免责声明：凡在本杂志发表的文章只代表作者观点，而非美国国防部、空军部、空军教育和训练司令部、空军大学或美国其他任何政府机构的官方立场。

如何在 2035 年国家间冲突中夺取制空权

2035 Air Dominance Requirements for State-on-State Conflict

彼得・M・比洛杜，美国空军中校（Peter M. Bilodeau, Lt Col, USAF）*

引言

2035 年，一些国家的一体化防空系统将能发现、修正、跟踪、锁定并同美国当前用于夺取制空权的战机交战。美军在这种环境中作战，可能付出沉重代价，折损大量飞机。美军作战近 60 年，一向以空中攻势为特征，以空中作战奠定胜利基础；然而，面对对手的超严防空体系，这一切可能就此终止。[1] 诚如一位评论家所说："美军面临着战略选择：要么从此被拒于攸关美国国家利益的区域的大门之外，要么寻找对策，保持介入能力。"[2]

与 1970 年代飞机隐形技术带来的变革不同，解决 2035 年制空权问题，我们没有技术上的"高招"。仅靠无线电频率、红外及光电遮蔽技术，美军不可能无阻挡地长驱直入。[3] 因此，美国需要从整体上重新评估其夺取制空权战略，确保能基本介入这种新型超严防空覆盖的空域，为接踵而至的高节奏进攻创造条件。要想在这样的未来环境中获胜，需要我们把各种作战概念、作战能力和战术结合起来，综合应用，才能打造出美军的优势。制敌之器虽有数种，如何择优使用却是一大难题，若有闪失将铸成风险，尤其在国防预算捉襟见肘、各种威胁仍在酝酿发展之中、对今后怎么走亦缺乏共识的当前时期。

若要做出正确决策，高层领导人需要一个框架和办法，来评估发展中的环境，帮助做出投资选择。本文试图搭建出这样一个框架，具体分五部分来展开分析。第一部分立足战略、战役和战术审察美国潜在敌对国家对美国构成的未来技术挑战。接着，第二部分列举各种防空网模型，解析美国如何打击和突破敌人的防空网。然后，本文就如何打击未来敌人网络的几种战略推荐一个三层次方法（作战层次、系统层次和采购层次）。在第四部分，本文运用此办法检视美国为突破敌人超严防空网而可能采用的三种作战概念。最后，本文就军方投资选择和技术机会提出建议，使美军能够做好制空武器的正确准备，在 2035 年的国家间冲突中夺取决定性胜利。

2035 年的各种挑战

战略挑战：到达战空

自从第一次世界大战以来，美国在向前沿基地部署制空飞机开展作战方面，还没有遇到过挑战。[4] 随着现代国家开始挑战美国的技术优势，缩小与美国的技术差距，这种情况可能会改变。一些国家利用各种协作，通过全球网络强化平台，迅速提升自身技术能力。[5] 中国最近隐形战斗机的研发，就是例证；其 J-20 在尺寸、航程、武器载荷和空中防卫能力方面，似乎能与 F-22 相提并论。虽然 J-20 的研发现状（原型机或技术演示机）尚不清楚，但估计这款新飞机可能在 8-10 年内投产。[6] 因此，美国必须调整自以为是的

* 彼得・M・比洛杜空军中校（Peter M. Bilodeau, Lt Col, USAF）是 F-16 飞行员，拥有超过 3,000 小时的飞行经验，包括以往 14 年来历次重大作战行动中的战斗飞行。他以出色表现服务于世界各地的 F-16 单位，担任 Snack-O、武器官、飞行指挥官、助理作战主任、作战主任和中队指挥官。比洛杜 中校完成了所有层次的专业军事教育，并获得多个高级学位。

普遍看法，不可继续以为“时间在我一方，我们的后勤支援畅通无阻，我们的前沿基地进攻所向披靡，我们必能迅速夺取空海优势。”[7]

从地理上看，中国拥有战略纵深，层层设防，要想攻入这个潜在的空中战场，决非易事。其防御系统包括 DF-21D 远程弹道导弹，有能力破坏和 / 或拒止美军的前沿空军基地和航母舰群。[8] DF-21D 一旦投入全面运作，能打击美军在该地区目前所有的前沿基地，仅关岛除外。因此，美军必须承认目前所有的前沿基地都处于被攻击范围，可能瘫痪而无法保障决战行动。

在美国前沿基地没有战区导弹防御网和加固掩体保护的情况下，美国将被迫退后，从更远的距离作战。距离的增加，如从关岛起飞作战，将导致飞行时间增加，由此减少特定时间内的可调度架次。以日架次计算，当标称作战半径为 500 海里时，每架飞机每天可出动 3.94 个架次；如果作战半径增加到 2,250 海里，每架飞机每天就只能完成 1.79 个架次。[9] 因此，美国的战略制定者必须在可用的远程制空平台、架次需求，以及完成战斗目标所需的时间之间做好平衡。

