

# 城市轨道交通线路承载力影响因素的量化分析\*

——以上海市为例

李晓龙\*\* 韩静茹

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院,上海 201804)

**摘要:**根据城市轨道交通承载力的特点,对影响承载力的因素进行分析和研究,分别建立了理想状况、考虑列车折返能力因素、考虑线路换乘能力因素以及考虑线路服务水平因素等 4 种状况下的承载力计算模型。并结合上海轨道交通的实际运营条件,分析了不同状况下的线路承载力,最后通过比较分析计算结果,得出了各个因素对线路承载力的影响程度。

**关键词:**城市轨道交通;承载力;影响因素;计算模型

**中图分类号:**U231.92 **文献标识码:**A **doi:**10.16507/j.issn.1006-6055.2016.01.017

## Quantitative Analysis on Influencing Factors of Load Capacity of Urban Rail Transit: Taking Shanghai as an Example\*

LI Xiaolong\*\* HAN Jingru

(Institute of Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804)

**Abstract:** Factors that influence the load capacity of urban rail transit are analyzed based on the characteristics of the load capacity, and four kinds of calculation model are separately built, which are ideal condition, the factors of the ability to train back, the factor of line transfer capability and the service level of the route. Then, according to the real operating conditions of urban rail transit in Shanghai, the load capacities with different modes are analyzed. Finally, the influence degree of these factors to the load capacity are gained.

**Key words:** urban rail transit; load capacity; factors; calculation model

### 1 引言

城市轨道交通线路承载力是在一定内部条件和外部环境条件下,城市轨道交通系统所具有的乘客输送能力,具有客观性、系统性、可变性、安全性、服务相关性等特点。当内、外环境发生变化或受到各种因素制约时,城市轨道交通线路承载力会随之发生变化,进而影响整个轨道交通系统承载能力。在这种情况下,一旦发生突发事件,若不能及时发现问题所在并启动相应的应急预案,则会造成很大的影响。因此,研究影响城市轨道交通线路承载力的因素尤为重要。

文献[1]从轨道交通线路间换乘客流的角度,分析了路网结构、换乘模式、票价、出行时间等客观因素和换乘方便性、拥挤程度、乘客对路网的熟悉程度等主观因素对路网承载能力的影响;文献[2-3]从影响线路通过能力和输送能力的因素进行分析,涉

及到线路信号制式、行车交换、车辆选型、列车编组及定员等因素;文献[4]则从影响轨道交通运输能力的各项因素分析,主要包括折返能力、供电能力和信号能力等因素。

这些研究主要侧重于计算系统的承载力,而忽略了定性、定量分析各个因素对承载力的影响程度。因此,本文结合城市轨道交通承载力的特点,分别建立不同状况下的承载力计算模型,并通过计算结果探究各个因素对承载力的影响程度。

### 2 城市轨道交通线路承载力的影响因素

城市轨道交通线路承载力的制约因素分为列车载客能力因素、线路输送能力因素以及客运设施因素等三类,而列车载客能力与车辆型号、列车编组、列车定员有关,而对于已有线路,列车载客能力将不再变化,故本文不予讨论;线路输送能力因素包含运用车组数量、折返能力、供电能力和信号能力等,而这些因素又都受列车运行时间间隔的影响<sup>[5]</sup>;客运设施因素主要包含车站客流集散换乘能力以及服务水平等因素<sup>[6]</sup>。综上所述,本文主要从列车运行时

2015-06-29 收稿,2015-09-06 接受,2016-02-25 网络发表

\* “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAG19B00)资助

\*\* 通讯作者,E-mail:xlonglee@sina.com

间间隔、线路换乘能力以及服务水平三个因素进行研究。

### 2.1 列车运行时间间隔

轨道交通线路通常采用双线运行模式,列车在区间实行追踪运行,并在每一个车站停车供乘客乘降。为降低车站的造价,轨道交通线路一般不布置车站配线,列车是在车站正线上办理客运作业。根据行车及客运作业和车站线路设备的各种特点,列车运行时间间隔成为影响线路能力的主要因素。

