

基于贝叶斯分析的道路交通系统可靠性模型

陈富坚^{1,2}, 柳本民¹, 郭忠印¹, 陈富强¹

(1. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804; 2. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对灾变事件下重大公路交通基础设施所在路网运营安全管理实时决策的需要, 提出了基于贝叶斯分析的道路交通系统可靠性计算模型. 以系统工程理论对道路交通系统进行建模和分类, 以可靠性工程理论对道路交通系统可靠性的概念进行定义, 并逐级建立 4 类道路交通系统的可靠性计算模型. 为了满足路网交通系统可靠性模型的应用需要, 引入贝叶斯网络理论, 提出了耦合贝叶斯网络的道路交通系统可靠性计算模型, 并以算例示范了模型的应用.

关键词: 交通安全; 路网运营安全管理; 道路交通系统; 可靠性; 贝叶斯网络

中图分类号: U 412.3

文献标识码: A

Reliability Models of Road Traffic Systems Based on Bayesian Analysis

CHEN Fujian^{1,2}, LIU Benmin¹, GUO Zhongyin¹, CHEN Fuqiang¹

(1. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 210804, China; 2. College of Civil & Architecture Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: For the need a of real-time decision-making in safety management of road network operation, models based on Bayesian analysis (BA) for calculation of reliability of road traffic system were presented. Based on road traffic system models constructed with theories in system engineering, the concept of reliability of road traffic system was defined with reliability engineering, and reliability models of four kinds of road traffic systems were constructed respectively. To solve problems in application of the reliability models, Bayesian network (BN) was introduced to construct BN-coupled reliability models for road traffic systems. A case study was conducted to illustrate the use of the BN-coupled models.

Key words: traffic safety; safety management of road network operation; road traffic system; reliability;

Bayesian network

在重大公路交通基础设施所在路网的运营管理中采取合理的方法实时评价各种灾变事件, 如雨、雾或冰雪等灾害性天气或交通事件对路网造成的安全风险, 对科学地进行路网安全管理决策以及及时排除风险、防范交通事故有着重要作用.

现有的道路安全评价方法很多, 有的从单因素角度评价道路行车风险, 如运行车速法^[1]、车速离散性法^[2], 也有的较综合地从道路、交通工程设施、交通流状况等方面评价道路交通安全状况, 如人工神经网络法^[3]、马尔可夫链法^[4]、模糊综合评判模型^[5]等. 由于道路交通安全系统是由人、车、路(含整个环境)组成的复杂动态系统^[3], 从单因素或者仅从车和路方面来评价道路交通系统的安全状态对于路网实时安全管理决策显然是不完全的, 也是不够的. 因此, 进一步的研究应从系统的角度, 综合人、车、路、环境和管理等方面全面地评价路网运营安全状态.

1 道路交通系统模型的构建及其分类

系统是由 2 个或以上有机联系、相互作用的要素组成、具有特定功能、结构和环境的整体^[6]. 显然, 由人一车一路等要素组成的整体符合系统的定义, 见图 1^[3]. 从系统的定义看, 在道路交通系统中, 人一车一路是系统的内部要素, 自然环境、交通管理条件则是系统的外在环境. 笔者按系统的定义对图 1 进行变换, 得到图 2 的系统模型. 图 2 表明, 系统中人、车、路三要素相互依赖、共同作用, 并受系统外部环境的影响, 系统安全依赖于三要素间的相互协调, 当协调不畅时, 就可能引发交通事故或事件.

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2007AA11Z235)

第一作者: 陈富坚(1974—), 男, 副教授, 博士生, 主要研究方向为道路交通安全. E-mail: 690273745@qq.com

通讯作者: 柳本民(1968—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为道路安全工程. E-mail: liubenming@tongji.edu.cn

为了明确对象,方便构建道路交通系统可靠性模型,将道路交通系统按车辆数量和道路特征分4类:由单车(包括司机,下同)及其行驶的单元路段的半幅路组成的单元交通系统记为UTS;由单元路段的半幅及其上交通流组成的单元路段交通系统记为USTS;由若干个单元路段(最少1个)及其上交通流组成的路段交通系统记为STS;由多条道路的路段交通系统组成的路网交通系统记为NTS.此处单元路段指一条道路中路线几何线形指标相近的局部路段,如平曲线路段.对于路网安全管理,主要考虑USTS,STS和NTS,而UTS是它们的基础.

