

## 并行飞机气动模拟工作台软件设计

吴 响<sup>1,2</sup> 张 鉴<sup>1</sup> 邓笋根<sup>1</sup> 陆忠华<sup>1</sup> 胡晓东<sup>1</sup>

(1. 中国科学院计算机网络信息中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 针对主流计算流体力学软件计算精度低、并行规模受限等问题, 在中国计算流体力学软件 CCFDV1.0 的基础上, 设计一种新的工作台软件。基于开放服务网关协议原理, 采用微内核 + 插件的架构实现批处理作业、双模式控制参数设置、计算过程监控等功能的用户友好操作界面, 通过集成 7 个核心求解模块和一个优化设计模块, 提高软件的并行规模。实验结果表明, 与主流计算流体力学软件相比, 该软件具有较高的计算精度, 且并行规模较大。

**关键词:** 飞机气动模拟; 计算流体力学; 高性能计算; 优化模块; 多目标优化

中文引用格式: 吴 响, 张 鉴, 邓笋根, 等. 并行飞机气动模拟工作台软件设计[J]. 计算机工程, 2016, 42(4): 31-36.

英文引用格式: Wu Xiang, Zhang Jian, Deng Sunge, et al. Design of Parallel Workbench Software for Aircraft Aerodynamic Simulation[J]. Computer Engineering, 2016, 42(4): 31-36.

## Design of Parallel Workbench Software for Aircraft Aerodynamic Simulation

WU Xiang<sup>1,2</sup> ZHANG Jian<sup>1</sup> DENG Sunge<sup>1</sup> LU Zhonghua<sup>1</sup> HU Xiaodong<sup>1</sup>

(1. Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

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

**【Abstract】** In view of the low accuracy and limited parallel scale of the major Computational Fluid Dynamics (CFD) software, a new workbench software based on China CFD software CCFDV1.0 is developed in this paper. The software is based on the principle of Open Service Gateway Initiative (OSGI), uses the architecture of Micro-kernel + Plugins and provides batch processing, double-model control arguments, computing monitoring and other user-friendly functions. The parallel scale of the software is improved by integrating 7 core solving modules and an optimized design module. Experimental results show that the parallel workbench software has higher accuracy and larger parallel scale than the major CFD software.

**【Key words】** aircraft aerodynamic simulation; Computational Fluid Dynamics (CFD); high performance computing; optimization module; multi-objective optimization

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.04.006

### 1 概述

解决大型飞机的空气动力学<sup>[1]</sup>问题的一个重要手段是基于并行计算的流场数值模拟方法。大型飞机的设计需要解决复杂流场计算模型的建立、分辨率要求高和数值模拟计算规模大等问题<sup>[2]</sup>。随着高性能计算机及其相关技术的发展, 计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)高性能计

算在大飞机航空工程设计领域中扮演着关键的角色, 已经成为飞机研制不可缺少的环节, 各国科研人员在如何充分利用高性能计算提供的计算、通信优势, 实现高性能数值仿真, 满足科研人员日益增长的计算需求以及工程实用性等方面开展了大量研究, 并取得了丰硕的成果。但是, 由于种种原因, 国外的一些先进 CFD<sup>[3]</sup>软件对我国严格保密, 至今严格禁运。其他比较成熟的商业软件, 如

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育基金资助项目“飞行器高雷诺数下气动优化及动边界问题高精度快速算法研究”(91130019); 国家自然科学基金资助重点项目“飞机机翼形状优化问题的关键数学理论和快速算法”(91330206); 国家“863”计划基金资助项目“真实飞机外形全流场和优化设计数值模拟”(2012AA01A304); 中国科学院信息化专项基金资助项目“面向云服务的超级计算环境建设与应用”(XXH2503-02)。

作者简介: 吴 响(1986-)男, 博士研究生, 主研方向为网格计算、高性能计算、计算流体力学; 张 鉴, 副研究员、博士; 邓笋根, 高级工程师; 陆忠华, 研究员、博士生导师; 胡晓东, 博士研究生。

