

汽轮机调节系统中存在摩擦与间隙的响应特征研究

戴义平¹, 邓仁纲¹, 宋晓炜¹, 谢诞梅²

(1. 西安交通大学 叶轮机械研究所, 陕西 西安 710049; 2. 武汉大学, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 由于部件的磨损、工作油液的污染和杂物的侵入可能导致调节系统中摩擦与间隙增大, 系统发生极限环振荡。当摩擦阻力增大到一定程度时, 可能发生卡涩, 严重威胁机组的安全。本文从时域响应和频谱分析两个方面对汽轮机调节系统中存在摩擦与间隙时的响应特性进行了研究, 给出了摩擦与间隙响应的特征, 可以用于系统的状态监测与故障诊断。

关 键 词: 汽轮机; 调节系统; 非线性系统; 响应特征

中图分类号: TK263.7⁺ 文献标识码: A

1 引言

实际系统总是非线性的, 在汽轮机调节系统中存在着死区、限幅、死区加限幅以及摩擦与间隙等非线性因素。死区与限幅往往在系统设计时已经考虑, 并且有些是为了改善系统的性能而有意引入的。摩擦与间隙在机组的运行过程中可能由于部件的磨损、工作油液的污染和杂物的侵入而增大, 使得系统发生极限环振荡。当摩擦阻力增大到一定程度时, 可能发生卡涩, 使系统失效, 严重威胁机组的安全。无论是传统的液压调节系统还是数字电液调节系统, 最终都采用液压元件来实现机组的转速和负荷调节, 因此以液压执行机构

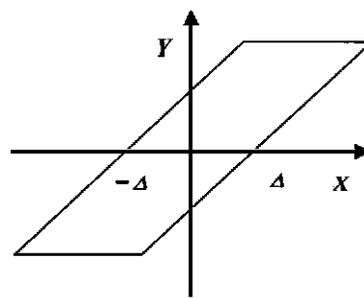
为对象进行

分析具有一定的代表性。本文采用时域分析和频谱分析的方法对汽轮机调节系统的液压执

行机构中存在摩擦与间隙时的响应特性进行了研究, 给出了系统中不同部位存在摩擦与间隙时的故障特征, 为进一步开展系统的状态监测和故障诊断提供了

理论依据。

2 摩擦与间隙的数学模型及系统的传递函数



摩擦与间隙的输入输出模型为奇函数^[1], 如图 1 所示。摩擦与间隙的存在使得系统或环节的运动出现滞环, 对系统响应特性的影响相同。

图 1 摩擦与间隙图

当液压执行机构中错油门和油动机反馈滑阀存在摩擦以及油动机控制调节阀的传递机构存在间隙时, 相当于非线性存在于信号传递通道的内回路、反馈回路和前向回路。调节装置的传递函数方框图如图 2 所示, 图中 A、B、C 分别表示前向回路、内回路和反馈回路中非线性的三个位置, A₁、A₂ 代表前向回路中非线性位置的变化。在文献[2]中, 作者采用经典控制理论的描述函数法分析研究了非线性对系统稳定性的影响, 并提出了评

