

# 半刚性基层沥青路面车辙等效温度

杨瑞康, 金 添, 刘黎萍, 孙立军, 袁 江, 程怀磊

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 为准确预测沥青路面服役期间的车辙深度, 简化预测流程, 基于温度场预测模型和车辙预估模型计算 10 个地区半刚性基层沥青路面的车辙等效温度, 分析了面层厚度和地区因素对等效温度的影响, 建立了考虑深度、年平均气温和年降雨量的预估模型, 对模型进行了全面的检验。结果表明, 面层厚度只对 0.5 cm 深度处的车辙等效温度有显著影响, 地区对各亚层的车辙等效温度均有显著影响; 基于车辙等效温度沿深度的分布特性, 提出了外延性和稳健性较好的模型; 结合地区修正因子, 建立了考虑地区差异的车辙等效温度模型。与国内外已有的模型相比, 建立的车辙等效温度模型对于不同的设计条件、材料和交通量具有更好的适用性。

**关键词:** 道路工程; 沥青路面; 车辙等效温度; 预估模型

中图分类号: U416

文献标志码: A

## Effective Temperature of Rutting for Semi-Rigid Base Asphalt Pavement

YANG Ruikang, JIN Tian, LIU Liping, SUN Lijun, YUAN Jiang, CHENG Huailei

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804)

**Abstract:** This paper aims to predict the rutting depth more accurately and simplify the prediction process. First, the effective temperature for rutting of semi-rigid base asphalt pavement in 10 sites was calculated based on the full-thickness asphalt pavement temperature field prediction model and rutting prediction model. Then, the effect of asphalt layer thickness and site factors on the effective temperature were analyzed. Afterwards, a prediction model was established, incorporating the depth, annual average temperature (AAT), and annual rainfall (AR). Finally, the model was verified and compared with other existing models. The results show that the asphalt layer thickness only has a significant effect at a depth of 0.5 cm, and the site significantly

affects each sublayer. A model with a better extensibility and robustness is proposed based on the distribution characteristics of effective temperature along the depth. Combined with the regional correction factor, an effective temperature prediction model considering regional differences is established. Compared with the existing models, the effective temperature model established in this paper is suitable for different design conditions, materials, and traffic volumes.

**Keywords:** road engineering; asphalt pavement; effective temperature for rutting; prediction model

车辙是沥青路面最常见的病害之一, 准确预估车辙在路面结构设计及养护维修过程中至关重要<sup>[1-3]</sup>。因沥青混合料的黏弹特性, 温度是车辙预估需要重点考虑的因素<sup>[4-5]</sup>。因路面服役环境复杂, 车辙预估过程中难以考虑沥青路面内部温度场的实时变化。因此, 许多学者基于车辙等效温度的概念<sup>[6-8]</sup>, 按照车辙深度等效的原则, 将实时变化的路面温度场转化为一个等效温度, 便于车辙的分析与预测。

目前车辙等效温度主要有 2 种表达方式, 第 1 种为选取沥青层某一深度的温度值或代表温度来表征该地区整体的温度情况。Zhu 等<sup>[9]</sup>考虑交通荷载的非均布特性, 使用数值模拟的方式计算确定了南京的车辙等效温度, 结果表明, 南京的年等效车辙温度为 38.5°C。苏凯等<sup>[10]</sup>提出了 4 种不同的等效温度计算方法, 分别为基于车辙损伤等效、沥青混合料劲度模型等效、沥青粘滞度等效以及经验法, 使用上海的路面温度场数据确定了上海的车辙等效温度为 40~45°C。上述方式确定的等效温度值代表性不足, 难以反映面层厚度对等效温度的影响。第 2 种方式则建立了车辙等效温度与深度、年平均温度等气象因素之间的关系。Witczak<sup>[11]</sup>研究了 5 种不同因素对等

收稿日期: 2022-12-21

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFA1008904, 2018YFB1600100)

第一作者: 杨瑞康, 博士生, 主要研究方向为道路工程。E-mail: rkyang@tongji.edu.cn

通信作者: 孙立军, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路工程。E-mail: ljsun@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

效温度的影响,包括面层厚度、土基模量、级配类型、轮胎压力和不同地区,共计 648 种不同的情况,提出了车辙等效温度与深度、年平均气温之间的关系。进一步,SHAP A-407<sup>[12]</sup>参考 Witczak 等的研究成果,将可靠度水平纳入了模型中。Sotil<sup>[8]</sup>、EI-Basyouny 等<sup>[13]</sup>建立了考虑行车速度(频率)、风速、日照时间和降雨量的车辙等效温度模型,该模型考虑的因素最终被 NCHRP 9-33A<sup>[14]</sup>所采纳。李伊等<sup>[7]</sup>选取 18cm 沥青层厚的路面结构,使用上海和沈阳地区的相关数据建立了考虑温度非均匀分布的等效车辙温度预估模型。基于第 2 种方式建立的预估公式,使用的模型类型为线性或者多项式,线性模型与路面实际的温度场分布规律不符,多项式模型则容易出现过拟合的现象。

基于此,选取中国 10 个典型地区,使用全厚式沥青路面温度预估模型确定路面的温度场变化;结合温度场和车辙预估模型,确定不同地区、不同厚度路面结构的车辙等效温度;进而利用统计分析方法研究厚度和地区因素对于车辙等效温度的影响,建立考虑结构参数以及地区因素的车辙等效温度预估模型,为后续沥青路面结构车辙分析提供更为可靠的依据。

