DOI: 10.15986/j.1006-7930.2019.05.016

基于动态模量和三层式车辙试验的车辙深度预估

杨永红[1]，张尚龙[2,3]，张 倩[2]

(1. 包头市公路局，内蒙古 包头 014040；2. 西安建筑科技大学 土木工程学院，陕西 西安 710055；
3. 河西学院 土木工程学院，甘肃 张掖 734000)

摘要：为研究沥青混合料在动态荷载作用下的车辙变形量，根据沥青混合料动态模量试验及标准车辙试验数据，论证了沥青混合料动态模量指标 $|E^*|/\sin\varphi$ 与车辙变形量间的相关性，引入温度、加载频率、加载应力、有效沥青用量、空隙率及级配参数构建了动态模量预估模型. 然后采用“亚层变形叠加”基本思想，运用基因遗传算法基本原理，建立了包含沥青层厚度、荷载作用次数、动态模量指标 $|E^*|/\sin\varphi$ 等因素的三层式车辙试验车辙深度预估模型. 结果表明：提出的车辙预估模型能较准确地反映三层式车辙试验的车辙变形规律，预估方法对于不同温度区间及不同行车荷载作用下沥青路面车辙问题研究与沥青路面设计具有一定参考价值.

关键词：沥青混合料；动态模量；三层式车辙试验；车辙变形量；预估模型

中图分类号：U416.2 **文献标志码**：A **文章编号**：1006-7930(2019)05-0717-07

Rutting depth prediction based on dynamic modulus and three-layer wheel track rutting test

YANG Yonghong[1], *ZHANG Shanglong*[2,3], *ZHANG Qian*[2]

(1. Baotou Highway Bureau, lnner Mongolia Baotou 014040, China;
2. School of Civil Engineering, Xi′an Univ. of Arch. & Tech, Xi′an 710055, China;
3. School of Civil Engineering, HeXi University, Gansu Zhangye 734000, China)

Abstract: To explore the rut deformation of asphalt mixture under dynamic load, this paper proved the correlation between dynamic modulus indicator $|E^*|/\sin\varphi$ and rut depth of asphalt mixture based on dynamic modulus test and standard wheel track rut test of asphalt mixture. A dynamic modulus prediction model was presented containing mix volumetric parameters and loading parameters. The rutting prediction model was established incorporating factors as asphalt layer thickness, loading number and dynamic modulus indicator $|E^*|/\sin\varphi$ using the thought of sublayer deformation superposition and principle of genetic algorithm. Research shows that the proposed rutting prediction model could accurately reflect the deformation law of three-layer wheel track rutting test. And the prediction method has reference value for the study of asphalt pavement rutting at different temperature gradient and different vehicle loading and the design of asphalt pavement.

Key words: asphalt mixture; dynamic modulus; three layer pavement rutting test; rut depth; prediction model

车辙作为沥青路面的痼疾，严重影响沥青路面的服务水平和车辆的行车安全，如果能较准确地预测车辙变形量，对于车辙预防和有效实施养护具有重要意义. 众多学者通过分析车辙变形机理和影响因素，建立了设计指标与车辙变形量的计算方法，对车辙进行预测. Fwa 等[1]基于沥青混合料的剪切流动变形原理，采用 c-φ 模型建立了车辙预估模型；苏凯等[2]以车辙试验和单轴贯入抗剪试验为基础，建立了以温度、作用次数、剪应力、材料抗剪强度和行车速度等因子的沥青混凝土永久变形预估模型；王海燕等[3]以汉堡车辙试验，根据试验温度、最大剪应力、抗剪强度和加载次数为基础参数，建立了基准速度为 66 km/h 的车辙预估模型；栗培龙等[4]通过汉堡车辙试验建立了以荷载作用次数、试件厚度、温度、混合料力学性能等因子的沥青混合料车辙预估模型. 车辆荷载对路面的作用可视为动态正弦波荷载，而大量的研究者在预估模型中采用静态指标未能真

收稿日期：2018-01-23 **修改稿日期**：2019-09-19

基金项目：陕西省交通运输厅交通科技基金项目(16-14K)；陕西省高性能混凝土工程实验室开放基金课题(SHPC201704)；浙江省交通运输厅科研计划基金项目(2015J19)；内蒙古自治区交通运输科技基金项目(NJ-2014-23)

第一作者：杨永红(1980－)，男，工程师，主要从事道路工程养护、施工技术方面的研究. E-mail: 396189549@qq.com

实地反映沥青路面的工作状态. 因此，在沥青路面结构设计及车辙预估时选择能够反映沥青混合料真实动力响应特性的设计指标[5,6]，能够更合理地反映沥青路面的受力特性. 我国《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)[7]推荐采用动态模量作为沥青路面设计和评价分析的参数.

