

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.04.005

公路沥青层振动压实质量实时监控与评估

刘东海,高 雷,林 敏,李子龙

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

摘要: 为了克服传统公路沥青层压实质量控制方法的局限性,基于智能碾压(intelligent compaction, IC)技术,提出了结合振动加速度频域分析指标和单位体积压实功 E 的公路沥青层压实质量实时监控与快速评估方法,实现 100% 施工工作面压实质量的快速评估,避免了单独采用振动加速度频域分析指标评价沥青层压实质量易受路基(二灰层、水稳层)坚硬程度的影响,从而可减少压实度推算的误差,可客观地反映公路沥青层压实质量。

关键词: 高速公路施工;沥青路面;智能碾压;压实质量;实时监控;质量评估

中图分类号:U416.2 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2018)04-0307-07

Real-time monitoring and assessment of compaction quality for highway asphalt pavements

LIU Donghai, GAO Lei, LIN Min, LI Zilong

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to overcome the limitations of traditional methods, an intelligent compaction (IC) technology-based method for the real-time monitoring of compaction quality of highway asphalt pavements as well as the rapid assessment was proposed using the combined index of the frequency analysis index and the unit volume compaction power (E). It could realize the rapid assessment of compaction quality for highway asphalt layers with the 100% coverage of construction zone and effectively overcome the shortage that the value of C_{v0} was easily influenced by the hardness of subgrade (lime-fly ash layer and water stable layer). Accordingly, the estimated compactness error was decreased, resulting in a high detecting precision of asphalt layers compaction quality. The presented method is helpful to improve the construction quality and provides a new way to control the construction quality of highway.

Key words: highway construction; asphalt pavements; intelligent compaction; compaction quality; real-time monitoring; quality assessment

目前,国内一些高速公路沥青路面出现严重早期破坏(车辙、开裂、水损坏等)的一个重要原因就是沥青路面压实效果不佳,而沥青层压实质量是沥青路面生产建设中的关键环节,直接影响着沥青路面的强度、稳定性和耐久性。我国现行的《公路沥青路面施工技术规范》^[1]强调“以碾压过程(如碾压遍数、碾压速度、振动状态、施工温度和铺层厚度)控制为主,并按抽检的方式检测压实质量”。然而,用有限的抽样结果去反映整个公路沥青层的压实质量会导致一定的偏差。

近年来,美欧等国提出的智能碾压(intelligent compaction, IC)技术已在道路工程中广泛应用,在控制施工质量方面,取得较好效果,有些国家正在出台相应的规范,如美国高速公路管理局(FHWA)和美国国家高速公路与交通协会(AASHTO)正在研究制定高速公路 IC 规范^[2]。Kassem 等^[3-4]开发了沥青路面压实质量

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB035902);国家自然科学基金(51479132);天津市科技支撑计划重点项目(BZCZDSF01800)

作者简介: 刘东海(1974—),男,教授,博士,主要从事大型工程系统仿真与优化、数字化施工与质量实时评估研究。E-mail: liudh@tju.edu.cn

引用本文: 刘东海,高雷,林敏,等.公路沥青层振动压实质量实时监控与评估[J].河海大学学报(自然科学版),2018,46(4):307-313.
LIU Donghai, GAO Lei, LIN Min, et al. Real-time monitoring and assessment of compaction quality for highway asphalt pavements[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46(4): 307-313.

的实时监控系统(CMS),提高了沥青面层压实的均匀性。Do 等^[5]开发了针对沥青路面的碾压施工实时监控系
统,可实现沥青路面施工过程中对碾压遍数、碾压机运行轨迹和沥青路面温度的实时监控。Krishnamurthy
等^[6]针对沥青路面的施工特点开发研制了 AutoPave 系统,可自动计算最优碾压遍数。Xu 等^[7]将 IC 技术应
用于沥青混凝土的压实质量实时监测,以获取最优的碾压遍数。此外,许多国外碾压机厂家纷纷推出基于
IC 技术的压实效果实时监控系
统,包括 AMMANN 公司的 ACE(ammann compaction expert)^[8]及 Caterpillar 的
基于碾压机净输出(machine drive power,MDP)的碾压过程监测系统^[9]等。

