

基于 Copula 函数的交通网络行程 时间可靠度计算方法*

崔毓伟¹, 袁鹏程^{2†}, 倪安宁¹, 隽志才²

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 上海交通大学 安泰经济管理学院, 上海 200052)

摘要: 针对有效利用路段行程时间随机性特征计算路径、OD 对(origin and destination, 出发和到达地点)及交通网络上的行程时间可靠度问题进行了研究, 提出一种更加准确的求解路径和 OD 对之间行程时间可靠度的计算方法。该方法基于 Copula 理论, 通过构建 Copula 函数求出能够反映路径与 OD 对随机性特征的行程时间联合密度分布。新算法将路段流量实测数据用于模型的标定, 并且考虑到了同一路径上不同路段的相关性。结合三种拓扑结构下的实际路网作为算例, 模型算法的有效性得到验证, 结果表明, 当不考虑路段间相关性时, 路径行程时间可靠度的计算结果会被高估。

关键词: 行程时间; 可靠度; 路段相关; Copula 函数

中图分类号: U491.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2014)05-1385-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.05.024

Travel time reliability estimating methodology in transportation networks based on Copula function

CUI Yu-wei¹, YUAN Peng-cheng^{2†}, NI An-ning¹, JUAN Zhi-cai²

(1. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Antai College of Economics & Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200052, China)

Abstract: Concentrating on the issue of travel time reliability estimating for routes, OD pairs and traffic network, the research proposed a new reliability estimating algorithm which incorporated the stochastic characteristic of link travel time. Based on the Copula theory, this methodology constructed a Copula function to determine the joint density function of travel time to produce travel time reliability value of routes and OD pairs. This method could put the actual measured data into model parameters calibration and it took the correlation problem of different links on the same route into consideration. Three kinds of traffic network topological structure cases testified the effectiveness of this new algorithm model. Results show that the ignorance of involving the links correlation effect into consideration will generate a higher reliability value.

Key words: travel time; reliability; link correlativity; Copula function

0 引言

交通网络可靠性研究始于 20 世纪 80 年代, 到目前为止, 对于交通网络可靠性的计算方法主要分成以 Clark 等人^[1]、Palma 等人^[2]为代表的解析法和以 Lam 等人^[3]、Chen 等人^[4]、AL-Deek 等人^[5]、Sumalee 等人^[6]为代表的模拟仿真算法两个方向。利用解析方法计算交通网络可靠度的学者将交通网络随机性产生的原因归于交通供给和需求的随机性^[7,8]。其中, 交通供给的随机性一般表示道路通行能力的随机性^[9], 形成原因主要是道路拥堵、管理、保养、交通事故、随意停车等^[10,11]。而交通需求的随机性则表现为每天从出发点到目的地的出行人数和次数的不确定。解析算法首先需要将交通网络系统供需的概率分布情况进行标定, 然后根据网络上路段之间的相互连接关系、流量与阻抗关系及交通网络均衡分配原则, 推算网络上总的行程时间分布, 进而计算出交通网络的可靠度^[12,13]。而模拟算法主要是利用交通流模拟器模型产生网络流量, 然后利用蒙特卡罗模拟方法对网络可靠度评价参数的随机概率分布进行模拟标定, 进而计算出交通网络的可靠度^[14]。这两种评价方法虽然在理论上解决了交通网络的可靠度评价问题, 但在实际中却很难应用。因为这两种方法都需要对交通供需的随机性特征进行测量, 而实际中测量这个参数并不容易。

为此, 近年来一些学者试图从其他角度寻找计算交通网络可靠度的方法, 其中如何利用路段随机特征推导网络可靠度的问题受到大量关注: 如假设行程时间和出行需求服从正态分布情况下基于仿真的遗传算法^[15], 利用路段行程时间历史数据的基于风险的交通可靠性算法^[16]以及基于蒙特卡洛仿真的可靠性求解算法^[17]等。随着交通信息化技术的提高, 路段的随机性特征变得越来越容易测量。以直接获得的数据为基础的计算方法比起以交通均衡分配原则得到的间接数据来说更加真实可靠。这一思路为交通网络可靠度计算问题提供了一个

收稿日期: 2013-07-15; 修回日期: 2013-08-29 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71001067)

