

# 运输类飞机及发动机的绿色创新发展路径

陈 斌

(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

**摘要:**为了更好地掌握运输类飞机及其推进系统的未来发展方向和创新发展路径,利用第一性原理分析方法,基于布雷盖航程方程进行分析。结果表明:运输类飞机的创新发展主要是围绕飞机气动性能提升、重量性能提升和推进性能提升 3 个维度进行,且飞机技术的创新发展一方面依赖于航空科技的进步,另一方面则会受发展环境等的影响;动力则仍然以大涵道比涡扇发动机为主要构型,混电等新概念发动机的使用则主要取决于电池等技术的突破。

**关键词:** 运输类飞机; 发动机; 第一性原理; 绿色航空; 创新发展路径

**中图分类号:** V11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)07-0273-06

以燃料经济性为动力装置主要考量因素的亚音速民用客机、军用运输机、军用巡逻机、信息节点类飞机等固定翼飞机,可统一归纳为运输类飞机。随着过去 100 年航空科学技术的飞速发展,运输类飞机的安全性、经济性、舒适性和环保性等指标实现了大幅度提升,已经成为当前最高效的中远程运输工具。但随着全球经济和运输业的快速发展,运输类飞机机队规模不断扩大,航空运输业产生的碳排放量也保持着持续快速增长的态势,这给全球“碳达峰”“碳中和”目标的实现带来了巨大的挑战。据统计,在人类造成的温室气体排放中,全球航空运输业产生的碳排放量约占全球碳排放总量的 3%,但是碳排放量的增长速度极快,预计到 21 世纪中叶可达 22% 左右<sup>[1]</sup>。

在全球减碳发展的大背景下,绿色航空成为当前及未来航空运输业的发展主题,是未来运输类飞机及发动机的发展方向。各航空强国的飞机及发动机制造商们为保持其在航空运输领域的领先地位,从战略高度积极推进绿色航空技术的研究和发展,推出了一系列创新型飞机和推进系统设计概念,如桁架支撑机翼、联结翼、可变弯度机翼、双气泡布局、GTF(齿轮传动风扇发动机)、开式转子、混合电推进系统等,为 2050 年左右的运输类飞机技术发展指明了方向。本文从第一性原理的角度出发,梳理总结运输类飞机及发动机在绿色航空概念牵引下的创新发展路径,以期对未来民用航空飞行器及动力系统的发展规划提供新的思路。

## 1 创新发展原理

运输类飞机的任务特点决定了其任务剖面相对简单,即起飞-爬升-巡航-下降-着陆,其中的巡航阶段占全部任务剖面的 85% 以上,因此,提升运输类飞机巡航阶段的性能就能显著提升其在整个任务剖面内的性能。

按照布雷盖(Breguet)航程评估方程(1),以燃气涡轮发动机为动力的飞机巡航航程可以用飞机的巡航速度、巡航耗油率、巡航升阻比以及巡航始末飞机重量的变化来表示,其中巡航速度  $v$  和耗油率  $sfc$  表示燃气涡轮发动机燃油转化为推力的效率,可以描述为飞机的推进性能;巡航升阻比  $L/D$  表示飞机产生升力的效率,可以描述为飞机的气动性能;而巡航始末飞机重量比值的对数  $\ln \frac{W_{ini}}{W_{fin}}$  可以描述为飞机的重量性能。通过提升飞机的推进性能、气动性能和重量性能,可实现在相同条件下飞机航程的增加,也可理解为,在飞行相同航程的条件下,飞机的经济性会更高。因此,运输类飞机的技术创新发展是围绕着飞机气动性能、重量性能和推进性能提升这 3 个维度开展。

$$R = \frac{v}{sfc} \frac{L}{D} \ln \frac{W_{ini}}{W_{fin}} \quad (1)$$

式中: $R$  为飞机航程,km; $v$  为飞机巡航速度,km/h; $sfc$  为涡轮发动机的耗油率,kg/(kgf·h); $L$  为飞机的升力,N; $D$  为飞机的阻力,N; $W_{ini}$  为飞机巡航初始的重量,kg; $W_{fin}$  为飞机巡航结束的重量,kg。

