

中国航空发动机的四面突围

序：

我国航空发动机的研制始于上世纪六十年代，大致经历了三个阶段，第一阶段是60年代至80年代中期，这一阶段主要特征是引进国外发动机仿制结合自主研发，第二阶段是80年代中期至90年代末期，这一阶段以自主研发为主，第三阶段是2000年初至今，经过近60年的发展，已经建立了相对完整的发动机研制生产体系，具备了涡桨、涡喷、涡扇、涡轴等各类发动机的系列研制生产能力，并向世界先进水平迈进。

大国产业

No.10

任正非讲过一个故事：上世纪70年代，英国罗·罗公司主动提出可以将他们的斯贝发动机卖给中国，而且愿意直接卖军用发动机。负责谈判的中方领导人大喜过望，要向英国科学家致敬，英国科学家却说，“要感谢的是中国科学家的伟大发明”。领导人回来后查是哪位科学家，是吴仲华。他在哪？在湖北务农。那赶紧调回北京去做热物理研究所的所长吧。

这是被戏剧化的爽文故事，后来被人证实与现实有一些出入。但可以肯定的是，斯贝发动机的三元流技术，的确是建立在“叶轮机械三元流动理论”基础上。1950年，吴仲华在纽约美国机械工程师学会年会上宣读论文，正式提出这一理论，后来被学界定为“吴氏通用理论”，理论中的基本方程则被称为“吴氏方程”，吴仲华的讲学录像曾一度被NASA作为培训教材。

任正非感慨的是，如果我们当初沿着吴仲华的基础理论，持续进行工程技术突破，今日我国航空发动机的局面或许会更加乐观。

2020年12月，美国商务部公布新的“军事最终用户”清单，58家中国公司中有八成与航空相关。这并不算是突如其来的坏消息，早在2020年初对中国商飞禁运的传闻，就一度引发国内对C919发动机可能断供的担忧。2020年的一头一尾，美国狙击的重点都是中国的航空工业，尤其是发动机。

作为一架飞机的心脏，航空发动机是人类迄今为止最为复杂的工程技术之一。目前能造飞机的国家不少，但真正能独立研制航空发动机的却只有美、俄、英、法、中五个联合国常任理事国。我国航空发动机建设始于上世纪50年代，从仿制和改进，到部分自主研发，再到完全独立研发，走过了一条波折重重的道路。

21世纪初期，随着“两机专项”的实施、中国航发的成立，我国航空发动机的发展开始进入追赶的快车道。在军用航发方向，自主研发的“太行”系列发动机已经依次批产，逐步摆脱进口依赖。在民用方向，配套C919的“长江”发动机CJ-1000A已经进入试制阶段，35吨级的CJ-2000也已于2020年实现了核心机点火试车，据传已开始首台验证机整机装配。

从上世纪90年代开始，中国关于航空发动机的各种反思和讨论就此起彼伏，一直绵延至今。问题早就找到了，难在如何解决。以“两机专项”和中国航发的成立为里程碑，中国开始了从技术创新到体制创新的四面突围。

从“若有若无”到“聚力发展”

“发展航空飞机固然重要，但赶不上发展导弹重要。——钱学森”

