

软件——拖延F-35系统升级的关键问题

李亮

美国国防部负责采购、技术和后勤的前副部长，现任美国空军部长弗兰克·肯德尔在2014年评论F-35项目时曾经说过：“我担心的是软件，作战软件。我还担心自主保障信息系统（ALIS），这也是一个软件，基本功能是为F-35系统提供运行支持。”短短几句话，道出了美国国防部当时对F-35项目的关注焦点——软件系统。

从那时起到现在，在美国政府发布F-35项目进展报告和媒体的报道中，重点关注也是F-35项目中自动化能力相关的软件问题。给人的感觉是，F-35项目的软件问题一直没有很好地解决。

F-35联合攻击机项目仍未完成初始作战试验鉴定（IoT&E）

F-35联合攻击机项目是美国国防部历史上最大的装备系统项目。该项目2001年10月启动，进入系统开发与演示（SDD）阶段。按照美国国防部2019年12月的最新计划，美国空军、海军陆战队和海军共采购2456架F-35战斗机，总成本约为3978亿美元。

2021年美国国防部F-35联合项目办公室（JPO）的数据，按计划中的66年寿命周期估算，F-35机队的运行和维护成本约为1.3万亿美元。

F-35起初被美国视作价格相对较便宜的五代机，按照美国空军和海军需求启动，后来将美国海军陆战队的的需求合并，以避免三种独立战术飞机的开发、采购、运行和维护带来的高成本。

F-35项目中，有三个版本的飞机：F-35A：传统起降版本（CTOL），主要针对美国空军的需求，美国空军计划采购1763架F-35A。

F-35B：短距起飞和垂直降落版本（STOVL），主要针对美国海军陆战队的的需求。美国海军陆战队计划采购353架F-35B。

F-35C：航母版本（CV），主要针对美国海军的需求，美国海军计划采购273架F-35C，海军陆战队计划采购67架F-35C。

虽然到2021年底，三个版本的F-35都已经在美国军队中形成了初始作战能力（IOC），并且已经交付了753架飞机——接近全部采购计划的三分之一——但项目本身仍处于低速生产状态（low-rate production）。这是因为，该项目尚未完成初始作战试验鉴定（IoT&E），没有达到全速生产（full-rate production）的要求。

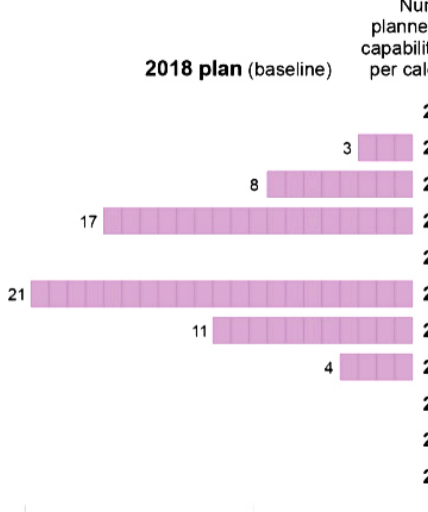
美国审计署已经连续多年表达了对这一问题的担忧：“自项目开始以来，项目办公室已数次推迟全速生产决定。在这一点上，预计全速生产决定将比最初计划的时间晚10年。”“由于未能按时完成F-35的作战试验鉴定，国防部推迟了F-35全速生产决定，但仍以相对较高的频率购买飞机——每年高达152架，这个数字高于拟定全速生产后的部分计划生产率。根据我们过去的经验，在完成测试、解决缺陷、达到全速率生产里程碑并满足相关要求的采购大量战斗机，会增加额外的改装成本和风险。”

F-35项目现代化升级雄心勃勃

F-35项目的研发按照阶段、批型（Block）的方式进行管理，经过17年之久的系统开发和演示（SDD）阶段，2018年开始，项目办公室宣布进入持续能力开发和交付（C2D2）阶段。在该阶段，首先启动的就是Block 4批型现代化升级。

