

Study on Tunnel Concrete Structure Theoretical Model and Its Characteristics of Radar Reflection

Chunqing Wang¹, Hui Chen²

¹Geological Publishing House, Beijing

²Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing

Email: wangchunqing0220@126.com

Received: Jul. 2nd, 2012; revised: Jul. 17th, 2012; accepted: Jul. 29th, 2012

Abstract: Study on theory model helps us to process the complicated problem in practice, the basic law of the physical phenomenon in the model is studied by using the mathematical technique, the Radar response of the model is calculated with the computer, the reflection character of the Radar wave is analyzed to identify the geological horizon and solve the practical problem. So, in order to improve the ability in processing and interpreting the GPR data. The author has learnt a great deal of basic principles about GPR, and studied the theory of the non-destructive examination to tunnel lining, and then structured the tunnel concrete structure model and attained the Synthetic GPR record.

Keywords: GPR; Tunnel; Concrete Structure; Non-Destructive Examination

隧道混凝土结构理论模型及其雷达波反射特征的研究

王春庆¹, 陈辉²

¹地质出版社, 北京

²中国铁道科学研究院铁道建筑研究所, 北京

Email: wangchunqing0220@126.com

收稿日期: 2012年7月2日; 修回日期: 2012年7月17日; 录用日期: 2012年7月29日

摘要: 理论模型的研究有助于处理实际中的复杂问题, 应用数学的方法研究发生在这个模型里的物理现象的基本规律, 通过计算机计算由这个模型产生的雷达响应, 分析其雷达波反射特征来达到识别层位、解决实际问题的目的。所以为提高对雷达图像的处理和解释能力, 本文通过对隧道混凝土结构的雷达无损检测基本理论进行研究, 建立了隧道混凝土结构的理论模型, 实现了其雷达信号的正演合成。

关键词: 地质雷达; 隧道; 混凝土结构; 无损检测

1. 引言

地质雷达^[1-6]技术是二十世纪七十年代发展起来的一门新技术。随着对高频电磁波理论研究的深入和广泛应用, 人们越来越重视对地质雷达无损检测技术的研究。地质雷达作为一种高分辨率和高准确率且快速高效的检测技术而得到迅速推广和应用, 地质雷达方法具有轻便、快速、准确、直观等优点。隧道混凝土的结构适合地质雷达检测的物性前提, 所以隧道混

凝土衬砌的无损检测主要采用地质雷达方法。本文从隧道混凝土的基本结构入手, 建立隧道混凝土结构模型, 实现雷达波信号正演合成。

2. 隧道混凝土的基本结构

隧道混凝土结构横向断面图如图1所示。一般情况下可将隧道分为三个电性层, 依次为衬砌层、回填层和围岩层。隧道呈拱门形状, 衬砌层的混凝土一般

设计厚度在 25~45 cm 之间, 在衬砌和围岩之间留有一定厚度的空间用水泥砂浆、砂砾石或其他建筑材料充填, 这一层称为回填层。

隧道混凝土结构纵向断面图如图 2 所示。其为层状结构, 可视为三个具有均匀厚度的各向同性电性层, ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别表示衬砌层、回填层、围岩层的相对介电常数; ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 分别表示衬砌层、回填层、围岩层的电阻率; h_1 、 h_2 、 h_3 分别表示衬砌层、回填层、围岩层的厚度。

在隧道的衬砌检测中使用适宜频率的共发送、接收的方型天线, 既方便又能取得最好的检测效果。工作时天线贴着隧道壁拖动, 一般沿隧道壁上的五个部位: 拱顶、左拱腰、右拱腰、左边墙、右边墙进行检测, 如图 1 所示。

3. 雷达合成记录基本原理

如果雷达子波用 $S(t)$ 表示, 雷达剖面的反射系数也表示成双程垂直反射旅行时 t 的函数, 用 $R(t)$ 表示, 那么雷达记录形成的物理过程在数学上可以用 $S(t)$ 与 $R(t)$ 的褶积来表示, 即雷达记录 $f(t)$ 是

$$f(t) = S(t) * R(t) = \int_0^T S(\tau) R(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

