

CFM56 航空发动机案例研究

李子衍, 李成智

(北京航空航天大学人文社会科学学院, 北京 100191)

摘要: CFM56 系列发动机是民用航空发动机史上最引人赞叹的成就, CFM 国际公司是由法国斯奈克玛公司和美国通用电气公司组成的合资企业, 这两家公司的此项合作也堪称是国际合作的典范。本文将就 CFM56 系列发动机的研发历史, 论述 CFM 国际公司在该航空发动机项目成功背后的深层原因以及在激烈的国际市场竞争中长期立于不败之地的成功经验; 阐明了航空发动机具有技术难度高、投资需求大、研制周期长、经营风险高等显著特点; 简述了对中国航空发动机发展以及中国航空发动机集团争夺国际民航市场的借鉴思路。

关键词: CFM56; 民用发动机; 民航; 斯奈克玛公司; 通用电气公司

中图分类号: V262-092 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-4969(2017)06-0628-10

引言

自第二次世界大战以来直到今天, 世界主要的飞机生产企业里, 无论其规模有多大, 都很少涉及飞机发动机的生产, 飞机制造商与航空发动机制造商之间的上下游生产分离成为世界航空工业发达国家的普遍现象。不仅欧洲和美国如是, 在苏联以及 90 年代转型后的俄罗斯也是如此, 航空产业的发展在这种情况下与国家实行什么样的经济政策以及国家经济水平无关, 完全由航空产业其本身特性所决定。例如, 著名的洛克希德马丁公司、波音公司、空客公司等等, 无论是否涉及军事航空, 也不管它们规模如何, 经济体量怎样, 都不生产航空发动机^{[1]15}。这种现象的根本原因在于, 一架完美的飞机虽然需要发动机和飞机主机的紧密结合形成最终的产品, 但飞机的生产和发动机的研制在产品特性上的差异性使发展规律不同, 这个规律就是航空发动机研制难度比飞机大, 研制周期比飞机长, 飞机的更新换代是以发动机的更新换代为基础。因此, 发动机和飞

机无法达到垂直整合, 即不能直接在一家厂家生产。而相对于飞机机身来讲, 航空发动机行业本身具有很高的技术和经济的门槛, 它被誉为“工业之花”, 是一个国家工业基础、综合国力和科技水平的集中体现。世界上真正独立生产喷气式发动机的工业体系目前只存在于美国、俄罗斯和欧洲这三个国家和地区, 具体的企业为美国通用电气、英国的罗·罗公司, 法国斯奈克玛公司, 以及俄罗斯的相关发动机研制单位。民航发动机在全球范围内实行的是自由贸易竞争体制下的发展, 从而形成国际性的民用航空发动机市场^{[2]26}。本文探讨的是法国斯奈克玛公司最成功的 CFM56 系列发动机的研制始末, 并深度分析该系列发动机在国际民航市场上取得成功的原因, 以期取得借鉴。

1 CFM 国际公司的诞生与 CFM56 系列发动机的概述

1.1 CFM 国际公司的成立

能独立研究、开发先进航空发动机的国家,

收稿日期: 2017-11-01; 修回日期: 2017-11-13

作者简介: 李子衍(1994-), 男, 研究生, 研究方向为航空航天史与发展战略。E-mail: erd_edui@163.com

李成智(1961-), 男, 教授, 研究方向为科技政策与管理、航空航天史。E-mail: lichengzhi@263.net

无不把航空发动机列为国家的战略性产业,通过各种渠道给予大量资金支持,以保证发动机技术的领先地位,并严格禁止向国外出让或转移其核心技术。20 世纪六十年代西方国家的航空公司所采用的商用运输机基本由英国、美国供应,其中美国占有绝对优势,当时西方航空发动机领域的三大巨头,即美国普拉特·惠特尼公司,通用电气公司和英国罗尔斯·罗伊斯公司,联手分割并霸占了商用发动机领域,形成了三足鼎立的格局^[2],他们在互相竞争的同时又彼此结成同盟,联合制定商用航空发动机制造行业法规,层层设置障碍,将其他潜在竞争对手拒之门外。西欧各国看到世界空运的繁荣前景,认为 70%应该属于中短程航线,他们有意与美国争夺这个范围的民航飞机市场,法国斯奈克玛公司经过形势分析和研判之后,仍毅然决定进军民用发动机领域,而这一政策在当时得到了法国政府的大力支持。

虽然斯奈克玛公司在军用发动机领域已经有了一定的基础,但在商用发动机方面还是毫无经验,由于发动机研制需要极大的资金投入,一旦项目失败就可能血本无归,所以在普·惠、罗·罗和通用三大巨头之间,斯奈克玛公司决定选择通用公司进行合作。

