

# 交流电位法裂纹深度测量仪

方志成 陆丽华 程均琦

(华侨大学)

(上海交通大学)

## 摘 要

本文讨论了一种新的电位法裂纹深度测量仪,由于作者首创了交流恒流源及用数理统计和计算机技术求出仪器刻度曲线的数学模型,使仪器的性能得到很大地提高。文中并结合实测数据证明该仪器的技术性能优于目前国内外的同类仪器。

## 一、前 言

利用无损检测方法精确地测量工件或试件表面的裂纹深度,无论对工程技术和科学研究都具有重大的实际意义。根据国外统计资料表明,电位法比起超声波法,涡流法具有较好的测量结果。目前市场上电位法裂纹深度测量仪有日本的 A-5 型,西德的 R-XT705 型,上海探伤机厂的 LX-2, LX-3 型等。由于裂纹深度的测试机理非常复杂,因此目前有关这方面的一些测量仪器,无论在精密度、准确度以及功能方面还是远远满足不了实际的要求。

本文作者根据对测试机理的分析,在仪器中首次设计了交流恒流源及用数理统计和计算机技术对仪器进行刻度,并根据上述思路研制了 SJD-51 型电位法裂纹深度测量仪,使仪器性能得到很大地提高。通过实测证明该仪器的技术性能优于目前国内外的同类产品。

## 二、电位法测量裂纹深度的测试机理

有关这方面问题,国外已有不少论文阐述过,这里不打算做太多的重复。作者主要提出一个新的概念,则用电位法测量裂纹深度,测得电压信号  $U$  与裂纹深度  $D$ ,它们之间的关系仅是相关变量的关系,不是确定性变量关系,因此不能用确定性的数学模型来描述它们之间的刻度曲线。为此,就不能沿袭测量确定性变量的方法来研制电位法裂纹深度测量仪,而目前国内外有关这方面的仪器,其精密度、准确度之所以不高,忽视了相关概念这一特点,是其主要原因之一。

电位法,亦即四探针法,是测量微小电阻的一种经典方法。其工作原理如图1。外侧两探针(电极)A, B 称为电流电极,激励电流  $I$  通过 A, B 电极传递给被测试件。内侧两探针(电极)C, D 称为电压(电位差)电极, C, D 两电极的电位差  $U$  取决于电流  $I$  在试件中的分布。

从 C、D 电极取得的信号电压 U 为

$$U = IR \quad I \text{ 是直流} \quad (1)$$

$$U = IZ = I\sqrt{R_N^2 + X_L^2} \quad I \text{ 是交流} \quad (2)$$

- 式中：R：跨在 C、D 电极两端的等效直流电阻；
- R<sub>N</sub>：跨在 C、D 电极两端的等效交流电阻；
- X<sub>L</sub>：跨在 C、D 电极两端的等效感抗；
- Z：跨在 C、D 电极两端的等效阻抗。

随着试件表面裂纹深度 D 的不同，试件中 I 的分布也不同，即 R 或 Z 值不同，从而使 U 具不同的相应值，因此可以通过测量 U 值的变化或其相应的变化来测定裂纹深度 D，这就是电位法的基本原理。但是，影响 U 值大小的不仅是 D，凡是影响电流 I 及其在试件中分布的一切因素，包括电气因素，材质因素和几何因素，均影响 U 值。亦即

