

养路机械化丛书

超声波钢轨探伤

(修订版)

汪至中 编

中国铁道出版社

1984年·北京

再 版 前 言

铺设在铁路线上的两股钢轨是机车车辆运行的基础。钢轨状态的好坏直接关系到铁路行车的安全。五十年代初，超声波钢轨探伤这门新技术在我国得到了应用。近十年来，由于电子技术的发展和JGT型仪器的采用，横波探伤在钢轨检查中已打开了新的局面，全路的钢轨探伤技术也有了很大的发展。目前，全路各工务段都成立了钢轨探伤组，配备了新型的探伤仪器并积累了丰富的探伤经验。

提高轨检质量，确保行车安全；提高探伤仪器的操作和维修人员的技术水平，已成为现场的迫切要求。为此，将1976年出版的《超声波钢轨探伤》作了全面的修订，再次出版，以满足读者需要。新版本除增加了集成化仪器一章外，其它章节的内容也作了较多的增删，反映了轨检技术的新发展。

本书在编写过程中，曾得到了许多现场探伤人员的支持和帮助。唐浩良、陆汉炆、朱怀桑等同志对本书的内容提出了许多宝贵的意见。朱怀桑同志对新版第三章内容进行了校阅，并在铁道部工务局于昆明举办的JGT-Ⅲ型仪器学习班上试讲。在此，特向上述同志表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中欠妥之处，诚望读者批评指正。

作 者

1984.2.

内 容 提 要

本书共分五章。第一章介绍超声波的基本知识；第二章叙述超声波钢轨探伤仪的构造和工作原理；第三章以 JGT-Ⅲ型仪器为主，介绍集成化仪器的电路原理；第四章叙述仪器的使用，各种探头的使用以及铝热焊接头的检查方法；第五章讲述了仪器的维修和故障排除方法。附录部分列出了钢轨探伤分类。

本书可供钢轨探伤人员、超声电子仪器维修人员和养路技术人员参考。亦可供其它从事超声检测的技术人员参考。

目 录

第一章 超声波	1
第一节 声 波	1
第二节 波的传递形式——波型	2
第三节 声速、频率和波长	5
第四节 指向性	11
第五节 绕射、反射和折射	14
第六节 超声波的发生和接收	19
第七节 超声波的能量和衰减	22
第二章 超声波钢轨探伤仪的构造和工作原理	27
第一节 超声波钢轨探伤仪的构造	27
第二节 主控振荡器	36
第三节 超声波的发送和接收	42
第四节 闸门与报警电路	51
第五节 显 示	61
第六节 电源与探头	73
第三章 集成化仪器	82
第一节 集成电路	82
第二节 集成化仪器主控脉冲发生器和电源	89
第三节 接收放大器	101
第四节 扫描电路	108
第五节 闸门和报警	114
第六节 国产仪器的性能简介	127
第四章 超声波钢轨探伤仪的使用	136

第一节	超声波钢轨探伤仪的使用	137
第二节	50°探头的使用	145
第三节	30°(35°)探头的使用	160
第四节	双35°探头的使用	168
第五节	铝热焊接头轨脚的检查	178
第六节	垂直探头的使用	186
第五章	超声波钢轨探伤仪的维修	196
第一节	仪器的一般检修方法	196
第二节	仪器零配件的测试与检修	204
第三节	仪器各部分电路的检查和测试	216
第四节	蓄电池的保养及充电	235
附录一	超声波钢轨探伤常用名词术语	242
附录二	钢轨伤损的分类(节录)	246
附录三	钢轨伤损分类表	248

第一章 超 声 波

第一节 声 波

在生产斗争和科学实验中，人们经常要遇到各种各样的波、如电波、光波、声波等。声波则是与人们日常生活联系最密切的一种波。譬如，人们说话的声音是声波；汽笛、喇叭、电铃等发出的声音也是声波。

