

美国国防部计算研究和工程采办工具及环境计划分析

Program Review of U.S. Department of Defense's CREATE Program

■ 温泉 孙巍 / 中国航发研究院

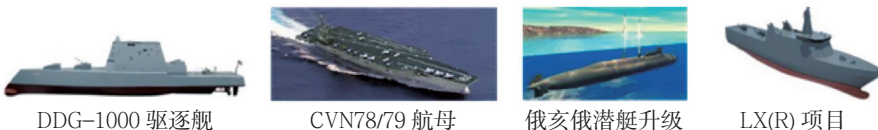
计算研究和工程采办工具及环境 (CREATE) 计划是一个由美国国防部采办部门主导的武器系统设计仿真软件研发项目。通过分析CREATE计划特色、模式以及后续规划,对科学制订和实施我国航空发动机工业软件研发计划,具有重要的借鉴意义。

航空发动机数值仿真是支撑航空发动机自主研发的重要手段,可大幅提高航空发动机的研发效率和质量,减少反复实物试验,缩短研制周期,降低研制成本。通过对美国国防部CREATE计划在航空、船舶等领域的仿真软件开发与应用进行分析总结,提出提升我国航空发动机工业软件仿真能力的战略措施,将有效加强仿真技术在发动机设计、试验、制造、装配和维修阶段的全生命周期中的推广应用,加速航空发动机研制由传统模式向基于建模和仿真的预测模式的转变。

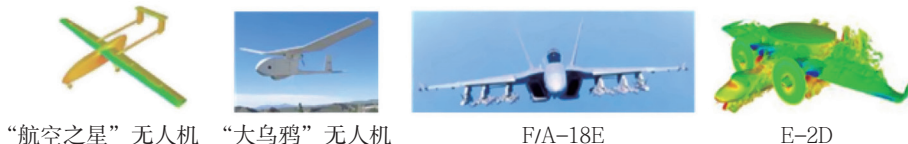
CREATE 计划核心内容

CREATE计划是美国国防部于2006年批准的一项军事系统建模与仿真多阶段行动计划,于2008年正式启动,并于2019年结束计划第一阶段。计划旨在为美国国防部采办委员会以及各军种采购部门开发和部署一套基于多物理的高性能武器系统设计仿真软件,帮助采办工程师独立评估供应商提供的交付物,为最终采购提供重要决策参考。

美国海军海洋系统司令部



美国海军航空系统司令部



美国陆军



美国空军全生命周期管理中心

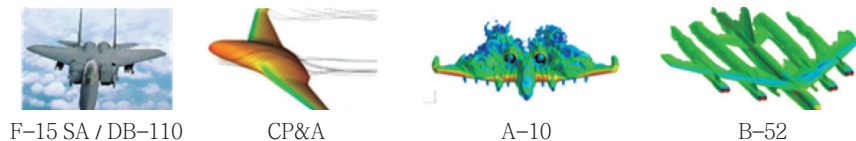


图1 使用CREATE评估陆军、海军和空军系统的代表性案例

CREATE计划的核心为发展和部署5套基于物理的高性能计算工程软件工具包,涉及飞行器、船舶、射频天线、地面车辆、网格和几何五大领域,共13个软件。这些软件分别为飞行器优化设计软件 (DaVinci)、固定翼飞行器仿真

软件 (Kestrel)、旋翼飞行器仿真软件 (Helios)、快速船舶设计软件 (RSDE)、冲击和损伤效应仿真软件 (NESM)、船舶水动力仿真软件 (NavyFOAM)、集成化的水动力学设计环境 (IHDE)、天线阵列电磁仿真软件 (SENTRI)、车辆系统战术机

动性模拟平台 (Mercury)、车辆战术机动性预测分析软件 (MAT)、地面车辆设计工具用户接口 (GVI)、地面车辆数据管理分析工具 (ES)、几何体和网格生成软件 (CAPSTONE)。这些软件均由美国国防部领导的团队开发, 产权归政府所有, 每个软件的设计寿命均为30年以上。采办工程师利用这些软件生成和分析飞行器、舰船、地面车辆以及嵌入在武器系统的射频天线的数字虚拟原型, 并准确预测其性能。软件部分评估结果如图1所示。

