

汽轮机调节系统中摩擦与间隙的定位方法研究

戴义平¹, 宋晓炜¹, 邓仁刚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 动力系, 湖北 武汉 430072)

摘要: 摩擦与间隙的存在将使系统发生极限环振荡, 极限环频率和幅值的变化可以作为故障诊断的特征。根据系统中信号传递的衰减特性, 各个环节中极限环的频谱特性会发生变化。因此, 本文采用频谱分析的方法, 根据可观测信号的高阶幅值谱与基波幅值谱两者的比值关系, 实现摩擦与间隙的定位诊断, 仿真试验证明了其可行性。

关键词: 汽轮机; 调节系统; 定位诊断; 频谱分析

中图分类号: TK263.7 文献标识码: A

1 引言

系统中存在摩擦与间隙时, 在扰动作用之下将出现极限环振荡, 其振荡的频率和幅值不随扰动量的大小而变化; 当摩擦与间隙增大时, 极限环的幅值增大而频率不变, 因此, 极限环的频率和幅值可以作为摩擦与间隙的特征参数, 用于系统的状态监测与故障诊断^[1]。在文献[1]中已经指出, 当摩擦与间隙位于调节装置的内回路和反馈回路时, 极限环的频率将有别于故障存在于前向回路时的频率。因此, 可以利用系统时域信号的极限环频率, 确定故障是位于前向回路, 还是内回路或反馈回路。但仅通过极限环的频率还不能确定摩擦与间隙位于回路的哪一个具体的环节。本文利用汽轮机及其调

节系统具有很好的低通滤波特性的特点, 提出了通过频谱分析, 由可观测信号的高阶幅值谱与基波幅值谱之间的衰减关系, 实现摩擦与间隙的定位诊断的方法, 并通过仿真试验对其可行性进行了分析。

2 摩擦与间隙的位置及定位的机理

在文献[1]中给出了调节装置的传递函数方框图, 如图 1 所示, 位置 A、B 和 C 代表了摩擦与间隙位于前向回路、内回路和反馈回路的典型情况。A₁、A₂ 是前向回路位置的变化, B₁ 是内回路位置的变化。从系统稳定性的角度来看, 摩擦与间隙位于 A₁、A₂ 等效于 A 处的作用, 位于 B₁ 等效于 B 处的作

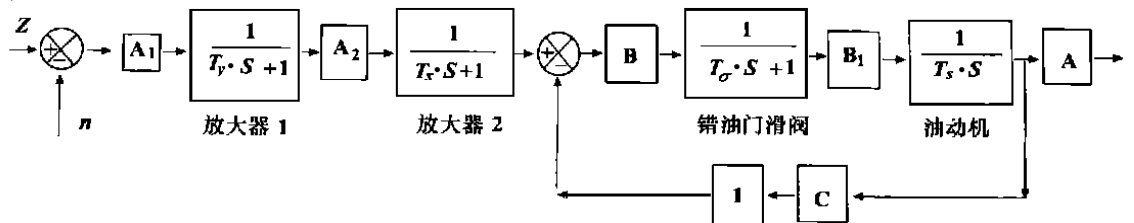


图 1 调节装置的传递函数方框图

用。但是, 当系统发生极限环振荡后, 要实现摩擦与间隙的定位与诊断, 必须准确判断故障发生的具体部位, 即故障发生在前向回路中 A₁、A₂ 或 A 的具体位置以及内回路 B、B₁ 或反馈回路 C 的位置。

在引言中已经指出, 通过极限环的频率与幅值及其变化还不能完全实现摩擦与间隙的准确定位。另一方面, 汽轮机及其调节装置具有很好的低通滤

收稿日期: 2000-05-15; 修订日期: 2000-07-17

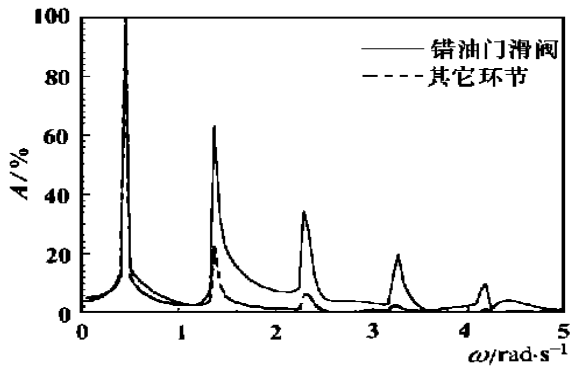
作者简介: 戴义平(1961-), 男, 湖北天门人, 西安交通大学副教授, 博士。

