

# 基于甲醇燃料的航空燃料电池内燃机混合动力系统性能分析\*

李成杰<sup>1</sup>, 王紫璇<sup>2</sup>, 哈 婵<sup>1</sup>, 周兆洲<sup>1</sup>, 秦 江<sup>1</sup>, 魏立秋<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 100081;  
2. 哈尔滨工业大学(深圳) 智能海洋工程研究院, 广东 深圳 518055)

**摘 要:** 为了实现航空碳减排的时代需求, 亟需在航空燃料体系和航空动力系统方向实现技术革新。本文提出了基于甲醇燃料的航空燃料电池内燃机混合动力系统方案, 甲醇通过机载在线催化重整制氢为燃料电池供氢, 燃料电池和内燃机发出的电能带动电动螺旋桨进行工作。进行了模块化建模方法和混合动力系统性能仿真分析研究, 结果表明: 混合动力系统的发电效率达到了55%, 相比甲醇内燃机有了15%绝对值的效率提升, 有助于降低燃料消耗。进行了混合动力系统性能参数影响规律分析, 结果表明: 混合动力系统的效率随着压比的增大而提高, 随着燃料利用率的提高而呈现先升高后降低的效果。进行了混合动力系统的焓分析, 结果显示: 混合动力系统中焓效率最高的部件是燃料电池, 焓损最大的部件是重整器。质量分析结果表明: 混合动力系统的功率密度达到0.488 kW/kg。

**关键词:** 燃料电池; 内燃机; 混合动力系统; 甲醇燃料; 性能分析

**中图分类号:** V231.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2024) 03-2211044-09

**DOI:** 10.13675/j.cnki. tjjs. 2211044

## 符号表

|                       |        |                   |        |      |      |
|-----------------------|--------|-------------------|--------|------|------|
| $\varepsilon$         | 有效度    | $\eta/V$          | 极化损失   | conc | 浓差极化 |
| $q/J$                 | 热量     | $E_x/(J/mol)$     | 焓      | ch   | 化学焓  |
| $U/V$                 | 电压     | $m/kg$            | 质量     | D    | 焓损   |
| $F/(C/mol)$           | 法拉第常数  | $\dot{P}/(kW/kg)$ | 功率密度   | ele  | 电能   |
| $G/(J/mol)$           | 吉布斯自由能 | $\beta/(J/mol)$   | 热值     | ex   | 焓    |
| $H/(J/mol)$           | 焓      | $f$               | 燃料利用率  | gen  | 发电机  |
| $j/(A/m^2)$           | 电流密度   | $Al/km$           | 海拔     | h    | 热流体  |
| $W/J$                 | 功      | $\pi$             | 压比     | in   | 入口   |
| $N/(mol/s)$           | 物质摩尔流量 | $\mu/h^{-1}$      | 空速     | OCP  | 开路电势 |
| $P/kW$                | 功率     | $E_f$             | 发电效率   | ohm  | 欧姆极化 |
| $p/Pa$                | 压力     | $Ex_f$            | 焓效率    | out  | 出口   |
| $R/(J/(mol \cdot K))$ | 气体常数   | 上下角标              |        | ph   | 物理焓  |
| $S/m^2$               | 单电池面积  | an                | 燃料电池阳极 | hex  | 换热器  |
| $\gamma/(g/(kWh))$    | 耗油率    | act               | 活化极化   | ref  | 重整器  |
| $\alpha/(g/(kWh))$    | 碳排放量   | c                 | 压气机    |      |      |
| $T/K$                 | 温度     | ca                | 燃料电池阴极 |      |      |

\* 收稿日期: 2022-11-16; 修订日期: 2023-09-08。

**作者简介:** 李成杰, 博士生, 研究领域为燃料电池内燃机混合动力系统。

**通讯作者:** 秦 江, 博士, 教授, 研究领域为燃料电池混合动力系统。E-mail: qinjiang@hit.edu.cn

**引用格式:** 李成杰, 王紫璇, 哈 婵, 等. 基于甲醇燃料的航空燃料电池内燃机混合动力系统性能分析[J]. 推进技术, 2024, 45(3): 2211044. (LI C J, WANG Z X, HA C, et al. Performance analysis of hybrid power system of aviation fuel cell internal combustion engine with methanol fuel[J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(3): 2211044.)

## 1 引言

能源革命伴随着人类的发展,传统的化石燃料助力了科技进步。但是,化石燃料的大量使用也造成了二氧化碳的过量排放,进而导致了温室效应的发生<sup>[1]</sup>。而航空领域每年由于使用化石燃料带来的碳排放约占总碳排放量的3%<sup>[2]</sup>。为了降低航空领域的碳排放,一方面是对燃料进行改良,使用低碳替代燃料,另一方面是开发新的能量转换技术,使之能够实现更高的效率和更低的环境影响<sup>[3]</sup>。使用低碳替代燃料主要有传统的生物燃料和新兴的电力燃料。生物燃料是动植物油脂及生物质通过化学合成手段得到的燃料,由于植物具有可再生的特点,因此,生物燃料在其生命周期内可实现大幅降低碳排放<sup>[4]</sup>。但是生物燃料需要土地和水资源,且原料收集困难,成本高昂,其可持续性是大规模应用的阻碍。

电力燃料是指使用可再生电力电解水获得的氢气以及氢气与二氧化碳或氮气再合成得到的甲醇和氨等氢基燃料<sup>[5]</sup>。氢气由于环境友好特性被认为是具有前景的能源载体之一<sup>[6]</sup>。但是,由于氢能特殊的物理化学特性,标况下呈现气态且不易液化(常压沸点 $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ )<sup>[7]</sup>。因此,氢气的储存成为制约氢能发展的关键技术挑战之一<sup>[8]</sup>。目前的储氢技术中,高压气态储氢密度低,液态储氢耗能大,绝热困难,金属氢化物储氢放氢速率慢,储氢密度低。因此,化学储氢是一种有效的解决方案。甲醇是一种优良的化学储氢载体,常温下为液体,质量储氢密度为12.5%且放氢条件较为容易实现,而且甲醇还可以通过可再生的方式获得,被称为“液态阳光”、“碳中和燃料”。

