

# 第12章 振动传感器

黄昭毅

振动的测量和分析，首先要求用振动传感器把机械的振动信号转换为电信号，然后通过放大，进行记录和显示。振动传感器有以下几项基本要求：

- 1) 具有较宽的动态范围，即对非常微弱和非常剧烈的振动都能精确地响应。
- 2) 具有较宽的频率响应范围。
- 3) 在其频率响应范围内具有良好的线性度。
- 4) 抗干扰强，对环境变化有较低的灵敏度。
- 5) 结构坚固，工作可靠，能够长时间保持稳定的性能。

## 第1节 传感器的种类、原理和性能

### (一) 传感器的种类和原理

振动传感器的种类很多，常用的有3种：即感受振动位移的位移传感器，感受振动速度的速度传感器，以及感受加速度的加速度传感器。

振动位移、速度和加速度三者之间有着微分、积分关系。只要获得其中之一，便可换算求得另外两个参数。在选择测量参数时，通常应选择能得到最平坦的频率的参数，这样可以使测量仪器的可用动态范围最宽。图12-1-1为振动位移、速度和加速度频谱比较。

#### 1. 加速度传感器

目前应用最广的是压电式加速度计，由于它的频率范围与动态范围都比速度和位移传感器宽得多，因此在一般设备监测中总是优先选用。而且它体积小、重量轻、稳定性高，可以安装在任何方位，无需电源供电，自身产生信号；无移动元件，不易造成磨损，而且输出信号通过积分电路能容易

地转换成速度或位移信号。其不足之处是只有高阻输出。图12-1-2示出三种传感器频响和动态范围的比较。

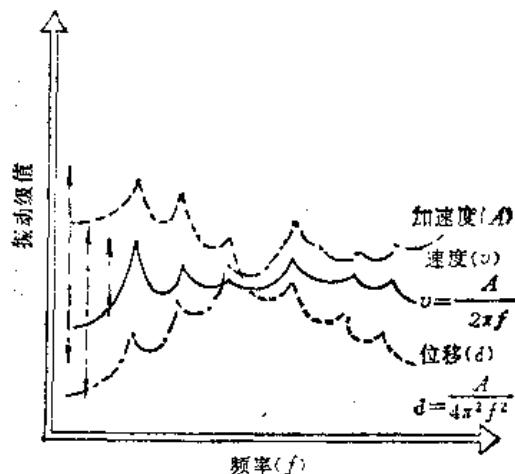


图12-1-1 振动位移、速度和加速度频谱比较

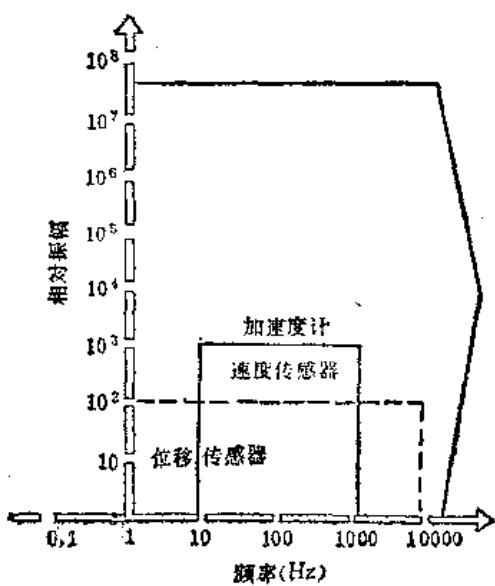


图12-1-2 不同传感器频响和动态范围比较

压电式加速度计的核心是压电晶体材料，通常是人工极化的铁电陶瓷。当受到机械应力时，不论是拉伸、压缩或剪切，在它的两个极板上会出现与所加应力成正比的电荷。当一个加速度计受到振动时，其内部质量块的惯性力就作用在压电晶体上，输出的电荷量与振动加速度成正比。