收稿日期: 2014-12-16 修回日期: 2015-01-27 E-mail: wuxiang@ccas.cn

Fluent<sup>[4]</sup>, CFX, Start-CD, 包括我国自主研发的 CFD 软件, 均存在着计算精度低、并行规模受限等缺点, 无法满足大型飞机工程设计的需要。所以, 现在我国工业部门面临的问题是: 有硬件, 无适用的软件; 有国外昂贵的商业软件, 无自研的高精度高效率软件。为了解决上述问题, 本文在中国计算流体力学软件 1.0 版本( CCFDV1.0) 的基础上, 设计并实现了一款具有强可扩展性的中国计算流体力学工作台软件( CCFD Workbench), 其

对 CCFDV1.0 的架构进行了优化与升级, 目前 CCFD Workbench 中共集成了 7 个核心求解模块和一个优化设计模块。

## 2 CCFD Workbench 架构及扩展性实现

### 2.1 CCFD Workbench 架构

如图 1 所示, CCFD Workbench 共分为 4 层, 从下至上分别为资源层、核心层、应用插件层以及用户层。



图 1 CCFD Workbench 架构

资源层为工作台软件提供最基本的硬件设施及软件资源, 包括基础算法库、标准求解器及其他模块。核心层在资源层之上, 为工作台的微内核, 为应用插件层的各应用插件提供一个安装、管理及卸载的环境, 同时与资源层交互提供作业管理、数据操作、资源管理、监控及统计等功能。

应用插件<sup>[5-7]</sup>层是整个平台提供的功能插件的集合, 如图 2 所示。



图 2 核心求解模块步骤

国内外常见的 CFD 求解模块的求解步骤<sup>[8]</sup>主要包括 5 个步骤, 由最初的输入对象集合经过前处理、控制文件生成、作业提交与运行、计算过程监控与后处理 5 个步骤后, 生成输出对象集合。依据此, 本文将应用层的插件分为 3 类, 即前处理插件、求解器插件和后处理插件。目前, 本文中的软件共集成如下核心求解器插件, 即非结构/混合网格有限体积法可压缩流动 Navier-Stokes 求解器( CCFD-UG)<sup>[9]</sup>、单块结构网格有限差分法可压缩/不可压缩流动 Navier-Stokes

求解器( CCFD-Hoam)、多块结构化网格有限体积法可压缩流动 Navier-Stokes 求解器( CCFD-MB)、多块结构化网格有限体积法可压缩流动 Navier-Stokes 求解器( CCFD-EC)<sup>[10]</sup>、基于格子波尔兹曼方法的计算流体力学数值求解器( CCFD-LB)<sup>[11]</sup>、多块结构化网格有限体积法可压缩流动 Navier-Stokes 求解器, 为 CCFD-EC 的增强版( CCFD-SEC)<sup>[12]</sup>, 以及多块重叠结构化网格的非定常可压缩流动 Navier-Stokes 求解器( CCFD-MGMB) 和一个优化设计模块( 基于遗传算法的多目标优化设计模块, 其调用 CCFD-MB 求解模块( CCFD-MO)<sup>[13]</sup>)。用户层位于最上层, 是集成化的人机交互系统, 主要为用户提供方案管理、作业管理、批作业处理、控制文件参数设定、前/后处理接口和命令行控制台等功能模块, 如图 3 所示。

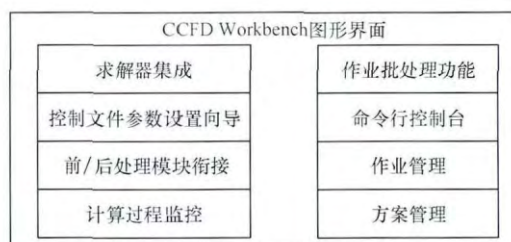


图 3 CCFD Workbench 功能模块

## 2.2 扩展原理

### 2.2.1 插件依赖关系

现代软件的规模相比多年前已发生巨大的变化, 渐进式的增量开发模型在大型软件中越来越普及。如何快速、低成本应对软件新功能的增加, 对于软件设计人员来说是一大挑战。随着时间推移, 具有强可扩展性的插件体系结构逐渐成熟起来, 为应对这一挑战带来了曙光。

本文中的 CCFD Workbench 正是基于开放服务网关 (Open Service Gateway Initiative, OSGI) 协议插件原理, 采用了“微内核 + 插件”的体系结构。软件的功能模块封装成符合 OSGI 规范的 Bundle, 软件的微内核为这些 Bundle 提供一个安装、管理及卸载的环境。软件的各 Bundle 之间可能存在着依赖关系, 如图片、源码等。如图 4 所示, 仅列出软件各 Bundle 之间存在的源码依赖关系。

