

FWD 无损检测数值的动态分析

Dynamic analysis of FWD nondestructive test data

魏翠玲

(大连理工大学土建学院, 大连, 116024)

王复明

(郑州工业大学水环学院, 郑州, 450002)

周 晶

(大连理工大学土建学院, 大连, 116024)

中图法分类号 U 416

作者简介 魏翠玲, 女, 1963 年 10 月出生, 副教授。1984 年毕业于复旦大学应用力学系, 1989 年获大连理工大学地震工程与防护工程专业硕士学位, 现为大连理工大学博士学位研究生。工作单位, 河北建筑科技学院。

1 引言

目前, 高速公路事业在世界各国引起普遍重视, 我国的高等级公路建设也在蓬勃发展。路面检测技术, 作为公路建设与管理中的关键性、基础性技术, 不仅对于检测和控制工程质量至关重要, 而且决定着路网养护决策的科学性, 并直接影响养路资金分配的合理性, 因而在国内外也深受重视^[1]。

近 20 年来, 路面的无损检测与评价技术因为具有不损害路面结构的独特优势而在国内外得到了迅速的发展。作为最重要的路面结构状况评价指标, 弯沉的量测与分析技术发展十分迅速, 自 1953 年贝克曼 (Benkleman) 发明梁式弯沉仪以来, 路面弯沉检测设备已从静力弯沉仪发展到能够模拟行车荷载作用的落锤式弯沉仪 (FWD), 从单点最大弯沉检测发展到对路面弯沉盆的检测, 并将原来仅局限于柔性路面意义上的弯沉概念发展到刚性路面的结构评价与设计分析中, 路面结构性能的评价也从路面整体强度评定发展到对路面各结构层模量的反分析, 各种评价软件也广泛用于实际, 取得了巨大的经济效益和社会效益。

FWD 是目前国际上比较流行的先进的路面无损检测设备, 可很好地模拟行车荷载对路面结构的作用并精确测出路表的变形信息^[2], 但是, 目前用于 FWD 检测结果的分析技术存在着许多不足, 有待进一步发展^[3]。如 FWD 采用的是脉冲荷载, 而常规的 FWD 数值的分析方法却仍是以静荷载条件为基础, 通过弯沉盆研究采用静力分析而非动力分析来反演路面特性; 另外, 路面材料的非线性行为以及路基中刚性卧底层的存在等都对弯沉有一定影响, 所有这些都有待我们进一步去探索研究。本文针对 FWD 无损检测数值的特点, 给出一种动态处理 FWD 数值的方法, 并对某路面的实测数值进行了分析。

2 FWD 及其动态检测数值与分析

FWD 装置是通过计算机控制下的液压系统提升并释放一重锤而对路面施加脉冲荷载, 荷载大小可通过改变锤重和提升高度来进行调整, 并通过刚性圆盘作用到路面上。路面的弯沉通过按一定规律布置的速度型传感器来测定。FWD 时程数据可自动采集记录, 通常, 每 0.1 ms 采集数据一次, 总采集时间为 60 ms。现有的研究成果充分表明, FWD 是进行弯沉检测和结构性能评价的较理想的工具, 1988 年美国实施了著名的战略性公路研究计划 (SHRP), 其中长达 20 年的路面长期跟踪检测与使用性能研究就是选用了 Dynatest FWD 作为路面弯沉检测的标准设备。

FWD 可提供路面系统的输入与输出双方面的时程数据, 输入为力, 而输出则为每一传感器处的路表弯沉。通过脉冲响应函数 $h(t)$, 可将系统的输入 $F(t)$ 及输出 $Z(t)$ 用卷积积分表达如下:

$$Z(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) F(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

本文中采用快速 Fourier 积分变换将 FWD 脉冲数据由时域转换到频域, 然后在频域进行分析。将时间脉冲信号记为 $f(t)$, 其 Fourier 积分变换表示为 $F(\omega)$, 由于 FWD 的荷载脉冲形状为近似的半正弦波, 在转换过程中将之视为周期函数。在频域中与 (1) 式对应的输入—输出关系为:

$$Z(\omega) = H(\omega) F(\omega) \quad (2)$$

式中 $Z(\omega)$ 为 Fourier 变换位移 (输出), $F(\omega)$ 为 Fourier 变换力 (输入), $H(\omega)$ 为频率响应函数。频率响应函数为一复数, 有相应的幅值和相角, 它表征路面系统的线性动力响应, 其物理意义为每一传感器处在稳态正弦垂直表面力作用下由单位力产生的垂直位移。频率响应函数可由式 (2) 计算, 即用力和位移的时程信

