

# 我国城市轨道交通运营线路 旅行速度和速度效率分析

高国飞<sup>1,2</sup>, 杨运泽<sup>3</sup>, 闫亚娜<sup>4</sup>, 杜港德<sup>1,2</sup>

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司 技术研究院, 北京 100037; 2. 城市轨道交通绿色与安全建造技术  
国家工程研究中心, 北京 100037; 3. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044;  
4. 北京交通运输职业学院 城市轨道交通系, 北京 100096)

**摘要:** 为衡量城市轨道交通线路的旅行速度所发挥的效率, 提出速度效率的概念。基于我国 170 条城市轨道交通线路的运营数据, 涵盖全封闭运行的地铁、轻轨、单轨等系统, 只考虑站站停的列车运行模式, 从平均站间距和线路设计速度两个方面对旅行速度和速度效率进行分析, 结果表明: 大部分线路(约 64%)设计速度为 80 km/h, 平均站间距为 1.0~2.5 km, 其中约 90%的线路旅行速度为 30~40 km/h, 速度效率为 37.5%~50.0%。此外, 量化分析旅行速度和平均站间距、设计速度正相关的变化关系, 以及速度效率与平均站间距正相关、与设计速度负相关的变化关系。最后, 基于实际数据拟合的旅行速度和速度效率公式, 计算得到平均站间距、设计速度、旅行速度和速度效率的对应分布值, 可为衡量城市轨道交通线路旅行速度和速度效率的合理范围提供参考。

**关键词:** 城市轨道交通; 线路设计速度; 平均站间距; 旅行速度; 速度效率

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)04-0038-08

## Travel Speed and Speed Efficiency of Existing Urban Rail Transit Lines in China

GAO Guofei<sup>1,2</sup>, YANG Yunze<sup>3</sup>, YAN Yana<sup>4</sup>, DU Gangde<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Technical Research Institute, Beijing 100037;  
2. National Engineering Laboratory for Green & Safe Construction Technology in Urban Rail Transit, Beijing 100037;  
3. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;  
4. Urban Rail Transit Department, Beijing Vocational College of Transportation, Beijing 100096)

**Abstract:** The concept of speed efficiency was proposed to measure the travel speed efficiency of urban rail transit lines. This study analyzed the operating data of 170 urban rail transit lines in China, including fully closed-operated subway, light rail, and monorail systems, considering only the train operating mode at station stops. The analysis covered various factors such as average station spacing, line design speed, and travel speed. The results showed that most lines (approximately 64%) have a design speed of 80 km/h, with average station spacing ranging from 1.0 to 2.5 km. Among these lines, about 90% have a travel speed between 30 and 40 km/h, with speed efficiency distributed between 37.5% and 50.0%. Additionally, the study quantitatively analyzed the relationships between travel speed, average station spacing, and design speed, finding both positive and negative

收稿日期: 2023-09-21 修回日期: 2024-04-28

第一作者: 高国飞, 男, 博士, 教授级高工, 从事轨道交通规划设计理论与方法研究, gaoguofei\_2007@sina.com

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(226Z0802G)

引用格式: 高国飞, 杨运泽, 闫亚娜, 等. 我国城市轨道交通运营线路旅行速度和速度效率分析[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(4): 38-45.

GAO Guofei, YANG Yunze, YAN Yana, et al. Travel speed and speed efficiency of existing urban rail transit lines in China[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(4): 38-45.

correlations. Finally, based on fitted travel speed and speed efficiency formulas and actual data, the corresponding distribution relationships of average station spacing, design speed, travel speed, and speed efficiency were calculated. These findings provide a reference for determining a reasonable travel speed range and speed efficiency for urban rail transit lines.

**Keywords:** urban rail transit; line design speed; average station spacing; travel speed; speed efficiency

当前,我国已进入城市轨道交通网络化发展的时代。截至2023年底,中国大陆地区共有59个城市开通城市轨道交通运营线路338条,运营线路总长度达到11 224.54 km<sup>[1]</sup>。城市轨道交通系统以其运量大、速度快、准点率高等优势已在城市公共交通系统中占据重要地位<sup>[2]</sup>。随着人民生活水平的提高,以及网约车、定制公交的兴起,居民的出行方式选择越来越多,如果城市轨道交通系统无法发挥其速度优势,不能满足乘客快速出行的需求,则对客流的吸引力会下降,在与其他出行方式的竞争中也会处于不利地位,对城市轨道交通系统的可持续发展产生影响<sup>[3]</sup>。当然也不能一味地追求快速,为保证一定的服务范围和经济效益,需尽可能多停站,最大程度地吸引客流和服务乘客。有的线路设计速度很高,但是旅行速度较低,最高设计速度没有很好地发挥出来,造成了工程的浪费;而有些线路设计速度不高,却达到了较高的旅行速度,也充分发挥了线路的设计速度。因此,线路设计速度和旅行速度两者间需达到一个平衡。衡量乘客服务水平的线路旅行速度及其所发挥的效率亟需分析和研究,在此特提出衡量线路设计速度发挥情况的速度效率这一概念。

