

小波变换在公路技术状况评定中的应用

王旺¹, 侯信²

(1. 广东交科检测有限公司, 广东 广州 510420; 2. 长沙华南工程监理有限公司)

摘要:针对路面弯沉数据普遍不服从正态分布的问题,采用2倍标准差法及小波变换对弯沉数据进行处理,完整地保留了弯沉的原始特征,正态化率达到86.7%,其中使2倍标准差法剔除后80.6%的非正态分布数据组及93.1%的正态分布数据组重新服从正态分布,提出了新的路面弯沉代表值计算公式,并在公路技术状况评定指标路面结构强度评定中取得了良好效果,使评定结果更好地反映了公路实际技术状况。

关键词:公路技术状况评定; 正态化率; 小波变换; 弯沉代表值计算公式

随着中国高速公路建设的快速发展,路面使用性能状况如何,应采取什么样的养护决策,都是日常养护工作中公路工作者尤其是管理方关心的问题,也是日常养护工作的重点。而判断路面使用性能状况的前提就是对路面状况进行检测、调查,并按文献[1]中的相关规定进行评定,进而采取相应养护措施。已有研究表明:路面弯沉检测数据并不服从正态分布,因此评定标准中关于路面结构强度(PSSI)的计算并不准确;且随着检测设备的自动化程度越来越高,检测数据受环境误差、仪器误差及系统误差等的影响越来越大。因此,如检测数据不经处理就进行计算、评定路面技术状况,必然不能反映路面状况的真实情况,影响路面养护决策的制定。一些研究者采用小波变换对公路技术状况评定的部分指标进行了处理,并使其更加真实地反映了所代表的路面真实状况。毛庆洲提出了一种基于小波变换的路面平整度测量数据精确处理的新算法,解决检测车变速运动环境下检测精度低且稳定性差的难题。但这些研究皆没有系统地进行公路技术状况评定。该文拟采用小波变换进行公路技术状况评定,并提出新的评价方法,为公路技术状况评定及路面养护工作提供有价值的参考。

1 小波变换及消噪原理

1.1 小波变换

小波变换是在傅立叶变换的基础上发展而来的一

种新的变换分析方法,继承和发展了短时傅立叶变换局部化的思想,克服了傅立叶变换容易丢掉时间信息及不利于分析非平稳信号等缺点,能够提供一个随频率改变的时间-频率窗口,实现时间(空间)频率的局部分析,主要特点是通过变换能够充分突出某些方面的特征。“小波”就是小区域、长度有限、均值为0的波形,“小”即其具有衰减性,“波”即其具有正负交替的波动性。小波变换通过伸缩平移运算对信号(函数)逐步进行多尺度细化,达到高频处时间细分,低频处频率细分,并自动适应时频信号分析的要求,从而可聚焦到信号的任意细节。

设 $\psi(t) \in L^2(R)$, 其傅立叶变换为 $F_\psi(\omega)$, 若 $F_\psi(\omega)$ 满足容许条件:

$$C_\psi = \int_{R^*} \frac{|F_\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

则称 $\psi(t)$ 为一个基本小波或母小波。式中: $R^* = R - \{0\}$ 表示非零实数全体。对于实数对 (a, b) , 参数 a 为非零实数, 函数 $\phi(a, b)(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$ 称为由小波母函数 $\psi(x)$ 生成的依赖于参数对 (a, b) 的连续小波函数, 简称小波。其中 a 为伸缩因子, a 较大, 分析频率低, a 较小, 分析频率高, b 为平移因子。

对路面弯沉检测数据等任意的函数或信号 $f(x)$ 的连续小波变换定义为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_R f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (2)$$

其逆变换(即回复信号或重构信号)为:

$$f(x) = \frac{1}{C_\psi} \iint_{R \times R^*} W_f(a, b) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) da db \quad (3)$$

从定义式可知:连续小波变换实际就是选定一个小波,与处在分析时段部分的信号进行比较,并计算该时刻的连续变换小波系数 C , C 表示该小波与处在分析时段内的信号波形的相似程度, C 越大,两者的波形相似程度越高,然后调整参数 a 、 b ,计算出所有尺度的连续小波变换系数,重构信号,即完成了小波变换。

