

基于空间句法的武汉轨道交通网络结构分析

李梦

【摘要】 机动车拥有量的持续增长使城市交通问题日益严重，轨道交通以其运量大、污染小、消耗低的优势成为城市交通体系的重要组成部分。空间句法作为近年来新兴的一种分析城市形态和交通的方法，其理论和模型对轨道交通的网络结构也能进行一定程度的定量分析。本文以武汉市轨道交通规划为例，使用凸空间模型以及深度值、不对称值、可达性指标值以及整合度值等形态分析变量对武汉市轨道交通网络进行评价，研究显示空间句法能够定量分析轨道交通中各条线路以及重要站点的可达性。

【关键词】 空间句法；武汉市；轨道交通；网络结构分析

1 武汉轨道交通背景

1.1 武汉市概况

随着“中部崛起”战略的提出和 1+8 武汉城市圈“两型社会”试验区的批准设立，以及武汉市正面临着建设“国家中心城市”、“国家级综合交通枢纽”、“1+6 城市新格局”等历史发展机遇，武汉市的社会经济发生了巨大的变化，机动车拥有量的持续增长使城市交通拥堵问题日益严重，由此带来的压力成为制约武汉市可持续发展的重要因素。随着武广、合武高铁的开通以及各综合交通枢纽的扩建，以武汉为中心到达各城市的交通圈正悄然形成，区域交通的快速发展对市内综合交通客运体系提出了更高的要求。

1.2 武汉市轨道交通规划

2006 年武汉市首个地铁站在武昌火车站动建，它是武昌火车站改造的配套项目。2008 年 6 月，武汉市轨道交通线网规划正式过得武汉市人民政府的批准，规划确定远景年武汉市轨道交通线网由 3 条市域快线和 9 条市内线构成，总长约 540 公里，其中 3 条市域快线总长 216 公里，设站 74 座，主要连接城市 CBD、城市副中心和新城组群中心以及重大对外客运枢纽；市内线总长 324 公里，设站 240 座，主要是为了满足主城交通需求，适应主城用地结构调整优化、引导主城功能提升。

2008 年底武汉市正式启动新一轮轨道交通建设规划的编制工作，2009 年，建设规划中期成果和规划成果先后通过武汉市政府、湖北省政府以及国家发改委。2011 年经国务院同意，国家发改委正式批复《武汉市城市轨道交通近期建设规划（2010-2017）》。目前，武汉市轨道交通已经开通 2 号线与 4 号线，3 号线于 12 月底将投入使用。近期建设规划

(2010-2017) 在已确定的 3 条轨道交通线路的基础上，结合城市总体规划、武汉市城市轨道交通线网规划，在满足城市客流需求和建设能力的条件下，到 2017 年新增 4 条轨道交通线路建设成线网总规模达到 215.3 公里，基本形成“四线越长江、缝合都市，支撑主城集约发展；两线穿汉水，整合功能，协调江北整体发展；一线贯汉口，激活旧城，提升滨江城市功能”的覆盖三镇的轨道交通网络体系，以适应武汉市“两江三镇、多轴多心”的城市空间格局。



图 1 2017 年武汉市城市轨道交通规划网络图

2015 年 6 月国家发改委印发了关于《武汉市城市轨道交通第三期建设规划（2015-2021 年）》的批复。随着国家中心城市建设的全面推进，以及《武汉市城市总体规划（2010-2020 年）》明确提出在城市空间布局方面改变“摊大饼”现状，全新构建“1 个主城+6 个新城组团”的城市空间格局，近期建设规划（2015-2021 年）在上轮轨道建设规划的基础上，并结合武汉市社会经济发展情况和城市空间 1+6 发展格局，新增 2 号线南延及北延、4 号线西延，新增轴向放射线 11 号线东段（29 号线）、11 号线西段（24 号线）、1 号线西延、21 号线、7 号线南段（27 号线）；主城中心区内建设轨道 5 号线、8 号线二期和 11 号线东段，支撑“两江四岸”重点发展区建设，完善主城轨道骨架网络。近期建设规划（2015-2021 年）通过延伸旧有线路和新增新城线路使武汉市轨道交通线网在总体上呈现放射格局，促进“1+6”城市发展格局的落实，促进土地集约利用，优化主城用地布局。

