

基于改进牛顿法的燃-燃联合动力装置建模方法研究

王志涛,李 健,李淑英,李铁磊

(哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:燃-燃联合动力装置(COGAG)以其功率密度大、机动性好等优势,在船舶动力领域展现了很好的发展前景。对燃-燃联合动力装置的部件进行了模块化建模,为提高模型的计算效率和收敛性,对传统的牛顿拉普森(Newton-Rapson)迭代法进行改进,建立了COGAG稳态模型。利用四阶龙格库塔法建立动态模型,在python仿真环境下对建模方法进行了仿真验证。仿真结果表明:提出的基于改进牛顿法的燃-燃联合动力装置的建模方法可以实现系统的稳态和动态运行过程,提高了模型稳态计算的收敛速度,为联合动力装置的响应特性研究和控制器的设计提供了模型基础。

关 键 词:燃-燃联合动力装置;牛顿拉普森法;系统建模;性能仿真

中图分类号:U664.1 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.10.027

[引用本文格式]王志涛,李 健,李淑英,等. 基于改进牛顿法的燃-燃联合动力装置建模方法研究[J]. 热能动力工程,2021,36(10):204-211. WANG Zhi-tao, LI Jian, LI Shu-ying, et al. Research on modeling method of the combined gas turbine and gas turbine device based on improved newton-raphson algorithm[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10):204-211.

Research on Modeling Method of the Combined Gas Turbine and Gas Turbine Device Based on Improved Newton-Raphson Algorithm

WANG Zhi-tao, LI Jian, LI Shu-ying, LI Tie-lei

(College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code:150001)

Abstract: Because of its advantages such as high power density and good maneuverability, the combined gas turbine and gas turbine (COGAG) device has shown a good development prospect in the field of marine power. Modular modeling for the components of COGAG was established. In order to improve the computational efficiency and convergence of the model, the traditional Newton-Raphson algorithm is improved to establish the steady-state model of COGAG. Then fourth-order Runge-Kutta Algorithm is used to establish the dynamic model. The modeling method is verified by simulation in Python environment. The simulation results show that the modeling method for COGAG proposed can simulate the steady-state and dynamic operation. The convergence speed of steady-state calculation is improved. The model foundation is provided for the study of response characteristics and the controller design of the system.

Key words: COGAG; Newton-Raphson algorithm; system modeling; performance simulation

引言

燃-燃联合动力装置(COGAG)作为一种功率大、机动性好、工作模式灵活的动力形式被广泛应用于船舶推进和发电领域^[1-2]。COGAG 的结构复杂,采用数字化仿真的方法对其进行研究可以降低研究成本。在风险性试车及故障复现中将危险减至最小程度^[3],是非常有效的研究手段。国内外的专家学者对燃气轮机及其组成的动力装置的建模仿真技术进行了广泛研究。丁毅等人^[4]针对部件特性数据缺乏的情况,提出了基于相似理论的建模方法,证明了所建模型的精度和收敛性。任敬琦等人^[5]建立了一种非线性的 H 级单轴重型燃气轮机动态仿真模型,基于模型研究了外界扰动下重型燃气轮机的动态特性。黄伟等人^[6]采用 BP 神经网络预测压气机特性,建立了 GE9F 型重型燃气轮机的性能预测模型,所建模型能够准确地计算出机组的性能指标。U Campora 等人^[7]采用模块化建模的方法,在 Matlab/Simulink 环境下开发了船舶动力装置系统与部件的仿真模型,基于模型分析了其非设计点和瞬态条件下的系统响应。

上述研究重点关注了建模时燃气轮机的运行特性,在求解算法方面多采用容积惯性法^[8-9],此种求解方法受限于 matlab/simulink 等仿真平台,算法灵活性及重用性较差。本文通过分析 COGAG 关键部件的运行原理,建立燃气轮机及螺旋桨的模块化模型。重点研究了燃-燃联合动力装置的稳态及动态求解算法,对传统的牛顿拉普森算法进行了改进,提高了模型的求解效率。在此基础上,对所建立的模型进行了稳态及动态性能的仿真测试,验证了建模方法的有效性。

1 COGAG 部件级模型

燃-燃联合动力装置的结构如图 1 所示,主要包括燃气轮机和螺旋桨。由图可知,燃-燃联合动力装置的左右舷侧的装置结构是对称的。我们以左舷侧的两机一桨结构为研究对象,进行后续研究。根据不同部件的运行特性建立相应部件级模型。

