



突破战术飞机航空技术接近极限的困境

The Limits of Tactical Aviation Technology

托马斯·R·麦卡布, 美国空军后备役退役中校 (Lt Col Thomas R. McCabe, USAFR, Retired) *

几个世代以来, 美军——尤其是美国空军——依赖军事技术优势, 在战场上稳居上风。与常规敌军对抗, 美军技高一筹已成定例, 以至大家习以为常。只是, 好景难再, 还能维持多久, 众说纷纭。许多人认为, 就技术而论, 我们已经陷入停滞状态, 尤其是在战术航空平台领域。本文提议我军从两个方面着手, 突破这种困境。

目前形势

我军目前的航空优势主要立足于冷战时期最后几十年研发和部署的技术。¹ 但是, 自那场意识形态冲突结束以来, 我军的作战飞机航空技术无甚长进。新获得的重要作战能力仅有两项: (1) 已投入部署的数量不多的 F-22 飞机, 具备较为先进的隐形机型, 能够执行超音速巡航任务; (2) 至今无法批量生产的 F-35 飞机。² 除此之外, 我们把大量精力集中在对现有能力的有限升级, 以及研发和部署遥驾飞机系统。³

过去二十多年的地缘政治环境, 成就了我军当今这种状态。在 1980 年代, 我军利用新装备对航空兵部队进行了大规模的更新换代, 却在苏联解体后失去了旗鼓相当对手。自那时以来, 我们的重点是改进指挥、控制、通信、计算机、情监侦和遥驾系统, 不再重

视有人驾驶战术飞机技术的研发。不幸的是, 这种多少有点宽容的地缘政治和作战环境不大可能一直如此。

目前, 我们在全球面临一个混乱和日益危险的威胁环境。中国、俄国、伊朗、朝鲜和形形色色的极端伊斯兰 / 恐怖分子, 还有许多其他组织, 都对我们的国家安全提出挑战。尤其是, 中国试图利用反进入和区域拒止战略挫败我们在西太平洋地区投送力量的能力, 而该项战略已经取得巨大进展, 建立了执行该战略所需的技术基础。此外, 中国人正在空天技术领域推行一系列令人目不暇接的变革。⁴

当(潜在)敌方迎头赶上时, 最显而易见的对策——也是我军历史上一贯的对策——就是突飞猛进发展技术。然而遗憾的是, 如前所述, 有人驾驶军事航空技术, 尤其是有人驾驶战术飞机, 似乎正处于停滞状态。在 2010 年启动的空军长远研究纲领“技术地平线”计划中, 只有一小部分涉及实际的飞机技术。该计划的首要重点是先进的(而且, 无疑地, 可能是革命性的) 计算机应用程序, 其预期用途是从事我们已经在做的事情——只是更快一点, 成本更低一点, 使用的人力更少一点。⁵ 目前对有人驾驶战术飞机的研究大多数以现有系统的所谓逐步改进和持续发展为主, 而对于可能取代此类飞机

* 本文部分内容由利昂·麦金尼 (Leon McKinney) 提供, 特致感谢。

的下一代战机的研究仅进入初步阶段。至少在今后 20 年内，有人驾驶战术飞机的采购基本上就是购买目前仍在装配线上的那些飞机。⁶ 海军也处于类似的境地。⁷ 此外，尽管我们显然正在对未来的遥驾系统倾注大量的精力，它们最终能具有什么样的作战能力——尤其是，它们在动态的、高风险战场上的生存能力究竟如何——仍然有待实践证明，不能光凭那些系统推介者的热情追捧。

我们必须承认，有人驾驶战术航空技术停滞不前的一个核心原因是，我们正在接近——如果说尚未达到——战术作战飞机目前可达且经济能力许可的极限。此外，至少有可能的是，我们已经达到或几乎达到有人驾驶喷气式作战飞机的技术可行极限。对现有系统所做的任何可能升级，都不是真正的技术突破，都谈不上改变游戏规则。⁸ 除了这些升级之外，没有可以继续研发的可见或可用的突破点。在目前阶段，唯一明显的例外是，有源电子扫描阵列雷达也许能使我们拥有高功率微波武器作战能力；其他例外则包括反电子高功率微波先进导弹工程弹头等电磁脉冲武器，以及我们已经开发或将要开发的计算机网络攻击能力。⁹

