



中华人民共和国国家计量检定规程

JJG 632—1989

动态力传感器

Dynamic Force Sensors

1989-09-11 批准

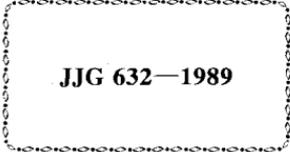
1990-07-01 实施

国家技术监督局 发布

动态力传感器检定规程

Verification Regulation of

Dynamic Force Sensors



JJG 632—1989

本检定规程经国家技术监督局于 1989 年 09 月 11 日批准，并自 1990 年 07 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

本规程技术条文由起草单位负责解释

本规程主要起草人：

程克玉 （中国计量科学研究院）

参加起草人：

史正北 （无锡市标准计量局）

张 跃 （中国计量科学研究院）

姜 华 （中国计量科学研究院）

目 录

一 技术要求	(1)
二 检定条件	(2)
三 检定项目和检定方法	(3)
(一) 首次静态性能检定	(3)
(二) 首次动态性能检定	(5)
(三) 随后检定	(8)
四 检定结果的处理和检定周期	(9)
附录 1 标准装置的激励 (输入) 信号	(10)
附录 2 落锤式动态力标准装置	(12)
附录 3 单自由度二阶线性系统	(14)
附录 4 压电晶体力传感器电容测试方法	(16)
附录 5 压电晶体力传感器灵敏阈的测试方法	(17)
附录 6 传感器检定记录	(18)
附录 7 温度特性检定记录	(19)
附录 8 传感器动态技术性能检定记录	(20)
附录 9 检定证书内面格式	(22)
附录 10 检定证书内面格式 (时域检定结果)	(23)
附录 11 检定证书内面格式 (频域检定结果)	(24)

动态力传感器检定规程

本规程适用于新制造、使用中和修理后的压电晶体力传感器（以下简称传感器）的检定。应变式力传感器的动态性能按照本规程的动态部分进行检定。其他类型的电测式动态力传感器可参照本规程进行检定。

注：（1）指压向、拉向和拉压向的动态力传感器。

（2）应变式力传感器的静态检定按国家计量检定规程“负荷传感器”JJG391—1985（试行）中的规定进行。

（3）对于不能静态检定的传感器暂不包括在本规程中。

一 技术要求

1 传感器及其附件应稳固地放在盒（或箱）中，传感器铭牌上应标明传感器名称、型号规格、编号、制造厂、出厂年月、量程和精度等。传感器上应标明型号和编号。

2 传感器的表面不应有影响技术性能的疵病，连接电缆及附件应齐全、完好。

3 基本技术指标

3.1 静态技术指标：额定力值、最大力值、电荷灵敏度、直线度、滞后、重复性、绝缘电阻、刚度、稳定度、电容、灵敏度、灵敏度温度系数，工作温度范围等 13 项。

注：对内装放大器组件低阻输出的传感器，应将电荷灵敏度、绝缘电阻、电容相应改为电压灵敏度、输出阻抗和放电时间常数。

3.2 动态技术指标（分为时间域和频率域指标）

时间域：力的相对幅值准确度、自振频率（包括传感器的自振频率和传感器安装后系统的自振频率）、上升时间。

频率域：工作频率范围、工作频率范围内相对幅值准确度和共振频率。

注：上升时间——在阶跃力作用下传感器的响应第一次达到最终稳态值的 10% 到 90% 所需的时间；自振频率——传感器有阻尼的自由振荡频率；共振频率——传感器在动态力作用下幅值比达到峰值时的频率。

3.3 生产厂一般应给出每个传感器的各项静态技术指标和自振频率、上升时间共 15 项指标。计量部门一般应检定以下 10 项指标：电荷灵敏度 S_q 、直线度 L 、滞后 H 、重复性 R 、绝缘电阻 I_Ω 、稳定度 S_b 、灵敏度温度系数 T_e 、电容 C 自振频率 f_r 、上升时间 t_r 。

