

# 路面行驶质量差异的当量出行时间费用

邵敏华<sup>1</sup>, 云修萌<sup>1</sup>, 袁雨樵<sup>2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海市位育中学, 上海 200231)

**摘要:** 以国际平整度指数为中间指标, 构建路面行驶质量指数与出行时间费用之间的定量关系, 给出路面行驶质量变化带来的当量出行时间费用差异. 通过已有四分之一车模型的动力方程, 以高速公路为研究对象, 对选定的 50 条道路在 13 个速度下的国际平整度指数进行仿真计算. 以国际平整度指数为中间指标, 利用已有不同速度下平整度指数与行驶质量指数的关系, 给出每条道路在不同速度下的行驶质量指数. 以  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的路面行驶质量指数为基准, 给出了路面行驶质量指数差异与达到相同行驶质量时的行驶车速差异之间的关系. 分析结果表明, 两者具有良好的相关性. 路面行驶质量变化对出行时间费用有显著影响, 在出行选择行为分析、道路维修保养效益评估等相关研究中应予以考虑.

**关键词:** 国际平整度指数; 行驶质量指数; 速度; 出行时间费用

中图分类号: U411

文献标志码: A

## Equivalent Travel Time Cost of Road Quality

SHAO Minhua<sup>1</sup>, YUN Xiუმeng<sup>1</sup>, YUAN Yuyqiao<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Weiyu High School, Shanghai 200231, China)

**Abstract:** Using IRI (international roughness index) as a bridge, the quantitative relationship between RQI (ride quality index) and travel time cost was established. First, at different speeds, IRIs of fifty different roads were simulated by the use of dynamic equation of quarter-car model. Next, the relationship between RQI and speed was obtained by the analysis of the relationship between RQI and IRI. Finally, the difference of RQIs at the same speed of  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  and the difference of speeds at the same RQI for any two of fifty roads were calculated. Good correlations were found between them. This result shows that the influence of RQI on travel time cost should not be ignored in the study of the behavior of travel choice or in the study of benefit evaluation of road maintenance.

**Key words:** international roughness index; ride quality index; velocity; travel time cost

路面行驶质量指数(road quality index, RQI)综合反映了路面表面特性、车辆悬挂系统的振动特性以及人对振动的反应, 常用于表征路面为出行者提供的行驶舒适性. 作为影响出行者路径选择行为的重要因素, RQI 不同所带来的行驶舒适性的差异应当在出行成本中得以体现. 目前国内外的已有研究均未给出 RQI 与出行成本的明确关系, 对 RQI 对出行者选择行为的影响也少有考虑. 已有研究<sup>[1-5]</sup>更多地集中在路面表面特性对车辆运营费用和安全的影 响, 少有考虑对出行时间费用的影响<sup>[5]</sup>. 路面平整度作为路面表面特性的重要表征, 是影响路面行驶质量的主要因素<sup>[6-7]</sup>, 它的评价指标主要可以分为两类<sup>[8]</sup>, 一类是直接统计指标, 以功率谱密度(power spectral density, PSD)为主要指标; 另外一类是间接指标, 如国际平整度指数(international roughness index, IRI)、舒适度指数(ride number, RN)、断面指数(profile index, PI)、半车平整度指数(half-car roughness index, HRI)等. 在路面平整度众多评价指标中, 国际平整度指数 IRI 运用范围最为广泛<sup>[9]</sup>. 已有研究给出了用于评价 RQI 在不同速度下的 IRI 分级临界值<sup>[10]</sup>, 建立了 IRI 与行驶速度的关系<sup>[11]</sup>, 这为以 IRI 建立 RQI 与行驶速度的关系提供了良好的基础, 而速度又可以较为容易地转化为出行时间费用, 进而在出行成本中予以考虑. 本文即采用这一思路, 首先在已有研究基础上, 以高速公路为研究对象, 仿真计算 50 条典型道路在不同行驶速度下的 IRI 值; 而后, 以 IRI 为中间指标, 进一步给出每条道路不同行驶车速下的 RQI 值; 最后, 通过计算任意两条道路同一速度( $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )下的 RQI 差值与同一 RQI 水平下的速度差值, 尝试建立 RQI 与当量

出行时间费用的关系. 研究将为在出行选择行为研究中纳入 RQI 的影响提供参考,也将为进一步在道路养护维修效益评估中更为全面地考虑 RQI 对出行者收益的影响提供指导.

## 1 不同行驶速度下的 IRI 值计算

### 1.1 计算模型的选定

IRI 是由世界银行赞助的通过国际道路平整度实验(IRRE)建立的道路评价指标,被世界各国广泛使用.

