

文章编号:1671-8879(2014)01-0095-08

# 城市轨道交通枢纽换乘供需的分形综合评价

叶 臻,关宏志

(北京工业大学 交通工程北京市重点实验室,北京 100124)

**摘 要:**为综合评价城市轨道交通枢纽的客运供给能力与枢纽换乘需求之间的供需平衡,根据分形理论,提出了半径维数、网格信息维数和枢纽关联维数;采用这 3 种分形维数,对城市轨道交通枢纽的客运供给能力分布以及枢纽的换乘需求分布进行了量化,进而提出了一致性指数与分形综合指数,对城市轨道交通枢纽的换乘供需平衡问题进行了评价;最后以北京市轨道交通线网为例,验证了方法的有效性。研究表明:半径维数代表了枢纽换乘供需从城市中心向周边的分布变化趋势,网格维数代表了枢纽换乘供需在空间分布的均衡性,枢纽关联维数代表了轨道线网各枢纽之间的通达性;分形一致性指数与分形综合指数则分别从单一方面与整体上评价了供给能力与换乘需求之间的供需平衡;研究为城市轨道交通线网及枢纽的规划与后评价提供了有益参考。

**关键词:**交通工程;城市轨道交通;分形理论;枢纽换乘需求;分形综合指数

**中图分类号:**U491

**文献标志码:**A

## Comprehensive evaluation of supply and demand of urban rail transit terminals with fractal theory

YE Zhen, GUAN Hong-zhi

(Beijing Key Laboratory of Transportation Engineering, Beijing University of Technology,  
Beijing 100124, China)

**Abstract:** Based on the fractal theory, this research adopted the radius fractal dimension, grids information fractal dimension and terminal relation fractal dimension for the comprehensive evaluation of the balance of supply capacity and transfer demand of urban rail transit terminals. With the above three fractal dimensions, the research made quantitative analysis on the distribution of transportation supply capacity and transfer demand of urban rail transit terminals. Then the consistency index and comprehensive consistency index were introduced for the evaluation of the balance of supply and demand for urban rail transit terminals. Taking rail transit network of Beijing as an example, this article verified the validation of the model and algorithm. The results show that the radius fractal dimension represents the change trend from the city core to the periphery of transfer supply and demand of rail transit network, grids information fractal dimension represents the balance of spatial distribution of the transfer supply and demand and terminal relation fractal dimension represents the accessibility of terminals. The consistency index and comprehensive consistency index have represented the balance of supply capacity and transfer demand from different aspects. The research results can provide a useful reference for the application of the study

收稿日期:2013-06-21

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2012CB725403);国家自然科学基金重点项目(51338008)

作者简介:叶 臻(1981-),男,北京市人,工学博士研究生,E-mail:zhenye@bjut.edu.cn。

on planning and post evaluation for urban rail transit network and terminals. 4 tabs, 5 figs, 16 refs.

**Key words:** traffic engineering; urban rail transit; fractal theory; terminal transfer demand; comprehensive consistency index

## 0 引言

轨道交通是城市交通系统的重要组成部分,由于轨道交通线网中的枢纽承担了绝大部分的客运换乘需求,线网的供需平衡特性可以通过枢纽的供需平衡特性表现出来。因此如何评价轨道交通枢纽的供给对换乘需求的适应能力,是研究轨道交通线网供需平衡的一个重要问题。城市轨道交通的线网形态复杂多样,传统的量化评价方法,如线网长度、线网密度等难以准确描述城市轨道交通线网的分布特征。由于分形理论能够描述复杂的形状形态<sup>[1-4]</sup>,针对城市轨道交通线网的供需问题,国内外学者基于分形理论进行了相应研究:Benguigui 等发现了大巴黎地区的轨道交通系统网络长度与研究区域半径之间的分形关系,并测算出了相应的分形维数<sup>[5-6]</sup>;Kim 等研究了韩国首尔市的轨道交通线网,计算了轨道长度分布与轨道站点分布的半径分形特征<sup>[7]</sup>;Antonio 根据历史数据研究了欧洲多座大型城市的轨道交通线路长度与人口的分形关系<sup>[8]</sup>;孙壮志讨论了城市轨道交通网络形态的分形计量问题<sup>[9]</sup>;马超群等进行了城市轨道网络与城市人口协调性的分形量化分析<sup>[10]</sup>。以上研究存在 2 个问题:①描述分形特征的有效参数是分形维数,而城市轨道交通线网的分形特征可以采用多种分形维数描述,但以往研究较多地仅从一种分形维数入手研究,较少采用多个分形维数进行综合分析;②以往的分形研究多从交通网络的形态入手,并未涉及网络中由于客流分配而产生的枢纽换乘需求。基于此,本文采用 3 种分形维数:半径维数、网格维数和枢纽关联维数,通过这 3 种分形维数对轨道线网枢纽的客运供给能力及枢纽换乘需求进行量化;针对每种分形维数的量化结果,计算相应的一致性指数,用以代表轨道交通枢纽的客运供给能力与换乘需求的一致性;最后根据 3 种分形一致性指数,计算分形综合指数,综合地评价轨道交通枢纽的客运供给能力与换乘需求在空间分布上的供需平衡。

