

美国典型航空发动机发展计划及 对技术创新的影响

梁琴琴

(中国科学技术信息研究所, 北京 100038)

摘要:介绍了在美国航空发动机发展历程中具有重大意义的典型发展计划,综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)研究计划和通用的经济可承受的先进涡轮发动机(VAATE)研究计划,并以UPSTO专利数据为基础,从发展趋势、技术分布以及机构分布等维度研究了这两个计划对美国航空发动机技术创新的影响作用。

关键词:航空发动机; IHPTET 计划; VAATE 计划; 专利分析; 技术创新

中图分类号: G327.712; V23 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2015.07.012

1 引言

航空发动机作为飞机的心脏,被誉为“工业之花”,其直接影响飞机的整体性能、可靠性及经济性,是一个国家科技、工业和国防实力的重要标志。航空发动机技术复杂,研究和发技术难度大,研发周期长,经费投入多,经营风险高^[1]。目前,世界上能够独立研制高性能航空发动机的国家只有美、英、法、俄等少数几个国家。

美国是世界航空发动机技术的发源地,其最早的研发对象为活塞式发动机,从20世纪40年代初开始发展燃气涡轮发动机,通过继承和创新相结合,完成了仿制向自行研制的过渡,在1956年率先研制出马赫数大于2的先进涡轮喷气发动机(J79、J75),从此,美国在航空涡轮发动机方面跃居世界领先地位。

20世纪60年代,受“要导弹不要飞机”政策的影响,美国航空发动机的技术研发投入减少,发展步伐减缓,同时由于飞机的战术技术要求趋于多

样化,使得对发动机内部各部件之间以及飞机和发动机之间的匹配要求很高,因此,这一时期美国国防部实施了“配套发展法”,美国空军开始实施飞机推进分系统综合计划(APSI),重视核心机和技术验证机研究试验,发展核心技术。这一阶段大约持续至70年代左右结束。

从70年代中期开始至2000年前后,是美国航空发动机技术发展的黄金时期。这一时期“配套发展法”取得成功,随后80年代中期,美国国防部又发起制定了综合高性能涡轮发动机技术研究计划(IHPTET)^[2],该计划的制定和实施大力推动了美国航空发动机技术的发展,美国用15年时间取得了相当于过去30~40年的技术进步,使得美国在21世纪的航空燃气涡轮发动机技术方面继续保持全面领先地位。

进入21世纪后,航空发动机技术面临多重挑战,需要同时兼顾提高性能、降低费用、以及环境友好等方面。为此,美国提出了多项发展计划,在2000年初先后实施了超高效发动机技术计划

作者简介:梁琴琴(1982—),女,工学博士,博士后,助理研究员,主要研究方向为科技政策与领域分析。

基金项目:国家科技图书文献中心(NSTL)重大专项服务资助项目(2014XM052)

收稿日期:2014-12-18

(UEET)^[3]和宇航推进与动力计划(AP&P)^[4],目的是研究降低发动机的噪声、排气污染,提高发动机的经济性。2003年,在IHPTET研究计划取得部分重要成果和成功经验的基础上,开始部分实施(2005年全面实施)其后续计划—通用的经济可承受的先进涡轮发动机研究计划(VAATE)^[5],进一步开发、验证和转移革新的涡轮发动机技术。

可以看出,不同阶段的发展计划都对美国航空发动机产业的发展起到了一定的推动作用。在这些计划中,具有重大意义的典型计划有IHPTET和VAATE,这两者对推动第三代(超声速涡扇发动机)和第四代(先进技术涡扇发动机)发动机技术的发展至关重要。从关联性来看,后者之于前者既有衔接、连续,又存在诸多不同之处。因此,本文以专利数据为基础,对这两种计划及其对这一时期美国技术创新的影响进行了深入分析,有助于我国航空发动机相关计划的制定。

2 数据来源

本文选用USPTO的公开专利数据库作为数据来源,检索的时间范围为1990年至今,采用标题和摘要字段检索的方式,检索时间为2015年4月1日,检索策略如下:ttl/(aeroengine or aero-engine or "aircraft engine") or abst/(aeroengine or aero-engine or "aircraft engine") and apd/>1/1/1990。共检索到822件专利。

对下载的专利进行字段的规范清洗和统计分析,发现检索到的专利均为2000年以后公开的专利。这是由于,IHPTET研究计划虽然开始于20世纪80年代,总时间长达17年,但该计划侧重于基础研究,且作为美国军方发起的计划,在基础研究阶段的成果较少以普通专利的形式来公开。直至进入2000年后,此时IHPTET计划进入第三阶段,同时VAATE计划开始逐步实施,IHPTET计划的研究成果开始进入技术转移阶段,因此才开始检索到与之相关的专利。

根据IHPTET计划和VAATE计划实施的时间区间,将下载的专利数据以公开年为坐标,分为2000—2007年和2008年至今两个时间段,其中2000—2007年间公布的专利更多体现了IHPTET计划的研究成果,而2008年至今的专利体现了