支撑CREATE计划的基础是目前不断增长的高性能计算能力。自第二次世界大战结束以来, 计算机运算能力从每秒1次浮点数水平增长到今天的 10^{16} 浮点运算 (Flops) / s峰值水平, 使得开发和在高性能计算集群上部署CREATE软件成为现实。CREATE软件能够涵盖所有已知的重要影响; 模拟一个全尺寸的整机系统; 在合理的时间内完成大量参数化设计评估; 采用精确的求解算法, 并进行充分的验证和校核。在今天的中型超级计算机上运行的CREATE软件可用于准确预测全尺寸军舰、飞行器或嵌入在武器平台上的一组射频天线的性能。随着计算机硬件性能的不提升, 以及软件求解算法的持续升级, CREATE软件的设计仿真能力也将得到持续提升。

CREATE 计划进度安排

CREATE计划启动之初就确立了以年为单位发布软件新版本, 以及以若干年为单位实现计划里程碑目标的原则, 进度安排如下。

- 2008年1月—2008年12月, 明确用户初始需求, 制订项目计划;

- 2009年1月—2011年12月 (版本1 ~ 版本3), 软件物理模块开发, 模块集成测试;

- 2012年1月—2015年12月 (版本4 ~ 版本7), 软件并行能力提升 (版本5实现了P级计算, 10^{15} Flops/s);

- 2016年1月—2019年12月 (版本8 ~ 版本11), 软件超大规模计算集群部署 (版本8实现了E级计算, 10^{18} Flops/s)。

CREATE 计划组织管理

CREATE计划中共组建了13个软件开发团队, 总计有50名政府雇员, 90名合同雇员, 其中70人拥有博士学位。项目开发团队受国防部采办工程委员会和团队所在机构共同管理。下面以船舶为例, 介绍CREATE计划组织管理架构及其优势。

CREATE船舶设计仿真软件的4个开发团队 (RSDE / NESM / Navy FOAM / IHDE) 均来自美国海军水面战中心卡德洛克分部, 接受国防部CREATE计划管理办公室和卡德洛克分部的双重领导。团队由在计算流体动力学、结构动力学、海军建造、计算机科学和编程等领域拥有丰富专业知识的物理学家、船舶设计建造专家、计算机专家和软件开发工程师组成。团队间存在业务交集, 每个团队的负责人兼具管理其他团队的代码贡献, 同时团队间既相互协作又相互监督。

由于卡德洛克分部本身负责海军舰船设计和设计工具的开发应用, 具有船舶流体力学、冲击损伤、海军建造等多个领域的专家团队, 这种组织管理模式的优势在于, 将团队设置在用户机构, 有利于快速组建开发团队, 且使开发的软件工具能够快速向

设计团队转移。代码开发团队领导和团队是用户机构的一部分, 受到用户组织的信任, 并对开发设计仿真工具和大部分设计分析负有责任。开发团队与设计团队关系紧密, 有利于将软件开发过程中形成的新知识、新技术快速转换成生产力。

CREATE 软件开发原则

CREATE计划在实施过程中始终遵循严格的软件开发原则, 总结为以下5点。第一, 单个软件开发团队由5 ~ 15名受政府领导的员工组成, 团队植根于用户机构, 由用户机构提出需求, 接受用户机构监督。第二, 具有纪律性且敏捷的软件开发过程监督, 在软件开发过程中始终强调代码质量, 对代码和注释编写进行标准化管理。第三, 具有支持性的软件开发环境, 包括高性能计算集群、带有代码库的中央服务器、高性能计算机工作站、自动代码测试系统等。第四, 每个软件以年为单位发布新版本, 软件更新过程响应用户不断变化的需求, 持续拓展软件求解功能、计算精度、易用性以及大规模并行能力, 软件发布前须经过由用户机构开展的测试, 测试应遵循严格的验证 (Verification) 和校核 (Validation) 过程。第五, 丰富的文档记录撰写, 包括算法理论手册、用户使用手册、程序开发手册、功能模块更新文档、算例验证校核手册等。