3.4 由于检定条件的限制，暂不能满足以上要求时，生产厂至少应给出除稳定度 S_b 、灵敏度温度系数 T_e 和上升时间 t_r 之外的 12 项指标。计量部门至少应给出电荷灵敏度 S_q 、直线度 L 、滞后 H 、重复性 R 、绝缘电阻 I_Ω 、自振频率 f_r 等 6 项指标。

3.5 对使用中的传感器，除以上规定应给出的各项技术指标外，还应根据具体条件和不同要求给出以下动态技术指标。时间域：力的相对幅值准确度 E_{A1} 、或传感器安装后

系统的自振频率 f_{sr} ；频率域：工作频率范围 B 、工作频率范围内相对幅值准确度 E_{Af} 、共振频率 f_o 。

4 等级划分

表 1 静态特性等级划分

项 目 \ 等 级		等 级			
		一	二	三	四
允 差	$L/(\%FS)$	± 0.3	± 0.5	± 1.0	± 2.0
	$H/(\%FS)$				
	$R/(\%FS)$				
	$T \cdot (\% \cdot ^\circ C^{-1})$	± 0.03	± 0.03	± 0.06	—
	$S_b/(\% \cdot \text{年}^{-1})$	± 0.6	± 1.0	± 2.0	± 3.0

表 2 动态特性等级划分

项 目 \ 等 级		等 级			
		一	二	三	四
允	$E_{At}/(\%)$	± 2.0	± 3.0	± 5.0	± 10
差	$E_{Af}/(\%)$	± 2.5	± 5.0	± 10	± 20
注：对每个传感器一般只给出 E_{At} ，或只给出 E_{Af} 。					

5 对新制造的传感器产品按静态特性划分等级。对使用中的传感器按静态和动态特性分别划分等级。

6 传感器的绝缘电阻 I_Ω ，对于静态一、二级的传感器不小于 $10^{13} \Omega$ ；对于静态三、四级的传感器不小于 $10^{12} \Omega$ 。

7 传感器其他有关技术特性（如非轴向力的影响、加速度效应、过载特性等）应满足相应技术文件（如国家标准、部颁标准、出厂说明书等）的要求。

二 检 定 条 件

8 环境条件

8.1 室温 $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $\leq 70\%$ 。

8.2 电源电压 220 V $(1 + 10\%)$ 。

9 安装

9.1 传感器的底面和安装传感器的支承面应清洁、平滑。动态性能检定时，在安装表面涂一薄层润滑脂，有助于良好的接触和提高接触刚度。

9.2 动态性能检定时，传感器的安装状态应与使用时的相同或类似，一般用螺栓、双端螺栓连接固定。根据不同情况和要求，也可采用粘胶等方法固定。

9.3 传感器的轴线与所加作用力的轴线相重合。使倾斜、偏心力影响减到最小。静态检定时，传感器上端应加承压垫。

10 连接导线

连接导线采用低噪声屏蔽电缆，电缆的长度和类型应与使用时的相类似，尽量用传感器厂配用的电缆。传感器到电荷放大器的连接头和电缆必须保持清洁、干燥。电缆的绝缘电阻不低于所接传感器的相应指标。

11 检定各个等级传感器的静态力标准机的有关技术指标，应优于被检传感器相应技术指标的 3 倍。

12 检定各个等级传感器的动态力标准装置的误差 e_s 不可忽略（参看附录 2）。评定准确度等级时，应将标准装置的误差估计到检定结果中去。

13 动态性能检定采用参考测量系统时，系统（包括安装）的自振频率至少为 $10/\tau_s$ ，或 $5/t_s$ 。其中 τ_s 、 t_s 是校准信号的脉冲持续时间和上升时间。