收稿日期: 2024-10-22

作者简介: 陈斌(1990—),男,甘肃武威人,硕士,工程师,研究方向为航空发动机发展战略。

## 2 创新发展途径

### 2.1 气动性能提升

一架传统亚音速管-翼构型的运输类飞机在  $Ma=0.8$  巡航状态下,其机翼、机身和尾翼的阻力占总阻力的 88% 左右。因此,飞机气动性能的提升可通过创新飞机设计理念,优化或改进传统亚音速运输类飞机“管-翼”构型的气动性能,或者采用联结翼(Box-wing)以及多机身等气动效率更加高效的非常规气动布局设计技术来降低飞机的阻力,以提高飞机升阻比,进而实现飞机气动性能的提升。具体实现途径主要包括以下 6 种。

(1)采用鸭翼布局。鸭翼布局是指在固定翼飞机主翼前面增加一组水平升力面,主翼后方去掉平尾的布局。相较于采用水平尾翼布局的飞机,鸭翼布局能产生向上的升力以配平飞机,使得飞机的整体升力效率得到提升,且在垂直方向上高于机翼平面的鸭翼在大迎角时能获得更大的升力,同时在降低阻力方面也有更好的表现。鸭翼目前只在军用飞机上使用,民机领域,除了已退役的 TU-144 超声速客机之外,目前该项技术正处于研究阶段<sup>[2-3]</sup>,尚未在其他正式运营的型号上得到实际应用,随着技术不断发展成熟,未来可能会在 BWB(翼身融合)飞机上得到应用。

(2)采用桁架支撑机翼。桁架支撑机翼是由主机翼和桁架组成的一种机翼类型,其中桁架部分由斜撑和支撑构成,而主机翼一般采用超薄和大升阻比的设计。同传统的悬臂梁式机翼相比,桁架支撑机翼由于桁架承担了部分载荷,减轻了翼根弯矩,理论上重量可以更轻;如果在同等重量下则机翼可以更大,而机翼越大,升阻比越大。此外,通过增加跨距,能减少诱导阻力,可降低对发动机的性能要求,且上单翼布局允许更大的发动机尺寸,例如开式转子发动机<sup>[4]</sup>。研究表明:桁架支撑机翼既可以用于宽体飞机,又可以用于窄体飞机<sup>[5]</sup>,具有巨大的应用潜能。目前美国国家航空航天局(NASA)已经选择波音公司及其工业团队来领导一种全尺寸跨声速桁架支撑机翼验证机的研发和试飞工作。

(3)采用联结翼。联结翼布局飞行器是指机翼包含串列的前翼和后翼,通常后翼的根部与垂尾的顶端相连,前后翼的连结点位置根据设计要求有比较大的选择灵活性。与传统构型的飞机相比,联结翼布局的飞机具有众多优点。例如,在气动方面,具有低的诱导阻力,高的最大配平升力系数,以及良好的跨音速面积分布;在结构方面,可以保证较

低的结构重量和较高的结构刚度;从飞行力学角度看,具有良好的稳定性和操纵性,可以使用直接升力控制和直接侧力控制<sup>[5-6]</sup>。联结翼在军用飞机上典型应用就是无侦-7 无人机,商业飞机上目前正在开展技术研究,尚未实际应用。