归纳战略挑战可以发现，对前沿基地威胁的增加，加上地理方面的因素，正在降低美军的空中力量投射能力。这将挑战我们严重依赖前沿基地的传统方式，并对所有制空机种提出增加航程和改进生存能力的新要求。这些制空平台中除 B-2 隐形轰炸机外，可能无法在缺乏空中加油机的支援下到达战场。这种战略性“外推”，将迫使我们因可用飞机架次的减少而需要更多的平台，进而增加空中加油的需要，最终放慢美军空中作战的传统节奏。[10] 由此引出下一个挑战：如何使这些有限数量的制空平台介入战场。

战役挑战：突破战空

具备先进防御网络的国家，能够研发出传统和非传统的手段，发现和攻击进入其战空的美军制空飞机。拥有传统的单基地雷达防空网的国家，如伊朗，可能获取更先进的防空系统（如俄罗斯的 SA-20），大幅度改善自身的防空能力。[11] 先进国家可能追求更加先进的手段，如双基地雷达，来进一步加固防空系统。在这种新的战空中行动，美军隐形飞机可能猝不及防遭受攻击。

随着软件和处理技术的不断改进，双基地雷达系统可能很快淘汰现有的隐形技术。目前的隐形飞机借助外形和设计，能有效躲避传统的单基地雷达监视。[12] 但双基地雷达系统具有先进的信号处理能力，可“利用大气中已经存在的大量无线电信号，而不需产生自己的目标波束。”[13] 对此，美军可能需要运用网络攻击信号处理中心，以此支援制空飞机。

归纳战役挑战可以发现，传统的单基地空导弹和先进的双基地雷达可能阻止美国制空飞机突破对方战空。而发现和锁定威胁性发射机和无源接收机很困难，使挑战更加艰巨。美国决策者可能需要思考跨领域手段，协助制空平台提高生存机会。由此在夺取未来制空权的努力中构成下一个挑战：如何在防御超强的战空中实现使命目标。

战术挑战：驰骋战空

定向能武器技术的发展和超严防空体系的建设，对飞机的生存性乃至各种机载武器

的生存性，都构成挑战。激光武器成本不高，针对飞机和机载武器形成点防御。[14] 因此美军必须对照自己的作战能力来分析敌人的整个杀伤链，而不仅仅其某个部分。如果制空飞机发射出武器，却在击中目标之前就被打掉，那么到达和突破战空的努力就会前功尽弃。

在未来超严防御的战空中，地空导弹系统将重点打击武器发射平台，而点防空武器如激光将打击来袭武器（以及进入射程的飞机）。[15] 美国已成功展示兆瓦级碘氧化学激光器。[16] 因此，决策者们应预测到，先进国家最终将获得具有以光速锁定目标、击毁美军发射平台和武器的激光武器。

激光武器的广泛使用，可能迫使美军增加武器数量，才能确保摧毁敌人目标。今天，制空飞机也许只要用一两枚武器就能实现预定的摧毁。但是在超严防御（具备点防御激光系统）的战空中，可能需要发射数十枚武器，才能确保其中一到两枚能击中目标。因此，美国决策者可能必须修改武器运用战略，以保证使命成功。

归纳战术挑战可以发现，对手在超严防御的战空中运用定向能武器，可能打败美国制空飞机和武器。这将改变美国可接受风险程度的估算，美国可能需将大量的资源用于发展制空平台和武器的激光对抗技术。但是，在为应对某一特定威胁而草率制定作战构想之前，美国决策者必须首先了解敌人整个防空网体系，然后规划制胜之道。

了解防空网

防空网，无论是传统的单基地雷达网，还是先进的双基地雷达网，其相关的能力取决于敌对双方对网络的强项和弱项的评估，由此导致技术和作战上的博弈。守方寻求各种技术来织补其防空网的漏洞（固网能力），攻方则极力发现和利用这些相同的漏洞，予以击破（破网能力）。就对方防空网的各项能力，我们可以用美国空军作战准则中的动态杀伤链程序来描述。[17] 这些能力包括发现、确定、跟踪、锁定、交火和评估对手力量。实施反介入 / 区域拒止策略的国家不断强化自身的防空网，而拥有夺取制空权能力的对手则不断寻求如何突破对方的防空网。

表 1 围绕防空网的上述六项能力，将守方的固网技术和攻方的破网技术进行对比。在右栏中，守方研制防空网武器，以期阻挡、摧毁和拒止敌人的进攻；无源和双基地雷达提高发现、修正和追踪制空飞机的能力；先进导弹系统（SA-20 和 DF-21D）提高远距离锁定能力，从而增强整体区域拒止能力。在左栏中，试图夺取制空权的攻方必须重点发展压制、阻延及击破防空网的能力，才能闯

表 1：解析防空网

常见的破网技术	网络能力	具体的固网技术
隐形 / 太空 / 网空	发现	无源双基地雷达
隐形 / 太空 / 网空 / 电子战	修正	无源双基地雷达
隐形 / 电子战 / 超音速	跟踪	无源双基地雷达
隐形 / 电子战 / 超音速	锁定	SA-20: 地空 /DF-21D: 地地
隐形 / 欺骗（诱饵）/ 电子战 / 超音速	交战	SA-20/DF-21D/ 定向能（激光）
本文不讨论	评估	本文不讨论

