



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 338—1997

电 荷 放 大 器

Charge Amplifier

1997-09-01 发布

1998-03-01 实施

国家技术监督局 发布

电荷放大器检定规程

Verification Regulation of

Charge Amplifier

JJG 338—1997

代替 JJG 338—1983

本检定规程经国家技术监督局于 1997 年 09 月 01 日批准，并自 1998 年 03 月 01 日起施行。

归口单位： 中国计量科学研究院

起草单位： 中国计量科学研究院

中国航空工业总公司三〇四研究所

本规程技术条文由起草单位负责解释

本规程主要起草人：

李文龙 （中国计量科学研究院）

于 梅 （中国计量科学研究院）

参加起草人：

于仲敏 （中国计量科学研究院）

杨素贞 （中国航空工业总公司三〇四研究所）

目 录

一 概述	(1)
二 技术要求	(2)
三 检定条件	(3)
四 检定项目和检定方法	(5)
五 检定结果的处理和检定周期	(12)
附录 1 电荷放大器各旋钮的辨认	(13)
附录 2 公式的举例说明及推导	(14)
附录 3 低于 2 Hz 的失真度测量方法介绍	(16)
附录 4 检定记录、检定证书背面格式	(18)

电荷放大器检定规程

本规程适用于新制造、使用中和修理后的二级和三级电荷放大器的检定。

一 概 述

电荷放大器是接压电传感器的一种前置放大器，它的输出电压正比于输入电荷。电荷放大器广泛地应用于振动、力、压力、声学等非电量电测技术中。

电荷放大器的核心——电荷转换级是一种特殊形式的运算放大器，如图 1 所示。电容 C_i 是传感器的等效电容， C_f 是电荷转换级的反馈电容器。

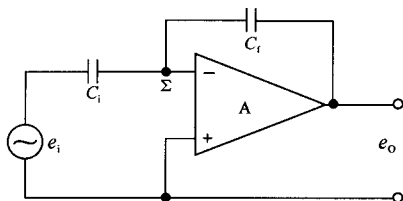


图 1 电荷转换级的电原理图

根据运算放大器的理论，开环增益和输入阻抗很高的放大器 A 的输出电压 e_o 与输入电动势 e_i 的关系为：

$$e_o = - \frac{\frac{1}{j\omega C_f}}{\frac{1}{j\omega C_i}} e_i = - \frac{C_i}{C_f} e_i \quad (1)$$

图 1 中 Σ 点的电位几乎为零，是所谓虚地点，因此电容器 C_i 极板上的电荷 Q_i 为

$$Q_i = C_i e_i \quad (2)$$

将 (2) 式代入 (1) 式得

$$e_o = - \frac{1}{C_f} Q_i \quad (3)$$

(3) 式表明：电荷转换级的输出电压正比于输入电荷，比例系数就是反馈电容的倒数。上述电荷转换级在电荷放大器中是第一级，其后往往还有滤波器、积分器、归一化放大器以及输出放大器等，典型的电荷放大器方框图如图 2。

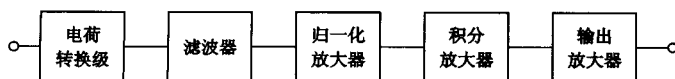


图2 典型的电荷放大器方框图

二 技 术 要 求

1 环境特性

电荷放大器的工作环境应符合温度 $0\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；湿度 ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时) $20\%\sim 90\%\text{ RH}$ 的要求。

2 电荷放大器的分级

电荷放大器按准确度分级，按下限频率又分为 A 类和 B 类。电荷放大器分级分类情况详见表 1。

表 1

准确度等级		准确度 (20 ± 5) $^{\circ}\text{C}$ %	下限频率 (3dB) Hz	上限频率 (0.5dB) kHz	失真度 %	输入等效 噪声电荷 pC
二级	A 类	2	5×10^{-6}	10	1	0.5
	B 类	2	0.3	30	1	0.1
三级	A 类	3	10^{-5}	10	2	1
	B 类	3	0.3	10	2	0.5

3 参数指标

3.1 电荷放大器准确度 σ 由衰减挡误差 δ_1 、归一化误差 δ_2 和线性误差 δ_3 按 (4) 式合成。

$$\sigma = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} \quad (4)$$

电荷放大器线性误差的测量范围，应从本衰减挡的满量程到相邻的灵敏度高一挡的满量程。

在线性误差测量范围内，等间隔地测量 10 个输出电压值，并计算相应的传输系数，

再求出 9 个传输系数相对于满量程传输系数的相对误差，取 9 个相对误差中最大的 1 个作为电荷放大器的线性误差。

3.2 电荷放大器的下限频率，是指电荷放大器在低频的传输系数比 160 Hz 下降 3 dB 的频率。

3.3 电荷放大器的上限频率，是指电荷放大器在高频段的传输系数比 160 Hz 下降 0.5 dB 的频率。在电荷放大器的通频带内，传输系数的频率响应波动不得超过 0.5 dB。

3.4 电荷放大器的输入噪声是用一个 (1.000 ± 5) pF 电容接到电荷放大器的输入端与地之间，电荷放大器归一化置于 1-0-0。高通滤波器置于最低挡，低通滤波器置于最高挡，在电荷放大器最高灵敏度挡位测量输出噪声，再折算为电荷放大器输入端的等效噪声电荷量。