国际平整度指数的定义式为

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^L |Z_s - Z_u| dx \quad (1)$$

式中:  $Z_s$  为车身的绝对位移;  $Z_u$  为轮胎的绝对位移;  $L$  为行驶的距离;

由式(1)可知, IRI 就是计算一定行驶距离内的悬挂系统的累计位移. 假定行驶速度恒定为  $v$ , 行驶时间为  $t$ , 则  $dx = vdt$ ,  $L = vt$ . 对式(1)进行变换得

$$IRI = \frac{1}{vt} \int_0^t |Z_s - Z_u| vdt \quad (2)$$

式(2)与式(1)等价, 式(2)含义是, 在行驶速度为  $v$  时, 一定运行时间  $t$  内的悬挂系统累计位移. 对于  $Z_s$  和  $Z_u$ , 采用由世界银行所建立的两自由度四分之一车模型动力方程<sup>[12]</sup> 计算如下:

$$m_s \ddot{Z}_s + C_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + K_s(Z_s - Z_u) = 0 \quad (3)$$

$$m_u \ddot{Z}_u + C_s(\dot{Z}_u - \dot{Z}_s) + K_s(Z_u - Z_s) + K_t(Z_u - Y) = 0 \quad (4)$$

式(3)、(4)中:  $m_s$  为簧上质量, 即车身质量;  $m_u$  为簧下质量, 即轮胎质量;  $K_s$  为车身悬架刚度;  $K_t$  为轮胎刚度;  $C_s$  为悬架阻尼;  $Y$  为路面的断面高程, 是路面不平整度的函数.

将式(3)和式(4)两式同时除以  $m_s$ , 得

$$\ddot{Z}_s + C(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + K_2(Z_s - Z_u) = 0 \quad (5)$$

$$u \ddot{Z}_u + C(\dot{Z}_u - \dot{Z}_s) + K_2(Z_u - Z_s) + K_1 Z_u = K_1 Y \quad (6)$$

式(5)和式(6)中采用四分之一车模型标准车的各种车辆参数<sup>[13]</sup>, 为

$$C = \frac{C_s}{m_s} = 6.0 \text{ s}^{-1}; K_1 = \frac{K_t}{m_s} = 653 \text{ s}^{-2};$$

$$K_2 = \frac{K_s}{m_s} = 63.3 \text{ s}^{-2}; u = \frac{m_u}{m_s} = 0.15.$$

只要给定路面断面高程函数  $Y$ , 就可以采用数值方法或解析方法对微分方程组式(5)和式(6)进行

求解. 由于道路断面高程函数是离散的, 世界银行采用数值方法中的传递矩阵法进行计算; 但为了简化理论计算, 采用解析方法对微分方程组进行求解. 假定道路断面高程函数  $Y$  为连续函数, 确定  $Y$  的形式对 IRI 的解析计算是十分必要的.

### 1.2 路面纵断面断面形状假定

任何函数一般都可以分解成单个谐振之和的形式, 则路面断面高程函数  $Y$  也可用多个波长、振幅和频率不同的简谐函数叠加表达. 为了计算简单起见, 可以采用较为简单的路面激励函数  $Y = ae^{i\omega t}$ ,  $a$  为路面振幅,  $\omega$  为系统固有圆频率, 波长为  $\lambda = \frac{2\pi v}{\omega}$ .

国际平整度与速度之间推导<sup>[11]</sup> 如下:

$$Z_s = AY = Aae^{i\omega t}, Z_u = BY = Bae^{i\omega t} \quad (7)$$

将式(7)代入式(5)和式(6), 反解出  $A$ 、 $B$  并将  $A$ 、 $B$  代入式(7), 得到  $Z_u$ 、 $Z_s$  的具体表达式. 由于  $Z_u$ 、 $Z_s$  均为实数, 所以取其部, 即

$$Z_u = \text{Re}(Z_u), Z_s = \text{Re}(Z_s) \quad (8)$$

将式(8)代入式(2)就可以得出 IRI- $v$  的关系式.

$$IRI = f(\lambda, a, v) \quad (9)$$

由式(9)可知, IRI- $v$  的关系表达式中, 共有 3 个自变量, 它们是  $\lambda$ 、 $a$  和  $v$ , 只要确定这 3 个自变量的取值就可以计算相应的 IRI.

### 1.3 IRI- $v$ 的关系式中参数的确定

#### 1.3.1 路面纵断面断面形状参数的确定

##### (1) 路面波长 $\lambda$ 的确定

国际道路协会常设委员会(PIARC)将引起路面不平整度的路面波长范围划分为 3 类: 短波 0.5~5.0 m, 中波 5.0~15.0 m, 长波 15.0~50.0 m<sup>[14]</sup>. 为了全面覆盖引起路面不平整度的路面波长范围, 路面波长  $\lambda$  取 1.0~50.0 m, 间隔为 1.0 m, 共计 50 个波长.

