

基于精细化模型的燃气轮机启动过程建模及半物理仿真验证

汤鑫宇,胡振超,陈金伟,张会生

(上海交通大学 动力机械与工程教育部重点实验室,上海 200240)

摘要:针对燃气轮机启动特性的研究中较少考虑关键辅助系统的影响,以某型号F级燃气轮机为研究对象,建立了一个包括本体系统、进排气系统、冷却空气、防喘放风、静态变频器和阀门执行机构等在内的精细化启动过程仿真模型。对该模型进行设计点工况验证,最大误差能控制在0.15%以内。通过dSPACE系统与实际电厂控制逻辑相连,构建半物理联合仿真平台。对燃机模型在启动瞬态过程的特性进行仿真分析,并与实际电厂运行数据对比,最大偏差发生在刚点火之后,其中转速偏差为11 r/min,压气机出口压力偏差为6 kPa透平排气温度偏差为9℃。

关键词:燃气轮机;启动过程;精细化模型;半物理仿真平台

中图分类号:TK472 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.10.026

[引用本文格式]汤鑫宇,胡振超,陈金伟,等.基于精细化模型的燃气轮机启动过程建模及半物理仿真验证[J].热能动力工程,2021,36(10):197-203. TANG Xin-yu, HU Zhen-chao, CHEN Jin-wei, et al. Modeling of gas turbine start-up process based on the detailed model and verifying through semi-physical simulation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10):197-203.

Modeling of Gas Turbine Start-up Process Based on the Detailed Model and Verifying through Semi-physical Simulation

TANG Xin-yu, HU Zhen-chao, CHEN Jin-wei, ZHANG Hui-sheng

(Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code:200240)

Abstract: Since the research on the characteristics of the gas turbine start-up process lack considerations of key auxiliary systems, with an F-class gas turbine as the research object, a detailed model of the gas turbine start-up process including intake and exhaust system, cooling air, anti-surge ventilation, static frequency converter system and valve actuator has been built. The gas turbine model is verified under design point and the error can be controlled within 0.15%. A semi-physical co-simulation platform through the dSPACE system and the actual power plant control logic has also been built. Based on the platform, the simulation results of the gas turbine speed, compressor outlet pressure and turbine exhaust temperature during the start-up process show that the maximum error to the actual power plant operating data happens just after the ignition. The maximum error is about 11 r/min, 6 kPa and 9℃ respectively.

Key words: gas turbine, start-up process, detailed model, semi-physical simulation platform

引 言

燃气轮机的启动是指机组从停机状态到合闸并网准备加载的中间过程^[1],一般燃机要经历盘车、清吹、惰走、点火、直起及并网等阶段。在启动过程中,燃气轮机的转速、各截面压力及温度等参数的变化范围较大,因而燃气轮机在启动过程的建模相比其他工况需要考虑更多的因素,使得建模过程变得更为复杂。

石恒等人^[2]采用非线性化建模方法建立了一个包括本体系统及液压启动系统在内的三轴燃气轮机仿真模型。张文杰等人^[3]以 GE 9FA 机组为对象建立了燃气轮机模型,通过给定启动边界条件,实现燃机从启动、加载到额定负荷的过程。徐强等人^[4]建立了包含本体系统以及进排气系统的仿真模型,并对燃气轮机的启动过程进行了仿真。曹军等人^[5]搭建了包括本体系统、防喘及冷却空气等在内的燃机模型,利用虚拟分散控制系统(Distributed Control System, DCS)对模型进行了动态验证。

在以往的研究中,燃气轮机启动过程的仿真模型都不够精细化,通常只是考虑了部分系统对启动过程的影响,忽略了一些其他同步参与启动过程的系统建模,且缺乏部分燃气轮机关键截面参数与实际机组之间的误差对比分析。

本文针对某型号 F 级燃气轮机,利用现场运行数据获取其相关特性,结合燃气轮机的机理,采用模块化的建模思路,在 MATLAB/Simulink 平台对燃气轮机启动过程进行精细化模型的搭建,并验证其设计点工况精度。之后通过 dSPACE 系统与实际控制系统相连,测试该模型在启动过程的特性与实际机组的运行数据是否一致,并分析两者的偏差。