4 低通滤波器的特性

4.1 电荷放大器必须具备一个或多个低通滤波器。推荐的截止频率系列是 100 kHz, 30 kHz, 10 kHz, 3 kHz……等，也可以用一可连续调谐的低通滤波器。

4.2 低通滤波器的截止频率是指传输系数下降 3 dB 的频率，在滤波器的通频带内，传输系数上下波动不得超过 0.5 dB；在通频带外，应以每倍频程不小于 12 dB 的斜率衰减（专用的例外）。

4.3 滤波器截止频率误差由 (5) 给出

$$0.9f_{\text{标}} \leq f_{\text{实}} \leq 1.2f_{\text{标}} \quad (5)$$

式中 $f_{\text{标}}$ ——电荷放大器面板上标出的截止频率；

$f_{\text{实}}$ ——实际测得的截止频率。

对连续可调的滤波器，可参考第 4.1 款选一个频率测量。

5 对负载能力的要求

5.1 电荷放大器作电流输出时，应规定最大输出电流（峰值）。在最大输出电流时，电荷放大器的输出电压不得低于 1.5 V（峰值）。输出波形不得失真，失真度也应符合要求。

6 接插件

电荷放大器的输入、输出插座只能从 Q9 和 M5 二种中选取。

三 检 定 条 件

7 检定时环境条件

7.1 电荷放大器的检定应在 $(20 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ 和相对湿度小于 85% 的室内进行。

7.2 室内应无强的电磁场干扰和腐蚀性气体。

8 检定用仪器

8.1 作信号源的低频振荡器应包括从 0.1 Hz 到 100 kHz 的频率范围。可以使用一个或几个振荡器，振荡器的内阻、输出电流、输出电压、输出电压幅度稳定性、频率误差、

失真度等规定如表 2。

表 2

频段 (Hz)	0.1~100	100~10 ³	10 ³ ~10 ⁴	10 ⁴ ~2×10 ⁴
10 min 幅度稳定性 %	2	0.1	0.2	0.2
内 阻 Ω	<10 k	<100	<10	<5
输出电流 mA	1	10	70	130
输出电压 V (峰值)	10	10	10	10
频率偏差 %	3	2	1	1
失真度 %	0.3	0.2	0.2	0.2
注：对于 0.1~2 Hz 的频段，如果没有可用仪器则用示波器观察失真度和稳定性，应看不到失真和幅度不稳方可使用。				

8.2 示波器

使用频段为 DC~200 kHz，y 轴测量误差应小于 5%（也可使用相当的电压表）。

8.3 交直流数字电压表

推荐用真有效值检波的电压表。

直流电压测量误差 < 0.01%；

交流电压测量误差 < 0.2%；

频率范围：上限 200 kHz，下限低于 50 Hz。

8.4 电容器

3 个电容器的容量必须稳定，损耗小 ($\tan \delta \leq 10^{-4}$)，装在很好的屏蔽盒中。3 个电容器的容量分别约为 100 pF，1 000 pF 及 10 000 pF，具体容量应通过误差小于 0.05% 的电容电桥测量后确定。测试电容器每 3 个月测量 1 次，在潮湿高温天气使用时，应增加测量次数。

8.5 数字频率计

当振荡器频率偏差较大时，可用数字频率计来监视信号频率。数字频率计应能测量周期，测量误差小于 0.1%。

8.6 失真度测量仪 2 Hz~100 kHz，失真度范围 0.1%~10%。

8.7 秒表测量误差为 0.1 s。

四 检定项目和检定方法

9 外观检查

旋钮转动灵活, 波段开关跳步清晰, 定位准确。输出输入插座不允许松动。归一化, 衰减挡, 滤波器及积分器旋钮都必须有明确的标志。

10 低通滤波器的检定

10.1 按图 3 连接检定用仪器和被检定电荷放大器。图中 C 选用 $1\,000\text{ pF}$ 的测试电容器。连通电源, 预热 10 min 。电荷放大器的高通滤波器置于 0.3 Hz , 低通滤波器置于第 4.1 款所规定的任一挡上。电荷放大器的归一化旋钮置于 10-0-0 处。有积分功能的电荷放大器置于加速度挡。

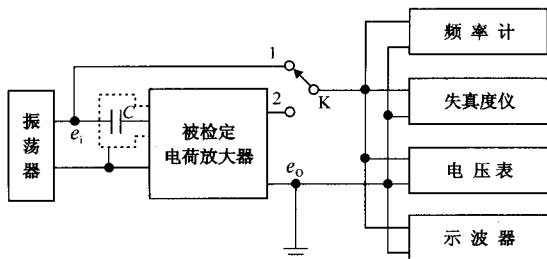


图 3 检定电荷放大器的接线图

10.2 振荡器频率调至所测滤波截止的 $1/10 \sim 1/20$ 处。调整电荷放大器的衰减挡, 使其输出电压与振荡器的输出电压近似相等。调整振荡器输出电压到 e_i , 使电荷放大器的输出电压 e_o 为最大输出电压的 90% , 即 $e_o \approx 0.9 E_o$ 。微调归一化旋钮, 尽量使振荡器的输出电压 e_i' 与电荷放大器的输出电压 e_o' 相等并记下比值 $R = \frac{e_o'}{e_i'}$ 。逐渐升高振荡器的频率到高频, 反复拨动开关 K , 测量振荡器的输出电压 e_i' 和电荷放大器的输出电压 e_o' 。当 $e_o' = 0.7 R e_i'$ 时, 读取振荡器频率。即是该挡滤波器实际的截止频率 $f_{实}$ 。它与该挡滤波器标称截止频率 $f_{标}$ 必须符合第 4.3 款式 (5) 的规定。在滤波器通频带内 e_o' 的 e_i' 必须满足不等式 $0.944 R e_i \leq e_o \leq 1.06 R e_i$ 。否则, 在该挡滤波器为不合格。

