

路面层状结构低频介电增强特性

张 勇,刘 策,郭 晨,贺之莉,靳 钊,李 婷,秦鸿瑜

(长安大学 信息工程学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为减小因介电增强特性带来的路面检测误差,借助模拟路面层状结构的“双电层”模型,对路面层状结构的介电增强特性进行分析。通过 Debye 模型推导双电层模型介电常数计算公式,采用有限差分算法对模拟路面层状结构的双电层模型建模仿真;根据仿真结果,讨论了路面层状结构中电性参数对介电增强的影响,并基于电容器原理,设计了一款平行板电容器,在低频段对不同膜层的双电层模型进行测量。研究结果表明:双电层模拟的路面层状结构在低频段存在介电增强,其主要受界面层的电导率、厚度等参数影响;面层和基层材料的电性参数只影响路面层状结构的弛豫频率和时间,不影响介电增强;采用增大界面层电导率,限定界面层厚度的方法能减小路面检测中因界面层中各参数差异产生的介电增强,提高测量精度。

关键词:道路工程;层状结构;介电增强;平行板电容;双电层;路面

中图分类号:U416.06

文献标志码:A

Dielectric enhancement of layered pavement at low frequencies

ZHANG Yong, LIU Ce, GUO Chen, HE Zhi-li, JIN Zhao, LI Ting, QIN Hong-yu

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To reduce the pavement measurement error caused by dielectric enhancement, dielectric enhancement of layered pavement was analyzed with electric double layer (EDL) model. Firstly, the dielectric constant formula of EDL was derived from Debye model. Secondly, EDL model about layered pavement was established and simulated by FDM software. The influence of EDL parameters on dielectric enhancement was discussed. Finally, a parallel plate capacitor was designed, and used to measure EDL admittance with different membranes at low frequencies. The results show that the layered pavement simulated by EDL has dielectric enhancement at low frequencies, which is affected by the conductivity and thickness of pavement interface. The electrical parameters on surface and base pavement only affect relaxation frequency and time, but have no effect on amplitude of dielectric enhancement. Increasing conductivity and limiting thickness of the interface layer can reduce dielectric enhancement of layered pavement in pavement detection so as to improve measurement accuracy. 1 tab, 10 figs, 13 refs.

Key words: road engineering; layered structure; dielectric enhancement; parallel plate capacitor; electric double layer; pavement

收稿日期:2013-08-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51277012,61201233);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011ZD004,CHD2011JC049,2013G1241120,2013G1241107)

作者简介:张 勇(1980-),男,陕西西安人,工学博士研究生,E-mail:helloaword@126.com。

0 引言

路面由各铺砌层组成,包括沥青面层、混凝土基层、砂砾垫层等^[1]。其中对面层和基层的施工检测包括含水量、压实度、平整度、回弹模量、抗滑性能、结构层厚度等方面^[2]。微波检测技术是近几年新兴的路面检测技术,通过测量路面层状混合介质等效电学参数求得路面结构相关技术指标。目前,国内外微波路面检测技术主要有探地雷达法、电极探针法、同轴探针法^[3-4]。

在外电场作用下,电参数不同的层状介质界面会出现电荷积累效应,即界面极化,国外学者称 Wagner 效应^[5-6]。而 Wagner 效应是引起介质介电增强的主要原因^[7]。最近研究发现,Wagner 效应与层状介质内部传导电流和位移电流分布有关^[8]。前者为带电粒子(电子、离子等)穿过物质孔隙通道定向运动的转向极化引起,后者为偶极子在界面处定向排列的界面极化引起。低频段层状介质内部传导电流强度减弱,主要以位移电流为主,而位移电流引起界面极化,因此在低频段路面层状结构容易引起介电增强。为此,本文采用双电层模型模拟路面层状结构,对模型进行公式解析和仿真建模,对影响路面层状结构介电增强特性的因素进行讨论。

