

基于 MATLAB 的三轴燃气轮机 动态仿真模型研究

敖晨阳, 张 宁, 陈华清

(海军装备论证中心 舰船所, 北京 100073)

摘 要: 仿真技术是燃气轮机性能研究的有效手段。本文作者采用准非线性方法建立了三轴式燃气轮机数学模型。基于动态仿真软件 MATLAB, 开发出面向对象的燃气轮机动态仿真平台。验证仿真结果表明, 该仿真模型正确合理、简便易行。

关 键 词: MATLAB; 三轴燃气轮机; 仿真模型; 面向对象
中图分类号: TP391.9; TK479 文献标识码: A

1 引言

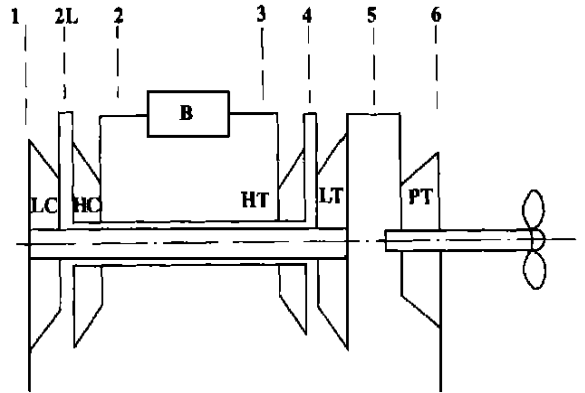
燃气轮机作为现代化船用的主推进动力之一, 对其动态性能的研究是非常必要的, 只有充分了解其动态性能(如加速、减速等工况下的性能和设计指标), 才能设计出合理的控制系统, 使燃气轮机既能可靠工作又具有良好的机动性, 而利用计算机仿真技术则是实现这一目的的有效手段^[1]。

如何利用计算机对燃气轮机进行仿真、分析和研究, 关键在于构造出准确描述燃机特性的仿真模型, 只有所使用的仿真模型能够真实地反映研究对象的本质, 所研究的仿真结果才有意义。目前, 燃气轮机主要有三种建模方法^[2]: 稳态模型法、准非线性模型法、非线性热力学模型。根据不同的仿真目的, 可采用不同的建模方法。在本研究中, 燃气轮机只作为船用推进系统的一个输出扭矩和转速(功率)的部件, 我们所感兴趣的是其外部的动态特性, 而对其内部特性, 如内部能量转换和流动过程, 则不多研究。因此, 根据这一情况, 作者采用了准非线性建模方法来研究某型三轴式燃气轮机仿真模型, 该模型的特点是:

- (1) 以稳态工作线为小偏差线性化为起点, 分段线性化;
- (2) 考虑了压气机、涡轮机的特性, 以及燃气热力性质的变化;
- (3) 计算精度高, 运算速度快, 能完成大扰动过渡过程的计算。

2 三轴式燃气轮机的数学模型

图 1 给出了某三轴式燃气轮机的动力学物理模型。从图中可以看出, 该机是一个多输入多输出的复杂非线性连续系统, 主要由进排气道、双转子燃气发生器、动力涡轮等组成。其模型中除了有转动惯性环节以外, 还应包含容积惯性和热惯性等环节, 但考虑到容积惯性和热惯性与转子转动惯性相比要小得多, 对于船用燃气轮机而言往往都予以忽略。因而, 描述其动态过程的微分方程主要考虑其转子转动惯性的转子微分方程组, 即:



1—低压压气机入口; 2L—低压压气机出口; 2—高压压气机出口;
3—高压涡轮入口; 4—高压涡轮出口; 5—低压涡轮出口; 6—动力
涡轮出口

图 1 三轴式燃气轮机简图

$$\left. \begin{aligned} KJ_H \frac{dn_H}{dt} &= \Delta Q_H \\ KJ_L \frac{dn_L}{dt} &= \Delta Q_L \\ KJ_{PT} \frac{dn_{PT}}{dt} &= \Delta Q_{PT} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: J_H 、 J_L 、 J_{PT} 分别为高、低压及动力涡轮转

