通用航空活塞发动机现状及发展趋势探讨

郑君 中电科芜湖钻石飞机制造有限公司

**摘要：**阐述了通用航空产业发展现状，通过数据分析的方式总结和归纳了通航产业的发展趋势，从技术角度论证了活塞发动机两种研制路线及两种燃料选取的优缺点，得出结论认为：我国通航产业发展存在着巨大潜力；通航活塞发动机在亚太地区将有较大的发展空间，活塞发动机为动力的通航飞机将在一定时间内占据主要地位；“汽车改”研制路线在研制航空活塞发动机方面具有更大的可行性，采用航煤或柴油作为燃料的航空活塞发动机将更受使用者青睐。在此基础上为研制单位提出了正向研制活塞发动机应重点考虑的关键技术和零部件供应链问题。

**关键词：**通用航空 活塞发动机 正向研制 关键技术 发展趋势

## 引言

通用航空，是指除军事、警务、海关缉私飞行和公共商业航空运输飞行以外的航空活动。通用航空发展始于二战后，最初就以活塞发动机作为动力来源。随着涡轮燃气发动机研制技术的逐步成熟，功重比/推重比高、舒适性好的燃气涡轮发动机也逐步应用于通用航空，但经济性占显著优势的活塞式航空发动机仍占据决定性的比例，并在轻型低速飞机上广泛应用。

国内在通用航空领域一直显著落后于西方发达国家，在通航发动机领域研制适航发动机的厂家为数不多，其产品更没有得到广泛应用。自2010年以来，国家陆续出台了发展通用航空的若干政策，并得到了积极的响应。清华大学[1]、南京航空航天大学[2]~[4]、北京理工大学[5]~[6]、芜湖钻石航空发动机有限公司[7]等高校和企业都开始了航空活塞发动机的研发工作，并取得了一定的阶段性成果。

本文首先分析了通用航空活塞发动机的发展现状，随后对其后续的发展趋势和技术发展方向进行了归纳总结，以求为通航活塞发动机的后续研制提供参考依据。

## 1、国内外发展现状

**1.1国外产业现状：**

通用航空在西方发达国家发展较为成熟。通用航空高速发展始于二战后，于70年代步入顶峰。1978年通用航空飞机交付量达17811架。进入80年代，由于经济衰退、通航飞机相对饱和、技术创新减少等，导致通用航空开始下滑并陷入低谷。90年代以来，随着世界经济的持续增长、政府鼓励政策的出台、航空产品的推陈出新，使通用航空在90年代后半期呈现复苏和重新崛起的势态。

通用航空产业主要集中在美国、欧洲、加拿大、澳大利亚等发达国家和地区。北美和欧洲销量约占全球总销量的70%左右。美国是世界通用航空产业最为发达的国家。2016年美国拥有通用飞机超过22.3万架，占世界总量的62%，拥有2万多个通用航空机场，年飞行时间近2500万小时。通用航空产业给美国带来的经济产值超过1500亿美元。

多年的发展和技术积累为西方技术先进国家积累了大量的研制和使用经验，形成了较为完善、灵活的航空活塞发动机研制体系和适航管理制度。

**1.2国内产业现状：**

通用航空产业是中国改革开放以来极少数没有放开发展的产业，致使中国通航明显落后于西方先进国家。截至2018年底，中国通航飞机数量仅有3380架（其中2009年到2018年新注册通用航空器418架），不足全球通航飞机总量的5‰，飞行时间仅达到美国的2%。这些数据一方面说明了国内通航产业发展的滞后，另一方面也表明了中国通航产业发展的巨大潜力。

就通航动力系统而言，国内通用航空发动机整体实力较弱，是制约中国通用航空发展的重要因素。国内缺少成规模的通航发动机生产商，也缺少成熟的通航发动机产品，通用航空发动机基本上全部依赖进口。

自2005年开始，国家陆续出台了大量的通航激励政策，通航产业开始引起国人的关注，但受多方面因素制约，至今仍然发展缓慢。国内最早于2006年，由中国航发南方工业有限公司开发活塞6K和HS9航空活塞发动机项目，并成为目前国内仅有的两款适航取证的航空活塞发动机[8]。随后，清华大学、南京航空航天大学、北京理工大学、芜湖钻石航空发动机有限公司等高校和企业也开展了通航活塞发动机的研制开发工作。截止目前，绝大部分的产品尚处于研制阶段，还没有达到批量装机使用的程度。