不幸的是，并非只有美军才能获得此类技术。世界上其他国家，尤其是我们的对手，正在急起直追，预计不久甚至已经在某些领域掌握和部署这些技术。更令人不安的是，可能在最近的将来改变游戏规则的一些技术，例如极远程空对空导弹、精准制导反舰弹道导弹、网空武器、隐形巡航导弹以及各类先进弹头（例如集束弹、电磁脉冲弹和燃料空气爆破弹），既可能由我们用来对付敌方，也可能（即使并非更有可能）被敌方用来对付我们。显然，这些技术对于我们将在世界各地面临的战略和战术形势产生深远的影响。

具体而言，我们和我们的盟国将不一定能够继续依赖优势的技术和作战能力，无法像冷战结束之后那样，以技术优势来增强兵力和弥补兵员不足。另一方面，鉴于我们持续的财政和经济状况，汰换陈旧装备和研发新技术将会遇到巨大的困难。我们不应该期望通过遥驾系统的低成本来缓解目前的困境。至今部署的遥驾系统大多相对便宜，因为它们的机体比较简单，价格低廉。但是，随着机体和传感器组件越来越复杂，成本会迅速上升。那末，我们怎么办？

未来出路

首先，我们必须灌溉未来研究和开发之树，并且要持续灌溉——但是，我们只能从长远观点来期望树木结果。例如，目前，空军和国防先进研究计划局似乎有一个较为一致的高超音速（飞行速度达到或超过 5 马赫）研究计划。但是，眼前的重点应是提升战术导弹，有预计称可望在 2030 年开发出较大型和可反复使用的遥驾高超音速飞机，在 2040 年推出有人驾驶高超音速飞机。¹⁰ 如果我们无法立即或快速在机体或发动机方面取得重大进展，是否有其他替代方案？我们能否在最近或不远的将来采摘伸手可及的成果，这些成果应能提供新的作战能力，或至少能扩展现有系统的生存能力，而且最好是不需要耗费巨额预算？

有两个方面也许值得探索，而且如果落实，可望最快在今后五、六年内产生影响。此外，在我们需要从更远的距离应对更精明的敌方部署反进入和区域拒止系统的作战环境中，这两个方面的发展将会证明特别有用。它们是：射程加大的空对空导弹和高效燃料（后者更加隐蔽和不引人注意）。

射程加大的空对空导弹

如前所述，我们面临的形势是，射程日渐加大的空对空导弹有可能扩散或不可避免地会扩散。据报道，中国人正在部署的空对空导弹，其射程至少相当于美国目前部署的空对空导弹。¹¹ 因此，在 F-35 普遍部署之前，美国战斗机队及盟军所依赖的第四代战机将不再拥有导弹射程优势。俄国人正开始在其升级型米格 -31BM 上部署 R-37/AA-X-13（据可靠的信息来源报道，其射程超过 150 海里）。¹² 此外，俄国人声称此类导弹的变型还可以安装在其他飞机上，例如苏 -35 和 T-50 第五代战斗机。¹³ 俄国人的 R-172/K-100 导弹更令人不安，据报道其射程可达 200 海里或以上。¹⁴ 一旦面世，这种导弹可安装在广泛部署的苏 -27 系列飞机上。¹⁵ 最起码，此类极远程系统很可能对加油机和机载预警与控制系统飞机等易受攻击的支援飞机构成很大的威胁，而我们的空中作战行动极为依赖这些支援飞机。

