

基于 Simscape 的重型燃气轮机建模与仿真研究

许萌萌¹, 朱玉昊¹, 冯 瑞², 刘永文¹

(1. 上海交通大学 燃气轮机研究院, 上海 200240;
2. 上海西门子燃气轮机部件有限公司, 上海 200240)

摘 要:现代重型燃气轮机的二次空气约占总空气通流量的 20% 左右, 对燃气轮机整体性能有着不可忽略的影响。为研究二次空气对重型燃气轮机的影响, 采用 Simscape 语言编写了燃气轮机通用模块库, 利用模块库搭建了重型燃气轮机模型, 并验证了模型的正确性。最后, 进行了变工况仿真实验, 结果表明二次空气冷却系统可以在保护高温透平的同时提高压气机效率, 从而优化了燃气轮机整体性能。

关 键 词:重型燃气轮机; 建模; 二次空气; Simscape

中图分类号: TK472 文献标识码: A 文章编号: 1009-2889(2015)01-0019-05

效率是发电用重型燃气轮机最重要的性能指标之一, 提高燃气轮机效率的两个最基本途径就是提高压气机压比和透平进口温度。随着现代重型燃气轮机透平进口温度的不断提高, 为保护透平主流道内的部件, 二次空气所占的比重也不断增加, 约占总空气通流量的 20% 左右。有效地提高二次空气系统的作用, 可以有效地减少由压气机内部抽走的压缩空气量, 提高燃气轮机的整体效率和性能^[1]。

现有的部分重型燃气轮机模型^[2-4]等虽然考虑了二次空气的作用, 但选择仿真的机型并不包含二次空气回路的控制, 而且由于使用了 Simulink 数学建模等方法, 虽然建立了通用模块库, 但由于接口众多, 并不方便使用。为克服上述缺点, 采用 Simscape 物理网络方法建模, 不仅可以有效减少模块接口, 而且在模型上增加二次空气回路控制模块的难度也大大降低。

1 西门子重型燃气轮机

西门子重型燃气轮机现有机型主要有 2000E、4000F、5000F 以及更加先进的 8000H, 其二次空气回路中具有流量控制阀的比重越来越大, 显示出二次空气冷却控制系统对燃气轮机性能的重要性。其中, SGT5-4000F 是西门子开发的第三代大功率重型燃气轮机, 由 15 级轴流式压气机、带有 24 个混合火

焰筒的环形燃烧室和 4 级反动式透平组成, 该机型采用全空气冷却, 并且所有冷却空气均来自压气机^[5]。图 1 为 SGT5-4000F 的二次空气回路示意图, 该机型内外二次空气回路总共有 9 条, 其中 4 条回路具有流量控制阀。需要注意的是, 同一压气机抽气级和透平冷却级采用 2 条带有控制阀的回路, 这是由于受单个控制阀尺寸限制, 不足以通过足够的冷却空气量, 但这同时可能会引起 2 条空气回路流量分配不均等问题。

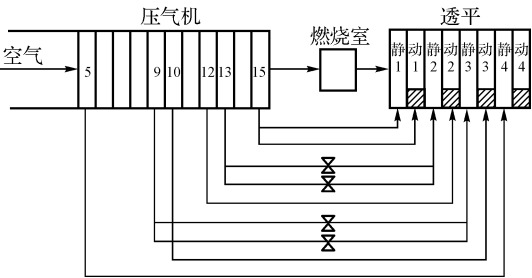


图 1 SGT5-4000F 二次空气回路

在这里, 二次空气冷却控制系统主要是指包括控制阀在内的控制阀的执行机构、控制器以及控制策略。图 2 为 SGT5-4000F 的二次空气控制系统示意图, 其基本控制原理是这样的: 设定一压比值, 该压比值指透平冷却级压力与压气机出口压力的比值, 该设定值根据环境温度和燃气轮机功率进行修

