

非接触式双波长激光路面气象传感方法研究

吴德操, 柳朋, 罗彬彬*, 蒲君豪, 刘恩华, 蒋上海, 汤斌, 宋涛, 赵明富

重庆理工大学光纤传感与光电检测重庆市重点实验室, 重庆 400054

摘要 道路湿滑程度是表征公路交通安全的重要指标,路面气象传感技术能准确检测道路积水和结冰的情况,进而定量分析临界滑水速度和路面附着系数等湿滑参数,通过实时调整车速甚至封闭道路,可有效预防交通事故。非接触式路面气象传感方法具有精度高、不破坏路基和安装灵活等特点,是目前的研究热点,但核心技术仍被国外垄断,设备价格十分昂贵。基于积水、结冰路面的红外反射光谱特征,利用 1310 nm 与 1550 nm 激光的反射光强,研究了一套水膜厚度检测及冰水状态判别的数学模型和探测方法。以此为基础建立了路面气象传感系统,并对系统的光学结构进行了仿真优化。实验结果表明,该系统的测量距离可达 3~5 m,水膜厚度在 9 mm 下的测量误差小于 0.1 mm,系统能够精准判别路面干燥、积水和结冰等气象状态,具备良好的实用价值。

关键词 测量; 短波红外激光; 路面气象; 激光传感

中图分类号 TL25+3

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2312004

Methods for Non-Contact Road Surface Meteorological Sensing Based on Dual-Wavelength Laser

Wu Decao, Liu Peng, Luo Binbin*, Pu Junhao, Liu Enhua, Jiang Shanghai, Tang Bin, Song Tao, Zhao Mingfu

Chongqing Key Laboratory of Optical Fiber Sensor and Photoelectric Detection, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

Abstract The extent of road slippery is an important indicator of road traffic safety. The road surface meteorological sensing technologies can accurately detect the conditions of water accumulation and ice formation on the road, and thus can quantitatively analyze the slippery parameters such as critical hydroplaning velocity and road adhesion coefficient. Using these technologies, we can effectively prevent traffic accidents by adjusting vehicle speed or even closing roads in real time. The non-contact road surface meteorological sensing method is currently a hot research topic because of its high accuracy, no damage to roadbeds and flexible installation. However, its key technology is still monopolized abroad and the equipment is very expensive. Based on the characteristics of infrared reflection spectra of stagnant water and ice on road surfaces, we use the reflected laser intensities at 1310 nm and 1550 nm to study a set of mathematical models and detection methods for detecting water film thickness and distinguishing water/ice state. Based on it, a road surface meteorological sensing system is established and the optical structure of this system is optimized by optical simulation. The experimental results show that the detection distance of the system reaches 3–5 m and the measurement error of water film thickness is less than 0.1 mm in the range of 9 mm. The system can accurately distinguish the meteorological states of drying, water accumulation and ice formation on road surfaces, which has good practical value.

Key words measurement; shortwave infrared laser; road surface meteorology; laser sensing

OCIS codes 120.1880; 140.3070; 140.3325; 140.3515

收稿日期: 2020-07-20; 修回日期: 2020-08-11; 录用日期: 2020-08-26

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(cstc2019jcyj-msxmX0243)、重庆市教委科学技术研究计划青年项目(KJQN202001117)、重庆市教委科学技术研究计划重点项目(KJZD-K201905601)、重庆理工大学研究生创新项目(ycx20192056)

* E-mail: luobinbin@cqut.edu.cn

1 引 言

公路运输是国民经济发展的重要环节,由于我国纬度跨度大,气候条件复杂多变,天气原因造成的交通事故时常发生,由此产生的直接和间接损失不可估量。利用路面气象传感技术实时监测路面气象状态,如干燥、积水和结冰等,准确报告路面湿滑情况,能有效降低事故的发生概率,保障车辆安全行驶。积水路面的湿滑程度通常用临界滑水速度(简称滑水速度)进行表征。当车辆行驶超过此速度时,轮胎无法完全排开路面水膜,将进入膜上滑行状态^[1],导致转向控制失效,极易引发交通事故。而滑水速度与水膜厚度相关^[2],因此膜厚检测是计算滑水速度和估计积水路面湿滑程度的关键。对于结冰路面,任意冰厚条件下路面的附着系数都较小,此时需准确判断结冰状态^[3-4]。