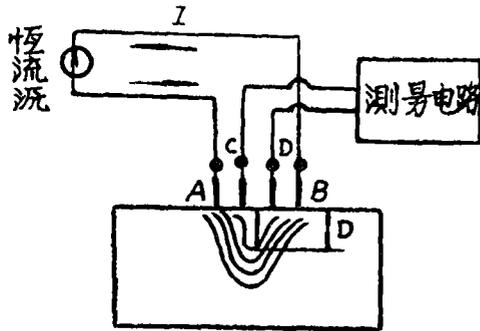


图 1 四探针测量裂纹深度原理图

$U = F(D, \text{电气因素, 材质因素, 几何因素})$

由此可见，U 与 D 仅是相关关系，上述任一因素的变化都会使测量仪带来系统误差。因此要提高测量仪的精确度，必须尽量排除或减少上述因素的影响。在无法彻底排除情况下，应是按实用场合，搞统计样本分类，亦即将相接近的因素合并成为一个统计样本，做出相应的标准试块，然后实测 U 与 D 的关系，得出一系列数据，用数理统计和计算机技术，求出这个统计样本刻度曲线的数学模型。而在另一些因素条件下，又有另外的统计样本，求出另外的刻度曲线数学模型。总而言之，电位法测量裂纹深度仅是一种相对法，不可能用一根刻度曲线来描述所有条件下的 U、D 关系。目前一些裂纹深度测量仪，用一特定材质和尺寸的标准试块来进行仪器的刻度，这样，当被测试件与标准试块的特定条件相差甚远时，将使测量结果出现很大的误差，甚至使测量失去现实意义。

下面进一步来分析这些因素是什么？如何排除或减小，以及如何归类为若干统计样本。

### 1、电气因素

① 电流 I，从式 (1)、(2) 看出，I 的变化将引起 U 值的变化，使得 I 变化的一个主要原因是探针 A、B 与试样间的接触电阻值随着压紧程度不同而在不断变化着。为清除此影响，必须采用恒流源。日本的 A-5 型及上海探伤机厂的 LX-3 型由于没有采用恒流源，所以测量重复性（即仪器精密密度）很差。而西德的 R-XT705 型是采用了直流恒流源，虽然抑制了接触电阻这一因素的影响，但却带来了接触热电势干扰源，为补偿掉热电势的影响，使仪器的结构与操作变得复杂化，而且由于直流法信噪比低，I 必须很大（达 20A 以上），这样非但仪器功耗大，而且这样大的电流通过试件，容易引起试件物理性能的变化。为此，作者首次提出采用交流恒流源，并设计了交流恒流源电子电路，它非但可以抑制接触电阻的影响，而且也可以不受热电势的影响，并可以大大地提高信噪比，使流过试件的电流仅在数百毫安的数量级，这样仪器的功耗可以大大地减小，试样的物理性能也不会受到影响。

②探头引线间的互感电势 $E_M$

由于电流电极及引线回路中的电流  $I$  产生了磁通，链到电压探极及其引线回路产生互感电势  $E_M$ ，见图2，此干扰电势叠加在信号电压  $U$  之中，而且随着探头引线的移动而变化。由于  $U$  仅是微伏级，所以如对  $E_M$  不加以抑制，将造成变动的系统误差，使仪器的分辨率精密度、准确度下降。解决此干扰电势简单而有效的办法是将电流引线和电压引线各自成对地绞合在一起，如图3所示。并尽量缩短两对引线的接线段（即无法绞合的那一段）。这样电流线的磁通相互抵消，就可以使  $E_M$  大大地降低，本仪器对所配探头进行了特殊设计，使电压探极引线及电流电极引线都比现有的探头离得远，这样可以使  $E_M$  抑制到很小的数值。

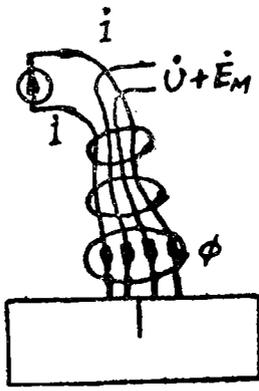


图2  $E_M$ 的产生

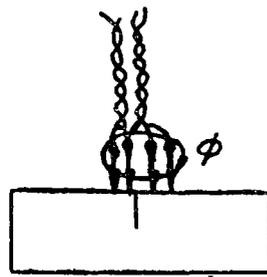


图3  $E_M$ 的抑制

此外，应该提起的，由于  $E_M$  大小是与频率成正比，所以不宜采用过高的频率，日本的A—5型是用1800HZ，而我们是采用1003HZ。

③测量电路的输入阻抗 $Z_c$ ：

由电位法原理可知，只有当测量电路的输入阻抗足够高时，才能使其测得电压  $U_c$  与真正信号电压  $U$  相等，否则  $U_c$  将只是  $U$  的分压，而且其值将受电极与与试件接触电阻  $R_1$  和引线电阻  $R_2$  的影响，仪器精度下降（见图4）。本仪器第一级采用了场效应管 3D01，因此具有很高的输入阻抗，也就抑制了这方面的干扰因素。

