

# 基于步行网格的城市轨道交通车站步行可达范围计算

唐小勇, 陈易林, 高志刚, 刘晏霖  
(重庆市交通规划研究院, 重庆 401147)

**摘要:**缓冲区分析、网络分析等计算城市轨道交通车站步行可达范围的常用方法在计算精度、宽敞步行空间效果模拟、适用场景等方面存在不足,特别是支撑规划方案评估能力不足。构建代表城市公共步行空间的步行面,设置不同高程标签区分上下层步行空间并设置连通规则,对立体过街设施、坡道、台阶、信号控制交叉口等特殊区域步行速度进行折减。按照 $0.1'' \times 0.1''$  (经差 $\times$ 纬差)的尺寸划分步行网格,并对网格进行18位编码。提出基于步行网格的搜索算法,以城市轨道交通车站各出入口为起点,搜索给定距离或时间阈值下的最大步行可达范围。以重庆市城市轨道交通车站为例,对现状案例和规划方案进行评估。计算结果显示,受山地地形、干路或小区阻隔等影响,重庆市城市轨道交通车站10 min步行可达范围仅为800 m缓冲区覆盖范围的69%。案例应用验证了该方法可以准确模拟广场、开放小区等宽敞步行空间以及地形高差、城市道路立体交叉口、过街设施的实施效果。

**关键词:**城市轨道交通;步行可达范围;步行网格;网格搜索;网格编码

Calculation of Walking Distance Accessibility Range for Urban Rail Transit Stations Based on Walking Grids

TANG Xiaoyong, CHEN Yilin, GAO Zhigang, LIU Yanlin  
(Chongqing Transport Planning Institute, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** Common methods for calculating the accessible walking distance of urban rail transit stations, such as buffer analysis and network analysis, have limitations in terms of computational accuracy, spacious walking space simulation, scenario applicability, and particularly the capability to support planning scheme evaluations. This paper presents a pedestrian surface that represents urban public walking spaces, assigns elevation tags to distinguish multi-level walking spaces, and defines connectivity rules. Walking speeds are adjusted in specific areas, including pedestrian overpasses, ramps, stairs, and signal-controlled intersections. Walking grids are created with a resolution of  $0.1'' \times 0.1''$  (longitude difference  $\times$  latitude difference) and coded using an 18-digit system. A grid-based search algorithm is proposed, which uses the entrances and exits of urban rail transit stations as starting points to search and determine the maximum accessible walking distance within a given distance or time threshold. Taking Chongqing's urban rail transit stations as a case study, current conditions and planning schemes are evaluated. The results indicate that, due to constraints such as mountainous terrain and barriers posed by arterial roads and residential complexes, the 10-minute accessible walking distance for Chongqing's urban rail transit stations covers only 69% of the area within an 800-meter buffer zone. The application of this method demonstrates its capability to accurately simulate the implementation effect of spacious walking spaces such as plazas and open residential areas, as well as terrain altitude variations, multi-level urban road interchanges, and pedestrian crossing facilities.

**Keywords:** urban rail transit; accessible walking distance; walking grid; grid search; grid encoding

收稿日期: 2023-03-23

基金项目: 自然资源部科技项目“重庆市国土空间规划实施监测网络系统关键技术研发及示范”(2023ZRBSHZ066)

作者简介: 唐小勇(1983—), 男, 湖南武冈人, 博士, 正高级工程师, 研究方向为交通大数据应用, 电子邮箱71780735@qq.com。

## 0 引言

随着大城市轨道交通网络规模持续增长,以“城市轨道交通+步行”为主的绿色集约出行越来越普遍。步行是城市轨道交通重要的接驳方式,例如:北京市城市轨道交通乘客进站前和出站后的步行比例分别为66%和75%<sup>[1]</sup>;重庆市中心城区受山地地形影响,非机动车使用较少,进出站客流中步行比例高达89%。Yang R. R.等<sup>[2]</sup>指出城市轨道交通车站的吸引力随着与车站的距离增加

而衰减,超出一定范围后乘客步行意愿急剧下降,乘客步行至城市轨道交通车站可接受时间不超过12 min、可接受距离不超过1 km。通常取800 m步行距离或者10 min步行时间范围作为城市轨道交通车站合理步行吸引范围<sup>[3]</sup>。在给定时间(距离)阈值下,受道路网络、地形、小区阻隔等因素影响,每个车站真实的步行可达范围可能相差较大。在规划设计阶段,准确评估车站步行可达范围可以有效支撑客流预测,从而合理规划城市轨道交通线网和布设车站。在城市轨道交通建成后,通过扩大步行可达范围能够吸引更多客流,从而提高城市轨道交通运营效益。

表1 城市公共步行空间分类及步行面构建方法

Tab.1 Classification of urban public walking spaces and methods for constructing pedestrian surfaces

名称	定义	步行面构建方法
交通性道路的人行道及人行过街设施	交通量大,不允许行人随意穿越,只能通过人行横道、立体过街设施(人行天桥、人行地道)等过街的道路	取路缘石线与道路红线之间区域、人行横道划线区域、立体过街设施投影区域
生活性道路	交通量不大、无中央分隔、允许行人穿越的部分次(支)道路	取道路红线之间区域
步行街及专用步道	专供行人通行的街道、人行坡道、台阶路等	取步行街或专用步道的道路红线之间区域
临街建筑后退空间	临街建筑后退留出的可供行人通行的空间	取建筑实际后退区域
开放地块内部步行空间	允许行人穿越通行的广场、公园、商业及办公地块、开放式居住小区、医院、大学、体育场馆等	取开放地块内部道路及步行铺装区域,商业地块可包含建筑基底,其余类型地块不含建筑基底

