

考虑快慢车模式的地铁地下线纵断面优化研究

孙元广¹,汪茜²,彭磊¹,齐嫣然²,柏赞^{*2}

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司,广州510699; 2. 北京交通大学
综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室,北京100044)

摘要: 优化地铁线路纵断面设计方案可降低列车运行能耗与风井建设成本.本文以盾构法施工的地铁地下线为研究对象,考虑地铁设计规范约束与实际施工条件,建立以列车双方向运行能耗与风井成本之和最小为目标的线路纵断面优化模型.采用模拟退火与遗传算法的组合方法求解.广州地铁14号线案例分析证明,与实际方案相比,本文模型所得优化方案节省2.65%的总成本.与仅考虑站站停模式下的纵断面优化方案相比,本文模型所得方案在快慢车总能耗方面更优,说明考虑停站方案进行纵断面优化的必要性.

关键词: 城市交通;轨道交通;线路纵断面;列车能耗;风井成本

Optimization on Track Vertical Alignment of Subway Lines Considering Express/Local Trains

SUN Yuan-guang¹, WANG Qian², PENG Lei¹, QI Yan-ran², BAI Yun²

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd. Guangzhou 510699, China;
2. Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The optimization on vertical alignments of subway tracks reduces the energy consumption of train movement and the construction cost of ventilation shafts. Focusing on the subway lines constructed by the shield tunneling method, this paper establishes an optimization model on the track vertical alignment with the objective of minimizing the weighted sum of train energy consumption and ventilation shaft cost. The model takes various design criteria and practical construction requirements into consideration. The simulate anneal and genetic algorithms are applied to solve the proposed model. The case studies on Guangzhou Metro Line 14 indicate that the optimized track alignment reduces the total cost by about 2.65% in comparison with the practical alignment. Moreover, the proposed model outperforms the previous models considering trains stopping at every station only in energy saving, which indicates the train stop patterns should be considered in the optimization on vertical alignments of subway tracks.

Keywords: urban traffic; rail transit; track vertical alignment; train energy consumption; ventilation shaft cost

0 引言

地铁线路纵断面设计主要是指坡段的设计,直接影响线路建设成本和列车运营成本^[1].目前,对地铁纵断面方案的优化研究主要分为区间与全线的纵断面优化.前者在固定地铁某区间两端车站水平位置与高程的条件下,对区间的坡段设计

进行优化^[2-7];后者是在线路起终点固定后,考虑中间车站高程的变化对全线坡段设计进行优化^[8-9].

区间纵断面的优化研究较为成熟.Hoang^[2]等结合列车操纵提出6种典型的纵断面设计方案,并设计算法对坡度参数进行寻优.Lafortune^[3]等开发了一种交互式地铁线路设计系统,辅助纵断面方

收稿日期:2020-02-12

修回日期:2020-04-20

录用日期:2020-05-06

基金项目:国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(71571016,71621001).

作者简介:孙元广(1975-),男,山东莱阳人,教授级高级工程师.

*通信作者:yunbai@bjtu.edu.cn

案设计以降低列车牵引能耗. Duarte^[4]等设计了一种梯度恢复算法,以最小化列车牵引能耗为目标生成地铁站间的最优纵断面线型.余路^[6]以降低建设和列车运营成本为目标,利用遗传算法优化地铁区间纵断面方案.白晓^[7]构建以列车双方向牵引能耗最小为目标的区间纵断面设计优化模型,采用遗传算法求解.

相较于区间纵断面优化,全线纵断面优化需要考虑中间车站高程变化. Lai^[8]等构建了以建设成本、用户成本和运营成本最小为目标的模型,用切平面法优化地铁平纵断面方案和车站高程. Li^[9]等采用距离变换算法优化轨道交通平纵断面方案和车站高程.

上述研究均未考虑列车停站方案对地铁纵断面设计的影响. 由于快、慢车运行轨迹不同,其节能坡设置也有所区别. 因此,有必要对快慢车组合运营线路构建纵断面优化模型,求解使建设成本与列车运营成本最低的纵断面方案.

