

文章编号:1674-7607(2026)02-0064-16

DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.240693

高温燃料电池/燃气轮机混合发电系统研究进展

张 昊¹, 杨 锐^{1,2}, 杨建道², 李志刚¹, 李 军¹

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西西安 710049;

2. 上海汽轮机厂有限公司, 上海 200240)

摘 要: 针对高温固体氧化物燃料电池/燃气轮机混合发电系统(SOFC-GT)技术,讨论了 SOFC-GT 系统的示范性工程、半物理实验平台和计算机仿真等研究的研究进展以及面临的挑战,展望了其未来“高效清洁、联合循环、微型分布式发电”的发展特点,以及相应的燃烧室、透平设计等延伸技术。

关键词: 能源系统工程; 混合发电系统; 高温燃料电池; 燃气轮机

中图分类号: TK474.7

文献标志码: A

学科分类号: 470.30

Review of High-temperature Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Power Generation System

ZHANG Hao¹, YANG Rui^{1,2}, YANG Jiandao², LI Zhigang¹, LI Jun¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049,

Shaanxi Province, China; 2. Shanghai Turbine Works Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract: For the high-temperature solid oxide fuel cell/gas turbine (SOFC-GT) hybrid system technology, the research progress and challengers of the demonstration project, hardware-in-the-loop simulation and computational simulation of the SOFC-GT hybrid system were discussed. The future development trends of "high efficiency and cleanliness, combined cycle, and micro-distributed power generation" of this technology were discussed, as well as the corresponding extended technologies such as combustion chamber and turbine design.

Key words: energy system engineering; hybrid power generation system; high-temperature fuel cell; gas turbine

随着全球化石能源消耗的持续增长和环境保护意识的不断增强,绿色、清洁、高效的发电技术成为未来发展的必然趋势。据美国能源情报署统计数据^[1]显示,随着亚洲经济的快速增长和能源危机的缓解,全球 2023 年电力需求增长为 2.6%,其中一半的增长来自中国^[1]。我国在能源发展方面也提出了“碳

达峰”和“碳中和”的双碳目标,形成了煤、油、气、可再生能源多轮驱动的能源生产体系,并已成为世界上第一大能源生产国和消费国^[2]。然而,未来清洁高效的能源需求和对生态环境保护的要求对我们提出了严峻的挑战。因此,提高能源效率和减少 CO₂ 排放成为目前能源发展的主要目标。

收稿日期:2024-11-12 修订日期:2025-01-08

作者简介:张 昊(2001—),男,浙江湖州人,博士研究生,研究方向为气动热力学和传热冷却。

李 军(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:jnli@mail.xjtu.edu.cn。

作为新能源技术之一,燃料电池技术在能源、交通和工业领域得到了广泛应用。其直接将燃料的化学能转化为电能,具有高发电效率且不受卡诺循环效率限制的特点,因此一直受到人们的广泛关注和研究。其中,高温燃料电池在高温工作区域下运行,废热能极高,能够与燃气轮机组成高效、清洁的混合发电系统。同时,由于高温燃料电池对燃料种类的敏感性较低,可以使用天然气、生物质燃料和沼气等多种燃料作为发电原料,适用于中小型电厂的分布式发电。此外,高温燃料电池/燃气轮机混合发电系统可以与CO₂捕集技术、制氢技术、整体煤气化联合循环等清洁高效的技术相耦合,形成更加系统化的集成系统。这种系统易于实现CO₂的富集和再利用、先进煤气化技术的发展以及氢气的生产和运输,是极具发展前景的发电技术。目前,针对高温燃料电池/燃气轮机混合发电系统的研究已经受到了广泛关注^[3]。

本文系统总结了高温固体氧化物燃料电池/燃气轮机混合发电系统的研究进展和相应成果,简单阐述了高温燃料电池的种类、特点,以及高温燃料电池/燃气轮机混合发电系统的概念和基本结构,重点介绍了高温固体氧化物燃料电池/燃气轮机混合发电系统的示范性工程、半物理实验平台以及计算机仿真研究。此外,针对不同燃料种类、耦合热力系统、控制策略和部分负荷性能等研究进行了简单介绍,最后给出了该技术的未来应用方向和延伸技术。

1 高温固体氧化物燃料电池/燃气轮机混合发电系统

1.1 燃料电池

燃料电池是一种将燃料的化学能直接转化为电能的电化学装置。与发动机中所涉及能量转换的多步过程相比,燃料电池中能量转换是一步过程且不受卡诺循环效率限制也不会产生任何机械损失,能量转换效率可达到60%~80%。燃料电池适应负载的模块化结构和出色的负载跟踪能力有望彻底改变发电行业,从集中式发电和长距离输电转向分布式发电。对于小规模电厂,它是传统发电的有利替代品^[3]。

燃料电池单体由阳极、阴极和电解质三层组成,依据电解质层的不同,可将燃料电池划分为碱性燃料电池(AFC)、质子交换膜燃料电池(PEMFC)、磷酸燃料电池(PAFC)、熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)和固体氧化物燃料电池(SOFC)5种类型。SOFC的工作温度在600~1 000℃,MCFC的工作温度在

600~700℃,由于其较高的工作温度,通常应用在分布式发电以及与其他设备耦合形成的混合发电系统中。MCFC和SOFC除了具备一般燃料电池的高效和低排放特点外,还具有以下优势:

(1) 燃料选择范围广,天然气、煤合成气、生物质气体均可作为燃料,燃料重整可以集成在燃料电池内部。

(2) 高温燃料电池的高品位排气可以为燃料重整过程提供热量,也可通过换热器为燃料和空气进行预热,以进一步提高效率。

(3) 由于高工作温度和氧化离子电荷载体,与其他类型的燃料电池相比,高温燃料电池可实现更佳的燃料适应性。

1.2 SOFC-GT 混合发电系统

高温燃料电池出口气体温度高,蕴含高品位废热,能够与其他热力系统耦合组成联合循环发电系统。Grillo对比了高温燃料电池与不同热力部件相耦合形成的混合系统的性能^[4],结果发现燃料电池和燃气轮机组成的混合发电系统是最佳组合之一,混合发电效率在60%以上。对于高温燃料电池/燃气轮机混合发电系统(FC-GT),由燃料电池和燃气轮机所建立形成kW或MW级FC-GT的发电效率可达到60%~70%以上,即使是变工况运行期间的效率也在50%以上,因此适用于中小型电厂的分布式发电、航空飞行和船舶发电中。

相比MCFC,SOFC是全固态装置,消除了电解质蒸发和循环的需要,同时工作温度高,耐硫性更强,燃料利用率更高,使得SOFC-GT混合发电系统的研究更为广泛和深入。在SOFC-GT混合发电系统的研究中,虽然有众多学者提出了不同类型的布置结构,但依据燃料电池和燃气轮机的涡轮相对位置可以分为顶层循环和底层循环2种结构模式^[5]。顶层循环和底层循环2种结构模式的根本区别是能量利用的主体不同:顶层循环发电的主要来源是燃料电池。相反,底层循环发电的主要来源是燃气轮机,燃料电池只起到利用余热的作用。

此外,为了利用排气废热,在高温燃料电池/燃气轮机混合发电系统中燃料电池与其他部件之间进行着物质或能量交换。能量交换方式有直接混合和间接热交换2种,如图1所示^[5]。

图1(a)为直接混合热耦合,这种模式的特点是燃料电池与混合对象(部件或循环)存在着能量和物质交换,两者的工作介质和压力相同,该模式是SOFC-GT混合的最常用模式。图1(b)为间接混合热耦合,这种模式的特点是燃料电池与混合对象(部件或循

环)只存在能量交换,不存在物质交换,燃料电池与混合对象是2个闭合的子系统,2个子系统通过换热器交换热量,其工作特点是对工作介质和压力的要求并不高。由于间接混合热耦合没有直接热交换,而是通过换热器换热,能量利用效率会有所降低。

