

# 路面形貌数字化测量技术 研究与应用

---

王元元 © 著

西南交通大学出版社

• 成 都

新时代下，随着 5G、云计算、大数据、物联网、人工智能等新一代信息技术的快速发展，数字化和智慧化已然成为现代交通基础设施发展的新趋势。《交通强国建设纲要》《数字交通发展规划纲要》以及《推进综合交通运输大数据发展行动规划纲要（2020—2025 年）》都明确提出“实现交通基础设施全要素、全周期数字化，建成综合交通大数据中心”的目标任务。道路交通作为基础设施的重要组成部分，通过路面三维形貌的数字化测量实现道路数字化信息的动态感知，实时感知路面信息状况，服务于自动驾驶、智能治理、路面功能与技术状况评价等内容，对打造舒适安全的交通环境，建设数字化、信息化的交通基础设施等均具有重要的理论价值和现实指导意义。

本书由湖北文理学院王元元主笔，其顺利出版得到国家自然科学基金（52178422，51808084）、2020 年度襄阳青年科技英才开发计划、新能源汽车与智慧交通学科群等项目的资助，东南大学、襄阳路桥建设集团有限公司、广西公路检测有限公司、广西路建工程集团有限公司、湖北省枣阳市公路建设有限公司等单位的支持与帮助，以及重庆交通大学刘燕燕，湖北文理学院李业学、曹林涛等教授的建设性修改意见；湖北文理学院薛金顺、研究生李仁杰、研究生张亨通参与了文字校对和文本修改工作。现借本书出版之际，谨向为本书出版做出贡献的项目资助方、合作企事业单位、提出宝

贵意见的专家和学者，为本书出版付出诸多心血的同人致以真诚的感谢。

由于作者水平有限，书中疏漏与不足之处在所难免，敬请广大读者和同行批评指正。

**王元元**

2021年7月

# 目 录

第 1 章	绪 论 .....	1
	1.1 研究路面形貌数字化测量的背景和意义 .....	2
	1.2 国内外研究现状及动态 .....	4
	1.3 本书的主要研究内容及技术路线 .....	9
第 2 章	测量路面形貌光度立体算法的改进与优化 .....	13
	2.1 光度立体视觉技术的基本理论 .....	14
	2.2 光度立体算法的改进与优化 .....	27
	2.3 基于光度立体算法的路面形貌的测量效果分析 .....	34
	2.4 本章小结 .....	44
第 3 章	测量路面双目重构算法的改进与优化 .....	47
	3.1 双目重构技术的基本理论 .....	48
	3.2 双目重构算法的改进与优化 .....	56
	3.3 基于双目重构算法的路面形貌的测量效果分析 .....	61
	3.4 本章小结 .....	76
第 4 章	基于抗滑性能评价的路面形貌指标的表征 .....	79
	4.1 图像二维纹理信息指标表征 .....	80
	4.2 路面三维形貌信息的指标表征 .....	86
	4.3 路面抗滑性能测试方法的选择 .....	92
	4.4 试样的制备 .....	94
	4.5 粗糙特性指标间的聚类和相关性分析 .....	95
	4.6 二维形貌指标与三维形貌指标的对比分析 .....	102

4.7 本章小结 .....	105
----------------	-----

第 5 章	数字化路面纹理形貌的测量与衰变特性分析 .....	107
5.1	沥青路面抗滑性能衰变的特点 .....	108
5.2	室内加速磨损试验仪的设计 .....	112
5.3	路面形貌衰变模型的分析与构建 .....	115
5.4	数字化路面纹理形貌的测量及衰变特性试验方案的设计 .....	121
5.5	数字化路面形貌指标衰变特性分析 .....	123
5.6	路面图像二维纹理信息指标衰变特性分析 .....	133
5.7	本章小结 .....	134
第 6 章	基于数字化形貌的路面抗滑性能关系模型的建立 .....	137
6.1	路面形貌对抗滑性能影响机理的分析 .....	138
6.2	路面干湿状态对抗滑性能的影响 .....	146
6.3	基于纹理形貌粗糙特性的路面抗滑性能模型的建立 .....	149
6.4	基于路面数字化三维形貌指标的 IFI 评价体系的建立 .....	158
6.5	本章小结 .....	161
第 7 章	提高路面抗滑性能措施的研究 .....	163
7.1	提高路面抗滑性能的常见措施 .....	164
7.2	基于抗滑性能的沥青混合料设计 .....	166
7.3	本章小结 .....	175
第 8 章	结论与展望 .....	177
8.1	路面形貌数字化测量和应用的主要研究结论与创新 .....	178
8.2	进一步研究路面形貌数字化测量和应用的建议及展望 .....	182
参考文献	.....	183







