http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0810

面向集群的工业CFD软件交互设计与实现

张凡[1,2]，丁明松[1,2]，陈坚强[1,2]，刘婉[1,2,*]，江涛[1,2]，李鹏[1,2]，蒋军[1,2]

(1. 中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所，绵阳 621000；
2. 空天飞行空气动力科学与技术全国重点实验室，绵阳 621000)

摘　　要：在航空航天领域，工业计算流体力学(CFD)软件依赖于高性能计算集群生产气动数据，是辅助飞行器设计的重要工具。针对国产CFD软件集群部署、仿真场景交互、软硬件环境兼容等问题，结合国家数值风洞（NNW）软件研发和推广应用需求，设计并实现了一种面向集群交互的CFD软件框架。该框架采用客户端/服务器架构，集成交互界面、集群通信、登录认证、仿真任务管理与作业监控等功能，支持命令调用求解器并传递参数文件的求解模式，具有良好的通用性和扩展性。测试表明：该框架可兼容主流集群架构与作业调度系统，相较传统耦合架构，在百次并发下内存占用率降低36%，CPU占用率降低69%，平均响应时间稳定在100 ms以内，具有资源占用低、响应速度快等优势。目前，所设计框架已应用于NNW软件体系，为用户提供流畅的集群仿真交互服务，提升了CFD仿真用户体验。

关 键 词：高性能计算集群；计算流体力学；工业软件；作业调度；航空航天；国家数值风洞工程

中图分类号：TP311.52; TB126
文献标志码：A　　**文章编号**：1001-5965(2026)11-3879-15

计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)数值仿真软件通过计算机求解流动控制方程生产气动数据，是辅助飞行器设计的重要工具[1]。随着数值求解方法和高性能计算技术的发展，CFD软件在航空航天和高端制造等领域得到了快速发展及应用[2-4]。为实现CFD软件自主可控和国产替代，2018年，在国家数值风洞(National Numerical Windtunnel, NNW)工程的资助下，中国空气动力研究与发展中心牵头建设了空气动力数值模拟平台，目前已向全国发布套装软件[5-6]。NNW-HyFLOW[7]软件是基于风雷框架[8-9]研发的高速流动数值模拟软件，属于NNW套装软件的重要组成部分，已在国内多家工业部门部署应用。

CFD软件属于计算密集型软件，在工程应用中依赖于高性能计算集群(简称集群)。长期以来，国内CFD软件研发团队侧重于CFD理论方法研究，在集群交互、兼容部署等方面发展相对迟缓，在国产工业软件替代的过程中给用户带来诸多不便。早期的NNW-HyFLOW集群版软件采用交互界面与求解程序耦合一体的设计方案，面对工业部门集群硬件环境缺乏GPU支持或集群软件环境不兼容等问题，无法直接部署使用，用户在集群只能单独使用求解器，依靠手动操作完成参数文件上传、提交计算、结果文件下载等仿真流程，操作繁琐、效率低下。

关于CFD软件研究，美欧等西方国家发展较早，推出了ANSYS Fluent/CFX、Star-CCM+、CFD++、Numeca等成熟商业软件[10]，在国内市场受众广、用

收稿日期：2024-11-12；**录用日期**：2025-03-28；**网络出版时间**：2025-04-30 12:35
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250430.1114.001
基金项目：国家数值风洞工程
*通信作者. E-mail：13340898729@163.com

引用格式：张凡，丁明松，陈坚强，等. 面向集群的工业CFD软件交互设计与实现[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(11)：3879-3893.
Zhang F，Ding M S，Chen J Q，et al. Interactive design and implementation of cluster-oriented industrial CFD software[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(11)：3879-3893 (in Chinese).

户黏性高。近年来,在政策和需求的驱动下,国内涌现出如索辰流体仿真软件、QFLUX 软件、UNSMB 软件、HUNS3D 软件等一批国产 CFD 软件[11-12]。在面向集群交互仿真方面,国内外已有相关研究和实践。例如,航空工业西安航空计算技术研究所针对 CFD 软件云化技术进行了探索和设计,以简化仿真流程,降低仿真难度[13];北京空间飞行器总体设计部设计了面向航天器设计的高性能计算平台,提升用户体验,降低了使用门槛[14];中国船舶及海洋工程设计研究院通过整合计算资源设计了混合云架构的仿真平台,实现远程仿真可视化,提高了仿真效率[15]。子虔科技采用 Web 轻量化前端与云端后端分离架构开发了 Zixel CFD 数据分析模块,支持多用户实时共享仿真结果;华北计算机系统工程研究所构建了云端服务器,实现云计算环境的 CFD 数据可视化[16];达索系统将交互界面与后端分离构建了 SIMULIA 平台,使用户无需本地算力支持即可完成大规模仿真;ANSYS Fluent 软件在 2018 版本优化了客户端/服务器模式,以更好地支持分离式部署解决硬件环境兼容问题。总的来说,交互模式的革新是 CFD 软件普惠化与高效化的核心,传统的以命令行和复杂参数输入为主的交互方式正逐步被云端交互所取代。

本文针对 NNW-HyFLOW 软件在推广部署中面临的兼容性与交互性问题,基于跨平台开发语言,采用客户端/服务器设计模式,通过解耦集群作业管理系统的交互指令,构建了一套高效的 CFD 软件集群交互框架。实验结果表明,该框架具有资源占用低、响应速度快、兼容性强等优势,并在 CFD 集群求解任务中展现出良好的通用性,为大规模数值模拟提供了可靠的技术支持。

1 系统设计

1.1 架构设计

面向集群的工业 CFD 交互软件架构设计采用客户端/服务器模式,如图 1 所示。

客户端使用 QT 语言开发,主要负责仿真参数设置和结果渲染,通过将求解程序与交互界面解耦合的客户端/服务器设计,能够有效避免由于集群架构、显卡、编译器版本等软硬件差异而导致的交互界面无法运行问题。

服务端使用能够跨平台的 Java 语言开发,能够兼容国内航空航天单位的集群软硬件环境,对于 Slurm、负载共享设施 (load sharing facility, LSF)、便携式批处理系统 (portable batch system, PBS)、Sun 网格引擎 (Sun grid engine, SGE) 等不同类型的作业

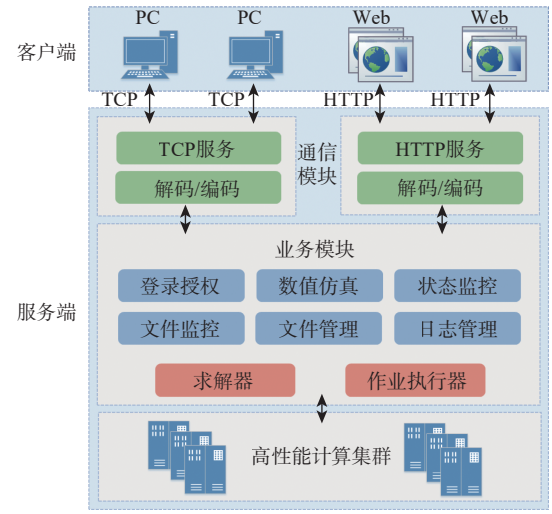

图 1 面向集群的工业 CFD 软件架构

Fig. 1 Industrial CFD software architecture for clusters

管理系统,服务端通过将与作业管理系统交互的指令解耦到 Shell 脚本中进行兼容。基于客户端对服务端的功能需求,服务端设计包括通信、登录认证、数值仿真、状态监控、文件监控、文件管理和日志管理等模块。

1.2 部署方案设计

从集群部署角度来看,目前工业部门集群可分为 2 类:①具有集群门户网站,用户登录后由门户网站的 Web 服务提交作业;②用户能够直接通过终端命令使用集群。本文针对上述集群环境,面向集群的工业 CFD 软件设计了不同的部署方案。

部署方案 1:针对集群门户网站,CFD 软件服务端提供了作业提交的交互接口,服务端会在完成作业计算准备后生成压缩包文件,调用门户网站提交作业脚本至集群,门户网站的执行脚本仅需返回作业在集群的绝对路径和作业在集群作业管理系统中的编码即可;将客户端交互界面部署在门户网站的 Web 服务器内,用户通过登录门户网站使用客户端交互界面。

部署方案 2:针对用户能够直接通过终端使用集群,集群登录节点具备可视化硬件条件支撑时,客户端交互界面与 CFD 软件服务均部署在登录节点,用户通过终端打开 CFD 软件客户端交互界面使用;集群登录节点不具备可视化硬件条件支撑时,将客户端部署在用户本地 PC 端,在集群登录节点部署服务,用户之间通过本地 PC 端远程连接集群服务端进行使用。