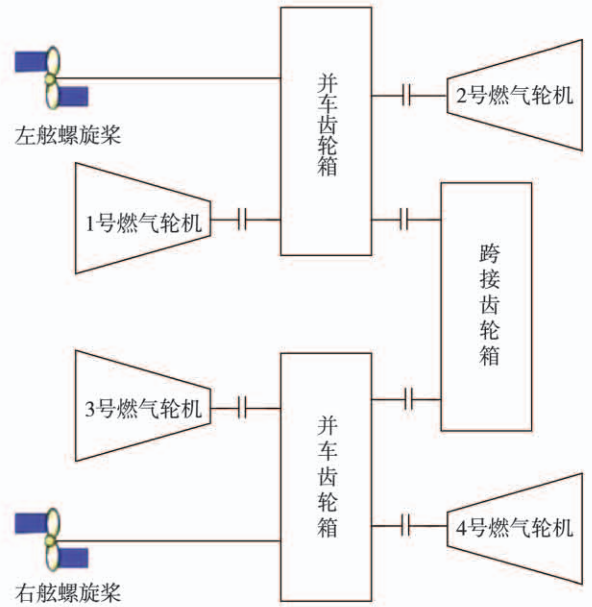


图 1 COGAG 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of COGAG

1.1 燃气轮机

燃气轮机主要包括压气机、燃烧室和涡轮三大部件,对三大部件分别进行模块化建模。

1.1.1 压气机模型

压气机是燃气轮机的重要组成部件,其作用是通过高速叶片压缩空气,对气体做功。压气机的工作特性可用折合流量、压比、效率、折合转速这四个参数表示,只要其中任意两个参数确定,压气机的工作状态就可以确定,进而得到其他两个特性参数,对应关系为:

$$G_{c,a} \frac{\sqrt{T_{in}}}{p_{in}} = f_{c,a} \left(\frac{p_{c,out}}{p_{c,in}}, \frac{n_c}{\sqrt{T_{c,in}}} \right) \quad (1)$$

$$\eta_c = f_{c,\eta} \left(\frac{p_{c,out}}{p_{c,in}}, \frac{n_c}{\sqrt{T_{c,in}}} \right) \quad (2)$$

式中:下角标 c—压气机; $p_{c,in}$ —压气机进口压力, kPa; $p_{c,out}$ —压气机出口压力, kPa; n_c —压气机转速, r/min; $T_{c,in}$ —压气机进口温度, K; $G_{c,a}$ —压气机空气流量, kg/s; η_c —压气机效率; $G_{c,a} \frac{\sqrt{T_{in}}}{p_{in}}$ —

折合流量; $\frac{n_c}{\sqrt{T_{in}}}$ —折合转速; $f_{c,a}$ —压比、折合转速与折合流量之间的函数关系; $f_{c,\eta}$ —压比、折合转速与效率之间的函数关系。

压气机内的空气可以按理想气体处理,根据式

(1)和式(2)得到的特性参数,采用熵函数变比热法对压气机进行热力性能计算,经推导可得公式:

$$S_{c,out,s} = S_{c,in} + R_g \ln \pi_c \quad (3)$$

式中: $\pi_c = \frac{p_{c,out}}{p_{c,in}}$ —压气机压缩比; R_g —空气的气体常数, $J/(mol \cdot K)$; $S_{c,out,s}$ —绝热条件下压气机出口熵函数; $S_{c,in}$ —压气机进口熵函数; 下角标 s —绝热。

熵函数为工作的状态参数,只与温度有关:

$$T_{c,out,s} = f_s(S_{c,out,s}) \quad (4)$$

$$h_{c,out,s} = f_t(T_{c,out,s}) \quad (5)$$

式中: $T_{c,out,s}$ —绝热压缩压气机出口温度, K ; $h_{c,out,s}$ —绝热压缩压气机出口比焓, kJ/kg 。 f_s — $S_{c,out,s}$ 与 $T_{c,out,s}$ 之间的函数关系; f_t — $T_{c,out,s}$ 与 $h_{c,out,s}$ 之间的函数关系。压气机的空气压缩功率为:

$$N_c = \frac{h_{c,out,s} - h_{c,in}}{\eta_c} \quad (6)$$

式中: N_c —压气机的空气压缩功率, kW ; $h_{c,in}$ —压气机进口空气焓值, kJ/kg 。

$$h_{c,out} = h_{c,in} + N_c \quad (7)$$

式中: $h_{c,out}$ —压气机出口空气比焓, kJ/kg 。

1.1.2 燃烧室模型

$$FAR = \frac{G_f}{G_{c,a}} \quad (8)$$

$$p_{cc,out} = \sigma \cdot p_{cc,in} \quad (9)$$

$$h_{cc,out} = (G_{c,a} \cdot h_{c,out} + \eta_{cc} \cdot G_f \cdot Q_u) / (G_f + G_{c,a}) \quad (10)$$

