

航空活塞发动机工程技术管理

丁发军 闫锋 著



西南交通大学出版社
· 成 都 ·

前 言

近年来随着我国低空空域开放步伐的加快，国家相继出台了各种发展通用航空产业的支持政策。国务院颁布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》把“低空多用途通用航空飞行器”列为“重点领域——交通运输业”的“优先主题”内容。作为民航的“两翼”之一的通用航空业也进入了发展的高速期和重要机遇期。据《2013年中国通用航空产业发展分析报告》数据显示，截至2013年底，我国通用航空机队在册总数为1 654架（具），比上年增长23.2%。据中国民航总局的预测，到2020年通用航空机队规模总数将达到10 000架，其中活塞飞机6 000架，涡桨飞机2 000架，喷气公务机500架，直升机1 500架。通用航空业在国家经济中起的作用会越来越大。

如何保证该行业健康持续地发展下去，是我们应该提前考虑的一个重要问题。活塞类飞机占据通用飞机的主导地位，航空活塞发动机的适航管理也是一个绕不开的问题。中国民航飞行学院作为全球最大的民航飞行员培训机构，拥有5个飞行训练分院，5个机场，1个模拟机训练中心，其中活塞类飞机达200多架。2003年至2013年10月中国民航飞行学院共完成飞行训练180多万小时（2012年全年飞行训练258 750小时），事故万时率为0.011，事故征候万时率为0.182，远低于成熟通航国家万时率，甚至低于运输航空万时率。在这么高强度的飞行训练环境下，取得这么高的安全飞行纪录，是和科学有效的航空器维修工程管理分不开的。美国CMI大陆发动机公司（中航国际控股）于2014年5月底正式向中国民航飞行学院飞机修理厂颁发大陆发动机IO-360-ES维修中心授权证书和大陆发动机试车台授权证书，这不仅是美国CMI大陆发动机公司在全球授权修理大陆发动机的首家维修中心，也是唯一一家大陆发动机授权维修中心。大陆发动机是目前国内通航飞机上使用最多的活塞发动机之一。标志着中国民航飞行学院在提升通用航空维修标准和能力上又向前迈出了一大步。中国民航飞行学院飞机修理厂已同时具备了全球最主要的两种航空活塞发动机型号的维修能力（另外一种型号为美国莱康明发动机）。

我国航空活塞发动机维修工程技术管理刚刚起步，各种问题有待解决。本书从几个角度，结合作者所属单位的航空活塞发动机使用和工程管理经验，

研究和提出了一些适航管理方法，人工智能故障诊断技术和计算机应用工程技术。本书选用市场主导型号的航空活塞发动机（莱康明、大陆等）为研究对象。全书分为八章：第一章介绍了通用航空概况，包括通用飞机概况和航空活塞发动机概况；第二章介绍了航空活塞发动机适航管理，包括初始适航管理要求和持续适航管理要求；第三章介绍滑油系统故障诊断方法，重点分析了基于 BP 神经网络的滑油故障诊断方法；第四章介绍了点火系统的故障诊断方法，重点分析了应用 GO 法理论的故障诊断技术；第五章介绍了燃油系统故障诊断方法，重点分析了基于 Petri 网模型的燃油系统故障诊断方法；第六章介绍了通用航空航材的 7S 管理理论；第七章介绍了基于层次分析方法的安全风险评估方法；第八章介绍了维修成本管理方法，应用 GM (1,1) 优化模型对发动机大修成本进行预测。书后附录了相应程序的源代码，以便读者参阅。

最后，感谢中国民航飞行学院领导、各职能部门、分院、飞机修理厂、航空工程学院等领导和同仁，以及莱康明和大陆发动机生产厂家等提供的帮助，特别感谢中国民航飞行学院发动机核心修理技术科研创新团队同仁们的辛勤努力和付出，感谢赵成荣厂长的大力支持。同时，感谢向纪鑫、罗意、陈辰等同学所做的工作。感谢被参考文献资料的作者（含未列出的参考文献作者或单位）或单位。由于编者水平有限，错误和疏漏在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2014 年 7 月于四川广汉

