

燃气轮机双燃料切换控制策略研究

刘明依,王冰晓,冉军辉,杨 健

(中国船舶重工集团公司第七〇三研究所,黑龙江 哈尔滨 150078)

摘 要:为了使国产某型双燃料燃气轮机具备实时可靠的天然气-燃油双向燃料切换,需要制定出适用于燃机燃料切换的控制逻辑。通过 MATLAB Simulink 软件对双燃料燃机油-气切换与气-油切换过程进行了数值仿真。结果表明:所提出的燃料切换控制逻辑能够满足燃机 0.85 工况运行时在 60 s 以内实现双燃料切换,且燃烧过程可控的性能指标要求。

关 键 词:燃气轮机;双燃料切换;控制逻辑;Simulink 仿真

中图分类号:TP273 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2020.03.006

[引用本文格式]刘明依,王冰晓,冉军辉,等.燃气轮机双燃料切换控制策略研究[J].热能动力工程,2020,35(3):45-50. LIU Ming-yi, WANG Bing-xiao, RAN Jun-hui, et al. Research on duel fuel switching control strategies for the turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(3):45-50.

Research on Duel Fuel Switching Control Strategies for the Turbine

LIU Ming-yi, WANG Bing-xiao, RAN Jun-hui, YANG Jian

(No. 703 Research Institute of CSIC, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: In order to realize real-time and reliable fuel switching between natural gas and diesel on a domestic dual-fuel gas turbine, it is necessary to develop a suitable control logic for the fuel switching. In this paper, the process of oil-gas switching and gas-oil switching of dual-fuel engine has been carried out by the MATLAB Simulink simulation software. The simulation results show that the control logic selected in this paper meets the performance requirements of dual-fuel gas engine operating under 0.85 operating conditions: switching time less than 60 seconds and providing a controllable combustion process.

Key words: gas turbine, duel fuel switching, control Logic, Simulink simulation

引 言

目前,很多燃气轮机都使用双燃料,即气体燃料和液体燃料。两种类型的燃料能够互相切换和混烧,使得燃气轮机系统对燃料的适应性得以提高。而海上油气开采平台所开采的天然气与燃油作为得天独厚的环境资源,则可以为双燃料燃气轮机发电提供充足的石化能源。

为了满足海上平台对国产燃气轮机双燃料运行

模式的需求,需要在现有的国产船用燃气轮机燃烧室以及燃料系统基础上,结合国外多型机组双燃料系统的设计理念,对国产船用燃气轮机燃烧室结构、燃料系统布置以及机旁控制系统进行改进设计。对于燃气轮机而言,燃烧室出口温度是在燃机燃料切换的过程中,燃气发生稳定与否最直观的性能指标;在燃料切换过程中,燃气轮机转速、功率和温度等量的波动幅度与范围都与双燃料切换控制系统有关。

双燃料切换控制作为国内工程应用的新问题,现有相关研究内容较少,杨家龙、王涛等人针对化学

收稿日期:2019-03-25; 修订日期:2019-04-24

基金项目:上海市科委战略新兴产业引导专项(16DZ1121202)

Fund-supported Project: The Special Project of Shanghai Science and Technology Commission's Strategic Emerging Industries(16DZ1121202)

作者简介:刘明依(1993-),男,黑龙江哈尔滨人,中国船舶重工集团公司第七〇三研究所硕士研究生, E-mail:liumingyi1993@163.com.