2 道路交通系统可靠性模型的构建

2.1 道路交通系统可靠性的定义

根据国标GB3187—1982《可靠性基本名词术语及定义》,可靠性的定义为“产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力.”对于道路交通系统,各要素处于开放且动态变化环境中,因此,上述定义不完全适合道路交通系统.为路网安全管理决策用的道路交通系统可靠性的度量应是当时(或实时)条件下的可靠性,因此,必须放弃“在规定的时间内”这个寿命条件而强调实时性,或者说当时性.此外,交通事故或事件作为道路交通系统故障具有的不可再现性和不可试验性使得传统以频率定义的可靠度作为可靠性指标已不适合,这就需要用新的方式对可靠度进行度量,以作为道路交通系统可靠性的确定方法.事实上,人们对行车风险的判断主要是根据个人经验,结合当时的道路、交通和气象条件,对当时是否会发生交通事故给出个人主观判断,或者说个人信念.这实质上是统计学上的贝叶斯立场^[7].因此,当前概率论^[7]4种概率定义中的主观概率更适合作为道路交通系统可靠性的指标.

基于上述分析,将道路交通系统的可靠性定义为:在规定的驾驶人、道路、车辆、环境和管理条件下,道路交通系统在当时保持正常运行而不发生故障的能力.这个能力主要以主观概率表示,强调当时性或实时性.有了这个定义,就可构建道路交通系统可靠性模型.

2.2 道路交通系统可靠性模型的构建

2.2.1 单元交通系统UTS可靠性模型的构建

经验表明,在单元交通系统UTS中,当人(司机)—车—路三要素构成的道路交通系统的任一要素失效,系统就会失效,只有当三要素都能正常工作

时,UTS才能正常运行.根据串联系统的定义^[8],UTS可看作各要素以串联方式连接的串联系统,其可靠性模型如图3,系统的整体可靠度由人—车—路三要素各自的可靠度的乘积共同决定,由此得到UTS的可靠性模型,即式(1).

$$R_{\text{uts}} = R_d R_v R_r \quad (1)$$

式中: R_{uts} 为UTS的可靠度; R_d , R_v , R_r 分别为司机、车辆和道路的可靠度.式(1)表明,当UTS中某一元件的可靠性较低,如路面有冰雪致使 R_r 较小,则提高UTS中其他元件的可靠性,如司机提高警惕(R_d 提高)或给车轮缠上链条(R_v 提高),都可以提高UTS的整体可靠性,一定程度上弥补道路可靠性低的不足.因此,UTS三元件中任一元件的可靠性缺陷可由其他元件一定程度上弥补,三者共同决定系统的可靠性.显然,以串联系统模型作为UTS的可靠性模型符合客观实际,是合理的.

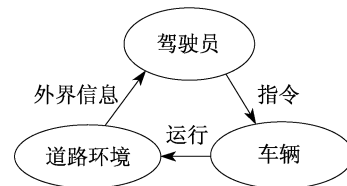


图1 三因素道路交通系统^[8]

Fig.1 “Three elements” road traffic system^[8]

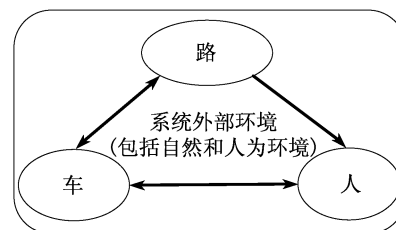


图2 道路交通系统各要素

Fig.2 Elements of road traffic system

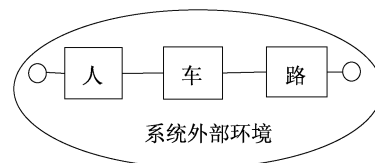


图3 各要素为串联关系的单元交通系统可靠性模型

Fig.3 Serial link between sub-systems of UTS

根据系统可分性原理^[6],图3表示的UTS可靠性模型的3个基本要素自身也是系统,是UTS的子系统,每个子系统由若干个基本元件组成.从必要性和效用不重叠的原则出发,对UTS的3个子系统作进一步划分,得到图4所示基于元件的UTS可靠性模型.所得的模型同样是串联模型,系统的可靠度

