

DOI: 10.19666/j.rlfed.202408193

基于实时与虚拟联合仿真的燃气轮机控制系统软硬件一体化验证方法研究

李俊昆^{1,2}, 谢瑾瑜¹, 章旋¹, 白涛¹, 沈新军¹, 王金建¹,
王伏忠¹, 蔡喜冬¹, 赵瑜¹

(1.中国联合重型燃气轮机技术有限公司, 上海 201306;

2.上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

[摘要] 为实现燃气轮机控制系统组态软件和硬件平台的仿真验证, 开展基于实时与虚拟的联合仿真方法研究。采用实时仿真机、信号调理装置、故障注入装置构建实时仿真硬件平台, 并基于多域物理建模方法建立考虑热浸效应、容积效应、转动惯性等动态因素的燃气轮机及燃料系统精细化仿真模型; 采用控制系统虚拟控制器构建虚拟仿真环境, 并基于逻辑建模方法构建润滑油系统、电气系统等辅助系统仿真模型; 利用硬接线、通信等方式进行实时仿真平台、虚拟仿真平台和控制系统硬件平台之间的信号交互, 实现联合仿真运行。结果表明: 采用实时与虚拟的联合仿真方法, 既可以为燃气轮机控制系统组态软件提供包含全链路要素的轻量化仿真环境, 实现控制逻辑功能和性能测试; 又能够为控制系统硬件平台提供带燃气轮机运行工况的验证环境, 实现燃气轮机多运行场景下的控制系统硬件功能和性能测试。该研究成果可用于燃气轮机控制系统软硬件一体化验证, 支撑自主燃气轮机国产化控制系统研制和在役机组控制系统国产化改造。

[关键词] 燃气轮机; 控制系统验证; 实时仿真; 虚拟仿真; 多域物理建模

[引用本文格式] 李俊昆, 谢瑾瑜, 章旋, 等. 基于实时与虚拟联合仿真的燃气轮机控制系统软硬件一体化验证方法研究[J]. 热力发电, 2025, 54(4): 85-94. LI Junkun, XIE Jinyu, ZHANG Xuan, et al. Research on integrated hardware-software verification methods for gas turbine control systems based on real-time and virtual joint simulation[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(4): 85-94.

Research on integrated hardware-software verification methods for gas turbine control systems based on real-time and virtual joint simulation

LI Junkun^{1,2}, XIE Jinyu¹, ZHANG Xuan¹, BAI Tao¹, SHEN Xinjun¹, WANG Jinjian¹,
WANG Fuzhong¹, CAI Xidong¹, ZHAO Yu¹

(1.China United Gas Turbine Technology Co., Ltd., Shanghai 201306, China;

2.School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To achieve simulation validation for the control software and hardware platform of a gas turbine control system, the co-simulation method based on real-time and virtual environments is studied. A real-time simulation hardware platform is built using a real-time simulator, signal conditioning devices, and fault injection devices. Additionally, a detailed simulation model of the gas turbine and fuel system is developed based on multi-domain physical modeling methods, taking into account dynamic factors such as thermal soak effects, volume effects, and rotational inertia. A virtual simulation environment is constructed using a virtual controller for the control system, and logic modeling methods are used to create simulation models for auxiliary systems such as the lubrication and electrical systems. Signal interaction between the real-time simulation platform, virtual

收稿日期: 2024-08-07 网络首发日期: 2025-01-23

基金项目: 国家科技重大专项 (J890, J2019-V-0014-0109)

Supported by: National Science and Technology Major Project (J890, J2019-V-0014-0109)

第一作者简介: 李俊昆 (1990), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为燃气轮机建模、仿真与控制, lijunkun@speri.com.cn。

通信作者简介: 沈新军 (1980), 男, 工程师, 主要研究方向为燃气轮机控制、自动化控制, shenxinjun@spic.com.cn。

simulation platform, and control system hardware platform is achieved through hardwiring and communication methods, enabling integrated co-simulation operation. The results show that, the co-simulation method, combining real-time and virtual environments, not only provides a lightweight simulation environment for the gas turbine control software, encompassing all critical link elements, but also allows for functional and performance testing of the control logic. Moreover, it offers a validation environment for the control system hardware platform under various gas turbine operating conditions, enabling functional and performance testing of the hardware in multiple operational scenarios. This research can be applied for integrated validation of both software and hardware in gas turbine control systems, supporting the development of domestic gas turbine control systems and the retrofitting of control systems in existing units for domestic applications.

Key words: gas turbine; control system verification; real-time simulation; virtual simulation; multi-domain physical modeling

“双碳”战略目标下区域电力呈现多源发展的趋势^[1-2], 风电、光伏、储能等发电占比不断增强, 使得构建稳定的新型电力系统面临更大挑战^[3], 而燃气轮机作为快速调峰电源, 可有效平衡可再生能源发电波动, 增强电力系统稳定性, 同时, 其低排放特性也符合“双碳”目标下对清洁能源的迫切需求, 有助于推动电力行业绿色转型^[4-6]。

重型燃气轮机长期受国外垄断, 我国出台相关政策支持研制自主化的燃气轮机, 如中国重燃的国产 300 MW、东汽 G50^[7]、中航工业 AGT-110^[8]等, 而控制系统是重型燃气轮机研制的关键部件之一。同时燃气轮机打捆招标 20 年, 其控制系统已经到了老化的地步。目前对于老款的控制系统, 燃气轮机主机厂已停止维护, 逼迫用户进行控制系统升级^[9]。随着近些年的政策推进, 国内已经逐步开始探索 E 级、F 级主力机型控制系统国产化改造。但由于燃气轮机热惯性小、响应快^[10], 无论自主燃气轮机国产化控制系统, 还是控制系统国产化改造, 均需要对燃气轮机控制系统进行全面验证, 然后才能用于实际燃气轮机运行控制, 而采用仿真的方式对控制系统软硬件进行一体化验证, 可以消除控制系统绝大部分缺陷, 大大减小调试和试验过程风险。

目前燃气轮机控制系统仿真验证主要分为软件在环验证、硬件在环验证和半物理仿真验证。软件在环验证可以实现对控制程序的验证^[11-12], 硬件在环验证可以带着燃气轮机真实控制器, 对燃气轮机控制程序和控制器进行验证^[13-15], 半物理仿真验证可以对燃气轮机关键执行机构的闭环控制回路进行验证^[16-18]。曹军等^[11]基于虚拟 DCS 技术和 APROS 仿真支撑平台建立 AE94.3A 型燃气轮机全范围仿真系统, 其中虚拟 DCS 实现燃气轮机控制程序仿真, APROS 实现燃气-蒸汽联合循环机组工艺系统动态仿真, 实现对运行人员、热控人员仿真培训, 并能进行控制策略研究和验证。沈立锐等^[13]采用基于模