回热循环的柴油与裂解气的燃料切换控制策略做了相关的研究^[1],南京燃气轮机研究院的刘瑞同对双燃料燃气轮机的燃料切换与混烧给出了燃料切换的相关原则^[2],东南大学的潘蕾、杨瑜文等人通过理论建模与数值仿真方法,建立了双燃料伺服系统的动态数学模型^[3]。

由于国内相关参考资料较少,为了保证双燃料燃烧室在使用中柴油与天然气燃料的顺利切换,本文分析国外双燃料机组燃料切换控制策略与实机切换过程监测数据,提出了切换时间相对最短且燃烧过程可控的控制策略,采用 MATLAB Simulink 软件对切换过程中的性能指标要求进行了仿真分析。证明了其合理性和可行性。

1 双燃料系统设计

1.1 双燃料系统组成

双燃料系统主要由天然气系统、燃油系统和空气吹扫系统组成。其主要功能是为双燃料喷嘴供给燃油、天然气燃料,以及对未工作的燃料通路持续供应吹扫空气或天然气,从而实现单一燃料的稳定燃烧及双燃料的稳定切换。

气体燃料系统主要由过滤器、切断阀、点火阀门、吹扫阀门和气态燃料调节阀等部件组成,具备燃机点火、燃料过滤、燃料调节和紧急切断等功能,如图 1 所示。

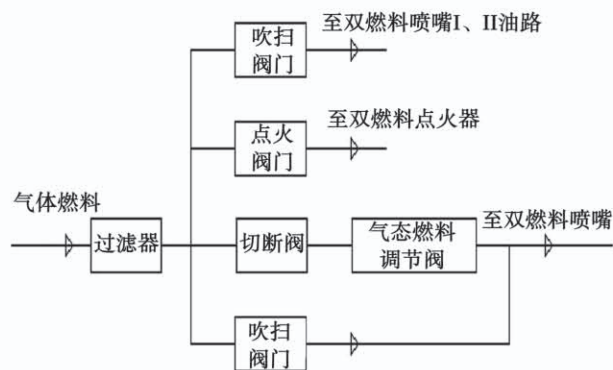


图 1 气体燃料系统

Fig. 1 Gas fuel system block diagram

液体燃料系统主要由过滤器、高压油泵、点火阀门和液态燃料调节阀等组成,具备燃机点火、燃油过滤、燃油增压和燃油量调节等功能,如图 2 所示。

在燃机采用燃气或燃油运行的过程中,为防止连接到燃烧室且未投入工作状态的燃气、燃油及喷水通道发生燃料聚集及燃烧回流现象,利用压气机排气对这些管道进行吹扫^[4]。

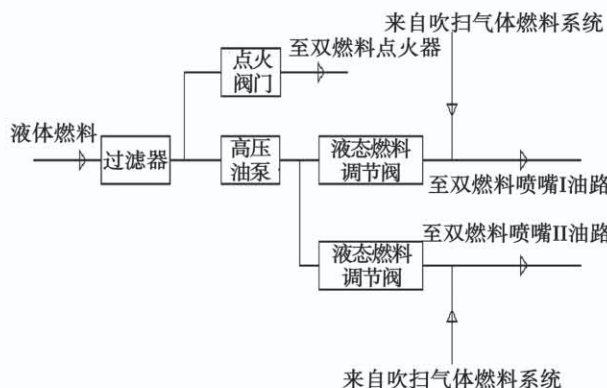


图 2 液体燃料系统

Fig. 2 Diesel fuel system block diagram

1.2 双燃料系统功能

燃料切换分为燃油切换至天然气和天然气切换至燃油两种情况,控制系统需根据相应的切换指令,在保证调节目标不变的情况下,当满足燃料切换条件时,按步骤和设定速率调整燃料阀门的输出,从而在一定的时间内完成燃料切换,并保证机组在燃料切换过程中平稳、无扰动地运行。

双燃料系统运行时应具备以下性能指标:

(1) 天然气切换燃油切换时长不大于 60 s,切换工况范围 0.20 ~ 0.85。

(2) 燃油切换天然气切换时长不限(初定 3 ~ 4 min),切换工况范围 0.20 ~ 0.85。

(3) 燃料切换期间,机组容许输出功率波动应不大于 ± 0.5 MW。

2 双燃料切换控制策略

2.1 双燃料切换影响因素

天然气切换燃油过程流程如图 3 所示,主要包括切换命令输入、切换准备、燃料切换和切换结束过程控制几个阶段。“切换准备”时间为设备固有时间;燃料切换是影响天然气快速切换燃油时间的关键阶段,而燃烧室性能闭环调节是造成燃料实际切换时间与燃料设定切换时间偏差的主要原因。