目前,路面气象传感器分为接触式与非接触式两类。接触式传感器的发展比较成熟,如电导率法^[5]、多普勒雷达法^[6]和电容法^[7]等,但此类传感器采取埋入式安装方式,需要破坏路基,部署灵活性较差,而且对水膜厚度的检测量程一般小于 5 mm,尚未达到美国航天航空局(NASA)滑水实验模型^[2]计算滑水速度所要求的 7.62 mm 量程,现在正逐渐被非接触式传感器取代;非接触式传感器主要利用路面反射的红外光谱特征进行气象检测,如 Casselgren 等^[8]利用多波长红外激光成像技术分辨路面气象状态,该方法具备不破坏路面的特点,但并未测量水膜厚度,且短波红外成像设备的成本相对较高,难以得到广泛应用;徐松松^[9]提出了基于单波长红外激光的非接触式气象传感器,该传感器能够对干燥、积水和结冰状态进行判断,设备成本低,但对积水和结冰状态的分辨需要依赖外部温度检测装置,仪器结构过于复杂;芬兰 Vaisala 公司研发的 DSC111 路面传感器,利用了多波长激光遥测技术,不但能分辨路面气象状态,还能检测水膜和结冰厚度,在当前市场上处于垄断地位。但其核心技术严格保密,设备售价十分昂贵,且水膜测厚量程仅为 2 mm,难以获取可靠的滑水速度。

鉴于此,本文基于短波红外激光技术,提出了一种双波长非接触式水膜厚度测量和路面气象状态判别的方法。该方法环境适应力强,设备安装简单,具有探测距离远、量程高和成本低等优势,有利于非接触式路面气象传感技术的推广普及。

2 基本原理

2.1 水膜厚度检测原理

检测原理如图 1 所示,激光光源(LD)与光电探测器(PD)并排放置,LD 输出的光强为 I_0 的探测光束以 θ 角照射积水路面,PD 接收其后向反射光强。令光束进入水面后的折射角为 δ ,探测距离为 L ,水膜厚度为 D ,探测光在水膜中的总传播路程为 l 。

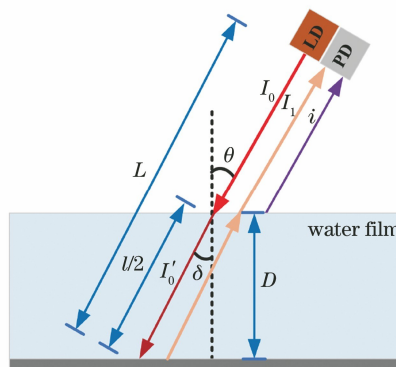


图 1 水膜厚度检测原理

Fig. 1 Detection principle of water film thickness

水膜表面及道路表面并非理想光滑面,两者均会产生漫反射。考虑到探测器仅能接收 θ 方向的反射光,定义 θ 方向上的路面漫反射光强为 I_1 ,水膜表面的漫反射光强为 i ,则进入水膜后的入射光强可简化表示为 $I'_0 = I_0 - i$ 。若只讨论水分子的光谱吸收作用,忽略传播路径上的其他光强衰减,则 I_0 、 I_1 与光束在水膜中的传播距离 l 满足朗伯比尔定律^[10-11],表示为

$$Kl = \ln \frac{I_0 - i}{I_1}, \quad (1)$$

式中: K 为水膜吸收系数。

进一步引入各类路径衰减,令探测距离衰减因子为 R_L 、水面漫反射衰减因子为 R_θ 、路面漫反射衰减因子为 R_δ ,干燥路面和待测路面的探测光强分别为 I_{dry} 和 I 。由于干燥状态下不存在水面反射和水膜光谱吸收,可得到

$$\begin{cases} I_1 = I/R_\delta R_L - i \\ i = I_0 R_\theta R_L \\ I_0 = I_{dry}/R_\delta R_L \\ l = 2D/\cos \delta \end{cases}, \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式,可得

$$D = \frac{\cos \delta}{2K} \ln \left(\frac{I_{dry} - I_{dry} R_\theta R_L}{I - I_{dry} R_\theta R_L} \right), \quad (3)$$

