

10-18-2021

High Performance Simulation Method and Test Platform for Full Envelop of Flight Vehicle

Jianlin Wang

1. Key Laboratory of Space Physics, Beijing 100076, China; ;

Sufang Chen

1. Key Laboratory of Space Physics, Beijing 100076, China; ;

Tie Ming

1. Key Laboratory of Space Physics, Beijing 100076, China; ;

Liu Jing

1. Key Laboratory of Space Physics, Beijing 100076, China; ; 2. Beihang University, Beijing 100191, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

High Performance Simulation Method and Test Platform for Full Envelop of Flight Vehicle

Abstract

Abstract: In order to meet the needs of the overall performance simulation and verification of the vehicle with large subsamples and massive states, *a high-performance simulation method is proposed, in which a parallel simulation architecture based on high-performance computers is established, the technologies and software such as decoupling of simulation tasks, real-time monitoring of simulation, concurrent conflict control and automatic aggregation of large-scale test results are realized, and a test platform for the large-scale parallel verification of flight performance is developed.* Simulation results show that the method has high acceleration ratio and scalability, and can complete the verification efficiently, which not only improves the overall verification and evaluation capability of the vehicle, but also promotes the improvement of the vehicle design.

Keywords

overall performance, massively parallel, high performance simulation, test platform

Authors

Jianlin Wang, Sufang Chen, Tie Ming, Liu Jing, and Zhang Jun

Recommended Citation

Wang Jianlin, Chen Sufang, Tie Ming, Liu Jing, Zhang Jun. High Performance Simulation Method and Test Platform for Full Envelop of Flight Vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(10): 2298-2306.

飞行器全包络高性能仿真方法与试验平台

王建林¹, 陈素芳¹, 铁鸣^{1*}, 刘璟^{1,2}, 张军¹

(1. 空间物理重点实验室, 北京 100076; 2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 针对飞行器总体性能超大子样、海量状态仿真验证需求, 提出了高性能仿真方法, 建立基于高性能计算机的大规模并行仿真架构, 实现了大子样仿真任务解耦、高性能仿真实时监控、并发冲突控制、大规模试验结果自动聚合等技术与软件, 研制了飞行器性能大规模并行验证的高性能仿真试验平台。仿真应用结果表明该试验方法具有较高的加速比和可扩展性, 能够高效、高质量地完成数字化验证过程, 不仅提升了飞行器总体验证、评估能力, 也通过高性能仿真技术的应用促进了飞行器总体设计的改进。

关键词: 总体性能; 大规模并行; 高性能仿真; 试验平台

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 10-2298-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0625

High Performance Simulation Method and Test Platform for Full Envelop of Flight Vehicle

Wang Jianlin¹, Chen Sufang¹, Tie Ming^{1*}, Liu Jing^{1,2}, Zhang Jun¹

(1. Key Laboratory of Space Physics, Beijing 100076, China; 2. Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to meet the needs of the overall performance simulation and verification of the vehicle with large subsamples and massive states, a high-performance simulation method is proposed, in which a parallel simulation architecture based on high-performance computers is established, the technologies and software such as decoupling of simulation tasks, real-time monitoring of simulation, concurrent conflict control and automatic aggregation of large-scale test results are realized, and a test platform for the large-scale parallel verification of flight performance is developed. Simulation results show that the method has high acceleration ratio and scalability, and can complete the verification efficiently, which not only improves the overall verification and evaluation capability of the vehicle, but also promotes the improvement of the vehicle design.

Keywords: overall performance; massively parallel; high performance simulation; test platform

引言

与传统飞行器相比, 现代飞行器的飞行范围是一个覆盖高度 20~100 km、速度 0 到第一宇宙速度、机动范围上千乃至上万公里的三维立体的飞行包络。由于各种条件的限制, 难以进行全程多状态的飞行试验, 只能在地面通过大子样、海量飞行状态的模拟仿真试验获取飞行包络及其边界。

同时, 由于长时间在大气层内高速飞行, 各系统、物理场产生了复杂的交连耦合关系^[1], 对其开展总体性能评估与验证需要进行百万量级、甚至更大量的全程飞行仿真试验。这类仿真往往采用蒙特卡洛打靶或多偏差极限拉偏组合的方式进行, 由于飞行时间长, 仿真状态极多, 传统的串行和小规模并行集群的仿真模式难以有限的时间内保证仿真试验状态覆盖的全面性, 无法满足飞行器全剖面

收稿日期: 2021-07-06

修回日期: 2021-08-28

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1701600); 国家自然科学基金(61773068)

第一作者: 王建林(1987-), 男, 硕士, 高工, 研究方向为飞行器仿真、半实物仿真。E-mail: 20051186@163.com

通讯作者: 铁鸣(1976-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为复杂系统建模与仿真、智能飞行器。E-mail: tming7611@sina.com

