

基于 FFT 的燃气轮机燃烧数据处理装置

刘炯 闵泽生 郑婷

东方电气自动控制工程有限公司, 四川 德阳 618000

摘要: 燃气轮机的控制中, 稳定燃烧控制是最核心、难度最大技术课题, 要实现燃气轮机燃烧的稳定控制, 快速、准确的燃烧数据处理是前提。论文基于 F 级燃气轮机燃烧器的运行特点和运行方式, 对其提出针对性的燃烧状态测量方法, 并在实现燃烧数据测量的基础上, 兼顾燃烧控制策略的需求, 对燃烧数据进行后期处理、分析, 最终完成样机的产出。

关键词: FFT; 燃气轮机; 燃烧控制; 数据处理

中图分类号: TK47

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2016)04-0085-04

Gas Turbine Combustion Data Processing Device Based On FFT Algorithm

LIU Jiong, MIN Zesheng, ZHENG Ting

(Dongfang Electric Auto Control Engineering Co., Ltd., Deyang, Sichuan, 618000, China)

Abstract: Combustion stabilization control is the core and difficult portion of gas turbine control, combustion data processing should be quick and accurate in order to realize it. This paper proposes the combustion status processing scheme for the combustor of F type gas turbine to adapt to its operation characteristic. The processing scheme includes data acquisition and FFT processing, and the then prototype basing on this scheme is manufactured.

Key words: FFT; gas turbine; combustion control; data processing

随着能源可持续性发展战略的实施和环境保护意识的增强, 发展高效清洁的燃气轮机技术引起了全世界的广泛重视。但对于燃气轮机的燃烧技术(预混、扩散), 其发展受到了燃烧不稳定性的限制, 主要表现为燃烧室会出现自激振荡, 直接会对燃气轮机燃烧室的火焰筒和过渡段造成损坏。例如, 在燃气轮机升负荷的过程中, 高频段的燃烧室压力波动可能会导致过渡段和火焰筒的损坏, 这样就需要实时地对燃烧室内的压力波动进行监测, 提前甩负荷或者跳机来阻止热部件的损坏。因此, 如何有效地对燃烧信号进行测量, 并对其实施最优的控制以保证燃气轮机的稳定运行, 是燃气轮机的控制核心。

如何有效地对不稳定的燃烧信号进行分析, 最常用的方法是对燃烧信号进行时-频分析。目前时-频分析的常用方法有傅里叶变换(FFT)、短时傅里叶变换(STFT)、小波变换(WT)等, 本装置基于传统的 FFT 算法实现对燃气轮机燃烧数据的处理。

1 装置软件

1.1 FFT 理论

傅里叶变换的基本思想是将信号分解成一系列不同频率的连续正弦波的叠加, 或者从另外一个角度来说是将信号从时间域转换到频率域, 它是纯频域的分析方法, 在频域的定位完全准确;

收稿日期: 2016-03-01

作者简介: 刘炯(1973-), 男, 2002年毕业于西安交通大学, 工学硕士, 高级工程师。现在东方电气自控工程有限公司工作, 长期从事透平机械控制系统的研究。

但在刻画时域信号的局部特性以及非平稳信号的处理效果有一定的局限性。其理论技术如下所述：任何复杂的周期信号 $f(t)$ 可以用简单的调和振荡函数表示成如下形式：

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{+\infty} (a_k \cos k\omega_0 t + b_k \sin k\omega_0 t) \quad (1)$$

公式 (1) 为著名的傅里叶级数， $\cos k\omega_0 t$ 和 $\sin k\omega_0 t$ 为振荡函数，简称为正弦波； a_k 和 b_k 是 $f(t)$ 的傅里叶系数。

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega_0 t dt, k = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega_0 t dt, k = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

于是，周期函数 $f(t)$ 就与下面的傅里叶序列产生了一一对应，即

$$f(t) \Leftrightarrow \{a_0, (a_1, b_1), (a_2, b_2), \dots\} \quad (4)$$

图 1 表示了傅里叶变换的模型图示。

燃气轮机燃烧室燃烧过程的稳定性，主要表

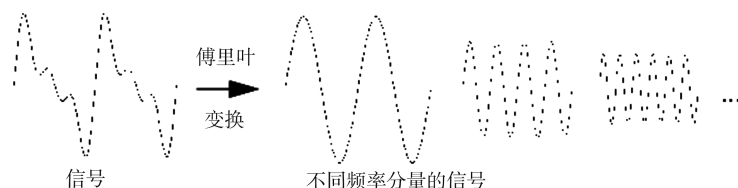


图 1 傅里叶变换模型

现为燃烧压力的脉动，对其采用 FFT 变换，将燃烧信号在时域上的脉动转换到频率域，进行频率分量的解析，并通过分频采样，分频段分析，定义保护阈值的方式实现对燃气轮机运行过程中，燃烧不稳定性的分析。

