

TMSR 云仿真平台初步设计与实现

何 越^{1,2,3} 程懋松¹ 戴志敏¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 嘉定园区 上海 201800)

2 (中国科学院大学 北京 100049)

3 (上海科技大学 上海 201210)

摘要 传统核能仿真系统一般采用基于物理机的分布式服务部署,存在资源利用率低、部署和扩展难度大等问题。本文结合云计算平台具有弹性资源调度、敏捷运维等优点,提出一种分层级、模块化的钍基熔盐堆(Thorium-based Molten Salt Reactor, TMSR)核能系统云仿真平台系统架构。通过搭建 TMSR 云仿真试验平台,验证基于开源云操作系统框架 OpenStack 构建 TMSR 云仿真平台的技术可行性。将分布式服务部署的固态燃料钍基熔盐实验堆(Thorium-based Molten Salt Experimental Reactor-Solid Fuel, TMSR-SF1)工程仿真机各功能模块迁移到 TMSR 云仿真试验平台,实现基于云计算的服务部署,用户可通过 Web 端访问 TMSR-SF1 仿真服务。仿真运行测试结果表明:TMSR 云仿真试验平台可在整个软件生命周期内敏捷、高效地为用户按需提供 TMSR-SF1 仿真资源,可实现仿真系统快速、灵活地部署和重构。

关键词 钍基熔盐堆, 云仿真平台, 系统架构, OpenStack, 工程仿真机

中图分类号 TL365

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.070603

Preliminary design and implementation of TMSR cloud simulation platform

HE Yue^{1,2,3} CHENG Maosong¹ DAI Zhimin¹

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3(ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

Abstract [Background] Traditional nuclear energy simulation systems generally adopt the distributed service deployment based on the physical machines, there exist problems such as low resource utilization, difficulty in deployment and expansion. [Purpose] This study aims to design and implement cloud simulation platform for thorium-based molten salt reactor (TMSR) by making use of cloud computing platform's advantages of flexible resource scheduling, agile operation and etc. [Methods] Combining these advantages of cloud computing platform, a hierarchical and modular system architecture of TMSR cloud simulation platform was deployed. Then, a TMSR cloud simulation test platform was built to verify the technical feasibility of building the TMSR cloud simulation platform based on OpenStack. The functional modules of thorium-based molten salt experimental reactor-solid fuel (TMSR-SF1) engineering simulator were migrated to the TMSR cloud simulation test platform, which implements service deployment based on cloud computing. [Results] Users can access TMSR-SF1 simulation services through the browser without installing any client software. At the same time, the simulation resources provided by the

中国科学院战略先导科技专项(No.XDA02001005)资助

第一作者: 何越, 男, 1992 年出生, 2015 年毕业于南华大学, 现为硕士研究生, 研究领域为先进仿真技术

通信作者: 程懋松, E-mail: mscheng@sinap.ac.cn

收稿日期: 2018-03-12, 修回日期: 2018-04-26

Supported by Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDA02001005)

First author: HE Yue, male, born in 1992, graduated from University of South China in 2015, master student, focusing on advanced simulation technology

Corresponding author: CHENG Maosong, E-mail: mscheng@sinap.ac.cn

Received date: 2018-03-12, revised date: 2018-04-26

platform are modular, and each module can be used independently or in combination. [Conclusion] After running tests, the TMSR cloud simulation test platform can provide users with the required TMSR-SF1 simulation resources quickly and efficiently throughout the software lifecycle, enabling rapid and flexible deployment and reconstruction of simulation systems.

Key words TMSR, Cloud simulation platform, System architecture, OpenStack, Engineering simulator

核电仿真技术可以分为仿真平台技术和仿真建模技术。仿真平台技术为核能系统建模、软件模块集成等提供运行支撑环境；仿真建模技术则侧重于对物理模型对象本身的求解^[1]。核电仿真平台是一个涉及多专业软件、多操作系统、多硬件集成的系统工程^[2-4]，传统的仿真软件部署及系统运维管理相对复杂。以田湾核电站全范围仿真机为例，其软件包含超过 2 000 个计算程序，可仿真 70 个工艺系统、500 类运行事故、10 万个参数；其硬件主要包括仿真主机（采用美国 SGI 公司的 Origin 2000 计算机，1 024 MB 内存，9.1 GB 硬盘，IRIX6.5 操作系统）、控制系统模块（采用德国西门子公司的工作站，256 MB 扩展内存，9.1 GB 硬盘，Solaris2.8 操作系统）、仿真机开发与管理工作站（采用德国西门子公司的工作站）、教练员站（采用 SGI 02 工作站，128 MB 内存，4 GB 硬盘，IRIX6.5 操作系统）等^[5]。