# 第 1 章

PART ONE

## 绪 论

## 1.1 研究路面形貌数字化测量的背景和意义

研究路面形貌数字化测量是为了更好地研究其抗滑特性。研究表明，路面抗滑性能同形貌之间关系紧密，其好坏直接取决于路表宏观和微观形貌<sup>[1,2]</sup>。其中，研究路面抗滑性能的意义主要在于：首先，良好的路面抗滑性能是行车安全的重要保障。全国道路交通事故统计结果表明，2019年共发生交通事故24.76万起，导致人员死亡6.27万人，直接财产损失高达13.46亿元<sup>[3]</sup>。其次，路面抗滑性能作为道路新建、养护、维修及改扩建等过程中的关键性指标，直接影响着道路的质量验收、路面状况性能评价及养护时期的抉择等。因此，建立完善的路面抗滑性能检测与评价方法，既是项目工程质量自身的需要，也是项目管理人员决策的需要。

作为衡量一个国家现代化水平、国民经济综合实力重要标志之一的公路交通，是服务于人民生活、社会发展和国民经济的基础设施<sup>[4]</sup>。随着我国公路建设事业的不断壮大和发展，截至2019年底，全国高速公路通车总里程已名列世界第一，达到14.96万公里。相比之下，沥青路面本身具有其无可比拟的优势，主要表现为：施工周期短、平整无接缝、噪声低、振动小、行车舒适、养护维修简便，适宜于分期建设等。近年来，我国大多数新建道路以沥青路面为主<sup>[5]</sup>。

参与交通主体因素之间的不和谐（这些因素主要包括参与人、行驶车辆、运营道路以及交通管理等），使得交通安全已然成为交通领域突出、严峻的问题之一。根据世界卫生组织（WHO, World Health Organization）的统计报告，在全球范围内，每年因交通事故造成120万人死亡和5000万人受伤<sup>[6]</sup>。尽管有文献指出仅因路面抗滑性能不足所引发的交通事故的比率并不高，仅约10%<sup>[7]</sup>；但是，具有如此庞大基数的交通事故量，就算是其自身引发比率不大，其事故总量以及由事故总量所引发的经济损失也是震撼人心的。除了满足顺利通行这一基本要求外，从以人为本的基准点出发，道路的建设还必须要考虑使用者的安全。道路应当具备良好的抗滑性能，良好的抗滑性能可以减小交通隐患，为车辆驾驶提供良好的附着性，保证驾驶安全。

目前，路面抗滑性能的评价主要以摩擦系数类指标为主。而这种忽略形貌特性的摩擦系数类抗滑评价方法主要存在以下不足：①摩擦系数类测试方法存在离散性大、野外不好控制等特点<sup>[8]</sup>；②测试结果易受路面干湿状况、测试速度等因素的影响，导致摩擦系数类测试方法出现条件限制性强、普适性差等问题<sup>[9,10]</sup>。因此，充分利用形貌特性同抗滑性能间的紧密联系，精确测量路面三维宏观和微观形貌，建立基于形貌粗糙特性的抗滑评价方法，有助于完善甚至是取代条件限制性强、普适性差的摩擦系数类指标。

在实际路面检测中，常用的形貌测试方法主要存在分辨率差和测试精度不足等问题，难以满足路面微观形貌测试的需要。但国际道路协会却认为微观形貌同样对路面抗滑性能有着决定性的影响，特别是在车辆低速行驶条件下，其影响更为突出。此外，常用的形貌类抗滑评价指标主要用于表征形貌沿高程方向的特征属性，很少涉及水平横向、水平纵向及形状等其他方面。但研究却表明形貌波长特性、形状特性均会影响路面抗滑力

的形成<sup>[1]</sup>。所以，开发稳定可靠、高分辨率、高精度的路面三维形貌检测设备，是实现路面宏观和微观形貌同步测量的前提，更是多角度建立形貌类表征指标，更好地服务于交通安全的基础。

综上所述，如图 1-1 所示，良好的抗滑性能是路面行车安全的重要保障，而路面的抗滑性能又直接取决于路面形貌特性；同时，也是为了更好地消除不同评价方法给交流带来的障碍，取代条件限制性强、普适性差的摩擦系数评价指标。本研究从数字化三维形貌测量出发，通过建立基于计算机视觉改进算法的非接触式数字化测量技术提取路面形貌，分析其特性，建立形貌粗糙特性的表征指标，并进一步构建路面抗滑性能同其表面粗糙特性之间的关系模型。本研究不仅为沥青路面抗滑性能评价提供了理论基础，同时对减少交通事故的产生，对沥青路面抗滑性能的评价以及抗滑性能指标的统一，对选择原材料、决策养护时机以及指导路面设计，均具有理论价值和现实指导意义。

