

针对脉冲发电机突变负载的微型燃气轮机工作性能研究

刘家兴,翟世杰,赵晨旭

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:为分析有动力涡轮的微型燃气轮机在带动脉冲发电机中的性能,建立带动力涡轮的微型燃气轮机数学模型。因有动力涡轮的微型燃机是由动力涡轮驱动负载,其负载变化对燃机核心机影响不大,但为了使动力段转速恢复稳定而采用的改变供油量方法会对核心机产生很大影响。基于所建立的微型燃气轮机数学模型对其进行仿真计算,研究了该燃机设计点性能参数、高度特性、温度特性及供油量快速改变的瞬间燃机核心机工作参数的动态变化过程。

关键词:微型燃气轮机;非设计点性能;数值仿真;载荷突变;动态特性

中图分类号:TM314+.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)01-0203-04

Research on Performance of Micro Gas Turbine for Sudden Load of Pulse Generator

LIU Jiaying, ZHAI Shijie, ZHAO Chenxu

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

Abstract: To analyse the performance of running micro gas turbine with power turbine drive pulse generator, the mathematical model of micro gas turbine with power turbine is established. As the load of the micro gas turbine with power turbine is driven by the power turbine, the load change has little effect on the core engine of the gas turbine. However, in order to make the speed of power turbine stable, the method of changing fuel supply is generally adopted. And the simulation calculation of the established micro gas turbine model is carried out. The design performance parameters, altitude and temperature characteristics as well as the fuel supply change instance and the dynamic change process of the core engine working parameters are studied.

Keywords: micro gas turbine with power turbine; off - design performance; numerical simulation; loadmutation; dynamic characteristics

0 引言

电磁轨道炮利用洛伦兹力使弹丸在磁场中加速的原理突破了以往通过化学能来发射弹丸的传统方式的理论极限。相比于传统火炮,电磁轨道炮具有以下优点:弹丸的巨大动能大幅度提高了其威力和射程;炮弹具有体积小、质量轻的优势,大幅度增加了武器装备的携弹量;电磁轨道炮结构简单,炮口形状可以根据作战环境进行灵活调整。而高功率电源系统是轨道炮系统的重要组成部分之一。

微型燃气轮机因其具有体积小、质量轻、结构简单、并且在其工作过程中只有旋转运动等优势^[1],被作为电磁轨道炮的初级能源。微型燃气轮-脉冲发电机组作为轨道炮电源在工作过程中,会发生瞬时增大和减小燃机负载的现象,一般需要通过增加或减少供油量来使燃气轮机尽快恢复稳定工作状态,因载荷突变的动态过程会直接影响整个机组的稳定性和系统的性能。动态特性就是当机组在起动、停车、载荷突增或突减等从一个稳定工况转换到另一个稳定工况的过程中所经历的不稳定过渡段工况。这就要求燃气轮机在工作过程除了需要具有良好的稳态性能外,还要具备快速响应能力,并且在其动态响应过程

中要保证燃气轮机始终工作在稳定区域^[2-5]。

本文建立了双转子微型燃气轮机的模型,在此基础上,对微型燃气轮机的工作性能进行了仿真,完成其设计点和非设计点的性能计算以及燃油增加与降低、载荷突增与突卸的动态过程仿真。

1 微型燃气轮机数学模型

由于篇幅所限对其内部各部件中的气动热力参数计算过程仅作简要介绍。

1.1 进口条件

微型燃气轮机的进口条件就是外界的大气条件,可以根据工作地点的海拔高度计算出该位置的大气温度和压强,而燃气轮机发电机组又只在地面工作,于是有:

$$T_1^* = T_0 = 288.15 - 6.5H \quad (1)$$

$$p_1^* = p_0 = 101\,325(1 - H/44\,308)^{5.2553} \quad (2)$$

式中: T 和 T^* 分别代表静温和总温; p 和 p^* 分别代表静压和总压; H 是飞行高度。

1.2 压气机

根据压气机部件通用特性图,可以在已知换算转速、

压比、换算流量和效率这4个参数中的两个时,通过在通用特性图上插值的方法计算得到其他两个参数。在本文的计算过程中,选定压比 π_c^* 和进口流量 W_2 作为两个已知量。压气机部件的气动热力参数计算如下:

$$p_2^* = \pi_c^* p_1^* \quad (3)$$

通过在压气机特性图上插值的方法有:

$$n_{e,cor} = f(W_{e,cor}, \pi_c^*) \quad (4)$$

$$\eta_c = f(n_{e,cor}, \pi_c^*) \quad (5)$$

进一步计算压气机进口截面流量为

$$W_2 = \frac{W_{e,cor} \cdot p_2^* / 101\ 325}{\sqrt{T_2^* / 288.15}} \quad (6)$$

1.3 燃烧室

在燃烧室中需要定义两个参数即燃烧室的总压恢复系数 σ_b 和燃烧效率 η_b ,其计算过程如下:

$$p_4^* = \sigma_b p_3^* \quad (7)$$

$$W_4 = W_3 + W_f \quad (8)$$

$$T_4^* = \frac{W_3 \cdot C_p T_3^* + (H_u \eta_b + h_f) W_f}{W_4 \cdot C_{pg}} \quad (9)$$

式中 H_u 表示燃油低热值,取值为42 900 kJ/kg。

1.4 涡轮和动力涡轮

核心机涡轮部件和动力涡轮都是系统中输出功的元件,涡轮效率、折合流量、折合转速、落压比的计算方法和压气机部件相似,都是通过在通用特性图上插值的方法得到。在涡轮部件中首先获得的两个参数为换算流量 $W_{t,cor}$ 和换算转速 $n_{t,cor}$,而在动力涡轮中首先得到的是落压比 π_{pt}^* 和换算流量 $W_{pt,cor}$,但两者计算方法一样。这里以核心机涡轮为例,动力涡轮的计算不再赘述。

$$\pi_t^* = f(n_{t,cor}, W_{t,cor}) \quad (10)$$

$$\eta_t^* = f(n_{t,cor}, W_{t,cor}) \quad (11)$$

$$p_5^* = \pi_t^* p_4^* \quad (12)$$

$$T_5^* = T_4^* \left[1 - \left(1 - \pi_t^* \right)^{\frac{1-k}{k_g}} \eta_t^* \right] \quad (13)$$

2 系统的共同工作和动态响应分析

2.1 微型燃气轮机中的共同工作规律

在微型燃气轮机的工作过程中,各部件气动参数之间存在着一些物理关系,称为共同工作条件,每个部件的工作都要遵循以下共同工作条件:

- 1) 压力之间的平衡关系;
- 2) 气流的质量流量平衡关系;
- 3) 压气机和涡轮同轴,即物理转速相等关系;
- 4) 核心机涡轮和压气机之间及动力涡轮和负载之间的功率守恒关系。

2.2 微型燃气轮机中的动态响应分析

根据上述共同工作规律,在系统的动力段,动力涡轮发出功率和负载应满足功率平衡方程:

$$N_{pt} = J_1 n_1 \left(\frac{\pi}{30} \right)^2 \frac{dn}{dt} + N_{load} \quad (14)$$

式中: J_1 是动力轴段的转动惯量; n_1 是动力轴的转速。

在负载功率突然减小的过程中,动力轴转速加速度为正值,转速持续上升。为了使转速 n_1 恢复稳定,应该采取措施降低动力涡轮的输出功率 N_{pt} 。一般采取降低燃气总焓的方法来减低涡轮的输出功率,有两种方式:

1) 在核心机压气机后设置放气阀,当需要降低涡轮输出功率时,以打开阀门放气的方式来降低通过涡轮的燃气质量流量。

2) 以减少燃油流量的方式来降低流经动力涡轮燃气的总焓,但在降低供油量的过程中应避免过分贫油燃烧而导致的燃机熄火。

3 微型燃气轮机稳态性能计算

3.1 设计点性能计算

燃气轮机的初步气动热力参数计算都是在设计点处进行的。为了满足设计要求,首先选定一个主要工作状态为设计点作为燃气轮机的设计状态,根据计算所得结果选择其中最合理的工作过程参数来设计燃气轮机。本文选定参数主要有:进口流量、压气机压比、燃烧效率、涡轮前温度等,如表1所示。