入战空。为避免被发现，需要综合运用隐形、太空、网空和情监侦技术。此外，诸如诱饵、欺骗、密集 / 饱和打击等战术，也需用来加强制空飞机的能力，躲避跟踪和锁定。因此，美军需要对对手的防空网进行充分的解析和研究，确定必须重视对手的哪些能力及如何破解。

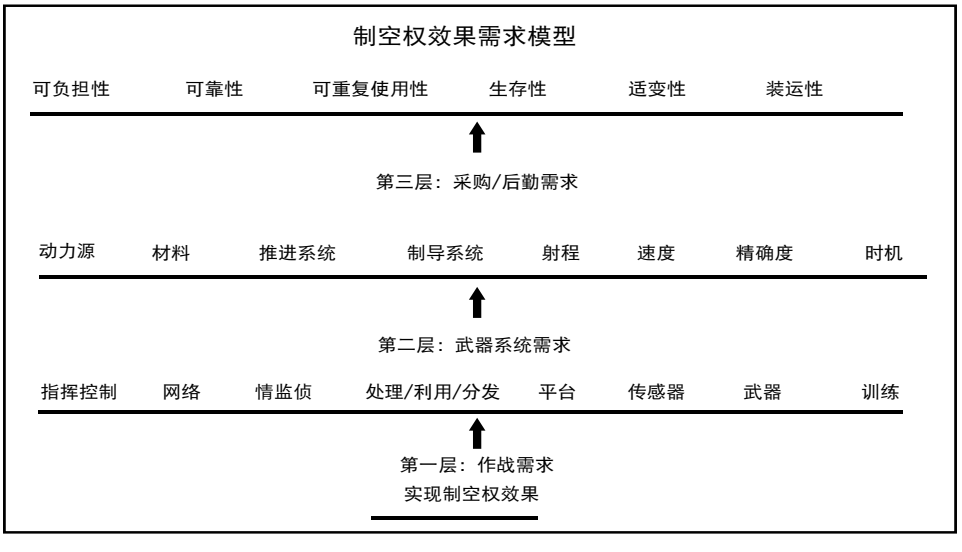
简言之，先进的防空网和强大的技术发展，将挑战美军未来的夺取制空权能力。美国决策者必须解析对手的防空网，了解其能力和相关技术。美国必须确定是否利用现有的跨领域能力，或者制定新的需求，投资和研发未来的技术。战略家们需要一种简单的方法论来解决问题，确定需求，并引导做出相应的决策。

解决问题的办法: 需求模式

美国决策者需要一个模型，在适当的详细程度上评估夺取制空权所需的能力。目前，美国空军使用以能力为基础的架构，但这在本质上过于笼统。[18] 但如果借助一种把作战、系统和采购 / 后勤需求整合为一体的模型，则能帮助规划者做出计划。这样一种详尽、多层次的架构可以确保规划者把重点落在那些经过透彻分析的能力需求（和相应的限制）上，避免投资失误。

表 2 概述如何运用三层次结构来确定具体的能力需求，以发展出未来夺取制空权所需的真正能力。能否攻破敌人防空网的关键节点，取决于在能力需求决策中能否统筹考虑所有层次上的因素。第一层次是作战需求，第二层次是武器系统需求，第三层次是采购和后勤需求。值得注意的是：每个层次的具体需求与上一层次的所有需求相对应，如果任一个层次的需求没有做好规划，可能导致其他层次上的能力需求规划不正确或不完整。

第一层，作战需求，由用于实现制空权效果的基本工具组成。指挥控制、网络和情监侦将继续担当幕后运作的大脑。作战空间数据的处理 / 利用 / 分发可能不总是以传统的方式传递给作战人员。作战平台可能需要突破超严防御战空，或从防区外进行部署。



传感器可以机载或非机载配置，帮助突防和精确定位。要运用各种动能和非动能打击武器夺取制空权。还有，需要研发战术 / 战技 / 战规开展训练，确保作战人员具备夺取制空权的充分能力。

第二层，武器系统需求，由每场作战行动需要的具体部分组成。动力源、材料、推进系统、制导系统、射程、速度、精确度和时机等要素，在不同的作战行动中可能相似也可能不同。动力源需保证作战平台具备完成任务的续航时间。所用材料应能延迟、减少或消除被敌人发现的危险。推进系统需要充分强劲高效以确保任务要求。制导系统最好能做到自主运行和抗干扰以确保精准导航。射程和速度因平台和武器不同而各异，但必须足能到达并突破战空。武器精确度在决定性的作战中能保证武器效果，减少飞行架次和敌人火力威胁。另外，时机对于在对抗超严防空的作战中实现协同效果至关重要。[19]

第三层，采购和后勤需求，对于决策者就第一和第二层需求做出决定时至关重要。可负担性与可靠性是一种性价比之间的平衡，将成为未来国防采购预算的主要约束。重复使用性将取决于平台和传感器数量，以及具体的用途。生存性不仅指飞机能到达发射位，而且意味着武器能击中目标。适变性要求飞机具备多种功能，以应对敌防空网的多种能力。最后，可装运性意味着这些作战平台可以在作战行动开始前拆装和运输到位，以确保后勤能承担和维持运输要求。总之，在分析敌人空中防空网之后，运用这个需求模型将有助于制定作战概念。