的性能指标验证需求。

随着高性能计算技术和大规模并行仿真技术的发展, 高性能计算机集群系统在科研活动中得到了广泛应用, 成为了提高仿真效率的有力工具^[2], 在航天器的计算分析与仿真领域应用效果显著^[3-6], 为现代飞行器的仿真模拟提供了有效的技术支持。

飞行器全包络高性能仿真方法研究主要基于高性能计算机系统展开, 首先根据仿真任务特点设计了大规模并行仿真架构, 然后对并行仿真中涉及的关键技术进行了讨论, 研制了并行仿真试验平台, 最后在高性能计算集群环境中进行了应用, 实现了大规模仿真任务的快速提交和试验结果的自动聚合, 为高效开展多子样的飞行器总体性能评估和验证提供了有效手段。

1 总体性能仿真对象分析

飞行器总体性能评估验证仿真流程如图 1 所示。在数学仿真状态下, 每个状态需要实现试验状态参数设置、作用力和力矩计算、六自由度弹体方程计算、惯组模型计算、飞行控制计算、伺服机构模型计算、热环境计算等。在每个仿真周期内, 首先由作用力和力矩计算模块根据伺服摆角和飞行运动参数计算飞行器的合力和合力矩(包括气动力和力矩、控制力和力矩、干扰力和力矩), 然后六自由度弹体方程计算模块据此求解弹体模型并更新弹体参数, 输出加速度和角速度信号给惯组模型计算模块, 飞行控制计算模块使用惯组模型输出的角增量和速度增量数据进行导航、制导和姿控计算, 形成伺服机构控制指令, 伺服机构模型对伺服特性进行模拟并完成伺服摆角的计算, 最后热环境计算模块根据伺服摆角和飞行参数计算加热量和热流等, 形成系统的闭环仿真。

图 1 中行 4 的六自由度弹体方程计算主要涉及 12 个弹体运动微分方程(6 个绕心运动方程和 6 个质心运动方程)求解、不同坐标系下几何关系转换和弹道参数计算, 是整个仿真流程中最耗时的部分。

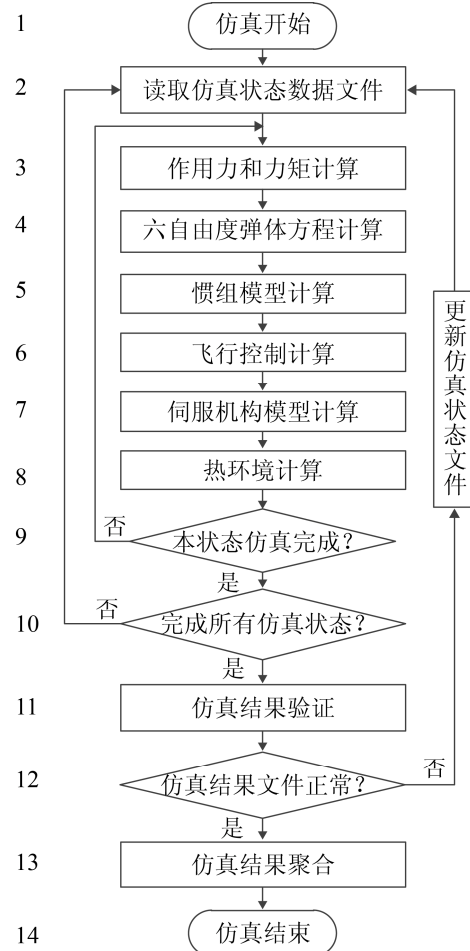


图 1 总体性能评估验证仿真流程示意图

Fig. 1 Diagram of overall performance evaluation and validation simulation flow

飞行器在弹体坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 内的绕心运动方程为:

$$\dot{\omega}_{x1} = (J_{y1} - J_{z1})\omega_{y1}\omega_{z1} / J_{x1} + M_{x1} / J_{x1}$$

$$\dot{\omega}_{y1} = (J_{z1} - J_{x1})\omega_{z1}\omega_{x1} / J_{y1} + M_{y1} / J_{y1}$$

$$\dot{\omega}_{z1} = (J_{x1} - J_{y1})\omega_{x1}\omega_{y1} / J_{z1} + M_{z1} / J_{z1}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\gamma} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \gamma \tan \psi & \cos \gamma \tan \psi \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma / \cos \psi & \cos \gamma / \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{x1} \\ \omega_{y1} \\ \omega_{z1} \end{bmatrix}$$

式中: M_{x1} , M_{y1} , M_{z1} 是作用于弹体的力矩在弹体系的 3 个分量; J_{x1} , J_{y1} , J_{z1} 是弹体绕其 3 个主轴的转动惯量; ω_{x1} , ω_{y1} , ω_{z1} 是弹体绕其 3 个主轴的角速度。飞行器在发射惯性系 $OXYZ$ 内的质心运动方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_x \\ \dot{V}_y \\ \dot{V}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{W}_x \\ \dot{W}_y \\ \dot{W}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}$$