1974 年 9 月,斯奈克玛和通用公司通过 CF6-50 发动机和 F101 发动机两个项目的成功合作后建立了对彼此的信任,经过时任法国总统蓬皮杜和时任美国总统尼克松以及美国国防部的协商,通用电气公司与斯奈克玛公司正式成立了双方各承担 50%的责任、义务和风险,并且分享 50%利益的合资企业——CFM 国际公司,并以国防部的 F101 发动机的核心机为基础,共同开发一种能够满足八十年代飞机要求的高效率、低油耗、低噪音、低污染、85~155 千牛推量级、大涵道比的涡轮风扇发动机,但是由美国通用电气公司完全负责 F101 发动机的核心机部分,斯奈克玛公司则将核心机作为“黑匣子”的形式,负责开发与该核心机配套的其他部件,包括进气道风扇、低压

压气机、低压涡轮、附件机匣、燃油与滑油系统,并且在研制过程中法国斯奈克玛公司无法触碰任何 F101 发动机的核心机研制技术^{[1][20]},虽然合作条件对斯奈克玛公司很不利,但是斯奈克玛公司仍欣然接受了此项合作,这也意味着 CFM56 系列发动机项目的正式开始。

1.2 CFM56 系列发动机的研发历程

1.2.1 CFM56-2

1974 年 6 月,两台 CFM56-2 发动机分别在通用电气公司和斯奈克玛公司开始进行地面试车台考核实验。1979 年 11 月,CFM56-2 发动机获得美国 FAA 和法国民航管理局 DGAC 的适航证^[3]。

当时,占据美国和欧洲发动机市场大片江山的是普惠公司的 JT3D 发动机,主要在波音 707 和麦道 DC-8 两大机型上使用,当 CFM56-2 发动机问世之后,给飞机制造商、航空公司及部队用户提供了一个择优选择的机会。如表 1 中二者的技术对比所示,CFM56-2 发动机与 JT3D 发动机相比,由于 CFM56-2 发动机采用了先进的单元体设计和视情维护理念,耗油率、污染排放物和噪声都大为降低,发动机整体性能和可靠性得到了大幅度提高,西方各大航空公司和部队用户对 CFM56-2 发动机的整体性能非常满意,根据两种发动机的对比结果,他们纷纷选择了 CFM56-2 发动机,要求将其所拥有飞机的发动机换成 CFM56-2 发动机。

1.2.2 CFM56-3

1964 年波音公司为了满足市场 100 座级中短程飞机的迫切需要,开始了波音 737 系列飞机的研制,该型号飞机初始型号 737-100/200 都是选装普·惠公司的 JT8D 发动机。当 CFM56-2 发动机击败 JT3D 之后,通用电气公司和斯奈克玛公司决定下一步跟普·惠公司争夺 737 飞机发动机的订单。1981 年 3 月,CFM 国际公司与波音公司签署了发动机专项应用研究开发合同,共同推出一款专门以 CFM5-3 发动机为动力的飞机,即 737-300。

表 1 CFM56-2 与 JT3D 发动机的技术对比

发动机型号	CFM56-2 (F108)	JT3D (TF33)
结构形式	双转子涡轮风扇 (1F+3-9-0-1-4)	双转子涡轮风扇 (2F+6-7-8T-1-3)
推力范围/千牛	98~107	76~93
起飞推力 (30℃) /千牛	107	80
耗油率/ (千克/ (千牛·小时))	36.2	78.5
空气流量/(千克/秒)	357.4	236
总增压比	24.7	16
涵道比	6	1.25
涡轮进口温度/℃	1270	960
风扇直径/毫米	1735	1350
发动机长度/毫米	2430	3840
发动机重量/千克	2104	1969
推重比	5.1	4.13
发动机取证时间	1979 年 11 月	1960 年 3 月
装备飞机	DC-8-70、波音 707、 KC135R、E-3、E-6	DC-8、波音 707、 波音 720、C-141、 B-52

数据来源: 文献[1]40。

表 2 CFM56-3 与 JT8D 发动机的技术对比

发动机型号	CFM56-3C1	JT8D-217
结构形式	双转子涡轮风扇 (1F+3-9-0-1-4)	双转子涡轮风扇 (2F+6-7-9T-1-3)
推力范围/千牛	82~105	82~93
起飞推力 (30℃) /千牛	105	90
耗油率/ (千克/ (千牛·小时))	40	52
空气流量/(千克/秒)	322	219
总增压比	25.3	18.6
涵道比	5	1.73
涡轮进口温度/℃	1369	1134
风扇直径/毫米	1524	1255
发动机长度/毫米	2365	4283
发动机重量/千克	1951	2037
推重比	5.36	4.42
发动机取证时间	1984 年 1 月	1980 年 10 月
装备飞机	波音 737-300/400/500	波音 737-100/200、 MD-81/82/83/87