(3) SLS 快速成型机的预热温度场的均匀性也是受两方面的因素的影响, 一个是热流密度的均匀性; 另一个是散热条件的均匀性。

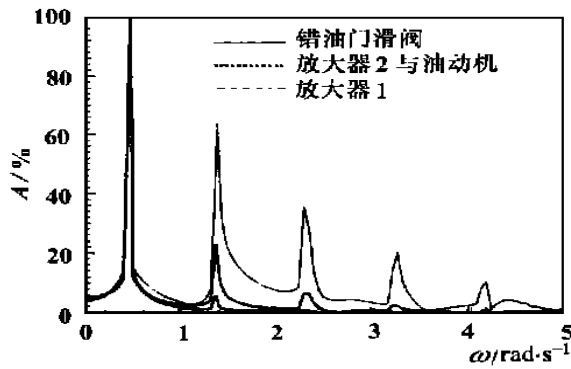
参考文献:

- [1] JAY EASWAN. Rapid prototyping with the selective laser sintering and polyform processes[A]. Chartoff R P and Lightman A J Fifth International Conference on Rapid Prototyping[C], Dearborn, USA: SME, 1996. 103-107.

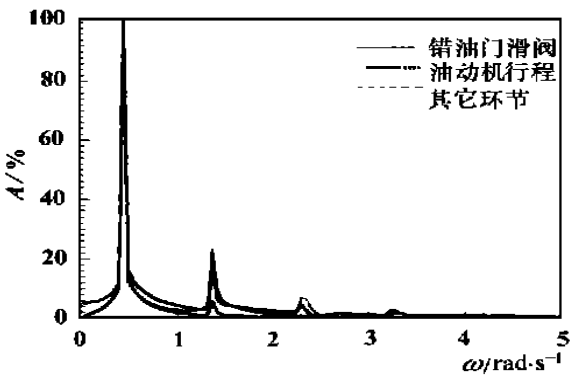
(孙显辉 编辑)



(a) 位于放大器 1



(b) 位于放大器 2



(c) 位于油动机输出

图 2 摩擦与间隙位于前向回路时的频谱

波特性, 调节装置中摩擦与间隙形成的极限环信号经过调节对象汽轮机后, 其高次谐波得到了充分的衰减。所以, 在汽轮机调节系统中, 前向回路中存在摩擦与间隙时, 极限环的高次谐波只能向前传播直到调节对象, 而不会逆向传播到存在摩擦与间隙的环节的前面。因此我们可以利用这一特点, 实现摩擦与间隙故障的准确定位与诊断。

3 摩擦与间隙形成极限环的频谱特征

对图 1 所示的系统, 通过仿真试验确定摩擦与间隙位于不同部位时系统的时域响应特性及其极限环, 对各个环节的输出信号进行频谱分析。图 2 为摩擦与间隙位于前向回路时对应的频谱, 图 3 为摩擦与间隙位于内回路和反馈回路时所对应的频谱, 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, 各环节输出时域变量的谐波谱峰如表 1、表 2 所示。由于各环节输出信号的谐波频谱衰减很快, 在图 2、图 3 中的频谱曲线迭加在一起, 不容易区分, 但是从表 1、表 2 所对应的各变量的谐波谱峰值可以清楚地判断非线性出现在哪一个环节中。