式中: $\dot{W}_x, \dot{W}_y, \dot{W}_z$ 是飞行器飞行中所受的全部非质量力的加速度在发射惯性系的分量; V_x, V_y, V_z 为飞行器速度在发射惯性系的分量。多维气动插值计算根据给定的数表, 由飞行高度、攻角、侧滑角、马赫数、舵偏等进行插值得到。

从计算角度, 飞行器总体性能仿真具有一定的挑战性。假设偏差状态为 n 个, 按照偏差正负极限拉偏组合方式, 一轮共进行两组全偏差状态组合的仿真, 需计算 2^n 个状态。假设一条状态在 Intel E5540 CPU (主频 2.53 GHz) 的串行仿真时间约为 30 s, 当 n 为 22 时串行仿真时间约为 $2 \times 2^{22} \times 30 / 3600 \approx 2912$ d, 这种串行仿真时间在工程设计中是无法接受的。当 n 比较大时, 超大批量总体性能仿真的计算量十分庞大, 因此基于高性能计算机开展高效并行仿真试验方法的研究是非常必要的。

2 全包络飞行高性能仿真方法

2.1 高性能仿真体系架构

为实现高效的仿真计算, 需要确保 2 个条件: 多核并行计算与负载均衡。

从图 1 可以看出, 每条状态的仿真主要是内循环(行 3~8), 不同状态仿真的连续计算过程为行 2 的读取状态数据至行 13 的仿真结果聚合的外循环。由于读取偏差状态数据文件和仿真结果聚合与内循环和外循环的耦合度都非常低, 从而具有极高的并行性。这种低耦合、高并行性在物理意义上也可以清晰解释。每个仿真偏差状态产生一条弹道, 即一条独立的飞行轨迹, 单个飞行器的不同飞行轨迹之间是相互独立的, 最终形成不同偏差组合条件下的飞行包络供分析设计使用。

基于上述分析, 将基于高性能计算机的飞行器总体性能大规模并行仿真分为 3 个层次, 包括任务解耦层、实时监控层和数据聚合层, 包含 K 个进程的大规模并行仿真架构如图 2 所示。任务解耦层主要完成并行仿真任务划分, Set_k 为第 k ($1 \leq k \leq K$) 个进程需要完成的仿真状态集合。实时监控层的仿真器包含图 1 中行 2~12 的仿真过程, 主要完成三方面的工作: 一是实时监控仿真进程工作状态并进行容错处理, 二是对各进程仿真结果进行验证, 三是查找结果异常或进程意外退出的任务并进行再次提交。数据聚合层的工作分为二个层次: 第一个层次是对每一个仿真进程生成的结果文件进行聚合, 第二个层次是对第一层的聚合结果进行再聚合。在两次聚合的过程中, 实现数据按照仿真状态编号的有序排列, 使分析人员想要看到的数据一目了然。

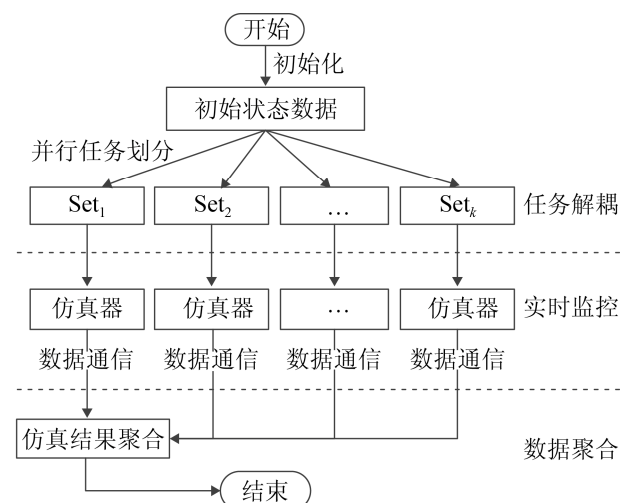


图 2 大规模并行的高性能仿真架构
Fig. 2 Massively parallel simulation architecture

2.2 高性能仿真任务解耦技术

任务解耦是开展飞行器总体性能或全包络飞行性能并行仿真的基础。仿真状态数据可以抽象成仿真状态集合, 其由初始数据生成。初始数据包含一系列可变参数, 每个参数包含一系列参数值, 任务解耦层需要根据可变参数及参数值生成对应各进程的仿真状态集合。假设初始数据包含参数 a, b ,

a, b 的极值分别为 $a_{\min}, a_{\max}$ 和 $b_{\min}, b_{\max}$, 变化量分别为 dlt_a, dlt_b , 则有:

$$a_i = \{a_1, a_2, \dots, a_M\},$$

$$b_j = \{b_1, b_2, \dots, b_N\},$$

其中

$a_i = a_{\min} + (i-1) \times dlt_a$, $b_j = b_{\min} + (j-1) \times dlt_b$, 并满足 $a_M \leq a_{\max}$, $b_N \leq b_{\max}$ 。生成的仿真状态为:

$$\{a_1, b_1\}, \{a_1, b_2\}, \dots, \{a_1, b_N\},$$

$$\{a_2, b_1\}, \{a_2, b_2\}, \dots, \{a_2, b_N\},$$

...

