

船用燃气轮机总体性能分布式集成仿真 平台设计及功能验证研究

李铁磊¹,马正军²,马佳毅¹,王志涛¹

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:为了满足多学科、多层次的船用燃气轮机仿真分析需求,运用分布式集成仿真和多软件协同仿真的方法,对燃气轮机总体性能集成仿真平台进行设计研究。使用 C#语言在 .Net 平台上对仿真平台应用层进行开发,以商用仿真软件与 Sql Server 数据库为支撑层,使用 web 服务协议和改进的多软件协同仿真接口作为通讯层以及由服务器、计算节点和网络设备组成的设备层,这四个层次组成了平台的体系结构。基于 MVC(Model View Controller)框架和 B/S(Browser/Server)架构,设计了平台的运行框架。平台能够实现网络环境下的燃气轮机高效率高精度的性能分析。通过间冷燃气轮机装置在发电负载下变工况分布式集成仿真方案,初步验证了平台体系框架的合理性和有效性。

关 键 词:燃气轮机;分布式仿真;集成仿真;仿真平台

中图分类号:TK221 文献标识码:B DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.03.026

[引用本文格式]李铁磊,马正军,马佳毅,等.船用燃气轮机总体性能分布式集成仿真平台设计及功能验证研究[J].热能动力工程,2022,37(3):186-192. LI Tie-lei, MA Zheng-jun, MA Jia-yi, et al. Research on design and function verification of distributed integrated simulation platform for marine gas turbine overall performance[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(3): 186-192.

Research on Design and Function Verification of Distributed Integrated Simulation Platform for Marine Gas Turbine Overall Performance

LI Tie-lei¹, MA Zheng-jun², MA Jia-yi¹, WANG Zhi-tao¹

(1. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001;
2. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150001)

Abstract: In order to meet the needs of multi-disciplinary and multi-level marine gas turbine simulation analysis, distributed integrated simulation and multi-software co-simulation are used to design and research the integrated simulation platform for the overall performance of gas turbines. C# language is used to develop the application layer of the simulation platform on the .Net platform. With commercial simulation software and Sql Server database as the supporting layer, web service protocol and improved multi-software co-simulation interface are adopted as the communication layer and the equipment layer that is composed of servers, computing nodes and network equipment. These four layers form the architecture of the platform. Based on the MVC(Model View Controller) framework and the B/S(Browser/Server) framework, the operating framework of the platform is designed. The platform can realize high-efficiency and high-precision performance analysis of gas turbines in a network environment. Through the distributed integrated

收稿日期:2021-07-09; 修订日期:2021-07-14

基金项目:国家科技重大专项(2017-I-0011-0012, 2017-V-0005-0055)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project(2017-I-0011-0012, 2017-V-0005-0055)

作者简介:李铁磊(1981-),男,山东昌邑人,哈尔滨工程大学高级实验师。

simulation program of the indirect cooling gas turbine device under variable working conditions and the power generation load, the rationality and effectiveness of the platform system framework are preliminarily verified.

Key words: gas turbine, distributed simulation, integrated simulation, simulation platform

引言

船用燃气轮机的研制通常面临着装置系统复杂、研发流程长及设计研发成本高等问题。而运用计算机集成仿真技术进行船用燃气轮机的研发设计,不仅能缩短研发周期、节约研发成本,同时运用船用燃气轮机集成仿真技术能够满足其研发过程中的多学科、多维度的仿真需求。

船用燃气轮机的一体化集成仿真环境的特点是集合了一系列仿真所需的软件,能够完成“建模-仿真实验-结果分析”的所有任务,支持涉及多学科领域,多个维度的耦合仿真^[1-3]。在国外,对于集成仿真平台的研究已较为成熟。NASA早在20世纪80年代后期就提出了“推进系统数值仿真(Numerical Propulsion System Simulation, NPSS)”研究计划,其目的是建立起一个基于高性能计算和通信技术的集成仿真平台,该平台能完成高精度、多层次的整机性能仿真分析^[4-5]。国内对于燃气轮机集成仿真平台方面进行了较多的研究。李铁磊等人^[6]对燃气轮机的分布式集成仿真平台进行开发,提高了对自治性仿真模型的重用。陈涛等人^[7]研究总结了多软件协同集成仿真的两种常用的仿真接口,并以此为基础研发了船舶燃气轮机多软件协同集成仿真平台。