## 1 车辙等效温度的确定方法

已有研究表明,在基层可以提供足够支撑的情况下,车辙的形成和发展主要是沥青层内部的剪切流动变形<sup>[1,15]</sup>。为反映这种特点,参考孙立军等<sup>[1,16]</sup>提出的基于剪切强度的车辙预估模型,该模型基于环道试验数据和多条高速公路的现场实测数据建立,考虑了累积轴载作用次数、行车速度、温度、路面结构类型和材料抗剪强度等参数。模型形式如式(1)所示:

$$R_d = 0.4565 \cdot (1 + L_p) \sum_{i=1}^n 10^{-7.6422} \cdot T_i^{3.7586} \cdot (N / (1 + 5.5572 \cdot V^{1.2219}))^{0.8358 \left( \frac{\tau_i}{[\tau]_i} \right)^{0.8256}} \quad (1)$$

式中: $R_d$ 为车辙深度,mm; $L_p$ 为隆起系数; $T_i$ 为第*i*亚层平均温度,℃; $N$ 为设计车道设计轴载累积作用次数; $V$ 为载重车平均行车速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $[\tau]_i$ 为第*i*层沥青混合料抗剪强度,MPa; $\tau_i$ 第*i*层沥青层平均剪应力,MPa。

基于上述车辙预估模型,提出了如图 1 所示车辙等效温度的计算方法。

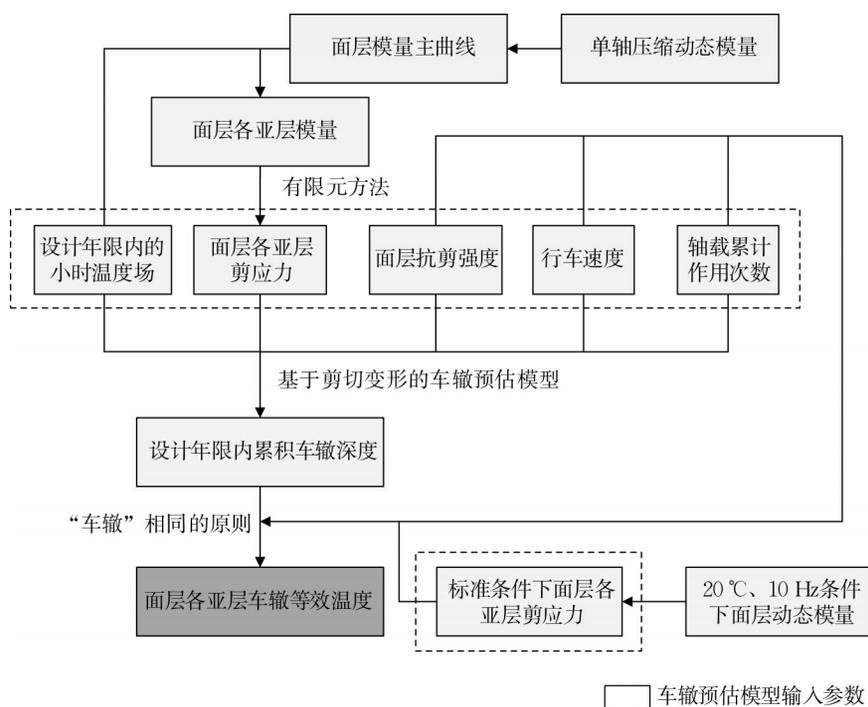


图 1 车辙等效温度确定流程

Fig. 1 Process of determining effective temperature for rutting

取设计期为 1 年,上中面层抗剪强度取值为 0.8 MPa,下面层抗剪强度取值为 0.5 MPa,行车速

度取  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,每小时标准轴载作用次数 ESAL 取 1 000 次。由图 1 可知,确定了设计年限内面层不同

深度的小时温度和各亚层的剪应力,通过最优化方法即可求解得到面层各亚层车辙等效温度。

为了确定面层不同深度的小时温度,参照李伊等<sup>[17]</sup>提出的全厚式路面温度场预估模型,该模型以月平均气温、大气温度、太阳辐射量和路面深度为输入参数,考虑了大气温度和太阳辐射量对沥

青层的累积影响。获取上海等10个地区2021年的小时大气温度、太阳辐射量和月平均气温参数,计算了10个地区一年面层各亚层的逐时温度。选取的10个地区如表1所示,其中使用地区01到07的数据来建立模型,地区08到10用来对模型进行验证。

表1 模型建立地区的位置

Tab. 1 Sites used for modeling

地区	所在区域	经度/(°)	纬度/(°)	地区	所在区域	经度/(°)	纬度/(°)
01	鄂尔多斯	109.983	39.833	06	北京	116.585	40.080
02	武汉	114.208	30.784	07	广州	113.299	23.392
03	漳平	117.400	25.300	08	西宁	101.767	36.617
04	上海	121.336	31.198	09	南宁	108.172	22.608
05	济南	116.983	36.683	10	大连	121.539	38.966

采用有限元方法计算面层各亚层的剪应力,所分析的路面结构类型为半刚性基层沥青路面。结构组合及各层材料类型如表2所示。其中,面层的模量取值通过动态模量试验<sup>[18]</sup>来获取,其他结构层参数取值参考《公路沥青路面设计规范》<sup>[19]</sup>。基于动态模量的试验结果可拟合得到动态模量主曲线,计算得到指定温度和频率(行车速度)条件下面层不同深度位置的模量值,最终计算得到面层各亚层的剪应力。常用的模量主曲线为Sigmond函数<sup>[20-21]</sup>形式,如