1 双电层模型

模拟路面层状结构采用双电层(EDL)结构来描述路面介电增强现象。从电学特性分析,双电层结构与路面层状结构相同,上下层为介质层,中间为薄膜层。当外加电场时,中间薄膜层阻碍了介质层传导电流形成,带电粒子在介质与膜表面聚集,发生界面极化,产生位移电流,使双电层模型产生介电增强,这种产生机理与路面层状结构相同。

1.1 双电层模型等效电路

EDL 模型集总参数电路如图 1(a)所示, C_1 、 G_1 为绝缘层电容、电导; C_2 、 G_2 为介质层电容、电导。介质层电学参数相同,电路可等效为图 1(b)^[9]。

$$Y_1 = G_1 + j\omega C_1 \quad (1)$$

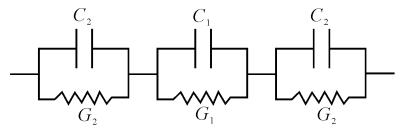
$$Y_2 = G_2 + j\omega C_2 \quad (2)$$

$$Y_{\text{total}} = L + j\omega N \quad (3)$$

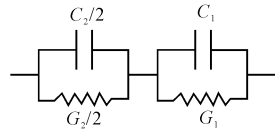
式中: Y_1 为绝缘层导纳; Y_2 为介质层导纳; Y_{total} 为电路总导纳; L 、 N 分别为 Y_{total} 电路总导纳实部和虚部; ω 为角频率; $j^2 = -1$ 。

在双电层集总参数电路中

$$Y_{\text{total}} = \frac{Y_1 Y_2}{Y_1 + Y_2} \quad (4)$$



(a) 双电层模型集总参数电路



(b) 双电层模型简化电路

图 1 双电层模型等效电路

Fig. 1 EDL model equivalent circuit

令 $\frac{G_2}{2} = G_n$, $\frac{C_2}{2} = C_n$, 将式(1)、式(2)代入式(3)、

式(4)可得

$$L = \frac{\omega^2 (C_1^2 G_n + C_n^2 G_1) + G_1 G_n (G_1 + G_n)}{(G_1 + G_n)^2 + \omega^2 (C_1 + C_n)^2} \quad (5)$$

$$N = \frac{\omega^2 (C_1 + C_n) C_1 C_n + G_1 G_n^2 + C_n G_1^2}{(G_1 + G_n)^2 + \omega^2 (C_1 + C_n)^2} \quad (6)$$

1.2 德拜模型

德拜模型用来描述界面极化产生的介电增强^[10],等效电路如图 2 所示,等效电容、导纳见式(7)~式(9)。

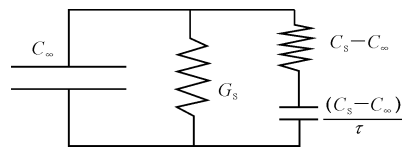


图 2 德拜模型等效电路

Fig. 2 Debye model equivalent circuit

$$C_{\text{total}}^* = C_{\infty} + \frac{C_s - C_{\infty}}{1 + j\sigma\tau} - j \frac{G_s}{\omega} \quad (7)$$

$$Y_{\text{total}} = j\omega C_{\text{total}}^* \quad (8)$$

$$Y_{\text{total}}^* = K + j\omega X = j\omega \left[\frac{C_s + \omega^2 (C_{\infty} \tau^2)}{1 + (\omega\tau^2)} \right] + G_s + \frac{\omega^2 \tau (C_s - C_{\infty})}{1 + (\omega\tau^2)} \quad (9)$$

式中: C_{total}^* 为 Debye 模型复电容; Y_{total}^* 为 Debye 模型复导纳; C_s 为静态电容; C_{∞} 为高频电容; G_s 为静态电导; τ 为弛豫分布时间参数。

