

一. 振动测量传感器的选择指南

工程振动量值的物理参数常用位移、速度和加速度来表示。由于在通常的频率范围内振动位移幅值量很小，且位移、速度和加速度之间都可互相转换，所以在实际使用中振动量的大小一般用加速度的值来度量。常用单位为：米/秒²(m/s²)，或重力加速度(g)。

描述振动信号的另一重要参数是信号的频率。绝大多数的工程振动信号均可分解成一系列特定频率和幅值的正弦信号，因此，对某一振动信号的测量，实际上是对组成该振动信号的正弦频率分量的测量。对传感器主要性能指标的考核也是根据传感器在其规定的频率范围内测量幅值精度的高低来评定。

常用的振动测量传感器按各自的工作原理可分为压电式、压阻式、电容式。压电式加速度传感器因为具有测量频率范围宽、量程大、体积小、重量轻、对被测件的影响小以及安装使用方便，是最常用的振动测量传感器。

1. 传感器的种类选择。

1) 压电式- 原理和特点

压电式传感器是利用弹簧质量系统原理。敏感芯体质量受振动加速度作用后产生一个与加速度成正比的力，压电材料受此力作用后沿其表面形成与这一力成正比的电荷信号。压电式加速度传感器具有动态范围大、频率范围宽、坚固耐用、受外界干扰小以及压电材料受力自产生电荷信号不需要任何外界电源等特点，是被最为广泛使用的振动测量传感器。与压阻和电容式相比，其最大的缺点是压电式加速度传感器不能测量零频率的信号。

2) 压阻式和电容式

压阻和电容式加速度传感器的结构动态模型都是弹簧质量系统。与压电相比其最显著的特点是这两种传感器均能测量直流（零频）信号。现代微加工制造技术的发展使这两种敏感芯体的设计具有很大的灵活性以适合各种不同的测量要求，比如体积超小型化，直流测量，高冲击以及汽车碰撞；并可以批量化生产。但前期的大投入以及因此这两类传感器在实际使用中都受到一定的限制，在通用振动测量中压电式加速度传感器目前仍为主导传感器。

2. 压电式传感器的敏感芯体材料和结构形式

1) 压电材料

压电材料一般可以分为两大类，即压电晶体和压电陶瓷。常用的压电晶体为石英，其特点为温度范围宽，性能稳定，但输出小一般只用于计量标准传感器。压电加速度传感器运用最普遍的压电材料为压电陶瓷，其中锆钛酸铅（PZT）是目前压电传感器中最经常使用的压电陶瓷。需指出的是，虽然相同型号的压电陶瓷其基本特性相同，但不同的制作工艺使同一种材料的具体性能指标相差甚大。这种差距可以通过典型的国产传感器和进口传感器的比较得以反映，国内振动测试业几十年的经验对此深有体会。

2) 传感器敏感芯体的结构形式

压电加速度传感器的敏感芯体一般由压电材料和附加质量块组成，当质量块受到加速度作用后便转换成一个与加速度成正比并加载到压电材料上的力，而压电材料受力后在其表面产生一个与加速度成正比的电荷信号。压电材料的特性决定了作用力可以是受正应力也可以是剪应力，压电材料产生的电荷大小随作用力的方向以及电荷引出表面的位置而变。根据压电材料不同的受力方法，常用传感器敏感芯体的结构一般有剪切，压缩和弯曲三种形式：

剪切形式：通过对压电材料施加剪切力而产生电荷的结构形式。从理论上分析在剪切力作用下压电材料产生的电荷信号受外界干扰的影响甚小，因此剪切结构形式成为最为广泛使用的加速度传感器敏感芯体。然而在实际制造过程中，为保证传感器有稳定和较高的频率测量范围就要求剪切敏感芯体的预紧力稳定一致，这是传感器制造中工艺中最为重要的一个环节，北智 BW-Sensor 采用进口记忆金属材料的紧固件从而保证传感器具有稳定可靠的谐振频率和频率测量范围。

压缩式和弯曲式都基于线变形所以温度影响大，且都不能有效减小横向灵敏度；因此虽然有输出信号大，制作简单和成本低，但在当前通用压电加速度传感器的结构形式中已很少使用。

3. 压电式加速度传感器的信号输出形式

1) 电荷输出型

压电加速度计通过内部敏感芯体输出一个与加速度成正比的电荷信号，高阻抗的电荷信号必须通过阻抗变换即通称为二次仪表将电荷转换成低阻抗电压信号才能读取。由于高阻抗电荷信号非常容易受到干扰，所以传感器到二次仪表之间的信号传输必须使用低噪声屏蔽电缆。实际应用中电荷型加速度传感器多用于高温环境下的测量以及低成本的工业巡回检测仪表。北智 BW-Sensor 采用进口陶瓷的加速度计可在温度 $-40^{\circ}\text{C}\sim 250^{\circ}\text{C}$ 范围内长期使用。

2) 低阻抗电压输出型 (IEPE)

IEPE 型压电加速度计即通常所称的 ICP 型压电加速度计。其特点是将阻抗变换器和压电敏感芯体封装成一体，这样传感器输出便是低阻抗电压，信号可直接读取。IEPE 型传感器通常为二线输出形式，直流供电和信号使用同一根线。传感器的输出为直流偏置电压与测量信号电压的叠加，其直流电压一般采用交流耦合方式滤去。IEPE 传感器的最大优点是测量信号质量好、噪声小、抗干扰能力强和使用方便，能与显示仪器及数采系统直接连接读取测量数据。当今振动测试中已普遍使用 IEPE 型传感器。

4. 传感器的灵敏度，量程和频率范围的选择

压电型加速度计是振动测试中使用最广泛传感器。虽然压电型加速度计的测量范围宽，但因市场上此类加速度计品种繁多，所以给选用带来一定的难度。作为基本原则：传感器的正确选用应从以下三个方面进行分析和估算。