文献[8-10]表明沥青混合料动态模量指标 $|E^*|/\sin\varphi$ 与其高温稳定性关系密切. 本文首先通过对沥青混合料动态模量试验和标准车辙试验结果的分析，验证动态模量指标 $|E^*|/\sin\varphi$ 与车辙变形量的相关性；然后，建立计算模型，得到了考虑沥青混合料体积设计指标、加载频率、试验温度、竖向压应力等因素作用下三层式车辙试件各亚层动态模量值[11]；最后，结合三层式车辙试验数据，采用“亚层变形叠加”思想，根据基因遗传算法基本原理，建立了包含沥青层厚度、荷载作用次数、动态模量等因子的三层式车辙试验变形量预估模型，并对模型参数进行了修正[2].

1 动态模量指标与车辙变形量的相关性验证

动态模量 $|E^*|$ 能够反映沥青混合料恢复弹性变形的能力，相位角 φ 则反映沥青混合料抗剪切变形的能力，表征其粘性特性. 动态模量指标 $|E^*|/\sin\varphi$ 可综合反映沥青混合料粘弹性特性和抗永久变形能力. 动态模量指标 $|E^*|/\sin\varphi$ 越大，沥青混合料弹性性质越显著，高温时流动变形越小，抗永久变形能力越强. 动态模量指标 $|E^*|/\sin\varphi$ 较小时，沥青混合料粘性较显著，高温时流动变形较大，很容易发生车辙病害.

美国路面长期研究计划 LTPP 对开挖路段车辙变形量进行了观测，在不同路段钻芯取样，对试样进行动态模量试验，试验结果如图 1. 由图 1 可知：S161、S162 和 S164R 路段动态模量指标较低，车辙变形量大；S122、S113、S164NR 和 S166 路段动态模量指标较高，车辙变形量小. 表明沥青混合料动态模量可以作为评价材料高温抗车辙性能的指标. 本文对 SMA-13、AC-20 和 ATB-30 三种沥青混合料进行了不同条件下室内动态模量试验和标准车辙试验，对试验结果进行回归分析如图 2. 由图 2 可知：随着温度升高，同种沥青混合料动态模量指标值降低，抗车辙能力降低，表明沥青混合料动态模量指标与其高温抗车辙性能有较高相关性，能反映其抗车辙性能的好坏，可作为评价和预测其高温性能的指标.

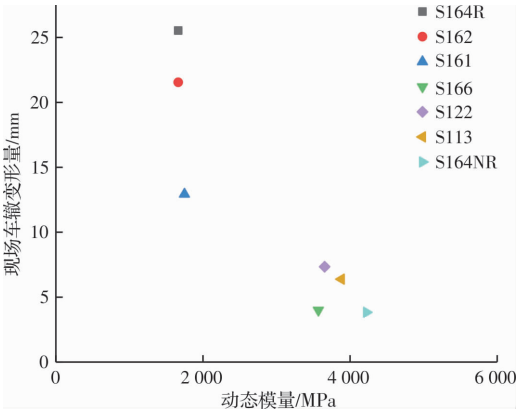

图 1 LTPP 动态模量与试验段车辙变形量的关系

Fig. 1 Relationship between dynamic modulus and rut depth of LTPP test

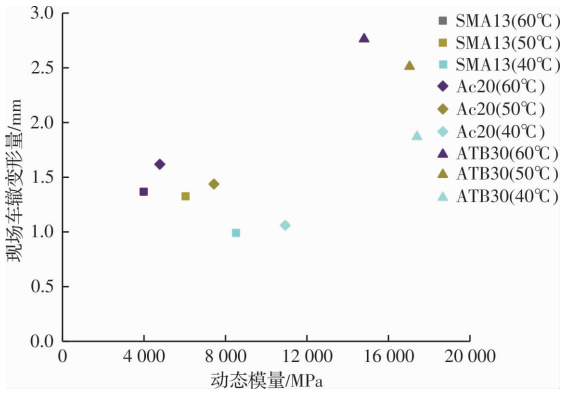

图 2 动态模量与标准车辙试验变形量的关系

Fig. 2 Relationship between dynamic modulus and rut depth of standard rutting test