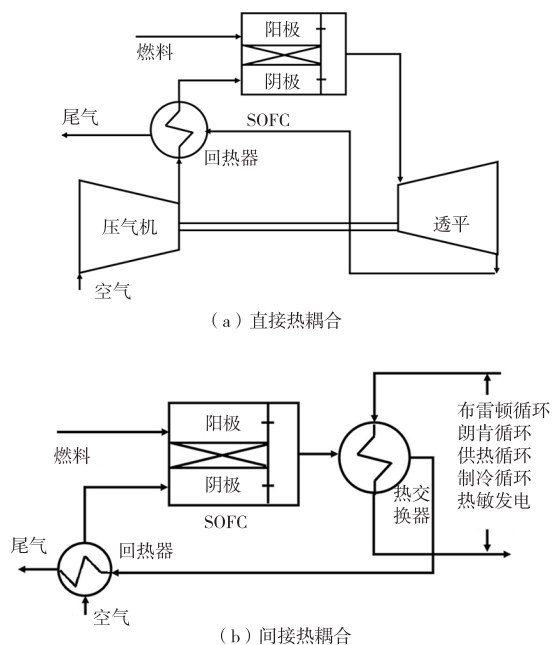


图1 SOFC-GT的能量交换形式
Fig. 1 Energy exchange mode of SOFC-GT system

图2展示了直接混合热耦合SOFC-GT顶层循环结构示意图^[6],该循环结构是SOFC-GT分布式混合系统的常用模式。在系统中,空气经过压气机压缩后,进入换热器进行预热,预热后的空气进入燃料电池的阴极。燃料则通往阳极并在燃料电池内部进行重整。阳极尾气通常由于存在未反应完全的气体,与阴极出口的空气混合进入后燃烧室中燃烧,并进入涡轮中做功。做功后的气体压力和温度下降,在换热器内对压缩空气进行预热后排出。根据仿真结果,该循环结构在以天然气为燃料的系统中,发电效率可达60%以上。

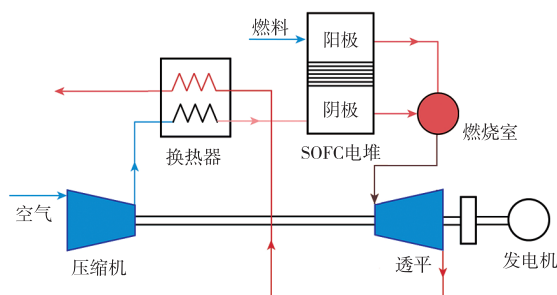


图2 直接混合热耦合SOFC-GT顶层循环
Fig. 2 Direct thermal coupling SOFC-GT topping hybrid cycle

图3展示了间接热耦合SOFC-GT底层循环的结构^[6]。在此结构中,空气经过压气机压缩并由换热器加热,之后与燃料混合送入燃烧室燃烧。产生的燃气进入涡轮中做功,涡轮尾气通过换热器对SOFC进口的空气进行加热。SOFC阳极出口的尾气对压缩空气进行加热,以提高循环效率。

尽管该循环系统的发电效率相对于直接热耦合增压型SOFC-GT系统有所降低,但此循环结构中SOFC与布雷顿循环之间的耦合度较低,使得2个系统相对更加独立,有利于简化循环的控制系统。

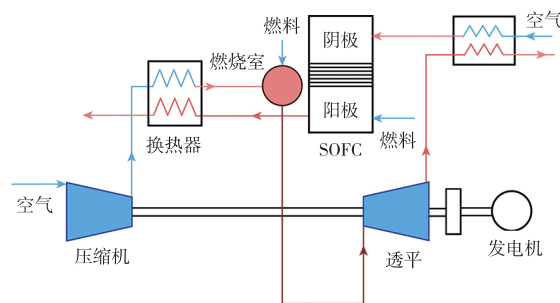


图3 间接混合热耦合SOFC-GT底层循环
Fig. 3 Indirect thermal coupling SOFC-GT bottoming hybrid cycle

2 示范性工程与半物理实验平台

2.1 SOFC-GT示范性工程

2.1.1 德国西门子SOFC-GT混合发电装置

2000年,世界上第一台SOFC-GT混合发电系统的示范电站由德国西门子公司设计制造并在美国的加利福尼亚大学投入运行,该电站是220 kW功率等级的内重整增压式顶层循环结构,如图4所示。截至到2003年,该装置运行期间并未有任何的电压下降,其发电效率达到53%^[7]。



图4 德国西门子的220 kW SOFC-GT混合发电装置
Fig. 4 The 220kW SOFC-GT hybrid generation device from Siemens of Germany

考虑到产品设计商业化,增压 PSOFC-GT 混合循环发电系统由于其效率更高而更具优势,同时在 0.2~10 MW 范围内的分布式发电市场中具有更低安装成本和更高功率密度的潜力。Veyo 等研究并开发了额定功率为 300 kW、效率为 57% 的增压 SOFC-GT 混合发电系统。Veyo 等的 300 kW 级 PSOFC-GT 混合发电系统的示意图如图 5 所示^[8]。

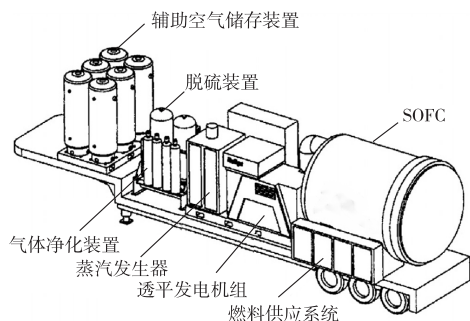


图 5 德国西门子的 300 kW PSOFC-GT 混合发电装置

Fig. 5 The 300kW PSOFC-GT hybrid power device from Siemens of Germany

2.1.2 日本三菱 SOFC-GT 混合发电装置

图 6 所示为日本三菱公司设计并制造的 200 kW 等级的 SOFC-MGT 联合循环系统^[9]。2007 年三菱公司对该 200 kW SOFC-GT 混合发电装置进行测试,测试结果表明该系统的最大总输出功率为 229 kW,系统效率可达 50 % 以上。结果表明在运行 3 224 h 并在运行期间启停 4 次后没有观察到 SOFC 的性能下降。随后三菱公司着手提高 SOFC-GT 混合发电装置的可靠性、成本、紧凑性和系统控制等技术并设计制造了紧凑型 250 kW 级 SOFC-GT 混合发电系统全实物发电装置^[10]。与传统型相比,电堆封装密度增加了 1.7 倍,SOFC-MGT 混合系统的占地面积减少约 50%。该发电装置的发电效率可达到 55% 以上并在运行 4 100 h 内稳定无电压降级。

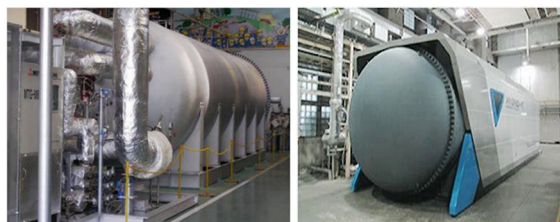


图 6 日本三菱的 200 kW SOFC-GT 混合发电装置

Fig. 6 The 200kW SOFC-GT hybrid power device from Mitsubishi of Japan

2.1.3 韩国能源研究所 SOFC-GT 混合发电装置

韩国能源研究所设计并建造了一个带有阳极支

撑平板式燃料电池的 30 kW 等级的 SOFC-GT 混合发电装置,其中 SOFC 功率为 5 kW,其实物图如图 7 所示^[11]。



图 7 韩国能源研究所 30 kW SOFC-GT 混合发电装置

Fig. 7 The 30 kW SOFC-GT hybrid power plant of the Korea Institute of Energy Research

2.2 SOFC-GT 半物理仿真实验平台

硬件在回路仿真(hardware-in-the-loop simulation, HILS),也可称作半物理仿真,既保留了数学模型对燃料电池内部机理的描述和预测,同时避免了 SOFC-GT 全实物模型的昂贵实验条件。其原理如图 8 所示^[12]。

在 SOFC-GT 半物理仿真实验平台中,数学模型用来替代 SOFC-GT 混合发电系统中昂贵的高温燃料电池。数学模型与实验设备之间始终保持实时的信息交互,由传感器所测出的物理状态参数通过转化成数字信号传递到实时的动态数学模型中,然后数学模型根据此刻的物理状态参数计算出燃料电池在此刻的动态响应,所计算的数据通过传输系统来控制实验设备的运行状态(燃气轮机转速、阀门开关等),至此形成闭环。

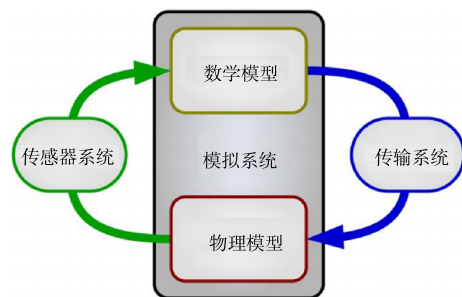


图 8 半物理仿真系统

Fig. 8 Hardware-in-the-loop simulation system

目前,国外在利用半物理实验平台对 SOFC-GT 混合系统进行仿真实验方面处于领先地位。美国的国家燃料电池研究中心(NFCRC)、国家能源技术实验室(NETL),德国的宇航中心(DLR),以及意大利的

