

环境温度对微型燃气轮机运行特性的影响研究

陈颖¹, 李永毅², 陈绍敏¹, 陈大鹏³

(1. 重庆电力高等专科学校 动力工程学院, 重庆 400053; 2. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 河北 保定 071003;

3. 神华内蒙古国华准格尔发电有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300)

摘要: 为了研究环境温度对微型燃气轮机关键部件与系统全工况运行特性的影响规律, 针对 100 kW 级微型燃气轮机, 通过模块化的建模方法建立了全工况计算模型, 在环境温度 $-30 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、转速在 75% ~ 100% 工况下, 对机组与关键部件的运行特性进行了计算和分析。结果表明: 随环境温度下降压气机压比与流量显著升高; 燃气初温降低, 回热器换热性能与压损均降低, 机组功率、回热度与发电效率得到提升; 当环境温度降低使机组功率高于设计功率时, 随功率增加发电效率下降。

关键词: 微型燃气轮机; 环境温度; 运行特性; 变工况性能; 变工况模型

中图分类号: TK472⁺5

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2021.12.005

[引用本文格式] 陈颖, 李永毅, 陈绍敏, 等. 环境温度对微型燃气轮机运行特性的影响研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(12): 31-37. CHEN Ying, LI Yong-yi, CHEN Shao-min, et al. Research on the influence of ambient temperature on the operating characteristics of micro gas turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(12): 31-37.

Research on the Influence of Ambient Temperature on the Operating Characteristics of Micro Gas Turbine

CHEN Ying¹, LI Yong-yi², CHEN Shao-min¹, CHEN Da-peng³

(1. College of Power Engineering, Chongqing Electric Power College, Chongqing, China, Post Code: 400053; 2. School of Energy

Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003;

3. Inner Mongolia Guohua Jungar Power Generation Co., Ltd. of CHN Energy, Ordos, China, Post Code: 010300)

Abstract: In order to study the influence rule of ambient temperature on the full operating characteristics of the key components and system of the micro gas turbine, a full working condition calculation model was established for a 100 kW micro gas turbine by the modular modeling method. When the ambient temperature was between $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the speed was between 75% and 100%, the operating characteristics of unit and key components were calculated and analyzed. The results show that as the ambient temperature decreases, the compressor pressure ratio and flow rate increase significantly; when the initial gas temperature decreases, the heat exchange performance and pressure loss of the recuperator are both reduced, and the unit power, recuperated effectiveness and generating efficiency are increased; when the unit power is higher than the design value due to the decrease of the ambient temperature, the generating efficiency will decrease with the increase of the power.

Key words: micro gas turbine, ambient temperature, operating characteristics, off-design performance, off-design model

收稿日期: 2021-02-08; 修订日期: 2021-04-07

基金项目: 中央高校基本科研业务费(2017XS044)

Fund-supported Project: Fundamental Scientific Research Funds for the Central Universities(2017XS044)

作者简介: 陈颖(1989-), 女, 重庆人, 重庆电力高等专科学校讲师.

通讯作者: 李永毅(1990-), 男, 河北衡水人, 华北电力大学博士研究生.

引 言

环境温度变化对微型燃气轮机的运行性能有较大的影响,研究其在变工况下的运行特性,分析环境温度对其性能的影响规律,对其在能源系统中的应用具有重要意义。国内外学者已针对微型燃气轮机在变工况下的运行特性进行了大量的研究。郭晓娟等人^[1]对 30 kW 微型燃气轮机的变工况性能进行了实验研究,发现当输出功减少时,机组效率、排烟温度和余热量均有所降低。和彬彬等人^[2]建立了微型燃气轮机冷热电联供系统的变工况分析模型,研究发现,冷、热负荷提高时应依次采用发电功率调节、回热度调节和补燃量调节,而冷、热负荷下降时应采用相反的顺序。邢畅等人^[3]以整机实验的方式研究了燃烧室变工况燃烧特性,研究表明,NO 生成量非常低,CO₂ 质量浓度与燃烧效率的变化趋势基本一致,与 CO 质量浓度变化趋势相反。都静^[4]建立了微型燃气轮机的动态模型并进行了性能分析,对基于微燃机的回热循环与湿空气透平循环(Humid Air Turbine Cycle, HAT)的 3 种循环结构进行了动态特性分析。杨青^[5]的研究表明,机组的功率越低,效率随功率下降越快,且低负荷下余热量占比升高。目前,对机组变工况的研究多集中在整机性能和燃烧特性的分析,而对部件间参数匹配与运行特性变化规律的讨论较少。

