

压电加速度计 和振动前置放大器

理论和应用手册



Brüel & Kjær 

**压电加速度计和
振动前置放大器
手册**

by

Mark Serridge, BSc

and

Torben R. Licht, MSc

1986年10月

Translation of October 1986

目 录

1. 振动测量	1
1.1. 引言	1
1.2. 为什么要测量振动?	1
1.3. 什么是振动?	5
1.4. 振动参数	6
1.5. 振级的量化	7
线性幅值和频率刻度	9
对数幅值和频率刻度	9
1.6. 振动测量的分析	11
2. 压电加速度计	12
2.1. 引言	12
2.2. 加速度计的工作原理	13
加速度计工作的分析	14
2.3. 频率范围	18
频率上限	19
频率下限	20
2.4. 压电材料	20
2.5. 实际的加速度计设计	22
线驱动加速度计	24
其他设计	25
2.6. 加速度计的灵敏度	25
电荷和电压灵敏度	26
划一增益 [®] 灵敏度	28
线性度和动态范围	28
横向灵敏度	29
2.7. 相位响应	30
2.8. 瞬态响应	33
泄漏影响	33
振铃	35
零点偏移	37

3. 振动前置放大器	38
3.1. 前置放大器的设计和工作.....	39
3.2. 电荷放大器.....	39
电荷灵敏度.....	40
下限频率.....	44
由加速度计电缆引入的输入电容负载.....	48
电荷衰减.....	49
电荷放大器的噪声.....	50
3.3. 电压前置放大器.....	54
电压灵敏度.....	55
下限频率.....	56
电压前置放大器的噪声.....	57
3.4. 前置放大器输出电缆.....	57
3.5. 线驱动系统.....	58
B&K 线驱动加速度计和线驱动供电.....	61
B&K 线驱动放大器和线驱动供电.....	61
3.6. 各种不同振动前置放大器系统灵敏度和外部噪声源的比较.....	61
接地的加速度计和电荷前置放大器.....	64
接地的加速度计和电荷前置放大器(“浮地”输入).....	65
B&K 线驱动放大器和供电(接地输入).....	66
B&K 线驱动放大器和供电(“浮地”输入).....	67
以恒流电源为基础的线驱动系统.....	68
平衡加速度计和差分电荷放大器.....	69
加速度计的绝缘安装.....	71
3.7. 特殊前置放大器的特性.....	71
积分网络.....	72
滤波器.....	76
过载指示器.....	77
参考振荡器.....	78
电源.....	78
4. 实际的加速度计性能	79
4.1. 引言.....	79
4.2. 环境的影响.....	80
温度范围.....	80
温度的瞬变.....	82
声灵敏度.....	84

基座应变	85
湿度	85
磁灵敏度	86
辐射	86
4.3. 加速度计的质量加载作用	86
4.4. 安装加速度计	88
振动测试表面的加工要求	89
安装位置	89
使用不同安装技术的加速度计的频率响应测定	90
双端螺栓安装	90
蜡安装	93
磁铁安装	95
自粘安装片	97
粘接	98
探针	102
4.5. 机械滤波器	105
概述	105
工作原理	106
4.6. 加速度计电缆	107
4.7. 接地注意事项	109
5. 加速度计的校准和测试	111
5.1. 引言	111
为什么要对加速度计进行校准?	113
5.2. 校准标准分级体系	114
总体系	114
B&K 的总体系	115
校准技术的精确度	118
5.3. 校准方法	119
激光干涉法	119
其他的绝对校准方法	121
背靠背式比较校准方法	121
应用校准过的振动激励器核查灵敏度	123
5.4. 加速度计其他参数的测量	124
横向灵敏度	125
频率响应	126
无阻尼固有频率	128
电容	129

5.5. 确定环境对加速度计性能参数的影响	129
温度瞬变灵敏度	129
温度灵敏度	129
基座应变灵敏度	130
声灵敏度	130
磁灵敏度	131
温度极限	131
冲击极限	132
5.6. 加速度计电缆的工厂测试	132
5.7. 校准设备	133
9559型校准系统	133
各种校准设备	135
5.8. 与加速度计校准有关的一些标准	135
6. 附录	137
附录 A. 换算图表	138
附录 B. 振动计算图表	141
附录 C. 振动标准	142
附录 D. B&K 振动文献	142
附录 E. B&K 前置放大器汇总	144
附录 F. 内装前置放大器的 B&K 仪器汇总	146
附录 G. B&K 加速度计频率和动态范围图表	148
附录 H. B&K 加速度计汇总	151

符号表示

一般量

t	=时间
f	=频率
ω	=角频率
j	= $\sqrt{-1}$
e	=自然对数的底

一般动力学

x	=位移
v	=速度
a	=加速度
F	=力
T	=周期
τ	=时间常数

加速度计动力学

m_s	=惯性块(质量块)质量
m_b	=基座质量
x_s	=惯性块(质量块)位移
x_b	=基座位移
F_e	=激励力
ω_n	=固有共振频率(弧度/秒)
ω_m	=安装共振频率(弧度/秒)
f_m	=安装共振频率(Hz)
A	=放大系数
Z_s	=结构的机械阻抗
Z_a	=加速度计的机械阻抗

一般电学量

I	=电流
V	=电压
Q	=电荷
C	=电容
R	=电阻
Z	=阻抗

符号表示

加速度计电学量

- V_a = 加速度计开路电压
 Q_a = 压电元件产生的电荷
 C_a = 加速度计的电容
 R_a = 加速度计的电阻
 S_{qa} = 加速度计的电荷灵敏度
 S_{va} = 加速度计的电压灵敏度 (有负载)
 S_{vao} = 加速度计的电压灵敏度 (开路)
 C_h = 平衡加速度计输出端对外壳的电容

电缆电学量

- C_c = 电缆的电容
 R_c = 电缆的电阻
 C_s = 平衡加速度计电缆的内芯与屏蔽之间的电容
 C_d = 平衡加速度计电缆绝缘介质的电容
 q_n = 摩擦电电荷噪声

前置放大器电学量

- R_p = 前置放大器输入电阻
 C_p = 前置放大器输入电容
 C_f = 反馈电容
 R_f = 反馈电阻
 A = 运算放大器的增益
 V_i = 前置放大器的输入电压
 V_o = 前置放大器的输出电压
 Z_f = 反馈阻抗
 Z_i = 加速度计、电缆和前置放大器输入端的总阻抗
 i_f = 从 C_f 来的电流
 i_c = 通过反馈电容的电流
 V_c = 反馈电容两端的电压
 C_i = 加速度计、电缆和前置放大器输入端的总电容
 R_i = 加速度计、电缆和前置放大器输入端的总电阻
 R_{float} = 前置放大器“浮地”级的电阻
 $CMRR$ = “浮地”运算放大器的共模抑制比
 e_n = 噪声电压
 i_n = 噪声电流
 R_o = 线驱动放大器的输出电阻

1. 振动测量

1.1. 引言

近几年来，由于设备的结构越加精密巧妙，机器趋向于快速和更复杂，与其相关的振动问题日益增多。 these 问题是伴随着降低运行成本和提高效率这类要求而出现的。人们也开始关注噪声和振动对人类以及对产品工作寿命的影响。因此这就要求对振动的起因以及设备的结构对振动力的动态响应有深刻的了解。为了做到这一点，就需要有精确、可靠和多用途的振动传感器。此外，往往还需要使用先进的测量和分析设备。但是，如果没有可靠的振动传感器精确地检测振动信号，则这种设备的多功能性和能力就将白白浪费。

压电加速度计是被选作最佳的振动传感器。使现有的各种高性能测量设备能充分利用由这类振动传感器所提供的非常宽的频率范围和动态范围。

本手册的主要意图是实际指导使用 B&K 的压电加速度计对振动进行精确的测量。

1.2. 为什么要测量振动？

测量振动的原因有很多。通常不受控制的振动会产生噪声，引起机械应力，而且可能会导致结构发生故障，是一种不希望产生的现象。振动的测量大致可以划分成四个范围。

1. **振动试验。**振动试验是基本环境试验程序或工程设计的一个组成部分，起着查明部件承受在实际使用场合可能会遇到的各种振动环境的能力的重要作用。

在振动试验期间，一台装置（例如飞机的一个部件）要承受振动激励器产生的高振级。振级在规定的频率范围内保持恒定，并进行频率扫描。这是借助于振动激励控制器和提供有关结构所承受的加速度数据的反馈加速度计完成的。此外，将另一个加速度计装到结构上就可以取得频率响应的数据。

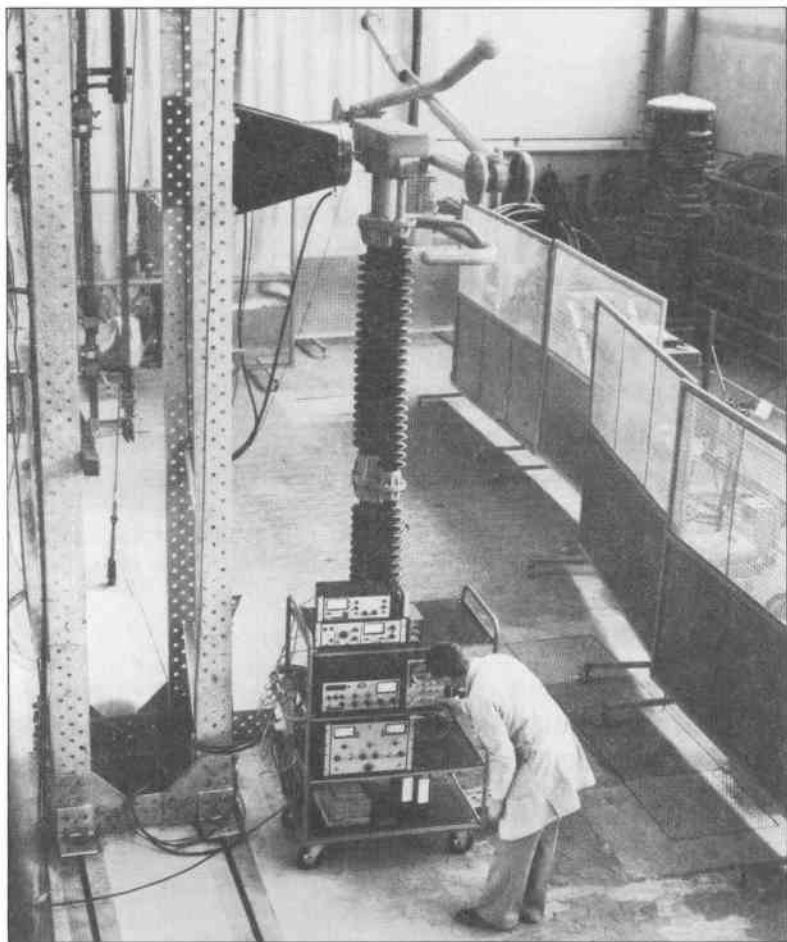


图1.1. 高压输电铁塔用绝缘子的振动试验

2. **机器状态监测和故障诊断。**在一台机器上对振级进行最简单的全面测量可以预告即将发生的问题。然而，通过频率分析可取得更多数据。这种技术包括测量机器在良好状态下的特征频谱和通过在一段时间内测量振动，监视频谱分量的任何变化。这种变化通常是即将发生问题的前兆。也可以利用振动测量来进行故障诊断。

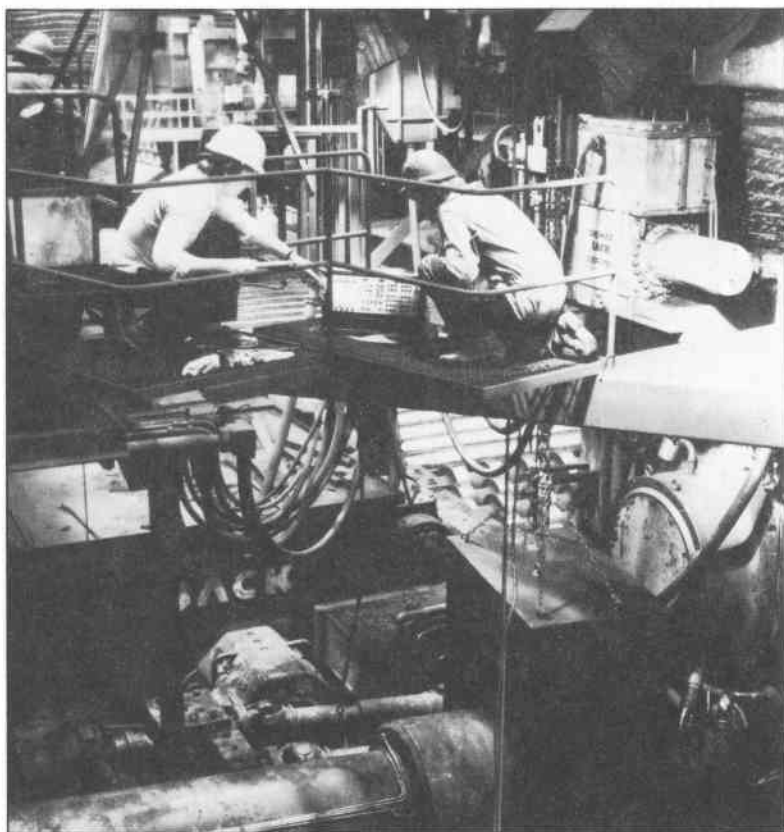


图1.2. 振动测量用于机器状态监测和故障诊断程序

在工业中，振动测量也可以作为修正旋转机器的轴不平衡的依据。不平衡是造成高振级的起因。它往往会导致疲劳，导致轴承发生故障。

3. **结构分析。**结构分析是利用振动测量确定某一结构的动态性能的有效实验方法。采用一个力传感器和一个加速度计，利用一台双通道分析仪可同时测量激励信号和结构的振动响应。分析仪连同一台台式计算机进行高速运算，可为小至汽轮机叶片，大到桥梁的各种结构的设计验证和修改提供必要的数据。



图1.3. 利用振动测量对机车车辆进行结构分析

4. **人体振动测量。**这个范围所涉及的是测量传到人体上的振动。这类振动是由例如客运车辆和手持式动力工具等产生的。测出的振级需适应人的舒适感和有关国际标准规定的健康标准。



图1.4. 利用一个加速度计和一台振动计测量由链锯手柄传出的振级

1.3. 什么是振动？

振动是一种动态现象，是我们所观察到的某一平衡位置上的往复运动。振动是由一种或多种力的作用导致结构中能量的传递和储存引起的。振动往往是其它有效操作引起的一种很难避免的副产品。

振动可以在“时域”内观察到，即振动振幅随时间（“时间历程”）而变化。振动的时域历程可以分解成根据数学方程式或振动所含运动的统计特性确定的若干等级之一。振动也可以从“频域”加以考虑，即根据频谱说明振动。这两个域经“傅里叶变换”在数学上相互关联。关于这个问题可以查阅 B&K 出版的“频率分析”一书，这本书主要论述这个问题。

压电加速度计不同于其它振动传感器，只要加速度计的频率范围和动态范围正确，所有各类振动，无论其性质是属于时域还是频域，都可以用加速度计进行测量。由于压电加速度计的频率和动态范围很宽，因此总是能为任何振动测量找出一种特定的类型。只有分析技术才需要根据振动的类型加以改变。

1.4. 振动参数

压电加速度计可以测量加速度，这种信号经采用电子方法一次积分后可以提供速度信号，二次积分后可以提供位移信号。这是压电加速度计的一大很有吸引力的特点。

图 1.5 所示为一台电钻的加速度的积分结果。振动在频域内显示。积分器起低通滤波器的作用，衰减在积分以前出现的高频分量。采用一个积分网络可有效地“丢弃”有关振动的数据，显然只有在所丢弃的是测量所不需要的数据时才允许这么做。

如果无任何理由进行积分，应始终使用加速度。例如测量速度的一个明显理由是要取得实际振动速度幅值。还需尽量减少对振动测量配置中测量仪表的动态范围的要求，从而提高测量的信 - 噪比。只要采用能提供最平缓频谱的参数就能做到这一点（见图 1.5 (b)）。只有频率分析才能显示一个振动信号的频率成分。对于在旋转机器上进行的宽带（宽频成分）测量，发现在所有测量实例中，速度参数为最佳的占 70%，加速度最佳的占 30%，几乎从不使用位移。位移参数有时用于测量象在船舶、建筑物和桥梁等结构上经常碰到的低频率大位移振动。

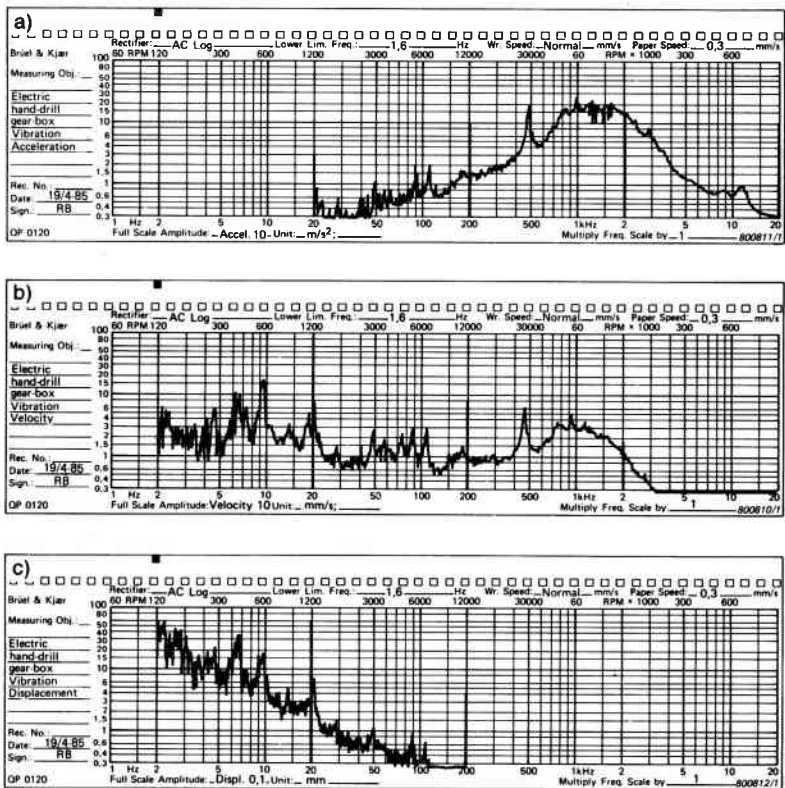


图1.5.使用三种测量参数——加速度、速度和位移对电钻的振动进行频率分析

在测量象冲击和脉冲这样的复杂信号时，不应该使用积分网络，因为积分网络会产生相位误差，导致严重的幅值测量误差。

1.5. 振级的量化

用数量表示时域内信号振动幅值的方法有好几种，尽管本节所述的描述符使用得很广泛，实际上测量单位则可能有所不同(如 in/s^2 、 m/s^2 、 g 等)。

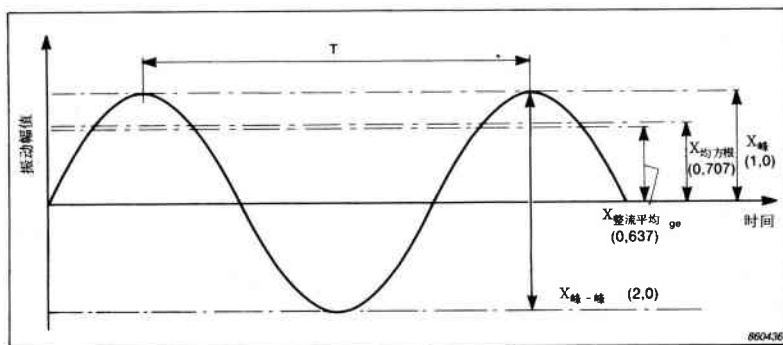


图1.6. 所示简谐振动信号的幅值可以看作是位移、速度或加速度

图1.6 表示振动时间历程的最简单形式。它由在参考位置周围振荡的质点表示。在此参考位置上可以以固定的时间间隔碰到完全相同的运动状态。这个时间间隔被称为振动的周期 T 。振动的幅值随时间作正弦变化。

当选择位移、速度或加速度代表运动时，可以看出振动的形式和周期保持不变。只有相对相位不同。

1. **RMS (均方根) 值**：最能说明各振级。积分时间平均平方函数的平方根与振动的能量有关，因而也同振动的破坏势能有关。正弦波的均方根值是 $1/\sqrt{2}$ 乘以峰值。
2. **峰值**：确定短持续时间冲击测量中测得的最大值，这种测量是很有用的。但峰值不考虑振动的时间历程。
3. **峰-峰值**：这一描述符尽管对描述振动位移有一定用处，但很少使用。
4. **平均值**：考虑振动的时间历程，但平均值与任何物理量之间无任何有用的关系。图1.6 所示为经过整流的正弦波的平均值。

5. **峰值因数**：确定信号峰值与均方根值之比。从上述均方根的定义中可以看出，图1.6中正弦波的峰值因数是 $\sqrt{2}$ 。当振动变得更脉冲性或更随机时，峰值因数会增大。用一个配有均方根和峰检波器的简单振动计很容易计算出这个简单的关系。当在一台机器的轴承壳上进行宽带测量时，均方根测量可能无法发现由损坏的轴承造成的单个振动分量的增长，但峰值因数的增加则可能显示出这一分量的增长。因此，只要监测峰值因数的增加就能预测故障或元件的损坏。

从结构测试技术中还可以看到峰值因数另一用途的一个实例。结构输入信号的峰值因数能够显示有关激励的重要信息。如果峰值因数能象锤击激励情况下那样变得很高，则结构可能会产生非线性动态特性。高峰值因数还能显示输入所含的能量可能不足以取得良好的信 - 噪比。另一方面，高峰值因数表明输入的频率范围很宽。

1.5.1. 线性幅值和频率刻度

在振动测量中，当需要有较高的分辨力时，可以使用线性幅值和频率刻度。线性频率刻度有助于分离紧密相邻的频率分量。线性频率刻度另一个优点，即能容易地识别振动信号中间隔相等的谐波分量。

1.5.2. 对数幅值和频率刻度

压电加速度计能够在极宽的动态和频率范围内精确地测量振动。因此，为了方便地解释测量结果，往往需要下列两种刻度：

1. 一个能够适应从最低可检测幅值至各冲击级的振动幅值，而且还能简化各振级的比较的幅值刻度。
2. 在记录纸整个幅宽内具有相同的百分比分辨力频率刻度。

使用下列两种刻度可以达到这两个目标：

1. **分贝刻度**：尽管分贝 (dB) 与声学测量的关系更为密切，但它同样可用于振动测量。分贝可定义为一个幅值与另一幅值之比，以对数形式表示。振动幅值比可用下列关系式表示：

$$\begin{aligned} N(\text{dB}) &= 10 \log_{10} \left(\frac{a^2}{a_{\text{ref}}^2} \right) \\ &= 20 \log_{10} \left(\frac{a}{a_{\text{ref}}} \right) \end{aligned}$$

式中：

N = 分贝数

a = 被测振级

a_{ref} = 参考级

根据 ISO 1683，参考级的参数如下所示：

加速度 = 10^{-6}ms^{-2}

速度 = 10^{-9}ms^{-1}

位移 = 10^{-12}m

对于角频率 $\omega = 1000$ 弧度/秒 (约为 159 Hz) 的正弦波，这些级是相同的。当绝对振级以 dBs 表示时必须参照这些参考幅值 (例如，参考级为 10^{-6}ms^{-2} ，振动幅值测得为 110 dB)。但是，当各振动幅值进行比较时，只要这些幅值参考级用同一个参考幅值，就可以使用分贝差值。例如无需任何参考值就可以正确地说出一种幅值比另一幅值高 20 dB。

2. **对数频率刻度**。有时频率标绘在对数刻度上。这一类刻度具有扩展较低频率范围和压缩较高频率范围的效果。其结果是频率轴 (屏幕上或纸上) 上的相对分辨力相等，刻度的大小保持合理的比例。因此，对数频率刻度被用于覆盖一个宽的频率刻度。

1.6. 振动测量的分析

尽管现代的时域分析技术正越来越有效，但传统的时域分析所能取得的数据量是有限的。不过，增加了频率分析设备，例如模拟和数字频率分析仪以后，就可以取得额外的非常有用的数据。本手册不打算对这一类性质的仪器作深入的说明。在进行频率分析时可以参阅 B&K 出版的“机械振动和冲击测量”以及“频率分析”两书，以打下坚实的理论基础。有关 B&K 所能提供的仪器范围的详细情况请查阅 B&K 总目录和简明目录。

测量仪器装置的复杂性和测量结果的分析会有很大的差异。但在任何情况下，振动传感器总是测量环节中最关键的一环。因为如果没有精确的振动信号，则以后对测量结果的分析就不会可靠。

压电加速度计是最可靠、用途最广、最精确的振动传感器。

2. 压电加速度计

2.1. 引言

本章的目的是对压电加速度计的工作和特性作一基本理论性介绍。由于它的工作性质，还将涉及一些有关振动前置放大器的性能。本手册第三章“振动前置放大器”对前置放大器的工作和特性作全面的叙述。B&K加速度计的完整系列汇总在附录 H 中可找到。

压电加速度计被广泛认为是振动的绝对测量的最佳传感器。这是由于它具有下面一些特点：

1. 可用于非常宽的频率范围。
2. 在很宽的动态范围内具有良好的线性。
3. 加速度信号可经过电子积分得到速度和位移数据。
4. 在较宽范围的环境条件下进行振动测量而仍能维持良好的精确度。
5. 由于是自发电的，因此不需要外加电源供电。
6. 无活动部件，因此坚固耐用。
7. 极其紧凑而且具有高的灵敏度质量比。

为了充分体现这些优点，有必要将一些其他类型的振动传感器和振动测量器件的特性作调查。

1. **邻近探头。**这是一种仅可作相对振动位移测量的器件，它具有静态位移响应和较低的电气阻抗输出。而此器件不是自发电的，并且高频性能很差。此外，振动表面必须是导电的。

2. **电容探头。**这是一种小型、无触点振动位移传感器。其灵敏度高、频率范围宽，但缺点是振动表面必须导电，而且探头的动态范围有限，校准非常困难。
3. **位置电位器。**这是一种价格低廉的低阻抗器件，可用于测量静态位移。但是其动态范围和频率范围有限，而且器件的工作寿命很短，分辨力很低。
4. **压阻传感器。**这是一种可测量静态加速度的振动加速度传感器、测量频率和动态范围可以很宽。有限的冲击处理能力意味着这种类型的传感器容易损坏，通常用粘滞阻尼来保护传感器免受冲击，但这样会减小工作温度范围并且改变相位特性。
5. **动圈传感器。**这是一种自发电低阻抗振动速度传感器，频率范围和动态范围有严重局限性，它对磁场敏感并受其方向影响。

2.2. 加速度计的工作原理

图2.1是B&K三角剪切[®]加速度计机械部件的简单模型。加速度计的有源元件是压电元件。它们象弹簧一样经刚性三角形中心支柱连接加速度计基座至质量块。当加速度计受振动时，一个等于质量块的加速度与它的质量乘

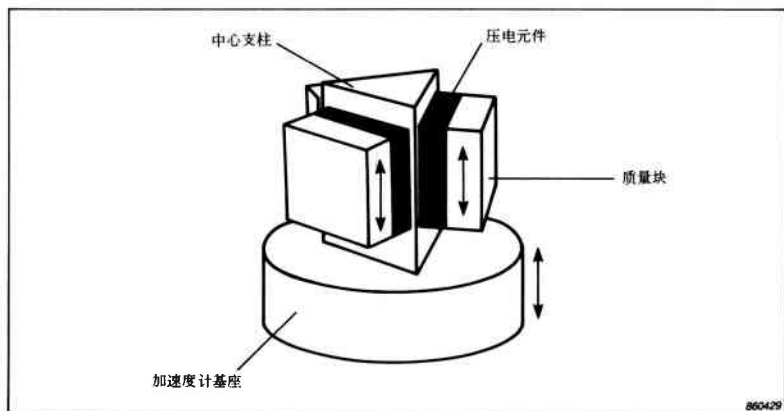


图2.1. B&K 三角剪切[®] 压电加速度计示意图

积的力作用于每一个压电元件上。压电元件产生与受的力成正比的电荷。因为质量块的质量是常数，因此，压电元件产生的电荷与质量块的加速度成正比。因为在很宽的频率范围内，质量块与加速度计基座受到相同幅度、相同相位的加速，所以加速度计的输出正比于基座的加速度以及安装加速度计的表面的加速度。

上述模型可以简化成图2.2 的形式。

2.2.1. 加速度计工作的分析

图2.2 是上面叙述的加速度计的简化模型并作为一个惯性系统，两个无支持的质量由一个理想弹簧连接，因为 B&K 加速度计具有很低的阻尼系数，这个模型中的阻尼可以忽略不计。

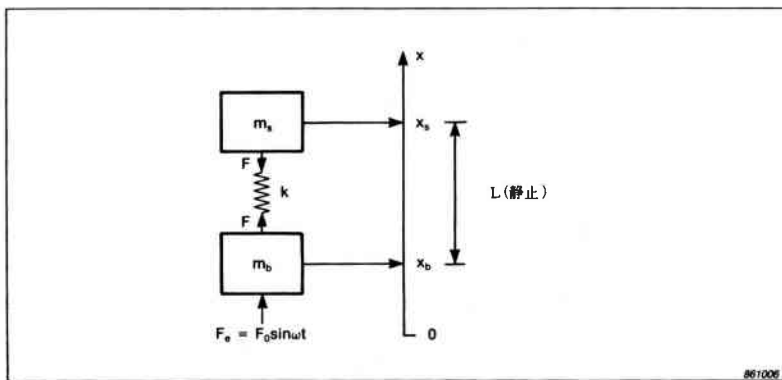


图2.2. 加速度计的简化模型

m_s = 总的质量块质量

m_b = 加速度计基座的质量

x_s = 质量块的位移

x_b = 加速度计基座的位移

L = 当加速度计在惯性系统中处于静止时质量块与基座之间的距离

k = 压电元件的等效刚度

F_e = 谐和激励力

F_0 = 激励力的幅值

ω = 激励频率 (rad/s) = $2\pi f$

ω_n = 加速度计的固有共振频率 (rad/s)

ω_m = 加速度计的安装共振频率 (rad/s)

f_m = 加速度计的安装共振频率 (Hz)

f = 激励频率 (Hz)

下列表达式说明模型中出现的力

$$F = k(x_s - x_b - L) \text{ (弹簧力)}$$

$$m_b \ddot{x}_b = F + F_e \text{ (基座上的力)}$$

$$m_s \ddot{x}_s = -F \text{ (质量块上的力)}$$

可得到模型的运动方程

$$\ddot{x}_s - \ddot{x}_b = -\frac{F}{m_s} - \frac{F + F_e}{m_b} = -\frac{k}{\mu} (x_s - x_b - L) - \frac{F_e}{m_b} \quad (1)$$

或

$$\mu \ddot{r} = -kr - \frac{\mu}{m_b} F_0 \sin \omega t$$

其中

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_b}$$

或

$$\mu = \frac{m_s m_b}{m_s + m_b}$$

μ 通常作为“折算质量”， r 是质量块对基座的相对位移。

$$r = x_s - x_b - L$$

当加速度计处于自由悬挂位置并不受外力激励时 ($F_e = 0$)，对此自由振动的运动方程可简化为：

$$\mu \ddot{r} = -kr$$

此简单的微分方程可假定 m_s 相对于 m_b 的位移以幅值 R 作谐和，换句话说：

$$\begin{aligned} r &= R \sin \omega t \\ -\mu R \omega^2 \sin \omega t &= -kR \sin \omega t \end{aligned}$$

因此，加速度计的共振频率 ω_n 可直接写成：

$$\omega_n^2 = \frac{k}{\mu}$$

此结果的含义可通过改写成下列方程而看出。

$$\omega_n^2 = k \left(\frac{1}{m_s} + \frac{1}{m_b} \right) \quad (2)$$

如果加速度计现在完全刚性地装到重量远远大于加速度计的一个结构上，则 m_b 变为远大于 m_s ，加速度计的共振频率变低。取极限情况，如果加速度计装在一个无限重的结构上 ($m_b \rightarrow \infty$)，则上述方程简化成：

$$\omega_m^2 = \frac{k}{m_s} \quad (3)$$

这是质量块 - 弹簧系统的固有频率并定义为加速度计的安装共振频率 ω_m ，安装共振频率是加速度计质量块 - 弹簧系统的一个特性。下面我们将看到，这个频率用来定义一个加速度计的可用工作频率范围。

很明显，实际上不可能把加速度计安装在无限重的刚性结构上来测量其安装共振频率。近似的做法是把加速度计装在一个 180 克重的钢块上，在一个很宽的频率范围内对两者以恒定的加速度进行激励以测量安装共振频率。这在第 5 章中作探讨。

如果结构不完全是刚性的，或者加速度计的安装技术问题引起基座和结构之间有附加的柔度，则安装共振频率将会改变。共振会分成两半，最低共振频率将低于安装共振频率。这在第 4 章中讨论。

现在来探讨加速度计的受迫振动，加到加速度计上的力必须和前面谈到的固有共振频率 ω_n 一起来分析。模型的运动方程 (1) 现在变为：

$$\ddot{r} + \omega_n^2 r + \frac{F_0}{m_b} \sin \omega t = 0$$

再假定质量的位移作正弦变化，则：

$$-\omega^2 R \sin \omega t + \omega_n^2 R \sin \omega t + \frac{F_0}{m_b} \sin \omega t = 0$$

因此

$$R(\omega_n^2 - \omega^2) + \frac{F_0}{m_b} = 0$$

或者

$$R = -\frac{F_0}{m_b (\omega_n^2 - \omega^2)}$$

在频率远低于加速度计的固有共振频率时 ($\omega \ll \omega_n$)，位移，现在称为 R_0 ，可用下式表示：

$$R_0 = -\frac{F_0}{m_b \omega_n^2}$$

低频时的位移 R_0 与高频时的位移 R 之比可这样表示：

$$\frac{R}{R_0} = \frac{-\frac{F_0}{m_b (\omega_n^2 - \omega^2)}}{-\frac{F_0}{m_b \omega_n^2}}$$

重新整理表达式，并命名此比为 A ，则：

$$A = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (4)$$

此重要结果表明：当受迫振动频率与加速度计的固有共振频率可比拟

时，基座和质量块之间的位移增大。因而，压电元件上的力以及加速度计的电输出信号也要增加，由于 B&K 加速度计所用的压电元件呈现恒定的力灵敏度，在接近其共振频率时的输出电信号的增加完全归因于加速度计的固有共振频率。加速度计频率响应曲线的典型形状(见图2.3)和幅值测量误差与此方程有关，这在2.3节中说明。

加速度计的自由悬挂固有共振频率很大程度上取决于总的质量块质量与传感器余下部分质量，主要是基座质量的比值，作为一般规则，加速度计中总的质量块质量近似等于其基座的质量，这就给出如下关系：

$$\frac{\text{安装共振频率}}{\text{自由悬挂共振频率}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

2.3. 频率范围

加速度计的电输出的相对变化情况示于图 2.3。这样的频率响应曲线表明：在一个很宽的频率范围内，当加速度计受恒定振动激励时的电输出变化。为了得到这样一条频率响应曲线，加速度计装于一个 180 克的激励头上，

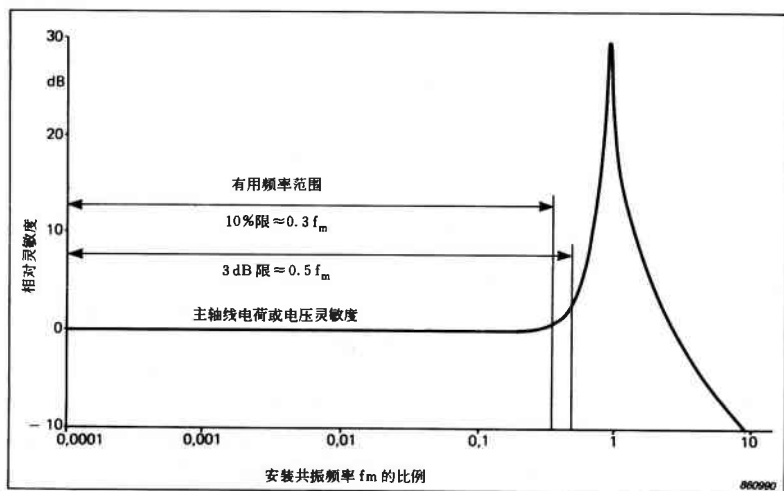


图2.3. 加速度计对频率的相对灵敏度

这样可找到加速度计的近似的安装共振频率，这个频率响应曲线与上述方程(4)有关。现在安装共振频率可以直接代入(4)而得到

$$A = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_m}\right)^2} \quad (5)$$

