



编者按：

自去年3月接收首批2架F-35A战斗机之后，截至今年11月，韩国空军已累计接收了24架F-35A战斗机。根据2014年的采购合同，韩国将在2021年底接收全部40架F-35A。也许是对F-35A的性能很满意，韩国已经表示将继续增购F-35战斗机，包括至少20架F-35A和20架可用于未来轻型航母的F-35B。无论是以平均每个月至少一架的速度接收已经订购的F-35A，还是决定继续采购更多该型战斗机，都在证明韩国谋求快速建立一支具备实战能力的四代机部队的心情之迫切。

## 韩国四代机：外购增量 自研增速

| 梁剑

### 外购自研双发力

韩国空军目前装备的战斗机总数约为600架，其中包括260多架老旧的F-4E、KF-5E，担负主力作战任务的F-15K与KF-C/D总数约为230架，另外还有60架本国制造的FA-50轻型战斗机，以及24架F-35A战斗机。由此可见，韩国空军中的主力战斗机仍然以三代机为主，而随着F-4E、KF-5E逐渐退役，必须加快采购新型战机弥补数量上的不足。在四代机渐成主流的当下，韩国希望通过外购和自研两条腿走路，加快装备的更新换代。外购F-35高速交付，自研KF-X也在加快脚步。

关于韩国KF-X，最近的一次大动作是在今年9月初，该机首架原型机在庆尚南道泗川的工厂进行组装。现场公布的图片可以看出，首架KF-X原型机已经基本成型，机头大部段，机翼-机身中段大部段以及后机身大部段已经全部制造完成并处于总装前状态，单等发动机以及其他机载系统就位。相较于两个多月前首架原型机制造厂首次对外公布时的状态，KF-X的进度不可谓不快。

据KAI透露，作为未来KF-X的主要生产基地，泗川工厂将于2021年完成首架原型机的制造，以确保2022年能够实现首飞。按照计划，KAI（韩国航空航天工业集团）将总计生产6架原型机，并进行为期4年的各类地面测试和飞行测试，2026年完成全部设计开发工作。2026年到2028年之间，主要进行Block1标准飞机的小批量生产，Block2标准的飞机拥有完整的空空作战能力和有限的空地作战能力；2029年开始进行Block2标准飞机的量产，Block具备完整的空空和空地作战能力。

今年8月，韩华-泰雷兹公司正式对外展示用于KF-X的首套主动相控阵雷达（AESA）系统，并表示该雷达系统的电线阵列由1000个T/R模块组成，具备很强的边缘跟踪扫描能力，并能够同时跟踪、探测和识别多批次目标。目前，该雷达系统已经开始进行地面测试。韩华-泰雷兹公司的前身是由韩国三星集团和法国泰雷兹集团联合出资创办的合资公司，主要为韩国开发国防电子系统和设备。2015年6月，三星集团进行业务调整，

将其与国防相关的一些业务出售给了韩华集团。在这之后，韩华集团曾与泰雷兹公司就如何处理合资公司中的泰雷兹所占股份进行了谈判。考虑到未来韩国国防市场的潜力，泰雷兹集团最终以2.3亿欧元的价格购买了其在合资公司中的全部股份，在韩华-泰雷兹公司中占比50%。

而早在今年5月，GE公司就向KAI交付了第一台用于KF-X项目的F414-GE-400K发动机，目前该发动机已经由韩华技术负责在韩国国内进行地面测试。截至2021年底，GE将总计向韩国提供15台该型发动机，这些发动机将全部用于6架原型机（3台备份）。而按照KAI的研制计划，如果KF-X的总产量能够达到120架，那至少将需要240台F414-GE-400K发动机，这些发动机里的一部分将由韩华技术负责在韩国国内制造总装。

### KF-X 历经十年终上马

关于KF-X的研制，第一次被韩国政府提及是在2001年3月，时任韩国总统金大中在韩国空军学院的毕业典礼上，提出韩国需要自行研制一款先进的多任务战斗机，以取代已经老旧的F-4D/E和F-5E/F等机型。2002年，韩国参谋长联席会议正式向国内航空研制机构和工业部门提出了关于新型战斗机的研究与开发需求，不过当时的韩国国防分析研究所（KIDA，韩国国防部的智库）认为，韩国根本不具备独立完成新型战斗机研制的的能力。KIDA之所以有如此观点，也是基于对当时韩国国内航空研制能力的整体衡量。因为在2002年前后，韩国与美国联合研制的T-50高级教练机项目正处于紧要关头，该项目是韩国国内航空工业主导的第一个完整的军机项目，并且得到了美国洛克希德·马丁公司的技术支持。尽管如此，T-50项目从1992年首次被提出，到2002年8月首飞，中间整整等了10年。所以，KIDA认为，研制一款面向未来的新型战斗机，必须以韩国国内企业为主导，这样才能真正掌握核心技术，而当时的韩国根本不具备同时研制两种新型飞机的能力。所以在2002年之后的几年里，是否独自研制一款新型战斗机在韩国国内一直没有统一的意见，以致于整个计划在2008年之前没有迈出实质性的一步。

