

基于空间句法的高铁站域地下空间连通整合性能研究

杜 杨

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要:随着高速铁路的蓬勃发展,高铁站域地下空间的连通整合问题成为影响通行效率的重要因素之一。然而,当前研究多从定性分析出发,缺乏针对空间内部的系统性定量研究。基于此,文章以高铁站域地下空间的连通整合性能为主要研究对象,结合其特征属性确定研究范围,以空间句法为主要定量分析方法,构建了高铁站域地下空间连通整合模型,通过对现有案例的建模提出了两方面的优化方案,并进行了进一步的对比研究。研究表明:1)连通中心对于站域地下空间连通性能提升呈现较强的整体性;2)连通主轴对于站域地下空间连通性能提升呈现较强的局部性;3)高铁站域地下空间布局中可以考虑将连通轴与连通中心组合布置以提高连通能力。本文内容可为国内外高铁站域地下空间开发及连通整合性能提升提供参考。

关键词:高铁站域; 地下空间; 空间句法; 连通整合

中图分类号: TU921

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)02-0018-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.02.018

Optimization of underground space connectivity and integration surrounding high-speed railway station based on space syntax

DU Yang

(School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The construction of high-speed railways is now in full swing, and the connectivity and integration of the underground space surrounding high-speed railway station has become one of the most important factors affecting the traffic efficiency. The current research mostly starts from qualitative analysis, lacking in systematic quantitative research on the interior of the space. Based on that, the research objects are mostly focused on the urban spatial analysis at the macro scale. Therefore, this study focuses on the connectivity and integration planning of the underground space of the high-speed railway station, the research scope of the underground space of the high-speed railway station is determined by referring to the existing research, space syntax is used as the main research method, and depthmap is used as the main spatial analysis tool to build a model, selects suitability indexes to measure connectivity performance, and two optimization schemes for comparative research are proposed through the modeling research of existing cases, which are further comparatively compared. The results show that: 1) The connectivity center exhibits a strong overall effect on improving the connectivity performance of underground space surrounding high-speed railway stations; 2) The main axis exhibits a strong local effect on improving the connectivity performance of underground space surrounding high-speed railway stations; 3) In the layout of underground space surrounding high-speed railway stations, it can be considered to combine the connecting axis with the connecting center to improve the connectivity performance. This paper could provide relevant suggestions for the connection and integration of underground space in the high-speed railway station area.

Key words: space surrounding high-speed railway station; underground space; space syntax; connectivity and integration

收稿日期: 2023-11-01

作者简介: 杜 杨(1999—),男,硕士研究生,从事城市韧性、城市地下空间规划方面的研究。

随着社会经济的高速发展，长距离交通已经成为各类资源流转以及行人出行的重要方式，愈来愈多的高铁车站被纳入城市建设。与传统铁路客站一样，高铁车站也存在着割裂城市乃至阻碍城市均衡发展的问题^[1]。基于此，地下空间与高铁客站协同开发受到广泛关注。1913 年建成的纽约中央车站开发了地下两层空间以供地铁进行换乘。于 1914 年和 1963 年建成通车的东京站以及新宿站均布置了地下 5 层的站域地下空间用于地铁换乘、公共服务、停车以及商业等^[2]。上海虹桥站建成于 2010 年，其在车站主体下修建了两层站域地下空间，用于接驳地铁及连接周围商务区以及停车设施。北京南站在地面两层的主体下开发了 3 层站域地下空间，分别布局地铁、商业、停车等功能。

相关学者从城市案例入手进行了定性研究。王国炜等^[3-4]讨论了俄罗斯城市建设在交通方面面临的主要问题，并提出了通过开发站域地下空间的方式解决交通问题的途径。樊鹏涛等^[5]通过分析高铁站域地下空间开发实例，提出高铁枢纽地下空间优化策略。周浪雅^[6]研究站城服务模式，提出高速铁路枢纽地下空间接驳换乘优化方案。阚凯^[7]研究了哈尔滨西客站发展的约束条件，提出了适宜性站域地下空间综合开发策略。