10.3 本规程规定必须测量滤波器的一挡, 当送检单位有要求时, 可以多测量几挡, 对于没有测量的滤波器, 应在检定证书上注明。

11 线性误差的检定

11.1 按图 3 连接各仪器, 选用 $1\,000\text{ pF}$ 的电容器, 振荡器频率调至 160 Hz , 电荷放大器归一化旋钮置于 10-0-0 处。有积分功能的电荷放大器置于加速度挡。

11.2 反复拨动开关 K 于位置 1 和 2, 同时控制振荡器的输出电压和调整电荷放大器的

衰减挡,使电荷放大器的输出电压与振荡器的输出电压近似相等。增加振荡器的输出到 e_i ,使电荷放大器输出电压 e_o 达到最大输出电压 E_o 。若衰减挡读数为 z_1 ,相邻的灵敏度较低的一挡为 z_2 ,按式(6)算出10个输出电压值 e'_{om} 。

$$e'_{om} = E_o \left(1 - \frac{z_1 - z_2}{9z_1} m \right) \quad (6)$$

$$(m = 1, 2, 3, \dots, 9)$$

调整振荡器的输出电压为 e_{im} ($m = 0, 1, 2, \dots, 9$),使电荷放大器的输出分别与(6)式算出的10个电压值 e'_{om} 近似相等,并记为 e_{om} ,用(7)式算出9个误差值:

$$\delta_m = \left(\frac{e_{i0} e_{om}}{e_{o0} e_{im}} - 1 \right) \times 100\% \quad (7)$$

$$(m = 1, 2, 3, \dots, 9)$$

式中 e_{i0} ——使电荷放大器输出电压 e_{o0} 近似等于最大输出电压 E_o 时振荡器的输出电压。

9个误差值中最大的一个即为电荷放大器的线性误差 δ_3 。

12 下限频率(或等效下限频率)的检定

A类和B类电荷放大器下限频率的测定使用不同的方法。对于A类电荷放大器,测量等效下限频率;对于B类电荷放大器,用逐点法测量频率响应确定下限频率。

12.1 A类电荷放大器接线如图4所示。

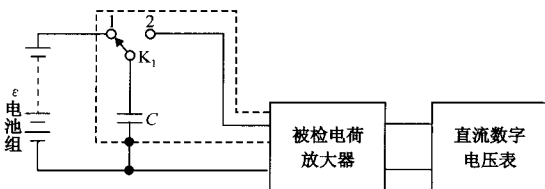


图4 A类电荷放大器等效下限频率的检定接线图

12.1.1 电荷放大器归一化旋钮置于10-0-0,高通滤波器置于最低频率挡。调整电荷放大器的衰减挡,使电荷放大器总的传输系数为 10^5 pC/V 。有积分功能的电荷放大器置于加速度挡。

12.1.2 图4中电池(或直流稳压电源)电动势 ϵ 与电容器的容量 C 的乘积 $Q_i = \epsilon C$ 应能使电荷放大器的输出电压 $e_{om} = \pm 0.1 E_o$,为此可用(8)式计算电动势 ϵ 和电容器 C 的数值:

$$\epsilon = \pm \frac{0.1 E_o G}{Z} \cdot \frac{1}{C} (\text{V}) \quad (8)$$

式中 E_o ——电荷放大器最大输出电压, V;

Z ——电荷放大器总的传输系数为 10^5 pC/V 时的衰减挡数值, V/单位;

G ——归一化数值, 10.00 pC/单位 ;

C ——电容器的电容量, pF。

电荷放大器的输出电压 e_{om} , 正值一个, 负值一个, 共两个, 等效下限频率必须在这两个输出电压下测定, 以最高的一个作为电荷放大器的等效下限频率。

12.1.3 将开关 K_1 置于位置 1, 使电容器充电, 过数秒后把 K_1 转向位置 2, 约 1 s 后再转回到位置 1, 这时电荷放大器的输出电压大约为算出的 e_{om} 。此时, 可以看到数字电压表读数会逐步变化, 看准一个读数 E_{t_1} 后及时撤动秒表, 大约等 180 s 后再记下数字电压表的读数 E_{t_2} , 同时关闭秒表。秒表记录时间间隔 t 与等效下限频率 f_F 的关系为:

$$f_F = \frac{\left| \ln \frac{E_{t_1}}{E_{t_2}} \right|}{2 \pi t} \quad (9)$$

12.1.4 对于另一个 e_{om} 值重复 12.1.3 项测量, 共计算出两个等效下限频率 f_F , 以最高的一个作为电荷放大器的等效下限频率。

12.2 B 类电荷放大器的接线图如图 3 所示 (可以用误差小于 5% 的低频电压表代替示波器测量电压)。示波器应放在 DC 挡。

12.2.1 选用 $1\,000 \text{ pF}$ 的测试电容器, 电荷放大器归一化旋钮置于 10-0-0 处。振荡器频率调至 160 Hz 。有积分功能的电荷放大器置于加速度挡。