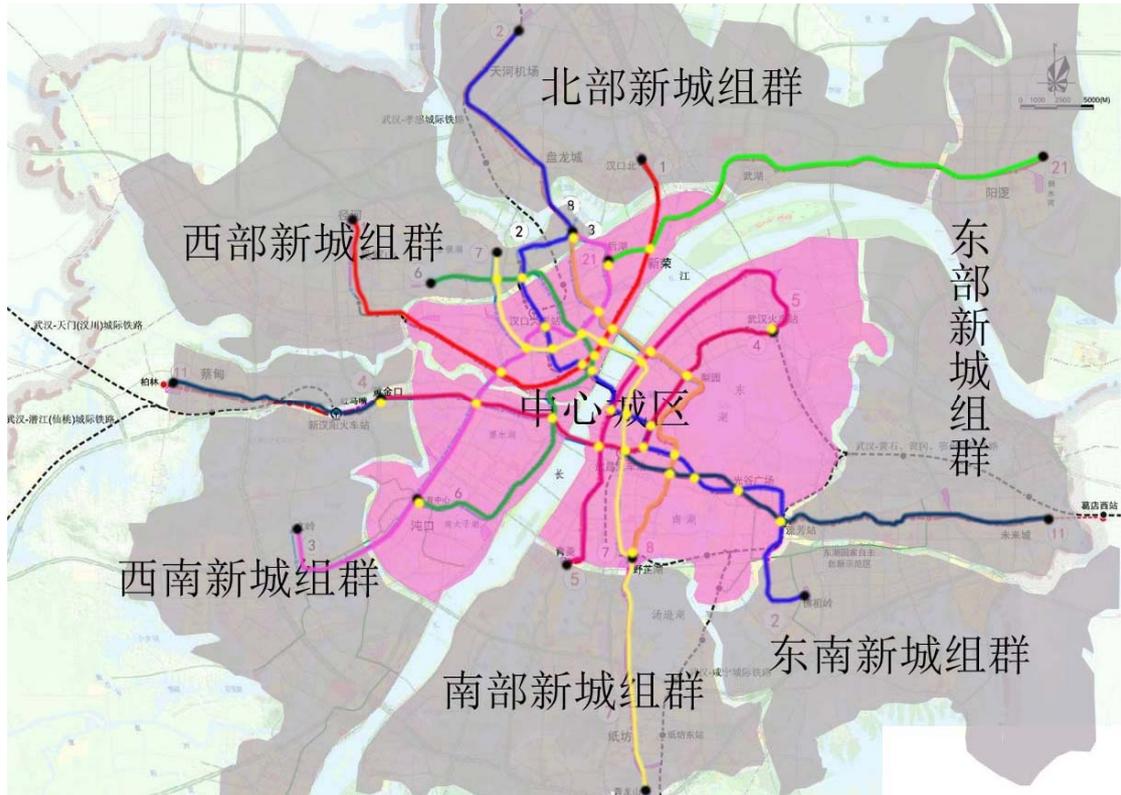


图 2 2020 年武汉市城市轨道交通规划网络图

2 基于空间句法的评价方法

随着武汉市区域交通的快速发展和综合交通枢纽的扩建,对武汉市市内综合交通客运体系提出新的挑战,轨道交通以其运量大、污染小的优点成为武汉解决市内交通的主要工具。以 2017 年武汉市轨道交通规划和 2020 年武汉市轨道交通规划为例,探讨轨道交通网络结构对武汉市空间结构的影响。由于人们在乘坐轨道交通时,考虑更多的是转换次数而非实际距离,在图论上,我们认为其关注点是起始站与目标站之间的拓扑距离,而空间句法模型本质上空间之间的相互关系简化成拓扑连接图。因此,空间句法在一定程度上能够对城市轨道交通进行网络结构分析。

2.1 研究方法：空间句法模型

“空间句法”是研究城市中各个空间之间的拓扑结构关系,其根本出发点是对城市空间进行分割,运用空间句法理论对分割后的空间进行定量描述。英国伦敦大学巴格特建筑学院比尔·希列尔于 1970 年首先提出空间句法理论,其核心思想颠覆了城市空间是社会经济活动的背景,将空间作为社会经济生活的一部分,通过对城市空间、街道以及建筑进行定量描述,从而探究空间组织结构与人类活动之间的相互关系。目前国内学者从不同的方面将空间句法应用于城市,如陈泳、戴晓玲将空间句法应用于城市空间形态的发展演变,^[1]杨滔、盛强将