正,并与实际测得的压比值进行比较,通过三相开关控制,来实现电机的正反转,从而改变蝶阀的开度,进而改变相应二次空气回路的冷却空气量。

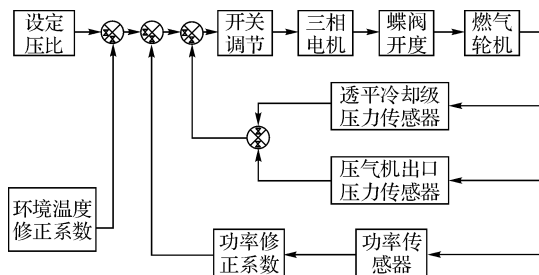


图2 二次空气冷却控制系统

2 重型燃气轮机建模与验证

2.1 Simscape 简介

Simscape 是 Simulink 产品家族中比较新的一员。不同于 Simulink 数学建模的方式, Simscape 采用物理网络方法构建模型(即非因果建模),使用这种方式建模,模型描述的是系统的物理结构,而非底层的数学原理。同时, Simscape 支持二次开发功能,非常适合用户根据自身需求编写通用模块库。目前,使用 Simscape 建模与仿真的文献较少,其中,文献[6]~[9]已经尝试使用 Simscape 解决一些工程问题,但基本上停留在使用 Simscape 已有的建模块件,无法满足燃气轮机建模。为此,需利用 Simscape 的二次开发功能,建立燃气轮机的通用模块。

2.2 燃气轮机通用模块库

图3为燃气轮机通用模块库,包含了燃气轮机部件、二次空气控制系统模块以及相关传感器模块。下面将介绍主要模块的建模原理与过程。

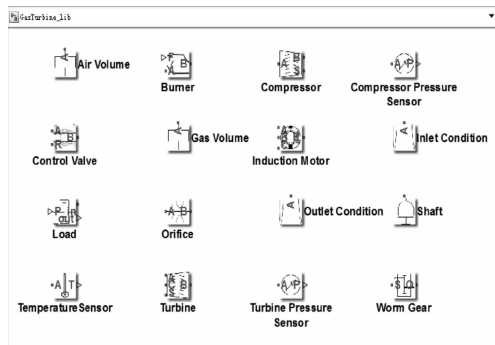


图3 燃气轮机通用模块库

2.2.1 工质热力学特性

在建立燃气轮机部件之前,需要充分考虑工质的热力参数的影响。对于燃气轮机而言,其工质最主要的两个热力学参数是气体常数和比热容。其中,气体常数仅受工质种类影响,而比热容的大小受

工质种类和温度影响。在燃气轮机工作过程中,压气机的工作介质为空气,因此其气体常数不变,而比热容是温度的函数;透平的工作介质为烟气,烟气的组分变化由空燃比决定,因此气体常数为空燃比的函数,而比热容是温度和空燃比的函数。

2.2.2 进出口模块

进出口模块给定了重型燃气轮机进口和出口的环境大气的温度、压力和气体成分,并分别与压气机进口和透平出口连接。

2.2.3 压气机模块

压气机的特性曲线由文献[10]的方法获得,之后压气机模块采用级堆叠法^[11]搭建,并采用文献[12]中的平均级特性获取的方法。压气机模块按照抽气点的个数可分为若干段,由于采用的是非因果建模的方法,故压气机模块的每一段不需要额外的抽气端口。压气机模块每一段可由以下函数表示:

$$\frac{q_{m,c}\sqrt{T_1}}{p_1} = f_1(\pi_c, \frac{n}{\sqrt{T_1}}) \quad (1)$$

$$\eta_c = f_2(\pi_c, \frac{n}{\sqrt{T_1}}) \quad (2)$$

式中: T_1 为进口温度; p_1 为进口压力; $\frac{q_{m,c}\sqrt{T_1}}{p_1}$

为折合质量流量; $\frac{n}{\sqrt{T_1}}$ 为折合转速; π_c 为压比值; η_c

为绝热压缩效率。

2.2.4 容积模块

为了反映燃气轮机部件内部的非稳定质量和能量平衡,需要在压气机每一段之间和透平级之间加容积模块来模拟。容积模块根据质量和能量守恒方程,可得:

$$\frac{V_p}{RT} \left(\frac{dp}{dt} - \frac{p}{T} \times \frac{dT}{dt} \right) = q_m \quad (3)$$

$$\frac{c_v V_p}{R} \times \frac{dp}{dt} = Q \quad (4)$$

式中: V_p 为容积模块当量体积; p 、 T 为容积模块的压力和温度; R 为气体常数; c_v 为定容比热容; q_m 为容积模块的流量; Q 为容积模块的热能。