数据来源: 文献[1]44。

由于传统设计的 737 只能装配低涵道比发动机，它的两翼距地面较低，因此，737 的翼展下不能完全容纳 CFM56-3 整个发动机。为了赢得订单，CFM 国际公司做出了一个非常冒险的决定——CFM56“减肥”。一方面，减少涡扇发动机的大小。附件机匣、附件、机械舱从正下方移到发动机两侧，最终形成了经典的非圆形式，即经典的非圆外壳设计^[4]。如表 2 中二者的技术对比所示，可以看出 CFM56-3 比 JT8D 发动机在多项指标上都有优化，终于得到了波音的青睐，并成为波音 737 系列（737-600、700、800）唯一的动力装置。选装了 CFM56-3 发动机的波音 737 飞机销售量也超出了波音公司的预期，共销售了两千多架该型号飞机，CFM56-3 发动机也卖出了四千多台，双双创下型号飞机和发动机的销售记录^[5]。

1.2.3 CFM56-5

1979 年 7 月，欧洲空中客车公司宣布了 150 座级双发单通道中短程客机 A320 的设计方案，为了抢夺 A320 的市场，CFM 国际公司和普·惠公

司同时开始研制新的发动机。1983 年 9 月，普·惠和罗·罗公司、日本航空航空发动机公司、联邦德国摩天宇和意大利菲飞特公司联合成立了国际航空发动机公司 IAE，共同研制生产 V2500 发动机^{[6]90}。CFM 国际公司则于 1984 年 9 月开始研制一款新型发动机，即 CFM56-5A。1987 年 8 月，CFM56-5A 取得适航证，而 V2500 在 1988 年才取得 FAA 颁发的型号适航证，此时 CFM56-5A 已经提前了 V2500 一年的时间在 A320 飞机上投入使用，CFM 国际公司也已经与空客公司签订了第二款 CFM56-5B 发动机的合作协议，并在后续的 A321 和 A320 上投入使用。

CFM56-5 和 V2500 这两种发动机相比，CFM56-5 在可靠性指标、通用性、技术、先进性和性能担保、使用和维护成本及售后服务上都要领先于 V2500。CFM56-5 首次使用先进的发动机涉及高性能材料，使用了根据三维空气动力学原理涉及的风扇叶片。首次使用双通道全权梳子电子控制系统 FADEC，使飞机与发动机的数据传输

更通畅、更准确、效率更高,仅此一项就使该发动机的燃油消耗率比前期发动机降低了 10%~11%,为 A320 飞机节省了 15%~17%的燃油成本。在 CFM56-5B 上首次采用先进的双环型燃烧室技术,使污染物排放降低 45%,而它的可靠性、维护性、通用性、经济性、环保性等指标都遥遥领先其竞争对手的发动机^{[6]91}。

1.2.4 CFM56-7

波音公司的 737 系列飞机曾经备受用户青睐,但在 20 世纪八十年代出现了走下坡路的趋势。波音公司经过一番研究后得出结论:空客的 A320 系列飞机之所以能够攻占原来属于波音 737 飞机的市场,其中一个关键原因就是 A320 飞机上使用了许多先进技术,而这些先进技术领域里,发动机的技术突破则是重中之重,所以他们认为新一代的 737 飞机需要与 CFM 国际公司合作。1993 年,新一代波音 737 系列飞机和 CFM 国际公司新型发动机 CFM56-7 的研制工作同时开始,1996 年 10 月新型号发动机 CFM56-7 取得 FAA 和法国民用航空管理局颁发的适航证。CFM56-7B 发动机推力范围为 87~121 千牛^[7],增加涡轮进口温度裕度以提高发动机在翼服役寿命,应用先进的热力学循环原理以降低燃油消耗,使用了全新的钛合金的直径为 1550 毫米的宽弦风扇叶片,高压涡轮叶片使用的是高温高强度的 N5 单晶合金,以及由通用电气公司不断改进和研发的高压核心机技术,这些新科技的实施都得益于应用了当时最先进的三维空气动力设计技术。为了满足环保要求,CFM-7B 发动机还提供了让控制污染排放性能更佳的双喷头燃烧室。1997 年 2 月,波音 737-700/CFM56-7 首飞。其后,波音 737-800 和波音 737-900 相继选装 CFM56-7B 型发动机,CFM56-7 发动机是波音公司指定为新一代波音 737 飞机的唯一动力,此举也进一步巩固了 CFM 国际公司在航空发动机领域的霸主地位^[8]。

2 CFM56 发动机背后的成功要素分析

CFM56 发动机项目有六个主要特点:首先,

CFM 国际公司有通用电气公司和斯奈克玛公司的财政实力和基础设施作后盾;其次,CFM 国际公司是各自负责 50%并分享 50%利润的合资公司,双方在决策方面地位平等;第三,也是非常重要的特点就是 CFM 国际公司是收入共享公司而不是利润共享,突破了利润分享的“金钱”范围,这一方法也确保了双方的活力;第四,工作内容与责任均分;第五,CFM 国际公司的组织结构简单,CFM 国际公司没有雇员,所有工作由斯奈克玛公司和通用电气公司组织内的专职 CFM 工作人员承担;最后的因素是公司的产品开发方法,即在新 CFM56 发动机研制过程中,合作的任一方随时可要求另一方证明其负责的技术是产品线上最好的。