子转动惯量; n_H 、 n_L 、 n_{PT} 分别为各转子转速; ΔQ 为各转子剩余力矩; N_e 为燃气轮机有效功率; Q_p 为负载阻力矩。

此外, 为了求解这组方程式, 还须借助燃机部件特性方程组及参数联系方程组^[2], 燃机部件特性一般可由厂商提供的压气机及涡轮特性曲线图获得。

对图 1 所示的三轴燃气轮机而言, 在确定的大气压力 P_1 和大气温度 T_1 条件下, 决定其任一运行状态的参数, 除了控制量外, 还有状态变量 n_H 、 n_L 、 n_{PT} 。而从监控的需要来讲, 燃气轮机的控制量只有一个, 即燃油的供油量 W_f , 它直接影响燃气发生器的两转子转速和涡轮与压气机的功率平衡, 然后再向动力涡轮提供燃气。因此, 当 W_f 、 n_H 、 n_L 、 n_{PT} 这四个量确定后, 与之相对应的燃气轮机的动态运行状态就唯一确定, 发动机所有的参数就有了确定的值。即燃气轮机所有非平衡参数可用如下通式来表示:

$$Z_i = Z_i(W_f, n_H, n_L, n_{PT}) \quad (2)$$

上式表示的函数关系, 实质上代表了上述给定的部件特性方程组及参数联系方程组所确定的参数之间的物理数学关系。将式(1)与式(2)结合起来就形成了反映燃气轮机动态特性完整的数学模型。计算这样一个动态系统的常规方法是直接求解方程组。但实际上对于计算象式(2)这样的四变量的函数, 在有限的仿真系统规模及处理能力的条件下, 要想达到足够的精度, 直接求解在实际应用时是有难度的, 需要经过迭代和非常复杂的运算。

为了解决该问题, 参考文献[3], 作者采用一种三轴燃气轮机准非线性模型, 即将发动机的任一非平衡状态参数简化为控制量 W_f 和高压转子转速 n_H (或 n_L) 的函数。将以上函数以不同的基础按泰勒级数展开就决定了不同的建模方法, 准非线性模型是以稳态线为基础, 而不是以设计稳态点为基础。这就考虑了不同稳态点系数不相同的情况, 提高了仿真精度, 减少了误差。

因此将上式多元函数沿高压压气机稳态工作线 $f(n_H)$ 逐点用泰勒级数展开, 略去二次以上高阶项, 取其线性项为:

$$\Delta Q_H = \Delta Q_{HSS} + \frac{\partial \Delta Q_H}{\partial W_f} \Big|_{SS} \cdot [W_f - W_{SS}] + \frac{\partial \Delta Q_H}{\partial n_L} \Big|_{SS} \cdot \Delta n_L \quad (3)$$

式中 Δn_H 、 Δn_L 是相对于稳态点的小偏差, ΔQ_H 是高压转子剩余力矩, 在稳态点为零, 即:

$$\Delta Q_{HSS}(n_H) = 0.$$

同理, 可以获得其它非平衡参数的泰勒展开式。

上面各方程式中的系数, 与设计稳态工作线有关的参数如 W_{SS} 、 n_L 等, 它们和高压转子转速之间的稳态对应关系须预先通过精细的燃机热力过程的仿真计算获得, 而各参数对 W_f 、 n_L 、 n_H 的偏导数必须在热力计算结果的基础上通过离线计算获得。

有了上述工作为基础, 可以建立起三轴式燃气轮机准非线性仿真数学模型。

当然, 为了实现燃机动态仿真, 还必须加入燃气轮机燃油调节系统仿真模型, 其功能是将燃机功率手柄角度信号(PLA)转变成对应的燃油供给量 W_f , 该系统主要由电子控制柜、燃油控制器(杜曼)及执行机构组成, 根据该系统工作原理, 可将系统的数学模型简化为比例积分调节(PI 控制), 并加上适当的惯性和滞后环节。在燃油控制器模型中, 可以根据需要设定对应的供油规律。

3 仿真语言及仿真模型的建立

建立了燃气轮机动态特性的数学模型后, 就可将其转换为可在计算机上运行的仿真模型。

以往基于仿真语言(如 ZFX 仿真软件)开发的燃气轮机仿真软件, 受当时仿真技术的局限, 存在建模功能弱、可重用性差、用户接口不够友好和不易扩展等诸多缺点, 一定程度上限制了仿真技术在燃气轮机性能研究的应用和推广。因此, 采用先进仿真技术和方法对燃气轮机进行仿真研究是非常有意义的。

作者采用目前计算机仿真领域最受欢迎的仿真软件—MATLAB 语言及其提供的图形交互式仿真工具箱 SIMULINK 作为三轴式燃气轮机仿真软件的开发工具^[4]。该语言除了传统的交互式编程之外, 还提供了丰富可靠的矩阵运算、图形绘制、数据处理、方便的 Windows 编程等便利工具。SIMULINK 是实现动态系统建模和仿真的一个集成环境, 已成为一种可视化、模块化、一体化的动态系统仿真软件, 同以往的仿真软件相比, 它的主要优点在于以图形界面方式向用户提供动态系统的建模手段, 实现了可视化建模, 实现了多工作环境间文件互用和数据交换, 具有很强的通用性和友好的人机界面。因此, 本文中选择 SIMULINK 作为燃气轮机仿真软件的开发工具, 深入研究了面向对象可视化建模方法, 建立了面向对象的燃气轮机仿真模型, 可供科技人员根据各自需要进行仿真研究。