##### (2) 路面振幅 $a$ 的确定

为选取合适的路面振幅  $a$ , 计算了  $a = 0.001 \sim 0.050$  m, 间隔为 0.001 m, 共 50 (波长)  $\times$  50 (振幅) = 2 500 个路面组合状况. 选定 80 km  $\cdot$  h<sup>-1</sup> 下的 RQI 分级标准, 统计每个振幅  $a$  下, 不同级别 RQI 下的道路数, 结果如表 1 所示. 考虑典型道路组合宜覆盖所有路面行驶质量等级, 故选择  $a = 0.005$  m 作为本文典型道路的路面振幅.

综上(1)和(2)可得, 将 50 个路面波长和 1 个路面振幅进行组合, 在固定速度 80 km  $\cdot$  h<sup>-1</sup> 下, 将每种组合分别代入  $Y = ae^{i\omega t}$  得一条道路典型断面, 共计 50 条, 结果如图 1 所示.

表 1 路面振幅值  $a$  的选定

Tab. 1 Selection of pavement amplitude  $a$

$a/m$	80 km · h <sup>-1</sup> 下,不同 RQI 级别下道路数				
	非常好	好	一般	较差	差
0.001	50	0	0	0	0
0.002	31	19	0	0	0
0.003	30	7	8	5	0
0.004	24	4	2	20	0
0.005	21	5	2	11	11
0.006	19	5	3	3	20
0.007	18	5	2	4	21
0.008	15	6	3	3	23
0.009	22	8	3	3	24
0.010	10	8	3	4	25
0.020	0	6	4	7	33
0.030	0	0	2	7	41
0.040	0	0	0	4	46
0.050	0	0	0	0	50

1.3.2 行驶速度的确定

选取我国高速公路的设计车速取值范围[60, 120]km · h<sup>-1</sup>[15]作为本文行驶速度  $v$  的取值区间,间隔为 5 km · h<sup>-1</sup>,共取 13 个速度水平.

1.4 IRI 仿真计算

如前所述,对于选定的 50 条典型道路(50 个路面波长,1 个路面振幅),分别计算每条道路在 13 个行驶速度下的 IRI 值,部分计算结果如图 2 和表 2 所示.

2 不同行驶速度下 RQI 的计算

在测定速度 80 km · h<sup>-1</sup>下,IRI 的分级临界值具有局限性,为扩大 IRI 分级临界值的适用范围,已有研究根据车辆振动效果相同,建立了不同速度下的 IRI 分级临界值<sup>[10]</sup>,如表 3 所示.

2.1 不同速度下 RQI 与 IRI 分级临界值的扩充

虽然表 3 已经列出不同速度下的 IRI 分级临界值,但是由于其速度间隔较大,且 IRI 分级临界值自身为区间形式,难以建立 RQI 与 IRI 之间的定量关系.鉴于此,对表 3 的速度值进行扩充,并将 IRI 值按速度间隔 5 km · h<sup>-1</sup>线性内插.此外,RQI 选用 5 分制,1~5 依次代表差、较差、一般、好和非常好 5 个等级.扩充后的 IRI 分级临界值如表 4 所示.

