

文章编号: 1674-8190(2024)02-042-07

航空发动机全生命周期碳排放计量方法研究

邵彦博, 李伟, 颜应文, 刘云鹏

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘要: 航空产业是碳排放八大重点行业之一, 航空产业的碳排放主要受航空发动机碳排放的影响, 因此亟需开展航空发动机碳排放计量方法研究。以生命周期评价作为航空发动机碳足迹的量化方法, 将航空发动机全生命周期碳排放分为燃料周期碳排放与材料周期碳排放, 并分别进行统计; 将航空发动机系统边界进行划分, 对各个阶段进行数据收集, 并对数据做出要求, 得到一套相对完整的航空发动机碳排放计量方法。本文得到的方法可以从生命周期的角度全面评估航空发动机碳排放, 能够为航空发动机全生命周期碳排放计量提供指引, 从燃料角度与材料角度为减排提供理论基础。

关键词: 航空发动机; 生命周期; 碳排放; 计量方法

中图分类号: V23; X738

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.02.05

Study on measurement method of aero-engine life cycle carbon emission

SHAO Yanbo, LI Wei, YAN Yingwen, LIU Yunpeng

(College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aviation industry is one of the eight key industries of carbon emission. The carbon emission of aviation industry is mainly affected by the carbon emission of aero-engine. Therefore, it is urgent to carry out the research on the measurement method of aero-engine carbon emission. The life cycle assessment is used as a quantitative method for the carbon footprint of aero-engines. The life cycle carbon emissions of aero-engines are divided into fuel cycle carbon emissions and material cycle carbon emissions, and statistics are carried out separately. The aero-engine system boundary is divided, the data collection that should be carried out in each stage is proposed, and the data is required. A relatively complete set of aero-engine carbon emission measurement method is obtained. The method obtained in this paper can comprehensively evaluate the carbon emissions of aeroengines from the perspective of life cycle, which can provide guidance for the measurement of carbon emissions of aeroengines throughout the life cycle, and provide a theoretical basis for emission reduction from the perspective of fuel and material.

Key words: aero-engine; life cycle; carbon emission; measurement method

收稿日期: 2023-01-13; 修回日期: 2023-05-29

基金项目: 国家科技重大专项(2017-III-0006-0031)

通信作者: 刘云鹏(1992-), 男, 博士, 讲师。E-mail: ypliu@nuaa.edu.cn

引用格式: 邵彦博, 李伟, 颜应文, 等. 航空发动机全生命周期碳排放计量方法研究[J]. 航空工程进展, 2024, 15(2): 42-48.

SHAO Yanbo, LI Wei, YAN Yingwen, et al. Study on measurement method of aero-engine life cycle carbon emission[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(2): 42-48. (in Chinese)

0 引言

由于人类的工业化活动加剧,造成越来越多的以二氧化碳为主的温室气体排放到大气中,我国2019年碳排放98.25亿吨,约占全球碳排放量的29%,位列全球之首^[1]。“以经济社会发展全面绿色转型为引领,坚定不移走生态优先、绿色低碳的高质量发展道路”^[2]是未来绿色航空发展的必然要求。航空产业的碳排放在全球范围内虽然占比不高,但是其增速较快,有研究预测,由于航空产业造成的温室气体排放将在2050年占到全球温室气体总排放的15%^[3]。飞机的飞行高度一般在8 000~12 000 m之间,这个高度属于平流层,该层大气稳定,飞机尾气产生的二氧化碳将留在天空中超过100年,这里紫外辐射充足,是光化学反应的理想场所,这种碳排放对温室效应的影响是地面等量碳排放量的八倍还多^[4],加剧了全球温室效应,由此可见,实施航空产业的碳减排面临现实而紧迫的压力。航空产业作为碳排放八大重点行业之一,因此未来仍有很长的路要走。

对某类产品作碳排放计量,通常采用碳足迹(Carbon Footprint,简称CFP)方法,国际标准化组织(ISO)编制了产品碳足迹(PCF)的国际标准ISO 14067^[5],规定以生命周期评价(Life Cycle Assessment,简称LCA)方法作为产品碳足迹的量化方法,认为碳足迹是某一产品或服务从原材料购买到生产、运输、销售、使用和回收处置的整个生命周期过程中所排放的温室气体量。