由于三轴式燃气轮机的数学模型较复杂, 为了

使建模过程容易, 作者在建模过程采取了以下策略:

(1) 将整个燃气轮机系统模型按照实现功能的不同分解为若干子系统, 如燃机燃油调节器、燃机本体模型、燃机参数模型等, 采用面向对象的建模方法, 使模型描述更贴近实际燃机系统, 模型对象与实际系统中各个组成实体相对应。

(2) 分别构建各子系统的基本模型, 单独调试、修改, 直到符合要求, 然后利用 SIMULINK 的组合命令将一组基本模块转换为一个子系统方框。

(3) 采用“重用”技术。一方面充分利用模块库已有的模块或已建成的子系统来建立新模型; 另一方面对具有共性的系统建立通用模块, 以便于模型的管理和再使用。

(4) 对于系统中很难直接应用 SIMULINK 模块来构建的模型, 采用 MATLAB 语言编写 M 文件来替代模型, 实现了 MATLAB 内嵌文件与 SIMULINK 仿真模块的合理组合。

采取以上建模策略可使燃气轮机的仿真建模过程大为简化, 图 2 为依此建立的面向对象的三轴式燃气轮机仿真模型总体框图。

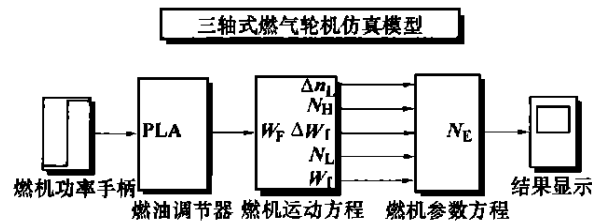


图 2 三轴式燃气轮机仿真模型框图

图中模块是通过利用 SIMULINK 中的 subsystem 模块构建的, 可以通过点击该模块进一步打开以便观测和修改。

从图 2 可以看出, 该仿真模型的仿真对象与实际燃机系统中的真实对象一一对应, 模型直观形象, 缩小了仿真模型与实际系统的距离, 提高了仿真模型的可理解性和可操作性。

4 模型的确认

模型是仿真的核心, 模型的正确性直接影响仿真结果的置信度。因此, 不仅要数学模型本身进行校核, 还须对模型在计算机上的实现的正确性进行确认。通过理论分析和实验结果相结合, 本文作者采取以下步骤进行模型的认可与验证。

4.1 数学模型的认可

包括燃气轮机动态数学模型和仿真模型的认可。数学模型的认可包括对数学表达式和建模方法的认可。而且, 由于数学模型是对真实对象的抽象, 数学建模过程需作假设, 对这些假设的合理性需进行认可。本文在建立燃机数学模型时主要作了两点假设: (1) 动力涡轮转速的变化对燃气轮机流量特性的影响较小; (2) 在动态过程中, 高低压转子转速的匹配关系可近似地取其稳态时的关系。这两点假设的合理性从文献[3]及压气机特性曲线中可以得到确认。

通过分块试验, 确认子系统仿真模型和接口间的正确性, 从局部到整体确认仿真模型的正确性。

4.2 稳态仿真结果的验证

为了对上述燃机稳态仿真模型进行验证, 最直接和最可靠的方法是将稳态仿真结果与燃机稳态试验结果相比较, 表 1 给出了某三轴式燃气轮机几个主要工况点计算结果和试验数据的对比。

表 1

工 况	参 数			
	$n_L / r \cdot \min^{-1}$	$n_H / r \cdot \min^{-1}$	$W_f / (kg \cdot h^{-1})$	$T_5 / ^\circ C$
1.0 计算	7 402	9 731	5 791	805
1.0 实测	7 346	9 729	5 775	769
1.0 误差	0.76%	0.02%	0.27%	4.6%
0.8 计算	7 045	9 532	5 093	758
0.8 实测	7 072	9 514	5 135	725
0.8 误差	0.4%	0.2%	0.8%	4.5%
0.35 计算	6 193	8 689	2 824	568
0.35 实测	6 232	8 615	2 955	555
0.35 误差	0.6%	0.9%	4.4%	2.3%
慢车 计算	3 088	6 150	500	290
慢车 实测	3 165	6 410	544	332
慢车 误差	2.4%	4.1%	8.0%	12%

