

# 间冷回热航空发动机技术发展趋势分析

王占学, 龚昊, 刘增文, 周莉  
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)



王占学(1969),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为航空发动机总体设计和推进系统气动热力学。

基金项目:工业和信息化部民用飞机专项科研项目(MJ-D-2011-10)资助

收稿日期:2013-06-03

**摘要:**间冷回热航空发动机是最受到重视的新型循环发动机。详细分析了间冷回热航空发动机的研究背景和开展该类发动机研究的必要性,描述了间冷回热发动机的基本工作原理和典型的技术特征。在此基础上,结合间冷回热航空发动机的发展历史的回顾,对其技术发展趋势和应用前景做出了预测。分析表明:间冷回热航空发动机以其低油耗的显著技术优势,将成为未来最有希望的“环境友好”民用航空发动机概念之一。

**关键词:**间冷;回热;航空发动机;技术发展趋势

## Analysis of Technical Development Trend of Intercooled Recuperated Aeroengine

WANG Zhan-xue, GONG Hao, LIU Zeng-wen, ZHOU Li

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The research background of the intercooled recuperated aeroengine was analyzed in detail, and the necessity of its research was highlighted. The basic principle of the intercooled recuperated aeroengine and its technical characteristics were described. On this basis, through the review of the technical development progress of the intercooled recuperated aeroengine, a prediction of its technical development trend and application prospect was made out. The analysis results indicate that intercooled recuperated aeroengine with obviously technical advantages of low fuel consumption becomes one of the most promising "environment friendly" concepts of civil aviation engine. It is necessary to research the intercooled recuperated aero engine which is the representative of the unconventional thermal cycle aircraft engines.

**Key words:** intercooled; recuperated; aeroengine; technical development trend

## 0 引言

近年来,民用航空运输量不断增长,航空业迅速发展。与此同时,燃油价格不断上涨,环保要求也愈发严格。民航领域迫切要求进一步降低发动机的油耗,并减小发动机排放和噪声对环境的影响,以提高民航运输经济性。目前,常规循环航空发动机性能水平已经很高,其性能参数进一步提高受到限制。因此可以考虑新型热力循环,发展“环境友好”民用航空发动机。在当今世界航空强国提出的诸多研究计划中,间冷回热航空发动机(IRA)是一个重要研究方向,通过使用间冷回热循环技术可以进一步提高航空发动机的性能和环保水平。

本文旨在通过分析间冷回热航空发动机的研究

背景、技术特点和技术发展历程,指出开展相关研究的必要性,并对其发展趋势做出预测。

## 1 研究背景

### 1.1 民用航空领域面临的压力

民用航空运输已成为现代社会重要的组成部分。随着科技进步和经济增长,世界航空运输不断发展,尤其是2003年以来,发展速度越来越快。世界经济的发展,人民收入的提高,贸易往来的增多,给民用航空运输带来了新的市场。但同时航空燃油价格上涨和越来越严格的环保要求也成为民用航空领域不得不面对的压力。

2011年,空客公司发布了未来航空运输量预测报告<sup>[1]</sup>。报告指出,根据国际民用航空组织(ICAO)统

计的世界航空运输量,1970~2010年,每隔15年,世界航空运输量翻1番。空客公司对未来航空运输量的预测为:未来15年,世界航空运输量将较2011年的水平翻1番,年增长达4.8%,如图1所示。近年来,原油价格波动较为剧烈,其中有能源危机的大背景,也有政治因素的作用,但是从根本上讲能源危机并未解除,未来油价增长的趋势是不会改变的,预计2010~2030年,国际平均原油价格将超过120美元/桶,如图2所示。而航空燃料价格趋势和原油价格趋势是一致的。从航空公司经济性角度看,由于航空燃料占总航空运输成本的25%以上,航空燃料价格的上涨趋势进一步增加了航空公司要求显著降低燃油消耗量的迫切性。



