

基于道路骨架性的城市道路等级划分方法

叶彭姚¹, 陈小鸿²

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031; 2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 200092)

摘要: 首先在总结现有城市道路分级理论存在的不足基础上, 从道路在路网中承担的结构功能角度指出, 道路骨架性是城市道路分级方法的重要依据. 然后提出了道路骨架性的定义, 采用介数中心度作为定量描述道路骨架性的计算指标, 并建立了依据道路骨架性定量划分道路等级的计算分级法; 最后采用多个城市的现状与规划道路网数据, 比较了计算分级法和传统道路分级方法所得到的道路分级结果的相似程度, 验证了所提出的计算分级法的合理性和可行性.

关键词: 城市道路; 道路骨架性; 道路分级; 道路网结构
中图分类号: U 419.12 **文献标识码:** A

Urban Road Hierarchy Based on Road Arteriality

YE Pengyao¹, CHEN Xiaohong²

(1. School of Traffic and Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This study firstly defines the arteriability of roads as an indicator to describe the relative importance of road in network topology, and uses betweenness centrality to calculate the arteriability of each road. Then a new method of road hierarchy is proposed by quantitatively calculating the arteriability of each road in the network. Finally, the reasonability of this new method is verified by a comparative study of the results of conventional road hierarchy method and this new calculation method.

Key words: urban road; road arteriability; road hierarchy; road network topology

则来构建路网, 进而影响整个城市道路网的结构与功能^[1].《城市道路交通规划设计规范》(GB50220—95)虽然提出城市道路应分为快速路、主干路、次干路和支路四级, 并详细规定了每级道路的各种技术指标, 但并未明确指出城市道路的分级依据, 也未能建立一套定量、客观的道路分级程序. 事实上, 目前施行的国标《道路工程术语标准》(GBJ124—88)、《城市道路交通规划设计规范》(GB50220—95)和部标《城市道路设计规范》(GBJ124—88)甚至对快、主、次、支四级道路的定义都不相同^[2]. 这种对分级标准理解上的差异和缺乏定量的分级程序必然导致在实际的道路分级工作中以主观定性判断为主, 缺乏科学性. 针对上述问题, 国内部分学者对我国的四级道路体系的分级依据进行了阐释. 李朝阳等认为, 国标是按道路在路网中的地位、交通功能以及对沿线建筑物的服务功能等诸多因素进行分级的^[2], 但并未对这些因素的影响作定量分析. 文国玮指出, 国标中城市道路的分级是按城市骨架分级, 所谓城市骨架指道路在城市总体布局中的位置和作用^[3], 但并未对这种“城市骨架性”作进一步的严格定义和定量描述, 进而建立划分道路等级的程序.

因此, 本文首先定义了道路骨架性作为城市道路分级方法的重要依据, 然后提出了定量描述道路骨架性的计算指标和依据道路骨架性定量划分道路等级的计算分级法, 最后通过对多个城市道路网的比较研究, 验证了所提出的城市道路计算分级法的合理性和可行性.

1 道路骨架性的定义

道路骨架性描述的是一条道路与其他道路之间

城市道路分级决定了各级道路的类型、功能及技术标准, 同时也决定了它们之间采用何种衔接原

收稿日期: 2010-06-04

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(50908195); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(SWJTU09BR138, SWJTU09ZT18)

第一作者: 叶彭姚(1980—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为城市道路网规划、交通仿真. E-mail: yepengyao@163.com

通讯作者: 陈小鸿(1961—), 女, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为交通运输系统规划、区域交通线路、公共交通系统规划与设计. E-mail: chenxh@tongji.edu.cn

的相对关系及在整个路网中所占的结构性地位. 与道路的物理特性(如红线、车道数、横断面布置形式等)和使用功能(如交通量、车速等)不同,道路的骨架性并不完全由自身所具有的特性决定^[1]. 道路骨架性虽然与道路的使用功能和物理特性有一定关系,但本质上更为稳定,即只有当路网中道路之间的衔接关系(而不是物理特性和使用功能)发生变化时,道路的骨架性才会发生变化. 因此,用道路的骨架性来划分道路等级最为稳定. 美国的道路功能分级方法指出,道路应依据其提供的交通服务功能(机动性与出入性)进行分级,各级道路建设与运行的技术标准是根据道路准备提供的服务特性来确定的,是道路分级后保障功能的技术措施,而不应成为分级的依据^[4]. S Marshall 指出这种道路功能分级方法表面上是建立在出行距离分级的基础上的,但本质上依据的是道路在路网中的骨架性,因为每条道路的服务功能在很大程度上是由其在路网中的结构功能决定的^[5].