AIM-120D 是我军中最新型号的先进中空对空导弹（AMRAAM），据报道其射程比早期 AMRAAM 增加 50%（据说增加到 97 海里），但除此之外，我军的武库中没有射程更大的空对空导弹，而且研发计划中也没有。¹⁶ 海军的 Phoenix 导弹和携带这种导弹的 F-14 飞机早已成为历史。原先打算取代 AMRAAM（以及 AGM-88 高速反辐射导弹）的下一代导弹 / 联合两用空中优势导弹，据说由于经费负担问题已在 2012 年取消研发计划，但是有些信息来源认为这个保密项目可能仍在继续。¹⁷ 由于该导弹的主要预期特点之一是显著加大射程，因此其研发工作应该作为一个主要优先项目予以恢复。¹⁸ 我们曾经考虑过在 AMRAAM 上安装一台冲压式喷气发动机，借以加大射程和提升作战能力，就像若干下一

代导弹的做法那样，例如英国 Meteor 导弹、报道中的中国 PL-21 导弹，以及可能还有俄国 R-77/AA-12 导弹的一个型号。¹⁹ 如果这么做能进一步改善 AIM-120D 的射程和作战能力，我们应该认真考虑重新启动这个研发项目。还有，雷声公司正在研发一种可用于地面发射台的射程延伸型 AMRAAM（称为 AMRAAM-ER），我们应该考虑对其加以改进而用于极远程空对空作战。²⁰ 我们还应该考虑重新启用网络中心机载防御系统（NCADE）导弹计划，用作极远程空对空导弹的替代方案。NCADE 原定用于弹道导弹防御的助推段拦截，它采用 AMRAAM 导弹壳体以及来自 AIM-9X 的先进火箭助推器和红外寻的器。²¹ 初步试验显然是成功的，但是 2013 财政年度或随后年度的预算中，似乎没有包括这个计划。²²

我们应该考虑的能改进未来导弹作战能力的另一个功能，涉及（如果技术上可行）在 AMRAAM 上安装一台有源电子扫描阵列雷达，就像日本人已经在 AAM-4B 导弹上安装的那样，以及英国人也许会在 Meteor 导弹上安装的那样。（AAM-4 比 AIM-120 略大，可携带较大的天线。）²³ 安装在导弹上的有源电子扫描阵列雷达能自主追踪目标，并可增大探测距离，据说可多达 40%。²⁴ 我们还可以利用氮化镓元件技术实行雷达升级，进一步增大其探测距离。²⁵

高效燃料

增大飞机航程的另一个显而易见但未受大量关注的方法是，使用单位容积能量密度较高的燃料，以此燃料取代目前燃料，重量无明显超过，却可增程。零星的报道显示，在冷战时期，苏联人曾经研发和使用一种燃料，其单位容积能量密度高于西方通常使用

的燃料，遂使其飞机航程显著超过预期，但是此类报道至今仍未得到公开确认。²⁶ 最近，美国在研究一种新燃料，称为 JP-900，理由有二：一是取代从石油生产的燃料（研究中的燃料以煤为主要原料）；二是其耐热性优于目前燃料（取名 JP-900，是因为它在 900 华氏度的高温下仍能在一个特定时段内保持稳定）。研究结果确认，JP-900 的能量密度也高于目前使用的喷气发动机燃料，尽管只超过几个百分点。²⁷ 但是，高能量密度似乎只是研究项目的次要考虑因素。国防部应该把能量密度作为此类研究的首要考虑因素，同时也要考虑成本（新燃料的成本不应该高于现有燃料），以及确保不需要修改飞机系统就可以立即用新燃料替代现有燃料。²⁸

结语

美国当仁不让占据世界空天技术头号超级大国交椅的时代也许仍未结束，但是自鸣得意显然不足取。最重要的是，我们需要看

到竞争的长期性，必须不断地精心灌溉我们自己的空天创新大树，尤其是对于战术系统而言。诚如本文的分析所示，这棵大树上伸手可及就能采摘的果实，已经寥寥无几。我们应该尽快调整对作战飞机和系统的前瞻，突破束缚，创新思维，时不我待。

