

基于检测数据的路网交通运行可靠性分析

姜桂艳^{1,2}, 牛世峰², 常安德²

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学 交通学院, 长春 130022)

摘要:为了满足交通管理对路网可靠性分析的需要,提出交通运行可靠性的概念。在对路网进行层次划分的基础上,构建了分时可靠度和全时可靠度两个路网交通运行可靠性的特征量。根据最小路集法设计了 OD 对间子路网交通运行分时可靠性分析方法。利用全局扫描法设计了路网交通运行全时可靠性分析方法。实证分析表明,所设计的方法能够分别对路网的全时和分时可靠性进行分析,并能根据路段对路网可靠性的影响程度确定路段和路口的重要度,可为交通管理提供决策依据。

关键词:交通运输工程; 道路网络; 可靠性; 检测数据

中图分类号:U491 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2011)05-1216-06

Road network traffic operation reliability analysis based on detected data

JIANG Gui-yan^{1,2}, NIU Shi-feng², CHANG An-de²

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to meet the needs of the traffic management on road network reliability analysis, a concept of the traffic operation reliability was proposed. The time-segmenting reliability and the time-aggregating reliability, two characteristic parameters were constructed for the road network traffic operation reliability. The analysis method of the time-segmenting reliability of the road network between O and D was designed according to the minimal path set method. The analysis method of the time-aggregating reliability was designed using the global scanning method. The experimental results indicated that the proposed method can analyze the time-aggregating and time-segmenting reliabilities of the road network, can define the importance degree of the road segment and intersection according to their effects on the road network reliability, providing a basis for decision-making in the traffic management.

Key words: engineering of communications and transportation; road network; reliability; detected traffic data

0 引言

随着经济的发展和社会的进步,人们对道路网络服务质量的可靠性提出了更高的要求,交通

管理部门需要根据交通流的近期状况制定相应的管理措施^[1]。交通管理主要目标是实现交通系统的总体最优,目前,从系统最优角度研究路网可靠性成果主要有连通可靠性和容量可靠性。前者反

收稿日期:2010-04-26.

基金项目:“863”国家高技术研究发展计划项目(2009AA11Z218);吉林大学研究生创新基金项目(20101025).

作者简介:姜桂艳(1964-),女,教授,博士生导师. 研究方向:交通信息工程及控制. E-mail:jianggy@jlu.edu.cn

映了道路网络中节点之间保持连通的概率, 主要用于研究路网的拓扑结构对其可靠性的影响^[2-4]; 后者反映了特定服务水平下, 路网能够满足一定交通需求的概率^[5-7]。其中, 连通可靠性主要研究路网的物理结构, 不能反映交通状况对路网可靠性的影响, 无法满足交通管理的需求; 容量可靠性的分析必须以静态的需求预测和流量分配为基础, 需要进行大量的调查, 不适于在短期内多次进行分析。而路网的交通状况并不能长期保持稳定, 一方面, 同一天的不同时段的路网交通状况具有较大的不同; 另一方面, 不同时期路网的整体交通状况也会有较明显的不同。为了保障交通管理措施的有效性, 交通管理者需要对路网各时段的可靠性和不同时期整体的可靠性进行分析, 但容量可靠性只适于对路网整体的可靠性进行单次分析, 无法满足这一需求。

基于连通可靠性和容量可靠性的研究成果, 本文提出了交通运行可靠性的概念, 在对路网进行层次划分和重新定义路网交通运行可靠性特征量的基础上, 利用最小路集法和全局扫描法, 分别设计了基于检测数据的 OD 对间子路网分时可靠性 (Time-segmenting reliability of network between O and D, TSR-OD)、路网分时可靠性 (Time-segmenting reliability of network, TSR) 和路网全时可靠性 (Time-aggregating reliability of network, TAR) 的分析方法。

1 路网交通运行可靠性分析基础

1.1 路网的层次划分

在本文中, 将道路网络分为路口与路段、路径、OD 对间子路网和路网 4 个层次。

路口与路段是组成路网的基本单元。其中, 路口是指交通流可能改变其行使方向的道路区域, 路段是指两个路口之间的道路。为了获得路口和路径的可靠性, 本文提出了方向路段的概念, 将其定义为表达交通流在路口转向的虚拟路段, 一个路口包含多个方向路段, 其在空间上可能重叠。