图1 ICAO和空客公司对未来航空运输量的预测<sup>[1]</sup>

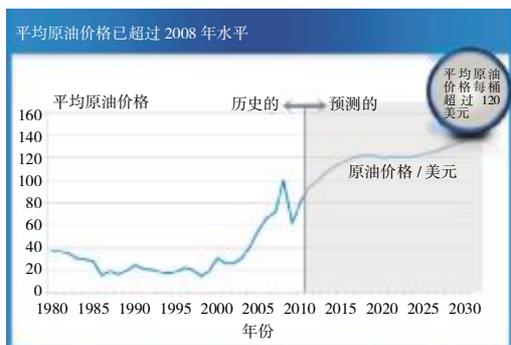


图2 ICAO和空客公司对未来原油价格的预测<sup>[1]</sup>

从航空运输对环境影响的角度,有预测表明,至2050年,航空运输对环境的影响将占到全部人类活动的7%。鉴于航空运输快速发展的趋势,其对环境的影响日益显著。世界经济越发达地区,航线越密集,对环境的影响也越严重。为加强对环境的保护,1983年,ICAO成立了航空环境保护委员会(CAEP)。CAEP分别于1986、1993、1999和2004年制定了排放标准CAEP/1、CAEP/2、CAEP/4和CAEP/6。一些国家对飞机噪声和污染排放也提出了严格要求,例如瑞典、瑞

士、英国、德国就制定了着陆收费标准。随着航空运输的快速发展及对环境的影响越来越严重,飞机污染排放的规则将会不断更新,且会更加严格。环保要求成为民用航空领域不得不面对的新的压力,并且在未来,此压力将越来越明显。

为了应对挑战,欧盟航空研究咨询委员会(ACARE)制定了2020年发展目标,要求2020年以后投入使用的飞机和发动机,SFC将减少50%。其中,飞机的贡献占20%~25%,发动机的贡献占15%~20%,空管的贡献占5%~10%。具体到发动机来说,要求SFC(基准为2000年TRENT700和CFM56发动机)降低20%,NO<sub>x</sub>排放减少80%(相对ICAO1996),噪声减少10dB。

## 1.2 间冷回热航空发动机概念的引出

一方面,民航飞机航程的增大,未来航空燃油价格的上涨,要求发动机的耗油率进一步降低,以提高飞机经济性。尽管随着气动设计、材料技术的发展,发动机热力循环参数和部件效率仍有一定提高的空间,但这种空间已经很小。传统简单循环航空发动机性能水平已经很高,其性能参数进一步提高受到限制。因此,要求发展新概念循环航空发动机。

另一方面,航空运输的增长和公众对环境污染的意识不断增强,使得航空发动机排放和噪声成为航线经济性越来越重要的问题,也成为发动机制造商之间竞争越来越重要的方面。随着各国政府提高对环境污染的关注以及系列政策的出台,民航运输的成本明显增加。因此,要求发展“环境友好”民用航空发动机。

综合来看,最可行的降低发动机SFC的方法是研究新型热力循环发动机。在当前所关注的新型热力循环发动机中,采用间冷回热技术的涡扇发动机是最受到重视的一类新型涡扇发动机。

## 2 基本原理和技术特点

以间冷回热大涵道比涡扇发动机为例,发动机截面如图3所示。其热力循环与常规循环相比,增加了间冷过程和回热过程。其间冷器和回热器均为间壁式换热器,冷热端气流仅换热,不掺混。间冷器热端位于增压级(IPC)与高压压气机(HPC)之间,热端进口24接增压级出口,热端出口25接高压压气机进口;外涵道中增加1个分流器,分出一中涵道,间冷器冷端占据中涵道,冷端进口13、冷端出口14接外涵道。回热器

位于低压涡轮后,冷端通过导管与高压压气机出口(燃烧室进口)相连,冷端进口 3 接高压压气机出口,冷端出口 3r 接燃烧室进口;热端进口 6 接低压涡轮出口,热端出口 6r 接尾喷管进口。

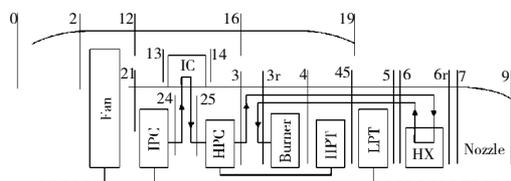


图 3 间冷回热航空发动机截面

空气进入进气道后,内涵空气首先经过风扇和增压级的压缩后流入间冷器,再通过间冷器与外涵空气进行热交换,内涵空气温度降低后进入高压压气机。经过高压压气机压缩后,通过导管流入位于低压涡轮后的回热器。在回热器中,由高压压气机流出的空气从低压涡轮较高温度的排气中吸收热量,再通过导管流回燃烧室。由于从排气中回收了一部分热量,燃烧室只要有较低的温升就可达到高压涡轮的目标进口温度。流出燃烧室的燃气在高压涡轮和低压涡轮中膨胀做功,然后通过尾喷管排出。同时,经过间冷环节,外涵道气流经热交换后总温升高,提高了做功能力,增大了单位推力。最终内外涵道排气共同产生飞机所需的推力。