然而，当前国内外有关高铁站域地下空间的地下空间的研究多为面向车站主体空间的定性分析，以行人在站域地下空间慢行为视角的连通性能评价有待开展进一步的深入分析。本研究以高铁站域地下空间为研究对象，以行人步行为主要行为方式，首先参考有关研究对研究范围进行了界定，其次通过空间句法等方法对空间内部连通整合布局模式进行量化计算，并选取经典测度指标为度量标准，针对上海虹桥站域地下空间案例进行实例研究，提出连通整合优化方案并进行对比分析，以此归纳针对高铁站域地下空间连通

整合规划的相关策略。

1 高铁站域地下空间研究范围界定

高铁站域地下空间从属于城市地下空间，合理界定其空间范围对提高连通整合性能评估具有重要意义。对于站域地下空间的范围，学界中普遍采用以车站为中心，不同长度为半径作圆划分影响区的形式进行界定。研究参考两种理论，如表 1 所示。

考虑到高铁车站对于周围地下空间的影响范围，本研究中选取以高铁站为中心，半径 600 m 范围作为高铁站域地下空间的核心区，600 ~ 1 000 m 为高铁站域地下空间的影响区。研究中高铁站域地下空间研究范围的界定，选择在核心区内地下空间中筛选与高铁站相互连通的地下空间作为站域地下空间，独立的地下空间则不纳入研究范围^[10]。需要注意的是，此处的相互连通包括直接连通和间接连通。高铁站域地下空间研究范围的示意图如图 1 所示。

2 高铁站域地下空间模型构建

2.1 理论基础

空间句法理论于 20 世纪 70 年代由伦敦大学学院的 Bill Hillier 教授等人提出，其理论基础主要有以下 3 点：空间的自然法则、个人的空间认知域社会对空间的影响以及空间对个人与社会的影响^[11]。

空间句法理论作为一种描述人与空间关系的语言，学界中有学者将其应用于地下空间与城市轨道交通中。罗克乾等^[12]以空间句法为理论指导，综合量化数据与相关性分析对提升地下空间活力给予建议和讨论。LAW 等^[13]编写算法，将路网线段的速度、成本等性质作为权重，参与到空间句法变量的计算中，研究了伦敦站域地下空间

表 1 空间范围界定相关研究

理论提出者	理论内容
罗兰 ^[8]	总结出两个与地铁站域地下空间范围有关的概念：“影响区”和“合理区”。并提出以车站为核心，步行 5 ~ 10 min 距离(400 ~ 800 m)为站域地下空间的影响范围为开发站域地下空间的区域
POL ^[9]	将高铁站区划分为 3 个可开发区域，提出了“3 个发展区”的结构模型。其中高铁站点周边半径 800 m 内为核心区，车站周边半径 1 500 m 以上为车站影响区

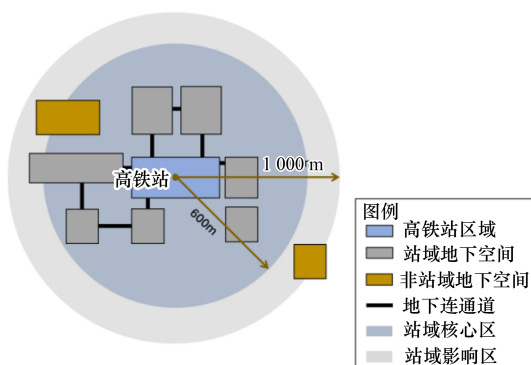


图 1 研究范围

的连通网络结构效应。杜杨^[14]以空间句法分析了上海市五角场站域地下空间的地下步行系统,并以防灾为视角提出了规划布局策略。当前学界中针对地下空间的连通整合研究多应用于宏观的城市网络与混合交通体系研究中,以空间句法进行面向高铁站域的地下空间连通整合研究还有待开展进一步的深入分析。

基于此,文章以空间句法为研究工具,以现有案例的站域地下空间连通情况为基础,通过轴线分析法构建高铁站域地下空间连通整合评价模型,选取空间句法的经典测度指标进行高铁站域地下空间连通性能评价,并通过更改流线规划等尝试优化连通整合评价模型,从而总结出相关规律并为后续规划提供参考。

2.2 模型构建

文章主要研究对象为高铁站域地下空间。考虑到当前高铁站域地下空间竖向分层利用中主要集中于地下 2~4 层,且地下 3、4 层多用于地下停车,同时,当前站域地下空间连通网络大多停留在单层地下空间^[15],基于此,本研究提出“主连通层”的概念,即在高铁站域地下空间中选取地下空间规模最大、连通设施最全面的层作为整个高铁站域地下空间连通整合评价的代表平面进行空间分析^[16]。

