

考虑动荷载影响的当量轴载换算理论分析

胡 朋^{1,2}, 潘晓东¹

(1. 同济大学 交通运输工程学院, 201804 上海, eimhp@163.com;

2. 山东交通学院 土木工程系, 250023 济南)

摘 要: 为了分析考虑动荷载后的当量轴载, 建立二自由度车辆模型, 计算出动荷载系数功率谱密度、动荷载的大小及分布概率, 推导了考虑动荷载后的当量轴次增长率, 并进行实例计算. 结果表明: 计入动荷载后当量轴次比目前轴载换算标准有不同程度的提高, 对沥青路面以设计弯沉值和沥青面层层底拉应力为指标时, 高速和一级公路相应指标值提高 1% ~ 2%, 其他等级公路相应指标值提高 2% ~ 5%; 以半刚性基层层底拉应力为指标时, 高速和一级公路相应指标值提高 3% ~ 6%, 其他等级公路相应指标值提高 7% ~ 17%. 对水泥混凝土路面高速和一级公路相应指标值提高 15% ~ 25%, 其他等级公路相应指标值提高 35% ~ 80%.

关键词: 动荷载; 轴载换算; 路面平整度; 功率谱密度; 当量轴次

中图分类号: U416.01

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)06-0091-05

Equivalent standard axle load conversion in theory considering dynamic load

HU Peng^{1,2}, PAN Xiao-dong¹

(1. School of Transportation Engineering, Tongji University, 201804 Shanghai, China, eimhp@163.com; 2. Civil Engineering Department, Shandong Jiaotong University, 250023 Ji'nan, China)

Abstract: To consider dynamic load while equivalent standard axle load conversion is carried out, two degree of freedom vehicle model is built to calculate power spectral density of dynamic load coefficient, and then distribution of dynamic load coefficient is calculated. Increasing degree of equivalent standard axles is calculated in theory while dynamic load is considered. The results of examples show that equivalent standard axle load shall be increased when dynamic load is considered for various kind of pavement: for asphalt pavement, while design deflection and tensile stress at the bottom of asphalt pavement is taken as index, 1% - 2% shall be increased for expressway and first class highway, 2% - 5% shall be increased for other classes highway; while tensile stress at the bottom of semi-rigid base is taken as checking index, 3% - 6% shall be increased for expressway and first class highway, 7% - 17% shall be increased for other classes highway; for cement concrete pavements, 15% - 25% shall be increased for expressway and first class highway, 35% - 80% shall be increased for other classes highway.

Key words: dynamic load; axles load conversion; pavement roughness; power spectral density; equivalent axles

目前我国路面结构设计是以静止的车辆荷载作为路面设计参数的. 随着车速的提高和轴重的增加, 路面不平整激起的车辆动荷载越来越大, 使

得路面在没有达到设计使用年限就出现破坏, 因而越来越多的学者主张路面设计时应考虑动荷载的影响. 国外很多学者都对动荷载进行了研究, Picoux 采用有限元模型模拟落锤式弯沉仪对路面的作用, 分析了动荷载作用下的弹性模量^[1], Hunaid 通过现场实测的方法分析了公交车作用下路面产生的振动情况^[2]; 我国对地面动力学研究开展较早的是钟阳、王哲人和张肖宁^[3], 之后邓

收稿日期: 2010-03-20.

基金项目: 浙江省交通科技项目(2009H10).

作者简介: 胡 朋(1976—), 男, 讲师, 博士研究生;
潘晓东(1960—), 男, 教授, 博士生导师.

学钧、孙璐和黄晓明采用二自由度车辆模型开创了车辆-地面结构动力学理论的新体系^[4-6]. 由于动荷载大小的不确定性,在以往的研究中仅仅给出了动荷载求解的基本理论或者分析了路面内部应力应变指标,并未涉及到如何使用动荷载对路面进行设计. 本文根据二自由度车辆模型进行了动荷载大小和概率分布计算,并将动荷载看作一系列大小不一按照一定概率分布的静载,将动载和车辆轴载之和换算成为标准轴载,以此分析动荷载对标准当量轴载换算的影响.

1 路面不平度的分类及关系

国际平整度指数 IRI、连续平整度仪测定的标准差 σ 和路面功率谱密度 PSD 是评价路面平整度的三大指标,前两者对应于道路工程,后者在车辆学科中研究较多.