联立 EDL 等效电路与 Debye 模型,通过建立式(3)和式(9)中的实部、虚部相等,即 $K=L$ 且 $X=N$ 得

$$\tau = \epsilon_0 \frac{\epsilon_{r1} d_n V + \epsilon_{rn} d_1}{\sigma_1 d_n + \sigma_n d_1} \quad (10)$$

$$\epsilon_{\infty} = d_{\text{total}} \frac{\epsilon_{r1} \epsilon_{rn}}{\epsilon_{r1} d_n + \epsilon_{rn} d_1} \quad (11)$$

$$\epsilon_s = d_{\text{total}} \frac{\epsilon_{r1} d_1 \sigma_n^2 + \epsilon_{rn} d_n \sigma_1^2}{(\sigma_1 d_n + \sigma_n d_1)^2} \quad (12)$$

$$\sigma_s = d_{\text{total}} \frac{\sigma_1 \sigma_n}{\sigma_1 d_n + \sigma_n d_1} \quad (13)$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_{r1} 为绝缘层等效介电常数; d_n 为介质层厚度; ϵ_{rn} 为介质层等效介电常数; d_1 为绝缘层等效厚度; σ_n 为介质层等效电导率; ϵ_∞ 为高频介电常数; d_{total} 为介电体厚度; ϵ_s 为静态介电常数; σ_s 为静态电导率; σ_1 为绝缘层等效电导率; $\epsilon_{r1} = \epsilon_m$; $\sigma_1 = \sigma_m$; $d_1 = d_m$; $\epsilon_{rn} = \frac{\epsilon_{r2}}{2}$; $\sigma_n = \frac{\sigma_2}{2}$ 。

模型的电容 C_k 、电感 G_k 可表示为^[11]

$$C_k = \epsilon_0 \frac{\epsilon_{rk} A_k}{d_k} \quad (14)$$

$$G_k = \sigma_k \frac{A_k}{d_k} \quad (15)$$

联立式(10)~式(15),可得

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\Delta\epsilon}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (16)$$

$$\epsilon_\infty = \frac{d_{\text{total}}}{d_m} \left[\frac{\epsilon_m \epsilon_{r2}}{\epsilon_m (d_{\text{total}}/d_m) - \epsilon_m + \epsilon_{r2}} \right] \quad (17)$$

$$\epsilon_\infty = \frac{d_{\text{total}}}{d_m} \left[\frac{\epsilon_m (\sigma)^2 - \epsilon_m^2 \epsilon_{r2} + (d_{\text{total}}/d_m) \sigma_m^2 (\epsilon_{r2})}{(\sigma_m (d_{\text{total}}/d_m) - \sigma_m + \sigma_2)^2} \right] \quad (18)$$

$$\tau = \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_m (d_{\text{total}}/d_m) - \epsilon_m + \epsilon_{r2}}{\sigma_m (d_{\text{total}}/d_m) - \sigma_m + \sigma_2} \right) \quad (19)$$

式中: ϵ_{rk} 为模型相对介电常数; A_k 为模型横截面积; d_k 为模型厚度; ϵ' 为德拜模型相对介电常数; $d_{\text{total}} = 2d_2 + d_m$, $\sigma_m \approx 0$, $\frac{d_{\text{total}}}{d_m} = \infty$ 。

代入式(16)~式(19),得

$$\epsilon_s = \epsilon_m \frac{d_{\text{total}}}{d_m} \quad (20)$$

$$\epsilon_\infty = \epsilon_{r2} \quad (21)$$

$$\Delta\epsilon = \epsilon_s - \epsilon_\infty = \epsilon_m \frac{d_{\text{total}}}{d_m} - \epsilon_{r2} \quad (22)$$

$$\tau = \epsilon_0 \left[\frac{\epsilon_m (d_{\text{total}}/d_m) - \epsilon_m + \epsilon_{r2}}{\sigma_2} \right] \quad (23)$$

因为在低频段测量,频率 $\omega\tau \approx 0$,则

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \Delta\epsilon = \epsilon_s = \epsilon_m \frac{d_{\text{total}}}{d_m} \quad (24)$$