路径是由多个路段和方向路段首尾相接串联组成的一条通路。OD 对间子路网是指某指定 OD 对间所有合理路径组成的网络状道路结构。路网是指特定管理区域内的所有道路组成的网状系统。

如图 1 所示, 1、2、…、10 是路段, 圆圈所示位

置为路口, 粗线所示是由 1~10 号路段和相应的方向路段串联组成的从 A 地到 B 地的一条路径, OD 对间各条合理路径的集合组成 OD 对间子路网, 而路网是指特定区域内所有路段和路口的集合。

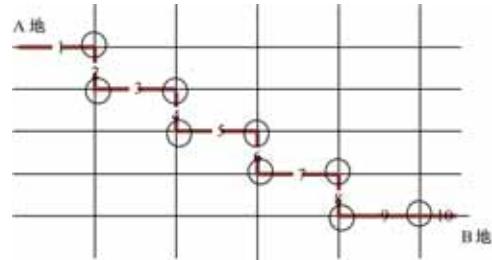


图 1 路段与路口、路径和路网示意图

Fig. 1 Diagram of section and intersection, path and network

1.2 路网交通运行可靠性特征量的构建

在本文中, 将路网交通运行可靠性定义为在规定的条件下和规定的时间内路段、路口或路网以规定的运行质量通过规定交通量的能力。为了度量可靠性的大小, 本文根据可靠性的定义构建了分时可靠度和全时可靠度 2 个度量路网交通运行可靠性的特征量。

HCM2000 将道路服务水平分为 A、B、C、D、E、F 六级, 在前五级服务水平时, 交通流运行质量随着服务水平级数的增加而变差, 但路段交通量会增加。当服务水平由 E 级变为 F 级时, 交通流运行质量随着服务水平级数的增加而变差, 同时路段交通量也会减少^[8]。在交通需求大于供给的情况下, 交通管理的目标是使路网系统的运能达到最大。因此, 本文以交通流运行质量优于 F 级服务水平作为路网可靠性分析的保障目标。

分时可靠度是指在一定的条件下路段或方向路段在特定时段的运行质量优于 F 级服务水平的概率, 即路段或方向路段保持或备有通行能力的概率, 其函数为

$$RG^p(t) = \frac{\sum_{i=k-N}^{k-1} w_{kj}^p(t)}{N} \quad (1)$$

$$w_{kj}^p(t) = \begin{cases} 1, & f_{kj}^p(t) \leq f_c^p \text{ 或 } v_{kj}^p(t) \geq v_d^p \\ 0, & f_{kj}^p(t) > f_c^p \text{ 或 } v_{kj}^p(t) < v_d^p \end{cases}$$

式中: $RG^p(t)$ 为 p 路段或方向路段在 t 时段的分时可靠度; N 为计算分时可靠度所需的数据个数; $w_{kj}^p(t)$ 为 p 路段或方向路段在第 k 周第 j 天 t 时段的平均行程速度; $f_{kj}^p(t)$ 为 p 路段或方向路

段在第 k 周第 j 天 t 时段基于地点交通参数的交通状态判别指数,其可以是由地点交通参数组成,可以用于判别路段交通状态的任何函数; f_c^p 为 p 路段或方向路段在饱和流情况时基于地点交通参数的交通状态判别指数值; v_i^p 为 p 路段或方向路段在饱和流情况下的区间行程速度; $w_{kj}^p(t)$ 为 p 路段或方向路段在第 k 周第 j 天 t 时段的交通运行质量值,用于表示路段在该时段的运行质量是否优于 F 级服务水平。

考虑到现有的路网交通采集系统具有多种采集方式并存的特点,为了提高算法的适用性,交通运行质量值既可以通过区间交通参数 $v_i^p(t)$ 获得,也可以通过基于地点交通参数交通状态判别指数 $f_{kj}^p(t)$ 获得。需要注意的是,当路口存在直左和直右车道时,相应方向路段的交通运行质量值将无法通过基于地点交通参数的交通状态判别指数准确获得,只能通过近似估计获得。本文建议将直右车道当作右转车道处理,直左车道当作一半直行一半左转处理。

