

活塞航空重油发动机发展现状

潘钟键¹, 何清华^{1,2}, 杨晶²

1. 中南大学高性能国家重点实验室, 长沙 410083

2. 山河智能装备股份有限公司, 长沙 410199

摘要 中国的活塞式航空发动机使用的是航空汽油,其活塞航空重油发动机研制目前尚属空白,而研制该类发动机对中国通用航空、军事领域的发展具有重大意义。介绍了国外活塞航空重油发动机的发展现状,列举、对比了4种成熟机型的相关性能参数,阐述了中国在活塞航空重油发动机方面的研究现状。通过借鉴国外的先进技术,分析了中国在研究过程中出现的燃烧效率、控制系统等问题,提出了中国研发活塞航空重油发动机的关键技术难题,为中国通用航空领域的发展提供参考。

关键词 活塞;航空重油发动机;通用航空;性能参数

中图分类号 U464.27

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.34.012

Development Status of Piston Aviation Heavy Oil Engine

PAN Zhongjian¹, HE Qinghua^{1,2}, YANG Jing²

1. State Key Laboratory of High Performance, Central South University, Changsha 410083, China

2. Sunward Intelligent Equipment Co., Ltd., Changsha 410199, China

Abstract The development and manufacturing of piston aviation heavy oil engines remains a blank area in China at present, since the aviation gasoline is used in piston engines. The study of the piston aviation heavy oil engine is of great significance to the aviation for both general and military uses. The development status of researches abroad is reviewed, the performance parameters of 4 types of advanced engines are compared. The problems of combustion efficiency and control system are the keys of researches in China according to the advanced foreign technology. This review provides a technical reference for the development of the general aviation in our country.

Keywords piston; aviation heavy oil engine; general aviation; performance parameter

0 引言

活塞发动机目前主要用做低成本无人机和初级教练机、行政机、小型运动飞机的动力装置。该类发动机使用的都是航空汽油(含铅)。欧美国家已经明确提出禁止使用含铅燃料的时间限制,而且在军舰等军事设施上严禁配备汽油,同时各大航线也不配备航空汽油。活塞发动机的燃料问题成为通航和军事领域的一道难题。解决方式一是使用车用的无铅汽油替代航空汽油,二是研制航空重油发动机,使用航空煤油或者柴油作为燃料。由于车用汽油有较高的饱和蒸汽压和添加剂腐蚀性,会给飞机带来安全隐患,因此使用航空重油是

最佳的解决方案。航空重油的燃料供应有保障,其比能量高于汽油,运输和存储更加安全,而且带涡轮增压,高空性能优越,燃烧效率提高,可大大提升轻型飞机的性能^[1-3]。

国际上能开发不使用含铅的活塞式航空重油发动机的国家有美国、德国、英国、法国等发达国家,通用航空技术被西方发达国家垄断,由西方发达国家研发的活塞重油发动机占领了通航市场。据美国联邦航空管理局(FAA)数据显示,2012年美国拥有超过30万架安装活塞发动机的通用航空飞行器,这一数据仍在增长。随着中国低空领域的逐渐开放,轻型飞机在国内将会有广阔的前景,活塞重油发动机的研发也开始

收稿日期:2013-07-18;修回日期:2013-09-22

基金项目:湖南省新科技成果转化项目(2012CK1003)

作者简介:潘钟键,博士研究生,研究方向为活塞航空重油发动机性能模拟,电子信箱:pzjsh@126.com;何清华(通信作者),教授,研究方向为智能装备与小型飞机开发,电子信箱:hqh@sunward.com



受到关注^[9]。本文综述国内外活塞重油发动机的研究现状,对目前比较先进的活塞重油发动机的性能参数进行对比,分析该类发动机在研发和使用过程中的技术瓶颈,以期为中国通用航空的发展提供参考。

1 国外研究现状

(1) Thielert Centurion 2.0。Centurion 2.0 由德国 Thielert 公司生产,钻石飞机公司曾将其安装在超过 3500 架飞行器上。发动机构造如图 1 所示。



图 1 Centurion 2.0 型发动机
Fig. 1 Centurion 2.0 type engine

Centurion 2.0 发动机是 Centurion 1.7 的延伸,2006 年开始生产,发动机采用液冷方式^[45],4 冲程,航空煤油和柴油均可作为其燃料。该型号发动机获得了欧洲航空安全局 (EASA)、FAA 等 60 个机构的认证,是第一款取得适航认证的新型航空煤油发动机,但由于价格昂贵、维修保养复杂、每飞行 300h 要更换齿轮箱、售后服务网络少等因素,销售一直不佳。Centurion 2.0 发动机的具体性能参数为:涡轮增压柴油机,4 缸直列,缸径 83mm,冲程 92mm,压比 18:1,外形尺寸为 778mm×816mm×636mm,质量 134kg,最大功率 100kW,功重比 0.7463,不失功率最大爬升高度 1828m,排量 1.9L,起飞转速 2300r/min,大修间隔 1500h,油耗 25L/h。

