



# 中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 338—2013

---

## 电荷放大器

Charge Amplifiers

2013-10-25 发布

2014-04-25 实施

---

国家质量监督检验检疫总局 发布

# 电荷放大器检定规程

Verification Regulation of Charge Amplifiers

JJG 338—2013

代替 JJG 338—1997

归口单位：全国振动冲击转速计量技术委员会

主要起草单位：中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术  
研究所

参加起草单位：北京市计量检测科学研究院  
扬州英迈克测控技术有限公司

**本规程主要起草人：**

邵新慧（中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所）

曾 吾（中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所）

**参加起草人：**

张宁宁（中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所）

李学瑞（北京市计量检测科学研究院）

陈启山（扬州英迈克测控技术有限公司）

# 目 录

引言 .....	( II )
1 范围 .....	( 1 )
2 引用文件 .....	( 1 )
3 术语和计量单位 .....	( 1 )
3.1 增益挡 .....	( 1 )
3.2 归一化挡 .....	( 1 )
3.3 传输系数 .....	( 1 )
4 概述 .....	( 1 )
5 计量性能要求 .....	( 2 )
5.1 电荷放大器的分级 .....	( 2 )
5.2 输入等效电荷噪声 .....	( 3 )
5.3 归一化误差 .....	( 3 )
5.4 增益挡误差 .....	( 3 )
5.5 线性误差 .....	( 3 )
5.6 失真度 .....	( 3 )
5.7 低通滤波器截止频率 (上限频率) .....	( 3 )
5.8 高通滤波器截止频率 (下限频率) .....	( 3 )
5.9 幅频特性 .....	( 4 )
5.10 相频特性 .....	( 4 )
5.11 积分器误差 .....	( 4 )
6 通用技术要求 .....	( 4 )
6.1 外观要求 .....	( 4 )
6.2 其他技术要求 .....	( 4 )
7 计量器具控制 .....	( 4 )
7.1 检定条件 .....	( 4 )
7.2 检定项目 .....	( 5 )
7.3 检定方法 .....	( 5 )
7.4 检定结果的处理 .....	( 15 )
7.5 检定周期 .....	( 15 )
附录 A 等效下限频率的推导 .....	( 16 )
附录 B 检定原始记录推荐格式 .....	( 17 )
附录 C 检定证书/检定结果通知书内页信息及格式 .....	( 21 )

## 引 言

本规程依据 JJF 1002—2010《国家计量检定规程编写规则》对 JJG 338—1997《电荷放大器》进行修订，与 JJG 338—1997 相比，除编辑性修改外，主要技术变化如下：

- 将“衰减挡”改称为“增益挡”；
  - 取消了“准确度合成”的定义；
  - 修改了电荷放大器分级表，增加了“一级”的级别，取消了“准确度”、“0.5 dB 上限频率”和“失真度”级别判定条件，增加了“增益挡误差”级别判定条件；
  - 提高了归一化误差、线性误差和失真度的技术指标要求；
  - 将“下限频率”的寻找改为对“高通滤波器限截止频率处衰减量”的判定；
  - 将“低通滤波器截止频率误差”的判定改为对“低通滤波器限截止频率处衰减量”的判定；
  - 取消了“0.5 dB 上限频率”检定项目；
  - 增加了“数字式归一化挡”的“归一化误差的检定方法”；
  - 增加了幅频特性和相频特性的计量性能要求；
  - 细化了积分器误差的计量性能要求。
- JJG 338—1997 的历次版本发布情况为：
- JJG 338—1983。

## 电荷放大器检定规程

### 1 范围

本规程适用于电荷放大器的首次检定、后续检定和使用中检查。

### 2 引用文件

本规程引用下列文件：

JJG 233—2008 压电加速度计检定规程

JJG 449—2001 倍频程和 1/3 倍频程滤波器检定规程

JJG 834—2006 动态信号分析仪

JJF 1156—2006 振动、冲击、转速计量术语及定义

JJF 1269—2010 压电集成电路传感器（IEPE）放大器校准规范

GB/T 20485.1—2008 振动与冲击传感器校准方法 第1部分：基本概念

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规程；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规程。

### 3 术语和计量单位

以下术语和定义适用于本规程：

#### 3.1 增益挡 gain switch

电荷放大器“输出放大器”功能模块的选择开关或按键，其变量用  $G$  表示，单位为  $V/Unit$ 。

#### 3.2 归一化挡 unity switch

电荷放大器“归一化放大器”功能模块的选择开关或按键，也叫作“传感器灵敏度挡”，其变量用  $S$  表示，单位为  $pC/Unit$ 。

#### 3.3 传输系数 transmission coefficient

电荷放大器输入电荷量与输出电压的比值，用  $T$  表示，单位为  $pC/V$ 。

### 4 概述

电荷放大器是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。电荷放大器广泛应用于振动、冲击、力、压力、声强等非电量电测中。

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，见图1。其中  $C_i$  是传感器及导线的等效电容， $C_f$  是电荷转换级的反馈电容。

根据运算放大器的理论，开环增益和输入阻抗很高的电荷放大器的输出电压  $e_o$  和输入电动势  $e_i$  的关系见公式（1）。

图1中  $U_x$  点的电位几乎为零，是所谓的虚地点，因此电容器  $C_i$  极板上的电荷  $Q_i$  与电动势  $e_i$  的关系可表示为公式（2）。

将公式 (2) 代入公式 (1) 得到公式 (3)。公式 (3) 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负倒数。