VAATE计划推动下的技术创新成果。

3 IHPTET计划

1988年,由美国国防部发起,美国空军、国家航空航天局(NASA)、国防部高新技术预研局(DAPAR)、陆军和海军等政府部门,GE、普惠等工业界巨头,以及霍普金斯、加州理工、MIT等著名高校共同参与支持制定了综合高性能涡轮发动机技术计划(IHPTET)。其总目标是到21世纪初使航空涡轮发动机的能力较1988年的提高1倍,具体指标是使推重比提高100%、耗油率降低30%、成本降低35%^[6]。该计划分为三个阶段,第一阶段为1988—1991年,目标为在1995年之前试验机推重比相比于F100/110发动机增加30%,涡轮进口温度比现有先进发动机高222℃;第二阶段为1991—1997年,目标为在2000年之前试验机推重比相比于第一阶段已经达到的成就再增加至少30%,涡前温度相比于第一阶段成果再提高至少100K;第三阶段为1997—2005年,目标为在2005年之前试验机推重比相比于第二阶段已经到达的成就再增加50%以上,涡前温度相比于第二阶段成果再提高200K^[7]。为了计划的整体顺利实施,计划本身又分为涡扇/涡喷发动机、涡桨/涡轴发动机和一次性使用发动机三个基本部分,分别命名为“先进涡轮发动机燃气发生器计划(ATEGG)”、“联合涡轮先进燃气发生器计划(JTAGG)”和“联合短寿命涡轮发动机概念计划(JTTEC)”,后来涡扇/涡喷发动机部分又增加了“联合技术验证机发动机计划(JTDE)”^[8]。2005年IHPTET计划取得巨大成功,成为20世纪航空发动机技术发展的旗帜性计划,使美国在航空发动机领域取得巨大的空中优势和商业竞争优势。

在IHPTET计划各阶段研究的基础上,进入技术移植阶段后,与航空发动机相关的专利文献不断被公开,从图1可以看出,从2001年至2007年在美国申请的航空发动机相关专利逐年增加。从专利所属的IPC分类来看(表1),集中在B64D和F02C这两个技术领域,即飞行器动力装置的制造、装配以及燃料供给等领域。具体到IPC小组来看,属于B64D27/00(飞机上动力装置的布置或安装)的专利最多,其次为发动机及其零部件的研制、推

进装置燃料供给装置及燃料供给控制方法等的研究。结合 IHPDET 计划各阶段的目标可以看出，这一阶

段申请专利的技术方案主要围绕 IHPDET 计划提出的提高推重比和涡前温度两方面。

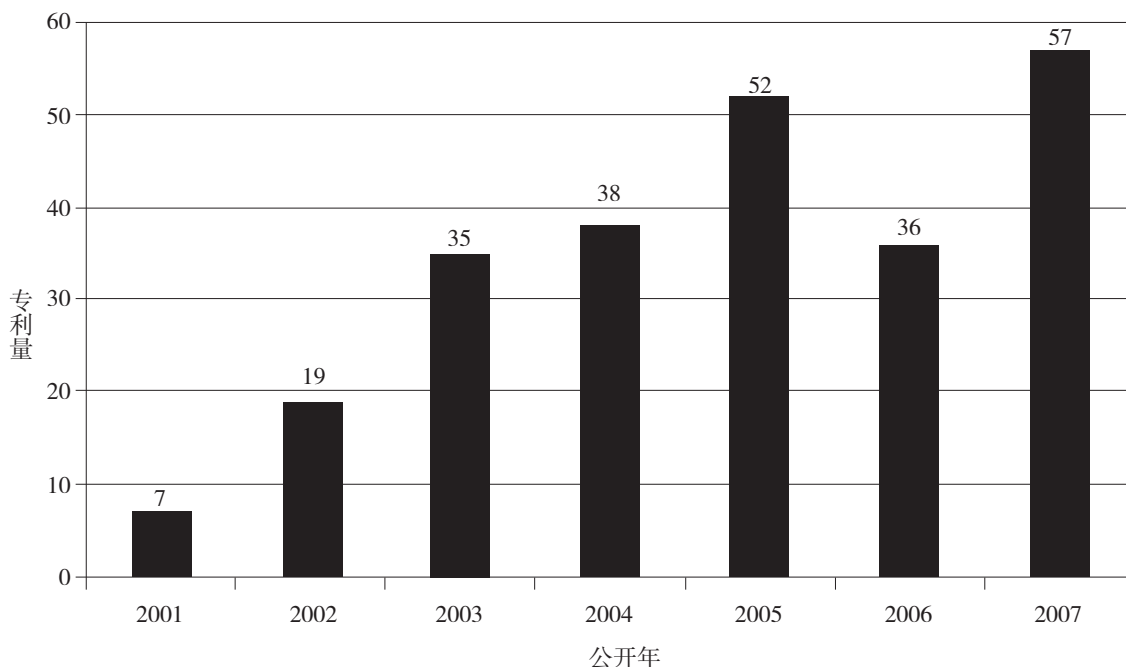


图 1 IHPDET 计划实施阶段专利公开年度趋势

表 1 IHPDET 计划实施阶段专利 IPC 分布

IPC 小类 (数量)	中文释义 ^[9]	IPC 组 (数量)	中文释义 ^[9]
B64D(44)	飞行器动力装置或推进传动装置的配置或安装	B64D27/00(21)	飞机上动力装置的布置或安装
F02C(37)	燃气轮机装置；喷气推进装置的空气进气道；空气助燃的喷气推进装置燃料供给的控制	G06F19/00(6)	专门适用于特定应用的数字计算或数据处理的设备或方法
B64C(25)	飞机；直升飞机	F02C7/20(6)	喷气推进装置的空气进气道的安装或支承
F01D(19)	非变容式机器或发动机	F02C9/26(5)	空气助燃的喷气推进装置燃料供给的控制
F02K(16)	喷气推进装置	F02G3/00(5)	以装置中燃烧产生的工作气体为特点的变容式发动机装置
G06F(13)	电数字数据处理	F02K3/04(5)	包括涵道风扇的发动机装置