图 11 所示为热那亚大学半物理仿真实验平台的 SOFC-GT 混合发电系统。阀门 VC 和 VR 的开关状态决定了回热器旁通管道的通断。而阀门 VB 和 VBE 则负责将压气机的空气直接排放到大气中,以防止压气机发生喘振。此外,VBCC 阀可用于调节送入阴极模拟管道中的燃料流量。换热器和燃烧室之间的连接由 VM 阀管理。

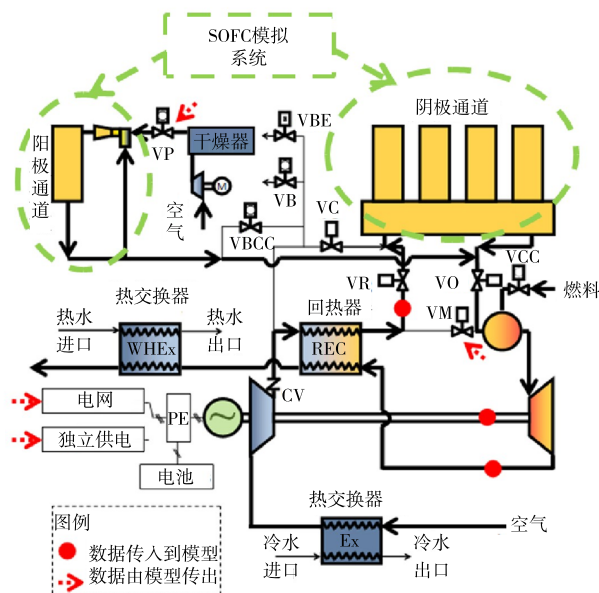


图 11 热那亚大学 SOFC-GT 混合发电系统

Fig. 11 The SOFC-GT hybrid power generation system at the university of Genoa

2.2.3 德国 DLR 的半物理仿真平台

德国 DLR 搭建了 SOFC-GT 混合发电系统的半物理仿真平台^[22]。图 12 为该平台的 3D 模型示意图。

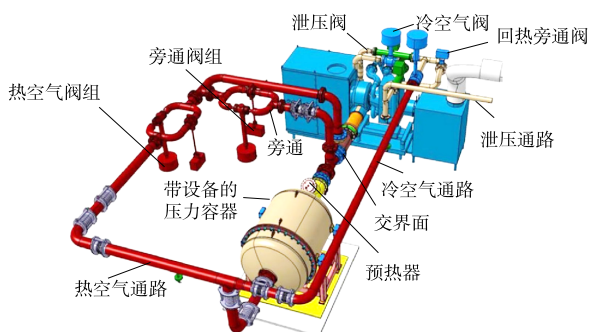


图 12 DLR 的 SOFC-GT 半物理仿真实验平台

Fig. 12 The SOFC-GT HDLS platform of the DLR

与热那亚大学的半物理仿真实验平台相似,DLR 的半物理实验设施也采用了回热型燃气轮机。此外,该半物理仿真实验平台只对 SOFC 阴极通道进行模拟。该设施包括 2 个压力容器,第一个压力容器模拟管式 SOFC 阴极通道中气体压损和逗留

时间,第二个压力容器为燃烧室,用于模拟 SOFC 阴极出口的高温排气。

图 13 展示了 DLR 的 SOFC-GT 半物理仿真实验平台的流程图。空气在经过压气机压缩后,出口有 3 个流向通道。第一条通道旨在防止压气机喘振,通过泄压阀将空气排放到大气中。在第二条通道中,空气经过冷空气阀直接进入模拟 SOFC 阴极通道的压力容器内。在第三条通道中,部分空气经回热阀换热,并从热空气阀通往模拟 SOFC 阴极通道的压力容器内。通过调节热空气旁通和冷空气旁通中的空气质量流量,就可以控制 SOFC 阴极通道的进口空气温度。

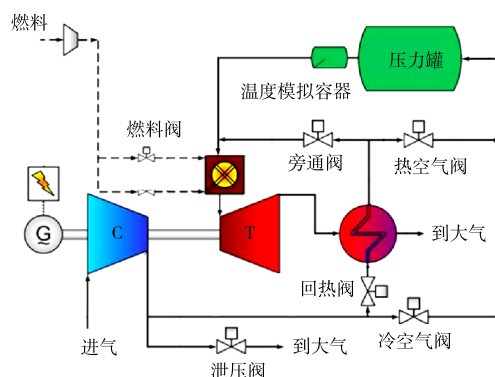


图 13 DLR 的 SOFC-GT 混合发电系统结构示意图

Fig. 13 The SOFC-GT hybrid power generation system of the DLR

3 SOFC-GT 计算机仿真研究现状

昂贵的燃料电池价格和运行维护成本以及复杂的 SOFC-GT 混合发电系统结构导致目前很少有 SOFC-GT 混合发电装置的运行和实验实例。此外,燃料电池和燃气轮机间的非耦合响应特性也为半物理实验平台的搭建以及控制软件的开发带来了困难。随着计算机技术的快速发展,大部分研究者转而使用计算机仿真建模技术来研究混合发电系统。通过仿真建模,研究者可以在较低成本和较少实验条件的限制下,对系统进行更全面的分析和优化,为混合发电系统的开发提供重要的指导和参考。

3.1 SOFC-GT 混合发电系统建模技术研究现状

SOFC-GT 混合发电系统的建模技术目前主要分为机理模型和基于数据驱动的辨识模型(数理模型)。机理模型是根据混合发电系统的工作原理,通过建立质量守恒、组分守恒、能量守恒和动量守恒方程来描述各部件的内部机理特性。这种建模方法需要对系统内部的物理过程进行深入

理解和建模,以及对各部件的参数和特性有较为准确的了解。

基于数据驱动的辨识模型则忽略了混合发电系统的内部机理,直接从输入输出数据中挖掘出系统的内部特性,建立输入输出之间的关系模型。这种建模方法基于统计学和机器学习技术,通过

处理大量的实验数据来建立模型。

3.1.1 机理模型

目前,国内外很多研究机构和学者对不同布置形式、不同容量的 SOFC-GT 混合发电系统的稳态和动态机理模型做了大量的研究,其中主要的 SOFC-GT 混合发电系统机理建模如表 1 所示。

表 1 主要的 SOFC-GT 混合发电系统机理建模

Tab. 1 The major mechanism model of SOFC-GT hybrid power generation system

研究机构	作者	主要工作
美国 NFCRC	Rao 等 ^[23]	建立了包括管式 SOFC 以及 SOFC 混合发电装置所需设备的稳态分析模型
	Roberts 等 ^[24]	1.15 MW 级 SOFC-GT 控制系统设计和动态响应
	Martinez 等 ^[25]	基于 FORTRAN 建立了 3.5 MW SOFC-GT 的动态响应模型
意大利热那亚大学	Costamagna 等 ^[26]	基于集总管式 SOFC 稳态模型的 300 kW 级 SOFC-MGT
美国国家能源技术实验室 NETL	Tucker 等 ^[27]	基于 ASPEN PLUS 开发了以煤基合成气为燃料的 SOFC-GT 稳态计算模型,并比较了不同系统热管理方案
德国宇航中心 DLR	Leucht 等 ^[28]	基于 MATLAB SIMULINK 建立了 SOFC-GT 动态模型以及系统动态响应和性能的仿真研究
	Rossi 等 ^[18]	基于物理经验简化的 SOFC-GT 混合系统的动态建模方法
新加坡南洋理工大学	Chan 等 ^[29]	基于集总管式 SOFC 的混合发电系统模型的建立以及系统部分负荷特性
清华大学	史翔翔等 ^[30]	建立了预重整、内部重整结合的平板式 SOFC 的稳态计算模型,在此基础上研究了 700 kW 级的基于双轴燃气轮机的混合发电系统的稳态性能

3.1.2 数理模型

机理模型通常是对高温燃料电池运行时内部反应方程的描述,具有一定的结果可信度和对变工况系统性能的预测。但是 SOFC-GT 混合发电系统的高度非线性、多变量、强耦合特性以及机理模型对燃料电池控制方程的计算简化,使得机理模型难以做到对 SOFC-GT 混合发电系统的精准预测。同时,在半物理仿真实验平台、系统变工况和启停控制等实时性要求较高的场合,详细建模的机理模型的计算成本过高、时间过长,并不适用于系统的快速响应预测。而基于数据驱动的建模技术直接从系统的输入输出数据中出发建立起输入与输出模型,是针对真实运行机组的 1 种更有效建模方式,由于忽略了系统内部的机理方程,将大幅度降低模型的复杂度和计算成本,提高了计算速度。对于数据驱动的建模技术,可以利用近年来发展迅速的神经网络、机器学习等技术针对系统的输入和输出数据建立精准度更高、计算速度更快的非线性模型。目前,对于燃料电池及其混合发电系统数据驱动建模方法已经有了一些初步的研究。

