

金属支护立柱对巷道无线传输特性的影响

张传雷¹, 孙继平¹, 刘 珺²

(1. 中国矿业大学信息工程研究所 北京 海淀区 100083; 2. 河北农业大学人文学院 河北 保定 710075)

【摘要】针对矩形巷道中由于金属支护立柱的存在而带来的分叉不连续问题, 提出用分叉波导模型并用模式匹配法和多模传输理论分析传输特性。用模式匹配法求出不连续面的阻抗变换公式, 利用多模传输理论求出整个不连续问题的散射参数, 得出了均匀区域的基模电压反射系数与工作频率和支护立柱排数及立柱直径的关系。

关键词 模式匹配; 支护立柱; 传输特性; 巷道
中图分类号 TD65 文献标识码 A

Effect of Metallic Pit Prop on Transmission Characteristics in Tunnel

ZHANG Chuan-Lei¹, SUN Ji-Ping¹, LIU Jun²

(1. The Institute of Information Engineering, China University of Mining & Technology Haidian Beijing 100083;
2. College of Humanities Agricultural University of Hebei Baoding Hebei 710075)

Abstract The effect of metallic pit prop on transmission characteristics in tunnel is studied. A fork waveguide model is proposed and the mode matching and multi-mode network technique are used to analyze the transmission characteristics of rectangular tunnel with metallic pit prop. The change of the reflection coefficient of dominant mode with working frequency, the row number of metallic pit prop, and pit prop diameter are obtained, respectively. The present approach can be used to analyze other discontinuity problems caused by metallic obstacle in rectangular tunnel.

Key words mode matching; pit prop; transmission characteristics; tunnel

进行矿井巷道中电磁波传输特性的理论研究是设计和开发矿井移动通信系统的基础和必需环节^[1]。研究井下巷道无线传输特性需要了解巷道的传输特性、场的分布情况以及对环境参数的依赖性。在高档普采区, 一般用金属性的支护立柱来支撑, 这样使巷道顶更加坚固^[2]。文献[3]应用有限元方法分析了金属支护立柱在矩形巷道中对截止频率的影响。金属支护立柱的存在将使均匀矩形巷道产生不均匀并引起分叉, 从而影响矩形巷道的传输特性。

本文针对矩形巷道中由于金属支护立柱的存在而带来的分叉不连续问题, 提出了分叉波导模型, 并用模式匹配法和多模传输理论分析了传输特性。

1 基本原理

煤矿井下巷道的围岩一般由高电导率的岩石构成, 其中的电磁场模式与具有理想导电壁的波导相比变化也很小。这样可假设巷道壁为良导体, 把巷道看作波导来研究^[4]。支护立柱本身是金属良导体,

为了简化该问题, 假设巷道为无限长以及每排支护立柱含有无限多根立柱。图1是含有一排金属立柱的矩形巷道的纵截面和横截面示意图, 矩形巷道A在 $z=0$ 处被金属支护立柱分叉为矩形巷道B和矩形巷道C。

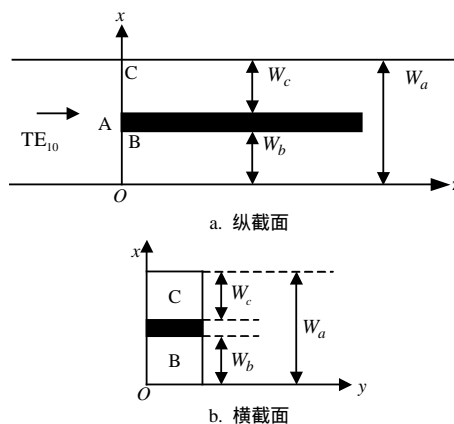


图1 矩形隧道截面与支护立柱

图中, $W_b + W_c + W_d = W_a$, W_a 、 W_b 、 W_c 为矩形巷道A、B、C的宽度, 假设支护立柱的直径为 W_d 。

收稿日期: 2005-07-15

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20030290019)