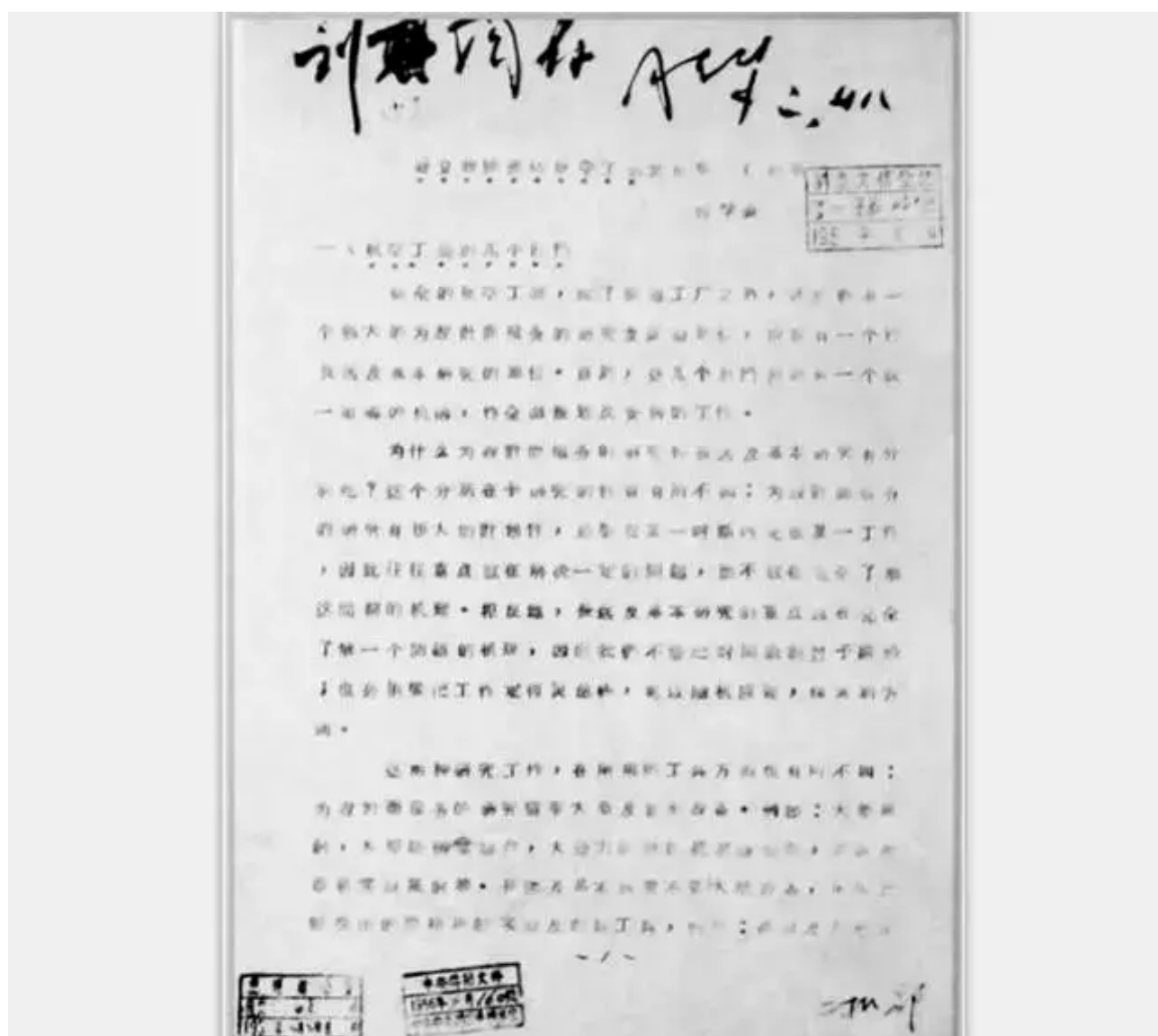
1958年，被誉为我国“航空发动机之父”的吴大观借着去英国访问的机会，在回国途中专程去了趟苏联，他要去向苏联航空工业部求证一件事。

传闻苏联成功发射世界上第一颗人造卫星后，赫鲁晓夫兴奋宣称，飞机今后都要进博物馆。意思是有了导弹技术以后，飞机就没什么用了。这个论调传到中国，在决策层引发了激烈争论。当时，中国已经在沈阳航空发动机厂根据苏联BK-1φ仿制出第一台涡喷发动机涡喷-5，安装该发动机的喷气战斗机歼5也在沈阳飞机厂冲上蓝天。

那接下来还要不要研制我们自己的发动机？吴大观去北京询问首长，首长说的很明确，打仗首先要考虑威力大的，况且飞机可以从国外买，导弹买不来。所幸苏联航空工业的部长们给他吃了定心丸：美国专家是有这个说法，赫鲁晓夫确实也这么讲过。但他们经过论证，认为这个说法不成立。

战争中，导弹虽然杀伤力巨大，但真正要征服对方还得靠飞机。所以，美国并没有停止搞战斗机，我们苏联也还在搞米格-21。

建国初期的新中国国力薄弱，只能优先发展紧要的科技。在“优先发展飞机还是优先发展导弹”的争论中，钱学森向中央提出《建立我国国防航空工业意见书》，主张集中力量发展火箭和导弹。中央在一系列调研讨论后，把航空航天作为一个整体看待，将注意力先行集中于突破导弹和火箭。最终“两弹一星”奠定了我国的国际地位和安全基石，也证明了钱学森的远见。