目 录

第一章 通用航空概况.....	1
第一节 通用飞机概况.....	1
第二节 航空活塞发动机概况.....	6
第二章 航空活塞发动机适航管理.....	错误!未定义书签。
第一节 初始适航管理.....	错误!未定义书签。
第二节 持续性适航管理.....	错误!未定义书签。
第三章 滑油系统故障诊断方法.....	错误!未定义书签。
第一节 滑油系统概述.....	错误!未定义书签。
第二节 滑油系统常见故障及原因分析.....	错误!未定义书签。
第三节 基于油液分析的发动机磨损故障诊断.....	错误!未定义书签。
第四节 基于 BP 神经网络的滑油系统故障诊断.....	错误!未定义书签。
第五节 滑油系统故障预防措施.....	错误!未定义书签。
第四章 点火系统故障诊断方法.....	错误!未定义书签。
第一节 点火系统概述.....	错误!未定义书签。
第二节 点火系统常见故障.....	错误!未定义书签。
第三节 点火系统检查程序.....	错误!未定义书签。
第四节 GO 法理论.....	错误!未定义书签。
第五节 基于 GO 法的点火系统可靠性分析.....	错误!未定义书签。
第五章 燃油系统故障诊断方法.....	错误!未定义书签。
第一节 燃油系统概述.....	错误!未定义书签。
第二节 Petri 网模型理论概述.....	错误!未定义书签。
第三节 基于 Petri 网模型燃油系统故障分析.....	错误!未定义书签。
第四节 燃油系统的日常维护.....	错误!未定义书签。
第六章 航材的 7S 管理.....	错误!未定义书签。
第一节 7S 管理概述.....	错误!未定义书签。

第二节	对运输航空航材 6S 管理的借鉴	错误!未定义书签。
第三节	通用航空航材的 7S 管理	错误!未定义书签。
第七章	安全风险评估方法	错误!未定义书签。
第一节	层次分析法	错误!未定义书签。
第二节	质量功能展开	错误!未定义书签。
第三节	技术成熟度等级	错误!未定义书签。
第四节	建立评估模型	错误!未定义书签。
第八章	维修成本管理	错误!未定义书签。
第一节	维修成本概述	错误!未定义书签。
第二节	航空活塞发动机维修成本评估	错误!未定义书签。
第三节	航空活塞发动机维修成本的估算	错误!未定义书签。
第四节	基于灰色理论的维修成本预测模型	错误!未定义书签。
第五节	工程实例分析	错误!未定义书签。
第六节	航空活塞发动机维修成本数字化管理方法	错误!未定义书签。
参考文献	错误!未定义书签。
附录	C 语言编程源代码	错误!未定义书签。

第一章 通用航空概况

第一节 通用飞机概况

通用飞机的概念可根据 2003 年 5 月 1 日民用航空总局开始实施的《通用航空飞行管理条例》来进行定义。《通用航空飞行管理条例》规定,所谓通用航空,是指除军事、警务、海关缉私飞行和公共航空运输飞行以外的航空活动,包括从事工业、农业、林业、渔业、矿业、建筑业的作业飞行和医疗卫生、抢险救灾、气象探测、海洋监测、科学试验、遥感测绘、教育训练、文化体育、旅游观光等方面的飞行活动。用于这些活动的飞机统称为通用飞机。目前,世界上有 36 万架通用航空飞机,其中有将近 80% 是活塞发动机飞机。

通用飞机是全部飞机类型中数量最多、型号最多的机种。包括了小型飞机、大型涡轮和螺旋桨飞机等。通用飞机的用途广泛,涉及空中巡逻、空中救助、小型专线货运、资源勘测、农林防护、飞行员培训、公司通勤、私人公务、休闲观光等方方面面。

在许多国家,特别是在美国,通用航空、通用飞机已经发展成为一个很成熟的产业,有着巨大的产值和就业人数。近年来,我国也注意到了相关的市场前景,逐步开始重视发展自己的通用航空产业,放开相关政策,制定相适应的法律规定,使通用飞机为社会和经济的发展提供服务。

