

引用格式: 刘子源, 姜刚. 舰用燃气轮机寿命周期费用分析[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(增刊 1): 109–115.
LIU Z Y, JIANG G. Life cycle cost analysis of marine gas turbine[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(Supp 1): 109–115.

舰用燃气轮机寿命周期费用分析



扫码阅读全文

刘子源*, 姜刚

中国人民解放军 92228 部队, 北京 100072

摘 要: [目的] 作为重要的舰用动力装备, 舰用燃气轮机的研制具有难度大、周期长、费用高的特点, 其经济性是十分重要的评价指标。因此, 有必要在立项阶段通过主要指标和参数对其主要寿命周期费用进行估算, 开展寿命周期的经济性评估。[方法] 首先, 收集整理典型舰用燃气轮机的技术指标、物理参数、费用等数据, 建立研制费、订购价格的参数法估算模型, 并进行验证。同时, 结合运行、维护维修等阶段费用发生特点, 建立主要寿命周期费用分析框架与估算模型。[结果] 结果显示, 建立的研制费、订购价格模型估算误差在 5% 以内; 建立的运行费、维护维修费估算方法贴合实际, 易于使用。[结论] 研究表明, 建立的寿命周期费用分析框架与估算模型具有适用性与可行性, 可为舰用燃气轮机立项阶段的经济性分析工作提供有效支撑。

关键词: 舰用燃气轮机; 寿命周期费用; 研制费; 订购价格; 费用估算
中图分类号: U664.13 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19693/j.issn.1673-3185.02458

Life cycle cost analysis of marine gas turbine

LIU Ziyuan*, JIANG Gang

The 92228 Unit of PLA, Beijing 100072, China

Abstract: [Objectives] The marine gas turbine is an important piece of marine power equipment, and its development is characterized by great difficulty, long cycle and high cost. Thus, the cost-effectiveness is a significant evaluation indicator. As such, it is significant to estimate the major life cycle cost of marine gas turbines based on their dominant technical indicators and parameters, as well as to further evaluate their full life-cycle economy during the early proposal stage. [Methods] The technical indicators, physical parameters and cost data of typical marine power equipment are collected to build a development cost model and purchase price estimation model which are validated against existing data. At the same time, combined with the cost characteristics of the operation and maintenance stages, a main life cycle cost analysis framework and estimation model are established. [Results] The development cost and purchase price models achieve high accuracy with an error less than 5%, while the estimation method for operation and maintenance is plausible and easy to apply to real work. [Conclusions] Validation against the available data shows that these analytical framework and estimation models are applicable and feasible. This paper proposes effective approaches to support economic analysis in the marine gas turbine proposal stage.

Key words: marine gas turbine; life cycle cost; research and development cost; purchase price; cost estimation

0 引 言

舰用燃气轮机是重要的舰船动力装备, 常用于发电或推进, 对舰船的整体性能有着重要影响。舰用燃气轮机与航空涡扇、涡喷发动机类似, 具有研制难度大、周期长、费用高的特点, 型

号定型后会持续使用多年。因此, 在立项阶段通过一些指标和参数对装备研制、订购等主要寿命周期费用进行估算及评估其经济性, 是立项决策的重要依据。

燃气轮机的经济性一直是备受关注的问題, 众多学者也在此方面开展了广泛研究。张娜等^[1]

收稿日期: 2021-07-19 修回日期: 2021-12-04 网络首发时间: 2022-10-24 17:15

作者简介: 刘子源, 男, 1990 年生, 硕士
姜刚, 男, 1978 年生, 硕士

*通信作者: 刘子源

收集了燃气轮机发电机组价格数据,运用最小二乘法进行了订购价格估算,估算精度令人满意。崔正心^[2]在此基础上,运用新的数据,更新了发电燃气轮机订购价格估算方程。余又红等^[3]将空气流量等更多因素纳入考虑,对舰用燃气轮机的热经济性进行研究,取得了较好的效果。上述工作为舰用燃气轮机的经济性分析奠定了一定的基础,但也存在一定局限。一是上述工作多采用功率与效率作为主要的费用影响因素,重点考虑了性能先进性,但较少关注耗油率等经济性指标,而后者对寿命周期费用有重要影响;二是上述工作主要研究了订购价格,对研制费、运行费、维护维修费等因素考虑较少。