1956年2月，
钱学森向中央呈送的《建立我国国防航空工业意见书》

然而在火箭技术取得突破后的较长一段时间里，中央对航空工业发展迟迟没有整体规划，导致飞机尤其是航空发动机的自主研发缺乏战略牵引。政界学界还在为“航空工业是否属于高新技术”这一问题争论不休，直到1995年“九五计划”意见征求稿发布，航空技术依然没有列入高新技术。许多科学家开始着急了，由王大珩、师昌绪等7位德高望重的老专家联名，向国家领导人写信陈情。

专家们提出两点大力发展航空技术的理由：一是海湾战争证明，空中力量在现代战争中仍具有决定性作用；二是发展航空工业对国民经济的带动作用明显。专家们认为，我国航空技术与先进国家差距日益扩大，如不大力发展，不仅有军事上的危机，未来国内民航客机巨大的市场也将全部被外国人占领。

对于航空发动机，“两弹一星”勋章获得者王大珩院士更是用“游离”两字来形容，游离不等于没有，而是时有时无，若隐若现。

“游离”意味着投入不足。我国第一台自主设计的大推力发动机涡扇-6历时20年，研制经费共计1.5亿人民币，在研制关键阶段其中两年可用经费仅有200来万人民币。而同时期美国研制一台普通的大中型飞机的发动机，耗资约为20亿美元。

上世纪80年代，美国相继提出IHPTET(综合高性能涡轮发动机计划)、VAATE(先进涡轮发动机计划等预研项目，分别投入50亿和37亿美元。我国也在上世纪80年代提出了两项高性能发动机预研计划，但20年的总投入仅仅相当于美国一个季度的投入，即使算上同期货币购买力的因素，两者差距也十分巨大。

时间	发动机预研发展计划	经费/美元	参与单位
50 年代	航空推进技术探索发展计划	—	美国军方
70~80 年代	先进战术战斗机发动机计划(ATFE)	—	美国军方
	先进涡轮发动机燃气发生器计划 (ATEGG)	3000 万/年	
	飞机推进分系统综合计划 (APSI)	—	
70 年代	发动机部件改进计划	—	NASA
	高效节能发动机计划 (E3)	—	
	先进螺旋桨计划 (APT)	—	
	发动机热端部件技术计划 (HOST)	—	
1988-2005	高性能发动机综合技术(IHPTET)	50 亿	国防部高级计划研究局 (DAPAR)、陆军、海军、空军、NASA 和七家航空发动机公司
2006-2017	先进涡轮发动机计划 (VAATE)	37 亿	DAPAR、国防部办公室 (OSD)、陆军、海军、空军、NASA、能源部 (DOE) 和六家航空发动机公司，三家飞机制造商

数据来源：《燃气涡轮试验与研究》，钛禾产业研究院整理



美国的航空发动机预研计划

直到过去了大半个世纪，我们对航空发动机的战略价值和复杂性才有了更为深刻的认知。从2011年开始，工信部牵头对航空发动机与燃气轮机启动调研与论证；2012年“两机专项”批准立项。2016年3月，国务院印发的《“十三五”国家科技创新规划》中，航空发动机及燃气轮机位列第一。

“两机专项”的实施，意味着航空发动机作为国家战略重大项目，当下和未来一段时期内都将获得政策、资金和资源方面的强大支持，从根本上解决投入不足问题。截至2020年底，“两机专项”的投入已经达到3000亿元。

在政策和资金的有力支持下，我国航空发动机和燃气轮机技术正在加速追赶世界先进水平，实现历史性跨越。

从“飞机从属”到“飞发分离”

“飞机都没有了，还要发动机干什么？”

1982年，由于国家空军装备体制变化，歼-9和强-6飞机计划相继下马。作为其配套动力的涡扇-6发动机，也因为突然失去适用对象而面临下马，而此时涡扇-6已经历经了18年的艰难研制，刚刚通过24小时飞行前试车。从1964年开始方案研究到1984年停止研制，涡扇-6共历时20年，几乎凝聚了一代人的青春。据相关人员事后回忆：

“宣布中止研制的那一刻，吴大观潜然泪下，台上台下也哭成一片。”

因飞机下马而终止研制还有上海长征机械厂承担研制的涡扇-8。这台为运-10大飞机配套而生的大推力民用航空发动机，曾装载在波音707上成功试飞十几次，并作为“运-10”心脏飞到拉萨等地，累计飞行时间170小时，各项性能均达到设计标准。1985年，美国通用航空发动机分部副总裁克莱勃司来华参观，曾对涡扇-8赞叹不已：