航空动力系统的效率提升是降低耗油率和碳排放的有力措施之一。目前飞机的燃油效率比上一代提高了20%,比20世纪60年代的飞机提高了85%<sup>[9]</sup>,然而,航空发动机的热效率受限于材料性能等因素,其提升的速度正在逐步放缓<sup>[10]</sup>。目前提升航空动力系统效率的颠覆性技术是航空电推进技术。航空电推进是指利用电力提供部分或全部动力的飞机推进概念,目前正在使用的电动推进技术路线一般可分为全电和混合动力两类<sup>[11]</sup>。全电指的是电池作为飞机上唯一的推进动力源,由电池向电动机供电,带动风扇或螺旋桨产生推力。这种推进方式理论上最清洁环保,可实现零排放<sup>[12]</sup>。但是目前的电池能量密度低( $\sim 250\text{ Wh/kg}$ )<sup>[13]</sup>,无法支撑飞机进行长航时飞行。考虑到全电的劣势和问题,混合动力似乎是更

加可行的方案。由燃气涡轮发动机或内燃机(Internal combustion engine, ICE)提供推力并为电池充电,同时电池在飞行的多个阶段提供推进所需的能量<sup>[14]</sup>。因为发动机工作在设计工况,所以发动机的效率相较于变工况时高。

航空活塞内燃机作为最早出现的航空发动机,具有技术成熟、功重比高、良好的动力性和经济性等优点<sup>[15]</sup>,在通航飞机发动机领域占据了大部分市场。根据GAMA(General Aviation Manufacturers Association,通用航空制造商协会)报告<sup>[16]</sup>,在不考虑飞行距离的情况下,基于活塞内燃机的飞机的运行时间明显高于基于涡轮的飞机。此外,GAMA预测,在未来10年甚至20年内,活塞式飞机将继续比涡轮式飞机飞行更长的时间。由于新时期对碳减排的需求,有学者开始了基于甲醇替代燃料的内燃机研制工作。与汽油相比,甲醇具有更高的辛烷值和更高的汽化热值,使其适合于输出功率更大的高压压缩比发动机。Celik等<sup>[17]</sup>在单缸汽油机上研究了在高压压缩比下使用纯甲醇作为燃料。他们发现,通过将发动机的压缩比从6:1增加到10:1,发动机功率和热效率分别增加了14%和36%。此外, $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 排放量分别减少约37%、30%和22%。Brusstar等<sup>[18]</sup>在柴油发动机内使用甲醇作为燃料,结果表明:与原来的柴油发动机相比,甲醇发动机的峰值效率接近43%,并且在更宽的速度和负载范围内保持了40%以上的效率。国内的吉利汽车公司已经研制出了基于甲醇燃料的内燃机重卡<sup>[19]</sup>。但是由于热机的效率受限于卡诺循环,无法有很大的提升,因此需要开发新的能量转换方法和装置。

燃料电池技术是一种直接将燃料中的化学能通过电化学反应转化为电能的技术<sup>[20]</sup>。燃料电池通过化学反应的能量转化过程规避了卡诺循环的限制,拥有高效率(40%~60%)的优势。在几类燃料电池中,固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)由于具有能量转化效率高、电流密度和功率密度高、燃料适应性广、不需要贵金属作催化剂、全固态、模块化组装、近零污染等诸多优点<sup>[21]</sup>,被认为是最具有发展潜力的燃料电池。在纯氢的储运技术没有较大突破前,使用氢基燃料将是最可行的措施,因此SOFC拥有广阔的应用前景。SOFC虽具有很多优点,但是目前燃料电池的功重比较低(几百瓦每千克)。

SOFC的阳极尾气内残余有未利用完的燃料,可以进入热机内进行再利用。另一方面,SOFC的启动

较慢,变负载特性较差,而热机则具有启动速度快、变负载能力强的优势。因此,将 SOFC 与热机结合起来使用,可以实现高效率或优动力性的多种工作模式。本文通过利用内燃机和燃料电池的优势同时结合航空低碳燃料的未来趋势,提出了基于甲醇燃料的航空燃料电池内燃机混合动力系统,甲醇通过在线催化制氢为燃料电池提供氢气,机载现场供氢方法解决了氢气储运的难题。充分利用 SOFC 的性能优势,与内燃机构建混合动力系统,对系统进行了性能分析和变工况影响规律分析,最后对混合动力系统开展焓分析及质量分析。

2 混合动力系统方案简介

图 1 为基于甲醇燃料的燃料电池内燃机混合动力系统的方案图。其方案为在飞机巡航状态下,甲醇通过在线制氢为 SOFC 提供燃料,内燃机利用 SOFC 尾气中的剩余燃料,实现燃料的有效利用。因此,本系统可以实现低耗油率进而减少碳排放。其具体工作原理为空气经过涡轮增压器加压再经 SOFC 阴极出口气体预热后进入 SOFC 阴极,甲醇经换热器 1 预热进入重整器内与 SOFC 阳极再循环的尾气混合后发生重整制氢反应,富氢重整气进入 SOFC 阳极内与阴极的氧气发生电化学反应发出电能,SOFC 尾气再进入内燃机内进行燃烧做功,带动发电机发电,内燃机尾气给甲醇预热后带动废气涡轮做功。通过使用废气涡轮增压器对大气加压提高 SOFC 工作压力,采用 SOFC 阳极再循环为甲醇蒸汽重整提供水。在动力系统启动时则由内燃机进行工作,而在加力情

