

基于改进广义牛顿法的燃气轮机性能数字孪生体构建方法

闫斌斌¹, 冯 坤^{1,3}, 江志农^{1,2}

(1. 北京化工大学 高端机械装备健康监控与自愈化北京市重点实验室, 北京 100029; 2. 北京化工大学 发动机健康监控及网络化教育部重点实验室, 北京 100029; 3. 北京化工大学 航空发动机振动健康监控联合实验室, 北京 100029)

摘 要: 为了提高燃气轮机性能数字孪生体求解过程的鲁棒性, 提出了一种基于改进广义牛顿法的燃气轮机性能数字孪生体构建方法。首先, 选择广义牛顿法作为性能数字孪生体的求解方法; 其次, 在广义牛顿迭代法的基础上, 调整隐式非线性方程对应曲线切线的斜率, 改进广义牛顿法的初值设置方法; 最后, 构建性能数字孪生体, 将改进广义牛顿法嵌入性能数字孪生体。通过 PGT25 + 型燃气轮机实测数据验证提出的方法, 结果表明: 扩大初值范围后, 基于改进广义牛顿法的性能数字孪生体的仿真精度仍与原始方法一致, 该方法能够提高性能数字孪生体的鲁棒性, 扩大性能数字孪生体的适用范围。

关 键 词: 燃气轮机; 改进牛顿迭代法; 数字孪生体; 性能仿真; 变工况

中图分类号: TK471 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2022.01.015

[引用本文格式] 闫斌斌, 冯 坤, 江志农. 基于改进广义牛顿法的燃气轮机性能数字孪生体构建方法[J]. 热能动力工程, 2022, 37(1): 110-116. YAN Bin-bin, FENG Kun, JIANG Zhi-nong. Construction method of gas turbine performance digital twin based on enhanced generalized newton method[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(1): 110-116.

Construction Method of Gas Turbine Performance Digital Twin based on Enhanced Generalized Newton Method

YAN Bin-bin¹, FENG Kun^{1,3}, JIANG Zhi-nong^{1,2}

(1. Beijing Key Laboratory of Health Monitoring Control and Fault Self-recovery for High-end Machinery, Beijing University of Chemical Technology, Beijing, China, Post Code: 100029; 2. Key Lab of Engine Health Monitoring Control and Networking of Ministry of Education, Beijing University of Chemical Technology, Beijing, China, Post Code: 100029; 3. Joint Laboratory of Aero Engine Vibration Health Monitoring, Beijing University of Chemical Technology, Beijing, China, Post Code: 100029)

Abstract: In order to improve the robustness in the solution process of the gas turbine performance digital twin, a construction method of the gas turbine performance digital twin based on the enhanced generalized Newton method is proposed. First, select the generalized Newton method as the solution method of the performance digital twin; Secondly, on the basis of the generalized Newton iteration method, adjust the slope of the implicit nonlinear equation corresponding to the curve tangent to improve the initial value setting method of the generalized Newton method; Finally, construct the performance digital twin, and embed the enhanced generalized Newton method into the performance digital twin. The proposed method is verified by the testing data of the PGT25 + gas turbine. The results show that after expanding the initial value range, the simulation accuracy of the performance digital twin based on the enhanced generalized

收稿日期: 2021-05-07; 修订日期: 2021-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(U1708257)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(U1708257)

作者简介: 闫斌斌(1993-), 男, 山西临汾人, 北京化工大学博士研究生。

通讯作者: 冯 坤(1982-), 男, 山东潍坊人, 北京化工大学教授

Newton method is still consistent with the original method, which can improve the robustness of the performance digital twin, and expand the application scope of performance digital twins.