核电仿真系统的开发是一个不断扩展和完善的过程，仿真平台应具备高可扩展性。韩国月城核电站坎杜型(Canadian Deuterium Uranium Reactor, CANDU)反应堆为提高仿真系统的灵活性和性能，将原来部署在 UNIX 系统上的应用服务迁移到 Windows 系统^[6]；秦山核电站 300 MW 机组全范围仿真机为确保提供足够的机时、存储空间、信息流通能力，便于扩展和修改，其相应硬件设备的设计余量均大于 45%^[7]。设计余量越大，扩展和修改的空间越大，同时意味着硬件支出及资源闲置率越高。

仿真技术的发展依赖于计算机技术的进步。近年来，云计算技术快速发展，其在仿真设计等领域得到越来越广泛的应用^[8-10]。彭辉等^[11]提出基于云计算技术构建核动力装置设计平台的思路和实施方案。胡波等^[12]提出一种基于云计算的火电仿真平台，该平台可实现模型资源的调度管理、多用户协同仿真等功能。

中国科学院钍基熔盐堆核能系统(Thorium-based Molten Salt Reactor, TMSR)先导科技专项旨在研发第四代反应堆核能系统，TMSR 仿真平台是 TMSR 核能系统研发的重要环节之一。本文结合固态燃料钍基熔盐实验堆(Thorium-based Molten Salt Experimental Reactor-Solid Fuel, TMSR-SF1)工程仿

真机的部署和使用经验，提出一种分层级、模块化的 TMSR 云仿真平台系统架构，通过搭建 TMSR 云仿真试验平台验证基于 OpenStack 构建 TMSR 云仿真平台的可行性。

1 TMSR 云仿真平台需求分析

目前，TMSR 各类工程仿真机都是基于 TMSR 仿真平台和 TMSR 各类反应堆工程设计模型化、参数化及软件实施而建立。TMSR-SF1 工程仿真机主要用于 TMSR-SF1 堆型的工程设计、分析和验证，同时，可为事故分析、运行规程和应急处理规程的制定提供决策支持^[13]。在 TMSR 工程仿真机开发和运行过程中，TMSR 仿真平台起到至关重要的作用。它既是 TMSR 工程仿真机的开发工具，也是仿真系统正常运行的支持平台。

TMSR 云仿真平台在满足现有 TMSR 仿真平台功能性需求的前提下，解决 TMSR 仿真平台中存在的一些问题。为此，本文对现有 TMSR-SF1 工程仿真机的软件部署、使用、扩展等过程进行分析，梳理得出 TMSR 云仿真平台应具备如下基本功能：

1) TMSR-SF1 仿真建模功能。模型是仿真系统的基础，仿真模型开发、调试和运行是 TMSR 云仿真平台必备的核心功能。TMSR 云仿真平台可向用户提供原有 TMSR-SF1 工程仿真机的全部仿真建模功能，其仿真功能主要包括：仿真运行支撑环境、核电站系统热工水力仿真、控制与保护系统仿真和人机交互界面仿真。另外，用户也可以根据仿真需求自定义新的仿真建模功能。

2) 敏捷地服务部署、重构。现有的 TMSR-SF1 工程仿真机采用分布式服务部署，即将不同仿真软件部署在不同物理机上组成分布式仿真系统。分布式服务部署可保证系统的安全性和可靠性，由于各仿真软件相互间物理隔离，当其中某项服务发生故障时，仿真系统其他部分的服务不会受到影响。同时，可根据不同仿真软件对计算机性能的需求，而有针对性地配置硬件资源。如表 1 所示，TMSR-SF1 仿真系统涵盖多个功能模块，涉及多种专业仿真软件及系统环境，其分布式服务部署较为复杂。TMSR 云仿真平台应具备实现分布式服务部署的能力，同时，可将各子系统、专业仿真软件及其系统环境的

安装、配置过程固化为模块化仿真组件。用户可通过模块化仿真组件快速地实现仿真系统的服务部

表 1 TMSR-SF1 工程仿真机的主要软件及其部署情况
Table 1 The main software deployment of TMSR-SF1 engineering simulator