作战概念

制定作战概念

作战概念有多种定义，本文采纳的定义是：把所需部署能力同战术及所需外部保障整合，实现指挥官的目标。[20] 因此，2035 年夺取制空权的作战概念应注重摧毁、瘫痪、破坏或突破敌人防空网“杀伤链”的一部分或全部。对防空网的评估和需求模型能帮助确定哪些能力能取得理想的效果。战术能提高这些能力的成功机会，同时减少防空网威胁风险。外部保障，无论是嵌入和 / 或分离，将支援这些平台坚持对敌防空网的攻击，直到完成任务目标。

在以下表 3 中，第一列给出夺取制空权所需的能力和战术，第二列开出敌防空网的相关能力，最后两列将支援程度和需求连接起来，以此凸显作战概念各组成部分之间的相互关系。值得注意的是，用隐形能力和隐形战术相结合，可大幅度降低所需的保障，因为这些空中平台能自主运作机载武器、传感器和对抗手段。但这种预测是基于隐形遮护技术能在 2035 年之前达到成熟。相较而言，如果采用饱和打击战术，即通过多平台组合实施突破，将要求加强保障支援，尤其在指挥控制和目标数据分发方面。

以表 3 的相互关系为基础，可针对反介入 / 区域拒止挑战考虑以下三种作战概念。第一个概念是防区外打击，它最大限度地减少人员伤亡的危险，同时最大限度地发挥远程武器的效果。第二个概念是突防攻击，即依靠高能力的载人隐形飞机闯入战空，投射精确打击武器。第三个概念是密集 / 饱和打击，即运用隐形的、传统的、载人和无人平台，突防和远程打击相结合，摧毁超严防空网。在每一种作战概念中，都需要就人和飞机面

表 3：作战概念设计的能力、战术和保障的相互关系			
作战概念（能力 + 战术 + 保障）			
制空权能力	**敌防空网能力**	**保障水平**	**保障需求**
隐形	发现 / 修正	低	无
速度（超音速）	交战	低	平台 / 武器能力
高度	交战	低	平台 / 武器能力
指挥 / 控制	发现 / 修正 / 跟踪 / 锁定 / 交战	中	安全网络
太空 / 网空	发现 / 修正	高	安全网络
制空权战术	**敌防空网能力**	**保障水平**	**保障需求**
隐形	发现 / 修正	低	无
诱饵 / 欺骗	锁定 / 交战	中	指挥控制 / 数量大
密集 / 饱和	跟踪 / 锁定	高	指挥控制 / 数量大
多轴	跟踪 / 锁定	高	指挥控制 / 电子战
组合	跟踪 / 锁定	高	指挥控制 / 电子战

对的风险做好平衡，同时正确选择打击能力攻击敌人的防空网。

作战概念 1：防区外打击

防区外打击的概念要求多领域的协同，来获取目标数据，传送给防区外平台，再发射武器打击目标。这种方案能大幅度降低伤亡威胁，但严重依赖太空 / 网空资源来发现、修正并跟踪敌人目标。航母战斗群必须处于 DF-21D 射程范围（1500 海里）以外，其他各种武器平台也需处于敌人主战机的航程（500 海里）以外。[21] F-22 提供护航，维持空中走廊。因此，防区外打击的核心概念就是运用非机载传感器指示多种武器攻击各种固定目标。

在作战需求层面，美军的指挥网络需要前沿部署，最好部署在航母打击群上。关注的重点是能连接太空，确保卫星情报的接收、带宽能力和网空安全，使卫星情报能及时传递给武器平台。B-2、B-52 和 B-1 等武器平台需要获得武库机的支持，做到合理分工打击主次目标。[22] 高超音速武器是最好选择，因为高超音速武器能增加敌人锁定目标的难度，而提高自身生存率。

从武器系统需求层面来看，武器的动力源、材料、制导、射程、速度和精确度，都是重要的考虑因素，对确保数百英里的飞行极为重要。武器材料需拥有隐形特征，具有电子战属性，或能接收网络攻击支援，从而在飞向目标的过程中减少、延迟或消除被发现的危险。制导和精确度必须确保引导武器进入攻击范围，以取得理想的打击效果。整体而言，在此作战概念中，对武器系统的需求是重中之重。

在采购需求层面，武器的可靠性和生存性是主要关注因素。具备自主末段制导的抗干扰惯性辅助武器（如冷原子技术）可能解决这个挑战。[23] 此外，这些武器应配备抗电磁脉冲和定向能武器的屏蔽层。因此，应在可负担性与武器整体能力之间做好平衡。总之，防区外打击若想成功，需要保持畅通的太空 / 网空数据传输，网络化的指挥 / 情报支

援，以及生存能力强并能击中预定目标的武器。

作战概念 2：突防打击

突防打击是使用制空飞机强行进入反介入 / 区域拒止战空，运用自主锁定目标的武器打击敌人。突防飞机处于高威胁环境之中，需要依赖先进技术来躲避敌人防空火力。F-22 需护卫处于敌人主战机航程（500 英里）以外的加油机。B-2 或下一代轰炸机必须突防进入敌人战斗空间执行攻击任务。因此，突防打击的核心概念是自主锁定和打击固定、移动和加固目标。

