

ASPJ

AIR & SPACE POWER JOURNAL

中文(简体)

空天力量杂志

2011年秋季刊 — 第5卷第3期

本期主题：科技强军

- 施里弗 2010：在无硝烟领域建立威慑
Susan J. Helms 空军中将
- 论国防技术教育的关键意义
Walter D. Givhan 空军少将；Eric D. Trias 空军少校/博士；William H. Allen 空军少校
- 推动实现美国空军的能源计划
Frederick G. Harmon 空军中校；Richard D. Branam 空军中校/博士；Doral E. Sandlin 空军中校
- GPS 受阻环境下的精确定位、导航和定时
Kenneth A. Fisher 空军少校/博士；John F. Raquet 博士
- 战术 C4ISR 飞机在过去、现在和未来冲突中的作用及其革新意义
Thomas J. Rath



AIM HIGH...FLY-FIGHT-WIN —— 志向高远...飞行—战斗—必胜

本期导读

科技强军 2

将帅视角

施里弗 2010：在无硝烟领域建立威慑 4
Susan J. Helms 空军中将

良好和优秀之别：寄语上校军官 9
Robert C. Kane 空军少将； Gene C. Kamena 教授； James Lackey 陆军上校

论国防技术教育的关键意义 13
Walter D. Givhan 空军少将； Eric D. Trias 空军少校/博士； William H. Allen 空军少校

军事技术

推动实现美国空军的能源计划 19
Frederick G. Harmon 空军中校； Richard D. Branam 空军中校/博士； Doral E. Sandlin 空军中校

空军转用生物燃油的潜在问题及意外后果 26
Mark N. Goltz 空军退役中校/博士； Charles A. Bleckmann 博士；
Khai Vuong（王洪恺）空军少校； Jerrod P. McComb 空军上尉

用寿命周期评估法比较 JP-8 航空油和替代燃料 32
Peter P. Feng 空军中校/博士； Alfred E. Thal 博士； Charles A. Bleckmann 博士

利用纳米技术检测神经毒剂 41
Mark N. Goltz 空军退役中校/博士； Dong Shik Kim（金东石）博士； LeeAnn Racz 空军少校/博士

GPS 受阻环境下的精确定位、导航和定时 45
Kenneth A. Fisher 空军少校/博士； John F. Raquet 博士

X-HALE：未来的大气层监视平台 54
Christopher M. Shearer 空军中校

机动航天器——轨道和亚轨道飞行相结合实现节约效益 57
Thomas C. Co 空军上尉； Jonathan T. Black 博士

战略战术

卫星和遥驾飞机：两艘遥控船在战争中交会 64
Keith W. Balts 空军上校

以史为鉴

战术 C4ISR 飞机在过去、现在和未来冲突中的作用及其革新意义 70
Thomas J. Rath

四十五年无奈依旧——美国空中力量对付反叛力量的长久困境 84
Mark Clodfelter 博士

编读来往 95



科技强军

本期以军事技术发展动态为主题，几乎是美国空军理工学院的“特刊”。

美国空军是联邦政府组织中最大的能源消费部门，2008 年仅燃油一项帐单就达 70 亿美元，占美国政府燃油总耗费的一半以上。在美国开始把注意力转向替代燃料的大势下，空军也制定了《2010 年能源计划》，希望通过“减少需求、增加供应、改变文化”这三大原则措施来开源节流和培养节约思维，实现到 2016 年空军国内飞机使用 50/50 混合燃料的比例达到总用油量 50% 的目标。本期发表三篇文章介绍空军理工学院在新型燃料研究领域的作为。

“推动实现美国空军的能源计划”一文介绍美国空军理工学院及时设置替代能源专业学位课程，大力研发适用于小型遥控飞机和微型航空器的混合电动系统和燃料电池系统，深度分析合成混合燃油替代传统航空油的可行性和效益，努力培养连接燃料学和空天工程学的跨学科人才。科研和人才培养都需要经费，如同其它几篇文章一样，作者不失时机地呼吁军队领导人加强对科研的支持。“用寿命周期评估法比较 JP-8 航空油和替代燃料”一文对比分析这两类燃油从原材料开始到燃料在飞行中耗尽的整个周期中，每一个阶段排放温室气体的情况。对比结果认为：基于碳氢化合物的替代燃料比基于石油的传统燃料“更绿”。“空军转用生物燃油的潜在问题及意外后果”一文立足现场实验结果，指出两个问题：一是致癌物质苯雾流中如含乙醇，其在地表下的留存期将大为延长且污染范围扩大，二是微生物在生物燃油中滋生导致变质的可能性大幅度提高。

生化毒气监测和检测也是美国空军理工学院关注的一个领域。当前测试生化毒气的设备体积大、造价高、灵敏度偏低、测试速度偏慢，不能适应作战需要。“利用纳米技术检测神经毒剂”一文让我们看到，一种全新的手握式、背包式或遥测式快速检测器已经呼之欲出。

卫星全球定位系统 GPS 因其精确定位及导航性能令美军战力倍增，又因其易受攻击及干扰而成美军软肋。“GPS 受阻环境下的精确定位、导航和定时”一文提出四种替代导航概念技术，分别是无线电信标导航、人造随机信号导航、自然发生随机信号导航、影像辅助导航。作者进一步指出，未来方向是把 GPS 和此四种导航技术相结合，形成不怕干扰和阻断的“全源导航”。

卫星和有人/无人机已经将战场全面透明化，但两者各有短处。于前者，造价太高，变轨转位太慢，从研制到生产到发射周期太长；于后者，留空时间太短，且易被小型武器击落。“X-HALE：未来的大气层监视平台”向我们介绍一种全新的空中平台，它介于上述两者之间，而集两者优势于一身。它可能是一个携带 500 磅有效载荷的空中监视平台，在小型武器威胁范围之上的高空（而非太空）飞行，在天空驻位巡逻数周甚至几年，而成本显著低于卫星，并可随时转到全球其他任何空域。也许不久，这种细长柔翼、慢速飘忽的高空长时遥控飞机就会神不知鬼不觉地掠过天空。

美国空军理工学院研究人员不仅在研制高空长时飞机，还在想象能灵活变轨执行多项任务的航天器。“机动航天器——轨道和亚轨道飞行相结合实现节约效益”一文大胆提出：目前正在实施的机动响应太空（Operationally Responsive Space—ORS）项目将无法真正做到迅速响应作战需求，应给这种 ORS 战术卫星进一步配备能反复出入大气层的强大变轨能力，这种变轨不可采用现行的化学燃料推进，而应改为火箭推力发动机与电控小推力发动机相结合。

卫星和遥驾飞机（RPA）的一个关键共性，就是都采取分布式作战方式。就美国而言，太空作战体系相对成熟，而 RPA 大量投入实战还只是近十年的事情，虽然其战法正在迅速成熟。“卫星和遥驾飞机：两艘遥控船在战争中交会”一文围绕这个共性，建议 RPA 作战借鉴太空作战。作者利用 DOTMLPF（作战准则、组织、训练、装备、领导和教育、人员、设施这七个部分的英文缩写）框架来展开其论述，让读者领悟到太空作战和 RPA 作战之间可以共享的许多经验教训。

本刊 2011 年春季号曾发表数篇文章辩论高效能低成本的轻型战术飞机在未来非对称和非正规战争中的必要性。本期“战术 C4ISR 飞机在过去、现在和未来冲突中的作用及其革新意义”一文与这些文章有几点重大区别，第一，强烈反对改造现成机型而提出专门研制；第二，重点放在轻型侦察而非轻型攻击；第三，更强调有人驾驶而反对以无人机执行战术侦察；第四，更倾向涡轮风扇发动机而非螺旋桨，第五，明确指出此款新型战术飞机将对整个作战准则体系的巨大冲击；还有极重要的一点：作者痛陈空军领导人对非常规战争及其战术侦察特征的无视和无知，表现出一名退伍军人的强烈责任感和勇气，也折射出一种畅所欲言的环境对国家军队发展的重要性。

本刊 2011 年夏季号曾发表“五环论”创始人约翰·沃登上校力主空中力量至上的重要文章。本期“四十五年无奈依旧：美国空中力量对付反叛力量的长久困境”与沃氏理论表现出某种程度的对立。此文作者认为：对于生存在人民之水中的游击队之鱼，空中力量的硬杀伤经常于事无补，美军应更多使用空中力量的空运和侦察等软杀伤能力。若在伊拉克和阿富汗战争中继续坚持以轰炸、斩首等手段为主，将葬送美国政府的大局目标，重蹈越战的覆辙。

美国空军每年一度的红旗军演系列起始于 1975 年，以实演（Exercise）形式演练和评估联盟及联合空中作战能力。也是每年一度但才 10 年历史的施里弗军演系列相对年轻，以虚演或推演（Wargaming）形式探索如何在太空和网空领域构建无硝烟战略威慑。“施里弗 2010”（SW 10）于 2010 年 5 月举行，邀英、澳、加三国军事代表团参加，组成联盟推演。本期首文“施里弗 2010：在无硝烟领域建立威慑”由参加这场推演的美国著名女宇航员、现在的空军中将苏珊·J·赫尔姆斯撰写。有关 SW 10 的更多文章，请参看美国空军太空司令部的专业杂志《高边疆》（HIGH FRONTIER）第 7 卷第 1 期（2010 年 11 月）。

《空天力量杂志》中文编辑姜国成



施里弗 2010：在无硝烟领域建立威慑

Schriever Wargame 2010: Thoughts on Deterrence in the Non-Kinetic Domain

苏珊·J·赫尔姆斯，美国空军中将（Lt Gen Susan J. Helms, USAF）

美国战略司令部于 2010 年 5 月组织了庞大团队前往内华达州内利斯空军基地，参加空军太空司令部主办的“施里弗 2010”年模拟战争推演。

施里弗推演是空军太空司令部司令主导的一项模拟作战实验系列，目的是深度检视未来的太空和网空行动。参与者在这场模拟推演中思考如何运用外交、经济、信息和军事影响，在太空和网空领域构建威慑和防卫；通过推演了解未来需求，检验组织结构，宣讲辩论太空和网空政策及交战规则。虽然“施里弗 2010”是空军主持的推演，战略司令部从此作战实验项目十年前诞生开始就积极参与，并成为关键的使命伙伴。

从施里弗推演系列的参与经历中，我们获得一项重大的结论，这就是：冷战时代的某些威慑做法和教训可能不适用于太空和网空领域。

“施里弗 2010”的一个核心目的，是考察如何在太空和网空构建威慑，探讨怎样整合各种规划过程，运用“全政府参与”的综合方式在多个空间领域中实施行动。这项推演还希望展现国家的战略态势和决心，有效协调开展强大的多国联盟行动，必要时夺回太空和网空的主动权。

在以往多年的推演基础上，本年度施里弗推演进一步丰富了过去的经验教训，实验

了新概念，更重要的是，纳入了新的太空和网空整合元素，邀请了各职能和地理作战司令部、政府和工业部门、国防部和跨国机构，以及美国的盟国及伙伴。



这场推演从第一项行动开始，就向我们所有人预示：思考和实施有效的威慑战略来阻止一场危机将是极其严峻的挑战。

推演场景设在 2022 年，假设对一个意料中的挑衅做出反应。一个地区级对手瘫痪了美国某关键盟国的网空和太空运行系统，推演由此展开。在随后四天中，危机升级到国家高层决策机构，不久笼罩到我们所有部门，包括本国政府及国家之外的各盟国。跨国机构领导人会晤，商讨反击和慑阻未来冲突的对策，探讨如何开展多国协调来取得最佳效果。

在整个过程中，就如何慑阻敌人威胁我们的太空和网空能力，我们和盟友各抒己见。态势逐渐明朗，我们的威慑未能阻止敌人停止挑衅升级。我们了解到，这个地区级挑衅国家的领导人已经确定了这次行动的目标（尽管这些目标我们尚不清楚），并已详细比较了

* Translated and reprinted with permission from *HighFrontier*, the professional journal of USAF Sapce Command.

其行动的整体代价和收益。换言之，他们已经预测了我方在这种形势下的可能反应，认定此行动所获利益大于所冒风险，于是决定“出击”。到了这个节点，美国与其盟国手中的威慑选项已经“为时太晚”。

作为一个联盟，我们还有其他哪些选项？

我们是否可以采取某些行动来迫使冲突降级直至回归现状？有无途径来劝说对方克制，使这场推演开始出现的临界局面逐步消解？对手究竟想得到什么，准备花多大代价来达到目标？在他们的盘算中，决定“捅马蜂窝”后对方联盟最可能做出的反应是什么？我们所做的反应是否不出其所料？如果是这样，我们就等于在不知不觉中按照对方为这场冲突编写的脚本排演，我方军事行动就无威慑可言，对敌人的决策过程起不到影响效果。我方反应的易预测性，以及对方的准确运筹，都是对方成本/收益算计的一部分，早在其出手发起第一击之前就编排好。

威慑的原则

当敌对行动迅速逼近时，要想规划和实施有效的威慑极其困难。有效的威慑战略，不可局限于一个空间领域、一个责任区域、或者一个国家。威慑不可遮遮掩掩，因为其关键前提就是要提前把己方可能采取的行动作为信息明确传递给对方并影响对方的决策。

在战略层面，威慑若求有效，必须换位思考，了解敌人是如何揣摩世界地缘政治的，从而知道己方的威慑在敌人眼中应该是什么状态。而要想如此理解敌人非常复杂和困难。威慑并非一成不变，有效的威慑战略总是根据危机形势发展相应调整，必须紧密跟踪和把握敌人决策过程中不确定性程度的变化，否则就可能严重失算，致使威慑失效。

确定太空和网空威慑目标所面临的挑战

在几十年的核对峙框架中，威慑目的总是着眼于如何影响对手的政治视角和军事选择。核威慑的目的就是慑阻敌人动用核武器。一方对另一方的信仰、目的、价值观、政治运作以及动机必须透彻理解，虽然极难做到但极其必要，因为只有这样才能设计出有效的威慑战略。而且风险极高，一旦失算，后果将不堪设想。

尽管国家政府的决策过程中充满复杂因素，核威慑中有一点明白无误，且超越所有变量：你的威慑目的就是使对方明白：保持克制是所有无奈选项中最好的选项。

换言之，在几十年的核对峙框架中，问题不在威慑什么，而在怎样威慑。我们为慑阻对方不要轻举妄动跨越核门槛而设计战略时，有具体的场景，也高度复杂，尤其是在危机期间。但是就威慑的目的而言，并无模糊。

另一个显见的事实是，核门槛构成公认的威慑“成/败”标准，任何政治领导人都能理解。后果的范围和程度显而易见，敌人若决意动用核武器，马上就能被察觉。

而在探讨太空和网空威慑的目的时，除了有一道动能打击门槛比较清晰之外，其他一切都不甚明朗。在没有硝烟的战场上，威慑究竟想达成什么目的？是慑阻对方不得动用太空和网空“武器”吗，不得在太空和网空领域发动“攻击”吗，不得明显扰乱我们太空和网空网络运行吗，或者干脆就是慑阻对方不得对美国及其盟友发动任何形式的动能或非动能攻击？

本质而言，威慑战略必须建立在同等理解的基础之上，即双方明确知道对方希望影

响哪些决定。在你对威慑什么做出明确的界定之前，怎样威慑就无从谈起。

比方说，我们的目标是慑阻敌人使用动能反卫星武器攻击天基平台，那么这个目标总体而言容易衡量其成败，因为一旦出现碎片云，就会引起所有人的注意，引发全球愤慨和谴责。但是，如果这颗卫星只是神秘地停止工作了，又如何解释？卫星再无法为你提供服务，和被击落在效果上并无二致。但是因为导致这颗卫星失效的手段不同，于是彻底颠覆了你设计威慑目的的背景。

事实上，你的目的说到底还是慑阻对方以硬杀伤或软杀伤手段对美国卫星的**任何**攻击。假设你有证据证明某个敌人和这个事件有牵连，你就需要扩展你的威慑战略的范围。就是说，不只是以狭义的、即以动能攻击卫星的威胁及其相关太空碎片引发的代价为威慑的设计背景，你应在威慑战略中引入其他重要的影响因素，才能有效震住潜在敌人。

肇因判断和其他因素

在施里弗 2010 推演中，网空部队面对着如何判定肇因的挑战，这项挑战很有指示意义，它表明在确定无硝烟空间领域中的威慑目的时，存在着重大的“灰色地带”。这种威慑的目的，通常是慑阻敌人不得“扰乱我方网络，”但是“扰乱”行为不能用太空和网空通信中非 0 即 1 的二进制规则来界定。

非动能攻击可造成程度迥异的破坏，从大面积的中断，到微不足道的扰乱，其来龙去脉无常，肇因和评估难定，有的可忽略不计，有的则几乎无法溯源。想做到态势感知，或者想准确界定扰乱性质和特征，都不是容易的事情，取决于扰乱的结果和监测形势的手

段。即使从结果认定此次扰乱出于蓄意，那么谁是背后的主谋？

我们都意识到在肇因判断上面临的挑战，而威慑的成败之判别，又取决于能否判断出肇因。如果连肇事者或事件起源都无法断定，你又如何能确保你想威慑的对手会在危机前环境中对你的威慑做出意料中的响应？第三方也可能浑水摸鱼制造或升级危机，你如何消解此类风险？再者，如果你不确信肇因为何，又如何评估实施威慑战略的效果，又如何根据形势变化调整对敌威慑的布局？

复杂性还不止于此。我们对扰乱的容忍程度将根据危机环境和网络中断的范围及时间长短来调整，这又可能损害我们在危机前早就表明决心和承诺。何况这类攻击多变毫无定数，很难判断是漫不经心的小骚扰还是蓄谋已久的战略攻击。因此对于非动能攻击和打击，我们还没有设定出一个清晰的门槛，难以让太空和网空威慑目的有据可依。

不幸的是，我们还习惯于消极接受偶尔发生的网络中断，视之为正常生活的一部分，这种思维定势无助于我们制定威慑目标。但是，运行环境无论多么复杂，我们都必须思考出明确的地缘政治威慑目的，构思出有效的威慑战略，并付诸实施。

制定太空和网空威慑战略所面临的挑战

一个广泛的看法是：冷战期间的核威慑经验教训可以直接移植到太空和网空领域。实际上冷战格局相对简单，两个主要对手冰冷对峙，互知对方所付代价的根底，并建立起一个确保力量平衡稳定的核武力结构。

核环境

让我们看一下核环境下成本 / 收益交换的前提条件。核武器具有迅速而巨大的毁灭能力，一般作为最后的武器手段来取得战略政治目标，只有在断定受到威胁的形势下，才有可能首先使用。

但是，核武器的使用受制于一个很高的“行动收益”标杆，这是因为一方做出此决定的代价是，很可能引发对方或其盟国的核报复。只要双方的冲突尚未升级到核门槛高度，相关国家通常宁愿自我克制，是以保持核威慑引而不发。

我们从这个威慑战略实例中看到，“使用核武器的代价超出使用核武器的收益。”此例虽然相对简单，但无论是在美苏对峙时代，还是在当今地缘政治环境中，战略分析都极为复杂、要求深刻智力投资，不可误算。

网空和太空环境

在为太空和网空制定威慑战略时，必须认识到这两个空间领域全然不同于核平衡战略所依存的背景环境。太空和网空能力都属于新技术范畴，用以实施多年早已施行的指挥控制和态势感知功能，而非用于生成迅速毁灭和恐怖效果。我们需要就此开展一场彻底的、慎重的、涉及整个国家的讨论，对过去的许多战略经验和教训，必得先做全盘审视和调整，方可应用到太空和网空领域。

正如在这次推演中多次提及的那样，敌人在太空和网空发动攻击，其动机多为扰乱，而非大规模毁灭。如此，这些行为很容易被视为企图造成信息流中断环境，以非对称手段制造“战争迷雾”。如果你拥有手段，伺机把你的敌人搞乱，不仅能收获巨大的显见利益，而且也体现了传统军事战略中实现战略目标的一个重要手法。但由于缺乏先例，且

各国对太空和网空的依赖程度不同，故而可能对发生的成本和扰乱行动的预期收益很难预测，远不如核环境下那么显见。

这项计算，取决于特定背景环境下的许多因素：我方系统在非动能攻击下的韧性、攻击造成的破坏范围、公开政策的现行状态、威胁升级的可信程度，等等。这些因素构成零乱的罗网，其之错综，因为没有先例，也因为难找出肇因，因而较以往更为复杂和不确定。

在实现威慑目标的过程中，可以运用战略模糊，前提是此战略必须发展成熟，必须对敌人的思维发挥有效影响，必须远在敌人启动决策过程之前就部署实施。

如果在战斗打响之后才部署威慑战略，那是典型的“为时太晚”。若使太空和网空威慑战略产生效果，所有相关方在危机发生之前就必须理解以往那些久经考验的原则。

威慑战略可根据不同的敌人，酌情考虑“打击”这个选项，通过我们的太空和网空部队迫使敌人付出代价。它取决于此选项在敌人心目中是否具备威慑价值，还取决于敌人是否在其作战策划中包含了这项考虑，是否相信我方有决心动用打击手段。这一点意义重大：和核对峙下我们多年来发展的成熟战略不同，在太空和网空中做出高科技打击的威胁态势，并不一定能镇住敌人，或阻止其运用同类军事能力。

运用太空和网空能力制造中断效果固然具有军事价值，但其本身是否构成可行威慑战略的基础，则完全是另一个问题。要想慑阻一场瘫痪性非动能攻击，最有效的战略可能不在于仅仅慑阻对方动用太空和网空能力，而在于在整个冲突发生之前就提前加以慑阻，

因为冲突中运用这些能力所获得的收益，可能不及对方付出的实际代价。

结语

我们的国家拥有威慑思维的长期历史，也具备在必要时调整思维定势的能量，故而有关太空和网空的威慑讨论明显向着健康的方向发展。但是，在冷战中效果显著且在当今国际环境中继续显效的核威慑概念，不可直接移植到太空和网空领域。

与此同时，传统威慑理论所立足的基本行为原则依然适用，对核环境和网空及太空环境而言都是如此。这些原则包括：

- 需要提前获知并保持知情；
- 需要确定敌人的动机——敌人看重什么，什么是其无法承受的代价；
- 需要知道威慑欲成其效必须和其他手段并用，例如战略交流，即把意图和门槛信息明确传递过去。通过战略交流，我们可以把己方意图清晰传达给敌人以及更广大的公众社会，从而加强威慑。在信息时代，争取民心支持也能发挥巨大作用，它和展示军事武力一样，都能影响敌人的行为。

还有，在太空和网空领域，复杂程度在不断加深——难以找到肇因就是一个最显见的例子——其之错综更甚于核对峙时代，那时候，我们已经习惯于面对一个清晰的敌人和威胁。寻求大规模杀伤武器的无赖组织和非国家行为体构成另一种不对称威胁的挑战，也对传统威慑研究增添了一个令人警醒的新视角。

笔者参加“施里弗 2010”推演后，对两种威慑战略的区别做了一些初步思考，酿成本文。文中指出了我们应就实现目标的途径做哪些调整，以及应采取哪些战略来实现这些目标。文中也提出了一些问题，以助改进未来的推演。

施里弗推演为太空和网空专家提供了一个实验平台，让他们有机会应用从过去作战实验和实际环境中获得和观察到的各种经验教训，可以试验各种“出格”的建议方法，而无后果之忧。其中许多方法如在作战实验中成功，将作为验证经验贯彻到实际政策和做法中去。

战争推演的最终目的，就是使国家领导和军队做好备战，以备推演成为现实的那一天来临。“施里弗 2010”机会可贵，它培养我们在当今高科技全球环境中成为更敏捷、更应变，更富战斗力的队伍。♣



苏珊·J·赫尔姆斯，美国空军中将 (Lt Gen Susan J. Helms, USAF)，美国空军军官学院航空工程理学士，斯坦福大学航空航天理科硕士，现任加州范登堡空军基地战略司令部联合功能部队司令官暨第 14 编号空军（空军战略部队）司令官。在这项新近提升之前，她是内布拉斯加州奥弗特空军基地美国战略司令部规划与政策主任，就与本司令部及其使命执行有关的国家安全政策和指导方针、军事战略和指导方针、太空及武器运用概念与政策，以及联合作战准则的制定和实施向战略司令部司令官直接负责。她也负责国家战略级战争计划、对战区作战司令官战略支援计划以及全球打击使命应急计划的制定。赫尔姆斯中将指挥过佛罗里达州帕特里克斯空军基地的第 45 太空联队，并曾在空军太空司令部总部和空军教育训练司令部总部担任过参谋职位。

赫尔姆斯中将于 1980 年自美国空军军官学院获授军官衔，曾任 F-15 和 F-16 武器分离工程师及试飞工程师。她在担任试飞工程师期间曾飞行过 30 种美国与加拿大军用飞机。她也曾以美国空军交换军官身份，在加拿大空天工程测试中心担任 CF-18 飞机项目主管。

赫尔姆斯中将于 1990 年一月通过国家航天总署选拔，于 1991 年 7 月成为宇航员。1993 年 1 月 13 日，以空军少校和“奋进号”航天飞机乘员的身份，成为第一名进入太空的美国女军人。将军飞行过 STS-54（1993 年）、STS-64（1994 年）、STS-78（1996 年）和 STS-101（2000 年）使命，并于 2001 年作为“探险-2”号乘员在国际空间站服务。将军历经五次航天使命，在太空停留 211 天，包括长达 8 小时 56 分的太空行走，创下世界纪录。

良好和优秀之别：寄语上校军官

Good or Great: Colonel, It Is Up to You!

主笔：罗伯特·C·凯恩，空军少将（Maj Gen Robert C. Kane, USAF）

副笔：基恩·C·卡梅纳教授（Prof. Gene C. Kamena）

詹姆斯·莱杰，陆军上校（Col James Lackey, USA）*

在过去十年中，我在各种参谋、指挥和作战环境中直接领导过 90 多名上校军官，发现他们大多数人可被分为两类：良好的上校和优秀的上校。前些日子我在担任第 321 空军远征联队指挥官奔赴伊拉克作战的一年中，更坚定了自己的看法：优秀上校与良好上校的区别，在于前者具备某些可感受到的优秀品质。现在我就任空军战争学院院长，责任就是帮助军官理解这些品质，更重要的是，激励他们成为真正优秀的上校。

优秀的上校和良好的上校之间的差距，在待人接物等日常交往中依稀可辨，在艰巨任务面前则显而易见，两者在个人风范、专业勇气、领导才能等方面都有不同。优秀的上校应该是什么样的人？一名军官如何成为优秀的上校？本文试图回答这些问题，并为此列举一些必须的品质，勾勒一幅优秀上校的轮廓，不妨称之为上校艺术。在军事教育系统中，并无所谓专门培养“优秀上校”的学校。上校之优秀，在于能理解作为一名上校的整体素质，善于观察并能向其他优秀的上校学习，能反省自己的经验教训，能发奋上进并时时以上校的标准规范自己。

所有上校，无论身在什么岗位、位居什么指挥等级、拥有什么资历，都需要在其位谋其政，行使决定，解决问题。良好的上校和优秀的上校之间的区别在于如何做好这些事情。这“如何”二字涉及到怎样建立和上



级领导的关系和怎样完成任务，其间的区别极为微妙或难言述，但优秀的上校行事处人自有一番风格，令人刮目相看。这些上校办事效率高效果好，由此得到公认：“让他来做没问题！”优秀的上校不仅自己上进，而且带动整个团队走向优秀，使集体的合力远大于个人努力之和，集体的成就远超过外界的期许。在这样的上校的领导下，整个团队生机勃勃，注重效率和效果，同心协力，跨越组织机构的等级和层次障碍。

优秀的上校不以资历为本，其之优秀，在于有观点，有判断，有目标和动力——立志卓尔不凡。上校可能指挥一支部队或领导一个参谋班子，其之优秀，在于能填补缺陷，能贯彻意图、能培养和提携别人，能交流沟通，能办成事情。我们如果认真看一看他们的言行举止就会有所感悟。遗憾的是许多高层领导者不愿花时间来向新晋上校解说如何从良好迈向优秀。

* 凯恩将军的简历见文末。卡梅纳教授以上校军衔从美国陆军退役，服役期间是步兵军官，现在美国空军大学战争学院教授领导艺术和品德课程。莱杰上校在马克斯韦尔空军基地任美国陆军顾问组组长，同时在空军战争学院作战系和领导艺术系执教。

优秀的上校能填补缺陷

优秀的上校总是首先注意到缺陷，发现人员配备、程序计划、资源安排中的短板，然后不事张扬地加固、修正、训练、教育，直到补平缺陷为止。填补缺陷是一个上下左右全方位的过程——亦即可能涉及上级、下级和同级。

身为上校者，有相当的自由度来界定自己的许多职责，因此必须做到审时度势，知道自己的努力、经验和才能的落点。换言之，优秀的上校能在权责范围内高效发挥自己。上校的具体岗位只是发挥的起点，他不似中校那样，不需受僵硬的权责边界束缚，有一定的选择发挥空间，可与内部和外部的上级机构交往。

上校自主决断何时何地办何事的能力能否获得认可，取决于其信誉、反应力和其与直接上级、间接上级及同级成员的关系。一旦这位上校的专业决断能力获得信赖后，大多数上级领导都会乐意并鼓励他加强发挥。如何既要树立敢挑重担“能成事情”的形象，同时又不至冒犯他人，这是一名上校磨练成优秀的关键技能。上校必须有选择地发挥自己，知道在执行任务及处理问题过程中何时必须亲自过问，何时应鼓励别人来干。这种理解和把握时机的感觉来自于对环境的熟悉，对周围事态的了解，然后根据自己敏锐的思考、经验和判断，在必要的时间采取行动。

填补缺陷既是科学，更是艺术。优秀的上校需要透彻理解人和程序，培养专业风范关系，做出可信可行的决策，并在此基础上运用人际相处技能赢得广大信任和信赖，从而成功填补缺陷。优秀的上校必须培养出何时何地卷入和参与的准确判断力，绝不信口推辞“非关我事”。

优秀的上校能贯彻意图

上校应具备的所有能力中，贯彻意图的能力，亦即正确理解和施行的能力，可能最为重要。上校从良好成长为优秀，需要准确理解上级指挥官的意图，知道其措词、动作、表情的真实含义。优秀的上校从上级的散漫思绪和“即兴闪念”中理出头绪，补充意义，知道何时应不打破思维，何时应采取行动。有时候，上校必须请求澄清，但一旦理解上级的意图之后，就必须自行发挥和落实，传达方向，交流情况，布置轻重缓急，通过自己的言行贯彻或加强上级指挥官的意图。

上校需要通过各种贯彻意图的技能来保证上级指挥官一直处于知情状态，包括安排正式或非正式汇报及讨论，布置日程使上级准确把握局势发展，有时可能要闭门请示，把局面的隐晦方面如实呈报。这最后一点不易做好，但有必要且需要这样做。同样，优秀的上校也应鼓励自己的下级“私下说事”，把不宜公开的情况讲出来。优秀的上校能处理好这种坦诚，从而鼓励整个组织健康和成长。

如果上校不能贯彻上级的目的和意图，不能将之落实于行动，整个组织就会受损，任务就无法完成。这样的失败起因于无所适从，无所作为，乱下气力，乃至士气低迷。优秀的上校能判断出何时贯彻，或者何时需要请示更多信息，在横向和纵向上都能全面理解一项行动计划或决定，前瞻到其二阶和三阶效应、风险，以及其他相关考虑。上校能帮助上级做出决定，也有勇气自己做出困难决定。优秀的上校上承领导，下传部属，横接同事，积极做好上下衔接和贯彻，却置身幕后，不事张扬。当然最终，优秀上校的这些作为定能获得回报和理解。

优秀的上校能培养和提携别人

优秀的上校是好导师，善于运用各种正式和非正式手段培养别人，因为他们知道只有辅导好别人才能留下真正的精神财富。辅导不只是一项责任——培养新人是一项义务。所有真正的人才培养都需要有一个健全的辅导计划，需要在工作 and 生活中花精力于人际交往，愿意主动承担错责，投入资金和时间送他们去专业培养学校深造。优秀的上校在投资于人的培养上注重短期效益和长期效益的结合，能从今天的努力看到未来的回报。

优秀的上校注意发现别人及整个组织的优缺点，并努力帮助纠正。上校善于在正式和非正式场合教育别人，包括自己的上级、下级和同级。这样做时需要谨慎思考工作负荷，切勿因此导致个人或组织超负荷运转而透支。优秀的上校激励别人追求卓越，注意培育团队精神，强调提升集体的整体表现和效能。

优秀的上校不仅培养部下成员，而且将他们向上级推荐。优秀的上校勇于推让荣誉而承担错责，把主要成绩让给部下，是以帮助他们成功发展。这种权衡方式和技能需要巧妙把握和善为人想，因为上校这样做是在分发权限，但同时愿意为成功和失败承担最终责任。军官晋升到上校官衔之后，就必须抑制争功受赏的欲望，而把成绩归于集体。

优秀的上校通过培养、提携和激励部下而开创出优秀的集体。这个过程需要投入时间和精力，但是只要能做好，就能成倍地提升士气、效率和创造力。长此以往，将能留下一段精神财富，其影响之深远当超越任何军官个人的声名——即使他是一名优秀的上校。

优秀的上校能交流沟通

优秀的上校始终努力在指挥链的上下层级及本部门内外广结交流网络，是以凝聚人心促发合力。善结人脉，就能集思广益群策群力，把集体建设得更健康更高效，形成堪比高校研究生层次的团队建设环境。优秀的上校能团结众人，组成比任何个人努力都要强大的团队。

上校在信任和信赖的基础上开拓人脉，并从中获得动力，做成事情。良好的上校闷头构筑关系，优秀的上校则理解这关系其实是双行道，既有付出也有纳入。这种视角对于成功非常重要，以个人或小团体为中心的上校将难以获得别人的合作。毕竟，能否获得支持取决于上校能否运用这些关系来服务整个集体的利益。

优秀的上校能做成事情

就像一场精彩棒球赛中的“杀手铜投手”，肩负着第九回合的压力，立志为本队获胜夺下关键一分，优秀的上校总是努力为自己的部门做成事情。亦如“杀手铜投手”，优秀的上校拥有高超的服众技能，这种服众不是施压，而是基于情理和理智的坦诚辩论。优秀的上校理解健康的辩论不含个人意气，热烈而不狂热。理性的服众能达成共识，共识则是共事及合作的重要因素。例如，优秀的上校能够全面及专业地在本组织中为一项作战计划或行动方案配备好人员，并与上级、同级和下级各部门做好协调，然后通过良好关系获得支持和共识，完成决策过程。能获得支持和共识常常是靠在日常的非正规交往中加强各方关系，关系则建立在上校作为诚实“中介人”的个人信誉和信赖之上。偶尔，上校必须敢于力排众议和干扰才能完成任

务。但长远而言，上校只有建立持久的和谐
工作关系，保持正派的专业形象，才能真正
迈向优秀。

如本文开始所言，上校有良好和优秀之
分。优秀的上校能巧妙权衡和把握，把事情
做成——不在于做什么，而在于如何做。优
秀的上校能带动整个组织一起走向优秀，他

善于填补缺陷，善于贯彻意图、善于培养和
提携别人，善于交流沟通，善于在组织内外
办成事情。在当今的环境中，任何一个组织
若无优秀的上校都难成功。良好固好，却不
足成就事业。上校：再加把劲，迈向优秀！♣



罗伯特·C·凯恩空军少将 (Maj Gen Robert C. Kane, USAF), Grove City 学院理学士, 南加州大学理科硕士, 现任阿拉巴马州马克斯韦尔空军基地的 Spaatz 军官教育中心司令官暨空军战争学院院长。Spaatz 军官教育中心负责指导、整合、协调和支持军官的持续专业教育、科研与外联, 旨在培养联合及联盟作战指挥官。凯恩少将曾在土耳其、韩国、德国及伊拉克担任过多种作战与参谋职位, 包括中队、大队、联队和中心层级指挥职位。将军在驻德国担任第 86 空运联队司令官兼 Kaiserslautern 军队社区领导人期间, 为带领 Ramstein 社区赢得 2006 年度优秀设施总司令奖发挥了关键性作用。担任现职以前, 他是伊拉克巴格达联盟空军过渡部队将级指挥官, 负责盟国重建伊拉克空军的努力。将军是指挥飞行员, 飞行过 C-130、C-21、KC-135、C-37、C-32、VC-137、C-12、C-141、T-37 和 T-38 等多种机型, 拥有超过 4,200 小时飞行经验。凯恩少将是空军中队指挥官学院、空军指挥参谋学院和空军战争学院的毕业生。

The difficulty lies, not in the new ideas, but in escaping the old ones, which ramify, for those brought up as most of us have been, into every corner of our minds.

——John Maynard Keynes

观念之改变，难不在纳新，而在除旧，皆因我们从小到大，心灵各处已被传统观念占满。

——约翰·梅纳德·凯恩斯（英国经济学家）

论国防技术教育的关键意义

The Criticality of Defense-Focused Technical Education

沃尔特·D·吉翰空军少将 (Maj Gen Walter D. Givhan, USAF) ; 埃立克·D·特赖亚斯空军少校 / 博士 (Maj Eric D. Trias, PhD, USAF) ; 威廉·H·艾伦空军少校 (Maj William H. Allen, USAF)



美 国 空 军

生于技术，长于技术，诞生至今，始终以技术为身份和力量的核心。从一开始，远见卓识的领导人

就认识到技术教育对发展空中力量的深远意义。多年来，高等教育机构如美国空军理工学院，以及其所管理的民间高教计划，一直致力开发技术，培养人才，确保美国空军保持锐利的战斗锋芒。当今技术发展推动空军进入太空和网空新领域，面对新领域的种种挑战，如何提供符合国防需要的技术教育更成为关键。在这个过程中，充分利用我校的科研协作网络，培养具备技术知识并熟悉作战需求的空军人才，对于提升空军能力而言意义重大。鉴于国防对这些毕业生的需求不断增长，国家必须相应增加对科学、技术、工程和数学 (STEM) 教育的投资。今天和昨天一样，具备国防技术教育背景和丰富经验的空军领导人继续是确保美军保持领先的关键。空军理工学院从 1919 年诞生起就致力满足国家的这项需要，现在继续视之为己任。

回溯以往

莱特兄弟从俄亥俄州的代顿开创了人类航空时代，虽然当时技术简陋（木材、铁丝和纺织品），羽翼初发，但动力飞行本身就是奇迹，从一开始就启示了军事领导人思考其在军事上的运用，其对战争的革命性作用。自此而今，在莱特—帕特森空军基地的教育

和科研一直引领着天空、太空、网空力量的发展方向。在航空发轫的年代，一位充满远见的军事领导人班恩上校 (Col Thurman H. Bane) 主导创办了空中应用学校，即空军理工学院的前身。班恩意识到：技术将是空军作为未来新军种的识别标志和能力核心，因此对航空兵必须采取以技术为主的教育，才能保持这个军种充分发挥效能。班恩向在首都华盛顿负责军事航空的领导人写信，强调了以教育支持新生的空中力量的重要性，他说：“一无所知的外行担当领导将一事无成。”¹ 学校开办后，由 Edwin Aldrin 中尉（宇航员 Edwin “Buzz” Aldrin Jr. 的父亲）为骨干的第一届学生于 1920 年毕业。从此以后，空军理工学院造就出一代又一代的高级军事领导人，他们立足技术教育背景和基础，为空军的发展规划方向。

空军传奇人物中还有两人在成为传奇之前也曾在空军理工学院深造。后来晋升将军的乔治·肯尼和吉米·杜立德为别是该校 1921 年和 1923 年的毕业生，学成后都成为技术创新倡导者和高瞻远瞩的领导人。试想：对肯尼在 1920 到 1921 年的两年技术教育投资相对而言不会很大，但将军正因为从学校获得技术教育，得以不断拓展空中力量的边界，成功推动在机翼上安装机炮及开发弹跳滑翔轰炸战术等新概念。这后一种创新战术在俾斯麦海战中全歼日军供应船队发挥了重大作用。²

杜立德的传奇是另一个靠坚实技术背景引领作战创新的经典例子。他是仪表飞行的

先驱，多项飞行速度记录的保持者，审慎然而大胆地冒着生命危险拓展飞行极限。杜立德 1923 年从空军理工学院毕业，获航空工程学位，继而入麻省理工学院深造，于 1925 年获博士学位。在惊天动地的 1942 年东京空袭中，他率领 B-25 机队从航母起飞直奔东京，完成轰炸后迫降中国。这场空袭不仅展现了他的领导才能，也显示了他的技术理解能力，从而成就了别人不敢想象的壮举。

更举一例：伯纳德·A·施里弗将军被尊称为“空军太空和导弹计划之父”，其传奇在尼尔·希恩(Neil Sheehan) 所著《冷战中的血火和平》有详尽描述，将军以其从空军理工学院获得的工程技术教育，领导空军飞向太空领域。³ 他是一名精明而老到的领导，不仅熟悉华盛顿的迷宫厅廊，也理解科技发展动态，能够交往民间科学家、工程师、承包商和项目决策者，仅用几年时间就带领美国洲际弹道导弹(ICBM) 计划从蓝图发展成真实的作战能力。施里弗堪称学者型领导人典范，依靠经验和知识，在动态发展环境中推行领导，不断拓展极限。

在我军的一些伟大领导人中，以上几位将军的特点在于其之伟大更多地得益于先进技术教育。千千万万的更多理工毕业生，成就虽不似显扬，但都在科技开发领域中有所作为，为我军在每一个新使命领域中装备优势技术能力做出独特贡献。

新领域，新挑战

随着空军的使命逐步扩展，对我军领导人的技术教育要求在广度和深度上也相应扩大。正如施里弗将军领导空军飞向太空，新一代领导人肩负着引领我军深入网空的重任。这一新的作战领域需要对所有军衔和技

能层级都投入重资，开展 STEM 教育。网空与天空及太空有一点不同，这就是进入成本低，但若遭破坏，则对国家安全和经济破坏巨大。网空领域在演进中其复杂程度呈几何速度增长。⁴ 网空作战训练固不可少，但不足以保证成功。我们还必须对部队开展技术教育，使军人能预测和评估风险，研发解决方案，确保占据网空优势。空军理工学院响应空军太空司令部的要求，加强发挥培养未来军队领导人的前沿作用，在网空研究生教育和规划发展教育中增加了网空专业继续教育课程。这种有着明确目标的多层次教育围绕各种网空科研项目展开，更重要的是，输送大量拥有学位或证书的毕业生，强化我空军网空技术力量。

空军面对着困难的挑战，同时承受着必须提高效率的越来越重的压力。空军正把强化核武器管理作为一项主要任务，由此引发对这个领域的重新重视。空军全球打击司令部主导这项任务，但是需要得到与核武器相关的许多部门的配合支持。国防部长领导下的国防部核武器管理特遣队特别点出了教育和训练的意义，认为只有通过教育和训练才能保障我军形成核管理万无一失的文化。⁵ 空军理工学院及时响应，重新开设核工程课程，除了传统研究生学位课程之外，又增加了证书课程，教学内容也都更新。空军理工学院是为空军和陆军提供国防核工程硕士研究生学位教育的唯一单位。民间核工程教育的重点是核发电和核医学，空军理工学院的重点是解决国防中的独特问题。国防部不仅关注核材料的安全和安保，还对核武器的效果与运用研究有特别要求。这些需求引发相关的国防技术教育和科研需要，而空军理工学院有现成教学资源。

