

美国双车道公路通行能力分析的新方法

马晓翠¹, 陈明磊²

(1.潍坊市寒亭区公路事业发展中心, 山东 潍坊 261100; 2.潍坊市市政工程设计研究院有限公司, 山东 潍坊 261061)

摘要: 双车道公路通行能力分析的目标是评定每个方向的服务水平。美国《道路通行能力手册》(HCM) 第 7 版的重大修订之一是对双车道公路通行能力分析方法的改进, 取消跟车时间百分率指标, 引入跟车密度作为服务水平评定指标。文中从路段类型划分、性能指标计算、服务水平评定方面介绍 HCM 第 7 版中双车道公路通行能力分析新方法。

关键词: 公路交通; 双车道公路; 通行能力; 《道路通行能力手册》(HCM); 服务水平

中图分类号: U491.114

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)06-0019-08

双车道公路是每个方向一条车道的公路。双车道公路通行能力分析多车道公路的关键区别是, 由于双车道公路每个方向的交通受到对向交通的影响, 通行能力需要双向分别分析。双车道公路一个方向的基本通行能力为 1 700 pcu/h, 但两个方向的基本通行能力为 3 200 pcu/h, 不是 3 400 pcu/h, 由于两个方向交通互相作用, 当一个方向的交通流率达到 1 700 pcu/h 时, 另一个方向的交通流率最大为 1 500 pcu/h。因此, 双车道公路通行能力分析的目标不是确定每个方向的通行能力, 而是在考虑对向交通的条件下评定每个方向的服务水平。2022 年, 美国交通运输研究委员会发布《道路通行能力手册》(Highway Capacity Manual, HCM) 第 7 版, 对双车道公路通行能力分析进行了改进, 取消了跟车时间百分率指标, 引入跟车密度作为服务水平评定指标。本文对新的分析方法进行介绍, 为交通规划、设计与管理提供借鉴。

1 路段类型划分

超车机会是影响双车道公路通行能力的主要因素。根据超车条件, 将路段分为借道超车段、有超车道段、禁止超车段三类。

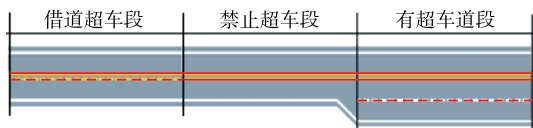


图 1 路段类型示意图

1.1 借道超车段

借道超车段是指允许借用对向车道进行超车的

双车道路段, 为特定交通条件下超车行为提供合理空间。为了给超车行为提供有效空间, 借道超车段应满足最小超车长度, 且不能位于没有充分超车机会的路段。借道超车段的交通运行改善作用受分析方向流率、对向流率、重车百分率、平面线形、纵断面线形、路段长度等因素的影响。此外, 上游相邻路段的交通运行改善程度会影响进入借道超车段的跟车队列长度。

1.2 有超车道段

有超车道段是指为了让快速车辆超过慢速车辆, 消解上游相邻路段形成的跟车队列, 在所分析方向的同向增加一个附加车道的路段。有超车道段的交通运行改善作用受分析方向流率、重车百分率、平面线形、纵断面线形、路段长度等因素的影响。需要注意的是, 爬坡车道、“2+1”断面形式与有超车道段类似, 但应用场景不同, 不可一概而论。

1.3 禁止超车段

禁止超车段是指禁止借用对向车道进行超车或可借用的空间不足以完成超车(如视距不足)而禁止超车的双车道路段。线形条件不同的两个相邻禁止超车段, 如果客车和重车在两个路段的运行性能相对一致, 且客车与重车的运行性能差异不大, 则可以合并为一个分析路段。这样, 货车性能成为确定是“一般路段分析”还是“特殊路段分析”的关键因素。另外, 虽然为借道超车段但根本无法超车(不论对向交通流率是多少)的相邻路段也可以合并到分析路段。这种状况出现的原因可能是视距不足(这个路段应明确为禁止超车段)。

禁止超车段可能包含线形不同的多个路段, 但

每个路段都不能与其余路段有显著的运行条件差异。否则,有显著不同运行条件的路段应单独列为一。禁止超车段的交通运行改善作用受分析方向流率、重车百分率、平面线形、纵断面线形、路段长度等因素的影响。

2 性能指标计算

2.1 自由流速度

假定自由流速度对应单向流率为 100 veh/h 时的平均行程速度(Average Travel Speed,ATS)。运用自由流速度值,通过回归分析得到直线段和平曲线段的自由流速度计算公式。

2.1.1 直线段

直线段自由流速度按式(1)、式(2)计算,该计算公式适用于所有路段类型(包括借道超车段、有超车道路段、禁止超车段),不同路段类型通过式(2)中对向

流率 V_o 取值予以区分。

$$v_{FFS} = v_{BFFS} - aP_{HV} \quad (1)$$

$$a = \max[0.033\ 3, a_0 + a_1 v_{BFFS} + a_2 L + \max(0, a_3 + a_4 v_{BFFS} + a_5 L) V_o] \quad (2)$$