2、材质因素

主要是指被测试件的电阻率  $\rho$  值和导电率  $\mu$  值的影响。由于各种材料的  $\rho \cdot \mu$  值不同，因此就是同一裂纹深度  $D$  电流在试件中的分布情况也不会完全一样，为抑制这方面的干扰因素，宜采取下列措施：

①采用电压比  $\frac{U}{U_0}$  读数来对应  $D$  值（ $U_0$  为无裂纹测得的电压值， $U$  为有裂纹测得的电压值）。

由于是在同一试件中测  $U_0$  与  $U$ ，因此  $\rho$  值的影响基本上可以抵消掉，而  $\mu$  值的影响也可以抵消一部分。

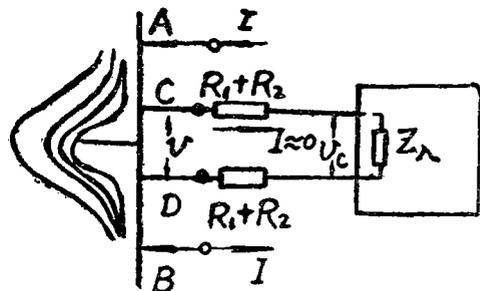


图4 输入阻抗 $Z_c$ 对测量精度的影响

②由于集肤效应是随着  $\mu$  值的增大而显著，随着裂纹深线的不同，集肤效应对电流在试件中分布情况的影响也会有所差异。要减少  $\mu$  值的影响，可以采用降低频率的方法。但是集肤效应显著也不一定是坏事，因为如果集肤效应显著，则刻度曲线对材质比较敏感，而对试件尺寸不大敏感。反之，如果集肤效应不是显著则刻度曲线对材质不敏感，但对尺寸敏感。这个特点可以做为我们选取统计样本的依据，如果刻度曲线要按材质来分，则宜选取较高频率。反之如果刻度曲线要按尺寸来分，则宜选取低频。

### 3、几何因素

以矩形截面试样为例。

#### ①试样厚度 T

由于电力线的分布情况离探针越远分布越疏，而电阻 R 是电力线管平均长度  $l$  和平均截面  $S$  的函数，因此不同的 T 值对测试结果有不同程度的影响。但是当  $T/a$  足够大时，如图5所示。则 T 值对  $l$ 、 $s$  的影响已可忽略，所以做为仪器应规定一个  $T/a \geq K_T$  的测试条件，频率选择得较高， $K_T$  值可小些。

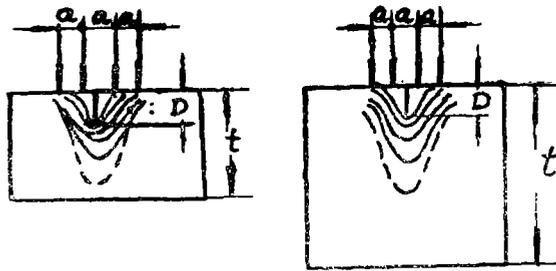


图5 T/a对测试结果的影响

此外  $D/a = k_a$  也要小于某一数值，因电力线平均长度  $l$  随  $D$  的变化，当  $K_a$  大于某一数值时，将变得很不敏感，刻度曲线趋近饱和。见图6。

本仪器  $a = 2\text{mm}$ ， $T/a \geq 8$ ， $D/a \leq 3 \sim 4$  则在  $0 \sim 6\text{mm}$  量程内，被测试件的厚度  $T \geq 16\text{mm}$ 。

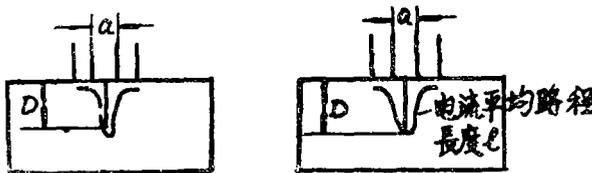


图6 D/a 大于某值时，电流平均路程长度 l 示意图

#### ②裂纹长度与深度比

在不贯通裂纹下，当  $L/D$  小于某一数值时，由于电流的分流作用显著，同样的 D 值会对应出较小的  $U/U_0$  值。通常仪器的刻度曲线是以贯通裂纹的试块来求出的。因此仪器应规定另一测试条件，则  $L/D \geq K_D$ ， $K_D$  值随  $D$  的增大而减小。