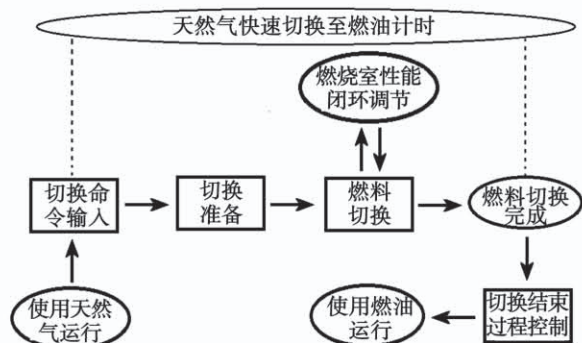


图3 天然气切换燃油控制流程图

Fig.3 The analysis chart of dual-fuel exchange influencing factors

2.2 切换过程双燃料混烧

双燃料燃气轮机燃料混烧过程一般应遵循以下原则:

(1) 只有机组负载高于某一允许数值之后才可以混烧,允许混烧的负载一般为机组额定负载的20%~30%。

(2) 为了避免喷嘴的压力比过小(<1.025)而引起的燃烧脉动。机组满载时,气体燃料与总燃料的比例不小于30%,允许负载下不得小于60%。

(3) 由于多数液体燃料的调节过程都采用定排量泵、燃油旁通的方式,液体燃料的比例太小将必然导致过量的燃料在泵内循环,引起过热、损害油泵。因此,液体燃料占总燃料比例不得小于10%。

图4为某轻油、天然气双燃料机组的允许混烧区。燃气轮机在两种燃料切换的混烧过程中,可能会由于两种燃料供给的不匹配,使混烧状态出现变化,导致燃烧室内燃料燃烧火焰过长或过短,烧蚀低压涡轮叶片或燃料喷嘴,在极限情况下,甚至可能会导致燃烧室超温或熄火。因此,需要明确切换混烧过程中的油气比例,进而实现燃料切换时间短的同时又能够保持燃烧室火焰驻定位置(燃烧室出口平均温度)及火焰的稳定性(燃烧室内动态压力值)。

允许双燃料混合燃烧的油气比例随着工况的变化而改变。因此在机组运行时,在线燃料切换应当迅速通过油气比例限制点,进入可以稳定燃烧的油气比例区域,从而保证机组稳定运行。

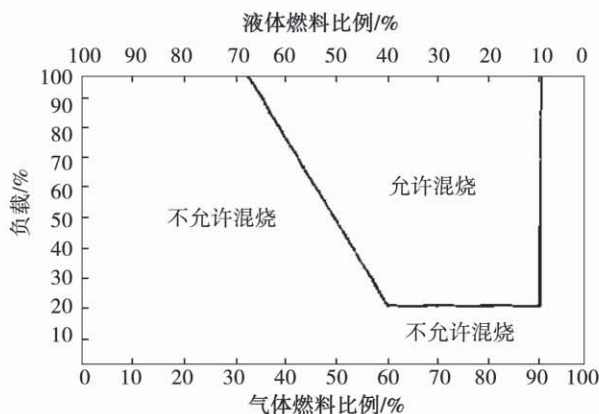


图4 天然气和轻油的混烧

Fig.4 Mixed combustion of natural gas and light oil

2.3 燃料变化率的控制策略

由于设计输入中,天然气组分存在变化,因此对于两种燃料的最大变化率,以燃油为基准,采用拟合公式推导等功率下的天然气最大变化率。

燃油变化率选在0.85稳定工况下,理论切换完成时间60s对应的数值进行切换尝试。由于天然气切换燃油有时间限制,可采用逐步增加燃油变化率,缩短切换时间,同时视功率波动情况,选择最短切换时间。