1.2 小波消噪原理

小波分析的重要应用之一就是信号消噪,其基本思想是信号由有用部分和噪声构成的,通过小波变换对信号进行层层分解,使有用部分与噪声分离,进而获得有用部分。在实际工程应用中,有用信号通常表现为低频信号或是一些比较平稳的信号,而噪声信号则通常表现为高频信号,为了获得信号中的有用部分,必须对信号进行分解,即 $S = CA_1 + CD_1 = CA_2 + CD_1 + CD_2 = CA_n + CD_1 + CD_2 + \dots + CD_n$, 其中 CA_i 为分解的近似部分, CD_i 为分解的细节部分, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。噪声部分通常包含在 CD_i 中,用门限阈值对小波系数进行处理,对处理过的小波系数作逆变换 C_0^{-1} , 重构信号即可达到去噪目的。

2 弯沉正态化

将路面检测弯沉看作含噪声的信号,利用 Matlab 中的小波(wavelet)工具箱对其进行消噪处理。经过试验,发现利用 Daubecheies(dbN)小波系处理弯沉数据的效果较好,dbN 小波的特点是随着阶次(序列 N)的增大消失矩阶数越大,光滑性越好,频域的局部化能力越强,频带的划分效果越好,但使时域紧支撑性减弱,并大大增加计算量,实时性变差,较多地改变了原信号的特征;同时,变换等级越大对原始信号中的有用信息破坏越大。因此选用小波函数 db2,变换等级选用 1 级进行路面弯沉数据分析。从 8 条高速公路检测到的路面弯沉数据中随机挑选 60 组数据进行路面弯沉正态化分析,组距划分与路面管理系统(CPMS)的路段划分一致,所有数据皆已进行季节、温度影响修正。路面弯沉正态化处理方式有小波消噪、3 倍标准差法(以下简称 3S 法)、2 倍标准差法(以下简称 2S 法)等,采用 Shapiro-Wilk 检验法检验路面弯沉数据是否服从正态分布。路面弯沉正态化分析结果见表 1。

表 1 路面弯沉正态化分析结果

项目	正态分布/组	非正态分布/组	正态化率/%
原始数据	12	48	20.0
原始数据小波消噪	35	25	58.3
原始数据 3S 法处理	16	44	26.7
原始数据 3S 法处理后小波消噪	37	23	61.7
原始数据 2S 法处理	29	31	48.3
原始数据 2S 法处理后小波消噪	52	8	86.7

由表 1 可得:从路面上采集的弯沉数据服从正态分布的仅 20.0%,不能直接按文献[9]中的公式计算路面弯沉代表值,必须对其进行处理,使其服从正态分布。因此考虑采用规范中推荐的 3 倍标准差法(3S 法)、2 倍标准差法(2S 法)剔除原始数据中超出 $\bar{l} \pm (2 \sim 3)s$ 的特异值,然后进行正态化判断。两种方法处理后数据的正态化率(服从正态分布的数据组数与总数据组数的比值)分别为 26.7%、48.3%,仍然较低,满足不了公式计算的要求,说明原始数据中的各类干扰因素较多即噪声较强。因此考虑对原始数据、3S 法及 2S 法处理后的数据进行小波变换处理,以消除数据中含有的干扰信号。小波变换后 3 组数据的正态化率分别为 58.3%、61.7%、86.7%,前两组数据的正态化率仍然较低,2S 法后采用小波变换处理的正态化率达到 86.7%,基本满足规范公式计算的要求。且 2S 法后采用小波变换处理弯沉数据,能使非正态数据组正态化率达 80.6%,正态组正态率达 93.1%,虽然仍然受噪声的影响使正态化率不能达到 100%,但已经较接近,因此采用 2S 法处理原始数据后再小波变换作为路面弯沉数据正态化的方法。

在路面技术状况评定过程中,如果每组数据都进行小波变换,势必非常麻烦,且影响数据处理效率,因此有必要建立处理前后数据间的联系,以减小计算量。将经 2S 法处理,再经小波变换处理后服从正态分布的数据进行对比,结果见表 2、3 及图 1、2。

