

# 上海城市轨道交通旅行速度影响因素分析及对策<sup>\*</sup>

胡康琼

(上海申通地铁集团有限公司,201103,上海//工程师)

**摘要** 目前,上海城市轨道交通中有近80%线路的实际旅行速度低于设计旅行速度,为了进一步提升上海城市轨道交通的运营效率,从旅行速度设计流程的角度出发,研究分析旅行速度的成因,以及在各阶段中影响旅行速度的主要因素。结果表明,影响旅行速度的因素主要有列车最高运行速度、平均站间距、限速曲线段数量、列车运行自动化等级和开关门时间等。以上海轨道交通12号线为例,采用控制变量法对各类影响旅行速度的因素进行计算分析,研究其对旅行速度的影响程度与主次关系。结果表明,按影响程度排序,5个因素的影响重要程度依次为平均站间距、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。基于上述研究结果,提出旅行速度优化策略:①在线路设计阶段,线路应尽量使曲线半径、缓和曲线长度与行车速度相匹配,列车最高运行速度与平均站间距相匹配;采用全自动驾驶线路可以大幅度减少司机人为工作量,以有效降低停站时间中的司机操作时间。②在线路运营阶段,应将司机作业标准化,缩小实际停站时间与设计停站时间之间的差距,以提升线路旅行速度的综合整体效能。

**关键词** 上海城市轨道交通;旅行速度;影响因素

**中图分类号** U292.4<sup>+</sup>3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.05.017

## Analysis of Shanghai Urban Rail Transit Travel Speed Influencing Factors and Countermeasures

HU Kangqiong

**Abstract** Currently, nearly 80% of Shanghai urban rail transit lines are operating at the speed lower than the design. To further improve the operation efficiency of Shanghai urban rail transit, from the angle of travel speed design process, how the travel speed is established and the main factors that affect speed at each stage are analyzed. Results show that the main factors influencing travel speed include train maximum operational speed, average station spacing, number of speed-limit curves, train operation automation grade and door switch time. Taking Shanghai Rail Transit Line 12 as an example, control variate

method is adopted to calculate and analyze various types of travel speed influencing factors for the study of their influencing degree, and the primary and secondary relation. Results show that, ranking by influencing degree, five factors from high to low are average station spacing, train maximum operational speed, automation degree of train door and platform door, train operation automation grade and number of speed-limit curves. Based on the research results, travel speed optimization strategy is proposed: (1) at line design stage, line curve radius and curve transition length should match with train operating speed, and the maximum operational speed should match with average station spacing; adopting FAO (fully automatic operation) to reduce the drivers' manual workload so that the driver's operation time during stop could be effectively reduced. (2) at line operation stage, the driver operations should be standardized, so that the gap between the actual station dwell time and the design is narrowed, and the overall efficiency of line travel speed will be improved.

**Key words** Shanghai urban rail transit; travel speed; influencing factor

**Author's address** Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China

截至2019年底,已有超过41座城市开通城市轨道交通运营线路,运营线路总长度为6 736.2 km。其中,北京、上海和广州的运营线路长度均超过了500 km,这3个城市的运营线路长度预计还将持续增长。为了满足日益增长的客流需求、缓解列车和车站内的客流拥挤情况,各城市的城市轨道交通均通过增加开行对数和提升运能的措施来解决运能与运量之间的矛盾,但运能增加的幅度跟不上客流增长的速度,客流拥挤现象在未来还将长期存在。因此在存量列车数量一定的情况下,通过提高旅行速度(以下简称“旅速”)来增加既有列车的周转率便成为了目前缓解既有运能矛盾的重要举措。

<sup>\*</sup> 上海市科委项目(20dz1202902)

分析上海城市轨道交通既有线路的实际旅速与设计旅速可以发现,近 80% 地铁线路的实际旅速低于设计旅速。采用非 CBTC(基于通信的列车控制)信号系统的上海轨道交通 1 号线(以下简称“1 号线”)和上海轨道交通 2 号线(以下简称“2 号线”),其实际最高运行速度较高,达到了 77 km/h;采用 CBTC 信号系统的地铁线路,其实际最高运行速度普遍偏低,甚至低于 1 号线和 2 号线的实际运行速度。究其原因,旅速不仅涉及到设计阶段的列车、信号、站间距、限速标准、列车运行自动化等级和站台门等因素,其与线路的客流规模和运营管理方式也密切相关。