国内外对航空业碳排放计量方法进行了一些研究。国际民航组织采用了一种基于距离的计算方法,制定了相关的燃料消耗公式,主要考虑乘客数量、飞行距离、飞机类型等因素^[6];Sabre Holdings方法基于Sabre数据库来估算碳排放^[7],Sabre数据库包含所有航班的信息,这样可以实现更详细和准确的排放估计;Jvdof^[8]通过使用Simapro软件模拟A330-200飞机的制造、运行和回收阶段,对飞机进行了生命周期评估(LCA)。

目前国内外的研究主要针对航空整机的碳排放,航空产业的碳排放主要受航空发动机碳排放的影响,本文针对航空发动机的碳排放,基于生命周期理论开展相关研究,得到航空发动机生命周期碳排放计量方法,以便于对航空发动机进行碳

排放量化。具体研究内容包括:对系统边界进行划分,根据划分好的系统边界进行碳排放数据收集,对收集的碳排放数据做出要求以及碳排放量化。

1 航空发动机介绍

航空发动机是一种高度复杂和精密的热力机械,作为飞机的心脏,是飞机飞行的动力^[9]。典型的某型航空发动机如图1所示,其结构复杂,涉及的材料种类繁多,包括变形高温合金、铸造高温合金、粉末高温合金、钛合金、结构钢、复合材料等^[10],同种材料制造的合金又由于材料所占组分不同而有所差异,这使得航空发动机的材料构成更加复杂,同时加工工艺流程差异较大。航空发动机的种类型号多种多样,使用过程中产生的碳排放是相对于飞机整机而言的,当对某一台航空发动机做生命周期碳排放计量时,首先应对其做产品技术说明,包括型号(航空发动机型号和安装的飞机型号)、质量、油耗率、长度、推力、总增压比、空气流量、涵道比等^[11]。

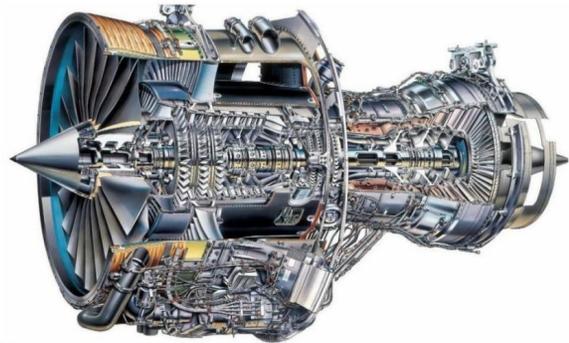


图1 典型某型航空发动机
Fig. 1 Typical aero-engine

2 航空发动机碳排放计量方法

2.1 系统边界

航空发动机结构复杂,材料及加工工艺种类繁多,且在全生命周期使用过程中燃油消耗量多,碳排放量大,因此将航空发动机全生命周期碳排放分为两大类,燃料生命周期碳排放与材料生命周期碳排放^[12]。

2.1.1 燃料生命周期碳排放

燃料生命周期碳排放仅产生于以航空煤油为

代表的各类航空燃料在航空发动机内燃烧并提供动力,这与航空发动机的使用时间、发动机的油耗率以及燃油的碳排放系数等因素有关。将飞机飞行过程分成两个阶段:第一阶段是起降阶段(LTO),包括起飞、爬升、近地着陆和滑行四个过程,此阶段飞机处于海拔 1 000 m 以下,由于高度固定,因此此阶段燃油消耗主要受航空发动机型号影响;第二阶段是巡航阶段(CDD),即飞机在海拔 1 000 m 以上的活动,此阶段燃油消耗受航空发动机型号和航程共同影响。

2.1.2 材料生命周期碳排放

材料生命周期碳排放指的是在航空发动机全生命周期内除燃料生命周期碳排放以外的过程,根据生命周期评价方法将航空发动机材料周期碳排放分为三个阶段,生产制造阶段、使用阶段、废弃回收阶段。材料生命周期流程图如图 2 所示。以下过程涉及的碳排放复杂且相对独立故不计入航空发动机生命周期碳排放内:生产设备、建筑和其他资产商品的制造,与人员相关的活动包括人员的商务出行、人员的上下班、研究开发活动等。