表 1 摩擦与间隙位于前向通道时各环节的输出频谱峰值

故障位置	放大器 1				放大器 2				油动机输出			
谐波频率/Hz	0.073	0.22	0.366	0.513	0.073	0.22	0.366	0.513	0.073	0.22	0.366	0.513
谱	100	22.77	6.66	2.64	100	5.74	0.78	0.29	100	5.76	0.85	
波	放大器 1	放大器 2	错油门滑阀	油动机	放大器 1	放大器 2	错油门滑阀	油动机	放大器 1	放大器 2	错油门滑阀	油动机
幅	100	22.80	6.63	2.65	100	22.84	6.65	2.67	100	5.75	0.84	
值	100	63.34	34.98	20.05	100	63.43	35.39	20.42	100	16.81	4.62	2.41
	100	22.68	6.35	2.56	100	22.73	6.41	2.61	100	22.92	6.70	2.86

表 2 摩擦与间隙位于反馈回路和内回路时的频谱峰值

非线性位置	内回路(错油门滑阀)				内回路(油动机)				反馈回路			
谐波频率/Hz	0.171	0.513	0.855	1.197	0.171	0.513	0.855	1.197	0.35	1.05	1.75	2.45
谱	100				100	6.53			100			
波	放大器 1	放大器 2	错油门滑阀	油动机	放大器 1	放大器 2	错油门滑阀	油动机	放大器 1	放大器 2	错油门滑阀	油动机
幅	100				100	6.33			100			
值	100	30.29	11.13	8.58	100	38.35	15.48	12.35	100	26.43	10.85	5.74
	100	9.95	1.96		100	31.24	11.00	9.06	100	26.55	10.45	

无论摩擦与间隙位于何处, 由于其数学模型为奇函数, 其谐波必然只有基频的奇次倍频存在。图 2、图 3 的频谱和表 1、表 2 的谐波峰值清楚地反映了这一点, 除基频外, 其它谐波为基频的奇次倍频。当摩擦与间隙出现在前向回路中时, 从表 1 所示的谐波谱峰值可见, 当故障位于放大器 1 中时, 从放大器 1 开始, 除错油门滑阀外, 其后各环节输出信号的频谱各次谐波具有近似相同的衰减率, 三次谐波幅值为基波幅值的 22.7%, 衰减率为 77.3%。当摩擦与间隙位于放大器 2 中时, 除错油门滑阀外, 放大器 2 和油动机输出信号的频谱具有近似相同的衰减率, 三次谐波幅值也近似为基波幅值的 22.7%, 衰减率为 77.3%。而放大器 1 输出信号的三次谐波幅值只有其基波幅值的 5.7%, 衰减率达 94.3%, 比其它环节具有大得多的衰减率。

