文章编号: 1000-6788(2010)03-0550-07 中图分类号: U113 文献标志码: A

基于风险的交通网络可靠性分析方法

马寿峰, 贺正冰, 张思伟

(天津大学 系统工程研究所, 天津 300072)

摘 要 从风险角度提出了一种交通网络可靠性分析方法 —— 基于风险的交通可靠性 (Reliability based on risk, RBR), 并对其定义、形式与应用进行研究. 首先提出 RBR 的概念, 并对 RBR 与其他交通网络可靠性指标的异同进行了分析; 通过高斯核估计, 给出了基于历史数据的路段出行时间分布函数的估计与计算方法, 从而得到该路段的 RBR, 并使用误差分析与返回检验对该方法的误差进行验证; 随后使用天津某高速公路的历史观测数据对文中 RBR 及其计算方法进行验证; 最后给出了 RBR 的其他形式 —— 路径 RBR、路网 RBR 的概念及相应的计算方法, 从而将 RBR 推向更广泛的应用空间.

关键词 交通网络; 风险; 可靠性

Approach based on risk for traffic network reliability

MA Shou-feng, HE Zheng-bing, ZHANG Si-wei

(Institute of Systems Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract This paper provides an approach based on risk for traffic network reliability, which is called RBR, and studies its definition, formulation and applications. First, the definition of RBR is proposed, and its differences from other traffic network reliabilities are compared. Then, an estimation approach for the distribution function of travel time on a link is given based on historical data by the kernel estimation method, and RBR on a link is able to obtain through this approach; the error analysis and back testing methods are employed to calculate the error of this approach. Furthermore, the historical data from a highway in Tianjin are used for the verification of RBR and its calculation. At last, Route RBR and Network RBR are discussed, respectively.

Keywords traffic network; risk; reliability

1 引言

可靠性概念多用于工程技术, 通常为规定条件下完成规定功能、任务的概率. 将可靠性研究与交通网络通行状况结合则仍处于起步阶段. Iida 早期将交通网络可靠性区分为路径连通可靠性和出行时间可靠性两种[1]. 路径连通可靠性指对于给定时段内的任一 OD 对, 至少存在一条能够将它们有效连接起来的路径的概率; 出行时间可靠性则是在给定的时段和正常的流量波动范围内, 车辆能够到达目的地的概率[2−3]. 此后有学者认为可靠性还应包括通行能力可靠性, 即路网能够满足某一交通需求且维持在一定服务水平上的概率[4]. Heydecker 等认为可靠性还应包括交通需求满足可靠性 (Travel demand satisfaction reliability)[5], 即交通网络能够满足由潜在需求事件, 如交通高峰时段或重大体育赛事等引起的 "潜在交通需求" 的概率. 另外, Bell 和 Schmöcker[6] 认为交通网络可靠性还应包括遭遇可靠性 (Encountered reliability), 即路段不会遭遇任何通行能力下降的概率. Bell 还利用博弈理论对可靠性问题进行研究[7]: 分别将出行者和假想的 "邪恶

收稿日期: 2008-11-28
资助项目: 国家自然科学基金 (70671073); 国家高技术研究发展计划 (863 计划)(2006AA11Z210); 天津市科技支撑计划重点项目 (08ZCKFSF01000)
作者简介: 马寿峰 (1965–), 男, 博士生导师, 研究方向: 交通系统工程, E-mail: sfma@tju.edu.cn; 贺正冰 (1982–), 男, 博士研究生, 研究方向: 交通系统工程, E-mail: he.zb@hotmail.com.

主体"(Evil entity) 看作局中人, 其中出行者寻求最小期望出行费用路径出行, 而 Evil entity 则试图通过降低网络关键路径的通行能力来增加出行费用, 最后由 Nash 均衡得到路径堵塞的概率, 从而得到可靠性指标. 以往的研究中虽已经取得一定成果, 但也存在一些问题:

1) 缺乏一个综合评价指标. 如连通性、通行能力和出行时间可靠性之间有着紧密的联系. 通行能力的下降, 造成路径连通性的降低, 必然导致出行时间的增加, 因此这三个可靠性指标是一致的, 不妨采用统一的指标.

