

# 基于 EES 的船舶制冷压缩机仿真与优化

孙 斌, 何治斌, 邹 滔

(大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁大连 116026)

**摘 要:** 为了使船舶制冷仿真系统达到更好的模拟效果, 需要建立更为精确和高效的模型。基于拥有专业且成熟的热物性计算包的 EES 软件, 结合船用制冷压缩机试验数据, 对经验模型进行拟合验证和多工况下的性能预测, 对半经验模型中的容积效率提出 2 种优化方法, 并传统计算方法进行对比, 分析和验证其优化效果。结果表明: 经验模型在一定工况范围内具有良好的精度, 可作为压缩机性能预测的参考; 提出的容积效率优化计算模型相较于传统经验公式有着更高的精度, 对于制冷仿真系统精度的提高有所帮助。

**关键词:** 船舶; 制冷压缩机; EES; 稳态仿真

**中图分类号:** TB652 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2020.08.15

## Simulation and Optimization of Marine Refrigeration Compressor Based on EES

SUN Bin, HE Zhibin, ZOU Tao

(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Liaoning Dalian 116026, China)

**Abstract:** In order to achieve a better simulation effect of the ship refrigeration simulation system, it is necessary to establish a more accurate and efficient model. EES software is based on a professional and mature thermal property calculation package, combining with experimental data of marine refrigeration compressors. The empirical model is fitted and verified, and the performance prediction under multi-case conditions. Two optimization methods are proposed for the volumetric efficiency in the semi-empirical model, and compared with the traditional calculation methods to analyze and verify the optimization effect. The results show that the empirical model has good precision in a certain working condition and can be used as a reference for compressor performance prediction. The proposed volumetric efficiency optimization calculation model has higher precision than the traditional empirical formula, which can help to improve the accuracy of the refrigeration simulation system.

**Key words:** ship; refrigeration compressor; engineering equation solver (EES); steady state simulation

### 0 引言

船舶制冷系统主要由压缩机、冷凝器、膨胀阀和蒸发器 4 个主要部件组成, 是船舶重要的辅助设备, 是设备正常运行的保障, 能够改善人们的生活和工作环境, 保证食品的贮存条件<sup>[1]</sup>。

制冷压缩机是船舶制冷系统的主要动力来源, 通过消耗外功来提高制冷剂蒸汽的压力, 并将其送入冷凝器进行冷凝。通常压缩机模型可分为 2 大类: 1) 用

于压缩机设计的模型。这类模型用物理公式表达压缩的所有过程, 结构极其复杂, 不适合在制冷系统仿真时应用<sup>[2]</sup>; 2) 用于系统仿真的模型, 可分为半经验模型和经验模型。半经验模型将经验公式与基本物理过程描述相结合; 经验模型则是根据试验数据, 将压缩机工作过程完全简化成纯数学拟合计算公式。

在仿真计算中, 一般不需要过多描述压缩机的内部工作细节, 重点考虑的是进出口的制冷剂状态、输

收稿日期: 2019-11-25; 修回日期: 2020-02-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助

作者简介: 孙 斌 (1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 轮机自动化与智能化。

通信作者: 何治斌 (1974—), 男, 副教授。E-mail: hezb999@126.com

气量、和功耗等,因此本文主要介绍的是第二类模型。

对于系统仿真中使用的模型主要考量的是其快速性、稳定性和准确性。快速性和稳定性对于压缩机模型来说不是什么大问题。准确性的要求对于压缩机模型而言是最高的<sup>[3]</sup>,因为压缩机是影响系统性能的关键因素。压缩机模型的精度对系统仿真精度的影响比其他部件模型大得多,一般来说,压缩机模型 1% 的误差会产生约 0.7% 的系统误差。由此可见,压缩机不仅仅是压缩式制冷系统的“心脏”,也是系统仿真模型的“心脏”。为了优化船舶制冷系统中的压缩机仿真模型,本文将介绍一种计算简单快速的经验模型和一种目前船舶制冷仿真中应用较为广泛的半经验模型,并对半经验模型中容积效率的计算模型提出优化方式,为今后的船舶制冷压缩机建模提供可行方法。

