

北京市轨道交通市域快线最高运营速度值研究

赵莹莹¹ 杨中平¹ 林飞¹ 翟东武²

(1.北京交通大学 北京 100044; 2.北京市基础设施投资有限公司 北京 100101)

摘要 基于地铁 A 型车的模型,通过牵引计算从运行时分、旅行速度、运行能耗等角度研究了不同线路条件下 80km/h、100km/h、120km/h、140km/h、160km/h 等最高运营速度的运营效果;得到了不同线路条件下适宜采用的速度值。对具体线路最高运营速度的合理选择,引用了无量纲化的综合评价方法。以北京市规划建设的某条市域快线最高运营速度的选择为例进行了探讨,分析结果表明北京市市域快线 140km/h 速度等级在理论上是比较合理的。

关键词 轨道交通 市域快线 最高运营速度 综合评价 能耗

Study on the Maximum Operation Speed of Regional Express Railway for Beijing Rail Transit

Zhao Yingying¹ Yang Zhongping¹ Lin Fei¹ Zhai Dongwu²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. Beijing Infrastructure Investment Co.,LTD, Beijing 100101)

Abstract: Based on the metro vehicle of A style, the paper calculates the operational performance, including operation time, traveling speed and energy consumption of regional express railway under five maximum operation speeds (80km/h、100km/h、120km/h、140km/h、160km/h), and concluded the reasonable speeds of different average distance between stations. Dimensionless method is introduced in the comprehensive evaluation of specific lines. The simulation results of a regional express railway of Beijing which plans to build show that 140km/h is an appropriate maximum operation speed for Beijing regional express railway.

Key words: rail transit; regional express railway; maximum operation speed; comprehensive evaluation; energy consumption

1 绪言

近年来,北京地铁发展迅速,截至 2012 年底,北京地铁共有 16 条运营线路,总长 442km。它包含 15 条地铁线路、1 条机场快轨,覆盖了北京市 11 个市辖区。以运营里程计算,北京地铁是世界上规模最大的城市地铁系统。以客运量计算,北京地铁是国内最繁忙的城市轨道交通系统,极大缓解了市区道路交通压力。但随着城市的发展,郊区人口的增多,对远郊新城及环北京周边的城市,乃至京津冀都市圈内的城市交通出行,缺乏快速便捷的交通方式。急需发展轨道交通市域快线,形成城市大范围内的快速通勤圈,以解决居民长距离出行问题。

如何确定合理的最高运营速度对轨道交通市域快

线建设十分重要,其大小将直接影响列车运行时间、能耗、旅行速度及投资成本等。从国外发展情况来看,法国、英国及日本均已建立了市域轨道交通快线系统。法国 Z20900、M184 列车最高运营速度分别为 140km/h、130km/h;英国 class313、class317 列车分别达到了 120km/h、160km/h;日本 E233、E259 列车分别达到了 120km/h、130km/h。可见国外市域快线系统列车最高运营速度均不低于 120km/h^[1]。国内香港东涌线 Rotem 列车最高运营速度为 130km/h;服务于新机场线的 Adtranz-CAF 列车最高运营速度为 135km/h。正在建设的上海 16 号线、深圳地铁 11 号线以及已投入运营的广州地铁 3 号线,设计时速均为 120km/h。可见国内各大城市都在积极建设最高运营速度在 120km/h 及以上的市域快线。

本文探讨了北京市市域快线建设最高运营速度的选择,研究基于地铁 A 型车的模型,经过牵引计算,

作者简介: 赵莹莹,女,在读硕士研究生,从事城市轨道交通电气牵引的研究, 12121591@bjtu.edu.cn

北京市科委课题: 140 公里等级城市轨道交通系统核心设备研制(Z111100059411009)

比较了常规运营速度 80km/h 与 100、120、140、160km/h 几个不同最高运营速度的运营效果;从列车运行时分、旅行速度及运行能耗方面探讨了不同线路条件下适宜采用的最高运营速度。对具体线路不同最高运营速度的比较,引用了无量纲化的综合评价方法,并以北京市规划建设某条市域快线为例进行了探讨。

2 北京市快线发展分析

2.1 北京市交通圈层规划

图 1 为北京市交通圈层规划示意图。根据北京市交通圈层的规划研究成果及要求,第三圈层为 4 个远郊新城(延庆、怀柔、密云、平谷)及河北环首都经济圈 13 县市,范围约 65~80km,通勤时间构想为 1h^[2]。