注：脉冲持续时间——冲击脉冲从基准值上升到最大值，再下降到基准值所需的时间（脉冲最大值的 10% 为基准值）。

14 配用仪表和预热

14.1 静态性能检定时，传感器和电荷放大器作为整体，配套一起检定。指示仪表的准确度指标应优于该“整体”相应指标的 3 倍。

14.2 参考测量系统中，配用的模数转换器（A/D）的二进制位数不少于 10 bit，为保证测量精度，推荐采样频率不小于传感器输出最高频率的 20 倍。

14.3 所用仪器应有良好的接地，用同一接地点。

14.4 预热

检定前必须对传感器和配用的仪表通电预热，预热时间应符合制造厂的规定。没有明确规定的一般预热不少于半小时。

三 检定项目和检定方法

（一）首次静态性能检定

15 按照本规程第 1、2 条的要求进行外观检查。

16 按照本规程第 6 条的要求，使用外加电压 100 V 的高阻表或静电计，测量传感器端点间的绝缘电阻 I_{Ω} 。

17 按以下程序检定传感器的受力特性

17.1 对照本规程“检定条件”中的有关规定，检查该检定的条件是否与规定相符。

17.2 将传感器放置到力标准机上，连接导线，调整电荷放大器和指示仪表的量程和零点，通电预热。

17.3 预加载 3 次。每次加到额定力值，然后退回到零值。每次施加力值前，调好电荷放大器和指示仪表的零点。

17.4 通常以相同的增量施加递增值，直到额定值。所施加力值的级数应选 5~10 级（不包括零值），每加一级力值后保持一定时间，一般取 5 s，再读取输出值。然后以同样的方法施加递减值和读取输出值，直到零值，读取零输出值。

17.5 重复本规程第 17.4 的步骤进行检定，至少 3 次。每次开始施加递增值前，调好电荷放大器和指示仪表的零点。

17.6 按以下公式计算相应的技术指标

$$\text{额定输出} \quad V_n = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m V_{nj} \quad (1)$$

$$\text{电荷灵敏度} \quad S_q = \frac{V_n \cdot G \cdot D}{F_n} \quad (2)$$

$$\text{直线度} \quad L = \frac{\Delta V_L}{V_n} \times 100\{ \% \text{FS} \} \quad (3)$$

$$\text{滞后} \quad H = \frac{\Delta V_H}{V_n} \times 100\{ \% \text{FS} \} \quad (4)$$

$$\text{重复性} \quad R = \frac{\Delta V_R}{V_n} \times 100\{ \% \text{FS} \} \quad (5)$$

式中： m ——校准循环的次数；

V_{nj} ——第 j 次 ($j=1, 2, \dots, m$) 进程测量时额定力值的输出读数；

G ——电荷放大器被设定的衰减挡读数，N/V；

D ——电荷放大器被设定的归一化读数，pC/N；

F_n ——额定力值；

ΔV_L ——进程平均校准曲线与平均端点直线偏差的最大值；

ΔV_H ——回程平均校准曲线与进程平均校准曲线偏差的最大值；

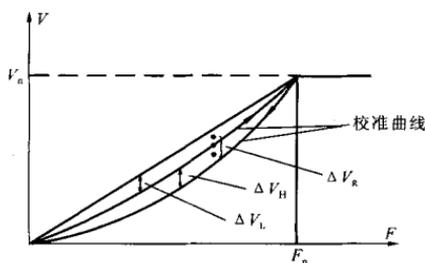
ΔV_R ——进程重复校准时各级力值点输出极差的最大值。

18 按以下程序检定灵敏度温度系数

18.1 对照本规程“检定条件”中的有关规定，检查该检定的条件是否与其规定相符。

18.2 将传感器放置在装有恒温箱的力标准机上，连接导线，调好电荷放大器和指示仪表的量程和零点，通电预热。

18.3 预加载 3 次。每次加到额定力值，然后退回到零值。每次施加力值前，调好电荷



放大器和指示仪表的零点。

18.4 施加额定力值，待力值达到后保持 5s，读取输出值。然后退回到零值，保持 5s。读取零输出值。重复 3 次。每次施加力值前，调好电荷放大器和指示仪表的零点。

