

《孙子兵法》和航空发动机的发展

The Art of War of Sun Tzu and the Development of Aero Engine

■ 王奉明/中国航发研究院

《孙子兵法》是战争的经典，但其影响又不局限于战争，还涉及政治、经济、地理、心理学，以及凌驾这一切之上的哲学其中蕴含经过千年锤炼的思想，对我国航空发动机战略地位的确立、航空发动机发展战略的制定、航空发动机研制基础的建设、航空发动机型号攻关和技术发展方向的确立等都带来一定的启发。

作为我国历史上思想最丰富年代所产生的兵书，《孙子兵法》浓缩了中国古代最优秀的战略智慧精华，一直被尊为“兵学圣典”，充满了谋略的智慧，不但在军事上的影响遍及世界，震撼古今，而且在商战、科研等领域的战略制定中发挥着重要的作用，许多企业家和政治家都不约而同地认为《孙子兵法》是赢得当今激烈竞争的强大武器。由于航空动力重要的战略地位和蕴含的巨大商机，该领域的国际竞争非常激烈，完全不亚于炮火硝烟的战争。从兵法“其用战也，胜久则钝兵挫锐，攻城则力屈，久暴师则国用不足”“兵贵胜、不贵久”的角度讲，航空发动机的研制在一定程度上犯有兵法之忌——航空发动机的研制不同于一般的战役，而是一场持久的攻坚战，需要长期的准备、科学的决策、严谨的部署、周密的组织和具有高专业素质的科研人员为之锲而不舍地长期奋斗。

航空发动机的战略地位

“兵者，国之大事也，死生之地，存亡之道，不可不察也。”——《始计篇》



航空发动机是飞机的“心脏”，其内部的气动、热力和结构材料特性非常复杂，是世界公认的复杂多学科综合性系统工程，研制难度极大。航空动力发展水平是一个国家军事实力和综合国力的重要标志之一，纵观世界军事强国，无一不把航空动力作为国家战略性高技术产业来抓，始终把航空动力放在核心、优先发展的战略地位。

美国之所以能够长期占据世界航空动力的领先地位，是与其非常重视航空动力技术、实施战略性优先发展密不可分的。美国早在1915年就组建了美国国家航空咨询委员会。美国总统里根上台初期，为了缓解国内矛盾曾建议将美国国家航空航天局（NASA）申请的航空研究经费砍掉50%、关停刘易斯航空技术研究中心，这一提议被指责为“扼

杀美国21世纪航空”，最终总统科学顾问小组通过对NASA和政府航空研究和技术发展中的作用调查，得出“航空技术对美国仍然十分重要”“航空研究经费应该保持稳定”的结论。美国总审计长1980年向美国国会报告，对美国20世纪70年代以来的航空发动机管理经验进行总结时指出，“新发动机的发展比飞机机体需要更长的时间，如果后者是决定进度的因素，二者就不应同时开始”。美国将喷气发动机放在与核武器、雷达等同样重要的位置来抓，在美国国防部列出的国防十大关键技术领域中，发动机技术位居第二。美国参谋长联席会议在《2010联合设想》中指出“航空平台成功的关键是推进系统”。对航空动力技术的重视和将其放在优先发展的战略地位，确保了美国长期牢牢占据世界航空动力的领先地位。

一方面，与飞机研制相比，航空发动机的研制周期通常较长。例如，第一代超声速战斗机研制周期约为4年，配套发动机的研制周期为5年左右；第二代战斗机研制周期为5~7年，配套发动机的研制周期为6~8年；第三代战斗机研制周期为6~10年，配套发动机的研制周期为10~15年；第四代战斗机研制周期约10年，配套发动机的研制周期需15年以上。另一方面，航空发动机又是一个国家航空装备发展的基础，其研制成败对于一个国家的军事实力和商业竞争力有着重要的影响。因此，航空发动机的研制为“国之大事”，航空动力发展水平关系到一个国家在国际竞争舞台上的“存亡之道”，对航空动力技术在一个国家科技装备发展中

