

文章编号:1671-8879(2013)06-0001-07

# 基于数理统计方法的 MEPDG 车辙预估模型校正

汪海年<sup>1</sup>, 张琛<sup>1</sup>, 尤占平<sup>2</sup>, 陈兴伟<sup>3</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 密歇根理工大学 土木工程与环境学院, 密歇根 霍顿 49931;

3. 路易斯安那州交通与发展部, 路易斯安那 巴吞鲁日 70803)

**摘要:** AASHTO 新力学经验法路面设计指南(MEPDG)的车辙预估模型具有较好的科学性与准确性,但其预估模型仅基于美国长期路面性能(LTPP)观测结果,其在中国的适用性仍有待进一步验证。基于规划求解原理,采用数理统计方法对陕西省某高速公路 25 条试验段的车辙实测数据进行分析,对 MEPDG 半刚性基层沥青路面车辙预估模型的参数进行校正,提出了考虑当地气候条件、交通荷载与参数校正的车辙预估校正模型,并分析了该模型的适用条件。研究表明:采用数理统计方法对多条试验路车辙数据的拟合,可大大提高 MEPDG 车辙预估模型的预测精度;基于规划求解原理得到的 MEPDG 车辙预估模型的陕西省校正系数,对陕西省类似路面结构的高速公路具有良好的适用性;建立的 MEPDG 车辙预估校正模型集参数输入与校正模型为一体,为 MEPDG 在陕西省乃至中国其他高速公路上的应用提供了参考。

**关键词:** 道路工程;MEPDG;车辙;预估模型;规划求解

**中图分类号:** U416.217

**文献标志码:** A

## Calibration of rutting prediction model in MEPDG based on mathematical statistics method

WANG Hai-nian<sup>1</sup>, ZHANG Chen<sup>1</sup>, YOU Zhan-ping<sup>2</sup>, CHEN Xing-wei<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University,

Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Civil and Environmental Engineering Department, Michigan

Technological University, Houghton 49931, Michigan, USA;

3. Louisiana Department of Transportation and Development, Batonrouge 70803, Louisiana, USA)

**Abstract:** The rutting prediction models in MEPDG have better science and accuracy. Since these prediction models were developed and calibrated based on test results of LTPP in North American, the feasibility of these models in China needs to be verified. Based on plan solution theory and adopting the method of mathematical statistics, the data from 25 field sections at an expressway in Shaanxi province was analyzed and the parameters of rutting prediction models for semi-rigid pavement were calibrated. Then the rutting prediction models which takes local climatic conditions, traffic loading and parameters calibration into consideration has been present. The results indicated that the calibrated HMA rutting model improved the rutting prediction accuracy; the calibrated factors based on plan solution theory has good applicability for pavements with sim-

收稿日期:2012-11-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51178056)

作者简介:汪海年(1977-),男,江苏涟水人,副教授,工学博士,E-mail:wanghn@chd.edu.cn。

ilar structure in Shaanxi province; the established prediction model sets parameters input and calibration model as a whole, which provide a reference for MEPDG method used in the other highway in Shaanxi province and even in China. 5 tabs, 5 figs, 18 refs.

**Key words:** road engineering; MEPDG; rutting; prediction model; plan solution

## 0 引言

中国高速公路沥青路面车辙永久变形已成为高速公路路面早期损坏的主要形式之一,造成较大的经济损失和不良的社会影响。近年来,国内外道路工作者对车辙问题进行了大量的研究,提出了各种车辙预估方法<sup>[1-3]</sup>。然而,在现有的沥青路面车辙预估模型中,车辙预估方法多数是建立在应力应变分析的基础上,并且考虑因素也较为单一。