从作战需求层面来看，指挥网络、太空和网络攻击可支援突防打击平台，但这些突防飞机必须能躲避和抗击各种自主存在的威胁。突防打击机种需要重大的技术提升，以对抗双基地雷达和先进的地空导弹。传感器和武器必须能躲避防空激光到足够近的距离，才可能成功引导武器击中目标。突防飞机数量有限，这意味着减少可用架次，从而可能延长完成决定性战斗的时间。总体而言，这些低密度 / 高需求突防平台如果在任何能力上设计不当，就可能成为溃堤之穴。

在武器系统需求层面，主要取决于技术进步，武器的发展必须超越防空网能力发展。飞机的材料需要做到能最大限度地遮蔽无线电频率、红外及光电频谱，因此需要使用超材料。[24] 武器的推进系统、射程和速度不需要像防区外打击那样重要，因为有载机载送接近目标。但是武器制导和精确锁定功能必须能抗干扰，具备和防区外打击武器相同的特性。

在采购需求层面，主要的挑战是如何为这些突防平台配备所需能力。可负担性将成为主要的制约因素，决定着这些突防平台、传感器和武器能在对抗敌防空网方面获得多大程度的可靠性、生存性和适变性。此外，新兴的技术，如超材料，需要在 2035 年之间达到可接受的成熟水平。如果突防飞机载运武器不能充分接近目标，导致武器投射之后难以生存，那么就面临着超出可接受水平的高风险，就无法完成任务。总之，突防打击若想成功，突防飞机就必须比超严防空网技高一筹（并且在时间要求上更加宽裕）。

作战概念 3：密集 / 饱和打击

密集 / 饱和打击是将各种载人隐形飞机、高 / 低技术无人机和传统攻击机等混合起来，集群攻击并压制敌防空系统。一些飞机实施突防，用机载武器 / 诱饵开展攻击，另一些平台在防区外发射武器 / 假目标，里外结合取得战果。按照飞机的使用情况和突防强度等，敌人的火力威胁应在中等程度范围。F-22 需要护卫在敌人主战机航程（500 英里）以外的加油机和传统战斗机，并发射防区外打击武器。无人机系统则群起突防，密集发射诱饵和攻击武器。另外，B-2 或下一代轰炸机突防进入战空，完成攻击任务。因此，密集 / 饱和打击的核心概念，是各种武器平台倾巢而出，密集攻击各种固定、移动和加固目标，摧毁敌防空网。

作战需求层对此有高和低技术两个方面的要求。对传统战机和无人机系统的指挥网络要求与防区外打击作战概念相似。B-1 和 B-52 需要目标数据，而其他突防飞机可能需要配备自主锁定目标功能。密集攻击平台如微航空器和饱和打击平台如 X-47 等，也需要具备自主目标锁定功能。[25] 因此根据使用情况，这些传感器和武器可以是一次性使用型也可以是反复使用型。总体而言，这种作

战概念要求投入大量传统武器和先进平台，在一个可靠的指挥网络下协同作战。

武器系统层的需求比较错综，因为这种作战概念综合了各种阶段的技术。指挥系统必须能防御网络攻击，有相当韧性，这对各类武器平台协同作战至关重要。B-2 和参加突防的无人机都要采用隐身材料，与突防打击作战概念一样。隐形攻击机可能需要技术升级，但传统飞机保持现有能力即可。因此，各种打击平台的数量和种类将推动技术升级的整体水平和成本。

采购需求层包括对防区外打击和突防打击的双重考量。可反复使用的密集 / 饱和打击飞机相对于一次性使用的打击平台而言，将需要代价昂贵的升级，以求生存。这样，对可负担性的考虑将影响战力的构成。可靠性和生存性主要是对需反复使用的攻击平台而言。总之，若想通过密集 / 饱和打击获得成功，就要求先进和传统打击平台结合使用，压制住敌防空系统，获得充分时间来对敌人各种能力实施致命打击。

以上三种作战概念都可能破解反介入 / 区域拒止挑战，它们在能力、战术和保障支援方面各有优势，也都面对着技术研发的难题。表 4 列出这三种作战概念的组成要素(优化目标类型、火力威胁、攻击 / 支援平台、未来主导技术)，加以比较。最后的步骤是将重点能力和相关需求进行优先排序，以确定优先投资哪些技术。

建议/投资选择

作战概念 1，即防区外打击，需要对太空和网空技术及先进远程武器进行投资。指挥网络需要保持太空态势感知，需要确保情报数据经由安全通讯线路传输到防区外打击平台。第一优先是改进防御性太空反击和网空网络防御能力。然后，通过实施网络攻击和太空反击为远距打击敌防空网提供直接支援。如能破坏敌方双基地雷达指挥 / 控制和激光指示系统，可极大地支援防区外打击武器。即使网络攻击和太空反击可能迫使对方的防御系统进入自主模式，各种打击武器也都需要能接近和击中目标。

美国可继续开展远程导弹研发，如联合空地防区外增程导弹。初始作战能力预计在 2012 年形成，美军已签订 77 亿美元合同，采购 2,500 枚导弹。[26] 该系统以及空射巡航导弹和战斧对地攻击导弹可用隐形技术加以改进，美军也可考虑开发全新系统。