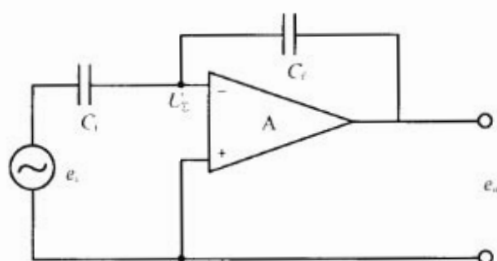


图1 电荷放大器的电荷转换级原理电路图

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

式中：

$e_o$ ——电荷放大器电荷转换级的输出电压，V；

$e_i$ ——电荷放大器电荷转换级的输入电动势，V；

$C_i$ ——电荷放大器电荷转换级的等效输入电容，pF；

$C_f$ ——电荷放大器电荷转换级的反馈电容，pF。

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

式中：

$Q_i$ ——电荷放大器电荷转换级的输入电荷量，pC。

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

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级、积分放大器级、归一化放大器级以及输出放大器级等，典型的电荷放大器方框图见图2。

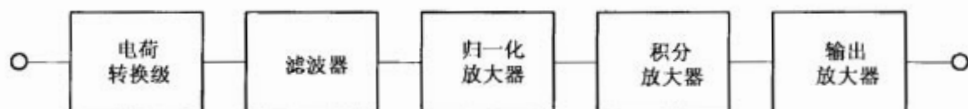


图2 典型的电荷放大器方框图

## 5 计量性能要求

### 5.1 电荷放大器的分级

电荷放大器按下限频率分为A类和B类，按增益挡误差、归一化误差分和输入等效电荷噪声为三个级别。电荷放大器分级见表1。

表 1 电荷放大器的分级

级别		增益挡误差 %	归一化误差 %	下限频率 Hz	输入等效电 荷噪声(有效 值) pC	线性误差 %	谐波失真度 %
一级	A 类	≤0.5	≤0.1	≤1×10 <sup>-5</sup>	≤0.20	≤0.10	≤0.30
	B 类	≤0.5	≤0.1	≤0.3	≤0.05		
二级	A 类	≤1.0	≤0.2	≤5×10 <sup>-5</sup>	≤0.50		
	B 类	≤1.0	≤0.2	≤0.3	≤0.10		
三级	A 类	≤1.5	≤0.5	≤1×10 <sup>-4</sup>	≤1.00		
	B 类	≤1.5	≤0.5	≤0.3	≤0.50		

## 5.2 输入等效电荷噪声

当用一个 1 000 pF 的标准电容接到电荷放大器的输入端与地之间时, 由输出电压有效值折算出的输入电荷量, 应满足表 1 的要求。

## 5.3 归一化误差

电荷放大器归一化挡实际比例系数与放大器归一化理论系数的误差, 应满足表 1 的要求。

## 5.4 增益挡误差

电荷放大器增益挡实际比例系数与放大器增益挡理论系数的误差, 应满足表 1 的要求。

## 5.5 线性误差

在电荷放大器输出电压量程范围内, 在相同挡位设置下, 不同输出电压时的传输系数与相应基准值(拟合后的直线)的最大偏差值对额定输出电压的百分比, 应满足表 1 的要求。

## 5.6 失真度

以标准正弦电荷信号通过电荷放大器, 通过测量输出电压信号的谐波失真度评价电荷放大器的失真度指标, 应满足表 1 的要求。

## 5.7 低通滤波器截止频率(上限频率)

电荷放大器通常具备多挡可调节的低通滤波器, 应按生产厂家说明书中给出低通滤波器的截止频率进行检定。低通滤波器在截止频率处的衰减应为  $(-3 \pm 1)$  dB [或  $(-10 \pm 3)\%$ ]。-3dB 截止频率外的高频衰减斜率应不小于 12 dB/oct (专用的除外, oct 表示倍频程)。低通滤波器的 -3 dB 截止频率称上限频率, 记为  $f_u$ 。

## 5.8 高通滤波器截止频率(下限频率)

电荷放大器通常具备多挡可调节的高通滤波器, 应按生产厂家说明书中给出低通滤波器的截止频率进行检定, 高通滤波器在截止频率处的衰减应为  $(-3 \pm 1)$  dB [或  $(-10 \pm 3)\%$ ]。高通滤波器的 -3 dB 截止频率称下限频率, 记为  $f_l$ 。

## 5.9 幅频特性

幅频特性是电荷放大器的输出电压信号与输入电荷信号的幅值比（即传输系数的倒数）随频率变化的特性，生产厂家应在说明书中给出每个滤波器的幅频特性曲线。在选定的测量频带内，各频率点的幅值比相对参考频率点的幅值比的偏差应不大于1%。

## 5.10 相频特性

相频特性是电荷放大器的输出电压信号与输入电荷信号的相位差随频率变化的特性，生产厂家应在说明书中给出每个滤波器的相频特性曲线。在选定的测量频带内，各频率点相频特性应满足出厂技术指标要求。

## 5.11 积分器误差

积分器误差是指以标准正弦信号输入具有积分电路的电荷放大器，其实际积分输出与理论积分结果的偏差。生产厂家应在说明书中给出积分器的频率范围和特性曲线。在说明书给定的频率范围内，速度挡（一次积分挡）误差应不大于3%，位移挡（二次积分挡）误差应不大于5%。

# 6 通用技术要求

## 6.1 外观要求

6.1.1 受检电荷放大器应标有名称、型号、出厂编号、制造厂或商标。

6.1.2 电荷放大器的各功能开关灵活可靠，归一化挡、增益挡、滤波器、积分放大器、输入和输出端口等应有清晰标志。

## 6.2 其他技术要求

出厂技术指标应包括电荷输入范围、使用频率范围、额定输出电压、负载能力、插接件规格、使用环境要求、输入和输出阻抗等。

# 7 计量器具控制

## 7.1 检定条件

### 7.1.1 环境条件

温度：(18~28)℃；

相对湿度：小于80%。

室内应无强的电磁场干扰和腐蚀性气体。

### 7.1.2 检定用仪器的技术要求

#### 7.1.2.1 函数信号发生器

频率范围：0.1 Hz~200 kHz，输出电压峰值不小于10 V，输出电压幅度稳定性优于1%，频率稳定性优于0.05%，频率准确度优于 $1 \times 10^{-5}$ ，失真度不大于0.05%。