作者简介: 张传雷(1973-), 男, 博士, 工程师, 主要从事矿井无线传输、计算机监控、网络、多媒体技术和移动通信方面的研究。

区域A中TE₁₀基模沿z方向投射到z=0的分叉不连续面,由于分叉不连续面的存在,将激励起包括基模TE₁₀在内的各高次模式。由于结构只在x方向不均匀,y方向仍然是均匀的,而激励波TE₁₀在y方向无变化,也是均匀的,所以TE₁₀波投射到分叉不连续面只激励起TE_{m0}各高次模式。由于只考虑TE_{m0}诸模式,各区域横向场量只有E_y、H_x分量。它们可分解为无限多模式场的叠加^[5]:

$$E_y^r = \sum_m E_{ym}^r(x, z) = -\sum_m \phi_m^r(x) V_m^r(z) \quad (1)$$

$$H_x^r = \sum_m H_{xm}^r(x, z) = \sum_m \phi_m^r(x) I_m^r(z) \quad (2)$$

式中r为a、b、c,表示相应区域A、B、C中的量;φ_m^r为r区域的模式函数,因为场在y方向没有变化,故φ_m^r满足的方程为^[6-7]:

$$\left(\frac{d^2}{dx^2} + k_x^2 \right) \phi_m^r(x) = 0 \quad (3)$$

其解为φ_m^a(x) = A_m sin(mπ/W_a)x、φ_m^b(x) = B_m sin(mπ/W_b)x、φ_m^c(x) = C_m sin(mπ/W_c)(x - W_b - W_d); A_m、B_m、C_m为相应模式函数的归一化常数。引入归一化条件,有∫_{x₁}^{x₂} φ_m^r(x) φ_m^r(x) dx = 1。积分限定义为A区: x₁ = 0, x₂ = W_a; B区: x₁ = 0, x₂ = W_b; C区: x₁ = W_b + W_d, x₂ = W_a,由此可得A_m = √(2/W_a); B_m = √(2/W_b); C_m = √(2/W_c)。

分叉不连续面的存在将引起不连续面两边各区域模式之间的耦合,这种耦合关系可通过模式匹配技术求得,即不连续面两边场的全部切向分量必须连续^[8]。即:

$$E_y^a(0^-) = \begin{cases} E_y^b(0^+) & 0 < x < W_b \\ E_y^c(0^+) & W_b + W_d < x < W_a \end{cases}$$

$$H_x^a(0^-) = \begin{cases} H_x^b(0^+) & 0 < x < W_b \\ H_x^c(0^+) & W_b + W_d < x < W_a \end{cases} \quad (4)$$

因为切向分量可表示为模式函数和模式电压或模式电流的乘积,用V_m^r和I_m^r来表示模式函数幅值,把式(1)和式(2)代入式(4)便可得到分叉不连续面两边模式电压或模式电流之间的关系分别为:

$$\sum_m \phi_m^a V_m^a(0) = \sum_n \phi_n^b V_n^b(0^+) \quad 0 < x < W_b \quad (5)$$

$$\sum_m \phi_m^a V_m^a(0) = \sum_n \phi_n^c V_n^c(0^+) \quad W_b + W_d < x < W_a \quad (6)$$

$$\sum_m \phi_m^a I_m^a(0^-) = \sum_n \phi_n^b I_n^b(0^+) \quad 0 < x < W_b \quad (7)$$

$$\sum_m \phi_m^a I_m^a(0^-) = \sum_n \phi_n^c I_n^c(0^+) \quad W_b + W_d < x < W_a \quad (8)$$