Key words: gas turbine, enhanced Newton iteration method, digital twin, performance simulation, variable operating conditions

引言

燃气轮机结构复杂,长期在高转速、高压、高温度的恶劣环境中运行,极易发生性能退化或故障,导致燃气轮机工作效率下降^[1],甚至诱发安全事故。因此,准确地掌握燃气轮机性能状态对燃气轮机的运行维护 and 健康管理具有重要意义^[2]。

近年来数字孪生成为求解复杂多元系统耦合问题的一种新方法,在燃气轮机运行维护 and 健康管理领域,性能数字孪生将使维修效率大大提高,运营成本得到降低^[3]。当前,燃气轮机维护均属于基于状态的维护(Condition Based Maintenance, CBM),为了能达到更精准的预测性维护,需要一个能精确映射物理实体发动机性能状态的数字模型,称为性能数字孪生模型^[4]。物理实体燃气轮机的运行环境、条件以及状态参数被输入到数字孪生模型中,便可在数字空间准确地复现该燃气轮机的性能状态^[5]。

燃气轮机性能仿真作为数字孪生技术手段之一,可用于评估燃气轮机的性能状态^[6]。目前,燃气轮机性能仿真研究主要以计算机仿真软件为平台,通过各种算法构建燃气轮机性能数字孪生体,可实现燃气轮机稳态和动态性能仿真^[7-9]。准确的稳态性能是动态性能仿真的基础,一般选取设计点稳态模型的仿真结果作为动态模型的循环参考点^[10],稳态模型的准确性直接影响动态模型仿真精度^[11-12]。稳态模型求解通过 Newton-Raphson 法反复迭代收敛实现,而收敛的关键因素之一是初值的选取,稳态模型的收敛性对迭代初值特别敏感。目前的方法是参考类似燃气轮机的已知数据,通过试凑法选择初值^[13],然而该方法耗时长、准确率低,容易造成模型无法收敛,因此该方法的鲁棒性有待提高。

对此,本文提出了一种基于改进广义牛顿法的

性能数字孪生体构建方法。选择广义牛顿法作为性能数字孪生体的求解方法,在广义牛顿法的基础上,通过调整隐式非线性方程对应曲线切线的斜率,改进广义牛顿法的初值设置方法。该方法可以克服初值试凑的局限性,提高性能数字孪生体的鲁棒性。

1 广义牛顿法

传统的牛顿法需对非线性方程组显式表达,而本文的方程组形式为隐式方程组^[7],因此选择广义牛顿法对其进行求解。理想情况下,发动机在某一设定状态下稳定工作时,一定存在一组解使稳态共同工作方程成立。但是由于建模过程中存在简化,还有特性曲线拟合误差、设计参数取值误差以及非线性求解方法本身的局限导致的误差,稳态协调方程实际很难成立。只能通过数值算法求解,从而得到一组满足精度要求的解。

理想稳态协调方程为:

$$\begin{cases} f_1(n, \pi_c, \pi_t, \pi_{pt}) = (G_{c,out} + G_f)/G_{t,in} - 1 = 0 \\ f_2(n, \pi_c, \pi_t, \pi_{pt}) = G_{p,lin}/G_{t,out} - 1 = 0 \\ f_3(n, \pi_c, \pi_t, \pi_{pt}) = \eta_{m,t} W_t/W_c - 1 = 0 \\ f_4(n, \pi_c, \pi_t, \pi_{pt}) = \eta_{m,pt} W_{pt}/W_e - 1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: n —燃气发生器转速, r/min; π_c —压气机压比; π_t —燃气涡轮膨胀比; π_{pt} —动力涡轮膨胀比; G —流量, kg/s; η —效率; W —功率, kW; 下标 c, t, pt, f, in, out, m 和 e—压气机、燃气涡轮、动力涡轮、燃料、进口、出口、机械参数和负载。

实际稳态协调方程存在误差,为了体现实际存在的误差,将式(1)转换为式(2):

$$\begin{cases} f_1(n, \pi_c, \pi_t, \pi_{pt}) = (G_{c,out} + G_f)/G_{t,in} - 1 = e_1 \\ f_2(n, \pi_c, \pi_t, \pi_{pt}) = G_{p,lin}/G_{t,out} - 1 = e_2 \\ f_3(n, \pi_c, \pi_t, \pi_{pt}) = \eta_{m,t} W_t/W_c - 1 = e_3 \\ f_4(n, \pi_c, \pi_t, \pi_{pt}) = \eta_{m,pt} W_{pt}/W_e - 1 = e_4 \end{cases} \quad (2)$$