2 路面层状结构

路面层状结构包括沥青面层、混凝土基层,如图3所示。面层与基层间为界面层。双电层结构是一种介电特性更为理想的层状结构模型,代替路面层状结构能更好地研究路面层状结构介电增强特性。

2.1 路面层状结构建模

路面层状结构可采用介电特性等效的 EDL 结构建模,EDL 由上下介质层和绝缘薄膜层构成。上

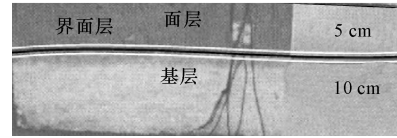


图3 路面层状结构模型

Fig. 3 Layered pavement model

下介质层相当于路面层的沥青面层、混凝土基层。因沥青面层、混凝土基层的介电常数、电导率相差不多,且对研究介电增强现象影响不大,上下介质层可取相同介电参数,且厚度差异可忽略。EDL 的薄膜层相当于路面界面层。薄膜层电导率极小(或为绝缘层),这样可以完全阻断传导电流,使自由电荷完全在薄膜表面聚集,产生更强界面极化,有利于介电增强产生。

路面层状结构中沥青面层、混凝土基层介电常数一般小于 10^2 量级,电导率大于 10^{-4} 量级。界面层为空气界面(或导电率较小介质),介电常数一般为 $1 \sim 10^2$ 量级,电导率通常小于 10^{-4} 量级。界面层厚度一般大于 10^{-7} 量级。EDL 结构参数设置需根据路面层状结构实际参数取值。

采用有限差分(finite difference method, FDM)方法电磁软件建模。设置介质层电导率和介电常数,上下极板面为导体电边界,采用同轴线馈电,同轴线端口为激励端,模型边界为集总 RLC 边界。EDL 模型如图4所示,采用网格长度小于 $\lambda_0/3$ 波长自适应网格剖分。对于薄膜结构,因膜厚度远远小于初始网格尺寸,采用手动网格剖分,调整迭代误差,使膜局部网格加密提高精确度。

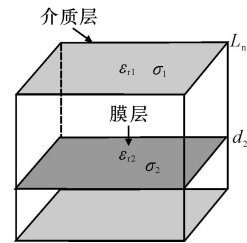


图4 双电层膜结构

Fig. 4 EDL model with membrane

2.2 路面层状结构仿真

路面层状结构介电特性分析从传导电流与位移电流入手,面层总电流密度 j_z 为

$$j_z = j_c + j_d = (\sigma + j\omega\epsilon_r) E \quad (25)$$

式中: j_c 为传导电流; j_d 为位移电流; ϵ_r 为相对介电常数; E 为电场强度。

因界面层电导率很小,阻断了路面面层与基层间传导电流 j_c ,只有位移电流 j_d 在界面产生界面极化。针对路面介电增强与界面层位移电流有关这一

特点,采用 EDL 模型仿真。主要对薄膜层电导率、薄膜层厚度、介质层电导率进行分析,讨论各参数与介电常数、弛豫频率的关系。

2.2.1 界面层电导率对介电常数和频率的影响

EDL 的薄膜层相当于路面结构中的界面层。界面层绝缘性可通过薄膜层电导率大小模拟。薄膜层电导率大小反映其阻断介质层传导电流的能力,即路面中界面层的绝缘程度。绝缘程度越高,在界面层聚集自由电荷越多,产生界面极化越强。

EDL 参数设置:介质层电导率 $\sigma_1 = 0.01 \text{ S/m}$,介电常数 $\epsilon_1 = 3.0$,介质层厚度 $L_n = 10 \text{ cm}$,薄膜层介电常数 $\epsilon_2 = \epsilon_m = 5.0$,电导率 $\sigma_2 = \sigma_m$ 为可变参数,薄膜层厚度 $d_2 = d_m = 0.5 \text{ mm}$,求解会继续到自适应网格剖分频率,扫频设置 $100 \text{ Hz} \sim 100 \text{ MHz}$ 快速扫描。仿真得到的 EDL 等效介电常数与弛豫频率如图 5 所示^[12]。