目前,已有文献针对城市轨道交通列车旅速的部分影响因素进行了分析与研究。文献[1]从列车拥挤度和旅速两个指标的角度出发,分析了两者之间的相互关系和计算方法,以达到降低列车拥挤度、提高城市轨道交通服务水平的目的。文献[2]基于地铁信号和列车系统的控制机理分析了影响列车旅速和追踪能力的关键因素及其内在联系。文献[3]通过模拟有轨电车的正常运行过程,获得了交叉口延误和站间距是影响有轨电车旅速主要因素的结论。文献[4]通过优化列车的停站时间对列车运行图方案进行了改进,显著提升了地铁运行效率和服务水平。

本文介绍了确定旅速的主要依据,以及旅速的计算方法及其相关计算参数,系统地分析了列车最高运行速度、平均站间距、限速曲线段数量、列车运行自动化等级和开关门时间等影响旅速的 5 大因素,探讨了这些因素的影响重要程度。本文研究可为今后提升城市轨道交通运行效率及其服务水平提供参考。

## 1 旅速的确定与实现

在设计阶段,旅速是确定列车配属规模和基地建设规模的主要依据;在运营阶段,旅速是反映列车周转率的重要指标。因此,提高城市轨道交通新线路的设计旅速不仅可以减少列车配置和减小基地规模,还可以提高既有线路的旅速实现水平并加快列车的周转,用较少的列车实现较大的运能,从而达到缓解供需矛盾的目的。

设计旅速的确定与实际旅速的实现水平与地铁线路、列车、信号、客流和行车组织等多个专业密切相关,因此有必要从旅速的设计流程和影响因素

出发,根据其影响程度找出影响旅速的主次因素,从而为提升旅速提供理论依据。

在工程可行性研究阶段,行车专业首先根据站点的高峰小时上下客流和开行对数等参数计算列车停站时间,接着依据线路实际运营情况,利用牵引计算求出区间运行时间,最后根据线路运营长度计算出列车运行的理论速度值。考虑到实际运营条件,理论旅速值会考虑一定量的冗余设计,并依此计算全线所需列车的运行数量。目前,对于运行速度为 80 km/h 的地铁线路,其设计旅速通常为 35 km/h。若城市轨道交通运行线路平均站间距较短,其设计旅速会稍低于 35 km/h;对于线路平顺性强且平均站间距较大的地铁线路,其设计旅速会稍高于 35 km/h。在总体设计及初步设计阶段,行车专业会根据由不同线路方案和车站的调整引起的客流变化对列车停站时间进行核算。

## 2 旅速计算方法及其相关计算参数

### 2.1 计算方法

旅速  $v_{\text{旅}}$  可以通过停站时间  $t_{\text{i停}}$  和区间运行时间  $t_{\text{i区间}}$  获得,其中: $t_{\text{i停}}$  由列车开门时间、乘客上下车时间和列车关门时间三部分组成; $t_{\text{i区间}}$  是根据线路平、纵断面资料及列车参数,采用牵引计算获得的。旅速可以表示为:

$$v_{\text{旅}} = L / (\sum_i t_{\text{i停}} + \sum_i t_{\text{i区间}}) \quad (1)$$

式中:

$L$ ——线路长度。

### 2.2 相关计算参数

#### 2.2.1 停站时间计算参数

1) 乘客上下车时间。乘客上下车时间由乘客上车时间和下车时间两部分组成,其主要受到单位小时内的开行对数、本站上下车客流量、车门数量及宽度和车厢内的布置等因素的影响。目前,上海城市轨道交通中采用的主要是 A 型车和 C 型车,其中:A 型车每侧设有 5 对车门,开度为 1 400 mm;C 型车每侧设有 4 对车门,开度为 1 300 mm。

2) 列车开、关门时间。列车开、关门时间主要取决于列车自身性能及站台门与车门间是否联动。列车开、关车门时间按不小于 14 s 计:列车开门时间为列车停稳至列车车门和站台门完全打开的时间,一般取为 6 s;列车关门时间为上下客完毕至车门关闭、列车准备启动的时间,一般取为 5 s;站台门

附加时间取为 3 s。此外,各车门上下客不均衡延误时间一般取为 3 s,即停站时间中的无效时间为 17 s。

3) 停站时间。停站时间主要由车站高峰小时上下车客流量、行车间隔、车门数量和列车开关车门时间等参数计算确定。停站时间  $t_{\text{停站}}$  可以表示为:

$$t_{\text{停站}} = t_1 [P_{\text{上下}} / (Nn)] \tag{2}$$

式中:

- $P_{\text{上下}}$ ——车站高峰小时上下车人数之和;
- $N$ ——高峰小时开行列车对数;
- $n$ ——列车一侧车门总数;
- $t_1$ ——平均上下客时间,一般取每人 0.6 s。

城市轨道交通列车采用 6 节编组 A 型车(以下简称“6A 型车”),每小时开行 30 对,每个车站停站时间为 30 s,高峰小时上下车客流量约为 1.95 万人次。

2.2.2 区间运行时间参数

区间运行时间受到列车性能、限速曲线段数量和区间最高运行速度的影响。对于 6A 型车和 4 节编组的 C 型车而言,不同列车运行速度对应的牵引力、制动力和基本阻力的参数取值也有所不同。对于最高运行速度为 80 km/h 的地铁线路,其正线设定速度通常不高于 80 km/h,允许瞬时超速为 5 km/h。大部分既有线路的区间持续最高运行速度约为 75 km/h。

3 实际旅速与设计旅速差异分析

3.1 设计旅速与实际旅速对比

在上海城市轨道交通既有线路中,近 80%线路的实际旅速低于设计旅速,其中,6 号线、12 号线和 16 号线的设计旅速与实际旅速间的差值较大。郊区线路的实际旅速反而高于设计旅速,如 5 号线、9 号线和 11 号线。早期线路的实际旅速与设计旅速较为接近,如 1 号线和 2 号线。上海城市轨道交通既有线路设计旅速与实际旅速对比如表 1 所示。由表 1 可知,早期线路的实际旅速与设计旅速较为接近。

3.2 差异原因分析

设计旅速与实际旅速产生差值的原因主要有:

1) 客流增长不确定性。部分大客流车站高峰小时实际客流超过了其预测客流,导致设计停站时间无法满足实际的上下客需求,停站时间有所延长。

表 1 上海城市轨道交通既有线路设计旅速与实际旅速对比  
Tab.1 Comparison of design travel speed and actual travel speed for existing urban rail transit lines in Shanghai

线路名称	设计旅速/ (km/h)	实际旅速/ (km/h)	设计旅速与 实际旅速 差值/(km/h)
1 号线	35.0	34.00	1.00
2 号线	35.0	34.84	0.16
3 号线	35.0	32.88	2.12
4 号线	35.0	31.45	3.55
5 号线	35.0	37.00	-2.00
6 号线	36.0	29.58	5.42
7 号线	36.0	33.00	3.00
8 号线	35.0	31.65	3.35
9 号线	37.0	39.69	-2.69
10 号线	35.0	31.94	3.06
11 号线	41.5	42.07	-0.57
12 号线	35.0	30.33	4.67
13 号线	35.0	31.44	3.56
16 号线(大站车)	94.3	75.00	19.30
16 号线(普通车)	70.0	61.82	8.18

2) 站台管理时间未纳入理论计算。从车门关闭至列车起动过程中,一系列站台管理操作时间在设计阶段并未纳入其计算值。

3) 系统延误时间未纳入理论计算。车门关闭后至列车起动间有延误时间,在设计阶段并未纳入其计算值,构成了区间运行时间的偏差。

4) 列车最高运行速度匹配性。目前,大部分城市轨道交通线路设计的最高运行速度为 80 km/h,在设计时通常不考虑其他因素,只计算其最高理论设计值,但实际应用中由于线路或系统的操作偏差导致实际旅速无法达到最优的理论设计值。

4 旅速的主要影响因素

综合来看,旅速的影响因素可从线路条件、装备条件 and 设计流程及接口三方面进行考虑。线路条件包括站间距和限速曲线段数量。装备条件包括车门与站台门性能和列车运行自动化等级设计。设计流程及接口包括列车最高运行速度及其匹配性。

本文以上海轨道交通 12 号线为例进行分析。目前,12 号线采用 6A 型车,其平均站间距为 1.29 km,有 27 个限速曲线段,列车最高运行速度为 80 km/h,5 个列车运行自动化等级,站台门模式为自动开手动关,匹配速度为 75 km/h,理论旅速为 41.50 km/h。