2.2.5 燃烧室模块

燃烧室应反映其内部的非稳态质量和能量平衡,根据质量和能量守恒方程,可得:

$$q_{m,in} + q_{m,f} - q_{m,out} = \frac{V_b}{RT_2} \left(\frac{dp_2}{dt} - \frac{p_2}{T_2} \times \frac{dT_2}{dt} \right) \quad (5)$$

$$q_{m,in} h_{in} + q_{m,f} h_f - q_{m,out} h_{out} = \frac{c_v V_b}{R} \times \frac{dp_2}{dt} \quad (6)$$

式中: $q_{m,in}$ 、 $q_{m,f}$ 、 $q_{m,out}$ 分别为燃烧室进口空气、

进口燃料、出口烟气质量流量; h_{in} 、 h_{out} 为燃烧室进出口焓值; h_f 为燃料热值; V_b 为燃烧室当量体积; R 为气体常数; c_v 为定容比热容; p_2 、 T_2 为燃烧室出口压力和温度。

2.2.6 透平模块

透平模块与压气机模块建模方法类似,透平模块按级分解。所不同的是,由于透平主流道为烟气,而冷却口进入的工质为空气,故透平每一级有两个进口。工质在透平做功之前,烟气和空气首先进行预混合,根据质量和能量守恒,其表达式为:

$$q_{m,i1} + q_{m,i2} = q_{m,t} \tag{7}$$

$$Q_{i1} + Q_{i2} = Q_t \tag{8}$$

式中: $q_{m,i1}$ 、 $q_{m,i2}$ 、 $q_{m,t}$ 分别为混合前后的质量流量; Q_{i1} 、 Q_{i2} 、 Q_t 分别为混合前后的能量。

2.2.7 转子模块

转子连接压气机、透平和负载。在动态仿真模型中,应考虑转子的转动惯性,根据角动量平衡方程,可得:

$$J \frac{d\omega}{dt} = (t_t - t_c - t_l) \tag{9}$$

式中: J 为转动惯量; ω 为转子转速; t_t 、 t_c 、 t_l 分别为透平输出扭矩、压气机输入扭矩和负载吸收扭矩。

2.2.8 管阻与蝶阀模块

管阻与蝶阀模块是从压气机抽气口到透平冷却口的阻力模块,其中,管阻模块可由下式表达:

$$q_m = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} |\Delta p|} \tag{10}$$

式中: q_m 为质量流量; C_d 为流量系数; A 为节流面积; ρ 为密度; Δp 为进出口压差。

与管阻模块不同的是,蝶阀模块的流量系数是蝶阀开度的函数,故在不同蝶阀开度下,蝶阀的流通能力是不同的。

2.2.9 电机模块

电机模块采用机理建模,其动态模型由磁链方程、电压方程、转矩方程和运动方程组成,限于篇幅,具体可参考文献[13]。

2.3 系统模型搭建与验证

2.3.1 模型搭建

根据西门子 SGT5-4000F 机型,采用燃气轮机通用模块库,搭建重型燃气轮机模型如图 4 所示,1 为燃气轮机的主控制器,在本模型中采用的是转速控制^[14]。2 为燃气轮机本体,两端为进出口环境模块,左侧压气机根据抽气口数量分解为 6 段,中间为燃烧室,右侧透平分解为四段,压气机和透平每段之间为体积容性模块。3 为二次空气回路模块,其控制阀采用蝶阀。4 为相关压力和转速传感器模块。5 为负载模块。6 为二次空气冷却控制系统。模型的控制器的均使用 Simulink 搭建。为简化模型,冷却透平动叶片的空气在下一级透平做功,忽略气体混合的损失。