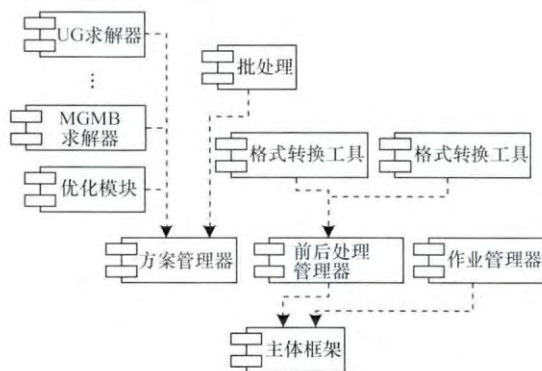


图 4 应用插件依赖关系

如图 4 所示, 左上角 UG 求解器至优化模块表示软件包含的 7 个核心求解器及一个优化设计模块; 主体框架为软件的主界面; 方案管理器、前后处理管理器、作业管理器分别为方案管理插件、前后处理插件和作业管理插件。其中, 批处理代表软件的批处理插件, 主要为批量生成方案; 格式转换工具用于前后处理, 负责网格的转换, 为软件的前后处理插件。

### 2.2.2 组件的管理

本文中的软件以插件为一级模块化概念, 而插件又由组件组成, 插件提供的功能由组件来实现, 组件是插件中真实提供服务的更小粒度的功能单元。组件之间的服务引用实现了软件的功能需求。软件中的组件管理器采用了 OSGI 规范下的 Declarative Services 技术, 即组件声明提供的服务及需要使用的服务。软件中的组件不主动向组件管理器注册、查找、获取服务, 而由组件管理器主动解析组件提供的服务及其需要的服务, 将组件提供的服务准确注入到需要服务的组件中, 如果软件中已存在组件需要

的服务, 则为其注入<sup>[14]</sup>。

图 5 展示了组件管理器的工作原理, 组件管理器维护了软件已存在服务及需要服务的表单。

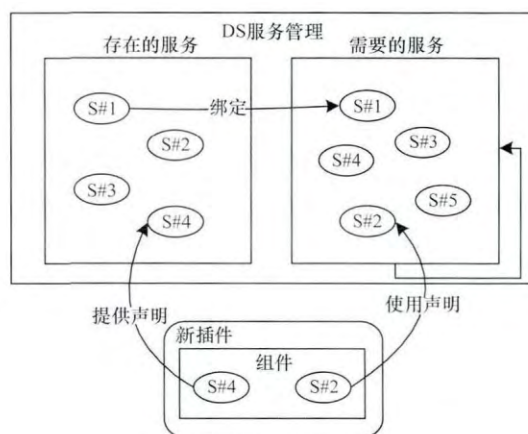


图 5 组件管理器工作原理

存在服务表单的每一项代表了软件已存在的一个服务, 该服务由软件中已存在的某个组件提供。需要服务的每一项代表软件中某个组件的一个服务请求。需要的服务如果已经存在, 则存在服务表单与需要服务表单之间就建立起了一个绑定, 即产生了一个动态依赖关系, 如左边 S#1 与右边 S#1 之间产生了一个依赖关系。当软件出现了一个新插件, 插件中的组件提供的服务被组件管理器记录到存在服务表单中, 需要的服务被记录到需要服务表单中, 如果需要服务表单的服务请求被满足, 则产生新的绑定, 建立起新的动态依赖关系<sup>[15]</sup>。

新的功能被设计为插件, 通过向软件中增加插件的形式实现非入侵式扩展。插件内部被设计为组件的集合, 组件提供服务、引用服务, 组件通过服务协作实现软件功能。组件由组件管理器统一管理, 组件提供的服务被动态发布, 组件需要的服务被动态注入, 从而实现软件的动态扩展。