研究发现,将间冷器引入燃气涡轮发动机具有以下优点:能够大大降低驱动高压压气机所需的功输入;可用冷却器冷却二次流空气;可在所有推力范围内提高发动机性能;燃烧室进口温度较低,易于设计热端部件,且能够降低  $\text{NO}_x$  的排放量。但与此同时,也必须解决以下问题:由于最优的总压比较大,需要更多级压气机和涡轮,需要提高静态和动态燃气负荷,因此,影响了转子叶片、核心机机匣和高压轴推力轴承的负荷;核心机尺寸小,降低了部件效率;需要更多的压气机可调级或放气阀,还可能需涡轮可调,以控制压气机的工作线。

将回热器引入燃气涡轮发动机带来的好处是:由于最优总压比明显减小,简化了叶片的设计,并可以使用冷却空气作为冷却介质;提高了部分推力状态的性能,特别是在涡轮采用可调面积导向器的情况下;大大提高了总压比有限的小发动机的性能;在一定的推力下,可以减小涵道比和减少低

压涡轮所需的级数;降低低压涡轮的噪声。但与此同时,将回热器引入燃气涡轮发动机也面临着以下问题:在大推力下,较大发动机的收益很小、费用增加、质量增大、复杂性增加;承受热负荷的回热器耐久机械性能差;较高的燃烧室进口温度可能增加  $\text{NO}_x$  的排放量。

如果将间冷器与回热器同时引入燃气涡轮发动机,除了需要解决质量明显增大的问题外,可以在所有推力下,特别是对较小的发动机,能够降低发动机的耗油率;依据所选择的循环,有降低  $\text{NO}_x$  排放量的潜力,并可以减少部件数量,降低成本。间冷回热循环较只间冷或只回热的具有明显优势,发动机的热效率更高,减少污染物排放的潜力也更大,是最有希望达到 ACARE 目标的新概念发动机。

### 3 技术发展历程

间冷回热技术研究可追溯到 20 世纪 40~50 年代。当时就已经认识到间冷回热技术具有提高燃气涡轮发动机性能的潜力,并开展了大量研究。之后的几十年中,德国、英国、前苏联(俄罗斯)、美国等国均有研究机构或公司在航空发动机和燃气轮机方面不同程度地开展过间冷回热技术研究,包括飞机用发动机、直升机用发动机、巡航导弹/无人机用发动机、舰船燃气轮机、车辆用燃气轮机、发电用燃气轮机和微型燃气轮机等。

目前,间冷回热技术在燃气轮机上已成功应用,主要代表有美国阿夫柯·莱卡明公司研制的 M1A1 坦克用回热燃气轮机 AGT1500、格鲁曼/罗罗公司合作研制的英国皇家海军 Type45 型 D 级驱逐舰用间冷回热燃气轮机 WR-21、美国通用公司研制的发电用间冷燃气轮机 LMS100 等。在微型燃气轮机上,各种构型的回热器均有使用,成功地提高了热效率。在航空发动机方面,间冷回热技术的发展历程及重要成果如图 4 所示<sup>[2-4]</sup>。

热交换航空发动机概念的提出最初是由于当时航空发动机技术水平较低,迫切希望能够降低发动机油耗从而增大飞机的航程。从 1943~1970 年期间,进行了大量的理论和试验研究,由于当时航空发动机总压比不高,因此研究主要针对回热航空发动机。