- 1) 估算被测振动量的大小，确定传感器的灵敏度和量程
- 2) 被测振动信号的频率范围
- 3) 振动测试现场环境

1) 传感器的灵敏度与量程范围

传感器的灵敏度是传感器的最基本指标之一。灵敏度的基本单位为：毫伏/g 或毫伏/米/秒²。不难理解，传感器的灵敏度应根据被测振动量（加速度值）大小而定，由于相同的位移幅值下加速度值与信号的频率平方成正比，所以不同频段的加速度值大小相差甚大。例如当振动位移为 1mm，频率为 1 Hz 的加速度值仅为 0.04m/s^2 (0.004g)；然而对高频振动当位移为 0.1mm，频率为 10 kHz 的信号其加速度值可达 $4 \times 10^5\text{m/s}^2$ (40000g)。通常来说压电式加速度传感器具有较大的测量量程范围，常用的加速度传感器灵敏度：电压输出型 (IEPE 型) 为 10~100 mV/g，电荷输出型为 10 ~ 50 pC/g；一般能满足通用的振动测量。但对用于测量高低两端频率的振动信号，选择加速度传感器灵敏度时应对信号有充分的估计。

加速度值传感器的测量量程范围是指传感器在一定的非线性误差范围内所能测量的最大测量值。通用型压电加速度传感器的非线性误差大多为 1%。作为一般原则，灵敏度越高其测量范围越小，反之灵敏度越小则测量范围越大。

IEPE 电压输出型压电加速度传感器的测量范围是由在允许的非线性误差内最大输出信号电压所决定，相对应于 1% 的误差，最大输出电压量值一般为 $\pm 5\text{V}$ 。传感器的最大量程即可换算得到，即 $\pm 5\text{V}$ 与灵敏度的比值；当灵敏度为 10 mV/g 时其相应的测量范围是 500g。而电荷输出型测量范围则受传感器机械刚度的制约，在同样的条件下传感敏感芯体受机械弹性区间非线性制约的最大信号输出要比 IEPE 型传感器的量程大得多，其值大多需通过实验来确定。

一般情况下当传感器灵敏度高，其敏感芯体的质量块也就较大，传感器的量程就相对较小。当传感器的谐振频率偏低时外环境比较容易激发传感器敏感芯体的谐振信号，结果使谐振波叠加在被测信号上造成信号失真。因此在最大测量范围选择时，也要考虑被测信号频率组成以及传感器本身的自振谐振频率，避免传感器的谐振分量产生。

冲击传感器量程的非线性误差可以有两种方法表示：全量程偏差或按分段量程的线性误差。前者是指传感器的全量程输出为基准的误差百分数，即无论测量值得大小其误差均为按全量程百分数计算而得的误差值。按分段量程的线性误差其计算方法与全量程偏差相同，但基准不用全量程而是以分段量程来计算误差值。

传感器的最小测量量通常取决于系统的电噪声。由电荷输出型传感器组成的测量系统，由于传感器输出为高阻抗信号很容易受外干扰影响，一般不适合用于微小振动的测量。对 IEPE 型传感器其最小测量量由传感器分辨率决定。传感器分辨率等于传感器的电噪声与灵敏度的比值。北智公司 IEPE 型传感器的电噪声可控制到 $10\mu\text{V}$ 。

2) 传感器的测量频率范围

传感器的测量频率测量范围是指传感器按标定的灵敏度为基准，在其相应的频率响应幅值误差内 ($\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 3\text{dB}$) 所确定的传感器使用频率范围。频率范围的高，低限分别称为高，低频截至频率。截至频率与允许误差值直接相关，所允许的误差范围大则其频率范围也就宽。北智公司传感器均以 $\pm 5\%$ 幅值误差来确定测量频率范围。

作为一般原则，传感器的高频响取决于传感器的机械特性，而低频响则由传感器和后继电路的综合电参数所决定。高频截止频率高的传感器必然是体积小，重量轻且灵敏度也较小；反之用于低频测量的高灵敏度传感器相对来说则一定体积大和重量重。

a) 传感器的高频测量范围

传感器的高频截止频率通常由传感器机械频率特性的高低和稳定性来决定。传感器截止频率的确定直接取决于相对应的幅值误差，所以在选定传感器截至频率时，必须了解其相应的幅值误差值 ($\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 3\text{dB}$)。北智公司通用和特殊传感器的剪切敏感芯体均采用特殊记忆金属为紧固器件，其高频截至频率具有稳定一致的特点，能确保其高频频率幅值误差小于 5% 。

b) 传感器的低频测量范围

传感器的低频测量取决于低频截止频率。和低频特性不同，传感器的低频截至频率与传感器的任何机械参数无关，而仅取决于传感器和后继仪器的电特性参数。电荷输出型与 IEPE 电压输出的电特性完全不同，因此需分开讨论。

电荷输出型加速度传感器的低频截止频率一般都由后继电荷放大器确定。在实际应用中，当电荷型传感器的芯体绝缘阻抗远大于电荷放大器输入端的输入阻抗时，由传感器和电荷放大器组成的测量系统其低频截至频率应该由电荷放大器的低频特性所决定。但是如果传感器的芯体绝缘阻抗下降，此时传感器则可能影响整个测量系统的低频特性。因此保证芯体的绝缘阻抗对电荷输出型加速度传感器的低频测量非常重要。

IEPE 电压输出型的低频截至频率主要取决于传感器内置电路。IEPE 传感器内置电路的低频特性可等同于一个一阶高通系统，其低频截至频率与一定的频率响应的幅值偏差相对应。在实际使用中 IEPE 传感器需要恒电流的电压源供电，且绝大部分的输出都通过恒流电压源的交流耦合，因此对甚低频振动测量必需考虑恒流电压源输出端的低频相应。严格说对这类超低频测量需配用直流恒流电压源。通用型传感器的低频截止频率大多为 $0.5\text{Hz}\sim 1\text{Hz}$ ，专门用于低频测量的传感器低频截至频率可扩展到 0.1Hz 或更低。

需指出，当传感器用于甚低频测量时，能否准确测量低频信号并不完全决定与系统的低频响应特性，系统的低频电噪声大小也将直接影响低频信号的测量。另外传感器的瞬态温度响应大小也将直接影响传感器的低频测量。

5. 传感器的整体封装设计与电缆

1) 传感器的封装形式

压电式传感器的工作原理是利用敏感芯体的压电效应，而压电材料产生的是高阻抗的电荷信号。传感器敏感芯体的绝缘阻抗与传感器的低频测量截止频率存在着相互对应的关系。为了保证传感器的低频响应，传感器壳体封装设计应使敏感芯体与外界隔绝，以防止压电陶瓷受到任何污染而导致其绝缘阻抗下降。敏感芯体绝缘阻抗下降对传感器性能造成的直接影响表现为低频响应变差，严重时还将造成传感器灵敏度改变。为保证传感器的密封特性，大多传感器的封装采用激光焊接。同时在今密封材料品种多样，采用合适的密封材料替代激光焊接也能达到传感器密封的要求。但必须指出不同的密封材料效果差异很大。