从表 2、图 1 可以看出:经 2S 法处理后的路面弯沉原始数据再经小波变换消噪后,其平均值几乎没有变化,即小波变换完整地保留了路面弯沉的原始特征,说明这种变换是合理且有效的,两者的转换关系为: $y = 1.0017x - 0.0172$ ($R^2 = 0.9997$), 其中 x 、 y 分别为 2S 法处理后、小波变换后的路面弯沉平均值。同样,小波变换前后路面弯沉标准差也有良好的对应关系,两者的转换关系为: $y = 0.7856x - 0.2377$ ($R^2 =$

表 2 路面弯沉平均值(0.01 mm)

处理方式	各测试组弯沉平均值/(0.01 mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2S 法 处理后	7.2	7.2	9.9	6.9	7.6	8.9	10.4	6.1	7.2	6.9
	9.5	7.9	6.6	5.0	7.8	5.6	5.4	6.2	5.6	8.6
	7.1	7.8	6.6	4.5	5.2	8.2	10.6	11.2	8.7	9.5
	6.9	11.8	9.7	10.0	5.4	5.9	7.9	11.1	6.6	8.8
	6.5	11.1	13.7	8.5	8.3	5.8	7.3	6.0	5.5	5.1
	6.2	6.4								
2S 法处理 后再小波 变换	7.2	7.2	9.8	6.9	7.7	9.0	10.4	6.1	7.2	6.9
	9.6	7.9	6.6	5.0	7.8	5.6	5.4	6.2	5.6	8.6
	7.0	7.7	6.7	4.5	5.2	8.1	10.6	11.2	8.7	9.5
	6.9	11.9	9.7	10.0	5.4	5.9	7.8	11.2	6.6	8.8
	6.4	11.1	13.7	8.5	8.4	5.9	7.3	5.9	5.5	5.1
	6.2	6.5								

表 3 路面弯沉标准差(0.01 mm)

处理方式	各测试组弯沉标准差/(0.01 mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2S 法 处理后	2.83	3.33	4.35	3.32	3.74	4.85	5.67	3.23	3.37	3.33
	4.90	4.04	2.28	2.40	2.80	2.02	2.38	2.89	2.84	3.57
	2.68	3.39	3.13	1.83	2.40	3.27	5.50	3.48	3.09	3.68
	2.49	6.18	4.38	3.40	2.54	2.08	4.12	5.13	2.19	3.80
	2.64	5.10	5.09	3.24	3.61	2.40	2.71	1.82	2.45	2.16
	2.40	2.29								
2S 法处理 后再小波 变换	2.19	2.38	3.08	2.72	2.64	3.46	4.55	2.76	2.20	2.26
	3.61	3.12	1.62	1.96	2.31	1.48	1.66	2.18	1.87	2.88
	1.41	2.23	1.94	1.26	1.92	2.01	4.43	2.49	2.36	2.44
	1.78	4.04	2.79	2.30	1.83	0.91	3.07	4.30	1.50	2.86
	2.03	3.41	4.10	1.81	2.67	1.31	1.62	1.38	1.76	1.65
	1.61	1.27								