当摩擦与间隙位于油动机输出回路时, 油动机输出信号的三次谐波幅值为基波幅值的 22.9%, 衰

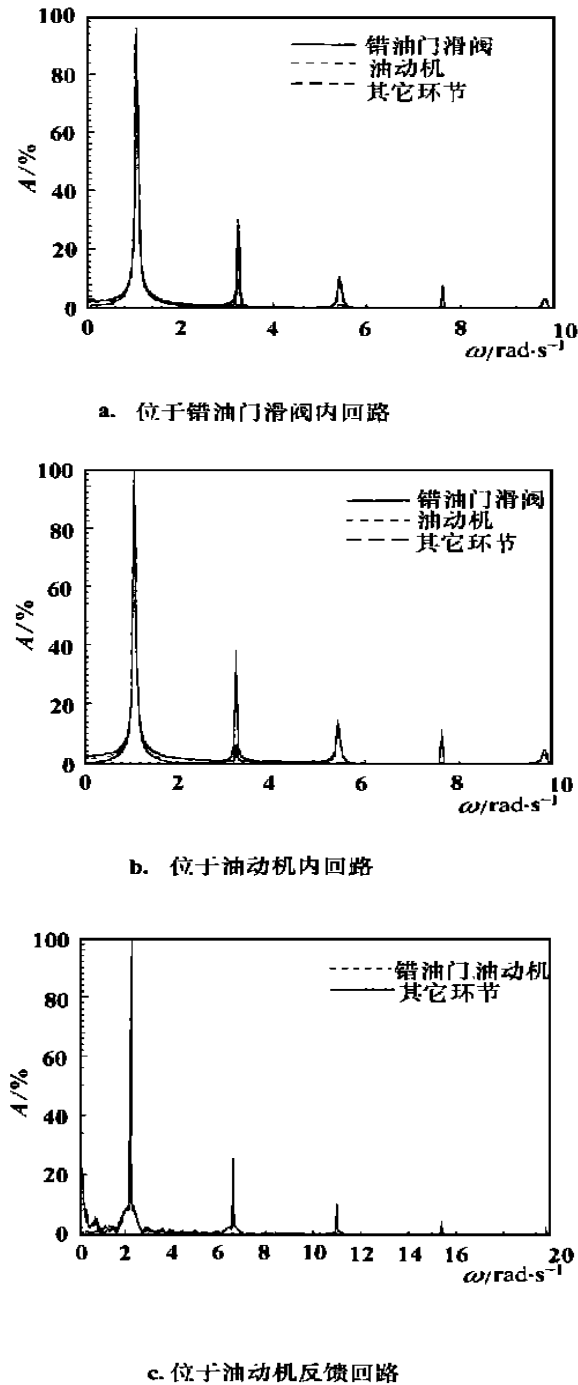


图3 摩擦与间隙位于反馈回路和内回路时的频谱

减率为 77.1%，而放大器 1 和放大器 2 输出信号的三次谐波幅值只有其基波幅值的 6% 左右，衰减率达 94%。从错油门滑阀输出信号的谐波谱峰值可见，当摩擦与间隙位于其前面时，由于滑阀与油动机形成局部闭环，因此摩擦与间隙的影响强烈，谐波衰减很慢，三次谐波的幅值达基波的 63%，衰减率仅为 37%。当摩擦与间隙位于油动机输出回路时，油

动机对错油门滑阀的反馈没有受到非线性的影响，但错油门滑阀的输入与油动机的实际输出不协调，产生相互干扰，相对于放大器 1 和放大器 2 来说其衰减率有明显的降低，三次谐波幅值为其基波的 16.8%，衰减率为 83.2%。

前面曾经指出，当摩擦与间隙位于其它位置时，系统极限环的频率将发生变化。因此，根据系统产生极限环的时域波形及其谐波谱峰的衰减情况，可以对前向通道中存在的摩擦与间隙进行定位与诊断。

同理，当摩擦与间隙位于反馈回路和内回路时，放大器 1 和放大器 2 输出信号的三次以上的谐波得到了充分的衰减，其谐波频谱峰值接近于零。摩擦与间隙位于反馈回路时，错油门滑阀和油动机输出信号的谐波频谱峰值有相近的衰减率，但是系统极限环的频率要比摩擦与间隙位于其他位置时要高得多。当摩擦与间隙位于内回路的错油门滑阀上时，油动机输出信号的三次谐波频谱峰值为基波频谱峰值的 9.95%（衰减率达 90%），比摩擦与间隙位于油动机内回路时的对应值（三次谐波频谱峰值为基波频谱峰值的 31.2%，衰减率仅为 68.8%）要低得多。另一方面，摩擦与间隙位于内回路时，系统极限环的频率也要发生变化。因此无论摩擦与间隙位于前向通道、内回路和反馈回路，都可以通过系统时域信号的极限环频率和对应的频谱特性的分析，实现汽轮机调节系统摩擦与间隙的定位与诊断。

4 结论

当系统中存在摩擦与间隙时，扰动作用下将形成极限环振荡。极限环频率取决于摩擦与间隙故障的位置，而幅值取决于摩擦与间隙的大小。由于汽轮机及其调节系统具有良好的低通滤波特性，摩擦与间隙形成的滞环信号首先在该环节上出现明显的奇数倍频分量，而在该环节之前的环节上不会出现高频分量。因此可以通过系统极限环频率和极限环高阶频谱与基波频谱的衰减特性，实现摩擦与间隙的定位与诊断，仿真试验结果表明这一方法是可行的。

参考文献:

- [1] 戴义平, 邓仁纲, 宋晓炜, 等. 汽轮机调节系统存在摩擦与间隙的响应特征研究[J]. 热能动力工程, 2001, 16(3): 275-277
- [2] 胡广书. 数字信号处理—理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