在国内,沥青道路的智能压实控制技术尚处于起步研究阶段^[10],且主要集中在道路路基压实方面。譬
如:刘东海等^[10]利用实时监控的振动加速度频域分析指标(compaction value)与压实度 D 、动态变形模量 E_v ,
建立了公路路基层压实度回归模型,用于公路路基层全工作面的压实质量评估;徐光辉等^[11]利用碾压过程
中被压材料的抵抗力变化来反映材料的压实状态,并提出适合路基粗粒土的压实质量监控方法。

然而,现阶段少有对公路沥青层智能压实的研究。在公路沥青层压实过程中,沥青混合料易受施工温度
和自身流动性的影响,不同于路基材料的压实。虽然国外在沥青道路上使用的 IC 技术已充分证实有效,但
是国外的监测装置往往价格昂贵,并且只面向碾压机司机使用,不符合中国公路施工质量控制中承包商-业
主-监理一体化控制的体制。因此,本文借鉴国外 IC 技术,基于课题组先前研发的振动加速度频域分析指标
 C_{v0} 和单位体积压实功 E ,研究公路沥青层压实质量实时监控与快速评估方法,旨在监控沥青层压实质量、实
现公路施工质量有效控制。

1 沥青层压实质量监测指标

课题组前期提出的振动加速度频域分析指标 C_{v0} 已被广泛应用到心墙坝料、堆石料和公路路基材料压
实质量控制上^[12-14]。但采用单一的 C_{v0} 监测指标表征沥青层压实质量可能存在一定的偏差,如: C_{v0} 指标易
受到被压料体底层坚硬程度和底层压实均匀性的影响,由于振动轮的振动影响深度大约在 $1.0 \sim 1.2\text{ m}$ ^[15],
而沥青层的摊铺厚度仅为十几厘米, C_{v0} 测量深度与振动轮的振动影响深度一致,远大于沥青层压实厚度,所
以在沥青层压实过程中可能会受路基坚硬程度的影响,使监测指标 C_{v0} 值偏大,但实际上沥青混合料未必压
实。考虑到单位体积压实功 E 可客观反映碾压机对被压料体的压实作用和被压料体接受外界施压的效果,
所以 E 的大小一定程度上可反映沥青混合料的压实程度。但是,由于被压料体颗粒在空间上分布的差异
性,即便碾压机对沥青混合料做功相同的情况下,沥青混合料的压实效果也不一定一致。因此,将 C_{v0} 和 E
作为实时监控指标,既能减少由于 C_{v0} 指标异常而导致评估效果的误差,又能真实反映碾压机对沥青混合料
的压实做功情况。

1.1 振动加速度频域分析指标 C_{v0}

通过安装在振动轮上的振动加速度计,可实时获得振动轮的加速度时域数据,经快速傅里叶变换
(FFT),得到加速度的频域数据(各谐波分量)。现有研究表明:被压材料的压实度越大,振动轮的加速度畸
变也越大,谐波分量也越多, C_{v0} 值也就越大^[16];当被压材料已经被压实后,在加速度频域图上会出现 $1/2$,
 $3/2, \dots$, 等半倍谐波^[17]。 C_{v0} 可定义为

$$C_{v0} = \alpha \frac{A_4}{A_2}$$

(1)

式中: A_2 、 A_4 ——频谱分析中一次谐波(基频)、二次谐波的幅值; α ——系数,取 300。

1.2 单位体积压实功 E

根据振动轮-地形系统,忽略车架与振动轮之间的动态力,碾压机在振动工作时的竖向作用力为

$$P = W + F \sin \omega t$$

(2)

式中: W ——振动轮的径向荷载; F ——振动轮的激振力; ω ——振动轮的角速度。

由于被压料体的阻尼作用,振动轮的垂直位移相对于碾压机偏心块滞后一个相位差 φ ^[18],振动轮在单
个振动周期中所做的压实功为^[12]

$$E_1 = WA(1 + \sin \varphi) + \frac{1}{2}FA \left[\cos \varphi + \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \sin \varphi \right]$$

(3)

式中: A ——振动轮工作振幅, m 。

利用振动轮上的加速度传感器实时采集加速度时域数据,同时进行加速度频域积分,得到工作振幅 A ,该方法可有效减少时域积分过程中产生的误差趋势项。

当碾压机激振频率接近被压料体的固有频率时, φ 接近 $\frac{\pi}{2}$ ^[18],沥青混合料的固有频率大约在 40 ~ 50 Hz 之间,本试验中采用 DYNAPAC 压路机(型号 CC624HF),激振频率 50 Hz。则

$$E_1 = 2A\left(W + \frac{\pi F}{4}\right)$$

(4)