2 模块设计

2.1 通信模块

Reactor 模式是 Doug Schmidt 提出的一种基于

事件驱动的设计模式, 其能够处理并发服务请求, 并通过多路复用机制将请求分发给相应的处理器进行处理。经过逐步演化, 目前, 并发网络编程中最为流行的是 Reactor 主从多线程模式[17], 如图 2 所示。在此基础上, Trustin Lee 构建了一个异步的、事件驱动的网络应用程序框架 Netty, 用于快速开发可维护的高性能协议服务器。服务器通信模块在 Netty 框架基础上, 结合 CFD 软件在集群作业过程中残差、气动力/热等大量高频气动数据实时传输的特点, 开展了线程模型设计和通信协议设计。

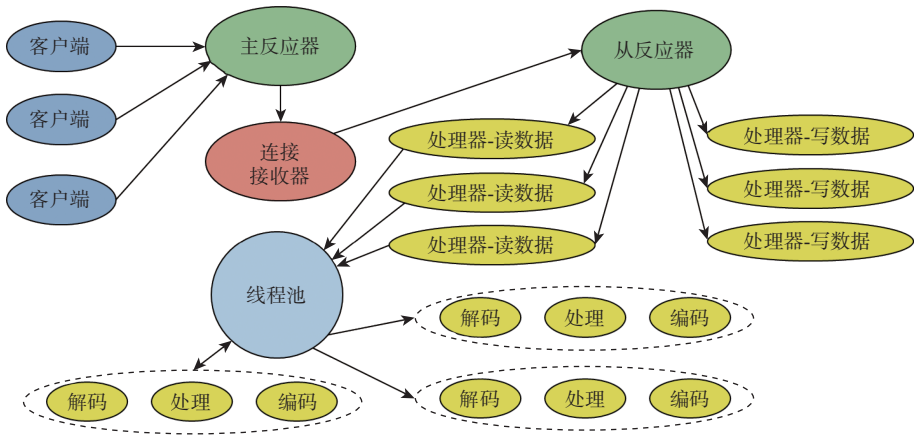

图 2　Reactor 主从多线程模式结构

Fig. 2　Structure of Reactor master-slave multi-threading mode

2.1.1　线程模型设计

Netty 框架基于 Reactor 主从多线程模型, 抽象出 2 组线程池, 将监听端口服务和处理数据功能剥离, 监听线程组负责接收客户端的连接请求, 事件处理线程组负责仿真请求事件的读写, 具体流程如图 3 所示, 监听线程组中的事件循环器轮询客户端的请求连接事件, 发现请求事件后, 与对应客户端建立连接, 将其注册到事件处理线程组中的事件循环组选择器上, 由事件处理线程组中的读写事件循环器轮询读写事件, 发现读写事件后, 交由流水线中的业务处理器中进行后续处理, 期间不会发生线程切换。Netty 通过非阻塞式处理客户端的连接和读写事件, 避免了反复建立与销毁线程耗费资源的操作, 能够有效提高软件服务端性能。

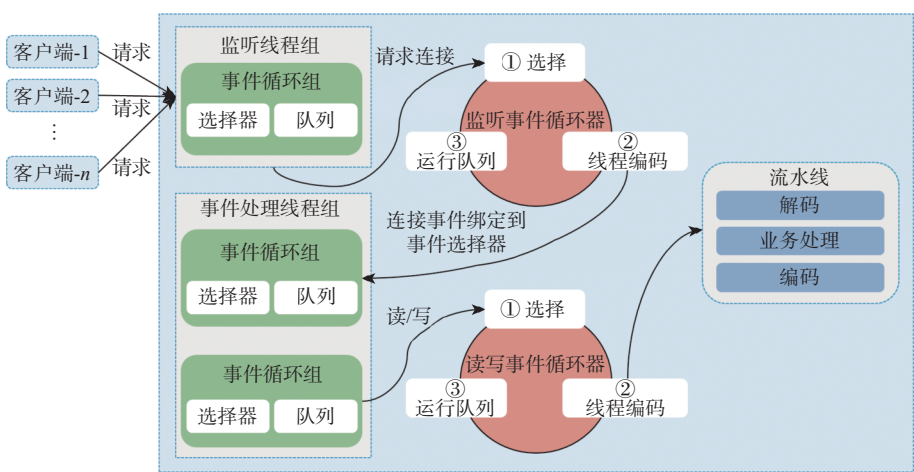

图 3　基于 Netty 的通信模块线程模型

Fig. 3　Thread model of communication module based on Netty

代码清单 1 是 NNW-HyFLOW 软件应用 Netty4.1 版本构建服务端通信模块的核心代码。其中, boss 和 worker 这 2 个事件循环线程组对象负责处理连接和读写事件, 线程数根据集群情况和软件应用情况设置。ServerBootstrap 对象是构建 Netty 框架服务的核心引导类, 参数包括设置传输控制协议(transmission control protocol, TCP)通道类型、绑定事件循环线程组、定义客户端连接的处理器链等。在此基础上, 用户需要构建自定义的入站和出站事件读写处理器来处理业务逻辑, 如编解码、消息转换、登录、求解、数据监控、状态监控、作业管理、文件管理等处理器, 并通过 addLast 方法添加到双

向链表结构的 pipeline 中。服务端接收到请求后，出入站的适配器会根据添加处理器的顺序按照入站顺序执行和出站逆序执行的顺序调用处理器，自定义的处理器可通过继承 SimpleChannelInboundHandler 和 ChannelOutboundHandlerAdapter 这 2 个基础的处理器适配器来处理指定消息类型的读写事件。

代码清单 1

```
public void start(){
    NioEventLoopGroup boss = new NioEventLoopGroup(1); //处理连接的线程组
    NioEventLoopGroup worker = new NioEventLoopGroup(thread_max); //处理读写事件的线程组
    try {
      ServerBootstrap serverBootstrap = new ServerBootstrap();
      serverBootstrap.channel(NioServerSocketChannel.class); //异步非阻塞 TCP 通道
      serverBootstrap.group(boss, worker);
      serverBootstrap.childHandler(new ChannelInitializer<NioSocketChannel>(){
        @Override
        protected void initChannel(NioSocketChannel ch) throws Exception {
          ch.pipeline().addLast(new ProcotolFrameDecoder()); //解码器
          //省略非关键代码
          ch.pipeline().addLast(new MessageInboundHandler()); //消息入站处理器
          ch.pipeline().addLast(new JobManageHandler()); //作业管理处理器
          ch.pipeline().addLast(new JobFileMonitoringHandler()); //气动数据监控器
          ch.pipeline().addLast(new JobStateMonitoringHandler()); //作业状态监控器
          ch.pipeline().addLast(new FileManageHandler()); //文件处理器
          //省略非关键代码
          ch.pipeline().addLast(new MessageOutboundHandler()); //消息出站处理器
          ch.pipeline().addLast(new ProcotolFrameEncoder()); //编码器
        }
      });
      Channel channel = serverBootstrap.bind(port).sync().channel(); //启动服务
      //省略非关键代码
      channel.closeFuture().sync();
    } catch (InterruptedException e) {
      //省略非关键代码
    }
}
```

2.1.2 通信协议设计

TCP 消息传输是基于流的方式，本身没有边界，设计通信协议的目的是划定消息边界，制定通信双方要共同遵守的通信规则，解决双方通信过程中由于套接字缓冲区的大小限制而出现的拆包/黏包的情况。在工程应用中，结合仿真消息传输需求，同时考虑工程实现的难易程度、编解码性能等因素。本文设计了如图 4 所示的协议以供参考，该协议消息头包含数据长度和指令类型，消息体的数据采用 JavaScript 对象表示法（JavaScript object notation, JSON）格式。在数据传输前，先将需要传输的 JSON 格式数据序列化为十六进制数据，计算出数

据长度, 将数据长度信息写入消息头部固定长度的字段中, 再将消息的类型, 如作业查询、计算、数据监控、状态监控等类型通过数字标识存放到指令类型字段中, 方便双方处理, Netty 框架提供了二进制、十六进制、JSON、可扩展标记语言(extensible markup language, XML)等丰富的编码器, 本节继承于 Netty 的 LengthFieldBasedFrameDecoder 类进行实现。

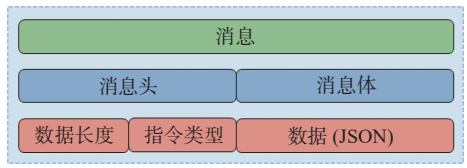

图 4　通信协议示意图

Fig. 4　Schematic of communication protocol

2.2　登录认证

不同用户在集群上的访问权限和文件空间不同, 当服务端以管理员权限部署在集群上时, 需要鉴别用户权限, 并根据鉴别结果找到对应的文件空间进行仿真作业的业务操作, 设置登录认证模块一方面是为根据用户权限在集群进行仿真业务操作, 另一方面是为方便用户对集群求解器授权, 该模块包括登录和求解器授权 2 部分。