令 $Q = -\frac{2K}{\cos \delta}$, $j = I_{dry} R_\theta R_L$, 则水膜厚度为

$$D = \frac{1}{Q} \ln \frac{I - j}{I_{dry} - j} \quad (4)$$

当测量角度和距离不变,仅改变水膜厚度时,由于 $L \gg l$,可认为 R_L 不变,则 I_{dry} 、 Q 和 j 均为常数,可通过干燥路面及两组不同水膜厚度下的探测光强值标定获得这三个参数的取值。因此,在 I_{dry} 、 Q 和 j 确定之后,通过检测反射光强 I ,就可以计算得到水膜厚度。

2.2 检测系统结构设计

检测系统和实验系统图分别如图 2、3 所

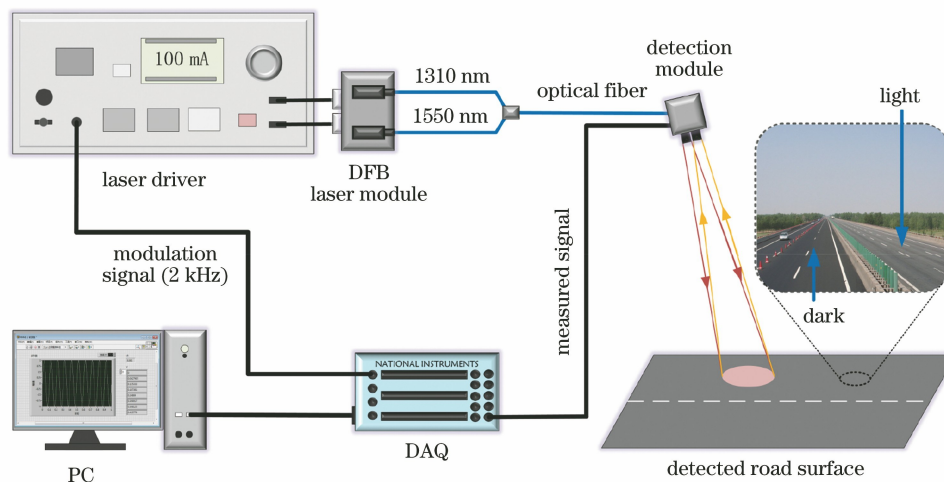


图 2 路面气象检测系统结构

Fig. 2 Structure of road surface meteorological detection system

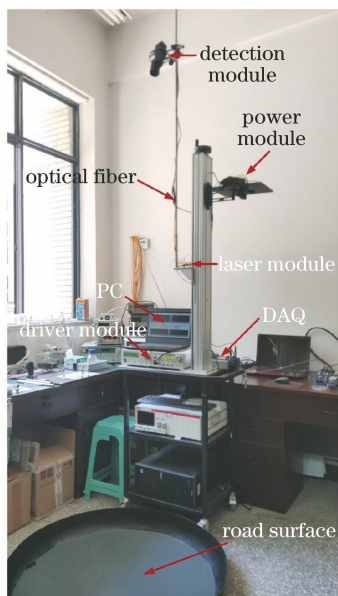


图 3 实验系统图

Fig. 3 Image of experimental system

信号采集软件使用 LabVIEW 编写,引入数字锁相放大器^[12]滤除探测信号中的环境噪声,大幅提高输出信噪比。

示。系统由两个分布式反馈 (DFB) 激光器、Newport 501B 激光驱动器、5 mm 钢镓砷探测模块 (含准直透镜和聚焦透镜)、NI USB-6361 数据采集器 (DAQ) 和上位机 (PC) 等组成。水膜厚度检测模型的设计精度为 ± 0.1 mm,能够对干燥、积水和结冰状态进行准确判别,且能适应不同的路面反射率。为了避免环境光干扰和空气扰动,利用 DAQ 输出的 2 kHz 正弦信号对光功率进行调制,后文中探测光强 I 均代表接收光强的正弦峰值。

对于最优激光波长的选择,本文利用复享光学 NIR2200 短波红外光谱仪对纯水及其结冰 (无霜) 状态进行反射光谱测量,测量参数为 $L = 50$ mm, $D = 2$ mm, $\theta = 20^\circ$ 。光谱如图 4 所示,其中 λ 为波长。由于水膜的反射谱混合了“水膜表面漫反射谱”和“地面漫反射谱”,谱线发生红移和展宽,特征吸收带出现在 1450~1600 nm 处;冰的反射谱型与水的基本一致,但由于冰面较粗糙,表面反射率更高,因此光谱基线向上漂移。同时,由于结冰之后晶体结构也发生了变化,冰的反射光谱的红移比水更加明显,反射谱特征吸收带在 1500~1650 nm 处。