目前国内相关研究主要集中在分析旅行速度的影响因素、合理范围,城市轨道交通线路设计速度的确定等方面。何肖等<sup>[4]</sup>统计分析了我国134条城轨线路的旅行速度,得到旅行速度的分布范围为26.44~62.31 km/h,并对比了不同制式及同一制式的不同线路旅行速度的差异。黄伟利<sup>[5]</sup>统筹考虑市域铁路功能定位、运输组织、运营和时间适应性等,确定了昆明市域铁路采用160 km/h、线下工程预留200 km/h的速度目标值时在与车站分布、线网延伸的协调等方面具有优势。洪海珠<sup>[6]</sup>结合不同站间距的设置和最短时间速度曲线的计算,给出了速度等级为80、100和120 km/h的线路站间距不应低于1.0、1.4和2.5 km的取值建议。胡康琼<sup>[7]</sup>采用控制变量法对平均站间距、列车最高运行速度、列车门与站台门的自动化程度、列车运行自动化等级和限速曲线段数量对旅行速度的影响进行分析,确定了各类因素的影响程度排序与主次关系。可见,当前研究多是考虑线路运营的影响因素确定旅行速度、速度目标值或站间距的选取,未能从旅行速度

所发挥的效率角度来分析我国城市轨道交通线路设计速度的运用情况。本文提出速度效率的概念,基于我国运营线路的实际数据,从定量和定性两方面分析并得出旅行速度和速度效率的分布和变化情况,结果可为确定线路合理的旅行速度、速度效率提供参考。

## 1 速度效率的定义及影响因素

### 1.1 速度效率的定义

城市轨道交通在规划、建设和运营时,一方面,为达到便捷、舒适、节能的目的,需尽量拉大站间距或者减少停站以提高线路的旅行速度<sup>[8-9]</sup>;另一方面,也不能一味地追求快速,为保证一定的服务范围和经济效益,需尽可能多停站,最大程度地吸引客流和服务乘客。因此,旅行速度和平均站间距两者间也需要达到一个平衡,基于对衡量线路设计速度发挥情况的速度效率进行分析有助于解决这一问题。

速度效率是指旅行速度与线路设计速度的比值,表达的是旅行速度与线路设计速度的匹配关系,是衡量旅行速度对于线路设计速度所发挥效率的指标。其计算式可以定义为: $\eta = V_s / V_{\max}$ 。其中, $V_s$ 为旅行速度, $V_{\max}$ 为线路设计速度。

列车在车站间的旅行速度主要由站间距和站间运行时间决定,分析列车运行过程可知,站间运行时间取决于站间距、线路设计速度、加减速度和停站时间<sup>[10-11]</sup>。列车站间运行时间和旅行速度的计算式分别为式(1)和式(2)。

$$t_s = \frac{s}{V_{\max}} + \frac{V_{\max}}{2} \left( \frac{1}{\bar{a}} + \frac{1}{\bar{b}} \right) + t_l \quad (1)$$

$$V_s = \frac{s}{t_s} = \frac{s}{\frac{s}{V_{\max}} + \frac{V_{\max}}{2} \left( \frac{1}{\bar{a}} + \frac{1}{\bar{b}} \right) + t_l} \quad (2)$$

式中, $t_s$ 为站间行驶时间; $s$ 为站间距; $t_l$ 为列车的停站时间,可取30 s; $\bar{a}$ 和 $\bar{b}$ 分别表示车辆行驶过程中的平均加速度和平均减速度。

根据速度效率的定义,可知速度效率的理论计算式为:

$$\eta = \frac{V_s}{V_{\max}} = \frac{s}{t_s \cdot V_{\max}} = \frac{s}{s + \frac{V_{\max}^2}{2} \left( \frac{1}{\bar{a}} + \frac{1}{\bar{b}} \right) + t_l \cdot V_{\max}} \quad (3)$$

## 1.2 速度效率的影响因素

由速度效率的定义可知,旅行速度和线路设计速度是直接影响速度效率的两个因素。较高的旅行速度和合理的线路设计速度是充分发挥速度效益的关键。

此外,城市轨道交通列车在车站间的运行过程包括启动加速、惰行、减速制动等几个阶段<sup>[12]</sup>。如果站间距较小,则列车只能完成从加速到减速制动的运行过程,称这种情况为列车未达速运行。在站间距较大的情况下才能完成加速—巡航—惰行—制动的运行过程<sup>[2]</sup>,如图1所示。可见,列车能否达到线路设计速度运行取决于站间距离。