压电加速度计的结构（图12-1-3）主要有正置压缩式、倒置压缩式、环形剪切式和三角剪切式几种。

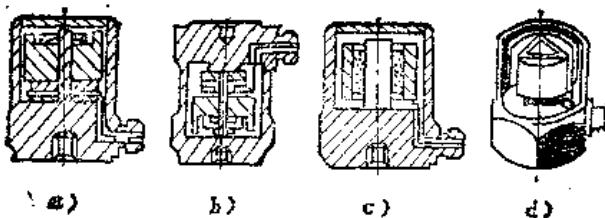


图12-1-3 不同压电加速度计的结构示意图  
a) 正置压缩 b) 倒置压缩 c) 环形剪切  
d) △形剪切

## 2. 速度传感器

目前比较普遍的是磁电式速度传感器，其工作原理是电磁感应。当传感器承受振动时，它的线圈在磁场中运动而切割磁力线，产生感应电动势，形成电压输出，而该输出的电压正比于被测物体的速度，因此称为磁电式速度传感器。

磁电式传感器灵敏度高，最适合用于测量振动量微小的高精度机械。它也可用作对相位误差要求较高的动平衡机或现场动平衡仪的讯号传感器。它的输出阻抗低，无需转换就可直接连接电压表及二次仪表。其缺点是体积较大，不适宜测量小的设备；频率范围窄，测量范围小；而且结构较复杂，在撞击下易损坏。

磁电式速度传感器的结构示于图12-1-4。

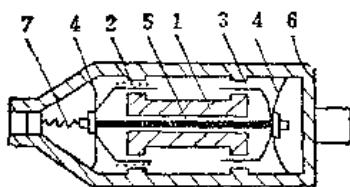


图12-1-4 磁电式速度传感器结构示意图  
1—磁钢 2—线圈 3—阻尼环 4—弹簧片  
5—芯轴 6—壳体 7—输出线

## 3. 位移传感器

目前应用最广的是电涡流位移传感器（图12-1-5），这是一种非接触式距离测量系统。它不断地测量传感器顶端与被测对象表面之间距离的变化，并使之转换成一个与之成正比的负直流电压。它既可单独测量静态位置或动态位移的变化，也可以同时测量静态位置和动态位移的变化。

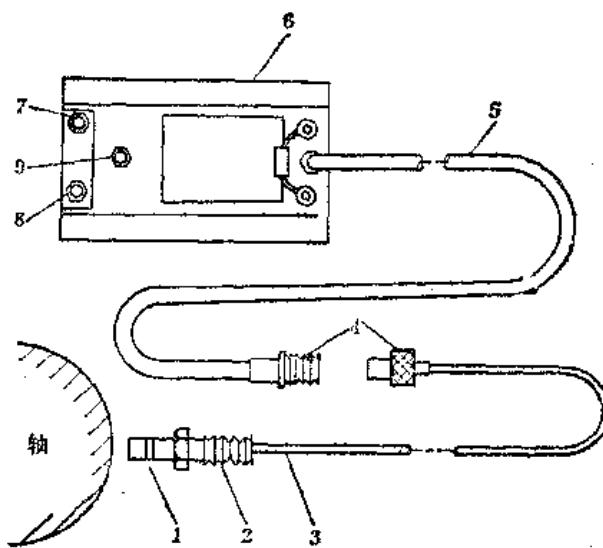


图12-1-5 涡流传感器系统结构图  
1—传感器头部 2—传感器体 3—固定电缆 4—接插头 5—延长电缆 6—前置器 7—信号输出  
8—电源电压 9—公共端

电涡流传感器是根据涡电流原理工作的。传感器的顶部有一个小线圈，高频载频信号从此线圈产生一个磁场，该磁场感应的涡电流对磁场有相反的影响，并产生与间隙距离成正比的载频幅值，而解调器可把载频幅值的变化转换成低阻抗经校准的电压输出。

电涡流传感器在设备诊断中的作用主要是和前置器及有关电缆组成相位标记传感器系统。而相位标记所产生的信息可供测量转轴的转速、相位角、振动频率以及转轴的运动方向等，它能有助于鉴别不同的机械故障和对故障分类，再有就是在旋转机械的动平衡上起着重要的作用。