2 道路骨架性的定量描述方法

2.1 道路网拓扑结构分析方法的选择

现有交通网络结构分析方法根据对实际交通网络抽象方式的不同,主要分为原始法(primal approach)和对偶法(dual approach). 原始法是指将交通网络中的节点(如交叉口、空港等)抽象为图中的顶点,将节点之间的连接线(如路段、航线等)抽象为图中的边^[6]. 对偶法是指将道路、公交线路等交通网络中的线状设施抽象为图论中的顶点,将这些线状设施的衔接关系(道路交叉点、公交换乘站等)抽象为图论中的边^[7]. 在分析城市道路网结构时,连续的道路才是实体设施,交叉口与路段只是不同道路交叉时形成的“副产品”. 因此,道路(而不是交叉口)才是组成城市道路网的基本元素. 道路在连贯性、衔接关系上的差异形成了干道和支路,但原始法并不能在本质上区分出道路的这种衔接结构上的差异. 例如,图 1 中路网布局 A 与路网布局 B 的道路衔接关系具有明显的差异,但采用原始法抽象得到的拓扑结构图却完全相同. 而对偶法则保留了交通网络的布局特点和线路之间的空间关系,特别适合于分析以运输线路为核心的网络模式或结构,因此本文在计算道路骨架性时采用对偶法.

2.2 路线的定义与提取方法

本文以“连续的道路中心线”(smoothly

continuous road center-line segments,以下简称为路线(stroke))作为分析路网结构特性的基本单元. 路线是由多条在方向上具有良好的连续性,在道路属性(如路名、宽度、类型等)上具有较好的一致性的路段组成的线性元素,不同的路线在交叉口相交^[8]. 理论上,所有的道路网都可以根据连续性原则分解为独立的路线(见图 2).

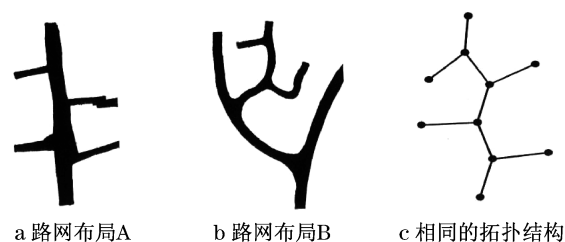


图 1 不同路网布局采用原始法得到相同的拓扑结构

Fig.1 Same primal graph of different road network layouts

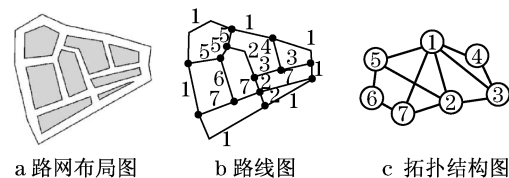


图 2 连续道路中心线法的路网抽象过程示意

Fig.2 Dual graph based on smoothly continuous road center-line segments

大量研究指出,在完全缺少路段属性的情况下,仅根据道路的方向连续性和拓扑关系也能够推断出路线在路网中的相对重要性^[9-10],故本文仅以方向连续性作为路线的提取原则. 对道路网中每一个节点,路线提取程序需要分析与节点相连的边中,哪两条边应该被合并到一起. 由于两条边形成的夹角大小反映了这两条边的方向连续性的好坏,因此最简单的路线提取原则就是判断两条相邻的边(简称边对)的夹角是否大于某一确定的阈值,然后根据夹角值从大到小的顺序将大于确定阈值的边对进行连接. 一旦全部的节点都完成了这样的判断,一组路线就由一系列相互连接的边集组成了. 当全部的边都分别被分配到某一个边集中时(即每一条边都被赋了一个确定的路线编号值),路线建立程序就自动结束^[11].

为了对道路网中每条路线的骨架性进行定量计算,本文以方向连续性为原则,设计了一个基于 Arcgis 的将道路网自动分解为路线的程序 Stroke Analysis 1.0^[12]. 该程序读入 SHP 格式的道路中心线图(见图 3a),根据预先规定的夹角阈值判定相邻

路段是否需要合并,将道路网分解为路线图(见图3b),并输出描述这些路线衔接关系(见图3c)的邻接矩阵表(adjacency matrix)和各条路线的属性统计表等数据,作为计算道路骨架性的基础。