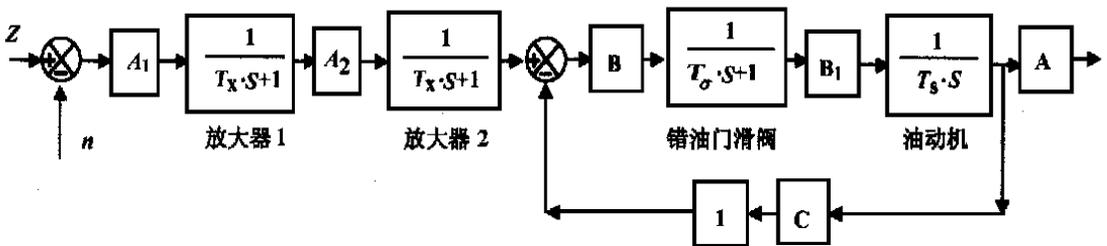


图 2 调节装置的传递函数方框图

价非线性因素对系统稳定性影响的总体评价方法, 通过总体图确定非线性处于不同位置时形成的极限环及其振幅与频率。因此, 从描述函数评价系统稳定性

的角度来看,非线性位于前向回路中的其它位置可以等效于位置 A 的影响,位于内回路 B₁ 处等效于 B 处的影响,即非线性位于 A、B、C 时具有一般性。

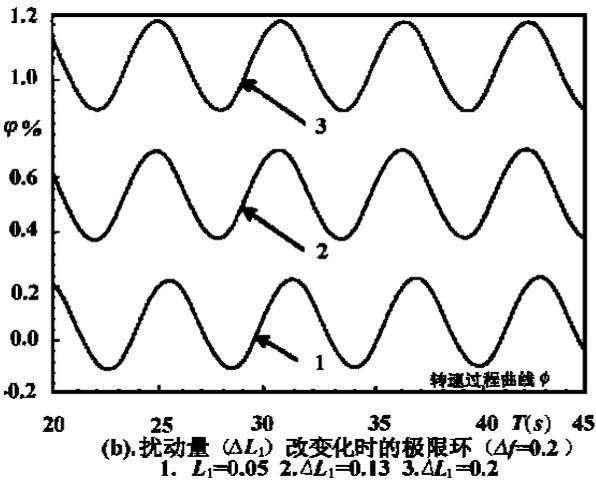
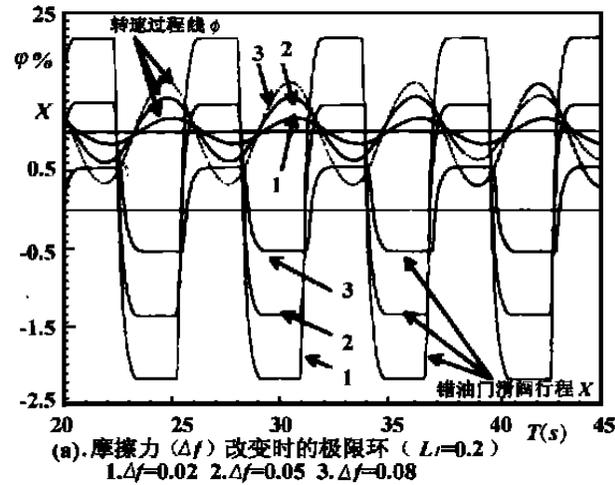


图 3 内回路存在摩擦与间隙形成的极限环

3 摩擦与间隙形成的极限环和频谱

对图 2 所示的调节装置,以典型的冷凝式汽轮机为对象,研究系统存在摩擦与间隙时的响应特性,图中 X 为滑阀相对位移,φ% 为转速变化相对值。图 3(a) 给出了错油门滑阀(内回路)存在摩擦,当量摩擦阻力 Δf 分别为 0.02、0.05 和 0.08 时,在负荷扰动作用下,系统出现的极限环。从图中可以清楚地看到,摩擦阻力的存在使得错油门滑阀的运动出现保持现象,即运动方向发生转换时,只有当滑阀上液压力的变化量大于摩擦阻力之后错油门滑阀才开始反向运动。极限环的周期为 5.85 s,频率为 0.171 Hz(1.074 弧度/秒)。随着摩擦阻力的增大,震荡的频率不变,幅值增加。图 3(b) 给出了摩擦阻力不变而扰动量变化时的转速过

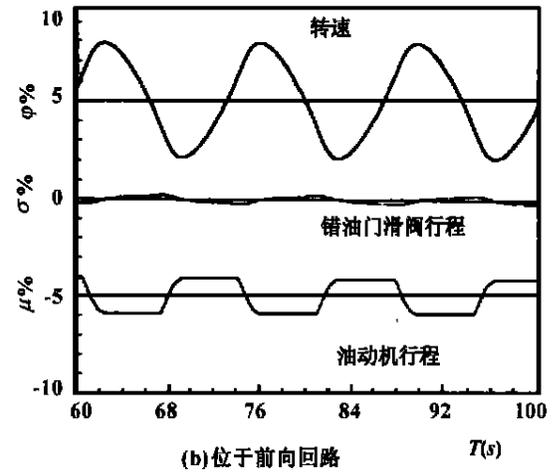
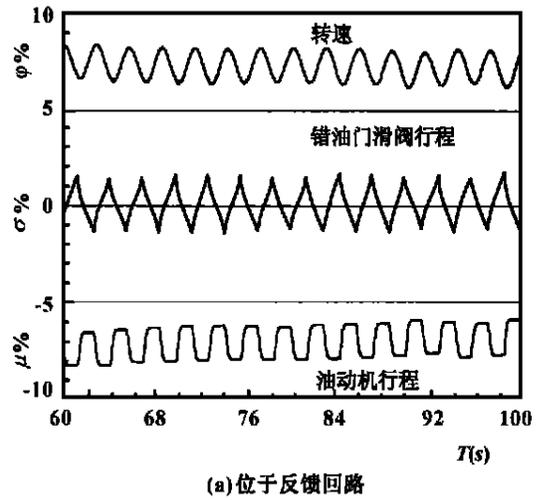