环境温度的变化对燃气轮机运行特性的影响较大,在文献调研时发现,对重型燃气轮机特性影响的研究较多^[6-9],而对微型燃气轮机的研究较为缺乏,主要集中在环境温度或进气温度对整机性能的影响。Firdaus 等人^[10]研究了环境温度对微型燃气轮机热电联产系统性能的影响,结果表明,随环境温度升高,机组发电效率降低。Hasan 等人^[11]将不同环境温度下的运行性能与标准状况下的性能进行了比较,发现高温区发电量降低约 2.87%~0.71%,当进气冷却到 10℃ 时,发电量增加约 0.27%~10.28%。Ashley 等人^[12]则提出了机组功率与环境温度的经验关系,环境温度每升高 1℃,效率下降 0.1%。Gabriele 等人^[13]研究了进气冷却对微型燃气轮机性能的影响,结果表明,雾化冷却可将功率提

高 4%~11%,直接膨胀法机组功率可提高 8%。

目前,环境温度对机组运行的影响研究多集中在机组整体性能方面,对于部件的运行特性研究较少,深入研究环境温度变化时压气机、透平的运行特性对于微型燃气轮机系统优化以及综合能源系统的设计与优化具有重要意义。本文将建立微型燃气轮机变工况模型,研究环境温度在 -30~40℃ 之间变化时压气机、透平和回热器的全工况运行特性,并分析其对系统总体性能的影响。

1 微型燃气轮机变工况数学模型

1.1 微型燃气轮机结构与参数配置

以 Turbec T100 型微型燃气轮机为研究对象,其结构如图 1 所示。燃气轮机由压气机、回热器、燃烧室和透平组成,在 ISO 工况下的关键参数如表 1 所示。

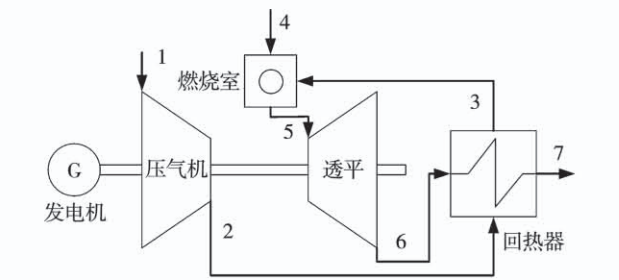


图 1 Turbec T100 微型燃气轮机基本结构

Fig. 1 Basic structure of Turbec T100 micro gas turbine

表 1 Turbec T100 微型燃气轮机主要设计参数^[14]

Tab. 1 Main design parameters of Turbec T100 micro gas turbine ^[14]	
参 数	数 值
功率/kW	100
压比	4.5
透平进气温度/K	1 223. 15
透平排气温度/K	918. 15
机组排气温度/K	543. 15
额定转速/r · min ⁻¹	70 000
发电效率/%	30

1.2 压气机模型

压气机特性(压比、等熵效率等)通过压气机特性曲线获得^[15]。当压气机折合流量 $\frac{m_C \sqrt{T_{C,in}}}{p_{C,in}}$ 、折

折合转速 $\frac{n}{\sqrt{T_{C,in}}}$ 、压比 π_C 和等熵效率 η_C 中的任意两个参数确定后即可求得另外两个参数。当环境参数 ($T_{C,in}, p_{C,in}$) 已知时,给定空气质量流量 m_C 与转速 n 可求得折合流量与折合转速,进而求取压比与等熵效率:

$$\pi_C = f_1 \left(\frac{m_C \sqrt{T_{C,in}}}{p_{C,in}}, \frac{n}{\sqrt{T_{C,in}}} \right) \quad (1)$$

$$\eta_C = f_2 \left(\frac{m_C \sqrt{T_{C,in}}}{p_{C,in}}, \frac{n}{\sqrt{T_{C,in}}} \right) \quad (2)$$