式中: e_1 —平衡方程 1 的残差; e_2 —平衡方程 2 的残差; e_3 —平衡方程 3 的残差; e_4 —平衡方程 4 的残差。

广义牛顿法中关键是雅可比矩阵 (J) 的求解, 一般牛顿法中求解误差矩阵通过对非线性方程组中的每一个方程求偏导数构成雅可比矩阵, 广义牛顿法求解雅可比矩阵则是调用模型输出的误差向量进行差商运算, 逐项计算出雅可比矩阵中的每一项元素, 进而组成雅可比矩阵, 其形式为:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial x_1} & \frac{\partial e_1}{\partial x_2} & \frac{\partial e_1}{\partial x_3} & \frac{\partial e_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial e_2}{\partial x_1} & \frac{\partial e_2}{\partial x_2} & \frac{\partial e_2}{\partial x_3} & \frac{\partial e_2}{\partial x_4} \\ \frac{\partial e_3}{\partial x_1} & \frac{\partial e_3}{\partial x_2} & \frac{\partial e_3}{\partial x_3} & \frac{\partial e_3}{\partial x_4} \\ \frac{\partial e_4}{\partial x_1} & \frac{\partial e_4}{\partial x_2} & \frac{\partial e_4}{\partial x_3} & \frac{\partial e_4}{\partial x_4} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: ∂x_1 —迭代参数 1 的扰动; ∂x_2 —迭代参数 2 的扰动; ∂x_3 —迭代参数 3 的扰动; ∂x_4 —迭代参数 4 的扰动。

以雅可比矩阵中的第一行元素为例说明每一项元素的求解方法:

$$\begin{cases} \frac{\partial e_1}{\partial x_1} = \frac{E_1(1,1) - E_0(1,1)}{\Delta x_1} \\ \frac{\partial e_1}{\partial x_2} = \frac{E_2(1,1) - E_0(1,1)}{\Delta x_2} \\ \frac{\partial e_1}{\partial x_3} = \frac{E_3(1,1) - E_0(1,1)}{\Delta x_3} \\ \frac{\partial e_1}{\partial x_4} = \frac{E_4(1,1) - E_0(1,1)}{\Delta x_4} \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_0 —模型初始误差向量; E_1 —模型第 1 次扰动后的误差向量; E_2 —模型第 2 次扰动后的误差向量; E_3 —模型第 3 次扰动后的误差向量; E_4 —模型第 4 次扰动后的误差向量; $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ 和 Δx_4 —与 $\partial x_1, \partial x_2, \partial x_3$ 和 ∂x_4 含义相同。

将广义牛顿法求解非线性方程组的过程编写成 M 文件, 其中每更新一次雅可比矩阵需要运行 5 次仿真模型, 仿真结果即为稳态协调工作点, 仿真结果包括各截面的热力参数和误差向量。

2 改进广义牛顿法

广义牛顿法可通过离散方式迭代求解隐式非线性方程组, 该方法对迭代初值要求较高, 只具有局部收敛性。改进广义牛顿法通过调整非线性方程组对应的雅可比矩阵保证取任意初值, 迭代均可收敛, 改善广义牛顿法对初值的苛刻要求。

假设隐式非线性方程组的解为式 (5), 收敛域为 $x_1 \in [x_{10} - \delta_1, x_{10} + \delta_1], x_2 \in [x_{20} - \delta_2, x_{20} + \delta_2], x_3 \in [x_{30} - \delta_3, x_{30} + \delta_3], x_4 \in [x_{40} - \delta_4, x_{40} + \delta_4]$ 。

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4] \quad (5)$$

式中: X —迭代参数向量; x_{10}, x_{20}, x_{30} 和 x_{40} —迭代参数初始值; $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 和 δ_4 —迭代参数偏离量, $\delta_1 = x_{10} \cdot 5\%, \delta_2 = x_{20} \cdot 5\%, \delta_3 = x_{30} \cdot 5\%, \delta_4 = x_{40} \cdot 5\%$ 。

