评估指标的一致性检验。通过多方案评估软件内置的“指标权重计算”进行相互比较和排序, 使得每一层次的因素相对上一层某一因素的单排序问题简化为一系列成对因素的判断比较。

(5) 定性及定量指标的归一化计算。在多方案评估软件中, 首先对“定性指标”进行调查评价, 即参加评估的专家可按照设定的“定性指标评分设定参考”(如图 3 右下角所示)进行评价; 在调查表中填入对各方案做评价的专家对应人数, 总数为参加评估的总专家人数; 同时进行“定量分析计算”, 对图 3 的“方案评级指标值总表”中定量的指标输入对应的数据, 如本例中对于各方案的费用指标, 直接填写会发生的实际费用。然后多方案评估软件对定量和定性指标进行归一化计算, 结合专家打分权重值, 再进行加权运算, 得到综合评价结果。最终以分值和文字说明相结合的方式对推进动力系统的方案进行优劣排序。



图 3 定性指标调查表界面

2.3 推进动力系统多方案评估分析

本例中多方案评估的结果显示, 第三种方案: 柴电混合推进动力系统评分最高, 即为最优。推进动力系统多方案评估软件可提供明确的量化数值来表示方案的优劣, 并最终实现评估过程和评估结果的报告输出, 方便操作者使用。

基于 AHP 法的多方案评估软件, 对于专家打分和指标权重计算比较敏感, 其中专家打分由于是人为因素对评判结果影响巨大, 可以通过增设专家数量和减少专家各自权重来减少误判; 同时, 指标权重计算是不同指标间的相互比较, 应避免所选指标不合理或指标间关系不正确造成的一致性检验不合格, 从而导致方案评估的失效。

从多方案评估的过程看, 指标的选取和权重打分都基于实船的功能需求。例如, 第一种方案全柴推进的港作拖轮, 柴油机长期处于低负荷工况, 排放差、油耗高, 但初期投入资金少, 经济性较优; 第二种方案双燃料主机加 CPP 全回转推进器, 设

备昂贵、维护成本很高、技术含量高、排放较好, 但是经济性最差; 第三种方案为柴电混合动力系统, 通过引入电动机, 在低速时采用辅机电力推进, 中高负荷时仍采用柴油机单独推进或油电混合推进, 体现了该套系统很高的灵活性。根据图 4 港作拖轮负荷图可知, 低负荷工况较多。因此该港作拖轮低速自由航行时, 可采用电机单独推进 (PTH); 高速自由航行时, 可采用柴油机单独推进 (在部分转速区间可以进行可逆电机 PTO 发电); 拖带作业情况下, 可采用柴油机单独推进 (可逆电机 PTO 发电不可用); 高载荷拖带作业情况下, 可采用柴油机和可逆电机并车推进 (PTI)。该方案使拖轮在各种作业模式下均处于经济运行状态, 相比传统拖轮主推进柴油机装机功率可减小约 20%, 大幅提升了综合能效。

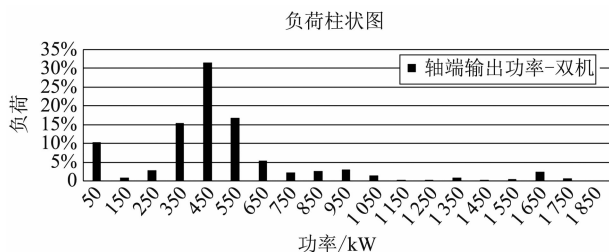


图 4 使用工况范围

3 结 论

柴电混合动力系统在降低油耗及减少污染方面优势明显, 同时操作性和灵活性得到提高, 特别适合港作拖轮的复杂工况需求。但是柴电混合方式导致设备数量和种类增加, 控制策略及工况切换复杂, 对操作人员素质要求高等问题也不容忽视。常规推进方式的缺点是能耗高, 但操作相对简单, 后续维护也便利, 故直接对某个方案优劣下结论很困难。本文采用基于 AHP 法的多方案评估软件, 从不同评价指标和专家打分角度出发, 尽可能减少人为干扰因素, 运用数学模型的客观尺度进行计算和评估, 从而选取合理的方案。

参考文献

- [1] 周庆波, 王剑, 邱爱华, 等. 唐山 1 000 T 级船主推进系统集成优化设计 [J]. 柴油机, 2016, 38 (6): 34-37.
- [2] 申卿, 谭坤, 郭丰泽, 等. 三沙 1 号交通补给船主推进动力系统继承研究 [J]. 柴油机, 2016, 38 (3): 33-37.
- [3] 周庆波, 申卿, 邱爱华, 等. 某船双机并车推进系统集成设计研究 [J]. 柴油机, 2014, 36 (6): 26-29.
- [4] 彭义健, 林焰, 陈明, 等. 船舶推进系统数据库及软件开发 [J]. 舰船科学技术. 2012, 34 (10): 53-58.