方程(5)可用来计算任何频率下实际振动与测量值之间的偏差并可限定有用频率范围。

2.3.1. 频率上限

图2.3表明安装共振频率确定了加速度计可用的频率范围，在这范围内，当振动输入恒定时，加速度计的电输出仍维持恒定。

安装共振频率越高，工作频率范围就越宽。为了得到较高的安装共振频率，必须使压电元件具有较好的刚性，或者采用较小的质量块总质量。一般来说，压电元件的刚性是常数，因此要求用较小的质量块质量，但是质量块质量变小会使作用在压电元件上的力变小从而降低加速度计的灵敏度。因此，能工作在较高频率的加速度计，其灵敏度较低，反过来讲，高灵敏度的加速度计就不能作很高频率时的测量。

有几个有用的频率限可以来定义加速度计的频率响应曲线，它们是：

5%频率限在此频率上，实际加到加速度计基座上的振动与测量值之间的偏差为5%。以此精确度测量的最大振动频率近似为加速度计安装共振频率的五分之一(0.22)。

10%频率限在此频率上，实际加到加速度计基座上的振动与测量值之间的偏差为10%，以此精确度测量的最大振动频率近似为加速度计安装共振频率的三分之一(0.30)。

3dB频率限在此频率上，实际加到加速度计基座上的振动与测量值之间的差为3dB。以此精确度测量的最大振动频率近似为加速度计安装共振频率的一半(0.54)。

2.3.2. 频率下限

压电加速度计不可能达到真正的直流响应。压电元件只有在受到动态力的作用下才会产生电荷，实际的频率下限决定于与加速度计相连的前置放大器，此放大器决定了从加速度计泄漏电荷之速率，用 B&K 加速度计和前置放大器可测量低至 0.003 Hz 的振动。

实际应用中很少需要频率下限小于 1 赫芝，因此不能达到真正的直流响应还谈不上一个大的缺陷。

前置放大器的低频性能可参阅第 3 章“振动前置放大器”的叙述。与低频测量有关之环境影响在第十章“实际的加速度计性能”中说明。

2.4. 压电材料

压电材料是指受力能发生电荷现象的一种材料。呈现这种特性的材料为本征压电单晶体，例如石英和罗谢尔盐（四水酒石酸钾钠），以及人造极化铁电陶瓷，这是不同化合物之混合物，象钛酸钡、铅锆酸盐和铅偏铌酸盐。

陶瓷的极化过程与软铁受磁场磁化的过程相类似。在材料的两端加上高的电压冲击，材料分子结构中的畴进行排列，外力使畴变形并在材料的两端产生相反的极性。图 2.4 为说明此效应的简图，当一个加速度计受振动时，与加速度成比例的力作用于压电元件上，产生的电荷由接点检出，在非常宽的频率范围和动态范围内，力与电荷之间的关系保持极高的线性，以致压电加速度计具有优异的特性。压电材料的灵敏度用 pC/N 表示。

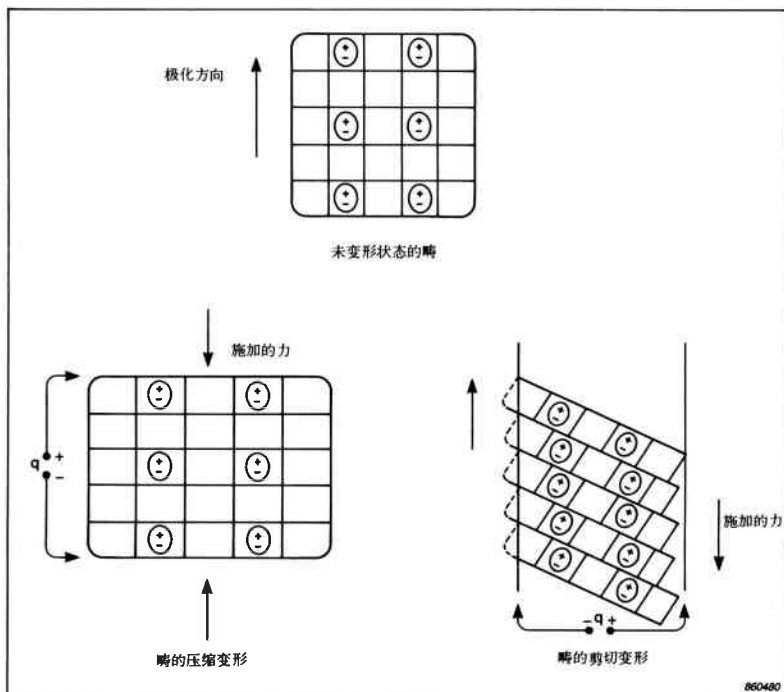


图2.4. 人造极化陶瓷中压电效应的简单模型，电荷 q 在所示的表面之间聚集。

如图2.4所示，压电元件能经受压缩和剪切两种变形。在这两种情况下，电荷都沿受力表面产生。

在压缩变形情况，电荷是沿极化方向检出。这样做的明显缺点是非振动的输入，例如温度波动，在极化方向产生的电荷也和振动所产生的电荷一起被检出，这样加速度计的输出不再仅仅与振动输入有关。然而，当用剪切变形时，电荷在与极化方向相垂直的方向上检出，这样由于温度造成的额外电荷就不被检出。这是剪切型加速度计的设计比压缩型设计性能好的原因之一，温度波动影响的深入讨论详见4.2.2.节。

铁电陶瓷可以做成任何需要的形状，它们的成分也可以改变来得到特殊的性能以作不同之应用，象石英这样的压电单晶材料就不是这样了，因为它们的成分是固定的，而且形状受到切割成石英片的晶体本身的尺寸限制。由于这个原因，用单晶元件做的加速度计比铁电陶瓷做的加速度计灵敏度低，内部电容小。

B&K 加速度计所用的压电材料有 PZ 23, PZ 27, PZ 45和 PZ 100 几种。它们的特性如下：

1. PZ 23 属于钛酸铅、锆酸铅族的铁电陶瓷，是人造极化材料。它可用于 250°C (482°F) 的温度。由于它的高灵敏度 (大约 300 pC/N) 和其他良好的特性，被广泛用于 B&K 公司大多数之加速度计中。
2. PZ 27 是一种人造极化的钛酸锆酸铅元件，与 PZ 23 很相似，它适用于小型加速度计。
3. PZ 45 是一种特殊配方人工极化铁电陶瓷，它具有特别平坦的温度响应，可用于 400°C (752°F) 以下的温度范围。B&K 差分高温和高冲击加速度计中用此材料。
4. PZ 100 是一种精心选择和准备的石英晶体。可用于 250°C (482°F) 以下的温度范围，具有良好的稳定性与低的温度瞬态灵敏度，它被用于 B&K 8305 型标准参考加速度计以及力传感器中。

所有 B&K 加速度计用的压电元件都可在加速度计产品资料中查到。

2.5. 实际的加速度计设计

B&K 加速度计使用了三种不同的机械结构设计，前二种设计，即平面剪切和三角剪切[®] 设计示于图 2.5。还使用了压缩设计 (见图 2.6)。由于三角剪切[®] 的性能极其优异，几乎所有的 B&K 加速度计都用到它。

1. **三角剪切[®]设计。**三个压电元件和三个质量块以三角形配置安排在三角形中心支柱的各边。它们用高张力的夹圈固定。组件不需用粘合剂或螺柱，从而保证了最佳性能和可靠性。夹圈使压电元件产生预应力，以得到极高的线性度。电荷在壳体与夹圈之间聚集。

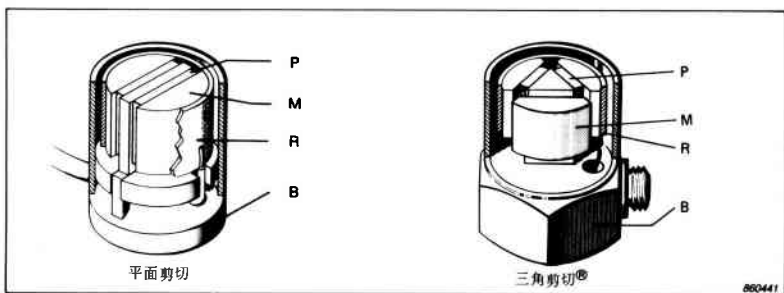


图2.5. 平面剪切和三角剪切[®]设计， M = 质量块， P = 压电元件， R = 夹圈， B = 基座

三角剪切[®]设计比其他设计的灵敏度与质量之比要高，共振频率相对较高，对基座应变和温度瞬变的隔绝性能较好，这种设计在各方面的优异特性使它对通用和特殊型式的加速度计都很理想。

2. **平面剪切。**与三角剪切[®]一样，这种设计的压电元件经受剪切变形。两个矩形压电材料片放在矩形中心支柱两侧，两个质量块如图2.5中安放，它们用高张力的夹圈固定，与三角剪切[®]设计中的功能相同，基座和压电元件有效地相互隔绝，这样，就不受基座弯曲以及温度变化的影响。
3. **中心安装的压缩设计。**这种传统的简单构造做到适当高的灵敏度与质量之比，压电元件 - 质量 - 弹簧系统装于与加速度计基座相连的圆柱形中心支柱上。由于中心支柱和基座象与压电元件并联的弹簧一样，基座上的任何动态变化，例如弯曲或热膨胀等都能引起压电元件受到应力而造成假象输出。尽管 B&K 采用非常厚的基座以使压缩设计中的这种影响减至最小，但弯曲和伸长仍能传到压电元件上去。这将造成在振动频率上的与振动无关的假象输出。在前面几节中可看到温度变化也可在压电片中产生电荷，这在压缩设计中可检测到。

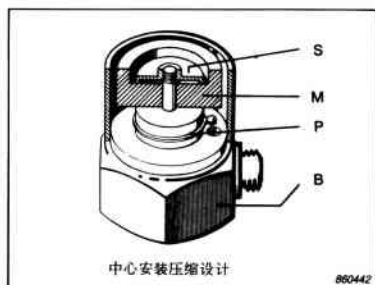


图2.6. 传统的压缩设计， M = 质量块， P = 压电元件， B = 基座， S = 弹簧

由于上述原因，B&K 仅用压缩设计加速度计来测量大信号（即冲击测量），这种场合，假象输出比振动信号要小得多。压缩设计还可用于在控制环境下作加速度计校准的标准参考加速度计中。这里，用附加的铍圆盘来加强基座以减小基座弯曲的影响。这种加速度计是倒置安装的，以更精确地测量安装加速度计的基座的振动。

2.5.1. 线驱动加速度计

这种加速度计内装前置放大器。线驱动加速度计示于图 2.7，这种设计的加速度计部分与前面所讲的三角剪切[®]结构相同。电子部分用厚膜微电子电路技术以得到性能良好的前置放大器，第 3 章有前置放大器的工作情况说明。

线驱动加速度计需要外部电源供电才能工作。内装的前置放大器由一个定电压供电，而振动信号以调制的供电电流的形式送回到外部电源单元，这个系统也在第 3 章叙述。

内装前置放大器毕竟引入温度和冲击的限制。为了克服这个缺点，B&K 还生产单独的线驱动前置放大器与加速度计配用。



图2.7. B&K 线驱动加速度计，外壳打开后可看到其内部电子线路

2.5.2. 其他设计

加速度计还有基于压缩和剪切变形原理的其他设计。B&K仅采用上面叙述的那些设计，其中特别是三角剪切[®]设计，它提供了所有非压缩型设计的强有力的性能。在其他地方，还能遇到下面一些通用的设计：

环形剪切设计这种设计中的压电元件和质量块形成环形并简单地粘接在一起。

隔离剪切（螺栓剪切）这种设计与平面剪切相似，不同的只是压电元件用一螺栓固牢。

2.6. 加速度计的灵敏度

现在已可看出加速度计是一种自发电器件，它的电输出是与作用的加速度成比例的。为了对作为测量器件的加速度计的作用进行评价，对于它的输入（加速度）和输出（电荷或电压）之间的关系要进行更详细的探讨。

2.6.1. 电荷和电压灵敏度

压电加速度计能被看作一个电荷源或一个电压源。压电元件起到一只电容 C_a 的作用，它与一只极高内部泄漏电阻 R_a 并联。在实用中 R_a 可以忽略。它可以被当作一只与 C_a 和电缆电容 C_c 并联的理想电荷源 Q_a 或是与 C_a 串联并由 C_c 作负载的电压源 V_a ，如图2.8所示。两种型式的等效电路如图2.8所示。根据哪一种型式引出的计算最简单，两种型式都能独立使用。

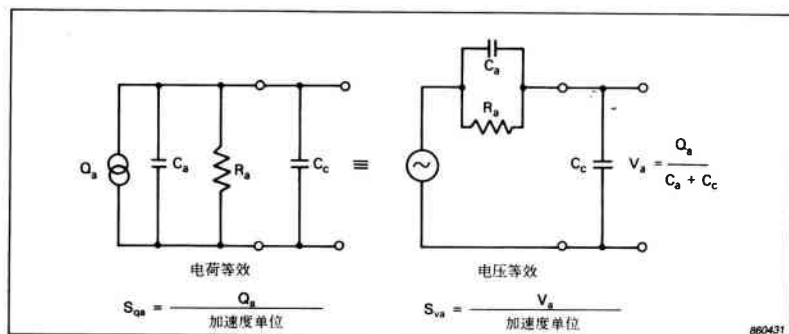


图2.8. 压电加速度计和连接电缆的等效电路

加速度计的前置放大器的选择决定于它们要检测从加速度计来的电输出是电荷还是电压。

压电加速度计的电荷灵敏度 S_{qa} 是根据每个加速度单位的电荷（以 pC 计量）来校准。

$$S_{qa} = \frac{\text{pC}}{\text{ms}^{-2}} = \frac{\text{pC}_{\text{均方根}}}{\text{ms}^{-2}_{\text{均方根}}} = \frac{\text{pC}_{\text{峰值}}}{\text{ms}^{-2}_{\text{峰值}}}$$

同样，电压灵敏度是根据每个加速度单位的电压来表达。

$$S_{va} = \frac{\text{mV}}{\text{ms}^{-2}} = \frac{\text{mV}_{\text{均方根}}}{\text{ms}^{-2}_{\text{均方根}}} = \frac{\text{mV}_{\text{峰值}}}{\text{ms}^{-2}_{\text{峰值}}}$$

从简化的图解中可以看出，加速度计产生的电压分布在加速度计电容和电缆电容上。从而当用不同类型的电缆或电缆长度变化引起的电缆电容变化将造成电压灵敏度的变化，因此就要求对灵敏度进行重新校准。这是用电压前置放大器的主要缺点，在第三章中有详细得多的探讨。如今差不多总是用电荷放大器的。

在一个加速度计的有用工作频率范围内，在低频和中频，电压灵敏度与频率无关。这一点也适用于用PZ 45和PZ 100压电材料的加速度计的电荷灵敏度，但不适用于用PZ 23和PZ 27压电材料的加速度计。可是已经设计了这种压电材料，即电荷灵敏度和电容在频率每增加10倍时都会降低约2.5%。这个降低的效果可部分地抵消在共振点时输出的升高。用PZ 23材料的中到高共振频率的加速度计在整个有用工作频率范围内测量的和实际的加速度之间的最大偏差是加于加速度计基座上的加速度的 $\pm 5\%$ ，见图2.9所示。

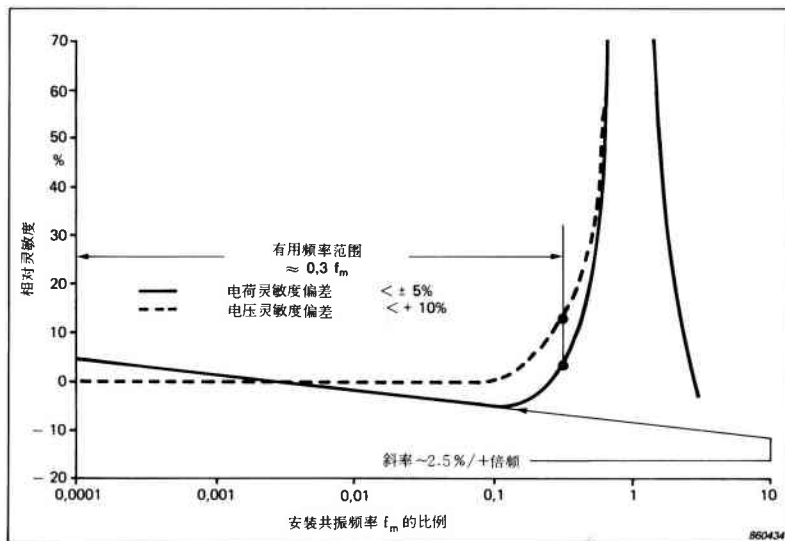


图2.9.用PZ 23压电材料的加速度计的电荷和电压灵敏度对频率的关系

2.6.2. 划一增益[®] 灵敏度

几乎每一种B&K加速度计都属划一增益[®] 设计。就是说，它们的测量灵敏度已被调整至合适值的 2 %以内。如 1 ;3.16 ;10或31.6 pC/ms⁻²。划一增益[®] 加速度计之间可以由一个同类型的来取代另一个而不需对任何仪器设定值作进一步调整。因为上述值相互之间的相对间隔为 10 dB，测量系统的设置和校准非常容易。例如，一个加速度计换成另一个不同类型的，只需在测量仪器上作固定的 10 dB的增益改变。

B&K加速度计是通过仔细调整质量块的质量而达到划一增益[®] 灵敏度。

2.6.3. 线性度和动态范围

线性度是任何测量系统的基本要求。系统的输出在要求的频率和动态范围内必须与输入成线性关系。B&K加速度计的优良线性度见图2.10。

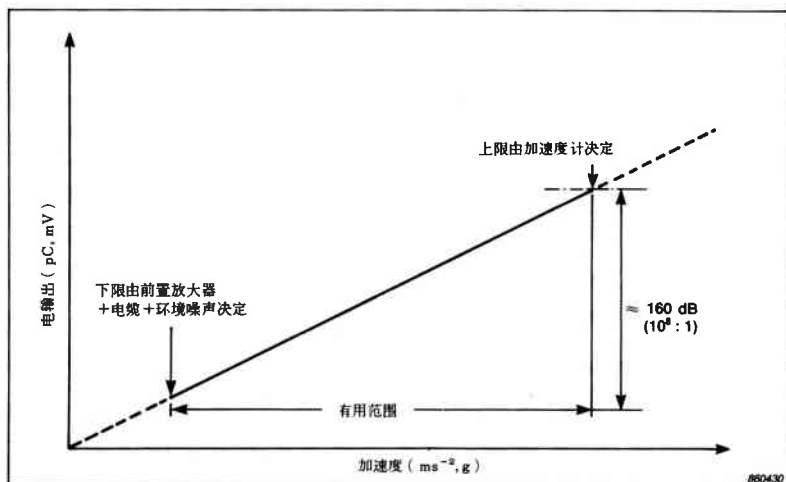


图2.10. 显示压电加速度计的线性度和宽动态范围的加速度计输出对加速度的关系

压电加速度计是一种宽动态范围的线性极好的器件，因为压电元件在一个宽的动态范围内呈线性的性能。在理论上，加速度计的线性范围达到零加速度下限，然而实际的下限决定于由测量系统来的噪声。这种噪声可能来自几个源，第三和第四章中讨论这个问题。

当压电加速度计使用范围超过其最大加速度极限，其非线性增加。若振级大大地超过加速度计的最大加速度极限，预加载夹圈有可能使压电元件滑落下来，最终同基座短路，使加速度计失灵。加速度计除了遭受到超过所规定工作范围的高冲击外，上述情况实际上不会发生。

2.6.4. 横向灵敏度

当一个加速度计受到垂直于它的安装轴线的加速度时，加速度计仍将有输出。在加速度计的校准曲线上，横向灵敏度以主轴线灵敏度的百分值来表达。理想中一个加速度计的横向灵敏度应该是零，但实际上由于压电元件和金属零件中微小的不均匀却做不到这一点。B&K特别注重选用均匀的压电陶瓷和精密加工、抛光和加速度计零部件精确的调整。这样，经适当的处理和

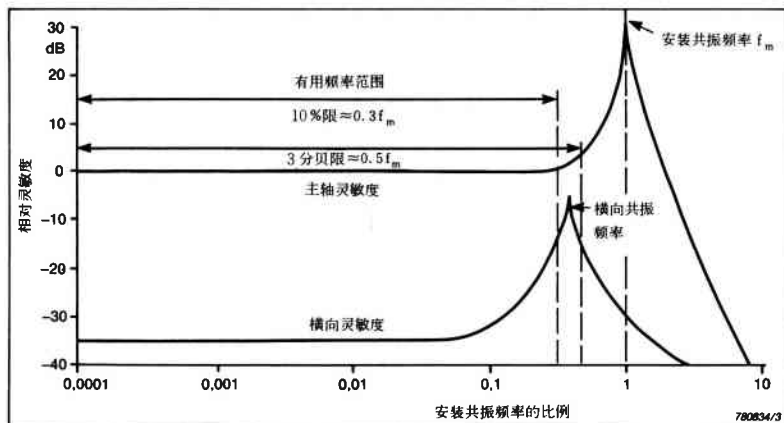


图2.11. 加速度计对主轴和横轴振动的相对响应

安装在一个平整、清洁的表面上，大多数 B&K 加速度计的最大横向灵敏度，在 30 Hz 时，可以保持低于主轴灵敏度 的 4 % (见图 2.11) 。

在频率低于主轴安装共振频率的六分之一时，横向灵敏度可保持低于 10 % 。在频率刚超过主轴安装共振频率的三分之一时，很难定出一个确切的横向灵敏度值来，因为产生横向共振，如图 2.11 所示。

如图 2.12 所示，横向灵敏度可当作加速度计的最大电荷和电压灵敏度轴线与安装轴线不完全一致的结果。因此横向灵敏度的最大值和最小值是有方向的，它们互相之间及对主灵敏度轴线都成直角。横向灵敏度的最大值绘示在加速度计的校准曲线图上。最小灵敏度的方向在外壳上用红点标示。这是 B&K 加速度计的一个很大特点。

应该指出，三角剪切[®]设计在所有横向方向上都有恒定的刚度，因而只有一个横向共振。而其它的剪切设计则可以有二个或更多的横向共振。

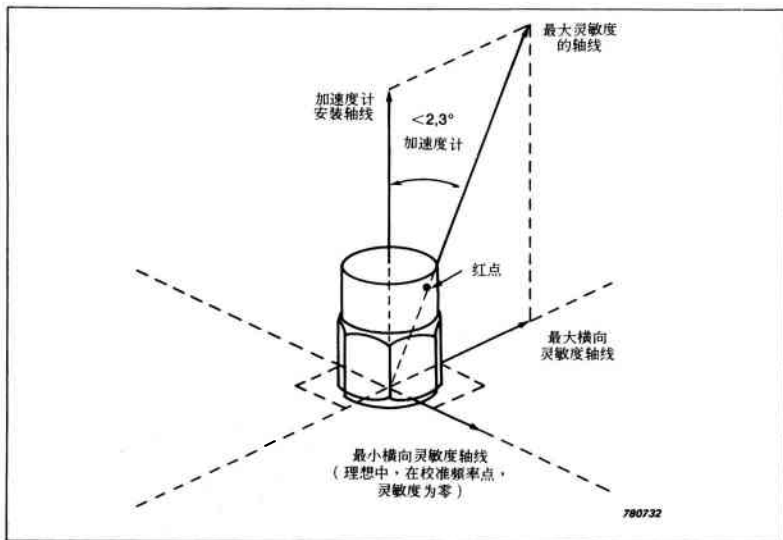


图 2.12. 横向灵敏度的矢量表示

因为横向共振正好在加速度计有用工作频率之外，并且一个峰值正低于主轴线灵敏度以下，所以重要的是横向振动和冲击要远远地保持在规定的主轴线连续振动极限以下。同样，加速度计的跌落或猛烈敲击能使它们受到大的横向冲击，很可能超出实际设计极限，导致加速度计内部的压电元件永久性损坏。

下列预防措施是用来针对一些严重的横向振动的。

1. 将红点对准最大横向加速度的方向。

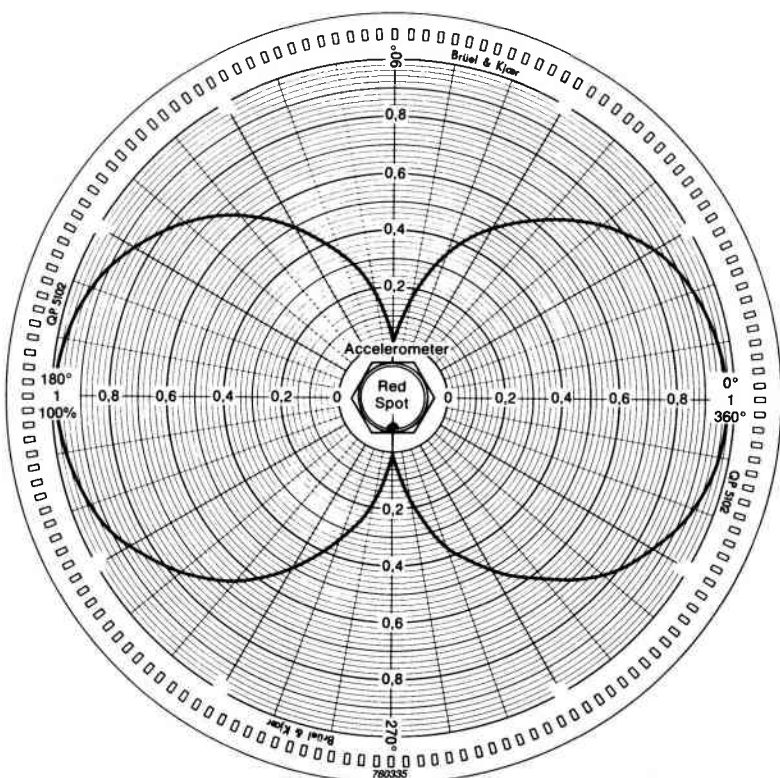


图2.13. 当最大横向灵敏度已知时加速度计在任意方向上决定横向灵敏度的图表

2. 用一个机械滤波器滤掉主轴以外方向上的振动。
3. 利用图2.13的图表，从最大横向灵敏度计算出在任何方向上对振动的灵敏度。

举例：在对 0° 的最大灵敏度轴线成 60° 处，图表指示了一个0.5的横向灵敏度系数（这也可以用角度的余弦来计算）。所以最大横向灵敏度为2%的加速度计在 60° 时的横向灵敏度为： $0.5 \times 2\% = 1\%$ 。

2.7. 相位响应

加速度计的相位偏移对应于机械输入和由此产生的电输出之间的时间延迟。假如在工作范围内的所有频率上的相位并不是恒定的，则一个振动信号的各种频率组成成分间的相位关系将相互变换，所引起的电输出是机械输入的失真的显示。

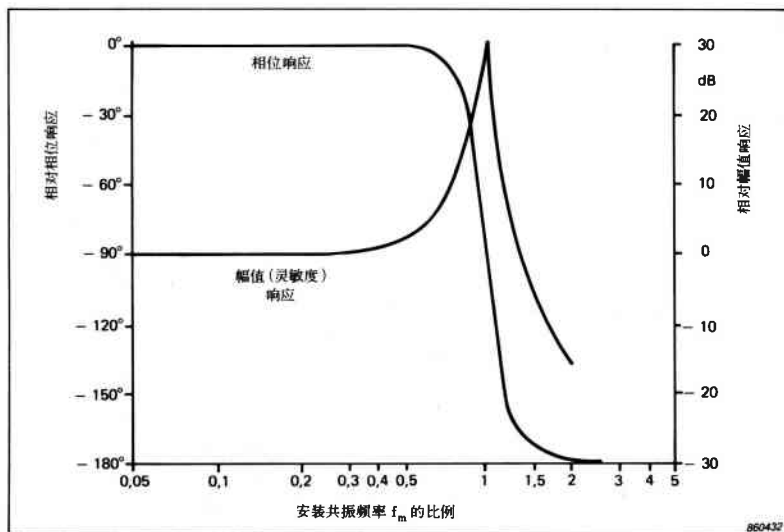


图2.14. 加速度计幅值和相位响应是频率的函数

加速度计的灵敏度和相位响应示于图2.14。在低于安装共振频率时引起的相位偏移是可以忽略的。在频率非常接近共振点时质量块的运动滞后于基座的运动并引起相位失真。然而，B&K加速度计的很小的共振阻尼系数保证了产生共振的频率范围能相对地狭窄。所以加速度计可以在超过其规定有用频率范围条件下工作而不引起相位失真。

然而，也需要考虑到所用电荷和电压前置放大器的相位线性度，特别是用到积分网络和其它滤波器。这在测量瞬态振动和机械冲击时尤为重要。

2.8. 瞬态响应

在测量瞬态振动和冲击时必须特别注意系统的总的线性度，否则重现的瞬态将会失真。压电加速度计是线性度极好的传感器，在很宽范围内重现瞬态是不成问题的。在瞬态测量不理想的场合，造成出错的主要根源不在加速度计，经常是前置放大器和有关的滤波器及积分网络引起的问题，无论如何，为了保证测量精确度，必须考虑下述瞬态现象。

2.8.1. 泄漏影响

在图2.15中，对准静态加速度脉冲波形发生失真现象，这在火箭发射或快速升降机中可能遇到，这种失真由于加速度计和前置放大器共同工作在不正确的频率范围内造成，并可作如下解释：

当加速度计受到准静态加速度作用时，在压电元件上产生电荷。依靠压电元件的电容，电荷贮存在元件中，并由于加速度计的高泄漏电阻阻止电荷“漏掉”。但由于加速度计有限的泄漏时间常数以及前置放大器的输入阻抗和下限频率设定，一些电荷要漏掉，这就造成波形上从A至B点的一段负斜坡。在加速度停止时，电荷改变相应的数量并降到低于零电平的C点。然后回升到零电平点D。在A和B以及C和D之间的指数变化率是相同的，它由加速度计和前置放大器的时间常数所决定。

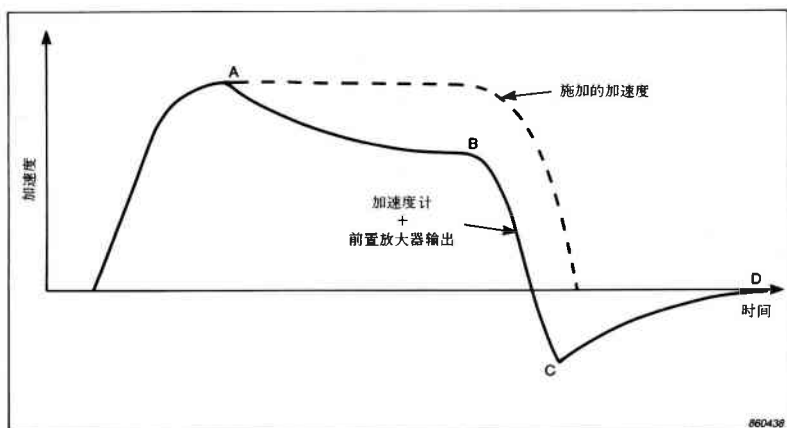


图2.15. 加速度计和前置放大器的泄漏对准静态加速度输入引起的波形失真

此泄漏效应在加速度峰值测量中引入误差。其原因是加速度计配用了不正确的下限频率的前置放大器。保证前置放大器的 -3 dB 下限频率小于 $0.008/T$ ，可使由于泄漏造成的峰值测量误差保持在 5% 之内，这里 T 为方波的瞬态周期，对于测量半正弦波瞬态信号，下限频率必须小于 $0.05/T$ 。

以特定精确度测量这种瞬态信号的整个测量系统的频带宽度可在图2.16中查到，图中还包括了上限频率要求，因为瞬态信号有较高的频率成分，对它也必须作无失真的重现。

由于在不正确的频率范围上使用加速度计所造成的瞬态波形失真，特别是在准静态振动中，与诸如零点偏移等其他现象产生的失真是很相似的（见2.8.3节）。必须明白，问题的起因与解决方法是不同的。

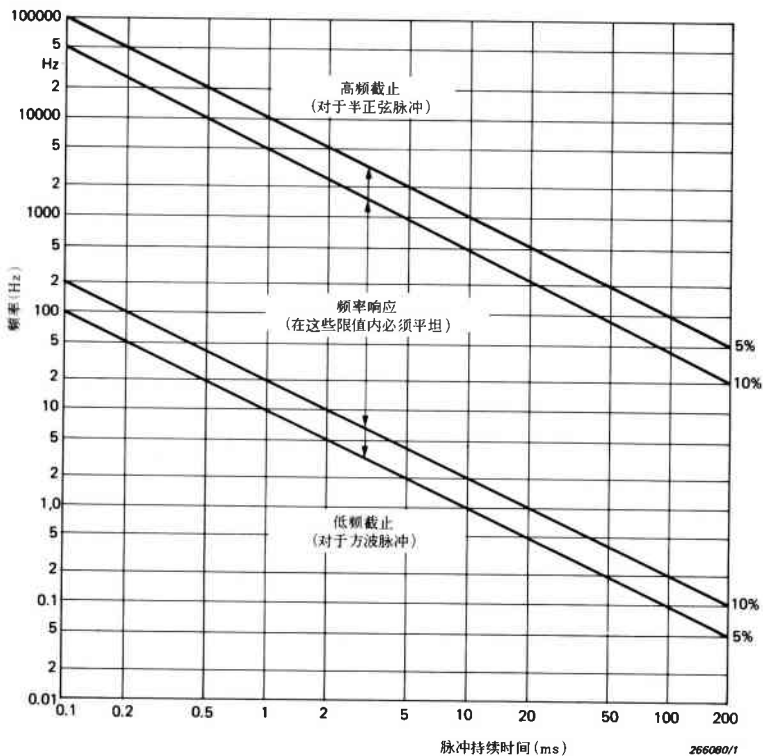


图2.16. 对脉冲持续时间为 T 的加速度测量，保持幅值测量误差分别小于5%和10%所要求的振动系统 - 3 dB 下限与上限频率

2.8.2. “振铃”

这个技术名词用来描述加速度计在测量有用频率范围之外的瞬态振动时引起的失真，失真信号的例子示于图2.17。由高频振动成分激起加速度计的共振，这是应该避免的。振铃的首次警告可能由前置放大器的过载指示显示。

“振铃”将在振动幅值峰值测量中造成误差。对于5%的峰值测量误差，加速度计的安装共振频率应该小于 $10/T$ ，其中 T 是瞬态信号的长度（以秒计）。

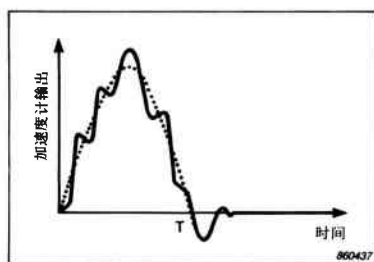


图2.17. 由于“振铃”引起的波形失真

加速度计的共振可经阻尼来减小振铃，以最佳使用测量系统的动态范围和带宽。这可用机械滤波器来安装加速度计（见4.5节），或把加速度计信号加到带低通滤波器的前置放大器来实现。在后面一种情况，滤波器必须具有 12 dB/倍频程的高频衰减斜率以及相当于 $1/2$ 加速度计安装共振频率 f_m 的 -3 dB 上限频率 f_u （即 $f_u = 0.5 f_m$ ）。这样给出的系统响应示于图2.18，保证对于持续时间 $T = 1/f_m$ 的半正弦波瞬态信号的幅值测量误差为小于10%。

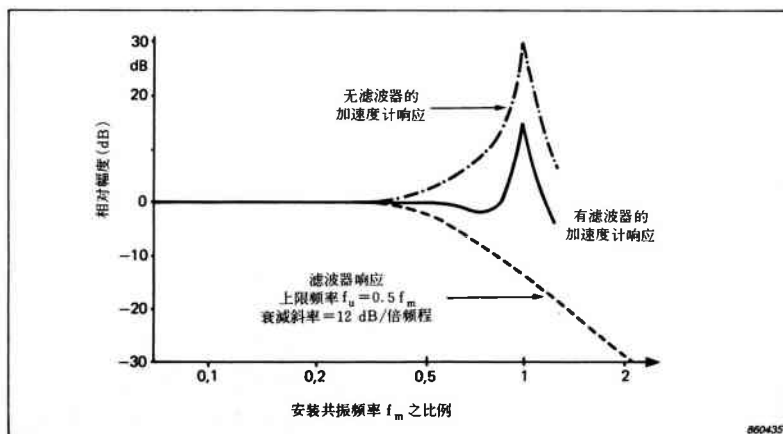


图2.18. 为测量半正弦型冲击脉冲（持续时间 $T = 1/f_m$ 秒），幅值误差小于10%时要求的抑制加速度计安装共振频率 f_m 所需的低通滤波器或前置放大器的响应