在这六个特点之外,还有政治因素、技术因素、市场因素等等共同造就了 CFM56 系列发动机的传奇。

2.1 发动机合作中的政治因素

在 CFM56 发动机的成功之中,我们首先能看到的是政治合作的因素在这里面所起到的巨大作用。

在 CFM56 项目刚刚准备启动合作之时,因为 F101 是军用发动机,其出口需要美国国防部的批准,但是,由于对发动机核心技术泄漏的恐惧,在 1972 年初被美国国防部拒绝批准申请。申请被驳回后,通用电气公司并没有取消该项目,而是通过尼克松总统的科学顾问要求政府重新审查。所以,由当时的国际经济政策委员会成员和国家航天委员会成员工作组的人组成 GE-SNECMA 调查组重新评估与研究该项合作。该调查组首先评估了通用电气公司总裁纽曼的意见,他声称 CFM56 将创造巨大的出口机会和数以万计的就业机会,而且项目的整个过程由斯奈克玛公司作为“黑匣子”来处理,所以不会造成技术泄露或者使国防部的军机发动机设计涉入一个危险的情境。但是国防部的态度则是对该项目的坚决不同

意, 国防部认为这个项目肯定会造成核心技术泄露并且将损害美国的国家安全。

合作项目最终还是获得了双方的一致通过, 不得不说, 在这期间法国总统蓬皮杜和美国总统尼克松起到了很大的助力作用。蓬皮杜总统了解到该项目在美国国防部受阻后, 先是向尼克松写了一封亲笔信, 希望将该项合作升级为美法两国战略合作的高度, 而尼克松也先后联系了通用电气公司总裁纽曼和国防部负责人, 希望能促成此项合作。最后经过各个方面的协调, 几周后通用电气公司提交了一份新的申请, 通用电气公司同意与斯奈克玛公司合作, 但是需要斯奈克玛公司作为“黑匣子”处理核心机, 通用电气公司则负责提供完整的核心机。此外, 通用电气公司进一步建议, 美国由国务院和商务部监督信息资料交流, 以确保整个合作过程符合美国政策。值得一提的是, 在这个新的申请中增加了两个细节: 一个是通用电气公司为 F101 发动机向政府支付 8000 万美元的特许税; 另一个是从法国外交部获得一项协议, 不谋求对美国卖给欧盟的航空航天产品征收进口税。

1973 年 5 月 30 日, 尼克松总统和法国蓬皮杜总统在葡萄牙的阿速尔群岛举行双边高峰会谈, CFM56 合作项目赫然列在日程表上。尼克松驳回了对该项目的所有反对意见, 按照选择 GE-SNECMA 调查组和国防部以及两国公司的最终建议批准了该项目。当日, 尼克松与蓬皮杜总统联合宣布了此决定。1973 年 6 月 4 日, 基辛格代表总统发布 220 号国家安全决策备忘录, 批准该合作项目。

在整个 CFM56 项目合作之中, 在两国公司的商务会谈陷入僵局之时, 由两国总统和政府出面, 希望能促成该项目的继续, 美法两国在合作中各自做出让步: 美国同意让法国斯奈克玛公司参与发动机的项目, 但是不允许触及核心机技术; 法国则促使欧盟不对美国的航空航天产品征收进口税, 并同意了对发动机的核心机的物理安全和技

术保护。可以说, 为了能让法国公司顺利进入民用航空发动机市场领域, 法国是做出了巨大让步和牺牲的。

2.2 CFM56-7 发动机合作中的技术因素

通用公司和斯奈克玛公司在合作之前都在航发领域有着长期的技术积累。美国通用电气公司成立于 1892 年, 由爱迪生电灯公司和汤普森休斯顿电气公司合作成立, 后来发展成为美国最大的电气集团。早在与斯奈克玛公司合作之前, 美国通用公司就已经在发动机市场上积累了大量的技术和经验, 无论是在军机航空发动机还是民用航空发动机上面, 通用电气公司都已经有了许多自主研发的发动机型号并占有一定的市场份额。通用电气公司在军用发动机方面研究过离心式 I-40 与轴流式 TG-180 发动机、涡轮轴发动机 T58。在商用发动机方面, 通用电气公司与康维尔飞机公司为美洲航空公司合作开发 CJ805-23B 型发动机, 还研究过新一代 TF39 大涵道比涡轮风扇发动机^[9]。