分时可靠度可以定量地评价每个时段路段和方向路段上交通运行的可靠程度,为了对较长时期内路网交通运行的可靠性进行总体评价,本文定义了路段和方向路段的全时可靠度 RZG^p

$$RZG^p = E[RG^p(t)] \quad (2)$$

2 基于最小路集法的 TSR-OD 分析方法

当发生突发事件或举办大型活动时,交通管理部门需要保障某些 OD 点对间的交通畅通。因此,本文提出了 OD 点对间子路网的概念,并基于最小路集法设计了 OD 对间子路网交通运行分时可靠性分析方法以及影响 OD 对间子路网交通运行分时可靠性的重要路段确定方法。

2.1 OD 对间子路网交通运行分时可靠度计算

在通常情况下,路径的路阻随其长度的增加而增加。因此,在完成特定 OD 对间的出行任务时,绝大多数出行者会选择距离最短的 K 条最短路之一。因此,为了简化算法,本文假设出行者在特定 OD 对间出行时,只可能选择距离最短的 K 条路径之一出行。此时, K 条最短路径组成了 OD 对间子路网的所有合理路径。

为了提高 OD 对间子路网的调用速度,需要通过离线分析获得所有 OD 对间的 K 条最短路径,建立 OD 对间的子路网数据库。

OD 对间子路网所包含最短路径数 K 应该根据路网的复杂程度进行确定,当路网较复杂时 K 应选较大的值,反之, K 应选较小的值。在无法确定最优的 K 值时,本文建议 K 取 20。

由于本文确定的 OD 对间子路网只用于路网的可靠性分析,O 点和 D 点的选取范围只要能够覆盖路网上所有节点即可满足要求。为了节省存储空间,在本文中,O 点和 D 点只能从所分析路网的路口和路段外端点中选取,实际分析的 O 点和 D 点不在路口时,将其匹配到距离最近的路口或路段外端点。

在特定 OD 对间子路网中,每条最短路径代表该 OD 对间子路网中的一条最小路集,共有 K 个最小路集,分别为 L_1, L_2, \dots, L_k 。本文假设路网上的交通流符合 wordrop 准则二,交通流会按照平均或总的出行成本最小为依据趋于平衡。因此,子路网中只要有一条最小路集上的交通运行可靠,则整个子路网的交通运行可靠,其可靠度函数为

$$R^{O-D}(t) = P\left[\bigcup_{i=1}^n L_i(t)\right] \quad (3)$$

由概率的加法公式得

$$R^{O-D}(t) = P[L_1(t)] + P[\overline{L_1(t)} L_2(t)] + \dots + P[\overline{L_1(t)} \overline{L_2(t)} \dots (\overline{L_{n-1}(t)} L_n(t)] \quad (4)$$

式中: $R^{O-D}(t)$ 为 t 时段特定 OD 对间子路网的交通运行分时可靠度; $P[L_i(t)]$ 为最小路集 i 在 t 时段的交通运行分时可靠度。

路径由路段和方向路段串联组成,其交通运行的分时可靠度函数为

$$R^{O-D}[L_i(t)] = P[L_i(t)] = \prod_{p=1}^{n_i} RG^p(t) \quad (5)$$

式中: $R^{O-D}[L_i(t)]$ 为 OD 间路径 i 在 t 时段的交通运行分时可靠度; $RG^p(t)$ 为路径 i 中第 p 个路段或方向路段在 t 时段的交通运行分时可靠度; n_i 为路径 i 中路段和方向路段的个数。

2.2 影响 TSR-OD 的重要路段确定

由上述分析可知,OD 对间子路网交通运行的分时可靠度 $R^{O-D}(t)$ 可以表示为由路段和方向路段交通运行分时可靠度组成的多项式。

在 OD 对间子路网交通运行可靠性较低时,交通管理部门需要及时采取有效对策,以防止引发大面积路网的交通瘫痪。为此,本文根据可靠性理论中元件重要度确定方法,设计了路段和方向路段的分时重要度计算方法,如式(6)所示:

$$I_p(t) = \frac{\partial [R^{O-D}(t)]}{\partial [R_p(t)]} \quad (6)$$

式中: $I_p(t)$ 为路段或方向路段 p 的分时重要度。

将各路段的分时重要度按降序排列, 排在前面的路段即为在 t 时段对 OD 对间子路网交通运行分时可靠性具有重要影响的路段, 是交通管理部门管理的重点所在。

3 TSR 分析方法

传统的系统可靠性由元件的可靠度和元件间的结构关系决定, 而元件间的结构关系是相对于输入和输出定义的, 路网系统没有固定的输入和输出, 路段和路口间的结构关系随 OD 对的变化而变化, 所以无法借鉴传统的网络可靠性分析方法对路网的交通运行可靠性进行分析。

