

覆冰条件下路面摩擦特性与试验研究

王培荔¹, 郭忠印², 宋灿灿², 彭翔³

(1. 山西省高速公路管理局, 山西 太原 030006; 2. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室;
3. 同济大学 建筑设计研究院(集团)有限公司)

摘要:覆冰条件下路面行车性能下降极易诱发交通安全问题,引发交通事故的根本原因是胎面—路面接触界面的摩擦性能的改变。该文根据路表构造深度特征,理论分析薄层冰路面、厚层冰路面条件下摆值的适用性,并于陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室开展室内模拟试验,利用维萨拉遥感道面状态传感器、摆式仪采集不同覆冰路面结构的冰层厚度、冰层表面温度及摆值,分析覆冰路面摩擦性能的影响因素,通过回归分析方法建立薄层冰路面摩擦系数与冰层厚度、厚层冰路面摩擦系数与冰层表面温度的关系模型。结果表明:薄层冰路面摆值与冰层厚度间呈二次函数关系;对于厚层冰路面,其摆值与冰层表面温度亦呈二次函数关系。

关键词:覆冰路面;冰层厚度;冰层表面温度;回归分析

1 前言

轮胎—路面接触界面的摩擦系数直接影响车辆行驶安全。路面覆冰后,摩擦系数急剧降低,车辆因制动距离增加及操作失控导致事故频发。统计数据表明:2015年,在中国,冰雪天气的事故致死率、致伤率、平均财产损失分别为0.385人/起、1.299人/起、1.171万元/起。从事故伤害程度及发生率角度分析,覆冰路面的低摩擦特性对行车安全存在重大隐患。研究覆冰条件下路面的摩擦性能,有利于提高公路的安全运营性能,减少事故发生数,降低损失。

目前,国内外对于结冰路面的摩擦性能研究方法包括理论分析法、室内模拟试验法、室外实车试验法。

理论分析法以摩擦热传递原理、流体力学为基础,建立摩擦系数与橡胶滑移速度、接触面特征尺寸、温度变化量等因素间的关系。同时,研究者利用摩擦接触理论与有限元仿真方法,对不同工况下车辆制动距离以及抗滑性能进行分析。虽然理论分析法可重复性强,但是该方法所建立的模型接触面特征难以确定,模型的适用性受到限制。

考虑到轮胎滚动与橡胶滑动的差异,三轮便携式摩擦系数测试设备用于冬季不同路面状态下的抗滑性能测试。同时,室外实车试验通过测量制动距离,反算

出完全结冰状态下的摩擦系数。实车试验测得的结果虽然真实,但指标难以选取,试验参数受环境影响无法控制,同时成本较高,使得该方法应用较少。

目前,研究者广泛使用室内试验方法确定冰层与橡胶块间摩擦系数关系。利用橡胶滑块、线性摩擦系数测试设备、摆式仪等模拟轮胎作用,从冰的物质组成及其结构形态、冰层表面状态、冰层厚度、温度、硬度、橡胶滑移速度、荷载大小等因素出发,分析各因素对摩擦系数的影响趋势并建立关系模型。室内试验方法对影响指标控制方便,试验方法简单,但是目前大多数研究集中在建立冰块与橡胶间的滑移作用下摩擦系数的变化规律方面,未考虑路面构造特征对冰与橡胶接触界面的影响。

路面覆冰类型包括降水结冰、冰霜、暗冰等。降水结冰的冰层厚度大于1 mm且完全覆盖路表,而对于冰霜或暗冰,其厚度薄,路面构造仍能提供一定摩擦。根据冰的分布位置及路面构造特征,将结冰路面分为完全覆盖路表构造深度的厚层冰以及未完全覆盖路表构造深度的薄层冰。

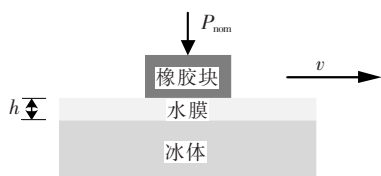
该文选取目前中国广泛使用的AC-13及SMA-13路面结构,以路面宏观构造深度为分界点,采用理论与试验结合的方法,研究路面附着薄层冰、厚层冰条件下摩擦系数的变化规律。首先理论分析摆值在覆冰条件下的适用性,随后通过试验法研究覆冰路面摩