1.1 路面不平度功率谱密度

根据文献[7],路面不平度功率谱密度拟合表达式为

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left[\frac{n}{n_0} \right]^{-w}. \tag{1}$$

式中: n 为空间频率,为波长 λ 的倒数,表示每米长度内包含波的个数. n_0 为参考空间频率,取 0.1 m^{-1} ; $G_q(n_0)$ 为参考空间频率 n_0 下的路面功率谱密度值,其大小取决于路面等级,见表 1,在此仅列出 A、B、C 3 个等级. w 为频率指数,即双对数坐标上曲线的斜率,它决定路面功率谱密度的频率结构,在路面分级时取 $w = 2$.

表 1 路面不平度功率谱密度

路面等级	功率谱密度/($10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)		
	下限	几何平均值	上限
A	8	16	32
B	32	64	128
C	128	256	512

1.2 公路工程平整度

我国公路沥青路面设计规范规定新建高速公路和一级公路平整度应满足 $\text{IRI} < 2.0 \text{ m/km}$, $\sigma < 1.0$ ^[8],公路沥青路面施工技术规范规定新建高速公路和一级公路上面层平整度应满足 $\sigma < 1.2$,其他公路 $\sigma < 2.5$ ^[9],水泥混凝土路面施工技术规范规定新建高速公路和一级公路平整度应满足 $\text{IRI} < 2.0 \text{ m/km}$, $\sigma < 1.2$,其他公路 $\text{IRI} < 3.2 \text{ m/km}$, $\sigma < 2.0$ ^[10].

对平整度指标 IRI、 σ 和 PSD 之间的关系,多位学者进行了研究,得出的结论也基本一致^[11-14],在此取 $\text{IRI} = 0.6 \sqrt{S_q(n_0)}$, $\sigma =$

0.6IRI ^[12]. 结合规范规定,取高速公路和一级公路的路面功率谱密度 $S_q(n_0) = 4$,其他公路取 $S_q(n_0) = 17$.

2 车辆振动模型及随机动荷载

2.1 二自由度车辆振动模型

本文采用二自由度振动系统,即 1/4 车辆模型,如图 1 所示. 由牛顿运动定律,可导出图 1 所示车辆模型的运动方程为

$$\begin{aligned} m_2 \ddot{Z}_2 + C(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) + K(Z_2 - Z_1) &= 0, \\ m_1 \ddot{Z}_1 + C(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) + K(Z_1 - Z_2) + K_t(Z_1 - q) &= 0. \end{aligned} \tag{2}$$

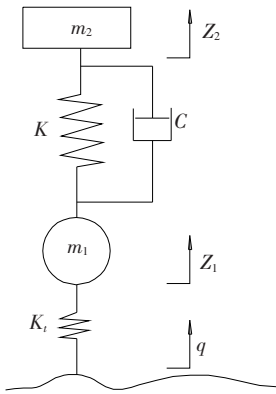


图 1 1/4 车辆模型

2.2 幅频特性求解

随机过程理论指出,对于平稳过程中输入,线性时不变系统的输出也是平稳过程. 对于一个线性系统,受到的振幅为 x_0 ,频率为 ω 的激励 $x_0 e^{i\omega t}$,经过一个瞬态滞后,该线性系统的稳态响应输出与输入形式类似,表示为

$$Z_1 = Z_{10} e^{i(\omega t + \phi)}, Z_2 = Z_{20} e^{i(\omega t + \phi)}.$$

将上式求导可得车轮和车身质量块的速度和加速度,代入式(2)并求解可得 $Z_1 - q$ 的频率响应函数为

$$\frac{Z_1}{q} = \frac{A_2 K_t}{A_3 A_2 - A_1^2}, \tag{3}$$

其中: $A_1 = i\omega C + K$, $A_2 = -\omega^2 m_2 + K + i\omega C$, $A_3 = -\omega^2 m_1 + K + K_t + i\omega C$.

对式(3)的分子分母进行复数运算,然后求模可得到幅频特性函数 $|H_t(\omega)| = \left| \frac{Z_1}{q} \right|$.