当  $D = 5$  时  $\frac{L}{D} \geq 6,$

$D = 10$  时  $\frac{L}{D} \geq 5,$

$D = 15$  时  $\frac{L}{D} \geq 3.5.$

如果  $K_L$  不符合上述条件, 则求出的  $D$  值应该进行修正, 目前正在研究一套计算机程序以便进行自动修正。

③ 试件宽度  $B$  与深度  $D$  之比

$\frac{B}{D}$  小于某一数值时, 会使电力线的分布挤在一起, 造成读数  $U/U_0$  值偏高的现象。

通过上面的分析, 可见, 对电气干扰因素主要是采用电的方法来抑制, 而对材质和几何的干扰因素可以采用电压比的方法和规定测试条件来抑制一部分。剩下无法抑制的部分, 可以用统计样本来分类, 亦即归并为几条曲型的刻度曲线。如根据材质分类, 则宜采用较高的工作频率, 反之如果按几何尺寸分类, 则宜采用低频。

三、仪器的设计

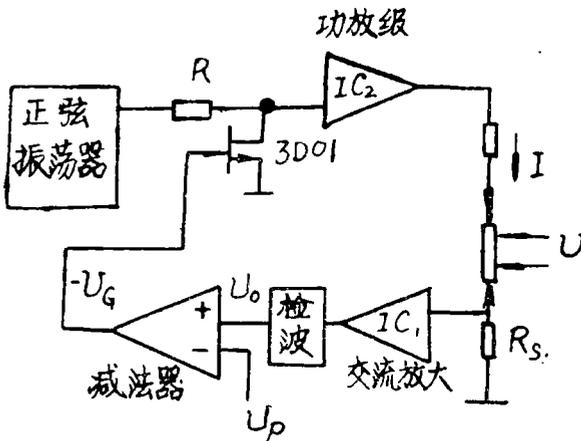


图7 交流恒流原理方框图

1、根据上面分析, 要保证精密度, 仪器中必须要有一个高质量的交流恒流源。作者采用负反馈自动调整系统, 通过对一个非线性电阻元件的控制, 达到恒流的目的。其原理如图7所示, 3D01是一个非线性变阻元件, 它与电阻  $R$  组成分压电路。设负载电流  $I$  突然加大, 通过采样电阻  $R_s$ , 交流放大器  $IC_1$ , 检波器, 使加到减法器同相输入端的电压  $U_0$  增大。原比较电压  $U_P > U_0$ , 所以这时减法器输出电压  $1-U_G$  降低, 场效应管 3D01 漏源极的等效电阻  $R_{DS}$  变小, 分压降低, 于是输入到功放级的输入信号减小, 功放级输出电压下降, 使负载电流  $I$  又拉回到原来数值或接近原来值。反之如  $I$  突然降低, 同样通过上述过程使  $|-U_G|$  升高, 分压增大, 功放级输出电压提高, 于是又将降低的电流拉上去, 以保持恒流。其电子线路如图8所示。