擦系数与特征参数间的相关性并建立关系模型。通过检测路面特征参数,包括冰层厚度、冰层表面温度,即可实时获取路面摩擦系数,进而指导驾驶员安全驾驶。

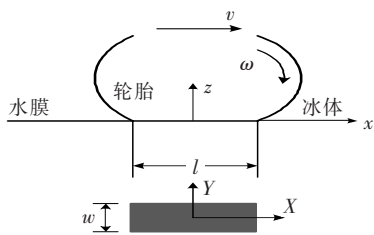
2 覆冰路面摆值适用性分析

2.1 厚层冰路面摩擦机理分析

路面附着厚层冰后,当冰层表面温度接近某一阈值时,接地面冰体在摩擦热传导作用下将出现部分融化现象,此时轮胎胎面/橡胶块的接触物质包括薄层水膜、冰体。轮胎胎面/橡胶块作用下,摩擦机理如图1所示。



(a) 橡胶块-冰体摩擦机理图



(b) 轮胎-冰体摩擦机理图

图1 厚层冰路面摩擦机理分析

如图1(a)所示,根据能量守恒原则,摩擦热被转换成两种能量。当摩擦热达不到冰层表面融化的温度时,则热量完全传递至冰体内部。当摩擦热达到融化温度时,一部分热量将被传递至冰中,其余热量将表面冰层融化,形成表面附着薄层水膜状态。根据牛顿黏性定律、摩擦热平衡原理,得出黏性剪切力、水膜厚度随时间变化规律并建立摩擦系数模型,如式(1)~(3)所示。由此说明,当冰面温度很低时,摩擦热无法使冰面表面产生摩擦融化现象。此时,冰面表面的摩擦状态类似于干摩擦。

$$\frac{dh(t)}{dt} = \left[\frac{\eta_{\text{water}} v^2}{h(t)} - \lambda_{\text{ice}} \partial_z T_{\text{ice}}(0, t) \right] \frac{1}{\rho_{\text{ice}} L_{\text{ice}}} \cdot \delta \{ T_{\text{ice}}(0, t) = T_{\text{melt}} \} \quad (1)$$

$$\mu(t) = \frac{F_{\text{shear}}(t)}{F_z} = \frac{\tau_{\text{shear}}(t) A_{\text{nom}}}{F_z} = \frac{\tau_{\text{shear}}(t)}{p_{\text{nom}}} = \frac{\eta_{\text{water}} v}{h(t)} \cdot \frac{1}{p_{\text{nom}}} \quad (2)$$

$$\delta \{ T_{\text{ice}}(0, t) = T_{\text{melt}} \} = \begin{cases} 0 & T_{\text{ice}}(0, t) > T_{\text{melt}} \\ 1 & T_{\text{ice}}(0, t) < T_{\text{melt}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: p_{nom} 为名义压力; η_{water} 为水的黏度; v 为橡胶块的滑移速度; $h(t)$ 为 t 时刻水膜厚度; $T_{\text{ice}}(0, t)$ 为 t 时刻冰层表面温度; T_{melt} 为冰体融化温度; ρ_{ice} 为冰体密度; λ_{ice} 为冰体导热系数。

如图1(b)所示,根据流体动力润滑理论和热平衡理论,认为摩擦热一方面用于融化冰,另一方面则传导至未融冰层和轮胎中,得出接地面平均压力 p_0 、轮胎纵向摩擦力 τ 、摩擦系数 μ 关系如式(4)所示:

$$p_0 = \frac{F}{lw} = \frac{\eta m v^2}{\rho h^3}; \tau = \frac{\eta v_s}{h}; \mu = \frac{\tau}{p_0} = \frac{\eta v_s}{h} \frac{1}{p_0} \quad (4)$$

式中: v_s 为滑移速度; h 为水膜厚度。

通过上述对橡胶块-厚冰层、轮胎-厚冰层的摩擦机理分析可知,两种情形下的摩擦作用机理相同。

2.2 薄层冰路面摩擦机理分析

对于薄层冰路面而言,其摩擦机理与未结冰路面相似,如图2所示。在轮胎荷载作用下,附着在路面上的薄层冰很容易损坏。在这种情况下,橡胶可以与沥青表面接触。橡胶和薄层冰路面之间的摩擦包括滞后摩擦和黏性摩擦。因宏观结构中的附着冰层,故橡胶块与沥青路面的接触面积减小,摩擦力比干燥路面更低。