### 2.2 线路换乘能力

城市轨道交通车站,尤其是换乘枢纽站,除承担轨道交通内部大量列车的到发、通过和折返等行车技术作业外,还承担着大量的乘客售检票、乘降、换乘等客运作业以及整个路网的连通作用,客流压力重大,如果遇到突发事件还将造成巨大的安全隐患,严重影响乘客的人身安全。因此,有必要对以换乘站为中心的轨道交通系统的换乘能力进行研究,为轨道交通系统的有机协调以及轨道交通线路承载力的合理利用提供理论支撑。

### 2.3 服务水平

运输服务水平是道路使用者从道路状况、交通条件、道路环境等方面可能得到的服务程度或服务质量的描述,是描述交通流的运行条件及乘客舒适度的一种质量测定标准,是乘客对线路舒适度、安全性、可靠性的综合评价,影响线路客流量以及线路承载能力的发挥。

## 3 不同状况下的城市轨道交通线路承载力计算模型

### 3.1 情况1:理想状况下的承载力计算模型

城市轨道交通系统承载力涉及众多的因素,为方便计算,对理想状况进行以下假设:

1)将城市轨道交通系统中的每条线路看作一个系统;

2)外部环境能力足够,不对系统承载力形成约束作用;

3)系统内部各个组成部分(如车站、线路、通信、供电、车辆等)的能力集中体现在列车追踪时间间隔和列车的载客能力方面;

设理想状况下的线路承载为线路*i*日均承载力 $C_i^{(1)}$ (万人次),则

$$C_i^{(1)} = t_p C_{pi}^{(1)} + t_g C_{gi}^{(1)} \quad (1)$$

其中, $t_g$ 为线路*i*高峰时段,  $t_p$ 为线路*i*平峰时段,  $C_{gi}^{(1)}$ 为线路*i*高峰时段的平均承载力,万人次;

$C_{pi}^{(1)}$ 为线路*i*平峰时段的平均承载力,万人次。

设线路*i*高峰期列车平均时间间隔 $h_g^{(1)}$ (分钟),单位时间内(小时)通过的最大列车数为 $n_{g列}^{(1)}$ ,列车编组数为 $m$ ,列车定员人数为 $p$ ,最大超员率为 $\sigma_i$ ;平峰期间列车平均时间间隔为 $h_p^{(1)}$ (min),单位时间内(小时)通过的最大列车数为 $n_{p列}^{(1)}$ 。则

$$n_{g列}^{(1)} = \frac{60}{h_g^{(1)}} \quad (2)$$

$$n_{p列}^{(1)} = \frac{60}{h_p^{(1)}} \quad (3)$$

$$C_{gi}^{(1)} = 2n_{g列}^{(1)}mp\sigma_i \quad (4)$$

$$C_{pi}^{(1)} = 2n_{p列}^{(1)}mp\sigma_i \quad (5)$$

为便于衡量线路承载力与客流量之间的关系,引入承载强度系数的概念,反映线路承载力对客流需求的满足能力和满足程度。设 $\beta$ 为线路承载强度系数,线路客流量为 $Q$ ,线路承载力为 $C$ ,则

$$\beta = \frac{Q}{C} \quad (6)$$

### 3.2 情况2:考虑列车运行时间间隔因素时的承载力计算模型

列车运行时间间隔主要取决于列车追踪时间间隔以及列车折返时间。列车追踪间隔是指采用一定的闭塞方式条件下,前行列车与后行列车之间的行车间隔,取决于线路所采用的闭塞方式及信号系统,对于已有的线路,列车追踪时间间隔变化较小,主要为高峰期、平峰期列车追踪时间间隔;折返列车在终点站的最小出发间隔反映了列车在终点站的折返迅速程度,是决定列车折返设备通过能力大小的基本参数,一般情况下按照出发间隔进行折返能力计算。

设列车高峰期的追踪时间间隔为 $h_g$ ,平峰期的追踪时间间隔为 $h_p$ ,在折返站最小出发间隔时间为 $h_z$ (min),则高峰期列车运行时间间隔 $h_g^{(2)}$ 、平峰期的追踪时间间隔 $h_p^{(2)}$ 分别为

$$h_g^{(2)} = \max(h_g, h_z) \quad (7)$$

$$h_p^{(2)} = \max(h_p, h_z) \quad (8)$$

设情况2下线路*i*高峰期内单位时间通过的最大列车数为 $n_{g列}^{(2)}$ ,平峰期内单位时间通过的最大列车数为 $n_{p列}^{(2)}$ ,则线路*i*高峰期平均承载力 $C_{gi}^{(2)}$ 、平峰期平均承载力 $C_{pi}^{(2)}$ 的计算方法同情况1。