依据国外机组两种燃料流量与功率对应关系可知,在0.2~1.0工况范围内,相等发电机端子功率下的天然气流量与燃油流量比值约为1.18,同时考虑天然气组分变化,天然气流量变化率为:

$$dG_g = dG_L \times \alpha_1 \times \alpha_2 \quad (1)$$

式中: α_1 —相等功率下燃油与天然气流量的比值,初设 $\alpha_1 = 1.18$; α_2 —天然气热值对天然气流量的修正系数, α_2 的值通常会随着外界环境的变化而发生改变,将 α_2 的值取为理想值1。

2.4 燃料切换开始与结束切换前的控制策略

由于实机与理论仿真对燃料阀开启与关闭的方式不同,需要在燃料切换开始与结束前,针对即将开启与关闭的燃料通路加入适当的开环控制:

(1) 燃料切换开始控制策略:两种燃料切换前,将切入的燃料对应的调节阀开启至最小燃料流量对应开度,待燃烧室出口温度稳定后,开始两种燃料相互切换。

(2) 燃料切换结束控制策略:燃料切换结束前,

当一种燃料调节阀开度减小至最小燃料流量对应开度时,该燃料调节阀瞬时关闭,另一种燃料调节阀开度增大,使其燃料流量提升至设定值,以维持输出功率稳定。

由于只涉及理论仿真部分,故将燃料切换开始前切入的燃料流量与燃料切换结束前切出的燃料流量设定为零。

2.5 燃烧室出口温度调节控制策略

燃烧室出口温度调节分为主动调节和从动控制两个部分。主动调节即为主动装置改变阀门开度调节燃烧室出口温度;从动控制即为在主动装置调节燃烧室出口温度过程中,从动装置仅按控制程序设定动作。本文主要研究燃机处于 0.85 工况下燃烧室出口温度波动为 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,燃机输出功率变化不超过 $\pm 564.4\text{ kW}$ 双燃料切换控制的性能指标。

3 双燃料切换控制策略仿真试验验证

3.1 燃机仿真模型

燃气轮机模型如图 5 所示,动力涡轮转速 n_3 作为 PID 调节的控制变量,变量说明如表 1 所示。

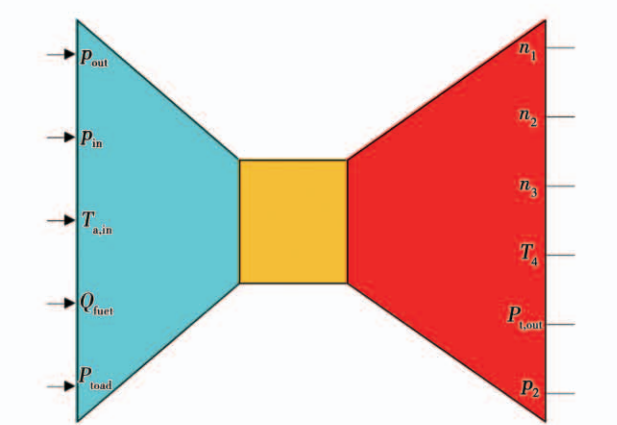


图 5 燃气轮机仿真模型

Fig. 5 Gas turbine simulation model

3.2 双燃料切换控制模型与控制逻辑说明

仿真控制模型如图 6 所示,基于双燃料燃机模型燃油的供给方式,通过燃料阀流量 - 阀门角度 - 电信号计算转换模块与封装在子系统 subsystem 内的电信号 - 阀门角度 - 燃料阀流量转换模块,将原有燃机模型中的单燃料控制转换为柴油 - 天然气双

