

航空燃料电池燃气涡轮混合动力系统研究进展

Development of Aviation Fuel Cell Gas Turbine Hybrid Power System

■ 李成杰 刘禾 郭发福 秦江 刘洋 魏立秋 / 哈尔滨工业大学

燃料电池燃气涡轮混合动力系统以其发电功率大、效率高、污染物排放低等优势，成为一种极具应用前景的、可同时满足飞行器推进与能源需求的一体化动力装置。

传 统燃气涡轮航空发动机受材料限制，涡轮入口温度提升困难，导致发动机性能提高受到限制，此外，压气机和涡轮的功率、转速的宽范围匹配也是航空发动机发展的一大难题，需要新的解决途径。与此同时，为了简化飞机能源结构、降低燃料消耗以及污染物排放，多电/全电飞机成为飞机的新发展方向之一，其中电推进技术成为飞机动力系统电气化的重要实现途径。然而，锂离子电池较小的能量密度限制了飞机的载重、速度以及航程等，影响了电推进技术的应用。作为上述问题的解决途径之一，以质子交换膜燃料电池（PEMFC）和固体氧化物燃料电池（SOFC）等为代表的燃料电池电推进技术成为近年来的研究热点，目前航空燃料电池系统的主要类型如图1所示。其中，SOFC具有燃料适应性广、效率高（40%~60%）等优势，且其产生的高温尾气可以被燃气涡轮（GT）利用，组成混合动力系统，混合动力系统的发电功率来自SOFC和涡轮两部分，较单一的燃料电池或燃气涡轮效率有较大提升，因此，耗油率低的SOFC-GT混合动力可作为航空动力系统使用。

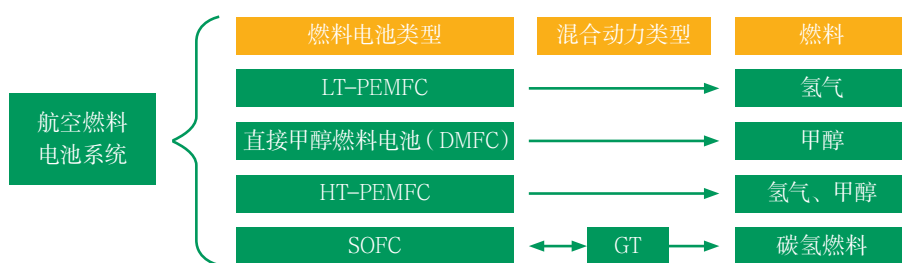


图1 航空燃料电池系统主要类型

SOFC-GT混合动力系统工作原理

SOFC与GT发动机结合后形成的动力系统通常具有推进和发电两个作用，前一作用一般通过与涡喷（或涡扇）等发动机集成实现，而后者一般通过与涡轴（或涡桨）发动机集成实现。SOFC与涡喷发动机集成的混合动力系统往往适用于多电飞机；而SOFC与涡轴发动机集成的混合动力系统则全部输出电功率，对应于未来的全电飞机。

SOFC-涡喷混合动力系统以及SOFC-涡轴混合动力系统的物质流路基本一致：SOFC布置在压气机与燃烧室之间，阴极为经压气机加压后的高压空气，阳极入口一般为含氢气的重整气，如图2所示，燃料电池出口的高温尾气则进入燃烧室进一步反应，以增大推进系统的能量利用率及系统效率。二者在做功形

式上差别较大，前者混合系统的高温高压燃气从喷管喷出，由喷管提供推力；后者混合系统主要通过动力涡轮输出轴功，进一步通过发电机转化为电功，与SOFC产生的电功共同为螺旋桨/涵道风扇等推进器提供电能。

SOFC-GT混合动力系统研究现状

SOFC-GT混合动力系统用于航空领域已被众多科研机构研究。该系统既可以作为飞机辅助动力装置（APU）的一种替代方案，也可作为飞机的发动机。

已发表的研究涉及了50~972 kW的SOFC-GT的APU方案，其中较有代表性的是通贾（Tunca）等的研究^[1]。该方案将SOFC-GT的APU用于波音737上，额定功率为440 kW。研究结果表明，新型APU