## 1 研究方法

### 1.1 研究思路

在城市轨道交通线网中将出行分布(即 OD)矩阵输入,进行流量分配计算,得到线网中每个枢纽的换乘流量需求,之后计算如下参数:①站点-半径维数、换乘需求-半径维数和半径维数一致性指数;②站点-网格信息维数、换乘需求-网格信息维数和网格信息维数一致性指数;③枢纽关联维数和牛鸦比(关联维数一致性指数);④分形综合指数。

### 1.2 流量分配模型

针对轨道交通线网中的客流分配问题,较为可行的方法是采用网络均衡分配理论,基于此,有中国学者提出了各自的城市轨道交通线网客流分配数学优化模型<sup>[11-13]</sup>。本文采用 Logit 模型<sup>[14]</sup>,即轨道交通线网出行路径上的流量分配满足

$$f_{rs,p} = q_{rs} \frac{e^{-\alpha c_{rs,p}}}{\sum_{p \in P_{rs}} e^{-\alpha c_{rs,p}}}, \quad \forall r \in R, s \in S \quad (1)$$

式中: $q_{rs}$  为 OD 对  $(r, s)$  之间的总出行需求; $f_{rs,p}$ 、 $c_{rs,p}$ 、 $P_{rs}$  分别为 OD 对  $(r, s)$  之间路径  $p$  上的分配流量、路径的出行广义费用以及 OD 对  $(r, s)$  之间的路径集合; $\alpha$  为出行者对路径出行广义费用的感知误差参数; $R$  为出发站集合; $S$  为目的站集合。

### 1.3 半径维数和一致性指数

#### 1.3.1 站点-半径维数

站点-半径维数定义为:轨道交通线网的站点密度(客运供给能力)从城市中心点向周边区域的变化趋势。设有一面积为  $A$  的矩形城市区域,设城市中心点  $O$ ,轨道交通线网分布其中。如果轨道交通线网的站点分布是分形的,则轨道交通线网的站点数量  $N(r)$  与相应的城市半径  $r$  之间有如下关系<sup>[7]</sup>

$$N(r) \propto r^{D_N^R} \quad (2)$$

式中: $N(r)$  为以  $O$  为中心,半径为  $r$  的城市区域范围内的轨道站点数量; $D_N^R$  为轨道交通线网的站点-半径维数, $D_N^R = 2$  时轨道站点从中心点向外呈均匀分布, $D_N^R < 2$  时轨道站点密度从中心点向外递减,

$D_N^R > 2$  时轨道站点密度从中心点向外递增。

$D_N^R$  的计算方法:以城市中心点  $O$  为圆心作圆,取半径  $r=1,2,\dots,n$ ,如图 1 所示。依次计算半径为  $r$  的圆中的轨道交通站点之和  $N(r)$ ,将点列  $(r, N(r))$  绘在双对数坐标图上,如图 2 所示。点列呈对数线性分布的区域称为无标度区,直线的斜率便是站点-半径维数  $D_N^R$ 。斜率越大表明轨道交通站点密度从中心点向外递增得越快或递增得越慢。

