

文章编号：1004-051X(2002)02-0017-03

路况服务性能评定指标的综述与分析

李 拔¹, 莫志凡²

(1. 重庆交通学院道路工程系, 四川 重庆 400074; 2. 广西路桥总公司机械施工处, 广西 南宁 530001)

摘 要：针对目前常用的几个路况服务性能评价指标的特点及其相互之间的关系，阐述了车辆跳跃的数学计算和路况功能的评定。

关键词：路况性能；评定指标；车辆跳跃；分析

中图分类号：U418 文献标识码：A

Description and Analysis of Road Service Performance Evaluation Indicator

LI Ba¹, MO Zhi-fan²

(1. Road Engineering Dept. of Chongqing Communications College, Chongqing, Sichuan 400074

2. The Mechanical Construction Divi. of Guangxi Road and Bridge Company, Nanning, Guangxi 530001, China)

Abstract : Focus on the characteristics of some normal road service performance evaluation indicators and the relations among them, the paper illustrates the mathematical calculation on vehicle bound and the assessment on function of road condition.

Key Words : function of road condition ; evaluation indicator ; vehicle bound ; analysis

长期以来，人们一直把路况功能指标评定作为衡量道路使用性能的重要标准，其中被广泛采用的有：现有路况功能指标（PSI），国际平整度指标（IRI）等。

本文通过分析了PSR和IRI及其它它们之间的关系，然后采用四分之一车辆模型和功率谱模型，根据相应的道路物理参数以及四分之一车辆模型的动态性能，进行车辆跳跃的数学计算，求得车辆跳跃指标，并说明怎样用车辆跳跃来评价路况服务性能，同时建议把车辆跳跃也作为路况功能评定的一个重要指标。

1 PSI和IRI及其之间的关系

1.1 现有路况服务性能指标（PSI）

人们在对路面进行服务能力评价时道路的服务能

力，称为现时服务能力。对现时服务能力进行的评定称为现有路况功能评定。进行路况功能评定时，对于各评价路段，由评定小组各成员分别对路面的服务能力按自己的意见进行评分，然后，对各小组的评分结果进行综合，目的是对路面能力进行主观的评价。

综合各路段状况的测量结果和相应的服务能力的主观评定值，对结果作统计分析，则可得：

$$PSI = 5.41 - 1.80\lg(1 + \overline{SV}) - 0.09\sqrt{C + P} \quad (1)$$

式中：PSI——现时服务能力指标；

$\overline{SV}$ ——两条轮迹的平均坡度方差；

$$SV = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n}(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n - 1} \quad (2)$$

X_i ——第*i*次坡度测定值

n——总测定次数

C——裂缝长度（ft/1 000 ft²）；

P——修补长度（ft²/1 000 ft²）；

裂缝长度定义为每1 000 ft²（93 m²）路面范围内3级和4级裂缝的总长度。裂缝长度按平均或垂直路中线的投影长度计。其中3级裂缝为在一半以上长度内

收稿日期 2002-05-17

基金项目 重庆市教委科技项目(011601)

作者简介 李 拔(1972-)男,湖北黄石人,硕士研究生,主要从事路基、路面工程研究;莫志凡(1970-)男,广西桂林人,工程师,从事公路桥涵施工技术管理与研究。

缝隙张开或碎裂的宽度达 0.63 mm 以上的裂缝；4 级裂缝则为已被填封的裂缝。裂缝修补以每 1 000 ft² (93 m²) 路面内进行修补处理的面积计。

1.2 国际平整度指标 (IRI) 及其与现有路况功能评定 (PSR) 的关系

现有路况功能评定，在不同的国家、地区，以及采用不同的测量仪器都会有不同的评定结果，因而可比性较差。世界银行在 80 年代组织了国际联合小组，花了多年时间提出了可供国际共用的平整度指标—国际平整度指数 IRI。IRI 是以计算机为基础的虚拟响应型系统，是以纵剖面为基础的统计量。

