

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.01.052

微型燃气轮机发电系统总体性能分析

任玉锋,傅鑫,柴希远

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘 要:基于 Simulink 软件平台搭建微型燃气轮机动力部分的部件与整机模型。通过比较稳态点与加速过程的计算结果和试验数据,验证所搭建的微燃机模型具有较高的准确性,为进一步开展负载动态变化下相关实验研究工作打下基础。对非设计点性能开展高度特性、速度特性以及温度特性的计算。结果表明:随着海拔高度的增加,动力涡轮的输出功率、流量和耗油率均有不同程度的下降;随着来流速度的增加,动力涡轮的输出功率和流量有所上升,耗油率有所下降;而输出功率、流量和耗油率随温度的变化规律与来流速度呈相反趋势。

关键词:微型燃气轮机;小型发电系统;总体性能

中图分类号:TM314⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)01-0277-06

Overall Performance Analysis of Micro Gas Turbine Power Generation System

REN Yufeng, FU Xin, CHAI Xiyuan

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

Abstract: Based on the Simulink software platform, the component-level and complete machine models of the power part of the micro gas turbine were built. By comparing the calculation results and experimental data of the steady-state point and the acceleration process, it is proved that the micro-combustion engine model has high accuracy, which lays a foundation for further experimental research under dynamic load changes. For the non-design point performance, the characteristics of the altitude, speed and temperature were calculated. The results show that the output power, flow rate and SFC of the power turbine all decrease with the increase of the altitude. With the increase of incoming flow speed, the output power and flow rate of the power turbine increase, and the SFC decreases. The variation law of output power, flow rate and SFC with temperature is opposite to the trend of incoming flow speed.

Keywords: micro gas turbine; small-scale power generation systems; overall engine performance

0 引言

社会的每一次发展都伴随着能源进步,当石油资源被开发利用后人们实现了现代化的生产与生活,并推动了内燃机与燃气轮机的研发、利用与发展,同时也加速了电气化的发展^[1]。燃气轮机是一个复杂的系统工程,整机和部件技术都是工业领域的尖端技术,其研制难度高、研制周期长,研发一款综合性能优越的燃气轮机往往需要投入大量人力物力、消耗巨额经费、花费十几年甚至更长的时间。正因此,目前西方发达国家普遍采用航改燃的技术途径——用已有的成熟航空发动机型号来进行燃气轮机的改型研制,依靠国家在航空发动机的前期投入和上万小时飞行考核的可靠性积累,可以极大地缩短燃气轮机的研制过程^[2]。

目前,军事上多采用柴油发电机作为电站动力源,柴油发电机系统体积大、寿命低、噪声大、长

期工作维护成本高、使用燃料单一,很难满足独立发电和小型化等军事需求^[3]。近年来分布式能源系统迅速兴起,而微型燃气轮机则作为分布式能源系统的核心受到广泛关注^[4]。基于大型燃机航改燃的技术基础,使用小微型涡喷发动机改装用于涡轮发电系统的微型燃气轮机是一条可行且高效的技术路线。小型涡喷发动机指推力量级在 100~2 000 daN 的涡轮喷气式发动机,微型涡喷发动机指推力量级在 100 daN 以下的涡轮喷气式发动机。小微型涡喷发动机一般为单转子结构,结构简单紧凑,造价低廉,整体较为轻巧。目前国内外小微型涡喷发动机技术成熟,产品众多,为改型微型燃气轮机提供了很好的技术条件^[5]。

美国的 Capstone Turbine 公司于 20 世纪 90 年代中期率先推出功率为 30 kW 的商用微型燃气轮机,随后又推出功率为 60 kW 和 65 kW 型号的商用微型燃气轮机,其市场反响强烈。Allied

第一作者简介:任玉锋(1998—),男,河南信阳人,硕士,研究方向为发动机内流流动,395494198@qq.com。

Signal 公司(后并入 Honeywell 公司)推出了 75 kW 的微型燃气轮机, Eliott 公司及英国的 Bowman 公司也先后研制出 80~100 kW 的微型燃气轮机。微型燃气轮机市场发展迅猛,各大公司也纷纷推出功率更大、用途更广泛的型号,功率范围覆盖 30~1 000 kW,以满足用户的不同需求。同时,美国 Hamilton Sundstrand 基于 TJ-50 微型涡喷发动机开发的高速涡轮发电机组,最大转速可达到 130 000 r/min,发电功率仅为 1 kW;美国 IHI 公司开发的微型涡轮发电机组,最高转速可达 100 000 r/min,额定输出电压 100 V,发电功率 2.6 kW;同时法国、瑞士、英国等国都有开展功率在 100~1 000 W 范围的小功率微型涡轮发电机组和配套高速/超高速永磁发电机的相关研究,取得了一定的成果^[6-9]。