型的设计方法, 建立了高实时的燃气轮机分段线性化模型, 并通过代码生成技术集成到了 FWORKS 航空发动机及燃气轮机控制系统协同设计开发平台, 可用于燃气轮机先进控制算法和故障诊断技术研究。李健等^[18]针对燃燃联合动力装置, 采用代理模型方法驱动电机以模拟实际燃气轮机的驱动过程, 并将其与负载连接构建成半物理仿真试验台, 实现了并车过程不同比例负荷分配控制。V. Panov 等^[19]利用物联网云平台, 探索了基于实时嵌入式计算的性能数字孪生平台, 并研究了基于混合和离散的部署方式, 实现了与燃气轮机控制系统的集成测试, 用于燃气轮机的监控和故障诊断。

工程应用燃气轮机控制系统需进行软硬件全范围验证。通常 E 级燃气轮机 I/O 硬通道约 500 点, F 级燃气轮机超 800 点, 软件在环仿真无法对控制系统硬件进行验证, 硬件在环和半物理仿真若对软硬件全范围进行验证, 则系统规模大、成本高, 通常仅进行部分仿真, 无法满足出厂测试的全范围验证要求。考虑到燃气轮机辅助系统、电气系统等多为过程控制, 主机为闭环控制, 因此提出基于实时与虚拟联合仿真的燃气轮机控制系统软硬件一体化验证方法。该方法首先采用实时仿真机、信号调理装置、故障注入装置构建实时仿真硬件平台, 并基于 Simscape 建模工具, 采用多域物理建模方法建立燃气轮机及燃料系统精细化仿真模型; 其次采用控制系统虚拟控制器构建虚拟仿真环境, 并基于逻辑建模方法构建润滑油系统、电气系统等辅助系统仿真模型; 最后通过硬接线、通信等方式进行实时仿真平台、虚拟仿真平台和燃气轮机控制系统之间的信号交互, 实现联合仿真运行, 构建形成燃气轮机控制系统软硬件一体化验证环境。

1 实时与虚拟联合仿真架构

实时仿真是指采用实时仿真机实现燃气轮机的

仿真模拟，通过硬接线方式与燃气轮机控制系统进行数据交互，构建出与真实燃气轮机控制系统运行高逼真的验证环境。虚拟仿真是指采用控制系统虚拟控制器实现燃气轮机的仿真模拟，通过以太网通信实现与燃气轮机真实控制器的数据交互，构建出轻量化的验证环境。

实时仿真可以构建高精度的燃气轮机仿真模型，实现包含全链路要素的组态软件及控制系统硬件全范围验证，但系统复杂、工程量大、成本高，适用于局部的软硬件功能和性能验证。虚拟仿真通过组态方式构建仿真逻辑，实现组态软件基本功能验证，但无法对控制回路的性能以及控制系统硬件进行验证，也受限于控制器性能无法建立高精度的复杂模型，验证环境置信度不高，适用于控制逻辑快速迭代与工程调试。

实时与虚拟联合仿真可以兼容两者的优点，构建全范围的燃气轮机控制系统软硬件一体化仿真验证环境。实时与虚拟联合仿真架构如图 1 所示。

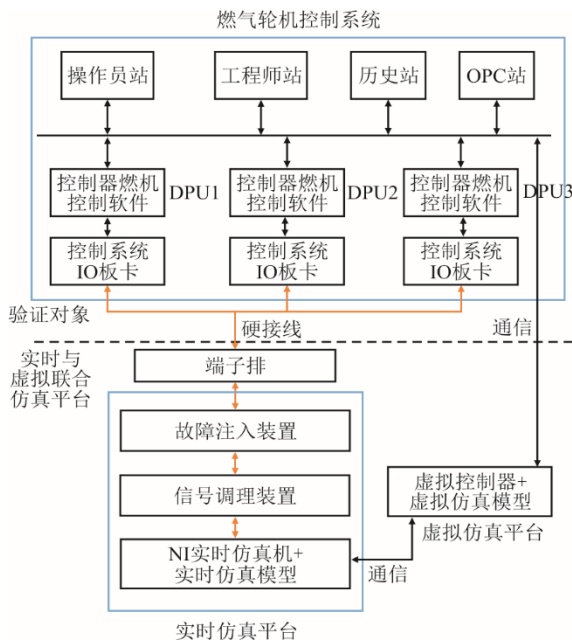


图 1 实时与虚拟联合仿真架构

Fig.1 Real-time and virtual co-simulation architecture

由图 1 可见：燃气轮机 3 大部件（压气机、燃烧室、透平）、燃料系统采用实时仿真，实现对燃气轮机关键闭环控制回路和控制系统硬件各模块的功能和性能测试；润滑油、控制油、进气、电气等辅助系统采用虚拟仿真，实现对燃气轮机辅助系统控制程序的功能测试。该方式既可为燃气轮机控制系统组态软件提供包含全链路要素的轻量化仿

真环境，实现控制逻辑功能和性能测试；又能为控制系统硬件平台提供带燃气轮机运行工况的验证环境，实现燃气轮机多运行场景下的控制系统硬件功能和性能测试。

2 燃气轮机全范围仿真模型

2.1 实时仿真模型

基于 Simscape 建模软件平台，采用多域物理建模方法构建实时仿真模型，并采用代码生成技术下装到实时仿真机中。多域物理建模方法是按照实际物理节点进行建模，每个节点由 Across 变量和 Through 变量描述物理状态，燃气轮机主机及燃料系统模型中节点按照域类型进行划分^[20-21]，如表 1 所示。采用多域物理建模方法构建燃气轮机主机模型，能够模拟燃气轮机的热浸效应、容积效应、转动惯性等动态特性；可以实现主机与二次空气系统的耦合仿真，为二次空气系统闭环控制策略验证提供仿真对象；也能够模拟燃料系统的动态特性。

表 1 燃气轮机主机及燃料系统模型中的域类型
Tab.1 Domain types in gas turbine main engine and fuel system models

