

美国 CH-53K 重型直升机及 T408 涡轴发动机发展分析

U.S. Heavy Helicopter CH-53K and Its Powerplant T408

■ 李明 / 中国航发研究院 肖蔓 / 中国航发动研所

美国 CH-53E “超级种马” 重型直升机在服役 40 多年后，面临机群老化、损耗严重等突出问题，美国急需新一代重型运输直升机以获得快速机动能力。2005 年，美国国防部批准了 CH-53K “种马王” 发展计划，以 GE 公司的新一代大功率涡轴发动机 T408 为动力，在形成战斗力之后分批取代 CH-53E。

重型直升机具有运载量大，运输效率高、快速机动、快速部署和垂直起降等优点，在各兵种协同作战中发挥着重要作用。20 世纪 60 年代，西科斯基公司开始研制 CH-53 “种马” 系列重型直升机，先后发展出 CH-53A/D、CH-53E 和 CH-53K（如图 1 所示）等多个型号，主要装备美国海军和海军陆战队，以航母、两栖攻击舰或其他战舰为基地执行两栖运输任务，是美国海军陆战队从军舰到陆地的主要突击力量之一。2021 年 1 月，美国海军航空系统司令部（NAVAIR）授予 GE 公司 1 亿美元合同，采购 21 台 T408 涡轴发动机，支持 CH-53K “种马王” 重型直升机的第 5 批次低速率生产。2021 年 2 月，NAVAIR 再授予 GE 公司 2110 万美元，采购 4 台备用发动机及零备件。2021 年 7 月，美国海军陆战队开始对 CH-53K 进行初始作战试验与评估（IOT&E），预计 2022 年结束。2021 年 9 月，海军陆战队的一架 CH-53K 在一次真实的任务中成功将一架受损的 MH-60 “海鹰” 直升机从一处山脊上吊运回基地，标志着 CH-53K 项目向前



图1 CH-53K 直升机

迈出了重要一步。2021 年 11 月，海军陆战队第 1 作战测试与评估中队（VMX-1）首次使用 CH-53K 在大西洋上空开展了超视距重型运载和部队运输舰到岸行动，测试海军陆战队未来作战概念。

CH-53K 新一代重型多任务运输直升机

迎合作战需求

CH-53K 可以满足改进安全性、

可靠性和维修性的 21 世纪智能飞机的标准，主要执行美国海军陆战队装甲车辆、装备和作战部队的运输任务，以实现从海上向内陆“分布式作战”理念，将成为海军实施远征任务的主力运输直升机，特别是在印太地区。未来，具备全天候综合作战能力的 CH-53K，将与高航速的 V-22 “鱼鹰” 倾转旋翼机和 UH-1Y “毒液” 中型通用直升机一起，为美国海军陆战队提供强大的运输保障。美国海军

表1 CH-53K作战能力关键指标要求

关键指标	门槛值和目标值
网络互通率	CH-53K 与美国海军陆战队其他飞机和舰船等武器装备之间的信息互通 门槛值：100% 满足“联合集成架构”的企业级或临界级要求 目标值：100% 满足“联合集成架构”的全部要求
航程/载荷 (海军高原/高温)	门槛值：不加油，外挂载荷为 12.2t,任务半径达到 204km 目标值：不加油，外挂载荷为 16.3t,任务半径达到 204km
任务战备率	门槛值：89% 目标值：90%
后勤支持规模 (空中和海上)	门槛值：≤ 现役 CH-53E 的后勤支持规模 目标值：相比现役 CH-53E，后勤支持规模降低 10%
出勤率	每 10h 作战任务，出勤飞行次数 2.6 次，或者每次出勤飞行时长 2.25h
生存能力	在受到典型弹击损伤后，仍能确保具备飞离战区的出色能力
兵员防护	要求飞行器在受到典型弹击的情况下，能够保障机组人员和战斗人员的安全

陆战队对新一代重型直升机提出作战需求，并为每个关键指标设定了门槛值和目标值（见表1）。

多功能作战能力

CH-53K 装备了 3 台全新发动机、全权限飞行控制系统、先进复合材料旋翼桨叶和全数字驾驶舱，对美国军事力量是一种跨越式发展，在两栖突击能力、机动性和飞行速度等方面均超过俄罗斯米-26 重型直升机，其如下几种作战能力是美国海军陆战队实施未来作战概念所需要的。