“你们在10年前能完成这样一台复杂的发动机，的确是一个伟绩”。



随运-10下马而停产的涡扇-8

项目频繁下马既打击科研人积极性，也耽误发展时机。很长一段时间，我国航空发动机的发展路径是“使用维护—测绘仿制—改进型号—型号研制—预先研究”，跟美国的路径基本上是反过来的。美国当时已经建立起成熟的预研机制，走的是“技术预研—核心机—试验验证”的稳进路线。

2001年，吴大观在《对航空工业两个重大历史问题的思考》一文中指出，航空工业制定的“科研先行、动力先行”的方针并没有得到共识和贯彻，事实上沦为一般口号。

预研无法贯彻的根本原因之一在于，发动机的研制在当时从属于飞机，即“一厂一所一型号”。一个厂要研制一款飞机，才会有一个研究所去研发一款配套的发动机。发动机跟着飞机走，飞机项目下马，发动机研制也随之停摆。

另一方面，由于航发研制长期缺少技术储备和预先研究，航空发动机的研制周期远大于飞机研制周期，飞机往往等不起发动机，自主研制不如买别人现成。对于这个问题，航空动力专家刘大响院士曾经有过反思：

“长期以来过分强调以飞机带发动机，以型号带预研，对先期技术验证重视不够，许多关键技术型号立项之前未能得到有效突破，往往型号研制与技术攻关、部件排故同步进行，造成型号研制反反复复，大大拖延了研制周期”。

在航空工业专家的集体反思下，“飞发分离”的呼吁持续高涨。2009年，中国航发商用航空发动机有限责任公司（简称“中国航发商发”）成立，成为中国大型客机发动机项目的总承制单位，着手研制中国民用航空发动机。2016年，中国航空发动机集团有限公司（简称“中国航发”）正式成立，由国资委、北京国有资本经营管理中心、中国航空工业集团有限公司、中国商用飞机有限责任公司共同出资组建。

自此，中国拥有了国家级的专业化航空发动机企业集团，意味着至少在体制上，航发研制彻底摆脱了对飞机研制的依附，走向独立发展的星辰大海。

从“测绘仿制”到“自主研发”

“能买就买，买不了就仿。”

任正非讲的故事背景是上世纪70年代，事实上，从英国引进“斯贝”发动机只是一个意外插曲。早期我国大多数航空发动机来自于对苏联发动机的测绘仿制。作为航空工业的核心技术，西方国家对中国自始至终是封锁策略。在苏联断绝援助后，我国航空工业一度陷入无发可用的窘境。1972年，英国罗·罗公司主动提出愿意向中国提供斯贝MK202发动机，并同时转让技术，让人颇为意外。



斯贝MK202发动机

1975年12月，中英双方签订了约7700万英镑的购买合同。原计划分两步走，先用3年时间学会利用进口零件组装出合格的斯贝，再用5年实现国产化。1980年，根据英国毛料研制组装的斯贝发动机在英国完成模拟试车。但在80年代的国民经济调整中，面临着与涡扇-6一样的现实，国产化进程因此中止了十几年。

斯贝国产化前后持续了30年，令人感慨。因为等不来发动机，为保障飞机生产，我们先把存放了20年的库存斯贝发动机拿来使用，然后又从英国购入一批二手发动机。一直坚持到2010年左右，涡扇-9才终于跟上进度，实现了持续量产供应。

从斯贝发展而来的涡扇-9“秦岭”发动机属于“部分自主设计”，在此之前，我们绝大多数是“仿制和改进”苏联的发动机。长期的测仿，导致研究所技术能力甚至不如工厂，技术无法消化，无法形成自己的研制体系。直到2002年国产涡喷-14“昆仑”发动机定型，中国才算是第一次走完了自行研制的全过程。

2005年12月，由沈阳黎明发动机公司抓总研制的国产涡扇-10“太行”通过满寿命测试，成为我国首个具有自主知识产权的大推力涡扇发动机。“太行”从1978年预研，到1987年立项，再到2005年12月底完成设计定型审查考核，历时27年，这个过程可以说是磕磕绊绊，甚至发生过试验机爆炸的事故。直到2011年，涡扇-10的最大加力推力被确定为125KN，意味着这台被人们寄予厚望的“国产心脏”总算进入量产状态。“太行”总算走过了被网友诟病“不太行”的阶段，近来年的表现也算得上争气，截止目前没有一架搭载“太行”的战机因发动机故障坠毁。

