

高速公路雨天交通事故风险路段识别以及路面综合整治方案研究

陆禄

(广东省高速公路发展股份有限公司佛开分公司, 广东 佛山 528000)

摘要: 随着广东多个高速公路改扩建项目的建成通车, 宽幅路面雨天交通事故增多成为公路和交通管理部门正在面临的新课题。结合实际高速公路雨天交通事故多发路段综合整治应急工程, 提出了高速公路雨天交通事故多发的原因及机理; 提出并验证了高速公路雨天交通事故风险路段识别程序, 以及高速公路雨天交通事故风险路段综合整治措施和雨天允许行车速度的确定方法。相关成果对于改扩建高速公路排水设计以及已有高速公路雨天交通事故多发路段综合整治有参考价值。

关键词: 高速公路; 雨天交通事故; 路面水膜厚度; 车辆水漂速度阈值

中图分类号: U491.31

文献标识码: A

Study on Identification of Traffic Accident Risk Sections on Rainy Days and Comprehensive Improvement Scheme of Expressway

LU Lu

(Guangdong Province Expressway Development Co., Ltd. Fokai Branch, Foshan 528000, Guangdong, China)

Abstract: With the completion of many expressway expansion projects in Guangdong, the increase of traffic accidents on rainy days has become a new challenge for highway and traffic management. Therefore, this study combined the comprehensive improvement emergency project of expressway sections with frequent traffic accidents on rainy days, put forward the cause or mechanism of frequent traffic accidents on rainy days; proposed and verified the "identification procedure of traffic accident risk sections of expressway", and the comprehensive improvement measures of traffic accident risk sections and the determination method of allowable driving speed on rainy days. The relevant results have reference value for the drainage design of expansion expressway project and the comprehensive improvement of existing expressway sections with traffic accidents on rainy days.

Key words: highway; rainy day traffic accidents; pavement water film thickness; hydroplaning speed threshold

随着社会和经济的高速发展, 广东省内交通量剧增, 早期修建的高速公路基本达到饱和状态。未来若干年内, 高速公路的改扩建将成为交通行业的重要任务。根据广东省综合交通运输“十四五”发展规划, 广东省高速公路改扩建项目规划里程超 1500 公里^[1]。然而, 高速公路宽幅路面(双向八车道以上)带来交通顺畅的同时, 雨天交通事故增多成为已通车改扩建高速公路

路面临的一个新的严峻问题。据某高速公路管理部门统计, 雨天事故占总事故的比例为 73%, 而 88% 的雨天事故发生在超高渐变段, 如图 1 所示。因此, 开展高速公路雨天交通事故多发或风险路段识别以及路面综合整治方案研究对于广东这样的多雨潮湿地区刻不容缓。

公路交通安全统计数据显示, 大多数事故(约 94%)是由驾驶员操作失误造成的^[2], 但许

收稿日期: 2023-08-04

作者简介: 陆禄, 路桥工程师, 本科, 研究方向为高速公路路面施工及养护



图1 广东某高速公路雨天事故监控画面

多因素可能是引发事故的原因，并加重了事故的严重程度。不利天气就是其中之一^[3-4]。具体来说，雨天对道路交通安全的影响主要体现在两个方面：积水会降低路面的摩擦力（抗滑性能），车轮溅起的水雾影响驾驶员的能见度，两者的结合大幅增加了道路碰撞事故的可能性^[4-5]。美国国家运输安全委员会（NTSB）指出，在潮湿路面上发生致命事故的频率是在干燥路面上的3.9~4.5倍^[6]。

Gallaway认为，雨天车辆事故的增多源于高速行驶车辆的“水漂”现象。雨天形成的路面积水会导致轮胎与路面部分分离（抗滑性能下降）或全分离（“水漂”，此时车辆会失去控制），通过控制路面表面的水膜厚度和车速，避免出现“水漂”现象，可以有效提高道路雨天行车的安全性。基于这样的认识，Gallaway通过事故调查、多领域问卷、现场测试和数学模型等方式，较早地系统开展了水膜厚度、行车速度以及路面特性间的定量研究，提出了水膜厚度模型和水漂速度阈值模型，建立了水漂预测和基于水漂控制的路面几何设计框架^[7]。Ong和Fwa使用3D有限元模型来预测积水路面的抗滑和水漂速度阈值，发现对于正常行驶的小型客车，水漂速度阈值主要受轮胎充气压力的影响，其次是水膜厚度；路面的抗滑性能随着水膜厚度的增加而降低，

