

精确测量汽车底盘测功机基本惯量新方法

周申生，周速帆，鲍国华，王良清

（浙江工兴汽车检测设备有限公司）

摘要：目前精确测量汽车底盘测功机台体基本惯量困难较大，传统两次加力滑行惯量测量法因计算公式无法溯源【注 2】，实际测量重复性差。而用增减标准飞轮基本惯量测量法；因工作条件变化，测量误差更大，也不实用。2006 年我们研发成功实用精确测量汽车底盘测功机台体基本惯量方法。本文阐述该方法测量公式的推导过程，对测量系统的误差进行定量分析，用双标准飞轮替换测量，对公式准确度进行验证，并提供测量系统误差修正办法。

关键词：汽车底盘测功机，基本惯量，公式，测量，误差

根据国家环境保护总局行标 HJ/T290-2006 规定【注 1】，用于工况法排放检测的底盘测功机，其基本惯量（DIW）应为 $907.2 \pm 18.1 \text{ kg}$ ，实际基本惯量与标称基本惯量允许偏差 $\pm 9 \text{ kg}$ ，即相对允许误差为 1%。我厂经过实验和探索，现利用计算机快速采样和快速计算的特点，找到实用较为准确测量底盘测功机基本惯量方法，现分述如下：

1 台体阻力系数（ k ）【为方便公式计算而引入】

1) k 的定义

采用自由滑行，测量汽车底盘测功机内部阻力损耗功率（ P_c ）时【注 2】，根据能量守恒定律有下面公式成立：

$$P_{Ci} = \frac{\frac{1}{2} \cdot V_{i-1}^2 - \frac{1}{2} \cdot V_{i+1}^2}{t_{i+1} - t_{i-1}} \cdot m$$

即台体滚筒表面速度为 V_i 时的台体内部阻力损耗功率 P_{Ci} 为速度 V_{i-1} 至 V_{i+1} 台体动能变化值与经过时间之比。

台体自由滑行时，计算机定时对台体各测量参数采样，（字符下标 i 是采样顺序编号）：

$$\because P_{Ci} = f_i \cdot V_i; \quad f_i = \frac{P_{Ci}}{V_i}; \quad V_i = \frac{V_{i-1} + V_{i+1}}{2}$$

$$\therefore f_i = \frac{V_{i-1} - V_{i+1}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \cdot m = k_i \cdot m$$