的地位的确立“不可不察”。这也是航空动力发达国家都坚持优先发展航空动力技术的政策，提出“动力先行”战略的原因。

航空发动机的发展战略

“凡先处战地而待敌者佚，后处战地而趋战者劳。故善战者，致人而不致于人。” ——《虚实篇》

航空动力技术的创新发展不仅对航空武器和航空运输装备的发展有直接影响，而且还可为舰船、坦克、车辆、电站、泵站提供优良动力，对能源、交通、机械、化工、冶金、材料等基础工业和科学技术的发展产生巨大的带动作用，所以航空动力是少数发达国家高度垄断、严格保密的技术。世界上可以独立研制飞机的国家很多，但迄今为止能完全独立研制先进航空发动机的却只有美、俄（苏联）、英、法等国。这些国家之所以能在航空动力领域取得成功，关键之一就是确立了符合各自国情的航空动力自主发展的战略。

美国和苏联（俄罗斯）之所以能成为航空发动机型谱体系最全、发动机种类最多的两个航空超级大国，主要原因之一就是国家坚持自主研发发动机，通过努力达到了“先处战地而待敌者佚”的目标，避免了处于“致于人”的境地。最初，美国在第二次世界大战后自英国引进喷气发动机专利；之后，美国国防部明确要求只对GE公司自行设计的产品进行购买；最后，美国凭借大量的技术积累和雄厚的经济实力，提出了航空发动机“全面优势”的发展战略，即发动机每项技术都追求优势以达到整体先进。苏联（俄

罗斯）在军事技术上一直是美国的主要对手，在引进尼恩发动机专利后，在仿制成功的基础上立即转入自行设计；但其并没有盲目追求“先进”，而是根据自身国情进行发动机的设计，例如，在设计RD-93发动机时，其焊接技术没有达到美国的水平，便利用传统的螺栓进行发动机叶盘的固定，也取得了较好的效果。

法国虽然可以从美国引进F110、F100等先进发动机，但是法国一直坚持使用性能略差于美国的国产阿塔发动机配装“幻影”战斗机，正是这种“立足本国、自主发展、集中突破”的航空发动机发展战略的确立，使法国只用十几年就赶上了世界先进水平，成功研制出推重比10一级的发动机。英国联合意大利、德国共同开发航空技术，采取“跟踪美国、保持特色、领先世界其他国家”的发展战略。

正是这些适合本国国情的航空动力发展战略的确立，奠定了以上四国的航空动力强国地位。

航空发动机研制基础的建设

“凡用兵之法，驰车千驷，革车千乘，带甲十万，千里馈粮；内外之费，宾客之用，胶漆之材，车甲之奉，日费千金，然后十万之师举矣。”

——《作战篇》

航空发动机技术是一项多学科技术，涉及空气动力、燃烧、传热传质、结构强度、机械振动、自动控制、电子、电气等大量工程技术领域，研制一型先进的发动机与一个国家的材料、设计、制造、工艺等基础性工业息息相关，并且耗资巨大，动辄投资数十亿美元，需要以强大的综合国力为基础，巨大的

物力、人力投入为保障，长期的技术积累和丰富的型号研制经验为支撑。例如，美国的F404发动机耗资11亿美元；F119发动机耗资40多亿美元；法国研制M88发动机耗资16亿美元。可以毫不夸张地说，航空发动机的研制需要“驰车千驷，革车千乘，带甲十万，千里馈粮”。

由以上发动机的研制可以看到，一型先进航空发动机的研制不是一件只靠理想就能够完成的事情，而是要有相当的技术积累、工业基础和强大的综合国力才能实现。如美、俄、英、法无一不是老牌工业强国、军事强国，即使是这些发达国家，也需要举国之力才能进行先进的大推力涡扇发动机的研制。美国尽管科技发达、经济实力雄厚，也只有普惠和GE两家公司能够生产先进战斗机用大推力涡扇发动机；俄罗斯也只有土星科研生产联合体能够生产先进的战斗机用大推力涡扇发动机；英国和法国也分别只有一家公司能生产先进的战斗机用大推力涡扇发动机。