当水膜厚度超过6 mm时，曲线趋于平缓^[8]。Anderson等人借助NCHRP项目的资助，开发了计算机软件PAVDRN1.0，制定了佛罗里达州交通部（FDOT）积水风险评估指南。相关调查和研究结果表明，较宽幅的路面更容易产生水漂事故；与开级配沥青混合料路面（OGFC）相比，密级配沥青混合料（AC）路面更易引发水漂事故发生^[9]。Dehnad等利用自己研发的模拟实验设备，模拟路面条件与水漂速度间的关系，并建立了相关模型。统计分析结果显示，已有的预测模型与Gallaway等的模型之间没有显著差异^[10]。

已有研究文献调研表明，路面抗滑性能的降低或“水漂”现象导致了路面雨天事故的增加。路面的水漂风险与路面横坡度、路面构造深度、路面宽度、轮胎花纹深度、轮胎压力、降雨强度和行车速度直接相关。据此，本研究试图应用已有的研究成果（路面水膜厚度和水漂速度模型）对某高速公路雨天交通事故多发路段进行水漂风险评估和路面抗滑综合整治措施效果评价，为制定广东高速公路雨天交通事故多发路段路面综合整治方案奠定良好基础。

1 路面水漂现象概述与风险路段判别

1.1 路面水漂现象概述

路面水漂是一种水动力学现象，因此也称之为动力水漂^[11]。是指在特定的水膜厚度和行车速度条件下，由于水的不可压缩性，使得轮胎与路面部分或完全分离（水漂）的情况，如图2所示，并以轮胎与路面的分离百分率作为评价水漂程度的指标^[12]。

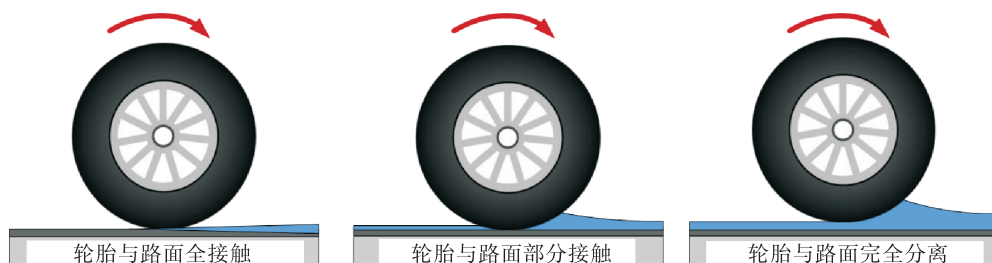


图2 路面水漂现象的简化示意图

已有的研究认为，水漂的影响因素可分为四类：①道路和路面参数（水膜厚度和表面构造深度等）；②环境因素（降雨强度等）；③驾驶员因素（车辆行驶速度等）；④车辆因素（轮胎类型和压力、轮胎花纹形式和深度等）。其中，与道路和路面参数相关的因素应该作为公路管理部门

定期评估和管理的内容，以保证车辆行驶的安全。

1.2 PAVDRN水膜厚度（WFT）模型

PAVDRN的水膜厚度模型是在比选和修改已有模型的基础上得出的，适用于不同的路面类型（水泥路面，密级配沥青路面和排水路面）。模型方程如式（1）所示：

$$WFT = \left(\frac{n \cdot L \cdot I}{36.1 \cdot S^{0.5}} \right)^{0.6} - MTD \quad (1)$$

式中: WFT = 水膜厚度 (等于路表面积水深度减去平均路表构造深度/mm); n = 曼宁值 (无量纲); MTD = 平均路表构造深度/mm; L = 排水路径长度/m; I = 降雨强度 (mm/h); S = 路面合成坡度 (无量纲)。

根据路面类型, 式 (1) 中的曼宁值可以由下面方程计算得出:

水泥混凝土路面 (PCC):

$$n = \begin{cases} = \frac{0.388}{N_R^{0.535}} & (N_R < 240) \\ = \frac{0.345}{N_R^{0.502}} & (N_R < 500) \\ = \frac{0.319}{N_R^{0.480}} & (N_R < 1000) \\ = 0.017 & (N_R \geq 1000) \end{cases} \quad (2)$$

密级配沥青路面 (DGFC):

$$n = 0.0823 \cdot N_R^{-0.174} \quad (3)$$

开级配沥青路面 (OGFC):

$$n = \frac{1.490 \cdot S^{0.306}}{N_R^{0.424}} \quad (4)$$

式中: N_R 为无量纲雷诺数, 可由下式计算:

$$N_R = \frac{L \cdot I}{\mu} \quad (5)$$

式中: 参数 μ 表示水的运动黏度。

1.3 PAVDRN 水漂速度 (HPS) 阈值模型

PAVDRN 水漂速度阈值由两个水膜厚度分别计算得出:

$WFT < 2.4$ mm 时:

$$HPS = 26.04 \cdot WFT^{-0.259} \quad (6)$$

式中: HPS = 水漂速度/mph; WFT = 水膜厚度/英寸 (1 英寸 = 2.54 cm)。

(2) $WFT \geq 2.4$ mm 时:

$$HPS = 3.09 \cdot A \quad (7)$$

式中: A 由下式计算:

$$A = \text{Max} \left[\frac{10.409}{WFT^{0.06}} + 3.507, \left(\frac{28.952}{WFT^{0.06}} - 7.817 \right) \cdot MTD^{0.14} \right] \quad (8)$$

式中符号意义同前, 但单位不同。

1.4 水漂风险路段的识别与整治

根据已有的研究成果, 水漂风险路段的判别可以按以下步骤进行:

影响因素或输入变量:

降雨强度/ (mm/h): 参考设计文件或当地

气象资料;

道路几何要素: 车道数、车道宽度、分析路段的纵坡、各车道的横坡;

路面表面特性: 路面类型 (DGFC、OGFC、PCC)、平均构造深度 (MTD)、路面材料渗透系数 (k);

曼宁值 n : 路面温度、路面积水的运动黏度、雷诺数;

车辆要素: 轮胎充气压力、轮胎荷载。

(2) 计算或输出变量:

路面水膜厚度/mm: 式 (1);

水漂速度阈值/ (km/h): 式 (6) 或 (7)。

(3) 水漂风险路段的识别: 如果分析路段的水漂速度阈值/ (km/h) 小于等于路段的允许行车速度, $HPS \leq S_{\text{允许}}$, 则认为该路段属于水漂风险路段, 应予以整治。

(4) 水漂风险路段的整治方案: 对于判别为存在水漂风险的路段可以进行影响因素敏感性和显著性分析, 如路段纵横坡、路面类型、构造深度等; 进行技术经济效果评估, 优化和确定路段水漂风险整治方案。

2 实例分析

2.1 问题描述

某高速公路弯道超高渐变段三天内发生四起雨天侧滑交通事故。事后调查发现, 事故主要发生在超高渐变段, 特别是横坡在 0% ~ 0.5% 为主的范围。本研究将该处路段作为算例, 分析了不同暴雨强度下路面的水膜厚度和对应于不同水膜厚度的水漂速度阈值, 以及不同路面形式 (密级配和开级配) 对水膜厚度和水漂速度阈值的影响。计算条件如下:

路段纵坡: 3% (取自设计图纸);

车道横坡: 0%; 车道宽度: 3.75 m; 车道数: 4 (取自设计图纸);

路面类型: ①密级配沥青混合料 (表面构造深度: 0.5 mm; 渗透系数: 0.0 cm/s); ②开级配沥青混合料 (表面构造深度: 1.7 mm; 渗透系数: 0.153 cm/s^[13]);

极端暴雨强度: 156 mm/h (取自设计图纸);

边缘排水方式: 单侧开放式排水。

2.2 路面水膜厚度和对应的水漂速度阈值

本研究参考已有的研究成果, 应用 PAVDRN 水膜厚度模型和 PAVDRN 水漂速度模型计算了分析路段在不同暴雨强度下的水膜厚度和对应于

不同水膜厚度的水漂速度阈值。作为一种简化的模型，PAVDRN 模型不需要输入车辆信息（轮胎压力和花纹深度等），也不需要输入路面温度。两种路面类型（密级配沥青混合料和开级配沥青混合料）的水膜厚度计算结果见表 1，两种路面类型（密级配沥青混合料和开级配沥青混合料）的水漂速度阈值计算结果见表 2。

表 1 分析路段在不同暴雨强度下的水膜厚度
单位：mm

暴雨 强度/ (mm/ h)	车道分布（密级 配沥青混合料）				车道分布（开级 配沥青混合料）			
	车道 1	车道 2	车道 3	车道 4	车道 1	车道 2	车道 3	车道 4
2.54	1.24	1.65	2.01	2.29	0.3	0.79	1.19	1.55
6.35	2.41	3.07	3.66	4.14	1.68	2.46	3.12	3.73
12.7	3.76	4.75	5.61	6.35	3.28	4.45	5.44	6.32
25.4	5.79	7.24	8.48	9.58	5.66	7.37	8.84	10.13
50.8	8.76	10.92	12.75	14.38	9.17	11.71	13.87	15.77
101.6	13.16	16.33	19.02	21.44	14.33	18.08	21.29	24.1
152.4	16.64	20.62	24.03	27.03	18.44	23.14	27.15	30.68