1 燃气轮机瞬态仿真模型建立

综合分析燃气轮机的启动过程,基于模块化建模思想,搭建了燃气轮机精细化启动模型,将各个部件相互连接构成燃气轮机启动过程瞬态模型。将燃气轮机模型划分为 6 个截面,分别为进气系统入口截面 0、压气机入口截面 1、压气机出口截面 2、燃烧室燃料入口截面 f 、透平入口截面 3 及透平出口截面 4。

1.1 本体系统模型的建立

燃气轮机的本体系统包括压气机、燃烧室、透平以及转子模块。针对压气机和透平,利用其各自的特性曲线线性插值,得到不同工况点的工作特性。转子模型的建立则是考虑了压气机、透平、负载和静态变频器的功率对转速变化率的影响关系。

考虑到燃烧室的容积惯性,并忽略其热阻和流阻,假设燃烧一直处在火焰稳定区,因而根据质量和能量守恒定律,得到燃烧室出口焓值与压力随时间的变化关系:

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{k(G_f h_f \eta_b + G_2 h_2 - G_3 h_3)}{\rho V} - \frac{k(h_3 - p_3(1 - \sigma_b)/\rho) \cdot (G_f + G_2 - G_3)}{\rho V} \quad (1)$$

$$\frac{dp_3}{dt} = \rho \frac{k-1}{k} \cdot \frac{dh_3}{dt} + \frac{RT_3(G_f + G_2 - G_3)}{V(1 - \sigma_b)} \quad (2)$$

式中: k —绝热指数; h_2 —进口空气比焓, kJ/kg; h_3 —出口燃气比焓, kJ/kg; G_2 —进口空气质量流量, kg/s; G_3 —出口燃气质量流量, kg/s; G_f —燃料质量流量, kg/s; h_f —燃料热值, kJ/kg; p_3 —燃烧室出口压力, Pa; T_3 —燃烧室出口温度, K; ρ —燃气密度, kg/m³; R —气体常数, J/(mol · K); V —燃烧室体积, m³; η_b —燃烧室效率; σ_b —燃烧室总压损失系数。

如图 1 所示,连接压气机、燃烧室、透平和转子,构建燃气轮机本体系统的动态仿真模型。

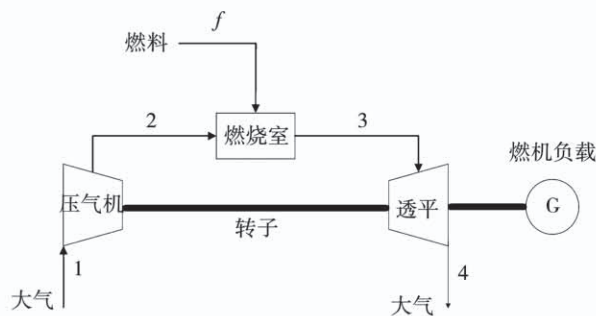


图 1 燃气轮机本体系统模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the gas turbine system model

1.2 精细化模型的建立

考虑到工质流经进排气系统的压力损失、用于冷却和防喘的抽气、协助燃气轮机启动的静态变频器特性及启动过程的其他影响因素,建立了燃气轮

机的进排气系统、冷却空气、防喘放风、静态变频器系统以及阀门执行机构等精细化模型。

1.2.1 进排气系统模型

考虑到进排气的压力损失 Δp 与流量 G_0 平方成正比,与气体密度 ρ 成反比,设进排气压力损失系数为 α ,得到压力损失的计算式:

$$\Delta p = \alpha G_0^2 / \rho \tag{3}$$

由于燃气轮机的进气温度对整机性能有很重要的影响^[6],因而在建模中也考虑了进气冷却系统,其原理为换热介质和空气的能量守恒。

1.2.2 冷却空气模型

燃烧室出口的高温燃气会对透平叶片造成损害,从压气机引来冷却空气可以保证叶片温度降到其材料承受极限以下。在该燃气轮机的压气机中,共包含 5 级冷却空气抽气,分别在压气机第 5、第 9、第 10、第 12 和第 13 级后,如图 2 所示。