理论上 X 定义域为 $[0, \infty]$, 因此在理论定义域 (拓宽域) 内任取一个初值 $X_0 = [x_{10}, x_{20}, x_{30}, x_{40}]$, 则按照广义牛顿法计算, 可得:

$$X_1 = X_0 - J^{-1} \cdot E_1 \quad (6)$$

式中: X_1 —第 1 次运行的迭代参数向量; X_0 —初始迭代参数向量, E_1 —第 1 次扰动后的误差向量。

若 x_1, x_2, x_3, x_4 均落在各自收敛域区间内, 则进入广义牛顿迭代, 如其中任意元素在收敛域区间外, 对雅可比矩阵进行如下处理, 如式 (7), 直到 X 落在收敛域内为止, 其迭代格式如式 (8) 所示。

$$J' = \frac{1}{2^m} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial x_1} & \frac{\partial e_1}{\partial x_2} & \frac{\partial e_1}{\partial x_3} & \frac{\partial e_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial e_2}{\partial x_1} & \frac{\partial e_2}{\partial x_2} & \frac{\partial e_2}{\partial x_3} & \frac{\partial e_2}{\partial x_4} \\ \frac{\partial e_3}{\partial x_1} & \frac{\partial e_3}{\partial x_2} & \frac{\partial e_3}{\partial x_3} & \frac{\partial e_3}{\partial x_4} \\ \frac{\partial e_4}{\partial x_1} & \frac{\partial e_4}{\partial x_2} & \frac{\partial e_4}{\partial x_3} & \frac{\partial e_4}{\partial x_4} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: m —斜率改变次数, $m = 1, 2, 3, \dots$, 取决于初值满足收敛域的迭代次数。

$$X_{k+1} = X_k - J^{-1} \cdot E_k \quad (8)$$

式中: E_k —模型实时计算的误差向量, $E_k = [e_1, e_2, e_3, e_4]$; X_k —第 k 步的迭代参数向量。

图 1 为改进广义牛顿法求解流程。

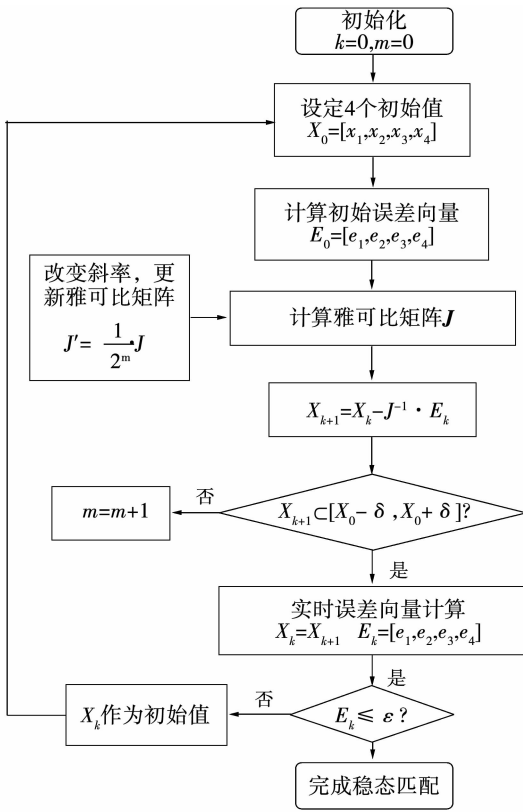


图 1 改进广义牛顿法流程图

Fig. 1 Enhanced generalized Newton method flow chart

在迭代过程中,每一步迭代都要检查迭代的根是否落在收敛区间外,若是,则将斜率增加一倍重新计算即可。另外, $m = 0$ 即为常规广义牛顿迭代法,所以广义牛顿迭代法可视为本文方法的特例。

3 燃气轮机性能数字孪生体构建

以分轴燃气轮机为例,介绍性能数字孪生体构建过程。分轴燃气轮机整体模型由各部件模块和稳态协调模块组成,其中稳态协调模块计算结果用于改进广义牛顿法求解过程。

3.1 稳态协调模块

燃气轮机稳定运行时,为了保证各部件之间工作状态协调,必须满足流量平衡和功率平衡。分轴燃气轮机需要满足以下 4 组平衡方程:

压气机空气流量、燃料流量和燃气涡轮燃气流量平衡:

$$G_{t,in} - G_{c,out} - G_f = 0 \quad (9)$$

式中: $G_{t,in}$ —燃气轮机入口流量, kg/s; $G_{c,out}$ —压气机出口流量, kg/s; G_f —燃油流量, kg/s。

燃气涡轮燃气流量和动力涡轮燃气流量平衡:

$$G_{pt,in} - G_{t,out} = 0 \quad (10)$$

式中: $G_{pt,in}$ —动力涡轮入口流量, kg/s。

压气机耗功和高压涡轮有效功平衡:

$$\eta_{mt} \cdot W_t - W_c = 0 \quad (11)$$

式中: W_t —燃气涡轮输出功率, kW; W_c —压气机消耗功率, kW; η_{mt} —燃气发生器机械效率。

动力涡轮输出功率和负载功率平衡:

$$\eta_{m,pt} W_{pt} - W_e = 0 \quad (12)$$

式中: W_{pt} —动力涡轮输出功率, kW; W_e —负载消耗功率, kW; $\eta_{m,pt}$ —动力涡轮 - 负载轴系机械效率。

流量值和功率值均可以从部件模块输出变量中实时获得,通过数据传递线将其通入稳态协调模块,用于判断稳态协调平衡方程是否成立。稳态协调模块内部建模情况如图 2 所示。

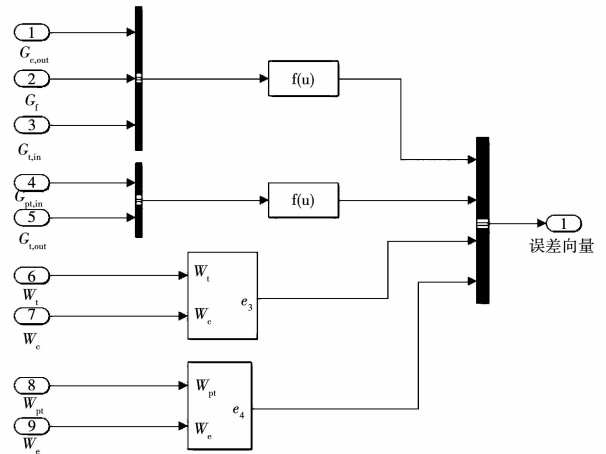


图 2 稳态求解模块

Fig. 2 Steady state solution module

3.2 燃气轮机性能数字孪生体

根据分轴燃气轮机的物理结构和工作原理,将各部件模块和稳态协调模块组合起来构成分轴燃气轮机性能数字孪生体。如图 3 所示。

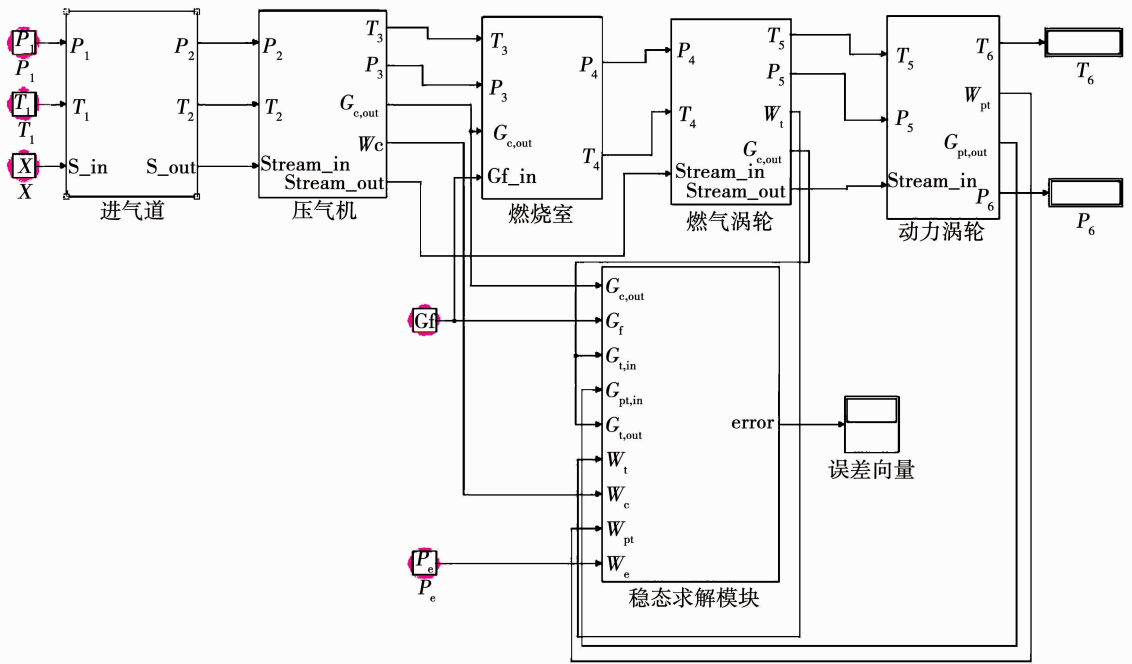


图3 燃气轮机稳态仿真整体模型

Fig. 3 Steady state simulation integral model of gas turbine

该分轴燃气轮机整体模型运行所需参数有入口空气温度和压力、燃油流量 G_f 、负载功率 W_e 、燃气发生器转速 n 、压气机增压比 π_c 、燃气涡轮膨胀比 π_t 和动力涡轮膨胀比 π_{pt} 。其中,前 2 个参数入口空气温度和压力作为常量从进气道入口流入模型,后面 6 个参数构成一个六维向量,从进气道流入,贯穿仿真模型,各部件运行所需参数可以从中调取。

4 算例验证

为了验证改进广义牛顿法对性能数字孪生体仿真鲁棒性的影响,通过 PGT25 + 型燃气轮机现场实测数据验证该方法的有效性。对比广义牛顿法改进前后的初值设置和对应性能数字孪生体的仿真结果。