$$k_i = \frac{V_{i-1} - V_{i+1}}{t_{i+1} - t_{i-1}}$$

式中： V_i — 对应测量点 i 的滚筒表面线速度（ m/s ）；

f_i — 对应测量点 i 的内部阻力等效滚筒表面阻力（ N ）；

P_{Ci} — 对应测量点 i 的测功机内部损耗功率（ W ）；

k_i — 对应测 I 的阻力系数（ N/kg ）；

t_i — 对应测量点 i 的瞬时时间（ s ）；

m — 底盘测功机基本惯量（ kg ）。

我们定义 K_i 为台体阻力系数，其大小与台体内部阻力有关并与滚筒速度成函数关系，

2) $K-V$ 曲线的绘制：用空载滑行法测量台体阻力系数

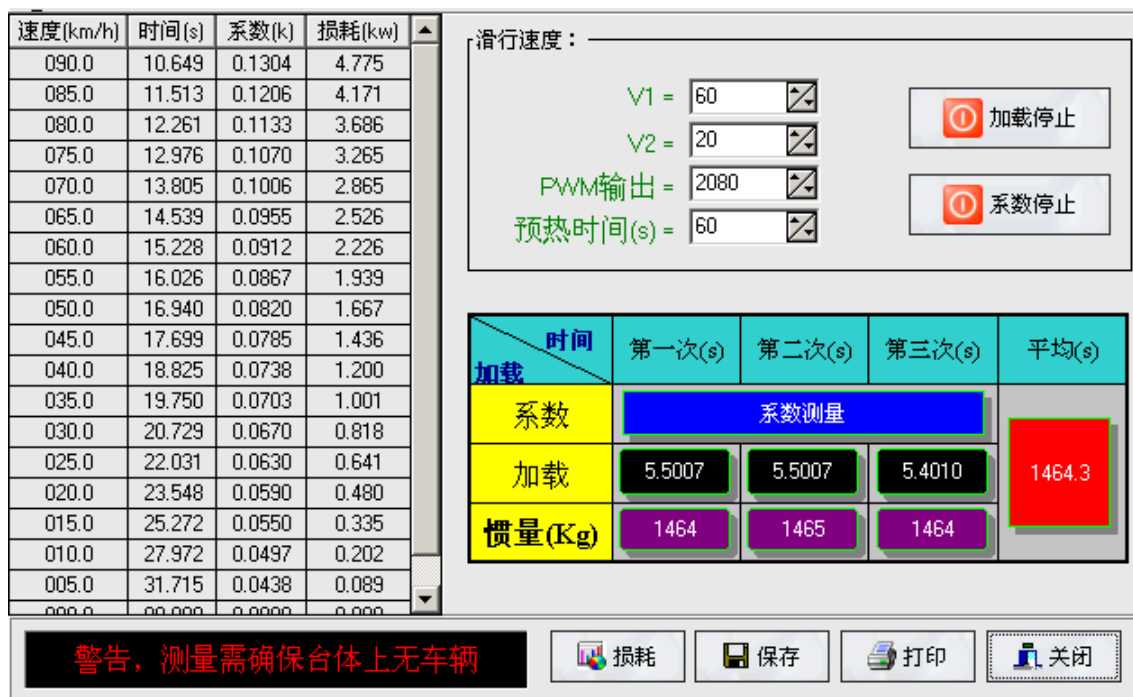
a. 预热：靠驱动电机使滚筒运转，润滑轴承，使台体阻力稳定，为保证今后测量基本惯量准确，台体预热要求：滚筒线速度在 $40km/h$ 时， K_i 值重复性在 1% 之内。

b. 测绘 $K-V$ 曲线：将滚筒驱动至 $96km/h$ 以上，脱开驱动电机电源，让滚筒自由减速滑行，至 $92.5km/h$ 时开始计时，以后速度每隔 $5km/h$ 均计时一次，直至滚筒速度为 $7.5km/h$ 为止。

$$\text{根据 } k_i = \frac{V_{i-1} - V_{i+1}}{t_{i+1} - t_{i-1}}$$

通过计算机可得，下表（1）：表中的时间为两速度点之间时间差。

再将上表数据绘成 $k-V$ 曲线（多段折线代表曲线）。在公式计算时，速度单位应变为（ m/s ）。基本惯量测量时，计算机在测到滚筒表面线速度后，可通过此曲线迅速查到对应该速度下的 k_i 值 i ，供公式计算 DIW 之用。



编号: ZC-001 试验: 朱青、龙辉

日期: 2007. 4. 20

表 1 重型柴油车测功机数据

(表中的时间为两速度点之间时间差)

2 台体基本惯量测量计算公式的推导:

将台体滚筒表面线速度(下称速度)驱动至 75 km/h 以上, 断电机电源让滚筒自由滑行, 同时使涡流机进入恒力控制, 滚筒减速度滑行, 计算机每 t 秒(一般取 0.1 s) 间隔, 读取下列参数一次, 第 i 次读得:

 v_i —滚筒表面线速度 (m/s) f_i —内部阻力等效滚筒表面阻力 (N) t_i —对应速度 v_i 的瞬间时间 (S) F_i 涡流机加载等效滚筒表面阻力 (N) K_i —对应速度 V_i 的阻力系数 (N/kg) 【查 K-V 曲线获得】 $F_{\text{总}i} = f_i + F_i$ 式中, $F_{\text{总}i}$ 为等效施加滚筒表面总阻力。

根据能量守恒定律:

$$\frac{1}{2} (V_{i-1}^2 - V_{i+1}^2) \cdot m = F_i \cdot V_i \cdot 2t + f_i \cdot V_i \cdot 2t$$

$$\because \frac{1}{2} (V_{i-1} + V_{i+1}) = V_i$$

$$\therefore F_i + f_i = \frac{V_{i-1} - V_{i+1}}{2 \cdot t} \cdot m \quad f_i = k_i m$$

