

DOI: 10.19666/j.rlfed.202312171

重型燃气轮机控制回路时延稳定性分析

苏洋, 陈远野, 刘亚娟

(华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206)

[摘要] 在实际工业生产过程中, 时延会对控制系统的性能产生不利影响, 甚至导致控制系统不稳定。从切换系统角度研究了重型燃气轮机转速/功率控制回路的时延稳定性问题, 以某电厂 GE MS109FA 275 MW 重型燃气轮机在 100% 负荷下的模型为研究对象, 通过增广状态变量, 选择时延变化作为切换信号, 将含有时变时延的转速/功率控制回路转换为一类切换系统。运用范数相关引理, 推导出确保含有时变时延的转速/功率控制回路稳定的充分且必要条件, 并给出稳定性验证算法, 同时基于国产重型燃气轮机 NuCON 控制系统进行了硬件在环仿真实验, 验证了所提理论结果的正确性。该研究结果可为国产重型燃气轮机控制系统设计和参数调整提供理论参考。

[关键词] 重型燃气轮机; 时延; 稳定性; 硬件在环仿真

[引用本文格式] 苏洋, 陈远野, 刘亚娟. 重型燃气轮机控制回路时延稳定性分析[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 110-116.
SU Yang, CHEN Yuanye, LIU Yajuan. Delay stability analysis of heavy-duty gas turbine control loop[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 110-116.

Delay stability analysis of heavy-duty gas turbine control loop

SU Yang, CHEN Yuanye, LIU Yajuan

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In industrial production processes, time delays can have adverse effects on the performance of control systems, and may even lead to system instability. This article investigates the stability issues of time-delay in the load/speed control loop of a heavy-duty gas turbine from the perspective of switching systems. The model of GE MS109FA 275 MW heavy-duty gas turbine under 100% load is taken as the research object. The load/speed control loop with time-varying delay is transformed into a class of switching system by augmenting the state variable and selecting the change of time delay as the switching signal. By using the norm correlation lemma, a necessary and sufficient condition to ensure the stability of the load/speed control loop with time-varying delay is derived and the stability verification algorithm is given. The hardware-in-the-loop simulation is carried out based on the domestic heavy-duty gas turbine NuCON control system. The results of this study can provide theoretical references for the design and parameter adjustment of heavy-duty gas turbine control system.

Key words: heavy-duty gas turbine; time-delay; stability; hardware-in-the-loop

重型燃气轮机因其发电的灵活性和可靠性, 在风电、光电等可再生能源整合方面发挥着巨大作用^[1]。因此, 重型燃气轮机发电机组作为调峰机组越来越受重视。目前, 大多数重型燃气轮机控制系统都采用分布式架构实现^[2]。然而, 当信息以网络方式从传感器传输到控制器以及从控制器传输到

执行器时, 时延是不可避免的^[3]。随着重型燃气轮机向更高效率和更高功率的发展, 更多的测量点和调节部件被添加到控制系统^[4]。这不可避免地会使控制系统更加复杂, 同时也加重了网络负担, 导致更大的时延。

近年来, 主动容错技术被广泛用来提高重型燃

收稿日期: 2023-12-08 网络首发日期: 2024-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(62103144); 国家航空发动机及燃气轮机重大专项基础研究(2017-V-0010-0061)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (62103144); National Aero-engine and Gas Turbine Major Project Basic Research (2017-V-0010-0061)

第一作者简介: 苏洋(1997), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为时延系统和切换系统, 120212227054@ncepu.edu.cn。

通信作者简介: 陈远野(1987), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为多智能体协同控制和网络化控制系统, yuanyechen@ncepu.edu.cn。

气轮机控制系统的可靠性。主动容错过程中无论是故障检测还是控制器重组同样也会在控制系统中引入时延^[5]。时延可能会降低整个系统的性能，甚至使闭环系统变得不稳定。因此，当前研究含有时延的重型燃气轮机控制回路的稳定性非常必要。