将式(5)和式(7)两边同乘以φ_n^b并在(0, W_b)范围内积分,将式(6)和式(8)两边同乘以φ_n^c并在

(W_b + W_d, W_a)内积分,将式(5)~(8)两边同乘以φ_n^a,并在(0, W_a)内积分可得到矩阵形式有:

$$[V^b(0^+)] = [P][V^a(0^-)] \quad (9)$$

$$[I^b(0^+)] = [P][I^a(0^-)] \quad (10)$$

$$[V^c(0^+)] = [Q][V^a(0^-)] \quad (11)$$

$$[I^c(0^+)] = [Q][I^a(0^-)] \quad (12)$$

$$[V^a(0^-)] = [P]^T [V^b(0^+)] + [Q]^T [V^c(0^+)] \quad (13)$$

$$[I^a(0^-)] = [P]^T [I^b(0^+)] + [Q]^T [I^c(0^+)] \quad (14)$$

$$[V^r] = (V_1^r, V_2^r, \dots)^T \quad (15)$$

$$[I^r] = (I_1^r, I_2^r, \dots)^T \quad (16)$$

式中上标T表示矩阵转置式,其中,P_{nm} =

$$\int_0^{W_b} \phi_n^b(x) \phi_m^a(x) dx, Q_{nm} = \int_{W_b+W_d}^{W_a} \phi_n^c(x) \phi_m^a(x) dx。$$

式(9)~(14)表明了分叉不连续面两边各区域模式之间的耦合关系。本文用多端口网络来表示它们之间的关系,用网络问题的处理来代替场的问题。为了求得区域A中的反射波,则可将多端网络连同z>0的区域B、C等效为一个输入阻抗矩阵,并可求得区域A中的反射系数矩阵^[9]。由此,可从已知的入射波求出区域A中[V^a]、[I^a],再利用式(9)~(14)式即可求得[V^b]、[I^b]、[V^c]、[I^c]。

定义[Z_{in}^a]、[Z_{in}^b]、[Z_{in}^c]分别为z=0平面处区域A、B、C向区+z方向看过去的输入阻抗矩阵,

$$[V^a(0^-)] = [Z_{in}^a][I^a(0^-)] \quad (17)$$

$$[V^b(0^+)] = [Z_{in}^b][I^b(0^+)] \quad (18)$$

$$[V^c(0^+)] = [Z_{in}^c][I^c(0^+)] \quad (19)$$

假设金属支柱墙为无限长,[Z_{in}^b]、[Z_{in}^c]简化为对角矩阵[Z^b]、[Z^c],对角线上的元素分别为区域B、C相应模式的特征阻抗。

定义z=0分叉不连续面处的电压反射系数矩阵为[Γ^a],电流反射波、入射波列向量分别为[I^r]、[Iⁱ],即[I^r] = [I₁^r, I₂^r, ...]^T, [Iⁱ] = [I₁ⁱ, I₂ⁱ, ...]^T。根据传输线理论^[10]有:

$$[I^a(0^-)] = ([1] - [\Gamma^a(0^-)])[I^i] \quad (20)$$

$$[V^a(0^-)] = [Z^a]([1] + [\Gamma^a(0^-)])[I^i] \quad (21)$$

式中[Z^a]为A区的特征阻抗矩阵,是个对角矩阵,其对角线上的元素分别为相应模式的特征阻抗。

由式(17)、(20)、(21)可得电压反射系数矩阵:

$$[\Gamma^a(0^-)] = ([Z^a] + [Z_{in}^a])^{-1} ([Z_{in}^a] - [Z^a]) \quad (22)$$

由式(17)~(19)及式(10)、(12)和(13)可得到:

$$[Z_{in}^a(0^-)] = [P]^T [Z_{in}^b(0^+)] [P] + [Q]^T [Z_{in}^c(0^+)] [Q] \quad (23)$$

当B、C区延伸至之无穷远时,有[Z_{in}^b(0⁺)] = [Z^b],

$[Z_{in}^c(0^+)] = [Z^c]$, 因而:

$$[Z_{in}^a(0^-)] = [P]^T [Z^b] [P] + [Q]^T [Z^c] [Q] \quad (24)$$

将本节的推导分叉模型做进一步推广, 可以求得多排金属支柱墙存在时巷道的反射特性。

2 数值结果

根据前面的计算原理, 研究A区的TE₁₀基模电压反射系数随工作频率、支护立柱排数及立柱直径的变化情况:

(1) 研究A区的TE₁₀基模电压反射系数随工作频率的变化情况, 数值结果如图2所示。

(2) 研究A区的TE₁₀基模电压反射系数随立柱排数和立柱直径增加时的变化情况, 选择工作频率为1 000 MHz, 数值结果如图3所示。

在问题分析计算中始终设巷道工作面宽度为4 m, 巷道工作面高度为3 m, 支护立柱直径为20 cm, 第一排支护立柱到煤层侧壁的距离为2 m不变, A区所取的模式数等于30, 为B、C中的模式数之和。

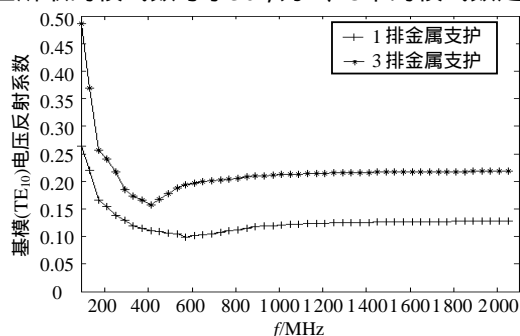


图2 基模电压反射系数与工作频率的关系

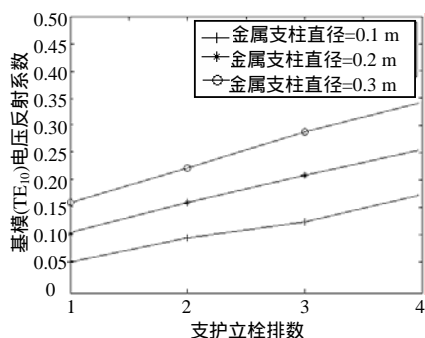


图3 基模电压反射系数与支柱排数、直径关系

由图2可知, 随着工作频率从100 MHz增加到2 000 MHz附近, A区的TE₁₀基模电压反射系数首先是下降, 下降到最小值以后, 再逐渐缓慢增大, 有平坦的频率特性。用微波理论解释是, 矩形巷道中

金属立柱排的存在相当于在矩形波导中插入了一个(或多个)纵向(E面)金属插片, 引起了波导分叉, 就构成了一个E面金属插片滤波器。由图3可知, A区的TE₁₀基模电压反射系数随支护立柱排数和支护立柱半径的增加而增大。

3 结束语

本文用模式匹配法和多模传输理论分析了矩形巷道中金属支护立柱存在时的传输特性, 并得出结论: 随工作频率的增加或支护立柱排数的增加, 矩形巷道中均匀区域的TE₁₀基模电压反射系数增大。

了解上述特点对于研究井下巷道中移动通信是很重要的。因为, 在有金属支护立柱存在的井下巷道中移动通信的工作频率如果很高, 或者随着开采工作面宽度增加, 需要的支护立柱排数增多, 都将导致巷道传输功率效率降低。由于模式匹配法的高效性, 本文方法可以应用到分析矩形巷道中由于其他如机车、通风设施等金属障碍物带来的不连续问题。

参 考 文 献

- [1] 杨 维, 程时昕, 孙继平. 矿井无线通信与频率资源利用[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 535-538.
- [2] 魏占永. 电磁波在隧道中传播特性的研究: [学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学(北京校区), 2003: 101-108.
- [3] 孙继平, 魏占永. 矩形隧道中的金属支护立柱对电磁波截止频率的影响[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2003, 30(4): 565-568.
- [4] 保罗·德隆涅. 泄漏馈线和地下无线电通信[M]. 王椿年, 译. 北京: 人民邮电出版社, 1988.
- [5] 傅君眉, 冯恩信. 高等电磁场理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [6] 周 斌. 微波波导元件的模式匹配分析法: [学位论文][D]. 北京: 中国科学院电子所, 2003:5-22.
- [7] Bhag S G, Huseiyin R H. Electromagnetic field theory fundamentals[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 351-353.
- [8] 毛开宇, 徐善驾. 任意横截面形状非均匀介质波导传输特性的分析[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(6): 434-437.
- [9] 陈抗生. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [10] 赵春晖, 杨萃元. 现代微波技术基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2001.

编 辑 刘文珍