

城市地下通道畅通可靠度算法研究

阳丹, 王富

(武汉工程大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430073)

摘要: 城市地下通道畅通可靠度的分析和计算对城市道路路网的畅通性和安全性意义重大。通过分析现有研究成果,对城市地下通道运行特点进行了研究,提出了几种关于城市地下通道畅通可靠度的计算方法,分别为基于地下通道功能函数、饱和度、车流密度和交通流统计。以武汉东湖通道为例,证明算法计算得到的东湖通道畅通可靠度与实际调查得到的交通状况一致。结果表明,利用畅通可靠度分析城市地下通道运行状态具有实用性。

关键词: 交通工程;城市地下通道;畅通可靠度;计算模型

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)03-0209-04

0 引言

城市地下通道是城市功能区之间或者功能区内各种道路网络的重要组成部分。城市地下通道虽然能够迅速地将道路网络顺畅连接起来,但还是会经常出现交通堵塞现象。地下通道是一个半封闭空间,过分拥堵会造成驾驶员心理恐慌,同时增加引起突发事件的概率。基于此,合理分析和研究城市地下通道畅通可靠度的相关科学理论,以及准确评估实施它们的畅通可靠度,能够给交通出行者提供准确、可靠的出行路线。同时,交通管理者能够依据自己的经验对地下通道的区域路网进行合理性的探索和分析,选择部分敏感度高、可靠性低的道路,对其进行设施优化,建立和改善解决交通拥挤的可靠性方案,有效地提高区域路网的道路顺畅度和通行能力^[1-2]。

1 城市地下通道畅通可靠度分析

1.1 基于地下通道功能函数的可靠度算法

畅通可靠度指的是在道路交通过程中,以畅通状态前进的总体概率。在道路网络规划管理中,畅通可靠度分析的目的在于保障道路网络的顺畅通行,同时也决定着地下通道交通管理的优劣^[3]。在现实情况中,正是由于地下通道通行能力和实际的交通通行需求不匹配,使得交通堵塞现象时常发生,严重削弱了地下通道通行的正常效率。当然,造成这种形势的主要因素是交通需求与通行能力具有很大的随机性。

在一定的时间内,城市道路在某一特定交通高峰时期中的交通需求和实际的通行能力是一个随机的变量。此变量基本遵循正态分布^[4],具体的供需分布曲线图如图1所示。

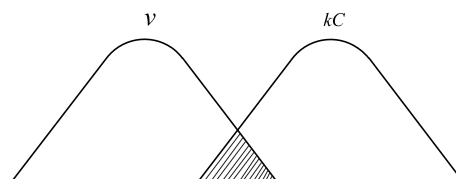


图1 城市道路供需分布曲线图

通过图1可以得出城市道路中地下通道的功能函数:

$$F = g(C, V) = kC - V = C'V \quad (1)$$

式中: V 为交通需求; $C' = kC$ 为畅通通行能力 (C 为实际通行能力), 主要是指地下通道在交通畅通度足够的情况下能够实现的最大的服务交通量; k 为通行能力折减系数, $0 < k < 1$ 。当城市道路处于不同的等级时,需要采取不同的值。对于快速路地下通道, k 取 0.8 ~ 0.9; 对于主干路地下通道, k 取 0.7 ~ 0.8; 对于次干路地下通道, k 取 0.6 ~ 0.7。

当道路在正常通行时,如果具有合理准确的交通数据资料,就能够获取到畅通通行能力 C' 和交通需求 V 的概率密度分布函数。在假设 C' 和 V 互不牵扯、相互独立的情况下,图1中的阴影部分所占有的面积就是阻塞概率 P_z :

$$\begin{aligned} P_z &= P(F < 0) = P(kC - V < 0) \\ &= \iint_{kC - V < 0} f_{kC}(kC) \cdot f_V(V) dC dV \end{aligned} \quad (2)$$

由概率论的知识可知,畅通可靠度为:

$$\begin{aligned} P &= 1 - P_z \\ &= 1 - \iint_{kC - V < 0} f_{kC}(kC) \cdot f_V(V) dC dV \end{aligned} \quad (3)$$