$$\{a_M, b_1\}, \{a_M, b_2\}, \dots, \{a_M, b_N\}$$

合计为 MN 个仿真状态。假设并行任务数 K 能够被 MN 整除, 其并行仿真任务划分过程如图 3 所示。由于采用均匀分配的方式, 各进程间的仿真任务基本保持相同。由于单个进程的仿真时间可能长短不一, 当每个进程被分配的任务颗粒比较小时, 可能产生一定的负载不均衡; 当每个进程被分配的任务颗粒比较大时, 由于概率原因, 负载均衡性会非常好, 而在进行总体性能大规模仿真时, 分配的任务颗粒度都比较大, 从而保证了负载的均衡性。

$$a_i = a_{\min}$$

$$b_j = b_{\min}$$

for $k=1$ to K step by 1

set Set_k empty

for $i=1$ to M step by 1

for $j=1$ to N step by 1

$$L = (i-1) \times N + j$$

if $((k-1) \times MN / K < L < (k \times MN / K + 1))$

$$a_i = a_{\min} + (i-1) \times dlt_a$$

$$b_j = b_{\min} + (j-1) \times dlt_b$$

produce simulation state $\{a_i, b_j\}$

insert $\{a_i, b_j\}$ into Set_k

图 3 任务解耦示意图

Fig. 3 Task decoupling diagram

2.3 高性能仿真实时监控技术

基于超算系统开展高性能仿真, 需要实时监控试验状态、控制试验运行, 这是通过主从模式实时

监控技术实现的。

主从模式实时监控流程图如图 4 所示。其中主进程为在高性能计算机服务节点上运行的监听进程, 从进程为各作业进程, 分布于各计算节点上。主从进程间通过交互接口进行通信, 交互接口包括 2 个部分: ①作业管理系统获取的各进程的状态标志, 如 RUN、SUSPEND 等; ②并行仿真容错系统设计的状态文件。状态文件包含二行, 第一行为该进程的总仿真状态数目, 第二行为已经完成的仿真状态数目。

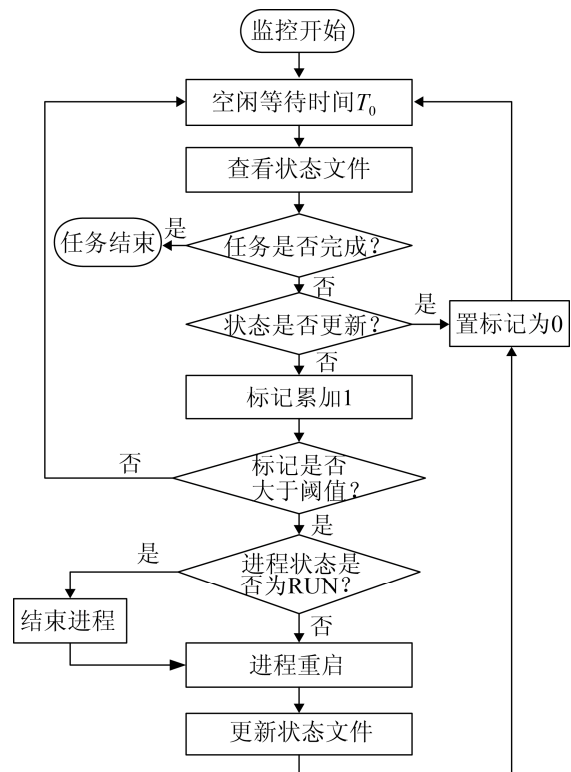


图 4 主从模式监控流程图

Fig. 4 Master-slave mode monitoring flow chart

图 4 中等待时间 T_0 一般设置为 2 min, 标记阈值一般设置为 3, 由此可知, 6 min 以内如果没有状态更新, 即没有新的仿真状态完成计算, 则对处理该仿真状态集合的进程状态进行判断。若进程处于 RUN 状态, 则使用作业管理系统提供的命令结束相应进程。重启进程之后需要更新状态文件、进程标记等, 进行下一轮补算。如果在仿真过程遇到不可逆的情况, 如高性能计算机断电、文件系统出故障

等, 导致所有作业全部掉线, 在服务节点启动主进程, 当完成阈值监控之后, 会全部重启未完成作业。

2.4 高性能仿真并发冲突控制

开展海量飞行状态并行仿真试验, 并行仿真任务划分提高了仿真试验效率, 但由于多个进程同时进行, 如何保证所有飞行状态仿真数据准确输出、规避和解决并发冲突是必须要解决的问题。由于高性能计算机的文件管理系统、操作系统仅具备有限的处理并发写入冲突的能力, 当大批量的仿真进程向同一存储区同时写入大量结果数据文件或过程数据文件时, 极有可能出现如下故障:

(1) 少数飞行状态仿真结果缺失;

(2) 仿真结果数据缺项;

(3) 并发冲突强度超过操作系统处理能力, 需要研制主动处理冲突的专用软件, 不仅损失相当的仿真效率, 处理效果也很差。

高性能仿真平台的并发冲突控制软件可在大规模并行试验结果聚合时, 首先判断结果文件是否存在。若仿真结果文件不存在或数据记录不完整, 则需记录仿真状态编号, 然后将问题状态仿真编号统一更新到仿真状态文件中, 最后重启计算进程进行仿真, 直到所有异常问题都处理完成。同时, 对并发冲突强度进行协同控制。

控制量为:

(1) 并发输出频率;

(2) 输入流的数量。

调节量为:

(1) 每条弹道仿真数据的写入频率;

(2) 仿真数据文件数量, 将琐碎的文件合并成大文件, 文件数量的增减可控制输入流的数量。

2.5 高性能仿真试验结果聚合技术

如前所述, 当所有的作业完成局部仿真集合中所有状态的计算之后, 需要进行 2 个层次的结果聚合, 分别是对每一个节点(进程)生成的结果文件进行聚合和对上一层聚合结果文件的再聚合。具体聚合过程示意如图 5 所示。

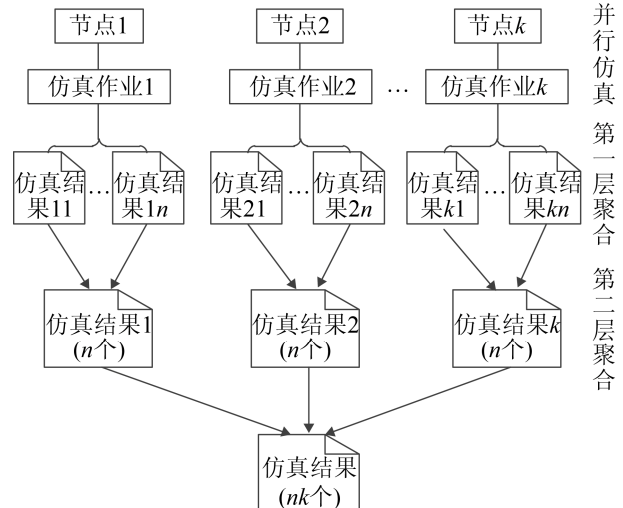


图 5 仿真结果聚合过程示意图

Fig. 5 Aggregation process of simulation results

从图 5 可以看出, 第一层结果聚合过程具有各节点相互独立的特点, 因此可以分成 k 个任务提交到高性能计算节点上进行并行数据采集来提高数据聚合效率。

在进行飞行器总体性能并行仿真时, 一般把需要聚合的仿真数据分为 3 类并通过数据聚合配置文件(见图 6)进行设置, 这 3 类数据包括统计类数据、时间历程数据和失稳点数据。其中统计类数据为对某些参数进行一定时间统计后得到的数据, 可以利用该数据获取多偏差遍历条件下的参数极值, 对于一个具体的仿真状态而言, 一般每个参数对应一个数值, 比如主动段最大飞行高度、燃料消耗量、全程最大飞行攻角等; 时间历程数据为按照固定的输出周期记录的某些参数随飞行时间变化的飞行过程数据, 主要用于绘制各参数随时间变化的包络曲线, 比如每隔 1 s 输出一当前飞行高度、速度、动压、过载等; 失稳点数据仅在仿真出现失稳时进行记录, 一般包括失稳点角速度、攻角、动压、高度、马赫数、舵偏角等。每个仿真状态的统计类数据和失稳点数据(如果存在)仅包含一行有效数据, 结果聚合时需要对所有仿真状态的该数据进行抽取并写入对应的结果文件中。时间历程数据为多行数据, 结果聚合时要将每个状态的该数据进行提取并合并到一个时间历程数据文件中。

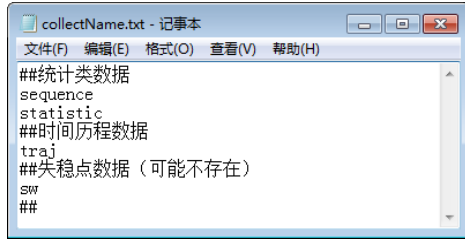


图 6 数据聚合配置文件示意图

Fig. 6 Diagram of data aggregation profile

试验结果聚合后产生的某统计类数据文件的基本格式如表 1 所示。

表 1 统计类数据文件的基本格式

Tab. 1 Basic format of statistical data files

仿真编号	时间/s	最大攻角/(°)	...	最大高度/m
1	294.2	30.95	...	51 213
2	295.7	28.73	...	49 854
...	...	...	...	...
MN	298.4	29.54	...	50 335