式(2)所示:

$$\lg(|E^*|) = d + \frac{a}{1 + e^{b+c(\lg f + \lg a_T)}} = d + \frac{a}{1 + e^{b+c(\lg f + \frac{C_1(T-T_{ref})}{C_2+T-T_{ref}})}} \quad (2)$$

式中: $|E^*|$ 为动态模量,MPa; $a, b, c, d, C_1, C_2$ 为回归参数; $f$ 为加载频率,Hz; $a_T$ 为温度转换因子,该因子可以把任意温度下的频率转换为参考温度下的频率; $T_{ref}$ 为参考温度; $T$ 为需要计算的温度。

表2 路面结构与材料类型

Tab. 2 Pavement structure and materials

结构层	材料	厚度/cm								模量/MPa	泊松比	
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧			
面层	SMA-13	4	4	4	4	4	4	4	4	由模量主曲线来确定	0.25	
	AC-20	5	6	6	6	6	6	6	6		0.25	
	AC-25	6	8	10	14	18	22	26	30		0.25	
基层	水泥稳定碎石(CSG)					40					11 000	0.25
底基层	水泥稳定碎石(CSG)					20					10 000	0.25
土基											60	0.40

基于动态模量试验,确定了SMA-13、AC-20和AC-25三类沥青混合料的动态模量;利用式(2)拟合得到混合料的动态模量主曲线参数,结果如表3所示。

表3 沥青层模量主曲线参数

Tab. 3 Fitting parameters of dynamic modulus master curve

级配	$a$	$b$	$c$	$d$	$C_1$	$C_2$	$T_{ref}/°C$	$R^2$
SMA-13	2.44	-0.54	-0.69	7.79	11.599	113.967	20.0	0.996
AC-20	2.15	-0.58	-0.76	8.32	13.882	132.794	20.0	0.997
AC-25	2.91	-1.01	-0.62	7.68	23.809	206.613	20.0	0.999

确定了各结构层的材料参数之后,使用大型商业软件ABAQUS建立有限元模型。荷载接地形状

和面积参照标准轴载,确定为0.192 m×0.186 m,两轮的间隙取0.314 m<sup>[22]</sup>。有限元模型的尺寸为10 m×10 m×15 m,如图2所示。其中,Z方向为行车方向(10 m),X方向为横断面方向(10 m),Y方向为深度方向(15 m)<sup>[23]</sup>。各结构层层间黏结状态设置为完全连续。模型边界条件为:X和Z方向限制法向位移,Y方向完全固定。沿深度方向,以1 cm的间隔对沥青层进行网格划分,以4 cm的间隔对基层和底基层进行网格划分,土基网格划分则沿深度方向逐渐变疏,共划分15个网格。为了计算效率,荷载区域网格划分较密,远离荷载区域网格划分逐渐变疏。基于有限元模型的结果,计算得到车辙所需的面层各亚层剪应力。

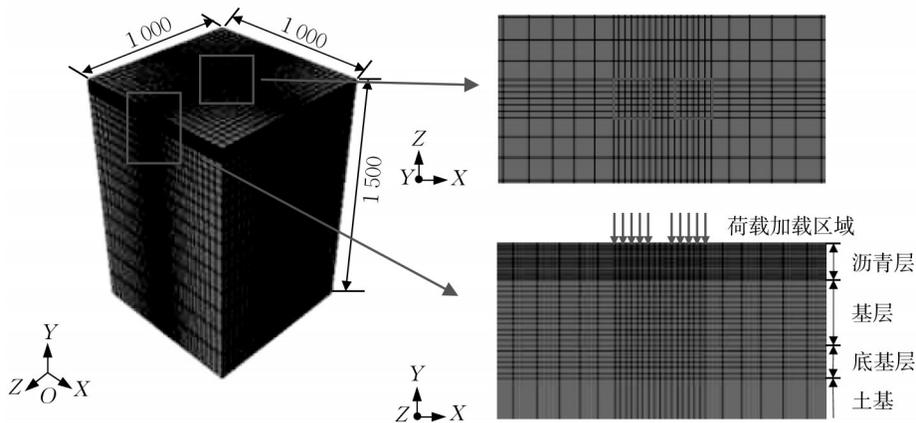


图 2 有限元模型(单位:cm)

Fig. 2 Finite element model (unit: cm)

## 2 车辙等效温度模型的建立

采用第 1 节中的车辙等效温度确定方法,求解得到 80 种(8 种面层厚度、10 个地区)不同的工况下面层各亚层的车辙等效温度。

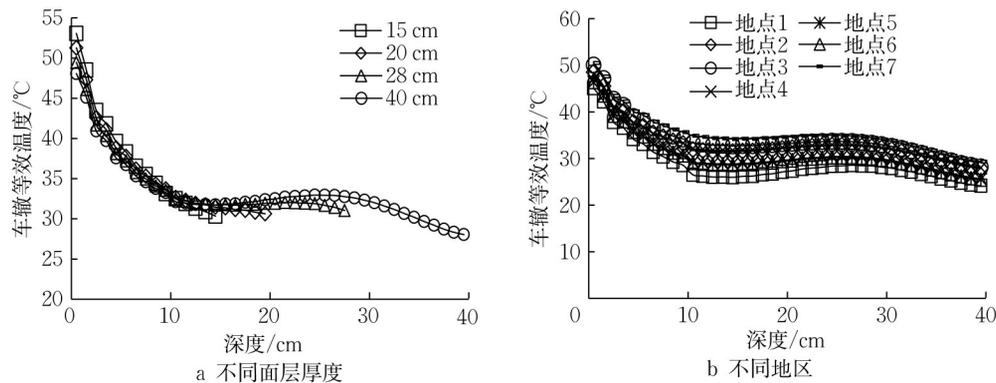


图 3 面层厚度和地区对车辙等效温度的影响

Fig. 3 Effect of asphalt layer thickness on effective temperature for rutting

从图 3 可以看出,车辙等效温度随着深度呈现出先快速减小后逐渐趋于稳定的特性,不同面层厚度对车辙等效温度的影响很小,不同地区的车辙等效温度沿深度分布则呈现相同的趋势。进一步,使用单因素方差分析检验了面层厚度和地区对各亚层车辙等效温度的影响。单因素方差分析要求数据具有正态性和方差齐性。经检验,分析数据正态性和方差齐性均满足要求。分析结果如表 4 和表 5 所示。