针对路网系统中各组成部分间结构关系不固定的特点, 本文以 TSR-OD 的分析结果为基础, 设计了基于全局扫描法的 TSR 分析方法。

由于路网系统没有固定的出行 OD 对, 出行者可能选择任意 OD 对作为其单次出行的起点和终点, 因此, 路网系统需保障所有 OD 对间子路网的可靠性。

本文定义路网系统的分时可靠度 $R_{net}(t)$ 为所有 OD 对间子路网可靠度的期望

$$R_{net}(t) = E[R^{O-D}(t)] \quad (7)$$

各路段相对于路网分时可靠度的重要度可以通过相同的思路获得, 其计算方法为

$$I_p^{net}(t) = E[I_p(t)] \quad (8)$$

式中: $I_p^{net}(t)$ 为 t 时段路段 p 的重要度。

由于一个路口包含多个方向路段, 所以各路口对于路网系统分时可靠度的重要度应该为所有方向路段分时可靠度的平均值的期望, 其计算方法为

$$KI_p^{net}(t) = E\left[\frac{\sum_{m=1}^{k_p} I_p^m(t)}{k_p}\right] \quad (9)$$

式中: $KI_p^{net}(t)$ 为 t 时段路口 p 的重要度; $I_p^m(t)$ 为 t 时段路口 p 中方向路段 m 的重要度; k_p 为路口 p 的方向路段个数。

4 TAR 分析方法

为了合理评价路网全时的可靠性, 本文在获得 TSR 分析结果的基础上, 设计了路径、OD 对间子路网以及路网的全时可靠度分析方法。

根据路段和路口全时可靠度的定义方式, 本文设计了路径全时可靠度计算方法

$$R^{O-D}(l_i) = E[R^{O-D}[l_i(t)]] \quad (10)$$

式中: $R^{O-D}(l_i)$ 为 OD 间路径 i 的全时可靠度。

OD 对间子路网的全时可靠度 R^{O-D} 的计算式为

$$R^{O-D} = E[R^{O-D}(t)] \quad (11)$$

路网全时可靠度 R_{net} 的计算式为

$$R_{net} = E[R_{net}(t)] \quad (12)$$

路段的全时重要度 I_p^{net} 的计算式为

$$I_p^{net} = E[I_p^{net}(t)] \quad (13)$$

路口的全时重要度 KI_p^{net} 的计算式为

$$KI_p^{net} = E[KI_p^{net}(t)] \quad (14)$$

5 实证分析

5.1 验证数据来源

本文的验证数据来源于 VISSIM 4.20 交通仿真系统。仿真路网的物理参数和加载的流量参数根据上海市实际路网的调查数据进行标定。路网中包括主干路、次干路、支路 3 个等级的道路, 包括信号控制交叉口和无信号控制交叉口两种交叉口类型。

如图 2 所示, 方框内是交叉口编号, 编号为 6、9、10 的交叉口为无信号控制交叉口, 其余全部为信号控制交叉口。直线旁边的是路段编号, 粗实线表示 2 车道以上的城市主干路, 细实线表示次干路和支路, 路段 14 和路段 9 为单向车道。

本文采用不同的随机种子数连续模拟 5 次, 代表连续 5 周第 i 天的数据。每次模拟时长 18 000 s, 包括交通流的高峰、平峰和低谷 3 个阶段, 数据采样间隔为 5 min, 采集交通数据为路段行程时间。