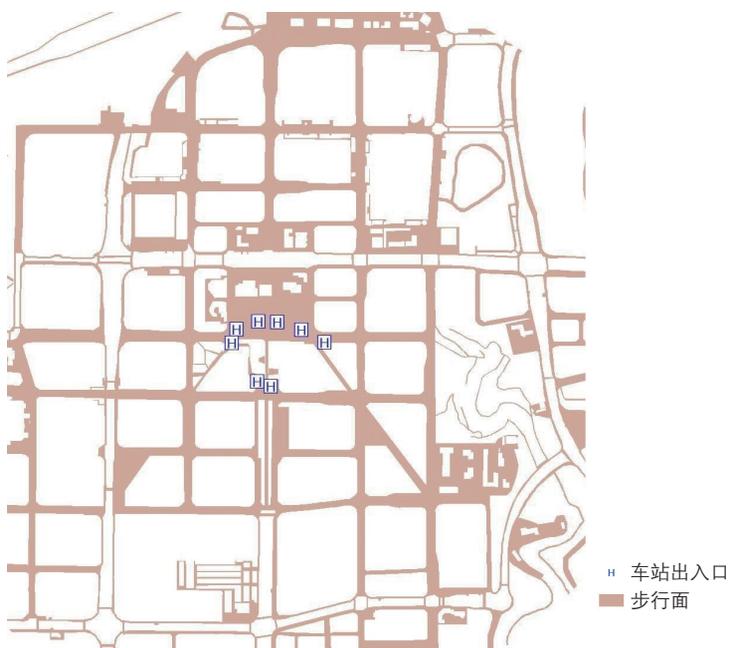


图1 城市轨道交通车站周边区域步行面示意

Fig.1 Illustration of pedestrian surfaces in the surrounding area of urban rail transit stations

计算城市轨道交通车站步行可达范围常用方法包括缓冲区分析法和网络分析法:

1) 缓冲区分析法以城市轨道交通车站为圆心,以给定距离阈值为半径,划定圆形缓冲区作为步行可达范围。该方法标准统一、操作简单、适用范围广,是相关政策、标准中评估公共交通覆盖水平的主要测算方法<sup>[4]</sup>。该方法在城市宏观尺度研究时应用较多,例如:评估澳大利亚墨尔本城市轨道交通车站以公共交通为导向的开发(Transit-Oriented Development, TOD)模式适宜性时,D. Jeffrey等<sup>[5]</sup>采用800 m半径缓冲区作为车站服务范围;评估印度德里城市轨道交通车站步行可达性时,G. R. Bivina等<sup>[6]</sup>也采用了同样的方法;考虑北京方格路网影响,Zhai J. T.等<sup>[7]</sup>对缓冲区分析法做了一些改进,划定1 km×1 km网格,计算网格与最近城市轨道交通车站的曼哈顿距离,评估居住区至城市轨道交通车站的步行便捷度。

2) 网络分析法以城市轨道交通车站或其他设施点为起点,以周边需求点为终点,基于步行网络寻找最短路径,通过反复尝试,确定给定距离或者时间阈值下的最大步行可达范围。例如:华晨等<sup>[8]</sup>在社区商业设施步行可达性评估时,首先构建道路网络,然后借助ArcGIS软件提供的网络分析工具得到各居住小区到社区商业设施的时间;通过建立城市道路网络和公共汽车线网,借助ArcGIS软件,袁红霞等<sup>[9]</sup>生成各人口网格到城市轨道交通车站的步行和公共汽车出行距离,裴玉龙等<sup>[10]</sup>生成公共汽车站分圈层服务范围;借助ArcGIS软件提供的服务区分析工具,N. L. Stoia等<sup>[11]</sup>分别计算得到公园5 min, 10 min, 15 min, 30 min步行和自行车服务范围;评估香港地铁可达性时,He S. Y.<sup>[12]</sup>采

用 ArcGIS 最短路算法计算地块与城市轨道交通车站的步行时间。

随着互联网地图开放应用，公开地图 (OpenStreetMap, OSM)、高德地图、百度地图等平台及数据可以为网络分析法的应用提供便捷的分析服务，免除用户开展烦琐的资料收集及网络建模工作。例如：申犁帆等<sup>[13]</sup>以城市轨道交通车站的几何中点为中心，每隔 10 m 设置步行点阵，基于高德地图应用程序编程接口 (Application Programming Interface, API) 获取每个点阵到达车站出入口的最短时间，以此确定步行可达范围；戴智等<sup>[14]</sup>以高德地图 API 为步行路径和时耗的计算基础，分析得到深圳市各城市轨道交通车站 10 min 步行可达范围；张俊杰等<sup>[15]</sup>通过百度地图 API 计算每个小区建筑物至公共汽车站的最短步行时耗，用于分析公共汽车站对小区的覆盖率；M. Tarkowski 等<sup>[16]</sup>基于 OSM 数据集及 QGIS 软件计算每个居住区到公共交通车站的步行时间，用于评估公共交通服务覆盖的人口。

缓冲区分析法虽然简单，但由于不考虑真实步行路径，无法反映断头路、干路分隔、地形高差、封闭小区阻隔等影响因素，误差大，不适用于中微观精细化评估。网络分析法需要构建步行网络，通常将步行空间抽象为网络节点连接线，将所有乘客的步行流线限定至连接线代表的单一路径。当存在步行广场、开放小区、步行街等宽敞步行空间时，不同方向(可以用进入位置和离开位置的连线表达)乘客有不一样的流线，采用单一路径与真实情况不符。当步行起终点位于网络节点(边)之外时，需要先将起终点投影到最近的边，再进行路径搜索和距离计算。由于受到建筑、围墙阻断可能需要绕行，使得实际接入网络的距离超过投影距离，导致总的步行距离被低估。此外，基于互联网地图的网络分析法通常只适用于评估现状，难以支撑规划方案的测试评估。

鉴于此，本文提出一种基于步行网络的城市轨道交通车站步行可达范围计算方法，将所有步行空间抽象为步行面，通过划分步行网格并对网格进行编码，采用基于网络的搜索算法计算步行可达范围。该方法综合考虑了地形高差、道路坡度、过街设施等影响因素，可以准确地模拟公园、广场、开放小区、步行通道、人行出入口等实施效果，得到城市轨道交通车站真实的步行可达范围，