物理域	子域	Across 变量	Through 变量
气体域	空气		
	天然气 燃气	温度、压力	质量流量、能量流量
机械旋转域		角速度	扭矩
热域		温度	热流量

注：Across 变量为通过并联方式测量；Through 变量为通过串联方式测量。

以某 F 级重型燃气轮机为对象，按照模块化建模方法分别构建压气机、燃烧室、透平、二次冷却空气系统等模型，然后按照物理关系进行节点连接，构建形成多域物理仿真模型；模型计算时，将物理网络中的所有方程联立，求解方程组。主机系统模型如图 2 所示。

2.1.1 压气机建模

按照冷却抽气点进行分段建模^[22]，每段压气机设置节点 A、B、D₁、D₂、H、R、C，其中节点 A 为入口空气节点，B 为出口空气节点，D₁ 和 D₂ 为冷却空气节点，H 为传热节点，R 和 C 为机械旋转节点。为实现燃气轮机主机模型与二次空气系统模型的耦合计算，系统中流体能量详细区分静焓和动能，分段建模主要方程如下。

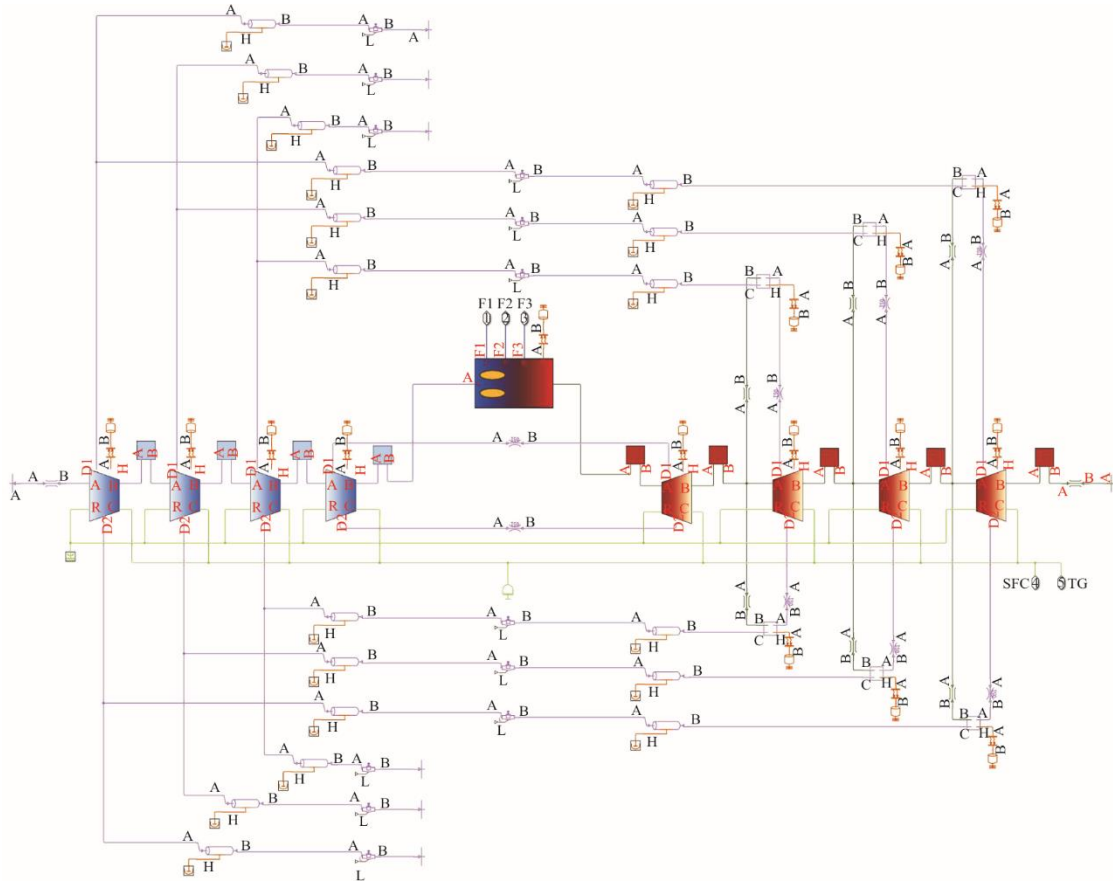


图2 主机系统模型
Fig.2 Host system model

能量守恒方程:

$$m_{Cl}h_{t,Cl} + P_C = \sum_{j=1}^2 m_{CLj}h_{t,CLj} + m_{Co}h_{t,Co} + Q_C \quad (1)$$

$$h_{t,Cl} = h_{Cl} + \frac{1}{2} \left(\frac{m_{Cl}}{\rho_{Cl} A_{Cl}} \right)^2 \quad (2)$$

$$h_{t,CLj} = h_{Co} + \frac{1}{2} \left(\frac{m_{CLj}}{\rho_{Co} A_{CLj}} \right)^2 \quad (3)$$

$$h_{t,Co} = h_{Co} + \frac{1}{2} \left(\frac{m_{Co}}{\rho_{Co} A_{Co}} \right)^2 \quad (4)$$

式中: m_{Cl} 、 m_{CLj} 、 m_{Co} 分别为压气机进口流量、第 j 个抽气流量 (通常有 2 个, 对称抽气)、出口流量; $h_{t,Cl}$ 、 $h_{t,CLj}$ 、 $h_{t,Co}$ 分别为压气机进口滞止比焓、第 j 个抽气滞止比焓、出口滞止比焓; h_{Cl} 、 h_{Co} 分别为压气机进口比焓、出口比焓; ρ_{Cl} 、 ρ_{Co} 分别为压气机进口密度、出口密度; A_{Cl} 、 A_{CLj} 、 A_{Co} 分别为压气机进口截面积、第 j 个抽气口截面积、出口截面积。

绝热压缩方程:

$$s_{CoS} - s_{Cl} = Rg_A \ln \left(\frac{p_{Co}}{p_{Cl}} \right) \quad (5)$$

式中: s_{Cl} 、 s_{CoS} 分别为压气机进口比焓、出口绝热

压缩后比焓; p_{Cl} 、 p_{Co} 分别为压气机进口压力、出口压力; Rg_A 为空气气体常数。

热浸效应方程:

$$Q_C = k_C A_{CSF} (T_{Co} - T_{CM}) \quad (6)$$

$$\frac{dT_{CM}}{dt} = \frac{Q_C}{M_C c_{p,CM}} \quad (7)$$

式中: k_C 为对流换热系数; A_{CSF} 为对流换热表面积; T_{CM} 为金属温度; M_C 为压气机质量; $c_{p,CM}$ 为压气机金属比热容。