12.2.2 反复拨动开关 K 于位置 1 和 2, 同时控制振荡器输出电压和调整电荷放大器的衰减挡, 使电荷放大器的输出电压与振荡器的输出电压近似相等。可微调归一化旋钮, 使其尽量相等。增加振荡器的输出到 e_i , 电荷放大器的输出 e_o 约等于电荷放大器的最大输出电压 E_o 。调节示波器 Y 放大器的倍率, 使电荷放大器的输出电压 e_o 正好能使示波器满偏转, 即波形占满全部刻度。转换开关 K 在 1、2 位置时, 示波器屏幕上的波形应一样大。逐步降低振荡器的频率, 示波器的扫描速率也作相应的改变。当开关在 2 处的波形高度只有 1 处的 70% 时, 读取振荡器的频率, 就是该电荷放大器的下限频率。应测量 3 次, 取平均值。

13 0.5 dB 上限频率的检定

13.1 按图 3 接线, 使电荷放大器归一化旋钮置于 10-0-0 位置, 低通滤波器置于最高频率挡, 高通滤波器置于 0.3 Hz 挡, 选用 $10\,000 \text{ pF}$ 的测试电容器。有积分功能的电荷放大器置于加速度挡。

13.2 振荡器频率调至 160 Hz , 调整电荷放大器的衰减挡, 使其输出电压与振荡器的输出电压近似相等 (拨动开关 K , 观察数字电压表)。调节振荡器的输出电压, 使电荷放大器的输出电压为最大输出电压 E_o 。微调归一化旋钮, 尽量使振荡器的输出电压 e_i 与电荷放大器的输出电压 e_o 相等。并记下比值 $R = \frac{e_o}{e_i}$, 逐步升高振荡器频率, 同时保

持振荡器输出电压 e_i 为定值, 当电荷放大器的输出电压 e_o' 满足下面二等式之一时, 读取振荡器的频率, 即是电荷放大器的 0.5 dB 上限频率。

$$e_o' = 0.944 Re_i$$

$$e_o' = 1.06 Re_i \quad (10)$$

14 失真度的检定

推荐使用失真度测量仪测量失真度, 也可以用频谱分析仪测量失真度。频谱分析仪的测量带宽应大于所测失真频率的 5 倍, 动态范围和信噪比应大于 60 dB。

14.1 按图 3 连接检定用仪器和被检定电荷放大器。图中 C 选有 1 000 pF 的测试电容器。有积分功能的电荷放大器置于加速度挡。电荷放大器的高通滤波器置于最低频率挡, 低通滤波器置于最高频率挡, 归一化旋钮置于 1-0-0 处。

14.2 把振荡器的频率调至测失真度的频率上。反复拨动开关 K 于位置 1 和 2, 同时控制振荡器的输出电压和调整电荷放大器的衰减挡, 使电荷放大器的输出电压与振荡器的输出电压近似相等。增加振荡器的输出到 e_i , 使电荷放大器的输出电压 e_o 达到最大输出电压 E_o 。此时, 示波器显示的波形应无明显的失真, 用失真度测量仪测量电荷放大器输出电压 e_o 的失真度。

14.3 在 160 Hz、2 Hz、电荷放大器说明书规定的 0.5 dB 上限频率 (如没有规定 0.5 dB 上限频率, 可用 3 dB 上限频率的三分之一代替) 与第 13 条实测的 0.5 dB 上限频率中的一个较低频率上, 分别重复第 14.2 款步骤。

14.4 检定人员认为有必要时, 可在电荷放大器通频带之内增加测量失真度的频率点, 取测得各失真度中最大的一个作为检定结果填入检定证书。

15 输入等效噪声电荷的检定

用屏蔽良好的 $(1\,000 \pm 5)$ pF 电容器短接电荷放大器的输入端, 如图 5 所示。对于有几个输入端的电荷放大器应将其其他的输入端用屏蔽帽盖上。

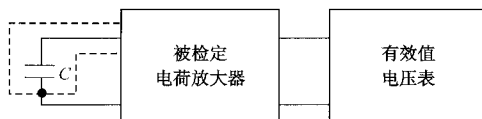


图 5 检定输入等效噪声电荷的方框图

电荷放大器归一化旋钮置于 1-0-0 位置, 高通滤波器置于最低挡, 低通滤波器置于最高挡, 有积分功能的电荷放大器积分旋钮置于加速度挡, 调节电荷放大器的衰减挡到最高灵敏度挡, 即输出噪声电压最大。用频带宽度不窄于 2 Hz~100 kHz 的真有效值电压表或失真度测量仪。测量电荷放大器输出端的电噪声有效值电压 e_{no} , 按 (11) 式折

算为输入端等效噪声电荷 Q_n

$$Q_n = \frac{e_{no} G}{z} (\text{pC}) \quad (11)$$

式中 e_{no} ——电荷放大器输出端的噪声有效值电压, V;

z ——衰减挡的读数, V/单位。

16 衰减挡误差的检定

16.1 按图 3 接线, 将电荷放大器归一化旋钮置于 1-0-0 位置, 低通滤波器置于最高频率挡, 高通滤波器置于 0.3 Hz 挡。有积分功能的电荷放大器置于加速度挡。