况下,通过向内燃机内增加燃料来提高输出功,进而提高整个动力系统的输出功。

3 混合动力系统热力性能建模

为了获得动力系统在巡航状态的工作性能,本文通过建立 SOFC 模型、内燃机模型、涡轮增压器模型、重整器模型和换热器模型,再根据系统内的物质流路和能量流路将模型搭建起来,最终得到混合动力系统的部件性能和系统性能。

3.1 模型假设

为了简化模型的建立,本文做了以下假设:(1)混合动力系统工作在稳态条件下;(2)重整器和燃料电池内的反应处于平衡状态;(3)空气的组分为氧气和氮气,比例为 21:79;(4)不考虑系统内部件的热损失。

3.2 重整模型

重整器发生甲醇蒸汽重整反应,蒸汽由阳极尾气再循环提供,重整温度作为重整器的出口温度,对于甲醇燃料,其重整的产物有甲烷、一氧化碳、二氧化碳和氢气。重整反应的平衡状态由 NASA 提供的化学平衡软件求解<sup>[22]</sup>。

3.3 SOFC 模型

本文的 SOFC 模型采用零维模型,重整器后面的气体流入 SOFC 阳极通道,主要由甲烷、氢气、一氧化碳、二氧化碳和水蒸气组成。随着氢气电化学反应的进行,阳极通道中的甲烷在催化层的作用下与蒸汽发生重整反应,生成氢气。同时,一氧化碳也与蒸汽发生置换反应,如式(1)~(3)所示。

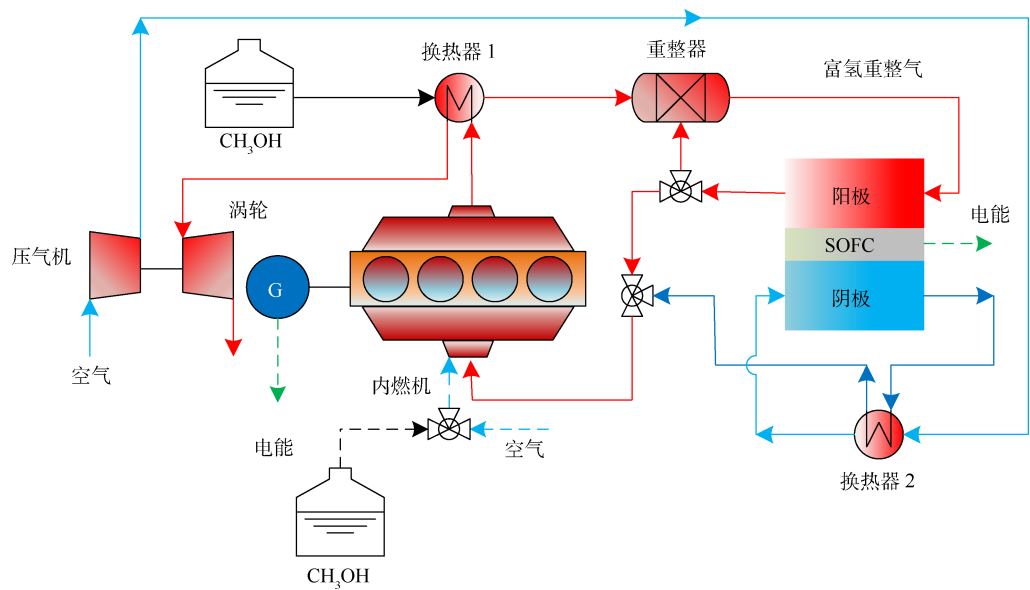
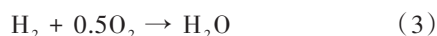
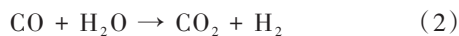
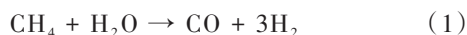


图 1 航空燃料电池内燃机混合动力系统方案图



电化学模型是燃料电池输出电压、电流和各种极化损耗的计算模型。燃料电池的输出电压等于能斯特电动势以消除极化损耗。极化损耗主要包括浓度极化损耗、欧姆极化损耗和活化极化损耗。计算公式如式(4)~(9)所示。

$$U_{\text{OCP}} = -\frac{\Delta G}{2F} \quad (4)$$

$$U = U_{\text{OCP}} - (\eta_{\text{ohm}} + \eta_{\text{conc}} + \eta_{\text{act}}) \quad (5)$$

$$\eta_{\text{ohm}} = jR_{\text{ohm}} \quad (6)$$

$$\eta_{\text{conc}} = \frac{RT_{\text{PEN}}}{2F} \ln\left(\frac{p_{\text{H}_2\text{O,TPB}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \frac{p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2\text{,TPB}}}\right) + \frac{RT_{\text{PEN}}}{4F} \ln\left(\frac{p_{\text{O}_2}}{p_{\text{O}_2\text{,TPB}}}\right) \quad (7)$$

$$j = j_{0,\text{ca}} \left[ \exp\left(\frac{F}{RT_{\text{PEN}}} \eta_{\text{act,ca}}\right) - \exp\left(-\frac{F}{RT_{\text{PEN}}} \eta_{\text{act,ca}}\right) \right] \quad (8)$$

$$j = j_{0,\text{an}} \left[ \frac{p_{\text{H}_2\text{,TPB}}}{p_{\text{H}_2}} \exp\left(\frac{F}{RT_{\text{PEN}}} \eta_{\text{act,an}}\right) - \frac{p_{\text{H}_2\text{O,TPB}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} \exp\left(-\frac{F}{RT_{\text{PEN}}} \eta_{\text{act,an}}\right) \right] \quad (9)$$

式中,  $U$  为输出电压,  $V$ ;  $U_{\text{OCP}}$  为开路电压,  $V$ ;  $\eta_{\text{act}}$  为活化极化损失,  $V$ ;  $\eta_{\text{ohm}}$  为欧姆极化损失,  $V$ ;  $\eta_{\text{conc}}$  为浓度极化损失,  $V$ ;  $j$  为电流密度,  $\text{A}/\text{cm}^2$ ;  $j_0$  为交换电流密度,  $\text{A}/\text{cm}^2$ 。

