

高速数据采集和分析系统研究

清华大学 唐锡宽* 刘清瑞 杨 巍
株洲航空动力机械研究所 徐长庚

【摘要】 为了在地面实验中监测航空发动机的振动情况进行故障诊断, 研制了高速数据采集系统、信号处理系统以及基于模糊聚类方法上的故障诊断系统。在数据采集系统中采用并行A/D结构以提高采集速度; 研制高性能的数字倍频电路以准确实现整周期采样。利用软、硬件结合的方法对测试结果进行补偿, 提高了相位精度。用标准信号和现场试验信号进行考核, 结果表明该系统能很好满足测量要求。

主题词: 故障诊断 数据采集 航空发动机 信息处理 振动

1 高速数据采集系统

1.1 并行A/D结构

为提高数据采集速度, 在本系统中采用并行A/D结构。与通常的串行系统相比, 其采集速度高, 且容易实现各通道信号之间的无相差采集, 降低了对A/D片的要求。

系统设置8个通道, 用4个A/D片。由12位A/D芯片AD574得到的信号通过采集, 依次存放在相应的存贮器中。为了协调各A/D的触发脉冲, 设置了A/D转换触发脉冲分配电路。当信号频率很高时, 可以将该信号同时接入几个通道, 在预置采集模式条件下, 用几个A/D采集一路信号, 这样提高了采集速度。预置的采集模式有以下几种: 八采一(即一信号同时通过八通道采集); 2个四采一; 4个二采一和8个一采一。

每个通道分别设置八阶低通滤波器, 可以有效地抑止4kHz以上的高频成份。每通道有各自的放大器。采用精密的仪用放大器组成12挡手动放大器或用精密宽带放大器构成八挡程控放大器。放大倍数由用户预置。

1.2 整周期数据采集

本系统具有非整周期和整周期两种采集方式。前者为内触发方式, 后者为外触发方式。对转子—支承系统的稳态振动一般采用整周期采样。每一周期采样点数 N 一般取为 2^m (m 为整数), 以便于进行富氏变换。

为了实现整周期采样, 研制了高速高精度的数字倍频电路。它具有良好的转速跟踪性能。转速测量。用光电或其它传感器得出与转速同频的信号经整形电路成为同频脉冲基准信号。时钟脉冲由晶振给出。在本系统中使用10MHz频率, 即时钟脉冲间隔为 $t_c = 0.1\mu s$ 。当基准脉冲到来, 触发计数器, 一直到下一个基准脉冲到来时停止。所记录的时钟脉冲数乘以 t_c 即为

转速周期 T , 也即得到转速频率 $n = 1/T \text{ Hz}$ 。由于采用了 10MHz 的晶振, 转速测量误差很小。转速误差百分比 Δn 为

$$\Delta n = n \times 10^{-5} \% \tag{1}$$

例如当 $n = 1000\text{Hz}$ 时, $\Delta n = 0.01\%$ 。当 n 小时, 精度更高。

N 倍频采样。用计算机预先设置倍频数 N ($N = 1 \sim 1024$), 它决定于转速的高低。当转速高时, 则取较小值, 使之不超过 A/D 的采集速度。

在转子第一转时, 测出了转动周期 T 。将它除以 N , 得到采样周期 $t_s = 1/nN$ 和采样间隔的时钟脉冲数 $N_s = 10^7/nN$ 。把 N_s 放在一计数器中, 依减 1 处理, 到零时产生一触发脉冲。各触发脉冲间的间隔将为 t_s 。其原理框图见图 1 (1 双时钟发生电路, 2 倍频信号发生电路, 3 信频控制电路, 4 外触发信号整形, 5 倍频信号合成电路)。考虑到计算出的 N_s 不一定正好为整数, 所以存在着舍入误差。一周期中的累积误差小于或等于 $N t_s$ 。若连续采集 p 个周期, 则累积误差 $pN t_s$ 可能超过采样周期, 造成一个周期内多采或少采一点的情况 (图 2)。为减少累积误差, 把每一周期最后一采样脉冲剔除, 代之以基准脉冲。这样虽然最后一个采样间隔有些误差, 但不会累积到下一周期中去, 提高了整周期采样的精度。