2.8.3. 零点偏移

考虑图2.19中二个相同的半正弦脉冲造成的加速度计输出信号。在两种情况下加速度计都产生了失真，测量动态电平与加速度计的最大加速度限值非常接近。

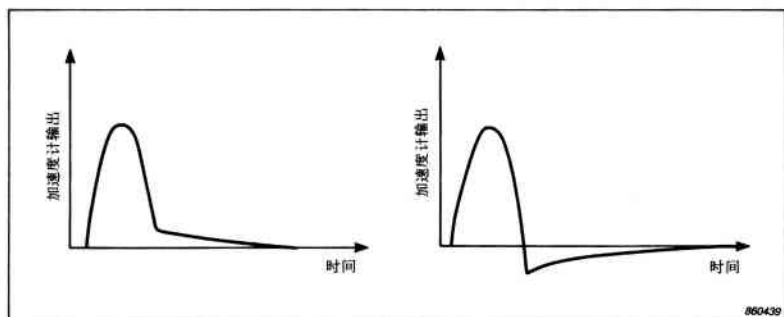


图2.19. 半正弦脉冲作用下加速度计和前置放大器的输出，由于高振级造成“零点偏移”

如果压电元件不视为完全的弹性材料，当作用于元件上的力突然减小时，分子不可能都回到受力前的状态。因此，在力消失时，元件仍产生缓慢衰减的电荷，直至前置放大器输出回到零，其速率取决于它的下限频率。这种现象随机发生，而且符号也是随机的。

从零点偏移到消失所需要的时间要比原来的脉冲宽度长得多，约有1,000倍之多。因此，如果用积分网络，会有很大的误差。

经常用机械滤波器来克服零点偏移。

备忘：零点偏移、“泄漏”和“振铃”是加速度计在其有用频率范围之外使用才会发生的问题。

3. 振动前置放大器

振动前置放大器的基本作用是把压电加速度计的高阻抗输出转换为低阻抗的信号，使其直接送至测量仪器或分析仪器中。

除此而外，这类前置放大器还具备下列功能，有的前置放大器具备下述所列功能中的几项，有的则具备下述所列的全部功能。

1. 使加速度计的输出信号与测量仪器的输入灵敏度匹配。
2. 为了得到所要求的整个系统的灵敏度而放大振动信号。
3. 对加速度计的输出信号进行积分以获得速度信号和位移信号。
4. 给出前置放大器输入，输出的过载报警信号。
5. 进行低频滤波和高频滤波以去除无用信号。

图3.1.所示是通用 B&K 振动前置放大器的完整系列，可选用的 B&K 前置放大器有下列几种形式。



图3.1. 通用 B&K 振动前置放大器系列

1. 每个独立单元均具备上述的多项功能，它们均能用电池供电也能采用外接电源。有关这些仪器的型号规格可参看附录 E。
2. 作为诸如振动计等测量仪器输入电路的一部分或作为磁带记录仪的输入组件等等，有关这类形式的仪器可参看附录 F。
3. 线驱动前置放大器与 1 和 2 中所述的有所不同，这种微型化的装置仅包含传统前置放大器的“前端”，它们可以组装在加速度计的內部，也可以装配在加速度计的上面或安置在加速度计附近。只需要一根两芯电缆或同轴电缆用于信号传送和用作电源线。线驱动前置放大器的增益是固定的，不能加以控制。

3.1. 前置放大器的设计和工作

与压电加速度计配用的典型的前置放大器有两种。

1. 电荷前置放大器，它们给出一个与输入电荷成比例的输出电压，但并不对电荷进行放大。
2. 电压前置放大器，它们给出一个与输入电压成比例的输出电压。

一般来讲，优先采用电荷前置放大器。从目前的 B&K 前置放大器系列可看出，在这些型号中只有 2650 型能既适用于电荷输入又适用于电压输入，这种前置放大器的设计不是用于通常的振动测量而是用于加速度计的校准。电荷放大器最明显的优点在于，无论是使用长电缆还是短电缆都不会改变整个系统的灵敏度。然后，采用电压前置放大器时，电缆长度有变化的情况下就必须对系统的灵敏度进行重新校准。有关这方面内容将在 2.6.1. 节中讨论。

3.2. 电荷放大器

电荷放大器采用了一个运算放大器的输入级。这个运算放大器的反馈回路上带有一只电容器以此形成一个积分网络对输入电流进行积分。这个输入电流是由加速度计内部的高阻抗压电元件上产生的电荷形成的。放大器的作用是对该电流抗衡，使形成与电荷成比例的输出电压。

3.2.1. 电荷灵敏度

电荷放大器的输出电压与输入电荷成比例，因而也与加速度计的加速度成比例。输出信号由跨接运算放大器的反馈电容加以控制。

图3.2. 表示压电加速度计和电荷前置放大器相连的等效电路。

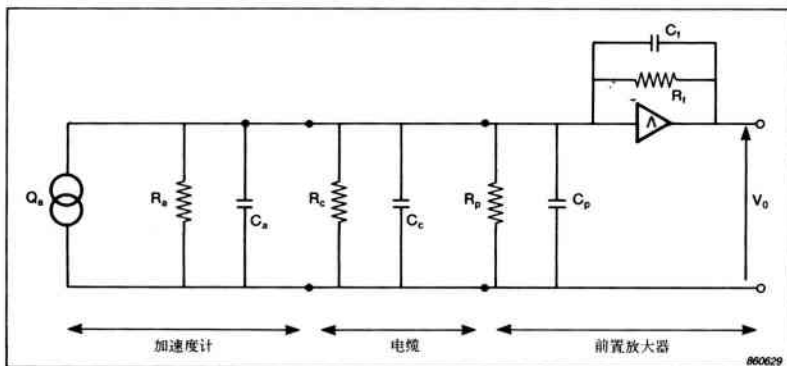


图3.2. 电缆连接加速度计和电荷放大器的等效电路

Q_a = 压电加速度计产生的电荷（与所加的加速度成比例）

C_a = 加速度计的电容值

R_a = 加速度计的电阻值

C_c = 电缆和连接插头的电容值

R_c = 电缆和连接插头的电阻值

C_p = 前置放大器输入电容值

R_p = 前置放大器输入电阻值

C_f = 反馈电容器

R_f = 反馈电阻值

A = 运算放大器增益

V_o = 前置放大器输出端电压

一般来讲，加速度计的阻值，前置放大器输入端的阻值和反馈通道的阻

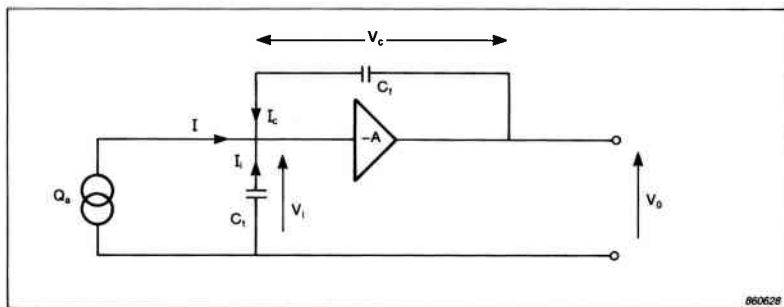


图3.3. 加速度计和电荷放大器相连的简化等效电路

值可以维持得很高。因此图3.2. 所示的电路可以再简化为图3.3. 所示，在此总的电容量和总的电流如下所述：

$$C_t = C_a + C_c + C_p$$

I = 从加速度计出来的总电流

I_i = 从 C_t 出来的电流

I_c = 运算放大器反馈回路上的电流

输入电压 V_i 和输出电压 V_o 之间存在下述等式关系：

$$V_o = -A V_i$$

再者， V_c 可简单地按下式计算：

$$V_c = V_o - V_i = V_o - \frac{V_o}{-A} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) V_o$$

一个理想的放大器其输入电流为零。在图3.3中运用基尔霍夫定律，则：

$$I + I_i + I_c = 0$$

这些电流值可用其它电路参数定义。 I 和压电元件产生的电荷有关：

$$I = \frac{dQ_a}{dt}$$

$$I_c = C_f \frac{dV_c}{dt} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) C_f \frac{dV_o}{dt}$$

$$I_i = -C_f \frac{dV_i}{dt} = \frac{1}{A} C_f \frac{dV_o}{dt}$$

用基尔霍夫等式代替这些表示方式则从加速度计出来的电流可以为：

$$\frac{dQ_a}{dt} = -\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_f \frac{dV_o}{dt} - \frac{1}{A} C_f \frac{dV_o}{dt}$$

这个等式可用积分来解决。把最初在放大器输出端出现的任何直流偏置电压相对应的常数假设为零。这个偏置一旦启用前置放大器时会很快消失。等式的解就为：

$$V_o = -\frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_f + \frac{1}{A} C_f} \quad (1)$$

要是考虑到 A 的值 ($\approx 10^5$) 则这个解可进一步简化为：

$$V_o = -\frac{Q_a}{C_f} \quad (2)$$

从上式可清楚看到，输出电压与输入电荷成比例，因此，也就是输出电压与加速度计的加速度成比例。前置放大器的增益由反馈电容值决定。

因为在理想的情况下 ($A \rightarrow \infty$) 输入电压为 0，所以输入电容值对输出电压值并不起作用。

$$V_i = -\frac{V_o}{A} = 0$$

所以有限的输入电阻值对输出电压没有作用。也就是说只有从加速度计和反馈电容器流到输入端的电流，并且这些电流值相等而极性相反。这就出现了从加速度计出来的所有电荷流到反馈电容器去的情况。

所有这些是较简单的模式，而包括 R_a 、 R_c 和 R_p 作用在内的真实模式又是怎样的呢？图 3.4. 就表示了这种真实的模式，在此图中算出了输入端的总电阻值 R_t 和总的电容量 C_t 。这样的线路便包含了图 3.2. 中的所有元件，则等式可写成：

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_p}$$

$$\begin{aligned}
 V_o &= -AV_i \\
 V_c &= \left(1 + \frac{1}{A}\right) V_o \\
 I_c &= C_f \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_c}{R_f} \\
 &= \left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[C_f \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_f} \right] \\
 I_i &= -C_i \frac{dV_i}{dt} - \frac{V_i}{R_i} = \frac{1}{A} \left[C_f \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_f} \right] \\
 \frac{dQ_a}{dt} &= -\left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[C_f \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_f} \right] - \frac{1}{A} \left[C_f \frac{dV_o}{dt} + \frac{V_o}{R_f} \right]
 \end{aligned}$$

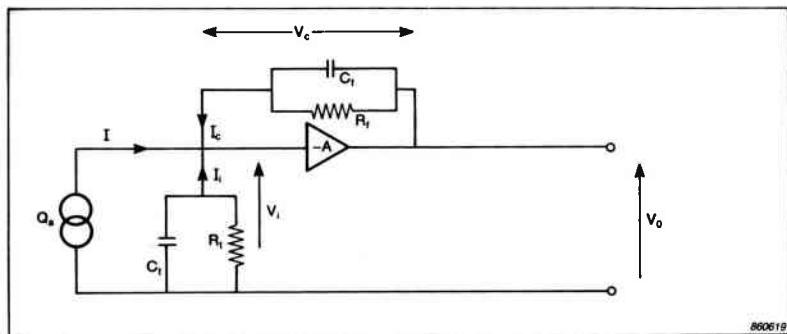


图3.4. 加速度计连接到电荷前置放大器的等效电路

这样的等式就不能采用前面那种模式中的那种简单的积分方法来解决。然而，假使电压和电流是随时间而谐和地变化则能得到解的。再者，在分析过程中直流等项及原始条件很快消失的情况可以忽略不计。则这个解就成为：

$$j\omega Q_a = -\left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[j\omega V_o C_f + \frac{V_o}{R_f} \right] - \frac{1}{A} \left[j\omega V_o C_f + \frac{V_o}{R_f} \right]$$

为了获得输出电压 V_o ，此式可改写成：

$$V_o = - \frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) \left(C_f + \frac{1}{j\omega R_f}\right) + \frac{1}{A} \left(C_f + \frac{1}{j\omega R_f}\right)} \quad (3)$$

再假设 A 和 R_f 均是很大，则上述的关系式可引伸为：

$$V_o = - \frac{Q_a}{C_f} \quad (4)$$

倘若 R_f 值是有限的，那样的话，表达式中就要包括它的作用：

$$V_o = - \frac{Q_a}{C_f \left(1 + \frac{1}{j\omega R_f C_f}\right)} \quad (5)$$

因此，由于 Q_a 与加速度计的加速度成比例，所以加速度计同前置放大器总的灵敏度可通过改变 C_f 加以控制。另外，最后的等式告诉我们，通过改变反馈回路的时间常数，电荷放大器的低频响应可以加以控制。

3.2.2. 下限频率

电荷放大器的低频响应是由运算放大器的反馈电路中的设定时间常数决定的，并不受输入端输入负载条件的改变影响。下限频率是通过改变反馈电阻阻值加以调节的。

所有加速度计都是自发电器件，因此实际上它们没有直流响应，从这个物理基本概念出发，就很显然，这种器件没有电功率输入也就没有电功率输出。作用在压电元件上的静力并不提供任何输入电功率。

为了充分理解电荷放大器（和电压放大器）的低频性能，有必要搞清简单的 RC 网络的工作情况。

电容器是积聚电荷的器件。电容量的定义是：电容器在单位电压作用下所积聚的电荷量，下列等式给出了一个用于压电元件的理想的电容器电压

V、电流 I、电荷 Q 和电容量 C 之间的关系。

$$V = \frac{Q}{C}$$

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

$$I = C \frac{dV}{dt}$$

如果一只理想的电容器被充电而得到某一电压 V_0 ，这个电压就会贮存在电容器二极之间。这是因为理想的电容器具有相当好的直流绝缘性能（例如：它们的绝缘电阻是无限大的）。然而，实际上在真实的电容中绝缘阻值是有限的，所积聚的电荷会漏掉，形成的电压会按指数规律下降。电压下降的速率由系统的常数 τ 决定。请参看图 3.5. 所示。

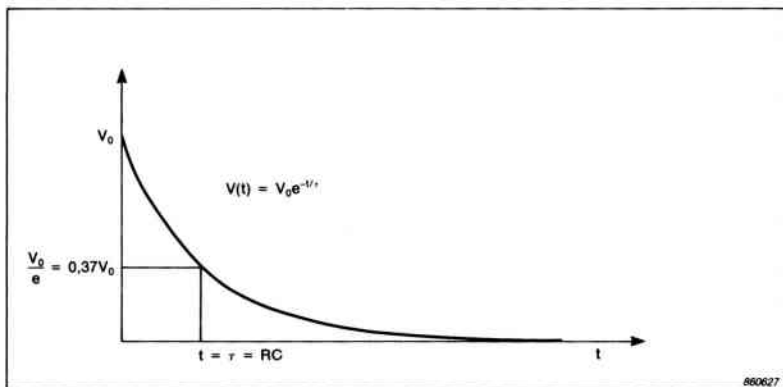


图 3.5. 电容器上电压按指数规律衰减说明了“时间常数” τ 这个概念

对于正弦波信号测量来讲时间常数 τ 显得尤为重要。它影响着系统的低频性能。把电荷源（压电元件）和几个 RC 网络相连并作为它的负载。如图 3.6. 所示。用单一电阻和电容代表几个电阻和电容的组合。

根据上述定义，电路的公式可以写成：

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{V}{R} + C \frac{dV}{dt}$$

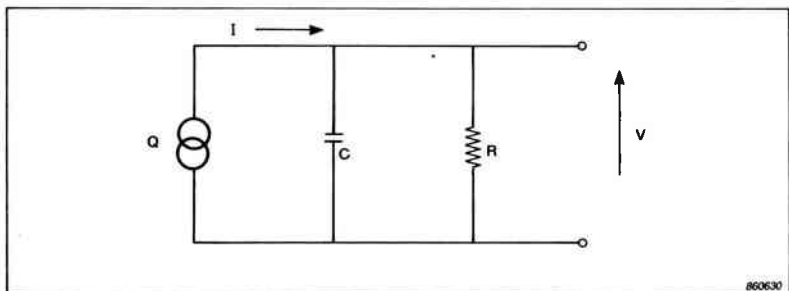


图3.6. 电缆和前置放大器的等效电容和等效电阻作为加速度计的负载的等效电路。
这个等效电路可用来确定前置放大器的低频性能

再者，如果假设这些电流和电压是谐和函数，那么可推导出这样的公式：

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{Q}{\left(1 + \frac{1}{j\omega RC}\right) C} = \frac{Q}{\left(1 + \frac{1}{j\omega\tau}\right) C} \\
 &= \frac{Q \left(1 + j\frac{1}{\omega\tau}\right)}{\left(1 + \frac{1}{\omega^2\tau^2}\right) C}
 \end{aligned}$$

为使分析起来方便，直流值和原始条件被略去不加考虑。复杂的表达方式告诉我们：输出信号的值 $|V|$ 和相位 ϕ 和下式所表达的输入信号有关：

$$\begin{aligned}
 \tan\phi &= \frac{1}{\omega\tau} \\
 |V| &= \frac{Q \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau}\right)^2}}{\left(1 + \left(\frac{1}{\omega\tau}\right)^2\right) C}
 \end{aligned}$$

式中，当 $\omega\tau = 1$ 时， $\tan\phi = 1$ ， $\phi = 45^\circ$ 和 $V = \frac{Q}{\sqrt{2} C}$

如图3.7. 所示，输入电压和输出电压之间的相位和幅值关系是 $\omega\tau$ 的函数。当 $\omega\tau = 1$ ($2\pi fRC = 1$) 时，频率为：

$$f_l = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

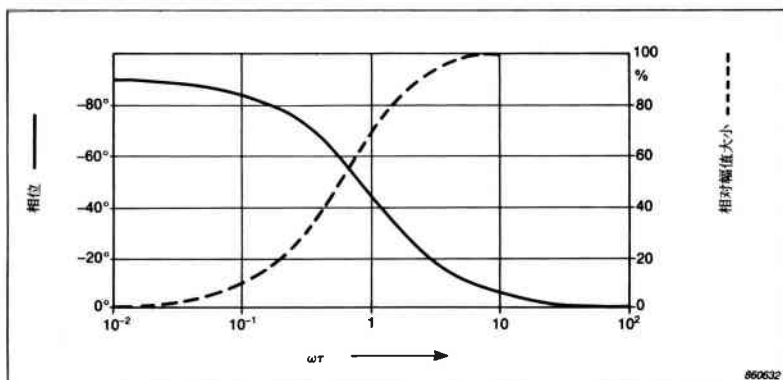


图3.7. 输入电压和输出电压之间的相位和幅值关系是 $\omega\tau$ 的函数

通常情况下这就称为下限频率（LLF），其特征为：输出信号电平下降3dB，并伴有45°相位变化。

现在，再回到电荷前置放大器这一内容来，参看3.2.1.节中的方程式（3）。LLF是由反馈电路的时间常数决定的，如 $\tau_f = R_f C_f$ 。输入信号与输出信号之间的相位差一般是180°（反相），而在LLF时相位还要滞后45°。从公式（3）中可知，电阻性输入负载在它的阻值没有达到与 R_f/A 差不多大小时是不会改变LLF的。这意味着若 C_f 和 C_i 的量值差不多，相对于简单的RC网络来讲，负载的影响通过 A 这个因子而降低了。

举例：如果要求LLF是1Hz，则 R_i 是多少？

假设 A 为 10^5 左右， C_f 为 1 nF，则：

$$R_i = \frac{1}{2\pi C_f}$$

$$R_i = \frac{1}{2\pi \cdot 10^5 \cdot 10^{-9}} = 1.6\text{k}\Omega$$

这个例子表明了电荷放大器下限频率在输入负载条件变化时的抗干扰能力。不过，要把加速度计、连接插头和前置放大器的输入降到举例中那样的量值是相当困难。即使把整个加速度计全部浸没在水中也做不到这一点。

B&K 电荷前置放大器提供的 LLF 可达到小于一个赫兹的数量级。对于长持续时间脉冲和准静态振动测量来讲，低频性能相当重要。然而要进行这样的测量，只能采用三角剪切[®] 加速度计，因为其它类型的加速度计在设计上就确定了它们会产生由环境诱发的低频噪声，这种噪声会把输出信号中的振动信号掩盖起来。

3.2.3. 由加速度计电缆引入的输入电容负载

电荷放大器的灵敏度对改变电缆长度而产生的电容量变化是没有多大影响的。在采用很长的电缆时，高频响应的衰减也是极微的。

已经指出，从电荷前置放大器出来的输出信号仅仅由反馈电容量 C_f 和压电元件产生的电荷量 Q_a 决定的。一个典型的电荷放大器中的 C_f 值通常在 100pF 和 10nF 之间，而典型的 1nF 给出输出灵敏度为 1mV/pC。除非 C_t 值变得与 AC_f 差不多大小，否则这种情况是不会改变的。现举一个简短的例子来说明电荷放大器所能承受电缆电容变化的能力。

举例：要使加速度计和前置放大器连接起来后电荷灵敏度的变化不大于 1%，所用电缆的最大长度是多少？

假设 C_t 和 C_a 都是 1nF， A 是 10^5 ，再代入 3.2.1. 节公式 (1)

$$V_o = - \frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) C_t + \frac{1}{A} C_t}$$

$$C_t = 0.01(A+1)C_f = 0.01(10^5+1)1\text{nF} = 10^3\text{nF} = 1\mu\text{F}$$

这个电容量相当于 100pF/m 的电缆长度达到 10,000 米。

前置放大器输入大的电容性负载对它的高频性能会有些轻微的影响。这是因为在高频情况下运算放大器的增益会减小。涉及电荷灵敏度定义的分析过程中假设 A 值是无限的，这样的假设必然是欠精确的。电荷放大器输出的减小由前面推导输出电压的公式给出：

$$V_o = - \frac{Q_a}{\left(1 + \frac{1}{A}\right) \left(C_t + \frac{1}{j\omega R_f}\right) + \frac{1}{A} \left(C_t + \frac{1}{j\omega R_f}\right)}$$

举例：假设在高频情况下，增益 A 值降到 10^3 ，反馈电容量 C_f 是 1 nF 。相应于 100 pF/m ，长度为 200 m 的传感器电缆有 20 nF 的输入负载，这个负载在频率响应曲线上使灵敏度降低 5% ，所以这种影响一般来讲并不是很重要。

图 3.8 显示了采用很长的电缆而使输入电容量增加，从而影响 B&K 电荷前置放大器的高频响应的情况。对于特殊情况可查阅有关说明书。

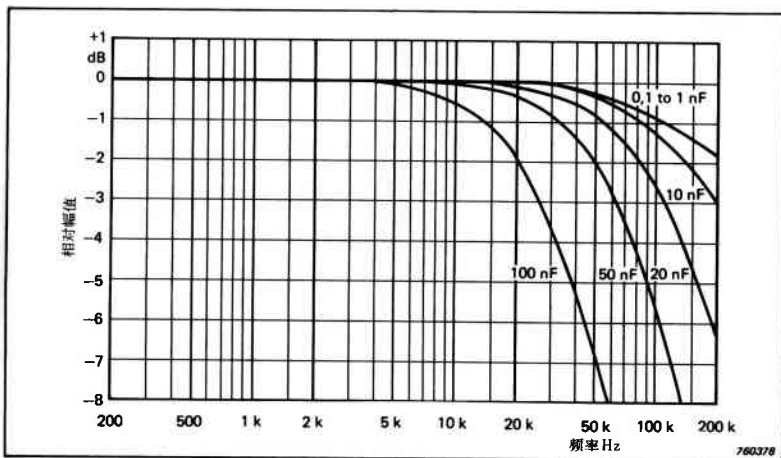


图3.8. 关于 B&K 电荷放大器输入负载电容量对高频响应的影响

3.2.4. 电荷衰减

虽然加入一只分路电容之后对电荷灵敏度的影响可忽略不计，而加入一只串联电容进去就会减少传感器的有效输出电荷。这就是说，当用高灵敏度的加速度计来测量大振动时就有必要这样做。由于在前置放大器输入端出现大量电荷，很可能使前置放大器过载，只要把仔细选择经过标定的电容器并联和串联在加速度计上，那么，在输入端的电荷就会被衰减。可参看图3.9。

B&K 经常有现成的电荷衰减器供选用。其中 WB0726* 和 WB0778* 可供选用，它们分别提供 12 dB 和 20 dB 的衰减量。

* 这些是 B&K 公司系统工程部开发的产品，不是标准产品。详情可通过您当地的 B&K 代理联系。

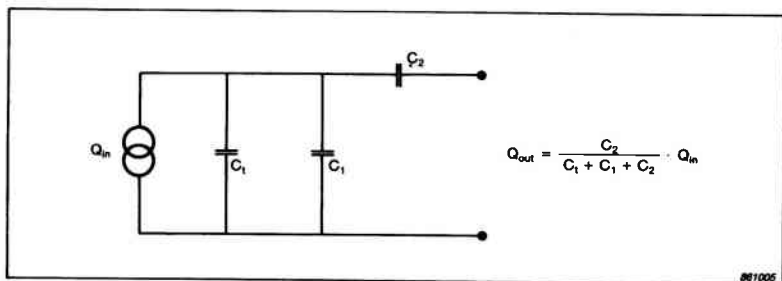


图3.9. 电荷衰减器的设计

3.2.5. 电荷放大器的噪声

使用很长的加速度计电缆以及低增益设定都会增加电荷放大器的噪声，因此使测量值的信噪比减小。

如果输入端的电阻性负载明显减小也会使噪声增加。

运算放大器内部噪声源的模式如图3.10所示，这种模式并不包括外部噪声源的作用，譬如：电缆中摩擦生电效应，接地回路电压和电磁干扰。这些量将在3.6节中进行探讨。

Z_f = 加速度计和电缆的等效阻抗

Z_f = 反馈回路的等效阻抗

e_n = 噪声电压

i_n = 噪声电流

V_o = 输出电压

在压电源处于高阻抗和主要是电容性反馈的情况下，电流噪声是可以略去不计的。从3.2.1节中可看到一个虚地和在运算放大器反向输入端没有电流流过。因此：

$$I = \frac{-e_n}{Z_f} = \frac{e_n - V_o}{Z_f}$$

$$V_o = e_n \left(1 + \frac{Z_f}{Z_f} \right)$$

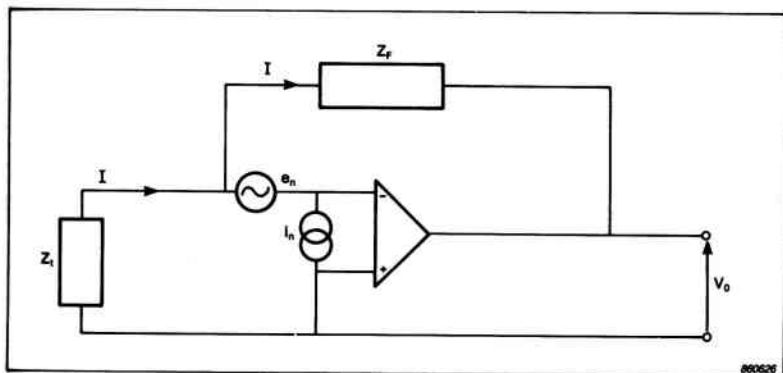


图3.10. 连接到电荷前置放大器的加速度计的等效电路，前置放大器内部的所有噪声源都已用在输入端的电压源和电流源表示

为了把此输出电压转换成用噪声源的信号表示，则必须除以放大系数， Z_f/Z_i 。

$$\begin{aligned} e_s &= -V_o \frac{Z_i}{Z_f} \\ &= -e_n \left(1 + \frac{Z_i}{Z_f} \right) \end{aligned}$$

在中频范围内，在噪声和在输出端的阻抗都是电容性的，所以：

$$\frac{Z_i}{Z_f} = \frac{C_f}{C_i}$$

这里

$$\begin{aligned} C_i &= C_a + C_c + C_p \\ e_s &= -e_n \left(1 + \frac{C_f}{C_i} \right) \end{aligned}$$

进而把电容性噪声源 C_f 乘上 C_i ，便可转换成一个等效电荷噪声 q_f

$$q_f = e_s \cdot C_i = -e_n (C_i + C_f)$$

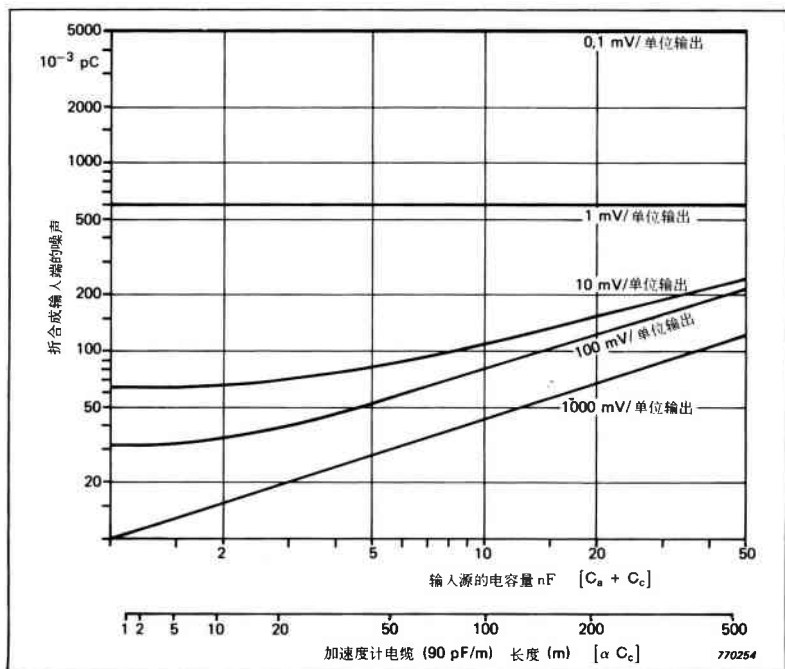


图3.11. 从一台 B&K 电荷放大器出来的 2 Hz - 100kHz 宽频带噪声与输入源电容量的函数关系

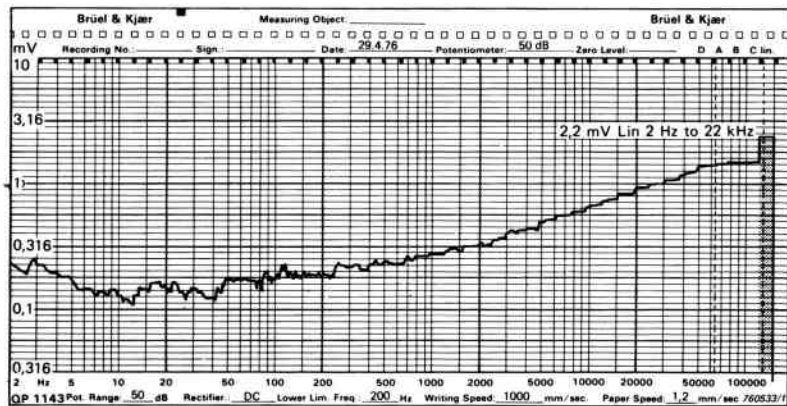


图3.12. 对 B&K 电荷放大器产生的噪声所作的 $\frac{1}{3}$ 倍频程分析

从这里可以看到，虽然输入端加电容性或电阻性负载，灵敏度和 LLF 并没有重大的改变而电荷噪声会因为 C_t 和 C_f 的增加而增加。因此，用很长的输入电缆就会使信噪比不可避免地减小。图3.11给出了对一台特定的 B&K 电荷放大器输入端噪声电平对输入电容量函数的相依关系。其它型号也呈现出相类似的相依性。

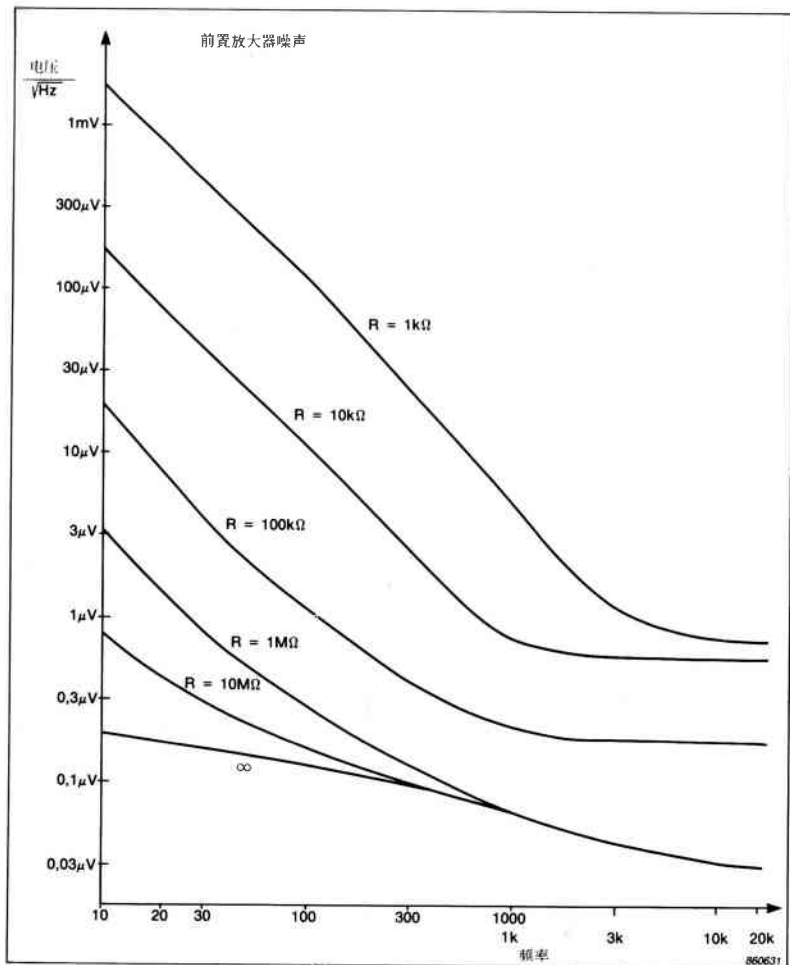


图3.13. 电荷放大器的输入端电阻值与噪声的关系

当 C_f 决定前置放大器的增益时，较低的增益设定就会有较高的噪声存在，各种设定需要较大的反馈电容，应用高增益的加速度计和前置放大器也设定为高增益则就会得到较好的信噪比。

有一点必须记住：当电缆受到机械振动时，它自身就有可能产生噪声。因此，一般来讲应该采用 B&K 低噪声电缆。在低振级测量时尤其应该这样。电缆应稳妥安全地进行固定，参看 4.6 节。

在低频情况下 ($<100\text{Hz}$)，放大器的噪声的增加通常是与频率成反比。这是运算放大器的一种特性，一般情况下可用一只高通滤波器使其降低。图 3.12 给出了 B&K 电荷放大器产生噪声的 $1/3$ 倍频程分析。

若输入端的电阻性负载值降到 $10\text{M}\Omega$ 以下，电荷放大器的噪声开始增加，在低频情况下其变化非常显著。然而，对噪声源所作任何一种分析都需要有关输入组件和它们连接情况的资料。图 3.13 给出了窄频带前置放大器和输入电阻之间根据试验推导出来的关系。噪声以滤波器带宽平方根分之电压值表示。

3.3. 电压前置放大器

电压前置放大器的输出电压与输入电压值成比例并且加速度计是被处理为一个电压源。电缆电容量的变化引起整个灵敏度的变化。输入电阻的变化会使低频性能发生变化。

电压前置放大器检出由振动而随之出现的加速度计电容上的电压变化，并产生与此成比例的输出电压。电压前置放大器的自身设计是较简单但与电荷前置放大器相比它有一些操作上的缺点，因为 B&K 只生产一种具有电压输入选择的前置放大器，所以对其工作原理及说明只作一般介绍。

3.3.1. 电压灵敏度

图3.14所示是一个加速度计连到电压前置放大器去的等效电路，把这个等效电路与图3.2 中所示电路作一比较即可看出除了运算放大器的连接方式以外其它都是一样的。在这种情况下运算放大器的增益为1 ($V_o = V_i$) 用作为一个电压缓冲器。用 C_p 和 R_p 代表很高的输入阻抗。所用术语与图3.2 和图3.3相同。