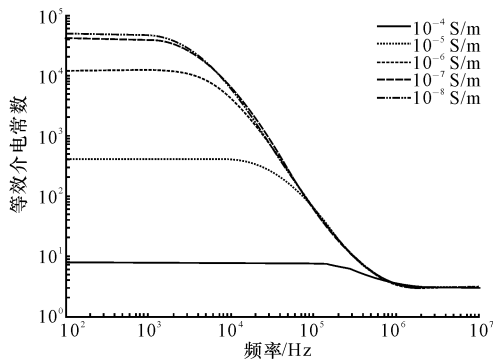


图 5 不同膜电导率下等效介电常数与弛豫频率的关系

Fig. 5 Relationship of dielectric constant and relaxation frequency with different membrane conductivities

从图 5 可以看出,随弛豫频率从 10^4 Hz 增加到 10^6 Hz ,介电常数从 10^4 减小到 10^1 ,膜电导率从 10^{-8} 增加到 10^{-4} ,介电增强从 10^4 减小为 10^1 。由此说明,路面层状结构中界面层导电性能对路面层状结构介电增强幅值和弛豫频率有影响。

2.2.2 界面层厚度对介电常数和频率的影响

EDL 的薄膜层厚度相当于路面结构中界面层厚度。界面层厚度对路面介电增强影响可通过薄膜层厚度模拟。薄膜层厚度对膜层导电性能(绝缘度)有影响。因此,产生传导电流和位移电流强度不同,对界面极化、介电增强均有影响。

EDL 参数设置:其中介质层介电常数 $\epsilon_1 = 3.0$,电导率 $\sigma_1 = 0.01 \text{ S/m}$,介质层厚度 $L_n = 5 \text{ cm}$,薄膜层介电常数 $\epsilon_2 = \epsilon_m = 5.0$,电导率 $\sigma_1 = \sigma_m = 10^{-7} \text{ S/m}$,薄膜层厚度 $d_2 = d_m$ 为可变参数,在 $100 \text{ Hz} \sim 100 \text{ MHz}$ 扫频,仿真结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,介电常数和弛豫频率都与薄膜厚

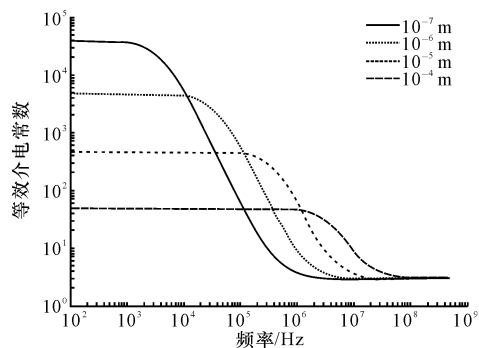


图 6 不同膜厚度下等效介电常数与弛豫频率的关系

Fig. 6 Relationship of dielectric constant and relaxation frequency with different membrane thicknesses

度有关。随弛豫频率在扫频范围内变化,介电常数从 10^4 减小到 10^1 。随着膜厚度从 10^{-7} m 增加到 10^{-4} m ,介电常数增强从 10^4 减小到 10^1 。由此说明,路面层状结构中界面层厚度越小,介电增强越明显。但当薄膜厚度小于 10^{-7} m ,此时薄膜不能完全阻断传导电流,位移电流减小而传导电流增加,路面介电增强趋于稳定。

2.2.3 面层、基层电导率对介电常数和频率的影响

EDL 模型的介质层可等效为路面结构中的面层、基层。面层和基层电导率对介电增强影响可通过介质层电导率变化模拟。介质层介电常数 $\epsilon_1 = 3.0$,电导率 σ_1 为可变参数,厚度 $L_n = 10 \text{ cm}$,薄膜层介电常数 $\epsilon_2 = \epsilon_m = 5.0$,电导率 $\sigma_1 = \sigma_m = 10^{-7} \text{ S/m}$,厚度 $d_2 = d_m = 0.2 \text{ mm}$,在 $100 \text{ Hz} \sim 1 \text{ GHz}$ 扫频,仿真结果如图 7 所示。