压气机出口的空气参数:

$$p_{C,out} = p_{C,in} \cdot \pi_C \quad (3)$$

$$h_{C,out} = \frac{h_{C,out,s} - h_{C,in}}{\eta_C} + h_{C,in} \quad (4)$$

式中: $h_{C,in}, h_{C,out,s}$ —压气机进口和等熵压缩过程压气机出口空气的焓, kJ/kg。

压气机压缩过程消耗的机械功率:

$$P_C = m_C (h_{C,out} - h_{C,in}) \quad (5)$$

1.3 燃烧室模型

燃烧室模型依据质量守恒与能量守恒关系建立,流入燃烧室的工质为回热器出口的压缩空气与天然气,流出燃烧室的工质为生成的高温燃气,燃烧室内质量守恒与能量守恒关系可表示为:

$$m_a + m_f = m_g \quad (6)$$

$$m_g (h_g^{T_{CC,out}} - h_g^{T_0}) = m_a (h_a^{T_{R,out}} - h_a^{T_0}) + m_f \cdot (h_f^{T_{CC}} - h_f^{T_0}) + LHV \cdot m_f \cdot \eta_{CC} \quad (7)$$

式中: $h_a^{T_{R,out}}, h_a^{T_0}$ —回热器出口温度与标准温度下空气的焓, kJ/kg; $h_f^{T_{CC}}, h_f^{T_0}$ —燃烧室入口温度与标准温度下天然气的焓, kJ/kg; $h_g^{T_{CC,out}}, h_g^{T_0}$ —燃烧室出口温度与标准温度下燃气的焓, kJ/kg; η_{CC} —燃烧室效率; LHV—低位发热量, kJ/kg; 下标: a, f, g 代表空气、天然气和燃气。

1.4 透平模型

透平特性与压气机类似^[15],由折合流量

$$\frac{m_T \sqrt{T_{T,in}}}{p_{T,in}}, \text{折合转速 } \frac{n}{\sqrt{T_{T,in}}}, \text{膨胀比 } \pi_T \text{ 和等熵效率 } \eta_T$$

描述。确定进气参数 ($m_T, T_{T,in}$ 和 $p_{T,in}$) 和转速 n 后,可求得折合流量与折合转速,进而求取膨胀比与等熵效率:

$$\pi_T = f_3 \left(\frac{m_T \sqrt{T_{T,in}}}{p_{T,in}}, \frac{n}{\sqrt{T_{T,in}}} \right) \quad (8)$$

$$\eta_T = f_4 \left(\frac{m_T \sqrt{T_{T,in}}}{p_{T,in}}, \frac{n}{\sqrt{T_{T,in}}} \right) \quad (9)$$

透平排气参数:

$$p_{T,out} = p_{T,in} \cdot \pi_T \quad (10)$$

$$h_{T,out} = h_{T,in} - \eta_T (h_{T,in} - h_{T,out,s}) \quad (11)$$

式中: $h_{T,in}$ —透平进口燃气焓, kJ/kg; $h_{T,out,s}$ —等熵膨胀过程透平出口燃气焓, kJ/kg。

透平的机械功率:

$$P_T = m_T (h_{T,in} - h_{T,out}) \quad (12)$$

1.5 回热器模型

该机组采用一次表面回热器,用于回收透平排气热量,变工况下回热器换热性能和压降的变化对机组性能有较大影响。

回热器的换热量可按下式计算:

$$Q = KA \Delta T \quad (13)$$

变工况下回热器换热系数与换热面积的乘积 KA 可为^[16]:

$$KA = KA_d \cdot \left(\frac{m_g}{m_{g,d}} \right)^{0.65} \cdot \frac{F_g}{F_{g,d}} \left(\frac{m_a}{m_{a,d}} \right)^{0.15} \quad (14)$$

$$F_g = \frac{\bar{c}_p^{0.33} \cdot \lambda_g^{0.67}}{\mu_g^{0.32}} \quad (15)$$