航空发动机的研制必须将“内外之费，宾客之用，胶漆之材，车甲之奉”考虑周全，有“日费千金”的思想准备，才能举“十万之师”，进行航空发动机的研制。如美国航空发动机的研制通常分为“基础研究、确定用户需求、装备解决方案分析、技术成熟和风险降低、工程研制与制造、生产与部署、使用与保障”几个阶段，其中基础研究尤其受到重视。基础研究是原始创新的前提，例如，人类工程学的产生催生了“人机工程”的理念；由于结构疲劳理论的产生，“发动机结

构完整性”的概念得以提出；由于断裂力学的问世，产生了航空发动机“损伤容限”的概念；价值工程学催生了航空发动机“全生命周期成本”的研究。在预先研究方面，美国更是不惜投入巨资。预先研究计划，如“综合高性能涡轮发动机技术”（IHPTET）计划（1987—2005年，平均每年耗资3亿美元左右，政府投资50%以上）、“多用途经济可承受性先进涡轮发动机”（VAATE）计划（2006—2017年，投资水平与IHPTET计划相当）等取得的成果，使美国能够对他国长期保持航空动力技术优势。

另外，为了降低一些新技术在新型号上的研制风险，如推力矢量技术、高空长航时无人机动力技术等，美国还开展了专项技术演示验证。在型号研制方面，美国非常重视研制规范的制定。早在1951年7月就颁布了MIL-E-5007A，并不断发展完善，20世纪70年代美国颁布了MIL-E-5007D，80年代颁布了MIL-E-5007E/F（海军用），到90年代又颁布了JSGS-87231A（空军用），为催生性能、可靠性和经济性皆优的发动机发挥了重要的作用。除此之外，美国根据大量的外场使用经验，认识到航空发动机应该“边使用，边改进”，他们在F100、F110、F404等航空发动机的使用过程中，针对存在的问题实施了发动机部件改进计划和高周疲劳研究计划等。为了同美国竞争，欧洲联合各个国家的力量，制订了一些发动机的预研、发展计划，如英、德、意联合实施了“先进核心军用发动机”（ACME）计划，英国和法

国联合实施了“先进军用发动机技术”（AMET）计划，也取得了重大成就。俄罗斯也有类似的计划，但由于经济原因进展较慢。正是这些周密论证、严密组织、巨资投入计划的实施，分别催生了军用推重比10一级的航空发动机和先进的商用大涵道比涡扇发动机，使美国和欧洲成为世界先进军用和商用航空发动机最为发达的两极。

当然这些计划和研究工作的开展是建立在经济基础上的，美国、俄罗斯（苏联）、英国、法国都投入了大量的发动机研究发展资金。据统计，以上四个国家在20世纪80年代末90年代初，每年用于发动机科研的经费分别为25亿、16亿、8亿和5亿美元，航空动力行业的基建技改投资和研究发展经费均占整个航空工业的四分之一以上，并有逐年增加的趋势。

航空发动机的型号攻关

“途有所不由，军有所不击，城有所不攻，地有所不争。”——《九变篇》

我国工业基础相对薄弱，没有现成的航空发动机研制经验可供借鉴，却被先进的高新燃气技术封锁包围，要想突出重围，缩短与国际先进航空技术水平的差距，就要找准技术突破口，集中力量攻关。

由于航空发动机科技含量高、技术难度大、研制耗资多，尤其是先进的战斗机用大推力涡扇发动机因其飞行任务多变，使用载荷谱复杂，致使发动机工作环境更加恶劣，其技术含量更高，研制难度进一步增大。当前，世界航空动力技术的发展呈加速的趋势，美国、法国和

欧洲的其他几个国家都研制出了推重比10一级的先进军用航空发动机(F119、M88-2、EJ200)以及推重大、油耗低、环保好的高水平民用大涵道比涡扇发动机(PW5000、遑达900),俄罗斯推重比10一级的发动机也取得了初步成功。而且西方发达国家正在预先研究推重比能够达到15~20的更为先进的航空动力技术。