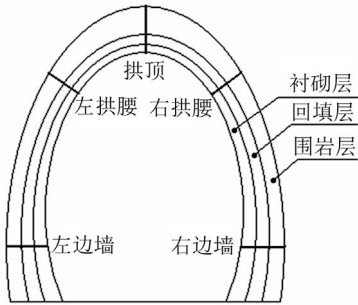


Figure 1. Transverse section of tunnel concrete structure
图 1. 隧道混凝土结构横向断面图

衬砌层	$\varepsilon_1, \rho_1, h_1$
回填层	$\varepsilon_2, \rho_2, h_2$
围岩	$\varepsilon_3, \rho_3, h_3$

Figure 2. Longitudinal section of tunnel concrete structure
图 2. 隧道混凝土结构纵向断面图

实际计算时用的公式是离散式, 设合成记录的总长度为 T , 取样间隔为 Δt , 即 $T = N\Delta t$, $R(t)$ 可以表示成 $R(i\Delta t) (i = 1, 2, 3, \dots, N)$; $S(t)$ 的取样间隔也是 Δt , 共有 M 点, 即 $S(j\Delta t) (j = 1, 2, 3, \dots, M)$ 。如果雷达合成记录的取样间隔也是 Δt , 即 $f(t) = f(i\Delta t)$, 则

$$f(i\Delta t) = \sum_{j=1}^M S(j\Delta t) R^*(i\Delta t - j\Delta t) \Delta t \quad (2)$$

计算反射系数时, 首先根据

$$R_i = (\sqrt{\varepsilon_{i-1}} - \sqrt{\varepsilon_i}) / (\sqrt{\varepsilon_{i-1}} + \sqrt{\varepsilon_i}) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

($\varepsilon_{i-1}, \varepsilon_i$ 分别表示相邻两结构层介质的相对介电常数, ε_0 是空气的相对介电常数, 一般为 1.0) 计算出各结构层面的反射系数 R_1, R_2, \dots, R_n , 然后再计算出由发射机发射的雷达波在各个界面的反射系数 $R_1^*, R_2^*, \dots, R_n^*$, 它们两者之间的关系^[7]是

$$\begin{aligned} R_1^* &= R_1 \\ R_2^* &= A_1 R_2 (1 - R_1^2) / 2h_1 \\ R_3^* &= A_1 A_2 R_3 (1 - R_2^2) (1 - R_1^2) / 2(h_1 + h_2) \\ &\dots \\ R_n^* &= \prod_{i=1}^{n-1} A_i \prod_{i=1}^n (1 - R_i^2) / 2 \sum_{i=1}^{n-1} h_i \end{aligned} \quad (3)$$

式中 n 是结构层的数目, $A_1, A_2, \dots, A_{n-2}, A_{n-1}$ 是雷达波在各结构层内的振幅, $A_i = e^{-2\beta_i h_i} (i = 1, 2, \dots, n-1)$, 其中 β_i 和 h_i 分别是各结构层(第 n 层除外)的衰减系数^[8]和厚度, $\beta_i \approx 188.5 / (\rho_i \sqrt{\varepsilon_{ri}}) (i = 1, 2, \dots, n-1)$, 其中 ρ_i 和 ε_{ri} 分别是各结构层(第 n 层除外)介质对应的电阻率和相对介电常数。

如果将各结构层划分为若干薄层, 使得雷达波在薄层中的双程旅行时都等于 Δt , 则以双程垂直旅行时间为变量的反射系数的离散函数可以表示为

$$R(j\Delta t): R_1, R_2, \dots, R_M \quad (j = 1, 2, 3, \dots, M),$$

则新的反射系数曲线的离散值为

$$R^*(j\Delta t): R_1^*, R_2^*, \dots, R_M^* \quad j = 1, 2, 3, \dots, M。$$

计算各层面的双程旅行时时, 按

$$\left(t_i = \sum_{i=1}^n 2h_i / v_i \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \right)$$