式中: 下角标 cc —燃烧室; FAR —燃料空气比; G_f —燃油流量, kg/s ; $p_{cc,in}$ —燃烧室进口压力, kPa ; $p_{cc,out}$ —燃烧室出口压力, kPa ; σ —压力损失系数; $h_{cc,out}$ —燃烧室出口烟气比焓, kJ/kg ; $h_{c,out}$ —高压压气机出口烟气比焓, kJ/kg ; η_{cc} —燃烧室燃烧效率; Q_u —燃油热值, kJ/kg 。

1.1.3 涡轮模型

高温高压燃气进入涡轮膨胀做功,为压气机和负载提供功率。涡轮的工作特性可以用折合流量、膨胀比、折合转速和效率这四个参数表示,确定其中任意两个参数就可以确定涡轮的工作状态。对涡轮进行建模的方法与压气机类似,特性计算和热力学计算参考压气机相关内容。采用的压气机及涡轮的

特性线数据均来自于 Gasturb 商业软件。

1.2 螺旋桨

螺旋桨的功能是吸收主机功率并将其转化为船舶运行所需要的推力,是船舶联合动力装置重要的组成部件。由下式可计算螺旋桨的推力及扭矩:

$$F_p = K_t \cdot \rho \cdot n_p^2 \cdot D^4 \quad (11)$$

$$M_p = K_q \cdot \rho \cdot n_p^2 \cdot D^5 \quad (12)$$

式中: 下角标 p —螺旋桨; F_p —螺旋桨推力, N ; M_p —螺旋桨扭矩, $N \cdot m$; ρ —海水密度, kg/m^3 ; D —螺旋桨直径, m ; K_t —螺旋桨推力系数; K_q —螺旋桨扭矩系数。 K_t 与 K_q 均可通过进速系数 j 和螺距比 HD 求得。

螺旋桨对船体提供的有效推力为:

$$F_e = (1 - t) F_p \quad (13)$$

式中: F_e —有效推力, N ; t —推力减额系数。

2 求解算法

2.1 稳态求解

当发动机处于稳态时,COGAG 稳态共同工作方程组一般包括下列平衡方程^[10]:

低压转子功率平衡:

$$f_1(X) = \frac{N_{lt} \eta_{lt,shaft} - N_{lc}}{N_{lc}} = 0 \quad (14)$$

高压转子功率平衡:

$$f_2(X) = \frac{N_{ht} \eta_{ht,shaft} - N_{hc}}{N_{hc}} = 0 \quad (15)$$

高压压气机进口流量平衡:

$$f_3(X) = \frac{G_{lc,s} - G_{hc,s}}{G_{hc}} = 0 \quad (16)$$

高压涡轮进口流量平衡:

$$f_4(X) = \frac{G_{cc,out} - G_{ht,s}}{G_{ht}} = 0 \quad (17)$$

低压涡轮进口流量平衡:

$$f_5(X) = \frac{G_{ht,s} - G_{lt,s}}{G_{lt,s}} = 0 \quad (18)$$

动力涡轮进口流量平衡:

$$f_6(X) = \frac{G_{lt,s} - G_{pt,s}}{G_{pt,s}} = 0 \quad (19)$$

机桨功率平衡:

$$f_7(X) = \frac{M_{pt,1} \cdot n_{pt,1} + M_{pt,2} \cdot n_{pt,2} - M_p \cdot n_p}{M_p \cdot n_p} = 0 \quad (20)$$