取显著性水平  $\alpha$  为 0.05,由表 4 和表 5 可知,面层厚度只对 0.5 cm 深度处的车辙等效温度有显著影响,地区对各亚层的车辙等效温度均有显著影响。因此,车辙等效温度模型需要考虑地区因素的影响。

### 2.1 面层厚度和地区对各亚层车辙等效温度的影响

首先分析面层厚度和地区对车辙等效温度的影响。以地区 04 为例,不同面层厚度对车辙等效温度的影响如图 3a 所示。以 40 cm 面层厚度为例,不同地区对车辙等效温度的影响如图 3b 所示。

### 2.2 模型基本形式的确定

由图 3a 可知,面层厚度对各亚层车辙等效温度几乎没有影响。以地区 04 为例,选取 32 cm 面层厚度的等效车辙温度数据进行模型建立,以 40 cm 面层厚度的数据对模型进行评价,从而筛选出合适的模型形式。确定三次多项式和有理式 2 种不同的模型形式,分别如式(3)和式(4)所示。拟合结果如图 4 所示。

$$y_{tem} = a_1 + a_2 \cdot d + a_3 \cdot d^2 + a_4 \cdot d^3 \quad (3)$$

$$y_{tem} = \frac{a_1 + a_2 \cdot d + a_3 \cdot d^2 + a_4 \cdot d^3}{1 + a_5 \cdot d + a_6 \cdot d^2 + a_7 \cdot d^3} \quad (4)$$

从图 4 可见,三次多项式和有理式的形式对于 32cm 面层厚度的车辙等效温度均具有非常好的拟

表 4 面层厚度对各亚层车辙等效温度的影响

Tab. 4 Effect of asphalt layer thicknesses on effective temperature for rutting

深度/cm	样本量	统计值	$\rho$ 值	深度/cm	样本量	统计值	$\rho$ 值	深度/cm	样本量	统计值	$\rho$ 值
0.5	80	3.18	0.01	12.5	80	0.02	1.00	24.5	40	0.15	0.93
1.5	80	1.59	0.15	13.5	80	0.05	1.00	25.5	40	0.22	0.89
2.5	80	0.83	0.56	14.5	80	0.11	1.00	26.5	40	0.32	0.81
3.5	80	0.56	0.78	15.5	70	0.05	1.00	27.5	40	0.45	0.72
4.5	80	0.41	0.89	16.5	70	0.10	1.00	28.5	30	0.18	0.84
5.5	80	0.24	0.97	17.5	70	0.19	0.98	29.5	30	0.23	0.80
6.5	80	0.13	1.00	18.5	60	0.13	0.98	30.5	30	0.30	0.74
7.5	80	0.07	1.00	19.5	60	0.24	0.94	31.5	30	0.36	0.70
8.5	80	0.04	1.00	20.5	50	0.09	0.98	32.5	20	0.12	0.73
9.5	80	0.06	1.00	21.5	50	0.15	0.96	33.5	20	0.15	0.71
10.5	80	0.01	1.00	22.5	50	0.23	0.92	34.5	20	0.19	0.67
11.5	80	0.01	1.00	23.5	50	0.37	0.83	35.5	20	0.22	0.65

表 5 地区对各亚层车辙等效温度的影响

Tab. 5 Effect of sites on effective temperature for rutting

深度/cm	样本量	统计值	$\rho$ 值	深度/cm	样本量	统计值	$\rho$ 值	深度/cm	样本量	统计值	$\rho$ 值
0.5	80	24.78	0	12.5	80	3 808.27	0	24.5	40	258.17	0
1.5	80	49.72	0	13.5	80	1 446.92	0	25.5	40	176.80	0
2.5	80	94.78	0	14.5	80	670.63	0	26.5	40	119.25	0
3.5	80	140.11	0	15.5	70	1 354.73	0	27.5	40	85.68	0
4.5	80	186.67	0	16.5	70	674.46	0	28.5	30	163.11	0
5.5	80	323.47	0	17.5	70	349.67	0	29.5	30	125.87	0
6.5	80	599.71	0	18.5	60	430.26	0	30.5	30	95.41	0
7.5	80	1 037.67	0	19.5	60	238.68	0	31.5	30	79.70	0
8.5	80	2 154.96	0	20.5	50	522.02	0	32.5	20	158.56	0
9.5	80	893.15	0	21.5	50	325.41	0	33.5	20	131.00	0
10.5	80	5 334.88	0	22.5	50	203.89	0	34.5	20	104.33	0
11.5	80	8 727.22	0	23.5	50	127.14	0	35.5	20	89.81	0