基于上述5点开发原则, CREATE计划管理办公室和团队所在机构在项目实施之初就严格明确每款软件各个版本的交付时间和交付功能, 并对每个版本的开发流程和模式实行标准化流程管理。CREATE软件开发遵

循统一流程, 代码开发人员在完成各自编写的代码部分的测试后, 将代码提交至代码管理仓库, 如SVN, Git等, 由仓库对提交的代码进行整合和更新。整合更新完成后, 仓库将代码提交至自动代码测试系统(ATS), 由ATS完成代码编译和算例测试, 该过程通常称为团队内部测试。测试完成后, 代码开发人员根据测试结果, 完成软件相关技术文档的撰写, 并决定继续调试代码还是将代码封装打包。若测试通过, 开发人员会将代码打包成出库形成版, 并提供给用户进行测试。用户会将测试结果及时向CREATE计划负责人反馈, 由负责人决定是否将软件发布给最终用户。

值得注意的是, CREATE计划采用ATS来对代码进行测试。这种做法的优势在于, 由ATS替代代码测试人员进行算例测试, 极大地降低了人为出错机率, 节约了人力成本, 提高了软件测试效率。代码开发人员只需对测试结果进行分析总结, 从而将其从繁重的重复性劳动中解脱出来, 使其能更专注于模型算法开发和代码编写工作。据公开披露的ATS信息, ATS每晚能完成3500个单元级算例, 250个组件级算例, 以及25个系统级算例的测试工作; ATS每两周运行一次, 这意味着代码每两周整合更新一次; ATS每次运行需测试125个各类算例。ATS系统值得我国工业软件行业的持续关注。

CREATE计划完成情况及效果

截至CREATE计划实施的最后一年(2019年), 计划中规划的13款

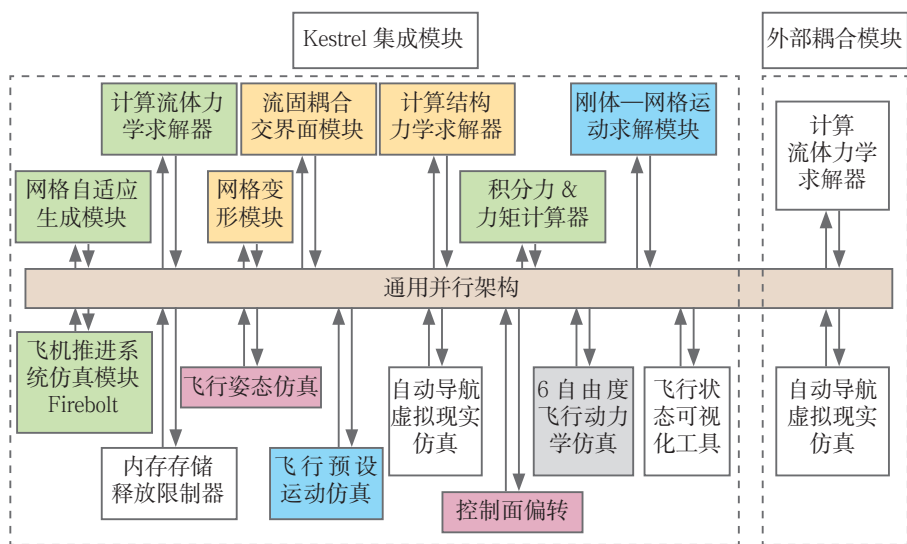


图2 Kestrel 版本7软件架构及组成模块

软件均已开发部署完成, 所有软件均具备了计划实施之初所承诺的功能。这些软件已被美国国防部用于商业用途, 并被用于提高国防部测试能力, 评估企业的效率和产品性能。下面以CREATE固定翼飞行器系统仿真软件“红隼”(Kestrel)为例, 阐述CREATE计划形成的成果、关键技术和能力。

Kestrel 软件成果

经过CREATE计划3个阶段(2008—2015)的发展, Kestrel软件成为了以通用并行框架为基础架构, 耦合网格生成、气动、结构、飞机推进和飞行控制等专业功能模块的高保真多物理场仿真软件。Kestrel软件架构及组成模块如图2所示。