在工业现场测试现场，为防止电磁场对传感器信号的影响，对用于工业现场的在线监测传感器往往要求传感器采用双重屏蔽壳封装形式。双层屏蔽结构的传感器输出接头一般采用双芯工业接头或联体电缆输出形式。由于双层

屏蔽壳的结构特点和双芯输出电缆，传感器的高频特性一般将受到较大的制约，因此如果用户必须选用双层屏蔽型传感器进行高频振动信号测量，应谨慎考虑。

2) 传感器输出接头形式

M5 (10-32UNF) 接头是加速度传感器最为常用的输出接头形式。M5 接头特点是尺寸较小，一般配用直径较细的电缆 (2mm 或 3mm)，比较适合振动实验的测试。另外 M5 (10-32) 的结构型式对信号屏蔽较好，所以对电荷输出型加速度传感器因其输出为较容易受干扰的高阻抗信号一般电缆两头均采用 M5 (10-32) 接头。而 IEPE 性传感器的电缆则多采用 M5 (10-32) 和 BNC (Q9) 组合的接头形式。

用于工业环境下的振动测量加速度传感器按可分为巡回检测和在线监测，前者一般采用单层壳屏蔽型式，因此传感器的接头较多使用 M6 或 TNC 接头。而在线监测因经常采用双层屏蔽的结构型式，与其对应的电缆为双芯屏蔽电缆，所以双芯工业接头 MIL-C-5015 被广泛使用。另外连体电缆具有较高的可靠性，因此在工业环境下使用的传感器无论是单层和双层屏蔽的结构都广泛采用连体电缆为输出接头的形式。

需要指出的是无论是那一种输出接头对水下测量都有其局限性，即使传感器本身密封性能达到要求，但电缆联接一般都需要做特殊处理后才能用于水下测量。目前我公司采用特殊材料的定制电缆和特殊工艺，水密深度可达到 100 米。

3) 电缆的选择

为保证测量信号不受因电缆移动而造成噪声的影响，输出为高阻抗信号的电荷型压电加速度传感器其输出信号电缆必需采用低噪声电缆。而输出为低阻抗电压信号的 IEPE 传感器，低噪声电缆并不一定是必需的。对不同阻抗的测量信号要求不同电缆的典型例子是多轴向测量传感器的电缆，电荷型多轴向传感器其各通道信号的电缆必须是各自独立的低噪声屏蔽电缆，而低阻抗的多通道电压信号便可采用多芯绞线加屏蔽的电缆。

在通用型传感器的电缆配备中因考虑到电缆的重量和成本， $\Phi 2\text{mm}$ 直径的低噪声电缆为加速度传感器的标准配置。工业现场用的传感器一般以 IEPE 型为主，电缆本身的强度也成为重要考虑因素，因此 $\Phi 4.5\text{mm}$ 直径的普通同轴屏蔽电缆为最长使用的电缆。而对双层屏蔽壳设计的 IEPE 型传感器的电缆配置均为双绞芯线外加屏蔽的电缆。

在加速度传感器输出信号电缆的选择中，除电缆强度外，其他最经常考虑的指标是电缆的应用温度以及在工业现场测试中电缆外层材料耐腐蚀的能力。使用最普遍的电缆绝缘材料为 PVC，其使用温度范围为 -40°C 到 $+105^{\circ}\text{C}$ 。对应用环境较恶劣的场合，常选用的电缆绝缘材料为聚四氟乙烯；其使用温度范围为 -45°C 到 $+250^{\circ}\text{C}$ ，且耐腐蚀能力也优于其它大多数电缆绝缘材料。但用四氟材料做的电缆柔性较差，价格也远高于 PVC 材料。

6. 外界环境对测量传感器的影响

1) 传感器横向灵敏度及横向振动对测量的影响

由于压电材料自身特性，敏感芯体的结构设计和制造精度偏差使传感器不可避免地对横向振动产生输出信号，其大小由横向输出和垂直方向输出的比值百分数来表示。与其它形式的敏感芯体相比剪切结构设计在理论上不存在横向输出，所以当前绝大部分敏感芯体的结构均采用剪切形式。当然在实际制造过程中无论是压电材料还是传感器装配工艺都无法避免一定的偏差，所以最常用的横向灵敏度指标为 $\leq 5\%$ 。

2) 温度对传感器输出的影响

温度改变而引起传感器输出变化是由压电材料特性所造成的。压电材料中，石英晶体受温度影响最小，但压电加速度传感器中使用最多的压电材料还是压电陶瓷。压电陶瓷敏感芯体的输出随温度变化而改变，但其变化与温度并不呈线性，一般说低温时的输出变化比高温时的要大。另因为各传感器的温度响应很难保持一致，实际使用中传感器的输出一般很少用温度系数进行修正。典型温度响应曲线或温度系数一般只作为对传感器温度特性的衡量。压电陶瓷对温度响应除材料本身特性之外，生产工艺也将直接影响压电材料对温度的响应，而同种材料对温度响应的离散度更是如此。不同厂商由于采用的生产工艺不同，使得相同材料的压电陶瓷而其各自的使用温度范围，温度响

应和温度响应的离散度相差甚大。综合对基础压电材料和生产工艺的研究，国内压电陶瓷的温度特性与国外先进水准相比还有一定差距；为确保用户的要求，北智采用进口压电陶瓷，使电荷输出型传感器可在+250°C 下长期使用，且温度响应及其离散度都好于国产压电陶瓷。

不同的敏感芯体结构设计对温度的变化的响应会产生不同的结果。由于不同材料有不同的线膨胀系数，因此温度变化必然使压电材料和金属配件之间产生因线膨胀系数不同而造成的应力变化；这种由温度产生的应力使压缩式和弯曲梁型的敏感芯体产生输出信号，有时这种温度变化引起的输出会大于振动测量信号（特别在低频测量中）。需要特别指出温度变化有稳态和瞬态两种，传感器输出灵敏度随温度变化通常是指稳态高低温度状态对信号输出的影响。瞬态温度变化对传感器输出的影响主要表现在低频测量中。