表中 T_5 为低压涡轮出口温度; 误差为相对误差值。

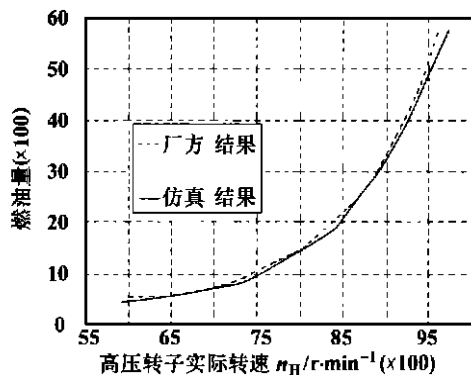


图 3 稳态计算结果 ($W_f \sim n_H$)

图 4 还分别给出了燃油量 W_f 与高压转子实际转速 n_H 、低压转子实际转速 n_L 与高压转子实际转

速 n_H 之间的对应关系。图中实线为热力学稳态模型计算结果, 虚线为厂商提供的稳态试验结果。

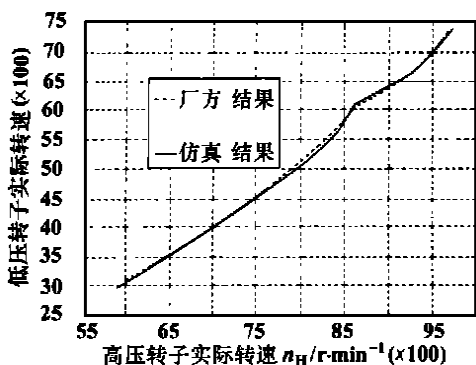


图4 稳态计算结果($n_L \sim n_H$)

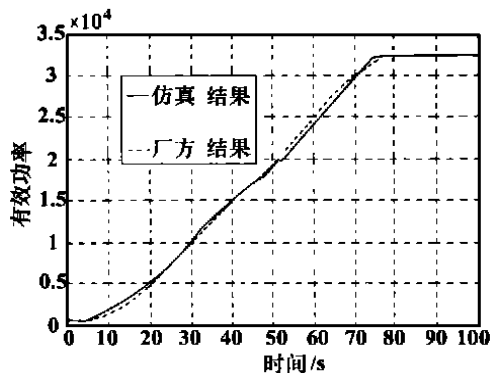


图5 燃气轮机加速工况($N_e \sim t$)

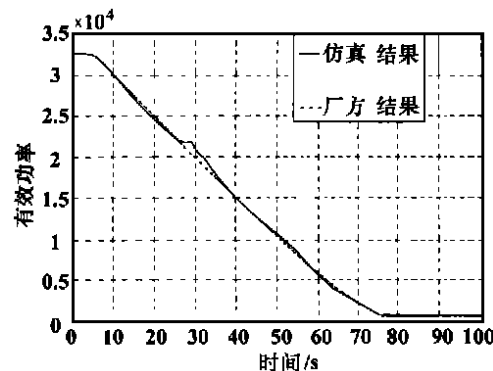


图6 燃气轮机降速工况($N_e \sim t$)

误差在允许范围内。

因此, 通过以上定量比较表明, 所建立的热力学稳态仿真模型是正确的。

4.3 动态仿真结果的验证

动态结果的验证是确定所建立燃机动态仿真模型的关键。当然最直接和可靠的方法也是和实机试验结果进行比较, 但由于缺少这方面的资料, 作者采用一种间接验证方法, 即将动态仿真结果与厂商提

供的同样控制条件下的动态仿真结果相比较, 如果两结果较为一致, 这可间接证明动态仿真模型的正确性。

图5是三轴式燃气轮机从慢车在90S内加速到1.0额定工况动态响应曲线。横坐标为仿真时间, 纵坐标为有效功率(N_e), 实线为动态仿真结果, 虚线为厂商提供的仿真结果, 通过比较可以看出, 除了在这个个别点有偏差外, 在其它大部分工况两者基本吻合, 偏差在较小范围。

图6是三轴式燃气轮机从1.0额定工况在80S内减速到慢车工况时的动态响应曲线, 坐标的设定见图6, 同样实线为动态仿真结果, 虚线为厂商提供的结果, 通过比较可以看出, 两组结果基本吻合, 偏差在较小的范围内。

通过以上对动态结果的对比, 表明采用作者所建立的三轴式燃气轮机动态模型进行动态仿真, 其计算结果和同样控制条件下厂商提供的仿真结果较为一致, 这就间接验证了动态仿真模型的有效性。