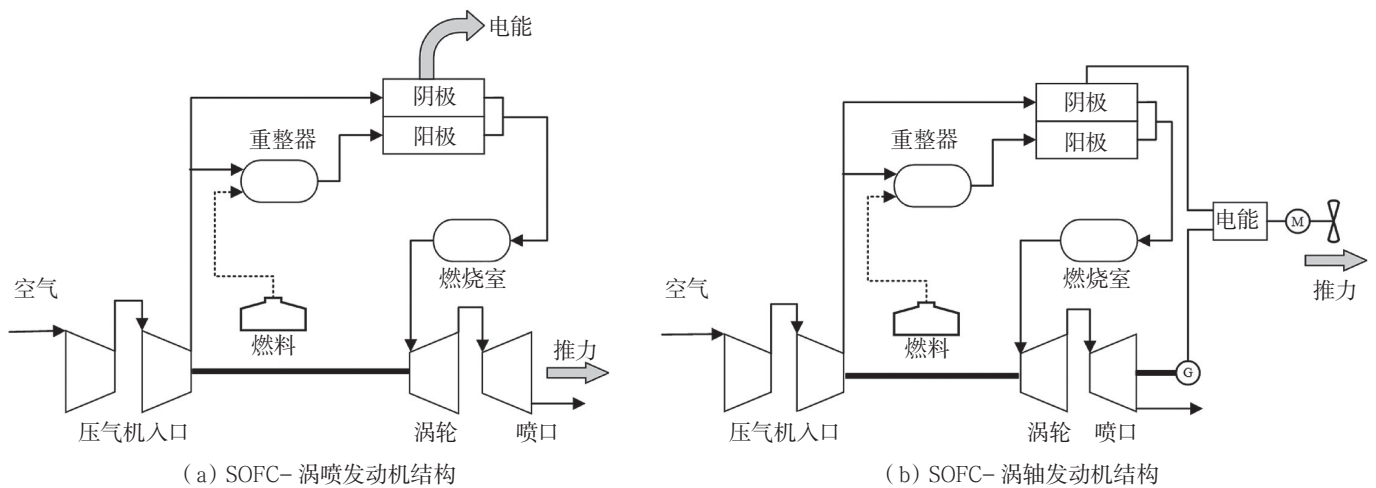


图2 SOFC-GT混合动力系统结构

的质量为传统APU的2倍，但燃油消耗每小时降低了58.2 kg，同时该系统还可以回收产生43.7 kg的水，因此对于飞机整体而言，比传统的APU节省了101.9 kg的质量。

在载人飞行器领域，具有代表性的SOFC-GT应用为美国国家航空航天局（NASA）研制的电动飞机X-57^[2]。该SOFC-GT系统的燃料为低硫柴油，系统功率为120 kW，质量功率密度为281 W/kg，发电效率为55%。

另外，罗伯茨（Roberts）等^[3]

研究了SOFC与90kN级的涡轮发动机结合的动力系统（见图3）。结果表明，此构型在小推力和低马赫数下耗油率降低的更为明显。当马赫数为0.2、推力为10kN时，混合系统的耗油率相比传统的涡轮发动机耗油率降低16%左右。该推进系统可在满足推力的情况下为飞行器提供更多的电力，是一种适合多电飞机的动力系统方案。虽然目前SOFC功率密度较低，但通过部件之间的协调配合，该构型的质量功率密度有潜力达到760 W/kg。

改进型SOFC-GT混合动力系统

为了进一步提升SOFC-GT混合动力系统的性能，业界对SOFC-GT混合动力系统进行了构型改进。

2015年，马里兰大学帕克分校沃特斯（Waters）等^[4]发表了一系列文章，提出了类似SOFC与燃气涡轮发动机并联式混合动力系统的概念，将催化部分氧化重整器和SOFC集成到燃气涡轮发动机内，来增加具有相对较大电力需求的无人机的航程/航时，开发并验证了SOFC、催化部分氧化重整器和3种燃气涡轮发动机（涡喷发动机、小涵道比涡扇发动机和大涵道比涡扇发动机）的热力学模型（见图4）。结果表明，对于电功分数（飞机电功率与总功率之比）为10%的无人机，与传统的发动机-发电机发电相比，集成系统可以降低4%的燃油消耗。在电功分数分别为30%和50%时，集成系统可以分别降低12%和29%的燃油消耗。

