

机械故障诊断学的理论及其应用

第二讲 故障诊断中的信号检测与信号处理

Topic 2 Data Acquiring and Signal Processing in Fault Diagnosis

摘要 信号检测与信号处理是工况监测与故障诊断的基础。本文在阐述特征信号及其选择方法的基础上，介绍了主要的振动传感器，并详细说明了信号调理、计算机采集与处理的理论与方法。

关键词：特征信号，传感器，采样

信号检测的基本任务是获取有用的信息，是人类认识客观世界的手段。在机械设备运行过程中，适当的检测方法是发现故障信息的重要条件，因而也是故障诊断技术中不可缺少的环节。它涉及到根据检测对象选择合适的传感器、信号调理、采样、信号处理及检测系统等许多方面因素。

1 特征信号的选择^[1]

机器在运行过程中能提供的信号很多，但并不是每一种信号都对工况监视有积极的意义。要选择能实时采集的、且能敏感地反应工况状态变化的信号。在故障诊断中称之为特征信号。

机械设备故障诊断与医学诊断比较有许多相似之处，在医学诊断过程中，医生通常是应用各种检测仪器，获取如体温、心率、血压等能够反映病症特征的各种信息，在此基础上进行诊断。在机器的运行过程中，我们也可以应用各种现代科学仪器（包括计算机的软硬件）获取种种信息，对机器的整体或部件进行诊断，判别工况正常还是异常。机器设备的主要征兆信号有振动、温度、压力、流量等，但不是所有信号对工况状态都很敏感，不同的机器在不同的运行状态下其特征信号的敏感程度是不相同的。特征信号蕴含了机器运行状态的最本质信息，各种机器设备具有各自特征变化规律。特征信号的获取，不仅与所选择的信号内容有关，且与传感器型号、传感器的精度和测点位置有关。

2 传感器

工程上通常把直接作用于被测量，能按一定规律将其转换成同种或别种量值输出的器件称为传感器。它把被测量转换为易测信号，传送给测量系统的信号调理环节。

机器设备的运行状况有振动、温度、压力、流量等。对于故障诊断来说，由于许多故障，如不平衡、不对中、裂纹、热弯曲等都直接或间接以振动形式表现出来，因此，振动信号的检测在故障诊断中最受重视。

1) 测振传感器

表达振动信号特性的基本参数是位移、速度、加速度、频率以及相位，测振传感器的作用是检测被测对象的振动参数，在要求的频率范围内正确地接受下来，并将此机械量转换成电信号输出。测振传感器种类很多，以被测参数分有：位移传感器，其中包括接触式（电阻式、应变式）和非接触式（电容式、电涡流式）两类；速度传感器，有接触式（动圈式、动磁式）和非接触式（变间距式）；加速度传感器，有压电式加速度计和应变式加

速度计。有关传感器的具体结构、特性等可以参见文献[1-4]。

2) 传感器的合理选择

传感器的选择应注意下列几问题:

(1) 直接测量参数的选择

测振传感器的被测量是位移、速度或加速度, 可以通过微积分实现换算。但由于低频时加速度的幅值可小到与测量噪声相当的程度, 因此如用加速度计测量低频振动的位移, 会因低信噪比增大测量误差, 不如直接用位移传感器更合理。用位移传感器测高频位移有类似的情况发生。

传感器选择时还应力图使最重要的参数能以最直接、最合理的方式测得。例如考察惯性力可能导致的破坏或故障时, 宜作加速度测量; 考察振动环境(振动烈度以振动速度的均方值来描述)时, 宜作振动速度的测量; 要监测机件的位置变化时, 宜选用电涡流或电容传感器作位移的测量。

(2) 传感器的量程、灵敏度等指标

各种测振传感器都受其结构的限制而有其自身适用的范围, 如对于惯性式传感器, 一般质量大的传感器上限频率低、灵敏度高; 质量轻的传感器上限频率高、灵敏度低。以压电加速度计为例, 作超低振级测量的都是质量超过 100g 灵敏度很高的加速度计, 作高振级(如冲击)测量的都是小到几克或零点几克的加速度计。