4.1 站间距

通过对 12 号线全线依次减少 1 个、2 个、3 个、4

个、5 个、6 个、9 个和 11 个车站实现线路平均站间距的变化,计算其对应的旅速理论值。平均站间距与旅速的关系如图 1 所示。由图 1 可知,当站间距为 1.0~2.0 km 时,旅速随平均站间距的增大呈线性增加,说明旅速提升较明显。

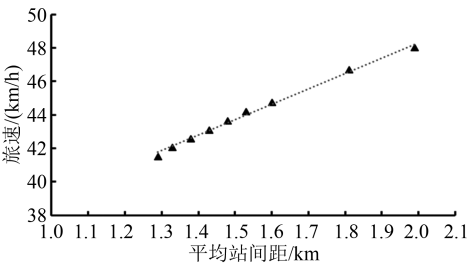


图 1 平均站间距与旅速的关系

Fig. 1 Relation of average station spacing and travel speed

4.2 限速曲线段

曲线对旅速的影响主要体现在两方面。一方面,列车在曲线上行驶时会受到附加阻力,造成列车在区间的运行时间有所增加,进而降低旅速;另一方面,若线路曲线半径过小或超高不足,曲线段会形成限速,同样会降低旅速。一般而言,曲线长度段占全线长度的比例越高,线路旅速越低。

据统计,12 号线上行曲线段长度占比为 53.0%,上行线共计 102 个曲线段,其中 27 个限速曲线段。依次减少 12 号线的限速曲线段个数,研究其与旅速之间的关系,如图 2 所示。由图 2 可知,当减去所有限速曲线段后,全线旅速仅由 41.50 km/h (无任何删减) 提升至 42.17 km/h,上升幅度仅为 1.6%,因此限速曲线段数量对旅速的影响较小。

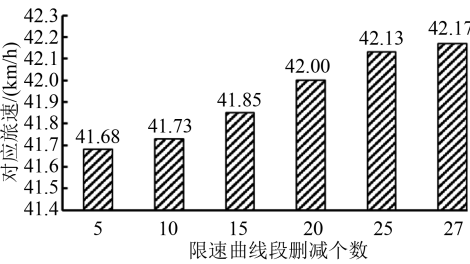


图 2 限速段曲线数量与旅速的关系

Fig. 2 Relation of speed-limit section curve number and travel speed

4.3 列车最高运行速度

一般而言,列车最高运行速度与旅速呈正比,列车最高运行速度越高,则旅速越高。但在站间距一定的情况下,列车最高运行速度增加至某一定值后,由于站间距较小,其速度效益无法完全发挥,此

时再增加列车运行速度对旅速的提升效果不明显。

目前,12 号线的最高运行速度为 80 km/h,其相应的旅速为 41.50 km/h,为了获得列车最高运行速度和旅速之间的关系,最高运行速度按 5 km/h 进行递增,研究其相应旅速的变化情况。列车最高运行速度与旅速的关系如表 2 所示。由表 2 可知,随着列车最高运行速度的增加,旅速不断上升,当最高运行速度由 80 km/h 提升至 85 km/h 时,旅速上升较为明显,递增值为 2.16 km/h。

表 2 列车最高运行速度与旅速的关系

Tab. 2 Relation of train maximum operational speed and travel speed

最高运行速度/(km/h)	旅速/(km/h)	旅速递增值/(km/h)
80	41.50	—
85	43.66	2.16
90	44.22	0.56
95	44.67	0.45
100	44.97	0.30

4.4 列车运行自动化等级

不同列车运行自动化等级下,12 号线上、下行线的旅速如表 3 所示。由表 3 可知,5 个列车运行自动化等级下,旅速为 31.10~35.67 km/h,自动化等级每提高一级,旅速提升约 2.8%~4.3%,仅 GOA4 的旅速达到了 35.00 km/h,其余均在 35.00 km/h 以下。

表 3 不同列车运行自动化等级下 12 号线上、下行旅速

Tab. 3 Upward and downward travel speed of Line 12 under different train operation automation grades

自动化等级	上行旅速/(km/h)	下行旅速/(km/h)
GOA4	35.56	35.67
GOA3	34.10	34.21
GOA2	33.17	33.29
GOA1	32.31	32.43
GOA0	31.10	31.22

注: GOA0 为人工目视列车运行; GOA1 为非自动化列车运行; GOA2 为半自动化列车运行; GOA3 为无人驾驶列车运行; GOA4 为无人干预列车运行。