Jurado 将有源自回归线性建模技术应用用于 SOFC 模型的建立,得到了 SOFC 的动态模型^[31]。

Spivey 等^[32]和 Colclasure 等^[33]直接利用输入输出的数据建立起由线性状态空间方程构成的辨识模型,并将辨识出的模型应用于 SOFC 的模型预测控制。陈金伟等设计了一种基于最小二乘支持向量机算法(LS-SVM)的数据驱动模型的 SOFC-GT 系统的混合模型^[12]。

3.2 SOFC-GT 混合发电系统的复杂耦合循环研究

SOFC-GT 混合发电系统能够与朗肯循环、煤气化(IGCC)、CO₂ 捕集技术、超临界 CO₂ 布雷顿循环、制氢技术等热力系统技术相耦合,极大地拓宽了 SOFC-GT 混合发电系统的应用范围与效率。表 2 简单阐述了主要的 SOFC-GT 耦合循环发电系统。

3.3 SOFC-GT 混合发电系统的燃料研究现状

SOFC 的高工作温度使得它对于燃料并不敏感,相比其他种类的燃料电池,SOFC 的燃料种类要更加广泛,包括天然气重整制氢、水热解制氢、汽油、柴油重整和生物质气化等^[5]。表 3 给出了主要的 SOFC-GT 混合发电系统的燃料相关研究。SOFC 可以与多种燃料生产方式相结合形成从燃料生产到燃料消耗产电的一体化系统,减少了燃料运输的消耗,而燃料电池和多种燃料匹配耦合发电的可能性也为未来高效清洁电厂的设计运行提供了方案。

表 2 主要的 SOFC-GT 耦合循环发电系统

Tab. 2 The main SOFC-GT coupled cycle power generation system

耦合系统	作者	主要工作
SOFC-GT-Rankine	田松峰等 ^[34]	建立了 SOFC-GT-ST-ORC 和氨水吸收式制冷循环液化回收 CO ₂ 的热电联产系统
	阎哲泉等 ^[35]	建立了 SOFC-GT-ORC 联合循环,研究了燃料摩尔流量、压气机压比、蒸汽与碳物质的量比等参数的影响
IGCC+SOFC-GT	Zouhri 等 ^[36]	IGCC-SOFC 混合系统的焓分析以及不同合成气混合物下的焓损和焓效率
SOFC-GT-ST+CO ₂ 捕集	田松峰等 ^[37]	气体再循环比对混合发电系统的影响,贫液温度、烟气温度、吸收塔和再生塔压力对碳捕集系统的影响
SOFC-GT-ST	Pirkandi 等 ^[38]	系统研究了 SOFC-GT-ST 混合发电系统中不同蒸汽循环配置对系统发电效率的影响
SOFC-GT-逆布雷顿循环	Xie 等 ^[39]	设计了最大发电功率 523.1 kW 的 SOFC-GT 耦合逆布雷顿循环(有机闪蒸循环在近大气压条件下运行,涡轮在低于大气压条件下膨胀做功)
	Cardenas 等 ^[40]	基于 Aspen Plus 设计了耦合逆布雷顿循环的新型常压 SOFC-GT 混合发电系统,大幅简化了系统结构的同时,还保证了混合系统的高发电效率
SOFC-GT-超临界二氧化碳循环	Xia 等 ^[41]	设计并优化了 SOFC-GT-SCO ₂ (超临界 CO ₂)的混合发电系统,其中 SCO ₂ 循环置于 SOFC/GT 子系统内部,并利用 SCO ₂ 循环的余热加热系统空气
	Cao 等 ^[42]	研究分析了 SOFC-GT 耦合分流再压缩超临界 CO ₂ 布雷顿循环的混合系统发电性能
SOFC-GT+制氢	Li 等 ^[43]	基于 Aspen Plus 对 200 MW 级 SOFC-GT 耦合制氢和压缩空气储能混合发电系统进行了分析
	Chitgar 等 ^[44-45]	设计并优化了 2.5 MW 级 SOFC-GT 联合多效蒸馏、有机闪蒸循环以及质子交换膜电解水制氢技术的混合发电系统

表 3 SOFC-GT 混合发电系统燃料相关研究

Tab. 3 Research on fuels for SOFC-GT hybrid power generation system

研究燃料	作者	主要工作
甲醇	张钟等 ^[46]	建立了基于甲醇燃料的 SOFC-GT-ORC 有机朗肯系统并对系统进行了能量分析、经济分析和焓分析
航空丙烷	Chen 等 ^[47]	分析了压比、燃料利用率、燃料分配对 SOFC-GT 混合动力系统性能和耗油率的影响
生物质气体	Ding 等 ^[48]	考虑生物质气体中 CH ₄ 、H ₂ 、CO、CO ₂ 、N ₂ 和 H ₂ O 的含量波动对 IT-SOFC-GT 混合系统热力学特性的影响
	耿孝儒等 ^[49]	基于生物质气体,研究了燃料质量流量、空气质量流量等参数对 SOFC-GT 混合系统的影响
	Huang 等 ^[50]	不同燃料种类(CH ₄ 、CO 和 H ₂)对 SOFC-GT 混合发电系统性能的影响并在安全运行范围内进行了系统优化
	Finocchi 等 ^[51]	基于生物质气体对 SOFC-GT 混合发电系统性能的波动性提出了稳健优化方案
氨燃料	马壮等 ^[52]	建立了基于氨分解制氢的 SOFC-GT 混合发电系统的稳态模型,利用焓分析对比了天然气重整制氢和氨分解制氢为燃料的混合发电系统性能
天然气掺氢	孙浩哲等 ^[53]	建立了风光发电、制氢设备、SOFC-GT 以及 CO ₂ 回收的耦合循环,研究了掺氢比对系统效率和发电成本的影响
	Yang 等 ^[54]	提出了一种以液化天然气为燃料、回收 CO ₂ 的分布式能源系统 SOFC-GT-RC 的稳态热力学模型

3.4 控制系统设计及方法

SOFC-GT 混合发电系统包含多个部件且各参数之间相互耦合,为保证系统安全高效运行,燃料电池工作温度、燃料电池工作电压、电池内温度和压力梯度、透平入口温度、喘振裕度等诸多参数要限制在合理范围内,给混合发电系统控制策略的设计带来很大难度。对于 SOFC-GT 混合发电系统,其动态性能参数和主要控制变量如表 4 所示。SOFC-GT 混合发电系统的控制设计目标如下:(1) 系统安全运行,避免可能损坏燃料电池或系统的情况,如压气机喘振;(2) 快速负载跟踪和高效率;(3) 燃料电池的长寿命;(4) 控制外部影响,如压气机结垢或燃料电池退化。

表 4 系统动态性能参数和控制变量

Tab. 4 System dynamic performance parameters and control variables	
系统性能参数	主要控制变量
SOFC 工作温度	空气流量
透平入口温度 T_{it}	空气流量、燃烧器补燃量
燃料利用率、电池电压	燃料流量
SOFC 的汽碳比	喷射器工作压力、蒸汽流量
SOFC 阴极和阳极间压差	喷射器工作压力
压气机喘振裕度	旁通阀开度

依据上述 SOFC-GT 混合发电系统的控制目标可设计 SOFC-GT 控制系统,SOFC-GT 控制系统的主要初步设计方法分为五个方面,分别是 SOFC 功

率控制、SOFC 温度控制、燃料利用率控制、转速控制和透平进口温度控制。下面对每种控制进行阐述:

(1) SOFC 功率控制:通过控制 SOFC 电流,消除 SOFC 所需产生的功率与实际功率之间的差异,达到快速响应。

(2) SOFC 温度控制:通过旁通路质量流量对 SOFC 工作温度进行控制。

(3) 燃料利用率控制:通过燃料阀的开度来控制燃料质量流率。

(4) 转速控制:通过 SOFC 温度可以控制转速设定值,通过转速设定值可以控制燃气轮机的转速。

(5) 透平进口温度控制:透平进口温度低于燃料电池阴极出口排气温度时,需要在压气机和透平间增加冷气旁通阀来控制透平进口温度;透平进口温度高于燃料电池阴极出口排气温度时,需要通过在燃料电池下游添加后燃烧室,以进一步反应未完全反应气体,从而控制透平进口温度,燃烧时可额外