作者简介: 崔毓伟(1988-), 男, 天津人, 硕士, 主要研究方向为行程时间可靠性评价(cuiyw31@163.com); 袁鹏程(1982-), 男(通信作者), 博士研究生, 主要研究方向为交通网络可靠性; 倪安宁(1981-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为交通系统可靠性; 隽志才(1954-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为运输系统规划与管理。

新视角。但是,目前这种评价方法受限于路段行程时间相互独立的条件,而实际中,这些顺次连接的路段行程时间之间存在着某种相关性,路段上的通行情况会受到其相邻路段的影响^[18],而路段行程时间又与一天的不同时刻相关联^[19,20],考虑路段间行程时间相关性条件下的交通网络可靠度计算问题正是本文研究的核心。

1 不考虑路段相关性的行程时间可靠性

1.1 问题描述

当交通供需的随机性特征(概率分布函数)不易被测量时,依据交通需求的随机性特征计算交通网络行程时间可靠性的方法就不再实用。随着信息技术的进步,道路交通属性变得容易被测量,因此可以利用这些易于获取的数据对交通网络行程时间可靠度进行推算。交通网络可以看做由路段元件组成的按照路段之间的连接关系构成的抽象网络(图 1(a)(b))。

图 1(a)中,节点代表实际交通网络的两条道路之间的交叉点,两点之间的连线代表这两点之间的道路。图 1(b)中,道路被抽象成某个元件,这些元件之间通过相互依存的节点连接在一起。此时,路径可视为由组成这条路径的顺次连接的路段串联组成,而 OD 对可视为通过此 OD 的多条路径并联组成。由于不考虑这些路段之间的相关性,路径及 OD 对的行程时间可靠度便可按照独立系统串、并联的方式来计算。

1.2 路段行程时间可靠度

简化后的交通网络是由路段和交叉口组成的网络系统,类似于电子元件系统,将路段和交叉口看成一个基本单元。定义路段的行程时间可靠性为路段(不包括连接路段的两个交叉口)上行驶车辆的行程时间不高于此路段自由行走时间 λ 倍的概率,可以表示为

$$R_a = p(t_a^0 < T_a < \lambda t_a^0) \tag{1}$$

其中: R_a 表示路段 a 的行程时间可靠性; T_a 表示路段 a 的实际行程时间; t_a^0 表示路段 a 的自由行走时间; λ 为一常数,表示期望行程时间标准, λ 越大表示对可靠性评价的标准越低。若路段行程时间在统计意义上服从某种分布,则根据概率计算理论可以得出路段行程时间的可靠度。同理,也可以定义交叉口的行程时间可靠度。

1.3 路径行程时间可靠度

经过简化的交通网络路径由一系列路段和交叉口串联组成。若把路径也看成是一个网络基本单元,那么可以统计出路径的行程时间分布,然后根据路径行程时间可靠度定义,即路径的行程时间可靠性为车辆该路径上的行程时间不高于此路径自由行程时间 α 倍的概率:

$$R_k = p(t_k^0 < T_k < \lambda t_k^0) \tag{2}$$

其中: R_k 为路径 k 的行程时间可靠度; t_k^0 为路径 k 的自由行走时间; λ 为一常数,表示期望行程时间标准。

在不考虑路段之间相关性时,路径的行程时间可以通过串联的路段和交叉口的可靠度计算得出

$$R_k = R_{a_1} R_{a_2} \dots R_{a_n} \tag{3}$$

1.4 OD 行程时间可靠度

OD 对间存在着多条路径,将 OD 对间至少存在一条路径,使得出行者能在其自由行程时间 α 倍内从 O 点到达 D 点的概率定义为 OD 对行程时间可靠度。若将 OD 对间的出行路径看成是相互独立的,则 OD 对行程时间可靠度为

$$R_w = 1 - \prod_{k=1}^j (1 - R_k) \tag{4}$$

式中: R_w 表示 OD 对 w 间的行程时间可靠度, R_k 为连接 OD 对路径 k 的行程时间可靠度, j 表示连接路径 k 的 j 个基本单元(路段)。

事实上,以上路径之间完全独立的假设是一种理想情况,实际中并不成立,因为路径之间可能有多条路段共用的现象,如图 2 所示。路径 1-3-5 和路径 2-3-4 就共用了路段 3。

