

基于闭塞原理的高速预警系统设计

曾凯 梁家根 程棋 潘家辉

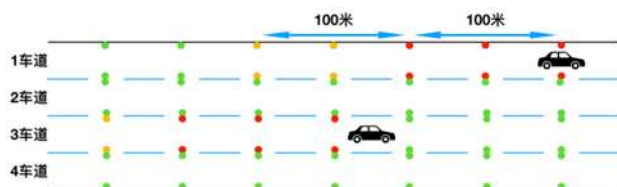
南京理工大学紫金学院 江苏南京 210000

摘要:近年来,我国高速公路事故率是普通公路事故率的4倍,其中致死性事故多发生在晴朗天气和干燥路面,RR 分别为 1.17(95% CI: 1.15—1.19) 和 1.23(95% CI: 1.21—1.26)。高速公路交通冰雪路面,大风、雾、沙尘天气导致的事故死亡率最高,分别为 61.17 士 20.12 人/100 起和 73.84 士 21.51 人/100 起。当前,我国高速公路大规模基建时代基本结束,高效的管理运营已经成为新时代发展的新需求。安全作为高速公路发展建设的核心,如何提高相关部门管控能力,降低事故发生率已经成为亟待解决的问题。本项目旨在设计一套基于“区间闭塞”防追尾原理的车道级车距预警系统,优化“雨”、“雾”等特殊气象条件下驾驶视觉条件,降低能见度导致的追尾事故概率。

关键词:高速公路事故率;区间闭塞;驾驶视觉条件;车道级预警

1 选题背景和目的

高速公路有前后车 200 米车距要求,但在实际运营中,遵守 200 米车距要求的车辆少之又少。公安部数据统计,中国交通事故死亡人数一直位居全球首位,平均每天就有 200 多人丧生车祸,而在高速公路上,车辆行驶速度快,标志标线分布的合理性有待提高,促成了我国高速公路追尾事故的频发。Bruce Hamilton 等认为恶劣的天气条件如雾、烟等,增加了高速公路交通事故的发生率^[1],为了降低事故发生的概率,减少人员伤亡,本项目提出,将道钉这一种交通安全设施,安装于道路标线中间或双黄线中间,通过其逆反射性能提醒司机按车道行驶。道钉不仅有反射型反光器,也有 led 自发光型反光器。具体方案如下:如图所示,每个车道两侧每隔 50 米安置一个发光道钉,车道中有车通过时,车后 100 米内的道钉亮红色,提醒后方车辆禁止继续压缩跟车距离,车后 100 到 200 米内的道钉亮黄色,提醒后方车辆注意减速并提高警惕。车辆在高速公路上显然是在以高速不停向前运动的,故道钉的色灯显示也应伴随车辆的移动而变化。如图 1 所示,从而达到将轨道交通中固定闭塞的思想应用于高速公路的目的。



2 选题创新点

将轨道交通区间闭塞防追尾原理引入高速公路,动态调整车距,确保系统的精准性,该系统具备全天候监控与预警功能,不受天气或时间限制,确保恶劣环境下的交通安全。对比传统的团雾诱导系统,本系统适用于不同类型的高速公路,能有效应对超车、变道等复杂交通情形,提升道路通行能力。相比传统红外线车辆检测雷达,本系统利用了检测精度更高、抗干扰能力更强的对射式光电传感器

利用 MATLAB,Smulink,UC-win/Road 等仿真模拟软件模拟不同能见度条件下的行车。

3 闭塞原理与预警系统理论基础

基于轨道交通区间闭塞原理,此闭塞系统基本原理是根据连续检测先行车辆位置和速度进行车辆运行间隔控制的车辆安全系统。该系统把先行车辆的后部看作是假想的闭塞区间。这个假想的闭塞区间随着车辆的移动而移动,在移动高速公路线路划分为若干个区间,通过信号设备控制,确保在同一时间内,每个区间内只有一辆车行驶,从而防止车辆发生正面冲突或追尾事故,保证车辆行驶安全。将轨道交通中的固定闭塞区间动态化,通过实时检测车辆位置,动态划分高速公路上的虚拟闭塞区间。每个车道两侧安装 LED 发光道钉,根据车辆位置动态显示红、黄、绿灯信号,控制后方车辆的安全车距^[2]。

3.1 道钉显示技术

通过三色道钉(绿,黄,红)进行分级预警,绿色(安

全距离);黄色(车距缩短至50-100米,提示减速);红色(车距小于50米,强制制动提醒)。同时特殊天气提升预警等级,如雾天黄色预警提升为红色。

3.2 元胞自动机仿真模型

将道路离散为单元格,模拟车辆运动,道钉状态响应及随机减速机制,验证系统在复杂场景(如拥堵,变道)下的有效性。支持可视化展示,实时呈现分布车辆,道钉状态及安全距离变化。