2 三层式车辙试验及沥青面层各亚层动态模量的确定

2.1 三层式车辙试验

利用改进车辙试验仪的温度区间控制系统以及变速变载功能进行车辙试验[12-13]，成型结构为 4cm SMA-13＋6cm、AC-20＋14cm、ATB-30 的三层式车辙试件，材料指标及级配等详见文献[13]. 对此路面结构，分别进行 20～45 ℃和 20～60 ℃两种温度区间下的重载低速车辙试验，以及温度区间为 20～60 ℃条件下的重载常速和常载常速车辙试验. 设置温度控制系统，将试模底部的循环水温度保温为 20 ℃，将环境箱温度设置为相应温度区间的最高温度，保温时间≥12 h，至外部温度检测仪显示试件内各测点处温度保持稳定不变，即视为达到试验设计的恒定温度区间. 表 1 为不同温度区间下，温度检测仪采集的恒温后试件内各测点处的温度. 表 2 为不同试验条件下，三层式车辙试验结果.

表 1　不同温度区间下恒温后试件内各测点温度值

Tab. 1　Temperature of each point in specimen under different temperature gradient

结构层	SMA-13		AC-20		ATB-30		
距表层相应深度/cm	0	3	7	13	18	22	24
各测点温度值/ ℃	45	43	38	31	26.9	23	20
	60	52.2	43.2	34.2	28.4	24.4	20

表 2　不同条件下三层式车辙试验结果

Tab. 2　Test results of three-layer rutting test under different conditions

	A 条件	B 条件	C 条件	D 条件
试验条件	温度场 20～45 ℃ 轮压 0.7 MPa 轮载作用次数 42 次/min	温度场 20～60 ℃ 轮压 0.7 MPa 轮载作用次数 42 次/min	温度场 20～60 ℃ 轮压 1.3 MPa 轮载作用次数 42 次/min	温度场 20～60 ℃ 轮压 1.3 MPa 轮载作用次数 21 次/min
车辙变形量/mm	2.211	2.392	2.451	2.770

2.2　沥青面层各亚层动态模量确定

根据 Sigmoidal 函数模型、Witczak 预估模型及 Hirsch 预估模型基本方法，由 SMA-13、AC-20 和 ATB-30 三种混合料分别在 5 ℃、20 ℃、40 ℃、50 ℃和 60 ℃时，在不同加载频率下的动态模量试验数据(详见文献[13])，对动态模量的影响因素作相关性分析论证后，选择温度 T、加载频率 f、加载应力 P、有效沥青用量 V_{beff}、空隙率 VV、9.5 mm 筛孔累计筛余 ρ_{38}、4.75 mm 筛孔累计筛余 ρ4 、0.075 mm 筛孔通过率 ρ_{200}等主要影响因素，采用 Levenberg-Marquadt 通用全局优化算法对动态模量进行预估，得到动态模量预估模型式(1).

$$\lg|E^*| = \frac{1.503\ 34 - 0.004\ 04\rho_4 - 0.018\ 19\rho_{200}^2}{1+e^{0.067\ 79T-1.113\ 091lgf-2.984\ 01}} - \frac{0.064\ 06V_{beff}}{V_{beff}+VV} - 0.005\ 46VV + 0.400\ 97P^{0.205\ 52} + 0.037\ 66\rho_{38} - 0.000\ 46\rho_{38}^2 + 0.008\ 09\rho_4 + 0.183\ 72 \tag{1}$$

根据表 1 中数据，采用 3 阶多项式拟合得到的三层式面层结构在各温度区间下，各亚层的温度代表值，如表 3、表 4；采用 Abaqus 有限元模拟软件在面层结构承受不同轮压时，计算出的三层式车辙试件内各亚层的竖向压应力代表值，如表 5. 采用沥青混合料动态模量和相位角预估模型[13]得到各亚层动态模量代表值如表 6.