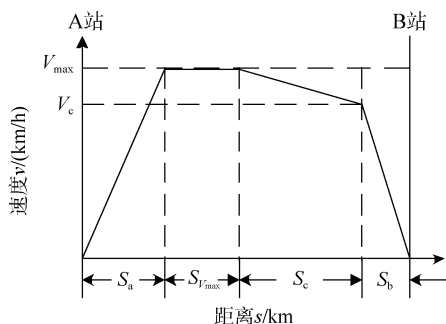


图1 列车完整运行过程

Figure 1 The complete operation process of the train

因此,即使有的轨道交通线路设计速度很高,但如果站间距较小,列车不能达速运行,也很难发挥设计速度的优势,同时旅行速度也较低,导致速度效率偏低。而有的线路虽然设计速度不高,但是站间距较大,列车能够较长时间的维持巡航状态,对线路设计速度的发挥程度较高,旅行速度也较高,速度效率也很高。可见,站间距是影响速度效率的关键因素之一。

同样地,根据列车的运行过程可知,列车启动到巡航过程和制动到停车过程的加速度和减速度也是明显影响旅行速度的因素。列车在站间开行若能较快地加速到设计速度运行或减速停止,则可以减少运行过程中的速度虚糜,更大程度地利用线路设计速度,旅行速度得以提高,速度效率也更高。另外,停站时间也是影响列车旅行速度的一个方面,也会对速度效率产生影响。

综上,影响速度效率的因素包括旅行速度、线路设计速度、站间距、列车加减速度和停站时间。这些因素均反映在式(3)所示的速度效率的计算式中。

## 2 运营线路旅行速度和速度效率分析

### 2.1 旅行速度分析

城市轨道交通列车的旅行速度与线路的平均站间距和设计速度有关,通常而言,站间距越大,线路设计速度越高,列车的旅行速度越高<sup>[13]</sup>。本节选取国内已开通运营的170条线路作为样本,包含大部分地铁及个别城市的轻轨和自动导向轨道线路,线路均为全封闭运行,只针对站站停的运输组织模式,分析我国运营线路的列车旅行速度和线路平均站间距、设计速度的关系。基于统计和计算数据,得到图2~图4,图2为所分析线路的旅行速度和平均站间距、设计速度的具体分布情况。

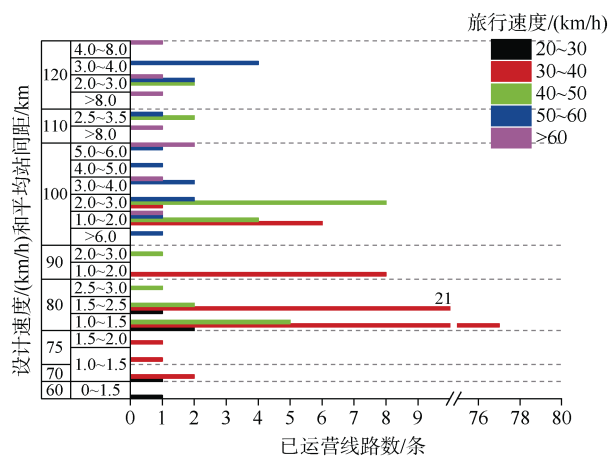


图2 样本线路的旅行速度和设计速度及平均站间距的对应分布情况

Figure 2 The corresponding distribution of the travel speed and design speed of the sample line and the average station spacing