2) 没有形成完整的体系, 模型本身仍存在问题. 首先, 可靠性通常是随着时间不同而不断变化, 非恒定不变, 现有方法给出的可靠性概率并不能全面描述这种动态性; 其次, 以往方法在给出概率后并未给出相应的置信区间, 这是不完整的; 此外, 可靠性的检验问题也很少被考虑.

3) 缺少完整可行的计算方法, 不利于实际应用. 如计算出行时间可靠性的公式为: $P\{T \leq T'\} = \alpha$. 若想知道一条路径或整个路网的可靠性必须首先给定 T', 而 T' 的选择却莫衷一是, 不同的 T' 导致不同的可靠性, 无法统一判别.

本文针对现有方法存在的问题, 首先提出了一种利用风险进行可靠性度量的新概念及其方法 — 基于风险的交通网络可靠性; 并利用高斯核估计, 给出了基于历史数据的路段出行时间分布函数的估计方法, 并得到该路段的 RBR; 使用误差分析与返回检验对该方法的误差进行验证与判别; 随后利用天津某高速公路的历史观测数据对 RBR 及其计算方法进行计算与验证; 并给出了其他形式的 RBR— 路径 RBR、路网 RBR 的概念及相应的计算方法. RBR 统一了交通网络可靠性的指标, 解决了现有方法存在的问题, 并有着更广泛的应用空间.

2　基于风险的可靠性

定义基于风险的交通网络可靠性 (Reliability based on risk, 简称 RBR) 为在一定概率水平下 (置信度), 出行者到达某一目的地最大可能花费的出行时间, 如式 (1) 和图 1. 其中, t 为出行时间; $f(t)$ 表示 t 的概率密度函数; $\alpha(\alpha \leq 1)$ 为 RBR 为最大可能出行时间的置信度.

$$\mathrm{P}\{t \leq \mathrm{RBR}\} = 1 - \alpha \tag{1}$$

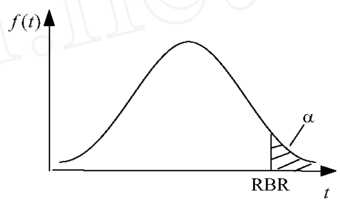

图 1　RBR 示意图

显然, RBR 给出的是时间而非概率, 可直接衡量出行者欲到达某一目的地最多可能需要的出行时间, 较之概率, 其更直观且接近实际. 这个时间信息既是出行者需要承担的风险, 又是对出行时间可靠性的度量, 因此不妨称之为基于风险的交通网络可靠性 (Reliability based on risk). 作为用户选择某路段或路径需要承担的风险, RBR 涵括了基本风险和额外风险两个部分. 基本风险指出行者在正常情况之下通过该路段或路径需要的出行时间, 是无法避免的风险; 而额外风险是在基本风险之外出行者选择该路段或路径需要承担的风险, 出行者可以通过其他路段或路径的选择规避该部分风险, 这也是需要重点考虑的部分. 对该部分风险的控制, 可以有效提高交通网络可靠性.

较之以往的可靠性概念, RBR 既相联系又有区别. 与出行时间可靠性相比, 出行时间可靠性考虑的是该路段或路径出行时间不超过标准时间的概率, 是一定分位数下的概率值; 而 RBR 考虑的则是在一定概率水平下, 出行者在该路段或路径上最大可能花费的时间, 是一定概率下的分位数. 因此, 二者研究的是同一个工作, 但 RBR 对出行者来说更加直观、容易理解; 相对路径连通可靠性而言, 如果该路径的 RBR 值超过正常值很多, 则表示路径连通可靠性很低, 即说明该 OD 对的连通性较差. 因此, RBR 可以作为一个统一的指标来表示以往大部分交通网络可靠性指标.