斯奈克玛公司与通用电气公司合作之前, 就已经在军用航空发动机领域有了颇多的经验与技术积累。斯奈克玛公司成立于 1945 年, 其法文意义为国营航空发动机研究制造公司。斯奈克玛公司在航发领域真正的起点是阿塔 (ATAR, 下文简称阿塔) 系列航空发动机。从 1946 年开始, 斯奈克玛公司相继生产了阿塔 101V1、阿塔 101A、阿塔 101B、101E 型航空发动机、阿塔 8、阿塔 9 和阿塔 9K50 发动机上, 其中阿塔 9K50 在 15000 米的高度上达到了 2.34 马赫数, 打破了欧洲的记录。

斯奈克玛与通用电气公司的成功合作, 是在两者长期的技术积累之上达成的, 如果通用电气公司之前没有在军机和民机方面的发动机研发经验和专利技术支持, 斯奈克玛公司没有 CFM 国际公司成立之前在军用发动机阿塔系列上的研发经验, 也就没有办法在发动机合作研发上取得成功。

2.3 发动机研发与竞争中的市场因素

2.3.1 发动机制造商的竞争

1974 年,当斯奈克玛公司与通用电气公司正式合作创立 CFM 国际公司之时,航空发动机市场上占据较大份额的是普·惠公司的 JT-3D 型发动机,占据了美国 and 欧洲的大部分市场份额,CFM56-2 发动机在 1979 年获得第一个订单之后,吸引了业界的目光,同时也给了航空发动机用户一个除了普·惠之外的选择。通用电气公司先进的 F101 核心机技术与斯奈克玛公司研究开发的低压部分完美结合,在耗油率和可靠性胜过普·惠公司 JT3D 的同时整体性能大幅提高,先进的设计理念让 CFM56-2 发动机的可维护性大大提高,而维护成本大幅度降低,其返厂维修率和空中停车率也很低,让航空公司和部队用户对 CFM56-2 发动机给予了高度评价。1981 年 CFM 国际公司与波音公司签署发动机专项研究开发合同,研制新一代发动机 CFM56-3 之时,波音公司的 737-100/200 型飞机都是选装的普·惠 JT8D 发动机,波音公司于 CFM 国际公司签署的合同里就要求 CFM 国际公司所开发的新型发动机必须在满足现有 737 飞机结构及气动造型不变的同时取代 JT8D 发动机,而 CFM 国际公司也不负众望,1982 年首台 CFM56-3 发动机就投入了试车实验,其设计在满足波音公司要求的前提下,与 JT8D 发动机相比,起飞推力增加了 16.7%,耗油率降低了 23%,CFM56-3 的涵道比是 5.00,也比 JT8D 的 1.73 的涵道比高,同时在增加风扇直径的同时长度缩短了,重量也比 JT8D 轻,噪声和污染物排放方面也比 JT8D 有优势,藉此,CFM56-3 发动机顺利抢占了 JT8D 在 737 飞机后续机型上的市场。1988 年,CFM 国际公司的新一代发动机 CFM56-5 在空客 A320 飞机上首飞,当时市场上同类型飞机是麦道公司的 MD-80/JT8D 和波音 737/CFM56-3 在争夺市场份额,A320/CFM56-5 的出现,则打破了两者争雄的局面,A320/CFM56-5 与这两者相比,

载客人数没有大的变化,但是航程上却大大增加,耗油率也比前期发动机降低了 10%,污染物排放则降低了 45%,而且它可以一机多用,通用于 A318、A319、A320 和 A321 这几种型号,大大降低了航空公司用户的使用成本和维护成本,航空公司纷纷将订单抛向装备 CFM56-5 发动机的 A320 飞机,使 CFM56-5 的竞争对手束手无策。1993 年波音新一代 737 系列飞机与 CFM 国际公司的新型发动机 CFM56-7 的研制工作同时拉开序幕,新的 CFM56-7 发动机燃油消耗率比上一代减少了 8%,并可节省 15% 的维护费用,在换发现场即可一次性更换发动机,新一代 737 飞机也让波音公司获得了大笔订单。

我们可以看出,国际市场上每隔数年时间,就有新一代的更优更高效且可靠性也更高的新型发动机问世,发动机的研发是不断地更新迭代的,它需要满足航空公司用户不断增加的使用要求,而 CFM 国际公司与其他国际发动机制造商之间的良性竞争,既推动了互相之间发动机技术的发展,也为发动机用户带来了实实在在的利益。

2.3.2 航空公司的选发

一款发动机研制出来,能不能获得市场的认可,进而得到大笔的订单,是决定一个发动机是否取得成功的关键,而相比于技术与竞争因素,发动机制造商也要在研制与销售过程中考虑到发动机用户的需求与内在想法。

