

小型曲面分割式双探头研制

杜培用 曲淑琴

(上海钢铁研究所、上海电机厂)

超声波脉冲反射法检验工件内部近表面缺陷时,使用分割式联合双探头是有效方法之一。检验平面型工件用的联合双探头制作已有不少资料介绍。但对小直径大曲率工件使用的分割式双探头制作尚无资料介绍。我们在对上海电机厂生产的双水内冷汽轮发电机转子线圈引水管接头检验时,试制了小型曲面分割式双探头,对模拟试件进行超声探测并解剖验证,取得较满意结果。

一、原理

引水管接头由紫铜与不锈钢管钎焊而成。在实际生产中应用的接头形状比较特殊(图1),能探伤部位仅6~10毫米,且曲率大,壁薄,工件被探测厚度:铜3毫米,不锈钢2毫米,总厚度5毫米。纵波在这样薄的工件内往返传播时间仅1.9微秒(铜1.2微秒、不锈钢0.7微秒),较始脉冲宽度小得多,

因此始脉冲、伤波、底波将分辨不清,使用一般单探头脉冲反射法达不到探伤效果。另一方面,由于接头采用等截面套筒式钎焊结构,产生的缺陷基本上是与探测面平行的未焊透或气孔,且均在距表面3毫米的固定位置上,因此采用有延迟块的一发一收联合双探头是较合适的。超声波由一块晶片发出,通过有机玻璃延迟块进入紫铜管,折射后进入不锈钢管至内孔壁反射,由另一块晶片接收,使接收不受发射始脉冲的影响。若在紫铜管与不锈钢管钎焊层处有缺陷时,一部份声能遇到缺陷就反射,被另一块晶片接收,在示波屏上就有伤波反射。图2是探伤原理图。

二、探头晶片倾斜角度选择

对套筒式钎焊接头采用纵波探伤,希望在工件中产生的主要是纵波,并要求晶片的中心声束在焊缝处交会,这就要取决于晶片

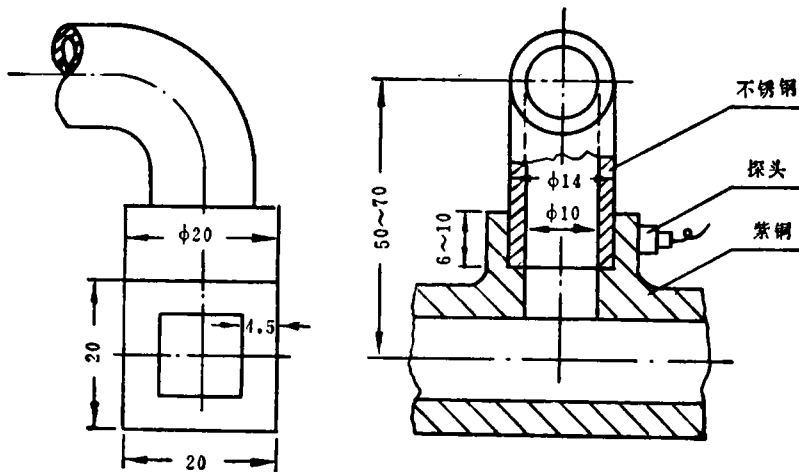
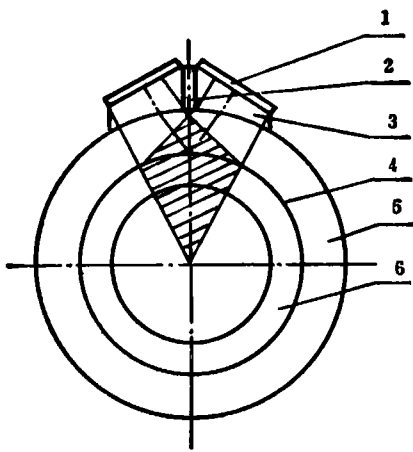