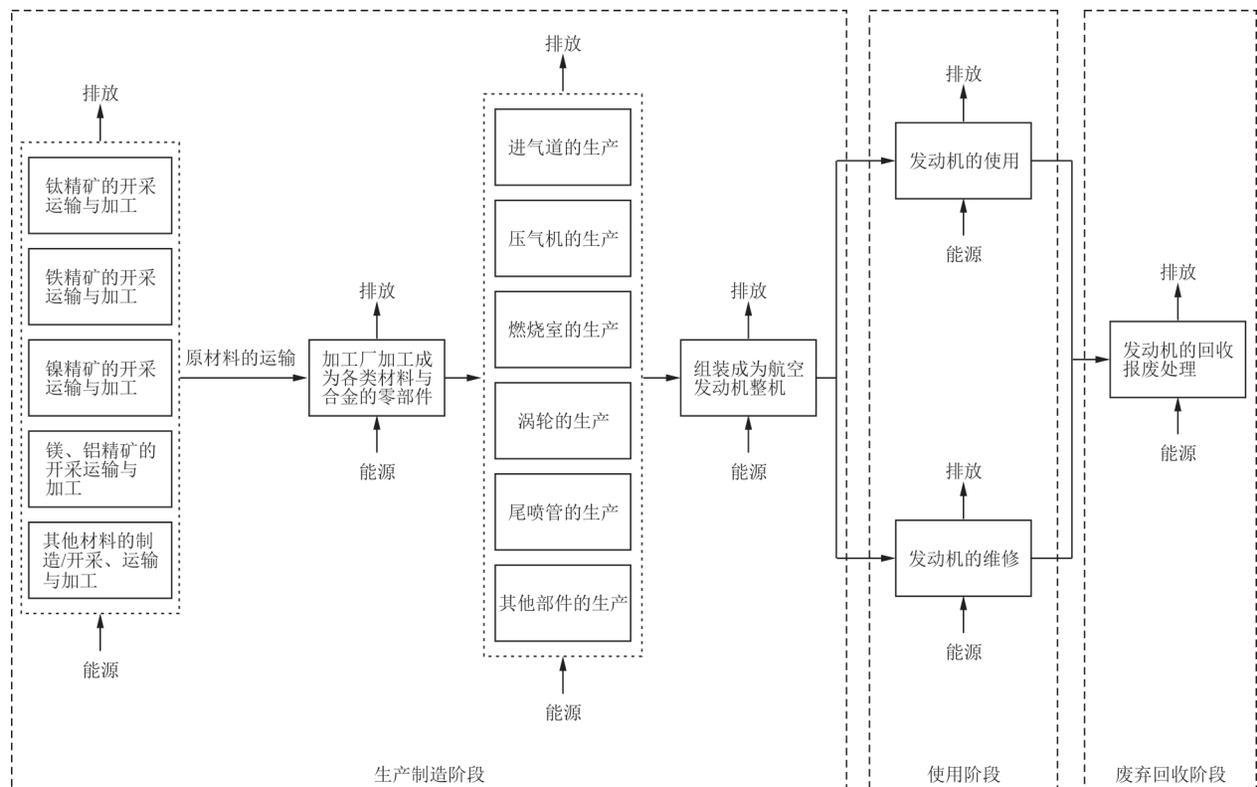


图 2 材料生命周期碳排放流程图

Fig. 2 Material life cycle carbon emission flow chart

1) 生产制造阶段碳排放

生产制造阶段碳排放包括原材料的开采/制造、原材料的运输、原材料加工处理成为各种零部件、零部件组装成为航空发动机整机等各阶段的碳排放,也包括其他辅助材料、化学品等制造和运输以及处理此阶段产生的废物等产生的碳排放。

2) 使用阶段碳排放

使用阶段碳排放为材料生命周期内使用阶段的碳排放,但不包括发动机运行时的燃油消耗。此阶段主要包括航空发动机使用时润滑油等物料的消耗、使用阶段各零部件的更换、航空发动机定

期的维修保养、此阶段涉及的运输过程以及处理此阶段产生的废物等产生的碳排放。

3) 废弃回收阶段碳排放

废弃回收阶段碳排放主要包括航空发动机到拆解厂的运输、航空发动机的拆解过程以及废弃物的报废处理等产生的碳排放。废弃物指不可再生废弃物,对于可再生废弃物的再生过程不包含在航空发动机材料周期碳排放内。