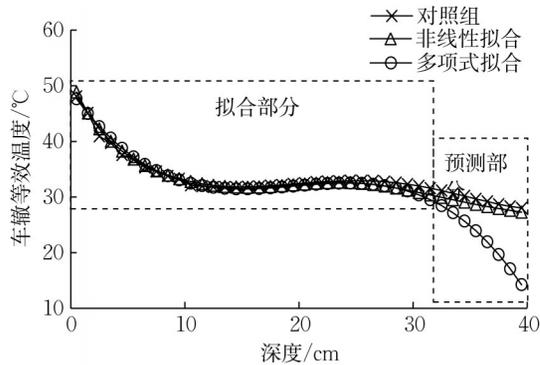


图 4 模型拟合结果

Fig. 4 Evaluation of model on fitting

合效果。但由于多项式模型的外延效果很差,因此本文采用式(4)的形式。

2.3 地区修正因子的确定与模型的建立

由图 3b 可知,不同地区车辙等效温度沿深度的分布具有较好的一致性,方差分析结果则表明地区对各亚层等效温度均有显著影响,因此选取 32 cm 面层厚度的路面结构,计算不同地区车辙等效温度的皮尔逊相关系数,计算结果如表 6 所示。

从表 6 可见,不同地区车辙等效温度的相关系

表 6 不同地区等效车辙温度的相关系数

Tab. 6 Correlation coefficient of effective temperature for rutting in different sites

皮尔逊 相关系 数	地区 01	地区 02	地区 03	地区 04	地区 05	地区 06	地区 07
地区 01	1.000	0.991	0.982	0.988	0.995	0.995	0.974
地区 02	0.991	1.000	0.998	1.000	0.999	0.999	0.995
地区 03	0.982	0.998	1.000	0.999	0.996	0.996	0.999
地区 04	0.988	1.000	0.999	1.000	0.998	0.998	0.997
地区 05	0.995	0.999	0.996	0.998	1.000	1.000	0.992
地区 06	0.995	0.999	0.996	0.998	1.000	1.000	0.991
地区 07	0.974	0.995	0.999	0.997	0.992	0.991	1.000

数为 0.974~1.000,具有很强的线性相关性。为了建立考虑不同地区的车辙等效温度模型,引入地区修正因子,模型的形式如式(5)所示:

$$y_{tem} = K_{site} \frac{a_1 + a_2 \cdot d + a_3 \cdot d^2 + a_4 \cdot d^3}{1 + a_5 \cdot d + a_6 \cdot d^2 + a_7 \cdot d^3} \quad (5)$$

基于计算结果,将地区 04 的地区修正因子  $K_{site}$  设为 1.000,确定了地区 01 到地区 07 的地区修正因子。选取了各地区的年平均温度、年降雨量和相对湿度等与地区相关的气象要素,计算其相关系数,结果如表 7 所示。

表 7 各地区气象要素与地区修正因子的相关性

Tab. 7 Correlation between meteorological elements and site correction factors

地区	$K_{site}$	大气温度/ °C	降水量/ mm	相对湿度/ %	风速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	年太阳辐射/ ( $MJ \cdot m^{-2}$ )	日照时数/ h	紫外强度/ ( $MJ \cdot m^{-2}$ )
01	0.87	6.6	427.9	45.6	4.1	6 195.8	1 721.0	666.8
02	0.998	16.0	1 454.6	72.2	2.7	5 288.3	1 469.0	597.8
03	1.028	21.0	1 506.5	77.8	3.0	5 520.5	1 533.5	647.3
04	1.000	16.3	1 352.9	74.9	3.3	5 155.3	1 432.0	586.3
05	0.928	12.1	775.9	62.6	2.7	5 697.3	1 582.6	617.8
06	0.924	11.2	723.2	51.8	2.1	5 500.3	1 527.9	586.9
07	1.064	22.5	2 102.6	73.8	2.7	5 076.1	1 410.0	600.9
相关系数		0.988	0.983	0.920	-0.324	-0.857	-0.857	-0.380

基于表 7 计算结果,对不同气象要素与地区修正因子的相关性进行排序,从强到弱为:年平均温度、年降雨量、相对湿度、年太阳辐射(日照时数)、紫外强度、风速。考虑到模型的参数需要容易获取,因此最终选取年平均温度和年降雨量这 2 个参数来预估地区修正因子,模型最终的形式和拟合参数如式(6)和式(7)所示:

$$y_{tem} = K_{site} \cdot \frac{51.242 - 0.064 \cdot d - 0.1406 \cdot d^2 + 4.64 \times 10^{-3} \cdot d^3}{1 + 0.099 \cdot d - 0.0098 \cdot d^2 + 2.37 \times 10^{-4} \cdot d^3} \quad (6)$$

$$K_{site} = 0.8085 + 0.0066 \cdot A_{tem} + 5.40 \times 10^{-5} \cdot A_{rain} \quad (7)$$

式中: $A_{tem}$ 为年平均温度,°C; $A_{rain}$ 为年降雨量,mm;

$K_{site}$ 为地区修正因子。

式(6)和式(7)的 $R^2$ 为 0.977,表明本文模型具有较高的精度。

### 3 车辙等效温度模型的评价

#### 3.1 车辙等效温度模型的预测效果

首先,将地区 01 到 07 的年平均温度和年降雨量代入预估模型中,对比分析车辙等效温度计算值和由预估模型计算得到的温度值,如图 5a 所示。同时,为了验证本文建立模型的适用性,使用地区 08 到 10 这 3 个未参与建模的地区来进行验算,如图 5b 所示。