图1 引水管接头



1—晶片；2—隔声块；3—延迟块；4—钎焊缝；
5—紫铜管；6—不锈钢管。

图2 探伤原理图

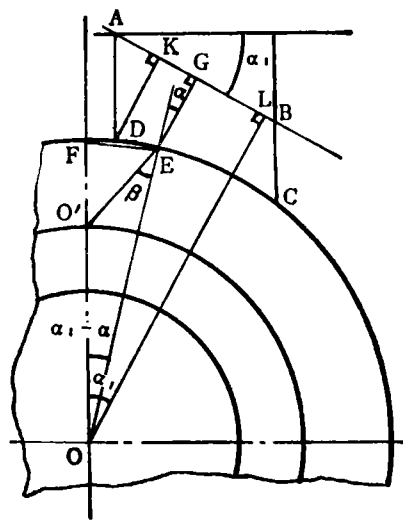


图3 发射晶片声程图

的倾斜角度及延迟块的尺寸和形状，图3是发射晶片声程图。AB是晶片，KL段是声能进入工件内部可产生纵波的晶片面积。在此范围内的每一条声束到达探测面时入射角及相应折射角均不同，其中必有一点E的声束经折射后能到达焊缝O'点。当倾斜角 α_1 一定时，E点的入射角 α 也一定，弦长EF也一定。在隔声块尺寸确定后，EF大，则产生的纵波量多，符合工件探伤要求。为此，必须先求E点的入射角。但E点的入射角 α 及相应的折射角 β 和弦长EF均随晶片倾斜角 α_1 的改变而改变，是一组变量，因此只有选择适当的 α_1 时，才能取得较多纵波量和合适的入射角。

设：铜管外圆半径 $OE=R$ ，焊缝处半径 $OO'=r$ ，晶片倾斜角 α_1 ，E点入射角 α ，折射角 β ，距轴线F点弦长 $EF=m$ 。

在 $\triangle OEO'$ 中，根据三角形边角关系：

$$EO'^2 = OE^2 + OO'^2 - 2 \cdot OE \cdot OO' \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha)$$

$$= R^2 + r^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha)$$

$$EO' = \sqrt{R^2 + r^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha)} \quad (1)$$

$$\text{又知：} \frac{EO'}{\sin(\alpha_1 - \alpha)} = \frac{OO'}{\sin \beta} = \frac{r}{\sin \beta} \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式得：

$$\frac{\sqrt{R^2 + r^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha)}}{\sin(\alpha_1 - \alpha)} = \frac{r}{\sin \beta} \quad (3)$$

根据声波折射定律得：

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{C_1}{C_2} \quad \sin \beta = \frac{\sin \alpha}{C_1/C_2} \quad (4)$$

式中 C_1 ——有机玻璃纵波速度； C_2 ——铜纵波速度。

将(4)代入式(3)式整理后得：

$$\frac{C_1}{C_2} \cdot r \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha) - \sin \alpha$$

$$\cdot \sqrt{R^2 + r^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha)}$$

$$= 0$$

根据上列方程取

$$y = \frac{C_1}{C_2} \cdot r \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha) - \sin \alpha$$

$$\cdot \sqrt{R^2 + r^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha)} \quad (5)$$

则方程化为 $y(\alpha)=0$ ，方程中 C_1 、 C_2 、 R 、 r 、 α_1 (假设)均已知，求未知数 α 。但在化简中知道，此方程是一个大于3次的非整次一元方程，如用数学解析法直接求出是有困难的，所以可采用逐渐逼近法来求解。即把未知量 $(\alpha_1 - \alpha)$ 分成若干区域，在每一个区域中分别

求出相应参数： $\frac{C_1}{C_2} \cdot r \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha)$; $\sin\alpha$;

$\sqrt{R^2 + r^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha)}$ 等,根据 $y = 0$ 要求,逐渐缩小 $(\alpha_1 - \alpha)$ 范围,就能求出 α 的解。

例:当 $R=10$ 毫米, $r=7$ 毫米, $\frac{C_{有纵}}{C_{纵纵}} =$

$$\frac{2640 \text{米/秒}^*}{4700 \text{米/秒}} = 0.56$$

假设 $\alpha_1 = 30^\circ$,将上述数据代入(5)式得:

$$y = 0.56 \times 7 \times \sin(\alpha_1 - \alpha) - \sin\alpha$$

$$\cdot \sqrt{10^2 + 7^2 - 2 \times 10 \times 7 \times \cos(\alpha_1 - \alpha)}$$

$$= 3.92 \times \sin(\alpha_1 - \alpha) - \sin\alpha$$

$$\cdot \sqrt{149 - 140 \times \cos(\alpha_1 - \alpha)}$$

把未知量 $(\alpha_1 - \alpha)$ 在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 之间分成若干区域,并逐渐缩小区域范围,在每个区域中分别求出上述方程中的每项数据,经多次计算最后得 $y=0$ 点是 $\alpha_1 - \alpha = 14^\circ 28' \sim 14^\circ 30'$ 之间,现取 $\alpha_1 - \alpha = 14^\circ 29'$,则 $\alpha = 30^\circ - 14^\circ 29' = 15^\circ 31'$ 。