2.2.1　登　录

登录流程如图 5 所示, 服务端登录处理器会拦截未登录用户的登录请求, 解码用户登录信息, 与集群中配置的用户信息进行匹配, 并校验密码, 以此判断是否登录成功。

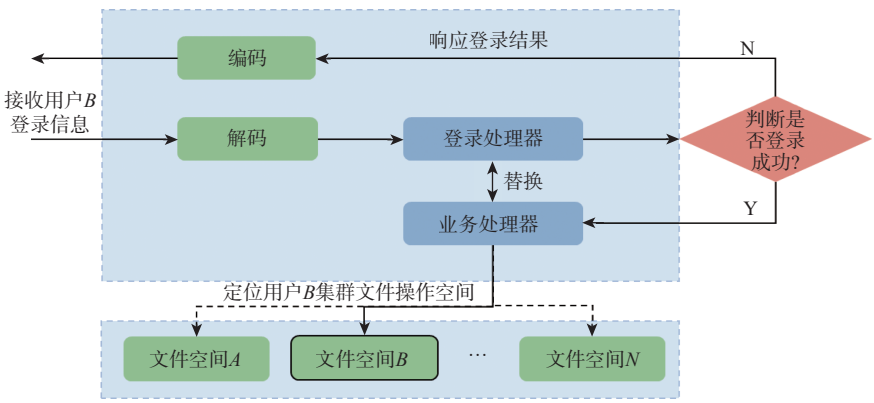

图 5　登录流程示意图

Fig. 5　Schematic of login process

用户登录成功后, 服务端会将用户登录信息、集群文件空间地址信息存储在客户端与用户的连接信息中, 并移除登录处理器, 添加业务处理器, 达到用户在集群管理员配置的文件空间内操作仿真作业的目的。

2.2.2　求解器授权

为保护软件版权, 防止软件非法传播和破解, 求解器设置了许可证管控。目前, 主流的基于硬件信息特征码的许可证管控方式大多是针对单机授权, 面对节点众多的集群, 往往难以获取每个节点的硬件信息特征码, 针对集群多节点授权场景, 本文设计了 CFD 软件授权管理服务。如图 6 所示, 授权管理服务部署在集群登录节点, 在运行时会读取登录节点介质访问控制 (media access control, MAC) 地址、中央处理器标识符(identifier, ID)和硬盘序列号, 并结合需要管控的 CFD 软件信息生成硬件信息特征码, 根据硬件信息特征码, 设置并行计算核数、网格规模等管控信息, 通过加密算法生成授权证书, 并导入集群登录节点, CFD 软件在集群并行计算时, 计算节点通过集群高速互联网络请求授权管理服务获取软件运行权限及允许的并行计算核数和网格规模, 实现软件版权保护及允许限制的管控需求。

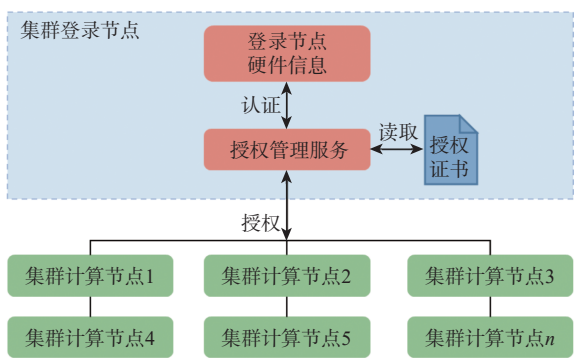

图 6　CFD 软件集群授权认证流程

Fig. 6　Cluster authorization and authentication process for CFD software

2.3　仿真模块

仿真模块作为面向集群的工业 CFD 软件系统的核心之一, 其主要作用是为客户端提供接口支撑, 保障用户能够通过客户端交互界面操作集群, 完成仿真作业的上传/下载、提交、查询、取消等仿

真相关操作。

仿真模块的设计难点在于兼容不同作业管理系统的指令集及其返回值。目前，主流的集群作业管理系统的关键操作指令如表 1 所示。为实现上述指令集的兼容，仿真模块将集群作业调度相关的指令代码解耦合，将指令代码及工业部门提交作业的特殊参数写入 Shell 脚本，通过执行 Shell 脚本的方式进行兼容。对于指令的返回值，服务端基于适配器原理设计了统一的作业状态，作业提交之后的初始状态设置为 PD，作业开始计算后状态为 R，其他状态均设置为 S，当执行集群作业管理系统指令后，其运行状态返回值不同时，由 Shell 脚本代码进行转换。

表 1 集群作业管理系统常用指令

Table 1 Common instructions of cluster job management system

集群作业管理系统	提交指令	查询指令	取消指令
Slurm	sbatch\srun	squeue	scancel
LSF	bsub	bjobs\bqueue	bstop\bkill
PBS/SGE	qsub	qstat	qdel

服务端仿真流程如图 7 所示，其主要流程是用户通过服务端程序在集群文件空间创建仿真作业，通过服务端程序执行 Shell 脚本调用作业管理系统将仿真作业分发到计算节点完成并行计算，具体包括创建作业和管理作业。

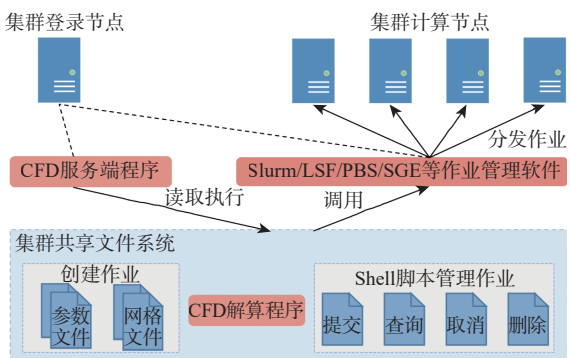

图 7 CFD 软件集群作业示意图

Fig. 7 Schematic of CFD software cluster job

2.3.1 创建作业

在面向集群的工业 CFD 软件服务系统中，创建作业由用户在交互界面导入网格模型，设置计算核数、计算模型、边界条件、离散格式、输出格式等参数后，生成参数文件，通过服务端提供的文件上传接口将参数文件、网格文件上传至服务端用户文件空间。考虑到工程实用性，服务端提供了创建批量作业的接口，客户端仅需在单个作业创建完成后，调用批量作业接口发送批量的工况参数，如高度、迎角、马赫数、侧滑角等，服务端接收到创建批量作业参数后会创建批量作业，并根据批量的工况参数修改参数文件的参数，完成批量作业创建。

2.3.2 作业管理

作业管理主要是为客户端提供面向集群作业管理系统的支持，具体包括以下功能：

1）提交作业。用户完成输入参数文件上传后，客户端调用服务端提交作业接口发送消息请求，接口部分参数如表 2 所示，服务端接收消息后，入站消息处理器 MessageInboundHandler 会根据消息类型 messageType 通过反射将 JSON 数据转换为 Java 实体对象，在 pipeline 中由 JobManageHandler 处理器根据作业类型进行处理，执行对应的提交作业脚本，由 Shell 脚本调用作业管理软件完成作业分发及计算，并在作业路径下记录该作业在集群的作业编码及求解器的写屏输出，以供服务端后续的作业查询和写屏数据监控，通常在单作业计算时，提交作业完成后，客户端会发起作业状态监控和气动数据监控请求，代码清单 2 是提交作业的 Shell 脚本伪代码。此处将获取作业 projectId 的代码解耦到脚本中，可以通过在部署过程中灵活改写配置脚本，避免不同集群返回不同格式的数据，造成服务端无法解析的情况，实现不同类型集群管理系统的兼容。

表 2 客户端与服务器提交作业交互接口的部分参数

Table 2 Some parameters of interface between client and server when submitting jobs

相关参数	功能
messageType	消息类型
jobType	作业类型
batchPara	批量作业参数
solverName	求解器名称
solverType	求解器类型
ncpus	并行计算核数
jobPath	作业在集群的绝对路径
state	作业在集群的运行状态
projectId	作业在集群的运行编码

代码清单 2

submit.sh

```
#!/bin/bash
projectId=yhbatch HyFLOW_Submit.sh ncpus solverName jobPath //向集群管理系统提交作业
//省略非关键代码
echo projectId > jobPath/id.hy //记录作业编码
HyFLOW_Submit.sh
```

```
#!/bin/bash
//省略非关键代码
wait=$(rm jobPath/HyFLOW.out)
mpirun -n ncpus installPath/solverName jobPath >> HyFLOW.out 2>&1 //求解并重定向写屏数据
```

2) 查询作业。用户完成作业提交后, 客户端调用服务端查询作业接口, 传入作业在集群作业管理系统中的 ID, 服务端会执行查询作业的 Shell 脚本获取作业在集群作业管理系统中的状态。

3) 取消作业。作业在集群运行过程中, 客户端调用服务端取消作业接口, 传入作业在集群作业管理系统中的 ID, 服务端执行取消作业的 Shell 脚本停止集群作业。