式中: v_{FFS} 为分析方向的自由流速度(mi/h,1 mi/h=1.61 km/h,下同); v_{BFFS} 为分析方向的基本自由流速度(mi/h),一般按限制速度的 1.14 倍取值; a 为 $v_{FFS} - P_{HV}$ 关系的比数(比例系数); P_{HV} 为分析方向的重车比例(%); $a_0 \sim a_5$ 为比数 a 的计算系数,其取值见表 1; L 为路段长度(mi,1 mi=1.61 km,下同); V_o 为对向流率(kveh/h),有超车道路段 $V_o = 0$,禁止超车段 $V_o = 1.5$ kveh/h。

从式(1)来看,重车比例 $P_{HV} = 0$ 时,自由流速度 v_{FFS} 等于基本自由流速度 v_{BFFS} ;随着重车比例的增加,自由流速度 v_{FFS} 以比数 a 为比例线性增长。根据式(2),比数 a 与基本自由流速度 v_{BFFS} 、路段长

表 1 比数 a 的计算系数取值

纵断面线形分类	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
2	-0.450 36	0.008 14	0.015 43	0.013 58	0.000 00	0.000 00
3	-0.295 91	0.007 43	0.000 00	0.012 46	0.000 00	0.000 00
4	-0.409 02	0.009 75	0.007 67	-0.183 63	0.004 23	0.000 00
5	-0.383 60	0.010 74	0.019 45	-0.698 48	0.010 69	0.127 00

注:纵断面线形分类值见表 2;纵断面线形分类为 1 时,基本自由流速度 v_{BFFS} 、路段长度 L 和对向流率 V_o 对比数值几乎没有影响,比数值为常数 0.033 3,比数计算系数记为“N/A(Not Applicable)”,以下类似。

表 2 纵断面线形分类值

路段长度 L /mi	下列坡度 i (%)下纵断面线形分类值									
	$i \leq 1$	$1 < i \leq 2$	$2 < i \leq 3$	$3 < i \leq 4$	$4 < i \leq 5$	$5 < i \leq 6$	$6 < i \leq 7$	$7 < i \leq 8$	$8 < i \leq 9$	$i > 9$
$L \leq 0.1$	1(1)	1(1)	1(1)	1(1)	1(1)	1(1)	1(1)	2(1)	2(2)	2(2)
$0.1 < L \leq 0.2$	1(1)	1(1)	1(1)	1(1)	2(1)	2(2)	2(2)	3(2)	3(3)	3(3)
$0.2 < L \leq 0.3$	1(1)	1(1)	1(1)	2(1)	2(2)	3(2)	3(3)	4(3)	4(4)	5(5)
$0.3 < L \leq 0.4$	1(1)	1(1)	2(1)	2(2)	3(2)	3(3)	4(4)	5(4)	5(5)	5(5)
$0.4 < L \leq 0.5$	1(1)	1(1)	2(1)	2(2)	3(3)	4(3)	5(4)	5(5)	5(5)	5(5)
$0.5 < L \leq 0.6$	1(1)	1(1)	2(1)	3(2)	3(3)	4(4)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)
$0.6 < L \leq 0.7$	1(1)	1(1)	2(1)	3(2)	4(3)	4(4)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)
$0.7 < L \leq 0.8$	1(1)	1(1)	2(1)	3(3)	4(4)	5(4)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)
$0.8 < L \leq 0.9$	1(1)	1(1)	2(1)	3(3)	4(4)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)
$0.9 < L \leq 1.0$	1(1)	1(1)	2(2)	3(3)	4(4)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)
$1.0 < L \leq 1.1$	1(1)	1(1)	2(2)	3(3)	4(4)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)
$L > 1.1$	1(1)	1(1)	2(2)	4(4)	4(4)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)	5(5)

注:括号内数值适用于下坡路段。

度 L 和对向流率 V 。相关。比数计算系数($a_0 \sim a_5$)因纵断面线形分类不同而不同,因而比数 a 与纵断面线形也相关。

2.1.2 平曲线段

基本自由流速度是在既定道路平纵线形条件下车道宽度和路肩宽度均为标准宽度且没有路侧接入口时的期望速度。平曲线段的基本自由流速度可能比直线段的小,按式(3)计算。根据式(3), $v_{\text{BFFS,HC}_i}$

随 $v_{\text{BFFS,T}}$ 的增大而增大,随 C_i 的增大而减小; $v_{\text{BFFS,HC}_i}$ 不会大于 $v_{\text{BFFS,T}}$ 。

$$v_{\text{BFFS,HC}_i} = \min(v_{\text{BFFS,T}}, 44.32 + 0.372 \cdot 8 v_{\text{BFFS,T}} - 6.868 C_i) \quad (3)$$

式中: $v_{\text{BFFS,HC}_i}$ 为第 i 段平曲线的基本自由流速度(mi/h); $v_{\text{BFFS,T}}$ 为直线段的基本自由流速度(mi/h); C_i 为第 i 段平曲线的平面线形分类,其取值见表 3。