全球化的发展增加了美国对海外资源、技术和人力的依赖，不断挑战着我们保持技术优势的能力。美国必须继续自主培养出新一代科学家和工程师，不断补充到国防部和空军队伍之中，否则我军的技术创新能力将面临萎缩危险。⁶ 空军理工学院连同空军研究实验室，是 STEM 人才的摇篮，是应用研究、教育和国防使命的聚合点，其显著作用一目了然。我们的学生在学习期间就多有贡献，在毕业之后同样能迅速发挥所长，运用学位课程知识服务国防部和空军的各种重大项目。对他们的教育投资，在其投身工作之后，成效立竿见影，效益长久深远。

大协作，大力量

要跟上技术发展，就需要集教育、研究、以及那些依赖技术实施使命的各应用部门的力量。根据对技术领导人才的需求，用人单位和培养单位互动互助，就能在正确的时间和地点培养出正确的人才队伍。合作与协同，对于提高教育效果及扩展科研机会至为重要。空军理工学院拥有莱特—帕特森空军基地的独特地理优势，毗邻空军研究实验室、空军装备司令部、以及国家空天情报中心等高科技部门。而且，空军理工学院积极和全国许多机构开展合作，包括国家安全局、国土安全部、国家侦察局等，机构间共享专业技术、实验设施和其他资源，同心协力实现共同目的——增强美国空军和国家的天空、太空和网空力量。国防界、学术界、及政府有关部门长期合作，构筑核心框架，在战争时期、变革时期和财政紧缩时期提供不同的制胜能力，满足战场将士的需求，保证我们的毕业生紧跟全球当前作战形势需要，及时调整技能，充分发挥作用。

空军历来奉行职衔顺序晋升和专业网络交流的做法，从而持续为空军创造内外合作的机会。这种合作对于满足紧急使命需求而言至为重要和珍贵。空军理工学院通过跟踪学生的升迁调任，通过与校友、使命伙伴和出征教职员保持联系，及时了解到各种紧急的科研开发要求。在此基础上，军事组织就能以空前的速度和灵活性做出响应，而无需等待政府和民间部门签署繁复合约才能启动开发。在 2009 年，当美国中央司令部提出对阿富汗空军建设的进展进行监督后，北约训练部负责阿富汗军训的部门找到空军理工学院，请求研发一种自动化工具，要求能够自动收集全面数据，开展日常回归统计，跟踪关键指标。空军理工学院经过三个月科研攻关，就研制出第一套样机。也是应中央司令部的要求，空军理工学院设计出用于伊拉克军队的 22 种后勤采购课程，从本年开始交付。学院中拥有宝贵的教学和科研力量，不仅能迅速培养军队技术领导人才，还能系统化地开发先进科学技术。

这些实例表明了核心技术教育能力的价值，表明获得高等技术教育的毕业生对保证我国现代空军始终保持技术创新的重要作用。学生在学校的研究成果和课堂项目能应用到作战实践和国家的其他科研计划中；毕业离校后参加各种最新科研项目，也会把信息反馈到学校，以助课堂内容及时更新。这种科研与课程设置的共生和循环关系，要求学校保持足够数量的学生和教员，要求国家提供足够的经费，以保证技术教育的繁荣，生成预期的结果。依靠坚实的技术教育计划，我们将培养出杰出的技术型领导人，研发出可能改变游戏规则尖端技术。如果我们无法持续稳定提供具有国防技术教育背景的人才，以技术为支撑的空军将在所有方面都受

到影响。军队对技术人才的需求不断升高，空军理工学院已经改造教育方式，引进网上和卫星通信教学法，一方面把学生招进校园课堂，另一方面把网络课堂送到空军基地。经过这些努力，去年一年就有 28,000 人获得继续技术教育毕业证书，320 人获理工硕士学位，31 人获博士学位，2,600 人从各民间院校毕业。

展望未来

美国国家科学院国家研究学会最近公布报告，指出空军在技术竞争能力上的衰退，将引发科学、工程和国防采办的数个领域中出现问题。⁷ 表述空军总部对科学技术远景展望的《技术地平线报告》也承认：我军所需的这些能力潜在敌人也可能发展出来，因为他们能接触到相同的科学和技术。⁸ 在国防预算紧缩之时，决不可松懈技术发展，凭借技术，我们才能提高人力效能，加强空军的各项能力。空军理工学院所拥有的科研和教育能力，能在多个领域直接支持《技术地平线报告》表述的远景目标，其中包括提高网空韧性、研发自适应自主系统、在无地球定位系统（GPS）环境中作战、建造快速组网卫星系统、提高太空态势感知，等等。根据这份报告的精神，本期《空天力量杂志》从我校大量论文中选择发表了具有代表性的几篇，这些论文谈及了一些关键的科研领域，如网空发展、能源和燃料、GPS 替代技术、以及能改进作战效能和效率的技术。

和当年施里弗将军力主研发洲际弹道导弹能力一样，要想有效推动现在的这些军事技术发展，领导人的远见卓识和指引必不可少，这些领导人必须具备坚实的科技知识基础，拥有强大的技术教育背景。早在过去，阿诺德将军就认识到：能启发他发现自己需

要什么的首先是科学家和工程师。⁹ 《2010 年空军科技战略》是我空军科技研发工作的纲领，指引我们迎接全球化的挑战，在其他国家也在开发类似技术和人力以求发展出先进作战能力的形势下，确保我军继续保持技术优势。并且，美国必须继续通过坚实的 STEM 教育，培养出新一代科学家和工程师，吸引他们加入空军，否则我们的技术创新能力将走向萎缩。¹⁰ 要培养出这些资质优异的 STEM 专业人才，空军理工学院是一个关键的源泉。

国防技术教育对国家的最大贡献就是培养毕业生。他们思维敏捷、掌握科技知识后，将成长为攻克各种技术难关的带头人。他们甚至在学校承担科研项目时期，就注意联系当今问题和未来挑战，取得重要的科研成果。长期而言，他们无论在军队还是在民间发展，其影响和贡献将随着肩上的责任加重而提升。例如，空军理工学院最近一位著名的校友雷伊·O·约翰逊博士（Dr. Ray O. Johnson）目前就任洛克希德·马丁集团资深副总裁兼首席技术官，他从空军理工学院获得电气工程硕士和博士学位，通过学校学习打下坚实的技术知识基础，在空军服役期间成就卓著，现在进入国防工业再做贡献。他的发展虽非个别，但是，如果我们希望继续保持空军和整个国家的技术领先地位，就必须培养出更多的肯尼、杜立德、施里弗、埃伦斯，和约翰逊。

为此目的，相关机构必须注意拓宽和增加 STEM 学生的生源。虽然空军理工学院的学生主要是空军军官，其他各军种和其他许多伙伴国家也派遣军官前来求学。并且，从 2004 年开始，我校已有 75 名学生以士官身份取得理工硕士学位。这些军人学者学业优异，再一次表明空军也必须依靠获得高等教

育拥有坚实科技知识的士官队伍。莱特—帕特森空军基地的文职人员也踊跃报名参加空军理工学院的课程，在过去数年中，通过各种赞助计划，如国家科学基金会和国防部科学/数学/研究转岗（SMART）奖学金计划，我校文职学员人数不断增加。我校所在城市代顿地区研究生学院（DAGSI）作为当地高校工程研究生学院的协同总校，积极挖掘当地的生源，也为我校提供了许多文职学员。自 DAGSI 成立以来，招收到 700 多名 DAGSI 奖学金学生，其中有 119 名 STEM 学生进入空军理工学院深造并毕业，他们中大多数人最终在莱特—帕特森基地获得政府工作。

虽然成就显著，但我们深知：我们未能成为美国空军培养出足量的拥有先进 STEM 技术知识和学位的未来领导人，原因之一就是目前的人事管理模式不能准确匹配和管理军队的需求。我们正在讨论缓解这个问题的方案，这就是运用一个类似于管理评级部队的人才储备管理系统。这个系统可以发现和界定真正的人才需求，确保军队保持具备国防技术教育背景的军事后备领导人才的充分储备。¹¹ 这个系统还将允许少量技术博士军官进一步拓宽经历，让他们在战场和教学领域都能更好发挥作用，而不会因为称职教官人数不足就简单地派他们在空军军官学院和空军理工学院轮流教学。

回到1919……以及未来

空军从一开始就拥有技术基因。我们的第一代领导人在航空技术发轫之初就认识到这个事实。我们的领导人还理解国防技术教育对于空军承载国家使命、满足国家需要、实现战略目标的重要性。科学技术的发展正引导我们进入新的作战领域，足以证明我们只有在国防技术教育上看得更远，做出更大努力，才能保持我军的竞争锋芒和实力。

民间机构若需充实高层主管，可从内部提拔，也可从外部招聘。军队组织则不然，必须自己培养。这种晋升金字塔结构凸显出军队投资技术教育的必要性，从而确保未来的空军领导人具备必要的教育和技术基础，知道如何为空军和国家发展作战能力。空军理工学院正是培养这些领导人的园地，为国家、为盟国、为我们的整个武装力量，积极提升天空、太空和网空力量。我们将继续致力提供符合国家需要的国防技术毕业生，同时开展继续教育、科研和咨询服务。空军前参谋长加布里埃尔（Gen Charles A. Gabriel）曾经说过：“空军理工学院的今天代表着美国空军的明天。”¹² 此语对 1919 年而言自是贴切，对今天而言更一语中的。♣

注释：

1. Col Thurman H. Bane 1918 年 11 月 30 日致首都华盛顿军事航空总监的信，参看 Air Force Institute of Technology: First Sixty Years, 1919—1979 [空军理工学院 1919—1979 六十年历史]，1—2。
2. Sam McGowan, “General George C. Kenney: Pioneer of Aerial Warfare Strategy and Tactics in World War II's Pacific Theater” [肯尼将军：第二次世界大战太平洋战区空中战争战略和战术先驱]，World War II 11, no. 2 (July 1996): 10。
3. Neil Sheehan, A Fiery Peace in a Cold War: Bernard Schriever and the Ultimate Weapon [冷战中的血火和平：施里弗将军和终极武器]，(New York: Random House, 2009)。
4. Office of the Chairman of the Joint Chiefs of Staff, The National Military Strategy for Cyberspace Operations [国家网空作战军事战略]，(Washington, DC: Department of Defense, 11 December 2006), v, <http://www.dod.gov/pubs/foi/ojcs/07-F-2105doc1.pdf>。

5. Secretary of Defense Task Force on DOD Nuclear Weapons Management, Report of the Secretary of Defense Task Force on DoD Nuclear Weapons Management: Phase I: The Air Force's Nuclear Mission [国防部长领导下的国防部核武器管理特遣队报告：第一阶段：空军核使命], (Washington, DC: Department of Defense, September 2008), 4—5, http://www.defense.gov/pubs/phase_i_report_sept_10.pdf.
6. Office of the Chief of Staff of the Air Force, Air Force Science and Technology Strategy, 2010 [2010 年空军科技战略], (Washington, DC: Office of the Chief of Staff of the Air Force, 2010).
7. National Research Council of the National Academies, Examination of the U.S. Air Force's Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) Workforce Needs in the Future and Its Strategy to Meet Those Needs [美国空军科学、技术、工程和数学 (STEM) 未来人才队伍需求及应对此需求的战略], (Washington, DC: National Academies Press, 2010), http://download.nap.edu/cart/deliver.cgi?&record_id=12718.
8. United States Air Force Chief Scientist (AF/ST), Report on Technology Horizons: A Vision for Air Force Science and Technology during 2010—2030 [技术地平线报告：空军 2010—2030 科技远景], vol. 1, AF/ST-TR-10-01-PR (Washington, DC: Headquarters US Air Force, Office of the USAF Chief Scientist, 15 May 2010), http://www.aviationweek.com/media/pdf/Check6/USAF_Technology_Horizons_report.pdf.
9. Maj Dik A. Daso, Architects of American Air Supremacy: Gen Hap Arnold and Dr. Theodore von Kármán [美军空中优势配置设计师阿诺德将军和卡尔曼博士], (Maxwell AFB, AL: Air University Press, September 1997), 119, <https://research.maxwell.af.mil/papers/ay1997/books/Daso.pdf>.
10. Office of the Chief of Staff of the Air Force, Science and Technology Strategy [空军科技战略].
11. Lt Col Raymond W. Staats, Lt Col Marty Reynolds, and Maj Aaron D. Troxell, “Inventory Management of Officers with Advanced Academic Degrees: The Case for a New Approach” [对拥有高级学术学位军官的人才储备管理新方法案例], Air and Space Power Journal 21, no. 2 (Summer 2007): 42—52, <http://www.airpower.au.af.mil/airchronicles/apj/apj07/sum07/sum07.pdf>.
12. 加布里埃尔将军 1983 年 12 月 15 日在莱特—帕特森空军基地空军理工学院校友协会宴会上的讲话, 参看 Air Force Institute of Technology: First Sixty Years, 1919—1979 [空军理工学院 1919—1979 六十年历史], 7-2.



沃尔特·D·吉翰空军少将 (Maj Gen Walter D. Givhan, USAF), 南方大学文学士, 州立特洛伊大学理科硕士, 高级空天研究学院军事艺术科学硕士, 武装力量工业学院理科硕士, 现任俄亥俄州莱特—帕特森空军基地空军理工学院院长。空军理工学院主要培养国防科技高级人才, 并具备持续教育、科研、咨询等功能, 以推进美国及其武装力量与伙伴的天空、太空和网空力量为使命。吉翰少将出生于阿拉巴马州 Safford 镇, 由军官训练学校获授军官衔。他曾在“沙漠盾牌”与“沙漠风暴”行动中担任法国地面部队将级指挥官的美国空军联络官。将军指挥过战斗训练中队、作战大队、空军基地联队及空军远征联队, 在担任空军理工学院现职以前, 是驻喀布尔的阿富汗联盟安全过渡司令部下属的联盟空中力量过渡部队将级指挥官。将军是指挥飞行员, 飞行过 T-37、T-38、T-1、AT-38、F-15 和 A-10 等多种机型, 拥有超过 2,500 小时飞行经验。他也曾任麻省理工学院国家安全研究员。将军获得的军功奖励中包括二橡叶簇功绩勋章和铜星勋章。



埃里克·D·特赖亚斯空军少校 / 博士 (Maj Eric D. Trias, PhD, USAF), 加州大学戴维斯分校理学士, 空军理工学院理科硕士, 新墨西哥大学博士, 现任俄亥俄州莱特—帕特森空军基地空军理工学院院长行动组主任兼计算机科学助理教授。他于 1988 年入伍, 并入围空军 1994 年度十二位杰出航空兵奖候选人。他于 1998 年通过航空兵教育及军官授衔计划和军官训练学校获授军官衔, 曾作为网空作战官在韩国乌山空军基地和汉弗莱陆军基地, 以及新墨西哥州克兰德空军基地分布使命作战中心服役。他的科研领域涉及知识发现与数据挖掘、信息系统安全、数字法庭, 及若干网空相关课题。特赖亚斯少校是空军中队指挥官学院和空军指挥参谋学院的毕业生。



威廉·H·艾伦空军少校 (Maj William H. Allen, USAF), 基督教兄弟大学理学士, 空军理工学院理科硕士, 现任俄亥俄州莱特—帕特森空军基地空军理工学院行政官。他于 2000 年通过孟菲斯大学预备役军官训练团课程获授军官衔。他曾以工程师身份在各种岗位任职, 包括弹药测试、火箭推进设计、评估与系统工程等。艾伦少校是空军中队指挥官学院空天基础课程和空军指挥参谋学院的毕业生。



推动实现美国空军的能源计划

Achieving the Air Force's Energy Vision

弗里德里克·G·哈蒙, 美国空军中校 (Lt Col Frederick G. Harmon, USAF)

理查德·D·布拉南, 美国空军中校 / 博士 (Lt Col Richard D. Branam, PhD, USAF)

杜拉·E·桑德林, 美国空军中校 (Lt Col Doral E. Sandlin, USAF) *



美 国 空 军 是

联邦政府机构中最大的能源消费部门, 其飞机、地面车辆和设施在 2008 年的能源耗费达 90 亿美元。¹ 同年中,

空军的燃油账单为 70 亿美元, 占美国政府燃油总耗费的一半以上。² 鉴于能源对空军执行其使命至关重要, 空军部长制订了《美国空军 2010 年能源计划》, 此计划由三大原则措施支撑: 减少需求、增加供应、改变文化; 并提出能源愿景: 一切工作考虑能源因素 (图 1)。空军理工学院积极响应空军的能源计划和愿景, 组织师生参与前两大措施的实施, 建立专门研究替代能源的学位课程, 研制混合电动遥驾飞机, 测试合成燃油的应用, 创设燃料配发管理的新课程, 开展燃料储存、管理和配发的研究。第三大措施“改变文化”则不属本文讨论范围。鉴于空军理工学院在能源方面的学术教育和研究卓有成效, 因此美国空军应该继续支持我院加强能源相关课程和研究项目。我院可利用增加的经费, 建

立一个能源研究中心, 从而更好地支持空军应对能源相关的挑战。

设置替代能源专业学位课程

在美国, 研究人员正在探究替代能源 (混合电动系统、燃料电池、生物燃油、太阳能) 的可行性, 力图减少美国对国外石油供应的依赖。这方面的研究大多数关注汽车运输和地面设备, 本文则探讨军事界和工业界对清洁、再生能源用于航空领域的兴趣和进展。美国航空航天学会 (AIAA) 《2009—2013 年



图 1: 空军能源计划三大措施 (取自《美国空军 2010 年能源计划》, 见注释 1。

* 哈蒙中校是美国空军理工学院航空工程学助理教授; 布拉南中校是空天工程学助理教授, 目前在阿拉巴马州马克斯韦尔空军基地的空军战争学院担任教官; 桑德林中校是物流和供应链管理理学助理教授。

战略计划》围绕能源和航空航天发展,将“改进空天能源效率和推进新能源技术”列为一项战略必需。按照这项要求,“AIAA 必须提供协作和信息共享环境,确保最优秀的技术精英和创新人才投身航空航天领域的燃料效能研究,发现新兴机遇,为开创未来清洁和合理价位能源作出贡献。”³ 美国空军、国防承包商,以及工业界需要这些同时拥有空天工程和替代能源专业知识的研究人才。许多大学提供质量优良的相关领域专业培养课程,但能把这两类专业结合在一起培养学生的院校却少之又少。空军理工学院填补了学术界的这个缺口,在相关专业培养计划中增加了能源相关学位课程,聘请跨两个学科的专家授课,并扩充实验室设施。

面对空军缺乏具有替代能源和空天工程双重教育背景的综合人才的压力,空军理工学院在航空工程学和航天工程学硕士培养计划中增设了研究替代能源系统的专业学位课程。此学位课程作为目前两项硕士培养计划的延伸,要求学生掌握能源、能源优化和空天工程的专业知识,学生应具备航空航天工程专业背景,在此基础上学习能源相关系列课程,主要关注替代能源和先进推进系统,以及它们在微型航空器(MAV)、小型遥控飞机和高空长时飞机中的应用等研究课题。已经有两名学生在2010年完成此系列课程,我院在2011年又招人六名学生。

俄亥俄州另有两所大学,即莱特州立大学和代顿大学,通过非常成功的代顿地区研究生联合培养计划,也参与到这项替代能源学位培养计划中。俄亥俄州已经批准了这两所大学设立清洁和再生能源专业硕士学位的建议,两所大学并设计出相关课程,接受空军理工学院学生前来修习。这种军民协作允许军事院校利用民间大学已经具备的研究条

件,派学生到民间院校研读课程以满足学位要求。

作为这项新专业培养计划的一部分,空军理工学院还设计出一门独立研修课程,要求学生研究小型遥控飞机推进系统构件的性能分析方法,如电动机、先进蓄电池、内燃机和燃料电池等。在这个新兴学术领域有一定发展之后,我院计划建立一个实验室课程,专门探讨燃料电池技术、电动机、先进蓄电池和超电容器的基础机理。

空军理工学院正在努力培养对替代能源和航空航天工程都有一定研究的跨学科专业人才,满足空军和工业界的人才需求。新一代工程师将支持空军实施能源计划,实现降低能源需求的目标,重点放在提高推进系统效率,以及通过使用替代能源来加强能源供应。从战略位置上看,空军理工学院与空军研究实验室位于同一个基地(赖特—帕特森空军基地),周围有许多航空航天企业,因此有利于我院学生能就近获得实际工作经验。完成学业的学生可获得跨能源工程和航空航天工程的“混合”学位,因此我院的这项新培养计划具有明显特色。

研制遥控飞机混合电动系统

工业界和高校学术界都在研究新型推进技术,包括为航空航天器设计混合电动系统。有些混合电动系统采用内燃机加电气驱动系统,也有些采用燃料电池形式。在实验飞机协会2009年美国奥什科什 AirVenture 大会上,德国 Flight Design 飞机设计制造公司展示了一款可用于普通飞行器的并联式混合电动推进系统,其中采用了内燃机和电动机(图2)。功率为30 kW的电动机采用蓄电池动力,对尺寸缩小的86 kW Rotax 914 发动机提供



图 2：Flight Design 公司研制的混合电动推进系统（取自 Jason Paur, “Hybrid Power Comes to Aviation”), 见注释 4。

加力，用于起飞和爬升过程。⁴ 这种动力辅助并联混合配置还允许飞行员在发动机故障时利用电力滑翔。另一家公司 AeroVironment 在为大型遥控飞机研制电气驱动与氢燃活塞发动机混合配置的系统，准备安装到其高空长时“全球观察者”（Global Observer）遥控飞机中。⁵ 在此之前，加州大学戴维斯分校三位研究人员已经推出一种用于小型遥控飞机的混合电动系统概念设计，为空军理工学院目前研制的遥控飞机样机奠定了基础。⁶

空军理工学院毕业生 Ryan Hiserote 选取了三种用于小型遥控飞机的典型并联式混合电动系统概念设计，每种设计采用三种电池放电结构，共构成九种不同配置。⁷ 通过对比研究他发现：对于一架执行典型的五小时情报侦察飞行任务的遥控飞机来说，最适合的配置是一台内燃机加一台电动机和一个离合机构，脱开发动机之后，飞机便转入电动静音飞行。在情报侦察空中飞行过程中，发动机处于关机状态，从而减少飞机噪音痕迹。在空军理工学院航空航天工程系学习的军队和文职学员在 Fred Harmon 助理教授的指导下，正在设计一种基于双点概念设计的混合电动

遥控飞机样机，此设计中包含一台能保证巡航速度的内燃机、一台电动机和一组能保持较低续航速度（巡逻速度）的蓄电池。这种并联式混合电动设计比仅采用电动动力的飞机获得更长的留空时间和更远的航程，并且比汽油动力飞机表现出更小的噪音和热痕迹。此新型遥控飞机重量为 13.6 千克，耗油比传统内燃机动力飞机低 40%，在执行空中情报侦察任务期间仅依靠电动系统动力飞行，即处于“静音”飞行模式，从而提高飞机的任务能力。这些科研努力表明，人们对混合电动技术运用于航空航天领域的兴趣越来越高，也表明此技术具备作战潜力。

除了研究碳氢辅助燃料动力发动机的混合电动系统之外，许多公司和高等院校还在开发基于燃料电池的技术，希望将此技术用于航空领域。波音公司最近成功试飞一款有人驾驶飞机（采用 Dimona 电动机的双座滑翔机，16.3 米翼展），该机使用质子交换膜燃料电池 / 锂离子电池混合推进系统。⁸ 波音公司专家相信，这种燃料电池技术可以驱动小型有人和无人驾驶飞机。对于大型商用飞机，设计人员可能将固态氧化物燃料电池用作如辅助动力装置等二次发电系统。佐治亚州理工学院也设计、制成并试飞一款燃料电池动力遥控飞机。⁹ 另外，美国海军最近起飞一款称为“离子虎”（Ion Tiger）的小型遥控飞机，飞机动力来自一个 500 瓦燃料电池。¹⁰ 还有，空军研究实验室制成一种基于燃料电池的系统，为一款“美洲狮”（Puma）遥控飞机提供动力。依据和空军研究实验室签署的一份小企业技术创新科研协议，他们对原来只靠蓄电池提供动力的“美洲狮”进行了改造，改用燃料电池混合系统，从而将此飞机的续航时间从 3 小时提高到 9 小时，极大改善了飞机的任务能力。¹¹ 在 2009 年 7 月，

Antares DLR-H2 实验飞机试飞成功，成为世界上第一架采用燃料电池动力起飞的有人驾驶飞机。¹² 不久前，空军理工学院启动了一项概念设计工具研发项目，用于探讨在微型航空器中使用燃料电池的利益得失。¹³ 此工具整合空气动力学、推进、动力管理和动力源等方面的精密分析，确定一款微型航空器执行既定任务的续航能力。

以上在混合电动系统方面的多项研究成果，无论是基于内燃机还是燃料电池，都清楚表明人们对替代能源在航空领域的应用充满兴趣，上述成果将在不同尺寸 / 类型的飞机和不同任务的应用中发挥作用。例如，如前所述，空军理工学院科研人员正在测试一种用于小型遥控飞机的混合电动系统样机，以确定其在执行典型情报任务中的用处。另外，我院学生正在开发一种用于教练机的混合电动系统概念设计，以测定在一次典型的教练任务中可以节省多少燃料和能源。美国空军应支持空军理工学院对燃料电池技术的研究，使我院能加大研究力度，确定这些技术对小型遥控飞机和微型航空器的航程及续航能力有多大改进。对于大型飞机，这些技术也可以用作辅助动力。混合电动系统将对上述空军能源计划中呼吁的第一项措施做出贡献，有助于空军降低能源需求。

开展合成燃油应用测定

空军理工学院也正在努力支持这项能源计划中的第二项措施：增加能源供应。我院正在开展替代能源的研究。航空油对空军和民航系统而言都是一项巨大的开支。在 2006 年，燃油费用在历史上第一次成为美国民航业运营成本中的最大一项费用。¹⁴ 美国空军作为美国政府的最大航空油用户，每年消耗约 25 亿加仑。¹⁵ 空军可以减少燃油开支，

途经包括使用替代燃料（例如 Fischer-Tropsch [FT 或费-托] 合成燃油）、设计更高效的发动机或新式推进系统、研制更优化的空气动力配置和更轻的飞行器结构。¹⁶

工商界和政府都成立了具体部门，研究和验证替代燃料应用。有一个联合计划称为“商业航空替代燃料项目”，目的是通过联合新兴的喷气发动机替代燃料工业，将这些新型燃油用于商业航空，从而促进航空业的能源安全和环境可持续发展。¹⁷ 在空军研究实验室，担任推进系统理事会燃料及能源技术顾问的 Bill Harrison 也强调指出，美国需要增加国内燃料供应，需要研究、测试和验证新型替代 / 本国产燃油。¹⁸ 替代燃料可以取代如 JP-5、JP-7 和 JP-8 号航空油等许多传统燃料。例如在 2007 年 8 月，B-52 轰炸机通过认证，可以使用比例为 50/50 的合成油 / JP-8 混合油。¹⁹ 空军还在 2007 年成立了替代燃料认证办公室，经空军部长特许，负责管理对空军所有作战平台（40 多种）、保障设备和基地基础设施使用比例为 50/50 的 FT/JP-8 混合油认证工作。²⁰ 现在空军中几乎所有作战平台都已通过认证，可以使用加入合成油的混合油。

空军理工学院积极研制取代传统喷气发动机燃料的替代燃料。喷气发动机燃料属于通称为煤油的碳氢大类材料。²¹ 把基于 FT 合成燃料工艺的合成燃油与从石油提炼的传统燃油（如 JP-8 号航空油）相比，FT 燃油来自其它原材料，如煤、天然气或生物质，这是一个催化化学过程，先将原料转化为一氧化碳和氢气，然后结合而成为更长的碳氢分子链。理论上，FT 燃油的能源含量足以取代传统燃油，但是我们需要开展更多的研究，探讨这些燃油在那些原本使用传统燃油的设备中的使用情况。²² 空军理工学院的燃烧优

化及分析激光实验室正在研究 FT 燃油用于超密燃烧室的可行性，该实验室拥有数种诊断手段（例如：测定燃剩碳氢化合物和氧化氮含量），可用于分析这些新型燃料的性能。阶段性成果表明新型燃料大有可为，证明 FT 燃油可以取代传统喷气发动机燃料。

设置石油管理专业课程和燃油配发研究课程

最近，空军理工学院设置了一个燃料管理理科硕士专业，属于物流和供应链管理范畴。在 2010 年秋季，空军五名燃料管理军官入学，投入这门新专业的学习。专业课程包括库存模型、需求预测、供应链韧性、替代燃料、环境问题、以及石油的运输、配发和储存。学生完成此专业学习计划后，将分配到空军石油局、国防后勤局及各大司令部参谋部的其他石油管理岗位。

在空军理工学院运营学系学习的美国和国际学生开展了有关燃料管理的大量深度和前沿研究。例如，David Mazzara 少校完成了遥驾飞机空中加油的成本效益比分析。²³ James Nicholson 少校论证了在空中机动司令部内用生物柴油取代石油基柴油类燃油的费效比，得出传统燃料价格提高后如何补偿生物柴油生产成本所需的价格数据。²⁴ Juan Salaverry 中校设计出一个预测其母国阿根廷喷气发动机燃料价格走向的模型。²⁵ Murat Toydas 少校研制出两个非线性优化模型，可用于验证在特定起飞地、目的地和加油机基地的飞机起飞燃油重量与加载货物之间的互相交换关系。²⁶ Evren Kiyamaz 中尉开展了一项测定空运燃油的能效研究。²⁷ 所有这些科研活动都在于寻找降低燃料需求或者提高燃料供应的新途径。

空军理工学院一名完成了空中机动司令部高级研修计划的近期毕业生 Phil Morrison 少校在一项非常成功的研究中，完成了调整 KC-135 压舱重量的研究。²⁸ 他的设想是把压舱燃油从机身前部的燃油箱移出去，代之以在飞机其他部位安放其他重量（比如防护装甲），这样做有两个重大好处：(1) 加油机可以向受油机输送更多的燃油；(2) 空军可以从 KC-135 机队的节油改进中收获重大的节省效益。Morrison 少校的这项研究表明，他的建议如果得到实施，可在不到两年时间内收回成本，并在此后每年节约 1,400 万美元的燃油费用。空军最近已经拨出资金来改造 KC-135 的压舱油箱设计。

结语和建议

美国空军通过减少需求、增加供应和改变文化这三大措施，正致力实现减少能源开支和提高能源安全的目标。空军理工学院坚定支持空军能源计划中的前两大措施，具体表现为开设研究替代能源和燃料的新专业课程，研制混合电动推进系统，测试可以取代传统燃油的合成燃油，以及推动燃油配发和管理方面的研究等科学教研活动。空军理工学院的军队和文职学员在读完航空航天工程、替代能源和燃油管理等专业课程之后，将具备跨学科知识背景，走上技术领导岗位，把学到的知识和技术运用于关键的航空和航天领域，为空军实现能源计划做出贡献。

美国空军需要全力支持空军理工学院在能源领域的投入。空军理工学院应扩大课程设置，开设更多的能源和燃料相关课程，并建造能测试混合电动系统、燃料电池和合成燃油的实验室。我院需对各种概念设计工具加以改进，以能分析空军未来飞机如混合电动教练机和遥驾飞机的各种选择方案。我院

还需要对基于燃料电池的系统做进一步研究,测定这种技术能将小型遥驾飞机和微型航空器的航程和续航能力提高多少。对于大型飞机,我院应该开展更多科研,理解燃料电池系统作为辅助动力装置的可行性。另外,如

果我院获得足够的支持,可能考虑建造一个专门研究能源的跨学科研究中心。显然,空军理工学院在支持美国空军实现能源愿景的过程中必能发挥关键的作用。♣

注释:

1. Air Force Energy Plan 2010[美国空军 2010 年能源计划], (Washington, DC: Assistant Secretary of the Air Force for Installations, Environment, and Logistics, 2010), 4, <http://www.safie.hq.af.mil/shared/media/document/AFD-091208-027.pdf>.
2. Mark J. Lewis, "Military Aviation Goes Green" [军事航空变绿], Aerospace America 47, no. 8 (September 2009): 25, [http://www.aerospaceamerica.org/Documents/Aerospace%20America%20PDFs%20\(2009\)/Aerospace%20America_SEP2009.pdf](http://www.aerospaceamerica.org/Documents/Aerospace%20America%20PDFs%20(2009)/Aerospace%20America_SEP2009.pdf).
3. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), "2009—2013 Strategic Plan: Sections I and II" [2009—2013 年战略计划, 第一和第二节], (Reston, VA: AIAA, 2009), 1, http://www.aiaa.org/pdf/industry/Strat_Plan_ShortVersion_March09.pdf.
4. Jason Paur, "Hybrid Power Comes to Aviation" [混合动力进入航空], Wired.com, 28 July 2009, <http://www.wired.com/autopia/2009/07/hybrid-aviation>.
5. "Stratospheric Persistent UAS: Global Observer" [全球观察者: 在平流层坚持守望的无人飞机], AeroVironment, http://www.avinc.com/uas/stratospheric/global_observer.
6. Frederick G. Harmon, Andrew A. Frank, and Jean-Jacques Chattot, "Conceptual Design and Simulation of a Small Hybrid-Electric Unmanned Aerial Vehicle" [小型混合动力无人飞机概念设计和模拟], Journal of Aircraft 43, no. 5 (September—October 2006): 1490—98, http://www.dodsbir.net/sitis/view_pdf.asp?id=REF%203%20AF103_209.pdf; 另参看 Frederick G. Harmon, Andrew A. Frank, and Jean-Jacques Chattot, "Parallel Hybrid-Electric Propulsion System for an Unmanned Aerial Vehicle" [遥驾飞机中的并联混合电动推进系统], (presentation, Association for Unmanned Vehicle Systems International Unmanned Systems North America 2004 Symposium, Anaheim, CA, 3—5 August 2004); 另参看 Frederick G. Harmon, Andrew A. Frank, and Sanjay S. Joshi, "Application of a CMAC Neural Network to the Control of a Parallel Hybrid-Electric Propulsion System for a Small Unmanned Aerial Vehicle" [将 CMAC 中性网络应用于小型无人飞机并联混合电动推进系统的控制], (presentation, Institute of Electrical and Electronics Engineers International Joint Conference on Neural Networks, Montreal, Canada, 31 July—4 August 2005); 另参看 Frederick G. Harmon, Andrew A. Frank, and Sanjay S. Joshi, "The Control of a Parallel Hybrid-Electric Propulsion System for a Small Unmanned Aerial Vehicle Using a CMAC Neural Network" [运用 CMAC 中性网络控制小型无人飞机中的并联混合电动推进系统], Neural Networks 18 (2005): 772—80.
7. Ryan M. Hiserote and Frederick G. Harmon, "Analysis of Hybrid-Electric Propulsion System Designs for Small Unmanned Aircraft Systems" [对小型无人飞机混合电动推进系统设计的分析研究], (presentation AIAA-2010-6687, 8th Annual International Energy Conversion Engineering Conference, Nashville, TN, 25—28 July 2010).
8. "Boeing Successfully Flies Fuel Cell-Powered Airplane" [波音研制的燃料电池动力飞机成功试飞], Boeing, 3 April 2008, http://www.boeing.com/news/releases/2008/q2/080403a_nr.html.
9. Thomas H. Bradley et al., "Flight Test Results for a Fuel Cell Unmanned Aerial Vehicle" [燃料电池动力无人飞机试飞结果], (presentation AIAA-2007-32, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, 8—11 January 2007); 另参看 Blake A. Moffitt et al., "Design and Performance Validation of a Fuel Cell Unmanned Aerial Vehicle" [燃料电池动力无人飞机的设计和性能验证], (presentation AIAA-2006-823, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, 9—12 January 2006).
10. "Surveillance Vehicles Take Flight Using Alternative Energy" [使用替代能源的侦察机升空], Public Affairs, Office of Naval Research, 2009, <http://www.onr.navy.mil/Media-Center/Press-Releases/2009/Surveillance-Vehicles-Alternative-Energy.aspx>.

11. “UAS Advanced Development: Fuel Cell Puma” [无人飞机的先进设计：介绍燃料电池动力“美洲狮”飞机], AeroVironment, http://www.avinc.com/uas/adc/fuel_cell_puma.
12. Pat Toensmier, “The Cutting Edge: Fuel Cell Powers Manned Flight” [前沿技术：介绍燃料电池动力有人驾驶飞机], Defense Technology International, September 2009, 60.
13. Paul M. Hrad and Frederick G. Harmon, “Conceptual Design Tool for Micro Air Vehicles with Hybrid Power Systems” [混合动力微型航空器的概念设计工具], (presentation AIAA-2010-6688, 8th Annual International Energy Conversion Engineering Conference, Nashville, TN, 25—28 July 2010).
14. Frank Sietzen, “Growing Fuels for Greener Skies” [更绿燃料和更绿天空], Aerospace America, September 2009, 32.
15. 见注释 1, 第 4 页。
16. 见注释 2, 第 24 页。
17. “Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative” [商用航空替代燃油建议], (CAAFI brochure), caafi.org, 17 August 2010, http://www.caafi.org/about/pdf/CAAFI_brochure_August_2010.pdf.
18. William E. Harrison, “Alternative Energy for Aerospace Applications” [替代能源用于航空领域], (presentation, 4th Annual Dayton Engineering Sciences Symposium, Dayton, OH, 27 October 2009).
19. 见注释 2, 第 24 页。
20. Beatriz Rodriguez and Thomas M. Bartsch, “The United States Air Force's Process for Alternative Fuels Certification” [美国空军替代燃料认证程序], (presentation AIAA-2008-6412, 26th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Honolulu, HI, 18—21 August 2008).
21. Tim Edwards, “Kerosene Fuels for Aerospace Propulsion-Composition and Properties” [煤油燃料用于航空推进——成份和属性], (presentation AIAA-2002-3874, 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Indianapolis, IN, 7—10 July 2002).
22. M. A. Mawid, “Development of a Detailed Chemical Kinetic Mechanism for JP-8 and Fisher-Tropsch-Derived Synthetic Jet Fuels” [JP-8 航空油和 FT 合成燃油之详细化学动能机制研究], (presentation AIAA-2007-5668, 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Sacramento, CA, 8—11 July 2007); 另参看 Tim Edwards et al., “Fuel Composition Influence on Deposition in Endothermic Fuels” [燃油成份对吸热燃油沉淀的影响], (presentation AIAA-2006-7973, 14th AIAA/AHI Space Plane and Hypersonic Systems and Technologies Conference, Canberra, Australia, 6—9 November 2006).
23. Maj David J. Mazzara, “Autonomous Air Refueling for Unmanned Aircraft Systems: A Cost/Benefit Analysis” [无人航空器自主空中加油：成本效益比分析], graduate research paper AFIT/IMO/ENS/09-08 (Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Institute of Technology, 2009).
24. Maj James B. Nicholson, “Bio-Diesel for Air Mobility Command Assets: The Way Ahead” [空中机动司令部资产应用生物柴油的前景], graduate research paper AFIT/IMO/ENS/09-10 (Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Institute of Technology, 2009).
25. Lt Col Juan A. Salaverry, “Predicting Argentine Jet Fuel Prices” [预测阿根廷喷气发动机燃料价格走向], AFIT/GLM/ENC/07M-01 (thesis, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, OH, 2007).
26. Maj Murat Toydas, “Fuel Savings Opportunities from Air Refueling” [空中加油中的节油机会], AFIT/LSCM/ENS/10-12 (thesis, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, OH, 2010).
27. Lt Evren Kiyamaz, “Fuel Efficiency Assessment with DEA” [对 DEA 的燃油能效评估], AFIT/LSCM/ENS/10-07 (thesis, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, OH, 2010).
28. Maj Phil G. Morrison, “Reballasting the KC-135 Fleet for Fuel Efficiency” [调整 KC-135 机队压舱油, 提高燃油能效], graduate research paper AFIT/IMO/ENS/10-10 (Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Institute of Technology, 2010).