压气机各段之间通过容积模块建立^[22], 用于模拟压气机的容积效应。容积模块设置节点 A 和 B , 分别为入口和出口空气节点。

2.1.2 燃烧室建模

燃烧室建模时考虑燃料管路的数量, 设置节点 A 、 B 、 F_1 、 F_2 、 F_3 、 H , 其中节点 A 为入口空气节点, B 为出口燃气节点, F_1 、 F_2 、 F_3 为天然气节点, H 为传热节点。主要方程如下:

$$\frac{dT_3}{dt} = m_2 h_{t,2} + \sum_{i=1}^n m_{F-i} (h_{t,F} + q_{LHV} \eta_{CB}) - m_3 h_{t,3} - Q_{CB} \quad (8)$$

式中： m_3 为燃烧室出口流量； $m_{F,i}$ 、 $h_{t,F}$ 分别为第*i*路燃料流量、燃料滞止比焓； $h_{t,2}$ 、 $h_{t,3}$ 分别为燃烧室进口滞止比焓、出口滞止比焓； T_3 为燃烧室出口燃气温度； Q_{CB} 为燃烧室对流换热量； q_{LHV} 为低位热值； η_{CB} 为燃烧效率。

燃烧室热浸效应方程与压气机相似，见式(6)一式(7)。

2.1.3 透平建模

按照冷却点进行分段建模^[22-23]，每段透平设置节点A、B、D₁、D₂、H、R、C，其中节点A为入口燃气节点，B为出口燃气节点，D₁和D₂为冷却空气节点，H为传热节点，R和C为机械旋转节点。分段建模主要方程如下。

能量守恒方程：

$$m_{TI}h_{t,TI} + \sum_{j=1}^2 m_{TL,j}h_{t,TL,j} = m_{TO}h_{t,TO} + P_T + Q_T \quad (9)$$

式中： m_{TI} 、 $m_{TL,j}$ 、 m_{TO} 分别为透平进口流量、第*j*股冷却空气流量、出口流量； $h_{t,TI}$ 、 $h_{t,TL,j}$ 、 $h_{t,TO}$ 分别为透平进口滞止比焓、透平第*j*股冷却空气进口滞止比焓、出口滞止比焓； P_T 为透平功率； Q_T 为透平对流换热量。

绝热膨胀方程：

$$s_{TI} - s_{TOS} = Rg_F \ln\left(\frac{p_{TI}}{p_{TO}}\right) \quad (10)$$

式中： s_{TI} 、 s_{TOS} 分别为透平进口比熵、出口绝热膨胀后比熵； p_{TI} 、 p_{TO} 分为透平进口压力、出口压力； Rg_F 为燃气气体常数。

透平热浸效应方程与压气机类似，见式(6)一

式(7)。透平各段之间通过容积模块建立，与压气机类似。

关于冷却空气参数，透平一级冷却由喷嘴模型等效计算，透平二、三、四级冷却由二次空气系统模型计算。喷嘴模型方程^[24]为：

$$m_{OF} = \begin{cases} C\rho_0\left(\frac{p_D - p_U}{1 - b_L}\right)\sqrt{\frac{T_0}{T_U}}\left[1 - \left(\frac{b_L - b_C}{1 - b_C}\right)^2\right]^{m_s}, & b_L \leq \frac{p_D}{p_U} \leq 1 \\ C\rho_0 p_U \sqrt{\frac{T_0}{T_U}}\left[1 - \left(\frac{b_L - b_C}{1 - b_C}\right)^2\right]^{m_s}, & b_C \leq \frac{p_D}{p_U} < b_L \\ C\rho_0 p_U \sqrt{\frac{T_0}{T_U}}, & \frac{p_D}{p_U} < b_C \end{cases} \quad (11)$$

式中： m_{OF} 为喷嘴流量； C 为声速导纳； p_U 、 p_D 分别为上游压力、下游压力； T_U 为上游温度； ρ_0 为参考条件下的密度(1.185 kg/m³)； T_0 为空气在参考条件下的温度； m_s 为亚声速指数； b_L 为层流转捩时的临界压比； b_C 为阻塞流动时的临界压比。

2.1.4 二次空气系统

二次空气系统通常用于透平静子、转子冷却及密封，部分F级燃机通过控制持环腔室压力调节冷却空气流量，因此二次空气系统模型不仅需要计算冷却空气温度、流量等参数，还要计算持环腔室压力。利用喷嘴、混流等基础模块等效描述该物理过程，二次空气系统等效模型如图3所示。

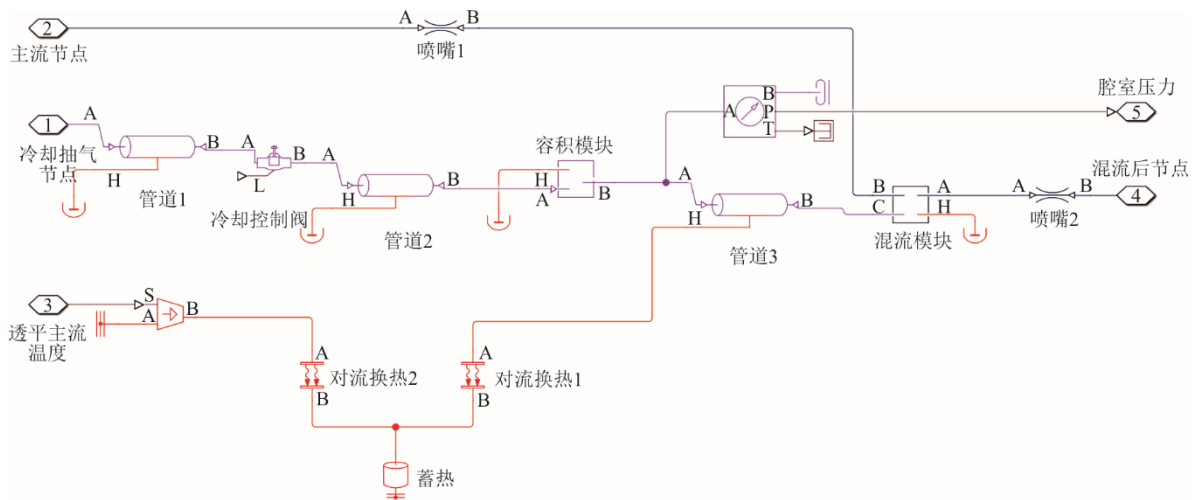


图3 二次空气系统等效模型
Fig.3 Equivalent model of secondary air system

图3中蓄热模块用于模拟透平静子、转子的金属蓄热效应;对流换热1用于模拟冷却空气对静子、转子的冷却效应;对流换热2用于模拟透平主流对静子、转子的传热效应;管道3用于模拟透平叶片内部冷却流路;容积模块用于模拟持环腔室。