16.2 把振荡器频率调至 160 Hz, 根据衰减挡的位置, 用公式 (12) 选择测试电容器的容量 C 和振荡器的输出电压 e_i , 算出的 e'_i 不得小于 0.1 V。否则必须更换容量小一些的测试电容器。

$$e'_i = \frac{E_o G}{z} \cdot \frac{1}{C} \quad (12)$$

对某些灵敏度高的电荷放大器, 在用 100 pF 测试电容时, 振荡器的输出电压仍低于 0.1 V 时, 可以将归一化改调在 10-0-0 状态测量衰减挡误差。但应将 10-0-0 状态的归一化误差作为系统误差从该衰减挡的测试结果中扣除。控制振荡器的输出电压 e_i , 使电荷放大器的输出电压 $e_o \approx E_o$, 则该衰减挡的误差为

$$\delta'_i = \left(\frac{G}{zC} \cdot \frac{e_o}{e_i} - 1 \right) \times 100\% \quad (13)$$

16.3 换另一衰减挡重复第 16.2 款, 电荷放大器的所有衰减挡都必须测量。在测量的诸误差中取最大的一个作为电荷放大器的衰减挡误差 δ_1 。

17 归一化误差的检定

17.1 按图 3 接线, 把电荷放大器归一化旋钮置于 1-0-0 位置, 低通滤波器置于最高频率挡, 高通滤波器置于 0.3 Hz 挡, 测试电容器选用 1 000 pF。有积分功能的电荷放大器置于加速度挡。

17.2 振荡器频率调至 160 Hz, 调节电荷放大器的衰减挡, 使其输出电压约为振荡器输出电压的 10 倍, 调节振荡器的输出电压, 使电荷放大器的输出电压 e_o 略低于说明书规定的最大输出电压 E_o 。保持振荡器的输出不变, 依次改变归一化旋钮为表 3 所列的 28 个状态, 并测量每个状态时电荷放大器的输出电压 e_{oj} (各状态电荷放大器正确的输出电压 E_{oj} 表 3 中已给出)。每个状态的归一化误差由下式计算:

$$\delta_j = \frac{e_{oj} - E_{oj}}{E_{oj}} \times 100\% \quad (14)$$

$$(j = 2, 3, \dots, 28)$$

在所有 δ_j 中选最大者作为电荷放大器的归一化误差 δ_2 ，本条适用于 3 个归一化旋钮的电荷放大器。

表 3 不同归一化状态时正确输出电压

状态 序号 j	归一化 状态 G_j	正确的输 出 电 压 E_{0j}	状态 序号 j	归一化 状态 G_j	正确的输 出 电 压 E_{0j}	状态 序号 j	归一化 状态 G_j	正确的输 出 电 压 E_{0j}
1	1-0-0	1.000 e_0	11	1-1-0	0.909 e_0	21	1-0-2	0.980 e_0
2	2-0-0	0.500 e_0	12	1-2-0	0.833 e_0	22	1-0-3	0.971 e_0
3	3-0-0	0.333 e_0	13	1-3-0	0.769 e_0	23	1-0-4	0.962 e_0
4	4-0-0	0.250 e_0	14	1-4-0	0.714 e_0	24	1-0-5	0.952 e_0
5	5-0-0	0.200 e_0	15	1-5-0	0.667 e_0	25	1-0-6	0.943 e_0
6	6-0-0	0.167 e_0	16	1-6-0	0.625 e_0	26	1-0-7	0.935 e_0
7	7-0-0	0.143 e_0	17	1-7-0	0.588 e_0	27	1-0-8	0.926 e_0
8	8-0-0	0.125 e_0	18	1-8-0	0.555 e_0	28	1-0-9	0.917 e_0
9	9-0-0	0.111 e_0	19	1-9-0	0.526 e_0			
10	10-0-0	0.100 e_0	20	1-0-1	0.990 e_0			

17.3 4 个归一化旋钮的电荷放大器可参考 17.2 款的方法测量归一化误差，4 个旋钮应组成 37 个状态，每个状态时电荷放大器正确的输出电压 E_{0j} 可由该状态时的归一化读数 G_j 算出：

$$E_{0j} = \frac{e_0}{G_j} \quad (15)$$

$$(j = 1, 2, \dots, 37)$$

每个状态时的归一化误差由 (16) 式算出

$$\delta_j = \left(\frac{e_{0j} G_j}{e_0} - 1 \right) \times 100\% \quad (16)$$

$$(j = 2, 3, \dots, 37)$$

式中 e_o ——归一化为 1-0-0 时电荷放大器的输出电压；

e_{oj} ——归一化为 G_j 时电荷放大器的输出电压。

17.4 如果电荷放大器的归一化旋钮是一个多圈电位器，则用本款代替 17.3 款。保持振荡器的输出不变，依次改变归一化旋钮为下列 47 个（对二级电荷放大器）或 24 个（对三级电荷放大器）状态时，测量电荷放大器的输出电压 e_{oj} ，二级电荷放大器全部都测量，三级电荷放大器不测量括号中的状态。各状态的误差 δ_j 可由 17.3 款中公式 (16) 算出 (j 分别为 2~47 或 2~24)。从诸 δ_j 中找出最大者重新测量一次，取平均值作为归一化误差 δ_2 。

