引文格式:王小龙,闫浩文,李精忠,等.微地图辅助寻路的方向-距离模型构建与表达[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(2):380-390.DOI:10.13203/j.whugis20240072

Citation: WANG Xiaolong, YAN Haowen, LI Jingzhong, et al. Construction and Representation of a Direction-Distance Model for WeMap Assisted Wayfinding[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(2): 380-390. DOI: 10.13203/j.whugis20240072

微地图辅助寻路的方向-距离模型构建与表达

王小龙[1,2] 闫浩文[1,3,4,5] 李精忠[3,4,5] 颉耀文[1,2] 王 卓[6]
马文骏[3,4,5] 杨绮丽[3,4,5]

1 兰州大学资源环境学院,甘肃 兰州,730000
2 西部环境教育部重点实验室,甘肃 兰州,730000
3 兰州交通大学测绘与地理信息学院,甘肃 兰州,730070
4 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心,甘肃 兰州,730070
5 甘肃省测绘科学与技术重点实验室,甘肃 兰州,730070
6 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

摘 要:针对现有微地图辅助用户寻路的算法或模型未充分考虑辅助寻路的方向、距离等其他要素,致使在寻路过程中缺失关键信息的问题,构建了一种方向-距离模型(direction-distance model, DDM)来解决微地图辅助寻路时无法满足微地图特点(微内容)的问题。首先,描述了辅助寻路过程中符合微内容特点的表达要素:方向和距离,在微地图中给出了符合微内容特点的表现形式;然后,针对路径数据的构成要素,通过构造方位角计算函数实现对路径数据的定量描述与建模,再依托八方向锥形模型对量化结果进行定性描述;最后,设计路径距离的计算方法,结合欧氏距离分别定义路段和节段的长度计算函数,并基于求和函数算出路径的总距离。结果表明,相比于现存的方向关系计算模型,DDM能够有效避免计算冗余;相比于最短路径和基于地标权重的计算模型,DDM能定量和定性描述空间方向关系,还能在用户寻路的动态过程中提供缺失的方向和距离信息。

关键词:微地图;辅助寻路;空间方向关系;欧氏距离
中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-06-08
DOI:10.13203/j.whugis20240072 **文章编号**:1671-8860(2026)02-0380-11

Construction and Representation of a Direction-Distance Model for WeMap Assisted Wayfinding

WANG Xiaolong[1,2] *YAN Haowen*[1,3,4,5] *LI Jingzhong*[3,4,5] *XIE Yaowen*[1,2] *WANG Zhuo*[6]
MA Wenjun[3,4,5] *YANG Qili*[3,4,5]

1 College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China
2 Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou 730000, China
3 Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China
4 National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China
5 Key Laboratory of Science and Technology in Surveying & Mapping, Gansu Province, Lanzhou 730070, China
6 School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives:** Digital media and sensing technologies have created new ways to present maps. WeMaps have grown quickly because they are easy to make and easy to share. They use microcontent and offer only what most users need. Many people now rely on them in indoor and outdoor settings. Yet the support for wayfinding remains weak. Direction cues are often vague and distance cues are often absent. Users with a

基金项目:国家自然科学基金重点项目(42430108);国家自然科学基金面上项目(42371463,42271454);国家自然科学基金重大项目(42394063);甘肃省联合科研基金重大项目(24JRRA848);兰州市科技计划(2024-3-68)。

第一作者:王小龙,博士,主要从事微地图制图研究。120220909881@lzu.edu.cn
通信作者:闫浩文,博士,教授。yanhw@mail.lzjtu.cn

weak sense of direction struggle even more. Existing landmark or shortest-path methods offer limited help. They focus on path choice or landmark weights and ignore key spatial relations. Some of them return the shortest route but give no idea of how to move along it. Others highlight landmarks but fail to guide users between them. Traditional direction models add long lists of direction types. These details are too complex for fast decisions. They also break the "just enough and no extra" idea behind microcontent. A direction-distance model (DDM) is introduced to fill this gap and to give clear, compact, and non-redundant guidance. The goal is to supply essential spatial cues without adding noise. The design also considers indoor scenarios such as large stations, malls, and parking garages, where common mobile map apps often fail to give accurate or readable direction hints. The model aims to support these cases as well. **Methods:** The core features of WeMaps are examined to find what matters most during wayfinding. Direction and distance emerge as the essential elements. They also show clear advantages over landmark-based cues. Both features can be presented with a small amount of information yet still guide users through complex spaces. Reasons for the failure of classic direction models are analyzed that many existing models add direction types that users do not need. Such extra information slows decision-making. Some methods also rebuild the direction model every time the user moves. This adds delay and causes outdated cues. The DDM is built in two parts. First, path azimuths are calculated to give simple numeric direction values. These values are then grouped with an eight-direction cone model. The grouping reduces noise and keeps the output short. The same rule applies to long routes, curved routes, and routes with multiple turns. Paths with and without shape points are handled separately to avoid errors caused by dense geometry. Second, distance is computed with Euclidean metrics. Segment functions and road-section functions are defined and summed to give total distance. Both local and global distance cues are tested. The output includes step-level distances and overall route length. Experiments use road-network data from different map types and several indoor layouts are added to test short segments and complex turn sequences. Each dataset produces direction output, distance output, and combined descriptions. The results are compared with current direction and distance models, including shortest-path methods and landmark-weight methods. The comparison focuses on time cost, clarity, and redundancy. **Results:** The DDM removes repeated modeling steps that many direction models require. It reduces time cost and supports fast guidance during wayfinding. The improvement is clear on paths with many turns. Direction relations are expressed in both numeric and verbal form with little noise. The output stays short even for long or irregular paths. The model also adds missing direction and distance cues that WeMaps often lack. Users with weak direction sense can gain clearer support. The combined direction-distance output gives a more natural description for real users. It shows the next turn, the direction of movement, and the approximate distance. It avoids long lists of direction types and landmark overload. Compared with existing spatial direction models, DDM keeps stable performance when the geometry changes. Compared with distance-only models, DDM preserves the sense of movement that users need to maintain orientation. The model also avoids lag from repeated reconstruction, which helps in dynamic settings. **Conclusions:** The DDM fits the microcontent nature of WeMaps and adds key information for wayfinding. It overcomes the limits of landmark-based and traditional direction or distance methods. The output avoids extra details and supports quick decisions. It offers simple direction steps and clear distance cues in one compact form. Some direction descriptions for curved paths remain complex. Further work will simplify these descriptions and improve how users read and remember them. Work will also explore adaptive rules that adjust the amount of information based on the user's directional sense and the layout of the space.