1.3 交直流分离电路、数据采集软件

在振动监测时有时需要判明信号中的直流分量, 或当直流分量很大, 交流分量小时, 采用较大放大倍数则会造成信号失真; 放大倍数小时, 交流分量太小, 影响测量精度, 因而需要把交、直流分开, 分别给以各自的放大倍数。为满足这种要求, 设置了交、直流分离电路 (图 3)。分离后的交、直流分量将占两个通道, 由同一 A/D 采集。由于使用一个 A/D 采集两路信号, 所以在采集的 12 位数中设置一标记, 用以标志哪一通道是在基准脉冲到来时开始触发采样的。

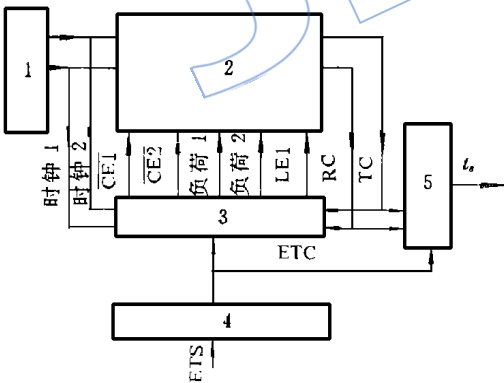


图1 倍频电路原理框图

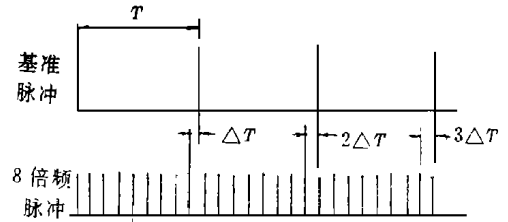


图2 采样间隔的累积误差

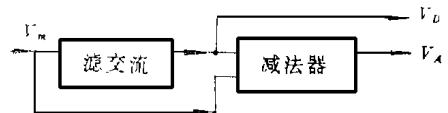


图3 交、直流分离电路原理框图

与硬件系统配合, 编制了相应的软件。其功能包括对数据采集方式的选择 (整周期或非整周期)、采集模式选择、倍频数 N 和放大倍数预置等硬件初始化程序、采集数据的存盘和格式处理等等。

2 信号处理系统

采集到的数据存盘后,由本信号处理系统 THCX-1 加以调用。为了适应不同的硬件系统,设置了一个初始化功能块,将采集的信号数据转为标准格式,使以后的分析软件能很好工作。全部程序用 C 语言编写,采样和实时监控程序用宏汇编编写。可用于 BM /A T 及其兼容机。

2.1 系统功能

系统有以下功能: (1) 转速和角加速度显示。(2) 能在屏幕上同时显示 2 个通道的时域波形,该波形可按指令逐点或逐页左右移动。(3) 可同时显示 4 个相继周期的轴心轨迹,以观察轨迹的变化情况。(4) 根据整周期或非整周期采集的数据进行快速富氏变换(FFT),给出功率谱和相频图。在谱图上移动光标,可得到光点位置处的频率及相应的幅值和相位,在屏幕的右下角显示。(5) 采用模糊聚类分析方法,按专家知识建立聚类中心集(典型故障频谱集),把当前采集的信号样本的频谱和它对比,寻找最贴近的典型故障谱,再辅以用人机对话方式给以补充的瞬态响应、历史状况等知识以判明故障类型。按百分数形式给出最大可能的若干种故障。

2.2 幅相值修正

由于在电路中存在着电容(分布电容)等器件,会引起信号的相移等问题。而相位信息在例如动平衡等情况下是十分重要的,所以需要对测出的信号幅相值进行定标和校正。在本系统中利用软件加以补偿。

相位误差来源主要有: (1) 用 1A /D 同时采集两通道信号,因此两通道采出的样本不是同一时刻的; (2) 应用了前置模拟滤波器,对于不同频率有不同的相移。第 1 项误差与一周期内采样点数 N 有关。两通道间的相移 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi = (360^\circ/N) (f_i/f) \quad (2)$$