#### 7.1.2.2 示波器

有效频率范围DC~20 MHz，电压测量误差应在5%之内。

#### 7.1.2.3 数字电压表（多用表）

在10 Hz~200 kHz的频率范围内，直流电压测量准确度等级优于0.01级，交流电压测量最大允许误差绝对值不大于0.1%。

## 7.1.2.4 标准电容器

标准电容器的准确度等级优于 0.1 级, 损耗小 ( $\tan\delta \leq 10^{-4}$ ), 装在屏蔽良好的盒中, 容量分别约为 100 pF、1 000 pF 及 10 nF, 具体容量应通过校准确定, 并在使用中带入校准后的电容容量值。

## 7.1.2.5 失真度测量仪

失真度测量仪频率范围不低于 2 Hz~100 kHz, 失真度测量范围不低于 0.01%~100%, 输入电压范围不低于 300 mV~10 V。

## 7.1.2.6 动态信号分析仪

技术指标应满足 JJG 834—2006《动态信号分析仪》中 A 级的规定, 分析带宽不小于 50 kHz, 至少有 2 个同步采样通道。

## 7.1.2.7 秒表

秒表的测量误差不大于 0.1 s (测量间隔 10 min)。

## 7.2 检定项目

电荷放大器的首次检定、后续检定和使用中检查项目见表 2。

表 2 电荷放大器的首次检定、后续检定和使用中检查项目一览表

项目	首次检定	后续检定	使用中检查
外观及工作正常性检查	+	+	+
输入等效电荷噪声	+	+	+
归一化误差	+	+	—
增益挡误差	+	+	—
线性误差	+	+	—
失真度	+	+	—
低通滤波器截止频率 (上限频率)	+	—	—
高通滤波器截止频率 (下限频率)	+	—	—
幅频特性	+	+	+
相频特性	+	—	—
积分电路误差	+(如果有)	+(如果有)	—(如果有)
注: “+”表示需检定的项目, “—”表示不需检定的项目。			

## 7.3 检定方法

## 7.3.1 外观及工作正常性检查

被检电荷放大器外观应完整无损, 其标志应满足 6.1 的要求。

接通电源, 数字显示应清晰完整, 预热时间应为 15 min 以上。

## 7.3.2 输入等效电荷噪声

用屏蔽良好的 1 000 pF 标准电容器, 输入端对地短接, 输出端接入电荷放大器的输入端, 如图 3 所示。对于有多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。

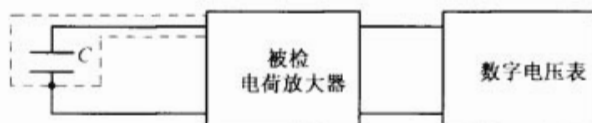


图3 检定输入等效电荷噪声的方框图

电荷放大器归一化挡置于“1”，高通滤波器置于最低频率挡，低通滤波器置于最高频率挡，有积分功能的电荷放大器设置为加速度挡（或线性挡），调节电荷放大器的增益挡到最高灵敏度挡，此时输出噪声电压最大。用频带宽度不小于2 Hz~100 kHz的数字电压表测量电荷放大器输出端的噪声电压有效值 $e_{no}$ ，按公式（4）折算为输入端的等效电荷噪声 $Q_n$ 。

$$Q_n = \frac{e_{no} S}{G} \quad (4)$$

式中：

$Q_n$ ——电荷放大器输入端的等效电荷噪声（有效值），pC；

$S$ ——归一化挡，pC/Unit；

$e_{no}$ ——电荷放大器输出端的电压（有效值），V；

$G$ ——增益挡；V/Unit。

检定结果应满足5.2的要求。

### 7.3.3 归一化误差

#### 7.3.3.1 具有4个归一化旋钮的电荷放大器

按图4接线，把电荷放大器归一化旋钮置于“1”位置，低通滤波器设置为最高频率挡，高通滤波器设置为最低频率挡（A类电荷放大器可设置为“中”挡），标准电容器选用1 000 pF，有积分功能的电荷放大器设置为加速度挡（或线性挡）。

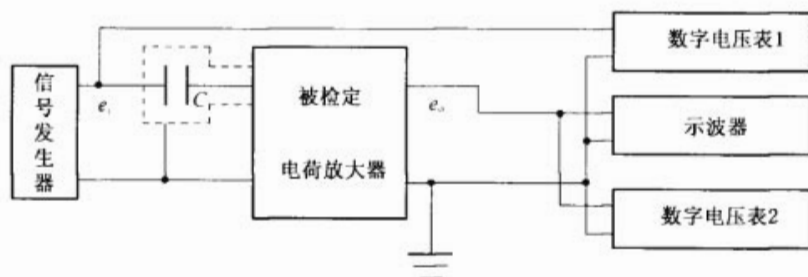


图4 电荷放大器归一化误差的检定接线图

信号发生器频率调至160 Hz，调节电荷放大器的增益挡，使其数字电压表2的读数约为数字电压表1的读数的10倍，调节信号发生器的输出电压，使数字电压表2的读数略低于电荷放大器说明书规定的额定输出电压，记为 $e_o$ 。保持信号发生器的输出不变，依次改变归一化旋钮为表3所列的37个状态，并记下每个状态时数字电压表2的读数 $e_{oj}$ ，由公式（5）计算各状态的归一化误差，取其中最大误差值作为归一化误差的检定结果。

$$\delta_{sj} = \frac{e_{oj} - e_o / S_j}{e_o / S_j} \times 100 \quad (j = 2, 3, \dots, 37) \quad (5)$$

式中:

$\delta_{S_j}$ ——状态序号为“ $j$ ”时对应的归一化误差, %;

$S_j$ ——设置的归一化挡的数值;

$e_0$ ——归一化挡为“1”时电荷放大器的输出电压, V;

