

田间有效软路面谱的统计分析*

郑联珠 程悦菽 梅雷军 张志伟 殷继红

(吉林工业大学)

提 要 本文利用专门研制的软路面不平度测定仪,测量了几种田间软地面的路面谱(原始地表路面谱、车辙谱和有效路面谱),根据试验数据统计出考虑了土壤和轮胎特性影响的有效软路面谱计算表达式。经试验验证,该公式的计算值和实测值吻合较好。

关键词 有效软路面谱 土壤特性 轮胎特性

一 前 言

路面不平是拖拉机及农机行驶时产生振动的主要激励源,通常用路面谱表示路面不平程度。为了研究车辆的振动及疲劳强度等问题,测取各种路面的路面谱是非常必要的。对于硬路面(如沥青路)的路面谱,目前国内外均已有了成熟的测取方法,并规定了路面谱的分级标准。但要测取田间、土路等会变形的软路面谱却是一个很复杂的问题,它不像硬路面那样只涉及地表形状,而且还和土壤特性、轮胎特性及载荷等参数有关。目前对软路面谱的测量尚无成熟的方法,大多沿用测硬路面谱的方法,测量未经轮胎行驶的原始路面谱,或测量轮胎行驶后形成的车辙作为软路面谱,前者反映了地表的自然情况,后者反映轮胎行驶后的路面状况,这两者都不是轮胎与软路面互相作用时,实际激励车辆振动的承载轮下的有效软路面谱,而对拖拉机和农机来说,这是最为重要的一种软路面谱。为研究有效软路面谱与软路面的土壤特性、轮胎特性及载荷等参数之间影响规律,我们研制了专门测量软路面不平度的测定仪,并进行了大量的田间软路面不平度的测量工作。本文从大量的测量数据中统计出有效软路面谱与上述诸参数之间定量关系式,然后通过先测得的原始地表谱来求得有效软路面谱的计算表达式,为计算拖拉机和其他车辆在软路面上行驶时的激励提供依据。

二 测试工况

我们研制的软路面不平度测定仪,有A、B和C三个测试轮,可分别测量原始路面谱 $q_A(\Omega)$ 、有效路面谱 $q_B(\Omega)$ 及车辙谱 $q_C(\Omega)$,测定仪结构简图如图1所示。有关测定仪原理及结构见〔1〕。

测试了四种农田软路面:甜菜收后地、土豆收后地、谷子和玉米的垄沟地。以土壤抗压强度特性系数 $K_t(\text{kPa}/\text{mm})$ 作为土壤坚实度的评价指标,通常用下列经验公式表示:

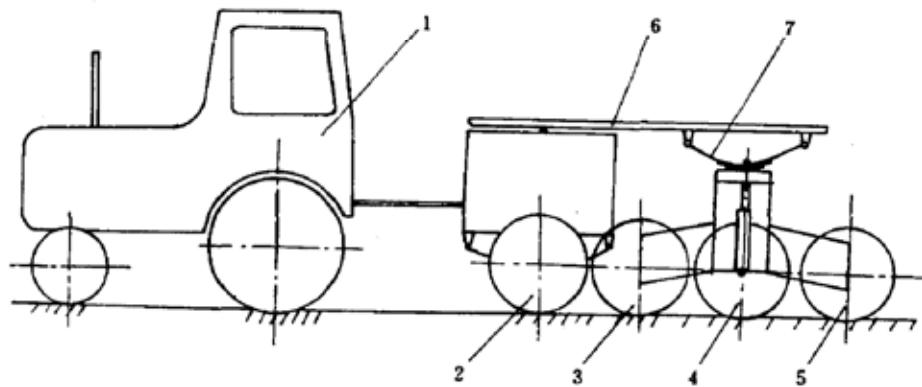
* 国家自然科学基金资助项目

$$q_n = Kh^\mu \quad (1)$$

式中 q_n — 土壤抗压强度(kPa);

h — 下陷量(mm);