(4)采用可变弯度机翼。可变弯度机翼指有柔性前缘和后缘,翼面为连续、光滑、没有开缝或滑动接头的机翼,其通过内部联动装置来控制实现随环境变化和所需升力变化而变化。可变弯度技术通过改变机翼前后缘的形状来调整机翼的升力,使之与最佳气动效率状态相匹配,提高燃油经济性。同时由于机翼前后缘变形没有缝道和剪刀口,曲率变化连续,翼面压力变化平缓,无明显流动分离,可以有效降低起飞和进场噪声<sup>[7-8]</sup>。可变弯度机翼技术是亚音速运输类飞机结构设计变革的大趋势,有助于提升未来民用飞机的全球市场竞争力。欧盟及美国国家航空航天局(NASA)、空军研究实验室(AFRL)等都开展了相关技术研究,且 AFRL 的变弯度柔性机翼项目完成了在无人机上的飞行测试。

(5)采用层流控制技术。层流控制技术是指通过采用一定的技术手段,适当塑造飞机表面(自然层流)或边界层吸力(混合层流),对飞机表面进行流动控制,保持飞机表面上的气流无湍流,实现大范围的层流区,以此来减小气流与飞机表面的摩擦阻力,提升飞机的升阻比<sup>[9]</sup>。NASA 在 N+3 计划、空客在欧盟“清洁天空”等计划中都在开展层流控制等先进技术的研究,并都取得了一定进展。应用方面,NASA 与波音公司在 B757 飞机上完成了飞行试验,欧盟在“洁净天空”计划支持下在空客 A340 飞机上完成了试验。

(6)采用新型气动布局,如翼身融合布局等。翼身融合布局是指机翼和机身高度融合的全升力面飞机外形。在相同装载要求下,翼身融合设计能够降低全机浸润面积从而减小摩擦阻力,与传统的“管-翼”布局相比,翼身融合布局巡航效率可提高 15%~20%(相对 B787 和 A350 飞机),并具有降低噪声、排放和结构重量等潜力<sup>[10]</sup>。研究表明,翼身融合布局应用不再局限于 250 以上座级的大型民机,而是可扩展到 100~150 座级支线机和高端公务机领域<sup>[11]</sup>。典型的设计方案如 NASA 的 X-48C 翼身融合飞机,其在整个飞行包线测试中表现出较好的性能。

此外,翼梢小翼、沟槽减阻、层流减阻涂层、主动载荷减轻、后机身减阻涡流发生器、柔性后缘等

减阻技术目前技术成熟度已较高,部分已经得到了应用,有效地支撑了飞机气动性能的提升,并促进了飞机设计技术的不断创新发展。

## 2.2 重量性能提升

提升飞机的重量性能是指采用轻量化设计技术和手段来减轻飞机机体的重量,从结构设计的角度来讲,飞机结构的重量越轻,在同等条件下,其飞行高度越高、航程越大、起飞和降落距离就越短,能整体提升飞机的飞行性能。对于飞机重量性能的提升,主要有以下3种途径。

(1)继续增大“轻量化材料”的使用比例。“轻量化材料”主要包括镁、铝合金和复合材料等,其中复合材料由于比强度高、比模量大、耐腐蚀性能优及易于大面积整体成型等独特性能,已经成为继钢、铝、钛合金之后的第四大航空结构材料<sup>[12]</sup>,是实现飞机减重的重要途径,使用部位也由最初的舱门、整流罩、安定面等次承力结构,逐步向机翼、机身等主承力结构部位发展,使用量占机体结构质量的比例由空客 A380 飞机的 25%,提高到波音 787 飞机的 50%以及空客 A350XWB 飞机的 52%,且该比例仍然保持增长的趋势<sup>[13]</sup>。未来,如纳米增强复合材料、智能复合材料、碳纤维复合材料、陶瓷基复合材料和树脂基复合材料等当前在研的新型复合材料将进一步助推飞机的重量性能提升。

(2)采用结构优化设计技术。在传统飞机零部件及系统的设计过程中,通常为了注重零部件及机体结构强度和寿命等安全性因素,导致设计的部分零部件及整个机体的重量会较重,使得飞机的重量性能大打折扣,不能充分发挥。结构优化设计技术包括对零部件的尺寸优化、形状优化和拓扑优化等。尺寸优化以结构设计参数为优化对象,如板厚、梁的截面宽度和长度等;形状优化形外形或孔洞为优化对象,如凸台过渡倒角的形状等;拓扑优化以材料分布为优化对象,在材料空间设计中找出最佳分布方案<sup>[14]</sup>,如空客公司使用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)技术对 A380 飞机的机身结构进行优化,采用了竖卵形横截面设计,飞机的总体阻力减小了 2%以上。