计算, 其中各结构层的波速

$$v_i = C/\sqrt{\epsilon_{ri}} \quad (i=1,2,\dots,n-1),$$

C 是光速, $C = 30\text{cm/ns}$ 。

雷达子波的选择是制作雷达合成记录的重要问题, 本文选择雷达子波的时间函数是

$$S(t) = A_0 e^{-at^2} \sin \omega_0 t \quad (4)$$

其中 A_0 是常数, a 是与振幅的衰减有关的常数, $\omega_0 = 2\pi f$ 是中心圆周频率, f 是中心频率。

4. 隧道混凝土结构理论模型的建立与实现

众所周知, 空气的相对介电常数 ϵ_0 为 1.0; 衬砌层相对介电常数大约^[9]为 4.0~40.0; 回填层的相对介电常数与回填的质量有关, 密实情况好的混凝土, 其相对介电常数接近衬砌的相对介电常数, 密实情况差的混凝土, 其相对介电常数会有很大的差别; 围岩层的相对介电常数也因其岩石的性质而有所差异, 完整基岩的相对介电常数一般都小于 10.0, 其变化特点与回填层相似, 含水量大时其相对介电常数大, 含水量小时其相对介电常数小。

在建立模型时, 将衬砌层和回填层分别理想化为厚度相等、相对介电常数和电阻率分布均匀的结构层, 这在实际中是合理的, 第三层是围岩层, 视其为无穷大电性体。模型计算中设置天线的频率为 400 MHz, 设衬砌层的相对介电常数 $\epsilon_1 = 9.0$, 电阻率 $\rho_1 = 6000 \Omega \cdot \text{m}$, 厚度 $h_1 = 30 \text{cm}$; 回填层的相对介电常数 $\epsilon_2 = 15.0$, 电阻率 $\rho_2 = 3000 \Omega \cdot \text{m}$, 厚度 $h_2 = 50 \text{cm}$; 围岩层的相对介电常数 $\epsilon_3 = 10.0$, 电阻率 $\rho_3 = 1000 \Omega \cdot \text{m}$, 厚度 $h_3 = \infty$ 。

隧道混凝土层状结构理论模型及对应的雷达波反射特征如图 3 所示。图中 Δt_1 、 Δt_2 分别表示雷达波通过衬砌层和回填层的双程走时, 其他参数意义如前文所述。

雷达波遇到介电性质发生变化时的界面时, 就在界面处发生反射, 在雷达波形图上就有相应的响应特征。界面两侧介质的介电性质差异越大, 反射波越强。从图 3 中可以看出, 波从衬砌层进入回填层时, 即波从介电常数小的介质进入介电常数大的介质时, 反射波振幅与入射波振幅反向; 波从回填层进入围岩层时, 即波从介电常数大的介质进入介电常数小的介质时, 反射波振幅与入射波振幅同向(入射波振幅是正向的)。

隧道混凝土结构理论模型的雷达波模拟结果如图 4 所示。图中共显示了 20 道的雷达记录, 衬砌层和回填层间的第一个反射界面与回填层和围岩层间的第二个反射界面在模拟的雷达记录上都清晰可见。由于不同介质层相对介电常数不同, 其层间界面反射系数不同, 反射波振幅和相位也不同, 反射波振幅和相位反映了各介质层的界面, 分析反射波的特征, 就能分辨出各层位界面。由图可见, 反射信号的大小主要取决于界面两侧介电常数的差异大小, 差异越大, 反射信号越强, 反映在雷达记录图像上异常比较明显。