设 k_i 与加载无关，计算机每次取样数据可构成下组公式

$$\therefore i \text{ 次取样【下依次】 } F_i + k_i m = \frac{V_{i-1} - V_{i+1}}{2 \cdot t} m$$

$$i+1 \quad F_{i+1} + k_{i+1} m = \frac{V_i - V_{i+2}}{2 \cdot t} m$$

$$i+2 \text{ 次} \quad F_{i+2} + k_{i+2} m = \frac{V_{i+1} - V_{i+3}}{2 \cdot t} m$$

.....

$$n-1 \quad F_{n-1} + k_{n-1} m = \frac{V_{n-2} - V_n}{2 \cdot t} m$$

$$n \quad F_n + k_n m = \frac{V_{n-1} - V_{n+1}}{2 \cdot t} m$$

从 i 到 n ，上述等式，左边相加等于右边相加

$$\sum_{i=1}^n F_i + m \sum_{i=1}^n k_i = \frac{V_0 + V_1 - V_n - V_{n+1}}{2 \cdot t} \cdot m$$

$$\bar{F} + m \bar{k} = \frac{V_0 + V_1 - V_n - V_{n+1}}{2 \cdot n \cdot t} \cdot m \quad (1)$$

$$m = \frac{\bar{F}}{\frac{V_0 + V_1 - V_n - V_{n+1}}{2 \cdot n \cdot t} - \bar{k}} \quad (2)$$

【2】为基本惯量计算公式

式中 \bar{K} 和 \bar{F} 分别为 K_i 和 F_i 的平均值

现利用数学公式：如果 $a/b=c/d \therefore a/b = \frac{a+c}{b+d}$ 将公式 (2) 简化令：

$$a = V_1 - V_n, \quad b = t_n - t_1, \quad c = \frac{(V_0 - V_1) + (V_n - V_{n+1})}{2}, \quad d = t$$

$$\therefore n = \frac{t_n - t_1 + t}{t} \quad n_t = t_n - t_1 + t$$

由公式 (1) 得：

$$\bar{F} + m \bar{k} = \frac{V_1 - V_n + \frac{(V_0 - V_1) + (V_n - V_{n+1})}{2}}{t_n - t_1 + t} \cdot m = \frac{m(a+c)}{b+d}$$

$$\therefore \frac{(v_0 - v_1) + (v_n - v_{n+1})}{2t} \approx \frac{v_0 - v_1}{t_n - t_1} = \text{平均减速度} \quad \text{即} \frac{a}{b} \approx \frac{c}{d}$$

当基准惯量约为 900 kg ，滚筒速度滑行约在 40 km/h ，等效加载为 1500 N ，采样速度为 10 Hz 时，加载滑行时间约 5 s 而计算机取样速度为 0.1 s ，因此 $a \approx 50c$ ； $b \approx 50d$ ，即 $a \gg c$ ， $b \gg d$

$$\begin{aligned} \therefore \bar{F} + m\bar{k} &= \frac{a+c}{b+d}m \approx \frac{a}{b}m \\ \therefore \bar{F} + m\bar{k} &= \frac{v_1+v_n}{t_n+t_1}m = \frac{\Delta v}{\Delta \tau}m \\ m &= \frac{\bar{F}}{\frac{\Delta v}{\Delta t} - \bar{k}} \end{aligned} \quad (3)$$

【3】为基本惯量计算简化公式。

式中： \bar{F} — 滑行数据选择区间所有力的采样点数据平均值（另加 0.5 分度值）。

\bar{k} — 滑行数据选择区间所有采样点对应 k_i 值的平均值。

$\Delta \tau$ — 滑行速度区间实际终点与起点时间差。

Δv — 滑行速度区间实际起点速度与终点速度差。

测量实例：

计算机每 0.1 s 读取参数数据一次，滑行速度测量范围从 60 km/h 至 20 km/h ，加力如为 1500 N ，速度传感器为 600 脉冲编码器。

力测量精确到 0.2% （用 16 位高速 A/D 转换器）；

速度分度值为 0.01 km/h （公式计算用 m/s ）；

力分度值为 1 N （因小于 1 N 力均为 0 ，所以公式计算平均值时应加 0.5 N ）；

阻力系数有效数位为 0.0001 N/kg ；

时间分度值为 0.0001 s ；

m 有效数位为 0.1 kg 。

测量结果由计算机将数据自动打入下表（2）：表 2

采样序号	V_i (km/h)	k_i (N/kg)	t_i (s)	F_i (N)

