

Y1902237

## 重庆交通大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名: 

日期: 2011 年 4 月 19 日

## 重庆交通大学学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆交通大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本人学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并进行信息服务（包括但不限于汇编、复制、发行、信息网络传播等），同时本人保留在其他媒体发表论文的权利。

学位论文作者签名: 

日期: 2011 年 4 月 19 日

指导教师签名: 

日期: 2011 年 4 月 19 日

本人同意将本学位论文提交至中国学术期刊（光盘版）电子杂志社 CNKI 系列数据库中全文发布，并按《中国优秀博硕士学位论文全文数据库出版章程》规定享受相关权益。

学位论文作者签名: 

日期: 2011 年 4 月 19 日

指导教师签名: 

日期: 2011 年 4 月 19 日



## 摘 要

部分滑水是车辆在一定水膜厚度的道路上行驶时，由于轮胎与路面之间不能完全排除积水而引发的轮胎与路面部分脱离的现象。部分滑水现象一旦发生，使得轮胎与路面的附着系数显著降低，经验不丰富的驾驶员在行车及制动时极易发生对速度和间距的误判，导致交通事故发生。因此，研究路面水膜在轮胎胎面和路表界面之间的影响机理和规律，以确定安全行车速度和间距对保障雨天高速公路行车安全具有重要意义。

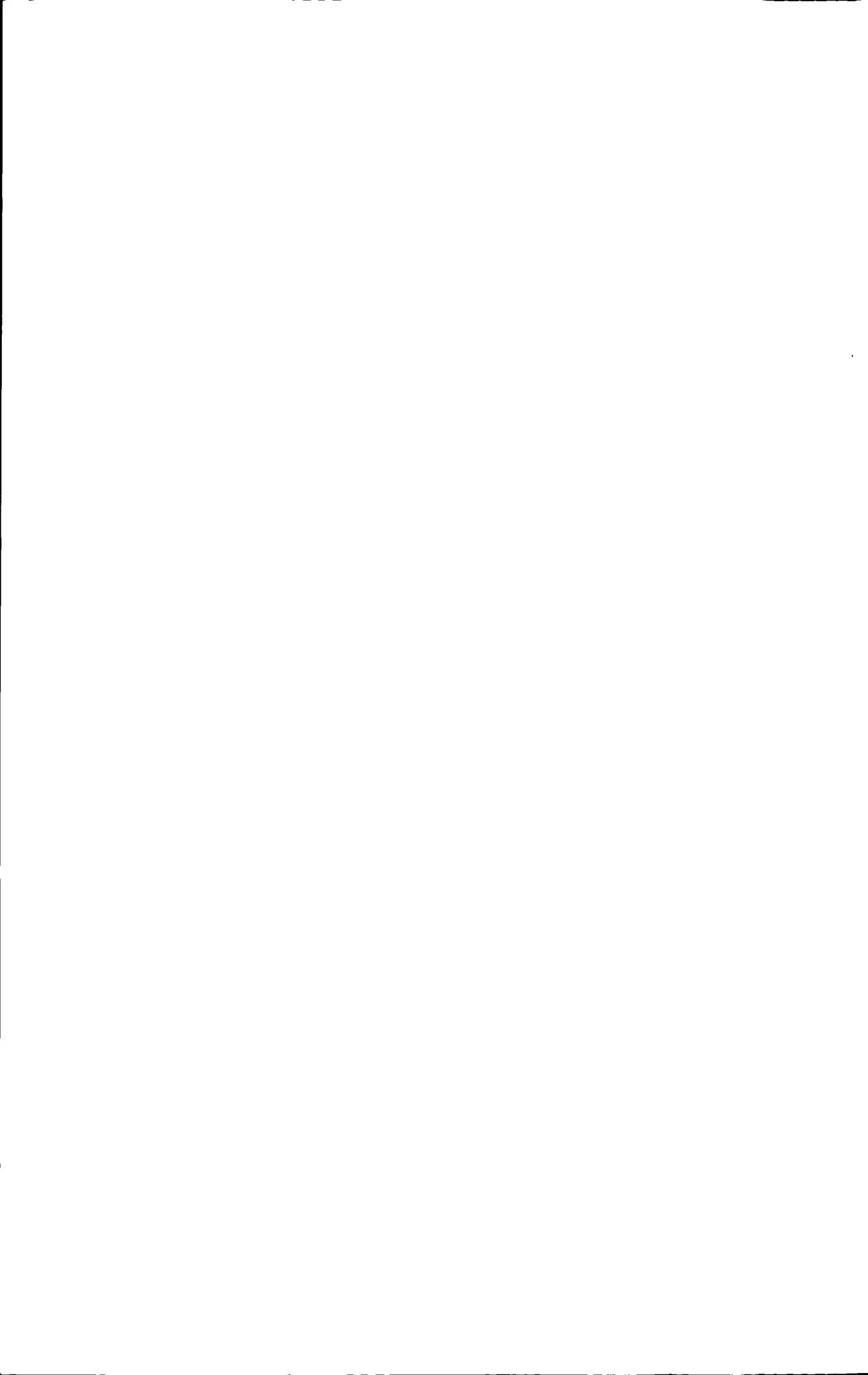
本文以交通部西部科技项目“灾害天气下山区高速公路运营安全关键技术研究”（合同号2008318000034）为依托，针对小客车雨天产生滑水的几个关键问题进行了研究。

论文首先考虑轮胎压缩变形性能，结合市场占有率来选取代表轮胎，根据相关参数建立有纵横向花纹的轮胎有限元模型，通过软件模拟轮胎在代表车型荷载下的变形量；然后通过调整模型中水膜厚度，使用 FLUENT 软件模拟轮胎模型在不同行驶条件下所受的动水压强，得到部分滑水条件下动水压强与其影响因素的关系式。

在分析轮胎与潮湿路面附着系数影响因素的基础上，研究行车速度、水膜厚度影响下不同行驶条件的路面附着系数，根据发生部分滑水的动水压强计算代表车型在该行驶条件下的停车视距。同时，通过分析降雨强度与能见度的关系、驾驶员雨天环境下行车间距反应规律，综合道路纵坡、圆曲线半径等因素提出雨天环境高速公路纵坡停车视距修正值和极限安全车速建议值。

最后依据本文对部分滑水条件下停车视距和极限车速的研究成果，设计了车速（间距）反馈仪的工作流程和布设方法。建议高速公路管理部门在急弯陡坡等危险路段设置车速（间距）反馈仪，并结合车距确认标志对驾驶员进行提醒，以减少由于判断失误而产生的部分滑水事故。

**关键词：**部分滑水；FLUENT；停车视距；能见度；降雨强度；附着系数



## ABSTRACT

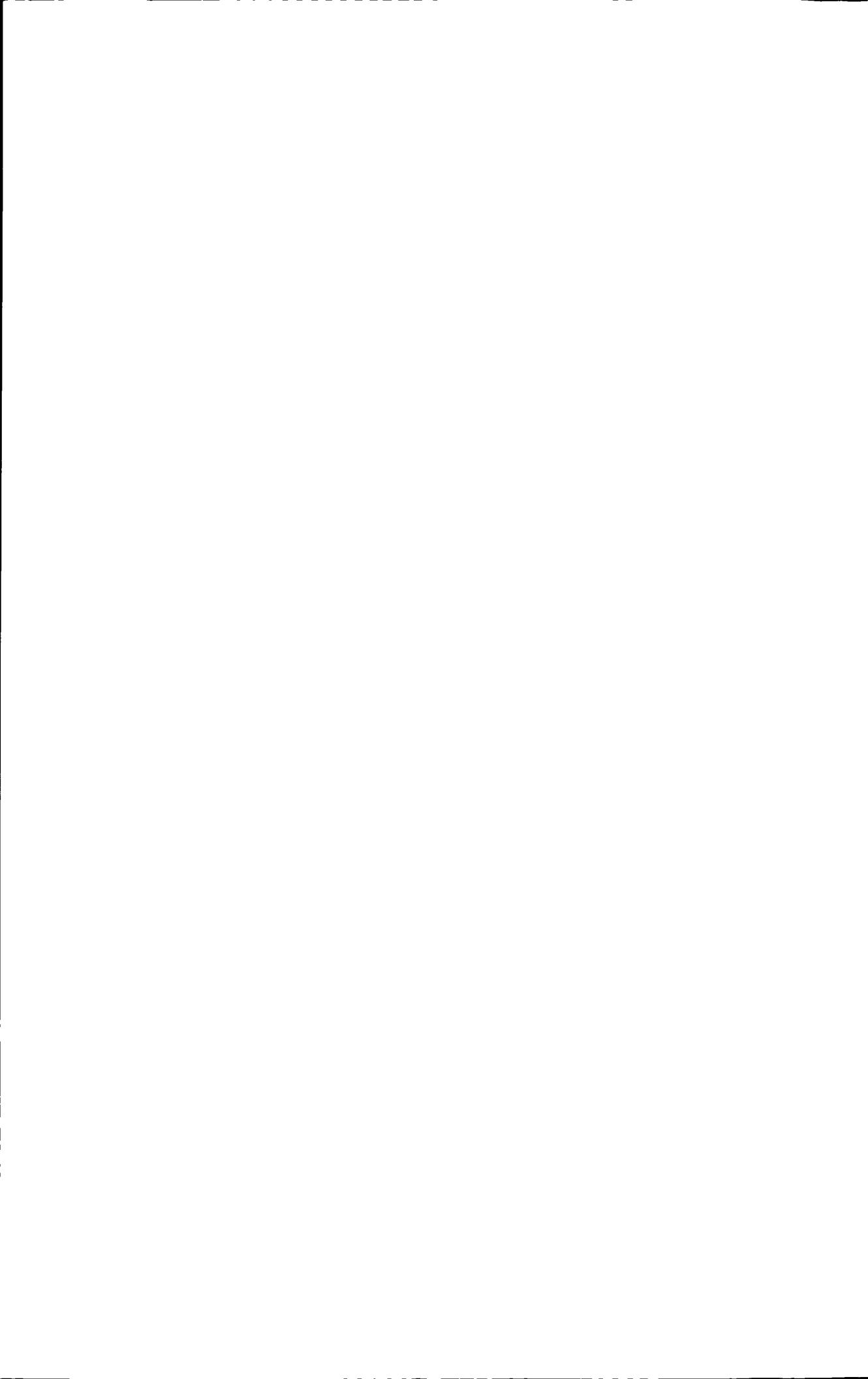
If water between tires and the ground cannot be completely excluded and tires float upward even out of the ground completely when tires are rolling on a wet way, then a phenomenon called partly hydroplaning occurred. Once the partly hydroplaning happens, the friction coefficient between tire and road surface decreases significantly, less experienced drivers are more vulnerable to making misjudgments toward speed and distance during driving and braking, which lead to traffic accidents. Therefore, in order to determine the safe driving speed and distance and guarantee the safe traffic environment on highway in the rain, it is vital to study water film's influence mechanism and rules between the tire tread and road surface.

The paper relies on the western technology project of Ministry of Communications — *Research on Expressway Safety Operation Strategies Under Atrocious Weather Conditions*, and studies key issues of hydroplaning for sedan cars on rainy days.

First, tire's compressive deformation capability and market share are considered to select the appropriate representative tires. Three-dimensional finite element model of tire possessing vertical and horizontal grooves is established based on correlation parameter. Tire deformation of representative vertical loading is simulated by software; then after adjusting the water film thickness, FLUENT is used to study hydrodynamic pressure suffered by the tire model under different driving conditions to got the critical hydroplaning speed.

On the basis of analyzing the influence factors about of tires and wet road's adhesion coefficient, the road adhesion coefficients under different driving conditions, such as speed, water film thickness, is researched. And according to hydrodynamic pressure when partly hydroplaning happens, representative models' stopping sight distance is calculated. Meanwhile, by analyzing the relationship between rainfall intensity and visibility, drivers' reaction distance rule in the rain, and by combining road longitudinal slope, radius of circular curve environment and other factors, longitudinal stopping sight distance and the amendment safe speed of expressway on the rainy day are proposed.

Finally, according to the research results of stopping sight distance and safe speed under partly hydroplaning, velocity (distance) feedback instrument workflow and layout methods are designed. To reduce the accident of partly hydroplaning by



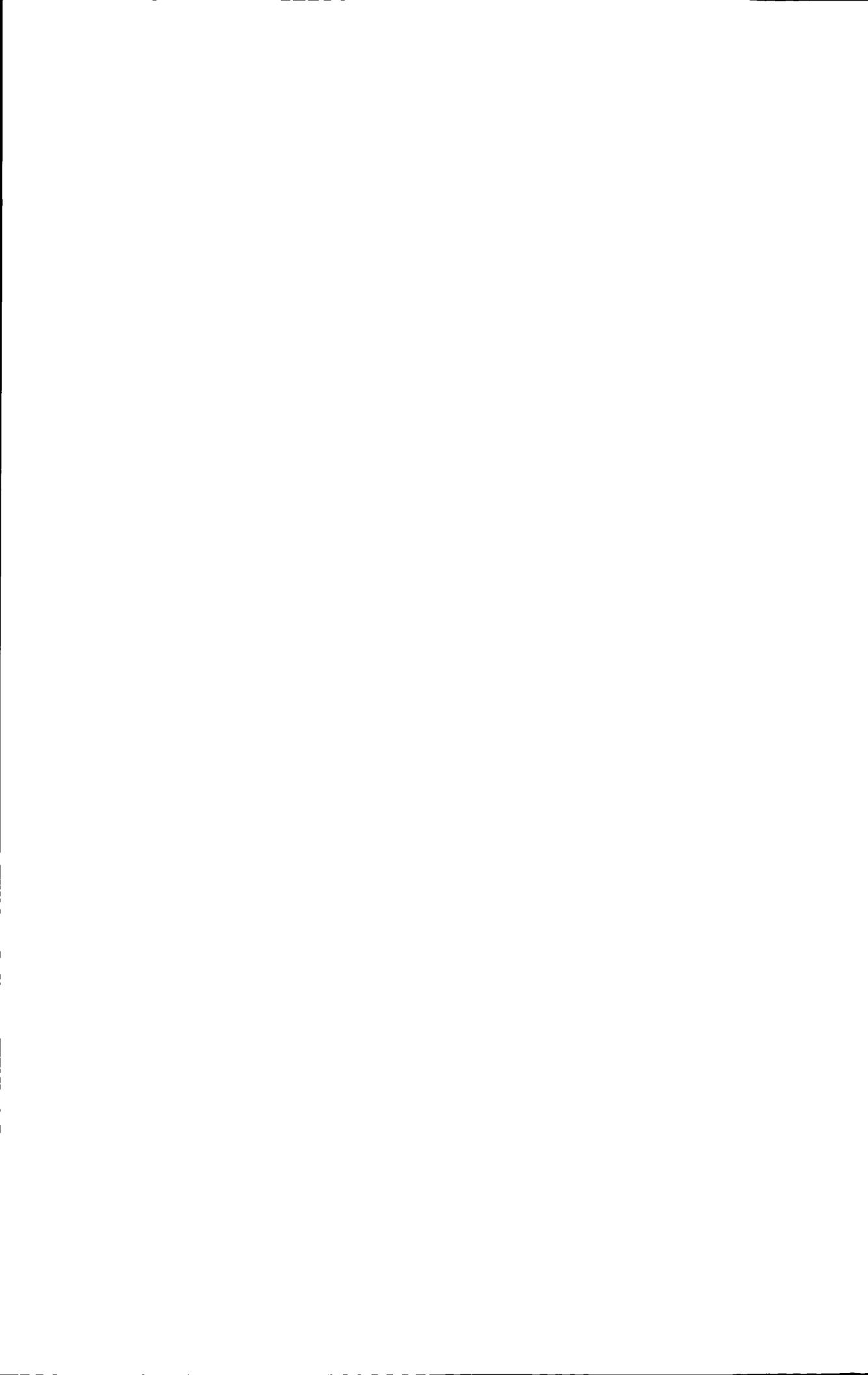
misjudgment, highway management departments' setting the velocity (distance) feedback instrument in the steep and dangerous sections of sharp bends combined with Chevron confirmed signs are recommended.

**KEY WORDS:** partly hydroplaning; FLUENT; stopping sight distance; visibility; rainfall intensity; adhesion coefficient



# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 研究背景 .....	1
1.2 国内外研究概况 .....	2
1.2.1 国外研究现状 .....	2
1.2.2 国内研究现状 .....	4
1.3 本文主要研究内容及技术路线 .....	4
<b>第二章 轮胎滑水的机理及理论模型分析</b> .....	<b>7</b>
2.1 轮胎滑水的机理分析 .....	7
2.2 滑水的类型 .....	9
2.3 滑水的理论模型 .....	10
2.3.1 雷诺方程模型 .....	10
2.3.2 水膜厚度模型 .....	13
2.3.3 轮胎荷载方程 .....	14
2.3.4 汽车滑水方程 .....	14
2.4 本章小结 .....	15
<b>第三章 轮胎结构有限元模拟分析</b> .....	<b>16</b>
3.1 轮胎的基本结构 .....	16
3.1.1 轮胎的组成 .....	16
3.1.2 轮胎的分类 .....	16
3.1.3 轮胎的花纹 .....	18
3.2 轮胎结构有限元模拟 .....	20
3.2.1 代表轮胎的选择 .....	20
3.2.2 轮胎的组成材料及其性质 .....	21
3.2.3 轮胎的变形模拟 .....	24
3.3 本章小结 .....	25
<b>第四章 基于 FLUENT 的轮胎滑水模拟试验分析</b> .....	<b>27</b>
4.1 轮胎的计算参数及试验设计 .....	27
4.1.1 轮胎压缩变形量的确定 .....	27
4.1.2 轮胎接地面积及花纹分布参数的确定 .....	27
4.1.3 试验设计 .....	28
4.2 仿真软件的选择 .....	29
4.3 轮胎模型的建立 .....	30
4.3.1 计算范围及轮胎参数的确定 .....	30
4.3.2 边界条件及初始值的确定 .....	31
4.4 试验数据分析 .....	34
4.4.1 水膜厚度对动水压强的影响 .....	34
4.4.2 行驶速度对动水压强的影响 .....	37
4.4.3 动水压强影响因素的多元回归分析 .....	38
4.5 本章小结 .....	39
<b>第五章 高速公路雨天环境行车安全分析</b> .....	<b>41</b>
5.1 雨天环境道路附着系数对行车安全影响 .....	41



5.1.1 附着系数含义及计算 .....	41
5.1.2 雨天环境道路附着系数影响因素 .....	42
5.1.3 附着系数对制动距离的影响 .....	46
5.1.4 雨天环境下停车视距计算模型 .....	47
5.2 雨天能见度对行车安全的影响 .....	48
5.2.1 降雨的定义及雨环境的分类 .....	48
5.2.2 降雨对能见度的影响 .....	49
5.2.3 驾驶员行车间距判断的反应规律 .....	52
5.3 本章小结 .....	56
<b>第六章 部分滑水时高速公路行车安全性改善措施 .....</b>	<b>57</b>
6.1 设计标准的补充完善 .....	57
6.1.1 停车视距纵坡修正 .....	57
6.1.2 安全车速建议 .....	60
6.2 管理改善措施 .....	63
6.3 本章小结 .....	64
<b>第七章 结论与展望 .....</b>	<b>65</b>
7.1 主要结论 .....	65
7.2 本文创新点 .....	65
7.3 展望 .....	66
<b>致 谢 .....</b>	<b>67</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>68</b>
<b>在学期间发表的论著及参与的科研项目 .....</b>	<b>71</b>
<b>附录部分 .....</b>	<b>72</b>



# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景

阴雨天气里道路表面覆盖一层水膜，汽车在道路上行驶，由于水膜的润滑作用，使得轮胎与路面的附着系数显著降低，经验不丰富的驾驶员在行车及制动时极易发生误判，导致交通事故发生。日本高速公路在 1992 年、1993 年死亡事故中，与雨天有关的占 42%；美国 2001 年雨天发生的事故次数占非晴天事故比例的 75.11%<sup>[1]</sup>（图 1.1）；王宝书<sup>[2]</sup>等人利用 1999–2002 年的气象、交通资料，对长春市的交通事故进行统计分析，发现雨天发生事故的平均数明显高于平均值（表 1.1）

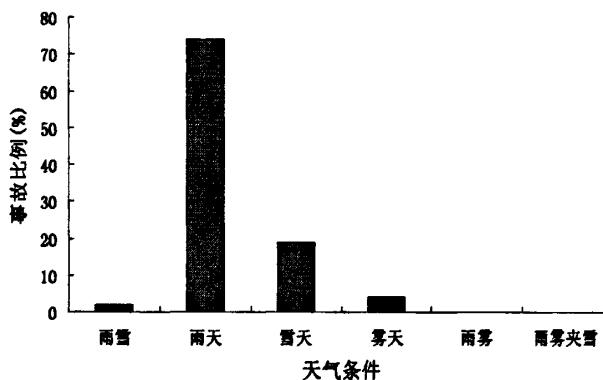


图 1.1 美国 2001 年非晴天事故分类比例比例

Fig1.1 American accident in different weather condition (2001)

表 1.1 交通事故天气条件比较

Tab1.1 Comparison the number of accident in different weather condition

天气	雨	雪	轻雾	大雾	大风	阴天	雨夹雪	晴天	平均
天数百分比 (%)	4.63	3.93	1.18	0.27	3.18	26.3	0.21	60.3	12.5
交通事故率 (%)	4.86	3.83	1.05	0.31	2.87	26.59	0.19	60.8	12.5
日平均事故数	40.24	37.34	34.43	44.97	28.75	38.79	33.65	38.69	38.64

车辆行驶速度过快，积水不能及时从轮胎花纹中排出，会产生较大的动水压强导致轮胎与路面发生分离，这种现象称为滑水或水漂现象（图 1.2），根据轮胎与路面接触程度不同，滑水可分为完全滑水和部分滑水。当轮胎与路面发生完全分离时为完全滑水；轮胎与路面存在部分接触区域时为部分滑水。受行车速度和驾驶员本能意识等因素的影响，雨天行车大都发生的是部分滑水。部分滑水现象的产生会导致制动失控，转向不灵，汽车很容易偏离正常的行驶方向，并使得轮胎动力产生差值造成车辆旋转<sup>[3-4]</sup>。对于驾驶员来说，滑水现象是突然发生的，并且毫无征兆，再加上山区高速公路常见的急弯、陡坡，行车安全问题比平原区高

速公路更加突出，因此引发的重特大交通事故屡见不鲜。例如 2001 年 8 月 23 日晚 9 时，在陕西省凤县境内灵官峡路段，由于雨后路滑，山路险峻，甘肃省一辆卧铺客车摔下悬崖，客车上有 50 人，死亡 32 人，伤 18 人，造成特大交通事故（见图 1.3）；2009 年 6 月 21 日，在成渝高速由于降雨影响造成一车辆突然打滑导致 16 辆车连环相撞，高速路封闭 3 小时<sup>[5]</sup>（见图 1.4）。

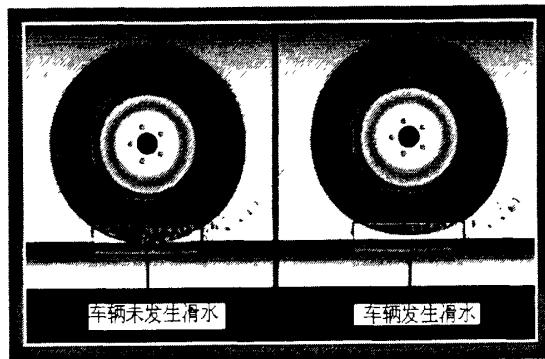


图 1.2 车辆滑水示意图

Fig1.2 Hydroplaning schematic



图 1.3 2001 年 8.23 灵官峡特大交通事故

Fig1.3 Serious accident

in Lingguanxia, 2001.8.23



图 1.4 2009 年 6.21 成渝高速特大事故

Fig1.4 Serious accident

in ChengYu Expressway, 2009.6.21

由于雨天环境下车辆与路面的动态附着力影响车辆行驶安全，而动态附着力与水膜厚度有很大关系。因此，通过研究路面水膜在轮胎胎面与路面界面接触过程中的影响机理和规律，对于确定部分滑水条件下高速公路车辆安全行驶策略具有重要意义。

## 1.2 国内外研究概况

### 1.2.1 国外研究现状

20世纪60年代，Horne, W. B和Leland, T. J. W通过实验建立了最早的滑水方程

<sup>[6]</sup>并广泛应用于轮胎、航空、汽车等行业：

$$V_p = 6.36\sqrt{P} \quad (1.1)$$

式中  $V_p$ ——临界滑水速度 (km/h)；

$P$ ——轮胎气压 (kPa)。

20世纪70年代, Schlosser L H M<sup>[7]</sup>研究了1965—1966年发生在荷兰国道上的36364起事故, 其中2360起发生于雨天的高速公路, 5243起发生在雨天的其他等级道路。其研究结果表明, 随着抗滑值的下降, 事故率呈指数型增加。

同一时期, Schulze K H, Gerbaldia 和 Chavet J<sup>[8]</sup>研究了发生在德国高速公路和主要公路80个路段上的交通事故, 得到了雨天发生事故的百分率与摩擦系数的关系(图1.5)。

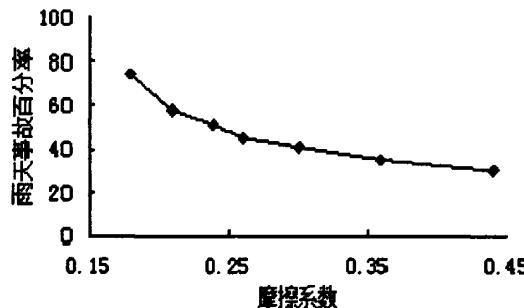


图 1.5 雨天事故率和摩擦系数之间的关系

Fig 1.5 The relationship between accident rate of rainy day and coefficient of friction