数据显示,截至 2012 年年底,通用航空企业适航在册航空器总数达到 1 320 架,同比增长 17.44%,其中教学训练用飞机 328 架。

一、世界范围内活塞类通用飞机的使用情况

图 1.1 所示为世界现役通用飞机数量,图 1.2 所示为通用飞机飞行小时。由这两幅图表可以看出航空活塞发动机飞机在通用航空领域占有主导地位。

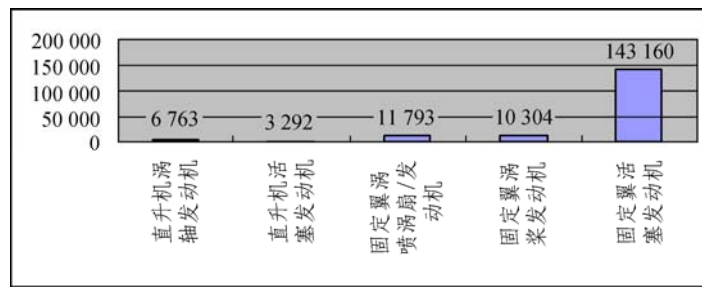


图 1.1 现役通用航空飞机数目 (数据来源 FAA)

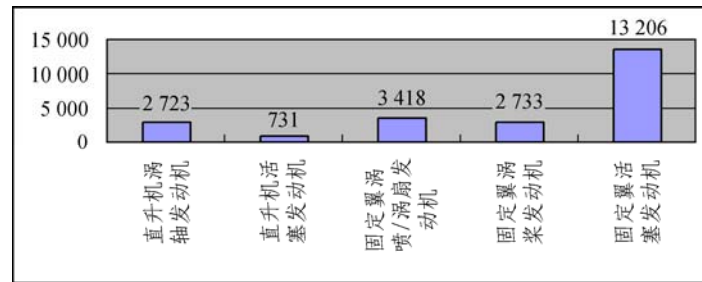


图 1.2 通用航空飞机年均飞行时间 (千小时) (数据来源 FAA)

活塞飞机能够占主导地位的原因在于，相比涡桨飞机，活塞飞机更加便宜并且耗油更少（见图 1.3），但其性能却能满足大部分通用航空活动需求。

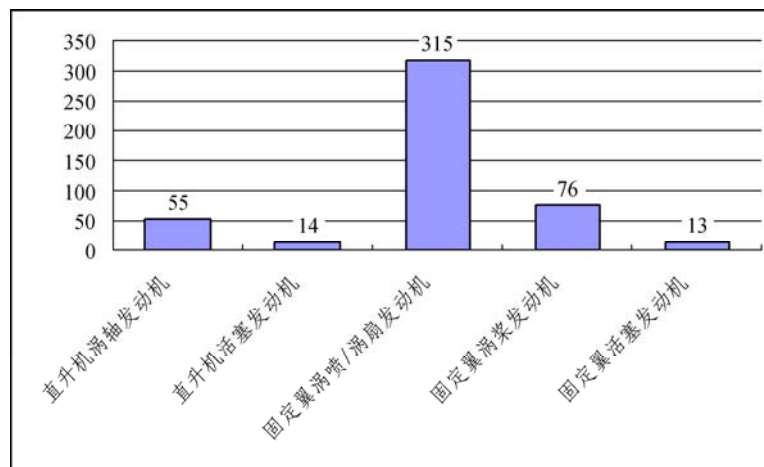


图 1.3 通航类飞机平均耗油量 (加仑每小时) (数据来源 FAA)

这些特点使得活塞飞机成为大部分私人及教学飞行活动的首选（见图 1.4）。尽管目前北美是主要市场，亚太地区的销量正在稳步增长。这暗示了将来活塞飞机将有很大的增长空间。

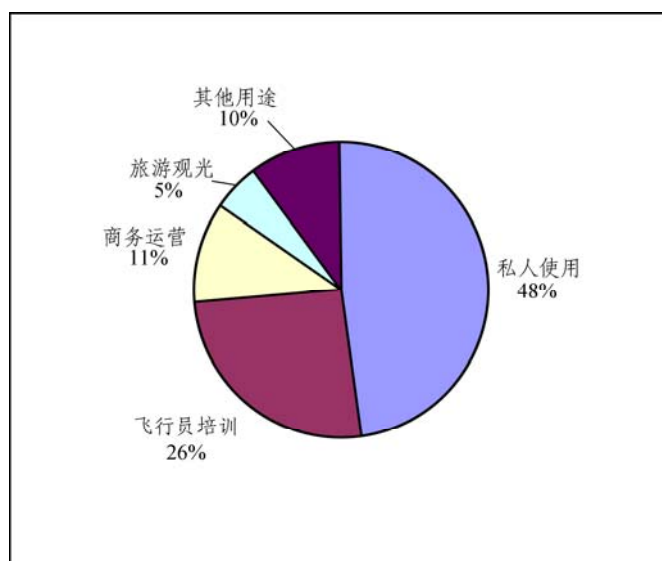


图 1.4 航空活塞发动机应用领域 (数据来源 FAA)