3 基本惯量测量误差分配和注意事项

因汽车底盘测功机基本惯量与示称值允许误差仅为 $\pm 1\%$ ，因此要尽可能消除各种因素引入误差。

1) 力测量误差要控制在 $\pm 0.5\%$ 之内

a 标定杆有效长度误差占 $\pm 0.2\%$ ，即 1 米长的标定杆长度其误差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内。

b 标定砝码，其误差占 $\pm 0.1\%$

c 力数据采集不稳定占 $\pm 0.2\%$

值得一提的是：涡流机加载的是脉动电流，力传感器输出放大讯号也带脉动成份，因此，因此即使涡流机平均加力一样，在加力的（电流）周期内，不同时刻采样读数也不一样。为此我们可以适当给讯号滤波，使放大讯号平滑，采用快速数据采集器件，读取加力周期内多次读数平均作计算机一次读数，避免采样值偏离实际值。

2) 速度测量误差应控制在 $\pm 0.4\%$ 之内，因此滑行速度范围要达 40km/h 间隔。

3) 阻力系数测量影响误差控制在 $\pm 0.05\%$ 。

a 因此要求涡流机加力要大于台体阻力约 20 倍。【见后面误差分析】

b 台体预热后要立即进入 k_f 值测量和基本惯量测量，以保证 k_f 值稳定性在 $\pm 1\%$ 之内【滚筒轴承温度会直接影响 k_f 】。

4 基本惯量测量误差分析：现将分析的参数分别作为单一变量，用求微分的方法进行误差分析。

1) 力 \bar{F} 测量误差对基本惯量的影响

$$m = \frac{\bar{F}}{\frac{\Delta v}{\Delta t} - \bar{K}}$$

$$dm = \frac{d\bar{F}}{\frac{\Delta v}{\Delta t} - \bar{K}}$$

$$\frac{dm}{m} = \frac{d\bar{F}}{\bar{F}}$$

即基本惯量相对误差等于力测量相对误差。

2) 阻力系数 \bar{K} 测量误差对基本惯量测量误差的影响

$$m = \bar{F} \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta t} - \bar{K} \right)^{-1}$$

$$dm = \bar{F} \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta t} - \bar{K} \right)^{-2} d\bar{K}$$

$$\frac{dm}{m} = \frac{d\bar{K}}{\frac{\Delta v}{\Delta \tau} - \bar{K}} = \frac{dk}{K} \cdot \left(\frac{\Delta \tau}{K} - 1 \right) - 1$$

$$\therefore \frac{\Delta v}{\Delta \tau} m = \bar{F} + \bar{K} m \quad \text{公式 (3)}$$

$$\therefore \frac{\Delta \tau}{K} = \frac{\bar{F}}{Km} + 1$$

设台体基本惯量为 900 kg ，速度在 $60 \text{ km/h} \sim 20 \text{ km/h}$ 区间滑行时，平均阻力约为 60 N ，电涡流机加载阻力约等于 1500 N 时

$$\text{由上式得: } \frac{\Delta \tau}{K} = \frac{1500}{60} + 1 \approx 20 \quad \text{公式 (4)}$$

$$\frac{dm}{m} \approx \frac{d\bar{K}}{\bar{K}} * \frac{1}{20}$$

即阻力系数测量重复性在 1% ，对基本惯量误差影响为 0.05% ，因此适当加大涡流机等效载荷，可补偿台体内部阻力变动对惯量测量值的影响，但力也不能太大，否则减速度太快，变速测量速度不准也会引入测量误差。

3) 速度测量误差和时间测量误差对基本惯量值的影响：基本惯量公式计算时，速度单位用 m/s ，为讨论方便，下面速度单位用 km/h ，为方便推导现先证明减速度测量相对误差与基本惯量值相对误差相等。

$$m = \frac{\bar{F}}{\frac{\Delta v}{\Delta \tau} - \bar{K}}$$

$$\text{设减速度 } \frac{\Delta v}{\Delta \tau} = X \quad dm = \frac{-\bar{F} dx}{(x - \bar{K})^2}$$

$$\text{由公式【4】} \quad \frac{\Delta \tau}{K} = \frac{1500}{60} + 1 \approx 20$$

$$\text{所以} \quad \frac{dm}{m} = \frac{-\frac{dx}{x}}{1 - \frac{\bar{K}}{x}} \approx \frac{-dx}{x}$$

a 速度测量误差对基本惯量值的影响

$$\frac{dm}{m} = -\frac{da}{a} = -\frac{d(\Delta V/\Delta t)}{\Delta V/\Delta t} = -\frac{d(\Delta V)}{\Delta V}$$