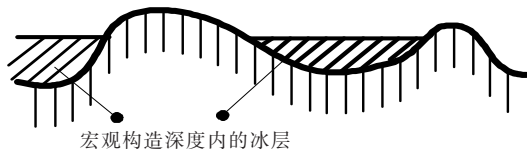


图2 薄层冰路面摩擦机理分析

2.3 摆值适用性分析

摆式仪作为单点路面抗滑性能检测常用仪器,其对冰雪路面摩擦系数检测的适应性、合理性需要根据橡胶块/轮胎-冰/雪面的摩擦机理论证。摆式仪测试示意如图3所示。测试范围为 $12.6 \text{ mm} \times 7.62 \text{ mm}$,测试结果为纯滑动摩擦系数。

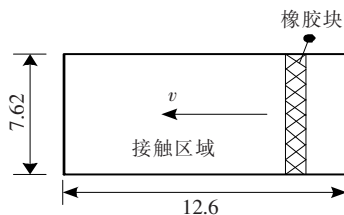


图3 摆式仪橡胶块摩擦机理分析(单位:mm)

测试过程中,因橡胶块的后端边缘与测试区域接

触,故橡胶—覆冰路面接触宽度窄,橡胶块瞬时接触区域内的冰面可假设为光滑平整,橡胶块与冰体接触界面因摩擦热传导产生薄层水膜且厚度均匀。由以上分析可知:摆值适用于厚层冰在摩擦热传导作用下产生部分融化的情形以及低温厚层冰。

薄层冰路面,如冰霜、暗冰路面,因路面构造深度对路面抗滑仍有作用,作用机理与正常路面相似,仅接触面由橡胶—沥青界面转变为橡胶—冰面,故摆值适用于薄层冰路面。

3 试验设计

该文基于室内外试验相结合的方法,于交通部公路交通试验场 F 区环道试验场、陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室的恶劣气象交通条件模拟试验箱开展试验,研究覆冰路面摩擦系数影响因素及变化特性。其中,室外试验定性确定影响路面摩擦系数的关键因素,室内试验定量研究路面摩擦系数与影响因素间的关系模型。

3.1 试验设备

室外试验过程中,利用夜间不同低温环境于环道试验场形成薄层冰、厚层冰环境,利用温度枪测定冰层表面温度,并使用摆式仪测试覆冰路面的摆值。

室内试验过程中,选择维萨拉遥感道面状态传感器实时监测采集覆冰路面冰层厚度、表面温度;使用摆式摩擦系数测试仪测量摆值;通过 3 块平行的 AC—13、SMA—13 车辙板试件模拟路面结构;利用手工铺砂仪获取路面构造深度,该文的 AC—13、SMA—13 路面构造深度分别为 0.47、0.72 mm。

3.2 试验方法

(1) 室外试验

在进行温度对薄层冰摆值影响试验中,利用夜间不同低温环境($-3\sim-12\text{ }^{\circ}\text{C}$),分别在同一路面类型(AC—13)的 8 处固定位置喷洒固定体积的水膜形成薄层冰,并使用液氮加速结冰进程,待冰层形成且表面温度稳定后,测定表面温度及摆值,每个测点单独连续测试 5 组,共计 8 个测点 64 次 320 组摆值数据。

在进行冰层厚度对摆值影响的因素分析中,因冰层厚度室外较难测定,因此采用多次累积喷洒冰膜控制冰层厚度的方法,利用结冰次数作为冰层厚度的定性描述指标,进而分析冰层厚度对薄层冰摆值的影响水平。采用室外试验定量分析影响覆冰路面抗滑性能的因素,并为室内模拟试验的控制指标提供依据。

(2) 室内试验

当研究薄层冰路面摆值与冰层厚度关系时,分别在 AC—13、SMA—13 车辙板表面喷洒不同用量的雾状冰水,在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中快速形成不同厚度的冰层,直至冰层厚度接近车辙板表面构造深度时停止试验,采集路面状态稳定时的冰层厚度、冰层表面温度及 5 组摆值,AC—13、SMA—13 路面分别累计采集 25 组、50 组数据。

当研究厚层冰路面摆值与冰层表面温度关系时,该试验中 AC—13、SMA—13 车辙板的结冰厚度分别为 0.66、1.13 mm,测点范围内的冰层表面光滑平整。自 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 开始以 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的梯度升温,每上升 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持试验箱温度恒定,采集路面状态稳定时的 5 组摆值,累计采集 70 组数据。