为了弄清声波究竟是什么以及它是怎样产生的，可以做一个简单的试验：取一根钢锯条，将其一端固定，用手指去弹其另一端，锯条就会振动。当锯条上某点离开它原来的位置向一侧运动时，会将其一面的空气推压；同时，在另一面的空气立即去填充遗留下来的空隙，因而变得稀疏一些。在该点反向运动时，道理相同。如此反复，锯条各点就把振动时产生的能量传给空气，使空气也产生一系列疏密的振动。

空气是一种弹性介质，在空气中某一点或某一部分的振动会象一块石头在水面激起水波一样，向四面八方传播开来，形成声波。声波又传到人们耳朵内的鼓膜上，使鼓膜也产生振动，故听到“嗡……”的声音。

由此可知，声波是由振动引起的。它是指某种弹性介质（例如空气或水等）中的压力的变化和质点的位移，或质点速度变化的传递，以及这些变化的叠加。

假如上述实验中，锯条的固定使悬端再短一点，用手指去弹时，每秒钟振动的次数就会多一些，听到的振动声频率也高一些。反之，悬端加长，其每秒钟振动的次数就会降低，振动声频率就低一些。这些现象说明，介质中传播的声

波频率是由声源决定的。所谓声音频率，也就是声源的振动频率，即每秒钟内声源振动的次数。频率以赫兹为单位，每秒钟内振动一次即为一赫兹。譬如：每秒钟振动 200 次，声音频率就是 200 赫兹。频率用字母 f 表示，单位简称“赫”。

现在已知的声波频率范围很宽，从 10^{-4} 赫一直到 10^{14} 赫。但是，人们的耳朵所能听到的声波频率范围要相对窄的多，只在 16 赫~20 千赫之间。

频率是表征声波特点的一个重要物理量，常常根据其高低来区分音的性质。例如，敲大鼓的时候发出的声音频率比较低，称为低音。吹小号时发出的声音频率比较高，称为高音。频率低于 16 赫和超过 20 千赫的声波，分别称为次声波和超声波（如图 1—1）。次声波和超声波都是人的耳朵所听不到的。



图 1—1 次声、声和超声

次声波也称亚声波，它的频率在 10^{-4} 赫到 16 赫之间。次声波已被应用于气象探测、海啸预测以及火箭发射的监督等许多方面。

超声波在现代科学技术上有着比次声波更为广泛的用途。虽然它的发展到今天只不过四十多年，但它在无损检验、金属加工、医疗、化工以及信息处理等方面都得到了广泛的应用。

第二节 波的传递形式——波型

同一个声源在介质中产生的声波可以以几种不同的方式

进行传播。声波在介质中传播的方式称波型。例如：JGT-Ⅲ型仪器的 50° 和 30° 斜探头向钢轨中发射的是横波，而垂直探头发射的是纵波。

下面举两个例子来说明纵波和横波。

取一根弹簧，把它固定在墙上，另一端用手强迫它在纵向振动（图 1—2）。这时，弹簧中波的传递使弹簧形成了一段疏、一段密的周期变化。如果在弹簧上某一点打个记号，设它为 A 质点，可以发现质点 A 的振动频率和手的振动频率是一致的，振动方向和波的传递方向是平行的。以这种方式传递的波，即为纵波，一般用 L 来表示

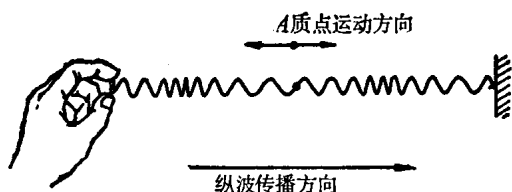


图 1—2 弹簧振动传递纵波

固体、液体和气体在受力变形时都能产生弹性力，因此都能传播纵波。在上述三种介质中传播纵波的情况和弹簧的实验是一样的，表现为质点的疏密变化（图 1—3），质点振动方向和波的传递方向相平行，频率和声源也是一致的。用直探头探测钢轨伤损时，向钢轨中发射的就是超声纵波。