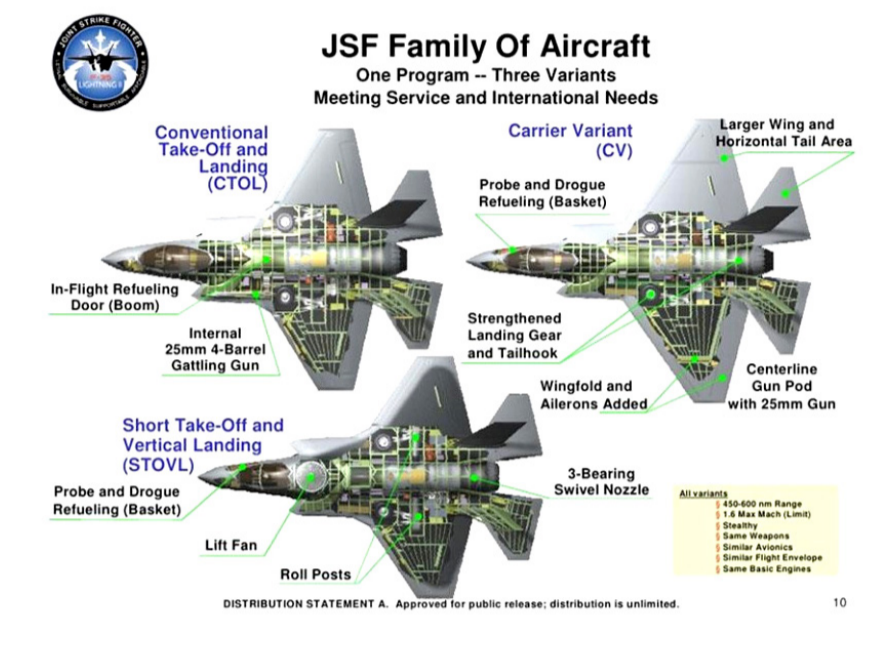
按计划，Block 4批型现代化升级会为F-35战斗机提升对地/水面打击能力，包括增加核打击能力，被格外关注。

在2019年的报道中，Block 4升级包括53项能力提升：



按照2021年年底的计划，Block 4批型较最早计划新增加了25个能力。

- 11项雷达和光学系统性能增强；
- 8项后勤和支持措施变革；
- 7项人机交互和网络系统改进；
- 7项驾驶舱和导航系统升级；
- 集成7种新武器系统，包括SDB2小直径炸弹、MBDA先进近距空空导弹（ASRAAM）和“流星”超视距空空导弹（BVRAAM）、联合攻击导弹（JSM）等。



DISTRIBUTION STATEMENT A. Approved for public release; distribution is unlimited.

F-35战斗机的三种基本型及主要区别说明。

除此之外，按照持续能力开发和交付（C2D2）的理念，还将持续增加和调整更多的能力。根据2022年福布斯的报道，“最新计划的第4批型（Block 4）能力升级，涉及70项能力提升，包括14种新武器。”这意味着又增加了17项能力和7种武器。最近几年的媒体报道还涉及到了ASO-239电子战系统升级、自动地面防撞系统（AGCAS）、视频数据链路（VDL）、全景驾驶舱显示单元（PCD-EU）、数据处理能力提升25倍的新处理机、转向开放式架构等等。最近更有项目办公室推进有人机-无人机编队能力相关工作的报道。

在核打击能力方面，由F-35项目办公室牵头的核常能力兼备飞机（DCA）团队在2021年已经完成了核武器认证的设计认证部分（核能力认证包括核武器设计认证和核武器运行认证）。预计全部认证将于2023年完成，认证完成后部分F-35A战斗机可以实现携带B61-12型战术核武器执行任务的能力。

在Block 4批型能力升级中，再次强调了机载计算机软硬件升级。2022年，F-35项目的Block 4升级已经执行到第4年。正在进行的升级工作包括TR-3（Technology Refresh-3）的硬件条件升级，以及基于TR-2和TR-3不同硬件的两个版本软件的升级。