式中:下角标 lt—低压涡轮;下角标 lc—低压压气机;下角标 ht—高压涡轮;下角标 hc—高压压气机;下角标 pt—动力涡轮; $X = [n_{lc,1}, n_{hc,1}, n_{pt,1}, n_{lc,2}, n_{hc,2}, \pi_{lc,1}, \pi_{hc,1}, \pi_{lt,1}, \pi_{ht,1}, \pi_{lc,2}, \pi_{hc,2}, \pi_{lt,2}, \pi_{ht,2}]^T$; $n_{pt,1}, n_{pt,2}$ —两台燃机动力涡轮转速, r/min; $n_{lc,1}, n_{lc,2}$ —两台燃机低压压气机转速, r/min; $n_{hc,1}, n_{hc,2}$ —两台燃机高压压气机转速, r/min; π_{lc}, π_{ht} —低压压气机、高压压气机的增压比; π_{hp}, π_{lp} —高压涡轮、低压涡轮的膨胀比; N_{lt}, N_{ht} —低压涡轮和高压涡轮功率, kW; N_{lc}, N_{hc} —低压压气机和高压压气机功率, kW; $\eta_{lt,shaft}, \eta_{ht,shaft}$ —低压涡轮和高压涡轮效率; G_{lc}, G_{hc} —低压压气机和高压压气机的空气流量, kg/s; $G_{cc,out}, G_{ht}, G_{lt}, G_{pt}$ —燃烧室出口、高压涡轮、低压涡轮和动力涡轮的烟气流量, kg/s; $M_{pt,1}, M_{pt,2}, M_p$ —两台燃气轮机和螺旋桨扭矩, N·m。

方程(14)~(20)主要包括转速平衡方程和流量平衡方程。由于两机一桨系统包括两台燃气轮机,所以两台燃气轮机的平衡方程都需要建立,2号燃气轮机需要建立除机桨功率平衡方程之外的其他平衡方程。系统的稳态求解过程即求解包含13个未知数的13个平衡方程。

由于COGAG系统的运行机理复杂,方程组本身是隐式非解析的,只能通过数值方法迭代求解,本文将采用改进Newton-Raphson迭代法进行求解。

当发动机内部不满足平衡工作条件时,方程组右侧必然出现残量。其非线性残量方程组可以用矢量形式表示:

$$E = F(X) = \begin{cases} f_1(X) \\ f_2(X) \\ \vdots \\ f_{13}(X) \end{cases} \quad (21)$$

式中: $E = [e_1, e_2, \dots, e_{13}]^T$ 为残差向量。基于文献[11]提出的方法对 $F(X)$ 进行包含积分余项型的Taylor公式展开,再将M Podisuk等人^[12]提出的四点Newton-Cotes求积公式代入到Taylor公式,根据文献[13]和[14]的思想构造迭代方法:

$$Y_k = X_k - \frac{F(X_k)}{J(X_k)} \quad (22)$$

$$Z_k = X_k - \frac{F(X_k)}{B(X_k, Y_k)} \quad (23)$$

$$X_{k+1} = Z_k - \frac{F(Z_k)}{J(Y_k)}, k = 0, 1, 2, \dots \quad (24)$$

式中: $B(X_k, Y_k)$ —以 X_k 和 Y_k 为自变量的函数表达式; $J(X)$ — $F(X)$ 的Jacobian矩阵:

$$J(X) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_{13}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_{13}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_{13}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{13}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_{13}}{\partial x_{13}} \end{bmatrix} \quad (25)$$

由于COGAG的残差方程组没有显示表达式,只能通过差分的方法计算Jacobian矩阵中的偏导数元素值。中心差分格式为:

$$\left. \frac{\partial f_i}{\partial X_j} \right|_k = \frac{f_i(X_k + \delta X_j | k) - f_i(X_k - \delta X_j | k)}{2\delta X_j | k} \quad (26)$$

通过 X_{k+1} 计算残差向量 E_{k+1} ,当其向量的二范数 $\|E_{k+1}\|_2$ 满足设定精度,即完成迭代计算过程,得到系统稳态运行状态。

以100%工况为基准,对数据进行归一化处理。选取初始点 $x_0 = [0.881, 0.881, 0.941, 0.941, 1.01, 0.815, 0.815, 0.921, 0.921, 0.997, 0.997, 0.970, 0.970]$,分别采用传统牛顿拉普森迭代法和改进牛顿拉普森迭代法对30%工况的稳态运行状态进行求解。计算结果对比如表1所示。

表1 不同算法计算结果对比

Tab.1 Comparison of calculation results

迭代步数	传统N-R算法动力	改进N-R算法动力
	涡轮转速/r·min ⁻¹	涡轮转速/r·min ⁻¹
1	0.753 221	0.697 354
2	0.708 883	0.688 862
3	0.685 485	0.689 005
4	0.688 548	0.689 005
5	0.689 020	0.689 005
6	0.689 003	0.689 005
7	0.689 005	0.689 005