4) 删除作业。作业计算完成后, 用户将作业结果数据下载至本地客户端后, 调用删除作业接口, 服务端会根据客户端发送的作业路径删除相关文件。

2.4　作业监控

客户端交互界面为用户提供仿真场景交互离不开作业状态和气动数据的监控和实时推送, 服务端提供了作业状态监控和气动数据监控 2 个接口, 其难点在于轮询作业管理系统和气动数据带来的性能开销。针对性能开销问题, 服务端监控程序设计采用单例模式, 轮询作业状态和文件属性实现状态和气动数据的实时监控。

2.4.1　作业状态监控

服务端作业状态监控主要流程如图 8 所示, 作业状态监控采用异步单线程定时执行集群上的批量查询脚本, 其优点是单个线程能够满足所有客户端的状态监控需求, 效率高且内存资源开销小, 在集群兼容方面, 通过解耦批量查询脚本, 在实际部署过程中, 能够根据集群作业管理系统的返回值在现场快速完成修改得到作业编号和运行状态。图 9 给出了监控模块关键步骤的时序图, 监控模块接收到作业状态监控请求后, 将作业状态监控请求添加至作业监控队列中, 开启异步监听线程, 时序图中步骤 8, 监听线程会先获取监控队列中的任务对象, 该对象包括作业在集群上的 ID、上一次运行状态等属性, 随后执行步骤 9, 按轮询时间间隔运行监听线程执行批量查询脚本, 获取作业在集群上的 ID 和运行状态, 对比任务的当前状态与上一次运行状态, 当计算作业状态由 PD 变为 R 时, 通知客户端作业开始计算, 当作业状态 R 变为 S 时, 通知客户端作业计算完成并将其从监听队列移除, 状态监控模块线程会定时循环执行, 直至监控队列为空时, 停止监听线程。相比耦合交互 CFD 软件每个客户端需独立开启监听线程, 本文架构服务端共享状态监听器, 显著减少了监听线程数量, 降低了 CPU 和内存消耗, 同时缓解了作业管理系统应对大量轮询的压力。

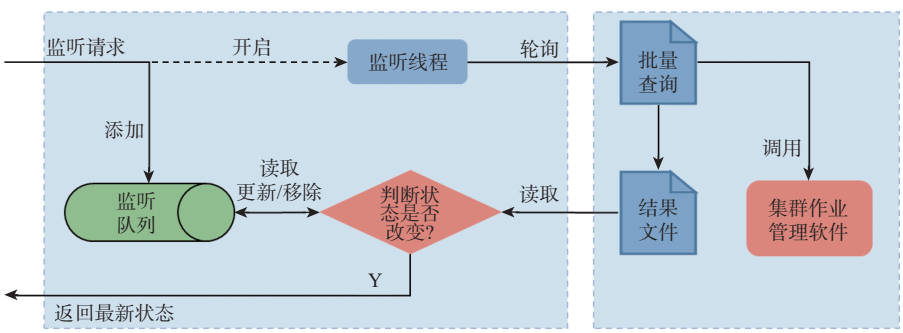

图 8　集群作业状态监控示意图

Fig. 8　Schematic of cluster job status monitoring

2.4.2　气动数据监控

气动数据监控主要包括残差、气动力、气动热及流场文件数据, 区别于作业状态监控。气动数据监控的特点是同时监控读取多个文件空间的气动数据文件, 具有数据量大且实时性要求高等特点, 属于典型的高频数据监控。针对气动数据的监控难点, 为减少集群登录节点内存开销, 如图 10 所示, 服务端将文件的监听与读写事件解耦合, 监听线程采用单线程设计, 负责接受客户端的文件监听请求, 并监听文件的创建和写入动作, 将结果返回给文件监听模块。图 11 给出了文件监控模块的时序图, 步骤 9 检测文件改变实现的核心逻辑是轮询对比文件状态快照, 在接收到文件监听请求后, 为需要监控的文件生成包括文件路径、最后修改时间、大小、是否存在等属性的状态快照, 在下一次轮询中, 递归文件监控目录树, 对比 2 次文件状态快照获取文件是否创建或更新。文件监听模块接收到文件创建和写入动作后, 会从线程池分配线程读取文件中实时更新的数据返回给客户端。由于 CFD 仿真具有计算周期长、输出数据多等特点, 用

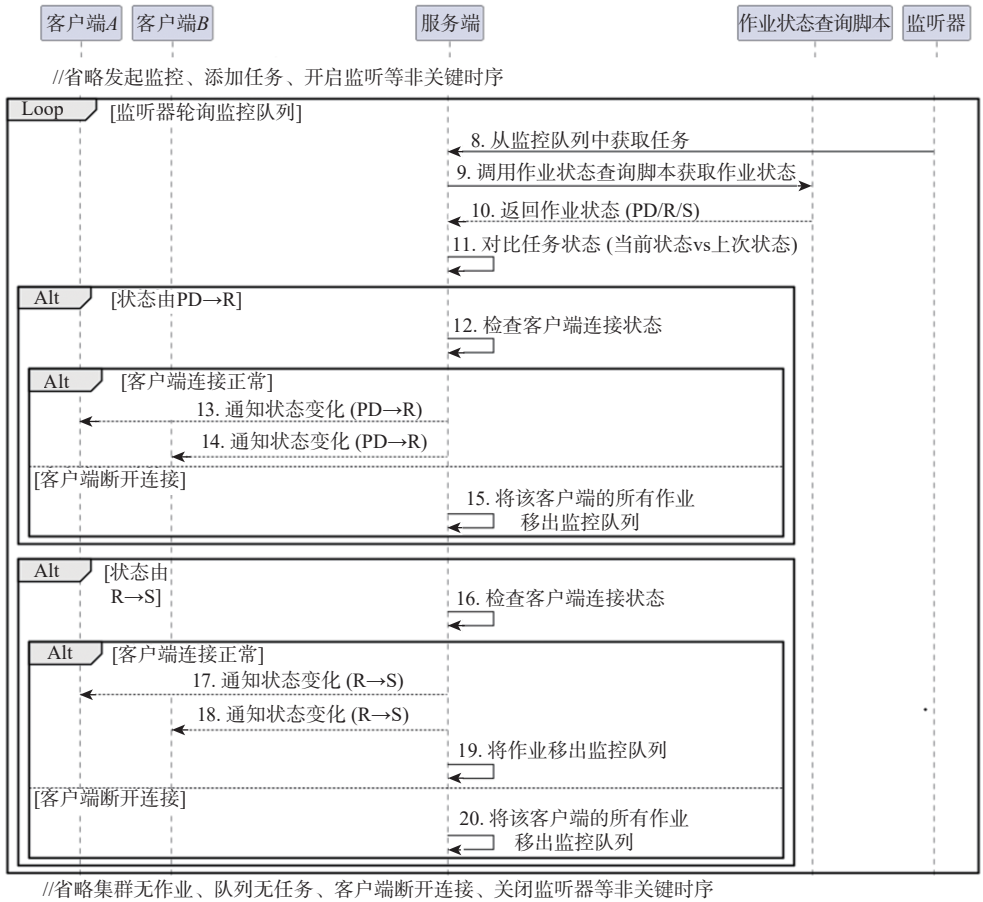

图 9 作业状态监控核心时序图

Fig. 9 Sequence diagram of job status monitoring

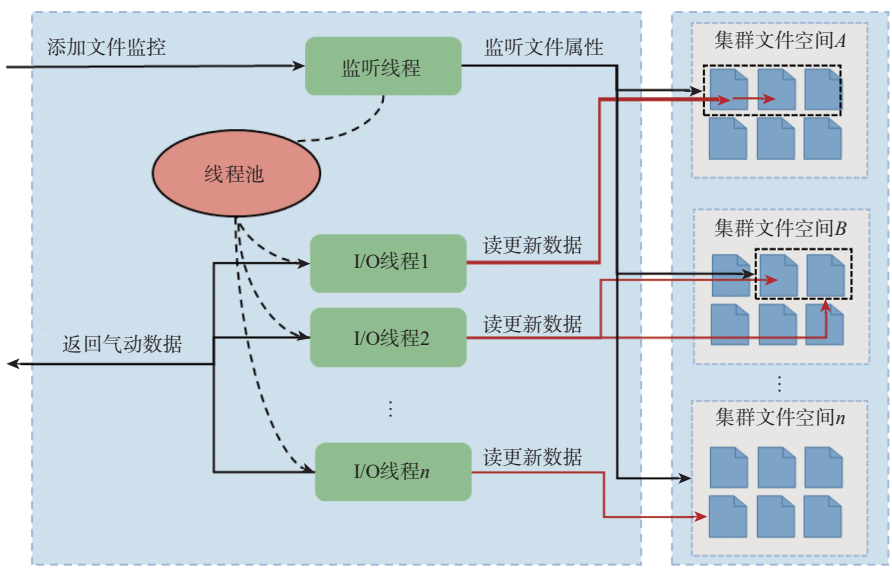

图 10 集群气动数据监控流程

Fig. 10 Process of cluster aerodynamic data monitoring

户在提交作业关闭客户端后，集群端仍在不断向结果文件写入气动数据，当用户再次连接时，为避免一次性读出大量历史数据导致客户端交互界面阻塞，服务端会先将客户端关闭期间生产的历史气动数据分段读出推送给客户端，再开始监听结果文件产生的最新气动数据并读取推送给客户端，时序图中的步骤 12 采用 Java 的 RandomAccessFile 类实现，其提供的 getFilePointer() 方法和 seek() 方法能够精确控制文件指针位置。