$e_{0j}$ ——归一化挡为“ $S_j$ ”时电荷放大器的输出电压, V。

检定结果应满足 5.3 的要求。

表 3 具有 4 个归一化旋钮的电荷放大器的设置状态

状态序号 ( $j$ )	归一化挡 状态 ( $S_j$ ) pC/Unit	状态序号 ( $j$ )	归一化挡 状态 ( $S_j$ ) pC/Unit	状态序号 ( $j$ )	归一化挡 状态 ( $S_j$ ) pC/Unit	状态序号 ( $j$ )	归一化挡 状态 ( $S_j$ ) pC/Unit
1	1.000	11	1.100	20	1.010	29	1.001
2	2.000	12	1.200	21	1.020	30	1.002
3	3.000	13	1.300	22	1.030	31	1.003
4	4.000	14	1.400	23	1.040	32	1.004
5	5.000	15	1.500	24	1.050	33	1.005
6	6.000	16	1.600	25	1.060	34	1.006
7	7.000	17	1.700	26	1.070	35	1.007
8	8.000	18	1.800	27	1.080	36	1.008
9	9.000	19	1.900	28	1.090	37	1.009
10	10.000	——	——	——	——	——	——

### 7.3.3.2 具有 3 个归一化旋钮的电荷放大器

可参考 7.3.3.1 的方法测量归一化误差, 3 个归一化旋钮共组成 28 个设置状态, 见表 3 (状态序号 1~28)。

### 7.3.3.3 具有多圈电位器归一化旋钮的电荷放大器

可参考 7.3.3.1 的方法测量归一化误差, 共 47 个设置状态, 见表 4。

表 4 具有多圈电位器归一化旋钮的电荷放大器的设置状态

状态序号 ( $j$ )	归一化挡 状态 ( $S_j$ ) pC/Unit	状态序号 ( $j$ )	归一化挡 状态 ( $S_j$ ) pC/Unit	状态序号 ( $j$ )	归一化挡 状态 ( $S_j$ ) pC/Unit	状态序号 ( $j$ )	归一化挡 状态 ( $S_j$ ) pC/Unit
1	1.00	13	1.80	25	3.20	37	6.00
2	1.05	14	1.90	26	3.35	38	6.30
3	1.10	15	2.00	27	3.50	39	6.70
4	1.15	16	2.10	28	3.70	40	7.00
5	1.20	17	2.20	29	4.00	41	7.40
6	1.25	18	2.30	30	4.20	42	7.80
7	1.30	19	2.40	31	4.50	43	8.20
8	1.35	20	2.50	32	4.70	44	8.60
9	1.40	21	2.60	33	5.00	45	9.00
10	1.50	22	2.70	34	5.20	46	9.50
11	1.60	23	2.90	35	5.50	47	10.00
12	1.70	24	3.00	36	5.70	——	——

## 7.3.3.4 具有数字式归一化挡的电荷放大器

按 7.3.3.1 的方法接线并设置电荷放大器和信号发生器。用数字电压表 1 读出信号发生器的输出电压, 记为  $e_i$ , 保持信号发生器的输出不变, 依次改变归一化挡为“1”、“2”、“5”、“10”、“20”、“50”(见表 5), 并测量各状态时电荷放大器的输出电压  $e_{oj}$ , 由公式 (5) 计算各状态的归一化误差。

调整信号发生器输出电压约为  $e_i$  的 10%, 即  $e_i' \approx 0.1e_i$ 。归一化挡重置为“1”, 用数字电压表 2 读出此时电荷放大器的输出电压  $e_o'$ 。依次改变归一化挡为“0.1”、“0.2”、“0.5”(见表 5), 并测量各状态时电荷放大器的输出电压  $e_{oj}$ , 由公式 (5) 计算各状态的归一化误差 (式中的  $e_o$  以  $e_o'$  代入)。

取各归一化挡误差的最大值作为归一化误差的检定结果, 应满足 5.3 的要求。

表 5 具有数字式归一化挡的电荷放大器的检定设置状态

状态序号 ( $j$ )	归一化挡状态 ( $S_j$ ) pC/Unit
1	1.000
2	2.000
3	5.000
4	10.000
5	20.000
6	50.000
7	0.100
8	0.200
9	0.500

## 7.3.4 增益挡误差

按图 4 接线, 将电荷放大器归一化挡置于“1”, 低通滤波器设置为最高频率挡, 高通滤波器设置为最低频率挡 (A 类电荷放大器可设置为“中”挡), 有积分功能的电荷放大器设置为加速度挡 (或线性挡)。

把信号发生器频率调至 160 Hz, 根据增益挡的设置, 用公式 (6) 选择标准电容器的容量并计算信号发生器的输出电压  $e_i$ , 信号发生器的输出电压不得小于 0.1 V。对某些灵敏度高的电荷放大器, 在用 100 pF 的标准电容器时, 信号发生器的输出电压仍低于 0.1 V 时, 可以将归一化挡置于“10”测量增益挡误差。但应将“10”状态的归一化误差作为系统误差从该增益挡的测量结果中扣除。

$$e_i = \frac{E_o S}{G} \cdot \frac{1}{C} \quad (6)$$

式中:

$G$ ——增益挡, V/Unit;

$e_i$ ——信号发生器的输出电压, V;

$E_0$ ——电荷放大器的额定输出电压, V;

$S$ ——归一化挡, pC/Unit;

$C$ ——标准电容容量 (以实际校准值代入), pF。

调整信号发生器的输出电压  $e_i$ , 使电荷放大器的输出电压  $e_o$  接近额定输出电压, 按公式 (7) 计算该增益挡的误差。

$$\delta_G = \left( \frac{S}{GC} \cdot \frac{e_o}{e_i} - 1 \right) \times 100 \quad (7)$$

式中:

$G$ ——增益挡, V/Unit;

$\delta_G$ ——增益挡误差, %;

$e_i$ ——信号发生器的输出电压, V;

$e_o$ ——电荷放大器的输出电压, V;

$S$ ——归一化挡, pC/Unit;