RBR 是一个涵盖了时间和空间两个维度的概念. 从时间上讲, 它既可以评价过去路段或路径的可靠性, 又可以对未来的可靠性进行预测; 而从空间角度说, 路段组合成为路径, 路径组合成为路网, 即 RBR 可以分为路段 RBR、路径 RBR 和路网 RBR. 因此, 在进行 RBR 计算时必须指明时间和空间范围. 下文将针对各种 RBR 提出具体的计算方法.

3　路段 RBR

3.1　路段 RBR 的计算

路段 RBR 的计算是获得路径和路网 RBR 的基础. 出行时间的概率分布是计算路段 RBR 的关键. 从

RBR 定义可知, 如果已知出行时间 t 的概率密度函数 $f(t)$, 则 RBR 可通过计算给定风险水平 (置信度) c 下的分位数 p^* 获得 (如式 (2)).

$$c=\int_{\infty}^{p^*} f(p)\mathrm{d}p \tag{2}$$

以 t 服从正态分布为例, $t\sim N(\mu,\sigma^2)$, 设 z_α 为置信度 $1-\alpha$ 下的分位数, 则有 $\mathrm{RBR}=\mu+z_\alpha\cdot\sigma$.

但在现实中, 出行时间的分布通常并非正态分布甚至是不可知的. 因此, 需要一种更加可靠有效的计算方法. 本文使用高斯核估计对样本数据的平滑概率密度进行估计, 进而得到更准确的路段RBR. 高斯核估计作为一种非参数回归的曲线拟合方法, 定义了一个核函数 $K(x)$, 并通过公式 (3) 估计得到样本 $X=[X_1,X_2\cdots, X_n]$ 的概率密度函数[8].

$$\widehat{f}(x)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}K\Big(\frac{x-X_i}{h}\Big) \tag{3}$$

其中 h 为光滑系数, h 越大, 拟合曲线越光滑.

首先, 对出行时间的概率密度函数和累积概率密度函数进行估计. 假设已有历史出行时间样本数据为 $T_1, T_2,\cdots,T_n$, 且每一数据点均服从正态分布. 以该数据点的概率密度函数为中心, 以 $0.9\sigma n^{-0.2}$ 为标准差 (又称带宽 Bandwidth) 平滑数据, 使其成为一条连续曲线. 其中, σ 表示容量为 n 的样本数据的标准差. 随着样本量的增加, 单个样本点的影响变小, 因此核的选择将不会对结果造成影响.

记出行时间的概率密度函数为 $f(t)$, 出行时间的累积概率密度函数为 $F(t)$, 则有 $f(t)$ 与 $F(t)$ 的高斯核估计:

$$\widehat{f}(t)=\frac{1}{n(0.9\sigma n^{-0.2})}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-T_i}{0.9\sigma n^{-0.2}}\right)} \tag{4}$$

$$\widehat{F}(t)=\int_{-\infty}^{t}\widehat{f}(x)\mathrm{d}x \tag{5}$$

向概率分布区间插入 n 个等距次序数据点 $t_1,t_2,\cdots,t_n$ 对式 (5) 进行离散化, 得到出行时间小于 t_m 的概率为

$$\widehat{F}(t_m)=\sum_{i=1}^{m}\widehat{f}(t_i)\Delta t_i \tag{6}$$

$$\Delta t_i=t_i-t_{i-1} \tag{7}$$

随后, 估计第 j 个次序统计量的概率分布, 即寻找百分位数对应的次序统计量 (注: 当结果非整数时, 进行四舍五入, 如 $n=155$ 时, 95%的分位数为第 8 个次序统计量).