(2) Austro AE300。AE300 由奥地利 Austro 公司生产,采用 DOHC(双对置凸轮轴)技术,每缸有 4 个气门,提高发动机高转速时的进气效率。齿轮箱和发动机之间安装扭转减振器,飞行时减少螺旋桨的震动。发动机构造如图 2 所示。



图 2 AE300 型发动机
Fig. 2 AE300 type engine

AE300 涡轮增压航空煤油发动机是 Centurion 2.0 的延续,在 2009 年获 EASA、FAA 认证。AE300 型发动机采用液冷方式,4 冲程,煤油、柴油、生物重油都可做为燃料^[9],其具体性能参数为:涡轮增压柴油机,4 缸直列,外形尺寸为 738mm×855mm×574mm,质量 185kg,最大功率 125kW,功重比 0.6756,不失功率最大爬升高度 3048m,100%功率飞行油耗 35.1L/h,经济飞行油耗 21L/h,排量 1.9L,发动机转速 3800r/min,大修间隔 1500h。

(3) SMA SR305-230E。SR305-230E 型发动机是法国 SMA 公司生产的 4 缸 4 冲程压燃式重油发动机,获得了 EASA、FAA、俄罗斯洲际航空委员会 (IAC-AR) 认证,该系列下的 230E-C1 发动机已安装在赛纳斯飞机上,并在 2013 年 7 月美国实验飞机协会举办的飞来者大会 (EAA Air Venture) 上进行了表演。SMA SR305-230E 型发动机的市场占有率不大,主要是因为发动机自身重量和体积过大,影响了发动机机身的整体设计^[78](图 3),其具体参数为:涡轮增压柴油机,4 缸水平对置,外形尺寸为 820mm×930mm×750mm,质量 208.6kg,最大功率 171.3kW,功重比 0.8212,不失功率最大爬升高度 3048m,油耗 28~40L/h,排量 5L,发动机转速 2200r/min,大修间隔 2400h。



图 3 SR305-230E 型发动机
Fig. 3 SR305-230E type engine

(4) DH4-165。DH4-165 型发动机是美国 Deltahawk 公司的产品,DH4 系列的功率范围为 119.2~149kW。该系列发动机正在接受美国 FAA 的最后认证,产品已经推向非认证市场。发动机构造见图 4。

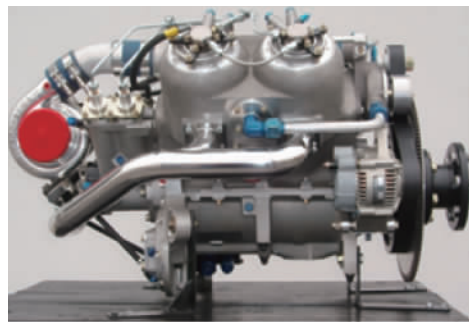


图 4 DH4-165 型发动机
Fig. 4 DH4-165 type engine

Deltahawk 的发动机结构紧凑,质量较轻,功重比高,气缸采用 V 型分布,对飞机整流罩有着特殊要求。DH4 型 4 缸发动机功率有 119.2、134、149kW 3 种类型^[9],属于 2 冲程压燃式柴油机,具体参数为:涡轮增压柴油机,4 缸 V 型,缸径 102mm,冲程 101mm,压比 18:1,外形尺寸为 831mm×586mm×524mm,质量 148kg,最大功率 123.5kW,功重比 0.8345,不失功率最大爬升高度 5486m,排量 3.3L,发动机转速 2700r/min,大修间隔 2000h。

通过对 4 种机型的性能参数进行对比,Deltahawk 公司的 DH4 系列发动机具有较高的功重比,爬升高度高,同时该系列发动机尺寸较小,结构紧凑,对于轻型飞机而言,这是一个绝对的优势。但该型发动机采用 2 冲程工作方式,与其他 4 冲程发动机相比,其排放技术将受到人们的关注。