除了应用快速成型等新兴技术之外，我们还应该寻求私营企业的帮助。²⁹ 许多公司在网空和空间运载火箭等领域处于领先地位。例如，SpaceX 似乎正在以低于历史规范的成本提供空间运载火箭能力，给这个领域带来革命性变化。³⁰ 此外，该公司显然还想再发动一场革命，使此类运载火箭能够完全重复使用。³¹ 若干民营公司也许正在高速飞行领域实施一场类似的革命，这与本文论述的内容有密切关系。例如，Hypermach 公司正在设计先进的商务喷气飞机 SonicStar，试图达到 4 马赫以上的巡航速度。³² 我建议国防先进研究计划局和空军密切关注其研发进程，如果切实可行，应该探索将该项技术转换到作战用途的可行性。³³ ★

注释：

1. 这些技术包括：

- 集成度越来越高而不再是离散子系统组合的第四代飞机，如 F-15、F-16 和 F-18；
- 隐形飞机；
- 以 AIM-9L “响尾蛇” 为首的全向攻击红外制导空对空导弹；
- 有源雷达制导空对空导弹，如 AIM-120 先进中程空对空导弹；
- 精准制导空对面弹药；
- 俯视图射雷达；
- 精准导航系统，尤其是全球定位系统；
- 进行集成作战和战争所需的指挥、控制、通信、计算机和情报系统。

2. 除了隐形特点之外，许多人认为 F-35A 并没有比 F-16 有多大改进，而且在一些重要的性能（最大速度和机动性）方面它实际上还不如 F-16。

3. 这些升级包括经过改进的武器；更先进的电子装置和发动机；飞机上和飞机之间传感器的进一步集成；指挥、控制、通信、计算机和情报系统的改进；维护日渐陈旧的机队并且同时在多个冲突中作战。

4. 这些变革涉及下列各项：

- 先进的军用作战飞机，包括隐形飞机；
- 支援飞机；
- 遥驾航空系统；
- 精准制导远程导弹，包括反舰弹道导弹；
- 防空；
- 反卫星系统；
- 航空母舰；
- 载人空间系统。

请参看 Lt Col Thomas R. McCabe, *China's Air and Space Revolutions [中国的空天变革]*, Mitchell Paper 10 (Arlington, VA: Mitchell Institute Press, 2013), http://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AFA/6379b747-7730-4f82-9b45-a1c80d6c8fdb/UploadedImages/Mitchell%20Publications/MP10_China.pdf.