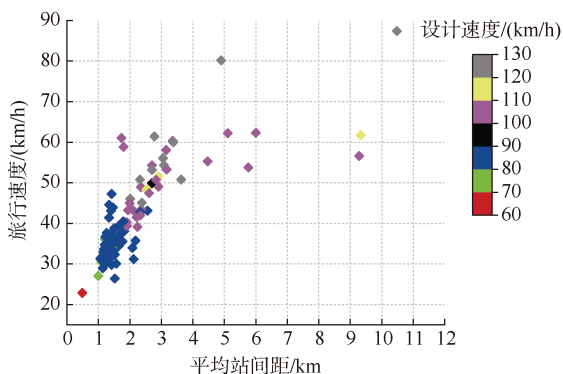


图3 旅行速度和平均站间距的关系

Figure 3 The relationship between travel speed and average

由图2可知,所分析线路的设计速度整体在60~120 km/h之间。平均站间距的范围对于不同的线路设计速度略有差别,当线路设计速度为60~75 km/h时,

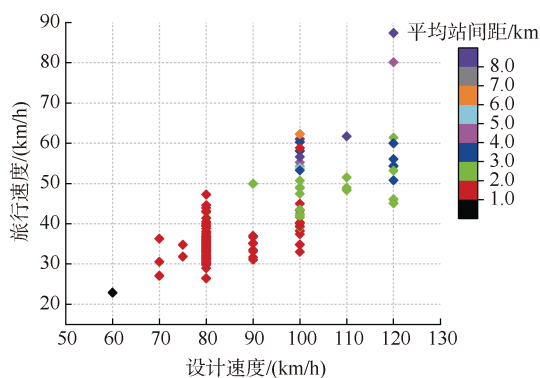


图4 旅行速度和线路设计速度的关系

Figure 4 The relationship between travel speed and line design speed

平均站间距为 0.5~2.0 km; 当线路设计速度为 80~90 km/h 时, 平均站间距为 1.0~3.0 km; 当线路设计速度为 100 km/h 时, 平均站间距基本为 1.0~6.0 km; 当线路设计速度为 110~120 km/h 时, 平均站间距基本为 2.0~8.0 km。此外, 列车的旅行速度多数为 30~60 km/h, 也有个别线路的旅行速度低于 30 km/h 和高于 80 km/h, 如广州 APM 线的旅行速度约为 22.88 km/h, 长春轻轨 3 号线的旅行速度约为 27.08 km/h, 哈尔滨地铁 3 号线的旅行速度约为 26.44 km/h, 呼和浩特地铁 1 号线的旅行速度约为 28.96 km/h, 南京地铁 S9 号线的旅行速度约为 87.40 km/h。

所分析的线路中设计速度为 60、70 和 75 km/h, 主要为广州自动导向轨道制式的 APM 线、长春轻轨制式的线路和重庆跨座式单轨制式的线路。部分线路是设计速度为 110、120 km/h 的地铁快线。多数线路是设计速度为 80~100 km/h 的地铁普线, 其中, 约 73% 的线路设计速度为 80 km/h, 且设计速度为 80 km/h 的 109 条线路中大部分平均站间距位于 1.0~2.5 km 之间, 旅行速度为 30~40 km/h。具体地, 平均站间距为 1.0~1.5 km、旅行速度为 30~35 km/h 和 35~40 km 的线路分别约占 62% 和 8%, 平均站间距为 1.5~2.5 km、旅行速度为 30~35 km/h 和 35~40 km 的线路分别约占 4% 和 13%。

对于运营线路的旅行速度与平均站间距、设计速度的关系, 由图 3 和图 4 可知, 在某一线路设计速度下, 平均站间距越大, 列车旅行速度也越大。当保持平均站间距取值不变时, 设计速度越低的线路, 其旅行速度也越低。这是因为列车在整条线路运行过程中, 如果设计速度较高, 则其可以达到的最高运营速度也较高, 因此整个线路运行的旅行速度也相对较高, 但

较高的旅行速度并不意味着较大的速度效率。当然, 旅行速度和平均站间距、设计速度的关系特点是在一定范围内而言的, 并非设计速度越大旅行速度就越高, 也并非平均站间距越大旅行速度就越高, 其会受到平均站间距或线路设计速度的制约。总之, 旅行速度与平均站间距、设计速度均为正相关且三者表现出相适应、相协同的特点。

综上分析, 经过对全国已经建成运营的城市轨道交通线路的计算和分析得出如表 1 所示的我国城市轨道交通线路的旅行速度和平均站间距、设计速度的对应分布关系。

表 1 旅行速度和平均站间距、设计速度的对应分布关系  
Table 1 Corresponding distribution relationship between travel speed and average station spacing and design speed of operating lines

线路设计速度/(km/h)	线路制式	平均站间距/km	旅行速度/(km/h)
60~75	轻轨、单轨、自动导向轨道系统	0~1.5	20~30
		1~2	30~40
80~90	地铁系统(普线)	1~2	30~50
		2~3	40~50
100	地铁系统(普线)	1~2	30~50
		2~6	40~60
110~120	地铁系统(快线)	2~8	50~70

## 2.2 速度效率分析

速度效率反映了旅行速度和线路设计速度的匹配程度, 也与平均站间距和设计速度有关, 根据  $\eta = V_s/V_{\max}$  计算得出所分析线路的速度效率, 并得到速度效率和平均站间距、设计速度的相互关系, 如图 5 和图 6 所示。图 7 为不同线路设计速度对应的速度效率分布情况。