已有的时延系统稳定性的研究成果很多，主要分为频域分析法和时域分析法^[6-8]。确定系统稳定性的频域分析方法主要基于时延系统特征方程的根或复 Lyapunov 函数的解。文献[9]采用频域分析和广义奈奎斯特准则对分数阶时延系统进行分析，得到与时延相关的一致性条件。文献[10]采用特征值跟踪法研究了多区域负载频率控制系统的时延稳定性。文献[11]基于有限频谱分配法分析了分数阶时延系统的鲁棒稳定性。当时延恒定且系统参数已知时，频域分析法可以精确地获得保证系统稳定性的时延范围。文献[12]推导出了通过 PID 控制实现的一阶或二阶不稳定系统的精确时延裕度。文献[13-14]进一步研究了 PID 控制下二阶不稳定系统的时延裕度。文献[15]利用解析函数插值和有理近似技术推导了离散时间线性系统稳定的时延裕度。

时域分析方法主要基于 Lyapunov-Krasovskii 函数 (LKF) 和 Lyapunov-Razumikhin 函数 (LRF)。文献[16-17]针对非线性时延系统提出了一种新的稳定性分析方法，即基于时延模式的 LKF 方法。文献[18]基于连接 Lyapunov 时延矩阵和这类方程的基本矩阵的新特性，引入一种完全型 LKF，提出了具有分布式单时延的积分时延系统稳定的必要条件。文献[19-21]利用适当的 LKF 和线性矩阵不等式，给出了网络控制系统的时延稳定性条件。文献[22]分析了 GE T700 涡轮轴发动机分布式发动机

控制系统的稳定性。

上述研究中，对于含有常时延的低阶系统给出了无保守性的稳定性条件。但对于含有时变时延的系统稳定性分析具有一定保守性。本文将具有时变时延的重型燃气轮机转速/功率控制回路转换为切换系统。借助切换系统的一些基于范数的稳定性条件，给出保证重型燃气轮机转速/功率控制回路时延稳定性的充要条件。这些结果可为国产重型燃气轮机控制系统的设计和实际应用提供参考。

1 转速/功率控制回路模型

控制系统是整个重型燃气轮机系统的核心部分。它负责监测系统工作状态、控制燃气轮机启停、转速功率和温度等调节。重型燃气轮机控制系统包含多个控制回路，如转速/功率控制回路、温度控制回路、加速度控制回路等。

当重型燃气轮机并网后运行，控制系统主要工作在转速/功率控制回路中。以升负荷过程为例，随着负荷提升，需要逐渐提高功率设定值，当输出功率和功率设定值存在偏差时，在控制器的作用下，执行机构不断增大燃料阀门开度，更多的燃料进入燃烧室，产生的高温高压的燃气进入透平做功，带动发电机产生更多的电量直到满足负荷需求。

通过文献[23]，得到某电厂的 GE 公司 MS109FA 型号 275 MW 单轴重型燃气轮机在标准工况下并网后且工作在 100% 负荷时的控制系统模型 (图 1)。该模型基于实际数据，并采用文献[24]中的方法确定模型的参数值。表 1 给出了模型中变量及相关数值，图 2 给出了输出功率实际数据和仿真数据对比，模型精度误差在 5% 以内。

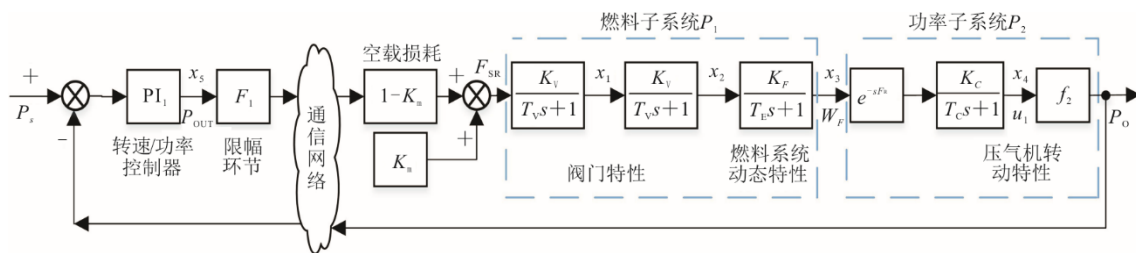


图 1 重型燃气轮机转速/功率控制回路模型
Fig.1 Model of the control loop for the speed/power of heavy-duty gas turbines