2.2.1 分析方法

空间句法常用的分析方法主要有凸状空间分析法、轴线分析法以及视域分析法。站域地下空间受制于其空间关系较为复杂且行人视线在其中的视线不仅受到自然环境的阻隔,也会由于建筑物边界而产生影响,因此凸状空间分析法和视域分析法适用性不高。因此,采用轴线分析法进行

模型构建及分析。

2.2.2 研究内容

主要研究内容包括高铁站域地下空间模型构建、空间句法测度指标计算对比以及案例连通整合优化对比,具体研究流程如图 2 所示。

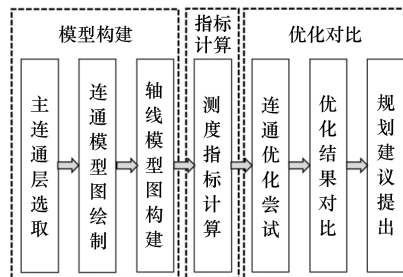


图 2 研究流程

2.3 指标参数

空间句法的常用测度指标主要有连接值、控制值、深度值、整合度、选择度以及可理解度。本研究结合研究对象特点选取空间的局部整合度用以评估局部空间的可达性,选取选择度用以衡量空间被穿行的可能性,选取可理解度用以衡量高铁站域地下空间的行人感知度,进行连通整合性能的综合评价。空间句法测度指标如表 2 所示。

3 高铁站域地下空间案例研究

3.1 案例背景

上海虹桥站位于上海市闵行区。其东侧为上海虹桥国际机场,西侧为虹桥商务区以及国家会展中心。上海虹桥站作为国内站城融合开发高铁站域地下空间的典范,其地下空间布局有“一轴+一网”的连通空间,具有较为鲜明的连通整合特色,其开发以及综合利用已经形成完备的系统。

3.2 案例计算

3.2.1 模型构建

上海虹桥站域地下空间的主要研究范围为东至虹桥二号航站楼,西至虹桥商务区核心区的全部地下空间,主要分为 3 个部分:车站范围地下空间、虹桥国展中心地下连通道以及虹桥商务区核心区地下空间,具体地下空间分布情况如图 3 所示。考虑到车站主体仅开发地下一层空间,且主要地下连通道——虹桥国展中心连通道多布局于地下一层,赋予了地下一层空间重要的地下连通功能。因此,选取上海虹桥站域地下空间中地下

表 2 空间句法测度指标

测度指标	指标定义	计算方法
整合度	指空间系统中某一元素与其他元素之间的集聚或离散程度,衡量了一个空间作为目的地吸引到达交通的能力,反映了该空间在整个系统中的中心性。整合度越高的空间,可达性越高,中心性越强,越容易集聚人流。	$R_A = \frac{N-2}{2(M_d-1)} \quad (1)$ 式中:M_d 为该节点的平均深度值;N 表示节点总数,个
选择度	指空间系统中某一元素作为两个节点之间最短拓扑距离的频率,考察空间单元作为出行最短路径所具备的优势,反映了空间被穿行的可能性,选择度越高的空间,则更有可能被人流穿行。在空间句法中,选择度常常和整合度同时出现,作为评价空间性能的不同指标。	$C = \frac{\log_2 \left[\frac{1}{(N-1)(N-2)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sigma_{(i,x,j)} + 1 \right]}{\log_2 \left[\sum_{i=1}^N t(x,i) + 3 \right]} \quad (2)$ 式中:C 为节点选择度;$t(x,i)$ 为节点 x 到 i 的最短拓扑距离;$\sigma_{(i,x,j)}$ 为节点 i 过 x 到 j 的最短拓扑距离;N 表示节点总数,个
可理解度	其用于描述人对复杂大尺度空间认知的难以程度的空间构型属性。通俗而论,其适用于衡量从一个空间所看到的局部空间结构,是否有助于建立起整个空间系统的图景,能否作为其看不到的整个空间结构的引导。该指标越高表示该地下空间的使用者能够更便利地从局部空间感知整体空间。	$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C}) (GI_i - \overline{GI}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2 \sum_{i=1}^N (GI_i - \overline{GI})^2} \quad (3)$ 式中:N 为节点总数,个;C_i 表示节点 i 的连接值;$\bar{C}$ 表示所有节点的平均连接值;GI_i 表示节点 i 的整合度;$\overline{GI}$ 是所有节点的平均整合度