从军用航空发动机长达50多年的发展历程看,美、俄(苏联)、英、法等国都根据市场需求和提高研制能力的需要,对航空发动机行业进行了整合,并集中全部的力量进行先进战斗机用大推力涡扇发动机的研制,走“同一时期研制一个型号”的道路。20世纪70年代,普惠公司的F100发动机是美国空军大推力发动机的主要供应商,直到20世纪80年代,美国空军受制于F100的故障频发与普惠公司的“傲慢”,不得不引进竞争,才开展了F110发动机的研制,两型发动机能够同时配装F-15和F-16飞机;俄罗斯长期以来只研制了AL-31F一型战斗机用大推力涡扇发动机。虽然美、俄根据飞机的需求衍生了众多型号的大推力军用涡扇发动机,但都是在F100、F110和AL-31F发动机成熟后,在其基础上改进发展而来。美国20世纪80年代开展的推重比10一级发动机的研制,虽然在验证机阶段同时研制了XF119和XF120两型验证机,但到工程制造与开发(EMD)阶段后,只选择了F119发动机进行投资研制装备。可见,对于先进的战斗机用大推力涡扇发动机,只有美国具备了“两型发动机保障一型飞机”的

能力,但其局面形成的历程也不是两型发动机同时开展研制的、两型发动机也不是同一公司的产品,其根本目的是为了产生竞争以提高发动机的外场使用保障服务。

技术发展方向的确立

“知彼知己,百战不殆;不知彼而知己,一胜一负;不知彼,不知己,每战必殆。”——《谋攻篇》

我国由于先进航空发动机的自主创新能力不足,以航空动力技术发达国家的发展道路为参照,将是我国现在以至将来很长时间内航空动力发展的格局。但是,确立我国航空发动机技术指标、技术发展方向时,不仅要基于我国的国情,还要基于对国外航空动力技术发展情况的正确评估。

通常情况下,国外技术资料是我们了解技术发展趋势的重要渠道,这些资料所包含信息的可信度是我们做到“知彼”所面临的一个大挑战。对于国外已经成熟、并在实践中被证明具有极大军事效益的技术,我们应该毫不犹豫地学习。而对于一些国外正在研制或处于概念研究阶段的一些成果,则要对其可信度进行认真论证,因为国外对这些事物的认知程度也处于初级阶段,随着事物的发展认知程度呈螺旋式发展会出现反复,资料情报中很可能存在错误,甚至有些还是“间谍”情报,用来误导对手的判断。例如,美国的“星球大战”计划,就是针对苏联而发布的“间谍”情报。20世纪50年代美国某些专家提出了“有了导弹以后,航空技术、飞机就可以进博物馆了,今后要靠导弹打天下”

的言论。在苏联,虽然赫鲁晓夫认同这个观点,但是经过科学家的认真论证,推翻了这个观点,而这一观点却给我国航空工业的发展带来了困惑。美国推重比10一级的发动机涵道比最初报道为0.3,后来为了满足飞机增加推力的需求而调整为0.4以上,这给我国先进发动机的研制也带来了一定的影响。

从以上例子可以看出,如果对国外技术资料的有效性缺乏准确的评估,极易引起对国外技术的把握缺乏准确性,可能会给我国航空装备研制带来一定的误导。

结束语

“道者,令民与上同意也,故可与之死,可与之生,而不畏危也。”

——《始计篇》

目前,上至国家和军方领导,下到普通的科研工作者和普通百姓,都意识到航空动力是我国装备发展的“瓶颈”,是阻碍我国成为航空强国的“拦路虎”,对国产自主研发的先进航空动力都有一种迫切期盼,可以说,中国航空发动机的研制已到了“上下同欲”的地步。在这样的有利时机下,乘着国家号召“自主创新”的春风,明确航空发动机的优先发展战略,确立“动力先行”的发展路线,科学统筹航空发动机研制基础建设,深入论证发动机型号和技术发展方向,我国的航空发动机就一定能迎难而上,研制出先进的航空动力,使中国迈入世界航空强国的行列。

航空动力

(王奉明,中国航发研究院,高级工程师,从事航空发动机总体论证研究)