## 1 压缩机模型

### 1.1 经验模型

经验模型即所谓的“黑箱”模型,制冷压缩机“黑箱”模型最典型的代表就是由美国空调供暖和冷藏行业协会(AHRI)制定的 ANSI/AHRI 540 准则给出的十系数模型<sup>[4]</sup>,并被压缩机生产厂商广泛采用。

$$Y = C_1 + C_2 T_e + C_3 T_c + C_4 T_e^2 + C_5 T_e T_c + C_6 T_c^2 + C_7 T_e^3 + C_8 T_e T_c^2 + C_9 T_e^2 T_c + C_{10} T_c^3 \quad (1)$$

式中:  $Y$  为输出值,可以代表压缩机的质量流量、功率、制冷量、能效比等性能参数。其中,  $T_e$  是蒸发温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_c$  是冷凝温度,  $^{\circ}\text{C}$ ; 在使用时,将若干组蒸发温度、冷凝温度以及对应温度下的试验数据代入公式,构成关于未知数  $C_1 \sim C_{10}$  的线性方程组,选取一种拟合方法(如最小二乘法)求出  $C_1 \sim C_{10}$  的值。

本文根据表 1 所示的比泽尔船用制冷压缩机厂商提供的输入功率试验数据,在 EES 中进行了模型的拟合尝试。

表 1 压缩机输入功率试验值

$T_c/^{\circ}\text{C}$	压缩机输入功率 $P/\text{kW}$								
	$T_e=-5^{\circ}\text{C}$	$T_e=-10^{\circ}\text{C}$	$T_e=-15^{\circ}\text{C}$	$T_e=-20^{\circ}\text{C}$	$T_e=-25^{\circ}\text{C}$	$T_e=-30^{\circ}\text{C}$	$T_e=-35^{\circ}\text{C}$	$T_e=-40^{\circ}\text{C}$	$T_e=-45^{\circ}\text{C}$
30	5.52	5.29	4.99	4.62	4.18	3.70	3.19	2.66	2.11
35	5.94	5.64	5.26	4.81	4.31	3.78	3.21	2.63	2.05
40	6.34	5.95	5.50	4.99	4.43	3.83	3.22	2.60	1.98
45	6.71	6.25	5.72	5.15	4.53	3.88	3.22	2.56	—
50	7.07	6.53	5.93	5.29	4.62	3.92	3.22	2.52	—

使用前 35 组数据在 EES 中进行拟合,将试验值作为因变量,蒸发温度和冷凝温度作为自变量,据此写出的压缩机输入功率  $P$  的十系数拟合公式。

$$\begin{aligned} P = & 1.680\ 764\ 798 - \\ & 1.066\ 739\ 7909 \times 10^{-1} T_e - \\ & 2.899\ 7330\ 733 \times 10^{-3} T_e^2 - \\ & 1.662\ 703\ 7068 \times 10^{-5} T_e^3 + \\ & 1.627\ 770\ 7253 \times 10^{-1} T_c - \\ & 1.183\ 7480\ 782 \times 10^{-3} T_c^2 + \\ & 5.317\ 706\ 7094 \times 10^{-6} T_c^3 + \\ & 4.368\ 760\ 7392 \times 10^{-3} T_e \cdot T_c - \\ & 1.078\ 753\ 7548 \times 10^{-5} T_e \cdot T_c^2 + \\ & 2.451\ 7495\ 755 \times 10^{-5} T_e^2 \cdot T_c \end{aligned} \quad (2)$$

使用其余 8 组数据进行验证并计算误差,见表 2。压缩机输入功率拟合效果图见图 1。

图 2 计算了在冷凝温度分别为  $30^{\circ}\text{C}$ 、 $35^{\circ}\text{C}$ 、 $40^{\circ}\text{C}$ 、 $45^{\circ}\text{C}$  和  $50^{\circ}\text{C}$  时,蒸发温度由  $-40^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$  时的压缩机功耗变化。计算时将蒸发温度从  $-40^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$  等间距选取了 351 个点(包括端点),从图 2 中可以清晰地看出压缩机在冷凝温度一定,而蒸发温度变化时,输

入功率的变化情况。

表 2 压缩机输入功率  $P$  拟合误差

$T_c/^{\circ}\text{C}$	$T_e/^{\circ}\text{C}$	实测值/ $\text{kW}$	计算值/ $\text{kW}$	误差/%
-5	50	7.07	7.061	0.127
-10	50	6.53	6.526	0.061
-15	50	5.93	5.932	0.034
-20	50	5.29	5.292	0.038
-25	50	4.62	4.618	0.043
-30	50	3.92	3.923	0.077
-35	50	3.22	3.219	0.031
-40	50	2.52	2.518	0.079

