

美国液体活塞公司开发新型转子重油活塞发动机

| 常小榕

航空重油发动机指燃油馏分在航空煤油到重柴油之间的任意混合物的航空活塞发动机，其低油耗、高功重比以及燃料易获得性和运输安全性，得到世界上发达国家的关注，是下一代通航活塞动力的解决方案之一。目前，世界发达国家的重油发动机已经投入使用，正在进行下一代重油发动机的研制，进一步提高安全性、经济性水平。

转子重油活塞发动机——X 发动机

在 DARPA 的支持下，美国创业公司液体活塞公司 (LiquidPiston) 正在测试一种新型转子发动机——X 发动机，该公司表示该发动机只有传统柴油发动机重量的十分之一，而燃油效率是燃气涡轮发动机的两倍。液体活塞公司自 2004 年以来一直致力于该发动机的研制，现正在进行其第五代发动机的研制工作。X 发动机已经验证了在转子活塞发动机中的最高压比，这家位于康涅狄格州布龙菲尔德的公司已经获得了 DARPA 提供的资金，建造和测试一个 30 千瓦 (40 马力) 压燃发动机的核心——X4，该发动机具有应用于飞机的潜力。

DARPA 项目经理马克·古斯塔夫森表示：“DARPA 认为，这

里存在发展出一个高效、紧凑、轻量重油发动机系列的可能性。如果这个项目完全成功，将提供概念证明，证明我们具有挑战性的目标是可实现的，并为可用于地面、空中和海上上的潜在能力铺平道路。”

最初瞄准无人机，以及地面动力的 X4 是一个四冲程重油“逆转子”发动机。

X 发动机的主要创新点

液体活塞公司发展了一个新的热力循环，称为高效混合循环，设计了 X 发动机，类似内外对调的万克尔 (Wankel) 转子发动机，不是一个三角形的内部转子加椭圆形的外壳，它有一个椭圆形的转子，外壳则为三角形，发动机只有两个活动部件。高效混合循环 (HEHC) 是一个四冲程循环。燃料/空气混合气通过转子进入 X 发动机，被压缩和点燃，利用定容燃烧提高效率，燃烧后的气体通过膨胀后通过转子排出。

在万克尔发动机中，进气口和排气口都在外壳上，当转子旋转时就会打开。压缩和膨胀容积是相同的。在 HEHC 循环中，膨胀容积更大，过膨胀可以从发动机中获得更多的能量。

在万克尔发动机中，三角形转子顶端的密封片在转子旋转过程中，在设置于转子顶端的密封槽中高速进出，不易润滑，润滑油被混合到发动机的进气中，但

其中 90% 被烧掉。液体活塞公司 CEO 和共同创始人亚历山大·施科尼克表示：在 X 发动机中，顶部和转子活塞侧面的密封都安装在固定外壳上，并直接润滑。

在 DARPA 项目的第一阶段，目标是演示 0.75 升 X4 发动机的结构完整性。重油运转比液体活塞公司的首个发动机——X-Mini——需要更高的压力，X-Mini 发动机为 70 毫升火花塞点火发动机，其压比为 9:1，燃烧室压力达 30 ~ 35bar (1bar=100000Pa)。

“高效率的重油发动机需要高压比。我们建造了 40 马力的 X4 的核心，并验证了高达 26:1 的压比。”施科尼克还说：“目标是证明我们可以在约 110bar 的压力下运行。我们已经在自然吸气，没有增压器的情况下达到在 150bar 下运行。”

第二阶段投资 250 万美元，将 DARPA 用于此项目的总资金提升至 600 万美元。第二阶段计划将重点放在验证发动机核心的功率和效率上。施科尼克表示：“目标是在一个有代表性的基础发动机而不是一个完整的发动机上，达到 30 千瓦功率和 40% ~ 45% 的制动效率，只是发动机核心。”

施科尼克表示：常规等效 30 千瓦柴油发动机在峰值功率情况下，一般其制动效率为 33% ~ 34%。液体活塞公司的终极目标是在峰值功率下达到 45% 的效率。同时 X 发动机相对于柴油发动机，在部分功率状态下具备更大的优势，传统柴油发动机在部分功率时效率一般会大幅下降。在传统的狄塞尔循环中，注入一半的燃料会产生一半的能量，但在较低的压力下效率较低。他说，X 发动机提供了一种替代的控制策略，称为跳跃点火。随着转子、轴和配重作为一个大的飞轮，燃料只在一半的时间内喷入。注入的燃料仍然在