### 3.4 SOFC 模型验证

通过将计算数据与文献实验数据<sup>[23]</sup>进行对比验证, 对比结果如图2所示。结果显示, 模型与实验数据拟合度较好, 可用于理论分析。

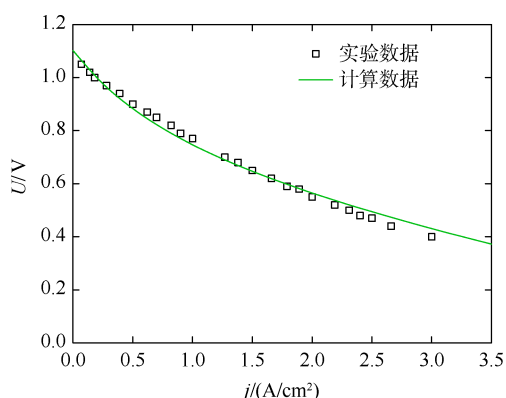


图2 SOFC 模型验证结果图

### 3.5 内燃机模型

目前的航空活塞内燃机通常为火花点燃汽油机。另一方面, 由于甲醇不易燃烧, 因此, 目前通常

也采用火花点燃的方式进行助燃, 因此本文的内燃机模型采用奥托循环模型, 循环示意图如图3所示。认为燃料可以充分燃烧<sup>[24]</sup>, 内燃机内的燃料燃烧化学方程式见表1。

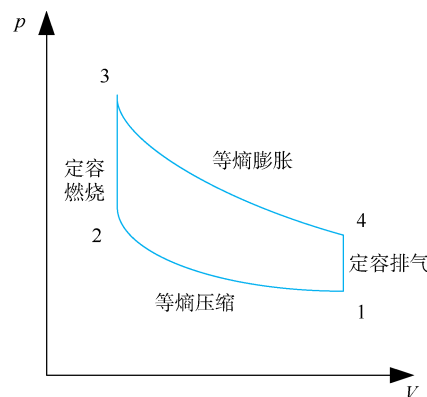


图3 奥托循环示意图

表1 燃烧化学方程式

| 燃料   | 方程式                                                                       |
|------|---------------------------------------------------------------------------|
| 甲烷   | $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ |
| 氢气   | $\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$               |
| 一氧化碳 | $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$                        |

计算循环输出功的公式如式(10)所示。最后, 通过给出内燃机的机械效率来计算内燃机的输出功, 如式(11)所示。

$$W = H_3 - H_4 - H_2 + H_1 \quad (10)$$

$$\psi_{\text{ICE}} = \frac{P_{\text{ICE}}}{\beta_{\text{in}} \times \dot{N}_{\text{in}}} \quad (11)$$

式中  $P_{\text{ICE}}$  为内燃机有效输出功,  $\text{kW}$ ;  $\dot{N}_{\text{in}}$  为燃料流量,  $\text{mol/s}$ 。

### 3.6 换热器模型

换热器主要是通过内燃机尾气为燃料进行预热和 SOFC 阴极尾气为空气预热, 本文通过有效度模型和能量守恒来获得换热器冷流和热流温度, 计算式如式(12)和(13)所示

$$\varepsilon = \frac{(\dot{N}c_{p,m})_c (T_{\text{out},c} - T_{\text{in},c})}{(\dot{N}c_{p,m})_{\text{min}} (T_{\text{in},h} - T_{\text{in},c})} \quad (12)$$

$$q = (\dot{N}c_{p,m})_c (T_{\text{out},c} - T_{\text{in},c}) = (\dot{N}c_{p,m})_h (T_{\text{in},h} - T_{\text{out},h}) \quad (13)$$

式中  $\dot{N}$  为工质流量,  $\text{mol/s}$ ;  $c_{p,m}$  为比热容,  $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

### 3.7 涡轮增压器模型

压缩机采用等熵压缩模型, 涡轮机采用等熵膨胀模型。压缩机的出口温度如式(14)所示。压缩机的功耗是空气流量、比热容量和温差的乘积。具体公式如式(15)所示。通过使用涡轮提供的压缩机的



功率消耗特性计算涡轮出口温度,然后计算涡轮出口压力。具体计算公式如式(16)和式(17)所示。

$$T_2 = \frac{T_1}{\psi_c} \left( \pi_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \quad (14)$$

$$W_c = \dot{N}_{\text{air}} c_p (T_2^* - T_1) \quad (15)$$

$$W_t = W_c = \dot{N}_g c_{pg} (T_1 - T_2) \quad (16)$$

$$T_2 = \left[ \psi_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] + 1 \right] T_1 \quad (17)$$

式中 $\psi$ 为机械效率。

### 3.8 烟分析模型

烟定义为系统从初始状态和周围环境达到平衡时获得的最大功。通过烟分析计算各单元的烟损失占总烟损失的比例,以确定系统中的最大烟损失单元,从而准确发现系统的实际缺陷,找出损失原因和能量利用的薄弱环节,指出了提高系统效率和减少烟损失的方向。系统中涉及的流动工质的烟包括物理烟和化学烟。

$$E_x = E_{x,\text{ph}} + E_{x,\text{ch}} \quad (18)$$

物理烟和化学烟的计算公式如式(19)和(20)所示

$$E_{x,\text{ph}} = H - H_0 - T_0 (S - S_0) \quad (19)$$

$$E_{x,\text{ch}} = -\Delta G + \sum_p v_j E_{x,\text{D},j} - \sum_R v_i E_{x,\text{D},i} \quad (20)$$

式中,小标P,R分别代表化学反应的生成物和反应物。

为了对部件进行烟分析,采用了燃料烟和产出烟的概念。燃料烟为部件消耗的烟,产出烟为部件输出的烟。燃料烟与产出烟的差值为烟损,如式(21)所示。产出烟与燃料烟的比值为烟效率,如式(22)所示。

$$E_D = E_{\text{fuel}} - E_{\text{prod}} \quad (21)$$

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{E_{\text{prod}}}{E_{\text{fuel}}} \times 100\% \quad (22)$$