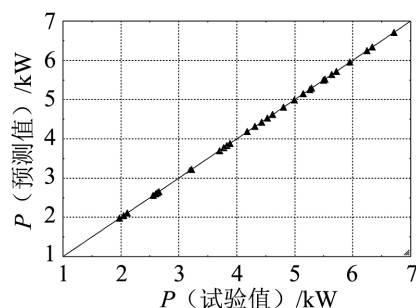


图 1 压缩机输入功率拟合效果

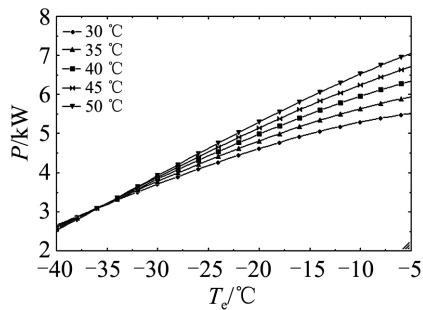


图2 不同蒸发温度下压缩机输入功率变化

图3 计算了冷凝温度从30℃~50℃, 蒸发温度从-40℃~-5℃时的压缩机输入功率变化情况, 计算时按照冷凝温度从30℃~50℃等间距选取21个温度值(包括端点), 蒸发温度从-40℃~-5℃等间距选取36个温度值(包括端点), 共计756个不同的温度值组合, 按照拟合公式计算出这些工况下压缩机的输入功率并输出图像, 从图3可清晰地看出压缩机在变工况下, 输入功率的变化情况。

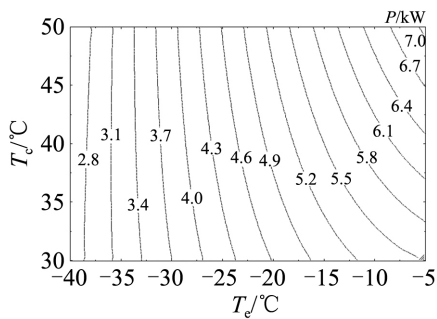


图3 不同冷凝温度、蒸发温度下压缩机输入功率变化

同理可以写出该压缩机制冷量  $Q$  的拟合公式

$$\begin{aligned}
 Q = & 37.510\ 941\ 686\ 554\ 1 + \\
 & 1.279\ 049\ 738\ 931\ 91T_e + \\
 & 1.542\ 791\ 553\ 757\ 32 \times 10^{-2} T_e^2 + \\
 & 6.416\ 092\ 384\ 533\ 14 \times 10^{-5} T_e^3 - \\
 & 0.452\ 741\ 308\ 259\ 304T_c + \\
 & 3.753\ 082\ 399\ 449\ 29 \times 10^{-4} T_c^2 + \\
 & 9.826\ 916\ 007\ 074\ 37 \times 10^{-7} T_c^3 - \\
 & 1.195\ 992\ 118\ 284\ 79 \times 10^{-2} T_e \cdot T_c - \\
 & 3.263\ 462\ 346\ 038\ 44 \times 10^{-6} T_e \cdot T_c^2 - \\
 & 1.013\ 797\ 733\ 269\ 8 \times 10^{-4} T_e^2 \cdot T_c
 \end{aligned} \quad (3)$$

使用其余8组数据进行验证并计算误差, 结果见表3。

压缩机制冷量拟合效果见图4。

图5 计算了在冷凝温度分别为30℃、35℃、40℃、45℃和50℃时, 蒸发温度由-40℃~-5℃时

的压缩机制冷量变化, 计算时将蒸发温度-40℃~-5℃等间距选取了351个点(包括端点), 从图5可清晰地看出, 压缩机在冷凝温度一定, 而蒸发温度变化时, 制冷量的变化情况。

表3 压缩机制冷量拟合误差

$T_e/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	实测值/kW	计算值/kW	误差/%
-5	50	12.805	12.82	0.117
-10	50	10.185	10.18	0.049
-15	50	7.975	7.956	0.238
-20	50	6.125	6.107	0.294
-25	50	4.589	4.584	0.109
-30	50	3.328	3.339	0.331
-35	50	2.307	2.322	0.650
-40	50	1.492	1.487	0.335