取一根细绳，一端固定在墙上，另一端用手去强迫它在垂直方向振动（图 1—4）。在绳上作一记号 A 点代表质点。可以看到质点 A 的振动方向和波的传播方向是互相垂直的。这种质点振动方向垂直于传播方向的波就叫横波，用 S 来表示。固体中传播的横波虽然和上述的绳有些差别，但质点的振动方向和波的传播方向相垂直这一点是完全相同的。

固体能够在机械外力下力图恢复本身的体积和状态，因而具有切变弹性的特点，在固体介质中，横波是依靠这一特点而传播的。气体和液体没有切变弹性，所以不能传播横波。在气体和液体中只能传播纵波。人们平时所听到的声音，无论在岸上或是在水中，都是纵波。声波横波在钢中传播时，钢的质点振动情况如图 1—5 所示。

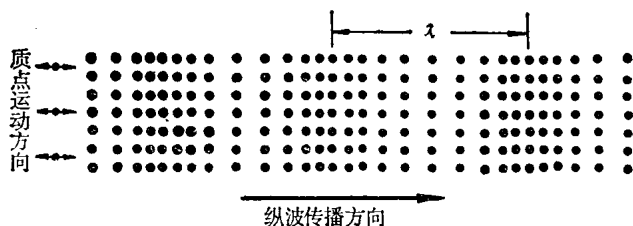


图 1—3 纵波的传播示意



图 1—4 绳子的振动示意

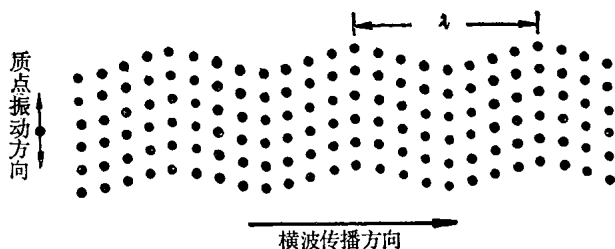


图 1—5 横波的传播示意

近十年来，由于 JGT-II 型仪器投入了现场的钢轨检查，

超声横波探伤已在钢轨检查上显示出了极大的优越性。尤其是对于核伤和较小的孔裂，目前用 50° 和 30° 斜探头去探查的效果已远远超过了直探头（纵波）的探查。横波探伤具有灵敏度高，分辨力强和方向性好等特点，因此横波在近代无损检验中得到了广泛的重视。

在实用上，可以利用超声波的折射现象，让纵波通过楔状波型转换块得到横波。

除了纵波和横波以外，超声波还能以表面波（瑞利波）、板波（弯曲波）等多种形式传播，但是这些波型在钢轨检查中还很少应用。

第三节 声速、频率和波长

站在高山对面敲一下锣，过一段时间以后即可听到锣的回音（图1—6）。这一过程是：声源（锣）发生振动后，激起邻近介质（空气）中的质点不断离开其平衡位置，依照声源的频率而振动，并依靠空气介质传递声波，一直到山，然后又返回来。假如站的地方离山的距离是255米，1.5秒后听到回音，那么空气中的声速是：

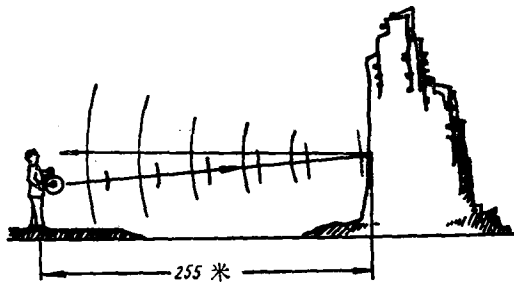


图1—6 回声测距示意图

$$C_{\text{声速}} = \frac{255\text{米} \times 2}{1.5\text{秒}} = 340\text{米/秒}$$

所谓声速，是指振动在传声介质中的传播速度。它和介质在传播声波时，质点离开平衡位置时的振动速度不是一回事。介质质点在振动时的速度和方向是不断变化的，但它只参与了振动的传递，其平衡位置始终没有移动。