5. Office of the United States Air Force Chief Scientist, *Technology Horizons: A Vision for Air Force Science and Technology, 2010-30 [技术地平线：空军 2010-2030 年科技愿景]*, vol. 1, AF/ST-TR-10-01-PR (Washington, DC: Office of the United States Air Force Chief Scientist, September 2011), http://www.defenseinnovationmarketplace.mil/resources/AF_TechnologyHorizons2010-2030.pdf. 最近的研究，例如以下“全球地平线”报告，也显示缺乏对航空学的重点关注。请参看 Office of the United States Air Force Chief Scientist, *Global Horizons Final Report: United States Air Force Global Science and Technology Vision [全球地平线最终报告：美国空军全球科技愿景]*, AF/ST TR 13-01 (Washington, DC: Office of the United States Air Force Chief Scientist, 21 June 2013), <http://www.defenseinnovationmarketplace.mil/resources/GlobalHorizonsFINALREPORT6-26-13.pdf>. 有趣的是，马克·梅博瑞博士 (Dr. Mark Maybury) 关于该主题的一份简报提到了模块性和速度 (未在本文提及) 作为航空游戏规则改变因素，但是没有具体说明这方面的研究工作。参看 Briefing, Dr. Mark Maybury, subject: Air Force Global Horizons [主题：空军全球地平线], 24 April 2013, <http://www.dtic.mil/ndia/2013ST/Maybury.pdf>; 另参看 House, Dr. David E. Walker, Fiscal Year 2014 Air Force Science and Technology, Presentation to the House Armed Services Committee, Subcommittee on Intelligence, Emerging Threats and Capabilities [2014 财政年度的空军科技，提交众院武装部队委员会情报、新现威胁和作战能力小组委员会的报告], 113th Cong., 1st sess., 16 April 2013, http://www.defenseinnovationmarketplace.mil/resources/FY14_AF_ST-Testimony.pdf. 在 2014 年，空军部发布的《美国空军：响应未来召唤》没有提到超级飞机是一项优先考虑。请参看 Deborah Lee James [secretary of the Air Force], *America's Air Force: A Call to the Future [美国空军：响应未来召唤]*, (Washington, DC: Headquarters US Air Force, July 2014), http://airman.dodlive.mil/files/2014/07/AF_30_Year_Strategy_2.pdf. 还有，在 2015 年初，空军的科学顾问委员会的关注重点在于量子系统、网空易受攻击性和遥驾系统等方面的研究。请参看 Aaron Mehta, “US Air Force Launches Trio of Tech Studies” [美国空军启动三项技术研究], *DefenseNews*, 31 January 2015, <http://www.defensenews.com/story/defense/air-space/air-force/2015/01/31/usaf-launches-study-trio-sab/22524543/>. 空军和国防先进研究计划局对未来空战的分析也明显地没有预期飞机性能和作战能力会有多大改善。请参看 Marc Schanz, “Rethinking Air Dominance” [重新思考制空权], *Air Force Magazine* 96, no. 7 (July 2013): 36–39; 另参看 Graham Warwick, “No Silver Bullet” [没有万能的银子弹], *Aviation Week* 175, no. 16 (20 May 2013): 52.
6. 除了远程攻击轰炸机也许 (但不大可能) 是一个例外，没有任何一项空军的首要现代化优先计划 (F-35、KC-46 加油机、远程攻击轰炸机、E-8 联合监视目标攻击雷达系统替代机和 T-X 教练机) 能够扩展飞机性能范围。请参看 June L. Kim, “The Top Modernization Priorities Developing Airmen” [发展空军的首要现代化任务], *Air Force Magazine* 97, no. 11 (November 2014): 39-40.
7. 海军声称其处于生产阶段或设计阶段的飞机项目是空军的三倍。但是，查看一下实际项目 (F/A-18 的三个改型、F-35 的两个改型、P-8 巡逻机 [重新设计的波音 737]、正在生产的 V-22 偏转式旋翼飞机、刚启动的先进战斗机项目以及处于设计阶段的隐形无人驾驶作战飞机)，即可发现海军也有同样的问题。请参看 John A. Tirpak, “Navy Offers Airplane-Building Advice” [海军提供飞机建造忠告], *Air Force Magazine* 96, no. 8 (August 2013): 14.
8. 这些包括有源电子扫描阵列雷达，它可增大探测距离，改善可靠性和生存能力，在某种程度上提高对隐形平台和巡航导弹等小型目标的探测能力；对发动机的改进，也许可使飞机扩展作战范围和提高速度；对飞机隐形性能的改进，可能重点在增大飞机防范的雷达频率范围，以及改善生产和维护便利性；此外还包括提高传感器的功能和集成程度以及改善计算机的性能，在某种程度上有助于应对扑朔迷离的战况变化、数据超载、干扰和敌方隐形技术。
9. James Drew, “USAF Nominates JASSM Missile to Host New Computer-Killing Weapon” [美国空军决定用联合空地对地防区外导弹携带新型计算机杀伤武器], *Flight-global*, 14 May 2015, <http://www.flightglobal.com/news/articles/usaf-nominates-jassm-missile-to-host-new-computer-killing-412348/>. 读者可注意报道中所传的以色列人在 2007 年 10 月 CHAMP 行动中