考虑到高反射率波段携带的厚度信息较少,低反射率波段的光强太弱而不利于检测,本文选择反射率适中且在光通信中大量使用的 1310 nm 为作为水膜检测波长,这样既可有效提高检测精度又能大幅降低激光器成本;同理,选择光通信波长 1550 nm 作为第二检测波长,从图 5 可知该波长的光易被冰、水吸收,反射光强主要取决于冰、水的表面反射率。实际结冰路面存在结冰不均匀、覆盖杂质和表面结霜等情况,冰、水表面的反射率差异显

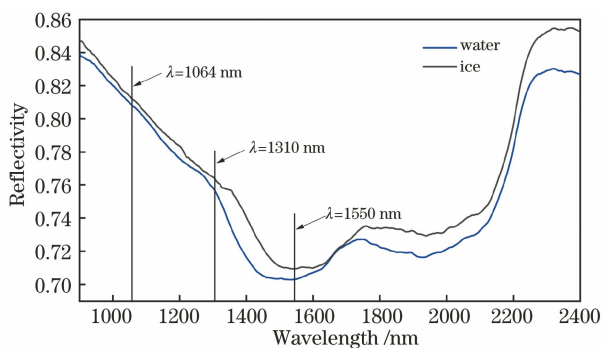


图 4 水与冰的短波红外反射谱

Fig. 4 Short wave infrared reflection spectra of water and ice. 因此,基于 1310 nm 和 1550 nm 波长可实现干燥、积水和结冰等路面气象状态的准确判别。

2.3 光束准直和聚焦系统设计

为了简化光学结构,系统采用拉锥光纤合束器将 1310 nm 和 1550 nm 激光耦合入同一光纤后再准直输出。探测部分则采用 PD 与聚焦镜直接耦合的方式,以提高探测效率。准直和聚焦均为单透镜方案,光路结构如图 5 所示,都采用了直径为 40 mm 的短波红外消色差镜片,PD 像元直径为 5 mm,设计探测距离为 3~5 m。

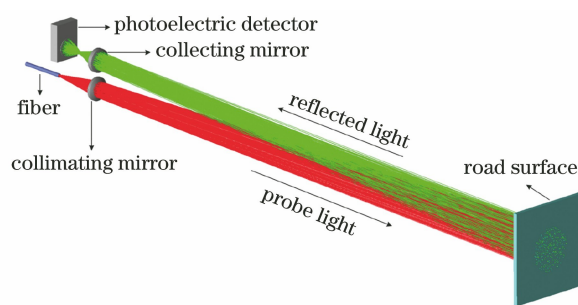


图 5 光路结构示意图

Fig. 5 Structural diagram of optical paths

为了避免路面局部起伏引起的反射率突变和测量误差增大,激光投射在路面的光斑直径应大于 500 mm,以实现路面反射信号的均匀化。利用 TracePro 对透镜的焦距和安装位置进行仿真优化^[13-14],令路面光斑直径为 d ,定义成像效率 E 为探测器像元上的光强与像面总光强之比。仿真结果如图 6 所示,当两片透镜焦距为 35 mm,准直镜距离光纤端面 40 mm,聚焦镜距离探测器 50 mm 时,探测距离 D 在 3~5 m 范围内的 E 分别为 92.456%、90.358%、94.627%,均高于 90%。