18.5 升高恒温箱的温度，温度变化速率 10℃/h~20℃/h，达到传感器工作温度范围的上限，保持 30 min，重复 18.3~18.4 的步骤。

注：在恒温箱的温度达不到上限温度时，允许用低于上限的温度进行检定。

18.6 下降恒温箱的温度，温度变化速率 10℃/h~20℃/h，达到传感器工作温度范围的下限，保持 30 min，重复 18.3~18.4 的步骤。

注：在恒温箱的温度达不到下限温度时，允许用高于下限的温度进行检定。

18.7 升高恒温箱的温度，温度变化速率 10℃/h~20℃/h，达到常温，保持 30 min，重复 18.3~18.4 的步骤。

18.8 按以下公式计算灵敏度温度系数

$$T_{eh} = \frac{S_{qh} - S_q}{\frac{S_q}{T_h - T}} \times 100 [\% / ^\circ\text{C}] \quad (6)$$

$$T_{el} = \frac{S_{ql} - S_q}{\frac{S_q}{T_l - T}} \times 100 [\% / ^\circ\text{C}] \quad (7)$$

式中： T_h ， T ， T_l ——检定时的上限温度，常温，下限温度；

S_{qh} ， S_q ， S_{ql} ——检定时与 T_h ， T ， T_l 相应的传感器电荷灵敏度。

检定结果处理时，取 T_{eh} 和 T_{el} 中绝对值较大的作为灵敏度温度系数 T_e 。

注：当由 18.4 和 18.7 计算所得的 S_q 不一致时，用这两次结果分别计算，取绝对值较大的作为最后的传感器灵敏度温度系数。

18.9 同一生产厂，相同型号和相同规格的一批传感器，其灵敏度温度系数允许抽检。抽检率为 10%（不得少于 3 个），按其劣者确定该批传感器的相应技术指标。

(二) 首次动态性能检定

19 时间域的技术性能

19.1 对安装的传感器系统,按使用要求的上升时间或脉冲持续时间进行力的幅值性能检定。

19.1.1 传感器的安装应与使用时的相同或类似。

19.1.2 将使用中的传感器及其测量系统作为整体进行检定。

19.1.3 对照本规程“检定条件”中的有关规定,检查该检定的条件是否与规定相符。

19.1.4 调好配用的放大器和记录仪表的各个挡位。对于电荷放大器,其灵敏度设定为已知的传感器静态灵敏度。将仪器通电预热。

19.1.5 施加递增的动态力值,读取(或打印)标准参考测量系统和被检传感器测量系统的输出值及输出波形的脉冲持续时间或上升时间。

19.1.6 施加的动态力值应覆盖被检传感器的额定范围或欲使用范围。力值级数不得少于5级,在每一级动态力值附近至少做3次。

19.1.7 根据以下公式计算力的相对幅值准确度 e_{At} :

$$e_{Ati} = \frac{F_{ci} - F_{ri}}{F_{ri}} \times 100[\%] \quad (8)$$

$$e_{At} = |e_{Ati}|_{\max}(i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

$$E_{At} = \pm \sqrt{(e_s)^2 + (e_{At})^2} \quad (10)$$

式中: e_{Ati} ——第 i 点校准力值的相对幅值误差;

F_{ci} ——被检传感器测量系统第 i 点输出所对应的力值;

注:对应变式力传感器取静态平均端点直线上对应的力值。

F_{ri} ——参考测量系统第 i 点输出所对应的力值;

e_{At} ——被检传感器力的最大相对幅值误差;

n ——校准点数;

e_s ——标准装置的不确定度。

19.2 传感器自振频率 f_r 和上升时间 t_r 的检定

19.2.1 对照本规程“检定条件”的有关规定,检查该检定的条件是否与其规定相符。

19.2.2 对被检传感器施加脉冲函数或阶跃函数的力信号,响应是阻尼衰减振荡的瞬变过程,记录(或储存)响应信号,并读取上升时间 t_r (施加阶跃力时)。至少重复3次。