(3)采用新的制造工艺。以增材制造为代表的新型制造工艺是飞机结构轻量化的关键。相对于传统对原材料去除、切削、组装的加工模式,增材制造是一种“自上而下”材料累积的制造方法,可以制造出具有复杂几何形状的结构,并且可以释放制造约束,增强结构设计的灵活性。设计灵活性的提升

使结构的整体化制造成为可能,而零件数量的减少往往意味着整体结构变得更轻,如 XB-1 超声速客机验证机上就使用了大量钛合金增材制造部件。

除通过采用上述技术单独提升飞机的推进、气动和重量性能之外,还可以多项技术同时使用,综合提升飞机各项性能指标。比如采用桁架支撑机翼的飞机,既可以因为更大的机翼来提升飞机的气动性能,又可以因为更轻的机翼重量来提升飞机的重量性能。此外,采用桁架支撑机翼的飞机为上单翼设计,机翼到地面的距离更大,有足够的空间安装更大涵道比的发动机,可实现飞机推进性能的提升。

## 2.3 推进性能提升

飞机推进性能的提升与发动机的总效率紧密相关,而发动机作为热机和推进器的组合体,其总效率又与发动机作为热机的热效率和作为推进器的推进效率密切相关。因此,运输类飞机发动机的一种创新发展途径就是提升现有发动机热效率、推进效率;另一种创新发展途径是颠覆传统发动机的发展思路,采用新的推进原理和构型等。

### 2.3.1 基于现有构型的创新发展路径

常规构型的大涵道比涡扇发动机是亚音速运输类飞机的主要动力形式,其热效率已经从初期约 20%提高到了目前的 40%左右。从发展趋势来看,目前大涵道比发动机热效率的提高主要有如下 2 种途径。

(1)采用更加先进的发动机部件或系统设计技术以及新材料、新工艺等实现发动机部件及系统效率的提升,进而提升发动机的整机热效率,如 GE 公司在 GE90-115B 与 GENX 发动机基础上全新研制的 GE9X 高性能发动机,其采用了近年来 GE 公司开发的众多先进设计技术,如复材风扇、第三代 TAPS 燃烧室、第四代粉末冶金材料涡轮盘等,并大量采用了 CMC 增材制造部件,使发动机的燃油效率比 GE90 发动机提升约 10%,涡轮冷却空气量减少约 20%,进而提升了整机效率<sup>[15]</sup>。

(2)通过对传统的布雷顿循环进行优化和改进来提高发动机的热效率,如在现有大涵道比涡扇发动机构型基础上,在压缩部件中设置间冷器以及在涡轮部件中设置回热器发展的间冷回热发动机<sup>[16]</sup>,其能够实现降低燃烧室进口温度、氮氧化物排放量减少约 80%、耗油率和二氧化碳排放量可减少约 18%的目标。此外还包括在压缩部件前面设置以燃料作为热沉的开式预冷循环或以冷却介质为热

沉的闭式预冷循环发动机,其利用预冷介质将高温气流携带的大量热能高效转化为功,大幅提升发动机性能<sup>[17]</sup>。

提高发动机推进效率的主要方式就是增大发动机涵道比或者等效涵道比,目前传统构型大涵道比发动机的涵道比已经达到 10 级,要继续提升涵道比的实现途径主要包括以下 3 种。