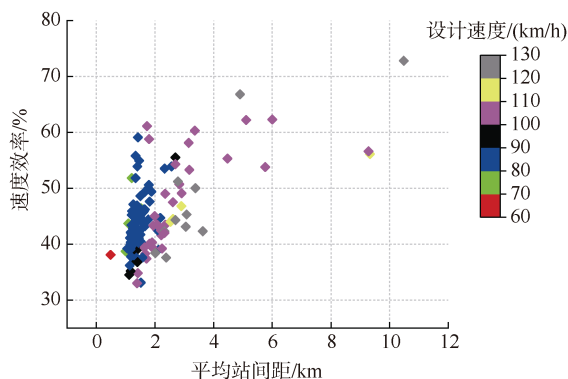


图5 速度效率和平均站间距的关系

Figure 5 The relationship between speed efficiency and average station spacing



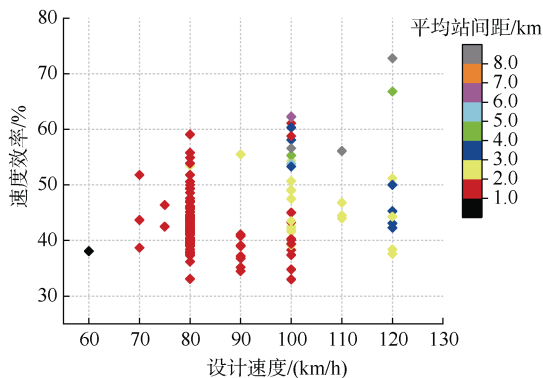


图6 速度效率和线路设计速度的关系

Figure 6 The relationship between speed efficiency and line design speed

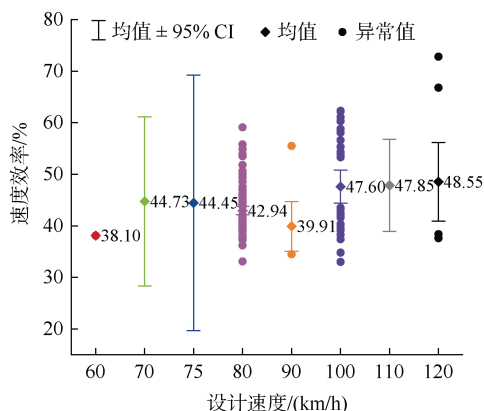


图7 不同线路设计速度下的速度效率分布

Figure 7 Speed efficiency distribution at different line design speed

对于速度效率和平均站间距的关系,由图5可知,所分析线路的速度效率大体在30%~60%之间,而南京S9号线,由于线路较长,且站点少,站间距达到10.48 km,线路设计速度能够得到较大程度地发挥,因此速度效率较高,约为72.83%。并且,在同一线路设计速度下,随平均站间距的增加,速度效率也会增大。另外,当平均站间距小于3 km时,不同站间距下的速度效率差异较小,基本在40%左右浮动。当平均站间距为4~6 km时,速度效率可以达到最大,能充分发挥设计速度的效率。当站间距大于8 km时,线路的速度效率并没有明显提高。

对于速度效率和线路设计速度的关系,由图6可知,在同一平均站间距范围内和在一定的设计速度范围内,随着设计速度的增加,速度效率整体会降低,这是由于站间距较小,列车停站频繁,因此大部分线路的旅行速度大体相同,所以当设计速度增加时,反而会降低其速度效率,这也说明在线路设计时不能一

味追求更高的设计速度。由图7可知,设计速度为70~80 km/h时,速度效率基本为40%~45%;而设计速度为90 km/h的线路速度效率整体偏低,基本低于40%;当设计速度为100~120 km/h时,线路设计速度发挥的效率一般高于45%且较为相似。

综上分析,得到我国城市轨道交通线路的速度效率和平均站间距、设计速度的对应分布关系如表2所示。

表2 速度效率和平均站间距、设计速度的对应分布关系  
Table 2 Corresponding distribution relationship between speed efficiency of operating lines and average station spacing and design speed

线路设计速度/(km/h)	线路制式	平均站间距/km	速度效率/%
60~75	轻轨、单轨、自动导向轨道系统	0~2	35~50
80~90	地铁系统(普线)	1~3	30~55
100		1~2	30~45
		2~6	40~65
110~120	地铁系统(快线)	2~8	40~55

### 2.3 旅行速度和速度效率的对比分析

使用式(2)计算得到线路旅行速度的理论值,并基于该理论值使用式(3)计算线路的理论速度效率。此外,将基于统计的线路实际旅行速度使用式(3)计算得到的值作为线路的实际速度效率。为对比线路旅行速度、速度效率的理论值和实际值,使用均方根误差(RMSE)和平均绝对误差(MAE)两类评价指标,计算公式分别如式(4)和式(5)所示。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (4)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i| \quad (5)$$

式中,  $x_i$  为线路实际的旅行速度或速度效率,  $\hat{x}_i$  为理论计算值,  $n$  为计算的线路数量。

对170条线路计算得到旅行速度的RMSE=7.40, MAE=6.39, 速度效率的RMSE=8.25, MAE=7.29。两类指标的计算结果表明,使用理论计算式确定线路合理的旅行速度和速度效率是可行的。

通过对比发现有11条线路的旅行速度和速度效率高于理论值,如表3所示。旅行速度偏差量的均值为  $\Delta \bar{V}_s = 5.06$  km/h, 速度效率偏差量的均值为  $\Delta \bar{\eta} = 5.52\%$ 。其中,厦门地铁2号线、兰州地铁1号线、