4.1 初值设置对比

根据收敛域计算方法,计算不同工况下的收敛域,分轴燃气轮机性能数字孪生体的迭代参数包括燃气发生器转速、压气机压比、燃气涡轮膨胀比和动力涡轮膨胀比 4 个参数,各参数的收敛域区间如表 1 所示。

为了对比广义牛顿法和改进广义牛顿法在性能数字孪生体仿真过程中对初值设置的敏感度,将广义牛顿法的初值设置在收敛域内,同时将改进广义

牛顿法的初值设置在收敛域外,如表 2 所示。从表中可以看出,广义牛顿法初值在收敛域内,改进广义牛顿法的初值在收敛域外,偏离度大于 5%。

表 1 不同工况下的收敛域区间

Tab. 1 Convergence domain intervals under different working conditions

工况	迭代参数	收敛域区间
1.0	燃气发生器转速 n	(9 261.6, 10 236.5)
	压气机压比 π_c	(18.3, 20.3)
	燃气涡轮膨胀比 π_t	(4.3, 4.8)
	动力涡轮膨胀比 π_{pt}	(3.9, 4.3)
0.8	燃气发生器转速 n	(8 976.7, 9 921.7)
	压气机压比 π_c	(15.8, 17.4)
	燃气涡轮膨胀比 π_t	(4.3, 4.7)
	动力涡轮膨胀比 π_{pt}	(3.3, 3.7)
0.6	燃气发生器转速 n	(8 808.5, 9 735.7)
	压气机压比 π_c	(13.0, 14.3)
	燃气涡轮膨胀比 π_t	(4.3, 4.7)
	动力涡轮膨胀比 π_{pt}	(2.8, 3.1)
0.4	燃气发生器转速 n	(8 512.0, 9 408.0)
	压气机压比 π_c	(9.2, 10.2)
	燃气涡轮膨胀比 π_t	(4.1, 4.5)
	动力涡轮膨胀比 π_{pt}	(2.1, 2.3)

表 2 广义牛顿法和改进广义牛顿法的初始值及其与收敛域从属关系

Tab.2 The initial values of generalized Newton method and enhanced generalized Newton method and their dependency relation to convergence domain

方法	工况	初始值	是否属于收敛域
广义牛顿法	1.0	(9700,19,4.5,4)	是
	0.8	(9500,16,4.5,3.5)	是
	0.6	(9200,13,4.4,2.9)	是
	0.4	(8900,9,4,2)	是
改进广义牛顿法	1.0	(5000,5,2,1)	否
	0.8	(5000,5,2,1)	否
	0.6	(5000,5,2,1)	否
	0.4	(5000,5,2,1)	否