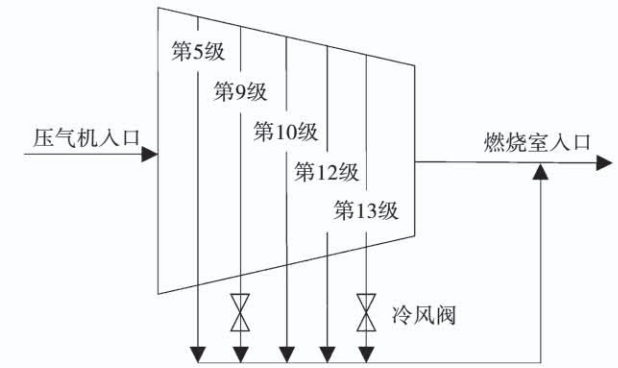


图 2 冷却空气模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the cooling air model

对于第 5 级、第 10 级和第 12 级 3 处的抽气流量 G_{cool} ,由于采用冷却通道的形式布置,因而按占压气机入口流量 G_1 的固定百分比 λ 设置:

$$G_{cool} = \lambda G_1 \tag{4}$$

剩余部分的冷却流量则分别根据该处冷风阀流量与开度的插值曲线求出。采用等效冷却空气的处理方式,将抽出的冷却空气和压气机出口气体混合再一起进入燃烧室。

1.2.3 防喘放风模型

为了避免燃气轮机压气机在运行过程发生喘振现象^[7],在压气机第 5、第 9 和第 13 级各布置了防

喘阀,在启动过程中会分别从这 3 处抽气,并与透平排气混合,如图 3 所示。

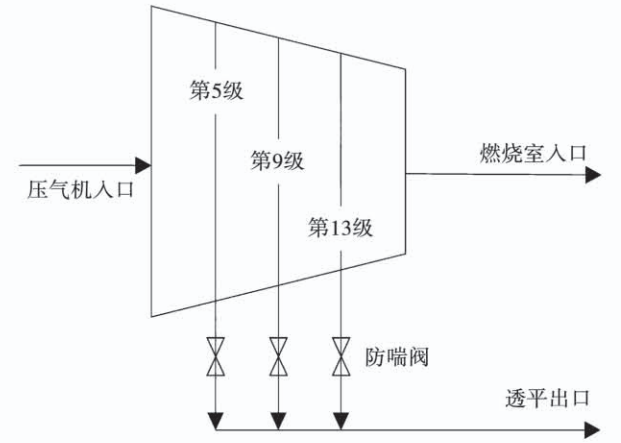


图 3 防喘放风模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the anti-surge ventilation

防喘放风模型建立在压气机模块内,为了模拟实际燃气轮机启动过程的防喘放风特性,基于实际运行数据,建立如式(5)所示的防喘阀抽气流量 $G_{anti-surge}$ 随燃气轮机转速 n 变化的曲线:

$$G_{anti-surge} = f(n) \tag{5}$$

1.2.4 静态变频器模型

由于燃气轮机本身无法自启动,需要外部提供动力,通常是使用静态变频器系统(Static Frequency Converter,SFC),带动燃气轮机轴旋转^[8]。在本模型中,静态变频器模块会不断接收来自控制系统的指令信号,包括盘车信号、清吹信号、运行信号和直起信号等。根据如表 1 所示的逻辑进行判断,输出与转速相关的静态变频器功率 P_{SFC} 至转子模块,辅助燃气轮机的启动。

表 1 静态变频器指令对应表

Tab. 1 Static frequency converter commands table

盘车信号	清吹信号	运行信号	直起信号	燃气轮机启动阶段
1	0	0	0	盘车
0	1	1	0	清吹
0	0	1	0	惰走
0	0	1	1	直起

1.2.5 阀门执行机构模块

燃气轮机的可调设备还包括燃料阀门开度、压

气机进口导叶(Inlet Guide Vane, IGV)开度等,燃料阀又可以分为值班阀和预混阀。在实际的燃气轮机发电设备中,控制系统发出的调节指令会送到可调设备的执行机构中,再由执行机构驱动设备调节到指定开度。以值班阀为例,图 4 执行机构的建模原理。