压缩峰值燃烧，在跳过的循环中，未燃烧的空气用来冷却燃烧室壁，提取这些废热做有用的功。这可以带来一个较为平坦的效率曲线，伴随在部分功率状态下较少的效率降低，同时对冷却的要求更低，从而也可以使用更小的散热器。

“我们将在 DARPA 项目的这个阶段中考察跳点火，但这不是一个严格要求的交付物。重点是证明功率和效率。”施科尼克表示，“在第 1 阶段，我们生产了一个不带冷却的核心发动机，没有要求很完善的设计，主要是为了验证发动机的基本运转。在第 2 阶段，我们增加了冷却器，使其在一个稳定的状态下运转。我们才刚刚开始功率和效率的测试。”

由于只有一个核心发动机正在测试，虽然液体活塞公司不会在这一阶段证明，但其目标是发动机功重比达到约 1.62 到 2.43 千瓦/千克 (1 到 1.5 马力/磅) 级别，制动额定耗油率 186 克/千瓦/小时 (0.3 磅/马力/小时)。这与相应柴油发动机的 0.1 ~ 0.2 马力/磅 (约 0.162 到 0.324 千瓦/千克) 相比，将减少 5 ~ 10 倍的体积和重量。而燃油效率优于重型柴油卡车发动机的两倍以上。

下一步计划

小型高效重油发动机可以赋予小型无人机更大的潜力，使其携带更重的载荷执行时间更长的任务；还可以通过降低混合动力推进系统的重量，克服电池的局限性，加速新兴电动飞机市场的发展。因此，新型转子重油活塞发动机具备在无人机和混合动力飞机市场广阔的应用前景。

液体活塞公司正在继续发展 X-Mini 发动机，根据与美国陆军合作的一项计划，陆军正在开发一种混合动力的牵引式加农榴弹炮，其中使用 70 毫升、火花塞点

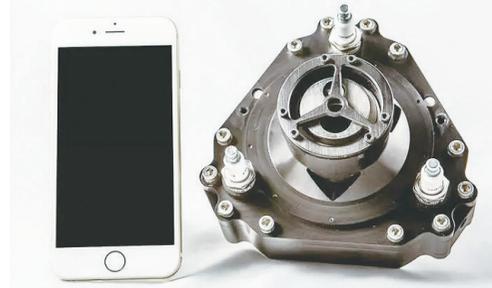
火的发动机驱动发电机，发动机可产生 3 马力功率，在项目完成时，可能会达到产生 5 马力功率。X-Mini 的一个演示发动机已经在 一辆卡丁车上进行测试了，以其 1.8 千克的重量代替原有的 18 千克的 6 马力活塞发动机。X-mini 是在 X4 之前发展的，技术成熟度已达 6 级，目标是达到技术成熟度 7 级，并准备在 2019 年 3 月之前转入生产。该公司的业务战略是与制造商合作，将其技术授权给发动机制造商，自己不会装备加工机械生产发动机，然后为特定的用途提供设计不同版本发动机的服务。

液体活塞发动机公司也正在推进 X4 重油发动机的研发，用于电动垂直起降 (eVTOL) 空中出租车的混合动力电推进系统。引用逐步对更高能量密度电池可用性“非常积极”的假设，施科尼克表示：“你可以使用电池飞行 20 分钟，或者你可以减少一些电池，并用我们的 40 马力发动机替换它们，使用一个完整的发电系统加上 36 磅的燃料共 100 到 150 磅，将可以替代 2000 磅电池。一个小的电池加上一个紧凑的发动机将会带来巨大的优势。”施科尼克认为城市空中出租车快速周转所需的充电也是一个问题，“使用 4C 充电，会比 iPhone 充电速度快 5 到 6 倍，将会很快使电池报废。在垂直起降机场为这些空中出租车充电将需要兆瓦级的电力，而我们的发动机是更加方便实用的动力装置。”