| 功能模块 Function modules | 仿真软件 Simulation software | 系统环境 System environment | 模块描述 Module description |
|---|-----------------------------|---|--|
| 人机交互界面 Human-machine interface | TMSRDesigner | Ubuntu 16.04LTS, JDK, etc. | 基于 Control System Studio 的跨平台人机界面开发和运行工具 A cross-platform man-machine interface tool based on Control System Studio |
| 仿真支撑环境 Simulation operating environment | TMSRRTE | Ubuntu 16.04LTS, gcc, g++, libreadline-dev, etc. | 基于 EPICS base 的分布式实时仿真运行支撑架构 Distributed real-time simulation architecture based on EPICS base |
| 控制和保护 Control and protection | TMSRControl | Ubuntu 16.04LTS, epics_labca, gcc, g++, libreadline-dev, etc. | 基于 MATLAB/Simulink 和 Scilab/XCOS 图形化控制系统建模工具 A modeling tool of graphical control system based on MATLAB/Simulink and Scilab/XCOS |
| 核电站热工水力 Thermal-hydraulic of nuclear power plant | TMSRSystem | Windows 7, msvcr110.dll, msvcpl110.dll, etc. | 基于 RELAP5/MOD4.0 的核反应堆实时热工水力系统程序 Nuclear reactor real-time thermal-hydraulic program based on Relap5/MOD4.0 |

3) 全软件生命周期管理。TMSR-SF1 工程仿真机的仿真资源访问方式包括两种: 一是用户通过实验室的客户端访问服务器上的仿真服务; 二是将仿真软件及其模型库、系统环境部署到用户的个人计算机上。方式一难以支持多用户同时支持访问单个仿真功能模块, 方式二将软件和模型库安装在其他用户个人计算机上, 无法对软件 and 程序的使用进行有效监管, 存在软件和程序代码外泄的风险。若将仿真软件及其模型库、系统环境部署到 TMSR 云仿真平台上, 不同用户可以通过云仿真平台按需访问各种仿真服务。同时, TMSR 云仿真平台管理人员可以对平台上仿真软件及其模型库的开发、使用和删除进行全生命周期监管。

4) 弹性资源管理, 高可扩展性。采用分布式服务部署的 TMSR-SF1 工程仿真机为确保系统有足够的扩展和修改空间, 其服务器的性能设计余量较大。为解决仿真系统开发初期, 用户访问量低, 服务器 CPU 和内存使用率较低而造成资源闲置和浪费的问题。TMSR 云仿真平台应具备高可扩展性和弹性计算资源管理能力, 可按需为开发人员提供计算资源。

5) 用户身份与权限管理。TMSR 云仿真平台可为不同用户按需提供 TMSR 仿真服务。因此, TMSR 云仿真平台必须包含两项功能, 即对不同用户身份进行验证和识别; 对不同仿真资源的访问权限管理。

6) 友好的人机交互界面。TMSR 云仿真平台应该简单实用, 具备友好的图形交互界面。为减少客户端等软件的安装, TMSR 云仿真平台采用基于

署、系统迁移和重构。

Web 的图形界面, 用户通过个人计算机的浏览器即可访问 TMSR 云仿真平台上的各项仿真资源。

2 TMSR 云仿真平台系统设计

OpenStack 最初是由美国宇航局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 与 Rackspace 公司共同开发的云计算平台, 后来通过 Apache 许可证授权开放源码。基于开源云操作系统框架 OpenStack 的云计算平台已经在多领域得到广泛应用。OpenStack 是一个可以管理整个数据中心里大量资源池的云操作系统, 包括计算、存储及网络资源。管理员可以通过控制台管理整个系统, 并可以通过 Web 接口为用户划定资源。OpenStack (Mitaka 版) 主要组件及其相互关系如图 1 所示^[14]。

TMSR 云仿真平台的系统设计基于 OpenStack 开源云操作系统框架, 结合了云计算的典型技术参考架构^[15]和 TMSR 云仿真平台的需求分析, 是一套分层级、模块化的仿真系统平台。如图 2 所示, TMSR 云仿真平台的系统架构由下至上可划分为 3 层, 即基础资源层、资源管理层和仿真应用层。

1) 基础资源层: 为最底层资源层, 不仅包含基础硬件资源 (服务器、存储、网络等), 而且包含仿真系统的软件资源。软件资源包括 3 部分: 即仿真软件系统环境 (Linux、OpenStack、JDK 等)、建模与仿真工具软件 (TMSRDesigner、TMSRRTE、TMSRControl、TMSRSystem 等) 和模型库 (堆本体设备模型、各回路设备模型、反应堆功率控制模型等)^[16]。

2) 资源管理层: 该层为 TMSR 云仿真平台的核心层, 该层整合底层各类软硬件仿真资源为仿真应用层提供 TMSR 仿真服务, 包括用户身份与权限管理、计算资源管理与调度、仿真组件模块管理、虚拟网络管理、系统备份和资源监控。管理员预先按照用户的需求创建并向平台发布 TMSR 仿真组件模块, 仿真组件模块为包含仿真软件、模型及其软件运行系统环境的镜像文件。