2.2 GHG 排放源

温室气体(GHG)排放源应该从以下方面重点考虑:由于能源利用(包括电能、化石燃料等)产生

的直接或间接碳排放,由于新鲜水资源利用造成的间接碳排放等。

2.3 碳排放数据收集

2.3.1 燃料生命周期碳排放数据收集

1) 起降阶段(LTO)

根据飞机不同的加权平均座位数,将国内各机型分为以下四类:B类座位数为50,C类为142,

D类为233,E类为381。应收集航空发动机在全生命周期内起飞、爬升、近地着陆和滑行四个过程分别占用的总时常;起飞、爬升、近地着陆和滑行四个过程分别对应的平均燃油消耗率^[13],如表1所示。对于表1以外型号的发动机,可收集标准推力下的燃油消耗率,推力大小与燃油消耗近似成比例,可根据推力设置获得LTO阶段的近似燃油消耗率,如表2所示。

表1 不同型号发动机起飞、爬升、近地着陆和滑行四个过程油耗率^[13]

Table 1 Fuel consumption rate of different types of engines during take-off, climbing, near-ground landing and sliding^[13]

分类	飞机型号	发动机		燃油流量/(kg·s ⁻¹)			
		型号	数量	起飞	爬升	近地着陆	滑行
B	D0328	PW119B	2	1.538 0	1.266 0	0.399 0	0.141 0
	CRJ-700	CF34-8C1	2	0.604 2	0.494 1	0.168 1	0.069 0
	EMB145	AE3007A	2	0.377 0	0.315 0	0.117 0	0.049 0
C	B733	CFM56-3C-1	2	1.154 0	0.954 0	0.336 0	0.124 0
	B734	CFM56-3B2	2	1.056 0	0.878 0	0.314 0	0.119 0
	B735	CFM56-3B-1	2	0.946 0	0.792 0	0.290 0	0.114 0
	B737	CFM56-7B	2	0.913 0	0.761 0	0.274 0	0.100 0
	B738	CFM56-7B	2	0.021 0	0.844 0	0.298 0	0.105 0
	A320	CFM56-5A3	2	1.131 0	0.925 0	0.307 0	0.104 4
	A319	CFM56-5B6/P	2	0.961 0	0.799 0	0.275 0	0.097 0
	A321	CFM56-5B3	2	1.430 0	1.141 0	0.366 0	0.115 0
	MD82	JT8D-217A	2	1.320 0	1.078 0	0.383 3	0.137 2
	MD90	V2525-D5	2	1.053 0	0.880 0	0.319 0	0.128 0
TU145	NK-8-2	3	1.750 0	1.170 0	0.580 0	0.240 0	
D	B757-200	RB211-535E4-B	2	2.080 0	1.640 0	0.550 0	0.190 0
	B767-200	CF6-80	2	2.145 0	1.795 0	0.615 0	0.150 0
	B767-300	CF6-80C2	2	2.400 0	1.953 0	0.636 0	0.199 0
	A300	CF6-80C2A2	2	2.117 0	1.745 0	0.580 0	0.189 0
	A330	CF6-80E1	2	2.702 0	2.199 0	0.714 0	0.226 0
E	B772	GE90-75B	2	2.830 0	2.330 0	0.780 0	0.300 0
	B742	JT9D-7R4G2	4	2.429 0	1.880 0	0.659 0	0.223 9
	B744	RB211-524G	4	2.620 0	2.080 0	0.700 0	0.260 0
	A300-600	PW4156/PW4158	2	2.449 0	1.981 0	0.647 0	0.188 0
	A343	CFM56-5C2	4	1.308 0	1.076 0	0.355 8	0.117 5

表 2 起降阶段发动机工作状态
Table 2 Working state of engine in take-off and landing stage

发动机工作状态	负荷/%
起飞	100
爬升	85
近地着陆	30
滑行	7

2) 巡航阶段(CCD)