4.5 车门与站台门

目前,12 号线全线采用车门自动开手动关、站台门联动的形式,不同的车门和站台门开关模式对旅速有一定的影响。改变列车门和站台门开关模式后的旅速变化情况如表 4 所示。由表 4 可知,若将 12 号线列车门自动开手动关优化为列车门自动开关后,旅速可以提升 0.9%。

基于上述分析可以得出,影响旅速因素的重要

表 4 改变开关门模式后旅速的变化情况

Tab. 4 Change of travel speed after door switching alternation mode

开关门模式	旅速提升值/ (km/h)	旅速提升率/ %
列车门自动开手动关、站台门联动	0	0
列车门自动开关、站台门联动	0.38	0.9
列车门手动开关、站台门联动	-1.17	-2.8
列车门自动开手动关、站台门手动	-2.33	-5.6
列车门手动开关、站台门手动	-3.46	-8.3

注:负号表示旅速下降。

程度依次为平均站间距、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、限速曲线段数量。

## 5 旅速提升对策

### 5.1 设计阶段

1) 各专业设计。线路应尽量使曲线半径、缓和曲线长度和行车速度相匹配;轨道对曲线超高设置应尽量满足列车以相对较高速度通过的要求。同时,各专业加强协调,如行车专业根据线路提资在进行牵引计算时,对于旅速影响较大的曲线段应及时向线路专业反馈,共同研究避免曲线限速或提高曲线限速值的可行性。

2) 适当采用运行速度较高的列车。从投资效益平衡的角度考虑,可对比多种最高运行速度的列车,在投资增加不多的情况下,应采购运行速度更高的列车。

3) 采用全自动驾驶方式。通过自动化作业方式可大幅度减少司机人为工作量,显著降低停站时间中的司机操作时间。

### 5.2 设计方法及参数优化

1) 停站时间。停站时间包括有效的上下客时间、车门及站台门开关门动作时间、站台安全管理所需的安全确认时间和系统延误时间四部分。计算有效停站时间时,除了考虑超高峰系数外,还应适当考虑客流分布的不均衡系数。无效时间部分应考虑站台安全管理所需的安全确认时间及系统响应延迟时间。

2) 设施设备性能。列车应具备自动开关列车门的功能,尽量减少按压开/关门按钮至车门响应的时

间,具备红外、激光等检测站台间隙的功能,并消除探测盲区。

3) 运营阶段。实际运营中,列车停站时间均高于其设计停站时间,这主要是由于设计停站时间中缺少从车门关闭到起动列车这一过程中的司机操作时间,在地铁设计规范中也缺少相应的规定。因此,可考虑将司机作业标准化,明确司机作业时间并纳入地方标准以缩小设计停站时间与实际停站时间的差距。

## 6 结语

本文从旅行速度设计流程的角度出发,研究分析旅行速度的成因,以及在各阶段中影响旅行速度的主要因素。基于城市轨道交通线路的站间距、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、限速曲线段数量等 5 大因素,通过控制变量法研究其对旅行速度影响的重要程度。研究表明,改变线路站间距是影响线路旅速的最大因素,而限速曲线段数量对旅速的影响较小。城市轨道交通的旅速提升是一项综合性多因素的考虑,无论是设计人员还是管理人员都需要在各方面达到最优条件才能实现线路旅速的整体效能提升。

## 参考文献

[1] 李更强. 城市轨道交通的旅行速度与列车拥挤度[J]. 都市轨道交通, 2017, 30(5): 23.

LI Gengqiang. Travel speed and train congestion degree in urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(5): 23.

[2] 易立富. 影响地铁列车旅行速度和追踪能力的关键因素[J]. 铁道通信信号, 2013, 49(11): 4.

YI Lifu. Key factors interfering traveling speed and tracking headway in metro[J]. Railway Signalling & Communication, 2013, 49(11): 4.

[3] 张海军, 李红雨, 胡军红. 现代有轨电车旅行速度计算与分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(9): 43.

ZHANG Haijun, LI Hongyu, HU Junhong. Calculation and analysis of modern tram travel speed[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(9): 43.

[4] 周明. 上海地铁停站时间影响因素分析及优化[J]. 交通与运输, 2018, 34(2): 19.

ZHOU Ming. Analysis and optimization of influencing factors of Shanghai Subway stop time[J]. Traffic & Transportation, 2018, 34(2): 19.

(收稿日期:2020-12-04)