3) 仿真应用层: 用户通过该层登录 TMSR 云仿真平台, 访问各项仿真资源, 通过建模和仿真工

具软件创建相应的功能模块, 仿真应用层的各个仿真功能模块可独立或组合使用。目前, 根据 TMSR 的仿真需求, 主要的仿真功能模块包括: 人机界面模块、中控台模块、控制与保护系统模块、核电站系统热工水力模块和三维堆芯物理-热工水力模块。当已有仿真功能模块无法满足仿真需求时, 用户可自己定义功能模块, 即根据个性化仿真需求创建虚拟机, 在虚拟机上部署所需的仿真软件、模型库和系统环境, 并创建相应的功能模块。

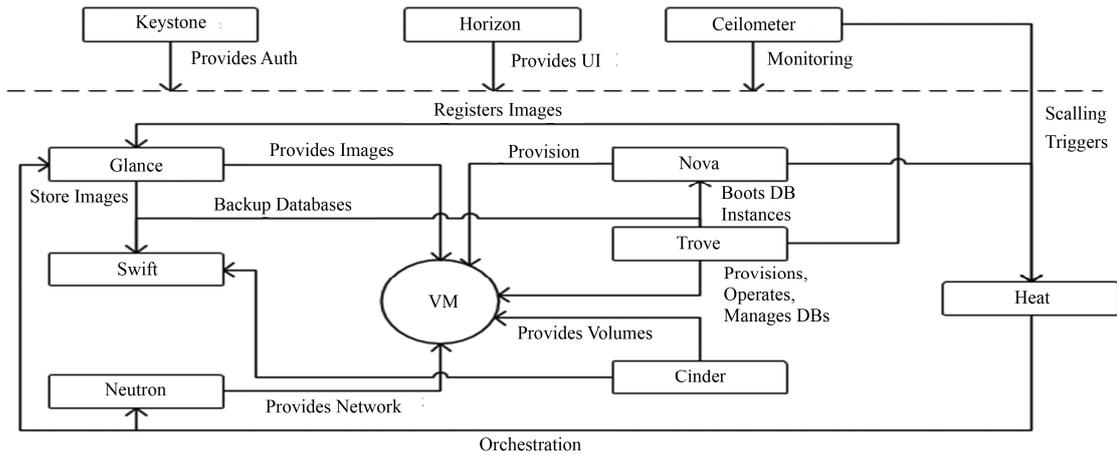


图 1 OpenStack 主要组件间相互关系
Fig.1 Functional interaction between OpenStack main components

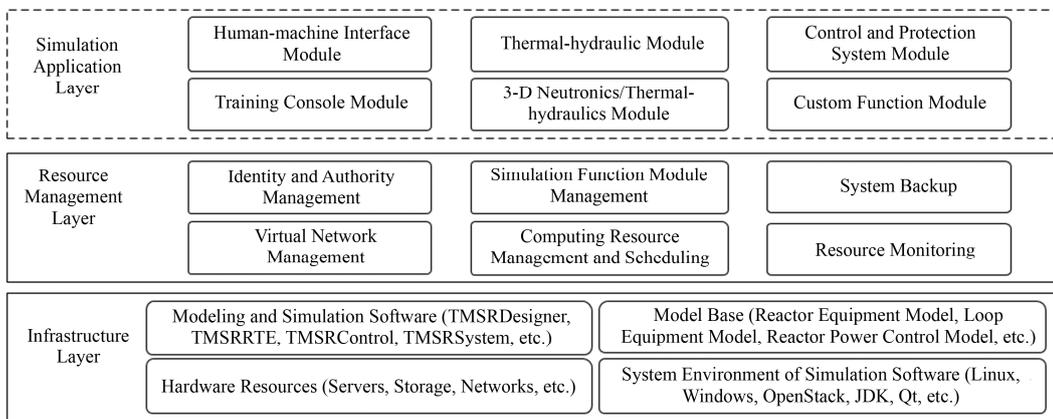


图 2 TMSR 云仿真平台的系统架构
Fig.2 The system architecture of TMSR cloud simulation platform

3 TMSR 云仿真试验平台技术实现

为了验证基于 OpenStack 云框架的 TMSR 云仿真平台设计方案的可行性, 在实验室搭建一个基于 OpenStack 的 TMSR 云仿真试验平台, 并将 TMSR-SF1 工程仿真机部署到云仿真试验平台。

3.1 TMSR 云仿真试验平台的硬件组成

使用两台服务器和两台路由器搭建 TMSR 云仿真试验平台。硬件服务器的配置如表 2 所示, 控制节点采用戴尔 T630 型号服务器, 计算节点采用戴尔 T620 型号服务器。平台的硬件架构如图 3 所示,