等效模型混流模块是关键计算模块,建模方程如下:

$$\frac{V_{MIX}}{RT_{MIX}} \frac{dp_{MIX}}{dt} = m_{MB} + m_{MC} - m_{MA} \quad (12)$$

$$m_{MB} h_{l,MB} + m_{MC} h_{l,MC} = m_{MA} h_{l,MA} \quad (13)$$

式中: m_{MA} 为流入透平主流的混流空气流量; m_{MB} 为透平主流分流流量; m_{MC} 为来自压气机的冷却空气流量; p_{MIX} 为混流模块压力; T_{MIX} 为混流模块温度; V_{MIX} 为混流模块等效体积; $h_{l,MA}$ 为流入透平主流的混流滞止比焓; $h_{l,MB}$ 为透平主流分流滞止比焓; $h_{l,MC}$ 为流入混流模块的冷却空气滞止比焓。

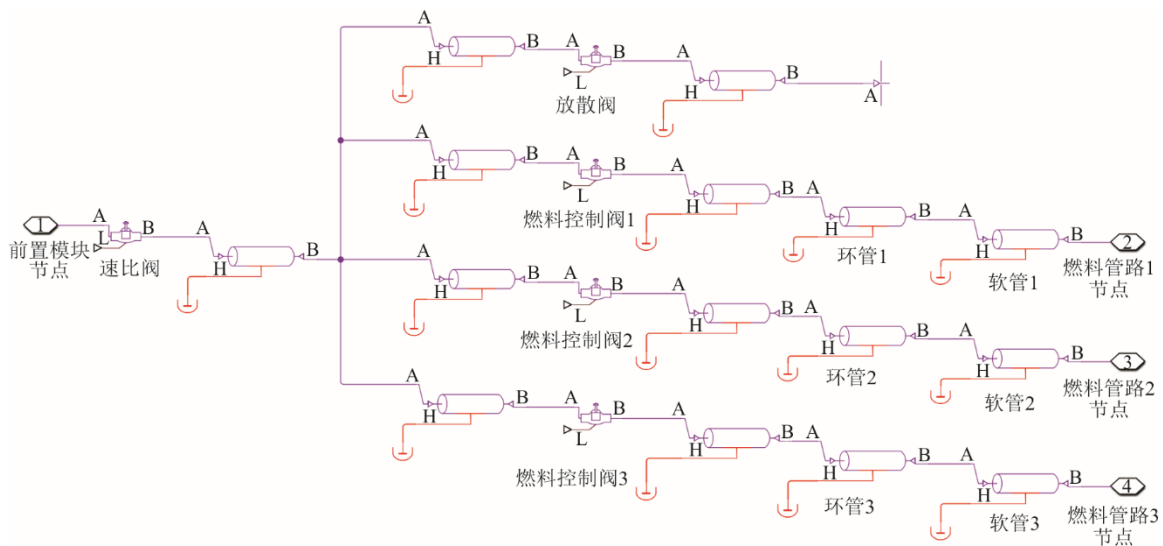


图4 燃料系统模型
Fig.4 Fuel system model

$$m = \begin{cases} 287 \cdot C_v \cdot \sqrt{\frac{\Delta p(p_1 + p_2)}{G(273 + T)}}, & \Delta p < \frac{p_1}{2} \\ \frac{249 \cdot C_v \cdot p_1}{\sqrt{G(273 + T)}}, & \Delta p \geq \frac{p_1}{2} \end{cases} \quad (15)$$

式中: m 为阀门流量; C_v 为阀门流量系数; Δp 为阀门前后压差; p_1 为阀门进口压力; p_2 为阀门出口压力; T 为气体温度; G 为气体比重。

2.2 虚拟仿真模型

采用逻辑建模方法,基于控制系统组态软件建

2.1.5 转子模型

利用转动惯性模块,通过机械旋转域节点将压气机、透平、SFC、盘车等模块进行连接,建模方程如下:

$$Tq = J \cdot \frac{dw}{dt} \quad (14)$$

式中: Tq 为总扭矩; w 为旋转角速度; J 为转动惯量。

2.1.6 燃料系统模型

燃料系统利用阀门、管道等基础模块,按照工艺系统流程图建立物理模型。图4为燃料系统模型。用于燃气轮机的燃料控制阀通常选择超音速阀,并通过速比阀调节控制阀阀前压力,以保证阀门运行于线性度较好的工作区域,因此控制阀模型需考虑亚音速和超音速下的工作状态,建模方程见式(15)。另外,不同的燃料控制阀的阀门特性不同,需根据阀门设备规格进行参数化配置。

立润滑油、顶轴油、液压油、电气等辅助系统仿真模型,并利用控制系统虚拟 DPU 运行仿真。

开关阀/泵/风机/断路器等开关控制类设备,通过对指令进行一定的延时后,将其作为设备的状态反馈信号^[25],仿真逻辑如图5所示。

调节阀等带模拟量输入类设备,将经过一阶惯性后的指令作为状态反馈信号。SFC、盘车等需闭环控制类设备,通过PID算法进行逻辑仿真。如SFC模型中,将SFC的转速设定值和实际转速的偏差,经过PID后输出SFC扭矩,然后通过Simscape的