由于燃气轮机的运行情况较为复杂,单一学科、单一维度的仿真无法准确且全面地模拟燃气轮机的运行状况。另外,现在的仿真软件仿真维度较为单一,因此应用多维度、多学科、多软件对燃气轮机进行总体性能设计和性能分析,可以更加全面地对燃气轮机的运行过程进行分析,并且使仿真模型能更准确地反映燃气轮机的实际运行状况,对燃气轮机进行多方面、多层次的仿真分析。

由于燃气轮机集成仿真需要多个仿真软件联合运行,因此对计算机的性能要求较高。为了提高燃

气轮机仿真的效率,本文基于一体化集成仿真环境对船用燃气轮机总体性能集成仿真平台进行设计研究,开发了拥有多计算节点多软件集成仿真功能的燃气轮机分布式集成仿真平台。该平台拥有通用性、可拓展性、高效性及网络交互功能,支持船用燃气轮机系统性、多学科和多层次的仿真分析。

1 总体性能集成仿真平台的设计思想

船用燃气轮机分布式集成仿真平台的搭建目标是能够满足不同功率等级、不同性能级别的船用燃气轮机总体性能设计和船用燃气轮机高精度性能分析需求。平台具体的功能为:将包含主机、负载、控制系统和传动系统等在内的各部件级模型协同运行,实现燃气轮机多部件的集成仿真,能够完成包括简单循环、复杂循环的单轴、多轴燃气轮机和燃气轮机联合动力装置的仿真分析;进行多维度的仿真分析,实现包括整机与部件之间、整机与附属子系统之间的多学科耦合仿真;能够通过网络实现远程仿真分析和数据资源共享。

由于不同的仿真软件涉及到的学科不同,仿真的维度也不同,选择合适的仿真软件能够大大提高仿真的精度,缩短仿真的时间。因此,为了使平台实现多维度、多学科的耦合仿真,需要实现多个仿真软件之间的协同运行。多软件协同集成仿真技术的核心是多软件协同运行接口,接口的功能是使不同的仿真软件之间进行数据传输和仿真时间的一致,保证仿真的同步运行。本文采用的多软件协同运行接口是以仿真软件A作为仿真活动的主体,其它仿真软件通过各自的接口与仿真软件A共同运行,依靠传输媒介,通常为文本文件,进行软件间的数据传输^[8]。该接口的优点是拥有较好的通用性,能兼容绝大部分的仿真软件且运行可靠性好。

由于平台仿真使用的是分布式集成仿真方法,即仿真过程是由多台计算机节点共同完成,因而还要保证各计算节点与服务器间的数据传输和运行同

步,因此需要对通常的多软件运行接口进行改进,使其适用于多计算机多软件的协同运行。改进的多软件协同运行接口程序编写逻辑如图 1 所示。

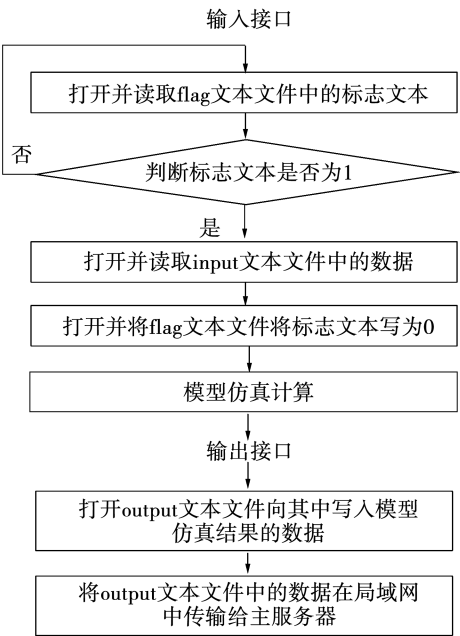


图 1 多软件协同运行接口程序编写逻辑
Fig. 1 Programming logic of multi-software cooperative running interface