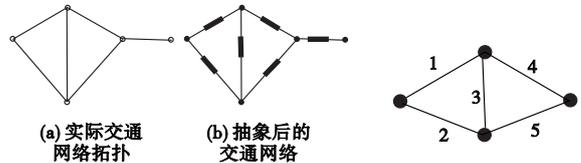


图1 交通网络拓扑

图2 一个路网结构

这时式(4)便不再成立。并且,当网络规模较大时,要计算出 OD 对的可靠度变得十分复杂,这种情况下根据可靠性函数界定定理,给出 OD 对可靠度的范围。

$$\prod_{i \in C} (1 - \prod_{j \in A_i} (1 - R_j)) \leq R_w \leq 1 - \prod_{i \in A_i} (1 - R_j) \tag{5}$$

其中: A 是交通网络的最小割集, C 是交通网络的最小路集。

2 Copula 理论

在不考虑路段相关时,可以利用第 1 章的方法近似计算交通网络行程时间可靠度。但是在实际的交通网络中,路段之间的行程时间不可能是完全独立的,它们之间必然存在着某种相关关系。这时根据串联结构对路径行程时间可靠度的评价方法就变得不再可行。这时可以利用 Copula 理论,推算出路径行程时间特征,然后再计算其可靠度。

2.1 Copula 函数定义及构造

Copula 的研究起源于 Sklar(1959),Nelsen(1998)比较系统地介绍了 Copula 的定义、构建方法、Archimedean Copulas 及相依性^[21]。Copula 可以解释为“相依函数”或“连接函数”,是把多维随机变量的联合分布用其一维边际分布连接起来的函数。下面首先引入 Sklar 定理。

Sklar 定理:假设一个多维分布函数 F 的边际分布函数为 $F_1(\cdot), F_2(\cdot), \dots, F_n(\cdot)$,则存在一个 Copula 函数 C 满足 $F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(F_1(\cdot), F_2(\cdot), \dots, F_n(\cdot))$,如果 $F_1(\cdot), F_2(\cdot), \dots, F_n(\cdot)$ 是连续的,则 Copula 函数是唯一确定的,反之亦然。

由这个定理可以推出当确定了多个路段行程时间边际分布和选定一个合适的 Copula 函数后,就可以方便地计算出这些路段行程时间的联合分布,这正是 Copula 函数在实际中解决交通网络行程时间可靠性的优势所在。Sklar 定理的数学表达如下:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) = c(F_1(x_1, \theta_1), F_2(x_2, \theta_2), \dots, F_n(x_n, \theta_n); \theta_c) \prod_{i=1}^n f_i(x_i; \theta_i) = c(u_1, u_2, \dots, u_n; \theta_c) \prod_{i=1}^n f_i(x_i; \theta_i) \tag{6}$$

$$\text{其中: } c(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) = \frac{\partial C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n))}{\partial F_1(x_1) \partial F_2(x_2), \dots, \partial F_n(x_n)} \tag{7}$$

$f(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta)$ 为具有参数 θ 的联合概率密度函数; $f_i(x_i; \theta_i)$ 为具有参数 θ_i ($i=1, 2, \dots, n$) 的边缘分布函数。

根据 Copula 函数的相关理论,可以运用两阶段法构建 Copula 模型。第一阶段,确定边缘分布;第二阶段,选取一个适

当的 Copula 函数,以便能很好地描述出随机变量之间的相关结构。

2.2 Copula 函数相关参数估计

Copula 模型的参数估计可以采用极大似然估计法和矩估计法。其中极大似然估计是最常用的 Copula 模型的估计方法。

采用极大似然估计法, Copula 模型的参数估计可以分为两步:

a) 估计边缘分布参数

$$\hat{\theta}_i = \operatorname{argmax}_{\theta_i} \sum_{i=1}^T \ln f_i(x_{it}; \theta_i) \quad (8)$$

b) 估计 Copula 函数中的参数

$$\hat{\theta}_c = \operatorname{argmax}_{\theta_c} \sum_{i=1}^T \ln c(F_1(x_{1t}, \hat{\theta}_1), F_2(x_{2t}, \hat{\theta}_2), \dots, F_n(x_{nt}, \hat{\theta}_n); \theta_c) \quad (9)$$

即,首先估计出边缘分布函数的参数 θ_i , 然后利用估计值 $\hat{\theta}_i$ 作为已知数代入 Copula 模型中,进而得到 Copula 函数中参数 θ_c 的估计值 $\hat{\theta}_c$ 。