4 试验数据处理

4.1 数据预处理

(1) 室外试验数据预处理

将不同温度、同一冰层厚度环境下的路面摆值以及同一温度、不同冰层厚度的测试数据进行分析,剔除测得的 5 个摆值数据中最大值与最小值差值大于 3 的测组,剩余的测试组取 5 次摆值的平均值。

(2) 室内模拟试验数据预处理

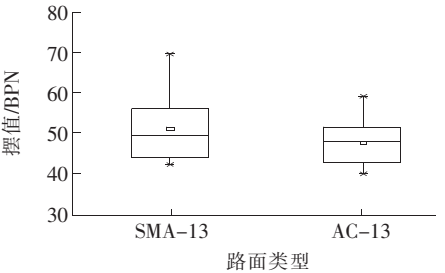
摆值测试过程中,由于试验设备、试验环境、试验者操作等因素影响会带来一定误差,所以需要测试数据结果的异常进行检验。绘制不同冰层厚度与表面温度条件下的摆值箱形图,如图 4 所示。图 4 显示:测试数据没有出现异常值,故原始数据可以进行直接处理。

4.2 室外试验数据分析

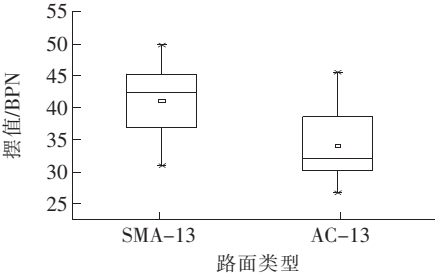
薄层冰路面(AC—13)在冰层厚度恒定环境下,摆值与冰层表面温度的关系如图 5 所示。由图 5 可知:冰层表面温度为 $-3\sim-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,摆值维持为 34.2~38.4 BPN。由此可以得出,低温环境下,薄层冰路面摆值随温度变化波动性较小,温度因素对薄层冰路面的摩擦性能影响小。

同一温度下,薄层冰路面厚度与摆值的关系如图 6 所示。由图 6 可知:随着结冰次数的增加,冰层厚度随之增加,且摆值随着冰层厚度的增加降低明显,最低达到 30 BPN。由此可知,薄层冰摩擦性能与冰层厚度存在明显相关性,与冰层表面温度间的关系不显著,因此室内试验重点研究薄层冰路面摆值与冰层厚度的定