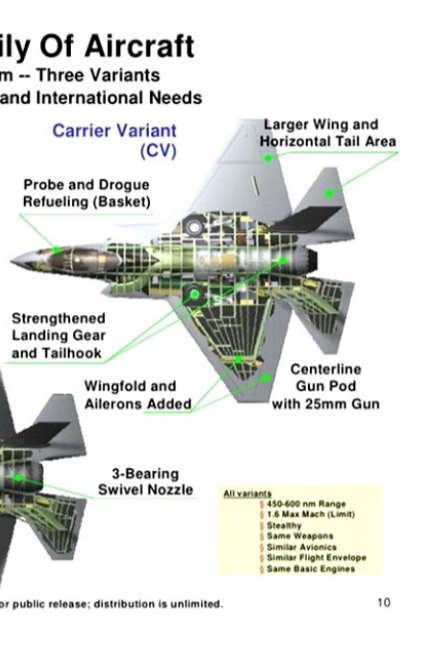
Block 4升级中的软硬件研发面临多重问题

1、整体进度较最初计划延长3年
从2019年开始的Block 4升级，每年都面临项目成本增加和计划延期问题。2021年间，由于关键硬件升级、软件开发测试、质量等原因，成本持续上涨。Block 4升级开发成本估算增加到151.4亿美元，比2020年144亿美元的估算增加了7.41亿美元，比2018年最早计划高出46亿美元（部分原因是将之前的部分工作纳入Block 4的成本）。2021年项目办公室制定的Block 4的计划较2018年的最初计划延长了3年，至2029财年。

2、硬件条件实施尚未完成
机载计算机软硬件条件升级，被命名为TR-3（Technology Refresh-3）。这是一套硬件和软件平台技术，将为飞机提供更强处理能力（据称可提升为25倍）、全景驾驶舱显示单元和增

加的内存。因为Block 4软件中的新功能无法在当前的TR-2环境下运行，项目办公室认为TR-3是未来Block 4功能的关键要素，预计将于2023年开始交付。

在2021年的评估中，TR-3的研发成本增加了3.3亿美元，据说这是因为其研发比最初预期的更复杂。按计划，TR-3升级计划将于2023年夏季初次交付。据项目办公室的说法，该项工作中仍然存在相应的软硬件风险，



DISTRIBUTION STATEMENT A. Approved for public release; distribution is unlimited.

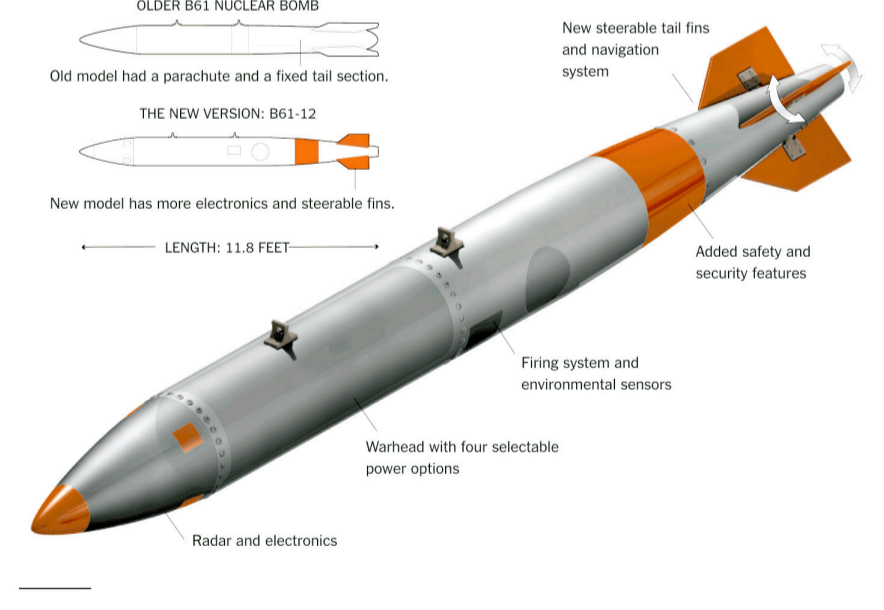
Block 4升级中的主要区别说明。

TR-3研发的任何延迟，都可能导致Block 4任务系统能力的相应延迟。

3、任务系统软件问题更多

根据美国国防部的总结，2021年度Block 4升级过程中功能优先级频繁调整，系统在部署到作战部队后发现了关键缺陷，反而边缘化了重要的作战测试和数据分析工作。软件的开发测试经常被提前中断，围绕基本系统开展的工作不充分，系统的作战测试与向部队交付同时执行。项目计划利用洛马公司实验室和模拟环境中的测试来减少迭代过程中的飞行测试，但由于实验室等测试环境限制，该计划至今仍未成功执行。

具体的软件开发过程，按照持续能力开发和交付（C2D2）阶段的要求，以敏捷开发模式为基础执行。按照项目管理办公室的计划，洛马公司应在生产交付任务系统软件的过程中，按4次增量开发（Increment）流程依次开发、测试和改进软件，并达到每6个月交付一次软件升级的目标。然而实际情况是，持续的软件质量问题带来了更多的工作，并持续拖延计划功能的测试和交付。