$C$ ——标准电容容量 (以实际校准值代入), pF。

换另一增益挡重复上述步骤, 电荷放大器的所有增益挡都必须测量。

取各增益挡误差的最大值作为电荷放大器的增益挡误差, 应满足 5.4 的要求。

### 7.3.5 线性误差

按图 4 连接各仪器, 选用 1 000 pF 的标准电容器, 信号发生器频率调至 160 Hz, 电荷放大器归一化挡置于“10”。有积分功能的电荷放大器设置为加速度挡 (或线性挡)。

调节信号发生器的输出电压和电荷放大器的增益挡, 使电荷放大器的输出电压与信号发生器的输出电压近似相等, 增加信号发生器的输出, 使电荷放大器输出电压  $e_o$  达到额定输出电压  $E_0$ 。在输入范围内均匀的选取 7~10 个幅值, 调节信号发生器分别输出所选取的电压幅值, 用数字电压表 1 测量信号发生器的输出电压  $e_{ij}$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ), 用数字电压表 2 测量电荷放大器的输出电压  $e_{oj}$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ), 按公式 (8) 计算线性误差。

取其绝对值的最大值作为电荷放大器线性误差的检定结果, 应满足 5.5 的要求。

$$\delta_{i,j} = \frac{e_{oj} - (a_0 + a_1 e_{ij})}{E_0} \times 100 \quad (j=1, 2, 3, \dots, n) \quad (8)$$

$$a_0 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{oj} \sum_{j=1}^n e_{ij}^2 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{ij} \sum_{j=1}^n e_{ij} e_{oj}}{\sum_{j=1}^n e_{ij}^2 - n \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{ij} \right)^2} \quad (9)$$

$$a_1 = \frac{\sum_{j=1}^n e_{ij} e_{oj} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{ij} \sum_{j=1}^n e_{oj}}{\sum_{j=1}^n e_{ij}^2 - n \left( \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{ij} \right)^2} \quad (10)$$

式中:

$a_0$ ——拟合直线的截距, V;

$a_1$ ——拟合直线的斜率;

$e_{ij}$ ——信号发生器的输出电压, V;

$e_{oj}$ ——电荷放大器的输出电压, V;

$E_o$ ——电荷放大器的额定输出电压, V。

### 7.3.6 失真度

按图 5 连接检定用仪器和被检电荷放大器, 选用 1 000 pF 的标准电容器。有积分功能的电荷放大器设置为加速度挡 (或线性挡)。电荷放大器的低通滤波器置于最高频率挡, 高通滤波器置于最低频率挡 (A 类电荷放大器可设置为“长”挡), 归一化挡置于“1”, 调整信号发生器至测量频率。调整信号发生器的输出电压和电荷放大器的增益挡, 使电荷放大器的输出电压与信号发生器的输出电压近似相等。增加信号发生器的输出, 使电荷放大器的输出电压  $e_o$  达到额定输出电压  $E_o$ 。此时, 示波器显示的波形应无明显的失真, 用失真度测量仪或动态信号分析仪测量电荷放大器输出电压  $e_o$  的失真度, 动态信号分析仪的分析带宽应大于所测失真频率的 5 倍。

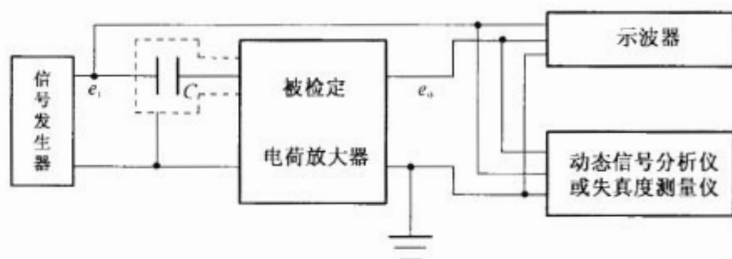


图 5 电荷放大器失真度的检定接线图

测量频率推荐选择 2 Hz、160 Hz 和 20 kHz, 必要时可在电荷放大器通频带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值作为检定结果, 应满足 5.6 的要求。

### 7.3.7 低通滤波器截止频率 (上限频率)

按图 4 连接检定用仪器和被检电荷放大器, 选用 1 000 pF 的标准电容器。电荷放大器的高通滤波器置于最低频率挡 (A 类电荷放大器可设置为“中”挡), 低通滤波器置于所要检定的挡位, 归一化挡置于“10”, 有积分功能的电荷放大器置于加速度挡 (或线性挡)。信号发生器频率调至所测滤波器截止频率的 1/10~1/20 处, 作为参考频率  $f_0$ 。

调整电荷放大器的增益挡, 使其输出电压与信号发生器的输出电压近似相等。调整信号发生器, 使电荷放大器的输出电压为其额定输出电压的 90% 左右, 用数字电压表 1 测量信号发生器输出电压  $e_{i0}$ , 用数字电压表 2 测量电荷放大器的输出电压  $e_{o0}$ 。调整信号发生器频率为低通滤波器截止频率  $f_0$ , 用数字电压表 1 和数字电压表 2 分别测量此频率下信号发生器输出电压  $e_{i1}$  和电荷放大器的输出电压  $e_{o1}$ , 用公式 (11) 计算电荷放大器低通滤波器截止频率处的衰减量。对于低通滤波器截止频率标注衰减为 10% 的电荷放大器用公式 (12) 计算衰减量。

$$A_{c1} = -20 \lg \left( \frac{T_1}{T_0} \right) \quad (11)$$

$$A_{c2} = - \left( \frac{T_1}{T_0} - 1 \right) \times 100 \quad (12)$$

$$T_0 = \frac{e_{i0}}{e_{o0}} C \quad (13)$$

$$T_1 = \frac{e_{i1}}{e_{o1}} C \quad (14)$$

式中:

$A_{c1}$ ——衰减量, dB;

$A_{c2}$ ——衰减量, %;