2.5 日志与文件管理

文件管理模块主要目的是为客户端提供灵活的文件查看、上传、下载、删除接口，方便客户端向

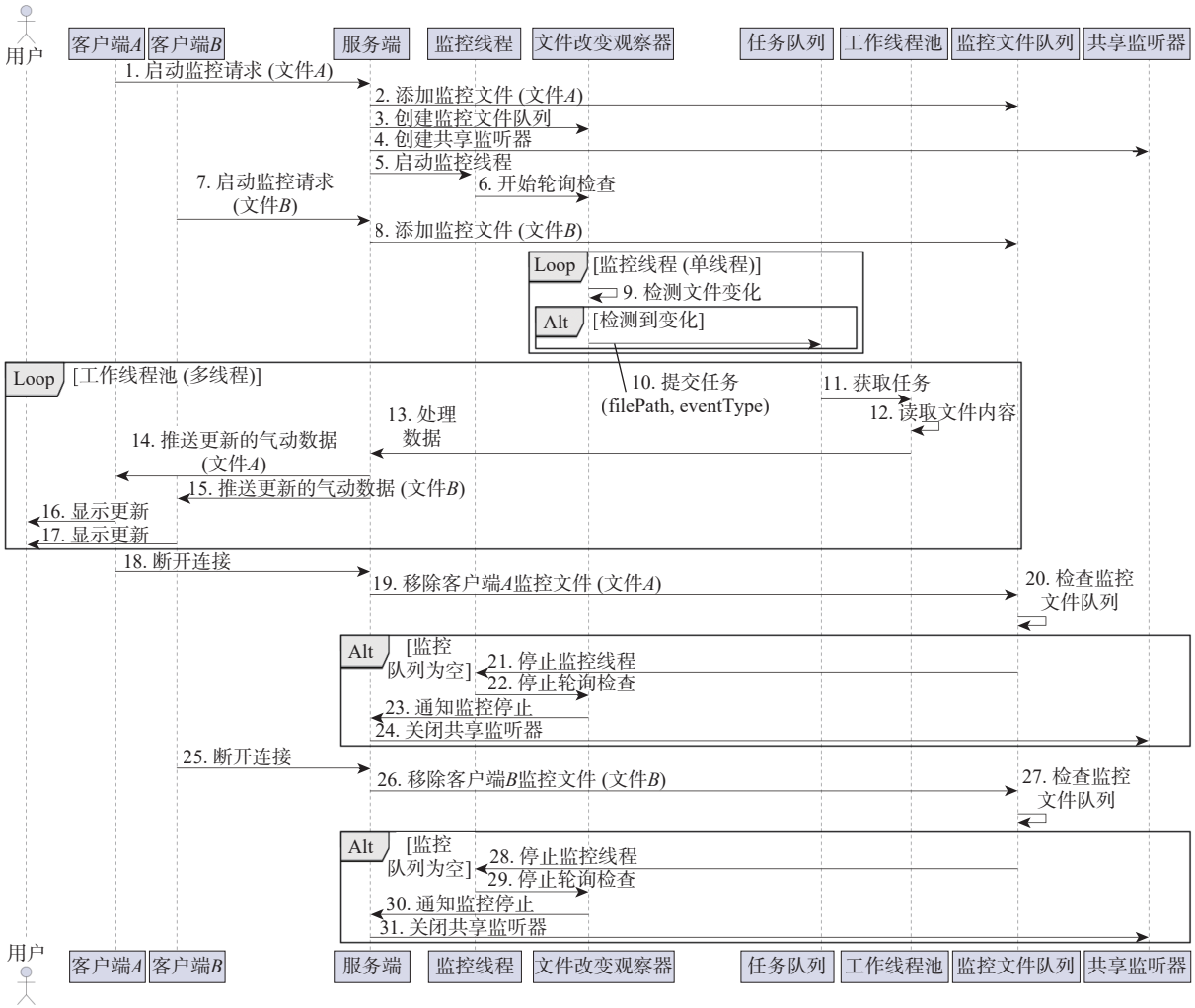

图 11　集群气动数据监控时序图

Fig. 11　Sequence diagram of cluster aerodynamic data monitoring

集群传输参数文件和查看结果文件。

日志模块主要是便于用户故障排查, 服务端日志模块包括提交作业后调度系统的输出及求解器输出, 在 linux 系统中, 每个进程都和标准输入 0-stdin (standard input)、标准输出 1-stdout(standard output)、标准错误 2-stderr(standard error)3 个系统文件相关联, 服务端在提交作业时, 通过使用 2&1 将求解器写屏输出和作业调度系统输出数据全部重定向到 HyFLOW.out 文件中, 再由客户端通过文件监控模块实时读取到控制台实现集群日志监控的数据交互。

3　测　试

3.1　软件简介

NNW-HyFLOW 是中国空气动力研究与发展中心自主研发的高速 CFD 软件, 是 NNW 系列软件的重要组成部分。专注于高速流场及热化学非平衡、稀薄滑移、湍流等多物理效应耦合模拟仿真, 具备高速飞行器流场结构、气动力特性、气动热环境、等离子体环境及其相关气动电磁、气动光学、气动辐射效应综合分析与评估能力。软件发展一系列自主模型算法和独特技术, 具有稳定、精准、高效的特点。

3.2　兼容测试

3.2.1　架构兼容测试

测试环境分别使用进阶精简指令集机器 (advanced RISC machine, ARM)架构和 X86 架构集群, 为避免不同集群软件环境的版本差异, 服务端将 Java 依赖的 Java 运行环境(Java runtime environment, JRE)和.jar 格式的依赖包, 及求解器依赖的消息传递接口(message passing interface, MPI)运行环境统一打包至安装包内, 在软件运行时通过设置加载临时环境变量来兼容集群环境的差异性。

测试集群 1: 服务器处理器类型为 FT-3000, 主频为 2.5 GHz, 操作系统版本 Ubuntu 19.04, ARM 架构, 计算节点为 12 000 余个, 单节点核心数为 64, 单节点内存为 128 GB, CFD 软件服务器在其登录节点启动如图 12 所示。

测试集群 2: 服务器类型为 Intel Xeon, X86 架



图 12 ARM 架构部署服务启动日志

Fig. 12 Server startup log based on ARM architecture



图 13 X86 架构部署服务启动日志

Fig. 13 Server startup log based on X86 architecture

构，计算节点为 30，单节点核心数为 40，单节点内存为 196 GB，CFD 软件服务器在其登录节点启动如图 13 所示。

3.2.2 调度系统兼容测试

为兼容集群作业管理系统，HyFLOW 软件服务端采用固定输入输出的方式来兼容集群实现交互。针对集群作业管理系统的差异性，在实际部署过程中，能够根据输入输出灵活配置服务端的提交作业、状态监控、作业查询、取消作业等脚本文件。表 3 给出了 HyFLOW 软件在 Slurm 作业管理系统主要脚本的输入输出配置。

表 3 HyFLOW 软件兼容 Slurm 作业管理系统的脚本配置

Table 3 Script configuration of HyFLOW software compatible with Slurm job management system

脚本类型	关键指令	输入	输出
提交作业 HyFLOW_Submit.sh	mpirun -n $n $solver $jobPath >>HyFLOW.out 2>&1	$n:[计算核数]、$solver:[求解器名称]、$jobPath:[作业路径]	日志文件
状态监控query.sh	squeue |grep $scriptName |awk -F: '{split(id status)}' >> $1/queryResults.txt	$scriptName:[提交作业脚本名称]	作业状态记录文件
状态查询queryByID.sh	squeue | grep $id	$id:[作业编号]	0:成功，1:失败
取消作业cancel.sh	scancel $id	$id:[作业编号]	0:成功，1:失败