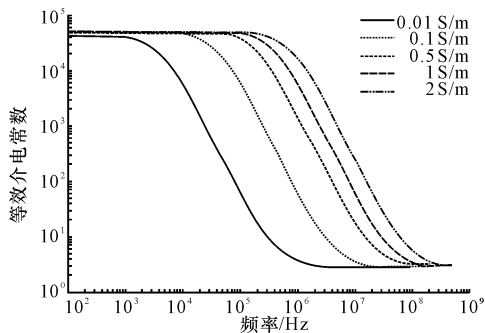


图 7 不同介质层电导率下等效介电常数与弛豫频率的关系

Fig. 7 Relationship of dielectric constant and relaxation frequency with different dielectric layer conductivities

从图 7 可以看出,在扫频频段范围内,介电常数从 10^4 减小为 10^1 。介质层电导率从 10^{-2} 增至 10^1 ,介电增强保持不变。由此说明,路面结构中面层、基层电导率变化只影响弛豫频率,对介电增强幅值无影响,即路面面层、基层不同材料不影响路面介电增强大小。

3 平行板电容器

将 EDL 模型放入两平行极板间,构成等效电

容,通过测量两极板间导纳求解 EDL 模型等效导纳,进而求得 EDL 电导率和介电常数。

测量导纳 Y_m 为同轴线端面,待测样品导纳 Y_l ,由于平行极板产生边缘效应,采用集总参数 π 网络校准测量导纳 Y_m 与样品导纳 Y_l 之间差值,如式 (26),等效电路如图 8 所示^[13]。

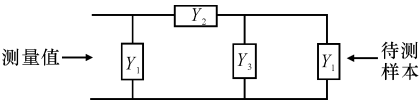


图 8 平行板电容器 π 型网络集总参数电路

Fig. 8 π network lumped circuit of parallel plate capacitor

$$Y_m=Y_1+\frac{Y_1+Y_3}{Y_2}=Y_1+\frac{Y_2Y_3+Y_2Y_1}{Y_2+Y_3+Y_1} \quad (26)$$

式中: Y_1 、 Y_2 、 Y_3 为 π 网络待定参数,采用校准件方法求解待定参数。

校准件为空气、红铜和有机玻璃,分别对校准件测量,得到测量导纳可表示为

$$Y_{ma}=Y_1+\frac{Y_2Y_3+Y_2Y_a}{Y_2+Y_3+Y_a} \quad (27)$$

$$Y_{mb}=Y_1+Y_2 \quad (28)$$

$$Y_{mp}=Y_1+\frac{Y_2Y_3+Y_2Y_p}{Y_2+Y_3+Y_p} \quad (29)$$

式中: Y_{ma} 为空气测量导纳; Y_{mb} 为黄铜测量导纳; Y_{mp} 为玻璃测量导纳; Y_a 为空气标准导纳; Y_p 为玻璃标准导纳。

Y_1 、 Y_2 、 Y_3 可由式 (27)~(29) 推导为

$$Y_2=\left[\frac{Y_{mp}-Y_{ma}}{Y_p-Y_a}(Y_{23}+Y_p)(Y_{23}+Y_a)\right]^{1/2} \quad (30)$$

$$Y_3=Y_{23}-Y_2 \quad (31)$$

$$Y_1=Y_{mb}-Y_2 \quad (32)$$

式中: $Y_{23}=\frac{Y_a(Y_{ma}-Y_{mb})-Y_p(Y_{mp}-Y_{mb})}{Y_{mp}-Y_{ma}}$; Y_{ma} 、

Y_{mb} 、 Y_{mp} 为测量值。

根据上式可以求出 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 , 根据待定参数 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 可推导出平行板电容器测量值与待测样本关系。