碾压 N 遍后,总的单位体积压实功为

$$E = 2A\left(W + \frac{\pi F}{4}\right) \frac{fN}{Bhv}$$

(5)

式中: E ——被压料的单位体积压实功, J/m^3 ; f ——碾压机振动频率, Hz ; B ——振动轮宽度, m ; h ——碾压层厚度, m ; v ——碾压机行车速度, m/s 。

2 沥青层压实质量实时监控与评估方法

2.1 沥青层压实质量实时监控的实现流程

基于 C_{v0} 和 E 的实时监控指标,构建了由 GPS 基准站、GPS 流动站、压实质量实时监测装置(C_{v0} 采集仪)、温度传感器、控制机、无线数据传输单元(DTU)、服务器、业主方总控中心、监理方分控站和承包商监控客户端等部分构成的公路沥青层压实质量一体化实时监控体系(图 1),可实现司机、承包商、监理和业主的共同参与。

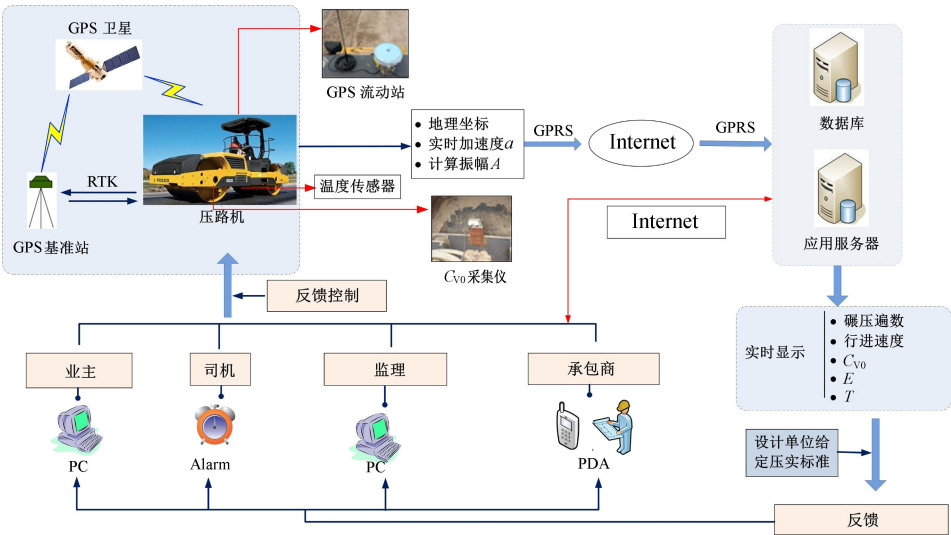


图 1 公路沥青层压实质量实时监控流程

Fig. 1 Real-time monitoring process of asphalt pavements compaction quality

沥青层压实质量实时监控具体的实现流程如下：

- a. 通过安装在碾压机顶部的 GPS 接收机,利用实时动态差分技术(RTK),实时采集碾压机的位置坐标,其定位精度水平方向达到 1 ~ 3 cm,垂直方向精度达到 2 ~ 5 cm,并通过 DTU 经 GPRS 网络实时发送至数据库服务器中计算及保存。
- b. 将公路碾压监控区域划分为固定大小的网格,将每个网格进行编号。利用课题组前期开发的“公路压实质量实时监控系统”可计算在 t 时刻碾压机的前进速度 v_t ,在 t 时刻网格 k 所经过的遍数 $n_{k,t}$ 以及压实厚度 H_k ^[14]。
- c. 利用放置在振动轮中心轴处的 C_{v0} 采集仪和驾驶室底部的温度传感器,实时采集加速度时域数据 a 和沥青层表面施工温度 T ,并在数据库服务器中计算得到 C_{v0} 值和碾压机激振频率 f 。
- d. 碾压机实际输出激振力计算公式为

$$F = \frac{f^2}{f_{\text{额}}^2} F_{\text{额}}$$

(6)