笔者团队提出了一种“旁路式”SOFC-GT的新构型^[5]，在高、低压涡轮间引入了级间燃烧室（ITB），不仅可满足未来机载设备高功率电

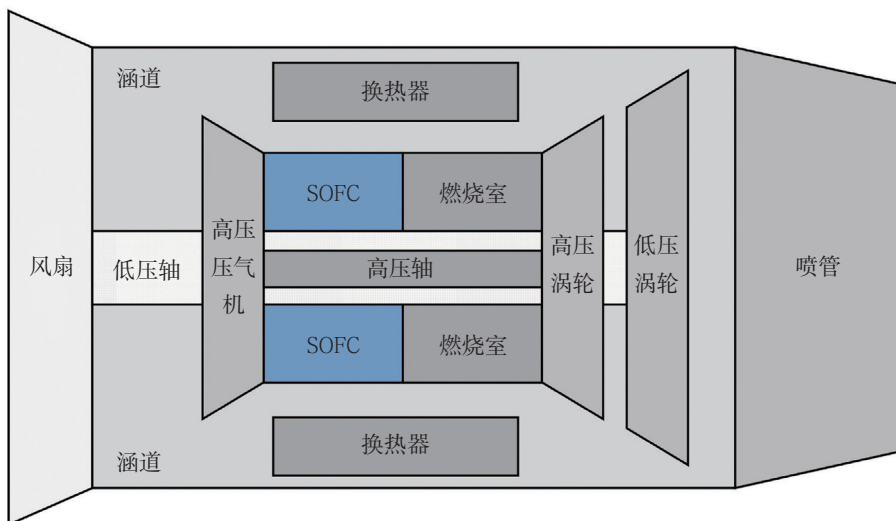


图3 SOFC与涡轮发动机一体化推进系统结构

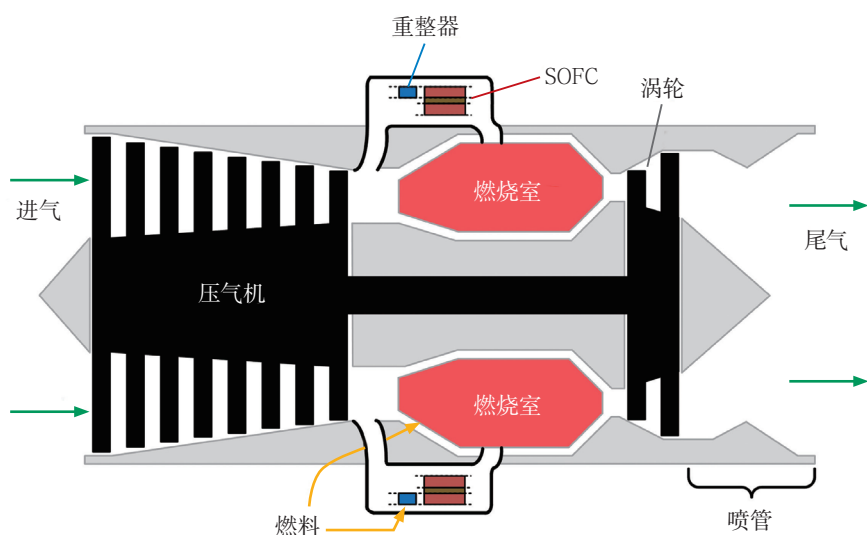


图4 沃特斯团队 SOFC-GT 并联式混合动力系统的概念

能需求，还可显著提高低压涡轮进口温度，进而提高发动机比功，增大推力。在该“旁路式”SOFC-GT混合动力系统中，碳氢燃料经过部分氧化重整后供给燃料电池。当电功分数为0.2时，相较于同等情况下工作的涡喷发动机，该发动机单位推力可提高24.07%。当压气机压比过高时，重整温度升高，燃料电池得不到有效冷却，因此存在压比限制，最大压比为24。