二、中国通用飞机的现状

中国通用飞机近年来每年都在增加，图 1.5 所示为 2003—2013 年中国通用飞机的数量。图 1.6 所示为我国现阶段通用飞机的使用情况。

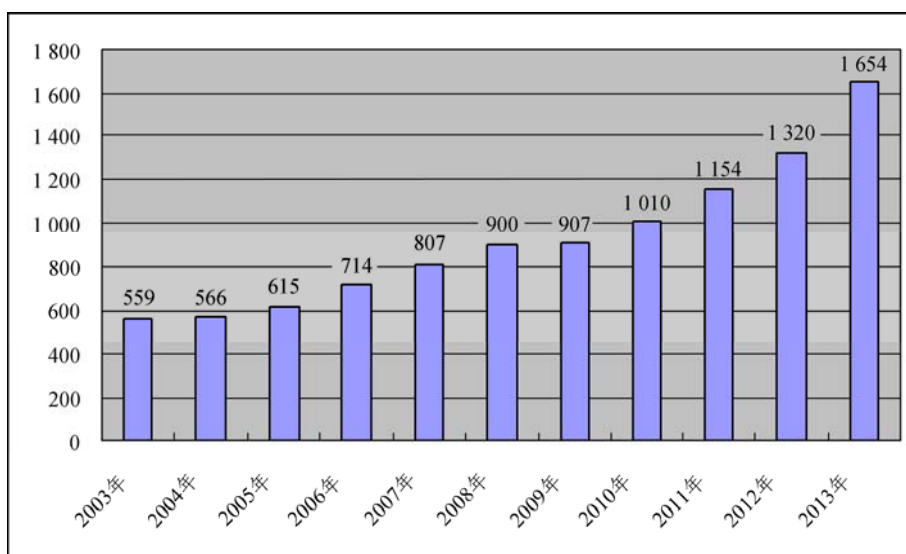


图 1.5 2003—2013 年中国通用飞机的数量

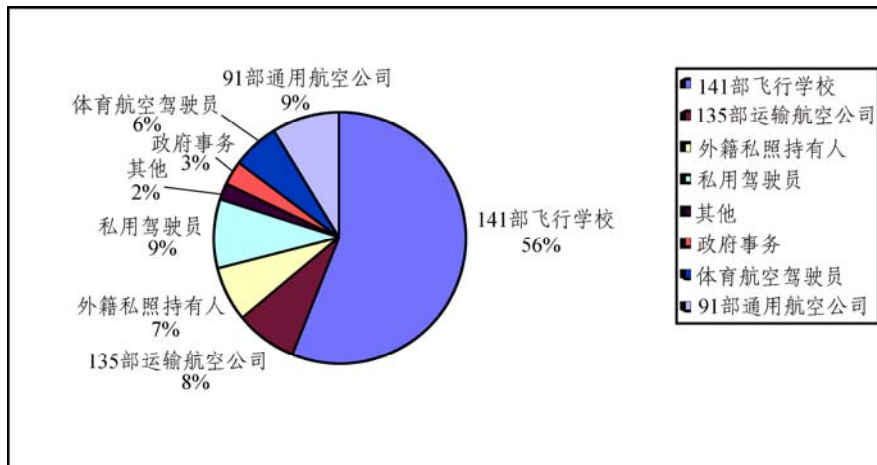


图 1.6 中国现阶段通用飞机的使用情况

《2013年通用航空发展报告》正式披露，截至2013年年底，我国通用航空机队在册总数为1654架（具），比上年增长23.2%。其中固定翼飞机1239架，旋翼机385架，气球24架，飞艇6架。2013年经民航局批准引进通用航空器291架，注销通用航空器60架。