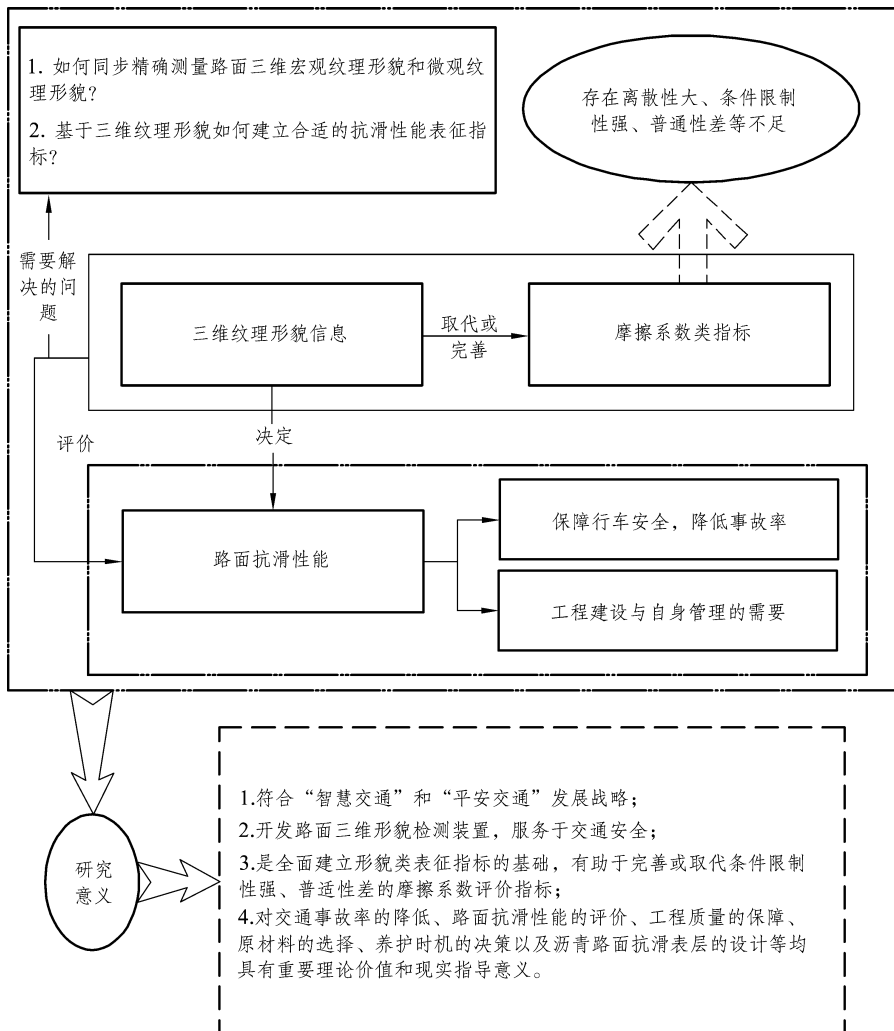


图 1-1 路面形貌数字化测量研究意义

## 1.2 国内外研究现状及动态

路面抗滑性能直接关系到车辆运行过程中的人身和财产安全。关于影响路面抗滑性能的因素组成、抗滑性能的评价及形貌的测试等方面，国内外展开了广泛的研究。下面分别阐述这三个方面的研究现状及发展动态。

### 1.2.1 影响沥青路面抗滑性能的因素组成

在车辆行驶过程中，轮胎、路面、所处环境、轮胎与路面间相对运动状态以及两者之间的介质等因素共同构成一个摩擦学系统。系统中各个因素相互作用，彼此影响，共同决定着路面的抗滑性能。根据性质的不同，这些因素被分为路面材料、轮胎特性、路表形貌特性、界面介质、环境气候等类别<sup>[12-14]</sup>。

在实际路面抗滑性能检测中，所用的测试轮、橡胶磨块、测试温度、表面状态都是加以限制和规定的。在排除轮胎特性、界面介质和气候环境等限定性因素的干扰后，影响路面抗滑性能的主要因素就剩下路面材料和路表形貌特性。其中，路面材料特性中的集料品质、级配、最大公称粒径和体积参数等属性，均是通过改变路表形貌特性或形貌的衰变特性来影响路面抗滑性能的，其本质原因仍为路表形貌特性对抗滑性能的影响。因此，本项目将路面形貌特性作为影响抗滑性能的关键因素，作重点突破和分析。

国际道路协会认为路面形貌是影响抗滑性能最主要的因素，并根据起伏不平的特性，将路表形貌分为四类：微观形貌、宏观形貌、粗大形貌和不平整度。其中，影响路面抗滑性能的形貌主要是指微观形貌和宏观形貌。

微观形貌，其波长小于 0.5 mm，高度尺寸介于 1  $\mu\text{m}$  ~ 0.5 mm。这种形貌构造直接与轮胎真实接触，是对沥青胶浆和集料表面微观构造等特性的直接反映。通常，微观形貌的构造密度越大，平均高度越高，对路面抗滑性能就越有利；构造越尖锐，潮湿条件下就越容易穿透水膜，减小动力水膜润滑的作用，增加行车安全性。同时，微观形貌构造能够增加轮胎和路面之间的咬合程度，是车辆在低速行驶过程中摩擦力形成的主要原因。