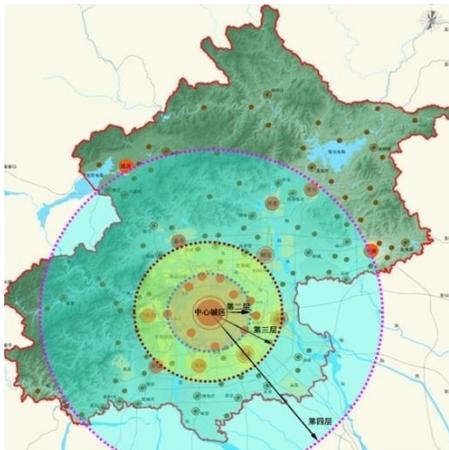


图 1 北京市交通圈层规划

对此北京市规划了平谷线、新机场线、R1 线、S6 线等市域快线,相较于一般地铁线路,这几条市域快线有以下特点:

- (1) 线路长,平谷线作为机场延伸线,服务平谷,线路长约 50km; R1 线服务通州和门头沟,长达 50km 以上;
- (2) 站间距大,平谷线最大站间距达 25km; 机场联络线最大站间距也达到了 20km 以上;
- (3) 服务的对象都以边缘组团为主,乘客乘坐的距离较长;

因此常规运营速度 80km/h 的地铁已经难以满足这些线路要求。根据第三圈层要实现 1h 内通勤的要求,线路的旅行速度必须达到 80km/h 以上。

轨道交通市域快线的建设,已成为大城市调整产业结构、引导卫星城发展、实现经济可持续发展的重要手段。北京高速发展之后,相关过多的产业、人口、资金逐渐向周边地区覆盖。发展轨道交通市域快线,为环首都经济圈的建立,解决了到中心城及新城的通勤问题,有利于快速带动周边地区的经济发展。

勤问题,有利于快速带动周边地区的经济发展。

2.2 车辆条件

北京市城市轨道交通市域快线列车,可以在现有地铁车辆的基础上升级。本文对最高运营速度的研究基于地铁 A 型车作比较论证。

2.2.1 列车基本参数

列车采用 4M2T 的编组方式,基本参数如表 1 所示,其中乘客质量以 60kg/人计。

表 1 地铁 A 型车参数

工况	车重 (t)		列车总重 (t)
	Tc	Mp、M	
AW0	35	38	222
AW2	53.6	56.6	333.6
AW3	59.6	62.6	372.26

2.2.2 列车动力性能

本文探讨了常规运营速度 80km/h 与 100、120、140、160km/h 几个不同最高运营速度的运营效果。这里给出最高运营速度 140km/h 的列车的动力性能。

在额定 AW2 情况下,平直干燥轨道上,车轮为半磨耗状态,额定电压 DC1500V 时,列车动力性能参数如表 2 所示。

表 2 列车动力性能

平均加速度	0~50km/h	1.0 m/s ²
	0~140km/h	≥0.5 m/s ²
平均减速度	常用制动	≥1.0 m/s ²
	紧急制动	≥1.3 m/s ²