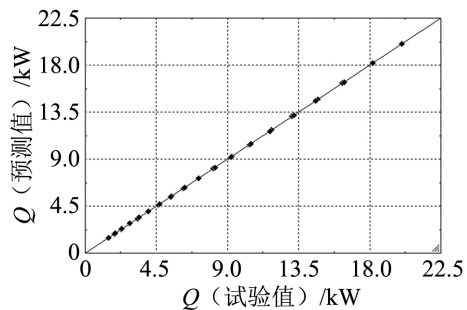


图4 压缩机制冷量拟合效果

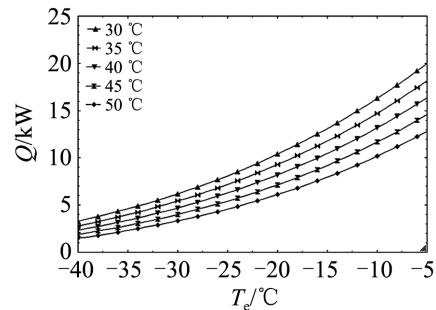


图5 不同蒸发温度下压缩机制冷量变化

图6 计算了冷凝温度从30℃~50℃, 蒸发温度从-40℃~-5℃时的压缩机制冷量变化情况, 计算时按照冷凝温度30℃~50℃等间距选取21个温度值(包括端点), 蒸发温度从-40℃~-5℃等间距选取36个温度值(包括端点), 共计756个不同的温度值组合, 按照拟合公式计算出这些工况下压缩机的制冷量, 并输出图像, 从图6可清晰地看出压缩机在变工况下, 制冷量的变化情况。

从表2和表3中的误差计算结果可看出, AHRI十系数拟合公式在一定的工况范围内的计算精度较高, 最大误差约为0.65%, 文献[2]中提到, AHRI十系数模型的最大误差约为试验数据误差的1.5倍, 也就是说, 若压缩机性能试验的误差为±2%, 那么 AHRI

十系数模型的误差限为 $\pm 3\%$ 。

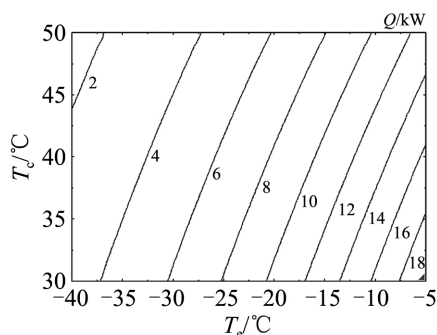


图 6 不同冷凝温度、蒸发温度下压缩机制冷量变化

AHRI 十系数模型中的试验值是在一定的吸气过热度条件下得到的（以上试验数据吸气过热度为 5 K），若压缩机在实际工作中吸气过热度偏离试验给定值时，实际的性能参数与模型计算值不相等，所以不适合直接用于系统仿真，需要增加修正方法，若假设容积效率与过热度无关，可由压缩机效率模型公式推导出质量流量的修正公式。

$$\dot{m} = \dot{m}_{\text{AHRI}} \left( \frac{v_{\text{suc,AHRI}}}{v_{\text{suc}}} \right) \quad (4)$$

式中：含有下标 AHRI 的是按十系数模型计算的值。

压缩机厂商一般不提供排气温度的试验数据曲线，所以在使用十系数模型时还需按式（5）计算排气的焓值  $h_{\text{dis}}$ 。

$$h_{\text{dis}} = \frac{Pf_Q}{\dot{m}} + h_{\text{suc}} \quad (5)$$

式中： $P$  为输入功率，kW； $f_Q$  为热损系数； $h_{\text{suc}}$  为吸气焓值，kJ/kg。

对于定频压缩机，AHRI 十系数模型可以达到较高的精度，若对变频压缩机进行建模，可使用文献[2]中提到的 AHRI 十系数模型的推广形式：变频压缩机 15 系数模型或 20 系数模型，或文献[5-6]中提到的变频压缩机经验模型。

## 1.2 半经验模型

半经验模型即所谓的“灰箱”模型，典型代表是压缩机的效率模型，也是在船舶制冷系统仿真中应用比较广泛的一类半经验模型。通常求解的未知量是排气量、质量流量、制冷量、排气温度和输入功率等参数[7]。