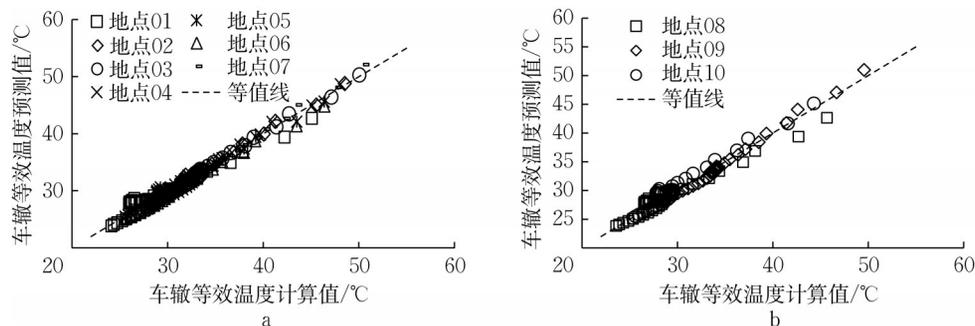


图 5 车辙等效温度的计算值和预测值对比

Fig. 5 Comparison of calculated and predicted values for effective temperature

车辙等效温度计算值为本文方法计算得到的结果,预测值则为通过式(6)和式(7)计算得到的结果。从图 5 可见,地区 01 到地区 10 计算得到的车辙等效温度和预测值均集中分布在等值线的两侧,说明式(6)和式(7)具有较高的精度。

#### 3.2 车辙等效温度模型对车辙深度的预测效果

将车辙等效温度预测值代入式(1)车辙预估模型中,对地区 01 到 10 沥青层累积车辙变形进行预估,并与根据路面小时温度场得到的累积车辙深度

进行对比,地区 01 到 07 的对比结果如图 6a 所示,地区 08 到 10 的对比结果如图 6b 所示。

车辙深度计算值为使用小时温度场数据非线性累加得到的数据,预测值则为使用车辙等效温度计算得到的结果。从图 6 可见,车辙深度的计算值和预测值较为均匀地分布在等值线的两侧,进一步证明了本文模型的适用性。

在建立车辙等效温度模型时,设定基准条件分别为:设计年限为 1 年,行车速度为  $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,上中

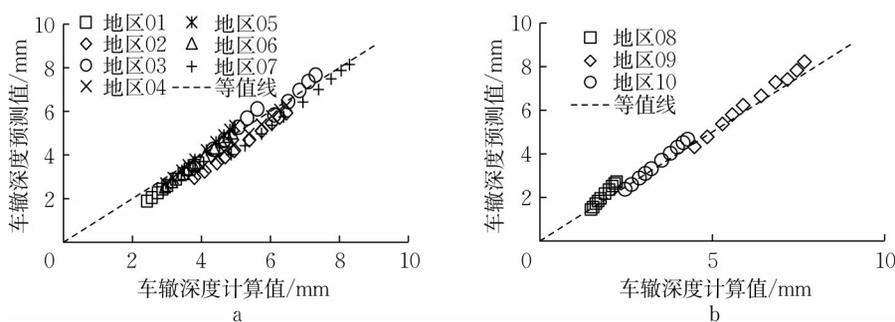


图6 车辙深度的计算值和预测值对比

Fig. 6 Comparison of calculated and predicted values for rutting depth

下面层抗剪强度取值分别为0.8、0.8、0.5 MPa,每小时标准轴载作用次数为1 000次。为了进一步评价车辙等效温度模型的适用性,对上述参数进行敏感性分析。以地区04为例,假定不同年份的温度场均相同,取设计年限为1年、5年、10年和15年,其他基准条件不变。使用2种方法进行计算:①使用小时温度场数据进行非线性累加计算车辙深度;②使用车辙等效温度计算车辙深度,计算结果如图7a所示。同样地,对于行车速度,取20、40、60、80和100  $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 这5种不同的情况,对比结果如图7b所

示。在实际路面工程中,上中面层一般采用改性沥青混合料,下面层材料则采用普通沥青混合料,因此结合实测数据和设计规范<sup>[1,19]</sup>,上中下面层抗剪强度值分别取8种不同的工况:①0.8、0.8、0.5 MPa;②0.8、0.8、0.8 MPa;③0.8、1.2、0.5 MPa;④0.8、1.2、0.8 MPa;⑤1.2、0.8、0.5 MPa;⑥1.2、0.8、0.8 MPa;⑦1.2、1.2、0.5 MPa;⑧1.2、1.2、0.8 MPa。不同工况的对比结果如图7c所示。对于每小时标准轴载作用次数,取值为200、500、1 000、2 000和10 000,计算结果如图7d所示。