## 2.3 扩展性实例

由于篇幅所限, 此处仅讲述菜单扩展和方案类型扩展 2 类扩展的原理。

### 2.3.1 菜单扩展

软件主菜单的模型为一棵无根树, 如图 6 所示, 树中每一个节点代表一个菜单或菜单项, 菜单 (白色圆形) 可以有孩子节点, 菜单项 (黑色圆形) 不能有孩子节点。虚拟根的每个孩子节点代表菜单栏中的一个菜单。对菜单的扩展则是对菜单添加新的孩子节点, 如果该孩子节点为一颗树的根, 则实际上向菜单中添加了多个菜单或菜单项。为了简化问题, 菜单扩展被抽象为向一棵树的某个节点添加一棵新树。图 6(a) 无根树的第 2 个孩子节点是扩展点 (顺序从左至右)。



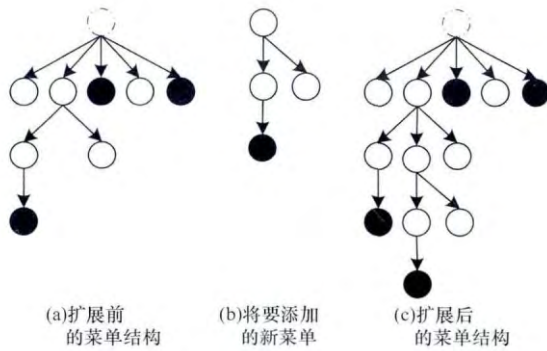


图6 菜单扩展模型

### 2.3.2 方案类型扩展

方案管理器插件维护了软件支持的方案类型列表。当软件新安装了提供方案类型服务的插件,引擎就会将方案类型服务注入方案管理器插件,方案管理器将新方案类型增加进方案类型列表。当包含方案类型服务的插件从软件中卸载时,方案管理器插件的服务移除操作将会被触发,服务将被从方案类型列表中删除。方案类型扩展设计如图7所示。

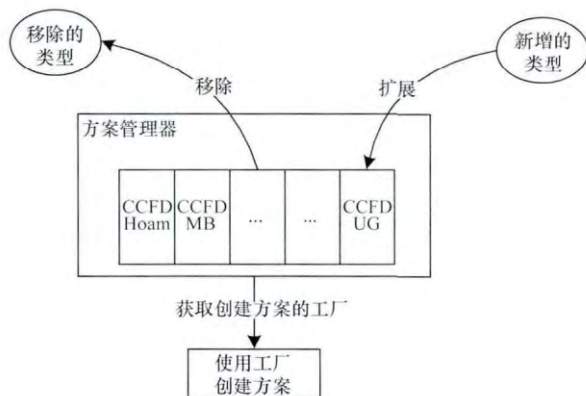


图7 方案类型扩展模型

## 3 软件评估及功能特色

### 3.1 软件评估

CCFDV1.0 是基于 Java Swing 技术实现的,其沿用了 Java Swing 的 MVC 架构,且以用户接口为中心实现软件的功能。本文中的软件在设计时,以用户界面为设计首要,通过对 Java Swing 组件的继承扩展实现软件功能。而 CCFD Workbench 是基于 OSGi 原理,采用“微内核+插件”的体系结构,通过将新增功能封装成插件,从而实现了软件功能的扩展<sup>[16]</sup>。表1从架构、模块化、组件模型等方面对 CCFDV1.0 与 CCFD Workbench 进行综合比较,从比较结果可以看出,CCFD Workbench 明显优于 CCFDV1.0。

表1 2种软件综合比较

分类	CCFDV1.0	CCFD Workbench
架构	模型即视图	微内核+插件
模块化	非标准	标准
组件模型	不存在	标准
动态化	不支持	支持
扩展性	静态封闭	动态开放
软件维护	困难	容易
软件演化	困难	容易

### 3.2 CCFD Workbench 功能特色

#### 3.2.1 面向大型飞机气动设计

CCFD Workbench 软件及其所包含的各核心模块,在设计之初就直接面向大型飞机气动设计的需要,瞄准若干前沿设计领域。针对大型飞机气动设计中的多个问题,例如为了得到更高精度的模拟结果和更精细的流场模型,CCFD-EC 求解器采用了高阶保单调差分、加权群速度控制等格式的高分辨率数值方法。为解决超大规模网格的生成需要海量内存的问题,采用了网格分区计算、分区自适应生成及最终装配的技术,有效地利用了高效能计算机上的分布式内存来满足内存需求瓶颈。