首先,控制逻辑会发出燃料值班阀的调节指令,这个调节指令通常是驱动信号,当调节信号大于 3 时,表示执行机构要不断往正方向运动;当调节信号小于 3 时,执行机构往负方向运动;当调节信号等于 3 时,执行机构停止运动。

在建模中,调节信号首先进入比较模块,以此判断执行机构的运动方向;然后,送入到死区模块以描述执行机构的一些死区特性;最后,进入到积分模块,描述执行机构在调节信号作用下的运动过程,积分模块的输出即表示值班阀此时的实际开度。后续经由阀门的开度流量曲线,得到各时刻值班阀的燃料流量。

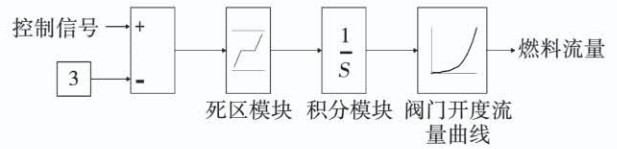


图 4 值班阀执行机构模块

Fig.4 Pilot valve actuator model

1.3 燃气轮机整机模型建立

对燃气轮机各系统模型的建模方法进行汇总,如表 2 所示。

表 2 燃气轮机各系统仿真模型建模方法汇总

Tab.2 Summary of simulation model modeling methods for gas turbine systems

模型分类	系统名称	建模方法
本体系	压气机、透平	基于特性的准稳态模型
	燃烧室	考虑容积惯性和热惯性集总参数模型
精细化	转子	考虑转动惯性的功率平衡模型
	进排气	考虑进排气压力损失
模型	冷却空气	冷却通道流量计算模块
	防喘放风	防喘放风流计算模块
	静态变频器	启动过程静态变频器特性模型
	阀门执行机构	阀门机械执行机构响应特性模型

基于各模型之间的连接关系及燃气轮机的结构进行相互连接,得到燃气轮机的精细化模型,如图 5 所示。各模块之间的关系为:环境空气通过进气系统进入压气机,被压缩成高温高压的气体,中间有部分冷却空气被抽出汇入压气机排气进入燃烧室,与值班阀、预混阀中的燃料在燃烧室内混合并燃烧,高温燃气通过透平对外做功,最后废气与压气机来的防喘放风抽气混合,经由排气系统排到大气中。在燃气轮机轴上则考虑静态变频器输出功率、压气机耗功、透平出功及燃气轮机负载之间对轴转速变化率的影响。

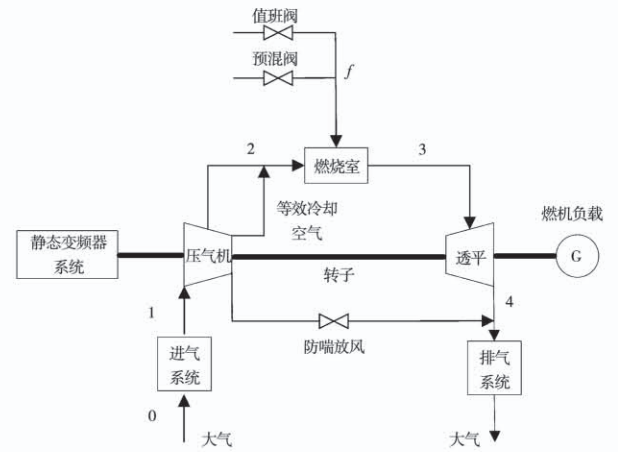


图 5 燃气轮机精细化模型图

Fig.5 Overall model of gas turbine

1.4 设计点工况验证

对于建立好的燃气轮机模型设定设计点工况下的边界条件,如表 3 所示,验证其稳态设计点工况的精度。

表 3 设计点工况边界条件设置

Tab.3 Boundary condition setting of design condition

参数	设计点工况
大气压力/kPa	101.325
大气温度/℃	15
湿度/%	60
燃料流量/kg·s ⁻¹	15.568 3
燃料热值/kJ·kg ⁻¹	50 035
IGV 开度/%	100