本文在收集典型舰用燃气轮机性能指标、物理参数和价格数据的基础上,拟分析价格驱动因素,运用普通最小二乘法、岭回归等方法,分别构建舰用燃气轮机的研制费、订购价格估算模型,比较估算效果。同时,结合舰用燃气轮机运行、维护维修等方面的特点和实际情况,提出相应分析框架,建立估算模型,以为舰用燃气轮机的寿命周期费用估算奠定方法基础和手段支撑。

1 装备费用估算

1.1 主要费用估算方法

装备费用估算包含多种方法,常用的有专家估算法、工程估算法、类比估算法、参数估算法等^[4]。其中,专家估算法是根据专家经验评估装备费用,具有实施简单、周期短的优点,但该方法会受到专家经验和项目特点的影响,有一定主观

性,适用于装备立项初期阶段;工程估算法是建立成本分解结构,将预计发生的各项费用从下至上逐项累加,从而计算得出总经费的一种方法,但需要详细的材料、工艺等信息,数据收集的难度高、工作量大、周期长,适用于装备研制的中后期等阶段;参数估算法是通过寻找费用影响因子与费用间的关系,建立费用估算关系式,并运用相应的数据进行估算的方法,适用于不同颗粒度,具有可量化分析等优点,广泛应用于寿命周期各阶段^[4]。

本文选用参数估算法进行研制费和订购价格的费用估算,其实质是寻找燃气轮机性能指标、物理参数与费用变量间的映射关系。表达该关系的数学方法有多种,如线性回归^[5]、支持向量机^[6]、人工神经网络^[7]、灰色预测^[8]、AdaBoost^[9]等。这种关系并非越复杂越好,要根据装备特点、样本量及费用影响因子等因素,选择最适合的方法。

1.2 参数估算法的主要步骤

运用参数估算法建立费用估算模型时,需要经过若干环节和过程。简言之,包括以下几方面:一是定义评估的一些“假设”和前提条件;二是数据收集及预处理,形成样本集,作为估算建模的数据基础;三是分析并对数据关系进行选择;四是通过统计回归分析和训练,建立费用估算模型;五是通过分析,对模型进行验证和测试;六是如模型不满足要求,则调整假设内容和前提条件,重复上述步骤,直至满意为止^[10]。具体的流程和顺序如图 1 所示。在实际建模中,可结合研究对象的具体情况和目的适当简化。

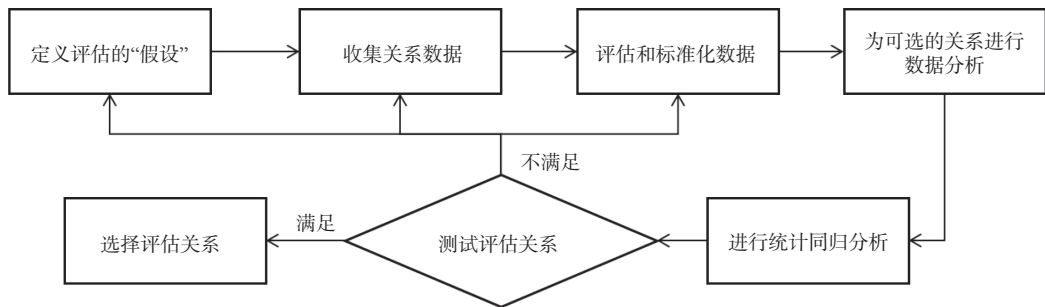


图 1 参数估算法工作流程^[10]
Fig. 1 Workflow of parameter estimation method^[10]