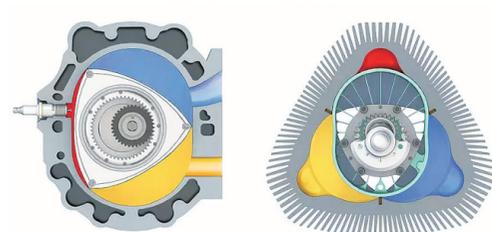
液体活塞公司也在考虑其 X 发动机的潜力，在 200 马力级别，作为飞机上的辅助动力装置 (APU)。施科尼克表示：“与涡轮基的辅助动力装置相比，使用我们的发动机，占用更小的空间，重量基本相同，可带来 4 倍的燃油效率提高。”



X4 是一台 30 千瓦、四冲程重油逆转子发动机。



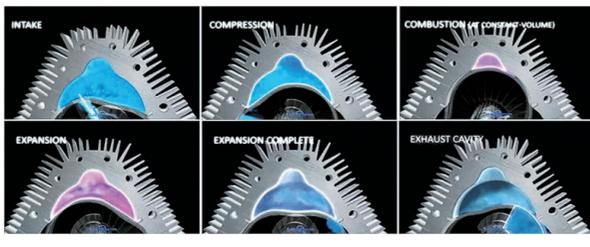
最初的 X-Mini 发动机。



X 发动机 (右) 和万克尔转子发动机 (左)。



在 40 马力下，X4 可以适用于第 2、3 类战术无人机。



X 发动机采用了高效混合热力循环。

航空发动机带热障涂层火焰筒异形孔制造工艺获突破



基于机械臂的柔性火焰筒皮秒激光精密制孔设备。

近日，中国科学院西安光学精密机械研究所召开了“商用航空发动机

带热障涂层火焰筒超短脉冲激光精密制孔设备及全套加工工艺”评审会，来自中国航发商发、中航动力等 4 家单位共 17 名专家与代表参加了此次会议。经与会专家质询、讨论以及现场考察等环节，评审专家组认为基于机械臂的柔性火焰筒超短脉冲激光精密制孔设备及全套加工工艺实现了带热障涂层火焰筒异形孔的高品质加工，可用于商用发动机带热障涂层火焰筒异形孔的加工。

火焰筒是航空发动机燃烧室的主要组成部分，也是发动机最重要的受

热部件之一，燃油和压缩空气在火焰筒内混合燃烧，将燃油的化学能转化为热能。随着航空发动机性能不断提升，航空发动机燃烧室进口温度也不断提高，为保障火焰筒在极端高温环境下稳定持续工作，必须对其进行冷却降温，通过在火焰筒合金材料上涂覆涂层并结合气膜冷却的方式是目前采用的主要手段之一。

对于带热障涂层火焰筒气膜孔的加工，国内通常采用先打孔再涂覆涂层的方式，存在涂层材料沉积导致孔径随机性缩小等问题；而采用长脉冲激光加工带热障涂层火焰筒气膜孔，又存在涂层表面氧化、烧蚀、涂层崩

边等缺陷，严重影响火焰筒的工作寿命。

针对上述工艺难题，西安光机所攻克了一批核心技术、关键工艺及整机系统集成技术，研发的基于机械臂的柔性火焰筒超短脉冲激光精密制孔设备及全套加工工艺，在国内率先实现了带热障涂层火焰筒异形孔高品质 (涂层无掉块、无开裂、表面无飞溅及烧蚀等缺陷、气膜孔几何尺寸和位置度符合设计要求) 一次性制孔，并从根本上解决了涂层材料沉积导致孔径缩小等难题，为带热障涂层发动机火焰筒气膜孔制造提供了全新加工手段。(辛文)

郜龙胜：“执拗”的软件工程师

| 中国航发动力所 陈翰

相传白居易写诗有股子“执拗”——总是不厌其烦地修改锤炼，执意要让不识字的老妪也能听得懂。因此他的诗在民间广为流传，很多都成为传世经典。

如果把代码比作软件工程师的“诗文”，郜龙胜对代码可读性的“执拗”也非同一般——每个软件项目有成百上千个变量，他要求每一个变量的名称必须一眼就能看明白；每个项目有成千上万行代码，他要求每一行代码必须一遍就能读清楚。