- 突袭叙利亚核反应堆时所用的“Suter”机载网络攻击系统。请参看 John Antal, “Ray Guns and War” [射线枪与战争], *Military Technology* 36, no. 8 (2012): 43; 另参看 David A. Fulghum and Douglas Barrie, “Israel Used Electronic Attack in Air Strike against Syrian Mystery Target” [以色列在空袭叙利亚神秘目标中进行电子攻击], *Aviation Week.com*, 8 October 2007, <http://abcnews.go.com/Technology/story?id=3702807&page=1>.
10. John A. Tirpak, “Getting All Hyper” [一切都要超], *Air Force Magazine* 98, no. 3 (March 2015): 18. 若要了解战术导弹的详细信息, 请参看 Kris Osborn, “AF Chief Scientist: Air Force Working on New Hypersonic Air Vehicle” [空军首席科学家: 空军正在研发新型高超音速航空器], *Defensetech*, 1 June 2015, <http://defensetech.org/2015/06/01/af-chief-scientist-air-force-working-on-new-hypersonic-air-vehicle/>.
 11. Wendell Minnick, “China Reveals New AMRAAM” [中国透露新型先进中程空空导弹], *DefenseNews*, 23 May 2011, <http://minnickarticles.blogspot.com/2011/05/china-reveals-new-amraam.html>; 另参看 Richard Fisher Jr., “China's Emerging 5th Generation Air-to-Air Missiles” [中国新露面的第五代空空导弹], *International Assessment and Strategy Center*, 2 February 2008, http://www.strategycenter.net/research/pubID.181/pub_detail.asp.
 12. Dr. Carlo Kopp, *The Russian Philosophy of Beyond Visual Range Air Combat* [俄国对超视距空战的指导思想], *Technical Report APA-TR-2008-0301*, *Air Power Australia*, updated April 2012, <http://www.ausairpower.net/APA-Rus-BVR-AAM.html>; 另参看 “Russian Air Force Tests New Air-to-Air Missile” [俄国空军试验新型空空导弹], *Sputnik International*, 24 January 2012, <http://en.rian.ru/russia/20120124/170929008.html>.
 13. “In the News: Missiles and Radars” [今日要闻: 导弹和雷达], *Beyond Defence (blog)*, 11 September 2013, <https://beyonddefence.wordpress.com/tag/rvv-bd/>; 另参看 Bill Sweetman, “Cloak and Dagger” [谍影重重], *Aviation Week* 175, no. 30 (2 September 2103): 29.
 14. 同注 12 “俄国的指导思想”。
 15. 同注 12 “俄国的指导思想”。
 16. Mike Hoffman, “Lockheed Test Pilot Calls for Longer Range AIM-120” [洛克希德试飞员要求有射程更大的 AIM-120 导弹], *Defensetech*, 18 February 2014, <http://defensetech.org/2014/02/18/test-pilot-calls-for-longer-range-aim-120/>. 必须注意的是, AIM-120 的各次报道射程差距很大, 也许取决于各种因素, 例如发射高度和发射飞机的速度。