既可用于现状建成环境评估，也可用于规划方案测试评估。

## 1 步行空间建模

### 1.1 步行面构建

步行空间指供行人穿越通行的物理空间。城市公共步行空间可以分为 5 类：交通性道路的人行道及人行过街设施、生活性道路、步行街及专用步道、临街建筑后退空

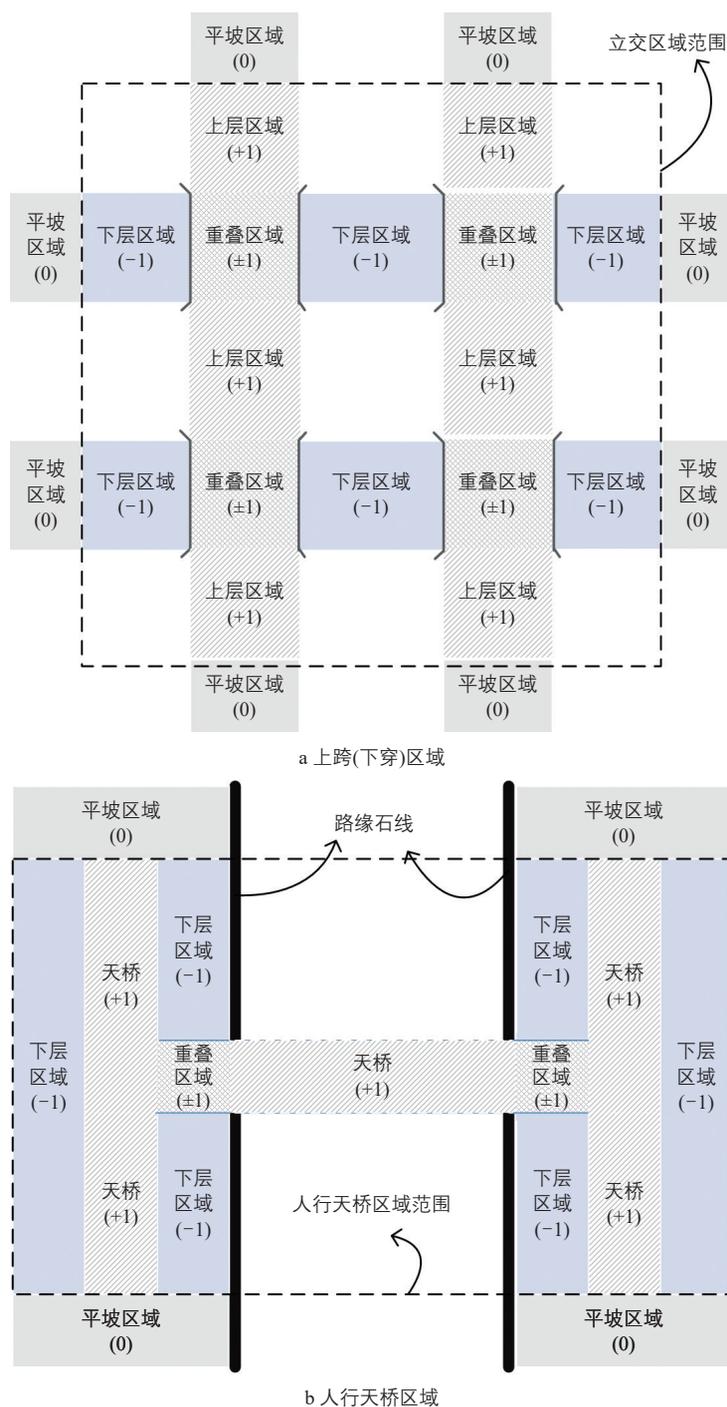


图2 城市道路立交区域高程设置示意

Fig.2 Illustration of elevation settings for urban road interchange areas

间、开放地块内部步行空间。借地理信息软件,根据每一类步行空间的投影制作步行面(见表1)。对人行坡道及台阶路、人行横道、立体过街设施、多层人行空间上下层及重叠区域单独制作步行面并进行标记,以便

设置不同的高程标签和步行速度折减系数。城市轨道交通车站周边区域步行面示意图1。

表2 坡道投影面步行速度和折减系数

Tab.2 Walking speed and reduction factors for ramp projection surfaces

类型	坡度值/%	坡面步行速度 <sup>[19]</sup> /(m·s <sup>-1</sup> )	坡道投影面步行速度/(m·s <sup>-1</sup> )	步行速度折减系数	
坡道	平坡	0~3.5	1.30	1.30	1.00
	缓坡	>3.5~8.0	1.01	1.01	0.78
	中缓坡	>8.0~23.0	0.90	0.90	0.69
	中坡(梯道)	>23.0~33.0	0.80	0.76	0.58
	陡坡(梯道)	>33.0~45.0	0.68	0.62	0.48
人行天桥和人行地道	楼梯	≤50.0	0.57	0.51	0.39
	电扶梯	<30.0	0.75	0.72	0.55
		30.0~35.0	0.50	0.47	0.36

表3 信号控制交叉口行人过街步行速度和折减系数

Tab.3 Pedestrian crossing speeds and reduction factors at signal-controlled intersections

车道数	人行横道长度/m	折减前的行人过街步行速度/(m·s <sup>-1</sup> )	红灯平均等待时间/s	折减后的行人过街步行速度/(m·s <sup>-1</sup> )	步行速度折减系数
2车道 (一次过街)	8	1.0	45	0.15	0.12
4车道 (一次过街)	16	1.0	45	0.26	0.20
6车道 (二次过街)	24	1.0	135	0.15	0.12
8车道 (二次过街)	32	1.0	135	0.19	0.15

### 1.2 高程及连通规则设置

城市道路立体交叉口(以下简称“立交”)区域通常存在上下层相互独立的步行空间,其平面投影相互重叠,但不直接连通。为了真实反映多层空间关系,将步行空间划分为平坡区域、上层区域、下层区域、重叠区域。通过高程标签描述上下层相对关系,设置平坡区域高程为0,上层区域高程为+1,下层区域高程为-1,重叠区域高程为±1。定义同高程的相邻区域步行空间可以连通(包括0与0、1与1、-1与-1),平坡区域可以与上下层分别连通(包括0与+1、0与-1),重叠区域的上下层步行空间不直接连通(即+1与-1不连通)。典型立交上跨(下穿)区域的高程标签设置见图2a,人行天桥区域高程标签见图2b(同理可设置人行地道区域高程标签)。