此阶段应收集航空发动机生命周期巡航阶段总里程、巡航阶段平均速度、标准推力下平均燃油消耗率。

应该注意的是,燃料生命周期碳排放对整个生命周期碳排放影响很大,因此在数据收集时还应考虑到气候因素、燃油质量、发动机性能等因素的影响。

2.3.2 材料生命周期碳排放数据收集

1) 生产制造阶段

生产制造阶段数据收集需要将航空发动机每一个细小的零部件向上游追溯,直到原矿石的开采或原材料的制造,碳排放主要是由于能源消耗直接或间接产生的。该阶段碳排放数据需要收集:矿石开采、原材料生产的能源消耗量,合金和复合材料制造过程的能源消耗量,零部件的生产加工过程的能源消耗量,零部件组装成为各核心部件(包括进气装置、压气机、燃烧室、涡轮和喷管等)的能源消耗量,核心部件组装成为航空发动机整机的能源消耗量,一切运输过程的运输方式、运输重量和运输距离,所有中间流的生产加工的过程能源消耗量,新鲜自来水的供应量,废弃物处理涉及的能源消耗量。

2) 使用阶段

使用阶段涉及的物料也需要和生产制造阶段一样向上游追溯。该阶段碳排放数据需要收集:航空发动机维修过程中拆卸部件的能源消耗量,零部件的维修和保养、易损件的更换、润滑油等材料的补充涉及的能源消耗量,一切运输过程的运输方式、运输重量和运输距离所有中间流的生产加工过程的能源消耗量,新鲜自来水的供应量,废弃物处理涉及的能源消耗量。

3) 废弃回收阶段

该阶段碳排放数据需要收集:航空发动机的

拆解、破碎、分拣的能源消耗量,废弃物的焚烧和填埋等过程的能源消耗量,一切运输过程的运输方式、运输重量和运输距离所有中间流的生产加工过程的能源消耗量,新鲜自来水的供应量,废弃物处理涉及的能源消耗量。

2.4 碳排放量化

碳排放数据收集完成后,分别得到航空发动机燃料生命周期碳排放、航空发动机材料生命周期碳排放,两部分的总量为航空发动机全生命周期碳排放。

$$C_{\text{总}} = C_{\text{燃}} + C_{\text{材}} \quad (1)$$

2.4.1 燃料生命周期碳排放

燃料生命周期碳排放量用LTO和CCD两个阶段碳排放量求和。先算出两个阶段的油耗量,然后乘以燃油的碳排放系数得到燃料生命周期碳排放量。

$$C_{\text{燃}} = \left[\left(\sum_{i=1}^4 F_{L_i} \times t_{L_i} \times n \right) + \frac{d}{v} \times F_C \right] \times E_F \quad (2)$$

式中: i 为从1到4对应LTO的四个阶段; F_{L_i} 、 F_C 分别为LTO,CCD阶段的燃油消耗率; t_{L_i} 为LTO四个阶段分别持续的时间; n 为飞机生命周期内飞行次数; d 为生命周期内CCD阶段飞机总航程; v 为CCD阶段平均飞行速度; E_F 为燃油碳排放系数,一般取3.15,也可参考ICAO发动机排放数据库(Engine Emission Databank,简称EEDB)^[14]。

2.4.2 材料生命周期碳排放

材料生命周期碳排放量主要与能源资源消耗有关,将每一个单元过程的能源资源消耗量和对应的碳排放系数相乘后再相加得到材料生命周期碳排放量。运输过程碳排放量用运输重量乘以运输距离乘以对应不同运输方式的碳排放系数得到。

$$E_{\text{材}} = \sum_{j=1}^n \left[\left(\sum_{i=1}^p E_{ij} \times E_{Fij} \right) + m_j \times s_j \times E_{Fsj} \right] \quad (3)$$

式中: n 为单元过程数量; p 为能源种类数量; E_{ij} 为第 j 个单元过程第 i 种能源消耗量; m_j 为第 j 个单元过程运输重量; s_j 为第 j 个单元过程运输距离; E_{Fij} 为第 j 个单元过程第 i 种能源的碳排放系数; E_{Fsj} 为第 j 个单元过程中运输的碳排放系数(与运输方式