3 考虑路段相关性条件下的可靠度计算

3.1 假设条件

当考虑路段间行程时间相关性时,计算路径行程时间可靠性便不能够通过简单的串联关系得到,即路径的行程时间概率分布函数不再是各路段行程时间的概率分布函数的乘积。此时需要利用 Copula 函数推导出路径行程时间的随机分布函数,然后再利用路径的行程时间可靠度定义计算出路径行程时间可靠度。

在考虑相关性条件下计算路径及 OD 对行程时间可靠度,需要首先得到路段的行程时间分布函数及可行的 Copula 函数。这两个函数的选取可以通过提出假设——检验假设的不断循环的过程获得。首先假设出一个路段行程时间的分布函数,然后利用实际数据对此分布函数进行假设检验,若通过检验则选取,否则放弃。

假设:路段行程时间分布符合参数为 (μ, σ) 的对数正态分布。其概率密度及累计分布函数分别为

$$f_{T_a}(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \frac{e^{-\frac{(\ln(t-t_a^0) - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{(t-t_a^0)} & t > t_a^0 > 0 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$F_T(t) = \int_{t_a^0}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \frac{e^{-\frac{(\ln(t-t_a^0) - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{(t-t_a^0)} dt \quad (11)$$

其中: t_a^0 为路段 a 的自由行走时间。

3.2 基于行程时间构造 Copula 函数

在 Copula 函数的构建中,常常使用高斯 Copula 函数。高斯 Copula 函数具有

$$C_{\Phi}(u) = \Phi(\Phi^{-1}(u_1), \dots, \Phi^{-1}(u_n)), u \in I^n \quad (12)$$

其中: u_i 是一个任意的边缘概率分布函数, $\Phi(\cdot)$ 是正态分布函数, $\Phi^{-1}(\cdot)$ 是标准 $\Phi(\cdot)$ 的反函数。 $\Phi(\cdot)$ 的密度函数具有如下形式:

$$\varphi(t) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} |\Sigma|^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(t-\mu)' \Sigma^{-1}(t-\mu)\right] \quad (13)$$

根据式(6)(10)(13)等,便可得到路径行程时间的联合分布密度函数

$$f_{T_1, T_2, \dots, T_n}(t_1, t_2, \dots, t_n) = c(F_{T_1}(t_1), F_{T_2}(t_2), \dots, F_{T_n}(t_n)) \prod_{i=1}^n f_{T_i}(t_i) =$$

$$(2\pi)^{-\frac{n}{2}} |\Sigma|^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(F_T(t) - \mu)' \Sigma^{-1}(F_T(t) - \mu)\right] \prod_{i=1}^n f_{T_i}(t_i) \quad (14)$$

其中: $F_T(t) = (F_1(t), F_2(t), \dots, F_n(t))$ 。

3.3 相关条件下的路径行程时间可靠度

以上根据 Copula 理论,利用路段的行程时间分布假设推导出路径行程时间的联合分布密度,经过参数估计后,便可以利用其计算路径的行程时间可靠度。根据式(2):

$$R_k = p(t_k^0 < T_k < \lambda t_k^0) = F_Z(\lambda t_k^0) - F_Z(t_k^0) \quad (15)$$

再根据式(14),利用卷积计算公式便可得到

$$F_Z(\lambda t_k^0) = p(T_1 + T_2 + \dots + T_n \leq \lambda t_k^0) = \int_{Z \leq \lambda t_k^0} \dots \int f(t_1, t_2, \dots, t_n) dt_1 dt_2 \dots dt_n \quad (16)$$

$$F_Z(t_k^0) = p(T_1 + T_2 + \dots + T_n \leq t_k^0) = \int_{Z \leq t_k^0} \dots \int f(t_1, t_2, \dots, t_n) dt_1 dt_2 \dots dt_n \quad (17)$$

