

多波长红外激光道路积水结冰厚度测量方法研究

吴德操¹ 杨希^{2*} 张俊杰² 孙浩然² 曾俊博²

1 重庆理工大学 2 重庆市清华中学校

DOI:10.12238/btr.v7i2.4234

[摘要] 车辆制动能力是影响行驶安全的关键变量,随着道路积水、结冰厚度增加,制动距离将大幅上升,极易引发交通事故。因此,准确测量路面冰水厚度,进而估计路面湿滑系数,是实现道路安全预警的重要手段。本文针对以往激光路面气象测量技术中存在的参数标定次数多、冰厚测量困难、精度偏低等问题,以朗伯比尔定律为基础,通过分析水、冰的光谱特征,建立路面冰水厚度测量模型,引入多波长激光差分测量法降低冰面反射光干扰,实现了积水厚度和结冰厚度的可靠解算。

[关键词] 路面气象; 红外激光; 厚度测量; 朗伯比尔定律

中图分类号: U416.2 文献标识码: A

Research on the method of measuring the thickness of water and ice on road with multi-wavelength infrared Lasers

Decao Wu¹ Xi Yang^{2*} Junjie Zhang² Haoran Sun² Junbo Zeng²

1 Chongqing University of Technology 2 Chongqing Tsinghua High School

[Abstract] The braking ability of a vehicle is a critical factor that affects driving safety. As the thickness of road water and ice increases, the braking distance significantly increases, which can easily lead to traffic accidents. Accurately measuring the thickness of ice and water on the road and using this information to estimate the road wetness coefficient is a crucial means of achieving road safety warning. However, previous laser-based road weather measurement technologies have faced issues with frequent parameter calibration, difficulty in measuring ice thickness, and low accuracy. To address these issues, this article based our approach on Lambert-Beer Law and analyzed the spectral characteristics of water and ice to establish a model for measuring road ice and water thickness, introduced a multi-wavelength laser differential measurement method to reduce interference from ice surface reflection and achieved reliable calculations of water and ice thickness.

[Key words] road surface meteorology; infrared lasers; thickness detection; Lambert-Beer Law

引言

道路交通事故中,据统计有近30%的事故与恶劣天气密切相关。其中,以路面积水和结冰现象最为常见且危害较大。在雨天行驶汽车,路面积水使轮胎和路面之间形成水膜,导致车轮附着力降低。当水膜厚度大于2mm,车速大于80km/h时,还可能发生滑水现象^[1],引起轮胎脱离路面致使转向失效。部分高纬度地区,由于昼夜温差较大,路面会突发结冰,使摩擦系数从0.6骤降至0.15,容易引发车辆打滑、侧翻等事故^[2]。因此,通过路面气象状态的检测研究可逐步建立道路湿滑预警机制,能有效降低气象灾害带来的交通危险。常见的路面气象传感器按检测原理可分为电导率法^[3]、雷达法^[4]、光电法等。其中,光电法为非接触式测量方式,设备的安装、维护十分便捷,不会影响路面的完整性,具有良好的应用前景,如西安光机所的徐松松等^[5]研制了一种双波长判别路面气象状态的设备,通过检测双波长激光反射

强度和路面温度实现路面状态的判别;吕勒奥理工大学的Casselgren等^[6]利用镜像方向和后向散射方向的宽带偏振光,设计了一种可识别4种路面状态的组合型传感器;罗马大学的Piccardi等^[7]利用红外光的偏振态检测危险路况,验证了安装在光源同一侧的光电二极管的光路是探测效率最高的结构;本课题组的柳朋^[8]研究了一种基于激光后向反射测量法的道路气象检测方法,实现了水膜厚度测量和积水、结冰判别^[1]。

本文主要针对目前的激光测量法存在标定复杂,且在结冰状态下表面反射光干扰引起测量精度较差的问题,通过分析水-冰的红外反射光谱特征,提出了一种多波长差分的路面积水、结冰厚度检测方法,通过实验室预先标定,即可实现现场路面水、冰厚度的准确测量,具有功耗低、精度高、应用范围广等特点^[2]。

1 厚度检测原理

路面气象检测系统如图1所示,1064nm、1310nm、1550nm三个波长激光经正弦调制后由光纤耦合器合并到同光纤到通过透镜准直输出,并照射积水/结冰路面形成漫反射;通过光电探测器测量其后向反射光强,利用数字锁相放大器对探测信号进行解调和噪声抑制,提取振幅特征用于道路气象数据解算^[3]。