表 3 平面线形分类值

半径 R/ft	下列超高(%)下平面线形分类值							
	$i \leq 1$	$1 < i \leq 2$	$2 < i \leq 3$	$3 < i \leq 4$	$4 < i \leq 5$	$5 < i \leq 6$	$6 < i \leq 7$	$i > 7$
$R < 350$	5	5	5	5	5	5	5	5
$350 \leq R < 500$	4	4	4	4	4	4	4	4
$500 \leq R < 650$	3	3	3	3	3	3	3	3
$650 \leq R < 800$	3	3	3	3	3	3	2	2
$800 \leq R < 950$	3	2	2	2	2	2	2	2
$950 \leq R < 1\ 100$	2	2	2	2	2	2	2	2
$1\ 100 \leq R < 1\ 250$	2	2	2	2	2	2	2	1
$1\ 250 \leq R < 1\ 400$	2	2	2	2	2	1	1	1
$1\ 400 \leq R < 1\ 550$	2	2	2	1	1	1	1	1
$1\ 550 \leq R < 1\ 700$	2	1	1	1	1	1	1	1
$R \geq 1\ 700$	1	1	1	1	1	1	1	1

注:1 ft=0.304 8 m,下同。

平曲线段的自由流速度与基本自由流速度的关系与直线段类似,式(4)为其关系式。根据式(4),基本自由流速度随着重车比例的增大而线性减小,这是因为重车的期望速度比客车低。

$$v_{\text{FFS,HC}_i} = v_{\text{BFFS,HC}_i} - 0.025 \cdot 5 P_{\text{HV}} \quad (4)$$

式中: $v_{\text{FFS,HC}_i}$ 为第 i 段平曲线的自由流速度(mi/h)。

2.2 平均行程速度

通过速度一流率变化回归分析,确定平均行程速度计算公式如下:

$$v_{\text{ATS}} = v_{\text{FFS}} - m(V_d - 0.1)^p \quad (5)$$

式中: v_{ATS} 为分析方向的平均行程速度(mi/h); V_d 为分析方向的流率(kveh/h); m 为速度一流率比数; p 为速度一流率指数。

仿真数据样本观测显示,流率为 0~100 veh/h 时,平均行程速度没有显著变化。因此,流率 ≤ 100 veh/h 时,平均行程速度等于自由流速度。

2.2.1 速度一流率比数 m

流率增加时,速度一流率比数 m 控制着平均行

程速度减小的快慢程度。比数 m 因道路和交通条件组合不同而不同。

(1) 直线段。针对不同纵断面线形分类和路段类型分别进行回归分析,得出速度一流率比数 m 的通用计算公式如下:

$$m = \max[b_5, b_0 + b_1 v_{\text{FFS}} + b_2 \sqrt{V_o} + \max(0, b_3) \sqrt{L} + \max(0, b_4) \sqrt{P_{\text{HV}}}] \quad (6)$$

$$b_3 = c_0 + c_1 \sqrt{L} + c_2 v_{\text{FFS}} + c_3 (v_{\text{FFS}} \sqrt{L}) \quad (7)$$

$$b_4 = d_0 + d_1 \sqrt{P_{\text{HV}}} + d_2 v_{\text{FFS}} + d_3 (v_{\text{FFS}} \sqrt{P_{\text{HV}}}) \quad (8)$$

式中: $b_0 \sim b_5$ 为速度一流率比数 m 的计算系数,其取值见表 4、表 5; b_3 为路段长度系数; b_4 为重车比例系数; $c_0 \sim c_3$ 为路段长度系数 b_3 的计算系数,其取值见表 6、表 7; $d_0 \sim d_3$ 为重车比例系数 b_4 的计算系数,其取值见表 8、表 9。

(2) 平曲线段。平曲线段速度一流率比数 m 的计算公式如下:

表4 借道超车段、禁止超车段的速度一流率比数的计算系数取值

纵断面线形分类	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
1	0.055 8	0.054 2	0.327 8	0.102 9	N/A	N/A
2	5.728 0	-0.080 9	0.740 4	可变	可变	3.115 5
3	9.307 9	-0.170 6	1.129 2	可变	可变	3.115 5
4	9.011 5	-0.199 4	1.825 2	可变	可变	3.268 5
5	23.914 4	-0.692 5	1.947 3	可变	可变	3.511 5

表5 有超车道段的速度一流率比数的计算系数取值

纵断面线形分类	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
1	-1.137 9	0.094 1	N/A	可变	可变	N/A
2	-2.068 8	0.105 3	N/A	可变	可变	N/A
3	-0.507 4	0.093 5	N/A	N/A	可变	N/A
4	8.035 4	-0.086 0	N/A	可变	可变	4.190 0
5	7.299 1	-0.353 5	N/A	可变	可变	4.870 0

表6 借道超车段、禁止超车段的路段长度系数的计算系数取值

纵断面线形分类	c_0	c_1	c_2	c_3
1	-0.102 9	N/A	N/A	N/A
2	-13.803 6	N/A	0.244 6	N/A
3	-11.970 3	N/A	0.254 2	N/A
4	-12.511 3	N/A	0.265 6	N/A
5	-14.896 1	N/A	0.437 0	N/A

表7 有超车道段的路段长度系数的计算系数取值

纵断面线形分类	c_0	c_1	c_2	c_3
1	N/A	0.266 7	N/A	N/A
2	N/A	0.447 9	N/A	N/A
3	N/A	N/A	N/A	N/A
4	-27.124 4	11.519 6	0.468 1	-0.187 3
5	-45.339 1	17.374 9	1.058 7	-0.372 9