《2013年通用航空发展报告》显示，截至2013年年底，中国通用航空器数量前三位的旋翼机型为R44、R22Beta、269C-1，分别为65架、34架、24架。截至2013年年底，中国通用航空数量前三位的固定翼机型为CESSNA172R、Y5、DA40D，分别为167架、102架、89架。截至2013年年底，我国通用航空器拥有量前三位的地区分别为华北地区、中南地区、西南地区，分别拥有航空器396架、395架、289架。2013年，我国共拥有通用航空机场及临时起降点286个，其中通用航空颁证机场起降点43个。截至目前，我国已经建立了包括陕西、辽宁、沈阳、贵州、安顺、黑龙江、成都、上海、南昌在内的11个国家级航空高技术产业基地，以及包括河北、内蒙古等在内的11个航空产业园。

三、活塞类通用飞机制造商

通用飞机的制造商主要集中在欧美国家。按照当前的市场占有率来衡量，主导厂家有加拿大庞巴迪宇航集团、美国湾流公司、美国塞斯纳飞机公司、美国豪客比奇飞机公司、法国达索公司、美国贝尔直升机公司和欧洲直升机公司等。航空活塞发动机飞机的制造商主要包括：赛斯纳（Cessna）、西锐

(Cirrus)、钻石 (Diamond) 和派珀 (Piper) (见图 1.7)。曾经有数十年比奇 (Beechcraft) 也在前三, 但在 20 世纪 80 年代的通用航空低迷时期, 比奇停产了很多活塞飞机型号, 转而专注于涡桨、喷气式飞机以及军用项目, 从而导致了比奇在活塞飞机市场份额的显著下降。依靠具有竞争力的性能和价格, 2000 年后西锐抢占了赛斯纳的大块市场份额。不过目前市场已经接近了均衡状态, 各家市场份额已经基本保持不变。

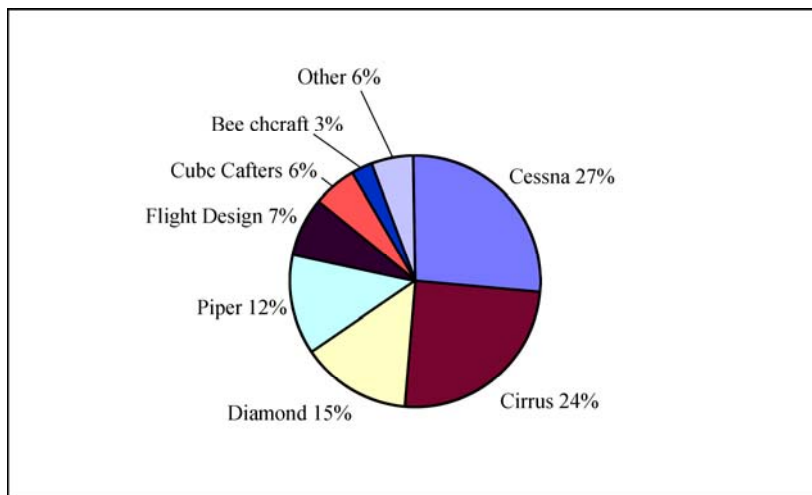


图 1.7 2012 年航空活塞发动机飞机市场占有比例 (数据来源 GAMA)

由表 1.1 数据可以看出大部分通用航空飞机制造商位于美国, 但值得注意的是有一些厂家实际已被其他国家拥有。西锐在 2011 年被中航工业收购, 派珀于 2009 年被出售给了文莱政府。这些变动的一个主要原因是 2008 年的金融危机, 通用航空飞机的销售受经济情况影响巨大。

表 1.1 主要活塞类飞机制造商 (2012 年数据)

飞机生产商	市场份额	厂址	所属公司
西锐	24%	明尼苏达州 (美)	中航工业集团
赛斯纳	27%	堪萨斯州 (美)	德事隆集团
钻石	15%	奥地利	奥地利钻石飞机制造公司
派珀	12%	佛罗里达 (美)	文莱 Imprimis 投资公司
小熊飞机	6%	华盛顿州 (美)	美国 CubCrafters
比奇	3%	明尼苏达州 (美)	德事隆集团