在集群基于表 3 完成 NNW-HyFLOW 软件在 Slurm 作业调度系统的脚本配置后，首先，通过 HyFLOW_Submit.sh 提交作业至集群计算，然后，执行 query.sh 脚本模拟作业状态监控时的接口调用，得到结果如图 14 所示。结果表明，通过脚本配置的方式可以获得 CFD 服务器能够解析的标准返回值，具备与集群作业调度系统交互的能力。进一步说明，通过解耦集群作业管理系统交互指令，在部署过程中按照输入输出标准配置指令脚本，能够解决集群版 CFD 软件兼容作业管理系统的问题。

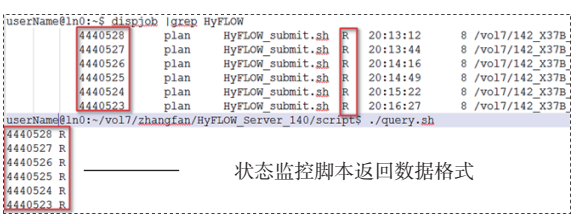

图 14 Slurm 作业管理系统指令兼容测试结果

Fig. 14 Instruction compatibility test results of Slurm job management system

3.3 功能测试

3.3.1 测试算例

测试算例选择类航天飞机 OV-102，通过使用本地客户端设置参数生成参数文件提交集群计算的方式考察服务端接口正确性及系统整体交互能力。图 15 和表 4 给出了类航天飞机网格和计算条件。

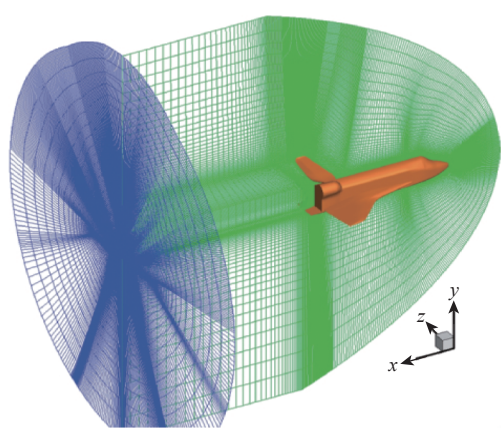

图 15 计算网格示意图

Fig. 15 Schematic of computational grid

表 4 计算条件

Table 4 Computational conditions

马赫数	迎角/(°)	密度/(kg·m^{-3})	单位长度雷诺数/m^{-1}	压力/Pa	壁温/K	侧滑角/(°)	来流温度/K
35	39.58	8.04×10^{-5}	1.1×10^{5}	32.31	1 120	0	216.28

3.3.2　气动数据监控接口测试

图 16 表明, 客户端向服务端发送气动数据监控请求后, 服务端根据客户端请求监听气动数据文件的写入, 读取最新的气动数据, 并按照如图 4 所示的通信协议格式, 在消息头部写入消息长度和消息类型, 消息体采用 JSON 格式数据, 写入气动数据及该工程的相关信息, 并返回给客户端。

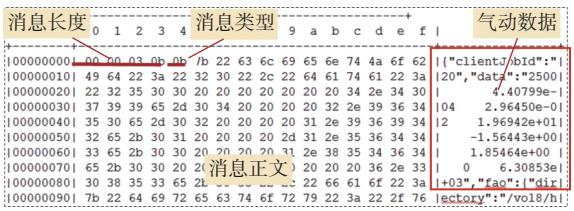

图 16　气动数据监控日志

Fig. 16　Aerodynamic data monitoring log

3.3.3　状态监控接口测试

客户端向服务端发送状态监控请求后, 服务端会开启状态监听线程, 通过轮询的方式查询 HyFLOW 软件提交至集群的作业状态, 并将读取到的当前状态与上一次查询到的状态进行比较, 当集群上计算作业状态由初始状态 PD 改变为计算状态 R 或由计算状态 R 改变为停止状态 S 时, 服务端会将计算状态推送给客户端。图 17 表明, 服务端监听到作业 OV_102, 由初始状态 PD 改变为计算状态 R, 按照约定的通信协议格式推送给客户端。

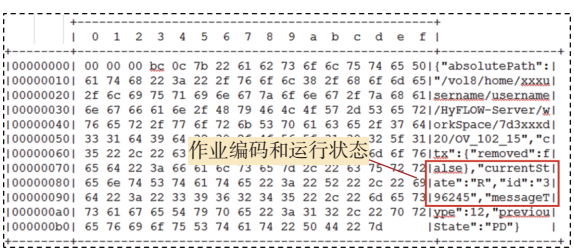

图 17　作业状态监控日志

Fig. 17　Job status monitoring log

3.3.4　批量作业接口测试

在飞行器设计中, 常常需要针对不同状态进行大批量计算, HyFLOW 软件批量作业基于单作业生成, 在单作业参数文件基础上, 通过客户端发送的批量作业参数复制参数文件并修改马赫数、高度、迎角、侧滑角等参数, 完成批量作业工程的创建, 交互界面设置如图 18 所示。图 19 表明, HyFLOW 软件服务端监控到的作业 ID 与直接通过集群作业管理系统查询的结果一致。

3.3.5　扩展能力测试

NNW-HyFLOW 软件集成了流场、气动光学、气动电磁、气动辐射等 10 余种求解器。尽管不同求解类型在客户端对应不同的参数设置界面, 但从

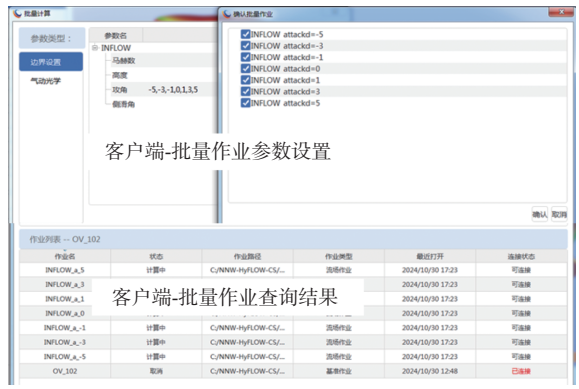

图 18　客户端提交批量作业截图

Fig. 18　Screenshot of submitting batch job on client



图 19　服务器批量作业状态监控日志截图

Fig. 19　Screenshot of batch job status monitoring log

服务端的角度来看, 其求解、监控和数据交互等操作具有一致性。与单机版类似, 面向集群的工业 CFD 软件提供了友好的交互界面, 用户可通过客户端完成网格导入、参数设置及集群计算任务, 并实时监控作业状态变化, 获取残差、气动力/热等气动数据的变化信息, 同时实现与集群仿真数据的快速同步。图 20 和图 21 展示了服务端集成气动光学、气动电磁、流场求解等多种求解类型的集群交互测试结果, 验证了该架构面对命令调用求解器并传递参数文件的 CFD 求解模式的良好扩展能力。目前, 集群交互版 NNW-HyFLOW 软件已成功部署于中国空气动力研究与发展中心、空天飞行空气动力科学与技术全国重点实验室等单位的集群环境中, 并在实际研究任务中取得了显著的应用效果。

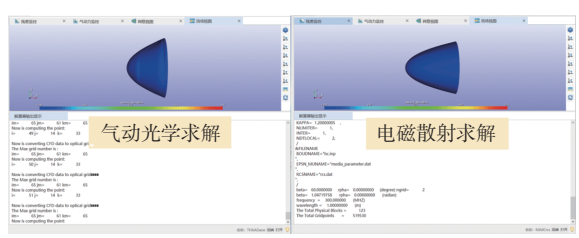

图 20　求解器兼容测试示意图

Fig. 20　Schematic of solver compatibility test

3.4　性能测试

3.4.1　测试环境

客户端使用一台 24 核工作站作为搭载系统, 配置参数信息为: CPU 主频为 2.5 GHz, 采用 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2648 v3 处理器, 32 GB 内存,

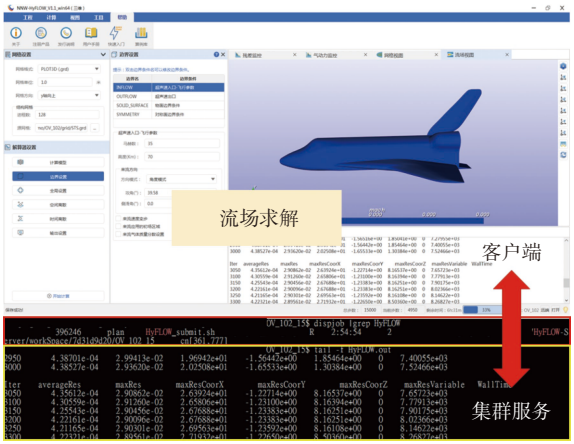

图 21 HyFLOW 软件客户端与集群数据交互示意图

Fig. 21 Schematic of HyFLOW software data interaction between client and cluster

500 GB 固态硬盘，型号为 Samsung SSD 870，操作系统为 win7。服务端部署在测试集群 1 上，Java 开发工具包（Java development kit, JDK）版本为 JRE1.8，Netty 版本为 netty-all-4.1.39.Final。性能测试采用开源压力测试工具 jmeter-5.6.3。测试在局域网进行，机器间通过千兆交换机相连，因此，实验不考虑带宽的影响。