IRI 的分析方法可用于不同类型的纵断仪。IRI 被定义为真实断面的性质，对它可以用任一可靠的纵断仪测定，其分析方法能将诸如采样间距等纵断面测量参数的影响减少到最小，IRI 概括了影响车辆响应的平整度性质。IRI 与大多数车辆响应型仪测得的纵断面指数有很好的相关性。Al - Omari 等依据美国战略路面研究计划 (SHRP) 中路面长期使用性能项目的 378 个观测路段的数据 (包括沥青路面和水泥混凝土路面)，建立了以国际平整度指数 IRI (m/km) 为指标的路面平整度同服务能力评定 PSR 的经验关系式：

$$IRI = 3.85 \ln (5/PSR) \tag{3}$$

以上均是通过仪器测量或人为感觉得到的对路面使用性能的评定。笔者在以前的文章中曾详细的介绍了从另一个角度来求得 IRI 的结果，即通过数值分析方法得到：

$$IRI = (1/vT) \int dt | \sum_k \omega_k A(q_k) R_0(\omega_k) \sin(\alpha_{\omega k} + \omega_k t + \varphi_{qk}) | \tag{4}$$

其中：v = 80 km/h；

R₀ (ω_n) ——车辆响应函数；

$$R_0(\omega) = \alpha_0 \omega^2 / (1 + \alpha_1 \omega^2 + \alpha_2 \omega^4 + \alpha_3 \omega^6 + \alpha_4 \omega^8)^{1/2}$$

$$\alpha_0 = M_s/k_s$$

$$\alpha_1 = c_s^2/k_s^2 - 2 M_s/k_s + (M_s + M_u)/k_t$$

$$\alpha_2 = [M_s/k_s + (M_s + M_u)/k_t]^2 + 2 M_s M_u k_s - c_s^2 (M_s + M_u)/k_s^2 k_t$$

$$\alpha_3 = c_s^2 (M_s + M_u)^2/k_s^2 k_t^2 - 2 M_s M_u (k_s M_u + (k_s + k_t) M_s)/k_s^2 k_t^2$$

$$\alpha_4 = (M_s M_u/k_t k_s)^2$$

2 车辆跳跃指标

当车辆行驶在较光滑的道路上时，它的垂直向加

速度通常不是很大，但在这种情况下，乘车者只是对车辆跳跃比较敏感。参考文献 [1] 的研究也表明人的舒适感与人所体验的车辆跳跃密切相关。因此，由评定小组作出的路况功能评定实际上与平均车辆跳跃或车辆跳跃本身在相应范围内的标准偏差有关。

2.1 车辆跳跃的数值求解

如图 1 所示，采用具有双自由度的四分之一车辆模型。由牛顿第二定律到系统的运动方程为：

$$M_s \ddot{z}_s + k_s (z_s - z_u) + c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_u) = 0 \tag{5}$$

$$M_u \ddot{z}_u + M_u \ddot{z}_u = k_t (z - z_u) \tag{6}$$

式中：Z_s, Z_u ——分别表示弹性体、非弹性体离开平衡位置的位移；

M_s, M_u ——分别表示弹性体、非弹性体的质量；

C_s ——为减振器的衰减常数；

k_t, k_s ——为非弹性体 M_u 和线性弹性体 M_s 的弹性常数。

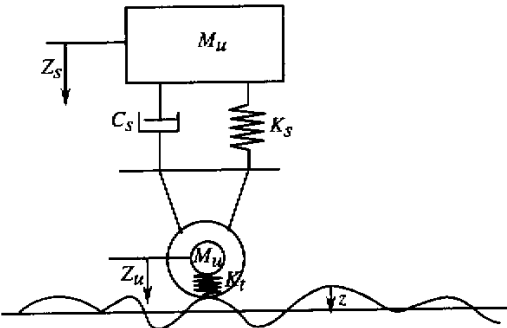


图 1 具有双自由度的四分之一车辆模型

下面来讨论系统在一个正弦波式路面上的响应。随机变量为 Z (x) 的纵剖面，对有限数数值模型则用傅里叶级数，对连续谱模型则作傅立叶变换，由此可以得到其近似的随机解。即：

$$z(x) = \sum_n A_n \exp (iq_n + i\varphi_n), \tag{7}$$

$$z(x) = \int_{-\infty}^{\infty} A_q \exp (iqx + i\varphi_q) dq/2\pi$$

式中：A_q ——正的实数；

φ_q ——(- π , π) 内的随机相位角；

q ——波长或谱频率。

注意到 A_q 在离散型的情况下，A_Q 取长度的量纲，而在连续型情况下，取长度平方的量纲。因为 Z (x) 是实数，则纵剖面线可以写成以下形式：

$$z(x) = (1/\pi v) \int_0^{\infty} A_q \cos(\omega t + \varphi_q) d\omega \tag{8}$$