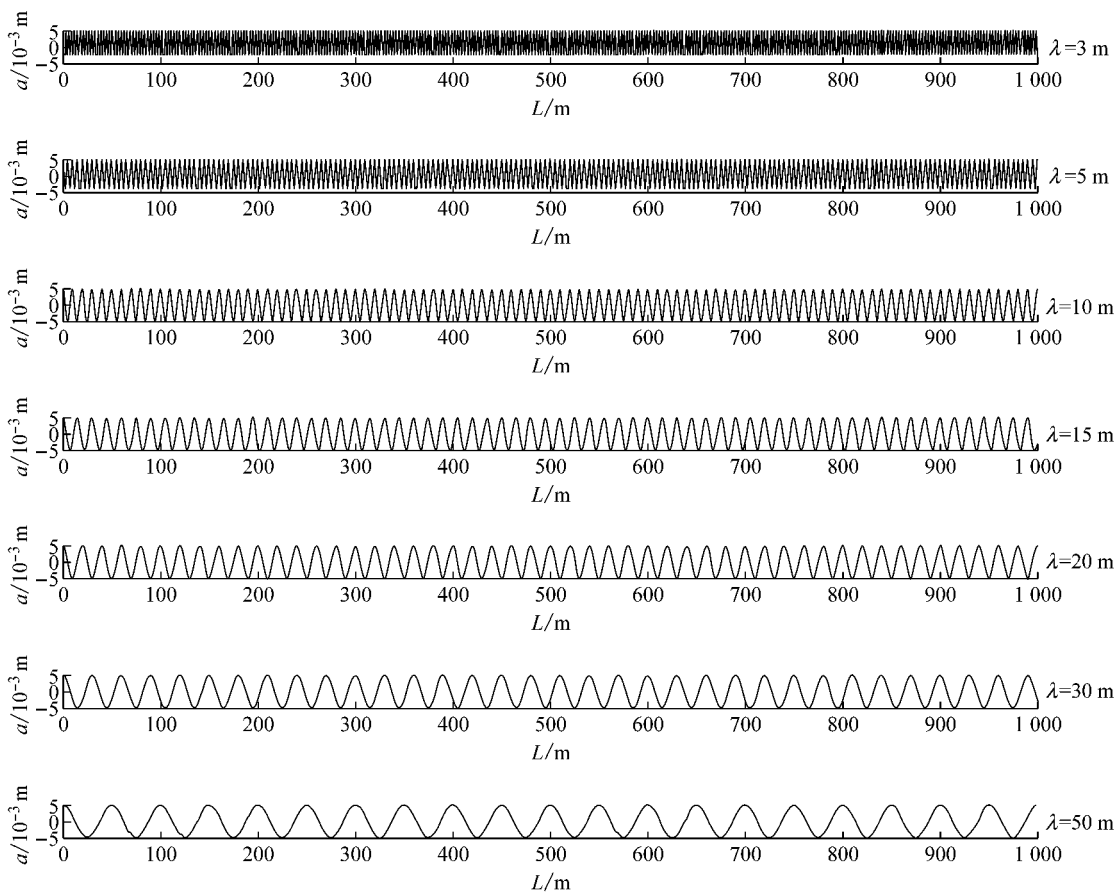


图 1 典型道路断面图 ( $a = 0.005$  m)

Fig. 1 Typical road profiles( $a = 0.005$  m)

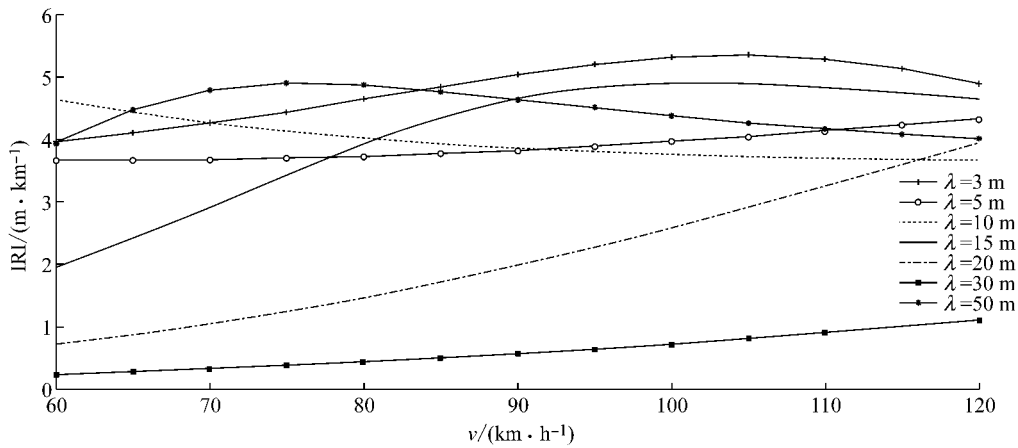


图 2 不同路面组合下 IRI 与 v 的关系 (a=0.005 m)

Fig. 2 IRI versus v in different pavement combinations (a = 0.005 m)

表 2 不同速度和波长下的 IRI 值(路面振幅 a = 0.005 m)

Tab. 2 IRI under different combinations (pavement amplitude a = 0.005 m)

λ/m	IRI/(m · km <sup>-1</sup> )												
	v/(km · h <sup>-1</sup> )												
	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
3	3.96	4.10	4.26	4.43	4.63	4.82	5.02	5.18	5.30	5.34	5.28	5.12	4.88
5	3.66	3.66	3.67	3.69	3.72	3.77	3.82	3.89	3.96	4.04	4.13	4.22	4.32
10	4.63	4.43	4.26	4.12	4.01	3.92	3.85	3.79	3.75	3.72	3.69	3.67	3.66
15	3.93	4.46	4.78	4.89	4.86	4.76	4.63	4.50	4.37	4.26	4.17	4.08	4.01
20	1.96	2.41	2.91	3.43	3.93	4.35	4.65	4.83	4.89	4.88	4.82	4.73	4.63
30	0.72	0.87	1.04	1.23	1.45	1.69	1.96	2.26	2.57	2.91	3.26	3.60	3.93
50	0.23	0.28	0.32	0.38	0.43	0.50	0.57	0.64	0.72	0.81	0.90	1.00	1.11