式中: $\bar{c}_p$ —燃气的平均比定压热容, kJ/(kg · K); μ_g —燃气的动力粘度, N · s/m²; λ_g —燃气的导热系数, kW/(m · K); 下标 d 表示设计工况参数; F_g —燃气的热物性系数。

变工况下回热器两侧工质压降可依照其质量流量 m 、温度 T 、压力 p 和比体积 ν 修正:

空气侧压降:

$$\frac{\Delta p_a}{\Delta p_{a,d}} = \left(\frac{m_a}{m_{a,d}} \right)^{1.98} \cdot \frac{\nu_a}{\nu_{a,d}} \quad (16)$$

燃气侧压降:

$$\frac{\Delta p_g}{\Delta p_{g,d}} = \left(\frac{m_g}{m_{g,d}} \right)^{1.48} \cdot \frac{T_g}{T_{g,d}} \left(\frac{p_g}{p_{g,d}} \right)^{-1} \quad (17)$$

1.6 系统模型与评价指标

机组运行时,通过调节转速与燃料量使发电功率满足负荷需求,并保证透平排气温度维持在设定值。计算中采用的天然气成分(体积分数)为: CH₄ (91.2%), C₂H₆ (6.7%), C₃H₈ (2.1%), 低位发热

量为 49 532.61 kJ/kg。

机组发电功率：

$$P_{\text{MGT}} = (P_{\text{T}} - P_{\text{C}}) \eta_{\text{G}} - P_{\text{AUX}} \tag{18}$$

回热器的回热度：

$$f = \frac{h_6 - h_7}{h_6 - h_2'} \tag{19}$$

式中： h_6, h_7, h_2' —回热器入口燃气焓，回热器出口燃气焓和回热器入口空气温度下燃气的焓，kJ/kg；下标 AUX 表示辅机。

机组发电效率：

$$\eta_{\text{MGT}} = \frac{P_{\text{MGT}}}{m_{\text{f}} \cdot \text{LHV}} \tag{20}$$

计算环境温度分别为 -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30 和 40 ℃，参数设定如表 2 所示。

表 2 计算中的关键参数设定

参 数	数 值
大气压力/kPa	101.30
大气湿度/%	60
燃烧室效率/%	97
设计工况回热器效能/%	91.57
透平排气温度/K	918.15
回热器排气压力/kPa	101.30

2 模型验证

为验证模型的准确性，利用所建立的微型燃气轮机变工况计算模型对机组性能进行了计算，结果如表 3 所示，与文献[17]中的结果吻合较好，误差均在 ±1.5% 以内。

表 3 模型计算结果与误差分析

参 数	计算结果	文献[17]数据	误差/%
空气流量/kg·s ⁻¹	0.80	0.79	1.27
压比	4.51	4.49	0.45
压气机出口温度/K	483.33	483.6	-0.06
压气机等熵效率/%	78.80	78.6	0.25
燃料流量/g·s ⁻¹	7.00	7.04	-0.57
透平膨胀比	4.07	4.08	-0.25
透平进气温度/K	1 218.15	1228	-0.80
透平等熵效率/%	83.26	82.9	0.43
机组发电效率/%	28.84	28.6	0.84

3 结果与分析

利用所建立的微型燃气轮机变工况模型对机组在环境温度为 -30 ~ 40 ℃ 时的全工况性能进行了计算分析。机组在 75% ~ 100% 额定转速之间运行，压气机与透平的运行点分别以等环境温度线、等转速线、等燃气初温线和等燃机功率线的形式绘制于其特性图上，如图 2 和图 3 所示。

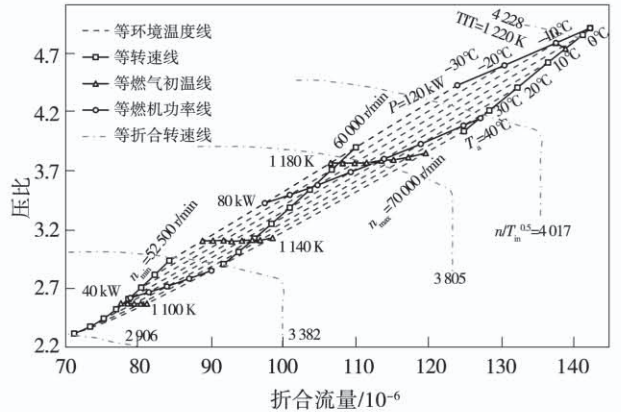


图 2 压气机在不同环境温度下的运行工况点
(流量与压比特性)