空军转用生物燃油的潜在问题及意外后果

Unintended Consequences: Potential Downsides of the Air Force's Conversion to Biofuels

马克·N·戈尔齐，美国空军退役中校 / 博士 (Lt Col Mark N. Goltz, PhD, USAF, Retired)

查尔斯·A·布莱克曼博士 (Dr. Charles A. Bleckmann)

道格拉斯·M·麦凯博士 (Dr. Douglas M. Mackay)

王洪恺，美国空军少校 (Maj Khai Vuong, USAF)

杰鲁德·P·麦库姆，美国空军上尉 (Capt Jerrod P. McComb, USAF) *

当今美国面对着依赖国外能源、环境忧患加深和石油价格不断上升等问题，希望有所突破，由此引发各种“更绿”的替代和再生能源的科研热潮，其中之一是开发基于酒精的生物燃油。美国国防部也采取对策，努力减少飞机和地面装备对石油燃料的依赖。美国空军与国防部目标呼应，制定了数项节能目标：(1) 减少运载工具使用石油燃料的比例，每年降低 2%；(2) 增加汽车使用替代燃料的比例，每年提高 10%；(3) 在 2011 年完成对所有飞机和武器系统使用 50/50 替代混合燃料的认证；(4) 在 2016 年实现空军飞机使用替代混合燃料达 50% 的目标。¹ 这份雄心勃勃的时间表将推动全球最大的石油用户——美国国防部——大步迈入替代能源市场。身为世界胃口最大的燃料消费者，国防部此举很可能驱动全球航空和汽车燃油市场转型，从供应传统燃料转为支持新兴市场，满足消费者对新型替代燃料的需求。虽然转用替代燃料能明显降低二氧化碳排放量，但这种燃料的外泄对土壤和地表水的污染风险一直不明，直到最近才开始显露。

本文认为，我们尚未充分研究替代燃料对环境的潜在影响。目前的研究成果表明，在大规模使用替代燃料后，其对地表下环境

的污染风险实际上可能升高。进一步，由于替代燃料的生物反应特性更强，未来的燃油配发和储运系统可能面对微生物滋生腐坏问题而束手无策。从谨慎的角度出发，空军应使用最新的研究结果，积极支持新科研项目，努力理解加速转用生物燃油的后果，包括燃油外泄对环境的影响和其他风险，以及运输、储存及消耗系统使用这类燃油后的受损情况。本文立足这些考虑，提出一些前瞻建议，旨在确保当替代燃料滚滚流入国防部巨大的油管系统之后，国防部的数千燃料配发和储运场不会发生污染地表水或生成爆炸气体等意外事故，也不会出现燃油因微生物繁殖变质而影响作战行动的情况。

对地表下环境的影响

在整个国防部，数百万加仑燃油从巨大的地面和地下储油罐安全流入和流出，构成我们的燃油体系。燃油储运和配发领域的技术百年来不断发展，但系统性的泄漏和溢洒仍时有所闻。数千英里管道中的每一个接头、每一道阀门、储罐中的每一条焊缝，都构成潜在的泄漏源。这些燃油从储罐、管道、油罐车及相关设备中不时外泄，污染了土壤和地表水，生成一类对环境有害的化合物，称

* 戈尔齐博士和布莱克曼博士在美国空军理工学院任教，参与环境工程科学项目研究。麦凯博士来自加州大学戴维斯分校陆地/天空/水资源系，就污染物在地表下的归宿开展过许多现场调研，包括最近对乙醇之影响的现场研究。王洪恺少校从空军理工学院获得硕士学位，目前在也位于赖特-帕特森空军基地的空军航空医学院担任顾问。麦库姆上尉亦从空军理工学院获得硕士学位，现在位于华盛顿州费尔柴尔德空军基地的第 92 工兵中队担任作战保障主管。

为芳香烃。在这类化合物中，以苯为代表的数种物质是已知的致癌物。² 在土壤和地表水中，芳香烃，如苯和其他溶解及气化污染物质的含量，通常经自然过程而降低，天然存在的地下（即地表下）细菌可把碳氢化合物污染物质，如苯、甲苯、乙苯、二甲苯异构体（四类物质统称为 BTEX）以及它们分解后的物质如甲烷等，转化为无害物质。有些细菌以这些有机污染物质——有时与一种氧化介质如氧气相结合——作为碳源和能源（亦即它们为生存和成长所需的关键“食物”）。

如本文以下的现场数据分析所示，将替代燃料引入一种不时发生泄漏的燃油混合物中，会严重改变细菌、BTEX 和其他污染物质，以及氧化介质之间的复杂生态关系，从而加大对地表水污染的风险。以往研究中用计算机建模技术研究这类污染，因为乙醇被广泛视为最理想的发动机替代燃料，故而重点放在细菌在有乙醇的环境中消化 BTEX 的能力。但这些模型实验通常假设有氧化介质（氧气）存在，而事实上这类介质通常并不大量存在于漏油现场周围的土壤和地表水中，因此研究结果高估了替代燃料对环境的无害性。³ 近期研究则揭示出更令人不安的后果。

研究人员在加州范登堡空军基地开展了现场实验，他们将汽油与乙醇混合，缓慢渗入地表水，相当于一个乙醇 / 汽油混合油罐发生难以察觉的泄漏，然后观察其所造成的地下污染，结果令人震惊。⁴ 这项现场研究是为探究 BTEX 在含有或不含有乙醇的状态下的归宿。研究人员在范登堡的地下蓄水层同步展开了两项实验，用硫酸盐作为主要的氧化介质，这也是国内许多石油现场处理泄漏的惯常做法。⁵ 第一项实验是连续九个月注入含有少量（每升中含 1-3 毫克 [mg/L]）BTEX 类的化合物、即苯、甲苯和邻二甲

苯异构体的污染水。同时进行的第二项实验取其相邻地点，注入含 BTEX 化合物的 500 mg/L 乙醇。研究人员持续观察 BTEX 污染物质、尤其是致癌物质苯的含量变化，同时关注氧化介质（特别是氧气和硫酸盐）、降解产品（包括甲烷），以及在第二项实验中乙醇的含量变化。第一项实验获得结果如预期，污染雾流在地下逐步散发，约四个月后苯污染几乎完全消散，因为自然繁殖的细菌在其中发挥了生物降解作用。

第二项实验的结果与之对比差异巨大。在加入乙醇和苯污染物质的第二个实验点，污染区域和第一项实验一样，出现扩散。不同的是，苯污染没有像第一项实验那样衰减。第二项实验中，苯的降解更加缓慢，并且，由于本土细菌的活动大量转移向更易于降解的乙醇，故而产生丰富的甲烷。那些以常见硫酸盐氧化介质为生存物质的细菌，以及那些不需要氧化介质就能降解污染物质（其中有些生成甲烷）的微生物，都符合这种现象描述。此结果进一步使研究人员认定：原先的计算机模型假设不完全符合所有环境。而现场实验的结果为研究人员提供了更有用的信息，使他们更深刻地理解了自然过程在存在有普遍认可的替代燃料即乙醇的环境中去除 BTEX 毒性的能力。现场实验也证明，乙醇可能降解而生成大量甲烷。在实际泄漏中如果燃油大量溢洒，导致超过实验数量的乙醇渗入地表，污染区可能生成大量甲烷，这种可燃气体将在土壤中大量扩散。如果这种甲烷不能被本土微生物所氧化掉，在一定形势下，生物燃油的泄漏就可能演变为可爆气体混合物，弥漫在建筑物的地下室和地下设施中，或者地面上。

把乙醇加入到石油燃料中看来会减缓有害的 BTEX 化合物的降解速度。并且，和

原先计算机模型的结果相比，有害物质将存留更长时间，散发更远距离。简言之，这项实验结果确凿无误，因为它是在典型的燃油泄漏现场进行，获得了明确和详细的证据支持。我们现在可以运用更加可信的计算机模型，根据现场实验结果来推断实验现场以外其他环境的演变。空军理工学院研究人员已经在范登堡基地重要实验结果的基础上建立起这样的计算机模型。我们在此模型中模拟向燃油中加入乙醇后的长期影响，以30年为期，做了两项模拟，其一仅以苯为对象，其二以苯/乙醇混合物为对象。模型结果再次确认了现场实验获得的数据：即在30年模拟期中，含乙醇的苯雾流远远比不含乙醇的苯雾流存留得更长。

丁醇也是一种酒精，也可作为生物燃油添加到燃油中，它和乙醇相比有多方面的优势。在能量密度上丁醇接近汽油，乙醇则比汽油低34%。⁶在挥发性和腐蚀性上，丁醇都比乙醇低，对水的亲和性也更低，并且与当前使用的管道和储油设施兼容。⁷丁醇和汽油充分相近，故而可以“直接加入任何汽油发动机而不必对发动机做改造或替换。”⁸基于这个事实，并且考虑到先前在范登堡基地的现场研究所揭示的乙醇对地表水的影响，空军理工学院研究人员进一步建立模型，模拟取丁醇为生物燃油后可能发生的现象。可是，在输入了过去实验室和建模研究中认为合理的那些假设数据之后，这项模型反而生成了更负面的预测结果，即丁醇比乙醇对苯的归宿有更大的负面作用，而苯是汽油中危害最大的化合物。⁹研究人员由此感到需要输入更多的假设才能把这项模拟做好，鉴于这项课题事关重大，我们认为有必要运用真实地质介质开展现场研究，获得发现，然后

确定或修改建模的假设数据，对含丁醇燃油对环境的影响做出更有说服力的预测。

微生物滋生腐坏风险

提高生物燃油使用比例后，除了对地表下环境发生影响之外，还可能引发另一个看似有趣实则极为重大的问题，这就是微生物滋生导致燃油变质。生物燃油和石油燃油在燃烧特性方面非常相近，但是两者的化学组成非常不同。¹⁰生物燃油（例如生物柴油）中包含一些物质，它们更易溶于水，更易被微生物降解。燃油管道、储油罐及油罐车等设施的运行维护人员目前都十分注意防水，原因就在于水/油界面区可能滋生微生物。但是我们不可能完全将水隔离于系统之外，比如简易通气孔可导入湿空气，凝结后就可能作为液态水进入燃油储运系统中。目前存在的燃油变质和微生物滋生问题虽然程度有限，却一直挥之不去，有时十分棘手，令储运人员难以对付。事实上，大概任何燃油储运系统都无法彻底解决微生物滋生和燃油变质问题。

通用的检验手段可能探察不出燃油中的微生物。空军理工学院多年来致力开展实验室和现场研究，查验燃油中的微生物现象。空军理工学院和空军研究实验室人员通过从航空燃油储罐取样，证明燃油中含有各种微生物但无一居首，不同地理区域或不同类型航空燃油中存在着不同的微生物组合，重复现象很低。¹¹许多细菌和真菌都能使燃油成份新陈代谢，导致燃油质量严重下降，如果因此发生腐坏或腐蚀，则可能破坏整个燃油储运系统。此事实表明，燃油变质有其复杂原因，但如果通过科研找到最常见的微生物祸首，将有助于找到预防燃油品质受损的途径。

生物燃油的溶水性和降解性更强，传统燃油中存在的微生物滋生腐坏问题随着生物燃油加大使用将成倍增长，目前面对的这些讨厌顽疾可能演变成重大问题。储油罐和油罐车等设施中微生物滋生腐坏可能蔓延而成为代价昂贵的不治之患，飞机燃油系统如腐坏可能导致悲剧事故。在上世纪五十年代后期，至少有一起飞机坠毁事故判定为微生物腐坏燃油系统所致。¹² 幸运的是，在此事故之后，人们发现一种除冰剂能有效抑制微生物，故而添加到燃油中，多年来防止了这类事故重演。现在因关注燃油毒性，燃油组成（JP-4 号变成 JP-8 号航空油）和除冰剂都已改变，这有可能导致微生物污染卷土重来。提高生物燃油使用比例可能更加强化微生物污染和燃油变质的风险。显然，我们需要找出那些对新型燃油构成最大危险的微生物品种，由此防患于未然。进一步，我们应通过研究判定新型燃油变质对不同储运系统的影响，从中找到降低此风险的最佳方案。例如，高流量系统中因燃油保持快速流动而不易滋生微生物，因此系统保洁相对容易。但在那些长期静止的储油罐中，例如为紧急备用发电系统配置的储油罐中，微生物污染和变质可能引发严重挑战。

至少，在使用生物燃油过程中，维护人员必须开展广泛监视，执行更严格的保洁标准。对生物燃油造成严重事故的预防，将远远超过对石油燃料所做的努力，将要求我们开展更多研究，加深了解，用科学知识来加强预防努力。

建议

最新的研究清楚表明：替代燃料对土壤和地表水构成潜在威胁，生物燃油的泄漏可能导致产生大量甲烷气体，并可能延长以苯

为代表的燃油致癌成份在水源中的留存期。另外，在使用替代生物燃油的环境中，由于苯和其他污染物质在漏油区域中的降解过程减缓，污染雾流在细菌将之消化到可接受的程度之前，就可能扩散到更大范围。还有，由于生物燃油的吸湿性和生物降解性比石油燃料更强，使用者以及储运系统人员在执行任务中可能必须做出更大努力来应对微生物腐坏带来的降解变质问题。¹³ 笔者理解军方转向使用生物燃油的迫切性，但建议在同时也关注由此带来的研究上的同等迫切性，以通过科研获得所需知识，调整我军的燃油管理做法和安全规程，从而保持高标准维护燃油储运设施、设备、人员和环境。笔者因此提出如下建议，旨在减少生物燃油对土壤和地表水的污染，及燃油储运系统的微生物滋生腐坏风险。

1. 开发新技术以降低、监视和减少生物燃油泄漏和溢洒，这些技术应针对生物燃油的配发和储运而设计。这个过程还要包括对各加工、配发、储运和使用设施中的关键固定件和连接件进行升级改造，确保最可能发生泄漏的部位都得到改进，符合使用新型混合燃油的密封需要。
2. 扩大研究范围，在生物燃油对环境的影响和微生物滋生腐坏等方面加深认识。

结语

美国空军响应国防部的减能目标，积极开展科研并研发能兼容生物燃油的军事装备，鉴于生物燃油有其明显优点，此项努力是有必要。但是我们尚未充分了解生物燃油的各种缺点。研究人员通过在范登堡空军基地现场实验后，才意识到原先计算机模型中使用的假设数据可能有误，由此揭示出生物燃油

对环境的潜在污染风险。这项研究清楚表明：以苯为代表的致癌物质污染雾流，在含乙醇情况下可能长期存留并扩散，在不含乙醇情况下则如预期消解。¹⁴ 另外，现场实验和在空军理工学院的科研活动，为理解石油基燃油中微生物滋生腐坏现象提供了关键的发现，预示在转用生物燃油之后，这种现象将更加严重。由于国防部没有为这方面的关键研究提供更多支持，空军部应提供资金，使此项研究得以继续。

在未来，军方高层领导班子将在为地面和空中平台选择生物燃油类型及其混合比例等方面面对一系列决策难题。空军目前开展的研究有助于在某些领域，例如替代燃料与终端用户系统、引擎、涡轮发动机等的兼容性，支持领导做出决策。但是在其他一些重大问题上，如“非显性”环境污染和微生物滋生

腐坏等，研究人员还未获得充分认知。因此至少，空军部应该支持进一步的现场实验，以加深对生物燃油对地表下环境潜在破坏的理解，并相应研制出监视泄漏和补救的新方法。空军还应该继续钻研微生物导致生物燃油变质的机理和预防途径。如果国防部和空军部必须在取得更多研究成果之前就部署采用生物燃油，我们建议对某些储存和使用生物燃油的地点进行远远超过正常规程的严密监控，也许可以设立一个“应用研究”项目，以澄清和界定本文提出的一些重大问题。只有通过良好控制的实验室和现场调研及应用研究，国防部和空军部才能把握这些问题的实质，开发出新技术，支持高层领导人做出知情决策，避免发生难堪意外。♣

注释：

1. Air Force Policy Memorandum 10-1.1, Air Force Energy Program Policy Memorandum [空军能源计划政策备忘录], 16 June 2009, 6—7, <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA502661>.
2. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2003 TLVs and BEIs: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices [化学物质和物理介质阈值及生物暴露指数], (Cincinnati: ACGIH, 2003), 15.
3. Diego E. Gomez and Pedro J. J. Alvarez, “Modeling the Natural Attenuation of Benzene in Groundwater Impacted by Ethanol-Blended Fuels: Effect of Ethanol Content on the Lifespan and Maximum Length of Benzene Plumes” [建立乙醇混合燃油对苯在地表水中自然衰减的作用模型：乙醇含量对苯雾生命周期和最大留存期的影响], *Water Resources Research* 45 (2009): W03409, doi:10.1029/2008WR007159.
4. Douglas M. Mackay et al., “Impact of Ethanol on the Natural Attenuation of Benzene, Toluene, and O-xylene in a Normally Sulfate-Reducing Aquifer” [乙醇对苯、甲苯和二甲苯在常规硫酸盐减弱蓄水层中自然衰减的影响], *Environmental Science and Technology* 40, no. 19 (2006): 6123—30.
5. Todd H. Wiedemeier et al., *Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface* [燃油和加氯溶剂在地表下的自然衰减], (New York: John Wiley and Sons, 1999), 213—18.
6. 密度指每单位体积之能量。
7. Lawrence P. Wackett, “Microbial-Based Motor Fuels: Science and Technology” [基于微生物的发动机燃油：科学和技术], *Microbial Biotechnology* 1, no. 3 (2008): 211—25; 另参看 Adriano P. Mariano et al., “Aerobic Biodegradation of Butanol and Gasoline Blends” [需氧菌对丁醇/汽油混合油的生物降解作用], *Biomass and Bioenergy* 33, no. 9 (September 2009): 1175—81.
8. Sang Yup Lee et al., “Fermentative Butanol Production by Clostridia” [用芽孢梭菌类细菌生成发酵丁醇], *Biotechnology and Bioengineering* 101, no. 2 (2008): 210.

9. Capt Khai H. Vuong, “Modeling the Fate of Groundwater Contaminants Resulting from Leakage of Butanol-Blended Fuel” [建模预测丁醇混合燃油泄漏后其污染物在地表水中的归宿], AFIT/GES/ENV/10-M06 (thesis, Department of Systems and Engineering Management, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, OH, March 2010), https://www.afresearch.org/skins/rims/q_mod_be0e99f3-fc56-4ccb-8dfe-670c0822a153/q_act_downloadpaper/q_obj_2262ab9b-e4ad-49da-ba4a-43c31778618f/display.aspx?rs=publishedsearch.
10. Jared A. DeMello et al., “Biodegradation and Environmental Behavior of Biodiesel Mixtures in the Sea: An Initial Study” [生物柴油混合油在海水中的生物降解和环境行为初探], *Marine Pollution Bulletin* 54, no. 7 (2007): 894—904.
11. Michelle E. Rauch et al., “Characterization of Microbial Contamination in United States Air Force Aviation Fuel Tanks” [美国空军航空油储罐中的微生物污染特征], *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 33, no. 1 (2006): 29—36; 另参看 Lisa M. Brown et al., “Community Dynamics and Phylogenetics of Bacteria Fouling Jet A and JP-8 Aviation Fuel” [细菌腐坏 Jet A 和 JP 8 号航空油的群体动态及生物种族机理], *International Biodeterioration and Biodegradation* 64, no. 3 (June 2010): 253—61.
12. Viola H. Finefrock and Sheldon A. London, *Microbial Contamination of USAF JP-4 Fuels* [美国空军 JP-4 号航空油中的微生物污染], Technical Report AFAPL-TR-66-91 (Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Aero Propulsion Laboratory, 1966), 1, <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=AD809366&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>.
13. “吸湿性”一词的英文是“Hygroscopic”，表示对环境水份的收湿或吸湿能力。
14. 见注释 4，第 6123—30 页。

The military relationship between the United States and China is one of the world’s most important. And yet, clouded by some misunderstanding and suspicion, it remains among the most challenging. There are issues on which we disagree and are tempted to confront each other. But there are crucial areas where our interests coincide, on which we must work together.

——Mike Mullen, Joint Chiefs of Staff,
[www.nytimes.com/2011/07/26/
opinion/26Mullen.html](http://www.nytimes.com/2011/07/26/opinion/26Mullen.html)

美国和中国之间的军事关系是世界上最重要的关系之一。但是由于一些误解和猜忌的存在，这种关系依然属于那类面临严峻挑战的关系。我们之间在有些问题上存在分歧，故而可能发生相互对抗。但是，我们在一些关键的领域存在共同的利益，又必须进行合作。

——美国参谋长联席会议主席迈克·马伦海军上将，
《纽约时报》2011年7月25日

用寿命周期评估法比较JP-8航空油和替代燃料

Jet Propellant 8 versus Alternative Jet Fuels: A Life-Cycle Perspective

彼得·P·冯, 美国空军中校 / 博士 (Lt Col Peter P. Feng, PE, PhD, USAF)

韦恩·C·金赛尔, 美国空军少校 (Maj Wayne C. Kinsel, USAF)

阿尔弗雷德·E·泰尔博士 (Alfred E. Thal, PhD)

查尔斯·A·布雷克曼博士 (Charles A. Bleckmann, PhD) *

美国空军是国防部系统内最大的喷气发动机燃料用户, 每年消耗量达到24亿加仑。¹ 由于不可再生燃料资源的消耗对环境造成破坏, 又因为依赖外国石油供应对国家构成安全之忧, 美国理所当然地把目光转向替代燃料。国防部和空军的能源战略都指出开发和生产替代燃料的必要性。国防部承诺要确保能源安全, 并制订了能源计划, 承诺“将尽力实现基础设施现代化, 提高能源利用率和节省能源, 大力降低需求, 并且改善能源灵活性, 从而节省纳税人的金钱, 减少导致空气污染和全球气候变化的废气排放。”² 这个计划有下列四个目标:

1. 在减少部队的整体能源需求的同时, 保持或提高作战效率。
2. 开发替代性 / 有保障的燃料和能源, 提高能源战略的弹性应变能力。
3. 在国防部规划和事务处理流程中实施能源考量和解决方案制度化, 从而提高作战和事务处理效率。

EIO-LCA = 经济投入产出寿命评估法
EIO = 经济投入产出模型
LCA = 寿命评估模型
CBTL = 煤及生物质转化为液体的工艺流程
FT process = 费—托 (或 FT) 合成燃油工艺
GWP = 全球增温潜势值

4. 在整个国防部系统内建立和监控能源统计管理制度 (黑体强调来自原文)。³

空军积极配合国防部的努力, 在其军种能源计划中提出了与之呼应的愿景: “一切工作考虑能源因素。”⁴ 空军的能源战略包含实现这个愿景的三项原则措施:

1. **减少需求**——节省能源, 减少使用, 提高我军能源效率, 并增强每个人对减少能源消耗的必要性认识。
2. **增加供应**——通过研究、测试和认证新技术, 包括可再生能源、替代能源和传统能源, 美国空军可以对建立新的国内供应源做出贡献。
3. **改变文化**——空军必须创建新文化, 使空军全体官兵在日常一切行动中都要考虑能源因素。⁵

本文论述空军能源战略的第二项原则措施以及下列具体目标: “做好准备, 到2016年, 空军国内航空油需求中混合燃料的使用比例达到50%, 此混合燃料应具有成本竞争力, 且混合到燃料中的新燃料即替代燃料由美国国内生产, 其生产方式比用常规石油生产的燃料‘更加绿色’。”⁶ 这个目标带来几个问题。不错, 使用“更绿”燃料是一个高

* 冯博士, 加州大学伯克利校区博士, 现为注册专业工程师, 美国空军理工学院助理教授。金赛尔少校是俄亥俄州莱特—帕特森空军基地空军装备司令部总部A6/7通信、设施及使命支援部设施能源团队主任。此前他曾在空军土木工程界从事研究生学业, 并担任作战飞行指挥官、工程飞行指挥官、基地发展主管, 及设计土木工程师。泰尔博士是退役空军土木工程师军官, 现任空军理工学院工程管理副教授, 科研领域包括发明创新、可持续发展和项目管理。布雷克曼博士是空军理工学院环境管理教授, 科研领域涉及碳氢化合物生物降解与补救、燃料的氧化生物降解、燃料的微生物污染、蜘蛛网作为环境监视器, 以及藻类植物作为生物燃料来源。

尚的追求，但是我们如何正确评估此类燃料？在此形势下，“更绿”的真实含义是什么？我们如何评定所提议的某种生物燃料比空军目前使用的喷气发动机燃料 JP-8 航空油更加绿色？为了回答这些问题，本文采用寿命周期综合分析的方法，因为许多现代燃料系统都很复杂，包含相互依存的流程和活动。本文首先介绍与生物燃料相关的背景资料，然后应用经济投入产出寿期评估法（EIO-LCA），把石油基喷气发动机燃料（以 JP-8 航空油为例）与替代燃料，即基于煤及生物质转化为液体的工艺流程（CBTL）的燃料进行对比，计算出这两种燃料在整个寿命周期的全球增温潜势值（GWP）。EIO-LCA 比较结果可让空军领导人在评估空军能源战略的各种实施方案时有一个考虑基础。

背景介绍

在提出和讨论 EIO-LCA 比较结果之前，本文将论述与燃料燃烧相关的环境问题，界定和介绍各类不同的替代燃料，包括空军提议的替代燃料；然后解说寿期评估法。

环境问题

温室气体在地球大气层中截留热量。根据能源信息管理局公布的资料，“这些气体让阳光自由地进入大气层。阳光照射到地球表面时，一部分光线会以红外辐射（热量）的形式向太空反射。温室气体吸收这些红外辐射，将其热量截留在大气层。”⁷ 有些温室气体是自然产生的，但是人类活动往往会增加温室气体排放。人类活动，主要是化石燃料的燃烧导致温室气体进入大气层，这些气体大多是二氧化碳、甲烷、一氧化二氮和含氟气体。⁸

替代燃料

根据国防部公布的定义：“使用‘替代’燃料一词，可区别用原油生产的柴油类喷气发动机基准燃料和用非原油类物质生产的合成燃料。替代燃料应该具有基准燃料的属性，以提高其在军用装备中的互换性。”⁹ 替代燃料若要获得合格认证，必须具有 JP-8 航空油的属性（产生同样的单位能量输出），以确保不降低飞行安全性。

空军替代燃料计划的目标是，无论是加注喷气发动机碳氢燃料还是混合燃料，都保证百分之百的“加注即用”。“加注即用”意味着这些新型燃料在性能和使用方式上可与当前航空燃料完全互换，对飞行安全性不会有任何损害。通常，混合燃料中包含对等比例的碳氢燃料（替代燃料）和石油基航空燃料。¹⁰ 替代燃料通常以生物质为原料生产。目前，科研人员正在研究用三大类生物质生产地面车辆燃料和喷气发动机燃料，这三类生物质是：糖和淀粉，脂肪和油类，以及“木质纤维素”材料。玉米就是一种淀粉类生物质，在美国被广泛用于生产乙醇；但是乙醇的闪点低，燃烧热量不足，无法用作喷气发动机燃料。¹¹ 我们经常用甘油三酯——从油料作物种子提取的油脂——生产生物柴油，但是这种燃料只适合地面车辆，不能用于飞机。最后，柳枝稷是一种木质纤维素生物质，可用于生产航空燃料。本文讨论的替代燃料是基于这最后一类生物质。

生物燃料是否比传统的石油基燃料更有利于环境保护，专家们至今莫衷一是。反对生物燃料者认为它们对环境有害。例如，普林斯顿大学威尔逊学院生物燃料研究专家提摩西·瑟奇格（Timothy Searchinger）认为：“以前的论述[分析]是片面的，因为它们只说

了使用土地种植生物燃料作物有减少碳排放等好处，但是没有提到改变土地的目的用途而牺牲的碳成本、碳储藏和碳封存。”¹² 如果把目前的森林或草原变为耕地用于生产生物燃料，这种转化将把原先储藏在树木和其他植物里的二氧化碳释放到大气层中。

提倡生物燃料者认为用生物质生产生物燃料可获得减少碳排放的效果。丹麦罗斯基尔德大学生物燃料研究员本特·索然森（Bent Sørensen）不同意瑟奇格的观点，他声称：“瑟奇格认为……应该把所有的碳吸收和释放视为时间函数而与时间联系起来，而不能仅仅把生物质视为碳中性，这样才更像学术研究。这类学者中，有一些人最近攻击‘第二代’生物燃料，甚至预言生物燃料不久将完全用边缘地带种植的木质纤维素材料生产。”索然森进一步反驳说：实际上木质纤维素材料将来自目前已在世界各地运营的生物质种植场的下脚料，因此不会造成额外的碳排放。¹³

本文以柳枝稷作为 CBTL 基喷气发动机燃料的生物质原料。我们假定柳枝稷来自边缘或荒凉地带，不属于瑟奇格所述的改变土地用途去生产木质纤维素生物质的范畴。¹⁴ 因此，我们分配了一个碳排放额度给 CBTL 基燃料的柳枝稷部分。根据代顿大学研究院

的一份报告，对以生物质为原料的经由 Fischer-Tropsch (FT) 合成燃油技术生成的喷气发动机燃料进行寿命评估时，可将柳枝稷的温室气体排放额度设定为 15%。¹⁵ FT 工艺是把煤衍生的一氧化碳和氢、天然气或生物质转化成液体燃料，例如柴油或喷气发动机燃料。代顿大学研究院的那份报告列出的柳枝稷温室气体排放额度是每吨生物质为 50 至 100 公斤当量的二氧化碳。¹⁶ 这项信息在进行寿命评估时有重要意义。

寿命评估

寿命评估 (LCA) 法是一种整体分析方法，可用于评估任何产品、流程或活动在整个生命周期中对环境的影响。这种评估的最单纯形式是，以从土地中初始萃取原材料开始，到所有材料返回土地结束。寿命评估经常被称为从摇篮到坟墓评估方法，其涉及的寿命包括五个阶段 (图 1)。这些寿命评估方法“帮助我们寻找正确的途径，生产我们所需的能源而不耗尽该能量来源，并且不释放导致气候变化的温室气体。”¹⁷

因此，LCA 模型是重要的工具，鼓励各种项目的设计中重视绿色概念。¹⁸ 它们还能向决策者提供额外的信息，帮助界定各类活

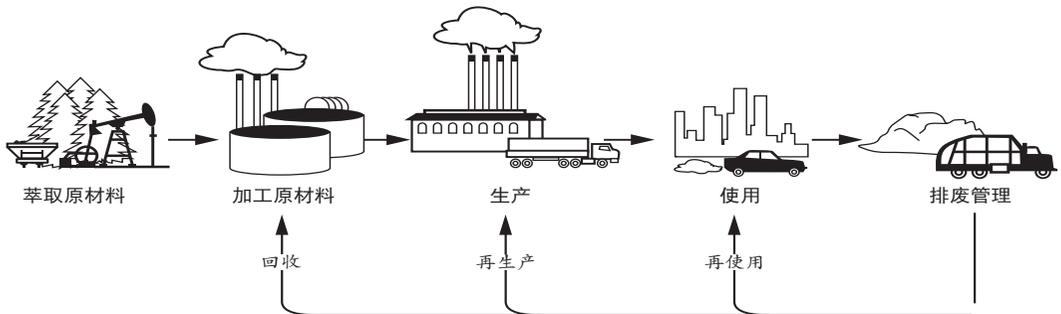


图 1 : LCA 评估法各阶段示意图 (取自 Congress of the United States, Office of Technology Assessment, Green Products by Design: Choices for a Cleaner Environment [设计和选用绿色产品 : 建设更清洁的环境], [Washington, DC: US Congress, Office of Technology Assessment, September 1992], 4.)

动的环境影响，发现改进的机会。LCA 模型有多种衍生版本，但基本类型只有三个：基于流程的模型、经济投入产出（EIO）模型和混合模型。这些模型通常使用类似的环境排放和资源条件，藉以确定与任何产品、流程或活动对应的环境负荷。但是，如果应用成本、反馈流量或分析速度是重要考虑因素，则 EIO-LCA 模型通常被认为更加有用。¹⁹

基于流程的寿期评估。基于流程的 LCA 法将一件产品或一项服务分解成小片，并追踪到每个小片的根源。这种 LCA 法能精确地分析出产品或服务对环境的影响。但是，基于流程的 LCA 法面临两个难题：分析界限和循环效应。由于整个流程及其所有的子流程很难捕获，研究人员必须非常谨慎地判断分析界限，确定需要排除的内容。循环效应的意思是，任何一件“东西”都是由其他许多“东西”而来的。例如，“制作一个纸杯需要用钢铁造的机器；但是制造钢铁造的机器需要用钢铁造的其他机器和工具；制造钢铁又需要用机器，而这些机器也是钢铁造的。实际上，如果要完成任何材料或流程的寿期评估，必须先完成所有相关材料和流程的寿期评估。”²⁰

经济投入产出寿期评估。EIO 法综合利用来自美国经济分析署的经济数据和来自环保署及能源部的环境数据。EIO-LCA 评估模型以诺贝尔奖获得者瓦西里·列奥捷夫（Wassily Leontief）的 EIO 模型为基础。²¹ 卡内基梅隆大学工程学教授克里斯·亨德里克森（Chris Hendrickson）说：

列奥捷夫提出一个一般均衡模型，用于指明任何一个经济部门生产一个产出单位而需要的来自所有其他部门的投入。他的模型立足于一个简化的假设：任何一个部门若要增加其货物或服务的产出，

则需要来自所有其他部门的投入有成本比例的增长。由此得到的 EIO 矩阵至今仍用于评估发达国家和许多工业化经济体。²²

EIO-LCA 评估模型使用 EIO 矩阵和产业部门层面的环境与资源消耗数据，以评估产品和流程对经济层面的环境影响。²³ 这个方法简化了寿期评估的复杂性，利用数学公式将产业部门之间的货币交易转化成环境影响。²⁴ EIO-LCA 评估模型识别货物和服务的生产及消费对环境造成的直接、间接和整体影响。整体影响是直接和间接影响之和。²⁵

混合寿期评估。混合模型融合了基于流程的 LCA 评估法和 EIO-LCA 评估法，以从某个物件或流程获得更准确的信息；当信息无法获得时，可使用 EIO-LCA 评估模型。例如：我们可能知道一个纸杯在使用阶段的环境影响，但是不知道原料萃取阶段的环境影响。在这种情况下，分析人员可以利用使用阶段的具体信息，然后使用 EIO-LCA 评估模型估算其他阶段的信息。本文的分析使用混合寿期评估模型。

确定燃料的“绿色程度”

美国能源部在 2009 年 1 月的一份报告中声称，CBTL 基燃料已经能够在经济层面与现有的石油基燃料进行竞争。具体而言，当原油价格等于或超过每桶 93 美元时，使用 8% 生物质（重量百分比）和 92% 煤（重量百分比）混合经由 CBTL 工艺流程生产的燃料就具有经济竞争力。此外，CBTL 基燃料的寿期温室气体排放量比石油基燃料低 20%。该报告还指出，即使 CBTL 基燃料不具有经济竞争力，它仍有两个明显的优势：(1) 它的温室气体排放量低；(2) 它能够利用国内资源

生产，从而可减少美国从外国进口的原油数量。²⁶

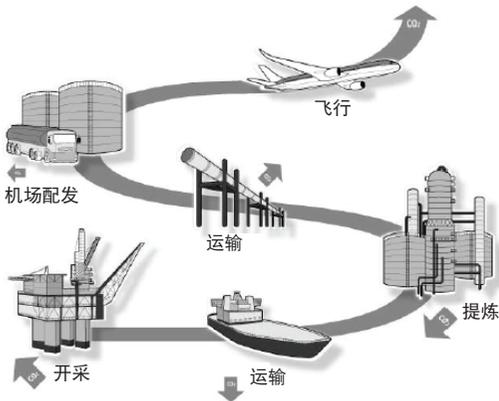
CBTL 流程采用三种现有技术将煤和生物质转化成液体燃料，这三种技术是：气化、FT 合成、以及碳捕获和封存。气化技术将煤和生物质转化成一氧化碳和氢，这种混合物通常称为“合成气”。FT 合成技术对合成气加热和加压，使其与催化剂（例如钴）起反应，生成液体燃料。²⁷ 同时对产生的二氧化碳副产物用称为碳捕获封存技术的低成本流程进行捕获和封存，有助于降低替代燃料的价格和减少温室气体排放。剩余的有毒一氧化碳气体用作燃料，产生化学反应所需的热量。图 2 显示用化石燃料生产的一种常用喷气发动机燃料（例如从石油提炼的喷气发动机燃料）和一种生物燃料（例如生物质转化成液体的喷气发动机燃料）的典型寿命期。

理论上，用生物质生产的喷气发动机燃料在其整个寿命期中二氧化碳排放量都较低。

生物质作物生长时期吸收的二氧化碳大约等于生物燃料燃烧过程中释放到大气层的二氧化碳。生物燃料并非“碳中和”，因为生物质的生长、萃取、运输和加工需要使用设备，而设备运行则需要能源；但是，在理论上，生产和使用生物燃料而释放到大气层的二氧化碳总量显著低于从石油或其他化石燃料生产喷气发动机燃料而释放到大气层的二氧化碳总量。²⁸ 我们研究的替代燃料（从 CBTL 流程生产的燃料）不具有完全用生物质生产的替代燃料那样的碳中和属性，因为 CBTL 基燃料的一大部分是从煤生产的；但是，在理论上，CBTL 基燃料对环境的影响应该比 JP-8 航空油小，因为前者使用了一定比例的生物质原料。

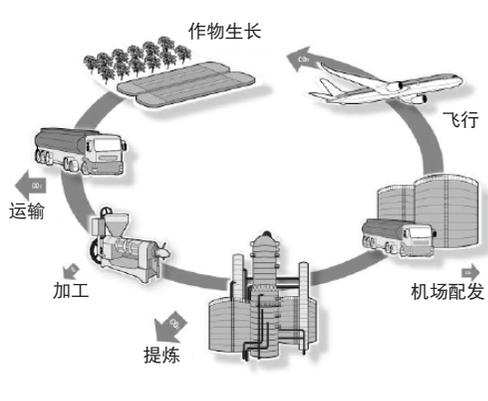
本文分析的寿命阶段包括原材料萃取（采矿 / 农业）、原材料加工（提炼 / FT 工艺）以及作为喷气发动机燃料使用（在飞行中燃烧）（见图 1）。各阶段之间的材料运输及其对环境的影响通过经济互联关系纳入 EIO-LCA 评

石油基燃料寿命周期中的废气排放



从开采到运输到飞行，寿命周期的每一个阶段都需要使用能源，生成的二氧化碳被排入大气。

生物燃料寿命周期中的废气排放



寿命周期中排放出去的二氧化碳被下一轮作物生长重新吸收。

图 2: 二氧化碳排放气体寿命期 (取自 Air Transport Action Group, Beginner's Guide to Aviation Biofuels [航空生物燃料入门], [Geneva, Switzerland: Air Transport Action Group, May 2009], 3, http://www.enviro.aero/Content/Upload/File/BeginnersGuide_Biofuels_WebRes.pdf.)

估，并整合到每个阶段温室气体排放的全球增温潜势（GWP）总值。本文假设：在寿命期评估的燃油使用阶段，JP-8 航空油和 CBTL 基燃料所排放的温室气体总量相同。根据能源信息管理局公布的资料，对于煤油基喷气发动机燃料，使用阶段排放的温室气体 GWP 总值通常是整个寿命期排放的温室气体 GWP 总值的 84%。²⁹ 我们并假设不存在弃置阶段，因为飞机燃料燃尽后无任何剩余物需要弃置。

我们需要对混合分析模型做一些说明。我们使用的 EIO-LCA 数据库包含 2002 年的数据，这些数据未必反映 2011 年的经济现状。³⁰ 若干产业仍在使用与 2002 年相同的流程，但也有许多产业已经升级使用效率更高的工艺流程，从而改变了它们的环境足迹。例如，采煤行业基本上还在使用 2002 年的技术，而新型油电混合汽车的燃料使用效率已超过使用标准燃料的汽车。³¹ 因此，这个数据库的准确性和完整性并不确定，因而使用 EIO-LCA 方法含有不确定因素。此外，2002 年尚无生产合成喷气发动机燃料的 FT 工艺流程，因此本文作者估算了用 FT 流程生产 CBTL 基燃料的成本，以计算其温室气体 GWP 值。尽管使用 EIO-LCA 比较 JP-8 和 CBTL 基燃料含有这些不确定因素，这个方法还是能够向决策者提供更绿色的喷气发动机燃料对环境影响的大致情况。

若要使用 EIO-LCA 评估模型，必须先确定接受评估的产品、流程或服务在特定寿命阶段所需的资源的成本。在这个方法中，EIO-LCA 工具对这两种燃料的原材料萃取阶段都适用。在材料加工阶段，EIO-LCA 评估模型仅适用于 JP-8 航空油，而不适用于 CBTL 基燃料，因为 FT 合成技术在美国不是一个行业标准流程。因此，美国没有一个合适的行业或部门能代表 EIO-LCA 评估模型中

的这个阶段。最后，我们没有包括这两种燃料寿命期评估的燃油使用阶段，因为我们假设它们在这一阶段的 GWP 总值是一样的。

JP-8 航空油的成本

典型柴油燃料的总成本包括四类成本。以 2010 年 10 月每加仑 2.80 美元零售价格为例，这四类成本分别是：17% 税金，12% 配送和营销成本，6% 提炼成本，以及 65% 原油成本。³² 本文据此估算了 JP-8 的原材料萃取和加工相关成本：鉴于空军在 2008 年的喷气发动机燃料支出为 67 亿美元，我们估计原材料萃取（原油价值）和提炼成本分别约为 44 亿美元和 4.02 亿美元。³³ 我们是利用 EIO-LCA 数据库“油气萃取”和“石油提炼”部分的详细数据得出上述成本估算的。

CBTL 基燃料的成本

我们分析的 CBTL 基燃料含有 8% 生物质（重量百分比）和 92% 煤（重量百分比）。鉴于空军在 2008 年的喷气发动机燃料使用量为 24 亿加仑，若要达到空军的目标，即“空军国内航空油需求中替代混合燃料的使用比例达到 50%”（如上文所述），则需要有 6 亿加仑为替代燃料。³⁴ 因此，其中大约 5.5 亿加仑将来自煤，还有 0.5 亿加仑将来自柳枝稷。由于生产一桶（42 加仑）柴油需要半个短吨的煤，而生产一桶 CBTL 基燃料需要一个干吨的柳枝稷，因此生产 12 亿加仑喷气发动机混合燃料将需要大约 650 万短吨煤和 120 万干吨柳枝稷。³⁵ 按照 2010 年 1 月的售价，一短吨煤是 42 美元，一干吨柳枝稷是 53 美元，因而原材料萃取总成本分别是 2.73 亿美元和 0.64 亿美元。³⁶ 我们是利用 EIO-LCA 数据库“煤采掘”和“所有其他作物种植”部分的详细数据得出上述成本数值

的。如前所述，EIO-LCA 工具不适用于提炼流程；因此，我们从能源部获得环境影响数据。

为了确定每种燃料的环境影响，我们计算出每种燃料每一寿期阶段分析结果总和。根据 EIO-LCA 评估模型分析结果，CBTL 基燃料的 GWP 值比 JP-8 航空油低 14%，其中未考虑碳捕获。换言之，CBTL 基燃料的温室气体排放量比 JP-8 少 14%，因此更加绿色。但是，美国 2007 年能源独立安全法（EISA 2007）要求今后研发的喷气发动机替代燃料的寿期 GWP 值低于石油基喷气发动机燃料 GWP 值 20%。³⁷ 由于我们发现 CBTL 基燃料 GWP 值仅比基准值低 14%，在不考虑碳捕获封存的情况下，CBTL 基燃料没有达到能源独立安全法所定义的替代燃料的要求。

我们还进一步分析了生物质含量百分比从低到高的变化，以及包括碳捕获封存（CCS）和不包括 CCS 的区别。分析结果由图 3 显示，图中列出 CBTL 基燃料的不同生物质含量百分比，并比较此燃料相对于 JP-8 航空油的绿色程度。20% 位置的水平线代表能源独立安全法规定的政府标准。虚线显示 LCA 评估中

未包括 CCS 的结果，实线则显示包括 CCS 的结果。该图表明，如果不考虑 CCS（这是较为保守的假设），生产 CBTL 基燃料时至少需要使用 8-10% 生物质。在任何情况下，如果考虑 CCS，则所有的 CBTL 基燃料都符合能源独立安全法标准。在生物质含量百分比较低时，采纳 CCS 处理工艺可明显改善 CBTL 基燃料与 JP-8 航空油相比较的绿色程度。

结语

替代燃料使国防部为其庞大的装备提供燃料时有更多选择。空军欢迎替代燃料，因为它们能使空军实现能源行动计划目标（提高国内来源燃料的比例）。但是，要确定一种燃料的绿色程度并非易事。空军决策者考虑的替代燃料必须在成本和可持续性方面与现有燃料不相上下；此外，替代燃料必须能大量生产，其寿期温室气体足迹必须低于石油基喷气发动机燃料（即替代燃料必须更加绿色），并且不会损害飞行安全性。³⁸ 采用替代燃料来源时会面临两个决策难题。第一，能源独立安全法等美国法律要求替代燃料的

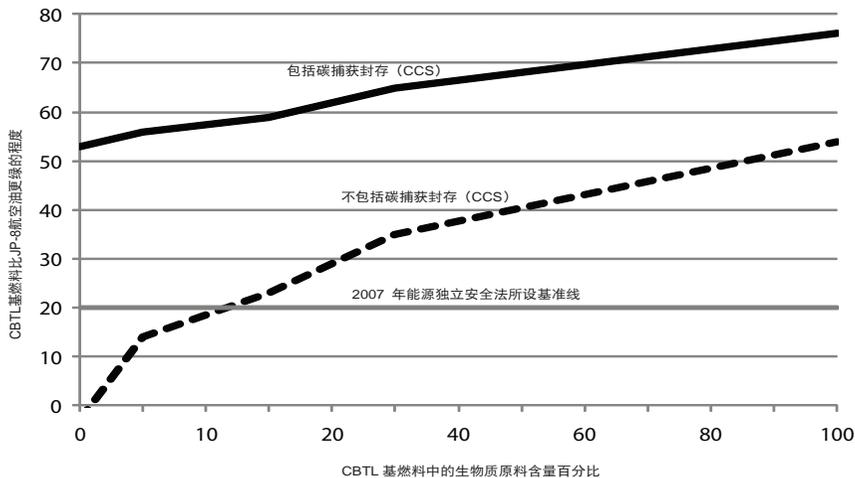


图 3：CBTL 基燃料中生物质原料含量越高，其相对于 JP-8 航空油的绿色程度就越高

GWP 总值必须低于基准值 20%。第二，决策者需要有一个评估燃料寿命环境影响的分析方法。

本文论述了这样一种分析方法，供空军领导人对替代燃料和石油基燃料进行比较、确定燃料的绿色程度时采用。如上述图 3 所示：所有 CBTL 基燃料的 GWP 总值，无论是否包括简单 CCS 工艺，都低于 JP-8 航空油，只有当替代燃料由百分之百煤转化且不包括 CCS 工艺时除外。因此，根据 EIO-LCA 分析，CBTL 流程可生产出整个寿命更加绿色的喷