Key words: WeMap; assistance wayfinding; spatial direction relation; Euclidean distance

随着自媒体、智能感知和大数据等技术的发展与创新,地图在满足不同层次需求的同时,其表现形式也出现了泛化[1-3]。微地图(WeMap)作为面向平民大众的新型地图,旨在解决地图制图门槛高、传播效率低的问题[4],具有传播便捷、表达内容恰到好处(微内容)且对制图者无门槛要

求(低门槛)等特点[5-6]。目前,有关微地图的研究多集中于制作和传播:对于制作而言,涉及特定场景下微地图制图方法[7]、微地图道路网数据评价方法[8]和微地图符号库构建[9-10]等;对于传播而言,主要涉及微地图用户建模[11-12]、微地图推荐[13]以及哲学视角下微地图的存在特征[14-15]等领域。然而,微地图低门槛的特点导致其辅助用户寻路时难以提供合理且精确的路线,即难以保证微内容的效果,严重影响了用户的寻路体验。

为此,相关学者构建了地标库服务个性化寻路[16]和微地图定向方法[17],为微地图辅助寻路提供支撑,但却忽略了辅助寻路的方向和距离信息。此外,尽管高德等手机地图可以在室外寻路中直接标注路径和行进路线,却无法支撑室内场景的寻路,如寻找地下车库出口、在大型火车站内寻找候车室等。在室内场景下,方向和距离辅助寻路尤为重要。因此,如何利用空间方向关系和空间距离关系补充寻路过程中缺失的信息且符合微内容的特点,是微地图辅助寻路亟待解决的问题。

空间方向关系和距离关系的计算与描述,可以从定性和定量两个方面丰富和补充现有的寻路模型。方向关系的计算和描述主要集中于空间方向关系的计算模型和评价模型。计算模型以单一目标计算模型和群组目标计算模型为主,单一目标计算模型主要由锥形模型[18-20]及其改进模型[21-22]、九方向矩阵模型[23]等经典模型构成;群组目标计算模型基于Voronoi图构建[24-26]或借助Delaunay三角网结合剥皮算法构建[27]。评价模型则利用方向关系相似度来评价制图综合结果的合理性[28-29]。空间方向关系的计算模型和评价模型虽然能够为辅助寻路提供支撑,但模型追求大而全,力求囊括和表达某一空间内的所有方向,这显然不符合微内容的特点,除了寻路所用方向外,其余方向对寻路用户而言过于冗余。

距离关系的计算和表达由最短路径算法和地标路径算法构成。最短路径算法主要以Dijkstra算法和A*算法为基础,如应急疏散路径优化方法依托Dijkstra算法规划路径[30],六边形格网模型规划路径则是以A*算法为基础[31]。地标路径算法的核心是构建地标权重模型[32],进而为生成符合人类认知的路径服务。由此可知,这两类算法都未顾及空间方向关系。然而,现实中存在对方向感知很弱的群体,即弱方向感大众[5,17]。他们的方向感较弱,从出发地到目的地难以迅速辨识方向,无法顺利到达目的地。因此,在构建空间距离计算模型时需要顾及空间方向关系。

综上,本文将空间方向关系和距离关系结合,补充寻路过程中缺失的方向和距离信息,同时满足微内容的特点,提出一种方向-距离模型(direction-distance model, DDM)的构建方法。首先,分析了辅助寻路过程中符合微地图特点的表达内容:方向和距离,并对方向和距离在微地图中的呈现关系进行了探讨。然后,利用方位角实现对路径数据的定量描述与建模,再依托八方向锥形模型对量化结果进行定性描述,实现空间方向关系计算模型的开发。最后,设计路径距离的计算方法,结合欧氏距离分别定义路段和节段的长度计算函数,并基于求和函数算出路径的总距离。

1 方向、距离与微地图辅助寻路

在讨论方向、距离与微地图辅助寻路的关系前,需进一步明确微地图的特点及含义。微地图的特点主要体现在低门槛和微内容两个方面:低门槛是指不要求制图者具备专业的地图学知识,也不用对他们进行长时间的、专门的地图绘制技能的训练,他们仍然能够制作微地图;微内容是指微地图表达的内容少而精,只要能够满足特定情况下的需求即可。如图1所示,低门槛是地图制作中需要着重考虑的特点,微内容则属于在地图应用中也需要兼顾的特点。所以,在寻路过程中,微内容体现在既要满足用户利用微地图寻路的需求,也要避免微地图所表达的内容产生冗余,进而造成歧义。本文集中于解决微地图辅助寻路的问题,相关研究属于地图应用范畴,因此更侧重于微内容的表达方面。

1.1 辅助寻路的微内容表达

寻路是一个动态变化的过程,当用图者利用微地图在客观世界寻路时,认知差异导致对参考目标的确定存在歧义,即制图门槛的降低使得所绘地图在寻路过程中存在制图者与用图者的主观认知冲突。图1为制图者绘制的从起点O到终点C的寻路地图,E(east)、SE(southeast)、SW(southwest)分别代表东、东南、西南方向。对于微地图用户而言,制图者认为A处的地标M易于发现,所以将地标M作为微地图的内容之一。然而,用图者则认为地标M难以寻找,地标N更易发现。所以,此种情况下所绘制的地图必须考虑将地标N也作为微地图的内容,才能使用图者在

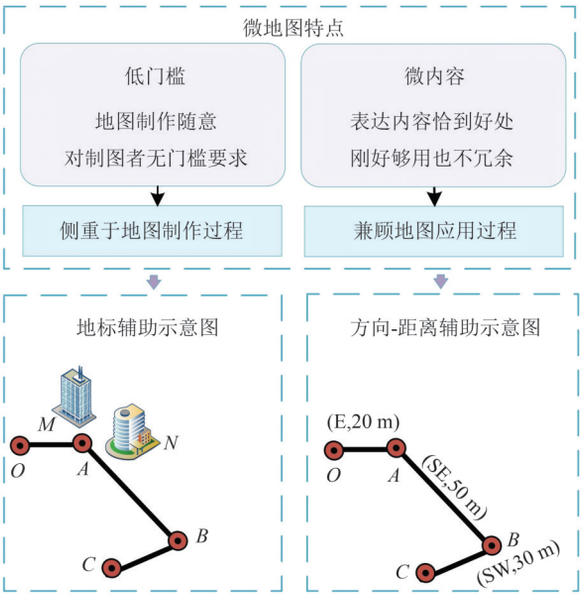


图 1　方向、距离与微地图辅助寻路的关系

Fig. 1　Relationship Between Direction, Distance, and WeMap Assisted Wayfinding

客观环境中完成寻路过程。因此,这幅微地图无法满足微内容这一特点,即此图对于用图者而言没有满足刚好够用(缺失地标 N 使得用图者无法顺利完成寻路过程)又不冗余(补充地标 N 则稍显冗余)的需求。

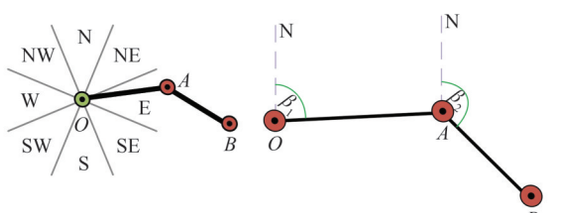
空间方向和距离相比于地标认知更为客观,可以定量表达具体的位置和方向,不会造成过大的认知偏差。如图 1 所示,无论用户的位置如何变化,用户位置与目标点之间的方向不因用户的认知差异而发生变化。具体而言,当用户移动到位置 A 时,B 在 A 的东南方,不会因为用图者和制图者的认知差异改变 B 在 A 东南方的既定事实。同理,B 与 A 之间相距 50 m 的客观距离也不会因其认知差异而改变。因此,仅依赖空间方向和距离,不仅能够减轻用图者判断地标的认知负担,还能满足用户利用微地图寻路的需求,而且地图内容表达恰到好处,刚好够用(能够用于寻路)且不冗余(避免因制图者与用图者的认知冲突而造成地标误认,进而导致无法完成寻路过程)。因此,相比于地标,方向和距离具有表达精确、不会造成过大认知偏差和无需顾及内容取舍的优势,更符合微内容的表达。