Fig. 2 Compressor operating points at different ambient temperatures (characteristics of flow rate with pressure ratio)

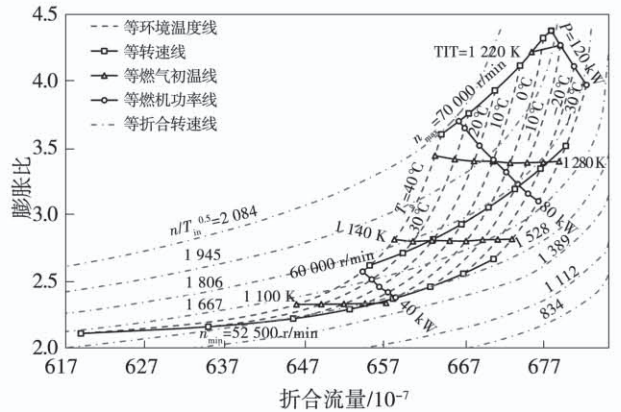


图 3 透平在不同环境温度下的运行工况点
(流量与膨胀比特性)

Fig. 3 Turbine operating points at different ambient temperatures (characteristics of flow rate with expansion ratio)

压气机与透平运行窗口边界分别为 70 000 r/min 等转速线、52 500 r/min 等转速线、-30 ℃ 等环境温度线、40 ℃ 等环境温度线与 120 kW 等功率

线。在相同燃气轮机转速下,随环境温度的降低空气质量流量增加,压气机压比也随之增加,燃烧室投入更多的燃料来提升透平的进气温度以匹配更高的膨胀比。工质流量和压比的升高提高了燃机功率,因此,在等转速线上,随环境温度的降低,透平初温与燃机功率均呈现上升趋势。当燃气初温恒定时(如图 3 所示),随折合流量的增加,透平膨胀比变化不大,转速降低,此时透平功率升高。从压气机特性来看,单纯转速的下降将会导致空气质量流量与压比的降低,环境温度的降低可抵消因转速降低导致的流量和压比的下降,从而维持透平膨胀比。因此,等燃气初温线上,随环境温度的降低,燃机转速呈现下降趋势,而燃机功率呈现上升趋势。在等燃机功率线上,随环境温度降低,转速下降,空气流量与压比均呈降低趋势。转速、流量和压比的下降势必会导致透平膨胀比与进气温度下降,工况点向右下方移动。总体来看,等燃机功率线上,随环境温度的降低,燃机转速与燃气初温均呈下降趋势。

图 4 与图 5 分别给出了不同环境温度下压气机空气流量与出口温度随功率的变化情况。恒定转速下,当环境温度降低时,进入压气机的空气流量增加,出口温度下降,机组功率显著提升即转速为 65 000 r/min 时,环境温度每降低 10 ℃,空气流量增加约 0.03 kg/s,压气机出口温度下降 9.5 ℃,机组功率的增加量在 7.8 ~ 11.9 kW 之间,且随温度的降低而升高,这种现象在高转速区更为明显。若维持机组功率恒定,机组所需空气量随环境温度的降低而减少,且转速与压气机出口温度均下降。

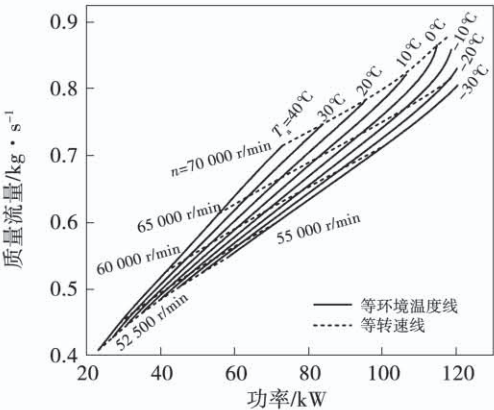


图 4 不同环境温度下空气质量流量随燃机功率的变化情况

Fig. 4 Variation of air mass flow rate with gas turbine power at different ambient temperatures