表 3　温度区间 20～45 ℃时三层式车辙试件内各亚层温度代表值

Tab. 3　Representative temperature of eachsublayer in the three-layer samples at temperature gradient 20～45 ℃

深度/cm	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5
温度/ ℃	44.9	43.9	42.9	41.8	40.8	39.7	38.7	37.6	36.5	35.5	34.4	33.3
深度/cm	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	21.5	22.5	23.5
温度/ ℃	32.3	31.2	30.1	29.1	28.0	27.0	26.0	24.9	23.9	22.9	21.9	20.9

表 4　温度区间 20～60 ℃时三层式车辙试件内各亚层温度代表值

Tab. 4　Representative temperature of eachsublayer in three-layer samples at temperature gradient 20～60 ℃

深度/cm	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5
温度/ ℃	58.7	55.8	53.1	50.6	48.3	46.2	44.2	42.4	40.7	39.2	37.7	36.4
深度/cm	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	21.5	22.5	23.5
温度/ ℃	35.1	33.9	32.7	31.5	30.4	29.3	28.1	26.9	25.7	24.4	23.0	21.6

注：亚层厚度为 1 cm，以亚层中点的温度值作为温度代表值.

表5 三层式车辙试件内各亚层压应力代表值

Tab. 5 Representative compressive stress of eachsublayer in three-layer rutting samples

三层式车辙板试件各面层	亚层/cm	各亚层内压应力/MPa	
		轮压0.7 MPa	轮压1.3 MPa
上面层	0～1	0.622	1.182
	1～2	0.481	0.874
	2～3	0.376	0.593
	3～4	0.270	0.438
中面层	4～5	0.182	0.346
	5～6	0.153	0.286
	6～7	0.132	0.244
	7～8	0.115	0.212
	8～9	0.102	0.188
	9～10	0.092	0.170
	10～11	0.084	0.156
	11～12	0.078	0.145
下面层	12～13	0.073	0.136
	13～14	0.069	0.128
	14～15	0.066	0.122
	15～16	0.063	0.117
	16～17	0.061	0.113
	17～18	0.059	0.110
	18～19	0.057	0.107
	19～20	0.056	0.105
	20～21	0.055	0.103
	21～22	0.054	0.101
	22～23	0.053	0.100
	23～24	0.052	0.098

注：以亚层中点的压应力值作为应力的代表值.

表6 不同条件下三层式车辙试件各亚层动态模量值

Tab. 6 Dynamic modulus for eachsublayer of three-layer samples under different conditions

亚层/cm	动态模量值/MPa			
	条件A	条件B	条件C	条件D
0～1	5 609.31	6 031.58	9 408.45	8 307.19
1～2	5 062.85	5 610.15	8 270.16	7 300.38
2～3	4 263.27	5 253.01	6 914.64	6 119.48
3～4	3 452.28	4 691.01	6 153.24	5 471.91
4～5	2 789.09	4 014.53	5 977.72	5 053.65
5～6	2 555.13	3 915.38	5 683.99	4 845.63
6～7	2 366.66	3 850.79	5 485.00	4 718.78

续表 6

亚层/cm	动态模量值/MPa			
	条件 A	条件 B	条件 C	条件 D
7～8	2 190.99	3 777.02	5 324.77	4 622.11
8～9	2 024.18	3 713.65	5 206.60	4 560.07
9～10	1 902.14	3 669.04	5 106.18	4 505.82
10～11	2 112.86	4 102.81	5 139.05	4 657.68
11～12	2 085.37	4 109.94	5 122.79	4 674.94
12～13	2 060.58	4 123.00	5 117.83	4 703.57
13～14	2 048.51	4 133.17	5 114.01	4 728.85
14～15	2 040.41	4 145.45	5 116.86	4 761.13
15～16	2 032.48	4 162.08	5 124.54	4 798.80
16～17	2 031.92	4 173.78	5 130.56	4 830.39
17～18	2 031.56	4 188.29	5 139.19	4 863.61
18～19	2 030.76	4 206.19	5 154.80	4 906.34
19～20	2 034.47	4 223.76	5 171.20	4 947.39
20～21	2 033.48	4 237.90	5 185.03	4 986.56
21～22	2 033.01	4 252.22	5 196.34	5 025.58
22～23	2 028.24	4 261.67	5 204.74	5 060.70
23～24	2 019.86	4 263.63	5 200.80	5 083.76

3　三层式车辙试验的车辙深度预估模型

3.1　建立车辙预估模型

通过车辙影响因素分析，在车辙预估模型中用幂函数的形式将动态模量指标、沥青层厚度、轮载作用次数等主要因素引入，根据“亚层变形叠加”原理[14]，提出车辙预估模型如式(2).