1.2　方向与距离的微内容呈现

微内容不仅体现在低门槛的制图过程中,在应用过程中也需兼顾。就寻路情景而言,用户在陌生环境中需要迅速判断从起点到达终点的行进方式,因此,微内容需要提供恰到好处的信息支持,即微地图的内容既要保证提供的信息在寻路过程中刚好够用,又要保证在地图的表达上不会冗余。然而,现有的空间方向关系计算模型和路径规划算法要么提供的信息不足以满足用户的寻路需求,要么提供的信息过于冗余。

传统的空间方向关系计算模型提供的信息存在冗余,追求大而全,力求囊括和表达某一空间内的所有方向;而微地图在辅助寻路过程中仅需计算寻路过程中一个决策点与另一个决策点之间的方位角即可,无需覆盖空间中所有可能的方向表达。

从起点 O 到终点 B 的寻路微地图如图 2 所示,图 2(a)中,当计算 B 相对于 O 的空间方向关系时,需要以 O 为中心,将其所在的空间划分为 8 个方向,N(north)、NE(northeast)、S(south)、W(west)、NW(northwest)分别代表北、东北、南、西、西北方向。然而,微地图辅助寻路过程中,仅需知晓 A 或 B 位于 O 的某个方向即可,使用方位角完全可以表示,其余的方向对于寻路而言稍显冗余。因此,空间方向仅需方位角即可呈现,对于寻路而言也不会冗余。



(a) 八方向锥形模型　(b) 微地图辅助寻路所需的空间方向关系模型

图 2　空间方向的微内容呈现

Fig. 2　Microcontent Presentation of Spatial Direction

距离关系模型同理,无论是基于地标路径的最短路径算法,还是基于 Dijkstra 的最短路径算法,都以距离和地标为主要因子。就地标而言,由于不同人对地标的认知存在差异,使用全部地标会使微地图的表达过于冗余,使用制图者眼中的地标则导致微地图寻路时所表达的内容不足。就距离而言,仅使用起点与终点的距离辅助寻路,所表达的内容稍显不足。如图 3(a)所示,用户位于 O 处,终点位于 B 处,位置之间的距离全部已知,但身处陌生环境的用户不知应朝哪个方向行进,仍然无法顺利到达终点,所以仅依赖于距离辅助寻路则稍显不足。因此,空间距离的呈现需要空间方向的支撑,对于寻路而言才能刚好够用而又不冗余(见图 3(b))。

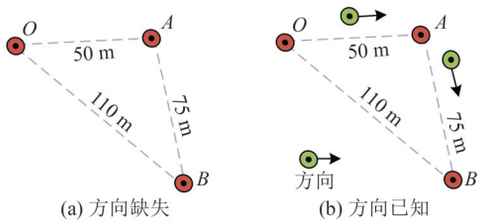


图3 空间距离的微内容呈现

Fig. 3 Microcontent Presentation of Spatial Distance

1.3 空间方向的计算

为更好地服务空间方向关系和距离关系的计算,首先需要获取路网数据,读取路段数据和信息,然后以路段的组成元素为一个节段或系列节段,对路段的构成要素进行分类。具体步骤如下:(1)获取路径$e_m=\{i\in \mathrm{N}|R_1,R_2,\cdots,R_i\}$,通过遍历$e_m$得到路段$R_i$;(2)将路段$R_i$分为两类:①若路段$R_i$中不含几何图形点,则将其记录为$E_i$;②若路段$R_i$中包含几何图形点,则将其记录为$C_i$。其中,$E_i\subseteq R_i$,$C_i\subseteq R_i$,$E_i\cup C_i=R_i$。

1)若路段R_i中不含几何图形点,则计算路段E_i的空间方向关系,步骤如下:

(1)获取路段E_i的结点$N_j(j\geqslant 1)$。

(2)记录以结点N_{j-1}为参考对象、结点N_j为源目标的空间方向关系$D(N_{j-1},N_j)=\{j\geqslant 1|d(N_{j-1},N_j)\}$。其中,$D(a,b)$表示结点$a$与结点$b$之间方向关系的集合,$d(a,b)$表示结点$a$与结点$b$之间的方向关系。如图4(a)所示,用户从初始结点$N_0$出发,到达目的地$N_2$。用户寻路期间,方向关系分别以$N_0$为参考对象、$N_1$为源目标,以$N_1$为参考对象、$N_2$为源目标记录空间方向关系,帮助用户在寻路时判断空间方向,具体记为$D(N_0,N_2)=\{d(N_0,N_1),d(N_1,N_2)\}=\{\mathrm{E},\mathrm{SE}\}$,表示$N_1$在$N_0$的东边,$N_2$在$N_1$的东南边。

(3)空间方向关系的定量表达,通过路段E_i的结点坐标计算得到方位角β_j,计算公式为:

$$\beta_j=\arctan\frac{x_j-x_{j-1}}{y_j-y_{j-1}}\ (j\geqslant 1) \tag{1}$$

式中,x和y分别表示结点的坐标;(x_{j-1},y_{j-1})为N_{j-1}的坐标;(x_j,y_j)为N_j的坐标。

(4)空间方向关系的定量表达能够被记录为$D(N_{j-1},N_j)=\{1\leqslant j<n(N_{j-1},N_j)|\beta_j\}$,在图4(a)中,$D(N_0,N_2)=\{\beta_1,\beta_2\}$。其中,$n(a,b)$表示$a$到$b$之间包含$a$和$b$在内的所有结点或几何图形点的数量。

2)若路段R_i中包含几何图形点,则计算路段C_i的空间方向关系,步骤如下:

(1)获取路段C_i的结点$N_j(j\geqslant 1)$,其中,在相邻结点N_{j-1}和N_j之间存在k个几何图形点,记为$G_k(k\geqslant 1)$。

(2)记录以结点N_{j-1}为参考对象、结点N_j为源目标的空间方向关系$D(N_{j-1},N_j)$。由于这些结点之间存在几何图形点,所以当遇到几何图形点时,则将其作为参考对象和源目标来记录空间方向关系。因此,$D(N_{j-1},N_j)=\{1\leqslant j<n(N_{j-1},N_j)|\{1\leqslant k<n(G_{k-1},G_k)|d(G_{k-1},G_k)\}\}$。