宏观形貌，其波长为 0.5 ~ 50 mm，高度尺寸为 0.5 ~ 20 mm。这种构造主要由级配、集料粒径、集料形状和集料排列等因素决定。宏观形貌对抗滑性能的影响主要体现在两个方面：宏观形貌直接决定了轮胎因弹性变形滞后而产生的阻滞分量；宏观形貌可及时排除接触面间的积水，增加真实接触面积，改善抗滑性能。

### 1.2.2 抗滑性能的评价

直接检测路面摩擦系数或形貌都可以实现路面抗滑性能的评价。因此，根据检测对象的不同，路面抗滑性能的评价可分为摩擦系数类抗滑评价法和形貌类抗滑评价法两类。

## 1. 摩擦系数类抗滑评价法

摩擦系数类检测设备，依据测量方式的不同，又可分为定点式和连续式两类。

常用的定点式检测设备主要有：摆式摩擦系数仪和动态旋转摩擦系数仪。其中：摆式摩擦系数仪调试方便、操作简单，但该设备受人为因素影响大，数据偏离性较大，且检测结果只能反映车辆低速行驶条件下路面的抗滑性能<sup>[15]</sup>。动态旋转摩擦系数仪则具有操作简单、测试速度快等优点；但是该设备需要临时封闭交通，影响正常的交通流，而且当路面构造过大时，检测结果往往不准确<sup>[16]</sup>。

而连续式检测设备分为横向力检测系统和纵向力检测系统两种。连续式摩擦系数检测设备易实现连续测量，且测试过程不影响正常交通。但其缺点就是影响因素复杂，不易在室内实现，且检测设备大多价格昂贵，检测结果受路面环境状况（如路面质量状况、路面温度、环境湿度及水膜厚度等）影响较大。

无论是定点式还是连续式摩擦系数检测设备，都无法改变摩擦系数指标对测试条件的过度依赖。其依赖性主要体现在干湿状态依赖性和速度依赖性两个方面。Dan 等<sup>[17]</sup>分别研究了干燥、下雾、积水、结冰以及覆雪等不同路况下路面抗滑性能的变化，发现摩擦系数会随路面状态的不同发生较大的改变，当路面从干燥变为积水、结冰状态时，摆值分别减小 27.5% 和 82.2%。桂志敬等<sup>[10]</sup>则采用动态旋转摩擦系数仪测试路面动态摩擦系数随测试速度的变化情况。结果表明，动态摩擦系数随测试速度的增加有减小的趋势，当测试速度从 20 km/h 增加到 80 km/h 时，其降幅高达 15%。因此，有必要考虑采用其他方法取代或补充摩擦系数类抗滑评价方法，以解决其条件限制性强、普适性差的问题。

## 2. 形貌类抗滑评价法

目前，实际用于检测路面形貌的方法主要包括铺砂法、环形形貌测试法和激光构造深度法等。其中，铺砂法效率低、重复性差，受人为因素影响最为严重。而且由于测试精度的限制，这些方法都只能测试宏观形貌，难以满足微观形貌测试对精度的要求。Kanafi 等<sup>[18]</sup>根据聚焦深度原理使用单目体视显微镜提取沥青混合料表面三维宏观和微观形貌。其研究结果同国际道路协会的结论一致，均认为微观形貌同样对路面抗滑性能有着决定性的影响，特别是在车辆低速行驶条件下，其影响更为突出。

此外，由于水平分辨率的限制，上述检测方法无法精确提取形貌的波长和形状等特性，以至于用于评价路面抗滑性能的形貌类指标主要集中在高程特性的表达上，很少涉及形貌的水平横向、水平纵向及形状等其他方面。朱晟泽等<sup>[19]</sup>通过设计不同间隙宽度组合的混凝土试件，研究间隙宽度对抗滑性能的影响。遗憾的是，该文献虽然指出试件的抗滑性能会随表面间隙宽度的变化而改变，但并没有给出具体的指标用于定量表述形貌沿水平方向的特征属性。曹平<sup>[20]</sup>采用接触式表面轮廓仪提取混合料表面二维形貌，构造轮廓线的形状评价指标，分析认为轮廓构造峰的尖锐程度同样会影响到路面的抗滑性能。笔者将二维形貌指标和三维形貌指标进行对比，发现二维形貌指标低估了路表粗糙度，

不能完全真实地表达路面形貌粗糙特性<sup>[21]</sup>。因此，针对现行路面形貌类抗滑评价方法中存在精度不足、重复性差、难以全面表达等问题，开发高分辨率、高精度的检测设备，同步检测路面三维宏观和微观形貌，并构建多重属性的表征指标用于全面评价形貌的粗糙特性显得十分必要。其对研究路面形貌特性、评价路面抗滑性能、建立关系模型等具有深远的意义。