## (二) 传感器的性能指标

衡量传感器性能的主要技术指标有以下几个：

(1) 灵敏度 传感器的灵敏度是它的输出电信号（电压、电荷等）同输入振动信号（加速度、速度、位移）的比值。例如，某只传感器灵敏度为

100mV/cm/s(峰), 表示当振动速度峰值为1cm/s时, 传感器输出100mV电压信号。

测量弱振动时, 传感器的灵敏度应高一些。因为灵敏度越高, 可以测量的下限值越低。

(2) 横向灵敏度 横向灵敏度是指传感器对横向振动与轴向振动的响应之比值

$$S_{\text{横向}} = \frac{\text{输出/单位横向振动}}{\text{输出/单位轴向振动}} \times 100\%$$

在振动测量中, 传感器的横向灵敏度越小越好。

(3) 测量范围 它表示输出信号与输入信号保持线性关系的输入信号幅度变化范围, 即传感器可测量的最小振动与最大振动之间的范围。

传感器信号不应超过其测量范围, 否则要造成损坏或较大误差。测量微振时, 要考虑传感器和二次仪表所组成的系统能分辨的最小输入信号值, 使信号和噪声之比大于10。

(4) 频率特性(频率响应)范围 它是一个很重要的技术指标, 当被测信号频率超过传感器(或系统)的使用频率范围时, 会产生很大的测量误差。例如, 某只传感器的灵敏度指标为100Pc/g, 规定误差为±5%, 那末, 如图12-1-6所示, 在 $f_1$ 和 $f_2$ 之间的任意频率点上, 其灵敏度 $S$ 在95Pc/g至105Pc/g的范围内。而在 $f_1$ 和 $f_2$ 之外的频率点上, 灵敏度的误差将超过5%。 $f_0$ 是传感器的共振频率, 一般选取 $f_2 = (\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5})f_0$ 。

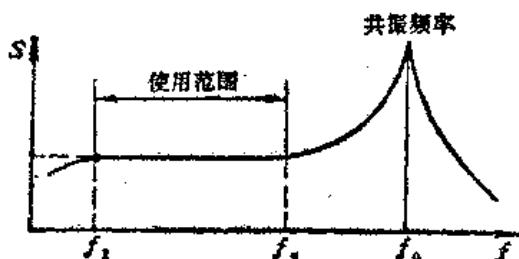


图12-1-6 加速度频率响应图

(5) 温度范围 传感器一般是工作在常温条件下, 即0°C~40°C左右。环境温度超过给定的温度范围就会引起传感器的损坏或造成较大的测量误差。

(6) 重量 一般要求被测物体的重量要大于传感器重量的10倍, 否则会由于附加了传感器的重量, 使被测物体的振动状态将发生变化。

## 第2节 传感器的选择

传感器的选择除应以其性能的主要技术指标为依据, 还需考虑与前置放大器及电缆系统的匹配关系。

由于加速度计的信号功率非常小, 容易迅速耗散, 而且它的输出阻抗很高, 电流和电压基本上是反相位。为调整这种状态, 就需要配上前置放大器。它还可以通过把信号“调节”到基准灵敏度的方法, 用以补偿非标准的传感器灵敏度。

前置放大器有电压放大器和电荷放大器两种, 应用最广的是电荷放大器。它可以固定于任何位置, 把加速度计输出的高阻抗的电荷量转换成低阻抗的电压量, 并加以放大。由于传感器的低频范围受到电荷放大器频率下限的限制, 所以在选用电荷放大器时需考虑性能指标的匹配。

电缆连接系统也是同样影响传感器最佳性能的重要因素, 由于电缆的布线电容与灵敏度和低频特性无关, 一般传感器和电荷放大器之间的实用电缆长度以100~200m为限, 而在电荷放大器后面的电缆长度则不受限制。这都是由于电荷放大器具有以下一些优点:

1) 当所用的电缆长度有变化时, 可不必重新校正。

2) 在一定的限度内, 可以使用不降低灵敏度的长电缆。

3) 传感器和电缆的绝缘电阻不必像电压放大器那样高。

4) 灵敏度的温度特性只影响传感器的电荷灵敏度的温度特性, 而与电缆电容的温度特性无关。

在选择和应用传感器时, 还可以从以下3种传感器的优缺点对比中, 取得最佳选择。

### (一) 电涡流位移传感器

#### (1) 优点

1) 直接测量转轴的振动运动。这是回转机械最常见的故障源, 如不平衡、不对中、磨损、轴承不稳定等。

2) 测量转轴在轴承间隙内相对于轴承或轴承座的平均位置。这是对转子稳态单向预载的重要指示, 如不对中、流体力或气动力的影响等。

- 3) 容易校准。只需用螺旋千分表和数字电压表进行静态校准。
- 4) 直接用工程单位测量位移，这是评定机器响应和振动烈度最有用的单位。
- 5) 信噪比高，可在300m外分离出高电压低阻抗的输出。
- 6) 频响范围宽广，从0~10kHz。
- 7) 固态结构，可靠性好。
- 8) 采用模块系统设计，更换零组件方便。
- (2) 缺点
  - 1) 转轴材质不均、表面粗糙度、划痕、锈斑以及局部磁场都会引起机械和电气的跳动。
  - 2) 对某些轴材料的金相成分表现敏感。
  - 3) 需要外部直流电源。
  - 4) 在某些机器结构中，可能不便于安装。
  - 5) 临时要求固定电涡流传感器比较困难，因此最好是永久性安装。
  - 6) 用于机械阻抗小的机器，必须在同一位置处与地震式传感器联合使用。

## (二) 速度传感器

### (1) 优点

- 1) 容易固定安装在机器的外部。
- 2) 在15~1kHz中频范围信号较强。
- 3) 自身产生信号，无需外部电源。
- 4) 与电涡流传感器组合使用，可以测量轴的绝对运动。
- 5) 可以用磁铁临时固定。
- 6) 频响适于中等转速回转机械的整体评价。
- 7) 传感器适合在中等温度下使用。
- 8) 速度容易积分成位移。
- (2) 缺点
  - 1) 提供动态运动信息有限，要求机械阻抗较小。
  - 2) 固定在机器外部，易受管路、基础及邻近机器振动的影响。
  - 3) 在使用一段时间后，其机械结构和性能将降级。
  - 4) 当传感器结构出现故障，则要求更换整个组件。
  - 5) 校准较困难，需从机上拆下。
  - 6) 低频时会引入幅值和相位差。
  - 7) 在大幅值时，横向灵敏度不好。

- 8) 体积较大，比较笨重。

## (三) 加速度计

### (1) 优点

- 1) 当固定于机器外部时，比较容易安装。
- 2) 特别适合于2kHz以上高频振动的测量。
- 3) 无活动件，可靠性好。
- 4) 能适用于高温及放射性幅照场所。
- 5) 可超过某一最高频率和温度的限制。
- 6) 重量相当轻。
- (2) 缺点
  - 1) 提供动态运动信息有限，要求机械阻抗较小。
  - 2) 固定在机器外部，易受管路、基础及邻近机器振动的影响。
  - 3) 容易因与机器的接触或固定不良而产生噪声影响。
  - 4) 当传感器结构出现故障，需要更换整个组件。
  - 5) 校准较困难，需从机上拆下。
  - 6) 难以用于某些低速机器和低频振动测量。
  - 7) 需经两次积分才得位移，容易出现噪声问题。
  - 8) 要求有外部电源。

## 第3节 传感器的安装要点

### (一) 加速度计安装位置的选择

由于加速度计的主要灵敏度是在轴向，其横向灵敏度较小，仅为轴向的1%~3%，因此在安装加速度计时需注意其轴向应与要测量的方向相一致。

测点的位置通常取决于振动测量的目的。例如，为了监测转轴及轴承的运转状况，可如图12-3-1所示，在轴承的外壳上安装加速度计，其安装原则是加速度计应安装在振动直接传达的通道上。

由图12-3-1可见，回转部件产生的振动是通过轴承传给轴承座。在A、C处测量比在B、D处测量，其传达通道要短，而且在B、D测量的信号还可能混杂着机器其它部位传来的讯号。就滚动轴承而言，一般测量一个轴向和一个径向振动，即可获得其运行状况的有用信息。

