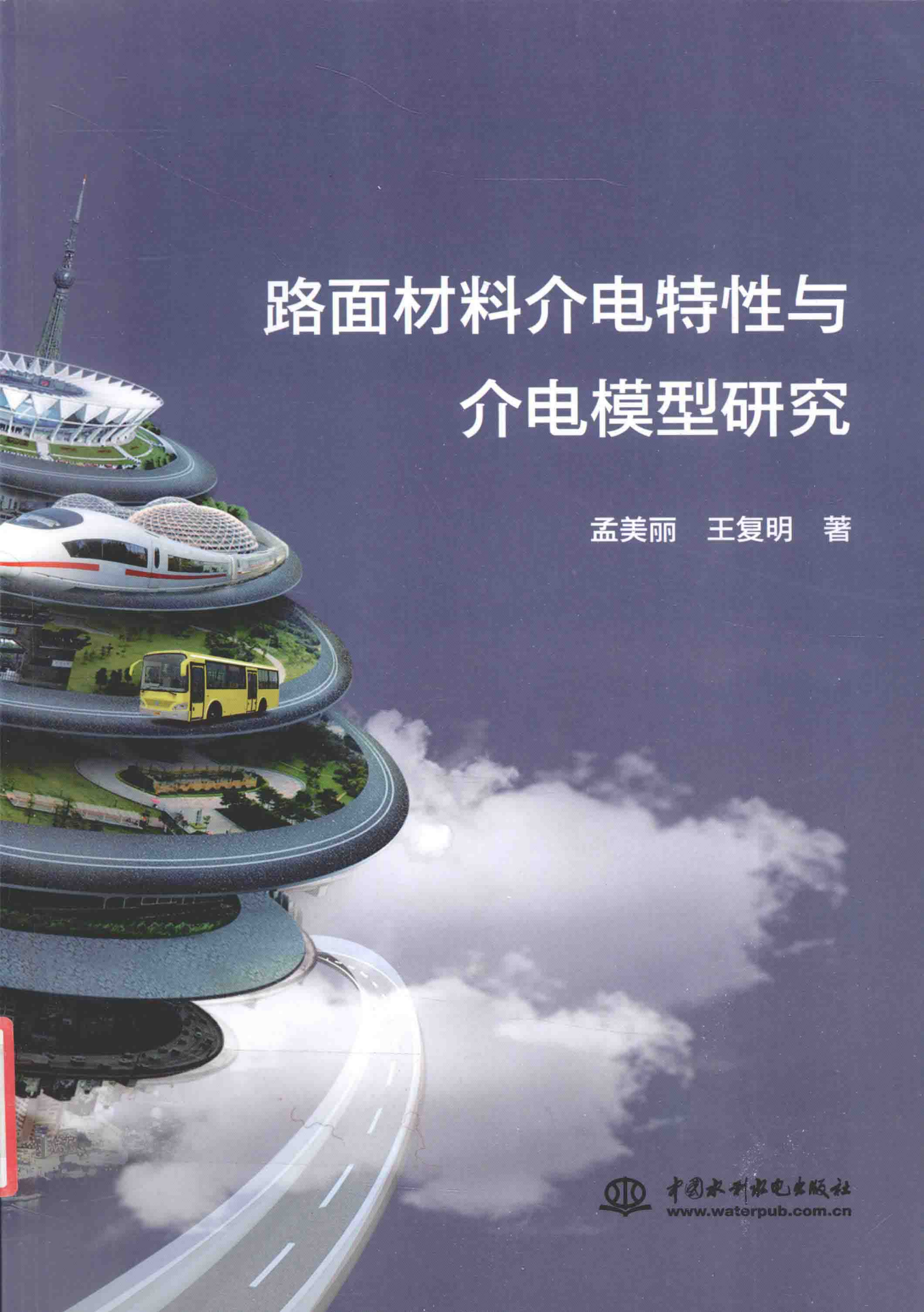




路面材料介电特性与 介电模型研究

孟美丽 王复明 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

路面材料介电特性与 介电模型研究

孟美丽 王复明 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书在电磁波基本理论的基础上,根据水泥混凝土和沥青混合料各自的结构特点,采用理论和试验相结合的方法,分析其介电性能和影响因素,探讨温度和测试频率对水泥混凝土和沥青混合料介电特性的影响规律,建立考虑频率、温度的水泥混凝土和沥青混合料综合介电模型。基于此关系模型,提出了水泥混凝土和沥青混合料成分体积率的计算方法,对实际工程路面进行了相关质检指标检测的实证研究。

本书是一部研究水泥混凝土和沥青混合料介电特性和介电模型的专著,具有较强的科学性、知识性、方法性,可供道路工程、土木工程、水利工程等专业的科研单位、高等院校及生产、管理和决策部门使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