表3 旅行速度和速度效率较高的城市轨道交通线路

Table 3 Urban rail lines with higher travel speed and speed efficiency

运营线路	平均站间距/km	线路设计速度/(km/h)	实际旅行速度/(km/h)	理论旅行速度/(km/h)	实际速度效率/%	理论速度效率/%	旅行速度差值/(km/h)	速度效率差值/%
广州 APM 线	0.49	60	22.88	22.37	38.13	37.29	0.51	0.81
长春 8 号线	1.21	70	36.27	35.88	51.82	51.26	0.39	0.54
乌鲁木齐 1 号线	1.34	80	41.43	39.02	51.79	48.77	2.41	3.03
福州 2 号线	1.40	80	43.10	39.89	53.88	49.87	3.21	4.03
深圳 4 号线	1.46	80	43.93	40.73	54.91	50.92	3.20	3.98
厦门 2 号线	1.34	80	44.61	39.02	55.77	48.77	5.60	7.03
兰州 1 号线	1.42	80	47.26	40.18	59.07	50.22	7.08	8.88
济南 3 号线	1.80	100	58.83	46.43	58.83	46.43	12.39	12.37
重庆地铁环线	1.73	100	61.06	45.45	61.06	45.45	15.61	15.65
青岛 11 号线	2.78	120	61.42	59.89	51.18	49.91	1.53	1.29
上海 16 号线	4.90	120	80.18	76.46	66.82	63.72	3.72	3.08

济南地铁 3 号线和重庆地铁环线的旅行速度和速度效率均高于  $\Delta \bar{V}_s$  和  $\Delta \bar{\eta}$ ，表明这些线路的运输组织较优，同时，站间距和线路设计速度的匹配度也较高。

除此之外，其他线路的旅行速度和速度效率均不同程度的低于理论值，偏差量的均值分别为  $\Delta \bar{V}_s = 6.48 \text{ km/h}$ ， $\Delta \bar{\eta} = 7.41\%$ 。经统计，约有 35% 的线路的旅行速度偏差量大于  $\Delta \bar{V}_s$ ，约有 39% 的线路的速度效率偏差量大于  $\Delta \bar{\eta}$ 。其中，长沙磁悬浮快线和北京首都机场线的旅行速度分别低于相应的理论旅行速度 25.12 km/h 和 25.59 km/h，速度效率低于相应的理论速度效率 25.12% 和 23.30%，上海地铁 4 号环线的速度效率比理论值低 21.10%，表明这些线路的旅行速度和速度效率还有进一步提升的空间。

### 3 线路合理旅行速度和速度效率的确定

部分线路的实际旅行速度和速度效率低于或高于理论计算值，是由于式(2)中列车的平均加速度和减速度以及停站时间的理论取值和实际取值的误差导致的。因此，基于实际数据拟合确定旅行速度和速度效率的计算式，使用该式计算得到的结果更具有参考价值。旅行速度和速度效率可看作是关于平均站间距和线路设计速度的二元函数。对于式(2)，令  $\alpha = (1/\bar{a} + 1/\bar{b})/2$ ，得到旅行速度的函数表达式：

$$V_s = \frac{s}{s/V_{\max} + \alpha V_{\max} + t_l} \quad (6)$$

式中， $\alpha$  和  $t_l$  为待拟合的参数。旅行速度随平均站间距和设计速度的变化而变化，三者可反映为三维空间坐

标中的点系，去除实际数据中偏差较大的点拟合式(6)，得到的拟合曲面如图 8 所示。

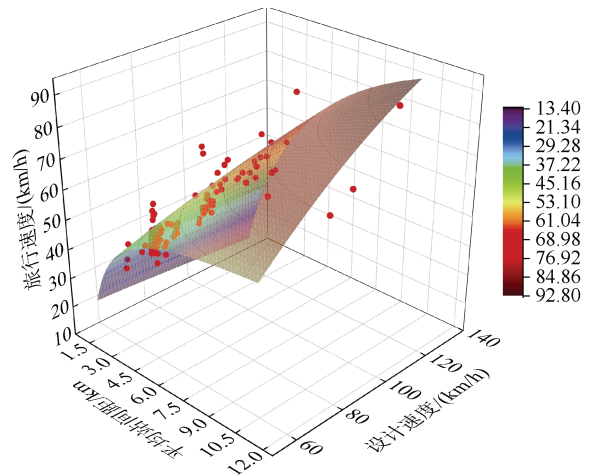


图8 旅行速度函数的拟合曲面

Figure 8 Fitting surface of travel speed function

经拟合计算得到  $\alpha = 0.000\ 159\ 97$ ， $t_l = 0.010\ 81$ ，拟合优度  $R^2 = 0.868$ ，旅行速度的计算式为：

$$V_s = \frac{s}{s/V_{\max} + 1.5997 \times 10^{-4} \cdot V_{\max} + 1.081 \times 10^{-2}} \quad (7)$$