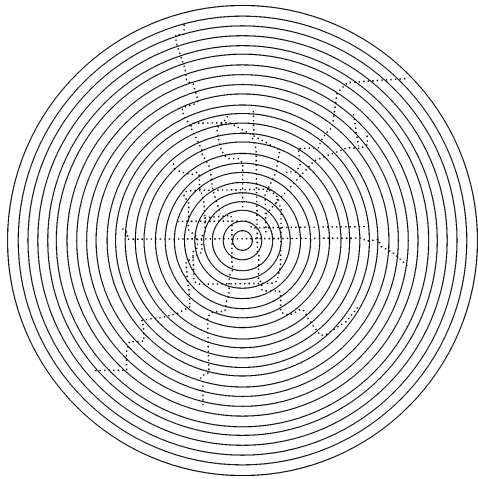


图 1 轨道交通线网区域与城市同心圆

Fig. 1 Rail transit network and concentric circles

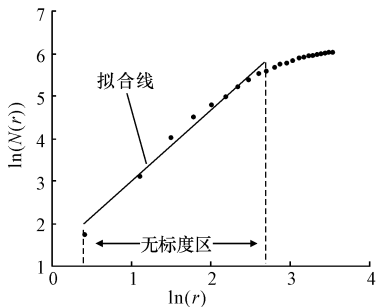


图 2 站点-半径维数

Fig. 2 Fractal dimension of station-radius

### 1.3.2 换乘需求-半径维数

按 1.3.1 节中的方法,半径为  $r$  的圆中的枢纽换乘需求之和  $Q_{TRS}(r)$  为

$$Q_{TRS}(r) = \sum_{i=1}^m q(r, i), \quad \forall 1 \leq i \leq m \quad (3)$$

式中: $q(r, i)$  为轨道交通线网达到网络均衡时,半径为  $r$  的圆形区域内第  $i$  个枢纽(半径为  $r$  的圆形区域内共有  $m$  个枢纽)内的不同轨道线路间的换乘流量之和。

改变  $r$ ,依次计算  $Q_{TRS}(r)$ ,将点列  $(r, Q_{TRS}(r))$  绘在双对数坐标图上,点列呈对数线性分布的区域

称为无标度区,直线的斜率便是换乘需求-半径维数  $D_{TRS}^R$ 。 $D_{TRS}^R$  反映了轨道交通线网枢纽的换乘需求分布从城市中心点向周边区域的变化趋势。

### 1.3.3 半径维数一致性指数

半径维数一致性指数  $\varphi$  为

$$\varphi = \begin{cases} 1 - \frac{|D_{TRS}^R - D_N^R|}{D_N^R} & D_{TRS}^R \leq 2D_N^R \\ 0 & D_{TRS}^R > 2D_N^R \end{cases} \quad (4)$$

$\varphi$  越大,表示 2 个分形维数越一致,即轨道交通线网的客运供给能力与枢纽换乘需求从城市中心点向周边区域的变化趋势越一致。如果  $D_{TRS}^R > 2D_N^R$ ,表明 2 个分形维数代表的分布的变化趋势相差过大,无可比性, $\varphi=0$ 。

## 1.4 网格信息维数和一致性指数

### 1.4.1 站点-网格信息维数

现在从另一个角度,即分布的均衡性来研究轨道交通线网的站点(客运供给能力)的空间分布。同样取面积为  $A$  的矩形城市区域,区域内轨道交通站点的总数量为  $N$ 。将矩形区域的边长视为 1 个单位(长边与宽边取不同单位),将长边与宽边  $k$  等分,则矩形区域分成了  $k^2$  个大小相同的网格,网格边长为  $l=1/k$ ,如下页图 3 所示。若第  $i$  个网格中存在的站点数量为  $N_i$ ,则第  $i$  个网格中站点出现的概率为  $P_i = N_i/N$ ,由此可以计算出矩形城市区域内,轨道交通站点分布的信息量为<sup>[3]</sup>

$$I_N(l) = - \sum_{i=1}^{k^2} P_i \ln(P_i), \quad \forall 1 \leq i \leq k^2 \quad (5)$$

如果轨道交通线网的站点分布是分形的,则信息量  $I_N(l)$  与网格边长  $l$  之间的关系为

$$I_N(l) \propto l^{D_N^l} \quad (6)$$

式中: $D_N^l$  为轨道交通线网的站点-网格信息维数,表示在矩形城市区域内,轨道交通线网站点(客运供给能力)在空间上分布的均衡性; $D_N^l$  取值一般介于 0~2 之间; $D_N^l = 2$  时,轨道交通站点呈空间均衡分布; $0 \leq D_N^l < 2$  时, $D_N^l$  越大表明轨道交通站点的空间分布越均衡,反之则越集中。

$D_N^l$  的计算方法:如下页图 3 所示,改变网格边长  $l$ ,可得到不同的信息量  $I_N(l)$ 。将点列  $(\ln(l), I_N(l))$  绘在坐标图上,与图 2 类似,点列呈线性分布的区域称为无标度区,直线的斜率便是站点-网格信

