

用线性回归法确定探地雷达表面时间零点

贾保江

廊坊市中铁物探勘察有限公司 河北 廊坊 065000

摘要：本文通过三个实例探讨了用线性回归法确定探地雷达表面时间零点和校正现场雷达波速的问题。

关键词：探地雷达；线性回归法；表面时间零点；波速校正；

在隧道衬砌等钢筋混凝土构件检测中，雷达法作为一种常用的无损检测方法，一般是用来发现工程实体中隐蔽的异常体。当使用探地雷达进行工程质量检测时，检测人员经常要碰到一个非常关键的参数——表面零声时。

一、表面零声时

一套完整的雷达包括探地雷达主机、单体屏蔽天线和连接电缆等。雷达主机发射出的电信号经过发射天线转换为雷达波子波，雷达波子波经过被测体内的反射、散射后到达接收天线再转换为电信号到达探地雷达主机，一个测试过程即告完成，多个测试过程形成雷达天线位置 - 时间剖面图。雷达记录的旅行时由三部分组成，包括：电信号在主机、电缆及天线的旅行时间、雷达波在天线与被测体表面耦合旅行时间、雷达波信号在被测体内的入射和反射旅行时间。在分析探地雷达数据时，我们只用到雷达波在被测体的入射和反射旅行时间；当天线和被测体表面密贴时，前两项旅行时间之和称表面时间零点。所以在进行工程检测前应先确定表面时间零点 t_0 ，剔除 t_0 后的时间才是雷达波经反射体的真实走时。

在多种雷达波速校正方法中，已知目标深度法在实际工程中应用广泛、简单、高效，本文实例应用的就是该方法^[1]。

二、表面时间零点和雷达波速数值求解

1. 探地雷达探测基本原理

表面耦合单体屏蔽天线与雷达主机组成的系统探测原理如图 1 所示。图 1 中 T 为发射天线，R 为接收天线，两者间距(收发距)为 x ， z 为目标体反射点埋深。雷达波从 T 发出，按几何光学原理，经目标体反射回地面到达 R，旅行时为 t 。

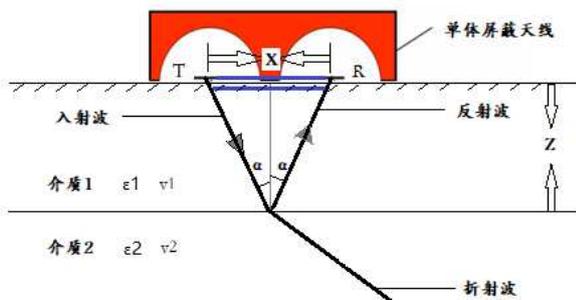


图 1 探地雷达探测原理示意图

2. 埋深和旅行时之间的关系

根据图 1，设雷达波在介质中的传播速度为 v ，由几何原理可推导出如下时距方程：

$$0 = 4z^2 + 2xt - 2z^2 \quad (1)$$

式中：

t ——包含表面时间零点在内的旅行时，对应实测曲线中反射波最大幅值处；

t_0 ——表面时间零点，待求；

z ——反射体距离测试表面的净距，已知；

x ——发射天线与接收天线间距，已知；

v ——雷达波速，待求。

当 $t_0=0$ ns、 $v=100$ mm/ns 时， z 取表 1 中埋深数值，带入式 1，求得各 t 值，如表 1。

表 1 埋深 - 双程旅时表

埋深 /mm	0	40	80	120	160	200	240	280	320
2z/mm	0	80	160	240	320	400	480	560	640
旅行时 t/ns	1.55	1.74	2.23	2.86	3.56	4.29	5.04	5.81	6.59

$2z$ 与 t 关系如图 2 所示。

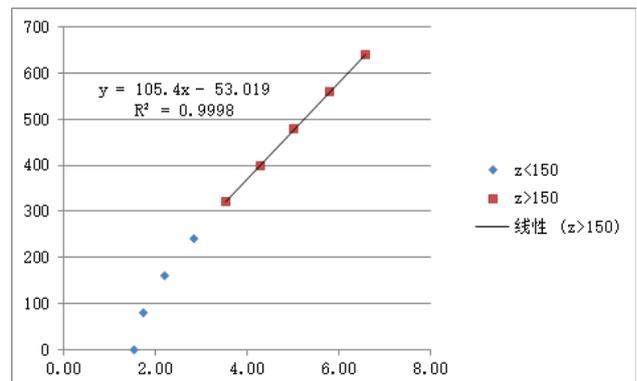


图 2 深度 - 时间关系及线性回归方程

由图 2 可知：当 z 大于 150mm 后， $2z$ 与 t 相关系数的平方 $R^2 = 0.9998$ ，二者呈非常好的线性相关关系；回归方程为：

$$z = 105.4 \times t - 53.02 \quad (2)$$

式 (2) 中 105.4 为雷达波在介质中的传播波速，单位 mm/ns，该值与设定波速误差为 5.4%；取 $z=0$ ，求得 t 在时间轴上的截距为 0.50，单位 ns，该值与设定值存在一定差距。

3. 求解 t0 和 v 的方法

方法 1——方程组法：当已知目标深度 z 有两个不同值时，可联立方程组求得 t0 和 v，如式 3 所示。

$$z_1 = 106.4 \times (t_1 - t_0) - 53.02, z_2 = 106.4 \times (t_2 - t_0) - 53.02 \quad (3)$$