量关系。



(a) 不同冰层厚度下摆值箱形图



(b) 不同冰层表面温度下摆值箱形图

图4 摆值箱形图

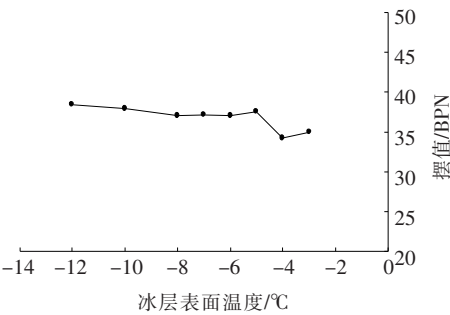


图5 薄层冰路面摆值与冰层表面温度关系趋势图

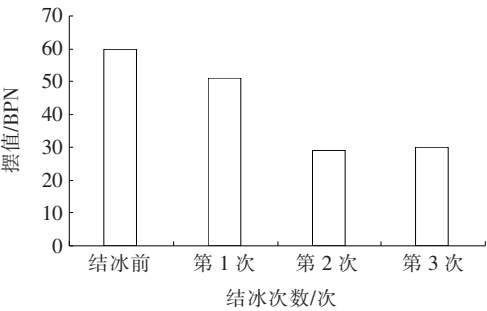


图6 薄层冰路面摆值与冰层厚度关系趋势图

4.3 薄层冰路面摆值与冰层厚度关系研究

(1) 试验数据分析

根据室内试验测试结果知,覆冰路面摆值与冰层厚度呈负相关,试验结果如图7所示。

由图7可知:当冰层厚度在构造深度0.47 mm以下时,AC-13车辙板覆冰表面摆值随冰层厚度的增

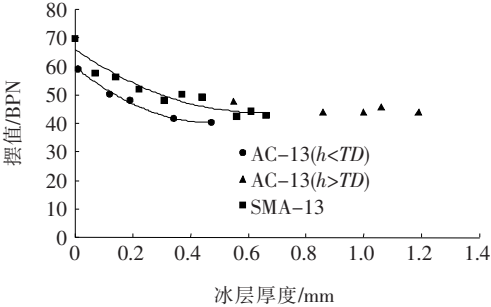


图7 薄层冰路面摆值与冰层厚度的关系

加而降低,从拟合结果以及物理意义角度分析,两者服从二次函数关系,模型形式均为: $BPN_{(h<TD)}=ah^2+bh+c$,其中, $a>0,b<0,c>0$,且 $c=\mu(T,h=0)$ 。当冰层厚度从0上升至0.47 mm时(构造深度以下),摆值变化率由-81.877 BPN上升至-1.65 BPN,摆值的下降率在逐渐减小,说明冰层厚度对摆值的影响效果随着厚度的增加而逐渐减弱。当冰厚大于构造深度时,因车辙板构造深度的空间体积均被冰层覆盖,故表面的抗滑性能主要取决于橡胶片与厚冰层间的关系。由试验结果可以看出,随着冰层厚度的持续增加,摆值维持为44~45 BPN,变化浮动范围较小。

为使模型结果更具适用性,将摆值与路面摩擦系数按照式(5)进行换算,得出在构造深度以下时,AC-13、SMA-13路面摩擦系数随冰层厚度的变化关系模型如式(6)、(7)所示:

$$BPN=95.93f+5.245(R^2=0.9527) \tag{5}$$

$$\mu_{(AC-13)}=0.89h^2-0.85h+0.57(R^2=0.993) \tag{6}$$

$$\mu_{(SMA-13)}=0.57h^2-0.73h+0.63(R^2=0.917) \tag{7}$$

式中: μ 为摩擦系数; h 为冰层厚度(mm)。

(2) 试验结果分析

当覆冰路面冰层厚度小于构造深度时,摆值随着冰层厚度的增加而减小,减小的速率逐渐放缓。如图8所示,这种下降趋势主要是由于AC-13路面和SMA-13路面被水膜覆盖结冰时,其微观构造首先会被冰层薄膜覆盖,此时对于低速下落的摆锤影响较大,导致摆值下降速率较快;随着冰厚的增加,其宏观构造深度范围内的空间被冰层填充,摆式仪橡胶块与冰层接触界面具有一定的黏聚力,使得摆值下降速率变慢。

4.4 厚层冰路面摆值与冰层表面温度关系研究

(1) 试验数据分析

根据前文的研究结果可知:当覆冰路面冰层厚度大于构造深度时,路面摆值随冰层厚度增加处于稳定

水平。因摩擦热传导与冰层表面温度有较大关系,故该文研究厚层冰路面摆值与冰层表面温度的关系。

厚冰层路面摆值与冰层表面温度关系如图 9 所示。

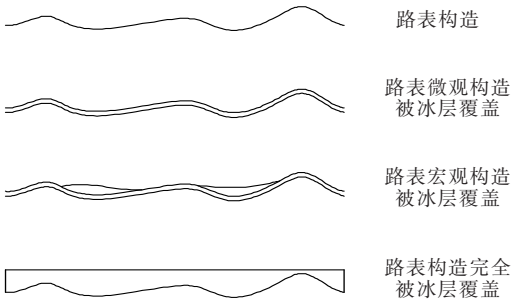


图 8 路面覆冰过程

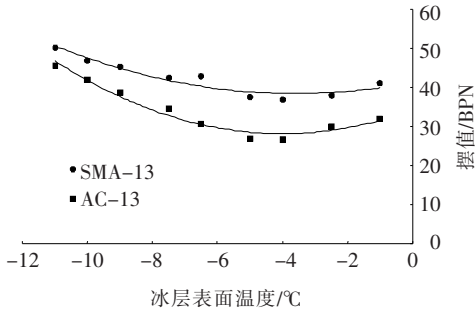


图 9 厚冰层路面摆值与冰层表面温度间关系

由图 9 可以看出:当冰层表面温度分别低于 -3.6 、 -4 $^{\circ}\text{C}$ 时,摆值随着温度的下降呈现上升的趋势。当大于该临界值时,路面摆值出现上升的趋势。