一是舰到目的地机动运输能力。美国海军陆战队急需加强运输直升机的从舰到目的地机动运输能力，并能执行重型突击任务。CH-53K 可吊挂武装突击战车、榴弹炮，可突击运送士兵、重型装备和物资，具备从海上基地起飞向目标地的运输能力，帮助陆战队进行快速机动作战，且不占据更多舰上空间。

二是辅助执行海面打击作战能力。CH-53K 具备辅助执行海面打击

作战、海基和远征机动作战任务的能力，具有高生存性、低成本、长寿命、长航程和高载荷能力等特点，战备率和维修性更好，可与海军陆战队其他武器装备之间更好互通。

三是重型运输能力。CH-53K 最大起飞质量 39.9t，运输能力是 CH-53E 的 3 倍，能在 204km 任务半径内

承担约 12t 的外挂载荷，最多可携带 16.3t 的外挂载荷。CH-53K 符合美国军队集装箱尺寸标准，可将事先用集装箱装好的各种军需物资整箱快速装机，以提高运输效率。

研发进展

CH-53K 从 2005 年启动初步开发与验证工作到 2017 年进入低速初始生产 (LRIP) 阶段，历经了 12 年的研发历程。自 2018 年首架交付美国海军陆战队后，CH-53K 持续进行飞机性能测试。2020 年 3 月，完成首次视觉降级环境测试，测试内容包括在沙尘、浓烟等复杂低能见度环境下的成功起降。2020 年 4 月，CH-53K 与 KC-130J 加油机完成空中加油试验，全程持续 4.5h，评估了在强湍流条件下直升机的飞行性能。2020 年 6 月，CH-53K 在“黄蜂”号两栖攻击舰上完成首次海洋环境下试验，开展 360 余次起降、旋翼启动与停转、舰上加油、外接电力、舰上维护等系列舰机适配性测试，评估了直升机海上性能，验证了其在舰上部署能力。2021 年 9 月，CH-53K 在高海拔低气压条件下



图2 CH-53K的综合能力

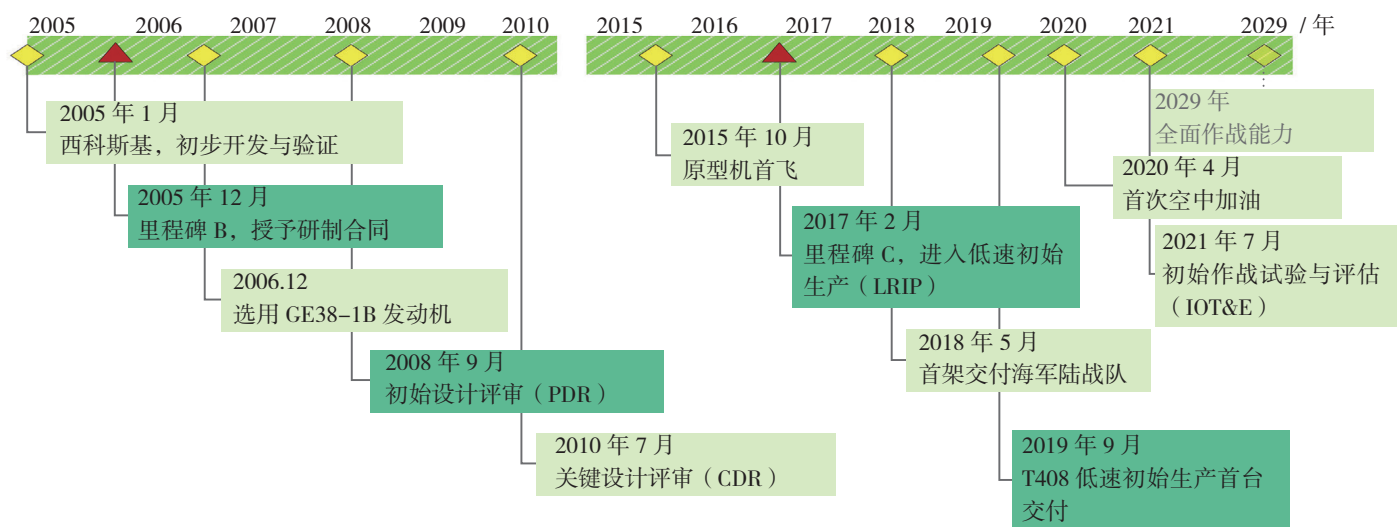


图3 CH-53K项目发展历程

完成回收一架受损的MH-60S“海鹰”直升机的重型吊运任务。2021年11月，CH-53K在大西洋上空将一辆重约12t的轻型装甲车，从“黄蜂”级两栖攻击舰“硫磺岛”号运送到岸上登陆区，评估了其满足超视距重型运载项目规范的能力。

