

英国军地联合公布军用高超声速飞机验证机概念方案

力办、国防部国防科学与技术实验室、罗罗公司和反作用发动机 (REL) 公司在范堡罗航展上联合公开展出了一个名为“5号方案”(Concept V) 的军用高超声速飞机模型及其概念方案，引发各界高度关注。该方案最大关注点在于一种综合集成了罗罗公司涡轮发动机技术和 REL 公司先进预冷器技术的高速动力，为全球高超声速飞机动力 (特别是高速涡轮动力) 发展开辟了一条新的技术路线。本次公开展示也标志着，英国成为继美国之后，第二个官方公开宣布军用高超声速飞机研发计划的国家。这无疑将为全球高超声速飞机技术发展注入新的强大力量。



英国“5号方案”高超声速飞机验证机概念设想图。

本要求显著低于4亿英镑(约4.8亿美元)，以便与竞争对手取得成本优势。《航空周刊》记者在现场报道时提到该机可用于ISR用途。罗罗和REL在官方报道中提出希望该项目技术成果能够扩展应用于太空进入、点对点快速运输等更多用途。

综合以上信息，英国 HVX 项目的“5号方案”高超飞机验证机关键指标包括：
 最大速度：Ma5；
 外形尺寸：长9米，翼展4米；
 起飞总重：约4~6吨量级(根据外形尺寸粗略估算)；
 动力系统：单台，预冷器+涡轮发动机+加力/亚燃冲压燃烧室；
 涡轮发动机具体型号不详；
 水平起降，重复使用。

3. 进展与计划
 HVX 项目目前正在开展全尺寸发动机(集成了预冷器和涡轮发动机)试验样机的冷态通流试验，同步开展飞行验证机的方案设计，计划今年完成发动机热试车。《航空周刊》和REL公司都提到，HVX项目要在2030年代实现Ma5以上飞行。英国BBC在航展采访报道中提到，项目组计划在2020年代完成一型验证机首飞。

综合相关信息推测，HVX项目可能会按照逐步扩展飞行包线的思路，分步实施，即第一步利用几年时间，在2030年以前完成一型速度不超过Ma5的验证机飞行试验；然后再利用该验证机或再研新一型验证机继续拓展包线，在2030年以后实现Ma5以上甚至更高速度的飞行试验。

4. 参研机构简介
 英国皇家空军快速能力办公室(RCO)：成立于2017年，旨在采用创新的思维和灵活的方式，通过跨专业的联合团队，不断拓展作战系统的性能边界，快速提升皇家空军作战能力。该办正在主管开展的项目包括下一代战斗机、无人蜂群、作战云、无人忠诚僚机、新型燃料、空天飞机等等。在HVX项目中并不是出资方，推测在该项目中负责未来装备和技术采办需求指导，并可能负责协调军队和工业部门的相关科研资源。

英国国防科学与技术实验室(DSTL)：在HVX项目中主要负责(1)利用英国国防部的研究经费支持开展潜在航空装备概念及其可行性研究；(2)探索这些航空装备的潜在作战用途；(3)最大化相关科技成果的共享和应用，如高超声速武器研究项目。

英国国防安全战略投资基金：由英国政府与英国商业银行(BBB)成立于2014年，是英国政府下属的经济政策性银行，主要面向中小科技企业共同发起，面向先进军民两用技术，以领投方式牵引带动长期投资。主要投资方向包括：数据分析与人工智能、商业航天与机器人、金融技术、新材料与能源等等。在HVX项目中主要负责提

供科研经费，但未披露具体数额。罗罗公司是全球顶尖的航空发动机巨头，研制生产了大量军用和民用飞机使用的涡轮发动机。REL公司是一家致力于研发空天发动机技术的高科技中小企业，长期开展基于强预冷技术的协同吸气式火箭发动机(即“佩刀”)技术研发。罗罗和REL负责HVX项目最核心的部分——高速发动机的研发。