### 1.2.3 形貌测量方法的研究现状及动态

形貌的测试根据原理的不同可分为直接测试和间接测试两类，见图 1-2。其中：直接测试是采用特定的技术手段直接测量物体表面形貌构成；而间接测试则是测量其他非形貌类指标，但这些指标又同形貌特征关系紧密，以此来间接反映形貌的粗糙特性。间接测试方法主要有体积法和溢出时间法等。由于间接测试法重复性差、精度低、测试效率低以及不能形象直观地反映路面形貌，本研究重点围绕直接测试方法展开论述。

#### 1. 非计算机视觉技术类形貌测试方法

如图 1-2 所示，常用的形貌直接测试方法主要包括接触式表面轮廓仪、三维激光扫描仪和计算机视觉技术类形貌测试法等，其中接触式表面轮廓仪、三维激光扫描仪属于非计算机视觉技术类形貌测试方法。

Thomsenschmidt<sup>[22]</sup>采用接触式表面轮廓仪提取物体表面轮廓，该仪器通过一微型探针在物体表面滑过，通过计算探针的竖向位移获得物体表面轮廓，其精度高达  $0.1\ \mu\text{m}$ 。这种轮廓仪具有测量范围大、测量结果稳定等优点。遗憾的是，这种设备测试速度较慢，只适用于实验室内有限点数的线性检测，难以获得高分辨率的三维表面形貌，限制了其使用范围。

李伟、Hong 等<sup>[23,24]</sup>研究了激光扫描技术对物体表面形貌的测试效果，发现探测器收集的光亮分布图容易受到场景光线分布、物体表面形状以及物体表面状态的影响，从而造成匹配误差，产生测量波动。该方法可以很好地测试车辙深度、不平整度以及宏观形貌等路面信息。但是，其价格昂贵，且不能满足路面微观形貌测试对精度的要求。

#### 2. 计算机视觉技术类形貌测试方法

计算机视觉技术类形貌测试方法又主要包括体视显微镜、摄影测量技术、RGB 深度传感器、光度立体三维重构技术和双目三维重构技术等。其中：体视显微镜虽然能够获得较好的重构效果，但需要获取一系列的图像，通过聚焦原理识别清晰目标区域，所需内存空间大，计算复杂且耗时<sup>[25]</sup>；摄影测量技术和 RGB 深度传感器尽管具有便捷、价格便宜、可自动控制、效率高等特点，但仅限于路面裂缝、坑槽等病害检测，难以获得满足精度要求的路面三维形貌<sup>[26]</sup>。因此，本节将重点阐述光度立体重构和双目重构在沥青路面三维形貌测量问题中的研究现状及发展动态。