1 问题描述

地铁地下线一般采用盾构法施工,轨道埋深

对于盾构机挖掘成本和处理废土成本的影响极小^[10]. 但地下线每隔一段距离需要设置风井,其建设成本取决于轨道埋深^[11],故风井建设成本为本文优化目标之一. 线路纵断面方案对列车运行能耗有较大影响^[12],对于快慢车线路而言,线路上运营多种停站方案的列车,同时考虑所有列车的总能耗并乘以电费单价将其转换为金钱成本,作为本文另一优化目标.

进行纵断面设计时,线路起终点位置(起点车站 H_1 和终点车站 H_M)和平面信息均为已知,车站数量 (M)、风井数量和面积通常也已确定. 本文通过调整中间站高程(站中心轨道高程)和各区间变坡点的数量与位置,使建设与运营成本之和最小. 纵断面方案如图 1 所示,中间站高程用 $H = \{H_2, H_3, \dots, H_m, \dots, H_{M-1}\}$ 表示, m 表示车站序号;各区间变坡点的水平位置 $X_j^{(k)}$ 与高程 $Y_j^{(k)}$ 以坐标形式给出,即 $(X, Y)_j = [(X_j^{(0)}, Y_j^{(0)}), (X_j^{(2)}, Y_j^{(2)}), \dots, (X_j^{(k)}, Y_j^{(k)}), \dots, (X_j^{(K)}, Y_j^{(K)})]$,其中, j 表示区间的序号, k 表示变坡点的序号, K 表示该区间的变坡点的总数量.

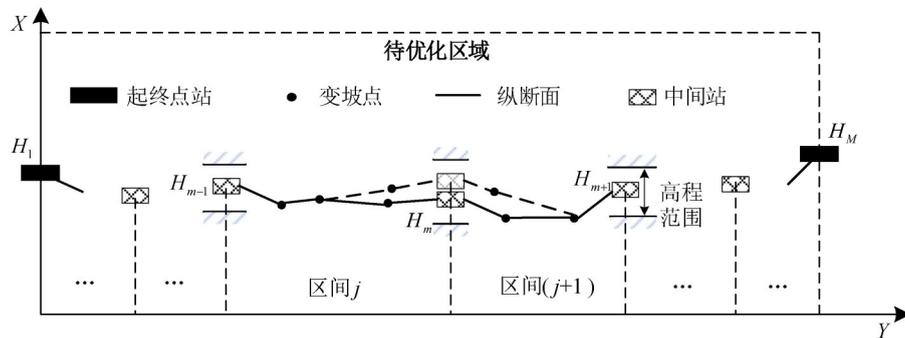


图 1 线路纵断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of track vertical alignment

纵断面设计需考虑的约束主要有两类:第一类是《地铁设计规范》(GB50157-2013)^[13]中明确要求的最大纵坡、最小坡长、最小夹直线长度等;第二类为中间站及区间某些地段的控制高程约束,如避让地质不良或管道经过区域,最小埋深约束. 列车运行需考虑限速和停站约束等.

综上所述,针对快慢车模式地铁地下线提出纵断面优化模型,在已知线路起终点三维位置和平面方案的条件下,考虑设计规范约束和施工条

件,通过改变区间各变坡点的位置和中间站高程,得到以风井建设成本和所有列车能耗成本总和最小的纵断面方案.

2 模型构建

本文考虑最为常见情景,做出如下假设:

(1) 线路平面方案在纵断面设计之前已确定,中间站与风井的数量和水平位置,以及风井面积作为已知参数.

(2) 列车采用“牵引—巡航—制动”的操纵策略运行,巡航速度等于允许速度减去设定的速度裕量;列车若在运行途中遇到低限速区段,将采用“牵引—巡航—(制动—巡航—牵引—巡航)—制动”的操纵策略,其中,括号内的工况序列出现次数决定于低限速区段的数量。