$$RD = \sum_{i=1}^{n} \Delta R\, D_i = \sum_{i=1}^{n} \alpha \cdot H_i \beta \cdot N\delta \cdot (|E^*|_i / \sin\varphi_i) n \tag{2}$$

式中，RD 为沥青面层的总车辙变形量(mm)；$\Delta R D_i$ 为各亚层的车辙变形量(mm)；H_i 为各亚层的厚度(cm)；N 为轮载的作用次数；$|E^*|_i$ 为各亚层的动态模量(MPa)；φ_i 为各亚层的相位角值(°)；n 为亚层的层数，试验中亚层的厚度为 1 cm.

根据三层式车辙试验数据和表 6 沥青面层各亚层动态模量值，建立优化模型确定预估模型中的相关系数，得出目标函数如式(3).

$$\sum (RD_{实测} - \sum_{i=1}^{n} \Delta RD_i)^2 \rightarrow \min|_{n\to\infty} \tag{3}$$

式中，$RD_{实测}$ 为三层式车辙试验车辙变形量.

车辙预估模型式(2)中有 α、β、δ、n 四个待定参数，本文参考遗传算法基本原理[15]编写 Matlab 程序对参数进行拟合. 将 4cm SMA－13＋6cm AC－20＋14cm ATB－30 三层式车辙试件置于温度区间为 20～60 ℃、轮压为 0.7Mpa、轮载作用次数为 42 次/min 的条件下，进行车辙试验，记录数据(每 1 min 得到 21 组数据，每次车辙试验可得 1 260 组数据). 根据试验数据，运用优化程序拟合和确定模型中系数 α、β、δ 和 n 分别为 0.834 6、1.135 6、0.270 和 0.116 5，得出预估模型如式(4).

$$RD = \sum_{i=1}^{n} \Delta RD_i = \sum_{i=1}^{n} 0.834\,6\, H_i^{1.135\,6} N^{0.270} \left(\frac{|E^*|_i}{\sin\varphi_i}\right)^{0.116\,5} \tag{4}$$

3.2　修正车辙预估模型

为验证车辙预估模型式(4)的适用性，将三层式车辙试件置于温度区间为 20～60 ℃，轮压为 1.3 MPa，轮载作用次数分别为 42 次/min、21 次/min 的试验条件下的进行车辙试验，比较实测值与车辙预估值，如图 3 和图 4.

由图 3 和图 4 可知，试件在温度区间为 20～60 ℃、轮压为 1.3 MPa、轮载作用次数为 42 次/

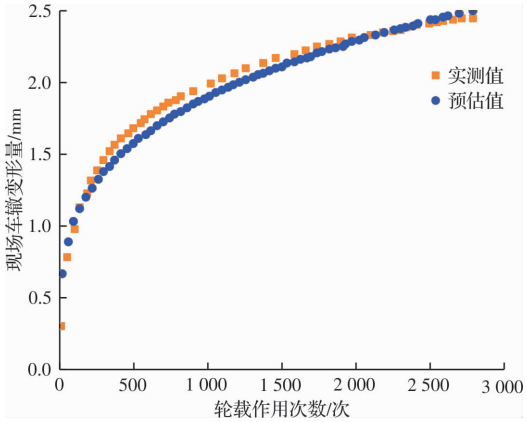

图 3 预估值和实测值的比较图
(20～60 ℃，1.3MPa，42 次/min)

Fig. 3 Comparison of predicted and measured rut depth
(20～60 ℃，1.3MPa，42times/min)

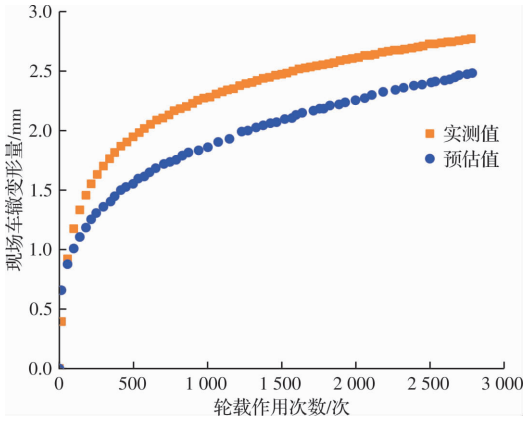

图 4 预估值和实测值的比较图
(20～60 ℃，1.3MPa，21 次/min)