3) 传感器的基座应变灵敏度

传感器受被测物体在传感器安装处应变的影响，可能导致传感器输出的变化。传感器的基座应变灵敏度一般由传感器基座刚度，传感器与被测件的接触面积以及敏感芯体结构设计形式所决定。剪切结构形式的敏感芯体与传感器基座间的接触面积很小，因而剪切芯体受基座应变的作用也相对较小，且这种应变并不直接导致压电陶瓷的输出。所以剪切敏感芯体传感器的基座应变灵敏度指标通常比压缩式的要好，在无需改变传感器的基座刚度以及与被测件的接触面积情况下（改变这两点都将影响传感器的频率响应指标），剪切型传感器一般都能满足大部分结构测量的要求。

4) 声场和磁场对传感器的影响、

声波和磁场对传感器的作用也都可能引起信号输出，这种输出的大小与传感器灵敏度的比值被称作为压电传感器的声灵敏度和磁灵敏度。

声灵敏度是表示传感器在强声场（140dB）的作用下，加速度传感器的输出值。加速度信号输出主要是声波通过对传感器外壳体的作用，再由外壳体传输给内部的敏感芯体而导致的信号输出。最直接减小传感器声灵敏度的方法是增加传感器外壳的厚度，绝大多数传感器的这一指标都能满足通常的测量条件。

磁灵敏度是表示传感器在强交变磁场作用下，加速度传感器的输出值。传感器内部敏感芯体受磁力的作用而导致信号输出是传感器产生磁灵敏度的基本原因。因此在传感器设计中，金属零部件尽量采用无磁或弱磁的材料是降低传感器磁灵敏度最直接的措施。另外双层屏蔽壳结构形式也能较好地减小传感器的磁灵敏度，同时双层屏蔽壳形式还能有效地防止磁场对输出电信号的干扰。

二. 压电计速度传感器的应用

1. 高频测量

◇ 传感器的高频截止频率

高频截止频率是指在所规定的传感器频率响应幅值误差 ($\pm 5\%$, $\pm 10\%$ 或 $\pm 3\text{dB}$) 内所能测量的最高频率信号。高频截止频率直接与误差值大小相关, 规定的误差范围大则其相应的高频截止频率也相对较高。所以不同传感器的高频截止频率指标必须在相同的误差条件下进行比较。

高频截止频率高的传感器其敏感芯体一定具有较高的固有频率, 所以传感器的灵敏度就相对较低。选用高频率测量的传感器时, 为了满足传感器的高频频率响应指标, 需要适当降低对其灵敏度的要求。压电式加速度传感器的高频特性取决于传感器机械结构的一阶谐振频率, 实际使用中传感器的一阶谐振频率往往是其安装谐振频率。安装谐振频率则由传感器内部敏感芯体的固有频率以及传感器的总体质量和安装耦合刚度综合决定。安装谐振频率的高低将直接影响传感器的高频测量范围, 所以在具有稳定的敏感芯体谐振频率的前提下, 提高安装耦合刚度是保证高频测量的重要条件。

在同样的安装条件下一般说传感器的重量越轻其安装谐振频率越高, 其高频截止频率也越高。当然决定传感器高频响应的最基本因素还是传感器内部敏感芯体的固有频率。BW-sensor 的内部敏感芯体采用国外先进的记忆金属紧固圈, 敏感芯体不仅有较高的固有频率而且有非常稳定的频率响应特性。BW-sensor 的高频响应特性及其一致性远优于仅靠安装零部件公差配合而设计制造的剪切型加速度计。

◇ 传感器的安装形式, 安装谐振频率

传感器生产厂商提供的高频截止频率都是在采用较理想的安装条件下所获得的。实际使用中传感器的安装形式的不同和安装品质的好坏会直接影响安装耦合刚度, 进而改变传感器的测量高频截止频率。不同安装方式 (螺钉, 粘接, 吸铁磁座和手持) 所对应不同安装谐振频率的特征已在很多振动测量的文献中被阐述; 但有必要指出当不同形式的安装方式组合在一起 (如螺钉安装加配吸铁座), 传感器的高频响应将被最低频率响应的安装形式所制约。高频测量的安装方式往往采用螺钉安装形式。为了达到理想的效果, 被测对象的表面必需达到所规定的平度和光洁度要求以及传感器安装时应所规定的扭矩, 以尽可能地提高安装耦合刚度保证传感器高频截止频率。传感器的高频截止频率越高则对传感器的安装要求也越高, 因此高频测量的传感器用户必须认真对待传感器的安装。

◇ 传感器的输出接头形式和电缆对测量信号的影响

传感器的信号输出接头也是潜在的影响高频测量的重要因素。在实际应用中传感器的接头和电缆也是传感器的组成部分。接头的各种形式, 接头与传感器的联接, 以及电缆的重量和电缆相对于被测物体的固定形式也将直接影响传感器的谐振频率。传感器的重量越轻, 接头和电缆对高频测量的影响越显著。所以当安装条件许可的情况下小型高频测量传感器的接头形式应首先考虑联体电缆, 联体电缆具有可动零件少, 重量轻的特点, 比较适合高频测量。

2. 低频测量

◇ 电荷输出型加速度计不适合用于低频测量

由于低频振动的加速度信号都很微小, 而高阻抗的小电荷信号非常容易受干扰; 当测量对象的体积越大, 其测量频率越低, 则信号的信噪比的问题更为突出。因此在目前带内置电路加速度传感器日趋普遍的情况下应尽量选用电噪声比较小, 低频特性优良的低阻抗电压输出型压电加速度传感器。

◇ 传感器的低频截止频率

与传感器的高频截止频率类同，低频截止频率是指在所规定的传感器频率响应幅值误差（ $\pm 5\%$ ， $\pm 10\%$ 或 $\pm 3\text{dB}$ ）内传感器所能测量的最低频率信号。误差值越大其低频截止频率也相对越低。所以不同传感器的低频截止频率指标必须在相同的误差条件下进行比较。

低阻抗电压输出型传感器的低频特性是由传感器敏感芯体和内置电路的综合电参数所决定的。其频率响应特性可以用模拟电路的一阶高通滤波器特性来描述，所以传感器的低频响应和截止频率完全可以用一阶系统的时间常数来确定。从实用角度来看，由于传感器的甚低频频率响应的标定比较困难，而通过传感器对时间域内阶跃信号的响应可测得传感器的时间常数；因此利用传感器的低频响应与一阶高通滤波器的特性几乎一致的特点，通过计算可方便地获得传感器的低频响应和与其对应的低频截止频率。