使用由核密度估计方法得到的概率密度函数, 求得第 j 个次序统计量的概率密度函数并计算其均值和方差. 设 t 为待估计的第 j 个次序统计量, 其概率密度函数为 $g_j(t)$、累积概率函数为 $G_j(t)$, 则数据点 j 小于或等于 t 的概率为 $\frac{n!}{j!(n-j)!}F(t)^j(1-F(t))^{n-j}$.

数据点 j 的累积概率密度函数为

$$G_j(t)=\sum_{k=j}^{n}\frac{n!}{k!(n-k)!}F(t)^k(1-F(t))^{n-k} \tag{8}$$

微分得到概率密度函数:

$$g_j(t)=\frac{n!}{j!(n-j)!}f(t)F(t)^{j-1}(1-F(t))^{n-j} \tag{9}$$

对式 (9) 积分, 得到概率密度函数的矩估计, 并使用 Gauss-Hermite 积分公式计算分位数的概率密度函数的积分及其方差, 得到路段RBR估计及其标准误差如下:

$$\mathrm{RBR}=\mathrm{E}(t)=\int_{-\infty}^{+\infty}tg_j(t)\mathrm{d}t \tag{10}$$

$$\mathrm{Var(RBR)}=\mathrm{Var}(t)=\int_{-\infty}^{+\infty}t^2g_j(t)\mathrm{d}t-\mathrm{E}^2(t) \tag{11}$$

3.2 路段RBR的误差分析

作为估计值, 路段RBR直接受样本量的影响, 即样本总量 $n \to \infty$ 时, 估计值更接近真实值. 但在实际中, 由于采集大量样本通常存在较大难度, 因此估计误差不可避免. 评价估计路段RBR的精确程度 (波动范围) 十分必要.

本文通过置信区间的构造评价RBR精度. 显然, 正态假设下的置信区间构造是非常简单的, 即 $\mathrm{RBR} = \mu + z_\alpha \cdot \sigma$, 其中 z_α 为置信度 α 的分位数, σ 为出行时间的标准差. 但由于 σ 在实际计算中是未知的, 因此需要使用 σ 的估计值对RBR的估计误差进行分析. 设 n 为样本量, 则有 $(n-1)\widehat{\sigma}^2/\sigma^2$ 服从自由度为 $n-1$ 的 χ^2 分布, $\widehat{\sigma}^2$(已知) 为样本方差, σ^2(未知) 为总体方差. 求得 σ^2 的 95% 置信区间为

$$(n-1)\widehat{\sigma}^2/\chi^2_{0.975} < \sigma^2 < (n-1)\widehat{\sigma}^2/\chi^2_{0.025} \tag{12}$$

其中, $\chi^2_{0.025}$、$\chi^2_{0.975}$ 分别为 χ^2 的 2.5% 和 97.5% 的分位数.

因此, 路段RBR的 95% 置信区间为

$$\mu + z_\alpha\widehat{\sigma}\sqrt{(n-1)/x^2_{0.975}} < \mathrm{RBR} = \mu + z_\alpha \cdot \sigma < \mu + z_\alpha\widehat{\sigma}\sqrt{(n-1)/x^2_{0.025}} \tag{13}$$

3.3 路段 RBR 的返回检验

实际应用中, 由于受到许多因素的影响, 路段RBR的预测值可能并非可行. 为进一步改进RBR模型和明确RBR的预测值, 有必要使用真实值对估计值的准确性进行验证.

比较估计路段RBR与其真实值, 从而检验RBR模型的有效性. 设RBR的置信度为 α, 样本量为 n, 实际出行时间大于RBR的次数为 m, 则估计错误的频数 $p\{m/n\}$. 设 $p = p^*$, 其中 p^* 为可接受的错误概率, 通常 $p^* = 1-\alpha$. 则当 p 与 p^* 存在明显差异时, 说明RBR模型是可行的.