### 1.3 步行速度折减

除了受乘客身体素质(年龄、性别、健康度)影响外,步行速度还受坡度、交通信号灯、人流密度、占道停放车辆等因素影响。成年人平坡自由行走步行速度约1.0~1.4 m·s<sup>-1</sup>[17],受到外部干扰时步行速度会有所下降,例如在道路交叉口受到人群聚集、车辆干扰等影响时步行速度下降至约1.01~1.26 m·s<sup>-1</sup>[18]。为了表征不同区域步行速度的差异,针对人行天桥和人行地道、人行坡道和台阶路、信号控制交叉口行人过街等特殊区域,在平坡步行速度基础上进行折减。坡道投影面步行速度计算公式为:

$$v_p = v_s / \sqrt{1 + \sigma^2} \quad (1)$$

式中:  $v_p$  为坡道投影面步行速度/(m·s<sup>-1</sup>);  $v_s$  为坡面步行速度/(m·s<sup>-1</sup>);  $\sigma$  为坡度值/%。取坡道投影面步行速度与平坡自由行走步行速度(取1.3 m·s<sup>-1</sup>)的比值为坡道投影面步行速度折减系数(见表2)。

综合考虑行人等待时间,信号控制交叉口行人过街步行速度计算公式为:

$$v_c = v_r / (1 + v_r w / s) \quad (2)$$

式中:  $v_c$  为折减后的行人过街步行速度/(m·s<sup>-1</sup>);  $v_r$  为折减前的行人过街步行速度/(m·s<sup>-1</sup>);  $w$  为红灯平均等待时间/s;  $s$  为行人横道长度/m。取折减后的行人过街步行速度与平坡自由行走步行速度(取1.3 m·s<sup>-1</sup>)的

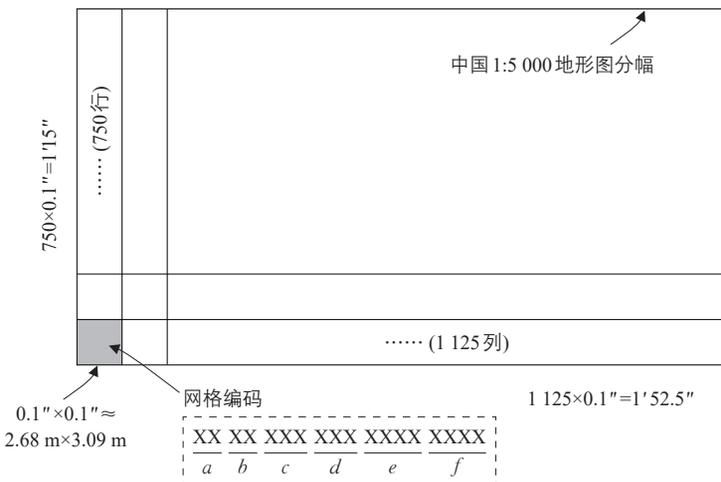


图3 基于1:5 000地形图分幅的步行网格划分

Fig.3 Division of walking grids based on a 1:5,000 topographic map

比值为信号控制交叉口行人过街步行速度折减系数。本文中折减前的行人过街步行速度取  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，红灯平均等待时间取  $45 \text{ s}$  (二次过街为  $135 \text{ s}$ )，信号控制交叉口行人过街步行速度和折减系数见表3。

## 2 步行网络构建

### 2.1 网格划分及编码

以中国 1:5 000 地形图分幅<sup>[20]</sup> (经差  $1' 52.5''$ ，纬差  $1' 15''$ ) 为基础划分网格。如图3所示，按照经差  $0.1''$ 、纬差  $0.1''$  将每幅地图划分为 750 行、1 125 列，共计 843 750 个网格。不同纬度地区的网格投影大小有所不同，北纬  $30^\circ$  地区网格尺寸约为  $2.68 \text{ m} \times 3.09 \text{ m}$ 。定义步行空间投影面所覆盖的网格即为步行网格。针对立交区域，分别提取重叠区域、上层区域、下层区域对应的步行网格，设置相应的高程标签。针对步行速度需要折减的区域，分别提取步行网格，按类型设置步行速度折减系数。定义高程标签不为 0 或步行速度折减系数不为 1 的步行网格为特殊步行网格。

采用 18 位网格编码。1~4 位为网格所在的国家 1:1000 000 地形图图幅编号，其中  $a$  为行号 (数字码)， $b$  为列号， $a$  或  $b$  不足 2 位时左边用 0 补齐。5~10 位为网格所在的 1:5 000 地形图图幅编号，其中  $c$  为行号， $d$  为列号， $c$  或  $d$  不足 3 位时左边用 0 补齐。11~18 位为网格在 1:5 000 地形图分幅中的行列号，其中  $e$  为行号， $f$  为列号， $e$  或  $f$  不足 4 位时左边用 0 补齐。计算公式为：

$$a = [\varphi/4^\circ] + 1, \quad (3)$$

$$b = [\lambda/6^\circ] + 31, \quad (4)$$

$$c = 4^\circ/1'15'' - [(\varphi - 4^\circ(a-1))/1'15''], \quad (5)$$

$$d = [(\lambda - 6^\circ(b-31))/1'52.5''] + 1, \quad (6)$$

$$e = 1'15''/0.1'' - [(\varphi - 4^\circ(a-1) - 1'15''(192-c))/0.1''], \quad (7)$$

$$f = [(\lambda - 6^\circ(b-31) - 1'52.5''(d-1))/0.1''] + 1, \quad (8)$$

式中： $\varphi$  为网格左下角的纬度； $\lambda$  为网格左下角的经度， $[ ]$  为向下取整运算。

### 2.2 相邻网格编码计算

快速求解相邻网格编码是网格搜索的前提。设当前网格编码为  $g_i$ ，8 个相邻网格编

码  $g_j (j=1, 2, \dots, 8)$  的计算方法如下：

1) 从网格编码中提取网格行列号。依次截取网格编码  $g_i$  的第 1~2，3~4，5~7，8~10，11~14 和 15~18 位字符，解析得到网格行号  $m(a, c, e_i)$  (由三级行号组成) 与列号  $n(b, d, f_i)$  (由三级列号组成)，简记为  $(m_i, n_i)$ 。

2) 对行列号  $(m_i, n_i)$  进行偏移得到相邻网格的行列号及编码。记  $m_i \pm 1$  为向北(南)偏移 1 行， $n_i \pm 1$  表示向东(西)偏移 1 列。8 个相邻网格行列偏移规则见图 4，偏移后的行列号计算规则见表 4。

## 3 基于步行网络的可达范围搜索

### 3.1 变量定义及初始化

定义  $W = \{g_i\}$  为步行网格集合， $S$  为特殊步行网格集合， $s_i(g_i, h_i, r_i)$  为集合  $S$  中第  $i$  个网格的标号， $P$  为待遍历的网格集合，