基于表 2 的列车动力性能要求,考虑参数匹配以及轮轨粘着的允许。最高运营速度 140km/h 的列车的牵引/制动曲线如图 2、图 3 所示。

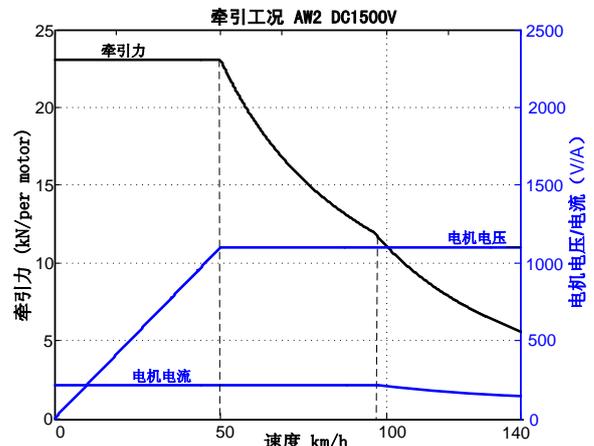


图 2 单台电机牵引特性

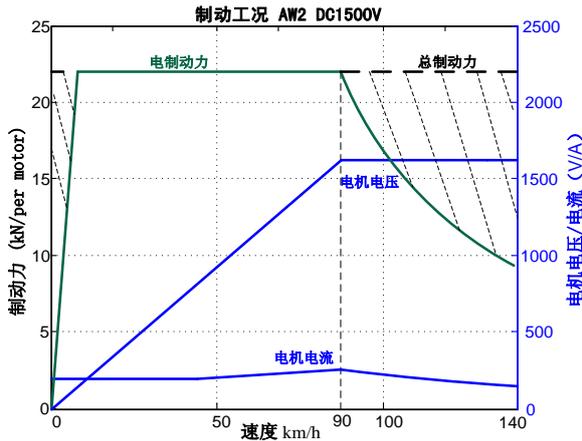


图3 单台电机制动特性

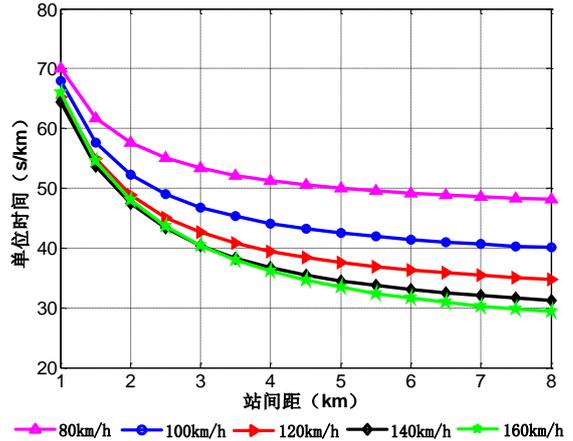


图5 不同最高运营速度的运行时间

3 不同线路条件下最高运营速度的选择

为探究不同线路条件下适宜的最高运营速度，本文基于 MATLAB 进行了牵引计算，从运行时分、旅行速度、运行能耗等方面比较了常规运营速度 80km/h 与 100、120、140、160km/h 几个不同最高运营速度的运营效果，并以北京市规划的某条市域线路为例进行了分析。

运行仿真采用最小时分的牵引策略，以最大的牵引力牵引至最大速度，然后以最大速度匀速，最大的制动力制停，如图 4 所示^[3]。

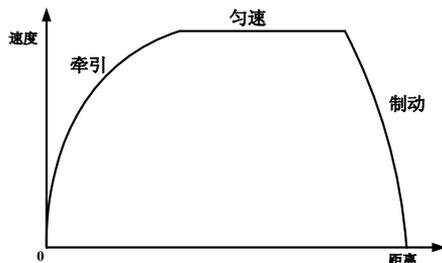


图4 最小时分牵引策略

3.1 不同线路条件下运营效果的比较

3.1.1 运行时间

图 5 为平均站间距在 1~8km 范围内，各最高运营速度的每千米所用时间。可以看出，随着速度的提高，每千米所用时间缩短；在平均站间距小于 2km 时，120km/h 及以上的速度对缩短运行时分的作用并不明显。在平均站间距小于 4km 时，140km/h 和 160km/h 相较于 120km/h 的最高运营速度对缩短运行时分作用很小。对于单个站间距，140km/h 与 160km/h 的列车每千米运行时间差距较小。

3.1.2 旅行速度

图 6 为各最高运营速度的旅行速度。在平均站间距达到 3km 时，120km/h 列车的旅行速度即达到了 85km/h，即能够满足北京市交通规划第三圈层旅行时间不超过 1h 的要求。

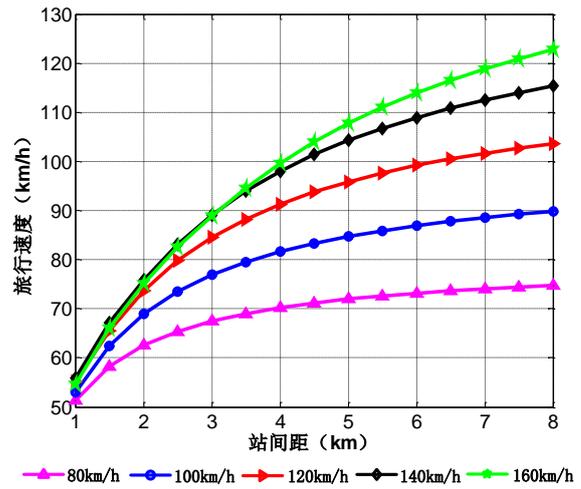


图6 不同最高运营速度的旅行速度

3.1.3 运行能耗

图 7 为各最高运营速度的单位能耗。可以看出随着最高运营速度的提高，单位能耗增加迅速；且各最高运营速度的单位车能耗均随着平均站间距的增加而减小，在站间距大于 6km 以后变化缓慢。

同时根据仿真得到，列车加速到 100km/h 并制停，站间距至少要 1.3km；加速到 120、140、160km/h 后制停，站间距至少分别要 2、2.6、4km。一般认为以最高速度运行的距离占总运行距离的 50% 及以上时，才具有一定的经济性。