未来的巡航导弹应为高超音速武器。如果高超音速武器在 2035 年完全具备作战能力，敌防空系统将极难锁定目标。美国将“克服制约着传统空天武器投射的距离、时间和防御障碍。”[27] 值得一提的是，在 2010 年 5

表 4：作战概念对比

关键的作战概念构成	防区外打击	突防打击	密集 / 饱和打击
优化目标类型	固定	固定 / 移动 / 加固	固定 / 移动 / 加固
火力威胁	低	高	中高
现有攻击平台	B-2, B-1, B-52	B-2	B-2
护送 / 支援平台	F-22/ 空中加油机	无 / 空中加油机	F-22/ 空中加油机
未来主导技术	太空 / 网空技术，弹库机，高超音速，冷原子	超材料，下一代隐形机，电子战	太空 / 网空技术，UCAS（X-47），微航空器

月，美军高超音速 X-51A“凌波者”（Waverider）首次试飞获得成功。[28] 这验证了其作为武器平台的未来应用潜力。因此，高超音速武器将能压制和摧毁敌防空系统。整体而言，防区外打击作战概念要求中到高投入，其之成功取决于目前技术的进步程度和先进新系统的研发进展。

作战概念 2，即突防打击，要求对 B-2 隐形飞机进行全面升级，或开发下一代隐形打击平台。和防区外打击作战概念相似，通过升级太空和网空攻击能力，将可支援对敌防空网的打击。美国的投资应重点放在材料和电子战的升级上，以保护 B-2 能深入敌方领空。B-2 的电子攻击能力升级可以是着眼于内部升级，也可注重加强其他机载电子攻击平台（如“鬼光”[Phantom Ray] 或 RQ-170“哨兵”无人机），以支援 B-2 轰炸机。[29] 总之，材料升级要比电子战升级困难得多。

目前正在研发超材料，希望能提供先进的隐形能力。罗杰·M·沃尔泽（Rodger M. Walser）第一次形容超材料为“人造、三维、周期细胞结构的宏观复合材料。”[30] 普通人的定义就是制造能控制电磁信号的人造材料。值得提醒的是，在被雷达跟踪的情况下，只有某些频率在精确的角度下才能产生“隐形”效果。到 2035 年,这些障碍大部分将被克服；但是美国需要确保首先实现作战能力。

超材料技术障碍存在于两个关键的光谱中。目前，在红外线光谱（300 千兆赫—300 太赫）和光电谱（> 300 太赫 < 3 拍赫）中，还未能看到超材料的进展。“困难在于如何在最佳状态生成电磁互动以形成遮蔽效果。”[31] 因此，我们无法确定这些超材料技术届时能否成熟。总之，构建突防打击能力需要巨大的投资，B-2 的升级和下一代隐形平台技术研发目前都还处在初级阶段。

作战概念 3，即密集 / 饱和打击，要求投资开发各种低 / 高技术无人机系统，作为突破敌人防空网的武器平台、传感器和诱饵。此外，需要投资开发类似的防区外武器，供防区外的传统平台使用。因饱和打击是最直接的打击方式，在于耗尽敌方的初始拦截弹药，因此对 B-2 升级的投入，取决于微航空器和无人空战系统 X-47 消耗敌防空网的能力。

微航空器将设计成长度不超过两英尺，能在都市环境低于屋顶高度作战。[32] 这种集群式作战平台将秘密潜入，收集、干扰和瘫痪敌方网络。在本作战概念中，将需要大量运用这样的一次性和非一次性微型无人机。此外，一次性使用的小型空中发射诱饵、改进型空中发射战术诱饵和传统的无人机，将协助参与饱和打击。[33] 现有的 QF-4 无人机能以极低的成本保护非一次性有人和无人制空飞机。总之，密集 / 饱和打击是一种低中成本作战方式，具体取决于投入的飞机及武器类型和数量。

表 5 简要说明与每种作战概念相关的投资选择。表中列出敌防空网能力和对抗这些能力的所需技术；相对成本栏中的数据只是作为初始的参照，可能根据未来技术研发的速度而有所不同；此外，表中所列各种资产的种类和数量，也将因敌方超严防空网的结构不同而各异。

结语

在 2035 年，隐形制空飞机能否真正匿形，可能性极小。希腊神话中的珀尔修斯隐形头盔在现实中并不存在。正如一些公开文

表 5：投资选择						
作战概念	对抗：发现	对抗：修正	对抗：跟踪	对抗：锁定	对抗：交战	备注 / 整体成本
防区外打击	太空 / 网空	太空 / 网空	先进隐形巡航导弹	高超音速武库机	高超音速武库机	
相对成本	中	中	高	高	高	中 / 高
突防打击	超材料 / 新一代隐形机 / 电子战	超材料 / 新一代隐形机 / 电子战	超材料 / 新一代隐形机 / 电子战	超材料 / 新一代隐形机 / 电子战	超材料 / 新一代隐形机 / 电子战	
相对成本	高	高	高	高	高	高
密集 / 饱和打击	微航空器	微航空器	X-47/ 诱饵 / 传统无人机	X-47/ 诱饵 / 传统无人机	X-47/ 诱饵 / 传统无人机	如 B-2 升级成先进隐形机，则成本 = 高
相对成本	低	低	中	中	中	中 / 低