方法 2——线性回归法^[2]：当已知目标深度 z 有多个时，可用线性回归法求解，如表 1、图 2 所示。

当有多个已知目标深度及对应旅行时间时，应用线性回归法可大大减小人为因素的影响，获得相对准确的雷达波速 v 和表面时间零点 t0。

基于此，作者在下面实例中应用了电子表格软件 EXCEL 中线性回归法求解雷达波速和表面时间零点。

三、数值验证

在室温条件下，空气和水的相对介电常数分别为 1 和 81，其对应的雷达波传播速度分别为 300mm/ns 和 33.3mm/ns，本文以此作为标准物质，求解其表面时间零点。

1. 标准物质验证

表 2 和表 3 是用 GSSI 生产的 Sir3000 及配套的 900MHz 屏蔽天线在室温条件下测得空气和水两种介质的距离 z 及对应的旅行时；图 3 和图 4 为表 2 和表 3 中数据画出的时距曲线及线性回归方程。

表 3 探地雷达在空气中测距 - 旅行时

距离 z/mm	200	250	300	350	950	1550
2z/mm	400	500	600	700	1900	3100
旅行时 t/ns	5.19	5.55	5.91	6.15	10.27	14.21

表 4 探地雷达在水中测距 - 旅行时

距离 /mm	150	200	250	320
2 倍距离 z/mm	300	400	500	640
旅行时 t/ns	13.54	16.40	19.66	23.32

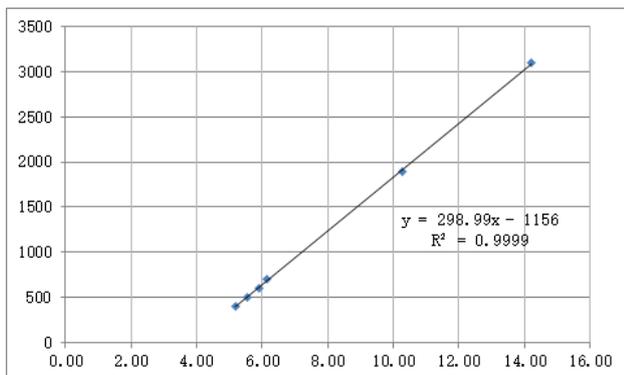


图 3 雷达波在空气中时距曲线及线性回归方程

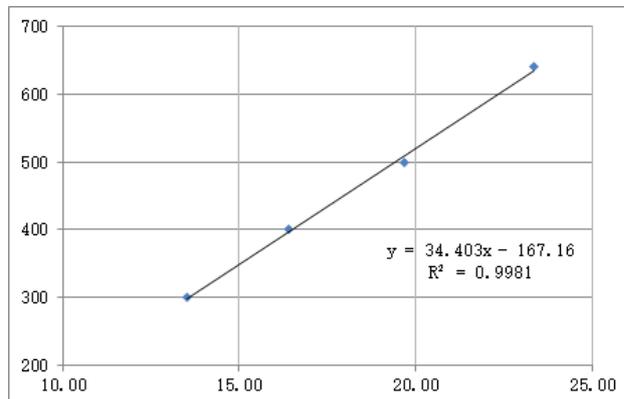


图 4 雷达波在水中时距曲线及线性回归方程

由图 3 和图 4 中线性回归方程可知：在室温环境条件下，空气和水中雷达波的传播速度和该套仪器对应的表面时间零点如表 5。

表 5 标准物质中波速及表面时间零点

被测介质	雷达波速 mm/ns	表面时间零点 ns
空气	299	3.87
水	34	4.91

2. 钢筋混凝土模型应用

表 6 是在图 5 所示的钢筋混凝土模型上的测试数据，图 6 为时距曲线及线性回归方程。



图 5 钢筋混凝土模型

表 6 钢筋混凝土构件钢筋保护层厚度及雷达波旅行时间

钢筋编号 (从左至右)	1	2	3	4	5
钢筋保护层厚度 z/mm	138	160	182	205	237
2z/mm	276	320	364	410	474
旅行时 t/ns	7.54	8.07	8.49	8.87	9.48

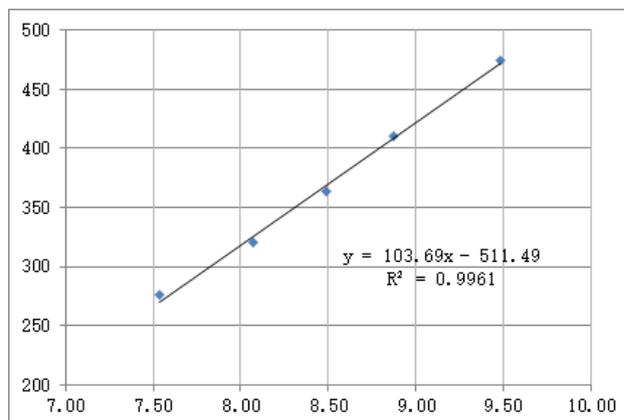


图 6 雷达波在钢筋混凝土模型中时距曲线及线性回归方程

由图 6 可知：该模型雷达波速为 104mm/ns，表面时间零点为 4.93。

3. 推论

三个测试实例表明：同一套雷达系统，在测试介电常数不同的介质时其表面时间零点不是一个定值，而是一个变化的值；开展新的工程项目时，应进行表面时间零点校正；线性回归法求解的表面时间零点存在一定误差。

四、结束语

在探地雷达记录的旅行时中应剔除表面时间零点，这

样测得的雷达波速才是被测体相对准确的波速值；如果表面时间零点不准确，得到的电性异常体或界面埋深将存在较大的误差，尤其是浅层的。

参考文献：

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部，雷达法检测混凝土结构技术标准，JGJ/T 456-2019，6-7

[2] Richard Yef and Daniel Yelf, Where is true time zero, Electromagnetic Phenomena, V.7, 1 (18), 2006,158-163