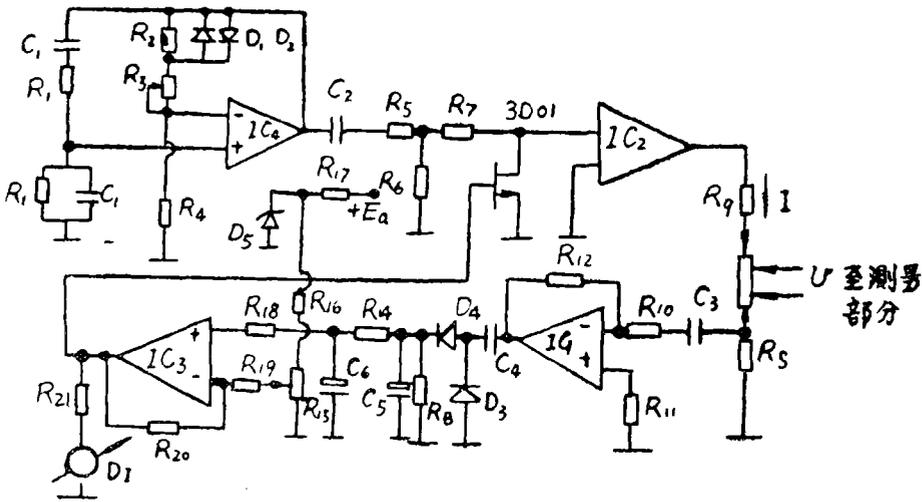


图 8 交流恒流源电子线路

2、测量部分

①为提高信噪比，测量电路除在输入端采用一个1 : 30的隔离变压器外，线路中还采用了有源滤波器。

②为提高测量线路的输入阻抗，第一级采用场效应管放大电路。

其电子电路如图9所示

四、仪器的刻度曲线

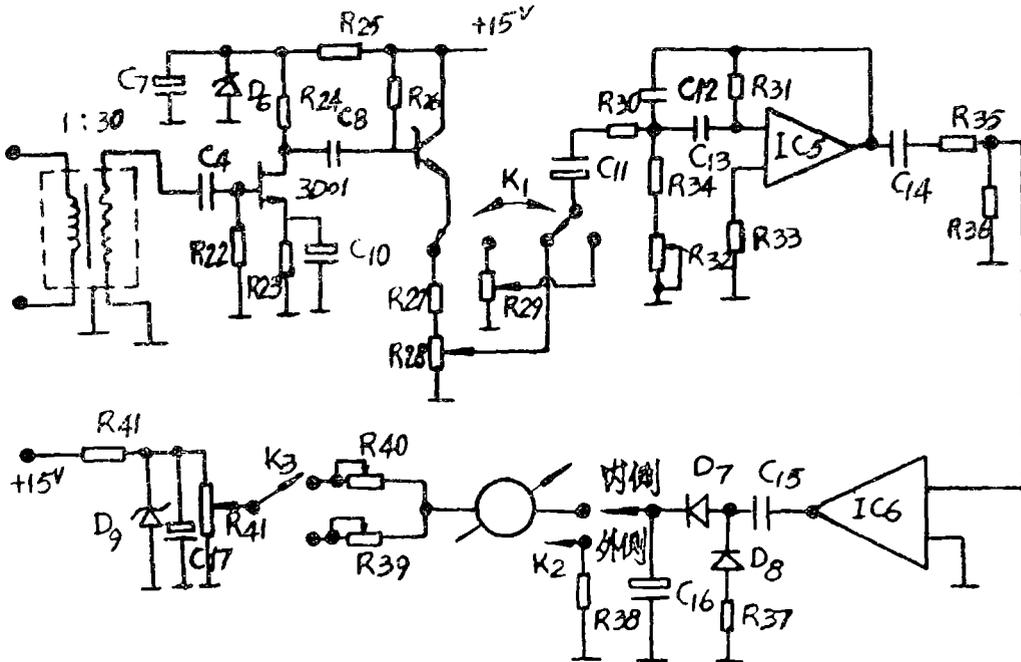


图 9 测量部分电子线路图

由于裂纹深度与电压比是属于相关变量关系，所以我们采用数理统计方法及计算机技术求出刻度曲线的数学模型。但是数理统计是建立在大量实验数据的基础上，因此研制了大量标准试块\*，并按七种常用钢类（即45, 904, 30Cr, MnSi, 18CrNiW, 921, GC.15, 4340）