我国于 20 世纪 70 年代就陆续开发了 37 kW、200 kW 等型号的微型燃气轮机,但是由于其技术水平相对较低,目前我国商用机型市场主要被美国 Capstone 公司占领^[10]。近年来我国也不断加大科研投入力度,在“十五”期间开展的 863 计划专项课题支持下,中科院热物理研究所、哈尔滨东安集团和西安交通大学三个单位共同完成了 100 kW 微型燃气轮机的设计与制造;中国航发沈阳黎明发动机公司研制了 95 kW 微型燃气轮机,已投入试验;中国航发 608 所测绘仿制的俄罗斯 75 kW 军用微型燃气轮机机组也已通过交付验收^[11];为提高能源综合利用率,吴旺松等^[12]分析了微型燃气轮机设计工况下不同有机工质的输出功率,使我国在微型燃气轮机发电系统中取得了良好进展。国内的新奥动力公司开发的 E100 等系列微型燃气轮机已投入市场运营,反响良好。

美国、德国等相继开发了 NSPP (numerical propulsion simulation)、GasTurb 等仿真软件,其可以提供多种学科和部件模型,这极大地提高了发动机建模的精度。国内研究人员对建模也开展了相关研究。李鸿扬等^[13]基于 MATLAB/Simulink 提出并改进了燃气轮机的简化模型及数学模型,并通过分轴燃气轮机发电的试验验证了其建模方法的有效性。李颖杰等^[14]采用最小二乘辨识方法,基于实验数据建立了微型涡喷发动机的转速模型和推力模型;杨晨^[15]建立了一套基于时间推荐通流方法的全机性能计算模型,并通过一台微型涡喷发动机进对此模型进行验证,结果表明此整机通流模型可广泛用于不同构型的燃气轮机,并快速得到高度、速度等总体特性;张睿^[16]针对

新一代变循环航空发动机建立了基于容腔动力学的涡扇发动机实时仿真模型,并结合 CFD 数值模拟验证进行了总体性能分析;陈典^[17]采用 Newton-Raphson 插值的数学方法进行了组合动力装置的建模,开发了组合动力装置总体性能计算程序。刘家兴等^[18]针对燃气轮机载荷突变的情况建立了微型燃机的数学模型,以控制燃油量为方案,验证了动力涡轮驱动的微型燃机发电系统的稳定性。

综上所述,开展微型航改燃及涡轮发电系统的相关研究符合我国在各领域对于微型燃气轮机迫切需求的实际情况。同时由于微型燃气轮机工作的过程较为复杂,工作时各气动热力截面的参数难以实时获得,为了进一步提高其性能,掌握在不同负载条件下的响应特性,对微型燃气轮机进行建模与试验结合的总体性能研究具有重要的理论和工程实践意义。

1 建立模型的基本假设

微型燃气轮机在实际工作时的内部流动非常复杂,为了降低模型的复杂程度,简化模型与计算,本文根据燃气涡轮发动机的结构和工作特点,做出如下合理假设:

- 1) 假设燃气涡轮发动机中的气体是理想气体,并忽略热惯性给计算带来的影响;
- 2) 仅考虑气体在燃气轮机中沿轴向的参数变化,即流动为一维流动;
- 3) 假设空气的定压比热 C_p 和绝热指数 κ 以及燃气定压比热 C_p' 和绝热指数 κ' 不随温度的变化而变化;
- 4) 忽略气体与燃气涡轮发动机部件间的热交换以及气体流动过程中的摩擦损失。

2 微型燃气轮机模型搭建

2.1 基于容腔法的微型燃气轮机数学模型

在燃气轮机内部及各部件之间,存在着一定体积的空腔,即容腔。在燃气轮机实际运行过程中,由于容腔内气体质量与能量的积聚与释放,引起压力的变化,进而造成容腔进出口气流参数不再相等,但仍满足一定的质量方程与能量方程,即容积动力学方程。本文为了简化计算,仅考虑质量方程,容腔的动力学模型如图 1 所示^[19]。