根据声波折射定律

$$\sin\beta = \frac{\sin 15^\circ 31'}{0.56} = 0.4776,$$

$$\therefore \beta = 28^\circ 32'$$

$$m = EF \text{ 弦长} = 2 \cdot R \cdot \sin \frac{\alpha_1 - \alpha}{2}$$

$$= 20 \cdot \sin 7^\circ 15' = 2.524 \text{ 毫米}$$

验证:根据图3的 $\triangle OEO'$ 中边角关系求得 β 值:

$$\frac{\sqrt{149 - 140 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha)}}{\sin(\alpha_1 - \alpha)} = \frac{7}{\sin\beta}$$

$$\sin\beta = \frac{7 \cdot \sin 14^\circ 29'}{\sqrt{149 - 140 \cdot \cos 14^\circ 29'}} = 0.4776$$

$$\therefore \beta = 28^\circ 32'$$

它与上述 β 值相符,故当 $\alpha_1 = 30^\circ$ 时, $\alpha = 15^\circ 31'$, $\beta = 28^\circ 32'$, $m = 2.524$ 毫米。曾用同样方法求出 $\alpha_1 = 14^\circ, 18^\circ, 25^\circ, 35^\circ$ 时相应的 α, β, m 值,列表如下:

α_1	14°	18°	25°	30°	35°
α	$7^\circ 28'$	$9^\circ 54'$	$13^\circ 20'$	$15^\circ 31'$	$17^\circ 27'$
β	14°	$17^\circ 51'$	$24^\circ 12'$	$28^\circ 32'$	$32^\circ 23'$
m (毫米)	1.082	1.416	2.034	2.524	3.051

从上表可以看出,晶片倾斜角度越大,产生的纵波量越多(m 值大)。但晶片倾斜角太大时,确保晶片中心声束在焊缝交会的延迟块尺寸太薄(35° 时最薄处仅 1.5 毫米),使延迟块起不到延迟作用,缺陷难分辨,且机械加工也较困难。但倾斜角度小时,探头灵敏度差,通过试验,我们认为晶片倾斜角 30° 较合适。

三、探头延迟块尺寸的确定

确定延迟块尺寸的目的是,在晶片尺寸已确定的情况($3 \times 6 \times 0.4$ 毫米³)下,使晶片中心声速在 E 点入射时的延迟块尺寸最小,以便达到最高灵敏度。按此要求,绘出延迟块尺寸分析图(图4), ABCD 是延迟块实际尺寸。

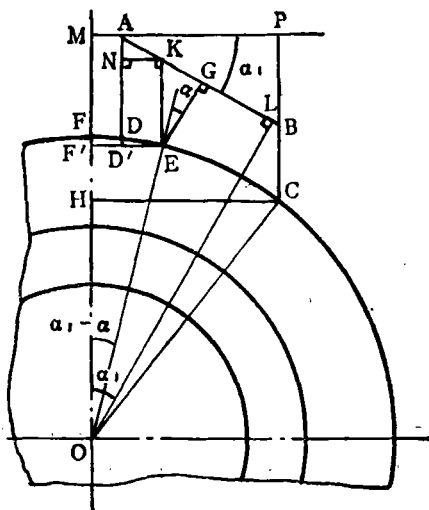


图4 延迟块尺寸分析图

* 根据一般资料介绍有机玻璃纵波声速 2640~2730 米/秒,本文取 2640 米/秒。

已知：晶片尺寸 $AB=a$ ，晶片倾斜角 α_1 ，E 点入射角 α ，隔声块软木厚度的一半 $MA=h$ 。

求：AP、BC、AD 的尺寸。

其中 $AN=NK \cdot \operatorname{tg}\alpha_1=(EF'-F'D')\operatorname{tg}\alpha_1=[R \cdot \sin(\alpha_1-\alpha)-h]\operatorname{tg}\alpha_1$ ；