Burchett J L 和 Rizenbergs R L<sup>[9]</sup>在肯塔基州进行了两项有关交通事故的统计学研究。第一项为两年时期内发生的29883次事故, 其中有5930次发生在雨天; 第二项为一年时期内发生在7100km双车道乡村道路上的16533起交通事故, 其中3785起为潮湿交通事故。分析结果表明, 路面摩擦力的降低会使交通事故显著增加; 同时发现用线性相关拟合交通事故与抗滑能力的关系要比其他函数拟合的效果好。

Hosking J R<sup>[10]</sup>用摆式仪和横向力系数测试车测量英国路面抗滑值并统计了五年内每个月事故发生率以分析二者的特点。结果表明: 夏季的路面抗滑值最低, 冬季的最高, 相对于平均值变化达30%; 而且事故发生率和路面抗滑值有关, 随着抗滑能力的增加, 潮湿路面滑水事故率曲线下降。

Pelloli R<sup>[11]</sup>提出临界滑水速度还与水膜厚度、路面摩擦系数、轮胎花纹类型有关。在此之后, 对于轮胎滑水现象的研究逐渐应用数值模型和有限元的方法。但是由于轮胎是一种复合材料, 主要由橡胶、帘线组成, 具有高度的非线性、非压缩性、各向异性和粘弹性特点, 再加上水流状态的复杂性以及不同路面类型性能差别使得数值模型法发展缓慢。

Robert D. Ervin 和 Luis Balderas<sup>[12]</sup>通过对不同轮胎花纹深度的货车进行滑水测试, 数据表明发生滑水后驱动轮的牵引性能下降很快。当驱动轮轮胎花纹深度为1.6毫米时, 牵引力是正常的30~50%, 确保驱动轮轮胎花纹深度对防止滑水有重要作用。

Manjijnath Mavinakere<sup>[13]</sup>通过CFD技术, 比较纵向花纹轮胎和光面轮胎模型在三种车速(30、60、90km/h)下发生滑水的情况。结果表明: 当水膜厚度与轮胎花纹深度相近时, 花纹轮胎丧失排水能力, 其性能与光面轮胎几乎相同。

21世纪初, 新加坡的T. F. Fwa, Santosh S. Kumar, G. P. Ong 和 C. J. H. Huang<sup>[14]</sup>通过建立三维有限元模型并运用 fluent 软件研究轮胎滑水现象, 得出了完全滑水车速与轮胎花纹深度、水膜厚度的关系式(式1.2), 但没有涉及部分滑水问题以及轮胎的荷载变形对排水作用的影响。

$$V = 96.45 + 1.631TD - 1.307WD \quad (R^2 = 0.99) \quad (1.2)$$

式中:  $V$  ——发生完全滑水的车速, km/h;

$TD$  ——轮胎花纹深度, mm;

$WD$  ——水膜厚度, mm。

### 1.2.2 国内研究现状

关于车辆滑水方面的研究国内较少涉及, 佳木斯大学的栾锡富和周俊<sup>[15]</sup>以ADAMS 软件为平台, 创建了滑水现象的动态仿真模型, 但建模时没有考虑轮胎花纹对水流的影响。同济大学的李少波等人<sup>[16]</sup>应用伯努利定理计算得到了理想状态发生滑水的动水压强理论值, 并进行了实际测量, 仅回归分析了实测动水压强与行车速度的关系式。

东南大学的季天剑<sup>[17~20]</sup>在推导水膜产生动水压强的计算方法时, 假设通过花纹沟槽的水分能以原有的速度排除, 不发生动能损失, 故认为将动水压强乘以花纹的密度系数就可得到轮胎胎面单元受到的平均动水压强, 并没有考虑轮胎花纹排水作用对动水压强的抑制。在对轮胎滑水分析时虽然考虑了路面粗糙对水流的影响, 回归得出轮胎发生动力滑水时轮胎与路面接触区域内平均水膜厚度与速度的关系(式1.3), 并没有考虑轮胎花纹深度、道路附着系数等因素对滑水的影响。

$$h = 0.001V^2 - 0.2798V + 21.499 \quad (R^2 = 0.96) \quad (1.3)$$

式中:  $h$  ——接触区的平均水膜厚度, mm;

$V$  ——速度, km/h。

## 1.3 本文主要研究内容及技术路线

随着水文学和计算流体力学的发展, 行车滑水问题的研究也越来越深入。目

前已有的研究主要集中在水膜厚度和速度方面,对轮胎花纹布设、降雨强度、附着系数与部分滑水的关系研究较少。为了弥补上述研究的不足并进一步深入研究部分滑水现象对行车安全的危害,本文提出了以下的研究内容:

#### ① 轮胎结构有限元模拟分析

汽车轮胎是一种复合材料,主要由橡胶、帘线组成,具有高度的非线性、非压缩性、各向异性和粘弹性。本论文首先考虑轮胎压缩变形性能,结合西南地区高速公路坡度较陡、轮胎磨耗量大的特点选取合适的代表轮胎,根据代表轮胎相关参数建立有纵横向花纹的轮胎有限元模型,通过试验分析轮胎在代表车型荷载下的变形量。

#### ② 轮胎滑水临界条件研究

当轮胎在水膜覆盖的路面上高速行驶时,轮胎与路面间实际接触区域内的水可能没有被完全排出,那么由于流体的压力就会使轮胎上浮,从而降低了轮胎在路面上的附着能力。本论文计划通过调整模型中水膜厚度,研究轮胎模型在不同水膜厚度(分别采用1mm, 2mm, 5mm, 8mm, 10mm, 12mm, 15mm, 18mm, 20mm)发生部分滑水时的动水压强,回归动水压强与行车速度、水膜厚度、轮胎花纹深度的关系函数。

#### ③ 雨天环境下高速公路行车安全性研究

雨天对高速公路行车安全性影响主要集中在附着系数和能见度的降低。影响附着系数的因素很多,与速度、轮胎气压、轮胎花纹类型、路面积水深度以及道路表面特征有关。本文计划通过模拟轮胎发生部分滑水得到的动水压强计算该行车条件下的附着系数,回归分析部分滑水时轮胎与路面接触面积的减少导致附着系数降低的变化规律。针对雨天环境导致驾驶员视野下降和视线模糊的问题,本文计划进行不同天气条件下(晴天、小雨、中雨)驾驶员行车间距判断试验,获取驾驶员估计行车间距与真实行车间距的差异规律。

#### ④ 部分滑水时高速公路行车安全性改善措施研究

针对目前路线设计规范的不足,本文计划分析能见度、道路纵坡、圆曲线半径和路面附着系数对雨天停车视距及车速的影响,从设计和管理的角度提出雨天环境高速公路停车视距的纵坡修正值和安全车速建议值。

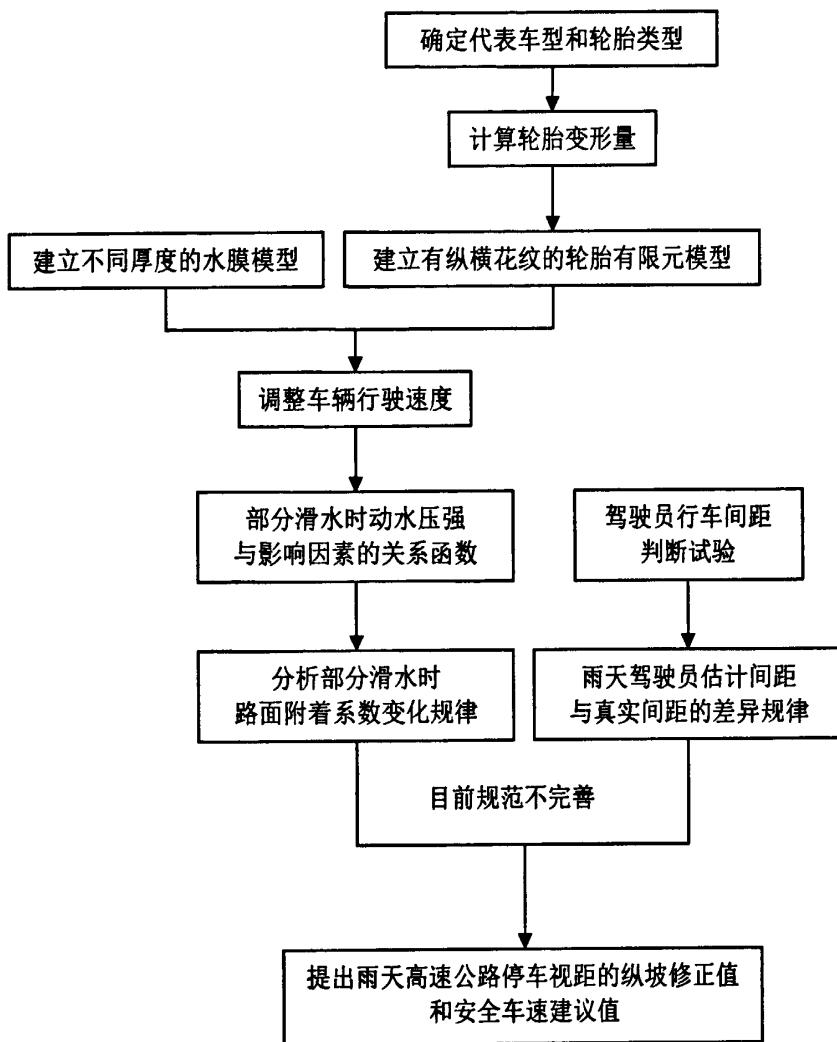


图 1.6 技术路线图

Fig1.6 Research technique route

## 第二章 轮胎滑水的机理及理论模型分析

### 2.1 轮胎滑水的机理分析

汽车在积水路面行驶时，轮胎与道路之间的接触存在三种不同的接触区域，如图 2.1 所示<sup>[13]</sup>。接触区域 A 区是完全悬浮区域，在此区域内的动水压强能够使得轮胎完全与路面脱离，轮胎不能产生任何制动或驱动力。水膜被轮胎推向两侧，水膜厚度逐渐减薄；接触区域 B 区为不完全接触区域，在这个区域内路面构造凸处的积水已被轮胎排出形成干燥区，而路面构造凹处仍有积水存在；接触区域 C 区的水分几乎全部被轮胎排出，接近干燥状态，胎面与路面完全接触，并对汽车产生向前的驱动力。

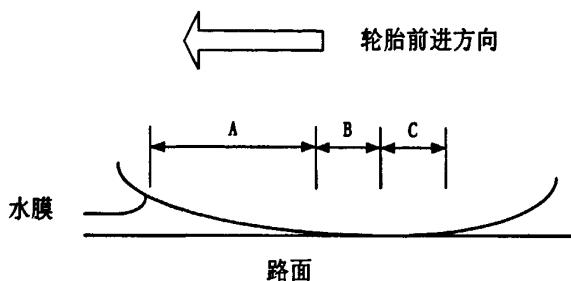


图 2.1 雨天轮胎行驶时与路面的三种接触区域

Fig2.1 Three kind of contact region between tires and pavement in rainy day

当三个区域同时存在时，轮胎与路面的附着力主要产生在 C 区，B 区其次；A 区不会产生任何附着力，水膜由于轮胎的挤压作用会对 A 区产生反作用力，其水平分力为行车阻力，垂直分力会对轮胎产生上浮作用，这种情况为部分滑水状态。上述三个区域的作用范围随路面粗糙度、行车速度等因素的变化而变化。当行驶速度较低时，C 区较长，这时车辆尚保存部分操纵性；随着车辆行驶速度的加快，A 区变长，当车辆行驶速度达到某一临界值时，C 区完全消失，整个轮胎悬浮在水膜之上，车辆发生完全滑水现象，此时汽车完全失去操纵性。

发生滑水时轮胎的受力状况如图 2.2 所示： $G$  为单个轮胎所承受的荷载； $W_h$  为动水压强在水平方向上的分量，该力对轮胎的前进起阻碍作用； $W_v$  为动水压强在竖直方向上的分量，该力承担部分（部分滑水时）或全部（完全滑水时）轮胎荷载。

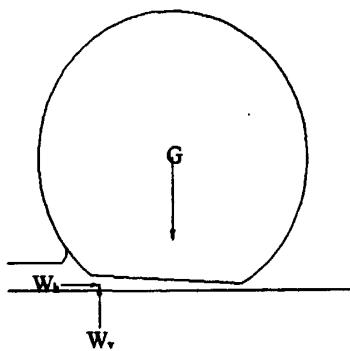


图 2.2 发生滑水时轮胎受力示意图

Fig2.2 Tires stress distribution in hydroplaning

在分析受力过程中可以保持轮胎为静止状态,使得水膜以一定的速度  $V$  相对轮胎运动<sup>[21]</sup>,从而建立以轮胎中心为原点的坐标系(如图 2.3 所示),则轮胎上某一点 B 所受的动水压强可在水平和竖直方向上分解,其数值为:

$$W_h = \int_{S_w} p_h ds \quad (2.1)$$

$$W_v = \int_{S_w} p_v ds \quad (2.2)$$

式中:  $p_h$ —单位面积水膜上的横向力;

$p_v$ —单位面积水膜上的竖向力;

$S_w$ —能够产生动水压强的水膜面积。

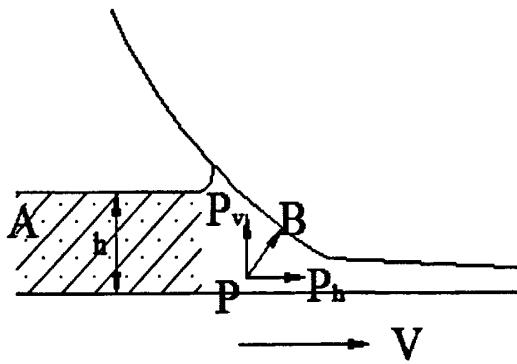


图 2.3 动水压强分量示意图

Fig2.3 Component of hydrodynamic pressure

对于静止液体,由欧拉平衡微分方程式<sup>[22]</sup>可知静水压强只是空间点的位置函数,与作用面的方向无关,即

$$p = f(x, y, z) \quad (2.3)$$

在一般的水利工程中,液体的自由表面都是敞开于大气中,对于所受质量力仅为重力的液体内任意一点的相对压强为

$$p' = \gamma h \quad (2.4)$$

式中:  $p'$ —液体中某一点的相对压强;

$\gamma$ —液体的重度;

$h$ —该点到液面的高度。

对于雨天路面积水, 由于水膜厚度  $h$  太小, 静水压强可以忽略。假设在轮胎发生滑水过程中水膜中某一微元体从 A 点向 B 点运动, 沿途动能不会发生损失, 到达 B 点时由于滑水产生的雍水使得该微元体的速度为零。根据理想液体恒定流的伯努利方程<sup>[22]</sup>

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \quad (2.5)$$

式中:  $Z_1$ 、 $Z_2$ —该点单位重量液体相对某水平基准面具有的位能;

$p_1$ 、 $p_2$ —该点的压强;

$\gamma$ —液体的重度;

$\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ —动能修正系数;

$g$ —重力加速度;

$v_1$ 、 $v_2$ —该点单位重量液体的流速;

可知微元水体对轮胎冲击, 由于轮胎的阻挡作用使得微元水体的动能全部转化为压强, 此时  $Z_1 = Z_2$ 、 $p_1 = 0$ 、 $v_2 = 0$ , 由式 (2.5) 可计算出 B 点的压强为:

$$p = \frac{\rho v^2}{2} \quad (2.6)$$

式中:  $\rho$ —水的密度;

$v$ —车辆行驶速度。

## 2.2 滑水的类型

由轮胎滑水发生的机理可以将滑水分以下几类<sup>[3]</sup>:

### ① 动水压强滑水 (dynamic hydroplaning)

这种滑水现象产生的原因是由于汽车高速行驶导致积水产生的流体动力效应引起的。当行驶速度较低时, 轮胎前端雍水产生的动水压强小于作用在轮胎上的荷载, 导致轮胎与路面不完全接触, 这种现象为部分滑水; 随着车辆行驶速度的增加, 轮胎前端雍水产生的动水压强随之增大, 最终导致轮胎与路面完全分离, 即产生完全滑水现象。此时轮胎与路面不再接触, 车轮发生空转。

### ② 粘滞滑水 (viscous hydroplaning)

该滑水现象产生的原因是由于附着在道路上的水膜被油分、灰尘、油脂或者橡胶所污染, 导致道路变得更为湿滑, 在低速刹车时也能使之完全失去作用。粘滞滑水的原因是水膜的粘度变大, 导致轮胎不能将水膜穿透排出而引起的。由于发生粘滞滑水的水膜厚度小于动力滑水, 因此该滑水现象可发生在任何车速或极

薄的水膜上。

③ 胎面橡胶返原性滑水 (tire tread reversion hydroplaning)

该滑水现象产生的原因是轮胎的高速旋转与路面摩擦生热，接触区内部分水分汽化形成隔离层导致轮胎与路面的分离。这种类型的滑水只有飞机、重型卡车、赛车在高速行驶或急刹车时才会发生。

由于动水压强滑水发生最为常见，因此本文只研究此类滑水现象。

### 2.3 滑水的理论模型

在该理论模型中，轮胎可以简化为表面光滑、以一定速度运行的橡胶块，路面粗糙，橡胶块与路面之间存在一定厚度的水膜（图 2.4）。随着橡胶块向前移动，水膜从橡胶块前端进入，从后端排出。

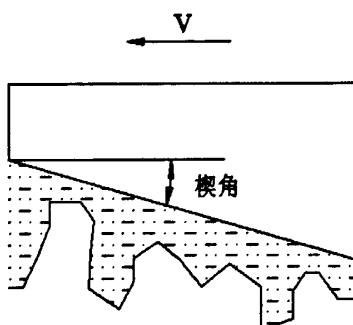


图 2.4 轮胎与积水路面接触示意图

Fig 2.4 The contact between tires and pavement with water film

#### 2.3.1 雷诺方程模型

路面上流动的积水由于道路构造深度的影响使得积水中的质点在空间和时间上高度无规律运动，并且发生着强烈的速度脉动和动量混合导致  $Re > 500$ ，因此这种状态为湍流状态。道路表面不同部位粗糙系数、水膜压力、水膜厚度等都是随机变量，假设发生滑水时轮胎不会在道路上发生横向位移，可以将其转化为平面问题，建立轮胎与路面的润滑系统（图 2.5）。在轮胎和路面两个滑动体间取出一个微元体，其受力状态如图 2.6。



图 2.5 产生滑水时的润滑系统

Fig 2.5 The lubrication system which composed by tyres and pavement with water film

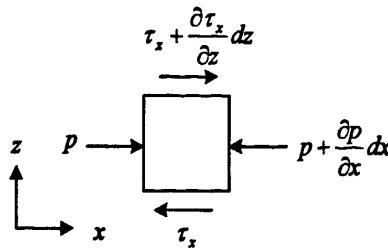


图 2.6 微元体受力图

Fig 2.6 The analyse of stress in microelement tires

微元体左侧由于滑水所产生的压强计作  $P$ ，右侧的压强为  $p + \frac{\partial p}{\partial x} dx$ ，微元体上表面剪应力为  $\tau_x + \frac{\partial \tau_x}{\partial z} dz$ ，下底面剪应力为  $\tau_x$ 。因此  $x$  方向的受力状态可知<sup>[17]</sup>：

$$pdz + (\tau_x + \frac{\partial \tau_x}{\partial z} dz)dx = (p + \frac{\partial p}{\partial x} dx)dz + \tau_x dx \quad (2.7)$$

根据牛顿内摩擦定律可知  $\tau_x = \eta \frac{\partial u}{\partial z}$ <sup>[22]</sup>，将其带入式 (2.7) 可将其简化为

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (\eta \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (2.8)$$

由于  $p$  和  $\eta$  均不是  $z$  的函数，所以  $\frac{\partial p}{\partial x}$  和  $\eta$  可作为常量，对  $z$  取两次积分可得：

$$u = \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} z^2 + \frac{C_1}{\eta} z + C_2 \quad (2.9)$$

根据雷诺方程的假设条件：当  $z=h_1$  时， $u=U_1$ ； $z=h_2$  时， $u=U_2$  ( $U_1$ 、 $U_2$  分别为轮胎和路面沿  $x$  轴运动的速度)，因此  $C_1$  和  $C_2$  为：

$$C_1 = \eta \frac{U_2 - U_1}{h_2 - h_1} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} (h_2 + h_1) \quad (2.10)$$

$$C_2 = U_1 + \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} h_1 h_2 - \frac{U_2 - U_1}{h_2 - h_1} h_1 \quad (2.11)$$

将式 (2.10)、(2.11) 代入式 (2.9) 可得

$$U = \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} z^2 + \left[ \frac{U_2 - U_1}{h_2 - h_1} - \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} (h_2 + h_1) \right] z + U_1 + \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} h_1 h_2 - \frac{U_2 - U_1}{h_2 - h_1} h_1 \quad (2.12)$$

设  $x$  方向的单位体积流量为

$$q_x = \int_{h_1}^{h_2} U dz \quad (2.13)$$

将式 (2.13) 代入式 (2.12)，对  $q_x$  积分可得

$$q_x = -\frac{h^3}{12\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{2} h (U_1 + U_2) \quad (2.14)$$

由于单位体积流量的质量  $m_x = \rho q_x$  ( $\rho$  为水的密度)，因此

$$m_x = -\rho \left( \frac{\rho h^3}{12\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{2} h(U_1 + U_2) \right) \quad (2.15)$$

根据流体力学可知, 单位时间内流体在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向流进, 流出控制体的流体质量差分别为:

$$\begin{cases} \Delta m_x = -\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} dx dy dz \\ \Delta m_y = -\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} dx dy dz \\ \Delta m_z = -\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} dx dy dz \end{cases} \quad (2.16)$$

根据质量守恒定律, 单位时间内流进、流出控制体的流体质量差应等于控制体内因流体密度变化所引起的质量增量: 即

$$\begin{aligned} \Delta m_x + \Delta m_y + \Delta m_z &= \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz \\ \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

由于上述润滑系统假设轮胎发生滑水时沿道路横向不会发生变化, 因此式 (2.17) 中  $y$  项为零。对变量  $z$  取积分, 由于  $z=h_1$  时  $w=W_1$  和  $z=h_2$  时  $w=W_2$  ( $W_1$ 、 $W_2$  分别为轮胎和路面沿  $z$  轴运动的速度), 得

$$\rho \left( \frac{\partial h_2}{\partial t} + U_2 \frac{\partial h_2}{\partial x} - \frac{\partial h_1}{\partial t} - U_1 \frac{\partial h_1}{\partial x} \right) = - \int_{h_1}^{h_2} \frac{\partial \rho}{\partial t} dz - \int_{h_1}^{h_2} \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dz \quad (2.18)$$

由于  $U_1 \frac{\partial h_1}{\partial x}$  和  $U_2 \frac{\partial h_2}{\partial x}$  指的是  $x$  方向的运动引起  $z$  方向的位移, 对式 (2.18) 进行求导变换, 得:

$$\frac{\partial m_x}{\partial x} + \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = 0 \quad (2.19)$$

将式 (2.15) 代入式 (2.19), 联立求得

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6 \frac{\partial}{\partial x} (\rho(U_1 + U_2)h) + 12 \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} \quad (2.20)$$

式 (2.20) 为等温条件的平均雷诺方程<sup>[23-24]</sup>, 由于  $Uh \frac{\partial \rho}{\partial x}$  代表变密度效应,  $\rho h \frac{\partial U}{\partial x}$  代表伸缩效应,  $U\rho \frac{\partial h}{\partial x}$  代表动压效应,  $\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}$  代表挤压效应, 因此上式是同时考虑了滚动动压、滑动动压和挤压效应的雷诺方程。

由式 (2.20) 可知, 等温条件下的雷诺方程包括液体密度、厚度、粘度的参数, 三者与动水压强相互影响, 只有对其进行联立才能求出结果。在上述的等温条件润滑系统中, 水的密度变化几乎不变, 则  $Uh \frac{\partial \rho}{\partial x}$  所代表变密度效应可以忽略; 在该

润滑系统与大气相接触, 为明渠流状态, 故  $\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}$  所代表挤压效应不产生作用。因此可以将式 (2.20) 进行简化为如下形式:

$$\frac{d}{dx} (h^3 \cdot \frac{dp}{dx}) = 6V \frac{dh}{dx} \quad (2.21)$$

由于汽车产生滑水时, 轮胎所受到的摩擦力几乎为零, 则可以将坐标系建立在轮胎中心, 保持轮胎为静止状态, 使得水膜和路面以一定的速度  $V$  相对轮胎运动 (见图 2.7)。

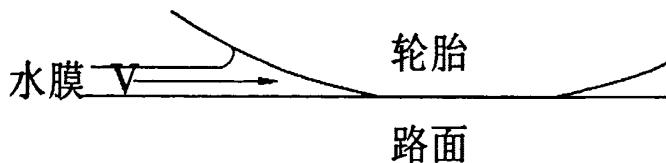


图 2.7 汽车滑水坐标转换示意图

Fig 2.7 Conversion of coordinates in hydroplaning

### 2.3.2 水膜厚度模型

汽车发生滑水后, 轮胎与路面之间间隔着一层水膜, 水膜厚度与轮胎的变形数值相互影响, 因此发生滑水后水膜厚度可以用下列公式计算<sup>[24]</sup>:

$$h = h_0 + h_1 \quad (2.22)$$

式中:  $h_0$ —胎面单元与路面成一定楔角时低角点的高度值;

$h_1$ —胎面单元在垂直方向上的变形值。

合肥工业大学的朱永刚通过研究橡胶材料的粘弹性性能得到了橡胶轮胎在垂直集中力  $P$  作用下胎面单元的垂直变形公式<sup>[25]</sup>:

$$h_1 = \iint_{dA} \frac{p}{\pi \rho} \left[ \frac{1}{2q_0} - \frac{q_1 - q_0 p_1}{2q_0 q_1} e^{\left( \frac{q_0 t}{q_1} \right)} \right] dx dy \quad (2.23)$$