从仿制和改进，到部分自主研发，再到拥有自主知识产权，中国航空工业人清醒认识到，关键领域必须要自力更生，核心技术必须要自己掌握。然而作为人类最复杂的工业领域，航空发动机的研制不能闭门造车。涡扇-10的研制也曾博采众家之长，例如核心机原理借鉴了美国通用的F-110，为满足国内实际装机需求，又引进了苏-27作为试飞平台，并且大量消化吸收了苏-27配套动力系统AL-31F的技术经验。和中国当前许多国产化的装备技术一样，涡扇-10既不照抄俄发，也不盲随美发，而是同时吸取美俄两国的经验，再探索出一条符合中国实际的技术路线。

发动机类型	发动机型号	装机型号	研制单位	生产单位
涡喷发动机	涡喷-5	米格-15、歼-5	仿制	沈阳黎明
	涡喷-6	歼-6/强-5	仿制	沈阳黎明/成发公司
	涡喷-7	歼-7/歼-8	仿制	沈阳黎明/贵州黎阳
	涡喷-8	轰-6	仿制	西航公司
	涡喷-13	歼-7III	仿制	贵州黎阳/成发公司
	涡喷-14（昆仑）	歼-8H/F/G	沈发研究所	沈阳黎明/西航公司
涡扇发动机	涡扇-6	未投产	沈发研究所	-
	涡扇-8	运-10	长征机械厂	成发厂/上发厂
	涡扇-9（秦岭）	歼轰-7	仿制	西航公司
	涡扇-10（太行）	歼-10/歼-11	沈发研究所	沈阳黎明/西航公司
	涡扇-11	K-8 教练机	仿制	南方公司
	涡扇-13	-	贵发研究所	贵州黎阳
	涡扇-15（峨眉）	歼-20	沈发研究所	西航公司/成发公司
	涡扇-18	-	仿制	成发公司
	涡扇-20	运-20	燃研院	西航公司
涡桨发动机	涡桨-5	运-7/水轰-5	仿制	南方公司
	涡桨-6	运-8 /安-12	仿制	南方公司
	涡桨-9	运-12	株洲研究所	南方公司
	涡桨-10	-	株洲研究所	南方公司
涡轴发动机	涡轴-5	直-6	仿制	哈尔滨东安
	涡轴-6	直-8	仿制	常州兰翔机械厂
	涡轴-8	直-9/直-10	仿制	南方公司
	涡轴-9	直-10	株洲研究所	南方公司
	涡轴-10	直-20	株洲研究所	南方公司
	涡轴-11	-	株洲研究所	南方公司
	涡轴-16	直-15/EC175	中法合作	南方公司

数据来源：《中国航空工业60年大事记》，钛禾产业研究院整理

从“填空补缺”到“望其项背”，最终确保和发达国家“并驾齐驱”的过程并不容易。中国航发成立后，确立了“三步走”的路线图规划。第一步，缩小与国外航空发动机先进水平的差距，初步建立航空发动机自主创新研发体系，打下发展基础；第二步，基本建成航空发动机自主创新研发体系；第三步，走完代表性型号自主研制过程，建成自主创新的基础研究、产品发展和产业体系，基本实现自主创新发展的战略转型，中国航发成为具有国际竞争力的创新型企业。

从“封闭独立”到“开放融合”

“小核心、大协作、专业化、开放式。”

前面半个世纪，中国航空发动机的发展并不顺遂，上世纪90年代至本世纪初，科技界出现许多关于中国航空发动机发展滞后的反思。老专家们总结“我们对航空技术发展规律的认知不足，缺乏长远计划和稳定规划”，但更深层次的原因还是在于体制。

美国军工产业模式是以企业为主角，波音、洛马、诺格等军民两用集团作为主制造商，雷神、霍尔韦尔、普惠、通用等集团为其提供分系统配套，往下还有TI、ADI等数千家军民两用企业负责供应材料和零部件，**形成开放协作、逐级竞争、专业细分的金字塔状军民融合生态圈。**

冷战期间，美国曾经通过政府操纵下的横向竞争机制，扶持起了GE和PW两大航发巨头。1968年，美国国防部要求普惠和通用各制造和试验一台发动机。这种政府主导的“择优扶强”效果明显，最终成就了大名鼎鼎通用F-110发动机和普惠F-100发动机。