斯奈克玛和通用电气所合作的发动机推力量级范围为 85~155 千牛,合作规定双方的任何一方都不能单独与任何第三方合作开发以上推力范围内的民用飞机发动机。所以在 80 千牛量级的小推力发动机方面,斯奈克玛公司与俄罗斯土星公司联合开发了 SAM146 发动机,通用电气公司则自行开发了 CF34 发动机,这两种型号的发动机在争夺支线飞机市场上形成了激烈的竞争。例如在中国的 ARJ21 飞机项目和俄罗斯 SUPE8RJET-100 项目的选发过程中,通用电气公司的 CF34 发动机

和斯奈克玛公司与土星公司的 SAM146 发动机竞争得难分难解, 最后 CF34 摘取了中国的 ARJ21 项目, 而 SAM146 则在俄罗斯的项目上胜出。不得不说, 在俄罗斯 SAM146 项目上, 用户和发动机公司都考量了政治因素, 而政治因素也是航空公司以及军队用户和其他用户选发时不得不考虑的一个方面。再例如国泰航空旗下 13 架 B777-200/-300 客机全数使用罗·罗公司 Trent 877/892 引擎, A330-300 系列全数使用罗·罗公司 Trent 772B-60/772C 系列、B747-400 系列全数使用罗·罗公司 RB211-525G 引擎。香港乃英国前殖民地, 选用英国企业罗·罗公司的产品也是基于一定的政治考量。

航空公司在选择发动机方面也会考虑到燃油消耗率和维护方便的问题。选用同一系列的发动机自然最方便维护, 也降低航空公司的维护成本, 所以前期购买了大量 CFM56 系列发动机的用户, 自然在下次换装发动机时最优考虑 CFM 国际公司的新一代发动机, 因为部件方面的通用性以及员工维修培训都是可以让发动机用户省一大笔资金的。在民用航空发动机所考虑的经济性以及污染物排放方面, 航空公司也要考虑到是否符合环保要求^[10]。

总而言之, 航空公司的选发, 对航空发动机制造商的盈利是至关重要的, 航空发动机与发动机用户是相辅相成的关系, 发动机订单给予发动机制造商利润, 更优更高效的发动机也让其用户节省成本, 两者互利共赢。

3 CFM56 项目对我国发动机研发带来的思考及借鉴意义

通过 CFM56 的相关史实, 同时借鉴中国的民用发动机技术现状, 我们或许可以说航空发动机技术靠仿造或者引进这种方法是学不会的, 发动机技术也是买不来的, 要获得发动机技术的进步必须要靠长期的技术积累, 不能抱有以国内民航市场来向国外公司换取航空发动机技术的梦, 发

动机的技术发展只有靠独立自主的技术积累才能实现。技术积累不可忽视, 必须自己打好理论与技术基础, 然后再寻求突破^[11]。

斯奈克玛公司和通用电气公司各自投入大量人力与物力还有资金开发出来的发动机先进技术, 其知识产权自然归其所有。在 CFM56 发动机项目上, 斯奈克玛公司和通用电气公司的分工很明确, 双方将各自开发出来的新技术、新工艺应用到 CFM56 发动机上, 但他们彼此之间则是各自的技术归各自所有, 甚至对对方绝对保密且严防抄袭, 根本不存在技术共享一说。比如 CFM56 发动机的核心机技术是通用电气公司开发出来的, 就属于绝密等级, 而由斯奈克玛公司投资研究开发的先进复合材料风扇叶片技术也对通用电气公司严格保密。如果一方想应用另一方所拥有的技术, 那就必须坐下来友好协商, 谈定具体技术和商务合作条件以及相应的费用之后, 再签订合同, 付诸实施。

看到通用电气公司与斯奈克玛公司合作研制的 CFM56 发动机取得如此大的成功, 西方其他公司在羡慕的同时也想效仿他们的合作模式。1990 年, 宝马公司和罗·罗公司联合投资 2.5 亿马克, 在德国成立了宝马-罗·罗有限公司, 研究开发推力范围在 60~100 千牛量级的涡轮风扇发动机。罗·罗公司在 1971 年开发 RB211 发动机时由于投入巨额资金而陷入严重财务危机, 最后被英国政府接管并改组为分别负责汽车和航空发动机业务的两个公司, 罗·罗航空发动机公司由此恢复元气。宝马-罗·罗公司成立之后, 研究开发全新的 BR700 系列发动机, 宝马公司的目的在于既想借此赚的利润, 也要将罗·罗公司的整套技术全部学到手。在合作初期双方都比较满意, 但是由于在发动机的设计、研究开发、试验、取证、市场营销和售后服务等方面几乎全部被罗·罗公司所掌握, 在所有技术研究开发费用方面则是全部由合资公司买单, 这样一来, 宝马公司付账时感到账单越来越多的同时也没有学到发动机的技术

秘诀,合资公司付出了高价,而德国人始终学不到手,终于在1999年的时候双方协商后决定宝马公司转让所持有的合资公司股份给罗·罗公司,只留下10%的股份,罗·罗公司全面接管合资公司之后公司财务状况和生产销售情况都开始节节攀升。罗·罗公司借用宝马公司的资金在德国建造了一家发动机制造厂,借用德国优良的工业基础和高素质科技人才生产出高品质的发动机来获取利润,而宝马公司想学到所有发动机技术的计划则落空了。