Source: Federation of American Scientists. By The New York Times

B61核炸弹说明图，F-35A将配备最新型的B61-12。

（1）敏捷开发模式的引入带来的需求变化。这是敏捷开发模式的一个特点，以用户需求为中心，允许需求变化，周期性调整计划优先级。根据项目办公室官员的说法，Block 4升级总体延迟有功能优先级调整的原因，按照2021年年底的计划，共增加了25个能力。

（2）持续的软件质量问题。F-35项目软件质量问题早已存在，在Block 2B、Block 3i、Block 3F等已经发布和部署的软件中，都曾暴露出严重的软件质量问题，如“每4小时必须关机重启以保证软件稳定”。根据美国媒体报道，在Block 4的软件升级中，“2020年的单元测试和现场测试发现了软件需要修改的重大运行缺陷。”该项目“继续向已部署部队提供不成熟、有缺陷和未充分测试的任务系统软件”。

根据2021年美国审计署的报告，“F-35项目仍有845处未解决的缺陷，其中6处归类为I类（或设计缺陷严重到可能导致死亡、重伤或严重职业病；或可能对武器系统造成损失或重大损坏；或严重限制使用单位的战备能力；

或导致生产线停工”

（3）敏捷开发计划未能有效执行。在启动持续能力开发和交付（C2D2）阶段的计划时，项目承诺以每6个月周期增量的方式提供软件更新。由于工程师和测试团队无法跟上时间表，该计划很快就崩溃了。根据美国国防部的报告，项目办公室已经放弃了6个月的更新计划，现在按年进行定期更新。

（4）两个版本软件的共存和过度。虽然项目已经从SDD阶段转到C2D2阶段，但在实际的软硬件中，并不像数学的从3到4一样明确。在Block 4升级中，需要同时支持TR-2硬件和TR-3硬件，软件也与此对应，存在Block 4之30系列和Block 4之40系列2个版本的软件。Block 4的30系列更多是在支持TR-2的Block 3F/3FR6软件上修补。这就需要项目团队同时开发两个版本的软件，并存在2个版本的软硬件升级过渡的复杂问题。

自主保障信息系统（ALIS）开发问题重重

1、启动早，设计先进而复杂
“自主保障信息系统”即ALIS系统，是持续保障F-35飞机及其任务执行的关键核心，是一个可支持作战、任务规划、供应链管理、维护和其它流程的复杂系统。尽管这个系统从2002年，也就是F-35项目启动后的第二年就开始建设。但其早期就规划了包括预测性维护、作战支持在内的先进而复杂功能。据称，这套价值167亿美元的ALIS系统应该能够使用预测性分析功能来开展检测；当系统发现问题时，将自动订购所需的替换零件，然后通过供应链进行跟踪；零件到达后，系统将指导维护人员按步骤修复问题。根据洛马公司的说法，ALIS系统“将来自多个来源的数据集成转化为可操作的信息，让飞行员、维护人员和指挥人员能够作出积极决定，以保持飞机的作战能力。”

2、研发过程问题很多

然而，从该系统开发的历史来看，问题重重。虽然ALIS系统从2002年就开始开发，然而，其第一个主要版本直到7年后的2009年10月才发布。美国国防部原计划在2010年完成第一个具备初步功能ALIS系统的测试，然而，这个里程碑在2018年9月才完成，比原计划晚了近8年。

是跳跃式的、阶段式的还是渐进式的。这个问题又牵扯到上面提到的云托管、知识产权和数据权利、二个软件版本的过渡，以及国际合作等一系列问题。这种纠结导致ODIN的开发陷入“停滞”。

联合仿真环境建设延期是影响F-35项目整体进度的关键问题

1、联合仿真环境作用很大
联合仿真环境是一套高保真的模拟环境，可以理解为测试高性能战斗机的元宇宙。这个模拟环境的系统中能够运行F-35高保真仿真模型（F-35 In-A-Box）、任务系统软件、以及其他武器系统、威胁系统、环境效应的软件模型，提供模拟复杂场景的虚拟环境，用于仿真、测试和训练。项目办公室任务联合仿真环境非常重要，因为除了与对手实际战斗外，只有在仿真环境中才能够测试F-35面对的密集、现代的地面和中威胁的能力。

必须保证模拟的真实性，模拟测试才能有效地显示F-35在战斗中的表现。设计人员通过在F-35实际飞行测试中收集的数据来验证模型。每架测试飞机都配备了记录机载任务系统数据的仪器，收集检测到雷达信号或其他威胁时的反馈数据。软件工程师对模拟进行编程，以准确反映F-35的任务系统对真实刺激的反应。