Ideal Torque Source 模块接入主机模型的转子模型

中, 其中输出结果需考虑设备最大出力。

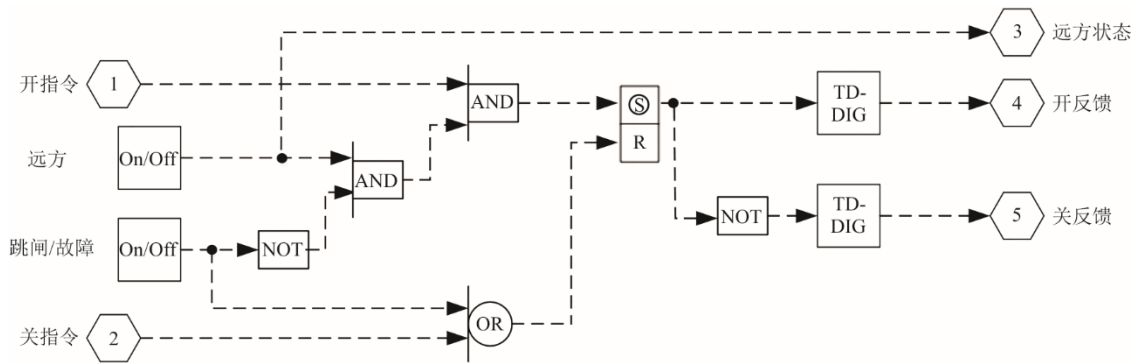


图5 开关控制类设备逻辑仿真
Fig.5 Logic simulation of switch control equipment

3 系统集成与仿真验证环境测试

将实时仿真模型生成代码后下装到实时仿真机中, 并进行模型信号与实时仿真机硬件通道的关联匹配, 其次将信号调理装置与控制系统硬件平台通过硬件线连接, 即可构成实时仿真环境。特别地, 模型中计算的是工程量, 而通过 I/O 模块采集和输出的通常为电流、电压、电阻、频率等信号, 因此需在模型侧进行工程量转换, 例如 4~20 mA AI/AO 类信号可采用线性转换; TC 和 RTD 类信号可根据相应的分度表进行转换。

在控制系统组态服务器上创建虚拟控制器, 将虚拟仿真模型组态程序下装到虚拟控制器中, 即可构成虚拟仿真环境。实时仿真模型与虚拟仿真模型中必要的信号交互通过 OPC 通信建立。实时仿真平台、虚拟仿真平台、燃气轮机控制系统三者集成后, 即可构成基于实时与虚拟联合仿真的燃气轮机控制系统软硬件一体化验证环境, 具体如图 6 所示。

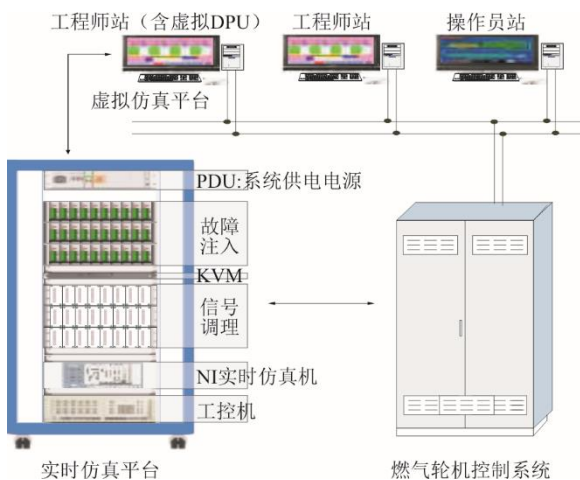


图6 燃气轮机控制系统软硬件一体化验证环境
Fig.6 Gas turbine control system software and hardware integrated verification environment

利用某 F 级燃气轮机设计数据对仿真模型精度进行验证, 结果如表 2 所示。ISO 条件下, 燃气轮机关键参数仿真值与设计值的相对误差在 1% 以内, 模型精度能够满足控制系统验证需求。

表 2 关键参数相对误差 单位: %
Tab.2 Relative errors of key parameters

负荷工况点	功率	压气机出口压力	燃烧室出口温度	透平出口温度
满负荷	0.15	0.19	-0.36	0.54
80%负荷	0.13	-0.28	-0.31	0.31
60%负荷	0.57	-0.51	-0.16	0.03
30%负荷	0.11	-0.73	-0.05	0.15
全速空载	0	0.53	0.49	0.73

利用某 F 级燃气轮机控制组态程序, 通过启停过程、关键闭环控制回路, 对软硬件一体化验证平台的功能进行测试。图 7 为燃气轮机启停过程仿真。由图 7 可见, 该平台可以实现燃气轮机盘车、清吹、点火、暖机、升速、全速空载、并网、升降负荷、解列、停机的全工况仿真, 能够实现实时与虚拟的联合仿真运行。

图 8 为燃气轮机负荷闭环控制回路仿真。由图 8 可见, 负荷仿真值能够较好地跟随负荷指令, 实现负荷闭环控制回路的全链路仿真。该回路包括了负荷指令、负荷控制燃料量计算、负荷信号采集的大闭环, 同时也包括了燃料分配控制、伺服卡阀门控制指令输出、伺服卡 LVDT 阀位状态采集的小闭环, 整个回路的仿真涵盖了真实运行的软硬件全部环节。图 9 为二次空气系统闭环控制回路仿真。可见, 闭环控制投入后持环压力仿真值能较好地跟随设定值。同时, 该回路仿真验证了主机模型与二次空气系统模型耦合的多域物理建模方法, 可为二次空气系统闭环控制提供软硬件一体化验证环境。