Fig. 4 Comparison of predicted and measured rut depth
(20～60 ℃，1.3MPa，21times/min)

min 的条件下，通过预估模型计算出的车辙变形量与实测值差异较小. 在温度区间为 20～60 ℃、轮压为 1.3 MPa、轮载作用次数为 21 次/min 条件下，实测值与预估值出现明显偏差，预估终值与实测终值差值约为 0.3 mm，实测值比预估值大 10%. 其原因可能是样本数量有限，实测值与预估值出现了一定的偏差，同时也表明轮载作用次数对车辙变形量的影响比较显著. 综上所述，预估模型式(4)可以用来预估沥青路面的车辙变形量，但具有一定的局限性，预估模型还需进一步优化.

将三层式车辙试件置于温度区间为 20～45 ℃、轮压为 0.7MPa、轮载作用次数 42 次/min 条件下进行车辙试验，结合上述四次试验数据对预估模型中的相关系数再次进行优化，拟合结果：α 为 0.832 5，β 为 1.104，δ 为 0.246，n 为 0.125，得到预估模型式(5)：

$$RD = \sum_{i=1}^{n} \Delta R\ D_i = \sum_{i=1}^{n} 0.832\ 5\ H_i^{1.104} N^{0.246} \left(\frac{|E^*|_i}{\sin \varphi_i}\right)^{0.125} \tag{5}$$

图 5～图 8 为不同试验条件下三层式车辙试件车辙试验实测值与优化后车辙预估模型预估值的对比.

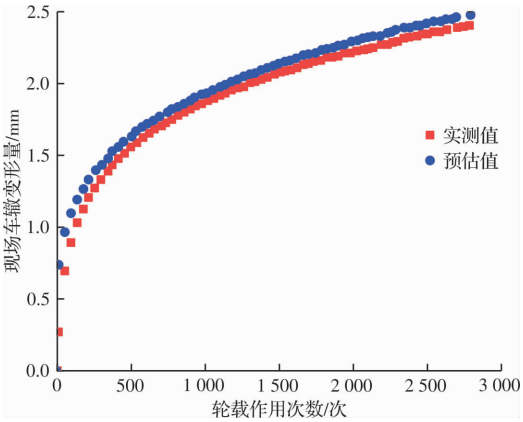

图 5 预估值和实测值的比较
(20～60 ℃，0.7 MPa，42 次/min)

Fig. 5 Comparison between predicted and measured rut depth (20～60 ℃，0.7 MPa，42times/min)

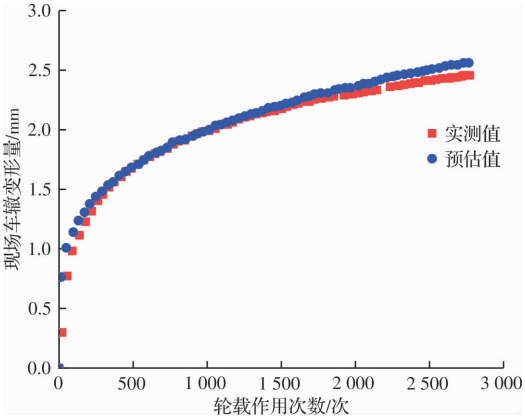

图 6 预估值和实测值的比较
(20～60 ℃，1.3 MPa，42 次/min)

Fig. 6 Comparison between predicted and measured rut depth (20～60 ℃，1.3 MPa，42times/min)

由图 5 ～ 图 8 可知，在不同试验条件下三层式车辙试件的车辙变形量的预估值与实测值较为接近，表明优化后的车辙预估模型与车辙试验结果具有较高的一致性，在不同的试验条件下都能较准确的描述此类路面结构在不同温度、不同轮压和不同轮载作用次数作用下的车辙变形特性.

4 结论

(1)在车辙预估模型中引用动态模量指标，能够较好地反映沥青混合料在车辙产生条件下的材料动力响应特征，进而能更真实反映沥青面层材料复合结构的动力特性及力学响应.