IHPDET 计划除了推动美国本国机构在航空发动机的研发中不断技术创新外，对全球航空发动机领域也产生了巨大影响。许多其他国家的航空业巨头纷纷在美国进行专利部署，图 2 列出了 2001—2007 年在美国申请航空发动机专利的主要机构。可以看出，除通用公司、普惠公司、霍尼韦尔公司等美国企业外，还有斯奈克玛公司、空中客车公司

等其他国家的企业。

通用公司、普惠公司、霍尼韦尔公司均参与了 IHPDET 计划，如在该计划的第二阶段，霍尼韦尔公司的 XTC56/2 验证机用来验证中小型涡轴 / 涡桨 / 涡扇发动机技术的联合涡轮先进燃气发生器，通用和艾利逊公司共同研制的 XTC76/3 验证机，用来验证大型涡扇 / 涡喷发动机技术的先进涡轮发动

机燃气发生器，普惠公司研制的 XTC66/1B 核心机成功验证了高级压比的高压压气机、采用超冷转子和静子叶片的高效涡轮、刷式密封和混合陶瓷轴承，实现了推重比提高 37%^[7]。

斯奈克玛公司主要从事推进技术和飞行设备等专业领域，在发动机的研制中，斯奈克玛公司和通用、普惠两个公司均有一定的合作，如该公司是通用 CF6-80 和 GE90 项目的合作者，其还加入了通

用电气与普惠公司的 GP7000 发动机项目。空中客车公司在推进系统装配、客舱设计、发动机，飞行控制、飞机系统、制造工艺等方面均有研究。

从专利公开时间来看（图 3），外国企业先于美国企业进行了专利部署，最早的是法国斯奈克玛公司，紧随其后的是英国罗·罗公司，美国企业通用公司和普惠公司的专利公布集中在 2003—2007 年。从各申请人专利的技术分布来看（图 4），其