转速/功率控制回路主要由控制器、燃料子系统、功率子系统 3 个子系统组成。转速/功率控制器采用比例积分控制器。其传递函数为：

$$C_1(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} \quad (1)$$

燃料子系统是从燃料控制基准 F_{SR} 到燃料流量 W_f 的过程，其传递函数可以表示为：

$$P_1(s) = \frac{W_f(s)}{F_{SR}(s)} = \frac{K_v^2 K_f}{(T_v s + 1)^2 (T_f s + 1)} \quad (2)$$

在功率子系统中,功率动力学可以被简单地建模为时延过程和透平功率的函数。 E_R 、 T_C 为管道、燃烧室和热通道中的气体流量的时延。可以使用函数 f_2 计算输出功率,其表示形式为:

$$P_O(s) = f_2(u_1) = 1.16 \times (u_1 - 0.138),$$

$$u_1(s) = \frac{K_C e^{-sE_R}}{T_C s + 1} W_F(s) \quad (3)$$

表 1 模型参数

Tab.1 The parameters of model

项目	数值
燃烧反应时延 E_R/s	0.005
限幅环节 F_1	-0.058~1.500
比例增益 K_P	0.55
积分增益 K_I	1
压气机增益 K_C	1
燃料系统增益 K_F	1
空载燃料量 K_m	0.138
燃料阀门增益 K_V	1
功率设定值 P_S	1(275 MW)
输出功率 P_O	1(275 MW)
控制器输出 P_{OUT}	1
压气机惯性时间常数 T_C/s	0.16
燃料系统时间常数 T_F/s	0.27
燃料阀门惯性时间常数 T_V/s	0.04
进入透平燃气流量 u_1	1
燃料流量 W_F	1

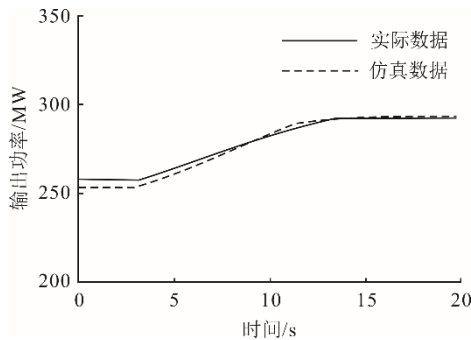


图 2 输出功率对比

Fig.2 Output power comparison

为了便于分析,对图 1 中的重型燃气轮机控制系统模型做以下简化:

- 1) 考虑重型燃气轮机并网后运行,且工作在 100% 负荷状态附近,故限幅环节可以忽略;
- 2) 考虑输入、输出之间的增量传递函数模型、 f_2 可以看作是 u_1 的比例函数;
- 3) 一般燃烧反应时延远小于传输时延,故可以忽略不计。

因此,可以得到转速/功率控制回路的开环传递

函数:

$$G_1(s) = \frac{\Delta P_O(s)}{\Delta P_S(s)} = \frac{1.16(1 - K_m)K_V^2 K_F K_C (K_P s + K_I)}{s(T_V s + 1)^2 (T_F s + 1)(T_C s + 1)} \quad (4)$$

由于数字控制器和被控对象之间通过网络连接,因此,控制系统需进行离散化。在工程实践中,控制系统的采样频率通常是控制对象的带宽 6 倍以上^[25-26]。而控制系统的带宽与其截止频率密切相关。根据转速/功率控制系统开环传递函数,绘制了系统的开环伯德图,如图 3 所示。转速/功率控制系统的截止频率为 $\omega=1.1$ rad/s。通过频率和周期之间换算,控制周期应该小于 0.95 s。考虑国产控制系统控制器的综合性能^[27]以及重型燃气轮机稳定运行在 100 % 负荷附近,因此,本文中控制周期设置为 $T=0.48$ s。