或 $z(x) = \text{Re} \sum A_n \exp(i\omega_n t + i\varphi_n)$
 对角频率用线性离散公式： $\omega = qv$ (9)
 式中： v ——四分之一车辆的速度。

取纵剖面线的一个正弦分量，即 $z = A_q \exp(i\omega t + i\varphi_q)$ ，这时 z_s 和 z_u 的函数形式分别为 $z_s = A_s \exp(i\omega t + i\varphi_q)$ $z_u = A_u \exp(i\omega t + \varphi_Q)$ 。依据这些表达式，式(5) 式(6)可以简化为如下形式：

($M_s \omega^2 - i\omega c_s - k_s$) $A_s + (i\omega c_s + k_s) A_u = 0$ (10)

$- M_s \omega^2 A_s + (k_t - M_u \omega^2) A_u = k_t A_q$ (11)

直接求解式(10) 式(11)，可得到：

$A_u = A_q \frac{k(k_s - M_s \omega^2 + i\omega c_s)}{(k_t - M_u \omega^2)(i\omega c_s - M_u \omega^2 + k_s) - M_s \omega^2(k_s + i\omega c_s)}$ (12)

式(12)又可以简化为下列复数形式：

$A_u = A_q R_u(\omega) \exp[i\varphi_u(\omega)]$ (13)

$R_u = \sqrt{c^2 + d^2} / \sqrt{a^2 + b^2}$ (14a)

$\varphi_u = \tan^{-1}(d/c) - \tan^{-1}(b/a)$ (14b)

式中： $a = k_t k_s - [k_s(M_s + M_u) + k_t M_s]\omega^2 + M_u M_s \omega^4$ (14c)

$b = \omega c_s [k_t - (M_s + M_u)\omega^2]$ (14d)

$c = k_t(k_s - M_s \omega^2)$ ， $d(\omega) = \omega c_s k_t$ (14e)

注意到 $a^2 + b^2 \neq 0$ ，除非系统没有衰减（即 $C_s = 0$ ），可以看出， a ， b 没有公共解（即取任一个 ω ， a ， b 不会为零）。重复上述步骤，可得：

$A_s = A_q R_s(\omega) \exp[i\varphi_s(\omega)]$ (15)

$R_s = [(c_1^2 + d^2)(a^2 + b^2)]^{1/2}$

式中： $\varphi_s = \tan^{-1}(d/c_1) - \tan^{-1}(b/a)$

$c_1 = k_t k_s$ ，

把式(12) 式(14)代入 Z_s 、 Z_u 方程，则有：

$z_s = \text{Re}\{A_q R_s(\omega) \exp[i(\varphi_s(\omega) + \omega_q + \omega t)]\}$ (16a)

$z_u = \text{Re}\{A_q R_u(\omega) \exp[i(\varphi_u(\omega) + \omega_q + \omega t)]\}$ (16b)

对一正弦分量，其角频率为 ω ，模型相应的绝对速度、加速度以及与四分之一车辆轴载有关的车辆跳跃可由下列式决定：

速度： $j_1(\omega t) = z_s^{(1)} - z_u^{(1)}$
 $= -\omega A_q R_0 \sin(\alpha_\omega + \omega t + \varphi_q)$ (17a)

加速度： $j_2(\omega t) = z_s^{(2)} - z_u^{(2)}$
 $= -\omega^2 A_q R_0 \cos(\alpha_\omega + \omega t + \varphi_q)$ (17a)

跳跃： $j_3(\omega t) = z_s^{(3)} - z_u^{(3)}$
 $= -\omega^3 A_q R_0 \sin(\alpha_\omega + \omega t + \varphi_q)$ (17b)

式中 z_s 以及 z_u 的上标表示变量的 n 次偏导数，而且：

$R_0 = \sqrt{R_1^2 + R_2^2}$ ， $\alpha_\omega = \tan^{-1}(R_1/R_2)$ (18a)

$R_1 = R_u \sin \alpha_u - R_s \sin \alpha_s$ (18b)

$R_2 = R_u \cos \alpha_u - R_s \cos \alpha_s$ (18c)