(3) 使用的环境要求、价格、寿命、可靠性、维修、校准等

例如激光测振尽管有很高的分辨力和测量精确度, 由于对环境(隔振)要求极严、设备又极昂贵, 它只适用于实验室作精密测量或校准。电涡流和电容传感器均属非接触式, 但前者对环境要求低而被广泛应用于工业现场对机器振动的测量中。如大型汽轮发电机组、压缩机组振动监测中用的传感器, 要能在高温、油污、蒸汽介质的环境下长期可靠地工作, 常选用电涡流传感器。

对相位有严格要求的振动测试项目(如频谱图, 波得图、振型等测量), 除了应注意传感器的相频特性外, 还要考虑放大器, 特别是带微积分网络放大器的相频特性。

3 信号调理^[1, 4]

被测量经传感器转换成的电信号需要进行某些调理和处理, 以便提高信噪比, 并把信号转换成更便于处理、接收和显示的形式, 最终转换成为仪表表示值、输入计算机、控制装置。

由传感器检测到的绝大部分特征信号(振动、温度、压力等)均为模拟信号, 经调理后可以采用如下方法进行处理: 1) 用磁带记录仪进行现场记录, 再回放至信号分析仪处理或经 A/D 转换后由计算机处理; 2) 直接送信号分析仪进行处理, 还可将处理结果通过接口送计算机作二次处理; 3) 通过二次仪表显示并记录; 4) 直接通过 A/D 采样, 将所得的数字信号传送到计算机进行在线分析和处理。

在将由传感器检测到的振动模拟信号送 A/D 转换器之前, 必须对信号进行适当的调理, 以便满足 A/D 转换的要求, 达到要求的精度。信号调理包含以下几方面的内容:

1) 信号滤波

为了观察某一感兴趣的频率成分或消除特征信号中的噪声, 常对检测信号进行滤波。滤波器一般可分为低通、高通、带通和带阻四类, 每一种滤波器相当于对信号进行不同的频域加窗处理。因此合理选择滤波器的类型及其参数, 对于保留对故障诊断有用的频率成分是极其重要的。

为了消除频率的混叠现象^[4], 根据 Shannon 采样定理, 分析频率应低于采样频率两倍以上(见下文)。因此, 在旋转机械工况监视与故障诊断系统中, 经常采用低通滤波器。

至于滤波器截止频率的选取，则要综合考虑设备本身的特点以及后续 A/D 采样的频率，以保证既不出现频率混叠现象，又不丢失有用信息。

2) 信号放大

这主要是为了满足 A/D 转换的要求。一般 A/D 转换要求输入 ± 5 V 范围内的电压信号，超出该范围则会产生截波，而信号太小又会降低信号的精度。因此在经 A/D 转换之前，需将信号放大到该范围内。

3) 交、直流分离

振动涡流位移传感器测到的振动信号包含交流和直流分量，以旋转机械为例，交流信号反映振动的瞬变情况，直流分量则反映了转子的位置情况。为了使特征信号准确、客观地体现设备运行工况，需采用适当的电路将反映不同工况特征的交、直流信号分离开来并分别进行采样。交流信号主要应用于振动的谱分析、统计分析等；直流信号则用于转子轴心位置的分析等。

4 计算机信号采集与处理

实际的工况监视与故障诊断不只是某一个具体问题，而是一个完整的系统。图 1 是某化工企业透平压缩机组研制的工况监视与故障诊断系统信号采集装置的示意图，该系统共有三个模块：振动信号采集模块，非振动信号（工艺参数信息）采集模块和开关量采集模块。三个模块设计的方法和步骤基本相同，此处主要以振动信号为例说明各个模块的功能。

1) A/D 转换

A/D 转换是信号工况监视与故障诊断系统中的重要环节，它将检测到的模拟信号转换成数字信号，以便于计算机分析与处理。A/D 转换将模拟信号 $x(t)$ 按一定的时间间隔 Δ 逐点取其瞬时值 $x(k\Delta)$ 。