仿真结果如表 4 所示。在设计点工况下,燃气轮机模型与实际运行数据之间最大的偏差参数为压

气机压比,最大相对误差约为 0.15%。表明该精细化燃气轮机仿真模型在设计点工况下能够保证有较好的精度。

表 4 设计点工况参数误差对比

Tab.4 Error comparison of design condition

参数	实际数据	模型数据	相对误差/%
压气机压比	19.92	19.89	0.150
压气机效率/%	87.47	87.47	0
透平流量/kg·s ⁻¹	742.80	741.80	0.135
透平排气总温/℃	582.43	582.90	0.081
透平效率/%	89.01	88.99	0.022
系统功率/MW	310.30	310.40	0.032

2 基于 dSPACE 的半物理仿真平台

dSPACE 实时仿真系统是一套基于 MATLAB/Simulink 的开发测试平台,包括硬件和软件两部分^[9]。硬件系统以 CPU 为核心,利用板卡与外界信号进行输入和输出。软件系统中一部分是实时接口 RTI(Real-Time Interface)与实时代码生成工具 RTW(Real-Time Workshop),用于实现对 MATLAB/Simulink 代码的生成下载;另一部分为 ControlDesk 软件,能够实时监测数据,并可进行快速在线参数调试^[10]。

基于实际燃气轮机控制系统,在 dSPACE 系统下搭建了燃气轮机半物理仿真试验平台,比较所建燃气轮机模型在启动过程中各参数的仿真计算结果与实际运行值之间的偏差,验证该模型的精度以及启动控制逻辑的有效性。

试验平台主要由燃气轮机控制系统、dSPACE 系统(硬件与 ControlDesk 软件等)和燃气轮机仿真模型组成,其整体结构如图 6 所示。将燃气轮机仿真精细化模型经过编译导入到 dSPACE 系统中,系统会不断通过硬件板卡接收来自控制系统的信号,包括静态变频器信号、燃料阀调节信号等,经由硬件 CPU 对模型的各运行参数进行求解计算,并通过板卡实时反馈到控制系统和 ControlDesk 软件中。此外,该平台也支持在 ControlDesk 软件中实时修改燃气轮机模型参数,方便用户进行调试。

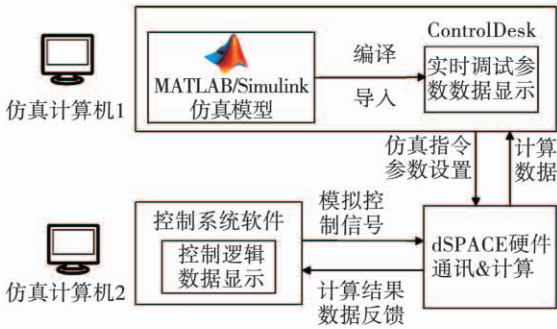


图 6 半物理仿真平台整体结构示意图
Fig.6 Schematic diagram of the overall structure of the semi-physical simulation platform

3 燃气轮机模型启动过程测试与分析

为验证已建立的启动仿真模型的可靠性以及启动控制逻辑的有效性,基于半物理联合仿真平台,对其启动过程进行测试。

3.1 部分控制系统逻辑

本文涉及的控制系统在启动过程中主要对静态变频器、防喘阀、冷风阀、燃料阀和 IGV 等进行控制。

针对防喘阀,在燃气轮机启动开始阶段三级防喘阀均为打开状态,当转速达到 2 400 r/min 时,压气机第 9 级处阀门关闭;当转速达到 2 940 r/min 时,第 5 和第 13 级阀门关闭。冷风阀的控制逻辑与之类似,当启动时转速小于额定转速的 94% 时均保持全开,当超过 94% 时则基于实时运行参数开始控制各自的阀门开度。值班阀、预混阀以及 IGV 的控制则是控制系统根据当前转速、透平排温等进行综合判断,实现对于开度变化的控制,调节燃气轮机在安全高效的状态下运行。

3.2 仿真测试结果分析

对燃气轮机启动过程模型进行仿真,选取燃气轮机转速、压气机出口压力及透平出口温度,与实际电厂启动过程的运行数据进行比较,测试该模型的启动特性。本次测试中环境温度设置为 28 ℃,压力 100.1 kPa,湿度 60%。仿真结果如图 7 ~ 图 9 所示。