其中 f_i 为基频的 i 倍频频率; f 为基频频率。按照采样数据的标志位区分两通道信号中哪一通道由基准信号首先触发采样。这样,对另一通道的相移按式(2)加以修正,从而使第 1 项误差得到补偿。对第 2 项误差,则用实验测定值来加以校正。以不同频率的正弦波输入,用相位计测出相移,和本系统采样结果比较,然后用多项式拟合技术给以补偿。经过上述措施后,相位精度可达到 $\pm 1^\circ$ 左右。由于采用了精密放大器,其线性度很好。在按实际情况标定好放大倍数后,可得良好的精度。在频率变化时,幅值的变化也不大。为了更好的提高采集精度,在取得了不同频率下的幅值后与采样结果比较,用多项式拟合技术给以少量补偿。

3 试验考核

为了检验研制的高速数据采集系统的精度和实用性,进行了标准信号采集试验和转子振动信号现场采集考核。

3.1 标准信号试验考核

试验装置和所用仪器如图 4。BX29 型超低频信号发生器可提供两路正弦波或方波信号,其间的相位差可以调节。将一路用作基准脉冲,另一路为被测信号,将它同时输入本系统(TS 3405A)的 8 个通道,以比较各通道的精度。BX29 发生的信号幅值用 8520A 高精度数字电压表读出。相位(与基准信号间的相位)用清华大学精密仪器系研制的相位计测量,其名义精度 $\pm 0.1^\circ$ 。同时用美国 BN 公司生产的 TK-20 转速、幅值、相位计测量,作为对比之用。

用 8 通道之一为例,列出测量结果如表 1、表 2。其它各通道情况基本相同。可以看出有很

好的精度, 相位精度不超过 1° 。

表 1 相频、幅频精度

信号频率(Hz)		100	125	200	250	333. 33	500	1000
相 位 ($^{\circ}$)	相位计	$90.0^{+0.1}_{-0.2}$	93. 1	93. 1	93. 0	93. 0		
	TK-20	- 359+ 1	- 357 $\pm$ 1	- 359 $\pm$ 1	- 359 $\pm$ 1	- 359 $\pm$ 1	- 357 $\pm$ 1	- 357 $\pm$ 1
	TS 3405A	90. 850	92. 371	92. 651	92. 852	92. 901	93. 310	92. 189
幅 值 (V)	8520A	1. 03831	0. 99998	1. 00010	1. 00021	1. 00031	1. 00053	1. 00092
	TS 3405A	1. 032874	0. 994133	0. 99363	0. 993806	0. 995825	0. 999849	1. 000363

表 2 相位、幅值精度

相 位 ($^{\circ}$)	相位计	$5. 0\pm 0. 1$	$10. 0\pm 0. 1$	$15. 9\pm 0. 1$	$30. 0\pm 0. 1$	$90. 0\pm 0. 1$	$182. 15\pm 0. 05$	$270. 0\pm 0. 1$
	TK-20	- 81 $\pm$ 1	- 77 $\pm$ 1	- 71 $\pm$ 1	- 57 $\pm$ 1	2 $\pm$ 1	92 $\pm$ 1	182 $\pm$ 1
	TS 3405A	4. 662	9. 693	15. 794	29. 939	89. 913	181. 980	269. 801
幅 值 (V)	数字电压表	1. 00043	0. 80012	0. 50022	0. 20038	0. 10027	0. 02001	0. 00499
	TS 3405A	1. 001648	0. 800723	0. 500778	0. 200576	0. 100365	0. 019977	0. 004967