表8 借道超车段、禁止超车段的重车比例系数的计算系数取值

纵断面线形分类	d_0	d_1	d_2	d_3
1	N/A	N/A	N/A	N/A
2	-1.776 5	N/A	0.039 2	N/A
3	-3.555 0	N/A	0.082 6	N/A
4	-5.777 5	N/A	0.137 3	N/A
5	-18.291 0	2.387 5	0.449 4	-0.052 0

表9 有超车道段的重车比例系数的计算系数取值

纵断面线形分类	d_0	d_1	d_2	d_3
1	N/A	0.125 2	N/A	N/A
2	N/A	0.163 1	N/A	N/A
3	N/A	0.220 1	N/A	0.007 2
4	N/A	0.750 6	N/A	0.019 3
5	3.845 7	-0.911 2	N/A	0.017 0

$$m = \max[0.277, -25.899\ 3 - 0.775\ 6 \times v_{\text{FFS,HCi}} + 10.629\ 4 \sqrt{v_{\text{FFS,HCi}}} + 2.476\ 6 C_i - 9.823\ 8 \sqrt{C_i}] \quad (9)$$

2.2.2 速度一流率指数 p

与速度一流率比数 m 一样,速度一流率指数 p 也因道路和交通条件的组合不同而不同。

(1) 直线段。通过回归分析得到直线段速度一流率指数 p 的计算公式如下:

$$p = \max[f_8, f_0 + f_1 v_{\text{FFS}} + f_2 L + f_3 V_o + f_4 \sqrt{V_o} + f_5 P_{\text{HV}} + f_6 \sqrt{P_{\text{HV}}} + f_7 (LP_{\text{HV}})] \quad (10)$$

式中: $f_0 \sim f_8$ 为速度一流率指数的计算系数,其取值见表10、表11。

(2) 平曲线段。平曲线段速度一流率指数 p 为常数0.5。限制平曲线段的速度超过直线段。

2.3 跟车百分率

双车道公路上超车经常受到限制时就会形成跟

表 10 借道超车段、禁止超车段的速度一流率指数的计算系数取值

纵断面线形分类	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8
1	0.675 76	0.000 00	0.000 00	0.120 60	-0.359 19	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.000 00
2	0.345 24	0.005 91	0.020 31	0.149 11	-0.437 84	-0.002 96	0.029 56	0.000 00	0.416 22
3	0.172 91	0.009 17	0.056 98	0.277 34	-0.618 93	-0.009 18	0.091 84	0.000 00	0.416 22
4	0.676 89	0.005 34	-0.130 37	0.256 99	-0.684 65	-0.007 09	0.070 87	0.000 00	0.339 50
5	1.132 62	0.000 00	-0.263 67	0.188 11	-0.643 04	-0.008 67	0.086 75	0.000 00	0.305 90

表 11 有超车道段的速度一流率指数的计算系数取值

纵断面线形分类	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8
1	0.917 93	-0.005 57	0.368 62	0.000 00	0.000 00	0.006 11	0.000 00	-0.004 19	0.000 00
2	0.651 05	0.000 00	0.349 31	0.000 00	0.000 00	0.007 22	0.000 00	-0.003 91	0.000 00
3	0.401 17	0.000 00	0.686 33	0.000 00	0.000 00	0.023 50	0.000 00	-0.020 88	0.000 00
4	1.132 82	-0.007 98	0.354 25	0.000 00	0.000 00	0.015 21	0.000 00	-0.009 87	0.000 00
5	1.120 77	-0.005 50	0.254 31	0.000 00	0.000 00	0.012 69	0.000 00	-0.010 53	0.000 00

车队列,跟车队列的速度受队列头车速度的限制,跟车队列变长意味着服务水平降低。

跟车百分率(Percent Follower, PF)是指跟车数量占全部车辆数量的比例。跟车是指由于不能超车而在慢速车辆后面行驶的车辆,一般定义为同一车道内车头时距小于临界值(2.5 s)的车辆。经过现场及仿真数据回归分析,得出跟车百分率 P_{PF} 计算公式[见式(11)]。由于平曲线对跟车百分率不像对平均行程速度一样有显著影响,计算中未考虑平曲线因素。

$$P_{PF} = (1 - e^{mV_d^p}) \times 100 \quad (11)$$

式中: m 为比数; p 为指数。

(1) 通行能力下跟车百分率。对于借道超车段和禁止超车段,通行能力下跟车百分率 $P_{PF, cap}$ 按式(12)计算;对于有超车道段, $P_{PF, cap}$ 按式(13)计算。

$$P_{PF, cap} = g_0 + g_1 L + g_2 \sqrt{L} + g_3 v_{FFS} + g_4 \sqrt{v_{FFS}} +$$

$$g_5 P_{HV} + g_6 (v_{FFS} V_o) + g_7 \sqrt{V_o} \quad (12)$$

式中: $g_0 \sim g_7$ 为通行能力下跟车百分率的计算系数,其取值见表 12。

$$P_{PF, cap} = g_0 + g_1 L + g_2 \sqrt{L} + g_3 v_{FFS} + g_4 \sqrt{v_{FFS}} + g_5 P_{HV} + g_6 \sqrt{P_{HV}} + g_7 (v_{FFS} P_{HV}) \quad (13)$$