2 总体性能集成仿真平台总体架构

采用分层次的体系结构设计平台,以便研究人员对系统进行开发以及维护^[9]。船用燃气轮机总体性能集成仿真平台分层体系结构如图 2 所示。

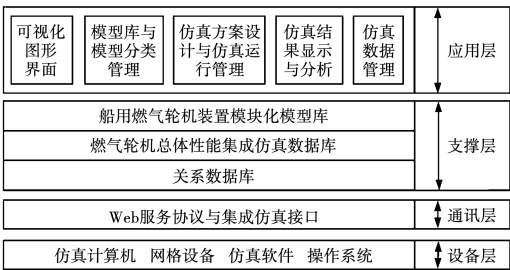


图 2 总体性能集成仿真平台体系结构
Fig. 2 Architecture of integrated simulation platform for overall performance

2.1 应用层

应用层是平台可实现的所有功能的集合,用户通过可视化图形界面可以方便地使用平台,并依靠

平台提供的模型库与模型分类管理、总体性能设计、仿真方案设计与仿真运行管理、仿真结果显示与分析 and 仿真数据管理等功能完成船用燃气轮机仿真活动中所需的所有任务。

2.2 支撑层

平台的支撑层主要是由船用燃气轮机装置模块化模型库、关系数据库和燃气轮机总体性能集成仿真数据库组成的一个整体。平台允许用户按照平台统一的标准在模块化模型库中添加部件级仿真模型。

2.3 通讯层

平台的通讯层由 Web 服务协议和多软件协同集成仿真接口组成,它的功能是维持各个计算机之间,不同仿真软件之间数据传输并保证燃气轮机整体仿真的同步运行。由 Web 服务协议保证各个计算节点和主服务器之间数据交互。通过 WebSocket 通信协议保证网页客户端与服务器之间的实时数据传输,提高传输效率,使用户能够实时查看仿真过程的数据。

2.4 设备层

设备层是由一台作为主服务器的计算机与几台作为计算节点的计算机所组成的。所有计算机都通过网络设备连接在同一个局域网内方便数据传输,同时主服务器支持广域网级别的联接。设备层是整个平台运行的硬件基础。

3 总体性能集成仿真平台运行框架

总体性能集成仿真平台界面应用 MVC (Model View Controller) 框架进行开发如图 3 所示。MVC 框架是由视图、模型和控制器三个核心部件组成,将视图和用户模型的实现代码分离,使得代码的层次结构更加清晰,简化系统的编写设计,并且模型和代码的重用性好^[10]。同时,由于业务模型层和视图管理层的分离,使得平台能够更加易于进行维护和优化。在 MVC 框架中,视图指的是用户进行操作和查看的可视化图形界面即浏览器页面;模型是数据和业务逻辑的集合,主要完成逻辑判断和数据存取等任务;控制器的功能是根据用户的操作去调用模型并通过视图反馈结果^[11]。