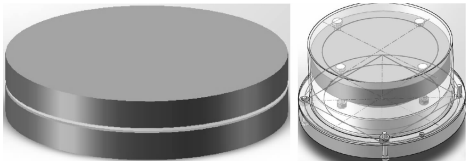
$$Y_{mu}=Y_1+\frac{Y_2Y_3+Y_2Y_{lu}}{Y_2+Y_3+Y_{lu}} \quad (33)$$

式中: Y_{lu} 为样本导纳; Y_{mu} 为测量导纳。

4 试验测量分析

为增强试验效果,测量双电层模型时,采用金属红铜板为上下介质层,这样可以获得更多自由电荷,增加界面极化和介电增强效果。双电层模型如图 9(a) 所示,铜板介电常数 $\epsilon_1=1$ F/m,电导率 $\sigma_1=5.96\times10^7$ S/m,铜板间为绝缘薄膜,

薄膜介电常数 $\epsilon_2=5.0$,电导率 $\sigma_2=10^{-6}$ S/m,厚度 $d_2=10^{-7}$ m。图 9(b) 为测量平行板电容器。



(a) 双电层模型 (b) 平行板电容器

图 9 双电层试验测量装置

Fig. 9 EDL measuring device

通过分析仪测量双电层导纳,将导纳参数转为电导率和介电常数。试验采用不同薄膜层电导率 σ_2 对双电层进行测量,膜厚度均为 0.5 mm,测量频率范围 10 kHz~1.2 MHz,选 11 个频点进行测量,测量结果见表 1。

表 1 不同膜层双电层的介电常数

Tab. 1 Dielectric constants of EDL with different membranes

频率/kHz	不同薄膜电导率(S/m)下的介电常数		
	$\sigma_2=0.01$	$\sigma_2=0.05$	$\sigma_2=0.5$
10	15.711 3	4.212 7	1.020 0
100	13.711 2	4.101 1	1.019 4
200	11.824 1	4.001 2	1.015 6
300	10.221 0	3.902 1	1.013 2
400	8.170 2	3.803 2	1.009 8
500	7.631 3	3.703 9	1.007 5
600	6.411 3	3.604 5	1.005 3
700	5.712 2	3.505 0	1.002 1
800	4.719 8	3.405 3	1.001 6
1 000	3.165 4	3.305 8	1.001 2
1 200	2.653 1	3.206 0	1.000 8

通过曲线拟合如图 10 所示,拟合方程为

$$y=a+(b-a)\frac{x^n}{k^n+x^n} \quad (34)$$

式中:纵轴 y 为双电层相对介电常数 ϵ_r ;横轴 x 为测量频率 f ;待定系数 $k=843.67$; $n=31.44$, $a=508.50$, $b=1.85$;判定系数 $R^2=0.995$ 。

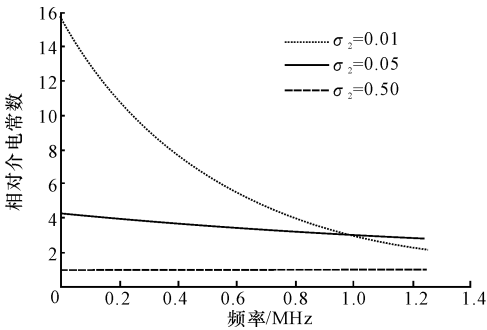


图 10 试验测量拟合

Fig. 10 Measurement data fitting

试验表明,薄膜导电性与介电增强有关,当薄膜层导电率小,可认为近似绝缘,介质层间传导电流被阻断,自由电荷聚集在膜表面,介电增强越大。随薄膜电导率增加,薄膜不能完全阻断传导电流,甚至导通作用,自由电荷无法在膜内聚集,介电增强减弱或消失。