表 3 不同速度和行驶质量下的 IRI 分级临界值

Tab. 3 Critical value of IRI at different speeds and running qualities

行驶质量	IRI 分级临界值/(m · km <sup>-1</sup> )				
	v/(km · h <sup>-1</sup> )				
	120	100	80	70	60
非常好	<0.95	<1.14	<1.43	<1.63	<1.90
好	[0.95,1.49]	[1.14,1.79]	[1.43,2.24]	[1.63,2.57]	[1.90,2.99]
一般	[1.50,1.89]	[1.80,2.27]	[2.25,2.84]	[2.58,3.25]	[3.00,3.79]
较差	[1.90,2.70]	[2.28,3.24]	[2.85,4.05]	[3.26,4.63]	[3.80,5.40]
差	>2.70	>3.24	>4.05	>4.63	>5.40

注: v=120 km · h<sup>-1</sup>为 FHWA 州际公路指标;IRI 分级临界值保留两位小数精度。

表 4 扩充后 IRI 分级临界值

Tab. 4 Critical value of IRI grading after expansion

RQI	IRI 分级临界值/(m · km <sup>-1</sup> )												
	v/(km · h <sup>-1</sup> )												
	120	115	110	105	100	95	90	85	80	75	70	65	60
5	0.95	1.00	1.05	1.09	1.14	1.21	1.29	1.36	1.43	1.53	1.63	1.77	1.90
4	1.22	1.28	1.35	1.41	1.47	1.56	1.66	1.75	1.84	1.97	2.10	2.28	2.45
3	1.70	1.79	1.87	1.96	2.04	2.17	2.30	2.42	2.55	2.74	2.92	3.16	3.40
2	2.30	2.42	2.53	2.65	2.76	2.93	3.11	3.28	3.45	3.70	3.95	4.28	4.60
1	2.70	2.84	2.97	3.11	3.24	3.44	3.65	3.85	4.05	4.34	4.63	5.02	5.40

2.2 不同速度下 RQI-IRI 关系的提取

对表 4 按不同速度,分别进行 RQI 和 IRI 的线性回归,RQI=c×IRI+d 回归结果如表 5 所示。

2.3 不同行驶速度下 RQI 计算结果

将 IRI 计算结果分别代入对应速度下 RQI-IRI 的回归方程,计算得到 RQI 值. RQI 计算结果中,对

表 5 行驶质量指数和国际平整度指数回归系数

Tab. 5 Regression coefficient between RQI and IRI

$v/(km \cdot h^{-1})$	$c$	$d$	$R^2$
120	-2.155	6.823	0.986 9
115	-2.053	6.825	0.987 0
110	-1.960	6.827	0.987 1
105	-1.876	6.829	0.987 2
100	-1.798	6.830	0.982 9
95	-1.693	6.833	0.983 0
90	-1.600	6.835	0.982 9
85	-1.516	6.837	0.987 1
80	-1.441	6.839	0.982 8
75	-1.343	6.834	0.982 9
70	-1.258	6.831	0.987 2
65	-1.161	6.831	0.983 0
60	-1.079	6.830	0.983 1

表 6 不同组合状况下部分 RQI 值(路面振幅  $a = 0.005 m$ )Tab. 6 RQI values in different combinations (pavement amplitude  $a = 0.005 m$ )

$\lambda/m$	RQI												
	$v/(km \cdot h^{-1})$												
	120	115	110	105	100	95	90	85	80	75	70	65	60
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0.17	0.88	1.48	2.07	2.56
5	0	0	0	0	0	0.25	0.72	1.12	1.47	1.88	2.22	2.58	2.88
10	0	0	0	0	0.09	0.41	0.68	0.89	1.06	1.30	1.47	1.68	1.84
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.26	0.82	1.65	2.59
20	0	0	0	0	0	0	0	0.25	1.18	2.22	3.17	4.03	4.72
30	0	0	0.44	1.36	2.20	3.01	3.70	4.27	4.75	5.00	5.00	5.00	5.00
50	4.42	4.76	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00

中任选 2 条道路  $i, j$ , 设在同一检测车速  $v_0$  (本文  $v_0$  取 IRI 的标准测定速度  $80 km \cdot h^{-1}$ ) 下, 其对应 RQI 值分别为  $RQI_{v_0 i}$  和  $RQI_{v_0 j}$ . RQI 的差异说明两条道路在行驶速度均为  $v_0$  时具有不同的行驶舒适性. 要达到相同的行驶舒适性, 车辆在其中一条道路上必须选择不同的行驶速度. 设车辆在道路  $j$  上必须选择速度  $v_{1j}$  才能达到与  $RQI_{v_0 i}$  相同的 RQI 值, 这意味着出行时间费用的改变. 本文以相同行驶舒适性(相同 RQI 值)条件下两条道路速度差异所带来的出行时间差异作为两条道路 RQI 差异(同一检测速度下)的当量时间费用.  $i, j$  道路的速度差异以  $v_{Rij} = (v_{1j} - v_0)/v_0$  表示, RQI 差异以  $RQI_{Rij} = (RQI_{v_0 j} - RQI_{v_0 i})/\max(RQI_{v_0 i}, RQI_{v_0 j})$  表示, 取  $v_0 = 80 km \cdot h^{-1}$ , 采用以下步骤建立两者的关系:

步骤 1 将 50 条道路按照波长  $\lambda$  依次排序编号,  $i, j$  为道路编号,  $i, j \in \{1, 2, \dots, 49, 50\}, i \neq j$ .