式中: $g_0 \sim g_7$ 的取值见表 13。

(2) 25%通行能力下跟车百分率。对于禁止超车段和借道超车段,25%通行能力下跟车百分率 $P_{PF, 25cap}$ 按式(14)计算;对于有超车道段, $P_{PF, 25cap}$ 按式(15)计算。

$$P_{PF, 25cap} = h_0 + h_1 L + h_2 \sqrt{L} + h_3 v_{FFS} + h_4 \sqrt{v_{FFS}} + h_5 P_{HV} + h_6 (v_{FFS} V_o) + h_7 \sqrt{V_o} \quad (14)$$

式中: $h_0 \sim h_7$ 为 25%通行能力下跟车百分率的计算系数,其取值见表 14。

表 12 借道超车段、禁止超车段通行能力下跟车百分率的计算系数取值

纵断面线形分类	g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7
1	37.680 80	3.050 89	-7.908 66	-0.943 21	13.642 66	-0.000 50	-0.055 00	7.137 60
2	58.211 04	5.733 87	-13.662 93	-0.661 26	9.085 75	-0.009 50	-0.036 02	7.146 20
3	113.204 39	10.017 78	-18.900 00	0.465 42	-6.753 38	-0.030 00	-0.058 00	10.032 40
4	58.299 78	-0.536 11	7.350 76	-0.270 46	4.498 50	-0.011 00	-0.029 68	8.896 80
5	3.329 68	-0.843 77	7.089 52	-1.320 89	19.984 77	-0.012 50	-0.029 60	9.994 50

表 13 有超车车道段通行能力下跟车百分率的计算系数取值

纵断面线形分类	g_0	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7
1	61.730 75	6.739 22	-23.688 53	-0.841 26	11.445 33	-1.051 24	1.503 90	0.004 91
2	12.300 96	9.574 65	-30.794 27	-1.794 48	25.764 36	-0.663 50	-1.260 39	0.003 23
3	206.073 69	-4.298 85	0.000 00	1.964 83	-30.325 56	-0.758 12	1.064 53	-0.008 39
4	263.134 28	5.387 49	-19.048 59	2.730 18	-42.769 19	-1.312 77	-0.322 42	0.014 12
5	126.956 29	5.957 54	-19.222 29	0.432 38	-7.356 36	-1.030 17	-2.660 26	0.013 89

表 14 禁止超车段、借道超车段 25%通行能力下跟车百分率的计算系数取值

纵断面线形分类	h_0	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7
1	18.017 80	10.000 00	-21.600 00	-0.978 53	12.052 14	-0.007 50	-0.067 00	11.604 10
2	47.838 87	12.800 00	-28.200 00	-0.617 58	5.800 00	-0.045 50	-0.033 44	11.355 70
3	125.400 00	19.500 00	-34.900 00	0.906 72	-16.100 00	-0.110 00	-0.062 00	14.711 40
4	103.135 34	14.684 59	-23.727 04	0.664 44	-11.957 63	-0.100 00	0.001 72	14.700 70
5	89.000 00	19.026 42	-34.542 40	0.297 92	-6.625 28	-0.160 00	0.004 80	17.566 10

$$P_{PF,25cap} = h_0 + h_1 L + h_2 \sqrt{L} + h_3 v_{FFS} + h_7 (v_{FFS} P_{HV}) \quad (15)$$

$$h_4 \sqrt{v_{FFS}} + h_5 P_{HV} + h_6 \sqrt{P_{HV}} + \quad \text{式中: } h_0 \sim h_7 \text{ 的取值见表 15。}$$

表 15 有超车车道段 25%通行能力下跟车百分率的计算系数取值

纵断面线形分类	h_0	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7
1	80.371 05	14.449 97	-46.418 31	-0.233 67	0.849 14	-0.567 47	0.894 27	0.001 19
2	18.378 86	14.718 56	-47.788 92	-1.433 73	18.320 40	-0.132 26	0.772 17	-0.007 78
3	239.989 30	15.906 83	-46.875 25	2.735 82	-42.881 30	-0.537 46	0.762 71	-0.004 28
4	223.684 35	10.269 08	-35.608 30	2.318 77	-38.300 34	-0.602 75	-0.677 58	0.001 17
5	137.376 33	11.001 06	-38.890 43	0.785 01	-14.886 72	-0.725 76	-2.495 46	0.008 72

(3) 比数 m 计算。计算公式如下:

$$m = k_1 \left[\frac{0 - \ln(1 - P_{PF,25cap}/100)}{0.25 P_{cap}} \right] + k_2 \left[\frac{0 - \ln(1 - P_{PF,25cap}/100)}{P_{cap}} \right] \quad (16)$$

式中: k_1 、 k_2 为比数 m 的计算系数,其取值见表 16;
 P_{cap} 为通行能力(kveh/h)。

(4) 指数 p 计算。计算公式如下:

$$p = l_0 + l_1 \left[\frac{0 - \ln(1 - P_{PF,25cap}/100)}{0.25 P_{cap}} \right] + l_2 \left[\frac{0 - \ln(1 - P_{PF,25cap}/100)}{P_{cap}} \right] +$$