### 1.2.1 排气量

通过压缩机的工作原理构建排气量的计算公式，以往复式压缩机为例，理论排气量的计算公式为

$$V_{\text{th}} = \frac{\pi}{4} D^2 i s n \quad (6)$$

式中： $V_{\text{th}}$  为压缩机的理论排气量， $\text{m}^3/\text{s}$ ； $D$  为压缩机的缸径，m； $i$  为压缩机运行的气缸数， $i=4$ ； $s$  为压缩

机活塞的行程，m； $n$  为转速，r/s。

压缩机的实际排气量为

$$V_r = \lambda V_{\text{th}} \quad (7)$$

式中： $V_r$  为实际排气量， $\text{m}^3/\text{s}$ ； $\lambda$  为压缩机的容积效率。

### 1.2.2 质量流量

质量流量计算公式如下

$$m_{\text{com}} = \lambda \frac{V_{\text{th}}}{v_{\text{suc}}} \quad (8)$$

式中： $m_{\text{com}}$  为压缩机中的制冷剂质量流量，kg/s； $v_{\text{suc}}$  为吸气比容， $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

### 1.2.3 排气温度

排气温度由下式计算

$$T_d = T_s \left( \frac{p_d}{p_s} \right)^{(k-1)/k} \quad (9)$$

式中： $T_d$  为压缩机的排气温度，K； $T_s$  为压缩机的吸气温度，K； $p_d$  为压缩机排气压力，Pa； $p_s$  为压缩机的吸气压力，Pa； $k$  为制冷剂工质的绝热系数。

### 1.2.4 输入功率

压缩机消耗的功率主要用于 2 个部分，一部分用于直接压缩气体，这部分叫指示功率；另一部分用于克服机械摩擦，称为摩擦功率，压缩机的轴功率为二者之和。

与外界无热交换的指示功率

$$P_{\text{th}} = p_s V_r \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_d}{p_s} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] \quad (11)$$

压缩机的输入功率

$$P_{\text{com}} = \frac{P_{\text{th}}}{\eta_m \eta_{\text{mo}}} \quad (12)$$

式中： $\eta_m$  代表机械效率； $\eta_{\text{mo}}$  代表电动机效率，两者均可作为常数处理，取值为 0.8 左右。

根据上述的计算流程可以看出，压缩机的数学模型为一组代数方程，根据输入状态参数即可计算输出参数，不涉及迭代过程。

## 2 容积效率的优化

为了提高船舶制冷压缩机半经验模型的精度，本文针对压缩机的容积效率（ $\lambda$ ）计算进行了研究。容积效率指的是在进气行程时气缸真实吸入的混合气体体积除以气缸容积[8]。通常在船舶制冷系中计算压缩机的容积效率  $\lambda$  使用的是简化的经验公式[9]。

$$\lambda = 0.966 - 0.089 \left[ \left( \frac{p_d}{p_s} \right)^{1/k} - 1 \right] \quad (13)$$

式中：压缩机排气压力  $p_d$  与吸气压力  $p_s$  之比也称为压缩比，但实际上容积效率不仅与压缩比相关，也与蒸发温度和冷凝温度有关，且不同类型的压缩机的容积效率计算值和实际值差异也不同，所以此半经验模型

精度还可以提高。

本文将尝试 2 种方式对容积效率重新计算。

## 2.1 容积效率的计算方法

根据某船用制冷压缩机在蒸发温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、冷凝温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的一组容积效率试验数据进行以下 2 种计算方法尝试。

### 2.1.1 多项式回归

第 1 种方法是基于试验数据用多项式函数来构造和拟合压缩机的容积效率, 以下是根据 1 组试验数据, 采用关于压缩比、冷凝温度和蒸发温度的二次多项式做出的拟合尝试, 图 7 中各个点为试验数据点, 试验数据点与对角线的接近程度即为拟合效果, 经过对比发现, 带有交叉项的二次多项式拟合效果更好, 见图 7。