### 3.9 质量模型

混合动力系统应用于航空领域,因此其功重比也是需要考察的指标,混合动力系统包含有SOFC、ICE、涡轮增压器、换热器和重整器。本文中SOFC的质量由功率密度确定,选取为 $0.6575 \text{ kW/kg}$ <sup>[25]</sup>,该系统中的涡轮增压器采用向心涡轮驱动的离心压缩机形式。离心压缩机的质量与入口质量流量和压力比有关,而向心涡轮的质量与速度和膨胀比有关。本文中的涡轮增压器质量是通过拟合文献[26]中的数据获得的。

内燃机的质量与功率呈正相关。本文中,参考Rotax公司<sup>[27]</sup>和Limbach公司<sup>[28]</sup>的航空活塞内燃机的功率质量比,将内燃机的功率密度选择为 $1.14 \text{ kW/kg}$ 。参考文献[29],发电机的功率选择为 $10.9 \text{ kW/kg}$ 。

换热器是系统的重要组成部分,主要包括预热燃料、预热燃料电池阴极空气和加热反应器。热交换器的材料为SiC,热交换系数为 $40 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 。热交换器的质量计算公式如式(23)<sup>[30]</sup>所示。

$$m_{\text{hex}} = A_{\text{req}} \times 0.0018 \times 2700 \quad (23)$$

式中 $A_{\text{req}}$ 为换热面积。

重整器结构基于文献中提出的长径比为2的管式反应器。重整器质量与空速和反应物质量流量有关<sup>[26]</sup>。本文中重整器的质量根据公式(24)计算。

$$m_{\text{ref}} = 2\pi(7200\dot{m}_{\text{rea}}/(\pi \cdot \mu \cdot \rho_{\text{rea}}))^{2/3} \cdot (\rho_{\text{vess}} \tau_{\text{vess}} + \rho_{\text{insu}} \tau_{\text{insu}}) \quad (24)$$

式中 $\mu$ 为空速, $\text{h}^{-1}$ ;  $\rho$ 为密度, $\text{kg/m}^3$ ;  $\tau$ 为厚度,m。

混合动力系统中管道、电线、控制器和其他部件的辅助部分占系统主要部件质量的10%<sup>[31]</sup>。

### 3.10 混合动力系统性能指标

混合动力系统的性能指标有发电效率、耗油率、碳排放量和功率密度,计算公式如式(25)~(28)所示。

$$\eta_{\text{ele}} = \frac{P_{\text{FC}} + P_{\text{ICE}}}{\dot{m}_{\text{fuel}} \cdot \beta} \times 100\% \quad (25)$$

$$\gamma = \frac{\dot{m}_{\text{fuel}} \times 3600}{P_{\text{FC}} + P_{\text{ICE}}} \quad (26)$$

$$\alpha = \frac{\dot{m}_{\text{CO}_2}}{P_{\text{ele}} \times 1/3600} \quad (27)$$

$$\dot{p} = \frac{P_{\text{ele}}}{m_{\text{tot}}} \quad (28)$$

## 4 结果与讨论

### 4.1 工作点确定

为了研究混合动力系统在设计条件下的发电效率,需要选择混合动力系统的一些参数,包括过量空气系数、燃料利用率等。为了降低SOFC的温度梯度,过量空气系数的值被设置为8,SOFC的燃料利用率为0.75,平均电流密度为 $5000 \text{ A/m}^2$ 。由于内燃机入口处燃料浓度较低,因此采用HCCI燃烧策略,高压比选择为15。参数见表2所示。

表3为混合动力系统的计算结果。甲醇流量设为 $1 \text{ mol/s}$ 。为了满足SOFC对阳极进气温度的要求,重整温度设为 $900 \text{ K}$ 。由结果可知,混合动力系统的

表 2 混合动力系统参数

| 参数                              | 数值       |
|---------------------------------|----------|
| 飞行海拔/km                         | 5        |
| 飞行速度                            | $Ma=0.1$ |
| 燃料利用率                           | 0.75     |
| 过量空气系数                          | 8        |
| 电流密度/( $\text{kA}/\text{m}^2$ ) | 5        |
| 阴极入口温度/K                        | 975      |
| 阳极回流率                           | 0.5      |
| 内燃机压比                           | 15       |
| 压缩机压比                           | 3        |
| 内燃机机械效率                         | 0.70     |
| 压缩机机械效率                         | 0.85     |
| 涡轮机械效率                          | 0.80     |
| 发电机效率                           | 0.95     |

发电效率为 55.11%，相比甲醇内燃机 40% 左右的效率<sup>[32]</sup>有了大幅提升。混合动力系统的碳排放量为 425.17 g/(kWh)，而甲醇内燃机的碳排放量为 555.01 g/(kWh)，柴油机的碳排放量为 772.97 g/(kWh)<sup>[33]</sup>，因此，本系统在使用过程中具有减碳的效果。混合动力系统的耗油率为 309 g/(kWh)，甲醇内燃机的耗油率为 403.64 g/(kWh)，柴油机的热值为 241.1 g/(kWh)。因此，本混合动力系统相比于甲醇内燃机具有高效率的优势，因此耗油率比甲醇内燃机要低，而比柴油机的耗油率高是因为甲醇的热值比柴油低。

表 3 混合动力系统计算结果

| 参数             | 数值     |
|----------------|--------|
| SOFC 输出功率/kW   | 361.61 |
| ICE 输出功率/kW    | 38.24  |
| 发电效率/%         | 55.11  |
| 耗油率/(g/(kWh))  | 309.00 |
| 碳排放量/(g/(kWh)) | 425.17 |