### 3.3 情况3:考虑线路换乘能力因素时的承载力计算模型

换乘站在不同时间段内的客流量及客流构成不尽相同。换乘系数与线路的通达性、客流的时间、空

间动态性、换乘站的地理位置等有关,因此不同线路的换乘系数也会有所不同。

对于一条线的平均换乘系数则可通过换出比例系数和换入比例系数计算。设线路长度为  $L_i$ , 线路平均运距为  $y_i$ , 换出比例系数为  $\theta_{xi}$ , 换入客流为  $N_{Hi}$ , 换入比例系数为  $\theta_{Hi}$ , 则线路  $i$  高峰期平均承载力  $C_{gi}^{(3)}$ 、平峰期平均承载力  $C_{pi}^{(3)}$  为

$$\theta_{xi} = \frac{y_i}{L_i} \quad (9)$$

$$\theta_{Hi} = \frac{N_{Hi}}{L_i} \quad (10)$$

$$C_{gi}^{(3)} = 2n_{g列}^{(2)} mp\sigma_i(1 - \theta_{xi})(1 + \theta_{Hi})\gamma_i \quad (11)$$

$$C_{pi}^{(3)} = 2n_{p列}^{(2)} mp\sigma_i(1 - \theta_{xi})(1 + \theta_{Hi}) \quad (12)$$

其中,由于高峰期,平均运距受客流方向的影响,变化较大,则客流集中方向系数为  $\gamma_i$ ,一般情况下  $\gamma_i$  的取值范围在 1~1.8 范围内。

### 3.4 情况 4:考虑服务水平因素时的系统承载力

线路服务水平的常用指标包括出行时间、费用、便捷性、安全性、可靠性、舒适性等。其中大多数指标都可以通过出行时间直接或者间接度量。因此将其作为路网服务水平的性能指标进行理论分析是较

为合理的。区间出行时间约束一般形式为

$$\tau = \bar{\partial} \tau \quad (13)$$

其中,  $\tau, \bar{\tau}$  分别代表没有拥堵情况下和实际区间最短出行时间,  $\partial$  代表可接受的出行时间服务水平。显然有  $\partial \geq 1$ , 并且  $\partial$  取值越大,代表的出行时间服务水平越低。则线路  $i$  高峰期平均承载力  $C_{gi}^{(4)}$ 、平峰期平均承载力  $C_{pi}^{(4)}$  为

$$C_{gi}^{(4)} = 2n_{g列}^{(2)} mp\sigma_i(1 - \theta_{xi})(1 + \theta_{Hi})\gamma_i/\partial \quad (14)$$

$$C_{pi}^{(4)} = 2n_{p列}^{(2)} mp\sigma_i(1 - \theta_{xi})(1 + \theta_{Hi})/\partial \quad (15)$$

## 4 上海市轨道交通线路承载力分析

### 4.1 上海轨道交通线路承载力计算

截止 2014 年底,上海市轨道交通网络系统由 14 条线路组成,全网运营线路总长 567 公里,上海城市轨道交通系统中各条线路的概况如表 1 所示。

结合上海地铁的实际运营情况<sup>[7,8]</sup>,为简化计算,设所有线路运营时间为 05:30—23:30,历时 18 小时,其中高峰时段为 06:30—09:30,16:00—19:00,共 6 个小时,其余为平峰时段,共 12 小时。则根据上述承载力公式,上海市轨道交通网络系统承载力的计算结果如表 2~4 所示。