3 高性能仿真平台

为方便飞行器全包围高性能仿真试验的开展,在上述方法研究的基础上搭建了高性能仿真试验平台。平台采用“应用层+协同层+基础层”的三层架构(见图 7),仿真操作客户端位于应用层,其运行于 Windows 系统上,使用 VS2015+WPF+MVVM 开发;协同层为高性能计算机相关操作模块,这些模块基于 Python 3.4+LSF 2.0 开发,运行于高性能计算服务节点上,负责客户端与高性能计算系统的协同和交互,实现了任务解耦、实时监控、并发冲突控制和结果聚合等功能。客户端集成了 SSH.NET Client 开源库,通过 SSH 接口登录高性能计算机并使用 SSH 相关命令调用协同层相关模块完成并行仿真试验任务。

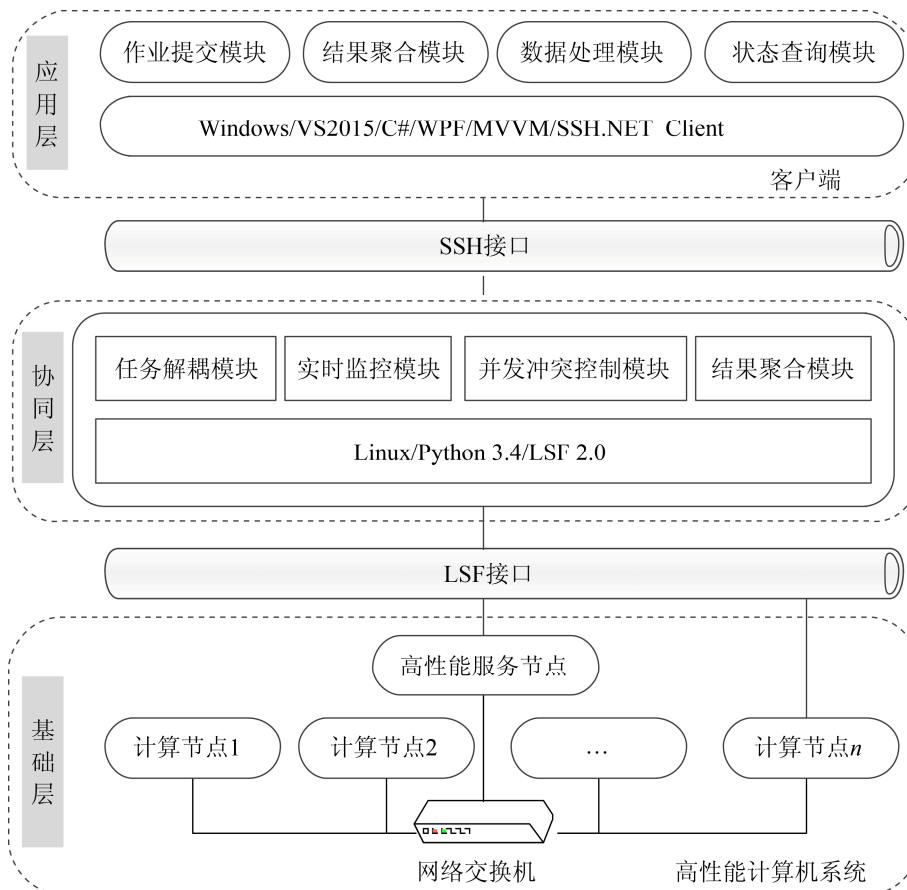


图 7 仿真试验平台总体架构

Fig. 7 Diagram of simulation platform

Windows 客户端软件分为作业提交、结果聚合、数据处理和状态查询共 4 个模块。作业提交模块主要完成四方面的工作：一是根据指定的任务名称创建仿真作业任务，二是上传仿真模型文件到高性能计算机的服务节点，三是对仿真模型文件进行重编译和仿真测试，四是根据仿真状态文件和拟并行节点数量对仿真任务进行均匀分割并分发到各计算节点上。结果聚合模块根据配置文件对各计算节点的仿真结果进行收集和两次聚合，并在聚合完成后将数据下载到指定位置。数据处理模块负责对聚合后的数据进行参数极值统计、时间历程包络曲线生成和失稳点数据分析。状态查询模块用于监控当前仿真任务执行状态，能够实时显示仿真进度信息。试验平台的作业提交和结果聚合模块用户界面如图 8、9 所示。



图 8 作业提交模块界面
Fig. 8 UI of submission module



图 9 数据聚合模块界面
Fig. 9 UI of data aggregation module

4 飞行器总体性能仿真应用

4.1 试验环境

使用研制的仿真试验平台，在某高性能并行集群系统上进行仿真测试，该集群每个计算结点包含 2 个 4 核 Intel Xeon E5540 CPU，详细规格如表 2 所示。总体性能仿真代码采用标准 C++ 开发，采用完全双精度浮点操作，编译器优化级别为三级 (-O3)。并行仿真程序运行时，进程与计算节点数量呈一一对应关系。