2 舰用燃气轮机寿命周期费用分解与估算

2.1 寿命周期费用分解

根据寿命周期费用(LCC)的相关理论,并结

合舰用燃气轮机的特点,将其寿命周期费用分解为研制费、订购费、运行费(使用费)、维护维修费、退役处置费等^[11],即

$$LCC = C_{RD} + C_P + C_W + C_M + C_R \quad (1)$$

式中: LCC 为寿命周期费用; C_{RD} 为研制费; C_P 为订购费; C_W 为运行费; C_M 为维护维修费; C_R 为退役处

置费。在装备不同阶段,资源消耗与费用产生的特点不同,需单独予以分析。

2.2 研制费估算

研制费包括从立项论证到状态鉴定期间开展研制活动所需的经费。结合研制工作特点和资源投向投量,可将研制过程分为设计工作、样机样件试制及各类试验等几部分。从成本构成上看,设计工作主要成本为人力劳务薪酬、事务性费用等;样机样件试制主要成本为各类样机和样件生产试制所需的材料费、制造费等,与样机样件种类、单价及数量密切相关;各类试验费主要成本为开展各项试验所需的燃动、事务或试验外协费用等,与试验种类、消耗强度、试验时间等因素息息相关。

总体上,研制费衡量了整体研制工作规模,其

中各部分工作是相互关联的。技术跨度越大、装备构成越复杂,研制难度越高、规模越大,需投入越多的人力和其他资源、进行更大规模设计,试制更多样机样件、开展更多试验进行分析和验证。因此,设计、样机样件试制、试验三者间存在较大的相关性。立项论证将对整个研制工作的技术路径、试验方案进行深入分析,一般可以确定样机样件与试验的种类、数量等。但设计工作所涉及的人力资源投入等要素,存在较大的不确定性,难以量化。因此,在分析时,可用样机样件、试验的相关信息衡量整体研制规模。

由于舰用燃气轮机研制周期长、内容复杂,且作为军用装备公开信息较少,因此难以收集到丰富的研制费数据样本。本文基于收集的国内 3 个型号燃气轮机研制费及相关数据,归一化处理后,得到如表 1 所示数据。

表 1 舰用燃气轮机研制费有关数据(归一化后)
Table 1 Data on development cost of marine gas turbine (normalized)

型号	样机数量	订购价格	连续功率	额定耗油率	整机试验小时	研制费
A	0.833 3	0.816 2	0.837 5	0.867 5	0.909 1	0.514 8
B	1.000 0	0.309 9	0.250 0	1.000 0	1.000 0	0.301 0
C	0.666 7	1.000 0	1.000 0	0.847 4	0.984 8	1.000 0

由表 1 可见,自变量的数量超过样本数量,难以建立合适的估算模型。由于研制费可通过样机样件、试验的规模来衡量,为减少自变量数量,这里将“样机数量×订购价格”作为“样机费”,将“连续功率×额定耗油率×整机试验小时”作为“试验消耗”,从而将研制费影响因素进一步简化为“样机费”与“试验消耗”,形成表 2 的样本数据。

表 2 简化后的舰用燃气轮机研制费有关数据(归一化后)
Table 2 Simplified data on development cost of marine gas turbine (normalized)

型号	样机费	试验消耗	研制费
A	0.680 1	0.660 5	0.514 8
B	0.309 9	0.250 0	0.301 0
C	0.666 7	0.834 5	1.000 0

由于样本数量较少,适于采用普通最小二乘法予以分析,这是一种无偏的线性回归方法,适用范围广泛。首先,假设模型关系为:

$$Y = \sum \beta X \tag{2}$$

式中:Y为因变量;X为自变量;β为系数。求解的目标函数为

$$J(\beta) = \sum (Y - \beta X)^2 \tag{3}$$

然后,求解可使目标函数值最小的β,即模型的系数解:

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \tag{4}$$

最后,运用普通最小二乘法训练,并将样机费、试验消耗进一步分解,归一化后得到如下模型:

$$C_{RD} = -2.315 y_{\text{prototype}} \cdot N_{\text{prototype}} + 2.609 SFC \cdot P \cdot H_{\text{test}} + 0.366 0 \tag{5}$$