3.3 硬件设计与集成

采用高亮度LED道钉防水、防雾设计,确保雨雾天气下的可见性。使用低功耗通信模块支持太阳能供电,降低部署和维护成本。

4 系统总体设计

4.1 功能需求分析

车距预警系统首先要有实时检测功能:车距预警系统需要能够实时检测有车辆经过,为后续的判断和预警提供支持。然后也需要距离显示功能:将测量得到的车距信息以直观的方式显示给驾驶员,通过车道两旁的道钉的显示颜色,让驾驶员能够实时了解当前车距情况。最重要的预警功能:当检测到车距小于设定的安全距离时,道钉应及时颜色显示变化发出,提醒驾驶员采取措施,如减速、保持车距等。

4.2 自适应分析

车距预警系统需要在不同的天气条件下正常工作,如晴天、雨天、雾天、雪天等。不同天气会对传感器的性能产生影响,例如,雨天和雾天会使激光雷达和毫米波雷达的信号衰减,超声波传感器在低温环境下性能可能下降。因此,需要选择合适的传感器,并采取相应的补偿措施来提高系统在恶劣天气下的性能。光照强度的变化也会对系统产生影响,如强光直射可能会干扰传感器的工作,而夜间低光照条件下需要保证显示设备的可视性。

5 基于闭塞原理的安全距离生成算法

设前车速度为 v_1 (单位:千米/时),后车速度为 v_2 (单位:千米/时),两车的反应时间为 t (单位:秒),刹车时的减速度为 a (单位:米/秒²)。当后车发现前车刹车时,后车在反应时间 t 内仍以原速度 v_2 行驶,行驶的距离为 $d_1 = v_2 t$ 。之后后车开始刹车,直到后车速度减到与前车速度相同(这样才能保证不追尾)。根据匀变速直线运动公式 $v^2 - v_0^2 = 2ax$,后车从速度 v_2 减速到 v_1 所行驶的距离

为 $d_2 = \{v_2^2 - v_1^2\} / (2a)$ 。前车在整个过程中行驶的距离为 $d_3 = v_1 \{t + v_2 - v_1\} / a$ (因为前车一直以 v_1 的速度行驶,在反应时间 t 后,又经过 $\{v_2 - v_1\} / a$ 时间后两车速度相同)。两车行驶的最短安全距离 d 应该是后车在反应时间内行驶的距离、后车刹车距离减去前车在这段时间内行驶的距离,即 $d = d_1 + d_2 - d_3$ 。

把 d_1 、 d_2 、 d_3 的表达式代入可得: $d = (v_2 - v_1)t + \{(v_2 - v_1)^2\} / (2a)$,在实际应用中,反应时间 t 一般在0.7-1秒之间,减速度 a 根据车辆的性能和路面情况等因素确定。例如,干燥的沥青路面汽车刹车的减速度大约在7-10米/秒²。

5.1 雨天情况

雨天时,路面湿滑,车辆刹车时的减速度会减小。一般来说,在干燥路面刹车减速度可能是7-10米/秒²,而在雨天湿滑路面可能会降低到3-5米/秒²。

沿用前面的例子,假设反应时间 $t = 1$ 秒,前车速度 $v_1 = 20$ 米/秒,后车速度 $v_2 = 30$ 米/秒,当刹车减速度 $a = 5$ 米/秒²时:最短安全距离 $d = (v_2 - v_1)t + \{(v_2 - v_1)^2\} / (2a) = 10 + 10 = 20$ 米。与干燥路面的约17.14米相比,需要增加约 $20 - 17.14 = 2.86$ 米的安全距离。因此我们在下雨时的最短安全距离上加3米。

5.2 雪天情况

雪天路面摩擦力为0.2,刹车减速度可能只有1-2米/秒²。同样的参数下,假设 $a = 2$ 米/秒²:最短安全距离 $d = (v_2 - v_1)t + \{(v_2 - v_1)^2\} / (2a) = 10 + 25 = 35$ 米。与干燥路面相比,需要增加约 $35 - 17.14 = 17.86$ 米的安全距离。因此我们在下雪时的最短安全距离上加18米。

6 预警策略设计

6.1 基于道钉亮灯颜色的预警分级

黄色闪烁:提示驾驶员需要关注车距。当后方车辆逐渐靠近前方车辆,车距缩小至一定范围(如50-100米),这种视觉信号变化提醒驾驶员需准备采取适当措施,如轻踩刹车减速或松开油门,以保持安全车距。红色常亮:意味着车距已处于危险状态。当车距进一步缩小到较危险的范围(如小于50米),此时警示驾驶员必须立即采取制动措施,大幅降低车速,避免追尾事故发生。