燃气涡轮发动机受限于涡轮材料和工艺，燃烧温度提升较为困难。因而涡轮入口温度成为限制燃气涡轮发动机性能进一步提升的制约因素。为了提高航空发动机的性能和电功率分数，笔者团队在国内率先提出了一种新型无涡轮喷气发动机^[6]（见图5）。该发动机中的压气机由电动机驱动，电动机由SOFC提供电能，SOFC后部直接连燃烧室和喷管。由于没有涡轮，因此没有“涡轮前最高工作温度”这一限制，可通过提高燃烧温度，大幅提升发动机推力。此外，由于燃料电池效率较高，该发动机在燃烧室温度较低时比冲较高。

火焰燃料电池涡轮混合动力系统

日本的堀内（Horiuchi）等最先提出了火焰燃料电池的概念^[7]。研究团队将SOFC分别置于丁烷、石蜡、固体石蜡和木材的富燃烧火焰中，并测试了其电化学性能，首次发现SOFC可以在富燃烧火焰下发电。火焰燃料电池以其结构简单、起动快的特点，近年来引起了业界的广泛关注。

戈特卡尔（Ghotkar）等^[8]对与辅助动力装置燃气涡轮集成的火焰辅助燃料电池进行了研究。与传统的双室SOFC不同，火焰燃料电池燃气涡轮混合辅助动力单元由燃烧室气体提供燃料。混合动力系统由JP-5提供燃料，在0.5V的燃料电池

电压下，燃料电池的燃料利用率高达75%。混合动力系统的热效率分别比海平面和巡航条件下的燃气涡轮热效率高30%和16%。

SOFC-GT混合动力系统的技术难点

SOFC-GT混合动力系统具有较为明显的理论性能优势，然而其在系统方案上还存在一些问题。

目前的SOFC-GT混合推进系统需要依赖航空煤油等燃料的重整，性能较好的重整方式为自热重整或蒸汽重整。这两种重整方式均需要水的参与，然而携带水会增加额外的质量，降低燃油的携带量。因此，通过燃料电池阳极尾气的再循环方式为重整过程提供水，可以从系统方案构型上解决该问题。笔者团队提出的应用于高空长航时无人机的、考虑燃料电池阴阳极尾气共同再循环的SOFC-GT混合动力系统，不仅为重整过程提供了水，还使得系统不再需要为空气加热的换热器，并从性能上比较了带有尾气再循环和不带有再循环的混合动力系统方案。结果表明，带有阳极尾气再循环的系统不仅可以不再携带额外的水，还使得系统的效率提升了20%左右。因此，通过燃料电池尾气再循环的方案优化，实现反应所需物质的供

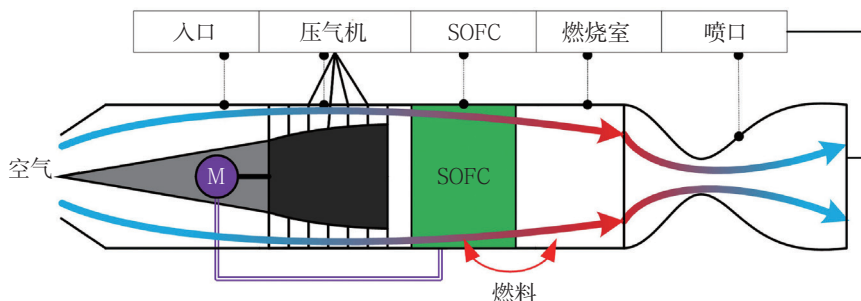


图5 无涡轮喷气发动机示意

给是一种有效的解决方法。

SOFC-GT混合动力系统存在的另一个问题是SOFC的压力损失导致的尾气燃烧问题。在混合动力系统构型下,SOFC的阳极尾气存在25%~35%的未反应的燃料,因此需要进入燃烧室进一步反应以提高系统的燃料利用率。但因SOFC的总压恢复系数要大于燃烧室的总压恢复系数,因此SOFC的尾气往往难以进入燃烧室或者在燃烧室中反应不充分。笔者团队针对该问题提出了级间涡轮燃烧器,即在高低压涡轮之间增加一个燃烧室,SOFC的尾气至此反应。此时SOFC的尾气压力要高于级间燃烧室的压力,因此尾气可以较好地注入燃烧室中反应。该系统比常规的涡轮发动机推力和热效率分别增加23.87%和2.94%。