#### 3.2.2 解决方案

如软件各层概述中所阐述,CCFD Workbench 软件目前共集成了 CCFD-UG, CCFD-Hoam, CCFD-MB, CCFD-EC, CCFD-LB, CCFD-SEC, CCFD-MGMB 7 个核心求解模块和一个优化设计模块 CCFD-MO,用户可根据所求解数值问题的特点选择不同的求解模块,以满足不同的需求。

#### 3.2.3 用户友好的图形用户界面

为了较好地契合飞机设计人员的工作习惯,CCFD Workbench 提供了批处理作业、双模式控制参数设置、计算过程监控、命令行控制台等功能插件,提升了用户的体验。能够无缝衔接前/后处理模块,有效地减轻了工程设计人员的负担,从而推动大飞机设计研制的进程。

#### 3.2.4 大规模并行计算

为了能够适应大规模并行计算,CCFD Workbench 各求解模块在并行编程模型、计算负载均衡、计算与通信重叠、高效率并行计算、多级并行实现方法与基于容量调节的告诉缓存命中率优化等方面开展了大量的研究,取得了丰硕的成果,为支持大规模并行计算奠定了坚实的基础。如文献[2]中所述,CCFD-Hoam在8192核上的大规模并行测试,并行效率超过了70%。

#### 3.2.5 强可扩展性

首先,CCFD Workbench 是基于 OSGi 原理,采

用“微内核+插件”的体系结构。OSGi 框架支持动态部署和下载应用程序的 Bundle,并且可以在未使用时删除。这个框架以一种动态的、可升级的方式在一个 OSGi 环境中管理 Bundle 的安装和更新<sup>[17]</sup>。软件将每个求解模块封装成一个 Bundle,当需要增加新的功能时,仅需开发相应的 Bundle,利用 OSGi 框架动态地部署到软件中即可以实现。这就使得软件具有强可扩展性。其次,由于各核心求解模块采用了并行计算技术,支持大规模的并行计算,使得各模块在百核、千核、万核甚至更大规模的高效能计算环境上运行得以实现,这也可以说明各求解模块具有强可扩展性。

#### 4 实验结果与分析

本节主要介绍 CCFD Workbench 软件的部署以及 2 个算例的测试:第 1 个算例是在“天河二号”上对 CCFD-MGMB 求解模块进行扩展性测试;第 2 个是在中科院超级计算中心的“元”上对 CCFD Workbench 软件进行部署与整体性测试。

##### 4.1 部署与测试

“元”一期的硬件资源包括:270 台曙光 CB60-G16 双路刀片计算节点,CPU 整体峰值性能达到 120.96 Tflops,每台刀片计算节点配置 2 颗 Intel E5-2680 V2 (Ivy Bridge | 10C | 2.8 GHz) 处理器,64/128 GB DDR3 ECC 1 866 MHz 内存;30 台曙光 I620-G15 GPGPU 计算节点,GPU 双精度浮点峰值达到 83.64 Tflops,每台 GPGPU 计算节点配置 2 块 Nvidia Tesla K20 GPGPU 卡,2 颗 Intel E5-2680 V2 (Ivy Bridge | 10C | 2.8 GHz) 处理器,64/128 GB DDR3 ECC 1 866 MHz 内存,支持 CUDA,OpenACC,OpenCL,支持 GPU Direct;40 台曙光 I620-G15 MIC 计算节点,MIC 双精度浮点峰值达到 98.8 Tflops,每台 MIC 计算节点配置 2 块 Intel Xeon Phi 5110P (8 GB 内存) 卡,2 颗 Intel E5-2680 V2 (Ivy Bridge | 10C | 2.8 GHz) 处理器,64/128 GB DDR3 ECC 1 866 MHz 内存,支持对 Xeon Phi 的 Offload 卸载、Symmetric、Native 原生模式调用。

CCFD Workbench 软件被实现为一组插件的集合,包括 OSGi 引擎插件和 CCFD Workbench 应用插件。图 8 是 CCFD Workbench 软件发布后在中科院超算中心“元”上的部署图,configuration 目录存放软件的配置信息,ire 目录放置了 Java 运行环境,plugins 目录放置了软件的插件,ccfd.log 目录存放软件运行日志,tools 目录存放了 CCFD Workbench 软件的各项求解模块及前后处理的可执行程序。图 8 的右下角详细展示了 CCFD 工作台 plugins 目录内容,其中,以 sccas.ccfd 为前缀的插件为 CCFD Workbench 软件的应用插件,实现了软件要求的功能。