5 结束语

(1) 作者建立了完整的三轴式燃气轮机动态仿真模型和精确的热力学模型, 验证结果表明仿真模型的正确性和有效性, 完全能够模拟三轴式燃气轮机稳态和动态特性, 可为监控系统的设计和使用提供参考。

(2) 作者基于 MATLAB 语言及 SIMULINK 仿真环境下开发的三轴式燃气轮机动态仿真模型具有集成性、灵活性及可视性等特点。

(3) 作者采用“准非线性法”建立的三轴式燃气轮机动态仿真模型具有计算精度高、简便易行, 且运算速度快等特点。

参考文献:

- [1] 汪玉. 舰用燃气轮机的实时仿真数学模型[J]. 热能动力工程, 1988, 3(5): 1-6.
- [2] 翁史烈. 燃气轮机性能分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.
- [3] 翁史烈, 张伯年, 朱宏. 燃气轮机可调桨推进装置实时混合仿真[J]. 热能动力工程, 1989 4(5): 1-8.
- [4] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计—MATLAB 语言及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

(渠源 编辑)

Through a simulation calculation of the air-tightness test of a steam turbine vacuum system it is concluded that the vacuum decrease rate is not a single-valued function of the air leakage into the condenser. The vacuum decrease rate can be affected more or less by a multitude of factors. Among these one may list: steam turbine load, cooling water flow rate, inlet temperature of cooling water and condenser tube material, etc. A detailed analysis is performed of the effect of the above factors on the vacuum decrease rate. The conclusions reached can be of some reference value for a more accurate evaluation of the steam turbine vacuum system. **Key words:** steam turbine, condenser, air-tightness test of a vacuum system

凝汽器喉部蒸汽流动的三维数值模拟 = **Three-dimensional Numerical Simulation of the Steam Flow at a Condenser Throat Section** [刊, 汉] / CUI Guo-min, CAI Zu-hui, LI Mei-ling (Thermal Energy Engineering Research Institute under the Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 520 ~ 522

With the help of a direct simulation Monte Carlo method incorporating a super-particle model and through a domain-decomposition and mathematical modeling of a steam turbine condenser throat a three-dimensional numerical simulation was conducted of the steam flow at the condenser throat of a specific structure. The simulation of the throat steam flow was undertaken with a focus on the analysis of its flow distribution. As a result, identified were the non-uniformity feature of the throat flow field and the underlying cause of the non-uniform flow field. **Key words:** condenser throat, numerical simulation, direct simulation Monte Carlo method

基于 MATLAB 的三轴燃气轮机动态仿真模型研究 = **Dynamic Simulation Modeling of a Three-shaft Gas Turbine Based on a Software MATLAB** [刊, 汉] / AO Chenyang, ZHANG Ning, CHEN Hua-qing (Naval Equipment Research Center, Beijing, China, Post Code: 100073) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 523 ~ 526

Simulation technology represents an effective means for the study of gas turbine performance. With the help of a quasi-nonlinear method set up was the mathematical model of a three-shaft gas turbine. An object-oriented dynamic simulation platform was developed for the three-shaft gas turbine on the basis of a dynamic simulation software MATLAB. The results of the simulation show that the simulation model is correct and rational, featuring simplicity and ease of use. **Key words:** software MATLAB, three-shaft gas turbine, simulation model, object-oriented approach

某型两级涡轮流场数值模拟 = **Numerical Simulation of the Flow Field of a Two-stage Turbine** [刊, 汉] / WU Meng, WANG Song-tao, FENG Guo-tai, WANG Zhong-qi, et al (Energy Science and Engineering Institute under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 527 ~ 529

Through the use of a three-dimensional viscous flow calculation program a numerical simulation was performed of a two-stage turbine. The program adopts a Godunov scheme of third-order accuracy with a turbulent flow model being of a B-L algebraic one. During the calculation the effect of a change in specific heat has been taken into consideration. An analysis of the calculation results indicates that there lacks a proper reflection of the matching of gas flow angles. This comes about because the gas turbine was designed and calculated through the use of a stream surface S_2 and single row viscous flow with losses being taken account of. As a result, there emerged a relatively great positive incidence angle in the second stage stator, leading to an ineffective role of adopting a rear loading profile and a failure to achieve an decrease in secondary flow loss. In view of this it is necessary to conduct in the aerodynamic design a calculation of the matching of multi-stage viscous flows. **Key words:** three-dimensional flow, numerical simulation, two-stage turbine

半干式脱硫系统的热量物质衡算模型 = **Calculation Model of Heat and Mass Balance for a Semi-dry Flue Gas Desulfurization System** [刊, 汉] / GAO Ji-hui, WU Shao-hua, Qin Yu-kun (Energy Science and Engineering Institute