R_{uts} 由其基本元件可靠度的乘积共同决定, 即式(2).

$$R_{\text{uts}} = \prod_i R_i =$$

$$R_{\text{ds}} R_{\text{dps}} R_{\text{rr}} R_{\text{rl}} R_{\text{rc}} R_{\text{rp}} R_{\text{rsd}} R_{\text{rsm}} R_{\text{vs}} R_{\text{vos}} R_{\text{L}} \quad (2)$$

式中: R_i 为系统各元件的可靠度; R_{ds} 为司机驾驶技能的可靠度; R_{dps} 为司机身心状况可靠度; $R_{\text{rr}}, R_{\text{rl}}, R_{\text{rc}}, R_{\text{rp}}, R_{\text{rsd}}$ 和 R_{rsm} 分别为路段的平曲线半径、纵坡、平纵组合、路面、视距和路段间运行车速差的可靠度; $R_{\text{vs}}, R_{\text{vos}}$ 分别为车身和车辆运行速度的可靠度; R_{L} 为影响单元交通系统安全的各种无法预测因素, 即安全漏洞.

2.2.2 单元路段交通系统 USTS 可靠性模型构建

USTS 可靠性模型的构建方法为将图 3 拓展为图 5, 以其作为可靠性模型. 此时, 司机的可靠度以路段上司机群体特征参数可靠度的期望值表示, 为群

体司机驾驶技能可靠度的期望值与群体司机身心可靠度的期望值的乘积, 即式(3); 车的可靠度以路段上车辆群体特征参数可靠度的期望值表示, 等于群体车辆车身安全可靠度的期望值与反映交通流整体安全状态的交通流特性参数的可靠度的乘积, 即式(4). 展开为式(5).

$$R_{\text{d,e}} = R_{\text{ds,e}} R_{\text{dps,e}} \quad (3)$$

式中, 下标 e 表示期望值.

$$R_{\text{v,e}} = R_{\text{vs,e}} R_{\text{vos,e}} R_{\text{vd}} R_{\text{vds}} R_{\text{vc}} \quad (4)$$

式中: $R_{\text{vd}}, R_{\text{vds}}, R_{\text{vc}}$ 分别为路段交通流密度、路段车速离散性、路段交通组成的可靠度.

$$R_{\text{usts}} = R_{\text{ds,e}} R_{\text{dps,e}} R_{\text{vs,e}} R_{\text{vos,e}} R_{\text{vd}} R_{\text{vds}} \cdot R_{\text{vc}} R_{\text{L}} R_{\text{rr}} R_{\text{rl}} R_{\text{rc}} R_{\text{rp}} R_{\text{rsd}} R_{\text{rsm}} \quad (5)$$

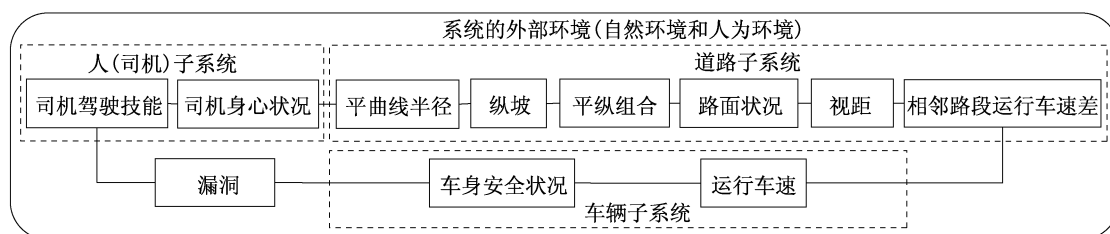


图 4 各元件为串联关系的单元交通安全系统可靠性模型

Fig.4 Serial link between elements in reliability framework of unit traffic system