1.2 算法搭建

通过对 F 级燃气轮机燃烧数据的分析，在燃烧室内部，其压力波动的频率解析范围在 0 Hz ~ 5 000 Hz 之间，基于此定义装置的最大采样频率 10 240 Hz，每通道采样点数 1 024，其频率解析范

围为 0 Hz ~ 5 120 Hz，频率分辨率为 10 Hz。

为了有效对燃烧信号进行分析，将燃烧信号进行时-频转换后的频率分量进行不等间隔分频，并求取各个频段的压力波动的最大值，同时确定燃烧压力脉动的预报警值，如图 2 所示。 $j = 1, 2, 3 \dots 8$ ，代表对应的燃烧器编号； $i = 1, 2, 3 \dots 9$ 代表频段号； Y_{ji} 是第 j 个燃烧器探测的压力波动在 i 频段的最大值， H_{ji} 是第 j 个燃烧器探测的压力波动 i 频段的预报警值。

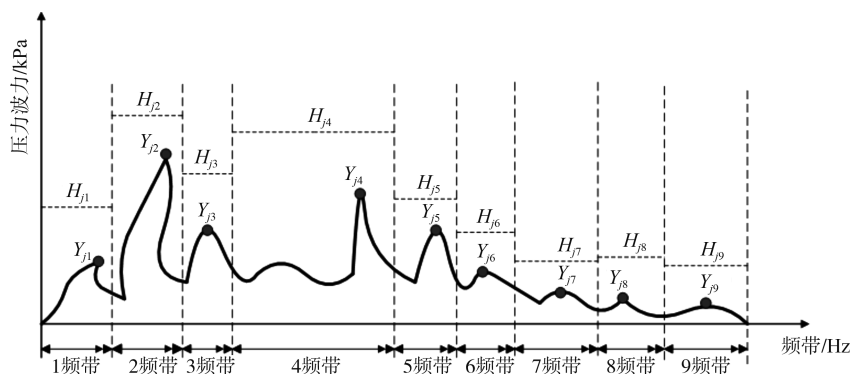


图 2 燃烧信号频带

表1是基于FFT算法燃烧数据的频带划分结果,基于不同的频带,从结构上可以判别其燃烧不稳定性在燃烧室可能发生的部位。

表1 频带划分

频段范围	频率 Hz	频段范围	频率 Hz
1 频带	0~45	6 频带	512~2000
2 频带	55~100	7 频带	2 000~3 000
3 频带	100~200	8 频带	3 000~4 000
4 频带	200~300	9 频带	4 000~5 120
5 频带	300~512		

1.3 保护逻辑

定义保护用阈值

H : 高阈值

HH : 高高阈值

HHH : 高高高阈值

设定 H_{ji} 的同时,还设定了 HH_{ji} (报警值) 和 HHH_{ji} (跳机值), 其中 HH_{ji} 是第 j 个燃烧器探测的压力波动 i 频段的报警值报警值, HHH_{ji} 是第 j 个燃烧器探测的压力波动 i 频段的跳机值。

保护逻辑简单表述如下:

(1) 对任一燃烧器, 在一个频段中, 出现 $Y_{ji} > H_{ji}$, 则输出①;

(2) 对任一燃烧器, 在 2 个频段中, 出现 $Y_{ji} > HH_{ji}$, 则输出②;

(3) 对任一燃烧器, 在 2 个或 2 个以上的频段中, 出现 $Y_{ji} > HHH_{ji}$, 则输出③。

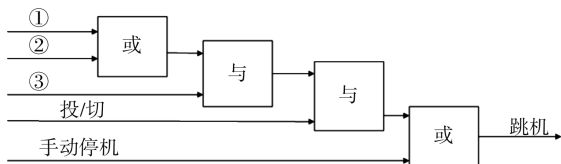


图3 保护逻辑

通过这 3 个参量进行逻辑运算,如图 3 示,最终输出跳机指令;同时还可通过监控画面中的手动启停按钮和投切按钮进行人为干预,参与保护动作,控制保护指令的输出。

2 装置硬件

燃气轮机燃烧数据处理装置内部架构,如图 4 所示,主要包括由主控制器、输入模块、输出模块、FPGA 模块、通讯模块组成。主控制器用于系统主控,以及动态分析算法的实现;输入模块用于燃烧状态数据采集;输出模块用于控制、保护指令的输出;FPGA 模块用于对燃烧数据进行精确定时;通讯模块用燃烧数据处理装置与人机界面或控制系统等外部设备的数据交互。图 5 是 8 通道燃气轮机燃烧数据处理装置的实物架构图。