表1

截面尺寸 厚×宽 (毫米)	平均电压 比值 $x = U/U_0$	裂纹深度测 得值 $\hat{y}$ (毫米)	裂纹深度 实际值 $y$ (毫米)	误 差 $y - \hat{y}$	折合误差 $\frac{y - \hat{y}}{y_m} \%$
40 × 30	1	0.0424414	0	-0.0124414	-0.7074%
	1.13143	0.9291086	1.005	+0.0758914	1.265%
	1.30071	2.103408	1.995	-0.108408	-1.807%
	1.42143	2.9999505	3.015	+0.0150495	0.251%
	1.54071	0.954732	4.020	+0.065268	1.088%
	1.66429	5.027408	4.985	-0.042498	-0.707%
	1.75286	5.850974	5.995	+0.144026	2.4%
40 × 30	1	0.0424414	0	-0.0424414	-0.707%
	1.14752	1.03811542	1.035	-0.00311542	-0.052%
	1.31915	2.236442	2.020	-0.216442	-3.607%
	1.43262	3.086392	2.980	-0.106392	-1.773%
	1.56738	4.17879	4.010	-0.16879	-2.813%
	1.68652	5.2298	5.080	-0.1498	-2.497%
	1.78614	6.113788	5.985	-0.128788	-2.146%
40 × 20	1	0.0424414	0	-0.0424414	-0.707%
	1.12714	0.9000959	1	+0.0999041	1.665%
	1.29143	2.0369302	2.051	-0.0219302	-0.366%
	1.42143	2.9999503	3.065	+0.0650497	1.084%
	1.5500	4.03232315	4.030	-0.00232315	-0.0387%
	1.67143	5.092093	4.99	-0.102093	-1.701%
	1.79286	6.237777	5.985	-0.252777	-4.213%
80 × 40	1	0.0424414	0	-0.0424414	-0.707%
	1.42553	3.0315632	2.97	-0.0615632	-1.028%
	1.74043	5.732644	5.995	+0.262356	4.372%
20 × 40	1	0.0424414	0	-0.0424414	-0.707%
	1.10714	0.765068	1.035	+0.269932	4.498%
	1.28429	1.9859315	2.02	+0.0340085	0.567%
	1.42143	2.99995053	3.005	+0.00504947	0.084%
	1.52143	3.795241	4.015	+0.219759	3.66%
	1.65000	4.898829	5	+0.101171	1.686%
	1.74286	5.755704	5.975	+0.219296	3.65%

\*承上海探伤厂机提供大量标准试块

表2

量 程	试样尺寸 (厚×宽)	裂纹实际 深度 $y$	I SJD-51型			II A-5型 (日)			III X-RT705型(西德)		
			实 数	平均值	误 差	实 数	平均值	误 差	实 数	平均值	误 差
I	40×40	1.005	1.05, 1.0, 1.0	1.0	0.015	0.8, 0.7, 0.8	0.77	-0.235	0.7, 0.8, 0.7	0.73	-0.275
		1.995	2.0, 1.95, 1.95	2.0	-0.025	1.8, 1.6, 1.8	1.73	-0.265	1.75, 1.8, 1.8	1.78	-0.215
		3.015	3.0, 2.95, 2.9	3.0	-0.055	2.9, 2.7, 2.9	2.83	-0.185	2.8, 3.0, 2.9	2.90	-0.115
0-6	40×40	4.020	3.9, 4.0, 4.0	4.0	-0.06	3.9, 3.7, 3.7	3.77	-0.250	3.8, 4.05, 4.0	3.95	-0.07
		4.985	5.0, 5.0, 5.10	5.0	0.055	5.0, 5.0, 4.8	4.93	-0.055	4.8, 5.3, 5.0	5.03	0.043
		5.995	6.0, 5.95, 5.95	5.95	-0.045	5.8, 5.8, 5.9	5.83	-0.165	6.0, 6.3, 6.2	6.17	0.175
II	20×40	1.00	0.95, 1.0, 1.0	1.0	-0.02	0.8, 1.0, 1.0	0.93	-0.07	0.75, 0.75, 0.75	0.75	-0.25
		2.015	22.0, 2.05, 2.05	2.0	-0.015	2.2, 2.1, 1.9	2.07	0.055	1.90, 1.95, 1.95	1.90	-0.115
		3.065	2.9, 3.0, 3.0	3.0	-0.095	3.2, 3.1, 3.2	3.17	0.015	3.0, 2.9, 3.2	3.03	-0.035
0-12	20×40	4.03	3.85, 3.9, 4.1	4.0	-0.07	4.0, 4.3, 4.2	4.17	0.14	4.1, 4.2, 4.35	4.22	0.19
		4.99	5.1, 5.1, 5.1	5.1	0.12	5.5, 5.3, 5.5	5.43	0.44	5.15, 5.3, 5.5	5.32	0.33
		6.04	5.8, 5.9, 5.9	5.9	0.17	6.3, 6.5, 6.0	6.27	0.23	6.45, 6.55, 6.70	6.57	0.53

分成七种统计样本，而以45号钢做为刻度的参考基准。有关这方面的问题，比较复杂，因此专门另写一文“裂纹深度刻度曲线的数学模型与计算机程序”做详细的阐述。本文仅将计算机处理45号钢统计样本的结果介绍如下：