4.2 仿真结果对比

基于上述初值设置条件,分别对基于广义牛顿法和改进广义牛顿法的性能数字孪生体进行仿真,并与实测值进行对比,选择 1.0,0.8,0.6 和 0.4 这 4 个工况。可用于验证的测量参数包括压气机出口温度 T_2 、燃气涡轮出口温度 T_4 、动力涡轮出口温度 T_5 、压气机出口压力 p_2 和燃气涡轮出口压力 p_4 ,如表 3~表 6 所示。从表中可以看出,广义牛顿法的仿真结果与实测结果高度一致,改进广义牛顿法在初值偏离收敛域的情况下,仿真结果与广义牛顿法基本一致。

表 3 仿真结果对比(1.0 工况)

Tab.3 Comparison of simulated results(under working condition of 1.0)

工况	测量参数				
	T_2	T_4	T_5	p_2	p_4
现场数据	770.4	1 098.6	814.2	1 780.4	375.8
GNM	770.9	1 099.0	814.9	1 782.7	376.1
EGNM	771.2	1 099.7	815.4	1 784.1	376.6

表 4 仿真结果对比(0.8 工况)

Tab.4 Comparison of simulated results(under working condition of 0.8)

工况	测量参数				
	T_2	T_4	T_5	p_2	p_4
现场数据	728.7	1 021.6	774.4	1 537.0	325.6
GNM	729.3	1 021.8	775.3	1 540.2	326.1
EGNM	729.6	1 022.5	776.1	1 539.8	326.7

表 5 仿真结果对比(0.6 工况)

Tab.5 Comparison of simulated results (under working condition of 0.6)

工况	测量参数				
	T_2	T_4	T_5	p_2	p_4
现场数据	699.7	948.3	745.7	1 260.7	268.9
GNM	700.2	948.5	745.7	1 262.9	269.0
EGNM	700.8	949.6	747.4	1 263.1	269.7

表 6 仿真结果对比(0.4 工况)

Tab.6 Comparison of simulated results(under working condition of 0.4)

工况	测量参数				
	T_2	T_4	T_5	p_2	p_4
现场数据	657.5	862.1	691.5	892.3	199.4
GNM	658.0	863.2	692.7	892.5	199.5
EGNM	658.3	864.1	692.8	892.4	199.9

为了进一步考察改进广义牛顿法的仿真精度,分别计算基于广义牛顿法(Generalized Newton Method,GNM)和改进广义牛顿法(Enhanced Generalized Newton Method,EGNM)的性能数字孪生体的仿真精度,以相对误差的绝对值表征仿真精度,取各测量参数仿真误差的最大值进行对比,如图 4 所示。从图 4 中可以看出,改进广义牛顿法的仿真精度与广义牛顿法的仿真精度基本一致,广义牛顿法最大仿真误差 0.13%,改进广义牛顿法最大仿真误差 0.18%,均能满足性能监测和故障诊断的工程需要。

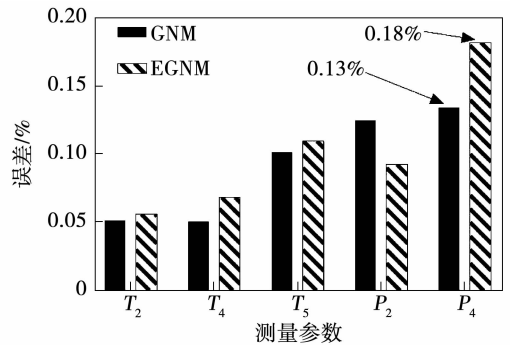


图 4 基于 GNM 和 EGNM 的性能数字孪生体仿真误差对比

Fig.4 Comparison of simulated errors of performance digital twin based on GNM and EGNM

5 结论

针对广义牛顿法对迭代初值的苛刻要求,提出了一种基于改进牛顿法的燃气轮机性能数字孪生体构建方法,对比了广义牛顿法和改进广义牛顿法的仿真结果和仿真误差,得到了如下结论:

(1) 基于改变斜率法的改进广义牛顿法克服了传统广义牛顿法对迭代初值设置的苛刻要求,初值设置不再受限,大大提升了燃气轮机性能数字孪生体的鲁棒性。

(2) 构建的燃气轮机性能数字孪生体可实现变工况性能仿真,能够映射物理实体燃气轮机实时性能状况,为燃气轮机性能数字孪生体构建提供了理论依据。

(3) 该方法已应用于 GE PGT25 + 燃气轮机。对比基于 GNM 方法和 EGNM 方法性能数字孪生体的仿真结果,仿真结果基本一致,验证了 EGNM 方法的有效性。

(4) 进一步对比基于广义牛顿法和改进广义牛顿法的性能数字孪生体的仿真精度,两者仿真精度基本一致,进一步验证了 EGNM 方法的有效性。两种方法均能满足性能监测和故障诊断的工程需要。为燃气轮机的现场维护,状态监测和故障诊断提供了技术支撑。

今后应考虑测量噪声对性能数字孪生体仿真的影响并基于性能数字孪生体研究气路故障诊断方法。

参考文献:

- [1] 李世尧,李振林,谷思宇.一种输气管道燃气轮机性能计算方法及其验证[J].油气储运,2019,38(6):678-684.
LI Shi-yao, LI Zhen-lin, GU Si-yu. A performance calculation method for gas turbines used in gas pipelines and its validation [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(6): 678-684.
- [2] 李刚,谷思宇,贾东卓,等.一种输气管道燃气轮机的综合故障诊断方法[J].油气储运,2019,38(5):568-573.
LI Gang, GU Si-yu, JIA Dong-zhuo, et al. A comprehensive fault diagnosis method used for the gas turbines in gas pipelines [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(5): 568-573.
- [3] 陶飞,刘蔚然,刘检华,等.数字孪生及其应用探索[J].计算机集成制造系统,2018,24(1):4-21.

- TAO Fei, LIU Wei-ran, LIU Jian-hua, et al. Digital twin and its potential application exploration [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 4-21.
- [4] GLAESSEGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and U. S. air force vehicles [C]//in 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2012.
- [5] 刘魁,刘婷,魏杰,等.数字孪生在航空发动机可靠性领域的应用探索[J].航空动力,2019,34(4):61-64.
LIU Kui, LIU Ting, WEI Jie, et al. Digital twin and its potential application in the field of aero engine reliability [J]. Aerospace Power, 2019, 34(4): 61-64.
- [6] 周少伟,吴炜,张涛,等.舰船动力系统数字孪生技术体系研究[J].中国舰船研究,2021,16(2):1-6.
ZHOU Shao-wei, WU Wei, ZHANG Tao, et al. Digital twin technical system for marine power systems [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(2): 1-6.
- [7] 应雨龙.船用燃气轮机气路诊断技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
YING Yu-long. Study on gas path diagnostics for marine gas turbine [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [8] 王文华,张乔斌,余又红.某艇用三轴燃气轮机性能仿真研究[J].海军工程大学学报,2017,29(5):88-91.
WANG Wen-hua, ZHANG Qiao-bin, YU You-hong. Performance simulation of X-type naval ship's triple-shaft gas turbine [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2017, 29(5): 88-91.
- [9] KI J, KONG C, KHO S, et al. Steady-state and transient performance modeling of smart UAV propulsion system using Simulink [C]//in ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air, 2008: 619-625.
- [10] YAN B, HU M, FENG K, et al. A tuning scheme of cycle reference point for gas turbine adaptive performance simulation with field data [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2020, 34(12): 5279-5294.
- [11] RASHDZADEH H, HOSSEINALIPOUR S M, MOHAMMADZADEH A. The SGT-600 industrial twin-shaft gas turbine modeling for mechanical drive applications at the steady state conditions [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(10): 4473-4481.
- [12] TSOUTSANIS E, MESKIN N, BENAMMAR M, et al. Dynamic performance simulation of an aeroderivative gas turbine using the Matlab Simulink environment [C]//in ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2013.
- [13] 吴海燕.分轴燃气轮机的建模和仿真研究[D].上海:上海交通大学,2013.
WU Hai-yan. Study on modeling and simulation of split-shaft gas turbine [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.