增加燃料以提高温度。

以上述控制系统设计思路为基础,分析系统的输入输出耦合程度,利用相对阶数的解耦矩阵进行模型线性化,利用比例积分微分控制器(PID)进行鲁棒控制设计,以及采用模型预测控制(MPC)等非线性自适应控制策略形成快速控制模型。此外,在此基础上还可以进一步考虑 SOFC-GT 多系统的并联长期运行管理、燃料电池在 SOFC-GT 混合发电系统中的退化以及 SOFC-GT 负载跟随时的控制策略等,使 SOFC-GT 混合发电系统更加高效可靠、鲁棒性更强、系统运行周期更长。

国内外研究者针对 SOFC-GT 混合发电系统控制展开了深入的研究,提出了许多不同的 SOFC-GT 混合发电系统控制的布置方式以及相对应的 PID 或 MPC 控制,针对系统的安全运行、快速响应、高效率以及减缓燃料电池退化速度等方面提出了不同的控制方法^[55]。国内外研究者所提出的系统控制方法如表 5 所示。

表 5 系统控制方法

Tab. 5 System control methods

研究机构	作者	主要工作
NETL	Emami 等 ^[13-14]	通过模拟 300 kW 级 SOFC-GT 混合发电系统的性能,找到满足稳定性、增益和相位裕度约束的 PID 控制器系数范围
	Zaccaria 等 ^[15]	开发了与 HyPer 相耦合的预燃室模型并给出了控制策略以在不同操作条件下保持恒定的阴极入口温度
	Tsai 等 ^[16]	使用在线前馈人工神经网络(ANN)控制混合燃料电池燃气轮机(FC-GT)模拟装置中各种执行器的可行性
	Mclarty 等 ^[17]	针对 SOFC-GT 混合发电系统提出不同控制方案,来减轻燃料电池的空间温度变化和载荷跟踪期间的压气机失速风险
NFCRC	Roberts 等 ^[24]	针对 15 MW 级 SOFC-GT 混合系统设计了控制器框架结构
热那亚大学	Ferrari 等 ^[19]	基于半物理仿真实验平台对模型预测控制(MPC)与 PID 控制进行了实验比较
	Larosa 等 ^[20]	外界环境温度对 SOFC-GT 系统中 MPC 与传统 PID 控制的动态响应影响,MPC 控制流程
	Larosa 等 ^[21]	针对加压 PSOFC-GT 系统对比了 MPC 控制、MPC-PID 结合控制和传统 PID 控制的变负荷动态响应
	Rossi 等 ^[56]	基于 1 MW 级的 SOFC-GT 系统研究了模型预测控制(MPC)对不同电池退化系数下并联发电系统的功率调节
美国 Virginia	Xu 等 ^[57]	基于 SOFC-GT 的动态集总模型,提出了 SOFC-GT 自主电力系统中补偿负载扰动的 PI 控制
上海交通大学	Wu 等 ^[58]	设计了基于动态 RBF 神经网络辨识模型的自适应 PID 解耦控制器
	Wang 等 ^[59]	提出了一种结合多回路控制和协调保护回路的控制方法,同时引入了模糊逻辑理论以提高 SOFC-GT 混合动力系统的瞬态稳定性和负荷跟踪能力

3.5 系统变负荷策略和性能

国内外研究学者针对高温燃料电池/燃气轮机混合发电系统开展了大量的变工况控制策略和性能研究,其中利用稳态燃料电池模型以及压气机、涡轮的变工况特性曲线所建立的分析方法是系统的稳态变工况性能,仅能反映系统各主要参数在部分负荷时的变化,无法反映负荷变化期间的参数实时变化趋势。对系统各部件构建动态计算方程并基于该动态模型分析系统的方式是系统的动态变工况性能分析,它弥补了稳态模型无法显示参数动态变化的不足,但与此

同时会增加分析系统所需的计算量,通常系统稳态模型用来分析系统在部分负荷时的性能,系统动态模型用来分析系统随负荷变化的快速响应程度以及变负荷期间的控制鲁棒性。

此外,SOFC-GT 混合发电系统需要逆变器来转换由燃料电池产生的直流电。因此,SOFC-GT 允许燃气轮机以可变转速运行。针对 SOFC-GT 混合发电系统在不同变负荷运行策略下的系统性能,国内外学者开展了广泛研究。表 6 给出了 SOFC-GT 混合发电系统的变负荷策略和性能。

表 6 SOFC-GT 混合发电系统变负荷策略和性能

Tab. 6 Variable load strategy and performance of SOFC-GT hybrid power generation system

研究机构	作者	主要工作
NFCRC	Martinez 等 ^[25]	基于 Fortran 代码开发了 3.5 MW 长途货车 SOFC-GT 的动态模型,分析了 H ₂ 、天然气和柴油重整在变负荷期间的动态系统性能
NETL	Zhang 等 ^[60]	基于 Hyper 半物理实验平台测试了 SOFC-GT 对快速负载变化的跟踪能力,整个系统对 50% 变负载实验测试的响应速度在 10 s 以内
热那亚大学	Larosa 等 ^[20]	研究了 100 kW~1 MW 级混合系统中径流式压气机和涡轮设计特性,变负荷策略:(1)控制燃料流速;(2)控制燃料流速和涡轮转速
日本东京大学	Kimijima 等 ^[61]	30 kW 级 SOFC-GT 微型混合发电系统的设计点和部分负荷特性,变负荷策略:恒定转速和可变涡轮转速
米兰理工大学	Campanari 等 ^[62]	250 kW 级 SOFC-GT 混合发电系统全负荷和部分负荷性能分析,变负荷策略:保持恒定涡轮转速以及保持恒定涡轮进口温度
重庆大学	Huang 等 ^[63]	基于 Aspen Plus 系统评估了基于天然气重整的 100 kW 级 SOFC-GT 混合系统在变运行温度(635~835 ℃)和不同燃料利用率下对系统性能的影响
曼彻斯特大学	Huang 等 ^[64]	针对涡轮与压缩机的匹配性要求,系统建模并评估了 SOFC-GT 混合发电系统的设计和非设计工况下的系统性能

4 应用方向和延伸技术

国内外学者在对高温燃料电池/燃气轮机混合发电技术深入研究的同时,也提出了一些具体的应用方向和延伸技术,下面对此进行简单阐述。

4.1 高效清洁的未来发电系统:SOFC-GT、煤气化、CO₂ 分离和回收、制氢技术联合循环

图 14 所示为集成 SOFC-GT、煤气化、CO₂ 分离和回收、制氢技术的一体化联合循环发电厂^[65]。在

未来的分布式发电中,煤和其他生物质气体进入气化炉并在气体净化后一部分进入制氢系统,通过氢气分离膜分离并压缩后由管道运输,另一部分作为燃料进入 SOFC 电池堆反应发电,燃气轮机、汽轮机和余热锅炉对 SOFC 阴极热空气余热进行利用,阳极尾气通过 CO₂ 捕集系统回收利用,系统发电效率在 60% 以上,能源利用率高,CO₂ 排放率大大降低,整个系统发电成本低,生产的氢气可用于新能源行业,是极具发展前景的未来发电厂布置方式。