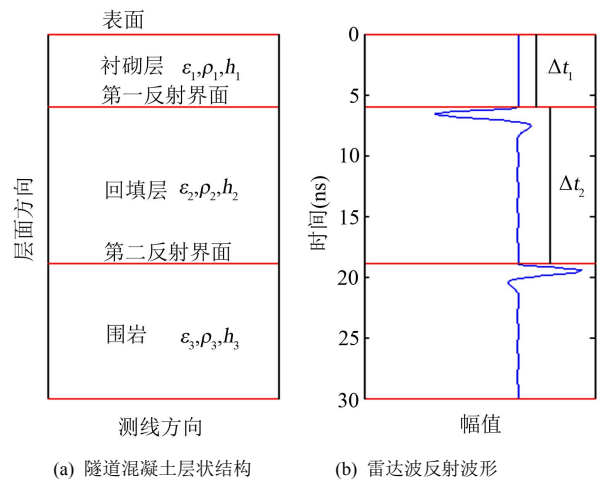


Figure 3. Tunnel concrete laminated structure theoretical model and corresponding radar reflection characteristics
图 3. 隧道混凝土层状结构理论模型及对应的雷达波反射特征

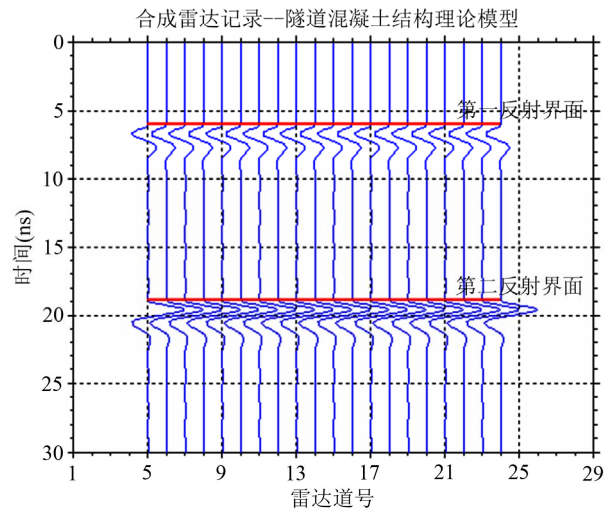


Figure 4. Tunnel concrete structure theory model for synthetic radar records
图 4. 隧道混凝土结构理论模型合成雷达记录

5. 结论

本文结合实际中的隧道混凝土结构，建立了隧道混凝土结构的数学理论模型，从理论上实现了雷达信号的合成。

在隧道衬砌质量检测中，地质雷达技术发挥了重要的作用。对地质雷达开发利用的重点应放在数据处理和资料解释上，一方面开发先进的处理软件，能确定目标体的尺寸、规模，能识别各类目标体的性质；另一方面要不断积累经验，从雷达正演模型入手，对模拟结果进行比较、分析、综合，由此来提高对雷达图像的处理和解释能力。

研究隧道混凝土结构理论模型的响应特征是解释雷达图像的基础。只有掌握了其相应的响应特征，才能正确地解释实际中的雷达数据，准确地识别层位，因此，研究隧道混凝土结构理论模型具有重要的

实际意义。

参考文献 (References)

- [1] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [2] 栗毅, 黄春琳, 雷文太. 探地雷达理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [3] 郭有劲. 地质雷达在铁路隧道衬砌质量检测中的应用[J]. 铁道工程学报, 2002, 2: 71-74.
- [4] 刘敦文, 黄仁东等. 应用探地雷达技术检测隧道衬砌质量[J]. 物探与化探, 2001, 25(6): 469-473.
- [5] 周黎明, 王法刚. 地质雷达法检测隧道衬砌混凝土质量[J]. 岩土工程界, 2003, 6(3): 74-76.
- [6] 茹瑞典. 地质雷达探测技术的应用研究[J]. 工程地质学报, 1996, 4(2): 51-56.
- [7] 黄南晖. 地质雷达探测的波场分析[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1993, 18(3): 294-302.
- [8] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [9] 薄会申. 地质雷达技术实用手册[M]. 北京: 地质出版社, 2006.