如图4(b)所示,相邻结点N_1和N_2之间有6个几何图形点,即G_0、G_1、G_2、G_3、G_4和G_5。假设用户要从初始结点N_0出发,最终到达目的地N_3,用户寻路期间,N_0和N_1之间的方向关系、N_2和N_3之间的方向关系属于不含几何图形点的空间关系计算,此处不作讨论,此处集中于相邻结点N_1和N_2之间的空间方向关系的计算。分别以N_1为参考对象、G_0为源目标,以G_0为参考对象、G_1为源目标,依此类推,直至以G_5为参考对象、N_2为源目标,记录空间方向关系,帮助用户在寻路时判断空间方向,具体记为$D(N_1,N_2)=\{d(N_1,G_0),d(G_0,G_1),\cdots,d(G_5,N_2)\}=\{\mathrm{SE},\mathrm{SE},\cdots,\mathrm{SW}\}$。

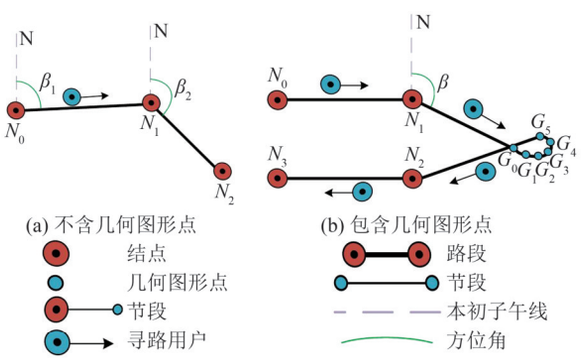


图4 空间方向关系的计算模型

Fig. 4 Calculation Model of Spatial Dection Relationship

(3)与不含几何图形点计算空间方向关系同理,空间方向关系需要定性和定量表达,通过结点坐标和几何图形点坐标能够计算得到N_{j-1}和N_j之间的方位角β_k。

(4)包含几何图形点的空间方向关系能够被记录为$D(N_{j-1},N_j)=\{1\leqslant j<n(N_{j-1},N_j)|\{1\leqslant k<n(G_{k-1},G_k)|d(G_{k-1},G_k)=\beta_k\}\}$。因此,在图4(b)中,从$N_0$至$N_3$这个路径的空间方向关系则表示为$D(N_0,N_3)=\{d(N_0,N_1),d(N_1,N_2),d(N_2,N_3)\}$,其中,$d(N_1,N_2)$不同于$d(N_0,N_1)$和$d(N_2,N_3)$,前者为一个集合,即$d(N_1,N_2)=\{1\leqslant k<8|\beta_k\}=\{\beta_1,\beta_2,\beta_3,\beta_4,\beta_5,\beta_6,\beta_7\}$,而后者为一个具体的值,即$d(N_0,N_1)$和$d(N_2,N_3)$的值分别为$\beta_1$和$\beta_3$。

上述空间方向关系的定量表达也能在四方向或八方向锥形模型中进行描述。在四方向锥形模型中,N 意味着 $\beta_j\in[0,\pi/4]\cup(7\pi/4,2\pi]$,E 意味着 $\beta_j\in(\pi/4,3\pi/4]$,S 意味着 $\beta_j\in(3\pi/4,5\pi/4]$,W 意味着 $\beta_j\in(5\pi/4,7\pi/4]$。在八方向模型中,N 意味着 $\beta_j\in[0,\pi/8]\cup(15\pi/8,2\pi]$,NE 意味着 $\beta_j\in(\pi/8,3\pi/8]$,E 意味着 $\beta_j\in(3\pi/8,5\pi/8]$,SE 意味着 $\beta_j\in(5\pi/8,7\pi/8]$,S 意味着 $\beta_j\in(7\pi/8,9\pi/8]$,SW 意味着 $\beta_j\in(9\pi/8,11\pi/8]$,W 意味着 $\beta_j\in(11\pi/8,13\pi/8]$,NW 意味着 $\beta_j\in(13\pi/8,15\pi/8]$。本文所提及的定性表达则是依托于八方向锥形模型进行描述的。

1.4　空间距离的计算

空间距离关系的计算核心是欧氏距离,本节基于欧氏距离提出了计算路径距离的算法,步骤如下:

1)所有的路径 e_i 共有 i 个距离,记为 $p_i(v_1,v_n)=\{T_1(l(R_1),l(R_2),\cdots,l(R_n)),T_2(l(R_1),l(R_2),\cdots,l(R_n)),\cdots,T_i(l(R_1),l(R_2),\cdots,l(R_n))\}$。

2)每条路径的构成要素主要为两类:①若路段 R_i 中不含几何图形点,即计算 E_i 的空间距离关系;②若路段 R_i 中包含几何图形点,即计算 C_i 的空间距离关系。

3)计算 E_i 的空间距离关系:①距离 $p(E_i)=p(v_1,v_n)=T(l(R_1),l(R_2),\cdots,l(R_n))$,其中,$v_1=(x_1,y_1)$,$v_n=(x_n,y_n)$,$x$ 和 y 分别表示路径结点的坐标值,$T(\ )$ 表示求和函数,$l(\ )$ 表示计算路段长度的函数。②若路段 R_n 的组成元素中不包含几何图形点,即由结点 v_{n-1} 和 v_n 构成,故函数 $l(R_n)=p(v_{n-1},v_n)$,计算公式为:

$$l(R_n)=p(v_{n-1},v_n)=\sqrt{(x_{n-1}-x_n)^2+(y_{n-1}-y_n)^2} \tag{2}$$

式中,$v_{n-1}=(x_{n-1},y_{n-1})$,$v_n=(x_n,y_n)$,$n\geqslant 2$。③$E_i$ 的空间距离计算完成,即第 i 条路径的距离完成计算,记为 $p_i(v_1,v_n)$,该路径中的路段不含几何图形点。

4)计算 C_i 的空间距离关系:①计算路段 R_n 的总长度。②若路段 R_n 的构成要素中包含几何图形点,即 $R_n=\{r_1,r_2,\cdots,r_n\}$,故 $l(R_n)=T(l(r_1),l(r_2),\cdots,l(r_n))$。③$r_n$ 是由几何图形点 v_{n-1} 和 v_n 构成,故函数 $l(r_n)=p(v_{n-1},v_n)$,由式(2)计算求得。④C_i 的空间距离计算完成,即第 i 条路径的距离完成计算,记为 $p_i(v_1,v_n)$,该路径中的路段的组成要素中包含几何图形点。

2　模型测试与讨论

本文以某道路数据为例,分别选取了起点和终点验证所提模型的可行性,数据共包括 1 225 个结点、1 597 个路段和 22 804 个节段。从起点到终点的寻路过程中,选取两条较为典型的路径,一条路径为不含几何图形点的数据,记为路径 A;另一条路径则为包含几何图形点的数据,记为路径 B,路段的几何形状表示为弧形,几何图形点为该路段上的转折点。路径数据的具体信息如图 5 所示。