$$KE=\frac{KG}{\sin\alpha_1}=\frac{AG-AK}{\sin\alpha_1}=\frac{1/2a-NK/\cos\alpha_1}{\sin\alpha_1}=\frac{a}{2\sin\alpha_1}-\frac{R \cdot \sin(\alpha_1-\alpha)-h}{\sin\alpha_1 \cdot \cos\alpha_1}$$

$$FF'=\sqrt{FE^2-F'E^2}=\sqrt{m^2-R^2 \cdot \sin^2(\alpha_1-\alpha)}$$

$$\begin{aligned} \therefore AD &= AN + KE - FF' = [R \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha) - h] \operatorname{tg} \alpha_1 + \frac{a}{2\sin\alpha_1} - \frac{R \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha) - h}{\sin\alpha_1 \cdot \cos\alpha_1} \\ &\quad - \sqrt{m^2 - R^2 \cdot \sin^2(\alpha_1 - \alpha)} \\ &= [R \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha) - h] \left(\operatorname{tg} \alpha_1 - \frac{1}{\sin\alpha_1 \cdot \cos\alpha_1} \right) + \frac{a}{2\sin\alpha_1} - \sqrt{m^2 - R^2 \cdot \sin^2(\alpha_1 - \alpha)} \\ &= [R \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha) - h] \left(\frac{1 - \cos 2\alpha_1}{\sin 2\alpha_1} - \frac{2}{\sin 2\alpha_1} \right) + \frac{a}{2\sin\alpha_1} - \sqrt{m^2 - R^2 \cdot \sin^2(\alpha_1 - \alpha)} \\ &= [R \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha) - h] \frac{-(1 + \cos 2\alpha_1)}{\sin 2\alpha_1} + \frac{a}{2\sin\alpha_1} - \sqrt{m^2 - R^2 \cdot \sin^2(\alpha_1 - \alpha)} \\ &= \frac{a}{2\sin\alpha_1} - [R \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha) - h] \operatorname{ctg} \alpha_1 - \sqrt{m^2 - R^2 \cdot \sin^2(\alpha_1 - \alpha)} \end{aligned} \quad (7)$$

$$BC = OM - OH - PB$$

$$\text{其中 } OM = MF' + OF' = AD + FF' + OF' = \frac{a}{2\sin\alpha_1} - [R \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha) - h] \operatorname{ctg} \alpha_1$$

$$- \sqrt{m^2 - R^2 \cdot \sin^2(\alpha_1 - \alpha)} + \sqrt{m^2 - R^2 \cdot \sin^2(\alpha_1 - \alpha)} + R \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha)$$

$$= \frac{a}{2\sin\alpha_1} - [R \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha) - h] \operatorname{ctg} \alpha_1 + R \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha);$$

$$OH = \sqrt{OC^2 - CH^2} = \sqrt{R^2 - (AP + MA)^2} = \sqrt{R^2 - (a \cdot \cos\alpha_1 + h)^2};$$

$$PB = AB \cdot \sin\alpha_1 = a \cdot \sin\alpha_1.$$

$$\therefore BC = \frac{a}{2\sin\alpha_1} - [R \cdot \sin(\alpha_1 - \alpha) - h] \operatorname{ctg} \alpha_1 + R \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha)$$

$$- \sqrt{R^2 - (a \cdot \cos\alpha_1 + h)^2} - a \cdot \sin\alpha_1 \quad (8)$$

例 已知：晶片尺寸 $3 \times 6 \times 0.4$ 毫米³，则 $a=6$ 毫米；隔声块厚度 2 毫米，则 $h=1$ 毫米；晶片倾斜角 $\alpha_1=30^\circ$ ；E 点入射角 $\alpha=15^\circ 31'$ ；弦长 $EF=m=2.524$ 毫米；外圆半径 $R=10$ 毫米。