式中:y_{prototype}为样机单价;N_{prototype}为样机数量;SFC为耗油率;P为连续功率;H_{test}为试验时间。样机单价一般可参考订购价格得出,其他参数在立项时可通过技术输入得到。由于样本有限,将训练样本代入模型,结果如表 3 所示。

表 3 研制费估算模型验证结果
Table 3 Verification of development cost estimation model

型号	研制费	预测值	误差	误差百分比/%
A	0.514 8	0.514 8	0	0.00
B	0.301 0	0.300 8	-0.000 2	-0.07
C	1.000 0	0.999 8	-0.000 2	-0.02

由表 3 可见,模型对 3 个样本的预测值与真实值十分接近,估算平均误差约 0.03%,拟合效果很好。由此可知,在立项阶段,一定程度上可运

用该模型对研制费进行估算和分析。

2.3 订购费估算

订购费的估算主要是订购价格的估算。这里收集了典型舰用燃气轮机的性能指标、物理参数和价格数据,运用不同的方法建立估算模型,并进行分析和评估。

2.3.1 数据收集及处理

样本数据要能反映舰用燃气轮机的特点,应

包括物理参数、性能指标及价格信息等。其中,性能指标包括连续功率 P (ISO 条件下)、耗油率 SFC ,设计参数包括增压比 PR 、流量 F 、涡轮速度 N 、排气温度 T 等,物理参数主要为重量 W 。相关数据主要源于《世界燃气轮机手册》^[12]。由于产品定价的货币、年度不同,难以在统一标准下分析,故通过相关年份的通胀率(这里使用CPI指数)、汇率等信息进行价格换算,将价格换算至同一币值、同一货币年。数据归一化后,如表4所示。

表 4 舰用燃气轮机订购价格有关数据^[12](归一化后)
Table 4 Data on purchase price of marine gas turbine^[12](normalized)

序号	型号	定型年代	P	SFC	PR	F	N	T	W	价格
1	LM2500	1969	0.575 6	0.651 6	0.677 2	0.567 8	0.109 1	0.958 9	0.1561	0.558 5
2	LM2500+	1998	0.706 4	0.617 6	0.778 9	0.692 4	0.109 1	0.904 0	0.1749	0.634 0
3	LM6000PC	1997	1.000 0	0.575 1	1.000 0	1.000 0	0.109 1	0.833 1	0.2729	1.000 0
4	501-KF5	1986	0.098 4	0.878 2	0.354 4	0.126 0	0.430 3	0.980 6	0.0379	0.243 0
5	Spey SM1A	1980	0.298 3	0.685 6	0.649 1	0.470 7	0.158 2	0.774 9	0.8505	0.445 3
6	THM1304-11	1999	0.262 0	0.781 9	0.378 9	0.395 6	0.260 6	0.889 1	0.3007	0.298 1
7	FT8 Marine	1990	0.582 9	0.631 7	0.659 6	0.671 8	0.109 1	0.840 0	0.2873	0.693 6
8	ST6L-794	1976	0.014 1	1.000 0	0.245 6	0.025 3	1.000 0	0.953 1	0.0035	0.046 4
9	ST18A	1995	0.045 9	0.798 9	0.491 2	0.064 5	0.572 7	0.920 0	0.0117	0.086 8
10	ST40	1999	0.094 5	0.730 9	0.593 0	0.112 1	0.450 8	0.933 7	0.0175	0.132 1
11	MT-30	2001	0.842 1	0.609 1	0.842 1	0.941 4	0.100 0	0.853 7	0.2333	0.955 5
12	SGT-500	1998	0.397 7	0.747 9	0.421 1	0.754 6	0.109 1	0.745 1	1.0000	0.384 2
13	TF40	1976	0.069 8	0.872 5	0.298 2	0.101 8	0.466 7	0.977 1	0.0201	0.086 8
14	TF50	1998	0.089 0	0.804 5	0.347 4	0.109 9	0.484 8	1.000 0	0.0237	0.132 1
15	UGT 15000	1988	0.396 0	0.682 7	0.701 8	0.589 4	0.160 6	0.803 4	0.3006	0.555 5
16	LM2500+G4	2005	0.826 3	0.614 7	0.842 1	0.749 8	0.109 1	0.939 4	0.1749	0.924 5
17	Spey SM1C	1987	0.421 1	0.651 6	0.768 4	0.538 5	0.166 7	0.835 4	0.8564	0.483 0
18	LM1600	1987	0.334 9	0.662 9	0.750 9	0.381 0	0.212 1	0.894 9	0.1242	0.445 3