空间句法应用于商业建筑设计中，^[2]刘承良将空间句法应用于路网空间可达性的分析等。^[3]

空间句法强调空间的重要性，以构型的理论和方法对城市空间进行分割，将城市整体空间分成若干个空间元素的几何代表，不管这些元素是凸空间、轴线、视域范围还是点，在此基础上根据组成元素之间的相互关系形成一个拓扑连接图，其中每个节点代表城市空间中的一个组成元素。空间句法中关于空间分割的理论模型主要有凸空间、轴线模型以及视域模型。轴线模型是用最少且最长的直线绘制的，每条轴线都代表一个独立的空间，多用于城市系统内建筑或比较密集的建筑群构成的街道空间以及城市交通网络。凸空间模型多用于空间呈非线性的情况下，如建筑物内部空间。目前对视域模型的应用较少，在此不予讨论。

2.2 形态分析变量

空间句法基于空间分割的方法，将分割后的空间作为节点，节点之间的相关关系取决于它们之间是否相连，根据节点以及节点之间的关系导出相应的连接图即拓扑结构图，由此得出基于拓扑计算的句法变量。Hiller 在《空间的社会逻辑》一书中提出 3 个可量化的传统形态分析变量，分别为大小、集合度和不对称值，其中不对称值可作为评价网络拓扑结构可达性指标。

$$\text{不对称值: } RA_i = \frac{2(MD_i - 1)}{n - 2}; \quad (1)$$

其中， n 为拓扑关系图中的节点个数， i 为节点 i ， MD_i 为平均深度值。

$$\text{平均深度值: } MD_i = \frac{\sum_{j=1}^n d_{ij}}{n - 1}; \quad (2)$$

深度值表示拓扑图中从节点 i 到达任意节点的距离，其中相邻节点之间的距离为一步， d_{ij} 它表示 i 空间到达 j 空间转换的次数，而非实际距离。 MD_i 为节点 i 到其他所有节点的最短路程的平均值，代表从节点 i 到其他所有节点的便捷程度。 MD_i 值越大，说明从该节点到其他节点所经过的转换次数越多，则该节点便捷程度较差，反之亦然。

由于 MD_i 受系统中节点数目的影响较大，P.steadman 提出用不对称值消除影响即 RA_i ， RA_i 表示系统中节点 i 的便捷程度，其中 RA_i 越大，说明该节点的便捷程度越差； RA_i 越小，该节点便捷程度越好。为了符合值越大，可达性越高的习惯，故将不对称值的倒数作为评价节点的可达性指标 AI_i 。

$$\text{其中, } AI_i = \frac{1}{RA_i}; \quad (3)$$

空间句法模型中还有一个比较重要的形态分析变量：整合度 (*Intergration*)， I_i 是针对具体元素而言的，整合度越高，说明该节点的可达性越高；反之亦然。在空间句法模型中，根据整合度类别分别赋予颜色，整合度值越高，颜色越偏暖，最大值为红色；整合度值越低，颜色越偏冷，最小值为蓝色。

$$\text{整合度 } I_i = \frac{1}{RRA_i}; \quad (4)$$

$$\text{其中, } RRA_i = \frac{RA_i}{RA_{ofDiamond}}; \quad (5)$$

在拓扑结构中，深度值除了受元素数目的影响，还包括连接关系之间的影响。因为相同元素数目的拓扑结构中，元素之间连接关系的不同会导致深度值差异， RRA_i 是用一个标准拓扑结构 (*RAofDiamond*) 来剔除拓扑结构的影响，*RAofDiamond* 中所有元素的深度值、平均深度值、不对称值等都是是一样的，是一个均值的空间结构。