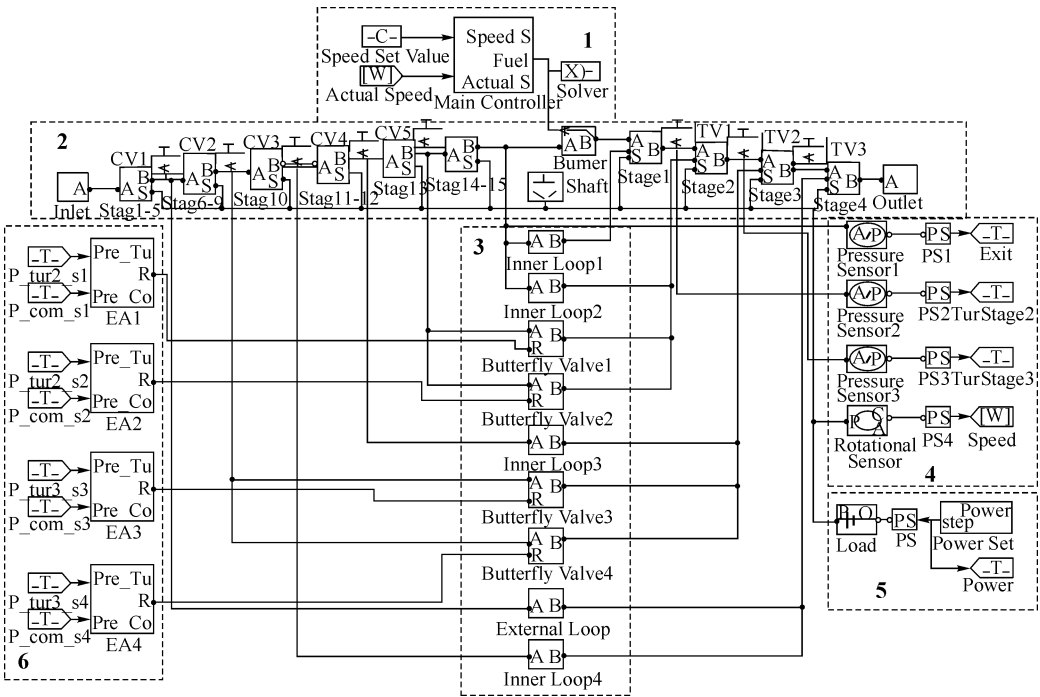


图 4 重型燃气轮机模型

2.3.2 模型验证

为验证模型的正确性,通过模型获得的输出参数与 SGT5-4000F 的技术指标进行对比,如表 1 所示。通过比较易见,重型燃气轮机模型输出参数与实际的技术指标接近,能够证明模型的合理性和正确性,保证了在设计点附近进行变工况仿真实验的合理性。

表 1 SGT5-4000F 技术指标与模型输出参数对比

参数	设计值	模型输出	误差
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	3 000	3 000	0%
功率/MW	307	307	0%
循环效率/%	40	40.336	0.84%
压比	18.8	18.974	0.93%
排气流量/($kg \cdot s^{-1}$)	723	724.522	0.21%
排气温度/ $^{\circ}C$	579	578.331	-0.12%

3 变工况仿真实验

根据前面对 SGT5-4000F 重型燃气轮机二次空气冷却控制系统的初步介绍可知,二次空气可控回路通过改变阀门的开度,从而改变了该回路的阻性,该回路的空气通流量随之变化,进而影响到其他回路。

为进一步分析二次空气冷却控制系统对重型燃气轮机整体性能的影响,利用搭建的燃气轮机模型,进行了设计工况点附近的变工况仿真实验,其仿真结果如图 5 ~ 图 11 所示。