第二节 航空活塞发动机概况

一、航空活塞发动机主要制造商

表 1.2 列出了一些畅销飞机机型使用的航空活塞发动机，大陆（Continental）和莱康明（Lycoming）两种类型的活塞发动机占据市场的大部分份额，两家的市场份额之和可以达到 80% 左右（见图 1.8）。中航国际分别于 2011 年和 2013 年对美国大陆发动机公司和德国蒂勒特公司进行了收购，由此中航国际已成为全球唯一拥有全系列航空汽油活塞发动机和全系列航空煤油活塞发动机的供应商。

表 1.2 畅销飞机机型

通用航空活塞发动机飞机型号	活塞发动机型号	发动机功率/HP*
赛斯纳 162	Continental O200D	100
钻石 DA20	Continental IO-240-B	125
赛斯纳 172R	Lycoming IO-360	160
Flight Design GmbH CTLS	Rotax912ULS	95
钻石 DA40	TAE Centurion 2.0	135
钻石 DA42	Thielert Centurion.1.7	180
西门诺尔 PA44	Lycoming O/LO-360-E 1 AD	180
西锐 SR-20	Continental IO-360-ES	200
西锐 SR-22	Continental IO-550-N	310
西锐 SR-22T	Continental TSIO-550-K	315
CubCrafters Carbon Cub SS	TITAN® 340CC	180

* 1HP=0.735 kW，马力（HP 为非法定计量单位）。

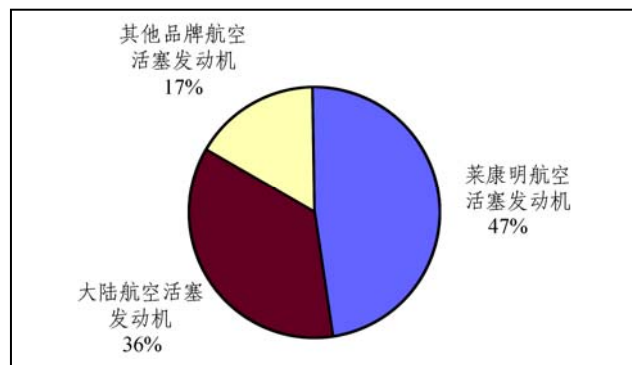


图 1.8 航空活塞发动机市场份额

Lycoming 发动机生产商的母公司是德事隆集团，该集团也是赛斯纳飞机的拥有者。Continental 发动机公司及维修服务公司的 100% 股权于 2011 年被中航国际收购。可以看出，现阶段活塞发动机和活塞飞机市场都被中航国际和德事隆集团这两家公司所主导（见表 1.3）。

表 1.3 主要航空活塞发动机制造商

航空活塞发动机品牌	燃料	厂址所在国家	母公司
Lycoming	航空汽油	美国	Textron
Continental	航空汽油	美国	中航国际
Rotax	汽车汽油	德国	BRP
SMA	航空煤油/柴油类燃料	法国	Safran
Austro	航空煤油/柴油类燃料	奥地利	Diamond
Centurion	航空煤油	德国	中航国际

二、航空活塞发动机功率等级

航空发动机的轴功率是一个重要的性能指标，常以马力（HP）为单位。从现有的主要飞机数目以及它们所使用的发动机马力（表 1.2）来估算，航空活塞发动机功率等级使用比例如图 1.9 所示。