由  $\eta = V_s/V_{\max}$  得到速度效率的计算式为：

$$\eta = \frac{s}{s + 1.5997 \times 10^{-4} \cdot V_{\max}^2 + 1.081 \times 10^{-2} \cdot V_{\max}} \quad (8)$$

根据式(7)和式(8)可以计算得到城市轨道交通线路在不同设计速度和平均站间距分布下的旅行速度及速度效率的参考取值范围。由于多数线路设计速度为 80 km/h 且平均站间距为 1.0~3.0 km，因此重点计算

该站间距范围内旅行速度和速度效率的参考取值范围,如表 4 所示。对于设计速度为 90、100 km/h 的线路,主要计算平均站间距为 1.0~6.0 km 的旅行速度和速度效率的参考取值范围,如表 5 所示。设计速度为 110、120 km/h 的线路属于地铁快线,平均站间距通常大于 2.0 km,所以主要计算 2.0~8.0 km 的平均站间距对应的旅行速度和速度效率的取值范围,如表 6 所示。

表 4 设计速度为 80 km/h 线路的速度效率和旅行速度的参考取值范围

Table 4 The reference range for speed efficiency and travel speed of a line with a design speed of 80 km/h		
平均站间距/km	旅行速度/(km/h)	速度效率/%
1.0~1.2	27~31	34~39
1.2~1.4	31~34	39~43
1.4~1.6	34~37	43~46
1.6~1.8	37~39	46~49
1.8~2.0	39~41	49~51
2.0~2.5	41~46	51~57
2.5~3.0	46~49	57~61

表 5 设计速度为 90、100 km/h 线路的速度效率和旅行速度的参考取值范围

Table 5 The reference range for speed efficiency and travel speed of a line with a design speed of 90 or 100 km/h				
平均站间距/km	设计速度 90 km/h		设计速度 100 km/h	
	旅行速度/(km/h)	速度效率/%	旅行速度/(km/h)	速度效率/%
1.0~2.0	27~42	30~47	27~43	27~43
2.0~3.0	42~51	47~57	43~53	43~53
3.0~4.0	51~57	57~64	53~60	53~60
4.0~5.0	57~62	64~69	60~65	60~65
5.0~6.0	62~65	69~73	65~69	65~69

表 6 设计速度为 110、120 km/h 线路的速度效率和旅行速度的参考取值范围

Table 6 The reference range for speed efficiency and travel speed of a line with a design speed of 110 or 120 km/h				
平均站间距/km	设计速度 110 km/h		设计速度 120 km/h	
	旅行速度/(km/h)	速度效率/%	旅行速度/(km/h)	速度效率/%
2.0~3.0	43~54	39~49	42~55	35~45
3.0~4.0	54~62	49~56	55~63	45~53
4.0~5.0	62~68	56~62	63~70	53~58
5.0~6.0	68~72	62~66	70~75	58~63
6.0~7.0	72~76	66~69	75~79	63~66
7.0~8.0	76~79	69~72	79~83	66~69

根据表 4~表 6 可知,在不同线路设计速度下,随平均站间距增大,旅行速度和速度效率均会增大,但增幅逐渐降低。对于设计速度为 80 km/h 的线路,在 1.0~2.0 km 的平均站间距范围内,每增加 0.2 km,旅行速度平均增加 2.69 km/h,速度效率平均增加 3.36%。而在站间距大于 1.5 km 后增加平均站间距,旅行速度和速度效率的增幅均会低于平均增幅,所以若考虑线路对一定服务范围的保障,当线路设计速度为 80 km/h 时,平均站间距的参考取值接近 1.4 km。同样地,对于设计速度为 90、100 km/h 的线路,依据旅行速度和速度效率随平均站间距的变化情况可以确定站间距的参考取值接近 3.0 km,设计速度为 110 km/h 的线路平均站间距的参考取值接近 4.0 km/h。对于设计速度为 120 km/h 的线路,平均站间距每增加 1.0 km,旅行速度平均增加 8.10 km/h,速度效率平均增加 6.75%,因此也可确定其平均站间距的参考取值接近 4.0 km。

4 结论

本文提出速度效率的概念,根据现有的城市轨道交通线路的运营数据对旅行速度和速度效率进行分析,得到如下结论:

- 1) 国内城市轨道交通线路的列车旅行速度和速度效率的分布范围在不同的设计速度下存在区别。设计速度为 60~75 km/h 的线路,列车旅行速度基本为 20~40 km/h,速度效率基本为 35%~50%;设计速度为 80~90 km/h 的线路,列车旅行速度基本为 30~50 km/h,速度效率基本为 30~55%;设计速度为 100 km/h 的线路,列车旅行速度基本为 30~60 km/h,速度效率基本为 30%~65%;设计速度为 110~120 km/h 的线路,列车旅行速度基本为 50~70 km/h,速度效率基本为 40%~55%。
- 2) 已开通运营的线路基本符合列车旅行速度与平均站间距、设计速度呈正相关,线路速度效率与平均站间距呈正相关,与设计速度呈负相关的变化规律。所分析的线路在平均站间距低于 2.0 km 时,速度效率相差不大,基本在 40%左右。对于设计速度为 80~90 km/h 的线路,当平均站间距为 3.0 km 时,速度效率较大,可达到 50%以上。对于设计速度大于 100 km/h 的线路,当平均站间距为 4.0~6.0 km 时,速度效率较大,高于 50%,而当平均站间距大于 6.0 km 时,增加站间距不会使速度效率有明显增加。
- 3) 本文基于实际数据拟合得到了旅行速度和速

度效率的计算式,并计算得到了不同线路设计速度和平均站间距下的列车旅行速度及对应速度效率,可为确定城市轨道交通线路的旅行速度和速度效率的合理范围提供参考依据。同时,基于计算结果分析得到线路设计速度为80、90和100、110和120 km/h时平均站间距的参考取值分别为1.4、3.0、4.0 km。

## 参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2023年度统计和分析报告解读[J]. 城市轨道交通, 2024(4): 15-17.  
China Association of Metros. Interpretation of annual statistics and analysis report of urban rail transit in 2023[J]. China metros, 2024(4): 15-17.
- [2] 江志彬. 城市轨道交通网络列车运行组织与管理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2018: 134-138.  
JIANG Zhibin. Organization and management of train operation in urban rail transit network[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2018: 134-138.
- [3] 赵墨林, 顾保南. 国外百万级人口城市快速轨道交通系统分析与启示[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(12): 11-16.  
ZHAO Molin, GU Baonan. Analysis and insights into rapid rail transit systems in foreign cities with million-level population[J]. Urban mass transit, 2023, 26(12): 11-16.
- [4] 何肖, 顾保南. 我国大陆各城市轨道交通线路旅行速度统计分析: 基于中国城市轨道交通协会数据分析的研究报告之七[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 1-5.  
HE Xiao, GU Baonan. Statistical analysis of travel speed of urban rail transit lines in China's mainland—report 7: analysis of Data from China Association of Metros[J]. Urban mass transit, 2020, 23(1): 1-5.
- [5] 黄伟利. 昆明市域铁路速度目标值研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(6): 39-43.  
HUANG Weili. Research on the speed target values for Kunming urban regional railway[J]. Journal of railway engineering society, 2016, 33(6): 39-43.
- [6] 洪海珠. 城市轨道交通全自动运行线路多专业速度控制与匹配设计研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(9): 1-7.  
HONG Haizhu. Research on speed control and matching design among multi disciplines for fully automatic operation line of urban rail transit[J]. Railway standard design, 2024, 68(9): 1-7.
- [7] 胡康琼. 上海城市轨道交通旅行速度影响因素分析及对策[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(5): 89-93.  
HU Kangqiong. Analysis of Shanghai urban rail transit travel speed influencing factors and countermeasures[J]. Urban mass transit, 2023, 26(5): 89-93.
- [8] 武倩楠, 褚芙琳, 刘欣然, 等. 国内典型城市轨道交通运营线路站间距统计分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(7): 188-193.  
WU Qiannan, CHU Fulin, LIU Xinran, et al. Statistical analysis of station spacing of typical urban rail transit lines in China[J]. Urban mass transit, 2023, 26(7): 188-193.
- [9] 李婷, 靳文舟, 朱子轩. 城市中心区轨道交通站间距优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(11): 116-122.  
LI Ting, JIN Wenzhou, ZHU Zixuan. A study on the optimization model of metro station spacing in the city central area[J]. Railway transport and economy, 2019, 41(11): 116-122.
- [10] 华珍. 城市轨道交通列车区间运行缓冲时间设置方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.  
HUA Zhen. Research on setting method of buffer time for train interval operation of urban rail transit[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [11] 苗沁, 潘琢. 城市轨道交通列车停站时间研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(6): 37-40.  
MIAO Qin, PAN Zhuo. Research of urban rail transit train dwelling time at station[J]. Urban mass transit, 2017, 20(6): 37-40.
- [12] 林诗悦, 张祎. 中低运量城市轨道交通列车运行仿真及优化研究[J]. 现代城市轨道交通, 2021(7): 93-98.  
LIN Shiyue, ZHANG Yi. Train operation simulation and optimization of medium and low traffic volume urban rail transit[J]. Modern urban transit, 2021(7): 93-98.
- [13] 徐德新. 城市轨道交通车辆最高运行速度的选择[J]. 铁道工程学报, 2008, 25(2): 97-99.  
XU Dexin. Choice of maximum running speed of vehicles for urban mass transit[J]. Journal of railway engineering society, 2008, 25(2): 97-99.

(编辑: 傅依萱)