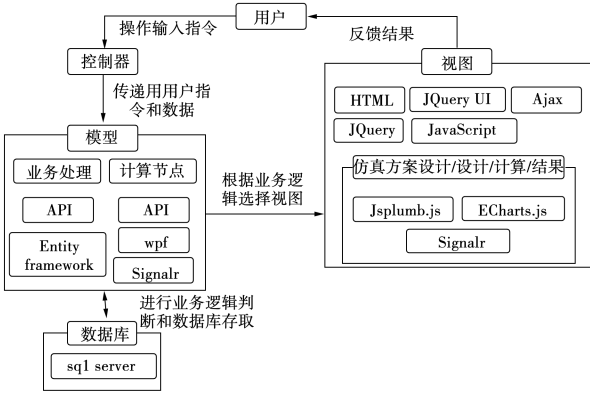


图3 总体性能集成仿真平台 MVC 框架

Fig.3 MVC framework of integrated simulation platform for overall performance

平台的运行模式如图4所示。

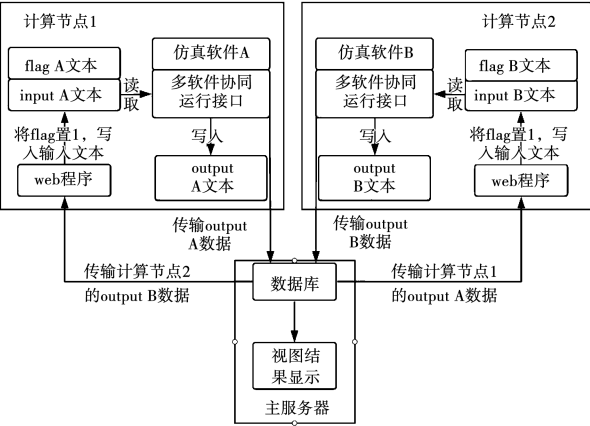


图4 总体性能集成仿真平台运行模式

Fig.4 Operation mode of integrated simulation platform for overall performance

平台的所有功能都集成在了主服务器上,主服务器的作用包括存储、中转和显示数据。计算节点只用于多软件协同仿真并将仿真结果实时传回主服务器。用户始终面对基于 C#语言开发的视图界面,通过人机交互完成仿真活动过程。在界面中显示的仿真模型模块都是存储在计算节点中的仿真模型。其中,多软件协同运行接口是按图 1 的逻辑进行编写,在不同计算节点上的不同仿真计算软件能够协同运行主要依靠的是作为传输媒介的多个文本文件,每台计算节点都拥有三个文本文件:flag、input 和 output。flag 文本保证两个计算节点仿真的同步:计算节点 1 将输出结果传回主服务器的数据库进行

存储并传给计算节点 2 的 web 程序,web 程序将数据存入 input 文本,并将 flag 文本置 1,则计算节点 2 的仿真模型通过多软件协同运行接口读取输入,开始运行并将输出写入 output 文本,通过接口将数据传回主服务器,计算节点 1 的运行过程类似。

4 总体性能集成仿真平台开发与功能验证

4.1 平台开发

在总体性能集成仿真平台的主要操作界面使用 C#语言,采用 B/S (Browser/Server) 架构,MVC 框架进行开发的。B/S 架构指浏览器/服务器架构,这种架构模式将平台分为浏览器层、服务器层和数据库层三个组成部分,实现平台主要功能的逻辑程序都集中在了服务器上,使得整个系统的开发、维护以及使用更加便利,减轻了计算机的负荷^[12]。浏览器层即为平台的操作界面,服务器层是平台 web 应用程序的集合,数据库层用于存储传输和管理数据。

在浏览器中输入对应的平台网址即可转到平台登录界面,而后进入平台运行的主操作界面框架图,如图 5 所示。

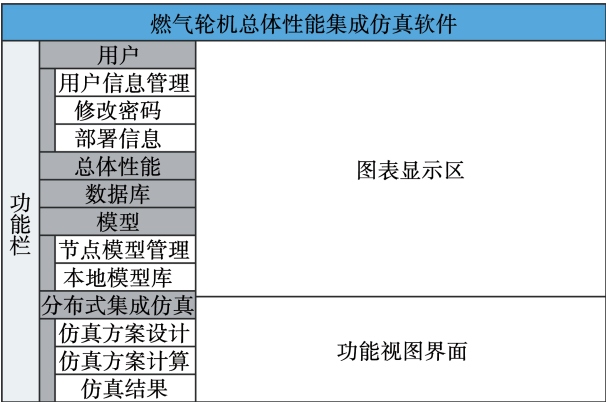


图5 总体性能集成仿真平台主操作界面框架

Fig.5 Master interface framework of integrated simulation platform for overall performance

在软件主界面可以查看用户的登录记录和模型的修改记录。左侧是软件的菜单栏,用户可以按需自行选择点击。菜单栏有 5 部分组成:用户,总体性能设计,数据库,分布式集成仿真和模型。点击“分布式集成仿真”按钮可以进入相关的模型仿真计算方案,当用户选中某个仿真方案时不需要用户进行手动建模就可以直接进行仿真方案计算与仿真结果

查询分析等操作。同时,界面也支持用户进行自主设计仿真方案、调节参数等操作。在“仿真方案设计”一栏,用户可以按需进行仿真建模等操作。点击“模型”一栏下的“本地模型库”,用户可以查看存储在本地服务器的船用燃气轮机装置模块化仿真模型。模型库下的节点模型对应的是计算节点上用于分布式集成仿真的仿真模型,通过每台计算节点的IP地址与服务器的节点模块模型相对应,如图6所示。