气发动机燃料。在此基础上，我们建议空军按照其能源战略的要求使用这些替代燃料。

空军和国防部领导人也许认为，美国国内来源燃料具有战略重要性，因而不一定需要再做寿命评估。但是，起码空军应该支持科研界继续进行更多的现场研究，以加深理解替代燃料的使用对环境的影响。而且，空军应该关注航空燃料保障供应链中的其他环节（例如燃料储存），从而避免使用替代燃料可能造成的任何负面的、意外的后果。♣

注释：

1. Samuel King Jr., "Air Force Officials Take Step toward Cleaner Fuel, Energy Independence" [空军采取措施获取更清洁燃料和实现能源独立], US Air Force, 25 March 2010, <http://www.af.mil/news/story.asp?id=123196846>.
2. Department of Defense Instruction 4170.11, Installation Energy Management [国防部 4170.11 指令：设施能源管理], 11 December 2009, 10, <http://www.dtic.mil/whs/directives/corres/pdf/417011p.pdf>.
3. Chris DiPetto, "Department of Defense Energy Security Task Force Update" [国防部能源安全工作组最新简报], slide presentation (Washington, DC: Pentagon, Office of the Secretary of Defense for Acquisition, Technology, and Logistics, 18 September 2008), slide 9, https://ldrd.llnl.gov/2008symp/DiPetto_symposium.pdf.
4. Michael A. Aimone, "Eliminating Energy Waste: The Role You Can (and Should) Play" [杜绝能源浪费：您能够（和应该）发挥的作用], (address, Society of American Engineers Conference, Salt Lake City, UT, 2009).
5. Air Force Policy Memorandum 10-1, Air Force Energy Program Policy Memorandum [空军政策备忘录 10-1：空军能源计划政策备忘录], 19 December 2008, 6.
6. 见注释 4。
7. "Diesel Fuel Explained: Diesel Fuel Outlook" [解说柴油燃料：柴油燃料展望], US Energy Information Administration, 2009, http://tonto.eia.doe.gov/energyexplained/index.cfm?page=environment_about_ghg.
8. "Oil: Crude and Petroleum Products Explained" [石油：解说原油和石油产品], US Energy Information Administration, 2009, http://tonto.eia.doe.gov/energyexplained/index.cfm?page=oil_home#tab1.
9. MIL-HDBK-510-1, Department of Defense Handbook: Aerospace Fuels Certification [国防部手册 MIL-HDBK-510-1：航空航天燃料认证], 13 November 2008, 10.
10. Tim Edwards, Biomass-Derived Aviation Fuels [生物质基航空燃料], internal document (Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Research Laboratory, 2009), 2.
11. 同上，第 150 页。闪点是指某种可燃液体释放足够的蒸气以致可在空气中点燃的最低温度。典型的喷气发动机燃料的闪点高于 60°C，而乙醇的闪点则低于 20°C。燃烧热是指某特定质量的物质与氧气完全燃烧时释放的热量。喷气发动机燃料的燃烧热大于 40 兆焦耳 / 公斤 (MJ/kg)，而乙醇的燃烧热则低于 30 MJ/kg。
12. Timothy Searchinger et al., "Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases through Emissions from Land-Use Change" [美国农田用于种植生物燃料作物而导致土地用途变更造成的温室气体排放增加], Science 319, no. 5867 (29 February 2008): 1238.
13. Bent Sørensen, "Carbon Calculations to Consider" [碳足迹计算考虑因素], Science 327, no. 5967 (12 February 2010): 780—81.
14. 见注释 12，第 1238 页。

15. University of Dayton Research Institute, Characterizing the Greenhouse Gas Footprints of Aviation Fuels from Fischer Tropsch Processing [介绍基于 FT 工艺流程的航空燃料的温室气体足迹] (Dayton, OH: University of Dayton Research Institute, prepared by the University of Texas at Austin, Center for Energy and Environmental Resources, 2010), 3.
16. 同上, 第 28 页。
17. United Nations Environment Programme, Why Take a Life Cycle Approach? [为何应采用寿命评估方法?], 5th ed. (New York: St. Joseph Print Group, 2004), 5, <http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DT1x0585xPA-WhyLifeCycleEN.pdf>.
18. Chris Hendrickson et al., "Economic Input-Output Models for Environmental Life-Cycle Assessment" [环境寿命评估的经济投入产出模型], Environmental Science and Technology 32, no. 7 (1 April 1998): 185.
19. 同上, 第 187 页。
20. "Approaches to Life Cycle Assessment" [寿命评估方法], Carnegie Mellon University, Green Design Institute, <http://www.eiolca.net/Method/LCAApproaches.html>.
21. 请访问 Carnegie Mellon University, Green Design Institute 网站: <http://www.eiolca.net/Method/eio-lca-method.html>.
22. 见注释 18, 第 185 页。
23. Chris Hendrickson et al., "Comparing Two Life Cycle Assessment Approaches: A Process Model vs. Economic Input-Output-Based Assessment" [比较两种寿命评估方法: 流程模型和基于经济投入产出的评估], in Proceedings of the 1997 IEEE [Institute of Electrical and Electronics Engineers] International Symposium on Electronics and the Environment (San Francisco, CA: IEEE, May 1997), 177.
24. 见注释 20。
25. 见注释 20。
26. National Energy Technology Laboratory, Affordable, Low-Carbon Diesel Fuel from Domestic Coal and Biomass [用国产煤和生物质生产可负担的低碳柴油燃料], DOE/NETL-2009/1349 (Washington, DC: United States Department of Energy, 14 January 2009), vi, <http://www.netl.doe.gov/energy-analyses/pubs/CBTL%20Final%20Report.pdf>.
27. 见注释 15, 第 34 页。
28. Air Transport Action Group, Beginner's Guide to Aviation Biofuels [航空生物燃料入门], (Geneva, Switzerland: Air Transport Action Group, May 2009), 2, accessed 1 March 2011, http://www.enviro.aero/Content/Upload/File/BeginnersGuide_Biofuels_WebRes.pdf.
29. 见注释 26, 第 24 页。
30. 见注释 18, 第 185 页。美国政府从 400 多个工业、制造业和服务业部门收集数据, 并利用 EIO 表确定各个经济部门的相关状态。这个数据库为 EIO-LCA 评估模型提供了基本资料。
31. "Hybrid Vehicles" [油电混合动力], US Department of Energy, http://www.fueleconomy.gov/feg/hybrid_sbs.shtml; 另参看 "2004 Automotive Fuel Economy Program" [2004 年汽车燃料经济性计划], National Highway Traffic Safety Administration, <http://www.nhtsa.gov/Laws+&+Regulations/CAFE++Fuel+Economy/2004+Automotive+Fuel+Economy+Program>.
32. 参看 "Coal News and Markets" [煤炭新闻和市场], US Energy Information Administration, 14 March 2011, <http://www.howstuffworks.com/framed.htm?parent=gas-price.htm&url=http://tonto.eia.doe.gov/oog/info/gdu/gasdiesel.asp>.
33. 空军使用了大约 24 亿加仑喷气发动机燃料。本文作者估计燃料成本大约为每加仑 2.80 美元。
34. 这 12 亿加仑是指混合燃油, 由替代燃料和常规燃料各 50% 混合而成。
35. Nicholas Ducote and H. Sterling Burnett, "Turning Coal into Liquid Fuel" [煤转化成液体燃料], Brief Analysis no. 656 (Washington, DC: National Center for Policy Analysis, 1 May 2009), 1, <http://www.ncpa.org/pdfs/ba656.pdf>.
36. 参看 "Coal News and Markets" [煤炭新闻和市场]。用于生产喷气发动机燃料的煤应该每磅至少产生 11,000 英热单位的热量。另参看 Michael Popp and Robert Hogan Jr., "Assessment of Two Alternative Switchgrass Harvest and Transport Methods" [对替代柳枝稷的两种作物及其运输方法的评估], (address, Farm Foundation Conference, St. Louis, MO, 12 April 2007), <http://www.farmfoundation.org/news/articlefiles/364-Popp%20Switchgrass%20Modules%20SS%20no%20numbers.pdf>.
37. US Public Law 110-140, Energy Independence and Security Act of 2007 [2007 年能源独立和安全法], sec. 202, 2007, 1522.
38. 见注释 10, 第 15 页。

利用纳米技术检测神经毒剂

Using Nanotechnology to Detect Nerve Agents

马克·N·戈尔齐, 美国空军退役中校 / 博士 (Lt Col Mark N. Goltz, PhD, USAF, Retired)

金东石博士 (Dr. Dong Shik Kim)

李安·拉奇, 美国空军少校 / 博士 (Maj LeeAnn Racz, PhD, USAF) *

纳米技术用途广泛, 其潜在影响涉及医学、消费产品等许多不同领域。

美国空军理工学院与托莱多大学 (University of Toledo) 合作, 正在探索利用纳米级有机基质检测有机磷酸酯 (OP) 神经毒剂的可能性。现有的 OP 化合物检测技术既费钱又费时。研发纳米级有机基质传感器, 将可在实战条件下实现直接和实时感测。本文论述此种传感器的科学原理及其可能的用途。

高性能传感器对于保护军人和平民免受攻击极为重要。当前作战准则要求空军单位在遭受化生武器攻击后两小时内能够继续执行其主要作战任务。¹ 能否达到两小时内继续作战的目标, 可能对作战行动的胜负有很大影响。但是目前采用的 OP 检测能力在灵敏度、操作时间紧迫性和易操作性方面都不理想, 很难达到规定的两小时时限要求。

一旦发生化学攻击, 军事人员必须拥有最灵敏和最快速的检测手段, 以检测化学毒剂和测定其浓度。例如, VX 是杀伤力最强和最持久的神经毒剂之一, 如接触到浓度大约为 1.2 毫克 / 立方米 (mg/m^3) 的 VX 毒剂, 接触人群在 10 分钟之后的死亡率为 50%。² 这个浓度相当于在覆盖一个足球场的一米高的空气层中加入大约一茶匙的毒剂。我们目前使用的设备

能够很容易地检测到这个浓度水平的 VX

OP = 有机磷酸酯

DMMP = 甲基磷酸二甲酯

OPH = 有机磷水解酶

毒剂。但是如果 VX 的浓度降低至大约 $0.08 \text{ mg}/\text{m}^3$ (降低 15 倍), 接触三小时之后仍然会导致死亡。不幸的是, 这样的低浓度处于或低于常规化学战剂检测设备的检测下限。如接触到浓度大约为 $0.01 \text{ mg}/\text{m}^3$ 的 VX 毒剂, 接触人群在 10 分钟之后有 50% 将会受到妨碍任务执行能力但非致命的影响, 例如出现针状瞳孔、恶心或呕吐等症状。³ 这个浓度相当于在覆盖 100 个足球场的一米高的空气层中加入一茶匙的毒剂。如果无法有效地检测这些低浓度 VX 污染, 执行重要任务的作战人员会丧失作战能力, 从而无法完成任务。另一方面, 在化学战剂浓度不清楚时, 作为保守措施, 指挥官也许会命令作战人员穿戴单兵防毒装具。防毒装具虽具保护作用, 但也会阻碍作战人员有效执行任务。因此, 有效监测环境中的微量化学战剂, 可使作战人员在适当的时候脱掉防毒装具, 减轻穿戴全身防护服带来的身心压力。⁴ 再者, 鉴于包括儿童和老人的平民群体对低浓度化学战剂的影响更为敏感, 因而需要改进传感器的使用性能, 以防发生对平民百姓的恐怖攻击。

空军生物环境工程作战单位目前拥有现场空气危险污染物检测系统, 能够检测、识别和测量浓度很低的化学战剂, 使作战人员能评估接触风险。⁵ 这种系统采用气相色谱法, 需要采集——有时还需要预处理——气体或液体样本, 然后把它们注入一个分离柱 (图 1)。目标物质通过分离柱之后, 其分子

* 戈尔齐博士和拉奇少校在美国空军理工学院系统和工程管理学系任教。金东石博士是托莱多大学化学和环境工程学系的教授。

到达一个测量浓度的检测器。然后，检测器生成的信号被转化成可在显示器上读取的电子信号。但是这套设备大约有 70 磅重，操作时很笨重，需要定期（每周）进行预防性维护，只能由经过特殊训练的人员使用，而且价格昂贵（每套设备价格超过 10 万美元）。⁶ 此外，这套系统需要运行长达 30 分钟才能测量下限浓度的化学战剂。在要求快速反应的作战环境中，这显然不理想。因此，我们需要刻不容缓地改进检测和量化的灵敏度、速度和准确度。

纳米技术提供了一个改进检测系统的途径。纳米传感器在分子层面运行，目标物质的分子与传感元件之间发生直接——几乎是瞬时——的反应，而且反应副产物几乎瞬时传送到检测装置。此外，纳米传感器不需要用分离流程隔离目标物质分子。纳米级传感器设计（图 2）采用对目标物质分子有特定亲和力的传感元件。这种特定亲和力很强，因而不需要额外的样本准备、预处理或分离流程。传感元件是固定的，采用精确定向，因而目标物质分子与传感元件的反应副产物会快速和准确地传送到微电极。整套系统可以安装在一个手持式装置或剂量计里，其价格显著低于常规色谱分析仪。但是请注意：传感器仅适用于检测特定的化学品。因此，

若要识别未知的神经毒剂，则需要在一个装置内安放几片不同的纳米传感基质。

托莱多大学和空军理工学院的研究人员正在研发一种酶纳米生物传感器，用于检测 OP 化合物，例如用于合成沙林神经毒剂的甲基磷酸二甲酯（DMMP）。该传感器归类为生物传感器，因为它使用一种酶来检测目标物质分子。甲基磷酸二甲酯是目前已知毒性最强的物质之一，并可能致癌，若吸入、咽入或透过皮肤渗入，可能会致命。OP 化合物会使人丧失行动能力和死亡，其主要作用机制是抑制对人体中枢神经系统功能有重要作用的一种酶，从而干扰肌肉活动和产生严重的症状，甚至最终死亡。⁷

若要有效检测 DMMP，则需要使用有机磷水解酶（OPH）作为传感元件，因为它有很强的 DMMP 亲和力。这种酶是有机化学品，会由于一种称为灭活化（deactivation）的现象而降解和失去功效。因此，先要把 OPH 酶放入保护性肽纳米管。研究人员使用肽纳米管的理由是，它们易于合成，具有良好的化学稳定性和热稳定性、良好的传导性、卓越的生物兼容性和良好的功能灵活性。⁸ 在初步试验中，肽纳米管中 OPH 酶的稳定性是游离酶的四倍。OPH 酶能够很容易地附着到肽纳米管内壁，然后肽纳米管附着到一个称为

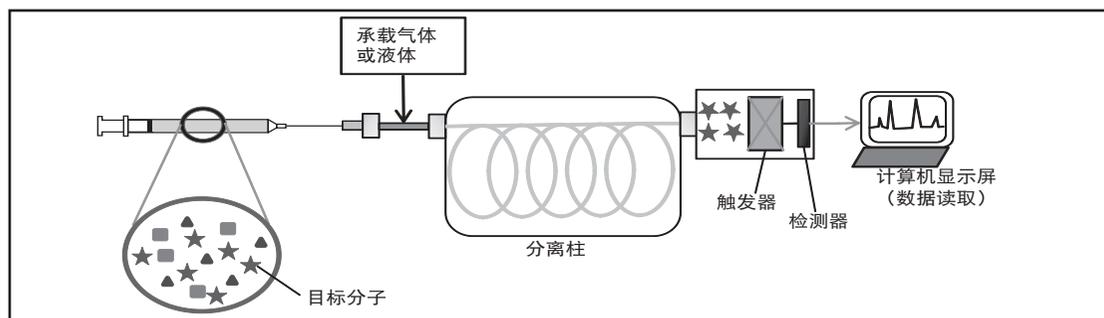


图 1：典型的气相色谱检测系统示意图

自组装单分子层的特别制备的链接膜，在电极上形成传感器基质（图 2）。基于 OPH 酶的生物传感器可以有效地直接监测和测量各种 OP 化合物，包括基于 OP 的农药和杀虫剂，以及沙林毒气等化学战剂。⁹ 这种生物传感器对空气中所含甲基磷酸二甲酯的检测极限在 $0.005\text{--}0.01\text{ mg/m}^3$ 范围内。¹⁰ 由于它的灵敏度超过常规检测设备二至四倍，它能检测对人无致命危害，但有严重影响的极低浓度毒剂。此外，这种生物传感器的检测结果生成速度比常规传感器快三倍。而且，凭借体积小和灵敏度高等优点，这种生物传感器非常适合安装在遥驾飞机上。鉴于这些飞机在战场上和侦察任务中发挥着越来越重要的作用，安装生物传感器具有非常重要的军事意义。传感器还可用于遥测空气中悬浮的化学品，有利于更安全和更有效地采样。尽管这种用途目前只是设想，其发展潜力极大。目前研发的纳米传感器是针对特定化合物研制的，因此只对目标物质分子起反应，不大会受到其他化合物的干扰。

除了用于保护 OPH 酶的肽纳米管之外，另一个研究重点是自组装单分子层链接膜，它在纳米传感器基质中起着重要作用，因为它控制从 OPH 酶到传感器的电子传输速率。研究人员正在研究链接膜分子和尺寸的各种不同组合，以优化传感器性能。空军理工学

院和托莱多大学的研究人员正在测试短链接和长链接的各种不同组合的电子传输速率和信号精确度。一方面，短链接可加快传输速率（因而灵敏度高），但是短链接膜的电容不够低，无法抑制来自其他电解质的杂讯（因而短链接的信号不精确）。另一方面，长链接可降低杂讯（因而它们的信号精确），但是电子传输速率低。有鉴于此，正确组合短链接分子和长链接分子，可获得最佳灵敏度和精确度。

如上所述，酶传感器面临两个关键问题：酶的活性衰减和灵敏度/精确度降低。托莱多大学和空军理工学院的研究人员正在尝试从两个方面解决这些问题：(1) 使用肽纳米管保护酶和延长其使用寿命；以及 (2) 特别设计链接分子，尽量获得最佳灵敏度和精确度。

纳米技术有很大的发展潜力，可用于制造能够快速和精确检测 OP 毒剂的手持式传感器。它还可用于制造体积小但灵敏度和精确度极高的传感器，安装在遥驾飞机上，具有重大的军事价值。另外，手持式传感器在作战和国土防卫方面的用途也值得重视。快速、精确和成本低廉的传感器可安装在人口密集地点和军事设施里，起到化学攻击预警作用。在发生化学攻击之后，通常需要派遣侦察小组到若干基点采样，然后才能确定适当的人员防护要求。即使生物传感器只比典

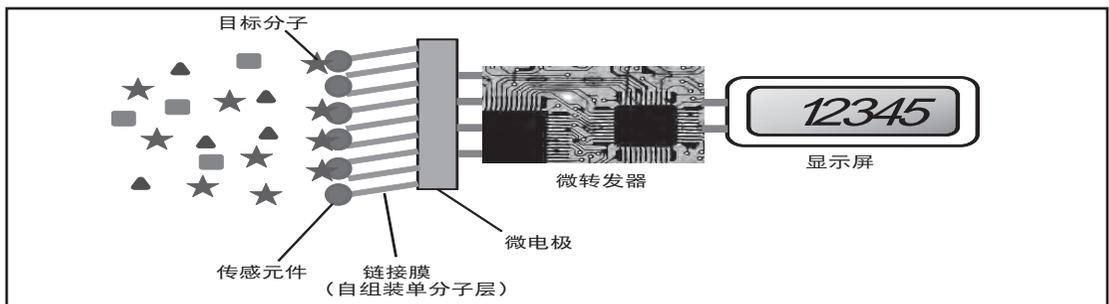


图 2：微芯片纳米传感器系统示意图

型的常规方法缩短几分钟采样时间, 多次采样累计的时间差异还是相当可观的。并且, 检测灵敏度提高后, 在确定低浓度化学污染区的风险时就更有把握。如果在化学攻击之后作战人员可以提前脱下单兵防毒装具而不会发生危险, 他们就能更有效地执行任务。再者, 如果存在 OP 毒剂, 其浓度不足以致命, 但会抑制任务执行能力, 指挥官可以命令作

战人员穿戴单兵防毒装具。这种生物传感器技术提供成本效益更高和性能更好的化学品检测方法, 能更好地应对目前和未来的威胁。此外, 肽纳米管是一种创新材料, 能增强对纳米级生物传感器至关重要的 OPH 酶的活性和使用寿命。显而易见, 空军应该支持此类装置的研发和商业化努力。♣

注释:

1. Air Force Manual 10-2602, Nuclear, Biological, Chemical, and Conventional (NBCC) Defense Operations and Standards [核、生物、化学和常规 (NBCC) 防御作战及标准], 29 May 2003, 9, <http://www.e-publishing.af.mil/shared/media/epubs/AFMAN10-2602.pdf>.
2. Air Force Medical Operations Agency, Environmental and Occupational Health Division; and Air Force Institute for ESOH [Environment, Safety, and Occupational Health] Risk Analysis, Industrial Hygiene Branch, "Chemical Warfare Agent Health Risk Assessment Guidance Document" [化学战剂健康风险评估指导文件], 61, 2 April 2003, <https://afkm.wpafb.af.mil/ASPs/docman/DOCMain.asp?Tab=0&FolderID=OO-SG-AF-06-3-7-2&Filter=OO-SG-AF-06>.
3. 同上。
4. Graham S. Pearson, "Chemical and Biological Warfare" [化学战和生物战], *Journal of Naval Engineering* 32, no. 2 (1990): 198.
5. "CENTAF Inficon HAPSITE Gas Chromatograph / Mass Spectrometer Concept of Operations and Execution" [美国空军中央司令部现场空气危险污染物检测系统气相色谱 / 质谱仪操作和执行概念], 14 January 2003, 1—2.
6. Air Force Medical Support Agency/SG3PB FY11—FY15 886H, "Homeland Security Medical Response Spend Plan, 2011—15" [国土安全部医学响应拨款支出计划], <https://afkm.wpafb.af.mil/ASPs/docman/DOCMain.asp?Tab=0&FolderID=OO-SG-AF-06-55-2-7&Filter=OO-SG-AF-06>.
7. Asja Bartling et al., "Enzyme-Kinetic Investigation of Different Sarin Analogues Reacting with Human Acetylcholinesterase and Butyrylcholinesterase" [各种沙林类有机磷化物与人体乙酰胆碱酯酶和丁酰胆碱酯酶反应的酶动力学研究], *Toxicology* 233 (2007): 166—72; 另参看 Kai Tuovinen et al., "Phosphotriesterase—a Promising Candidate for Use in Detoxification of Organophosphates" [磷酸三酯酶——可望用作有机磷酸酯的解毒剂], *Fundamental Applied Toxicology* 23, no. 4 (November 1994): 578—84; 另参看 William J. Donarski et al., "Structure-Activity Relationships in the Hydrolysis of Substrates by the Phosphotriesterase from *Pseudomonas Diminuta*" [从缺陷假单胞菌得到的磷酸三酯酶受质水解过程中的结构和活性关系], *Biochemistry* 28, no. 11 (1989): 4650—55.
8. Shuguang Zhang, Fabrizio Gelain, and Xiaojun Zhao, "Designer Self-Assembling Peptide Nanofiber Scaffolds for 3D Tissue Cell Cultures" [用于 3D 组织细胞培养的特定设计自组装肽纳米纤维支架], *Seminars in Cancer Biology* 15, no. 5 (2005): 413—20; 另参看 Manoj Nahar et al., "Functional Polymeric Nanoparticles: An Efficient and Promising Tool for Active Delivery of Bioactives" [功能性聚合物纳米粒子: 有效输送生物活性物质的高效和有发展潜力的工具], *Critical Reviews in Therapeutic Drug Carrier Systems* 23, no. 4 (2006): 259—318.
9. Thanaporn Laathanachareon et al., "Cross-Linked Enzyme Crystals of Organophosphate Hydrolase for Electrochemical Detection of Organophosphorus Compounds" [用于有机磷化合物电化学检测的有机磷水解酶交联酶晶体], *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 24, no. 12 (2008): 3049—55; 另参看 Jeffrey S. Karns et al., "Biotechnology in Agricultural Chemistry" [农业化学中的生物技术], *American Chemical Society Symposium Series* 334 (1987): 157—70.
10. Alan R. Hopkins and Nathan S. Lewis, "Detection and Classification Characteristics of Arrays of Carbon Black/Organic Polymer Composite Chemiresistive Vapor Detectors for the Nerve Agent Simulants Dimethylmethylphosphonate and Diisopropylmethylphosphonate" [神经毒剂模拟剂甲基磷酸二甲酯和甲基磷酸二异丙酯的碳黑 / 有机高分子复合材料化学阻抗型化学蒸气传感器组的检测和分类特性], *Analytical Chemistry* 73, no. 5 (2001): 884; 另参看 Chelsea N. Monty, Ilwhan Oh, and Richard I. Masel, "Enzyme-Based Electrochemical Multiphase Microreactor for Detection of Trace Toxic Vapors" [用于检测微量有毒蒸气的酶基电化学多相微反应器], *IEEE [Institute of Electrical and Electronics Engineers] Sensors Journal* 8, no. 5 (May 2008): 584.

GPS 受阻环境下的精确定位、导航和定时

Precision Position, Navigation, and Timing without the Global Positioning System

肯尼斯·A·费舍，美国空军少校 / 博士 (Maj Kenneth A. Fisher, PhD, USAF)

约翰·F·拉切特博士 (Dr. John F. Raquet) *

NAVSTAR 卫星全球定位系统 (GPS) 的出现引发了现代战争的革命性变化。从 2005 年以来，美国的精确制导弹药几乎都是采用了 GPS 的目标定位数据。¹ 武器发射系统因此得以精确打击敌方目标，大幅减少甚至消除附带损伤。并且，几乎所有军事资产，如飞机、坦克、舰船、导弹、迫击炮弹、运输船队，以及深入敌区的战士，无一不依靠 GPS 提供的精确定位功能。

这种定位系统对军事而言有两个重大限制。第一：此系统受限于视线范围，亦即此卫星必须在接收者的天线“视觉”范围内，才能获取信号。这个限制对室内（包括地下）及都市环境而言影响尤其大，对地面部队、遥驾飞机和精确弹药的导航构成严重的挑战。都市中的高楼可能阻断卫星的视线，造成反射或“多径”信号，使接收者困惑。在室内环境，GPS 信号虽可收到，但衰减严重，这意味着受建筑物保护的地面作战部队不容易获得可靠的 GPS 定位信号。

第二：敌人运用简单的技术和现成的设备，就可轻易破坏 GPS 信号。GPS 功率相对较低，敌人只要发射扰乱信号，就能造成“干扰”。据传：中国已经利用公路货车队部署 GPS 干扰器，另外，因特网多个网站也都兜售小型、廉价的装置，可以对抗基于 GPS 的运载平台跟踪。²

GPS = 全球定位系统
INS = 惯性导航系统
SoOP = 随机信号

还有一种虽然可能性不大但破坏力强大的阻入手段，这就是某些国家运用反卫星技术瘫痪或击毁 GPS 卫星网中的一颗或多颗卫星。目前有三个国家已经拥有这种技术：美国、俄国、中国，其中中国在 2007 年秘而不宣突然击毁本国一颗老化气象卫星，展现了中国的反卫星能力。³

无论出现哪种情况，都可能导致 GPS 能力降低或丧失，在此情况下，军队就需要一种能提供同等精确度和功能的替代导航系统。美国空军理工学院先进导航技术中心正在开发不需要 GPS 但具备类似 GPS 精确度的技术。先进导航技术中心在探索如何运用无线电信标、人造或自然发生随机信号（包括磁场）、以及影像辅助技术，来计算位置。在未来，把这几项技术结合起来，可能形成一种能替代 GPS 的成熟技术。本文对这些非 GPS 定位技术做简要介绍，以助读者理解。

导航原理

什么是导航

人类在早期，主要关注本地导航，即确定自身居住地在附近环境中的位置，主要是依据周围地标和已知位置信息来判断。后来，特别是海洋航行极大拓展了人类的移动能力，旅行者于是需要全球定位手段。⁴ 古代水手保持方向跟踪，记录航行中每一程的距离，从而保持不迷航，这项技术称为“航位推算

* 费舍少校是美国空军理工学院电气工程助理教授，在该院先进导航技术中心任副主任。拉切特博士也是空军理工学院电气工程副教授，在先进导航技术中心任主任。

仪”。⁵ 虽然现在导航技术已有巨大的发展,许多现代系统(比如惯性导航系统 [INS])仍然基于航位推算仪原理(假定一个起点,然后跟踪位置、速度、方向和/或距离经过一段时间后的变化)。

导航发展趋势

现代惯性导航系统在短期内相当精确,但若在大范围精确航行和协调,则需要极其严格的定位信息,因此催生出 GPS 技术。GPS 技术已经成为现代导航的中坚,在过去 20—30 年中不断改进,不仅极大提高了导航精确度,可以将导航中定位偏差精确到英尺甚至英寸,而且可将各种运作系统和设备同步,从而获得前所未有的效率。军事用户因此可以更经济运用作战资源、集中优势兵力和开展突然打击,将这种效率转变成作战优势。国防部和民间使用的许多系统越来越多地依赖可靠卫星导航,这些系统中的许多运载平台互相依存和协同,以(经常自动地)完成各种任务和使命。事实上,许多系统不仅仅需要靠 GPS 导航,还需要靠 GPS 才能运行,GPS 对这些系统而言已经是不可缺少的功能。并且,GPS 的精确度(包括设备本身精确度和支持设备运行的算法语言,如差动 GPS)不断提高,可以排除掉信号中的大多数错误。现在,用户在某些应用中,如军用飞机精确降落,以及不久将来的自动空中加油等,可以方便地获得近乎厘米级精确度的定位。随着 GPS 技术的潜在“客户”群体不断扩大,市场正在推出各种低成本、小体积的接收器,以满足需求。GPS 的无所不在特征,使用户(尤其是军事用户),包括参加作战的每一名军人、每一件机场设备、每一件运载平台等,越来越倾向于依赖 GPS 功能来执行跟踪和发现。在过去,由于传统导航装置和早期 GPS 接收器庞大而昂贵,我们只

能跟踪飞机等大型装备。而今,可以说每一名战士的背包中都配有一个 GPS 接收器。

军队和民间对 GPS 的依赖在增加,GPS 系统被干扰或毁坏的风险也相应加大。因此,用户需要配备具备导航和同步能力的备用设备,以备 GPS 系统发生问题。空军首席科学家最近把“GPS 中断环境下的 PNT(定位、导航、定时的词头缩写)”列为我军近期未来的 12 项科研重点之一(按重要程度排序)。⁶ 先进导航技术中心的研究人员正就这个问题进行攻关,努力研制出不依赖 GPS 的导航手段。

由于 GPS 系统在大多数情况下提供精确的 PNT,那么理想的替代技术通常需要运用导航算法把两个或更多的传感器结合起来。本文以下部分解释导航算法和传感器整合技术基本概念,然后介绍先进导航技术中心目前正在探讨的四种非 GPS 导航方法。

导航算法和传感器整合

导航算法是把信息按规则混合,通常通过预测—观测—比较流程来表达(见图 1)。图中右下处的“导航状态”表示用户当前的导航状态,或者说是有此用户当前位置、速度等的所有信息以及对此组信息质量的评定。我们可以认为这个状态是系统对用户位置的最佳猜定,以及系统对这种猜定之精确性的评定。图中的“传感器”框为整个系统测量或观测数据,从而了解用户的导航状态。对 GPS 而言,该系统观测的是到某一颗卫星的距离。它还运用真实世界的一个模型,称为“世界模型”框。在 GPS 中,这个模型可能由 GPS 所有卫星的位置(轨道)组成。

在“预测”阶段,该系统使用世界模型和导航状态来预测此系统应观测到什么;图

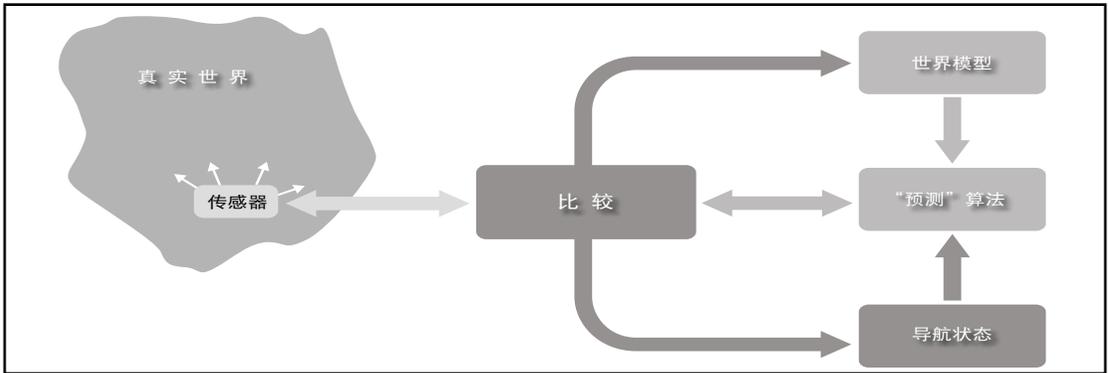


图 1：导航算法示意图

中的“预测算法”框表示这个过程。在“观测”阶段,该系统接收一个来自真实世界的噪声—蚀损测量值。在“比较阶段”,算法将预测值与实际值进行匹配对比,然后运用差值来修正导航状态,并可能修正世界模型。

设想一个简化导航示例:用户希望确定自己距一堵墙的位置。他用目测判断距离,预测为约 30 英尺(此时,导航状态为 30 英尺但不确定性高)。用户进一步通过测量或观测,即使用精密激光测距仪得到实际距离为 31.2 英尺。他将预测值和观测值进行比较,马上丢弃前者而相信后者,因为他显然更信任基于激光测距仪的测量值,而非(基于目测)的当前导航状态。

把预测和观测混合起来,构成了最令我们感兴趣的方法,但有时候用户对预测值和观测值同等信任,即使两者有差异。为处理好混合,典型的 INS/GPS 混合应用是采用 Kalman 过滤器来执行预测—观测—比较流程。⁷ INS 通过跟踪用户的移动来预测其位置;然后 GPS 接收器运用来自系统卫星的测量值来“观测”用户的位置;最后 Kalman 过滤器把 INS 预测值和 GPS 观测值对比,生成基于这两个结果之相对质量的混合解决方案。

典型的现代导航系统都是混合 INS 与 GPS 更新值来产生可信的导航估算值——之所以说“可信”,是因为这两个输入值互相补偿。INS 提供运载平台在运动中的近乎连续的准确估算,但误差总会随着时间而加大。例如,即使是最精确的 INS,在最初能生成非常接近真实位置的估算值,但误差积累到最后将导致其位置估算值不可再用。GPS 正好相反,它不频繁更新估算,从而也无误差积累。按串列方式,INS 可在短期中提供准确的导航估算值,GPS 则能在长期中提供准确数值。换言之,GPS 传感器约束了 INS 的漂移误差。

在 GPS 中断环境中进行定位、导航、定时的四种可能导航方法

用无线电信标导航

无线电信标(即人造信号源为导航目的进行广播以增强或替代 GPS 信号)可以在信号薄弱或被蓄意干扰的环境下发挥作用。美国国防先进研究局启动了一个计划,以“展示机载假卫星的应用前景,假卫星是由飞机运载的一种高功率、类似 GPS 的发射机,用于广播强大的 GPS 替代信号,此信号可以“烧

穿’干扰器,恢复 GPS 在作战区域的导航。”⁸ 实际现场试验表明,机载假卫星可以取代卫星广播,能向 GPS 军事用户提供优质导航信号,只需对接收器的软件程序稍做修改即可。

还有研究人员运用信标来发射独特信号,其接收机需要专门设计,以能根据这些信号进行导航。有一家公司在某局部地区设置地面信标装置,用于辅助 GPS,或者在没有 GPS 的情况下独立导航。⁹ 人们甚至可以使用这些信标装置来判定地下复杂采矿坑道中矿工的位置。进一步,这些装置有可能辅助地面部队在封闭环境中开展行动。从军事行动角度来看,这种方法需要把发射机部署在地面或飞机平台上。

用人造随机信号导航

GPS 是通过跟踪卫星发射的信号实现导航,用人造随机信号 (SoOP) 导航也是根据相同原理,不同点在于 SoOP 导航所跟踪的信号不是那些以导航为目的所发射的信号,而是为其他特定目的发射的信号,如调幅和调频无线电、卫星无线电、电视、手机发射网、无线电脑网,以及其他多种卫星信号。先进导航技术中心已经研究了电视信号、调幅无线电信号、数字音频/视频广播,以及无线网络等各种可行选择。¹⁰ 由于 SoOP 选择很多,研究人员开发了一种数学工具来确定这些信号对导航的可用性。¹¹

SoOP 导航相对 GPS 导航有若干优势。首先,SoOP 选择很多,可以保证导航用户需要定位和需要减少定位误差时有大量可用信号存在。第二,SoOP 的接收信号强度经常高于 GPS 信号。¹² (我们还经常可在室内环境接收到调频无线电台或手机网发射的可用信号,此点亦强于 GPS 信号。) 并且,采用 SoOP 导航的用户不必考虑设备部署或运行费

用。(当然,移动接收器,就像 GPS 接收器一样,需要专门设计和制造后才可投用。)

把 SoOP 用于导航也有缺点。信号发射系统既然不是有意把这些信号用于导航,其定时也就不会互相连接或同步。再者,导航用户可能不清楚发射的是什么信号。为减轻这两个问题,在典型的 SoOP 导航模式中,通常包括一个基地台,亦即一个在用户接收机附近的已知地点存在一个接收装置。基地台允许用户装置提取 SoOP 中的某些特征,从而减轻定时问题。大多数算法还假设 SoOP 发射机(例如无线电台塔或无线路由器)设在已知地点,有关确定这个地点信息的方法也已研制出来。SoOP 导航中发生错误的主要根源是多路或反射信号,这个问题很难解决。

正交频率分配多路传输用于数字音频/视频广播和许多无线网络装置,是一种最具潜力的 SoOP 信号结构。这些信号表现出其他信号所缺乏的导航用途优势,例如信号中含有冗余信息,用户可通过监听(被动收听一个信号)而获得导航数据,而不必使用基地台。¹³ 与此紧密相关的研究还有如何使用无线电频率指纹来把每个信号联系到某个特定的发射台。¹⁴

SoOP 导航法中,除了通过跟踪一个 SoOP 而获得定时信息(类似于 GPS 导航)之外,还有其他方式可供考虑。例如:我们可以使用角度到达数据(主要通过使用多个天线获得)进行导航,即把多个到达角进行等分,运用三角测量系来确定接收器的位置。另外,我们也可使用 SoOP 的信号接收强度来估算与其发射源的大致距离。有一家民间公司甚至提供无线网络位置和发射功率数据库,用于信号接收强度计算。¹⁵

用自然发生随机信号导航

虽然人造 SoOP 非常值得研究，自然发生 SoOP 也到处存在。从根本上说，凡能帮助一个人区别地球上的某一位置相对于另一个位置的任何源都可用于导航。一种现象对定位有多大用处，经常取决于我们对其所做的测量是否可靠，以及这种测量与用户的位置是否紧密相关，传感器的大小、重量和功率也都有关系。许多自然发生的 SoOP，如磁场、重力场、闪电等都可能用于导航，其中尤以磁场导航最具军事应用潜力。

磁场强度各异，但遍布整个地球。除了地球的主磁场之外，其他类似的磁场可发生在任何导电材料中（如建筑钢筋、墙内加强钢筋、金属管道、导线等）。因此磁场的强度在某个建筑物内各不同走廊各不同部位都不相同。先进导航技术中心已经测试了运用这些强度来辅助导航系统在室内环境工作的可行性，他们首先把从小型磁力仪（一幅扑克牌大小）获得的测量值与先前确定的此室内磁场分布图进行对比。¹⁶ 然后在磁场分布图上找出与磁力仪测量值最相关的地点，从而确定用户的位置。此实验结果证明很有前途，但仍有两处需要加强研究。第一：这个系统必须依靠已经制成的磁场图，我们不可能让战士们对现场进行勘测，因此研究人员正在研究移动过程中逐步建立这份磁场图的方法。第二：研究人员正在探索磁场经过一段时间后的变化，以及磁场导航算法在已观测磁场发生重大变化情况（磁场变化可因现场增加或撤除金属物体而引起）下的不适用性。

影像辅助导航

影像辅助导航是用照相机生成一种替代性的高度互补的系统，来限制惯性漂移。影像系统不是直接计算运载平台本身的位置，而是采用从图像传感器看到的运动来辅助惯

性导航系统。例如，假设一个人坐在椅子上旋转，生理上的前庭系统会感觉到这种旋转，但是视力通过观察运动的影像提示，来辅助对这种旋转的估算。影像传感器即以相近原理辅助惯性导航系统，从而提高导航精度。

影像辅助导航系统除了改善导航精度之外，还有其他多种优点。第一：计算机影像技术不受制于那些能有效瘫痪 GPS 的攻击（虽然基于影像的工具也面对其他制约因素，如雨雾和烟雾等）。第二：随着照相机和计算机功能更强大而成本更低，计算机影像迅速成为可以实现的及成本效益比可行的选择。第三：用于导航的照相机还可顺便收集情报。同样，用于情报收集的照相机也能顺便用于导航。还有，我们可以把数据信息与国家地理空间情报局或谷歌等商业地图提供商提供的地图信息进行整合。

由于计算上的复杂性，典型的影像辅助算法一般取用图像中的一些特征而非整个图像。此算法将连续图像中的特征进行对比，从而估算运载平台的相对运动位置。特征对比和匹配的质量好坏，取决于对后续图像序列的特征提取和识别。我们可以把分析集中在图像的一小块上，以进一步降低计算复杂性。这些计算上的改进可允许我们采用设置在相对较小平台上的影像系统。先进导航技术中心已经把一种速度更快但可信性稍差的特征跟踪算法与一种商用级惯性导航系统结合起来，在一种小型室内遥驾飞机上获得实时导航功能。¹⁷

从照相机到某特征之间的距离（即感知深度）是图像辅助导航的关键。先进导航技术中心采用两台照像机模仿人类视力，研制出立体影像辅助导航原型机，并证明其算法能接近实时。¹⁸ 美中不足的是，这种方法要

求两台照像机互相隔开一定距离，因此尚不能马上用于小型应用场合（例如装入一个微型航空器）中。

如果用一台小型常平激光测距传感器来增强一台照相机，就可免除制造立体影像系统原型机。先进导航技术中心已经使用这种传感器来测量照相机视场内的任何近物体的深度。¹⁹ 这些传感器，连同惯性传感器，可以帮助导航一架微型航空器，而不必依赖 GPS。这种技术对于室内探测和绘制地图特别有用。这种体型小重量轻的传感器组合装置除了提供非 GPS 导航功能之外，还能发现和拍摄物体目标，以用于情报或目标锁定用途。