3 武汉轨道交通网络结构分析

3.1 轨道交通规划线路可达性评价

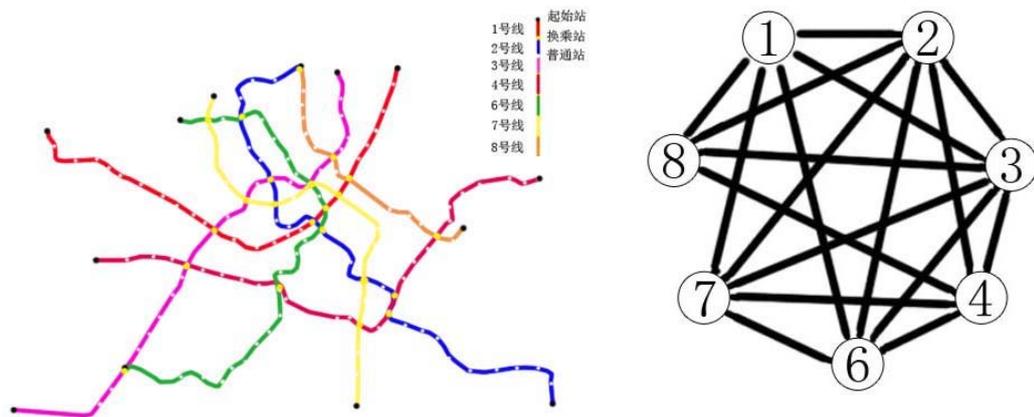


图 3 2017 年武汉市轨道交通规划网络图及网络拓扑结构图

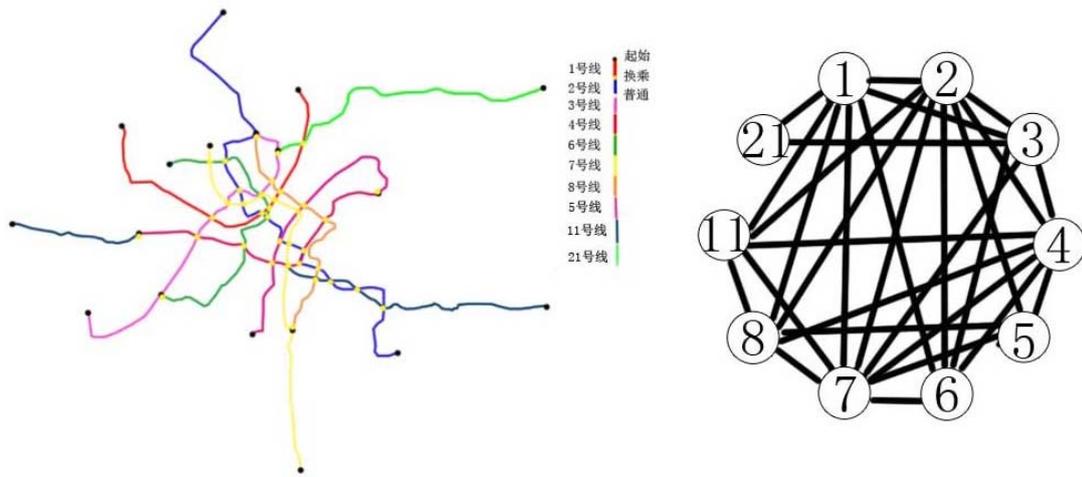


图 4 2020 年武汉市轨道交通规划网络图及网络拓扑结构图

根据 2017 年和 2020 年武汉市轨道交通规划网络图绘制出相应的网络拓扑结构图(图 3、图 4 右侧)。其中节点代表相应的轨道交通线路, 线段代表不同轨道交通线路之间的连通关系, 可通过换乘站进入彼此轨道交通线路中。根据 2.2 中 (1)、(2)、(3) 公式可计算得知各轨道交通线路的可达性指标, 如表 1 所示:

表 1 武汉市轨道交通规划线路可达性指标变量

	2017 年武汉市轨道交通规划网络			2020 年武汉市轨道交通规划网络			
	平均深度	不对称值	可达性指	平均深度	不对称值	可达性指	
	值 MD_i	RA_i	标 AI_i	值 MD_i	RA_i	标 AI_i	
1 号线	1.67	0.067	15	1 号线	1.22	0.056	18
2 号线	1	0	Max	2 号线	1.11	0.028	36
3 号线	1	0	Max	3 号线	1.33	0.083	12
4 号线	1.67	0.067	15	4 号线	1.22	0.056	18
6 号线	1.67	0.067	15	6 号线	1.44	0.11	9
7 号线	1.67	0.067	15	7 号线	1.11	0.028	36
8 号线	1.33	0.133	7.5	8 号线	1.44	0.11	9
				5 号线	1.67	0.17	6
				11 号线	1.44	0.11	9
				21 号线	1.89	0.22	4.5