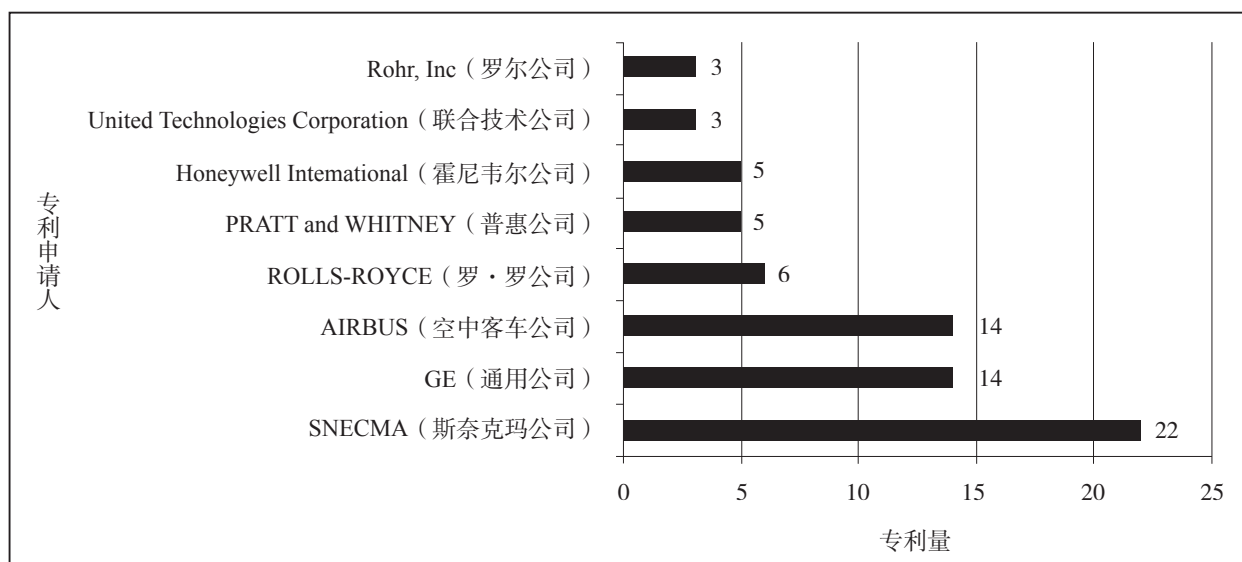


图 2 IHPDET 计划实施阶段主要专利申请人

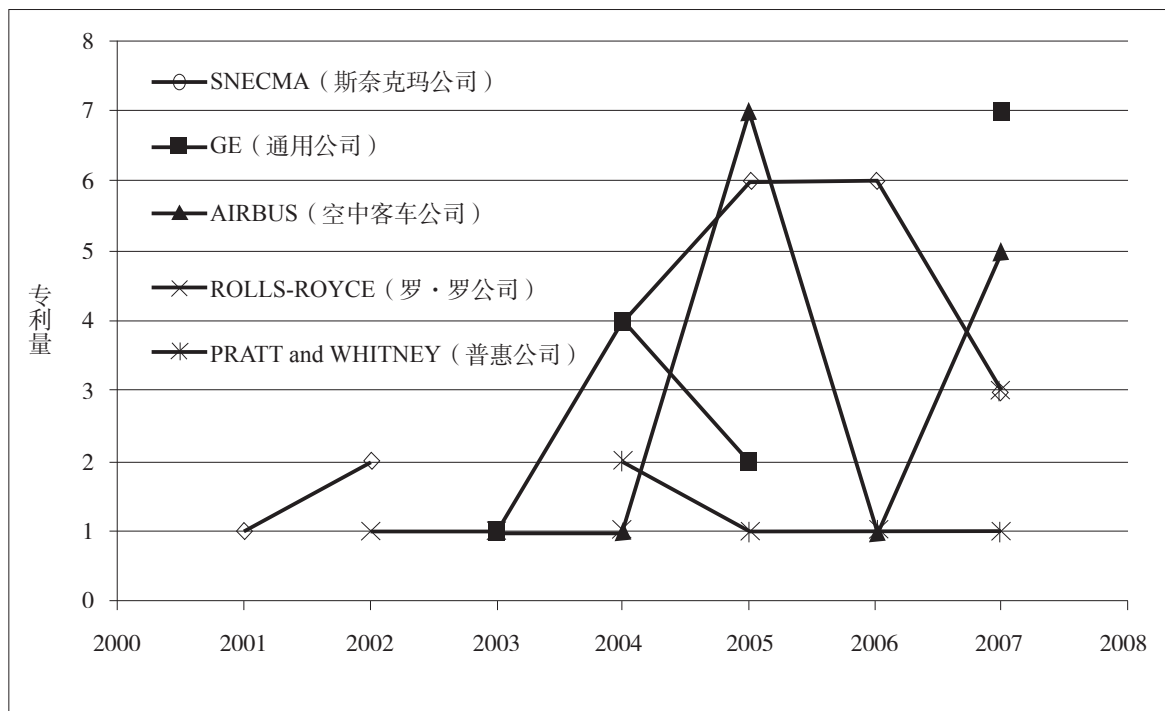


图 3 IHPDET 计划实施阶段主要专利申请人趋势分析

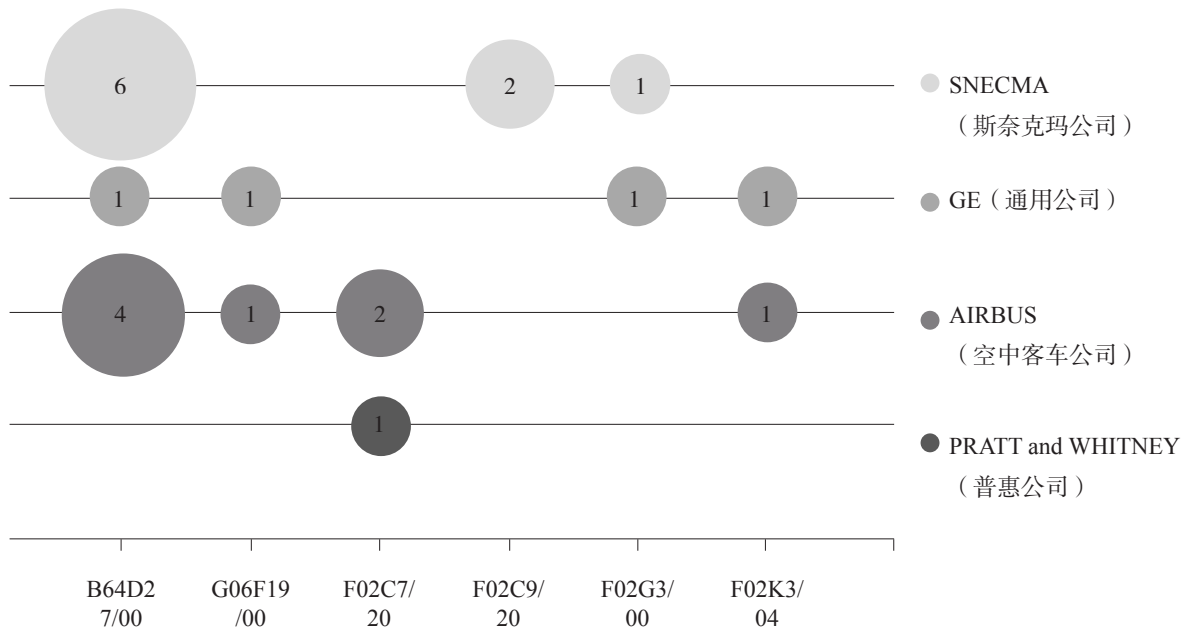


图 4 IHPTET 计划实施阶段主要专利申请人 IPC 分布

中横坐标为表 1 中列出的主要的 IPC 小组，法国斯奈克玛公司和空中客车公司在 B64D27/00 上部署了大量专利，英国罗·罗公司虽然在美国有一定数量的专利申请，但并未在表 1 中列出的主要 IPC 组中申请专利，这是由于罗·罗公司的研究主要集中在 F01D 方面。通用公司和普惠公司的研究主要集中在 F02C7/20、F02G3/00 和 F02K3/04 等方面，即推进装置进气管道、变容式发动机以及涡轮风扇喷气发动机的研究。