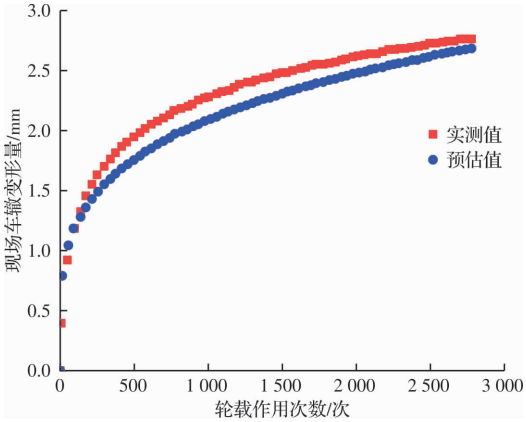

图 7　预估值和实测值的比较
(20～60 ℃，1.3 MPa，21 次/min)

Fig. 7　Comparison between predicted and measured rut depth(20～60 ℃，1.3 MPa，21times/min)

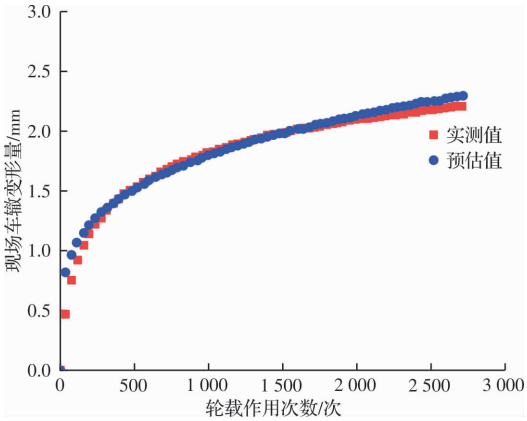

图 8　预估值和实测值的比较
(20～45 ℃，0.7 MPa，42 次/min)

Fig. 8　Comparison between predicted and measured rut depth(20～45 ℃，1.3 MPa，42times/min)

(2)本文验证了沥青混合料动态模量指标与高温车辙变形量的相关性，经过验证后可将动态模量指标作为沥青路面设计和性能评价的指标. 根据动态模量实验结果，引入温度、轮压、轮载作用次数、有效沥青用量，空隙率，不同孔径筛孔累计筛余等影响因素进行动态模量预估，将动态模量指标用于车辙预估，即在车辙预估模型中引入了以上参数.

(3)在车辙预估模型中引入动态模量、沥青层厚度、轮载作用次数等主要变量，建立了基于动态模量和三层式车辙试验结果的车辙预估模型，该模型对此类路面结构车辙变形预估有较高精度，可在一定程度上反映此类路面结构的车辙变形特性.

(4)本研究的下一步工作将根据室外沥青路面相关的车辙数据，进一步对预估模型方程式(5)进行修正，使室内三层式车辙预估模型能够应用于沥青路面的车辙预估.

参考文献　References

[1] FWA T F, TAN S A, ZHU LY. Rutting prediction of asphalt pavement payer using C-φ model [J]. Journal of Transportation Engineering, 2004, 130(5): 675-683.

[2] 苏凯，孙立军. 沥青混凝土永久变形预估方法研究[J]. 建筑材料学报，2007，10(5)，510-515.
SU Kai, SUN Lijun. A new method for predicting deformation of asphalt concrete [J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(5), 510-515.

[3] 王海燕，纪小平，王延海，等. 车辙预估模型研究[J]. 公路，2015，60(2)：40-45.
WANG Haiyan, JI Xiaoping, WANG Yanhai, et al. Research on the prediction model of rutting for asphalt mixture [J]. Highway, 2015, 60(2): 40-45.

[4] 栗培龙，李洪华，张争奇，等. 沥青混合料车辙进程影响因素及预估模型研究[J]. 交通运输工程学报，2011，33(7)，57-61.
LI Peilong, LI Honghua, ZHANG Zhengqi, et al. Research on influencing factors and prediction model of rutting process for asphalt mixture [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 33(7): 57-61.

[5] 王旭东，沙爱民，许志鸿. 沥青路面材料动力特性与动态参数[M]. 北京：人民交通出版社. 2002.
WANG Xudong, SHA Aimin, XU Zhihong. The dynamic characteristics and dynamic Parameters of asphalt pavement materials [M]. Beijing: China Communication Press.

[6] 冉隆举，陈斯宁，罗辉，等. 全厚度车辙试验与足尺加速加载试验相关性研究[J]. 公路，2015，60(12)：51-55.
RAN Longju, CHEN Sining, LUO Hui, et al. Research on the correlation between full-thickness rutting test and full-scale accelerated loading test [J]. Highway, 2015, 60(12): 51-55.