式中: $f_{\text{额}}$ ——碾压机激振频率额定值,Hz; $F_{\text{额}}$ ——碾压机激振力额定值,kN。

根据式(6)计算得到 F ,并结合公路沥青层压实质量一体化实时监控体系步骤b中得到的 v_t 、 $n_{k,t}$ 、 H_k ,通过数据库服务器实时计算 E 。实时绘制碾压轨迹线,同时显示碾压机行进速度、碾压遍数、 C_{v0} 值、沥青层施工温度 T 和单位体积压实功 E 等施工参数,最后根据时间或GPS位置同步,将压实度 D 与检测指标进行数据匹配。

e. 根据设计单位给定的设计标准,对施工现场实时获取的数据进行比较和反馈。实现公路压实质量一体化实时监控。

2.2 沥青层压实质量快速评估方法及流程

基于实时获取的 C_{v0} 、 E 和 T ,并结合现场原位试验数据,提出了沥青层压实质量快速评估方法(图2)。该方法的具体步骤如下:

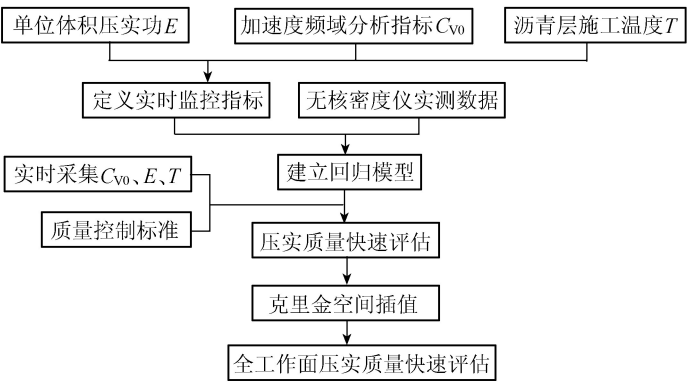


图2 公路沥青面层压实质量快速评估方法

Fig.2 Rapidly quality-assessing method of asphalt pavements

a. 现场试验,样本采集。现场设置试验条带,并布置相应的试验点。对于沥青层,用无核密度仪获取沥青混合料的压实度 D ,建立 D 与 E 、 C_{v0} 、 T 的样本数据。

b. 相关性分析。分析 D 与 E 、 C_{v0} 、 T 之间的相关性,当其中一个变量的相关性较小时,可将该变量去除,不作为回归模型的变量。

c. 建立回归模型。根据相关性分析结果,利用构建的样本数据,建立 D 与 E 、 C_{v0} 、 T 的回归模型如下:

$$D_i = f_i(E, C_{v0}, T; \beta) + \varepsilon$$

(7)

式中: D_i ——沥青层第 i 个回归模型对应的压实度; $f(\ast)$ ——压实度回归函数; β ——回归系数; ε ——模型残差。建立模型之后还要对回归模型进行显著性检验。

d. 压实质量估计。借助自主研发的公路沥青层压实质量实时监控系統,在施工过程中实时获取 C_{v0} 、 E 、 T 数据。然后利用所建立的回归模型,根据碾压机行走过程中计算得到的 C_{v0} 、 E 以及采集到的 T 估算采集位置处的 D 。

e. 压实度的空间插值。由于 C_{v0} 、 E 和 T 的各自采样之间有一定的时间间隔,计算出的压实度数据为离散的点,中间并不连续,因此利用克里金(Kriging)空间插值法对离散的压实度 D 进行插值,得到全工作面的压实质量云图。利用压实质量云图来指导现场施工,对不合格区域进行补充碾压,保证压实质量达标。

f. 压实质量均匀性分析。变异系数可以衡量施工路面的压实度均匀情况。碾压工作面压实质量的变异系数计算式如下:

$$C_v = \frac{D_{SD}}{D_{MN}} \times 100\%$$

(8)

式中: C_v ——变异系数; D_{SD} ——压实度标准差; D_{MN} ——压实度平均值。

将 Kriging 插值后的全工作区域划分成足够小的网格(本文实际工程中取 $0.5\text{ m}\times0.5\text{ m}$),得到每个网格上的压实度值,则可统计得到 D_{SD} 和 D_{MN} 。一般地,变异系数越小,被压料压实质量的均匀性越好,对于延长