号的快速傅里叶变换(FFT)求得。

本文中的 FFT 计算程序样本点必须是 2 的幂数,常规的样本尺寸为 $2^{10} = 1\,024$, 由于 FWD 的采样点区间尺寸为 600, 故需将 FWD 数据以一系列的零值进行补充。FWD 的数据采样间隔时间为 $\Delta t = 0.1\text{ ms}$, 选取 FFT 的频率范围为取样率之倒数, 频率间隔为 9.7656 Hz , Nyquist 频率 $f_{\frac{N}{2}} = \frac{1}{2\Delta t} = 5\,000\text{ Hz}$ 。

通过对荷载及弯沉的时程脉冲数值的 FFT 进行分析,可确定问题的频域分析带宽,略去高频部分,从而使得检测数值的分析更加简洁有效。根据 FWD 测试数据的一般情况,在 60 ms 的数据末端因脉冲截断而有一个尾部,即数值不为零,不同的路段及测点尾率不同,补零后整个脉冲数据曲线存在不连续点,这将会对脉冲的 FFT 产生不理想的影响(见算例),本文中通过利用一个线性校正将 FWD 脉冲数值进行调整,可将此影响减轻,大量的计算结果表明,线性校正后幅值与相角曲线的总体形状与原始数据曲线保持一致,但原始数据曲线的振荡得到减缓乃至消除。

频率响应函数之幅值随距离 r 的增加而减小,并随频率的增长而呈下降趋势。某些路段的幅值响应曲线上有明显的非常点,其形状有凹、凸或凹凸的组合,非常率随 r 的增加而降低,幅值曲线有 2~3 处微分零位(不存在)相对应于相角曲线的跳跃。不同路段的计算结果表明,频率响应函数的幅值及相角曲线的凹凸程度与路面的厚度有着密切的关系,非常率随路面厚度的增加而降低。

利用本文方法对 FWD 数据进行处理,由于可利用数值的增加从而可获得更多的路面结构层信息资料并使得对路面结构特性的分析结果更加精确可靠。

3 算 例

图 1 为某高速公路路段的 FWD 荷载脉冲时程曲线,荷载单位为 kPa,由图上可以看出,大约在 19 ms 处达到脉冲峰值。FWD 的九个传感器分别布置在距落锤中心为 0, 200, 305, 450, 610, 914, 1 219, 1 524, 1 829 mm 的位置处。九个传感器的弯沉时程示于图 2,单位为 μm ,注意到图中随距离的增加弯沉减少,脉冲峰值的产生亦随距离的增加而发生时间渐迟,此乃距落锤位置渐远时响应逐渐落后的波状表现,这一动态表现更进一步证明了静态分析方法的不合理之处。

通过对荷载及各传感器的弯沉进行快速傅里叶变换(FFT),发现荷载脉冲的 FFT 的大部分能量位于 0~250 Hz 范围之内,弯沉的 FFT 亦有类似的结论。根据这一结论,在以后的分析中可将高频部分略去,从而将