英国 REL 公司高超声速技术发展背景

英国作为老牌科技强国，曾在上世纪掀起过一轮空天飞机研究热潮，提出了“霍托尔”(Hotol)等空天飞机方案和研究计划，但也同样随着全球空天飞机研究降温而偃息。当



“佩刀”发动机核心技术——预冷器。

时有部分技术骨干在国家项目下马后，创立了REL公司，继续攻关空天动力技术，直到现在。这家企业在很长一段时间内，几乎成为了英国在高超声速技术领域的独苗，基本可以代表英国高超声速技术的发展历程。

1) 2015年以前，聚焦单级入轨空天飞机等远期应用，全力开展全尺寸“佩刀”发动机技术攻关

REL公司自1989年创立以来，长期将“云霄塔”单级入轨空天飞机作为应用背景，全力开展全尺寸“佩刀”发动机技术攻关。截至2015年，累计募集到了1.76亿美元(包括公司创建初期私人投资7500万美元，英国政府投资9000万美元和欧洲航天局投资1100万美元)资金。而REL曾预估研制“佩刀”发动机需要4.7亿美元经费。虽然经费不足以研制整机，但REL公司仍取得了不少技术突破。2012年完成了预冷器地面原理验证，2015年前又相继通过了欧洲航天局和美国空军研究实验室对其方案可行性的审查。

2) 2015年以后，广泛寻求飞行试验机、作战飞机等近期应用，灵活开展小型发动机、预冷器等技术攻关

2015~2018年，英美三家航空工

业巨头——BAE系统公司、波音公司和罗罗公司相继完成了对REL的战略投资，不仅投入了7050万美元投资，还带来了强大的技术支持和更多的成果转化需求。依靠巨头的扶持和牵引，REL公司迅速调整方向，不再执着于宏伟激进的空天飞机及其大型发动机，改为更加务实地瞄准战斗机尺度的军民用飞行器动力需求，聚焦攻关核心技术——预冷器技术，且更加注重技术和产品的快速转化应用。REL公司认为更小型的发动机成本更低、周期更短、配装更加灵活，很多零部件技术(如涡轮泵、压气机等)都可



“佩刀”全尺寸发动机(左)和1/4缩比验证机(右)概念图。

以选用货架产品的成果，有利于进一步降低成本和周期，能够更快、更容易找到潜在应用方向，比如X试验机、高超声速飞行验证机、多级入轨飞行器等。目前REL公司主要的发展方



配装“佩刀”发动机的“云霄塔”单级入轨飞行器概念图。

向有三个：(1)持续攻关部件级关键技术。2019年成功完成了预冷器在Ma5条件下的地面考核试验，2022年完成了预冷器系统的设计与制造集成，即将开展地面试验。(2)率先研制中型发动机。放弃一步到位研制80吨推力的“佩刀”发动机，改为研制尺寸仅为“佩刀”1/4的中型发动机(推力20吨级，与F-35战斗机用的F135发动机相当)。(3)参与飞机技术研发。与BAE系统、罗罗等战略合作伙伴合作，利用预冷器技术来提升航空发动机性能、扩展涡轮发动机的包线、提升机载热管理系统效率、支撑混合电推进等，积极参与英国新一代战斗机研发项目。

3) REL公司近年大力开展了基于换热预冷的涡轮扩包线技术研究

REL与罗罗在2018年就开始联合开展利用预冷器来扩展涡轮发动机速度上限的研究。2019年，英国皇家空军快速能力办启动了一个经费1200万美元的科研项目，要求BAE系统、罗罗和REL联合开展基于“佩刀”发动机预冷器的涡轮扩包线技术研究。该项目以罗罗公司EJ200涡扇发动机(配装“台风”战斗机)为试验平台，主要研究在不改涡轮发动机的前提下，预冷器与EJ200涡扇发动机的集成方案，以及不同方案带来的扩包

线等效果。其中一种集成方案就是把预冷器像“甜甜圈”一样沿进气道布置一圈，以此来冷却进气道抽吸的来流空气；同时项目组也研究过将预冷器安装在发动机后端，冷却排出的燃气以增强红外隐身。该项目周期2年(2019~2021年)，该项目研究成果的应用背景之一是皇家空军快速能力办正在主导开展的“暴风”新一代战斗机研发项目(即“未来空战系统技术倡议”FCAS TI项目)。