综合图 5、图 6、图 7 可以得到以下结论：对平均站间距小于 2km 的线路，选择 80km/h 的最高运营速度比较合适，再提高最高运营速度对缩短运行时的

效果不明显；平均站间距大于 2km 的线路，可考虑选择 100km/h 的速度值；平均站间距 3~5km 时可选择 120km/h；平均站间距大于 5km 时可选择 140km/h，平均站间距在 6~8km 时可选择 160km/h 的速度值。在大站间距的情况下选择较高的运营速度对于缩短运行时分、提高旅行速度效果较明显。

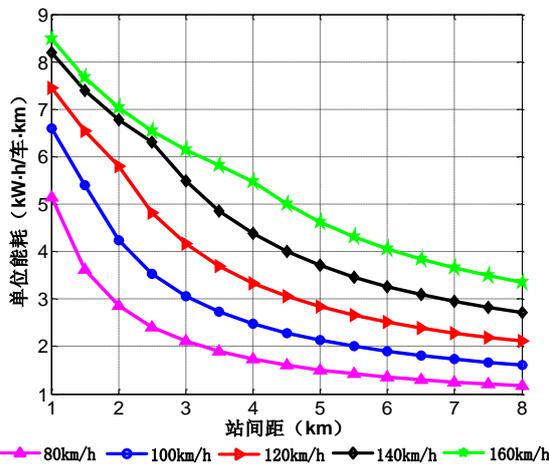


图 7 不同最高运营速度的运行能耗

3.2 北京市某条市域线路最高运营速度选择

表 3 为北京市第三圈层规划的某条市域线的线路条件，线路目标时间为 30min。线路全长 53.13km，共 7 站，平均站间距为 7.59km，其中 1、2 两站站间距较大，其余 5 站站间距均小于 6km。

表 3 线路条件

区间	站间距 (m)	类型
1	21900	高架
2	7900	高架
3	4950	地下
4	5650	地下
5	5000	地下
6	3700	地下
7	4030	地下

对该线路进行了牵引计算，运行仿真中停站时间按 30s 考虑，各最高运营速度的计算结果及比较如表 4、表 5 所示。

由表 4、表 5 可以看出最高运营速度 160km/h 比 140km/h 仅缩短了 0.8min，两者运行时分基本相同，节省时间有限。同时采用 140km/h 的最高运营速度基本能够实现 30min 到达的要求。速度从 140km/h 增加 160km/h，运行能耗增加了 23.7%，旅行速度仅提高了

2.9km/h。因此基于运行时分、旅行速度、运行能耗等方面可以看出该线最高运营速度选择 140km/h 比较合适。且 140km/h 的最高运营速度运行的距离达到全线的 66%，符合一定工程实践的经济性要求。

表 4 各最高运营速度的运行仿真结果

最高运营速度 (km/h)	最高速度运行比例	运行时分 (min)	与 80km/h 比较时间缩短 (min)	旅行速度 (km/h)	运行能耗 (kW h/车 km)
80	89.7%	45.8		69.6	1.19
100	82.4%	38.7	7.1	82.4	1.65
120	74.5%	34.0	11.8	93.8	2.17
140	66.0%	30.1	15.7	106.0	2.80
160	48.0%	29.3	16.5	108.8	3.45

表 5 各最高运营速度的结果比较

最高运营速度 (km/h)	运行时分缩短 (min)	旅行速度提高 (km/h)	运行能耗增加
100 较 80	7.1	12.8	38.2%
120 较 100	4.7	11.4	31.7%
140 较 120	3.9	12.2	28.7%
160 较 140	0.8	2.9	23.7%

4 无量纲化的综合评价方法

从 3.2 节的分析可以看出，最高运营速度的选择属于多属性的决策问题，不能从单个指标进行评价。速度的提高，缩短了运行时分，却不可避免的增加了能耗和投资成本，同时可能带来安全、环保问题，因此需要综合各个指标来选择合适的最高运营速度^[4]。但各个评价指标有不同的量纲，难以直接比较。因此本文引用了无量纲化的综合评价方法，来比较各最高运营速度的运营效果。

用向量 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 表示可供选择的各个方案的综合效益的集，用向量 $Y=(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in})$ 表示第 i 个方案 ($0 < i \leq n$) 的各属性的集，其中 Y_{ij} 表示第 i 个方案的第 j 个属性 ($0 < j \leq m$) 的值。矩阵 $Y=(y_{ij})_{m \times n}$ 称为决策矩阵。