(3) 因再生制动能的利用受时刻表等多方面因素影响,能耗计算不考虑再生制动。

2.1 优化目标

模型目标 $C_0[(X, Y), H]$ 是风井建设成本 $C_F[(X, Y), H]$ 和列车运行能耗成本 $C_E[(X, Y), H]$ 之和最小。风井建设成本属于一次性投入,而列车运行能耗则随时间增加而增大。本文用资本回收系数 Δ 将风井总建设成本转化为单位年的建设成本^[9],再与年能耗成本相加,得到目标函数,即

$$\min C_0[(X, Y), H] = \Delta \cdot C_F[(X, Y), H] + C_E[(X, Y), H] \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{b(1+b)^l}{(1+b)^l - 1} \quad (2)$$

式中: b 为年利率(%); l 为地铁生命周期(年)。

风井建设成本与其数量、建设面积与埋深有关,前两者为已知参量,风井建设成本主要取决于其埋深,即地面高程与风井高程之差。风井高程等于同里程的轨道高程,地面高程可通过勘察得到。风井成本计算公式为

$$C_F[(X, Y), H] = \sum_{i=1}^N C_{F,i} = \sum_{i=1}^N A_i \cdot c_F^{(M_i)}[(X, Y), H] \quad (3)$$

式中: i 为风井的序号; $c_F^{(M_i)}$ 为第 i 个风井的建设单价(万元/m²),取决于其埋深 M_i ; A_i 为风井 i 的面积(m²); N 为风井数量。

能耗成本等于所有列车双方向运行能耗之和乘以单价,即

$$C_E[(X, Y), H] = \sum_{r=1}^R \{n_r \cdot E_r[(X, Y), H]\} \cdot P \cdot 365 \quad (4)$$

式中: R 为列车停站方案数量; n_r 为1 d内停站方案为 r 的运行列次; $E_r[(X, Y), H]$ 为停站方案为 r 的列车双方向运行能耗(kw·h); P 为地铁电费单价(元/kw·h)。

列车运行过程中可能受牵引力 F 、阻力 W 和制动力 B 作用,三者均取决于列车速度。计算得到 t 时刻的列车合力 C_t 后,根据牛顿第二定律可计算

列车加速度 a_t 、速度 v_t 、位置 S_t 和能耗 E_t ^[12],计算公式为

$$C_t = F(v_t) - B(v_t) - W(v_t) \quad (5)$$

$$a_t = \frac{C_t}{(1+\gamma) \cdot M} \quad (6)$$

$$v_{t+1} = v_t + a_t \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$S_{t+1} = S_t + \left(v_t \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_t \cdot \Delta t^2 \right) / 3.6 \quad (8)$$

$$E_{t+1}[(X, Y), H] = E_t[(X, Y), H] + U_t \cdot [I(v_t) + I_0] \quad (9)$$

式中: γ 表示旋转质量系数; Δt 为时间步长(min); v_t 和 v_{t+1} 分别为第 t 和 $t+1$ 时刻的列车速度(km/h); S_t 为列车在 t 时刻的位置(m); U_t 表示 t 时刻的瞬时网压; $I(v_t)$ 表示速度为 v_t 时列车的牵引电流; I_0 表示辅助设备电流。

2.2 约束条件

(1) 《地铁设计规范》约束。

① 车站坡的坡度和坡长。

车站区域坡道的坡度值 $i_j^{(S)}$ 应服从设计规范要求从集合 N_s 中选取,车站区域坡道坡长 $l_j^{(S)}$ 不应小于站台长度 L_s ^[13],即

$$1000 \times \frac{Y_j^{(k)} - Y_j^{(k-1)}}{X_j^{(k)} - X_j^{(k-1)}} = i_j^{(S)} \in N_s, k \in 1 \text{ or } K \quad (10)$$

$$l_j^{(S)} = X_j^{(k)} - X_j^{(k-1)} \geq L_s, k = 1 \text{ or } K \quad (11)$$

式中: N_s 表示坡度集合,为 $\{-3\%, -2\%, 0\%, 2\%, 3\%\}$ 。

② 非车站区域坡道的坡度和坡长。

任意坡道的坡长 $l_j^{(b)}$ 不宜小于远期列车长度 L_T ,坡度 $i_j^{(b)}$ 的绝对值不小于 $i_a^{(\min)}$ 且不大于 $i_a^{(\max)}$ ^[13],即

$$l_j^{(b)} = X_j^{(k)} - X_j^{(k-1)} \geq L_T, 1 < k < K \quad (12)$$

$$i_a^{(\min)} \leq \left| i_j^{(b)} = 1000 \times \frac{Y_j^{(k)} - Y_j^{(k-1)}}{X_j^{(k)} - X_j^{(k-1)}} \right| \leq i_a^{(\max)}, 1 < k < K \quad (13)$$