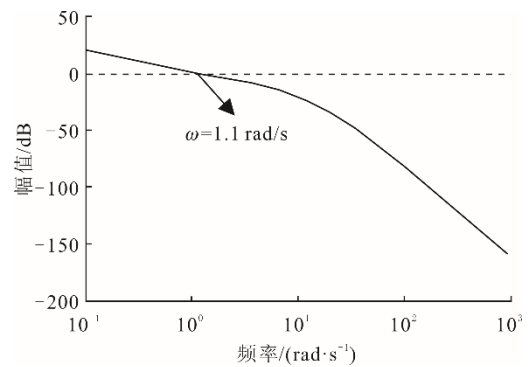


图 3 转速/功率控制回路开环伯德图

Fig.3 Bode plot of speed/power open control loop

2 时延稳定性分析

本节中将考虑含有网络时延的转速/功率控制回路。网络时延主要来自在网络中的传输时延和控制器的计算时延。相较于传输时延,控制器计算周期短,可以忽略不计。故系统的总时延由传感器到控制器传输时延和控制器到执行器传输时延 2 个部分组成。在总时延不变时,二者的取值分配并不会对系统的超调产生影响^[28]。因此,将二者合并,这样既能简化处理,又不影响结果的可靠性。

引理 1^[29]: 考虑切换系统 $x(k+1) = \Phi_{\sigma(n)} x(k)$, 其中 $\Phi_{\sigma(n)} \in \{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N\}$, 该系统在任意切换条件下时是全局渐进稳定的, 当且仅当存在一个有限整数 a , 下述条件成立:

$$\|\Phi_{i_1} \Phi_{i_2} \dots \Phi_{i_a}\| < 1, \forall \Phi_{i_j} \in \{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N\} \quad (5)$$

式中: $j=1, 2, \dots, a$ 。

为了进行时延稳定性分析,选择了 5 个状态变量,分别是 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 (图 1)。因此,闭

环转速/功率回路的连续时间状态空间方程可以表示为:

$$\Delta \dot{x}(t) = A \Delta x(t) \quad (6)$$

式中:

$$\Delta x = [\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta x_4, \Delta x_5]^T, A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix},$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_V} & 0 & 0 \\ \frac{K_V}{T_V} & -\frac{1}{T_V} & 0 \\ 0 & \frac{K_F}{T_F} & -\frac{1}{T_F} \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{(1-K_m)K_V}{T_V} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_C}{T_C} \\ 0 & 0 & \frac{K_C K_P f_2}{T_C} \end{bmatrix}, A_4 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_C} & 0 \\ \frac{K_P f_2 - T_C K_I f_2}{T_C} & 0 \end{bmatrix}$$

结合上一节中的控制周期,连续时间模型式(6)可以使用式(7)模型进行离散化和近似表示。

$$\Delta x[k+1] = \Psi \Delta x[k] \quad (7)$$

式中: $\Psi = e^{AT}$ 。

假设 1: 存在网络传输时延 $\tau(k) \in \{0, 1, \dots, N\}$, 其中 N 是传输时延的上界。

假设 2: 网络传输时延 $\tau(k)$ 在集合 $\{0, 1, \dots, N\}$ 中任意变化。

考虑上述假设。选择时延变换作为切换信号。通过增广状态变量,含时变时延的闭环转速/功率控制回路模型式(7)可以转换为一个切换系统模型:

$$\begin{bmatrix} \Delta x(k+1) \\ \Delta x(k) \\ \vdots \\ \Delta x(k-N+1) \end{bmatrix} = \mathcal{E}_{\tau(k)} \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ \Delta x(k-1) \\ \vdots \\ \Delta x(k-N) \end{bmatrix} \quad (8)$$

当 $\tau(k)=0$ 时,

$$\begin{bmatrix} \Delta x(k+1) \\ \Delta x(k) \\ \vdots \\ \Delta x(k-N+1) \end{bmatrix} = \mathcal{E}_0 \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ \Delta x(k-1) \\ \vdots \\ \Delta x(k-N) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{式中: } \mathcal{E}_0 = \begin{bmatrix} \Psi & \mathbf{0} & \dots & \dots \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} & & \\ & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \dots & \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix}; \mathbf{I} \text{ 为单位阵; } \mathbf{0}$$

为零矩阵。

当 $\tau(k)=1$ 时:

$$\begin{bmatrix} \Delta x(k+1) \\ \Delta x(k) \\ \vdots \\ \Delta x(k-N+1) \end{bmatrix} = \mathcal{E}_1 \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ \Delta x(k-1) \\ \vdots \\ \Delta x(k-N) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\text{式中: } \mathcal{E}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \Psi & \dots \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} & \\ & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \vdots & & \vdots \\ \dots & & \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix}.$$