两台服务器分别作为控制节点和计算节点，两个节点与两台路由器相互连接，构成 OpenStack 管理网络和实验室局域网。

OpenStack 管理网络的网关设置为 192.168.1.1，用于访问和维护云平台各物理节点，如包的安装及更新、域名系统(Domain Name System, DNS)和网络时间协议(Network Time Protocol, NTP)的设置等。实验室局域网的网关设置为 10.0.1.1，用户一般通过实验室局域网访问 TMSR 云仿真试验平台。

表 2 服务器的具体配置参数
Table 2 Specific parameter of the server

| | 控制节点 Control node | 计算节点 Compute node |
|-----------------|------------------------------|-------------------------------|
| 处理器 CPU | Intel Xeon E5-2609 8-core | Intel Xeon E5-2640 32-core |
| 内存 RAM | 8 GB | 16 GB |
| 存储 Storage | 2 TB | 1.2 TB |
| 网卡 Network card | 1 Gbit·s ⁻¹ | 1 Gbit·s ⁻¹ |

表 3 OpenStack 服务组件及其软件包部署
Table 3 Service components and installation package of OpenStack

| 节点 Node | 操作系统 Operating system | 服务组件 Code name | 软件包 Software package |
|----------------------|--------------------------|----------------------------|---|
| 控制节点 Control node | Ubuntu 14.04LTS | 系统环境 System environment | Chrony, python-OpenStackclient, mariadb-server, python-pymysql, rabbitmq-server, memcached, python-memcache |
| | | 计算服务 Compute service | nova-api, nova-compute, nova-conductor, nova-scheduler, nova-consoleauth, nova-novncproxy |
| | | 网络服务 Network service | neutron-server, neutron-plugin-ml2, neutron-linuxbridge-agent, neutron-metadata-agent, neutron-dhcp-agent, neutron-l3-agent |
| | | 认证服务 Identity service | Keystone, apache2, libapache2-mod-wsgi |
| | | 镜像服务 Image service | glance |
| | | 块存储服务 Block storage | cinder-api, cinder-scheduler |
| 计算节点 Compute node | Ubuntu 14.04LTS | 界面服务 Dashboard | OpenStack-dashboard(horizon) |
| | | 系统环境 System environment | chrony |
| | | 计算服务 Compute service | nova-compute |
| | | 网络服务 Network service | neutron-linuxbridge-agent |

TMSR 云仿真试验平台通过 OpenStack 的 Neutron 组件提供软件定义网络功能，实现仿真功能模块之间 L2 和 L3 层虚拟网络通信。其中：L2 的抽象 Network/Subnet 采用 Linux bridge 插件实现；L3 层则通过 Linux 内核的 IPv4 转发机制实现物理路由器功能，通过 dnsmasp 实现 DHCP 功能。

TMSR 云仿真试验平台通过 OpenStack 的 Glance 组件为用户提供镜像服务，用户登录 TMSR

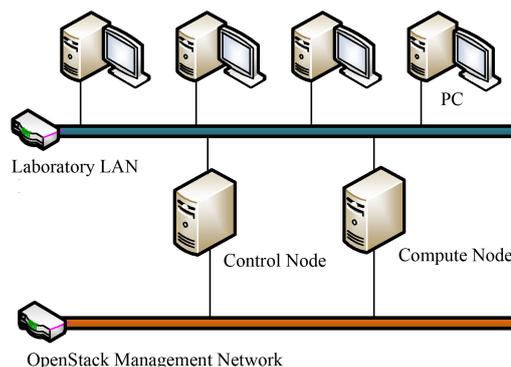


图 3 TMSR 云仿真试验平台的硬件架构
Fig.3 The hardware architecture of TMSR cloud simulation test platform

3.2 TMSR 云仿真试验平台服务部署

TMSR 云仿真试验平台在不同物理节点上部署的操作系统、OpenStack 服务组件及其软件包情况如表 3 所示。控制节点为平台提供仿真所需的网络资源、存储资源，而计算节点为平台提供仿真所需的计算资源。

云仿真试验平台选择所需镜像文件即可快速重构预先创建的仿真功能模块，实现了仿真系统服务部署和配置流程的固化。

TMSR 云仿真试验平台通过 OpenStack 的 Horizon 组件实现基于 Web 端的仿真功能模块管理。如图 4 所示，将功能模块的镜像文件上传至 TMSR 云仿真平台，并对镜像文件进行基本信息描述以供用户使用。其中，为满足仿真功能模块能对计算资