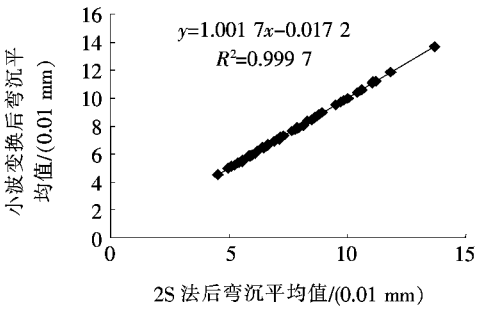


图 1 小波变换前后路面弯沉平均值关系图

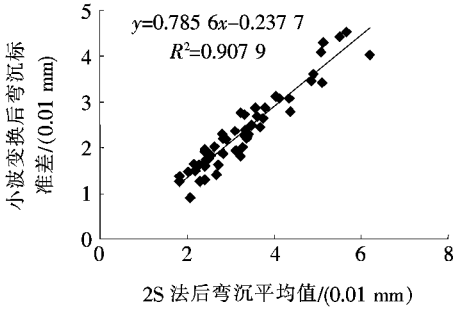


图 2 小波变换前后路面弯沉标准差关系图

0.907 9),其中 x 、 y 分别为 2S 法处理后、小波变换后的路面弯沉标准差。

上述分析表明:路面弯沉原始数据经 2S 法处理后再进行小波变换,不但能使弯沉服从正态分布,并能保持其原始特征,且小波变换前后的弯沉平均值、标准差存在良好的线性关系,因此可以利用这种关系式代表小波变换对原始数据进行正态化处理。

3 弯沉代表值新的计算方法

基于小波变换对路面弯沉正态化率的良好效果,提出了新的弯沉代表值计算方法,其推导步骤如下:

(1) 对路面弯沉数据进行温度、季节系数影响修正,并按路面管理系统路段进行分组。

(2) 采用 2 倍标准差法剔除各组弯沉数据中的特异值。

(3) 采用 Matlab 中的小波函数 db2、1 级变换等级对经第(2)步处理后的弯沉数据进行小波变换消噪,使弯沉数据服从正态分布。

(4) 计算路面弯沉平均值、标准差,建立由第(2)、(3)步处理后的弯沉平均值、标准差的关系式: $y = 1.001\ 7x - 0.017\ 2 (R^2 = 0.999\ 7)$,式中 x 、 y 分别为经第(2)步、第(3)步处理后的弯沉平均值; $y = 0.785\ 6x - 0.237\ 7 (R^2 = 0.907\ 9)$,式中 x 、 y 分别为

经第 2 步、第 3 步处理后的弯沉标准差。

(5) 基于小波变换完整地保留了弯沉的原始特征及良好的正态化转换率,提出新的路面弯沉代表值计算方法,表达式如式(4)所示:

$$l_r = (\alpha \bar{l} - 0.017\ 2) + Z_a (\beta S - 0.237\ 7) \quad (4)$$

式中: l_r 为弯沉代表值(0.01 mm); \bar{l} 为实测弯沉平均值(0.01 mm); S 为弯沉标准差(0.01 mm); Z_a 为保证率系数,按规范要求取值; α 为弯沉平均值修正系数,由第(4)步计算获得,取 1.001 7; β 为弯沉标准差修正系数,由第(4)步计算获得,取 0.785 6。

新的弯沉代表值计算法可直接用来计算路面弯沉代表值,取代了对弯沉数据进行小波变换的工作,提高了计算效率。

4 实体工程应用

应用新的弯沉代表值计算公式对某高速公路技术状况进行评定,该高速公路于 2004 年建成通车,运营期间进行了路面微表处、novachip、罩面等养护处理,路面结构见表 4。由于路面结构强度为抽样评定指标,单独计算与评定,故此次公路技术状况评定仅涉及路面结构强度。路面结构强度指数 PSSI 评定等级统计结果见表 5。

表 4 某高速公路路面结构

项目	干燥地基层路面	中湿、潮湿地基层路面
路面结构	4 cmAK-13A 改性沥青混凝土	4 cmAK-13A 改性沥青混凝土
	6 cmAC-20I 中粒式沥青混凝土	6 cmAC-20I 中粒式沥青混凝土
	8 cmAC-25I 粗粒式沥青混凝土	8 cmAC-25I 粗粒式沥青混凝土
	AH-90# 热沥青碎石封层	AH-90# 热沥青碎石封层
	18 cm6%水泥稳定碎石	18 cm6%水泥稳定碎石
	18 cm5%水泥稳定碎石	18 cm5%水泥稳定碎石
	20 cm4%水泥稳定碎石	20 cm4%水泥稳定碎石
	—	15 cm 级配碎石
路面总厚度/cm	74	89
设计弯沉/(0.01 mm)	22.7	22.7