式中可以看出来，相位角 φ_u 、 φ_s 以及 φ_ω 是 ω 的奇函数。这就说明函数 $j_n(\omega t)$ 是 ω 的偶函数。注意到式(12)包含道路性能函数 $A(\omega)$ 和车辆响应函数 R_0 ，直接计算可得：

$R_0(\omega) = \alpha_0 \omega^2 / (1 + \alpha_1 \omega^2 + \alpha_2 \omega^4 + \alpha_3 \omega^6 + \alpha_4 \omega^8)^{1/2}$ (19)

式中： $\alpha_0 = M_s/k_s$ (20a)

$\alpha_1 = c_s^2/k_s^2 - 2[M_s/k_s + (M_s + M_u)k_t]$ (20b)

$\alpha_2 = [M_s/k_s + (M_s + M_u)k_t]^2 + 2M_s M_u k_s - c_s^2(M_s + M_u)k_s^2 k_t$ (20c)

$\alpha_3 = c_s^2(M_s + M_u)^2/k_s^2 k_t^2 - 2M_s M_u(k_s M_u + (k_s + k_t)M_s)k_s^2 k_t^2$ (20d)

$\alpha_4 = (M_s M_u/k_t k_s)^2$ (20d)

对一给定谱频率 $q = \omega/v$ ，长为 L 的路段、 $J_n(\omega)$ 在整个路段上的绝对值的平均值为：

$I_n = \frac{1}{T} \int |j_n(t)| dt = \frac{1}{L} \int |z_s^{(n)} - z_u^{(n)}| dx$ (21a)

$I_{n,s} = \frac{1}{T} \int |j_{n,s}(t)| dt = \frac{1}{L} \int |z_s^{(n)}| dx$ (21b)

式中： T 为车辆以速度 v 该路段所用的时间， I_n ， $I_{n,s}$ 分别根据轴载和路面计算。 I_1 也可称为平均矫正速度 (ARV)， I_1/v 称为平均矫正斜率 (ARS)。对一足够长的路段来说，三角函数的相位角绕着同一个圆心多次重复循环。所以，长时间内 $I_n(\omega)$ ， $I_{n,s}(\omega)$ 的平均值为：

$I_n(\omega) = (2\omega^n/\pi) A_q R_0(\omega)$ (22a)

$I_{n,s}(\omega) = (2\omega^n/\pi) A_q R_s(\omega)$ (22b)

从式(17)看出，对给定的谱频率 q ，随着四分之一车辆的运行速度 v 的增加， $ARS \rightarrow 0(1/v^2)$ ， $ARV \rightarrow 0(1/v)$ ， $I_2 \rightarrow$ 常数， $I_3 \rightarrow 0(v)$ ，这说明，前三个对速度的增加是很不敏感的，但是 J_3 随之而增加。在这种情况下，频率 $qv/2\pi$ 正好是车辆在 1s 内通过时道路纵面谱峰值的大小。

这里讨论并没有涉及多重谱频率的纵面问题。在多重谱频率的情况下，只要把所有不同的频率分量进行叠加就可以求得精确的响应解，即：

跳跃：
 $j_3(t) = - \sum_j \overline{A_{3,j}} \sin[\varphi_s(\omega) + \omega_j + \varphi_{qj}]$ (23)

式中： $\overline{A_{3,j}} = \omega_j^3 A_q R_0(\omega_j)$ 。 $\overline{A_3}$ 的表达式与车辆的机械性能以及道路的统计性质有关。在连续谱范围内，用 $(1/v\pi) \int d\omega$ 代替 $\sum_j$ 。由此可以计算出相关范围内 j_n 的相似表达式： (下接第 31 页)

并使之紧贴地面。铺设过程中，不允许出现土工格栅鼓包、断裂等现象。

对需要拼接两块土工格栅的情况，必须使相临两块土工格栅之间的搭接长度不小于 20 cm，搭接可用塑料绳绑扎，尺寸如图 5 所示。

3.3 铺设土工格栅的路基碾压

禁止重车轮胎和其他施工机械直接碾过土工格栅表面。铺设好土工隔栅后，第一层填土可在土工格栅旁边卸土，用推土机或前置式装载机摊铺土方，且碾压时应采用轻型压路机压实，无轻型压路机的情况下，可采用重型压路机静压至密实度满足设计要求。

3.4 土工格栅保存

土工格栅应保存在阴凉的地方，绝对禁止将土工

格栅长时间置于太阳光下。

4 结束语

土工合成材料现已广泛应用于公路工程的路基、路面、排水、防护等各种结构中，宜柳高速公路运用于保证路基稳定性，减少沉降和控制不均匀沉降，从竣工通车后一年多的情况看，路基质量稳定，无明显的路基沉降现象，说明土工隔栅在保证路基稳定性及减少沉降上起到明显成效。

参考文献：

[1]JTJT 019-98，公路土工合成材料应用技术规范[S].