这里,选用前16个样本作为训练样本,用于模型的训练;选用第17,18个样本作为检验样本,用于对模型的评价和选择。

2.3.2 相关性分析及费用驱动因子筛选

Pearson 相关性分析是衡量相关关系十分有效的方法,可观察自变量对因变量及自变量间的相互影响程度,进而筛选出重要的费用影响因子。计算上述样本各变量间的 Pearson 相关系数,如表5所示。

由表5可看出:

1) 在性能指标中,连续功率与价格的相关系数达到了0.978,具有极强相关性,对价格有很好的解释;耗油率与价格的相关系数为-0.856,相关性同样较强。但同时,耗油率与连续功率有着较

强的相关性,存在多重共线性问题。

2) 在设计状态参数中,与价格相关性较强的增压比、流量等均与连续功率有着较强相关性。由于设计参数代表技术状态,而非关键的性能指标和物理参数,因此暂剔除。

3) 在物理参数中,重量与价格的相关性较弱,暂剔除。

综上,连续功率是最关键的影响因子,可以此为基础建立线性模型;耗油率与价格相关性同样较强,但存在多重共线性。由于耗油率与运行费密切相关,因此仍希望保留该变量,观察其对价格的影响。

2.3.3 普通最小二乘法估算与比例估算模型

首先,以连续功率和耗油率为自变量,运用普

表 5 订购价格各变量 Pearson 相关系数 (归一化后)

Table 5	Pearson's correlation coefficients of each variable of purchase price (normalized)							
	<i>P</i>	<i>SFC</i>	<i>PR</i>	<i>F</i>	<i>N</i>	<i>T</i>	<i>W</i>	价格
<i>P</i>	1.000							
<i>SFC</i>	−0.851	1.000						
<i>NR</i>	0.858	−0.933	1.000					
<i>F</i>	0.948	−0.833	0.789	1.000				
<i>N</i>	−0.761	0.890	−0.728	−0.834	1.000			
<i>T</i>	−0.386	0.479	−0.411	−0.627	0.563	1.000		
<i>W</i>	0.220	−0.321	0.202	0.462	−0.505	−0.832	1.000	
价格	0.978	−0.856	0.875	0.938	−0.775	−0.425	0.233	1.000

通最小二乘法, 计算变量系数、标准差及 *t* 检验量。然后, 根据计量经济学方法进行显著性检验^[13], 结果如表 6 所示。

Table 6 Significance test of bivariate least square method				
模型	系数	标准差	<i>t</i> 检验量	显著性
常量	0.226	0.272	0.831	0.421
<i>P</i>	0.921	0.116	7.964	0.000
<i>SFC</i>	−0.191	0.316	−0.606	0.555

由表 6 可见, 耗油率无法通过显著性检验, 应剔除。剔除后, 再次计算表中参数, 如表 7 所示。

Table 7 Significance test of univariate least square method				
模型	系数	标准差	<i>t</i> 检验量	显著性
常量	0.062	0.028	2.235	0.042
<i>P</i>	0.982	0.055	17.837	0.000

由表 7 可见, 常数项与连续功率系数均可通过显著性检验。因此, 得到以连续功率为变量的估算模型, 表达式(归一化后)为

y = 0.982*P* + 0.062

(6)