μ — 土壤抗压强度升高参数, 四种路面土壤的水分较少, 并具有一定弹塑性, 近似取为 1。



1.牵引车 2.行走轮 3.A 测试轮 4.B 测试轮 5.C 测试轮 6.车架 7.板簧

图 1 软路面谱测定仪

Fig 1. The measuring equipment of the spectrum of soft Terrain

应用土壤坚实度计实测 q_n-h 曲线, 对每种路面实测 100 个位置的曲线, 作平均以后, 再线性化处理。测得 K_i 值如表 1 所示。

表 1 各种软路面 K_i 值

路面种类	K_i (kPa/mm)
甜菜收后地	2.25
土豆收后地	4.24
玉米垄沟地	26.98
谷子垄沟地	58.17

为研究土壤特性、轮胎气压和载荷对有效路面谱的影响规律, 改变测定仪 B 轮的胎压 p 和载荷 Q (A 和 C 轮的气压和载荷不变), 并进行全面试验。 p 和 Q 分别调节四种水平:

p (MPa): 0.1、0.167、0.25、0.32。

Q (kN): 3.2、3.6、4.3、5.3。

按上述三因素四种水平进行全面试验, 共进行了 64 种工况的田间软路面不平度的测试试验。对每一种工况的测试数据进行了平稳性和正态检验, 检验结果表明田间的路面不平度变化过程是一个平稳的各态历经的正态随机过程, 然后对数据进行谱处理, 得到这一工况下的三种软路面 $q_A(\Omega)$ 、 $q_B(\Omega)$ 和 $q_C(\Omega)$ 。

路面不平度的表达式为:

$$q(\Omega) = 10^a \Omega^{-w}, (\text{mm}^2 / (1/\text{m})) \quad (2)$$

式中 10^a — 路面不平度系数(因次随 W 而变);

Ω — 空间频率, $(1/\text{m})$;

W — 频率指数(无因次的数)。

上式中 10^a 是主频带下限的路面谱值, W 决定路面不平度的频率结构, 因此决定路面不平度能量大小, 关键是 a 和 W 两个指数, 只要找出土壤特性系数 K_t 、轮胎气压 p 和载荷 Q 对 a 和 w 指数的影响规律, 就可确定有效软路面谱 $q_B(\Omega)$ 与原始路面谱 $q_A(\Omega)$ 、 K_t 、 p 和 Q 之间的统计关系式: $q_B(\Omega) = f[q_A(\Omega), K_t, p, Q]$ 。这样当已知该路面的原始地表谱及土壤特性后, 根据不同车辆的轮胎特性及载荷 Q , 就可计算有效路面谱 $q_B(\Omega)$ 了。

三 有效软路面谱的统计分析

为便于分析各因素对 a 和 w 指数影响规律, 可对 $q(\Omega)$ 取对数形式:

$$\log q(\Omega) = a - W \log \Omega \quad (3)$$

在双对数坐标系中进行统计分析处理。

1. 单因素回归方程

在同一种路面上, 保持某一载荷 Q 的条件下, 改变轮胎气压 p , 测取 $q(\Omega)$, 并拟合成对数回归方程:

$$\log[q_A(\Omega)] = a_{Ai} - W_{Ai} \cdot \log \Omega \quad (4)$$

$$\log[q_B(\Omega)] = a_{Bi} - W_{Bi} \cdot \log \Omega \quad (5)$$

(4)、(5) 式中各参数的脚标 A 、 B 分别代表原始路面谱和有效路面谱, i 代表某一种轮胎气压。

$$\text{设: } x_i = \frac{a_{Ai} - a_{Bi}}{a_A} \quad (6)$$

$$y_i = \frac{W_{Bi} - W_{Ai}}{W_{Ai}} \quad (7)$$

(6)、(7) 式的 x 和 y 表示了当其他参数相同, 仅仅由于轮胎气压 p 的变化造成 a 和 w 变化的程度。当改变 p_i 值, 就可相应测出 x_i 和 y_i 值, 根据 x_i-p_i 和 y_i-p_i 的变化关系, 回归出

单因素的回归方程。如以土豆收后地为例,在每一种 Q 下,都可拟合出 x 和 y 与 p 的回归方程,则四种不同水平 Q 的回归方程分别如表 2 所示。

表 2 四种载荷的回归方程

轮胎载荷 Q (kN)	回归方程				相关系数	
	$x = D_0 + D_1 p$		$y = D'_0 + D'_1 p$		ρ	
	D_0	D_1	D'_0	D'_1	x	y
3.2	0.077	0.3835	0.1326	1.7293	0.8901	0.8814
3.6	0.0759	0.4039	0.1603	1.6243	0.9345	0.8690
4.3	0.1324	0.4323	0.2077	1.8561	0.8433	0.9045
5.3	0.1440	0.4786	0.2568	1.9326	0.8991	0.9341