2008年，韩国国防部再次启动关于研制新型战斗机的可行性研究，

2010年11月，朝韩双方在延坪岛爆发冲突，这次事件坚定了韩国人独自研制战斗机的决心。韩国军方和工业界一致认为，尽管该项目存在很大风险，未来单机价格有可能会大大超过外购价格，但是一个全新的先进战斗机研制项目将会对韩国的航空工业产生巨大的辐射带动作用，韩国需要这样的研制项目，KF-X项目进入实质性研制阶段。作为继T-50之后的第二个新机研制计划，也是韩国第二个战斗机研制计划（韩国将基于T-50改进的FA-50视为第一个本国自研战斗机），在韩国国内，KF-X项目被称为Boramae（韩语中的“鹰”，也是韩国空军学院的标志）。2010年7月15日，印尼正式决定加入KF-X项目，并提供20%的项目资金，印尼航空航天公司代表印尼政府参与研制并占有一定份额的制造工作，印尼空军未来将采购至少50架飞机。土耳其政府当时也对该项目表示出极大兴趣，并承诺出资20%参与合作，并希望获得该项目更多的控制权，但没有得到韩国人的许可。

最终，韩国和印尼达成出资比例和工作份额的分配比例，KAI通过竞标成为主承包商，并与洛克希德·马

丁签署了合作协议。作为T-50项目的合作方，洛马将为KF-X提供相应的技术支持。在印尼国内，这个项目也被称作IF-X，按照合同，印尼可以派出人员参与项目的研制，共享相关数据，承担一定比例的制造工作，同时印尼空军将获得一架专门为其制造的原型机。而据印尼国内媒体报道，新型战斗机服役之后将正式被赋予F-33的编号。

然而，自2017年11月至今，印尼一直没有支付新一轮的研发资金，这引起了韩国方面的不满。截至2019年7月，印尼拖欠的研发资金将近18亿元人民币，印尼希望与韩国合作，以其生产的武器装备来冲抵部分研发资金。

### 弃欧亲美的技术选择

KF-X计划的最初目标是研制一款双发单座的第四代战斗机，其隐身能力要大大优于当前法国的“阵风”和欧洲的“台风”战斗机，但是比F-35稍差。在KF-X的概念设计阶段，韩国著名大学——建国大学武器概念与应用研究中心曾提出建议，KF-X的综合性能要明显优于最新型的F-16，航程增加50%，机体寿命增加34%，

装备有源相控阵雷达系统（AESA）以及更先进的航电系统、电子战系统和更加高效的数据链系统。更为关键的是，KF-X装备两台发动机，总推力不低于220千牛，这样可以保证该机具备超声速巡航能力。不过，韩国空军后来降低对KF-X的性能——将该机定义为具备一定隐身能力的3.5代战斗机。

在KF-X项目启动时，韩国国防部曾对本国航空研发和制造实力进行摸底，以确定该项目的发展路径。摸底的结果显示，韩国已经拥有KF-X项目所需的63%的技术，其他的则需要通过对外合作来获得。所以，为了促进合作过程中的技术转让，韩国国防发展局（ADD）在2012年到2013年之间先后提出了两个KF-X设计概念：类似于F-35的C103，以及类似于欧洲“台风”战斗机采用鸭式布局的C203。这个用意很明显，即最终选择哪个方案要取决于该项目是同美国还是欧洲合作。

在ADD提出两个设计方案之后不久，KAI在韩国国防采购计划管理局（DAPA）的支持下，提出了C501方案（也称KF-X-E）。该方案是一个外形尺寸相对较小，采用单发布局的低成本方案，整体性能与F-16相当。但是韩国空军更倾向于双发设计，因为其安全性更高，载荷能力和综合性能也更强，印尼空军也认为单发布局不适合印尼广袤的领空，所以C501方案很快就被放弃了。