把这些数据代入(6)(7)(8)式得

$$AP = 6 \cdot \cos 30^\circ = 5.196 \text{ 毫米};$$

$$AD = \frac{6}{2\sin 30^\circ} - (10 \cdot \sin 14^\circ 29' - 1) \operatorname{ctg} 30^\circ - \sqrt{2.524^2 - 10^2 \cdot \sin^2 14^\circ 29'} = 3.06 \text{ 毫米}$$

$$BC = \frac{6}{2 \cdot \sin 30^\circ} - (10 \cdot \sin 14^\circ 29' - 1) \operatorname{ctg} 30^\circ + 10 \cdot \cos 14^\circ 29' - \sqrt{10^2 - (6 \cdot \cos 30^\circ + 1)^2}$$

$$- 6 \cdot \sin 30^\circ = 2.232 \text{ 毫米}$$

延迟块宽度根据晶片宽度而定，具体尺寸及形状如图5所示。通过上述计算可以得到两点结论：

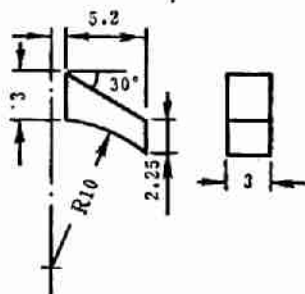


图5 延迟块尺寸及形状

(1) 套筒式钎焊接头曲率大，以致同一晶片的声束到工件表面上各点入射角均不同。因此为了既要保持纵波探伤，又要使收发两晶片中心声束在焊缝处交会，以便有最高灵敏度，晶片倾斜角必须选择适当。

(2) 在保证伤波与底波能分辨的情况下，延迟块尺寸尽量薄一些，以减少声能损失，这两点在设计时必须考虑。

四、探头结构及装配

分割式联合双探头由外壳、绝缘框、延迟块、晶片、隔声块、引线、插座等八个部件组成，晶片频率5兆赫。图6是探头内部结构及外形尺寸图。图7是实物照片。对延

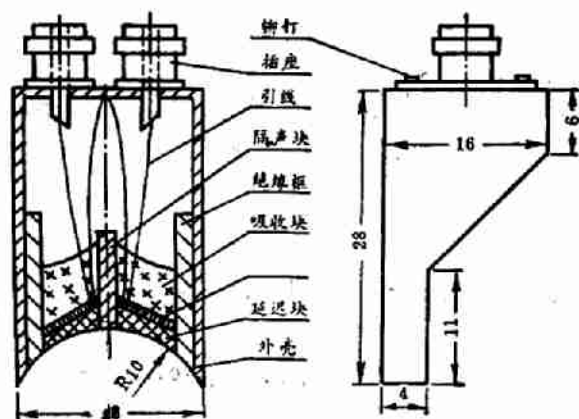


图6 探头结构及外形尺寸图



图7 实物照片

迟块加工要求较精确，装配时须细心，晶片与延迟块必须紧密粘贴。

五、仪器选择

由于使用小型曲面分割式双探头探测这种钎焊缝的缺陷一般不作定量测定，所以对仪器的动态范围及垂直线性要求不高，但仪器一定要具有底波与伤波分辨得出的特点。上海超声波仪器厂生产的JTS-4型和汕头超声电子仪器厂生产的CTS-12型均符合这些要求。

六、探头灵敏度测定

虽然对这种焊缝缺陷不作定量测定，但在探测时必须确定适当的起始灵敏度，否则灵敏度高会造成假象，灵敏度低会使缺陷漏检。为此，制作了两种比较试块，都是用 $\phi 20 \times 5$ 的铜管制成。一种在铜管内壁钻深2毫米、直径分别为 $\phi 1$ 、 $\phi 1.5$ 、 $\phi 2$ 和 $\phi 3$ 毫米四种平底孔。如图8。另一种是在铜管内壁用线切割割深2毫米，宽0.2、0.3、0.4、0.5、1和2毫米共六种不同宽度的槽，刻在两块试棒上，如图9。我们曾对两种不同形状的比较试块作对比试验。发现 $\phi 1$ 毫米平底孔当量近似0.5毫米槽宽的灵敏度。 $\phi 1.5$ 毫米平底孔当量近似槽宽1毫米的灵敏度，而 $\phi 2$ 毫米平底孔当量近似槽宽3毫米的灵敏度。对晶片倾斜角度为 18° 、 25° 和 30° 三种探头均用比较试块作了探测。倾斜角 30° 探头灵敏度最高，能发现槽宽0.2毫米当量，而倾斜角