[7] 交通部公路科学研究所. 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. 11
China Academy of Transportation Science. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: China Communication Press, 2011. 11

[8] 胡霞光，李德超，田莉. 沥青混合料动态模量研究进展[J]. 中外公路，2007，27(1)：132-136.
HU Xiaguang, LI Dechao, TIAN Li. The research improvement on the dynamic modulus of asphalt mixture [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27(1): 132-136.

(下转第 762 页)

characteristics of smoke from incense burning [J]. Building Science, 2010, 26(6): 18-24.

[12] SEE S W, BALASUBRAMANIAN R. Characterization of fine particle emissions from incense burning [J]. Building and Environment, 2011, 46: 1074-1080.

[13] HSUEH H T, KO T H, CHOU W C, et al. Health risk of aerosols and toxic metal from incense and joss paper burning [J]. Environmental Chemistry Letters, 2012, 10(1): 79-87.

[14] 杨秀峰, 亢燕铭. 单区静电净化器性能研究 [J]. 建筑热能通风空调, 2012, 31(6): 40-43.
YANG Xiufeng, KANG Yanming. Investigation of single-stage electrostatic cleaners' performances [J]. Building Energy & Environment, 2012, 31(6): 40-43.

[15] 杨华, 刘清珺, 曲晶明. 空气净化器净化燃香源$PM_{2.5}$的性能与效果评价 [J]. 环境工程, 2016, 34(6): 90-94.
YANG Hua, LIU Qingjun, QU Jingming. Performance assessment and removal effect of PM2.5 from source of incense burning by air cleaners [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(6): 90-94.

[16] 中国标准化研究院. 室内空气质量标准: GB/T 18883-2002 [S]. 北京:中国标准出版社,2002.
China National Inistitate of standardization Indoor air quality standard: GB/T 18883-2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.

[17] ZHANG Y P, MO J H, LI Y G, et al. Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality? A literature review [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(26): 4329-4343.

[18] 崔晶晶, 杨学宾, 沈恒根, 等. 不同过滤单元的室内空气净化器试验研究 [J]. 暖通空调, 2017, 47(2): 54-59.
CUI Jingjing, YANG Xuebin, SHEN Henggen, et al. Experimental study on indoor air cleaner based on different types of air filter unit [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2017, 47(2): 54-59.

(编辑 沈 波)

(上接第723页)

[9] 何昌轩,樊英华,郑晓光. 沥青混合料动态模量试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(4):555-558.
HE Changxuan, FAN Yinghua, ZHENG Xiaoguang. Test study on dynamic modulus of asphalt mixture [J]. Journal of Chong Qing Jiao Tong University (Natural Science), 2010, 29(4):555-558.

[10] 刘红,孔永健,曹东伟. 加入聚酯纤维对沥青混合料动态模量的影响[J]. 公路交通科技,2011. 28(8):25-29.
LIU Hong, KONG Yongjian, CAO Dongwei. Influence of adding polyester fiber on dynamic modulus of asphalt mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011. 28(8): 25-29.

[11] 张倩,张尚龙,李彦伟,等. 考虑温度场和可变荷载的沥青面层三层式车辙试验[J]. 公路交通科技,2013,30(10):18-22.
ZHANG Qian, ZHANG Shanglong, LI Yanwei, et al. Total-thickness rutting tests research of asphalt pavement surface considering temperature field and load changes [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(10):18-22.

[12] 关宏信,张起森,罗增杰. 考虑温度区间沥青路面面层三层式车辙试验[J]. 土木工程学报, 2011, 44(6), 143-147.
GUANG Hongxin, ZHANG Qishen, LUO Zhengjie. Total-thickness laboratory rut tests for asphalt surface course under temperature gradient [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(6), 143-147.

[13] 张尚龙. 基于动态模量的沥青混合料车辙预估模型研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2014.
ZHANG Shanglong. Research of asphalt mixture rutting prediction model based on dynamic modulus [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2014.

[14] 苏凯,王春晖,周刚,等. 基于加速加载试验的沥青路面车辙预估研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(4): 493-497.
SU Kai, WANG Chunhui, ZHOU Gang, et al. Rutting prediction model for asphalt concrete pavements based on accelerated pavement test [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, 36(4): 493-497.

[15] 王小平,曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.
WANG Xiaoping, CAO Liming. Genetic algorithm ga: theory, application and software implementation [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.

(编辑 沈 波)