70年代,中国曾花费巨资从罗·罗公司引进整套斯贝(SPEY)MK202发动机生产线和相关技术资料,该发动机在罗·罗公司早已被停产淘汰20多年,令人遗憾的是直到今天,该型号的国产化“秦岭”发动机仍然问题一大堆。80年代,中国又引进法国透博梅卡公司的阿赫耶(ARRIEL)系列发动机专利生产技术,按照其全套设计、工艺、冶金和检测资料在中国生产涡轴8系列发动机,虽然中国在此后的20多年里交付了300多台该型发动机,然而,由于中国并没有真正掌握该发动机的设计,所以并不可能对该型号发动机进行下一步的升级和改进。

发动机想进入民机市场,不仅要得到飞机制造商和航空公司的接纳,而且要整体考虑到市场容量、商业风险、技术难度、竞争对手实力、自身具备的条件、有待解决的问题等等,不仅要支付极其高昂的费用,而且离不开国家和政府的大力支持与帮助。

3.1 中国航空工业体制的特殊性

相比各国飞机制造和发动机制造分离的产业模式,中国的航空工业体制明显存在其特殊性。现在的中国航空工业体系来自于1993年由国家航空部转型的中国航空工业总公司,简称“中航总”。中航总又在1999年拆分为一航和二航,后于2008年再次合并,改名为中国航空工业集团公司,简称“中航工业”,不仅为国防安全提供先进

航空武器装备,也为交通运输提供先进民用航空装备。虽然2008年由于中国商飞的成立而使中航工业资产有所剥离,但是作为一家横向纵向一体发展的行业总公司,中航工业本身就构成了中国的航空工业。以前各航空发动机厂是附属属于中航集团的,航空发动机新型号的研制一般都隶属于某个飞机项目,如果这个飞机项目下马了,发动机也就下马了,发动机一般不独立存在,但是航空发动机与飞机研制的特殊性规律要求二者要分离研制,直到2016年,航发集团破壳而出,可以看出国家对航空产业之重视,发动机的研制将会和飞机的研制独立开来,不会出现飞机项目下马发动机也下马的事情,同时发动机的研究也能得到更多支持。飞机发动机的研制终于开始脱离飞机研制的束缚了。

3.2 航发、商飞、中航工业要做好搭档

中国的航空工业一直是剪不断,理还乱,但现在至少格局比较清楚了。以前是飞机先定型,再去寻找符合相应要求的发动机。可是飞机研发快,发动机需要积累的时间长。结果经常出现飞机等发动机的情况。现在分工明了,各自有各自的任务,不用让发动机去等飞机,这样航空发展的整体情况就明显快多了。

对比欧美和中国的航空工业格局,如表3所示,可以看出在欧美已经成熟的航空工业格局中,飞机制造和发动机制造都是完全分开的不同集团,相较之下,我国的航空工业直到2016年航发集团成立之后,才有了明显符合航空发动机和飞机研发规律的航空工业格局,而现今格局里中航工业、中国商飞和航发集团的各自发展方向也都清晰明了,自此可说,中国航空工业将真正走上符合其发展规律的道路。

相较于欧美的普惠、GE、罗·罗和斯奈克玛,只有罗·罗公司和航发集团最为相似,即国家重视且重金投入。罗·罗公司1971年解体为汽车与航空发动机两家公司之后,英国政府出资将发动

表3 航空工业格局对比

美国	波音	以民用航空制造为主, 兼顾军事工业的航空巨头
	普惠	专注于发动机、燃气轮机、工业装备的大型工业集团
	GE	专注于发动机的航空工业巨头
	洛克希德马丁	军用飞机巨头
欧洲	空客	以民用航空制造为主, 兼顾军事工业的航空巨头
	罗·罗	专注于发动机、燃气轮机的航空工业集团
	CFM	专注于民用发动机的航空工业巨头
	达索	私人小飞机以及军用飞机
中国	中航工业	以军事工业为主, 兼顾民用航空制造的航空工业集团
	中国商飞	民用航空飞机制造商
	航发集团	专注于发动机、燃气轮机的航空工业集团

机业务收归国有, 其后, 罗·罗公司下面有五大业务板块, 分别是民用航空业务、防务业务、动力系统、海洋业务、核能业务, 员工大概有五万名, 其中有一万五千名工程师, 但是罗·罗公司可以说是专注于核心业务, 即航空动力系统。中国航空发动机集团则主要从事军民用飞行器动力装置、第二动力装置、燃气轮机、直升机传动系统、航空发动机技术衍生产品的设计、研制、生产。可以说, 中国航发集团和罗·罗公司有着一样的政府管理背景, 发展领域也相同, 在航空发动机的国际市场竞争上, 有政府管理性质的航发集团与非政府管理的航发集团各有各的优势, 例如非政府管理的集团在争夺市场时会有价格优势, 更新换代速度也快, 政府管理的航发集团则有举国之力的支持, 特别是在中国明显落后的航空发动机水平上面, 能够倾举国之力追上国际水平。