式中: *y* 为订购价格。该模型的拟合优度 $R^2 = 0.958$, 具备很好的解释力度, 拟合效果较好, 使用简便。模型中, 系数 0.982 具有明确的含义, 亦即其他条件不变时, 每增加单位功率的代价约 0.982 单位价格, 也可称为“功率单价”。若去掉截距项, 进一步简化模型, 可得到如下一个简单的比例估算模型:

y = 1.078*P*

(7)

该模型拟合优度 $R^2 = 0.943$, 仍具备足够解释力度。与原模型相比, 两者主要在小功率范围存在一定差异, 在大功率范围差异较小, 且该模型

应用更为简便, 具有很好的应用价值。两种模型的拟合情况如图 2 所示。

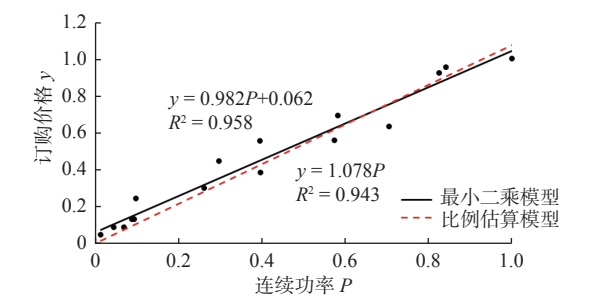


图 2 两种模型拟合结果
Fig. 2 Fitting results of two models

2.3.4 岭回归法模型

连续功率与耗油率存在严重的多重共线性, 解决该问题的有效手段之一是正则化, 这里采用岭回归法^[14]。岭回归是在普通最小二乘法的最小化目标中加入一个二范数惩罚系数, 也即在式(3)的基础上将最小化目标变为

J(β) = ∑(Y − βX)² + λ||β||₂² = ∑(Y − βX)² + ∑λβ²

(8)

求得的系数解为

β = (X^TX + λI)^{−1}X^TY

(9)

式中: λ 为二范数惩罚系数; *I* 为单位向量。由于增加了惩罚项, 岭回归可以保证 $(X^T X + \lambda I)$ 是满秩可逆的。但在加入了惩罚项以后, β 不再是无偏估计量。因此, 岭回归是以牺牲无偏估计精度为代价, 解决共线性问题的方法。以连续功率和耗油率作为自变量, 训练得到模型为

y = 0.910*P* − 0.208*SFC* + 0.242

(10)

该模型的拟合优度 $R^2 = 0.959$, 相较普通最小二乘模型, 解释力度有所提升。从表达式中可知, 耗油率 *SFC* 的系数为负, 耗油率越小, 价格越

高,与专业认知一致。

2.3.5 模型选择与订购费估算

运用上述 3 个模型分别对检验样本进行预测,结果如表 8 所示。

由表 8 可以看出,岭回归模型的平均误差最小,普通最小二乘法其次,比例估算法最大。三者的平均误差都在 15% 以内,具有一定估算精度。其中,岭回归模型的平均误差在 5% 以内,满

足立项阶段的估算要求,具有很好的工程应用价值。由于立项阶段一般具备了连续功率和耗油率这两个重要参数,这里推荐使用岭回归模型。因此,订购费估算模型为

$$C_P = N_P(0.910P - 0.208SFC + 0.242)$$

(11)

式中: N_P 为包含备份数量在内的燃气轮机总订购数量。

表 8 3 种估算模型预测误差比较

Table 8 Comparison of prediction errors of three estimation models

序号	真实值	比例估算		最小二乘模型		岭回归模型	
		预测值	误差/%	预测值	误差/%	预测值	误差/%
17	0.483 0	0.453 9	6.02	0.475 5	1.55	0.489 7	1.39
18	0.445 3	0.361 0	18.93	0.390 9	12.22	0.408 9	8.17
平均误差/%		12.48		6.89		4.78	