依此类推, 当 $\tau(k)=N$ 时:

$$\begin{bmatrix} \Delta x(k+1) \\ \Delta x(k) \\ \vdots \\ \Delta x(k-N+1) \end{bmatrix} = \mathcal{E}_N \begin{bmatrix} \Delta x(k) \\ \Delta x(k-1) \\ \vdots \\ \Delta x(k-N) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{式中: } \mathcal{E}_N = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \dots & \Psi \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} & \dots \\ & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \vdots & & \vdots \\ \dots & & \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix}.$$

因此,模型式(8)中的系统状态转移矩阵随时延变化在集合 $\{\mathcal{E}_0, \mathcal{E}_1, \dots, \mathcal{E}_N\}$ 中切换。运用引理 1, 可以得到定理 1。

定理 1: 含有时变时延的转速/功率控制回路是稳定的, 当且仅当存在有限数 m 时, 满足:

$$\|\mathcal{E}_{i_1}, \mathcal{E}_{i_2}, \dots, \mathcal{E}_{i_m}\| < 1, \forall \mathcal{E}_{i_p} \in \{\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_N\} \quad (12)$$

式中: $p=1, 2, \dots, m$ 。

定理 1 可以通过图 4 算法实现。

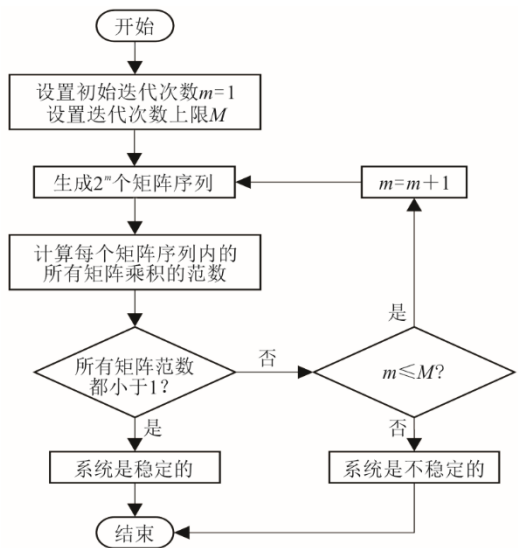


图 4 算法流程
Fig.4 Flow chart of the algorithm

在算法中, M 为迭代次数的上界, 一般可以根据系统的性能要求确定。结合定理 1 可近似认为, M 越大, 系统的收敛速度越慢, 快速性越差。当 m 达到 M 时, 实际控制系统的性能指标不能满足控制要求, 以至于可以认为系统是不稳定的。

3 案例及仿真

3.1 案例分析

本节通过案例分析, 验证所提方法的有效性。考虑转速/功率控制回路中存在网络传输时延 $\tau(k)$, 它的上界 $N=1$ 。因此, 可以得到系统状态转移矩阵集合 $\{\mathcal{E}_0, \mathcal{E}_1\}$, 其中:

$$\mathcal{E}_0 = \begin{bmatrix} \Psi & 0 \\ I & 0 \end{bmatrix}, \mathcal{E}_1 = \begin{bmatrix} 0 & \Psi \\ I & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

通过编写算法, 测试矩阵范数, 运用定理 1, 得到如下结果, 当 $m=4$ 时, 满足:

$$\|\mathcal{E}_{i_1}, \mathcal{E}_{i_2}, \dots, \mathcal{E}_{i_4}\| < 1, \forall \mathcal{E}_{i_p} \in \{\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2\} \quad (14)$$

结果表明, 案例中的含时变时延的转速/功率控制回路是稳定的。

3.2 仿真实验

为了更加准确地评估重型燃气轮机控制系统的时延稳定性, 同时避免直接在实际系统上进行测试带来的安全隐患, 本文搭建了模拟实际运行环境的硬件在环仿真平台。图 5 为工程师站和仿真机硬件, 图 6 为 NuCON 控制系统硬件。该仿真平台由 3 个模块组成: 控制器采用 NuCON 控制系统的控制器 CU, 被控过程模型通过 MATLAB/Simulink 来创建, 控制器和模型之间数据接口采用 NuCON 数据库。