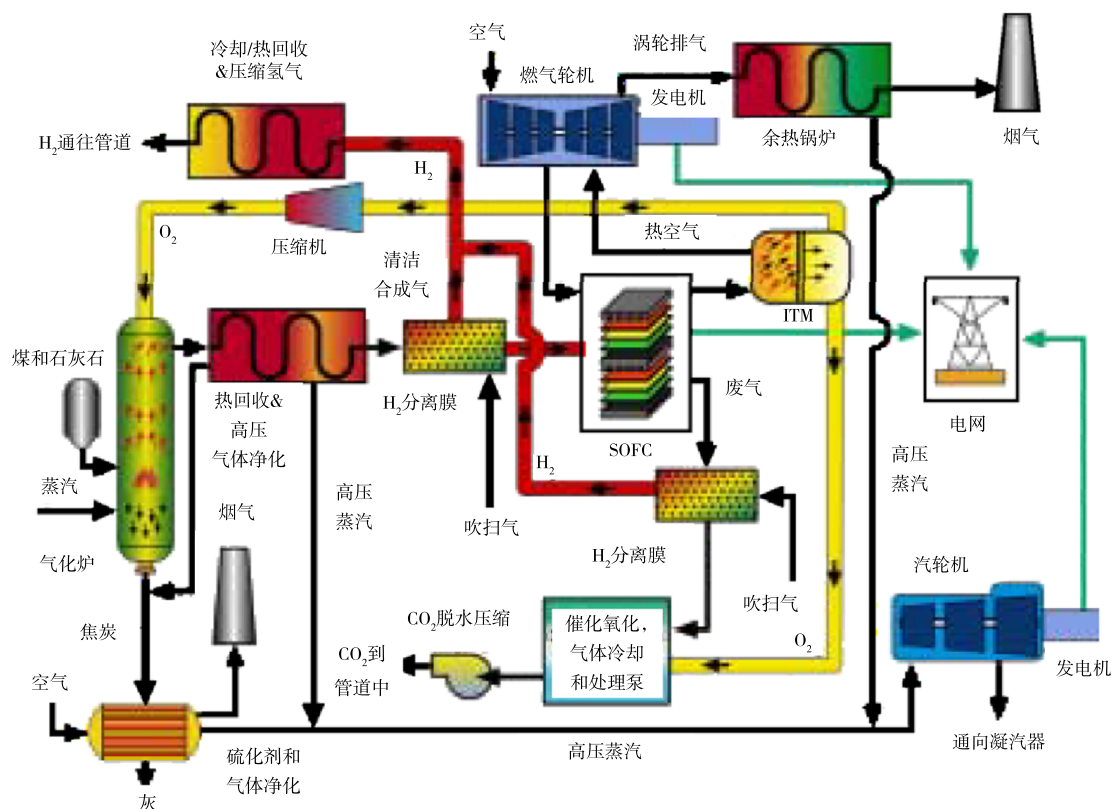
图 14 集成 SOFC-GT、煤气化、CO₂ 分离和回收、制氢联合循环

Fig. 14 The integrated combined cycle of SOFC-GT, coal gasification, carbon dioxide separation and recovery, and hydrogen production

4.2 农村微电网

微电网是将分布式电源接入电网的最有效方式之一。微电网主要由多个可再生能源、存储系统、负载和电源转换器组成,如图15所示^[66]。

微电网的主要特点是它能够与主电网连接或隔离工作,这一优势使得微电网特别适用于一些农村地区的电网。农村微电网存在的问题是传统的生物气发电装置的发电效率很低,并且经常产生太多未利用的热量。而由固体氧化物燃料电池和燃气轮机组成的混合发电系统可以克服这一缺点,其发电效率可高达70%以上。

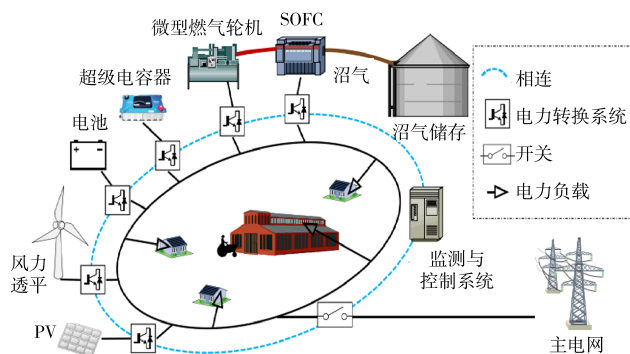


图15 农村微电网示意图

Fig. 15 Schematic diagram of rural microgrid

4.3 发展与SOFC相匹配的先进燃烧室设计

在航天领域的应用中,Roberts等提出了一种固体氧化物燃料电池与涡轮喷气式发动机的混合发电系统(SOFC-TJE)^[67]。在这个系统中,SOFC电堆被用来替代传统的燃烧室,而SOFC下游的燃烧室则是为了进一步反应未完全反应的气体。SOFC与燃烧器的集成结构消除了对换热器、鼓风机和管道系统等重型设备的需要,从而减少了系统的总体积和质量。这种方法提高了比功率密度和效率,与涡轮喷气式发动机(TJE)燃烧室集成的SOFC燃烧室展示了节省燃料的可行性以及发展前景。图16展示了航空SOFC-TJE混合发电系统的结构。

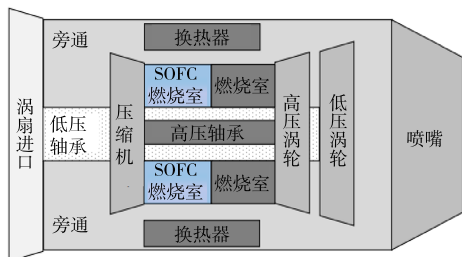


图16 航空SOFC-TJE混合发电系统结构

Fig. 16 The structure of the aeronautical SOFC-TJE hybrid power generation system

在燃烧发电领域,Bücheler等^[68]设计了一种单级射流稳定燃烧室,该燃烧室整合了燃气轮机燃烧室及SOFC后燃烧器的功能。图17展示了燃烧室的初步设计,其中12个环形布置的燃料和空气喷嘴在燃烧室内构建了内部再循环区。在阳极燃料和阴极空气的混合段采用渐缩通道,以防止回流自燃。

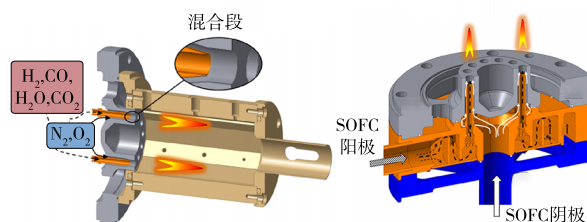


图17 SOFC排气后燃烧室初步设计示意图

Fig. 17 Preliminary design diagram of the combustion chamber after SOFC exhaust

为测试常压SOFC燃烧系统,在没有SOFC的情况下,提供了真实的阳极和阴极气流。如图18所示,通过预热空气和氮气的混合物可以简单地实现阴极通道的气体条件,而阳极气流则通过燃烧室提供必要的阳极入口温度和气体成分。

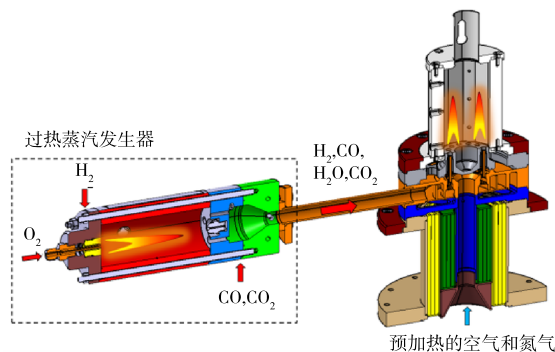


图18 带有前置过热蒸汽发生器和空气预热器的常压燃烧室

Fig. 18 Atmospheric combustor test rig with preceding superheated steam generator (SHSG) and air preheater

5 面临的问题和挑战

目前,SOFC-GT混合发电系统还未得到广泛应用,离商业化还有一定的差距,主要的技术挑战在于燃料电池的材料成本与制造工艺、系统的稳定性控制、变工况策略,以及快速负载跟随和快速启停等方面。此外,为建立未来清洁高效的一体化发电站,还需要将SOFC-GT混合发电系统和其他配套技术如燃料重整、煤气化、CO₂回收、H₂储存与运输相结合,这也加大了系统设计、控制以及商业化应用的难度。目前问题和挑战主要包括:

(1) SOFC-GT 混合发电系统的建模与仿真、变负荷性能与控制策略等技术。目前,SOFC-GT 混合发电系统的仿真建模技术已经得到了较为完善的发展。在国外,对于 SOFC-GT 系统的变工况性能与控制策略的研究较为广泛,然而对于 SOFC-GT 的启停过程与快速响应还有待进一步深入研究。在国内,控制策略的研究还处于初步阶段,其中较多的涉及到混合发电系统的单个部件或单一变量的控制效果,极少涉及到整个混合发电系统的综合控制。

(2) 半物理仿真实验平台。国内在 SOFC-GT 混合发电系统的半物理仿真技术上与国外存在较大差距,应加快开发 SOFC-GT 混合发电系统的半物理仿真实验平台和相应的仿真模拟软件。

(3) 与高温燃料电池和涡轮相匹配的先进燃烧室设计。燃烧室作为连接 2 个动态响应相差较大系统的中间部件,安全稳定高效地燃烧未完全反应气体是设计燃烧室的首要目标。其次,对于燃烧室内的布置、防止废气自燃、耦合其他先进燃烧技术等都是 SOFC-GT 混合发电系统发展过程中亟需解决的问题。

(4) 高温燃料电池模块的向上扩展化技术。不同的电池结构和堆叠方式都是在设计高温燃料电池/燃气轮机混合发电系统中所要考虑的。此外,根据电站系统不同的功率需求,在电池模块向上拓展化的过程中不可避免地会涉及电池的热管理、电池模块间的固定耦合和材料等问题。

(5) 先进透平技术。透平是 SOFC-GT 系统中高温燃料电池排气进一步做功发电的关键部件之一,发展与 SOFC 相匹配的先进透平技术,依据燃料电池电堆功率设计压气机和透平是提高发电效率、发电功率和可靠性的关键途径之一。