2.4 运行费估算

运行费主要是燃气轮机在运行期间所需费用。这里主要考虑运行中消耗的燃油费用,与耗油率、运行时间密切相关。根据调研结果,可归纳计算如下:

$$C_W = SFC \cdot P \cdot c_{fuel} \cdot H$$

(12)

式中: c_{fuel} 为燃油单价; H 为总运行时间。

2.5 维护维修费估算

舰用燃气轮机的维护维修费包含了装备服役期间与多次维护维修相关的费用,影响因素复杂,难以用表达式全面囊括。通过对燃气轮机主机所及使用单位的广泛调研,归纳主要费用,分析费用发生特点,可将该部分费用分为维护费与维修费两部分。其中,维护费主要与运行时间有关,一般可通过维护费率与运行时间估算。即

$$C_{M1} = c_{M1} \cdot H$$

(13)

式中: C_{M1} 为维护费; c_{M1} 为维护费率。

修理费主要是寿命周期内若干次翻修所需费用。根据调研及燃气轮机维修体制,要求在规定时间内对燃气轮机进行定期维修。平均而言,单次维修费一般取一定比例的订购价格。则维修费用为

$$C_{M2} = R_{M2} \cdot y \cdot N_{M2}$$

(14)

式中: C_{M2} 为维修费; R_{M2} 为平均单次维修费与订购价格的比例; N_{M2} 为总维修次数。 N_{M2} 可进一步地通过运行时间与燃气轮机的平均无故障工作时间(MTBF)进行估算:

$$N_{M2} = \frac{H}{MTBF}$$

(15)

综上,维护维修费为

$$C_M = C_{M1} + C_{M2} = c_{M1} \cdot H + R_{M2} \cdot y \cdot \frac{H}{MTBF}$$

(16)

2.6 退役处置费估算

当前,退役后的舰用燃气轮机一般按废材处理,对寿命周期费用有两方面影响:一是处理中需开展切割、拆分、运输等工作,需消耗资源;另一方面,可作废品处置收回部分残值。两部分金额在寿命周期费用中一般占比极小,在此假定两者相抵,整体退役处置费用为零,即 $C_R = 0$ 。

2.7 寿命周期费用估算

综合上文对寿命周期各阶段费用的分析,结合建立的费用估算模型,汇总可得舰用燃气轮机的寿命周期费用模型如下:

$$LCC = C_{RD} + C_P + C_W + C_M + C_R =$$

$$(-2.315y_{prototype} \cdot N_{prototype} + 2.609SFC \cdot P \cdot H_{test} +$$
$$0.3660)A + \left(N_P + R_{M2} \cdot \frac{H}{MTBF}\right)(0.910P -$$
$$0.208SFC + 0.242)B + (SFC \cdot P \cdot c_{fuel} + c_{M1}) \cdot H$$

(17)

式中,研制费、订购价格估算模型分别是归一化后的结果, A 、 B 分别为归一化系数。模型中,研制样机数量、样机价格(可参考订购价格)、试验时间、耗油率、连续功率、总订购数量、燃油单价、总运行时间、维护费用率、单次翻修费用与订购价格比例、平均无故障工作时间这些信息在立项论证阶段基本可以直接或估算获得。在该模型基

础上,对寿命周期费用进行分析和评估可为立项经济性决策提供支撑。

3 结 论

本文基于收集的典型舰用燃气轮机研制费、订购价格等相关数据,分析了主要费用影响因素,并运用多种方法建立了研制费、订购价格估算模型。经过验证和评估,估算模型的误差在5%以内,预测精度较高,表明模型具有较好的估算效果,可作为立项阶段的费用估算手段之一。同时,未来还应进一步收集和丰富国内型号装备相关数据,进行有针对性的研究。

结合调研、实际使用情况等因素,提出了运行、维护维修、退役处置等阶段的费用估算思路,过程较为简便,结构较为清晰,具有较强的操作性,可以此为基础开展各阶段的费用估算,补充和完善了舰用燃气轮机的各阶段费用估算方法。