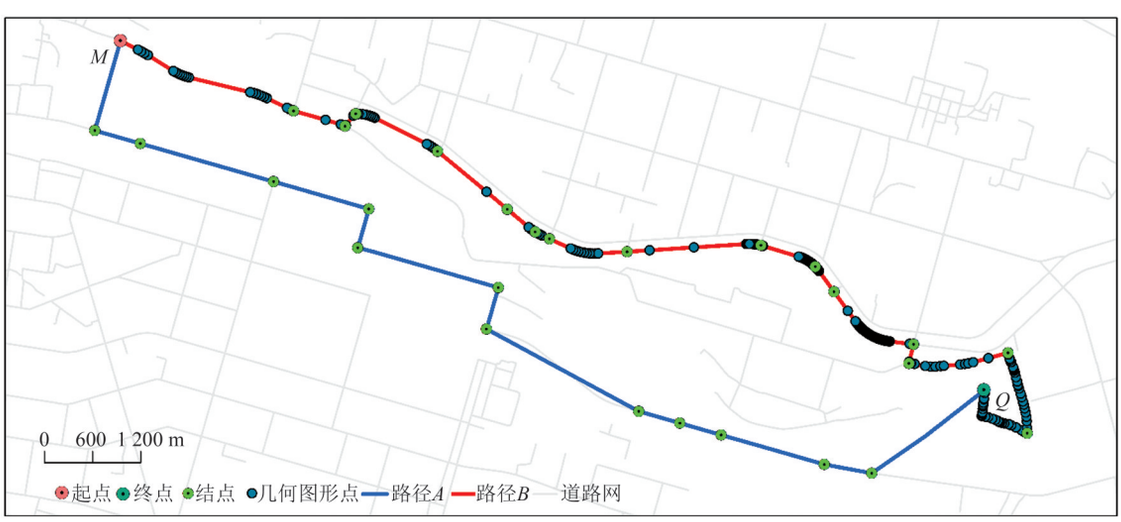


图 5　实验数据:从 M 到 Q 的两条路径信息

Fig. 5　Experimental Data: Information of Two Paths from M to Q

为了便于描述且方便本文模型的计算,将起点记为 M,终点记为 Q,M 和 Q 中间的两条路径分别为 A 和 B,结点则分别被记为 A_i 和 B_i,i 表示几何图形点的索引。其中,路径 A 的结点数量为 14,路径 B 的结点数量和几何图形点数量分别为 17 和 563。因此,根据 DDM 分别计算这两条路径

的方向关系和距离关系。

2.1 空间方向关系与距离关系的计算结果

1)空间方向关系的计算结果。路径A和B的空间方向关系计算结果分为定性表达和定量表达两种。

(1)对于不含几何图形点的路径A而言,其空间方向关系的定量计算结果为$D(M,Q)=D(A_{i-1},A_i)=\{1\leqslant i<14|3.42,1.85,1.85,1.85,3.42,1.85,3.42,2.07,1.85,1.85,1.85,1.75,0.94\}$,其中,当$i=1$时,$A_0=M$;当$i=13$时,$A_{13}=Q$。定性结果为$D(M,Q)=D(A_{i-1},A_i)=\{$S,E,E,E,S,E,S,SE,E,E,E,E,NE$\}$。

(2)对于包含几何图形点的路径B而言,其空间方向关系定量计算结果为$D(M,Q)=D(B_{i-1},B_i)=\{1\leqslant i<17|\{1\leqslant j<n(G_{j-1},G_j)|d(G_{j-1},G_j)\}\}=\{\{2.04_{j=1},2.06_{j=2},\cdots,1.96_{j=22}\}_{i=1},\{1.85_{j=1},1.86_{j=2},\cdots,2.05_{j=6}\}_{i=2},\cdots,\{5.07_{j=1},5.07_{j=2},\cdots,0.14_{j=28}\}_{i=16}\}$,定性结果为$D(M,Q)=\{\{\mathrm{SE}_{j=1},\mathrm{SE}_{j=2},\cdots,\mathrm{E}_{j=22}\}_{i=1},\{\mathrm{E}_{j=1},\mathrm{E}_{j=2},\cdots,\mathrm{SE}_{j=6}\}_{i=2},\cdots,\{\mathrm{W}_{j=1},\mathrm{W}_{j=2},\cdots,\mathrm{N}_{j=28}\}_{i=16}\}$。其中,当$i=1$且$j=1$时,$B_0=M$;当$i=16$且$j=28$时,$B_{16}=Q$;$n$的值为一个集合,具体为$n=\{23_{i=1},7_{i=2},5_{i=3},17_{i=4},3_{i=5},5_{i=6},5_{i=7},14_{i=8},90_{i=9},115_{i=10},101_{i=11},104_{i=12},3_{i=13},14_{i=14},28_{i=15},29_{i=16}\}$。

由此可知,本文模型能够计算寻路用户从出发地到目的地路径的方向关系,不仅能够提供含精确方向的定量描述,也能为用户提供容易理解的定性描述。这对于微地图辅助寻路的地标库构建等其他算法而言,能够弥补缺失的方向信息。

2)空间距离关系的计算结果。路径A和路径B的空间距离关系计算以两种形式体现:(1)起点与终点之间的直线距离;(2)起点与终点之间的路径距离。本文模型计算的为起点与终点之间的路径距离,即计算了每个结点之间及每个几何图形点之间的距离。

对于路径A而言,空间距离关系的计算结果为$p(M,Q)=T(l(R_1),l(R_2),\cdots,l(R_{13}))=T(526.31,267.58,782.60,559.87,227.76,824.71,242.60,976.49,241.36,242.58,605.93,272.37,785.84)=6\,556.00$。对于路径$B$而言,空间距离的计算结果为$p(M,Q)=T(l(R_1),l(R_2),\cdots,l(R_{16}))=T(1\ 063.95,303.25,93.59,513.16,511.98,201.82,89.87,454.52,757.69,334.01,176.07,572.97,110.54,569.68,468.57,438.54)=6\,660.21$。其中,所有距离单位均为m。

综上所述,无论是不含几何图形点的路径A,还是包含几何图形点的路径B,本文模型都能够精确地计算空间方向关系和空间距离关系。

2.2 与现存模型和算法的比较与讨论

1)与空间方向关系计算模型的比较。主要是与经典的八方向锥形模型进行比较,虽然本文模型计算的是路径的空间方向关系,归根结底还是依赖结点的位置数据进行计算,具体而言还是点与点之间的空间方向关系,而锥形模型是计算点与点之间空间方向关系的主要模型之一。另外,本文模型也是基于八方向锥形模型进行定性描述。因此,选择八方向锥形模型作为主要比较对象。

本文模型仅需建模一次,再遍历路径结点或几何图形点,即可完成用户寻路过程中空间方向关系的计算。八方向锥形模型如图6所示,从参考目标到源目标,需要先遍历结点或几何图形点,重复建模和检索,即在路径A中,除了起点未被看作源目标、终点未被看作参考目标之外,其余每个结点都被重复看作参考目标和源目标,并多次检索源目标是否位于8个方向区域内,进而计算空间方向关系。