在图2.8中曾告诉我们：当加速度计不接电缆，不与前置放大器相连时，它有一个输出电压 V_a

$$V_a = \frac{Q_a}{C_a}$$

R_a 是一个很高的并联电阻，因此可以忽略。根据3.2.2节所述，在前置放大器输入端的电压可直接写成下式：

$$V_i = \frac{Q_a}{C_a + C_c + C_p}$$

因此，

$$V_o = V_i = V_a \frac{C_a}{C_a + C_c + C_p}$$

这种表达方式可用电荷灵敏度 $S_{qa} [\text{pc}/\text{ms}^{-2}]$ 和电压灵敏度 $S_{va} [\text{mV}/\text{ms}^{-2}]$ 来表示。

$$\begin{aligned} S_{va} &= \frac{S_{qa}}{C_a + C_c + C_p} \\ &= S_{va(\text{开路})} \frac{C_a}{C_a + C_c + C_p} \end{aligned}$$

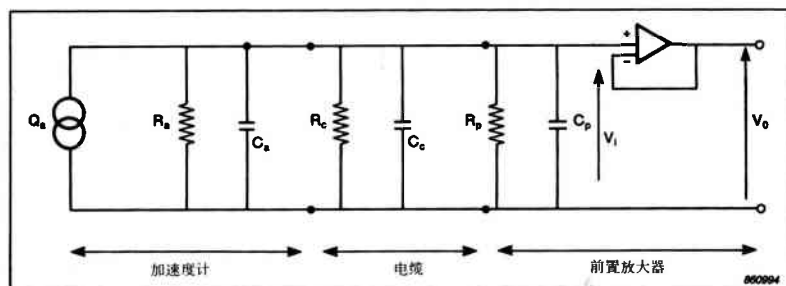


图3.14. 用压电加速度计作为一个电压源的电压放大器的等效电路

这里 $S_{va(\text{开路})}$ 指开路（没有负载）的加速度计电压灵敏度。

因为电荷灵敏度 S_{qa} 和 C_a 是加速度计的常数，则电压灵敏度 S_{va} 取决于电缆的电容量。很显然这是一种不希望有的情况，因为一个加速度计只有连上电缆才能使用。而它们要在生产厂里进行校准，假如说明使用电压灵敏度和电压前置放大器的话。如果更换电缆就需要重新校准。下面一个简短的例子能进一步的加以说明。

举例：在进行振动测量期间，对电缆提出的要求是长度长一些，强度好一些。使用中的电缆是 B&K 1.2m 长的标准电缆 AO 0038，而要更换上一根 3 m 长的加强电缆 AO 0122。请计算组合后的电压灵敏度。

$$\begin{aligned} \text{AO 0038 电缆的典型电容量} &= 110 \text{ pF} \\ \text{加速度计（包括电缆）的电容量} &= 1117 \text{ pF} \\ \text{电荷灵敏度} &= 9.8 \text{ pC/ms}^{-2} \\ \text{电压灵敏度} &= 8.76 \text{ mV/ms}^{-2} \end{aligned}$$

在此，可以算出压电元件自身的电容量 C_a

$$C_a = 1007 \text{ pF}$$

备件电缆 AO 0122 的典型电容量 C_c 是 260 pF，因此，新的电压灵敏度就容易算出：

$$\begin{aligned} S_v &= \frac{9.8 \cdot 10^{-12}}{(1007 \cdot 10^{-12}) + (260 \cdot 10^{-12})} \\ &= 7.73 \text{ mV/ms}^{-2} \end{aligned}$$

电缆一改变，电压灵敏度就下降了 11%。

使用不同的电缆不仅是灵敏度和输入电容的依存性而造成很大的不方便，而且意味着较长的电缆会使信噪比降低。用了特别长的电缆，无负载电压中只有一小部分加到放大器的输入端。

3.3.2. 下限频率

3.2.2 节中所述低频性能处理方法可再用于说明下限频率（-3dB点），可用这样的公式表示：

$$f_i = \frac{1}{2\pi R_t C_t}$$

这里

$$C_t = C_a + C_c + C_p$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_p}$$

当频率低到小于或等于 1 赫兹时，为了保证 LLF 低到足以正常运行，RC 的乘积必须非常大。理论上讲，有二种方法：

1. 把总的电容量尽可能地加大。因为 C_a 是加速度计的一个常数，要增加 C_c 量值就要加长电缆。这样做并不实用，因为这样做的结果使电压灵敏度降低并损失了动态范围。
2. 设计一个具有高的输入电阻的前置放大器。这里采用电压前置放大器的方法。然而，由于某种原因假如输入端电阻降低了，LLF 就会增加。如果潮气穿到加速度计的输出连接插头时就会发生这种现象。漏阻降低，这个分路电阻加在输入端使输入电阻变得更低。

3.3.3. 电压前置放大器内的噪声

不象一个电荷前置放大器产生的噪声那样，电压前置放大器产生的噪声与输入电容量无关。因此，增益的设定和电缆的长度都不会改变输入端的噪声。然而，这并不是真正的优点，因为当电压灵敏度随电缆长度增加而降低时，信噪电平变坏了。

3.4. 前置放大器输出电缆

无论是电荷还是电压放大器，有一点都很重要，就是它们都要有能力提供足够的输出电流去驱动一台测量仪器。形成这样的驱动电流的必需的电压是在运算放大器输出端引出来的，并经过电缆的阻抗。

在前置放大器输出端有一个大的电容量负载时，会出现最大输出电压摆程的限制。这在采用非常长的电缆和要求高频特性的情况下会成为一个问题。譬如，在频率为 10kHz，当负载超过 20nF（相应于 100pF/m 的 200m 电缆）时，这个限制将出现，下面来说明这种情况。

在某些情况下，这个限制直接由前置放大器的最大输出能力造成的。如果最大输出电流是 8 mA（典型的）负载是 20nF，则在 10kHz 时可得到约 796Ω 的阻抗并形成 6.37V 的峰值电压。因此，如果结合振级，加速度计灵敏度和前置放大器灵敏度后，将产生一个大于此值的输出，就要进行衰减。输出电缆电容对 B&K 电荷放大器高频响应的影响如图 3.15 所示。

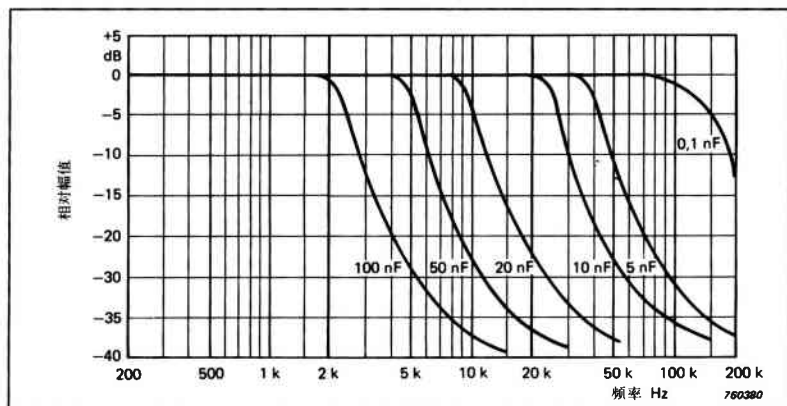


图 3.15. 输出负载电容对 B&K 电荷前置放大器高频响应的典型影响

3.5. 线驱动系统

一个线驱动放大器基本上是电荷或电压放大器的“前端”，它可以装在加速度计内部。B&K 线驱动加速度计的品种情况可参看图 3.16。一只单独的线驱动放大器也可直接和常规的加速度计装在一起，也可放置在附近一个地方。远距离使用 2644 型其优点是：和装在加速度计内部或装在加速度计顶上的线驱动型式相比，它能在高温下测量较高振级的振动。图 3.17 所示就是 B&K 2644 型线驱动放大器。

线驱动系统的电源必须由外部线驱动供电电器供给。为驱动 B&K 线驱动加速度计和前置放大器可用 2813 型线驱动供电电器。它是具备同时向二个线驱动加速度计供电的电池供电装置。图 3.18 展示了 2813 型供电电器的外观情况。

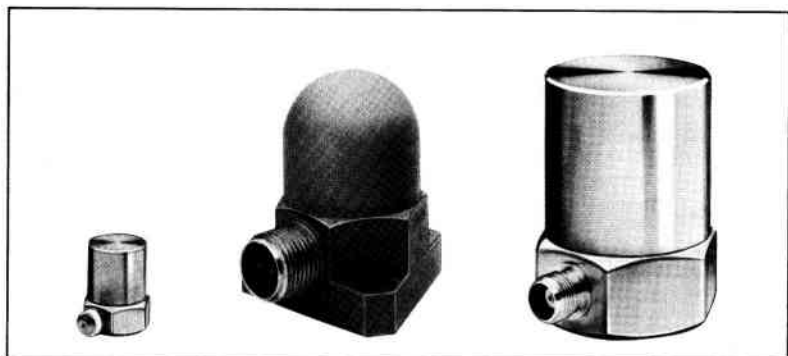


图3.16. B&K 线驱动加速度计 (从左到右) 4390型, 8317型和8318型, 照片的比例分别为 1:1 , 1:1 和 1:2



图3.17. 把2644型线驱动放大器装在一个加速度计顶上

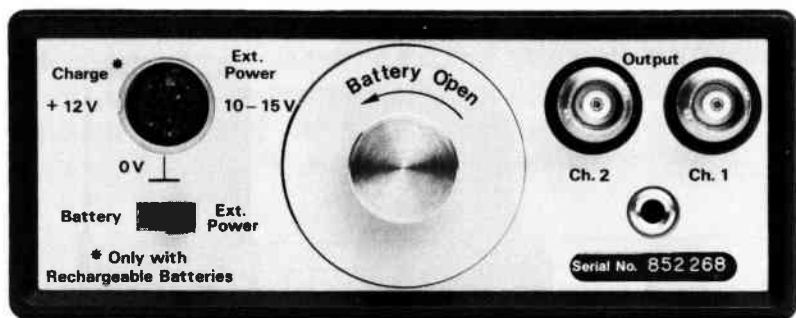


图3. 18. 2813型二通道线驱动供电器

2813型的输出电压用作测量仪器或分析设备的输入。一种相类似的线驱动供电器也已装入 B&K 振动和信号分析仪器。

要把前置放大器装入一个加速度计里去，目前尚无办法。这样的系统开始设计的目的是对使用石英为压电元件的非常低的电容量和低灵敏度的加速度计改善性能。而这种加速度计对电缆的摩擦电噪声和由电缆带人的电磁噪声都很敏感。

虽然，采用压电陶瓷的新型加速度计和低噪声的传感器电缆能解决上述大部分问题。它们仍具有这样的优点：可用装入加速度计内的前置放大器或较强的噪声环境中采用装在加速度计附近的线驱动前置放大器。当然，这类线驱动前置放大器常常用于工业检测设备上。它们具备这样的优点：能用特别长的廉价电缆来传送低阻抗信号。这种系统对于接地回路的电压和电缆噪声的灵敏度和其它类型的振动前置放大器作比较，它们是比较低的。详细的情况将在3.6节中加以讨论。

某些线驱动的设计由于内部电子线路的适应性较差因而性能也就不太好。然而，B&K 优先运用了厚膜电路技术，在 B&K 的加速度计中装入了高质量、高性能的前置放大器。

然而，加速度计中加入了这样的电子部分使加速度计的温度范围和动态使用范围受到了限制。这种限制也存在于装在加速度计顶上的线驱动前置放大器。在对轻型面板或相似的结构进行测量时也要对加入的前置放大器质量加以考虑。

过去曾应用过各种不同的线驱动设计，而目前几乎所有的系统都采用双芯电缆。双芯电缆把前置放大器连到电源上并且又送电源又传送振动信号。供电源不是恒流源便是恒压源。二个系统是不能互换的。B&K系统应用一个恒压源，并应用电源电流调制方式传输振动信号，这个系统具备比恒流源系统更好的性能。

3.5.1. B&K 线驱动加速度计和线驱动供电器

一个线驱动加速度计的灵敏度是用装有线驱动放大器输出端的电流灵敏度 ($\mu\text{A}/\text{ms}^{-2}$) 表示。供电器输出端的最终灵敏度可以简单地将电流灵敏度和供电器的灵敏度 ($\text{mV}/\mu\text{A}$) 相乘而得到，单位是 mV/ms^{-2} 。

例如：灵敏度为 $3.16\mu\text{A}/\text{ms}^{-2}$ 的一个线驱动加速度计与一台 2813 型线驱动供电器连接后，总的灵敏度就是 $3.16\text{mV}/\text{ms}^{-2}$ 。

3.5.2. B&K 线驱动放大器和线驱动供电器

加速度计的电荷灵敏度 (pC/ms^{-2}) 首先通过 2644 ($\mu\text{A}/\text{pC}$) 的灵敏度在 2644 的输出端转换成电流灵敏度 ($\mu\text{A}/\text{ms}^{-2}$)。再如上节所述那样，用供电器灵敏度乘以 2644 的输出便得到单位为 mV/ms^{-2} 的值。

例如：灵敏度为 $3.16\text{pC}/\text{ms}^{-2}$ 的一个加速度计，当它与 2644 和 2813 连用时，能得到和上述例子中一样的灵敏度 $3.16\text{mV}/\text{ms}^{-2}$ 。

3.6. 各种不同振动前置放大器系统灵敏度和外部噪声源的比较

在多通道测量的设置中接地回路和长电缆的使用往往是存在问题的，因此对了解测量系统对外部噪声的比较灵敏度是很重要的。应选择最佳的系统以适应这种环境。

现对下列系统作一比较。

1. 按常规接地的加速度计接一台电荷前置放大器（如：没有绝缘的）。
2. 接地的加速度计与采用“浮地”输入的电荷放大器相连。
3. 采用恒压源和调制电流的 B&K 线驱动系统。

4. 采用恒压源，调制电流和一台“浮地”输入的 B&K 线驱动系统。
5. 采用恒流二极管电源（B&K 并不供应此产品）的电压线驱动系统。
6. 用差分电荷前置放大器的平衡加速度计。

除开这些系统外，采用绝缘安装技术（例如：云母垫圈）或加速度计配用电绝缘基座之类的长处也要加以检验。

在下述的分析中，我们假设输入端的噪声由二个因素的综合而引起的。

1. **摩擦电效应。**如果同轴电缆的机械运动不加以限制它们都会生成一种电荷。为了在分析过程中把分析结果作一比较，电缆在下面的各种情况下都导致产生一个 100pC 的电荷噪声 q_n ，在分析过程中，这种摩擦电效应可以模拟为一个完善的电荷源。如果电缆并没有用夹子夹住在振动面上而且又没有采用低噪声电缆，那么这种现象就变得更明显了。

注意： 100pC 的摩擦电电荷是一个极端的情况，在此用这个值，仅是用以系统之间作比较时的一种手段。

2. **接地回路。**在大的机器设备中，常常存在着机器外壳不在地电位的可能性，因此，加速度计的外壳和电缆的屏蔽层也都不在地电位。这样，沿着电缆就存在着一个压降。为了比较分析中所得结果这目的，我们假设这个压降为 1V 。

另外，当在强交变磁场的地区进行操作时，电缆上就会出现由屏蔽层电磁感应所生成的噪声。然而，这个噪声很少能达到可以和上述两个量作比较的程度。

无论在哪种情况下，噪声指的是在仪器链中以合适的单位表示最后仪器的输入量（如：电荷前置放大器的等效电荷，恒压线驱动供电器的等效电流和恒流线驱动供电器的等效电压）这些值乘以最终仪器的灵敏度便可转换成总的噪声灵敏度。

为了使这些系统相互间的比较简化，我们把下列分析结果以表格的形式先列出。灵敏度都以不加绝缘措施的加速度计和常规电荷放大器相连的情况为基础，用分贝作单位来表示。因此负号表示一个系统具备对外部噪声有较强的抗干扰能力。参看表3.1。

加速度计 + 前置放大器说明	相对于外部 噪声的灵敏度 (dB)		加速度计带有绝缘 基座对相对于外部 噪声的灵敏度 (dB)	
	接地回路 噪声	摩擦电 噪声	接地回路 噪声	摩擦电 噪声
常规加速度计 接地输入电荷放大器	0 (参考值 1000pC/V)	0 (参考值 100pC)	-130	0
常规加速度计 “浮地”输入电荷放大器	-70	0	-70	0
B&K线驱动加速度计 B&K线驱动供电器	-26	-80	-154	-80
B&K线驱动加速度计 “浮地”输入B&K线驱动 供电器	-70	-80	-86	-80
线驱动加速度计 恒流线驱动供电器 (非B&K产品)	0	-80	-130	-80
平衡加速度计 差分电荷放大器	-60	0	-60	0

T01158GB0

表3.1. 几种加速度计/前置放大器对外部噪声的抗干扰能力的比较

表中给出二个参考值：一是对接地回路噪声的灵敏度，另一个是对摩擦电噪声的灵敏度。灵敏度的比较只能在同一类型噪声源之间进行和计算。参考值在表中列出。

3.6.1. 接地的加速度计和电荷前置放大器

图 3.19. 表示这种设置的等效电路，其中已引入了电荷噪声源和电压噪声源。由于在前一节中应用了电荷、电压和电容量之间的基本关系，欧姆定律和对噪声情况进行了假设，则使对前置放大器用输入端等效电荷噪声来表示就显得并不是一件难事了。每一个噪声源都被认为是独立的。

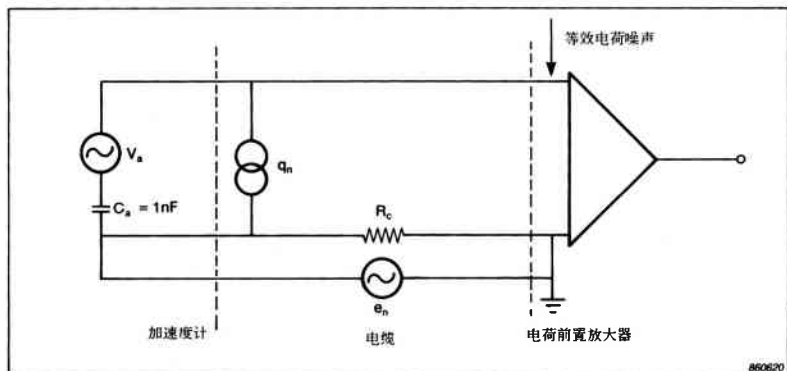


图3.19. 常规接地的加速度计与常规接地的输入电荷放大器相连的简化等效电路

接地回路噪声

很简单，它是噪声电压和加速度计电容量 ($C_a = 1nF$) 的乘积。如 $1000pC/V$ 。

摩擦电噪声

为了和其它例子作比较起见，我们规定这个量为 $100pC$ 。

由接地回路造成的噪声比由于摩擦电造成的噪声要大得多。

3.6.2. 接地的加速度计和电荷放大器 (“浮地”输入)

2651型电荷放大器相对于上面一个“接地”输入而言有一个称之为“浮地”输入可供选用。这种“接地”输入被用在 B&K 的各种前置放大器上。当第二级运算放大器被接到前置放大器的输入电路上时，电路分析就有点复杂了。这种形式的等效电路如图3.20所示。

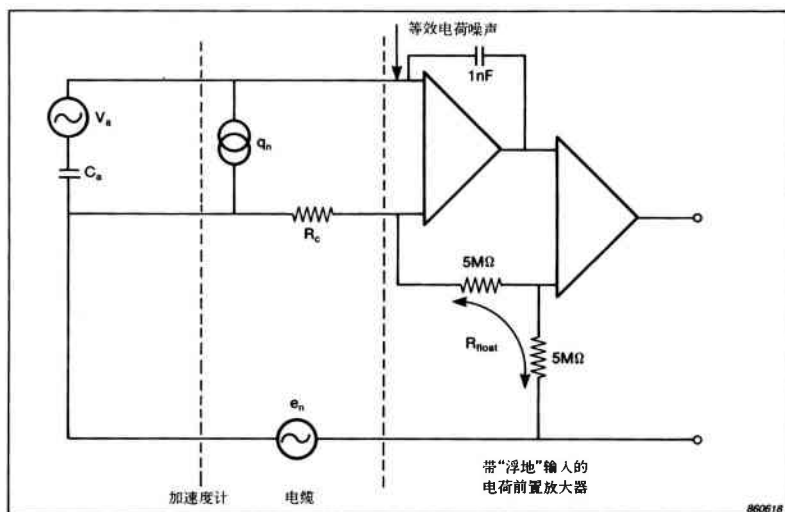


图3.20. 常规接地的加速度计与一个带有“浮地”输入的电荷放大器相连的简化等效电路

接地回路噪声

接地回路噪声的计算包括了运用第二级运算放大器的共模抑制比 ($CMRR$)。在此情况下, $CMRR$ 值大致为 70dB (一个 0.3×10^{-3} 因子)。在第二级运算放大器前来自电缆的噪声电压被分布在电缆电阻 R_c 和对地组合的高电阻 R_{float} 上, 几乎所有的压降都在 R_{float} 上, R_c 的典型值为 $0.05 \Omega/m$ 。相当于这个“浮地”放大器输出的等效电荷是除以 1 mV/pC 来确定的, 它即是这个电荷放大器的灵敏度。

则在输入端等效电荷噪声现在可写成：

$$C_a \frac{R_c}{R_{float} + R_c} \cdot e_n + \frac{e_n \cdot CMRR}{1 \text{ mV/pC}} \cdot \frac{R_{float}}{R_{float} + R_c}$$

把有关值代入这个等式并假设电缆长度为 200 米, 那么接地回路噪声灵敏度就是 0.301 pC/V 。

摩擦电所致的噪声

它不受第二级运算放大器的影响, 因此在输入端它仍然是 100 pC 。

由此可见，采用“浮地”输入后，可有效地消除由接地回路带来的噪声，着重考虑的是摩擦电所致的噪声。

3.6.3. B&K 线驱动放大器和供电（接地输入）

图3.21所示是一个线驱动加速度计或与加速度计相连的线驱动供电器，如2813型供电器或一台 B&K 分析器的等效电路，在电源输入端处的等效电流噪声必须注出，线驱动放大器的灵敏度固定在 $1 \mu\text{A}/\text{pC}$ ，线驱动放大器的输出阻抗设定在 $20\text{k}\Omega$ 。

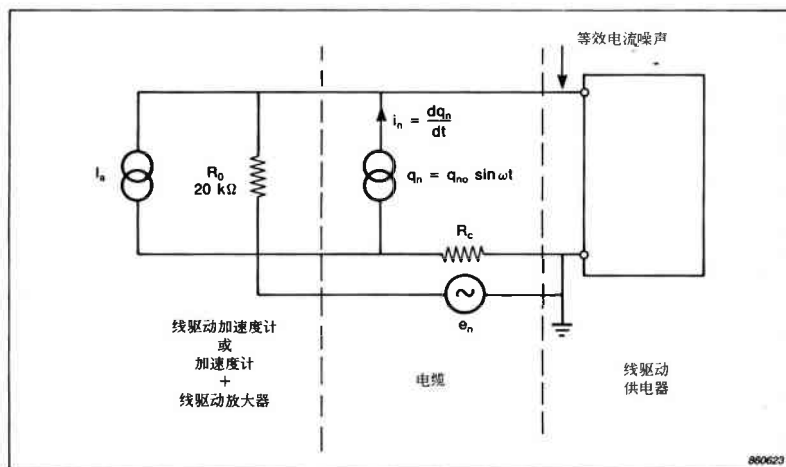


图3.21. 接地后的 B&K 线驱动加速度计和 B&K 线驱动供电器连接的简化等效电路

接地回路噪声

$$Q = \frac{e_n}{R_0 \cdot 10^{-6} [\text{A}/\text{pC}]}$$

除上 $[\text{A}/\text{pC}]$ 后，就轻而易举地把供电器输入端的等效电流噪声转化成线驱动放大器输入端的等效电荷噪声。这就得到了一个 $50\text{pC}/\text{V}$ 的等效噪声灵敏度。

摩擦电所致的噪声

如果是由电缆的低频谱和机械激励而产生出来的，则由于摩擦电效应电流 i 可以假设为一个谐和变化量。那么，输入到供电器的噪声电流就这样表示：

$$i_n = \frac{dq_n}{dt} = \omega q_{n0} \cos \omega t$$

当要把供电器的灵敏度也归入的话，这个式子就给出一个在 16Hz ($\omega = 100$) 时摩擦电噪声灵敏度 10^{-2} pC，此值随频率增加而加大。要想得到 3.6.1 节中常规电荷放大器的那样摩擦电所致噪声的量，那么电缆的激励频率应是 160kHz。所以与常规的电荷放大器相比，线驱动系统对摩擦电噪声这一性能作了极大的改进。

在此，也可看出，由接地回路产生噪声的干扰是摩擦电效应所致噪声的干扰的几千倍。与常规的电荷放大器相比，线驱动系统对整个噪声具备非常强的抗干扰能力。甚至在“浮地”电荷放大器，存在着较高的摩擦电所致的噪声情况下，线驱动系统的抗干扰能力仍然是极优的。

3.6.4. B&K 线驱动放大器和供电器（“浮地”输入）

把线驱动供电器的输入采用象 3.6.2 节中电荷放大器所用的相似方法“浮地”起来是有可能的。2813 型便是具备这一功能的设备，它的等效电路如图 3.22 所示。除了有一个等效浮地电阻 R_{float} ($\approx 20\text{k}\Omega$) 存在外，它和以前的情况一样。这是由 2813 型中一个运算放大器形成的。接地回路电压还是分布在 R_c 和 R_{float} 之间，2813 型的共模抑制比为 70dB，并且电缆长度假设为 200 米。

接地回路噪声

$$q_n = \frac{e_n \frac{R_c}{R_{float}}}{R_o [\Omega] 10^{-6} [A/pC]} + \frac{e_n [V]}{CMRR 1 [mV/pC]}$$

以此式计算，对接地回路电压的灵敏度只有 0.325 pC/V，它可与用“浮地”输入的常规电荷放大器比较。

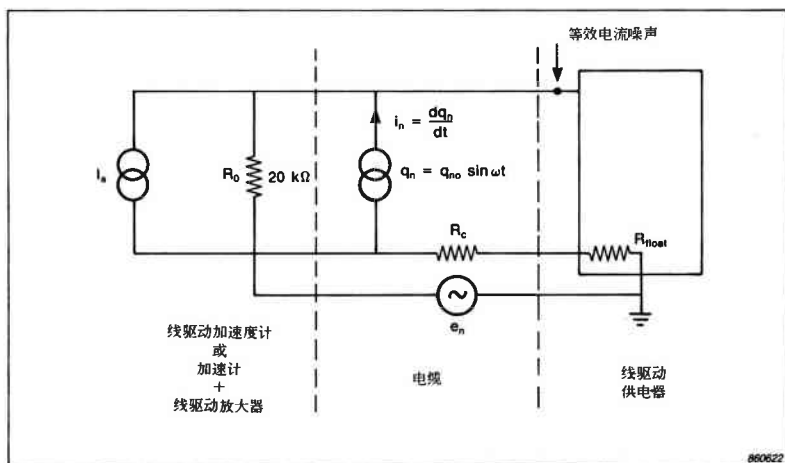


图3.22. 已接地的 B&K 线驱动加速度计与一台带有“浮地”输入的 B&K 线驱动供电器连接的简化等效电路

摩擦电所致噪声

加进浮地输入这一条件对摩擦电的噪声来讲并不改变灵敏度，得到和前一节一样的结果。

3.6.5. 以恒流电源为基础的线驱动系统

B&K 并不采用这种系统。这种电源比 2813 型中所用的恒压、调制电流电源简单。要强调的是电缆的噪声是由电磁场引起的。如果使用廉价的双芯电缆时情况尤为明显。由此可见，以恒流电源为基础的线驱动系统不能象 B&K 系统那样对电缆噪声具备抗干扰能力。当存在着厉害的电场时，无论选用哪种线驱动系统都必须要求用同轴电缆。上述几点都很重要，因为线驱动加速度计的主要长处应该是对电磁场作用的抑制和使用廉价的双芯电缆的可能性。

图3.23所示为一恒流系统的等效电路图。

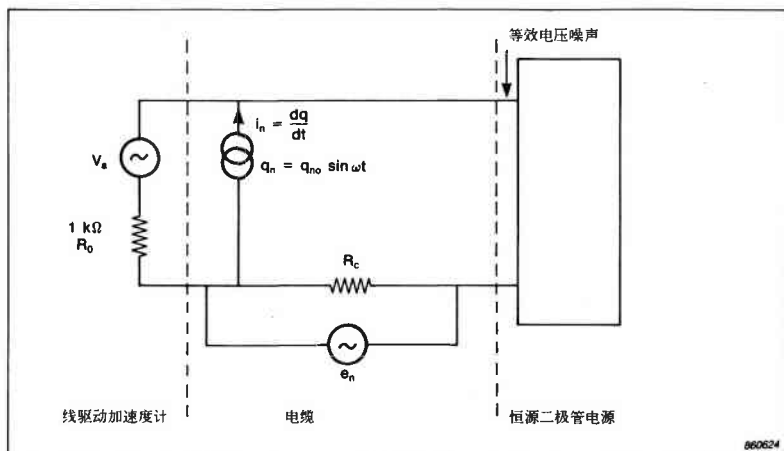


图3.23. 以恒流电源为基础的线驱动系统的简化等效电路

接地回路噪声

接地回路电压完全是加在电源供电器的输入端。如果线驱动放大器的灵敏度是 1 mV/pC ，那么噪声灵敏度是 1000 pC/V ，这就没有象 B&K 所设计的线驱动那样好，而且对传统的电荷放大器来讲并没有什么改进。

摩擦电所致噪声

$$q_n = \frac{i_n R_o}{1[\text{mV/pC}]}$$

$$= \frac{R_o \omega q_{no} \cos \omega t}{1[\text{mV/pC}]}$$

激励频率是 16 Hz 时，摩擦电所致的电荷噪声大约为 10^{-2} pC ，这值与 B&K 设计的线驱动相同。

3.6.6. 平衡加速度计和差分电荷放大器

在平衡加速度计中，压电元件和外壳是绝缘的，图3.24给出了它的等效电路示意图，在加速度计外壳和每个电荷检出点之间存在一个电容量 C_h 。

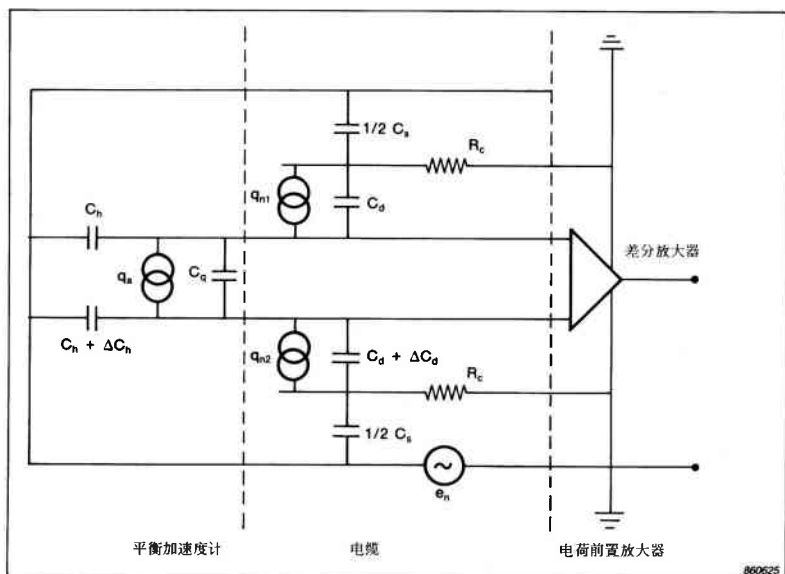


图3.24. 平衡加速度计和差分电荷放大器连接的简化等效电路

在运用条件下，这些电容量之间会出现不平衡，这时这个电容量用 ΔC_h 表示。

在外屏蔽层和二内屏蔽层之间的电容量用 C_s 表示，并且分为二个相等的内部电容。

包围两个导体的介质的电容用 C_d 表示，不平衡量用 ΔC_d 表示。

摩擦电的电荷 q_{n1} 和 q_{n2} 是两个互不关联的源并且不会相互抵消。

在加速度计内部压电元件上两个电荷检出点之间不平衡电容是 1 pF 即 $\Delta C_h = 1 \text{ pF}$ ，则等效电荷噪声是 1 pC/V 。

由于 C_s 和 R_c 之间，在 50Hz 时，阻抗很大，电缆的不平衡量要比传感器的不平衡量小 10^8 倍，因此可以略去不计。

当常规加速度计和电荷前置放大器组合在一起时，不相关联的摩擦电荷仍然在电荷放大器输入端引入同样量的电荷噪声。

3.6.7. 加速度计绝缘安装对于噪声的影响

加速度计安装时可与安装面相互绝缘（参看4.4节）。用云母垫圈垫加在加速度计底部或选用带有绝缘基座的加速度计均可做到这一点。除开平衡加速度计和带有“浮地”输入的常规电荷放大器外，这样绝缘对接地回路的噪声能得到很大的改善。对刚刚提及的那两种情况来讲，得不到什么改进。

显然，由电缆产生的摩擦电噪声与绝缘安装的加速度计之间毫不相关，也即摩擦电所致噪声灵敏度保持不变。无需借助复杂的电路分析就能得到表3.2中所示的噪声灵敏度。

采取绝缘措施的加速度计和前置放大器的形式	接地回路噪声灵敏度 pC/V
常规加速度计和电荷前置放大器	0.3×10^{-3}
B&K 线驱动加速度计和供电器（接地输入）	0.02×10^{-3}
B&K 线驱动加速度计和供电器（“浮地”输入）	0.05
基于恒流源的线驱动系统	0.3×10^{-3}

T01163GB0

表3.2. 加速度计和结构之间相互绝缘情况下，几种加速度计 / 前置放大器系统对接地回路的灵敏度比较

3.7. 特殊前置放大器的特性

下面一些装置应用于 B&K 电荷放大器和带有前置放大器输入的振动测量设备。在 B&K 前置放大器内为获得这些特点而作的各装置的布置情况可参看图3.25。有关不同类型的较详细内容可参看附录 E 汇总的技术规格表。

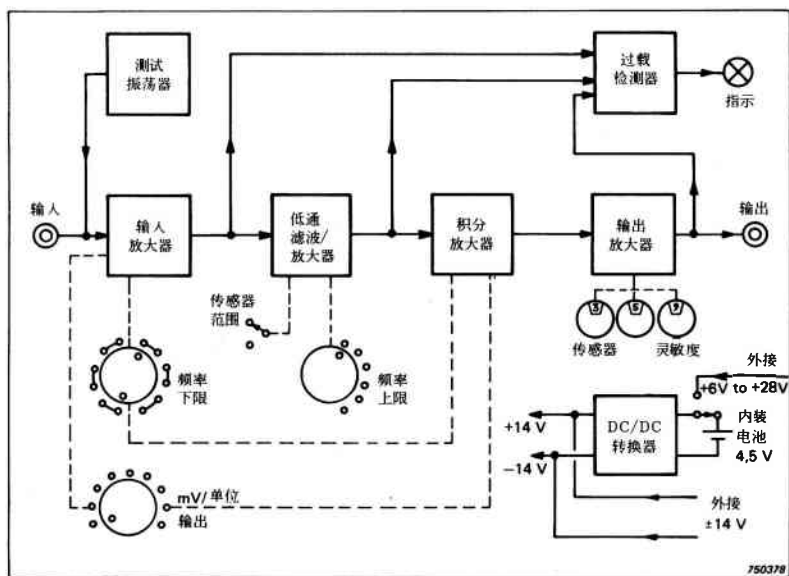


图3. 25. B&K 电荷放大器内部装置的布置情况方框图

3.7.1. 积分网络

对加速度信号积分给出速度和位移数据是采用加速度计作为任何振动测量中的传感器的一个明显优点。在第一章中已对测量参数的选择进行过讨论，现在要对这些信号的积分加以研究。

对于谐和信号来讲，加速度、速度和位移这些参数之间存在着一种关系。它们的积分并不是一件复杂的事，只要除以一个与频率成比例的因子。

设加速度信号用正弦波表示：

$$a = a_0 \sin \omega t$$

式中

a = 时间 t 时的加速度

a_0 = 加速度幅值

ω = 以弧度/秒表示的频率

第一次积分便得到速度 v

$$\begin{aligned}v &= \int a \, dt \\ &= \frac{-a_0}{\omega} \cos \omega t \\ &= v_0 \cos \omega t\end{aligned}$$