式中: $i_a^{(\min)}$ 和 $i_a^{(\max)}$ 分别表示《地铁设计规范》(GB50157-2013)规定的非车站区域坡道的坡度值绝对值的最小值与最大值。

③ 最小夹直线长度。

当相邻坡道坡度差超过 2‰ 时,需设置竖曲线来减缓列车运行时的振动幅度。为避免振动叠加,两竖曲线间的夹直线长度不小于 $L_{\text{tag}}^{(\min)}$ 。夹直线长度等于相邻变坡点之间横坐标之差再减去两端

竖曲线的切线长 T_q (T_q 取决于相邻坡道的坡度差和竖曲线半径 R_c , 计算方法可查阅文献[14]), 即

$$X_k - X_{k-1} - T_q(k-1, k) - T_q(k, k+1) \geq L_{\text{tag}}^{(\min)}, 1 < k < K \quad (14)$$

(2) 控制高程约束.

① 车站高程.

由于施工条件与工程造价限制, 车站高程值 H_m 应在一定范围内, 即

$$H_m^{(\min)} \leq H_m \leq H_m^{(\max)}, m \in (2, M-1) \quad (15)$$

式中: $H_m^{(\min)}$ 与 $H_m^{(\max)}$ 分别为车站 m 的高程下限值与上限值.

② 控制高程.

地下线路施工时通常需避开一些高程区域, 如管线经过的区域和地质条件达不到施工要求的区域. 因此, 在同一里程 z 下, 纵断面经过的高程点 $Y_j^{(z)}$ 与控制高程区域内的任意满足 $X_h = z$ 控制点 h 高程值 Y_h 须大于一定的间隔 ε , 即

$$Y_j^{(z)} - Y_h > \varepsilon, X_h = z \quad (16)$$

③ 风井埋深.

考虑施工要求, 风井的埋深须大于最小埋深 δ , 即

$$M_i > \delta, i \in N \quad (17)$$

(3) 列车运行限速约束.

① 区间限速.

列车运行速度不能超过当前位置的限速 $v_{s_i}^{(\text{limit})}$, 即设计限速 V_L 与曲线限速 $3.9\sqrt{R_i}$ 的较小值.

$$v_t \leq v_{s_i}^{(\text{limit})}, t \in [0, T_i] \quad (18)$$

$$v_{s_i}^{(\text{limit})} = \min\{3.9\sqrt{R_i}, V_L\} \quad (19)$$

式中: T_i 表示列车总的运行时分; R_i 表示 t 时刻列车所处位置处的曲线半径(m).

② 车站区域限速.

停站方案为 r 的列车, 其停站和越行站集合分别表示为 $O_r^{(s)}$ 和 $O_r^{(p)}$. 停站时, 列车在站中心的速度为 0; 在越行车站, 列车在车站区域的限速为 $v_p^{(\text{limit})}$.

$$V_r^{(s)} = 0, s \in O_r^{(s)} \quad (20)$$

$$V_r^{(p)} \leq v_p^{(\text{limit})}, p \in O_r^{(p)} \quad (21)$$

式中: s 和 p 表示车站的序号; $V_r^{(s)}$ 表示停站方案为 r 的列车在车站 s 的速度; $V_r^{(p)}$ 表示停站方案为 r 的

列车在车站 p 的速度.

3 求解算法

本文模型约束条件多且解空间较大, 设计一种双层启发式算法进行求解, 上层采用模拟退火算法求解车站高程方案, 下层运用遗传算法对区间变坡点的位置进行优化, 具体流程如下.

Step 1 设置模拟退火算法参数, 如初始温度 T_0 , 冷却系数 ρ , 结束温度 T_N .