1943 年,德国首次提出热交换航空发动机概念。该发动机为是 1 低总压比带有锥形转鼓回热器的回

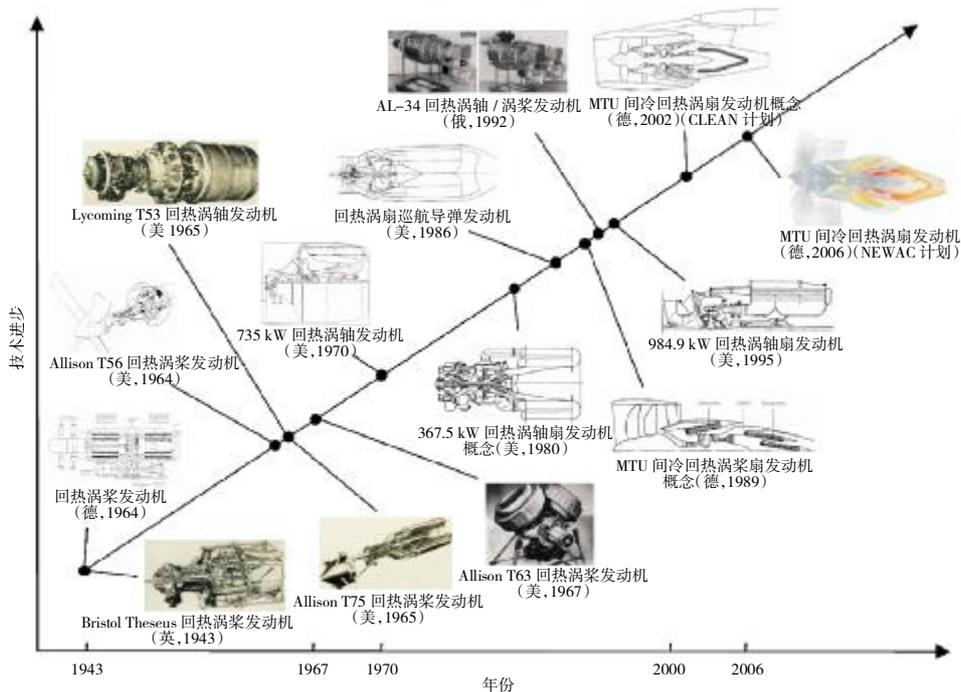


图 4 间冷回热航空发动机技术发展历程及重要成果

热涡轮发动机,设计用于为 Me264 轰炸机增加航程,但该发动机并没有被制造和试验。同年,英国提出 Bristol Theseus 回热涡轮发动机概念,并开始实施研制计划,第 1 次将回热器安装到航空发动机中。该发动机设计用于为商业航线飞机节油并增加航程。1945 年底,该发动机第 1 次运行时毁坏,计划中止<sup>[1]</sup>。

1967 年,为了对带回热的推进系统进行飞行验证,美国研究了直升机(轻型观察直升机)用 Allison T63 回热涡轮发动机。1967 年 10 月 20 日,回热 T63 发动机被安装在 1 架 YOJ-6A 直升机上,进行了 50 h 的飞行试验,这是带换热器发动机惟一的 1 次载人飞行试验<sup>[1]</sup>。

1970~2000 年,一方面由于常规循环航空发动机技术水平不断提高,同时轻质高效换热器技术并未取得突破;另一方面,燃油价格和环境压力并未成为航空发动机设计的关键驱动力,民用间冷回热航空发动机研究趋于停滞。但由于间冷回热技术降低红外信号等潜在的军事用途,各国提出了大量的无人机和直升机用间冷回热航空发动机概念,这些发动机绝大多数都没有被制造和试验,仅进行了概念研究和方案论证。

进入 21 世纪后,由于能源危机的压力和对环境污染的关注,间冷回热航空发动机再次成为研究热点。为了进一步提高航空发动机的热效率,降低航空发动机的耗油率和  $\text{NO}_x$  排放量,欧盟提出了很多涉

及间冷回热航空发动机的研究计划,如 FP5 下的环保型航空发动机部件验证(CLEAN)计划、FP6 下的新型航空发动机方案(NEWAC)计划和 FP7 下的清洁天空(Clean Sky)预研计划等,持续支持间冷回热航空发动机技术研究<sup>[5-7]</sup>。另外,德国 MTU 公司内部的洁净航空发动机(CLAIRE)计划也将换热器技术列为重要技术基础<sup>[8-9]</sup>。

在 CLEAN 计划的支持下,德国 MTU 和法国 SNECMA 公司等提出并研究了间冷回热循环发动机技术。目标是使  $\text{CO}_2$  排放降低 20%(相比 1995 年技术的发动机)和使  $\text{NO}_x$  排放降低 80%(相比 CAEP/2)。经理论与试验研究,结果为  $\text{CO}_2$  排放降低 16%, $\text{NO}_x$  排放降低 60%。由于间冷回热航空发动机技术复杂,2015 年前不考虑飞行验证,实际使用在 2020 年以后。