和以上选择特征的做法不同，影像辅助导航的另一个活跃研究领域，称为预测透绘（predictive rendering），采用对物体的认知来估计运载平台的运动。先进导航技术中心正在试验把这种方法应用到空中加油技术中。具体而言，就是我们可以从一架加油机的三维模型，在计算机上从受油飞机的视角预测加油机的图像。在照相机捕获到真实图像之后，我们通过算法来将预测图像和真实图像进行对比。这种导航方式使用图像处理技术，从而简化在预测和真实图像之间建立相关（即两类图像互相匹配的程度）的过程。²⁰

把通信/导航装置与影像辅助惯性导航系统结合起来

这种设计概念是把通信和导航结合起来，形成一个战场用手握式装置。深入敌区的战士目前通常把手握式无线电通信机和 GPS 接收器都带在身上。如能把二者合一，我们的战士就能利用无线电通信机之间的通信链接进行定位，减少对 GPS 的依赖。进一步，机

载式影像辅助惯性导航系统可提供短时稳定和姿态信息。正如 GPS 辅助的惯性导航系统是把 GPS 的长期稳定性与惯性导航系统的短期稳定性相结合一样，以上所建议的设计概念也有可能获得 GPS 受阻环境下的相对长期、精确的导航。

先进导航技术中心和雷声公司的研究人员正在验证使用基于雷声公司的 DH-500 手握式通信机获得的测距值来确定用户的位置，而不依赖 GPS。²¹ 这种袋装式无线电系统不仅是成熟的通信工具，还具有测距功能。最近，先进导航技术中心把雷声 DH-500 无线电通信机的测距功能与立体影像辅助惯性导航系统相结合，获得 GPS 受阻环境下的精确导航能力。²²

这类研究有可能为解决更广泛的问题提供出路，例如，运用导航/通信一体化手握式装置，再辅之以其他传感器，可以做到同时导航和通信。这些装置还可能允许多平台在同一网络中合作，提供有助于导航的更多信息。

一副药方不能包治百病

只要 GPS（或者 GPS + 惯性导航系统）保持正常运作，就能满足大多数军事行动中的导航需要。但是如果 GPS 不可用，我们就必须转而使用上述讨论的替代导航技术。这些技术和 GPS 相比较，各自都有重大缺点。例如，基于无线电信标的导航不能全球使用，并需要设置信标装置；SoOP 导航需要能够接触到正确类型的信号（还容易受前述讨论的其他缺点的影响）；影像辅助导航在雨雾天气或海洋环境中效果欠佳；基于无线电测距的导航只能在多运载平台环境中工作。因此，任何单项技术都无法在所有环境中完全取代

GPS。通过研究开发使用非 GPS 信号的导航能力有其必要性，应该继续下去。但是，仅仅获得更多替代技术选择并不能形成全面的解决方案。

未来方向: 全源导航

美国空军必须采纳全源导航方式，来解决 GPS 受阻环境下的精确导航需要。²³ 全源导航算法运用所有可用信息，能根据承载平台的动态变化而计算出精确的结果。图 2 表现一个依赖惯性导航系统的概念，此系统使用以下多种传感器信息：GPS、SoOP、影像、光线测定和测距、磁场、重力、以及雷达。请注意，此处我们有意把 GPS 包括在内（因为既然是全源导航，只要 GPS 信号可用，就应以 GPS 为主）。这样，这个完整系统结合所有可用信息，当某些传感器不可用时，仍可使用其他信号源。

美国空军理工学院先进导航技术中心正在开发相关系统，做到能通过最合适的传感器方便地按局部环境条件提供导航。例如，基于图像的导航可能在都市环境白昼条件下发挥良好效果；基于重力场的导航虽然精度稍差，但在大洋中可能最有效。显然，对不

同的环境需要配置不同的传感器。目前面临的问题是，当前的组合结构无法做到自由切换或调换导航传感器。大多数组合性导航系统都是按照具体客户的具体要求设计的，这些系统由规定的传感器组成，若增加传感器，需要做大量的调整。把各种 GPS 和非 GPS 传感器组合到同一个系统中并非不可能，只是这样的系统在体积、重量、功率等方面将极为庞大，算法将极为复杂。从现实角度考虑，不同的任务需要不同的传感器组合，如果任务发生变化，则传感器组合也应相应变化。理想的设计是，首先有一个核心整合处理器，然后按照具体的任务需要搭配合适的导航传感器，来满足这项任务的能力需求。

要制造出这样的“即插即用”式导航系统，需要我们开展大量的科研工作，研究出一套基本整合算法和整合搭配结构（包括所有软硬件），以能连接并结合来自多个物理传感器的输入数据。导航研究界对此课题兴趣越来越浓。例如：国防先研局最近发布一个广域研究项目通告，项目要求达到的目的是“开发出能够快速整合和重新搭配任何传感器组合所需的结构、抽象法，以及导航过滤算法语言。”²⁴ 自不必说，研制灵活系统整合是一项艰巨的挑战，但意义重大，如果这种系统

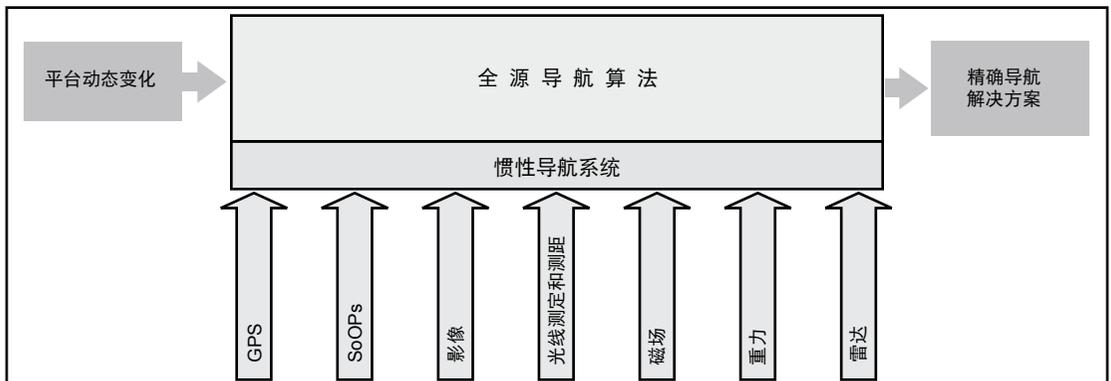


图 2：全源导航算法示意图

能在几乎任何环境中提供导航，将对军事用户有巨大作用。当然，此系统在体积、重量、功率和成本等方面都必须降到可接受的范围。

先进导航技术中心已经研制出相关技术，可以开始制造全源导航算法和部署全源导航

系统所需的传感器组合包。美国空军若想在 GPS 系统受阻的环境中保持精确导航能力，就必须继续提供投资，保证技术人员继续在整合算法、传感器能力和模块化等领域开展研究。♣

注释：

1. John W. Moyle, "The Space and Air Force: One Pathway to the Future" [太空和空军：一条通向未来的路径], Air and Space Power Journal: Chronicles Online Journal, <http://www.airpower.maxwell.af.mil/airchronicles/cc/moyle.html>.
2. Alan Cameron, "Perspectives—June 2008" [视角 — 2008 年 6 月], 24 June 2008, GPS World, <http://www.gpsworld.com/gnss-system/perspectives-june-2008-7254>.
3. Michael P. Pillsbury, PhD, An Assessment of China's Anti-satellite and Space Warfare Programs, Policies and Doctrines [关于中国反卫星及太空战争计划、政策和军事理论的评估], Report to the US-China Economic and Security Review Commission, 19 January 2007, http://www.uscc.gov/researchpapers/2007/FINAL_REPORT_1-19-2007_REVISIED_BY_MPP.pdf.
4. “导航”是指“记录、计划和控制 [船舶或飞机] 的方位和路线。”该词英文“navigate”源自拉丁文“navigare”，其中“navis”表示船舶，“agere”表示指示方向。见 Webster's II: New Riverside University Dictionary, 1988 词典中“navigate”词条。
5. 这是一个广泛使用的方向工具，即磁针罗盘，于 12 世纪在中国出现。人们通常根据船的速度和时间来确定距离。参看 Prapat Misra and Per Enge, Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance [全球定位系统：信号、测量和性能], (Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press, 2001).
6. United States Air Force Chief Scientist (AF/ST), Report on Technology Horizons: A Vision for Air Force Science and Technology during 2010—2030, vol. 1 [技术地平线报告：2010—2030 空军科技远景，第 1 卷], AF/ST-TR-10-01-PR (Washington, DC: Headquarters US Air Force, Office of the USAF Chief Scientist, 15 May 2010), 76, http://www.aviationweek.com/media/pdf/Check6/USAF_Technology_Horizons_report.pdf.
7. 此过滤器以 Rudolph Kalman 命名，Kalman 在其“线性过滤和预测问题新方法”论文中首先公布其预测—观察—比较算法，参看 Transactions of the ASME [American Society of Mechanical Engineers]—Journal of Basic Engineering 82 (1960): 35—45, <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/Kalman1960.pdf>.
8. Senate, Statement by Dr. Jane A. Alexander, Acting Director, Defense Advanced Research Projects Agency, before the Subcommittee on Emerging Threats and Capabilities, Committee on Armed Services, United States Senate [国防先进研究项目局代理局长 Jane A. Alexander 博士在美国参议院武装部队委员会新起威胁和能力小组委员会上的陈述], 107th Cong., 1st sess., 5 June 2001, 9, <http://armed-services.senate.gov/statemnt/2001/010605alex.pdf>.
9. 商用提供商 Locata 对基于信标的导航系统有详细说明，参看 Joel Barnes et al. 所著“LocataNet: A New Positioning Technology for High Precision Indoor and Outdoor Positioning” [LocataNet：一种在室内和露天环境中高精确定位的新定位技术], (presentation, 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the US Institute of Navigation, Portland, OR, 9—12 September 2003), 1119—28, <http://www.locatacorp.com/docs/2-%20UNSW%20Locata%20ION%20Paper%20presented%20Portland%20Sep%2011,%202003.pdf>.
10. Ryan J. Eggert and John F. Raquet, "Evaluating the Navigation Potential of the NTSC Analog Television Broadcast Signal" [评说 NTSC 模拟电视广播信号的潜在导航用途], (presentation, Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation [ION GNSS 2004], Long Beach, CA, 21—24 September 2004), 2436—46; 另参看 Jonathan McElroy, John F. Raquet, and Michael A. Temple, "Use of a Software Radio to Evaluate Signals of Opportunity for Navigation" [使用软件无线电来评估随机信号导航], (presentation, Proceedings of ION GNSS 2006, Fort Worth, TX, 26—29 September 2006); 另参看 Richard K. Martin, Jamie S. Velotta, and John F. Raquet, "Bandwidth Efficient Cooperative TDOA Computation for Multicarrier Signals of Opportunity" [有关多载体随机信号的带宽有效合作 TDOA 计算], IEEE [Institute of Electrical and Electronics Engineers] Transactions on Signal Processing 57, no. 6 (June 2009): 2311—

- 22: 另参看 Wilfred Noel, “Indoor Navigation Using OFDM [Orthogonal Frequency-Division Multiplexing] Signals” [把 OFDM (正交频率分配多路传输信号) 用于室内环境导航], (master's thesis, Air Force Institute of Technology, AFIT/GE/ENG/11-30, March 2011).
11. 此潜在导航用途由 Kenneth A. Fisher 和 John F. Raquet 首先提出, 参看 “Navigation Potential of Signals Modeled with Multipath Effects and Noise” [以多路效应和噪声建模证明信号的潜在导航用途], (presentation, Proceedings of the 2005 National Technical Meeting of the Institute of Navigation [ION NTM], San Diego, CA, 24—26 January 2005), 320—31.
 12. 有关调幅无线电台导航与 GPS 导航在真实演示中的比较, 参看 Timothy D. Hall, Charles C. Counselman III, and Pratap Misra, “Instantaneous Radiolocation Using AM Broadcast Signals” [用调幅广播信号瞬时无线电定位], (presentation, Proceedings of ION NTM, Long Beach, CA, 22—24 January 2001), 93—99.
 13. Jason Crosby 对此有详细介绍, 参看其硕士论文 “Fusion of Inertial Sensors and Orthogonal Frequency Division Multiplexed (OFDM) Signals of Opportunity for Unassisted Navigation” [惯性传感器和正交频率分配多路传输 (OFDM) 随机信号融合用于无辅助导航], (master's thesis, Air Force Institute of Technology, AFIT/GE/ENG/09-11, March 2009).
 14. 要利用信号来定位, 应首先知道信号源。无线电频率指纹有助于把信号联系到其特定发射器。参看 William C. Suski et al., “Using Spectral Fingerprints to Improve Wireless Network Security” (presentation, Global Telecommunications Conference [运用频谱指纹改善无线网络安全], 2008: IEEE GLOBECOM 2008, New Orleans, LA, December 2008).
 15. 请访问 Skyhook 网站, <http://www.skyhookwireless.com/howitworks/>.
 16. William F. Storms and John F. Raquet, “Magnetic Field Aided Vehicle Tracking” [磁场辅助运载平台跟踪], (presentation, Proceedings of ION GNSS 2009, Savannah, GA, 22—25 September 2009).
 17. Jeffery Gray and Michael Veth, “Deeply-Integrated Feature Tracking for Embedded Navigation” [深整合特征跟踪用于嵌入导航], (presentation, Proceedings of the 2009 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, Anaheim, CA, 26—28 January 2009), 1018—25.
 18. Michael Veth and John Raquet, “Fusing Low-Cost Image and Inertial Sensors for Passive Navigation” [低成本图像和惯性传感器融合用于被动导航], Navigation 54, no. 1 (Spring 2007): 11—20.
 19. 2nd Lt Don J. Yates, “Monocular Vision Localization Using a Gimbaled Laser Range Sensor” [运用常平架支承激光距离传感器实现单眼影像定位], (master's thesis, Air Force Institute of Technology, AFIT/GE/ENG/10-31, March 2010), <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA524323&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>.
 20. Capt Adam D. Weaver, “Predictive Rendering: A New Vision-Aided Approach for Autonomous Aerial Refueling” [预测透绘: 自主空中加油新影像辅助法], (master's thesis, Air Force Institute of Technology, AFIT/GE/ENG/09-45, March 2009).
 21. 雷声公司提供陆地作战用无线电通信系统, 目前装备给在伊拉克作战的第四史崔克旅级作战部队。空军理工学院先进导航技术中心和雷声公司根据研发合作协议开展合作, 研制 GPS 受阻环境下的导航技术。
 22. 2nd Lt Erich Lichtfuss, “Indoor Navigation Using Vision and Radio Ranging” [运用影像和无线电测距进行室内导航], (master's thesis, Air Force Institute of Technology, AFIT/GE/ENG/11-23, March 2011).
 23. “全源导航”一词衍生自“全源情报”, 后者表示把来自多个平台的情报数据整合处理, 生成比任何单一来源的情报更完整的情报。
 24. Strategic Technology Office, Broad Agency Announcement: All Source Positioning and Navigation (ASPN) [跨机构通告: 全源定位和导航 (ASPN)], DARPA-BAA-11-14 (Arlington, VA: Defense Advanced Research Projects Agency, Strategic Technology Office, November 2010), 5, [https://www.fbo.gov/download/b9e/b9e293bc25ab6cc1f7ad0601415bf5df/DARPA_BAA_11-14_All_Source_Positioning_and_Navigation_\(ASPN\).pdf](https://www.fbo.gov/download/b9e/b9e293bc25ab6cc1f7ad0601415bf5df/DARPA_BAA_11-14_All_Source_Positioning_and_Navigation_(ASPN).pdf).

X-HALE: 未来的大气层监视平台

X-HALE: Designing the Atmospheric Surveillance Platforms of the Future

克利斯朵夫·M·谢勒, 美国空军中校 (Lt Col Christopher M. Shearer, USAF) *

请设想一下, 如果有一个空中监视平台, 可携带 500 磅有效载荷, 在小型武器射程以外的高度上飞行, 可在天空驻位巡逻数周或甚至几年, 成本显著低于卫星, 并可在一两个星期内重新转到全球任何一个感兴趣区域, 那么, 对战场指挥官或情报分析员会有多大的帮助。这就是高空长时 (HALE) 飞机, 美国空军理工学院的目标是在 10 至 15 年内使这个概念成为现实。为了实现这个目标, 研究人员正在收集新的试验数据, 构建这架飞机的理论解析, 其研发路径类似莱特兄弟在一百多年前所走过的路。莱特兄弟当时发现, 现成的航空数据并不准确, 而这样的发现正是他们以后成功的关键。威尔伯·莱特甚至写道: “一开始, 我们绝对相信现有的科学数据, 但后来对一些事情接二连三地产生怀疑, 最后, 经过两年的实验之后, 我们完全抛弃了前人的数据, 决定只信赖我们自己的研究结果。”¹

2003 年 6 月 26 日, 美国国家航空航天局一架“太阳神” (Helios) 飞机在试飞过程中机翼过度变形, 导致飞行失稳及上翼面灾难性损坏, 飞机最终坠毁。这场事故令航空航天界大为震惊, 它再次警示人们必须精确编制气动数据和计算机软件程序。这是一架采用独特柔性机翼的 HALE 飞机, 按照设计, 应该爬升到 100,000 英尺的海拔高度。事故调查人员得出的结论是: 事故的根本原因在于“缺乏充分的 [气动] 分析方法, 导致对结构变化的影响做出不准确的风险评估, 继而引出不正确的飞行决定。”² 尽管现代化第

五代战斗机是采用先进的航空工程设计工具研制的, 这些工具却无法成功地设计时速低于 80 英里的高柔性 HALE 飞机。而且, 目前的设计工具也无法预测这些飞机的稳定性和控制性能。

“太阳神”事故凸显我们缺乏设计“太阳神”等 HALE 飞机所必需的知识和分析工具 (计算机软件)。这类飞机有很大的发展潜力, 不受大多数地面威胁的影响, 并可提供低成本监视能力。在“太阳神”事故之后, 国家航空航天局的首要建议是研发一种更先进的多学科 (结构、气动弹性、空气动力、大气、材料、推进、控制等学科) ‘时域’分析方法”, 以适合高度柔性‘变体’飞行器的设计 (粗体强调来自原文)。³

虽然缺乏了解这些飞行器的气动特性所必需的基本空气动力学知识和分析工具 (尤其是计算机软件), 飞机设计师们仍在努力研发能整合最新传感器技术的飞机。可是, 大多数设计仍在续航时间、有效载荷的电力供应和有效载荷重量方面遭遇瓶颈。若要充分发挥传感器技术的潜力, 我们需要有一个长时监视平台。

自 2008 年以来, 空军理工学院与国防部先进研究局 (DARPA) 合作研发能连续留空五年的 HALE 飞机。这个“秃鹫” (Vulture) 计划若取得成功, 将集飞机和卫星的优势于一身, 飞机的优势在于战位驻守和低成本转移到新任务区, 卫星的优势在于能持久运行和保持制高点。

* 作者是美国空军理工学院航空航天工程系助理教授。

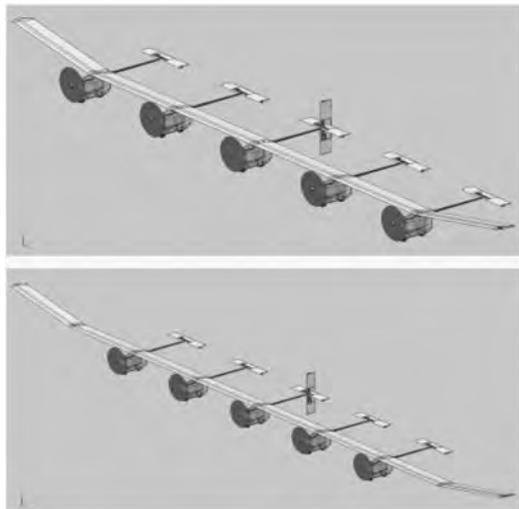
为了适应作战任务的要求，HALE 飞机采用大展弦比机翼和细长机身，因此极其柔韧。这些几何形状特征使得飞机机翼在低搏动频率时容易发生大幅动态变形。而“太阳神”试飞过程显示，这种变形可能会对飞机的飞行特性产生不利影响。⁴ 尽管发生了上述试飞事故，国防部先研局“秃鹫”计划的进展、其他民用 HALE 飞机的研发设计以及最近的分析结果都揭示了我们的实验测试数据严重不足。⁵ 但这些数据非常重要，有助于我们加深对 HALE 飞机的飞行动力学和操纵性能的了解，以及验证最近在软件和空气动力学研究方面的进展。⁶

实验性高空长时飞机

空军理工学院为验证与 HALE 飞机相关的软件和空气动力学理论，从 2007 年开始寻找现成的可用数据，未果。随后在国防部先研局召集的一次会议上，来自学术界、国防部（包括本文作者）、国家航空航天局和工业界的专家们证实了我们的怀疑：可用于此等验证研究的完整数据根本不存在。⁷ 有趣的是，国家航空航天局的“太阳神”飞机原本可以提供这些信息，但是由于政治原因和软件编程障碍而未能在飞机上安装信息收集仪器。

由于缺乏可用的数据，空军理工学院借助密歇根大学研究人员的独特专业知识，开始另一项研究努力，2008 年 8 月 27 日，空军理工学院与密歇根大学航空航天工程系建立合作关系，共同研发实验性高空长时（X-HALE）遥控无人机；这个合作项目得到空军研究实验室航空器部的支持，并由空军理工学院主导。此合作项目利用空军理工学院、空军研究实验室和密歇根大学研发的工具，设计了一架 HALE 飞机，并提出两个不

同的设计配置方案（见图），各自带有某些设计特点（见附表）。如果对飞机第一个配置方案（翼展 6 米）的试验没有获得必要的飞行动力特性（辅之以机翼柔性和飞机横向及纵向控制性能），则转向试验翼展为 8 米的配置方案。⁸



图：X-HALE 飞机 6 米翼展（上）和 8 米翼展（下）设计方案

翼展	6 米或 8 米
弦长	0.2 米
机翼面积	1.2 平方米或 1.6 平方米
展弦比	30 或 40
长度	0.96 米
螺旋桨直径	0.3 米
最大起飞重量	11 或 12 千克
电力/重量要求	30 瓦/千克
空速	12—18 米/秒
最大航程	3 千米
最大续航时间	45 分钟

X-HALE 飞机的首次试飞时间安排在 2011 年春末或夏季，地点在印第安纳州坎普阿特伯里。对于这些飞行试验，密歇根大学将负责提供飞机操纵方面的专门知识；空军

理工学院负责提供试飞方面的专门知识和项目管理；空军研究实验室负责提供资金和项目监督。这些试验的目的是利用积累的试飞数据来验证 HALE 飞机设计工具，以最终成功建造和飞行 X-HALE 飞机。X-HALE 的试飞分为两个阶段，在第一阶段，飞机将携带数量有限的仪器，是以减少软件编程风险。在第一阶段试飞成功之后，研究人员将再建造一架飞机，携带更多的仪器，执行更多的试飞任务，以完成研究的主要目标，即收集试飞数据用以验证 HALE 飞机的研究软件和空气动力学理论。研究人员打算与几家大型航空航天公司分享所有的数据，这些公司一直在密切关注这个研究项目。

结语

空军的目标是获得持久空中监视能力，帮助情报界实现长久的梦想。研究人员在飞机平台和传感器研发方面已经取得长足的进展，但是不对称战争不断扩散，意味着美国迫切需要拥有能够在意向目标上空连续巡航几周或几年的飞机。空军理工学院和战略伙伴携手合作，努力向作战部队提供这些能力，成就斐然。今后的方向是把卫星的制高优势和飞机的导航灵活性结合到同一个平台中。通过 X-HALE 项目，空军理工学院和航空航天工业界将获得需要的试验数据和经过验证的设计工具，最终研制出能满足作战部队需要的持久空中监视飞机。♣

注释：

1. John D. Anderson Jr., Introduction to Flight [飞行概论], 3rd ed. (New York: McGraw-Hill, 1989), 29.
2. Thomas E. Noll et al., Investigation of the Helios Prototype Aircraft Mishap [太阳神原型飞机事故调查], vol. 1, Mishap Report (Washington, DC: Headquarters NASA, January 2004), 10, http://www.nasa.gov/pdf/64317main_helios.pdf.
3. 同上。
4. 同上，第 9 页。
5. Christopher M. Shearer and Carlos E. S. Cesnik, "Nonlinear Flight Dynamics of Very Flexible Aircraft" [高柔性飞机的非线性飞行动力特性], (presentation AIAA-2005-5805, AIAA [American Institute of Aeronautics and Astronautics] Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, San Francisco, 15—18 August 2005), <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/2027.42/76937/1/AIAA-2005-5805-748.pdf>; 另参看 Shearer and Cesnik, "Trajectory Control for Very Flexible Aircraft" [高柔性飞机的飞行轨迹控制] (presentation AIAA-2006-6316, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Keystone, CO, 21—24 August 2006), <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/2027.42/77218/1/AIAA-2006-6316-117.pdf>.
6. 技术资料来源包括 Christopher M. Shearer, "Coupled Nonlinear Flight Dynamics, Aeroelasticity, and Control of Very Flexible Aircraft" [高柔性飞机的非线性飞行动力特性、气动弹性和控制性能耦合], (PhD diss., University of Michigan, 2006); Rafael Palacios and Carlos E. S. Cesnik, "Static Nonlinear Aeroelasticity of Flexible Slender Wings in Compressible Flow" [柔性细长机翼在可压缩流中的静态非线性气动弹性], (presentation AIAA-2005-1945, 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Austin, TX, 18—21 April 2005), <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/2027.42/76231/1/AIAA-2005-1945-496.pdf>; Leonard Meirovitch and Ilhan Tuzcu, "Unified Theory for the Dynamics and Control of Maneuvering Flexible Aircraft" [柔性飞机操纵的动态和控制之统一理论], AIAA Journal 42, no. 4 (April 2004): 714—27; Mayuresh J. Patil, Dewey H. Hodges, and Carlos E. S. Cesnik, "Nonlinear Aeroelastic Analysis of Complete Aircraft in Subsonic Flow" [亚音速流中整机非线性气动弹性分析], Journal of Aircraft 37, no. 5 (September—October 2000): 753—60; 以及 Mark Drela, "Integrated Simulation Model for Preliminary Aerodynamic, Structural, and Control-Law Design of Aircraft" [飞机的初步气动、结构和控制法则设计集成模拟模型], (presentation AIAA-99-1394, 40th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit, St. Louis, MO, 12—15 April 1999), http://web.mit.edu/drela/Public/web/aswing/asw_aiaa.pdf.
7. 国防部先进研究局于 2008 年 9 月 10 日和 11 日在华盛顿召集了一次非线性气动弹性工具会议。
8. “辅之以机翼柔性和飞机横向及纵向控制性能”来自 HALE 飞机机翼的内在柔性。当副翼有动作或横滚输入时，机翼外端先变形。飞机其余部分的移动迟于最早的机翼外端移动。这样的反应仿佛海洋中波浪的形成过程，海岸线附近的水流移动总是迟于最早的波浪移动。副翼输入导致的飞机移动迟缓造成额外的稳定性和控制性能问题。在大多数飞机上，机翼呈刚性，副翼输入导致整架飞机几乎立即开始横滚。

机动航天器——轨道和亚轨道飞行相结合实现节约效益

A Taskable Space Vehicle: Realizing Cost Savings by Combining Orbital and Suborbital Flight

托马斯·C·科奥空军上尉 (Capt Thomas C. Co, USAF)

乔纳森·T·布莱克博士 (Dr. Jonathan T. Black) *

美国通过太空开发，获得明显的战场环境优势，但是太空运行成本越来越昂贵，势将危及这些优势。美国不遗余力开拓太空技术始有今日，然而太空研究、开发和运行经费一再缩减，太空系统趋于老化，为当今世界敌手留出各种可乘之机。一些国家原无太空能力，而今迅速赶上，以难以想象的低成本发展太空技术，与美国争锋。美国国防部拥有强大的太空能力，但为降低部署和维护费用，必须考虑如何改变太空运作现行做法，以防失去太空支配地位。美国战略司令部、国家航天总署、国防先进研究项目署，以及空军部等，对预算削减对美国太空优势地位的冲击都有清醒的认识。为填补现有太空资产能力和需求之间的缺口，机动响应太空项目 (Operationally Responsive Space—ORS) 办公室规划了重大的发展目标，但笔者认为此目标需进一步扩展。本文提出一种分阶段发展方式，可以成倍提高 ORS 项目的成本节约效益，同时提升美国的太空能力。此方式注重挖掘航天飞机和卫星在轨道和亚轨道飞行的潜力，实施反复机动，执行多种任务。

ORS 办公室在 2007 年成立，由国防部内多个部门联合组成，目的是研制低成本进入太空技术，以响应和满足战场需要。进

ORS = 机动响应太空项目
TOT = 飞临目标上空时间

入太空的成本不低，航天器的研制和发射构成太空使命中最大的成本项目。ORS 办公室决心把这两项成本同时降低，做到能在几周內就将航天器升空，全部费用只及原来的一个零头 (亦即每一分钱相当于目前同类太空项目中一美元。) ¹ 但是就目前进展而言，ORS 项目只关注如何快速制备航天器和如何以最低成本发射，而没有考虑航天器的机动潜力，没有考虑使航天器获得变轨能力，在寿期内执行多种任务。ORS 项目的支持者 James Wertz 博士认为：“运用目前在轨卫星是无法实现 [机动响应太空] 目标的，这就像是子弹已经出膛，再指望坏蛋撞到弹道内。” ² 如果能采用非传统变轨技术使同一颗卫星执行多种任务，就能提高太空作战响应能力，满足战场需求，同时进一步降低项目的成本。

实施这种灵活变轨新方式需要经过四个阶段。第一阶段是改变太空运行概念，思考如何使一些在轨卫星以高效方式大幅变轨。有关此技术的硬件已经存在，经过大量检验，并获得透彻理解。此技术包括一个电控推进系统 (网格离子发动机或霍尔效应小推力发动机)，对重量 500—1,000 公斤的小型卫星有效。 ³ 第二阶段是对那些在地球表面 150—500 公里高度外大气层 (即热层) 中飞行的卫星合理利用有限的空气动力，通过空气动力的拽力实现变轨。 ⁴ 在以上所述的新太空

* 科奥上尉是美国空军理工学院博士研究生，布莱克博士是理工学院航空航天工程系助理教授。

运行概念和电控推进技术以及小型卫星平台的基础上，第三阶段是制造出能充分利用空气动力的航天器（类似于航天飞机和 X-37）。这三种硬件技术目前分别用在航天飞行装置中，因此，我们需以全新的运行概念，把航天器的各种功能正确组合，就可将轨道卫星变成机动航天器。第四个也是最后一个阶段是在研制过程中把机动能力纳入 ORS 项目概念。现在第一阶段正在进展中，机动变轨概念的潜力已现端倪。其他几个阶段将如下文所述逐渐展开。

机动响应太空

美国当前大量使用太空资产，导致国防部太空计划费用高涨，通常每年需花费数十亿美元。传统的太空使命着眼于战略层面、体现为很耐用（10—20 年寿期）、欠灵活、很昂贵（1 亿—20 亿）、很能干、很复杂、难替代。⁵ 这些特征互相牵制着。因为发射费用极高，研制者就将系统设计得极其能干和可靠，因此成本极高且寿期极长。在这种高度能干、高度可靠和长期运行的卫星中，所有关键部件都需有备份（几乎相当于整个卫星），而这些备份作为冗余，增加了卫星重量，由此提高发射成本。显然，这种保持自我运行的概念导致航天飞行装置无限膨胀，性能越来越强，动辄数十亿美元，并需要数十年才能制成。这种模式已经成为航天界的思维特征。现在我们需要把机动和快速响应作为一种制度化要求，使我们的太空资产能快速响应突发的威胁和灾难，因此我们必须找出新的太空资产研制和运作模式。

目前的太空系统研发运作模式经常满足不了战场的需求。这些太空系统需要长期研制才能进入成熟设计和容纳必要的技术，待到终于制成可以交付部署时，其中许多电子

部件已经落后，于是技术人员又要重新设计和纳入新技术。国防部无法跟上军事作战的需要。⁶ 交付期经常一延再延，用户不得不等待多年，到最后总算交付时，说不定原定的使用目的已经改变。在 1990 年 9 月策划“沙漠风暴”行动期间，作战策划者意识到现有卫星通信能力不足以支持这场战争，于是紧急请求增加发射国防卫星通信系统 III 卫星。此卫星最终在 1992 年 2 月 11 日升空，比战争晚了整整一年多。⁷ 设计者后来继续研制这颗卫星的后续星，即“宽带全球 SATCOM”卫星，它采用现成的商业货架技术，采购计划中声称可节省时间。研制过程自 2001 年启动，发射时间定在 2003 年第四季度。但是此卫星直到 2007 年 10 月 7 日才发射升空，2008 年才进入运行轨道——比原定时间推迟五年。⁸ 这项延误严重影响了太平洋司令部和中央司令部各战区之间的通信，致使近 80% 的通信流量依靠商用卫星，成本飞涨，纳税人埋单。

ORS 项目希望改变太空运作模式。和当前的方式不同，ORS 项目所开发的航天器着眼于战术层面、寿期短（一年寿期）、灵活（根据使命、时间和地理位置需要）、廉价（低于 2000 万美元）、功能专一（每颗卫星只配置和使命要求相关的功能，多颗专用卫星各司其责，构成大系统协同运作，从而减少外部攻击造成的破坏）、技术简易，以及可随时替换。⁹ ORS 强调卫星和发射火箭尺寸要小，能迅速按需部署，能快速向用户提供所需的能力。正在研制中的此概念技术继续依赖传统的开普勒轨道，意即发射出去的每一个航天器只用于一种用途。¹⁰ 只要稍做对比，就能看出 ORS 卫星与传统卫星无一处相同。

ORS 模式标志着对美国的太空文化进行重大修正。各相关方基本一致同意，太空运

作必须降低使命成本，提高对用户需求的响应速度。但是要想实现这些目标非常困难，需要有毅力有决心改变现有硬件、现行指挥控制，以及现存测试模式。但愿国家计划制定者们认可改变此思维模式能带来的种种收益，愿意接受新的运作规则，允许快速改变，使我们能够更灵活、更迅速、更高效地满足用户的需要。

ORS 项目如果能够考虑容纳对机动卫星技术的研究，例如设计一种 500 公斤重量级的卫星，带有多次机动变轨所需的足够燃料，应可实现更大的收益。¹¹ 这意味着，同一颗卫星在完成一项任务后，可以变轨执行另一项任务。假定变轨幅度不大，此卫星应可实施 15 次以上的变轨。¹² 一次机动变轨可以节省发射次数 50%，三次机动变轨就能节省 75%。按照 ORS 项目的现行思路，即便能在硬件研制和测试方面大量节省，发射费用将继续居高不下，因为必须为每一项任务发射一颗卫星。由此来看，如采用可多次变轨的多任务机动卫星，将比目前的 ORS 项目远更合算。

以机动卫星满足用户需要

ORS 项目乐观宣称，其研制的卫星将表现为低成本，能按需发射，能在接到任务指令后数小时以内进入指定轨道。ORS 项目的长期愿景是把制成这种卫星的目标日期定在 2020 年。假定这样的航天器按时制好，发射装置和地面控制都已就位，其速度将始终赶不上用户的需求，常态性的短缺将迅速消耗掉所有现存能力，生产根本无法跟上，所谓机动快速响应便成无稽之谈。机动响应能力的意义不仅仅局限于太空部分，快速发射定制卫星可以缩短满足用户新需求的时间，快速发射增补或替补卫星对于保持特定的太空

能力具有关键意义。目前的航天器制造流程遵照的是按计划发射的思维模式，而机动太空模式是将航天器事先造好备好，随时准备按需发射。如从目前流程有效转到机动太空模式，意味着我们必须在发射场保持相当数量的作战物资库存，即航天器储备，以及相应的发射火箭储备。¹³

ORS 概念要求具备快速发射库存航天器的能力，从而对突发危机做出迅速响应。比如今天可能突然接到命令要求发射一个卫星，部署到太平洋上空监视海啸灾区形势；明天又受命发射另一颗卫星，收集中亚起义农民的活动情报。为此，我们必须准备大量储备，一接到命令就能发射升空投入运作。但是在可见未来，需求将不断增长，将一直远远超过制造和部署这些资产的能力和速度。如上文有关 SATCOM 通信卫星的讨论所提及的那样，由于需要支持新现的地面和天空作战系统，前线部队和后方司令部之间的通信占用了大量带宽资源，导致军事能力迅速用竭。为了建设一种真正的机动响应能力（利用现有储备），我们需要转变思维模式。

如果对 ORS 概念下制造的卫星配备机动能力，经由非传统（新异）轨道变轨，就能降低快作战节奏形成的压力，减少必要能力储备。一颗发射到近地轨道的卫星如果具备这种机动能力，就能及时变换到另一个轨道平面，快速响应多种国际事件或用户需求。这样的运行方式，视卫星承担多少任务，可能缩短其在轨寿命，低于 ORS 项目目前所定的一年寿命标准。但是同一颗卫星如能执行用户要求的多种任务，就能大幅度降低发射次数，为每个航天器节省数百万美元发射成本。

具体而言，所建议的新异轨道将借助地球大气的空气动力，来改变卫星的轨道参数。我们可以方便地利用二十世纪中期“双子星座”计划、“水星”计划和“阿波罗”计划开发出的技术，来设计能再入大气层的航天器，利用升力和拽力来改变其飞行路径、速度和高度，实现变轨。¹⁴ 本质而言，这种轨道航天器几乎就是亚轨道飞行器，其在大气层中飞行时就像飞机。用 Kerry Hick 中校提供的运动方程做多次再入大气层飞行剖面模拟，表明航天器只要具备足够的升力，就能像飞机一样做爬升、俯冲和翻滚等机动。¹⁵ 航天器飞行剖面中的这段非开普勒部分不仅能改变轨道（改变新的行动目的所要求的航迹地面投影），对跟踪此航天器的敌人而言还将增添一个新的不确定性。敌人可能猝不及防，对突然飞临上空的航天器毫无预警。航天器再入大气层的深度确定控制机构如何调整轨道参数。再入大气层的深度若很大，就可实现大幅变轨，甚至大推力液燃推进火箭发动机都无法做到，因为无法携带此类发动机所需的大量燃料。¹⁶

当然，这种航天器需要经过一些设计修改，才能克服重力和大气摩擦发热影响而反复出入大气层。既然 ORS 项目决心彻底改变太空运作思维模式和结构，就可乘此机会索性再跨一步，认真考虑本文所提的新异建议，以相对简单的设计修改换取更大的灵活性和收益。我们通过早期载人太空飞行项目已经掌握了再入大气层的各种力量作用、控制、收益和风险。在新航天器的设计中，我们认真选择功能特征组合，应能极大提高其升力，把握空气动力控制，实现变轨。这样做，我们就能扩展其飞行包线，提高其作战灵活性。

机动航天器概念，除了对 150 公里以上高度不太适用之外，还可应用于目前在轨的

那些不具备 ORS 能力的卫星。大气拽力对在 700 公里或以下高度飞行的卫星产生不同程度的影响，航天飞机和国际空间站始终受此影响，必须抵消此力才能防止轨道变形。我们已经研制出卫星机动技术并投入应用，但是运行概念必须改变（参看以上第一阶段）。低推力电控发动机用于驱动已经入轨的卫星做缓慢、精确和高度有效的留守机动。当前的运行概念就是把航天器送入轨道，然后在此轨道上驻守至终，几乎没有例外。目前大多数航天器都是按这种概念设计，很少有人思考如何进一步利用这些具备动力的飞行。其实如果必要，这些发动机可以推动大型卫星进入新轨道；如果是地球同步卫星，可为不同的地理战区服务；如果是近地轨道卫星，可以改变飞临目标上空的时间。¹⁷ 为了利用这种潜力，运行概念必须起始于这样的假设：航天器并非必须在其最初发射和进入的轨道内飞行。此外，我们还可思考如何利用上层大气改变航天器轨道的潜能（即使是微小的拽力也能引起可观的轨道变化），就是说，对于已经在轨的航天器，即便不修改其特性，它也可实施重大机动，从而改变飞临目标上空时间（TOT）或者地理覆盖面（参看以上第二阶段）。

概念设计和结果

轨道的细小改变，可以影响卫星的航迹地面投影。未装备 ORS 硬件的航天器利用电控推力发动机连续推进 7 天时间，可以在同一轨道平面中充分改变速率，从而改变航迹地面投影而产生 24 小时 TOT 变动。¹⁸ 航迹地面投影的改变与调整轨道所用的时间成正比。或者说，实施 TOT 变动的的时间越长，变动的潜在幅度就越大。遵循以上所述项目的第一阶段和第二阶段可实现这个结果，即调

整目前在轨航天器的运行概念，允许通过轨道机动来改变 TOT。然而，这样做在响应时间上仍然和正在进展的 ORS 项目的目标值相距甚远。ORS 项目的目标是在接到任务的第一道命令后 9 小时内发射航天器，在发射后 45 分钟内到达地球任何指定部位的上空。¹⁹ 不过这个目标还未成为现实。目前的在轨卫星可借助电控推力在轨道中机动，但不能再入大气层（即卫星必须保持在 122 公里高度以上），可在 7 天时间内在规定的 TOT 抵达地球任何部位的上空。与之相比，电脑模拟表明，机动卫星如能借助空气动力做超平面变轨，则进入新轨道所需的时间可减少 75%（由 7 天缩短为约 2 天），即如以上第三阶段所述。如在 ORS 航天设计中增加一点精巧创新，我们应可为之配备大气机动能力，使之成为一种不昂贵但高度有效的航天器，能对美国面临的当前威胁迅速做出响应。

ORS 项目所设计的航天器在特征上体现为小巧、质轻、容易保持高度（定向）和位置（驻位）。为使这种航天器具备以上第四阶段所述的机动能力，我们可以为卫星配置一台小型冲力（火箭）发动机和一台高效电控推力发动机（例如霍尔效应小推力发动机）。冲力可推动卫星快速但小幅变轨，持续的电控推力则聚集能量推动卫星进入稳定驻位轨道，并可反复此过程。按照这种设计概念，我们首先将卫星发射到指定轨道平面，执行首项任务；完成此任务之后可通过冲力实施小幅变轨，使其近地点（轨道中距地球表面最近点）进入或“栽入”大气层，让卫星利用空气动力改变轨道平面，从而执行第二项任务。卫星每做这种机动，就会损失能量。计算机模拟表明，当卫星能量到了只能勉强维持轨道飞行的水平时，连续电控推力系统将能有效提升此水平，使卫星保持在轨道内。

这个过程可以重复多次，直到推进系统的燃料耗尽。航天器如配备本文所述的两种发动机（火箭和电控），就能运用现有技术响应执行多项用户任务。不过有关如何有效实施这些机动的知识和经验，目前还相当有限。根据本文的设计概念，航天器所能完成的任务，和传统的仅带化学推进系统的近地轨道卫星相比，可以提高 6 倍。（低推力电控发动机的效率 [每加仑航程数] 比大推力发动机高出 5—6 倍。）这样的航天器可以执行 15 项以上任务，即发射一次就能完成 15 项 ORS 使命，从而大幅度降低其所宣传的使命成本。