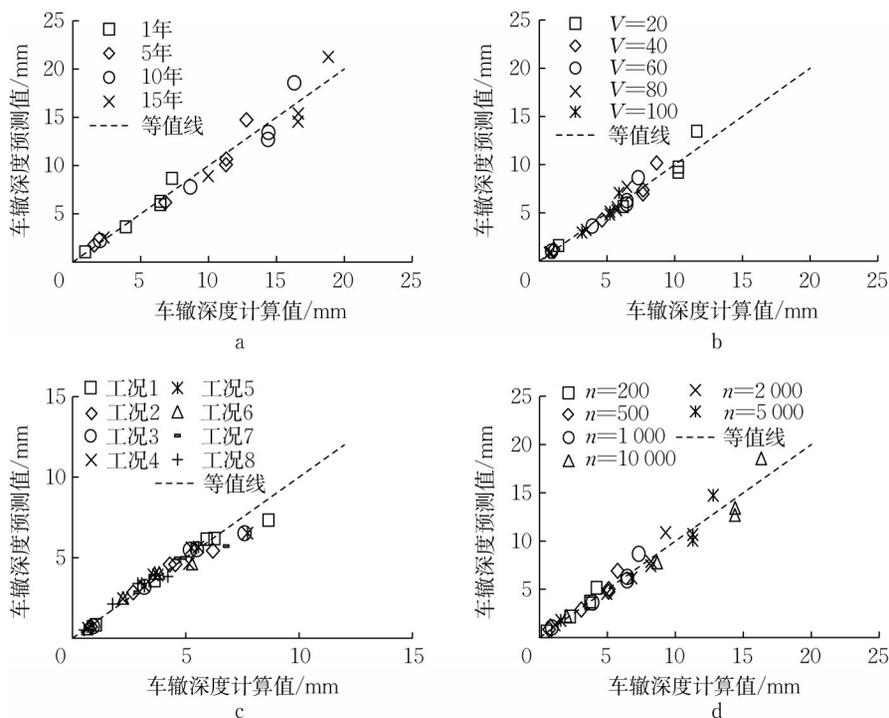


图7 车辙等效温度模型适用性分析

Fig. 7 Applicability analysis of effective temperature model of rutting

从图7可见,不同设计年限、抗剪强度、标准轴载作用次数和行车速度条件下车辙数据均比较好地集中分布在等值线的两侧,说明本文模型对于不同

的设计条件、材料和交通量均具有较好的适用性。此外,货车轮载作用的时间(空间)分布可以通过行车速度和小时标准轴载作用次数这2个参数来体

现,这表明基于本文方法确定的车辙等效温度与货车轮载作用的时间(空间)分布无关。与此同时,验证了不同材料类型(AC-13、BBME-13、SFP-13和EME-20)、不同基层厚度(30、40、50、60 cm)、基层模量(5 000、10 000、20 000、50 000 MPa)、土基模量(30、60、100、200、300 MPa)和面层厚度(10、12、36、40 cm)对车辙深度预测效果的影响,结果与图 7 一致。

为了验证模型对于在役路面车辙深度的预测效果,选取广州、重庆和南京多条高速公路,通过实地调研、钻芯等方式获取路段的交通量、材料和结构等参数<sup>[1]</sup>。将年平均温度和降雨量代入本文模型,可求解得到对应地区的车辙等效温度。进而将车辙深度实测值与利用式(1)计算得到的预测值进行对比,结果如图 8 所示。

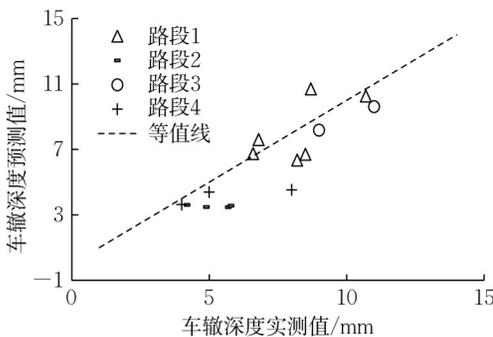


图 8 车辙深度的实测值与预测值对比

Fig. 8 Comparison of measured and predicted values for rutting depth

由图 8 可知,车辙深度实测值与预测值较为均匀地分布在等值线的两侧,表明本文模型对于在役路面车辙深度具有较好的预测效果。

### 3.3 不同车辙等效温度模型对比

对比了 4 种车辙等效温度预测方法,包括 SHRP 模型、NCHRP 模型、文献[7]模型和本文模型。在对比时使用地区 04 的相关数据,如如图 9 所示。

从图 9 可见,SHRP 模型和 NCHRP 模型计算的车辙等效温度随着深度的增加呈现线性减小的趋势,当路面深度较浅时等效温度具有一定的可靠性,随着深度的增加则呈现出较大的误差,不符合路面温度场沿深度的分布规律。文献[7]建立的模型考虑了温度沿深度分布的非线性特性,但由于其模型使用多项式的形式,当沥青层较厚时会有非常大的误差。本文模型不仅考虑了温度沿深度的非线性分布,还考虑了模型的外延性,即对于更厚沥青层的路