2.3 路面随机输入下的动荷载系数 C_{DL} 均方根

车轮的响应功率谱密度和激励功率谱密度之间关系^[15]为

$$G_z(f) = |H_t(\omega)|^2 G_q(f). \tag{4}$$

车辆静载 $G = (m_1 + m_2)g$, 车轮动载 $F_d =$

$K_l(Z_1 - q)$, 则动荷载系数 C_{DL} 等于 F_d/G , 其对 q 的频响函数为

$$H(\omega)_{F_d-q} = \frac{F_d}{Gq} = \frac{K_l(Z_1 - q)}{Gq}.$$

(5)

由式(3)~(5), 求得动荷载系数的功率谱密度为

$$G_{F_d/G}(f) = |H(\omega)_{F_d-q}|^2 G_q(f).$$

(6)

从统计的意义上讲, 车辆动荷载正负的概率相等, 动荷载的均值为零, 动荷载系数的均值也为零, 其方差就等于均方值, 即

$$\sigma_{F_d/G}^2 = \int_0^\infty G_{F_d/G}(f) df = \int_0^\infty |H(\omega)_{F_d-q}|^2 G_q(f) df.$$

(7)

3 计入动荷载后的轴载换算

3.1 动荷载系数 C_{DL} 分布概率计算

式(7)中的幅频特性表达式比较复杂, 本文采用 MATLAB 编程求解. 对线性系统来讲, 如果输入是正态分布的, 输出也是正态分布的. 路面的随机输入和汽车振动响应都基本上符合零均值的正态分布^[4], 按照正态分布的标准可以求得动荷载系数分布在某范围内的概率, 如表 2 所示(间距取 0.2 倍的 $\sigma_{F_d/G}$, 共 16 个区域, 负号表示动荷载向上).

表 2 动荷载系数概率分布

动荷载系数范围	分布概率/%
0~0.2	7.926 0
0.2~0.4	7.616 2
0.4~0.6	7.032 5
0.6~0.8	6.239 8
0.8~1.0	5.320 0
1.0~1.2	4.358 5
1.2~1.4	3.431 3
1.4~1.6	2.595 8
1.6~1.8	1.886 9
1.8~2.0	1.318 0
2.0~2.2	0.884 7
2.2~2.4	0.135 0
2.4~2.6	0.570 5
2.6~2.8	0.353 7
2.8~3.0	0.210 6
>3	0.120 5

3.2 当量轴载换算

根据表 2 就可以计算出动荷载 F_d 的分布概率, 从而求出动静荷载之和及其概率分布, 按照其大小和概率分布对车辆的荷载进行当量换算, 就可以求出考虑动荷载后的标准当量轴次.

根据我国沥青路面设计规范^[8], 当以设计弯沉值和沥青面层层底拉应力为指标时, 轴载换算公式为

$$N = \sum_{i=1}^k c_{1i} c_{2i} n_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^{4.35}.$$

(8)

则考虑动荷载的当量轴载换算公式为

$$N' = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m c_{1i} c_{2i} n_i Q_j \left[\frac{P_i(1 \pm C_{DL})}{P} \right]^{4.35}.$$

(9)

式中: m 为动荷载系数的离散区域数; Q_j 为动荷载系数的分布概率.

由于各车型的轴数系数和轮组系数不同, 在此进行轴载换算时, 将式(8)和(9)进行处理, 令 $c_{1i} c_{2i} n_i = n_i'$, 轮组系数和轴数系数就直接折算到轴次上, 以上两式就变为

$$N = \sum_{i=1}^k n_i' \left(\frac{P_i}{P} \right)^{4.35},$$

(10)

$$N' = \sum_{i=1}^k n_i' \sum_{j=1}^m Q_j \left[\frac{P_i(1 \pm C_{DL})}{P} \right]^{4.35}.$$

(11)

由式(11)可得计入动荷载后各轴载和标准当量轴载的换算系数为

$$\rho = \sum_{j=1}^m Q_j \left[\frac{P_i(1 \pm C_{DL})}{P} \right]^{4.35}.$$

(12)

考虑动荷载后的标准当量轴次增长率为

$$\gamma = \frac{N' - N}{N} \times 100\%.$$

(13)

4 计算与分析

选取车型时考虑了我国常见的车辆标准载重, 取以下 5 种车型作为代表, 其计算参数如表 3 所示. 按照编制的程序分别对以上 5 种车型在不同等级的公路上以不同的速度行驶时动荷载系数的均方差进行计算, 结果如表 4 所示. 将表 4 所得数据代入表 2 计算出动荷载系数的概率分布(动荷载系数大于 $3\sigma_{F_d/G}$ 时取 $3\sigma_{F_d/G}$, 其他取中值), 从而求出动静荷载之和及其概率分布, 依据式(12)可计算出考虑动荷载后各轴载和标准当量轴次的换算系数, 结果如表 5 所示.