(上接第 19 页)

$$j_{3s}(t) = -\frac{1}{v\pi} \int d\omega \overline{A_{3j}} \sin[\varphi_s(\omega) + \omega_j + \varphi_{qj}] \quad (24)$$

式中： $\overline{A_{3j}} = \omega_j^3 A_q R_s(\omega_j)$

2.2 车辆跳跃与服务性能指标之间的关系

利用上面计算出的平均车辆跳跃 I_3 和相应范围内的标准偏差 J_{3s} ，用 Fecher 定律来导出它与服务性能指标 PSI 的关系，从而可以利用车辆跳跃来作出路面服务性能的评定。Fecher 定律是根据外界刺激的对数比例尺来解释人的反应特征。当 $S \geq S_0$ 时， $\tilde{R} = R_0 \log S / S_0$ ， $\tilde{R}$ 为人为的响应程度大小， S 为外界刺激的大小， R_0 为灵敏度系数， S_0 为外界刺激的最小限度，若低于这个界限，则人一般不会对什么反应。则根据车辆跳跃，可得 PSI 的表达式为^[1]：

$$PSI = 5 - \beta \log(J_3 / J_{30}) \quad (25)$$

式中： J_{30} 是测得的最低界限， β 为灵敏度系数。

对 PCC 路面而言，可以计算出左轮迹和右轮迹上的标准偏差 J_{3L} ， J_{3R} ，则平均标准偏差为 $\overline{J_3} = \sqrt{(J_{3L}^2 + J_{3R}^2) / 2}$ ，于是路况功能指标为：

$$PSR = 5 - 3.47 \log(\overline{J_3} / 0.493) \quad (26)$$

将式 (26) 代入式 (3)，即得：

$$IRI = 3.85 \ln \left[\frac{5}{5 - 3.47 \log(\overline{J_3} / 0.493)} \right] \quad (27)$$

从而导出车辆跳跃与国际平整度之间的关系。同时，这一关系式也可以说明利用车辆跳跃作为评价道路服务性能指标的可行性。

3 结 语

路况服务性能的评定是一件比较困难的事情。本

文的研究和分析达到了以下目的：(1) 通过综合和归纳，分析了目前在进行路况服务性能评定时所采用的几种有代表性的指标及其使用特点，并初步探讨了它们之间的相互关系；(2) 通过建立四分之一车辆模型，求解车辆跳跃标准偏差的精确解。实际情况表明驾驶员或乘客是对车、路相互作用引起的振动情况下的车辆跳跃产生反应，而且可以发现，由车辆跳跃来求解的 PSR 包含了三个重要方面：道路纵剖面特性、运动车辆的特性及人为评定。所以把车辆跳跃参数作为评定路况功能的指标参数，能较好地对道路现有服务性能作出全面、真实的评定。当然，笔者在综合研究国内外有关方面前沿研究的基础上求得的数值解，还有待在实践中进行论证。

参考文献：

[1] Liu, c., and Human, R. (1998). "Roadway Profile Vehicle dynamics, and human rating of serviceability of roads - A spectral domain analysis." [J]. Transp. Engrg., ASCE, 124 (2).
[2] 赵济海等. 路面不平整度的测量、分析与应用 [M]. 北京：北京理工大学出版社，2000，10.
[3] 姚祖康. 水泥混凝土路面设计 [M]. 合肥：安徽科学技术出版社，1999.
[4] 沙庆林. 高速公路沥青路面的早期破坏现象及预防 [M]. 北京：人民交通出版社，2001，3.
[5] 邓学钧，黄晓明. 路面设计原理与方法 [M]. 北京：人民交通出版社，2001，5.
[6] Liu, C., Herman, R., and McCullough, B. F. (1998). "Rate of dynamic from deterioration of pavement surfer, and ride quality" [J]. Transp. Res. Rec., Transportation Research Board. D. D. C., in press.