息维数  $D_N^1$ 。

#### 1.4.2 换乘需求-网格信息维数

经过计算可得,矩形城市区域中轨道交通枢纽的总换乘需求为  $Q_{\text{TRS},\text{all}}$ 。按 1.4.1 节中的方法,将矩形区域分成  $k^2$  个网格,第  $i$  个网格中存在的枢纽数量为  $N_{T,i}$  个,则第  $i$  个网格中存在的枢纽换乘需求为

$$Q_{\text{TRS},i} = \sum_{j=1}^{N_{T,i}} q(i,j), \forall 1 \leq j \leq N_{T,i} \quad (7)$$

式中:  $q(i,j)$  为轨道交通线网达到网络均衡时,

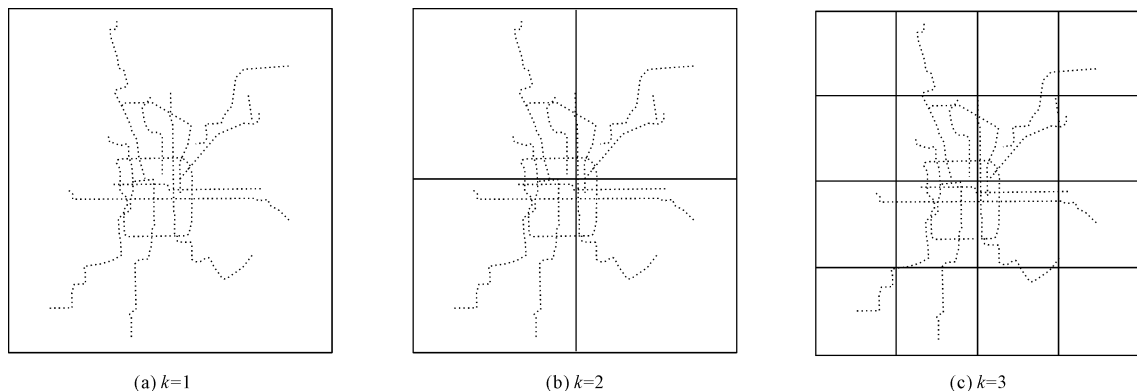


图 3 轨道交通线网与网格示意图

Fig. 3 Rail transit network and grids

#### 1.4.3 网格信息维数一致性指数

令网格信息维数一致性指数  $\sigma$  为

$$\sigma = \begin{cases} 1 - \frac{|D_{\text{TRS}}^1 - D_N^1|}{D_N^1} & D_{\text{TRS}}^1 \leq 2D_N^1 \\ 0 & D_{\text{TRS}}^1 > 2D_N^1 \end{cases} \quad (8)$$

与式(4)类似,  $\sigma$  越大,表示从空间分布均衡性上看,轨道交通线网的客运供给能力与枢纽换乘需求的分布趋势越一致。

#### 1.5 枢纽关联维数和一致性指数

枢纽关联维数(后文简称关联维数)与网格信息维数的含义相似,反映了轨道交通枢纽在空间分布上的均衡性。但有所不同的是:网格信息维数的均衡分布是指在指定的城市区域中,枢纽的空间分布情况;而关联维数的均衡分布是指在枢纽分布的区域内,枢纽的空间分布情况,与城市区域的大小无关。另一方面,关联维数还可以反映枢纽之间的通达性(非直线性)。

设某轨道交通线网中,轨道交通枢纽的总数量为  $N_T$ ,则关联函数  $C(y)$  定义为<sup>[3]</sup>

第  $i$  个网格内第  $j$  个枢纽内的不同轨道线路间的换乘流量之和。

则第  $i$  个网格中换乘需求出现的概率  $P_i = Q_{\text{TRS},i}/Q_{\text{TRS},\text{all}}$ 。类似于式(5),改变网格边长  $l$ ,可得到不同的换乘需求信息量  $I_{\text{TRS}}(l)$ 。将点列  $(\ln(l), I_{\text{TRS}}(l))$  绘在坐标图上,点列呈线性分布的区域称为无标度区,直线的斜率便是换乘需求-半径分形维数  $D_{\text{TRS}}^1$ 。  $D_{\text{TRS}}^1$  反映了轨道交通线网枢纽的换乘需求在空间分布上的均衡性。

$$C(y) = \frac{1}{N_T^2} \sum_{i,j=1}^{N_T} H(y - d_{ij}), \forall i \neq j \quad (9)$$

$$H(y - d_{ij}) = \begin{cases} 1 & d_{ij} \leq y \\ 0 & d_{ij} > y \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $y$  为尺码;  $d_{ij}$  为  $i, j$  两枢纽之间的距离;  $d_{ij}$  如果是两枢纽之间的欧氏距离,习惯称作乌鸦距离;  $d_{ij}$  如果是两枢纽之间的通过轨道交通线路运行的最短距离,习惯称作乳牛距离;  $H$  为 Heaviside 函数。