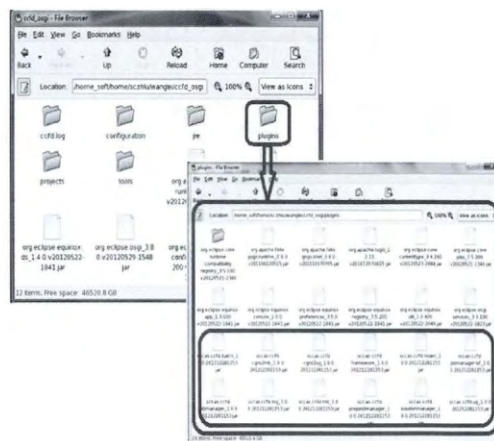


图 8 CCFD Workbench 软件部署

图 9 展示了 CCFD Workbench 的运行效果,图中的左上角展示了软件提供的双模式参数设置向导功能;右上角展示了软件提供的计算过程监控功能;左下角展示了软件提供的查看作业及命令行控制台的功能;右下角展示了软件提供的批处理作业的功能。



图 9 CCFD Workbench 软件运行效果

##### 4.2 CCFD-MGMB 扩展性测试

本节测试在“天河二号”上完成,天河二号是国防科大研制的超级计算机系统,以峰值计算速度每秒  $5.49 \times 10^{16}$  次、持续计算速度每秒  $3.39 \times 10^{16}$  次双精度浮点运算的优异性能位居榜首,成为全球最快超级计算机。

本部分以对 DLR-F6 模型进行测试为例,分析 CCFD-MGMB 在万核级计算机上的并行性能。案例的网格数为  $1.3 \times 10^8$ ,结构网格分块数为 40 896,马赫数为 0.75,雷诺数为  $3.0 \times 10^6$ ,温度为 273 K,使用 3 层的多重网格技术。对于同样的作业,分别采用 2 000,4 000,8 000,12 000,16 000 个处理器核来进行并行计算,迭代步数为 10 000 步。表 2 所示为不同并行规模的计算时间和加速比的比较。可以看出,随着并行规模从 2 000 核增加到 16 000 核,作业的运行时间稳定降低,加速比稳定上升。与 2 000 核并行规模相比较,作业在 16 000 核规模时的加速比为 7.49。与并行规模的增长速度相比较,作业在 4 000,8 000,12 000 情况下的加速比相比,接近线性

增加的特点,从而说明,CCFD-MGMB 在万核级规模下的并行性能比较理想。

表 2 DLR-F6 大规模并行测试性能比较

处理器核数	运行时间/h	加速比
2 000	56.72	1.00
4 000	30.97	1.83
8 000	19.19	2.96
12 000	11.10	5.13
16 000	7.58	7.49

## 5 结束语

本文设计一种具有强可扩展性的中国流体力学工作台软件(CCFD Workbench)。介绍其设计原理与实现方法,并且给出 2 个可扩展性实例。通过与 CCFDV1.0 的综合比较与分析证明,CCFD Workbench 能够支持大规模并行计算,并满足大型飞机气动研制过程中的工程设计需要。今后的研究方向主要包括对软件整体架构及 GUI 界面进行优化,使其能够最大限度地契合飞机设计人员的使用习惯。

### 参考文献

- [1] 陈再新. 空气动力学[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.
- [2] 陈刚, 王磊, 陆忠华, 等. 万核级并行飞机气动模拟软件 CCFD 研制[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39( S1): 99-101.
- [3] 傅德薰, 马延文. 计算流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [4] Fluent Inc. Fluent 6.3 User's Guide [EB/OL]. ( 2010-11-21 ).

http://hpce.iitm.ac.in/website/Manuals/Fluent\_6.3/fluent6.3/help/html/ug/main\_pre.htm.