路面材料介电特性与介电模型研究 / 孟美丽, 王复明著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2016.7
ISBN 978-7-5170-4692-9

I. ①路… II. ①孟… ②王… III. ①路面材料—介电性质—研究 IV. ①U414

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第211326号

书 名	路面材料介电特性与介电模型研究 LUMIAN CAILIAO JIEDIAN TEXING YU JIEDIAN MOXING YANJIU
作 者	孟美丽 王复明 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.5印张 157千字
版 次	2016年7月第1版 2016年7月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	32.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

路面材料如沥青混合料、水泥混凝土均是由几种不同材料组成的复合材料，复合材料介电常数与其组成成分介电常数及体积率有关，也与电磁波频率、环境温度等因素有关。通常将描述复合材料介电常数与其成分介电常数及体积率、频率和温度等参数之间的函数关系式，称为介电模型。若能建立复合材料介电模型，根据电磁无损检测技术测试的介电常数可计算各成分的体积率，实现沥青混合料空隙率、沥青含量、压实度和水泥混凝土配比、含水量等质量指标的检测。因此，水泥混凝土和沥青混合料介电模型的建立是应用电磁波技术进行路面材料质量检测的前提和基础。

国内外学者曾对不同复合材料的介电特性进行研究，建立了多种介电模型，但针对水泥混凝土和沥青混合料的研究较少，且大多介电模型没有考虑温度和频率的影响，这样会造成不同频率测试仪器在不同时间、不同温度条件下测出的数据不能共享和对比。针对上述问题，本书在电磁波理论的基础上，根据各自的结构特点，采用理论和试验相结合的方法，分析了两种路面材料介电特性和主要影响因素，建立了考虑频率、温度的综合介电模型，并应用于工程实践。

本书共6章。第1章为绪论，叙述研究背景、研究现状和研究内容；第2章为复合材料介电特性基本理论，主要介绍复合材料极化机制、复合材料介电模型、影响介电特性的主要因素和频域内测量介电常数的方法和仪器设备；第3章为水泥混凝土介电特性分析和介电模型研究，从理论上进行了介电模型的推导，应用矢量网络分析仪搭载同轴探头进行介电特性试验，依据试验成果建立考虑频率、温度综合介电模型；第4章为沥青混合料介电特性分析和介电模型研究，主要包括理论模型的建立，频率和温度影响规律的分析，依据试验规律建立了考虑频率、温度的综合介电模型；第5章为综合介电模型的工程应用，在介电模型基础上，建立了质检指标的计算方法，分别进行了水泥混凝土结构层厚度、含水量的计算，以及沥青混合料含水量和各成分体积率的计算；第6章为结论与展望。

有关院校和科研机构的专家对本书提出了宝贵意见，在此向他们以及本书所引用参考文献的作者表示衷心的感谢。本书的研究工作得到了高等学校博士学科点专项科研基金课题“复合材料介电常数模型研究”（项目号：20114101110002）的资助，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

作者

2016年3月

前言

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	5
1.3 研究内容	9
2 复合材料介电特性基本理论	11
2.1 复合材料极化和介电常数	11
2.2 复合材料介电模型	19
2.3 影响介电常数的因素	22
2.4 网络分析仪测量介电常数的方法	30
2.5 本章小结	39
3 水泥混凝土介电特性和介电模型研究	40
3.1 概述	40
3.2 水泥混凝土介电模型的理论推导	41
3.3 温度对介电常数的影响	43
3.4 频率对介电常数的影响	47
3.5 综合考虑温度、频率介电模型的建立	49
3.6 水泥混凝土介电特性试验成果分析	50
3.7 水泥混凝土介电模型的验证	64
3.8 本章小结	69
4 沥青混合料介电特性和介电模型研究	71
4.1 概述	71

4.2	沥青混合料介电模型的理论推导	74
4.3	组成成分体积率对介电常数的影响	75
4.4	温度对介电常数的影响	82
4.5	频率对介电常数的影响	86
4.6	综合考虑温度、频率介电模型的建立	90
4.7	沥青混合料介电模型的验证	92
4.8	本章小结	102
5	综合介电模型的工程应用	103
5.1	介电模型应用的基本理论	103
5.2	水泥混凝土介电模型的工程应用	104
5.3	沥青混合料介电模型的工程应用	113
5.4	本章小结	122
6	结论与展望	123
6.1	结论	123
6.2	展望	124
	参考文献	125