T408大功率涡轴发动机

2006年，美国宣布在普惠加拿大公司PW150、罗罗公司AE1107C和GE公司T408（内部编号GE38-1B）等发动机中选择CH-53K的动力。从成本、安全性和实际使用性能等多方面综合考虑，T408发动机最终胜出。CH-53K配装3台T408，并预留了第4台发动机位置。T408的单台额定功率为5600kW，是GE公司功率最大的涡轴发动机，相比CH-53E采用的T64发动机，其功率增加57%，燃油效率提升18%，而零件数减少63%。

持续的技术成熟与继承

T408起源于美国陆军现代技术验证机发动机（MTDE），其技术发展与GE27技术验证机、GE38及其他多种军民型号的发展紧密相关，

如图5所示。

1980年代，美国陆军发起4000~6000hp（2980~4470kW）现代技术验证发动机计划，目的是研制一型5000hp（3725kW）的涡轴发动机，并在设计过程中综合考虑性能、质量、可靠性、大修成本、技术支持成本、采购成本和生存能力等因素，GE公司的GE27获得技术验证机合同。GE27设计中最大的难点在于“按成本设计”，即需要设计一台比“黑鹰”、阿帕奇等直升机用的T700发动机功率高3倍而成本却只增加20%的发动机。采用了双转子单元体结

构以及先进的气动、材料和冷却技术的GE27，于1984年整机试车，1987年完成了4000h部件试验和超800h的整机试验，超过预期目标，满足MTDE计划要求，当时还创造了油耗、功重比、单转子压比、单位流量功率等4项纪录，是一型非常成功的先进涡轴技术验证机。GE27与T700相比，油耗降低25%，功重比提高62.5%，空气流量增加40%。