表1 设计点参数选取

参数	取值
进口总温/K	288.15
进口总压/kPa	101.325
进气总压恢复系数	0.99
进口流量/(kg/s)	2.5
压气机压比	8.4
压气机效率	0.78
涡轮前温度/K	1 200
涡轮效率	0.85
动力涡轮压比	2
设计转速/(r/min)	38 900

根据表1中的设计点性能计算所得结果如表2所示。

表2 在设计点计算所得参数

参数	计算值
压气机出口总温/K	592.12
压气机消耗功率/kW	779.3
供油量/(kg/s)	0.039
涡轮落压比	3.5
涡轮出口总温/K	919.4
动力段转速/(r/min)	38323
动力涡轮输出功率/kW	301.4
当量耗油率/(kg/(kW·h))	0.47

3.2 非设计点性能计算

燃气轮机的设计点是对应于特定的工作高度、大气温度以及油门杆位置的,当实际工作情况与以上这些设计点参数不同时,燃气轮机的工作点就偏离了设计点而处于非设计点工作,因此燃气轮机的主要性能肯定也会与设计点有所不同。为了对非设计点性能进行研究,对于这种带动力涡轮的燃气轮机特性可分为3种:高度特性、温度特性以及节流特性。

1) 高度特性

燃气轮机的高度特性是指其主要工作性能参数随其工作高度的变化。在标准温度和相同的控制规律下,图1和图2分别给出了该燃气轮机动力涡轮输出功率和当量耗油率及燃机进口流量、涡轮前温度和排气温度随燃机工作高度的变化。

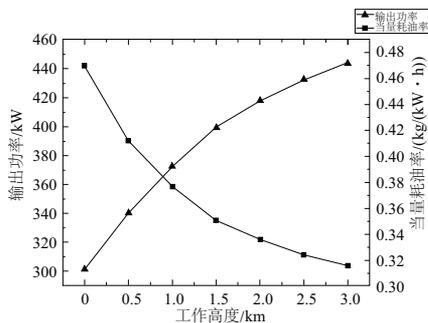


图1 动力涡轮输出功率和当量耗油率随工作高度的变化

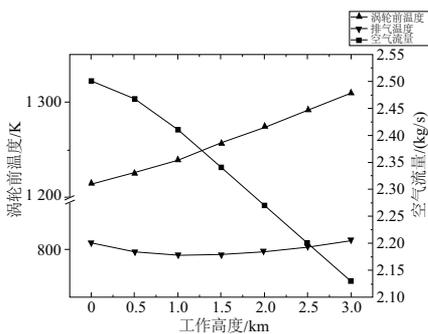


图2 燃机进口流量、涡轮前温度和排气温度随工作高度的变化

图1显示了在供油量不变的情况下,随着燃气轮机工作高度的上升其动力涡轮输出功率 N_{pt} 呈现上升趋势,这是由于随出口外界气压的降低使动力涡轮的落压比变大了。而随着工作高度的增加,燃机进口温度的降低所带来的增益要好于进口压强的降低,燃机当量耗油率是下降的。

图2显示了随工作高度提升所带来的影响。如果不改变燃机的供油量,会带来燃机流量的下降和涡轮前总温的提升,加之当量耗油率降低斜率一直在变小,说明如果进一步升高工作高度会影响燃机的稳定运行。所以应该限制燃机在高原工作的工作时长。

如果进一步降低进口压强则会引起燃机内的部件性能急剧恶化,使燃机内部流通能力急剧下降,耗油率升高^[6]。

2) 温度特性

燃气轮机的高度特性是指其主要工作性能参数随其进口大气温度的变化。图3和图4分别给出了在海拔高度为0 m时,该燃气轮机动力涡轮输出功率和当量耗油率及燃机进口流量、涡轮前温度和排气温度随燃机进口温度与标准温度之间差值的变化。