1 绪论

1.1 研究背景

路面是汽车车辆荷载的直接受载体,其质量好坏影响着路面的使用性能、服务水平和使用寿命等方面。近年来,随着交通量的猛增和重车比例的增加,路面出现过早破坏的工程实例屡见不鲜,通车不久之后产生裂缝、发生沉陷等破坏情况,影响了交通的舒适性和耐久性。分析其过早破坏的根由,大都与设计不合理、材料配比不科学、施工质量不合格等因素有关^[1],且主要是由于施工质量不合格所致。这主要是因为:当人们发现路面结构设计和材料配比有问题时,产、学、研等相关部门会投入大量的人力物力进行研究分析,并相继将研究成果应用于工程实践中加以改善,使得因设计不合理、材料配比不科学导致的工程问题大量减少,往往受很多随机不确定因素的影响,而对施工过程管理和施工质量缺乏深入系统的研究。这样一来,即使路面设计合理、混凝土配比科学,若没有良好的施工,也难以达到预期目标。就沥青混合料而言,其压实度、空隙率、沥青含量等技术指标难以达到规范要求;就水泥混凝土路面而言,材料配比、结构层厚度和强度以及含水量等技术指标难以满足规范要求,从而影响路面的正常使用。比如,若沥青混合料的压实度不够,空隙率相应增加,水和空气很容易在面层内积聚,在车辆荷载作用下会产生孔隙水压力,导致骨料之间开裂,尤其在冻融循环作用的条件下会出现裂缝或沥青剥落。水和空气的入侵也会加快沥青氧化的速度,使材料变脆,强度降低,使用寿命缩短。若路面空隙率较大,在雨天路面排水不畅时,路面积水极易透过面层达到基层和路基,使基层和路基变软,当车辆通过时,面层会因刚度不足变形过大而产生破坏。此外,对柔性路面来说,除压实度和空隙率外,沥青含量也是影响路面面层性能的一项重要参数,其值过大或过小均会导致病害的过早出现,沥青含量过多,易出现车辙;过少,骨料不能很好地黏结在一起形成承重骨架。由此可见,沥青混合料压实度、空隙率、沥青含量和水泥混凝土路面材料配比、结构层厚度和强度以及含水量等是影响路面结构性能和使用性能的重要因素,实际施工中,应加强检测这些参数,做好施工质量控制,以确保路面具

有良好的施工品质，达到预期设计目标。

目前，对这些指标的检测手段主要依赖于传统的有损方法，例如，沥青路面压实度是指按规定方法钻孔取芯，所取芯样的实际密度与标准密度之比，以百分率表示。从定义可看出，压实度常用的测量方法是钻孔取芯法，先从已施工成型的面层中钻取芯样，再根据沥青混合料的类型，相应采用表干法、水中重法、蜡封法或体积法等方法测量实际路面的密度，最后与实验室内马歇尔试件标准密度进行对比，从而得到沥青路面的压实度。诸如钻孔取芯这样的传统检测方法大多具有测点少、代表性差、测量速度慢等缺点，与公路建设的快速发展不相适应^[2]。

近年来，基于电磁波传播原理的无损检测技术的使用很好地弥补了上述方法的缺陷，越来越多地应用在路面工程的质量检测中。电磁无损检测技术种类很多，具有代表性的有以下几种。

1. 探地雷达（Ground Penetrating Radar，简称 GPR）

探地雷达是基于电磁波传播原理进行探测的，工作原理如图 1.1 所示^[3,4]，由天线向待测介质中发射高频脉冲电磁波，在介质介电特性变化界面上，会发生反射，分析回波信号的相关信息（如时延、振幅及频谱特性等）来计算介质的介电常数，从而分析和推断目标体的性质、位置、结构及所处的状态等^[5]。

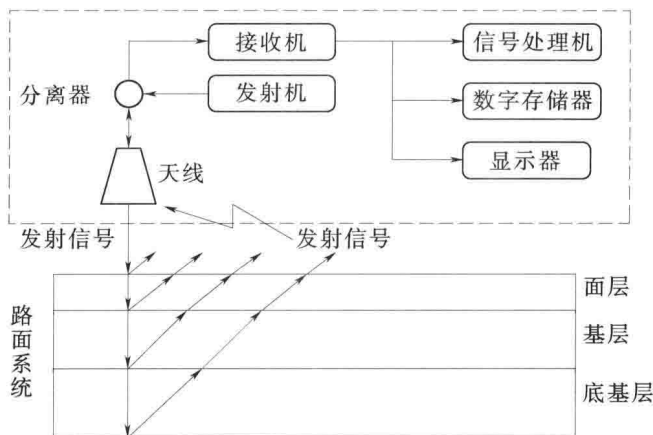


图 1.1 探地雷达系统（单基）

目前，探地雷达已成为地下浅层勘探的重要工具之一^[6]。在路面工程中，主要用于结构层厚度测量和刚性路面的脱空识别等，也曾尝试应用该技术进行沥青混合料压实度、空隙率等质检指标的无损检测^[7]，但测量效果不尽如人意，值得进一步深入研究和分析。