表 1 上海市轨道交通各条线路概况

线路	列车编组	列车定员	线路长度	平均运距	列车运行间隔/min		客流量(万人次)			
					高峰期	平峰期	高峰期/h	平峰期/h	日均/天	日均换入/天
1 号线	8A	2480	36.90	9.12	3	8	32.50	1.08	130.00	35.17
2 号线	8A	2480	64.00	8.89	4	9	39.25	1.31	157.00	46.85
3 号线	6A	1860	40.30	8.88	5	10	15.25	0.51	61.00	18.03
4 号线	6A	1860	33.60	6.37	5	10	22.00	0.73	88.00	33.69
5 号线	4C	840	17.20	9.10	5	7	3.75	0.13	15.00	4.28
6 号线	4C	840	36.10	7.12	3	6	9.25	0.31	37.00	11.78
7 号线	6A	1860	44.35	7.79	6	10	19.00	0.63	76.00	25.91
8 号线	6C	1470	37.40	7.02	3	5	22.50	0.75	90.00	32.74
9 号线	6A	1860	45.60	11.56	4	8	20.50	0.68	82.00	23.78
10 号线	6A	1860	36.00	7.17	10	13	19.00	0.63	76.00	25.74
11 号线	6A	1860	72.27	13.50	5	7	15.00	0.50	60.00	12.69
12 号线	6A	1860	17.91	7.52	5	10	3.25	0.11	13.00	0.03
13 号线	6A	1860	33.60	6.51	10	11	2.50	0.08	10.00	2.26
16 号线	3A	776	51.79	31.46	10	20	1.25	0.04	5.00	0.01

表 2 情况 1 下的上海市轨道交通承载力

线路	情况 1(理想状况)						线路	情况 1(理想状况)					
	承载力(万人次)			承载强度系数				承载力(万人次)			承载强度系数		
	高峰	平峰	日均	高峰	平峰	日均		高峰	平峰	日均	高峰	平峰	日均
1 号线	36.12	4.52	270.92	89.97%	23.99%	47.98%	8 号线	28.19	5.64	236.83	79.80%	13.30%	38.00%
2 号线	48.21	7.14	374.93	81.42%	18.32%	41.87%	9 号线	19.81	3.30	158.48	103.48%	20.70%	51.74%
3 号线	18.23	3.04	145.86	83.64%	16.73%	41.82%	10 号线	16.09	2.59	91.55	118.11%	24.49%	83.01%
4 号线	21.19	3.53	169.53	103.81%	20.76%	51.91%	11 号线	21.51	5.12	190.50	69.74%	9.76%	31.50%
5 号线	3.43	0.82	30.37	109.35%	15.31%	49.38%	12 号线	9.57	1.59	76.55	33.97%	6.79%	16.98%
6 号线	15.33	2.56	122.66	60.33%	12.07%	30.16%	13 号线	10.37	3.14	99.91	24.11%	2.65%	10.01%
7 号线	19.06	3.81	160.11	99.68%	16.61%	47.47%	16 号线	1.38	0.23	11.04	90.60%	18.12%	45.30%

表3 情况2的列车折返能力

线路	1号线	2号线	3号线	4号线	5号线	6号线	7号线	8号线	9号线	10号线	11号线	12号线	13号线	16号线
折返时间	1.91	2.7	2.5	1.56	2.47	1.79	1.64	2.32	2.3	2.9	1.56	2.67	2.06	2.69

表4 情况3和情况4下的轨道交通承载力

线路	承载力(万人次)											
	情况3(考虑换乘能力)			情况4(服务水平1.2)			情况4(服务水平1.4)			情况4(服务水平1.6)		
	高峰	平峰	日均	高峰	平峰	日均	高峰	平峰	日均	高峰	平峰	日均
1号线	51.83	4.32	362.81	43.19	3.60	302.34	37.02	3.09	259.15	32.39	2.70	226.76
2号线	80.84	7.98	580.87	67.37	6.65	484.06	57.74	5.70	414.91	50.53	4.99	363.04
3号线	27.62	3.07	202.58	23.02	2.56	168.82	19.73	2.19	144.70	17.27	1.92	126.61
4号线	35.62	3.96	261.24	29.69	3.30	217.70	25.45	2.83	186.60	22.26	2.47	163.28
5号线	3.11	0.49	24.61	2.59	0.41	20.51	2.22	0.35	17.58	1.95	0.31	15.38
6号线	24.34	2.70	178.50	20.28	2.25	148.75	17.39	1.93	127.50	15.21	1.69	111.56
7号线	31.60	4.21	240.19	26.34	3.51	200.15	22.57	3.01	171.56	19.75	2.63	150.12
8号线	46.85	6.25	356.06	39.04	5.21	296.72	33.46	4.46	254.33	29.28	3.90	222.54
9号线	28.61	3.18	209.84	23.85	2.65	174.86	20.44	2.27	149.88	17.88	1.99	131.15
10号线	25.87	2.77	188.48	21.56	2.31	157.07	18.48	1.98	134.63	16.17	1.73	117.80
11号线	31.79	5.05	251.25	26.49	4.20	209.38	22.70	3.60	179.47	19.87	3.15	157.03
12号线	8.34	0.93	61.18	6.95	0.77	50.98	5.96	0.66	43.70	5.21	0.58	38.24
13号线	15.37	3.11	129.50	12.81	2.59	107.92	10.98	2.22	92.50	9.61	1.94	80.94
16号线	0.81	0.09	5.97	0.68	0.08	4.98	0.58	0.06	4.27	0.51	0.06	3.73