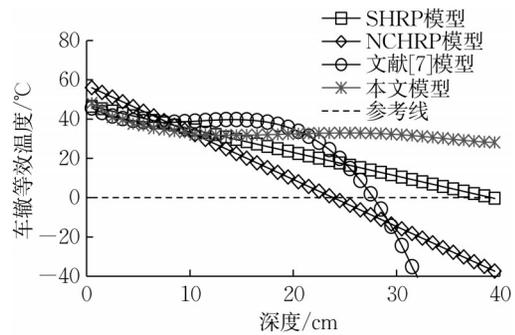


图 9 不同等效温度模型对比

Fig. 9 Comparison of different effective temperature models

面结构,得到的车辙等效温度也在比较合理的区间范围内。综上所述,本文建模型更加合理。

## 4 结论

(1) 基于全厚式沥青路面温度场预估模型和车辙预估模型,根据累积车辙相同的原理,确定了不同地区的车辙等效温度。

(2) 依据方差分析的结果,发现面层厚度只对 0.5cm 深度处的车辙等效温度有显著影响,地区则对各亚层的车辙等效温度均有显著影响。

(3) 针对车辙等效温度沿深度的分布特性,发现有理式比多项式更适合描述等效温度,具有更好的外延性和稳健性,特别是对于面层比较厚的路面结构。

(4) 不同地区的车辙等效温度均具有较好的相关性,通过引入地区修正因子建立了修正因子和年平均温度、年降雨量之间的关系,最终建立了考虑地区差异的车辙等效温度模型。

(5) 通过对不同地区、不同模型参数和不同路面结构进行验证,表明本文模型对于不同的设计条件、材料和交通量具有较好的适用性。

### 作者贡献声明:

杨瑞康:研究构思与设计、模型建立与力学计算、数据分析和解释、论文初稿撰写。

金 添:力学计算、数据收集、数据分析和解释。

刘黎萍:研究内容监管与指导、模型验证与核实、论文审阅与修订。

孙立军:研究内容监管与指导、论文审阅与修订。

袁 江:数据收集、数据分析和解释。

程怀磊:论文审阅与修订。

## 参考文献:

- [1] 孙立军. 沥青路面结构行为学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2013.  
SUN Lijun. Structural behavior of asphalt pavements [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2013.
- [2] TAHER B M, MOHAMED R K, MAHREZ A. A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes [J]. Scientific Research and Essays, 2011, 6(4): 670.
- [3] RAHMAN A A, MENDEZ LARRAIN M M, TAREFDER R A. Development of a nonlinear rutting model for asphalt concrete based on Weibull parameters [J]. International journal of pavement engineering, 2019, 20(9): 1055.
- [4] ALKAISSI Z A. Effect of high temperature and traffic loading on rutting performance of flexible pavement [J]. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2020, 32(1): 1.
- [5] 郑南翔, 牛思胜, 许新权. 重载沥青路面车辙预估的温度—轴载—轴次模型 [J]. 中国公路学报, 2009, 22(3): 7.  
ZHENG Nanxiang, NIU Sisheng, XU Xinquan. Temperature, axle load and axle load frequency model of rutting prediction of heavy-duty asphalt pavement [J]. China Journal of Highway Transportation, 2009, 22(3): 7.
- [6] 吁新华, 谈至明, 胡洪龙, 等. 沥青面层的车辙等效温度 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 701.  
YU Xinhua, TAN Zhiming, HU Honglong, *et al.* Rutting equivalent temperature for asphalt pavement [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(5): 701.
- [7] 李伊, 刘黎萍, 孙立军. 沥青面层不同深度车辙等效温度预估模型 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(6): 1703.  
LI Yi, LIU Liping, SUN Lijun. Prediction model on rutting equivalent temperature for asphalt pavement at different depth [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(6): 1703.
- [8] SOTIL A. Use of the dynamic modulus E test as permanent deformation performance criteria for asphalt pavement systems [D]. Arizona: Arizona State University, 2005.
- [9] ZHU T, MA T, HUANG X. Calculation of effective temperature for pavement rutting using numerical simulation methods [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2016, 32(3): 362.
- [10] 苏凯, 孙立军. 车辙等效温度确定方法探讨 [J]. 大连理工大学学报, 2006(S1): 162.  
SU Kai, SUN Lijun. Discussion of methods for determining effective temperature of rutting [J]. Journal of Dalin University of Technology, 2006(S1): 162.
- [11] WITCZAK M. Effective temperature analysis for permanent deformation of asphaltic mixtures [R]. Washington D C: National Research Council, 1992.
- [12] COMINSKY R J, HUBER G A, KENNEDY T W, *et al.* The superpave mix design manual for new construction and overlays [R]. Washington D C: National Research Council, 1994.
- [13] EI-BASYOUNY M, JEONG M G. Effective temperature for analysis of permanent deformation and fatigue distress on asphalt mixtures [J]. Transportation research record, 2009, 2127(1): 155.
- [14] CONSULTANTS F, University A S. A performance-related specification for hot-mixed asphalt [R]. Washington D C: Transportation Research Board of the National Academies, 2011.
- [15] KIM W J, LEE H J, PHAN H T. Calibration and validation of a rutting model based on shear stress to strength ratio for asphalt pavements [J]. Construction and Building Materials, 2017, 149: 327.
- [16] ZHU J, SUN L, WANG Y, *et al.* Development and calibration of shear-based rutting model for asphalt concrete layers [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(10): 937.
- [17] 李伊, 刘黎萍, 孙立军. 全厚式沥青路面温度场预估模型 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 377.  
LI Yi, LIU Liping, SUN Lijun. Temperature field prediction model for thick asphalt layer [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(3): 377.
- [18] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.  
Research Institute of Highway, Ministry of Transport. Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [19] 中交路桥技术有限公司. 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2017 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.  
CCRB Road & Bridge Technology Co., Ltd. Specifications for design of highway asphalt pavement: JTG D50—2017 [S]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [20] 程怀磊, 李斌, 刘黎萍, 等. 移动轴载作用下路面沥青层动态响应模量主曲线研究 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 125.  
CHENG Huailei, LI Bin, LIU Liping, *et al.* Evaluation of master curve of response-based modulus for asphalt pavement layer under vehicular loading [J]. China Journal of Highway Transportation, 2020, 33(10): 125.
- [21] 程怀磊, 刘黎萍, 孙立军. 沥青混合料铺装层现场模量探究——以钢桥面铺装为例 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(2): 119.  
CHENG Huailei, LIU Liping, SUN Lijun. A case study on evaluating in-situ layer modulus of asphalt pavement [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(2): 119.
- [22] 廖公云, 黄晓明. ABAQUS有限元软件在道路工程中的应用 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2014.  
LIAO Gongyun, HUANG Xiaoming. Application of ABAQUS finite element software in road engineering [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2014.
- [23] GUO J, YANG S, SUN Y, *et al.* Analysis of shear stress and rutting performance of semirigid base asphalt pavement on steep longitudinal slope [J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 4445653.