◇ 传感器的灵敏度，低频噪声特性和动态响应范围

用于低频测量的传感器一般要求有比较高的灵敏度以满足低频小信号的测量。但灵敏度的增加往往是有限的。虽然加速度传感器灵敏度是能达到 10V/g 或更高，但是灵敏度高往往带来其他的负面效应，比如传感器的稳定性，抗过载能力，以及对周边环境干扰的敏感性。因此追求过高灵敏度并不一定能解决微小信号的测量，相反高分辨率和低噪声的传感器在工程应用中往往更容易解决实际问题。所以选用具有低电噪声的传感器在低频测量中尤为重要。

为了表明传感器所能测量的最小信号大部分商业化的加速度计也都提供分辨率或电噪声指标。国内绝大部分传感器的宽带电噪声指标一般都标为 $20\mu\text{V}$ ，而 BW-sensor 的宽带电噪声指标已降低到 $10\mu\text{V}$ 。然而对低频小信号测量来说，仅提供宽频带的电噪声并不能完全反映传感器在低频范围内加速度测量的分辨率；这是因为由内置电路引起的低频噪声大小与频率的倒数成正比，即所谓 $1/f$ 噪声，当测量频率很低时传感器的电噪声输出按指数幅度增长。所以传感器的低频电噪声的数值与宽带电噪声指标是完全不同的而且频率越低这种差别越明显。因此用于甚低频测量的传感器其分辨率常用传感器输出电噪声的功率谱密度表示。此指标的实用意义是传感器在特定频率下的噪声大小，其单位是一般用 $\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 或 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 来表示。BW-sensor 内置电路电噪声功率谱密度的典型值为 $3\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}} @ 10\text{Hz}$ 。

◇ 传感器的瞬态温度响应对低频测量的影响

由于压电陶瓷的特性，压电式加速度计对温度的突然变化都会产生不同程度的电荷输出。传感器的瞬态温度响应指标就是衡量传感器对温度变化的敏感程度。这对低频测量尤为重要。由于低频测量的信号很小，而传感器因环境温度变化极可能产生与低频振动信号相当的误差；这两种信号在甚低频范围内很难区分，因此如何减小环境温度变化对传感器输出的影响在低频测量中显得非常重要。传感器的瞬态温度响应指标单位是 $\text{g}/^\circ\text{C}$ ，表示瞬态温度每变化一度所相当的加速度输出，其值是通过电压（电荷）输出和传感器灵敏度之间的换算得到的。

传感器的瞬态温度响应是由压电材料直接导致的，因此压电陶瓷对由温度突变所致的电荷输出大小决定了这一指标的好坏。BW-sensor 选用目前国外综合性能指标最好的压电陶瓷并结合记忆金属制成的用于低频测量的加速度传感器经国防兵器，航天和大型结构多年的使用验证了传感器具有优越的低频输出稳定性和抗干扰性能。

◇ 传感器的安装基座和基座应变对测量的影响

由于低频测量传感器对高频响应的要求不高因此传感器使用任何一种安装方式一般都能满足要求。但需要注意两个问题，其一是传感器应尽量考虑使用绝缘底座以避免任何由对地回路引起的噪声影响测量信号。其二是应考虑传感器安装处的被测结构应变对传感器输出的影响，即传感器应变灵敏度大小。剪切结构形式的压电加速度传感器具有良好的基座应变特性，一般都能满足通常的低频结构测试。如果结构应变过大对传感器的测量信号有影响，可通过减小传感器与被测结构之间的接触面积来降低结构应变对传感器测量带来的影响

3. 工业振动测量

◇ 电荷输出与低阻电压输出传感器在工业振动测量中的应用

工业振动测量传感器的实际应用根据测量对象和与测量系统的组合一般可分成两大类：1) 对测量对象进行实时监测即所谓在线监测 2) 定期对测量对象巡回检测。工业振动测量的周边环境相对都比较恶劣，在线监测的传感器到数字采集系统一般都有一定的距离，因此高阻抗的电荷信号就非常容易受干扰。除现场是高温测量外，工业振动 在线监测用的传感器通常都选用带内置电路的电压输出型。而对巡回检测用传感器往往因为出于对成本的考虑大多使用电荷输出型压电加速度传感器。

◇ 传感器的测量频率范围和灵敏度选择

工业振动测量传感器的灵敏度选择一般都以适中为多，50mV/g, 100mV/g 和 200 mV/g 可以满足大部分工业振动测量的需要；电荷输出型的传感器灵敏度的选择大部分是在 30 pC/g ~50 pC/g。然而对传感器的频率范围则必须根据不同的测量对象进行选择。需要指出的是传感器的安装形式和质量好坏以及不同的电缆配备都会直接影响到传感器的高频使用。比如在频率响应较高的传感器上加配吸铁座，这样传感器的高频使用范围将直接受到吸铁座制约；螺钉安装平面不能达到的平度要求也会降低其实际使用的高频截止频率；传感器的输出接头不同形式或电缆重量的增加也可能直接影响传感器的高频响应。这些影响响应的因素虽不能从传感器的技术指标上完全反映，但都是工业振动测量传感器使用中常见的问题。如果客户对实际应用有疑问，可直接与生产厂商咨询。

◇ 工业环境：环境噪声对信号的干扰，温度，湿度和腐蚀对传感器的影响

环境噪声对测量信号的影响在工业振动测量传感器选用中是一个重要而又容易忽视的问题。由于振动信号的大小和频率范围等综合因素，通用工业用传感器的灵敏度一般都在 50mV/g 到 200mV/g 之间。对噪声判断的重点应考虑如何确定工业现场的环境噪声以及如何防止外界噪声对测量信号的影响；这要比传感器自身的电噪声更为重要。最大限度地降低环境噪声对测量传感器的影响是工业振动传感器选择和使用中必须考虑的问题。

首先是对地回路这主要是由于传感器和测量系统中的其他仪器多点接地引起的接地回路，解决这个问题的一般方法是在传感器的信号地（传感器的外壳）和被测物体间采用绝缘安装座。使传感器浮地这样便可避免接地回路的形成。

其次在传感器安装周围有较强的电磁场（大电机或高电压电器），这将直接影响传感器输出信号。在这种情况下传感器应选用双层屏蔽壳设计，双层壳屏蔽形式可以将外界电磁场对传感器的干扰减少到最小。当然传感器也因为重量增加以及引入额外的机械耦合，使传感器的高频响应将会受到一定的影响。