2 国内研究现状

国内活塞式航空重油发动机大多处于基础研究阶段。南京航空航天大学在国防预研项目支持下,对 Thielert 公司生产的 2 冲程汽油机进行改装,利用煤油作为燃料,采用点燃式的方法进行实验,在煤油喷射油膜补偿和点火提前角方面取得了一定的研究成果,该研究完成了轻型飞机燃料的转变,实现了将重油作为活塞发动机燃料的设想。但由于重油的燃点很高,需要火花塞产生很高的能量,同时燃油效率没有得到提高,燃油消耗率高于压燃式 20% 以上,故经济性能没有提升^[10]。北京交通大学对小型高速航空重油发动机的混合气进行仿真,对火焰传播特性、混合气形成等进行研究,探讨燃烧规律。美国 Deltahawk 公司为提高燃烧效率,设计出一种新型燃烧室,活塞顶部与气缸盖之间设计成上下近似对称结构,同时采用 180° 喷射角,大大提高了重油的雾化效果和燃烧效率,减少了碳烟颗粒的排放,提高了发动机的性能^[11]。清华大学对压燃式活塞重油发动机的电控单元进行研究,以 Centurion 1.7 型号发动机为研究对象,通过电流反馈对喷射电磁阀进行喷油控制,控制精度高,但可靠性不太理想^[12]。Thielert 公司经过多次实验研究,自主研发的电子发动机和螺旋桨控制管理组件(FADEC)控制系统极大提高了飞机的性能,提高发动机的高鲁棒性和续航能力,该控制系统广泛应用于 Centurion 2.0、Centurion 4.0 型号发动机上。

国内目前还没有正式生产活塞式重油发动机方面的报道,但山河智能装备股份有限公司正与美国 Deltahawk 公司合作共同研发活塞重油发动机,为解决发动机轻量化、可靠性低等技术难题,采用国外先进的工艺技术和材料减轻发动机的重量和缩小外形尺寸。Deltahawk 公司对机体轻量化技术进行了多年研究,发动机主体采用铝合金以及金属基复合材料,采用钛合金连杆,活塞销采用 DLC 涂层增加耐磨,活塞组件分段采用不同材料,并进行了大量的可靠性和耐久性试验,以保证轻量化前提下的可靠性。结构方面,SMA 公司在保证可靠性前提下,采用凸轮轴驱动分布式油泵代替独立使用燃油泵技术,用以减轻发动机的重量,并计划 2015 年投入使

用,但这一技术 Deltahawk 公司已经开始使用。发动机的紧凑布局也能减小发动机的外形尺寸,Austro 和 SMA 公司采用气缸直列和对置分布,虽然外形尺寸有所减小,但仍然过大,难以得到航空爱好者的认可;V 型分布虽然增加了整流罩的设计安装难度,但总体外形尺寸得以减小,甚至低于 Lycoming 360 系列型号汽油机尺寸。

3 活塞重油发动机技术难题

航空重油的闪点、燃点都比汽油高,不易燃,不易挥发,安全性能高,燃烧效率高,获取方式容易,这些特性使重油发动机的受欢迎程度远远高于汽油机,尤其是在军事和航空上具有重要意义。重油发动机的点火方式有压燃式和点燃式两种,根据航空重油的特性,压燃式更符合其性能特点。因国内目前还没有真正的样机,故大多研究都是基于汽油机进行改造,燃烧煤油进行实验研究。对于活塞航空重油发动机,中国目前主要存在以下技术难题。

(1) 轻量化前提下的可靠性技术。活塞发动机因体积小重量轻而被广泛用于无人机、小型飞机等,能够完美设计机身曲线。而重油发动机,因其工作特性,使机体体积重量都较庞大,大大降低了发动机的功重比,这是活塞重油发动机能否顺利在轻型飞机上使用的一个关键问题。要保证轻型飞机有较好的飞行性能,必须减轻发动机的重量,合理设计其尺寸使其紧凑,在轻量化的前提下,同时保证在粗暴的工作方式下发动机各部件运行正常,不会因强度问题引起裂纹,从而导致安全事故发生。可靠性和耐久性试验也是国外一些发动机公司认证过程中的一大难题。

(2) 增压匹配技术。重油的点火方式基本都采用压燃式,需要较高的压缩比才能压燃重油。由于高空环境下空气稀薄,密度降低,发动机充量系数下降,热负荷增加,需要对其进行增压。美国 NASA 研究的 3 级涡轮增压活塞汽油发动机飞行海拔高度达到 24000m^[13],但在柴油机上,目前基本只使用 1 级增压技术,不失功率的情况下爬行高度在 3048m 左右,但这远远低于汽油机爬升高度。1 级增压技术达到高空后,压气机压气系数减小,压比增大,涡轮轴转速降低,发动机效率急剧下降。Deltahawk 公司采用废气涡轮与机械增压器共同增压技术,不失功率爬升高度可达 5846m,但仍远不及汽油机的爬升高度。随着对飞机爬升高度的追求,增压与发动机匹配技术也将是活塞重油发动机研究的技术难题。