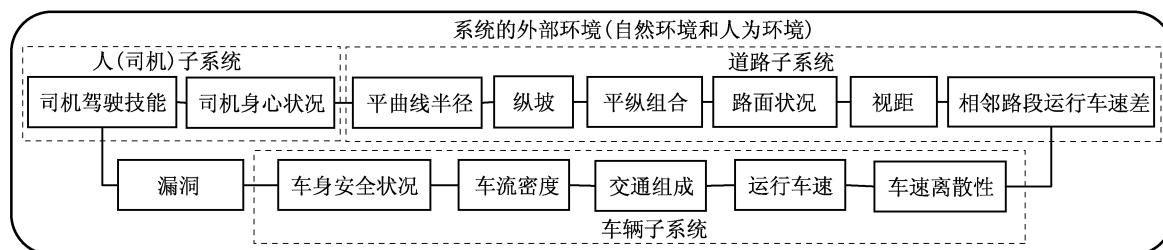


图 5 各元件为串联关系的单元路段交通安全系统可靠性模型

Fig.5 Serial link between elements in reliability framework of unit section traffic system

2.2.3 路段交通系统 STS 可靠性模型的构建

STS 是由路段范围内 2 个相反交通流向各自的 USTS 先同向串联再异向并联组成, 可视为特殊并串联系统, 笔者以式(6)作为其数学模型.

$$R_{\text{sts}} = \frac{1}{2} \prod_{i=1}^n R_{\text{usts},i} + \frac{1}{2} \prod_{i=1}^n R'_{\text{usts},i} \quad (6)$$

式中: R_{sts} 为路段交通系统可靠度; n 为路段内所含单元路段数; $R_{\text{usts},i}, R'_{\text{usts},i}$ 为 2 个相反流向路段的各个单元路段交通系统 USTS 的可靠度.

2.2.4 路网交通系统 NTS 可靠性模型的构建

建立了 STS 可靠性模型, 就可以此为基础建立 NTS 可靠性模型. 从可靠性工程角度看, NTS 是由

管理路网范围内的各个 STS 以串并联、并串联或桥式等方式连接而成的混联系统. 可靠度建模方法见文献[8].

2.2.5 路网交通系统可靠性模型应用中的困难

前面的分析给出了 NTS 可靠性模型的构建方法, 如果得到了系统各元件的可靠度, 即可计算 NTS 的可靠度; 然而, 由于 NTS 可靠性模型元件众多, 联接关系复杂, 不少元件的可靠度受外界环境影响很大, 变化很快, 有时甚至多个不利环境因素同时出现. 这些都给 NTS 可靠度的快速计算带来了极大的困难, 不利于及时进行路网安全管理决策. 此外, 在路网运营安全管理中, 有时还需要进行诊断推理, 如

路网脆弱节点诊断、路网事件状态下的事件因果诊断等. 这些诊断推理为及时采取措施排除路网故障、改善路网运营安全状况提供了依据. 显然, 单靠上述 NTS 可靠性模型满足不了实际需要. 为此, 笔者在上述模型中引入贝叶斯网络, 建立耦合型道路交通系统可靠性模型.

3 贝叶斯网络的引入

贝叶斯网络(BN)是耦合了概率论和图论将概率论应用于复杂领域进行不确定性推理的工具. 可靠度计算是不确定性推理的一种^[8], 因此, 可利用贝叶斯网络来耦合道路交通系统可靠性计算模型, 为路网运营安全管理决策服务.

贝叶斯网络可解决 3 类不确定性推理任务^[9]: ①后验概率或条件概率的求解问题; ②最大后验假设的求解问题; ③最大可能解释的求解问题. 任务①可用于计算 NTS 可靠度, 进行运营风险预测或事件状态下的原因识别, 任务②可用于路网薄弱环节或者脆弱点识别, 任务③可用于路网事件下的因果网络诊断或事件形成机制诊断, 这对路网安全改造有重要意义.

下面以软件 GeNIe 贝叶斯网络建模工具说明耦合型道路交通系统可靠性模型的构建方法.

4 耦合贝叶斯网络 NTS 可靠性模型的构建

以示例形式介绍耦合贝叶斯网络的道路交通系统可靠性模型的构建. 图 6 为一经过抽象简化、以重大公路交通基础设施为核心的通道型路网, 现要建立其可靠性模型. OD 为重大公路交通基础设施所在高速公路, B1B2B3 和 C1C2C3 为与 OD 并行的辅助二级公路, B1A1C1, B2A2C2, B3A3C3 为 3 条接线公路, 都是二级公路. 高速公路与二级公路间以一般互通立交方式连接.