根据数据变化趋势,由此可以建立厚冰层路面摩擦系数与冰层表面温度之间的关系模型,如式(8)、(9)所示:

$$\mu_{(\text{AC}-13)} = 0.004t^2 + 0.03t + 0.30 \quad (R^2 = 0.968) \quad (8)$$

$$\mu_{(\text{SMA}-13)} = 0.0023t^2 + 0.017t + 0.38 \quad (R^2 = 0.916) \quad (9)$$

式中: μ 为摩擦系数; t 为温度($^{\circ}\text{C}$)。

(2) 试验结果分析

当温度小于 $-3 \sim -4$ $^{\circ}\text{C}$ 时,摆值随着冰层表面温度的下降而上升,其主要是由于在低温条件下冰层表面摩擦热传导未将冰层表面融化,此时摆值大小主要取决于冰层表面的黏性作用,且温度越低黏着性越强,摩擦热传导的热量越不易达到冰体的融点。

当 AC-13 路面与 SMA-13 路面的温度分别升高至 -3.6 、 -4 $^{\circ}\text{C}$ 时,暖冰面上摩擦力上升的原因在于,当冰温接近冰的融点时,易屈服的冰表层和冰块内

部形成的层状剪切层导致冰面断裂,此时需要外力去破坏冰的完整性,同时冰面上生成的局部水膜使得边界润滑状态转变为弹流润滑状态,具有一定的黏滞阻力。此时,橡胶在低速下的滑动摩擦力主要取决于冰的性能与水膜的作用。

厚冰层摆值与温度间的关系变化趋势与冰的硬度也有显著关系。Schaefer 等与 Timco 等对不同温度下冰的硬度进行测量。Barnea 等通过控制接触时间,在不同温度下对冰晶体的硬度进行定量研究,两者服从一元线性关系,即 $H(t) = C_1T + C_2$, 其中, $C_1 = -5.08$, $C_2 = 15.19$, 且 $H(t)$ 为冰的硬度; T 为冰层温度。由计算式可见,随着温度的升高,冰的硬度呈线性下降。同时, Poirier 等认为在接近 0 $^{\circ}\text{C}$ 时,冰的硬度将会降低更快。因此,在橡胶摩擦的作用下, 0 $^{\circ}\text{C}$ 时冰体软化现象严重,水膜易于产生,且较低温条件下水膜厚度更厚,从而导致摆值出现增加的现象。

由于两种路面结构的表面均被厚冰层覆盖,但是在不同温度条件下却呈现不同的摆值,其主要是由于摆式仪与冰面的接触滑动长度为 12.6 cm ,而维萨拉遥感道面传感器的监测范围仅为 5 cm ;摆锤下落时,其滑动过程中可能会接触到车辙板表面的集料。同时,虽然传感器识别的厚度已经大于路面构造深度,但是在其监测范围之外的路面结冰状况并没有被识别,且车辙板成型后的表面并非完全平整,所以结冰的厚度无法保证完全均匀,导致两种路面结构在厚冰层条件下呈现不同的摆值。

4.5 模型检验

该项目样本量满足 T 检验的样本量需求,取显著性水平 $\alpha = 0.05$,对 4.3 节中所建立模型的回归系数进行显著性检验,结果如表 1 所示。表 1 表明:T 检验的 p 值均小于 0.05 ,故回归系数对因变量均产生显著影响,即覆冰路面冰层厚度及冰层表面温度对覆冰路面的摩擦系数影响作用明显。

为了评价与检验所建立模型的准确性与合理性,将模型计算所得到的结果与原始数据进行误差比较,以相对误差作为衡量标准。结果发现,两种路面结构的摆值相对误差基本集中在 5% 范围内。由此看出,所建立模型的误差较小,预测精确度高。

5 结论

(1) 基于路表构造深度特征,首先将覆冰路面分为薄层冰路面以及厚层冰路面;随后,基于理论方法,

表 1 模型回归系数显著性统计检验

模型	系数项	T 值	显著性(P 值)
薄层冰路面摆值与冰层厚度关系模型	冰层厚度_一次项_AC-13	-8.617	0.013
	冰层厚度_二次项_AC-13	4.543	0.045
	常数_AC-13	63.994	2.441×10^{-4}
	冰层厚度_一次项_SMA-13	-4.659	0.002
	冰层厚度_二次项_SMA-13	2.551	0.038
	常数_SMA-13	31.391	8.602×10^{-9}
厚冰层路面摆值与冰层表面温度关系模型	冰层表面温度_一次项_AC-13	4.851	0.003
	冰层表面温度_二次项_AC-13	7.571	2.759×10^{-4}
	常数_AC-13	20.512	8.733×10^{-7}
	冰层表面温度_一次项_SMA-13	2.326	0.059
	冰层表面温度_二次项_SMA-13	4.028	0.007
	常数_SMA-13	22.393	5.189×10^{-7}