总体上,3 个参数的变化规律与实际燃气轮机

启动过程相似。其中燃气轮机转速一开始稳定在 120 r/min 的盘车阶段,之后静态变频器模块收到控制系统发来的清吹信号,带动转轴转速上升至 720 r/min,开始清吹,清吹完成之后转速下降,约 270 s 时刻开始点火,燃气轮机的转速快速增加至额定转速 3 000 r/min 后保持稳定。

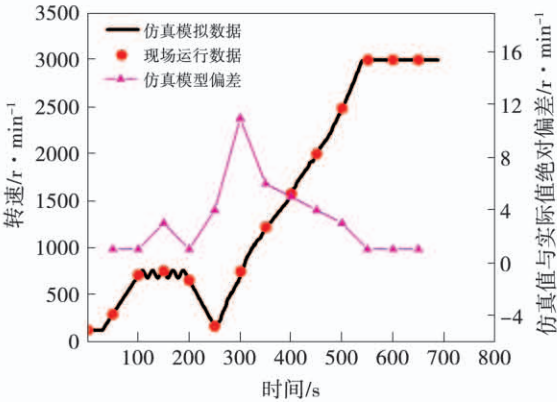


图 7 仿真模型与实际燃气轮机转速变化曲线

Fig. 7 The rotating speed change curve of simulation model and actual gas turbine

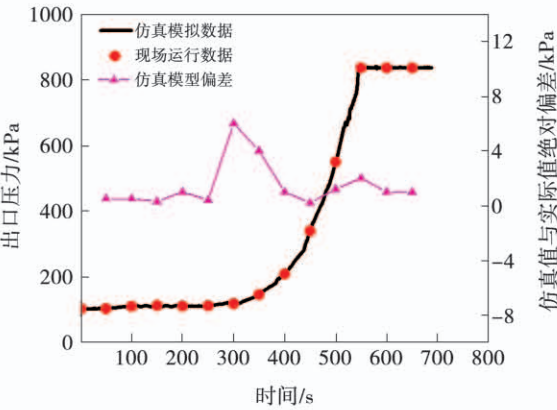


图 8 仿真模型与实际机组压气机出口压力变化曲线

Fig. 8 The compressor outlet pressure change curve of simulation model and actual gas turbine

压气机出口压力在点火之前基本保持稳定,当点火之后,出口压力快速上升,直到转速达到 3 000 r/min 以后,出口压力保持稳定在 836 kPa 左右。透平出口温度的变化与压气机出口压力类似,也是在点火之后快速上升到约 450 ℃,之后开始逐渐下降,直到启动过程结束。

分析 3 个参数的模型仿真值与实际运行值之间

的偏差,三者都在约 300 s 时刻的偏差最大,分别为约 11 r/min,6 kPa,以及 9 ℃。分析原因:300 s 时刻为刚点火之后不久,由于燃烧室内燃料与空气混合并开始燃烧,压气机出口压力和透平排气温度都快速上升,致使整机参数变化率与先前未点火状态相差较大,因而这个突变过程造成在刚点火之后的燃气轮机性能参数计算值与实际运行数据之间产生较大偏差。

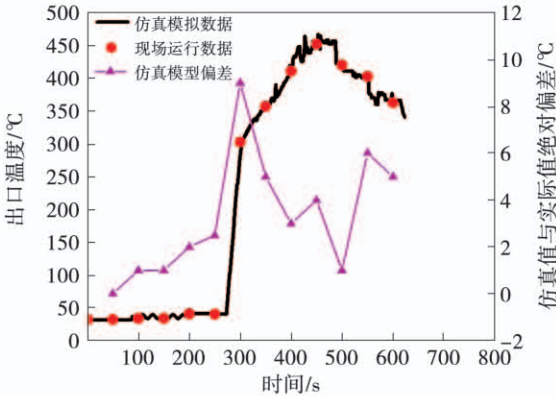


图 9 仿真模型与实际机组透平出口温度变化曲线

Fig. 9 The turbine outlet temperature change curve of simulation model and actual gas turbine