路面疲劳寿命、提高路基承载力越有利^[8]。

3 工程应用

3.1 试验段布置及试验点采样

以天津市滨海新区西外环高速公路某标段沥青底面层为例进行工程应用研究,该标段沥青底面铺设2层水泥稳定层。沥青底面层使用 ATB-30 沥青混合料,石油沥青标号为 50 号,最佳油石比为 3.6%,设计碾压厚度为 12 cm。试验设置 2 个碾压条带(红色细线标记),并利用标记杆标记 8 个试验点(白色圆点),如图 3 所示。在 DYNAPAC 的 CC624F 型双钢轮碾压机上安装“公路压实质量实时监控系统”,实时采集沥青层施工温度 T 、频域分析指标 C_{v0} 和单位体积压实功 E 的数据以及试验点的位置坐标数据,如图 4 所示。在碾压机经过试验点后,利用事先标定好的无核密度仪(PQI)测量试验点沥青压实度,同时用差分后的手持 GPS 设备测出试验点的位置坐标。由于加速度传感器安装在双钢轮碾压机的前轮上,因此,试验中采集到碾压第 1、第 4、第 5、第 8 遍(碾压机经过一次算 2 遍)下的加速度频域分析指标 C_{v0} 值、单位体积压实功 E 、压实度 D 和沥青层施工温度 T 数据。

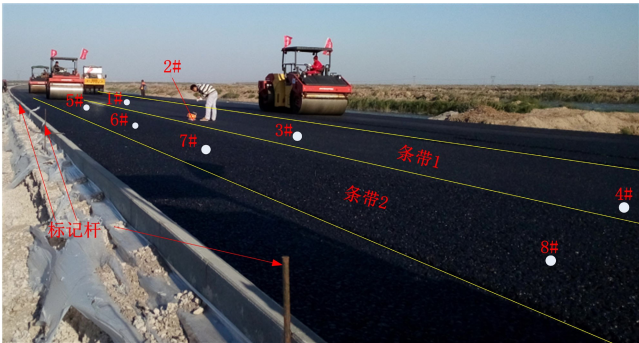


图3 现场试验布置
Fig.3 Settings of field experiments

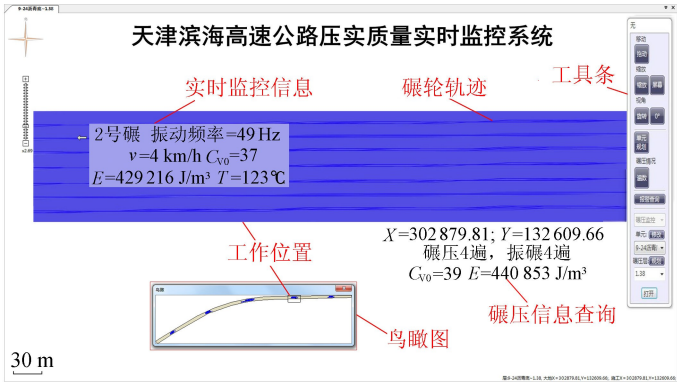


图4 公路沥青层压实质量实时监控系统界面
Fig.4 User interface of the real-time monitoring system for asphalt compaction quality

3.2 压实度回归模型建立

试验过程中,严格按照《公路沥青路面施工技术规范》^[1]的要求控制沥青混合料摊铺和碾压温度,试验标段沥青底面层混合料摊铺温度不得低于 140℃,碾压终了的表面温度不低于 80℃^[1]。在双钢轮碾压机碾压 4 遍过程中,车速行驶较快,车载温度传感器测得的沥青层施工温度 T 的变化范围较小,对压实度影响不大,所以把沥青层施工温度 T 从本试验回归模型变量中剔除。通过 SPSS 软件(statistical product and service solutions),最终建立沥青底面层 ATB-30 多元回归模型如下:

模型 I :

$$D = 89.45 + 0.24C_{v0}$$

(9)

模型 II :

$$D = 94.2 + 1.03 \times 10^{-5} E$$

(10)

模型 III :

$$D = 91.547 + 5.283 \times 10^{-6} E + 0.127C_{v0}$$

(11)

其中模型 I、II、III 分别为加速度频域分析指标 C_{v0} 、单位体积压实功 E 以及二者联合计算的压实度模

型。由图5可知,沥青底面层中 C_{v0} 和 E 对于压实度的相关指数 R^2 分别为0.659,0.657。将 C_{v0} 和 E 同时引入表征沥青底面层ATB-30的压实质量,相关指数进一步提高为0.690,这表明在沥青底面层压实试验中, C_{v0} 和 E 结合起来评估沥青底面层ATB-30材料的压实度相关性要优于单独指标 C_{v0} 或 E 。由图6可以看出,沥青底面层模型I的平均预测压实度误差为0.90%,模型II的压实度平均预测误差为0.91%,模型III压实度平均预测误差降低到0.85%。将 C_{v0} 和 E 同时引入表征沥青底面层ATB-30的压实质量,降低了模型预测误差。需要指出的是,若设计配合比改变或实际施工中料性不均匀时,则需要考虑上述因素,重新建立回归模型。