西北方向 ( $m_i + 1, n_i - 1$ )	正北方向 ( $m_i + 1, n_i$ )	东北方向 ( $m_i + 1, n_i + 1$ )
正西方向 ( $m_i, n_i - 1$ )	当前网格 ( $m_i, n_i$ )	正东方向 ( $m_i, n_i + 1$ )
西南方向 ( $m_i - 1, n_i - 1$ )	正南方向 ( $m_i - 1, n_i$ )	东南方向 ( $m_i - 1, n_i + 1$ )

图4 相邻网格行列号偏移规则

Fig.4 Offset rules for numbering adjacent grid rows and columns

表4 相邻网格偏移后的行列号计算规则

Tab.4 Calculation rules for row and column numbers after adjacent grids offset

偏移方向	偏移规则	行列号计算
向北偏移一行	$m_j = m_i + 1$	① $e_j = e_i + 1$ ;
		② 若 $e_j > 750$ ，则 $e_j = e_j \% 750$ ， $c_j = c_i + 1$ ;
		③ 若 $c_j > 192$ ，则 $c_j = c_j \% 192$ ， $a_j = a_i + 1$
向南偏移一行	$m_j = m_i - 1$	① $e_j = e_i - 1$ ;
		② 若 $e_j \leq 0$ ，则 $e_j = 750$ ， $c_j = c_i - 1$ ;
		③ 若 $c_j \leq 0$ ，则 $c_j = 192$ ， $a_j = a_i - 1$
向东偏移一列	$n_j = n_i + 1$	① $f_j = f_i + 1$ ;
		② 若 $f_j > 1125$ ，则 $f_j = f_j \% 1125$ ， $d_j = d_i + 1$ ;
		③ 若 $d_j > 192$ ，则 $d_j = d_j \% 192$ ， $b_j = b_i + 1$
向西偏移一列	$n_j = n_i - 1$	① $f_j = f_i - 1$ ;
		② 若 $f_j \leq 0$ ，则 $f_j = 1125$ ， $d_j = d_i - 1$ ;
		③ 若 $d_j \leq 0$ ，则 $d_j = 192$ ， $b_j = b_i - 1$

注：% 为取余数运算。

$R$  为遍历过的网格集合,  $p_i(g_i, h_i, r_i, l_i, t_i, k_i)$  (记为  $p_i$ ) 为集合  $P$  或  $R$  中的第  $i$  个网格的标号, 其中  $g_i$  为第  $i$  个网格的网格编码,  $h_i$  为第  $i$  个网格的高程,  $r_i$  为第  $i$  个网格的步行速度折减系数,  $l_i$  为第  $i$  个网格步行至最近城市轨道交通车站出入口的距离/m,  $t_i$  为第  $i$  个网格步行至最近城市轨道交通车站出入口的时间/s,  $k_i$  为距第  $i$  个网格最近的城市轨道交通车站出入口编号。

设城市轨道交通车站有  $N$  个出入口, 根据每个出入口坐标依次提取对应的步行网格  $i(i=1, 2, \dots, N)$ , 取  $h_i=0$ ,  $r_i=1$ ,  $l_i=0$ ,  $t_i=0$ ,  $k_i=i$ , 生成各出入口网格标号  $p_i(g_i, 0, 1, 0, 0, i)$ , 将  $p_i$  同时加入集合  $P$  和集合  $R$ 。

### 3.2 步行可达范围搜索

以城市轨道交通车站各出入口步行网格为起点, 遍历搜索给定时间或距离阈值下的步行可达范围, 算法流程见图5, 搜索步骤如下。

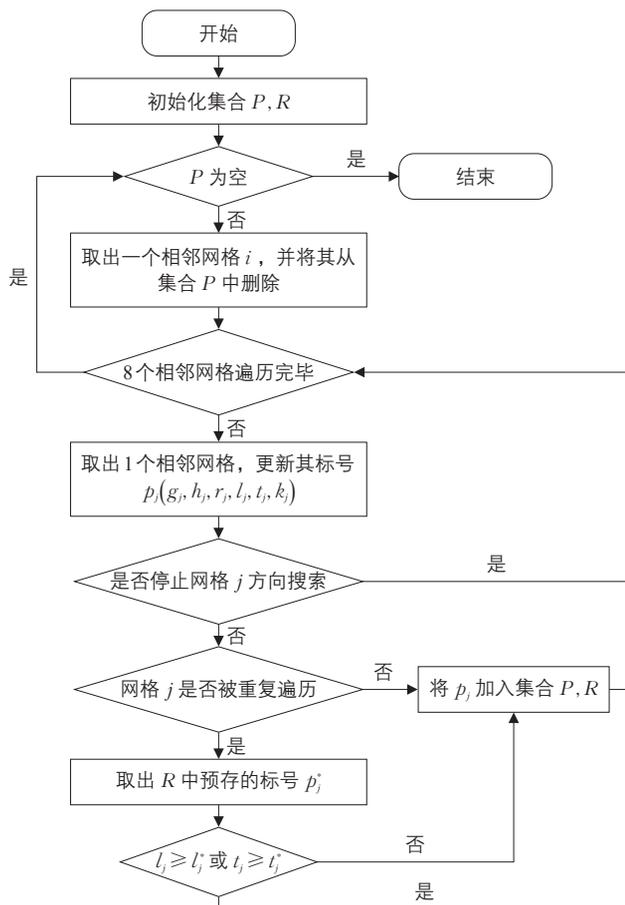


图5 基于步行网格的城市轨道交通车站步行可达范围算法流程  
Fig.5 Algorithm flowchart for calculating accessible walking distance of urban rail transit stations based on walking grids

1) 判断集合  $P$  是否为空。若是, 则结束遍历。若否, 则从  $P$  中取一个网格  $i$ , 并将其从集合  $P$  中删除。根据网格  $i$  的编码  $g_i$ , 计算 8 个相邻网格  $j$  的编码  $g_j$ , 其中  $j=1, 2, 3, \dots, 8$ 。

2) 判断 8 个相邻网格是否遍历完毕。若是, 返回步骤 1)。若否, 取出 1 个相邻网格  $j$ , 更新网格标号  $p_j(g_j, h_j, r_j, l_j, t_j, k_j)$  (简记为  $p_j$ ), 具体规则如下:

①  $h_j, r_j$  更新规则。判断集合  $S$  是否包含编号为  $g_j$  的网格。若不包含, 则取默认值  $h_j=0, r_j=1.0$ 。若包含, 则从标号  $s_j(g_j, h_j, r_j)$  中取出网格的高程值  $h_j$  和步行速度折减系数  $r_j$ 。若高程值  $h_j=\pm 1$ , 表明网格位于立交重叠区域, 需要进一步基于步行路径动态确定网格高程。若  $h_j=+1$ , 表明由上层步行至重叠区域, 取  $h_j=+1$ 。若  $h_j=-1$ , 表明从下层步行至重叠区域, 取  $h_j=-1$ 。

②  $l_j, t_j, k_j$  更新规则。 $l_j=l_i+\Delta_i, t_j=t_i+\Delta_i/(vr_j), k_j=k_i$ , 其中  $\Delta_i$  为网格步长/m,  $v$  为投影面步行速度/( $m \cdot s^{-1}$ )。若  $j$  位于  $i$  的正东或正西方向,  $\Delta_i$  取网格水平边长度/m; 若  $j$  位于  $i$  的正南或正北方向,  $\Delta_i$  取网格垂直边长度/m; 若  $j$  位于  $i$  的东北、西北、东南、西南方向,  $\Delta_i$  取网格对角线长度/m。

3) 判断是否停止相邻网格  $j$  方向的搜索。若是, 则返回步骤 2), 否则转步骤 4)。判断规则如下:

若  $g_j \notin W$ , 表明网格  $j$  已经超出步行空间范围, 停止网格  $j$  方向搜索;

若  $|h_j - h_i| > 1$ , 表明网格  $j$  与  $i$  位于不连通的上下高程层, 停止网格  $j$  方向搜索;

若  $l_j > l_{max}$  或者  $t_j > t_{max}$ , 表明网格  $j$  步行至城市轨道交通车站出入口的距离或者时间超出阈值, 停止网格  $j$  方向搜索。

4) 判断相邻网格  $j$  是否被重复遍历。若集合  $R$  中不包含编号为  $g_j$  的网格, 表明网格  $j$  被首次遍历, 将标号  $p_j$  同时加入集合  $P$  和集合  $R$ , 返回步骤 2)。若集合  $R$  中包含编号为  $g_j$  的网格, 表明网格  $j$  此前已经被遍历, 记  $j$  在集合  $R$  中预存的标号为  $p_j^*(g_j, h_j^*, r_j^*, l_j^*, t_j^*, k_j^*)$  (简记为  $p_j^*$ )。若  $l_j \geq l_j^*$  或者  $t_j \geq t_j^*$  则停止相邻网格  $j$  方向的搜索,

直接返回步骤2); 若  $l_j < l_j^*$  或者  $l_j < l_j^*$ , 则从集合  $R$  中删除  $p_j^*$ , 然后将标号  $p_j$  同时加入集合  $P$  和集合  $R$ , 返回步骤2)。

遍历结束后, 集合  $R$  中网格覆盖的区域即为步行可达范围, 根据网格的标号得到网格与最近城市轨道交通车站出入口的步行距离、步行时间、最近出入口的编号。

## 4 案例应用

### 4.1 现状案例评估

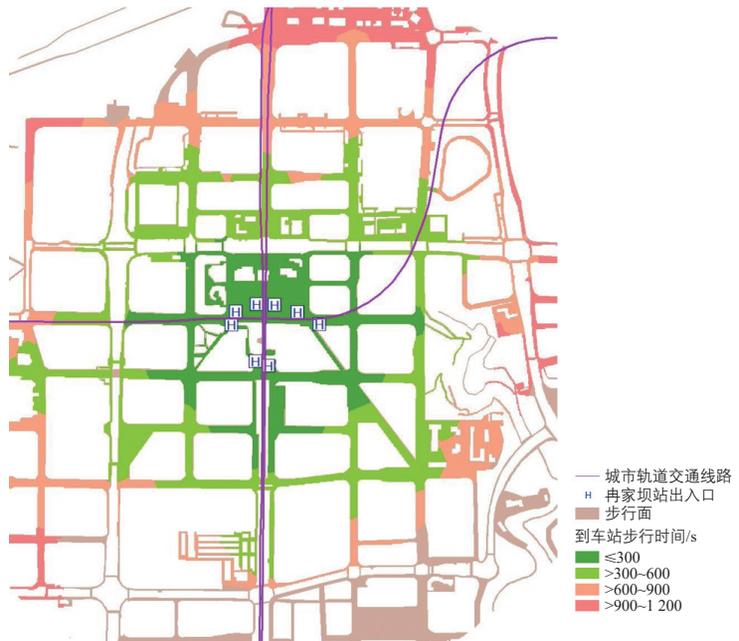
以重庆市地铁冉家坝站为例进行现状评估。该车站为地下车站, 有地铁6号线、5号线、环线3条线路经过, 共设置8个出入口。构建以车站为中心约1.2 km半径范围内的步行面, 针对立交、人行天桥和人行地道、信号控制交叉口行人过街等特殊区域制作步行面, 设置步行速度折减系数和高程标签。按照尺寸  $0.1'' \times 0.1''$  (经差 $\times$ 纬差)划分网格, 并对网格进行编码, 以8个出入口为起点开展网格搜索。遍历结束后得到车站步行可达范围及每个网格与最近出入口的步行距离和步行时间。冉家坝站5 min和10 min步行可达范围见图6a。

不考虑车站周边地块内部步行距离(时间), 取地块开口所在网格至最近车站出入口的步行距离(时间)对地块属性进行赋值。当地块存在多个开口时, 取离车站最近开口; 当地块为全开放地块时, 取地块边界上距离车站最近点作为开口。冉家坝站周边地块至车站步行时间分布见图6b。