NuCON 控制系统是国核自仪系统工程有限公司自主开发满足重型燃气轮机过程控制要求的数字化控制系统。控制器 CU 是 NuCON 控制系统自动处理和基本单元, 用于存储系统信息和过程控制策略与数据。

2 台装有 Windows 7.0 专业版操作系统的计算机作为工程师站和仿真机分别装载 NuCON 软件和 MATLAB/Simulink 软件。在 NuCON 软件中进行控制逻辑组态, 通过实时数据网, 将其下装到控制器 CU。测试了控制器和仿真机实际传输时间, 传输时间小于 1 ms, 远小于控制周期, 故可以忽略。然后, 根据图 1 和表 1 中的数值在 MATLAB/Simulink 环境下建立了重型燃气轮机模型。

OPC 是用于工业控制领域的一个技术规范和

工业标准, 用于解决不同应用程序和控制器之间的数据交互问题。通过对 NuCON 软件中的 OPC DA 服务器和 MATLAB/Simulink 中的 OPC 客户端进行相关配置, 实现了控制器与被控过程模型之间的数据通信。

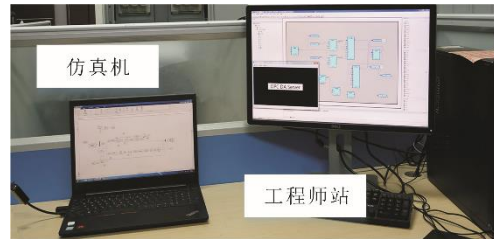


图 5 工程师站和仿真机硬件
Fig.5 Engineer station and simulator hardware



图 6 NuCON 控制系统硬件
Fig.6 NuCON control system hardware

基于搭建的硬件在环仿真平台, 本文进行如下仿真实验: 分别对无时延和含时变时延的转速/功率控制回路进行了阶跃响应测试。初始条件都分别设置为 $P_S=0.9$ 、 $P_O=0.9$ 和 $P_{OUT}=0.9$ 。在无时延和含时变时延的转速/功率控制回路中, P_S 都在 $t=1$ s 从 0.9 阶跃到 1.0。仿真实验中, 随机生成时变时延, 时延序列如图 7 所示, 输出功率响应和控制器输出曲线如图 8 和图 9 所示。