由于不同的传声介质质点惯性和弹性力的不同，声波在不同介质中的传播速度是不同的。在水中，声波的传播速度约为1450米/秒，比在空气中要快得多。在钢中，声的传播速度比在水中还要快一些。

在同一种介质中，随着介质温度的不同，质点的惯性和弹性力也是不同的。并且在同一种介质中波的传递形式也是多种多样的。所以，在一种介质中声波的传播还会随其波型及介质温度的不同而具有不同的声速。

声速一般用字母 C 来表示。

超声波和声波一样，要依靠一定的介质才能传播。但是，除掉频率较低的以外，超声波在空气中几乎是不能传播的，主要是在固体和液体中传播。由于波的传递形式不同，超声波在同一种介质中的传播速度也是不同的。在钢中，超声纵波的速度为5850米/秒，而横波则为3280米/秒。因为波速的不同，所以这两种波在射入钢轨时，虽然探头和伤损反射面的距离是一样的，但回波返回的时间却会产生很大的差异。这一点我们在探伤工作中必须注意。

钢轨断面一般是不太大的，在检查钢轨时，仪器发送的超声波和接收到的回波相隔时间很短，所以，常用“微秒”这个单位来描述这段时间。1微秒等于百万分之一秒，也就是：

$$1\mu\text{s}(\text{微秒}) = 10^{-6}\text{s}(\text{秒})$$

纵波在钢轨中垂直往返一次约需40~60微秒。横波在轨头内以与纵向成 20° 角入射时，二次波往返时间约为120微秒左右。如果知道了回波从伤损返回所需要的时间，那么，就可以根据波速算出伤损和探头间的距离。伤波返回所需要的时间和荧光屏上伤波与始发波的距离是互相对应的。国产JGT-II、III型仪器荧光屏刻度在扫描线处于标准位置时，约为每厘米25微秒左右。利用预先打好小孔的钢轨，可以确定它们具体的对应关系（图1—7）。通过不断的实践，可以把荧光屏刻度直接与伤的深度对应起来，这样，只要看一看荧光屏上面波的位置，就可以知道伤损离探头的距离。在实验和计测的时候，要注意超声波经过探头内有机玻璃和尼龙保护膜往返所需的时间。超声波在这两种介质中的波速较慢，所以，即使介质较薄，超声通过时还是需用一定时间的，不可忽略。

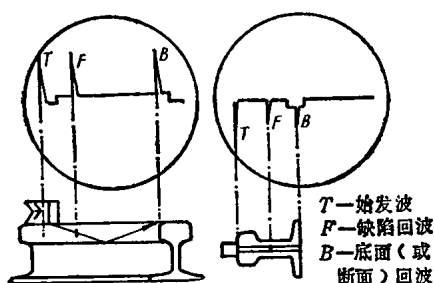


图1—7 回波在荧光屏上的位置与伤损在钢轨中的位置相对应

几种常用介质的声速、密度、声阻抗等有关数据列于表1—1。

在使用仪器的时候，经常要用到“工作频率”一词。它是指晶体在发射超声时每秒钟平均振动的次数，亦即晶体发出的超声波的频率。

表 1 — 1

介 质	纵波声速 C_L 米/秒	横波声速 C_s 米/秒	密 度 克/厘米 ³	声 阻 抗 ρ_c
钢	5850	3280	7.8	4.56×10^4
生铁	4500	2400	7.7	2.96×10^4
铜	4700	2260	8.9	4.18×10^4
铝	6260	3080	2.7	1.68×10^4
聚苯乙烯	2350	1120	1.06	2300
有机玻璃	2700	1300	1.18	3200
变压器油	1390	—	0.92	1300
水	1450	—	1.00	1450
空气	344	—	0.0012	0.413