$T_0$ ——电荷放大器在参考频率点的传输系数, pC/V;

$T_1$ ——电荷放大器在测量频率点的传输系数, pC/V;

$e_{i0}$ ——信号发生器在参考频率点的输出电压, V;

$e_{o0}$ ——电荷放大器在参考频率点的输出电压, V;

$e_{i1}$ ——信号发生器在测量频率点的输出电压, V;

$e_{o1}$ ——电荷放大器在测量频率点的输出电压, V;

$C$ ——标准电容容量 (以实际校准值代入), pF。

调整信号发生器频率为 2 倍上限频率  $2f_u$ , 重复上述测量过程, 得到 2 倍上限频率处的衰减量, 该衰减量即为 -3 dB 截止频率外的高频衰减斜率。

重复上述步骤, 对电荷放大器所有的低通滤波器挡进行检定。检定结果应满足 5.7 的要求。

### 7.3.8 高通滤波器截止频率 (下限频率)

A 类和 B 类电荷放大器高通滤波器截止频率的检定方法不同。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, 参照 7.3.7, 测量高通滤波器截止频率处的衰减量。

#### 7.3.8.1 A 类电荷放大器等效下限频率

A 类电荷放大器的检定接线如图 6 所示, 电荷放大器归一化挡置于“10”, 高通滤波器置于最低频率挡或“长”挡。调整电荷放大器的增益挡, 使电荷放大器的传输系数为 100 nC/V。有积分功能的电荷放大器设置为加速度挡 (或线性挡)。



图 6 A 类电荷放大器等效下限频率的检定接线图

图 6 中电池 (或直流稳压电源) 电动势  $\varepsilon$  与电容量  $C$  的乘积  $Q = \varepsilon \cdot C$  应能使电荷

放大器的输出电压  $e_{om} = \pm 0.1E_o$ ，为此可用公式 (15) 计算电动势  $\epsilon$  和电容器  $C$  的数值：

$$\epsilon = \pm \frac{0.1E_o S}{G} \cdot \frac{1}{C} \quad (15)$$

式中：

$E_o$ ——电荷放大器额定输出电压，V；

$G$ ——电荷放大器总的传输系数为 100 nC/V 时的增益挡数值，V/Unit；

$S$ ——归一化挡数值，10 pC/Unit；

$C$ ——标准电容容量（以实际校准值代入），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。

将开关  $K_1$  置于位置 1，使电容充电，过数秒后把  $K_1$  转向位置 2（1、2 触点间绝缘电阻应大于 10 TΩ），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  $E_{t_1}$  后及时掀动秒表，大约等 180 s 后再记下数字电压表的读数  $E_{t_2}$ ，同时秒表停止计时。用公式 (16) 计算等效下限频率  $f_{el}$ 。

也可以用动态信号分析仪采集放电过程的电压变化曲线，通过回放读取  $E_{t_1}$  和  $E_{t_2}$ 。

$$f_{el} = \frac{\left| \ln \frac{E_{t_1}}{E_{t_2}} \right|}{2\pi t} \quad (16)$$

式中：

$f_{el}$ ——A 类电荷放大器的等效下限频率，Hz；

$E_{t_1}$ ——秒表开始计时的  $t_1$  时刻的电荷放大器输出电压，V；

$E_{t_2}$ ——秒表停止计时的  $t_2$  时刻的电荷放大器输出电压，V；

$t$ ——秒表记录  $t_1$  时刻至  $t_2$  时刻的时间间隔，s。

对于另一个  $e_{om}$  值，重复上述测量，计算出另一个等效下限频率。取二者之中最大的一个作为电荷放大器的等效下限频率。

重复上述步骤，对 A 类电荷放大器所有的高通滤波器挡进行检定。

检定结果应满足 5.8 的要求。

#### 7.3.8.2 B 类电荷放大器下限频率

B 类电荷放大器的检定接线图如图 7 所示，选用 1 000 pF 的标准电容器。电荷放大器的高通滤波器置于所要检定的挡位，低通滤波器置于最高频率挡，归一化挡置于“10”，有积分功能的电荷放大器置于加速度挡（或线性挡）。信号发生器频率调至 160 Hz，作为参考频率  $f_0$ 。

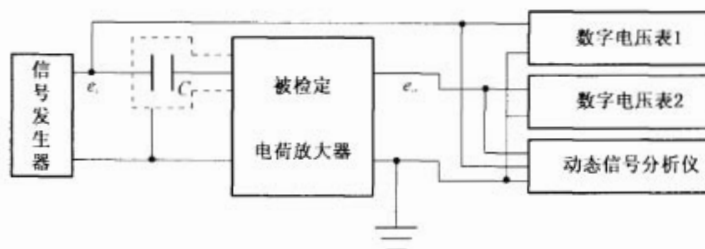


图7 B类电荷放大器下限频率的检定接线图

调整电荷放大器的增益挡,使其输出电压与信号发生器的输出电压近似相等。调整信号发生器,使电荷放大器的输出电压为其额定输出电压的90%左右,用动态信号分析仪或数字电压表1和数字电压表2读取信号发生器输出电压 $e_{i0}$ 和电荷放大器的输出电压 $e_{o0}$ 。

调整信号发生器频率为高通滤波器截止频率 $f_1$ ,用动态信号分析仪或数字电压表1和数字电压表2测量此频率下信号发生器输出电压 $e_{i1}$ 和电荷放大器的输出电压 $e_{o1}$ ,用公式(11)计算电荷放大器高通滤波器截止频率处的衰减量。对于高通滤波器截止频率标注衰减为10%的电荷放大器用公式(12)计算衰减量。

重复上述步骤,对B类电荷放大器的所有高通滤波器挡进行检定。

检定结果应满足5.8的要求。

### 7.3.9 幅频特性

按图7连接各仪器,选用1 000 pF的电容器,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(也可根据用户需要选定上限频率和下限频率),归一化挡置于“1”,有积分功能的电荷放大器置于加速度挡(或线性挡)。信号发生器频率调至参考频率160 Hz,调整电荷放大器的增益挡,使其输出电压与信号发生器的输出电压近似相等。调整信号发生器,使电荷放大器的输出电压为其额定输出电压的90%左右。