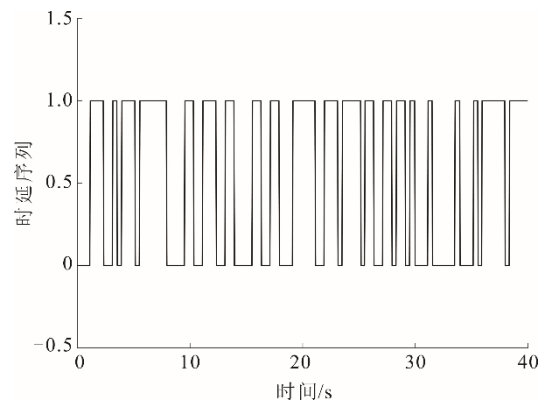


图 7 时延序列
Fig.7 Time delay sequence

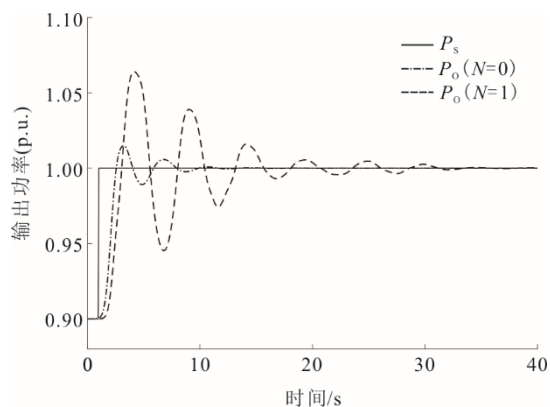


图8 输出功率
Fig.8 Output power

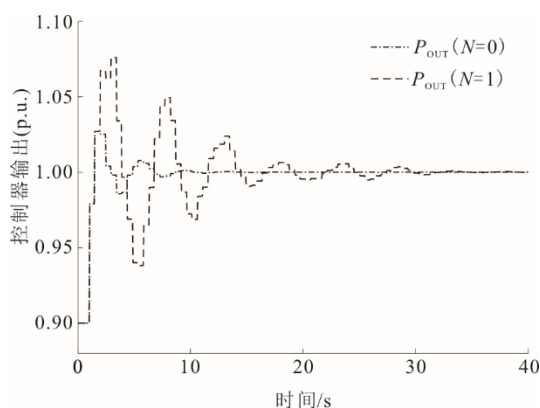


图9 控制器输出曲线
Fig.9 Controller output curve

从图8和图9可以看出,在时变时延扰动下,转速/功率控制回路仍然保证渐进稳定。验证了所提出的理论结果的正确性。此外,还可以从图8发现引入时延会降低系统的动态性能,如超调量从2.0%增加到6.4%。

4 结 语

未来国产重型燃气轮机将继续朝着高性能、大型化方向发展,控制系统的发展尤为关键。本文针对重型燃气轮机转速/功率控制回路中存在的时延问题,从切换系统的角度提出了系统稳定的充分且必要条件。并借助国产重型燃气轮机 NuCON 控制系统搭建硬件在环仿真平台,对理论结果进行了验证,为重型燃气轮机控制系统的国产化发展提供理论支撑。

[参 考 文 献]

[1] 王一丰,肖俊峰,胡孟起,等. 重型燃气轮机联合循环机组掺氢燃烧发电模型及变负荷研究[J]. 热力发电, 2022, 51(11): 129-139.
WANG Yifeng, XIAO Junfeng, HU Mengqi, et al. Modeling and load-following analysis of hydrogen

fueled power generation of heavy-duty gas turbine combined cycle unit[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(11): 129-139.

[2] 薛银春,孙建国. 燃气轮机控制技术综述[J]. 航空动力学报, 2005, 20(6): 1066-1071.
XUE Yinchun, SUN Jianguo. A survey of gas turbine control technique[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6): 1066-1071.

[3] XIAO C, HOU T. Delay-dependent exponential stability analysis for stochastic systems with mixed delays[C]. 2020 39th Chinese Control Conference (CCC), Shenyang, China, 2020: 944-947.

[4] 束国刚,余春华,沈国华,等. 新时期我国重型燃气轮机发展研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 184-192.
SHU Guogang, YU Chunhua, SHEN Guohua, et al. Development of heavy-duty gas turbines in China in the new era[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 184-192.

[5] SHEN Q, JIANG B, SHI P. Active fault-tolerant control against actuator fault and performance analysis of the effect of time delay due to fault diagnosis[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2017, 15(2): 537-546.

[6] 张冬梅,俞立. 线性时滞系统稳定性分析综述[J]. 控制与决策, 2008, 23(8): 841-849.
ZHANG Dongmei, YU Li. Survey on the stability analysis of linear time-delay systems[J]. Control and Decision, 2008, 23(8): 841-849.

[7] 李旭光,张颖伟,冯琳. 时滞系统的完全稳定性研究综述[J]. 控制与决策, 2018, 33(7): 1153-1170.
LI Xuguang, ZHANG Yingwei, FENG Lin. Survey on complete stability study for time-delay systems[J]. Control and Decision, 2018, 33(7): 1153-1170.

[8] 陈军,徐胜元,张保勇. 线性时滞系统稳定性最新研究综述[J]. 信息与控制, 2020, 49(1): 36-46.
CHEN Jun, XU Shengyuan, ZHANG Baoyong. Survey on recent results in stability of linear time-delay systems[J]. Information and Control, 2020, 49(1): 36-46.

[9] SHI M, YU Y, XU Q. Delay-dependent consensus condition for a class of fractional-order linear multi-agent systems with input time-delay[J]. International Journal of Systems Science, 2019, 50(4): 669-678.

[10] AYDM Ö, SÖNMEZ Ş, AYASUN S. Determination of stability delay margins for multi-area load frequency control systems with incommensurate time delays through eigenvalue tracing method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 137: 107821-107831.