(1)在传统大涵道比涡扇发动机的构型基础上引入齿轮驱动风扇装置,发展齿轮传动风扇发动机(GTF),该方案解决了风扇转子以低转速实现较高的效率和较低噪声的需求,又保证了低压压气机(增压级)转子和低压涡轮转子以高转速实现提升低压压气机增压能力和低压涡轮的效率,可综合实现推进效率的提升,如涵道比达 12 左右的 PW1000G 系列发动机<sup>[18]</sup>。在此基础上增加风扇可变桨距系统(CTi),实现对风扇工作线的主动控制,可以使风扇能够在更广泛的工况范围内一直保持高效率运行,进一步提升发动机的工作效率,如涵道比达 15 左右的 UltraFan 发动机<sup>[19]</sup>。

(2)取消传统构型大涵道比发动机的风扇机匣限制,采用超大涵道比和可调桨距结构设计,发展一种介于涡扇发动机和涡桨发动机之间的开式转子发动机,其解决大涵道比发动机为提升推进效率而持续增大风扇直径时,由于短舱重量和湿表面积增大所带来的损失抵消推进效率提升带来的收益问题,如 CFM 公司的可持续发动机革命创新(RISE)技术项目,设计的开式转子发动机涵道比将达到 30~60,燃油效率比现阶段常规构型大涵道比发动机提升 20%~30%<sup>[20]</sup>,但需要解决发动机噪声以及在飞机上的安装方式等问题。

(3)突破现有大涵道比发动机构型,创新燃气涡轮发动机的结构布局,如打破发动机的转子需要围绕一个轴线旋转的构型限制,从结构上将推进器与燃气发生器分离,将核心机反向并呈一定角度安装,解决由于核心机尺寸越来越小带来的低压涡轮轴与高压转子盘心孔的空间矛盾,同时将传统大涵道比涡扇发动机低压转子的细长哑铃形结构,改变为大尺寸风扇和大尺寸低压涡轮紧密安装结构,化解了结构挠曲问题和转子动力学设计难题。但由于核心机的反向布局,气流需要经过两次接近 180°的折转,需要考虑相关的损失问题<sup>[21]</sup>。

除了以上单独提升热效率和推进效率的创新发展路径之外,还有同时针对热效率和推进效率提升的发展举措,如美国 NASA 提出的混合热效率核

心机(HyTEC)研究项目。该项目旨在通过开发先进的核心机部件技术来发展尺寸更加紧凑涡轮发动机的核心机,使得发动机总压比相对于 CFM56 发动机提升 36%~52%,涵道比提升 135%~194%,达到 12~15,可实现油耗降低 5%~10%、效率提高 20%的目标<sup>[22]</sup>。

### 2.3.2 概念原理的颠覆性创新发展路径

基于现有发动机构型的技术创新发展实现了发动机燃油效率的提升,但基于布雷顿循环的燃气涡轮发动机效率提升也将面临发展极限。按照 S 创新曲线理论,目前采用布雷顿循环的燃气涡轮发动机已经达到了很高的技术水平,如果按照以往的资源投入水平,未来获得的性能提升收益将逐渐缩小。因此,面对全球航空运输业“碳中和”的远期发展目标,就需要更寻找加激进或者颠覆性的航空推进技术。从发展现状与趋势来看,目前主要有以下 2 种途径。

(1)混合电推进系统。该系统由燃气涡轮发动机带动发电机发电,结合机载电池组驱动电动机带动分布在机翼或机身上的多个风扇/螺旋桨提供全部或大部分推力(燃气涡轮发动机不提供或只提供部分推力)<sup>[22]</sup>,其本质是将燃气涡轮发动机的高功率密度和高能量密度与电力推进的灵活布置和电力储能装置“削峰填谷”能力相结合,放宽涡轮发动机与推进器在位置和安装等方面的约束,大幅提升了推进系统的等效涵道比<sup>[23-24]</sup>。混合电推进系统的另一种特殊形式是涡轮电推进系统。该系统由涡轮/涡轴发动机驱动发电机产生电能,再由电能驱动风扇或者螺旋桨等推进器获得推力。以“涡扇发动机+电驱动风扇”构型为例,一方面涡扇发动机的运行工况得到了优化,只需要在最优运行工况下持续将燃料化学能转变为电能即可;另一方面,通过将电驱动的风扇或螺旋桨耦合到推进系统,使推进系统获得更大的等效涵道比,两方面结合共同提升了推进效率<sup>[25]</sup>。