由表1可知,传统的牛顿拉普森迭代求解算法

需要 7 步才可达到收敛,而改进之后的算法收敛速度更快,仅需要 3 步迭代就可以达到收敛,仿真运算效率得到明显提高。

2.2 动态求解

与转子惯性相比,容积惯性要小得多,因此在求解系统动态性能时,也可以认为流量是实时平衡的,只考虑发动机转子的惯性。平衡方程(14),(15),(20)需要改写成微分方程的形式:

$$\frac{dn_{lc}}{d\tau} = \frac{900(N_{lt} \eta_{lt,shaft} - N_{lc})}{n_{lc} I_{lt} \pi^2} \quad (27)$$

$$\frac{dn_{hc}}{d\tau} = \frac{900(N_{ht} \eta_{ht,shaft} - N_{hc})}{n_{hc} I_{ht} \pi^2} \quad (28)$$

$$\frac{dn_p}{d\tau} = \frac{900(M_{pt1} \cdot n_{pt,1} + M_{pt,2} \cdot n_{pt,2} - M_p \cdot n_p)}{n_p I_c \pi^2} \quad (29)$$

式中: τ —时间。

采用显式四阶龙格 - 库塔法求解微分方程组,平衡方程依然采用改进 Newton-Raphson 迭代法来求解。四阶龙格库塔的求解算法如下:

$$y' = G(t, y) \quad (30)$$

$$\begin{cases} k_1 = G(t_n, y_n) \\ k_2 = G(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} k_1) \\ k_3 = G(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2} k_2) \\ k_4 = G(t_n + h, y_n + h k_3) \end{cases} \quad (31)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (32)$$

式中: $y' = [\frac{dn_{lc,1}}{d\tau}, \frac{dn_{hc,1}}{d\tau}, \frac{dn_p}{d\tau}, \frac{dn_{lc,2}}{d\tau}, \frac{dn_{hc,2}}{d\tau}]^T$ 。

利用显式数值微分方法求解公式(30) ~ (32),并在每个积分步长内迭代求解方程组公式(16) ~ (19),即可对发动机的动态过程进行计算。COGAG 动态运行求解流程如图 2 所示。

2.3 模型验证

为验证模型及建模方法的准确性,将燃气轮机的模型运行数据与实验数据进行对比,文中变化曲线(包括动力涡轮转速、螺旋桨转速及燃油流量)均以 100% 为基准,进行数据归一化处理,如图 3 所示。