表 5 路面 PSSI 评定等级对比

序号	规范中弯沉代表值算法				新弯沉代表值算法			
	代表值/ (0.01 mm)	SSI	PSSI	评定等级	代表值/ (0.01 mm)	SSI	PSSI	评定等级
1	18.0	1.3	97.8	优	14.7	1.5	99.5	优
2	19.2	1.2	96.8	优	12.5	1.8	99.9	优

续表 5

序号	规范中弯沉代表值算法				新弯沉代表值算法			
	代表值/ (0.01 mm)	SSI	PSSI	评定等级	代表值/ (0.01 mm)	SSI	PSSI	评定等级
3	26.1	0.9	85.4	良	17.7	1.3	98.0	优
4	20.2	1.1	95.6	优	12.3	1.8	99.9	优
5	15.5	1.5	99.2	优	11.9	1.9	99.9	优
6	27.5	0.8	82.2	良	22.7	1.0	92.0	优
7	20.8	1.1	94.8	优	14.0	1.6	99.6	优
8	27.3	0.8	82.6	良	17.5	1.3	98.1	优
9	21.7	1.0	93.6	优	14.6	1.6	99.5	优
10	19.7	1.2	96.2	优	15.4	1.5	99.2	优
11	28.9	0.8	78.9	中	23.5	1.0	90.5	优
12	19.8	1.1	96.0	优	13.4	1.7	99.8	优
13	21.9	1.0	93.2	优	16.4	1.4	98.8	优
14	18.8	1.2	97.1	优	15.2	1.5	99.3	优
15	25.7	0.9	86.3	良	19.3	1.2	96.6	优
16	23.6	1.0	90.3	优	18.8	1.2	97.1	优

表 5 表明:规范中弯沉代表值算法计算得到的 SSI 较小,新弯沉代表值算法算得的 SSI 较大,即按规范评定的路面结构强度较差,而用新的弯沉代表值算法评定的路面结构强度较好,说明采用小波变换对路面弯沉处理后降低了各种因素对弯沉值的影响,路面结构强度指标更能反映路面实际状况。

5 结论

(1) 从路面直接采集的弯沉数据正态率很低,不能按规范中的方法计算弯沉代表值,采用 3 倍及 2 倍标准差法剔除特异值后,弯沉正态率仍较低,也不能直接计算,采用 2 倍标准差法剔除弯沉特异值后,再进行小波变换消噪,小波变换消噪前后,弯沉平均值、标准差具有良好的线性相关性,前者相关系数 R^2 为 0.999 7,后者相关系数 R^2 为 0.907 9,完整地保留了路面弯沉的原始特征,正态化率达到 86.7%,且能使非正态数据组正态化率达 80.6%,正态组正态化率达 93.1%,基本满足规范公式计算的要求。

(2) 基于小波变换对路面弯沉正态化率的良好效果,提出了新的弯沉计算公式 $l_r = (\alpha \bar{l} - 0.017\ 2)$

$+ Z_\alpha (\beta S - 0.237\ 7)$ 。

(3) 小波变换消噪降低了各种因素对弯沉值的影响,在公路技术状况评定中采用新的弯沉计算公式得到的 SSI 值比规范推荐的公式计算值大,评定的路面状况更优良,路面结构指标更能反映路面实际状况。

参考文献:

[1] JTG H20—2007 公路技术状况评定标准[S].
[2] 曾小军. 自动弯沉仪检测数据的正态性检验与分析[J]. 广东公路交通,2013(1).
[3] 林大山,杨晓,徐科. FWD 弯沉的概率分布[J]. 中外公路,2005(5).
[4] 钟彪. 沥青混凝土路面预防性养护措施决策与应用[J]. 中外公路,2018(6).
[5] 房军,等. 自动弯沉仪检测值的统计分布研究[J]. 北方交通,2010(6).
[6] 陈团结,岳学军. 小波变换在弯沉检测数据消噪中的应用[J]. 公路交通科技,2005(9).
[7] 毛庆洲等. 基于小波变换的路面平整自适应提取算法[J]. 中国公路学报,2015(10).
[8] 关履泰. 小波方法与应用[M]. 北京:高等教育出版社,2007.
[9] JTG F80/1—2017 公路工程质量检验评定标准[S].