(2)全电推进系统。全电推进系统是在混合电推进系统的基础上进一步简化,去除涡轮发动机,由储能装置为推进系统提供全部的能量来源的一种推进方式。主要用于小型螺旋桨固定翼飞机、小型垂直起降旋翼机等<sup>[26]</sup>。采用全电推进系统可以大幅提升飞机空间设计的灵活性,同时能大大降低飞机噪声和热辐射等,但缺点是目前电池的续航能力仍然较低。根据电能来源形式,全电推进系统可以分为普通电池、燃料电池以及太阳能电池 3 大类。

### 3 结论

尽管当前的运输类飞机技术已经非常成熟,市场运营也足够高效,但在绿色航空发展主题的牵引下,对未来运输类飞机的要求除原有的安全性、经济性、舒适性之外,环保性要求逐步成为限制新一代飞机的门槛,这对未来运输类飞机发展提出了严峻的挑战。

(1)飞机方面。飞机设计是一项复杂的系统工程,面对未来更加严苛的环保、安全性等要求,无论是创新的零部件技术还是创新的气动布局设计等,都对未来飞机的总体设计技术提出更高的要求,如相关基础学科理论的研究水平、多学科设计方法工具的支撑、数字化技术应用等。此外,由于运输类飞机大多用于商业运营,制造商需要考虑新项目的技术风险、研究周期、市场以及投资收益等问题,运营方还需要考虑经济性等一系列问题。在当前全球经济压力、局部区域冲突等环境的影响下,给全球能源、粮食、地域安全等带来的冲击等因素,航空运输业也不例外,因此会影响到相关新技术的研究及使用。

(2)动力方面。大涵道比涡扇发动机作为运输类飞机的主要动力装置,尽管整体技术已经发展成熟,但未来以提升热效率、推进效率为目标的发动机气动设计、结构设计、材料和制造工艺等方面的关键技术的创新发展将继续进行。对于混合电推进、全电推进等新概念推进系统,未来将率先在小型及中小型通用飞机、公务机、支线客机上得到应用,待电池、电机、能量管理技术取得重大进展后,也将成为中大型运输类飞机动力装置的重要发展方向。但是,短期内能快速满足航空运输市场发展需求,同时又有助于远期绿色航空发展目标实现的最佳举措仍然是基于现有“管-翼”构型飞机及大涵道比构型涡扇发动机的技术创新发展。