通航活塞式发动机与车用活塞发动机有较多的共性技术，其供应链也可借用与车用活塞发动机供应体系。目前国内车用活塞发动机技术已有长足发展，通航活塞发动机在国内已具备了较好的研制基础，技术难度相对较低，自主研制安全可靠的发动机的具备可行性。

国内通航发动机的适航标准尚有待完善。目前国内的适航标准很大程度上借鉴了美国和欧洲的经验和标准，受行业现状发展因素影响，尚没有经过充分的验证和考核。

**1.3 活塞发动机研制技术现状**

现有航空活塞发动机多机型陈旧，缺少技术创新和新技术的应用。1980年以来，通航飞机销量的大幅下跌直接影响了发动机生产商的创新和开发热情。为了节约运营成本，各大活塞发动机生产商纷纷减少新产品开发投入，将重心转移到对现有产品的维护和改型上。时至今日，多数通航活塞发动机仍然是二十世纪中期的产品或其改型产品，如目前应用最为广泛的Lycoming系列发动机。汽车活塞发动机普遍应用的电控喷射、缸内直喷、涡轮增压等成熟技术，在通航领域却极少被应用。

虽然国内有很多单位开始了航空活塞发动机的研发，但绝大多数的研究均是基于国外较为成熟的航空活塞发动机改型，如将使用航空汽油点燃形式的活塞发动机改型为航空煤油点燃。真正意义上完全自主正向开发，掌握核心技术的研究单位并不多见。

此外，通航领域法规陈旧，对经济性、排放要求宽泛，产品开发取证周期长，投入大，对安全性要求苛刻等问题也是导致产品更新换代慢，新技术应用少的影响因素。

## 2.发展趋势分析

**2.1 通航产品正快速向高端发展，但活塞类飞机仍在一定时间内占据主导地位**

通用飞机按动力系统分类，主要包括通用活塞类飞机（配装航空活塞发动机）、通用涡轮类飞机（配装涡桨发动机、配装涡扇和涡喷发动机的商务飞机等）。活塞类飞机相比涡轮类飞机更加便宜，且耗油更少，其性能也能满足大部分通用航空活动需求，因此在2008年以前一直处于通用航空领域的绝对主导地位。图1为1995年到2018年两类飞机销量对比[9]。如图所示，活塞类飞机数量在2008年以前一直处于绝对的领先地位。但在2008年以后，涡轮类飞机在销售数量上超过了活塞类飞机，但在销售数量上相差不大。

图2是1980年到2017年两类飞机的飞行作业时间对比[9]。如图所示，涡轮类发动机的飞机飞行作业时间逐年提高；活塞发动机的飞机作业飞行时间逐年降低，下降趋势明显，但飞行时间的绝对数量还明显高于涡轮发动机的飞机。此外，图3对2018年到2027年两类飞机的飞行作业时间进行了预测[9]，从预测结果来看，在未来的10年内甚至20年内，活塞类飞机的飞行作业时间仍远高于涡轮类飞机。

 

图1 1995年到2018年两类飞机销量对比 图2 1980年到2017年两类飞机飞行时间对比



图3 2018年到2027年运行时间预测

此外，活塞类飞机庞大的在役数量和飞行作业使用时长带来了维修、翻修和更换发动机的巨大市场和商机，这也表明了活塞类飞机产业仍将在一定期间内占据通航的主导地位。

**2.2 通航应用向亚太等欠发达地区平衡，活塞发动机在亚太地区有较大发展空间**

随北美、欧洲等发达地区的饱和及全球经济逐渐平衡，通航应用向欠发达地区转移是大势所趋。图4、图5和图6分别是活塞类飞机、涡桨飞机及商务喷气飞机销量在全球各区域的销售量百分比分布对比[9]。

由图可见，北美地区作为通航产业最为发达的地区，活塞类飞机和涡桨飞机销量都出现了比较明显的下滑，而在商务机等高端通航方面有增长趋势。发展相对落后的亚太地区，在活塞类、涡桨类飞机和商务喷气飞机的销量都有较大提升，尤其在活塞类飞机方面提升尤为显著。由此可见，航空活塞发动机在亚太地区有望出现较大的发展空间和预期（数据尚未计入2014年至2018年中国的通航飞机数据）。

 