注：车道 4 为零横坡路段最内侧车道，并假定中央分隔带设置良好的排水系统，可以实现与开放式排水相近的排水效果。

从表 1 可以看出，由于水的牵引作用，即使是零横坡路段，最里侧车道（车道 4）的水膜最厚，最外侧车道的水膜最薄，水膜厚度随车道号基本呈线性分布；对于低暴雨强度（<50 mm/h），开级配沥青磨耗层对于降低路面水膜厚度是有作用的；当降雨强度较高时（≥50 mm/h），开级配沥青磨耗层路面上的水膜厚度大于密级配沥青磨耗层路面。这可能是由于较高的暴雨强度会使开级配沥青磨耗层快速饱和，而较深的表面构造又

表 2 分析路段在不同暴雨强度下的水漂速度阈值
单位：km/h

暴雨 强度/ (mm/ h)	车道分布（密级 配沥青混合料）				车道分布（开级 配沥青混合料）			
	车道 1	车道 2	车道 3	车道 4	车道 1	车道 2	车道 3	车道 4
2.54	90.88	84.48	80.48	77.6	129.92	102.4	92.16	86.08
6.35	76.64	75.68	75.2	74.72	84.32	86.24	84.64	83.52
12.7	75.04	74.24	73.76	73.28	84.32	82.4	81.12	80.16
25.4	73.6	72.8	72.32	71.84	80.8	79.04	77.92	77.12
50.8	72.16	71.52	71.04	70.56	77.76	76.16	75.2	74.4
101.6	70.88	70.24	69.76	69.28	75.04	73.6	72.64	71.84
152.4	70.08	69.44	68.96	68.64	73.44	72.16	71.2	70.4

会阻碍表面水排泄。这些计算结果与人们对路面排水的一般认知以及实际路面排水的观察效果都是一致的。

从表 2 可以看出，水漂速度阈值随水膜厚度的增加呈幂函数方式降低；开级配沥青磨耗层对于提高路面水漂速度阈值是有效果的（水膜厚度和表面构造的贡献）。这些计算结果可以帮助道路管理部门针对真实的雨天行车条件，制定有效的行车速度限制，以强化道路的行车安全。同时，也为路面行车安全的综合整治提供依据。