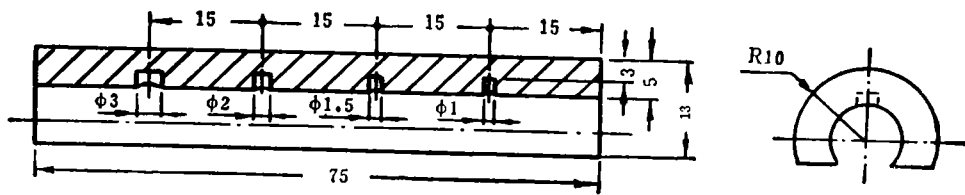


图8 平底孔比较试块

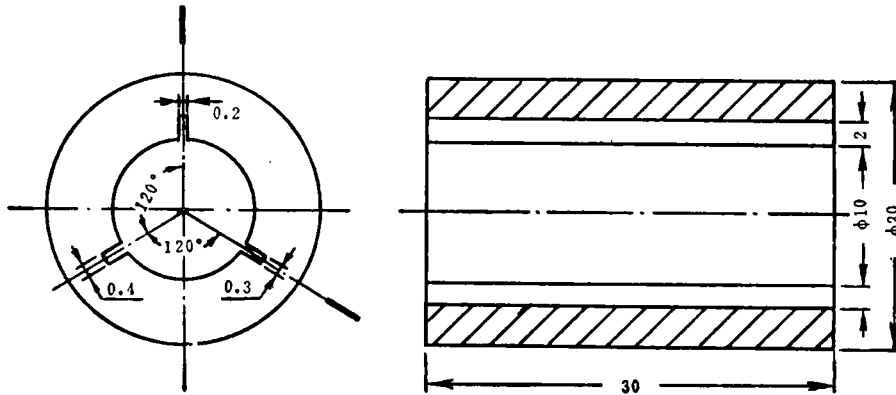


图9 槽形比较试块

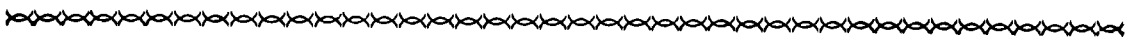
18°探头灵敏度最低，仅能发现 $\phi 3$ 毫米平底孔当量。实际使用时可根据被探工件的检测要求，选择不同类型的比较试块，来确定探伤起始灵敏度。

七、探头的应用

我们用晶片倾斜角 30° 的小型曲面分割式双探头对模拟试件进行探测，用 $\phi 1$ 毫米平底孔当量作为起始灵敏度，对探测结果作了详细记录，并根据测试情况，有的放矢解剖71只试样，其中51只是横向截面，20只是

纵向截面。解剖结果，缺陷情况与探测结果基本相符，纵向缺陷有基本贯穿长达9~10毫米的未焊透，横向缺陷有 $4/5$ 圆周的焊缝面未焊透的大缺陷，也有横向仅0.2毫米的小气孔缺陷。

通过上述试验，可以认为小型曲面分割式双探头对于发现套筒式钎焊缝的缺陷有较高灵敏度。此探头也适用于其他大曲率、小直径的工件近表面缺陷的检验，特别是检验与探测面等截面的近表面部位缺陷更合适。由于试验做得不够全面，可能有些提法欠妥。



(上接第35页)

常见的已知原因的故障样本就能根据谱相关系数的大小来判断是否故障及故障原因。也可以根据需要，一旦机器出现故障，微计算机立即报警或切断电源，以便及时进行修理。这样的谱相关方法适用于对机器作故障监视或巡回检测。特别是对于某些人不能接近的机器更有其优越性。

参考文献

- [1] Sapy, G., Automatismes-Tome xx, No.10, pp.392-399, October 1975.
- [2] Randall, R. B., B & K Technical Review, No.3, 1981.
- [3] Bogert, B. P., In Proceedings of Symposium on Time Series Analysis by Rosenblatt, M., (Ed.), Wiley, N. Y. 1963. pp.209-243.
- [4] 侯温良, «从振动噪声判别机器故障——谱相关法», 声学学报(英文版), 1983年第1期。