4.2 性能参数影响规律

为了更好地评估混合动力系统的性能，研究混合动力系统的参数影响变化规律。混合动力系统涉及许多参数，一个是影响工作介质物理性质的参数，二是影响燃料电池和内燃机燃料流量分布的参数。本节将讨论燃料利用率、压缩机压比和飞行海拔高度对混合动力系统的影响。

4.2.1 燃料利用率的影响

图 4 显示了在不同燃料供应下混合动力系统效率随燃料利用率的变化趋势。本节研究的燃料利用率变化范围为 0.5~0.75，其他参数与设计条件一致。

从图中可以看出，混合动力系统的发电效率随着燃料利用率的提高先升高后降低，这是因为混合动力系统具有阳极循环，导致实际燃料利用率高于设定燃料利用率。当燃料利用率过高时，分配给内燃机的燃料流量严重不足，导致内燃机的性能严重下降。换句话说，混合动力系统中存在最佳燃料利用率，这使得混合动力系统达到最佳效率。

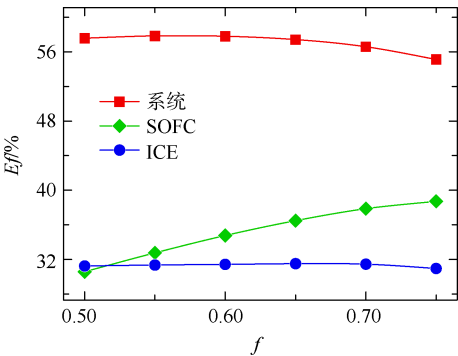


图 4 燃料利用率对系统的影响

4.2.2 压比的影响

图 5 显示了混合动力系统发电效率随压比的变化规律。本节研究的压比范围为 1.5~4，其他参数与设计条件一致。从图中可以看出，混合动力系统的发电效率随着压比的增大而升高，这是因为随着压比的增大，燃料电池的工作压力上升，燃料电池输出电压增大，功率密度增大，然后输出功率增大。燃料电池占系统的大部分输出功，混合动力系统的发电效率变化趋势与燃料电池一致。从图中还可以看出，随着压比的增大，效率逐渐提高，但是增益逐渐下降。同时，很难实现航空内燃机涡轮增压器的高压比。因此，有必要为混合动力系统选择合适的压比。

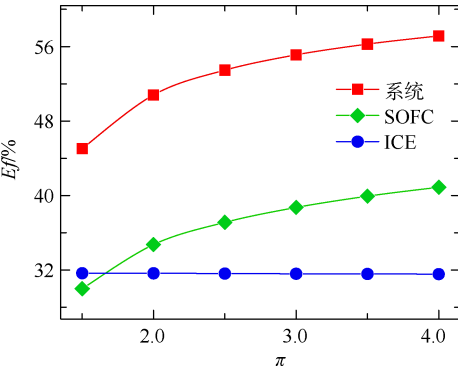


图 5 压比对系统发电效率的影响

4.2.3 飞行高度的影响

混合动力系统的工作高度将影响压缩机前方环境空气的温度和压力，从而影响燃料电池和混合动

力系统效率。本节将研究工作高度在 1~9 km 内变化时混合动力系统的效率,其他条件与设计条件一致。结果如图 6 所示。随着高度的增加,混合动力系统的发电效率逐渐降低。这是因为高度越高,环境空气的温度和压力越低。因此,燃料电池的效率将相应降低,降低了混合动力系统的输出功。

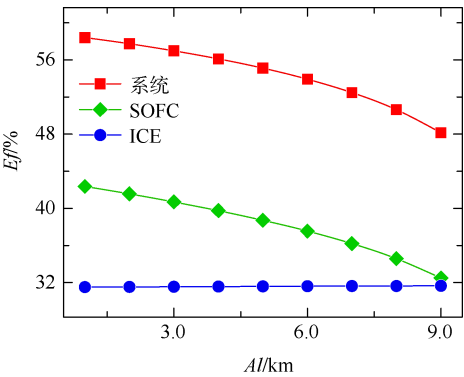


图 6 海拔高度对系统发电效率的影响

4.3 焓分析

为了分析系统的可用能损失的分布规律,更好地指明系统的性能改进方向,开展了混合动力系统的焓分析。结果如图 7 和图 8 所示。燃料输入的焓为 732.83 kW,其中 399.85 kW 转化为发电功率,混合动力系统的焓效率为 54.56%。对混合动力系统的焓分析表明系统中焓效率最高的是 SOFC,焓效率最低

的是内燃机,焓损最大的部件是重整器。

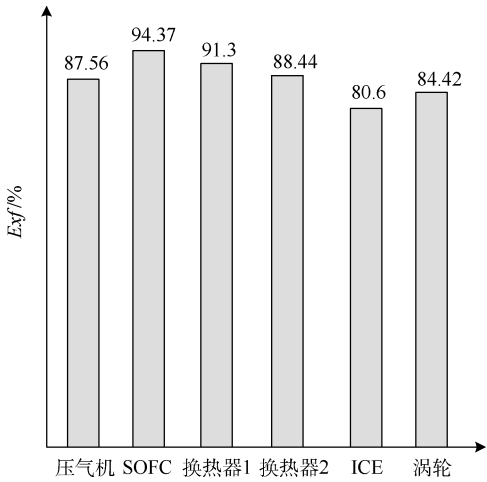


图 7 部件焓效率

4.4 质量分析

表 4 列出了基于甲醇燃料的混合动力系统装置的估算质量。可以看出,混合动力系统的总质量为 741.14 kg,功率密度为 0.488 kW/kg。其中,SOFC 占据了大部分的质量,因此,提升 SOFC 的功率密度是解决 SOFC 应用于航空领域的关键技术。本文采用的 SOFC 功率密度是保守值,据日本 JAXA 的报道<sup>[34]</sup>,目前已经研发的 SOFC 功率密度可以达到 1.2 kW/kg。届时,混合动力系统的功重比将有一个明显的提升。另一方面,系统需要进行优化以减少换热器的使用。