式中:  $dA$ —胎面单元的单位网格区域面积;

$\rho$ —变形点距离集中力作用点 (轮胎中心) 的距离;

$P$ —垂直集中载荷;

$q_0$ 、 $q_1$ 、 $p_1$ —与胎面单元、路面材料的弹性模量相关的计算系数;

$t$ —时间变量。

则公式 (2.22) 可以改写为:

$$h = h_0 + \iint_{dA} \frac{p}{\pi \rho} \left[ \frac{1}{2q_0} - \frac{q_1 - q_0 p_1}{2q_0 q_1} e^{\left( \frac{q_0 t}{q_1} \right)} \right] dx dy \quad (2.24)$$

### 2.3.3 轮胎荷载方程

轮胎在汽车荷载  $P$  的作用下与路面接触会发生变形，其二者的接触面可近似按照平面进行处理（图 2.8）。接触面的宽度为  $b$ ，并随着轮胎荷载的增大而增大；接触区中心变形比两侧大，其接触区的压力分布如图 2.9 所示。

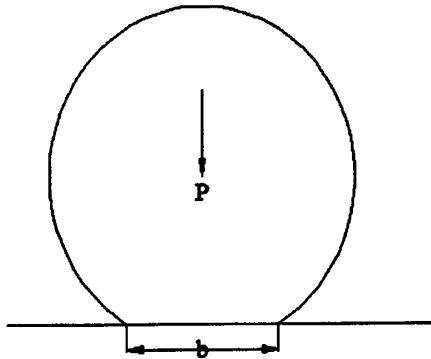


图 2.8 轮胎与路面接触变形示意图

Fig2.8 Transformation of the tires

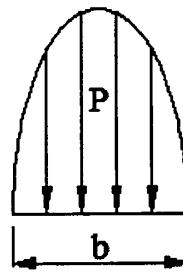


图 2.9 轮胎与路面接触区域压力分布示意图

Fig2.9 Stress distribution in the area of transformation

当轮胎发生滑水后，在整个润滑的水膜厚度范围内，对压强  $p$  求积分，即可得出滑水时水膜所受到的轮胎荷载：

$$N = \int_0^b p dx \quad (2.25)$$

式中：  $N$  — 水膜所受到的轮胎荷载；

$p$  — 单位长度水膜所受到的轮胎荷载。

### 2.3.4 汽车滑水方程

由上文可知，与汽车滑水相关的方程有：

① 等温条件的雷诺方程

$$\frac{d}{dx} (h^3 \cdot \frac{dp}{dx}) = 6V \frac{dh}{dx} \quad (2.26)$$

② 水膜厚度方程

$$h = h_0 + \iint_{\Delta} \frac{p}{\pi \rho} \left[ \frac{1}{2q_0} - \frac{q_1 - q_0 p_1}{2q_0 q_1} e^{\left( \frac{q_1}{q_0} \right)} \right] dx dy \quad (2.27)$$

③ 轮胎荷载方程

$$N = \int_0^b p dx \quad (2.28)$$

对于式 (2.28)，当  $x=0$  和  $x=b$  时为轮胎与路面接触的临界区域，故此时水膜所受到的轮胎荷载为 0，因此可将其作为汽车滑水方程的边界条件将上述三式联立求解。

## 2.4 本章小结

本章主要从动水压强的角度研究了汽车产生滑水的机理，并对产生滑水的理论模型进行了分析，得到以下结论：

① 推导出汽车滑水时理想动水压强计算公式

由汽车发生滑水时轮胎的受力状况，得出动水压强在竖直方向上的分量使汽车产生滑水，并通过恒定流的伯努利方程推导出汽车滑水时理想动水压强的计算公式。

② 分析得出汽车滑水方程

通过弹性流体动力润滑理论，从发生滑水时的水流状态、水膜厚度与轮胎变形的关系、水膜所受到轮胎荷载的角度综合分析得出汽车滑水方程：

$$1) \frac{d}{dx}(h^3 \cdot \frac{dp}{dx}) = 6V \frac{dh}{dx};$$

$$2) h = h_0 + \iint_{\Delta} \frac{p}{\pi \rho} \left[ \frac{1}{2q_0} - \frac{q_1 - q_0 p_1}{2q_0 q_1} e^{\left( \frac{q_1}{q_0} \right)} \right] dx dy;$$

$$3) N = \int_0^b p dx$$

### 第三章 轮胎结构有限元模拟分析

汽车轮胎的基本职能是支撑车辆重量，传递驱动和制动力矩，提供吸振与包络能力以及保证转向稳定性。此外，轮胎还必须具有诸如抗磨性、低滚动阻力、耐久性、安全性等性能特点。

#### 3.1 轮胎的基本结构

##### 3.1.1 轮胎的组成

轮胎由胎面、胎肩、胎侧、胎圈四部分组成。如果再细化一些，那就有胎面沟纹、防擦线、标志线、助理、胎圈底面、胎趾等部分。对有内胎的轮胎，还有内胎、气门嘴及势带等部分。轮胎结构材料的名称有：胎面胶、胎侧胶、帘布层、气密层、钢丝圈、胎圈包布、帘杯层包布、带束（缓冲层）、辅助缓冲层等<sup>[3]</sup>。

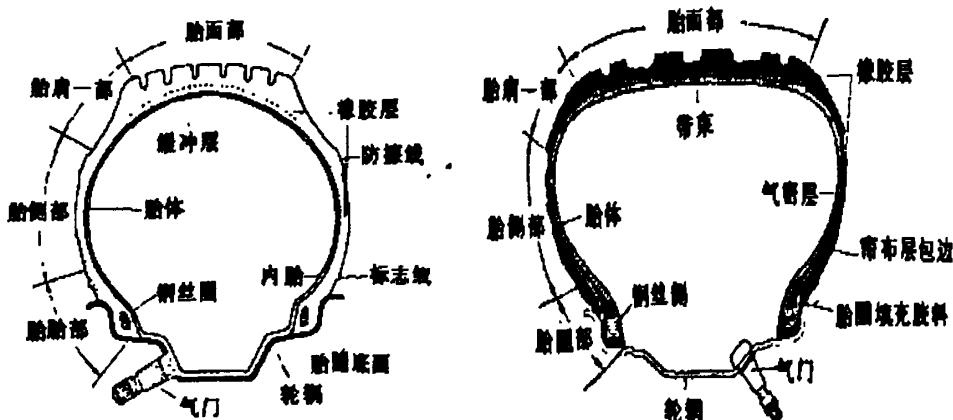


图 3.1 斜交轮胎的各部分名称 (以轿车为例) 图 3.2 子午线轮胎的各部分名称 (以轿车为例)

Fig.3.1 The composition of diagonal tire

Fig.3.2 The composition of radial tire

##### 3.1.2 轮胎的分类

汽车轮胎按用途可分为：轿车轮胎、载重车轮胎、摩托车轮胎和特种车辆及工程机械用轮胎等。按花纹可分为：普通花纹轮胎（横沟花纹轮胎与纵沟花纹轮胎）、混合花纹轮胎（横沟与纵沟兼有花纹轮胎）和越野花纹轮胎（砌块花纹轮胎）。按轮胎内空气压力大小可分为：高压轮胎（气压为 490—686kPa）、低压轮胎（气压为 196—490kPa）和超低压轮胎（气压为 196kPa 以下）。按轮胎的结构特点可分为<sup>[3]</sup>：斜交轮胎、子午线轮胎和带束斜交轮胎三种基本结构，其他轮胎是在这三种基本结构的基础上发展而来。

###### ① 斜交结构轮胎

斜交轮胎又称普通结构轮胎，其胎体帘布层是由数层挂胶帘布组成，相邻

的帘布层帘线角度相同，相互交叉排列，帘布层数一般为偶数，这样能使胎体帘布层负荷均匀分布。斜交轮胎胎冠帘线角度通常取 48 度到 55 度之间，帘布层分为内帘布层和外帘布层两部分。内帘布层是胎体主要的骨架层，其特点是层数多，帘线密度较密，使胎体强度增大。外帘布层位于内帘布层与缓冲层之间起过度作用，又称之为胎体的辅助层，其特点是层数少，帘线密度较内帘线稀疏，附胶量较多，捏着强度较高，缓冲层位于外帘布层与胎面胶之间，其结构由胶片或两层以上挂胶帘线组成，布层的上，下或中间加贴缓冲胶层。现在，斜交轮胎为了在制作工艺上的简化，提高使用效能和经济效益，已趋于轻量化减层化。斜交轮胎虽然沿用的时间很长，使用的范围很广，生产技术也有了一定的基础，但由于其结构上的不合理，影响了发展，逐渐将被子午线轮胎取代。

### ② 带束斜交轮胎

带束斜交轮胎又称半子午线轮胎，是指以带束层箍紧斜交轮胎胎体的充气轮胎。其结构特点是带束层帘线排列与斜交轮胎接近，缓冲层与子午线轮胎相仿。该轮胎的使用性能介于斜交轮胎和子午线轮胎之间，其生产方法基本上与斜交轮胎相同。这种轮胎世界上只有美国生产，作为由斜交轮胎向子午线轮胎过渡的产物，随着子午线轮胎的发展，这种轮胎将逐渐被淘汰。

### ③ 子午线轮胎

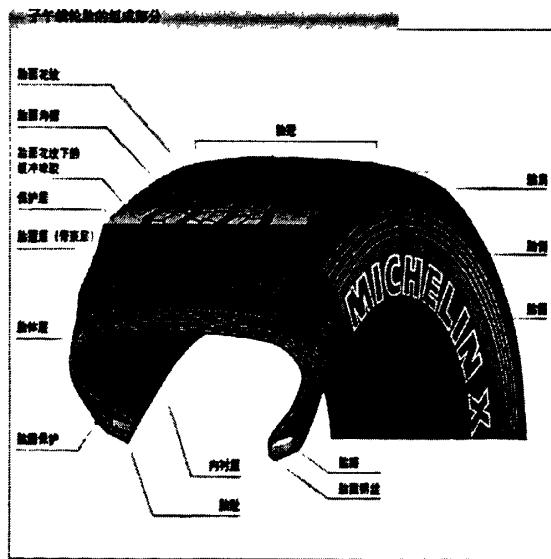


图 3.3 子午线轮胎结构图

Fig3.3 The composition of radial tire

子午线轮胎简称子午胎，该轮胎的帘线与外胎断面接近平行，像地球子午线排列（图 3.3），帘线角度小，一般为 0°，胎体帘线之间没有维系交点，当轮胎在行驶过程中，冠部周围应力增大，会造成周向伸张，胎体成辐射状裂口。因此子午线轮胎的缓冲层采用接近周向排列的打交道帘线层，与胎体帘线角度

成  $90^\circ$  相交, 一般  $70^\circ$  到  $78^\circ$ , 形成一条几乎不能伸张的刚性环形带把整个轮胎固定, 限制轮胎的周向变形, 这个缓冲层承受整个轮胎 60% 到 70% 的内应力, 成为子午线轮胎的主要受力部件, 故称之为子午线轮胎的带束层。

由于子午线轮胎具有耐磨, 节油, 乘坐舒适, 牵引性, 稳定性及高速性能好的特点, 使其获得了极快的发展。目前国际上子午线轮胎占市场的 80%, 轿车和载重子午线轮胎分别为 90% 和 63%。

### 3.1.3 轮胎的花纹

轮胎花纹的主要作用是为了确保轮胎与路面间的摩擦系数, 防止车轮打滑, 发挥制动、驱动和侧偏等力学特性。但是, 它对耐磨耗性、耐发热性、耐切割性以及振动噪声等特性也都关系重大。因此, 应该根据路面条件和汽车的使用要求合理选用不同类型花纹的轮胎。

轮胎胎面花纹是按照轮胎的类型、结构特性、使用条件和要求来确定的。轮胎花纹类型主要有下列几种<sup>[3]</sup>:

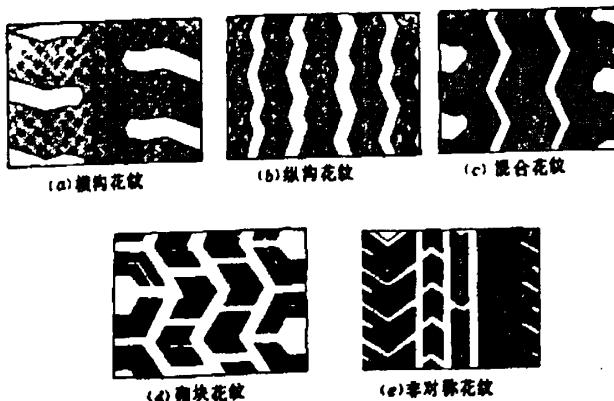


图 3.4 轮胎花纹分类

Fig3.4 Different kinds of grooves in tires

#### ① 横沟花纹

横沟花纹如图 3.4-a 所示, 是以与轮胎转动方向近似成直角的横沟为主体。横沟花纹轮胎的牵引力大, 轮胎胎肩的散热良好, 适用于在一般硬路面上工作的重型货车等。然而此种花纹因胎面胶厚, 故不适合于容易发热的高速行驶。

#### ② 纵沟花纹

纵沟花纹如图 3.4-b 所示, 该轮胎以几条纵沟为主体, 适用于在良好路面上行驶的载重车、公共汽车和轿车。这种花纹的滚动阻力小、省油、防侧滑性能好, 散热性能也较好; 但容易夹石子和产生裂口, 防纵滑性能较差。

#### ③ 混合花纹

这种花纹介于纵向花纹和横向花纹之间如图 3.4-c 所示。在胎面中部一般

具有曲折形的纵向花纹，而在接近胎肩的两边则制有横向花纹，因此这种型式花纹的轮胎适应能力强，应用范围广泛，它既适用于不同的硬路面，也适用于轿车和货车。

#### ④ 砌块花纹

这种轮胎花纹沟槽宽而深，花纹块接地面积一般为行驶面积的40%—60%。该轮胎在松软路面上行驶时，一部分土壤将嵌入花纹沟槽之中，因此，砌块花纹轮胎的抓着力大。一般适用于越野汽车和工程车辆。经测试，在泥泞路上，同一车型的车辆使用砌块花纹轮胎的牵引力可达普通花纹的1.5倍。

#### ⑤ 非对称花纹

非对称花纹的胎面左右两侧花纹形状不同。由于其增大了转弯时外侧花纹的着地压力，不仅极大地提高了高速转弯性能，并补足了外侧花纹的耐磨性能。但是应注意该轮胎的正确安装方向，因此比较适用于竞技用车及高性能车辆。

轮胎花纹越深，花纹块接地的弹性变形量越大，同时轮胎的滚动阻力也随之增大。如果轮胎花纹过深，则不利于轮胎散热，花纹根部也会因应力过于集中而导致易撕裂、脱落。轮胎花纹过浅不仅影响排水能力、易打滑，而且容易产生滑水现象，稍有疏忽就可能对行车安全造成危害。

为保证行车安全，各轮胎生产厂商一般在轮胎一侧用橡胶条、块标示轮胎的磨损极限（见图3.5），一旦轮胎磨损达到这一标志位置应及时更换，部分国家也对轮胎花纹的最小极限深度作了强制性规定（表3.1）<sup>[17]</sup>。

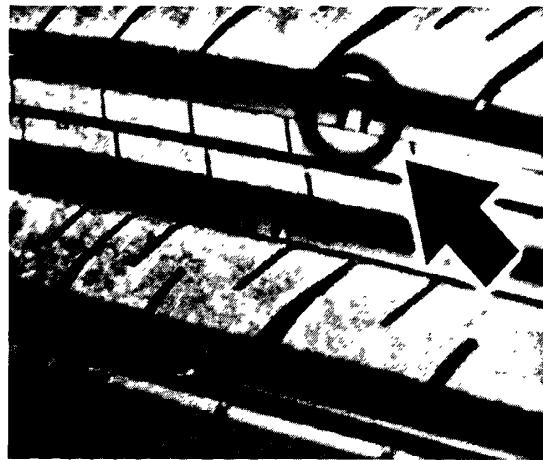


图3.5 轮胎磨损标志

Fig3.5 The mark of maximal abrasion

表 3.1 不同国家的轮胎花纹最小极限深度值 (mm)

Tab3.1 Different countries' regulation about minimal depth of grooves in tires

国家	轮胎类型	
	小轿车	客(货)车
中国	1.6	2
美国	1	1
日本	1.6	3.2

## 3.2 轮胎结构有限元模拟

汽车轮胎是帘布、钢丝和橡胶等复合材料构成的复杂多层结构，因此对其结构和性能的研究是比较困难的，人们曾用薄膜理论、薄壳理论等方法对其进行研究。上世纪八十年代以后，随着计算机技术的飞速发展，有限元理论开始在结构设计中得到广泛应用。Noor A K 和 Tanner A<sup>[26]</sup>在对轮胎结构进行研究时也引进有限元技术并取得一定的成就。因此本文根据相关参数建立有纵横向花纹的轮胎有限元模型，分析轮胎在代表车型荷载下的变形量。

### 3.2.1 代表轮胎的选择

根据国外研究成果，小轿车发生部分滑水事故的概率最大，一方面由于小轿车普遍行驶速度比较高，另一方面小轿车的重量比较轻，使得车辆发生部分滑水时动水压力比较小。结合重庆高速公路交通流量的调查，研究的代表车型选择桑塔纳 Gli (图 3.6，各项参数见表 3.2)，代表轮胎选用回力 195/60R14 尺寸的轮胎，轮胎上施加的荷载为 3430N (350kg)，轮胎内压为 250kPa。(如图 3.7 所示)。



图 3.6 桑塔纳 Gli



图 3.7 回力 028 型轮胎

Fig3.6 Pantana d li

Fig3.7 A00 fl 0 tire of 028

表 3.2 桑塔纳 GLi 参数

Tab3.2 Parameters of Santana Gli

标准引擎	水冷直列四缸四冲程二气门电控汽油喷射	标准变速器	手动 5 档	标准排量	1781cc
气 门 数	8	最大功率	72/5200 KW/rpm	最大扭矩	150/3100
燃油系统	电子燃油喷射式	理论油耗	7.7 升/百公里	最高时速	165km/h
驱动方式	前置前驱	转向助力	助力转向式	轮胎	195/60R14
车身重量	1100kg	轴 距	2548 mm	轮 距	1414/1422mm (前/后)
全车长度	4546 mm	车身宽度	1690 mm	车身高度	1427 mm

### 3.2.2 轮胎的组成材料及其性质

轮胎的组成成分很复杂，主要由橡胶、帘线、帆布、钢丝及各种辅助用剂组成。其中橡胶分为天然橡胶和合成橡胶；帘线又包括纤维、尼龙、的良、钢索等。由于轮胎是各种材料的合成物，因此其力学特征从材料方面就表现为非压缩性、非线性、各向异性和粘弹性<sup>[3]</sup>，单个 P197/75R14 型固特异轮胎的组成见表 3.3<sup>[17]</sup>。

表 3.3 固特异轮胎材料组成表

Tab3.3 Different materials of Goodyear tire

材料名称	质量 (kg)	质量百分比 (%)
合成橡胶 (30 种)	2.49	26.16
炭黑 (8 种)	2.27	23.84
天然橡胶 (8 种)	2.04	21.43
蜡、油、颜料等 (40 种)	1.36	14.29
带束钢帘线	0.68	7.14
聚酯、尼龙	0.45	4.73
钢丝	0.23	2.42

由上表可知，橡胶和炭黑两种材料占轮胎总重的 71.43%，而钢丝和带束钢线通常由金属材料制成，其弹性模量等性能与橡胶材料相差较大。为简化模型计算，可将橡胶、炭黑、帘线、颜料等作为一种材料进行考虑；而钢丝和带束钢线的力学性能与橡胶不同，因此可将其作为加筋材料进行计算。

### ① 橡胶及炭黑

该种材料在较小应力作用下具有高度变形的能力，其最大变形量甚至超过本身长度的百分之几百，因此不能用小变形理论进行分析。

由《材料力学》<sup>[27]</sup>可知，在物体单位长方体的各侧面存在拉伸应力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  时，拉伸应力与应变  $\varepsilon_x$ 、 $\varepsilon_y$ 、 $\varepsilon_z$  的关系为：

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

式中：  $E$  — 弹性模量；

$\nu$  — 泊松比。

若在该物体  $X$  和  $Y$  施加应力，保持应力在厚度  $Z$  方向为 0 (如图 3.8 所示)，则式 (3.1) 可以简化为：

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x) \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

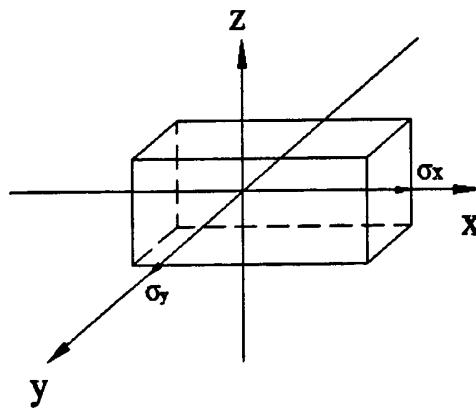


图 3.8 物体双轴受力时的情况

Fig 3.8 Effect of microelement on the biaxial compressive

因此可以计算得出：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E(\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y)}{1 - \nu^2} \\ \sigma_y &= \frac{E(\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x)}{1 - \nu^2} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

若仅在该物体  $X$  方向施加应力,  $Y$  和  $Z$  方向不加任何限制, 即保持  $\sigma_x \neq 0, \sigma_y = \sigma_z = 0$ , 则式 (3.1) 可以简化为:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_y}{E} \\ \varepsilon_y &= -\frac{\nu \sigma_x}{E} \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu \sigma_x}{E} \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

通过式 (3.4) 可知, 当对物体一个方向上施加应力进行拉伸时, 两个方向上会发生收缩现象。

假设橡胶试块长度为  $L_0$ , 宽度为  $W_0$ , 高度为  $H_0$  ( $L_0 \gg W_0, H_0$ ) (见图 3.9)。设橡胶试块  $X$  方向拉力的微分为  $dF$ , 拉伸变形的微小长度为  $dL$ , 由式 (3.4) 可得<sup>[3]</sup>

$$\frac{dL}{L} = \frac{dF}{EHW} \quad (3.5)$$

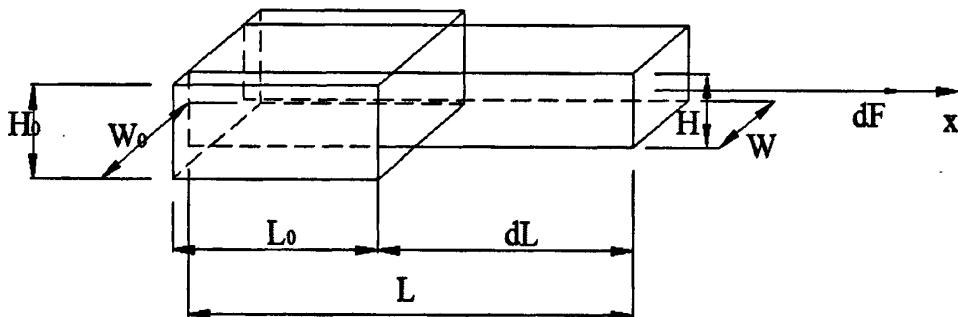


图 3.9 橡胶试块受力后尺寸变化示意图

Fig3.6 The change of shape about rubber block with stress

由于橡胶的泊松比值一般取 0.5, 因此由公式 (3.4) 可计算得出  $\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0$ , 即认为橡胶变形不会导致体积的变化, 则<sup>[3]</sup>

$$HW = V_0 / L \quad (3.6)$$

式中:  $V_0$ —橡胶试块原始体积。

将式 (3.6) 和式 (3.5) 联立, 则

$$\frac{dL}{L} = \frac{dF}{EV_0} \quad (3.7)$$

对上式两边求积分

$$\int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \int_0^F \frac{dF}{EV_0}$$

可求得

$$F = EV_0 \left( \frac{L - L_0}{LL_0} \right) \quad (3.8)$$

由式 (3.8) 可以看出, 轮胎变形时力与伸长量的关系为非线性, 因此轮胎的大变形理论呈现非线性特点。

## ② 加筋材料

加筋材料通常包括而钢丝和带束钢线, 通常由金属材料制成, 一般作为胎圈主体起轮胎骨架的作用, 具有高韧性、耐疲劳的特点, 因此能够保障轮胎高速行驶的安全性, 并且坚固耐用。

张清珍<sup>[28]</sup>通过分析不同轮胎胎圈钢丝的主要技术性能指标, 认为轮胎胎圈钢丝屈强比在 90%—97%、杨氏模量在 130—135GPa 时性能能够达到最佳状态, 否则会对轮胎的韧性和抗变形能力都有影响。

2002 年美国的 Lan Meng<sup>[29]</sup>在通过有限元对轮胎进行分析时, 采用加筋材料的弹性模量为 130GPa, 泊松比为 0.3。

### 3.2.3 轮胎的变形模拟

本文使用 ANSYS 软件建立轮胎有限元模型, 该模型采用六面体单元, 共计 512 个单元 (图 3.10)。两个刚体分别代表轮毂和路面, 各部分材料计算参数见表 3.4。