3.4.2 资源占用率测试

1）整体资源占用率。根据客户端/服务器的设计模式，服务端的数量不会随客户端增加，多个客户端共享一个服务端，而传统耦合交互的单机版 CFD 软件每一个客户端都需要一个服务端，对比本文客户端/服务器设计模式与传统耦合交互的单机版 CFD 软件使用场景，得到资源占用率对比数据。

在不影响集群正常生产次序下，客户端数量缓慢增加至 100，在不考虑交互界面在集群上资源占用的条件下，图 22 和图 23 分别给出了客户端/服务器模式一个服务端和传统耦合交互模式每个客户端一个服务端的内存占用率和 CPU 占用率对比，

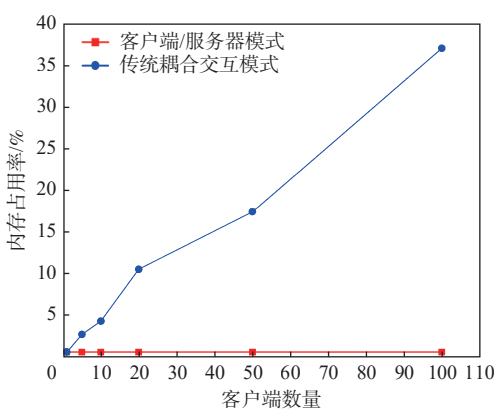

图 22 内存占用率对比

Fig. 22 Comparison of memory usage rate

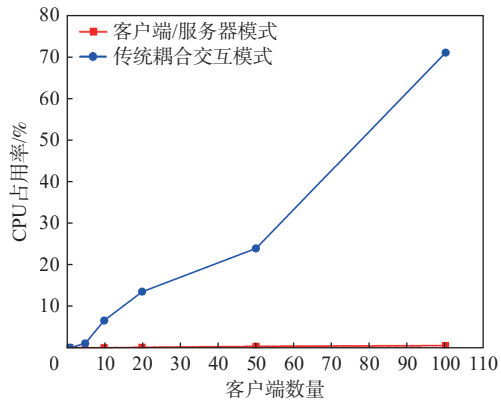

图 23 CPU 占用率对比

Fig. 23 Comparison of CPU usage rate

在 100 个客户端发起作业请求时，客户端/服务器模式的内存占用率不超过 0.6%，CPU 占用率不超过 0.7%，而在传统耦合交互模式每个客户端一个服务器的模式，由于线程数的增加及频繁创建销毁线程带来的性能开销，内存占用率和 CPU 占用率随客户端数量增加而上升，在 100 个客户端使用时，内存占用率为 37%，CPU 占用率超过 70%。相比之下，客户端/服务器的设计模式在 100 个客户端并发使用时，内存占用率减少约 36%，CPU 占用率减少约 69%，显著降低了资源占用率。

2）状态监听器性能对比测试。在只使用共享状态监听器的情况下，将采用一个线程监听所有作业运行状态（共享线程）和每个作业开启一个监听线程（独立线程）的方案进行对比。图 24 给出了不同线程模型的平均响应时间对比。从整体趋势上分析，随着客户端使用人数增多，独立线程模型平均响应时间逐步增加，在超过 50 个客户端数量时，大量线程轮询集群作业管理系统查询接口，独立线程模型平均响应时间超过 100 ms，而共享线程模型响应时间稳定在 100 ms 以内，在 100 个客户端情况下，平均响应时间降低了约 80%。

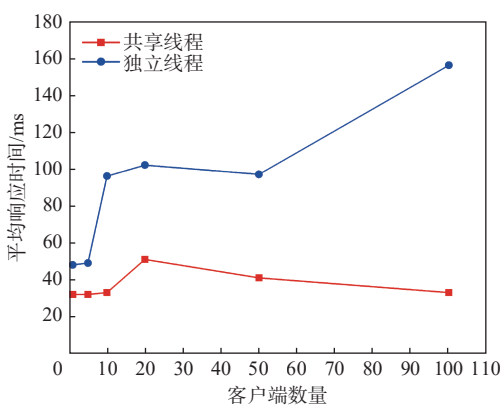

图 24 不同线程模型的平均响应时间对比

Fig. 24 Comparison of average response time between different thread models

3.4.3　服务端性能测试设计与分析

服务端性能测试主要探究其在不同并发量下的平均响应时间和吞吐量, 其中, boss 和 worker 这 2 个事件循环线程组大小设置采用官网推荐设置, 处理连接线程组设置为 1, 处理读写事件线程组设置为服务器 CPU 核数的 2 倍, 采用开源压力测试工具 apache-jmeter-5.6.3, 模拟大量客户端的 TCP 连接请求, 设置每秒线程数分别为 50、100、500、1 000、1 500、2 000, 每个线程请求 1 次, 发送和接收数据约 200 Byte。

1) 服务端平均响应时间。图 25 给出了 HyFLOW 软件服务端的系统平均响应时间对比。测试结果表明, 在 2 000 个并发数内, HyFLOW 框架的平均响应时间稳定在 100 ms 以内, 符合 Netty 框架的并发预期。在与 Slurm 系统交互的情况下, 受 Slurm 作业管理系统性能限制, 服务端在并发数不超过 500 个时, 平均响应时间缓慢增加, 但均在 1 000 ms 以内, 当并发数超过 500 个时, 平均响应时间急剧增加, 在 2 000 个并发数时达到约 6 100 ms。

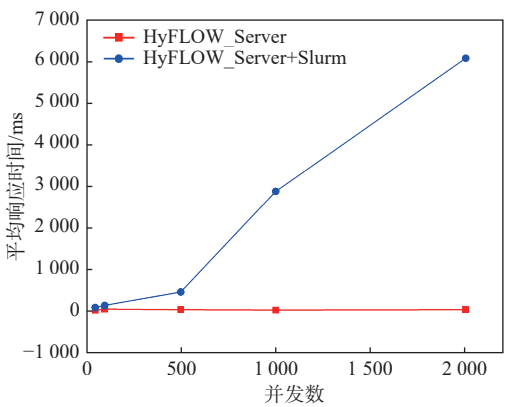

图 25　平均响应时间对比

Fig. 25　Comparison of average response time

2) 服务端平均吞吐量。图 26 给出了 HyFLOW 软件服务端的系统吞吐量对比。测试结果表明, HyFLOW 软件服务端在 2 000 个并发数内, 吞吐量线性增长, 受 Slurm 性能限制, 当并发数小于 100 个时, 吞吐量随并发数增加而增加, 当并发数大于 100 个时, 吞吐量缓慢下降, 在并发数达到 2 000 个时, 吞吐量约为 16 个/s。

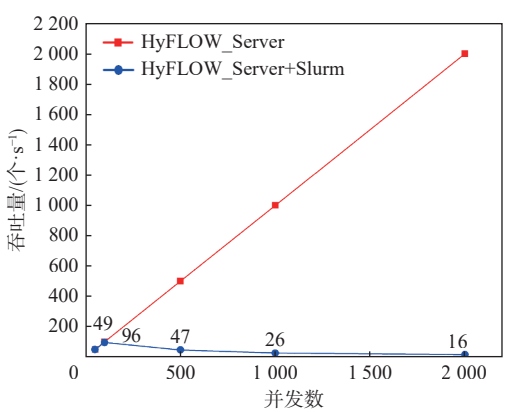

图 26　吞吐量对比

Fig. 26　Comparison of throughput

4　结　论

本文针对国产 CFD 软件在工业部门集群部署过程中存在的兼容性和交互性问题, 基于客户端/服务器架构, 从系统设计、部署方案、数据交互、作业调度与监控等维度, 设计并实现了面向集群交互的 NNW-HyFLOW 软件。通过集群环境下的兼容测试、功能测试和性能评估, 得出以下结论:

1) 系统自动化能力与易用性提升。相较于传统集群独立运行求解器模式, 本文架构能够自动监控集群作业运行状态获取结果数据, 通过文本和图形化界面直观展示残差、气动力及流场等关键计算结果, 降低了用户的学习成本, 促进了国产软件的应用推广。

2) 集群环境兼容能力显著提高。采用客户端/服务器架构, 通过解耦交互界面与求解程序, 解决了传统 CFD 软件对集群 GPU 支持的依赖问题。基于跨平台开发语言的服务程序可兼容 ARM 和 X86 等主流 CPU 架构, 显著提升了软件在异构集群环境中的适应能力, 为国产软件在工业领域的规模化部署奠定了基础。

3) 作业调度系统兼容性优化。通过解耦集群作业管理系统交互指令, 并采用标准化的输入输出配置方案, 有效解决了集群版软件与作业管理系统的兼容性问题, 提高了 CFD 软件的部署效率和运行稳定性。