SOFC的功率密度偏低也是该系统发展的一个障碍。根据对SOFC-GT混合动力系统的质量计算,SOFC电堆的质量占系统总质量的77%以上。敬一(Keiichi)团队针对轻质的航空用燃料电池,重新设计了SOFC电堆结构及材料,使其能在873K以下进行低温操作并减轻质量。针对75kW的SOFC电堆,质量功率密度达到了1.2 kW/kg,有了明显的提升。此外,NASA格伦研究中心研制了一种由双电极支撑(BSC)的SOFC,减小了70%的质量和体积,燃料电池的质量功率密度可以达到2.5 kW/kg,体积功率密度可以达到7.5kW/L。日渐提升的SOFC功率密度为SOFC-GT混合动力系统进一步的应用创造了更大的可能性。

除此之外,能量管理是发展SOFC-GT混合动力系统的关键技术

之一。SOFC-GT系统的构成复杂,SOFC和GT具有不同的工作区间和动态响应特性,因此,有必要采用能量管理系统对不同的子系统进行综合管理。通过制定相应的能量管理策略,系统可以在满足负载功率要求的同时提高稳定性和燃料经济性能。吕小静等提出了以压气机转速、燃料流量、空气流量和压比作为控制参数,同时考虑了压气机安全运行区域、涡轮过温和电池过温等因素的全工况划分安全区域的办法^[9]。目前的研究都集中在使用简单的比例-积分(PI)控制逻辑来实现对地面SOFC-GT混合动力系统的单变量控制。对于航空混合动力系统所涉及到的参数更多,其能量管理的研究目前也相对较少。

结束语

加强对航空用燃料电池燃气涡轮混合动力系统的研究,对航空领域的节能减排和缩短国内外相关技术的差距具有重要的意义。因此,尽快解决航空燃料电池燃气涡轮混合动力系统的关键技术难题是推动混合动力系统技术向着更成熟、更接近应用的方向发展的重要环节。

航空动力

(李成杰,哈尔滨工业大学,博士研究生,主要从事燃料电池混合动力系统研究)

参考文献

[1] FERNANDES M, ANDRADE S, BISTRITZKI V, et al. SOFC-APU systems for aircraft: A review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018,43(33):16311-16333.
 [2] STOIA T, BALAN C, ATREYA S, et al. Solid oxide fuel cell-steam reformation

power system configuration options for an all-electric commuter airplane flight demonstrator[C]//2018 aviation technology, integration, and operations conference, 2018.

[3] ROBERTS R, THERKELSEN P. Aircraft engine electrical power generation with a SOFC combustor[C]//Asme Turbo Expo: Turbine Technical Conference & Exposition, 2014.
 [4] WATERS D, CADOU C. Engine-integrated solid oxide fuel cells for efficient electrical power generation on aircraft[J]. Journal of Power Sources, 2015, 284: 588-605.
 [5] JI Z, QIN J, CHENG K, et al. Performance evaluation of a turbojet engine integrated with interstage turbine burner and solid oxide fuel cell[J]. Energy, 2019, 168: 702-711.
 [6] JI Z, QIN J, CHENG K, et al. Thermodynamics analysis of a turbojet engine integrated with a fuel cell and steam injection for high-speed flight[J]. Energy, 2019.
 [7] HORIUCHI M, SUGANUMA S, WATANABE M. Electrochemical power generation directly from combustion flame of gases, liquids, and solids[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2004, 151(9): A1402.
 [8] GHOTKAR R, MILCAREK R. Investigation of flame-assisted fuel cells integrated with an auxiliary power unit gas turbine[J]. Energy, 2020, 204: 117979.
 [9] 吕小静. SOFC/GT混合动力系统运行关键问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.