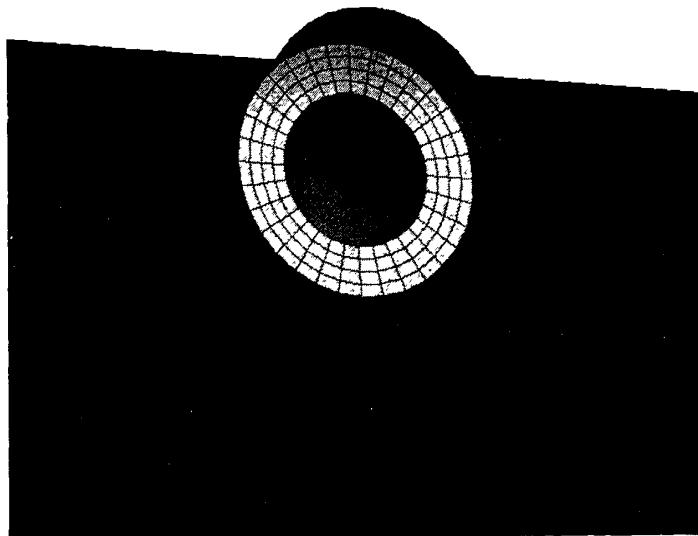


图 3.10 轮胎三维有限元模型

Fig3.10 Three-dimensional finite element model of tires

表 3.4 轮胎各部分材料计算参数

Tab3.4 Different materials' parameters of tire

轮胎气压 kPa	250	
施加的荷载 N	3430	
轮胎型号	195/60R14	
	橡胶	加筋材料
弹性模量 pa	7.84M	130G
泊松比	0.5	0.3
密度 kg/m <sup>3</sup>	1100	7850

### ③ 模拟结果

该轮胎模型在胎压、自重及荷载的作用下，产生的变形见 150

图 3.11，其最大变形量为 17.561mm。根据经验公式<sup>[3]</sup>，子午线轮胎在 3430N 的竖向静力荷载作用的下沉量大约为 17.1mm，与有限元分析的结果相差 2.6%。其结果表明用表 3.4 中的参数建立三维有限元模型来模拟实际轮胎结构是可行的。

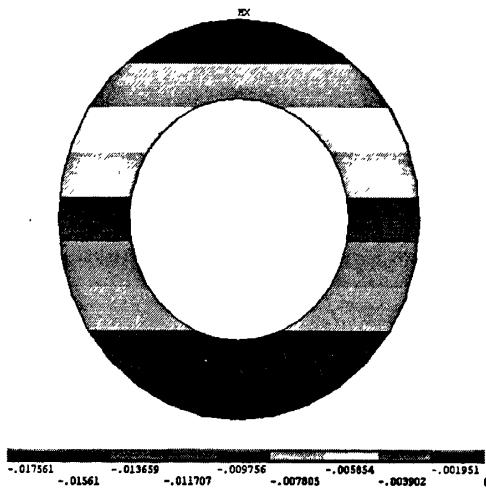


图 3.11 轮胎在竖向荷载下的变形量

Fig3.11 The deformation of model under vertical loading

## 3.3 本章小结

### ① 选取合适代表轮胎及轮胎模型的材料参数

通过比较不同类型轮胎的结构性能，选取回力 195/60R14 型轮胎为代表轮胎，并根据轮胎成分及力学特征分析主要材料的变形理论特点，以选取适合代表轮胎模型的密度、弹性模量和泊松比。

### ② 轮胎变形量的有限元分析

使用 ANSYS 建立回力 195/60R14 型轮胎的三维有限元模型, 计算该模型在代表车型荷载作用下的变形量, 并与经验公式相比较。结果表明通过该力学参数建立的模型与实际轮胎参数比较吻合。

## 第四章 基于 FLUENT 的轮胎滑水模拟试验分析

### 4.1 轮胎的计算参数及试验设计

#### 4.1.1 轮胎压缩变形量的确定

由于轮胎是多种材料组成的复合体，在较小应力作用下具有高度变形的能力，因此只能用大变形理论进行分析。轮胎的变形量通常用压缩系数来表示，其含义为轮胎径向变形与轮胎横断面高度的比值，变形量的计算通常使用经验公式求解。

匈牙利学者 G. Komandi 用不同尺寸的轮胎在不同气压条件下在混凝土路面上进行了实验，并提出轮胎变形  $\delta$  (cm) 的经验公式<sup>[3]</sup>：

$$\delta = c_1 \frac{W^{0.85}}{S_o^{0.7} D^{0.43} P^{0.6}} K_o \quad (4.1)$$

式中  $\delta$ —轮胎压缩变形量 (cm)；

$c_1$ —与轮胎设计有关的参数，对于斜交轮胎  $c_1=1.15$ ；而对于子午线轮胎  $c_1=1.5$ ；

$W$ —轮胎上荷载 (daN)；

$D$ —轮胎外径 (cm)；

$S_o$ —轮胎宽度 (cm)；

$P$ —轮胎内压 (100kPa)。

$$K_o = 15 \times 10 - 3 \times S_o + 0.42$$

根据式 (4.1)，计算本试验中轮胎变形量为：

$$\delta = 1.5 \times \frac{343^{0.85}}{19.5^{0.7} \times 29.48^{0.43} \times 2.5^{0.6}} \times 0.7125 \approx 1.71 \text{ (cm)}$$

为减少与实际的偏差，本文建模时，轮胎变形量取 1.8cm。

#### 4.1.2 轮胎接地面积及花纹分布参数的确定

吉林大学汽车地面力学研究室与长春汽车研究所的试验表明：轮胎的接地形状大多介于矩形和椭圆形之间；而且从测得的接地印痕来看，当轮胎变形较小时，接地形状近似为椭圆；当轮胎变形较大时，接地印痕中间部分为矩形，两端部分是弧形。在本试验中为数值解析的方便，将接地形状简化为矩形，接地面积可用下式近似计算<sup>[3]</sup>：

$$A = \left[ \frac{\pi}{2} D \left( \frac{\delta}{D} \right)^2 + \lambda \frac{4-\pi}{4} L_1 \right] B_o (1 - e^{-t\delta}) \quad (4.2)$$

$$B_o = B e^{t\delta} / (e^{t\delta} - 1) \quad (4.3)$$

式中 A—接地面积 (cm<sup>2</sup>);

$L_1$ —接触宽度 B 达到 0.95Bo 时的接地长度 (cm);

Bo—胎冠宽度 (cm);

D—轮胎外径 (cm);

$\lambda$ —系数, 当  $B < 0.95Bo$  时,  $\lambda = 0$ ; 当  $B \geq 0.95Bo$  时,  $\lambda = 1$ ;

B—接触宽度 (cm)。

表 4.1 各种轮胎 s、t 值

Tab4.1 Different tires's、t parameter

轮胎种类	5.60R16	5.60-16	5.00-10	4.00-12
结构类型	子午线	斜交	子午线	斜交
层级数	6	6	4	6
s	0.557	0.553	0.576	0.559
t	122.7	108.9	181.1	113.8

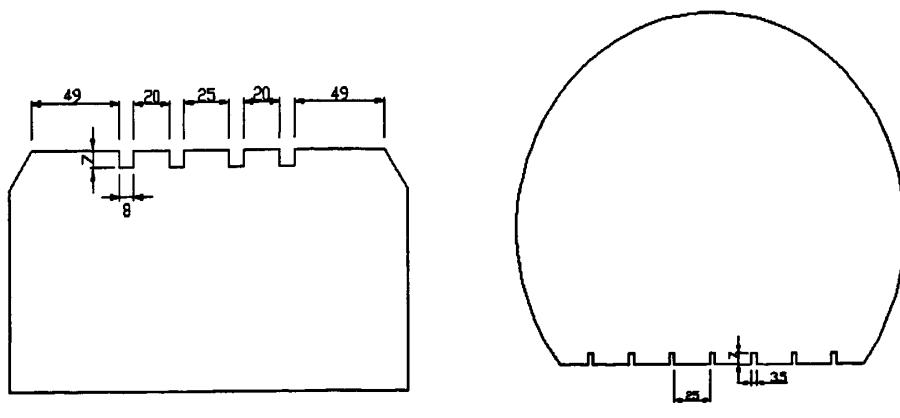
根据本试验的参数 (表 4.1) 计算得出接地面积:

$$A = \left[ \frac{\pi}{2} \times 58.96 \times \left( \frac{1.8}{58.96} \right)^{0.557} + \frac{4 - \pi}{4} \times 17.4 \right] \times 19.5 = 339.3 \text{ (cm}^2\text{)}$$

### 4.1.3 试验设计

#### ① 试验轮胎

经过实际调研, 本文选用的回力 195/60R14 型轮胎, 轮胎上施加的荷载为 3430N (350kg), 轮胎内压为 250kPa, 花纹分布、尺寸参数见图 4.1、表 4.2:



(a) 横断面图

(a) Cross-sectional view

(b) 平面图

(b) Plan view

图 4.1 回力 195/60R14 型轮胎花纹分布示意图 (单位: mm)

Fig4.1 Groove distribution of tires about WARRIOR tire (Unit:mm)

表 4.2 回力 195/60R14 型轮胎花纹尺寸参数 (单位: mm)

Tab4.2 Groove size of tires about WARRIOR tire (Unit:mm)

直径 mm	胎冠宽度 mm	纵向花纹			横向花纹		
		数量	宽度(mm)	深度(mm)	数量	宽度(mm)	深度(mm)
589.6	195	4	8	7	65	3.5	3

## ② 试验内容设计

试验目的是获得更多的样本数据, 用以回归分析动水压强与车速、轮胎花纹深度、水膜厚度的关系。参考 Jana.jreh<sup>[30-31]</sup>博士对轮胎试验项目的设置成果, 本试验设计项目 351 组, 按不同行车速度分别进行。试验以规定的车速 ( $V=60-120\text{km/h}$ , 每次以  $5\text{km/h}$  递增), 通过试验工况测得该行驶条件下轮胎所受的动水压强。设计试验工况见表 4.3。

表 4.3 设计试验工况表

Tab4.3 Experimentation design

水膜厚度	花纹深度	水膜厚度	花纹深度	水膜厚度	花纹深度
1	7	8	7	15	7
	4		4		4
	1		1		1
2	7	10	7	18	7
	4		4		4
	1		1		1
5	7	12	7	20	7
	4		4		4
	1		1		1

## 4.2 仿真软件的选择

目前已知水流运动的两种形态为层流和紊流, 而雷诺数是辨别水流形态的准则。对于明渠及天然河道的水流形态, 通常直接采用管流值进行判断, 即雷诺数  $Re < 500$  为层流,  $Re > 500$  为紊流<sup>[22]</sup>。由于紊流现象是高度复杂的形态, 因此在计算过程中要对不同紊流模型的模拟能力以及计算所需系统资源进行综合考虑后再选择合适的紊流模型。

FLUENT 软件包含丰富而先进的物理模型, 其中湍流模型包含 Spalart-Allmaras 模型、Standard (标准)  $k-\epsilon$  模型组、RNG (重整化群)  $k-\epsilon$  模型组、雷诺应力模型 (RSM) 组、大涡模拟模型 (LES) 组以及最新的分离涡模拟 (DES) 和  $v^2-f$  模型等, 另外用户还可以制定或添加自己的湍流模型。其中 RNG (重整化群)  $k-\epsilon$  模型组在  $\epsilon$  方程中增加了一个附加项, 并在模型中考虑了液体流动时产生的螺旋效应, 使得计算精度大大提高。而且该软件是采用有限元方法对流体进行分析, 因此能够

提供三种数值求解方法（非耦合隐式算法、耦合隐式算法和耦合显式算法）。其中非耦合隐式算法适用于不可压缩流体的低速求解，并对动量方程进行了压力修正，是一套很成熟的算法。

雨天积水在路面上流动，由于路面摩擦系数的影响使得积水发生紊流状态。这时积水的流线开始出现波浪状的摆动，摆动的频率及振幅随流速的增加而增加，即出现自由紊流状态。基于以上特点，本文计划采用 FLUENT 软件中的 RNG（重整化群） $\kappa - \epsilon$  模型通过非耦合隐式求解法计算轮胎在不同行驶条件下所受的动水压强，以此获取轮胎所受到的动水压强分布图、水流速度分布图，动水压强变化曲线等与部分滑水相关的一系列信息。

## 4.3 轮胎模型的建立

### 4.3.1 计算范围及轮胎参数的确定

国外学者通过理论分析得出：横向沟槽轮胎比纵向开槽更能够减少滑水危险，而且对滑水影响最大的因素是胎压、其次为水膜厚度、最后为轮胎荷载<sup>[21]</sup>。根据 Jana.jreh<sup>[30-31]</sup>博士的研究成果，由于计算区域和轮胎模型的不同会使得模拟结果产生 5%-10% 的差异。笔者在研究中为更能接近现实中轮胎的外形，建立了有纵横向排水沟槽的三维有限元轮胎模型（图 4.2），并依据垂直应力及轮胎接地尺寸的特性，确定模型计算范围 x、z 边界尺寸为 80×100cm，y 方向深度尺寸为 5cm，轮胎模型位于计算范围中心位置，呈对称分布；该轮胎模型的三种花纹深度分别为 7mm、4mm、1mm 以代表新胎、中度磨损的轮胎和严重磨损的轮胎；模型中对轮胎施加的荷载为 3430N，轮胎气压为 250kPa，竖向变形为 18mm。

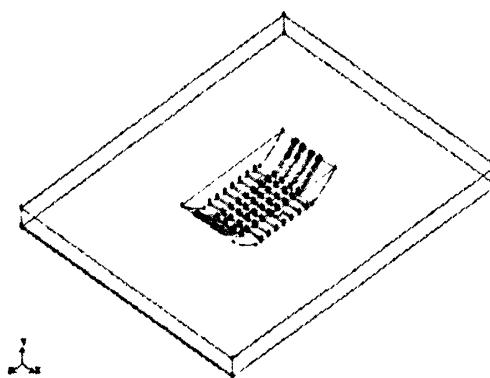


图 4.2 有纵横向花纹的轮胎模型图

Fig4.2 Rib-tire finite-element model

由于计算域外有较大的外流场，模型建立后使用 gambit 软件中的 Tgrid 方法对模型进行四面体网格划分，有轮胎花纹的模型共生成 1843222 个单元体（图 4.3），无轮胎花纹的模型共生成 1646402 个单元体（图 4.4）。由于轮胎花纹的几何复杂性，

在花纹与路面接触的区域，软件自动用三棱柱代替四面体进行网格划分。

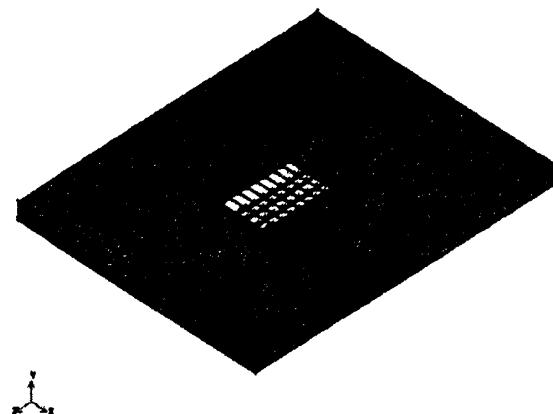


图 4.3 花纹深度为 7mm 的轮胎计算域模型

Fig4.3 Grooved tire model (groove depth is 7mm)

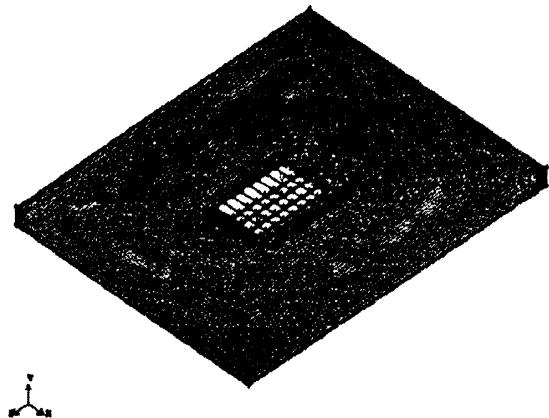


图 4.4 花纹深度为 1mm 的轮胎计算域模型

Fig4.4 Grooved tire model (groove depth is 1mm)

#### 4.3.2 边界条件及初始值的确定

使用 Fluent 软件进行模拟，首先要对模型的计算域设置符合现实条件的流体入口和出口。在本模型中，模型的坐标轴原点设置在轮胎底部的中心，并且将轮胎模型固定，空气和水以车辆的行驶速度相对于轮胎运动，大大简化了计算过程。

计算区域的边界条件设置见图 4.5。本模型是空气和水的共同作用，属于两相流动，因此在模型前端设置了空气和水的速度入口 (water-inlet 和 air-inlet)，二者边界的高度随模型中水膜厚度的变化而改变；模型后部和顶部设置为压力出口 (pressure outlet 和 pressure outlet-top)，以便将两相流动的压力及时排除；模型的下部作为路面被定义为可移动墙体边界 (wall-ground)，其移动速度的大小和方向与水和空气相同；为避免对整体流动造成影响，将模型的两个侧面设置为绝对光滑的静止墙体边界 (frictionless wall)；整个模型设置呈对称分布。本实验

中选取面  $x=1.65\text{cm}$ 、 $x=-1.65\text{cm}$ 、 $y$  面高度取值为水膜厚度的一半，对其进行流速和压强的研究。需要说明的是，边界条件设置的不同对计算结果的迭代次数和收敛性有影响，而且道路是水平和深度方向为无限、宽度方向为有限的三维结构，而 fluent 只能计算有限尺寸下流体的力学反应值。实际上，当将分析范围取到足够大时，计算结果是接近真实值的。

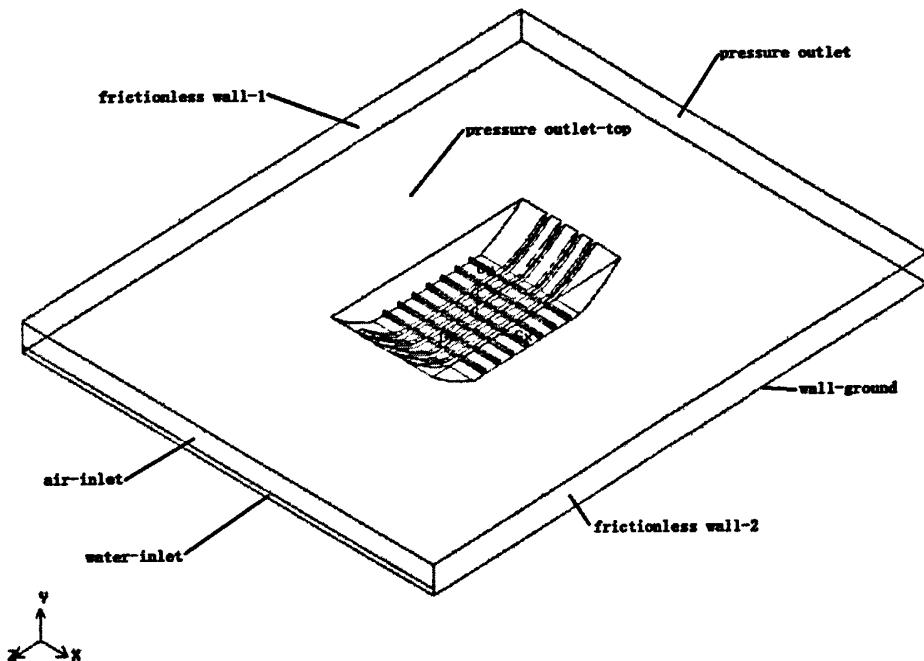


图 4.5 轮胎模型边界类型的设置图

Fig 4.5 The set-up diagram of the tyre model borderline type

本模型属于不可压缩流体的低速求解，因此在设置 FLUENT 的求解器时选择非耦合隐式算法 (segregated 见图 4.6)，此算法对动量方程进行了压力修正，是一套很成熟的算法，并在应用上已经过广泛验证。

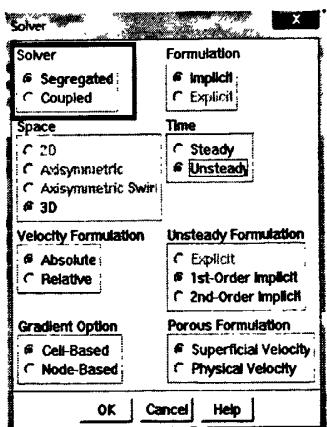


图 4.6 求解器的选择

Fig 4.6 Select of the solution method

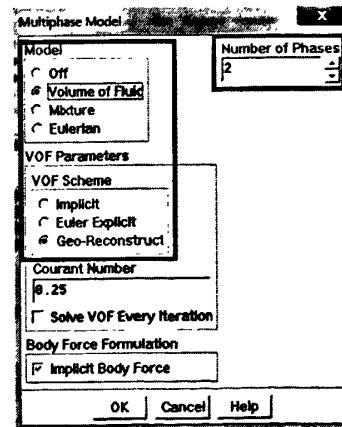


图 4.7 VOF 模型的设置

Fig 4.7 Set VOF model

在模型的二相流动中, 通过设置 VOF 模型中几何重构 (Geo-Reconstruct) 的方法 (图 4.7) 定义目标水流体积与模型网格体积的比值以实现对水流界面的追踪。然后对流体流相、速度、紊流类型等参数进行模型初始化设置 (图 4.8-4.11), 最后对轮胎模型进行迭代计算直至收敛。模型中水和空气的相关参数选取见表 4.2。

表 4.2 试验材料参数取值表

Tab4.2 material's parameter

参数 材料	温度	密度 kg/m <sup>3</sup>	动力粘度 Ns/m <sup>3</sup>	运动粘度 m <sup>2</sup> /s
水	25	998.2	$1.002 \times 10^{-3}$	$1.004 \times 10^{-6}$
空气	25	1.204	$1.82 \times 10^{-5}$	$1.51 \times 10^{-5}$

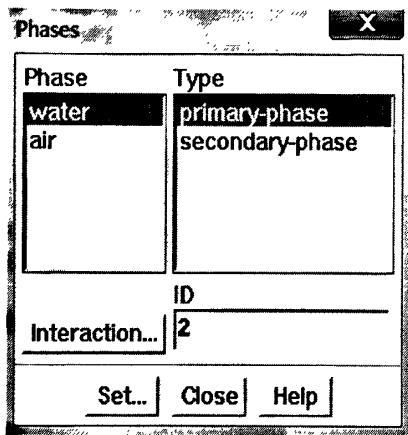


图 4.8 流相的设置

Fig4.8 Set phases

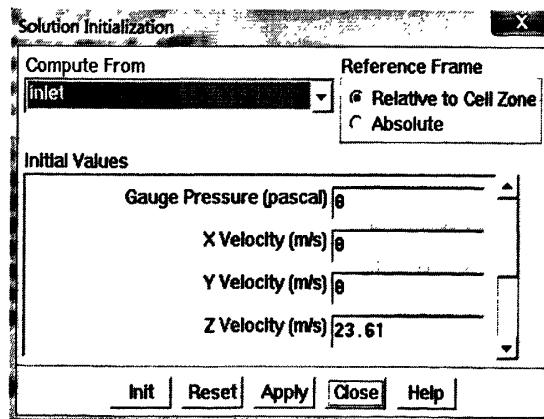


图 4.9 模型速度的初始化

Fig4.9 Velocity initial values

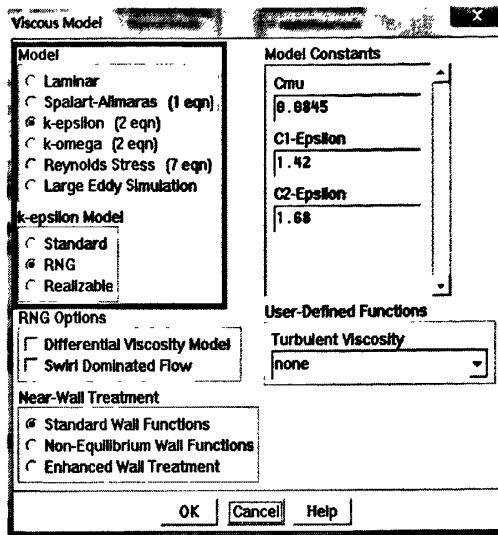


图 4.10 紊流类型的选择

Fig4.10 Select viscous model

## 4.4 试验数据分析

通过 Fluent 软件进行仿真可得到不同行驶条件下轮胎所受的动水压强（见附表 A1）。

### 4.4.1 水膜厚度对动水压强的影响

图 4.11 显示，三种花纹深度的轮胎在不同水膜厚度的路面上分别以 60、90、120km/h（低、中、高速）速度行驶时所受到的动水压强。从图 4.11 (a)、(b)、(c)可以看出：(1) 随着水膜厚度的增加，轮胎所受的动水压强持续增长，其关系曲线在花纹深度尺寸附近产生改变。(2) 当水膜厚度小于花纹深度时，动水压强增长缓慢，当水膜厚度大于花纹深度时，动水压强与水膜厚度近似为线性关系。原因分析：当水膜厚度较小时，轮胎花纹能够及时将水排出，轮胎前端没有产生雍水，轮胎沟槽内动水压强较小，胎面与路面存在良好接触；随着水膜厚度的增加，同一时间内通过轮胎花纹过水断面的水量加大，导致轮胎不能及时将积水排出，由此产生较大的动水压强。