在统一的基于Python的通用软件架构上, Kestrel版本7集成了计算流体动力学模块、结构动力学模块、推进系统仿真模块和飞行控制系统模拟模块, 并为外部耦合程序模块提供了通用数据接口。模块可用Fortran 90/95/2003和C语言编译, 且各模块所有的应用程序接口和数据

结构在Kestrel软件中保持一致。这为代码开发人员开发和维护Kestrel软件提供了极大的灵活性和便利性, 开发人员可以使用上述任一编程语言进行模块程序开发和测试, 各模块间既相对独立, 又可快捷地实现模块间数据传递和耦合求解。

Kestrel 软件的能力和特色技术

作为一款军用飞行器系统仿真软件, Kestrel软件具备飞行器外流/内流/内外流一体多物理场仿真能力。Kestrel软件应用能力展示举例如图3所示。

图3中的F110-100发动机整体作为一个控制体, 为飞机进气道和喷管提供边界条件, 从而实现了飞发一体化仿真。但这里并未包括对发动机内各个部件的仿真, 而是将发动机整机作为一个黑盒模型, 为飞机仿真提供流场边界条件。

Kestrel软件已具备对发动机内单部件以及飞机前机体、进气道、风扇、外涵道耦合的非定常雷诺平均(URANS)和混合雷诺平均-大涡模拟(Hybrid RANS-LES)仿真

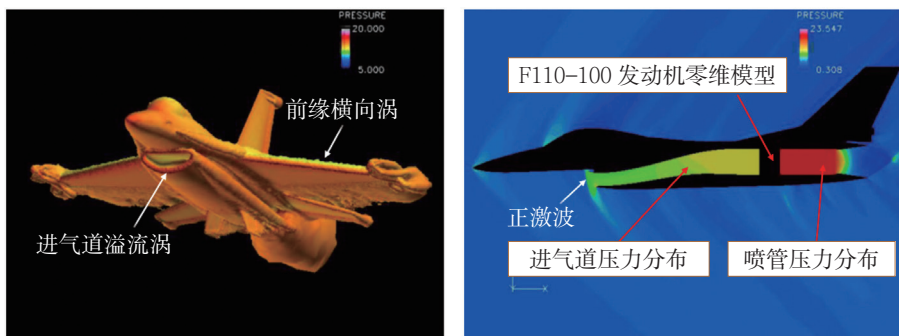


图3 F-16战斗机和F110-100发动机耦合一体气动仿真

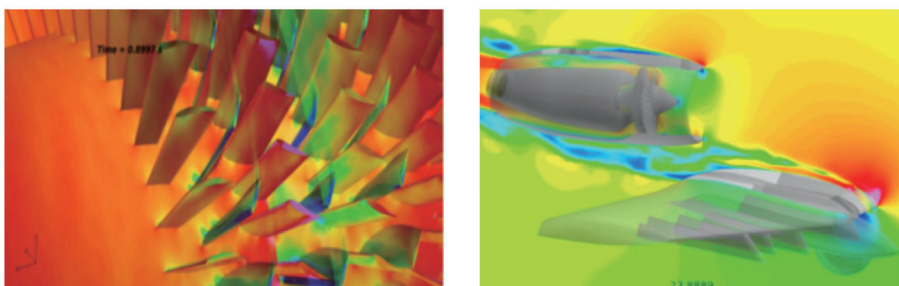


图4 发动机单部件、飞发多部件耦合仿真（来源：阿诺德工程发展中心）

能力，仿真结果如图4所示。然而Kestrel软件尚未具备对发动机整机多部件耦合的全三维、非定常、高精度数值仿真能力。作为CREATE计划的后续，美国国防部于2021年8月正式启动了燃气轮机发动机整机大规模集成仿真研究和开发计划。

此外，为确保美国军用仿真能力的全球领先地位，美国军方为Kestrel软件开发了多套网格耦合生成和求解技术，以实现整机近场和远场的自适应网格划分和高阶精度数值模拟。图5表明Kestrel软件已具备了近场和远场多套网格耦合生成和求解能力。近体区域采用非结构网格划分，离体区域采用自适应笛卡尔网格，两套网格间耦合连接和数据传递采用快速重叠网格生成技术和高阶精度流场数据插值技术，并结合适用于笛卡尔网格的高阶精度求解器完成整机仿真。近体离体