19.2.3 对记录(或储存)的阻尼衰减振荡信号进行分析,将各阶振荡频率分开(可用谱分析方法),具有较大幅值的最低振荡频率为传感器自振频率 f_r 。

19.2.4 计算自振频率标称值 f_{rn} 与实测值 f_r 的相对差值 e_f :

$$e_f = \frac{f_{rn} - f_r}{f_r} \times 100[\%] \quad (11)$$

19.2.5 同一生产厂,相同型号和相同规格的同一批传感器的自振频率允许抽检,抽检率为10%(不得少于5个)。按其劣者确定该批传感器的相应技术指标。

19.3 传感器安装后系统的自振频率 f_{sr} 的检定

19.3.1 传感器按使用要求安装。

19.3.2 重复 19.2.1 条的步骤。

19.3.3 对被检传感器系统施加脉冲力值, 记录 (或储存) 系统的衰减阻尼振荡信号。

19.3.4 重复 19.2.3 条的步骤, 用同样的方法确定传感器安装后系统的自振频率 f_{sr} 。

20 频率域的技术性能

20.1 用瞬态力信号源激励

20.1.1 对被检定的传感器测量系统在与使用相同或类似的状态下进行检定。

20.1.2 对被检传感器及其测量系统作为整体进行检定。

20.1.3 对照本规程“检定条件”中的有关规定, 检查该检定的条件是否与规定相符。

20.1.4 调好配用的放大器和记录仪各个挡位。对于电荷放大器灵敏度设定为已知的传感器静态灵敏度。将仪器通电预热。

20.1.5 施加动态力值, 对标准参考测量系统和被检传感器测量系统的输出进行打印 (或储存) 或实时处理。

20.1.6 施加动态力的级数一般应在被检传感器额定范围或欲使用范围内选定高、中、低 3 种力值, 在每一级动态力值附近至少做 3 次。

注: 在选定高力值时须考虑校准中的过冲量不要超过额定力值。

20.1.7 将参考测量系统的信号作为输入 $x(n)$ (n 为采样点数), 被检传感器测量系统的信号作为输出 $y(n)$ 进行信号 (或数据) 处理, 经快速傅立叶变换 (FFT), 计算频率域的传递函数, 计算公式如下

$$H(k) = \frac{G_{XY}(k)}{G_{XX}(k)} = R(k) + jI(k) \quad (12)$$

其中

$$G_{XY}(k) = X(k)^* \cdot Y(k) \quad (13)$$

$$G_{XX}(k) = X(k)^* \cdot X(k) \quad (14)$$

$$\text{而} \quad X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nk/N} \quad (15)$$

$$Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j2\pi nk/N} \quad (16)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

式中: $G_{XY}(k)$ ——互功率谱; $G_{XX}(k)$ ——自功率谱; $X(k)$ —— $x(n)$ 的傅立叶变换; $X(k)^*$ —— $X(k)$ 的共轭复函数; $Y(k)$ —— $y(n)$ 的傅立叶变换;