3 雨天交通事故风险路段识别与路面综合整治方案

3.1 雨天交通事故风险路段识别程序

本研究通过对实际路段水膜厚度和水漂速度阈值的计算和分析，认为已有研究成果对于广东的道路环境也是有效的，并据此提出雨天交通事故风险路段识别程序，如图 3 所示。

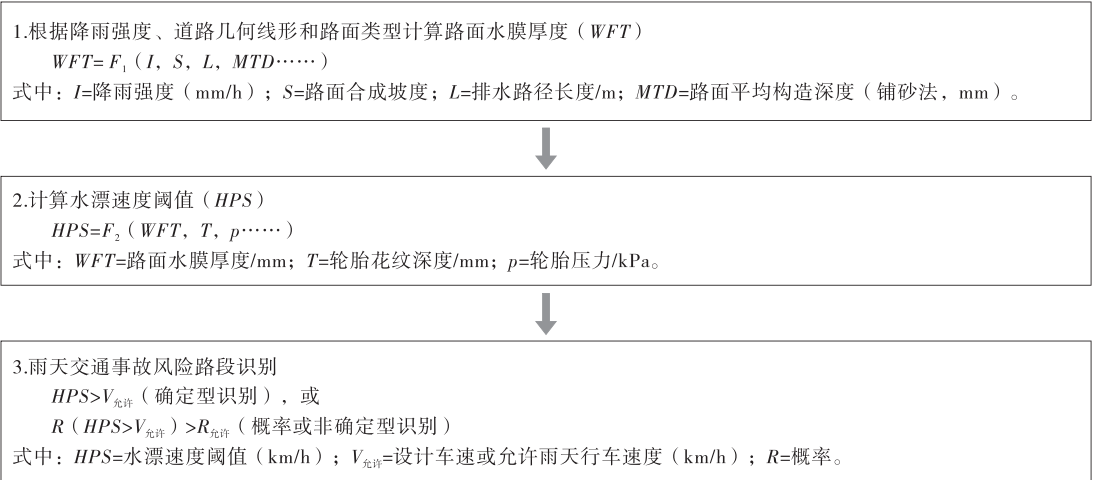


图 3 雨天交通事故风险路段识别程序

- [N]. 中国交通报,2023-06-16(002).
- [2] 曹皓,孙敦华,王子琛,等. 空心板梁桥表观病害与荷载横向分布关联分析[J]. 中外公路,2023,43(3): 114-121.
- [3] 钱若霖,苏佩,杨谦. 基于损伤分析的空心板桥荷载横向分布系数研究[J]. 公路与汽运,2021,202(1): 118-120,125.
- [4] 宋国听. 基于荷载横向分布影响线的空心板桥铰缝损伤识别方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2020.
- [5] 旷斌,李院军. 考虑铰缝损伤的装配式空心板梁桥荷载横向分布系数计算方法[J]. 世界桥梁,2019,47(5): 74-78.
- [6] 周建庭,张华彬,陈磊,等. 新型小箱梁铰缝损伤前后荷载横向分布规律研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(11): 34-40.
- [7] 李文,杜伟强,武先梅. 移动荷载下横向损伤对 T 梁桥边梁荷载横向分布的影响[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版),2020,35(03): 54-58,77.
- [8] 邬晓光,黄成. 考虑旧桥损伤的拼宽 T 梁桥荷载横向分布计算[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(9): 2233-2239.
- [9] GANGONE M V, WHELAN M J. Damage identification in highway bridges using distribution factors[C]. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series,2017.
- [10] 战家旺,高胜星,闫宇智,等. 基于模型修正的公路简支板梁桥荷载横向分布系数计算方法[J]. 中国公路学报,2019,32(05): 72-79.
- [11] 李院军,邬晓光,黄成,等. 考虑主梁损伤的装配式梁桥荷载横向分布系数计算[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(06): 1459-1465.

(上接第 18 页)

3.2 雨天交通事故风险路段综合整治原则

对于判别为存在水漂风险的路段可以通过水膜厚度计算模型和水漂速度阈值计算模型进行影响因素敏感性和显著性分析,如路段纵横坡、路面类型、构造深度等;进行技术经济效果评估,优化和确定路段水漂风险整治方案。对于已有综合整治困难的道路或路段,也可以通过限制雨天车速的方式实现交通安全的目标。

4 结论

本研究提出了高速公路雨天交通事故多发的原因及机理,系雨天路面积水,车辆发生水漂失控所致;鉴于雨天交通事故多发路段实际上就是车辆水漂风险路段,提出并验证了高速公路雨天交通事故风险路段识别程序;提出了高速公路雨天交通事故风险路段综合整治措施和雨天允许行驶速度的确定方法。

参考文献:

- [1] 广东省交通运输厅. NO. 1! 高速公路改扩建迎来“广东模式”[EB/OL]. (2023-05-04) [2023-08-04]. http://td.gd.gov.cn/dtxw_n/gdjrxw/content/post_4174414.html.
- [2] SINGH S. Critical reasons for crashes investigated in the national motor vehicle crash causation survey [R]. Washington, DC: National Center for Statistics and Analysis,2015.
- [3] South Carolina Department of Public Safety. South Carolina traffic collision fact book 2016 [M]. Columbia,SC: SCDPS,2017.
- [4] KHAN G, QIN X, NOYCE D A. Spatial analysis of weather crash patterns [J]. Transportation Engineering, 2008,134(5): 191-202.
- [5] JUNG S, JANG K, YOON Y, et al. Contributing factors to vehicle to vehicle crash frequency and severity under rainfall [J]. Safety Research,2014,50: 1-10.
- [6] BLACK G, JACKSON L E. Pavement surface water phenomena and traffic safety [J]. ITE J. 2000,70(2): 32-37.
- [7] GALLAWAY B M, IVEY L, HAYES G, et al. Pavement and geometric design criteria for minimizing hydroplaning [R]. Rep. No. HWA-RD-79-31. Washington, DC: FHWA. 1979.
- [8] ONG G P, FWA T F. Prediction of wet-pavement skid resistance and hydroplaning potential [J]. Transp. Res. Rec.,2007,(1): 160-171.
- [9] ANDERSON D A, HUEBNER R S, REED J R, et al. Improved surface drainage of pavements [R]. Washington,DC: Transportation Research Board,1998.
- [10] DEHNAD M H, KHODAII A. Effects of asphalt pavement texture on hydroplaning threshold speed [J] J. Cent. South Univ.,2019,26(1): 256-264.
- [11] HORNE W B. Tire hydroplaning and its effects on tire traction [J]. Highway Research Board,1968: 24-33.
- [12] GONG Y, CHEN X, YI J, et al. Hydrodynamics and friction estimation for wet tire/ground interactions [C]. San Diego: 2023 American Control Conference, 2023.