两套网格耦合生成和求解技术是网格生成和求解技术的集大成者，非常尖端，实现起来非常困难。目前，ANSYS公司商业软件CFX/Fluent、英国罗罗公司Hydra、德国航空航天中心TAU/Trace等同领域知名软件均无

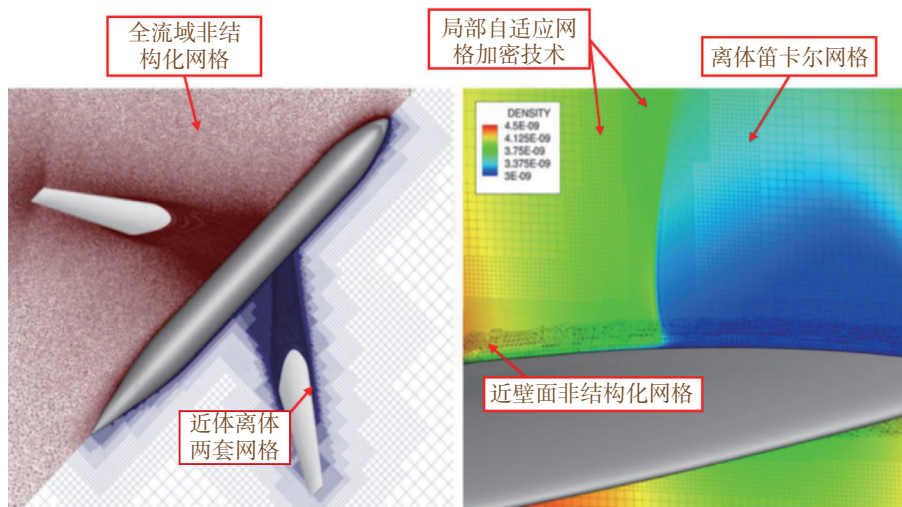


图5 NASA民机通用研究模型整机外场仿真

法实现。

启示

通过对CREATE计划的持续跟踪研究，总结了我国在发展工业软件过程中值得借鉴的几点启示。

清晰可行的项目进度表

通过分析CREATE计划，发现计划在发起之初就已形成了明确的以年为单位的软件功能实现目标，和以若干年为单位的软件技术成熟度提升目标，项目总体周期一般为10年左右。项目结束之时，各个学科软件已经部署到用户机构，工程化应用已经成熟。图6为Kestrel软件推进系统仿真模块（Firebolt）的开发路线图。