$R(k), I(k)$ —— $H(k)$ 的实部、虚部；

k ——离散频率点数。

20.1.8 按以下公式计算频率域技术指标

幅频特性：

$$A(k) = |H(k)| = \sqrt{[R(k)]^2 + [I(k)]^2} \quad (17)$$

相频特性：

$$\Phi(k) = \operatorname{tg}^{-1} \frac{I(k)}{R(k)} \quad (18)$$

由 (17) 式确定被检传感器测量系统的工作频率范围 B 和共振频率 f_0 。在工作频率范围 B 内相对幅值准确度 E_{Af} ：

$$e_{Af} = \left[\frac{A(k_m)}{A(0)} - 1 \right] \times 100\% \quad (19)$$

$$E_{Af} = \pm \sqrt{(e_s)^2 + (e_{Af})^2} \quad (20)$$

式中： e_{Af} ——在工作频率范围 B 内最大相对幅值误差；

$A(0)$ ——频率等于零时的相对幅值；

$A(k_m)$ ——在工作频率范围 B 内相对幅值误差最大时的相对幅值；

k_m ——在工作频率范围 B 内具有最大相对幅值误差的离散频率点。

20.2 用正弦力信号源激励

20.2.1 被检传感器及其测量系统与使用时相同或类似的状态下进行检定。

20.2.2 对照本规程“检定条件”中的有关规定，检查该检定的条件是否与其规定相符。

20.2.3 在力值不变的情况下改变频率，在要求的范围内选取频率校准点数不得少于 7 个点。每点重复 3 次。

20.2.4 检定结果

将各频率点所测得的幅值与相应的参考量输出幅值进行归一化处理得到幅频特性，由此确定被检传感器测量系统的工作频率范围 B 和共振频率 f_0 ，由 20.1.8 中公式 (19)、(20) 计算工作频率范围 B 内相对幅值准确度 E_{Af} 。

(三) 随后检定

21 传感器（产品）进行随后检定时，按本规程中的 15, 16, 17 和 19.2 的项目和步骤进行。由检定计算结果得到 I_0 , L , H , R , S_q 和 f_r 。稳定度 S_b 按下式计算：

$$S_b = \frac{S_{q1} - S_{q2}}{S_{q2}} \times 100\% / \text{年} \quad (21)$$

式中： S_{q1} ——上次检定的传感器电荷灵敏度；

S_{q2} ——本次检定的传感器电荷灵敏度。

22 对使用中的传感器除 21 条规定的检定项目外,按 19.1、19.3 和 20 中的项目和步骤进行检定。

四 检定结果的处理和检定周期

23 首次检定结果

23.1 对新制造的传感器,根据检定结果确定等级,发给检定证书,证书中一般给出 S_q , L , H , R , I_Ω , C , T_e , f_r , t_r 等 9 项技术指标。

23.2 对第一次使用的传感器,根据静态和动态性能检定结果分别确定等级,发给检定证书。证书中除 23.1 中规定的技术指标外,还应给出 E_{Af} (和 e_{Af}), 或幅频特性数据, B , f_o , E_{Af} (和 e_{Af})。

24 随后检定结果

24.1 传感器经随后检定所得到的 S_q , L , H , R , I_Ω , C , f_r , t_r , S_b 同上一次检定的 T_e , 确定传感器等级,发给证书。

24.2 对使用中的传感器经随后检定,根据静态和动态性能检定结果分别确定等级,发给检定证书。证书中除 24.1 规定的技术指标外,还应给出 E_{Af} (和 e_{Af}), 或幅频特性数据, B , f_o , E_{Af} (和 e_{Af})。

25 检定周期一般为 1 年。

附录 1

标准装置的激励（输入）信号

(一) 瞬变信号

1 钟形脉冲信号（高斯函数）

$$f(t) = Ee^{-\frac{t^2}{a^2}} \quad (1)$$

$$a = 0.3295$$

如图 1 所示。落锤式冲击力装置等可以产生冲击脉冲信号。

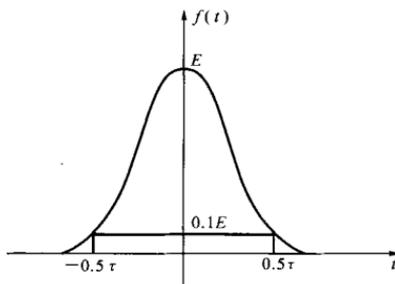


图 1 钟形脉冲信号

2 截平的斜变信号

$$R(t) = \begin{cases} \frac{K}{\tau_0}t & (0 \leq t < \tau_0) \\ K & (t \geq \tau_0) \end{cases} \quad (2)$$