图3 Stroke Analysis 1.0 程序分析过程示意

Fig.3 Analysis process of Stroke Analysis 1.0

2.3 道路骨架性的评价指标

由于道路骨架性反映了一条路线与其他路线的衔接关系及其在整个路网中的相对结构重要性.因此,可以采用描述网络拓扑结构中节点重要性的指标来描述每条路线的骨架性.评价网络中节点重要性的指标主要有3个,即点度中心度(degree centrality)、邻近中心度(closeness centrality)和介数中心度(betweenness centrality).由于网络中两个没有直接相连节点之间的路径需要通过其他节点,因此位于中间的节点对其他节点具有战略上的控制性和影响力,介数中心度描述了一个节点位于网络中其他任意两个节点之间最短路径上的概率,即一个节点在多大程度上位于网络中其他节点的“中间”,易见介数中心度是一个全局性的指标.在基于对偶法抽象后的道路网拓扑结构中,一个点度中心度和邻近中心度均较低的道路(如桥梁或城市组团间道路),可能在路网中起到重要的“中介”和“骨架”作用,即作为整个路网拓扑结构上的“枢纽”,在连通整个路网方面发挥重要作用.因此介数中心度的物理含义与道路骨架性的定义具有一致性,适合作为描述道路骨架性的指标,其计算公式如下:

$$C_i^b = \frac{1}{(N-1)(N-2)} \sum_{\substack{j,k \in N \\ j \neq k; j, k \neq i}} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \quad (1)$$

式中: N 是网络节点数, n_{jk} 是节点 j 与节点 k 之间的最短路径数量, $n_{jk}(i)$ 是节点 j 与节点 k 之间包含了节点 i 的最短路径数量. C_i^b 的取值范围为 $[0,1]$,取1表示图中所有节点间的最短路径都必须通过节点 i ,取0表示没有节点间的最短路径通过节点 i .

3 道路等级结构的定量划分方法

3.1 计算分级法的定义

所谓计算分级法,是指以路线作为划分城市道路等级的基本对象,以路线的道路骨架性作为划分城市道路等级的主要依据,以路线在基于对偶法抽象得到的路网拓扑结构中的介数中心度作为其道路骨架性的计算指标对城市道路的等级进行定量排序和划分的方法.由于路网中每条道路的结构重要性都不相同,导致这些道路的介数中心度值是一系列趋向于连续变化的值,因此计算分级法能够更为准确地描述一条道路在路网结构中的等级差异.

3.2 计算分级法的分析流程

采用计算分级法划分城市道路网的等级包括以下6个主要步骤:

- (1) 准备一张由交叉口和路段组成的城市道路网中心线图(SHP格式).
- (2) 将该道路网中心线图导入路线分析程序 Stroke Analysis 1.0.
- (3) 运行程序 Stroke Analysis 1.0,得到路线图(SHP格式)、描述路线编号、长度、交叉口间距等属性的路线属性表和描述路线衔接关系的路线邻接矩阵表.
- (4) 将邻接矩阵表导入网络分析软件 UCINET 6.0,得到描述路线衔接关系的拓扑图,并计算得到各条路线的介数中心度表.
- (5) 将介数中心度表导入路线属性表中,并与路线图进行关联.
- (6) 将路线图(SHP格式)导入 Arcgis 9.0 中,并根据路线属性表中各条路线的介数中心度值的大小绘制道路网等级结构图.

4 计算分级法与传统分级法相似性比较

4.1 相似性指标的确定

定义道路网总长度为 L_{zong} ,根据传统分级法(即根据国标《城市道路交通规划设计规范》(GB50220—95)定性划分的道路分级方法)将道路网划分为三个等级(由于快速路占道路网总长度的比例通常不超过10%,为简化分析过程,本文将其与主干路合并作为一个等级,统称主要干路,下同),其中主要干路总长度为 L_g^z ,次干路总长度为 L_g^c ,支路总长度为 L_g^{zh} ,其中上标 z, c, zh 分别表示主、次、支;下标 g 表示“规范”.则有

$$L_{\text{zong}} = L_g^z + L_g^c + L_g^{zh} \quad (2)$$

出于规划上的可操作性和管理上的便利性等因素的影响,传统分级法确定的道路等级通常是序数

值,如主、次、支或 1、2、3,每条路段的等级取值只有有限的几种可能.而实际上由于路网中每条道路的结构重要性都不相同,从而导致这些道路的介数中心度值是一系列趋向于连续变化的值.为了能够在传统分级法和计算分级法之间进行对比,必须保证两种方法确定的各级道路总长度基本相同.因此需要将所有路线按介数中心度值从大到小进行排序,并选择恰当的介数中心度阈值 C_{zc}^B 和 C_{czh}^B (下标 zc , czh 分别表示主次,次支),设 L_j^z, L_j^c 和 L_j^{zh} 即是采用本文提出的计算分级法得到的主要干路、次干路和支路的长度,使所有介数中心度值大于等于 C_{zc}^B 的路线总长度值 $L_j^z \approx L_g^z$,所有介数中心度值小于 C_{czh}^B 的路线总长度值 $L_j^{zh} \approx L_g^{zh}$,所有介数中心度值介于 C_{zc}^B 和 C_{czh}^B 之间的路线总长度值 $L_j^c \approx L_g^c$,易知