用同样方法可处理出其他三种路面的回归方程组(从略)。

2. 二因素回归方程

从表 2 所列数据,可以回归出 D_0 、 D_1 、 D'_0 及 D'_1 参数各自随 Q 变化而变化的回归方程,分别为:

$$C_0 = 0.0448Q + 0.2411 \quad \rho = 0.9962$$

$$C_1 = 0.0362Q - 0.412 \quad \rho = 0.9269$$

$$C'_0 = 0.1267Q + 1.2261 \quad \rho = 0.8552$$

$$C'_1 = 0.0591Q - 0.0531 \quad \rho = 0.9945$$

二因素回归方程模型为:

$$x = C_0 + C_1 p$$

$$y = C'_0 + C'_1 p$$

代入回归系数得回归方程为:

$$x = -0.412 + 0.0362Q + 0.2411p + 0.0448Qp \quad (8)$$

$$y = -0.0531 + 0.0591Q + 1.2261p + 0.1267Qp \quad (9)$$

用同样方法可求得其他三种路面的二因素回归方程:

甜菜收后地: $x = -0.0597 + 0.0588Q - 0.2066p + 0.1406Qp$

$$y = -0.0923 + 0.0063Q + 0.0549p + 0.7326Qp$$

玉米垄沟地: $x = -0.0114 + 0.0158Q - 0.074p + 0.1039Qp$

$$y = -0.0569 + 0.0417Q + 0.735p + 0.1825Qp$$

谷子垄沟地: $x = -0.0100 + 0.0159Q - 0.2133p + 0.1494Qp$

$$y = -0.0603 + 0.0437Q + 0.4788p + 0.2896Qp$$

3.三因素回归方程

根据上述四种路面的二因素回归方程的模型为:

$$x = b_0 + b_1 Q + b_2 p + b_3 Qp$$

$$y = b'_0 + b'_1 Q + b'_2 p + b'_3 Qp$$

进一步拟合 b_0 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b'_0 、 b'_1 、 b'_2 和 b'_3 随 K_t 变化的回归方程

$$b_0 = 7.6647 \times 10^{-4} K_t - 0.0481; \quad b'_0 = 3.1769 \times 10^{-4} K_t - 0.0729$$

$$b_1 = -6.2344 \times 10^{-4} K_t + 0.046; \quad b'_1 = 2.0373 \times 10^{-4} K_t + 0.0330$$

$$b_2 = -1.82 \times 10^{-3} K_t - 0.0212; \quad b'_2 = 1.52 \times 10^{-3} K_t + 0.5989$$

$$b_3 = 2.6059 \times 10^{-4} K_t + 0.1037; \quad b'_3 = -4.77 \times 10^{-3} K_t + 0.4434$$

最后得三因素回归方程为:

$$x = -0.0481 + 0.046Q - 0.0212p + 7.6647 \times 10^{-4} K_t + 0.1037Qp - 6.2344 \times 10^{-4} QK_t - 1.82 \times 10^{-3} K_t p + 2.6059 \times 10^{-4} QpK_t \quad (10)$$

$$y = -0.0729 + 0.033Q + 0.5989p + 3.1769 \times 10^{-4} K_t + 0.4434Qp + 2.037 \times 10^{-4} K_t Q + 1.52 \times 10^{-3} K_t p - 4.77 \times 10^{-3} QpK_t \quad (11)$$

上述三因素回归方程的模型为:

$$x = a_0 + a_1 Q + a_2 p + a_3 K_t + a_4 Qp + a_5 QK_t + a_6 K_t p + a_7 QpK_t \quad (12)$$

$$y = a'_0 + a'_1 Q + a'_2 p + a'_3 K_t + a'_4 Qp + a'_5 QK_t + a'_6 K_t p + a'_7 QpK_t \quad (13)$$

从方程模型表明, 方程包含了三个因素的独立影响, 两两交互影响和三项共同影响的综合结果, 较全面地考虑了 Q 、 p 和 K_t 对有效软路面谱的影响效果。定义 x 为不平度修正系数, y 为频率指数修正系数。

四 试验验证与分析

为验证拟合的三因素回归方程的可信度, 应用方程计算了甜菜地和谷子垄沟地的 x 和 y 值, 如表 3 所示, 并与再次试验的实测值相比如图 2 列出了部分工况的计算值与实测值。

从表 3 的计算结果表明, x 和 y 值随着轮胎气压 p 和载荷 Q 的增加而增加, 当土壤抗压强度低则 x 和 y 增加更大。这是由于气压 p 和载荷 Q 增加及 K_t 降低时, 轮胎下陷量增加, 同时软路面垂直变形量增加, 使原始地表不平中幅值更高的波形被碾平, 提高对原始不

