

印度航空发动机发展策略分析

Development Strategy of India's Aero Engine Industry

■ 王翔宇 刘金超 / 中国航发研究院

在经历了卡佛里（Kaveri）发动机项目漫长的研发过程后，印度航空发动机的发展从自主研制和技术引进之间的左右摇摆、不断反复，逐渐过渡到了优先实现小型航空发动机国产化、借助国际合作发展大推力航空发动机的新阶段。

回顾过去几十年的发展历程，印度航空发动机的研制已被证明是其航空产业寻求自力更生的关键弱点。由印度斯坦航空公司（HAL）研制的印度第一型国产战斗机HF-24就曾饱受进口航空发动机问题的困扰，印度燃气涡轮研究所（GTRE）主导的卡佛里涡扇发动机项目也是频频受挫。低估技术研发的复杂性、关键制造设备和材料缺乏、试验基础设施和相关专业人员严重不足都是制约印度航空发动机国产化的瓶颈问题。随着国际政治经济形势日益风云变幻，印度以灵活的外交姿态在激烈的大国博弈中左右逢源、长袖善舞，航空发动机研发国际合作水平也提升到了前所未有的高度。印度航空发动机产业是否迎来了跨越式发展的全新契机，印度航空发动机自研能力能否借助技术引进获得历史性突破正受到业界广泛关注。

卡佛里发动机研发一波三折

1989年，在法国斯奈克玛公司（现赛峰集团）的技术支持下，GTRE开始研发卡佛里发动机，计划配装印度轻型战斗机（LCA）“光辉”，实现飞机和发动机的双国产化。最初的



卡佛里发动机

计划是1997年完成产品交付，但直到1995年卡佛里核心机才运转成功，1996年整机进行了地面试车。1998年由于开展核试验，美国和欧洲对印度进行了大范围经济制裁，航空工业领域的合作一度暂停。印度只得转向俄罗斯以获取地面高空台和空中试飞平台相关能力支持，但发动机超重和推力不足等问题始终无法解决，印度军方不得不向GE公司订购F404发动机为LCA提供动力，2008年印度表示卡佛里发动机已经和LCA项目脱钩。

2010年，卡佛里发动机在俄

罗斯进行了不同海拔高度下的飞行性能测试，发动机整机的最大推力维持在70~75kN，较F404发动机85kN的推力存在相当大的差距。因此，卡佛里发动机在随后的LCA升级型号LCA Mk2的选发竞争中输给GE公司更为先进的F414发动机也就不足为奇了，至于印度正在研发的先进中型战斗机（AMCA）高达110kN的动力需求更是卡佛里发动机望尘莫及的。2014年，由于性能不达标、研发进度严重滞后以及缺乏飞机平台需求牵引，印度宣布终止这个历时近30年的发动机研发项



卡佛里发动机在经过改装的伊尔-76飞行平台上进行测试

目，此时总投资已经从最初的8970万美元飙升到了33亿美元。

沉寂了一段时间后，作为36架“阵风”战斗机军购合同补偿条款的一部分，印度和赛峰集团于2016年重启卡佛里发动机项目，希望通过大量引进M88发动机的相关技术完成卡佛里发动机的升级迭代，使其能够在10年内集成应用到LCA原型机上。从2017年的试飞结果来看，除了在高海拔地区性能下降、推力不足这些老生常谈的缺陷外，卡佛里发动机在大推力状态时的噪声问题历时近两年仍无法解决。赛峰集团认为小修小补已无法完成后续研制工作，建议直接以M88发动机核心机为基础开发改进型卡佛里发动机。但毫无疑问，这样做不但需要进一步追加海量的投资，还将使赛峰集团在卡佛里发动机项目中占据绝对的主导权，使得所谓的改进型卡佛里发动机很有可能就是换壳的M88发动机。