Step 2 针对中间车站高程, 考虑约束条件随机生成一组初始方案, 即 $H^0 = \{H_2^0, H_3^0, \dots, H_{M-2}^0, H_{M-1}^0\}$.

Step 3 求解给定中间站高程下各区间最优变坡点方案, 并计算综合成本 C , 过程如下:

① 设定遗传算法种群大小 P_M , 进化代数 G , 交叉概率 P_c , 变异概率 P_m .

② 通过对各区间变坡点横纵坐标进行间接编码, 随机产生个体均满足约束的初始种群.

③ 计算种群各个体的适应度 f , 即目标函数值的倒数.

④ 利用轮盘赌方式选择群体中的两个个体.

⑤ 对个体进行交叉(两点交叉)与变异(单点变异)操作, 生成新个体.

⑥ 对新个体进行适应度评价. 如果优于父代个体, 则进入下一代种群; 否则, 以 Boltzmann 准则^[15]接受子代.

⑦ 达到最大迭代次数后, 输出当代群体的最优解.

Step 4 随机生成一组满足约束的新解 H^0 , 并计算其对应的变坡点方案和综合成本.

Step 5 计算相邻两代解的综合成本差值 $\Delta C = C(H^0 - H^0)$. 若 $\Delta C > 0$, 则子代被接受的概率为 $\exp\left(-\frac{\Delta C}{T}\right)$; 若 $\Delta C < 0$, 则接受新解.

Step 6 更新温度值, $T_{k+1} = \rho T_k$.

Step 7 若当前温度 T_k 达到结束温度 T_N , 输出最优方案; 否则, $k = k + 1$, 返回 Step 4.

4 案例分析

选取广州地铁 14 号线嘉禾望岗站—新和站区

间,长度 29.89 km,设有嘉禾望岗、东平、夏良、太和、竹料、钟落潭、黎家塘、新和共 8 个车站.列车为四动两拖 B 型车,动车与拖车质量分别为 52.5 t 和

44.5 t,长度 120 m. 9~15 m、15~21 m、21 m 以上的风井单位平方米建设成本分别为 2 万元、3 万元和 4 万元,其他参数如表 1 所示.

表 1 模型基础参数

Table 1 Basic parameter of proposed model

参数	取值	参数	取值	参数	取值
i	1.75%	N_s	$\{-2\%,0\%,2\%\}$	$L_{lag}^{(min)}$	50 m
l	100 年	$i_a^{(max)}$	30‰	R_c	3 000 m
N	16 个	$i_a^{(min)}$	3‰	V_L	120 km/h
P	0.71 元/kWh	L_T	140 m	$v_p^{(limit)}$	80 km/h
δ	9 m	ε	2 m		

为验证模型有效性,本文对比分析实际方案与分别考虑快慢车和站站停得到的优化方案.快慢车模式下:快车仅在嘉禾望岗站和新和站停车,日开行 82 对;慢车采用站站停模式,日开行 83 对.在站站停模式下,每日开行 165 对列车.由于缺少竹料站至新和站的平面方案,为保证可比性,本案例仅优化嘉禾望岗至竹料的纵断面方案.换言之,3 种方案在竹料站至新和站采用相同的纵断面.

3 种纵断面方案如图 2 所示.原始方案和两种优化方案的线路长度分别为 16 940.000 39,

16 940.000 47,16 940.000 51 m. 土建成本按 7.5 万元/延米计算^[10],3 种方案施工成本差异可忽略.站站停模式下,纵断面优化方案采用“高站位、低区间”的节能坡设计,因仅考虑站站停列车,车站两端的加减速坡更加陡峭,为列车出站牵引提供更大动力.考虑快慢车模式的纵断面方案由于考虑了快车能耗,东平和夏良站高程较站站停方案均有小幅下降,使整体纵断面线型更加平缓,兼顾快车节能运行规律.