收稿日期: 2021-06-18

作者简介: 阳丹(1999—),女,硕士在读,研究方向为交通运输工程。

1.2 基于地下通道饱和度的可靠度算法

现在我国的研究与分析中,传统的弧(或边) a_{ik} 可靠度主要是利用了二值法进行计算。如果弧 a_{ik} 上的车流可以确定通行在一定的服务水平上,就可以得到它的可靠度是 $r_{ik}=1$;不然, $r_{ik}=0^{[5-7]}$ 。在利用二值法计算弧(或边)的畅通可靠度时,标准仅限于道路畅通可靠或不可靠。在日后的道路可靠度分析中,特别把地下通道的可靠度二值延伸在 $[0,1]$ 之间。同时也是利用一种实时的交通参数——饱和度(V/C),来确定地下通道的可靠度。若其可靠度为 r_{ik} ,则不可靠度为 $f_{ik}=1-r_{ik}$ 。假定 $f_{ik}=kf(v/c)$, k 为修正系数,函数 $f(v/c)$ 可由以下传统表达式确定。直线:

$$f(v/c)=\begin{cases} v/c, & (0 < v/c < 1) \\ 1, & (v/c > 1) \end{cases} \quad (4)$$

组合曲线:

$$f(v/c)=\begin{cases} \frac{(v/c)^2}{2(1-\beta)^2}, & (0 \leq v/c \leq \beta) \\ \frac{1}{2\beta^2} \left(\frac{v}{c} - 1 \right)^2 + 1, & (\beta < v/c \leq 1) \end{cases} \quad (5)$$

函数 $f(v/c)$ 曲线图,见图2。

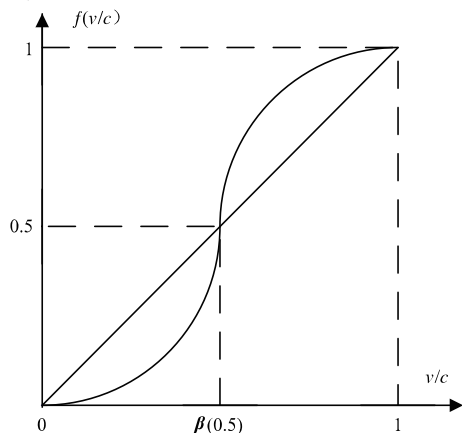


图2 函数 $f(v/c)$ 曲线图

1.3 基于地下通道饱和度回归分析算法

在日常的道路通行状况分析中,必须在数据量足够大的情况下才能获取到畅通通行能力 C' 和交通需求 V 的概率密度分布函数,同时具有很大的计算难度 $^{[8-9]}$ 。利用大数据对道路通行情况进行统计和分析后发现,城市地下通道的畅通可靠度与道路饱和度成反比关系,即地下通道的畅通可靠度可以通过计算预测地下通道的饱和度与规划流量得出。

因此,根据地下通道畅通可靠度 P 与饱和度 V/C 的关系,能够利用式(6)获得城市地下通道的畅通可靠度。

$$P = \alpha(V/C)^3 + \beta(V/C)^2 + \gamma(V/C) + c \quad (6)$$

式中: V/C 为地下通道某一时刻的饱和度; V 为该时刻道路交通流量; C 为道路通行能力; α 、 β 、 γ 为待定系数; c 为常数项。

对于不同城市或者同一城市内的功能不同的地下通道, α 、 β 、 γ 及常数的数值必须要依据具体情况,并对交通流的参数进行统计和分析进行设定。通常情况下,地下通道不一样,其对应的参数也不同。

1.4 基于车流密度的可靠度算法

若城市道路中某条道路上的通行量远超过其规定的最大通行能力且持续超载,交通的密度就会逐渐大于临界的密度,使得道路上的车流量越来越多,交通越来越堵塞,行车速度越来越慢,最终导致交通量迅速降低 $^{[10]}$ 。