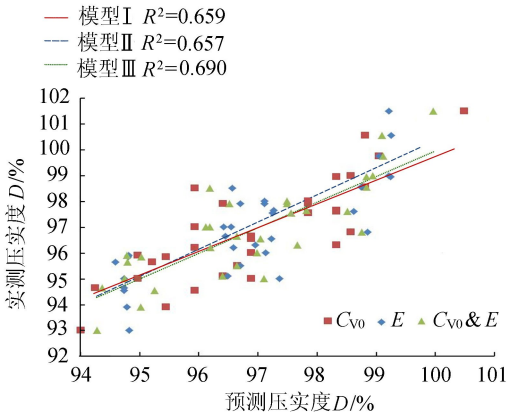


图5 公路沥青底面层模型拟合

Fig.5 Linear regression between the estimated density and the measured density

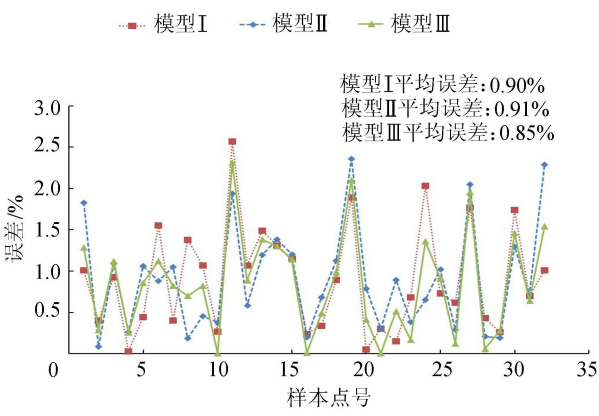


图6 公路沥青底面层模型误差

Fig.6 Compactness errors of three regression models

根据最后一遍实测得到的 C_{v0} 和 E ,利用模型III和Kriging空间插值法对试验区域进行插值,得到沥青底面层压实情况分布云图,如图7所示,并统计沥青底面层压实度的均匀性,压实度标准差为0.005,均值为98.27%,最小值为96.3%,变异系数为0.54%,合格率为100%(根据工程现场实际施工情况,压实度 $D\geq 96\%$ 且变异系数小于1%,即可认为合格)。以上结果表明该试验段沥青底面层压实均匀性好,压实度满足设计要求,可以较好地延长路面抗疲劳寿命、提高路基承载力,碾压结束后无需再对特定区域(不合格的)进行补碾。

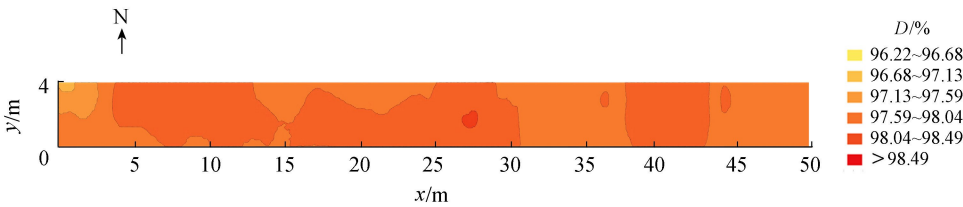


图7 沥青底面层压实情况分布云图

Fig.7 Color map of the asphalt pavements compaction

4 结 语

以振动加速度频域分析指标 C_{v0} 和反映碾压机对被压料体做功的单位体积压实功 E 作为公路沥青层压实质量实时监控指标,提出了公路沥青层压实质量实时监控与快速评估的方法和流程,并研制开发了“公路沥青层压实质量实时监控与快速评估系统”,实现了对公路沥青层压实过程中 C_{v0} 、 E 、 T 的实时监控。结合天津滨海新区西外环高速公路工程,建立了以 C_{v0} 和 E 为变量的沥青底面层压实质量预测模型,相关系数 $R^2=0.690$,预测压实度误差为0.85%,表明所建模型具有较高的预测精度,可用于公路沥青层压实质量的预测。最后,利用Kriging空间插值法对模型预测的压实度值进行插值,实现了全工作面任意位置压实质量的评估。本文所提出的沥青层压实质量实时监控与全工作面评估方法,可有效避免传统压实质量控制方法的局限性,使碾压质量始终处于受控状态,为我国公路沥青层压实质量控制提供新的方法。