4.2 上海市轨道交通线路承载力分析

1)由图1可知,上海地铁线路客流量分布不均衡,仅地铁1号线、2号线的客流量就占了全网的三分之一,日均客流量较高,交通压力较大。结合其地理位置可知,1号线、2号线均经过了大型的居民区以及上海最繁华的商业中心,如南京路商务区。与此同时,2号线还途经了大型的产业园区,如张江高科技园区。工作日客流的“潮汐”现象,造成了高峰期承载强度较大,高达89%。因此,从整体来看,为了缓解高峰期的拥堵现象,可以在中心城内另辟市域快线的走廊或在拥挤区段设置直达站,减少停站次数。

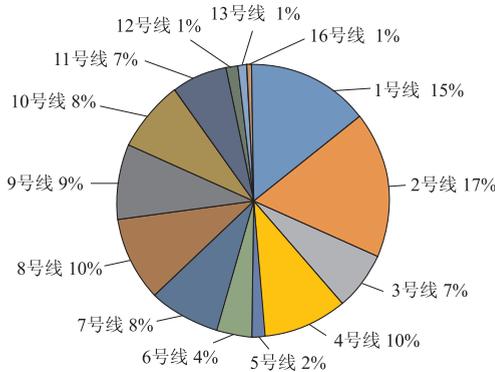


图1 各条线路日均客流量

2)由图2可知,平峰时段,系统承载强度分布较为均匀,均低于30%;日均承载强度分布不均衡,但大多数在50%以下;而高峰时段承载强度分布不均衡现象最为明显。高峰期,大部分线路承载强度系数较高,均在80%以上,客流压力较大。而12号

线、13号线、16号线高峰期承载强度系数较低,潜在利用率很高,有待挖掘。因此,在短期内尚无增能计划的前提下,可通过增加快速专列、组合运行方式或大小交路方式作为高峰时段的应急处理方案,以减小运行时间间隔、引导乘客调整乘车路径等措施缓解客运压力,进一步提高系统运力资源利用率。

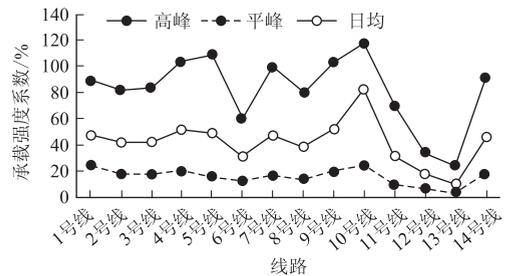


图2 线路承载强度系数

3)由图3可知,列车折返时间间隔均远小于高峰期、平峰期列车时间间隔,可见在当前情况下,线路列车的折返能力已经处于相对较高的水平,对系统承载力影响不大。

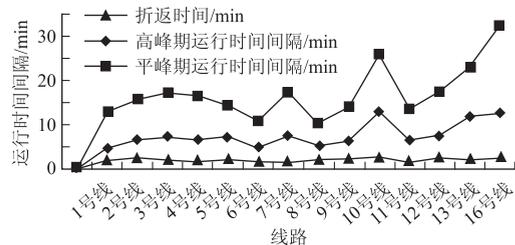


图3 各线路列车在高峰期、平均期的运行时间间隔及列车折返时间

4)由图4可知,当考虑换乘能力因素时,在平峰时期,承载力变化不大;高峰期及日均承载力呈明显上升趋势,说明当线路运能满足一定客流需求时,改善线路的换乘能力,有助于大大提高承载力;但5号线、12号线以及16号线的承载力变化较小,说明当线路运能较低或不足时,换乘站地理位置、出行距离及其他因素也会影响承载力的变化,而换乘能力对线路承载力的影响较小。