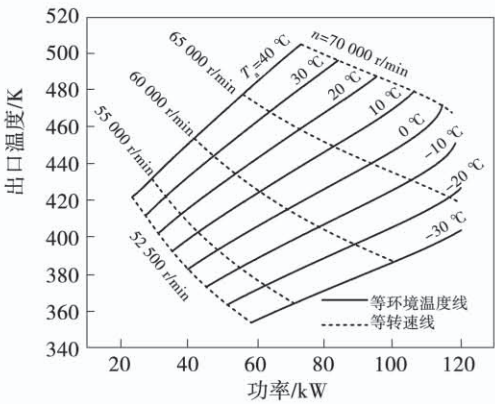


图 5 不同环境温度下压气机出口温度随燃机功率的变化情况

Fig. 5 Variation of compressor outlet temperature with gas turbine power at different ambient temperatures

压气机的空气流量与出口温度直接影响回热器的换热性能和压损,图 6 与图 7 分别给出了不同环境温度下回热器的 KA 与空气侧压降随功率的变化情况。首先,随机组功率的降低,进入回热器的冷、热流体流量显著下降,回热器的换热性能与空气侧压降均呈现快速下降趋势;其次,相同功率下,环境温度的下降使空气流量和回热器进口温度显著降低,回热器的换热性能下降。流速是影响回热器压降的主要因素,虽然环境温度降低使入口空气压力下降,但流量与温度的下降对流速影响更大,相同机组功率下,环境温度的下降使回热器压降降低,有助于提升机组的发电效率。

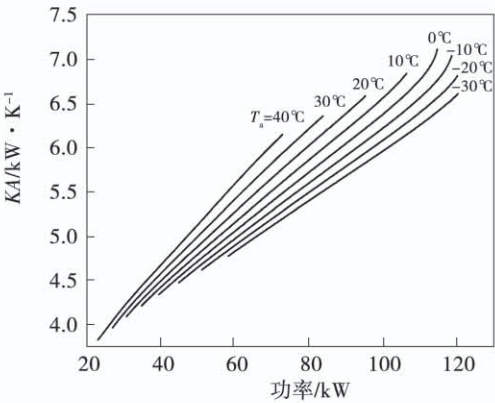


图 6 不同环境温度下回热器的 KA 随燃机功率的变化情况

Fig. 6 Variation of KA of recuperator with gas turbine power at different ambient temperatures

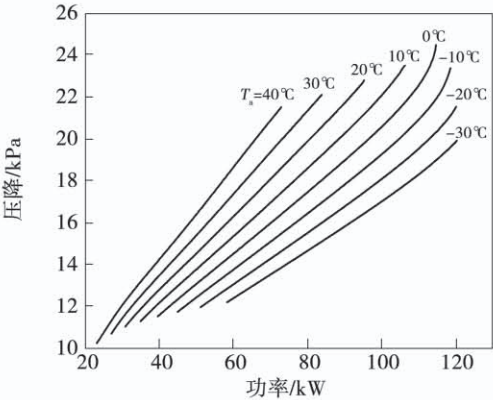


图 7 不同环境温度下回热器空气侧压降随燃气功率的变化情况

Fig. 7 Variation of air side pressure drop of recuperator with gas turbine power at different ambient temperatures

如图 8 所示,相同转速下,环境温度越低燃气初温越高,相同功率下燃气初温随环境温度的升高而提高,燃机功率在 120 kW 以内时最高燃气初温出现在环境温度 0 ~ 10 °C 之间。值得注意的是,由于环境温度的降低使压气机运行线上移,压气机压比与透平膨胀比升高,燃气在透平中的焓降增大,机组排气温度显著下降,如图 9 所示,能量利用效率提升。