$$L_{zong} = L_j^z + L_j^c + L_j^{zh} \quad (3)$$

由于传统分级法的基本分析单元是路段,而计算分级法的基本分析单元是路线(由一条路段或多条连续的路段合并而成),因此两种分级方法得到的同一等级的道路总长度通常会存在一定差异.大量实例计算表明,如果这种差异满足 $|1 - L_j^X / L_g^X| \leq 1\%$,其中 X 可代表主、次、支路,其对最终的各级道路相似度的影响小于 1%,可以接受.

城市道路网中所有路段按两种分级方法确定的道路等级不可能完全相同.定义在按计算分级法确定为主干路的路段中,按传统分级法也确定为主干路的路段总长度为 L_{jc}^{gz} ,按传统分级法确定为次干路的路段总长度为 L_{jc}^{gc} ,按传统分级法确定为支路的路段总长度为 L_{jzh}^{gzh} ,显然有

$$L_j^z = L_{jc}^{gz} + L_{jc}^{gc} + L_{jzh}^{gzh} \quad (4)$$

类似地,有

$$L_j^c = L_{jc}^{gz} + L_{jc}^{gc} + L_{jzh}^{gzh} \quad (5)$$

$$L_j^{zh} = L_{jzh}^{gz} + L_{jzh}^{gc} + L_{jzh}^{gzh} \quad (6)$$

为了描述计算分级法确定的每一级道路在多大程度上与传统分级法具有一致性,定义 γ_X 为两种分级方法确定的各级道路的相似度,即

$$\gamma_X = \frac{L_{jX}^X}{L_j^X} \quad (7)$$

式中, X 可代表 z, c, zh .

为了描述计算分级法确定的整个道路网的等级结构在多大程度上与传统分级法具有一致性,定义 γ_3 为两种分级方法确定的三级路网的整体相似度,即

$$\gamma_3 = \frac{L_{jc}^{gz} + L_{jc}^{gc} + L_{jzh}^{gzh}}{L_{zong}} \quad (8)$$

4.2 实际数据的验证

为验证计算分级法的有效性和普遍性,并比较两种分级法在划分现状道路网和规划道路网的道路等级时存在的差异,本文选取了 7 个不同规模、形态的现状和规划城市道路网数据^[12],根据 4.1 中的分析方法计算了两种分级方法的相似性,主要的分析指标见表 1.表中 7 个城市路网的 γ_3 值按道路网长度加权平均值为 74%,且城市道路网规模越大, γ_3 值越高,这说明道路骨架性的确是我国传统道路等级划分方法的主要依据,且计算分级法更适应用于规模较大的城市道路网.表中 4 个现状城市路网的 γ_3 值按道路网长度加权平均值为 69%,3 个规划城市路网 γ_3 值按道路网长度加权平均值为 79%,易见采用两种分级方法划分的规划路网等级的相似度要好于现状路网.这说明传统分级法在划分规划路网的道路等级时,相对较多地依据了道路的骨架性;而在划分现实路网的道路等级时,相对较多地依据了道路的其他特性.例如,受现状道路条件和管理措施的影响,传统分级法将一些按骨架性应划分为主要干路的道路,根据其物理属性(如红线、车道数等)和道路两侧用地属性等因素划分成了次干路或支路.

表 1 多个道路网的道路等级相似度汇总

Tab.1 Road hierarchy similarity of many road networks

路网 编号	路网名称	路网规模/ km	三级路网相似度/%			
			γ_z	γ_c	γ_{zh}	γ_3
1	遵义市区现状道路网	110.2	74	53	35	61
2	眉山市区现状道路网	125.1	67	34	70	61
3	眉山市区规划道路网	351.6	60	43	82	67
4	遵义市区规划道路网	467.1	75	50	81	72
5	成都市区现状道路网	744.2	78	28	80	70
6	沈阳市区现状道路网	1 054.1	79	52	76	70
7	成都市区规划道路网	1 438.4	86	47	92	84

5 结语

传统的分级方法缺少严格的定量评价指标和分级程序,对一条道路等级的确定多依赖于规划人员综合考虑各方面因素后的主观定性判断.由于不同的规划人员在理论认识和实践经验上差异较大,常常导致不同的规划人员对同一道路网给出不同的等级结构划分.而计算分级法以道路骨架性为分级依据,采用介数中心度作为描述道路骨架性的定量指

(下转第 878 页)