1.00 (1.05)	2.20 (2.30)	5.00 (5.20)
1.10 (1.15)	2.40 (2.50)	5.50 (5.70)
1.20 (1.25)	2.60 (2.70)	6.00 (6.30)
1.30 (1.35)	2.90 (3.00)	6.70 (7.00)
1.40 (1.50)	3.20 (3.35)	7.40 (7.80)
1.60 (1.70)	3.50 (3.70)	8.20 (8.60)
1.80 (1.90)	4.00 (4.20)	9.00 (9.50)
2.00 (2.10)	4.50 (4.70)	10.0

18 积分电路的检定

18.1 按图 3 接线，将电荷放大器归一化旋钮置于 1-0-0 位置，低通滤波器置于最高频率挡，高通滤波器置于 0.3 Hz 挡，开关 K 置于位置 2。振荡器频率调至电荷放大器位移的下限频率处，此时应用频率计读取频率（或周期）值，因为频率的误差将直接带来位移和速度的误差。

18.2 电荷放大器的积分开关置于位移挡，调节振荡器的输出电压到 e_i ，使电荷放大器的输出接近最大输出电压 E_o ，测量输出电压记为 e_D ；积分开关转换到速度挡，测量输出电压，记为 e_V ；再转换到加速度挡，测量输出电压，记为 e_a 。在测量 e_D 、 e_V 和 e_a 时振荡器的输出电压 e_i 保持不变。 e_D 、 e_V 和 e_a 三个电压中任何一个都不得大于电荷放大器的最大输出电压 E_o ，并且没有限幅失真。否则应重新调整 e_i ，并测量 3 个电压 e_D 、 e_V 和 e_a 。为此，低频时从位移挡开始测量，高频时应从加速度挡开始测量。

18.3 改变振荡器的频率至下限频率的二倍处，重复 18.2 款的测量。以后振荡器的频率（用频率计监测）以倍频程的间隔改变。重复 18.2 款的测量，测量频率为：下限频率；2 倍下限频率；4 倍下限频率；8 倍下限频率；16 倍下限频率；……。大约测量 10~15 个频率下的 10~15 组 e_D 、 e_V 、 e_a ，一直到 e_D 、 e_V 都很小，找出公式 (17) 和 (18) 算出的 δ_V 、 δ_D 都超过 10% 为止。在频率的高端应适当减小测量频率的间隔。

18.4 用公式 (17) 和公式 (18) 计算速度测量误差 δ_V 和位移测量误差 δ_D

$$\delta_V = \left(\frac{2\pi f e_V K_V}{e_a} - 1 \right) \times 100\% \quad (17)$$

$$\delta_D = \left(\frac{(2\pi f)^2 e_D K_D}{e_a} - 1 \right) \times 100\% \quad (18)$$

上两式中： δ_V ， δ_D ——分别为速度和位移测量误差，%；

f ——测量频率，Hz；

e_a ， e_V ， e_D ——频率为 f ，输出 e_i 不变时，相应的加速度、速度和位移三个挡位时的输出电压，V；

K_V ——无量纲系数，等于以 m/s 为单位的速度值；

K_D ——无量纲系数，等于以 m 为单位的位移值。

$$K_V = \frac{\text{电荷放大器面板上的速度单位}}{1 \text{ m/s}} \quad (19)$$

$$K_D = \frac{\text{电荷放大器面板上的位移单位}}{1 \text{ m}} \quad (20)$$

19 准确度的计算

根据第 3.1 款中公式 (4) 以及 11 条、16 条、17 条的测量数据，算出电荷放大器的准确度。

五 检定结果的处理和检定周期

20 经检定符合本规程各项要求的电荷放大器，按表 1 分级分类填发检定证书。凡有一项不合格者，发给检定结果通知书。

21 电荷放大器的检定周期为 1 年。

附录 1

电荷放大器各旋钮的辨认

1 归一化旋钮在仪器面板上常用下列标志：(1) 传感器灵敏度 $\text{pC}/\text{单位}$ ；(2) 灵敏度 $\text{PC}/\text{单位}$ ；(3) 灵敏度 pC/g ；……。

2 衰减挡在仪器面板上常用的表示方法有：(1) 输出电压 $\text{V}/\text{单位}$ ；(2) 输出电压 V/g ；(3) 输出单位 V ；(4) 量程 (单位)，10 单位，100 单位，1 000 单位……。本规程正文公式中用的衰减挡数值指的是前两种表示法，后二种表示法必须换算成前两种才能代入公式中计算。

第 (3) 种表示法的换算是求其倒数，如下式换算：

$$\text{衰减挡数值 } Z(\text{V}/\text{单位}) = \frac{1}{\text{仪器输出挡位值}(\text{单位}/\text{V})}$$

第 (4) 种表示法的换算是用仪器的最大输出电压 E_0 除以量程，如下式：

$$\text{衰减挡数值 } Z(\text{V}/\text{单位}) = \frac{\text{最大输出电压 } E_0(\text{V})}{\text{量程}(\text{单位数})}$$

3 高通滤波器在仪器面板上常用：(1) 低频下限；(2) 下限频率；……表示。

附录 2

公式的举例说明及推导

1 举例说明第 12.1.2 项中公式 (8)