表 16 比数 m 的计算系数取值

路段类型	k_1	k_2
借道超车段、禁止超车段	-0.297 64	-0.719 17
有超车车道段	0.158 08	-0.837 32

$$l_3 \sqrt{\frac{0 - \ln(1 - P_{PF,25cap}/100)}{0.25 P_{cap}}} + l_4 \sqrt{\frac{0 - \ln(1 - P_{PF,25cap}/100)}{P_{cap}}} \quad (17)$$

式中: $l_0 \sim l_4$ 为指数 p 的计算系数,其取值见表 17。

表 17 指数 p 的计算系数取值

路段类型	l_0	l_1	l_2	l_3	l_4
借道超车段、禁止超车段	0.811 65	0.379 20	-0.495 24	-2.112 89	2.411 46
有超车车道段	1.632 46	1.649 60	-4.458 23	-4.891 19	10.330 57

2.4 跟车密度

服务水平的评价指标是跟车密度(Follower Density, FD),即每英里每车道跟车的数量。 D_{FD} 按下式计算:

$$D_{FD} = P_{PF} \times \frac{10V_d}{v_{ATS}} \quad (18)$$

式中: D_{FD} 为跟车密度 $[f/(mi \cdot ln), 1 f/(mi \cdot ln) = 0.62 f/(km \cdot ln)]$, f 为 follower 的缩写,表示跟车数量,下同]。

双车道公路上设置超车道,可以为车辆提供更多的超车机会,消解跟车队列,提高道路服务水平。超车道的运行改善作用会向下游路段延伸一段距离,改善作用的总长度称为有效长度。有效长度的起点为超车道的起点,终点为下游交通运行状态重回起点状态的位置。有超车道段的有效长度 L_e 按下式计算:

$$L_e = 25.7 - 0.04V_d + 0.000\ 027V_d^2 - 0.031P_{PF} \quad (19)$$

式中: P_{PF} 为分析方向上游路段的跟车百分率。

有超车道段下游临近路段的终点仍位于有效长度范围内时,应对下游临近路段的跟车密度进行修正,修正系数计算公式如下:

$$I_{m,PF} = \max\{0, 27 - 8.75 \times \ln[\max(0.1, D)] + 0.1 \times \max(0, P_{PF} - 30) + 3.5 \times \ln[\max(0.3, L_{PLL})] - 0.01 \times V_d\} \quad (20)$$

$$I_{m,ATS} = \max(0, 3 - 0.8D + 0.1 \times \max(0, P_{PF} - 30) + 0.75L_{PLL} - 0.005V_d) \quad (21)$$

$$I_{FD,adj} = \frac{P_{PF}}{100} \times \left(1 - \frac{I_{m,PF}}{100}\right) \times \frac{V_d}{v_{ATS}(1 + I_{m,ATS}/100)} \quad (22)$$

式中: $I_{m,PF}$ 为跟车百分率的提高百分率; D 为路段终点与有超车道段起点的距离; P_{PF} 为有超车道段上游路段跟车百分率(计算 $I_{m,PF}$ 和 $I_{m,ATS}$ 时)或分析方向的跟车百分率(计算 $I_{FD,adj}$ 时); $I_{m,ATS}$ 为平均行程速度的提高百分率; $I_{FD,adj}$ 为跟车密度修正系数; L_{PLL} 为有超车道段的长度(mi)。

3 服务水平评定

相对于限速高的公路,限速低的公路在速度降低时跟车百分率下降并不成比例,限速低的公路需要有更高的服务水平临界值来抵消跟车密度不成比

例地增长。因此,服务水平评定分为两组,分别为高速组(≥ 50 mi/h)、低速组(< 50 mi/h)。评定标准见表 18。

表 18 服务水平评定标准

服务水平	跟车密度 $[f \cdot (mi \cdot ln)^{-1}]$	
	高速组	低速组
A	≤ 2.0	≤ 2.5
B	$> 2.0 \sim 4.0$	$> 2.5 \sim 5.0$
C	$> 4.0 \sim 8.0$	$> 5.0 \sim 10.0$
D	$> 8.0 \sim 12.0$	$> 10.0 \sim 15.0$
E	> 12.0	> 15.0

如果能够现场调查特定路段的平均行程速度、流率和跟车百分率,则可直接通过式(18)计算跟车密度,进而通过表 18 进行服务水平评定。

每个单独路段都可以通过以上方法进行路段分析方向终点处服务水平评定。多个连续的路段(相同方向)可以组合形成一个整体(特征变化的长路段),通过加权平均按式(23)计算总体平均跟车密度,进行总体服务水平评定。

$$D_{FD,F} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{FD,i} \times L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (23)$$

式中: $D_{FD,F}$ 、 $D_{FD,i}$ 分别为分析方向的总体平均跟车密度和每个路段的跟车密度 $[f/(mi \cdot ln)]$; L_i 为每个路段的长度(mi)。

4 计算示例

某平原区双车道公路某路段,路段类型为禁止超车段;路段长度为 3 960 ft(0.75 mi);分析方向上游为非有超车道段;分析方向交通量为 752 veh/h;高峰小时系数 $F_{PHF} = 0.94$;限速为 50 mi/h;重车百分率为 5%;纵坡度为零;平面线形为直线;车道宽度为 12 ft;路肩宽度为 6 ft;接入口数量为零。评价分析方向的服务水平。