图 4 反馈回路和前向回路存在摩擦与间隙形成的极限环($\Delta f=0.02$ $L_1=0.05$)

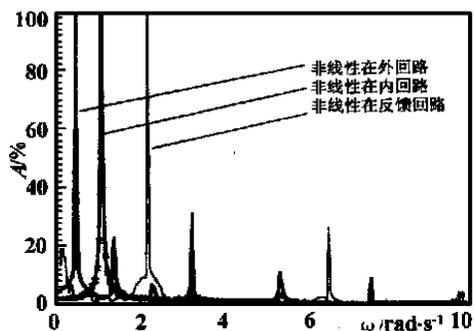


图 5 摩擦与间隙位置变化时的信号频谱

渡过程曲线,从图中的过程曲线可见,在摩擦阻力一定时,扰动量的变化对极限环振荡的频率和幅值均没有影响。因此错油门滑阀存在摩擦阻力时,在扰动作用下系统总是会出现极限环振荡,极限环的振幅随着摩擦阻力的增大而增加,振荡频率不变。当油动机活塞的运动中存在摩擦阻力时,相当于摩擦阻力存在于内

回路,在图2中位于 B_1 处。仿真试验结果表明,此时系统的极限环频率和幅值与油动机滑阀中存在摩擦阻力时的结果相同。从描述函数分析系统稳定性的角度来看,这是必然的。因为 B_1 处的摩擦与间隙等效于 B 处的影响;但从时域的过程曲线来看,两者是不同的。

图4(a)、(b)分别为油动机反馈滑阀(反馈回路)和传递机构(前向回路)存在摩擦与间隙时的仿真曲线,当量摩擦阻力 $\Delta f = 0.02$ 负荷扰动 $L_1 = 0.05$ 。

从仿真结果可见,前向回路和反馈回路中存在摩擦与间隙时,在扰动作用之下,系统也要产生极限环振荡。对于所研究的系统来说,摩擦与间隙处于不同的位置时,极限环的周期与频率是不同的,如表1所示。非线性位于前向回路、内回路和反馈回路时,极限环的振荡周期依次减小,而频率增加。图5所示的信号频谱清楚地反映了这种关系(图中纵坐标是相对于频谱的最大幅值进行标么后的幅值谱)。这是由于摩擦与间隙非线性位于前向回路时,信号将经过系统的所有环节,具有相当长时间的延时,使得系统的极限环周期延长。当摩擦与间隙非线性位于反馈回路时,油动机与滑阀形成一个闭环,非线性输出即刻影响滑阀与油动机的运动,信号的延时时间最短,因此其振荡周期最小,频率最高。而摩擦与间隙非线性位于内回路时,非线性输出既经过了系统前向通路的所有环节,又经过反馈滑阀反馈到错油门滑阀的输入端,影响错油门滑阀和油动机的输出,两者共同作用的结果,使得系统极限环的振荡周期介于非线性位于前向回路和反馈回路时的振荡周期之间。

当非线性位于前向通路的其它位置时,如图2中

A_1 、 A_2 处时,仿真试验的结果表明系统也要产生极限环振荡,且极限环的频率和周期与非线性位于前向回路位置 A (油动机输出)时的结果相同。摩擦与间隙的大小变化时,极限环的周期和频率不变,但幅值增大,和摩擦与间隙位于内回路时的结果相同。

表1 非线性位于不同位置时极限环的特征

回路	外回路	内回路	反馈回路
周期/s	13.70	5.85	2.86
频率/Hz	0.073	0.171	0.35
角频率/ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	0.459	1.074	2.197

4 结论

系统中存在摩擦与间隙时,在扰动作用下系统将发生极限环振荡。当摩擦与间隙位于前向回路、内回路和反馈回路时,极限环的振荡频率依次增大;当摩擦与间隙的位置不变,而摩擦阻力增大或间隙增大时,极限环的频率不变,而幅值增加。因此扰动作用后所形成的极限环的频率和幅值的变化可以作为摩擦与间隙故障的特征参数,用于系统的状态监测与故障诊断。

参考文献:

- [1] 绪方胜彦. 现代控制工程[M]. 卢伯英译. 北京: 科学技术出版社, 1981.
- [2] 戴义平, 张镇一. 非线性因素与中间再热透平调节系统的稳定性[J]. 汽轮机技术, 1991, 33(1): 8-14.