计算加以简化。图 3 与图 4 分别给出了荷载及第一个传感器 W1 的 0~300 Hz 范围内的 FFT(实部与虚部)。

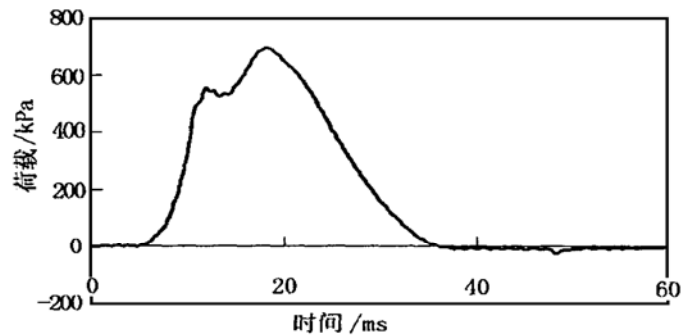


图 1 荷载时程曲线

Fig. 1 Load versus time

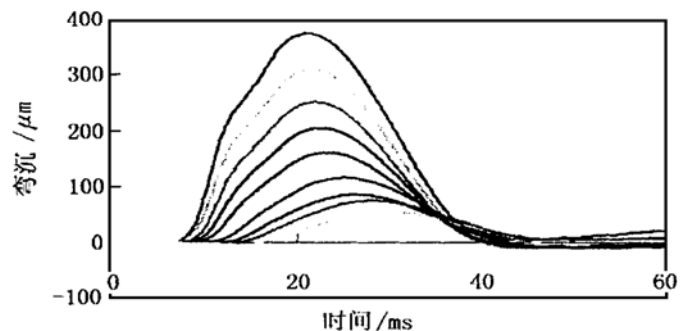


图 2 弯沉时程曲线

Fig. 2 Deflections versus time

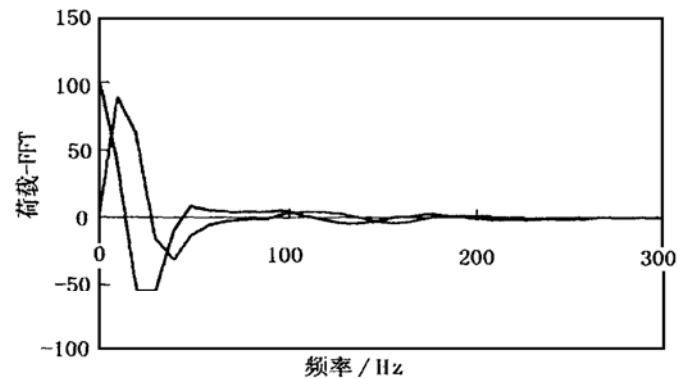


图 3 荷载的快速傅里叶变换(0~300 Hz)

Fig. 3 FFT of force pulse (0~300 Hz)

频率响应函数的幅值代表由 FWD 荷载产生的路表竖向变形结果,第 1 至第 9 个传感器处的频率响应函数的幅值按由大到小的顺序排列,相角数值代表荷载与表面弯沉之间的时滞角,按由小到大的顺序排列。图 5 为频率响应函数的幅值图,由于脉冲末端截断引起的不连续所造成的振荡可从图中明显看出。图 6,图 7 给出了将脉冲数据进行线性校正后的频率响应函数图,可以看出线性校正是很有效的,由脉冲截断引起的振荡基本消失,给出了较为平缓的幅值与相角曲线。幅值图上有中心位于 58.65 Hz 处的凹凸形状对应于相角曲线上以同一频率为中心的凹形。本例路段的频

率响应函数图中的非常率为中等偏高,有些路段的频响应函数曲线上没有非常点,而另外一些路段的频响应函数曲线上则有几处程度很大的非常处。相角图中第四至第九个传感器的相角数据有“跳跃”,这是由于反正切函数限制于 -180° 至 180° 范围之故。当相角大于 180° 时产生跳跃,引起反正切转到从 -180° 开始的另一分支。本例中,跳跃起始位置大约在39.1 Hz处,以最远的传感器先跳,前三个传感器表现出无跳跃,这是因为其相角在上述确定的有效频率范围内不会达到 180° 以外。

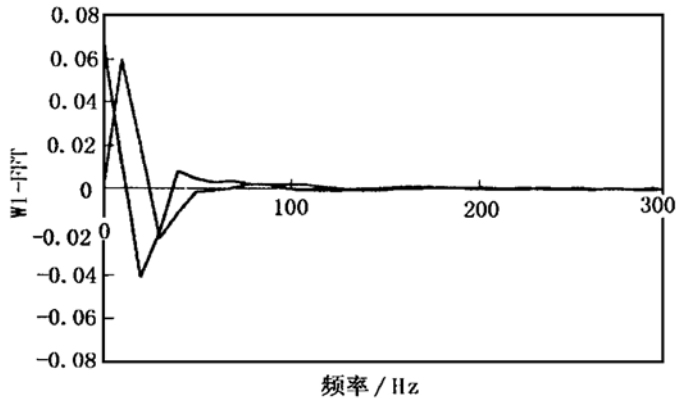


图4 弯沉W1的快速傅里叶变换(0~300 Hz)

Fig. 4 FFT of deflection W1(0~300 Hz)