式中

$$v_0 = \frac{-a_0}{\omega}$$

由此可见，积分常数是 0。当对瞬态信号进行积分时，情况并不是这样。

第二次积分得到的是位移信号 x

$$\begin{aligned}x &= \int v \, dt \\ &= \frac{-a_0}{\omega^2} \sin \omega t \\ &= x_0 \sin \omega t\end{aligned}$$

式中

$$x_0 = \frac{-a_0}{\omega^2}$$

这个简单的分析告诉我们，可由加速度除以一个与频率成比例的因子完成积分而得到速度。除以一个与频率平方成比例的因子而得到位移。

电子积分最基本的方法是采用类似图3.26中所示的电子网络就可得到。

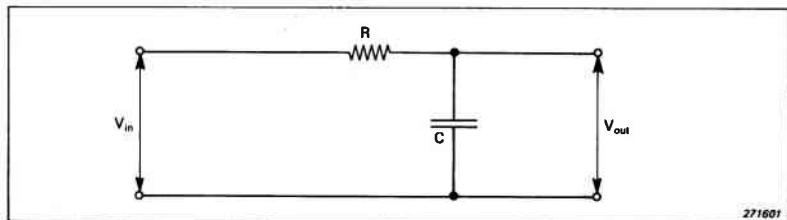


图3.26. 一个简单的 RC 积分网络

当从加速度计和前置放大器来的电压 V_{in} 加到输入端时，电容器上的电压 V_{out} 可用下式表示：

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 + j\omega RC}$$

当 $\omega RC \gg 1$ 时，则：

$$V_{out} \approx \frac{1}{jRC} \frac{V_{in}}{\omega}$$

把上面表达式和前面所述的积分分析作一比较，就可看出，已经进行了电子积分。因子 $1/RC$ 在内部校准时要注意。用一个第二级积分网络就可得到一个双重积分，这样就可获取位移的数据。

如果把上式计算的绝对值对应于频率描点下来，就可得到与图3.27相似的响应曲线。从中可看出存在着一个频率下限 ω_L ，低于此限值时，不会有真实的积分。在 ω_L 和 ω_T 之间也只有部分积分，只有信号频率大于 ω_T 时才能进行真实有效的积分。

在进入积分器之前，先把信号放大就可使滤波器的积分范围扩大。这也就改善了积分器的动态范围，这类积分器可称作“有源型”，在 B&K 前置放大器内设置有积分选择。积分器的典型响应可参看图3.28。注意在滤波器中存在着一个峰值。

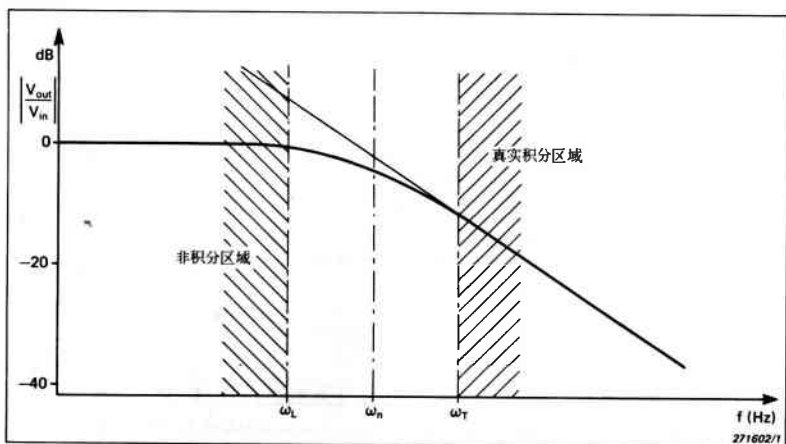


图3.27. 与频率成函数关系的积分信号的质量

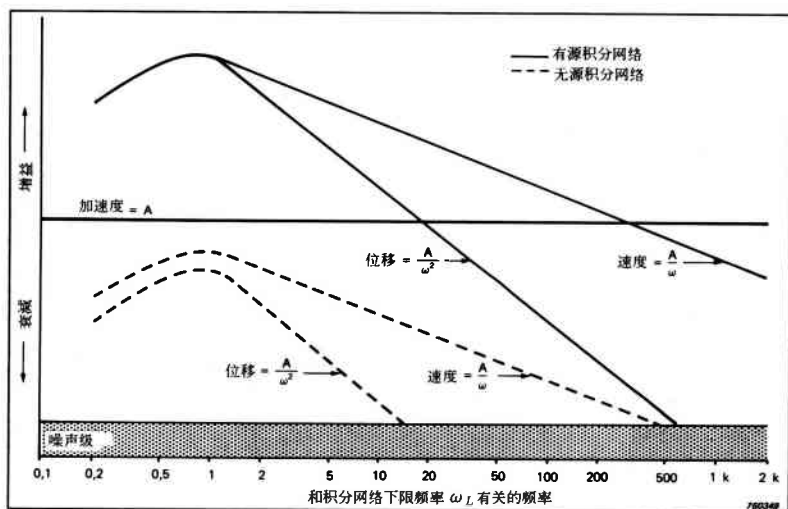


图3.28. 一个电子积分器的频率响应特性

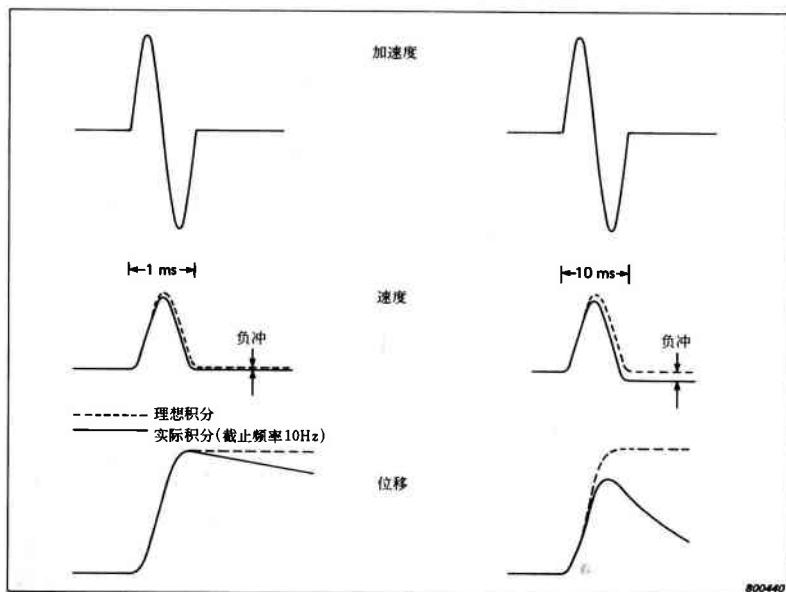


图3.29. 两个加速度脉冲的电子积分与理论积分的比较

测量瞬态振动信号时采用积分网络必须要小心。瞬态值中的低频成分完全可能激发滤波器的峰值并且使积分网络引起“振铃”，也使测量结果发生畸变。另外，积分器的相位响应也会引起瞬态信号畸变。图3.29显示了关于二个在1到10ms持续时间的正弦加速度瞬态信号的电子积分效果。电子积分与实际积分作了比较。较长的瞬态信号低频成分在峰值测量中产生了误差。

3.7.2. 滤波器

我们常常希望在振动测量过程中对频率范围加以限制，譬如：对含有齿轮的旋转机械进行振动测量时，如果频率在所研究的频带之上就会出现一个比所研究振动值高得多的值。如果这些较高的频率在滤波级中不能滤掉，将使放大器过载而削波并且产生一种附在所要求的频带上的不同频率，而且再也不能把它从需要的信号成分中区分出来。如1.4节所述，对振动信号的滤波能使仪器测量的动态范围最佳。

高通滤波器可用来剔除那些非振动输入造成的寄生低频噪声，例如温度的瞬变和基座的弯曲等。一般来讲当不选用三角剪切[®]型的加速度计时才会出现这类问题。

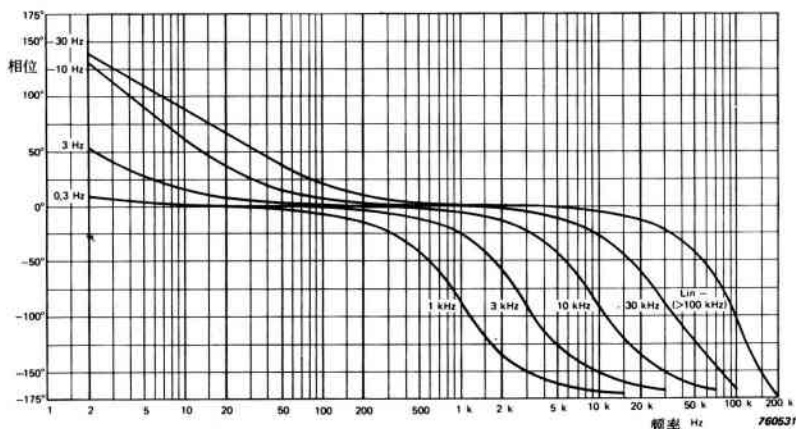


图3.30. B&K 电荷放大器采用不同滤波器设定值时的相位特性曲线

有几种配备有源低、高通滤波器（可选的-3dB点）的 B&K 前置放大器。有关它们不同型号的详细内容可参看附录 E 和附录 F。

至此，我们考虑了周期信号的测量，虽然在测量瞬态值时必须把相位考虑进去，但滤波器的相位非线性度并不对它们的均方根值有任何影响。如果已知信号的频率组成情况，则我们可以选择一个相位畸变量最小的频率范围，要做到这一点可参考类似图 3.30 中所示的那些曲线图，它们直接附在电荷放大器的技术说明书中。

当在机械阻抗测量中或在校准时两台电荷放大器一起使用，最大相位差 $\Delta\phi$ 可由下列关系式来决定：

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \frac{\frac{f_{c1}}{f_{cn}} - \frac{f_{c2}}{f_{cn}}}{1 + \frac{f_{c1} \cdot f_{c2}}{f_{cn}^2}}$$

式中 f_{c1} 和 f_{c2} 分别是每台前置放大器的下限频率， f_{cn} 是所要求的最大相位差时的频率。这个关系式对包括 6 dB/倍频（20dB/10倍频率）的滤波器在内的前置放大器来讲是正确的。若是滤波器的斜率为 12dB/倍频（40dB/10倍频率）则相位角是原来的 2 倍，上面的式子变成：

$$\Delta\phi = 2\tan^{-1} \frac{\frac{f_{c1}}{f_{cn}} - \frac{f_{c2}}{f_{cn}}}{1 + \frac{f_{c1} \cdot f_{c2}}{f_{cn}^2}}$$

3.7.3. 过载指示器

B&K 前置放大器最基本又独特的功能是过载报警装置。通过对输入放大器的输出端信号电平，滤波器的输出信号和输出放大器输出信号的监测有效地限制了产生错误测量的可能性（参看图 3.25）。只有这样的安排才能确保过载信号不被滤波过程掩盖起来。有一只小灯泡指示过载情况的存在。这个过载电路可以对短达 20 μ s 的过载峰作出反应。来自过载指示器指示的 20dB 也是一个相当有用的功能。输入增益和输出增益均可进行调节直至调到该指示灯亮为止。这就意味着系统的这一部分的动态范围得到了最佳选择。

3.7.4. 参考振荡器

这个装置是用于系统的校准和检查。在现场用便携式磁带记录仪进行测量时，它显得特别有用。参考信号可以和振动信号一起记录在磁带上，在以后就可用它来校准记录。在用电平记录仪和测量放大器时，它还可用来确定电平。

3.7.5. 电源

给 B&K 前置放大器供电的方式有几种，可参看附录 E 和附录 F 中的表格。

不管怎么样，都应该采用双极性电源，因为这种供电方法可大大地抑制共模信号和电源噪声。在大的多通道振动测量装置中显得特别有效。

电池供电使仪器便于携带又减少系统噪声，这两个特点在户外进行测量时特别突出。

2805 型电源最多可提供 12 个双极性电源，当然也可提供 12 个单极性电源。

4. 实际加速度计性能

4.1. 引言

本章提供正确使用压电加速度计以获得精确的振动测量值的指导准则。图 4.1 列举了在振动测量中可能存在的许多不同的外部输入量。三角剪切[®]加速度计设计成使所有这些现象的影响最小以确保输出量只与振动输入量有关。在这方面考虑了两点：

1. 工作环境。完全不受环境影响的振动传感器是不存在的。然而，我们将会看到三角剪切[®]加速度计在极端的工作环境下具有非常优良的性能。它对工作环境影响的灵敏度很低，并且受到严格限定。

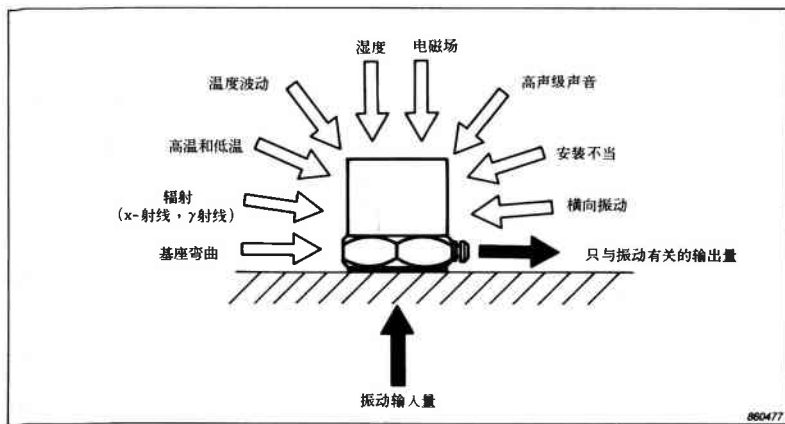


图4.1. 在一个设计得很差的振动传感器中能产生与振动无关的输出量的许多外部输入量

2. 加速度计的安装。安装技术可以改变加速度计的频率响应和动态范围。另外，不但必须考虑加速度计安装位置而且要考虑它的质量。如果想得到优良的性能，必须遵循本章所述的指导准则。

4.2. 环境的影响

振动测量常常需要在对加速度计有特殊要求的工作环境中进行。为了使测量准确可靠，设计一个最大限度消除所有环境影响的传感器是很重要的。为此，已经有许多加速度计类型。然而，在消除工作环境影响方面，没有一种设计能比得过三角剪切[®]型。它对工作环境影响的低灵敏度受到严格限定，例如，可以对很高的高温或很强的强磁场的影响进行计算，并且对整个被测测量振级进行估计。

每个B&K加速度计都提供有与工作环境影响有关的灵敏度方面的全面技术规格。测量这些影响的方法在国际标准中有描述，特别是ISO 5347，“冲击和振动传感器的校准方法”，以及美国标准ANSI S2.11 - 1969，“用于测量冲击和振动的电传感器的校准和测试方法选择”。

4.2.1. 温度范围

压电加速度计能在很宽的温度范围内进行振动测量。然而，由于压电材料的特性，当压电加速度计在参考工作温度以外工作时，它的电压和电荷灵敏度以及阻抗将产生变化。

作为一个例子，图4.2显示了在几乎所有的B&K加速度计中都使用的压电材料PZ23的电容量，电荷灵敏度和电压灵敏度的变化。在每个加速度计所提供的校准图表上有一个包含该加速度计所用的压电材料类型的类似的图。

灵敏度的这些变化是严格限定的，当工作温度回到校准温度时，不会产生永久性的变化。当在高温中使用加速度计时，考虑到由于工作温度增加而产生的灵敏度的改变，可以使用下面这样一个图来测定它的实际灵敏度。

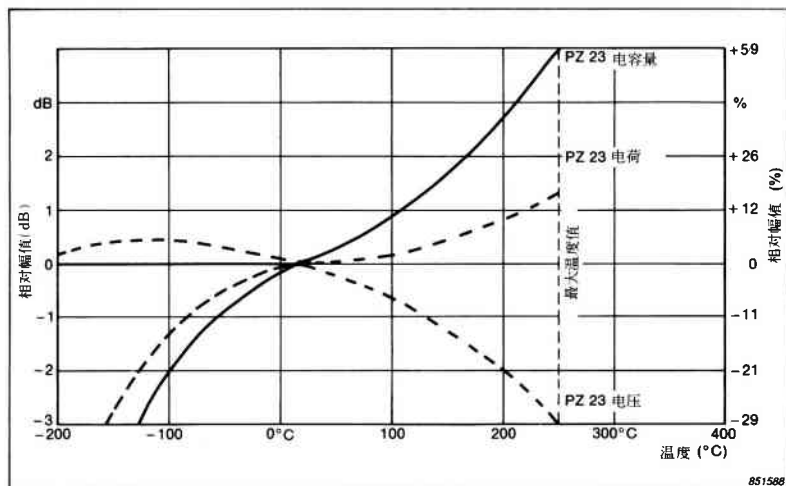


图4.2. 压电材料 PZ 23 的电容量，电荷灵敏度和电压灵敏度的温度相关曲线

灵敏度回到校准图表上标出的点所需时间是不易测定的，但是它将部分取决于加速度计的工作温度。如果周围环境温度缓慢地变化，那末，加速度计的灵敏度将按照图 4.2 中所示的曲线变化。然而，对于温度的快速变化，压电材料呈现出滞后型作用，加速度计将需一定的时间才稳定在图表上所示的灵敏度上。当加速度计突然从接近它的最大温度回到室温时，一般需要约 24 小时时间加速度计才能回到校准的灵敏度。

每种加速度计具有一个规定的最大工作温度，超出这个温度，压电元件将开始退化，并且，灵敏度产生永久性的改变。使用 PZ 23 压电材料的加速度计的最大工作温度为 250°C。在这个规定的温度极限以上直到 50°C 处，极化逐渐消失。如果工作温度再升高，极化消失得很快，加速度计就损坏了。

对于 250°C 以上的高温工作，可以使用 8310 型工业加速度计。它是设计成用于高达 400°C 的工作温度。可以使用屏蔽罩通用加速度计的基座与振动表面进行热隔离，这种屏蔽罩是由如图 4.3 所示的具有高热传导率的金属制

成的，它可以增加加速度计散热的速率。用这种屏蔽罩可以在高达 350°C 温度的表面进行测量。如果还有一股冷却空气流对着加速度计吹，就可以在高达 450°C 温度的表面上测量。然而，必须记住，使用这样一种紧固装置可能会改变加速度计安装处的刚性，这种装置又降低了加速度计的共振频率并减小了有用的频率范围。与之相配的测量仪器一般不耐高温，可能需要安装在离加速度计有一段距离的地方。

大多数 B&K 加速度计的低温极限值规定为 -74°C 。尽管通用加速度计仍有可能在甚至更低的温度下使用，但技术规格上没有规定低于这个极限的温度。使用通用加速度计已经可以在液态氮温度 (-196°C) 下进行结构振动测量。

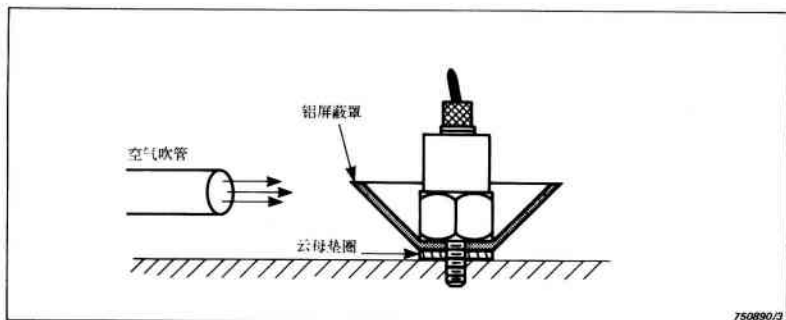


图4.3. 使用散热铝屏蔽罩，将加速度计安装在热的表面上

4.2.2. 温度的瞬变

在振动测量期间，环境温度的相当快的波动（例如，由于通风气流和热流）可以从加速度计上产生一个低频噪声信号。该信号的产生是由于下列两种效应。

1. **热电效应。**这是一种压电晶体和铁电体陶瓷由于温度不平衡和温度变化而带电的现象。在人造极化陶瓷中，这种电荷是在垂直于极化方向的表面上产生的。所以，当振动而在垂直于极化方向上产生电荷时，就象在

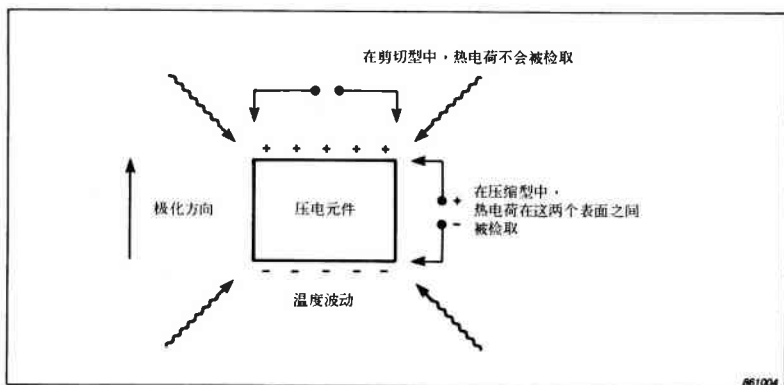


图4.4. 剪切型和压缩型压电材料抗温度波动的比较。所示电荷由热电效应产生，与振动无关

压缩型加速度计中一样，这种热电电荷也会产生，于是，产生了无用的输出信号。然而，在剪切型加速度计中，这种多余的电荷不会产生，因为电荷产生点处于与极化方向平行的表面上。在图 4.4 中说明了这种情况。

由于上述原因，剪切型在理论上对温度瞬变不敏感。实际上，剪切型对温度瞬变的灵敏度比压缩型要小大约一百倍。B&K 对压电元件精心挑选也减小了对温度瞬变的影响。

2. **不均匀热膨胀。**当部分加速度计结构膨胀和收缩的速率不同，或者在加速度计外壳上有热差时，就可能产生不均匀热膨胀。这两种现象使压电元件上产生了应力及由此而引起的输出信号。压缩型对这些作用比剪切型更敏感。

只有在测量低振级、低频振动时，这些作用才变得显著。在对例如建筑物、桥梁或船舶等大型结构进行户外测量的情况下，经常发生的风可能会产生突然冷却作用，必须使用一种设计成对这些作用灵敏度很低的加速度计。许多工业环境中可能还有潜在的温度瞬变问题，但是由于大多数是高振级测量，这些作用的影响不大。

每种加速度计的典型温度瞬变灵敏度可在为每个加速度计所提供的校准图表上找到。使用下列的一种或各种方法可以减少或者甚至消除由这些温度波动引起的低频噪声。

1. **正确选择加速度计**。在所有涉及减少温度瞬变作用的因素中最重要的是正确选择加速度计类型。三角剪切[®]型加速度计比压缩型加速度计要好得多。
2. **高通滤波器**。如果使用压缩型加速度计，可能需要使用一个高通滤波器来消除寄生低频输出。在用于振动测量的大多数 B&K 前置放大器中就有这种滤波器。频率下限是可以选择的，典型值为 0.3Hz 直到 30Hz。当在温度波动的环境中使用压缩型加速度计时，频率下限必须大于 3Hz。2644 型线驱动放大器或装在 4390 型、8317 型以及 8318 型加速度计里的线驱动放大器已经规定了使这些作用影响减到最小的频率下限。各种独立的前置放大器和线驱动放大器的详细资料请参阅现有的有关这些产品的产品数据手册。
3. **屏蔽**。在某些情况下，也许可以在加速度计的周围装上屏蔽罩或轻质绝热体。传声器风罩常常适合此用途。或者用由轻质聚苯乙烯材料做的屏蔽罩。

4.2.3. 声灵敏度

大多数振动都伴有声音输出。振动测量常在具有高声压级的环境中进行。B&K 三角剪切[®]加速度计已经设计得使高声压级 (SPL) 对振动测量没有影响。这是由使用一个刚性机械隔离设计来获得的。典型的三角剪切[®]加速度计的声灵敏度在 2 到 100Hz 频率范围内¹，声压级为 154dB 时，为 0.0001 到 0.004ms⁻²。其他结构的声灵敏度都比三角剪切[®]型的指标高许多。较老式的压缩型加速度计由于在外壳和压电片之间没有机械隔离，甚至可以象传声器一样有效地工作。

在许多情况下，试验结构由声音而引起的振动将是考虑的更重要的因素。

1 在这个范围内到较高的频率测得的声灵敏度多半是不变的，请参阅 5.5.4 节。

4.2.4. 基座应变

如果基座应变称为基座弯曲的话，这比较容易理解。无论何时加速度计装在一个振动结构上，它的基座将经受许多弯曲力，由此产生的电荷可以测量到。电荷的频率常常就是振动的频率。当然，在低频时位移大，因而应变也较大，这种作用比较显著。

在设计用于振动试验装置的反馈压缩器线路中，采用较低的基座应变灵敏度特别重要。加速度计提供的反馈信号可能受到大的基座应变的影响，振动激励器的激励信号将产生畸变。

B&K 加速度计由于使用了三角剪切[®]型，对基座应变作用的灵敏度很低。在这种型号的加速度计中，压电元件有效地与基座的所有应变隔离。因而没有必要象在所有压缩型加速度计中那样使用一个非常厚的、过重的基座来使这种作用减小。

B&K 8305 型参考加速度计是一个压缩型加速度计，使用一个铍片使压电片与基座弯曲作用隔离。当校准处在受控制的情况下，基座弯曲对于这种加速度计不构成问题。

对于通用三角剪切[®]加速度计，典型的基座应变灵敏度在基座应变为 $250\mu\epsilon$ 时为 $0.02\text{ms}^{-2}/\mu\epsilon$ 。每种加速度计的典型值在为每个加速度计所提供的校准图表中注明。

4.2.5. 湿度影响

所有的 B&K 加速度计都具有焊接的或环氧树脂密封的外壳这样的密封结构，可以使加速度计有效地与湿度作用隔离。当它们使用在潮湿的或湿度极大的情况下，加速度计电缆和螺纹连接插头完全密封是很重要的。否则就会降低加速度计的泄漏电阻值，低频响应就会发生变化。要密封可以使用例如 Dow Corning RTV 738、3M Scotch Clad Strip Coating 2253 或类似的化合物为密封介质。B&K 加速度计电缆连接套管一般是用不透水的 PTFE 或 PFA（聚四氟乙烯）制造的，故可完全浸入液体中。

4.2.6. 磁场灵敏度

B&K 加速度计对磁场很不敏感。其磁场灵敏度在 $0.5\text{ms}^{-2}/\text{Tesla}$ 和 $30\text{ms}^{-2}/\text{Tesla}$ 之间 ($0.005\text{g}/\text{k Gauss}$ 和 $0.3\text{g}/\text{k Gauss}$)。这是磁力线处于最大灵敏度方向的最坏的情况。

4.2.7. 辐射影响

除了线驱动加速度计以外,所有的 B&K 加速度计都可使用在 γ 辐射情况下 ($100\text{Gy}/\text{h}$, 6MeV),直到积累剂量为 20kGy ($1\text{Gy}=100\text{rad}$)。试验表明这些加速度计在这样的剂量照射下,灵敏度变化小于 10% 。除了在超过 1kGy 积累剂量情况下推荐使用特殊的电缆外,可以使用普通型加速度计电缆。8310型工业用加速度计在这样的剂量下灵敏度变化仅小于 3% ,故可在高剂量辐射条件下使用。在积累剂量为 1MGy 和 10^{18} 中子/厘米² ($10\text{kGy}/\text{h}$, $1-5\text{MeV}$ 及热中子通量为 10^{12} 中子/厘米²秒)情况下,灵敏度变化约为 5% 。详细情况请查阅工业用加速度计产品数据。

4.3. 加速度计的质量加载作用

当加速度计安装在振动试样上时,总的质量增加结合局部刚性的变化将不可避免地改变整个结构的动态特性。

当加速度计引入的附加的机械阻抗,其大小类似于在加速度计安装前被测结构所具有的机械阻抗时,这些变化才变得显著。由加速度计给于被测结构的机械阻抗 Z_a 可以按照它的质量 m_a 表示为:

$$Z_a = \omega m_a$$

本式对直到加速度计安装共振频率的 0.9 倍频率都是有效的。在这个频率范围内,靠近加速度计的被测结构部分的加速度可按下列关系式修改:

$$a_m = a_s \frac{Z_s}{Z_s + Z_a} \approx a_s \frac{m_s}{m_s + m_a}$$

式中

a_m = 由加速度计测量的加速度

a_s = 当没有装加速度计时，被测结构的加速度

Z_s = 尚未加载的结构的机械阻抗

m_s = 被测结构的“质量”。在许多情况下，机械阻抗主要是靠近加速度计被测结构的质量。

根据下面的关系式，被测结构的共振频率还将减小

$$f_m = f_s \sqrt{\frac{m_s}{m_s + m_a}}$$

式中

f_m = 有加速度计质量影响的被测结构的任意共振频率

f_s = 无加速度计质量影响的被测结构的任意共振频率

这两个关系式表明如果加速度计质量、机械阻抗与被测结构的质量相比很小，那末振动中的任何变化将是很小的。一般的原则是保证加速度计质量小于被测结构质量的十分之一。

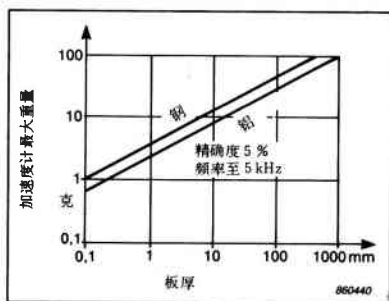


图4.5. 加速度计质量和薄铝板及薄钢板的振动变化之间理论上得到的关系

图 4.5 表明了对于在规定的频率范围内规定的加速度大小的变化，在要求的加速度计质量和板的厚度之间的理论关系。在测量轻铝板和钢板的振动时，可使用这个关系。

4.4. 安装加速度计

为了精确测量振动，用户必须确保：

1. 加速度计安装不要限制有用频率和动态范围。
2. 加速度计的附加质量不改变被测试物体的振动特性。
3. 能精确而重复地固定测量点，这保证了测量可重复进行。

选择正确的安装布局可以对上述每个准则产生有效的影响。我们已经知道加速度计的有用频率范围是由每个加速度计的校准图表上的安装共振频率决定的。安装共振频率是在最佳的安装条件下测量的，在一块 180 克钢块上使用标准安装双头螺栓，钢块的表面按图 4.6 规定的标准精加工。

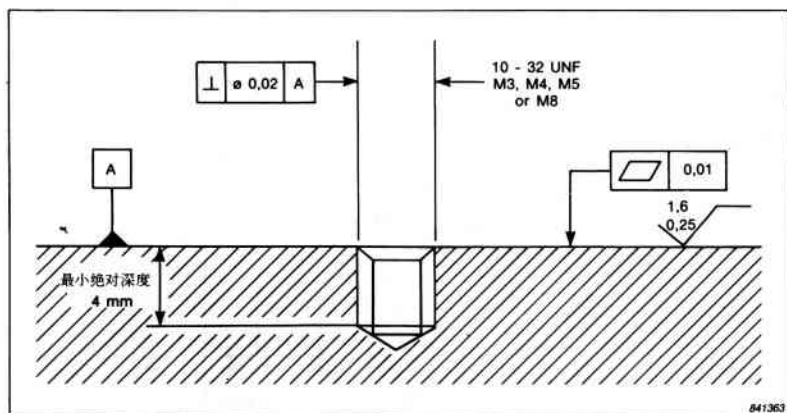


图 4.6. 安装表面和攻丝固定孔的推荐公差。尺寸和符号按照 ISO 1101

4.4.1. 振动测试样品表面的加工要求

为能有较高的安装共振频率，尽实际可能使测试样品的表面清洁而光滑是非常重要的。如果有可能，这个表面应达到图 4.6 中规定的加工要求。用于加速度计双头螺栓的安装孔也必须按图 4.6 中所示的标准攻丝。无用的油泥可用诸如丙酮一类溶剂清洗掉。

4.4.2. 安装位置

在许多情况下，加速度计安装位置是十分明显的，将按照测量振动的要求行事。加速度计的安装应使它的主灵敏度轴与所需测量的方向成一直线。

然而，我们已经提到过，加速度计除主灵敏度轴外在其他方向上也对振动作出响应。在 B&K 加速度计上的红点可以对准最大横向振动方向，这样它们的作用必然会减至最小。

选择一个位置，使从该位置到振动源的振动传输路径短和具刚性而避免任何柔性传输和在被测结构中出现如衬垫那样的阻尼元件。例如，在测量旋转机械的振动时，轴承箱常常是安装加速度计的好地方。

在轴向，水平方向或垂直方向的轴上常可发现存在着有价值的信息。使用三轴向加速度计可以同时提供在同一点的三个互相垂直轴上的振动数据。

许多被测结构的动态响应可能是非常复杂的，仅在安装位置上的微小差别就能产生大的测量差值，特别是在高频。作为一个普通原则，不要在波结点处进行测量。为了辨别在被测结构上波结和波腹的位置，可能需要用类似于 4.4.9 节中描述的手持探针“快速测试”法在被测结构上进行快速振动检查。

也许测量最有意义的最困难的振动领域之一是应用于人体的振动领域。这包括整个身体的振动和手 - 手臂振动。它们都需要特别考虑传感器的类型、频率范围、动态范围、安装技术和安装位置。

4.4.3. 使用不同安装技术的加速度计的频率响应测定

下面的几节中包含有关安装技术的建议以及它们对加速度计频率范围和动态性能的影响。大多数可行的技术都包括在内。频率响应的测量是用一个小的永磁激励器来驱动一个加速度计安装在其上的180克的振动台来进行的。使用电子反馈线路（压缩器回路），这个振动台的加速度可在很宽的频率范围内保持恒定。

为了使比较简单，在所有的测量中使用同一个通用加速度计。图 4.7 比较了用本节中介绍的安装技术得到的最重要的频率响应。

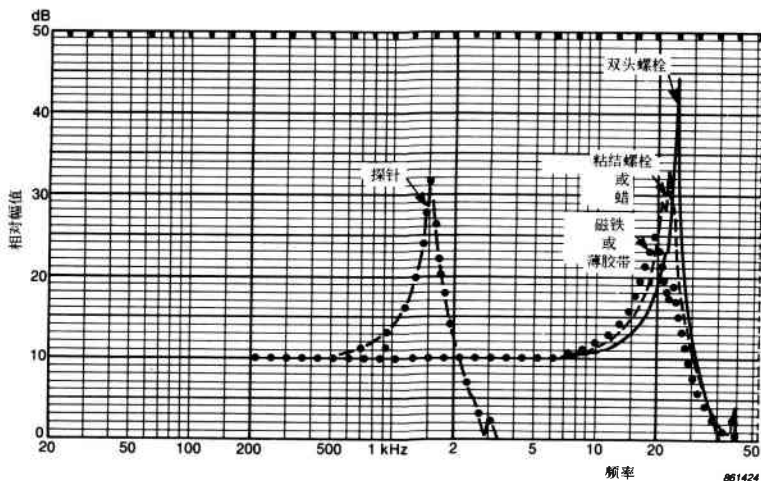


图 4.7. 使用若干种加速度计安装技术获得的频率响应比较

4.4.4. 双头螺栓安装

方法：

1. 按图 4.6 所示的公差准备好测试物体的表面。加速度计基座也应尽可能清洁和光滑。
2. 在测试物体上按所需尺寸钻固定孔并攻丝。孔的要求取决于加速度计的类型。孔深必须足以装下加速度计螺栓。最小的加速度计用 M 3 螺纹，

可使用 QA0041 丝锥和 8 毫米 (0.25 英寸) 长的钢质双头螺栓 YQ2007。通用加速度计使用 QA0029 丝锥及 10-32 UNF 安装螺栓 YQ2960 和 YQ2962, 它们分别为 12 毫米和 8 毫米长 (0.5 和 0.312 英寸)。8318 型加速度计使用 M 8 丝锥 QA 0141 和 YQ 9335 螺栓。