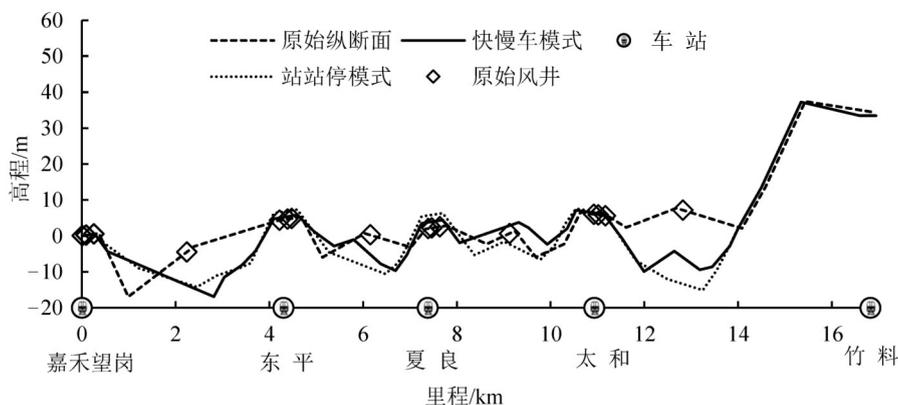


图 2 不同方案纵断面对比

Fig. 2 Comparison on different vertical alignments of subway track

不同纵断面方案的全天双方向列车能耗如表 2 所示.与原始方案相比,快慢车方案同时考虑快车和慢车的能耗,故快车能耗优化率为 2.72%,高于站站停模式的节能率 1.52%;而慢车能耗的优化率为 2.49%,低于站站停方案的节能率 2.53%.快慢车方案的总能耗优化率为 2.59%,优于站站停模式的 2.10%,说明考虑快慢车停站模式进行纵断面优化的必要性.

不同方案的风井埋深如表 3 所示.与实际方

案相比,快慢车方案中大部分风井埋深均有所减少,故总建设成本降低了 36 万元.但快慢车方案中的 4、8 和 16 风井埋深均有所上升,且变化幅度与其他风井相比比较大.这是由于“高站位、低区间”的纵断面更利于列车节能运行,且能耗成本节约量比埋深增加的风井成本量更大,因此这三处风井的埋深有所增加.此外,由于站站停方案比快慢车方案更注重降低慢车的能耗,使区间纵断面的高程进一步降低,总的风井建设成本较实际方案

上升8万元.

表2 不同纵断面方案下的快慢车运行能耗对比

Table 2 Comparison on energy consumption of train movement with different vertical alignments

列车	起点站	实际方案	快慢车模式		站站停模式	
		双向能耗/kWh	双向能耗/kWh	优化率/%	双向能耗/kWh	优化率
快车	嘉禾望岗	75 102	73 062	2.72	73 964	1.52
	嘉禾望岗	16 669	14 042	15.80	14 141	15.20
	东平	11 359	11 396	-0.30	10 868	4.30
	夏良	12 342	12 155	1.50	12 277	0.50
慢车	太和	17 437	17 698	-1.50	17 968	-3.00
	竹料	15 146	15 146		15 146	
	钟落潭	16 472	16 472		16 472	
	黎家塘	11 521	11 521		11 521	
	慢车总能耗	100 947	98 431	2.49	98 393	2.53
所有列车总能耗		176 049	171 493	2.59	172 357	2.10

表3 不同纵断面方案下的风井埋深

Table 3 Comparison on ventilation shaft depth with different vertical alignments

风井	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
实际/m	10.4	13.1	9.7	16.8	15.4	15.6	15.4	18.3	16.0	15.0	14.4	15.7	14.8	14.9	15.2	14.6
快慢车/m	10.4	13.1	11.7	25.3	14.7	14.9	14.6	22.5	14.2	13.2	12.6	13.7	14.1	14.2	14.5	26.6
站站停/m	10.4	13.1	11.7	25.3	13.2	13.4	13.1	26.9	12.3	11.2	10.6	18.0	13.7	13.8	14.1	34.6

不同纵断面方案下的风井与能耗综合成本如表4所示. 本文模型的综合成本最小, 与原始方案相比总成本降低2.65%, 高于站站停方案总成本节省率1.51%.