在 CLEAN 计划之后,欧盟又启动了 NEWAC 计划。目标仍然是希望采用热交换器技术提高发动机热效率,使  $\text{CO}_2$  和  $\text{NO}_x$  排放降低 6%和 16%,排放指标与 ACARE 目标要求接近。该计划下,IRA 回热器布局研究进展顺利,取得了大量的数值模拟数据,为最终回热器在发动机中布局的优化打下坚实的基础。在支持间冷技术的压缩系统研究方面也取得了相当的技术进展。

CLAIRE 计划是 MTU 内部技术计划,分 3 步进

行。(1)2005~2014年,完成齿轮传动涡扇发动机的研究,实现较2005年水平的V2500发动机的耗油率降低15%的目标;(2)2015~2025年,完成对转涡扇发动机的研究,实现较2005年水平的V2500发动机的耗油率降低20%的目标,即实现ACARE的目标;(3)2025~2035年,完成带间冷回热器的对转涡扇发动机的研究,实现较2005年水平的V2500发动机的耗油率降低30%的目标,实现彻底的技术领先。目前,该计划各项研究工作正在开展<sup>[9]</sup>。

值得注意的是,德国MTU公司分别于1989年提出间冷回热桨扇发动机概念,于2002年提出间冷回热涡扇发动机概念。这些MTU早期的间冷回热航空发动机研究为其后来承担欧盟CLEAN和NEWAC 2个计划中的间冷回热航空发动机研究打下良好的技术基础,同时为该公司自身的CLAIRE计划的不断推进做了良好开端。

综合分析目前国外在间冷回热涡扇发动机领域的研究成果可知,尽管该项技术短期内尚不可能进入工程实用阶段,但其代表了有效提高发动机循环热效率,降低耗油率和污染物排放的1种新技术。

在间冷回热技术研究方面,中国在地面或舰船燃气轮机已开展研究,并逐步转向工程化应用。但由于航空发动机使用的特殊性,决定了其采用间冷回热技术会具有比地面或舰船燃气轮机更复杂的技术特征。与国外先进民用大涵道比涡扇发动机已经达到的水平相比,中国先进循环民用大涵道比涡扇发动机的研究还仅仅停留在概念跟踪和总体方案初步研究阶段。

## 4 技术发展趋势分析

### 4.1 民用航空发动机发展方向

当代民用航空发动机的发展方向是节能环保航空发动机,即“绿色发动机”。在研究中,欧洲和美国有一些技术合作,但是发展路线也有差异。就目前的观点来看,欧洲建立了更加雄心勃勃的构想,致力于发展高度先进的和非常规的航空发动机概念,例如间冷回热循环系统。美国主要依赖常规循环和齿轮驱动涡扇发动机先进推进系统。技术路线如图5所示<sup>[10]</sup>。因此,民用间冷回热循环发动机研究方面,目前的研究热点是用于商用大飞机的间冷回热大涵道比涡扇发动机,研究主体在欧洲,研究目的是降低发动机耗油率并减少排放,最终实现ACARE 2020目标。在欧

盟框架计划下,间冷回热大涵道比涡扇发动机研究以MTU公司为核心,涉及的研究机构、公司、大学遍布整个欧洲。

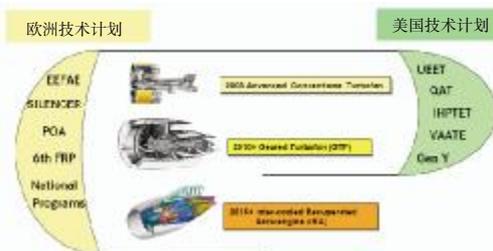


图5 “绿色发动机”发展路线<sup>[10]</sup>

根据CLEAN、NEWAC、CLAIRE等计划的研究目标、研究思路和阶段成果可以作出预测,在诸多研究计划的支持下,坚持开展间冷回热循环大涵道比涡扇发动机技术研究,不断突破该发动机相关的技术难点和关键技术,最终可以实现间冷回热循环大涵道比涡扇发动机的工程应用。

间冷回热循环大涵道比涡扇发动机的低耗油率、低排放和低噪声特性是通过不断增大涵道比,降低外涵风扇压比,使用间冷回热循环技术,使用低排放燃烧室实现的。其技术发展趋势如下:

(1)从短期看,其涵道比将维持在高的数值;从长期来看,其涵道比必然会超过现役所有涡扇发动机的,达到18~20左右,以实现极低的耗油率和噪声。

(2)其核心机非常紧凑高效,通过实现间冷器和回热器的优化布局,其尺寸可能会比相同推力级的涡扇发动机增大10%以内。

(3)从短期看,通过长航程应用,其增大的质量完全可以通过燃油量的减少得到补偿;从长期看,通过轻质紧凑换热器的技术突破,有可能实现IRA发动机总质量不增加。

(4)间冷回热循环涡扇发动机的总压比可以维持在较低值(25~30左右),为低排放燃烧室技术的应用创造了条件,将引领低排放燃烧的技术研究。

(5)换热器研究方面,未来轻质、紧凑、高效换热的间冷器和回热器会最终应用到航空发动机上,为间冷回热循环涡扇发动机的工程应用实现最重要的技术突破。

间冷回热循环技术在民用发动机上的应用主要是间冷循环涡扇发动机、间冷回热循环涡扇发动机和间冷回热循环桨扇发动机等。

## 4.2 军用航空发动机发展方向

间冷回热循环技术在军用航空发动机上的应用,主要是通过降低耗油率来增大飞机的航程或留空时间;通过减小发动机排气温度从而减小红外信号增强飞机的战场生存能力和突防能力。

根据文献[4]介绍,军用间冷回热循环发动机的研究主体为美国,其间冷回热循环发动机可能的技术路线为:

(1)研究无人机/巡航弹用发动机,如无人机和无人战斗机用回热小型涡桨发动机和回热小型涡扇发动机、高空无人机用间冷回热小型涡扇发动机、巡航导弹用回热小型桨扇发动机等,目的是增加留空时间或航程并减少红外辐射。

(2)研究军用直升机用回热循环涡轴发动机,目的是通过降低耗油率来增大飞机的航程或留空时间,同时由于排气温度降低可以减小红外信号和噪声,增强战场生存能力。

(3)待间冷回热循环技术在小发动机上应用成熟后,研制更大更复杂的军用间冷回热航空发动机,先小推力级的,后大推力级的,如军用运输机用回热循环涡桨发动机,以增大飞机的航程,同时减小红外信号;巡逻机用回热循环涡桨发动机,以增加飞机的留空时间,同时减小红外信号,增强战场生存能力。

## 5 结束语

间冷回热航空发动机以其低油耗的显著技术优势成为未来最有希望的“环境友好”民用航空发动机概念之一。当前有必要开展间冷回热航空发动机为代表的新型循环航空发动机技术预研工作,一方面可以为中国民用航空发动机技术发展做必要的技术储备,另一方面可以通过其技术牵引作用促进中国航空发动机技术发展。

## 参考文献:

- [1] John Leahy. Delivering the future global market forecast 2011–2030[R]. Blagnac: Airbus, 2011.
- [2] McDonald C F, Massardo A F, Rodgers C, et al. Recuperated gas turbine aeroengines, Part I—early development activities [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 2008,80(2):139–157.
- [3] McDonald C F, Massardo A F, Rodgers C, et al. Recuperated gas turbine aeroengines, Part II—engine design studies following early development testing [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 2008,80(3):280–294.
- [4] McDonald C F, Massardo A F, Rodgers C, et al. Recuperated gas turbine aeroengines, Part III—engine concepts for reduced emissions, lower fuel consumption, and noise abatement [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 2008,80(4):408–426.
- [5] Wilfert G, Sieber J, Rolt A, et al. New environmental friendly aero engine core concepts [R]. ISABE–2007–1120.
- [6] Rolt A M, Kyprianidis K G. Assessment of new aeroengine core concepts and technologies in the EU framework 6 NEWAC programme [C]/27th International Congress of the Aeronautical Sciences, Nice, France, 2010.
- [7] Boggia S, Rud K. Intercooled recuperated aeroengine [R]. Munchen, MTU Aero Engines, 2004.
- [8] Gmelin T C, Hüttig G, Lehmann O. Summarized description of aircraft efficiency potentials taking account of current engine technology and foreseeable mediumterm developments [R]. German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, FKZ UM 07 06 602/01, Berlin, Germany, 2008.
- [9] Engber M, Rüd K. Advanced technologies for next generation regional jetssurvey of research activities at MTU Aero Engines [R]. ISABE–2007–1282.
- [10] Krammer P, Rued K, Truebenbach J. Technology preparation for green aero engines [R]. AIAA–2003–2790.