(6) 与 CO₂ 回收、煤气化、制氢等技术相结合。SOFC-GT 与煤气化、CO₂ 分离和回收、制氢技术联合循环是未来高效清洁电厂的可行设计方式之一,但同时复杂的系统耦合及控制策略将是极大的挑战。

6 结论

系统介绍了高温固体氧化物燃料电池/燃气轮机混合发电系统的概念及基本循环结构,梳理了国内外高温固体氧化物燃料电池/燃气轮机的示范性工程、半物理仿真实验平台和计算机仿真分析。最后给出了该技术的未来应用方向和延伸技术。

高温固体氧化物燃料电池/燃气轮机混合发电系统具有较高的发电效率及广泛的燃料适应性,已

成为未来高效、清洁的发电技术。该系统可与煤气化、碳捕集、制氢等技术相耦合,形成联合循环发电系统,这将成为未来分布式发电厂的典型布局,并在零碳时代背景下对新型电厂的建设产生显著推动作用。

参考文献:

- [1] EIA. International energy outlook 2023[R]. Washington, DC, USA: US Energy Information Administration (EIA), 2023.
- [2] 国务院. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[R/OL]. [2024-10-12]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [3] 张兄文, 李国君, 李军, 等. 高温燃料电池/燃气轮机混合循环发电技术[J]. 燃气轮机技术, 2005, 18(1): 23-29.
ZHANG Xiongwen, LI Guojun, LI Jun, et al. The high temperature fuel cell/gas turbine hybrid power generation technology[J]. Gas Turbine Technology, 2005, 18(1): 23-29.
- [4] GRILLO O, MAGISTRI L, MASSARDO A F. Hybrid systems for distributed power generation based on pressurisation and heat recovering of an existing 100 kW molten carbonate fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2003, 115(2): 252-267.
- [5] 窦筱欣, 刘朝, 田辉, 等. 固体氧化物燃料电池/燃气轮机混合模式的统计综述[J]. 燃气轮机技术, 2010, 23(2): 5-11.
DOU Xiaoxin, LIU Zhao, TIAN Hui, et al. A statistic review of hybrid modes for solid oxide fuel cell/gas turbine power generation[J]. Gas Turbine Technology, 2010, 23(2): 5-11.
- [6] 连琰珂, 明平文, 蔡黎明. 固体氧化物燃料电池/燃气轮机混合动力系统建模仿真研究进展[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(3): 26-39.
LIAN Yanke, MING Pingwen, CAI Liming. Recent research progresses of mathematical modeling and simulation of solid oxide fuel cell/gas turbine (SOFC/GT) hybrid systems[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(3): 26-39.
- [7] SMITH T P. Hardware simulation of fuel cell/gas turbine hybrids[D]. Atlanta, USA: Georgia Institute of Technology, 2007.
- [8] VEYO S E, SHOCKLING L A, DEDERER J T, et al. Tubular solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid cycle power systems: status[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(4): 845-849.

- [9] KOBAYASHI Y, ANDO Y, KISHIZAWA H, et al. Recent progress of SOFC-GT combined system with tubular type cell stack at MHI[J]. ECS Transactions, 2013, 51(1): 79-86.
- [10] YOSHIDA S, KABATA T, NISHIURA M, et al. Development of SOFC-GT combined cycle system with tubular type cell stack[J]. ECS Transactions, 2011, 35(1): 105-111.
- [11] LIM T H, SONG R H, SHIN D R, et al. Operating characteristics of a 5 kW class anode-supported planar SOFC stack for a fuel cell/gas turbine hybrid system [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(3): 1076-1083.
- [12] 陈金伟. 基于引射回流的固体氧化物燃料电池—燃气轮机系统建模与控制策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [13] EMAMI T, TSAI A, TUCKER D. Decentralized PID controller design for SOFC-GT[C]//Proceedings of ASME 2020 Power Conference Collocated with the 2020 International Conference on Nuclear Engineering. [S. L.]; ASME, 2020: V001T03A001.
- [14] EMAMI T, TUCKER D, WATKINS J. Uncertain gain and time-delay control of 300 kW SOFC-GT [C]//Proceedings of ASME 2021 Power Conference. [S. L.]; ASME, 2021: V001T08A003.
- [15] ZACCARIA V, BRANUM Z, TUCKER D. Fuel cell temperature control with a precombustor in SOFC gas turbine hybrids during load changes[J]. Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, 2017, 14(3): 031006.
- [16] TSAI A, EMAMI T, TUCKER D. Neural network for balance of plant SOFC-GT actuator control[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. [S. L.]; ASME, 2020: V005T05A001.
- [17] MCLARTY D, BROUWER J, SAMUELSEN S. Fuel cell-gas turbine hybrid system design part II: dynamics and control[J]. Journal of Power Sources, 2014, 254: 126-136.
- [18] ROSSI I, TRAVERSO A, HOHLOCH M, et al. Physics-based dynamic models of three SOFC/GT emulator test rigs[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2018, 140(5): 051702.
- [19] FERRARI M L, ROSSI I, SORCE A, et al. Advanced control system for grid-connected SOFC hybrid plants: experimental verification in cyber-physical mode[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141(9): 091019.
- [20] LAROSA L, TRAVERSO A, ZACCARIA V. Ambient temperature impact on pressurized SOFC hybrid systems [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. Montreal, Canada; ASME, 2015: V00 3T06A006.
- [21] LAROSA L, TRAVERSO A, FERRARIM L, et al. Pressurized SOFC hybrid systems: control system study and experimental verification[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137(3): 031602.
- [22] HOHLOCH M, HUBER A, AIGNER M. Experimental investigation of a SOFC/MGT hybrid power plant test rig: impact and characterization of a fuel cell emulator[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Seoul, Korean; ASME, 2016: V003T06 A018.
- [23] RAO A D, SAMUELSEN G S. Analysis strategies for tubular solid oxide fuel cell based hybrid systems [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(3): 503-509.
- [24] ROBERTS R A, BROUWER J, SAMUELSEN G S. Fuel cell/gas turbine hybrid system control for daily load profile and ambient condition variation[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(1): 012302.
- [25] MARTINEZ A S, BROUWER J, SAMUELSEN G S. Feasibility study for SOFC-GT hybrid locomotive power: part I. development of a dynamic 3.5 MW SOFC-GT Fortran model [J]. Journal of Power Sources, 2012, 213: 203-217.
- [26] COSTAMAGNA P, MAGISTRI L, MASSARDO A F. Design and part-load performance of a hybrid system based on a solid oxide fuel cell reactor and a micro gas turbine[J]. Journal of Power Sources, 2001, 96(2): 352-368.
- [27] TUCKER D, VANOSDOL J, LIESE E, et al. Evaluation of methods for thermal management in a coal-based SOFC turbine hybrid through numerical simulation[J]. Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2012, 9(4): 041004.
- [28] LEUCHT F, BESSLER W G, KALLO J, et al. Fuel cell system modeling for solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid power plants, part I: modeling and simulation framework [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(3): 1205-1215.
- [29] CHAN S H, HO H K, TIAN Y. Modelling for part-load operation of solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid power plant [J]. Journal of Power Sources, 2003, 114(2): 213-227.