如果轨道交通线网的枢纽分布是分形的,则关联函数  $C(y)$  与尺码  $y$  之间的关系为

$$C(y) \propto y^{D_N^S} \quad (11)$$

式中:  $D_N^S$  为枢纽关联维数,  $D_N^S$  的数值一般介于 0~2 之间;  $D_N^S = 2$  时,表明在枢纽分布的区域内,枢纽呈现空间均衡分布;  $0 \leq D_N^S < 2$  时,  $D_N^S$  越大,枢纽的空间分布越均衡,反之则越集中。

$D_N^S$  的计算方法:改变尺码  $y$ ,根据式(9)、式(10),可得关联函数值  $C(y)$ 。将点列  $(y, C(y))$  绘在双对数坐标图上。与图 2 类似,点列呈对数线性分布的区域称为无标度区,直线的斜率便是关联维

数  $D_N^S$ 。

根据上文可知,当  $d_{ij}$  分别取乌鸦距离与乳牛距离,可得到相应的乌鸦-关联维数  $D_{N,crow}^S$  与乳牛-关联维数  $D_{N,cow}^S$ ,进一步可得到牛鸦比  $\gamma$ (即关联维数一致性指数)为

$$\gamma = D_{N,cow}^S / D_{N,crow}^S \tag{12}$$

$\gamma$  的取值介于 0~1 之间,显然  $\gamma$  越接近于 1,表明枢纽之间的通达性越好。

**1.6 分形综合指数**

根据上文得到的 3 种分形一致性指数,为全面地评价轨道交通线网的枢纽换乘供需平衡在空间上的分布特征,提出分形综合指数  $\omega$ ,其表达式为

$$\omega = \varphi \sigma \gamma \tag{13}$$

由于  $0 \leq \varphi \leq 1, 0 \leq \sigma \leq 1, 0 \leq \gamma \leq 1$ ,因此  $0 \leq \omega \leq 1$ 。 $\omega$  越大,表明轨道交通线网枢纽的换乘供需平衡越好。