在规避发动机加力系统技术风险的同时，为了避免卡佛里发动机

项目的研发努力被完全浪费、平息长期以来公众的不满与指责，2019年印度又开始进行卡佛里发动机衍生型的研发，这款设计推力为52kN的无加力发动机将配套印度首型隐身无人作战飞机（UCAV），预计起飞质量不超过15t，飞行高度为9144m。根据2023年年初公开的报道，卡佛里发动机衍生型验证机已完成超过140h的测试，包括在印度班加罗尔GTRE基地进行的70h地面试车和在俄罗斯中央航空发动机研究院（CIAM）进行的75h飞行测试。一个不得不承认的事实是，时至今日印度自身仍旧缺乏像伊尔-76那样的大型航空发动机飞行试验平台。GTRE曾计划在2024—2025年完成所有测试、在2026年前开始量产，然而由于新冠疫情和俄乌冲突等因素的影响，想要达成这一预期可能十分困难。

国际合作大行其道

卡佛里发动机艰难坎坷的研发之路，在一定程度上让印度认识到深厚扎实的基础技术和通用技术积

累、现代化项目管理机制以及完备的试验测试能力的重要性，但建立科学完整的设计、试验和制造体系绝非朝夕之功。在有声有色的大国梦诉求下，印度既无法放弃对航空发动机过高技术指标的坚持，也难以容忍单纯依靠自身努力步步为营、稳扎稳打所附带的时间成本。这种情况下借助国际合作引进相关技术就成为印度又好又快发展航空发动机的捷径。近年来，印度巨大的统战价值凸显，在空前宽松的外部环境下，印度政府和欧美国家一拍即合启动了一系列的航空发动机国际合作项目。

作为长期以来卡佛里发动机项目的合作方，赛峰集团在印度航空发动机发展过程中一直发挥着举足轻重的作用。2021年2月，赛峰集团和HAL签署谅解备忘录，为在印度进行M88发动机的零部件制造、装配以及相关技术转让扫清了障碍。这不仅是印度采购第二批“阵风”战斗机的前奏，也使得M88发动机成为了未来LCA的潜在动力选项。2023年7月，法国政府同意赛峰集团与印度联合进行M88发动机深度改型，使其最大推力达到110~120kN以完成与AMCA的集成。赛峰集团将主导发动机热端部件的开发和整机集成，GTRE则负责冷端部件研发以及后续的维护、修理和大修（MRO）业务。与此同时，赛峰集团还与HAL在印度成立合资公司，为印度未来13t级多用途直升机提供动力方案。

2023年4月，在从印度航空公司获得逾达XWB-97有史以来最大的订单后不久，罗罗公司表示有意针对AMCA和印度共同开发一型新

的军用航空发动机。在与意大利 Avio 公司、西班牙 ITP 公司以及德国 MTU 公司合作研制配装“台风”战斗机的 EJ200 发动机过程中，罗罗公司积累了丰富的经验，尽管 EJ200 发动机符合 AMCA 的配装要求，不过罗罗公司宣称对印合作项目将完全基于自身技术储备和实践开展，保证不涉及 EJ200 发动机的知识产权纠葛，印度也可获得新发动机的所有知识产权，这对印度来说无疑是一个相当有吸引力的条件。同时，该方案也表明参与 EJ200 发动机项目的其他合作方都会被排除在外。

从 2004 年开始，GE 公司的 F404 和 F414 发动机陆续成为 LCA 及其升级型号 LCA Mk2 开发和生产计划的一部分，并将为印度新一代双发舰载机（TEDBF）提供动力。2023 年 6 月，GE 公司和 HAL 签署谅解备忘录，计划在印度设厂联合生产 F414 发动机（代号 F414-INS6），相关合作将涉及 80% 的技术转让、估价约为 10 亿美元。尽管协议内容不包括 F414 发动机在设计过程中的关键技术共享，但这也是美国政府首次允许 GE 公司帮助其非盟国完善航空发动机制造能力。不仅如此，GE 公司



印度新一代双发舰载机

对 AMCA 的动力需求同样表现出浓厚的兴趣，借助此次 F414 发动机交易大单，GE 公司与印度政府和军方的联系进一步加深，某种程度上利好其涉足的 AMCA 选发竞争。

出于拉拢印度并在巨额军贸订单中获利的考虑，当前欧美国家对印度通过技术引进提升航空发动机研发能力的迫切需求的响应格外积极，双边合作进入了蜜月期。不过以市场换技术的“拿来主义”并不意味着可以坐享其成式地提升航空发动机研发能力，即便将 M88 和 F414