图 3 上海虹桥地下空间分布情况

一层为地下空间“主连通层”,以地下一层的连通能力进行站域地下空间的连通整合性能评价。

3.2.2 指标计算

主要测度指标为以局部整合度以及选择度衡量可达性等性能,因此需要选择关键节点进行横向对比。考虑到上海虹桥站域地下空间布局主要是以地下步行空间为主体的“一轴一网络”结构,关键点的选取应当覆盖行人出行的主要步行空间。故分别在高铁站主体地下空间、地下连通道轴线中心以及地下连通道网络中心,设置 5 个研究关键点。关键点设置以及计算结果如图 4 所示。

3.2.3 结果分析

各关键点的局部整合度关系为 $A > B > D > C > E$, 节点选择度关系为 $D > B > A > C > E$, 空间可理解度为 0.504。综合来看,处于连通中心轴线的节点 A 、 B 、 D 在可达性以及网络穿行度方面有着更好的表现,而作为整个网络“一轴 + 一网”连

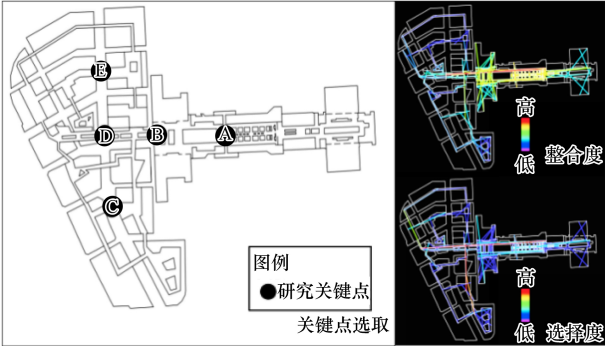


图 4 上海虹桥站域地下空间关键点选取及计算结果

通结构衔接中心位置的节点 B 在网络可达性方面相较于其他节点表现更好。

3.3 规划优化

为了提升上海虹桥站域地下空间的连通性能,同时考虑到连通空间中“一轴”空间流线较为固定,可优化程度有限。因此规划以“一网”连通结构为主要优化对象,考虑到地下空间建设的不可逆性,在不去除现有地下连通空间的前提下,主要提出以下两种优化策略。

3.3.1 构建连通副中心

将连通 4 个及以上地块的连通区域定义为“站域地下空间连通中心”。该案例中,节点 D 所 处 国 展 中 心 地 下 连 通 道 为 一 个 连 通 中 心, 考 虑 到 连 通 中 心 对 于 周 边 地 下 空 间 连 通 性 的 提 升, 此 处 分 别 在 连 通 中 心 南 北 两 侧 构 建 一 个 连 通 副 中 心。

3.3.2 构建连通次主轴

分析上海虹桥站域地下空间连通结构为“一轴一网络”的主要结构,其中“一轴”结构中包括从虹桥 2 号航站楼到虹桥商务区核心区的贯穿东西的步行中轴线。此优化方案即为在虹桥商务区连通中心设置垂直于连通主轴的连通次主轴,上述两种优化方式及建模结果如图 5 所示。

3.4 对比分析

根据上文确定的关键节点选取规则,上述两种优化方案计算结果对比如图 6 所示。由图 6 可知:优化方案一中,除了节点 A 外,其他关键节点的局部整合度均有不同程度的提高。其中节点 E 提升幅度较为明显,节点 B、C、D 则略有提升。同时,所有节点的选择度均有所提升,节点 A、B、E 的选择度提升较为明显。优化方案二中,节点 C、D、E 的局部整合度有所提升,而 A、B 两节点的局部整合度则产生了不同程度的下降。同时,各节点的选择度均有所提升,其中节点 D、E 提升较为明显。由此可见,设置次主轴对于沿