Kupiec[9] 使用 LR(服从自由度为 1 的 χ^2 分布) 对估计值进行返回检验:

$$\mathrm{LR} = -2\ln\left[(1-p^*)^{n-m}p^{*m}\right] + 2\ln\left[(1-m/n)^{n-m}(m/n)^m\right] \tag{14}$$

4 路段 RBR 计算实例

4.1 样本数据处理

使用来自天津某高速公路的实测流量数据, 并通过 BPR 公式[10] 计算路段上出行时间:

$$t = t_0\left[1 + \alpha\left(\frac{v}{Q}\right)^\beta\right] \tag{15}$$

其中, t 为出行时间; v 是路段的实际流量; Q 为路段通行能力; t_0 为自由流下的出行时间; α, β 为参数.

被选定路段长度为 40.14km, $Q = 100$ 辆/min, $t_0 = 30$min, 根据现有资料选取 $\alpha = 0.15$, $\beta = 4$. 路段检测器每隔 5min 将采集到的交通流量数据上传, 500min 内, 共获得 100 个流量数据, 通过式 (15) 计算得到 100 个出行时间数据, 分别记为 $T_1, T_2, \cdots, T_{100}$. 图 2 为其频数分布图, 样本均值及其标准差分别为 31.14, 1.4.

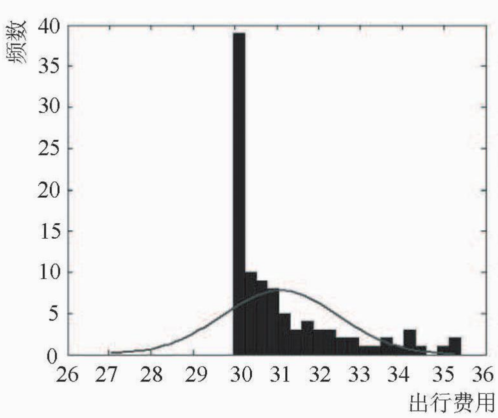

图 2 实测交通流量数据频数分布图

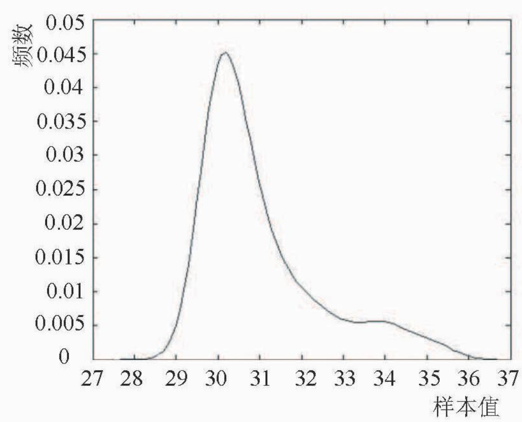

图 3 出行时间的估计概率密度函数

4.2 估计出行时间的概率密度函数

通过高斯核估计方程 (式 3), 选取带宽 $0.9 \times 1.4 \times 100^{-0.2} = 0.5$, 估计得到路段上出行时间 t 的概率密度函数 (式 16) 及其图像 (图 3).

$$f(t) = \frac{1}{100}\sum_{k=1}^{100}\frac{1}{0.5\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-0.5\left(\frac{t-T_k}{0.5}\right)^2} \tag{16}$$

将时间有效区间 $[28, 36]$ 平分 500 份, 得到数据点 $t_1, t_2, \cdots, t_{500}$, 步长 $\Delta t = 0.016$. 从而由概率密度函数估计出 t_i 的累积概率密度函数:

$$F(t_i) = \sum_{m=1}^{i} f(t_m) \cdot \Delta t \tag{17}$$

4.3 估计路段 RBR

500 个数据点的 95% 分位数为 25. 利用式 (9) 计算次序统计量 $j = 25$ 的概率密度函数 $g_{25}(t)$. 并通过 Gauss-Hermite 积分求得RBR的均值 (式 18) 与方差 (式 19), 从而得到RBR的估计值 — 出行时间以 95% 的概率小于 33.55, 即出行时间超过 33.55 的可能性小于 5%.