几点研判

1) HVX项目的首要目标是突破高速动力，且速度很可能不会超过Ma5

HVX项目的主要承研单位是REL公司和罗罗公司，这两家都是发动机研发单位，飞机方案设计由DSTL负责，而不是传统的飞机总体单位——BAE

系统公司，这已经充分说明至少在目前阶段(也许是该项目的一阶段或一期)的主要目标还是动力技术，飞机方案更多是为了牵引动力需求，并同步解决部分飞发一体化的问题。判断该项目首阶段飞行验证机速度很可能不会超过Ma5的原因主要有以下几点：(1)皇家空军快速能力办已经明确表达了不会一步到位达到Ma5，同时还会探索论证Ma6、8、10等更高速度的可行性；此外REL公布的高速也是2030年以后再实现Ma5+。(2)HVX项目的高速动力技术最初是以新一代战斗机“暴风”为应用背景而研发的，这就意味着它的速度指标不会有过高的要求。

(3)根据上文披露的动力方案，速度达到Ma3以后开始模式转换，涡轮发动机会逐步封闭起来，进气直接进入后端的加力/亚燃冲压燃烧室。这种布局更接近串联式TBCC，想要达到Ma5以上的速度会面临较大的内流阻力，显著降低推进效率。(4)美国空军早前探索过利用换热预冷技术将涡轮发动机扩展到Ma4级。早在2015年底，美国空军启动了“高马赫数耐久性预冷换热器”创新项目，目标是采用现代材料、制造和设计技术完成耐久性

系统公司，这已经充分说明至少在目前阶段(也许是该项目的一阶段或一期)的主要目标还是动力技术，飞机方案更多是为了牵引动力需求，并同步解决部分飞发一体化的问题。判断该项目首阶段飞行验证机速度很可能不会超过Ma5的原因主要有以下几点：(1)皇家空军快速能力办已经明确表达了不会一步到位达到Ma5，同时还会探索论证Ma6、8、10等更高速度的可行性；此外REL公布的高速也是2030年以后再实现Ma5+。(2)HVX项目的高速动力技术最初是以新一代战斗机“暴风”为应用背景而研发的，这就意味着它的速度指标不会有过高的要求。

(3)根据上文披露的动力方案，速度达到Ma3以后开始模式转换，涡轮发动机会逐步封闭起来，进气直接进入后端的加力/亚燃冲压燃烧室。这种布局更接近串联式TBCC，想要达到Ma5以上的速度会面临较大的内流阻力，显著降低推进效率。(4)美国空军早前探索过利用换热预冷技术将涡轮发动机扩展到Ma4级。早在2015年底，美国空军启动了“高马赫数耐久性预冷换热器”创新项目，目标是采用现代材料、制造和设计技术完成耐久性

系统公司，这已经充分说明至少在目前阶段(也许是该项目的一阶段或一期)的主要目标还是动力技术，飞机方案更多是为了牵引动力需求，并同步解决部分飞发一体化的问题。判断该项目首阶段飞行验证机速度很可能不会超过Ma5的原因主要有以下几点：(1)皇家空军快速能力办已经明确表达了不会一步到位达到Ma5，同时还会探索论证Ma6、8、10等更高速度的可行性；此外REL公布的高速也是2030年以后再实现Ma5+。(2)HVX项目的高速动力技术最初是以新一代战斗机“暴风”为应用背景而研发的，这就意味着它的速度指标不会有过高的要求。

(3)根据上文披露的动力方案，速度达到Ma3以后开始模式转换，涡轮发动机会逐步封闭起来，进气直接进入后端的加力/亚燃冲压燃烧室。这种布局更接近串联式TBCC，想要达到Ma5以上的速度会面临较大的内流阻力，显著降低推进效率。(4)美国空军早前探索过利用换热预冷技术将涡轮发动机扩展到Ma4级。早在2015年底，美国空军启动了“高马赫数耐久性预冷换热器”创新项目，目标是采用现代材料、制造和设计技术完成耐久性