4 结 论

(1) 在 MATLAB/Simulink 平台上,采用模块化建模方法,针对某 F 级燃气轮机,建立了包括本体系统、进排气、冷却空气、防喘放风、静态变频器、阀门执行机构等在内的燃气轮机的启动过程仿真模型,实现对于燃气轮机的精细化建模。对该模型进行设计点工况验证,最大误差能控制在 0.15%。

(2) 利用 dSPACE 系统连接电厂燃气轮机控制逻辑与仿真模型,构建半物理仿真平台。基于该平台对燃气轮机模型进行启动过程的动态仿真,分析了转速、压气机出口压力及透平出口温度的仿真结果,与实际机组启动特性相似,最大误差出现在刚点火之后。

(3) 搭建了燃气轮机启动过程精细化仿真模型,并与实际控制逻辑构成半物理联合仿真平台,便于燃气轮机控制逻辑的测试验证、电厂运维人员的培训以及对燃气轮机的性能调优等操作。

参考文献:

- [1] 崔 宝. 基于支持向量机燃气轮机启动系统故障诊断方法研究[D]. 北京:中国舰船研究院,2011.
CUI Bao. Based on support vector machine gas turbine start-up system fault diagnosis methods research[D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2011.
- [2] 石 恒,龚建政,余又红. 某型燃气轮机启动过程仿真[J]. 燃气轮机技术,2010,23(2):57-60.
SHI Heng, GONG Jian-zheng, YU You-hong. Start up process simulation of gas turbine[J]. Gas Turbine Technology, 2010, 23(2): 57-60.
- [3] 张文杰,刘尚明,蒲星星,等. 基于 Simulink 的单轴重型燃气轮机启动过程仿真研究[J]. 燃气轮机技术,2012,25(1):27-32.
ZHANG Wen-jie, LIU Shang-ming, PU Xing-xing, et al. Research on the startup simulation of single shaft heavy-duty gas turbine based on simulink[J]. Gas Turbine Technology, 2012, 25(1): 27-32.
- [4] 徐 强,孟 惠,计京津. 某 F 级重型燃气轮机启动过程仿真研究[J]. 热力透平,2016,45(4):269-274.
XU Qiang, MENG Hui, JI Jing-jin. Simulation of start-up for an F-class heavy-duty gas turbine[J]. Thermal Turbine, 2016, 45(4): 269-274.
- [5] 曹 军,周东阳,王 喆. 安萨尔多 F 级燃气-蒸汽联合循环机组高精度全范围仿真系统的开发[J]. 热能动力工程,2021,36(2):9-17.
CAO Jun, ZHOU Dong-yang, WANG Zhe. Development of high precision full-scope simulation system for F class ansaldo gas-steam combined cycle unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(2): 9-17.
- [6] MOHAPATRA A K, SANJAY. Comparative analysis of inlet air cooling techniques integrated to cooled gas turbine plant[J]. Journal of the Energy Institute, 2015, 88(3):344-358.
- [7] 武 冰. 燃压机组防喘振控制研究[D]. 沈阳:东北大学,2017.
WU Bing. Research on anti-surge control of gas turbine and compressor units[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [8] 舒 杨. SFC 装置在燃机启动过程中的 Simulink 可视化仿真[D]. 上海:上海交通大学,2015.
SHU Yang. The simulink visualization simulation of SFC device in the pocess of combustion engine start[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [9] 陈 韵,马清华,王 根,等. 基于 dSPACE 的“硬件在回路”导弹控制系统设计与仿真[J]. 弹箭与制导学报,2019,39(2):64-68.
CHEN Yun, MA Qing-hua, WANG Gen, et al. Study on HIL missile control system design and simulation platform based on dSPACE[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2019, 39(2): 64-68.
- [10] 刘建国,俞 力,李 希,等. 基于 dSPACE 的汽车电动玻璃升降器防夹控制的半实物仿真与验证[J]. 汽车技术,2016(5):1-5.
LIU Jian-guo, YU Li, LI Xi, et al. Semi-physical simulation and verification of the anti-pinch algorithm of automotive electric window lift based on the dSPACE[J]. Automobile Technology, 2016(5): 1-5.

(金圣迪 编辑)