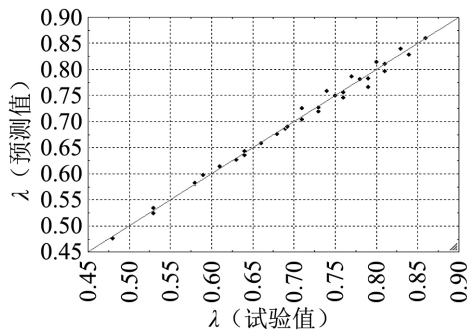


图 7 容积效率多项式拟合效果

据此写出的容积效率拟合公式为

$$\begin{aligned} \lambda = & -2.557\ 3 \times 10^{-2} + 1.187\ 7 p_r + \\ & 7.162\ 9 \times 10^{-3} p_r^2 - 4.521\ 1 \times 10^{-2} T_c - \\ & 1.279\ 6 \times 10^{-4} T_c^2 + 2.892\ 0 \times 10^{-2} T_e - \\ & 5.537\ 0 \times 10^{-4} T_e^2 - \\ & 7.155\ 6 \times 10^{-3} p_r \cdot T_c + \\ & 1.605\ 4 \times 10^{-2} p_r \cdot T_e + \\ & 4.288\ 6 \times 10^{-4} T_c \cdot T_e \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $p_r$  为压缩比。

### 2.1.2 神经网络模型

神经网络工具是一种万能函数逼近器, 在本质上是一种多变量非线性回归的关联模型, 通过使用神经网络工具并分析其输入和输出参数、各层结构和传递函数, 可以更好地找出容积效率和输入参数的内在关系。

在尝试了多种输入参数、隐层和输出层传递函数以及节点个数的组合之后, 发现使用压缩比和冷凝温度作为输入参数, 隐层节点为 4 个, 隐层传递函数为 tan-sig 函数, 输出层为线性函数时, 输出结果能达到较高精度。其数学表达式为

$$\lambda = \sum_{j=1}^4 w_{1,j} \left( \sum_{i=1}^2 u_{j,i} x_i + b_{1,j} \right)^2 + b_{2,1} \quad (15)$$

式中:  $u_{j,i}$  为连接第  $i$  个输入神经元和第  $j$  个隐层神经元的权值;  $b_{1,j}$  为第  $j$  个隐层神经元的阈值;  $w_{1,j}$  为连接隐层第  $j$  个神经元和第 1 个输出神经元的权值;  $b_{2,1}$  为输出层神经元的阈值。

神经网络结构见图 8。

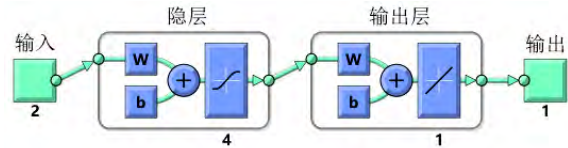


图 8 容积效率 BP 神经网络结构图

## 2.2 容积效率的精度对比

表 4 中的数据为该压缩机在蒸发温度为 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、冷凝温度为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时容积效率的试验值, 以及根据经验公式、多项式拟合、神经网络算法 3 种方式计算出的容积效率值, 并计算误差。

表 4 容积效率计算误差对比

试验值	经验公式	误差/%	多项式回归	误差/%	神经网络	误差/%
0.49	0.202 3	58.71	0.450 0	8.16	0.493 5	0.71
0.55	0.344 0	37.45	0.521 5	5.18	0.544 6	0.98
0.60	0.457 2	23.80	0.589 5	1.75	0.602 4	0.40
0.65	0.548 4	15.63	0.664 9	2.29	0.649 1	0.14
0.67	0.622 7	7.06	0.686 5	2.45	0.688 3	2.73
0.72	0.683 5	5.07	0.715 5	0.63	0.721 4	0.19
0.76	0.733 8	3.45	0.733 3	3.51	0.748 7	1.49

从对比结果上来看, 经验公式在一些工况下的计算误差相当大; 多项式回归模型精度要比经验公式高, 最大误差约为 8%, 甚至大部分工况下的误差小于 5%; 而神经网络模型的误差基本能控制在 1% 左右, 整体上相较于另外 2 种方法, 明显具有更高的精度; 但由于神经网络本质上也是一种回归模型, 只是比一般的多项式回归在算法上更为复杂和精细, 所以可能会出现个别计算数据误差大于多项式回归方法的情况 (例如表 4 中第 5 组数据)。在使用这 2 种方法时, 模型并没有某种结构是完美的, 只能选取相对来说最合适的结构, 在预先尝试不同的结构组合后, 选取能使计算结果较为稳定并且结构较为简洁的即可; 避免因过度复杂化, 而影响整体模型的计算速度。