的生产线原封不动送给印度，想要从头到尾了解其中的技术原理又谈何容易。

此外，还有几点需要关注。一是至少目前来看印度对俄武器装备依赖并未被明显削弱，2023 年 7 月，印度表示原定于 2024 年二季度在俄罗斯开展的卡佛里发动机衍生型下一阶段飞行试验计划不变，俄罗斯的技术支持在印度航空发动机研发活动中依然不可或缺；二是围绕 AMCA 的动力选型，赛峰集团、罗罗公司和 GE 公司之间已形成竞争态



印度先进中型战斗机



印度 13t 级多用途直升机

势（甚至还有俄罗斯配装苏-57战斗机的AL-41发动机），不过从平衡各方利益的角度出发，印度似乎很可能会重复“万国造”模式、选择一机多发的方案。三是印度糟糕的经商环境给航空发动机合作项目带来了较大不确定因素，复杂而繁琐的法律体系和行政程序、低效的政府官僚机构、薄弱的基础设施建设以及紧张的劳资关系正在使印度沦为“外企坟场”，事实上赛峰集团对印度“税务恐怖主义”的抱怨已经见诸媒体。

印度航空发动机发展路线

受印度国防部（MoD）委托，总部位于德里的防务战略咨询公司Insighteon于2022年8月进行了名为“印度航空发动机生态系统：识别并克服障碍”的互动推演，目的是确定印度航空发动机生态系统的发展路线图。

来自印度政府工业和外交部门、印度国防研究及发展组织（DRDO）、印度空间研究组织（IARO）、印度国家航空航天实验室（NAL）、HAL、GTRE以及其他私营企业的高级代表一致认为，发展印度国产化航空发动机是一种战略需要，与国外公司的联合开发模式并不会产生新的产品设计或技术改进/升级能力，外国政府对航空发动机及其零部件的出口限制风险始终存在，印度别无选择，只能发展自己的航空发动机并为产品建立具有高度韧性的供应链。

无人机和低成本巡航导弹正在深刻改变着未来作战模式，相应的小型燃气涡轮发动机已成为增长最快的军用动力市场，预计到2050年其市场价值将超过700亿美元，Insighteon公司在发展路线图中认为



卡佛里发动机衍生型将成为SWIFT等无人机的动力装置

这是印度后续自主发展航空发动机最为可行、最为现实的方向。一方面，卡佛里发动机衍生型有望成为3t以上各类无人作战平台的动力装置，其资源调配应被置于最高优先级，特别是完善相关地面与飞行试验条件已经到了刻不容缓的地步；另一方面，将小型航空发动机纳入积极国产化清单、限制进口规模，在HAL和GTRE之外鼓励印度其他学术机构、国家实验室和私营企业进入小型航空发动机领域，打造知识产权共享的研发和生产伙伴（DCPP）联合体。

在面向AMCA的110kN推力级发动机开发过程中，HAL和GTRE将以特殊目的实体（SPV）模式与私营企业和欧美航空发动机原始设备制造商（OEM）合作，由于不占有多数股权，

新成立的合资公司并不会以完全的政府实体身份出现，这不但大大降低了政府的研发投入、简化了未来的采购流程，也能够提升合作伙伴的参与热情，更容易通过欧美国家的技术转让审查。

为强化印度政府对航空发动机的全局性统筹，Insighteon公司呼吁成立国家航空发动机发展委员会（NCAED），由印度国家级领导人牵头，作为独立自治机构直接对航空发动机全生命周期的各个环节进行把控决策、提供资金支持，促进不同的型号项目、不同的专业学科之间的成果交互与整合。

整体来看，立足于加速印度航空发动机国产化这一顶层战略需求，Insighteon公司认为“困难的问题需要不同的解决方案和领导方法”，对

印度国产战斗机及其动力需求预测（来源：Insighteon公司）

时间周期/年	飞机型号	需求量/架	发动机型号
2024—2030	LCA	83	F404
2026—2032	LCA Mk2	73	F414-INS6
2034—2040	TEDBF	57	F414-INS6
2033—2036	AMCA（非隐身版）	40	F414-INS6
2036—2046	AMCA（隐身版）	100	110kN推力级发动机