45号钢0~6毫米量程刻度曲线的数学模型为：

$$\hat{Y} = -1.37385x^4 + 9.16792x^3 - 20.0433x^2 + 24.8019x - 12.5405$$

( $x = U/U_0$ )  $S_y = 0.141631$

表1列出了计算机对各种不同尺寸与裂纹深度的45号钢标准试块进行数据处理的结果。表中数据全由计算机运算得到的。

### 五、与国外同类型产品比较

我们选取日本1978年最新产品A—5型与西德1980年最新产品x—RT705型进行现场测试比较，无论从准确度、精密度等主要技术指标都优于这些国外先进产品。表2列出了准确度与误差的现场测试比较数据。

表3列出了仪器精密度的实测数据，测试方法是对截面尺寸为40×40毫米的45号钢人工裂纹标准试块进行等精度测量20次（内测用50 μA的电流表，外测用PZ—8数字电压表），然后用统计计算其相对标准离差值。

表3

内测	D = 0	50,
实数	D = 3	260,260,260,265,26,0262,262,262,260,260,265,267,265,265,265,260,260,262,262,262,262,
(Au)	D = 6	470,468,469,465,468,470,465,470,465,465,470,470,468,470,465,470,470,462,462,470,470,
外测	D = 0	1.39,1.40,1.40,1.40,1.40,1.39,1.44,1.40,1.40,1.40,1.40,1.40,1.40,1.40,1.40,1.40,1.40,1.40,1.40,1.40,
实数	D = 3	1.99,
(伏)	D = 6	2.44,

经统计计算的结果列于表4

表4

裂纹深度 $y$ (毫米)	电流平均值 $I$ (微安)	电流比值 $I/I_0$	电流离差 $S_I$	相对离差 $S_I/I$
0	50	1.00	0	0
3	261.65	5.233	2.87047	0.010976
6	468	9.36	2.53398	0.005414
裂纹深度 $y$ (毫米)	电压平均值 $V$ (伏)	电压比得 $V/V_0$	电压离差 $S_V$	相对离差 $S_V/V$
0	1.399	1.00	0.003078	0.002200
3	1.99	1.422	0	0
6	2.44	1.744	0	0

## 结 束 语

1、由于 SJD-51型电位法裂纹深度测量仪无论在探头，线路以及刻度曲线方面都采用了一些新方法，所以无论在精密度或准确度方面都优于目前国内外同类型的最新产品，如日本的 A-5型，西德的 X-RT705型，国内的 LX-3型等。

2、由于裂纹深度的定量测量机理非常复杂，牵涉因素很多，裂纹深度与电信号的转换关系是属于相关变量，因此不能用一个确定的数学模型来代表所有的刻度曲线。同时必须规定若干测试条件，其中最关键的是不贯通裂纹用贯通裂纹刻度曲线的修正问题，这些问题相当复杂，将在另外两篇论文（即裂纹深度刻度曲线数学模型与计算机程序，不贯通裂纹深度测量的计算机自动修正）做详细的介绍。

## 参 考 文 献

- [1] 方志成，交流恒电流源，上海电子技术，1 (1982)。
- [2] 对裂纹深度无损检测仪器的评价，理化检验(无损检测分册)，3(1978)。
- [3] R.P.Wei and R.L.Bragill, An Assessment of A.C.and D.C.Potential System for Fatigue Crack Growth, Lehigh University U.S.A.
- [4] Bedienungsanleitung Universal-Rißtiefe-Meßgerät X-RT705 KRAUTKRAMER.
- [5] advanced Electronic Circuit, (1978).
- [6] 亀裂の長さ と 深さの比が，深さの測定値に及ばず影响につつて，非破坏検査，12，5 (1963)。
- [7] 日本飞行机株式会社，亀裂深度测定器A-5型，(1978)。
- [8] 水电部电力科学研究所，直读式金属表面裂纹深度测量仪，技术报告，14(1966)。
- [9] 上海探伤机厂，Ls-3型裂纹测深仪(使用说明书)，(1980)。
- [10] 方志成，上海交通大学“实验数据处理”(讲义)，(1980)。