图 1 容腔动力学模型

对于仅考虑质量方程的容腔,其方程的描述如下:

$$\frac{dP_{out}}{dt} = \frac{(W_{a,in} - W_{a,out}) \times R_g \times T_{out}}{V} \quad (1)$$

式中: R_g 为气体常数; V 为容腔体积; $W_{a,in}$ 为进入容腔的流量; $W_{a,out}$ 为流出容腔的流量; T_{out} 为流出容腔的总温; T_{in} 为流入容腔的总温; P_{out} 和 P_{in} 分别为流出和流入容腔的总压。

选取 3 个容腔,分别为 I 燃烧室容腔、II 燃气涡轮与动力涡轮间容腔和 III 动力涡轮与排气出口之间的容腔,3 个容腔的位置示意如图 2 所示。

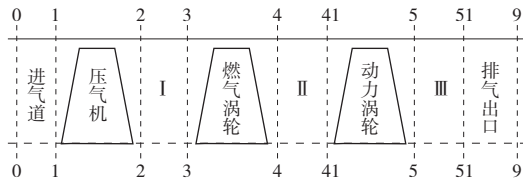


图 2 容腔动力学示意图

可推出动力方程如下。

容腔 I:

$$\dot{P}_{t,3} = \frac{(W_{a,2} - W_{a,3}) \times R \times T_{t,3}}{V_I} \quad (2)$$

容腔 II:

$$\dot{P}_{t,41} = \frac{(W_{a,4} - W_{a,41}) \times R \times T_{t,41}}{V_{II}} \quad (3)$$

容腔 III:

$$\dot{P}_{t,51} = \frac{(W_{a,5} - W_{a,51}) \times R \times T_{t,51}}{V_{III}} \quad (4)$$

式中: $\dot{P}_{t,3}$ 、 $\dot{P}_{t,41}$ 、 $\dot{P}_{t,51}$ 分别为图 2 中截面 3、41、51 位置处的流出容腔的总压; $W_{a,2}$ 、 $W_{a,3}$ 、 $W_{a,4}$ 、 $W_{a,41}$ 、 $W_{a,5}$ 、 $W_{a,51}$ 分别为图 2 中截面 2、3、4、41、5、51 位置处的流出容腔的流量; $T_{t,3}$ 、 $T_{t,41}$ 、 $T_{t,51}$ 分别为图 2 中截面 3、41、51 位置处的流出容腔的总温; V_I 、 V_{II} 、 V_{III} 分别为图 2 中三个容腔的体积。

2.2 压气机与涡轮部件的修正模型

基于 2.1 节的基本假设,利用相似原理计算压气机和涡轮部件的通用特性时,只考虑马赫数 Ma 的影响。马赫数表征了流体的压缩性,在压气机和涡轮部件中,气体的流动速度比较快,必须考虑气体的压缩性。压气机、涡轮等叶轮机械相似的条件是几何相似、马赫数相等,因此有压气机与涡轮部件的相似准则:

$$\frac{W \sqrt{T_t}}{P_t} = \text{const} \quad (5)$$

$$\frac{n}{\sqrt{T_t}} = \text{const} \quad (6)$$

式中: W 为流量; T_t 为总温; P_t 为总压。

最常用的相似参数是折合参数:折合流量 W_{cor} 与折合转速 n_{cor} ,是指在标准大气压的进口条件下的转速和流量,其计算方法为:

$$W_{cor} = W \frac{101325}{P_t} \sqrt{\frac{T_t}{288.15}} \quad (7)$$

$$n_{cor} = n \sqrt{\frac{288.15}{T_t}} \quad (8)$$

从 Gasturb 软件中导出单轴涡喷发动机的压气机与涡轮部件的通用特性图,如图 3—图 6 所示。

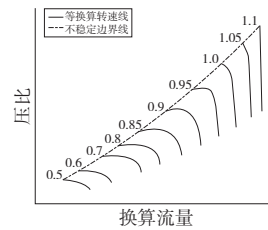


图 3 压气机压比-流量通用特性图

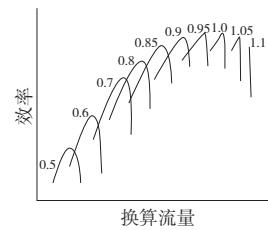


图 4 压气机效率-流量通用特性图

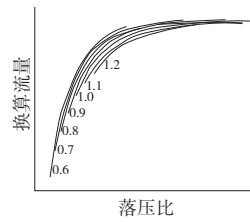


图 5 涡轮流量-压比通用特性图

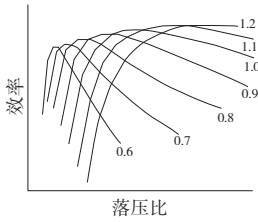


图 6 涡轮效率-压比通用特性图

图 3 中实线代表等折合转速线,等折合转速线旁的标定数值为某工作点折合转速与设计点折合转速之比。根据对象发动机的设计点数据与 Gasturb 软件中模型发动机的设计点数据计算修正系数,再对模型发动机导出的通用特性参数进行修正。其优点是可以通过一个模型发动机的通用特性快速得到任意相似发动机的特性参数,且具有良好的准确度。修正系数计算公式如下。

压比修正系数:

$$\xi_{\pi^*} = \frac{\pi_{model}^* - 1}{\pi_{Gasturb}^* - 1} \quad (9)$$

效率修正系数:

$$\xi_{\eta^*} = \frac{\eta_{model}^*}{\eta_{Gasturb}^*} \quad (10)$$

折合流量修正系数:

$$\xi_{W^*} = \frac{W_{cor,model}}{W_{cor,Gasturb}} \quad (11)$$

式中: π_{model}^* 、 $\pi_{Gasturb}^*$ 分别为实际的发动机压气机压比和参考模型的压气机压比; η_{model}^* 、 $\eta_{Gasturb}^*$ 分别为实际的压气机效率和参考模型的压气机效率; $W_{cor,model}$ 、 $W_{cor,Gasturb}$ 分别为实际的压气机折合流量和参考模型的压气机折合流量。其中:

$$\begin{cases} \pi^* = f_1(W_{cor}, n_{cor}) \\ \eta^* = f_2(W_{cor}, n_{cor}) \end{cases} \quad (12)$$

2.3 系统整体建模

微型燃气轮机的系统模型简图如图7所示。工作时空气由进气道进入,在压气机内增压后流入燃烧室与燃料掺混点燃,进行定压燃烧,产生的高温燃气推动涡轮,涡轮带动压气机做功,此时燃气仍有可用能量剩余,继续推动燃气发生器后的动力涡轮做功,燃气中的大部分能量被涡轮和动力涡轮提取,通过排气装置排出的燃气则不产生推力,动力涡轮通过输出轴向发电机输出轴功率,发电机再将电能输出给负载。

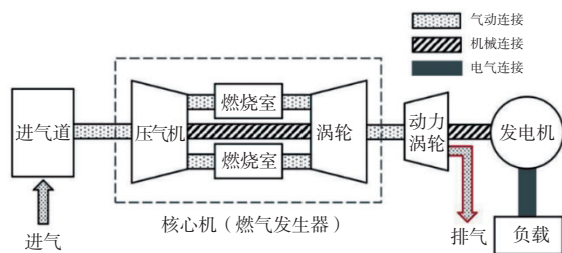


图7 微型燃气轮机的系统模型简图

在Simulink平台中搭建各部件级模型模块并进行封装,根据微型燃气轮机的结构关系与各部件间的连接关系将各模块进行连接,得到基于Simulink平台的微型燃气轮机整体模型。

3 仿真计算结果及分析

3.1 模型准确性验证

为验证模型建立的准确性,分别对稳态点和加速过程进行计算对比,结果如图8、图9所示。

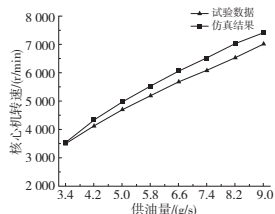


图8 稳态点结果对比

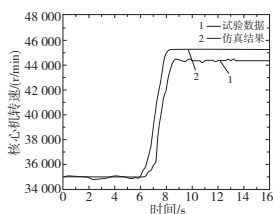


图9 加速过程对比

从图8可知,仿真结果与试验数据在不同稳态点都较为接近,模型在低供油量/低转速下的稳态点误差较小,在高供油量/高转速稳态点误差增大,计算模型在所有稳态点的误差均在5%以内,验证了微型燃气轮机模型对稳态点计算结果的准确性。图9为某次试验中推杆后的发动机供油量变化曲线,仿真计算结果与试验中测得的核心机转速曲线相比重合度较高,趋势一致,加速到达的稳态值转速误差在3%以内,验证了模型的准确性。