AASHTO 新力学经验法路面设计指南(MEPDG)综合考虑了交通、气候和路面结构等多因素。对道路设计使用年限内的车辙、纵向裂缝、国际平整度 IRI 以及路面龟裂等路面病害进行预测,且具有较好的科学性与准确性。国内外学者针对 MEPDG 设计方法也做了相关研究,Retherford 等对 MEPDG 中的各种可靠度分析方法进行了分析对比,阐述了各种方法的优缺点,分别利用力学经验法和蒙特卡罗模拟为这些可靠度分析方法建立极限破坏状态,并将结果作比较,研究表明两者呈线性相关<sup>[4]</sup>;Breakah 等对特定区域中 MEPDG 气候数据精确度的重要性进行研究,并将设计指南中现有的气候数据进行内插,然后与爱荷华州气象环境中心的气候资料同时应用于车辙、热裂解以及 IRI 的预测<sup>[5]</sup>;本文作者基于美国 AASHTO 新力学经验法路面设计的研究成果,阐述了沥青路面平整度发展规律,并借助拉丁超立方抽样方法和多元回归分析等计算机模拟技术,对沥青路面国际平整度指数(IRI)敏感性进行研究<sup>[6]</sup>。然而,MEPDG 基本上都是在美国本土进行研究,很少有关于 MEPDG 在中国应用的报道。究其原因在于,MEPDG 的预测原理是基于美国长期路面性能(LTPP)、分布美国 2 200 个试验段的观测结果,在不同的区域进行 MEPDG 的应用时,必须采用当地的数据对程序提供的设计模型进行标定。为此,本文基于规划求解原理,采用数理统计方法,以陕西省某高速公路为例,基于 MEPDG 的高速公路半刚性基层沥青路面车辙预估模型,对其校正方法与适用性进行研究。

## 1 研究路线

本研究基于 Excel 规划求解程序,采用数理统

计方法对 MEPDG 中的车辙预估模型进行了本地校正研究。通过对陕西省某高速公路 25 条试验段的车辙实测数据和 MEPDG 车辙预测结果的对比分析,最终建立了集参数输入与校正模型一体化的 MEPDG 车辙预估校正模型。详细技术路线如图 1 所示。

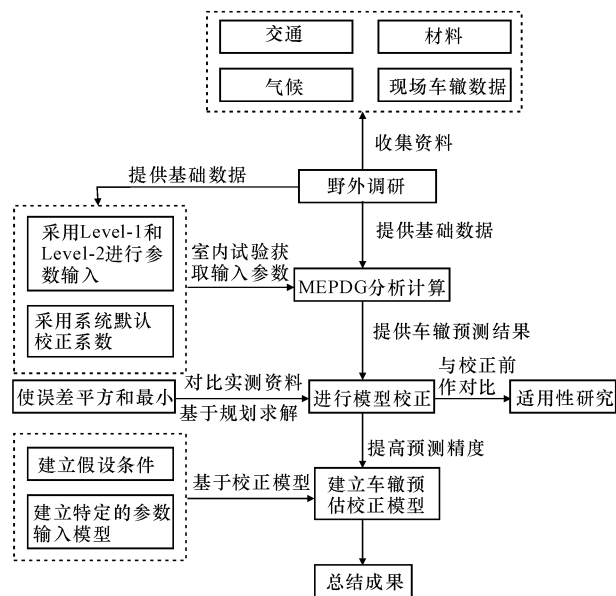


图 1 技术路线

Fig. 1 Technical route

## 2 MEPDG 输入参数的处理

MEPDG 路面设计理论源于美国,其核心理念在于综合考虑交通、气候和路面结构等多因素进行道路设计使用年限内的车辙、纵向裂缝、国际平整度 IRI 以及路面龟裂等路面病害发育状况的预测<sup>[7-9]</sup>。因此,在 MEPDG 的研究过程中,输入参数的收集与处理是一个重要环节。同时,MEPDG 输入参数的精确度也与预测结果的可靠性有直接联系。MEPDG 的输入参数可分为路面结构和材料参数、交通参数以及气候参数。这些设计参数分 3 个等级的输入:第 1 等级 Level-1 是用于重交通路面设计,参数主要通过实验室或现场试验、现场交通轴载测定以及现场无损试验等方法获取,具有最高的设计可靠度;第 2 等级 Level-2 为中等精度参数输入,适用于当一级输入参数条件不具备的时候,具有中等的设计可靠度;第 3 等级 Level-3 则采用地区典型