$$\mathrm{RBR} = \mathrm{E}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} t g_{25}(t)\,\mathrm{d}t \approx 33.55 \tag{18}$$

$$\mathrm{Var(RBR)} = \mathrm{Var}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} t^2 g_{25}(t)\,\mathrm{d}t - \mathrm{E}(t)^2 \approx 0.55 \tag{19}$$

4.4 路段 RBR 的置信区间

由样本得 $\chi^2_{0.975} = 8.53$、$\chi^2_{0.025} = 0.82$ 及 $z_{0.95} = 0.17$, 并由式 (13) 计算得到置信度为 95% 下的置信区间为

$$31.14 + 0.17 * 1.4 * \sqrt{(100-1)/8.53} < \mathrm{RBR}_R < 31.14 + 0.17 * 1.4 * \sqrt{(100-1)/0.82} \tag{20}$$

得 $\mathrm{RBR}_R \in [33.17, 33.76]$, $\mathrm{RBR} = 33.55$ 落在该置信区间内, 故可以认为该RBR是准确的.

5 其他 RBR

5.1 路径 RBR

在二维路网中, 路径与路段的可靠性对于交通网络的连通同样重要. 由于路径均由路段组成, 因此路径RBR的估计与路段RBR估计相似. 主要可从两个不同角度对路径RBR进行估计: 一, 如同估计路段RBR, 将整个路径看作整体, 用该路径的出行时间对其RBR进行估计. 虽然该方法计算比较方便, 但对于复杂多变的交通网络, 其所需数据通常较难获得; 二, 将其看作若干路段的组合, 分别评估, 再依据串并联关系进行组合. 下文将着重对方法二进行研究.

路径RBR为出行者提供了以估计出行时间选择某路径所要承担的风险, 其对出行者的路径选择及实际出行活动均有重要的影响. 通常, 一个 OD 对由多条路径构成, 且这些路径往往在某个或某几个路段上重合. 因此, 路径RBR依赖于所有相关路径的可能出行时间. 计算路径RBR首先需要对路径结构进行分析. 路段显然均由串联、并联两种方式组成. 以图 4 为例, 该 OD 对间共存在三条路径: 1-2-5, 1-3-5, 1-4-5. 路段 2、3、4 以并联的方式与 1、5 串联在 OD 对间. 分别计算两种连通结构, 最终获得路径RBR.

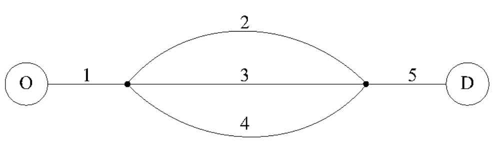

图 4 OD 对中的路段组合

图 5 串联结构

5.1.1 串联结构的 RBR

以一个简单的典型串联结构为例 (图 5), 假设已知路段 a 与 b 的出行时间分别为 t_a 及 t_b, 分别计算得到其RBR:

$$\mathrm{P}\{t_a \le \mathrm{RBR}_a\} = 1 - \alpha \tag{21}$$

$$\mathrm{P}\{t_b \le \mathrm{RBR}_b\} = 1 - \alpha \tag{22}$$

则串联结构RBR为

$$\mathrm{P}\{t \le \mathrm{RBR}\} = \mathrm{P}\{t_a + t_b \le \mathrm{RBR}\} = F(\mathrm{RBR}) = 1 - \alpha \tag{23}$$

其中, F 为路径 a 和 b 上出行时间的联合概率分布; $f_a(x)$、$f_b(x)$ 为其概率密度函数. 如果 t_a 与 t_b 相互独立, 则有

$$\begin{aligned} F(z) &= \mathrm{P}\{t \le z\} = \mathrm{P}\{t_a + t_b \le z\} = \iint\limits_{t_1+t_2 \le z} f(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \\ &= \int_{-\infty}^{z}\left[\int_{-\infty}^{\infty} f(x, v-x)\mathrm{d}x\right]\mathrm{d}v = \int_{-\infty}^{z}\left[\int_{-\infty}^{\infty} f_a(x)f_b(z-x)\mathrm{d}x\right]\mathrm{d}v \end{aligned} \tag{24}$$

令 $F(z) = 1 - \alpha$, 即可求得置信水平 α 下的串联结构RBR, 即 z.