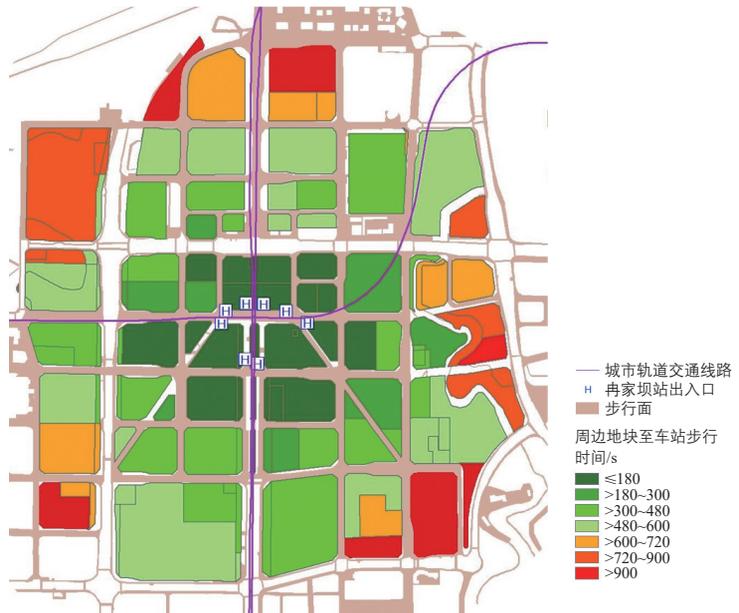
采用缓冲区分析法, 取800 m半径缓冲区作为步行可达范围, 则车站覆盖用地面积203 hm<sup>2</sup>。按照本文提出的网格搜索算法, 取10 min作为时间阈值, 则车站覆盖用地面积148 hm<sup>2</sup>, 约为缓冲区分析法计算结果的73%。缓冲区分析法计算结果明显大于城市轨道交通车站实际服务范围, 可能造成客流预测值或者其他指标偏大。选取车站周边33个地块, 调查从各地块开口步行至最近车站出入口的时间, 与网格搜索算法计算结果进行对比。结果显示, 实测结果与计算结果平均误差为24 s, 相对误差为10%, 表明本文方法能够较为准确地分析车站真实的步行可达范围。

对截至2022年末重庆市240个现状城市轨道交通车站进行评估, 按照缓冲区分析法得到800 m半径缓冲区内用地比例为29.2%(理

想值), 而按照本文提出的网格搜索算法得到城市轨道交通车站10 min真实步行可达范围内用地比例为20.1%(约为理想值的69%), 人口比例为40.5%。分析结果表明, 受山地地形不利条件影响重庆市城市轨道交通系统服务范围覆盖明显低于理想值, 从而导致城市轨道交通客运强度偏低, 这也表明优化提升车站周边步行接驳系统不仅具有较大潜力空间, 同时也是盘活城市轨道交通资产和发挥投资效益的有效手段。



a 以车站为中心的步行等时圈



b 周边地块至车站步行时间分布

图6 重庆市地铁冉家坝站步行可达范围

Fig.6 Walking distance accessibility range of the Ranjiaba Subway Station in Chongqing

#### 4.2 规划案例评估

基于本文提出的网格搜索算法可以对增加城市轨道交通车站出入口数、调整出入口布局、调整地块开口布局、开放封闭小区、增加专用步道等各种规划方案开展效果评估。以重庆地铁6号线刘家坪站为例，车站北侧大片居住区步行至车站绕行距离远，在北侧公园内规划新增跨越水体的步行桥及克服高差的步行坡道(见图7)。评估结果显示，方案实施后北侧居住区步行至车站距离缩短1 000 m以上、步行时间节省约10 min，约8 000个居民受益。

#### 4.3 应用讨论

本文提出步行可达范围的评估方法可以推广到计算公共汽车站、社区医院、小学、幼儿园、超市等公共服务设施的服务范围和优势竞争区域。只需要将城市轨道交通车站出入口替换成各类公共服务设施地块开口，根据设施服务要求设置不同的时间阈值(如

5 min, 10 min, 15 min)，便可以得到服务设施真实的步行可达范围，从而评估“15分钟生活圈”<sup>[21-22]</sup>的建设成效，即居民步行15 min内可获取的居住、工作、购物、教育、医疗、娱乐等城市功能的机会。若输入多个同类型服务设施，可能出现步行网格同时被邻近多个设施服务的情形，此时将网格归入步行距离最近的设施，从而输出多个设施的优势竞争范围。

#### 5 结束语

本文提出一种基于步行网格精确计算城市轨道交通车站步行可达范围的方法，区别于缓冲区分析法和网络分析法，该方法综合考虑了地形高差、道路坡度、过街设施等影响，能够较好地模拟公园、广场、开放小区等宽敞步行空间的实施效果，既可用于现状建成环境评估，也可用于规划情景方案测试评估，并且可以推广到城市轨道交通以外的