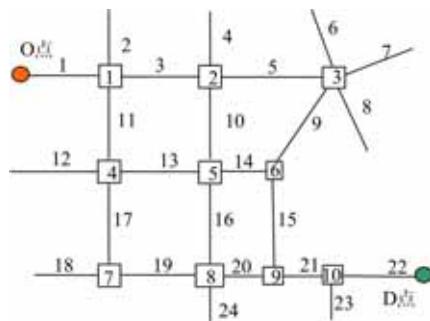


图 2 仿真路网示意图

Fig. 2 Diagram of simulation road network

5.2 实例分析

利用模拟获得的数据,本文对所设计方法进行了实例分析,分析步骤如下:

(1)根据式(1)计算各路段和方向路段的分时可靠度,限于篇幅,本文只给出路段 16 由路口 5 驶向路口 8 方向的可靠度,如图 3 所示。

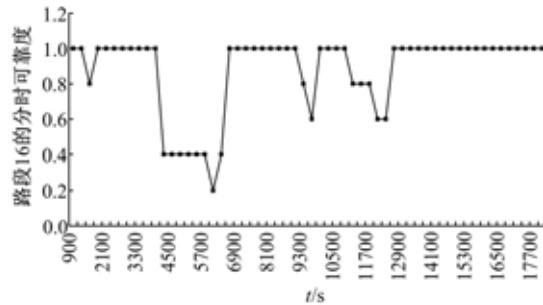


图 3 路段 16 的分时可靠度变化图

Fig. 3 Time-segmenting reliability change diagram of road section 16

(2)以路段 1 和路段 22 的外端点作为 O 点、D 点,根据 TSR-OD 分析方法,计算 OD 对间子路网的分时可靠度,计算结果如图 4 所示。由于实验路网较小,本文选取 OD 对间子路网的路径条数 K 为 5。

各路段相对于给定 OD 对间子路网分时可靠性的程度如表 1 所示。

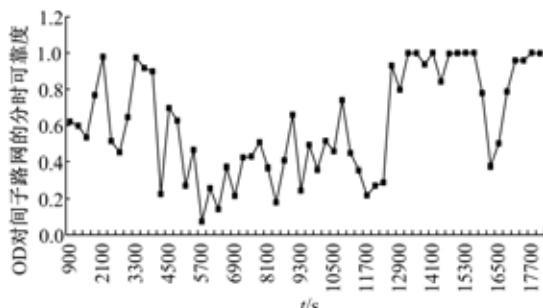


图 4 指定 OD 对间子路网分时可靠度变化规律

Fig. 4 Time-segmenting reliability change diagram of road network between O and D

表 1 2700 s 时各路段相对于 TSR-OD 的重要度

Table 1 Important degree of road section relative to TSR-OD at 2700 s

| 路段编号 | 重要度 | 路段编号 | 重要度 | 路段编号 | 重要度 |
|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 0.97 | 10 | 0.44 | 20 | 0.41 |
| 21 | 0.49 | 16 | 0.43 | 14 | 0.41 |
| 13 | 0.48 | 11 | 0.42 | 17 | 0.40 |
| 15 | 0.45 | 3 | 0.42 | | |
| 19 | 0.45 | 21 | 0.41 | | |