即基本惯量相对误差等于速度相对误差绝对值。

设速度测量影响值为 $\pm 0.4\%$ ，速度在 $60 \text{ km/h} \sim 20 \text{ km/h}$ 间滑行 = 40 km/h

$$\frac{dm}{m} = -\frac{d\Delta V}{\Delta V} = \pm 0.4\%$$

$$\therefore d\Delta V = 0.16 \text{ km/h}$$

即速度测量误差为 0.16 km/h 时，对基本惯量测量值影响为 0.4% 。

b 时间测量误差对基本惯量测量值的影响

$$x = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$$dx = -\frac{\Delta V \cdot d\Delta t}{(\Delta t)^2}$$

$$\frac{dm}{m} = \frac{-da}{a} = \frac{d(\Delta t)}{\Delta t};$$

即时间测量相对误差与基本惯量值相对误差相等

设时间影响基本惯量值为 0.05% 时，试验中当 $\bar{F} = 1500 \text{ N}$ $t = 5.0 \text{ s}$

$$0.0005 = \frac{d\Delta t}{5.0}$$

$$d\Delta t = 0.0025 \text{ (s)}$$

实际测量中，计算机定时器精度远高于 0.0025 s ，因此时间测量误差对基本惯量

影响可略去不计。

4、系统综合相对误差

$$\begin{aligned} \frac{\Delta m}{m} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta \bar{F}}{\bar{F}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \bar{k}}{20\bar{k}}\right)^2 + \left(\frac{d\Delta v}{\Delta V}\right)^2} \\ &= \sqrt{5^2 + 0.5^2 + 4^2} \cdot \frac{1}{1000} \\ &= 0.006 \end{aligned}$$

上述测量采用加力实际测量值代替加力控制值，确保加载是“准确的”。【注 2】

使之可以溯源。

基本惯量测量结果的验证和系统误差的修正；为精确测量台体惯量，对定型测量系统，考虑诸多因素引入误差，可用下述方法验证和修正，此验证确保加载“准确性”【注 2】可以溯源。

4) 验证方法

本方法采用大量平均值计算，选用合适参数，测量数据重复性可在 0.2%之内，该数据的可靠性，可通过下面方法给予确认。

我们用材质均匀，经精密加工，确保（计算）惯量精度达 0.1%，标准惯量飞轮，（分别增减飞轮）用上述方法做台体惯量测试实验。

机动车排放检测用底盘测功机

台体惯量实验原始记录表（阻力系数测量法）2008 年

工作状态						
飞轮当量惯量		无飞轮	659. 7kg	988. 0kg		
基本惯量测量值 (公斤)	第一组	1	355. 0	1015. 5	1340. 7	
		2	354. 0	1016. 3	1342. 0	
		3	355. 0	1016. 9	1343. 6	
		平均	354. 7	1016. 2	1342. 1	
		实验时间	3 月 28 日 16 时 49 分	3 月 29 日 13 时 14 分	3 月 30 日 15 时 18 分	
	第二组	1	354. 9	1015. 3	1343. 1	
		2	354. 8	1014. 5	1343. 2	
		3	354. 8	1015. 5	1344. 1	
		平均	354. 8	1015. 1	1342. 5	
		实验时间	3 月 28 日 17 时 12 分	3 月 29 日 13 时 30 分	3 月 30 日 15 时 40 分	
	第三组	1	354. 8	1014. 9	1342. 2	
		2	354. 9	1014. 8	1341. 7	
		3	354. 8	1015. 9	1343. 6	
		平均	354. 8	1015. 2	1342. 5	
		实验时间	3 月 28 日	3 月 29 日	3 月 30 日	
	平均值		354. 8	1015. 5	1342. 4	
	重复性		0. 1	1. 1	0. 4	
	误差（与无飞轮比较）		0	-1	-0. 6	
	相对误差		0	0. 098%	0. 045%	