燃料控制。

表 1 燃气轮机仿真模型输入输出变量

Tab. 1 Gasturbine simulation module in&out parameter

变量	说明
p_{out}	进口空气压力
p_{in}	出口空气压力
$T_{a,in}$	进口空气温度
Q_{fuel}	燃油流量
P_{load}	负载
n_1	低压压气机转速
n_2	高压压气机转速
n_3	动力涡轮转速
T_4	低压涡轮后排气温度
$P_{1,out}$	燃机输出功率
p_2	高压压气机出口压力

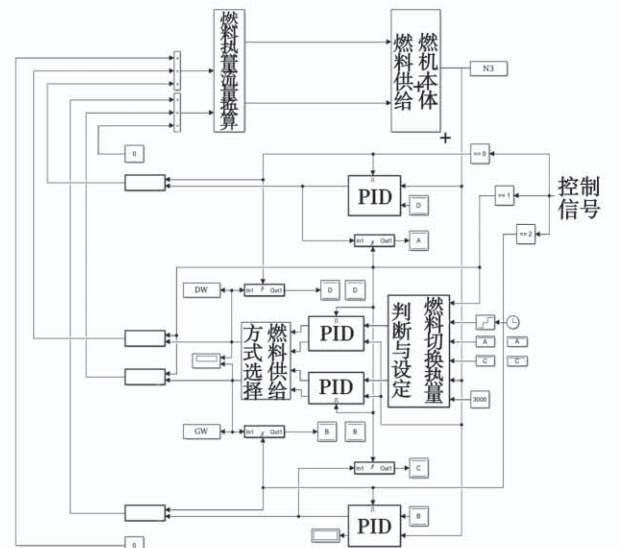


图 6 双燃料切换控制仿真模型总图

Fig. 6 General diagram of simulation model for dual fuel switching control

控制仿真模型总图中右侧模式选择模块根据控制信号(Control) 的选择,分为三类机组控制状态:单燃油运行、切换过程双燃料混烧运行与单燃气运行。

单燃料运行状态(Control = 1, 3) 时,机组处于稳定工况。当燃料切换开始后,随着控制信号 Control 状态的变化,当前机组输出的燃油燃烧放热或燃气燃烧放热分别存储于中间变量 A 与 C 中,随后

通过燃料切换热量判断与设定模块判断出当前放热量,并输出对应当前切换控制模式的给定燃油量与给定燃料量。随后将燃油与燃气放热输出给燃料供给方式选择并计算出对应的燃料流量输送到燃料阀流量-阀门角度-电信号计算转换模块,形成控制闭环。