依照式(10), 不考虑动荷载时各轴载换算为标准轴次: $N = 0.008n_1' + 0.086n_2' + 0.321n_3' + n_4' + 3.167n_5'$. 按照表 5 数据和式(13), 可得各级公路在不同车速下的当量轴次增长率, 如表 6 所示. 从表 6 可以看出, 无论各种车型的数量大小, 考虑动荷载后的当量轴次增长率均为正值. 为了研究各种情况下的增长率, 对 $n_1' \sim n_5'$ 取[1, 100]内任意数据(单位: 万次), 并对各种情况组合求出增长率的最大值和最小值. 由于组合数量巨大, 通过编程计算求出, 如表 7 所示.

从以上计算结果可以看出,考虑动荷载后,各级公路的当量轴次均有不同程度的提高,路面平整度质量越差、车速越高,当量轴次提高的也就越多,对路面结构设计的影响就越大. 高速和一级公路提高 1% ~2%,其他等级的公路相应提高 2% ~5%.

表 3 车辆参数

车型	簧下质量 m_1 / kg	簧上质量 m_2 / kg	悬架刚度 k / (kN · m ⁻¹)	轮胎刚度/ (kN · m ⁻¹)	悬架阻尼系数/ (Ns · m ⁻¹)	累计轴次/10 ⁴
a	300	3 100	200	2 300	5 000	n_1'
b	510	5 300	320	3 400	9 000	n_2'
c	730	7 130	430	4 000	12 000	n_3'
d	1000	9 204	500	5 000	15 000	n_4'
e	1100	12 200	700	6 500	18 000	n_5'

表 4 不同公路等级和不同车速下动荷载系数均方差

公路等级	车辆时速/(km · h ⁻¹)	均方差				
		a 车	b 车	c 车	d 车	e 车
高速和一级公路	120	0.058 5	0.049 5	0.044 8	0.044 9	0.043 4
	100	0.053 4	0.045 2	0.040 9	0.041 5	0.039 6
	80	0.047 8	0.040 4	0.036 6	0.036 7	0.035 4
其他公路	80	0.098 5	0.083 4	0.075 4	0.075 6	0.073 0
	60	0.085 3	0.072 2	0.065 3	0.065 5	0.063 2
	40	0.069 6	0.059 0	0.053 3	0.053 5	0.051 6

表 5 计入动荷载后各轴载和标准当量轴载换算系数

公路等级	车辆时速/(km · h ⁻¹)	均方差				
		a 车	b 车	c 车	d 车	e 车
高速和一级公路	120	0.009	0.088	0.326	1.015	3.210
	100	0.009	0.088	0.325	1.013	3.203
	80	0.009	0.087	0.324	1.010	3.195
其他公路	80	0.009	0.091	0.335	1.042	3.290
	60	0.009	0.090	0.331	1.031	3.259
	40	0.009	0.089	0.328	1.021	3.228

表 6 不同公路等级和车速下当量轴次增长率

路面等级	车辆时速/(km · h ⁻¹)	当量轴次增长率/%
高速和一级公路	120	$(0.001 n_1' + 0.002 n_2' + 0.005 n_3' + 0.015 n_4' + 0.043 n_5') / N$
	100	$(0.001 n_1' + 0.002 n_2' + 0.004 n_3' + 0.013 n_4' + 0.036 n_5') / N$
	80	$(0.001 n_1' + 0.001 n_2' + 0.003 n_3' + 0.010 n_4' + 0.028 n_5') / N$
其他公路	80	$(0.001 n_1' + 0.005 n_2' + 0.014 n_3' + 0.042 n_4' + 0.123 n_5') / N$
	60	$(0.001 n_1' + 0.004 n_2' + 0.010 n_3' + 0.031 n_4' + 0.092 n_5') / N$
	40	$(0.001 n_1' + 0.003 n_2' + 0.007 n_3' + 0.021 n_4' + 0.061 n_5') / N$

表 7 不同公路等级和车速下当量轴次换算增幅

公路等级	车辆时速/(km · h ⁻¹)	增幅/%
高速和一级公路	120	1.57 ~ 1.91
	100	1.35 ~ 1.73
	80	1.09 ~ 1.32
其他公路	80	4.11 ~ 4.60
	60	3.12 ~ 3.57
	40	2.04 ~ 2.58