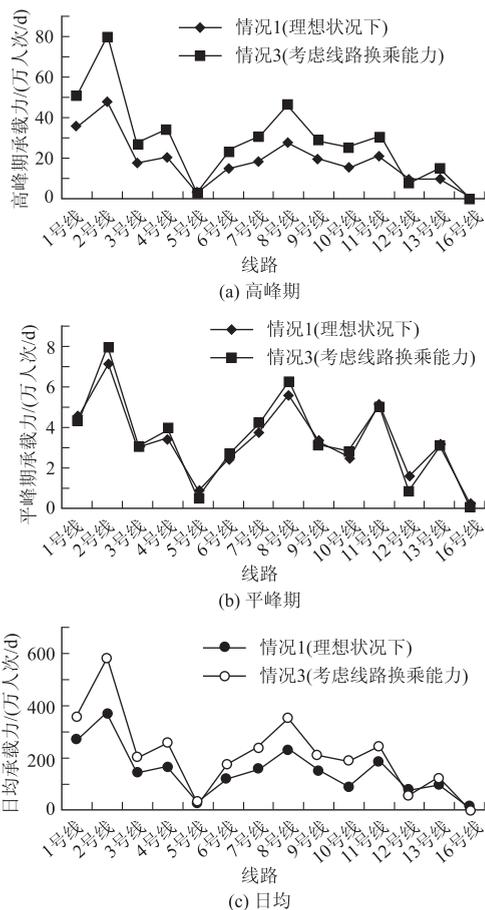


图4 情况1和情况3的高峰期承载力、平峰期承载力以及日均承载力

5)由图5可知,服务水平越低,服务水平系数越高。当服务水平系数从1.2增加到1.6时,系统承载力下降,承载强度系数上升。由此可知,当服务水平较低时,在一定程度上也会影响系统承载力,使各线路承载力降低,当低到一定程度,将会限制系统承载力的发挥,从而影响系统的通畅性和稳定性。

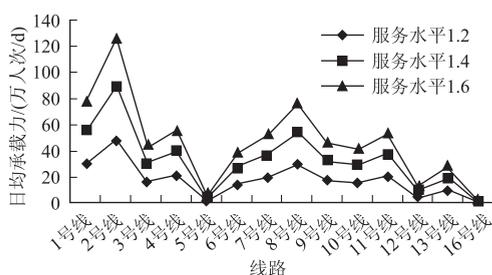


图5 不同服务水平下的日均承载力

### 5 结束语

本文建立了四种不同状况下的线路承载力计算模型,并结合上海轨道交通的实际运营条件,探讨了列车折返能力、线路换乘能力及服务水平等三种因素对线路承载力的影响程度。计算结果表明,在现有技术水平下,对于已有的城市轨道交通系统而言,列车折返能力对线路承载力的影响较小;当线路运能满足一定客流需求时,改善线路的换乘能力,有助于大大提高承载力,但当线路运能较低或不足时,换乘站地理位置、出行距离及其他因素对影响承载力变化的影响将超过换乘能力,占主导地位;与此同时,在一定条件下,线路服务水平与线路承载力呈正相关,当低到一定程度,将会限制系统承载力的发挥,从而会大大限制承载力的发挥。

### 参考文献

- [1]杨维.城市轨道交通路网承载能力计算方法研究[D].北京:北京交通大学,2011.
- [2]张一梅.基于路网的城市轨道交通系统运输能力研究[D].北京:北京交通大学,2009.
- [3]李俊芳.基于运输能力的城市轨道交通运输组织方案评价研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [4]汪波,韩宝明,战明辉,等.城市轨道交通运输能力计算及加强研究[J].城市轨道交通研究,2013,16(4):38-40.
- [5]伍敏,余海斌.上海地铁1号线运能现状分析及应对措施[J].城市轨道交通研究,2002,5(2):76-80.
- [6]朱文明.上海轨道交通9号线运营组织研究[J].城市轨道交通研究,2012,15(9):97-100.
- [7]朱沪生.上海轨道交通网络化运营中的安全管理与风险控制[J].城市轨道交通研究,2012,15(10):1-5.
- [8]李朴,徐田坤,刘夏楠.网络化运营模式下城市轨道交通客流分布特性[J].综合运输,2013(2):73-77.