平均值作为输入参数,设计可靠度较低。本研究采用 Level-1 的参数输入水平来进行 MEPDG 车辙预估模型校正。

2.1 路面结构和材料参数

陕西省交通运输厅曾对省内的高速公路进行过现场调查<sup>[10]</sup>。调查方法为查阅原设计资料、直接量测、钻芯取样、室内试验和专家咨询。本研究以陕西某高速公路为例,采用调查资料中共计 25 条试验段的车辙数据进行 MEPDG 车辙预估模型的校正,路面结构与车辙调查数据见表 1。

表 1 某高速公路实地调研车辙数据  
Tab. 1 Rutting data of field research

试验段 编号	路面结构	里程桩号	路 幅	车 道	车辙深 度/cm
1	4 cm AC- 16 中粒 式沥青混 凝土上面 层+6 cm AC-20 中 粒式沥青 混凝土中 面层+8 cm AC- 25 粗粒 式沥青混 凝土下面 层+30 cm 水泥 稳定碎石 基层+22 cm 水泥 稳定砂砾 底基层	K94+200~K94+600	右	行	3.0
2		K95+100~K95+250	右	行	2.5
3		K95+600~K95+800	右	行	4.0
4		K96+300~K96+400	右	行	2.0
5		K101+300~K101+500	右	行	2.0
6		K103+100~K105+500	右	行	8.0
7		K105+700~K105+900	右	行	4.0
8		K112+200~K112+600	右	行	3.5
9		K113+000~K113+200	右	行	4.0
10		K114+000~K115+000	右	行	2.5
11		K115+700~K115+850	右	行	3.5
12		K116+200~K116+600	右	行	4.0
13		K117+700~K118+800	右	行	7.0
14		K119+700~K120+800	右	行	3.5
15		K120+900~K121+600	右	行	4.0
16		K121+800~K122+300	右	行	5.5
17		K123+100~K123+300	右	行	4.5
18		K124+100~K124+500	右	行	2.5
19		K155+300~K155+700	右	行	6.0
20		K96+300~K96+700	左	行	2.5
21		K109+200~K110+300	左	行	2.5
22		K110+900~K111+500	左	行	2.0
23		K111+800~K113+500	左	行	2.5
24		K114+600~K115+000	左	行	2.0
25		K117+500~K118+300	左	行	2.5

注:由于半刚性基层沥青路面的车辙主要产生在沥青层,所以只考虑沥青层的车辙预测结果

在 MEPDG 路面设计方法中,沥青路面材料参数的输入主要分沥青混合料的材料特性、沥青结合料的材料特性以及沥青混合料的体积指标 3 大模块。其中,沥青混合料的材料特性是 MEPDG 材料参数中的核心部分,主要是指与时间-温度相关联的动态模量( $E^*$ );沥青结合料的材料特性主要是针入度、软化点

以及 PG 分级等沥青常规指标;沥青混合料的体积指标主要是指空隙率、有效沥青含量等。路基和土基材料参数的输入主要是指路基或土基回弹模量  $M_r$ <sup>[8-9]</sup>。在本研究中,材料参数的输入均采用第 1 等级 Level-1 的输入。基于室内模拟试验和参考相关规范,针对上述路面结构中的 3 层沥青混合料分别进行了动态模量试验,试验在 5 个温度(5、15、25、45、55 ℃)和 7 个试验频率(25、10、5、1、0.5、0.1、0.01 Hz)条件下进行。试件采用与所选路面结构中相同的集料和沥青制作而成,试件空隙率则采用与原路面相同的空隙率,经钻芯取样测得的各沥青层空隙率从上到下分别为 3%、4%和 6%<sup>[10]</sup>。基于时间-温度置换原理,选取参考温度为 25 ℃,对试验结果进行分析,得到各层混合料的动态模量主曲线和时间-温度转换因子,如图 2、图 3 所示<sup>[11]</sup>。其中,动态模量主曲线描述荷载作用频率对材料性质的影响,时间-温度转换因子描述温度对材料性质的影响。

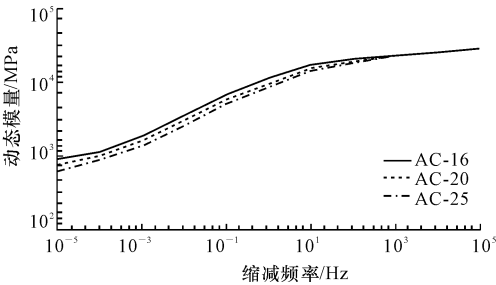


图 2 各沥青层动态模量主曲线(25 ℃)  
Fig. 2 Main curve of dynamic moduius of each level of asphalt (25 ℃)