我国沥青路面设计规范^[8]还规定,当以半刚性基层层底拉应力为验算指标时,轴载换算公式为

$$N' = \sum_{i=1}^k c_{1i}' c_{2i}' n_i' \left(\frac{P_i}{P}\right)^8.$$

(14)

根据我国水泥混凝土路面设计规范^[16],轴载换算公式为

$$N = \sum_{i=1}^k \delta_i n_i \left(\frac{P_i}{P} \right)^{16} \quad (15)$$

采用同样的方法,对式(14)代表的情况进行计算,高速和一级公路轴载提高3%~6%,其他等级的公路轴载提高7%~17%;对式(15)代表的情况进行计算,高速和一级公路轴载提高15%~25%,其他等级的公路提高35%~80%;文献[17-18]的研究表明,路面在使用过程中,随着营运时间的增长平整度变差,而以上结果的计算是建立在新建路面竣工验收标准上的,因而以上计算结果偏保守。

5 结论及建议

1)路面不平整会激起车辆的振动,产生动荷载。平整度越差,动荷载越大;车速越高,动荷载也越大,对各级公路平整度都应严格要求。

2)考虑动荷载的影响后,应对现有的标准当量轴次计算方法进行修正。按照现行规范方法计算出标准当量轴次后,应根据公路等级有不同程度的提高。对沥青路面,当以设计弯沉值和沥青面层层底拉应力为指标时,高速和一级公路可提高1%~2%,其他等级的公路应可提高2%~5%;以半刚性基层层底拉应力为验算指标时,高速和一级公路可提高3%~6%,其他等级的公路可相应提高7%~17%;对水泥混凝土路面,高速和一级公路可提高15%~25%,其他等级的公路可相应提高35%~80%。

3)路面在使用过程中,随着营运时间的增长平整度变差,而以上结果的计算是建立在新建路面竣工验收标准上的,因而计算结果偏保守。动荷载的大小及对路面的影响程度受到诸如轮胎气压、车辆悬架刚度、公路线形、车辆载重、车速、外界环境、路面材料及疲劳特性等多方面因素的影响,本文仅是从理论上对考虑动荷载后的当量轴次换算进行分析,还需要进一步进行长期的实验研究。

参考文献:

[1] PICOUX B, ELAYADI A, PETIT C. Dynamic response of a flexible pavement submitted by impulsive loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29: 845-854.

[2] HUNAIDIA O, GUANA W, NICKSB J. Building vibrations and dynamic pavement loads induced by transit buses [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 19(6): 435-453.

[3] 钟阳,王哲人,张肖宁. 不平整路面行驶的车辆对路面随机动压力的分析[J]. 中国公路学报, 1992, 5(2): 40-43.

[4] 孙璐,邓学钧. 车速和路面不平度特性对车路相互作用的影响[J]. 东南大学学报, 1996, 26(5): 142-145.

[5] 邓学钧. 车辆地面结构系统动力学研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2002, 32(3): 474-479.

[6] 陶向华,黄晓明. 车辆动载荷的频域模拟计算与分析[J]. 华中科技大学学报:城市科学版, 2003, 20(4): 47-50.

[7] GB/T 7031—2005. 机械振动—道路路面谱测量数据报告[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2005.

[8] JTG D50—2006. 公路沥青路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2006.

[9] JTG F40—2004. 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.

[10] JTG F30—2003. 公路水泥混凝土路面施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2003.

[11] 周晓青,孙立军. 国际平整度指数与行驶车速的关系[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2005, 33(10): 1323-1327.

[12] 吴庆雄,陈宝春,奚灵智. 路面平整度 PSD 和 IRI 评价方法比较[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(1): 36-40.

[13] 张向东,闫维明,葛惠娟,等. 由国际平整度指数模拟路面不平度方法研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(4): 13-16.

[14] SUN L, ZHANG Z, RUTH J. Modeling indirect statistics of surface roughness [J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(2): 105-111.

[15] 余志生. 汽车理论[M]. 5版. 北京:机械工业出版社, 2009.

[16] JTG D40—2002. 公路水泥混凝土路面设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2002.

[17] 杨瑞峰. 高速公路路面功率谱调查测量的研究[D]. 长春:吉林大学, 2004.

[18] 王恒. 随机动荷载作用下柔性路面结构及路基动力响应研究[D]. 长沙:中南大学, 2006.

(编辑 魏希柱)