(3) 喷雾燃烧技术。喷雾与燃烧技术影响发动机的整体性能,对发动机的热效率、排放都起着重要的影响。喷雾效果的好坏还影响发动机的启动,由于机体温度和天气的影响,使增压进入的空气温度不能快速得到提升,加之煤油自身黏度大,闪点燃点高,低温流动性差,喷雾效果不好,导致发动机启动困难。对于燃烧产物,欧盟已经明确活塞发动机的排放标准,中国对活塞发动机的排放也会尽快出台相关政策,由此喷雾燃烧技术也会在活塞重油发动机的使用中慢慢引起人们的重视。

4 结论

通过分析当前轻型飞机使用航空汽油作为燃料带来的问题,阐述研发活塞航空重油发动机的重要意义,指出解决这些问题的关键是研制重油发动机。对目前国外比较先进且成熟的4种型号的活塞重油航空发动机进行性能对比,介绍了它们的性能参数,同时对中国在活塞重油航空发动机方面的基础研究进行总结,并和国外技术进行对比,分析研究的不足。指出轻量化、可靠性、增压匹配、喷雾燃烧等是中国研发活塞航空重油发动机面临的主要技术难题,可为中国的自主研发提供参考。

参考文献 (References)

[1] 顾诵芬. 关于使用航空煤油活塞式发动机的评估 [R]. 北京: 中国航空运输协会通用航空委员会, 2008.
Gu Songfen. Evaluation of piston engines on the use of aviation kerosene [R]. Beijing: General Aviation Committee of Chian Air Transportation Association, 2008.

[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[J]. 小型内燃机与摩托车, 2012, 41(6): 87-90.
Li Binglin, Wei Minxiang. Small Internal Combustion Engine and Motorcycle, 2012, 41(6): 87-90.

[3] 王春丰, 魏民祥. 航空活塞发动机燃烧煤油冷起动油量控制研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(7): 1619-1624.
Wang Chunfeng, Wei Minxiang. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(7): 1619-1624.

[4] Dagaut P, Cathonnet M. The ignition oxidation and combustion of kerosene: A review of experimental and kinetic modeling[J]. Progress in Energy and

Combustion Science, 2006, 32(1): 48-92.

[5] Wentzler S. Upgrade to Centurion 2.0 [EB/OL]. 2010-06-25 [2013-07-10]. <http://www.centurion-engines.com/typo3/index.php?id=65&L=1>.

[6] Lietz P. AE300 technical data [EB/OL]. 2013-02-26 [2013-07-10]. <http://austroengine.at/en/home1>.

[7] Obodeh O, Akhere N C. Experimental study on the effects of kerosene-doped gasoline on gasoline-powered engine performance characteristics [J]. Journal of Petroleum and Gas Engineering, 2010, 1: 37-40.

[8] Perinet G. Technical characteristics of SR305-230E[EB/OL]. 2011-05-11 [2013-07-08]. <http://www.smaengines.com/spip.php?rubrique2&lang=en>.

[9] Weeb D R. Aviation engine economic comparison [EB/OL]. 2010-07-25 [2013-07-10]. <http://www.deltahawkengines.com/specif00.shtml>.

[10] 李冰林, 魏民祥. 二冲程煤油发动机整机建模与初始点火提前角计算分析[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(5): 704-708.
Li Binglin, Wei Minxiang. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(5): 704-708.

[11] 莫胜钧. 重油预混层流点火特性的仿真分析[J]. 内燃机与动力装置, 2012, 29(3): 113-116.
Mo Shengjun. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2012, 29(3): 113-116.

[12] 刘少杰. 压燃式航空活塞发动机电控单元设计 [D]. 北京: 清华大学, 2012.
Liu Shaojie. Design of ECU for compression-ignition aircraft engines[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.

[13] 魏名山, 盛申军, 彭发展. 活塞式航空汽油机增压的模拟研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(6): 652-656.
Wei Mingshan, Sheng Shenjun, Peng fazhan. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(6): 652-656.

(责任编辑 王媛媛)

·学术动态·



第十三届中国青年科技奖获奖者名单公布

由中央组织部、人力资源社会保障部、中国科学技术协会共同举办的第十三届中国青年科技奖,经推荐单位推荐和专家提名,中国青年科技奖领导工作委员会办公室资格审查,公示有效候选人信息,并经中国青年科技奖评审委员会评审,中国青年科技奖领导工作委员会审批,共99名优秀青年科技工作者获奖。

2013年11月29日,第十三届中国青年科技奖获奖者名单公布。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/15213549.html>。