图4活塞类飞机年销量在全球的分布 图5 通用涡桨飞机年销量在全球的分布



图6 商务喷气飞机年销量在全球的分布

## 3、活塞式航空发动机研制技术路线

**3.1 全新研制或者由汽车发动机改型**

航空活塞发动机研制路线主要有两条，一条路线是针对飞行器的需求全新研制；另一条路线是由汽车用发动机经航空适应性改型研制，下文称其为“汽车改”。

全新研制的活塞发动机一般设计成水平对置的结构形式（传统的星型布局已少有应用），这样更便于在飞机上的布局。同时在轻量化方面可以考虑得更多，重量方面具有较大优势。目前在用的活塞发动机很大比例都是该类型，如Lycoming及Rotax的系列产品。全新研制的发动机虽然在装机布局和轻量化方面有较大的优势，但受制于航空发动机实际用量小的限制，需要经过很长时间的使用和改进才能促成发动机的成熟完善。同时同样因为用量小，其供应链体系的维系、生产组织成本偏高及研发适航成本的摊销造成了发动机成本居高不下。更高投入、更长回报周期是采取全新研制活塞发动机路线所难以解决的难题。受此影响，一款航空发动机研发后，往往会应用数十年而不会做根本性的技术改动，导致技术水平相对落后。

针对全新研制路线中存在的问题，很多公司选择了基于汽车发动机进行航空适应性改进研发的方式研制航空活塞发动机，即“汽车改”路线。大批量的汽车应用，大幅度拉低了“汽车改”航空发动机的核心机的成本摊销，使其具有更大的市场竞争力。TAE Ceturion 2.0和Austro Engine公司的AE300发动机就是基于该路线研发。大批量汽车上的长时间应用充分考核了该类活塞发动机核心机的可靠性；很多新技术、新工艺在汽车上经短短几年的应用和改进后就可以直接应用在该类发动机上。然而，汽车发动机设计中轻量化关注度不足导致的重量偏大也被移植到改进研制的航空活塞发动机上来。此外，绝大部分汽车发动机采用的直列气缸结构形式不宜于在飞机上布局也是“汽车改”发动机研制路线中难以更改的弱点。

**3.2 活塞式航空发动机燃油选择**

目前大部分活塞式发动机使用100LL的航空汽油。航空汽油的产量仅有航空煤油的1%，不到汽车汽油的0.2%。受到产量小，以及更为严苛的生产标准的限制，只有很少几家公司愿意或者能够生产100LL航空汽油。这种情况已严重制约通航市场发展，发动机生产商不得不寻求新的替代燃料。这就促生了使用航空煤油或柴油、车用无铅汽油两个发展方向。

**3.2.1 航空煤油或柴油**

航煤或柴油燃料是一个更有前景的解决方式。和航空汽油不同，航空煤油(柴油类燃料，例如Jet A)在全世界都有广泛供应。此外，航空煤油或柴油的燃点显著高于汽油，其使用安全性更高，因此使用航煤或柴油的航空器更受舰船的青睐。航空煤油和柴油以为其柴油发动机的另外一个优势在于，此类发动机可以有更高的压缩比和更精确的燃料控制，从而有更高的燃烧效率及由此带来的更低的油耗。

2002年TAE公司的第一个产品Centurion 1.7正式生产，成为首个在飞机上大规模应用的航煤发动机，随后Austro公司的AE 300和SMA公司的SMA 305也取得了适航证。2008年初，Centurion发动机就已经生产了2500多台，共有1500多架飞机使用该发动机，是产量最大的航煤发动机。AE 300发动机2009年面世，现在在役数量近3000台，主要配装在钻石DA42和DA40飞机上。

从制造商来看，显然航空煤油发动机已经成为主流趋势。赛斯纳、钻石已相继推出航煤飞机。中航工业控股的大陆发动机公司SMA发动机的基础上选择了涡轮增压柴油活塞发动机技术。AE公司同样在为AE 300寻找替代产品，坚持增压柴油发动机。

**3.2.2 车用无铅汽油：**

Rotax公司的活塞发动机普遍使用97号汽油。莱康明公司也计划在不久的将来，通过对现有发动机的改进发展车用汽油发动机。使用汽油燃料的航空活塞发动机均需采用复杂的点火系统，据统计，点火系统故障率处于航空活塞发动机故障的第一位，且显著高于其他故障。

目前来看，无论是使用航空煤油/柴油，还是使用无铅汽油，技术层面上都存在一定的局限性。柴油发动机虽然燃油经济性好，但笨重的机体致使功重比远低于同等水平的其他发动机，如能在功重比方面取得长足进步，必将前景广阔。受制于燃油的低抗爆性，发动机的低压缩比，无铅汽油发动机注定只能停留在低功率水平。