- [5] 徐宏兴. 插件体系结构软件开发方法研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [6] 祖兆研. 基于插件技术的软件架构设计及应用[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [7] 李俊娥, 周洞汝. “平台/插件”软件体系结构风格[J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28( 5): 876-881.
- [8] 姚征, 陈康民. CFD 通用软件综述[J]. 上海理工大学学报, 2004, 24( 2): 137-144.
- [9] 李新亮, 马延文, 傅德薰. 可压槽道湍流的直接数值模拟及标度律分析[J]. 中国科学 A 辑, 2001, 31( 2): 153-164.
- [10] 李新亮, 马延文, 傅德薰. 不可压 N-S 方程高效算法及二维槽道湍流分析[J]. 力学学报, 2004, 33( 5): 577-587.
- [11] 王一伟, 王洋, 安亦然, 等. 基于 LBM 方法的高速列车空气动力学计算[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2008, 38( 11): 1795-1804.
- [12] 梁贤, 李新亮, 傅德薰, 等. 万核级可扩展 CFD 软件及应用[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39( S1): 67-70.
- [13] 徐榛, 崔德刚, 杜海, 等. 基于改进遗传算法的增升装置气动优化研究[J]. 航空科学技术, 2014, 4( 2): 17-22.
- [14] 王磊. CCFD 工作台软件可扩展性研究与实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [15] 张仕, 黄林鹏. 基于 OSGi 的服务动态演化[J]. 软件学报, 2008, 19( 5): 1201-1211.
- [16] 孙久振. 基于 OSGi 的 CFD 可信度分析平台的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [17] 吴波. OSGi 框架分析和应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.

编辑 刘冰

( 上接第 30 页)

### 参考文献

- [1] Understanding and Configuring User Account Control in Windows Vista [EB/OL]. [2014-11-10]. [https://technet.microsoft.com/en-us/library/cc709628\(WS.10\).aspx](https://technet.microsoft.com/en-us/library/cc709628(WS.10).aspx).
- [2] Apple Inc.. Mac OS X Security Configuration [EB/OL]. ( 2010-05-13 ). [https://www.apple.com/support/security/guides/docs/SnowLeopard\\_Security\\_Config\\_v10.6.pdf](https://www.apple.com/support/security/guides/docs/SnowLeopard_Security_Config_v10.6.pdf).
- [3] RootSudo [EB/OL]. ( 2014-06-10 ). <https://help.ubuntu.com/community/RootSudo>.
- [4] Loscocco P S. Integrating Flexible Support for Security Policies into the Linux Operating System [C]//Proceedings of USENIX Annual Technical Conference. Berkeley, USA: USENIX Association, 2001: 29-42.
- [5] Smalley S, Vance C, Salamon W. Implementing SELinux as a Linux Security Module [Z]. 2001.
- [6] Sandhu R S. Role-based Access Control [J]. Advances in Computers, 1998, 46: 237-286.
- [7] Sandhu R, Ferraiolo D, Kuhn R. The NIST Model for Role-based Access Control: Towards a Unified Standard [C]//Proceedings of the 5th ACM Workshop on Role-based Access Control. New York, USA: ACM Press, 2000: 47-63.

- [8] Davidson J A. Asymmetric Isolation [C]//Proceedings of Computer Security Applications Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1996: 44-52.
- [9] 王浩, 陈泽茂, 谯双双. 一种面向局域网的多级安全模型[J]. 计算机工程, 2012, 38( 21): 141-144.
- [10] 倪继利. Linux 安全体系分析与编程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [11] Haines R. The SELinux Notebook——The Foundations [EB/OL]. ( 2012-09-02 ). [http://www.fretechbooks.com/efiles/selinuxnotebook/The\\_SELinux\\_Notebook\\_The\\_Foundations\\_3rd\\_Edition.pdf](http://www.fretechbooks.com/efiles/selinuxnotebook/The_SELinux_Notebook_The_Foundations_3rd_Edition.pdf).
- [12] Lindqvist H. Mandatory Access Control [M]//van Tilborg H C A, Jajodia S. Encyclopedia of Cryptography and Security. Berlin, Germany: Springer, 2006: 756-758.
- [13] 乔然, 胡俊, 荣星. 云计算客户虚拟机间的安全机制研究与实现[J]. 计算机工程, 2014, 40( 12): 26-32.
- [14] Saltzer J H, Schroeder M D. The Protection of Information in Computer Systems [J]. Proceedings of the IEEE, 1975, 63( 9): 1278-1308.
- [15] 武延军, 梁洪亮, 赵琛. 一个支持可信主体特权最小化的多级安全模型[J]. 软件学报, 2007, 18( 3): 547-552.

编辑 陆燕菲