4.1 NTS 可靠性模型贝叶斯网络的确定

根据管理路网内各条道路的路段特征先对路网内所有路段的 USTS 进行编号, 共有 28 个 USTS, A1, A2, A3 为 3 座一般互通式立交, B2, C2 为 2 个平交路口, B1, B3, C1, C3 为单元路段的分界点, 如图 6 所示.

根据 NTS 可靠性模型中各元件、组件及子系统

等之间的逻辑关系以及贝叶斯网络的建网方法, 得到图 7 所示的 NTS 贝叶斯网络结构. 图 7 中, 根节点(USTS)的概率由图 5 的 USTS 可靠性模型建立的贝叶斯网络确定, 即由图 8 确定. 非根节点的条件概率 CPT(conditional probability table) 由 NTS 可靠性模型中各构成单位(元件、组件及子系统等)之间的串、并联逻辑关系确定. GeNIe 处理元件间联接关系的方式见文献[9].

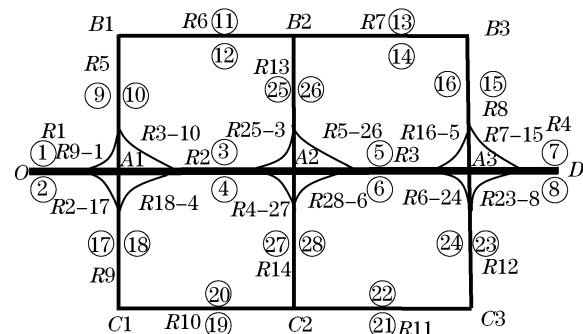


图 6 管理路网的结构

Fig.6 Structure of the designated road networks

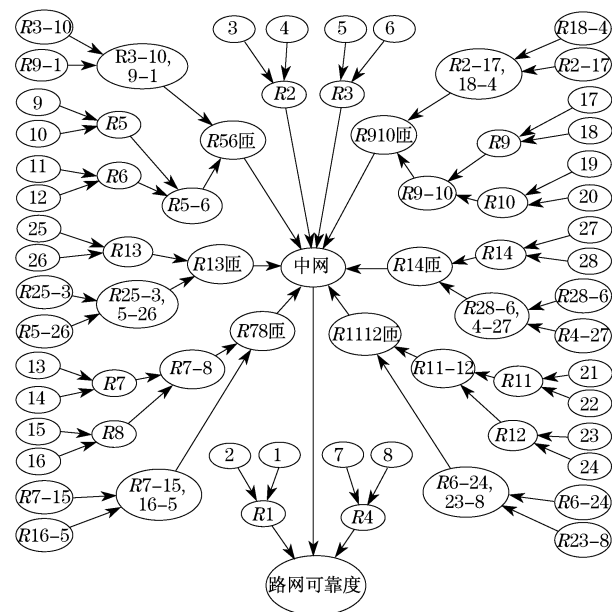


图 7 路网交通系统可靠性模型的贝叶斯网络结构

Fig.7 BN Structure of reliability model for the NTS

4.2 USTS 可靠性模型贝叶斯网络的确定

根据图 5 及贝叶斯网络的建网方法, 可建立 USTS 可靠性模型的贝叶斯网络, 见图 8. 图 8 有 2 种类型节点: 根节点和非根节点. 非根节点的条件概率 CPT 按文献[9]的方法确定; 根节点数量众多, 其可靠度很难准确获得, 目前是计算 NTS 可靠性的主要障碍, 是需要深入研究的主要问题.