3.2 高度特性分析

选取0~6km的高度区间中的7个工况点,在ISA标准大气条件和固定核心机转速的控制规律下。进行动力涡轮输出功率、空气流量、耗油率的计算,计算结果如图10所示。

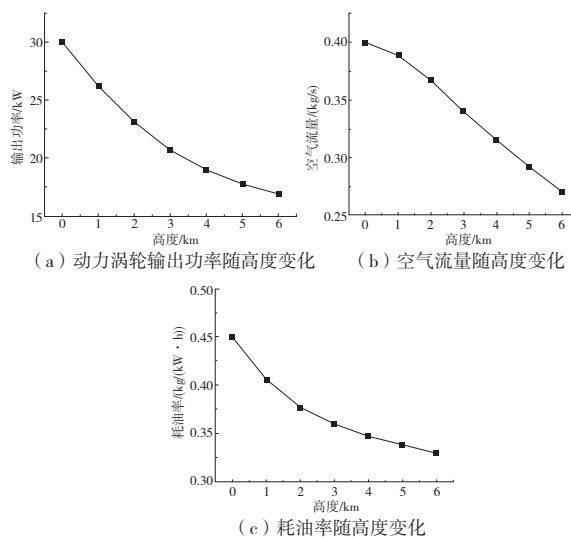


图10 高度特性分析

由图10可知,随着高度的增加,动力涡轮输出功率、空气流量和耗油率均有所下降。主要原因是随着高度增加引起的空气密度与空气中含氧量的显著降低,从而导致通过燃气轮机的空气流量的降低,动力涡轮的输出功率下降,在到达6km高度时,相比于0km高度,动力涡轮输出功率下降了43.67%,空气流量下降了32.5%。同时,随着高度的增加导致压气机的压比上升,核心机的热效率增加,维持相同转速条件下需要的供油量更小,燃气轮机的耗油率随高度增加而降低。同时也可以观察到,随着高度的增加,耗油率下降的趋势也逐渐放缓,相比于输出功率随高度上升的大幅损失,耗油率的小幅下降对于燃气轮机整体性能的贡献是有限的,在不调整控制规律的前提下,高海拔环境会严重影响燃气轮机的工作性能。

3.3 速度特性分析

选取 $0 \sim 0.5 Ma$ 来流速度区间中的 6 个工况点,在海平面 ISA 标准大气条件和固定供油量的控制规律下。进行动力涡轮输出功率、空气流量、耗油率的计算,计算结果如图 11 所示。

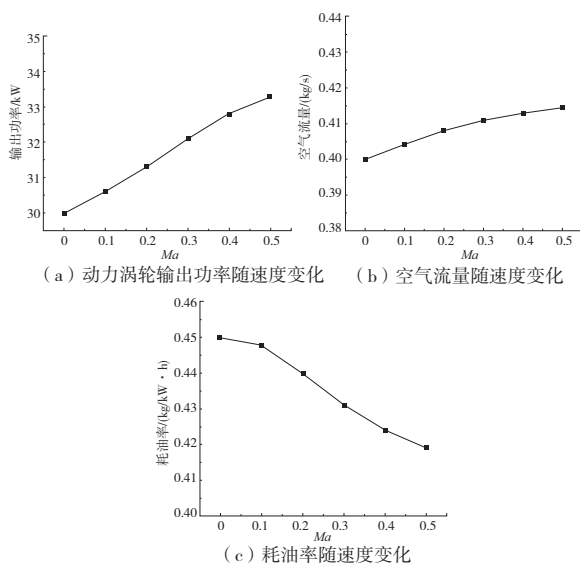


图 11 速度特性分析

由图 11 可知,在来流速度逐渐增加的情况下,动力涡轮的输出功率逐渐增加。主要原因是来流速度的提高会增加进口总压与空气流量,从而导致通过涡轮前总压的提高,动力涡轮的输出功率增加。来流速度达到 $0.5 Ma$ 时,相比于 $0 Ma$ 来流速度,动力涡轮输出功率上升了 11%。此外,由于来流总压的提高与空气流量的增大,燃气轮机的整体热效率有所提升,耗油率有所下降。同时也可以观察到,随着速度的增加,耗油率下降的趋势也逐渐放缓。由于燃气轮机的进气道与整体结构是基于亚音速来流进行设计的,因此在更高的来流速度下由于流动特性的改变工作性能可能会急剧恶化。因此关于速度特性的基本结论是:在 $0.5 Ma$ 以内的来流速度下,更高的来流速度可以改善燃气轮机的燃油经济性,适合在中低速飞行器挂载或者来流速度合适的稳定气源条件下工作。