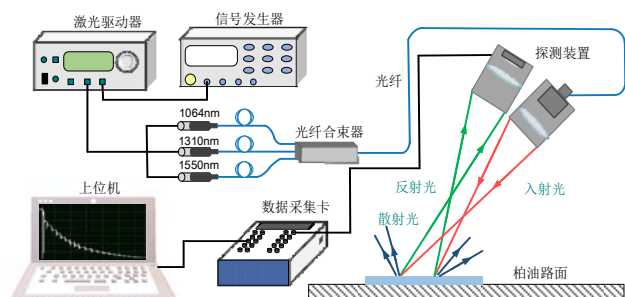


图1 路面气象检测系统结构

水膜测量时,使用水膜吸收系数适中的1310nm作为探测波长,以水膜吸收率极小的1064nm为参考波长。定义潮湿状态下(水膜厚度趋近于零)探测器接收光强为 I_0 ,特定厚度下的探测光强为 I_l ,由朗伯比尔定律可知:

$$kcL = \ln \frac{I_0}{I_l} \quad (1)$$

其中, L 为膜厚, k 为吸光系数, c 为吸光物质的浓度,在水中近似为1mol/L。在测量时由于 I_0 受探测距离、空气散射、路面反射率等影响变化较大,无法直接获知。因而,在此采用双波长测量方案:

$$(k_{1064} - k_{1310}) \cdot L = \ln \frac{I_{wet}^{1064}}{I_{wet}^{1310}} \quad (2)$$

在实际应用中,激光到达路面时的光功率受激光器自身衰减、探测距离、环境散射等影响,仅能保持短期稳定。因此,对路面干燥状态下的每路反射信号 I_{dry}^{1064} 、 I_{dry}^{1310} 归一化处理,可得:

$$L = k \cdot \ln \frac{I_{wet}^{1064} / I_{dry}^{1064}}{I_{wet}^{1310} / I_{dry}^{1310}} \quad (3)$$

令 D 为水膜厚度, K 为特定探测灵敏度下的水膜吸收系数,那么积水厚度测量方程为:

$$D = K \cdot \ln \frac{I_{wet}^{1310} / I_{dry}^{1310}}{I_{wet}^{1064} / I_{dry}^{1064}} \quad (4)$$

结冰特征与积水相似,可使用相近的检测模型和测量波长。但冰表面较为粗糙,存在明显的后向漫反射。由于该信号不包含膜厚信息,为强干扰源。为消除干扰,使用在冰内吸收极强且成本较低的1550nm激光进行差分测量。实测发现该波长的反射强度几乎与冰厚无关,而与表面反射率成正比。那么,基于三波长协同探测可有效抑制冰的表面反射干扰,其测量模型可表示为:

$$D = J \cdot \ln \frac{I_{ice}^{1064} / I_{dry}^{1064} - I_{ice}^{1550} / I_{dry}^{1550}}{I_{ice}^{1310} / I_{dry}^{1310} - I_{ice}^{1550} / I_{dry}^{1550}} \quad (5)$$

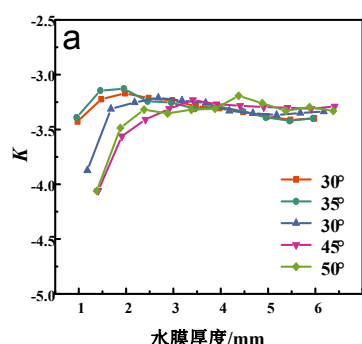
其中, I_{ice}^{1064} 、 I_{ice}^{1310} 、 I_{ice}^{1550} 分别是1064nm、1310nm、1550nm

激光在结冰路面状态下的探测光强, J 为冰层吸收系数。

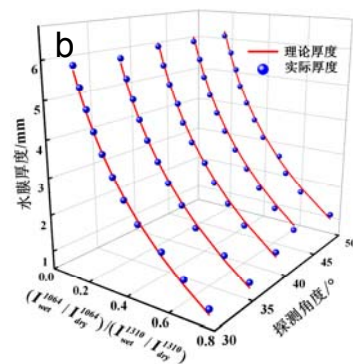
2 实验结果

2.1 积水厚度测量K参数的标定与实测误差分析

积水测量系数 K 主要与水膜吸收特性相关,设置标定实验如下:固定探测距离为3m,探测角度为 $30^\circ \sim 50^\circ$,分别利用带磨砂颗粒的树脂仿真柏油路面进行测试。以1mm的水厚为基础,利用移液枪向承载沥青仿真路面的方型容器内注水,注水步进为0.5mm,直至水厚为6mm。每次注水后,利用数显高度尺精确测量实际水膜厚度,并记录1064nm和1310nm激光的后向散射光强。根据探测角度不同,每种路面各得到5组数据。代入式(4)计算 K 与积水厚度的关系,如图2(a)所示^[4]。



(a) 积水测量系数 K 与积水厚度的关系



(b) 路面积水厚度测量结果

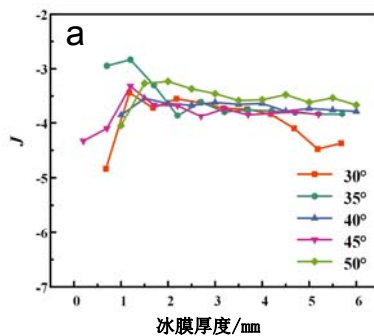
图2 不同路面的水膜厚度测量实验

可知在同一角度下,当水膜小于2mm时的 K 值偏小,这是由于积水厚度较浅时路面不平整导致的偏差。随着积水厚度增加,系数 K 趋于平稳,可认为是常数,取中间值为-3.327。以该系数进行水膜厚实测,如图2(b),在测量角度 $30^\circ \sim 50^\circ$,水膜厚度1~6mm范围内该模型的最大测量误差绝对值为0.15mm^[5]。