F110-GE发动机

普惠最初在竞争中获胜，首先签下合同。通用虽然在一开始的竞争中处于不利地位，但后续推出改进型F110-GE-129，普惠为与之抗衡又研制出性能改进型的F100-PW-229。1984年2月，美国空军按双承包商采购策略，对F100和F110按比例采购，基本上雨露均沾。两家公司正是在这样的“赛马”机制和订单扶持下，一路成长为全球顶级航空发动机公司。

而长期以来，我国军工产业模式是由带有较强行政色彩的军工集团负责抓总，以高度计划的方式对科研任务进行统筹、协调、保护。总体研究所到总装厂，配套研究所到配套厂之间大多为“纵向协作、条块割裂”的状态，军用民用两条线，形成研制分离、缺乏竞争、自我保护的封闭垄断体系。

“两机专项”和中国航发的成立，为其保驾护航的是国家军民融合战略的深入推进。2016年中共中央、国务院、中央军委发布的《关于经济建设和国防建设融合发展的意见》明确提出，深化国防科技工业体制改革，进一步打破行业封闭，扩大引入社会资本，突出核心能力，放开一般能力，推进社会化大协作，推进军工企业专业化重组。

打破军民二元分离，推进开放融合既是体制上的突破，也是产业链的重塑与整合。以航空工业领域为例，美国一直奉行的“主制造商-供应商”模式正在被全球航空制造企业纷纷效仿。在这个模式下，一架飞机的研制需要供应商早期介入，共同参与研发。

主制造商分拆自己属下的制造生产单元，转而成为系统集成制造角色，摆脱了“制造生产”这个需要高负荷才能出效益的“负重”环节，增强应对市场变化的实力；供应商则可专注于某一分系统的研发和技术实力储备，做到更加专业化和高效率。

航空发动机作为一架飞机的核心系统，开放协作也可极大提升研制效率。例如罗罗公司从 2004年开始，就只生产核心零部件和附加值最高的30%，而将余下的70%转包出去，从而在风险可控的前提下，尽可能地降低发动机全部零件的制造与采购成本。

中国航发在此基础上进一步确定了“小核心、大协作、专业化、开放式”的发展模式，意味着中国航空发动机的研制可以在全国乃至全球范围内吸纳更广泛的外部力量参与协作，企业则可集中力量提升关键核心能力。据披露资料显示，“长江”系列发动机目前有350多家供应商参与，初步形成全球供应链。同时，16个国家的69 家供应商有意愿参与中国商用发动机项目。

历史教训已经证明，关起门来造不好发动机。航空发动机由上万个精密零件集成组装而成，研制周期漫长且涉及领域广。自主研制航空发动机，对当下的基础学科、设计、材料、工艺都是艰巨挑战。中国制造业门类齐全，可调用资源丰富，但基础工业提供的支撑还远远不够。**通过开放融合，打通上游产业链上（如材料、机械加工、计量测试等）的标准和数据壁垒，可加速制造资源的整合，丰富完善产业链，最大限度实现全行业的降本增效。**

因为历史上的问题和当下的技术封锁，注定中国航空发动机的突围道路依然坎坷，需要极大的决心、耐心和智慧。但是这条路上初显的曙光，已经给我们指明方向，只希望将创新和改革坚持不懈的推进下去，不要再让中国航空工业重复半个多世纪以来的隐痛和泪水。

参考文献：

- [1] 吴大观，对航空工业两个重大历史问题的思考，2001
- [2] 杨可民，100位新中国成立以来感动中国人物：吴大观，2012
- [3] 赵忆宁，大国工程，2018
- [4] 刘大响\金捷\彭友梅\胡晓煜，大型飞机发动机的发展现状和关键技术分析，2008
- [5] 刘大响，航空动力发展的历史性机遇，2005
- [6] 韩新伟、陈良猷、吴昊，加快中国航空发动机发展的对策研究，2003
- [7] 温俊峰，航空发动机发展简述与思考，世界客机研究与发展，1998
- [8] 韩蕊、丁香，航空发动机的发展简述和思考，2012
- [9] 裴昱，大飞机“国产心脏”再有进展 CR929发动机验证机试车，2020
- [10] 刘振敏，从体制创新看中国航空发动机产业发展，2019