3. 将螺栓旋入固定孔内, 然后将加速度计旋在螺栓上。检查螺栓不要旋到加速度计内螺纹底部并用一个扳手旋紧加速度计, 当心不要紧过了头。见图 4.8。

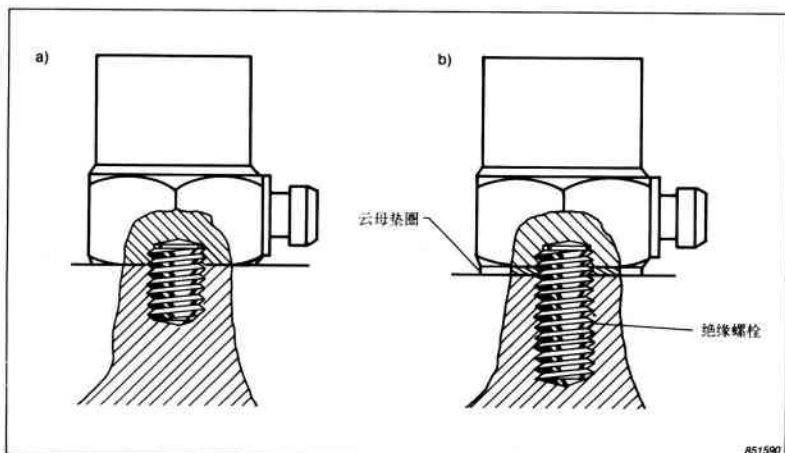


图 4.8. 使用螺栓安装加速度计。右边的加速度计是用绝缘螺栓和云母垫圈安装的

应用：

1. 高频振动测量需要可能的最高安装共振频率。
2. 永久性振动监测。

优点：

1. 给出加速度计的最佳性能。无论何时有可能就应使用这种方法。
2. 这种安装不限制加速度计的温度范围。
3. 可在很高振级下工作。

缺点：

1. 可能要花费时间来准备被测物体的表面以及钻孔和攻丝。

注：

1. 在加速度计基座和测试表面之间使用薄薄的一层硅脂将改善高频性能，特别是当表面不十分光滑时。
2. 安装加速度计所用的推荐扭矩取决于使用的螺栓尺寸，对通常10-32UNF螺栓，扭矩为1.8Nm，对于较小的M3钢质安装螺栓，扭矩为0.60Nm。“用手指拧紧”初看起来几乎没有足够的扭矩（ $\approx 0.3\text{Nm}$ ），不过倘若加速度计用很有力的夹钳来旋紧的话，被测的加速度计频率响应的实际差别是很微小的。只有当要了解最高频率时才有必要用扳手来拧紧加速度计。见图4.9。
3. 注意在使用扳手时，扭矩不要超限，因为螺栓可能会断裂或者丝扣可能从加速度计上拉脱。这会使从加速度计或测试表面上取下螺栓非常困难。加速度计可能损坏。
4. 螺栓不应顶到加速度计螺纹的底端。如果加速度计基座不与振动表面相接触，就会产生很大的误差。

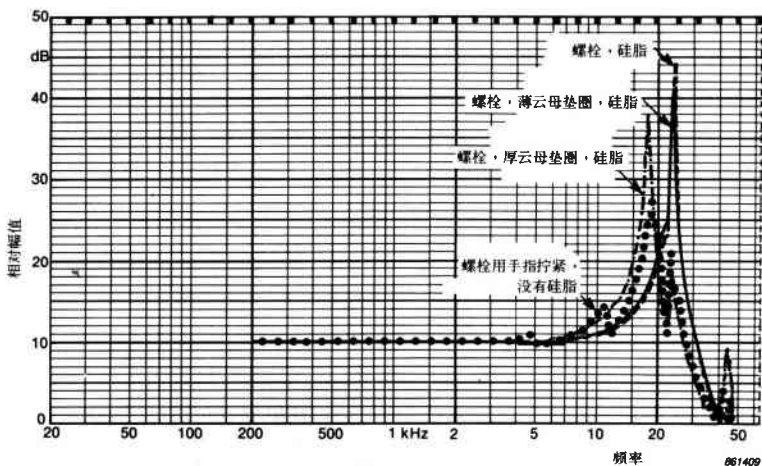


图4.9. 使用稍微不同的安装技术，用螺栓安装的通用加速度计的频率响应

5. 因为在振动测量中可能会产生接地回路，特别在大机器上设置多点装置时，所以有时还必须使加速度计与测试表面电绝缘。可用带绝缘基座的加速度计或者云母垫圈 YO 0534 或 YO 0746 加上绝缘螺栓 YP 0150 来绝缘。然而，添加云母垫圈会降低安装共振频率，特别是在温度超过 80℃，螺栓可能产生膨胀延伸时。尽量用最薄的云母片来取得良好的机械耦合。
6. 最小的加速度计没有设计成螺栓安装型，必须用另一种固定方法。
7. 冲击加速度计有一个 M 5 的构成整体的螺栓。
8. 工业用加速度计用螺丝安装。

4.4.5. 蜡安装

方法：

1. 确保安装表面尽可能光滑。还要保证加速度计基座无垢和油泥。
2. 刮下少量与加速度计配套供应的蜡 YJ 0216 并用手指碾挤使其软化。
3. 将蜡涂抹在测试表面上，复盖面要大于加速度计基座面积。涂层应该厚得刚好足以填满两个表面间的空隙。
4. 将加速度计轻轻放在蜡上并边压边转动加速度计使其吸粘在测试表面上。这可以稍稍实践一下。见图 4. 10。

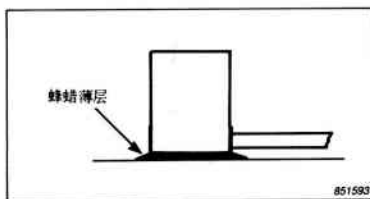


图4.10. 使用蜡安装的小型加速度计

应用：

1. 快速试验振动测量。

2. 要测量无法钻螺栓安装孔的地方，或者实在想要用这种方法的地方。
3. 安装在基座上没有螺纹孔的加速度计。

优点：

1. 安装快而容易的一种方法。
2. 安装共振频率仅比螺栓安装稍低一点。

缺点：

1. 严格的40℃温度极限。
2. 最大振级约为 100ms^{-2} 。

注：

1. 蜡的软化会引起温度性能变坏。这将使耦合刚度减小，导致安装共振频率变低直到最后加速度计从测试表面上脱离下来。
2. 使用超量的蜡会降低安装共振频率并限制测量频率范围。见图4.11。

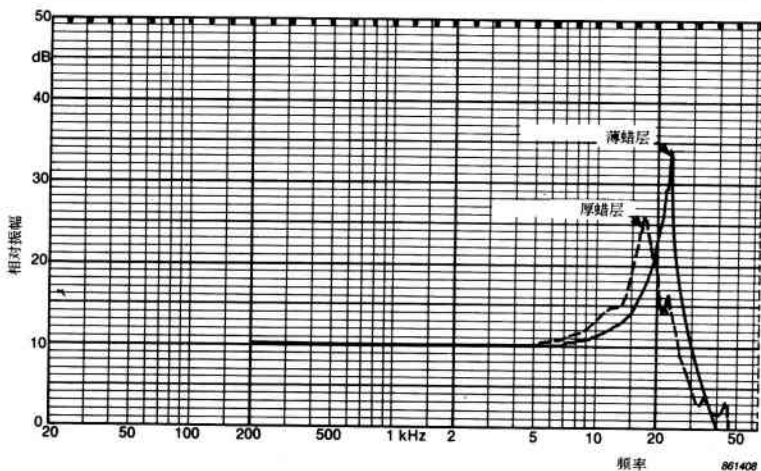


图4.11. 用蜡安装通用加速度计的频率响应

4.4.6. 磁铁安装

方法：

1. 确保测试物体和加速度计表面无油泥和突起。
2. 将加速度计装在永久磁铁 UA0642 上。如果必要再用扳手扳紧。安装小型加速度计可以供应较小的磁铁。在加速度计基座和磁铁之间使用薄层硅脂以及在将加速度计安装到被测结构上之前在磁铁和结构之间使用薄层硅脂可以改善高频响应。见图 4.12。

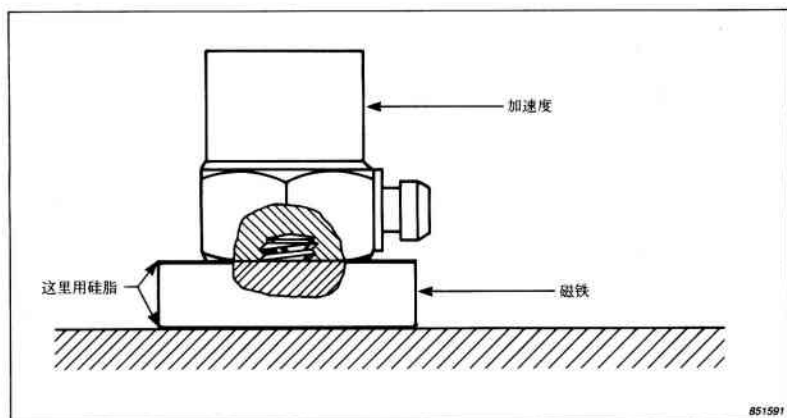


图4.12. 使用安装磁铁 UA0642 安装加速度计

应用：

1. 本方法的快速使其对在决定永久性振动监测点位置前对许多测试对象，例如工业机械，作预先测量是最理想的。

优点：

1. 非常快速的方法。
2. 考虑其明显的低耦合刚度，这种方法的高频性能是不错的，特别是在很平的表面上。见图 4.13。
3. 高加速度性能。

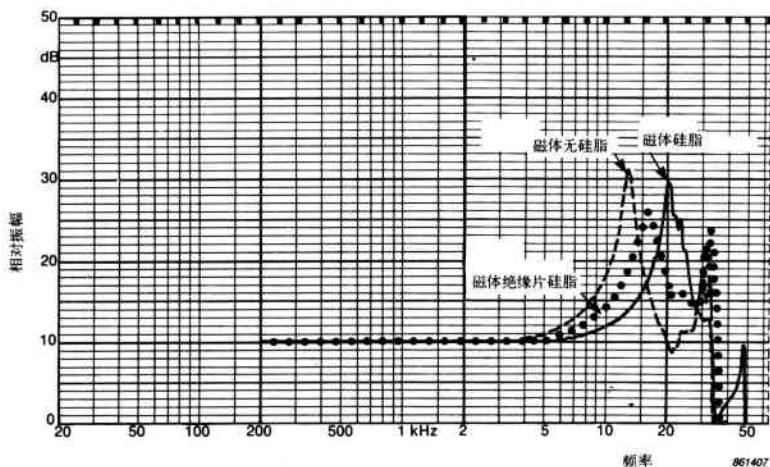


图4.13. 用磁铁安装的通用加速度计的频率响应

缺点：

1. 测试物体的表面必须有铁磁性。另一种办法，可将铁磁圆盘或板粘在测试结构上。
2. 无法保证测量点的绝对重复率。
3. 附加了磁铁在测试结构上产生了额外的质量加载作用。当测量轻型结构，例如盘或板时，这就可能是严重的缺点。磁铁 UA0642 重16克。

注：

1. 使加速度计与测试物体电气绝缘是可以实现的。使用5个安装磁铁 UA0643 为一套所提供的 PTFE 自粘绝缘片就可以做到。这个绝缘片要放置在测试结构的表面与磁铁之间。
2. 在弯曲表面上，例如管道，可以进行测量，不过频率范围将与表面的半径曲率成正比地减小。
3. 磁铁的巅峰附着力在35和60N之间不同，取决于测试表面的情况和是否使用了绝缘片。当然，最大振级将按照加速度计和磁铁的合成重量变

化。B&K 加速度计产品数据中有不同类型的最大振级极限值。例如，重 17 克的加速度计可以用到 1.2kms^{-2} 加速度，而重 175 克的加速度计最多只能用到 0.2kms^{-2} 。

4.4.7. 自粘安装片

方法：

1. 确保振动测试表面和加速度计上没有油泥。
2. 剥去自粘安装片背面的保护膜，并将安装片牢牢地贴到加速度计上。见图 4.14。
3. 将加速度计安装到振动表面上。

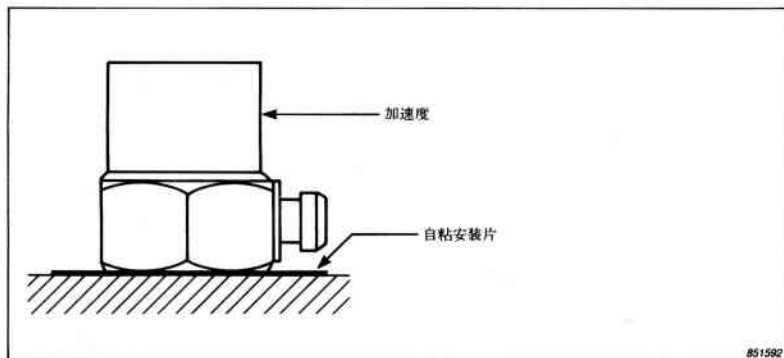


图4.14. 使用自粘安装片安装加速度计

应用：

1. 快速试验振动测量。
2. 测量无法或实在不希望钻螺栓安装孔的地方。
3. 安装在基座上没有螺纹孔的加速度计。

优点：

1. 快速，给出适合的高频响应和高加速度性能。
2. 提供了电气绝缘。

缺点：

1. 受高温和低温工作的限制。

注：

1. 直径尺寸40毫米双面自粘安装片 (DU0079) 和直径尺寸5.5毫米双面自粘安装片 (YO0073) 有货供应。较小的品种一套25个, 设计用于小型加速度计, 而较大的则单个供应, 它能在任何角度有足夠的粘着力来固定最大的加速度计以维持适当的高频性能。见图4.15。然而, 必须牢记, 这种方法和其他方法仅能接近用螺栓安装所能获得的优良性能。
2. 也可使用双面胶带, 如果带子很薄, 则可获得满意的结果。然而, 如果带子很厚, 那末高频性能将减弱。

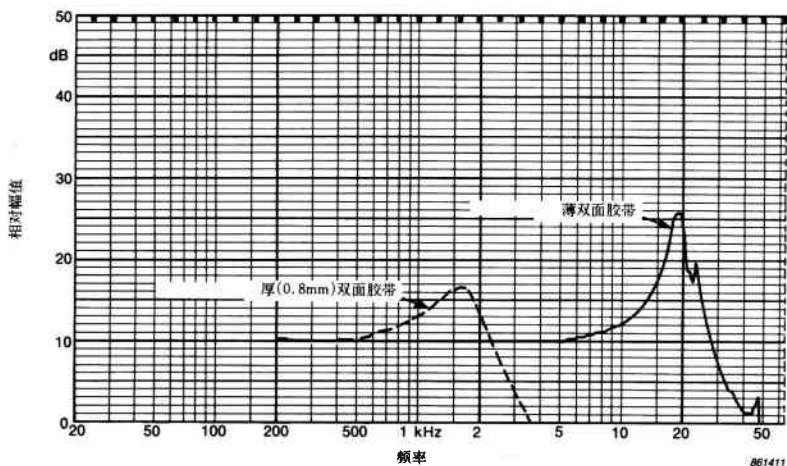


图4.15. 用自粘片安装的通用加速度计的频率响应

4.4.8. 粘接

使用粘接剂安装加速度计有两种基本方法。

直接安装：

方法：

1. 确保安装表面尽可能地光滑并没有垢物。
2. 按照粘接剂使用说明，使用快速凝固的丙烯酸酯粘接剂将加速度计固定在测试结构上。见图4.16。

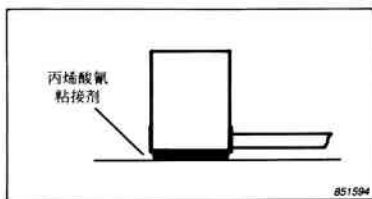


图4.16. 使用丙烯酸酯粘接剂安装小型加速度计

应用：

1. 本方法通常用于小型系列的加速度计。
2. 无法使用螺栓安装的永久性振动监测点。

优点：

1. 优良的高频性能及高加速度级。

缺点：

1. 非常不易将加速度计从测试表面取下，就一切情况而论，取下后需要用合适的溶剂清洗加速度计。这需要花费时间。
2. 不能保证精确的安装位置的重复性。
3. 电气绝缘有困难。

胶合螺栓安装

方法：

1. 确保一个光滑、无垢物的安装表面。
2. 选择适当的胶合螺栓，使用环氧树脂粘合剂将其粘在测试表面上并让它

干燥。这个过程可能要花30分钟时间，取决于所用的胶水。推荐使用Araldite®。

3. 用手指将加速度计牢固地拧在这种螺栓上。使用扳手时应加注意。见图4.17。

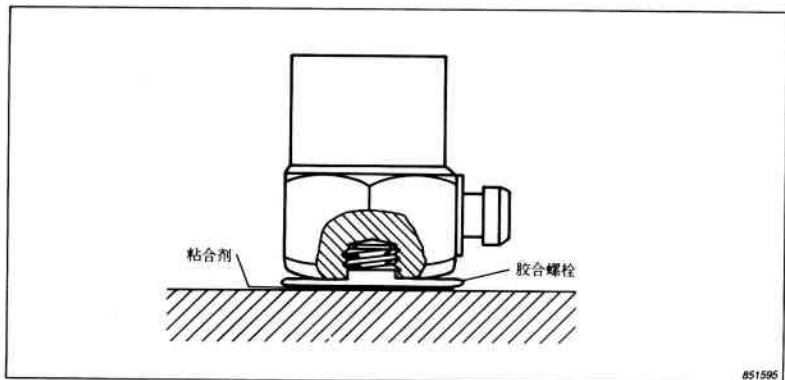


图4.17. 使用胶合螺栓安装加速度计

应用：

1. 加速度计经常从一个位置移到另一个位置以及需要重复进行但又不能使用通常的螺栓安装的地方的多点振动监测。

优点：

1. 良好的全面测量特性。

缺点：

1. 费时间（如果使用环氧树脂粘合剂的话）。
2. 从测试表面将螺栓和硬化了的胶水取下可能很困难。
3. 电气绝缘有困难。然而，在胶合螺栓下面加两层玻璃纤维可以提供良好的绝缘。另一种方法，螺栓可以涂上薄薄一层环氧树脂，并在粘到测试表面去之前让它固化。
4. 典型的温度最大极限值为80℃，取决于所用的粘合剂。亦可使用若干种较高温度的粘合剂。

注：

1. 丙烯酸酐粘合剂只能用在最光滑的表面上。这是因为粗糙或铣削过的表面，如胶合螺栓的底座上的突起能够“储存”减少这种粘合剂的粘合作用的空气穴。
2. 环氧树脂粘合剂可用来将加速度计直接粘到测试表面上去，不过，它们不如丙烯酸酐粘合剂粘得快。
3. “软性”粘合剂**不推荐**使用，因为耦合刚度的减小会大大减小频率范围。见图4.18。“软性”粘合剂的高温性能也很差。
4. 合适的甲基丙烯酸酐粘合剂是3M Cyanolite 101和Permabond 747, B&K的订货号为QS 0007。这两种粘合剂可在 -50°C 到 80°C 的温度范围里使用。其他型号有Eastman (Kodak) 910 MHT和Loctite IS。
5. 应极小心地使用扳手将加速度计在胶合螺栓上扳紧。经验表明，在取下加速度计时，往往不是加速度计先从螺栓上旋下来，而是螺栓从测试表面断裂下来，这时胶合螺栓仍紧紧地旋在加速度计基座里面。这是很难取出来的。

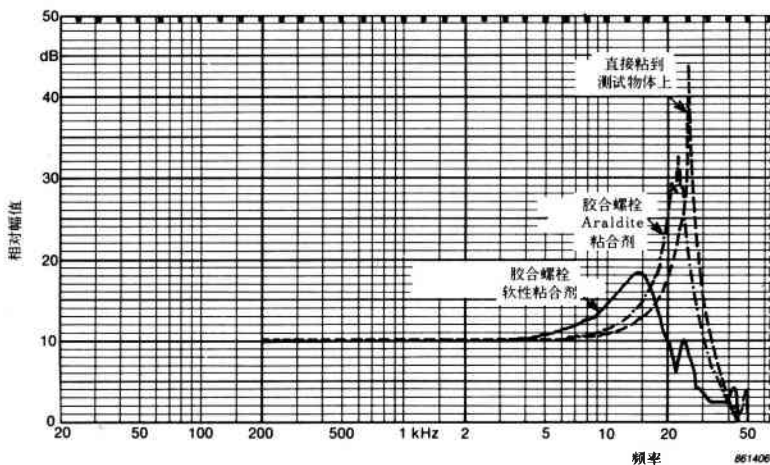


图4.18. 使用粘合剂安装的通用加速度计的频率响应

6. 有三种类型的胶合螺栓可供使用。有14毫米直径的 DB0756 和25毫米直径的 DB 2790，它们都采用跟大多数 B&K 加速度计一致的 10 - 32 UNF 螺纹。前面的一种一组25个，订货号为 UA0866。还有一种直径为 8 毫米，有 M 3 螺纹 (DB0757)的品种。这也可供选用，每组25个(UA0867)。

4.4.9. 探针 *

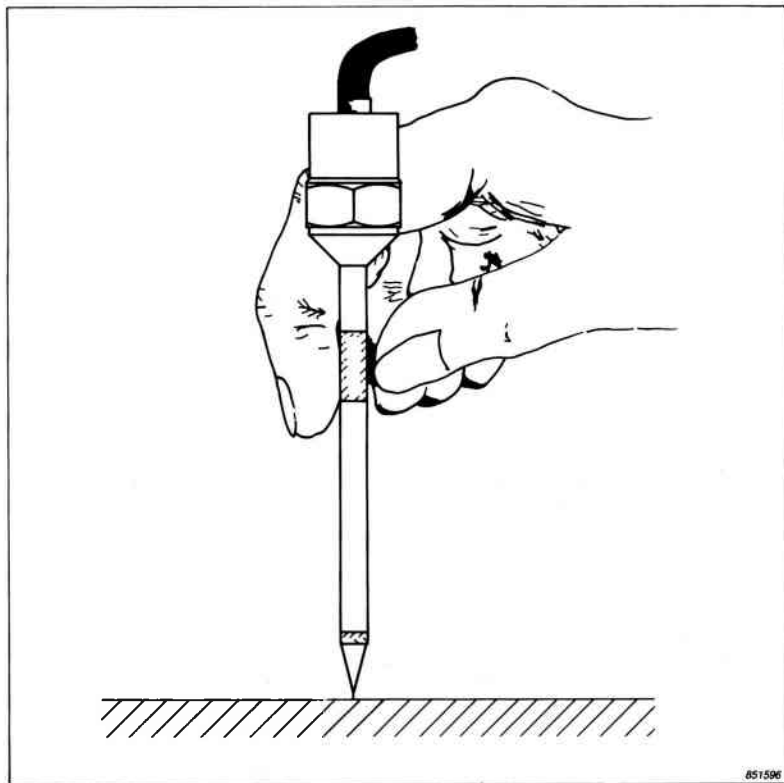


图4.19. 使用手持探针 YP 0080 作快速振动测量

* 在用探针测量时，必须经常考虑这种方法的局限性。

方法：

1. 通过 10-32UNF 螺纹将加速度计安装在手持探针 YP0080 上。见图 4.19。
2. 将探针尖蘸少量硅脂，然后将其压在测试表面上，确保手持探针的轴线垂直于测试表面，同时防止探针尖滑动。

应用：

1. 只适用于 1000Hz 以下的快速点测量和检查。

优点：

1. 能得到最快的安装方法。

缺点：

1. 在安装时，共振频率降得很低，以致它位于大多数振动测量的频率范围中，使测试结果无效。在使用这些探针之一时，推荐使用低通滤波器。见图 4.20。
2. 重复性非常差。

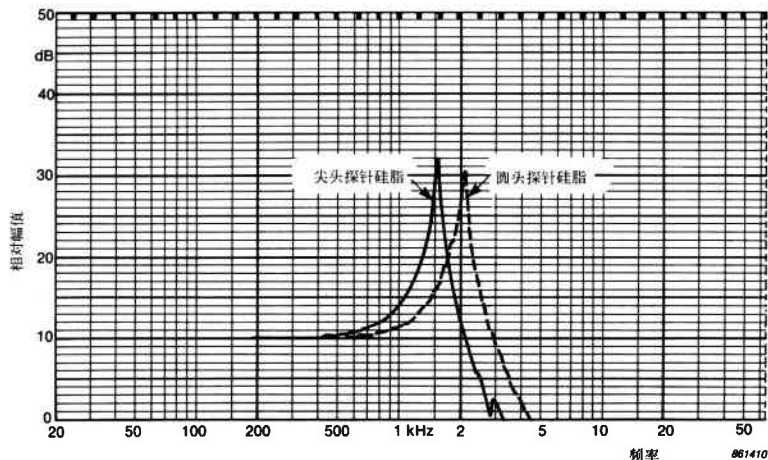
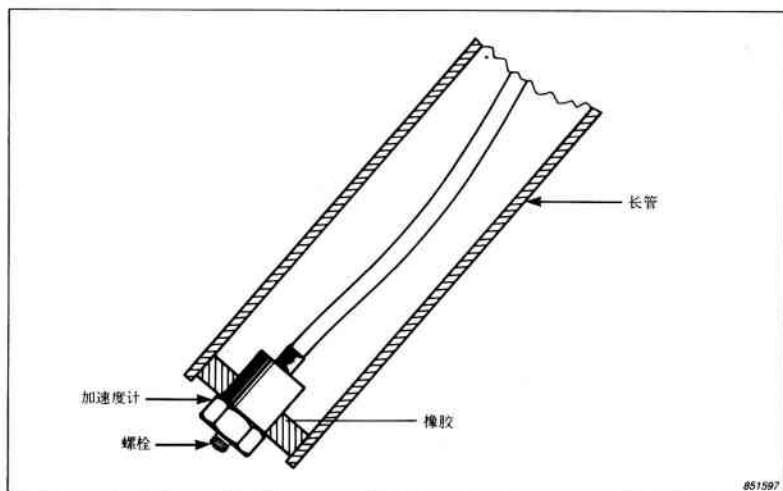


图 4.20. 在手持探针 YP 0080 上安装的通用加速度计的频率响应



851597

图4.21. 一个倒置的探针。橡胶有效地隔绝了探针质量，所以不会激起探针共振

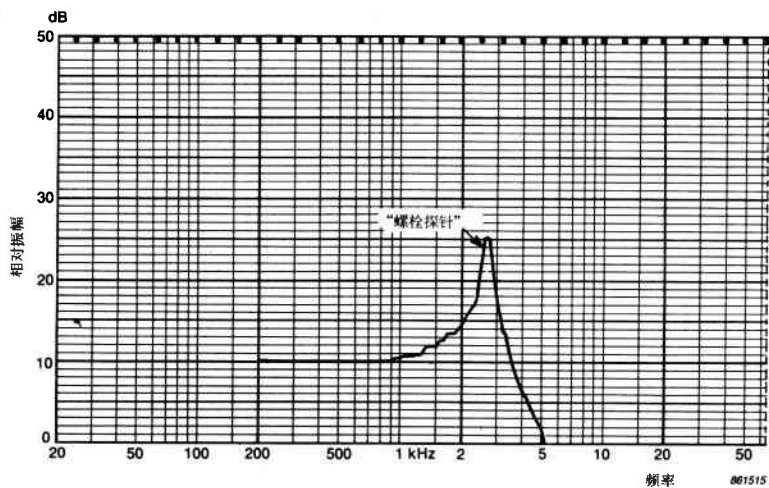


图4.22. 在一个倒置探针上安装的通用加速度计的频率响应

注：

1. 使用硅脂是试图增加耦合刚度。当使用圆头探针（DB0544）时可得到一个稍微扩展的频率范围。
2. 可以制作一个类似于在图4.21中所示的倒置探针，它可用于在无法达到所需测量点的位置的振动测量。加速度计安装螺栓可以当作探针尖来使用。这种安装技术与第一个探针相比可以改善高频性能。见图4.22。

4.5. 机械滤波器

机械滤波器 UA0559是和大多数 B&K 加速度计一起使用的非常简单和有用的器件。它按一组五个供应（UA0553）。

下面简短列举了机械滤波器的应用：

1. 测量“隐藏”在高频、高振级振动中的低频、低振级振动。
2. 保护加速度计不受破坏性的高振幅冲击的损坏，避免零点偏移影响。
3. 使加速度计与试样电气上绝缘。
4. 提供规定的频率上限，当使用的前置放大器没有内部滤波器时特别有用。
5. 消除横向振动的影响。

4.5.1. 概述

图4.23中所示的是机械滤波器 UA0559。它有坚固的耐腐蚀不锈钢壳体，在基座上带有一个 10 - 32 UNF 螺纹的孔用来装到试件上，在滤波器顶部还有一个 10 - 32 UNF 螺丝，用来固定加速度计。滤波器上部固定了一个内嵌异丁橡胶芯将滤波器与基座在电气上隔离开，而同时又在被测结构和加速度计之间作为低通滤波器使用。机械滤波器的侧面有一个通孔，可以穿过一根定位销钉，它将滤波器顶部和底部锁在一起并且当加速度计旋紧在滤波器上时保护橡胶芯不致过分扭曲。定位锁钉也可象扳手一样用来将滤波器拧紧在振动表面上。拧紧滤波器的扭矩推荐为 1.8Nm (15 lb in)。

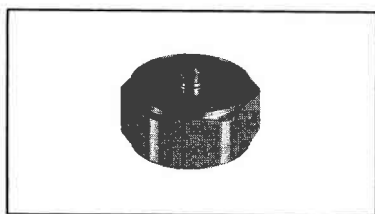


图4. 23. 机械滤波器 UA 0559

4. 5. 2. 工作原理

图4. 24中清楚地显示了机械滤波器对于加速度计主轴向及横向响应的影响。它的作用就象一个低通滤波器一样，衰减了至轴向和横向共振。仅管正常的加速度计共振使灵敏度比正常值增加了约30dB，但机械滤波器却在高频衰减40分贝/10倍频率的同时产生了仅有3到4 dB的强阻尼共振。附加的特点是能简单地通过在加速度计和滤波器之间增加额外的质量来调节截止频率。对横向振动的灵敏度也减小了。

由于滤波过程依赖于橡胶的刚度和阻尼特性，所以涉及到温度相关性。在低温时，橡胶芯的刚度增加，随着阻尼的减小，共振频率增高了。在高温时，刚度减小，伴随着共振频率和阻尼都减小了。在图4. 25中显示了这些特性。

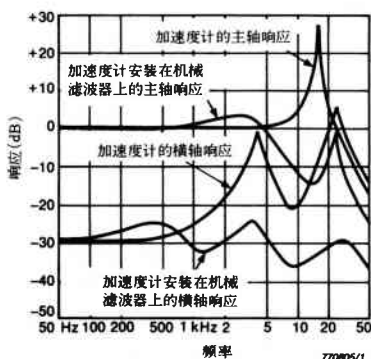


图4. 24. 当 B&K 加速度计安装在机械滤波器上时，其典型的主轴和横向频率响应

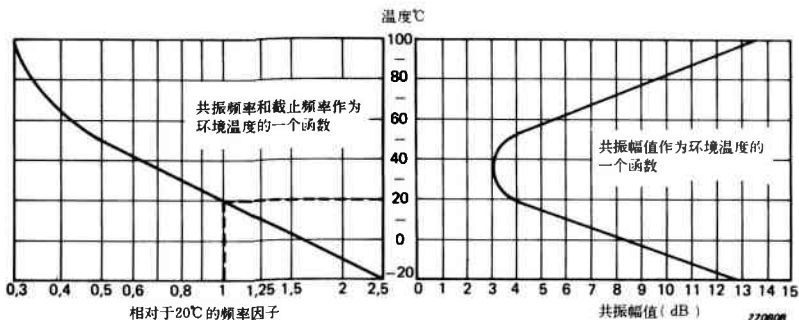


图4.25. UA 0559 典型的温度响应

如果可能在有油或其他碳氢化合物的环境中使用机械滤波器，那末在滤波器顶部周围和定位销孔口应使用耐油硅橡胶密封层。

有关这个器体的更详细的情况可参阅有关的 B&K 产品资料。

4.6. 加速度计电缆

连接加速度计和电荷放大器的电缆安装和布线不仔细的话，时常会引起振动测量不正确。主要的起因如下：

1. 当同轴电缆受到弯曲、压缩或拉伸时，屏蔽层在沿着其长度的一些点处与电介质瞬间分离。使这些点处的电容产生变化，形成了所谓“摩擦电”电荷。这种效应称为摩擦电效应，在测量低振级振动时，它表现为噪声的形式，特别麻烦。
2. 非常强的电磁场可以在电缆的二端感应出电压，在测量信号中会引起额外噪声。
3. 在压缩型设计中，如果电缆也受到振动，弯曲力可以通过电缆连接头传给压电片。

使用经过降噪处理的特殊同轴电缆可以有效地减少上述第一点的影响。这是 B&K 提供的所有加速度计电缆的标准特点。另外，电缆不应剧烈地弯曲或绞缠，因为这不仅会减弱降噪处理效果，而且也会损坏电缆接头。电缆应夹固在测试对象上以避免引起摩擦电噪声的过量相对运动。图4.26显示了电缆夹持的情况。

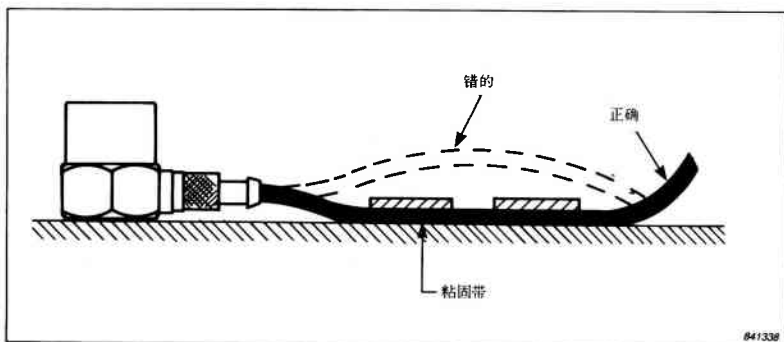


图4.26. 夹固加速度计电缆，减少电缆噪声

通过将电缆仔细布线以远离强电磁场源，可以克服上述第二点的影响。如果做不到，那末应该使用线驱动系统或平衡式加速度计以及特种电缆。这些系统的好处在3.6节中已作了分析，并汇总于表3.1中。8310型平衡式加速度计和2634型差分电荷放大器的详细情况请参阅工业加速度计产品资料。

大多数 B&K 加速度计的电缆套管是用不透水的聚四氟乙烯制造的，用在非常潮湿的环境中。另外，当环境特别潮湿时，电缆接头可以用室温硫化橡胶来密封。详情可看 4.2.5 节关于湿度的影响。有关电缆规格型号的准确详细资料可从 B&K 公司得到，包括硬管设计和卷曲电缆请参阅 B&K 加速度计和工业加速度计产品资料。

线驱动加速度计只需要一根同时传送电源和振动信号的电缆。常使用普通双芯电缆，因为它们与一般低噪声加速度计电缆相比更便宜。应该强调在有电磁场的环境中使用线驱动加速度计时，在电缆中将会感应出电压。这个电压对应于在3.6.3节、3.6.4节和3.6.6节中描述过的接地回路噪声。这几

节阐明了 B&K 线驱动系统消除接地回路噪声比恒流源供电的系统更有效。然而，在恶劣的工业环境中总是推荐使用同轴电缆同线驱动放大器相连。在不太恶劣的环境中可以使用双绞合电缆。

4.7. 接地注意事项

在多通道振动装置中，常常遇到测量仪器的地线之间流过小电流的问题。这种现象是由于装置不是一点接地以及每个接地点的电位不同而引起的。

可以通过仪器电源插座上的保护接地端子来接地。当加速度计与一个如机器那样的接地结构接触时，它的外壳也可以构成一个接地点。然而，在某些工业环境中，经常有这种可能性，机器外壳不处于地电位，甚至可能高于地几伏。这可能是由于机器缺少一个真正的接地端或是接地接头的阻抗不等于零而引起的。

连接电缆的屏蔽层时常连接到仪器的机箱和机架上，然后将它们连接到地。因此，如果仪器的机箱碰在一起，或通过电缆的屏蔽层或仪器的机架，地回路电流就会从一台仪器流到另一台。

地回路主要以电源的“交流声”形式表明它们的存在，这种交流声在确定的测量点处可以检测到，它们会有效地迭加在振动输出信号上。这会产生虚假的振级指示。为了防止它，必须“断开”地电流流经的回路。避免交流干扰有以下几种方法：

1. 确保所有仪器在接地链中只有一点接地，并且，这个接地点接地要可靠。
2. 挑选一台具有可以选择将输入电缆屏蔽层与前置放大器的地线绝缘的电荷放大器。这称为“浮地输入”。在前置放大器中噪声干扰的详细分析可参阅3.6节。
3. 使用一个如4.5.1节中描述的绝缘螺栓来安装加速度计。