“郜哥这点就跟有代码‘洁癖’一样，而且平时看不出来。”与郜龙胜合作过的测试主管笑着调侃道。

生活中，身为长子的郜龙胜，像一质朴厚实的邻家大哥，话不多，身材并不高大，语气也相当温和，面庞白净，嘴唇上方挂着一抹稀疏的胡须，笑起来有些腼腆。乍看之下，他更亲近随和，跟“执拗”并不沾边。但是那次前后持续了近一个月的代码审查，让很多人对郜龙胜的印象大为改观。

2016 年 4 月，郜龙胜受邀给一个新的重点型号项目做同行评审 (代码审查)，客户要求年底务必完成首飞。“新研到首飞，剩下的时间很紧，而且该项目的软件开发主管刚离职，代码又经手了好几个人，缺陷漏洞的风险比较大。”测试人员回忆说。

多发现一个缺陷，就有可能减少一轮代码迭代、为项目挽回更多的时间。在那间 10 平方米左右的会议室里，一个月的评审，郜龙胜几乎把自己当成一个外人来谈代码，小到一代码字符，大到整个程序架构，一丝一毫的疑惑和不解都不放过。

“郜龙胜声音不大，总是不紧不慢地给我提问，问题一个接着一个。”当时的开发主管略带苦笑地回忆说，“真的就和墙上挂钟的秒针一样，嘀嗒……嘀嗒……不仅有规律，还催着你按他的节奏走。”

“你不管改不改，我会把问题记录在 CO (缺陷管理工具) 里。”对于代码结构设计不清晰、存在风险的地方，



郜龙胜也不过多争辩，只是用不大的声音重复这句话。

“有些地方不直接影响功能，当时不太想改，但是拗不过他。”开发主管无奈地笑着说到。

新项目从研制到首飞，代码必然要随着需求变更经过多轮维护。“维护的人不一定是最初写代码的人，初期多花点功夫，后期维护会简单些。”郜龙胜说得很真诚，又忍不住微笑道，“我知道当时开发主管一定很烦。但是过不了我自己这关，没法给用户。”

最终，郜龙胜累计发现文档和代码问题 300 多个，他征服了自己这关，也征服了项目组的全体成员。得益于郜龙胜的“执拗”，不仅许多编码和软件设计缺陷得到修复，连系统设计也得到优化，为年底的首飞成功巩固了坚实的基础。该项目的开发主管自此对郜龙胜心悦诚服，其他软件项目经理也似乎产生了共鸣：“请郜龙胜评审的时候，真的让人‘又爱又恨’。”

控制系统是航空发动机的“大脑”，而控制软件更是灵魂所在，其涉及的参数变量、逻辑分支千头万绪。郜龙胜琢磨的不仅是可读性，而是产品质量源头的设计。他不仅研究软件专业本身，还经常向产品系统设计人员请教，从系统全局角度探讨软件功能的设计初衷，现在连系统设计师都非常认可郜龙胜的系统专业性。缺陷率是软件质量的重要标尺之一，郜龙胜负责的项目，缺陷率评价 95% 以上都是最高级别的 A 级。

去年，郜龙胜与另外两位同事一起从一百多位软件工程师中脱颖而出，被评为研究所的“优秀员工”，谈及获奖的感言时，他说：“每个人都有无限的可能，选定一种一直往前走，应该不会太差。”话虽简单，但确如其人——他似乎就如那根不停转动的秒针一般，嘀嗒不止，“执拗”向前。

叶片技术的“雕刻者”

——记中国航发南方王科昌

| 中国航发南方 熊英

发动机是飞机的“心脏”，叶片处在“心脏”高温、高压、高转速工作环境，为“心脏”提供最优性能和最强推力。其渐变的叶型曲面、复杂的空心内腔以及多形式安装榫头，注定了每件叶片的加工都是一个高、精、尖的“艺术雕琢”过程，凝聚了无数次大大小小的革新和改进。