3、系统改进障碍重重

从2017年开始，项目办公室、美国空军和海军、洛马公司分别就该系统的问题启动了独立的修复改进项目。他们分别是项目办公室推动的“ALIS Next”，侧重于利用现代化软硬件技术重新开发；美国空军和海军联合开展的“Mad Hatter”，侧重于敏捷开发模式和基于商业云的全新设计；洛马公司自筹经费实施的“内部ALIS投资”，兼顾原方案实现基于商业云的更新。

2020年美国政府问责办公室发布了一个针对ALIS系统问题的报告，总结了改善ALIS系统的主要障碍，包括：

（1）因为采取了多重修复改进措施，导致美国国防部对ALIS系统的功能评估不全面，其功能存在不确定性。

（2）尚未决定ALIS的改进设计将怎样利用云托管，而不是中队级的现场服务器。

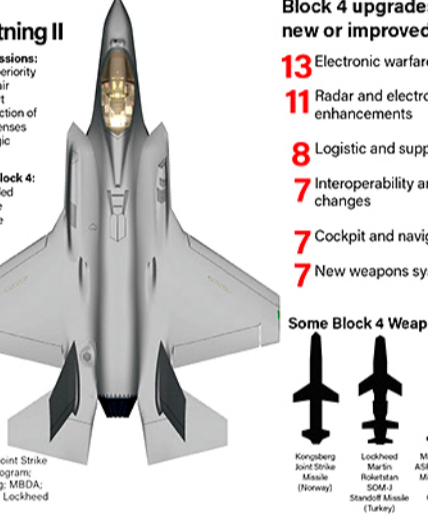
（3）因为组织、文化、采购流程、技术方法等原因，未能确定敏捷开发模式的可行程度。

（4）尚未确定美国国防部和主承包商洛马公司在未来ALIS开发和管理中的权利。目前洛马公司占有相当的软件知识产权和数据权利。

（5）在ALIS系统的改进方案中，没有尽早建立经常与用户交流反馈的模式。

4、目前进展仍然缓慢

据报道，因为启动较早，ALIS的一些问题源于其基于20世纪90年代的软硬件体系结构。在总结了2017年以来的三次修复改进项目后，美国国防部没有采纳任何一个项目作为ALIS的后续。而是在2020年提出从ALIS过渡到“运行数据集成网络”（ODIN）系统的新方案。据称ODIN的关键是定义新的数据架构，修复ALIS中的网络安全缺陷，并确保硬件和软件解决方案从一开始就考虑网络安全问题，并最终能够利用现代安全编程架构，与TR-3硬件协作。然而在之后的两年推进所谓A2O（从ALIS过渡到ODIN）的过程中，项目办公室又一直纠结于一个新的问题：ALIS和ODIN的过渡



F-35的基本特点及Block 4批型升级内容。

Block 4 upgrades include new or improved capabilities: 13 Electronic warfare updates, 11 Radar and electro-optical system enhancements, 8 Logistic and support changes, 7 Interoperability and networking changes, 7 Cockpit and navigation upgrades, 7 New weapons systems.

Some Block 4 Weapons Upgrades: Kongsuk Joint Air-to-Air Missile (Kongsuk), Lockheed Martin AIM-9X Block II, MBDA Meteor, MBDA Meteor, Raytheon AIM-120C-9, Raytheon AIM-120C-9.

联合仿真环境建设延期是影响F-35项目整体进度的关键问题

1、联合仿真环境作用很大
联合仿真环境是一套高保真的模拟环境，可以理解为测试高性能战斗机的元宇宙。这个模拟环境的系统中能够运行F-35高保真仿真模型（F-35 In-A-Box）、任务系统软件、以及其他武器系统、威胁系统、环境效应的软件模型，提供模拟复杂场景的虚拟环境，用于仿真、测试和训练。项目办公室任务联合仿真环境非常重要，因为除了与对手实际战斗外，只有在仿真环境中才能够测试F-35面对的密集、现代的地面和中威胁的能力。

必须保证模拟的真实性，模拟测试才能有效地显示F-35在战斗中的表现。设计人员通过在F-35实际飞行测试中收集的数据来验证模型。每架测试飞机都配备了记录机载任务系统数据的仪器，收集检测到雷达信号或其他威胁时的反馈数据。软件工程师对模拟进行编程，以准确反映F-35的任务系统对真实刺激的反应。