在工业环境中，建议使用带差分放大器的电气上平衡并绝缘的加速度计。这种加速度计设计减少了电缆中电磁场干扰的影响。在这种情况下，电缆有两根导电芯线。每根芯线都有自己的屏蔽层。两个屏蔽层产生相同的干扰。差分放大器产生一个与这两个导线中信号差成正比的输出信号，由于是平衡式加速度计，这就有效地消除了电磁干扰的影响。这样一种设计也将减少地回路电压的影响。

5. 加速度计的校准和测试

5.1. 引言

假如振动的测量不能追溯到绝对基准物理量，那末，压电式加速度计的精确度、可靠性和多用性，就仅有有限的价值。校准的目的就在于确信应用加速度计的所有优点，并给出振动测量中确定的置信度。加速度计的测试提供了在一定的环境和工作条件下的数据，其校准也只在上述条件下有效。


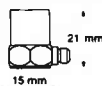

4383型加速度计校准图表				环境： 湿度：焊接、密封 温度范围：-74至+250°C (-100至+482°F) 最大冲击加速度：20kms ⁻² 峰值 典型的磁灵敏度 (50 Hz - 0.03 T)：1 ms ⁻² /T 典型的声灵敏度：0.002 ms ⁻² 在 154 dB SPL (2 - 100 Hz) 典型的基座应变灵敏度 (在基座面 250 με)： 0.01 ms ⁻² /με 典型的温度跨灵敏度 (3 Hz LLF)：0.1 ms ⁻² /°C 性能指标符合 ANSI S 2.11 - 1969	
单号： 1230172				外形：	
参考灵敏度在 50 Hz 时，100 ms ⁻² 及 23 °C 电荷灵敏度* 3.12 pC/ms ⁻² 或 30.5 pC/g 电压灵敏度* (包括 AO 0038) 2.75 mV/ms ⁻² 或 26.9 mV/g (前置电压放大器，输入电容：3.5 pF) 电容 (包括电缆) 1134 pF AO 0038 电缆的典型电容值 110 pF 最大的横向灵敏度 (在 30 Hz，100 ms ⁻² 下) 1.8 % 典型的无阻尼固有频率 51 kHz 典型的横向共振频率，使用 4290 激振台，加速度计由一个 10-32 UNF-2A 钢螺栓固定于一个钛立方体其固定扭矩为 1.8 Nm，并具有润滑油脂表面： 10 kHz 极性：连接插头的中心为正向，加速度方向从安装表面指向加速度计本体时 绝缘电阻：室温下，不低于 20,000 MΩ。 日期：..... 86.01.10 签名： 1g = 9.807 ms ⁻² 或 10ms ⁻² = 1.02g * 本校准数值可追溯到美国华盛顿 D. C. 国家标准局。				电气连接插头 同轴 10-32 UNF-2A	
				材料：钛，ASTM 2 级 敏感元件：PZ 23型压电片 重量：17 g 结构：三角刃切 安装螺纹：10-32 UNF-2B 安装螺栓：10-32 UNF-2A×13 mm 钢制 安装表面平整度：< 3 μm 安装扭矩：标称值 1.8 Nm，最小 0.5 Nm，最大 3.5 Nm 惯性质量：6.6 g 惯性质量的重心：高安装表面 12.1 mm 中心轴线上 加速度计的重心：高安装表面 9.2 mm 中心轴线上 有关进一步的细节可参阅 B&K 的“压电加速度计和前置放大器”手册。	
BC 0163-12				Pat. DK 131401	

图5.1. 校准图表，本图表叙述单个加速度计和一次校准的规格

B&K 生产的每一个加速度计都是在最严密的生产和质量控制条件下进行的，从而保证了传感器不仅可靠和确实是保持着可靠的，而且同一型号的各个器件的参数之间的离散性很小。于是，加速度计可以逐个校准，并给出几个参数的准确数值。

当我们谈论校准时，我们经常是指灵敏度的校准。然而，其他参数如：频率响应、电容、重量以及环境的影响是作为整个校准内容的一部分给出的。每一个加速度计都附有各自的校准图表，它包含有广泛的校准内容。某些校准内容仅针对特殊的加速度计，而有些只是对该型号通用的。请参阅图 5.1，5.2和5.3。

本章的目的并不想给出怎样一步、一步地进行校准。有关校准的方法可阅读涉及的特定校准设备的使用说明书。本章将给出综合的校准和测试 B&K 加速度计的梗概。

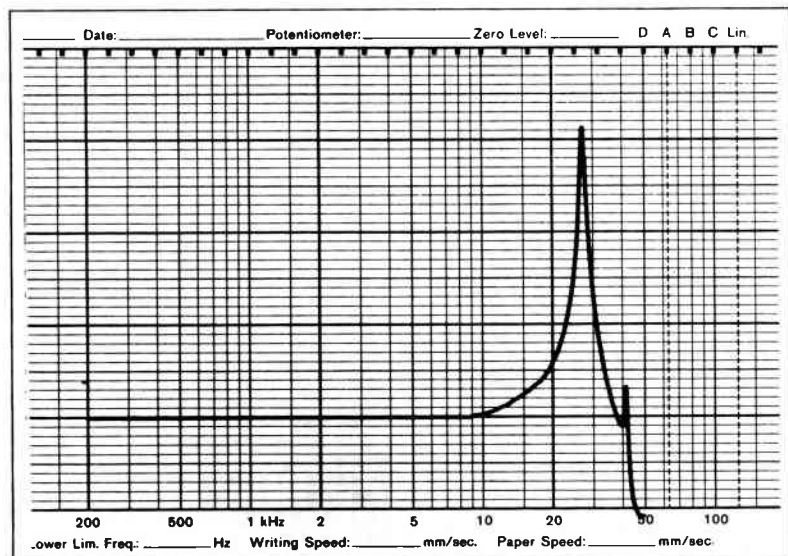
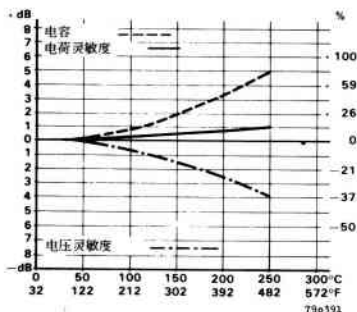


图5.2. 校准曲线。本图示出了单个频率响应曲线

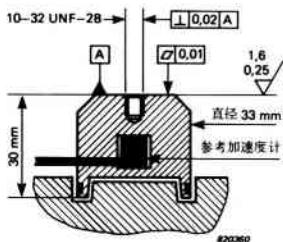
典型的温度灵敏度偏差：
(PZ 23 压电材料)



安装工艺：

检查安装表面应是清洁的和平滑的。
若有必要，则按 4290 校准用激励器简图，将表面精加工至允差范围内。
用一个 10-32 UNF-2A 双头螺栓固紧 4383。注意，别超过了所推荐的安装扭矩值，双头螺栓也不要拧到安装孔的底部。
加速度计和安装表面之间的润滑油或油脂薄层有助于达到良好的接触，和改善安装刚度。
有关其他类型的安装方法请参阅 B&K 的“压电加速度计和前置放大器”手册。

4290 激励器简图：
(修改的适合于实验室参考用)



材料：不锈钢
激励台的质量：180 g

应用本节建议的安装工艺所获得的 4290 激励器的
安装共振频率，示于随激励器所附的频率响应曲线。

图 5.3. 校准图表。本图表只叙述了一般通用数据

5.1.1. 为什么要对加速度计进行校准？

校准的主要原因是按确定的精确度建立与一定的物理量之间的关系；除此之外，还有一些其他的原因。在很多情况下，这是由于法律上的或合同上的原因，要求获得传感器精确度的证据；它们可能被用于与国际标准进行比较。

还会出现下述一些情况：加速度计将使用于特殊装置或者环境下，而校准图表中未列入上述条件下的加速度计性能。这时，用户就有必要为其特定目的，对加速度计进行校准。校准图表设计成内容足够广泛以满足大多数的应用场合。

校准过程的另一重要部分是核查整个系统，特别在测量系统是由许多仪器组成的情况下。只需运用快速校准核查方法，就可避免在计算整个系统灵敏度时产生的误差。这将在 5.3.4 节中阐述。

在进行任何一次校准前，我们总是建议测量加速度计的频率响应。这将保证加速度计在任何情况下，都不曾被损坏。这种损坏可从加速度计频率响应的无规律性显示出来，它表征着加速度计被损坏了，或者，在最好的情况下，加速度计的频宽范围是有限的了。假如出现了上述情况，那末，就不再需要进行校准了。加速度计频率响应的测量在 5.4.2 节中叙述。

5.2. 校准标准分级体系

5.2.1. 总体系

为了避免对每一个传感器进行绝对校准，首先建立一个标准传感器的体系。图 5.4 示出了这样一种体系。

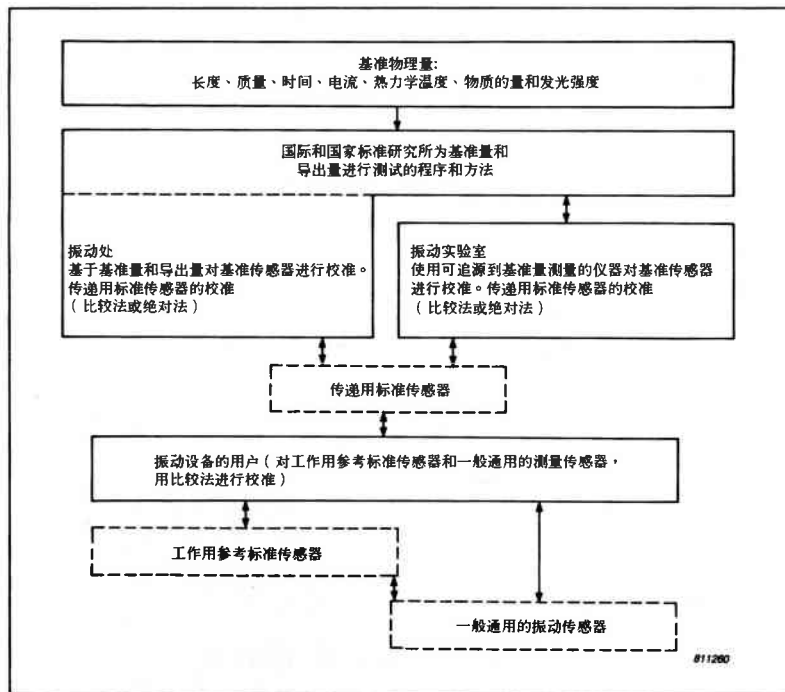


图 5.4. 校准标准的分级体系

标准传感器可以分为三类：

1. **基准传感器。**根据定义，绝对校准方法是指用基准或导出物理量，例如 SI(国际单位制)系统，表示传感器的灵敏度。用上述方法校准过的传感器称谓基准传感器，它处于校准标准分级体系的最高一级。它们为国际或国家标准研究所所拥有，或者为校准它们的校准实验室所拥有。
2. **传递用标准传感器。**它们也是在上述的研究所和实验室中校准的。校准方法可以是比较法，即用基准参考标准进行比较，或者是绝对法。

传递用标准传感器在标准研究所之间互相交换并复校，借以保持各研究所之间的一致性。校准实验室和标准研究所之间的一致性，也是通过交换和复校传递标准实现的。通过这种方式，我们建立了溯源性。溯源性规定了某一个标准研究所，负责建立某校准实验室中所进行的校准的一致性。于是，在该校准实验室中校准的传感器，就可溯源到标准研究所。

3. **工作用参考标准传感器。**它们用于用比较法校准通用传感器。工作用参考标准是在标准研究所或校准实验室中，用绝对法或比较法校准的。它们还用传递用标准传感器进行核查。这样，通用传感器校准的溯源性得到了保证。

5.2.2. B&K 的总体系

B&K 加速度计的校准，从 8305 型参考标准加速度计开始(参阅图 5.5)。

这是一个基于倒置中心安装压缩式设计的压电加速度计。压电元件是精心挑选和制备的 PZ 100 石英晶体，由于它对温度影响不敏感和卓越的长期稳定性而被选用。加速度计的顶部有一个螺纹孔，以便另一个加速度计安装在它的顶部，作背靠背式的加速度计校准(参阅 5.3.3)。

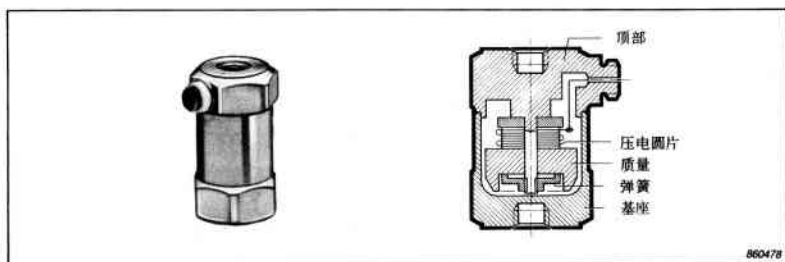


图5.5.8305型参考标准加速度计

每一个这种类型的加速度计都是用激光干涉技术，绝对法校准的（参阅5.3.1节）。此外，由8305和2626型适调放大器组合成的3506型校准配套是作为一个整体用激光校准过的（图5.6）。

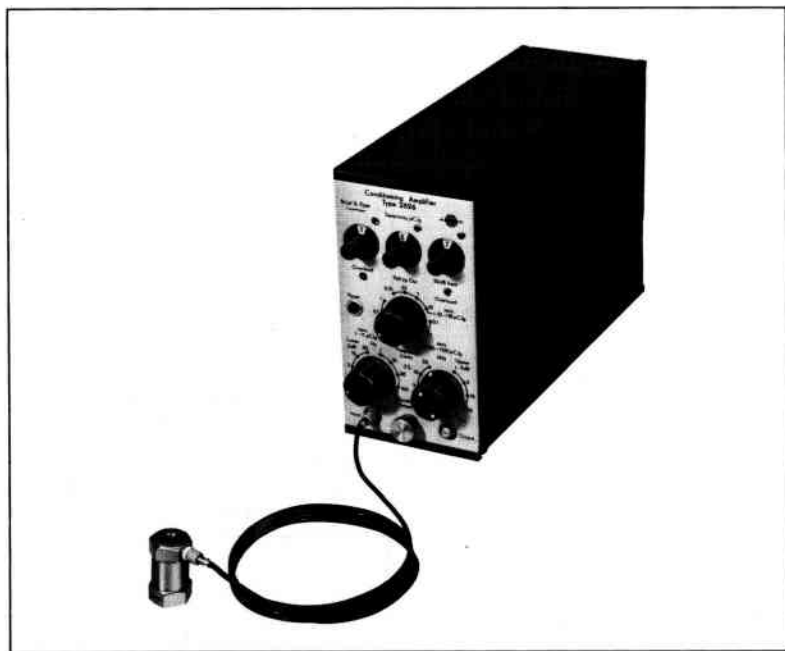


图5.6.3506型校准配套

B&K 的校准实验室每年定期定时向美国的国家标准局 (NBS)，送检 2 个 3506 型校准配套。这些传递标准还总是由专人送至 NBS，而不是经由通常的邮政渠道。这就保证了 B&K 的激光校准是稳定的，并使 8305 的数据可追溯到 NBS。

在丹麦建立并保有一套基准加速度计及其一套附属标准，以防任何一个基准标准遭到损坏。

所有 B&K 其他的加速度计，是用 8305 型作为工作用参考标准，采用半自动背靠背式比较系统进行校准的。

为了核查分布于世界各地的 B&K 服务中心和其他一些校准实验室中的校准系统，还建立了一套传递用标准。这儿，用 9559 型校准系统 (参阅 5.7.1 节)，应用背靠背方法为用户检定各种类型的加速度计。应用该系统也能校准其他一些参数。

这样，B&K 就拥有一套有效的校准体系，它不但在工厂生产阶段，而且还在加速度计售出数年以后，控制了整个校准过程，从而保证任一加速度计校准的追溯性。图 5.7 示出了这一体系。

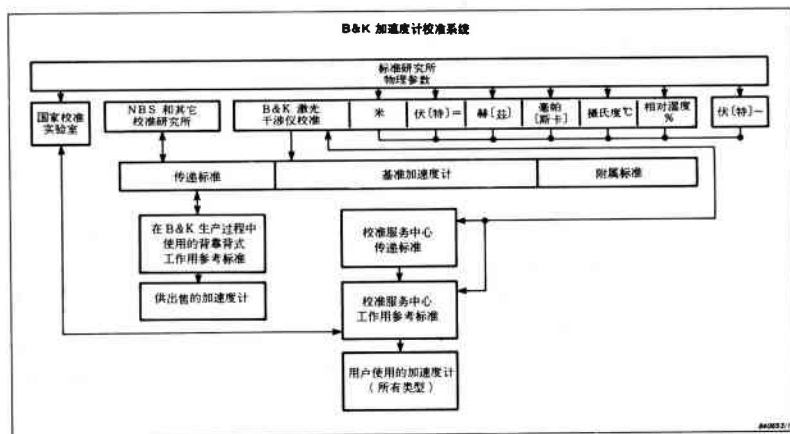


图 5.7. B&K 的校准体系

5.2.3. 校准技术的精确度

了解溯源性和精确度之间的区别是很重要的。溯源性只是指在标准研究所进行的校准的一致性，和校准是在允差范围内。这就意味着，假如一个校准实验室与一个和其相关的标准研究所相比，使用了更为精确的仪器，那末，在前者进行校准的不确定度就比后者小。

为了评价各种校准方法的精确度，必须用同一种方式处理校准的不确定度。B&K采用了英国校准中心的 No. 3003 指导文件所阐述的方法。该文件描述的方法是只用一个量(±)表示测量的不确定度，它包括了用概率表示的置信度，这时，测量的真值位于所列的范围(±)之内。为实际应用上的方便，校准时的不确定度分成两大类：

- a) 随机不确定度
- b) 系统不确定度

下面我们来研究绝对法和比较法校准时的不确定度。

绝对法。应用激光干涉术，理论上可以测定振动的振幅到0.02%的精确度。然而，在实际测量时，电压测量误差为(0.1%)，振动激励器运动的失真度为(0.1%)，参考加速度计的倾斜度为(0.2%)，以及参考加速度计的横向运动(0.1%)。用绝对法校准的3506型校准配套和8305型参考标准加速度计的估计不精确度，在置信度为99%时，经计算为0.6%。

比较法。NBS用本方法核查B&K的传递标准。B&K也用此法来校准各种加速度计，它的总不精确度估计为优于0.95%。在给出本方法整个估计误差时，还必须加上上面所述用绝对法校准的3506校准配套所引入的不确定度，在置信度为99%时，其值为1.12%。

必须记住，上述这些数字是基于应用B&K自己一套激光校准系统，而该系统是用绝对法校准的。然而，NBS比较系统是精确到1%的。于是，假如应用了3506系统的NBS的精确度数字，那末，比较法整个估计不精确度将相应地增加到1.38%，同样具有99%的置信度。

5.3. 校准方法

灵敏度的校准可分为三种截然不同的方法：

1. 绝对法。它们有激光干涉术和互易技术。
2. 相对法。即背靠背式方法。
3. 校准器法。它包括了使用已知振级的振动激励器。

5.3.1. 激光干涉术

这是一种绝对的校准方法，需要使用非常专门的设备，因此，大多数加速度计的用户都不大愿意应用这种方法自己进行校准。

B&K 为8305型参考标准加速度计和3506型校准配套进行校准时的装置，示于图5.8。

测量装置是以迈克尔逊干涉仪为中心。激光束射向待校标准加速度计的上表面，并由此沿同一光路反射回来。干涉仪的分束器（半反射平面镜）放置在该光路上，将从加速度计反射回来的部分光束射向光敏晶体管。射至光敏二极管的部分激光光束也来自分束器和干涉仪的固定平面镜，这就在光敏二极管上产生了干涉条纹，放大的光敏二极管的输出被馈入频率比计数器的输入，并由它测量每一周期的条纹数，而该条纹数是正比于加速度计的峰-峰位移量的。

振动频率（正弦波）由正弦发生器产生，它的输出还用作频率比计数器的外部时钟。调节振动的振幅，直至显示出正确的比例。标准加速度计的电信号输出，则用一个适调放大器和一个均方根差分电压表测量，它们在测量前都经过电参量校准。

本装置的激光干涉仪部分，测量8305的峰-峰位移量。由此，用频率计数器读出的频率数，可以导出加速度值。用测量到的加速度计的电信号输出除以加速度，就得到了灵敏度。

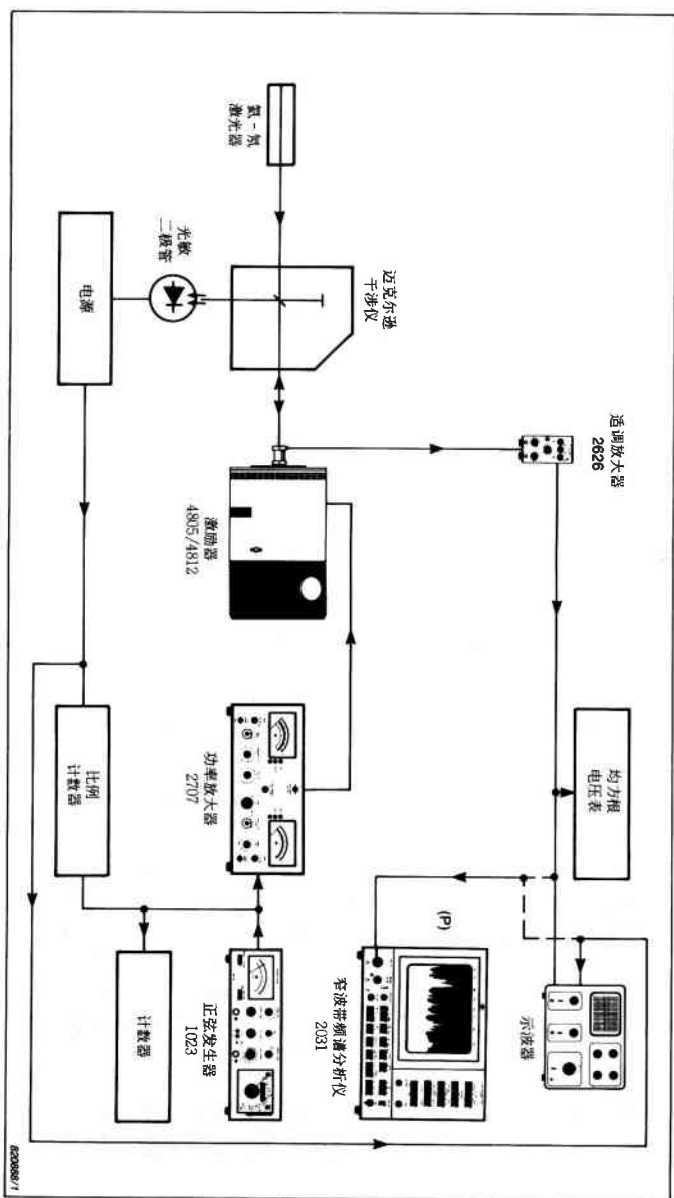


图5.8. B&K所用的激光干涉仪装置

B&K 使用的激励频率为 160 赫兹，加速度为 10米秒^{-2} 。

5.3.2. 其他的绝对方法

还有一些其他的绝对校准方法。但是，B&K 并不应用它们，因而只在此简单地叙述一下。这些方法是：

1. 互易法校准。B&K 的文献中，直至最近还一直建议互易校准作为绝对方法，任何一个拥有基本的，并非特殊专门设备者，都可应用此法。然而，本方法非常烦琐，且难以获得好的结果。本手册将不对此方法进行阐述。
2. 应用地球引力进行校准。应用本方法时，细心地将加速度计放在铅垂圈内，以保证只有重力作用于加速度计。本方法仅在低频率下是实用，有时还适用于静态（直流）加速度计。B&K 不使用此方法。

5.3.3. 背靠背式比较校准方法

B&K 应用背靠背式方法，对每一种类型的测量加速度计，进行工厂校准。B&K 使用的是半自动系统，然而，任何一个想对加速度计进行自己的比较校准者，都可建立一个类似的系统。

待测灵敏度的加速度计以背靠背方式，固定于 8305 型参考标准加速度计上，它们再一起被安装于合适的振源上。由于两个加速度计的输入加速度是一样的，它们的输出之比也就是它们的灵敏度之比。

能与 4815 型校准头相配的 4801 或 4805 型振动激励器，是为背靠背式校准加速度计设计的。4815 型内已安装有 8305 型参考标准加速度计。详细细节可参阅 B&K 该仪器的产品资料。

最简形式的背靠背式安排，示于图 5.9。两个加速度计以恒定的频率被激励，它们的输出经过前置放大器（可以以电荷或电压模式工作，这取决于测量电荷灵敏度还是电压灵敏度），再分别用已知精确度的高质量电子电压表测量。

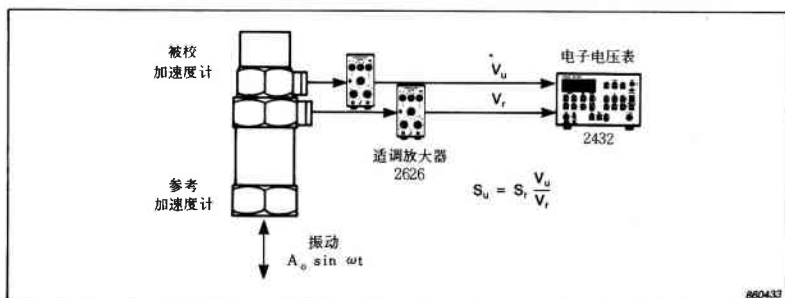


图5.9. 简易的背靠背式校准加速度计的装置。加速度计的信号先经过前置放大器，再接入电压表

上述系统可以通过应用扩展的电压表，如2970型灵敏比较器作为系统的一部分而得到改进（参阅图5.10）。通过调节待测加速度计一路中前置放大器的灵敏度，在2970表头上得到了最小的偏转。这时，灵敏度可简单地从适调前置放大器的面板上读出。

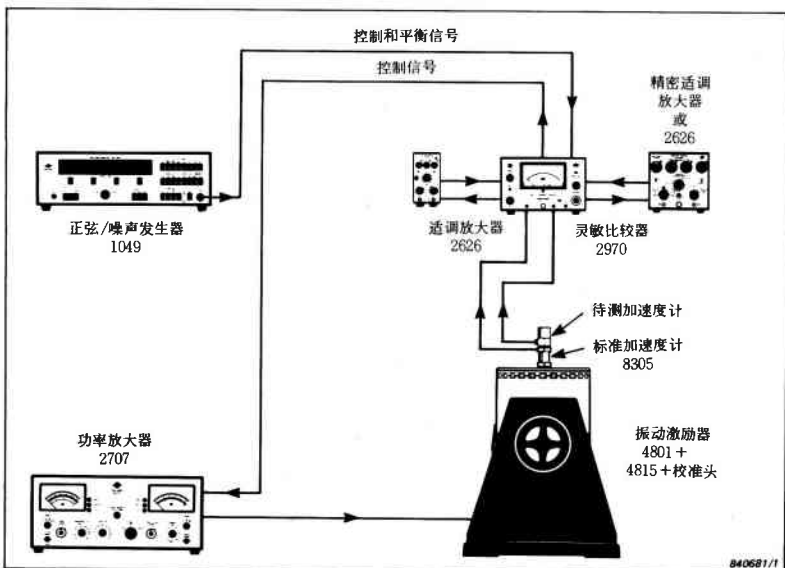


图5.10. 基于2970型灵敏比较器的整套背靠背式高精度校准装置

2970型执行下述功能：

1. 简化输出量之间的比较。
2. 加快测试过程的速度。
3. 给出与B&K自己的工厂校准和NBS校准相似的校准精确度。
4. 为电压和电荷灵敏度的校准，完成电压 - 电荷转换。

校准频率和加速度级，将根据必须遵循的标准改变。B&K测量加速度计是在160 Hz频率和 100 ms^{-2} 加速度级校准的。2970型只能用于60至250 Hz频率范围内。

在实际应用时，只要加速度计处在正常的工作范围内是好的；那末，在某一个加速度级或频率下校准加速度计，就不会产生什么差别。在频率和动态范围内，加速度计毕竟是非常线性的器件。在2.5.2节中，B&K应用PZ 23和PZ 27压电元件的通用加速度计，其电荷灵敏度（和电容）随频率每增加10倍频率而减小2.5%。于是，另一频率下的灵敏度，就可按此效应进行计算。例如，从50 Hz到160 Hz，其差近似为1.3%。

在测量电压灵敏度时，必须记住电压灵敏度是将加速度计和电缆作为整体考虑才有意义，因此，它们是一起进行校准的。假如换了电缆，则校准就不再有效。

5.3.4. 应用校准过的振动激励器核查灵敏度

也许，最方便和通用的核查技术是应用一台已校准过的振动激励器。B&K为此目的，专门生产了一种仪器。任何一个从事振动测量的工作者，都可使用本方法。

4294型校准激励器。这是一种小型的、袖珍式的用电池供电的、已校准过的振动激励器，它在159.2 Hz（1000弧度/秒）下，产生均方根值 10 ms^{-2} 的固定加速度，相当于均方根速度 10 mm^{-1} 和均方根位移 $10 \mu\text{m}$ 。精确度优于 $\pm 3\%$ 。用于现场核查系统是极为理想的。图5.11所示为4294型正利用测量放大器来核查一个加速度计的灵敏度。

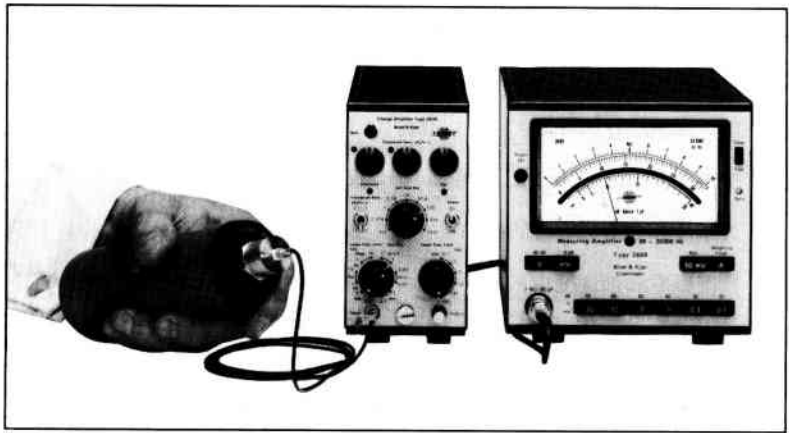


图5.11.4294型振动激励器

4294型适用于下述两个方面；

1. 加速度计灵敏度的核查。
2. 系统校准的核查和调节。

加速度计灵敏度的核查是一件极简单的事情，只要将加速度计装在激励器头部，并用一个好的电压表测量被装加速度计的前置放大器的输出就可以了。

4294型的一个显著特点是它校准从加速度计到分析仪整个测量链的能力。可以测得整个系统的灵敏度，而不管测量链中各个仪器的灵敏度。

此外，可以调节某个仪器的增益，以给出相应于激励器产生的参考加速度下的满刻度偏转。

5.4. 加速度计其他参数的测量

加速度计灵敏度是最通常应用的测量参数。但是，在振动的精确测量

中，它决不是唯一的最常用的测量参数。我们还希望逐个测量下述参数：

1. 横向灵敏度
2. 频率响应
3. 安装共振频率
4. 电容

B&K 生产的每个加速度计，大多数这些参数是逐个测量的。

环境参数的测量在 5.5 书中叙述。

5.4.1. 横向灵敏度

在 B&K 公司，横向灵敏度是用类似于示于图 5.12 的专门定制的振动台测量的。安装加速度计的平台在水平面内，以 30 Hz 频率和 100 ms^{-2} 的加速度振动。与此同时，在振动台中心的加速度计安装平台，缓慢地转动。这就变更了作用于加速度计上的横向振动的方向。测量加速度计的输出，就可找到最大的横向灵敏度。同时，还可以确定最小横向灵敏度的方向，并用红点标记在大多数 B&K 加速度计上。

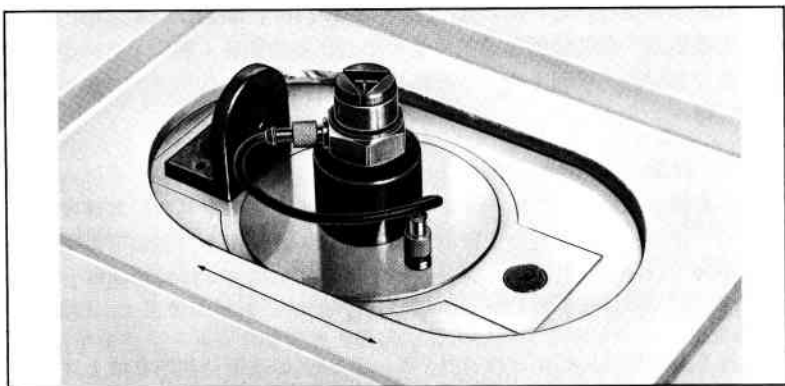


图 5.12. 类似于图示的专门激励器，用于 B&K 测量加速度计的横向灵敏度

5.4.2. 频率响应

类似于 B&K 用于测量频率响应的装置示于图5.13，它适用于除小型加速度计外的所有测量加速度计。

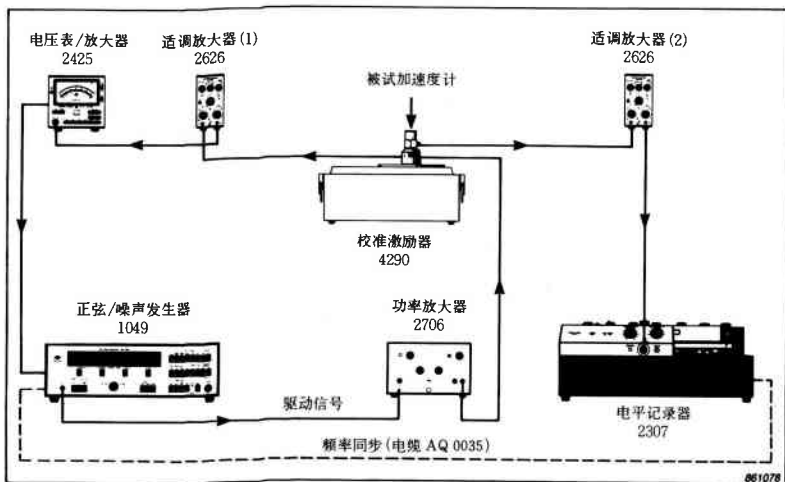


图5.13. 测量加速度计频率响应的一套装置

4290型校准激励器(参阅图5.14)，在200 Hz至50 kHz频率范围内由正弦发生器驱动。4290型的运动部件是一个180克的钢头，钢头上有一个仔细加工的安裝平面，平面上有一个带螺纹的安裝孔，为安裝加速度计提供了最佳的安排。

应用反馈信号(压缩器回路)，振动台的加速度在整个频率范围内保持恒定。安装于激励器头内的一个小型加速度计，产生一个与实际加速度相关的信号。该信号被馈入到发生器的压缩器部分，并被用于自动调节发生器的输出电平，由此，在激励器头部获得了恒定的加速度。待校加速度计的輸出，随之送入前置放大器并输到电平记录仪。

除了小型和8310型加速度计外，每一个B&K加速度计都附有按上述方式获得的各自的频率响应曲线。校准图表上注明的安裝共振频率，也可从曲线上读出。只要知道加速度计在任一特定频率下的响应，我们就可以不受硬性频率限的限制。



图5.14.4290型校准激励器

在应用本技术测量加速度计的频率响应时，下面几点必须记住：

1. 加速度计安装于激励器头部一事，是起决定性作用的。不好的安装会在频率响应曲线上，得出无法分析的误差。进一步的细节可参阅4.4节。
2. 除非反馈回路（压缩器）具有足够的增益，否则就不能得到激励器头部恒定的加速度。建议在测量的频率范围内，核查激励器头部的加速度是否恒定。这是通过将控制用加速度计的输出，经它的前置放大器馈入到电平记录仪，并调节前置放大器的增益和相应的发生器压缩器的速度完成的。本方法在正弦发生器或激励器应用控制的使用手册中有叙述。
3. 超过30 kHz以上，压缩器维持激励器头部恒定加速度的精确度很快下降。然而，高至50 kHz范围时，仍然能给出安装共振频率的可靠核查。