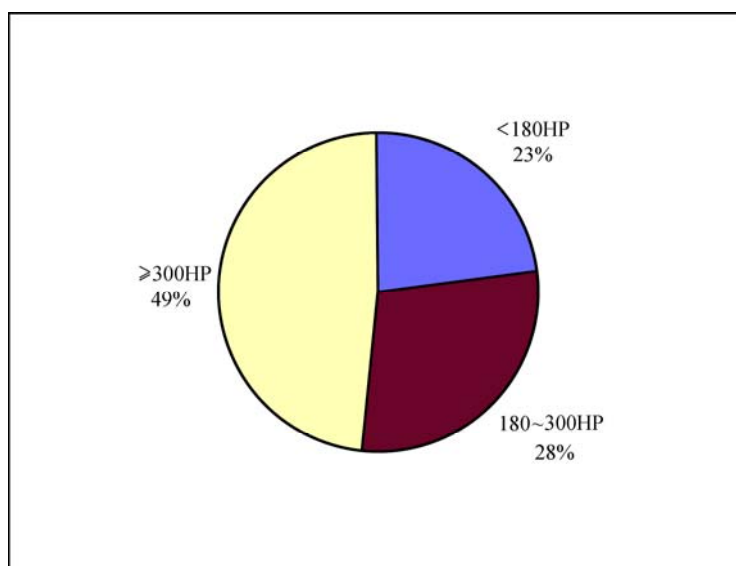


图 1.9 航空活塞发动机功率等级使用比例

三、航空活塞发动机的技术升级

目前，绝大部分航空活塞发动机是火花塞点燃汽油机，它们使用航空汽油。世界上最广泛的一种航空汽油是 100 LL。这种燃料含有四乙基铅，是一种有毒物质。含铅汽油早已被禁止在汽车上使用。2012—2013 年，FAA 采取了多项措施以达到其 2018 年航空业全面使用无铅燃料的目标。而这意味着航空活塞发动机市场的一个巨大转折点正在来临。

面对含铅航空汽油的禁止，人们有两个选择：为现有的火花塞点燃式发动机研制一种合适的无铅汽油，或者更换为柴油发动机。柴油发动机使用航空煤油（如 Jet A）等世界广泛提供的燃料。更多关于 100 LL 的信息也许能帮助人们回答这个问题。尽管 100 LL 是使用最广泛的航空汽油，它的产量也仅有航空煤油（比如 Jet A）的 1%，或者汽车汽油的不到 0.2%。这样小的产量，以及相较于汽车汽油更严苛的生产标准，使得世界上只有很少几家公司愿意或者能够生产 100 LL。在中国，只有兰炼（兰州石化公司）这一家公司生产航空汽油（但实际上它并不符合 100 LL 的标准）。另外，由于难以生产，航空汽油一般比航空煤油等柴油类燃料要贵 10%。并且，航空汽油在亚太、南美等地区很少提供。这也是限制这些地区通用航空飞机销售的一个重要原因。因此，如果活塞飞机能使用航空煤油等广泛提供的燃料，将能极大提升这些区域的飞机销售量。

一些公司正在研发无铅航空汽油。然而，它们也许会面对 100 LL 生产商类似的问题。新的燃料一般需要新的基础设施（储油、加油等），这些将限制其使用。UL 91 这种无铅汽油已经被研发出来几十年，至今仍未广泛使用。另外，航空发动机要求燃料有较高的辛烷值，符合这样标准的无铅汽油可能会有更高的价格，从而进一步减少需求。

汽车汽油也许是一些飞机的选择。Lycoming 批准了用户使用 AKI（抗敲缸指数）为 93 的汽车汽油。但是不能含有乙醇。这是因为乙醇可能损害航空发动机燃料系统的橡胶及铝制部件，乙醇也会增加燃料的挥发性。因此，在高海拔时，乙醇可能脱离燃料从而降低燃料的辛烷值。但是，目前几乎美国所有地区的汽车汽油都含有约 10% 的乙醇。一些汽车汽油的支持者表明有一些机场提供不含乙醇的汽车汽油，但是根据他们提供的列表，这些汽车汽油的 AKI 为 91 而不是 93。使用这种汽油需要额外的测试并且获取专门的批准（补充型号证书，Supplemental Type Certificates）。

因此，柴油发动机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。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。这些特点使得主要的飞机制造商（例如赛斯纳和钻石）已经开始推出使用柴油发动机的机型。另外，美国空军也已经开始专注于统一使用柴油发动机的无人机。面对这一潜在的柴油发动机需求的增长，中航工业于 2013 年也收购了 Thielert 这一柴油发动机生产商。

另外，新型清洁燃料也在不断地研发。例如“新一代钻石 DA42”，其 100% 采用了海藻生物燃料作为驱动燃料，首次证明了生物燃料技术完全可以独立为飞机的飞行提供能量。海藻现今被看做是最有前景的生物燃料来源，因为与麻风树属或亚麻荠属等其他生物燃料源相比，海藻所需的种植空间更少，在被污染水域也可以生长，而且特定品种的海藻也有更高的含油比例。海藻生物燃料所排放的废气中所含的碳氢化合物，只有传统航空煤油产生的废气的 1/8，所含氮氧化物少 40%，生成的氧化硫则更低，仅为传统燃料的 1/60。这是因为与矿物衍生燃料相比，生物原料本身的含氮量和含硫量就低得多。

}