探地雷达所用电磁波频率需要根据探测深度的不同进行选择，探测深度越大，所选频率应越小，对于路面质量检测这样的浅层勘探，一般所用频率在

500MHz~2.5GHz 范围内。

2. 时域反射法 (Time Domain Reflectometry, 简称 TDR)

时域反射法是 20 世纪 60 年代末出现的确定介质介电行为的一种方法, 该方法是通过测量电磁波波速进而测定介质的介电特性, 具体如图 1.2 所示^[8]。电磁脉冲波由传输线 (Transmission Line) 传送出去, 进入同轴电缆及感测器中, 将待测材料作为感测器的介质, 利用反射信号测量材料的介电常数和电导率, 进而推估材料的基本物理性质, 如土壤含水量、密度、颗粒组成和种类等。

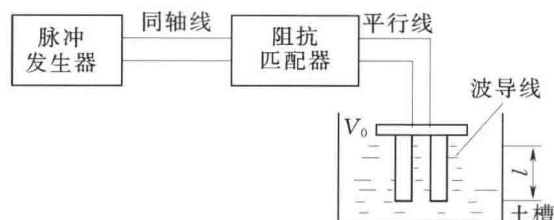


图 1.2 TDR 测试原理示意图

TDR 所用的频率范围从 1MHz 到几吉赫兹, 主要应用在遥感和大地工程领域土壤物理性质的测量。

3. 矢量网络分析仪法 (Vector Network Analyzer, 简称 VNA)

网络分析仪有两种类型: 矢量网络分析仪和标量网络分析仪两种。标量网络分析仪只能测量幅频特性, 不能测量电磁波的相位信息; 矢量网络分析仪不仅能测量电磁波的幅频信息还能测量相位信息, 因为测量信息较多, 在工程中应用较广。

矢量网络分析仪一般包括四部分: 信号源、信号分离器、接收机及信号处理和显示系统。信号源是用来提供入射信号的; 信号分离器是将入射波、反射波和传输信号分离开来; 接收机主要是接收信号; 信号处理和显示系统的功能是对接收的信号进行处理并显示。

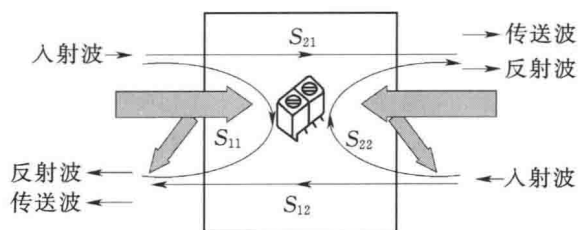


图 1.3 矢量网络分析仪的测试原理示意图^[9]

电常数、电导率等参数的计算^[9]。

矢量网络分析仪测量介电常数的方法很多^[10], 其中包括传输线技术 (Transmission Line)、共轴探头测量技术 (Coaxial Probe)、谐振腔技术 (Resonant Cavity)、自由空间技术 (Free Space)、开式谐振腔技术 (Open

矢量网络分析仪的工作原理如图 1.3 所示, 通过信号源向待测介质发射入射波, 入射波一部分碰到待测介质会反射回来, 另一部分继续以传输波的形式向前传播, 通过测量全部的 4 个 S 参数或部分 S 参数进行待测介质介

Resonator)、平行平板技术 (Parallel Plate) 等。不同测量技术所用的频率范围和对被测介质的介电损耗要求不同, 详见图 1.4; 各测量方法的比较见表 1.1。

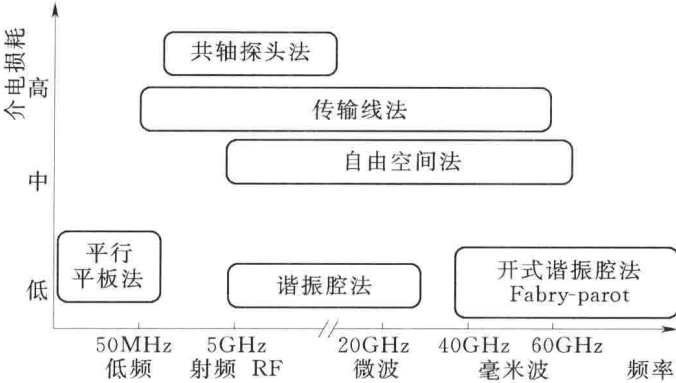


图 1.4 测量技术示意图^[10]

表 1.1 各测量方法比较^[10]