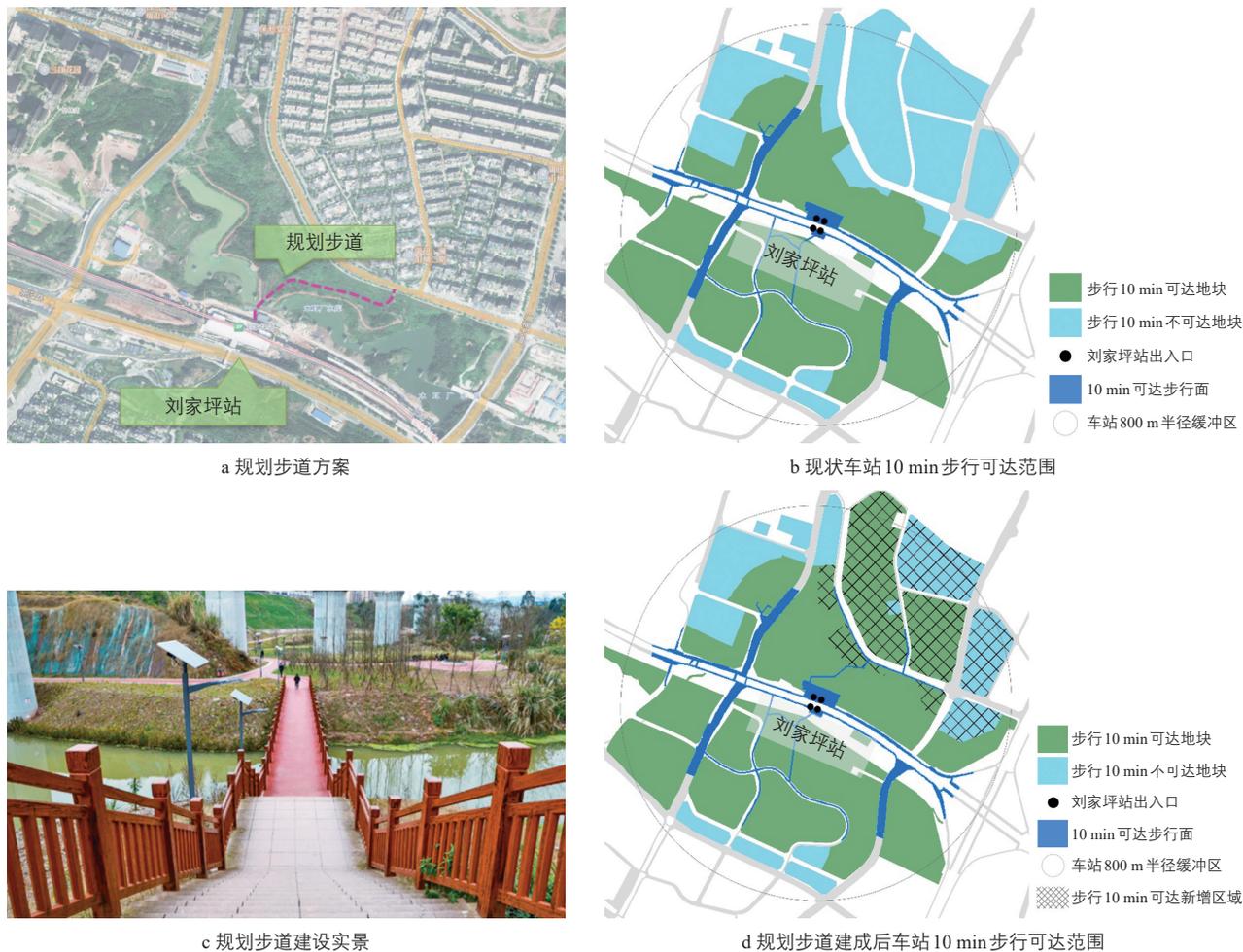


图7 重庆市地铁刘家坪站规划步道方案评估

Fig.7 Evaluation of the walkway planning scheme for the Liujiaping Subway Station in Chongqing

各类公共服务设施评估。

本文按照 $0.1'' \times 0.1''$  (经差 $\times$ 纬差)划分网格, 单个网格尺寸(北纬 $30^\circ$ 地区)约 $2.68\text{ m} \times 3.09\text{ m}$ , 基本能满足街区尺度分析精度要求。若有更精细的分析要求, 可以缩小网格尺寸并修改网格编码, 但网格搜索运算量会呈平方倍数增加。反之, 可以扩大网格尺寸, 减少网格搜索运算量。

案例分析结果表明, 由于受山地地形、干路或小区阻隔等影响, 重庆市城市轨道交通车站实际服务范围仅为理想值的69%, 明显低于理想范围。下一步可以基于精确的步行可达范围计算, 优化城市轨道交通客流预测、城市轨道交通网络覆盖人口和用地评估、车站一体化综合开发范围划定、车站周边步行系统规划设计等工作, 提高分析准确性。

参考文献:

References:

- [1] 岳芳, 毛保华, 陈团生. 城市轨道交通接驳方式的选择[J]. 都市轨道交通, 2007, 20(4): 36-39.  
YUE F, MAO B H, CHEN T S. Study on the choice of access modes to urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2007, 20(4): 36-39.
- [2] YANG R R, YAN H, XIONG W, et al. The study of pedestrian accessibility to rail transit stations based on KLP model[J]. Procedia social and behavioral sciences, 2013, 96: 714-722.
- [3] 王淑伟, 孙立山, 荣建. 北京市轨道站点吸引范围研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(3): 183-188.  
WANG S W, SUN L S, RONG J. Catchment area analysis of Beijing transit stations[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2013, 13(3): 183-188.
- [4] 杜光远, 谭桂菲. 基于路径规划数据的公共交通站点覆盖水平评价方法[J]. 交通运输研究, 2020, 6(2): 68-75.  
DU G Y, TAN G F. Evaluation method of public transport station coverage level based on path planning data[J]. Transport research, 2020, 6(2): 68-75.
- [5] JEFFREY D, BOULANGÉ C, CORTI B G, et al. Using walkability measures to identify train stations with the potential to become transit oriented developments located in walkable neighbourhoods[J]. Journal of transport geography, 2019, 76: 221-231.
- [6] BIVINA G R, GUPTA A, PARIDA M. Walk accessibility to metro stations: an analysis based on meso- or micro-scale built environment factors[J]. Sustainable cities and society, 2020, 55: 102047.
- [7] ZHAI J T, WU W J, YUN Y W, et al. Travel satisfaction and rail accessibility[J]. Transportation research part D: transport and environment, 2021, 100: 103052.
- [8] 华晨, 周学文, 李咏华, 等. 社区商业设施空间步行可达性评价及布局优化: 以绍兴市三区为例[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(2): 368-378.  
HUA C, ZHOU X W, LI Y H, et al. Spatial walking accessibility evaluation and layout optimization of community commercial facilities: the case of Shaoxing[J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2022, 56(2): 368-378.
- [9] 袁红霞, 徐菱, 严余松, 等. 基于改进两步移动搜索法的轨道交通接驳可达性分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(4): 113-119.  
YUAN H X, XU L, YAN Y S, et al. Accessibility to urban rail transit by multiple modes based on enhanced two-step floating catchment area method[J]. Journal of transportation systems engineering and information technology, 2022, 22(4): 113-119.
- [10] 裴玉龙, 潘恒彦, 马部珍. 基于GIS的城市公共汽车站可达性研究[J]. 城市交通, 2021, 19(1): 112-120.  
PEI Y L, PAN H Y, MA B Z. Accessibility of urban bus stops based on GIS[J]. Urban transport of China, 2021, 19(1): 112-120.
- [11] STOIA N L, NIȚĂ M R, POPA A M, et al. The green walk: an analysis for evaluating the accessibility of urban green spaces[J]. Urban forestry & urban greening, 2022, 75: 127685.
- [12] HE S Y. Regional impact of rail network accessibility on residential property price: modelling spatial heterogeneous capitalisation effects in Hong Kong[J]. Transportation research part A: policy and practice, 2020, 135: 244-263.

(下转第4页)