5.1.2　并联结构的 RBR

同样以一个简单的典型并联结构为例 (图 6), 假设已知路段 a 与 b 的出行时间分别为 t_a 及 t_b, 分别计算得到其RBR, 如式 (21) 与 (22).

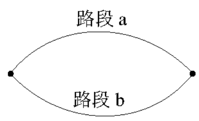

图 6　并联结构

则并联结构RBR为

$$\mathrm{P}\{t \le \mathrm{RBR}\} = \mathrm{P}\{\max(t_a, t_b) \le \mathrm{RBR}\} = F(\mathrm{RBR}) = 1 - \alpha \tag{25}$$

其中, F 为路径 a 和 b 上出行时间的联合概率分布; $f_a(x)$、$f_b(x)$ 为概率密度函数. 如果 t_a 与 t_b 相互独立, 则有

$$\begin{aligned} F(z) &= \mathrm{P}\{t \le z\} = \mathrm{P}\{\max(t_a, t_b) \le= z\} = \mathrm{P}\{t_a \le z, t_b \le z\} \\ &= \mathrm{P}\{t_a \le z\}\mathrm{P}\{t_b \le z\} = F_a(z)F_b(z) \end{aligned} \tag{26}$$

令 $F(z) = 1 - \alpha$, 即可求得置信水平 α 下的并联结构RBR, 即 z.

OD 对间的路段关系均可拆分为最简单的串联、并联结构, 因此路径RBR可通过拆分后的串联、并联结构RBR组合而成. 但是, 由于两种结构的计算均需要假设路段间出行时间相互独立, 而实际的交通状况并非如此, 因此该方法仍需改进.

5.2　路网 RBR

路径RBR的计算方法同样可以推广到路网RBR的计算中, 但是由于路网结构的复杂及路段数量的庞大, 直接计算较为困难; 并且, 路网连通可靠性无论对于出行者还是交通管理者其实际意义显然不是很大. 因此, 对于路网, 不妨定义其RBR为同一风险水平下单位距离内的平均出行时间, 以表示整个交通网络的风险状况, 如下式:

$$\mathrm{RBR}_{\mathrm{net}} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} \mathrm{RBR}_i \big/ l_i}{n} \tag{27}$$

其中, RBR_i 为路段 i 的RBR值, l_i 为路段 i 长度, n 为路网中的路段数.

为去除路段通行能力不同所带来的差异, 可使用标准状态 (自由流) 下的出行时间 (记为 T_i) 修正式 (27), 以减少路段差异 (如路段设计通行能力) 对路网RBR的影响:

$$\mathrm{RBR}_{\mathrm{net}} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} (\mathrm{RBR}_i - T_i) \big/ l_i}{n} \tag{28}$$

两种路网RBR均只反映了当前路网通行能力的整体状况. 从实际角度说, 路网RBR有着更多的概念上的意义, 如发布如同空气质量指数一样的城市交通通行指数, 以对当前或当天的城市交通状况进行衡量.

6　样本数据的选择

通过选取不同的样本数据, RBR不但可以评估过去交通网络状况, 还可以对未来可能的通行状况进行预测.

收集并使用过去时段的出行数据, 通过高斯核估计求得该时间段的RBR, 从而评价此时段的各种网络状况.

对于没有数据来源的未来路网状况预测. 通常认为交通流状况在 15 分钟内有着较高的再现性, 因此, 利用历史数据计算未来 15 分钟以内 ($\Delta t < 15\,\mathrm{min}$) 的RBR, 并以此对网络状况进行评价是相对合理的.