技术名称	准确性 (Typically Accurate)	样品描述	使用
平行平板	$LF\epsilon_r = \pm 1\%$, $\tan\delta = \pm 0.005$; $RF\epsilon_r = \pm 8\%$	平面, 光滑, 薄片	复杂
共轴探头	$\epsilon_r = \pm 5\%$, $\tan\delta = \pm 0.05$	液体, 有光滑表面固体, 非破坏性	简便
传输线	$\epsilon_r = \pm (1\% \sim 10\%)$	固体样品形状精确, 破坏性液体、气体要有一定容器	复杂
谐振腔	$\epsilon_r = \pm (0.25\% \sim 0.4\%)$, $\tan\delta = \pm 0.00002$	固体样品形状精确, 破坏性	复杂, 单一频率
自由空间	$\epsilon_r = \pm (1\% \sim 5\%)$, $\tan\delta = \pm 0.005$	断面面积大, 平行平面, 薄片, 非接触, 非破坏性, 适于高温测量	复杂

与其他测试方法相比, 终端开路同轴探头技术测量简便, 测试频率范围较广, 对待测介质试件的形状、尺寸等方面要求不多, 试件容易制作, 并且按照其他方面性能测试的要求来制作试件, 具有较强兼容性。

综合分析以上几种方法并结合学校实验室的具体条件, 本书采用 Agilent E5071C 矢量网络分析仪, 搭载终端开路同轴探头 (Open-Ended Coaxial Probe), 如图 1.5 所示, 联合相关软件进行混凝土介电常数测量, 该方法是利用网络分析仪产生的电磁波通过同轴线缆和探头传到试件内, 测量试件末端反射信号的相位和振幅, 进行散射参数的测量, 再利用相关软件由散射参数计算复介电常数的实部和虚部, 并作为最后的输出记录下来^[11]。

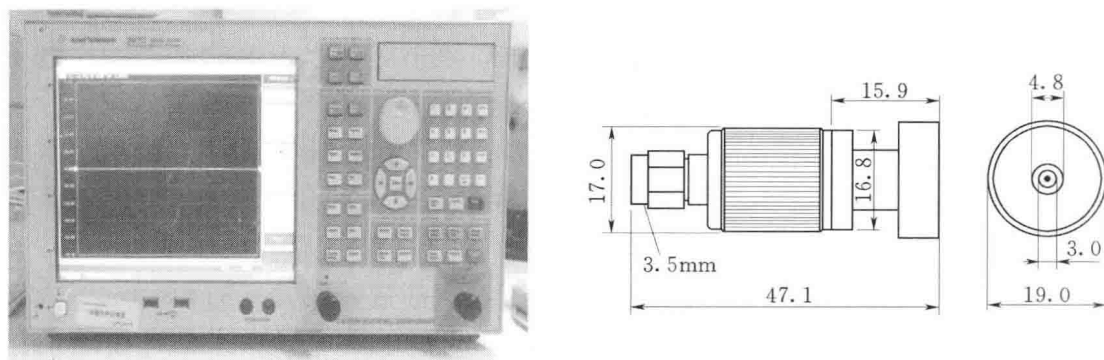


图 1.5 网络分析仪 (Agilent E5071C) 和终端开路同轴探头 (单位: mm)

当应用上述基于电磁波原理的无损检测技术对路面材料进行测试时, 从反射信号中获取的最初和最基本的参数就是介电常数, 介电常数是描述介质在电磁场中极化性质的参数, 与介质内部结构、组成成分以及组成成分所占的体积率有关, 同时还受到测试电磁波频率、环境温度等因素的影响。“描述这种多相复合材料介电常数与其组成成分、介电常数及其所占体积率等参数之间的函数关系, 称为复合材料的介电模型”^[5]。若能建立复合材料介电模型, 结合其他检测手段, 就可根据实测的介电常数计算出组成材料的体积率, 相应地实现对路面结构层厚度、材料配合比、压实度等重要技术指标参数的检测^[1]。

由此可见, 路面复合材料 (水泥、沥青混合料) 介电模型的建立是利用电磁无损检测技术对材料配比、压实度、空隙率、含水量/沥青含量等重要技术指标检测的基础和关键技术之一; 介电模型的建立将会大大拓宽电磁无损检测技术的工程应用领域, 为已建道路的维修防护和待建道路建造过程中的质量监控等工程实践环节提供依据和参考, 对其以后的理论研究和工程应用皆有裨益。

1.2 研究现状

水泥混凝土可视作由骨料、空气、水和水泥形成的水泥净浆组成的复合材料; 沥青混合料是由骨料、空气和沥青组成的复合材料。针对复合材料介电常数与质检指标间关系的研究大致分为两个方面: ①介电常数与指标参数的经验拟合公式; ②介电模型, 描述各相介质介电常数及体积率与混合物整体介电常数的关系。下面结合相关文献, 分别叙述上述两方面的研究进展。