报道中提到过用于ISR等任务，同时项目团队又提出希望该技术可拓展用于航天运载和点对点运输。这三类任务对飞机及动力的指标要求差异较大，会导致技术方案天差地别。这从侧面反映出该项目很可能现阶段还没有明确的作战需求，基本上仍处于技术推动的状态，未来发展存在较大不确定性。其次是燃料选用问题。REL公司独创的深度换热预冷技术高度依赖液氢这样的低温吸热燃料，但涡轮发动机要使用液氢燃料仍会面临不少工程问题。更关键的是，液氢燃料保障维护繁琐，难以满足军用飞机作战要求。如果换用航空煤油，换热效率又难以满足要求。推测该项目有可能会选用低温液态甲烷等新型燃料，兼顾换热和保障等要求，但依然会对飞机总体设计提出严峻挑战。更多的是飞机总体单位的问题。作为英国军用飞机总体的龙头企业，同时也是REL公司的战略投资方，BAE系统公司缺席项目团队的举动令人费解。即便现阶段首要目标是突破动力技术，但作为一个飞机和发动机高度融合的新型飞机项目，飞机总体单位的地位依然会为动力研制埋下很多隐患，这些隐患在后期飞机与发动机集成时一旦爆发，很可能会对项目造成颠覆性的影响。

3) HVX项目的重要意义在于为高超声速飞机高速涡轮动力开辟了一条全新路径。
 高超声速飞机需要覆盖从水平起飞到高超声速巡航的宽速度域工况，对动力提出了严苛要求。目前美国空军、DARPA等军方和波音、洛马等工业巨头公认的最优技术路线是涡轮冲压组合发动机(TBCC)，而高速涡轮就是其中的一个核心难点。全新研制高速涡轮发动机不仅技术难度大，而且周期长、成本高，只能作为一个远期选项。军方和工业部门更多地探索如何充分利用现役涡轮发动机进行改装，将工作上限从Ma2拓展到Ma3以上。目前采用最多的还是射流预冷扩包线技术，即往涡轮发动机中喷入水、甲醇、液氢等低温/常温介质，在降低进气总温的同时，增加进气流量，以显著增加高空高速状态的推力。该路线技术成熟度高，美国已完成了大量地面和飞行试验，美DARPA的AFRE项目、美空军“夸特马”验证机项目等都是采用的该技术路线。但缺点是比冲低、发动机寿命低。HVX项目提出的换热预冷扩包线技术如果能够解决冷源与燃料一体化、高效换热器等技术问题，实现预冷燃料完全燃烧、换热器减重减阻等，可能会是一种效率更高的扩包线技术。此外，高效换热器的应用也为高超声速飞机长时间大功率能源生成技术和热管理技术提供了更多解决方案，值得高度关注。

结束语

目前，除开洛马、波音等企业提出的项目，全球范围内由军方主导开展的高超声速飞机项目有美国空军“夸特马”验证机项目(详见)和英国皇家空军HVX验证机项目。对比发现，两个项目在定位、指标和方案等诸多关键点上高度趋同：定位都是重点突破组合动力技术，都将指标确定在Ma5一级(目前研判认为都很可能不超过Ma5)，验证机尺寸规模都在10米左右，总重都在4~6吨量级，都采用单发，都是利用现役涡轮发动机进行扩包线

ENABLING NEXT GENERATION HIGH-SPEED AND SUSTAINABLE FLIGHT

Transform the performance and efficiency of aircraft engines

Enable high speed - supersonic and hypersonic - flight capability

Support the drive towards more sustainable aviation

罗罗与REL战略合作达成的重点研究方向。

下150℃，大幅降低了技术难度，增加了可实现性。推测REL公司也很可能会采用类似的指标，以满足项目团队反复强调的“低成本和快速研制”要求。

2) HVX项目后续发展前景在需求和两端都还将面临多项挑战
 首先是作战需求不够明确。项目



英国“5号方案”高超声速飞机验证机模型。