2、F-35项目在近几年近乎停滞的主要原因，是联合仿真环境（JSE）建设的延期

初始作战试验鉴定（IoT&E）的目的是确定作战效能、适用性和生存能力。F-35的初始作战试验鉴定计划中，要求飞行员在模拟器中“飞行”64

个测试场景。这些测试包括11次防御性防空任务（DCA），以测试F-35击败攻击友军或设施的敌机的能力，22次巡航导弹防御任务（CMD），以及31次穿透敌方领空以击落敌机/摧毁地面目标/压制敌方防空（OCA/AL/DEAD）的组合任务。目前，这些测试还没有完成。

因为联合仿真环境项目在模拟器开发方面存在的技术挑战，导致延迟。这些延迟又导致初始作战试验鉴定要求的一系列测试无法进行，初始作战试验鉴定无法推进，继而导致了全速生产里程碑无法达成。

3、联合仿真环境建设进度已多次延期

根据2022年美国国防部的报告，自2015年以来，联合仿真环境建设经历了多次延误。当时项目办公室将模拟器的开发管理任务从之前洛马公司的VSim（一种验证模拟环境）团队，转移到位于马里兰州帕特肯特海军航空站的政府团队，由项目办公室和海军航空系统联合推进。这项任务需要构建复杂的硬件和众多软件模型，并集成洛马公司提供的F-35高保真仿真模型（F-35 In-A-Box）和任务系统软件。项目办公室和海军航空系统团队低估了集成和保真这种复杂模拟的难度。在最初于2015年由洛马公司移交政府团队时，项目办公室预计联合仿真环境将于2017年完成，但在接下来的六年中，进度几乎逐年推迟。

据美国媒体报道，联合仿真环境的基础设施建设几年前就完成了。现在的长时间延迟是因为设计人员无法完成仿真软件。

根据美国媒体报道和美国审计署分析，造成这种困难的原因主要有两个：

（1）仿真环境需要整合F-35飞机和传感器数据，而承包商洛马公司声称这些数据是其自己的知识产权。这一问题在2019年承包商提供必要数据后才得到解决。

（2）仿真环境的建设需要完成模拟器的开发、验证、确认、认证工作，任务复杂超出预期。

2021年5月，由项目办公室组织，约翰·霍普金斯大学应用物理实验室、卡内基梅隆大学软件工程研究所和佐治亚理工学院完成了一项独立技术评估。评估认为，联合仿真环境项目需要额外的财政资源和人力资源，以及所有相关团队的大力支持，才能达到初始作战试验鉴定的要求。

据报道，截至2021年12月，仍需要进行大量工作来完成开发、确认模型和验证模拟，才能开展项目测试。联合仿真环境还有54个模拟器缺陷，其中32个缺陷已经确认，在开始使用仿真环境进行模拟飞行测试之前，必须进行修复和验证。

尽管美国F-35项目研发中暴露了很多问题，也有很多先进之处

1、创新的设计思路

以ALIS系统为例，虽然在2002年就启动了项目建设，但在设计方案中就有了预测性维护、自动化保障、飞行任务规划等先进的理念和设计。当前的Block 4现代化升级中也在持续性地引入开放系统架构、敏捷开发模式、有人机-无人机编队等新思路新想法，并付诸实施。

2、先进的数字模型/数字孪生技术应用

无论在哪Block 4任务系统的态势感知功能中，在ALIS的预测性维修功能中，或者在联合仿真环境的模型中，都必须嵌入或装备或部件的数字模型。2018年6月美国国防部发布数字工程战略，在F-35项目的任务系统、维护系统、仿真系统中的相关技术研究和应用，是美军大力推进数字工程的重要实践。

3、强调敏捷开发模式和开放架构

通过敏捷开发模式，可以持续性的交付新能力，非常适合解决“装备型号研究周期长，软件技术更新换代快”的矛盾问题。虽然这项技术在中不仅仅是方法，更是文化、管理和哲学方法论，未必能够顺利解决这一问题，但是提出了一个很好的思路方向。

通过开放架构，更多功能可以“即插即用”。模块化开放架构在IT领域已经成为降低系统复杂性，有效解耦的共识手段。美国军方和工业界通过一系列活动也统一了思想。通过该技术的应用，可以大大降低软件系统整合难度并拓展更多系统和部件的能力。