用动态信号分析仪的两个并行通道或数字电压表1和数字电压表2同步测量信号发生器的输出电压 $e_{i0}$ 和电荷放大器的输出电压 $e_{o0}$ ,按公式(13)计算参考频率点的传输系数。调整信号发生器的频率,测量其他选定频率的信号发生器输出电压 $e_{i1}$ 和电荷放大器输出电压 $e_{o1}$ ,按公式(14)计算其他频率点的传输系数。

使用动态信号分析仪检定电荷放大器幅频特性前,要先对动态信号分析仪的两个测量通道进行自校准,得到各测量频率点的系统幅值比,用来修正电荷放大其各频率点的传输系数。

各频率点的传输系数相对参考频率点传输系数的偏差按公式(12)计算。

测量频带的选择:

对于A电荷类放大器,测量频带选取 $0.3 \text{ Hz} \sim 0.2 f_0$ ,低通滤波器为线性挡时选取测量频带 $0.3 \text{ Hz} \sim 20 \text{ kHz}$ ;对于B电荷类放大器,测量频带选取 $10 f_1 \sim 0.2 f_0$ ,低通滤波器为线性挡时选取测量频带 $10 f_1 \sim 20 \text{ kHz}$ 。

测量频率点的选择:

在测量频带内按标准 1/3 倍频程频率 (…，20，31.5，40，50，63，80，100，125，160，200，…) 序列选取 10~14 个测量频率点。

检定结果应满足 5.9 的要求。

### 7.3.10 相频特性

仪器的连接与设置、测量频带和测量频率点的选择同 7.3.9。

采用动态信号分析仪的两个通道同步测量信号发生器的输出电压和电荷放大器的输出电压。动态信号分析仪设置为直流耦合方式、频响函数分析功能，坐标设置为“相位”。每个测量频率点平均 10 次以上，得到各频率点电荷放大器的相移。

使用动态信号分析仪检定电荷放大器相频特性前，要先对动态信号分析仪的两个测量通道进行自校准，得到各测量频率点的系统相移，用来修正电荷放大器各频率点的相移。

检定结果应满足 5.10 的要求。

### 7.3.11 积分器误差

按图 7 接线，将电荷放大器归一化挡置于“1”，低通滤波器置于最高频率挡，高通滤波器置于最低频率挡，信号发生器调至电荷放大器说明书给出的位移挡（或二次积分挡）的起始频率，电荷放大器的积分开关置于位移挡（或二次积分挡），调节信号发生器的输出电压  $e_i$ ，使电荷放大器的输出接近额定输出电压  $E_0$ ，用数字电压表 2 或动态信号分析仪测量电荷放大器的输出电压，记为  $e_D$ ；保持信号发生器的输出电压不变，积分开关转换到速度挡（或一次积分挡），测量电荷放大器的输出电压，记为  $e_V$ ；再转换到加速度挡（或线性挡），测量电荷放大器的输出电压，记为  $e_a$ ，用公式 (17) 和公式 (18) 计算速度（一次积分）测量误差  $\delta_V$  和位移（二次积分）测量误差  $\delta_D$ 。

在说明书给定的频率范围内，按电荷放大器位移挡起始频率的倍频程选取 10~14 个频率，在频率的高端可适当减小测量频率的间隔，重复上述步骤。

各频率的积分电路误差应满足 5.11 的要求。

$e_D$ 、 $e_V$  和  $e_a$  三个电压中任何一个都不得大于电荷放大器的额定输出电压  $E_0$ ，并且没有限幅失真，否则应调整信号发生器输出电压并重新测量。为此，较低频时从位移挡开始测量，在较高频时应从加速度挡开始测量。

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

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

式中：

$\delta_V$ ——速度（一次积分）测量误差，%；

$\delta_D$ ——位移（二次积分）测量误差，%；

$f$ ——测量频率，Hz；

$e_a$ 、 $e_V$ 、 $e_D$ ——频率为  $f$ ，信号发生器输出保持不变时，相应的加速度（线性）、速度（一次积分）和位移（二次积分）三个挡位的输出电压，V；

$K_v$ ——无量纲系数，等于电荷放大器面板上所示的速度与 1 m/s 的速度比值；

$K_D$ ——无量纲系数，等于电荷放大器面板上所示的位移与 1 m 的位移比值。

#### 7.4 检定结果的处理

经检定符合本规程各项要求的电荷放大器，根据表 1 的规定判定其等级和类别，发给检定证书。对超出本规程表 1 各项规定或其他项不符合本规程要求的电荷放大器发给检定结果通知书，并注明不合格项目。

#### 7.5 检定周期

电荷放大器的检定周期一般不超过 1 年。

## 附录 A

## 等效下限频率的推导

在 7.3.8.1 A 类电荷放大器等效下限频率的检定中, 等效下限频率的计算公式 (16) 的推导如下:

电容充电完毕后,  $t_1$  时刻和  $t_2$  时刻的输出电压比见公式 (A. 1),

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

$$E_{t_1} = Ee^{-t_1/\tau} \quad (\text{A. 2})$$

$$E_{t_2} = Ee^{-t_2/\tau} \quad (\text{A. 3})$$

式中:

$E$ ——充电完毕后某时刻电荷放大器的输出电压, V;

$\tau$ ——电路的时间常数  $\tau=RC$ , s;

$t_1$ ——秒表开始计时的时刻, s;