3.4 温度特性分析

根据标准温差,即偏离 ISA 标准温度 ($288 K$) 的差值,来选取 7 个工况点,在除温度外的海平面 ISA 标准大气条件和固定核心机转速的控制规律下,进行动力涡轮输出功率、空气流量、耗油率的计算,计算结果如图 12 所示。

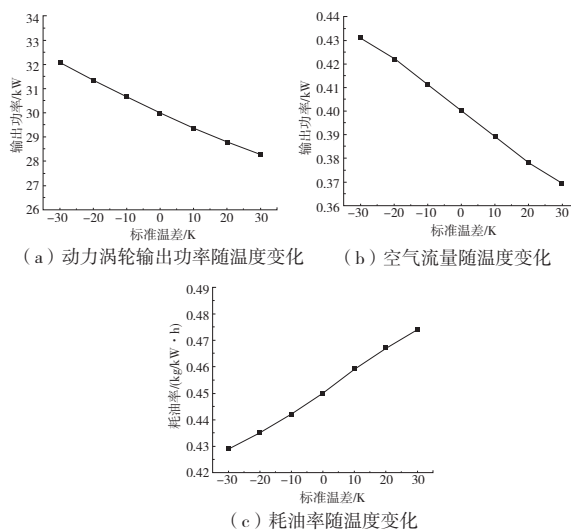


图 12 温度特性分析

由图 12 可知,在低温条件下,燃气轮机拥有更高的动力涡轮输出功率,随着温度的上升,空气密度下降、同时空气也更难压缩,这使得空气流量、压气机压比都有一定程度的下降,从而使得动力涡轮输出功率也下降。同时,也可发现,在温度逐渐增加的情况下,由于空气密度与压缩特性的变化,导致压气机压比的下降,从而降低了燃气轮机的整体热效率,耗油率增大,燃油经济性下降。计算结果表明在一定范围内,低温环境下微型燃气轮机具有更好的燃油经济性。

4 结语

本文介绍了某微型燃气轮机改型的建模,开展一系列的非设计点计算。结果表明:高度增加,燃气轮机的动力涡轮输出功率、空气流量和耗油率均呈下降趋势,说明在高海拔工况下,燃气轮机的工作性能会有一定程度的下降;来流速度增加,燃气轮机的动力涡轮输出功率、空气流量上升,而耗油率下降,说明在一定速度范围内,更高的来流速度能够提高燃气轮机的工作性能和燃油经济性;温度增加,燃气轮机的动力涡轮输出功率、空气流量下降,而耗油率上升,说明在高温对燃气轮机的性能有负面影响,并会降低燃油经济性。

参考文献:

- [1] 龚光英. 航改工业燃气轮机设计特点分析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2012, 25(增刊 1): 55-60.
- [2] 崔海庆. 燃气轮机发电技术分析[J]. 内燃机与配件, 2019(23): 89-91.
- [3] 靳智平. 微型燃气轮机发电在我国的应用前景[J]. 电力学报, 2004, 19(2): 95-97.