八方向锥形模型不仅要遍历路径结点或几何图形点,还需要多进行一次检索,即确定参考目标后,需要检索源目标位于锥形模型的哪块区域。本文模型则直接计算其方位角,进行定量表达,判断其量化结果是否属于某个方向区域。用O符号描述时间复杂度,O符号表示算法时间随输入规模n增长的趋势,如$O(n)$指时间与n呈正比增长,是描述计算量级的数学单位。对于八方向锥形模型,若将路径上的结点数记为n,路径A的时间复杂度为$O(n^2)$,路径B的时间复杂度则为$O(n^3)$。而对于本文模型,路径A的时间复杂度为$O(n)$,路径B的时间复杂度则为$O(n^2)$。二者的复杂度对比示意如图7所示,路径中涉及到的结点或几何图形点越多,八方向锥形模型的时间成本则越高。因此,八方向锥形模型相比于本文模型耗时更多。

近年来,研究者们也提出了许多新的方向模型,如改进的锥形模型[22]、基于Voronoi图的方向关系计算模型[25-26]、计算群组目标的空间方向关系模型[27]、空间方向关系的度量模型[28-29]等,这些模型均属于静态模型。当需要为用户提供路径方向时,这类方法需要不断重复建模,效率较低;

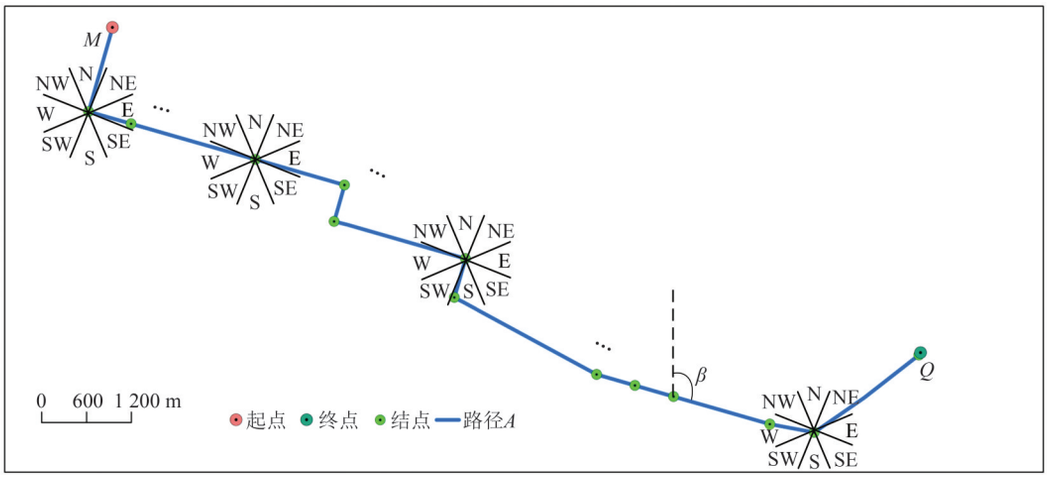


图 6　本文模型与八方向锥形模型对比示意图

Fig. 6　Diagram of Comparison Between the Proposed Model and Eight-Direction Cone Model

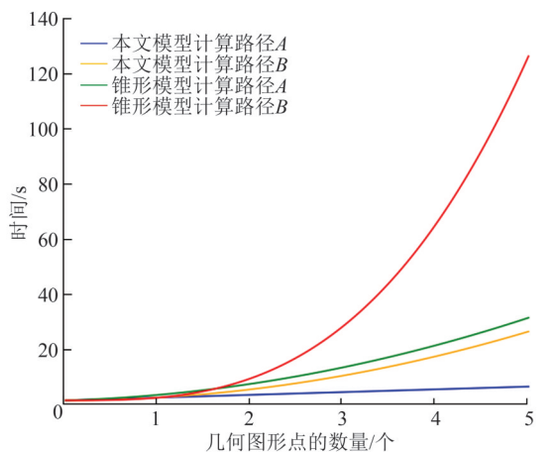


图 7　本文模型与八方向锥形模型复杂度对比示意图

Fig. 7　Diagram of Complexity Comparison Between the Proposed Model and Eight-Direction Cone Model

若路径上缺乏群组目标,甚至无法计算方向关系。因此,基于群组目标的方向模型难以处理此类场景。

本文提出的方向模型的优点在于:(1)不需重复建模,仅需建模一次即可获得定量结果;(2)不需多次检索,即可定性表达;(3)能够计算路径的空间方向关系。当然,本文模型仍存在不足:计算包含几何图形点路径的空间方向关系时,定性描述稍显复杂,会造成用图者阅读和认知上的冗余。因为本文主要是解决如何利用空间方向关系和空间距离关系来补充辅助寻路过程中的缺失信息的问题,所以这些不足对于本文DDM的影响基本可以忽略不计。

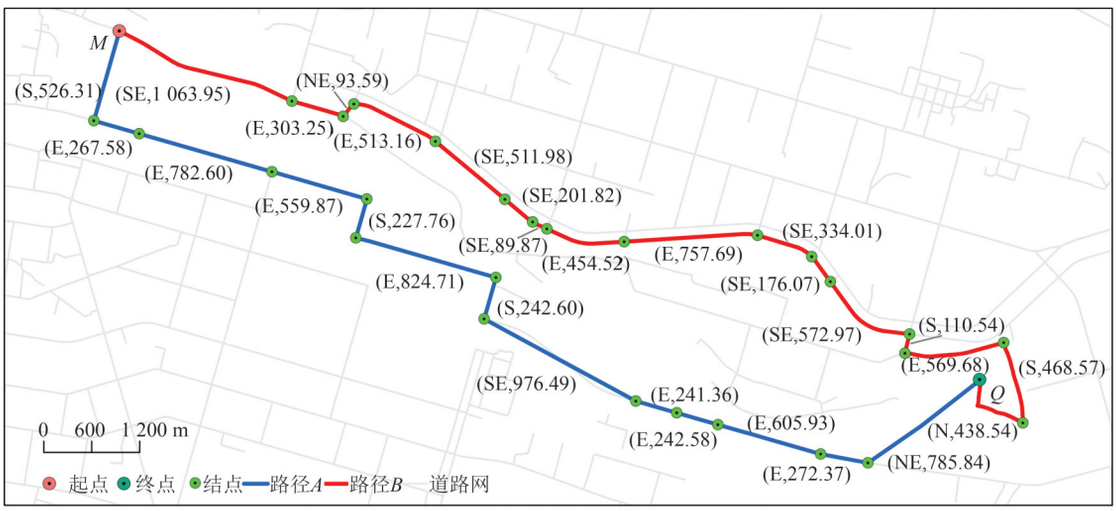
2)与空间距离关系计算模型的比较。通过计算空间距离为用户提供有效的寻路路径主要集中于两类算法:最短路径算法和地标权重算法。一些新的路径推荐或计算算法,如路径规划模型[31]和地标权重算法[32],均是基于最短路径算法或地标权重算法进行设计和研发。因此,将本文模型与最短路径算法和地标权重算法进行对比和讨论,对比示意图如图 8 所示。