1. 介电常数与指标参数的经验拟合公式

这方面的研究工作最早是针对土壤这一复合材料进行的。1964 年, 苏联

学者 Chernyak G. Ya. 撰写了《湿土介电特性研究方法》^[12] (Dielectric Methods for Investigating Moist Soil) 一书, 该书对含水土壤的介电特性做了全面地研究分析, 使人们首次对土壤的介电物理行为有了系统性的认识。

1980 年, 加拿大农业土地资源研究中心的 Topp 利用 TDR 方法测定水土混合物的介电常数, 并由此得到了反映土壤含水率 ω 和介电常数 ϵ 之间关系的两个回归多项式方程, 即著名的 Topp 方程^[13]。

在 Topp 等人研究工作的基础上, 美国农业部盐碱实验室的 Dalton 等人研究了电导率与土壤盐分之间的关系, 可通过测量土壤电导率来估计土壤的盐分^[14]。Alharath 和 Ferre 先后对粉砂、细砂性土介电常数与含水率之间的关系进行了试验研究, 提出了各自的公式。后来, Roth 在他们两人基础上进行适当修正, 使得公式的应用拓宽到了砂性土^[15]。

借鉴土壤方面的研究思路, 国内外学者相继开展了路面结构层材料介电特性研究工作, 最先提出应用 GPR 测试的介电常数来计算基层含水量和压实度的是 Texas A&M University 的 Robert L. Lytton 教授, 之后许多国家的学者也进行了研究, 而且率先对含水量和压实度的相关内容运用了 GPR 技术^[16-18]。

国外, 为分析水泥混凝土的介电特性, 1994 年 Virginia Tech 开展了关于水泥混凝土组成成分、氯化物含量、内部损伤、冻融现象等因素对介电常数影响的研究工作, 得到了水灰比越大介电常数越大等一系列重要结论^[19]。1995 年, Robert 等学者采用大型宽带同轴测量技术对水泥混凝土介电特性进行试验测试, 所用频率范围为 0.05~1GHz, 研究了介电常数随龄期的变化规律。1998 年, Rhim 对 0.1~20GHz 频率范围内混凝土的含水量与介电常数的关系进行了试验研究。关于热拌沥青混合料的介电性能, 1992 年, Al-Qadi 研究了沥青混合料在 12.4~18GHz 频率范围内的介电性能, 基于试验数据, 建立了热拌沥青混合料介电常数和含水量之间的相关关系^[20]。1999 年, Shang 等采用一种新型装置测量了热拌沥青混合料介电常数, 所用频率范围为 0.1MHz~1.5GHz, 研究发现沥青含量和拌和方式对沥青混合料的介电常数影响不大, 而含水量对介电常数影响较大。

国内, 为分析水泥混凝土介电特性和影响因素, 武汉理工大学先后利用探地雷达测量新拌水泥混凝土的介电常数, 并结合试验分析了矿物掺和料、温度、骨料、含水量等因素对介电常数的影响, 建立了含水量与介电常数之间关系式, 可由介电常数计算新拌混凝土含水量^[21]; 郑州大学也先后对水泥混凝土介电性能进行了试验和理论研究, 文献中主要分析了不同龄期时介电常数变化规律、密度、强度、水灰比、骨料级配等参数对介电常数的影响规律^[5,22,23]。

此外,文献针对隧道衬砌混凝土介电常数随频率的变化进行了研究^[24,25],初步得到了水泥混凝土频散特性方面的规律,给本书类似工作的开展提供了参考。

沥青混合料方面,国内学者也做了大量工作。郑州大学对沥青混合料介电性能进行了试验和理论研究,文献中主要分析了沥青混合料介电常数随时间变化规律,强度、油石比、骨料级配等参数对介电常数影响^[5,26]。台湾学者先后对流动性沥青混合料的介电和工程性质进行了研究^[27,28]。2008年,台湾成功大学吴资彬对沥青混合料材料的介电特性进行了深入的研究,发现电磁波频率、温度、空隙率、水分等因素对沥青混合料的介电常数都会产生影响,并建立了沥青混合料介电特性与密度等工程性质之间关系^[5,29]。

综上所述,介电常数与某一指标之间的关系大多是基于各自试验数据提出的经验拟合公式,缺少理论依据。因为其涉及的参数较少,关系式简单,所以在工程上也有一定的应用。但由于实验方法、测量仪器、试件材料、配比等方面的不同也导致了经验拟合公式的多样性,很不统一,难以相互比较。此外,拟合函数类型不同也导致公式大相径庭,可比性差,人为因素干扰较多,公式代表性和适用性差。