(平均深度值为 1 表示该节点到达系统中任一节点都只需要一个拓扑距离, 该节点是相对对称的, 故对称值为 0, 可达性指标为系统节点中最高, 用 Max 表示。)

从表 1 中可以看出：

(1)2017 年武汉市轨道交通规划网络中可达性最高的轨道线路分别为 2 号线和 3 号线，并能够从该线路到达轨道交通网络中任一线路；1 号线、4 号线、6 号线和 7 号线的可达性指标值均为 15；轨道交通线网规划中可达性指标值最低的为 8 号线，可达性指标值为 7.5；将可达性指标值分为三个等级，而三个等级相对应的轨道线路拥有换乘站点数目分别为：8~9 个、5~7 个和 4 个。近期建设规划（2010-2017）中确定轨道交通网络体系为四线越长江、两线穿汉水、一线贯汉口；四线分别为轨道交通 2 号线、4 号线、7 号线与 8 号线，其中 4 号线缝合汉阳和武昌，可达性指标值为第二等级，2 号线、7 号线和 8 号线缝合汉口和武昌，其可达性指标值分别为第一、第二、第三等级，将线路可达性指标值与武汉市轨道交通规划图（图 1）进行叠加分析，发现轨道交通线路规划能够满足支撑主城集约发展的要求；两线分别是 3 号线和 6 号线，可达性指标处于第一等级和第二等级，能够满足协调江北整体发展的要求；1 线为 1 号线，贯穿汉口并沿着汉水和长江进行布局，其可达性指标值处于第二等级，能够满足提升滨江城市功能的要求。

(2) 2020 年武汉市轨道交通规划网络中可达性指标值最高的是 2 号线和 7 号线，可达性指标值为 36，其次按照可达性指标值依次为 1 号线、4 号线>3 号线>6 号线、8 号线、11 号线>5 号线>21 号线。轨道交通线路可达性指标值相对应的换乘站点数目分别为：14、9>9>9>7、8、6>5>2。近期建设规划（2015-2021）中确定武汉城市轨道交通规划在空间上呈现放射格局，满足促进“1+6”城市发展格局落实、土地集约利用和主城用地布局优化等要求。结合线路可达性指标值和轨道交通规划网络分析（如图 2），1 号线、2 号线、21 号线经至北部新城组群，其可达性指标值分别处于第一、第二、第六等级，西部新城组群轨道交通线路较多，包括 1 号线、2 号线、6 号线、7 号线、8 号线，其可达性指标值也较高，相对能够支撑起北部新城组群和西部新城组群的发展；而东部、东南、南部、西南新城组群，其可达性虽强，但轨道交通线路较少，相对不能满足新城组群的发展要求，可结合其他类公共交通规划，提高新城组群交通能力。

(3) 分析换乘站点数目与轨道交通线路可达性之间的关系，我们发现二者之间具有较高的相关性，因此我们认为轨道交通站点的可达性是影响轨道接通网络的重要因子。比较 2017 年武汉市轨道交通规划网络可达性和 2020 年武汉市轨道交通网络结构，我们发现线路可达性之间的等级增加，这说明武汉市轨道交通规划网络结构正逐渐合理、丰富。

表 2 2017 年和 2020 年武汉市轨道交通站点整合度值前十位

2017 年武汉市轨道交通站点		全局整合度	2020 年武汉市轨道交通站点		全局整合度
	三阳路	1.517		徐家棚	1.494
	香港路	1.491		大智路	1.434
	大智路	1.465		三阳路	1.353
	江汉路	1.44		积玉桥	1.292
	螃蟹甲	1.44		螃蟹甲	1.258
	循礼门	1.349		江汉路	1.247
	洪山广场	1.328		复兴路	1.247
	王家墩东	1.249		香港路	1.215
	宗关	1.249		黄浦路	1.215
	钟家村	1.249		钟家村	1.205