献所下的结论，美国目前的隐形飞机数量有限而造价昂贵，在今后几十年中将逐渐失去其隐形突防优势。[34] 假如下一场战争的对手不再是次级对手，而是旗鼓相当的国家对手，那么面对其超严防空网，美国必须准备好折损一些现有的隐形飞机。

在三种作战概念中，密集 / 饱和打击算是成本和能力平衡最佳的作战方式。以非动能打击方式和电子战方式干扰敌防空网所需的成本很低；以大量的低成本一次性无人机和武器蜂拥扑向敌人，可以耗尽敌人准备的第一批拦截弹药。由此为我方的高技术武器创造突防条件，一举摧毁敌人的固定、活动和加固目标，最终削弱或摧毁敌人的防空系统，夺回制空权，为美军构建出更习惯的自由作战空间，取得决定性胜利。要想打败一个依赖反介入 / 区域拒止能力的敌人，我们需要这种多领域整合协同的战略。

总之，美国决策者需要一个类似本文提出的框架，破解反介入 / 区域拒止国家对美国未来制空权的挑战。首先要了解潜在敌人的技术挑战和防空网能力，然后借助一个需求方式模型，制定出可行的作战概念。在完成这些步骤后，再确定对哪些技术进行投资开发。在未来决战中，最终需要靠技术构成的平台、传感器和武器来夺取胜利。♣

注释:

1. Jan Van. Tol, AirSea Battle: A Point-of-Departure Operational Concept [空海一体战：作战概念的起点], Washington DC: Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2010Washington DC: Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2010, xii. 作者深入研讨了中国和其他国家日渐强大的反介入 / 区域拒止能力，以及美军未能因应以对加以抗衡的原因。
2. Andrew Krepinevich, Why Air Sea Battle? [为何空海一体 ?], Washington, DC: Center for Strategic and Budgetary Assessment, 2010, viii.
3. Lt Col Arend G. Westra,“Radar verses Stealth: Passive Radar and the Future of U.S. Military Power”[雷达对抗隐形：无源雷达和未来美军力量], Joint Forces Quarterly issue 55, (4th Quarter 2009): 139. 作者从整个电磁光谱方面探讨了美国隐形技术目前面临的多种先进反制措施，以及其对未来空中力量发展的影响。

4. 见注释 2，第 5 页。作者认为：美国早期基本的力量投射能力可追溯到 1898 年的美西战争，后来在冷战期间，美军向前沿基地的战力投送从未受到苏联的挑战。此观点仅涉及重大作战行动。

5. Thomas L. Friedman, The World is Flat [世界是平的], New York, NY: Farrar, Starus and Giroux, 2005, 176. 作者详尽阐述了产生这个基于网络的新协作平台的 10 大世界因素及其聚合造成的影响，认为这种代价小而快速的协作正在帮助各国提高教育、研发和发动战争的能力。

6. Aviation Week and Space Technology,“Editorial: Remain Watchful of China's Ascent”[社论：关注中国崛起], http://www.aviationweek.com/aw/generic/story.jsp?id=news/awst/2011/01/10/AW_01_10_2011_p58-280833.xml&channel=misc 1.

7. Harry Foster,“Air Power and Anti-Access/Area Denial Networks”[空中力量和反介入 / 区域拒止网络], Lecture. Counter A2/AD Conference, Washington DC, 28 October 2010, slide 3.

8. Wendell Minnick,“China Builds First Anti-Ship Ballistic Missile Base?”[中国兴建第一个反舰弹道导弹基地 ?], Defense News, 5 August 2010. http://www.defensenews.com/story.php?i=4735654. 作者介绍了 DF-21D 弹道导弹的射程可能在 1500-2000 公里，能覆盖南中国海的 70%。

9. 见注释 7，第 8 张幻灯片。假设飞机以 480 节地面速度向目标飞行，有 1 小时任务延迟和 3 小时返回至落地。

10. 见注释 1，第 24 页。作者论述了在反介入 / 区域拒止的冲突中丧失前沿空军基地的后果，包括架次减少和空中加油需要增加。

11. David Fulghum,“Russia Sells SA-20 to Iran,”[俄罗斯向伊朗出售 SA-20 导弹], Aviation Week and Space Technology, December 2008. http://www.aviationweek.com/aw/generic/story_generic.jsp?channel=awst&id =news/aw121508p2.xml&headline=null&prev=10.

12. 同上，第 14 页。

13. 同上，第 15 页。

14. Richard J. Dunn,“Operational Implications of Laser Weapons”[激光武器对作战的影响], Northrop Grumman Analysis Center, http://www.northropgrumman.com/analysiscenter/paper/assets/Operational_Implications_of_La.pdf, 3.

15. 同上。

16. Dr. William D. Schneider, Defense Science Task Force on Directed Energy Weapons [定向能武器国防科学工作组], Washington, DC: Office of the Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology and Logistics, December 2007, 6.