 17. Zach Rosenberg, “USAF Cancels AMRAAM Replacement” [美国空军取消先进中程空空导弹取代项目], *Flightglobal*, 14 February 2012, <http://www.flightglobal.com/news/articles/usaf-cancels-amraam-replacement-368249/>; 另参看 Dave Majumdar, “AF Looks to Trim Procurement, R&D in 2013” [空军寻求在 2013 年削减采购和研发], *Air Force Times*, 13 February 2012, <http://www.airforcetimes.com/article/20120213/NEWS/2012130341/>; 另参看 Amy Butler, “Next-Generation Fighter, Directed Energy Weapons May Converge” [下一代战斗机和定向能武器可能交汇], *Aviation Week*, 5 August 2014, <http://aviationweek.com/defense/next-generation-fighter-directed-energy-weapons-may-converge>.
 18. Stephen Trimble, “In Focus: USAF Committed to Replace AMRAAM and HARM with New Missile” [新闻聚焦: 美国空军执意要用新型导弹取代先进中程空空导弹和高速反辐射导弹], *Flightglobal*, 6 December 2011, <http://www.flightglobal.com/news/articles/in-focus-usaf-committed-to-replace-amraam-and-harm-with-new-365333>.
 19. Douglas Barrie, “British Court Germany and France on FMRAAM Project” [英国人吸引德国和法国共同参与未来中程空空导弹项目], *Flightglobal*, 14 June 1995, <http://www.flightglobal.com/news/articles/british-court-germany-and-france-on-fmraam-project-25672/>; 另参看 Dr. Gareth Evans, “Air-to-Air Missiles—Expanding the No-Escape Zone” [空空导弹—扩大无法逃脱区域], *airforce-technology.com*, 11 April 2012, <http://www.airforce-technology.com/features/featureair-to-air-missiles-expanding-the-no-escape-zone/>; 另参看 Wendell Minnick, “China Developing Counterstealth Weapons” [中国正在研发反隐形武器], *Defense-News*, 31 January 2011, <http://www.defensenews.com/article/20110131/DEFBEAT04/101310315/China-Developing-Counterstealth-Weapons/>; 另参看 Douglas Barrie, “Vypel Launches R-77 Ramjet from Su-27” [Vypel 系统从苏 -27 飞机发射 R-77 冲压式喷气导弹], *Flightglobal*, 5 July 1995, <http://www.flightglobal.com/news/articles/vypel-launches-r-77-ramjet-from-su-27-21749/>.
 20. Richard Tomkins, “Raytheon Developing Extended Range AMRAAM” [雷神公司正在研发射程加大的先进中程空空导弹], *UPI*, 24 February 2015, http://www.upi.com/Business_News/Security-Industry/2015/02/24/Raytheon-developing-extended-range-AMRAAM/5641424782276/.
 21. 请参看 “NCADE: An ABM AMRAAM—Or Something More?” [网络中心机载防御系统: 是一种反弹道导弹式先进中程空空导弹, 还是另有蹊跷?], *Defense Industry Daily*, 20 November 2008, <http://www.defenseindustrydaily.com/ncade-an-abm-amraam-03305/>; 另参看 “Exhibit R-2, RDT&E Budget Item Justification: PB 2013 Air Force” (U) [附件 R-2, 研究、开发、试验和评估预算项目说明: 2013 财年年度关于空军的总统预算], February 2012, <http://www.globalsecurity.org/military/library/budget/fy2013/usaf-peds/0604330f.pdf>.