其中: $Z = T_1 + T_2 + \dots + T_n$ 。

将式(16)(17)代入式(2),便可得到路径可靠度的计算公式:

$$R_k = p(t_k^0 < T_k < \lambda t_k^0) = F_Z(\lambda t_k^0) - F_Z(t_k^0) = \int_{Z \leq \lambda t_k^0} \dots \int f_{T_1, T_2, \dots, T_n}(t_1, t_2, \dots, t_n) dt_1 dt_2 \dots dt_n - \int_{Z \leq t_k^0} \dots \int f_{T_1, T_2, \dots, T_n}(t_1, t_2, \dots, t_n) dt_1 dt_2 \dots dt_n = \int_{Z \leq \lambda t_k^0} \dots \int (2\pi)^{-\frac{n}{2}} |\Sigma|^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(F_T(t) - \mu)' \Sigma^{-1}(F_T(t) - \mu)\right] \prod_{i=1}^n f_{T_i}(t_i) dt_1 dt_2 \dots dt_n - \int_{Z \leq t_k^0} \dots \int (2\pi)^{-\frac{n}{2}} |\Sigma|^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(F_T(t) - \mu)' \Sigma^{-1}(F_T(t) - \mu)\right] \prod_{i=1}^n f_{T_i}(t_i) dt_1 dt_2 \dots dt_n \quad (18)$$

3.4 相关条件下的 OD 行程时间可靠度

有了路段及路径的可靠度计算公式,便可以利用路段及路径可靠度计算公式以及 1.4 节的分析计算 OD 行程时间可靠度。计算步骤为:

- a) 求解 OD 对的最小割集 A;
- b) 求解 OD 对的最小路集 C,并利用式(13)求解各最小路集的可靠度;
- c) 利用式(5),求解 OD 对可靠度。

4 算例及结果

4.1 数据来源及采集

本文数据来源于某城市视频监控的实测数据,各路段行程时间通过布设在路段出入口的监控摄像头得到。监控摄像头可以记录车辆进入路段及驶出路段的时刻,从而计算出车辆在道路上的行驶时间。标定模型时还要去掉数据中的噪声(如车辆可能在路段中停车等)。本文共采用了三个小型网络,如图 3(a)~(c)所示,共由九条路段组成。三个路网分别代表不同的路网拓扑结构。其中图 3(a)所示为路径 1,由两条路段 Link1 和 Link2 串联而成;图 3(b)中包含两条路径,由 Link4 与 Link5 并联后再与同一路段 Link3 串联;图 3(c)由两条路径并联在一起,每条路径含有两条路段。流量信息采集时间是 2010 年 3 月 27 日早高峰 7 点至 8 点,详细数据如表 1 所示。

4.2 路段行程时间分布参数估计及检验

为了计算路径上行程时间可靠度首先需要得到各路段行程时间边缘分布情况。本文 3.1 节中假设路段行程时间服从

对数正态分布。因此首先利用采集到的行程时间数据对各路段分布参数进行估计,然后对分布特征进行卡方检验,以验证假设是否成立。各路段行程时间拟合结果如图 4 所示。参数估计及卡方检验结果如表 2 所示。

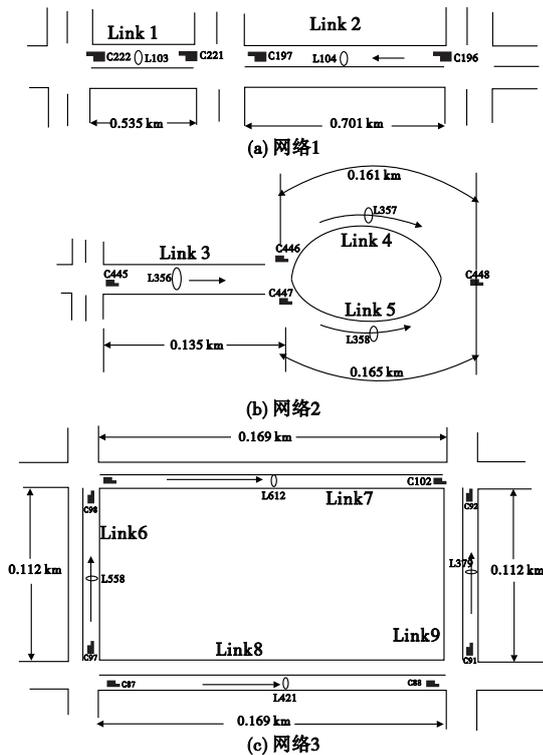


图3 三个小型网络

表 1 行程时间数据采集概要

摄像机	路段号	样本量	摄像机	路段号	样本量
C196&C197	1	798	C97&C98	6	798
C221&C222	2	987	C101&C102	7	975
C445&C446&C447	3	854	C87&C88	8	864
C446&C448	4	432	C91&C92	9	697
C447&C448	5	412			