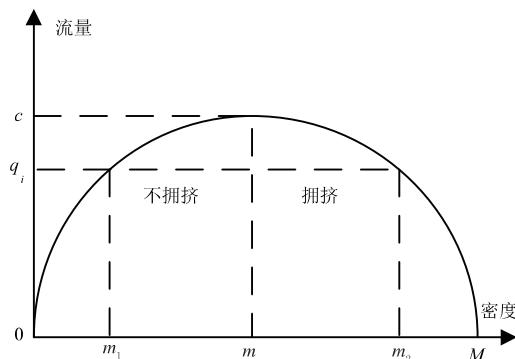


图3 流量及密度关系曲线图

由图3可以看出,对于相对较小的流量 q_i 可能对应着两个密度 m_1 和 m_2 。而这两个密度对应着完全相反的状态,即道路不拥挤和拥挤,但是依据传统的公式计算,无论是处于拥挤还是不拥挤的状态,最终都能得到一样的地下通道可靠度。很明显,这种结果并不符合具体的情况。针对此现象,若能够在拥挤状态下获得一个可靠性,且此可靠性能够代替饱和度,最后对传统的公式进行改正,就能够对交通状况可靠度进行全面的分析和描述。

道路交通中的3个参数为交通量、速度和交通密度。其中,密度指数用于描述道路拥挤程度,并反映道路上车辆的空间分布,为有效分析道路在拥挤状态下的可靠性提供一种修正型计算方式。

格林希尔兹提出了速度与密度的关系函数:

$$s = \bar{s} \left(1 - \frac{m}{M} \right) \quad (7)$$

式中: s 为车速; $\bar{s}$ 为自由行驶下的平均车速; m 为密度; M 为车流无法通行时的阻塞密度。

根据流量 V 、密度 m 与速度 s 之间的关系式:

$$V = m \times s \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)中,得到式(9):

$$V = m \times s = \overline{s} \left(m - \frac{m^2}{M} \right) \tag{9}$$

令 $\frac{d_v}{d_m}=0$, 得到当 $m_j=0.5M$ 时, 获取到的流量最大值(即道路的通行能力) $C, C=0.25\overline{s}M$, 临界密度即 $0.5M$, 城市地下通道饱和度可以表示为:

$$\begin{aligned} V/C &= \frac{m \times s}{C} = \frac{\overline{s} \left(m - \frac{m^2}{M} \right)}{C} = \frac{\overline{s} \left(m - \frac{m^2}{M} \right)}{0.25\overline{s}M} \\ &= 4 \frac{m}{M} \left(1 - \frac{m}{M} \right) \end{aligned} \tag{10}$$

为了准确表达出当交通流达到或超过临界密度后, 通行流量逐渐变小的可靠度状况, 需要将流量的减少量加上其对应的通行能力, 会获得一个虚拟流量, 同时将拥挤的部分曲线沿着 C 轴旋转, 就能够有效地避免同一流量对应着两种完全不同的交通密度和状态(见图 4)。

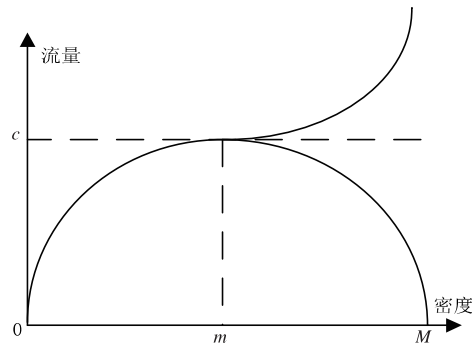


图 4 拥挤部分曲线沿 C 轴对称旋转

由式(6)和曲线翻转的原理, 同时利用式(10)中的密度来代替饱和度, 就能够得到一个修正型的畅通可靠度算法。该算法可以全面地描述道路可能会发生的各种交通状态。密度在 $[0, M]$ 区间内的地下通道可靠度公式如下:

$$P\left(\frac{m}{M}\right) = \begin{cases} \frac{3}{5} \left[1 - 8 \left(\frac{m}{M} \right)^2 \right] + \frac{2}{5}, & \left(0 \leq \frac{m}{M} \leq \frac{1}{4} \right) \\ \frac{3}{5} \times 8 \left[\frac{1}{2} - \left(\frac{m}{M} \right)^2 \right] + \frac{2}{5}, & \left(\frac{1}{4} < \frac{m}{M} \leq \frac{1}{2} \right) \\ \frac{2}{5} \left[1 - 8 \left(\frac{m}{M} - \frac{1}{2} \right)^2 \right], & \left(\frac{1}{2} < \frac{m}{M} \leq \frac{3}{4} \right) \\ \frac{2}{5} \times 8 \left(\frac{m}{M} - 1 \right)^2, & \left(\frac{3}{4} < \frac{m}{M} \leq 1 \right) \\ 0, & \left(\frac{m}{M} \geq 1 \right) \end{cases} \tag{11}$$

修正型的可靠度算法方程式(11)只需获得某一时刻的地下通道密度和地下通道的阻塞密度, 就可计算出地下通道的畅通可靠度。如果车流量达到该地下通道最大通行能力, 可根据式(11)求得地下通

道可靠度为 0.4。由此得出地下通道畅通可靠度随密度的变化曲线, 如图 5 所示。

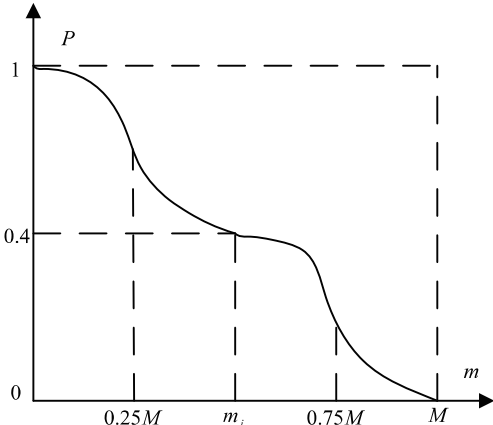


图 5 道路单元畅通可靠度曲线变化图

1.5 基于交通统计的可靠度算法

若当前的城市地下通道不存在足够准确的交通参数数据对地下通道的运营概率进行合理的分析和评价, 也能够利用临时的交通数据统计。多次频繁收集同一高峰时间的地下通道通行流量和数据, 从而可以分析出地下通道是否已经达到或超过限定的畅通状态, 同时利用式(12)对道路畅通的可靠度进行近似的计算和统计。

地下通道畅通可靠度近似值 φ 的表达式为:

$$\varphi = \frac{\text{高峰时间内单元畅通的次数 } n_1}{\text{高峰时间内单元总的观察次数 } n_2} \tag{12}$$

通常情况下, 畅通的概念并不明确, 因此对评价现实交通状况并不友好。而利用车速指标对道路进行畅通度的分析和判断更加准确。若想要有效地改善判断精准性, 适当地增多观察次数, 效果更明显。具体的城市服务水平下的速度值见表 1。

表 1 不同城市不同服务水平下的速度值

城市类型	服务水平	运行速度 / (km·h ⁻¹)
大城市	A	31
	B	28~31
	C	25~28
	D	22~25
	E	20~22
	F	0~20
中小城市	A	34
	B	31~34
	C	28~31
	D	25~28
	E	22~25
	F	0~20

1.6 可靠性计算方法的选择

上述中提到的对于城市地下通道畅通可靠度的

有效计算,必须按照城市地下通道的具体状况和相关可靠性分析需求,综合考虑经济、数据等条件限制,选择合理的评价方法。由于道路的饱和度获取途径相对轻松,所以基于道路饱和度的可靠度算法是一种常用的计算方法。

2 案例应用

以东湖通道为例,利用基于道路饱和度的可靠度算法计算其可靠度,验证算法的可行性。

通过对东湖通道进行交通调查统计得知,东湖通道2020年主线上的高峰小时交通流量为4 560辆/h,饱和度为0.70,服务水平是C级,具有相对中等偏上的地下通道交通运行水平。

根据东湖通道2020年的交通统计数据,通过基于道路饱和度的可靠度算法计算可知,东湖通道2020年总体可靠度为0.891 9。这与东湖通道实际交通调查结果相对应,表明利用畅通可靠度算法分析道路运行状态具有合理性和可行性。