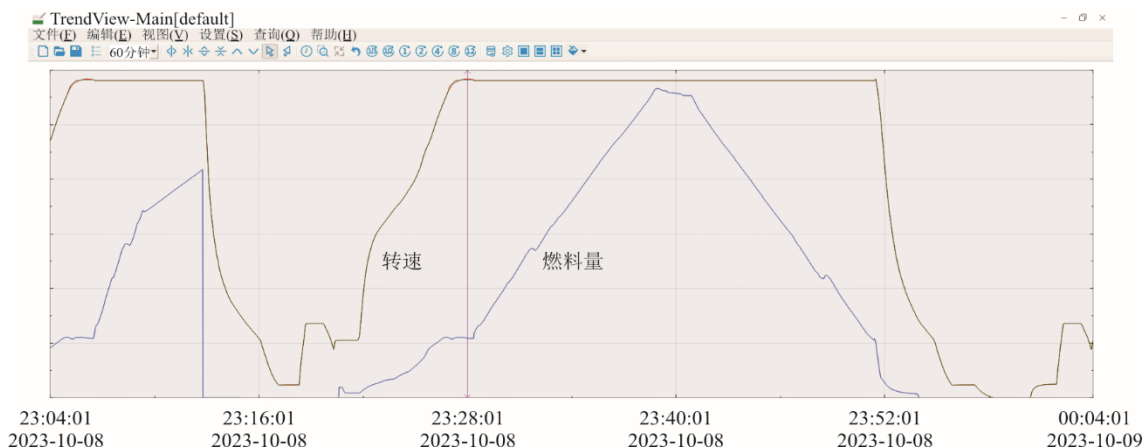


图 7 燃气轮机启停过程仿真
Fig.7 Gas turbine start-stop process simulation

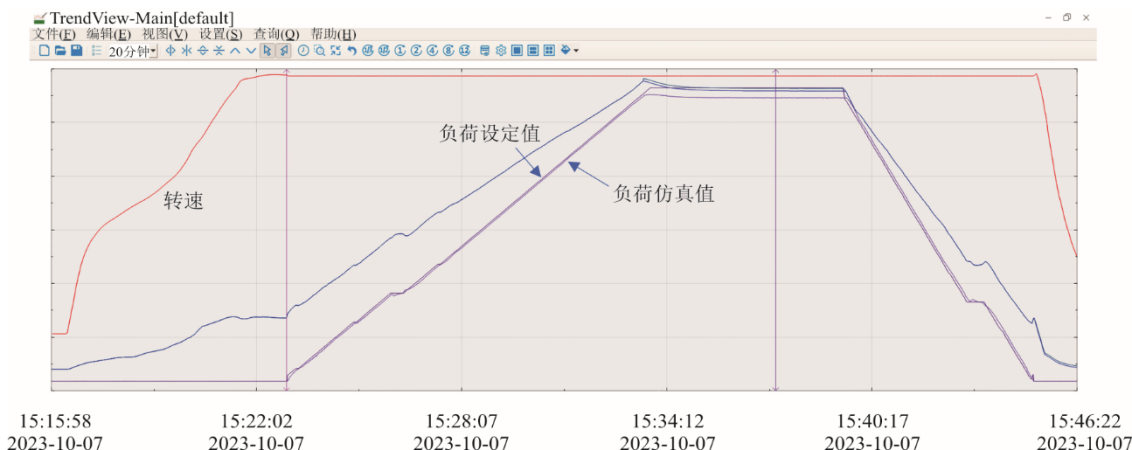


图 8 燃气轮机负荷闭环控制回路仿真
Fig.8 Closed-loop control loop simulation for gas turbine load

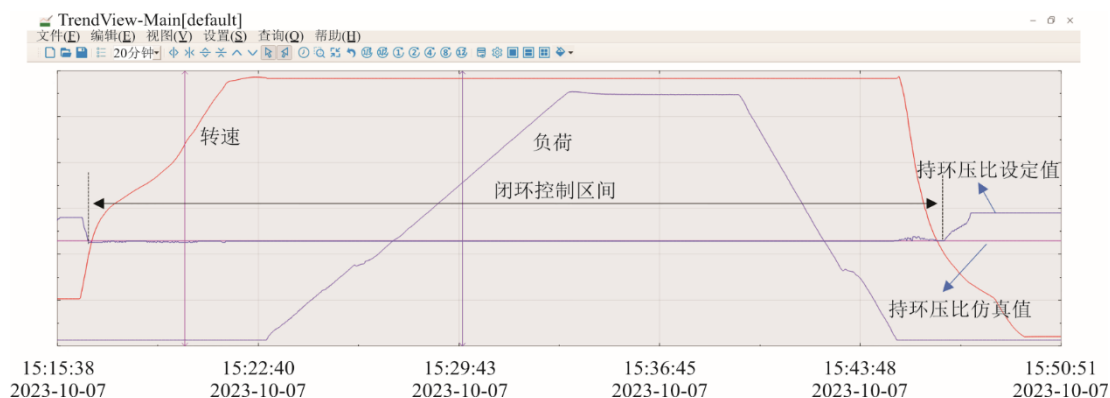


图 9 二次空气系统闭环控制回路仿真
Fig.9 Closed-loop control loop simulation for secondary air system

4 结 论

1) 采用实时与虚拟的联合仿真架构, 可以根据燃气轮机控制系统验证需求, 灵活选择工艺系统建模仿真方式, 既可以建立燃气轮机主机及燃料系

统的高精度仿真模型, 实现对核心控制算法的验证, 又能够构建轻量化的燃气轮机全范围仿真环境, 实现开环过程控制逻辑的验证。

2) 基于多域物理建模方法构建燃气轮机及燃料系统实时仿真模型, 不仅可以实现燃气轮机主机

与二次空气系统的耦合仿真、燃料系统的动态仿真,还能够模拟燃气轮机运行过程中热浸效应、容积效应、转动惯性等系统动态环节,进而为燃气轮机关键控制回路的参数整定提供高精度动态模型。

3) 采用软硬件一体化的仿真技术,一方面可以对关键控制回路验证提供包含全链路要素的仿真环境,实现燃气轮机组态控制软件程序的全范围验证,另一方面对控制系统硬件提供带燃气轮机运行工况的仿真环境,可有效支撑燃气轮机控制系统软硬件一体化测试。

[参考文献]