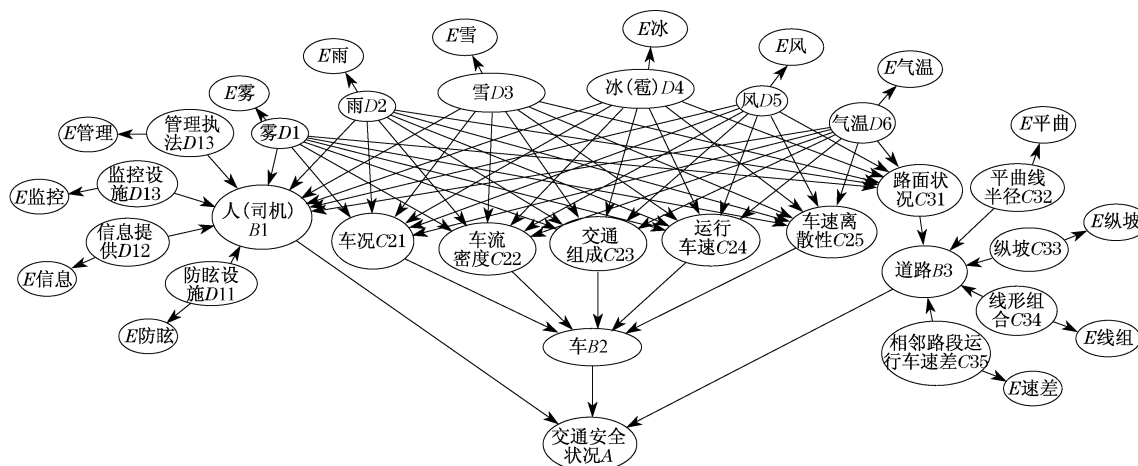


图 8 单元路段交通系统可靠性模型的贝叶斯网络结构

Fig.8 BN Structure of reliability model for the USTS

4.2.1 人的可靠性的确定

人的可靠性极不稳定,准确计算人的可靠性非常困难.目前,人的综合可靠性的确定方法主要有井口教授模型^[10]、王武宏模型^[11]等,其中,井口教授模型(式(7))在人机工程中使用较广,参数容易获得,笔者以此计算司机的可靠性.

$$R = 1 - k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 (1 - R_0) \quad (7)$$

式中: R 为实际工况下人的可靠度; $k_1 \sim k_5$ 为可靠度修正系数,分别代表作业时间、操作频率、危险程度、人的身心状态及环境条件,各系数的取值方法见文献^[10]; R_0 为人的基本可靠度.

4.2.2 车辆可靠性参数的确定

图 5 表明,在 USTS 中,群体车辆的可靠度主要由车身安全状况、运行车速、车速离散性、车流密度和交通组成(货车比例)等 5 个因素(元件)串联确定,即为 5 个因素可靠度的乘积.

车身安全状况的可靠度可由一个地区群体车辆安全可靠度的期望值确定,可用调查统计法确定,缺乏数据时可采用专家评判法来确定.

车速离散性的可靠度按其交通安全的影响程度^[1-2]分 5 级,并以专家评判法确定各级的可靠度.一级: $> 25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 0.800; 二级: $20 \sim 25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 0.900; 三级: $15 \sim 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 0.950; 四级: $10 \sim 15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 0.990; 五级: $< 10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 0.999.

对于其余元件,如交通组成(货车比例),对交通安全的影响可参考文献^[12],运行车速可参考文献^[5-13],车流密度可参考文献^[14].

4.2.3 道路可靠性参数的确定

纵坡的安全性影响分 2 方面: 坡度与坡长,坡度

与坡面排水能力相关,影响雨天交通安全,长大纵坡影响刹车安全.综合考虑^[15],可对纵坡分级及得到相应的可靠度.

4.2.4 外界环境对道路交通系统元件可靠度影响

外界环境通过影响道路交通系统各元件的可靠度对系统整体的可靠性产生影响.按环境事件对其可靠度的影响程度进行分级,并确定各级事件的影响系数,可用式(8)表示.

$$R' = k_{m,n} R'_0 \quad (8)$$

式中: R' 为具体灾变事件下系统元件的可靠度; $k_{m,n}$ 为具体环境事件对系统元件可靠度的影响系数, m 代表环境类型, n 代表 m 环境类型下的具体级别, $k_{m,n}$ 值目前主要采用贝叶斯专家评判法获取,当积累数据足够时应结合统计资料进行修正; R'_0 为正常状态时系统元件的基本可靠度.如参考文献^[16]将环境温度分为 5 级得相应的可靠度折减系数.

5 应用示例

现以图 6 的路网为例说明所提出的耦合贝叶斯网络的道路交通系统可靠性模型的应用.假定图 6 单元路段 $R3$ 检测到局部雾团,可视距离为 110 m,将相关参数代入图 8 的 USTS 可靠度模型,即可求得 $R3$ 路段中⑥USTS 的可靠度为 0.566.求得图 7 中所有元件的可靠度后,即可利用图 7 的模型计算图 6 路网当时的可靠度为 0.745,上述过程在 GeNIe 软件中可快速实现.