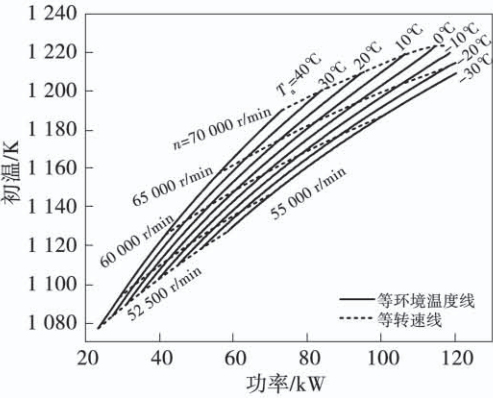


图 8 不同环境温度下燃气初温随燃气功率的变化情况

Fig. 8 Variation of initial gas temperature with gas turbine power at different ambient temperatures

图 10 给出了回热度随环境温度与转速的变化情况。随环境温度的降低,回热度呈升高趋势,有利于机组效率的提升,且低转速下系统通过回热器回收的排气热量比例较高转速情况更高。如图 11 所示,环境温度每降低 10 °C,相同功率下机组发电效率提升 0.7% ~ 1.3%。当机组功率低于额定功率时,发电效率随功率的提升而升高,但环境温度降低使机组功率超过设计功率后,发电效率会随功率的

升高而降低,这是由于压气机与透平偏离设计工况,而使其效率下降所致。

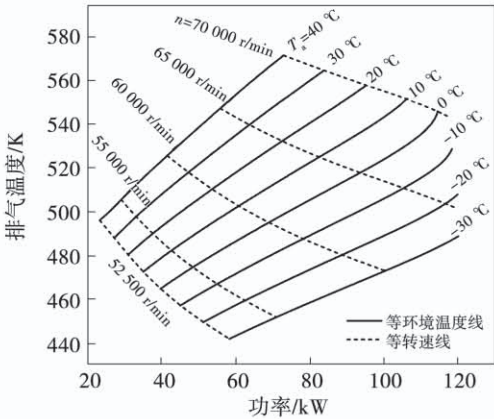


图 9 不同环境温度下回热器排气温度随燃气功率的变化情况

Fig. 9 Variation of recuperator discharge temperature with gas turbine power at different ambient temperatures

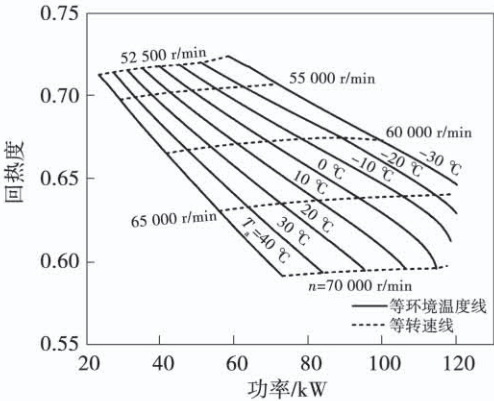


图 10 不同环境温度下回热度随燃气功率的变化情况

Fig. 10 Variation of recuperated effectiveness with gas turbine power at different ambient temperatures

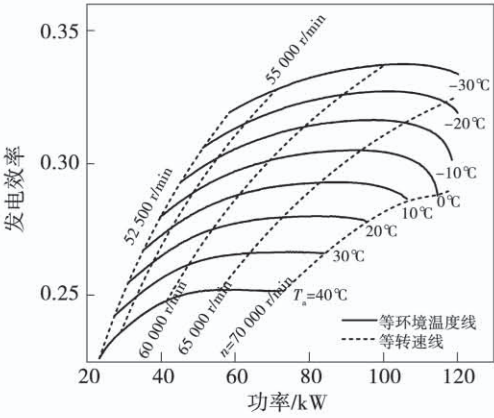


图 11 不同环境温度下机组发电效率随燃气功率的变化情况

Fig. 11 Variation of unit generating efficiency with gas turbine power at different ambient temperatures

4 结 论

建立了微型燃气轮机的变工况分析模型,计算了环境温度在 $-30 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时机组的全工况运行特性,分析了环境温度对各部件和整机运行特性的影响,得出结论:

(1) 相同转速下,随环境温度的降低,空气流量与压比升高,燃气初温提升,机组功率增加;相同燃气初温下,随环境温度的降低,机组转速下降,功率升高;相同功率下,随环境温度的降低,机组转速下降,空气流量下降,燃气初温降低。