- [30] 史翊翔,蔡宁生,李振山. SOFC/Micro-GT 混合循环系统性能分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(8): 1142-1145.
SHI Yixiang, CAI Ningsheng, LI Zhenshan. Performance analysis of SOFC/micro-GT hybrid system [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2005, 45(8): 1142-1145.
- [31] JURADO F. Modeling SOFC plants on the distribution system using identification algorithms[J]. Journal of Power Sources, 2004, 129(2): 205-215.
- [32] SPIVEY B J, EDGAR T F. Dynamic modeling, simulation, and MIMO predictive control of a tubular solid oxide fuel cell[J]. Journal of Process Control, 2012, 22(8): 1502-1520.
- [33] COLCLASURE A M, SANANDAJI B M, VINCENT T L, et al. Modeling and control of tubular solid-oxide fuel cell systems. I: physical models and linear model reduction[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(1): 196-207.
- [34] 田松峰,刘诗尧,刘亚轩,等. 耦合氨水吸收式制冷液化回收 CO₂ 的 SOFC/GT/ST/ORC 系统研究[J]. 动力工程学报, 2023, 43(6): 724-734.
TIAN Songfeng, LIU Shiyao, LIU Yaxuan, et al. Study on SOFC/GT/ST/ORC system for liquefaction and recovery of CO₂ by coupling ammonia absorption refrigeration[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(6): 724-734.
- [35] 阎哲泉,王漫,王江峰,等. 基于固体氧化物燃料电池的有机工质余热发电联合系统特性的理论研究[J]. 动力工程学报, 2013, 33(7): 560-566.
YAN Zhequan, WANG Man, WANG Jiangfeng, et al. Theoretical study on a waste heat power generation system driven by SOFC based on organic working medium[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2013, 33(7): 560-566.
- [36] ZOUHRI K. Exergy analysis of combined cycle of SOFC-gas turbine using coal-base syngas at different mixture compositions [C]//Proceedings of ASME 2014 12th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology Collocated with the ASME 2014 8th International Conference on Energy Sustainability. Boston, USA; ASME, 2014; V001 T03A002.
- [37] 田松峰,张都,李正宽,等. 基于 SOFC-GT-ST 的双塔解吸 CO₂ 捕集工艺模拟研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(1): 71-81.
TIAN Songfeng, ZHANG Du, LI Zhengkuan, et al. Simulation study on CO₂ capture process by double tower desorption based on SOFC-GT-ST[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(1): 71-81.
- [38] PIRKANDI J, PENHANI H, MAROUFI A. Thermodynamic analysis of the performance of a hybrid system consisting of steam turbine, gas turbine and solid oxide fuel cell (SOFC-GT-ST) [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 213: 112816.
- [39] XIE Junen, YAN Peigang, LIU Yang, et al. Analysis of the thermodynamic performance of the SOFC-GT system integrated solar energy based on reverse Brayton cycle[J]. Energy, 2024, 308: 132873.
- [40] CARDENAS DE LA CRUZ C T, HERZ G, REICHELTL E, et al. Modeling of a novel atmospheric SOFC/GT hybrid process and comparison with state-of-the-art SOFC system concepts [J]. Fuel Cells, 2020, 20(5): 608-623.
- [41] XIA Minjie, YAO Shouguang, YING Chao. Analysis and multi-objective optimization of SOFC/GT/SCO₂ hybrid power system based on thermodynamics and economics [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 232: 121033.
- [42] CAO Runqing, WANG Youna, WU Zhongliang, et al. Thermodynamic analysis and optimization of a supercritical CO₂ power cycle driven by a SOFC-GT hybrid system[C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2024; Turbomachinery Technical Conference and Exposition. London, England; ASME, 2024; V011 T28A016.
- [43] LI Bo, CHEN Heng, LI Jinhang, et al. Thermodynamic and economic analysis of a novel multi-generation system integrating solid oxide electrolysis cell and compressed air energy storage with SOFC-GT [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 293: 117552.
- [44] CHITGAR N, EMADI M A. Development and exergoeconomic evaluation of a SOFC-GT driven multi-generation system to supply residential demands: electricity, fresh water and hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46 (34): 17932-17954.
- [45] CHITGAR N, MOGHIMI M. Design and evaluation of a novel multi-generation system based on SOFC-GT for electricity, fresh water and hydrogen production[J]. Energy, 2020, 197: 117162.
- [46] 张钟,安吉振,潘佩媛,等. 基于甲醇重整的燃料电池与有机朗肯循环耦合热电联产系统性能分析[J]. 动力工程学报, 2023, 43(8): 1068-1076.
ZHANG Zhong, AN Jizhen, PAN Peiyuan, et al. Performance analysis of combined heat and power

- system coupling fuel cell and organic Rankine cycle based on methanol reforming[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2023, 43 (8): 1068-1076.
- [47] CHEN Zhaoyi, LIANG Fengli, MAO Junkui, et al. Optimization design of SOFC-GT hybrid power system for aviation application[J]. *Energies*, 2024, 17 (15): 3681.
- [48] DING Xiaoyi, LÜ Xiaojing, WENG Yiwu. Fuel-adaptability analysis of intermediate-temperature-SOFC/gas turbine hybrid system with biomass gas [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2021, 143(2): 022104.
- [49] 耿孝儒, 吕小静, 翁一武. 基于生物质气的固体氧化物燃料电池-燃气轮机混合动力系统的性能分析[J]. *动力工程学报*, 2015, 35(2): 166-172.
- GENG Xiaoru, LÜ Xiaojing, WANG Yiwu. Performance analysis of an SOFC-GT hybrid system fueled with biomass[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2015, 35(2): 166-172.
- [50] HUANG Y, TURAN A. Fuel sensitivity and parametric optimization of SOFC-GT hybrid system operational characteristics[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2019, 14: 100407.
- [51] FINOCCHI P, ZACCARIA V, FERRARIM L, et al. Optimization under uncertainties of a biogas-fueled SOFC-GT hybrid system [C]//*Proceedings of ASME Turbo Expo 2022: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. Rotterdam, Netherlands: ASME, 2022: V004T06A017.
- [52] 马壮, 秦江, 李成杰, 等. 基于氨分解的 SOFC-GT 系统建模及分析[J]. *动力工程学报*, 2023, 43(1): 109-116.
- MA Zhuang, QIN Jiang, LI Chengjie, et al. Modeling and analysis of SOFC-GT system based on ammonia decomposition[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2023, 43(1): 109-116.
- [53] 孙浩哲, 张辉, 盛明珺, 等. 基于 SOFC/GT 和掺氢天然气的综合能源系统性能研究及经济性分析[J]. *动力工程学报*, 2024, 44(9): 1493-1502.
- SUN Haozhe, ZHANG Hui, SHENG Mingjun, et al. Performance study and economic analysis of integrated energy systems based on SOFC/GT and hydrogen-blended natural gas [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2024, 44 (9): 1493-1502.
- [54] YANG Xiaoyu, ZHAO Hongbin, HOU Qinlong. Thermodynamic performance study of the SOFC-GT-RC system fueled by LNG with CO₂ recovery[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2019, 141 (12): 122005.
- [55] YUAN Qiao, LI Xiongzhuan, HAN Shuo, et al. Performance analysis and optimization of SOFC/GT hybrid systems: a review[J]. *Energies*, 2024, 17 (5): 1265.
- [56] ROSSI I, ZACCARIA V, TRAVERSO A. Advanced control for clusters of SOFC/GT hybrid systems[C]//*Proceedings of ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. Charlotte, USA: ASME, 2017: V003T06A022.
- [57] XU Ming, WANG C, QIU Yang, et al. Control and simulation for hybrid solid oxide fuel cell power systems[C]//*Proceedings of the Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. Dallas, USA: IEEE, 2006: 7.
- [58] WU Xiaojuan, HUANG Qin, ZHU Xinjian, et al. Temperature control of a SOFC and MGT hybrid system[J]. *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 2011, 8(5): 051009.
- [59] WANG Xusheng, LÜ Xiaojing, MI Xicong, et al. Coordinated control approach for load following operation of SOFC-GT hybrid system[J]. *Energy*, 2022, 248: 123548.
- [60] ZHANG Biao, MALONEY D, HARUN N F, et al. Rapid load transition for integrated solid oxide fuel cell-gas turbine (SOFC-GT) energy systems: a demonstration of the potential for grid response[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 258: 115544.
- [61] KIMIJIMA S, KASAGI N. Performance evaluation of gas turbine-fuel cell hybrid micro generation system[C]//*Proceedings of ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air*. Amsterdam, Netherlands: ASME, 2002: 351-360.
- [62] CAMPANARI S, ASSISTANT R. Full load and part-load performance prediction for integrated SOFC and microturbine systems[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2000, 122 (2): 239-246.
- [63] HUANG Shanglong, YANG Chen, CHEN Hao, et al. Coupling impacts of SOFC operating temperature and fuel utilization on system net efficiency in natural gas hybrid SOFC/GT system[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2022, 31: 101868.
- [64] HUANG Yu, TURAN A. Mechanical equilibrium operation integrated modelling of hybrid SOFC-GT systems: design analyses and off-design optimization [J]. *Energy*, 2020, 208: 118334.
- [65] WILLIAMS M C, STRAKEY J P, SURDOVAL W

- A, et al. Solid oxide fuel cell technology development in the U. S. [J]. Solid State Ionics, 2006, 177(19/20/21/22/23/24/25): 2039-2044.
- [66] BAUDOUIN S, VECHIU I, CAMBLONG H, et al. Sizing and control of a solid oxide fuel cell/gas micro-turbine hybrid power system using a unique inverter for rural microgrid integration[J]. Applied Energy, 2016, 176: 272-281.
- [67] ROBERTS R A, THERKELSEN P. Aircraft engine electrical power generation with a SOFC combustor [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, Düsseldorf, Germany; ASME, 2014; V03AT07A032.
- [68] BÜCHELER S, HUBER A, AIGNER M. Development of a jet-stabilized combustion system for the use of low-caloric SOFC off-gas [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Charlotte, USA; ASME, 2017; V04BT04A018.