分析了薄层冰路面、厚层冰路面及摆式仪的摩擦机理,并确定摆值的适用性;摆值适用于部分融化冰层、低温厚层冰路面及薄层冰路面;最后,基于室内试验,确定薄层冰路面摆值与冰层厚度、厚层冰路面与冰层表面温度的关系模型。

(2) 相比于已有的研究成果,该文对目前常用的路面抗滑测试设备摆式仪在覆冰条件下的适用性进行理论分析,同时考虑路面本身对覆冰条件下摩擦系数的影响,并将覆冰路面的摩擦性能由定性层面上升至定量结果,为覆冰路面摩擦系数的实时监测提供依据,保证车辆行驶安全性。结果发现,薄层冰路面摆值与冰层厚度间呈二次函数关系;而对于厚层冰路面,其摆值与冰层表面温度呈二次函数关系。

(3) 虽然该文建立了覆冰路面表面摩擦系数与冰层厚度、冰层表面温度间的关系模型,但是由于试验设备以及试验条件的限制,未能获得多因素综合影响下的摆值变化规律,如橡胶块滑移速率、橡胶块压力等,以后可在该方向深入研究。

参考文献:

[1] 公安部交通管理局,公安部交通管理科学研究所(无锡). 道路交通事故统计年报(2015 年)[Z],2016.

[2] Lassw Makkonen, Maria Tikanmäki. Modeling the Friction of Ice[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014,102:84-93.

[3] 彭旭东,孟祥铠,李纪云. 冰面上橡胶滑动摩擦特性的数值分析[J]. 润滑与密封,2006(6).

[4] 彭旭东,谢友柏,郭孔辉. 接地面全融化条件下冰面轮胎摩擦力的预测[J]. 汽车工程,1999(4).

[5] 彭旭东,谢友柏,郭孔辉. 接地面部分融化条件下冰面轮胎摩擦力的研究[J]. 汽车技术,1999(3).

[6] 朱云升,向会伦,张谢东,等. 沥青路面结冰条件下抗滑性能[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2012(1).

[7] 朱文琪,雷宗建,欧阳积耀,等. 结冰路面抗滑性能分析及对交通安全影响研究[J]. 武汉理工大学学报,2014(6).

[8] A. Bergström, H. Åström and R Magnusson. Friction Measurement on Cycleways Using a Portable Friction Tester[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2003, 17 (1):37-57.

[9] 王正君,雷明臣,丁琳,等. 冰雪路面抗滑性能试验研究[J]. 中外公路,2009(2).

[10] 程国柱,李惠,徐亮. 积雪路面特性分析及其造成驾驶员行车紧张性评价[J]. 吉林大学学报,2011(2).

[11] Alex Klein—Paste, Nirmal K. Sinha. Comparison between Rubber—Ice and Sand—Ice Friction and the Effect of Loose Snow Contamination[J]. Tribology International, 2010,43:1 145-1 150.

[12] 郑少鹏,程志豪,苏宇,等. 恶劣气象条件对路面湿滑系数的影响研究[J]. 中外公路,2017(1).

[13] C. Klapproth n, T. M. Kessel, K. Wiese. An Advanced Viscous Model for Rubber—Ice—Friction[J]. Tribology International,2016,99(1):169-181.

[14] Schaefer, J. A., Ettema, R., Nixon, W. A. Measurements of Icing Hardness[J]. Cold Regions Science and Technology,1989,17(1):89-93.

[15] Timco, G. W., Frederking, R. M. W. Laboratory Impact Tests on Freshwater Ice[J]. Cold Regions Science and Technology,1993,22(1):77-97.

[16] Poirier, L., Lozowski, E. P., Thompson, R. I. Ice Hardness in Winter Sports[J]. Cold Regions Science and Technology,2011,67(3):129-134.