航空工业虽然不像日用消费品那样极致地做营销, 但是以客户为中心的使命, 一点也不应该被忽视, 毕竟航空发动机不是独立存在的, 它必须依附于航空飞行器, 航空飞行器和航空发动机, 其被市场选择与否, 在军用方面则取决于军方, 在民用方面则取决于航空航司、航空租赁公司等, 所以航发集团与中航工业、中国商飞的配合

一定要跟得上。

3.3 中国航空发动机的发展中企业、高校、科研单位, 以及政府之间的合作关系

在中国航发发动机研发中, 政府、企业、高校和科研院所的合作关系如图1所示。高校、科研院所和航发集团都是受国家政府领导并给予政策和资金支持的, 而高校则会对科研院所与航发企业进行科研合作及人才输送, 例如2017年的6月和9月, 航发集团就分别与南航和北航签署合作协议并共建实验室, 而高校的毕业生也会投身于科研院所或航发企业, 这就是人才输送。科研院所和航发企业本身则都有科研和生产的能力, 航发企业也涉及发动机产品最后的营销及售后服务, 但总得来说, 高校在航发研制中对于技术基础性研究产生的重要贡献不言而喻, 所以更要发挥高校学科优势, 深化有高校参与的创新平台建设、基础研究、科研攻关以及人才培养等方面的全面合作。

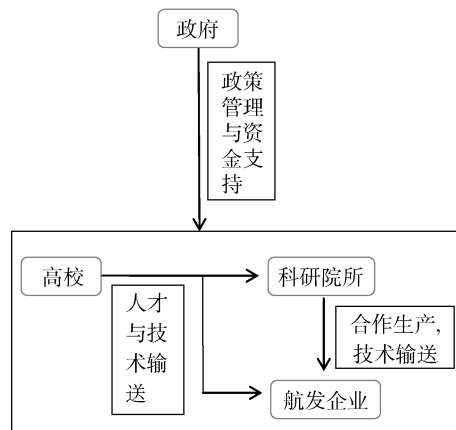


图1 我国政府、高校、科研院所和航发企业的合作关系

参考文献

- [1] 倪金刚. CFM56-5 方程[M]. 北京: 航空工业出版社, 2007.
- [2] 倪金刚. GE 航空发动机百年史话[M]. 北京: 航空工业出版社, 2015.
- [3] 邓尧. CFM: 一代引擎的传奇[J]. 大飞机, 2015, (5): 66-68.
- [4] 陈尘. CFM56 的下一代?[J]. 航空维修与工程, 2008,

- (3): 27-29.
- [5] 李璇. CFM56 发动机维修需求旺盛[J]. 航空维修与工程, 2016, (7): 32-33.
- [6] 刘瑞新, 赵季勇. 三种典型民航发动机: V2500、CFM56-5B、CFM56-7B 的维修经济性对比研究[J]. 经营管理者, 2010, (7): 90-91.
- [7] Ming Zhao, Jiwei Xu. Reliability Analysis for High Pressure Turbine Clearance Control of CFM56-5B Engine Based on Minitab[C]. Wuhan: ICMVEE, 2015: 164-168.
- [8] 阎成鸿. V2500 紧逼 CFM56[J]. 民航飞行与安全, 1998, (1): 34-36.
- [9] Jiwei Xu, Ming Zhao. Reliability Analysis for Main Engine Control of CFM56-3 Engine[C]. Zhengzhou: Computer Science and Electronic Technology International Society, 2015: 1699-1702.
- [10] 连永华. 从 CFM56 发动机的发展所想到的[J]. 江苏民航, 1995, (1): 17-18.
- [11] 陈伟宁. 衷心期待 C919 早日腾飞——专访 CFM 国际公司总裁兼首席执行官让-保罗·埃邦加[J]. 大飞机, 2014, (6): 28-31.

CFM56: A Study Case of Aero-engine

Li Ziyan, Li Chengzhi

(School of Humanities and Social Sciences, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: CFM56 series engine is an amazing example in the civil aviation engine history. CFM international is composed of French SNECMA and American GE Corp joint venture, and the cooperation of two companies is also called a model of international cooperation. In this paper, CFM56 series engine's development history is studied, and the successful experiences and lessons of the CFM international company in aero engine development project is demonstrated. Engine has high technical difficulty, long development cycle, and high business risk significantly. CFM56 engine's successful experience has made an excellent example for the development of China's aero engine group and C919 in the international aviation market.

Keywords: CFM56; civil aviation engine; civil aviation; Snecma; GE