1980年代末，GE公司在GE27基础上以GE38命名开展了涡轴、涡桨和涡扇等一系列发动机的研发工作。从1988年开始先后研发了T407军用

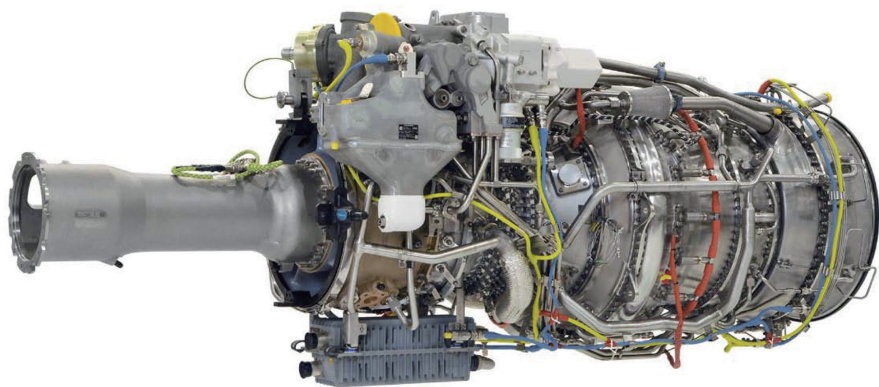


图4 T408-GE-400 涡轴发动机

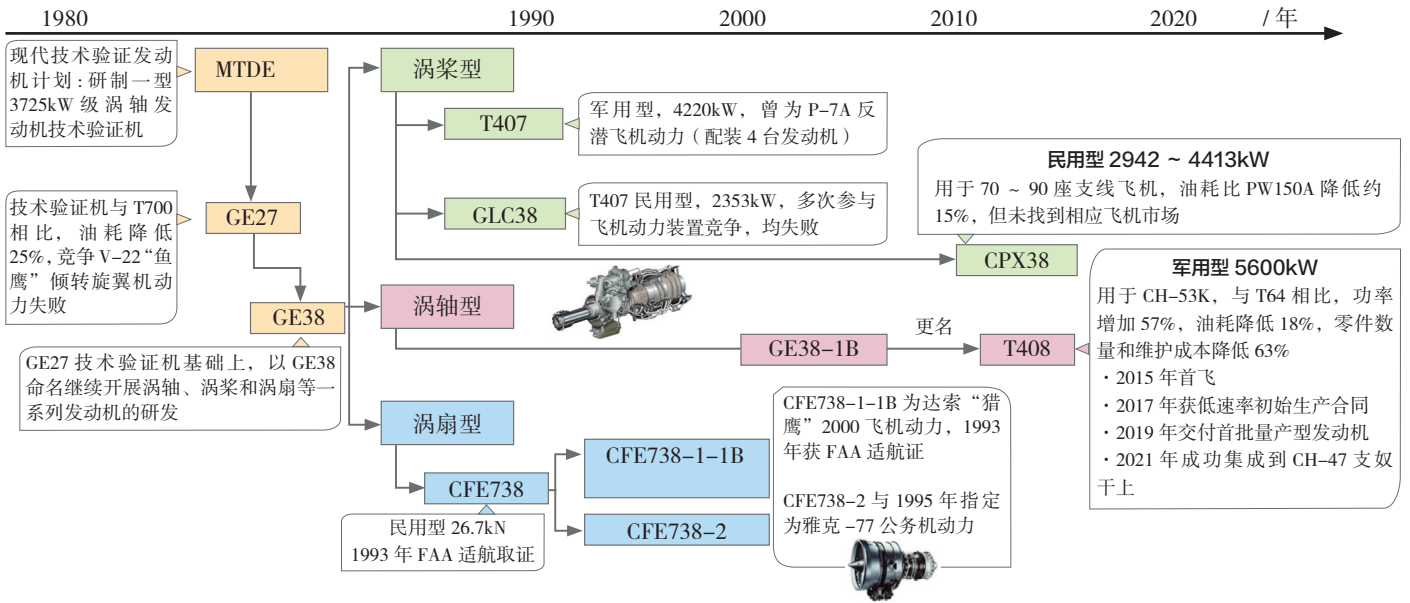


图5 T408发动机技术演变发展

涡桨发动机、GLC38民用涡桨发动机、CPX38民用涡桨发动机、CFE738民用涡扇发动机和T408军用涡轴发动机。

T408在GE27先进技术验证机、T407涡桨发动机的基础上发展而来，借鉴了GE27核心机的总体结构、单元体结构、高压比单转子压气机及其冷却方案、润滑系统和支承方案；还参考了T407的3级动力涡轮，其中气冷的第1级涡轮，可提高耐久性

和功率增长能力，并有一个独立的封闭模块以防止轴承和油槽受污染。

技术创新与突破

T408融合了一系列新技术，包括新的三维气动设计、冷却方案和先进材料：与T407相比，同等进口气流和燃油消耗下，功率提高约45%；热端部件的冷却设计可防沙砾堵塞，并采用改进的材料和涂层，以防侵蚀和腐蚀；压气机更加坚固，

采用了分机匣和防腐涂层，具有抗风沙侵蚀和盐水腐蚀的能力，能适应严酷的作战环境；采用了整体叶盘压气机，无螺栓转子、低稠度/高功率涡轮减少了涡轮叶片和导向器数量，减少了零件数；附件系统中采用空心管路，节省了较多管路和支架。