印度主要在研航空发动机项目

研发机构	型号名称	推力/功率级	拟配装飞行平台
HAL	HTSE-1200 涡轴	1200kW	3 ~ 6t 级直升机
	HTFE-25 涡扇	25kN	单发教练机、公务机和UCAV
	PTAE-7 升级型涡喷	3.43kN	1 ~ 2t 级忠诚僚机
	130kW 级涡桨		F414-INS6
GTRE	卡佛里衍生型	46kN	UCAV
	110kN 涡扇		AMCA
DRDO	1kN 涡喷		1t 级以下靶机
	2.7kN 涡喷		空地导弹
	4.4kN 涡扇		巡航导弹
NAL	2.7kN 涡喷		小型UCAV (代号Rustom II)
其他 私营企业	巴拉特铸造 (Bharat Forge) 公司 : 1.2kN、1.6kN、2.0kN、3.0kN 和 4.0kN 推力级涡喷发动机 帕尼安 (Paninian) 公司 : 3kN、3.7kN、4.5kN、8.5 ~ 12.5kN 推力级各类涡喷涡扇发动机		

未来20年印度燃气涡轮发动机需求量预测 (来源: Insighteon公司)

飞行平台	发动机需求量/台	发动机主要来源
战斗机	2000	基于SPV模式自研、全球采购
教练机	700	HAL自研、获欧美许可后自行生产
3 ~ 6t 级直升机	4000	HAL自研
10 ~ 13t 级直升机	1000	全球采购
3 ~ 8t 级UCAV	3000	GTRE自研
2t 级中空长航时无人机	2000	HAL/GTRE/NAL/私营企业自研
巡航导弹、小型忠诚僚机	3000	HAL/DRDO/私营企业自研
靶机	2000	HAL/DRDO/私营企业自研

于小型航空发动机, 由于其技术壁垒相对较低、卡佛里发动机项目也有了一定基础, 印度应全力推进自研进程, 特别是要发动私营企业的力量打破HAL和GTRE的研发垄断、实现资源和技术相互补充; 对于大推力战斗机动力系统, 借助于国际合作逐步提升技术能力是印度当下的必然选择, 印度政府应通过明确固定的订货量、缩短订单谈判与付款周期等方式吸引欧美OEM参与,

降低合资公司的运营风险, 并构建跨部门、跨行业的航空发动机发展高端协调机制对其监督指导。特别值得一提的是, 印度航空发动机发展路线图并没有给出一个具体清晰的国产化时间表。

结束语

印度在2020年发布的国防采购程序(DAP)中将航空发动机定义为国家重要项目, 政府正在通过给予航空

发动机特殊地位的方式表达其推动航空发动机自主发展的意图。近些年, 印度航空发动机由小到大分步演进的发展策略已较为明确, 以卡佛里发动机项目前期成果为基础吸纳社会各界力量发力小型航空发动机的自研, 依托一系列国际合作尽可能获取大推力航空发动机关键技术从而满足其国产战斗机的现实动力需求。不过这无疑是一种非常理想化的布局, 很难掩盖并扭转印度对国外航空发动机依赖日渐加深的事实。

抛开印度是否具备消化吸收外部先进技术的产业基础和配套计划不谈, 自主研制和技术引进之间的天然矛盾不可能通过划定不同的细分市场和产品就被隔离开来, 卡佛里发动机项目惨痛的教训和宽松的国际合作环境不断冲击着印度自主研发航空发动机的信心和决心。在巨大的外部诱惑面前, 印度能够多大程度保持定力仍旧是个未知。引用印度媒体对此的评论就是, “印度寻求的航空发动机未来会是什么样子——这个问题非常复杂, 可能不会有有一个直接明了的答案。” **航空动力**

(王翔宇, 中国航发研究院, 高级工程师, 主要从事航空发动机发展战略研究)

参考文献

- [1] Insighteon. The aero engine eco system in India : identifying and overcoming barriers[EB/OL]. [2022-08](2023-11-6). <https://www.insighteonconsulting.com/the-aero-engine-eco-system-in-india-identifying-and-overcoming-barriers.php>.