3.3 仿真试验结果

3.3.1 柴油切换天然气

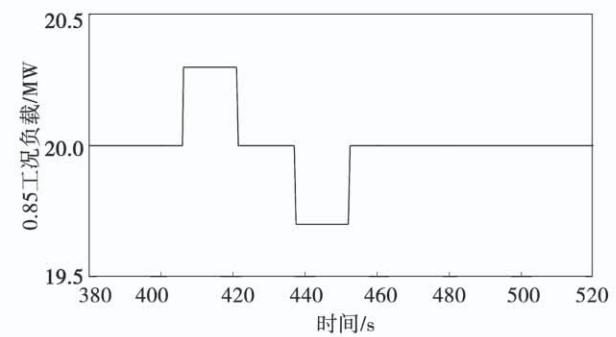


图 7 油-气切换过程负载变化

Fig. 7 Load variation in diesel-gas switching

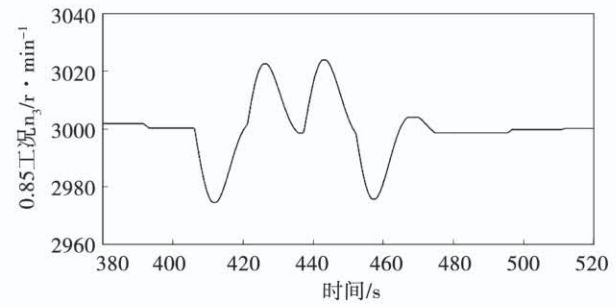


图 8 油-气切换过程 n_3 转速变化

Fig. 8 n_3 variation in diesel-gas switching

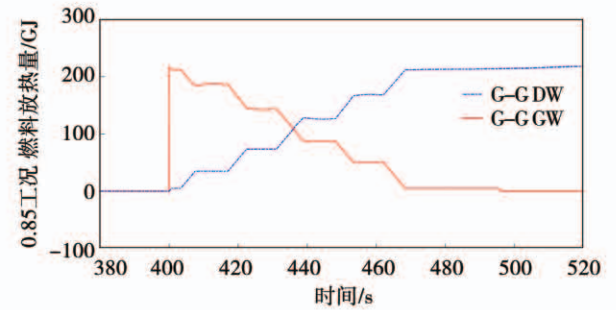


图 9 油-气切换过程柴油与天然气燃烧热量变化

Fig. 9 The variation of gas & diesel heat combustion in diesel-gas switching

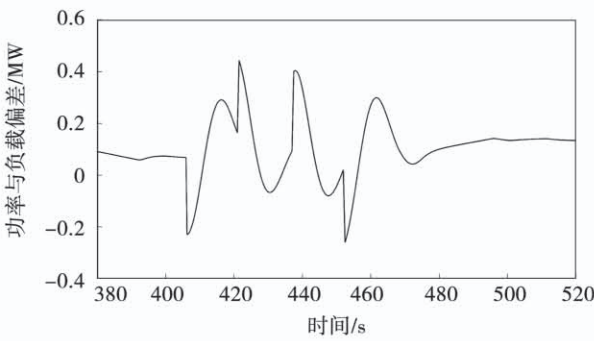


图 10 油-气切换过程燃机输出功率与当前负载偏差

Fig. 10 The difference between turbine output and current load in diesel-gas switching