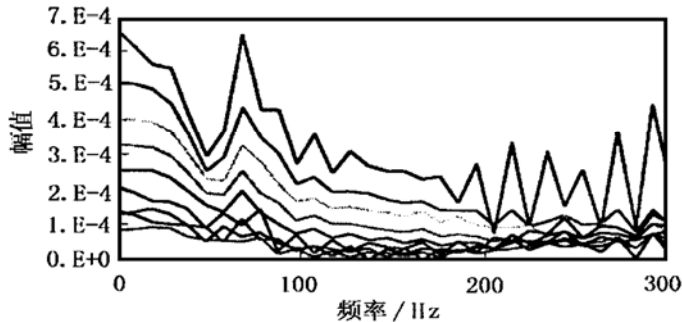


图5 频率响应函数(幅值)

Fig. 5 Magnitude of frequency response function versus frequency

4 结 语

FWD是目前工程应用中最先进的路面无损检测设备,其检测结果包含大量的路面特性信息而目前只有很小一部分被利用,用于FWD数值的分析技术急待发展。本文给出的分析方法,即利用快速傅里叶变换,将时间全程的FWD数值由时域转换到频域进行动态分析以获得路面的动力响应信息,通过计算表明是快捷、有效的,且在频域中更易于进行理论与实验的某些对比分析,诊断理论模型与实际系统的差异。与仅利用脉冲峰值的静态分析相比,动态分析由于考虑了路面各层的瞬态(依赖时间的)反应而具有许多优势,如可通过对荷载与弯沉的FFT分析确定频域分析带宽,

简化计算范围;通过对频率响应函数曲线的分析探测路段的自然频率等。另外,利用线性校正对原始的FWD脉冲数值进行处理,可减轻或消除由于脉冲截断引起的数值不连续对频率响应函数所造成的不良影响。

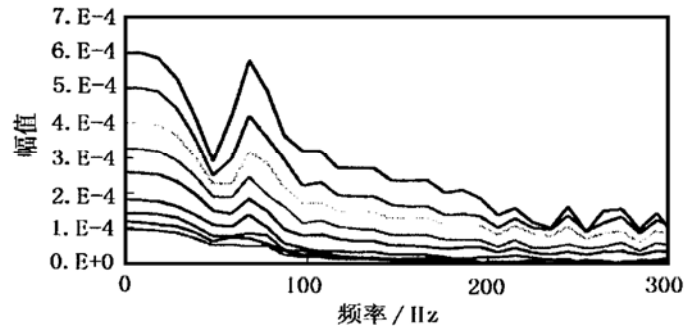


图6 线性校正后的频率响应函数(幅值)

Fig. 6 Magnitude of frequency response function versus frequency

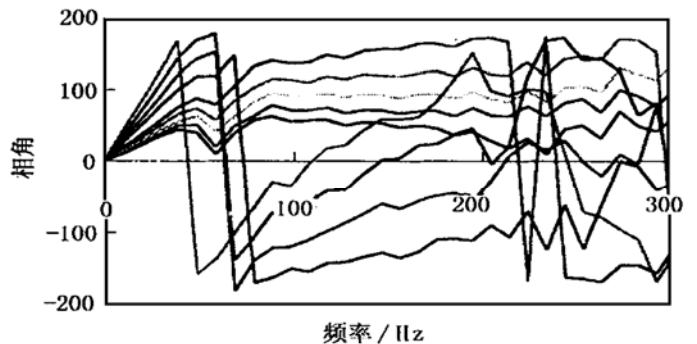


图7 线性校正后的频率响应函数(相角)

Fig. 7 Phase angle of frequency response function versus frequency (corrected pulse)

由于粘弹特性为动态所固有,故而利用对FWD数值的动态分析可处理沥青砼面层的粘弹性表现,将之应用于路面系统的动态反分析过程,可更精确地确定路面各层的模量,获取路段的响应特点,使路面结构的分析更精确,物理上更逼真,因而动态分析在工程实际中有着更加广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 王复明,刘文廷.路面无损检测与评价技术的研究与应用.二十一世纪土木工程科学的发展趋势.北京:科学出版社,1997.65~73
- 2 Magnuson A H, Lytton R L, Briggs R. Comparison of computer predictions and field data for dynamic analysis of falling-weight deflectometer data. Transportation Research Record 1293, Back-calculation of pavement Moduli, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D C, 1991. 61~71
- 3 Magnuson A H. Dynamic analysis of falling-weight deflectometer data. Report No. FHWA/TX-88/1175-1, Texas Transportation Institute, Texas A&M System, College Station, Texas 77843-3135, November, 1988