有关)。

2.5 碳排放数据要求

2.5.1 数据收集规则

碳排放数据包括现场数据和背景数据,如果能够获得现场数据(也称特定数据、基本数据),在实施数据质量评估后,应使用。如果现场数据不易获得,可以使用背景数据(也称一般数据、次级数据),收集现场数据时,有些数据可以直接收集,例如某运输过程的运输重量、运输距离和运输方式,航空发动机的零部件关于材料和质量的清单等;有些数据可以间接获得,例如已知某加工厂加工某材料一个月的耗电量,可以将总量平均分配到目标产品得到加工单位目标产品的耗电量。收集背景数据时,应该选择权威的数据来源,主要可以考虑国内外专业数据库,由政府、科研机构等正式公布的 GHG 排放数据,也可以参考排放数据手册、企业数据、文献等。

2.5.2 碳排放数据质量要求

现场数据应该具有准确性,现场数据中的资源、能源、原材料消耗数据应该来自于生产单元的实际生产统计记录。环境排放数据优先选择相关的环境监测报告,所有现场数据均须转换为单位产品,且需要详细记录相关的原始数据、数据来源、计算过程等。背景数据应具有代表性:选择数据时应优先选择国内数据,优先选择近年数据,优先选择认可度较高、准确性较强的数据。

2.5.3 碳排放数据取舍原则

航空发动机由于燃油消耗产生的碳排放量巨大,对于燃料生命周期的碳排放,数据不可忽略。对于材料生命周期碳排放,航空发动机材料种类很多,加工工艺复杂,可以对数据进行适当取舍,在简化工作的同时,对结果的准确性影响不大。但要做到对确实难以获得的数据进行删减简化,尽量保证数据的完整性。取舍主要原则如下:若某排放源的 GHG 排放量估测值小于或等于材料生命周期碳排放总量估测值的 1%,则可进行删减,但所有删减项目的碳排放量估测值合计不得超过材料生命周期内总碳排放量估测值的 5%;道路与厂房的基础设施、各工序的设备、厂区内人员及生活设施的消耗和排放,均忽略;航空发动机合金种类众多,对于成分及配比差异不大导致碳排放差

异也不大的合金材料,可适当简化为无差别合金材料。

3 案例

A320 是世界上销售最快的喷气式客机,通常在中短途航线上运行,目前有超过 4 530 架 A320 在服役。A320 飞机配备两台 CFM56-5B 发动机。一台 CFM56-5B 发动机平均一个 LTO 阶段消耗航空煤油 474 kg,假定大约此型号航空发动机生命周期内共起降 2 万次,则 LTO 阶段产生的燃料生命周期碳(CO₂)排放为: $474 \times 20\,000 \times 3.15 = 2.9862 \times 10^7$ kg。

A320 的主要结构部件在欧洲多个地方制造,然后运输到位于法国图卢兹的总装线,在整个材料生命周期中考虑了运输过程,计算了从每个制造基地到图卢兹的平均距离。对涉及回收、焚烧和填埋的飞机进行了处置。工艺和材料数据是从欧盟的 Ecoinvent 2.0 数据库(Ecoinvent, 2007)中获得的。每台 CFM56-5B 发动机的质量约为 2 380 kg,约占飞机总质量的 35%。CFM56-5B 型号航空发动机对材料生命周期碳排放影响较大,约占 A320 整机的 31%,如图 3 所示。

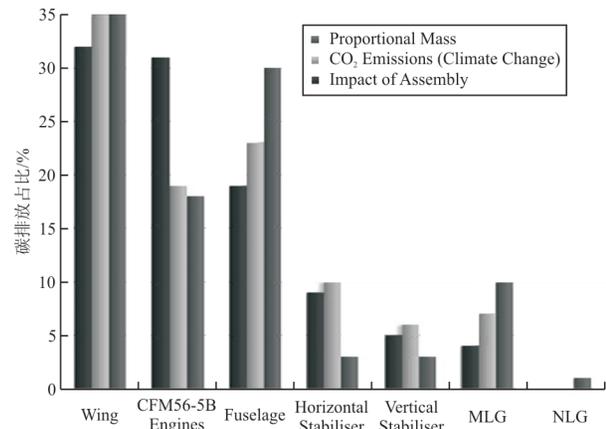


图 3 二氧化碳排放量,排放造成的气候影响和每个组件所占质量^[15]