高温环境下的振动测量对压电型加速度传感器一直是一个挑战。对带内置式电路的传感器其指标一般多为 125°C，衡量内置电路型传感器在高温下是否能正常工作的关键是传感器的偏置电压稳定与否。

如果传感器的偏置电压不稳定，这将直接影响测量信号。BW-Sensor 的内置电路能保证传感器在 125℃ 有稳定的偏置电压，与室温环境相比其偏差小于 1V。对电荷输出型加速度传感器的高温测量将基本取决于敏感芯体的压电陶瓷特性。采用国产陶瓷的通用型加速度传感器的最高使用温度一般在 170℃ 左右，BW-sensor 有选用进口陶瓷的电荷输出型加速度传感器，其工作温度范围-45℃ 到+250℃，而且传感器的温度响应系数以及温度响应的离散度都远优于国产陶瓷的传感器性能。

◇ 湿度和各种腐蚀对压电传感器的影响

压电加速度传感器为保证敏感芯体高绝缘一般均采用全密封形式，因此绝大多数工业振动测量传感器都能满足在一般工业现场的湿度条件长期使用。如对传感器的工作环境湿度有特殊要求，客户应与制造厂家联系。

不锈钢材料通常被用于压电加速度传感器的壳体，因此传感器的耐腐蚀能力能适合大部分工业现场测试的条件。然而对电缆外包装材 料则由于存在各种不同选择，客户应根据不同的实际工业现场条件选择与其相适应电缆。

◇ 传感器的信号输出接头形式和电缆的选择

接头选择是否恰当能直接影响到测量信号，特别是对双层壳屏蔽的传感器。双芯外加屏蔽的电缆与传感器联体的形式很为普遍，但安装不如可拆卸电缆接头方便。双芯可拆卸的传感器接头成本较高，且其可靠性不如联体电缆。对单层壳的传感器 M6 和 TNC 都是经常选用的接头。

由于工业测量现场环境条件复杂多变，因此在电缆选择时首先要确保信号的质量，将外部噪声对信号的干扰降低到最小；其次是考虑电缆的寿命和使用方便程度。双重屏蔽电缆对电荷输出的传感器是必需的。但对低阻抗电压型传感器而言，带屏蔽的双绞线电缆一般都能满足工业现场的要求。而普通的同轴屏蔽电缆则按不同的环境条件来确定是否合适。需要指出的是，如果传感器选用双层屏蔽壳设计形式，其对应的电缆则必然是屏蔽的双绞线电缆或双重屏蔽电缆。

电缆外绝缘层的材料选择将直接影响现场条件下电缆的寿命。电缆外绝缘材料和直径尺寸则根据具体测量现场条件（温度，接触介质和机械特性）选定，最经常使用的材料为 PVC 和四氟。PVC 为最经常使用的电缆外绝缘材料，但 PVC 在耐油方面和高温环境下使用都不如聚四氟乙烯材料；聚四氟乙烯材料虽在温度和防腐蚀优于其它绝缘材料，但其成本较高。在环境特别恶劣的场合，金属铠甲也常被采用以保护电缆，防止意外损伤。必须认识到由于金属铠甲自身重量较重，作为传感器的附加质量将会导致传感器高频响应发生变化（高频截止降低）以至测量误差增加，所以在选用时应谨慎。

◇ 传感器的安装形式

工业测量传感器的安装一般采用以下 3 种方法，巡回检测常用吸铁安装座或手持测量，而在线监测则采用螺钉安装。吸铁安装座因使用方便而在巡回检测应用中非常普遍，这种安装方式一般适合中低频率的测量。另外因吸铁撞击的作用，传感器与被测物体之间的冲击可达数千 g，这对带内置电路型的加速度传感器可能造成偏置电压的飘移，使测量数据直接受到影响。对手持传感器振动测量，由于方向上的不稳定性 and 很低的频率响应范围，这种形式仅用于低频振动的定性或对比数据的测量。在螺钉安装形式中，带有中心通孔的传感器具有 360 度可旋转的特点，便于侧向电缆输出传感器的安装。由于压电式传感器是通过与被测对象直接接触来获取信号，而工业设备本身都有一定的电位差，所以工业振动测量传感器一般要求安装底座对地绝缘或采用双层壳屏蔽。

4. 结构动态特性测量

◇ 传感器的频率相位响应

结构动态特性测量是通过给予被测对象激励，通过测量获得结构对激励的响应，然后对激励和响应进行数据处理，以此获得结构的动态特性。测试中响应与激励之间必需是相互之间一一对应，因此传感器的频率响应的相位差必须是滞后，即相位差是负值。同时为了保证各测点之间对激励的同步响应，这就要求各测点的传感器输出响应的相位差必需控制在一定的误差范围内。这个测量传感器之间的相位差又称为相对相位差。在实际使用中不同测点传感器之间的的相对相位误差要比每个传感器实际相位差值更重要。一般工程模态试验要求传感器的相对相位误差值为 $\pm 3\% \sim 5\%$ 。

◇ 重量对结构响应的影响

作为结构动态测试的准则，安装在被测结构上的传感器(既作为附加在结构上的质量)不能因为其重量而改变结构的动态特性。因此在对用于结构特性测量的传感器选择时，使用者往往要求传感器的重量越轻越好，以保证测试的结果能正确地反映结构动态特性。但重量轻，体积小的传感器一般也意味着灵敏度低。所以使用者在选择传感器时应根据实际情况进行综合平衡。通用型结构动态试验传感器的灵敏度大多选用 $50 \text{ mV/g} \sim 100 \text{ mV/g}$ 。

◇ 传感器的分辨率对结构测量影响

很多动态结构特性测试具有低频测量的特点，所以结构动态特性测量的传感器通常要求有比较高的分辨率。类同于低频测量，当前结构动态测试已很少有使用电荷型加速度传感器。根据被测对象的频率结构特性，对传感器的分辨率可以用普通的宽带电噪声指标来衡量，也能借鉴低频测量，用传感器输出电噪声的功率谱密度来反映某一特定频率的电噪声。在结构动态特性测试中结构响应幅值大小直接与激励有关，传感器的电噪声也仅是测量系统噪声的一部分，因此虽然传感器的分辨率是一个不可忽的因素，但此因素如何影响测试则需要结合系统整体性能以及综合测试技术等进行统筹考虑。