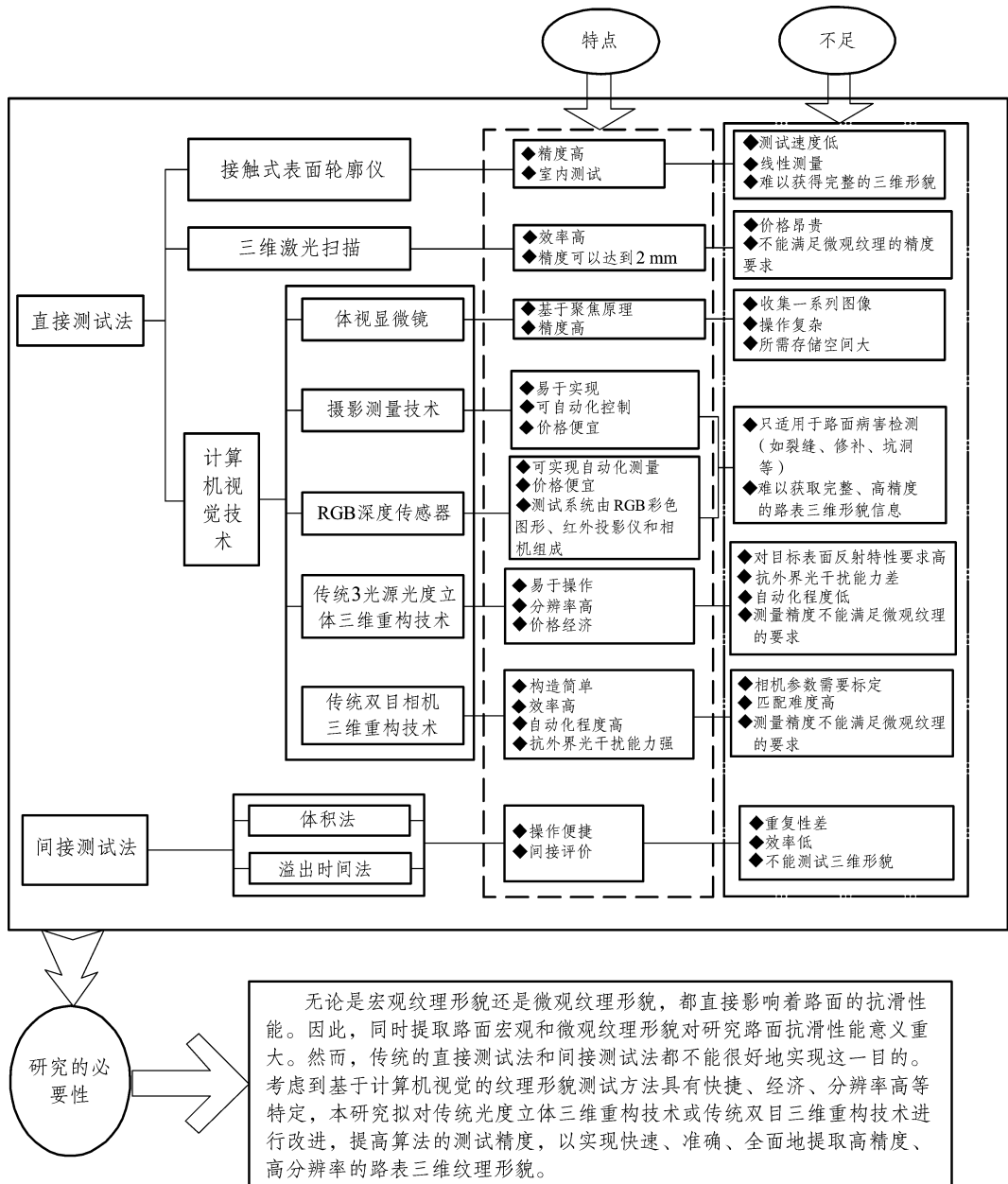


图 1-2 直接测试法和间接测试法对比示意

光度立体重构和双目重构具有快速、全面、分辨率较高等特点，同是计算机视觉技术类重构技术中的重要组成部分，都以数字图像处理操作为基础，但两者的重构原理却截然不同。其中：光度立体三维重构技术以双向反射分布函数为理论基础，根据多幅不同照明条件下图像的亮度变化求解表面法向量，完成三维重构；而双目重构技术则通过计算左右视图间像素点对的视差，根据严谨的几何关系计算完成三维形貌的求解。

Medeiros 和 Gendy 等<sup>[27,28]</sup>将传统光度立体和双目三维重构技术应用到路面形貌的测量中。结果表明：对于宏观形貌，传统光度立体和双目重构技术均可以获得较好的测试效果；而对于微观形貌，则由于沥青路面自身的特殊性并没有取得满意的效果。这些路面的特殊性主要表现在：沥青路面粗糙不平，并非连续光滑；沥青油膜和细小的矿粉在光照条件下会产生镜面反射现象，形成高光点或噪声点，并非理想的朗伯体（Lambert 体）；对于粗糙的沥青路面，容易产生一些光照死角，形成阴影区域。因此，传统的光度立体和双目三维重构技术虽然具有较高的分辨率，仍难以满足路面微观形貌对测试精度的要求，需要进一步改进。

Sun 等<sup>[29]</sup>指出保证目标区域不存在任何拍摄盲区，以实现全域三维重构的最小拍摄方向数是 6。同时，该文献通过分层选择策略识别高光点和阴影区域，将识别获得的高光点和阴影区域剔除。分层选择策略求解法向量虽然保留了大量的有效信息，且能有效地区分并剔除高光点和阴影区域等异常点；但是，该算法仅对连续光滑表面有效，且识别算法和剔除准则的计算过程复杂，计算量大。刘亚敏等<sup>[30]</sup>根据光度立体法，获取 3 张 RGB 图像，基于三维真彩色图像的彩色信息分量重构路面形貌。由于图像信息量的增加，图像可处理的采集区域有所减小；同时由于局部误差的存在，该方法依然难以满足路面微观形貌测试对精度的要求。

相比之下，双目三维重构技术最大的困难在于像素点对间的精确匹配，该匹配直接决定了视差的计算，进而影响重构精度。而双目重构中的匹配算法根据原理又可分为局部匹配算法和全局优化算法两大类<sup>[31]</sup>。其中：局部匹配算法是基于区域约束，采用匹配窗的代价聚合、特征点匹配及相位匹配等方法求解匹配关系。该算法运算速度快，能够快速恢复出丰富纹理区域的视差；但在弱纹理区域易出现误匹配，得到不致密的视差图，需要在后期进一步修正。全局优化算法则是基于整个约束区域，通过图割、神经网络、遗传及置信传播等算法完成匹配关系。这种匹配算法虽然能够在整体上获得较好的视觉效果，但运算时间较长，丢失细节信息过多，影响局部重构精度。