某电荷放大器最大输出电压 $E_0 = 10 \text{ V}$ ，归一化旋钮置于 10-0-0 位置时对应的读数是 10 pC/单位 ，那么衰减挡置于 0.1 mV/单位 时仪器总的传输系数为：

$$10 \text{ pC}/0.1 \text{ mV} = 10^5 \text{ pC/V}$$

则公式中的 Z 就是 0.1 mV/单位 ，上述各量代入公式 (9) 中并设测试电容 $C = 10\,000 \text{ pF}$ 。

$$\begin{aligned}\epsilon &= \pm \frac{0.1 \times 10 \text{ V} \times 10 \text{ pC/单位}}{0.0001 \text{ V/单位}} \times \frac{1}{10\,000 \text{ pF}} \\ &= \pm 10 \text{ pC/pF} \\ &= \pm 10 \text{ V}\end{aligned}$$

2 举例说明 16.2 款公式 (13)

某电荷放大器归一化旋钮位于 1.00 pC/单位 ，衰减挡在 10 mV/单位 ；测试电容器 $C = 1\,006 \text{ pF}$ ；当输出为有效值 7.070 V 时输入为 0.6993 V 。则该挡衰减的误差可由公式 (14) 算出：

$$\begin{aligned}\delta'_1 &= \left(\frac{1.00 \text{ pC/单位}}{10 \text{ mV/单位} \times 1\,006 \text{ pF}} \times \frac{7.070 \text{ V}}{0.6993 \text{ V}} - 1 \right) \times 100\% \\ &= \left(\frac{1.00 \text{ pC}}{10.06 \text{ pC}} \times \frac{7.070 \text{ V}}{0.6993 \text{ V}} - 1 \right) \times 100\% \\ &= (1.00498 - 1) \times 100\% \\ &= 0.498\%\end{aligned}$$

3 第 12.1.3 项中公式 (9) 的推导

t_1 时刻输出电压 $E_{t_1} = Ee^{-t_1/\tau}$ ， t_2 时刻输出电压 $E_{t_2} = Ee^{-t_2/\tau}$ 。 E 是充电完毕后某时刻的输出电压， τ 是电路的时间常数， $\tau = RC$ 。对比值：

$$\frac{E_{t_1}}{E_{t_2}} = e^{1/\tau(t_2-t_1)}$$

求自然对数得 $\ln \frac{E_{t_1}}{E_{t_2}} = \frac{1}{\tau} (t_2 - t_1)$ ，又知下限频率与电路的时间常数的关系为 $f =$

$\frac{1}{2\pi\tau}$ ，因而得：

$$f_{\text{下}} = \frac{\ln(E_{t_1}/E_{t_2})}{2\pi(t_2 - t_1)} = \frac{\ln(E_{t_1}/E_{t_2})}{2\pi t}$$

4 第 11.2 款中公式 (7) 的推导

仪器和测试电容器 C 组成的系统, 在满输出时的传输系数为 $\frac{e_{o0}}{e_{i0}}$, 输出为 e_{om} 时的传输系数为 $\frac{e_{om}}{e_{im}}$, 则输出为 e_{om} 时的线性误差是:

$$\begin{aligned}\delta_m &= \frac{\frac{e_{om}}{e_{im}} - \frac{e_{o0}}{e_{i0}}}{\frac{e_{o0}}{e_{i0}}} \times 100\% \\ &= \left(\frac{e_{i0}e_{om}}{e_{o0}e_{im}} - 1 \right) \times 100\%\end{aligned}$$

5 第 17.3 款公式 (15) 的推导

第 j 个归一化状态数值 G_j 与正确的输出电压 E_{oj} 之间的关系应为:

$$E_{oj} = \frac{e_o}{G_j}$$

e_o 是第一个归一化状态, 即归一化旋钮位于 1-0-0-0 位置时仪器的输出电压值, 则第 j 个归一化状态的误差是:

$$\begin{aligned}\delta_j &= \frac{e_{oj} - E_{oj}}{E_{oj}} \times 100\% = \frac{e_{oj} - e_o/G_j}{e_o/G_j} \times 100\% \\ &= \left(\frac{e_{oj}G_j}{e_o} - 1 \right) \times 100\%\end{aligned}$$

附录 3

低于 2 Hz 的失真度测量方法介绍

由于失真度测量仪最低只能测量 2 Hz 的失真度, 所以对低于 2 Hz 的信号必须变换时间尺度, 将其频率变换到 2 Hz 以上才能测量失真度。用磁带记录仪可以很方便地进行这种变换, 此处仅介绍用瞬态信号记录仪改变频率来测量失真度的方法。