超声波工作频率的概念和声波频率的概念是一样的。在第一节例子中已知，每秒钟振动200次的锯条所发出的声波频率就是200赫。如果锯条只振动了半秒钟，即100次就停止了，那么它发出的声波频率仍然是200赫兹，即：

$$f = \frac{100}{0.5 \text{秒}} = 200 \text{赫}$$

因此，如果一台超声波探伤仪的发射晶体在发射一束超声波时，晶体只在5微秒内振动了10次，那么我们很快就可以算出这束超声波的频率是：

$$f = \frac{10}{5 \times 10^{-6}} = 2 \times 10^6 \text{赫} = 2 \text{兆赫}$$

这个频率，也就是这台仪器的工作频率。

声源（例如上述的锯条或晶体）每振动一次，称为一周。振动一周所需要的时间，称为周期。

周期一般以 T 来表示，单位是秒。显然，周期是频率的倒数，即：

$$T = \frac{1}{f} \text{ (秒)}$$

例如上述每秒振动 2×10^6 次的晶片，发出的超声波频率是 2 兆赫。它的振动周期为：

$$T = \frac{1}{2 \times 10^6} = 0.5 \times 10^{-6} \text{ 秒} = 0.5 \text{ 微秒}$$

如果将一个周期称为一周（即 360° 或 2π 弧度），则频率还可以以每秒钟内振动所经过的弧度数来表示，称为角频率 ω 。频率、角频率、周期之间的关系是：

$$\omega = 2\pi f \text{ (弧度/秒)}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \text{ (秒)}$$

目前，钢材超声波探伤使用的工作频率一般在 $0.4 \sim 10$ 兆赫之间。晶粒越粗、衰减越大的材料，象铸钢、合金钢等应使用频率低一些的超声波来探伤。锻钢、晶粒较细、衰减较小的钢轨等使用的工作频率则宜高一些。工作频率愈高、超声发射出去的扩散角愈小，能量愈集中，同时能够发现的伤也愈小，对提高探伤灵敏度及确定伤损位置有利。但工作频率如果提得太高，材料中超声的衰减和散射也将跟着增强，使回波难以收到，或产生许多杂波，同样对探测不利。工作频率的选择是对立而统一的，根据钢轨的探测条件，一般选择 $2 \sim 5$ 兆赫的工作频率较为适宜。国产 JGT-III 型钢轨探伤仪的工作频率为 2 兆赫。

重复频率是指一秒钟内探头向钢轨内射入超声脉冲的次数。所谓超声脉冲，就是指极短时间内发生的一次超声。为了提高对伤损的分辨能力和发现近表面的伤损，应使发射超

声脉冲间隙越窄越好，最好在几个微秒以下。重复频率越高，两次发射的超声波间隔就越短，仪器就越不容易漏伤，检查速度可以高一些。但是，假如重复频率太高，往往会使上一次发送超声的回波进入下一次接收的检测时间内去，造成干扰。这样仪器就会产生误报，检查人员也就无法判断伤损了。因此，重复频率应根据所检查的材料大小，一次声程所需的时间长短，仪器接收和发送超声的能力以及检查速度等多方面因素来决定。一般在检查钢轨时，直探头重复频率以不大于4千赫、斜探头不大于2千赫为宜。国产JGT-Ⅲ型仪器的重复频率为500赫，适合于一般步行的检查速度。

声波完成一次完整的振动（即一周的时间内）传播出去的距离称之为波长。波长也就是相邻两个波密或波疏间（纵波）或相邻两个波峰或波谷间（横波）的最短距离（参见图1—3及1—5）。