张一豪、韩宝玲等<sup>[32,33]</sup>分别采用特征匹配、边缘特征匹配等算法，以提高局部区域的匹配精度。遗憾的是这些改进对不连续、弱纹理目标的作用十分有限，难以用于路面三维形貌的精确检测。Sun 等<sup>[34]</sup>则在目标物体的特殊位置通过人为设置符号控制点，以增加像素点对匹配的准确性。但这些控制点的数量毕竟有限，难以实现该算法真正意义上的高分辨、高精度测量。

综上所述，尽管随着表面测试技术的飞速发展，产生了诸多形貌测试方法；但是，针对沥青路面三维形貌检测而言，这些测试方法总是存在着这样或那样的问题。受限于高精度、高分辨率、实用的路面三维形貌检测设备的匮乏，研究形貌对抗滑性能的影响仅停留在宏观形貌层面，并且评价指标也主要集中在高程特性相关类指标上。相比之下，计算机视觉三维重构技术具有快速、全面、分辨率较高的特点，可以被考虑用来提取路面三维形貌信息，但需要进一步改进，以满足路面微观形貌测试对精度的要求。因此，



本研究立足于计算机视觉三维重构技术，从原理出发，对传统计算机视觉三维重构技术加以改进，以实现沥青路面三维形貌的同步精确测量，并进一步多角度地建立三维形貌表征指标，综合分析形貌特性对抗滑性能的影响。

## 1.3 本书的主要研究内容及技术路线

### 1.3.1 主要研究内容

本研究基于计算机视觉数字化测量的基本理论和方法改进和研发非接触式形貌测量技术，以实现路面三维形貌的快速、全面、精确测量，构建三维形貌表征指标，评价路面形貌的衰变特性以及其对抗滑性能的影响。并在此基础上，进一步建立基于形貌指标的抗滑评价模型，以克服传统基于摩擦系数的抗滑评价方法普适性较差的不足。本书的主要研究内容如下：

#### 1. 测量路面形貌光度立体算法的改进与优化

基于计算机视觉的数字化三维形貌的重构技术，首先需要选用适当的三维重构算法。考虑到算法的精度以及操作的难易程度，本研究首先选择了光度立体技术的三维重构算法。为了获得高精度的重构效果，本书分别采用了基于 6 光源算法和鲁棒主成分分析低秩矩阵分解算法来控制法向量求解步骤中的误差和噪声的传递，采用基于控制点加权和基于控制点插补面两种算法来保障三维形貌重构步骤中的精度。

#### 2. 测量路面形貌双目重构算法的改进与优化

考虑到光度立体重构技术抗光干扰能力差，多幅图片需依次拍摄，难以实现实际现场的运用。本研究立足于双目三维重构技术，从原理出发，分别采用多条固定激光线分区域和单条移动激光线全局扫描两种约束模式，对传统双目重构技术加以改进，研究激光约束改进双目重构技术对路面三维形貌的测量效果，重点解决如何强化匹配约束和提高匹配精度等问题，通过计算左右视图间像素点对的视差，根据严谨的几何关系计算完成三维形貌的求解。

#### 3. 基于抗滑性能评价的路面形貌指标的特征

传统的路面形貌构造的表征多采用二维形貌分析指标，并不能完全反映出路面真正的粗糙特性。因此，本研究希望从三维形貌和图像二维纹理信息两个层面分别建立基于三维形貌和基于二维纹理信息的路面粗糙特性表征指标。其中：三维形貌表征指标主要包括形貌高度相关指标、形貌波长相关指标、形貌形状相关指标和形貌综合指标四个方面；图像二维纹理信息表征指标则主要包括裸露粗集料区域化面积比、图像二维纹理信息分形维数以及基于图像灰度共生矩阵的角二阶矩、逆差矩、熵等指标。为了选择出较优越的表征指标，避免多重共线性问题，本研究进一步对相关性较高的表征指标进行归

类处理，通过类聚分析和相关性分析进行保留和剔除，以优选出具有代表性的表征指标用于后续的研究。

#### 4. 数字化路面形貌的测量与衰变特性分析

路面形貌受到多种因素综合影响，会随着时间的推移表现出衰变的特性。影响形貌衰变特性的因素众多，如集料尺寸分布、石料磨光值、石料磨耗性能、混合料的级配类型和车辆荷载作用、油石比、集料表面特性、气候环境因素等。研究沥青路面形貌的衰变规律对正确选择原材料、路面养护时机的决策以及混合料的设计等具有重要的意义。该部分内容分析不同因素对形貌衰变特性的影响，也是更好地为后文中建立抗滑性能同形貌粗糙特性指标之间关系模型提供研究基础，使得后文中所建立的关系模型能够综合考虑多种影响因素，便于模型的广泛应用。因此，本研究首先测量数字化路面形貌，在分析形貌粗糙特性指标变化的基础之上，根据灰色系统理论建立数字化路面形貌的衰变模型；进一步根据模型参数的变化，分析矿料的种类、混合料的级配、最大粒径等因素对路面形貌衰变特性的影响。