2. 复合介电模型

国外对复合材料介电模型方面的研究较早,先后提出了许多介电模型,部分模型曾经被一些学者加以归纳总结,在各自所研究领域已进行了部分模型应用效果的检验,如经典的瑞利模型^[30],Böttcher方程、复折射率方法(CRIM),都是在Lichtenecker-Rother(LR)方程的基础上发展而来^[31]。1974年,CRIM模型被Birchak等人应用于两相色散介质中,用来模拟复介电常数,模型的使用条件要求介质粒径远小于波长($d \ll \lambda$)^[32]。1980年,Wharton等用复折射率方法来解释油、气体的复合介电模型。1999年,该模型被Boersma和van Turnhout修正并拓展到多相材料中。Leshchanskyi和Ulyanychev在1980年成功地应用Berentsveig公式进行100MHz~9GHz范围内砂土的介电常数模拟;Bruggeman-Hanai(BH)模型是Bruggeman在1935年由介电常数定义推导得到,1936年,Hanai修正了Bruggeman方程后用于含有限导电材料的介电常数模拟^[5,33];其中,CRIM模型、线性模型、瑞利模型被广泛应用于路面材料领域。

国内对复合材料介电特性的研究主要集中在遥感^[34-37]、大地工程^[38-41]、工程勘测和石油测井等领域^[42-45],研究材料多为土壤、水、矿物岩石等典型天然地物^[46-50]。

对水泥混凝土介电模型的研究可以追溯到20世纪五六十年代,伴随着非

均质介质的介电模型的相继出现,越来越多的模型被应用于水泥混凝土介电模型的研究。考虑到各相介质介电特性之间的相互影响,国外, Hilhorst 于 1998 年提出了包含极化参数 S 在内的介电模型^[51]; 在 1974 年 Birchak 所建指数模型的基础上, Zakri 于 1998 年给出了指数模型的物理解释, 使该介电模型理论更完整^[52]。国内郑州大学利用介电常数仪对水泥混凝土的介电特性进行了实验分析, 尝试将线性模型和均方根模型、立方根模型应用在水泥混凝土方面, 试验研究表明, 上述三种模型需要修正后才适于水泥混凝土; 中国海洋大学学者研究发现: 渠道衬砌混凝土在浇筑 15d 内, 介电常数变化规律符合线性模型; 15d 后实测值接近平方根模型^[53], 但也需修正, 试验采用探地雷达测试, 天线中心频率为 1.5GHz; 武汉理工大学学者用 1.5GHz 探地雷达对新拌混凝土拌和物的介电常数进行测试和分析, 并建立了考虑温度因素在内的串-并联混合模型^[21]。

针对沥青混合料介电模型的研究国内外也有些成果, 具有代表性的是: 1993 年 Subedi 和 Chatterjee 针对沥青-粒料混合物并根据实验数据建立的沥青混合料介电混合模型, 被称为 SC 模型, 该模型认为混合物介电性质一方面受各成分介电性质的影响, 另一方面受各成分间相互极化作用的影响^[54]; 文献 [23] 曾在该模型基础上进行了改进工作; 国内郑州大学对沥青混合料的介电模型进行了试验研究, 研究发现: 线性模型和均方根模型、立方根模型均需修正后才适于沥青混合料, 试验采用的介电常数仪测量介电常数; 文献 [49] 利用 GPR 进行介电常数测量, 探讨了现有模型在描述沥青混合料介电特性的适用性, 初步结果显示: 修正后线性模型拟合结果较好, 但试验数据较少, 代表性差^[55]。

由上述文献综述可以看出, 目前国内外对路面结构层材料介电特性和介电模型的建立做了研究工作, 但同时也存在以下一些问题。

(1) 关于沥青混合料、水泥混凝土两种路面材料的介电模型研究较少, 虽然介电模型不少, 但大都是基于一定假设而建立的, 并非针对沥青混合料、水泥混凝土两种路面材料。鉴于这两种路面混凝土材料都是人造石材, 有其自身的材料及结构特点, 不同于岩石、土壤等自然界物质, 因此需要根据水泥混凝土、沥青混合料各自的结构特点, 通过分析其介电常数与组成成分、介电常数和体积率的关系, 确立合适的介电混合模型。

(2) 上述大多文献分析介电模型时没有考虑温度、频率等因素的影响。而实际上, 由能量与熵的理论可知: 温度增加会影响介质分子间排序进而影响极化改变介电常数。此外, 由电磁波基本理论知: 介质都有一定的频散特征, 介电常数随电磁波测试频率的不同而不同。实际工程测量时, 若不考虑环境温度

和电磁波测试频率的影响，会造成由不同频率的测试仪器在不同时间和不同环境温度条件下测试出的数据不能共享和进行对比分析。若忽略两者的影响，势必会造成一定的误差，影响测试精度。因此建立介电模型时需综合考虑温度、频率影响，并探讨温度和测试频率对水泥混凝土和沥青混合料介电特性的影响规律，在此基础上，建立两种复合材料含频率和温度在内的介电模型。