如图 2 所示，液压式快启伐门装置等可以产生截平的斜变信号。

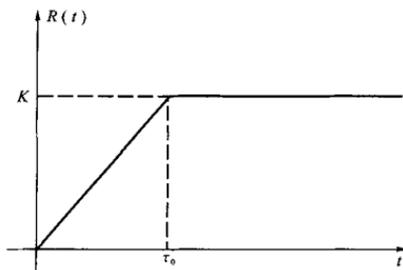


图 2 截平的斜变信号

3 阶跃信号

$$U(t - t_0) = \begin{cases} K_0 & (0 \leq t < t_0) \\ K - K_0 & (t > t_0) \end{cases} \quad (3)$$

如图 3 所示，激波管校准装置可以产生阶跃力信号。

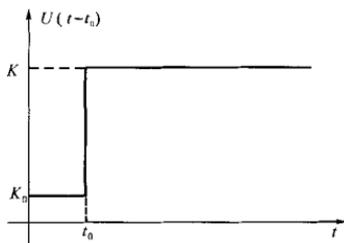


图 3 阶跃信号

(二) 正弦信号

正弦信号的函数表达式：

$$f(t) = K \sin(\omega t + \theta) \quad (4)$$

式中，角频率 ω 与周期 T 、频率 f 满足下列关系式：

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (5)$$

如图 4 所示，校准振动台等可以生产正弦力信号。

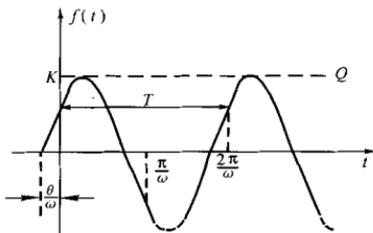


图 4 正弦信号

附录 2

落锤式动态力标准装置

1 装置的组成

落锤式动态力标准装置可分为三部分：冲击力源、标准参考测量系统和信号处理系统。检定装置框图如下：

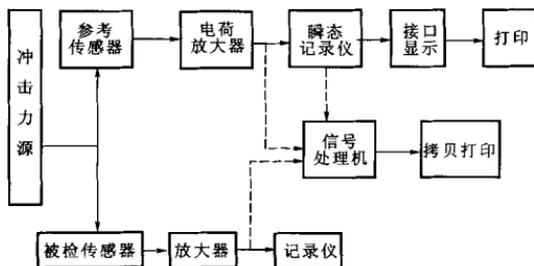


图 5 检定装置框图

2 主要结构和原理

落锤式冲击力源尽量采用整体结构，刚性好。重锤质量均匀、集中，认为是刚体，从而保证冲击力波形光滑、频响较高。

标准冲击加速度计安装在重锤上，被检传感器安装在砧子上，如图 6 所示。重锤自由下落作用在被检传感器上，此时标准参考测量系统和被检传感器测量系统同时、分别响应，将响应信号记录（显示、打印或储存）和进行数据处理。该装置经 6 年多的使用

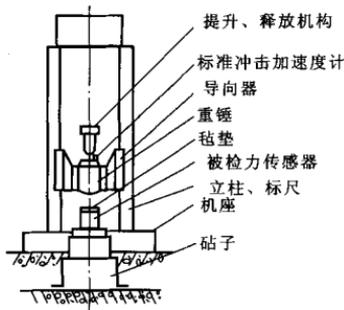


图 6 结构简图

和比较试验表明其性能稳定、可靠，精度不变。

3 主要技术指标

量程	500 N~1 MN
幅值上升时间	≥ 0.3 ms (10%~90%)
幅值不确定度	$\pm 2.0\%$ (误差分析部分略)

附录 3

单自由度二阶线性系统

力传感器从理论上讲属单自由度二阶线性系统，运动方程：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c_0 \frac{dx}{dt} + k_0 x = f(t) \quad (1)$$