17. Air Force Doctrine Document (AFDD) 2-1.9, Targeting, [空军作战准则 AFDD 2-1.9：目标锁定], 8 June 2006, 49. 这部作战准则文件在封面解释说：空军赞赏联合作战准则 3-60《目标锁定的联合作战准则》中的相关论述。此外，动态锁定程序也被称为“杀伤链”。

18. Dr.Werner J.A. Dahm, Technology Horizons: Vision for Air Force Science and Technology during 2010-2030, Volume 1 [技术地平线：2010-2030 空军科学和技术愿景，第 1 卷], Washington, DC, Office of the US Air Force Chief Scientist, 15 May 2010, 43. 空军研究实验室尝试使用一种总体构想来界定未来作战人员的需求。他们用八项长期重点挑战作为目前的研究指导方针，第四个重点是：持久精确交战能力，被定义为“机动进入反介入 / 区域拒止环境，迅速并 / 或持续投射效果。”

19. Air Force Doctrine Document (AFDD) 1, Air Force Basic Doctrine, [AFDD 1:基本作战准则], 17 November 2003, 31. 其中，“协同效应”是空天力量的七条原则之一。具体而言，AFDD 1 指出：其目的是精准协调应用天空、太空和地面力量的各种元素，给敌方首脑施以不对称压力，迫其顺应我们的国家意志。

20. 对作战概念的界定，从战略层次到战术层次大不相同。美国空军对本军种作战概念所下的定义是：“军种层次的最高概念，概括司令官的假设和期望达到的效果，这就是在相关引导下整合各种能力和任务，解决预期任务区域内的问题。”同时，联合作战准则 5-0 中第四层作战策划概念对整合战术行动给出真实的评述。

21. 见注释 2，第 19 页。作者指出:航母需要离中国海岸线 1000-1600 海里，以避开先进的地对地或舰对舰导弹威胁。此外，机载武器平台需要保持 500 海里的距离，即处于中国主战机不做空中加油的最大航程以外，假定中国战机必须返回大陆原空军基地。

22. 华盛顿特区总部空军人员需求、未来概念部助理主任 Eric Weidanz 在 2011 年 1 月 6 日给笔者的电子邮件。据此邮件：所谓的武库机是由波音 777 改装的攻击平台，具备发射如 JASSM-ER 等防区外导弹的能力。

23. Stefanie Tompkins,“Precision Inertial Navigation Systems”[精确惯性导航系统], Defense Advanced Research Project Agency. http://www.darpa.mil/dso/thrusts/physci/newphys/pins/. 研究人员正在研制冷原子干涉仪，以取代 GPS 导航系统。这种技术无需外部传输，仍能提供精确导航能力。

24. Bora Ung,“Metamaterials: A Metareview”[超材料综述], Ecole Polytechnique of Montreal: http://www.polymtl.ca/phys/doc/art_2_2.pdf, 1. 超材料系人工合成材料，具有独特电磁特性，理论上在无线电波、红外和电子光学频谱中无法被发现。这将增加隐形平台的隐形能力。

25. US Air Force Fact Sheet,“Micro Air Vehicle Integration and Application Research Institute”[微航空器整合和应用研究所简介], Department of the Air Force, http://www.wpafb.af.mil/library/factsheets/factsheet _print.asp?fsID=17006&page=1. 微航空器能提供近距离隐蔽传感能力，提高环境感知和锁定数据精确度。另参看 Mark Gunzinger, Sustaining America’s Strategic Advantage in Long-Range Strike [保持美国的远程攻击战略优势], Washington, DC: Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2010, 69. 根据此专著，X-47 是舰载无人飞机，具有隐形、侦察和自主锁定目标的能力。

26. Deagel.com,“AGM-158 JASSM-ER”[联合空对地防区外导弹 AGM-158 简介],http://www.deagel.com/Land-Attack-Cruise-Missiles/AGM-158-JASSM-ER_a001073002.aspx.

27. Richard P. Hallion,“Hypersonic Power Projection”[高超音速战力投射], Mitchell Institute for Airpower Studies. http://www.afa.org/mitchell/reports/MP6_Hypersonics_0610.pdf, 8.

28. United States Air Force.“X-51 Waverider makes Historic Hypersonic Flight”[X-51“凌波者”高超音速试飞开创历史], Air Force News, 26 May 2010, http://www.af.mil/news/story.asp?id=123206525.

29. 见注释 25，第 75 页。

30. Akhlesh Lakhtakia,“Evolution of Metamaterials”[超材料的演变], Department of Engineering Science and Mechanics, Pennsylvania State University, April 2007, www.esm.psu.edu/~axl4/lakhtakia/ documents/Lakhtakia_07_7.pdf , 12.

31. Laura Rea,“Sensors Directorate Applied Metamaterials”[传感器部应用超材料], Lecture, Air Force Research Laboratory, Wright Patterson AFB, Ohio, 20 September 2010, slide 7.

32. 见注释 25，第 1 页。

33. Global Security.org,“Miniature Air Launched Decoy (MALD)”[小型空射诱饵弹], http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/systems/mald.htm.

34. 见注释 3，第 142 页。作者认为：无源雷达发展快速，导致目前的隐形技术在未来数年内落后。美国不可忽视迅速发展的反制隐形技术，而一味地投资于隐形技术。