参考文献:

[1] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范:JTG F40—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

[2] PETERSEN D, SIEKMEIER J, NELSON C, et al. Intelligent soil compaction technology: results and a roadmap toward widespread use [C]//Anon. 85th Annual Meeting of the Transportation-Research-Board. Transportation Research Record-Series. Washington: NATL ACAD SCI,2006:81-88.

[3] KASSEM E, LIU Wenting, SCULLION T, et al. Development of compaction monitoring system for asphalt pavements[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96: 334-345.

[4] KASSEM E, SCULLION T, MASAD E, et al. Comprehensive evaluation of compaction of asphalt pavements and development of compaction monitoring system[R]. Texas: The Texas A & M University, 2012.

[5] DO W S, OLOUFA A, THOMAS H. Evaluation of global positioning system devices for a quality control system for compaction operations[C]//Anon. 78th Annual Meeting of the Transportation-Research-Board. Transportation Research Record-Series. Washington: NATL ACAD SCI,1999: 67-74.

[6] KRISHNAMURTHY B K, TSEMG H P, SCHMITT R L, et al. AutoPave: towards an automated paving system for asphalt pavement compaction operations[J]. Automation in Construction, 1998, 8(2): 165-180.

[7] XU Qinwu, CHANG G K. Evaluation of intelligent compaction for asphalt materials[J]. Automation in Construction, 2013, 30: 104-112.

[8] AMMANN. European and US. patents on the ACE-system[R]. Swiss: AMMAN Verdichtung AG, 2002.

[9] CORCORAN P T, FEMANDEZ F. Method and apparatus for determining the performance of a compaction machine based on energy transfer; U. S. Patent 6,188,942[P]. 2001-02-13.

[10] 刘东海, 巩树涛, 魏宏云. 基于实时监测的高等级公路路基压实质量快速评估[J]. 土木工程学报, 2014, 47(11): 138-144. (LIU Donghai, GONG Shutao, WEI Hongyun. Fast assessment on compaction quality of highway subgrade based on real-time monitoring[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(11): 138-144. (in Chinese))

[11] 徐光辉, 高辉, 王哲人. 路基压实质量连续动态监控技术[J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 17-22. (XU Guanghui, GAO Hui, WANG Zheren. Continuous dynamic monitor technology on subgrade compaction quality [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 20(3): 17-22. (in Chinese))

[12] LIU Donghai, LIN Min, LI Shuai. Real-time quality monitoring and control of highway compaction [J]. Automation in Construction, 2016, 62: 114-123.

[13] LIU Donghai, LI Zilong, LIAN Zhenhong. Compaction quality assessment of earth-rock dam materials using roller-integrated compaction monitoring technology[J]. Automation in Construction, 2014, 44: 234-246.

[14] 刘东海, 李子龙, 王爱国. 堆石料压实质量实时监控指标与碾压参数的相关性分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(4): 361-363. (LIU Donghai, LI Zilong, WANG Aiguo. Correlation analysis of rolling parameters and real-time monitoring index for rockfill dam compaction quality evaluation [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2013, 46(4): 361-363. (in Chinese))

[15] CHANG G, XU Qinwu, RUTLEDGE J, et al. Accelerated implementation of intelligent compaction technology for embankment subgrade soils, aggregate base, and asphalt pavement materials[R]. US: FHWA, 2011.

[16] ANDEREGG R, KAUFMANN K. Intelligent compaction with vibratory rollers [C]//Anon. 82nd Annual Meeting of the Transportation-Research-Board: Transportation Research Record-Series. Washington: NATL ACAD SCI,2004:124-134.

[17] CARLOS Z, VINCENT D. Advanced compaction quality control [R]. West Lafayette: Civil Engineering Building Purdue University, 2006.

[18] MOONEY M A, RINEHART R V. Field monitoring of roller vibration during compaction of subgrade soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(3): 257-260.

(收稿日期:2017 -03 -27 编辑:高建群)