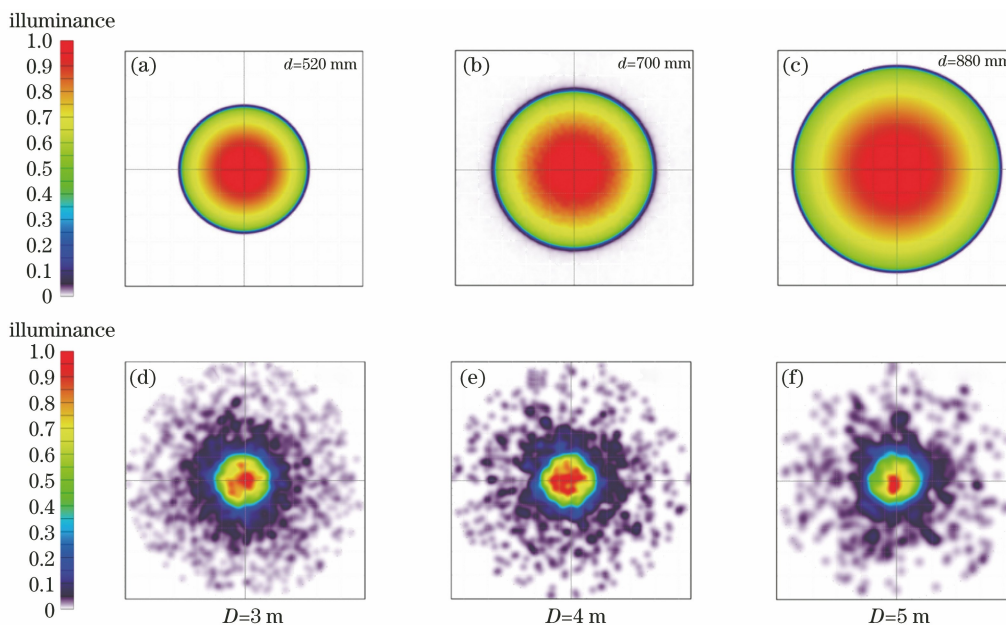


图 6 仿真优化后不同探测距离下的光斑。(a)(b)(c)地面光斑;(d)(e)(f)探测器光斑

Fig. 6 Light spots under different detection distances after simulation optimization. (a)(b)(c) Ground spst; (d)(e)(f) detector spot

此外,为了获得更高的探测灵敏度,有必要适当提高激光器的输出功率,但这同时也会带来人眼安全问题。本系统的探测光主要通过地面漫反射方式进入人眼,且光斑面积较大,实际到达人眼的光强将会大幅衰减,根据激光安全等级与防护要求^[15],最

大光功率可限制在 100 mW 以内。

3 实验分析

3.1 水膜厚度测量实验

通过改变路面反射率、探测倾角和探测距离,本

文进行了6组水膜测量实验,从而模拟实际检测中不同的测量环境。为了准确标定水膜厚度,以两种反射率的聚酯纤维仿真路面作为被测目标,将其放置于平底盘状容器中,当容器直径已知时,通过测量注水体积即可得到实际膜厚。值得一提的是,所使用的仿真路面的红外反射率与实际沥青路面的红外反射率高度吻合。

首先根据干燥及2 mm和6 mm积水状态的1310 nm反射信号幅值,结合(4)式计算各组的测量参数 I_{dry} 、 Q 和 j ,得到膜厚检测的拟合方程。然后

表1 不同探测条件下水膜厚度的测量结果($\lambda=1310$ nm)

Table 1 Measurement results of water film thickness under different detection conditions ($\lambda=1310$ nm)

No.	Condition	I_{dry}/mV	Q	j	RMSE	E_{MAX}	E'_{MAX}
1	Light, $L=3000$ mm, $\theta=20^\circ$	2700	-0.333	44	0.051	0.082	0.082
2	Light, $L=5000$ mm, $\theta=20^\circ$	1966	-0.311	32	0.052	0.096	0.115
3	Light, $L=3000$ mm, $\theta=30^\circ$	1381	-0.291	20	0.054	0.041	0.108
4	Dark, $L=3000$ mm, $\theta=20^\circ$	1595	-0.335	43	0.069	0.098	0.098
5	Dark, $L=5000$ mm, $\theta=20^\circ$	1438	-0.355	26	0.074	0.069	0.078
6	Dark, $L=3000$ mm, $\theta=30^\circ$	923	-0.315	20	0.070	0.098	0.112

从实验结果可知,测量值与标定值的吻合度非常高,在积水厚度9 mm以内的测量误差小于0.1 mm,与传统埋入式路面状况检测器相比,达到了同等精度,且有效量程更高,证明了该测量模型的正确性。

3.2 路面气象状态判别实验

为了降低探测角度和距离对状态判别的影响,定义相对反射率 $R=(I/I_{dry})$ 作为判别依据。如图7所示,实验首先测量了当 $L=3$ m、 $\theta=20^\circ$ 时,干燥(Dry)、潮湿(Wet)、冰水混合(Mix)、冰面无霜(Ice)和冰面结霜(Frost)五种路面状态在1550 nm波长下的相对反射率。其中,1~5组为浅色路面,6~10组为深色路面,积水、结冰状态的水膜从刚好覆盖表面(厚度约为0.1 mm)均匀递增至10 mm厚度。由于仿真路面的结冰是利用干冰制冷实现的,冰水混合状态下的厚度难以控制,采取了随机测量方式。