表4 不同纵断面优化方案下成本对比

Table 4 Cost comparison with different vertical alignments

方案	单位年能耗成本/万元	单位年风井成本/万元	单位年总成本/万元	单位年能耗成本节省率/%	单位年总成本节省率/%
实际	4 534	1 243	5 777		
快慢车模式	4 417	1 207	5 624	2.58	2.65
站站停模式	4 439	1 251	5 690	2.10	1.51

5 结论

本文考虑建设与运营成本, 构建考虑快慢车模式的地铁地下线纵断面优化模型, 设计求解算法和相应的案例验证其效果, 主要结论为: 相较于经验丰富工程师设计的纵断面方案, 本文模型得到的纵断面方案不仅能减少风井建设成本, 同时节约了所有列车的总能耗, 可显著降低线路建设与运营的综合成本; 与仅考虑站站停模式的纵断面优化方案相比, 考虑快慢车模式得到的纵断面方案在节能与减少建设成本方面均表现更好, 说明考虑停站模式和建设成本进行纵断面优化的必要性. 本文仅研究了地下线的纵断面优化, 没有考

虑敷设方式变化对线路填挖方成本和路权成本的影响, 后续将进一步研究多种敷设方式下的地铁线路纵断面优化问题.

参考文献:

- [1] 何永春. 轨道交通中的节能坡及其工程应用[J]. 城市轨道交通研究, 2003, 6(2): 37-40. [HE Y C. Energy saving vertical section in rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2003, 6(2): 37-40.]
- [2] HOANG H, POLIS M, HAURIE A. Reducing energy consumption through trajectory optimization for a subway network[J]. Automatic Control IEEE Transactions on, 1975, 20(5): 590-595.

- [3] LAFORTUNE S, POLIS M P. Interactive computer aided analysis and design of energy efficient subway tunnel trajectories[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1983, 16 (19): 437-446.
- [4] DUARTE M A, SOTOMAYOR P X. Minimum energy trajectories for subway systems[J]. Optimal Control Applications & Methods, 1999, 20(6): 283-296.
- [5] XIN T, ROBERTS C, HE J, et al. Railway vertical alignment optimization at stations to minimise energy [C]. IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2014.
- [6] 余路. 基于遗传算法的城轨线路纵断面优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014. [YU L. Research on vertical optimization of urban rail line using genetic algorithms [D]. Changsha: Central South University, 2014.]
- [7] 白晓. 城市轨道交通线路纵断面节能优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2019. [BAI X. Vertical optimization of urban rail line for energy saving[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.]
- [8] LAI X, SCHONFELD P. Optimization of rail transit alignments considering vehicle dynamics[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2275(2275): 77-87.
- [9] LI W, PU H, SCHONFELD P, et al. Methodology for optimizing constrained 3-dimensional railway alignments in mountainous terrain[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 68: 549-565.
- [10] 禹化才. 隧道盾构法施工成本价格分析[J]. 铁路工程造价管理, 2003(4): 8-10. [YU H C. Analysis of the construction cost of shield tunneling method[J]. Railway Engineering Cost Management, 2003(4): 8-10.]
- [11] 岳小丽, 何亚伯. 隧道盾构法施工的成本分析与降低成本措施[J]. 现代隧道技术, 2008(2): 72-75. [YUE X L, HE Y B. Analysis and reduction measures of shield tunnel construction cost[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008(2): 72-75.]
- [12] 刘海东, 毛保华, 丁勇, 等. 城市轨道交通列车节能问题及方案研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7 (5): 68-73. [LIU H D, MAO B H, DING Y, et al. Research of train energy-saving and evaluation of schemes of urban mass transit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(5): 68-73.]
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB50157-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. [Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB50157-2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.]
- [14] 易思蓉. 城市轨道交通线路规划与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2013. [YI S R. Urban rail transit line planning and design[M]. Beijing: Science Press, 2013.]
- [15] 刘素华, 侯惠芳, 李小霞. 基于遗传算法和模拟退火算法的特征选择方法[J]. 计算机工程, 2005(16): 157-159. [LIU S H, HOU H F, LI X X. Feature selection method based on genetic and simulated annealing algorithm[J]. Computer Engineering, 2005(16): 157-159.]