6 结语

(1) 以系统工程理论对道路交通系统进行建模可以清晰地表达系统各要素间的关系,有助于深入理解道路交通安全机理及事故发生机制。

(2) UTS 和 USTS 可靠性模型中各元件的串联连接方式说明了系统的脆弱性,揭示了交通事故易发之深刻机理,这和现实经验是相符的。

(3) STS 可靠性模型和 NTS 可靠性模型以混联方式建立,说明这 2 种系统具有一定的稳健性,个别单元路段交通系统故障一般不会引起上层系统的崩溃,这与经验也是一致的。

(4) 贝叶斯网络克服了道路交通系统可靠性计算的困难,耦合了贝叶斯网络的道路交通系统可靠性模型可为路网安全管理决策服务。

参考文献:

- [1] 高建平. 高速公路运营安全性评价与对策研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2005.
GAO Jianping. Operational safety evaluation and safety improvement strategies of freeway [D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2005.
- [2] 裴玉龙, 程国柱. 高速公路车速离散性与交通事故的关系及车速管理研究[J]. 中国公路学报, 2004(1): 74.
PEI Yulong, CHENG Guozhu. Research on the relationship between discrete character of speed and traffic accident and speed management of freeway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004(1): 74.
- [3] 郭忠印, 方守恩, 刘涛, 等. 道路安全工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
GUO Zhongyin, FANG Shou'en, LIU Tao, et al. Road safety engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [4] Salvatore Cafiso, Ruediger Lamm, Grazia La Cava. Fuzzy model for safety evaluation process of new and old roads[J]. Transportation Research Record, 2004(3): 54.
- [5] 王晓飞. 灾变条件下道路网运营安全管理及应急处置研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2008.
WANG Xiaofei. Research on operation safety management and emergency disposal against disastrous conditions of freeway corridor [D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2008.
- [6] 汪应洛. 系统工程[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
WANG Yingluo. System engineering [M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [7] 茆诗松, 程依明, 濮晓龙. 概率论与数理统计教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
MAO Shisong, CHENG Yiming, PU Xiaolong. A textbook of probability & statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [8] 郭永基. 可靠性工程原理[M]. 北京: 清华大学出版社, Springer 出版社, 2002.
GUO Yongji. Principles of reliability engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press & Springer Press, 2002.
- [9] 张连文, 郭海鹏. 贝叶斯网引论[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
ZHANG Lianwen, GUO Haipeng. Introduction to Bayesian networks[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [10] 刘铁民, 张兴凯, 刘功智. 安全评价方法应用指南[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
LIU Tiemin, ZHANG Xingkai, LIU Gongzhi. Guidelines for application of safety evaluation methods[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [11] 王武宏, 曹琦, 刘东明. 汽车驾驶员操作可靠性分析及评定[J]. 汽车工程, 1994(4): 207.
WANG Wuhong, CAO Qi, LIU Dongming. Analysis and assessment of driver's operation reliability [J]. Automotive Engineering, 1994(4): 207.
- [12] 陈小鸿, 付强, 杨晓芳. 高速公路货运车辆速度下限设定研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007(2): 199.
CHEN Xiaohong, FU Qiang, YANG Xiaofang. Research on setting of freeway lower velocity limit for trucks[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007(2): 199.
- [13] 张殿业, 王武宏, 曹琦, 等. 驾驶员反应能力与最高时速的安全可靠性分析[J]. 中国公路学报, 1998(1): 109.
ZHANG Dianye, WANG Wuhong, CAO Qi, et al. Reliability analysis for response time of drivers with limit speed[J]. China Journal of Highway and Transport, 1998(1): 109.
- [14] Min Z, Sisopiku V P. Relationship between V/C Ratios and accident rates [R]. Washington D C: Transportation Research Record, National Research Council, 1997.
- [15] 陈永胜, 高耀华. 高速公路纵面设计微观事故预测模型研究[J]. 公路交通科技, 2004(2): 5.
CHEN Yongsheng, GAO Yaohua. Study on microcosmic accident-predict model focused on vertical design of expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004(2): 5.
- [16] Sherif Aly, Hassan Yasser, Hassan Y. Impacts of pavement surface temperature and condition on road safety[C]// Annual Conference-Canadian Society for Civil Engineering. Edmonton: [s. n.], 2008: 2800-2808.