在获取了更为精确的容积效率计算值后, 根据上述效率模型中的其他公式即可计算出更精确的压缩机实际排气量和质量流量等参数。

(下转第 136 页)

- [10] SAAD-ELDEEN S, GARBATOV Y, SOARES C G. Strength Assessment of a Severely Corroded Box Girder Subjected to Bending Moment [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 92: 90-102.
- [11] 江小龙. 考虑随机腐蚀损伤的 FPSO 船体梁极限强度研究[D]. 江苏镇江: 江苏科技大学, 2016.
- [12] 中国船级社. 海上浮式装置入级规范[S]. 2014.
- [13] 中国船级社. 海洋工程结构物疲劳强度评估指南[S]. 2013.
- [14] 王芳. 具有裂纹损伤的船舶结构剩余极限强度分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [15] 王来贵, 黄润秋, 张倬元, 等. 岩石力学系统运动稳定性问题及其研究现状[J]. 地球科学进展, 1997(3): 236-241.
- [16] 中国船级社. 钢质海船入级规范[S]. 2018.

(上接第 84 页)

### 2.3 EES 仿真模型搭建

根据上文中介绍的半经验模型以及容积效率的优化模型, 在 EES 中搭建船舶制冷压缩机的仿真模型, 可使用 Diagram Window 功能编写一个简单的界面。通过输入压缩机结构参数、蒸发温度和冷凝温度, 点击“Calculate”按钮即可得到压缩机稳态运行时的性能参数, 见图 9。

输入冷凝温度 40 [C]  
 输入蒸发温度 -25 [C]  
 Calculate  
 容积效率 0.6872  
 实际排气量 0.005091 [m<sup>3</sup>/s]  
 质量流量 0.0506 [kg/s]  
 排气温度 71.89 [C]  
 输入功率 3.813 [kW]  
 压缩比 7.615

图 9 EES 中的船舶制冷压缩机仿真计算

### 3 结论

本文介绍了船舶制冷仿真系统中压缩机部分的 2 种建模方法。在 EES 中使用“黑箱”模型拟合了多工况下压缩机性能的曲线并介绍了吸气过热度偏离时的修正方法。针对“灰箱”模型中的容积效率计算方法提出 2 种优化方式, 并进行精度对比。结论如下:

1) AHRI 十系数模型不涉及任何制冷剂热物理性质的计算和迭代, 也不涉及压缩机热力过程, 计算非常简单, 在厂商限制的工况范围内有着较高的精度, 其结果可作为压缩机状态参数预测的一种可靠参考; 但在使用时要注意临界条件, 并且在吸气过热度偏离试验条件给定值时使用修正模型。

2) 效率模型相较于 AHRI 十系数模型, 不仅包含经验关联式, 同时也结合了理想压缩过程下的物理方程, 使得计算具有一定的物理意义, 针对容积效率的获取方法提出了 2 种优化方式, 尽管多项式回归模型和神经网络模型相比传统经验公式更为复杂, 但通过计算结果的对比可以看出其精度更高, 趋势更为合理, 在船舶制冷系统建模仿真中, 为压缩机其他性能参数的计算以至系统整体模型的计算提供精度保证。

### 参考文献:

- [1] 何治斌. 船舶空调系统的建模与仿真[D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2011.
- [2] 滕杰, 陈蕴光. 变频压缩机仿真模型的对比与分析[J]. 低温与超导, 2019, 47(1): 82-87, 93.
- [3] 张春路. 制冷空调系统仿真原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [4] ANSI/AHRI. Standard for Performance Rating of Positive Displacement Refrigerant Compressors and Compressor Units: ANSI/AHRI Standard 540[S]. 2004.
- [5] 邵双全, 石文星, 李先庭, 等. 变频压缩机性能仿真建模[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(3): 362-365.
- [6] SHAO S Q, SHI W X, LI X T, et al. Performance Representation of Variable-speed Compressor for Inverter Air Conditioners based on Experimental Data [J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(8): 805-815.
- [7] 吴世杰. 船舶制冷与空调系统的仿真研究[D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2014.
- [8] 叶长根. 对流量、容积效率的术语、定义探讨[J]. 化工与通用机械, 1980(2): 44-46.
- [9] 蒋德志. 船舶制冷仿真系统的研究与开发[D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2009.