◇ 传感器的安装形式和对地绝缘安装的必要性

结构动态测量的频率范围一般都不高,然而被测结构一般都不允许打孔用螺钉安装,所以传感器安装大多使用粘接形式。也因为动态测量往往要求了解某一测点在空间三个方向的响应信号,所以三轴向传感器或三轴向安装转接座也常被采用。同时为了防止传感器与被测结构间形成接地回路,增大噪声,因此安装转接座或传感器本身通常要求为对地绝缘型,以保证测量信号的质量。

5. 冲击测量

◇ 传感器输出响应的零点飘移

冲击传感器的零点飘移是指传感器在受大冲击信号之前与之后传感器输出零点之间产生的一个电位差。这个电位差随时间会逐渐减小即恢复到原零位。当测量信号产生零飘后不仅加速度测量值本身产生误差,更重要的是无法对有零飘的信号进行积分,因为零飘会引起很大的积分误差。需要指出的是产生零点飘移不仅与绝对加速度量值有关,更重要因素是传感器所受到的冲击能量大小。因此通常冲击传感器并不提供会产生零飘的具体冲击加速度值。理论上可认为在最大量程内不应产生零飘,但市场上销售的冲击传感器许多不尽人意。即使厂家提供不产生零飘的最大冲击值,这一量值也都是在单点碰撞的条件下得到的,所以一般也只能作为参考。客户在选用时应根据产生冲击源的具体情况(碰撞或冲击波),以厂商所能提供不产生零飘的加速度值为参考再加上一定的安全系数进行选择。

◇ 传感器输出的线性指标及最大量程

冲击传感器的线性指标(误差)与其最大量程直接相关,即在规定的线性误差范围内传感器的最大测量量程。线性误差可以 1% 到 10% 不等,所以在对最大测量量程的选择中应注意线性误差的范围。更重要的是满量程线性误差和通常加速度传感器幅值线性误差之间的差别。前者定义为误差的量值在全量程上是一个固定值,即等于最大量程乘以非线性误差百分数;而后者是指各量值点上的误差值与传感器理论量值(由传感器灵敏度计算得到的量值)之间的比值是常数,既非线性误差百分数。所以同样是非线性误差,但根据其定义不同其非线性误差值可相差几倍。因为对非线性误差的表达方法上并没有统一的规定,因此用户在选择时应确认制造厂商是如何定义非线性误差的。

另外由于冲击传感器的线性指标与结构,材料和工艺密切相关,而且这些参数对线性指标的影响远大于通用加速度传感器,因此传感器的实际性能与给厂家给出的指标数据可能相差甚远。BW-Sensor 系列中的冲击传感器在材料选择,结构设计和加工工艺上最大限度上采用国际先进技术和进口原材料,所以冲击传感器的实际最大量程和线性误差与给出的技术指标之间的偏差很小。

◇ 传感器所能承受的最大冲击

传感器的最大冲击值指标是在不永久改变传感器的性能-既传感器不损坏的前提下,指传感器所能承受的最大加速度。至于传感器在此加速度值的作用下其输出信号如何并不受任何其它指标的约束。传感器的最大冲击速度指标与最大测量范围中的加速度值不同,前者要比后者高。而传感器对在其最大测量范围内加速度值的响应而产生的输出信号则应满足规定的线性误差和零点飘移指标。

◇ 传感器的安装形式和安装谐振频率对信号的影响

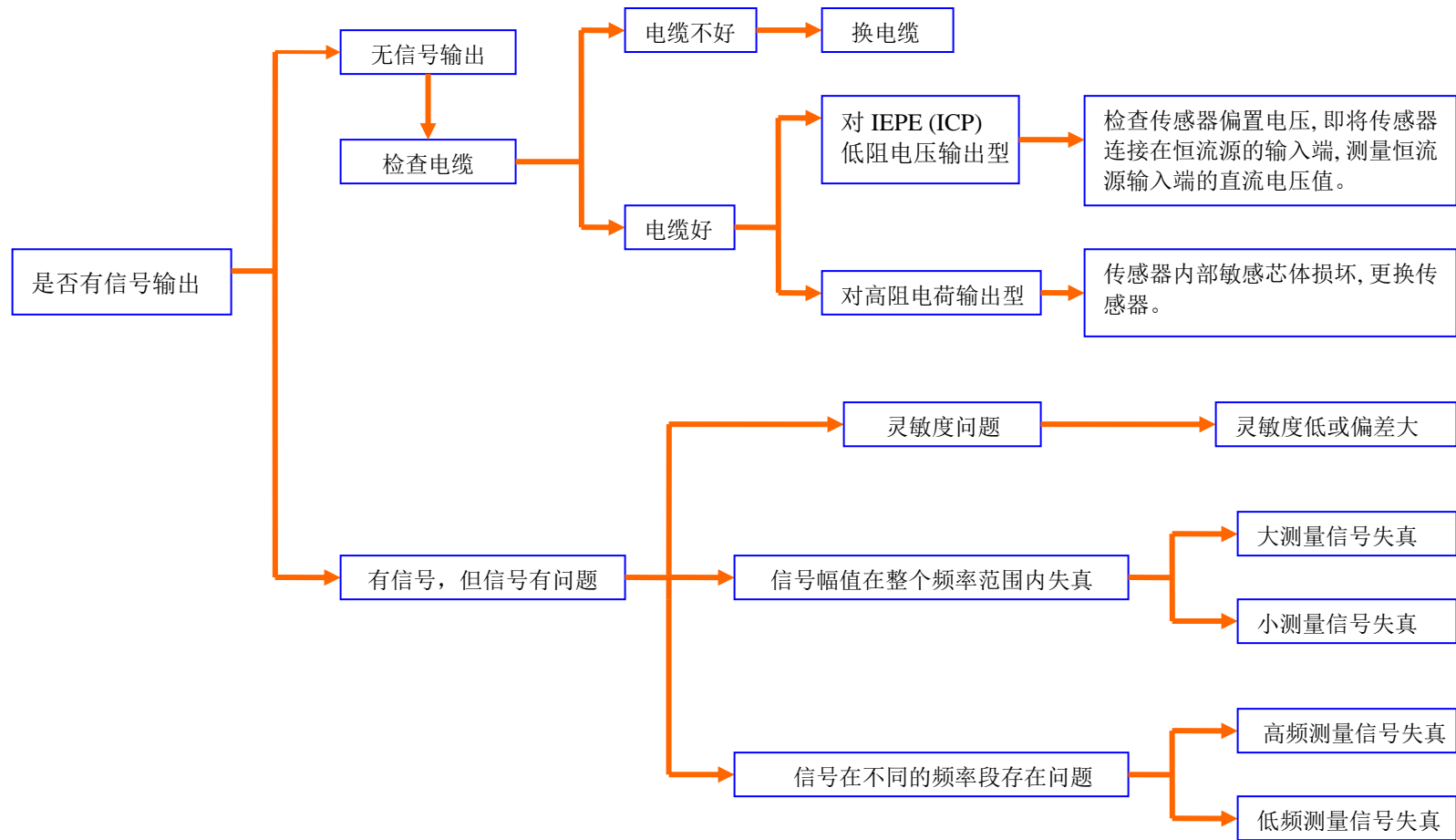
冲击传感器的安装谐振频率不仅影响高频响应,更重要的是安装谐振频率越低其激发谐振的可能性越大,这就越可能引起零点飘移。所以在保证传感器内部其他性能指标的条件下,应尽可能提高安装谐振频率。影响传感器的安装谐振频率的因素除了传感器的自身的谐振频率以及螺钉安装质量外,螺钉的大小和螺钉的精度也会影响安装谐振频率。大冲击传感器的安装螺钉采用 M6 的螺钉较合适,螺钉于螺孔之间的配合间隙也应尽量小为好。