(3) 上述文献中，所用测试频率随着测量方法的不同也不尽相同，路面结构体系的质量检测属于浅层勘探，常用到的电磁波频率较高，大多在 500MHz~2.5GHz 范围内，如路用探地雷达，因此在此频率范围内，分析沥青混合料、水泥混凝土的介电性能和建立介电模型具有重要的工程应用价值。

(4) 基于介电模型进行沥青混合料空隙率、含水量、压实度和水泥混凝土厚度、材料配比、含水量等指标的检测成果较少，其应用工程实例也罕见，该方法的可行性和效果有待研究和论证。

1.3 研究内容

为解决上述电磁无损检测技术中存在的主要问题，本书针对路面工程常用的水泥混凝土和沥青混合料两种材料进行介电特性和介电模型研究，研究工作拟采取的主要技术路线如图 1.6 所示。

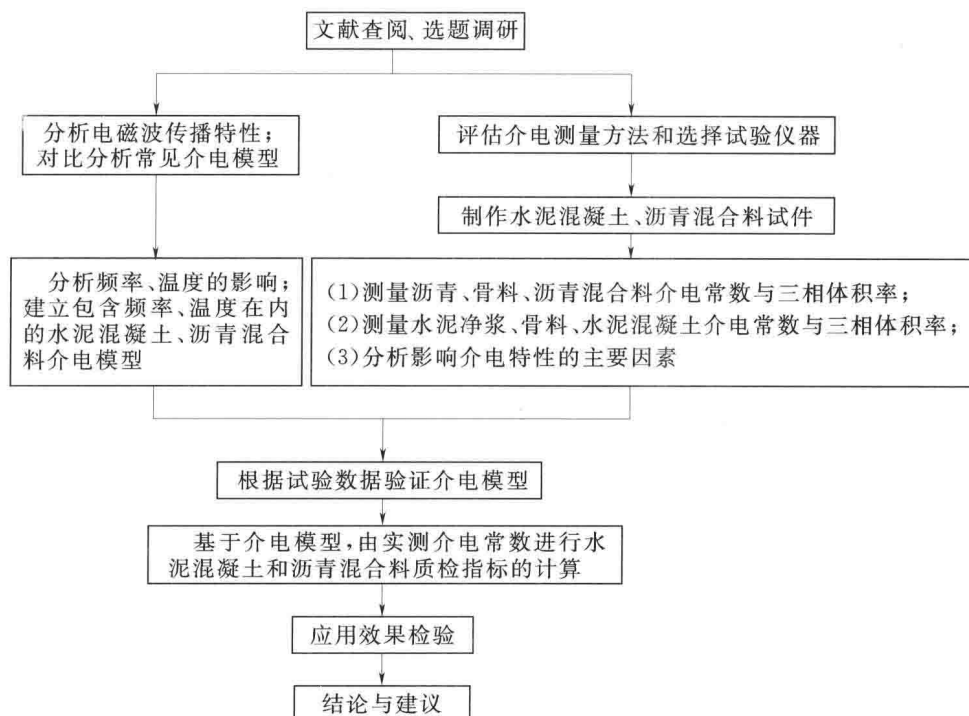


图 1.6 技术路线流程图

本书基于电磁波基本理论以及复合材料介电性能的一般规律,结合水泥混凝土、沥青混合料各自的特点,从理论上分析其介电性能和影响因素,包括电磁波频率、温度的影响,探讨温度和测试频率对水泥混凝土和沥青混合料介电特性的影响规律,建立综合考虑频率、温度的水泥混凝土和沥青混合料介电模型。

为分析两种复合材料的介电性能和验证理论模型,对水泥混凝土和沥青混合料的介电性能进行了室内试验研究,应用矢量网络分析仪搭载同轴探头测量了水泥净浆、骨料、水泥混凝土、沥青、沥青混合料的介电常数。同时,联合其他相关测试方法测定或计算各成分体积率,如由含气量测定仪测量试件空隙率。基于试验数据分析了影响两种复合材料介电性能的因素,检验理论介电模型的拟合效果和精度,并确定模型中的待定常数。

为了能将所建的综合介电模型应用于工程实践,本书基于水泥混凝土介电模型,建立了结构层厚度、含水量的计算公式,并结合相关参数和实测介电常数进行了结构层厚度、含水量的计算;由沥青混合料介电模型和实测介电常数进行含水量和成分体积率的计算,并分别与各自的实测值进行比较分析,通过实际工程应用来考核两种复合材料介电模型的应用效果和精度,进一步验证该技术可行性。