源的需求, 保证创建的仿真功能模块能正常使用, 可预先设置镜像文件所需的最小磁盘和最低内存。当云仿真平台剩余计算资源少于镜像文件所需的最小磁盘或最低内存时, 将无法创建该仿真功能模块。



图 4 创建 TMSR 云仿真试验平台上的镜像文件
Fig.4 Create an image file on the TMSR simulation test platform

TMSR 云仿真试验平台部署了包含 TMSR-SF1 工程仿真机多种仿真软件及其运行环境的镜像格式文件。其中, 仿真软件包括人机界面 TMSRDesigner、仿真支撑环境 TMSRRTE、控制与保护系统 TMSRControl、核电站系统热工水力 TMSRSystem。镜像文件的格式包括.vdi 格式和.qcow2 格式^[16]。

3.3 TMSR 云仿真试验平台的仿真测试

在 TMSR 云仿真试验平台上部署并运行 TMSR-SF1 工程仿真机仿真系统, 测试 TMSR 云仿真试验平台是否满足 TMSR 云仿真平台的功能设计要求。功能性测试包括: 用户登录测试、仿真应用模块管理、仿真运行测试。

1) 用户登录测试

测试步骤: 打开实验室台式个人计算机, 在浏览器端地址栏输入 TMSR 云仿真试验平台的登录地址(<http://10.0.1.10/horizon>), 进入登录窗口。

测试结果: 用户通过浏览器端进入 TMSR 云仿真试验平台登录界面的窗口如图 5 所示。用户需要输入正确的域、用户名、密码才能登录 TMSR 云仿真试验平台。

2) 仿真应用模块管理

测试步骤: a) 普通用户登录后浏览自己创建和权限内的仿真应用资源等; b) 管理员登录查看普通用户创建的仿真应用模块, 对仿真应用模块进行删除和创建操作。

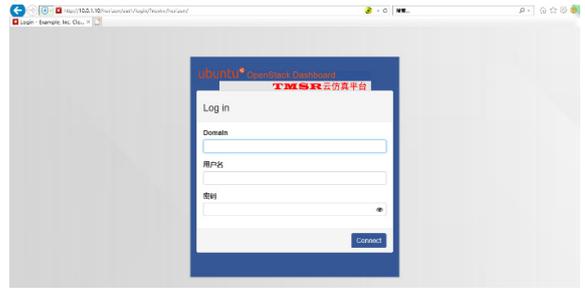


图 5 TMSR 云仿真试验平台的登录窗口
Fig.5 The login window of the TMSR cloud simulation test platform

测试结果: 以普通用户身份(demo)登录 TMSR 云仿真试验平台, 创建的仿真实例如图 6 所示。以管理员身份(admin)登录 TMSR 云仿真试验平台, 可查看平台剩余的計算资源、全部用户已创建的仿真实例和网络资源、普通用户账号及其所属信息等, 可对普通用户的创建的模块进行删除和创建。从而验证了用户权限管理功能和仿真应用模块化功能管理的可用性。

| 实例名称 | 镜像名称 | IP 地址 | 大小 | 密码 | 状态 | 任务 | 优先级 | 创建时间 | Actions |
|---------------|-------------------------|--------------|-------------------|-------|----|------|-----|------|---------|
| simulation-01 | ubuntu14.04_mattlab_lab | 192.168.1.58 | m1.large | mykey | 运行 | nova | 天 | 4月 | 启动/停止 |
| simulation-02 | ubuntu14.04-quickstart | 192.168.1.80 | m1.medium | mykey | 运行 | nova | 天 | 4月 | 启动/停止 |
| simulation-04 | win7_accor2 | 192.168.1.79 | simulation_vm_500 | mykey | 运行 | nova | 天 | 4月 | 启动/停止 |
| simulation-03 | ubuntu14.04-quickstart | 192.168.1.81 | m1.medium | mykey | 运行 | nova | 天 | 10月 | 启动/停止 |

图 6 查看用户已创建的仿真实例
Fig.6 The simulation instance created by the user

3) 仿真运行测试

测试步骤: a) 登录 TMSR 云仿真试验平台, 选择 TMSR-SF1 工程仿真机的 4 个仿真功能模块创建 TMSR-SF1 仿真系统; b) 将相同的仿真模型库分别部署到物理机和 TMSR 云仿真平台上, 进行 TMSR-SF1 功率调节测试, 对比分析功率、堆芯进出口温度的运行数据。

测试过程: TMSR-SF1 启堆并达到稳态运行, 功率维持在 10 MW 左右, 对调节棒进行提棒操作; 当 TMSR-SF1 功率升至 11 MW 时, 停止提棒操作; 运行 4 000 s 后, 切换为 TMSR-SF1 功率自动调节。