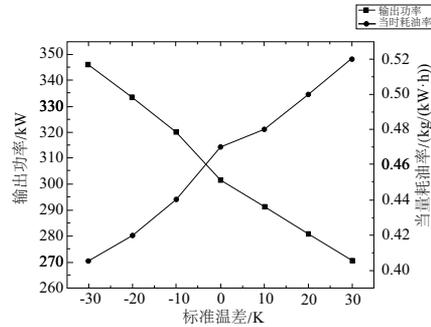


图3 动力涡轮输出功率和当量耗油率随标准温差的变化

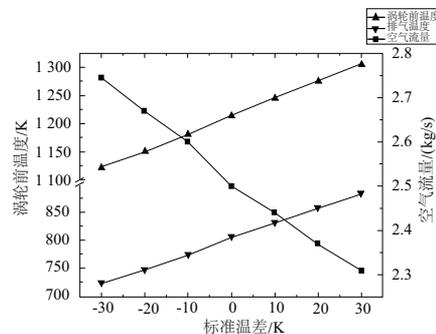


图4 燃机进口流量、涡轮前温度和排气温度随标准温差的变化

图3显示了燃机动力涡轮输出功率 N_{pt} 随温度的上升而减小,这是由于随燃机进口温度的升高,流经燃机的空气密度和流量(图4)都随之降低,同时会引起压气机压比的降低。而燃机当量耗油率则随环境温度的升高而降低。在低温区域,燃机当量耗油率高不符合其要求的经济型,而在高温区域,由于涡轮前温度的升高会引起压气机稳定裕度的减小,使燃机动态响应范围缩小,动态性能变差。

4 微型燃气轮机动态性能计算

所谓动态特性就是指燃机从一个稳定状态过渡到另一个稳定状态过程中发动机性能参数的变化。对于带脉冲发电机的燃机经常会发生载荷突变的情况,这会对动力段转速产生很大影响。为了使动力段转速尽量稳定,常用的方法是控制核心机的供油量。供油量的瞬时变化会对核心机产生很大影响,这就要求必须足够了解燃机核心机部分的动态性能,制定良好的调解方案,才能够在发生负载突变时,使燃机-脉冲发电机组尽快恢复稳定状态。

4.1 供油量突增工况

本文模拟了标准工况下燃机突增10%供油量时,燃

气轮机内部发生的动态变化过程。图5和图6分别表示动力涡轮输出功率、当量耗油率及核心机关键参数在燃油突增的情况下随时间发生的变化规律。整个系统在燃油突增后在2s左右回归稳定。

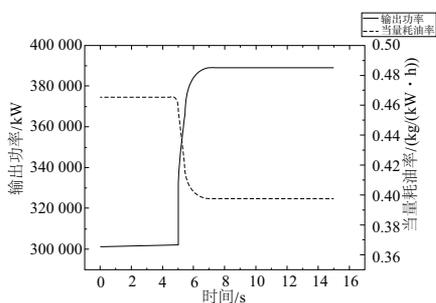


图5 供油量突增时动力涡轮输出功率和当量耗油率的变化

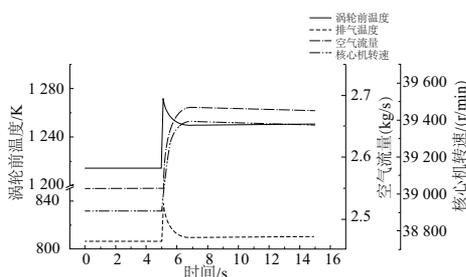


图6 供油量突增时燃机核心机关键参数的变化

图5表示动力涡轮输出功率和当量耗油率随时间的变化。在燃油量突然增加的过程中,随着燃气涡轮排气温度的瞬间增加,动力涡轮进口温度瞬间增加使得动力涡轮输出功率经过一个阶跃式的增加后,最终经历2s左右的时间达到稳定状态。