结语：

当前的太空思维模式是发射大型、昂贵及能力强大的卫星，这种做法缺乏可持续发展性，既不能满足美军的战场需要，也跟不上其他拥有太空能力的国家对美国的威胁程度。正如传统战争模式必须改变以适应当今平叛作战需要一样，传统的太空运行做法也需要改变，才能适应今天的太空环境。新的项目，如 ORS 项目及本文讨论的研究概念，都力求实现这种改变。

我们应该采用分阶段的方式来扩展目前的 ORS 概念。在第一阶段，要围绕新的模式建立新的运行概念，利用现有在轨卫星进行实验，探讨能否通过电控推力实施大气层外机动，从而获得大幅 TOT 改动。我们已经具备经过大量验证的、获得充分理解的必要技术。这个阶段并不需要开发任何新装置，因此成本不大。在第二阶段，利用空气动力对轨道高度 122 公里以上的航天器进行机动，从而提高其灵活性，更快速响应战场需求，并打破以往航天器本身和燃料的限制，开辟出新的机遇空间。在第三阶段，将设计新型航天器，使之具备再入大气层能力，实施预

定的变轨，爬升回归太空。充分利用升力和拽力的卫星设计技术也已存在，并经过大量研究。不过，为支持地面需要而改变卫星航迹地面投影可以通过无数种可能选项，目前对这方面的理解还比较有限，故而我们需要加强研究。这个阶段所能提供的潜在效益巨大，可能以极低燃料成本实现大幅变轨并增加航天器的寿期（和利用化学推进实施同等变轨的传统做法相比），甚至能将任务完成量提高5—6倍，而目前的卫星无法做如此大幅机动。在最后一个阶段，将通过增加机动能

力来扩展 ORS 项目收益。这些高效低成本的卫星将能在寿期内实行多种任务，从而减少发射次数，使 ORS 卫星成为真正的机动快速响应系统。

美国太空发展思维模式将不可避免地发生变化，这种变化已经开始。我们未来的常规太空行动必须包括小型、廉价、快速响应和灵活机动的航天器，我们将不再需要数年，只需数月，就能研制、生产和发射所需的航天器。♣

注释：

1. James R. Wertz, *Responsive Space Mission Analysis and Design* [灵活响应太空项目使命分析和设计], (El Segundo, CA: Microcosm Press, 2007), 4. (这是 Wertz 博士所教课程的一本参考手册。) 灵活响应太空项目中每一颗卫星的制造、有效载荷、发射、及运行一年的成本为 2000 万美元，笔者将此费用与传统太空计划中每颗卫星需要 20 亿美元（不包括运行成本）相比。
2. 同上，第 5 页。
3. 霍尔效应小推力发动机是一种离子推进发动机，通过电场来加快推进剂。此小推力发动机捕获磁场中的电子，用以对推进剂离子化，从而有效加快离子速度，产生推力，同时将雾流中的离子中和。在霍尔效应小推力发动机中，开放端的电子等离子区，而非标准离子推力器的网格，产生有吸引力的负电荷。参看 Wikipedia: The Free Encyclopedia, s.v. "Hall effect thruster" [霍尔效应小推力发动机], http://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect_thruster; 和 "Hall Effect Thruster Systems" [霍尔效应小推力发动机系统], Busek, <http://www.busek.com/halleffect.html>.
4. 地球大气层与外层空间的界限并不明确。在距地球表面 700 公里高度以下飞行的卫星受到大气层拽力不同程度的影响。从 120 公里高度开始，再入大气层阻力变得明显，当前的卫星都不具备抗拒这种阻力的能力。
5. 见注释 1，第 7 页。
6. 在 2007 年 9 月的一系列汇报和会议上，联合宽带工作小组讨论了国防部军事卫星通信的能力瓶颈，以及使用这些卫星满足战场需求的途径。军用平台，如“全球鹰”、“捕食者”及“蓝军跟踪”等，需要高能力、灵活及按需随得的卫星带宽，但当时的卫星网无法提供。国防部的这些需求有 80% 通过商用卫星来满足，引发越来越严重的担忧。工作小组每季度碰一次头，见面地点每次不同，如加州、科罗拉多州、佛罗里达州等。另参看 Greg Berlocher, "Military Continues to Influence Commercial Operators" [军界继续影响商界运营商], *Satellite Today*, 1 September 2008, http://www.satellitetoday.com/military/milsatcom/Military-Continues-To-Influence-Commercial-Operators_24295.html.
7. David N. Spires, *Beyond Horizons: A Half Century of Air Force Space Leadership* [空军主导太空半世纪], rev. ed. (Peterson AFB, CO: Air Force Space Command in association with Air University Press, 1998), 268.
8. "Wideband Gapfiller System" [宽带缺口填补系统], *GobalSecurity.org*, 10 April 2005, <http://www.globalsecurity.org/space/systems/wgs-schedule.htm>. 宽带缺口填补系统后来在约 2007 年改名为宽带全球卫星通信 (Wideband Global SATCOM)。
9. 见注释 1，第 7—9 页。
10. "Keplerian" (开普勒) 一词表示围绕一个天体运行的卫星的轨道，此轨道受引力控制，没有大气拽力或推进力（推力发动机）。
11. Robert Newberry, "Powered Spaceflight for Responsive Space Systems" [灵活响应太空系统项目中的动力航天器], *High Frontier* 1, no. 4(2005): 48.
12. 同上。

13. Les Doggrell, "Operationally Responsive Space: A Vision for the Future of Military Space" [发展太空作战反应能力 — 军用太空未来纵观], Air and Space Power Journal 20, no. 2 (Summer 2006): 49.
14. Lt Col Kerry D. Hicks, Introduction to Astrodynamic Reentry [航天动力再入大气层原理], AFIT/EN/TR-09-03 (Wright-Patterson AFB, OH: Graduate School of Engineering and Management, 9 September 2009), 239—41.
15. 同上。
16. "Mars Reconnaissance Orbiter Successfully Concludes Aerobraking" [火星侦察轨道器成功实现飞行制动], National Aeronautics and Space Administration, 30 August 2006, http://www.nasa.gov/mission_pages/MRO/news/mrof-20060830.html.
17. 在 2008 年, WGS-1 卫星从其测试位置纬度 122.8 度西移到 180 度西, 但继续在对地静止轨道上。此卫星的这次分阶段机动完全依靠 Xenon 离子推进系统发动机 (一种电控推力发动机)。有关近地轨道卫星实现 TOT 变化的讨论, 参看注释 11, 46—49.
18. 同上, 第 48 页。
19. 见注释 1, 第 9 页。


AIR UNIVERSITY

ASPJ AIR & SPACE POWER JOURNAL


Arabic


Chinese



**Distributed
in over
150
countries**


English


**Africa and
Francophonie**


Portuguese


Spanish

Read *Air & Space Power Journal* online
<http://www.airpower.au.af.mil/>


AIR FORCE RESEARCH INSTITUTE



卫星和遥控飞机：两艘遥控船在战争中交会

Satellites and Remotely Piloted Aircraft: Two Remotely Operated Ships Passing in the Fight

基思·W·巴尔斯，美国空军上校 (Col Keith W. Balts, USAF) *

沉住气，看到敌人的眼球再开火！

— 威廉·普雷斯科特上校，1775 年邦克山之战

在时敏目标打击行动中，无人机的作战识别系统可能面对一团乱麻，获得的信息输入可能来自分布式共用地面 / 水面系统、联合空天作战中心、地面指挥官，当然还有无人机飞行员。

— “持久自由”行动中一名遥控飞机操控员

技术的进步，允许现代军队在极端距离以外实施打击，让射手远离目标。当年的普雷斯科特上校是亲临前线下达他那脍炙人口的命令，现在的阿富汗战地指挥官则是同远在美国内华达州的遥控飞机 (RPA) 机组通讯，与此同时，各种情报从美国弗吉尼亚州的分布式共用地面 / 水面系统以及卡塔尔的联合空天作战中心源源不断地涌入。¹ 和 RPA 作战一样，太空作战也呈现地面和 (太空) 飞行器之间间隔着巨大地理空间的特征。美国战略司令部司令奇尔顿上将 (Gen Kevin Chilton) 说过，太空作战“在本质上绝对是全球性的，超然于物理地形和地图线条之外。”²

能在地理上开展分布式作战的部队，可在部队保护、经济用兵、灵活机动性，以及系统和人员成本上占据优势。但是，这种分布式作战也存在独特的弱点和挑战。美国军方重视这些优势，已部署很多遥控系统，并继续开展研制，表明正在向更多分布式作战的趋势演变。上述的 RPA 例子常见于空中领域，其它有形领域也不乏类似的例子。奇尔顿上将强调太空和网空领域对分布式作战的

依赖越来越强，指出在这两个领域“美国将面临挑战”。³ 一般来说，第四代战争理论也支持这种趋势，认为军事行动更“可能大范围分散且基本无界定”。⁴

鉴于这种相对的新趋势，军事领导人需要研究同分布式作战能力相关的潜在负面效应，以防这些附带效应削弱分布式作战能力给作战行动带来的优势。如果把太空作战和 RPA 作战相比较，就可能揭示出这样一些效应。亦即军事领导人可把积累数十年的实用太空作战经验，从太空这个相对成熟的遥控领域转而应用于相对年轻的 RPA 领域。其中很多经验教训也适应于在其它领域的遥控作战能力。

我们为何要将太空作战与 RPA 作战进行比较？在所有基于陆地的遥控系统中，RPA 是目前最主要的远距离分布系统，即分布在直接责任范围以外。而其它遥控系统的操作人员同他们控制的飞行器相对靠近，但也将随着时间的推移加大分布距离。因此，这些系统的控制单位也能从本文讨论中获益。太空作战与天空、陆地和海上领域的最近趋势不同，它从一开始就具备分布 (及遥控) 特征，

这是因为太空具有独特的物理属性、独特的技术挑战和风险。正如空军太空司令部司令科勒上将（Gen C. Robert Kehler）去年视察空军 RPA 的大本营内华达州克里奇空军基地时所言：“我们熟悉太空司令部的远程分工作战法，我们运作无人飞行器也已多年，区别只在他们把无人飞行器放飞在大气层之上，我们把无人飞行器放飞在 22,000 英里之外，并以远程分工作战方式来运作。”⁵ 军事太空行动当然也包括若干种载人武器系统，特别是从事太空相关任务的陆基平台，例如运载火箭、大多数太空态势感知传感器，以及用直接物理而不是遥控方式同武器系统连接的太空控制系统。但本文论及的卫星是指那些典型的遥控空间飞行器，因为这些卫星代表着太空作战的主要系统。卫星系统构架与 RPA 构架极为相似，两者都由控制部分、飞行器部分，以及连接双方的链路组成。

然而，卫星和 RPA 在演变中的交会又使两者同中有别。太空作战从分布模式开始，但逐步向战场靠拢，新系统和新技术专业正部署到战区之内。⁶ RPA 作战正好相反，正在将传统天空作战模式的关键元素移离战区。太空作战和 RPA 作战尽管在作战能力和运作领域上不同，但有大量的共同特征，因此有必要将二者作为典型的分布式作战方式互相比较。

背景、分析和建议

太空领域在分布式作战方面已具有 50 多年的经验，那么哪些方面的经验适用于 RPA 领域？比较和分析中最好依循联合能力集成和发展系统所采用的 DOTMLPF 框架，即作战准则（D）、组织（O）、训练（T）、装备（M）、领导和教育（L）、人员（P）、设施（F）。⁷ 用 DOTMLPF 分析太空作战，可生成

一些建议，帮助在其他领域开展遥控作战的部队更好地为将来分布式作战做好准备。

作战准则

作战准则对军事成功、尤其对新技术的运用非常重要，但是我们至今没有一部关于 RPA 的完整作战准则。⁸ 这些飞机和其它远程操作系统有自身的独特性，因此应制定专门的指导文件，解决现有作战准则的不足和不同。

在二十世纪九十年代后期和二十一世纪初期，随着太空能力与传统军事行动加速整合，现行的指挥与控制（C2）作战准则与太空作战严重脱节，其中大部分障碍与指挥关系相关，更具体地说，在重大军事行动中，如何最合理地使用太空部队并实施指挥与控制。

当时太空作战有两个独特的细微特征，迫使战区内和美国本土的太空组织领导人重新检视现有的 C2 作战准则，以建立指挥关系。第一个特征是，太空部队不需完全部署到战场或改变战区作战指挥关系，就能在传统的作战区域产生效果。第二个特征是，太空能力能对整个作战区域、甚至跨越多个责任区域同时产生效果，或者在同一个战术任务时段内（例如：为卫星规划类似“全球鹰”一个架次的单一任务执行周期）产生效果。

有关设立指挥关系的传统标准没有涉及这些细微特征，因此在受援和支援指挥官之间、就如何处理作战准则的这个缺失产生矛盾。经过多年的实验、演练、作战经验总结，以及激烈交换意见后，空军制定了专门的作战准则标准，帮助指挥官建立适合的指挥关系，例如战役控制、战术控制，或设立支援附属部门。⁹ 由于 RPA 部队也无需完全部署到战场，而其武器系统也可对数个传统作战

区域同时产生效果，因此应以上述作战准则为参照，为 RPA 领域设立界定指挥关系的准确标准。

组织

在过去二十年间，太空专业知识和组织在各大区域司令部内获得发展，相关太空专业人员推动将太空能力整合到传统的军事作战中，向战区高级领导人提供运用太空能力的咨询，规划、协调并实施战区太空作战。此演变的速度和有效性视相关太空人员的地点和组织所属而稍有差距。

起初，在美国太空司令部以外，很少有精通太空的人员能帮助战区司令官整合运用这些新能力。¹⁰ 同样，战区的专业知识和经验也没有反馈给太空司令部，职业太空军官因此不了解传统军事作战的环境、要求和文化。为改进这种形势，美国太空司令部、空军太空司令部，还有其它军种的相关部门，在 1990 年中期开始向战区组织部署太空支援小组，开展规划、演习和实际作战。接着，各主要战区司令部总部设立了永久部门，驻扎联络官，这些联络官同战区指挥部门并肩合作，但向美国太空司令部或其所属部门报告。再后来，空军向主要战区司令部派遣太空专家，他们大部分毕业于美国空军武器学院太空作战课程，向战区司令官直接报告。整个演变过程从部署小组开始，向驻扎联络官做法发展，再演变到配备永久专家团队，这个关键过程有效提高了太空能力的作战运用效果，使各战区司令官能够对太空能力需求和整合施加更多影响。¹¹

这种演变不仅发生在低级军官层次，也发生在高级军官层次，只是后者的演变晚了数年。我们把高级太空军官部署到战区作为联络官，最后成为战区司令部的永久领导成

员，担任太空部队总监。设立该职位的目的是便于协调、整合和配置行动人员，支援联合部队空中统一指挥官的太空整合努力。¹² 设立太空部队总监一职是一个关键的里程碑，在战区司令部内为太空作战提供了表达意见的渠道，弥补了低级军官可能无法发言的缺陷。该职位还有助于高级太空领导人获得战区作战的直接经验。

RPA 作战的根基是在战区，应借鉴战区太空作战组织的演变，因为这番演变展现了分布式作战中如何发挥专业知识和经验的理想状态。如果 RPA 作战部队屈从诱惑，将太多的专业人员远离战区分布，将重复太空作战界在 1990 年代初期的相同状态。如能在战区组织中保持嵌入足够数量的低级和高级 RPA 专家，而不依赖联络官，RPA 部队将能确保有效地整合现有的和未来的能力。太空组织为了更好地支援战区行动，也进行了数次组织结构调整，本文对此不再赘述。

训练

分布式作战本身也有不利因素，这就是同一支部队同时要受两条指挥链的管辖，一条是本军种司令部的“组织、训练和装备”指挥链，另一条是所在作战区域司令部的作战指挥链。当这支部队进入或离开一个战区却不改变作战控制关系时，指挥官在统一指挥方面就面对困境，因为同一支部队无法同时兼顾打仗和训练。太空作战在消减这种不利因素方面积累了经验，这就是为航线机组人员建立重复性训练要求，并为训练和评估人员（以及部队领导人）建立实际作战能力标准。教官和评估人员定期投入实际作战，不仅能保持业务水平，而且可填补航线机组人员的空缺，使机组人员能脱岗轮训，完成每月的训练和评估任务。重大的系统升级和

程序变更也可能加重稳态下的人员配置压力，使他们难以兼顾训练和实战。配备人员时，需要顾及武器系统或程序的重大调整或实战节奏的变化带来的潜在能力猛增问题。太空作战界已经制定了政策和要求文件，可为 RPA 作战部队提供借鉴，因为 RPA 部队也面临如何兼顾作战和训练的问题。

分布式作战为训练提供一个重要的好处，这就是记录数据有助于提高个人任务简报的质量，并有助于训练其他操作员。不利的一面是，独家使用本部队的的数据记录，可能造成“自己的洗澡水自己喝”，即把自己的错误经验也一并学来，而无其他支援或受援部队的外部观点作为映照。如能使用一些协作工具并有机会亲自访问有关地点，应可了解外部的看法。因此，为访问现场、出席重要会议和分发相关情况简报等提供经费，将帮助分布式操作人员改进工作；反过来，这些操作人员也能进一步指导前线部队了解新型武器系统的能力和局限。事实上，战区太空组织演进的第一个真正的益处，就是来自于教育战区指挥官了解太空能力，这样做同时也提升了外界对太空部门的信任。

装备和设施

由于卫星和遥驾飞机所运作的领域非常不同，在对照两者的装备要求时，重点应放在与控制部分和通信链有关的设施。虽然我们应限制成本，但对控制节点的要求应包括规模和协调需求的增长能力。我们的处理能力除了应对日常任务目标之外，应能有效处理信息流量的爆发性增长，这样，操作人员才能执行不经常但复杂的作战行动，而无需增加人手；能开创和外部交流的机会，而无需干扰日常运作（例如：接纳外部来访活动）；并随时可整合目前尚无法预见的未来能力。

分布式系统超越传统载人系统的另外一个优势，是无需做重大的重新设计和改动就可扩展系统的某些部分。

在分布式作战中，模拟器的作用是属于有关装备因素讨论的范畴。遥控系统的控制节点在很大程度上依赖计算机和数据操作，因此其功能比在实物环境中操作的有人驾驶系统更容易模拟。分布式作战模拟器可以做到非常逼真，尤其是武器系统的显示器，采用文字/图形而非实时视频或声音输入。由于在当前形势下，训练和作战经常同步发生，真实系统和模拟器需要紧密同步升级，这一点至为重要。

最后，有效的分布式作战依赖于同外部世界的联系。这些联系的重要性，不仅在于保持与航空器的联系和势态感知，还在于将任务相关操作员与他们支援的前线将士或支援他们的人员保持心理上的联系。同样，真实地可视化工具和有意义的协作能力，能够放大在传统作战区域以外操作人员所做的贡献。三维共享作战图和训练工具，以及实时视频传送，有助于操作员了解他们并不身临其中的物理环境。视频电信会议，实时聊天，以及充足的出差机会，也能建立并维持专业关系，保证协作成功，让操作员理解他们接收的输入中隐含的微妙寓意和超脱语言的表达和沟通。对控制节点和通信链的保护也应是指挥官的优先考虑事项，因为它们常常是武器系统的最薄弱环节。

领导和教育

随着太空界和 RPA 界的交错演变，我们也可就如何克服与分布式作战相关的领导和教育方面的挑战加以比较并从中获益。分布式作战的带兵者面临两个重大障碍——一是如何培养勇士精神，二是如何使那些远离战

场和前线战友的操作员保持斗志。因为与前线的某些脱离，有可能导致 RPA 机组人员在经历某些伤亡性战斗后留下严重的创伤后遗症。¹³ 尽管太空作战目前并不涉及杀伤，但操作员必须具备战士精神，保持高昂斗志，这对使命的成功仍然至为重要，尤其是那些直接参与正在进行的军事行动的人员。RPA 部队在建设初期，主要人员来自有人驾驶系统，这些人带来了他们的作战经验。新一代操作员却缺少这些战区实战经验，如何将战斗精神和经验代代相传挑战着我们的带兵者。视频电视会议、实时短信，以及其它电子协同通信工具可以建立和维系与眼前控制节点之外的各路人员及武器系统的联系，但也就是这种连接感而已，这种体验无论如何“比不上身临战场的那种强烈感受”。¹⁴ 分布式作战可以大幅降低成本和减少风险，不过为了使操作员与战场保持心理联系，指挥官应拨出资金和时间，组织操作员前往战区及其它分布点访问。新的操作人员需要等三年，才能被派往战区内担任联络官或嵌入 RPA 岗位，从战场经验受益的角度来看，三年的时间太长。

人员

军事太空界脱胎于工程文化，早期太空操作人员包括持有技术学位的军官或精通技术的合同商。在 1990 年代，空军过渡到非技术军官，并最终演变到以士官作为太空作战的中坚力量，同时也保留合同商人员来平衡技术专家的损失。虽然此举有助于太空能力的运作并节省资金，但步伐跨得太大，稀释了初级和中级岗位的经验水平。空军于是进行矫正，加强职业领域的专门技术人才和高等学位人才的培养，以应对技术水平的下降。此外，向士官方向的转化使年轻的军官失去获得这些专业技术知识的早期机会，导

致其职业发展中出现缺失。如果我们不能为低级岗位人员提供学习专业技术经验的充分机会，要想从他们中选拔未来的高级领导人将增加困难。(参加第二轮部署的太空军官中，约有 75% 的人的第一个岗位是导弹发射手)。¹⁵

简言之，RPA 界应注意不要离弃自己的根，即使技术允许他们这样做。加速培养新军官或士官来操作 RPA 虽然具有吸引力，但这种政策变化应循序渐进，以允许指挥官有充分时间发现和解决这种变化引起的第二和第三层效应，以防最后不得已再猛力矫正。

结语

分布式作战在战争中具有独特的优势，但也带来严重的副作用。检视太空作战并将其经验教训应用于其它领域的分布式作战，可以帮助军事领导人有效减少附带而来的负面效应，确保使命的成功。

借鉴作战准则、组织、训练、装备、领导和教育、人员、设施这七个部分的经验教训，有助于我们在开辟新领域或者将遥控系统投入现存作战环境中开展作战时，能防止重复过去的错误。分布式作战拓展了我们对成熟作战领域的现有了解，由此需要我们编写新的独特作战准则，建立新的组织结构。此外，人员政策、领导培养、训练计划等，都必须加以调整，以关注传统战争中未曾遇到的、或者现代分布式作战中已出现但未曾重视的细微差异。最后，将重点更多地放在控制节点的设计上或许可能牺牲飞行器的一些优势，但将允许领导人最大程度地利用分布式武器系统中普适性和灵活性这两大优势。

认真研究太空界如何处理这些因素，有助于军事领导人改善 RPA 这类较新的分布式

作战系统的整合、演变，以及对整个战争的贡献。随着太空作战趋近而 RPA 作战渐离传

统作战环境，两者之间有许多经验教训可共享，犹如两艘遥控的舰船在战斗中交会。♣

注释：

1. National Park Service, “Bunker Hill Monument” [邦克山独立战争纪念碑], <http://www.nps.gov/bost/historyculture/bhm.htm> (accessed 22 September 2009); 以及 Joseph L. Campo 2009 年 9 月 28 日给笔者的邮件。
2. Gen Kevin P. Chilton, “Cyberspace Leadership: Towards New Culture, Conduct, and Capabilities” [主导网空：向着新文化、新行为和新能力发展], *Air and Space Power Journal* 23, no. 3 (Fall 2009): 5, <http://www.airpower.au.af.mil/airchronicles/apj/apj09/fal09/fal09.pdf> (accessed 21 May 2010).
3. 同上，第 6 页。
4. William S. Lind et al., “The Changing Face of War: Into the Fourth Generation” [战争面貌在变化：进入第四代], *Marine Corps Gazette* 85, no. 11 (November 2001): 66.
5. 军事准则没有明确定义远程分工作战，本段中所指的作战是，操作员和作战平台在地理上相互分离。参看 SSgt Alice Moore, “AFSPC Commander Visits UAS Operations at Creech AFB” [空军太空司令部司令视察克利奇空军基地遥控飞机部队], Schriever Air Force Base, 25 March 2009, <http://www.schriever.af.mil/news/story.asp?id=123141399> (accessed 21 May 2010).
6. Maj Keith W. Balts, “The Next Evolution for Theater Space Organizations: Specializing for Space Control” [战区太空组织新演变：太空控制专业化], 选自 *Space Power Integration: Perspectives from Space Weapons Officers* [太空力量整合：太空武器官的视角], ed. Lt Col Kendall K. Brown (Maxwell AFB, AL: Air University Press, December 2006), 124, <http://www.au.af.mil/au/aupress/Books/Brown/brown.pdf> (accessed 21 May 2010).
7. Sean C. Sullivan, “Capabilities-Based Planning: Joint Capabilities Integration and Development System and the Functional Capabilities Board” [基于能力的规划：联合能力整合和发展系统及功能能力委员会], course reading (Newport, RI: Naval War College, 20 August 2008), 4.
8. P. W. Singer, *Wired for War: The Robotics Revolution and Conflict in the Twenty-first Century* [连线战争：二十一世纪的自动化革命和冲突], (New York: Penguin Press, 2009), 210.
9. Air Force Doctrine Document (AFDD) 2-2, *Space Operations* [空军作战准则 AFDD 2-2：太空作战], 27 November 2006, 10—14, http://www.dtic.mil/doctrine/jel/service_pubs/afdd2_2.pdf (accessed 21 May 2010).
10. 今天，美国太空司令部的太空作战使命隶属于美国战略司令部
11. 见注释 6，第 124 页。
12. 见注释 9，第 7 页。
13. Scott Lindlaw, “UAV Operators Suffer War Stress” [无人飞机操作员承受战争心理压力], *Air Force Times*, 8 August 2008, 1, http://www.airforcetimes.com/news/2008/08/ap_remote_stress_080708/ (accessed 9 January 2010).
14. 见注释 8，第 308 页（308 页图片中第 3 个文字框内容）。
15. US Air Force, “13S Career Paths, Deliberate Force Development” [13S 培养专业：深思熟虑的战斗培养], briefing, AF/A30-ST, January 2009, slide 21.



基思·W·巴尔斯上校 (Col Keith W. Balts, USAF)，威斯康星大学理学士，科罗拉多大学科罗拉多泉分校工程硕士，提交本文时任加州范登堡空军基地的第 30 太空联队副司令。巴尔斯上校曾任职多个作战和参谋岗位，包括卫星指挥控制、太空控制、导弹预警、国家侦察与战区太空作战。他指挥过第 10 太空预警中队，并进入编号空军部队、一级司令部和国家级机构工作，他也曾在“南方守望”行动及“持久自由”行动中就职于联盟空中作战中心。上校是美国空军武器学院、空军指挥参谋学院和海军战争学院的毕业生。



战术C4ISR飞机在过去、现在和未来冲突中的作用及其革新意义

Tools of Change: Tactical C4ISR and Conflicts—Past, Present, and Future

托马斯·J·拉斯 (Thomas J. Rath)

美国到目前为止，还没有一款能够执行战术侦察的飞机。要理解这个断言，必须从此种飞机在非正规战争中的应用来澄清“战术”和“侦察”这两个概念。在非正规战争中，“战术”所表达的是小股部队的行动与活动，这个概念应用于战术侦察部队本身和他们所支援的部队，以及他们想要发现的敌军部队。战术侦察部队也能够支援较大规模的友军部队并发现大股敌军部队，但在能力上着重体现小股部队的特征。在非正规战争中，“侦察”是指搜寻敌军部队及其踪迹、营地、补给线、边界进入点、兵站及境外训练营地等，本质上就是发现敌军的存

在非正规战争中，这两个概念合并而成为“战术侦察”，即是确保获得关于敌军、地形和天气等多样信息，以能随时应用于战场，或进一步由覆盖相关地区的战术人员继续执行下一步的情报或监视任务。战术部队与战役及战区级部队的指挥、控制、通信、计算机、情报、监视和侦察 (C4ISR) 的整合程度，依发现敌军的初始情报的重要性和可用性，可以迅速扩展。在阿富汗，首先发现敌人动静的大多是

C4ISR = 指挥、控制、通信、计算机、情报、监视和侦察

C3I = 指挥、控制、通信和情报

O = 观察机代字

A = 攻击机代字

地面部队。如果我军有一款专用的有人驾驶

战术侦察机，则空中力量可以对战争做出更大贡献。

美国空军至少在某种程度上意识到其在战术侦察方面的缺失。仔细阅读《二十一世纪的空军：非正规战争战略》(The 21st Century Air Force: Irregular Warfare Strategy) 白皮书，通篇流露出未能提供一款纯粹战术侦察平台的缺憾。¹ 该文件的“宗旨”部分谈及“长期战争”及通过“部署适当能力”来“启动新方式并使空军行动一体化”的必要性。² 在“战略背景：非正规战争的挑战”部分，白皮书指出空军期望成为“联合部队”的一部分，并“与伙伴国家共同合作，依靠和通过伙伴国家，……建立起伙伴国家能够最终不需要外部直接援助而繁荣发展的安全环境，”但没有提及如何实现这一预期所需的手段，特别是飞机。³ 该书“非正规战争环境下的空中力量”部分的“间接方法”一节中实际上概述了一款战术级有人驾驶 C4ISR 飞机的作用和使命。同章的“直接方法”一节认定机动性和情报、监视、侦察 (情监侦) 通常为平叛作战中“最重要的因素”。⁴ 在“最终目标：打赢长期战争所需的组织、训练和装备”部分，暗示我军以常规战争手段作战，尚未获得打非正规战争的基本能力。⁵ 接着“方式：全球影响力的五大支柱”一章再次概述了对于战术级 C4ISR 飞机的需要，却未说明具体规格。⁶ 再后来，“手段：二十一世纪

非正规环境下的空中力量”部分谈及“调整我军保障能力规模，例如情报监视、网空及指挥与控制，以满足全频谱冲突的联合作战需求。”⁷最后，“风险：未能预见、调适及学习”和“结论”部分均谈及“采用相关的作战新概念，”“从我军自身……的经验学习，”以及“将久经验证的空中力量原则以创新方式运用于我军当前作战及未来继续作战的环境中。”⁸可以说，这部白皮书已经对空军目前缺乏的这种飞机的需要做出了足够全面的概括。除非特别设计一种专用的有人驾驶战术 C4ISR 飞机，其它任何一种现有的或提议的平台都不能接近于满足空军自身未来战略的这一巨大需求。空军应将这种专用飞机定位为 O/A（观察 / 攻击机）机型，但其主要功能是作为一种 C4ISR 平台。

空军和政府内很多人以为，将民用飞机和教练机稍加改装，就能执行战术侦察任务；空军传统上也是这样做的。但是这些飞机不足以担当这一重要而危险的作战角色。如以下讨论所表明，空军历史上用来执行战术侦察的飞机，在应对非正规战争中常见的敌军时，一贯表现出能力短缺。

战术侦察飞机简史

战术侦察机今天的短缺有其深远的历史渊源。最早用于战斗的飞机，即第一次世界大战中的观察 / 定位机，被冠以“O”代字，沿用至今，从此规定了它的作用和使命范围。为了生存，这类飞机很快就被加装武器，而且现在必须覆以适当而有效的装甲。战术侦察的概念源自德国，首先出现于 1930 年代，以反映这类飞机具备轻型攻击能力并能提供远超出单纯炮兵观察定位的更多信息。遗憾的是，一场分裂随后发生，最终演变成以所谓指挥、控制、通信和情报（C3I）作用 / 使

命为主的一方，和以观察定位为主的另一方，似乎这两方并无明显重叠一样。然而这一分裂往往导致将战术侦察一词表示旨在发现敌军动向的那些任务。由此，这一概念可能用来表述一架 O-1 在 1,500 英尺高度飞行、呼叫空中打击或炮兵开火的场合，也可表述一架 TR-1（即 U-2）为战区作战司令官执行高空照相侦察的场合。前一种使命确实是战术性的，而后一种则是为达成战役目的而使用战区级资产。更近些时出现了一套包含发现、确定、跟踪、定位、交战和评估的战术使命集。目前我们假定上述的每一项任务需要不同的飞机来执行。最后，现有技术极大扩展了战争所有层面可能的作用和使命范围，又出现了一个更广泛的缩略语 C4ISR，将观察定位与 C3I 作用联结起来。遗憾的是，空军专注于把战区级资产整合于一个复杂的 C4ISR 网络，一厢情愿地假设战区级资产也能执行战术级的 C4ISR 任务。本文即以相当篇幅针砭这一关注点的错置所造成的严重负面后果。

非正规战争几乎完全是在战术层面进行，而且旷日持久，常常一拖就是十年。美国在其历史上打过多次这样的战争。美军已经学会如何打这种战争并开发出有关作战工具，但是正规军种在每一次战争之后很快就将这些工具撤销、抛弃、乃至遗忘。空军尤其如此，始终不肯开发专用于对地攻击或单纯战术级侦察的飞机。空军反对开发、采购和保留 A-10 型作为专用对地攻击机的一贯立场，可谓人所共知。⁹但很少有人注意到空军始终不愿出资开发一款纯粹专用于战术侦察的有人驾驶飞机。空军整体对这种能力的忽视可一直追溯到第二次世界大战。

在那场大战中，执行美军大部分战术侦察任务的，是非武装、无装甲、动力不足的改装民用飞机，如 Aeronca L-3 和 Piper L-4。

敌军极其惧怕这些飞机，因为它们一飞过，就会引来高度精确有效的毁灭性打击。¹⁰ 必须指出：这些飞机的飞行员无论在大战期间还是战后都没有获得表彰其英勇行为的嘉奖。

与美国的做法相反，德国人开发出专用的战术侦察机 FW-189 Uhu。¹¹ 这款双引擎飞机可搭载一名飞行员、领航员兼电报员和一名观察员兼机炮手。该机视界宽广，通信设备优越，性能、耐用性和机动性优于 L-3 和 L-4 一倍以上，并配有轻型进攻与防御武器。FW-189 飞机经历东线战场验证非常有效，为德国的闪电攻势战术发挥了关键作用。

二次大战后，美国透彻评估了轴心国的武器，对飞机尤甚，却偏偏漏掉了 FW-189，因为这种飞机只要靠近美军前线就无法生存，更不要说执行战术侦察了，因此美军对它的审视只是一带而过。事实上，任何德国飞机只要飞临美军前线，不出十分钟都会被击落，包括广泛视为大战中一款最优秀螺旋桨战斗机的 FW-190。美国付出了 50,000 余名伤亡的代价才获得如此全面的空中优势。因此，所谓德国人能否在西线有效运用 FW-189 的提问并没有问到要领，应当提问的是：如果美军在其空中优势掩护下、使用一款对等的飞机飞越德国战线上空及其后方作战，可能打出什么样的局面？我们将永远不会获得确切的答案，但不妨作一点推测。比如：“凸出部战役”还会发生吗？又比如：纵然外交局限牵制了艾森豪威尔将军的决策，美军部队有无可能在 1944 年后期就渡越莱茵河并向纵深推进？然而历史已经铸成，我军于此役及此后付出了沉重代价。

在朝鲜战争的最初几个月，正因为联合国军缺乏战术侦察，北朝鲜因此得以发起更为凌厉和有效的攻势。仁川登陆之后，Cessna

L-19 广泛投入战场，但此飞机比二战时期的 L-3 和 L-4 并无显著改进，更远远不及老式的 FW-189。当中国军队跨过鸭绿江时，其部队和物资运输主要是靠步行。装备简陋的 L-19 在追踪这种大规模运动方面表现极差。空军最后只好动用老式的 T-6 Texan 教练机，其性能大大优于 L-19，并证明它执行战术侦察比美军或联合国军的任何喷气式或螺旋桨战斗机都更适用。空军将改装的教练机用于作战的倾向即从朝鲜开始，而且美军自那时以来就一直缺乏专用的战术侦察平台。兰德公司 1963 年发表的一篇论文批评朝鲜战争中美军缺乏“A-Frame 监测器”，意指美军缺乏在己方前线以外进行有效战术级侦察的基本能力，连中国军队徒步行进这一最简单的动向都不能发现，指出这种缺失似已贯通全体制，对未来将产生恶劣后果。¹²

到越南战争初期，唯一可用的战术侦察机仍然是那款已被证明能力不足的 L-19，当时定名为 O-1。¹³ 其缺点导致另一种稍加改装的民用飞机 Cessna 337 以 O-2 的命名登场。这两款飞机都有重大缺陷。O-1 勉强用作观察 / 定位机，但其动力不足，易受攻击；而 O-2 的座舱视界有限，缺少装甲，武器也不足。但是 O-2 的作用在于空军对其性能做出了评估并引出一款后继机型。Cessna 公司倾听了 O-1 和 O-2 机组人员的批评意见，并根据他们的建议设计出 O-2TT。¹⁴ 不料空军对此新机型的反应极为苛刻，以致 O-2TT 的试飞样机被拆卸销毁，其存在也从 Cessna 公司的记录中销声匿迹。¹⁵

同时，空军采购并使用了 OV-10 Bronco，该机的性能显著改进，乘员的前方及侧面视野清晰，能载多样武器，但仍未能作为一款完备的战术侦察机交付使用。其设计意图是执行非正规战争的所有任务，却一样也未能

做好。原始设计没有纳入专用侦察设备，而且后座仅有的一点仪表完全不具备侦察功能。因此，OV-10 勉强用作一款轻型攻击机，不过加装了空军决定要装的设备而已。空军后来在一些 OV-10 上加装了“宝石钉”激光照射器，而海军陆战队使用了夜视观察 / 机炮系统。这两种系统都没有达到预期，因为设计者未能充分考虑非正规战争中战术侦察所忌讳的噪音、显形性及其它特征标记。¹⁶

有趣的是，陆军却就如何减少其中一种特征标记即噪音开展了消音研究，结果从洛克希德公司诞生了 Q-Star 和 YO-3A 飞机。¹⁷ 报道称这两种大幅改装的试验型动力滑翔机在越南用于夜间侦察极为成功，但不具备其它战斗功能。¹⁸ 空军没有参与 YO-3A 的开发，显然将其视为本军种项目的竞争对手。同时空军继续将改装的教练机投入作战任务，在老挝使用 T-28，在越南使用 A-37B（全面改造的 T-37）。空军后来停止使用 OV-10，因为顾虑继续让这种飞机执行战术侦察任务造成的损失太高。空军后来将 OV-10 和 A-37B 转让给菲律宾和泰国之类的国家，广泛用于平息叛乱。



洛克希德·马丁公司研制的 YO-3A 飞机（照片来源：洛克希德·马丁公司）

越南战争提供了战术侦察的大量宝贵经验教训。然而，现在要让一名现役空军军官正确地识别 O-2TT 或者 YO-3A 似乎不大可

能，也别指望他读过关于曾驾轻型机飞越老挝上空的机组人员的介绍。越南战争的另一教训是执行对地攻击任务的各种飞机的损失率比较。一位空军少校撰写的一份飞机损失率研究表明，在低空对地攻击中，使用喷气式飞机远优于螺旋桨飞机。相对于喷气式飞机，特别是与 A-37B 相比，螺旋桨飞机的损失率高出许多。但是这种对比信息并没有改变最近“轻型攻击武装侦察机——能力信息征求书（LAAR-CRFI）”计划中对涡轮螺旋桨飞机的偏好，也没有在后来的 OA-X 项目中得到反映。¹⁹ 这两个项目要求将待选飞机限制于已经投产的机型，意味着只能挑选现有的涡轮螺旋桨教练机。²⁰ 至于能否将普惠（Pratt and Whitney）或威廉斯（Williams）小型涡轮风扇发动机驱动的轻型有人作战飞机用于非正规战争和常规战争中，执行如战术 C4ISR 及轻型攻击之类的关键使命，其可能性尚未研究过。空军本应吸取越南战争中战术侦察的教训，当时把改装民用机或教练机投入战斗使命的做法，在办公室里看来可行，在实战中却效果不彰。

第一次海湾战争时期，空军不去研究为完成战术侦察使命可能要求什么条件，而是直接拿来若干架双座 OA-10，为这种观察机配备手提望远镜、夜视镜，还有稍加改进的无线电收发报机。它的机载武器系统也作了改进，以适应战术侦察需求。但伊拉克人很快就学乖了，看到一架 A-10 飞过，不再向它开火以免遭到攻击。这倒是解决了飞机损失太高的问题。空军看来没有认真研究过使用双座 A-10 所得的正反面教训，只是把它们作为一项临时解决方案。

当空军参与 2001 年对阿富汗的初始进攻时，并不具备战术侦察能力来补充战区级 C4ISR 资产。所幸的是，随行的阿富汗本土

部队已与塔利班战斗多年，方便地弥补了这一缺陷。但战术级侦察能力的缺乏致使我军后来在托拉博拉谷地（Tora Bora）之战中付出代价，据报当时有多达 4,000 名塔利班和基地组织人员、外加 50 至 80 名头目畅通无阻地穿过一个未设防的山口逃入巴基斯坦东北部。²¹ 未能发现并阻止这股敌人窜逃，在很大程度上造成了阿富汗和巴基斯坦后来战乱不已。

其后的伊拉克战争初始阶段在战役和战略上大获成功，但当美军部队指挥官吃惊地报告说大批伊拉克士兵携带武器逃离战场时，竟无人在意。萨达姆·侯赛因宣称非正规部队将在常规战事结束之后长期坚持战斗，也无人关注。未能理解非正规战争的可能性并为之备战终致我军遭受重大伤亡，其程度远超过为推翻萨达姆政权而进行的所有战斗伤亡的总和。空军是为非正规战争的必然发生而做准备最差的军种，当时的空军领导人只是承袭其前辈做法，把民用飞机——如豪客比奇飞机公司（Hawker Beech）的 King Air 和 Cessna 208 等——改装一下，就投入意义重大的战术侦察，而不是为非正规战争使命提前设计专用战术飞机。

今天，阿富汗需要更适合于非正规战争的装备已是不争的事实。陆军和海军陆战队已经开始接收为满足此需求而设计的第二代武器与车辆。而空军所做的，只不过是各型民用飞机上加装不同的情监侦系统，发布轻型攻击武装侦察机的能力信息征求书，启动 OA-X 项目，并更频繁地使用遥驾飞机。无独有偶，LAAR/OA-X 项目的主要待选飞机又是改装的教练机，包括海军“迫近愤怒”项目下的改装巴西产 Super Tucano A-29，以及 AT-6B，后者是由豪客比奇公司特许制造的瑞士产皮拉图斯（Pilatus）PC-9，该机经多

处改装，以 T-6 “Texan II” 命名与 Tucano 竞标。由于空军对 OV-10 的缺陷大为不满，将其全部淘汰。倘若现在还有一架保留下来的话，就可以改装后试验类似于 AT-6B 原型机上所装的那种情监侦系统。若采用 OV-10 作为基线能力比较，本应很快表明，按传统将上述两种教练机改装用于武装侦察的做法是完全不妥的。而且，因原始的“OA”代字已被缩短为“A”，并将“O”代字从 A-29 和 AT-6B 上彻底除掉，这种不妥就更加明显。²² 这也凸显空军视攻击高于一切，继续对纯粹战术级侦察不屑一顾。然而，传统涡轮螺旋桨飞机的噪音和显形印记太强使它不适用于非正规战争，而其雷达印记太强又使它不适用于常规战争，哪怕是担任轻型攻击也不适宜。