5.4.3. 无阻尼固有频率

本参数在振动测量中，几乎没有实用意义。由于它是加速度计的一个基本参数，在校准图表上仍需引用。有两种方法可选用来测量它。

加速度计通过它的电缆被悬挂着，并由一个通过 1 nF 电容耦合的电压源电激励。无阻尼固有频率定义为：在此频率下，加速度计的电压和电流同相。监测通过电容和通过加速度计的两个电压，并找出两者相位差 90° 时的频率，它就是无阻尼固有频率的近似值。使用类似于图5.15所示的一套装置，可以很容易地完成测量，这儿，使用一台示波器同时监测两个量。通过调节激励频率，可以获得正确的频率，此时，得到了圆形李沙育图。

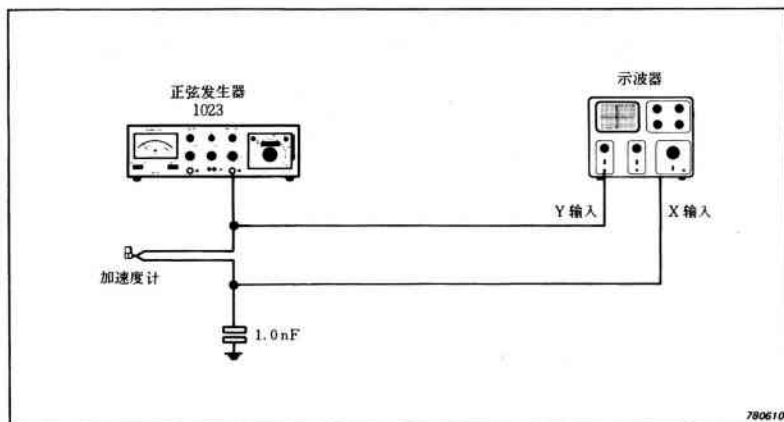


图5.15. 加速度计无阻尼固有频率的测量装置

第2种方法仍然是通过电缆将加速度计悬挂起来，不过，这时是通过轻叩基座给予机械的冲击。加速度计信号经电荷放大器送入存储示波器，在示波器上得到了衰减的振荡曲线。测量该响应中一个振荡的周期，并取它的倒数，就获得了无阻尼固有频率。

5.4.4. 电容

一个加速度计的电容可以定义为它的电荷灵敏度与电压灵敏度之间的比值，并可从这两个校准数值经计算获得。校准图表上所写的值就是这样得到的。

假如应用电容电桥在 1000 Hz 频率下测量该电容，就会得到与第一段中所写的算法得到的不同的电容量。这是由于压电元件的电容随频率每增加 10 倍，递减 2.5% 引起的。测量的电压也可能不一样。

校准图表上写明的典型电容量，包括了随加速度计所附的电缆的影响，或者是以加速度计为一整体。为了仅仅计算加速度计自身的电容，必需减去电缆电容的影响。校准图表上能找到典型的电缆电容值。

5.5. 确定环境对加速度计性能参数的影响

加速度计校准图表上有一段落给出了环境因素对加速度计灵敏度影响的细节。本节阐述 B&K 测定这些灵敏度的方法。

5.5.1. 温度瞬变灵敏度

测量过程如下：将加速度计固定在一块铝块上，铝块的质量近似为加速度计的十倍，然后缓慢地将其放入水槽中，水温近似为 25℃，高于室温。小心不要诱发任何振动于该装置上。

前置放大器设置的下限频率为 3 Hz，其衰减陡度为 6 dB/ 倍频程。加速度计的峰值输出由存储示波器测量。产生上述输出的加速度可根据加速度计的灵敏度通过计算获得，再除以温度变化量，就得到了温度瞬变灵敏度。

5.5.2. 温度灵敏度

假如在显著不同于室温的温度下进行振动测量，要求的测量精确度优于 1 或 2 dB，那末，建议应用写于校准图表上的数据，以获得加速度计灵敏度

的修正系数。这个数据是根据在校准温度（室温）下得到的灵敏度和电容值以图表形式给出的变化。电压、电荷灵敏度和电容，都随温度而变。

对于B&K加速度计，逐个校准它们的温度依赖关系是不必要的，这是因为同一型号的压电材料具有相似的温度依赖关系。于是，温度曲线可从批量试验中得到，并印在同一型号加速度计的校准图表上。

为了测量温度依赖关系，加速度计被固定在一个带有一根推杆的专门振动激励器上，推杆则插入环境试验箱。待校加速度计安装于振动台面，台面则固定于试验箱内推杆的端面；激励器和参考加速度计则安装在试验箱外推杆的另一端面。B&K所用的振动台面，能容得下20个加速度计（取决于它们的大小）。校准是在低频下进行的，所以不存在由于推杆或振动台面引起的共振而产生不准确的危险。温度依赖关系的测量是一个极其耗时的过程，这是因为需要足够长的时间来保证加速度计达到了平衡的温度。不容许存在温度梯度，否则，灵敏度将改变。

在应用本技术时，加速度计电容的温度依赖关系，可从电压和电荷灵敏度中导出。

5.5.3. 基座应变灵敏度

基座应变灵敏度是通过将加速度计安装在靠近于一根重的钢悬臂梁的固定端来测量的。应变片粘着于加速度计周围的梁上。在梁的自由端，给予一定的位移，由于这一运动，加速度计基座受到了应力。应变片的输出与加速度计的输出一起，由存储示波器监测。当应变下降到 $250 \mu\epsilon$ 大小时，测量加速度计的输出，并计算得产生这一相应输出所需的加速度。用应变除加速度，就得到了基座应变灵敏度。每一份校准图表上，给出了它的典型值。

5.5.4. 声灵敏度

会引起误解结果的声学激励器在没有机械干扰情况下，精确地测量加速度计的声灵敏度是困难的。在B&K公司，加速度计被安装在一个专门的小

室内，小室严实地靠在一高压传声器校准器上，校准器在小室内产生 154 dB 的声压级。上述装置确保了传输给加速度计的振动最小。

加速度计和它的前置放大器的输出，输至频率分析仪，校准器是由正弦波扫描频率激励的。根据加速度计输出的频谱，可以确定信号的那一部分来自声激发，那一部分又来自激励器活塞的传输振动。在 100 Hz 频率以上，后者一般将前者遮蔽掉，这就是为什么声灵敏度参数，只在 2 至 100 Hz 频带内引用。然而，在频率高至几千赫芝时，结果仍然被估计为有效的。在这样高的频率下，波长已可和加速度计的尺寸相比较。

5.5.5. 磁灵敏度

这也是一个难以精确测定的参数。在 B&K 公司，加速度计被放置于大线圈的中心，当 50 Hz 市电通过线圈时，交变的磁场产生了。在线圈中心处，场强为 0.03 特斯拉。加速度计被紧紧地固定在重型支架上，这样，加速度计和固定装置的电磁感应运动，被减至最小。正如上面例子一样，测出加速度计的输出大小，并转换成灵敏度。下述几点必须考虑。

1. 元件周围夹圈内的感应电流是无法避免的。这个电流将重新产生磁场，并且，夹圈和由它夹紧的压电元件将运动。
2. 因为惯性质量具有一点磁导率，它也将有些感应运动，不过这运动是很小的。
3. 加速度计电缆中，也会有感应电流。

由于不可能逐项区分各个效应的影响，我们只能采用累积总效应，并由此导出磁灵敏度。

5.5.6. 温度极限

加速度计可以应用的最高温度和最低温度，定义为它的温度极限。在此范围内，当加速度计重又在室温下放置 24 小时以后，任一校准参数不得有小的和超过规定的变化。

在 B&K 公司，用烘箱加热或冷冻箱冷却加速度计进行上述试验。加速度计的全面校准是在它从烘箱或冷冻箱取出，并放置 24 小时后进行的。容许灵敏度变化 2%。

5.5.7. 冲击极限

冲击试验是这样做的：将加速度计安装在液压装置上，以一已知的冲击级，短暂连续撞击加速度计100次，并且在加速度计的三个方向(x、y和z)上，重复进行。然后，对灵敏和频率响应进行校准。在任一轴向使灵敏度改变了2%的那个最小冲击量，即取为最大冲击限。

只要与加速度计配用的前置放大器，能接受并处理来自加速度计的非常高的输入电荷，那末，冲击限就是测量限。仅在很少的情况下，应用高灵敏加速度计测量冲击，加速度计的输出可以用一个电荷衰减器衰减。参阅3.2.4节。

5.6. 加速度计电缆的工厂测试

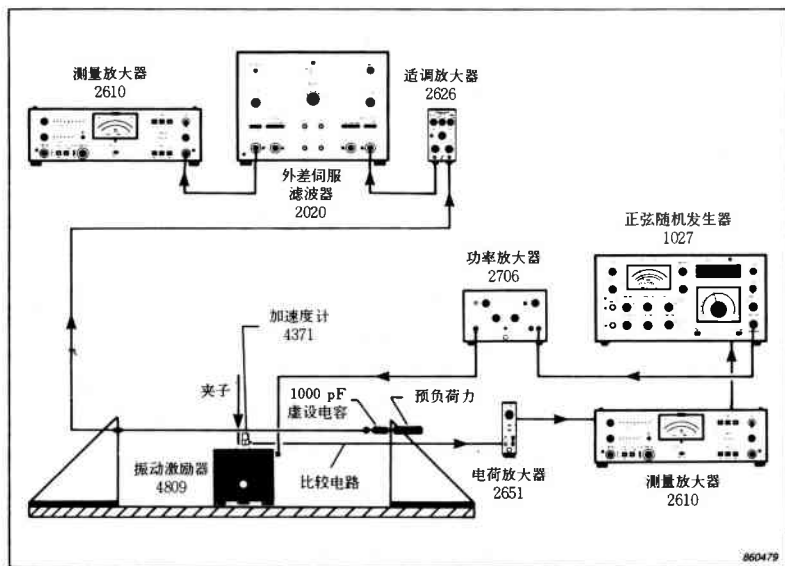


图5.16. 加速度计电缆摩擦电噪声的测量

与 B&K 用以测试加速度计电缆低噪声性能相类似的一套装置，示于图 5.16。电缆一端接有一负载，它表示了一个通用的加速度计，而另一端则有一预负荷力。电缆的输出馈至一电荷前置放大器。然后，电缆连接于两个支承端之间，它的中点则被夹紧于激振器。应用中心频率为 80 Hz 的窄带随机振动，激振电缆。测量电缆的输出。假如电缆噪声太大，则丢弃它。在 B&K 公司，每根 AO 0038 电缆是单独测试的。所有其它电缆则是批量测试的。

5.7. 校准设备

5.7.1. 9559 型校准系统

这是一套专用于加速度计和传声器校准的系统。装备有该系统的实验室能校准灵敏度和频率参数，并颁发校准证书。图 5.17 示出了该系统。



图 5.17. 9559 型校准系统

世界各地有好几个 B&K 服务中心拥有本系统，本系统也可提供给任何希望进行上述校准的组织。每一套系统都附有如何校准加速度计和传声器的详尽指导。若想获得 9559 型的详细资料，请与您当地的 B&K 公司代理接洽。

<p>4290型校准激励器</p> 	<p>用于加速度计频率响应测量的小型振动激励器。与 B&K 正弦发生器连用</p> <ul style="list-style-type: none"> ■最大力值 3 牛顿。频率范围 200 Hz 至 50 kHz ■内装有调节发生器输出大小用的加速度计
<p>4815型校准头</p> 	<p>主要适用于用背靠背和激光干涉仪方法，校准加速度计的高加速度和其他测量传感器</p> <ul style="list-style-type: none"> ■装有 8305 型标准参考加速度计 ■可以安装 4801 型激励器本体或 4805 型永磁体 ■加速度计可在 5 Hz 至 10 kHz 频率范围内校准
<p>2970型灵敏度比较仪</p> 	<p>加速度计的快速背靠背比较校准。与 3506 型校准装置和 2650 型精密适调放大器连用</p> <ul style="list-style-type: none"> ■校准精确度 $\pm 1.02\%$，99% 的置信度
<p>4294型校准用激励器</p> 	<p>用于加速度计或测量系统校准的袖珍型参考振动源</p> <ul style="list-style-type: none"> ■在 159.2 Hz (1000 弧度/秒) 下固定的 $10 \text{ ms}^{-2} \pm 3\%$ 均方根值。 ■内部干电池供电 (1 × IEC 6LF 22)
<p>3506型校准装置</p> 	<p>由 8305 型参考加速度计和 2626 型适调放大器组成，并用激光干涉仪方法作为一个整体进行校准。用于加速度计校准装置</p>

T01019GB0

图5.18. 可从 B&K 购得的校准设备概要

5.7.2. 各种校准设备

图5.18给出了本章叙述过的可从 B&K 购得的校准设备的概要。

5.8. 与加速度计校准有关的一些标准

在 B&K 公司，各种型号加速度计的校准与测试都遵循 ISO 5347“振动和冲击传感器的核准方法”。本书仅概述推荐用于各种加速度计校准的技术，进一步的细节必需查阅有关资料。

有关校准的其他标准有：

ANSI S2.11-1969——“用于测量冲击和振动的电传感器的校准和测试的选择”。

ISO/DP 8042——“用于冲击和振动测量的惯性传感器的某些性能规定”。

英国检定（管理）局 NO. 3003 指导文件。

6. 附录

附录A

米	厘米	毫米	英尺	英寸
1	100	1000	3,281	39,37
0,01	1	10	0,0328	0,3937
0,001	0,1	1	0,00328	0,03937
0,3048	30,48	304,8	1	12
0,0254	2,54	25,4	0,0833	1

T01087GB0

表 1. 长度的换算

米/秒	公里/小时	英尺/分	英里/小时
1	3,6	196,85	2,2369
0,2778	1	54,68	0,6214
$5,08 \times 10^{-3}$	$1,829 \times 10^{-2}$	1	$1,136 \times 10^{-2}$
0,4470	1,6093	88	1

T01088GB0

表 2. 速度的换算

g	米/秒 ²	厘米/秒 ²	英尺/秒 ²	英寸/秒 ²
1	9,81	981	32,2	386
0,102	1	100	3,281	39,37
0,00102	0,01	1	0,0328	0,3937
0,03109	0,3048	30,48	1	12
0,00259	0,0254	2,54	0,0833	1

T01089GB0

表 3. 加速度的换算

千克	tekma	克	磅	盎司
1	0,102	1000	2,2046	35,274
9,807	1	9807	21,6205	345,93
10^{-3}	$1,02 \cdot 10^{-4}$	1	$2,205 \cdot 10^{-3}$	$3,527 \cdot 10^{-2}$
0,45359	$4,625 \cdot 10^{-2}$	453,59	1	16
$2,835 \cdot 10^{-2}$	$2,8908 \cdot 10^{-3}$	28,35	$6,25 \cdot 10^{-2}$	1

T01091GB0

表 4. 重量 (质量) 的换算

牛顿	公斤力	磅英尺/秒 ²
1	0,102	7,2329
9,807	1	71,0
0,1379	$1,405 \cdot 10^{-2}$	1

T01090GB0

表 5. 力的换算

牛顿/米 ²	毫巴	毫米水柱	大气压	英寸水柱	磅/英寸 ²
1	10^{-2}	0,102	$9,869 \cdot 10^{-6}$	$4,02 \cdot 10^{-3}$	$1,4505 \cdot 10^{-4}$
100	1	10,917	$9,868 \cdot 10^{-4}$	0,402	$1,4504 \cdot 10^{-2}$
9,807	$9,807 \cdot 10^{-2}$	1	$9,678 \cdot 10^{-5}$	$3,937 \cdot 10^{-2}$	$1,4223 \cdot 10^{-3}$
$1,013 \cdot 10^5$	1013	$1,0332 \cdot 10^4$	1	406,77	14,696
249,10	2,491	25,4	$2,453 \cdot 10^{-3}$	1	$3,605 \cdot 10^{-2}$
6908,9	69,089	704,49	$6,805 \cdot 10^{-2}$	27,736	1

T01092GB0

表 6. 压力的换算

焦耳=瓦秒	千瓦小时	公斤·米	千卡	英国热量单位	英尺·磅
1	2,778 10 ⁻⁷	0,1020	2,39 10 ⁻⁴	9,48 10 ⁻⁴	0,7376
3,6 10 ⁸	1	3,6710 10 ⁵	860	3413	2,655 10 ⁶
9,807	2,7241 10 ⁻⁶	1	2,3423 10 ⁻³	9,2949 10 ⁻³	7,233
4187	1,163 10 ³	427	1	3,9685	3087,4
1056	2,93 10 ⁴	107,59	0,25198	1	778
1,3558	3,766 10 ⁻⁷	0,1383	3,239 10 ⁻⁴	1,285 10 ⁻³	1

T01094GB0

表 7. 功能和热的换算

千瓦)	千克米/秒	l 公制马力	千卡/小时	英尺·磅/秒	英制马力
1	102	1,36	860	738	1,34
9,81 10 ⁻³	1	1,33 10 ⁻²	8,44	7,23	1,32 10 ⁻²
0,735	75	1	632	542	0,986
1,16 10 ⁻³	0,119	1,58 10 ⁻³	1	0,858	1,56 10 ⁻³
1,36	0,138	1,84 10 ⁻³	1,17	1	1,82 10 ⁻³
0,745	76	1,014	642	550	1
2,93 10 ⁻⁴	2,99 10 ⁻²	3,99 10 ⁻⁴	0,252	0,216	3,93 10 ⁻⁴
3,52	35,9	0,479	3024	259	0,471

T01096GB0

表 8. 功率的换算

符号	前缀	倍数
G	giga	10 ⁹
M	mega	10 ⁶
k	kilo	10 ³
c	centi	10 ⁻²
m	milli	10 ⁻³
μ	micro	10 ⁻⁶
n	nano	10 ⁻⁹
p	pico	10 ⁻¹²

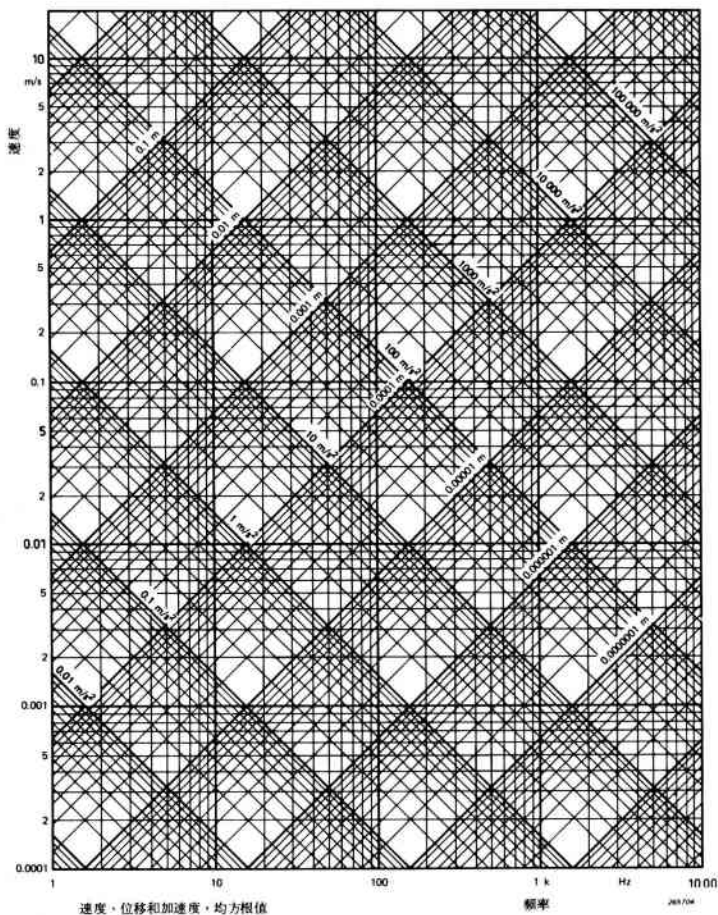
T01235GB0

表 9. 常用前缀

附录B

振动计算图表

振动计算图表是一种在简谐振动情况下对频率、位移、速度和加速度之间的关系用图表来描述。只要已知其中两个参数，那末另外两个参数就很容易地从图表中读出。



附录C

振动标准

由于各种标准的不断发展，并且在世界范围内有多种标准，所以组合的一套有关的标准有其极限值。然而，B&K 出版过一本“声、振动和冲击、亮度和对比度的国家标准、国际标准和推荐”刊物，您可从您当地 B&K 代理处索取、由世界上各地区标准权威机关出版供选用的标准连同该权威机关的地址均包括在这本刊物中。

附录D

B&K 有关振动的文献

B&K 在振动领域内出版了相当数量的技术教育用的刊物，它们被分为下列几类：

入门。A5幅面基础教科书为所选题目的范围内的有关理论和应用提供了简明的介绍。在振动这一领域内提及了三本初级读物：振动测量、振动试验和机器状态的监测。这三本初级读物均可从您当地B&K代理那里得到。

应用短文。这些短小的文章是定期出版的，并且主要集中论述 B&K 设备的应用，尤其对最近感兴趣的方面。

技术评论。这种刊物每年出版四次。论及某些 B&K 仪器设备的应用问题以及考虑到用户的要求而开展特殊产品的发展工作。

书籍。关于振动的几种书籍，B&K都能提供，下面提供一些供选择：

“机械振动和冲击测量”

“频率分析”



“模态试验——理论与实践”




“大型结构的模态分析”

最近的应用短文一览表和技术评论均可根据要求提供。

附录E

当前 B&K 可供应的前置放大器汇总。2644 型线驱动放大器在第三章内说明。关于这些型号的较详细资料可参看它们的产品资料。



前置放大器型号	<p style="text-align: center;">2635</p>  <p style="text-align: center;">3 位灵敏度 适配低噪声电荷 放大器</p>	<p style="text-align: center;">2626</p>  <p style="text-align: center;">3 位灵敏度 适配低噪声电荷 放大器</p>				
测量方式	加速度 速度 位移	加速度				
放大器灵敏度	0.1 mV 至 10V/pC (-20 至 +80 dB)	0.1 mV 至 1V/pC (-20 至 +60 dB)				
频率范围 (3dB 点)	0.1Hz - 200kHz	0.3Hz - 100kHz				
可选择的 频率极限 (3dB 极限)	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: right; padding-right: 10px;">低</td> <td>0.2; 1; 2; 10Hz (10% 极限)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right; padding-right: 10px;">高</td> <td>0.1; 1; 3; 10; 30; >100 kHz (10% 极限)</td> </tr> </table>	低	0.2; 1; 2; 10Hz (10% 极限)	高	0.1; 1; 3; 10; 30; >100 kHz (10% 极限)	0.3; 3; 10; 30Hz 1; 3; 10; 30; > 100 kHz
低	0.2; 1; 2; 10Hz (10% 极限)					
高	0.1; 1; 3; 10; 30; >100 kHz (10% 极限)					
电源	内接电池或 外接直流电源	交流市电				
其它特点	过数指示器, 试验振荡器, 电池供电情况指示器	过数指示器, 直接和变压器耦合输出				
应用	现场振动测量。配以水听器 测量水声	通用测量。加速度计的 比较校准				


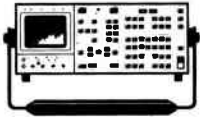
<p style="text-align: center;">2651</p>  <p style="text-align: center;">3 个级别—增益灵敏度设定 电荷放大器，具有很低的 频率测量能力</p>	<p style="text-align: center;">2634</p>  <p style="text-align: center;">体积小，坚固， 增益可调电荷放大器， 对电磁辐射的抗干扰性极佳</p>	<p style="text-align: center;">2650</p>  <p style="text-align: center;">4 位灵敏度可调噪声电荷 和电压放大器</p>
加速度 速度	加速度	加速度
0.1-1-10mV/pC (-20至+20dB)	0.9至10mV/pC 可内部调节 (0-20dB)	0.1mV/pC至100mV/pC, 100mV/V至100V/V (-20至+40dB)
0.003Hz至200kHz	1Hz至200kHz	0.3Hz至200kHz
0.003;0.03;0.3;1Hz		0.3;3Hz;2kHz
200kHz		1;3;10;30 >200kHz
外接直流	外接直流	交流市电
输入信号， 地浮地或接地	常规或差分输入， 可固定在机械架子上	过载指示器 测试振荡器
多通道测量 冲击测量	工业环境中振动测量 永久性安装	加速度计的比较校准 一般测量

T00669GB0

附录F

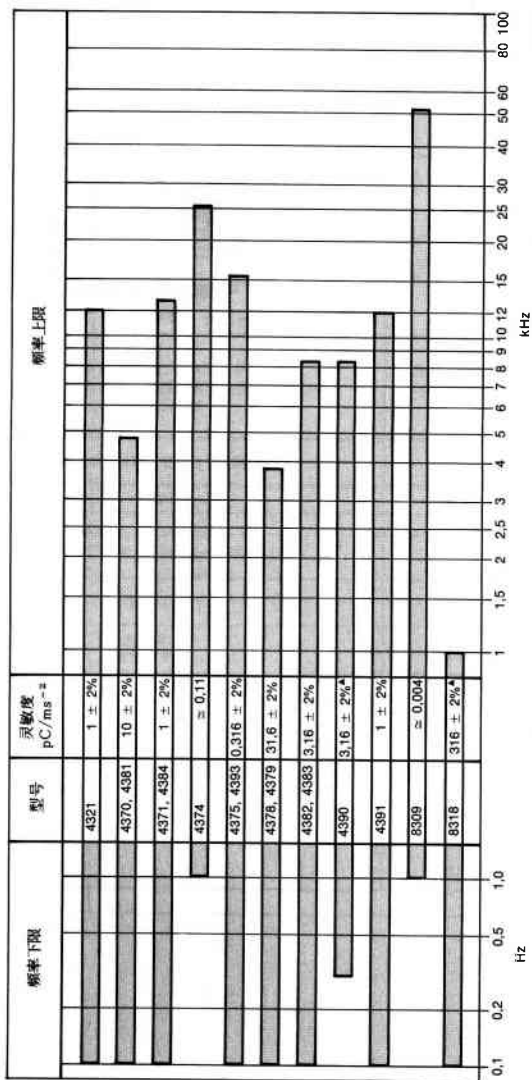
各种加速度计可直接与下述仪器相连，关于这些仪器更详细的资料可查阅它们的产品资料。

仪器型号	<p style="text-align: center;">2511</p>  <p style="text-align: center;">振动计</p>	<p style="text-align: center;">2513 2516³</p>  <p style="text-align: center;">积分式振动计</p>
简介	一般振动测量的多用途振动计	经常使用的经济而精确的振动计
测量方式	加速度、速度、位移	加速度、速度
频率范围 (-3 dB)	0.3Hz - 15kHz	10Hz - 10kHz ¹
可选频率极限 (-3 dB)	下限频率 1.3 和 10Hz ¹ 上限频率 1 和 15 kHz ²	下限频率 ² 8Hz 和 10Hz 上限频率 ² 1kHz 和 10kHz
检波器	均方根 真实的峰至峰	一分钟 Leq 均方根，最大峰值
电源	内装电池 外接直流电	内装电池
输入	电荷	电荷
注意事项	<ol style="list-style-type: none"> 对于加速度方式是 0.3Hz 和 3Hz 2511 选用 1 kHz 时可用来对振动烈度进行测量 	<ol style="list-style-type: none"> 当选择线性计权时 用于线性，手 - 臂和振动烈度测量 (ISO/DP 5349 和 ISO 2954) 2513 用国际单位，2516 用英制单位，2513 / WH 2134 是这些仪器的简易形式

<p style="text-align: center;">7007 ZM 0060</p>  <p style="text-align: center;">磁带记录仪</p>	<p style="text-align: center;">2515</p>  <p style="text-align: center;">振动分析仪</p>
<p>是一台便携式仪器，用于现场和实验室，用插入式组件ZM 0060记录振动和声音数据</p>	<p>用于机械振动分析的极有功效的快速付里叶变换分析仪，包括机械状态监测，故障诊断和平衡。</p>
<p style="text-align: center;">加速度，速度</p>	<p style="text-align: center;">加速度，速度，位移（模拟量）</p>
<p style="text-align: center;">$0.3\text{Hz} - 16\text{kHz}^1$</p>	<p style="text-align: center;">$0.3\text{Hz} - 20\text{kHz} (-1\text{dB})^1$</p>
<p style="text-align: center;">下限频率0.3, 1和10 —</p>	<p style="text-align: center;">下限频率0.3Hz或3Hz 上限频率分8档可选，取决于分析模式</p>
<p style="text-align: center;">—</p>	<p style="text-align: center;">除了许多频率分析选择之外还包括总均方根</p>
<p style="text-align: center;">插入式电池盒 外接直流电</p>	<p style="text-align: center;">内置电池 外接直流电</p>
<p style="text-align: center;">C 电荷</p>	<p style="text-align: center;">I 电荷，电压，线驱动</p>
<p>1. 取决磁带速度</p>	<p>1. 下述几种功能提供选择：恒定百分率带宽分析（6%和23%），窄带分析，频谱展宽分析，扫描分析，倒谱分析，速度补偿，频谱比较，大容量存储器</p>

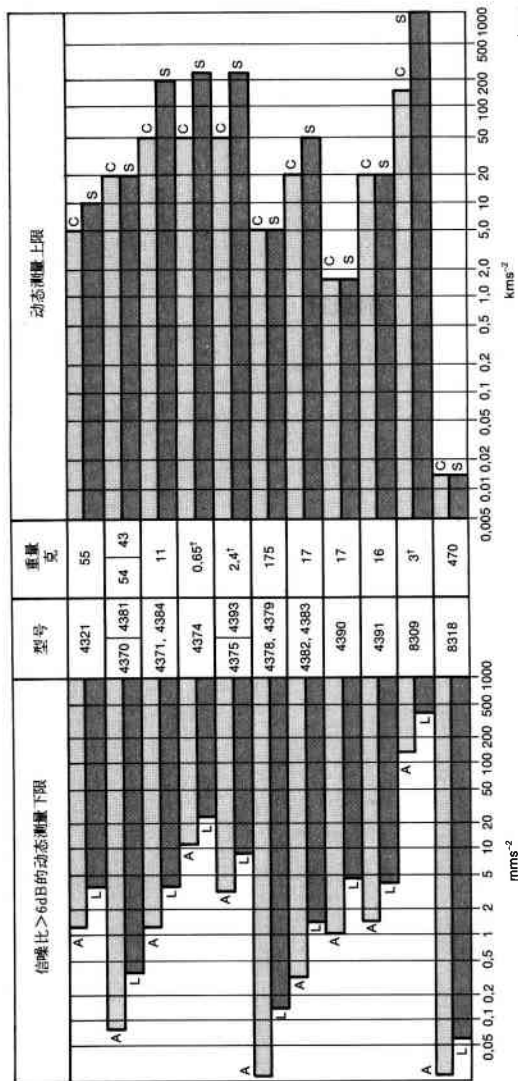
T00843 MW

附录G



851205

通用加速度计的频率上、下限(10%)和灵敏度。▲符号表示是线驱动型的,它的灵敏度单位是 $\mu\text{A}/\text{ms}^{-2}$ 。



65/266

加速度的动态测量上和下限及重量。最大值(C=连续的正弦波振动, S=冲击)是指峰值。最小限值(A=1/3倍频程带宽到各加速度计+10%的频率上限, L=2Hz-22kHz线性)是均方根值。动态测量限是用B&K加速度计和2635型电荷放大器的典型可测振级。†符号不包括电缆重量。

附录H

型号	重量 (克)	灵敏度		频率范围 +10% 极限 (kHz)	显著的特点	应用场合
		电压 mV/ms ⁻² (mV/g)	电荷 pC/ms ⁻² (pC/g)			
4374	0.65 不包括电缆	≈ 0,18 (≈ 1,8)	≈ 0,11 (≈ 1,1)	26	微型剪切型, 具有重量轻, 高共振频率, 整体电缆, 划一增益®灵敏度	高振级高频率振动测量冲击测量, 精密机构和在有限的空间作振动测量
4393	2,4	≈ 0,48 (≈ 4,8)	0,316 ± 2% (3,10 ± 2%)	16,5	微型三角剪切®型具有重量轻, 高共振频率	
4375	2,4 不包括电缆	≈ 0,48 (≈ 4,8)	0,316 ± 2% (3,10 ± 2%)	16,5	微型三角剪切®型, 具有重量轻, 高共振频率, 整体电缆	
4391	16	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	12	三角剪切®结构, 具有划一增益灵敏度 绝缘底座和采用 TNC 顶部连接	适用于一般的冲击和振动测量
4371	11	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	12,6	侧面连接	
4384	11	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	12,6	顶部连接	
4382	17	≈ 2,6 (≈ 26)	3,16 ± 2% (31,0 ± 2%)	8,4	顶部连接 三角剪切®结构, 具有划一增益® 灵敏度, 对系统校准方便	
4383	17	≈ 2,6 (≈ 26)	3,16 ± 2% (31,0 ± 2%)	8,4	侧面连接	
4390	17	3,16 ± 2% μA/ms ⁻² (31,0 ± 2% μA/g)		8,4	线驱动加速度计, 具有划一增益® 灵敏度和三角剪切®设计	适用于一般的振动场合, 也适用于直接和 B&K 双信道信号分析仪连接
4370	54	≈ 8 (≈ 80)	10 ± 2% (98,1 ± 2%)	4,8	顶部连接 三角剪切®结构, 具有较高的 划一增益®灵敏度	一般的振动测量对低振级测量具有较高的灵敏度
4381	43	≈ 8 (≈ 80)	10 ± 2% (98,1 ± 2%)	4,8	侧面连接	
4378	175	≈ 26 (≈ 260)	31,6 ± 2% (310 ± 2%)	3,9	顶部连接 非常高的灵敏度划一增益®型 的三角剪切®结构加速度计	适用于只有低振级振动的环境
4379	175	≈ 26 (≈ 260)	31,6 ± 2% (310 ± 2%)	3,9	侧面连接	
8318	470	316 ± 2% μA/ms ⁻² (3100 ± 2% μA/g)		1	三角剪切®设计具有内装线驱动前置放大器 并有较高的灵敏度 划一增益®灵敏度	非常低的振级振动测量。内装的低通滤波器 提供明确规定的频率上限
8309	3 不包括电缆	≈ 0,04 (≈ 0,4)	≈ 0,004 (≈ 0,04)	54	尺寸小, 5mm整体固定螺栓, 整体电缆	冲击测量可达10 ⁶ ms ⁻² 。 高频振动测量
4321	55	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	12	三个有同样划一增益®灵敏度的三角剪切® 加速度计组合成一个单元	在三个相互垂直的方向上进行振动测量
4322	350	≈ 0,8 (≈ 8)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	0,1 在橡胶垫内	三个三角剪切®划一增益®型的加速度计 装在一个橡胶和金属外壳内	4322和2512型人体响应振动计一起使用 对人体振动进行测量
8305	40	-	≈ 0,125 (≈ 1,25)	5,3 (2% 极限)	稳定性非常高, 温度范围广的石英元件, 用激光进行校准, 精确度达±0.6%	f 标准参考加速度计用作加速度计背对背校准
8310	100 不包括电缆	≈ 1,0 (≈ 10)	1 ± 2% (9,81 ± 2%)	9	整体不锈钢电缆, 工作温度可高达400°C 划一增益®灵敏度	按工业现场使用设计的加速度计, 能在特别恶劣的环境条件下使用, 经常用于 固定安装的振动监测
8315	102	≈ 2,5 (≈ 25)	10 ± 2% (98,1 ± 2%)	8,1	在强电磁场的场合能得到电平衡和 绝缘以获低噪声	
8317	112	3,16 ± 2% μA/ms ⁻² (31,0 ± 2% μA/g)		7,5	内装线驱动放大器可获低噪声, 在存在引爆源 场合能安全使用, 划一增益®灵敏度	

T00720GB1

B&K 现有各种加速度计一览表。对于完整的详细数据可再查阅最近的通用加速度计、工业用加速度计及标准参考加速度计的产品资料。

Brüel & Kjær

必凯公司

DK-2850 Nærum · Denmark · Telephone: +45 280 05 00 · Telex: 37316 bruka dk

北京: 咨询部——海淀区紫竹院路16号, 电话: 8021274。服务站——学院南路34号, 电话: 2012789。

上海: 服务站——青海路105号, 电话: 530009 - 101分机。沈阳: 咨询部——黄河大街七段六号

电话: 62574 - 350分机。

广州: 咨询部——天河区东莞庄路竹丝岗1号, 电话: 705579。香港: 必凯亚洲有限公司 - 信德中心三〇〇六-八室

电话: 487486, 电传: 63340 BANDK HX