2014年，韩国和印尼最终选择了C103方案，同时作为韩国采购F-35战斗机合同的一部分，洛克希德·马丁公司答应向韩国转让20多项关键技术。不过，包括AESA雷达、红外搜索与跟踪（IRST）系统、光电目标跟踪设备、机载无线干扰系统在内的4项技术被美国政府命令禁止转让。韩国决定由国内研究机构负责开发上述技术，或者通过其他的合作途径获取这些技术。

对于韩国来说，研制KF-X的难度与之前的T-50高级教练机项目相比完全是两个量级。所以自2001年该项目首次公开到现在，期间因为合作伙伴的变化、国内执政者的变动、关键技术卡壳等原因，导致项目多次拖延。2013年3月，朴槿惠当选韩国总统，该项目一度因为财务问题被推迟了18个月，差一点胎死腹中。

所以在2013年5月30日，当时的EADS（即现在的空客集团）曾经向韩国示好，表示如果韩国空军在F-X计划的第三阶段选购“台风”战斗机，EADS将出资20亿美元参与KF-X项目。然而在2017年9月，韩国空军在F-X计划第三阶段采购中最终选择购

买40架F-35战斗机，EADS随即收回了之前的全部承诺。

### 在质疑中持续推进

在实施过程中，KF-X项目采用了主承包商加子系统分包商模式。KAI作为项目主承包商，与多家韩国国内和国际分包商签署了合作协议，其中还包括之前T-50项目中的合作伙伴。在选择国际合作伙伴时，韩国特别要求对方能够进行技术转让，包括零部件在韩国国内制造等方面。韩华集团下属韩华技术与GE签署合作协议，负责GE公司为KF-X提供的F414-GE-400K关键零部件的生产以及总装，以及为发动机的安装、测试提供技术支持。除此之外，正如前文提到的，同属韩华集团的韩华-泰雷兹公司负责KF-X项目AESA雷达系统的研制，并得到了以色列Elta公司的技术支持，而与雷达系统配套的软件则由瑞典萨博和韩国LIG NexL公司联合开发和测试。LIG NexL公司还负责机载无线电干扰系统的研制。

除了发动机、机载雷达等主要子系统外，KF-X的其他子系统也大多来自国外。美国的制造商Texstars与KAI合作，为KF-X研制气泡式座舱盖风挡玻璃和镀膜，凯旋集团则负责为KF-X研制机身液压作动系统及配套部件，联合技术公司（UTC）负责为KF-X研制环控系统，包括座舱增压系统、涡轮增压器以及流量控制阀。基于和英国马士-贝克在T-50项目上的长期合作，KF-X选择了该公司Mk18弹射救生系统；导弹发射装置、机载通信天线、外挂副油箱机载制氧系统则由Cobham与KAI所属子公司联合研制；英国Meggitt负责提供供刹车系统，以及座舱备份显示系统和机身内部传感器系统；机载武器方面，由MBDA负责为KF-X整合“流星”超视距空对空导弹；寇蒂斯-莱特负责为KF-X项目提供完整的飞行测试系统，包括飞行测试期间的数据采集与分析。

很显然，在外界看来，KF-X只是由韩国制造了一个壳子，内部机载系统全部来自国外供应商。这也难怪直到今天，韩国国内仍有许多人坚持认为韩国不具备完成KF-X的能力。由于缺乏研制此类战斗机的经验和关键技术，KF-X项目的研制成本将会远远超过DAPA预测的6万亿韩元（约55亿美元），而可能会达到8.5万亿韩元（约78亿美元），最终的成本甚至超过10万亿韩元（约92亿美元）。这就意味着在KF-X项目中，未来单机寿命周期价格将是进口同类装备的2倍，日本在研制F-2的时候遇到过类似情况。

尽管如此，韩国国防部仍然在力推KF-X的研制加速。T-50项目在启动时也遭遇同样的怀疑，但是在韩国人的坚持下，T-50项目和FA-50研制获得了成功，并且取得了不错的外销成绩。对于要将航空航天工业打造成支柱产业之一的韩国，KF-X是必须迈过去的一道坎。2018年6月，KF-X完成初步设计方案，2019年2月，首架KF-X原型机零部件正式开始制造。2019年9月，韩国和印尼军方联合对设计进行审查，其中390个关键数据经审查全部达到了韩国空军的要求。不过，这期间也有让韩国人不顺心的地方，2018年5月，印尼方面就该项目中的技术分享、出口许可等问题向韩国提出抗议，并要求同韩国重新就合作条款细节进行谈判，以获得更多的分工和出口许可，并将参与该项目的期限延长至2031年。新的谈判一直持续到2019年1月，之后两国都没有对外公布谈判的结果，但是这并没有影响到KF-X项目的继续前进。