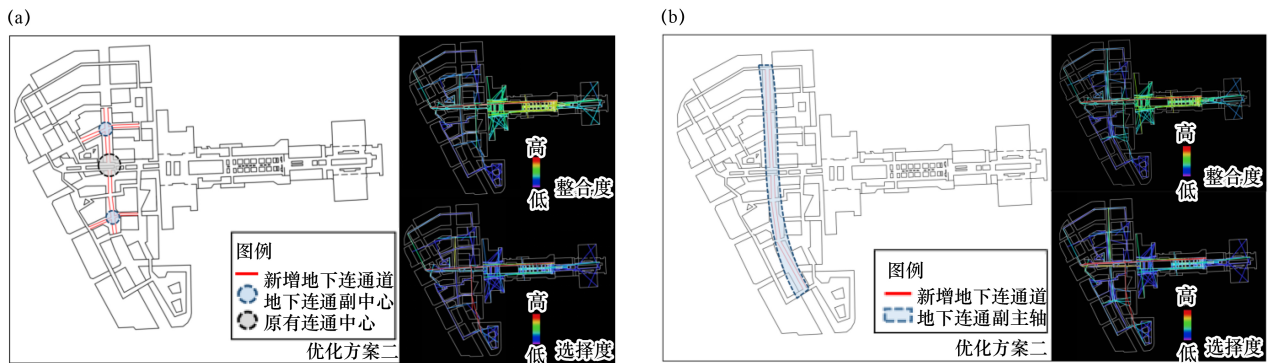
次主轴走向的空间可达性有较好提升,对于其他空间可达性影响较弱,对较远处的空间产生的负面效果更加明显。

据此可知,在连通中心附近设置连通副中心,有助于提升连通中心附近的空间可达性,但是会对空间距离较远空间的可达性产生负面影响。同时对于空间中的行人空间穿梭可能性会产生全局性的提升。同时,设置连通副中心有利于提高行人通过局部感知整体的情况,而设置连通副主轴则会增强局部空间性能,减弱行人对于高铁站域地下空间的整体感知。

3.5 策略总结

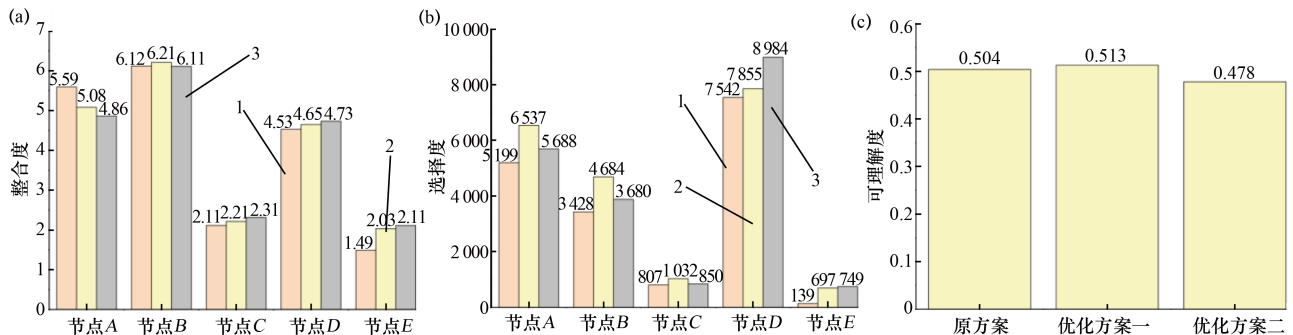
以上海虹桥站为研究对象进行了案例研究,通过模型构建、参数计算、对比分析,得到经验如下。

(1) 连通中心对于站域地下空间连通性能提升呈现较强的整体性。连通中心对于周围空间的连通性能以连通中心为圆心,呈圆形辐射提升,对于站域地下空间连通能力影响呈整体性提升效



(a) 优化方案一; (b) 优化方案二

图 5 两种优化方案建模及计算结果



(a) 整合度对比; (b) 选择度对比; (c) 可理解度对比

1—原方案; 2—优化方案一; 3—优化方案三。

图 6 对比分析结果

果较好。因此对于已有连通中心的站域地下空间, 可通过设置连通副中心的方式扩大其连通中心的影响区域。

(2) 连通主轴对于站域地下空间连通性能提升呈现较强的局部性。连通主轴对于站域地下空间连通能力的提升范围为沿主轴方向类线性分布, 其对于主轴区域站域地下空间连通能力的提升更为显著, 对于区域范围外较远空间的连通能力可能产生负面影响。