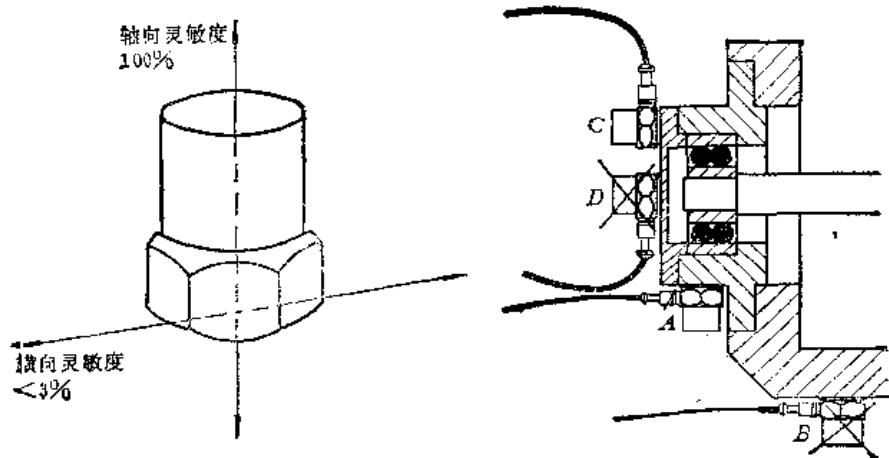


图12-3-1 加速度计灵敏度及安装位置图

## (二) 加速度计安装方法的选择

加速度计的安装与使用方式不同，其频率特性也不一样，不同的安装及特性列于表12-3-1。

1) 凡用于长期状态监测以及对故障信号需作频谱分析，且对高频信号有需要时，应尽量采用双头螺栓牢固地固定在监测点上。有些监测点也可以只有双头螺栓，而不安装传感器，以供巡回点检使用。

2) 磁吸座固定仅适用于低频，振动较大超过1 kHz就难以吸牢。当测量微振低加速度，最多可使用到2 kHz。

3) 巡回点检用的便携式仪器，常在手持式探针中装有加速度传感器，使用中应注意：

① 手持探针应垂直于测量点基线，如果倾斜就会造成较大的测量误差。

② 每次测量必须在同一位置同一方向，稍有移动也会造成很大的测量误差。

③ 探针抵触测点要用力适中，不可过猛使基座应变造成输出增大，也不可太轻因虚接触引起冲击振动。

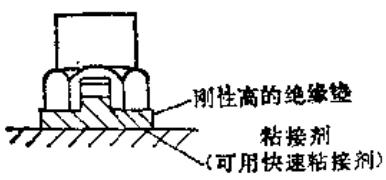
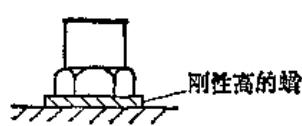
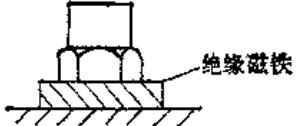
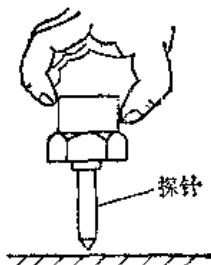
④ 要防止发生接触共振现象，一般只适宜测量1 kHz以下的振动，对高频振动信号则损耗较大。

4) 有时由于加速度计及测量仪器各自接地，会产生接地回路电流，引起测量误差，可在传感器与安装表面之间加云母片或绝缘片，采用绝缘螺栓，以切断接地回路。

表12-3-1 加速度计的安装方法及特征

安 装 方 法	特 征
 钢制双头螺栓	这是最好的安装法，有如将传感器与被测体看成为整体
 绝缘螺栓	用绝缘螺栓固定，其特点与钢制双头螺栓相同。但用于需要电气绝缘时

(续)

安 装 方 法	特 征
 <p>刚性高的绝缘垫 粘接剂 (可用快速粘接剂)</p>	用粘接剂固定，和绝缘法一样、频率特性良好，可达到 $10\text{kHz}$ 水平
 <p>刚性高的夹</p>	用夹固定，频率特性好，缺点是不耐温
 <p>绝缘磁铁</p>	用磁铁固定，仅适用于 $1\sim 2\text{kHz}$ 的频率
 <p>探针</p>	用手持探针，仅用于 $1000\text{Hz}$ 以内的频率