表 2 路段行程时间参数估计及检验

路段	参数估计				假设检验		
	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$	均值	方差	自由度 ($k-r-1$)	$\hat{\chi}^2$	$\chi_{0.05}^2(k-r-1)$
Link 1	4.171	0.147	65.55	85.93	7	5.981	14.067
Link 2	4.295	0.097	73.74	51.78	7	2.563	14.067
Link 3	2.788	0.077	16.30	1.67	5	8.565	11.071
Link 4	2.865	0.085	17.62	2.29	6	10.346	12.592
Link 5	2.862	0.090	17.57	2.53	7	8.973	14.067
Link 6	2.469	0.050	11.82	0.36	4	1.456	9.488
Link 7	2.938	0.058	18.93	1.21	6	2.176	12.592
Link 8	2.956	0.064	19.24	1.54	5	3.283	11.071
Link 9	2.658	0.070	14.31	1.01	6	6.162	12.592

从检验结果可以看出,各路段行程时间分布的 χ^2 值满足 $\chi^2 < \chi_{0.05}^2(k-r-1)$,表明不能拒绝原假设,即认为各路段行程时间服从对数正态分布。

4.3 Copula 函数的参数估计

得到各路段行程时间边缘分布后,即可依据式(13)构造 Copula 函数,求得全路径行程时间的联合分布函数。通常应首先计算各 OD 对的最小路集,然后利用最小路集包含路段的边

缘分布去估计 Copula 函数的未知参数。本文采用较为简单的三个具有代表性路网拓扑结构作为算例,共包含五条路径,每条路径含有两条路段。依据 2.2 节给出的极大似然估计方法得到参数估计结果,如表 3 所示。