基于各阶段的费用分析结果,建立了舰用燃气轮机寿命周期费用估算模型,明确了估算所需的输入条件,确立了整体估算框架,得到了可量化的输出结果。在立项阶段可以此为基础,开展寿命周期费用估算和分析工作,为立项决策和经济性评估提供有效支撑。

参考文献:

[1] 张娜,蔡睿贤,林汝谋,等. 燃气轮机发电机组简捷估价方法[J]. 燃气轮机技术, 1992, 5(4): 37-41.
ZHANG N, CAI R X, LIN R M, et al. Simple evaluation method for gas turbine generator set[J]. Gas Turbine Technology, 1992, 5(4): 37-41 (in Chinese).

[2] 崔正心. 1998 年燃气轮机估价方程[J]. 燃气轮机技术, 1999, 12(3): 14-15.
CUI Z X. Gas turbine evaluation equation in 1998[J]. Gas Turbine Technology, 1999, 12(3): 14-15 (in Chinese).

[3] 余又红,孙丰瑞,刘永葆. 舰用燃气轮机的热经济性分析[J]. 燃气轮机技术, 2007, 20(3): 10-12,22.
YU Y H, SUN F R, LIU Y B. Thermoeconomic analysis of marine gas turbines[J]. Gas Turbine Technology, 2007, 20(3): 10-12,22 (in Chinese).

[4] 赵曰强. 防空导弹武器系统费效分析建模及方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
ZHAO Y Q. Research on cost-effectiveness analysis modeling and method of air defense missile weapon system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 (in Chinese).

[5] 赵曰强,安实,麦强,等. 装备费用效能分析及建模的方法研究[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(8): 1521-1540.

ZHAO Y Q, AN S, MAI Q, et al. Research on cost-effectiveness analysis and modeling of equipment[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(8): 1521-1540 (in Chinese).

[6] DENG S, YEH T H. Using least squares support vector machines for the airframe structures manufacturing cost estimation[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 131(2): 701-708.

[7] 张伟,花兴来. BP 神经网络的地面雷达全寿命周期费用估算[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2009, 10(1): 52-55.
ZHANG W, HUA X L. A method of estimating the LCC of ground radar equipment based on BP nerving network[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2009, 10(1): 52-55 (in Chinese).

[8] 郝丽娟,冯柯. 灰色预测在装备 LCC 估算中的应用[J]. 工兵装备研究, 2006, 25(5): 52-55.
HAO L J, FENG K. Application of grey theory to estimate life cycle cost of equipment[J]. Engineer Equipment Research, 2006, 25(5): 52-55 (in Chinese).

[9] 刘子源,王翀,李晓飞. 基于 AdaBoost 算法的直升机结构制造复杂度估算[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(10): 977-983.
LIU Z Y, WANG C, LI X F. The helicopter structure manufacture complexity estimation based on AdaBoost algorithm[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2020, 15(10): 977-983 (in Chinese).

[10] AL C, ANDY P, ANTHONY M, et al. NASA Cost Estimating Handbook[M]. Washington: NASA, 2014.

[11] 李天照. 舰艇作战系统全寿命费用估算研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2016.
LI T Z. The research of LCC estimation of ship combat system[D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2016 (in Chinese).

[12] 胡晓煜. 世界燃气轮机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
HU X Y. Gas turbine world handbook[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011 (in Chinese).

[13] 卢曲琴,刘勇,郑辉烈,等. 案例教学模式在 SPSS 统计软件实习课教学中的启示[J]. 中国卫生统计, 2020, 37(5): 761-763.
LU Q Q, LIU Y, ZHENG H L, et al. Enlightenment of case teaching mode in SPSS statistical software practice teaching[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2020, 37(5): 761-763 (in Chinese).

[14] 张凤莲. 多元线性回归中多重共线性问题的解决办法探讨[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
ZHANG F L. The discussion on solutions of multicollinearity in multilinear regression models[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010 (in Chinese).