通过对采集信号进行 FFT 得到单一根频谱, 说明采集的波形是相当准确的, 在整周期采集时, 一周期内准确地按 N 点采样。

3 2 现场振动信号采集考核

除了用标准信号检验外, 还对航空发动机高速转子地面试验进行振动测试考核。其设备装置简图如图 5。

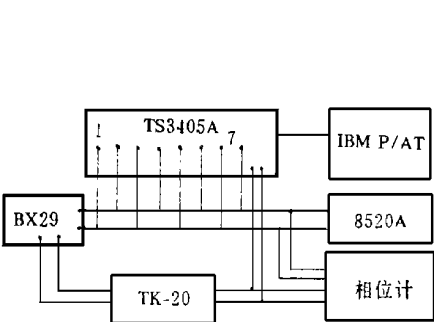


图 4 测试装置

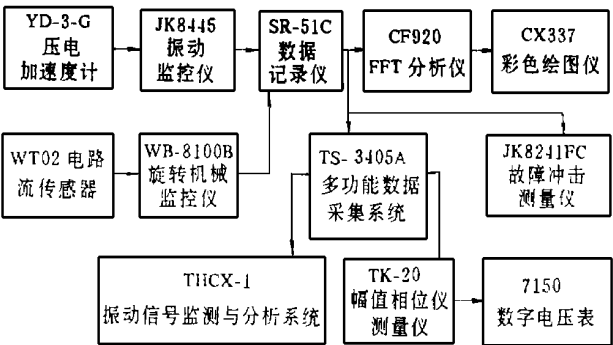


图 5 设备装置

由 CF920 和 TS3405A、THCX-I 信号处理系统画出的频谱相符。典型的对比图见图 6。其中 a 是用 CF920 画出的, b 是用本系统画出的。两者对比可看出, 所研制的高速数据采集和信号处理系统是可以满足工程使用要求的。

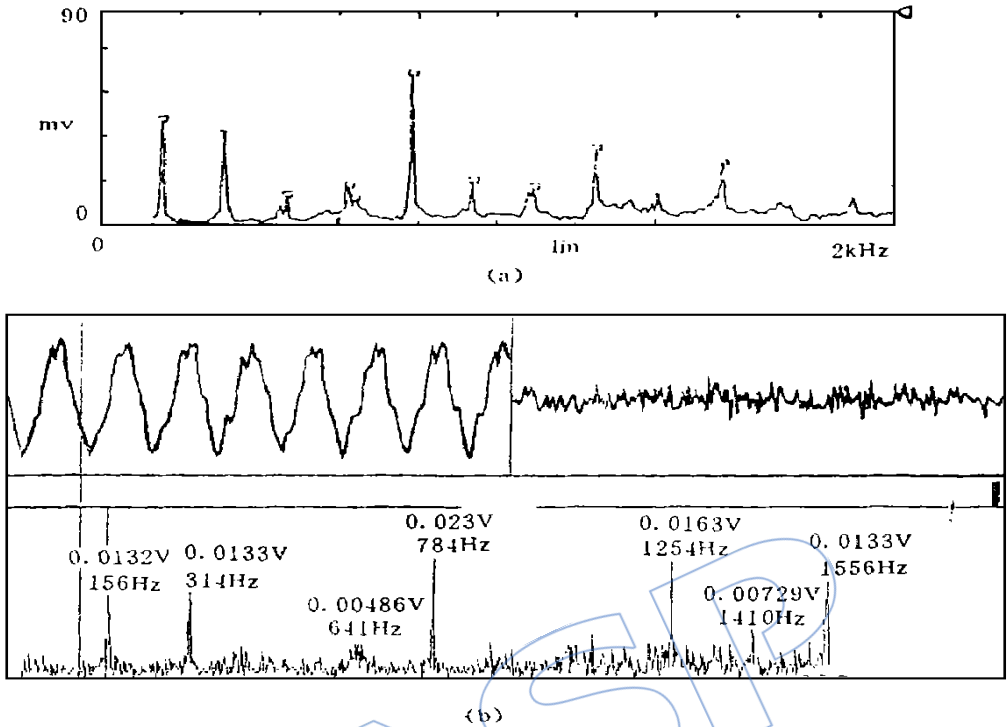


图 6 测试频谱图

除此之外,应用本系统的故障诊断软件,对不平衡、不对中和碰摩故障进行诊断,结果与实际相符。

参 考 文 献

- 1 姚久成, 张亚勤 多总线并行输入的多通道高速采集系统 气动实验与测量控制, 1988 年
- 2 施昊, 严普强 一种新型数字锁相环 仪器仪表学报, 1990, 8
- 3 Hurrey M. F. Engine In-Flight Data Collection and Analysis in United Kindom. 56th Symposium of A GARD Turin Italy, 1980
- 4 Jame A. J. F100 Engine Diagnostic System Summary of Remets Boyless A ircr, 1984; 21(2)

(责任编辑 杨再荣)