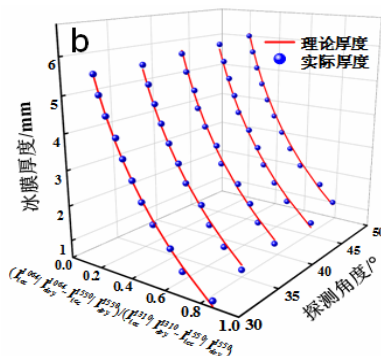
2.2 结冰厚度测量参数J的标定与实测误差分析

与水膜吸收系数的标定实验相同,结冰测量参数 J 的标定也选择五个探测角度进行测量。使用半导体制冷器置于仿真沥青路面下模拟结冰过程。首先,改变调制信号的强度使干燥路面下

三个探测波长的光强相等,然后以5400uL注水量为基础,2700uL为增量步进制冷结冰,得到不同的冰膜厚度,利用数显高度尺测量冰膜实际厚度;以激光照射的路面区域完全结冰为标准,记录不同厚度下的 I_{ice}^{1064} 、 I_{ice}^{1310} 、 I_{ice}^{1550} 。基于式(5)得到的冰层吸收系数J随探测角度、冰层厚度的变化曲线如图3(a)所示^[6]。



(a) 冰厚测量系数J与结冰厚度的关系



(b) 路面结冰厚度测量结果

图3 不同路面的冰厚测量实验

可见,当结冰厚度小于2mm时,由于冰面不平整,在两种路面下求得的冰层吸收系数J均出现了较大抖动,予以忽略。以其余数据计算得J均值为-3.712。以该系数进行水膜厚实测,如图3(b)所示,在测量角度30°~50°,不同厚度的测量误差绝对值小于0.15mm^[7]。

综上,基于水膜厚度和冰膜厚度的推导模型,标定相关参数并在实验室条件下模拟道路积水和结冰的情况,进行了厚度测量与误差分析,实验证明在30°~50°的探测角度下,水膜/冰膜厚度的检测量程为6mm,测量误差均保持在±0.15mm以内,远低于中国GB/T33697-2017标准中最大允许误差为±0.5mm的要求。

3 结论

本文提出了一种多波长激光协同测量道路积水、结冰厚度的可靠方法。通过分析水和冰的反射光谱确定了激光双波长差分测量水厚,三波长差分测量冰厚的技术方案,并以朗伯比尔定律为基础建立了对应的厚度解算模型,只需对不同路面条件下的水膜/冰膜吸收系数进行一次标定即可完成准确测量。测试结果表明,该模型能够有效抑制冰面结霜引入的动态干扰,量程6mm内的水膜厚度和冰膜厚度的测量误差绝对值均小于0.15mm,具备良好的实用价值^[8]。

[基金项目]

重庆市教委雏鹰计划研究项目(CY230917)。

[参考文献]

- [1]胡昌耀,李天昊,刘紫秋,等.基于降雨强度的安全车速限值研究[J].山东交通科技,2021,6:12-14,27.
- [2]Zhou H, Jiang Z, Jiang B, et al. Optimization of tire tread pattern based on flow characteristics to improve hydroplaning resistance[J].Proc Inst Mech Eng, Part D,2020,234(13):2961-2974.
- [3]Fujimoto A, Yamada T, Osara K, et al. Development of a Device for Measuring the Thickness of the Road Surface Water Film Using a Vehicle-Mounted Salinity Sensor[J].J Ja Soc Civ Eng,2019,75(2):1-8.
- [4]Takahashi N. Analysis of a precipitation system that exists above freezing level using a multi-parameter phased array weather radar[J].Atmosphere,2019,10(12):755.
- [5]徐松松.一种非接触式路面气象传感技术研究[D].西安:中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所),2014.
- [6]Casselgren J,Sjödahl M.Polarization resolved classification of winter road condition in the near-infrared region[J].Appl Opt,2012,51(15):3036-3045.
- [7]Piccardi A,Colace L.Optical detection of dangerous road conditions[J].Sensors,2019,19(6):1360.
- [8]吴德操,柳朋,罗彬彬,等.非接触式双波长激光路面气象传感方法研究[J].光学学报,2020,40(23):23.

作者简介:

吴德操(1984--),男,汉族,重庆人,博士,讲师,研究方向:大数据系统软件开发。

通讯作者:

杨希(1986--),男,汉族,重庆人,硕士,中学一级教师,研究方向:从事中学物理教学与研究。