对今天的含义

空军长久以来忽视战术侦察，甚至不能准确规定其作用和使命。²³ 技术的飞速进展使战术侦察能够承担全范围的 C4ISR 使命。然而，现代的空军已深深投入开发遥驾飞机，却不真正理解一种有人机的必要性，不理解潜在的人员/系统一体化，不掌握非正规战争对飞机性能和关键特征标记的要求，没有分析适当的机载武器组合，也没有研究这种飞机如何融入整体 C4ISR 网络。空军没有意识到一款设计得当的战术 C4ISR 飞机对于在未来各种强度冲突（核战争除外）中发挥其第五代和第四代更新战机效能的重要性。空军作为一个整体组织，很少认真考虑美国长期卷入别国非常规战争而引起的政治和预算问题，更不重视如何为可行的退路战略做好准备，比如着手装备和训练发展中国家军队——尽管空军中一些个人已经对以上许多问题做过很好的研究。²⁴ 空军如此远离非正

规战争的现实和需求，对空中力量在非正规战争中必须发挥哪些关键作用已经没有感知，遑论理解。

美国和德国在第二次世界大战中的战术侦察经验表明了战术侦察对常规战争的重要作用。在非正规战争中，战术侦察，特别是空中战术侦察，对于成功压制并击败非正规武装更是不可或缺的条件。该种能力所依赖的关键要素是一款设计和装备适当的有人驾驶专用战术侦察机，能执行全频谱战术级 C4ISR 任务，同时能与战区级 C4ISR 网络中的任何可用要素全面连接。这种概念性的先进战术 C4ISR 飞机相当于前述 FW-189 飞机的现代美国版本，尽管这种类比就像是 F-22 与 P-51 相提并论。

如果非正规叛乱武装能够对当权政府的常规部队实施充分有效的火力打击，那么他们早就掌权了。只是他们并不具备这种火力，从而决定了他们必须以小股部队隐秘行动。叛乱群组分散行动或从一地向另一地移动时，很难发现。历史表明，叛乱武装通常以小股行动逃避侦察，直至集结发起攻击时才被发现。不论技术多么进步，发现小股部队仍需继续依赖简单的目视观察，其它一切技术都只能起辅助作用。着眼于以上现实，一款纯粹的战术级 C4ISR 飞机必须先机发现并确认敌对武装，目视引导攻击，判定打击结果，并具备机动性、载荷能力及灵活性（武器和系统套件），还可调整切换多种视角和视界选项，以及多样的通信能力。

众多研究、文章和演习均支持上述观点。一份涉及空军国民警卫队责任（空军传统上把“O”代字飞机归入警卫队责任范围）的研究文献简直是在乞求空军研制一款具备大多上述能力的新型前进空中控制员载机。²⁵

《空军》杂志 1985 年 10 月号刊登了一篇与战术空军司令部总部对地攻击战机要求部主任 Thomas A. Lanum 中校的访谈，他说“战术空军目前拥有 235 架前进空中控制飞机……我们努力争取获得更多更好的飞机。”²⁶ 一年之后，该司令部认定这项计划优先性太低而将其取消。加州欧文堡基地举行的演习反复证明，在历来所称的“机动战”中，鉴于地面侦察部队受到地形条件限制，一款“O”代字有人驾驶飞机对于实施这类战斗绝对必要。²⁷ 由于非正规战争中地面战术侦察部队面临同样的限制，因此需要专门设计一款飞机，用于独立执行战术侦察，或与地面部队、现有攻击平台或 C4ISR 网络协同执行战术侦察，然而这一必要需求尚未得到满足。

改装民用机、教练机、遥驾机和战区级情报侦察飞机执行战术侦察的不足

以上讨论强调了专门设计一款有人驾驶战术侦察机的必要性。稍加改装的民用机或教练机太容易被敌军发现并遭敌防空火力攻击。²⁸ 因此这些飞机必须在高空运行，从而与构成 C4ISR 网络的战区级飞机相比，并无多大功能优势。但是改装民用机或教练机确有两点独特优势：其一，它们具备相对于有人或无人军用战机的重大成本优势；其二，将它们转让给发展中国家几乎没有安全和出口障碍。

逐最新潮流而得宠的遥驾飞机，在针对非正规武装的 C4ISR 进攻作战中效能更加低。²⁹ 在当前（以及未来相当长时期，如果我们未能开发出一款有人驾驶战术 C4ISR 飞机的话），遥驾飞机将继续依赖易受攻击且机动性相对差的地面部队首先发现非正规武装。遥驾飞机受制于中到高倍放大率下极狭窄视角（即所谓“汽水吸管”现象）的制约，

态势感知有限，捕获目标速度较慢，以及完全依赖于长距离通信网络，系统成本远远高出相应的有人驾驶飞机。再者，其损失率更高，况且仅为执行一次监视任务就要求数量庞大的专业人员。³⁰ 遥驾飞机基本上是一种遥驾打击平台，就 C4ISR 使命而言，它只在监视方面表现出色，目前用于任何 C4ISR 任务却可能适得其反。

空军依赖遥驾飞机引起四个方面的担忧，忽视这些担忧就等于漠视一个纯技术解决方案的缺点与弱点。首先，波音公司作为合同商在美—墨边境从事遥驾飞机监视飞行已有多年，但仍不能使其有效运作。这项计划并不复杂，所覆盖的是静态而线性的地区，已充分标入地图且不具争议性，并有固定视频监视系统和障碍樊篱系统支持。³¹ 这项计划由于效率低、成本高，已遭资金冻结，仅保留亚利桑那州边境的行动。³² 其二，国家航天总署已在其卫星和航天器上发现若干仿制的计算机芯片。³³ 同军方相比，航天总署开展的系统检查更加广泛，而需要关注的系统部件设备数量要少得多；那么，人们有理由怀疑仿制芯片可能更广泛地植入了军方的武器、通信设备以及遥驾飞机之类的电子系统内。再进一步，这些芯片可能会导致装备故障吗？其三，黑客们已深度渗透入五角大楼和国会，将大量极为敏感的信息传输到中国，这表明我们的整个 C4ISR 网络都易受攻击而受损。³⁴ 那种认为新的加密技术可以解决因深度渗透而引起的大量问题只不过是幻想。任何不能完全自主操作的飞机或系统都易遭受攻击，而这是不可接受的。³⁵ 最后，任何实时遥驾飞机操作必须使用连续通信和视频输入。我们现在知道塔利班和基地组织下载遥驾飞机视频输入已有一段时日。³⁶ 他们下载遥驾飞机视频的能力或许令人耻笑，但更

大的问题是叛乱分子现在已能发现遥驾飞机视频输入。他们只需要一两件不太复杂的手提式信号接收器就可以警告同伙，让其知道遥驾飞机正在搜寻他们，并报告该机的位置与扫描系统的特性。小股部队不需要下载加密的视频就知道何时分散躲藏，如何销声匿迹。

除了以上四个方面的担忧之外，我们还要关注和遥驾飞机用于战术 C4ISR 相关的另一个同样重要的问题。美军撤离被占领国之后，这些国家的政府军方将无法继续依赖美国系统和支持，必须独立有效运作某种战术 C4ISR 能力。美国不大可能为一个发展中国家提供一个连同密码和卫星接入在内、全备运作的高科技遥驾飞机中队，更不可指望这个国家能在战术层级上或者至少战役层级上长期有效运作和维持这样一个中队，财政上养不起，也无法提供经过严格训练的专业人员。再者，他们无法保证接入和控制密码或操作手册不外泄，一个月的安全都谈不上。

本文仅只稍微触及遥驾飞机用于战术 C4ISR 的不足，就已凸现美国空军沉湎于遥驾飞机的现实，空军派遥驾飞机担任一切角色，执行一切任务，遥驾飞机已经表现出的种种弱点都无法打破空军的这一“目标锁定”。随着时日迁移，空军越来越远离卷入非正规战争的世界各地发展中国家所面临的迫切现实需要。

把用于战区级情报监视的飞机用于战术侦察，其效果也不见得比改装的民用机和教练机或遥驾飞机更好。为了弥补战术侦察的缺口，空军提出对目前在阿富汗上空运行的 E-8C 飞机进行升级，以具备发现地面小股运动部队的 ability。这一提案逐步膨胀，现在发展到由波音公司对空军的机载地面监视机群

进行基于 P-8A 设计的现代化改造，或由诺格公司对 E-8C 机群做大幅度升级，让这些体型庞大、数量稀少而又价格昂贵的飞机能执行战术级侦察以搜寻小股非正规敌军。³⁷遗憾的是，这种搜寻能力只有当非正规部队运动时才有效。如此重视使用战区 707 或 737 型飞机执行战术侦察，表明空军在文化认知上丝毫不考虑开发一款有效的有人驾驶战术侦察机，也说明现任空军领导人对非正规战争中的战术侦察几乎一无所知。空军的整体心态与非正规战争的现实和需求相距甚远，可以说是全盘否定了前述《二十一世纪的空军：非正规战争战略》白皮书。

总而言之，我们的情报资产虽然如此庞大、气派，在这样的战争中，说得最客气些也只是勉强奏效；美国再富，经济上也承受不了，时间上也拖不起。

我们所需的轻型战术 C4ISR 飞机的特征

这种 C4ISR 飞机有三类可探测特征标记对其效能最为关键。首先是飞机本身固有的特征标记，包括运行噪音、显形性（飞机易被看见）以及红外辐射。美国空军对减少噪音印记未采取任何措施，对降低显形性稍加处置（例如被动或主动伪装），对消减红外线做了大量努力。其二是外部生成的特征标记，主要指在敌方系统上生成飞机雷达影像，而美国在隐形和干扰技术上领先。其三是与飞机运行无关的自生信号，是由其设备，例如机载雷达、通信设备与激光等在随机运用中产生的。空军做出巨大努力降低飞机的雷达特征标记，但没有想到其通信设备（包括视频输入）也存在易被发现的弱点故而大为惊讶，对激光装置的易暴露性则几乎从未在意。

这些类别的特征标记影响飞机的设计特征及其系统在非正规战争与常规战争中的效能。在非正规战争场合，雷达特征标记并不重要。非正规敌军不可能携带“移动”雷达，即便有也不敢开机，恐怕暴露自己的位置。空军需要让编写战术 C4ISR 要求的专业人员亲身体验实战中的战术侦察飞机，而且参与地面部队行动，他们才能知道飞机的哪些特征标记是恐怖分子或游击队所看重的。这些人员将会立即判定，飞机噪音是地面营地内或运动中敌人所能识别的主要特征标记。当战术侦察飞机搜寻带有隐匿防空武器的室内敌人时，噪音特征就可能关乎到飞机的存亡，因为敌军虽受视角和射界的局限，但可根据噪音的接近预设伏击。陆军直升机越来越多地遭遇到有效的火力攻击，因此必定意识到这一点。³⁸ 但我们可以特别设计战术 C4ISR 专用飞机，采取被动减噪措施，有效减轻噪音。如进一步采用主动减噪技术，可进一步降低噪音特征标记，从而对非正规敌军构成致命威胁。因此我们需要一款具备这些特征并容纳此类技术的平台。

第二类重要特征标记是显形性，在非正规战争中，这种特征极易导致从地面目视发现飞机。我们通过物体的对比、运动、颜色差别和形状看见物体的形象。运动和形状特征是飞机所固有的，几乎没有可能降低。但我们可以努力改善对比和颜色差别。从简单和直观到高科技，有几种可能的选择。目前最可取的是一种简单且低价的系统，即用多色发光二极管直射光照机身下部。战术 C4ISR 飞机如果同时具备低噪音和低显形性，将对无法克服自身弱点的非正规敌军构成严重威胁，使其难于应对。

第三类重要的特征标记是通常与发动机排气有关的红外辐射，其本身不是非正规战

争中的一个关键因素。非正规敌军没有红外搜索跟踪系统，原本不可能凭此特征来发现我军飞机并警告同伙。但由于我们未能尽力降低飞机的噪音和可视特征标记，红外辐射特征因此也成为严重忧虑。若干非正规敌军已携带 SA-14 和 SA-18 便携式防空系统，不久还可能获得更新型的 SA-24。徒步机动中的非正规敌军可能首先听到飞机临近的噪音，而后目视捕捉目标，然后通常有足够时间来发射此类红外制导导弹，击落飞机。

在常规战争中，情况正好相反。战争区域满布各种陆基与机载雷达和大量红外搜索跟踪系统，所有这些系统指引多种不同的防空导弹与高射炮火发出致命打击。飞机必须极大降低雷达与红外特征标记，才有可能在执行一二次任务后继续存活。

有趣的是，非正规冲突和常规战争中对飞机效能和生存的要求看似大相径庭，实际上却有很多重叠之处。用于非正规战争领域降低噪音和红外特征标记的技术也可有助于减少雷达特征标记。进一步，战术 C4ISR 飞机整体采用隐形技术有助于提高机组人员的作战绩效；这种隐身配置还使机身下部更为光洁，从而简化照明而同样达到降低显形性的效果。另外，降低红外特征标记在任何强度的冲突中都是有用的。

空军需要下大决心，认真编制战术侦察飞机的设计要求，精明管理这个项目（即以尽量简洁的设计获得超出最低要求的最大任务能力），避免附加不相干的任務能力而损害飞机设计（任何此类设计只要包含固有的武装战术侦察与轻型攻击能力，加上为掌握这些能力和完成这些任务而必须的高级训练环境，就已足够）。最后，要禁止大飞机公司继续采用“镀金”的一贯加码做法，毕竟他们

不敢因此而牺牲与政府的其它投标及合同。（以往对大飞机公司这种加码做法的默许，导致许多原本有希望的项目走形变样或下马，最后的设计要么满足不了基本能力要求，要么虽然达到要求但要价太高而无法采购到所需的数目。）³⁹

美国空军不愿开发战术侦察飞机的另一个重要原因，是空军显然需要在低、中、高不同强度的作战中以多种平台来执行各种侦察使命，特别是在强大的移动式雷达问世之后。笔者曾在 1987—88 年间（以外部合同商身份）为空军做过一项合同研究，依据实战飞行过侦察使命的空勤人员以及从事过前进空中控制员演习与测试的陆军、海军陆战队和空军国民警卫队人员的意见，界定一款“有人驾驶先进侦察飞机”的要求。⁴⁰此外，Eidetics 国际公司为此研究做了一份项目可行性调查，表明以一款飞机满足所有要求在当时技术条件下是完全可行的。⁴¹

这种飞机设计进展到今天，所面临的挑战在于如何在可行成本范围内既满足空军的隐形要求，又符合非正规战争作战需要。如前所述，非正规战争和常规战争对许多特性有着同样的需要。其中之一是空军要求雷达特征标记越弱越好，这意味着需要为同一机型设计两种版本。为达到空军的要求，需要对机身做非常复杂的表面处理，其中涉及重大成本和技术安全考虑，故而这种版本的飞机只能出口给美国最坚定的盟国。那么从现实考虑，设计两种版本不失为一个可行的途径，两者的唯一区别只在于机身表面处理（飞机外部蒙皮和座舱盖的合成材料）。

这种飞机的国内和国际市场比许多研究所表明的要大得多，国际市场只是因受美国政策的限制而无法反映实际需求。“VISTA

1999”研究报告估计全球市场总需求为 800 架飞机，但随着非正规战争的世界性蔓延，产量当应大幅提高。⁴² 为生产配备和不配备先进隐身表面的两种飞机版本，不妨考虑建立两条生产线。其中一条设在某主要国防合同商的高科技制造厂内，另一条则由某家具创新意识的轻型飞机制造商运作。采用这种解决途径生产出机身后，再依据美国与外国市场的需求加装不同的武器和系统。潜在市场前景将使这一飞机项目具有非常好的成本效益及充分的上马理由，惟空军现有飞机机群中将增加一款新飞机和发动机。然而，如果考虑到该平台所将取代的改装民用机和教练机数目，机群总数实际上可能会下降，人力要求也可能减少。还有一个重大优势因素是，这一款飞机将由美国设计、美国制造、并装备美国武器和系统。

从一款C4ISR飞机引发的作战准则和人事意义

空军在引进任何新飞机时，需要考虑其作战准则和人事方面的影响。由于空军使用改装的民用机和教练机，为有人驾驶飞机编写的 C4ISR 作战准则受到严重限制。现在，如果能获得一款设计得当而能力强大的战术 C4ISR 飞机，其作战性能的发挥将影响到目前美国军用飞机计划的整个范畴，势将改写空军的非正规战争准则。情报能力的短缺，已迫使空军将数量稀少的 E-8C 飞机用于纯粹战术级侦察，装备 Sniper 吊舱的 F-15E 战机在伊拉克和阿富汗过度使用后面临着如何延寿的忧虑，空军还不得不考虑改装一系列运输机（包括 AC-130 和 MC-130 各版本，还可能包括 C-27 改型机）来执行对地火力支援。把这些问题统筹思考之后，空军应可意

识到，作战准则将因为一款真正的战术 C4ISR 飞机的出现而改写。⁴³

为战术侦察编写的作战准则也必须做重大改写。目前作战准则规定的战术作战最低高度 1,500 英尺（或 OA-X 飞机的 15,000 英尺）将改为浮动高度，接战小股敌军的决定将由机组人员依据其战术判断自行做出，这些改动都体现出剧烈的变革性质。事实上，所有军种都将因为这种真正的战术 C4ISR 能力的出现而受到影响，由此都必须大幅改写其作战准则。一个战术 C4ISR 机组在战斗中为执行作战指挥官意图时将拥有巨大的权限，由此来看，一款飞机带来的变革将令人吃惊。套用拿破仑的名言，“元帅的指挥棒”实际掌握在该机组的手中。

最后一个问题关乎飞行员的专业前途。传统来看，只拥有“O”代字机飞行记录的飞行员很难越过上校军衔的门槛。空军似乎认为，这类飞行员只退不进，因为飞行的是基本型或至多是中级教练机。空军的晋升评审委员会似乎并不看重这些飞行员使命的关键价值，而执行这些使命唯一可用的飞机是教练机和民用机。

战术 C4ISR 飞机是一片独特的领域，向来被称为“印第安人领地”，这个历史引喻是指昔日美国西部广袤的原野，引申而言指的是曾经帮助美国骑兵征战制胜的侦察兵。在今天的常规战争中，该词指的是双方高度机动并强大的主力部队在交战之前必须保持的越来越大的隔离空间。在非正规战争中，它指的是友军控制范围之外的所有领域。不管是哪种情况，“印第安人领地”既非空虚，亦非中立，构成双方战术侦察的主要领域。如果拥有一款设计得当的有人驾驶战术 C4ISR 飞机，它将成为这一广大领域的头号捕食者。

那些认为驾驶 F-15、F-16、F-22 或 F-35 是战斗飞行最高境界的人们应当知道：非正规战争中的战术侦察机人员与等待分配目标的战斗机或攻击机飞行员相比，可能更经常遭遇到多样化的作战场景。倘若美国再次参与一场重大常规战争，那么战术 C4ISR 飞机因机遇所造就的王牌飞行员，可能会比 F-22 以外的任何战斗机都多。设计得当的战术 C4ISR 飞机将成为名副其实的捕食者，是其领域内的一款极高性能飞机，也是战斗机很难应付的对手。

空军作为一个整体亦应意识到：真正战术 C4ISR 飞机（配备适当 C4 装备及情报监视系统的战术侦察平台）的机组人员若卷入交战，将经常担任现场指挥官。其所需的知识范围，以及其所获得的经验，可能比军队中其他任何军事岗位更能把一名军人培养成参谋长。

结语

二十一世纪的空军为迅速满足长期战争的大多数需要，应考虑获得一款高效能低成本的轻型战术 C4ISR 飞机。为此，空军首先需要在其文化中包容这种创新思维，因为空军历来鼓励思维创新。然后，迅速实施一项创新研发与生产计划，不要去凑那些大公司，费力说服他们简化其习以为常的公司评估、投标和研发程序，而应找一家具有非正规战争作战经验和世界级设计能力的小公司集团承包。空军这样做就可避免那种样机试飞等

三年、初始投运等三年、项目成本翻三倍、产品交付赶不及、在阿富汗派不上用场的常见困境。



Rutan 151 ARES 飞机（照片来源：Scaled Composites）

我们需要一种类似于二战期间 FW-189 飞机的现代美国版本。具有同级重量、尺寸和推重比的 Rutan 151 ARES，可作为一款现代战术 C4ISR 飞机的概念模型，它能满足二十余年前战场的全部功能和使命要求。⁴⁴ 特别是 ARES 装有一台 JT-15D 涡轮风扇发动机，仅靠其内载燃油即可达到续航力和航程标准。美国拥有成熟的技术和工程制造能力，研制出一款专用的有人驾驶战术 C4ISR 飞机并满足全部功能和使命要求及现代隐形性能，不会太困难。我们可以快速获得一款能够从根本上改进我军进行现代战争、特别是非正规战争能力的飞机。今日空军若要实施其二十一世纪战略，舍此便别无其它战术上或成本上更为有效的选择。我们本应在二十年前就采购这样一款飞机，现在更陷燃眉之急。♣

注释：

1. The 21st Century Air Force: Irregular Warfare Strategy, Irregular Warfare White Paper [《二十一世纪的空军：非正规战争战略》非正规战争白皮书]. (Washington, DC: Headquarters US Air Force, January 2009), https://www.nshq.nato.int/NSTEP/GetFile/?File_ID=108&Rank=0.
2. 同上，第 3 页。

3. 同上, 第 4—5 页。
4. 同上, 第 5—6 页。
5. 同上, 第 6—7 页。
6. 同上, 第 7—9 页。尤其是“发现、锁定、消灭或孤立叛乱分子和恐怖分子”部分。
7. 同上, 第 9 页。
8. 同上, 第 11 页。
9. Robert Coram, Boyd: The Fighter Pilot Who Changed the Art of War [博伊德: 改变了战争艺术的战斗机飞行员], (Boston: Little, Brown, 2002), 232—37.
10. “也许对它们服务的最大赞扬来自一名德国战俘: ‘当这小飞机临头时, 一切都停滞了。我们除了眨眼之外, 一动都不敢动。’” 参看 Jan Bos, “The Flying Eyes of the Artillery” [炮兵的飞翔之眼], WWII Quarterly: Journal of the Second World War 2, no. 1 (Fall 2010): 97.
11. Leonard Bridgman, ed., Jane's All the World's Aircraft, 1942 [简氏世界飞机年鉴, 1942 年], New York: Macmillan, 1943), 79c—80c.
12. “A-frames”原指最简单形态的机库或仓库结构, 这里指发现当时几乎完全靠徒步运动的中国军队所需的战术级侦察能力, 也指差不多所有类型非正规战争中所必需的那种侦察能力。Amrom H. Katz, Some Ramblings and Musings on Tactical Reconnaissance [战术侦察杂议], (Santa Monica, CA: Rand Corporation, 1963), <http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/papers/2008/P2722.pdf>.
13. Leonard Bridgman, ed., Jane's All the World's Aircraft, 1956—57 [简氏世界飞机年鉴, 1956—57 年], (London: Jane's All the World's Aircraft Publishing Co., 1956), 248. Cessna 公司为海军陆战队开发了 OE-2。该机装有更为强大的发动机, 性能更好, 并配及轻装甲、自我封闭油箱和特种通信设备。另外, OE-2 每一翼下能挂载一枚 250 磅炸弹或三枚火箭。但空军从未采购或使用过该款飞机。
14. John W. R. Taylor, ed., Jane's All the World's Aircraft, 1969—70 [简氏世界飞机年鉴, 1969—70 年], (New York: McGraw-Hill Book Co., 1969), 304.
15. 笔者 1987 年对 Cessna 公司公关经理的访谈。据这位经理说, Cessna 从未生产过该款飞机, 公司图书馆或官方历史中也找不到该机的纪录。
16. 这两种飞机的生产数量从未超出试飞样机所需。各军种均未保留“宝石钉”(Pave Nail)或夜视观察/机炮系统, 也未作任何努力来改进两者的原型以适合 OV-10。
17. John W. R. Taylor, ed., Jane's All the World's Aircraft, 1971—72 [简氏世界飞机年鉴, 1971—72 年], (London: Sampson Low, 1971), 341—42.
18. 见“Lockheed YO-3A Quiet Star”[洛克希德公司的 YO-3A “静星”飞机], Western Museum of Flight, <http://www.wmof.com/yo-3a.htm>; 另参看维基百科词条“Lockheed YO-3”, http://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed_YO-3.
19. Maj Steven J. Tittel, “Cost, Capability, and the Hunt for a Lightweight Ground Attack Aircraft” [寻求成本低、能力强的轻型对地攻击机], (thesis, US Army Command and General Staff College, 2009), <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA510947>. 遗憾的是, Tittel 少校并未提及 A-37B 与其它喷气式战斗机的区别, 因为前者飞行使命不同于其它喷气式飞机, 而与 A-1、OV-10、O-1 和 O-2 更为接近, 且损失率低得惊人。这一事实本应激起更多兴趣。另参看 Fred George, “Low-Cost CAS COIN Candidate” [平叛作战近距离空中支援低成本待选机种], Aviation Week and Space Technology 172, no. 28 (26 July 2010): 59—62.
20. “美国空军……希望其 OA-X 飞机成本不超过每架机身 1,000 万美元, 小时运营费用低于 1,000 美元, 并基于已有服役记录、久经验证的机身、发动机和航电系统建造。空军并未具体规定 OA-X 的发动机, 但情况表明倾向于小型涡轮螺旋桨发动机, 例如 1,600 轴马力的普惠公司 PT6A-68 型, Texan II 和 Super Tucano 都采用这种发动机。” Robert F. Dorr, “Special Report: Light Attack Comeback” [特别报告: 轻型攻击机回归], Combat Aircraft 11, no. 4 (April 2010): 24—25.
21. Philip Smucker, “How bin Laden Got Away” [本拉登是如何逃脱的], Christian Science Monitor 94, no. 68 (4 March 2002): 1, 12, <http://www.csmonitor.com/2002/0304/p01s03-wosc.html>.
22. 见注释 19 中 Fred George 文, 第 57—62 页。

23. 有两个例子可说明这种忽视。据 Christopher Robbins 说,“当 Greg Wilson 从前线返回时, 请求分配战斗机任命。负责军队人事管理的官员在电话上给他的答复却是‘我们正要把在越南担任过 FAC [前进空中控制员] 的经验从战斗机空勤人员中清除掉, 因为我们已进入一个空战新时代, 你们当年在东南亚所从事的低威胁、低速、近距离空中支援已经不再适用。而且我们不想让我们的战斗机人员保留这些习惯, 最好是忘掉。’”参看 Christopher Robbins, *The Ravens [渡鸦飞行员们]*, (New York: Crown Publishers, 1987), 339. 正如 Marshall Harrison 所言,“我正在稳步学习我的行当。我知道每一个村庄周围的稻田应当有多少村民。如果人数太多, 就说明可能有人来访。人数太少的话, 可能是因为越共正在进行征兵运动, 村民们决定待在家里, 等到运动过去。对于新建的步行桥要分析, 判断桥上通过的是什么样的载重, 因为农民很少离开自己的村庄出远门。对于桥梁和小径的比较性监视差不多总会显示这一地区的步行交通量。在雨季行动想要隐瞒是不可能的, 泥土和草丛上会留下足迹。我开始感觉就像是到了詹姆斯·库柏小说里描写的那种场景。”参看 Marshall Harrison, *A Lonely Kind of War [孤独的战斗]*, (Novato, CA: Presidio Press, 1989), 125. 将这里的描写与阿富汗战争中的貌似战术侦察相比较, 在那里遥控飞机飞行高度是 15,000 英尺, 而 E-8C 飞机是 25,000—30,000 英尺。
24. 例如, 可参看 Maj William Brian Downs, “Unconventional Airpower” [非常规空中力量], *Air and Space Power Journal* 19, no. 1 (Spring 2005): 20—25, <http://www.airpower.au.af.mil/airchronicles/apj/apj05/spr05/spr05.pdf>; 另参看 Capt Vance C. Bateman, “Tactical Air Power in Low-Intensity Conflict” [低强度冲突中的战术空中力量], *Airpower Journal* 5, no. 1 (Spring 1991): 72—80, <http://www.airpower.au.af.mil/airchronicles/apj/apj91/spr91/6spr91.htm>; 另参看 Col John D. Jogerst, “Preparing for Irregular Warfare: The Future Ain't What It Used to Be” [打好非正规战争, 着眼非常规未来], *Air and Space Power Journal* 23, no. 4 (Winter 2009): 68—79, <http://www.airpower.au.af.mil/airchronicles/apj/apj09/win09/win09.pdf>; 另参看 Maj Richard D. Newton, “A US Air Force Role in Counterinsurgency Support” [美国空军在平叛支援中的作用], *Airpower Journal* 3, no. 3 (Fall 1989): 62—72, <http://www.airpower.au.af.mil/airchronicles/apj/apj89/fal89/newton.html>.
25. US National Guard Bureau, *VISTA 1999: A Long Look at the Future of the Army and Air National Guard [长远展望陆军与空军国民警卫队的未来]*, (Washington, DC: National Guard Bureau, 8 March 1982). (Pentagon Library, call no. UA42.A584). 见“前进空中控制员”一节。
26. James P. Coyne, “Coordinating the Air-Ground Battle” [空地协同作战], *Air Force Magazine* 68, no. 10 (October 1985): 57, <http://www.airforce-magazine.com/MagazineArchive/Documents/1985/October%201985/1085air-ground.pdf>.
27. 见注释 25, 及笔者 1987 年与加州欧文堡美国陆军人员的访谈。
28. 笔者 1987 年十月与战术空军司令部总部对地攻击战机遇要求部 Higgins 上尉的访谈。该司令部也取消了这项计划, 理由是不论以任何一种现有飞机 (例如民用机改型) 执行前进空中控制使命, 都易受到攻击。
29. 最近一款遥控飞机系统“Gorgon Stare”未能达到多项测试标准, 但仍然可能投入使用, 这表现出战术级侦察的缺失已达到迫不及待的程度。参看“Drone Spy System Fails Tests, Draft Report Says” [报告草稿称遥控飞机间谍系统未通过测试], *Los Angeles Times*, 25 January 2011, A9.
30. “五角大楼说, 国防部总共采购了 195 架‘捕食者’遥控飞机, 其中因损失超过一百万美元的 A 级事故即摔掉了 55 架”。参看 Amy Butler, “Grim Reaper Rate” [严酷的收割者比率], *Aviation Week and Space Technology* 170, no. 18 (4 May 2009): 24—26. 另参看 Sandra Erwin, “Air Force Chief: We Will Double the Size of the UAV Fleet” [空军参谋长: 我军遥控飞机队将翻番], *National Defense*, 6 October 2010, accessed 3 December 2010, <http://www.nationaldefensemagazine.org/blog/Lists/Posts/Post.aspx?List=7c996cd7%2Dcbb4%2D4018%2Dbaf8%2D8825eada7aa2&ID=213>. 该文指出, 遥控飞机的“人力密集程度极高, 为每一架遥控飞机‘在轨’值守一轮 24 小时, 就需要 120 名人员操作”。
31. “即便是一个相对温情的情监侦屏幕也许都不实用。‘美国沿本国南部边境建篱墙都起不了铁幕作用, 在外国国土上空飞行几十甚至几百架遥控飞机又有何用。’华盛顿 Teal Group 咨询公司的遥控飞机专家 David Rockwell 如是说。”参看 John M. Doyle, “Boundary Issues” [边界问题], *Aviation Week and Space Technology* 169, no. 18 (10 November 2008): 57—58.
32. 参看“Border Project” [边界项目], *Los Angeles Times*, 22 October 2010, A1, A20.
33. Jeff Bliss, “NASA Discovers More Counterfeit Spacecraft Parts (Update 2)” [国家航天总署发现更多仿造航天器部件], *Bloomberg*, 5 March 2009, <http://www.bloomberg.com/apps/news?pid=newsarchive&sid=akUwVbu507m4>.
34. Julian E. Barnes, “Pentagon Computer Networks Attacked” [五角大楼计算机网络遭袭击], *Los Angeles Times*, 28 November 2008, A-1, A-30.
35. David A. Fulghum, “Digital Goes Viral” [数字招徕病毒], *Aviation Week and Space Technology* 171, no. 17 (9 November 2009): 74—76.

36. Siobhan Gorman, Yochi J. Dreazen, and August Cole, “Insurgents Hack U.S. Drones” [叛乱骇客从美国无人机窃取信息], Wall Street Journal, 17 December 2009, A1, A21.
37. Amy Butler, “Intelligence Choices” [情报选择], Aviation Week and Space Technology 172, no. 34 (13 September 2010): 44—48.
38. 在越南情况也是一样, 如同 Harrison 少校叙述他飞行 OV-10 被击落的景况: “他们可能是在我第一次飞过之后转弯的全过程中追踪我的发动机噪音, 所以他们早已布下罗网, 只等我自投……我没想到 Bronco 的发动机会这么大的噪音。”参看注释 23 中 Harrison, Lonely Kind of War. [孤独的战斗], 244.
39. 有关这类项目的例子, 见 Bettina H. Chavanne, “Humpty Dumpty” [悔之晚矣], Aviation Week and Space Technology 170, no. 18 (4 May 2009): 28. 举步维艰的“武装侦察直升机项目”企图取代陆军视为样板却华而不实终遭砍削的 RAH-66 Comanche 计划, 然而这款直升机研制费用直线上升, 却依然不能满足不断增加的新要求。Robert Dorr 写道: “想开发一款小型简单的战斗飞机却又必须满足美国空军采购清单上不断生出的新要求, 将谈何容易……某些观察家认为: 要求开出一连串, 也许会偏离空军运用 Texan II 或 Tucano 轻型特征的初衷, 更不要说战场上空需要的灵活性和机动性了。”参看注释 20 中 Dorr, “Special Report” [特别报告], 24.
40. Thomas J. Rath, Robert Parker, and James R. Stevens, “A Study Identifying the Requirements for, and the Feasibility of, an Advanced Manned Aerial Scout” [确认一款有人驾驶先进侦察飞机的要求与可行性研究报告], contract no. F33657-87-C-2161 (Wright-Patterson AFB, OH: Aeronautical Systems Division, USAF/AFSC, March 1988).
41. “A Study to Determine the Feasibility of an Advanced Manned Aerial Scout Airplane” [认定一款有人驾驶先进侦察飞机的可行性研究报告], (由 Eidetics International 公司进行的项目研究, 附于上述 Rath, Parker, and Stevens 研究报告)。
42. 见注释 25。
43. Marcus Weisgerber, “The Light Attack Aircraft” [轻型攻击机], Air Force Magazine 93, no. 1 (January 2010): 56—58, <http://www.airforce-magazine.com/MagazineArchive/Documents/2010/January%202010/0110aircraft.pdf>.
44. 参看 “Scaled Composites” [比例合成], <http://www.scaled.com>. 两份有关历史、设计方法、尺寸、重量以及测试性能的详细发布资料函索即寄。



汤马斯·拉斯 (Thomas J. Rath), 加州大学伯克利分校文学士, 曾作为海军军官飞行员在古巴导弹危机期间驾机前往关塔纳摩执行支援使命, 及在刚果叛乱期间驾机执行联合国支援使命。他在“言论自由运动”时期获得加州大学学位, 其后六年半担任 Air America 飞行员, 飞行深入南越、老挝和柬埔寨的使命。有感于战术侦察领域缺乏进展, 他与美国空军签订合同, 从事有关战术侦察要求的详尽研究并撰写了分析报告。拉斯先生现已退休并从事规划咨询, 自撰写本研究之后一直与战术侦察部门保持联系。

四十五年无奈依旧

——美国空中力量对付反叛力量的长久困境

Forty-Five Years of Frustration

—America's Enduring Dilemma of Fighting Insurgents with Airpower

马克·克洛德菲特博士 (Dr. Mark Clodfelter)

战略家喜用对比，一个常用的比较对象就是越南战争。专家学者、政策制定者、记者、历史学家等，在评说自从西贡陷落以来美军所卷入的每一场冲突时，几乎无一不想起越战的幽灵，提及越战的泥沼。当前的伊拉克战争和阿富汗战争也不例外。随着美国越来越深地卷入伊拉克战事，美国《国家杂志》2003年11月22日的封面标题是：“伊拉克犹如越南”。一年以后，美国《新闻周刊》的封面标题是：“伊拉克危机：越战因素”。再一年，美国《外交事务》的封面赫然列出前国防部长梅尔文·莱尔德 (Melvin Laird) 撰写的该期重要文章：“伊拉克：汲取越战教训”¹ 继续往下，《新闻周刊》2009年2月9日的封面标题是：“奥巴马的越南：怎样拯救阿富汗”。² 鲍勃·伍德沃德 (Bob Woodward) 的新著《奥巴马的战争》(Obama's Wars) 进一步揭示越战“鬼魂”如何影响了奥巴马总统向阿富汗增兵的决定，书中并引用了拜登副总统在2009年11月向总统提出的警告，要求总统在阿富汗战争问题上给出明确的方向；拜登坚持说：若无坚定的指引，“我们会陷入另一场越战”。³

诸如此类的宣示也许耸人听闻，但越战和当前的冲突之间确有可比之处。要说越战为当前的军事行动树立了精确的评价标杆难免言过其实，毕竟每一场战争都有其特征，杂陈的变量混合为每一场战争编织出独特的背景，一场战争的制胜策略对另一场战争而言可能是全军覆没的药方。在许多方面，越

南战争和伊拉克战争或阿富汗战争相比，异远大于同。但对战略家而言，在评估伊阿战场上的美军行动时，如果对越战教训视而不见，则铸成错误。不错，美军在越南面对的敌人从许多方面来看不同于在伊拉克和阿富汗的敌人，但是眼前的对手所发动的攻击映照出越共部队和其北越支持者的零散游击战法，这种游击战在约翰逊总统执政的大部分时间一再发生。一如现任总统奥巴马在伊拉克和阿富汗追求的政治目标，当时的约翰逊总统也是意图建立一个稳定的、独立的、非共产主义的南越政权，但是要把这个目标转化为可行的军事目标，则证明极端困难。并且，奥巴马总统和约翰逊总统的处境很像，在选择适当的军事力量工具实现其政治目标时，必须考虑其行动对全球的影响。

约翰逊总统认定，空中力量是一项关键的军事工具，能够抑制敌军的能力和意志，使其无力推翻美国扶植的西贡南越政权。奥巴马总统也诉诸空中力量来扶持巴格达和喀布尔新生不久的政府。就美国的政治目标和敌人的作战方式而言，越战和伊阿战争之间有许多相似性，越战的示例为当前的空中力量运用提供了一个耐人寻味的对照。概言之，这一幕幕事件说明，面对那些擅长躲避常规作战并博取世界公众舆论有力支持的顽强敌人，要想借助炸弹来达成广泛的政治目标注定会遭遇困难。尽管越战的经验不可能为伊拉克或阿富汗战争面临的问题带来准确的答案，但是恰如利德尔·哈特 (B. H. Liddell

Hart) 在谈及历史的价值时所说, 它确实提供了“从先人的错误中汲取教训的机会”。⁴

文化比较

越战和当前战争的一个重大区别是, 敌人的组成状况不同。在越战中, 当地交战各方在宗教信仰和种族上差异极小, 政治和意识形态目标主宰着争夺越南南方控制权的战争。⁵ 南越的反叛组织, 即民族解放阵线, 简称“越共”, 以推翻美国扶持的西贡政府为目标, 并从其北越后台获得人力和物资支援。胡志明把北越正规军源源不断地潜运到南越, 到 1967 年 8 月, 越共部队估计总数达到 300,000 人, 其中有 45,000 名北越军人。⁶ 南越政府建立了一支庞大的地面部队, 兵员最终接近一百万人, 其中许多人受过美式训练。⁷ 但是这支部队在战斗中的表现差强人意, 约翰逊总统不得不增派美军。1963 年, 美国有 16,000 名军事顾问在南越, 到 1969 年他离开白宫时, 在南越的美国作战部队已超过 500,000 人。他还从美国在亚洲的盟邦获得了有限的援助, 包括南韩派遣了 50,000 名军人到南越。⁸ 但是对于许多南越人——包括许多支持西贡政权的南越人——而言, 美国人及其盟友显然“非我族类”, 而是占领军。⁹

越南人的种族和宗教类同性与伊拉克和阿富汗当地交战各方的差异性形成明显的对比。在伊拉克, 什叶派和逊尼派的对立产生了大量的宗派暴力, 迟至 2010 年, 双方的战斗仍然导致每月有数百名平民死亡。¹⁰ 许多宗教领袖, 例如萨德尔, 组织了民兵武装, 有时和政府军对抗, 有时则和敌对派别冲突。种族差异也比比皆是。伊拉克北方库尔德族是长期坚持独立诉求的少数民族, 但是库尔德族人——以及什叶派——在伊拉克当前安

全部队中占很大比重。截至 2010 年 9 月, 安全部队的兵员超过 660,000 人, 他们尽管受过美式强化训练, 其作战能力仍难令人放心。¹¹ 除了民兵之外, 当地的犯罪分子在伊拉克也占有地盘, 极端组织和阿拉伯复兴党人经常发起攻击, 人肉炸弹也在继续从叙利亚零散地潜入伊拉克。¹² 在技术层面, 美国已经结束其在伊拉克的作战行动, 但仍有将近 50,000 名士兵留守该国, 在 2010 年到 11 月为止, 仍有 20 名美国人死于敌对火力。¹³

在阿富汗, 各个部落的纵横捭阖则又是一番景象, 这些部落往往相互残杀, 想推动他们形成反对塔利班和基地组织的统一战线, 谈何容易。宗派分歧也是到处可见: 普什图族是最大的族群, 主要是逊尼派穆斯林, 还有少数什叶派, 但是该族群又分为两大部落, 即吉尔查伊部落和杜兰尼部落; 塔吉克人也是一个大族群, 里面有逊尼派和什叶派; 法尔西万人是什叶派; 哈扎拉人是逊尼派和什叶派兼而有之; 乌兹别克人和土库曼人则是逊尼派。¹⁴ 其他还有许多部落, 分别效忠错综交织的宗派, 而且许多部落的控制地域跨越国界, 延伸到巴基斯坦、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦。截至 2010 年 9 月, 阿富汗国民军的兵员总数为 138,200 人, 来自不同的部落, 都受过北约军事顾问的训练。¹⁵ 北约自己有一支 140,000 人的国际安全援助部队 (ISAF), 目前包括将近 100,000 名美国军人。这支部队努力扶持普什图族杜兰尼人卡尔扎伊领导的阿富汗政府 (尽管卡尔扎伊经常指责北约和美国的行动), 但外国军队在这个国家的存在更加凸显了阿富汗错综复杂的族群版图。¹⁶

政策比较

在越战期间，约翰逊总统也曾尽力扶持羽毛未丰的当地政府。他把美国在东南亚的战争目标定义为维持一个稳定的、安全的、非共产主义的南越政权——一个无法具体量化进展的目标；他还把越南战争视为遏制全球共产主义侵略的广泛行动中的一个关键部分。¹⁷ 因此，他把胡志明视为苏联和中国的走卒，在为保护非共产主义的南越政权而策划各种行动时，总是以莫斯科或北京会如何反应为前提。约翰逊还顾虑世界公众舆论对美国行为的反应，担心公众会把美国视为圣经中的巨人歌利亚，把北越视为被欺辱的大卫，歌利亚欺凌大卫的情景不仅会削弱美国扶持南越的努力，还会削弱为挫败共产主义向世界其他地区扩张所需的支持。还有，约翰逊总统试图减少美国公众对越战的注意力，希望公众更多地关注他在美国国内推行“伟大社会改革计划”所投入的资金，而不要注意花在 8,000 英里以外的一场战争中的费用。