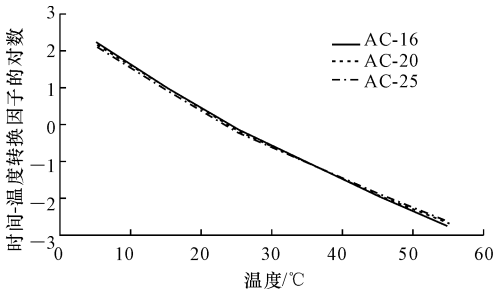


图 3 时间-温度转换因子  
Fig. 3 Conversion factors of time-temperature

2.2 交通参数

在 MEPDG 路面设计指南中,交通荷载是使用轴载谱的方法来描述的,这比中国当前使用的当量轴载作用次数方法更全面准确。MEPDG 中所需的交通参数主要包括车辆类型分布系数、卡车交通量月调节系数、卡车交通量小时分布系数、卡车轴数系数以及轴载分布系数等,其中轴载分布系数为轴载谱的核心参数。轴载分布系数的确立需要有一个符

合实际情况的车辆分级标准,而 MEPDG 中的车辆分级是采用美国联邦公路局(FHWA)的车辆分级系统,如图 4 所示<sup>[12-13]</sup>。该分类方法把车辆共分为 13 个等级,与中国现行的车辆分类方法有一定的差异。因此必须根据实际情况建立一个新的车辆分级标准来满足 MEPDG 系统交通参数的输入<sup>[13]</sup>。

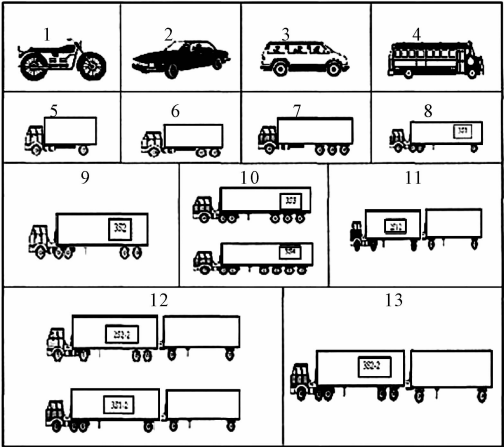


图 4 FHWA 车辆分级系统

Fig. 4 Vehicle classification system of FHWA

目前,陕西省高速公路行驶车辆中,常见的轴型有 3 种(单轴、双联轴、三联轴),常见的轮型有 2 种(单轮和双轮),陕西省高速公路行车常见轮轴类型及图示见表 2。

表 2 常见轮轴类型与图示

Tab. 2 Common axle type and diagram form

编号	轮轴类型	图示
1	单轴每侧单轮胎	I—I
2	单轴每侧双轮胎	II—II
3	双轴每侧单轮胎	I—I I—I
4	双轴每侧一单、一双	I—I II—II
5	双轴每侧双轮胎	II—II II—II
6	三联轴每侧各三单轮胎	I—I I—I I—I
7	三联轴每侧各三双轮胎	II—II II—II II—II

基于表 2 中的轮轴类型,将货车类型划分为 13 级。依次为 11 型、12 型、15 型、112 型、115 型、117 型、122 型、123 型、125 型、127 型、155 型、157 型、1127 型。

为了便于 MEPDG 设计软件中交通参数的输入,本研究基于上述陕西省车辆分类方法,将包含客车在内的共计 14 类车按车辆类型、轴型(单轴、双联轴、三联轴)与轴数重新组合使其与 MEPDG 中的默认车辆分级相对应,见表 3。