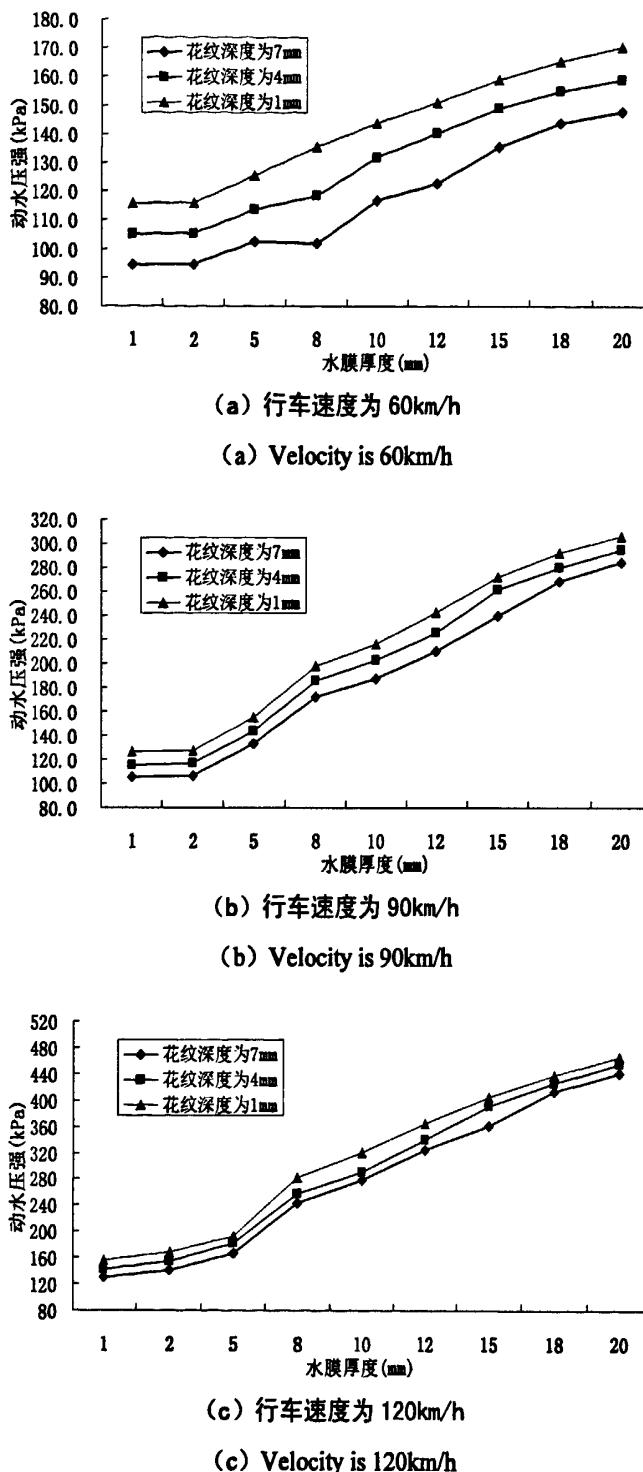
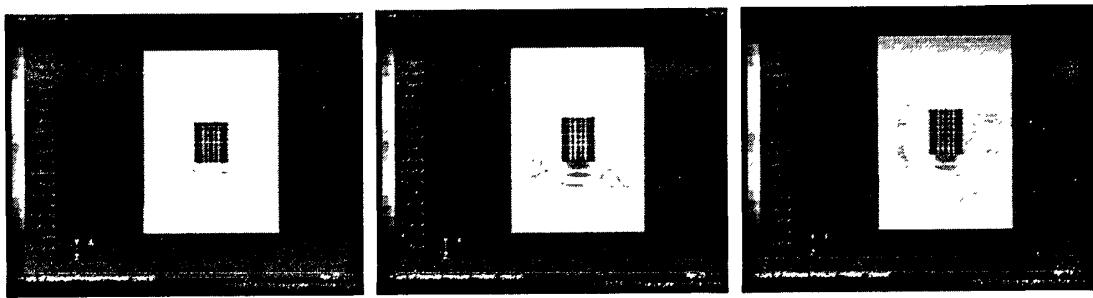


图 4.11 三种车速下动水压强与水膜厚度的关系

Tab4.11 Relationship between hydrodynamic pressure and water depth in three velocity

以 8mm 水膜为例 (如图 4.12-b 所示), 轮胎的阻挡作用使过水断面减小而产生壅水, 并在轮胎的前部形成一个高压区域 (图 4.12-b 中红色部分)。该高压区

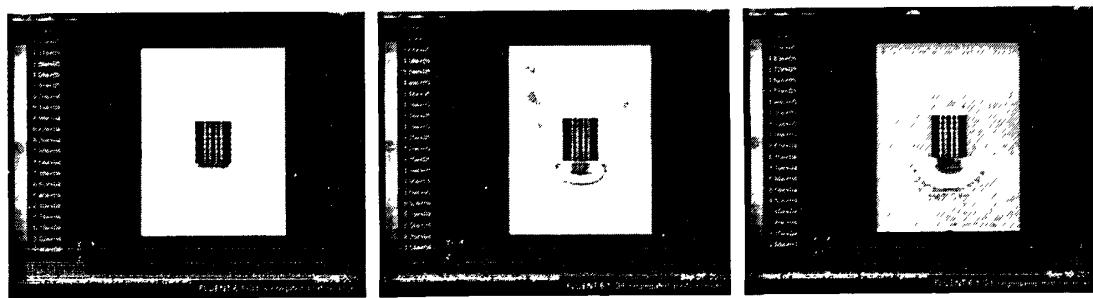
域的压力数值分布由中间向两侧递减，大致呈对称分布。当水膜厚度较浅（8mm 以下）时，由于轮胎花纹的排水作用没有完全丧失，高压区域对轮胎的作用会延伸至轮胎底部；随着水膜厚度的提高，轮胎花纹逐渐丧失排水作用（即轮胎发生滑水现象），高压区域对轮胎的作用只发生在轮胎前端。国外专家通过研究认为：当动水压强等于轮胎内部压强就会发生完全滑水现象<sup>[21]</sup>。当轮胎沟槽内的积水能够及时排除，产生的动水压强远小于轮胎内部压强；随着轮胎前端雍水的产生，轮胎前端动水压强逐渐增大，当动水压强等于轮胎内部压强时，轮胎与路面完全脱离接触，即出现临界滑水状态。



(a)  $y=0.1\text{cm}$   $h=0.2\text{cm}$   $V=90\text{km/h}$  (b)  $y=0.4\text{cm}$   $h=0.8\text{cm}$   $V=90\text{km/h}$  (c)  $y=0.5\text{cm}$   $h=1.2\text{cm}$   $V=90\text{km/h}$

图 4.12 Y 平面动水压强分布图（轮胎花纹深度为 7mm）

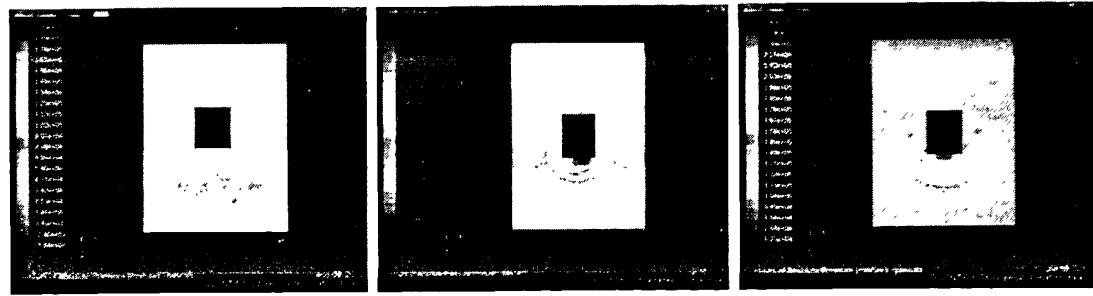
Fig4.12 Surface-y water pressure distribution (the tire tread depth is 7 mm)



(a)  $y=0.1\text{cm}$   $h=0.2\text{cm}$   $V=90\text{km/h}$  (b)  $y=0.2\text{cm}$   $h=0.8\text{cm}$   $V=90\text{km/h}$  (c)  $y=0.2\text{cm}$   $h=1.2\text{cm}$   $V=90\text{km/h}$

图 4.13 Y 平面动水压强分布图（轮胎花纹深度为 4mm）

Fig4.13 Surface-y water pressure distribution (the tire tread depth is 4 mm)



(a)  $y=0.1\text{cm}$   $h=0.2\text{cm}$   $V=90\text{km/h}$  (b)  $y=0.4\text{cm}$   $h=0.8\text{cm}$   $V=90\text{km/h}$  (c)  $y=0.5\text{cm}$   $h=1.2\text{cm}$   $V=90\text{km/h}$

图 4.14 Y 平面动水压强分布图（轮胎花纹深度为 1mm）

Fig4.14 Surface-y water pressure distribution (the tire tread depth is 1 mm)

#### 4.4.2 行驶速度对动水压强的影响

(1) 当水膜厚度远小于轮胎花纹深度 ( $h_k = 2\text{mm}$ )，车辆以正常速度 ( $V \leq 120\text{km/h}$ ) 行驶时，动水压强增长缓慢 (图 4.15-a)，轮胎花纹排水效果明显 (图 4.16)。

(2) 当水膜厚度与轮胎花纹深度差别不大时 ( $h_k = 5\text{mm}$ )，由于轮胎的阻挡，轮胎前段形成一条与行驶方向几乎平行的速度界限从而影响轮胎后部排水速度。此时，轮胎花纹已不能完全将积水排出，轮胎前端发生雍水现象使得动水压强增大、沟槽内水流速度下降，动水压强与车速已逐渐转化为线性关系，花纹较浅的轮胎已经丧失排水能力导致动水压强增长幅度加快 (图 4.15-b)。

(3) 当水膜厚度远大于轮胎花纹深度时 ( $h_k = 10.15\text{mm}$ )，轮胎前端的雍水现象更加明显，动水压强迅速增大，轮胎前端的速度界限 (图 4.17 中绿色与蓝色分界线) 由于轮胎的阻挡则向后偏移，其偏移量随着速度的增大而增大，动水压强与车速已成为线性关系 (图 4.15-c)；当车速达到  $75\text{km/h}$  左右时，中度磨损的轮胎也丧失排水能力，三种花纹轮胎的排水性能差异更为显著 (图 4.15-d)。

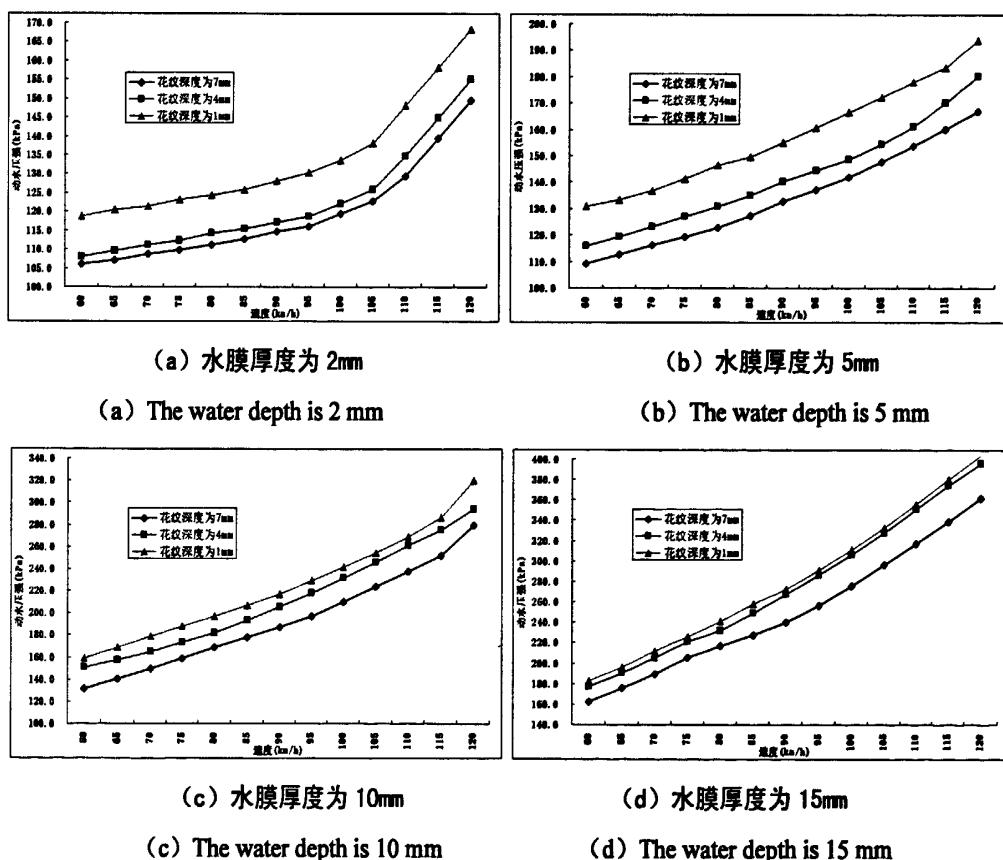
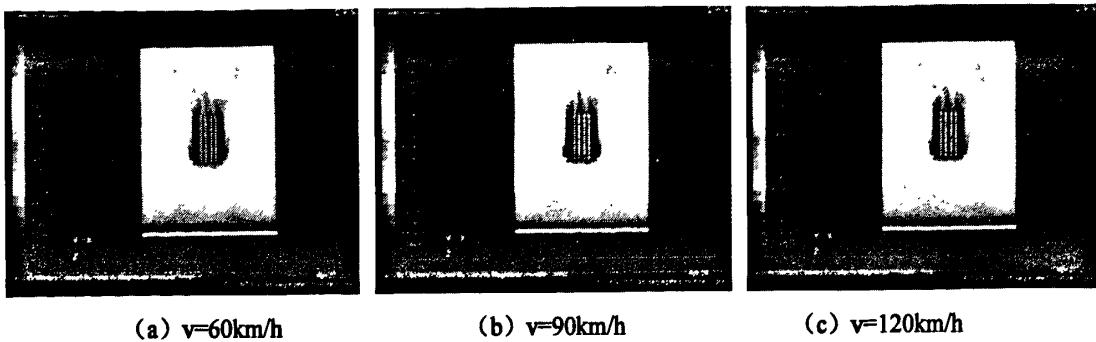
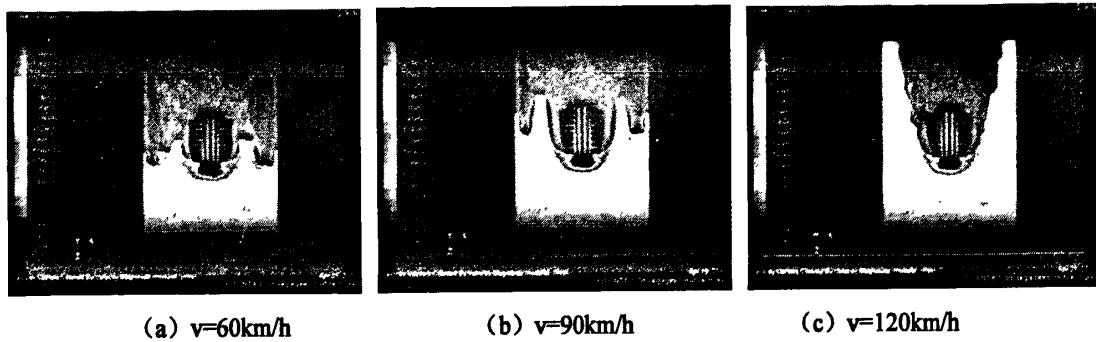


图 4.15 不同水膜厚度下动水压强与车速的关系

Fig 4.15 Hydroplaning pressure increasing at different depth of water

图 4.16 水流速度分布图 ( $h=2\text{mm}$ )Fig4.16 Water velocity distribution (Surface  $h=2\text{mm}$ )图 4.17 水流速度分布图 ( $h=12\text{mm}$ )Fig4.17 Water velocity distribution (Surface  $h=12\text{mm}$ )

#### 4.4.3 动水压强影响因素的多元回归分析

由于行车速度、水膜厚度和轮胎花纹深度对动水压强有很大影响，而且上述因素之间有很好的相关关系。因此可以通过行车速度、水膜厚度和轮胎花纹深度与动水压强之间的关系建立四者的多元回归模型。

假设上述三因素与动水压强呈线性关系，即有

$$P = b_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3$$

通过对试验中的 351 组数据（见附表 A1）进行多元线性回归分析<sup>[32]</sup>，求得回归系数的估计值：

$$\hat{\beta}^T = \left( \hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3 \right) = (-84.686, 2.26, 9.437, -0.9996)$$

因此多元样本线性回归方程为

$$\hat{y} = -84.686 + 2.26 \chi_1 + 9.437 \chi_2 - 0.9996 \chi_3 \quad (R^2=0.9329) \quad (4.4)$$

在此方程中  $\hat{y}$  为动水压强  $P$ ； $\chi_1$  为车辆行驶速度  $V$ ； $\chi_2$  为道路水膜厚度  $h$ ； $\chi_3$  为轮胎花纹深度  $h_{\text{tire}}$ 。因此，式 (4.4) 可以改写为：

$$P = -84.686 + 2.26V + 9.437h_{\text{tire}} - 0.9996h_{\text{road}} \quad (R^2=0.9329) \quad (4.5)$$

式中： $P$ ——动水压强 (KPa)；

$V$ ——行车速度 (km/h);

$h_*$ ——道路水膜厚度 (mm);

$h_{\text{胎}}$ ——轮胎花纹深度 (mm)。

对式 (4.5) 进行显著性检验, 即检验

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$$

为此先计算各偏差平方和

$$S^2_T = \sum_{i=1}^{351} \hat{y}_i^2 - 351 \bar{y}^2 = 898500.5$$

$$S^2_R = \hat{\beta}_1 \hat{l}_{1y} + \hat{\beta}_2 \hat{l}_{2y} + \hat{\beta}_3 \hat{l}_{3y} = 783130.6$$

$$\text{其中 } l_{iy} = \sum_{k=1}^{351} \left( \chi_{ki} - \bar{\chi}_i \right) \left( y_k - \bar{y} \right) \quad (i=1, 2, 3)$$

$$S^2_E = S^2_T - S^2_R = 115369.9$$

于是

$$\frac{S^2_R}{S^2_E} = 6.788$$

取显著性水平  $\alpha=0.01$ , 查 F 分布表得  $F_{1-\alpha}(k, n-k-1) = F_{0.99}(3, 401) = 3.78$ ,

从而临界值  $c = \frac{k}{n-k-1} F_{1-\alpha}(k, n-k-1) = 0.0283 < 6.788$ , 故拒绝  $H_0$ , 即行车速度、水膜厚度、轮胎花纹深度对动水压强的线性影响在  $\alpha=0.01$  下是显著的。

通过对试验数据进行分析, 当轮胎花纹深度为 7mm 时, 发生临界滑水的车速与水膜厚度的关系约以  $3.5 \text{ (km/h)}/\text{mm}$  递减; 当轮胎花纹深度为 4mm 时, 临界滑水车速与水膜厚度的关系约为  $4.083 \text{ (km/h)}/\text{mm}$ 。由此可知旧胎发生滑水的临界车速约为新胎的 85—90%。对上述三个因素进行主成分分析评价, 结果表明行车速度对动水压强的影响最为明显 (贡献率为 48.43%), 水膜厚度和轮胎花纹深度对动水压强的影响几乎相同 (贡献率分别为 25.82% 和 24.07%)。因此, 仅靠改变轮胎花纹深度以避免滑水的方法效果不理想。

## 4.5 本章小结

本章通过使用 FLUENT 软件模拟纵横向花纹轮胎模型在不同行驶条件下所受到的动水压强, 得到以下结论:

① 轮胎动水压强大小取决于水膜厚度、胎纹深度及水膜在胎纹里的充盈度

当水膜厚度小于轮胎花纹深度时 ( $h_* < 5\text{mm}$ ), 轮胎的排水作用并未丧失, 动水压强增长速度较慢, 与水膜厚度近乎为非线性缓慢增长, 其关系曲线在花纹深度值附近形成拐点; 当水膜厚度大于花纹深度时, 轮胎排水作用丧失, 导致轮胎前端产生雍水, 动水压强与水膜厚度呈线性快速增长。

② 随着水膜厚度的增加, 动水压强与车速的关系逐渐由非线性向线性转变

当水膜厚度远小于轮胎花纹深度时, 动水压强与车速近乎成非线性关系, 动水压强增长速度十分缓慢。水膜厚度与轮胎花纹深度差别不大时, 轮胎的阻挡作用影响其排水速度, 轮胎前端产生动水压强的高压区域, 车速的增大导致轮胎前端发生雍水现象, 动水压强与车速已逐渐转化为线性关系。当水膜厚度远大于轮胎花纹深度时, 雍水现象更为显著, 动水压强的高压区域由轮胎底部移至前端, 当车速达到 75km/h 左右时, 中度磨损的轮胎也丧失排水能力, 三种花纹轮胎的排水性能差异更为显著。

### ③ 回归得出动水压强与车速、水膜厚度、轮胎花纹深度的关系函数

采用多元回归的方法对试验模拟所得的 351 组数据进行分析, 得出动水压强与车速、水膜厚度、轮胎花纹深度的关系模型, 即

$$P = -84.686 + 2.26V + 9.437h_{\text{水}} - 0.9996h_{\text{胎}} \quad (R^2=0.9329)$$

### ④ 动水压强影响因素的主成分分析

对影响动水压强的三个因素进行主成分分析评价, 结果表明行车速度对动水压强的影响最为明显 (贡献率为 48.43%), 水膜厚度和轮胎花纹深度对动水压强的影响几乎相同 (贡献率分别为 25.82% 和 24.07%)。

## 第五章 高速公路雨天环境行车安全分析

### 5.1 雨天环境道路附着系数对行车安全影响

#### 5.1.1 附着系数含义及计算

为了保障汽车在道路上安全、顺畅行驶, 轮胎与路面之间必须有足够的附着力。附着系数  $\varphi$  是路面对驱动轮切向应力的极限值  $F_{r\max}$  与驱动轮法向接触应力  $P_G$  的比值, 即:

$$\varphi = \frac{F_{r\max}}{P_G} \quad (5.1)$$

附着系数是直接影响行车安全的一项重要技术参数。因此, 附着系数和行车速度一起成为道路设计的两大基本指标。附着系数除与轮胎类型、胎压等车辆条件有关外、还与路面构造深度、路面干湿类型及污染状态、行车速度等因素关系密切, 而且随着路面磨损的增加, 其附着系数也将发生变化。

路面由砂、石、沥青等混合料共同构成, 表面凸凹不平。当轮胎与凸凹不平的路面接触时, 橡胶的弹性导致轮胎在道路集料突起部分产生很大的变形, 使二者发生真实接触, 产生附着力。附着力包括两个分量: 一是与真实接触面积成正比的粘着附着力  $T_M$ ; 另一个是轮胎橡胶滑动时, 由于突起变形, 因迟滞损失而引起变形损失附着力  $T_B$ 。这两个分量是相互关联的, 因此在计算总的附着力  $T$  时, 可以采用二者之和<sup>[3]</sup>, 即:

$$T = T_M + T_B \quad (5.2)$$

对于轮胎与路面接触发生变形后的某个微小凸体  $i$ , 其附着力可以根据式 (5.2) 表示为:

$$T_i = T_{Mi} + T_{Bi} \quad (5.3)$$

从文献<sup>[33]</sup>可知:

$$T_{Mi} = (\tau_0 + \beta P_r) \pi r h_{yi} \quad (5.4)$$

$$T_{Bi} = \frac{0.25 \alpha_{eff} h_{yi}^2}{\Theta} \quad (5.5)$$

式中:  $T_{Mi}$ 、 $T_{Bi}$ —轮胎某个微小凸体附着力的粘着附着分量和变形损失附着分量;

$\tau_0$ 、 $\beta$ —摩擦参数, 对于轮胎  $\tau_0$  取 2.5 MPa,  $\beta$  取 0.03 或 0.05;

$r$ —微小凸体顶部平均曲率半径 (m);

$h_{yi}$ —第  $i$  个微小凸体的变形深度,  $h_{yi} = 1.6r$ ;

$\alpha_{eff}$ —轮胎橡胶的滞后损失系数,  $\alpha_{eff} = 2.5\alpha$

$\alpha$ —材料拉压状态下的滞后损失系数, 橡胶取 0.09—0.13;

$$p_r \text{ 一第 } i \text{ 个微小凸体与路面的实际接触应力, } p_r = 0.68 \left( \frac{R_a}{r\Theta^2} \right)^{0.4} P_G^{0.2};$$

$R_a$ —轮胎微小凸体高度的算术平均值;

$P_G$ —轮胎法向接触应力, 为轮载与轮胎接地面积的比值;

$\Theta$ —材料的弹性常数,  $\Theta = (1 - \mu^2)/E$ ;

$\mu$ —泊松比;

$E$ —弹性模量。

因此轮胎和路面总的附着力为:

$$T = \sum_{i=1}^{n_r} T_i \Delta n_r \quad (5.6)$$

式中:  $\Delta n_r$ —任意截面上具有相同变形深度的微凸体个数。

路面对驱动轮切向应力的极限值  $F_{r\max}$  为<sup>[33]</sup>:

$$F_{r\max} = \frac{0.12 \alpha_{eff} \Delta^{1/3} P_G^{4/3}}{E^{1/3}} + \frac{\tau_0 P_G^{2/3}}{E^{2/3} \Delta^{1/3}} + \beta P_G \quad (5.7)$$

$$\Delta = \frac{R_{\max}}{rb^{1/\nu}} \quad (5.8)$$

$$b = t_m \left( \frac{R_{\max}}{R_p} \right)^\nu \quad (5.9)$$

$$\nu = 2t_m \frac{R_p}{R_a} - 1 \quad (5.10)$$

式中:  $R_{\max}$ —轮胎微凸体的最大轮廓峰谷距;

$R_p$ —轮胎微凸体的最大轮廓高度;

$t_m$ —轮胎微凸体纵截面支撑线长度的算术平均值。

将式5.7代入式5.1, 即可得出轮胎与路面的附着系数计算式:

$$\phi = \frac{T}{N} = \frac{F_{r\max}}{P_G} = \frac{0.12 \alpha_{eff} \Delta^{1/3} P_G^{1/3}}{E^{1/3}} + \frac{\tau_0}{E^{2/3} \Delta^{1/3} P_G^{1/3}} + \beta \quad (5.11)$$