4.1 识别路段类型

根据已知条件,路段类型为禁止超车段。

4.2 确定交通流率

根据交通量及高峰小时系数,按式(24)计算高峰小时交通流率 $V_{d,PH}$,得 $V_{d,PH} = 0.8$ kveh/h,小于禁止超车段的通行能力 1 700 veh/h,进入下一步计

算。禁止超车段的对向流率 V_o 为 1 500 veh/h = 1.5 kveh/h。

$$V_{d,PH} = \frac{V_d}{F_{PHF}} = \frac{752}{0.94} = 800 \text{ veh/h} = 0.8 \text{ kveh/h} \quad (24)$$

4.3 确定纵断面线形分类

根据表 2 及已知路段长度和纵坡度,得纵断面线形分类为 1。

4.4 计算自由流速度

根据限速计算基本自由流速度,得 $v_{BFFS} = 1.14 \times 50 = 57.0 \text{ mi/h}$ 。按式(1)计算自由流速度,得 $v_{FFS} = 57.0 - 0.033 \times 5 = 56.83 \text{ mi/h}$ (纵断面线形分类为 1, $a = 0.033 \times 3$)。因车道和路肩的宽度均为标准宽度,且平面为直线,无须对自由流速度进行修正。

4.5 计算平均行程速度

由于流率大于 100 veh/h,平均行程速度按式(5)计算。

(1) 根据表 4 及纵断面线形分类 1 确定 $b_0 \sim b_5$ 分别为 0.055 8、0.054 2、0.327 8、0.102 9、0.000 00、0.000 00。按式(6)计算速度一流率比数,得:

$$m = \max[0, 0.055 \ 8 + 0.054 \ 2 \times 56.83 + 0.327 \ 8 \times \sqrt{1.5} + \max(0.000 \ 0, 0.102 \ 9) \times \sqrt{0.75} + \max(0.000 \ 0, 0.000 \ 0) \times \sqrt{5}] = 3.626$$

(2) 根据表 10 及纵断面线形分类 1 确定 $f_0 \sim f_8$ 分别为 0.675 76、0.000 00、0.000 00、0.120 60、-0.359 19、0.000 00、0.000 00、0.000 00、0.000 00。按式(10)计算速度一流率指数,得:

$$p = \max[0.000 \ 00, 0.675 \ 76 + 0.000 \ 00 \times 56.83 + 0.000 \ 00 \times 0.75 + 0.120 \ 60 \times 1.5 - 0.359 \ 19 \times \sqrt{1.5} + 0.000 \ 00 \times 5 + 0.000 \ 00 \times \sqrt{5} + 0.000 \ 00 \times (0.75 \times 5)] = 0.416 \ 76$$

(3) 按式(5)计算平均行程速度,得:

$$v_{ATS} = 56.83 - 3.626 \times (0.8 - 0.1)^{0.416 \ 76} = 53.7 \text{ mi/h}$$

因平面线形为直线,无须对平均行程速度进行修正。

4.6 计算跟车百分率

(1) 分别按式(12)、式(14)计算通行能力下跟车百分率、25%通行能力下跟车百分率,得:

$$P_{PF, cap} = 37.680 \ 80 + 3.050 \ 89 \times 0.75 - 7.908 \ 66 \times \sqrt{0.75} - 0.943 \ 21 \times 56.83 + 13.642 \ 66 \times \sqrt{56.83} - 0.000 \ 50 \times 5 -$$

$$0.055 \ 00 \times (56.83 \times 1.5) + 7.137 \ 6 \times$$

$$\sqrt{1.5} = 86.41\%$$

$$P_{PF, 25cap} = 18.017 \ 80 + 10.000 \ 00 \times 0.75 -$$

$$21.600 \ 00 \times \sqrt{0.75} - 0.978 \ 53 \times 56.83 +$$

$$12.052 \ 14 \times \sqrt{56.83} - 0.007 \ 50 \times 5 -$$

$$0.067 \ 00 \times (56.83 \times 1.5) + 11.604 \ 10 \times$$

$$\sqrt{1.5} = 50.52\%$$

(2) 分别按式(16)、式(17)计算比数、指数,得:

$$m = -0.297 \ 64 \times \left[\frac{0 - \ln(1 - 50.52/100)}{0.25 \times 1.7} \right] -$$

$$0.719 \ 17 \times \left[\frac{0 - \ln(1 - 86.41/100)}{1.7} \right] =$$

$$-1.337$$

$$p = 0.811 \ 65 + 0.379 \ 20 \times$$

$$\left[\frac{0 - \ln(1 - 50.52/100)}{0.25 \times 1.7} \right] - 0.495 \ 24 \times$$

$$\left[\frac{0 - \ln(1 - 86.41/100)}{1.7} \right] - 2.112 \ 89 \times$$

$$\sqrt{\frac{0 - \ln(1 - 50.52/100)}{0.25 \times 1.7}} + 2.411 \ 46 \times$$

$$\sqrt{\frac{0 - \ln(1 - 86.41/100)}{1.7}} = 0.752 \ 4$$

(3) 按式(11)计算跟车百分率,得:

$$P_{PF} = (1 - e^{-1.337 \times 0.8^{0.752 \ 4}}) \times 100 = 67.7\%$$

4.7 计算跟车密度

按式(18)计算跟车密度,得:

$$D_{FD} = 67.7 \times \frac{10 \times 0.8}{53.7} = 10.1 \text{ f/(mi} \cdot \text{ln)}$$