[11] LIU L, ZHANG S, XUE D, et al. Robust stability analysis for fractional-order systems with time delay based on finite spectrum assignment[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2019, 29(8): 2283-2295.

[12] MA D, CHEN J. Delay margin of low-order systems achievable by PID controllers[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(5): 1958-1973.

[13] MA D, CHEN J, LIU A, et al. Explicit bounds for guaranteed stabilization by PID control of second-order unstable delay systems[J]. Automatica, 2019, 100: 407-411.

[14] CHEN J, MA D, XU Y, et al. Delay robustness of PID control of second-order systems: pseudo-concavity, exact delay margin, and performance tradeoff[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2022, 67(3): 1194-1209.

- [15] CHEN Y, ZULFIQAR A, MA D, et al. Simultaneous stabilization of discrete-time delay systems and bounds on delay margin[J]. *Automatica*, 2019, 101: 296-308.
- [16] WANG Y, LIU H, LI X. A novel method for stability analysis of time-varying delay systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2021, 66(3): 1422-1428.
- [17] WANG L, HAN J, ZHANG Z, et al. Robust stability and stabilization of uncertain systems with time-varying delays via delay-partition[C]. 2021 40th Chinese Control Conference (CCC), Shanghai, China, 2021: 956-961.
- [18] ORTIZ R, VALLE S, EGOROY A, et al. Necessary stability conditions for integral delay systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(10): 4377-4384.
- [19] ABDELJAWAD R, BAHRI N, LTAIEF M. Stability bound analysis of slow sampling discrete-time singularly perturbed systems with time-delay[C]. 2017 18th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), Monastir, Tunisia, 2017: 1-5.
- [20] LIU Y, XIONG L, WANG L, et al. Stability analysis of haptic systems with time-varying delay via a delay-product-type Lyapunov-Krasovskii functional[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, 69(11): 4339-4343.
- [21] MANIKANDAN S, PRITANKA K. Stability analysis of network controlled DC position servo system with constant and time-varying delays[C]. 2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing (ICESIP), Chennai, India, 2019: 1-5.
- [22] LIU X, LUO C. Stability analysis for GE T700 turboshaft distributed engine control systems[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 22485-22491.
- [23] 卫星光, 房方, 刘玉升. 基于自适应观测器的燃气轮机控制系统传感器故障容错控制[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(19): 6658-6669.
- WEI Xingguang, FANF Fang, LIU Yusheng. Sensor fault tolerant control for gas turbine control system based on adaptive observer[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(19): 6658-6669.
- [24] 谷俊杰, 张永涛, 曹喜果. 一种新的燃气轮机模型建立与其参数求取[J]. *汽轮机技术*, 2014, 56(2): 123-127.
- GU Junjie, ZHANG Yongtao, CAO Xiguo. A novel model of gas turbine and the extracting of the parameters[J]. *Turbine Technology*, 2014, 56(2): 123-127.
- [25] FRANKLIN G F, POEWLL J D, WORKAMAN M L. Digital control of dynamic systems[M]. 3rd ed., Half Moon Bay, CA 94019: Ellis-Kagle Press, 1998: 352-372.
- [26] ACKSON T W. Selection of sample rate and computer wordlength in digital instrumentation and control systems[M]. Washington, D C 20555: U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research, 2000: 16-24.
- [27] 卢化, 蔡钧宇, 蔡萍萍, 等. 国产分散控制系统主要性能测试对比[J]. *航空发动机*, 2022, 51(3): 191-198.
- LU Hua, CAI Junyu, CAI Pingping, et al. Comparative test of main performance of domestic distributed control system[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(3): 191-198.
- [28] 李义炜, 潘慕绚, 仇小杰, 等. 针对网络时延的发动机PI控制系统稳定性分析和控制器设计[J]. *航空发动机*, 2021, 47(增刊 1): 93-99.
- LI Yiwei, PAN Muxuan, QIU Xiaojie, et al. Stability analysis and controller design of engine PI control system for network time-delay[J]. *Aeroengine*, 2021, 47(Suppl.1): 93-99.
- [29] LIN H, ANTSAKLIS P. Stability and stabilizability of switched linear systems: a survey of recent results[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(2): 308-322.

(责任编辑 杜亚勤)