平的平滑作用, 因而 x 值增加。又因 p 和 Q 的增加, 加大了轮胎与地面的接触面积, 造成更多较高频率的波形被碾平, 起到滤波作用, 使有效路面谱的能量在频率域上分布规律有所改变, 即降低高频能量, 提高了低频能量, 造成有效路面谱的频率指数 W_B 大于原始路面谱的 W_A , 所以 y 值增加。

表3 x 和 y 的计算值

路面类型	气压 载荷	0.1 (MPa)		0.167 (MPa)		0.245 (MPa)		0.315 (MPa)	
		x	y	x	y	x	y	x	y
甜菜收后地 $K_t = 2.25$ (kPa/mm)	3.2 (kN)	0.1272	0.2336	0.1478	0.3667	0.1719	0.5217	0.1935	0.6607
	3.6 (kN)	0.1492	0.2643	0.1726	0.4090	0.2000	0.5774	0.2245	0.7286
	4.3 (kN)	0.1877	0.3180	0.2167	0.4830	0.2491	0.6751	0.2787	0.8475
	5.3 (kN)	0.2427	0.3947	0.2781	0.5887	0.3192	0.8105	0.3561	1.0172
谷子垄沟地 $K_t = 58.17$ (kPa/mm)	3.2 (kN)	0.053	0.2109	0.070	0.2926	0.090	0.3826	0.1074	0.4729
	3.6 (kN)	0.0616	0.2355	0.0818	0.3216	0.1052	0.4218	0.1263	0.5117
	4.3 (kN)	0.0767	0.2785	0.1018	0.3724	0.1324	0.4816	0.1593	0.5797
	5.3 (kN)	0.0984	0.3400	0.1312	0.4449	0.1713	0.5671	0.2065	0.6768