测试结果: 用户登录 TMSR 云仿真试验平台, 通过模块化的镜像文件依次创建 TMSRDesigner 云主机以提供 TMSR-SF1 人机交互的仿真功能, TMSRRTE 云主机以提供 TMSR-SF1 仿真运行支撑环境, TMSRControl 云主机以提供 TMSR-SF1 控制与保护的仿真功能(图 7), TMSRSystem 云主机以提供 TMSR-SF1 热工水力的仿真功能。4 台云主机通过云平台的虚拟子网组成 TMSR 仿真系统。

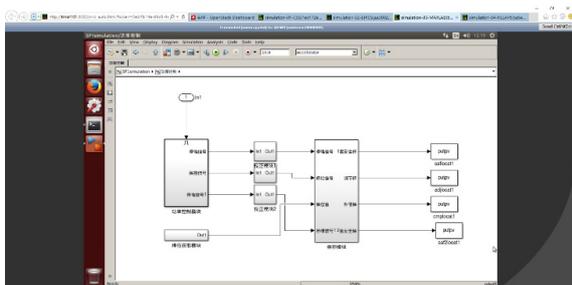


图7 TMSRControl 云主机的界面
Fig.7 Cloud hosting interface of TMSRControl

对比物理机和 TMSR 云仿真平台的 TMSR-SF1 功率调节测试结果。如图 8 所示, TMSR-SF1 处于稳态运行状态, 在 $t=2000$ s 时, 手动提升调节棒, 堆芯功率快速提升。当堆芯功率达到 11 MW 时, 停止提棒操作, 但堆芯功率会继续上升, 到达 11.5 MW 后缓慢下降。在 $t=6000$ s 时, 切换为反应堆自动控制, 堆芯功率迅速下降, 然后缓慢上升趋于稳态功率 10 MW。在功率调节过程中, TMSR-SF1 堆芯进出口温度变化曲线如图 9 所示, 在 $t=2000$ s 时, 由于调节棒提升, 进出口温度均出现上升。在 $t=6000$ s 时, 由于切换至功率自动控制, 堆芯进出口

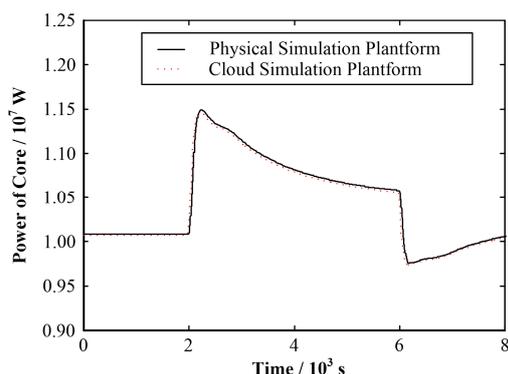


图8 TMSR-SF1 功率调节过程热功率变化曲线
Fig.8 Curve of thermal power in TMSR-SF1 power regulate process

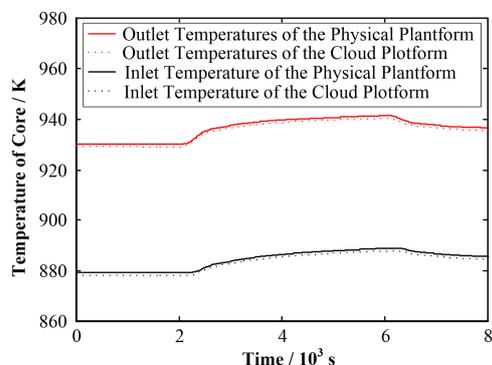


图9 TMSR-SF1 功率调节过程堆芯进出口温度变化曲线
Fig.9 Curve of outlet temperatures and inlet temperatures in TMSR-SF1 power regulate process

口温度均开始逐渐下降, 并趋于稳态运行时进出口温度值。由曲线变化可知, 相同仿真软件及其模型库在物理机和 TMSR 云仿真平台上的运行测试结果是一致的, 从而验证了 TMSR 云仿真平台的正确性。

4 结语

本文首先对 TMSR 云仿真平台进行需求分析, 结合云计算的典型技术参考架构提出了分层级、模块化的 TMSR 云仿真平台系统架构。基于开源云计算系统框架 OpenStack 搭建了 TMSR 云仿真试验平台, 将 TMSR-SF1 各个功能模块部署在 TMSR 云仿真实验平台上, 用户可以通过 PC 端浏览器直接访问 TMSR-SF1 工程仿真机系统的各项仿真服务, 而不需安装任何客户端软件。同时, 该平台提供的仿真计算资源是模块化的, 各功能模块可独立或组合使用。通过仿真资源模块化管理, 用户可便捷地创建、修改、删除各个功能模块。相比于传统基于分布式物理机的核能仿真系统服务部署方式, TMSR 云仿真试验平台在整个软件生命周期内可更加敏捷、高效地为用户按需提供仿真计算资源, 实现仿真系统快速、灵活地部署和迁移。