针对特定作战环境设计的T408，包括飞行试验在内的各种试验验证了其出色抗风沙侵蚀、盐水腐蚀的

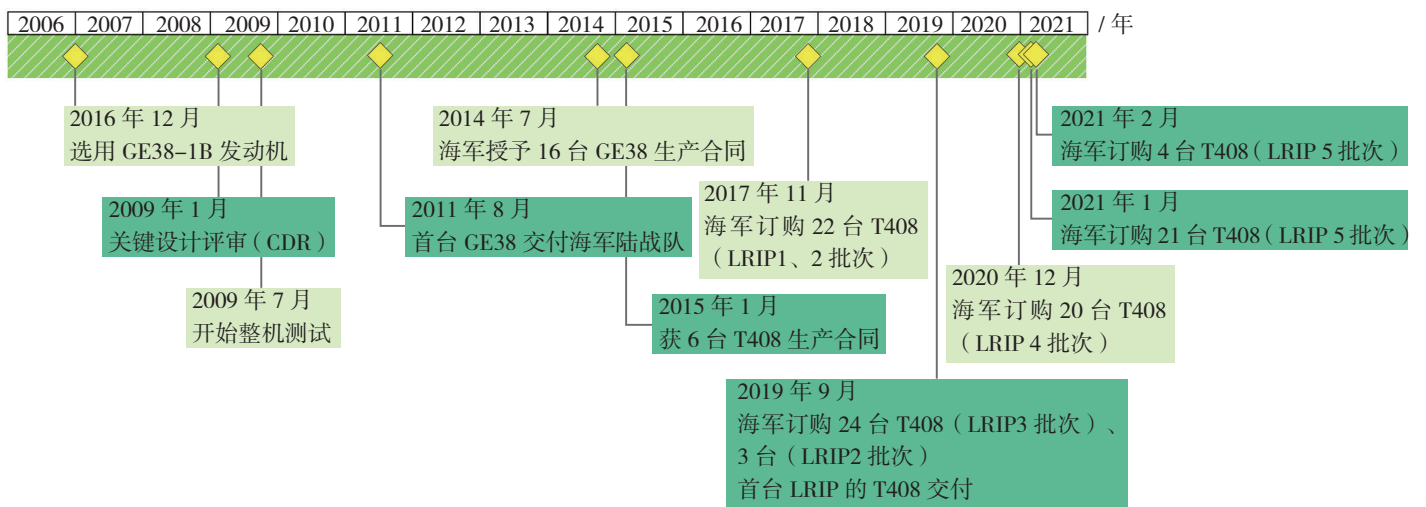


图6 T408发动机发展历程

能力和强耐久性，能够理想地在陆战队严酷的作战环境下使用。由于油耗较低，T408还能显著降低CH-53K的使用成本。

最新研究进展

T408在其发展和验证阶段为CH-53K的技术评估交付了1台核心验证发动机、5台工厂合格试验发动机和20台飞行试验发动机，发动机试验时数超8400h，其中地面试验4500h，高温和寒冷环境下的飞行试验超3900h，300h循环耐久性试验创造了GE公司史上在红线温度运行时间最长的纪录，是GE公司最苛刻的试验项目，其标准几乎是通常严苛水平的2倍。在系统开发和验证合同下进行了部件试验验证，完成28项环境要求符合性部件试验。目前，T408在机运行时间约为11000h。

T408从2007年开始研发至2017年获得低速率初始生产合同历经了10年时间，其中关键里程碑有：2009年，完成关键设计评审（CDR），开始整机测试；2011年，首台交付海军陆战队；2015年，为CH-53K提供动力首飞；2019年，首台低速

初始生产（LRIP）型交付美国海军陆战队；2020年，装配CH-47F直升机地面试验；2021年，被美国陆军确定可用于CH-47F升级。

未来潜在用途

T408发动机虽然是CH-53K的动力，但具有配装美国陆军重型运输直升机CH-47的潜力，后者专为货物和部队运输设计，几十年来一直是美国陆航重型运输机的主力。为大幅提高CH-47性能，美国陆军、波音公司和GE公司在2016年签署了一项为期5年的合作研发协议（CRADA），波音公司启动了一项CH-47升级计划，主要任务是为CH-47F试装更强劲的T408，以验证CH-47F集成大功率发动机的可行性并评估技术风险，最终推进直升机动力的升级。2020年，配装2台T408的CH-47F进行地面试验，使用了增材制造的承重传动系统组件和发动机外扭矩测量系统，验证发动机控制、热兼容性、质量以及飞机在飞行包线内的结构响应。2019—2021年，CH-47F换装T408共进行了18次地面试验和7次飞行试验（如

图7所示），经过7个月的飞行试验后，2021年5月，美国陆军宣布换发可行，T408可用于CH-47F机队升级，在降低技术和集成风险的同时，可满足美国陆军未来需求。

CH-53K与T408的项目管理

项目合同

美国将武器装备的研制成本增长列为高风险事项，国防部会在装备采办的各个阶段分别授予合同以进行风险管控。2010年，美国海军陆战队计划采购200架，总采购成本一直在涨，当前预估340亿美元，研发成本约80亿美元。2021年6月、12月美国海军再次采购低速初始生产（LRIP）第5、第6批次各9架CH-53K，将直升机的单价由原来的1.2亿美元降至1亿美元以下。