## 2 算 例

### 2.1 算例说明

选取北京市轨道交通线网(2008 年 12 月、2012 年 12 月、2015 年 12 月)作为研究对象,如图 4 所示。

为便于描述,在线网图中列出换乘枢纽和各条线路的始发站,如图 5 所示。

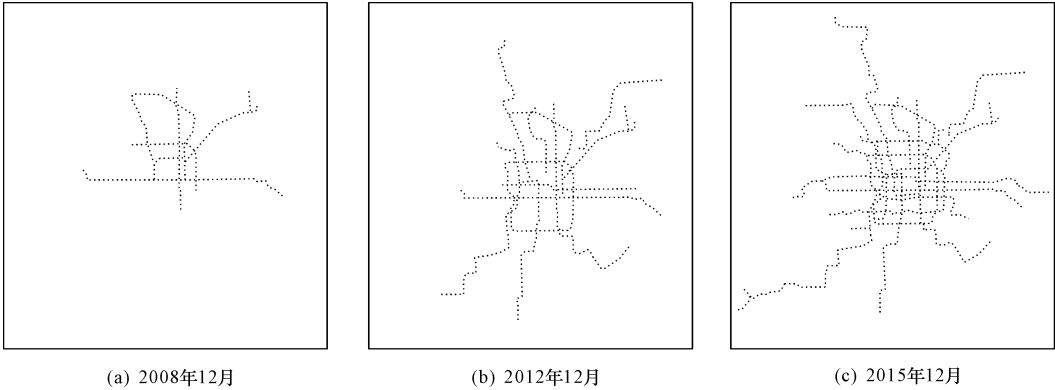


图 4 北京市轨道交通线网站点分布示意图

Fig. 4 Stations distribution of Beijing rail transit network

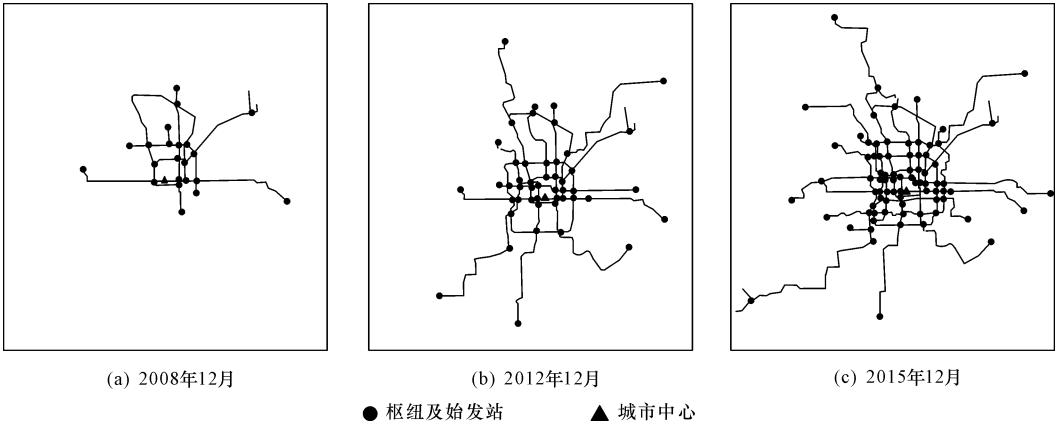


图 5 轨道线网中的枢纽及始发站

Fig. 5 Terminals and originating stations of Beijing rail transit network

在算例中:截至 2008 年 12 月,有运营线路 7 条,运营站点 108 座,其中始发站 11 座,换乘枢纽 15 座。截至 2012 年 12 月,有运营线路 16 条,运营站点 225 座,其中始发站 24 座,换乘枢纽 35 座。规划至 2015 年 12 月,有运营线路 20 条,运营站点

285 座,其中始发站 30 座,换乘枢纽 72 座。

相关数据与参数取值如下。

(1)基础数据:列车区段运行时间(行驶时间+停站时间)、各换乘枢纽的换乘步行时间、早高峰平均发车间隔来源于北京地铁公司公布的资料。轨道交通

现票价  $\tau=2$  元/人次。车厢容量根据北京轨道交通系统采用的 B 型车规格(按 6 辆编组,定员数 1 440 人/列,超员数 1 780 人/列)。根据文献[11-13],时间价值取  $\lambda=40$  元/h;出行者感知误差参数  $\alpha=0.1$ 。

(2)选取天安门西站作为城市中心。

(3)轨道交通出行量:根据北京地铁公司网站公布的数据,北京地铁 2008 年 12 月和 2012 年 12 月的日均出行量分别为 400 万人次和 800 万人次,早高峰时段出行系数约为 0.15,则早高峰时段出行量分别 60 万人次/h、120 万人次/h。根据文献[14],预计 2013 年 12 月北京地铁的日均出行量将达到 1 200 万人次,其早高峰时段出行量为 180 万人次/h。

(4)OD 矩阵:根据文献[15-16],可计算出北京市轨道交通的出行时耗分布比例:出行时耗在 30 min 内的出行比例为 26.7%;出行时耗在 30~90 min 内的出行比例为 53.8%;出行时耗大于 90 min 的出行比例为 19.5%。

表 1 半径维数与一致性指数

Tab. 1 Radius fractal dimensions & consistency indexes

年份	城市中心点	站点-半径维数	拟合优度检验 $R^2$	换乘需求-半径维数	拟合优度检验 $R^2$	半径维数一致性指数
2008	天安门 西站	1.44	0.983	1.22	0.985	0.847
2012		1.61	0.992	1.75	0.989	0.913
2015		1.79	0.989	1.87	0.986	0.957

从表 1 可以看出,在当前参数设定下:①站点-半径维数与换乘需求-半径维数均小于 2,大于 1,说明轨道交通的站点分布和换乘需求分布的分布趋势均从城市中心点向周围区域递减;②随着时间变化,站点-半径维数与换乘需求-半径维数均呈增长趋势,说明随着轨道线网的发展,站点分布与换乘需求分布均是从城市中心向周边均衡分布发展;③3 个年份的一致性指数均较高,表示换乘需求与站点呈

已知某一年份的轨道交通线网共有  $n$  个轨道站点(包括所有的始发站与换乘枢纽,因为始发站与换乘枢纽是主要的客流集散站点),将这  $n$  个站点组成集合  $W$ 。将  $W$  中的任意两两站点组成  $n(n-1)$  个,共  $m$  个 OD 对(2008 年、2012 年和 2015 年分别有 506 个、2 162 个和 6 642 个 OD 对)。根据 OD 对间的最短出行时间,将  $m$  个 OD 对分为 0~30 min、31~90 min、大于 90 min 这 3 组,将早高峰时段出行量按 26.7%、53.8%、19.5%的比例分配给以上 3 组,分配到各组的出行量再平均分配给组内的每个 OD 对,从而生成 OD 矩阵。根据此方法即可得到图 5 中各年份轨道线网的 OD 矩阵。