(渠源 编辑)

(上接第258页)

下两种厚薄不同板的振动加速度值及其随时间和空间的衰减情况。初步搞清了除灰过程中燃气脉冲产生、衰减以及对结灰面作用的规律。主要结论有:

(1) 火焰速度愈快, 出口截面愈小, 那么燃烧管内压力愈高。

(2) 出口外压力随距离衰减较快, 而加速度的衰减符合指数规律。

(3) 初步认为振动是粘结灰脱落的主要因素。

参考文献:

- [1] 孙文超, 詹焕青, 陈丽芳. 燃烧气脉冲—新一代除灰技术[J]. 中国

电力, 1997, 30(7): 46-48.

- [2] 孙文超, 詹焕青, 陈丽芳, 等. 燃烧气脉冲除灰技术的试验研究[J]. 燃烧科学与技术, 1999, 5(1): 8-13.
- [3] 李德葆, 沈观林, 冯仁贤. 振动测试与应变电测基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- [4] 戴莱 J W, 哈里曼 D R F. 流体动力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1983.
- [5] 岑可法, 樊建人. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1995.

(何静芳 编辑)

—2001, 16(3). —271~274

A detailed discussion was conducted concerning a blast furnace gas-fired 50 MW high-pressure boiler. Expounded were the combustion technology, which can promote the stable ignition of a blast furnace gas-fired boiler, and the latter's structural design features. After an analysis of the influence of blast furnace gas firing on the boiler's thermodynamic parameters, heat transfer characteristics and heating surface layout the authors have proposed a layout scheme suitable for a blast furnace gas-fired boiler. The first blast furnace gas-fired 50 MW boiler in China has been manufactured based on the above study results. Its successful operation experience indicates that with the blast furnace gas firing-related pollution issues effectively resolved this type of boiler will enjoy broad prospects of application in metallurgical industries. **Key words:** blast furnace gas, high-pressure boiler, research, design, operation

汽轮机调节系统中存在摩擦与间隙的响应特征研究 = **A Study of Response Characteristics of a Steam Turbine Governing System in the Presence of Friction and Clearance** [刊, 汉] / DAI Yi-ping, DENG Ren-gang, SONG Xiao-wei (Turbomachinery Research Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049), XIE Dan-mei (Wuhan University of Water Resources and Electric Power, Wuhan, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(3). —275~277

Due to component wear, working oil-related pollution and ingress of foreign matter there may emerge cases of friction and an enlarged clearance in the governing system of a steam turbine. The foregoing can lead to a system limit-ring oscillation. When the friction resistance increased to a certain degree, seizure of moving parts may take place, posing a serious threat to the safety of the turbine unit. From the perspective of time-domain response and the analysis of frequency spectrum the authors have studied the response characteristics of the steam turbine governing system in the presence of friction and clearance. With the response characteristics of the friction and clearance being identified the present paper can serve some useful purpose for system status monitoring and failure diagnosis. **Key words:** steam turbine, governing system, nonlinear system, response characteristics

二次风量非均匀配比控制烟气偏差的理论分析及模型试验 = **Theoretical Analysis of Gas Deviation Control Based on Non-uniform Distribution of Secondary Air Flow and Its Related Model Testing** [刊, 汉] / ZHANG Xiao-ke, QIU Ji-hua (National Key Lab of Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(3). —278~281

With regard to the common problem of gas deviation in a tangentially fired boiler this paper presents a new regulation approach from the perspective of engineering applications. Through an adjustment of the distribution of secondary air flow created is a local high-pressure and fuel-rich zone in the in-furnace gas flow. By squeezing and impacting on the flame main flow this zone can change the gas flow distribution at the furnace outlet, thus limiting the gas deviation. The feasibility of such a method has been validated from a theoretical analysis and checked by way of a cold model test. The results of study indicate that under this method of regulation the gas flow at the two sides of the horizontal flue duct can be balanced, resulting in a weakening of the residual swirl and a decrease in gas deviation. **Key words:** boiler, pulverized coal combustion, gas deviation, secondary air regulation, model test

燃气轮机装置中湿压缩过程的一般规律及性能 = **General Laws Governing Wet Compression Process in a Gas Turbine Plant and the Process Performance** [刊, 汉] / WANG Yong-qing, YAN Jia-lu, LIAN Le-ming (Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), LIU Ming, He Jian-yun (Liaoning Provincial Energy General Co., Shenyang, China, Post Code: 110014) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2001, 16(3). —282~286, 310

Based on the basic principles of thermodynamics as well as heat transfer and mass transfer the authors have studied the general laws governing wet compression process in a gas turbine unit and the process performance. This research work provides to a certain extent a theoretical basis for the implementation of the wet compression technology. **Key words:** gas