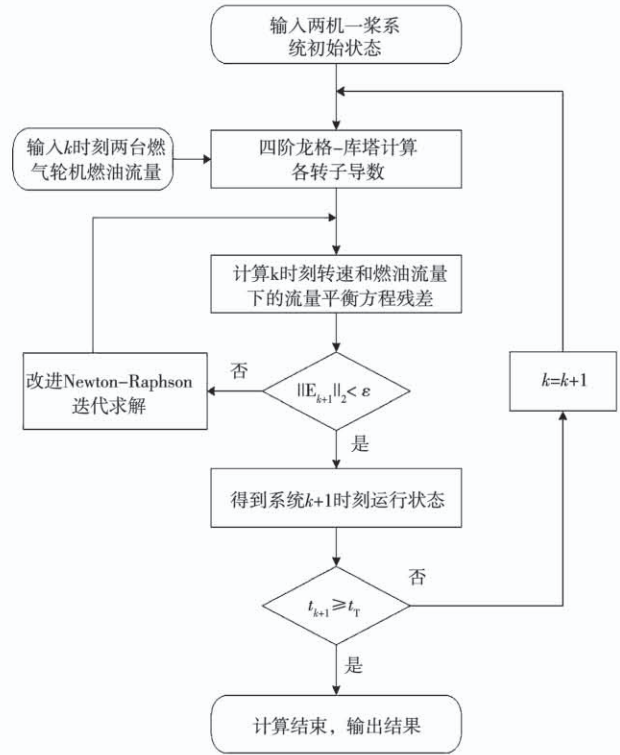


图 2 COGAG 动态运行求解流程

Fig. 2 Flow chart of COGAG dynamic operation

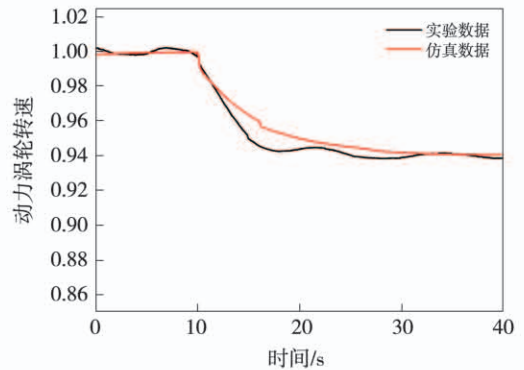


图 3 动力涡轮转速变化曲线

Fig. 3 The curve of power turbine speed

通过对比可以发现,仿真模型的稳态运行状态与实测数据几乎相同,仿真模型的动态运行状态与实测数据变化趋势一致,两种运行状态的误差均在 5% 以内,本文所建立模型的有效性得到验证。

3 仿真实证

在 python 仿真环境下,基于系统部件特性和设计的求解算法,建立燃 - 燃联合动力装置两机一桨仿真模型。基于所建模型分别对系统稳态运行和加

速运行进行仿真,测试模型性能。

3.1 稳态仿真

分别在 30%、50%、80% 和 100% 工况下进行仿

真测试。系统稳态运行特性如表 2 所示,由于两台燃气轮机的运行状态基本一致,表 2 中只列出了一台燃气轮机的运行参数。

表 2 稳态运行数据

Tab. 2 Steady-state operating data

负荷/%	燃油流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	低压涡轮转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	高压涡轮转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	动力涡轮转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	螺旋桨功率/kW	螺旋桨转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$
30	0.422	0.798	0.886	0.689	0.3	0.689
50	0.596	0.862	0.930	0.818	0.5	0.818
80	0.842	0.943	0.978	0.94	0.8	0.94
100	1	1	1	1	1	1

3.2 动态仿真

开始 10 s 为逐级加速过程,系统以 30% 工况运行,在第 10 s 改变设定运行状态为 50% 工况,在第 40 s 继续提升至 80% 运行工况,最后在第 80 s 使系统以 100% 工况运行,在第 120 s 时仿真结束。螺旋桨转速和燃油流量的变化曲线如图 4 和图 5 所示。

开始 10 s 为加速过程,系统以 30% 工况运行,在第 10 s 改变设定运行状态为 100% 工况,直至第 40 s 仿真结束。螺旋桨转速和燃油流量的变化曲线如图 6 和图 7 所示。