T408发动机各阶段合同的授予则都是基于CH-53K项目的研发需要。2007年，美国为CH-53K项目计划采购650台T408，费用为15亿美元。2020—2029年，美国将生产512台T408，总价值为14.33亿美元，T408试验型发动机最初合同单价为400万美元，预计批产型合同单价为280万美元。美国海军陆战队预计未来将获得800台T408来装备200架CH-53K机队。

项目进度协同

为使发动机和飞机的研发相互推进，T408研发进度与CH-53K研发进度紧密相扣，在一些里程碑标志性事件上几乎同步。2017年，CH-53K配装T408通过国防部采办委员会评审，达到里程碑C决策进入低速初始生产阶段后，T408也于2017年同步获得低速初始生产合同以支持直升机形成初始作战能力。



图7 CH-47F换装T408飞行试验

表2 CH-53K主要合同概览

合同名称	合同内容	合同价值 /亿美元	备注
系统开发与验证合同	生产9架原型机（1架地面试验机 and 4架工程研制试飞样机，4架系统级验证样机）	34.8	支持CH-53K研发、系统集成、试验和评估
项目开发、试验与评估合同	支持CH-53K项目开发、试验与评估	5.77	
低速率初始生产合同	共计42架第1~6批次低速率初始生产	33.5	已交付5架；预计2022年再交付4架第6批次，每架成本7610万美元
其他支持合同	用于零备件和材料采购，后勤保障、支持服务、技术出版、维护等	3.3	

表3 T408主要合同概览

合同名称	合同内容	合同价值 /亿美元	备注
系统级验证试验发动机生产合同	制造和交付22台发动机	0.98	支持CH-53K的作战评估
低速率初始生产合同	共94台第1~5批次低速率初始生产以及后勤和技术支持服务	5.2	2024年完成CH-53K相应批次生产
其他支持合同	用于工装、关键部件采购、组件改进和维护等	0.53	发动机及直升机研发

表4 CH-53K直升机与T408发动机研发进度协同

CH-53K和T408标志性事项	时间/年	
	CH-53K	T408
关键设计评审	2010	2009
首架飞机/首台发动机地面试验	2012	2011
原型机/发动机首飞	2015	2015
初始作战试验与评估/发动机合格鉴定	2016	2016
进入低速率初始生产阶段	2017	2017
第1架飞机交付美国海军陆战队/发动机装备飞机	2018	2018
飞机初始作战能力评估/交付第1批量产发动机	2019	2019

项目风险管控

尽管美国对CH-53K项目从技术成熟度、项目进度、成本和科研管理等方面进行了一定的风险控制，如追加系统验证样机以促进生产过

程的成熟度提高，但仍出现了进度一拖再拖和成本持续上涨，原计划在2015年形成初始作战能力，至今未实现，主要是由于以下两个问题。一是技术问题风险。研制试验

中发现了一百多项飞机和发动机的技术问题，其中发动机废气再吸入和直升机在“沙盲”状态下发动机性能下降影响直升机作战能力等问题比较突出。目前，关键性能指标中的任务可靠性和任务载荷达标仍被划定为中等风险等级。

二是项目管理模式缺陷风险。CH-53K项目采取试验和采购并行或重叠的方式，存在研制质量与研制进度、成本相矛盾的风险。试验中暴露出的技术问题必须在已研制出的更多飞机上解决，这种改造费用很高，进度也被大幅度拖延。

针对项目风险问题，美国政府和军方发布了《解决CH-53K项目前期问题与未来风险》《重型直升机项目：海军应解决成本与进度风险》等报告，加大对风险分析和管控。同时美国政府问责局（GAO）建议在完成试验之前应限制购买直升机的数量。

结束语

军用直升机作战能力很大程度上取决于其动力装置的功率等级和综合性能。CH-53K重型运输直升机是支持美国海军陆战队未来从海基中心战到内陆分布式作战的主力，代表了当前世界重型直升机最高水平，其最大的依托是拥有一颗强大的“心脏”。而先进动力的开发需要先期的预先研究提供技术储备，但即使是良好继承了多项成熟技术的T408，在发展中仍然面临多项技术问题，这也更加凸显了飞发研制，特别是新机配新发中的协同推进的重要性与必要性。

航空动力

（李明，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机科技情报研究）