作为一名叶片制造技术的“雕刻者”，王科昌一干就是 12 年。

作为初学者的坚守

自踏进“南方”这片热土，王科昌就接触了叶片工艺技术。他深知，技术的高深造诣必须有勤学苦练的基本功作为基石。于是，他将叶片生产一线作为练功房，敏锐地观察各种叶片的特点和加工技术；他喜欢向操作者拜师学艺，一手的操作经验是前行路上最宝贵的财富；他惯于翻阅专业书籍，让叶片加工的理论知识逐渐变得系统而丰富。王科昌想要深入生产现场的腹地，抓住叶片制造的核心。

坚守需要毅力，因为总会有困难和压力跑来扰乱计划、动摇信念。王科昌以初生牛犊不怕虎的精神，坚守叶片制造领域。一张张设计图、一本本工艺规程、一份份工艺更改单、一

沓沓临时资料、一件件叶片实物，他认真对待，不曾怠慢；在与设计、操作等人员沟通协调过程中，矛盾、争执和抱怨都会存在，他却不忘提升叶片制造技术的初心；叶片种类繁多、制造技术精密，其中深藏着繁瑛与细微，他凭借一张设计图、一支笔、一个本，用淡定和钻研理清头绪。

一步一个脚印，王科昌仅用半年时间就成为了某叶片工艺技术工作的骨干力量，缓解了工艺技术人员紧缺的情况；他让工艺规程从薄到厚、从粗放到细致，产品实物质量的提升眼睛看得见；现场操作者拿着他编制、优化的工艺规程加工零件时，时常称赞：“科昌编的工艺规程，我们干起活来一百个放心！”这些都是坚守者的收获。

一颗不变的初心，一份坚定的信仰，阳光下，汗水湿透了他们的衣衫，然而阳光下的脚步依然向前迈进。

作为坚守者的攻关

在航机叶片科研生产中，王科昌用乘风破浪的勇气打败排山倒海而来的困难，攻下了一个又一个“拦路虎”。

某型发动机涡轮叶片频率合格率不高，该问题一直困扰发动机的交付。王科昌“吃透”图纸，反复分析设计尺寸、毛坯尺寸、机加尺寸，比对设

计图样与毛坯及成品叶片测量数据，利用仿真软件反复计算，发现了问题的根源在于设计图样尺寸不协调，导致产品实物频率普遍偏低。他和团队展开了一场与“时间赛跑”的比赛，协调设计人员重新制定方案，与毛坯制造、机加单位对新方案反复进行讨论，预测风险点，逐条制定应对措施……他们夜以继日、争分夺秒，没有了休息日，也没有了热乎乎的饭菜，他们只有一个信念：顶住压力、克服疲劳、永不言弃！最终，王科昌和他的团队利用最短的时间完成复查、数据分析、工艺试验、装配验证等工作，成功锁定问题，制定解决方案并验证，使该问题得到圆满解决。

这攻关的场景那么熟悉，时常在王科昌的身上重现，他想，成为叶片“大拿”之前，必定要与一个个未知的“敌人”近身搏斗，如此才能真正深入了解叶片制造技术的精妙之处。

作为攻关者的雕琢

在致力提升公司叶片制造技术的道路上，王科昌渐渐习惯“精雕细琢”，当一件件叶片以完全符合设计技术要求的状态装进发动机，王科昌仿佛看到了一件艺术品的诞生。

怀着对叶片工艺研究的满腔热情，王科昌乐于钻研，年轻的他承担



了压气机叶片精密制造技术、单晶涡轮叶片表面完整性表征等多个集团公司、公司级专项课题的研究，啃下了一个又一个“硬骨头”。攻克这些难题，他并不满足。看到薄壁机匣变形的问题严重影响发动机交付时，他成功地将照相电解等新工艺应用到解决该问题上，加工效率提升 50%；大力推进榫齿边缘数控加工、叶片快换和自适应加工技术，加工效率提升 33%，解决了目前混线生产模式下科研与批产快速换型问题，提升了设备利用率。

不断的钻研和创新，让叶片的线条更加流畅，叶片的外观更加精致，叶片的质量更加稳定，王科昌的叶片技术也攀上了新高度。立足当下、着眼未来，他继续在叶片之路上前行，要为飞机“心脏”贡献更完美的产品。