## 5.1.2 雨天环境道路附着系数影响因素

由上文可知, 附着力包括轮胎与路面粘着附着力  $T_M$  和轮胎变形损失附着力  $T_B$ 。当轮胎发生滑水时, 动水压力的竖直分量和路面法向接触应力共同承担轮胎的荷载, 导致轮胎接地面积和轮胎变形量的减少, 因此造成汽车易发生侧滑, 引起交通事故。

### ① 行车速度

雨天道路的附着系数与行车速度密切相关。早在上世纪八十年代, 美国的 Wambold 和 Henry<sup>[34]</sup> 等人研究认为雨天道路附着系数  $\phi'$  与行车速度  $V$  的关系为:

$$\phi' = 0.874 e^{-0.00393V} \quad (5.12)$$

Warner<sup>[17]</sup>等人通过对斜交轮胎进行测试, 得到道路附着系数与行车速度的关系(图5.1)。由图中可以看出, 最大滑动摩擦系数(干、湿路面)和滑动摩擦系数(干、湿路面)均随速度的升高而下降。其原因为: 当行驶速度较高时, 轮胎与地面摩擦产生较多的热量使得轮胎橡胶软化, 从而降低轮胎与路面的附着力。

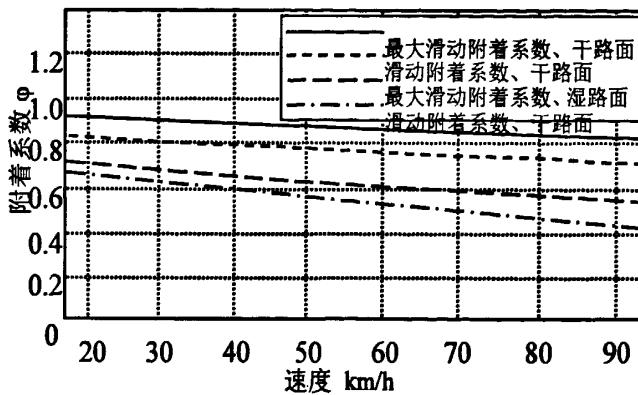


图 5.1 道路附着系数与行车速度的关系

Fig.5.1 The relationship between adhesion coefficient and driving speed

日本汽车工业研究所用 SN 型测试车对 7.5-14 型普通结构标准轮胎和 195SR14 型子午线轮胎进行测试, 得到了沥青路面摩擦系数与速度的关系图<sup>[3]</sup>:

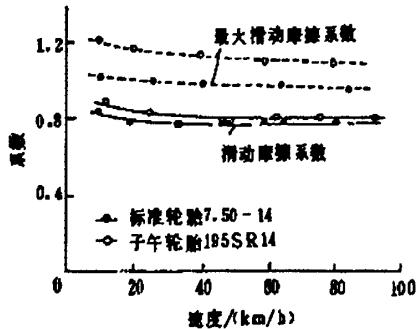


图 5.2 干燥路面摩擦系数与速度的关系图

Fig.5.2 The relationship between adhesion

coefficient of dry pavement and driving speed

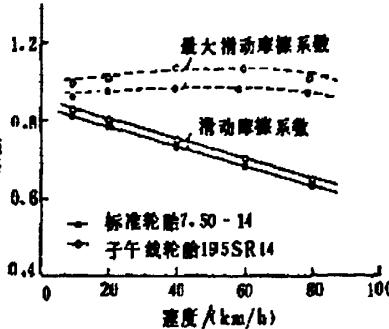


图 5.3 潮湿路面摩擦系数与速度的关系图

Fig.5.3 The relationship between adhesion

coefficient of wet pavement and driving speed

由上图可以看出, 最大滑动摩擦系数与滑动摩擦系数在干燥沥青路面上随速度的变化较小; 然而在潮湿沥青路面上滑动摩擦系数随速度的变化较大。根据大量测试结果, 潮湿沥青路面的纵向附着系数行车速度的关系大致可表示为:

$$\varphi' = \mu_0 - aV \quad (5.13)$$

式中:  $\mu_0$ —滑动摩擦系数;

$a$ —常数, 取 0.0052;

$V$ —行车速度。

## ② 水膜厚度

由于降雨在路表面产生一层水膜，对路表集料产生润滑作用。当轮胎行驶过后会发生润滑摩擦，轮胎与路面间的附着系数将会显著降低。东南大学的季天剑<sup>[18]</sup>通过ANSYS软件对轮胎进行有限元分析，计算出了汽车时速为60、70、80、90km/h以及水膜厚度为5、10、15、20mm时的附着系数（图5.4）。

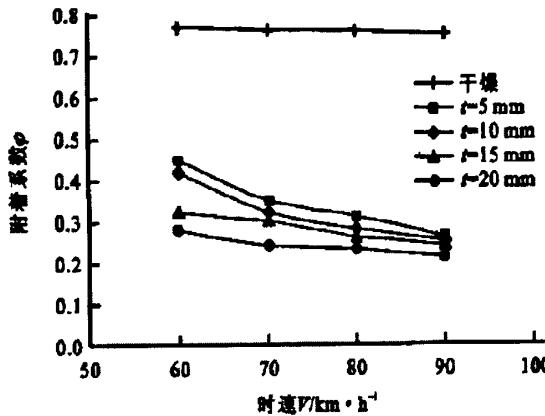


图 5.4 水膜厚度对附着系数的影响

Fig 5.4 The impact of water depth to adhesion coefficient on pavement

当汽车产生部分滑水时，轮胎可以分为两个部分：一部分由于动水压强的作用使得轮胎与路面脱离；另一部分由于此时车重大于动水压强使得部分轮胎仍然和路面保持接触。因此，汽车对轮胎的垂直荷载产生的压强  $G$  也可以分为两部分：动水压强的垂直分量所承受的荷载  $W_v$  和由路面承受的垂直荷载  $N$ ，并且路面的附着力  $f$  由路面承受的垂直荷载  $N$  产生，即：

$$f = \varphi N \quad (5.14)$$

在常温（20℃）条件下水的粘度为  $1.002 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，可以不考虑其影响。由于发生部分滑水时动水压强的垂直分量承受部分轮胎荷载，该部分轮胎荷载不产生附着力，此时轮胎与路面的附着系数  $\varphi'$  为：

$$\varphi' = \frac{f}{G} = \frac{\varphi N}{N + W_v} = \varphi \frac{N}{N + W_v} < \varphi \quad (5.15)$$

假设部分滑水时道路附着系数与行车速度、水膜厚度呈线性关系，即：

$$P = b_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$$

按照式（5.15）对第四章动水压强的模拟结果进行计算，对其数据进行多元线性回归分析，其回归系数的估计值：

$$\hat{\beta}^T = \left( \hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2 \right) = (0.8256, -0.0043, -0.0072)$$

因此，多元样本线性回归方程为

$$\varphi' = 0.8256 - 0.0043V - 0.0072h \quad (R^2=0.9317) \quad (5.16)$$

式中:  $\varphi'$ —部分滑水时道路附着系数;

$V$ —行车速度, km/h

$h$ —道路水膜厚度, mm。

季天剑<sup>[17]</sup>通过研究高速公路路面水膜厚度与降雨强度、纵坡坡度、坡长、构造深度的关系, 得出:

$$h = 0.1258 \cdot l^{0.6715} \cdot i^{-0.3147} \cdot q^{0.7786} \cdot TD^{0.7261} \quad (R^2=0.93) \quad (5.17)$$

式中:  $h$ —坡面水膜厚度, mm;

$l$ —坡长, m;

$i$ —纵坡坡度, %;

$q$ —降雨强度, mm/min;

$TD$ —构造深度, mm。

综合式(5.16)和(5.17)即可建立部分滑水时道路附着系数与行车速度、坡长、纵坡坡度、降雨强度、构造深度的关系。

$$\varphi' = 0.8256 - 0.0043V - 9.0576 \times 10^{-4} \cdot (l^{0.6715} \cdot i^{-0.3147} \cdot q^{0.7786} \cdot TD^{0.7261}) \quad (5.18)$$

我国的《公路排水设计规范》<sup>[35]</sup>规定“高速公路路面和路肩表面排水的设计降雨重现期为5年一遇”, 其排水汇流历时通常在5min以内。《公路路线设计规范》<sup>[36]</sup>规定设计时速为120km/h、纵坡为-3%时, 最大纵坡坡长取值不超过900m。《公路沥青路面设计规范》<sup>[37]</sup>规定高速公路路面构造深度在0.8~1.2mm之间为宜。本文取设计时速120km/h、纵坡-3%、纵坡坡长600m、构造深度1mm, 依据附表A1动水压强的结果, 由式(5.18)可计算出5min降雨强度下中度磨损轮胎与路面的附着系数 $\varphi'$ , 结果见表5.1。

表 5.1 不同降雨强度下路面附着系数  $\varphi^i$ 

Tab 5.1 In different rainfall intensity, number of the adhesion coefficient

降雨强度 (mm/5min) \ 速度 (km/h)	60	70	80	90	100	110	120
0.07	0.5604	0.5174	0.4744	0.4314	0.3884	0.3454	0.3024
0.2	0.5532	0.5102	0.4672	0.4242	0.3812	0.3382	0.2952
0.6	0.5316	0.4886	0.4456	0.4026	0.3596	0.3166	0.2736
1.0	0.5100	0.4670	0.4240	0.3810	0.3380	0.2950	*
1.3	0.4956	0.4526	0.4096	0.3666	0.3236	*	*
1.7	0.4812	0.4382	0.3952	0.3522	*	*	*
2.3	0.4596	0.4166	0.3736	*	*	*	*
2.9	0.4380	0.3950	0.3520	*	*	*	*
3.3	0.4236	0.3806	*	*	*	*	*

附注：“\*”表示为完全滑水状态，超出本文研究范围，在此不再进行阐述。

### 5.1.3 附着系数对制动距离的影响

汽车制动过程分析：驾驶员在行驶时看到需要制动的信号后，需要经过  $t_0$  时间的反应后才意识到需要采用制动行为，并将右脚从油门踏板移到刹车踏板并踩下刹车的时间为  $t_1$ 。因此， $t_0$  与  $t_1$  的和称为驾驶员反应时间  $t_{\text{人反应}}$ 。驾驶员踩下刹车踏板，经过时间  $t_2$  消除制动卡钳与制动盘之间的间距，此时制动力才开始起作用，并经过一段时间  $t_3$  的增长趋于稳定，使得汽车处于减速过程， $t_2$  与  $t_3$  的和称为汽车反应时间  $t_{\text{车反应}}$ （一般取 0.5s）。然后汽车经过时间  $t_{\text{制动}}$  后减速至完全停止，其制动过程见图 5.5。

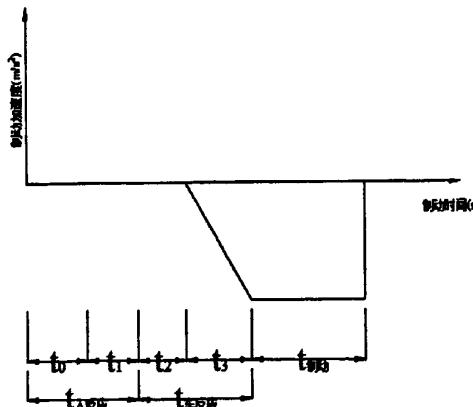


图 5.5 汽车制动过程示意图

Fig 5.5 The process of vehicle breaking

小客车行驶时, 当目高为1.2m、物高为0.1m时, 驾驶员自看到障碍物至完全停车所需的最短行车距离即为小客车的停车视距 $S_{\text{视距}}$ <sup>[38]</sup>。由上文可知, 停车视距包括三个部分: 驾驶员反应时间内汽车行驶的距离 $S_{\text{人反应}}$ , 汽车制动反应时间内行驶的距离 $S_{\text{车反应}}$ , 汽车制动生效至完全停止所行驶的距离 $S_{\text{制动}}$ 。如果汽车在附着系数为 $\mu$ 的道路以 $V$  (km/h) 的初速度进行制动时:

① 取驾驶员和汽车的反应时间之和 $t$ 为2.5s, 则

$$S_{\text{反应}} = \frac{V}{3.6} \times t = \frac{V}{3.6} \times 2.5 \quad (m) \quad (5.19)$$

$$② S_{\text{制动}} = \frac{V^2}{254 \times (\mu + i)} \quad (m) \quad (5.20)$$

式中:  $i$ —道路纵坡, 上坡为正, 下坡为负。

由式(5.18)、(5.20)可知, 汽车发生部分滑水时制动距离与道路纵坡、行车速度、降雨强度有关。本文以设计时速120km/h、道路纵坡为-3%、中度磨损轮胎为例, 根据式(5.18)、(5.20)对小客车的制动距离进行计算, 结果见表5.2。

表5.2 不同行驶条件下小客车的制动距离 (单位: m)

( $i=-3\%$ ,  $V=120\text{km/h}$ , 中度磨损轮胎 $\mu=0.75$ )

Tab5.2 In different conditions, saloon car's stopping distance (Unit:m)

(longitudinal gradient=-3%, design speed is 120km/h, tire tread depth is 4mm)

速度 (km/h) 降雨强度 (mm/5min)	60	70	80	90	100	110	120
0.07	26.7	39.6	56.7	79.4	109.8	151	208.1
0.2	27.1	40.2	57.6	80.9	112.1	154.6	213.8
0.6	28.3	42.1	60.6	85.6	119.4	166.2	232.7
1.0	29.5	44.1	64	90.9	127.8	179.8	*
1.3	30.4	45.6	66.4	94.7	134.1	*	*
1.7	31.4	47.3	69	99	*	*	*
2.3	33	49.9	73.3	*	*	*	*
2.9	34.7	52.9	78.3	*	*	*	*
3.3	36	55	*	*	*	*	*

附注: “\*”表示为完全滑水状态, 超出本文研究范围, 在此不再进行阐述。

### 5.1.4 雨天环境下停车视距计算模型

停车视距包括三个部分: 驾驶员反应时间内汽车行驶的距离 $S_{\text{人反应}}$ , 汽车制动

反应时间内行驶的距离  $S_{\text{车反应}}$ ，汽车制动能效至完全停止所行驶的距离  $S_{\text{制动}}$ 。在部分滑水条件下，影响行车安全性的因素主要是路面附着系数的下降。因此，可通过 AASHTO 停车视距模型（式 5.21）、（式 5.18）联立计算小客车的安全间距  $L_s$ ，作为该降雨强度下安全行车的建议停车视距。

$$\frac{V}{3.6}t + \frac{V^2}{254(\varphi'+i)} + L_{\text{前车}} + L_{\text{安全}} \leq L_s \quad (5.21)$$

式中：  $V$ —行车速度，km/h；

$t$ —反应时间，取 2.5s；

$\varphi'$ —部分滑水条件下道路附着系数；

$i$ —道路纵坡；

$L_{\text{前车}}$ 、 $L_{\text{安全}}$ —前车间距和安全距离，均取 5m；

## 5.2 雨天能见度对行车安全的影响

雨天行车时，驾驶员能见度较差，路面积水会对光线产生不规则的漫反射作用，导致驾驶员整体视野下降，影响安全视距。雨量的大小以及前车高速行驶产生的水雾影响汽车前挡风玻璃的清晰度，雨刮器频繁移动致使驾驶员视线缩小甚至模糊，对道路安全行车带来不利影响。

### 5.2.1 降雨的定义及雨环境的分类

#### ① 降雨的定义

雨是水蒸气上升到一定高度后遇冷从云中落下的水滴，其直径约为 0.2-6mm。而降雨强度是表示雨量的大小的指标，其含义为单位时段内的降雨量，以 mm/min 或 mm/h 为单位。我国气象部门一般将降雨强度分为 6 个等级，其分级标准<sup>[38]</sup>见表 5.3。

表 5.3 降雨强度分级标准

Tab 5.3 The grade of different rainfall intensity

降雨等级	降雨强度	
	12 小时内雨量 (mm)	24 小时内雨量 (mm)
小雨	<5	<10
中雨	5-14.9	10-24.9
大雨	15-29.9	25-49.9
暴雨	≥30	≥50
大暴雨	≥70	≥100
特大暴雨	≥140	≥250

## ② 雨环境的分类

降雨沿道路的时空分布可分为两类<sup>[39]</sup>:

### 1) 大范围降雨

由冷热两种性质不同的气流相遇, 暖湿气流在上升过程中由于气温不断降低形成的降雨导致水平范围大、持续时间长。可使得驾驶员数百公里在雨中行驶, 对行车安全有很大威胁。在此降雨范围内道路运行环境的特征是道路积水长时间、长距离存在, 导致道路附着系数降低; 汽车以高速行驶产生的水雾降低了自身的可见性和后车视距; 车辙槽内和局部路段积水降低了道路反光标线和突起路标的视认性。

### 2) 局部地区降雨

局部地区降雨一般是由本地区近地面空气局部受热或高层空气强烈降温, 导致上下层空气发生对流, 水汽在高空冷却、凝结而形成的雨。该类型降雨强度比较大, 但历时较短, 雨区范围也较小, 一般以夏季最多, 春季和秋季次之。此降雨范围内道路运行环境的特征是对交通量不太大的道路不会构成严重威胁, 但对隧道进出口等交通设施变化较大的路段影响比较明显。

## 5.2.2 降雨对能见度的影响

### ① 能见度的定义

能见度是表征大气透明度的一个指标, 与当时的天气情况密切相关。当出现降雨、雾、沙尘暴等天气过程时, 大气透明度较低, 能见度较差。在气象学中, 能见度用气象光学视程作为指标表示<sup>[40]</sup>。

气象光学视程是指白炽灯发出色温为2700K的平行光束的光通量在大气中削弱至初始值的5%所通过的路径长度。白天能见度是指视力正常(视力达到1.0以上)的人在当时天气条件下能够从天空背景中看到和辨认的目标物(黑色、大小适度)的最大水平距离; 夜间能见度是指: (1)假定总体照明增加到正常白天水平, 适当大小的黑色目标物能被看到和辨认出的最大水平距离; (2)中等强度的发光体能被看到和识别的最大水平距离。

雾、烟雾可将能见度降低至零, 雷雨天气的暴雨不仅使能见度降低, 同时由于地面湿滑而不能紧急制动。当能见度小于100m时通常被认为零, 在这种情况下道路管养部门应采取一系列措施(封闭道路、启动警示灯牌)。但是如果道路行车速度较大、能见度的大幅降低、道路监控系统实时性的不足, 则存在发生重大交通事故的隐患。

### ② 降雨与能见度的关系

造成能见度下降的主要因素是大气中各种微粒对可见光的吸收和散射, 而光

学原理测量能见度是利用能见度与光束路径上各种粒子群的消光系数成反比的原理。因此，欲研究降雨对能见度的影响，应将降水粒子的尺度、数密度作为参数分析大气消光系数的特性。

### 1) 短期强降雨

短时期强降雨对能见度影响的原因为：①降雨强度过大导致雨刮器不能及时刮尽前挡风玻璃的积水；②驾驶员视线触及范围因雨刮滑动过快而缩小；③强降雨发生时导致车内外温差，使得汽车内部前挡风玻璃产生水雾。从而造成驾驶员视线模糊，不能及时视认并获取道路交通运行环境信息从而对道路安全行车带来不利影响。

图5.6<sup>[41]</sup>为江苏省镇江气象局检测的2008年5月27日12-17时每分钟雨量和能见度的时间变化图。由图可知，从12:30-15:00的8次较大的强降雨峰值均导致能见度剧烈下降。在13:50左右，1min降雨强度为3.7mm，相对应的能见度从650m降低到50m左右。这种能见度在短时间内的剧变极其容易导致交通事故的发生。

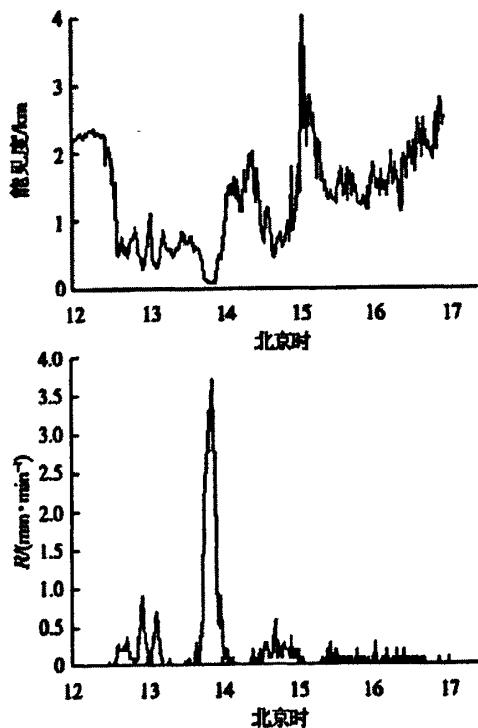


图 5.6 江苏省镇江市 2008 年 5 月 27 日 12-17 时 1min 降雨强度和能见度变化图

Fig.5.6 Curves of 1 min rainfall and visibility at the

Zhenjiang station from 12:00 to 17:00 on May 27, 2008

经过对图5.6中1min降雨强度进行分析，一次大的降雨过程可细分为若干个小系统，并随着小系统的生成、过境、消失，强降雨呈现出阵性。图5.6中1min降雨强度显示从12点到15点就有5个小的降雨系统、11次雨量峰值，降水强度的剧变致

使能见度改变频率过快，在操作上和心理上给驾驶人员造成很大的压力，从而增加了行车风险。

根据2008年5月27日镇江市的强降雨过程可以建立1min降雨强度与相应能见度的散点关系图（图5.7）。

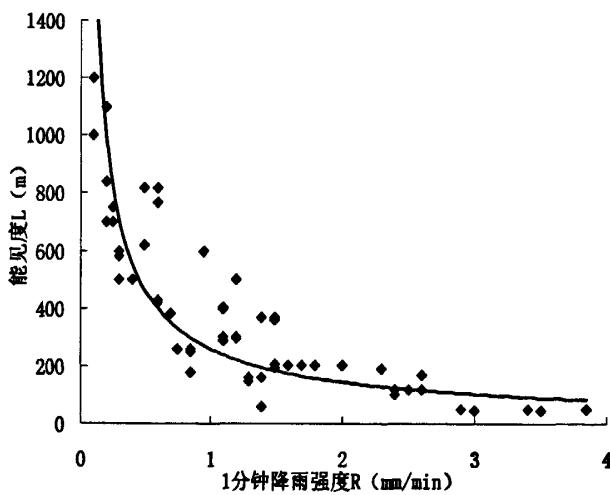


图 5.7 2008 年 5 月 27 日镇江 1min 降雨强度与能见度散点图和拟合曲线图

Fig5.7 Scatter diagram of 1 min rainfall against visibility and the fitting curve  
at the Zhenjiang station on May 27, 2008

由图5.7可知：当降雨强度R较小时，能见度L随着降雨强度R的增大而迅速降低；当降雨强度R大于1mm/min后，能见度L随降雨强度R的变化趋缓，但此时能见度已经降低到200m以下，当降雨强度R大于2mm/min时，能见度则小于100m。对图中55组数据进行回归分析，可拟合出降雨强度R和能见度L的关系曲线，该曲线的关系式为：

$$L = 252.1R^{-0.8731} \quad (R^2 = 0.8402) \quad (5.22)$$

式中：L—能见度（m）；

R—降雨强度（mm/min）。

## 2) 长时期中、小降雨

该类型降雨对能见度影响的原因为：①汽车高速行驶产生的水雾；②车辙槽内和局部路段积水降低了道路反光标线和突起路标的视认性。从而影响道路的视认性，容易引发追尾或单车掉线事故。

目前常用的中、小降雨雨滴谱是由Marshall和Palmer<sup>[42]</sup>于1948年提出的MP分布：

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D} \quad (5.23)$$

$$\Lambda = 41R^{-0.21} \quad (5.24)$$

式中:  $N_0$ —浓度参数, 取值为  $8 \times 10^4$  ( $\text{m}^{-3}/\text{cm}$ ) ;

$\Lambda$ —尺寸参数 ( $\text{cm}^{-1}$ ) ;

$D$ —雨滴直径 ( $\text{mm}$ ) ;

$R$ —降雨强度 ( $\text{mm}/\text{h}$ ) 。

该谱分布具有一般雨滴谱的特点, 对于分析长时期中、小降雨拟合效果较好。

Ulbrich和Atlas<sup>[42]</sup>于1984年在M P分布的基础上引入形状因子-Gamma分布:

$$N(D) = N_0 D^\mu e^{-\Lambda D} \quad (5.25)$$

当  $\mu > 0$  时, 式 (5.25) 为凹函数; 当  $\mu < 0$  时, 式 (5.25) 为凸函数; 当  $\mu = 0$  时, 式 (5.25) 即转化为式 (5.23)。Gamma分布对各类降水谱的拟合效果都很好, 尤其是对中、小雨的拟合效果更好, 但是其参数的确定比较复杂。降雨强度  $R$  与谱分布函数的关系为<sup>[42]</sup>:

$$R = \frac{\pi}{6} \int_0^\infty N(D) \rho_r D^3 v_r(D) dD \quad (5.26)$$

式中:  $\rho_r$ —雨的密度;

$v_r$ —雨滴下落的末速度。

由于降水粒子的最小直径远大于可见光波长, 应用射线追踪法对雨滴的散射特性进行计算。结果表明: 不同形状雨滴的散射相函数各不相同, 但是衰减效率因子随着粒子尺度参数的增大均趋向于 2, 因此本文在研究过程中取降雨粒子的衰减效率因子为 2, 即  $Q_{ext}=2$ 。

结合雨滴的谱分布函数, 单位体积内群雨滴的消光系数 (单位:  $\text{cm}^{-1}$ ) 为<sup>[43]</sup>:

$$\begin{aligned} \sigma_{rain} &= \frac{\pi}{6} N_0 \int_0^\infty D^2 Q_{ext}(D, \lambda, m) D^\mu e^{-\Lambda D} dD \\ &= \frac{\pi N_0 \Gamma(m+3)}{2 \Lambda^{m+3}} \end{aligned} \quad (5.27)$$