如图 7 所示，上式可改写为

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 x}{dt^2} + 2\xi \frac{dx}{dt} + x = \frac{f(t)}{k_0} \quad (2)$$

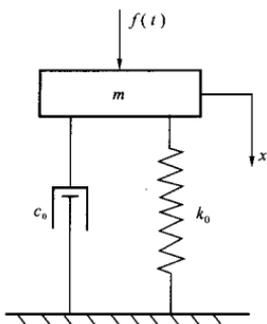


图 7 单自由度二阶线性系统示意图

其中

$$k_0 = m\omega_n^2 \quad (3)$$

$$\xi = c_0 \frac{\omega_n}{2k_0} \quad (4)$$

式中： ω_n ——传感器的固有频率，也称自然频率，即无阻尼自由振荡频率；

ξ ——阻尼比。

传递函数：

$$H(j\omega) = \frac{1/k}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + j\left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)} \quad (5)$$

其中幅频特性：

$$|H(j\omega)| = \frac{1/k}{\sqrt{(1-z^2)^2 + 4\xi^2 z^2}} \quad (6)$$

相频特性:

$$\Phi(\omega) = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{2\xi z}{1-z^2}\right) \quad (7)$$

式中: $z = \frac{\omega}{\omega_n}$ 。

实际上力传感器一般都是多自由度的,都不止一个共振频率。但最重要的是最低的共振频率,称为主振频率。如果主振频率占支配地位,则在低于主振频率的频率范围内,可近似地看作是单自由度二阶线性系统。

附录 4

压电晶体力传感器电容测试方法

在室温下要求在低激励电压、频率 800 Hz~1 000 Hz 时进行测试。

一般用数字电容表测量传感器端点间的电容。数字电容表的技术指标（以 MI-303 为例）：

激励电压：2.8 V

频 率：800 Hz

显 示：液晶 $3\frac{1}{2}$ 位

温 度：0~40 ℃

相对湿度：<80%

测量精确度：<10%

附录 5

压电晶体力传感器灵敏阈的测试方法

传感器的“灵敏阈”是按国家检定规程“常用计量名词术语及定义 JJG 1001—1982 (试行)”中的规定,指引起仪表示值可察觉变化的被测量的最小变化值。

设定传感器和电荷放大器在小量程 (50 N, 100 N, …) 时输出最大, 如 10 V。可将放大器归一化挡调到 10 pC/N、衰减挡调到 100 mV/N。传感器在有预负荷情况下进行微量加载, 将 0.1 N, 0.05 N, 0.02 N 或 0.01 N 重的砝码加在承压面上 (或从承压面上卸下来), 便可得到示值变化时相应被测量的最小变化。

附录 9

检定证书内面格式

测量范围：_____ 室温：_____ ℃ 相对湿度：_____ %	
检 定 结 果	
电荷灵敏度 $S_q / (\text{pC} \cdot \text{N}^{-1})$	
直线度 $L / (\% \text{FS})$	
滞后 $H / (\% \text{FS})$	
重复性 $R / (\% \text{FS})$	
绝缘电阻 I_n / Ω	
灵敏度温度系数 $T_c / (\% \cdot \text{℃}^{-1})$	
自振频率 f_1 / kHz	
上升时间 t_r / ms	
稳定度 $S_b / (\% \cdot \text{年}^{-1})$	
电容 C / pF	
电荷放大器：	
指示仪器：	
力标准机：	

附录 10

检定证书内面格式 (时域检定结果)

测量范围 _____		室温 _____ ℃	相对湿度 _____ %
检 定 结 果			
参考值/kN	实际值/kN	上升时间/ms	相对误差 e_{At} /%
相对幅值误差 e_{At} :		准确度 E_{At} :	
标准力源:		放大器:	
参考传感器:		记录仪:	