表 3 基于 MEPDG 分析系统的陕西省车辆分级标准

Tab. 3 Vehicle classification of Shaanxi province based on MEPDG

MEPDG 车辆分级	MEPDG 车辆类型	轴数/个	陕西省车辆分级	陕西省车辆类型
4	客车	2 或 3	客车	2 轴客车
5	单一卡车	2	1+2	2 轴单一卡车
6	单一卡车	3	3+4	3 轴单一卡车
7	单一卡车	≥4	5	4 轴单一卡车
8	单拖卡车	≤4	7+8+9	单拖卡车
9	单拖卡车	5	6+10+11	单拖卡车
10	单拖卡车	≥6	12+13	单拖卡车
11	多拖卡车	≤5		
12	多拖卡车	6		
13	多拖卡车	≥7		

注:MEPDG 中的车辆分级只考虑了 FHWA 车辆分级系统中对路面作用较大的 4 级~13 级,其中 4 级为客车,其余均为货车。

根据所提出的新车辆分级标准,可以收集相应的高速公路车辆动态称重(WIM)数据,按照 NCHRP1-37A 中的要求进行分析,从而得出相应的轴载分布系数,鉴于篇幅原因,此处不做一一赘述<sup>[14-15]</sup>。

2.3 气候参数

MEPDG 中考虑的气候因素是由增强集成环境模型(EICM)来表征,主要包括大气温度、降水量、风速、云层覆盖率以及相对湿度这 5 个指标。本研究采用实地调研与气象数据共享服务网络平台相结合的方式,获取相关的地下水位资料和气候资料,并将这些数据整理成 MEPDG 软件中相应的文件格式进行输入<sup>[16]</sup>。

3 MEPDG 车辙预估模型校正

3.1 MEPDG 的车辙预测理论

MEPDG 柔性路面总车辙为沥青层、粒料基层/底基层及路基车辙的总和,并假设半刚性基层不产生车辙。

MEPDG 对沥青层车辙的预测模型为

$$\Delta P_{HMA} = \epsilon_{P(HMA)} h_{HMA} = \beta_{r1} K_Z \epsilon_{r(HMA)} \cdot 10^{-3.354 \cdot 12} T^{1.560} \beta_{r2} N^{0.479} \beta_{r3} h_{HMA} \quad (1)$$

$$K_Z = (C_1 + C_2 I_{depth}) \times 0.328 \cdot 196 I_{depth} \quad (2)$$

$$C_1 = -0.103 \cdot 9 h_{ac}^2 + 2.486 \cdot 8 h_{ac} - 17.342 \quad (3)$$

式中: $\Delta P_{HMA}$  为沥青层累计的永久变形,单位为 2.54 cm; $\epsilon_{P(HMA)}$  为沥青层累计的塑性轴向应变; $\epsilon_{r(HMA)}$  为沥青层中部回弹(或弹性)应变(2.54 cm); $h_{HMA}$  为沥青层厚度(2.54 cm); $N$  为荷载次数; $T$  为路面温度(°F); $K_Z$  为深度围压系数; $\beta_{r1}$ 、 $\beta_{r2}$ 、 $\beta_{r3}$  为地方校正系数; $C_2 = 0.017 \cdot 2 h_{ac}^2 - 1.733 \cdot 1 h_{ac} + 27.428$ ,

$I_{\text{depth}}$  为路表到计算点的深度(2.45 cm); $h_{\text{ac}}$  为沥青层总厚度(2.45 cm)。

3.2 模型校正

在 MEPDG 车辙预估模型的校正过程中首先采用系统默认的地方校正系数,即  $\beta_{r1}=\beta_{r2}=\beta_{r3}=1$ , 由此可得<sup>[17]</sup>

$$\Delta P_{\text{HMA}}=\epsilon_{\text{P(HMA)}}h_{\text{HMA}}=K_Z\epsilon_{\text{r(HMA)}}\times10^{-3.354\,12}T^{1.560\,6}N^{0.479\,1}h_{\text{HMA}}\quad(4)$$

将式(1)除以式(4),可得 MEPDG 车辙预估模型校正前后的一个关系式,即

表 4 基于规划求解的 MEPDG 车辙预估模型校正(以陕西省某高速公路为例)

Tab. 4 Calibration of prediction model of rutting in MEPDG based on plan solution