22. Baker Spring, "President Obama's Missile Defense Program Falls behind the Threat" [奥巴马总统的导弹防御计划对付不了威胁], Back-grounder no. 2686, Heritage Foundation, 3 May 2012, http://thf_media.s3.amazonaws.com/2012/pdf/bg2686.pdf; 另参看 Spring, "Congress Must Stop Obama's Downward Spiral of Missile Defense" [国会必须终止奥巴马的走下坡的导弹防御计划], Issue Brief, Heritage Foundation, 20 May 2013, <http://www.heritage.org/research/reports/2013/05/congress-must-stop-obamas-downward-spiral-of-missile-defense>. 笔者也未能 在 2015 财政年度预算中找到任何提及试验计划的词语。
23. Bradley Perrett, "Japanese Guidance" [日本导向], Aviation Week 176, no. 26 (28 July 2014): 27; 另参看 Perrett, "Japan Upgrading 60 F-2s with AAM-4, J/APG-2" [日本人用 AAM-4, J/APG-2 对 60 架 F-2 进行升级改造], Aviation Week, 27 February 2012, http://www.aviationweek.com/Article.aspx?id=/article-xml/AW_02_27_2012_p27-428848.xml.
24. 同上文“日本人进行升级改造”。
25. 请参看 Amy Butler and Graham Warwick, "Power Circuit" [电源电路], Aviation Week 176, no. 5 (17 February 2014): 45; 另参看 Sydney J. Freedberg Jr., "The Biggest Thing since Silicon: Raytheon's Gallium Nitride Breakthrough" [自硅兴起以来最重要的材料：雷声的氮化镓技术突破], Breaking Defense, 20 February 2015, <http://breakingdefense.com/2015/02/the-biggest-thing-since-silicon-raytheons-gallium-nitride-breakthrough/>.
26. George C. Larson, "Cool Fuel" [冷燃料], Air and Space 19, no. 3 (August/September 2004): 12. 有些信息来源指向俄国 T-6 燃料，其重量大于俄国通常使用的喷气机燃料，但是无法获得具体的性能数据。参看 Lori M. Balster et al, "Development of an Advanced, Thermally Stable, Coal-Based Jet Fuel" [研发一种先进的、具有热稳定性的煤基喷气机燃料], Fuel Processing Technology 89, no. 4 (April 2008): 366, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037838200700238X>.
27. 笔者估计（且已得到一位飞行员同僚确认），JP-900 的能量密度提升幅度大约为 6%。但是，密度提升的代价是，燃料性能略有下降，并且重量稍有增加。依据注 26 中 Balster 文“研发燃料”图 1。
28. 据有些信息来源报道，JP-900 的密度太高，无法用于未经改造的燃料系统。请参看注 26 中 Balster 文“研发燃料”，第 366 页。
29. Aaron Mehta, "Rapid Prototyping the New Model: Sikorsky's New Norm Saves Money, Time" [实现西科斯基新型号“新规范”飞机的快速成型可节省金钱和时间], DefenseNews, 31 October 2013, <http://www.defensenews.com/article/20131031/DEFREG02/310310025/Rapid-Prototyping-New-Model>.
30. Andrew Chaikin, "Is SpaceX Changing the Rocket Equation?" [SpaceX 正在颠覆传统的火箭概念吗?], Air & Space, January 2012, <http://www.airspacemag.com/space/is-spacex-changing-the-rocket-equation-132285884/>.
31. 同上。另一方面，英国人正在试图跳过这个研发阶段，直接使用其单级入轨运载器 Skylon。
32. Chad Trautvetter, "HyperMach Reconfigures SSBJ Design, Aiming for Mach 4.5" [HyperMach 公司修改超音速商务飞机设计，试图达到 4.5 马赫飞行速度], AIN Online, 6 December 2012, <http://www.ainonline.com/aviation-news/2012-12-06/hypermach-reconfigures-ssbj-design-aiming-mach-45>.
33. 毋庸置疑，这是一个很大的“如果”。十年前，就有关于超音速商务飞机的宏伟计划，但是至今没有结果。请参看 Stuart F. Brown, "Mine's Faster Than Yours" [我的速度比你的快], Fortune, 28 June 2004, http://archive.fortune.com/magazines/fortune/fortune_archive/2004/06/28/374394/index.htm. 显然，预计此类超音速飞机至少在 2021 年之前不会进入市场。请参看 Grant Martin, "The World's First Supersonic Business Jet Will Reach the Market in 2021" [世界上第一架超音速商务喷气机将在 2021 年进入市场], Forbes, 31 October 2013, <http://www.forbes.com/sites/grantmartin/2013/10/31/the-worlds-first-supersonic-business-jet-will-fly-in-2021/>.



托马斯·R·麦卡布，美国空军后备役退役中校（Lt Col Thomas R. McCabe, USAFR, Retired），West Chester 州立学院文学士，乔治城大学文科硕士，国防情报学院战略情报理科硕士，以空军后备役中校军衔自美国国防部情报分析员岗位退役，其最后职务为俄罗斯军事航空分析员。他的著述见诸《空天力量杂志》（其中载于 1993 年秋季刊的“纵深攻击的局限”一文获 Ira C. Eaker 奖）、《Orbis》、《战略评论》（Strategic Review）、《参数》（Parameters）、《空中纪事》（Air Chronicles），和《王家空军空中力量评论》（RAF Air Power Review）等刊物。他的论文“中国的空天革命”（米切尔论文 10 号）于 2013 年由美国空军协会米切尔研究所发表。中校是空军中队指挥官学院和指挥参谋学院的毕业生。