(2) 相同环境温度下,回热器的换热性能与压降随机组功率的降低而下降;相同功率下,随环境温度降低,回热器的换热性能与压降均呈下降趋势。

(3) 环境温度的降低有助于提升机组的功率、回热度和效率,环境温度每降低 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,相同功率下机组发电效率提升 $0.7\% \sim 1.3\%$,当功率低于设计功率时,发电效率随功率的增加而升高,功率超过设计功率后,发电效率会随功率的升高而降低。

参考文献:

- [1] 郭晓娟,蒋润花,秦贯丰,等. 微型燃气轮机变工况性能实验研究[J]. 东莞理工学院学报,2014,21(1): 70-73.
- GUO Xiao-juan, JIANG Run-hua, QIN Guan-feng, et al. Experimental study on off-design performance of microturbine[J]. Journal of Dongguan University of Technology, 2014, 21(1): 70-73.
- [2] 和彬彬,杨勇平,段立强. 微型燃气轮机冷热电联供系统变工况性能研究[J]. 热能动力工程, 2008(6): 615-619, 689-690.
- HE Bin-bin, YANG Yong-ping, DUAN Li-qiang. A study of the off-design performance of a micro gas turbine-based combined cooling, heating and power (CCHP) cogeneration system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2008(6): 615-619, 689-690.
- [3] 邢 畅,邱朋华,刘 栗,等. 起动机驱动过程中微型燃气轮机燃烧室变工况燃烧特性[J]. 中国电机工程学报,2018,38(8): 2367-2375,2546.
- XING Chang, QIU Peng-hua, LIU Li, et al. Off-design combustion performance under starter-driven process for a micro-gas turbine combustor[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2367-2375, 2546.
- [4] 都 静. 微型燃气轮机循环的动态模拟与性能分析[D]. 北

京:中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所),2020.

DU Jing. Dynamic simulation and performance analysis of micro gas turbine cycle[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.

- [5] 杨 青. 变工况条件下微型燃气轮机运行仿真分析[J]. 上海电气技术, 2020, 13(1): 18-21, 26.
- YANG Qing. Operation simulation analysis of micro gas turbine under part-load conditions[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2020, 13(1): 18-21, 26.
- [6] 严志远. 浅谈进气温度对燃机联合循环性能的影响[J]. 中国新技术新产品, 2020(23): 47-49.
- YAN Zhi-yuan. The influence of inlet temperature on gas turbine combined cycle performance[J]. China New Technologies and Products, 2020(23): 47-49.
- [7] 张国强,刘恒平,张 恒,等. 不同环境温度与负荷条件下燃气轮机联合循环热电联产特性分析[J]. 热能动力工程, 2018, 33(12): 8-19.
- ZHANG Guo-qiang, LIU Heng-ping, ZHANG Heng, et al. Characteristics analyzing of gas turbine combined cycle with heat and power generation on different ambient temperature and load[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(12): 8-19.
- [8] 张 涛,付忠广,刘志坦,等. 进气温度对燃气-蒸汽联合循环机组性能的影响[J]. 化工进展, 2020, 39(11): 4367-4374.
- ZHANG Tao, FU Zhong-guang, LIU Zhi-tan, et al. Effect of the intake temperature of gas turbine on the performance of gas-steam combined cycle power plant[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(11): 4367-4374.
- [9] 祖 航,王秋颖. 环境温度及负荷率对燃气-蒸汽联合循环热电联产机组性能的影响[J]. 华电技术, 2019, 41(11): 49-52.
- ZU Hang, WANG Qiu-ying. Effects of ambient temperature and load ratio on performance of gas-steam combined cycle cogeneration units[J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 49-52.
- [10] FIRDAUS B, TAKANOBU Y, KIMIO N, et al. Effect of ambient temperature on the performance of micro gas turbine with cogeneration system in cold region[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(6/7): 1058-1067.
- [11] HASAN H E, SULEYMAN H S. Case study: effect of ambient temperature on the electricity production and fuel consumption of a simple cycle gas turbine in Turkey[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(2/3): 320-326.
- [12] ASHLEY D S, SARIM A Z. Gas turbine performance at varying ambient temperature[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(14/15): 2735-2739.