3 装置测试

3.1 负荷测试

表 2 是装置的 CPU 负荷测试记录,由 CPU 负荷测试记录可以看出,在预期设定的采样频率下,采样点数 1 024,通道数目不同,其对应的 CPU 负

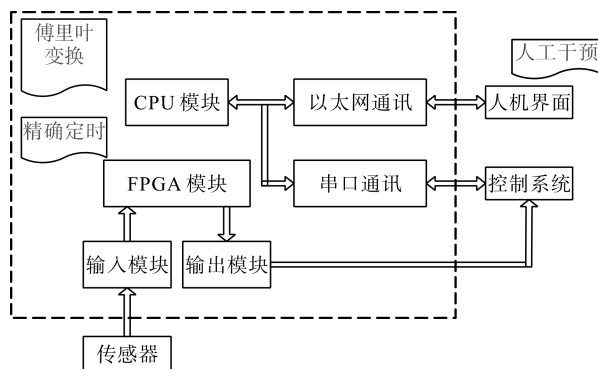
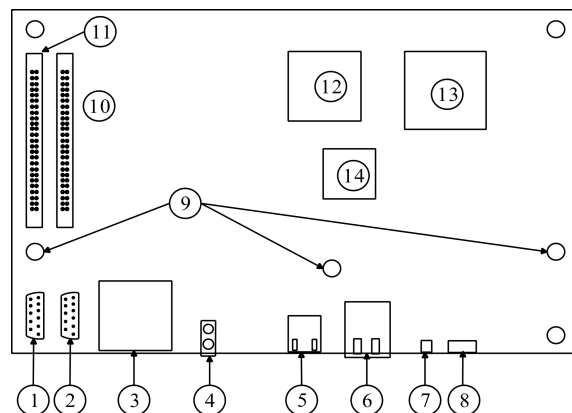


图4 燃气轮机燃烧数据处理装置内部架构



1. RS485
2. RS232
3. SDHC 卡
4. 电源接口
5. 以太网口
6. USB 接口
7. 复位按钮
8. 指示灯
9. 安装孔
10. 模拟量输入输出
11. 数字量输入输出
12. FPGA
13. CPU 处理器
14. NAND 闪存

图5 燃烧数据处理装置实物架构图

表2 负荷测试结果

序号	采样频率/Hz	采样点数/点	分辨率/Hz	负荷/%	采样时间/ms	通道数/个
1	12 800	1 024	12.5	67~77	80	12
	1 280	1 024	1.25		800	12
2	10 240	2 048	5	47~58	200	12
	1 024	2 048	0.5		2 000	12
3	10 240	1 024	10	62~67	100	12
	1 024	1 024	1		1 000	12
4	12 800	1 024	12.5	50~55	80	8
	1 280	1 024	1.25		800	8
5	10 240	1 024	10	48~52	100	8
	1 024	1 024	1		1 000	8

荷各不相同，因此在保证 CPU 负荷的基础上，合理的对可采样分析的通道数进行调整。

试，示波器通过模拟量输入结构给定某一特定频率的信号。结果表明，装置能够准确、稳定运行。

3.2 功能测试

表3 是在确定采样频率下对装置的功能进行测试

表3 功能测试结果

稳定信号低频测试(频率分辨率 1 Hz)							
序号	频段/Hz	给定频率 80 Hz		给定频率 150 Hz		给定频率 402 Hz	
		最大值/V	对应频率/Hz	最大值/V	对应频率/Hz	最大值/V	对应频率/Hz
1	0~45	0.001 1	17.5	0.156 625	30	0.396 9	21.25
2	55~100	9.457 8	80	0.823 3	70	2.458 3	73.75
3	100~200	0.000 8	110	9.382 3	150	0.226 2	137.5
4	200~300	3.186 5	240	1.161 2	230	0.624 9	253.75
5	300~512	2.163 4	400	3.052 3	450	8.970 6	402.5
稳定信号高频测试(频率分辨率 10 Hz)							
序号	频段/Hz	给定频率 1 000 Hz		给定频率 3 000 Hz		给定频率 4 500 kHz	
		最大值/V	对应频率/Hz	最大值/V	对应频率/Hz	最大值/V	对应频率/Hz
6	512~2 000	8.354 7	1 000	0.828 9	1 400	2.947 3	700
7	2 000~3 000	0.413 0	2 200	1.143 5	2 200	0.624 1	2 100
8	3 000~4 000	1.409 7	3 000	8.258 8	3 000	0.739 5	3 100
9	4 000~5 120	0.205 5	4 200	0.372 4	4 600	8.02	4 500

4 结语

燃气轮机燃烧数据处理装置可实现燃气轮机发电机组在运行过程中燃烧室内 8 通道燃烧压力波动与振动信号的实时采集，并通过 FFT 分频段实

时分析算法，可实现对 8 个采集通道内的不同频段进行解析计算，当燃气轮机的燃烧状态出现不稳定的异动时，通过保护阈值的判断，做出保护动作以确保机组正常稳定运行。