4.2 平台功能验证

平台以间冷燃气轮机装置在发电负载下的分布式集成仿真方案^[13-14]为例,其具体建模过程为:在船用燃气轮机总体性能集成仿真平台主界面点击“分布式集成仿真”一栏下的“仿真方案设计”按钮,从节点模型库中将整机(间冷燃气轮机)模块与

间冷器模块拖到建模界面,然后按照模块间的输入输出参数名称进行连线,完成间冷燃气轮机装置仿真案例的建模,如图7所示。其中,整机(间冷燃气轮机)模块与间冷器模块分别在两台不同的计算节点进行仿真计算,由传输媒介 flag 中的标志文本保证仿真的协同运行,通过传输媒介 output、input 文本文件进行数据传输。

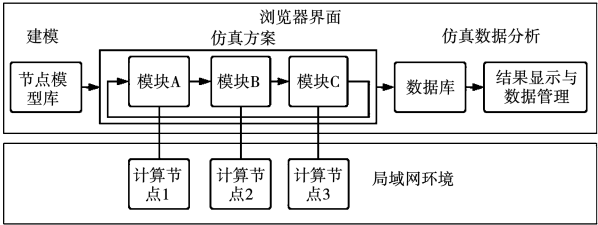


图6 总体性能集成仿真平台仿真过程结构图

Fig. 6 Structure diagram of simulation process of integrated simulation platform for overall performance

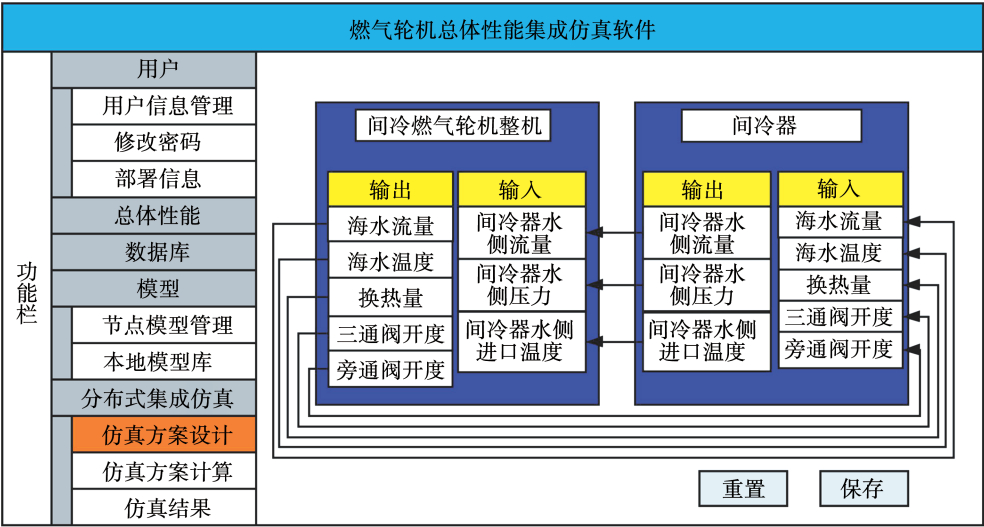


图7 间冷燃气轮机集成仿真案例建模界面框架

Fig. 7 Modeling interface framework of integrated simulation case from intercooled gas turbine

通过上述间冷燃气轮机集成仿真案例对平台进行功能方面的验证,仿真的步长设置为0.2 s,总仿真时间为600 s。对间冷燃气轮机负载突增突减过程进行仿真,间冷燃气轮机的发电负载输入信号如图8所示。仿真计算时,可以实时查看仿真运行结果。根据对间冷燃气轮机装置在发电负载下的分布式集成仿真案例的仿真计算,对总体性能集成仿真平台的分布式集成仿真计算功能进行了初步验证:

包括建模和仿真;在主服务器上能够实时查看仿真运行时各台计算机节点中的部件仿真参数变化,验证了计算节点与主服务器之间的数据传输接口功能和多软件协同仿真接口功能的有效性以及仿真的同步性。同时,在使用平台进行建模时由于各部件模型已进行封装存于模型库只需进行简单的操作即可完成仿真方案的设计,相比于传统的建模方法更加便捷高效。仿真计算完成后,得到如图9所示的仿