2) 上述数据测量条件

a. 在额定载荷 10t 排放底盘测功机上进行，前后滚筒采用同步带连接

- b. 力传感器信号采用 16 位 A/D 转换器采集，转换速度 10 微秒。
- c. 速度传感器采用 600 脉冲/转编码器。
- d. 涡流机电流采用 IGBT 脉宽调节，调节频率 800HZ

3) 系统误差的修正

由于系统中某个部份有误差,如砝码或标定杆有误差或采样值偏离实际值等误差导致测量值偏差,下面可用标准飞轮校对方法给予修正。

设: 系统误差与基本惯量成正比, 修正系数为 k

例: 当加力约为 2500N 时

测得 $DIW_{990}=1347\text{kg}$ (挂 990kg 飞轮)

$DIW_0=356\text{kg}$ (不挂飞轮)

$$1374 * K - 356 * K = 990$$

$$K = 0.999$$

因此修正后装大飞轮 (990kg 惯量) $DIW_{660}=1347 * 0.999=1345.7$ (kg)。为适应工厂化生产需要, 如已知系统在 900kg 时的修正值, 就可以对产品基本惯量测量值直接进行修正。

基本测量方法特点:

- 1) 测量时, 恒力性能力求稳定, 测量结果数据重复性好。
- 2) 测量误差满足 HJ/T290-2006 技术要求。
- 3) 不更动设备部件, 对内部阻力稳定性要求不高, 预热时间短, 测量误差影响可溯源。
- 4) 该方法适合于现场设备检测。加力在 2600N 时, 测量基本惯量其重复性可达千分之二, 它为系统测量误差修正提供良好条件。
- 5) 可以用标准“当量”飞轮给测量值进行修正。
- 6) 根据本测量方法原理, 已制成便携式测功机基本惯量检测仪 (已申请专利), 用于设备使用现场对底盘测功机基本惯量进行测量见附录。

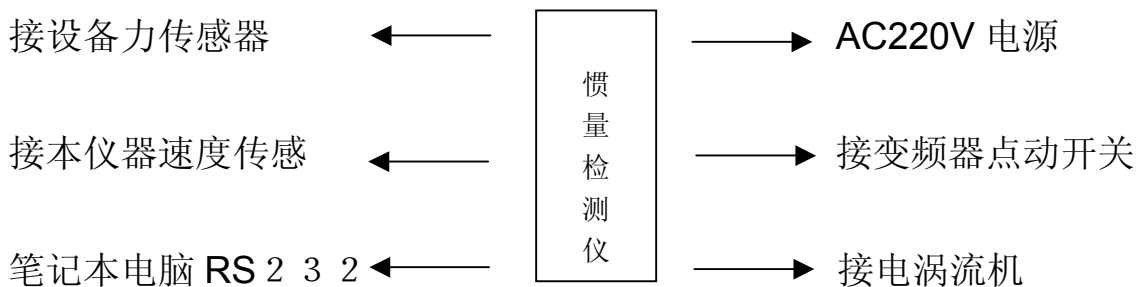
【参 考 文 献】

- [1] 国家环境保护总局行标 HJ-T290-20066 汽油车简易瞬态工况法排气污染物测量设备技术要求
- [2] 编制说明—北京理工大学 I/M 研究组 2005-8-18。
(简易瞬态工况法排气设备和计算机控制软件技术要求)

附录:便携式测功机基本惯量检测仪

一、用途：该设备用于汽车底盘测功机使用现场，对设备进行不拆卸飞轮基本惯量的测量。

二、工作原理方法图：



三、测量方法（见本论本）

四、接线

1. 力传感接口原测功机力传感器（工作电压 12V）
2. 本仪器电源接单相 AC220V。
3. 速度测量由压靠式摩擦轮和编码器组成传感器组件，适用任何规格直径筒，其结构见附图。

4. 检测仪带有变频器点动开关，可带动电机动转，方便检测。
5. 检测仪带有大功率（60A）场效应管控制电路，可实现恒力控制。
6. 经 RS-232 串口接笔记本电脑进行自动控制和测量。

五、适用范围

该仪器与原底盘测功机配合，用于各种汽车底盘测功机基本惯量测量。