(1) 采样频率

Shannon 采样定理给出了带限信号（信号中的频率成分 $f \leq f_{\max}$ ）不丢失信息的最低采

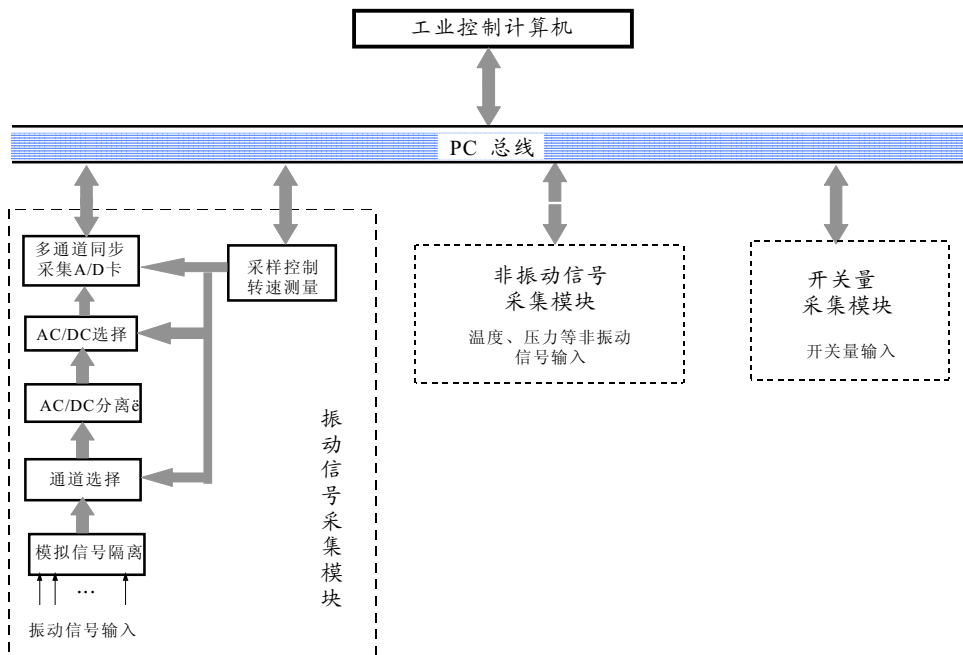


图 1 信号采集装置示意图

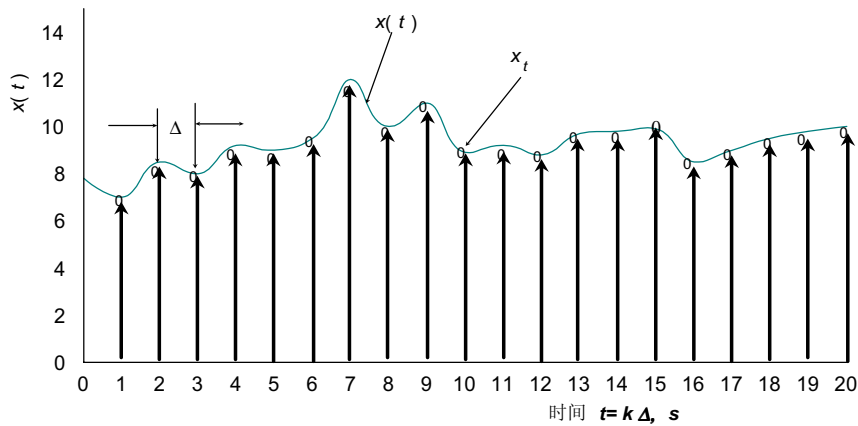


图2 A/D 转换取样过程

样频率 f_s

$$f_s \geq 2f_{\max}$$

式中 f_{\max} 为信号中最高频率成分。因此在选择采样频率时，必须确定测试信号中感兴趣的频率成分。对故障诊断来说，需确定能够反映设备运行工况，并提供诊断依据的频率范围。例如对于旋转机械来说，振动信号在工作频率及其数倍频率处的能量分布直接反映了设备的运行状态，因此诊断系统一般要求在数倍于工频的频率范围内分析振动频谱。对于不同的机械设备来说，由于其各自的工作频率不同，对采样频率也有不同的要求，如汽轮发电机组的工作频率为 50Hz，如果希望在 10 倍工频范围内分析机组振动的振动情况，则根据采样定理，下限采样频率至少为 1kHz。

为保证无频率混叠现象，或是提高采样频率，或是在 A/D 转换前先让模拟信号通过截止频率为 1kHz 的低通滤波器。因此在对模拟信号进行滤波处理时应统一地考虑滤波器的截止频率和采样频率的相互关系。