真结果。

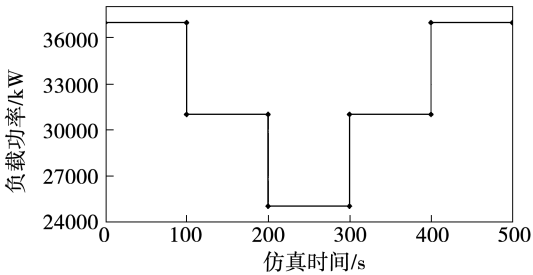


图8 间冷燃气轮机的发电负载输入信号

Fig. 8 Input signal of generation load of
intercooled gas turbine

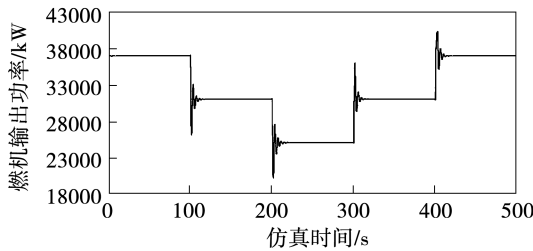


图9 总体性能集成仿真平台仿真结果

Fig. 9 Simulation results of integrated simulation
platform for overall performance

图10 为使用与平台一致的 simulink 底层模型，基于 Matlab/AMESim 集成仿真建模方法^[15]对同一间冷燃气轮机集成仿真案例的仿真结果。将图9和图10进行对比可以明显得出两者的仿真结果是一致的。

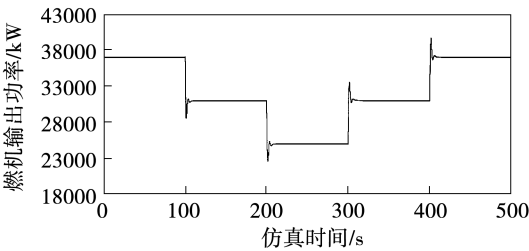


图10 传统集成仿真建模仿真结果

Fig. 10 Modeling simulation results of traditional
integrated simulation

表1为100,200,300,400和500s时平台与simulink的仿真结果数据对比,误差均小于0.005%。由此验证了总体性能集成仿真平台的分布式集成仿真计算功能是有用的。

表1 动力涡轮输出功率仿真结果数据对比

Tab. 1 Comparison of simulation data of power
turbine output power

时间/s	平台仿真/kW	传统仿真/kW	误差/%
100	36 999. 92	37 000. 00	0. 000 2
200	30 999. 33	31 000. 00	0. 002 2
300	25 001. 11	25 000. 00	0. 004 5
400	31 000. 20	31 000. 00	0. 000 7
500	37 000. 46	37 000. 00	0. 001 2

5 结 论

总体性能集成仿真平台运行分布式集成仿真方案,其仿真结果与实际相符,验证了船用燃气轮机总体性能集成仿真平台总体架构的合理性,证明了船用燃气轮机总体性能集成仿真平台能够稳定运行。应用上述体系框架设计的船用燃气轮机总体性能集成仿真平台拥有以下的特点:

(1) 平台应用范围广泛。平台能够通过添加编辑模型对模块化模型库进行扩展,使得平台能够满足不同功率等级、不同性能级别的船用燃气轮机性能仿真与总体性能设计需要。

(2) 平台拥有可拓展性。依靠多软件协同仿真接口,平台能够通过添加仿真模型和添加支撑软件等操作,使得平台能够兼容多种软件的集成仿真方案。同时,平台支持添加计算机仿真节点以提高运算效率。

(3) 平台运行高效。由多台计算节点共同对一个燃气轮机系统进行仿真运算提高了仿真过程的效率。

(4) 平台使用便利。用户能够使用网页通过账户登录平台,在局域网内进行仿真方案的编辑计算,仿真结果查询分析等一系列操作。极大地方便用户的使用、交流与资源共享。同时,平台简化了仿真活动的建模过程,用可视化图形界面方便用户进行建模方案设计。

总体性能集成仿真平台不同于以往的仿真平台只能单机运行且无法进行网络交互,用户可以通过浏览器登录总体性能集成仿真平台且提出了主服务器-计算机节点式的仿真运行模式以提高运行效

率。总体性能集成仿真平台应用了包括分布式集成仿真技术、多软件协同仿真接口技术、WebSocket 通信协议等关键技术保证平台集成仿真功能的有效性和运行稳定性。

参考文献：

[1] 贾连兴. 仿真技术与软件[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
JIA Lian-xing. Simulation technology and software [M]. Beijing: National Defense Industry Press,2006.