从图7可知,积水状态的 R 均小于0.15,而结冰状态的 R 大于0.3。如前文所述,当测量的水膜

从膜厚2 mm起,每次加水500 mL,逐次增大膜厚并记录反射信号幅值,由于实验使用的容器直径为886 mm,计算得到每次的膜厚增量为0.81 mm。需要说明的是,对于膜厚小于2 mm的情况,由于路面极为粗糙,实际厚度具有较大不确定性,测量结果仅能代表激光光斑范围内的平均膜厚。

最后,将信号幅值代入拟合方程得到膜厚测量值,实验结果如表1所示,其中RMSE为均方根误差, E_{MAX} 为9 mm量程下的最大绝对误差, E'_{MAX} 为10 mm量程下的最大绝对误差。

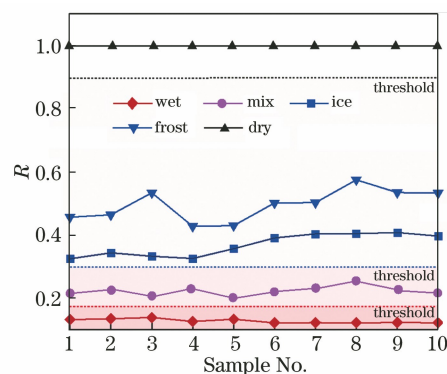


图7 当 $\lambda=1550$ nm, $L=3$ m, $\theta=20^\circ$ 时各状态的相对反射率测量值

Fig. 7 Relative reflectivity measurement value for each state at $\lambda=1550$ nm, $L=3$ m and $\theta=20^\circ$

厚度 D 大于2 mm时,便认为路面为积水(Seeper)状态,同时将冰面无霜与冰面结霜统一归纳为结冰(Freezing)状态。因此,结合水膜厚度的测量值 D ,定义表2所示的阈值参数,以判别干燥、潮湿、积水(Seeper)、冰水混合和结冰等五种路面状态。

表2 路面气象状态的判别阈值

Table 2 Threshold for meteorological state discrimination

State	Dry	Wet	Seeper	Freezing	Mix
Threshold	$R \approx 1.00$ and $D \approx 0$	$R \leq 0.15$ and $D < 2$ mm	$R \leq 0.15$ and $D \geq 2$ mm	$R \geq 0.30$ and $D \neq 0$ mm	$0.15 < R < 0.30$ and $D \neq 0$

将实验中的测量参数修改为 $L = 5 \text{ m}$, $\theta = 30^\circ$, 其他过程保持不变, 再次测得各组的相对反射率, 如图 8 所示。

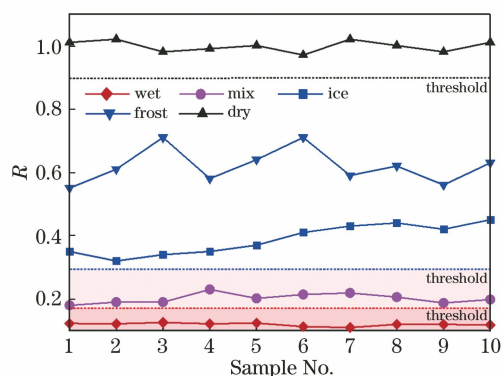


图 8 当 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $L = 5 \text{ m}$, $\theta = 30^\circ$ 时各状态的相对反射率测量值

Fig. 8 Relative reflectivity measurement value for each state at $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $L = 5 \text{ m}$ and $\theta = 30^\circ$

从图 8 可见, 虽然积水和冰水混合状态下的 R 稍有减小, 但它们仍与表 2 定义的判别阈值吻合。由此证明, 该方法具有较好的环境适应性, 在大多数情况下无需改变阈值定义即可对路面气象状态进行准确判别。