3 VAATE 计划

VAATE 计划是 IHPTET 计划的后续国家级技术研究计划，是为了满足美国未来武器系统的更高要求而实施的，实施时间为 2003—2017 年，分三个阶段进行，各阶段的结束时间点为 2009，2013 和 2017 年。计划的目标是使现役、在研和未来的军、民两用推进系统的经济可承受性较基准推进系统（如 F119 发动机）的提高 10 倍，具体到大型涡扇 / 涡喷发动机的目标是推重比增大 200%，耗油率降低 25%，费用降低 60%^[10]。作为 IHPTET 计划的延续，VAATE 计划的本质为发展、验证和转移先进的多用途涡轮发动机技术，同时，该计划也进行了拓展，组织结构进行了重组与优化，将工作重点由 IHPTET 计划的只提高推进系统的综合能力调

整为开发和验证先进技术、改善经济可承受性和实现通用性三个方面^[11]。因此，VAATE 计划的一个重要性能指标是采购性能，即发动机能力（推重比除以耗油率）与成本（研制、生产和维护成本之和）之比。从实施方法上，VAATE 计划与 IHPTET 计划也存在一定的差异，IHPTET 计划采用的是自下而上（部件→整机）的方法，而 VAATE 计划采用的是自上而下（航空器→领域→部件）的方法，通过强调高性能和低费用来保证实现 10 倍经济可承受性的目标^[5]。

由于 IHPTET 计划获得巨大成功，其大量的技术创新成果在其后续的 VAATE 研究计划阶段以专利的形式加以保护。因此，在 VAATE 计划实施阶段，在美国申请的航空发动机相关专利的数量较 IHPTET 计划实施阶段有很大提升，且由于 VAATE 研究计划是 IHPTET 计划的后续计划，是对 IHPTET 计划的延续和拓展，因此，从 2008 年至今专利数量波动较小（由于专利申请到公开的滞后性，2015 年的数据仅供参考）（图 5）。

从技术分布来看（表 2），B64D 依然是专利数量最多的 IPC 小类，F02C 同样紧随其后，值得注意的是 F01D 和 F02K 的相关专利数量较 IHPTET 计划实施阶段有大幅增加。