美国在伊拉克的目标与美国当初在越南追求并扩大的目标如出一辙。布什总统起初是寻求一个具体的目标：把萨达姆·侯赛因赶下台，防止他获得大规模杀伤武器。实现这个具体目标之后，布什总统又扩大了目标范围，试图在伊拉克建立民主制度和安全、稳定的局面。¹⁸ 越战期间的约翰逊总统总是看到冷战超级大国苏联和中国浮现在幕后的影子，布什总统也一样，决定在伊拉克采取何种行动时，不得不考虑全球反恐战争的大局。武力的大量使用反而促使敌人加紧招兵买马，吸引伊拉克境外的基地分子等狂热的原教旨主义者，或者伊拉克国内的某些派别，这些派别认为过多的武力是直接针对其所属的族裔或宗教群体。奥巴马总统也在继续试

图维持伊拉克的安全和稳定。¹⁹ 尽管暴力水平低于其前任所面临的状况，美国人和伊拉克人继续死于各种暴力活动，伊拉克仍然不安全。

在阿富汗，奥巴马总统也面临类似的挑战。战争初期的重点在于推翻塔利班政权，而此后，安全和稳定一直是主宰美国行动的首要目标。但是美国总统在追求在阿富汗的目标时，必须顾及和融合北约及多国部队的目标，遗憾的是这些目标有时并不容易互相融合。此外，阿富汗各部落对基地组织和塔利班叛军的支持程度不尽相同，有些敌方成员居住在国界另一边的巴基斯坦，巴基斯坦作为一个拥核国家，又有自己的安全和稳定问题，并且有时还协助阿富汗塔利班。²⁰ 在阿富汗和伊拉克，当初引导美国行动的崇高民主目标缓慢地演变成“调停”，但是，鉴于这两个国家深受族群和宗派分歧之害，要想实现调停目标也极为困难。²¹

奥巴马总统于 2009 年 12 月在西点军校所做的演讲中更为具体地指出：美国在阿富汗的目标是铲除基地组织的安全庇护所、逆转塔利班的发展势头和阻止其推翻政府，并且加强阿富汗的安全部队和政府力量，使他们能够“为阿富汗的未来承担主导责任”。²² 为了实现这些目标，他授权增加部署 30,000 名美军，并宣布美国将在 2011 年 7 月开始从阿富汗撤军。届时，阿富汗军队将开始在安全防卫方面发挥更大的作用。这个做法类似于当年的“越南化”计划，该计划是美国在越战最后几年的战略基石。

重走老路

在阿富汗和伊拉克，不仅是伴随战争而来的美国广泛政治目标似曾相识，冲突的类

型也和约翰逊总统任期内大部分时间里美国在东南亚面临的战争有诡异的相似之处。发生在伊拉克和阿富汗的冲突，都以常规战争开始，然后快速演变为零散游击战。越南的情况则是，当美军作战部队在1965年介入时，南越形势以越共叛乱为主，这种情况一直延续到越共于1968年发动春节攻势，并从此大伤元气。但是，像约翰逊总统一样，奥巴马总统耗费大量精力试图打败擅长游击战术的叛乱分子；布什总统也是如此。另外，布什和奥巴马也像约翰逊一样：依赖空中力量——尤其是轰炸力量——作为打击叛乱对手的重锤。当我们把美国不断扩大的政治目标和敌人的作战方式结合起来考虑时，我们看到：空中力量很难取得积极效果。

约翰逊总统将轰炸作为抑制越共叛乱的首选军事对策。他认为越共一旦失去北越后盾将无法继续作战，于是千方百计地想切断从北越进入南越的军事物资和人员供应线。空中力量似乎非常适合这项任务，总统可以小心地控制轰炸强度，从而避免中国人或苏联人或世界公众的谴责，还可防止分散美国公众对“伟大社会改革计划”的注意力。再者，在美军伤亡方面，使用空中力量比使用地面部队“代价低”，而且可激励西贡政府及其武装部队的士气。最后，轰炸的逐步升级将让胡志明意识到他的国家面临来自空中的最终毁灭，将迫使他放弃越共叛乱，以免亡国。这些基本假设引导约翰逊在1965年3月开始对北越实施“滚雷”空中战役。²³

不幸的是，事实证明这些假设并不正确。越共（及其北越后盾）平均每月只作战一天，因此每天只需要从南越境外获得三十四吨军事物资，这点物资只需要七辆两吨半载重量的卡车就可以运输。²⁴只要敌人选择这种零散作战方式，没有任何轰炸能够阻止他们获

得所需的少量军需品。西贡政府的士气确实受到“滚雷”的激励而上升，不过很快又回落，而胡志明则在逐渐增加派遣到南方的北越军人。他高兴地看出约翰逊的轰炸行动受到各种条件的制约，他知道根本不需要害怕轰炸。约翰逊总统后来增派美国地面部队去对抗越共和北越军队，“滚雷”逐渐升级，又持续了三年——此时的算盘是它会约束敌人可能在南方发动的战役的规模。但是，1968年春节攻势的规模之大出人意料，砸碎了这个神话。

“滚雷”行动持续了三年半，但投掷的炸弹比起美国在东南亚八年作战的总投弹量也只是一小部分。美国在东南亚战事中总共投掷了八百万吨炸弹，其中一百万吨扔到北越，三百万吨丢到老挝和柬埔寨，其余四百万吨炸在其盟邦南越的土地上。²⁵对北越的轰炸受到高度约束，在“滚雷”行动期间估计炸死52,000名平民，而相比之下，对南越目标的攻击则约束甚松。²⁶比如为了加强安全防护，美军指挥官们建立了“自由开火区”，即由美军或南越军队驱逐某个敌对区域的所有居民，然后将任何贸然进入者视为敌方作战人员。一旦有人出现在这些区域，美军往往就会出动飞机进行攻击，但进入这些区域者有可能是越共，也有可能只是想回老家看一看的无辜村民。越共和北越军队充分利用了美国人只要有飞机就用的习性。敌人爱用的一个战术是，在一个小村子里部署一两名狙击手，然后希望美国人来空袭，把整个村子炸平。²⁷在争夺“民心”的战争中，火力的滥伤常常让叛乱者大喜过望；那四百万吨炸弹，有许多就是不分青红皂白地投掷在南越的。

在伊拉克和阿富汗，滥伤性武器不再是主要轰炸火力。“智能”弹药自1972年在北越上空首次使用以来已有显著改进，现在的

飞行员，无论是在高空还是在地球另一侧的地面控制站里，能够从很远的距离投掷炸弹并利用卫星将炸弹导引到离目标几英尺之内的地点，不受气候条件的影响。在2003年“伊拉克自由”行动的头一个月里，美国空军向伊拉克投掷了18,000枚炸弹，其中11,000枚是制导弹药，而在1991年“沙漠风暴”行动的43天里，联军空中部队投掷的227,000枚炸弹和导弹中，只有15%是制导弹药。²⁸ 阿富汗的情况也是如此，在2001年“持久自由”行动的头五个星期里，投掷的大约6,000枚炸弹和导弹中有2,300枚是卫星制导的2,000磅联合直接攻击弹药。²⁹

遗憾的是，尽管美军注重使用智能炸弹，仍然无法消除平民伤亡事件。2001年10月，坎大哈附近五个村庄报告美军空袭导致总共100多名平民伤亡；当地军队指挥官和阿富汗官员亦证实确有此事。³⁰ 2003年春季，在“伊拉克自由”行动的头六个星期里，估计有1,500至2,000名伊拉克平民死于轰炸。³¹ 发生这些死亡事件时，阿富汗和伊拉克正处于常规战争时期，美军致力于实现“有限”目标，即摧毁塔利班政权和铲除基地组织的庇护所，以及推翻萨达姆政权并消除据信的大规模杀伤武器威胁。这两场战争都以重拳出击，很快实现了具体的战争目标，同时却忽视了平民伤亡造成的影响。

敌人变换战术

在阿富汗和伊拉克，正规作战结束之后，零散冲突始终不断，不仅凸显了平民伤亡的后果，而且揭示了作战动机的根本变化，其之转变与越战极为相似。越共及其北越支持者拥有主动权，决定着作战时机和地点，以及作战方式。1967年和1968年是美军在越南的作战活动高峰期，但是美军巡逻队遭遇

敌人的几率只有1%；如果加上南越军队的巡逻次数，遭遇敌人的几率下降到0.1%。³² 然而，1967年和1968年也是美军伤亡最惨重的年份，阵亡人数分别为10,000名和15,000名，其中23.7%死于地雷和饵雷。³³ 在正面交战之后经常出现的喘息期间，隐蔽弹药导致的美军死亡人数可能占总数的40%或以上。³⁴ 美军空中打击和炮火成了越军饵雷炸药的稳定来源，因为B-52投掷的炸弹有5%未爆，火炮发射的炮弹则有2%未爆，加在一起等于每月送给敌人800多吨弹药。³⁵

在伊拉克和阿富汗，叛乱分子也经常能够主动选择作战规模和战术。在这两个战场，美军死于路边炸弹的比例远远超过在越南死于隐蔽弹药的比例。截至2010年11月10日，美军在伊拉克作战阵亡3,483人，其中将近三分之二死于路边炸弹，另外还有21,583名美军官兵被路边炸弹炸伤。³⁶ 伊拉克叛乱分子依靠路边炸弹，避免正面交战，尽量减少接触美军火力，其作战方式不大需要从外部获得军需品；另一方面，萨达姆的军队在2003年瓦解，导致各种军械散落在伊拉克各地。这种战术在阿富汗也屡见不鲜，塔利班和基地组织的武装分子越来越多地使用隐蔽弹药来对付美军和北约部队。截至2010年11月中旬，美军在阿富汗作战阵亡1,058人，其中死于路边炸弹583人。³⁷ 从2009年10月到2010年10月，在阿富汗发生的有效路边炸弹攻击比例增加了30%。³⁸

用空中力量挫败敌人的零散作战，其效果褒贬互见。美国于2007年实施“兵力骤增”计划，增派30,000名军人到伊拉克，同时加强空袭，该年的空袭次数为2006年的五倍。³⁹ 空军领导人声称，通过增加兵力将叛乱分子撵出了市区，找到空袭较易打击的地方，而且情报能力改善，能够更清楚地了解

战场全貌。但是，自 2007 年 4 月开始轰炸，到该年年底仍有 200 多名平民被炸死。“阿帕奇”直升机和“捕食者”无人机发起的“地狱火”导弹攻击次数也显著增加，在 2008 年春季的两个月期间，美军对巴格达进行了 200 多次“地狱火”导弹攻击。⁴⁰ 其中许多是针对混杂在市区的敌人，尽管为避免平民伤亡做出了努力，但伤亡事件仍有发生。一名航空支队指挥官申辩说：“这不是好莱坞，不可能达到 110% 的完美。士兵和指挥官尽了最大努力，做到尽量精准。但那些坏蛋不是在开阔空间和我们打，他们躲在居民区，里面有平民，包括安分守己的伊拉克人。”⁴¹

在阿富汗，美国和北约飞机在 2007 年发动了 3,572 次空袭，是 2006 年的两倍多，更是 2005 年的 20 倍以上。这些轰炸在 2007 年估计导致 300 名平民伤亡，是 2006 年报告数字的三倍。⁴² 2009 年 5 月，一架 B-1 轰炸机在法拉省攻击叛乱分子时可能炸死了多达 86 名平民。⁴³ 面对平民伤亡，一个月后接任驻阿富汗美军指挥权的麦克克里斯托将军发布命令，要求部队停止与隐藏在村民中的叛乱分子交战。他还限制在这种情况下使用空中力量和炮火。他在 2009 年 6 月表示：“我们如果不负责任地滥用空中力量，会种下自我毁灭的恶果，可能会打输这场战争。”⁴⁴

平民伤亡造成的后果给实现安全、稳定和民主雏形的大目标带来严重的后果。2007 年 10 月 12 日对巴格达附近一个叛军盘踞点的空袭炸死了九名儿童和六名妇女，事发之后，格里格·史密斯海军少将（Rear Adm Greg Smith）声称这是一个“绝对痛心的”事件，然后他谴责叛乱分子向附近一支美军部队射击时使用平民作为人肉盾牌：“我们的一支地面作战部队遭到来自那座楼房的火力攻

击，我们不得不摧毁那座楼房。但敌人耍了一个花招……他们混在平民中，然后向美军开火，我们的部队**别无选择**，只能用相称的火力还击。”（粗体强调系笔者后加）。⁴⁵ 十之八九，敌人的“花招”奏效了，四十五年前的越共狙击手如果知道这一招，也会毫不犹豫地使用。那次轰炸是伊拉克战争期间到那时为止美军单次军事行动导致平民死亡人数最多的事件之一，媒体对该事件做了详尽报道。

美军指挥官们试图在伊拉克和阿富汗用空中力量夺取主动权，但是实际上却可能削弱当地民众对巴格达和喀布尔新政权的支持。2008 年 1 月 10 日，两架 B-1 和四架 F-16 在伊拉克中部对疑似武装叛乱分子的藏匿地、弹药储藏室和防御工事进行空袭，总共投掷了 20 吨炸弹。美国人事先警告了当地居民离开该地区，大多数居民确实离开了，因而那次空袭没有导致平民伤亡。⁴⁶ 但是，这种建立“安全”区域的做法类似当年在越南建立自由开火区，并非总能奏效。就在那次空袭发生前十天，在同一地区，以基地组织成员为目标的美军炸弹炸死了三名妇女和两名儿童。⁴⁷ 为了减少附带毁伤，空军改为采用投掷混凝土填装炸弹去引爆路边炸弹，并且经常使用 250 磅 GBU-39 “小直径炸弹”，以便尽量减小爆炸效应。但是，关键在于确定潜在目标附近什么时候可能会有平民，而目前在伊拉克和阿富汗采用的越战时期“显示武力使平民离开目标区域”的做法不能保证一定能取得正面效果。⁴⁸

2010 年 7 月，彼得雷乌斯将军接替麦克克里斯托将军担任驻阿富汗美军指挥官，其后不久，空袭次数显著增加。从 2009 年 11 月到 2010 年 5 月，美国和北约飞机平均每月实施空袭 207 次；从 2010 年 6 月到 10

月，平均每月空袭增加到 517 次。⁴⁹ 彼得雷乌斯将军曾在“兵力骤增”期间指挥驻伊拉克美军，并曾命令空袭升级以配合兵力骤增；阿富汗空袭升级与奥巴马总统在 2009 年 12 月西点军校演讲中授权派遣的 30,000 名美军到达阿富汗发生在同一时间。空袭增加也导致平民伤亡增加，尽管北约声称“导致平民伤亡事件的发生率实际上已降低”。⁵⁰ 联军的空袭在 2010 年 10 月导致 49 名平民死亡，在上一年 10 月则是 38 名，增加了 30%。相比之下，叛军在 2010 年 10 月杀死或杀伤了 322 名平民，其同比增长率与联军相似。⁵¹

尽管叛军导致的平民死亡人数亦有增加，联军导致的平民死亡最有可能激起阿富汗民众的激烈反应。美国国家经济研究署曾在 2010 年 7 月调查了阿富汗和伊拉克平民伤亡所造成的影响，研究报告认为：“在一个中等大小的地区开展平叛行动如果误伤平民，一次典型的平民误伤事件会在其后六周内促成六件额外的 [反国际安全援助部队] 暴力事件”。⁵² 该项研究还指出：“有一种说法认为：平民伤亡影响到后来的暴力行动，因为发生平民伤亡事件之后，加入叛乱组织的人更多。这些数据与此说法一致。”⁵³ 总之，“当国际安全援助部队杀死平民时，愿意投身叛乱作战者就会增加，并导致叛乱攻击增加。”⁵⁴ 该项研究认为复仇是暴力反应的主要动机（但认为在伊拉克并未发生类似的反应），并指出国际安全援助部队导致的平民死亡比叛军导致的平民死亡更有可能引发暴力反应。⁵⁵

反阿富汗塔利班的战争也蔓延到边界另一边的巴基斯坦，那里是塔利班的庇护所，就像老挝和柬埔寨曾经是越共和北越军队在东南亚的庇护所一样。但是在巴基斯坦，美国的空袭很有节制，不可和老挝或柬埔寨相

提并论，那两个国家最终总共受到三百多万吨美国炸弹的轰炸。美国对巴基斯坦的轰炸是缓慢开始的，2004 年只有一次空袭，2005 年也是一次，2006 年有三次，2007 年有五次。在 2008 年，空袭增加到 35 次，2009 年有 53 次，2010 年截至 11 月 19 日总共是 101 次。⁵⁶ 这些空袭主要由中央情报局控制的无人机实施，但也包括空军执行的几次空袭和次数有限的直升机攻击。⁵⁷ 《长战杂志》估计，自 2006 年以来，美国在巴基斯坦的空袭炸死了 1,606 名塔利班和基地组织作战人员（包括 57 名高层首脑）和 108 名平民，其中有 662 名敌军在 2010 年丧生，而该年的平民死亡人数只有 14 名。⁵⁸ 但是巴基斯坦方面声称，从 2007 年到 2009 年，无人机空袭只炸死 14 名恐怖分子首脑，却导致 700 名平民死亡。这些据说的平民伤亡在巴基斯坦人口最多的旁遮普省和信德省激起了公愤。⁵⁹

美国尽管拥有高科技武器，随着其在阿富汗和巴基斯坦的轰炸不断升级，发生附带损伤的几率也显著增加，而每个附带损伤事件都使得稳定和安全前景更加渺茫。这些事件吸引媒体的注意，并且成为敌军招募兵员的最佳工具。归根结底，炸弹不能对意志坚定的敌人产生显著的影响，他们执意打一场断断续续的游击战。狡猾的叛军将依靠其非对称战法，不仅能挫败美国的空中力量优势，而且能将这种优势为己所用。只要美国指望通过轰炸来达到“安全”和“稳定”等无定形的政治目标——更遑论“民主”，叛乱分子就有可能通过零散游击战挫败这些努力。实际上，对阿富汗和伊拉克平民最大的威胁是恐怖分子自杀炸弹，而轰炸对于阻止此类威胁几乎无能为力，而且越来越多的证据显示，

空中力量导致的平民死亡事件接连发生，只会引致越来越多的自杀炸弹攻击。⁶⁰

从许多方面比较，美国在伊拉克和阿富汗（以及巴基斯坦）的敌人其实比他们的越共前辈的日子要好过些。美国为当前伊拉克和阿富汗战争设定的，是难以实现的且与其在越南战争中相似的目标；但美国在伊拉克和阿富汗所面对的，是杂乱的敌对团伙而不是过去在东南亚交手的单一敌人。敌人纷杂凌乱，势必导致美国的战略更加复杂。再者，约翰逊总统及其顾问们虽然也对那些向全世界报道误炸事件的媒体影响头疼不已，但当时的媒体报道终究有些滞后，而不像现在的CNN、BBC和半岛电视台等，滚动提供连续、实时的电视播报。这类新闻，以及半岛电视台等媒体的片面报道，对于中东地区的公众舆论产生巨大的影响，而该地区的人口中有38%是文盲。⁶¹

结语

在所谓的争夺民心的战争中，认知的作用大于现实——实际上，认知就是现实。计谋多端的叛乱分子，无论是出于政治、思想、族群或宗教目的，总是处心积虑地寻求成功机会最大的方式发动作战。他们极力标榜自己为正义而战，渲染对手代表邪恶。美国所

追求的政治目标原无定数，又依赖轰炸作为实现这些目标的关键手段，于是正中叛乱组织的下怀，有利其加强零散游击作战，而美国空中力量对此无可奈何。

要击败此类敌人，空中力量可以发挥作用，但轰炸不是上策。叛乱分子喜欢在民众的“大海”中“游泳”，只有把这些敌人从人民中孤立出来，硬杀伤力巨大的空中力量才有用武之地。然而这些敌人精明老练，想使鱼水分离何其困难。而空中力量的非杀伤应用，特别是空运和侦察能力，可极大地提高美军对反叛力量的作战能力，这已在越战中得到反复证明。美军空军领导人——以及政治领导人——的思维定势是动辄诉诸空中力量的硬杀伤力。当叛乱分子攻击美军时或我方情报精确锁定“高价值”目标时，我们很难想象美军空中部队指挥官会考虑放弃轰炸这个选项。但是这些指挥官及其政治领导人必须全面了解轰炸的潜在后果，把想要获得的短期收益与可能需要付出的长期代价进行比较。在某些情况下，付出代价有其必要；但在更多情况下，节制也许更为稳妥。大肆动用空中力量的硬杀伤力，已经导致我们在越南平叛战争中葬送了美国的广泛政治目标；如果美国在伊拉克和阿富汗再步越战后尘，只怕难逃同样结果。♣

注释：

1. National Journal [国家杂志] 25, nos. 47—48 (22 November 2003); Newsweek [新闻周刊] 143, no. 16 (19 April 2004); and Foreign Affairs [外交事务] 84, no. 6 (November—December 2005).
2. Newsweek [新闻周刊] 153, no. 6 (9 February 2009).
3. Bob Woodward, Obama's Wars [奥巴马的战争], (New York: Simon and Schuster, 2010), 97, 279, 324.
4. B. H. Liddell Hart, Why Don't We Learn from History? [我们为什么不汲取历史教训?], (New York: Hawthorn Books, 1971), 16.
5. 越战结束时越南的人口总数为4000万，其中估计有290万是天主教徒。其他人的信仰则较为混杂，包括佛教、万物有灵说和占星术；也有许多人信奉儒家思想。参看 Delia Pergande, "Roman Catholicism in Vietnam" [天主教在越

- 南], in *The Encyclopedia of the Vietnam War: A Political, Social, and Military History*, ed. Spencer Tucker (New York: Oxford University Press, 2000), 360.
6. “Meeting with Foreign Policy Advisors on Vietnam” [与外交政策顾问讨论越南问题], 18 August 1967, Meeting Notes File, box 1, Lyndon Baines Johnson Presidential Library, Austin, Texas.
 7. Guenter Lewy, *America in Vietnam* [美国在越南], (New York: Oxford University Press, 1978), 455.
 8. Terrence Maitland and Peter McInerney, *A Contagion of War* [战争的蔓延], (Boston: Boston Publishing Company, 1983), 91.
 9. 前越共司法部长 Truong Nhu Tang 和 David Chanoff 及 Doan Van Toai 合著的 *A Vietcong Memoir* [一名越共的回忆录] 通篇反映了这个观点。(New York: Vintage Books, 1985).
 10. Larry Kaplow, “Think Again: Iraq” [重新考量: 伊拉克], *Foreign Policy*, 15 November 2010, http://www.foreignpolicy.com/articles/2010/11/15/think_again_iraq.
 11. Brig Gen Jeffrey S. Buchanan and Brig Gen Kendall P. Cox, *Operation New Dawn: Official Website of United States Forces-Iraq* [新曙光行动: 启动美国驻伊拉克部队官方网站], press conference, 7 September 2010, <http://www.usf-iraq.com/news/press-briefings/brig-gen-jeffrey-s-buchanan-and-brig-gen-kendall-p-cox-sr-sept-7>.
 12. 见注释 10。
 13. 见注释 10。
 14. 许多什叶派成员部落之间也有差异。塔吉克什叶派是伊斯玛依教派, 哈拉拉什叶派则包括伊斯玛依教派和更为传统的“十二伊玛目什叶派”。
 15. NATO Media Background, “Afghan National Security Forces (ANSF)” [阿富汗国家安全部队 (ANSF)], 26 October 2010, http://www.isaf.nato.int/images/stories/File/factsheets/1667-10_ANSF_LR_en2.pdf. 截至 2010 年 9 月, 阿富汗警察总数为 120,500 人。
 16. Joshua Partlow, “Karzai Calls on U.S. to Lighten Troop Presence” [卡尔扎伊要求美国减少驻军], *Washington Post*, 14 November 2010; 另参看 “Attacks Kill 8 Foreign Troops in Afghanistan” [阿富汗叛军攻击杀死 8 名外国军人], *Reuters*, 14 October 2010, <http://www.reuters.com/article/idUSTRE69D10P20101014>; 另参看 Karen DeYoung, “Obama Pushes Back on Karzai Criticism” [奥巴马反驳卡尔扎伊的批评], *Washington Post*, 21 November 2010. 最后一篇文章列出国际安全援助部队在阿富汗的驻军总数大约为 140,000 人; 第一篇文章则列为 150,000 人。
 17. “NSAM 288, U.S. Objectives in South Vietnam, 17 March 1964” [NSAM 288, 美国在南越的目标, 1964 年 3 月 17 日], 参看 Neil Sheehan et al., *The Pentagon Papers* [五角大楼文件], (New York: Bantam Books, 1971), 283.
 18. 例如, 参看 “President George W. Bush’s Address to the Nation Regarding Iraq” [布什总统关于伊拉克问题对全国的演讲], 7 September 2003, <http://www.johnstonsarchive.net/terrorism/bushiraq5.html>; 另参看 “President George W. Bush’s Address to the United Nations” [布什总统在联合国的演讲], 23 September 2003, <http://www.johnstonsarchive.net/terrorism/bushiraq6.html>.
 19. Barack Obama, “Remarks by the President in Address to the Nation on the End of Combat Operations in Iraq” [总统关于结束伊拉克作战行动对全国的演讲], (Washington, DC: White House, Office of the Press Secretary, 31 August 2010), <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2010/08/31/remarks-president-address-nation-end-combat-operations-iraq>.
 20. Ahmed Rashid, *Descent into Chaos: The U.S. and the Disaster in Pakistan, Afghanistan, and Central Asia* [陷入混乱: 美国以及巴基斯坦、阿富汗和中亚的灾难], (New York: Viking, 2008), 219—39, 265—92.
 21. Steven Lee Myers and Alissa J. Rubin, “U.S. Scales Back Political Goals for Iraqi Unity” [美国降低伊拉克团结的政治目标], *New York Times*, 25 November 2007.
 22. Barack Obama, “Remarks by the President in Address to the Nation on the Way Forward in Afghanistan and Pakistan” [总统关于阿富汗和巴基斯坦局势前景对全国的演讲], [United States Military Academy at West Point, West Point, New York] (Washington, DC: White House, Office of the Press Secretary, 1 December 2009), <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/remarks-president-address-nation-way-forward-afghanistan-and-pakistan>.
 23. Mark Clodfelter, *The Limits of Air Power: The American Bombing of North Vietnam* [空中力量的局限性: 美国对北越的轰炸], (Lincoln: University of Nebraska Press, 2006), 59—60.
 24. Headquarters USAF, *Analysis of Effectiveness of Interdiction in Southeast Asia, Second Progress Report* [在东南亚进行遮断轰炸的有效性分析, 第二份进度报告], May 1966, Air Force Historical Research Agency, Maxwell AFB, AL, file

- K168.187-21, 7; 另参看 Senate, Committee on Armed Services, Preparedness Investigating Subcommittee, Air War against North Vietnam [对北越的空中战争], 90th Cong., 1st sess., 25 August 1967, pt. 4, 299.
25. Raphael Littauer and Norman Uphoff, eds., *The Air War in Indochina* [印度支那的空中战争], (Boston: Beacon Press, 1972), 11, 168—72; 另参看 Earl H. Tilford Jr., *Crosswinds: The Air Force's Setup in Vietnam* [侧风飞行: 空军在越南的部署], (College Station: Texas A&M University Press, 1993), 109.
26. NSSM 1 (February 1969), Congressional Record [国会记录], 118, pt. 13 (10 May 1972), 16833.
27. A-4 飞行员 John Buchanan 在接受口述历史采访时讲述了这些事件, 详见 Harry Maurer, ed., *Strange Ground: Americans in Vietnam, 1945—1975: An Oral History* [异域见闻录: 美国人在越南, 1945-1975: 口述历史], (New York: Henry Holt and Company, 1989), 371—80. 尤其请参看第 377—78 页。
28. Sandra Jontz and Kendra Helmer, “Still Going: War Emphasizes Need to Keep Aircraft Carriers” [继续远航: 战争凸显需要保留航空母舰], *Stars and Stripes*, “Freedom in Iraq” ed., June 2003, 25, <http://www.stripes.com/mideast/iraq.pdf>; 另参看 Eliot A. Cohen, “The Mystique of U.S. Air Power” [美国空中力量的神秘性], *Foreign Affairs* 73, no. 1 (January—February 1994): 110.
29. William M. Arkin, “Bad News in the Good News” [好消息中的坏消息], *Washingtonpost.com*, 12 November 2001.
30. Susan B. Glasser, “Afghans Live and Die with U.S. Mistakes” [美国的错误主宰阿富汗人的生与死], *Washington Post*, 20 February 2002.
31. “Database,” *Iraq Body Count* [“数据库”, 伊拉克死亡人数统计], <http://www.iraqbodycount.net/database>. 2003 年 3 月 19 日至 5 月 1 日的数据显示, 空投弹药可能导致至少 1,612 名和至多 1,855 名平民死亡, 但是这些数字并未包括巴格达几所医院报告的因不明原因遭受战争伤害而死亡的 1,473 名至 2,000 名伊拉克非作战人员。
32. Edward Doyle and Samuel Lipsman, *America Takes Over, 1965—67* [美国接手, 1965-67] (Boston: Boston Publishing Company, 1982), 60.
33. 见注释 7, 第 309 页。
34. 见注释 7, 第 309 页。
35. 见注释 7, 第 101 页。
36. Defense Manpower Data Center—Data, Analysis and Programs Division, “Global War on Terrorism: [Casualties] by Reason, October 7, 2001 through November 10, 2010” [全球反恐战争: 按原因分类的 [伤亡统计], 2001 年 10 月 7 日至 2010 年 11 月 10 日], http://siadapp.dmdc.osd.mil/personnel/CASUALTY/gwot_reason.pdf. 总共有 2,195 名美国人在伊拉克死于路边炸弹; 在过去三年, 路边炸弹的杀伤率并未下跌。参看 Rick Atkinson, “The Single Most Effective Weapon against Our Deployed Forces” [对付我们作战部队唯一最有效的武器], *Washington Post*, 30 September 2007.
37. Defense Manpower Data Center, “Global War on Terrorism” [全球反恐战争]。
38. Chart, “Afghanistan IED Data for Stratcomm” [为战略司令部编制的路边炸弹数据], November 2010, Joint Improvised Explosive Device Defeat Organization (JIEDDO). “有效的”路边炸弹攻击系指导致伤亡的攻击。
39. Josh White, “U.S. Boosts Its Use of Airstrikes in Iraq” [美国在伊拉克加强空袭], *Washington Post*, 17 January 2008.
40. Ernesto Londoño and Amit R. Paley, “In Iraq, a Surge in U.S. Airstrikes” [美国在伊拉克空袭剧增], *Washington Post*, 23 May 2008; 另参看 Tom Vanden Brook, “Drone Attacks Hit High in Iraq” [无人机攻击在伊拉克增多], *USA Today*, 29 April 2008. 单是在 2008 年 4 月, “捕食者”无人机就实施了 11 次“地狱火”导弹攻击, 比这场战争中以前单月“捕食者”最高攻击次数增加了将近一倍。
41. 见注释 40 中 Londoño and Paley 文。
42. 见注释 39。
43. Jason Motlagh, “U.S. to Limit Air Power in Afghanistan” [美国将在阿富汗约束空中力量的使用], *Washington Times*, 24 June 2009.
44. 同上。
45. Paul von Zielbauer, “U.S. Investigates Civilian Toll in Airstrike, but Holds Insurgents Responsible” [美国调查空袭中平民死亡, 但认为责任在叛乱分子], *New York Times*, 13 October 2007. 在 2008 年 5 月 2 日对“萨德尔城一个犯罪分子指挥与控制中心”进行精确弹药空袭之后, 美军代表也是这番说词。电视报道和目击证人的阐述显示, 炸弹落在—

家医院附近，导致平民受伤，但是“美军官员反复指责什叶派战士在人口密集地区作战，并说他们应该对美军导弹袭击造成的平民死亡负责。”参看 Amit R. Paley, “5 U.S., 2 Georgian Troops Die in Iraq, Officials Say” [相关官员说，5名美军和2名格鲁吉亚军人在伊拉克阵亡], Washington Post, 4 May 2008.

46. Solomon Moore, “U.S. Bombs Iraqi Insurgent Hideouts” [美国轰炸伊拉克叛乱分子藏身之所], New York Times, 11 January 2008.
47. 同上。
48. 见注释 39。
49. USAFCENT Public Affairs Directorate, “Combined Forces Air Component Commander 2007—2010 Airpower Statistics” [联军空中部队指挥官 2007-2010 年空中力量统计], 31 October 2010, <http://timeswampland.files.wordpress.com/2010/11/afd-101030-001.pdf>.
50. Noah Shachtman, “Bombs Away: Afghan Air War Peaks with 1,000 Strikes in October” [狂轰滥炸：阿富汗空战在 10 月达到 1,000 次空袭的高峰], Danger Room, 10 November 2010, <http://www.wired.com/dangerroom/2010/11/bombs-away-afghan-air-war-peaks-with-1000-strikes-in-october/>.
51. 同上。
52. Luke N. Condra et al., The Effect of Civilian Casualties in Afghanistan and Iraq [阿富汗和伊拉克平民伤亡的影响], Working Paper 16152 (Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, July 2010), [1], “Abstract,” <https://afghancoin.harmonieweb.org/Lists/Announcements/Attachments/4/working%20paper.pdf>.
53. 同上，第 3 页。
54. 同上，第 4 页。
55. 同上，第 2—4 页。
56. Bill Roggio and Alexander Mayer, “Charting the Data for US Airstrikes in Pakistan, 2004—2010” [美国在巴基斯坦的空袭统计数据，2004-2010], Long War Journal, <http://www.longwarjournal.org/pakistan-strikes.php>. 另参看 Greg Miller, “U.S. Seeks More Drone Strikes to Slow Insurgents” [美国试图增加无人机攻击以求遏制叛乱分子], Washington Post, 20 November 2010.
57. Mark Mazzetti and Eric Schmitt, “C.I.A. Steps Up Drone Attacks on Taliban in Pakistan” [中央情报局在巴基斯坦增加对塔利班的无人机攻击], New York Times, 27 September 2010.
58. 见注释 56 中 Roggio and Mayer 文；并参看 Bill Roggio and Alexander Mayer, “Senior al Qaeda and Taliban Leaders Killed in US Airstrikes in Pakistan, 2004—2010” [被美国在巴基斯坦的空袭炸死的基地组织和塔利班高层领导人], Long War Journal, <http://www.longwarjournal.org/pakistan-strikes-hvts.php>.
59. David Kilcullen and Andrew McDonald Exum, “Death from Above, Outrage Down Below” [空袭死亡和民众的愤怒], New York Times, 16 May 2009.
60. Robert A. Pape and James K. Feldman, Cutting the Fuse: The Explosion of Global Suicide Terrorism and How to Stop It [切断导火索：全球恐怖主义自杀行动骤增及抵挡的对策], (Chicago: University of Chicago Press, 2010), 164—66.
61. Tony Corn, “World War IV as Fourth-Generation Warfare” [第四次世界大战和第四代战争], Policy Review, web special, January 2006, 8, <http://www.hoover.org/publications/policy-review/article/6526>.



马克·克洛德菲特博士 (Dr. Mark Clodfelter), 美国空军军官学院毕业生, 内布拉斯加大学文科硕士, 北卡罗来纳大学 Chapel Hill 校区博士, 现任国家战争学院军事战略学教授。他曾担任美国空军军官达 23 年, 其间在雷达部队服役并担任教职。他两度在空军军官学院教授历史, 升任该院军事历史部主任, 并成为阿拉巴马州马克斯韦尔空军基地的高级空天研究学院的创始教师之一。他也曾担任北卡罗来纳大学空军预备役军官训练团支队司令官。克洛德菲特博士的著作包括: “空中力量的局限: 美国对北越的轰炸” (内布拉斯加大学出版社, 2006 年) 和新近出版的 “有益的轰炸: 美国空中力量的渐进基础, 1917—1945 年” (内布拉斯加大学出版社, 2010 年)。



我们欢迎读者品评本刊文章，或提出有关改进刊物质量的任何建议。请用电子邮件将评论直接发给 aspj.chinese@yahoo.com。编辑部可能按版面需要对读者来信及作者答复做适当编辑。

读者评论“占据一席：向空军协调官放权”

豪斯杰中将是德高望重身经多战的空军老战士，其文章“占据一席：向空军协调官放权”（英文版 2010 年冬季刊，中文版 2011 年春季刊）再一次及时提醒我们：领导打仗说到底要靠人，人的亲临和在场，以及人与人之间的关系，对引导战争的发展非常重要。我还十分欣赏将军的另一个明智表述，即我们必须集中控制高需求 / 低密度作战资产，这对充分运用空中力量与生俱来的灵活性和远程能力以及对经济合理使用作战能力而言，都有重大影响。

但我对将军的这篇好文章也有保留，未敢苟同将军所称的“我的意图……是保证地面指挥官取得成功。”我提出疑义，是因为有些读者会将此话误解为我们从头至尾必须以地面为中心，除此战法之外，其他任何作战方式都不可能实现国家在阿富汗的战略目标，甚至不可能在任何冲突中实现战略目标。我觉得，对将军这段话的更好解释应该是：始终把完成全局使命作为重点，不可偏废和偏向，例如不可只是简单地保障某军种指挥官取得成功，无论是地面军种还是其他军种。换句话说，完成作战使命需要联合努力，而非只重视支持某一个军种组成部队。从更广义的角度看“联合”，目前的情况是，真正意义上的联合大概处于我多年所见的最低程度。空军向姐妹军种提供了巨大的支持（鲜有回馈），却吃力不讨好，甚至适得其反。尤其是，我担心我们空军越来越把自己看成是一个附属军种、一个只向地面指挥官提供服务的军种。这对国家而言不是好事。我们不应该忘记，在 2001 年，只用几个星期就击

溃塔利班组织的，是各军种中的空中力量，虽然地面部队的辅助也必不可少。不幸的是，在此之后，各种以地面部队为中心而忽视联合作战的战略大行其道，把早期的成功挥霍殆尽。

看来，现在是在我们的战法中重新加强天空意识（不是以天空为中心）的时候了。请注意：“天空意识”的核心，不只是关乎空军，甚至不只是关乎空中力量，而是指一种更明智的作战方式；它强调的是战略目标，它最基本的做法是寻找机会削弱敌人使用武器进行反抗的能力，从而实现我方目标。在这个意义上，它义无反顾地全盘否定地面军种对那种经常充满血腥且代价高昂的“肉搏战”的嗜好。用老前辈巴顿将军的话来解释，就是不能眼看着另一个同伴为着理想而赴死——如果我们能置自身于安全距离之外而歼敌，何乐而不为。天空意识意味着以俗语所说的“不公平决斗”干掉敌人，言下之意（虽不总是这样），就是运用敌人没有或者还没有掌握的技术来占据优势。这也包括震慑敌人，让他知道自己面对的对手是不知道怜悯、没有意识的机器，这个机器会无情地追击他，赶尽杀绝，绝不手软。天空意识的目的是散布原始恐惧，如果运用得当，其所生成的心理作用不仅使敌人心生恐惧，更使之彻底绝望，最终心理崩溃。这种战法要么摧毁其意志，要么摧毁其肉体，从而无情地迫使敌人二者择一，选择自己的命运。

空军，就要从空军角度看问题，就要把空军不同于其地面姐妹军种的独特视角带入战争。我甚至觉得，地面指挥官和其他军种指挥官需要的，正是这一点。我们有必要记

住国防部次长傅罗尼 (Michelle Flournoy) 的告诫：“在八十年代和九十年代早期，空军是 [国防部内] 开创新战略思维的先锋，有力推动了战争的作战新观念和新方式。那时候的空军在五角大楼简直就是思想领袖的化身。而后光环褪色，空军渐渐沉寂，虽然今天的形势比以往更迫切呼唤着空军的这种思维创新精神。”（参看“Remarks to the US Air Force Senior Leader Orientation Course” [在美国空军高级领导人辅导班上的讲话]，(speech, Air University, 14 August 2009), <http://www.au.af.mil/au/aunews/archive/2009/0419/Articles/USDPRemarks.htm>) 我认为豪斯杰中将的文章对于帮助空军重新树立明智作战意识而言，是迈出了关键的一步。让我们正确理解这篇文章，万不可误读误解而失其本意。

Charles J. Dunlap Jr., 美国空军退役少校
美国北卡罗来纳州杜克大学

读者评论“美国的阿富汗战略和此战略对美国空军的影响”

“美国的阿富汗战略和此战略对美国空军的影响”一文分析美军在阿富汗战略将分为三步，其一，帮助建立起一个“稳定的民主型政府”；其二，在很可能没有彻底消灭基地组织的情况下坚决按计划“撤出地面部队”；其三，对基地组织残余实施“围堵”以“把叛乱分子的威胁围堵在可控范围内”。虽然作者的原意是以这种战略预测为铺垫来论证美国空军如何在未来的长期围堵战略中发挥重要作用以免沦为“危机军种”，我想就围堵战略本身发表看法。

围堵——围而堵之最终克之，我想作者提出围堵战略是想以最小代价来获取最大收益。我国古代常用断绝水源、粮食、与城外的通信等方式来迫使坚城投降。元军忽必烈围克襄阳就用了 6 年；清军皇太极围困锦州（守将是祖大寿）也用了近 2 年；唐朝安史之乱中叛军围困张巡守卫的睢阳，久攻不克。

可见这种战略成本（时间、人力、后勤）较高，而胜算不太高。至于作者所引证的冷战期间西方通过围堵“成功地对付了一个极其强劲的对手”，我想，最具决定性的因素，可能不是物理“围堵”本身，而是西方在意识形态的对抗中占了上风。

所以我的观点是：若对对手实施围堵战略，在围堵的同时，需从敌人内部进行突破。如情报机构应派人打入敌人内部，或策反敌方高级领导人，或做出一些使敌人互相猜忌、窝里斗的事情。宣传机构应在意识形态领域大力开展宣传战、攻心战、诱诈战，这样几管齐下，效果可能会更好。

李欣
中国河北省

读者评论“确保空军指挥与控制机制适应二十一世纪联合作战需要”

布里德勒夫中将和泰勒少校合写的“确保空军指挥与控制机制适应二十一世纪联合作战需要”（英文版 2010 年秋季刊，中文版 2010 年冬季刊）是篇佳文，其中强调了在我军指挥控制体系中保持良好私人关系和灵活性的必要性。但有一点值得商榷：即作者所称“……在第一个问题 [联合部队各方之间的相互信任] 上，指挥官个人之间的关系往往比指挥体系关系更加重要。”我担心此话容易让人误解为正式的指挥关系本身无足轻重，或者无需花费时间精力去思考如何理顺指挥关系。因此我觉得，更正确的说法应该是：指挥关系和私人关系都重要，两者缺一，都可能削弱我军指挥体系的效能。

Edward J. Groening, 空军退役上校
美国佛罗里达州 Hurlburt Field