以路径 A 和 B 为例,本文模型计算结果如图 8(a)所示,最短路径算法和地标权重算法示意图如图 8(b)所示。本文模型的计算结果在显示距离的基础上也提供方向这一辅助信息,极大地方便了辨识方向困难的群体,也为空间方向关系和距离关系被割裂开、无法有效地为寻路提供手段支撑等问题的解决提供了新思路。图 8(a)中路径 B 的空间方向关系则按路段显示,将每个路段中所有节段的方向进行统计,以出现次数最多的定性描述结果进行显示。图 8(b)虽然能够提供最短的路径或者提供方便寻路用户辨识的地标路径,但是对于弱方向感大众而言还存在一定的不足,即这两类算法均忽略了空间方向关系的计算,导致部分人可能因为无法辨识方向而难以快速到达目的地。总之,最短路径算法能为寻路用户提供一条距离最近的路径,但是无法解决寻路过程中用户向哪个方向行进的问题;地标权重算法能够为寻路用户提供一条容易记忆、理解的路径,但到达地标后向哪个方向寻找下一个地标的问题依然未被解决。

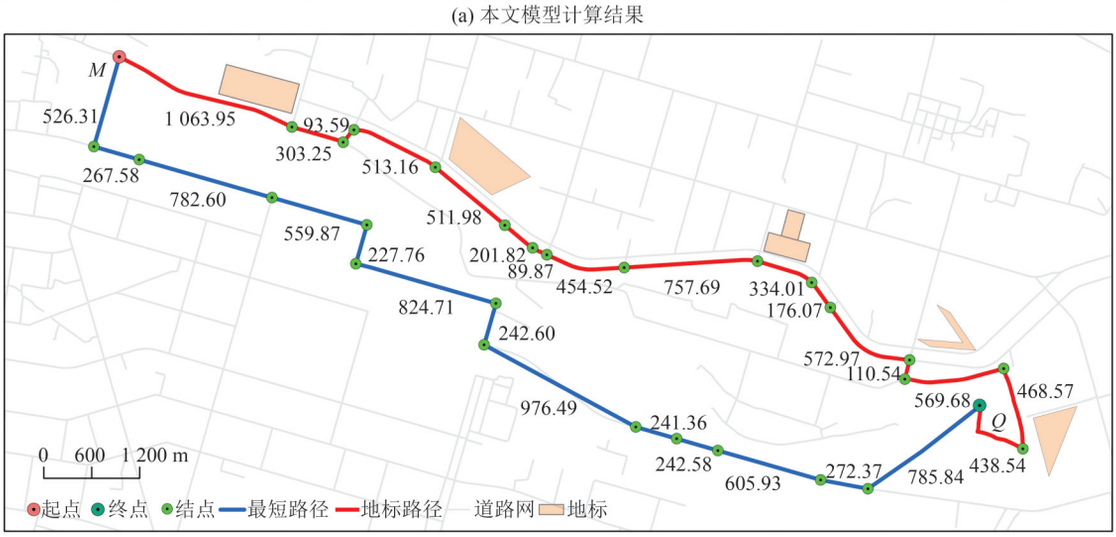
综上,本文模型在计算空间距离关系的同时还充分考虑了空间方向关系,弥补了一些算法规划路径时忽略方向的不足,顾及了弱方向感大众,为用户寻路过程提供了方向信息支撑,弥补了部分算法仅集中于最短距离或地标认知的不足。

3　结　语

本文提出了一种DDM的构建方法,旨在符合微内容特点的同时,能够为微地图辅助寻路提供



(a) 本文模型计算结果



(b) 最短路径与地标路径计算结果

图8 本文模型与空间距离计算模型对比示意图

Fig. 8 Diagram of Comparison Between the Proposed Model and the Spatial Distance Calculation Model

更多的信息支撑。首先,本文通过空间方向关系和空间距离关系的理论指导,使得微地图辅助寻路从构建地标集拓展至提供方向和距离的信息。然后,针对寻路的动态过程,本文设计了符合微内容这一特点的空间方向关系模型,弥补了寻路过程中信息冗余的缺陷。为便于模型的构建,将数据分为两类进行讨论,即包含几何图形点和不含几何图形点,并利用地图数据进行了实验验证。最后,基于欧氏距离,设计了空间距离关系的计算方法,进而获取距离信息。

本文模型通过道路网数据分别测试了空间方向关系和空间距离关系的计算和描述,并与现存模型、算法进行了对比与分析。相较于现存的空间方向关系计算模型,本文模型不需重复建模,避免了寻路过程中重复建模导致信息更新不及时的问题;相比于现有的空间距离关系计算模型,本文模型在描述距离信息的同时,还顾及弱方向感大众对方向辨识存在不足的问题,提供了方向和距离相结合的描述。

不足之处在于,本文模型在计算包含几何图形点路径的空间方向关系时,定性描述稍显复杂,会给用户的阅读和理解带来不必要的负担。下一步工作将考虑在为寻路用户提供更为详细的信息的同时,优化空间方向关系计算模型的定性描述,使用户阅读和记忆寻路信息更为容易。

参 考 文 献

[1] 王家耀. 地图科学技术:由数字化到智能化[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(12): 1963-1977.
WANG Jiayao. Cartography: From Digital to Intelligent [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(12): 1963-1977.

[2] 郭仁忠, 陈业滨, 赵志刚, 等. ICT时代地图的科学概念及表达框架[J]. 武汉大学学报(信息科学

版)，2022，47(12)：1978-1987.
GUO Renzhong，CHEN Yebin，ZHAO Zhigang，et al. Scientific Concept and Representation Framework of Maps in the ICT Era[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2022，47(12)：1978-1987.

[3] 于峰一泽，汤国安，陆鼎阳，等. 语言学视角下的地图演化[J]. 地理学报，2024，79(1)：171-186.
YU Fengyize，TANG Guoan，LU Dingyang，et al. Evolution of Maps from a Linguistic Perspective[J]. *Acta Geographica Sinica*，2024，79(1)：171-186.

[4] 闫浩文，张黎明，杜萍，等. 自媒体时代的地图：微地图[J]. 测绘科学技术学报，2016，33(5)：520-523.
YAN Haowen，ZHANG Liming，DU Ping，et al. WeMap：A New Type of Map in the Era of We Media[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*，2016，33(5)：520-523.

[5] WANG X L，YAN H W，WANG Z，et al. WeMap-Based Direction Model for Individuals with Limited Spatial Orientation Skills[J]. *Transactions in GIS*，2024，28(2)：111-129.

[6] 郭仁忠，陈业滨，应申，等. 三元空间下的泛地图可视化维度[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2018，43(11)：1603-1610.
GUO Renzhong，CHEN Yebin，YING Shen，et al. Geographic Visualization of Pan-Map with the Context of Ternary Spaces[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2018，43(11)：1603-1610.

[7] 王杭宇，闫浩文，马磊，等. 微地图环境下的手绘地图线要素综合方法[J]. 测绘科学，2019，44(10)：117-121.
WANG Hangyu，YAN Haowen，MA Lei，et al. Generalization Method of Hand-Drawn Map Line Elements in WeMap Environment[J]. *Science of Surveying and Mapping*，2019，44(10)：117-121.