3 结 语

(1)根据城市地下通道的特点和实际情况,提出了几种城市地下通道畅通可靠度的计算方法,分析了几种算法的前提条件,可综合考虑经济、数据等条件限制,选择合理的评价方法。

(2)以东湖通道为例,证明本文计算方法在地下

通道畅通可靠度的计算中具有实用性和可行性,可以合理地分析地下通道车辆的运行状态,使交通管理者能够以此为依据进行交通设施、路网优化,从而使地下通道畅通可靠度足够大或阻塞概率足够小,达到人们可以接受的概率。

参考文献:

- [1] 黄宏伟. 城市隧道与地下工程的发展与展望[C]. 地下空间, 2001: 311-317.
- [2] 胡锡岭, 陈立道. 城市道路隧道交通事故的分析[J]. 中国市政工程, 2003(6): 5-7.
- [3] 刘澜, 袁庆达, 杜文. ITS条件下道路行车系统可靠性评价的概念性研究[J]. 公路交通科技, 2001(6): 70-72.
- [4] 蒋雄. 基于复杂网络理论的城市道路系统可靠性测试[J]. 公路与汽车, 2013(6): 36-41.
- [5] 聂庆慧, 夏井新, 钱振东. 城市道路交通流短时预测及可靠性分析[J]. 西南交通大学学报, 2013(5): 955-960.
- [6] 唐涛. 道路交通网络路径行程时间可靠性计算方法[J]. 科技信息, 2013(14): 150-151.
- [7] 况爱武, 黄中祥, 唐志强. 考虑OD对出行时间可靠性的道路网容量可靠性[J]. 系统工程, 2013(1): 116-120.
- [8] 陈艳艳, 梁颖, 杜华兵. 可靠度在路网运营状态评价中的应用[J]. 土木工程学报, 2003(1): 36-40.
- [9] 黄中祥, 况爱武, 等. 出行信息对道路网络出行时间可靠性的影响[J]. 交通运输系统工程与信息, 2012(6): 93-99, 105.
- [10] 周翔, 韩印, 范炳全. 城市重大交通工程项目的交通影响分析研究——以温州市瓯江隧道工程为例[J]. 城市交通, 2006(6): 58-63.

~~~~~  
(上接第185页)

的UHPC加固层厚度可知,采用STC桥面加固方法后,各关注点疲劳应力幅有较大幅度降低,疲劳寿命也均有大幅提升,在当前车流状态下均满足运营年限需求。其中,45 mm厚加固层加固效果较好。

### 参考文献:

- [1] 张清华, 卜一之, 李乔. 正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 14-39.
- [2] 张允士, 李法雄, 熊锋, 等. 正交异性钢桥面板疲劳裂纹成因分析及控制[J]. 公路交通科技, 2013, 30(8): 75-80.
- [3] 陈斌, 邵旭东, 曹君辉. 正交异性钢桥面板疲劳开裂研究[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 170-174.
- [4] 吉伯海, 袁周致远. 钢箱梁疲劳开裂维护研究现状[J]. 工业建筑, 2017, 47(5): 1-5.

- [5] 邵旭东, 胡建华. 钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [6] 李佳, 冯啸天, 邵旭东, 等. STC钢桥面铺装新体系的力学计算与实桥试验对比分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(3): 39-44.
- [7] 邓鸣, 张建仁, 王蕊, 等. UHPC铺装加固斜拉桥正交异性钢桥面板[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(1): 67-74.
- [8] 王洋, 邵旭东, 陈杰, 等. 重度疲劳开裂钢桥桥面的UHPC加固技术[J]. 土木工程学报, 2020, 53(11): 92-115.
- [9] 田启贤, 高立强, 周尚猛. 超高性能混凝土-钢正交异性板组合桥面受力性能研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(3): 13-18.
- [10] 田启贤, 高立强, 周尚猛, 等. 超高性能混凝土-钢正交异性板组合桥面试验研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(S1): 13-19.
- [11] 祝志文, 黄炎, 文鹏翔, 等. 随机车流下钢-UHPC组合正交异性桥面疲劳性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 200-209.
- [12] JTG D64—2015, 公路桥梁钢结构设计规范[S].