参考文献

- 林克军. 核电仿真技术的发展[C]. 2011 年核能行业仿真技术及应用研讨会, 北京, 2011: 84-86.
LIN Kejun. Development of nuclear power simulation technology[C]. Proceedings of the 2011 Nuclear Energy Industry Simulation Technology and Application Symposium, Beijing, 2011: 84-86.
- 何元雷, 李小燕, 王勇. 核能数值反应堆国内外研究现状及进展[J]. 核科学与技术, 2015, 38(2): 41-47.
HE Yuanlei, LI Xiaoyan, WANG Yong. Current research status and progress of nuclear energy virtual reactor in China and abroad[J]. Nuclear Science and Technology, 2015, 38(2): 41-47.
- 黄建华, 郭天觉. 从先进核电厂仿真器到数字核电厂之现状与发展方向[J]. 中国核电, 2017, 10(3): 306-314+366.
HUANG Jianhua, GUO Tianjue. From advanced nuclear plant simulator to digital nuclear power plant, status and development direction[J]. China Nuclear Power, 2017, 10(3): 306-314+366.
- Christian C, José-Maria A, Dominique B, et al. NURESIM - a european simulation platform for nuclear reactor safety: multi-scale and multi-physics calculations, sensitivity and uncertainty analysis[J]. Nuclear

- Engineering and Design, 2011, **241**: 3416–3426.
- 5 孙永滨. 田湾核电站全范围仿真机综述[J]. 核动力工程, 2001, **22**(6): 563–566.
SUN Yongbin. Full scope simulator of Tianwan NPP[J]. Nuclear Power Engineering, 2001, **22**(6): 563–566.
- 6 Jae S S, Dae S S, Sang J K, *et al.* Migration of the UNIX application for eFAST CANDU nuclear power plant analyzer[C]. Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Gyeongju, Korea, 2006.
- 7 陈捷. 秦山核电站300 MW机组全范围仿真机[J]. 中国电力, 1998, **31**(4): 22–25.
CHEN Jie. Full scope simulator of 300 MW nuclear generating unit in Qinshan nuclear power plant[J]. Electric Power, 1998, **31**(4): 22–25.
- 8 Fujimoto R M, Malik A W, Park A J, *et al.* Parallel and distributed simulation in the cloud[J]. Computer and Information Science, 2010, **3**(3): 1–10.
- 9 Myungil K, Dongwoo S, Daeyong J, *et al.* Cloud-based modeling and simulation platform[J]. Advanced Science and Technology Letters, 2016, **140**: 203–206.
- 10 Theo L, Anna G, James B, *et al.* A preliminary systematic review of computer science literature on cloud computing research using open source simulation platforms[C]. Proceedings of the 7th International Conference on Cloud Computing and Services Science, Porto, Portugal, 2017.
- 11 彭辉, 肖安洪, 杨大为, 等. 云计算技术在核动力装置设计平台中的应用研究[J]. 核动力工程, 2013, **34**(S1): 214–217.
PENG Hui, XIAO Anhong, YANG Dawei, *et al.* Study on application of cloud computing technology in nuclear power plant design platform[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, **34**(S1): 214–217.
- 12 胡波, 万松森, 郝佳, 等. 基于云计算的火电仿真平台[J]. 热力发电, 2013, **42**(2): 95–97.
HU Bo, WAN Songsen, HAO Jia, *et al.* Cloud computing based thermal power simulation platform[J]. Thermal Power Generation, 2013, **42**(2): 95–97.
- 13 程懋松. TMSR-SF1工程仿真机初步设计说明书[R]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2016.
CHENG Maosong. Preliminary design manual of TMSR-SF1 engineering simulator[R]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- 14 OpenStack projects release notes[EB/OL]. 2016-04. <https://docs.OpenStack.org/mitaka/>.
- 15 顾炯炯, 李明, 章宇, 等. 云计算架构技术与实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 23–32.
GU Jiongiong, LI Ming, ZHANG Yu, *et al.* Cloud computing architecture technology and practice[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 23–32.
- 16 王凯, 施承斌, 程懋松. TMSR-SF1工程仿真机系统建模说明书[R]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2016.
WANG Kai, SHI Chengbin, CHENG Maosong. Manual of TMSR-SF1 engineering simulator system modeling[R]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.