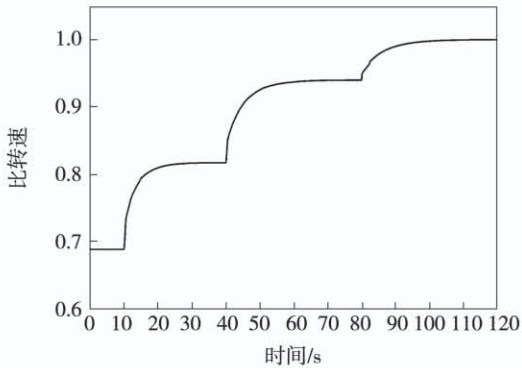


图 4 螺旋桨转速变化曲线

Fig. 4 The curve of propeller speed

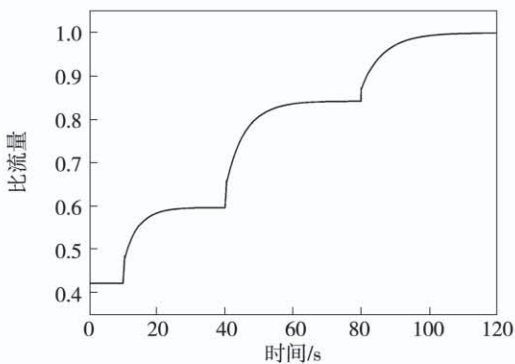


图 5 燃油流量变化曲线

Fig. 5 The curve of fuel flow

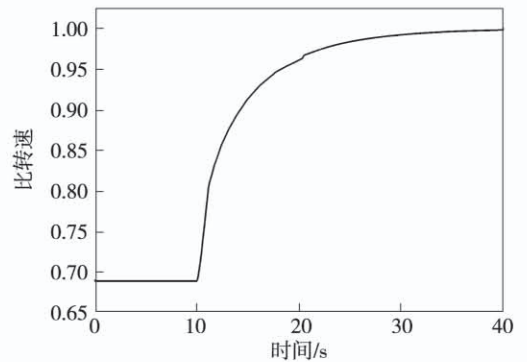


图 6 螺旋桨转速变化曲线

Fig. 6 The curve of propeller speed

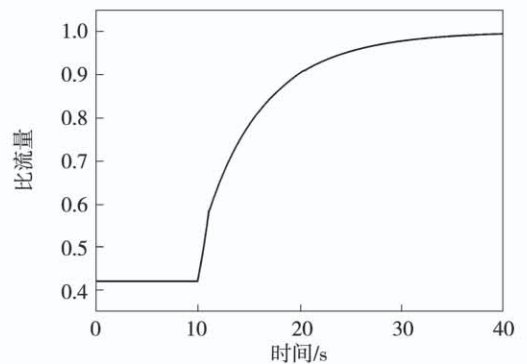


图 7 燃油流量变化曲线

Fig. 7 The curve of fuel flow

开始 10 s 为逐级减速过程,系统以 100% 工况运行,在第 10 s 改变设定运行状态为 80% 工况,在第 40 s 继续降低运行工况为 50%,最后在第 80 s 使

系统以 30% 工况运行,在第 120 s 时仿真结束。螺旋桨转速,燃油流量的变化曲线如图 8 和图 9 所示。

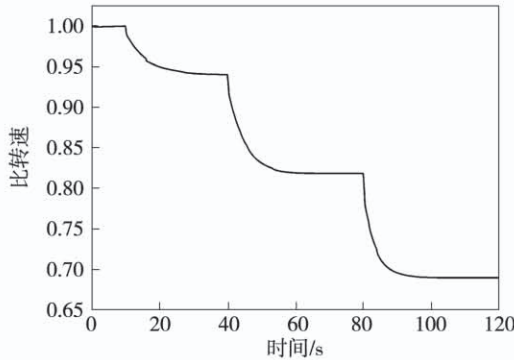


图 8 螺旋桨转速变化曲线

Fig. 8 The curve of propeller speed

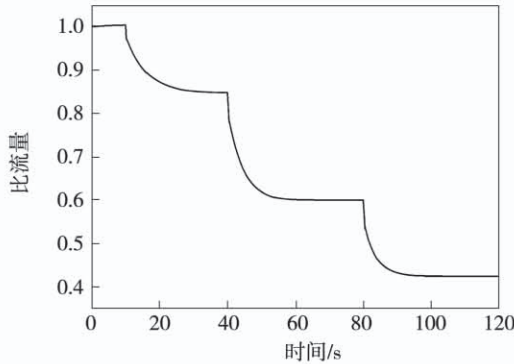


图 9 燃油流量变化曲线

Fig. 9 The curve of fuel flow

开始 10 s 减速过程,系统以 100% 工况运行,在第 10 s 改变设定运行状态为 50% 工况,直至第 40 s 仿真结束。螺旋桨转速和燃油流量的变化曲线如图 10 和图 11 所示。

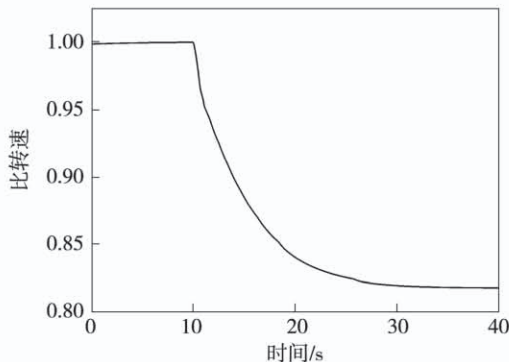


图 10 螺旋桨转速变化曲线

Fig. 10 The curve of propeller speed

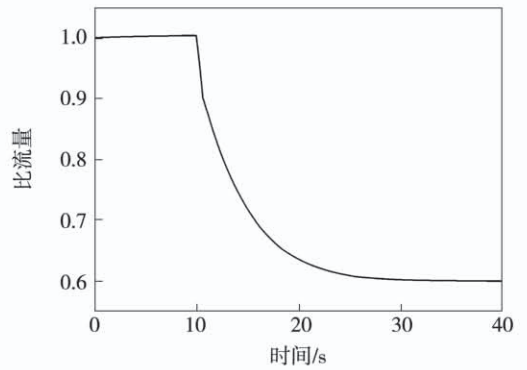


图 11 燃油流量变化曲线

Fig. 11 The curve of fuel flow

4 结 论

基于改进牛顿拉普森法建立 COGAG 的稳态模型,结合四阶龙格-库塔理论建立系统动态运算模型。得到结论:

(1) 通过分析部分特性和系统的运行规律,建立了基于改进牛顿法的燃-燃联合动力装置的仿真模型。经仿真研究表明,所建模型可以有效实现燃-燃联合动力装置的稳态及动态运行过程。

(2) 与传统的牛顿拉普森法相比,改进之后的求解算法具有更好的收敛性,在稳态模型求解时所需的迭代步数更少,运算效率提高。采用改进牛顿拉普森算法对 30% 工况的稳态运行状态进行求解时,迭代至收敛时步数由 7 步减少至 3 步,计算效率提高 57.14%。提出的建模方法为联合动力装置的响应特性研究和控制器的设计提供良好的模型基础。

参考文献:

[1] XU Zhen-zhong, WEN Xue-you, ZHAO Ning-bo. A Novel COGAG propulsion system for marine ships [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2018 Turbomachinery Technical Conference and Exposition. America: International Gas Turbine Institute, 2018. <https://doi.org/10.1115/GT2018-75908>.

[2] 李铁磊,王志涛,李淑英. 燃-燃联合动力装置工作特性仿真研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(10): 1366-1372.

LI Tie-lei, WANG Zhi-tao, LI Shu-ying. Simulation of performance characteristics of a combined gas turbine and gas turbine device

- [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37 (10): 1366 - 1372.
- [3] 黄向华,张天宏,丁毅.船用燃气轮机建模技术研究[J].中国造船,2005,46(4):31-36.
HUANG Xiang-hua, ZHANG Tian-hong, DING Yi. A study on modeling technology for ship gas turbine engine[J]. SHIP BUILDING OF CHINA, 2005, 46(4):31-36.
- [4] 丁毅,黄向华,张天宏.基于相似理论的燃气轮机建模技术研究[J].航空动力学报,2004,19(5):689-694.
DING Yi, HUANG Xiang-hua, ZHANG Tian-hong. The research of gas turbine performance modeling based on theory of similarity [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(5):689-694.
- [5] 任敬琦,曹越,桑懿谦,等.H级重型燃气轮机建模与动态仿真[J].动力工程学报,2018,38(2):98-104.
REN Jing-qi, CAO Yue, SANG Yi-qian, et al. Modeling and dynamic simulation of H-class Heavy-duty gas turbines[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(2):98-104.
- [6] 黄伟,常俊,孙智滨.重型发电燃气轮机的建模与状态监测研究[J].热能动力工程,2020,35(3):81-86.
HUANG Wei, CHANG Jun, SUN Zhi-bin. Modeling and condition monitoring of Heavy-duty power generation gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3):81-86.
- [7] CAMPORA U, FIGARI M. Numerical simulation of ship propulsion transients and full-scale validation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2003, 217(1):41-52.
- [8] 李枚媛.某型燃气轮机建模及控制规律研究[D].北京:中国科学院大学,2016.
LI Mei-yuan. Modeling and control law research for gas turbine [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [9] 吴海燕.分轴燃气轮机的建模和仿真研究[J].上海:上海交通大学,2013.
WU Hai-yan. Study on modeling and simulation of split-shaft gas turbine[J]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [10] 骆广琦,桑增产,等.航空燃气涡轮发动机数值仿真[M].北京:国防工业出版社,2007.
LUO Guang-qi, SANG Zeng-chan, et al. Numerical simulation of aviation gas turbine engine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [11] ORTEGA J M, RHEINBOLDT W C. Iterative solution of non-linear equation in several variables[M]. New York and London: Academic Press, 1970.
- [12] PODISUK M, CHUNDANG U, SANPRASERT W. Single step formulas and multi-step formulas of the integration method for solving the initial value problem of ordinary differential equation [J]. Applied Mathematics & Computation, 2007, 190(2):1438-1444.
- [13] CORDERO A, HUUESO J L, MARTÍNEZ E, et al. A modified Newton-Jarratt's composition[J]. Numerical Algorithms, 2010, 55(1):87-99.
- [14] 张辉,陈豫眉,周琴.构造一种六阶牛顿迭代法解非线性方程组[J].山东师范大学学报(自然科学版),2017,32(4):37-44.
ZHANG Hui, CHEN Yu-mei, ZHOU Qin. Construction of a family of sixth-order newton-type iterative method[J]. Journal of Shandong Normal University (Natural Science), 2017, 32(4):37-44.

(刘颖编辑)