(3)根据 TSR 分析方法,计算了路网的分时可靠度,结果如图 5 所示,计算了各路段相对于 TSR 的重要度,如表 2 所示。

(4)根据 TAR 分析方法,计算了路网的全时可靠度和各路段的全时重要度,结果如表 3 所示。

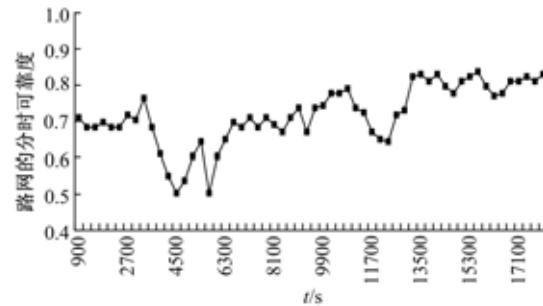


图 5 路网分时可靠度变化规律

Fig. 5 Time-segmenting reliability change diagram of road network

表 2 2700 s 时各路段和路口相对于 TSR 的重要度

Table 2 Important degree of road section relative to TSR at 2700 s

| 路段编号 | 重要度 | 路段编号 | 重要度 | 交叉口编号 | 重要度 |
|------|------|------|------|-------|------|
| 13 | 0.72 | 21 | 0.34 | 5 | 0.69 |
| 11 | 0.67 | 9 | 0.25 | 4 | 0.65 |
| 14 | 0.65 | 1 | 0.11 | 8 | 0.50 |
| 16 | 0.63 | 2 | 0.1 | 3 | 0.47 |
| 20 | 0.59 | 12 | 0.08 | 6 | 0.45 |
| 17 | 0.57 | 18 | 0.08 | 7 | 0.35 |
| 15 | 0.56 | 4 | 0.07 | 1 | 0.32 |
| 19 | 0.56 | 22 | 0.06 | 9 | 0.27 |
| 3 | 0.54 | 7 | 0.04 | 2 | 0.23 |
| 10 | 0.45 | 6 | 0.03 | 10 | 0.20 |
| 5 | 0.34 | 8 | 0.03 | | |

表 3 路网全时可靠性分析结果

Table 3 Results of TAR

| 路段编号 | 重要度 | 路段编号 | 重要度 | 交叉口编号 | 重要度 |
|------|------|------|------|-------|------|
| 13 | 0.70 | 14 | 0.25 | 5 | 0.64 |
| 17 | 0.64 | 9 | 0.24 | 4 | 0.60 |
| 19 | 0.60 | 4 | 0.18 | 2 | 0.57 |
| 3 | 0.57 | 22 | 0.18 | 7 | 0.57 |
| 16 | 0.55 | 1 | 0.17 | 8 | 0.56 |
| 20 | 0.53 | 2 | 0.15 | 3 | 0.50 |
| 11 | 0.50 | 6 | 0.10 | 6 | 0.49 |
| 10 | 0.48 | 18 | 0.10 | 1 | 0.48 |
| 5 | 0.47 | 7 | 0.09 | 9 | 0.36 |
| 15 | 0.32 | 12 | 0.08 | 10 | 0.27 |
| 21 | 0.27 | 8 | 0.04 | 全时可靠度 | 0.71 |

对表3进行分析可知,路段和路口在K路径中被利用次数越多、交通拥堵越严重,其重要度越高。在实验路网中,路段13是最重要的路段,交叉口5是最重要的交叉口。

6 结束语

在对路网层次进行划分的基础上,构建了分时可靠度和全时可靠度两个路网可靠性特征量,基于最小路集法设计了TSR-OD分析方法,在TSR-OD分析结果的基础上,利用全局扫描法设计了TSR和TAR分析方法。实证分析表明,本文所设计的方法可以实现路网全时和分时可靠性的分析,并能根据各路段对路网可靠性的影响程度确定各路段的重要度,为交通管理提供决策支持。

参考文献:

- [1] 姚智胜,邵春福,熊志华,等. 基于主成分分析和支持向量机的道路网短时交通流量预测[J]. 吉林大学学报:工学版,2008,38(1):48-52.
Yao Zhi-sheng, Shao Chun-fu, Xiong Zhi-hua, et al. Short-term traffic volumes forecasting of road network based on principal component analysis and support vector machine[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2008, 38(1): 48-52.
- [2] Mine H, Kawai H. Mathematics for Reliability Analysis[M]. Tokyo: Asakura-shoten, 1982.
- [3] Bell M G H, Iida Y. Transportation Network Analysis[M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [4] Asakura Y, Kasbiwadani M. Road network caused by daily fluctuation of traffic flow[C]// Proceedings of the 19th PTRC Summer Annual Meeting, Brighton, 1991.
- [5] Chen A, Tatneni M, Lee D H, et al. Effect of route choice models on estimating network capacity reliability[J]. Transportation Research Record, 2000, 1733: 63-70.
- [6] Lo H K, Tung Y K. Network with degradable links: capacity analysis and design[J]. Transportation Research Part B, 2003, 37(4): 345-363.
- [7] Liu H X, Recker W, Chen A. Uncovering the contribution of travel time reliability dynamic route choice using real-time loop data[J]. Transportation Research Part A, 2004, 38(6): 435-453.
- [8] National Research Council. Highway capacity manual 2000[Z]. Washington DC: TRB, 2000.