降雨强度 (单位:  $\text{mm}/\text{h}$ ) 为<sup>[44]</sup>:

$$R = \frac{2.28 \times 10^4 \pi N_0 \Gamma(m+5)}{\Lambda^{m+5}} \quad (5.28)$$

忽略降雨过程中空气其他气溶胶粒子对消光系数的影响, 将式 (5.27) 和式 (5.28) 联立求得能见度  $L$  (单位:  $\text{m}$ ) 与降雨强度  $R$  的关系为<sup>[45]</sup>:

$$L = \frac{0.302}{\sigma_{rain}} = \frac{1.376 \times 10^4 \Gamma(m+5)}{R \Lambda^2 \Gamma(m+3)} \quad (5.29)$$

### 5.2.3 驾驶员行车间距判断的反应规律

驾驶员驾驶汽车时, 大约 80% 以上的信息是由视觉得到的, 视觉是汽车驾驶中最重要的判断依据。但是随着车速的提高, 驾驶员眼睛的注视点逐渐前移, 再加上雨天降低了大气能见度, 驾驶员行车时不能清楚地分辨前方物体导致错误地估

计自己汽车与前方物体之间的间距，从而造成群车追尾等重大恶性事故。因此需要研究驾驶员对不同天气条件下行车间距判断的反应规律，并以此确定雨天安全停车视距。

依据《公路路线设计规范》<sup>[36]</sup>和《公路工程技术标准》<sup>[46]</sup>中关于停车视距的要求，选取重庆境内具有典型代表性的路段进行驾驶员不同能见度下行车间距判断反应规律试验。

#### ① 试验目的

1) 获得不同天气条件（晴天、小雨、中雨）下驾驶员真实行车间距与估计行车间距之间的差异；

2) 通过数理统计的方法对上述差异进行分析，总结二者的规律。

#### ② 测试设备、地点和人员

##### 1) 试验车型

本次测试选取代表性的长安铃木小轿车作为试验车型，外形为黄色，能够提高车辆的识别度。

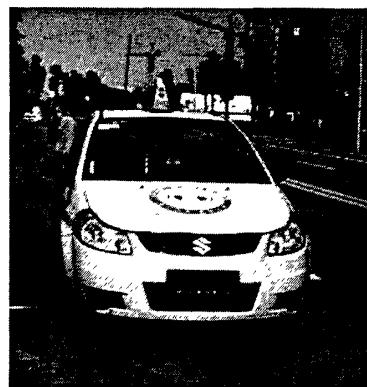


图 5.8 试验车辆

Fig 5.8 Experiment Vehicle

##### 2) 测试设备

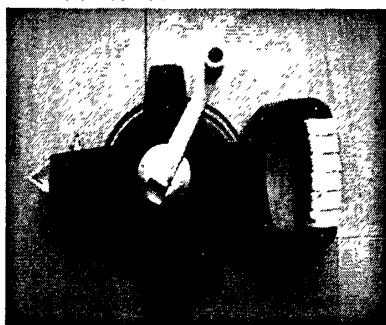


图 5.9 钢卷尺

Fig 5.9 Steel Tape

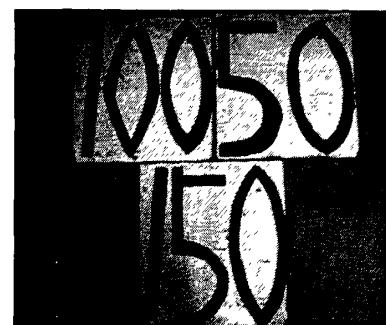


图 5.10 车距确认标志

Fig 5.10 The Sign of detecting distance between vehicles information

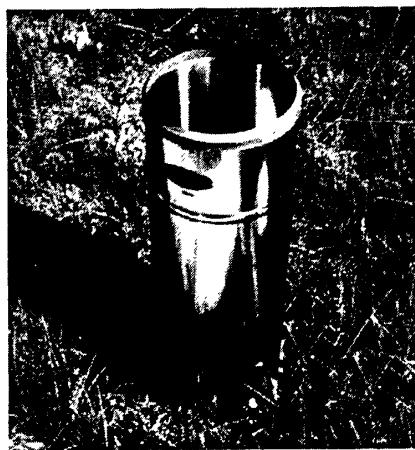


图 5.11 雨量计

Fig5.11 Rainfall Recorder

本次测试采取流水作业的方式进行, 对选择的试验车型(小轿车)在重庆市渝南大道巴南区龙舟湾附近的路段测定驾驶员在不同天气条件下行车间距判断反应规律试验。小轿车两辆、卷尺一个、雨量计一个, 自制车距确认标志牌 3 块(50 米、100 米、150 米), 样本驾驶员 15—20 人(女性占 1/4), 实验工作人员 5 人。

### ③ 测试流程

1) 在晴朗天气条件下中午 13 时至 16 时左右试验路段上前后停放两辆小轿车(两车距离不超过 200m), 前车打开尾灯, 让有经验的司机在后车驾驶员位置估计两车之间的间距(3 秒内完成), 读完一次数据确认无误后任意改变两车之间的距离(精确到米), 距离改变过程中用雨伞阻断样本驾驶员的视线, 每个样本驾驶员估读 5 次。全部完成后将估计值与真实值相比较, 分析二者离散关系

2) 样本驾驶员坐在后车驾驶员位置, 前车打开尾灯并缓慢远离后车至样本驾驶员不能清晰看到为止, 然后记下两车的真实距离作为道路可视距离(多样本测量求平均值, 超过 500m 可记录“大于 500m”), 一次试验结束。

3) 在测试之前让样本驾驶员观测自制车距确认标志牌, 确定距离感, 然后重复上述两步实验, 分析对比前后数据的差异。

4) 在雨天条件下(小雨、中雨)后车打开雨刮器重复上述试验。



图 5.12 阻挡视线



图 5.13 改变间距

Fig5.12 Prevent the vision

Fig5.13 Change the distance



图 5.14 估读间距

Fig5.14 Record the data

#### ④ 试验结果分析

驾驶员在晴天、小雨、中雨三种天气条件下对行车间距判断结果见附表 A2—A4。

将上述表格中的估计值减真实值，然后对二者的差值进行样本方差分析，即：

$$X_{i\text{差}} = X_{i\text{估}} - X_{i\text{真}} \quad (5.30)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_{i\text{差}} - \bar{X}_{\text{差}})^2 \quad (5.31)$$

经过计算，附表 A2—A4 的样本方差结果见表 5.4。

表 5.4 试验数据的样本方差结果表

Tab 5.4 Sample variance of the testing data

天气条件	是否观察车距确认标志牌	
	否	是
晴天	209.04	50.51
小雨	220.29	57.72
中雨	280.47	98.30

由表 5.4 可知, 驾驶员对行车间距判断的误差随着能见度的恶化而变大, 特别是中雨、没有车距确认标志牌的帮助下, 驾驶员判断误差比晴天时高 2 倍, 因此会造成驾驶员对行车间距盲目乐观, 增大了汽车追尾事故的风险。在不同的天气条件下, 车距确认标志牌能够显著提高驾驶员对行车间距判断准确率。

### 5.3 本章小结

① 得到部分滑水时道路附着系数的计算公式

由雨天道路附着系数的影响因素, 依据第四章动水压强的模拟结果对不同行车条件下道路附着系数进行计算, 并对附着系数计算结果进行多元回归分析; 结合季天剑关于道路水膜厚度与降雨强度的关系, 得到部分滑水时道路附着系数与行车速度、降雨强度、纵坡的关系式。

② 通过试验得到不同雨天环境下驾驶员行车间距的判断规律

通过对降雨的定义及雨环境的分类进行论述, 分析降雨强度与能见度的关系, 得到不同雨天环境下驾驶员行车间距的判断规律。试验表明: 驾驶员对行车间距判断的误差随着能见度的恶化而变大, 特别是在中雨、没有车距确认标志牌的条件下, 驾驶员判断误差比晴天高2倍。

## 第六章 部分滑水时高速公路行车安全性改善措施

由前文可知,高速公路雨天导致事故的原因主要是: (1) 降雨及前车轮胎排水产生的水雾导致驾驶员对停车视距产生误判从而不能及时制动; (2) 部分滑水导致轮胎与路面附着力下降造成车辆追尾; (3) 部分滑水导致各轮胎作用力产生差异,造成车辆旋转或侧翻。因此本文从以下几个方面入手,以提高雨天高速公路行车安全。

### 6.1 设计标准的补充完善

#### 6.1.1 停车视距纵坡修正

由公式 (5.18) 可知,停车视距与道路纵坡、附着系数有关。由于部分滑水导致轮胎与路面的附着系数发生变化,因此产生部分滑水后停车视距应根据行车条件的变化而异。《公路路线设计规范》<sup>[44]</sup>条文说明 7.9.1 中解释“潮湿状态下的停车视距计算值是采用纵坡为零时的平坦路面而求得”,没有考虑不同行车条件下附着系数和道路纵坡变化对停车视距产生的影响。

本文以雨天部分滑水现象为基础,综合能见度、道路纵坡和路面附着系数对停车视距的影响进行分析。结合公式 (5.18)、式 (5.21)、式 (5.29),提出小、中雨环境高速公路纵坡停车视距建议修正值,计算结果见表 6.1-6.6。

表 6.1 可视距离大于 500m 时小客车的安全间距 (单位: m)

( $i=-3\%$ ,  $V_s=120\text{km}/\text{h}$ , 中度磨损轮胎  $h_{\text{tread}}=4\text{mm}$ )

Tab 6.1 If visibility is more than 500m, saloon car's safety space (Unit:m)

(longitudinal gradient=-3%, design speed is 100km/h, tire tread depth is 4mm)

速度 (km/h)\降雨强度 (mm/5min)	60	70	80	90	100	110	120
0.07	78	98	122	152	189	237	301
0.2	79	99	123	153	192	241	307
0.6	80	101	126	158	199	253	326
1.0	81	103	130	163	207	266	*
1.3	82	104	132	167	214	*	*
1.7	83	106	135	171	*	*	*

附注:“\*”表示为完全滑水状态,超出本文研究范围,在此不再进行阐述(下同)。

表 6.2 可视距离大于 500m 时小客车的安全间距 (单位: m)

(i=-2%, V<sub>设计</sub>=120km/h, 中度磨损轮胎 h<sub>胎</sub>=4mm)

Tab6.2 If visibility is more than 500m, saloon car's safety space (Unit:m)

(longitudinal gradient=-2%, design speed is 100km/h, tire tread depth is 4mm)

速度 (km/h) 降雨强度 (mm/5min)	60	70	80	90	100	110	120
0. 06	78	97	121	150	186	233	294
0. 1	78	98	122	151	188	236	299
0. 5	79	100	125	156	195	247	317
0. 9	81	102	128	161	203	260	*
1. 1	81	103	130	165	209	*	*
1. 4	82	105	133	168	*	*	*
1. 9	84	107	137	*	*	*	*

表 6.3 可视距离大于 500m 时小客车的安全间距 (单位: m)

(i=-1%, V<sub>设计</sub>=120km/h, 中度磨损轮胎 h<sub>胎</sub>=4mm)

Tab6.3 If visibility is more than 500m, saloon car's safety space (Unit:m)

(longitudinal gradient=-1%, design speed is 100km/h, tire tread depth is 4mm)

速度 (km/h) 降雨强度 (mm/5min)	60	70	80	90	100	110	120
0. 04	77	97	120	148	183	228	287
0. 1	78	97	121	149	186	232	292
0. 4	79	99	123	154	192	242	308
0. 6	80	101	126	158	199	254	*
0. 9	81	102	129	162	205	*	*
1. 1	82	104	131	166	*	*	*
1. 5	83	106	135	*	*	*	*
1. 8	85	109	139	*	*	*	*
2. 1	86	111	*	*	*	*	*

表 6.4 可视距离大于 500m 时小客车的安全间距 (单位: m)

(i=1%, V<sub>设计</sub>=120km/h, 中度磨损轮胎 h<sub>胎</sub>=4mm)

Tab6.4 If visibility is more than 500m, saloon car's safety space (Unit:m)

(longitudinal gradient=1%, design speed is 100km/h, tire tread depth is 4mm)

速度 (km/h) 降雨强度 (mm/5min)	60	70	80	90	100	110	120
0.04	77	95	118	145	178	220	275
0.1	77	96	118	146	180	223	279
0.4	78	97	121	150	186	232	293
0.6	79	99	124	154	193	243	*
0.9	80	100	126	157	197	*	*
1.1	81	102	128	161	*	*	*
1.5	82	104	131	*	*	*	*
1.8	83	106	135	*	*	*	*
2.1	84	108	*	*	*	*	*

表 6.5 可视距离大于 500m 时小客车的安全间距 (单位: m)

(i=2%, V<sub>设计</sub>=120km/h, 中度磨损轮胎 h<sub>胎</sub>=4mm)

Tab6.5 If visibility is more than 500m, saloon car's safety space (Unit:m)

(longitudinal gradient=2%, design speed is 100km/h, tire tread depth is 4mm)

速度 (km/h) 降雨强度 (mm/5min)	60	70	80	90	100	110	120
0.06	76	95	117	143	176	217	269
0.1	76	95	117	144	178	219	273
0.5	77	97	120	148	183	228	286
0.9	78	98	122	152	189	238	*
1.1	79	99	124	155	194	*	*
1.4	80	101	126	158	*	*	*
1.9	81	103	130	*	*	*	*

表 6.6 可视距离大于 500m 时小客车的安全间距 (单位: m)

(i=3%, V<sub>设计</sub>=120km/h, 中度磨损轮胎 h<sub>胎</sub>=4mm)

Tab6.6 If visibility is more than 500m, saloon car's safety space (Unit:m)

(longitudinal gradient=3%, design speed is 100km/h, tire tread depth is 4mm)

速度 (km/h) 降雨强度 (mm/5min)	60	70	80	90	100	110	120
0.07	76	94	116	142	174	213	264
0.2	76	94	116	143	175	216	268
0.6	77	96	119	146	180	224	280
1.0	78	97	121	150	186	233	*
1.3	79	99	123	153	191	*	*
1.7	79	100	125	156	*	*	*

与建议停车视距计算结果相比, 目前《公路路线设计规范》<sup>[44]</sup>规定的停车视距普遍偏小, 相同道路纵坡条件下的数值与本文计算结果偏差最大达到 18.7%, 因此有必要对部分滑水条件下小客车停车视距进行修正。

### 6.1.2 安全车速建议

由第四章结论可知, 车速对行车部分滑水的影响最为明显, 因此限速是高速公路管理部门在不良天气条件下保障高速公路安全运营的一项重要措施。但是限速标准应根据路段线型条件、天气状况、交通量、路面条件等因素动态变化, 目前业内并没有统一的算法和标准。

本文取设计时速 120km/h、纵坡-3%、纵坡坡长 600m、构造深度 1mm, 结合式 (5.17) 和附表 A1 数据, 计算不同降雨强度下发生滑水的临界车速, 结果见表 6.7。

表 6.7 各降雨强度下小客车的临界滑水车速

Tab6.7 In different conditions, Saloon car's hydroplaning speed.

降雨强度 (mm/5min) 轮胎花纹 深度 (mm)	0.1	0.2	0.6	1.0	1.3	1.7	2.3	2.9	3.3
7	>120	>120	>120	119	111	100.5	90	83.5	79
4	>120	>120	>120	117.5	107	98	86	81	75
1	>120	>120	>120	110	104	93	83.3	78	72

#### ① 大、暴雨

大、暴雨时由于汽车雨刮器不能及时刮尽前挡风玻璃的积水, 再加上驾驶员

视线触及范围因雨刮滑动过快而缩小，从而造成驾驶员视线模糊。大雨时的能见度一般在200—500m，暴雨时可下降至50m左右。当道路能见度小于某一时速小客车的制动距离时，应将式(5.18)、式(5.21)、式(5.22)联立，反算该降雨强度下理论安全运行车速 $V$ 。本文以设计时速120km/h、纵坡坡长600m、构造深度1mm的高速公路为例，理论安全运行车速计算结果见表6.8。

表6.8 大、暴雨天气理论安全运行车速 $V$  (单位: km/h)

Tab6.8 Theoretical safe speed in heavy rain or torrential rain (Unit: km/h)

纵坡(%) \ 降雨强度 (mm/5min)	2.3	2.6	2.9	3.4	4.1	5.0	6.5
-1	>120	119	113	106	97	86	71
-2	>120	>120	116	109	101	91	78
-3	>120	>120	117	111	103	93	80
-0.3	117	111	104	95	84	70	51
0.3	118	112	105	96	85	71	52
1	>120	>120	116	108	99	88	73
2	>120	>120	>120	114	106	95	82
3	>120	>120	>120	118	110	99	86

结合表6.7可知，表6.8所得到的不同降雨强度下理论安全运行车速 $V$ 普遍偏高，即在该条件下小客车已发生完全滑水。因此大、暴雨条件下，应以小客车的临界滑水车速作为建议安全运行的最高车速。

## ② 弯道行车稳定性

汽车在弯道行驶时，受到侧向力的作用，例如重力、惯性力、空气阻力等的侧向分力。当作用在车轮上的侧向反力大于横向附着力时，汽车将沿着侧向力的作用方向滑动。发生部分滑水后，各车轮作用力性能产生差异，更容易发生侧向滑动或翻车，而《公路路线设计规范》<sup>[44]</sup>中并没有对避免雨天侧滑进行技术说明。

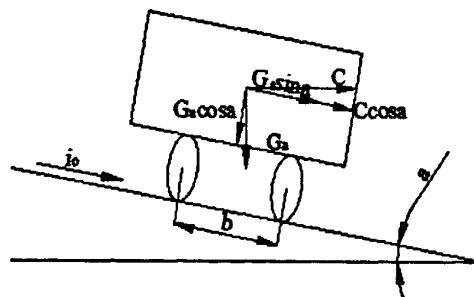


图6.1 汽车在圆曲线上行驶受到的横向力

Fig6.1 The transverse force of the automobile at circular curve

汽车在侧向坡面等速度行驶的受力情况见图 6.1。

横向力  $Y$  为<sup>[47]</sup>:

$$Y = C \cos \alpha \pm G_o \sin \alpha \quad (6.2)$$

当  $\alpha$  很小时,  $\cos \alpha \approx 1$ ,  $\sin \alpha \approx \tan \alpha = i_o$

则  $Y \approx C \pm G_o i_o$  (6.3)

式中: “+”一路拱双坡外侧, “-”一路拱双坡内侧;

$\alpha$ —路面横坡坡度;

$i_o$ —路面横坡坡度;

$C$ —离心力,  $C = (G a \cdot V^2) / (G \cdot R)$

$R$ —平曲线半径。

设侧向坡面无纵向坡度, 横向坡度为  $\alpha$ , 汽车的转弯半径为  $R$ 。随着汽车速度的增加, 离心力  $F$  也不断增大, 当离心力  $F$  等于横向力  $Y$  时, 汽车就失去侧向稳定开始发生横向滑移。根据向心运动可以推导出汽车在横向坡度为  $\alpha$  的道路上转弯时不发生侧滑的极限速度为<sup>[47]</sup>:

$$V_{\max} = \sqrt{gR(\varphi_{\text{横}} \pm i_o)} \quad (6.4)$$

式中:  $V_{\max}$ —转弯不发生侧滑的极限速度,  $\text{m/s}$ ;

$\varphi_{\text{横}}$ —路面的横向附着系数, 一般取  $0.6\text{--}0.7\varphi$ ;

$g$ —重力加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

以弯道横坡为 2%, 中度磨损轮胎为例, 将式 (6.4) 与式 (5.16) 联立即可求解发生部分滑水时不产生侧滑的极限车速; 当计算结果大于滑水的临界车速时应取二者较小值作为该行车条件下不产生侧滑的建议安全车速, 结果见表 6.9。

表 6.9 不同行车条件下不产生侧滑的建议安全车速

Tab6.9 The suggestion velocity of vehicle in different circular curve

圆曲线半径(m) 水厚 (mm)	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
1	61	80	93	102	110	116	120	120
2	61	80	92	102	109	115	120	120
5	60	78	91	100	107	113	118	120
8	59	77	89	98	105	111	116	117.5
10	58	76	88	97	104	107	107	107
12	58	75	87	96	98	98	98	98
15	57	74	85	86	86	86	86	86
18	56	73	81	81	81	81	81	81
20	55	72	75	75	75	75	75	75

## 6.2 管理改善措施

对于高速公路管理，雨天采取限制车速有利于缓解路面水膜的润湿作用，降低车辆部分滑水的事故风险。随着车速的降低，轮胎与路面的附着能力有所增强，因此，限制车速是降雨天气条件下提高行车安全的有力措施。然而驾驶员在雨天对车速和行车间距的判断准确率大幅下降，因此建议高速公路管理部门在急弯陡坡等危险路段对车速和间距进行控制，可以在这些路段通过增设车距确认标志对驾驶员进行提醒，以免由于判断失误而产生部分滑水造成交通事故。

根据季天剑<sup>[17]</sup>所得出路面水膜厚度与降雨强度的关系，结合本文第五、六章得研究成果，可计算出不同行车条件下发生滑水的临界车速及安全停车视距。为更准确的对驾驶员进行提醒，建议按车道位置布设车速（间距）反馈仪（图 6.4），并与车牌识别器相结合以强化信息提示作用，平面布设如图 6.5，工作原理如图 6.6。

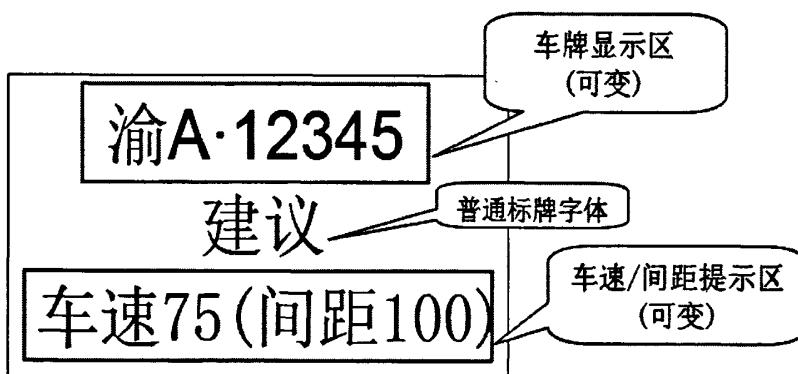


图 6.4 车速（间距）反馈仪版面布设图

Fig 6.4 Printing plate's implantation of velocity (distence) feedback instrument

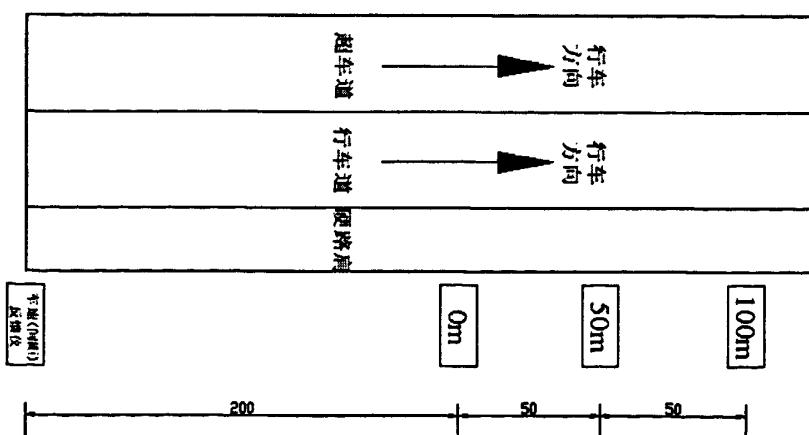


图 6.5 车速（间距）反馈仪及车距确认标志的平面布设图

Fig 6.5 The plan view about velocity (distence) feedback instrument and following distance acknowledgement signs' implantation

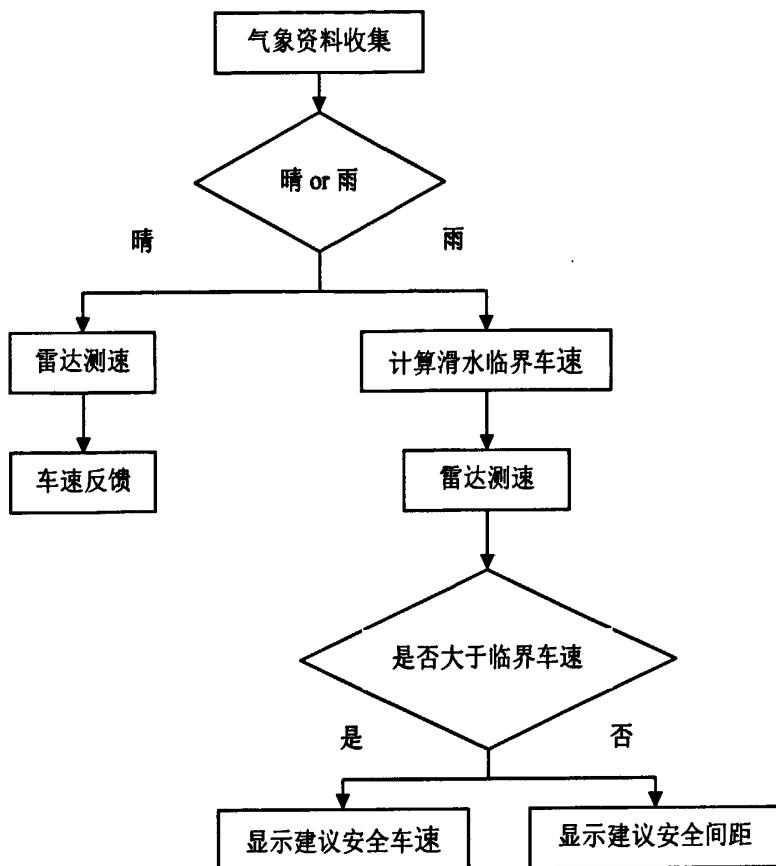


图 6.6 车速（间距）反馈仪工作流程图

Fig 6.6 The work-flow diagrammatical of velocity (distance) feedback instrument

### 6.3 本章小结

依据本文第五章的研究成果，本章提出了部分滑水条件下提高高速公路行车安全性的对策措施：

#### ① 纵坡停车视距修正和弯道极限车速修正

针对目前路线设计规范的不足，本章从设计的角度综合道路纵坡、圆曲线半径和路面附着系数对停车视距及弯道车速的影响进行分析，提出雨天高速公路纵坡停车视距和安全车速建议修正值。