4) 系统具备良好的可扩展性。针对命令调用求解器并传递参数文件的 CFD 求解模式, 本文架构仅需在交互界面增加功能参数设置, 并在服务端调整 Shell 脚本命令即可实现功能扩展, 显著提升了系统的通用性和可扩展能力。

5) 系统性能优势显著。与传统单机版架构相比, 在 100 个并发量的应用场景下, 软件的内存占用率、CPU 占用率和平均响应时间分别降低了 36%、69% 和 80%。系统在 100 个并发数以内可保持毫秒级响应速度, 为用户提供了高效的集群仿真交互体验。

展望未来, 在 CFD 软件的集群应用领域, 交互模式正朝着数字化、智能化方向快速发展。通过解耦客户端/Web 前端与集群后端, 整合算力资源, 用户无需依赖本地高性能硬件即可高效完成大规模复杂仿真任务。下一步, 面向集群交互的 NNW-

HyFLOW软件将在工业部门部署应用，为用户提供高效、易用的集群仿真服务，并基于用户反馈和工程实践需求持续迭代优化。未来，服务端将集成至数字化平台，助力软件完成数字化升级，从而更好地满足工业部门对智能化、协同化仿真解决方案的需求。

参考文献（References）

[1] 张健, 周乃春, 李明, 等. 面向航空航天领域的工业CFD软件研发设计[J]. 软件学报, 2022, 33(5): 1529-1550.
Zhang J, Zhou N C, Li M, et al. R & D and design of industrial CFD software for aeronautics and astronautics[J]. Journal of Software, 2022, 33(5): 1529-1550(in Chinese).

[2] 周铸, 黄江涛, 黄勇, 等. CFD技术在航空工程领域的应用、挑战与发展[J]. 航空学报, 2017, 38(3): 020891.
Zhou Z, Huang J T, Huang Y, et al. CFD technology in aeronautic engineering field: applications, challenges and development[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(3): 020891(in Chinese).

[3] 陈琦, 陈坚强, 袁先旭, 等. 国家数值风洞(NNW)工程在高超声速中的应用研究进展[J]. 航空学报, 2021, 42(9): 625746.
Chen Q, Chen J Q, Yuan X X, et al. Progress on application of National Numerical Windtunnel Project for hypersonic[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(9): 625746(in Chinese).

[4] 阎超. 航空CFD四十年的成就与困境[J]. 航空学报, 2022, 43(10): 526490.
Yan C. Achievements and predicaments of CFD in aeronautics in past forty years[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(10): 526490(in Chinese).

[5] 陈坚强. 国家数值风洞(NNW)工程关键技术研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2021, 51(11): 1326-1347.
Chen J Q. Advances in the key technologies of Chinese national numerical windtunnel project[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2021, 51(11): 1326-1347(in Chinese).

[6] 袁先旭, 陈坚强, 杜雁霞, 等. 国家数值风洞(NNW)工程中的CFD基础科学问题研究进展[J]. 航空学报, 2021, 42(9): 625733.
Yuan X X, Chen J Q, Du Y X, et al. Research progress on fundamental CFD issues in National Numerical Windtunnel Project[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(9): 625733(in Chinese).

[7] 李鹏, 陈坚强, 丁明松, 等. NNW-HyFLOW高超声速流动模拟软件框架设计[J]. 航空学报, 2021, 42(9): 161-177.
Li P, Chen J Q, Ding M S, et al. Framework design of NNW-HyFLOW hypersonic flow simulation software[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(9): 161-177(in Chinese).

[8] 赵钟, 何磊, 何先耀. 风雷(PHengLEI)通用CFD软件设计[J]. 计算机工程与科学, 2020, 42(2): 210-219.
Zhao Z, He L, He X Y. Design of general CFD software PHengLEI[J]. Computer Engineering & Science, 2020, 42(2): 210-219(in Chinese).

[9] 赵钟, 张来平, 何磊, 等. 适用于任意网格的大规模并行CFD计算框架PHengLEI[J]. 计算机学报, 2019, 42(11): 2368-2383.
Zhao Z, Zhang L P, He L, et al. PHengLEI: a large scale parallel CFD framework for arbitrary grids[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(11): 2368-2383(in Chinese).

[10] 陈坚强, 吴晓军, 张健, 等. FlowStar: 国家数值风洞(NNW)工程非结构通用CFD软件[J]. 航空学报, 2021, 42(9): 625739.
Chen J Q, Wu X J, Zhang J, et al. FlowStar: general unstructured-grid CFD software for National Numerical Windtunnel (NNW) Project[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(9): 625739(in Chinese).

[11] 章锦威, 戚姝妮, 郭承鹏, 等. 基于非结构平台的DLR-F6标模阻力预测[J]. 航空计算技术, 2015, 45(2): 84-87.
Zhang J W, Qi S N, Guo C P, et al. Computed verification of drag prediction for DLR-F6 wing body on unstructured grids flow solver[J]. Aeronautical Computing Technique, 2015, 45(2): 84-87(in Chinese).

[12] 刘毅, 王刚, 叶正寅. 典型外形高超声速气动力/气动热数值计算研究[J]. 西北工业大学学报, 2014, 32(2): 169-175.
Liu Y, Wang G, Ye Z Y. Numerical investigation of aerodynamic and aero-thermal effects for hypersonic vehicles[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2014, 32(2): 169-175(in Chinese).

[13] 徐瑞, 杨永, 胡春馨, 等. 航空计算技术工业软件云化研究[J]. 山西电子技术, 2024(1): 116-118.
Xu R, Yang Y, Hu C X, et al. Research on cloudization of industrial software in aviation computing technology[J]. Shanxi Electronic Technology, 2024(1): 116-118(in Chinese).

[14] 安洲, 袁义, 宋文龙, 等. 面向航天器设计的高性能计算平台研究与应用[J]. 航天制造技术, 2022(4): 74-78.
An Z, Yuan Y, Song W L, et al. Research and application of high performance computing platform for spacecraft design[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2022(4): 74-78(in Chinese).

[15] 陈晓明, 田喜民, 万李韦. 基于混合云的舰船高性能计算仿真平台研究[J]. 信息技术, 2023(10): 79-83.
Chen X M, Tian X M, Wan L W. Research on ship high-performance computing simulation platform based on hybrid cloud[J]. Information Technology, 2023(10): 79-83(in Chinese).

[16] 牟泓宇, 马轶聪, 淮晓永. 面向云计算环境的CFD数据可视化分析服务[J]. 电子技术应用, 2023, 49(3): 118-123.
Mou H Y, Ma Y C, Huai X Y. CFD data visualization analysis service for cloud computing environment[J]. Application of Electronic Technique, 2023, 49(3): 118-123(in Chinese).

[17] 李林锋. Netty权威指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014: 1-505.
Li L F. Netty authoritative guide[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 1-505(in Chinese).

Interactive design and implementation of cluster-oriented industrial CFD software

ZHANG Fan[1, 2], DING Mingsong[1, 2], CHEN Jianqiang[1, 2], LIU Wan[1, 2, *], JIANG Tao[1, 2], LI Peng[1, 2], JIANG Jun[1, 2]

(1. Computational Aerodynamic Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;
2. State Key Laboratory of Aerodynamics, Mianyang 621000, China)

Abstract: In the field of aerospace engineering, industrial computational fluid dynamics (CFD) software relies on high-performance computing clusters to generate aerodynamic data, serving as a critical tool for assisting aircraft design. This paper devises and executes a CFD software framework for cluster interaction to address the challenges faced by domestic CFD software in high-performance computing cluster deployment and simulation, along with compatibility issues with software/hardware environments, while considering the requirements of the National Numerical Windtunnel (NNW) project for software research, development, and promotion. The architecture employs a client/server model, incorporating features such as an interactive interface, cluster communication, login authentication, simulation task management, and job monitoring, while facilitating a command-based solver invocation and parameter file transfer, demonstrating significant versatility and scalability. Testing outcomes indicate that the framework is congruent with prevalent cluster architectures and job scheduling systems; in contrast to conventional coupled architectures, it diminishes memory utilisation by 36% and CPU consumption by 69% under hundreds of simultaneous tasks, while maintaining average response times within 100 milliseconds, highlighting its benefits in resource efficiency and swift responsiveness. Currently, the designed framework has been applied to the NNW software ecosystem, provide users with smooth cluster simulation interaction services and significantly improve the user experience of CFD simulations.

Keywords: high-performance computing cluster; computational fluid dynamics; industrial software; job scheduling; aerospace; National Numerical Windtunnel Project

Received: 2024-11-12; **Accepted**: 2025-03-28; **Published Online**: 2025-04-30 12:35
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20250430.1114.001
Foundation item: National Numerical Windtunnel Project
* **Corresponding author**. E-mail: 13340898729@163.com