(3) 高铁站域地下空间布局中可以考虑将连通轴与连通中心组合布置以提高连通能力。本研究中, 上海虹桥的“一轴一网络”连通结构可以归纳为一条连通轴和一个连通中心的组合形式, 实践证明其具有良好的连通性能。将二者组合有利于发挥其优势, 提高高铁站域地下空间的连通整合能力。

4 结 语

伴随着高铁站域地下空间开发的持续深入, 其连通整合性能正在成为影响旅客出行效率、通行体验的重要影响因素, 以更为精确、科学的视角对其进行系统性研究具有重要的现实意义。面向高铁站域地下空间的连通整合问题, 以空间句法为主要模型构建方法, 提出了高铁站域地下空间连通整合模型构建方法, 通过对上海虹桥的典型案例进行了建模计算, 对计算结果对比分析后总结出适宜性连通整合建议, 为高铁站域地下空间连通整合提供了借鉴。但需要注意的是, 在研究过程中对空间句法模型在高铁站域地下空间中的应用进行了相应简化, 例如忽略了行人在地下空间中的趋光性, 将整体连通整合性能抽象于主连通层进行建模计算, 同时对于空间阻隔对行人出行的影响也进行了统一性设置。在后续研究中应当从上述方面入手, 在模型精度以及理论适用方面进行深化, 进一步提升研究的精确度以及准确性。

参考文献:

[1] 李春舫. 站与城: 城市更新背景下的站城一体化[J]. 华中建筑, 2021, 39(4): 97-101.

- [2] 李建鑫, 王雪. 日本轨道交通站点与周边协同发展的经验借鉴: 以新宿站为例[J]. 上海城市规划, 2021(5): 110-115.
- [3] 王国伟, 张茂然, 唐杨, 等. 乡村振兴战略背景下县域农村公路网的规划[J]. 工程建设, 2021, 53(2): 44-48.
- [4] GAMAYUNOVA O, GUMEROVA E. Solutions to the Urban Problems by Using of Underground Space. Procedia Engineering[J], 2016(165): 1637-1642.
- [5] 樊鹏涛, 郑云昇, 魏巍. 站城融合, 适应城市视角的高铁车站设计策略[J]. 铁道经济研究, 2022(S1): 73-76; 80.
- [6] 周浪雅. 高速铁路综合枢纽站城融合模式及交通组织方法研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2021.
- [7] 阚凯. 哈尔滨西客站地区地下空间开发与规划策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [8] 罗兰. 地铁站域地下空间开发与交通: 土地特征相关性研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [9] POL P. M. J. A Renaissance of Stations, Railways and Cities, Economic Effects, Development Strategies and Organisational Issues of European High-speed-train Stations. [J] Journal of Virology, 2002, 72(6): 5046-5055.
- [10] 全树远, 董蕴豪, 乔永康, 等. 地铁域地下空间系统的交通效能评价: 以上海市中心城区典型车站为例[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S1): 152-162.
- [11] HILLIER B. Space is the Machine: A Configurationally Theory of Architecture [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [12] 罗克乾, 沈中伟. 基于空间句法的城市地下空间活力研究: 以成都市轨道交通站点接驳的地下空间为例[J]. 南方建筑, 2019(4): 116-121.
- [13] LAW S, CHIARADIA A, SCHWANDER C. Towards a multimodal space syntax analysis: A case study of the London street and underground network[J]. Dissertations & Theses Gradworks, 2012.
- [14] 杜杨. 基于空间句法的站域地下空间防灾研究[J]. 低温建筑技术, 2023, 45(9): 22-26.
- [15] 毛宁, 孙伟增, 杨运杰, 等. 交通基础设施建设与企业数字化转型: 中国高速铁路为例的实证研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(10): 47-67.
- [16] 王国伟, 张茂然, 唐杨, 等. 乡村振兴战略背景下县域农村公路网的规划[J]. 工程建设, 2021, 53(2): 44-48.
- [17] 彭芳乐, 乔永康, 李佳川. 上海虹桥商务区地下空间规划与建筑设计的思考[J]. 时代建筑, 2019(5): 34-37.