但对于 $\Delta t > 15\,\mathrm{min}$ 时, 刚过去的历史数据显然已不可靠, 但很多研究均认为每一天中同一时段上交通流有着一定的相似性, 如每个工作日的晚高峰通常发生在同一时段. 因此, 对于 $\Delta t > 15\,\mathrm{min}$ 的RBR计算, 不妨选择其他类似日子相同时段的交通流数据作为依据, 从而推出预测时间上的RBR.

7 结束语

针对以往交通网络可靠性存在的问题, 本文提出了一种基于风险的交通网络可靠性概念 —RBR, 并给出了其在不同情况下的计算方法. 通过分析, RBR有如下优点:

1) 统一量化出行可靠性的指标. 出行时间可靠性、通行能力和连通性之间有着紧密联系, 它们均可用 RBR 来统一描述. RBR是一个出行时间值, 其涵盖了时间可靠性; 若一条路经的RBR值超出正常值很多, 即可说明该路径的通行能力可靠性较低; 而当一条路径的RBR趋于无穷大时, 则必然说明该路径被切断, 连通可靠性很低.

2) RBR解决了传统方法在计算中存在的一些问题. 如前面所述, 传统计算方法在计算中往往需要既定数值才能够计算其可靠性, 而既定数值的确定又缺乏统一的标准. RBR则很好的解决了这个问题, 只要给定考察时间和置信水平就可以确定路段或路径可靠性, 而考察时间和置信水平可以根据不同的应用给出统一方法.

3) RBR有着更广阔的应用空间. 例如: 在路段设计中, 也可以利用长期历史数据计算得到的RBR评价路段可靠性, 以改进设计; 在交通诱导系统中, 可以将短时间内预测的路径RBR列入目标函数以计算最优路径; 在交通管理中, 路网RBR可以帮助管理者初步掌握未来路网交通流的动向, 并及时采取相应措施; 在对不同城市间交通状况进行比较时, 路网RBR值也可以作为一项重要参照指标.

参考文献

[1] Iida Y. Basic concepts and future directions of road network reliability analysis[J]. Journal of Advanced Transportation, 1999, 33(2): 125–134.

[2] 侯立文, 蒋馥. 城市道路网络可靠性的研究 [J]. 系统工程, 2000, 8(5): 44–48.
Hou L W, Jiang F. Study on the reliability of urban road network[J]. Systems Engineering, 2000, 8(5): 44–48.

[3] 熊志华, 邵春福. 路网可靠性研究的回顾与展望 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2003, 3(2): 77–80.
Xiong Z H, Shao C F. Review on the reliability of transportation network with prospect[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2003, 3(2): 77–80.

[4] Berdica K. An introduction to road vulnerability: What has been done, is done and should be done[J]. Transport Policy, 2002, 9(2): 117–127.

[5] Heydecker B G, Lam W H K, Zhang N. Use of travel demand satisfaction to assess road network reliability[J]. Transportmetrica, 2007, 3(2): 139–171.

[6] Bell M G H, Schmöcker J D. Public transport network reliability: Topological effects[C]// Proceedings of the Third International Conference on Transportation and Traffic Studies (ICTTS), 2002: 453–460.

[7] Bell M G H. Measuring network reliability: A game theoretic approach[J]. Journal of Advanced Transportation, 1999, 33(2): 135–146.

[8] Hendricks D. Evaluation value-at-risk using history data[J]. Economy Policy Review, 1996, 2(1): 73–90.

[9] Kupiec P. Techniques for verifying the accuracy of risk measurement models[J]. Journal of Derivatives, 1995, 3(2): 73–84.

[10] Bureau of Public Roads. Traffic assignment manual[K]. Urban Planning Division, US Department of Commerce, Washington DC, 1964.