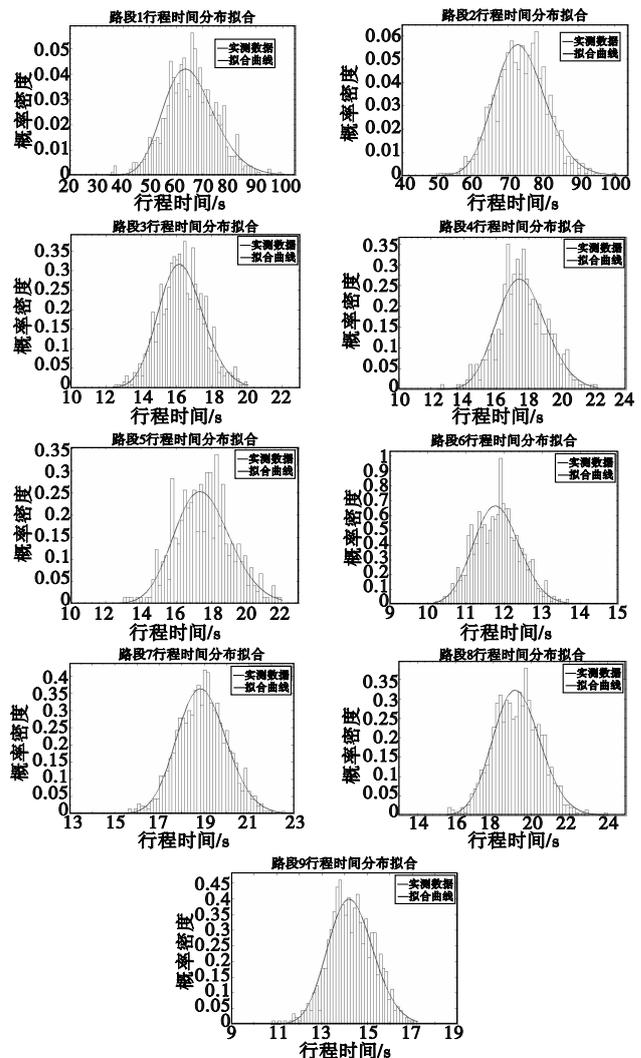


图4 各路段行程时间概率分布拟合

表 3 Copula 函数的参数估计结果

路径	包含路段	路段 1		路段 2		Copula 未知参数估计	
		$\hat{\mu}_1$	$\hat{\sigma}_1$	$\hat{\mu}_2$	$\hat{\sigma}_2$	$\hat{\mu}$	$\hat{\Sigma}$
Route 1	link2&link1	4.29	0.09	4.17	0.14	[17.82 26.77]	$\begin{bmatrix} 17.78 & 3.41 \\ 2.01 & 10.01 \end{bmatrix}$
Route 2	link3&link4	2.78	0.07	2.86	0.85	[43.45 8.75]	$\begin{bmatrix} 2.87 & 0.98 \\ 3.41 & 1.11 \end{bmatrix}$
Route 3	link3&link5	2.78	0.07	2.86	0.09	[3.99 17.90]	$\begin{bmatrix} 5.07 & 6.38 \\ 13.41 & 0.11 \end{bmatrix}$
Route 4	link6&link7	2.46	0.05	2.93	0.58	[18.87 12.21]	$\begin{bmatrix} 15.13 & 14.58 \\ 9.41 & 2.10 \end{bmatrix}$
Route 5	link8&link9	2.95	0.06	2.65	0.07	[45.22 9.00]	$\begin{bmatrix} 1.13 & 0.89 \\ 4.27 & 0.02 \end{bmatrix}$

4.4 模型结果

对路段行程时间分布及 Copula 函数进行标定后,便可通过式(1)计算出各路段的行程时间可靠度,通过式(2)和(3)计算出不考虑路段相关性条件下的路径行程时间可靠度,通过式(18)计算出各条路径的可靠度以及通过式(5)计算出各 OD 对的行程时间可靠度。本文给出在不同可靠度参数 λ 的情况下,不考虑路段行程时间相关性的路径及 OD 对的行程时间可靠度与考虑路段行程时间相关性的可靠度进行了对比,比较结果如表 4 所示。

从表 4 中可以看出,各路径与 OD 对间的行程时间可靠度随着 λ 的增加而显著增加。并且从对路径和 OD 对间行程时

间可靠度的估计结果来看,当不考虑路段之间行程时间相关性时,路径可靠度的估计结果总体上呈现出偏高趋势。因此处理复杂路网结构行程时间可靠度估算问题时应将路段间相关性因素考虑进去。

表 4 路径及 OD 可靠度计算结果

类型	路段号	$\lambda = 2$		$\lambda = 2.4$		$\lambda = 3$	
		相关	不相关	相关	不相关	相关	不相关
路径	1	0.0987	0.1146	0.7975	0.8527	0.9563	0.9947
	2	0.7654	0.9151	0.9212	0.9878	0.9214	0.9888
	3	0.7989	0.8966	0.8907	0.9657	0.9012	0.9757
	4	0.1569	0.1881	0.9679	1	1	1
	5	0.0011	0.0019	0.9213	0.9593	1	1
OD 对	1	0.1146	0.1146	0.8527	0.8527	0.9947	0.9947
	2	0.9528	0.9912	0.9913	0.9995	0.9922	0.9997
	3	0.1578	0.1896	0.9974	1	1	1

注:本算例三个网络拓扑结构都比较简单,实际上可以直接根据路径间的相关关系求得每个 OD 对的可靠度,而不需要得到其界的范围。

5 结束语

本文在总结以往行程时间可靠度评价方法不足的基础上,提出了基于 Copula 函数的交通网络行程时间可靠度计算模型。通过 Copula 理论可以利用每条路段行程时间的边缘密度分布方便地求得整条路径或 OD 对间行程时间的联合密度分布函数,从而给出了一种将路段实测流量数据用于行程时间可靠度计算中的方法,使得此类问题的求解算法更加准确。此外,本文提出的方法放开了以往研究中认为路段行程时间相互独立的假设,并以实际路网作为算例验证了路段行程时间相关性对可靠度计算结果存在影响。因此本文所提方法具有一定的现实意义,下一步研究将会进一步优化该算法,使之应用于更大规模的实际路网中。

参考文献:

[1] CLARK S, WATLING D. Modelling network travel time reliability under stochastic demand [J]. *Transportation Research Part B*, 2005, 39(2): 119-140.

[2] PALMA A, PICARD N. Equilibria and information provision in risky networks with risk-averse drivers [J]. *Transportation Science*, 2006, 40(4): 393-408.