2.2 数值分析

2.2.1 半径维数分析

根据上述条件,计算结果见表 1,包括站点-半径维数、换乘需求-半径维数、一致性指数。

现相似的分布趋势;④一致性指数呈现增长趋势,2008 年最低,2015 年最高。

2.2.2 网格信息维数分析

如图 4、图 5 所示,为使网格维数具有可比性,各年份的轨道交通线网均采用相同大小的矩形城市区域覆盖。计算结果见表 2,包括站点-网格信息维数、换乘需求-网格信息维数、一致性指数。

表 2 网格信息维数和一致性指数

Tab. 2 Grids information fractal dimensions & consistency indexes

年份	站点-网格信息维数	拟合优度检验 $R^2$	换乘需求-网格信息维数	拟合优度检验 $R^2$	网格信息维数一致性指数
2008	0.92	0.977	0.50	0.969	0.543
2012	1.21	0.987	0.97	0.991	0.802
2015	1.32	0.973	1.18	0.986	0.893

从表 2 可以看出,在当前参数设定下:①换乘需求-网格信息维数普遍要低于同一时间的站点-网格信息维数,说明相对于站点分布,换乘需求的分布更加集中于城市中心;②随着轨道线网的发展,站点-网格信息维数与换乘需求-网格信息维数均呈增长

趋势,说明在相同的城市区域内,轨道交通线网对于城市的覆盖程度在大幅提高,同时站点分布与换乘需求分布均是在向着空间均衡分布发展;③一致性指数较高(2008 年除外),表示换乘需求空间分布与线路站点空间分布呈现相似的分布趋势;④一致性

指数呈现增长趋势,2008 年最低,2015 年最高。

2.2.3 枢纽关联维数分析

令乌鸦距离为两枢纽之间的地理欧氏距离,乳

牛距离为两枢纽之间通过轨道线网的最短运行距离。计算结果见表 3,包括乌鸦-关联维数、乳牛-关联维数、一致性指数。

表 3 关联维数和一致性指数

Tab.3 Relation fractal dimensions & consistency indexes

年份	乌鸦-关联维数	拟合优度检验 $R^2$	乳牛-关联维数	拟合优度检验 $R^2$	关联维数一致性指数
2008	1.63	0.987	1.52	0.992	0.933
2012	1.87	0.988	1.73	0.996	0.925
2015	1.89	0.991	1.77	0.989	0.936

从表 3 可以看出,在当前参数设定下:①乌鸦-关联维数与乳牛-关联维数均呈现增长趋势,且各年的乌鸦-关联维数与乳牛-关联维数均较高(1.50 之上),表明随着轨道线网的发展,在枢纽分布的区域内,各年份枢纽的空间分布较为均衡且均衡性在提高;②2015 年的一致性指数最高,2012 年的最低,但一致性指数没有明显的变化趋势,且 3 年的一致性

指数均较高,表明尽管轨道交通线网向着城市边缘不断发展,各新建枢纽之间欧式距离在不断加大,但整体上枢纽之间的通达性并没有明显的变化,各年份的枢纽之间的通达性均较好。

2.2.4 分形综合指数分析

在上述 3 种分形一致性指数的基础上,计算分形综合指数,计算结果如表 4 所示。

表 4 对比一致性指数和分形综合指数

Tab.4 Comparison of the consistency indexes & comprehensive consistency indexes

年份	半径维数一致性指数	网格信息维数一致性指数	关联维数一致性指数	分形综合指数
2008	0.847	0.543	0.933	0.429
2012	0.913	0.802	0.925	0.676
2015	0.957	0.893	0.936	0.799

从表 4 可以看出:①分形综合指数呈现增加趋势,2008 年最低,2015 年最高,说明随着轨道交通的建设,北京市轨道交通线网枢纽的换乘供需平衡得到了一定程度的改善;②对比发现,2008 年与 2012 年的分形综合指数相差较多(0.247),而 2012 年与 2015 年的分形综合指数相差较少(0.123),说明随着线路长度与线网覆盖度的增加,通过建设轨道线网达到改善线网供需平衡的效果在降低。因此下一步的建设重点应当从扩大线网规模,转向线网建设与线网管理优化并重。在已有轨道交通线网的基础上,通过优化线路的运行运营,改善枢纽和线网的客运供需平衡。

3 结 语

(1)通过 3 种分形维数,对枢纽的客运供给能力以及枢纽的换乘需求进行了量化,其中:半径维数代表了枢纽换乘供需从城市中心向周边的分布变化趋势,网格维数代表了枢纽换乘供需在空间分布的均衡性,而枢纽关联维数代表了轨道线网各枢纽之间