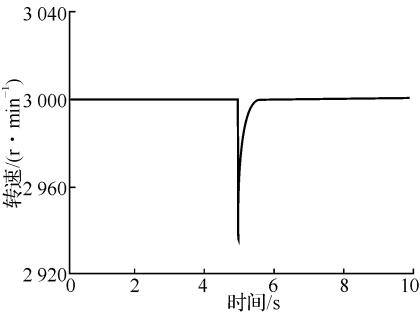


图 5 燃气轮机转子转速随时间的变化

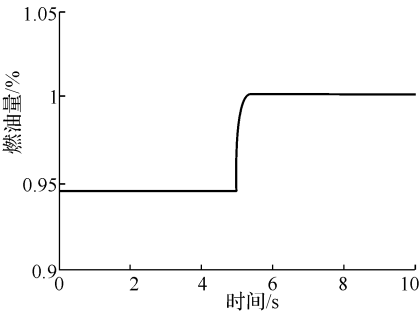


图 6 燃油量相对值随时间的变化

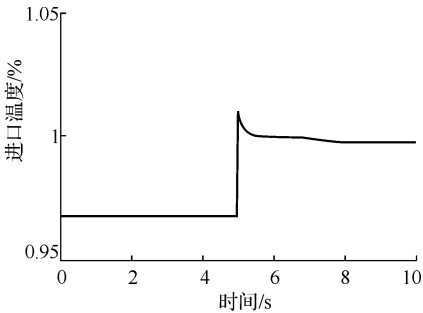


图 7 透平进口温度相对值随时间的变化

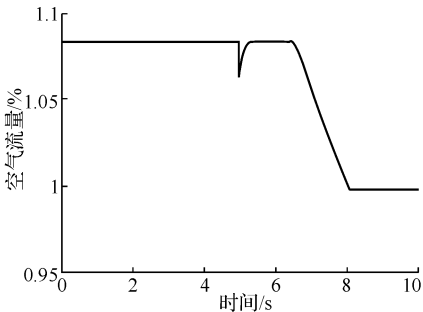


图 8 可控二次回路空气流量相对值随时间的变化

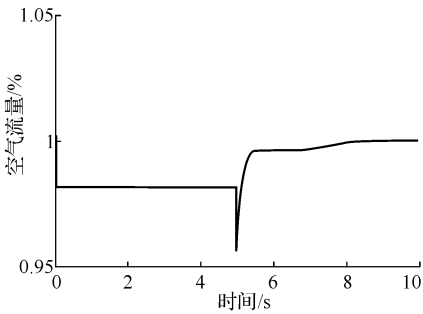


图 9 非可控二次回路空气流量相对值随时间的变化

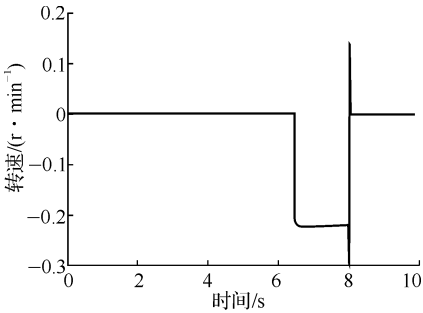


图 10 电机输出转速随时间的变化

在该仿真试验中,设定负载功率相对值从 0.93 在 5 s 时增加到 1。负载功率突然增加导致燃气轮机转子转速从额定转速 3 000 r/min 突然下降到 2 940 r/min 左右,然后迅速恢复,如图 5 所示;燃油量相对值在转速控制器作用下迅速增加,如图 6 所

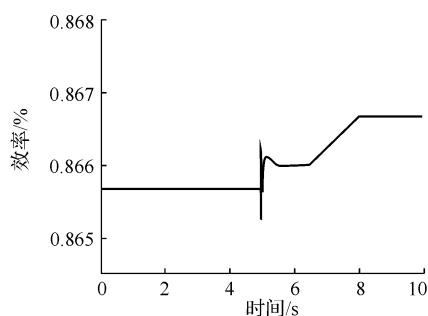


图 11 压气机效率随时间的变化

示;进而透平进口温度相对值也产生突变,产生超调后维持在一高值,如图 7 所示。由于二次空气冷却控制系统的采样频率低于主控制器的采样频率,其执行机构要比燃油系统动作要慢,有一定的延迟时间,此时尚未动作,二次空气回路在产生一个流量下降峰值后快速增加并恢复到大于原有空气流量的水平,如图 8 和图 9 所示,其中图 8 为模型中从压气机第 13 级到透平第 2 级的可控二次空气回路流量变化曲线,图 9 为从压气机出口(第 15 级)到透平第 1 级的不可控二次空气回路流量变化曲线。在 6.5 s 左右,二次空气冷却控制系统在压力和功率信号的反馈下,最终产生动作,使电机反转,如图 10 所示;这时可控回路的蝶阀开度逐渐减小,其空气通流量逐渐减小,如图 8 所示;而冷却透平第 1 级的二次空气回路的冷却空气量却逐渐增加,如图 9 所示,而该回路的冷却空气量约占二次回路总空气量的 30% 左右,故对透平第一级的冷却效果是明显的;此时透平进口温度在冷却空气的作用下逐渐降低,以达到维持透平长时间寿命的温度,如图 7 所示。图 11 为压气机的效率曲线,在二次空气冷却控制系统动作后其达到了较高值。