对于旅行速度等效益型属性的指标（属性值越大越好）、能耗和时间等成本型属性的指标（属性值越小越好），采用极值法处理的无量纲化公式如下^[5]：

对于效益型指标，令

$$z_{ij} = \frac{y_{ij} - y_j^{\min}}{y_j^{\max} - y_j^{\min}}$$

对于成本型指标，令

$$z_{ij} = \frac{y_j^{\max} - y_{ij}}{y_j^{\max} - y_j^{\min}}$$

其中 y_j^{\min} 和 y_j^{\max} 分别为第 j 个指标在各个方案中的最小值和最大值。经过无量纲化处理后, 数据的数值范围在 $[0, 1]$, 保证每种指标度量出来的指标值 z_{ij} 严格从 0 到 1 变化, 0 表示最差的状态, 1 为最好的状态。各个方案的综合效益 x_i 取:

$$x_i = \sum_{j=1}^n z_{ij}, \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

x_i 值越大则该方案越优。

实际工程实践中由于各种因素, 对于各个指标是各有所权重的, 部分线路重视时间效益、有些更关注能耗指标。各指标的权重常根据相关专家意见或者工程经验设定, 此时可以采用主观赋权法对不同指标赋予不同的权重, 来比较不同的运营结果。

设定权重 $W=(w_{11}, w_{21}, \dots, w_{n1})^T$, 根据主观因素来确定 w_{11} 、 w_{21} 、 \dots 、 w_{n1} 等相对权重且 $w_{11}+w_{21}+\dots+w_{n1}=1$, 令 $X=ZW$, 此时 X 越接近 1 时, 结果越优。

采用综合评价体系对 3.2 节市域线路的仿真结果进行无量纲化处理, 取最高速度所占比例、运行时分、旅行速度、运行能耗四个指标; 其中运行时间和运行能耗为成本型指标, 最高速度所占比例和旅行速度为效益型指标。从 80km/h 到 160km/h 共计 5 个方案。不考虑各指标的相对权重, 无量纲化处理后的结果如表 6 所示。

表 6 各指标无量纲化

最高运营速度 (km/h)	最高速度占比	运行时分	旅行速度	运行能耗	综合效益 X
80	1	0	0	1	2
100	0.825	0.430	0.327	0.796	2.378
120	0.635	0.715	0.617	0.566	2.534
140	0.432	0.952	0.929	0.288	2.599
160	0	1	1	0	2

由计算出的综合效益 X 可以看出, 在不考虑相对权重时, 140km/h 的速度目标值对于该线路是最优的方案。

5 结论

市域快线建设将促进城市轨道交通的发展, 为远郊新城等长距离乘客提供便捷的交通方式。最高运营速度的选择是市域快线建设首要考虑的技术指标, 根据本文对最高运营速度的计算、比较, 可以得到以下结论:

- (1) 平均站间距 3~5km 时可选择 120km/h 的最高运营速度; 平均站间距大于 5km 时可选择 140km/h, 平均站间距在 6~8km 时可选择 160km/h 的最高运营速度;
- (2) 对于北京市规划建设市域快线, 140km/h 速度等级的最高运营速度在理论上是比较合适的。

北京市市域快线最高运营速度, 需要针对线路具体特点和功能定位来选择。本文对最高运营速度的研究仅基于运行时分、旅行速度、能耗来考虑的, 更完整合理的评价方法也有待综合更多评价指标如投资成本、单位运输能力、环保、安全等因素进一步细化考虑。

在此感谢北京市基础设施投资有限公司及北京城建设计研究总院有限责任公司对于本研究所给与的支持和帮助。

参考文献

- [1] 杨耀. 国外大城市轨道交通市域线的发展及其启示[J]. 城市轨道交通研究, 2008, 11(2): 18-21.
- [2] 王灏. 关于城市轨道交通快线发展的研究[J]. 都市轨道交通, 2006, 19(3): 3-6.
- [3] 谢宏诚. 城市轨道交通车辆牵引仿真研究[D]. 同济大学, 2006.
- [4] 苏梅, 李建新. 我国城市铁路最高设计速度值研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2004(4): 64-68.
- [5] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [6] 瞿汉兴. 高速铁路时代我国城市轨道交通整体快线化的思考[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(2): 13-16.
- [7] Xuesong Feng, Baohua Mao. Study on the maximum operation speeds of metro trains for energy saving as well as transport efficiency improvement [J]. Energy, 2011, 36(65): 77-82.
- [8] GB 50157—2003 地铁设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003: 50-55.