步骤 2 从 50 条道路中任选两条道路  $i, j$ , 基于 2.3 节计算结果, 给出两条道路在检测速度  $v_0$  下的 RQI 值, 分别记为  $RQI_{v_0 i}$  和  $RQI_{v_0 j}$ .

步骤 3 计算  $RQI_{Rij} = \frac{(RQI_{v_0 j} - RQI_{v_0 i})}{\max(RQI_{v_0 i}, RQI_{v_0 j})}$ .

步骤 4 计算道路  $j$  达到  $RQI_{v_0 i}$  时的速度  $v_{1j}$ ,

于  $RQI < 0$  的值, 可以理解为在此速度和该种路面组合状态下, 毫无行车舒适性可言; 对于  $RQI > 5$  的值, 可以理解为在此速度和该种路面组合状态下, 行驶舒适性已达到最大值. 由于 RQI 的取值范围为  $[0, 5]$ , 所以将表中  $RQI < 0$  的值均取为 0;  $RQI > 5$  的值取为 5. 部分计算结果如表 6 所示.

### 3 RQI 差异的当量出行时间费用计算

#### 3.1 计算方法

本文假定两条道路在 RQI 值相等时就可以视为两者的行车舒适性相同. 现从前述 50 条典型道路

$v_{1j}$  的计算可以基于 2.3 的计算结果, 采用线性内差法获得.

步骤 5 计算  $v_{Rij} = \frac{(v_{1j} - v_0)}{v_0}$ .

步骤 6 检查是否 50 条道路中任意两条道路均完成了上述计算, 如未完成, 则回到步骤 2; 如已完成, 则执行步骤 7.

步骤 7 回归建立  $RQI_{Rij}$  与  $v_{Rij}$  的关系.

#### 3.2 RQI 差异与当量行驶速度差异的关系

研究采用 3.1 节中给出的计算方法, 以高速公路为研究对象, 以  $[60, 120] km \cdot h^{-1}$  为车速取值范围, 建立了 RQI 差异与当量行驶速度差异的关系. 结果发现, 与至少一条道路 RQI 大于等于 3 时相比, 当两条道路的 RQI 值均小于 3 (即行驶质量均处于较差或差) 时, RQI 差异与当量行驶速度差异的关系呈现出明显不同的特征. 将数据分为  $\max(RQI_{v_0 i}, RQI_{v_0 j}) \geq 3$  和  $\max(RQI_{v_0 i}, RQI_{v_0 j}) < 3$  两部分分别进行分析.

当  $\max(RQI_{v_0 i}, RQI_{v_0 j}) \geq 3$  时, 建立  $RQI_{Rij}$  与  $v_{Rij}$  的关系如图 3a 所示.

对于  $RQI_{Rij}$  和  $v_{Rij}$  的关系, 由图 3a 可知, 数据点

近似分布在直线附近,对它们进行线性回归拟合,结果如下:

$$\begin{aligned} RQI_{Rij} &= 2.786v_{Rij} - 0.006\ 027 \\ R^2 &= 0.917 \end{aligned} \quad (10)$$

由公式(10)相关系数  $R^2$  为 0.917 可知,  $RQI_{Rij}$  和  $v_{Rij}$  之间有良好的线性关系.

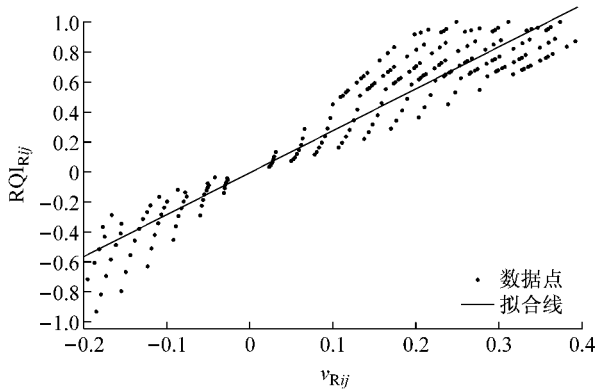
当  $\max(RQI_{v_0i}, RQI_{v_0j}) < 3$  时,建立  $RQI_{Rij}$  与  $v_{Rij}$  的关系如图 3b 所示.