从图6中可以看出,在燃油增加的过程中,燃气轮机涡轮前温度和动力涡轮排气温度应该有所上升,可是值得注意的是,在燃油量突然增大的过程中,这两者均是先升高再降低最终回归稳定。这是由于燃油增加的速度很大,而燃气轮机转速增加相比于燃油量的增加是很慢的,油气比在这个过程中剧烈增加导致温度升高得很快,而随着燃气轮机转速慢慢提升以后,空气质量流量增加,油气比下降,燃气轮机涡轮前温度和动力涡轮排气温度随之下降,最终使整个系统回归平稳。

4.2 供油量突减工况

假设燃油质量流量比标准工况突然减少10%,燃油量变化如图7-图8所示。因为系统参数变化规律和之前加油情况类似,在本节中不再进一步说明。随着供油量的减少,燃气涡轮发出的功率降低使得燃气轮机主轴转速降低,导致了空气质量流量的减少和动力涡轮输出功率的降低。燃气涡轮前和动力涡轮排气初始温度分别为1250.9K和810.4K,过程温度最低值分别为1215.1K和653.6K,最终在779.7K和808.4K时达到稳定。

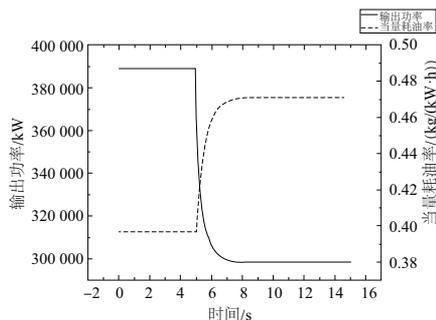


图7 供油量突减时动力涡轮输出功率和当量耗油率的变化

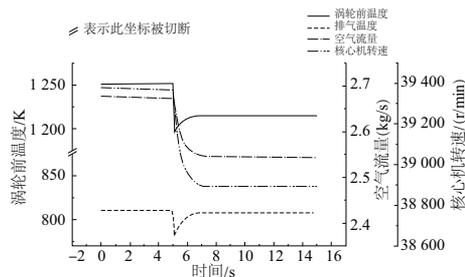


图8 供油量突减时燃机核心机关键参数的变化

5 结语

本文建立了带自由涡轮的微型燃气轮机数学模型,针对燃机-脉冲发电机组的工作特点,对其进行了稳态和动态性能仿真计算。通过对高度特性和温度特性的计算,可以直接得到其在不同海拔高度和大气温度工作环境下的工作性能参数。针对燃气轮机载荷突变情况,以控制燃油量的变化作为应对方案,得到以下结论:在燃油量突然增加的过程中,燃气轮机转速、空气质量流量、动力涡轮输出功率均立即增加,而燃气涡轮前温度以及动力涡轮排气温度会经历先上升再下降最终达到平稳;产生了一个曲线尖峰的过程,燃气轮机经历2s左右的时间达到稳定;而在燃油量突然减少的过程中,得到的结论与前者类似,只是系统稳定时间要比燃油突增情况下的长。

参考文献:

- [1] 黄国平,梁德旺,何志强. 大型飞机辅助动力装置与微型涡轮发动机技术特点对比[J]. 航空动力学报,2008,23(2):383-388.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 何季民. 微燃发电机展望[J]. 东方电气评论,2003,17(2):67-70,102.
- [5] 张俊文,马永光,高建强,等. 单轴燃气轮机建模与仿真研究[J]. 仪器仪表用户,2005,12(6):25-26.
- [6] 李政,王德慧,徐大懋. 微型燃气轮机变工况运行方式研究[J]. 汽轮机技术,2005,47(2):114-117.
- [7] 冯大庸. 航空发动机设计手册:第14册 辅助动力装置及起动机[M]. 北京:航空工业出版社,2001.

收稿日期:2020-11-11