Fig. 3 Carbon dioxide emissions, climate impact caused by emissions and the mass of each component^[15]

对比燃料生命周期碳排放与材料生命周期碳排放,发现由于航空发动机的使用过程中燃料消耗产生的碳排放量更大,占总量的 99% 以上,未来减排的主要方向依旧是提高燃烧效率,减少燃料消耗以及寻找可替代的清洁能源。

4 结束语

本文以生命周期评价作为航空发动机碳足迹的量化方法,首先对航空发动机进行目标与范围定义,确定功能单位和系统边界,然后对航空发动机碳排放数据收集与量化做了详细的介绍,最后对碳排放数据做出要求。本文形成的相对完整的航空发动机碳排放计量方法,为碳排放量化提供理论基础,但对于最终方法的验证与应用,还需实地调研并开展大量数据收集工作。

参考文献

- [1] 焦丽杰. 我国的碳排放现状和实现“双碳”目标的挑战[J]. 中国总会计师, 2021(6): 38-39.
JIAO Lijie. Current situation of China's carbon emissions and challenges in realizing the "double carbon" goals[J]. China General Accountant, 2021(6): 38-39. (in Chinese)
- [2] 张红旗. 航空研制企业实施绿色供应链影响因素研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(6): 184-190.
ZHANG Hongqi. Research on the influencing factors of implementing green supply chain in aviation development enterprises[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(6): 184-190. (in Chinese)
- [3] 孔令乾. 航空碳排放测算及影响因素分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
KONG Lingqian. Aviation carbon emission measurement and analysis of influencing factors[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017. (in Chinese)
- [4] JENS B K, TERJE B, JAN F. Specific climate impact of passenger and freight transport[J]. Environmental Science and Technology, 2010, 44(15): 5700-5706.
- [5] ISO. Greenhouse gases-carbon footprint of products-requirements and guidelines for quantification; ISO 14067[S]. US: ISO, 2018.
- [6] ICAO. Carbon emissions calculator[S]. US: ICAO, 2001.
- [7] Holdings Sabre. Carbon model description: description of Sabre Holding's emissions model for air[S]. US: Sabre Holdings, 2005.
- [8] JVDOLF L. Life cycle assessment of the airbus A330-200 aircraft [EB/OL]. [2023-01-13]. https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395142223995/Tese_JoaoVascoLopes.pdf.
- [9] 彭友梅. 苏联/俄罗斯/乌克兰航空发动机的发展[M]. 北京: 航空工业出版社, 2015.
PENG Youmei. The development of Soviet Union/Russia/Ukraine aero-engines [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [10] 《航空发动机设计用材料数据手册》编委会. 航空发动机设计用材料数据手册: 第五册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
Editorial Board of *Material Data for Aeroengine Design*. Material data for aeroengine design: Vol. 5[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [11] 《世界航空发动机手册》编写组. 世界航空发动机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2012.
Drafting Group of *World Aviation Engine Manual*. World aviation engine manual [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [12] 杨广, 谢瑞航, 史耀利, 等. 传统汽油车的全生命周期评价[C]// 2021年科学技术年会. 天津: 中国环境科学学会, 2021: 139-148.
YANG Guang, XIE Ruihang, SHI Yaoli, et al. Life cycle assessment of traditional gasoline vehicles [C]// 2021 Annual Conference of Science and Technology. Tianjin: Chinese Society of Environmental Sciences, 2021: 139-148. (in Chinese)
- [13] 卢志想, 刘永红, 徐伟嘉, 等. 基于ICAO的航空碳排放计算与低碳对策探讨[J]. 资源节约与环保, 2014(9): 129-130.
LU Zhixiang, LIU Yonghong, XU Weijia, et al. Calculation of aviation carbon emissions based on ICAO and discussion on low carbon countermeasures[J]. Resource Conservation and Environmental Protection, 2014(9): 129-130. (in Chinese)
- [14] EASA. ICAO aircraft engine emissions databank [EB/OL]. [2023-01-13]. <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>.
- [15] HOWE S, KOLIOS A J, BRENNAN F P. Environmental life cycle assessment of commercial passenger jet airliners [J]. Transportation Research Part D: Transport Environment, 2013, 19(6): 34-41.

(编辑:丛艳娟)