4 结 论

主要研究和讨论了一种非接触式的高精度短波红外路面气象检测方法。首先, 基于朗伯比尔定理建立了水膜厚度的反射式光学检测模型。通过分析反射光谱, 确定 1310 nm 为水膜厚度测量的最优波长, 同时利用水膜和冰层在 1550 nm 波长处的透过率较低的特点, 结合积水、结冰表面反射的显著差异, 讨论了路面气象状态的光学判别方法。基于 TracePro 建立了探测系统的光学模型, 并对透镜组参数进行了仿真优化, 在 $3 \sim 5 \text{ m}$ 的检测范围内, 成像效率达到 90% 以上。在不同测量条件下, 所提方法对水膜厚度的测量误差均小于 0.1 mm , 膜厚量程大于 9 mm , 为国内外相似传感器量程的两倍左右^[16-17]。该方法满足滑水速度计算的量程要求, 具备更优的实用价值。在路面气象状态判别方面, 实验论证了所提方法的正确性, 判别无需额外安装红外温度传感器, 大幅简化了传感器结构, 增强了检测设备部署的灵活性。

参 考 文 献

[1] Horne W B. Tire hydroplaning and its effects on tire traction[J]. Highway Research Record, 1968 (214):

24-33.

- [2] Kumar S S, Anupam K, Scarpas T, et al. Study of hydroplaning risk on rolling and sliding passenger car [J]. Procedia: Social and Behavioral Sciences, 2012, 53: 1019-1027.
- [3] Singh D, Patel H, Habal A, et al. Evolution of coefficient of friction between tire and pavement under wet conditions using surface free energy technique[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 105-112.
- [4] Tan T, Xing C, Tan Y Q, et al. Safety aspects on icy asphalt pavement in cold region through field investigations [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 161: 21-31.
- [5] Morón Z. Investigations of van der Pauw method applied for measuring electrical conductivity of electrolyte solutions: measurement of electrolytic conductivity[J]. Measurement, 2003, 33(3): 281-290.
- [6] Iguchi T. Evolution of the rain profiling algorithm for the TRMM Precipitation Radar [C]//2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 24-29, 2011, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE, 2011: 12357601.
- [7] Shen Y C, Wang S. Condensation frosting detection and characterization using a capacitance sensing approach[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 147: 118968.
- [8] Casselgren J, Rosendahl S, Sjö Dahl M, et al. Road condition analysis using NIR illumination and compensating for surrounding light [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 77: 175-182.
- [9] Xu S S. Research on a non-contact pavement meteorological sensing technology [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences. 徐松松. 一种非接触式路面气象传感技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学.
- [10] Stavn R H. Light attenuation in natural waters: Gershun's law, Lambert-Beer law, and the mean light path[J]. Applied Optics, 1981, 20(14): 2326-2327.
- [11] Ding J Y, He T B, Wang H L, et al. Detection method of volatile organic compounds based on external cavity quantum cascade laser spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0430002. 丁俊雅, 何天博, 王洪亮, 等. 基于外腔式量子级联激光光谱的挥发性气体检测方法 [J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0430002.
- [12] Ma F X, Tian Y, Chen K, et al. Detection technology of dissolved gas in oil based on miniature photoacoustic sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2020,

- 40(7): 0730003.
马凤翔, 田宇, 陈珂, 等. 基于微型光声传感器的油中溶解气体检测技术[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0730003.
- [13] Wang Y, Chen P, Gong C, et al. Design and simulation of optical path for collecting fluorescence signal based on TracePro software[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1117001.
王岩, 陈平, 龚诚, 等. 基于 TracePro 软件的荧光信号光收集光路的设计与仿真[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1117001.
- [14] Fu X H, Ma G J, Lü J W, et al. Research on open high reflection regression devices based on TracePro [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1131003.
付秀华, 马国俊, 吕景文, 等. 基于 TracePro 的开放型高反射回归器件的研究[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1131003.
- [15] Chen R S, Zhang G Z. Safety class of laser and its protection[J]. Radiation Protection, 2007, 27(5): 314-320.
陈日升, 张贵忠. 激光安全等级与防护[J]. 辐射防护, 2007, 27(5): 314-320.
- [16] Wang Y B, Li X H, Yu G H, et al. The measure method of water-depth in the infrared remote sensing road surface sensor [J]. Electronic Engineering & Product World, 2014, 21(4): 26-27, 56.
王艳斌, 李秀红, 余国河, 等. 红外遥测式路面状况传感器的水厚度测量[J]. 电子产品世界, 2014, 21(4): 26-27, 56.
- [17] Gui K, Ye L, Ge J F, et al. Road surface condition detection utilizing resonance frequency and optical technologies[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 297: 111540.