#### ② 车速（间距）管理对策措施

针对驾驶员雨天行车对车速和行车间距的判断准确率大幅下降这一现状，本文设计出车速（间距）反馈仪及工作流程。同时建议高速公路管理部门在急弯陡坡等危险路段分车道设置车速（间距）反馈仪，并增设车距确认标志对驾驶员进行提醒，以减少由于判断失误而产生的部分滑水事故。

## 第七章 结论与展望

### 7.1 主要结论

① 从动水压强的角度研究汽车产生滑水的机理, 通过流体能量方程推导出动水压强的计算公式; 根据弹性流体动力润滑理论, 从发生滑水时的水流状态、水膜厚度与轮胎变形的相互关系、滑水时水膜所受到轮胎荷载的角度分析得出汽车滑水方程。

② 根据轮胎组成成分及其力学特征选取合适的材料参数, 使用 ANSYS 建立回力 195/60R14 型轮胎的三维有限元模型, 模拟该模型在代表车型荷载作用下的变形量, 以检验选取材料参数的合理性。

③ 通过建立不同花纹深度、有纵横向沟槽的轮胎模型, 使用 FLUENT 软件模拟轮胎模型在不同水膜厚度下以不同速度 (60km/h-120km/h) 行驶时所受的动水压强, 得出动水压强与行车速度、道路水膜厚度、轮胎花纹深度的关系式:

$$P = -84.686 + 2.26V + 9.437h_{\text{水}} - 0.9996h_{\text{胎}} \quad (R^2=0.9329)$$

经过分析得知行车速度对动水压强的影响最为明显, 水膜厚度和轮胎花纹深度对动水压强的影响几乎相同。

④ 分析雨天道路附着系数的影响因素, 根据动水压强的模拟结果对轮胎与路面的附着系数进行回归分析, 得到车辆发生部分滑水时道路附着系数与行车速度、水膜厚度的关系式:

$$\phi' = 0.8256 - 0.0043V - 0.0072h \quad (R^2=0.9317)$$

⑤ 综合道路纵坡、圆曲线半径和路面附着系数对停车视距及弯道车速的影响进行分析, 提出雨天环境高速公路纵坡停车视距修正值和安全车速建议值。

### 7.2 本文创新点

① 通过建立不同深度的纵横向花纹轮胎有限元模型, 使用 FLUENT 软件模拟轮胎所受的动水压强, 并从数理统计的角度对动水压强数据进行多元回归, 得出动水压强与行车速度、道路水膜厚度、轮胎花纹深度的关系式, 部分滑水时道路附着系数与行车速度、水膜厚度的关系式。

② 针对目前相关设计规范的不足, 综合道路纵坡、圆曲线半径和路面附着系数对停车视距及车速的影响进行分析, 提出雨天高速公路停车视距的纵坡修正值和安全车速建议值。

③ 结合本文的研究成果, 设计出车速 (间距) 反馈仪的工作原理和布设方案, 并结合车距确认标志对驾驶员进行提醒, 以减少雨天高速公路部分滑水事故。

### 7.3 展望

本文在尝试使用软件进行雨天滑水条件下道路行车安全的研究虽然已经完成了一些工作，但也存在一定的局限性，有待进一步的研究。

① 在建立轮胎有限元模型的过程中，为简化模型的复杂程度而忽略了轮胎的斜向花纹，与实际情况有部分出入。

② 本文受经费和试验条件的客观限制，试验中采用驾驶员人数和试验次数略有不足。

鉴于以上两点，今后的研究应从轮胎花纹类型、增加驾驶员人数和试验次数等方面入手，扩大样本量，或考虑部分实车试验+大规模计算机仿真的研究手段，完善和修正相关结论。

## 致 谢

暮然回首，三年研究生生活转瞬即逝。回想三年前踏入重庆交通大学时，命运便把我和这片宁静的校园紧紧地拴在了一起，一晃便是三年，人生能有多少个三年啊，我很庆幸这段最美好的青春年华都留在了母校。我爱你，重庆交通大学！

在举笔即将完成这篇论文的时候，我猛然发觉自己即刻将离开校园，人生又将写下新的篇章。离别之际，尽管依依不舍，却很珍惜，因为在我的生命中有那么多可亲可敬可爱的人值得感激。

首先衷心感谢我的导师唐伯明教授，从确定论文题目、查阅文献、论文撰写、修改直至最终完稿的整个过程中，唐老师始终对我严格把关、专心指导，本文得以顺利完成，与导师的大量心血和汗水是密不可分的。另外，在攻读硕士学位的三年里，唐老师给予了我无微不至的关怀和孜孜不倦的教诲，并以身作则，言传身教，他严谨的治学之风和对事业的孜孜追求将影响和激励我的一生。

感谢课题组刘唐志副教授、朱洪洲教授，因为有了他们严格、无私、高质量的教导，我才能在这几年的学习过程中汲取专业知识并迅速提升能力；感谢高建平老师和李志勇老师，谢谢你们在论文写作和建立 fluent 模型过程中给我的指导和帮助；感谢课题组 06 级和 07 级已经参加工作师兄师姐对我读研期间的帮助和关心，你们的建议我会谨记在心；感谢 08 级陈明磊、谢国栋、严恒、李文珍、马国民、陈森、王伟等同门好友，在各位同门的共同努力之下，我们始终拥有一个良好的生活环境和一个积极向上的学习氛围，能在这样一个团队中度过，是我极大的荣幸；感谢安冠宇、赵光惠、王凤、卓玺、刘荣华、梅子俊、曾超、万东华、高源等师弟师妹在试验数据分析、论文校对等方面给我的鼎力相助，谢谢你们付出的辛勤劳动。感谢好友张赟、张新雨、余超、刘德功、周婧、孙丽娟、林国琼等在研究生学习阶段对我生活上的帮助以及在论文写作过程中给予的启发。

对我学业最支持的当然是父母，感谢你们竭尽所能地为我提供良好的学习环境、健康的体魄、诚朴正直的品质，这些都是我受益终身的财富。感谢所有亲人们给予我成长的关怀，祝你们永远健康幸福。

最后，我要感谢参与我论文评审和答辩的各位老师，你们给了我一个审视几年来学习成果的机会，让我能够明确今后的发展方向。我将在今后的工作、学习中加倍努力，以期能够取得更多成果回报你们、回报社会。再次感谢你们，祝你们一生幸福、安康！

## 参考文献

- [1] Lynette C. Goodwin. Weather-Related Crashes on US Highways in 2001. National Highway Traffic Safety Administration(NHTSA), DOT HS 809 484, December 2002.
- [2] 王宝书, 谢静芳.长春市交通事故与气象条件关系的分析及交通预报系统[J].吉林气象, 2004, 6.
- [3] 庄继德.汽车轮胎学[M].北京: 北京理工大学出版社, 1999.
- [4] 刘长生.汽车轮胎与公路路面附着系数的研究[J].公路, 2006, 5.
- [5] 新华网.[http://www.sc.xinhuanet.com/content/2009-06/22/content\\_16873511.htm](http://www.sc.xinhuanet.com/content/2009-06/22/content_16873511.htm), 2009-06-22.
- [6] Horne, W. B. and Leland, T. J. W. Influence of Tire Tread Pattern and Runway Surface Condition on Braking Friction and Rolling resistance of a Modern Aircraft Tire[M]. NASA, 1962.
- [7] Schlosser L H M. Traffic accidents and road surface skidding resistance[M]. Transportation Research Bord, 1977: 11-20.
- [8] Schulze K H, Gerbaldia, Chavet J. Skidding accidents, frictions numbers, and the legal involved[M]. Transporation Reasportation Boad, 1977: 1-10.
- [9] Burchett J L, Rizenbergs R L. Frictional performance of pavement and estimates of accident porbility[M]. ASTM Special Technical Publication 763: 73-97.
- [10] Hosking J R. Relationship between skidding resistance and accident frequency: estimate based on seasonal variation[M]. TRRL Research Report 76.
- [11] Pelloli, R. Road Surface Characteristics and Hydroplaning[A]. Transportation Research Record[C]. Washington D.C, 1972: 27-32.
- [12] Robert D. Ervin, Luis Balderas. Hydroplaning with lightly-loaded truck tires[D]. The University of Michigan Transportation Research Institute, 1990.
- [13] Manjijnath Mavinakere. Hydrodynamic Force Calculation on Smooth and Grooved Tires Using CFD[D]. The University of Texas, 2003, 5.
- [14] T. F. Fwa, Santosh S. Kumar, G. P. Ong and C. J. H. Huang. Study of Effect of Rib Tire on Hydroplaning by Analytical Modeling[A]. TRB 2008 Annual Meeting. Washington D.C., 2008: 109-118.
- [15] 朱锡富, 周俊.滑水现象的ADAMS仿真[J].佳木斯大学学报(自然科学版), 2006, (3): 388-389.
- [16] 李少波, 张宏超, 孙立军. 动水压力的形成与模拟测量[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 7.
- [17] 季天剑.降雨对轮胎与路面附着系数的影响[D].东南大学, 2004.
- [18] 季天剑, 黄晓明, 刘清泉.部分滑水对路面附着系数的影响[J].交通运输工程学报, 2003,

- (4): 10-12.
- [19] 季天剑, 黄晓明, 刘清泉, 唐国奇.道路表面水膜厚度预测模型[J].交通运输工程学报, 2004, (3): 1-3.
- [20] Ji Tianjian, An Jingfeng, He Shenming, Li Chunlei. Depth Prediction Of Rainwater On Road Surface Based On Artificial Neural Network[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics. 2006, (2): 115-119.
- [21] Ong, G.P. and T.F. Fwa. Prediction of wet-pavement skid resistance and hydroplaning potential[A]. TRB 2007 Annual Meeting, Washington D.C, 2007, 160-171.
- [22] 杨永全, 汝树勋, 张道成, 肖白云. 工程水力学[M].北京: 中国环境出版社, 2003.
- [23] Patir Nadir, Cheng H S. Application of Average Flow Model to Lubrication Between Rough Sliding Surfaces[J]. Journal of Lubrication Technology, 1979, 101(4): 220-229.
- [24] Patir Nadir, Cheng H S. An Average Flow Model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication[J]. Journal of Lubrication Technology, 1978, 100(1): 12-17.
- [25] 朱永刚. 考虑动压与路面粗糙度时轮胎的附着性能研究[D]. 合肥工业大学, 2006.
- [26] Noor A K, Tanner A. Advances and trends in the development of computational model for tires [J]. Computers and Structures, 1985, 20: 517-533.
- [27] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学(第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [28] 张清珍. 胎圈钢丝的品种、性能及发展趋势[J]. 轮胎工业, 2002, 22(9): 515-520.
- [29] Lan Meng. Truck tire/pavement interaction analysis by the finite element method[D]. Michigan: Michigan State University, 2002.
- [30] Janajreh, Isam, Rezgui, Ali and Estenne. Vincent "Tire Tread Pattern Analysis for Ultimate Performance of Hydroplaning" Computational Fluid and Solid Mechanics Proceedings, First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, 2001, (6): 12-15.
- [31] Janajreh, Isam, Rezgui, Ali and Estenne. Vincent "Towards Free Surface Hydroplaning Over a loaded Tire" Computational Fluid and Solid Mechanics Proceedings, First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, 2001, (6): 12-15.
- [32] 杨虎, 刘琼荪, 钟波. 数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [33] И. В. Крагельский, В. В. Алисин. Трение, изнашивание и смазка[M]. МОСКВА: МАШИНОСТРОЕНИЕ, 1979.
- [34] Wambold J C, Henry J J, Yeh E C. Methodology for Analyzing Pavement Condition Data[C]. Pennsylvania Transportation Institute: FHWA/RD-83/094, 1984.
- [35] 中华人民共和国行业标准. JTJ 018-97 公路排水设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [36] 中华人民共和国行业标准. JTG D20-2006. 公路路线设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社,

- 2006.
- [37] 中华人民共和国行业标准. JTGD50-2006.公路沥青路面设计规范[S].北京:人民交通出版社, 2006.
- [38] 凌天清.道路工程[M].北京:人民交通出版社, 2008.
- [39] 柳本民.灾害性天气下高速公路控制技术研究[D].同济大学, 2008.
- [40] 张潇.大气能见度对交通安全的影响[J].机电信息, 2010, 3.
- [41] 吴建军, 袁成松, 周曾奎, 吴震.短时强降雨对能见度的影响[J].气象科学, 2010, 2.
- [42] Carlton W, Ulbrich. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution[J].Journal of climate and applied meteorology, 1983, 22.
- [43] Glantschnig W J, Chen S H. Light scattering from water droplets in the geometrical optics approximation[J].Applied Optics, 1981, 20(14).
- [44] Yang P, Liou K N. Light scattering from water droplets in the geometrical optics approximation[J].Journal of the Optics Society of America, 1997, 20(14).
- [45] Macke A, Mishchenko M I, Muinonen K, et al. Scattering of light by large nonspherical particles:Ray-tracing approximation versus T-matrix method[J].Optics Letters, 1995, 20(19).
- [46] 中华人民共和国行业标准. JTGB01-2003.公路工程技术标准[S].北京:人民交通出版社, 2003.
- [47] 张维全, 周亦唐, 李松青.道路勘测设计(第二版) [M].重庆:重庆大学出版社, 2005.
- [48] 《道路交通安全与逆反射技术》编委会.道路交通安全与逆反射技术[M].北京:人民交通出版社, 2009.
- [49] 中华人民共和国国家标准. GB/T16311-2005 道路交通标线质量要求和检测方法[S].北京:中国标准出版社, 2003.
- [50] European standard. Road marking materials-Road marking performance for road users (EN-1436-2007) [S].Brussels: European committee for standardization, 2007.

## 在学期间发表的论著及参与的科研项目

### 一、在学期间发表的论著

- [1] 董斌, 唐伯明, 刘唐志, 张贊.基于 fluent 软件的雨天潮湿路面滑水现象研究.武汉理工大学学报(交通科学与工程版) (已录用)
- [2] 董斌, 唐伯明, 刘唐志.冰雪路面事故成因分析及对策探讨.交通标准化, 2010.7.
- [3] Liu Tangzhi, Tang Boming, Dong Bin, Gao Jianping, Li Haiying. Analysis of Impact of Tire Tread Groove Depth on Hydroplaning Risk Level. 2010 International Conference on Computational Intelligence and Vehicular System, 2010, 11.

### 二、参与的科研项目

- [1] 灾害天气下山区高速公路运营安全关键技术研究. 交通部西部交通建设科技项目

## 附录 A

A1 不同行驶条件下轮胎模型受到的动水压强 (单位: kPa)  
Tab A1 In different conditions, number of hydrodynamic pressure by simulation (Unit: kPa)

速度 (km/h)	水膜厚度 mm	1						2			5			8			10		
		7	4	1	7	4	1	7	4	1	7	4	1	7	4	1	7	4	1
60	107.2	108.0	108.1	108.0	108.1	108.8	119.3	119.5	120.9	132.9	133.0	137.2	141.2	147.7	149.0				
65	108.7	109.1	109.5	109.2	109.6	110.4	122.7	122.9	123.3	139.1	140.9	144.2	150.4	155.0	158.8				
70	110.2	110.2	110.3	110.8	111.2	111.3	126.1	126.7	126.9	146.4	149.5	151.8	159.5	162.6	168.4				
75	111.1	111.5	112.0	111.9	112.2	113.1	129.5	130.6	131.5	155.1	158.8	159.0	168.7	170.7	178.0				
80	112.7	112.8	113.0	113.2	114.2	114.3	132.9	134.5	136.5	162.7	167.6	168.3	178.5	179.1	187.4				
85	114.0	114.1	115.1	114.7	115.4	115.8	137.2	138.7	139.6	172.4	176.5	178.1	188.0	190.2	197.0				
90	115.3	115.4	116.3	116.7	117.2	118.1	142.9	144.1	145.1	182.6	186.0	188.1	197.2	203.1	206.6				
95	116.9	118.1	118.6	118.1	118.7	120.3	147.3	148.1	150.8	193.1	196.1	198.2	207.1	215.2	218.8				
100	120.2	120.7	121.9	121.4	122.0	123.8	152.2	152.2	156.5	204.2	206.5	208.2	219.8	229.0	231.3				
105	123.2	123.4	125.1	124.7	125.8	128.1	157.7	157.9	162.3	216.9	217.7	218.2	233.7	243.3	244.5				
110	125.8	128.4	130.9	131.5	134.8	138.1	163.7	164.8	167.9	228.3	229.4	230.2	247.7	258.2	259.2				
115	133.4	135.9	138.5	141.4	144.8	148.2	170.1	173.4	173.5	238.3	241.8	244.0	262.0	272.5	276.7				
120	141.0	143.6	146.0	151.5	155.0	158.4	176.9	183.8	184.1	254.9	258.3	272.2	289.5	291.5	310.2				

## 附录部分

(接上表)

速度 km/h	水膜厚度 mm	12			15			18			20		
		7	4	1	7	4	1	7	4	1	7	4	1
60	150.5	158.8	159.8	172.5	172.7	178.2	181.0	181.6	185.4	187.1	187.7		
65	160.5	168.4	168.6	185.8	186.0	186.1	192.1	195.1	196.3	200.6	202.4	202.7	
70	171.6	177.8	179.5	199.9	200.4	201.7	206.8	210.3	212.2	216.8	218.7	218.9	
75	183.7	187.8	191.9	215.2	216.0	216.1	222.9	226.4	229.2	233.9	234.3	236.8	
80	196.9	197.1	204.1	227.3	227.3	231.1	239.9	241.6	243.4	252.5	253.2	255.9	
85	207.3	210.8	218.1	238.2	244.2	248.7	258.6	260.0	262.9	273.0	273.3	277.1	
90	220.1	225.5	233.1	250.2	262.3	262.4	278.8	279.8	282.4	294.6	294.9	296.8	
95	233.8	240.4	247.1	267.1	281.4	281.6	299.6	300.9	304.5	317.7	317.7	318.1	
100	247.3	257.1	262.2	286.2	301.5	301.7	321.0	323.7	327.9	341.7	341.9	342.4	
105	262.5	275.0	276.9	306.1	323.0	323.1	344.1	348.0	352.0	366.9	367.3	368.6	
110	279.2	293.2	293.9	326.9	346.3	346.3	369.1	373.2	377.2	393.7	395.9	396.0	
115	297.9	313.6	318.7	348.7	369.9	370.1	395.6	399.1	403.5	421.3	424.8	424.8	
120	334.3	340.1	355.4	371.6	391.2	393.9	422.6	425.9	427.2	450.6	455.0	456.0	

表 A2 晴天行车间距判断结果  
Tab A2 The estimated value of travelling spacing (Sunshine)

天气状况: 晴			降雨量: 0		雨刮档位: 无			
样本 编号	年龄	驾龄	性别	是否观察车距确认标志牌				
				否		是		
				两车间距				
				估计值	真实值	估计值	真实值	
1	24	2	男	60	56	75	78.5	
				70	67	95	93.5	
				95	95	105	110	
				130	115	85	96	
				150	143	60	59	
2	24	1	女	40	38	50	59	
				80	70	70	54	
				98	97	90	91	
				130	140	110	107.5	
				110	113	120	123.5	
3	26	2	男	50	45	125	123.5	
				60	56	140	139	
				100	90	110	115.5	
				90	94	100	95.5	
				44	55	100	95.5	
4	23	1	女	80	78	80	79	
				120	92	60	64.5	
				150	126	55	55	
				40	36	40	41	
				60	53	45	41	
5	28	3	男	100	76	60	61	
				130	93	80	85.5	
				160	115	90	94.5	
				25	46	110	112	
				45	71	100	112	
6	36	4	男	80	91	110	127	
				105	113	120	156	

				115	120	120	132
				100	107	110	116
				130	93	70	82
7	31	3	男	120	83	50	54
				90	70	30	37.2
				70	63	25	30
				40	50	20	25
				53	66	18	20
				80	86	20	22.6
8	35	3	男	95	103	30	35.1
				110	118	38	42.8
				90	110	60	60.5
				80	74.7	70	73.6
				55	70	85	85.4
9	28	1	女	40	46	100	98.9
				20	26.3	105	103.2
				20	22	120	118.4
				32	20.3	110	107.1
				50	52	100	97.4
10	28	2	男	65	65	90	86.2
				68	78.5	80	74.7
				80	88.6	65	64.3
				95	103.4	60	57.4
				120	114.6	50	45.2
11	38	4	男	110	105.3	40	37.1
				95	88.6	30	25
				80	75.4	20	18.4
				65	63.9	30	39.5
				50	57.4	50	55.4
12	32	2	男	45	48.6	60	63.9
				40	40.1	70	78.4
				45	33.7	80	90.4
				30	20.2	100	106.7

表 A3 小雨天气行车间距判断结果  
Tab A3 The estimated value of travelling spacing (Sprinkle)

天气状况: 小雨			降雨量: 3.3		雨刮档位: 间隔 2 秒			
样本编号	年龄	驾龄	性别	是否观察车距确认标志牌				
				否		是		
				两车间距				
			估计值	真实值	估计值	真实值		
1	32	2	男	50	69	65	50	
				60	80	85	71	
				85	108	95	95	
				120	128	75	81	
				125	150	50	41.2	
2	28	2	男	30	51	40	55	
				70	83	60	39	
				88	110	80	76	
				100	120	100	92.5	
				130	126	110	108.5	
3	26	2	男	40	58	115	108.5	
				50	69	130	124	
				90	103	100	95	
				80	107	90	80.5	
				34	68	90	85	
4	23	1	女	70	91	70	64	
				95	90	50	49.5	
				110	100	45	40	
				30	49	30	26	
				50	66	35	28	
5	24	2	男	90	79	50	46	
				120	96	70	70.5	
				150	118	80	79.5	
				15	49	100	97	
				35	74	90	90	
6	24	1	女	70	94	100	112	
				95	116	110	120	

				105	123	110	117
				90	110	100	123
				120	96	60	50
7	38	4	男	110	86	40	39
				80	73	20	15
				60	66	15	12
				30	53	10	10.8
				43	69	8	5
				70	89	10	7.6
8	35	3	男	85	106	20	20.1
				100	121	28	21
				80	113	50	38
				70	77.7	60	50.1
				45	73	75	65
9	28	1	女	30	49	90	75
				10	29.3	95	88.2
				10	25	110	103.4
				22	23.3	100	92.1
				40	55	90	82.4
10	28	3	男	55	68	80	71.2
				58	81.5	70	59.7
				70	91.6	55	49.3
				85	106.4	50	42.4
				110	117.6	40	30.2
11	36	4	男	100	108.3	30	22.1
				85	91.6	20	15
				70	78.4	10	8
				55	66.9	20	24.5
				40	60.4	40	40.4
12	31	3	男	35	51.6	50	48.9
				30	43.1	60	48.6
				35	36.7	70	80.2
				20	23.2	90	77.6

表 A4 中雨天气行车间距判断结果  
Tab A4 The estimated value of travelling spacing (Moderate Rain)

天气状况: 中雨			降雨量: 6.1mm		雨刮档位: 间隔 1 秒			
样本 编号	年龄	驾龄	性别	是否观察车距确认标志牌				
				否		是		
				两车间距				
				估计值	真实值	估计值	真实值	
1	23	1	女	30	25.5	43	32.9	
				40	40	52	56.3	
				50	64	68	72.8	
				80	80	80	86.8	
				110	104	100	105	
2	24	1	男	120	104	105	105	
				100	97	115	120	
				80	75	100	107	
				60	55	95	89.5	
				30	40	65	74	
3	24	2	男	40	40	60	74	
				60	65	70	60	
				80	88	50	43	
				100	108	25	26.4	
				130	126.7	10	13.2	
4	23	1	女	120	140	10	13.2	
				110	128	25	31.8	
				100	112	47	46.7	
				80	100	57	63.2	
				70	83	85	80	
5	26	2	女	80	117	78	80	
				90	96.5	105	93.8	
				70	83.6	140	106.5	
				60	70.6	155	121	
				40	49	150	108.4	
6	28	3	男	40	40	102	108.4	
				90	65	101	100	

					110	86	90	86.6
					140	100	75	74.3
					170	117	55	60
7	30	4	男		35	49	55	60
					24	34	42	41
					64	67.8	35	34
					118	85.8	63	67
					125	97.5	80	81
					60	97.5	78	81
8	35	4	男		80	117	101	106
					70	86	120	120
					50	68.5	135	127.6
					45	54.3	150	140
					45	54.3	150	140
9	31	3	男		40	40	120	123.4
					62	71	80	87.2
					90	88.5	60	60
					120	113.5	20	27.5
					123	113.5	25	27.5
10	26	2	男		109	94	20	16.8
					90	88.5	25	26.4
					76	69	50	46.8
					62	55	60	61
					43	55	65	61
11	40	5	男		35	46	69	75.3
					19	38	90	89.4
					13	21.6	105	102.1
					15	15	110	116.7
					17	15	120	116.7
12	32	3	男		30	29	100	102.8
					55	51	85	95.4
					85	78.2	80	78.6
					100	90	50	55