在这一阶段，美国以外的航空发动机相关企业

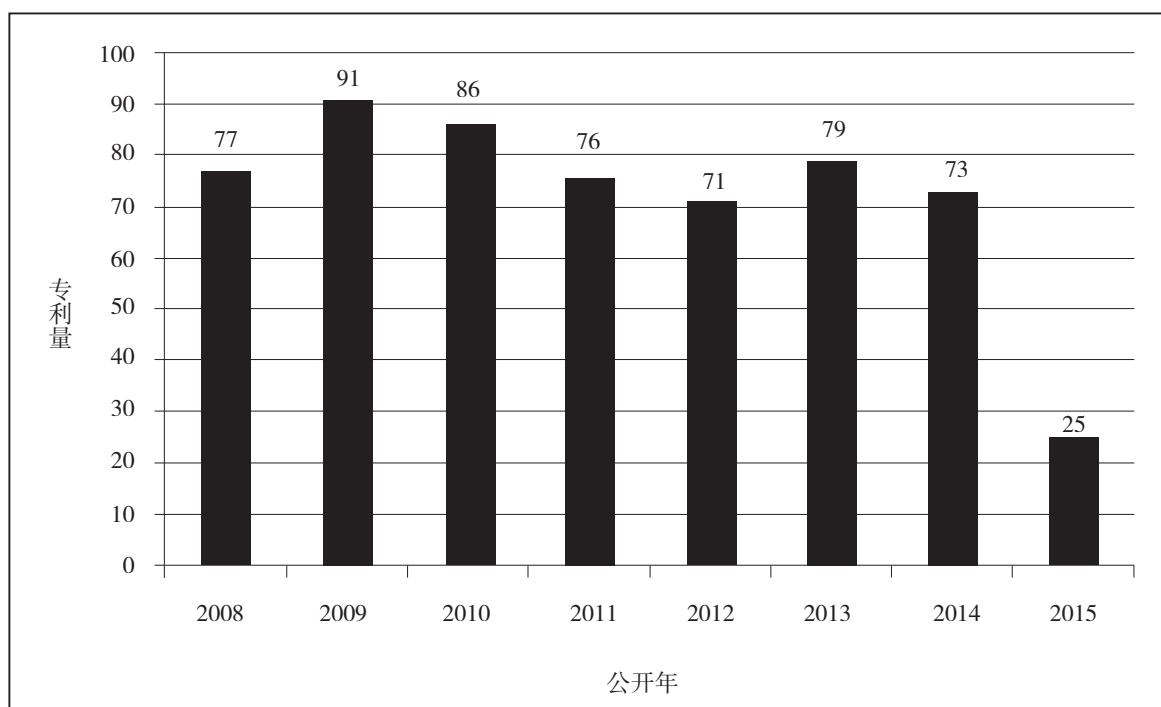


图 5 VAATE 计划实施阶段专利公开年度趋势

表 2 VAATE 计划实施阶段专利 IPC 分布

IPC 小类 (数量)	中文释义 ^[9]	IPC 组 (数量)	中文释义 ^[9]
B64D(141)	飞行器动力装置或推进传动装置的配置或安装	B64D27/00(38)	飞机上动力装置的布置或安装
F02C(81)	燃气轮机装置; 喷气推进装置的空气进气道; 空气助燃的喷气推进装置燃料供给的控制	B64D27/26(30)	以动力装置安装结构为特点的飞机
F01D(78)	非变容式机器或发动机	B64D33/02(14)	进气口燃烧的动力装置部件或辅助设备在飞机内的布置
F02K(61)	喷气推进装置	G06F19/00(14)	专门适用于特定应用的数字计算或数据处理设备或方法
B64C(47)	飞机; 直升飞机	F02K3/02(13)	部分工作流体旁通过燃气轮机和燃烧室的装置
B23P(34)	金属的其他加工; 组合加工; 万能机床	F01D25/24(12)	非变容式机器或发动机的外壳
G06F(23)	电数字数据处理	B23P11/00(12)	用不包含在其他类目中金属加工方法连接或拆开金属部件或金属物品
G01M(16)	机器或结构部件的静或动平衡的测试	F02C7/20(11)	喷气推进装置的空气进气道的安装或支承

继续加大在美国的专利申请, 尤其是空中客车公司成为这一时期在美国申请专利最多的申请人, 此外, 法国斯奈克玛公司和英国罗·罗公司也在美国有大量申请 (图 6)。通用公司和普惠公司作为 IHPTET 计划的成员继续参加了 VAATE 计划, 例

如: 在 VAATE 计划的第二阶段自适应通用发动机技术 (ADVENT) 计划中, 通用公司设计了逆向速度分布喷管 (inverted velocity-profile nozzle) 和流体屏蔽 (fluid shield) 装置以降低变循环发动机的噪声^[12], 普惠公司主要在结构紧凑的高效升力

发动机和涡扇发动机验证机方面进行研究^[13]，因此，在 VAATE 计划实施阶段这两个公司依然有相关专利公布，且数量上都有增加，尤其是普惠公司从上一阶段的 5 件增加为本阶段的 15 件。此外，VAATE 计划与 IHPTET 计划相比，针对更加宽广的应用领域开发、验证和转移先进涡轮发动机技术，这些应用领域，不仅包括军用航空器，还包括民用航空器，甚至包括革新的飞行器、舰船和发电设备等，因此，VAATE 计划实施阶段参与的企业成员数量较上一阶段增加，如波音公司就是本阶段加入的成员。

图 7 对图 6 中列出的主要专利申请人的申请趋势做了进一步分析。空中客车公司在 2008—2011 年加大了在美国的专利申请，斯奈克玛公司申请的高峰出现在 2011—2013 年，罗·罗公司的专利部署较为平稳，此外，这一时期法国赛峰集团也开始在美国申请专利。美国企业通用公司、普惠公司、联合技术公司和波音公司的专利申请虽然未出现高峰，但每年都有一定数量的专利申请。

图 8 是这一阶段部分主要申请人申请专利的 IPC 小组分布，横坐标为表 2 中列出的主要的 IPC 组。可以看出，空中客车公司依然在 B64D 领域部署了大量专利，而斯奈克玛公司却从动力装置的安装或配置，转为发动机的制造加工技术以及数据处理系统，罗·罗公司本阶段也开始在航空发动机的主要技术方向在美国申请专利，如，F01D25/24 和 F02C7/20。法国赛峰集团虽然本阶段才开始在美国申请专利，但其专利涉及到了较为核心的发动

机外壳的加工和发动机的装配等技术。就美国企业而言，通用公司和普惠公司都延续了上一阶段的申请方向，通用公司依然涉及到发动机的制造和装配技术，而本阶段普惠公司并未在图中所列的 IPC 小组中申请专利。波音公司的专利申请集中在飞机系统的装配和开发方面。

5 结论

美国航空发动机领域的技术进步与他们着力推进的一系列技术发展计划有着紧密的关系。本文深入分析了最具典型意义的 IHPTET 计划和 VAATE 计划，并以这两个计划实施时间段内在美国申请的专利数据为基础，分析了 IHPTET 计划和 VAATE 计划对技术创新的影响作用，得出如下结论：

(1) IHPTET 计划采用自下而上（部件→整机）的方法，聚焦于发动机本身性能的研究，在其总目标中将提高推重比列于首位，重点发展风扇/压气机、燃烧室、涡轮、排气、控制、机械系统和验证机等部件相关技术。在 IHPTET 计划的收官阶段，大量与航空发动机技术相关的专利在美国被公开，申请人既包括 IHPTET 计划的参与企业，如通用、普惠、霍尼韦尔等，也包括其他国家的航空制造业巨头，如法国斯奈克玛公司和英国罗·罗公司。从专利的 IPC 分布来看，通用、普惠等公司美国企业集中在 F02（燃烧发动机；热气或燃烧生成物的发动机装置）这一大类中，而斯奈克玛公司集中在 B64D（飞行器动力装置或推进传动装置的配置或安装）和罗·罗等公司集中在 F01D（非变容式