[8] 李馨涵，王中辉. 基于空间相似性的微地图道路网质量评价方法[J]. 地球信息科学学报，2024，26(1)：212-224.
LI Xinhan，WANG Zhonghui. Quality Evaluation Method of WeMap Road Network Based on Spatial Similarity[J]. *Journal of Geo-Information Science*，2024，26(1)：212-224.

[9] 白娅兰，闫浩文，禄小敏，等. 微地图符号的视觉变量及其应用[J]. 测绘科学，2021，46(7)：182-188.
BAI Yalan，YAN Haowen，LU Xiaomin，et al. Visual Variables of WeMaps Symbols and Their Applications[J]. *Science of Surveying and Mapping*，2021，46(7)：182-188.

[10] 闫晓婧，闫浩文，王小龙，等. 微地图符号的智能化匹配："识图配符"[J]. 测绘科学，2022，47(10)：205-212.
YAN Xiaojing，YAN Haowen，WANG Xiaolong，et al. An Intelligent Symbol Matching Solution for WeMaps Through Image Recognition[J]. *Science of Surveying and Mapping*，2022，47(10)：205-212.

[11] 张剑，闫浩文，王卓，等. 传播力约束下的微地图用户关联规则挖掘算法[J]. 测绘科学，2022，47(1)：227-235.
ZHANG Jian，YAN Haowen，WANG Zhuo，et al. Mining Algorithm of WeMap Users Association Rule Under the Constraint of Communication Capacity[J]. *Science of Surveying and Mapping*，2022，47(1)：227-235.

[12] MA W J，YAN H W，LI J Z，et al. A Cold-Start Recommendation Method for WeMap Considering Co-Occurrence Collaborative Signals and Contrastive Learning[J]. *Journal of Spatial Science*，2024，69(3)：897-916.

[13] 牛雪磊，杨军，闫浩文. 顾及微地图推荐因子的深度信念网络[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2025，50(7)：1415-1424.
NIU Xuelei，YANG Jun，YAN Haowen. Deep Belief Networks Considering WeMaps' Recommendation Factors[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2025，50(7)：1415-1424.

[14] 王海鹰，闫浩文，梁晓鹤. 经典范畴认知下地图的局限性[J]. 海洋测绘，2023，43(1)：78-82.
WANG Haiying，YAN Haowen，LIANG Xiaohe. The Limitations of Maps in the Cognition of Classical Categorization[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*，2023，43(1)：78-82.

[15] 王海鹰，闫浩文，田江鹏，等. 后现代哲学视野下的微地图[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2022，47(12)：2026-2037.
WANG Haiying，YAN Haowen，TIAN Jiangpeng，et al. WeMaps in the Perspective of the Post-Modernist Philosophy[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*，2022，47(12)：2026-2037.

[16] 何阳，闫浩文，王卓，等. 面向微地图的地标提取方法及个性化寻路应用[J]. 地球信息科学学报，2022，24(5)：827-836.
HE Yang，YAN Haowen，WANG Zhuo，et al. Landmark Extraction Method and Personalized Wayfinding Application for WeMap[J]. *Journal of Geo-Information Science*，2022，24(5)：827-836.

[17] WANG X L，YAN H W，GAO S，et al. WeMap Orientation Method Suitable for General Public with

Weak Sense of Orientation[C]//Spatial Data and Intelligence, Wuhan, China, 2022.

[18] PEUQUET D J, ZHAN C X. An Algorithm to Determine the Directional Relationship Between Arbitrarily-Shaped Polygons in the Plane[J]. *Pattern Recognition*, 1987, 20(1): 65-74.

[19] SHEKHAR S, LIU X. Direction as a Spatial Object: A Summary of Results[C]//The 6th International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, Washington, USA, 1998.

[20] HARRIE L, TOUYA G, OUCHEIKH R, et al. Machine Learning in Cartography[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2024, 51(1): 1-19.

[21] 郭庆胜, 郑春燕. 锥形空间方向关系模型的改进[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(1): 81-84.
GUO Qingsheng, ZHENG Chunyan. Improvement of Cone-Shaped Spatial Direction-Relation Model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(1): 81-84.

[22] 王中辉, 闫浩文. 一种改进的锥形方向关系模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(2): 186-190.
WANG Zhonghui, YAN Haowen. An Improved Cone-Based Model for Describing Spatial Direction Relations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(2): 186-190.

[23] 唐雪华, 秦昆, 孟令奎. 基于拓扑参考的定性方向关系矩阵描述模型[J]. 测绘学报, 2014, 43(4): 396-403.
TANG Xuehua, QIN Kun, MENG Lingkui. A Qualitative Matrix Model of Direction-Relation Based on Topological Reference[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(4): 396-403.

[24] YAN H, WANG Z, LI J. An Approach to Computing Direction Relations Between Separated Object Groups[J]. *Geoscientific Model Development*, 2013, 6(5): 1591-1599.

[25] YAN H W, CHU Y D, LI Z L, et al. A Quantitative Description Model for Direction Relations Based on Direction Groups[J]. *GeoInformatica*, 2006, 10(2): 177-196.

[26] 王中辉, 闫浩文. 基于方向Voronoi图模型的群组目标空间方向关系计算[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(5): 584-588.
WANG Zhonghui, YAN Haowen. Computation of Direction Relations Between Object Groups Based on Direction Voronoi Diagram Model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(5): 584-588.

[27] 禄小敏, 闫浩文, 王中辉. 群组目标空间方向关系建模[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(6): 721-729.
LU Xiaomin, YAN Haowen, WANG Zhonghui. The Modeling of Spatial Direction Relationship Between Object Groups[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20(6): 721-729.

[28] 陈占龙, 吴亮, 谢忠, 等. 利用约束满足问题进行多洞面实体相似性度量[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(5): 745-751.
CHEN Zhanlong, WU Liang, XIE Zhong, et al. Similarity Measurement of Multi-holed Regions Using Constraint Satisfaction Problem[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(5): 745-751.

[29] 张丁文, 陈占龙, 谢忠. 矩形方向约束的邻域空间推理[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(8): 1185-1192.
ZHANG Dingwen, CHEN Zhanlong, XIE Zhong. Neighborhood Reasoning of Rectangular Direction Constraints[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(8): 1185-1192.

[30] 贾兴利, 郭旭亮, 杨宏志, 等. 采用交通-灾害双层模型的公路网有效路径集构建方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(8): 1275-1286.
JIA Xingli, GUO Xuliang, YANG Hongzhi, et al. Construction Method of Effective Path Set of Highway Network Based on Transportation-Disaster Double-Layer Model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(8): 1275-1286.

[31] 王维才, 艾廷华, 晏雄锋, 等. 多约束条件下的正六边形格网室内路径规划[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(1): 111-118.
WANG Weicai, AI Tinghua, YAN Xiongfeng, et al. Indoor Route Planning Under Regular Hexagonal Grid Considering Multi-constraints[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 111-118.

[32] NUHN E, TIMPF S. Landmark Weights: An Alternative to Spatial Distances in Shortest Route Algorithms[J]. *Spatial Cognition & Computation*, 2023, 23(3): 206-232.