对于  $RQI_{Rij}$  和  $v_{Rij}$  的关系,由图 3b 可知,数据点近似分布在 S 型曲线附近,对它们进行回归拟合,结果如下:

$$\begin{aligned} RQI_{Rij} &= \frac{1}{(0.648\ 7 + 0.861\ 2e^{-22.99v_{Rij}})} - 0.733\ 3 \\ R^2 &= 0.873 \end{aligned} \quad (11)$$

由公式(11)相关系数数  $R^2$  为 0.873 可知,  $RQI_{Rij}$  和  $v_{Rij}$  之间有良好的相关性.

### 3.3 RQI 差异对当量出行时间费用的影响



a  $\max(RQI_{v_0i}, RQI_{v_0j}) \geq 3$

采用 RQI 差异对应的行驶时间差作为 RQI 差异的当量出行时间费用,以  $T$  表示,计算公式如下:

$$T = \left(\frac{1}{v_0} - \frac{1}{v_{1j}}\right)L \times 3\ 600 \quad (12)$$

将 3.1 中  $v_{Rij}$  的定义代入公式(12)得

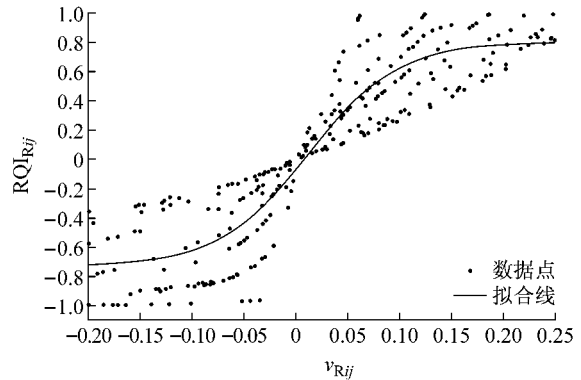
$$T = \frac{v_{Rij}}{v_0(1 + v_{Rij})}L \times 3600 \quad (13)$$

将  $L=1$  km 按公式(13)计算的当量出行时间费用  $T$  与以  $v_0$  行驶 1 km 的时间的比值,定义为当量时间费用比  $T_R$ .

$$T_R = \frac{v_{Rij}}{(1 + v_{Rij})} \times 100 \quad (14)$$

$T_R$  反映了  $RQI_{Rij}$  对当量出行时间费用的影响的程度.  $T_R$  越大,影响程度越大;反之越小.

通过公式(10)、(11)、(13)及(14)完成相应计算,结果如表 7 所示.



b  $\max(RQI_{v_0i}, RQI_{v_0j}) < 3$

图 3  $RQI_{Rij}$  与  $v_{Rij}$  的回归关系

Fig. 3 Regression relation between  $RQI_{Rij}$  and  $v_{Rij}$

表 7 当量出行时间费用计算

Tab. 7 Calculation of travel time cost

RQI <sub>Rij</sub>	$\max(RQI_{v_0i}, RQI_{v_0j}) \geq 3$				$\max(RQI_{v_0i}, RQI_{v_0j}) < 3$			
	T/s			T <sub>R</sub> /%	T/s			T <sub>R</sub> /%
	L=1 km	L=10 km	L=100 km		L=1 km	L=10 km	L=100 km	
0.8	10.10	100.99	1 009.88	22.44	4.25	42.52	425.15	9.44
0.5	6.92	69.18	691.79	15.38	1.38	13.76	137.57	3.07
0.3	4.45	44.54	445.44	9.89	0.83	8.28	82.82	1.84
0.1	1.65	16.50	165.00	3.67	0.38	3.76	37.57	0.84
-0.3	-5.31	-53.09	-530.93	-11.80	-0.56	-5.64	-56.44	-1.24
-0.6	-12.20	-121.96	-1 219.59	-27.11	-1.83	-18.35	-183.50	-4.07

由表 7 可知:首先,随出行距离  $L$  的增加,出行时间费用  $T$  也相应成正比例增长,可见  $L$  对  $T$  有重要影响.其次,随着  $RQI_{Rij}$  绝对值的增大,  $T_R$  的绝对值也逐渐增大,说明在本文计算的速度范围内, RQI 差异越大,由其差异引起的当量出行时间费用占总

出行时间费用的比例越高,影响越大.以  $RQI_{Rij} = 0.8$  为例,  $T$  约占总出行时间费用的比例(即  $T_R$ ) 高达 22.44% 或 9.44%,可见 RQI 差异对出行时间费用影响较大.在  $\max(RQI_{v_0i}, RQI_{v_0j}) \geq 3$  和  $\max(RQI_{v_0i}, RQI_{v_0j}) < 3$  这两种不同状态下,同一

$RQI_{Rij}$  水平下,对应的  $T$  和  $T_R$  值不一致,且前者比后者大.上述计算分析的当量出行时间费用,针对的研究对象是自由流状态下的单辆车,随着道路上交通流量的增大,车辆将逐渐开始受到其他车辆行驶的影响.当车辆无法自主选择车速时,车速的降低会使  $RQI$  差异减小,进而带来单车当量出行时间费用的减小.但随着流量的增大,所有车辆的当量出行时间费用的总和却未必减小.