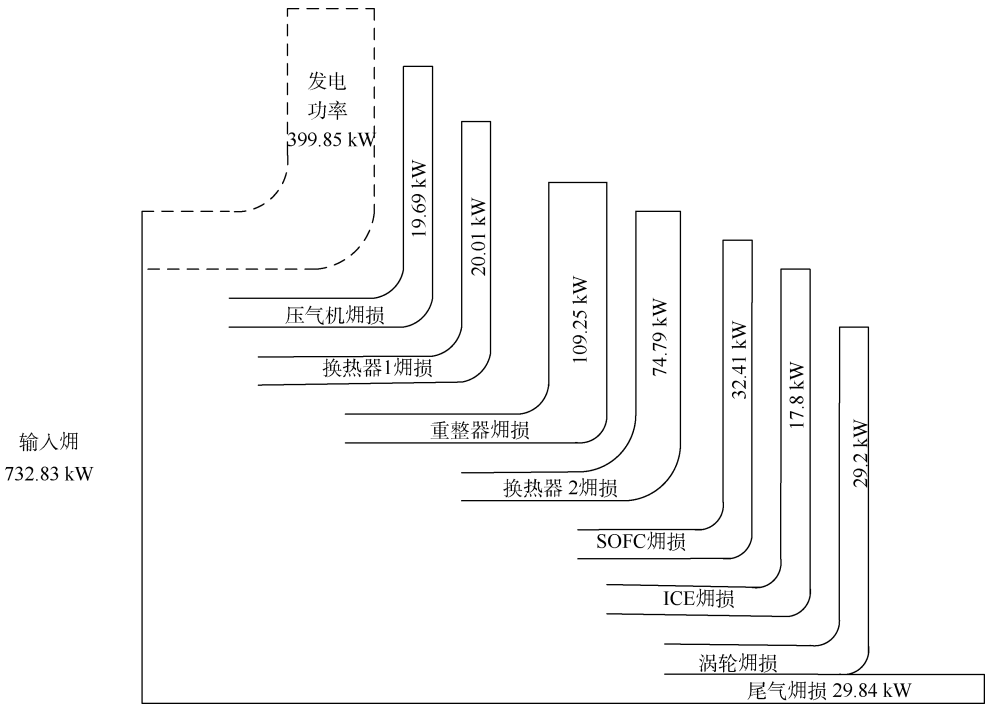


图 8 系统焓流路图

表 4 混合动力系统估算质量

| 部件   | 质量/kg  |
|------|--------|
| SOFC | 549.98 |
| ICE  | 33.54  |
| 换热器  | 47.93  |
| 重整器  | 13.29  |
| 涡轮   | 12.10  |
| 压气机  | 13.42  |
| 发电机  | 3.50   |
| 其他   | 67.38  |
| 合计   | 741.14 |

5 结 论

本文通过研究,得到如下结论:

(1)基于甲醇燃料的航空燃料电池内燃机混合动力系统在设计工况的发电效率达到了 55%,耗油率为 309 g/(kWh),相比目前的活塞发动机在效率上有较大的提升。

(2)参数影响规律研究表明,混合动力系统受工作介质的影响很大,混合动力系统的发电效率随着空气温度和压力的升高而升高,因此,混合动力系统适宜工作在中低空。另一方面,混合动力系统存在最佳的燃料利用率,使得混合动力系统的效率达到最高。

(3)混合动力系统的总体焓效率为 54.56%,系统中焓效率最低的部件是内燃机,而重整器内的焓损比较大,后续需要对重整器内的气体流路和反应条件进行重新优化以降低重整器内产生的焓损。

(4)混合动力系统的功率密度为 0.488 kW/kg,提升 SOFC 的功率密度是 SOFC 应用于航空领域的关键技术。

参考文献

[ 1 ] ExxonMobil. 2018 outlook for energy: a view to 2040 [EB/OL]. [http://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/%20outlook-for energy/2018/2018-outlook-forenergy.pdf](http://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/%20outlook-for%20energy/2018/2018-outlook-forenergy.pdf), 2018.

[ 2 ] International Energy Agency (IEA). CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion 2011[J]. Oecd Observer, 2011(3).

[ 3 ] BAROUTAJI A, WILBERFORCE T, RAMADAN M, et al. Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 106: 31-40.

[ 4 ] International Air Transport Association (IATA). Annual review 2017 [C]. Cancan: 73rd Annual General Meeting, 2017.

[ 5 ] DAHAL K, BRYNOLF S, XISTO C, et al. Techno-economic review of alternative fuels and propulsion systems

for the aviation sector [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 151: 111564.

[ 6 ] BILLUR S, FARIDA L D, MICHAEL H. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32 (9) : 1121-1140.

[ 7 ] 范舒睿, 武艺超, 李小年, 等. 甲醇-H<sub>2</sub>能源体系的催化研究: 进展与挑战[J]. 化学通报, 2021, 84(1): 21-30.

[ 8 ] YADAV M, XU Q. Liquid-phase chemical hydrogen storage materials [J]. Energy & Environmental Science, 2012, 5(12): 9698.

[ 9 ] 温 坤. 满足社会需求, 保持全球领先——《欧盟 2050 年航空发展展望》出台[J]. 国际航空, 2011(6): 67-69.

[ 10 ] International Civil Aviation Organization. Trends in emissions that affect climate change[EB/OL]. [2022-01-07]. [https://www.icao.\(int/environmental protection/Pages/ClimateChange\\_Trends.aspx](https://www.icao.int/environmental%20protection/Pages/ClimateChange_Trends.aspx).

[ 11 ] BRELJE B J, MARTINS J R R A. Electric, hybrid, and turboelectric fixed-wing aircraft: a review of concepts, models, and design approaches [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2019, 104: 1-19.