- [4] 张宁. 5 kW 微型燃烧室变工况燃烧性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [5] 徐庆邮. 微型燃气轮机的发展、技术特点及市场应用[J]. 上海电力,2009,22(5):355-357.
- [6] HUYNH C,HAWKINS L,FARAHANI A,et al. Design and development of a two-megawatt, high speed permanent magnet alternator for shipboard application[J]. Naval Engineers Journal,2005,117(4):23-29.
- [7] ZWYSSIG C,KOLAR J W,THALER W,et al. Design of a 100 W,500000 rpm permanent-magnet generator for mesoscale gas turbines[C]//Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005. Hong Kong, China: IEEE,2005:253-260.
- [8] JARDAN R K,NAGY I,NITTA T,et al. Environment-friendly utilisation of waste energies for the production of electric energy in disperse power plants[C]//Industrial Electronics,2002. ISIE 2002. Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on. L'Aquila, Italy: IEEE,2002:1119-1124.
- [9] WESTBROOK A. The electric car: development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars[J]. IEE Review,2002,48(3):14.
- [10] 谢哲. 现阶段我国微型燃气轮机发展与应用推广[J]. 科技与创新,2018(8):160-161.
- [11] 陈欣. 30 kW 级微型燃气轮机燃烧室性能研究[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学,2017.
- [12] 吴旺松,薄泽民,廖镔,等. 微型燃气轮机-有机工质联合循环总体性能分析[J]. 热能动力工程,2020,35(12):19-25.
- [13] 李鸿扬,温旭辉,王又珑. 基于分轴燃气轮机发电的混合动力系统建模与分析[J]. 电工电能新技术,2021,40(2):50-57.
- [14] 李颖杰,李环宇,吴林峰,等. 微型涡喷发动机推进系统的试验建模[J]. 清华大学学报(自然科学版),2017,57(1):107-112.
- [15] 杨晨. 燃气轮机整机通流模型及其模拟技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2020.
- [16] 张睿. 变循环发动机建模及气动性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
- [17] 陈典. 组合动力装置总体性能匹配与建模[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.
- [18] 刘家兴,翟世杰,赵晨旭. 针对脉冲发电机突变负载的微型燃气轮机工作性能研究[J]. 机械制造与自动化,2022,51(1):203-206.
- [19] 胡晓辰. 基于 MATLAB 仿真平台的动力与热管理系统建模及性能分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.

 收稿日期:2024-01-05

(上接第 276 页)

- [10] 苏立,毛成,文贤馗,等. 变速水力发电机组低电压穿越中机组转速上升率的计算及其影响分析[J]. 电网与清洁能源,2024,40(2):149-154.
- [11] 郝向阳,韩晓东,李晓明. 一种机载雷达双 Capon 迭代空时自适应处理算法[J]. 现代雷达,2022,44(12):101-105.
- [12] 张涛,袁涛,陈峰峰,等. 近场条件下数字阵列雷达自适应波束形成技术研究[J]. 电波科学学报,2023,38(1):152-158.
- [13] 王庆健,王森,伍星,等. 转子图像空时域增强与振动测量方法研究[J]. 振动与冲击,2023,42(7):133-142,169.
- [14] 雷茂林,叶芑,杨慧芝,等. 基于 Slepian 序列信号字典的目标频段瞬态信号检测方法[J]. 电子科技大学学报,2024,53(4):519-524.
- [15] 陈果,卢永刚. 宽带声源方位估计的多频稀疏贝叶斯学习改进算法[J]. 仪器仪表学报,2023,44(5):302-312.
- [16] 王绪虎,白浩东,张群飞,等. 阵列互耦情况下基于稀疏贝叶斯学习的离网格 DOA 估计[J]. 振动与冲击,2022,41(17):303-312.
- [17] 沈国堂,郭振宇,黄道均,等. 基于特征提取和神经网络的电力变压器声纹诊断方法建立与应用[J]. 变压器,2024,61(6):39-43.
- [18] 李烁,顾益军,谭昊,等. 改进 Xception 网络的声纹对抗检测研究[J]. 计算机工程与应用,2023,59(14):232-241.
- [19] 余斌,宋兴荣,周挺,等. 基于梅尔倒谱系数特征集的储能变流器开路故障诊断方法[J]. 中国电力,2022,55(12):34-42.
- [20] 张家安,田家辉,王铁成,等. 基于改进 MFCC 算法的风力机叶片故障诊断方法[J]. 太阳能学报,2024,45(1):285-290.
- [21] 葛铁洲,姚泽,张敬,等. 水声目标的 MFCC 特征提取与分类识别[J]. 计算机仿真,2024,41(2):13-16,33.
- [22] 施胜丹,黄金军,朱霄珣,等. 基于声纹 SDP-CNN 的变压器局部放电模式识别[J]. 电力信息与通信技术,2022,20(10):105-112.
- [23] 王宣军,于虹,祁兵,等. 基于注意力机制的混合神经网络电力设备缺陷文本挖掘方法[J]. 电力信息与通信技术,2023,21(9):44-51.
- [24] 王志学,张渝,王楠,等. 基于卷积神经网络的防松铁丝断裂分类算法研究[J]. 铁道学报,2022,44(2):27-33.
- [25] 封强,潘保芝,韩立国. 基于卷积降噪自编码器和 Softmax 回归的微地震定位方法[J]. 地球物理学报,2023,66(7):3076-3085.

 收稿日期:2025-05-30