编号	车辙实测值/cm	MEPDG 车辙预测值/cm		地方校正系数	目标函数	目标值(误差平方和)
		校正前 $\Delta P_Q$	校正后 $\Delta P_H$			
1	3.0	3.4	3.162 04	$\beta_{r1}=2.000\,000\,000$	0.026 259	12.326 37
2	2.5	2.0	2.343 11	$\beta_{r2}=1.092\,287\,640$	0.024 614	
3	4.0	3.0	3.527 61	$\beta_{r3}=0.640\,939\,665$	0.223 152	
4	2.0	2.5	2.325 03		0.105 646	
5	2.0	1.6	1.848 02		0.023 098	
6	8.0	6.0	6.871 21		1.274 167	
7	4.0	3.0	3.792 04		0.043 247	
8	3.5	3.0	3.252 29		0.061 360	
9	4.0	2.8	3.512 73		0.237 432	
10	2.5	2.0	2.191 12		0.095 407	
11	3.5	3.4	3.162 04		0.114 214	
12	4.0	6.0	5.580 08		2.496 651	
13	7.0	6.0	6.580 12		0.176 299	
14	3.5	5.0	4.650 07		1.322 652	

从表 4 可看出,采用规划求解方法求得的 MEPDG 车辙预估模型的地方校正系数  $\beta_{r1}=2$ ,  $\beta_{r2}=1.092\,28$ ,  $\beta_{r3}=0.640\,9$ 。将校正系数代入式(1),可得校正后的 MEPDG 车辙预估模型为

$$\Delta P_{\text{HMA}}=\epsilon_{\text{P(HMA)}}h_{\text{HMA}}=2K_Z\epsilon_{\text{r(HMA)}}\cdot10^{-3.354\,12}T^{1.704\,4}N^{0.307\,1}h_{\text{HMA}}\quad(6)$$

3.3 结果验证

本研究采用 Origin 软件对 MEPDG 车辙预估模型的校正结果进行拟合验证,如图 5 所示。

从图 5 看出,校正前的 MEPDG 预测值与实测值的拟合系数  $R^2=0.585\,77$ ;校正后的 MEPDG 预测值与实测值的拟合系数  $R^2=0.805\,68$ ,可见校正后的 MEPDG 车辙预估模型具有更高的精确度。

4 MEPDG 车辙预估校正模型的建立

基于以上分析结果建立了 MEPDG 车辙预估校正模型,该模型包含了参数输入控制和车辙校正模型两大模块,如下页表 5 所示。

本研究中 MEPDG 的车辙预估校正模型是基于以下 4 个理论假设而得出的:①该条路各个路段

$$\Delta P_H/\Delta P_Q=\beta_{r1}T^{1.560\,6(\beta_{r2}-1)}N^{0.479\,1(\beta_{r3}-1)}\quad(5)$$

式中: $T$  为路面温度( $^{\circ}\text{F}$ ),取该地区近 10 年的年最高气温平均值; $N$  为重复荷载作用次数,该参数可通过室内重复加载三轴永久变形试验获取; $\Delta P_Q$ 、 $\Delta P_H$  分别为校正前后的车辙预测值。

以式(5)作为 Excel 规划求解中的关系函数,基于沥青路面车辙的实测值与 MEPDG 的车辙预测值,采用最小化误差平方和(MinSSE)来进行车辙预估模型的校正,部分数据见表 4。

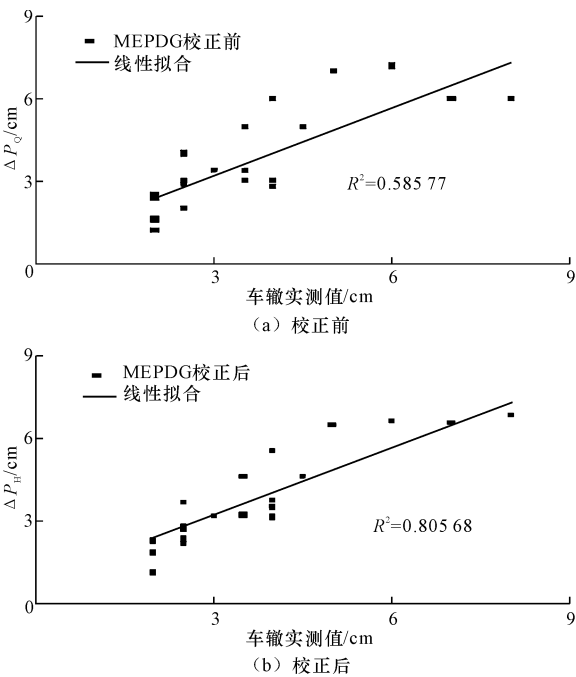


图 5 MEPDG 车辙预估模型的校正效果  
Fig. 5 Calibration effect of prediction model of rutting in MEPDG