6.2 结合车速的动态预警调整

高速行驶场景:在高速公路畅通无阻时车速较快时,适当增大预警距离范围。因为高速行驶时车辆制动距离长,

需要更早提醒驾驶员注意车距。低速行驶场景：在车速较慢（如遇到交通拥堵或在匝道行驶）时，缩小预警距离范围。这样能避免在低速场景下频繁发出不必要的预警，减少对驾驶员的干扰。

7. 仿真平台搭建

7.1 代码基本框架

基于 Python 语言搭建了高速公路多车道闭塞预警仿真平台。道路模型通过引用元胞自动机原理采用离散化网格设计，将道路离散为单元格，每个单元格长度为 1 米，包含快车道、超车道、慢车道共三条车道。车辆速度范围根据车道类型设定并对其设置相应的最大速度、最小速度和随机减速概率。显色道钉则通过感知车辆的距离范围，根据车辆接近程度设置三种状态：绿色、黄色、红色。

7.2 道路建模

将实际道路离散为等长的单元格。每个单元格长度为 1 米，整个道路总长设定为 1000 米，因此道路共包含 1000 个单元格。系统设定为三车道结构，分别为：快速车道、超车车道、慢速车道，每条车道的宽度为 3.5 米，车辆在车道内的移动仅考虑沿 x 轴（前进方向），不涉及纵向（y 轴）位置变化。

7.3 车辆建模

每辆车以一个三维数组 [位置, 速度, 车道] 的形式表示，模型中可自行对应车辆的初始数量，车辆的初始位置在各自车道内随机分布，保证不发生重叠。分配逻辑优先保证车道间数量均衡。不同车道类型对应不同速度范围：快速车道：最大速度（16 单元/秒）的 50% 至 100%、超车车道：最小速度（4 单元/秒）至最大速度、慢速车道：最小速度至最大速度的 50%，车辆每秒可加速 1 单位，受前车距离、道钉状态和随机减速机制影响。

7.4 显色道钉建模

该系统基于“区间闭塞”原理设计了一套三显色道钉系统，通过道钉标记实现动态闭塞区间，每隔 20 米设置道钉，其状态分为绿（安全）、黄（预警）、红（危险）三档，用于模拟道路上分布的发光道钉及感知设备。每个区间上的道钉根据车辆在该区间上的位置与距离动态调整状态。该算法有效模拟了道钉感应系统对交通密度的响应能力。

8 元胞自动机基本概念

元胞自动机（Cellular Automaton, CA）是一种离散的力学模型，广泛应用于复杂系统的建模与仿真。该模型由规

则网格组成，每个网格单元称为“元胞”，具有有限的状态，并在离散时间下根据预设的局部规则进行状态更新。元胞自动机的核心思想在于：每个元胞的状态变化只依赖于其当前状态及邻域元胞的状态，所有元胞在每个时间步同时更新，从而在全局上产生复杂的动态行为。在交通系统建模中，元胞自动机模型通过将道路离散为等长的单元格，并将车辆行为抽象为一系列局部更新规则，能够有效模拟交通流、拥堵现象及车道变化等复杂动态过程。以 Nagel-Schreckenberg 模型为代表的 CA 交通模型，因其计算简单、仿真高效且易于扩展，成为智能交通系统研究中的重要工具之一^[3]。

9 结论与展望

9.1 研究总结

此套预警系统理念能够降低因高速公路上雨天、雾天、雪天多种天气出现能见度降低引起的追尾事件概率，通过最短安全距离测算公式能够对于不同天气恶劣程度测算出不同最短安全距离，励志于研究一套基于轨道交通“区间闭塞”原理的车道级防追尾系统，优化高速公路恶劣天气下的道路环境。

9.2 展望

未来，为进一步提升系统的综合性能与应用价值，可先对核心感知部件进行优化升级，将原有的红外对射传感器替换为识别效率更高、长期运维成本更节省的视觉传感器；在此基础上，把迭代后的系统广泛拓展应用到城市快速路（如车辆高频交汇的出入口段）、山区公路视野盲区（如急弯、连续坡道区域）等对安全监测需求迫切的场景中；同时，通过串联气象监测终端、路侧通信设备等硬件，构建动态响应机制，让系统能依据实时天气变化（如降雨、大雾、降雪等恶劣天气）自动调整最短安全距离，从而更全面地保障通行安全。

参考文献：

- [1] 朱佩芳. 我国高速公路交通伤[J]. 中华创伤杂志, 2002, 18(6): 329. 33 10. 3760 / j: issn: 1001—8050. 2002. 06. 002.
- [2] 穆红明, 冰雪天气下高速公路交通安全保障体系的建立[J], 2011
- [3] 陈伟立, 雾对高速公路交通安全的影响分析与研究[D], 长安大学, 2005

作者简介：曾凯(2003.11-), 男, 汉, 四川成都人, 大学本科, 研究方向：交通运输