[2] 李淑英. 船舶动力装置仿真研究[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2011.
LI Shu-ying. Marine power plant simulation study [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press,2011.

[3] 周东祥,仲辉,李群. 复杂系统仿真的可组合问题研究综述[J]. 系统仿真学报,2007,19(8): 1819 – 1823.
ZHOU Dong-xiang,ZHONG Hui,LI Qun. A review of combinatorial problems in simulation of complex systems[J]. Journal of System Simulation,2007,19(8): 1819 – 1823.

[4] LYTLE,FOLLEN J,NAIMAN G. Numerical propulsion system simulation(NPSS)1999 Industry Review[R]. NASA TM – 2000 – 209795,2000.

[5] LYTLE,JOHN. The numerical propulsion system simulation;an overview[R]. NASA TM – 2000 – 209915,2000.

[6] 李铁磊,李淑英,王志涛. 船舶燃气轮机装置分布式集成仿真平台设计[J]. 船舶工程,2013,35(4): 94 – 98.
LI Tie-lei,LI Shu-ying,WANG Zhi-tao. Design of distributed integrated simulation platform for ship gas turbine[J]. Ship Engineering,2013,35(4): 94 – 98.

[7] 陈涛,黄莹莹,左晓镭,等. 船舶燃气轮机装置多软件协同集成仿真平台设计[J]. 热能动力工程,2019,34(11): 36 – 41.
CHEN Tao, HUANG Ying-ying, ZUO Xiao-lei, et al. Design of multi-software collaborative integrated simulation platform for ship gas turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2019,34(11): 36 – 41.

[8] 谢海滨,张代兵,沈林成,等. 基于 MATLAB/SIMULINK 与 FLUENT 的协同仿真方法研究[J] 系统仿真学报,2007,19(8):1824 – 1827.
XIE Hai-bin,ZHANG Dai-bing,SHEN Lin-cheng, et al. Research

on cooperative simulation method based on MATLAB /SIMULINK and FLUENT[J]. Journal of System Simulation,2007,19(8): 1824 – 1827.

[9] SCOTT M J. Steady-state Modeling of gas turbing engines using the numerical propulsion system simulation code[C]. ASME GT2010 – 20350,2010.

[10] 洪贵华. MVC 设计模式在 JSP 开发 Web 应用程序中的应用探究[J]. 信息与电脑(理论版),2017(24):16 – 17,20.
HONG Gui-hua. Research on the application of MVC design pattern in JSP development web application [J]. Information and Computers (Theoretical Edition),2017(24):16 – 17,20.

[11] 李灵华,何丽君. MVC 设计模式在 Web 应用程序开发中的研究[J]. 大连民族学院学报,2007(1): 9 – 11.
LI Ling-hua,HE Li-jun. Research on MVC design patterns in web application development[J]. Journal of Dalian College for Nationalities,2007(1): 9 – 11.

[12] 张鹏. 分布式管理系统架构研究与设计[J]. 信息技术与信息化,2019(7): 72 – 74.
ZHANG Peng. Research and design of distributed management system architecture [J]. Information Technology and Informatization,2019(7): 72 – 74.

[13] 张磊. 间冷循环燃气轮机发电模块负荷突变半物理仿真研究[D]. 北京:中国舰船研究院,2013.
ZHANG Lei. Semi-physical simulation of load mutation in generation module of intercooled gas turbine [D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy,2013.

[14] ZHI-Tao W, JIAN L, TIE-Lei L, et al. Research on Simulink/Fluent collaborative simulation zooming of marine gas turbine [J]. Applied Computational Intelligence and Soft Computing, 2017, 2017:1 – 8.

[15] 张善科. 船用间冷循环燃气轮机性能仿真研究[D]. 中国舰船研究院,2012.
ZHANG Shan-ke. Simulation study on the performance of marine intercooling cycle gas turbine [D]. China Ship Research and Development Academy,2012.

(金圣迪 编辑)