[ 12 ] ANDREAS W S, BARRETT S R H, DOYME K, et al. Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft[J]. Nature Energy, 2019(2): 160-166.

[ 13 ] MUENZEL V, HOLLENKAMP A F, BHATT A L, et al. A comparative testing study of commercial 18 650-format lithium-ion battery cells[J]. Journal of the Electrochemical Society 2015, 162: 1592-1600.

[ 14 ] EPSTEIN A H, O'FLARITY S M. Considerations for reducing aviation's CO<sub>2</sub> with aircraft electric propulsion[J]. Journal of Propulsion and Power, 2019, 35(12): 1-11.

[ 15 ] 孔祥恩, 刘海峰. 无人机用航空活塞发动机关键技术的研究进展[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2021, 50(3).

[ 16 ] 郑 君. 通用航空活塞发动机现状及发展趋势探讨 [J]. 内燃机与配件, 2020(19): 196-198.

[ 17 ] CELIK M B, OZDALYAN B, ALKAN F. The use of pure methanol as fuel at high compression ratio in a single cylinder gasoline engine[J]. Fuel, 2011, 90: 1591-1598.

[ 18 ] BRUSSTAR M, STUHLREHER M, SWAIN D, et al. High efficiency and low emissions from a port-injected engine with neat alcohol fuels [R]. SAE Technical, 2002-01-2743.

[ 19 ] 蔡文逸. 深耕甲醇汽车 17 年[N]. 上饶日报, 2022-04-20(003).

[ 20 ] SERVICES G G, PARSONS I. Fuel cell handbook[M]. 7th edition. West Virginia: U. S Department of Energy, 2004.

[ 21 ] STAMBOULI A B, TRAVERSA E. Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002, 6(5): 433-455.

[ 22 ] MARTINEZ A S, BROUWER J, SAMUELSEN G S. Comparative analysis of SOFC-GT freight locomotive fu-



- eled by natural gas and diesel with onboard reformation [J]. *Applied Energy*, 2015, 148: 421–438.
- [23] ZHAO F, VIRKAR A V. Dependence of polarization in anode-supported solid oxide fuel cells on various cell parameters[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 141(1): 79–95.
- [24] 赵重凯. 固体氧化物燃料电池联供系统设计方案优化研究与综合评价[D]. 南宁: 广西大学, 2022.
- [25] CIRIGLIANO D, FRISCH A M, LIU F, et al. Diesel, spark-ignition, and turboprop engines for long-duration unmanned air flights[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2018, 34(4): 1–15.
- [26] TORNABENE R, WANG X Y, STEFFEN C J, et al. Development of parametric mass and volume models for an aerospace SOFC/gas turbine hybrid system[R]. ASME GT 2005–68334.
- [27] AUSTRIA ROTAX. Product samples [EB/OL]. [2022–07–13]. <http://www.flyrotax.com>.
- [28] GERMANY LIMBACH. Product samples [EB/OL]. [2022–06–26]. <http://www.limflug.de>.
- [29] GOLOVANOV D, GERADA D, SALA G, et al. 4MW class high power density generator for future hybrid-electric aircraft [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(4): 2952–2964.
- [30] COLLINS J M, MCLARTY D, YAN J. All-electric commercial aviation with solid oxide fuel cell-gas turbine-battery hybrids[J]. *Applied Energy*, 2020, 265: 114787.
- [31] JI Z X, QIN J, CHENG K L, et al. Design and performance of a compact air-breathing jet hybrid-electric engine coupled with solid oxide fuel cells[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2021, 8: 613205.
- [32] VANCOILLIE J, DEMUYNCK J, SILEGHEM L, et al. Comparison of the renewable transportation fuels, hydrogen and methanol formed from hydrogen, with gasoline – engine efficiency study[J]. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 37: 9914–9924.
- [33] International Maritime Organization (IMO). Third GHG study—executive summary and final report [EB/OL]. [2014–05–12]. <http://www.docin.com/p-1778936727.html>.
- [34] HASHIMOTO S, HIROTA T, SUZUKI K, et al. Material development strategy of lightweight solid oxide fuel cells for airplane system electrification[J]. *ECS Transactions*, 2019, 91(1): 311.

(编辑:梅 瑛)

## Performance analysis of hybrid power system of aviation fuel cell internal combustion engine with methanol fuel

LI Chengjie<sup>1</sup>, WANG Zixuan<sup>2</sup>, HA Chan<sup>1</sup>, ZHOU Zhaozhou<sup>1</sup>, QIN Jiang<sup>1</sup>, WEI Liqui<sup>1</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 100081, China;

2. Institute of Intelligent Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** In order to achieve the need of the times to reduce carbon emissions in aviation, there is an urgent need for technological innovation in the direction of aviation fuel systems and aviation power systems. This paper proposes a hybrid power system for an aviation fuel cell internal combustion engine based on methanol fuel, where methanol is used to supply hydrogen to the fuel cell through on-board on-line catalytic reforming, and electric power from fuel cells and internal combustion engines drives the electric propeller. Modular modelling methods and hybrid power system performance simulation analysis were conducted, the results showed the power generation efficiency of the hybrid system reached 55%, which is a 15% absolute efficiency improvement compared to a methanol internal combustion engine and helps to reduce fuel consumption. An analysis of the effect of the hybrid system performance parameters was completed and the results showed that the efficiency of the hybrid system increased with increasing pressure ratio and showed an increase followed by a decrease with increasing fuel utilization. The exergy analysis of the hybrid system was conducted, and the results showed that the component with the highest exergy efficiency is the fuel cell, while the component with the highest exergy loss is the reformer. The mass analysis results showed that the power density of the hybrid system reached 0.488 kW/kg.

**Key words:** Fuel cells; Internal combustion engines; Hybrid power system; Methanol fuel; Performance analysis

Received: 2022–11–16; Revised: 2023–09–08.

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2211044

Corresponding author: QIN Jiang, E-mail: qinjiang@hit.edu.cn

2211044-9