#### 5. 基于数字化形貌的路面抗滑性能关系模型的建立

通过室内成型不同类型的沥青混合料试件，分别对不同类型的混合料试件的三维形貌指标、图像二维纹理信息指标和抗滑性能指标进行测试。以摩擦学理论和多元回归分析理论为基础，分别从理论和经验回归两个角度分析数字化形貌粗糙特性指标同路面抗滑性能间的关系。同时，为了便于统一来自不同国家、不同领域的抗滑性能评价标准的差异，避免基于摩擦系数的抗滑评价方法普适性差的问题，本研究直接依赖于路面的形貌粗糙特性，进一步建立了基于数字化形貌的路面抗滑性能的关系模型，为抗滑性能的评价提供新的思路和方法。

#### 6. 提高路面抗滑性能措施的研究

在环境侵蚀和交通荷载的综合作用下，路面材料发生冲击、揉搓、磨耗以及老化等现象，其抗滑性能终究会日益衰减，最终无法满足安全行车的需要，形成安全隐患。本研究在分析路面数字化形貌指标同路面抗滑性关系的基础上，从路面混合料设计角度出发，提出保障或恢复路面抗滑性能的措施。在设计阶段，采用事前控制以保障沥青路面在源头就具备必要的抗滑性能。

### 1.3.2 技术路线

本研究采用理论分析和试验研究相结合的手段开发了能够快速、全面、精确地测量路面数字化形貌的非接触式测量装置，并在此基础上研究了路面数字化形貌同抗滑性能之间的关系。其技术路线图如图 1-3 所示。

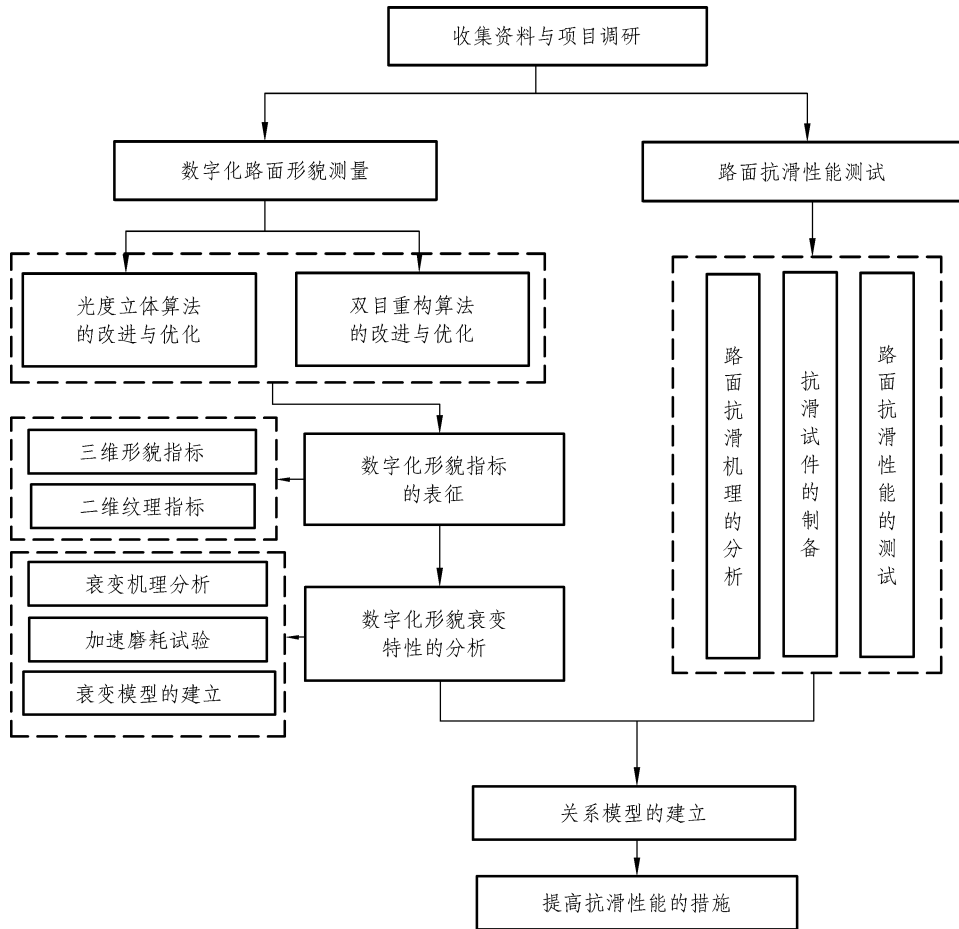


图 1-3 技术路线