(孙显辉 编辑)

空气与 $O_2 + CO_2$ 气氛下钙基脱硫剂固硫规律的实验研究 = **Calcium-based Desulfuration Agent under the Gaseous Condition of Air and O_2/CO_2** [刊, 汉] / ZHOU Ying-biao, ZHENG Ying, ZHANG Li-zhi, et al (National Key Lab of Coal Combustion under the Central China University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy Power. — 2001, 16(4). — 409 ~ 411

An experimental investigation was conducted of the mechanism of SO_2 emissions and $CaCO_3$ desulfuration during the burning of Heshan bituminous coal under the gaseous condition of air and O_2/CO_2 . The results of the experimental investigation indicate: 1. CaO in coal ash plays a significant role in effecting desulfuration; 2. The presence of CO_2 can markedly contribute to the desulfuration process; 3. Under the condition of a constant ratio of temperature and Ca/S it is essential to optimize the content of CO_2 . These findings provide an underlying basis for the comprehensive treatment of pollutant emissions under the circulating combustion mode of O_2/CO_2 . **Key words:** CO_2 , calcium-based desulfuration agent, desulfuration

激光选区烧结(SIS)成型机的粉末预热过程的实验研究 = **An Experimental Study of the Powder Preheating Process for a SLS (Selective Laser Sintering) Forming Machine** [刊, 汉] / LI Xiang-sheng, SHI Yu-sheng, WANG Zong-jun, Huang Shu-huai (Rapid Forming Technology Center of Materials College under the Central University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 412 ~ 414

In the rapid forming technology of selective laser sintering (SLS) the transfer and absorption of heat energy represents a key process. The effective use and uniform distribution of heat energy constitute a major factor in ensuring the success of the SLS forming technology. The preheating of powder has been considered as one of the most important factors having a decisive influence on the forming process and forming precision. An analysis is given of the preheating process of a general preheating method in the working cavity of a forming machine. On the basis of experiments obtained was a mathematical model depicting the preheating process of a preheating temperature field. The model plays a crucial role in the design of a preheating device and the control of SLS forming process. **Key words:** selective laser sintering, thermal energy, preheating, mathematical model

汽轮机调节系统中摩擦与间隙的定位方法研究 = **A Study of the Method for Locating the Friction and Clearance in a Steam Turbine Governing System** [刊, 汉] / DAI Yi-ping, SONG Xiao-wei, DENG Ren-gang, et al (Thermal Energy Engineering Department, Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 415 ~ 417

The presence of friction and clearance in a steam turbine governing system can cause a limiting ring oscillation of the system. The variation of the limiting ring frequency and amplitude may serve as the characteristics of fault diagnosis. The frequency spectrum features of the limiting ring in various links will change, depending on the damping characteristics of signal transfer in the system. In view of this, by using the method of frequency spectrum analysis, the authors have attained a locating diagnosis of the friction and clearance, based on the ratio of high-order amplitude spectrum and basic wave amplitude of measurable signals. The feasibility of the above-mentioned method has been verified by a simulation test. **Key words:** steam turbine, governing system locating diagnosis, frequency spectrum analysis

采用扩展温度振荡法测量超临界 CO_2 管内对流换热特性 = **The Measurement of Convection Heat Transfer Characteristics in a Supercritical Carbon-Dioxide Gas Tube by the Use of an Extended Temperature Oscillation Method** [刊, 汉] / ZHANG Hou-lei, XUAN Yi-min (Power Engineering Department, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, China, Post Code: 210094), Wilfried Roetzel (University of the Federal Armed Forces at Hamburg, Germany, Post Code: 22043) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 418 ~ 420

Presented is an extended temperature oscillation model for the measurement of in-tube convection heat-transfer factor during the variation of fluid temperature in a small duct. The recommended method can be employed to measure the local convection heat-transfer factor of flows in various kinds of smooth-surface duct. An actual measurement was conducted of the supercritical CO_2 convection heat-transfer factor in a round stainless steel tube of 2 mm inner diameter under typical pressure and temperature conditions. **Key words:** supercritical carbon dioxide, convection heat transfer, temperature os-