$t_2$ ——秒表停止计时的时刻, s。

对公式 (A. 1) 两边求自然对数, 得公式 (A. 4)。

$$\ln \frac{E_{t_1}}{E_{t_2}} = \frac{1}{\tau}(t_2 - t_1) \quad (\text{A. 4})$$

等效下限频率与电路的时间常数的关系见公式 (A. 5)。

$$f_{cl} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (\text{A. 5})$$

将公式 (A. 4) 代入公式 (A. 5) 并取绝对值, 得到公式 (A. 6), 即公式 (16)。

$$f_{cl} = \frac{\left| \ln \frac{E_{t_1}}{E_{t_2}} \right|}{2\pi(t_2 - t_1)} = \frac{\left| \ln \frac{E_{t_1}}{E_{t_2}} \right|}{2\pi t} \quad (\text{A. 6})$$



## 电荷放大器检定记录

第 页 共 页

## 4 增益挡误差

增益挡 V/Unit	归一化挡 pC/Unit	标准电容容量 pC	信号发生器输出 V	电荷放大器输出 V	误差 %

各增益挡最大误差为 \_\_\_\_ %。

## 5 线性误差

信号发生器输出 V	电荷放大器输出 V	误差 %

电荷放大器额定输出电压  $E_0 =$  \_\_\_\_ V, 截距  $a_0 =$  \_\_\_\_ V, 斜率  $a_1 =$  \_\_\_\_。

当输出电压为 \_\_\_\_ V (峰值) 时, 仪器传输系数相对基准值的偏差最大, 为 \_\_\_\_ %。

## 6 失真度

频率 Hz	失真度 %
2	
160	
20 000	

## 电荷放大器检定记录

第 页 共 页

## 7 低通滤波器截止频率（上限频率）

滤波器挡位 kHz		信号发生器输出 V	电荷放大器输出 V	衰减量 dB (%)
	参考频率			—
	截止频率			
	2 倍截止频率			
	参考频率			—
	截止频率			
	2 倍截止频率			
	参考频率			—
	截止频率			
	2 倍截止频率			
	参考频率			—
	截止频率			
	2 倍截止频率			

## 8 高通滤波器截止频率（下限频率）

A 类电荷放大器：

滤波器挡位 Hz	$t_1$ 时刻电压输出 $E_{t_1}$ V	$t_2$ 时刻电压输出 $E_{t_2}$ V	时间间隔 $t$ s	等效下限频率 $f_f$ Hz

B 类电荷放大器：

滤波器挡位 kHz	测量频率 kHz	信号发生器输出 V	电荷放大器输出 V	衰减量 dB (%)
	参考频率			—
	截止频率			
	参考频率			—
	截止频率			
	参考频率			—
	截止频率			

## 电荷放大器检定记录

第 页 共 页

## 9 幅频特性和相频特性

频率 Hz	系统 幅值比	系统 相位差 (°)	信号发生器 输出 V	电荷放大器 输出 V	传输系数 pC/V	传输系数 偏差 %	相移 (°)

## 10 积分器误差

频率 Hz	信号发生器 输出 V	加速度挡 (线性) V	速度挡 (一次积分) V	速度误差 (一次积分 误差) %	位移挡 (二次积分) V	位移误差 (二次积分 误差) %

以下空白

检验员\_\_\_\_\_, 检定员\_\_\_\_\_

## 附录 C

### 检定证书/检定结果通知书内页信息及格式

- C.1 检定证书/检定结果通知书内页应包含以下信息：
  - C.1.1 检定证书/检定结果通知书编号
  - C.1.2 检定所用计量基准或计量标准信息
    - C.1.2.1 计量基准或计量标准名称
    - C.1.2.2 测量范围
    - C.1.2.3 不确定度/准确度等级/最大允许误差
    - C.1.2.4 证书编号
    - C.1.2.5 检定证书有效期
  - C.1.3 环境条件
    - C.1.3.1 环境条件：温度、相对湿度等
    - C.1.3.2 检定地点
  - C.1.4 被检项目及检定结果
  - C.1.5 检定不合格项说明（只用于检定结果通知书内页格式）
  - C.1.6 页码
  - C.1.7 检定结论（只用于检定证书内页格式）

以上信息均为必备项。

## C.2 检定证书内页格式

## 检 定 结 果

第 页 共 页

1 外观及工作正常性检查\_\_\_\_\_。

2 输入等效电荷噪声

当源电容为 1 000 pF, 电荷放大器增益挡置\_\_\_\_ V/Unit, 归一化挡置\_\_\_\_ pC/Unit 时, 输入等效电荷噪声 (有效值) 为\_\_\_\_ pC。

3 归一化误差

该仪器归一化误差为\_\_\_\_% (归一化挡为\_\_\_\_ pC/Unit 时)。

4 增益挡误差

增益挡 V/Unit						
误差 %						

所有各增益挡最大误差为\_\_\_\_%。

5 线性误差

当输出为\_\_\_\_ V (峰值) 时, 仪器传输系数为满输出的偏差最大, 为\_\_\_\_%。

6 失真度

频率 Hz	2	160	20 000
失真度 %			

7 低通滤波器截止频率 (上限频率)

滤波器挡位 kHz		衰减量 dB (%)
	截止频率	
	2 倍截止频率	
	截止频率	
	2 倍截止频率	
	截止频率	
	2 倍截止频率	
	截止频率	
	2 倍截止频率	
	截止频率	
	2 倍截止频率	

## 检 定 结 果

第 页 共 页

## 8 高通滤波器截止频率（下限频率）

A 类电荷放大器：

滤波器挡位 Hz						
等效下限频率 $f_F$ Hz						

B 类电荷放大器：

滤波器挡位 Hz						
衰减量 dB (%)						

## 9 幅频特性和相频特性（以 160 Hz 为参考）

频率 Hz	传输系数 pC/V	传输系数偏差 %	相移 (°)

## 10 积分器误差

频率 Hz	速度误差（一次积分误差） %	位移误差（二次积分误差） %

结论：准予做 级 类电荷放大器用。

以下空白

### C.3 检定结果通知书内页格式

检定结果通知书内页格式与检定证书内页格式相同，但要说明检定结果的不合格项。

以下空白

---