5 结 语

(1)利用双电层模型与路面层状结构介电特性相似处,对双电层结构等效电路分析,找出求解双电层模型介电参数的理论依据。

(2)通过有限差分方法建模仿真,分析双电层模型参数对介电增强的影响。借助双电层模拟路面层状结构,指出路面中界面层导电性能是影响路面层状结构介电增强的主要因素。

(3)设计一款平行板电容器,对不同电导率薄膜双导体模型进行测量。试验证实薄膜导电性能对双导体模型介电增强特性有影响。

(4)路面层状结构介电增强主要与界面层导电性能(电导率、厚度)有关。本文的试验环境为室温常压,没有考虑温度和压力对路面层状结构介电增强的影响。此外,对主要影响介电增强的薄膜结构,仅从导电性不同进行研究,没有从微观结构上分类研究。今后研究方向上将考虑温度、压力对路面介电增强的影响,并进一步细化薄膜微观结构对界面极化的作用。

参考文献:

References:

- [1] 梁 旭,于 伟.刚性路面柔性联接层有限元分析[J].长安大学学报:自然科学版,2013,33(3):1-6.
LIANG Xu,YU Wei. Finite element analysis of rigid pavement flexible context layer[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(3): 1-6. (in Chinese)
- [2] 石 刚,田养军,王亚琼,等.基于模糊分形脉冲反褶积的探地雷达信号处理[J].长安大学学报:自然科学版,2012,32(5):79-84.
SHI Gang, TIAN Yang-jun, WANG Ya-qiong, et al. Signal processing of ground-penetrating radar on the principle of deconvolution based on fuzzy fractal pulse [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(5): 79-84. (in Chinese)
- [3] Fang H Y, Lin G, Zhang R L. The first-order symplectic euler method for simulation of GPR wave propagation in pavement structure [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(1): 93-98.
- [4] Huang L S, Kang Y M. Nondestructive evaluation of thickness and bearing capacity of roadway pavement structure [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2010, 3(6): 326-335.
- [5] Nisanci M H, De P F, Koledintseva M Y, et al. From Maxwell Garnett to Debye model for electromagnetic simulation of composite dielectrics-part II: random cylindrical inclusions [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(2): 280-289.
- [6] Campbell N, Look B, Nata A A. An investigation into the effect of salt water on the geotechnical properties of a residual clay [J]. Australian Geomechanics Journal, 2009, 44(1): 19-28.
- [7] Jinesh K B, Lamy Y, Klootwijk J H. Maxwell-Wagner instability in bilayer dielectric stacks [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(12): 36-40.
- [8] 梁端虹,董显林,陈 莹,等.直流偏置电场下 BaTiO₃基陶瓷介电常数非线性机理的研究[J].物理学报, 2005, 54(10): 4914-4919.
LIANG Duan-hong, DONG Xian-lin, CHEN Ying, et al. Mechanism of nonlinear dielectric constant of BaTiO₃-based ceramics under high DC electric field [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(10): 4914-4919. (in Chinese)
- [9] Rai P, Pandey S, Menemparabath M, et al. Enhancement of electric double layer capacitance of carbon nanotubes by gallium ion irradiation [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(4): 91-94.
- [10] Phager A, Gustafsson M, Nordebo S. Image reconstruction in microwave tomography using a dielectric Debye model [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2012, 59(1): 156-166.
- [11] Lazebnik M, Okoniewski M, Booske J H, et al. Highly accurate Debye models for normal and malignant breast tissue dielectric properties at microwave frequencies [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2007, 17(12): 822-824.
- [12] 张克生,王 殊,朱 明,等.混合气体声复合弛豫频谱的解析模型[J].物理学报,2012,61(17):1-11.
ZHANG Ke-sheng, WANG Shu, ZHU Ming, et al. Analytical model for acoustic multi-relaxation spectrum in gas mixtures [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(17): 1-11. (in Chinese)
- [13] 董政洁,刘桂礼,王艳林,等.基于 S 参数传输法的石英晶体静电容测量[J].仪器仪表学报,2011,32(4): 892-897.
DONG Zheng-jie, LIU Gui-li, WANG Yan-lin, et al. Quartz crystal static capacitance measurement based on S parameter transmission method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 892-897. (in Chinese)