根据表 2，对比 2017 年、2020 年武汉市轨道交通站点整合度前十位，三阳路、香港路、大智路、江汉路、螃蟹甲、钟家村 6 个换乘站仍然是整合度值较高的站点，均位于交通需求较高的地段。其中，2017 年和 2020 年交通站点整合度高值多位于汉口区，且集中在三江交汇区域，分布极不均匀，尤其表现在汉阳区，主要是因为汉口是武汉乃至中部地区的商业中心、金融中心和交通运输中心，且地势较为平坦，承担较大的交通流量，而武昌、汉阳由于自然地理原因，多湖泊和丘陵限制武昌、汉阳的发展。武昌和汉阳应补充好其他公交类的规划，以满足城市居民出行要求。

表 3 2017 年和 2020 年武汉市轨道交通站点整合度值后十个

2017 年武汉市轨道交通站点		全局整合度	2020 年武汉市轨道交通站点		全局整合度
	堤角	0.841		金台	0.732
	南湖花园	0.833		沌阳大道	0.728
	三金潭	0.823		天河机场	0.721
	黄金口	0.787		青龙山	0.717
	华侨城	0.752		光谷广场	0.713
	武汉火车站	0.752		环湖西路	0.693
	金银湖 1	0.739		柏林	0.632
	金银湖 2	0.739		流芳火车站	0.593
	流芳火车站	0.72		左岭	0.499
	文岭	0.714		光谷一站	0.499

根据表 3，对比 2017 年和 2020 年武汉市轨道交通站点整合度，二者发生了较大的变化，这主要是由于 2020 年轨道交通规划在 2017 年的基础上增加了道路网密度和轨道交通站点。但二者有一个共同的特征，整合度值较低的站点大部分是轨道交通的始发站或终点站，在其他类公共交通规划中应考虑到始发站和终点站的换乘需求，弥补轨道交通服务盲区，从宏观

方面规划武汉市公共交通的均等化，并促进城市空间格局的落实。2017年和2020年武汉市轨道交通规划中，向外集散中心的火车站、机场的整合度值都较低，其中通往机场的轨道交通线路仅有2号线，难以满足集散中心高客流量对交通的需求，应加强换乘站的建设，并增加通往不同区域的轨道交通线路。

4 结语

通过空间句法理论和模型对武汉市2017年和2020年轨道交通规划网络进行评价，研究发现空间句法可以定量分析城市轨道交通规划网络中各条线路和重要站点的可达性。其中，武汉市轨道交通规划网络基本上能够保证城市空间格局的落实，但可达性较高重要站点分布比较集聚，且客流量较大的站点可达性差，应进一步完善轨道交通规划，并结合其他公交类规划，以弥补轨道交通服务的盲点和缺陷。

【参考文献】

- [1] 陈泳,倪丽鸿,戴晓玲,李立. 基于空间句法的江南古镇步行空间结构解析——以同里为例[J]. 建筑师,2013,02:75-83.
- [2] 杨滔,盛强,刘宁. 无之以为用——论空间句法在商业建筑设计中的应用[J]. 世界建筑,2015,04:118-122+137.
- [3] 刘承良,余瑞林,熊剑平,曾菊新. 武汉都市圈路网空间通达性分析[J]. 地理学报,2009,12:1488-1498.
- [4] 刘洋,宋瑞,李志杰. 基于空间句法的轨道交通可达性评价[J]. 都市快轨交通,2014,06:70-74.
- [5] 张轮,朱敏,杨文臣,董德存. 城市轨道交通网络拓扑特性的建模与分析[J]. 城市轨道交通研究,2015,03:28-31.
- [6] 张晋. 城市轨道交通线网结构特性研究[D]. 北京交通大学,2014.
- [7] 马晔,李晓龙. 基于空间句法的上海、北京城市轨道交通网络拓扑分析及比较[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2011,05:689-692.
- [8] 蔡珺,王南. 基于空间句法的城市交通系统研究——以昆明市交通路网和轨道交通规划分析为例[J]. 华中建筑,2010,12:98-102.
- [9] 崔敏,曹荣林,蒋伟. 基于空间句法的西安地铁网络拓扑结构分析[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版),2010,06:124-127+132.
- [10] 程昌秀,张文尝,陈洁,蔡俊. 基于空间句法的地铁可达性评价分析——以2008年北京地铁规划图为例[J]. 地球信息科学,2007,06:31-35.

【作者简介】

李梦,女,硕士,华中科技大学。电子信箱:565228465@qq.com