4.8 有超车道段的修正

根据已知条件,上游路段为非有超车道段,无须进行修正。

4.9 评定服务水平

根据已知条件,该路段限速为 50 mi/h。根据表 18,服务水平为 D 级。

5 结语

HCM 从 1950 年第 1 版以来,通行能力分析内容不断丰富,分析方法不断更新,为交通规划、设计与管理提供了重要支持。本文介绍 HCM 第 7 版中双车道公路通行能力分析,旨在为专业人士提供相关借鉴。

HCM 中通行能力分析所用计算公式及计算系

(下转第 58 页)

过专业的安全知识教育培训、是否熟悉法律法规及安全管理制度等。

5 结语

本文分析了危险品道路运输中五类风险影响因素,构建了危险品道路运输风险因素层次结构模型,并基于因果关系将层次结构模型转化为贝叶斯网络模型,然后采用贝叶斯网络理论与模糊理论相融合的方法得到风险概率等级。但评价模型只选取了16个宏观的关键风险指标,不够全面;DEMATEL-ISM层次结构模型中的打分值由专家根据经验给出,存在主观性。这些将是今后的研究方向。

参考文献:

- [1] TRÉPANIÉ M, LEROUX M H, DE MARCELLIS-WARIN N. Cross-analysis of hazmat road accidents using multiple databases[J]. Accident Analysis & Prevention, 2009, 41(6): 1192-1198.
- [2] MA C X, ZHOU J B, YANG D. Causation analysis of hazardous material road transportation accidents based on the ordered logit regression model[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(4): 1259-1283.
- [3] 朱俊. 危险化学品物流运输的泄漏事故预防[J]. 化学工业, 2012, 30(4): 8-12+16.
- [4] 陈晓勇, 施式亮, 任竞舟, 等. 2013—2014年我国道路危险化学品运输事故统计分析及其对策[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2017, 32(3): 91-95.
- [5] 罗丹, 廖婵娟, 余欣柔. 2013—2017年我国危险化学品运输事故统计分析及其预防对策[J]. 中国公共安全(学术版), 2019(1): 28-32.
- [6] CONCA A, RIDELLA C, SAPORI E. A risk assessment for road transportation of dangerous goods: A routing solution[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 2890-2899.

- [7] LOWER M, MAGOTT J, SKORUPSKI J. Analysis of air traffic incidents using event trees with fuzzy probabilities[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2016, 293: 50-79.
- [8] CORDEIRO F G, BEZERRA B S, PEIXOTO A S P, et al. Methodological aspects for modeling the environmental risk of transporting hazardous materials by road[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2016, 44: 105-121.
- [9] 马晓丽, 刘禹杰, 陆键. 城市道路危险货物运输风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(5): 179-184.
- [10] 黄文成, 帅斌, 孙妍, 等. 熵-TOPSIS-耦合协调法评价铁路危险品运输系统风险[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(2): 134-138.
- [11] 王铁铭. 危险化学品道路运输安全管理现状及发展趋势研究[J]. 科学与信息化, 2019(25): 164+170.
- [12] 李长龙, 刘伟, 周邵萍. 基于 Mamdani 模糊推理的槽罐车运输安全评价[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2017, 43(4): 591-596.
- [13] 张宇, 吕淑然, 王婉青. 基于 AHP 和灰色聚类的危化品道路运输安全评价[J]. 安全, 2020, 41(3): 54-60.
- [14] 李耀南, 马国忠, 张东峰. 基于模糊层次分析法的危险品物流企业安全评价[J]. 公路与汽运, 2014(2): 98-102.
- [15] 周德群, 章玲. 集成 DEMATEL/ISM 的复杂系统层次划分研究[J]. 管理科学学报, 2008, 11(2): 20-26.
- [16] 陈露. 基于贝叶斯网络的桥梁挂篮施工安全风险动态评估研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [17] 杜建国, 王冰洁, 黄后庆. 基于拓展 OWA 算子的商业银行服务质量评价[J]. 统计与决策, 2011(22): 141-143.
- [18] 贾进章, 陈怡诺, 柯丁琳. 基于模糊集和改进 DS 证据理论的危化品道路运输体系贝叶斯网络风险分析[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2020, 47(1): 38-45.

收稿日期: 2023-03-28

(上接第 26 页)

数均通过回归分析得出,虽然增加了计算准确度,但计算过程较复杂。为此, HCM 开发了配套软件 HCS(Highway Capacity Software),大大减轻了计算工作量,值得学习借鉴。

参考文献:

- [1] WASHBURN S, WATSON D, BIAN Z, et al. Improved

analysis of two-lane highway capacity and operational performance[M]. The National Academies Press, 2018.

- [2] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Applications guide, highway capacity manual 7th Edition: A guide for multimodal mobility analysis[S]. The National Academies Press, 2022.

收稿日期: 2022-12-21