## 推动产品设计与生产过程双向融合

| 瞿飞

新产品导入（New Product Introduction，简称NPI）流程作为电子产品量产必不可少的环节，在全球电子制造服务业被广泛应用，构建具有敏捷、高效、高品质、低成本的NPI流程已成为产品获得成功的关键。目前，NPI流程在OEM生产中应用较多，然而，针对武器装备多品种、小批量的研制特点，常规多阶段试生产的导入模式存在单件制造成本高、研制周期短等痛点，制约了NPI流程在武器电子装备制造企业中的施行。

近年来，航空工业上电所积极创新，以基于模型的嵌入式深度应用系统工程为主线，将NPI过程融入产品研发系统工程，构建技术研发过程融合、技术管理过程融合、组织使能过程融合的NPI机制。基于研发系统流程中的协同理念、门径管理流程理念，研究现有的研发体系模式，以建立适用于上电所的NPI流程体

系，最终形成前端设计协同、节点评估控制、生产协同与反馈的体系化工作模式。

### 建立以DFX工程技术为核心的协同开发平台

航空电子装备的工程化设计过程涉及机械、电子、软件等多个专业学科。为了适应复杂航空电子装备的工程化设计需求，上电所大力发展DFX工程技术，开展专业化分工和工程化协同研发体系的创建，从“流程、工具、方法”三要素夯实DFX工程技术应用基础，匹配新型武器装备的研发需要。

DFX（Design for X）工程技术以工程数据为驱动，以提升产品设计可制造性、可维护性、可测试性、经济性及可靠性为价值目标，其核心在知识管理，关键在信息化建设。上电所聚焦产品工程化设计环节中存在的痛点问题，围绕产品可制造性设计（DFM）、可装配性设计（DFA）、可靠性设计（DFR）和可测试性设

计（DFT），结合所内生产实际与未来发展，进行了系统化和集成化的平台探索，并最终取得了诸多成果。一是论证、实施多专业DFX工作方法，涵盖结构设计、PCB布局布线、PCBA、整机集成等设计过程，将专业工程化知识转化为DFX工具语言，将原有基于文档的人工检查模式改进为基于数据、基于模型的工程化设计自动审查，实现了工程化知识的有效复用；二是建立设计工艺协同研发信息化平台，深入集成设计开发环境与DFX审查工具，实现基于EBOM、设计模型、工艺知识、DFX审查规则的产品协同开发，在提升产品研发效率的同时，通过信息化流程及数据管控等措施，保证产品DFX设计过程全闭环，弥补了新产品开发过程中的工程化设计管理短板，支撑产品研发能力与质量双提升。

### 构建基于工程审查的首件试制验证机制

按照国军标要求，武器装备研制企业通过

开展首件鉴定来检查、发现产品生产过程中存在的问题，以验证生产过程是否具备生产条件。然而对于新研装备，由于从未被生产，在首次试制时，除了需要验证生产过程中5M1E（人、机、料、法、环、测）要素是否满足生产需求外，验证范围还应包括首件试制设计的实施质量，确保装备转产后的质量稳定可靠。为满足新研装备试制过程的质量及效率需求，上电所积极构建基于工程审查的首件试制验证机制。

问题导向依据。通过结合设计质量历史问题数据，以产品生产路线为索引，提炼生产流程中可被识别及定性的工程化设计问题，结合FMEA、六西格玛等工具和方法，整理、归纳，并最终形成工序级产品首件试制审查项目指南。

信息协同提效率。依托制造执行系统（MES），将首件试制审查项目指南与生产工序信息化绑定关联，并同步开放工艺工程师审查窗口，实现了基于MES工作流试制工序的同步验证，在提高验证效率的同时，极大降低了

验证工作对生产进度的影响。

管理机制促归零。试制验证过程中发现的问题由质量管理体系（QMS）进行质量跟踪管理，结合NPI管理采取试制问题处理措施，如开展首件试制后的试制问题分析、转产前的问题归零总结等，确保达到“零缺陷设计”和“零缺陷制造”的双重目的。

面对武器装备快速发展的现实需要，新研装备的快速试制及高效转产已成为各军工企业生产单元的升级方向。上电所将以构建产品研发制造一体化体系为目标，将系统工程与NPI流程相结合，建立以DFX为核心的协同开发平台，构建基于工程审查的首件试制验证机制，逐步实现产品设计与生产过程的融合，形成设计与生产组织协同、设计与生产流程协同、设计与生产数据协同、设计与生产信息系统协同的一体化研发模式，全面提升新产品的工程研发能力及工艺制造能力，从研、产双向支撑新研发的质量与周期需求。