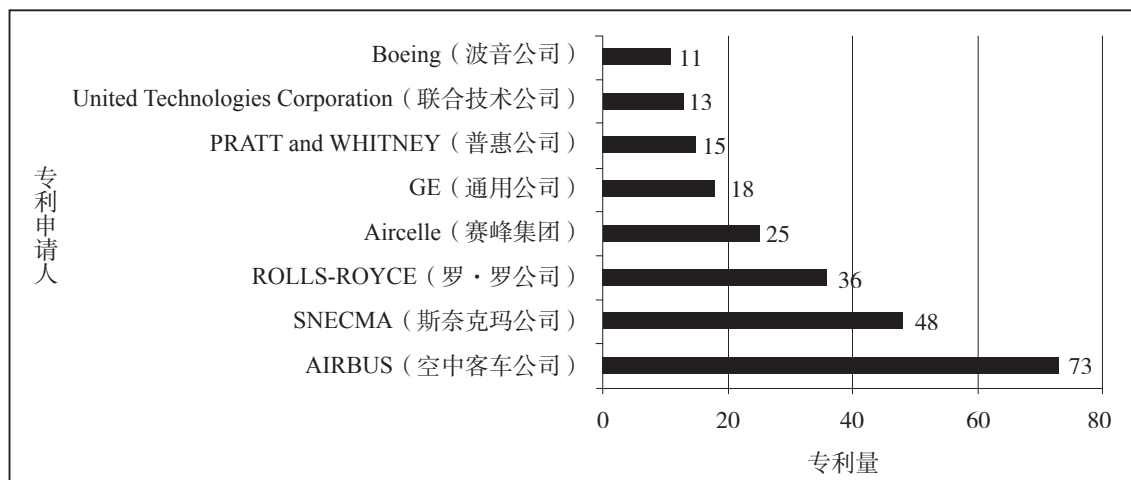


图 6 VAATE 计划实施阶段主要专利申请人

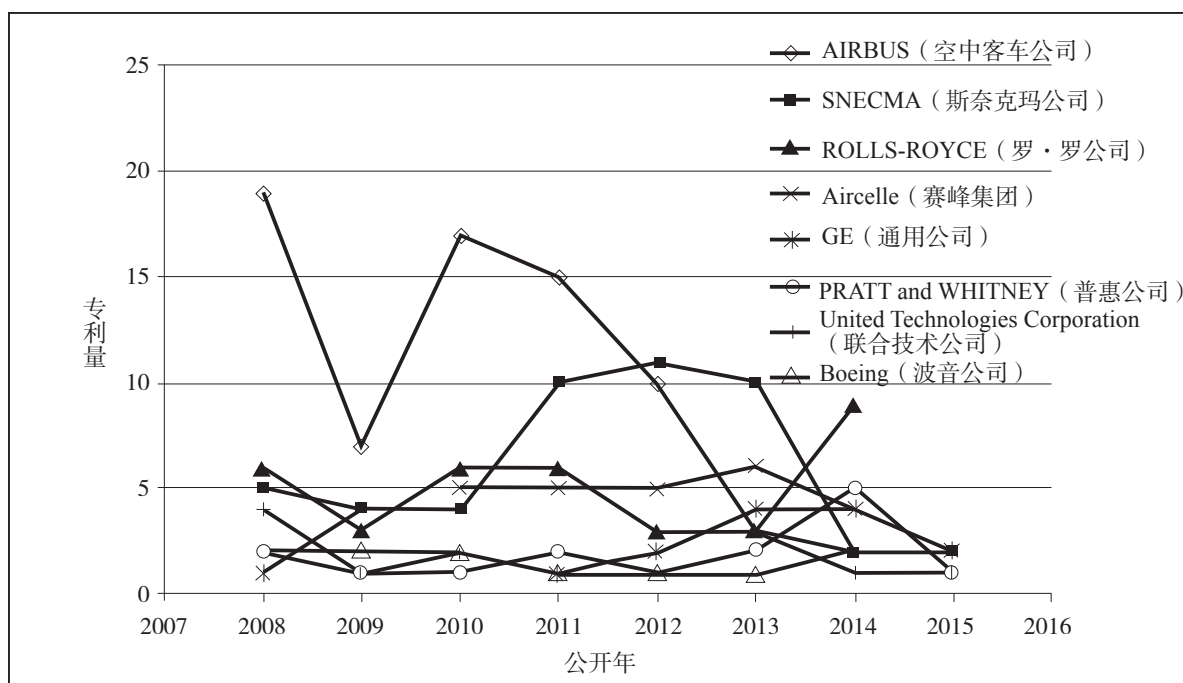


图7 VAATE 计划实施阶段主要专利申请人趋势分析

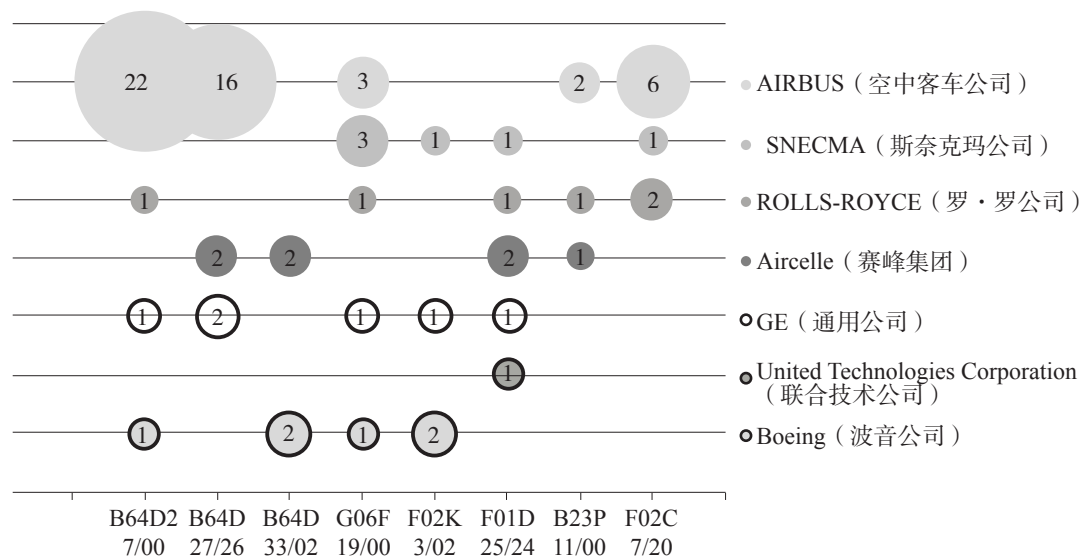


图8 VAATE 计划实施阶段主要专利申请人 IPC 分布

机器或发动机)方面。

(2) VAATE 计划诞生于 IHPTET 计划的收官之时，是 IHPTET 计划的延续，继续传承其战略目的，但 VAATE 计划更强调技术的经济性，技术思路转为自上而下（航空器→领域→部件），将系统的综合效益至于首位。这一阶段的参与企业除 IHPTET 计划的成员外，侧重飞机系统开发的企业，如波音公司也参与进来。这一时期的专利数量

也较 IHPTET 计划阶段有很大的提升，同时促使了同样侧重飞机系统开发的法国空客公司加大了在美国的专利部署。IPC 分布来看，B64D、F02C（燃气轮机装置；喷气推进装置的空气进气道；空气助燃的喷气推进装置燃料供给的控制）和 F01D 的专利较多。

(3) 目前我国虽然处于能够研制和制造航空发动机的少数国家行列，但与航空发动机强国美国

之间在关键技术上还存在着较大的差距。究其原因,缺少长期稳定且可操作的航空发动机发展政策与规划是主要因素。从2006年的大型飞机项目列入《国家长期科学和发展规划纲要》,到“十二五”时期将航空发动机列入国家重大专项,航空发动机的研制逐步提升至国家战略高度。但航空发动机的研制周期长,技术复杂度高,我国需借鉴美国IHPTET计划和VAATE计划的发展模式,制定国家级的航空发动机重点发展规划,从国家战略高度更全面地规划航空发动机产业,将发动机的研制先于飞机的研制,重点攻克关键技术,同时吸收实力强劲的制造企业加入发展计划,提高企业的技术创新能力。■

参考文献:

- [1] 方昌德,马春燕.航空发动机的发展历程[M].北京:航空工业出版社,2007.
- [2] Hill R J. The challenge of IHPTET[R]. ISABE 93-7001.
- [3] 梁春华,刘红霞.绿色、经济、创新美国NASA的超高效发动机技术计划[J].国际航空,2003(7):48-49.
- [4] 胡晓煜.NASA格林研究中心的宇航推进与动力计划[J].燃气涡轮实验与研究,2004,17(4):53-60.
- [5] 梁春华.通用的经济可承受的先进涡轮发动机计划的主要特点[J].航空发动机,2011,37(5):58-62.
- [6] 吴大观.关于新版综合高性能涡轮发动机技术计划—兼谈航空发动机研制中“基础技术”和“验证机”的重要性[J].航空发动机,2003,29(2):1-4.
- [7] 梁春华.IHPTET计划的最新进展[J].国际航空,2004(2):58-60.