表 2 高性能系统详细规格
Tab. 2 Detailed specification of HPC

名称	规格
CPU	Intel Xeon E5540, 4 cores, 2.53 GHz
操作系统	Kylin server version 3.1
编译器	Intel ICC version 11.1
通信	MPICH2 version 1.3rc2

4.2 并行性能

为了验证相关方法的有效性，针对某偏差状态仿真应用示例分别进行串行仿真和并行仿真实验。图 10 列出了串行仿真和并行仿真运行时间的比较。单节点的运行时间为 80.64 s，16 节点的仿真时间为 5.95 s，加速比为 13.55。针对某飞行器进行并行仿真的运行时间和并行效率测试结果如图 11 所示，其中偏差状态个数为 10，按照偏差正负极限拉偏组合方式，共仿真计算 $2^{10}=1\,024$ 个状态。同样的仿真状态数目，64 节点的仿真时间为 18.78 s，而 512 节点的仿真时间为 2.81 s，并行效率可以达到 83.54%。

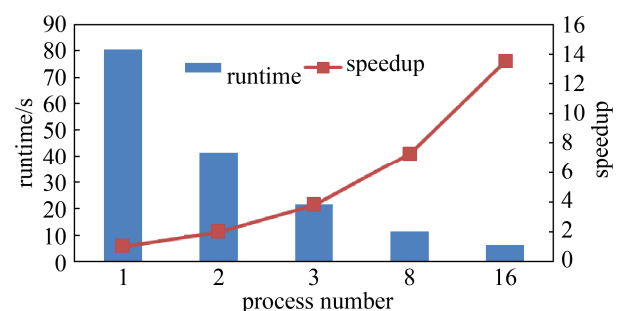


图 10 并行仿真的加速效果
Fig. 10 Acceleration effect of parallel simulation

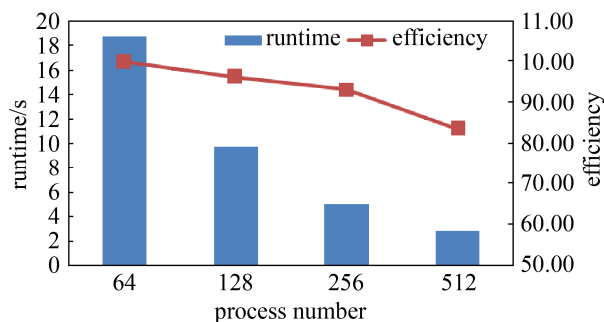
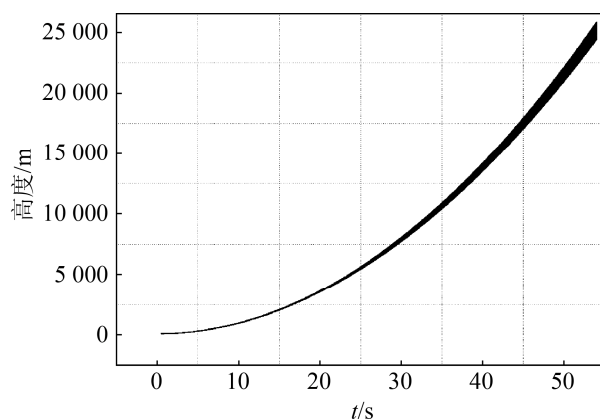


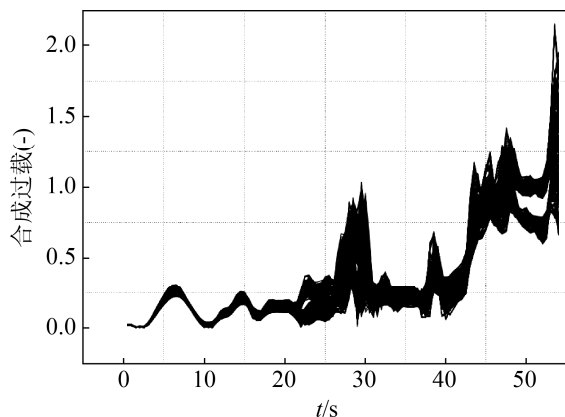
图 11 并行仿真的可扩展性
Fig. 11 Scalability of parallel simulation