我国应加强工业软件发展顶层设计，制定符合我国工业软件基础实际的发展路线图，既要明确最终发展愿景，更要细化阶段性要实现的目标。

符合软件工程实践规律的项目管理模式

CREATE计划的成功实施，得

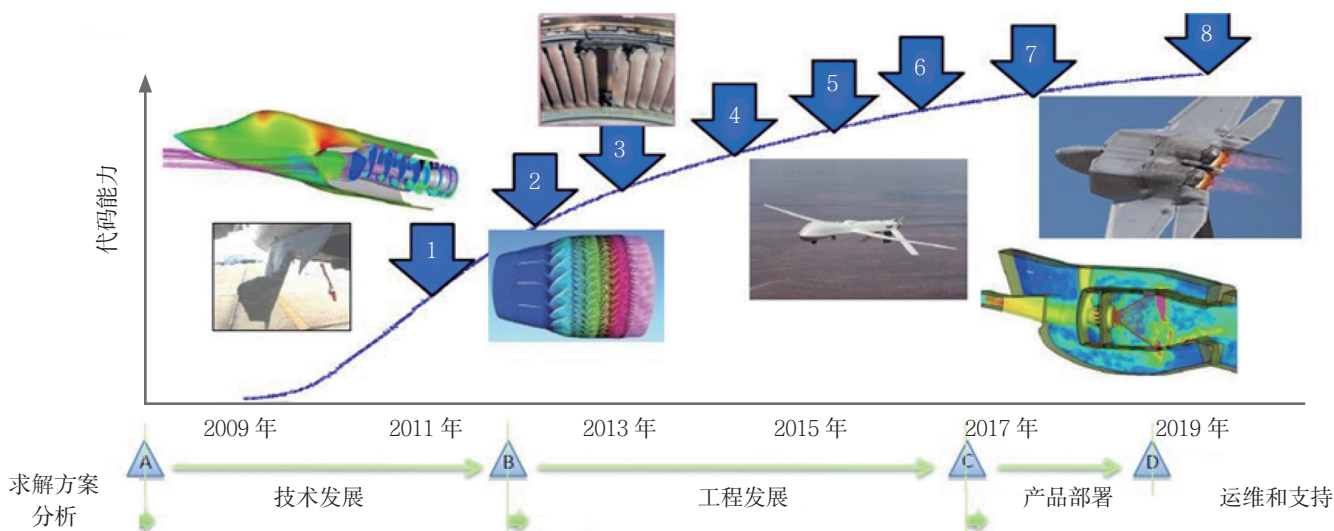


图6 Firebolt模块开发技术路线图

益于双重管理体制下各个部门明确的职责分工：CREATE计划管理办公室行使资金管理、条件建设、代码管理、过程管理、用户沟通和产品验收职责；CREATE软件开发团队所在机构行使团队组建、人员管理、技术研发、成果转化、代码标准化、软件测试、文档编制和进度考核职责。各个软件开发团队负责人既负责对软件开发团队的技术管理和监督，也作为开发团队和CREATE计划管理办公室沟通的桥梁。

我国在加强工业仿真软件顶层规划的同时，应着力加强项目行政主管部门对项目承研单位的技术管理与监督。为保证项目成功，行政主管部门应配齐配强熟悉计算工程软件开发与管理的专业人才，既可以作为行政主管部门与承研单位的技术沟通桥梁，又可以为行政主管部门提供理性的、专业化的决策建议。

理论联系实际的人才整合模式

CREATE计划的实施，以强大的计算工程软件人才支撑为保障。软件开发团队由物理学家、工程专家、计算机专家以及软件开发工程

师组成。配备强调了理论分析与工程实践的结合，并在理论知识与工程应用之间搭建了物理建模和代码实现的桥梁，实现了理论成果的快速工程转化。

为加快我国工业数字化转型进程，应采取集中优势兵力打歼灭战的方式方法，在各学科领域组建具有一定组织保障和技术保障的软件开发实践团队。同时，我国高校必须注重加强学生的专业理论基础、数理基础，强调学生对数学物理方法的熟练掌握和运用，以及培养学生的物理建模和代码开发能力。

接力式的技术积累

CREATE计划的成功实施，源于前期雄厚的技术储备，以及项目开展过程中精准的风险管控。CREATE软件技术迭代中的Kestrel版本9是基于项目发起之前的初始Kestrel版本，以及项目对Kestrel以年为单位的更新迭代而来，期间添加了更多的客户定制化功能。下一阶段，美国国防部将基于Kestrel版本9，整合高超声速气动仿真和发展发动机整机仿真能力。

为快速弥补与欧美国家在计算工程软件理论基础、物理建模、代码实现和工程应用等方面的差距，国家有关部门应充分重视、调研西方先进工程软件目前具备的技术能力以及开发现状。通过吸取西方同类工程软件开发的经验教训，加速提升我国自主开发的工程软件技术成熟度，借力加力，完成该领域对欧美国家从望尘莫及到望其项背的跨越，并最终实现赶超的战略目标。

结束语

航空发动机工业仿真软件研发是一项极其艰难、复杂和漫长的系统工程，需要政府、军方、工业部门、国家研究机构以及高等院校通力紧密协作才有可能取得成功。通过学习借鉴CREATE军用仿真软件研发计划，对我国优化同类软件研发计划的组织管理和技术管理，加快相关软件开发验证迭代、工程应用推广、后续功能提升，具有重要意义。

航空动力

（温泉，中国航发研究院党委书记，研究员，主要从事航空发动机总体和气动技术研究）