的路面结构相同;②该条路各个路段的交通量是一致的;③该条路各条路段的车辙深度呈正态分布;④各条路段车辙深度的不同是由于各条路段的气候、土基强度以及基层材料的不同而引起的。

因此,文中标定建立的车辙预估校正模型主要适用于类似情况的路面结构,对于其他路面结构的

适用性仍需进一步研究或重新标定。

MEPDG 的车辙预估校正模型依据参数敏感性分析方法和 MEPDG 的说明手册确定了重要参数,并对这些重要参数的默认值和输入值进行了说明与相应调整,该模型的建立方法同样也适用于其他高速公路的研究<sup>[6,9,18]</sup>。

表 5 MEPDG 车辙预估校正模型  
Tab. 5 Calibration model of rutting prediction of MEPDG

模块		输入参数		输入水平	补充说明
参数 输入 控制	基本 信息	设计年限		无	一般情况下可采用 MEPDG 系统的默认值
		目标 IRI		无	
		纵向裂缝		无	
		路面龟裂		无	
		沥青层永久变形(车辙)		无	
	交通	车辆等级分布		Level-1	根据当地的实际交通状况建立新的车辆分级标准,如表 1 所示
		轴载分布系数		Level-1	依据新的车辆分级标准并按照 NCHRP 1-37A 中的要求进行分析
		设计速度			根据实际情况而定
	气候	大气温度		无	依据“中国地下水信息网”和“中国气象科学数据共享服务网”提供的信息进行 MEPDG 气候源文件的修改
		降水量		无	
		风速		无	
		日照百分比		无	
		相对湿度		无	
	材料	面 层	动态模量	Level-1	室内模拟试验获取参数
			沥青层厚		
			沥青 PG 分级		
			空隙率(现场)		
			有效沥青含量(体积指标)		
		基 层	回弹模量	无	室内模拟试验获取参数
		底基层或土基	回弹模量	Level-2	依据相关规范和室内模拟试验获取参数,应注意考虑不同的土质
车辙 校正 模型	确定方法	基于 Excel 规划求解程序,采用数理统计中的最小化误差平方和法			
	获 取 目 标 参 数	1. 确定关系函数式(6)中的参数值,其中重复加载次数 $N$ 为重复加载三轴永久变形试验,对沥青混合料试件进行加载直至永久变形量达到现场车辙调研数据平均值时的加载次数; $T$ 为路面温度,取该地区近 10 年的年最高气温平均值。 2. 获取现场车辙实测值与 MEPDG 的预测值。			
	规划求解	得到校正后的车辙预估模型,如式(7)所示。			

5 结 语

(1)有关 MEPDG 病害预测模型的本地校正,国外也做了一些相关研究,但大都是采用多条道路的数据建立起一个本地通用模型。本文以陕西省某高速公路的 25 条试验段为例,有针对性的进行了 MEPDG 车辙预估模型的校正。

(2)采用规划求解方法对多条试验路车辙数据的拟合,可大大提高 MEPDG 车辙预估模型的预测精度,并得出了 MEPDG 车辙预估模型的陕西省校正系数。

(3)本文建立的 MEPDG 车辙预估校正模型集参数输入和校正模型一体化,对该高速公路的后续

建设具有一定的理论指导意义,在一定程度上提高了类似路面结构的高速公路车辙预测精度,同时也为 MEPDG 在陕西省乃至中国其他高速公路上的应用提供了参考。

(4)由于中国高速公路在病害数据库的建立上与国外还有一定的差距,道路施工现场也存在一些不确定因素,致使本研究也存在着一些不足,如对校正结果的现场验证等还需作进一步研究。

参考文献:  
References:

[1] 顾兴宇,袁青泉,倪富健.基于实测荷载和温度梯度的沥青路面车辙发展影响因素分析[J].中国公路学报,

- 2012,25(6):30-36.
- GU Xing-yu, YUAN Qing-quan, NI Fu-jian. Analysis of factors on asphalt pavement rut development based on measured load and temperature gradient[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(6): 30-36. (in Chinese)
- [2] 张争奇, 尚同羊, 孔 慧, 等. 基于现场钻芯取样的沥青结构层抗车辙性能评价方法[J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 31-37.
- ZHANG Zheng-qi, SHANG Tong-yang, KONG Hui, et al. Anti-rutting performance evaluation of asphalt structure layers with samples cored at site[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 31-37. (in Chinese)
- [3] 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]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(7): 57-61.
- LI Pei-long, LI Hong-hua, ZHANG Zheng-qi, et al. Research on influencing factors and prediction model of rutting process for asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(7): 57-61. (in Chinese)
- [4] Retherford J Q, McDonald M. Reliability methods applicable to mechanistic-empirical pavement design method[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2010(2154): 130-137.
- [5] Breakah T M, Williams R C, Herzmann O E, et al. Effects of using accurate climatic conditions for mechanistic-empirical pavement design [J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137(1): 84-90.
- [6] 汪海年, 张 琛, 尤占平. 基于MEPDG方法的沥青路面国际平整度指数(IRD)敏感性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(6): 42-47.
- WANG Hai-nian, ZHANG Chen, YOU Zhan-ping. International roughness index sensitivity of asphalt pavement based on MEPDG method[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(6): 42-47. (in Chinese)
- [7] 张 毅. 陕西省高速公路沥青路面车辙成因及对策研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- ZHANG Yi. Reasons of asphalt pavement rut formation on expressways in Shaanxi province and counter-measures[D]. Xi'an: Chang'an University, 2004. (in Chinese)
- [8] 陈兴伟. 力学-经验路面设计指南(MEPDG)简介[J]. 上海公路, 2011(3): 56-59.
- CHEN Xing-wei. The intro of MEPDG[J]. Shanghai Highways, 2011(3): 56-59. (in Chinese)
- [9] ARA Inc. User manual for the M-E pavement design guide (advance copy)[R]. Washington DC: NCHRP, 2007.
- [10] JTG D50—2004, 沥青路面设计规范[S].
- JTG D50—2004, Specifications for design of highway asphalt pavement[S]. (in Chinese)
- [11] 赵延庆, 吴 剑, 文 健. 沥青混合料动态模量及其主曲线的确定与分析[J]. 公路, 2006(8): 163-167.
- ZHAO Yan-qing, WU Jian, WEN Jian. Determination and analysis of dynamic modulus of asphalt mixture and Its master curve[J]. Highway, 2006(8): 163-167. (in Chinese)
- [12] NCHRP. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. final report[R]. Washington DC: NCHRP, 2004.
- [13] 赵延庆, 贾 渝, 曹荣吉. 交通荷载轴载谱参数的确定及分析[J]. 中外公路, 2007, 27(4): 185-188.
- ZHAO Yan-qing, JIA Yu, CAO Rong-ji. Measurement and analysis of axle load spectrum parameters on traffic loading [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2007, 27(4): 185-188. (in Chinese)
- [14] 周兴业, 刘小滔, 王旭东. 基于轴载谱的沥青路面累计当量轴次换算[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(1): 16-19.
- ZHOU Xing-ye, LIU Xiao-tao, WANG Xu-dong. Conversion method of accumulated equivalent axle load of asphalt pavement based on measured axle load spectrum[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(1): 16-19. (in Chinese)
- [15] 路 鑫. 陕西省高速公路沥青路面轴载参数与典型结构研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- LU Xin. Asphalt pavement axle load parameters and typical structure research in Shaanxi province [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [16] 苗英豪, 王秉纲. 中国沥青路面气候影响分区方案[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(6): 64-69.
- MIAO Ying-hao, WANG Bing-gang. Zoning scheme of climatic influence for asphalt pavement in China [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(6): 64-69. (in Chinese)
- [17] AASHTO-2010, Guide for the local calibration of the MEPDG [S].
- [18] NCHRP. Sensitivity evaluation of MEPDG performance prediction final report [R]. Washington DC: NCHRP, 2011.