- [8] Viars P R. The impact of IHPTET on the engine/aircraft system integrated high performance turbine engine technology[R]. AIAA-89-2137.
- [9] 国家知识产权局IPC中文释义查询系统. <http://www.pss-system.gov.cn/sipublicsearch/portal/classifyNum-showBasicClassifyNumPage.shtml>.
- [10] 孙明霞,梁春华.VAATE计划下的革新性发动机[J].2011(5):18-21.
- [11] AIAA Air Breathing Propulsion Technical Committee. The Versatile Affordable Advanced Turbine Engines (VAATE) initiative[R/OL]//www.aiaa.org, 2006, 1:1-10.
- [12] 杨东丹.GE和RR公司研究超声速低噪声推进系统[J].航空发动机,2012,38(4):21.
- [13] 胡晓煜.美国全面实施下一代军用航空发动机技术发展计划[J].国际航空,2007(12):40-42.

U.S.' Typical Aeroengine Development Program and the Influence on Technology Innovation

LIANG Qin-qin

(Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038)

Abstract: In this paper, the Integrated High Performance Turbine Engine Technology (IHPTET) program and the Versatile Affordable Advanced Turbine Engines (VAATE) program were introduced as the typical aeroengine development program in American aeroengine development process. Then, the influence of IHPTET program and VAATE program on American aeroengine technology was studied based on patents data collected from USPTO, included patent distribution in the year, technology distribution as well as the major research institutions.

Key words: aeroengine; IHPTET program; VAATE program; patent analysis; technology innovation