对要求有对地绝缘的冲击传感器来说,提高其安装谐振频率的难度就更大。北智公司采用一项新的专利技术使带绝缘底座传感器的谐振频率有大幅度提高,而且其绝缘及机械耦合性能稳定可靠。此类冲击传感器在经航天测量机构的反复测试之后已被多个单位作为首选冲击传感器。

◇ 传感器的信号输出接头形式和电缆

虽然冲击传感器输出接头有可卸式和联体电缆,但对高冲击测量来说连体电缆的形式远比可卸式可靠。与可装卸接头相比连体电缆的可动零件减少,所以由于零件之间相互作用产生的寄生谐振波的可能性也就相应减小很多。对于电缆的要求一般说在强度允许的条件下电缆直径越小,重量越轻则电缆对信号可能产生的影响越小。另外在实际使用中,传感器输出电缆的固定对测量信号以及电缆的寿命也是至关重要;因此传感器安装时,电缆应与传感器或被测物体固定成一体,尽量降低电缆的相对振动。

四. 传感器常见问题及故障分析



故障类别	故障的具体表现	可能造成故障的原因	可能解决故障的方法
测量偏置电压结果	偏置电压不正确	偏置电压等于供电电压	因电缆连接或传感器内部连线断开而造成，更换电缆或传感器。
		偏置电压接近零	因电缆连接或传感器内部连线断开而造成，更换电缆或传感器。
		偏置电压偏大或偏小，实际偏置电压超出正常偏置电压±2V的范围	传感器内置电路工作不正常，更换传感器。 由环境温度不稳定地变化，造成偏置电压漂移。加装隔热护套或更换传感器。
	偏置电压不稳定	偏置电压来回漂动，不能稳定	由传感器内部电路不稳定而造成，更换传感器。
	偏置电压正确	传感器内部敏感芯体损坏	更换传感器。
灵敏度问题	灵敏度低	偏置电压等于供电电压	将传感器在其使用温度范围内烘焙，灵敏度可以再回升，但一般会再下降。
		传感器敏感芯体的压电系数衰减	重新对传感器进行标定。
	灵敏度偏差大	在非室温的环境下，由于压电材料温度响应系数过大而造成的灵敏度偏差	选用温度响应系数偏差小的传感器
大测量信号失真	信号输出变小	由于供电电压降低而造成测量量程范围减小	更换电池或更正供电电压
		由与室温不同的环境温度造成的偏置电压超出规定的范围	采用偏置电压稳定的传感器
		由传感器的非线性造成	采用量程大的传感器
		在长距离信号输送时，恒流电压源的恒电流不够大	根据信号频率幅值选择正确的电压源恒电流
	偏置电压不稳定	输出信号与高频谐波叠加	一般由传感器的谐振频率造成，选择谐振频率较高的传感器

故障类别	故障的具体表现	可能造成故障的原因	可能解决故障的方法	
小测量信号失真	信号忽大忽小不稳定	由瞬态温度变化以至偏置电压忽大忽小而造成输出信号不稳定	采用偏置电压稳定的传感器	
	外界环境噪声对测量信号的影响	接地回路造成的噪声	避免多点接地，传感器采用对地绝缘。	
		电磁波的影响	采用双层屏蔽壳的传感器。	
		强声场的影响	采用双层屏蔽壳的传感器将有助于降低强声场对加速度传感器的影响。	
		瞬态环境温度变化	对用于超低频测量的高灵敏度传感器必须采用隔热护套。	
		被测点的基座应变影响	选用基座应变小的剪切型加速度传感器。尽量减小传感器与被测物体间的接触面积。	
	测量系统噪声对测量信号的影响	传感器自身的电噪声	检定传感器噪声，选择信噪比合适的传感器。	
		电缆引起的电噪声	往往发生在与电荷输出型传感器配用的低噪声电缆，换用好的低噪声屏蔽电缆。	
		传感器供电电源噪声	选用低噪声供电电源或采用电池供电。	
		数采系统的量程设置	选择合适的量程	
	低频测量信号失真	系统低频响应差	传感器低频响应的截至频率不够低	检查传感器的低频响应(可通过测量时间常数来判断), 选用低频好的传感器。
			与传感器配套使用的恒流电压源或电荷放大器的截至频率不够低	正确选用恒流电压源和电荷放大器的低频截至频率。
系统低频信噪比差		传感器的低频噪声大	低频时传感器的信噪比会显著下降，选用满足低频信噪比指标的传感器。	
外界对测量信号的影响	瞬态环境温度影响	对传感器采用隔热护套，选用温度响应系数小的传感器。		
高频测量信号失真	高频信号增大	由传感器安装方式引起的高频信号失真(增大)	调整安装方式，增加安装接触刚度，提高传感器的高频测量范围。	
		传感器内部敏感芯体谐振频率低	选用谐振频率高，高频响应好的传感器。	
		传感器安装绝缘底座连接刚度差	重新选择高刚度绝缘安装底座	
	高频信号减小	在长距离信号输送时，恒流电压源的恒电流不够大	根据信号频率幅值选择正确的电压源恒电流	