### 参考文献

- [1] 雷国东,徐悦. 未来大型客机发展方向及关键设计技术研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 26-37.
- [2] 夏明,袁昌运,巩文秀,等. 鸭翼对 BWB 飞机低速纵向气动特性的影响[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(5): 1004-1010.
- [3] GHOREYSHI M, KORKIS-KANAAN R, JIRÁSEK A, et al. Simulation validation of static and forced motion flow physics of a canard configured TransCruiser [J]. Aerospace Science and Technology, 2016, 48: 158-177.
- [4] 张帅,夏明,钟伯文. 民用飞机气动布局发展演变及其技术影响因素[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 30-44.
- [5] 陶智,马遥,由儒全,等. 边界层理论研究进展综述[J]. 中国科学:技术科学, 2024, 54(6): 979-1002.
- [6] CIPOLLA V, SALEM K A, SCARDAONI M P, et al. Preliminary design and performance analysis of a box-wing transport aircraft [C]//AIAA Scitech 2020 Forum. Orlando: AIAA, 2020: 2020-0267.
- [7] CIPOLLA V, SALEM K A, PALAIA G, et al. A DoE-based approach for the implementation of structural surrogate models in the early stage design of box-wing aircraft [J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 117: 106968.
- [8] 陈树生,贾苜梁,刘衍旭,等. 变体飞行器变形方式及气动布局设计关键技术研究进展[J]. 航空学报, 2024, 45(6): 629595-629595.
- [9] NHAN N, NICHOLAS C, KELLEY H, et al. Progress on gust load alleviation wind tunnel experiment and aeroservoelastic model validation for a flexible wing with variable camber continuous trailing edge flap system [C]//AIAA Scitech 2020 Forum. Orlando: AIAA, 2020: 2020-0214.
- [10] 王刚,张彬乾,张明辉,等. 翼身融合民机总体气动技术研究进展与展望[J]. 航空学报, 2019, 40(9): 623046.
- [11] MULYANTO T, LUTHFI N. Conceptual design of blended wing body business jet aircraft [J]. Journal of Kones, 2015(20): 299-306.
- [12] 陈勇,吴光辉,钟科林,等. 复合材料在大飞机上的应用现状[J]. 现代交通与冶金材料, 2024, 4(2): 1-7.
- [13] 吕岗. 基于复合材料的某飞机零部件轻量化研究[D]. 长春:吉林大学, 2013.
- [14] 王伟,袁雷,王晓巍. 飞机增材制造制件的宏观结构轻量化分析[J]. 飞机设计, 2015, 35(3): 24-28.
- [15] 陈光. 大涵道比涡扇发动机的发展[J]. 航空动力, 2019(3): 56-61.
- [16] 郭鹏超,马朝,唐治虎. 核心机派生间冷回热航空发动机热循环参数匹配研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(3): 17-23.
- [17] 王一帆,邹正平,陈懋章. 高超声速强预冷发动机热力循环研究进展[J]. 航空学报, 2023, 44(21): 48-84.
- [18] 赵平. PW1000G 系列发动机涡轮盘问题影响深远[J]. 航空维修与工程, 2023(10): 13-16.
- [19] 范灵. 罗罗“超扇”发动机等待更好的入市时机[J]. 航空动力, 2021(3): 19-20.
- [20] 李蕴. CFM 推出瞄准下一代开式转子发动机的 RISE 项目[J]. 国际航空, 2021(7): 14-16.
- [21] LORD W K, SUCIU G, CHANDLER J, et al. Engine architecture for high efficiency at small core size [J]. Mechanical Engineering, 2016, 138(3): 52-56.
- [22] 李明. NASA 混合热效率核心机项目分析[J]. 航空动力, 2021(3): 32-35.
- [23] 朱炳杰,杨希祥,宗建安,等. 分布式混合电推进飞行器技术[J]. 航空学报, 2022, 43(7): 48-64.
- [24] 王鹏,鞠新,郑天慧. 航空混合电推进系统的发展现状

- 及应用前景[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2021, 32(2): 52-57.
- [25] 江天牧, 张晓博, 王占学, 等. 涡轮电推进系统建模及控制规律设计[J]. 推进技术, 2024, 45(1): 23-35.
- [26] 刘翔, 竺宏杰, 张爱聆, 等. 新能源航空发动机研究进展与展望[J]. 航空工程进展, 2024(5): 1-12.

## Green Innovation Development Path of Transport Aircraft and Engines

CHEN Bin

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** In order to better grasp the future development direction and innovative development path of transport aircraft and their propulsion systems, the first-principles analysis method was used to analyze the Breguet range equation. The results show that the innovation and development of transport aircraft mainly revolves around three dimensions, including the improvement of aerodynamic performance, the improvement of weight performance and the improvement of propulsion performance. The innovation and development of aircraft technology depends on the progress of aviation science and technology on the one hand, and is affected by the development environment on the other hand. The power is still based on the turbofan engine with large bypass ratio, and the use of new concept engines such as hybrid electric vehicles mainly depends on technological breakthroughs such as batteries.

**Keywords:** transport aircraft; aeroengine; first principles; green aviation; innovate development paths