(2) A/D 转换器位数选择

A/D 转换器的位数是一定的，一般为 8 位、12 位、16 位。因此，在转换过程中就引入了量化误差。量化误差范围与 A/D 转换器的位数呈负指数关系^[4]。增加 A/D 转换器位数可以减少量化误差，提高 A/D 转换精度。但位数的增加直接影响数据转换速率，影响采样频率的提高。此外，增加 A/D 转换器位数造成实际系统成本的显著增加，因此在确定 A/D 转换器位数时应综合考虑以上因素。

(3) 整周期采样

在对经 A/D 转换后的数字信号进行谱分析时，希望数据是对数个完整的工频周期采样得到的，这样可以减小栅栏效应的影响，有效地避免谱泄漏，提高谱估计结果的正确性^[4]。

常用的谱估计方法 - FFT 算法一次处理的数据点数为 2^N ，若要求 2^N 点数据正好是数个完整的工频周期内的模拟信号的采样值，其必要条件是在每一个工频周期内进行 2^n 次采样，也就是说采样频率应为设备工频的 2^n 倍。其中指数 n 的值可视拟分析的上限频率确定，例如若要在 10 倍于工作频率的范围内分析振动的能量分布，则取 $n=5$ ，即在每个工频周期内采样 32 点即可满足 Shannon 采样定理的要求。

2) 转速测量及采样控制

对于实际运行的机器，往往需要同时采集多路振动信号，并对交、直流分量分别采集，此外采样频率和采样起始时刻等也必须根据机器的实际运行工况进行选择。采样控制模块的主要任务就是协调和控制采样电路的正常工作。

(1) 转速测量

转速测量可采用光电传感器或位移传感器，根据传感器获得的单位时间内的脉冲数确

定转速。转速测量的主要功能为：a) 提供一个相位基准信息。对于机械振动，相位与频谱是振动的主要特征，它为工况分析和故障诊断提供重要的特征信息；b) 转速信号可用于采样频率的确定，控制采样，以保证振动信号的整周期采样。

(2) 采样控制

采样控制电路对振动信号采集模块不断发出控制信号或指令，以协调整个模块的正常工作。其主要功能如下：a) 通道选择控制；b) 交直流选择控制，可以分别采集信号的交直流分量；c) 采样控制模块不断向采样电路发出来自转速传感器的脉冲信号，控制采样的起始时刻，以保证整周期采样。

3) 信号处理

A/D 转换后的数字信号需经适当的预处理后方可进一步分析，预处理主要包异常值处理和标定两方面的内容。

(1) 异常值处理

在由传感器、信号调理至 A/D 转换的过程中，任何一个中间环节的瞬时失常或外界随机干扰都可能导致数字信号中含有异常值。数字信号的各种分析处理方法对异常值的鲁棒性也各不相同，部分情况下，即使是一个异常值的存在也会对在很大程度上影响处理结果，这就对异常值的识别和处理提出了要求。

3σ 规则是常用的异常值处理方法^[5]，该规则基于对测试数据的平稳正态假设，其主要特点是计算简便。尽管平稳正态性过程具有广泛的代表性，但并非适用于所有的测试数据，因此 3σ 规则在处理实际问题时具有一定的局限性。异常值处理的其它方法还有很多，例如模式识别方法等。但在实际工况监视与故障诊断系统中，考虑到分析、诊断的实时性要求，必须在处理方法的简便性和有效性两方面进行权衡。

(2) 标定

由于 A/D 转换及精度原因，各种检测信号在经 A/D 转换之前一般已被转换成标准电信号（4~20mA 电流信号或 1~5V 电压信号），因此在对转换后的数字信号进行分析处理之前还需通过适当的线性运算将采样值转换，并根据传感器灵敏度系数转换为实际物理量。

以上简要说明了利用传感器获取机器运行状况的基本思路和方法，为进一步监测机器、故障诊断提供了可能。因此，信号检测与处理是故障诊断的基础。

参考文献

- 1 钟秉林，黄仁、贾民平等，机械故障诊断学，北京：机械工业出版社，1997年12月
- 2 陈克兴，李川奇，设备状态监测与故障诊断技术，北京：科学技术文献出版社，1991年8月
- 3 Harris, C. M. (ed.), *Shock and Vibration Handbook, Fourth Edition*, McGraw-Hill, New York, 1996
- 4 黄长艺、严普强. 机械工程测试技术基础（第2版），北京：机械工业出版社，1995年2月
- 5 杨位钦、顾岚. 时间序列分析与动态数据建模，北京：北京工业学院出版社，1986年12月