1 首先必须测定瞬态记录仪的失真度。为此, 接线如图 3—1 所示。

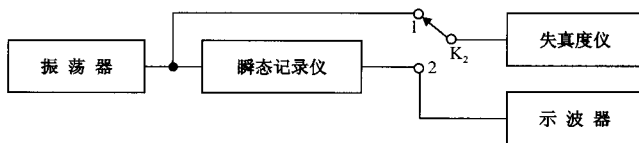


图 3—1 检定瞬态记录仪失真度的接线图

- 2 振荡器频率 f 调到 200 Hz, 开关 K_2 置于位置 1, 测量振荡器的失真度 γ_3 。
- 3 根据瞬态记录仪的内存容量 M (字) 和信号的周期 $T = 1/f$ (s) 选择适当的采样速率 S (s/字) 和最小正整数 n , 使得满足关系式 $nT = SM$ 。
- 4 先使瞬态记录仪记录信号, 然后再用模拟输出端读出该信号, 从示波器上观察波形应无间断处或重叠处 (示波器屏幕上的波数 N 应大于上一条中的 n)。否则可适当调整振荡器的频率, 并反复地记录和读出信号, 直到示波器上的波形为光滑完整的正弦波。
- 5 开关 K_2 置于位置 2, 用失真度仪测量读出信号的失真度 γ_4 。计算瞬态记录仪的失真度 $\gamma_5 = \sqrt{\gamma_4^2 - \gamma_3^2}$ 不应大于 0.5%。
- 6 接入电荷放大器和测试电容器 C , 如图 3—2 所示, 将振荡器频率调到某低频 f_1 , 选择适当的 n_1 和 S_1 , 使 $n_1/f_1 = S_1 M$, n_1 应取最小可能的正整数。

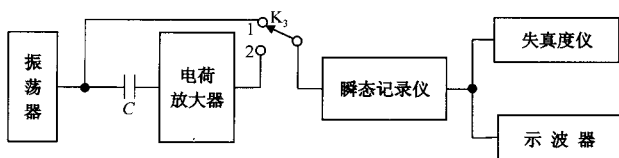


图 3—2 电荷放大器低频失真度的检定接线图

- 7 开关 K_3 置于位置 2 时, 将信号记入瞬态记录仪, 再用模拟输出端读出信号, 读出速率 (s/字) 应比记录速度 (s/字) 快, 使读出信号的频率比记录信号提高 m 倍, 读出的信号频率在 2 Hz 以上, 重复第 4 条的调整。

- 8 用失真度仪测量读出信号的失真度 γ_2 。
- 9 开关 K_3 置于位置 1, 其它不变, 重复第 7 条步骤。
- 10 重复第 8 条步骤测量失真度 γ_1 , 并计算出电荷放大器失真度。

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 - \gamma_2^2} \quad (3-1)$$

- 11 第 10 条公式中当 γ_2 接近于 γ_1 时, 算出的失真度 γ 的不确定度 $\Delta\gamma$ 是很大的, γ 的相对误差为:

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = k \frac{\Delta\gamma_1}{\gamma_1}$$

$\frac{\Delta\gamma_1}{\gamma_1}$ 是失真度仪的测量误差 (例如为 10%), k 是一个系数, 根据间接测量误差传递的原理, 可以推导出上式中的 k :

$$k = \frac{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}{\gamma_1^2 - \gamma_2^2}$$

这个式子表明 γ_2 近于 γ_1 时, 应用第 10 条中的公式 (3-1) 是不合理的, 下表中列出 k 与 γ_1 、 γ_2 的关系, 可以直观地说明这个问题。

γ_2/γ_1	0.95	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2
k	19.5	9.52	4.56	2.92	2.13	1.67	1.38	1.20	1.08

- 12 瞬态记录仪还可以测量 B 类电荷放大器的下限频率, 双通道的瞬态记录仪更方便一些, 具体方法不再赘述。

附录 4

检定记录、检定证书背面格式

(1) 检定记录格式

电荷放大器检定记录

送检单位 _____ 年 _____ 月 _____ 日
 型号 _____ , 出厂编号 _____ , 检定证书号 _____

一、低通滤波器

挡 位						
频率 (Hz)						
输出 e_o						
输入 e_i						
e_o/e_i						

二、线性误差 满输入 $e_{i0} =$, 满输出 $e_{o0} =$, $e_{i0}/e_{o0} =$

输出 e_{om}						
输入 e_{im}						
误差 %						
输出 e_{om}						
输入 e_{im}						
误差 %						

三、下限频率

E_{t_1}				
E_{t_2}				
t				
f_F				

频率	160 Hz	
e_o		
e_i		
e_o/e_i		

四、上限频率

频 率	160 Hz	
e_o		
e_i		
e_o/e_i		

五、失真度

频 率				
e_o				
%				

六、输入等效噪声电荷

衰减挡_____, 归一化_____时, 输入等效噪声电荷为_____ pC (RMS)。

七、衰减挡误差

衰减挡							
归一化							
测试电容							
误差 %							

(2) 检定证书或检定结果通知书背面格式

检 定 结 果

一、低通滤波器

二、线性误差

当输出电压为 _____ V (峰值) 时, 仪器传输系数为满输出的偏差最大, 为 _____ %。

三、下限频率

该仪器 3 dB 下限 (或等效下限) 频率为 _____ Hz。

四、上限频率

该仪器 0.5 dB 上限频率为 _____ kHz。

五、失真度

该仪器 2 Hz ~ _____ kHz 范围内的失真度小于 _____ %。

六、输入等效噪声电荷

当源电容为 1 000 pF, 仪器衰减挡 _____, 归一化 _____ 时, 输入等效噪声电荷 (有效值) 为 _____ pC。

七、衰减挡误差

衰减挡位						
误 差						

所有各挡最大误差为 _____ %。

八、归一化误差

该仪器归一化误差为 _____ %。

九、积分挡误差

该仪器在 _____ Hz ~ _____ kHz 范围内积分误差为 _____ %。

十、准确度

该仪器准确度为 _____ %。

检定条件: 温度 _____ °C, 相对湿度 _____ %。