- [1] 刘吉臻,王庆华,胡阳,等. 新型电力系统的内涵、特征及关键技术[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 49-65.
LIU Jizhen, WANG Qinghua, HU Yang, et al. Connotation, characteristics and key technologies of new power systems[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 49-65.
- [2] 王鹏,王文涛,辛力. 新型电力系统内涵特征及发展方向[J]. 中国基础科学, 2023, 25(3): 23-28.
WANG Peng, WANG Wentao, XIN Li. Connotation characteristics and development direction of new power system[J]. China Basic Science, 2023, 25(3): 23-28.
- [3] 梁作放,孔令勃,潘华. 新型电力系统面临的挑战及关键技术[J]. 电力与能源, 2024, 45(2): 154-159.
LIANG Zuofang, KONG Lingbo, PAN Hua. Challenges and key technologies of the new power system[J]. Power & Energy, 2024, 45(2): 154-159.
- [4] 潘志明,薛志敏. 燃气轮机快速变负荷在调频市场中的研究与实践[J]. 燃气轮机技术, 2022, 35(3): 12-18.
PAN Zhiming, XUE Zhimin. Research and practice of fast variable load gas turbine in frequency modulation market[J]. Gas Turbine Technology, 2022, 35(3): 12-18.
- [5] 孙大陆. “双碳”背景下中国天然气发电战略思考及中国海油实践[J]. 中国海上油气, 2023, 35(5): 232-242.
SUN Dalu. Strategic thinking of natural gas power generation development under the background of “double carbon” of China and the practice of CNOOC[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(5): 232-242.
- [6] 李项. 微电网背景下的燃气轮机和光储调频调峰一体化研究[J]. 电气时代, 2023(10): 58-61.
LI Xiang. Research on the integration of gas turbine and photovoltaic energy storage frequency regulation and peak shaving under the background of microgrid[J]. Electric Age, 2023(10): 58-61.
- [7] 赵长轶,谢洪明,郭勇,等. 大国重器研制的关键核心技术突破——东方电气集团G50重型燃气轮机纵向案例研究[J]. 管理世界, 2023, 39(12): 20-39.
ZHAO Changyi, XIE Hongming, GUO Yong, et al. A breakthrough on the core technology for developing “pillars of a great power”: a longitudinal case study on G50 heavy-duty gas turbine of Dongfang electric corporation[J]. Management World, 2023, 39(12): 20-39.
- [8] 周建华,刘英. 中国航发燃气轮机发展现状[J]. 航空动力, 2019(2): 58-61.
ZHOU Jianhua, LIU Ying. Development status of AECC's gas turbines[J]. Aerospace Power, 2019(2): 58-61.
- [9] 张龙,李卫团,熊永功. SGT-100燃气轮机控制系统国产化升级改造[J]. 科技传播, 2016, 8(12): 197-198.
ZHANG Long, LI Weituan, XIONG Yonggong. Domestic upgrade and transformation of SGT-100 gas turbine control system[J]. Public Communication of Science & Technology, 2016, 8(12): 197-198.
- [10] 何怡冲,李永毅,林育超,等. 考虑透平背压影响的燃气轮机动态特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8): 3155-3165.
HE Yichong, LI Yongyi, LIN Yuchao, et al. Study on dynamic characteristics of gas turbine considering the influence of turbine back pressure[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8): 3155-3165.
- [11] 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 Dongyang, 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.
- [12] 肖艳藏,王勇,杜凯,等. 仿真系统在9FA燃气轮机控制系统国产化改造过程中的应用[J]. 发电设备, 2023, 37(2): 119-125.
XIAO Yancang, WANG Yong, DU Kai, et al. Application of the localization retrofit for a 9FA gas turbine control system with simulation system[J]. Power Equipment, 2023, 37(2): 119-125.
- [13] 沈立锐,胡忠志,房娟,等. 一种基于燃气轮机实时模型的硬件在回路平台集成与验证[J]. 热能动力工程, 2021, 36(8): 42-47.
SHEN Lirui, HU Zhongzhi, FANG Juan, et al. Integration and verification on hardware-in-the-loop platform based on gas turbine real-time model[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(8): 42-47.
- [14] 刘月,蒋洪德,郭庆,等. 某重型燃气轮机硬件在回路仿真平台转速部分的搭建与仿真研究[J]. 燃气轮机技术, 2016, 29(1): 12-17.
LIU Yue, JIANG Hongde, GUO Qing, et al. Construction and simulation research on the speed parts of the hardware in the loop simulation platform for a heavy-duty gas turbine[J]. Gas Turbine Technology, 2016, 29(1): 12-17.
- [15] 苏洋,陈远野,刘亚娟. 重型燃气轮机控制回路时延稳定性分析[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 110-116.
SU Yang, CHEN Yuanye, LIU Yajuan. Delay stability analysis of heavy-duty gas turbine control loop[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 110-116.
- [16] 徐泽鹏,陈天祥,朱亚兵. 某燃气轮机半物理仿真试验平台的研制与调试[J]. 燃气轮机技术, 2021, 34(1): 30-34.
XU Zepeng, CHEN Tianxiang, ZHU Yabing. The development and debugging of a gas turbine semi-physical simulation test platform[J]. Gas Turbine Technology, 2021, 34(1): 30-34.
- [17] 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 Xinyu, HU Zhenchao, CHEN Jinwei, 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.

- [18] 李健, 王志涛, 马亮, 等. 燃燃联合动力装置半物理仿真方法及试验研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(12): 140-147.
LI Jian, WANG Zhitao, MA Liang, et al. Research on semi-physical simulation method and experiments of COGAG system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(12): 140-147.
- [19] PANOV V, CRUZ-MANZO S. Gas turbine performance digital twin for real-time embedded systems[C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2020, 84140: V005T05A010.
- [20] 李加护, 李佳兴, 唐子璇, 等. 基于 Simscape 的燃气轮机燃料控制阀建模及故障分析[J]. 热力发电, 2024, 53(5): 56-66.
LI Jiahu, LI Jiaxing, TANG Zixuan, et al. Simscape-based modeling and fault analysis of gas control valve for gas turbine[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(5): 56-66.
- [21] 许萌萌, 朱玉昊, 冯瑞, 等. 基于 Simscape 的重型燃气轮机建模与仿真研究[J]. 燃气轮机技术, 2015, 28(1): 19-23.
XU Mengmeng, ZHU Yuhao, FENG Rui, et al. Heavy-duty gas turbine modelling and simulation basing on Simscape[J]. Gas Turbine Technology, 2015, 28(1): 19-23.
- [22] 李俊昆, 杨志鹏, 白涛. 基于迁移学习的燃气轮机机理建模方法研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(6): 1500-1510.
LI Junkun, YANG Zhipeng, BAI Tao. Research on modeling method of gas turbine mechanism based on transfer learning[J]. Journal of Engineering Thermo-physics, 2023, 44(6): 1500-1510.
- [23] 朱志劫, 田书耘, 范雪飞, 等. 考虑透平逐级冷却的重型燃气轮机热力学建模及关键参数影响分析[J]. 热力发电, 2023, 52(5): 72-81.
ZHU Zhijie, TIAN Shuyun, FAN Xuefei, et al. Thermodynamic modeling and influence analysis of key parameters of heavy-duty gas turbine considering turbine stage cooling[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(5): 72-81.
- [24] BEATER P. Pneumatic drives/system design, modelling and control[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2007: 1.
- [25] 李俊昆, 邹荣贵, 张绪炎, 等. AE94.3A 型燃气轮机一键启停控制策略设计及仿真研究[J]. 热力透平, 2020, 49(4): 307-314.
LI Junkun, ZOU Ronggui, ZHANG Xuyan, et al. Design and simulation of one-key start-stop control strategy for AE94.3A gas turbine[J]. Thermal Turbine, 2020, 49(4): 307-314.

(责任编辑 杜亚勤)