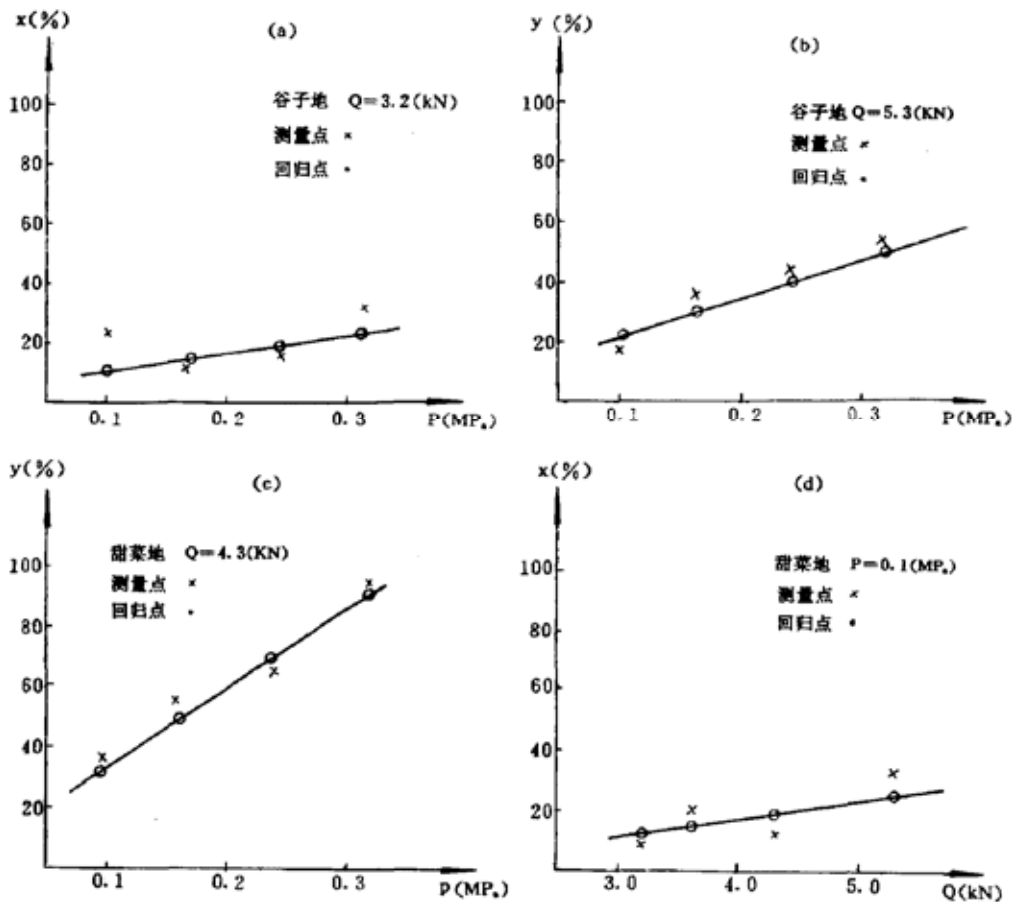


图2 计算值与实测值的比较

Fig. 2. Comparison to the calculated value and measured value

为验证回归方程可信度,再度在甜菜地和谷子垄沟地进行验证试验,从图2的计算和实测的 x 和 y 值相比较,表明两者符合较好,说明处理成的三因素回归方程是基本正确的。

当已知 x 和 y 值后,就可由原始路面谱来确定有效路面谱的计算公式:

$$x = \frac{a_A - a_B}{a_A} \quad \text{则 } a_B = a_A(1 - x) \quad (14)$$

$$y = \frac{W_B - W_A}{W_A} \quad \text{则 } W_B = W_A(1 + y) \quad (15)$$

因此有效软路面谱:

$$q_B(\Omega) = 10^{a_B} \Omega^{W_B} \quad (16)$$

当已测得原始路面谱 $q_A(\Omega)$ 的 a_A 和 W_A 后,并已知土壤和轮胎特性,就可根据本文提供的(10)和(11)式求出 x 和 y 值,然后就可计算出实际激励车辆振动的有效软路面谱 $q_B(\Omega)$ 。

例如:玉米垄沟地,其 $K_t = 26.98(\text{kPa})$ 、 $p = 0.17\text{MPa}$ 、 $Q = 3.4(\text{kN})$,先测得原始路面谱 $q_A(\Omega) = 10^{1.9} \Omega^{-3.38}$,即 $a_A = 1.9$, $W_A = 3.38$,求 $q_B(\Omega)$ 。

将 K_t 、 p 和 Q 数据代入(10)和(11)式计算得:

$$x = 0.1239 \quad \text{则 } a_B = a_A(1 - x) = 1.9(1 - 0.1239) = 1.66$$

$$y = 0.3572 \quad \text{则 } W_B = W_A(1 + y) = 3.38(1 + 0.3572) = 4.58$$

所以求得 $q_B(\Omega) = 10^{1.66} \Omega^{-4.58}$ 。

通过田间不同软路面的测试,揭示了 $q_B(\Omega)$ 与 $q_A(\Omega)$ 、 K_t 、 p 和 Q 参数间的影响趋势和规律,初步统计出 $q_B(\Omega)$ 的定量计算式,但由于土壤条件极其复杂,有效不平度的影响机理有待于更大量的试验结果来总结,以便求得一个更全面的软路面谱计算式,为拖拉机和农机的设计和研究工作提供参考。

五 结 论

1. 本文提出了实际激励车辆的是有效路面谱,它不仅与原始地表有关,并与土壤特性、轮胎气压及载荷有关的理论。

2. 通过田间的三因素四水平的大量试验,初步统计出根据原始路面谱进行有效软路面谱计算的定量公式,计算值与实测值吻合较好,说明定量计算公式是可行的。

参 考 文 献

- [1] 郑联珠等:“软路面不平度测量装置及其动态特性分析”,《农业机械学报》,1991(2)。
- [2] 梅雷军等:“软路面不平度测量方法的研究”,《农业机械学报》,1991(2)。
- [3] M.C.贝克:《地面—车辆系统导论》,北京,机械工业出版社,1978。
- [4] 庄继德:《汽车通过性》,长春,吉林科技出版社,1979。

Statistics Analysis of the Effective Spectrum of the Soft Terrain Surface

Zheng Lianzhu Cheng Yuesun Mei Leijun Zhang Zhiwei Yin Jihong
(Jilin University of Technology)

Abstract

The authors have measured the spectrums of the soft terrain surface by the measuring equipment of the soft terrain roughness (spectrum of the original terrain surface, spectrum of rut, spectrum of effective terrain surface), and according to testing results have put forward the relation of the effective spectrum of the soft terrain in consideration of the influence of the soil and the tyres. Results of test have shown that the good agreement is shown by comparing the calculated results with measured ones.

Key words Spectrum of the soft terrain surface Soil character Tyre character