[3] LAM W K, XU G. A traffic flow simulator for network reliability assessment [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 1999, 33(2): 159-182.

[4] CHEN A, YANG Hai, LO H K, et al. Capacity reliability of a road network: an assessment methodology and numerical results [J]. *Transportation Research Part B*, 2002, 36(3): 225-252.

[5] AL-DEEK H, EMAM E. New methodology for estimating reliability in transportation networks with degraded link capacities [J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2006, 10(3): 117-129.

[6] SUMALEE A, KURAUCHI F. Network capacity reliability analysis considering traffic regulation after a major disaster [J]. *Network and Spatial Economics*, 2006, 6(3-4): 205-219.

[7] LO H K, LUO X W, SIU B. Degradable transport network: travel time budget of travelers with heterogeneous risk aversion [J]. *Transportation Research Part B*, 2006, 40(9): 792-806.

[8] 刘海旭,蒲云. 基于路段走行时间可靠性的路网容量可靠性 [J]. *西南交通大学学报*, 2004, 39(5): 573-576.

[9] LEVINSON D, ZHANG Lei. Travel time variability after a shock: the case of the twin cities ramp meter shut off [C] // Proc of the 1st International Symposium on Transportation. 2001: 159-182.

[10] LIU H X, RECKER W, CHEN A. Uncovering the contribution of travel time reliability to dynamic route choice using real-time loop data [J]. *Transportation Research Part A*, 2004, 38(6): 435-453.

[11] 陈晓明,邵春福,熊志华. 混合交通信号交叉口的通行能力可靠度 [J]. *中国公路学报*, 2008, 21(4): 99-104.

[12] 朱顺应,王炜,邓卫,等. 交通网络可靠度及其通路算法研究 [J]. *中国公路学报*, 2000, 13(1): 91-94.

[13] SIU B Y, LO H K. Doubly uncertain transportation network: degradable capacity and stochastic demand [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 191(1): 166-181.

[14] 高爱霞,陈艳艳,任福田. 基于蒙特卡罗模拟方法的快速路运行时间可靠度研究 [J]. *公路交通科技*, 2006, 23(11): 126-132.

[15] 许良,高自友. 基于出行时间可靠性的城市交通网络设计 [J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(2): 494-498.

[16] WALKOWIAK T, MAZURKIEWICZ J. Reliability and functional analysis of discrete transport systems by modelling and simulation [J]. *Transport and Telecommunication*, 2009, 10(2): 33-42.

[17] 马寿峰,贺正冰,张思伟. 基于风险的交通网络可靠性分析方法 [J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(3): 550-556.

[18] LIDA Y. Basic concepts and future directions of road network reliability analysis [J]. *Journal of Advanced Transportation*, 1999, 33(2): 125-134.

[19] FOSGERAU M, KARLSTROM A. The value of reliability [J]. *Transportation Research Part B*, 2010, 44(1): 38-49.

[20] FOSGERAU M, ENGELSON L. The value of travel time variance [J]. *Transportation Research Part B*, 2011, 45(1): 1-8.

[21] NOH Y, CHOI K, DU L. Reliability-based design optimization of problems with correlated input variables using a gaussian copula [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2009, 38(1): 1-16.

(上接第 1384 页)

[11] LV Lin-yuan, ZHOU Tao. Link prediction in complex networks: a survey [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2011, 390(6): 1150-1170.

[12] LIBEN-NOWELL D, KLEINBERG J. The link-prediction problem for social networks [J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2007, 58(7): 1019-1031.

[13] LICHTENWALTER R N, LUSSIER J T, CHAWLA N V. New perspectives and methods in link prediction [C] // Proc of the 16th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM Press, 2010: 243-252.

[14] LIU Zhen, ZHANG Qiao-ming, LV Lin-yuan. Link prediction in complex networks: a local naive Bayes model [J]. *Europhysics Letters*, 2011, 96(4): 48007.

[15] ZHANG H, JIANG Liang-xiao, SU Jiang. A novel Bayes model: hidden naive Bayes [J]. *IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering*, 2009, 21(10): 1361-1371.

[16] Complex networks package for MatLab [EB/OL]. <http://www.levmtechnik.net/Content/Networks/ComplexNetworksPackage.html>.

[17] NIGBOR R L. Six-degree-of-freedom ground-motion measurement [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(5): 1665-1669.