波长一般用字母 λ 来表示，单位是米（或厘米）。波长和频率、声速间的关系是：

$$\lambda = \frac{C}{f}$$

式中 C —— 声速，它是随传声介质及波型、温度的不同而变化的，

f —— 频率，由声源决定；

λ —— 波长，由声速和频率决定。

例如：钢轨中横波声速为3280米/秒，则2兆赫的超声横波波长应为：

$$\lambda = \frac{3280}{2000000} = 1.64 \times 10^{-3} \text{米}$$

钢轨中纵波声速为5850米/秒，则2兆赫的超声纵波波长就是：

$$\lambda = \frac{5850}{2000000} = 2.93 \times 10^{-3} \text{ 米}$$

第四节 指向性

众所周知，站在广播着的喇叭前面，比站在其后面听到的声音要响一些，这说明声的传播是沿一定路径，有一定方向的。声波传播时的这一特性，称为指向性。声波传播的方向则称为波线。

在某一瞬间，声波在介质中传播所达到的各个质点组成的面，称之为波前。在波前和声源之间，沿波的传播方向每隔一个波长“ λ ”的距离，就会有一个由许多振动位置相同的质点组成的面，称为同相面或波阵面。波阵面和波前的位置总是垂直于波的传播方向的。

根据形状的不同，波阵面分为球面波、柱面波及平面波。在声波频率确定的情况下，如果声源直径较波长小得多，则可认为声源产生的是球面波。随着声源直径的增大，声源辐射出的声波波阵面就逐渐地趋于平面。当声源直径远大于声波波长的时候，它的波阵面就可以认为是一个平面了。

从声源到波前这样一个充满声波的空间，称为声场。点声源或球体声源在振动时能产生球状的声场。直线型声源及圆柱状声源在振动时则产生圆柱状的声场。而与波长相比尺寸要大得多的平面在振动时产生平面波，并且所形成的声场具有圆锥或接近圆锥的形状(图 1—8)。声源发出的主波束的圆锥体顶角，亦即圆锥形声场张开的角度，称为扩散角。扩散角的二分之一即为半扩散角。在实用及计算上常常用到半扩散角，一般用字母 θ 表示。在声源附近，主波束侧边的声场往往具有花瓣的形状，称为“副瓣”(图 1—8 c)。

当频率增高，而声源直径不变时，“副瓣”会明显地增多，以致接近声源附近的声场成为圆柱形。

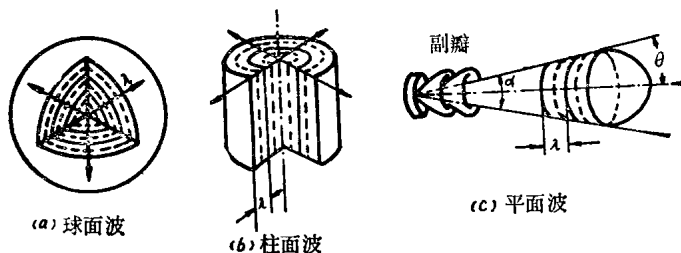


图 1—8 波阵面

由于超声波的频率比一般可听见的声波要高得多，在传声介质和声速相同的情况下，它的波长要小得多。因此，超声波比一般声波的指向性要强得多，只需要用稍大一些的声源（例如直径10毫米的晶体片）就可以将它的能量集中在一个方向发射出去了。一般来讲，超声波的频率越高，发射超声的晶体片面积越大，则发射出去的超声波扩散角就越小，波束越“细”，指向性也就越好（图 1—9）。

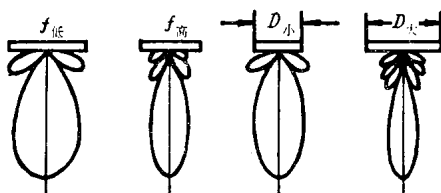


图 1—9 晶体直径 D 超声频率 f 与指向性的关系

当晶体尺寸远大于超声波波长的时候，晶体发出的超声场有类似示波管的外形（图 1—10）。紧靠晶体的一段叫近场区，接近圆柱状。离晶体较远的部分，超声以一定角度扩散，叫做远场区。由于扩散角的存在，探头往往能发现在晶