## 4 结论

本文给出了  $RQI$  差异的当量时间费用的概念:将两条道路在同一检测速度下的  $RQI$  差异的当量时间费用定义为达到相同行驶舒适性(即相同  $RQI$  值)时两条道路由于车速速度差异所带来的出行时间差异.在这一概念下,以高速公路为研究对象,研究给出了  $RQI$  差异的当量时间费用的计算方法.首先,将已知路面激励函数下  $IRI-v$  的关系式进行量化,依据量化后  $IRI-v$  的关系式,选择典型道路,计算不同速度下的  $IRI$  值;其次,对已有不同速度和  $RQI$  下的  $IRI$  分级临界值关系进行提取,计算典型道路在不同速度下的  $RQI$  值;然后,计算任意两条典型道路同一速度下的  $RQI$  差值与同一  $RQI$  水平下的速度差值,通过回归分析量化两者之间的关系;最后,将计算的速度差异转化为时间差异,给出  $RQI$  差异的当量时间费用.本文采用这一方法,对所选取的 50 条典型道路  $RQI$  差异的当量时间费用进行了分析,结果表明:同一速度( $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )水平下的  $RQI$  差异与同一  $RQI$  水平下的速度差异之间存在良好的相关性;在自由流状态下, $RQI$  差异的当量出行时间费用与实际出行时间费用的比值高达 10%,在实际应用中不可忽略.非自由流状态下,需要综合考虑  $RQI$  与流量对速度的共同作用.

## 参考文献:

- [1] CHATTI K, ZAABAR I. Estimating the effects of pavement condition on vehicle operating costs[R]. Washington D C: National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), 2012.
- [2] ZAABAR I, CHATTI K. Estimating vehicle operating costs caused by pavement surface conditions[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2014, 2455: 63.
- [3] STEYN W, BEAN W. The potential effects of deteriorating road quality and maintenance in South Africa [C]//CSIR 7th Annual State of Logistics Survey for South Africa. Pretoria: CSIR, 2010: 30-35.
- [4] LI Y, HUANG J. Safety impact of pavement conditions[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2014, 2455: 77.
- [5] ZENG H, FONTAINE M, SMITH B. Estimation of the safety effect of pavement condition on rural, two-lane highways[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2014, 2435: 45.
- [6] 陈长, 孙立军, 董茂强. 基于现代检测技术的沥青路面评价新方法 [J]. 公路交通科技, 2006, 23(9): 1.  
CHEN Zhang, SUN Lijun, DONG Maoqiang. New methods for asphalt pavements evaluation based on modern inspection technologies [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(9): 1.
- [7] 刘云, 钱振东. 路面平整度及车辆振动模型的研究综述 [J]. 公路交通科技, 2008, 25(1): 51.  
LIU Yun, QIAN Zhendong. Review of road roughness and vehicle vibration model [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(1): 51.
- [8] MÜČKA P. Current approaches to quantify the longitudinal road roughness [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2016, 17(8): 659.
- [9] 王永良, 张永平, 张洪亮, 等. 沥青路面平整度评价指标研究综述 [J]. 市政技术, 2014, 32(2): 26.  
WANG Yongliang, ZHANG Yongping, ZHANG Hongliang, et al. Research overview on evenness evaluation indexes of asphalt pavement [J]. Municipal Engineering Technology, 2014, 32(2): 26.
- [10] YU J, CHOU E, YAU J T. Development of speed-related ride quality thresholds using international roughness index [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2006, 1974: 47.
- [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): 47.  
ZHOU Xiaqing, SUN Lijun. Relationship between international roughness index and velocity of quarter car [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(10): 47.
- [12] PATERSON W. International roughness index: relationship to other measures of roughness and riding quality [J]. Journal of the Transportation Research Board, 1986(1084): 49.
- [13] SAYERS M W, GILLESPIE T D, QUEIROZ A V. The international road roughness experiment-establishing correlation and a calibration standard for measurements[R]. Washington D C: The World Bank, 1986.
- [14] 姚祖康. 公路设计手册: 路面 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.  
YAO Zukang. The manual of highway design: pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 1999.
- [15] 中交第一公路勘察设计研究院. 公路路线设计规范: JTG D20—2006[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.  
The First Highway Survey and Design Research Institute. Design specification for highway alignment: JTG D20—2006 [S]. Beijing: China Communications Press, 2006.