4.3 仿真结果

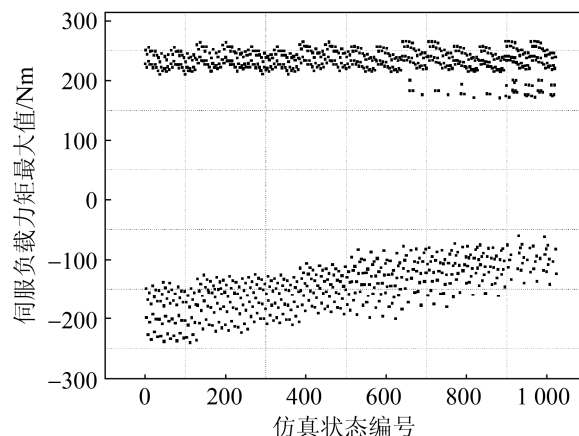
利用研制的试验平台对某飞行器开展的全包围高性能仿真试验结果进行处理, 得到高度和合成过载时间历程数据包围曲线以及伺服最大过载和最大法向力的统计数据如图 12 所示。通过这些曲线可以直观获取飞行包围并对性能参数进行评估, 极大提高了飞行器总体性能仿真验证效率。



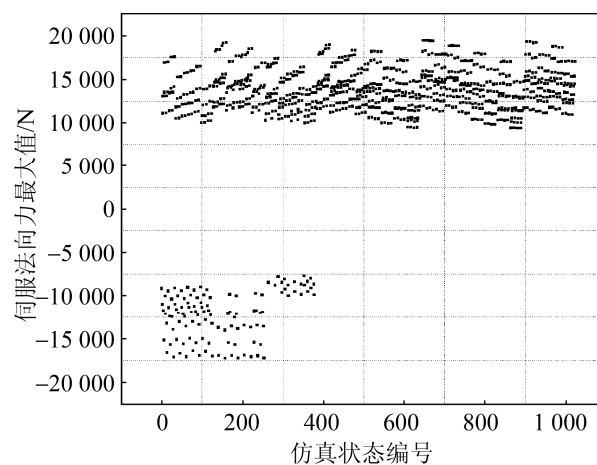
(a) 飞行高度时间历程数据的包围曲线



(b) 合成过载时间历程数据的包围曲线



(c) 最大伺服负载力矩统计数据



(d) 最大伺服法向力统计数据

图 12 仿真测试时部分参数曲线
Fig. 12 Partial parameter curves in simulation

5 结论

随着新一代航空航天飞行器的发展和对飞行器总体方案论证及设计要求的提升, 多轮次超大子样、海量状态的全程总体性能仿真试验已是有效且必要的数字化验证途径。本文提出的全包围飞行高性能仿真方法解决了传统仿真模式下飞行器性能评估仿真试验耗时长、覆盖状态少的问题, 通过设计高性能仿真体系架构, 使用任务解耦技术、主从模式实时监控技术、并发冲突控制技术和高效仿真试验结果聚合技术, 研制了总体性能并行仿真试验平台并实现了仿真任务的并行提交、任务监控、并发冲突控制和结果聚合, 极大提高了仿真效率。测试结果表明该方法具有很好的加速效果和可扩展

性,得到的试验结果能够直观、快速地对飞行器的总体性能进行评估,具有较好的实用价值。

本文提出基于超级并行计算机的大规模并行仿真试验方法,通过高性能计算技术与飞行器总体性能仿真试验技术的结合,在一定程度上改变了飞行器总体设计的验证模式,适应新一代飞行器的全包络飞行状态验证需求,从而促进复杂外形飞行器的研制效率和水平的提升。

参考文献:

- [1] 铁鸣, 于盈, 张星, 等. 基于 HPC 的多学科多物理场耦合虚拟飞行试验方法[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(9): 1733-1740.
Tie Ming, Yu Ying, Zhang Xing, et al. HPC-based Virtual Flight Test Method for Multidisciplinary Multiphysical Field Coupling[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(9): 1733-1740.
- [2] Gong C, Liu J, Chi L, et al. GPU Accelerated Simulations of 3D Deterministic Particle Transport Using Discrete Ordinates Method[J]. Journal of Computational Physics (S0021-9991), 2011, 230(15): 6010-6022.
- [3] Li Z, Jiang X, Wu J. Study on High Performance Parallel Algorithm for Spacecraft Re-entry Aerodynamics in the Whole of Flow Regimes Using Boltzman Model Equation[J]. Chinese Journal of Computers (S0254-4164), 2016, 39(9): 1801-1811.
- [4] Frezzotti A, Ghiroldi G, Gibelli L. Solving the Boltzmann equation on GPUs[J]. Computer Physics Communications (S0010-4655), 2011, 182(1): 2445-2453.
- [5] Brown P, Woods C, McIntosh S, et al. A Massively Multicore Parallelization of the Kohn-Sham Energy Gradients[J]. Journal of Computational Chemistry (S0192-8651), 2010, 31(10): 2008-2013.
- [6] 铁鸣, 吴旭生, 毕敬, 等. 高超声速飞行器总体性能虚拟飞行试验验证系统[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(9): 2004-2010.
Tie Ming, Wu Xusheng, Bi Jing, et al. Virtual Flight Test System for Overall Performance of Hypersonic Vehicles[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(9): 2004-2010.