3.3.2 天然气切换柴油

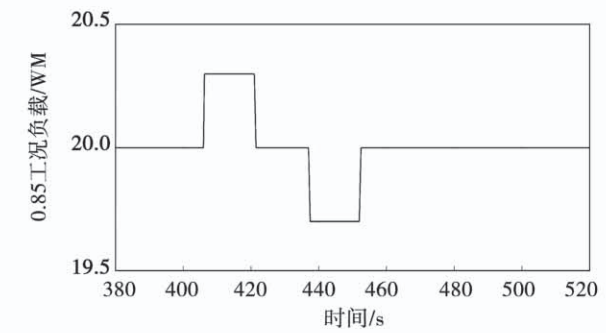


图 11 气-油切换过程负载变化

Fig. 11 Load variation in gas-diesel switching

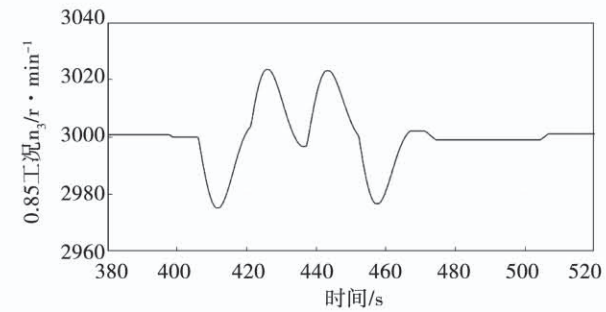


图 12 气-油切换过程 n_3 转速变化

Fig. 12 n_3 variation in gas-diesel switching

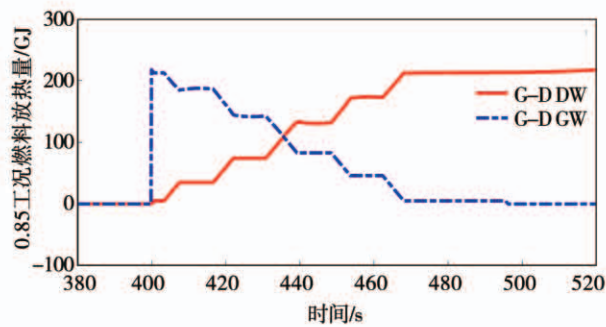


图 13 气-油切换过程柴油与天然气燃烧热量变化

Fig. 13 The variation of gas & diesel heat combustion in gas-diesel switching

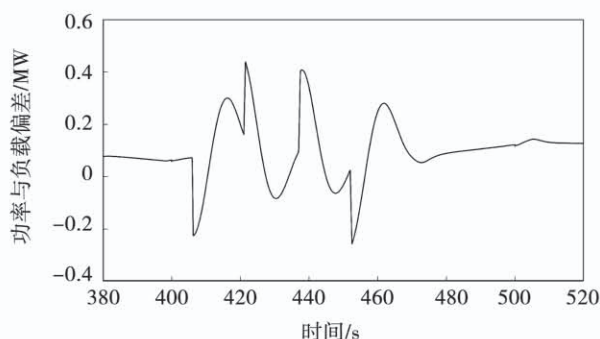


图 14 气 - 油切换过程燃机输出功率与当前负载偏差

Fig. 14 The difference between turbine output and current load in gas-diesel switching

4 结 论

在海上平台燃气轮机双燃料切换过程中建立了燃机本体模型和燃料切换控制模型,并且在 MATLAB Simulink 仿真的过程中,针对燃机 0.85 工况 (20 MW) 燃油 - 天然气双向切换过程进行了数值仿真,得到结论:

(1) 考虑到切换过程中可能出现外界因素从而引起燃机负载发生变化,故在双燃料切换仿真中引入 0.3 MW 的负载波动。并且 n_3 在负载变化的影响下切换过程中最大波动不超过 30 r/min, 试验仿真模型满足燃机燃烧室出口温度控制在 $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (n_3 转速波动 $\pm 150\text{ r/min}$) 的需求。

(2) 天然气切换燃油与燃油切换天然气的切换时长分别为 48 与 50 s 均小于预计 60 s 的切换时长。

(3) 油切气、气切油过程中的燃机输出功率与燃机当前负载最大偏差分别为:460.5 与 430.6 kW, 两者均满足 0.85 工况下允许功率变化量小于 $\pm 564.4\text{ kW}$ 要求。

所构建的燃气轮机双燃料切换控制逻辑与仿真模型符合设计需求,可以为后续实机设计与验证试验提供一定的基础。

参考文献:

- [1] 杨家龙,王 涛,郑洪涛,等. 燃气轮机燃烧室双燃料切换过程控制[J]. 控制工程,2009(3):166-168.
YANG Jia-long, WANG Tao, ZHENG Hong-tao, et al. Control of dual-fuel exchange of gas turbine combustion chamber[J]. Control Engineering of China, 2009(3):166-168.
- [2] 刘瑞同. 双燃料燃气轮机的燃料切换与混烧[J]. 燃气轮机技术, 2001, 14(1): 54-55.
LIU Rui-tong. Fuel transfer and mixed fuel operation in the dual-fuel GT[J]. Gas Turbine Technology, 2001, 14(1): 54-55.
- [3] 潘 蕾,杨瑜文,林中达. 燃气轮机双燃料伺服系统动态数学模型的研究[J]. 动力工程学报, 2001, 21(3): 1197-1202.
PAN Lei, YANG Yu-wen, LIN Zhong-da. Study on the dynamic property of the dual fuel servo system in gas turbines[J]. Power Engineering, 2001, 21(3): 1197-1202.
- [4] 蔡志杰. 9FA 双燃料燃气轮机燃料和吹扫系统分析[J]. 发电设备, 2007(2): 108-112.
CAI Zhi-jie. An analysis of the fuel and purging system of a 9FA dual-fuel gas turbine[J]. Power Equipment, 2007(2): 108-112.

(丛 敏 编辑)