通过上述分析,二次空气冷却控制系统能够在不同工况下改变二次空气回路的阻性,以达到二次分配空气冷却量的目的,既保护了透平主流道内的部件,又使压气机效率得到了提升,因此有效地改善了燃气轮机的整体性能。这同时验证了使用 Simscape 搭建的该重型燃气轮机模型可以用作二次空气回路优化分析的工具。

4 结论

(1) 通过介绍西门子 SGT5-4000F 重型燃气轮机及其二次空气回路系统,初步分析了二次空气冷却控制系统的控制策略与基本功能。

(2) 采用 Simscape 语言编写了燃气轮机通用

模块库,并按照 SGT5-4000F 搭建了重型燃气轮机模型,既证明了 Simscape 搭建燃气轮机模型的可行性,同时也验证了燃气轮机模型的正确性。

(3) 通过变工况仿真实验,指出二次空气冷却控制系统可以在保护高温透平的同时提高压气机的效率,从而能够优化重型燃气轮机整体的性能。

参考文献:

- [1] 蒋洪德. 重型燃气轮机的现状和发展趋势[J]. 热力透平, 2012, 14(2): 83-88.
- [2] G. Crosa F. Pittaluga A. Trucco, F. Beltrami A. Torelli F. Traverso. Heavy-Duty Gas Turbine Plant Aero-thermodynamic Simulation Using Simulink[J]. Gas Turbine Power, 1998, 120: 550-556.
- [3] V. panov. GASTURBOLIB-Simulink Library for Gas Turbine Engine Modeling[J]. Proceedings of ASME Turbo Expo, 2009(1): 555-565.
- [4] 刘尚明, 李忠义. 基于 SIMULINK 的单轴重型燃气轮机建模与仿真研究[J]. 燃气轮机技术, 2009, 22(3): 33-39.
- [5] 付功伟, 王佳伟, 杨建军, 等. 上海电气-西门子 SGT5-4000F 燃气-蒸汽联合循环机组技术特点综述[C]. 中国动力工程学会透平专业委员会 2008 年学术论文集.
- [6] 陈柏松, 伍先俊, 李兢. 基于 Simscape 的 2 级双作用液压缸的建模仿真研究[J]. 机械制造, 2009(4): 6-8.
- [7] 马钧, 何娅伶, 于玉真. 基于 Simscape 的塑料-钢螺旋蜗轮蜗杆稳态热分析[J]. 燕山大学学报, 2011(35): 413-416.
- [8] 钱森, 晔斌, 曹建斌, 等. 基于 Matlab/Simulink 的汽车起重机变幅机构的优化与仿真[J]. 机械传动, 2012(36): 41-43.
- [9] 刘迎澍, 刘建才. 基于 Simscape 的车辆 ABS 建模与仿真研究[J]. 计算机仿真, 2013(30): 148-152.
- [10] 夏迪, 王永泓. PG9171E 型燃气轮机变工况计算模型的建立[J]. 热能动力工程, 2008(23): 338-343.
- [11] S. M. Camporeale B. Fortunato M. Mastrovito. A Modular Code for Real Time Dynamic Simulation of Gas Turbines in Simulink[J]. Gas Turbine Power, 2006, 128: 506-517.
- [12] 马文通, 刘永文, 苏明. 多级轴流式压气机平均模型级特性获取方法[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(12): 1954-1958.
- [13] 纪志成, 薛花, 沈艳霞. 基于 Matlab 交流异步电机矢量控制系统的仿真建模[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(3): 384-389.
- [14] W. I. Rowen. Simplified Mathematical Representations of Heavy-Duty Gas Turbines[J]. Gas Turbine Power, 1983, 105: 865-869. Heavy-Duty Gas Turbine Modelling and Simulation basing on Simscape.

(下转第 34 页)