的通达性;进而针对每种分形维数的量化结果,计算了相应的一致性指数;之后根据 3 种分形一致性指数,提出了分形综合指数,综合评价了轨道交通枢纽的供给能力与换乘需求在空间分布上的供需一致性。

(2)以北京市轨道交通线网(2008 年、2012 年、2015 年)为例,验证了方法的有效性与算法的合理性。研究为城市轨道交通线网规划与后评价提供了有益参考

(3)下一步研究将针对分形量化城市经济发展分布指标、人口分布指标等社会经济指标展开,将量化结果与轨道交通枢纽的供需分形维数建立相关联系,从而更全面地评价城市轨道交通枢纽的供需情况。

参考文献:

References:

[ 1 ] Goodchild M F,Mark D M. The fractal nature of geographic phenomena[J]. Annals of the Association of

- American Geographers, 1987, 77(2): 265-278.
- [2] Appleby S. Multifractal characterization of the distribution pattern of the human population[J]. Geographical Analysis, 1996, 28(2): 147-160.
- [3] 刘继生, 陈彦光. 城镇体系空间结构的分形维数及其测算方法[J]. 地理研究, 1999, 18(2): 171-178.
- LIU Ji-sheng, CHEN Yan-guang. Fractal dimensions of spatial structure of an urban system and the methods of their determination[J]. Geographical Research, 1999, 18(2): 171-178. (in Chinese)
- [4] 刘继生, 陈彦光. 交通网络空间结构的分形维数及其测算方法探讨[J]. 地理学报, 1999, 54(5): 471-478.
- LIU Ji-sheng, CHEN Yan-guang. A study on fractal dimensions of spatial structure of transport networks and the methods of their determination[J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(5): 471-478. (in Chinese)
- [5] Benguigui L. A fractal analysis of the public transportation system of Paris[J]. Environment and Planning A, 1995, 27(7): 1147-1161.
- [6] Benguigui L, Daoud M. Is the suburban railway system a fractal [J]. Geographical Analysis, 1991, 23 (4): 362-368.
- [7] Kim K S, Benguigui L, Maria M. The fractal structure of Seoul's public transportation system[J]. Cities, 2003, 20(1): 31-39.
- [8] Antonio D. A topological phase transition between small-worlds and fractal scaling in urban railway transportation networks[J]. Physica A, 2009, 388(21): 4658-4668.
- [9] 孙壮志. 城市交通网络形态特征分形计量研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(1): 29-38.
- SUN Zhuang-zhi. The Study of fractal approach to measure urban rail transit network morphology[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(1): 29-38. (in Chinese)
- [10] 马超群, 王玉萍. 轨道交通网络与城市形态在分形上的一致性分析[J]. 城市交通, 2009, 31(3): 46-49.
- MA Chao-qun, WANG Yu-ping. Analysis on consistency between rail transit network and urban morphology in fractal dimension[J]. Urban Transport of China, 2009, 31(3): 46-49. (in Chinese)
- [11] 四兵锋, 毛保华, 刘智丽. 无缝换乘条件下城市轨道交通网络客流分配模型及算法[J]. 铁道学报, 2007, 29(6): 12-18.
- SI Bing-feng, MAO Bao-hua, LIU Zhi-li. Passenger flow assignment model and algorithm for urban railway traffic network under the condition of seamless transfer [J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(6): 12-18. (in Chinese)
- [12] 吴祥云, 刘灿齐. 轨道交通客流量均衡分配模型与算法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(9): 1158-1162.
- WU Xiang-yun, LIU Can-qi. Traffic equilibrium assignment model specially for urban railway network [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(9): 1158-1162. (in Chinese)
- [13] 刘剑锋, 孙福亮. 城市轨道交通乘客路径选择模型及算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(2): 81-86.
- LIU Jian-feng, SUN Fu-liang. Passenger flow route assignment model and algorithm for urban rail transit network [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009, 9(2): 81-86. (in Chinese)
- [14] 陆化普, 黄海军. 交通规划理论研究前沿[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- LU Hua-pu, HUANG Hai-jun. Theoretical research in transportation planning [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)
- [15] 蔡振兵. 轨道交通出行特征及其分担率预测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- CAI Zhen-bing. The research of rail transit travel characteristic and sharing rate [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [16] 王珂. 北京市轨道交通对居民职住地选择及通勤出行的影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- WANG Ke. Research on the influence of urban rail transit on residents' choice of residence, workplace and commuting travel mode [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)