**3.3 正向研制中的核心问题**

国内通航活塞发动机研制起步晚，但通航行业发展的迅猛态势促使很多研制单位投入到通航活塞发动机的研制工作中来，其研制路线也由基于现有机型改进逐步向正向研发转变。对于正向新研发动机抑或“汽车改”路线均有两个核心问题需要解决以确保产品研制得以成功。

首先需要解决的是发动机电控系统、燃油系统和涡轮增压系统（如果有）的技术突破。前述几个系统目前均为个别技术先进公司垄断，且与车用系统存在较大差异，是正向研制航空活塞发动机最需要突破的核心技术问题。其次，需要解决的是航空活塞发动机零部件的供应链问题。航空活塞发动机不同于汽车发动机，其批量小，质量要求高，受制于成本和市场等因素制约，零备件的长期持续供应是投放市场后产品能否存活的关键问题。

## 4、结论

（1）我国通航产业发展和技术水平明显落后于西方技术先进国家，这从另一角度也表明了中国通航产业发展存在巨大潜力；

（2）通航应用向亚太等欠发达地区平衡，通航活塞发动机在亚太地区将有较大的发展空间；

（3）通航飞机动力系统正快速向燃气涡轮发动机发展，但以活塞发动机为动力的通航飞机将在一定时间内占据主要地位；

（4）“汽车改”研制路线能有效降低活塞发动机研制周期和成本，在研制成熟可靠、有市场竞争力的航空发动机方面具有更大的可行性；

（5）如在功重比方面有所改进和突破，采用航煤或柴油作为燃料的航空活塞发动机将更受使用者青睐。

（6）电控系统、燃油系统和涡轮增压系统是正向研制中需要解决的关键技术问题，零备件长期供应是投放市场后产品能否存活的关键问题。

参考文献：

1. 冯光烁，周明. 重油航空活塞发动机技术路线分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(10): 1114~1121.
2. 李冰林,魏民祥.  [活塞式发动机燃烧煤油研究现状与技术分析](https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?filename=XXNR201206023&dbcode=CJFQ&dbname=CJFD2012&v=)[J].小型内燃机与摩托车. 2012(06)
3. 蔡娟.[某小型航空煤油活塞发动机总体性能分析及优化](https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?filename=1015952066.nh&dbcode=CMFD&dbname=CMFD2016&v=)[D].南京航空航天大学. 2015.
4. 高岩飞.[点燃式煤油发动机燃油雾化技术研究](https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?filename=1011291932.nh&dbcode=CMFD&dbname=CMFD2012&v=)[D].南京航空航天大学. 2010.
5. 耿钊,赵振峰,李鸿崔,华盛,王蕾. 点燃式航空重油活塞发动机冷起动控制策略[J]. [航空动力学报](https://kns.cnki.net/kns/NaviBridge.aspx?bt=1&DBCode=CJFD&BaseID=HKDI&UnitCode=&NaviLink=%e8%88%aa%e7%a9%ba%e5%8a%a8%e5%8a%9b%e5%ad%a6%e6%8a%a5).2020.01:185~195
6. [高宏力](https://kns.cnki.net/kns/popup/knetsearchNew.aspx?sdb=CJFQ&sfield=%e4%bd%9c%e8%80%85&skey=%e9%ab%98%e5%ae%8f%e5%8a%9b&scode=37638979&acode=37638979);[张付军](https://kns.cnki.net/kns/popup/knetsearchNew.aspx?sdb=CJFQ&sfield=%e4%bd%9c%e8%80%85&skey=%e5%bc%a0%e4%bb%98%e5%86%9b&scode=14405584&acode=14405584);[王苏飞](https://kns.cnki.net/kns/popup/knetsearchNew.aspx?sdb=CJFQ&sfield=%e4%bd%9c%e8%80%85&skey=%e7%8e%8b%e8%8b%8f%e9%a3%9e&scode=38992086&acode=38992086)等.航空煤油活塞发动机空气辅助喷射系统喷雾特性试验研究[J].兵工学报.2019.5: 927~937
7. 卢东亮,郑君,胡崇波,卞少春.通用航空活塞发动机的发展现状研究[J]. 内燃机与配件,2019.4: 927-937
8. 中国民用航空适航审定中心. 民用活塞发动机适航审定技术研究结题材料.2018.5
9. General Aviation Manufacturers Association, 2018 ANNUAL REPORT. 2018